



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Προχωρημένο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα για την
ανάλυση της κατασκευής και φόρτισης μεγάλων
φραγμάτων λιθορριπής**

Διδακτορική Διατριβή
της
Ελένης Στεφ. Σταυροθεοδώρου

Βόλος, Οκτώβριος 2015



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Προχωρημένο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα για την ανάλυση
της κατασκευής και φόρτισης μεγάλων φραγμάτων λιθορριπής**

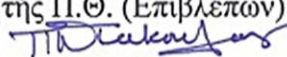
Διδακτορική Διατριβή

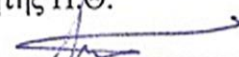
της

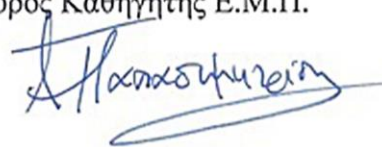
Ελένης Στεφ. Σταυροθεοδώρου

Η διατριβή υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου Διδάκτορος Μηχανικού.

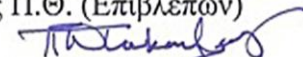
ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

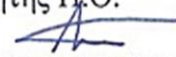
1. Π. ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ,
Καθηγητής Π.Θ. (Επιβλέπων)


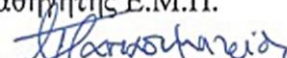
2. Α. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ,
Καθηγητής Π.Θ.


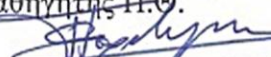
3. Α. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ,
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:


1. Π. ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ,
Καθηγητής Π.Θ. (Επιβλέπων)



2. Α. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ,
Καθηγητής Π.Θ.


3. Α. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ,
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.


4. Φ. ΠΕΡΔΙΚΑΡΗΣ,
Καθηγητής Π.Θ.


5. Α. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ,
Καθηγητής Π.Θ.


6. Γ. ΕΦΡΑΙΜΙΔΗΣ,
Λέκτορας Π.Θ.


7. Π. ΚΑΛΛΙΟΓΛΟΥ,
Λέκτορας Π.Θ.


Copyright © Ελένη Στεφ. Σταυροθεοδώρου, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, η διανομή, η αναπαραγωγή, η μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Προχωρημένο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα για την ανάλυση της κατασκευής και φόρτισης μεγάλων φραγμάτων λιθορριπής

Διδακτορική Διατριβή
Ελένη Στεφ. Σταυροθεοδώρου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την τελευταία δεκαετία, για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών για νερό και παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζονται και κατασκευάζονται υψηλά φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (ύψους ≥ 150 m) σε διάφορα μέρη του κόσμου. Η εμπειρία από τη συμπεριφορά υψηλών φραγμάτων λιθορριπής δείχνει ότι κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ρηγματώσεις στην πλάκα σκυροδέματος λόγω εφελκυστικών τάσεων. Επίσης, η χρήση λιθορριπής κακής ποιότητας ή ανεπαρκούς συμπίκνωσης είναι δυνατόν να δημιουργήσει σημαντικές καθιζήσεις και να προκαλέσει μεγάλες θλιπτικές τάσεις και θραύση του σκυροδέματος στους κατακόρυφους αρμούς της κεντρικής περιοχής της ανάντη πλάκας. Οι διαρροές είναι δυνατόν να αυξήσουν τις καθιζήσεις με ξέπλυμα των λεπτόκοκκων και να οδηγήσουν σε μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις και τοπικές θραύσεις. Σε φράγματα που έχουν κατασκευασθεί σε σειсмоγενείς περιοχές, πρόσθετες σεισμικές θλιπτικές τάσεις λόγω δυναμικής απόκρισης και δυναμικής συνίζησης είναι δυνατόν να αυξήσουν περαιτέρω τη θραύση κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών της ανάντη πλάκας. Καθώς η εμπειρία από τη συμπεριφορά φραγμάτων με ύψος ≥ 200 m είναι πολύ μικρή, έχει αρκετό ενδιαφέρον η αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης της δυσκαμψίας της λιθορριπής και του ύψους του φράγματος στη συμπεριφορά της ανάντη πλάκας σκυροδέματος και η σύγκριση με την πραγματική συμπεριφορά υπαρχόντων μεγάλων φραγμάτων.

Η παρούσα διατριβή διερευνά με προχωρημένη αριθμητική ανάλυση, την επίδραση της κλίμακας μεγέθους και της δυσκαμψίας φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs), λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών κατασκευής, ώστε να διασφαλισθεί η δομική ακεραιότητα της πλάκας έναντι θλιπτικής αστοχίας ή εφελκυστικών ρηγματώσεων. Δεδομένου ότι η εμπειρία της συμπεριφοράς πολύ υψηλών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος είναι περιορισμένη, δημιουργείται ένα ρεαλιστικό προσομοίωμα το οποίο επιβεβαιώνεται με βάση την καταγεγραμμένη συμπεριφορά πραγματικών φραγμάτων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο του Lade στον τρισδιάστατο χώρο των κυρίων τάσεων, βελτιωμένο με ένα απλό σχήμα βαθμίδας πλαστικότητας, και ενσωματώνεται στο γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, ως ένα νέο καταστατικό προσομοίωμα οριζόμενο πλήρως από το χρήστη. Η μέθοδος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο Lade είναι το σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince, η οποία υπερτερεί μακράν των υπολοίπων μεθόδων και σε ακρίβεια και σε υπολογιστικό κόστος. Το σκυρόδεμα της ανάντη πλάκας προσομοιώνεται με το ελαστοπλαστικό μοντέλο των Lee-Fenves για μονοτονική και ανακυκλική συμπεριφορά του σκυροδέματος, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη σταδιακή συσσώρευση βλάβης και τη χαλάρωση, διακρίνοντας τη βλάβη λόγω εφελκυσμού και θλίψης. Επίσης, λαμβάνει υπόψη την επίδραση της βλάβης στην απομείωση της δυσκαμψίας, και την ανάκαμψή της μετά το κλείσιμο της ρωγμής.

Βασικός στόχος της διερεύνησης είναι η βαθύτερη κατανόηση της επίδρασης του ύψους του φράγματος και της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην επιτελεστικότητα φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκαν τρία φράγματα λιθορριπής με ύψη 100, 200 και 300 m, αντίστοιχα, κατασκευασμένα σε στενές κοιλάδες τραπεζοειδούς σχήματος με λόγο μήκους προς ύψος ίσο προς 2. Το κάθε φράγμα κατασκευάστηκε με δύο διαφορετικά υλικά λιθορριπής, ένα εξαιρετικής ποιότητας και ένα μέτριας ποιότητας, από διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα λιθορριπής. Συγκεκριμένα, για βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν πειράματα σε μεγάλα δοκίμια λιθορριπής από τα φράγματα Oroville και Pyramid, αντίστοιχα.

Η κλίση των πρανών των φραγμάτων είναι 1.4:1 ανάντη και 1.5:1 κατάντη, και το εύρος της στέψης 10 m. Οι κύριες ζώνες υλικών είναι η ανάντη ζώνη λιθορριπής (3B), η κατάντη ζώνη λιθορριπής (3C) και η μεταβατική ζώνη χαλίκων κάτω από την πλάκα (2B). Η ανάντη πλάκα αποτελείται από ανεξάρτητα πάνελ σκυροδέματος με κατάλληλες συνθήκες τριβής και δυνατότητα ανοίγματος κενού στη βάση και στις κατακόρυφες

διεπιφάνειες με τα γειτονικά πάνελ. Σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας της ανάντη πλάκας επιτυγχάνεται με τη χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος σε συνδυασμό με κανονικό οπλισμό χάλυβα.

Τα έξι φράγματα αναλύονται με πλήρη προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής σε 40 στάδια ανάλυσης, ενώ στα επόμενα 15 στάδια ανάλυσης υπόκεινται σε σταδιακή πλήρωση της λεκάνης και σε μακροπρόθεσμο ερπυσμό και πιθανές δυναμικές συνιζήσεις. Οι προβλεπόμενες καθιζήσεις κατασκευής του φράγματος και οι βυθίσεις της πλάκας σκυροδέματος κατά την πλήρωση της λεκάνης συγκρίνονται με αντίστοιχες μετρήσεις από ένα μεγάλων αριθμό υπαρκτών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων καταδεικνύουν ότι το καταστατικό προσομοίωμα του Lade, επιτρέπει μια πολύ ρεαλιστική προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων επί δοκιμών λιθορριπής από την άποψη της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης και ογκομετρικών παραμορφώσεων σε ολόκληρο το εύρος των περιβαλλουσών τάσεων. Επίσης, η χρήση της βαθμίδας πλαστικότητας, ως ένα προαιρετικό εργαλείο για αποφυγή αριθμητικών δυσκολιών σύγκλισης σε συγκεκριμένα στοιχεία που υπόκεινται υψηλή διάτμηση, είναι αρκετά αποτελεσματική για την μείωση του υπολογιστικού χρόνου, χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Συγκρίσεις καθιζήσεων κατασκευής μεταξύ αριθμητικών προβλέψεων και μετρήσεων από ένα μεγάλο αριθμό υπαρκτών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος σε στενές κοιλάδες καταδεικνύουν μία αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ προβλέψεων και μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα αυτής της διατριβής υποδηλώνουν ότι, για φράγματα ύψους μεγαλύτερου των 150 m, οι κατασκευαστικές καθιζήσεις αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση του λόγου κενών και του ύψους, ακόμη και για στενές κοιλάδες. Η χρήση εξαιρετικής ποιότητας λιθορριπής με λόγους κενών περίπου $e=0.2$ επιτρέπει την ανάπτυξη πολύ μικρών κατασκευαστικών καθιζήσεων, ακόμη και στην περίπτωση πολύ υψηλών φραγμάτων (300 m). Αντίθετα, για φράγματα ύψους μικρότερου των 120 m, η επίδραση του λόγου κενών e , ο οποίος προσδιορίζει την ποιότητα της λιθορριπής, είναι σχετικά πιο μικρή.

Επίσης, καταδεικνύεται ότι η χρήση εξαιρετικής ποιότητας λιθορριπής με λόγους κενών περίπου 0.2 αποφέρει πολύ μικρές βυθίσεις πλάκας ακόμη και στην περίπτωση του φράγματος ύψους 300 m κατά την διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης και μετά την ολοκλήρωση των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων. Συγκρίσεις βυθίσεων μεταξύ αριθμητικών προβλέψεων και μετρήσεων από ένα μεγάλο αριθμό φραγμάτων λιθορριπής

με ανάντη πλάκα σκυροδέματος σε στενές κοιλάδες καταδεικνύουν μία αρκετά καλή συμφωνία.

Κατά την πλήρωση της λεκάνης αναπτύσσονται εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις στην πλάκα σκυροδέματος σε μια ζώνη εύρους περίπου 20 m κοντά στο αντέρεισμα, σε συμφωνία με υπάρχουσες καταγραφές πραγματικής συμπεριφοράς. Οι θλιπτικές τάσεις στην πλάκα σκυροδέματος φτάνουν στη μέγιστη τιμή περίπου στο 40% του ύψους κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης, αλλά μπορούν να φτάσουν και σε μια μεγαλύτερη τιμή κοντά στη στέψη υπό την επίδραση μακροπρόθεσμων καθιζήσεων. Για τη λιθορριπή εξαιρετικής ποιότητας, οι θλιπτικές τάσεις παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα σε σύγκριση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αντίθετα για τη λιθορριπή μέτριας ποιότητας, οι θλιπτικές τάσεις γίνονται πολύ υψηλές, ειδικά μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις. Σε μια τέτοια περίπτωση, η χρήση κανονικού σκυροδέματος (π.χ. θλιπτικής αντοχής $f_c = 25 \text{ MPa}$) για την πλάκα θα μπορούσε να οδηγήσει σε θλιπτική αστοχία. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε ικανοποιητική ποιοτική συμφωνία με τη συμπεριφορά χαρακτηριστικών περιπτώσεων φραγμάτων λιθορριπής στα οποία παρατηρήθηκε αστοχία στην πλάκα σκυροδέματος.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις της πλάκας, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την υδατοστεγανότητα των κατακόρυφων και περιμετρικών αρμών, γίνονται μέγιστες στην περιοχή του αντερείσματος στη στέψη του φράγματος. Για το φράγμα των 300 m και για εξαιρετικά συμπυκνωμένη λιθορριπή, οι μακροπρόθεσμες καθιζήσεις μπορούν να προκαλέσουν διαφορετική μετακίνηση που πλησιάζει αλλά δεν ξεπερνά τα όρια υδατοστεγανότητας. Για το φράγμα ύψους 200 m μέτριας λιθορριπής αυτές οι μετακινήσεις φτάνουν το όριο υδατοστεγανότητας, ενώ για υψηλότερα φράγματα γίνονται απαγορευτικές.

Τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος που κατασκευάζονται από εξαιρετικής ποιότητας και καλής συμπίκνωσης λιθορριπή, από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και υψηλή ικανότητα υδατοστεγανότητας, αναμένονται να παρουσιάσουν πολύ καλή συνολική συμπεριφορά μέχρι και το ύψος των 300 m. Αντίθετα, ο σχεδιασμός των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος από μέτριας ποιότητας συμπίεστη λιθορριπή, σε ύψη ίσα ή μεγαλύτερα των 200 m δεν συνιστάται.

Τέλος, πραγματοποιείται μία λεπτομερής προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και αστοχίας του φράγματος του Mohale και συγκρίνεται η προβλεπόμενη και η πραγματική συμπεριφορά. Η εφαρμογή του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος Lade για την ανάλυση της αστοχίας του φράγματος Mohale παρουσιάζει μία σχετική συμφωνία

μεταξύ προβλέψεων και επιτόπου μετρήσεων αναφορικά με τις καθιζήσεις κατασκευής και την καθίζηση της πλάκας. Όμως η πολυπλοκότητα του τρόπου κατασκευής και η ιδιαιτερότητα του αιφνίδιου τρόπου κατάρρευσης της δυσκαμψίας του υλικού λόγω θρυμματισμού της λιθορριπής οδηγούν σε κάποιες αποκλίσεις σε άλλες παραμέτρους, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Συνοψίζοντας, η προτεινόμενη μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης συνιστά ένα ισχυρό και αξιόπιστο εργαλείο για τη ρεαλιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος κατά την σταδιακή κατασκευή, πλήρωση της λεκάνης και υπό καθεστώς μακροχρόνιων καθιζήσεων ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης.

Λέξεις κλειδιά: Καταστατικό μοντέλο, λιθορριπή, φράγματα, βλάβη σκυροδέματος, αριθμητική ανάλυση, καθιζήσεις.



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Advanced elastoplastic simulation of staged construction and impoundment of tall concrete face rockfill dams

Doctoral dissertation

Eleni St. Stavrotheodorou

ABSTRACT

Over the last decade, to respond to the increasing need for water and clean energy production, extra-high CFRDs, having a height ($H \geq 150$ m), have been designed and built in various parts of the world. The experience of the behavior of high CFRDs shows that during the impoundment, cracks may be developed in concrete slab because of tensile stresses. Also use of poor rockfill or inadequate compaction may create significant settlements and cause high compressive stresses and breakage of the concrete to the vertical joints of the central region of the upstream slab. Water leakages may increase settlements through washing out of the finer materials leading to higher compressive stresses and local spalling. Dams built in seismic regions, additional seismic compressive stresses due to the dynamic response and dynamic settlement may increase further spalling of the upstream slab along the vertical joints. Since there is very little experience regarding the performance of CFRDs with height ≥ 200 m, it is of interest to investigate numerically the effect of rockfill stiffness and dam height on the performance of upstream concrete slab and make comparisons with observed performance of existing high dams.

This thesis undertakes a numerical investigation of the effect of the size scale and rockfill stiffness on performance of concrete face rockfill dams (CFRDs), considering the nonlinear behavior of the construction materials, to ensure the structural integrity of the slab against compressive failure or tensile cracks. As the experience of the behavior of very high concrete face rockfill dams is limited, a realistic model which is verified by the

recorded behavior of real dams is created. To this end, the three-dimensional principal stress space formulation of Lade's model, improved with a simple gradient plasticity methodology, is implemented as a user-defined material in the general purpose finite element program ABAQUS. The integration method used in Lade's model is the Runge-Kutta-Dormand-Prince (RKDP) scheme, which outperforms significantly the other methods in terms of accuracy and computational costs. The concrete of the upstream slab is simulated by the elastoplastic model of Lee and Fenves for monotonic and cyclic behavior of concrete, which takes into account the gradual accumulation of damage and the effects of softening, distinguishing damage between tension and compression. It further takes into account the effect of damage to the degradation of stiffness and the recovery of stiffness after crack closure.

The main objective of the investigation is a deeper understanding of the effect of the dam height and rockfill stiffness on the performance of the concrete face slab. For this purpose, three CFRDs with heights of 100, 200 and 300 m, respectively, constructed in narrow valleys with trapezoidal shape having a ratio length to height equal to 2 are analyzed. Each dam is constructed with two different rockfill materials, an excellent quality rockfill and a moderate quality rockfill, from available experimental data. More specifically, experimental results from triaxial tests on large rockfill specimens obtained from Oroville and Pyramid dams were used for the calibration of the model parameters.

In each dam, the upstream slope of the embankment is 1.4:1, the downstream slope is 1.5:1 and the width of the crest 10 m. The main material zones are the upstream rockfill zone (3B), the downstream rockfill zone (3C) and the transition gravel zone (2B) beneath the slab. The upstream slab consists of independent concrete panels with proper frictional conditions and gap opening capability at its base and at its vertical interfaces with the neighboring panels. Significant increase in the ductility of the upstream slab is achieved by using fiber-reinforced concrete in combination with a normal steel reinforcement.

The six dams are analyzed with full simulation of the staged construction in 40 stages of analysis, while in the next 15 stages the dam is subjected to gradual impoundment, followed by long-term creep and possible dynamic settlements. The predicted dam construction settlements and concrete slab deflections, during impoundment, are compared with corresponding measurements from a large number of existing CFRDs.

The results of the numerical simulations show that Lade's constitutive model, allows a very realistic simulation of the experimental results on rockfill specimens in terms

of stress-strain behavior and volumetric deformations throughout the entire range of confining stresses. Also, the use of gradient plasticity as an optional tool to avoid numerical convergence difficulties in specific elements subjected to high shear, was proved to be quite effective in reducing the computational time, without affecting the accuracy of the results.

Comparisons of the construction settlements between numerical predictions and measurements of a large number of existing CFRDs in narrow valleys show a fairly good agreement between predictions and measurements.

The results of this thesis suggest that for dams with height more than 150 m, construction settlements increase significantly with increasing void ratio, even for narrow valleys. The use of excellent quality rockfill with a void ratio of approximately $e = 0.2$ results to very small construction settlements, even for very high dams (300 m). In contrast, for dams of height less than 120 m, the effect of void ratio e , which determines the quality of the rockfill, is relatively small.

Moreover, it was demonstrated that the use of excellent rockfill with a void ratio of about 0.2 yields very small slab deflections even in the case of the 300 m dam during impoundment and after long-term settlements. Comparisons of the deflections between numerical predictions and measurements of a large number of CFRDs in narrow valleys show a fairly good agreement.

During impoundment plastic tensile deformations develop in the concrete slab in a zone of approximately 20 m close to the abutment, in agreement with existing records of the real behavior. The compressive stresses in the concrete slab reach the maximum value at about 40% of the height during the impoundment, but they can reach even higher values near the crest, under the influence of long-term settlements. For excellent rockfill quality, the compressive stresses remain low compared to the compressive strength of concrete. On the contrary, for medium rockfill quality, the compressive stresses are too high, especially after long-term settlements. In such a case, the use of normal concrete (e.g., with compressive strength $f_c = 25$ MPa) for the slab could lead to compressive failure. These results are in good qualitative agreement with the behavior of characteristics CFRDs which experienced failure in the concrete slab.

The horizontal displacements of the slab, which directly affect the waterproofness of the vertical and perimeter joints, are maximum in the region of the abutment at the crest of the dam. For the 300 m dam and excellent rockfill compaction, the long-term settlements can cause differential displacement approaching (but not exceeding) the

waterstop limit. For the dam having a height of 200 m, made of medium rockfill quality, these displacements may reach the waterstop limit, whereas for higher dams they are prohibitive.

CFRDs constructed with excellent quality, well-compacted rockfill, high-strength concrete and high waterproofing capacity, are expected to show very good overall performance up to a height of 300 m. Instead, the design of CFRDs with medium quality compacted rockfill, at heights equal to or greater than 200 m is not recommended.

Finally, a detailed simulation of the staged construction and failure of the Mohale dam is carried out and its predicted and real behavior are compared. The application of Lade's elastoplastic model for the analysis of the Mohale dam failure leads to a reasonable agreement between predictions and field measurements concerning the construction settlements and slab deflection. But the complexity of the actual construction method, as well as the characteristic severe collapse of the rockfill material stiffness due to rockfill fragmentation lead also to some differences in other response parameters that merit further investigation.

In summary, the proposed numerical simulation methodology is a powerful and reliable tool for a realistic prediction of the behavior of CFRDs during the staged construction, impoundment and under long-term creep settlements and dynamic settlement.

Keywords: Constitutive model, rockfill, dams, concrete damage, numerical analysis, settlements.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας διδακτορικής διατριβής κ. Ντακούλα Παναγιώτη, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Τον ευχαριστώ για την επιστημονική και ηθική υποστήριξη που μου παρείχε και ιδιαίτερα διότι χάρη στην εξαιρετική καθοδήγησή του, την ανεκτίμητη υποστήριξή του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια στην εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής, είχα την ευκαιρία να κάνω τα πρώτα μου ερευνητικά βήματα. Η αγάπη και η αμέριστη αφοσίωσή του στην επιστήμη, η εξαιρετική επιστημονική του έμπνευση, η συνεχής διαθεσιμότητά του παρά το πολυάσχολο πρόγραμμά του και η ενθουσιώδης ενθάρρυνσή του, αποτέλεσαν προνομιακές ιδιότητες και καθοριστικές για την άψογη συνεργασία μας στην παρούσα διατριβή. Επίσης, είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για την οικονομική υποστήριξη που είχα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Ευχαριστίες επίσης θα ήθελα να εκφράσω προς τα άλλα δύο μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής της διδακτορικής μου διατριβής, τον κ. Γιαννακόπουλο Αντώνιο, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και τον κ. Παπαδημητρίου Αχιλλέα, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την προσεκτική ανάγνωση της διατριβής μου, για την κατανόηση και την υποστήριξή τους κατά το στάδιο της καταρχήν αποδοχής της διατριβής, καθώς και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους, οι οποίες συνέβαλαν στη βελτίωση της ποιότητας της διατριβής. Ιδιαίτερα καθοριστική υπήρξε η συμβολή και η καθοδήγηση του Καθηγητή κ. Γιαννακόπουλου Αντώνιου όσον αφορά στην εφαρμογή της βαθμίδας πλαστικότητας, ως ένα εργαλείο βελτίωσης στη χρήση του προχωρημένου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος για την αποφυγή αριθμητικών δυσκολιών σε κρίσιμες θέσεις.

Τέλος θα ήθελα να αναφερθώ σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένειά μου, τους φίλους μου, τους συνεργάτες μου και να τους ευχαριστήσω για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και κατανόηση που υπέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Βόλος, Οκτώβριος 2015

Ελένη Στεφ. Σταυροθεοδώρου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	vii
Abstract.....	xii
Ευχαριστίες.....	xvi
Πίνακας Περιεχομένων.....	xviii
Κατάλογος Πινάκων.....	xxiii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xxv
 Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	 1
1.1 Ορισμός του προβλήματος.....	1
1.2 Στόχοι της έρευνας.....	3
1.3 Οργάνωση της διατριβής ανά κεφάλαιο.....	5
 Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	 9
2.1 Φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (ΛΑΠΣ).....	9
2.1.1 Ιστορική εξέλιξη φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.....	9
2.1.2 Σχεδιασμός και κατασκευή των λιθορριπτών φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος - Βασικές αρχές.....	12
2.1.2.1 Πλίνθος.....	12
2.1.2.2 Πλάκα σκυροδέματος.....	15
2.1.2.3 Οπλισμός.....	16
2.1.2.4 Αρμοί της πλάκας σκυροδέματος.....	17
2.1.2.5 Τοιχίο στέψης.....	19
2.1.2.6 Τυπική διαζώνιση των CFRDs.....	20
2.1.2.7 Ποιότητα και διαβάθμιση του επιχώματος.....	21
2.1.2.8 Τοποθέτηση της λιθορριπής.....	22
2.1.2.9 Κλίση πρανών.....	23
2.1.2.10 Σταδιακή κατασκευή του επιχώματος.....	23
2.2 Συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.....	25
2.2.1 Πρόσφατα προβλήματα σε ψηλά CFRDs.....	25
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός CFRD.....	26
2.3.1 Η επιρροή της λιθορριπής.....	27

2.3.1.1	Αντοχή σε θλίψη.....	27
2.3.1.2	Συμπύκνωση.....	27
2.3.1.3	Το σχήμα των κόκκων.....	28
2.3.1.4	Θρυμματισμός.....	30
2.3.1.5	Υλικό της λιθορριπής.....	31
2.3.1.6	Διαπερατότητα.....	31
2.3.1.7	Διαβροχή της λιθορριπής.....	31
2.3.1.8	Κοκκομετρία.....	32
2.3.1.9	Διατμητική αντοχή.....	33
2.3.1.10	Σχέση μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των διαφορετικών ζωνών.....	49
2.3.1.11	Χαλίκι.....	50
2.3.2	Η επιρροή άλλων παραγόντων πέραν της λιθορριπής στην ευστάθεια του φράγματος.....	51
2.3.2.1	Μορφολογία της κοιλάδας.....	51
2.3.2.2	Έδαφος θεμελίωσης.....	52
2.3.2.3	Η άμεση επιρροή της πλάκας.....	53
2.4	Καταστατικά προσομοιώματα χαλίκων και λιθορριπής.....	54
2.4.1	Εισαγωγή.....	54
2.4.2	Γραμμική ελαστικότητα.....	55
2.4.3	Μη γραμμικά μοντέλα.....	56
2.5	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	60
2.5.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	60
2.5.2	Σχεδιασμός μείγματος ενισχυμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα SFRC.....	60
2.5.3	Τεχνολογία για παραγωγή SFRC.....	62
2.5.4	Στατικές μηχανικές ιδιότητες SFRC.....	62
2.5.5	Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος (Nataraja et al., 1999).....	65
2.6	Καταστατικό προσομοίωμα ινοπλισμένου σκυροδέματος (Lee and Fenves, 1998).....	69
2.6.1	Καταστατικό μοντέλο πλαστικής βλάβης για σκυρόδεμα.....	69

Κεφάλαιο 3 Ελαστοπλαστικό προσομοίωμα για χάλικες και λιθορριπή.....	73
3.1 Γενική περιγραφή του μοντέλου.....	73
3.2 Ελαστική συμπεριφορά.....	74
3.3 Κριτήριο αστοχίας.....	75
3.4 Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού και νόμος διαρροής.....	76
3.5 Κριτήριο διαρροής και σχέσεις έργου κράτυνσης/χαλάρωσης.....	77
3.6 Υλικά με ενεργό συνοχή.....	81
3.7 Αποτελέσματα προφόρτισης με διάτμηση και υπερστερεοποίησης.....	81
3.8 Βηματικός τύπος καταστατικού μοντέλου.....	83
3.8.1 Ελαστοπλαστικό μητρώο δυσκαμψίας για το μοντέλο κράτυνσης με μία επιφάνεια διαρροής.....	83
3.8.2 Ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας.....	84
3.8.3 Παράγωγοι του πλαστικού δυναμικού.....	84
3.8.4 Παράγωγοι της συνάρτησης διαρροής.....	85
3.8.5 Μέτρο κράτυνσης.....	86
3.9 Βαθμίδα πλαστικότητας.....	86
3.9.1 Γενικά.....	86
3.9.2 Θεωρία μικρών παραμορφώσεων.....	87
3.9.3 Κρυσταλλική πλαστικότητα και σύνθετη κράτυνση.....	89
 Κεφάλαιο 4 Ενσωμάτωση του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος στον κώδικα ABAQUS για τρισδιάστατη ανάλυση.....	 93
4.1 Γενικά.....	93
4.2 Μέθοδος υπολογισμού.....	94
4.3 Αρχική τομή με την επιφάνεια διαρροής.....	96
4.3.1 Επίδραση προφόρτισης με διάτμηση και υπερστερεοποίησης στην αντοχή του υλικού.....	101
4.3.2 Η προσαρμογή των ελαστικών τάσεων.....	101
4.4 Ενημερωμένες τάσεις και παράμετρος κράτυνσης.....	101
4.5 Σχήμα ολοκλήρωσης forward Euler με υποβήματα.....	102
4.5.1 Διαδικασία.....	103
4.6 Τροποποιημένο σχήμα forward Euler με έλεγχο σφάλματος.....	104
4.7 Σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με έλεγχο σφάλματος.....	107

4.8	Σύγκριση σχημάτων ολοκλήρωσης.....	111
4.9	Ενσωμάτωση του καταστατικού προσομοιώματος Lade στον κώδικα ABAQUS.....	115
4.10	Επιβεβαίωση του καταστατικού προσομοιώματος Lade.....	118
4.11	Εφαρμογή της βαθμίδας πλαστικότητας.....	125
 Κεφάλαιο 5 Διερεύνηση της επίδρασης κλίμακας και δυσκαμψίας λιθορριπής στη συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.....		
5.1	Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των μοντέλων Lade και Duncan-Chang.....	130
5.2	Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.....	137
5.2.1	Γεωμετρία του φράγματος και ζώνες υλικών.....	138
5.2.2	Αριθμητική διακριτοποίηση.....	139
5.2.3	Προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής βασιζόμενη σε εργαστηριακά πειράματα.....	141
5.2.4	Επίδραση του θρυμματισμού των κόκκων της λιθορριπής.....	146
5.2.5	Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του επιχώματος της λιθορριπής.....	146
5.2.6	Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος.....	148
5.3	Προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, πλήρωσης της λεκάνης και μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του φράγματος.....	148
5.3.1	Καθιζήσεις κατασκευής.....	149
5.3.2	Δυσκαμψία λιθορριπής.....	154
5.3.3	Καθιζήσεις κατά την πλήρωση της λεκάνης και μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.....	156
5.3.4	Βύθιση της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.....	157
5.3.5	Βύθιση της πλάκας εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.....	158
5.3.6	Εφελκυστικές τάσεις και πλαστικές παραμορφώσεις.....	160
5.3.7	Θλιπτικές τάσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.....	163
5.3.8	Θλιπτικές τάσεις εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.....	167
5.3.9	Συνολικές παραμορφώσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.....	173
5.3.10	Συνολικές παραμορφώσεις εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.....	176

5.3.11 Μετακινήσεις της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και συμπεριφορά των αρμών.....	179
5.3.12 Μετακινήσεις εξαιτίας των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων και συμπεριφορά των αρμών.....	179
5.4 Επίδραση της γεωμετρίας της στενής κοιλάδας.....	182
5.5 Επίδραση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και του οπλισμού στη συμπεριφορά λιθορριπής.....	183
5.6 Συμπεράσματα.....	193
Κεφάλαιο 6 Ανάλυση της αστοχίας του φράγματος Mohale.....	198
6.1. Γενική περιγραφή του φράγματος και ιστορικό αστοχίας του.....	198
6.2. Αριθμητική προσομοίωση του φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος Mohale.....	212
6.3. Αναλύσεις αποτελεσμάτων από την αριθμητική προσομοίωση του φράγματος Mohale με τη χρήση του ελαστοπλαστικού μοντέλου Lade.....	216
6.4. Συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τις πραγματικές μετρήσεις στο φράγμα.....	222
6.5. Συμπεράσματα.....	227
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα.....	229
7.1. Σύνοψη συμπερασμάτων.....	229
7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	233
Βιβλιογραφία.....	237

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1.	Μέτρα ελαστικότητας στα ανάντη (E_{vu}) και κατόντη (E_{vd}) της λιθορριπής και βυθίσεις της πλάκας (στο μεσαίο 1/3 του μήκους της πλάκας: Dm, και στην κορυφή: Dc) στο τέλος της πλήρωσης.....	49
Πίνακας 4.1.	Συγκρίσεις αποτελεσμάτων ολοκλήρωσης του μοντέλου κράτυνσης με μια επιφάνεια διαρροής χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σχήματα.....	112
Πίνακας 4.2.	Παράμετροι του μοντέλου Lade.....	119
Πίνακας 4.3.	Παράμετροι του μοντέλου Lade για πυκνό ιλυο-αμμώδες υλικό.....	120
Πίνακας 4.4.	Παράμετροι του μοντέλου Lade για πυκνή λεπτόκοκκη πυριτική άμμο.....	123
Πίνακας 5.1.	Παράμετροι του προσομοιώματος Duncan-Chang.....	133
Πίνακας 5.2.	Παράμετροι του προσομοιώματος Lade.....	133
Πίνακας 5.3.	Ιδιότητες εργαστηριακών δοκιμών λιθορριπής.....	147
Πίνακας 5.4.	Παράμετροι του μοντέλου Lade για λιθορριπή Oroville και Pyramid.....	147
Πίνακας 5.5.	<i>Λιθορριπή Oroville</i> : Παράμετροι του μοντέλου Lade για τα τρία φράγματα.....	147
Πίνακας 5.6.	<i>Λιθορριπή Pyramid</i> : Παράμετροι του μοντέλου Lade για τα τρία φράγματα.....	147
Πίνακας 5.7.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες υλικών και καθιζήσεις κατασκευής από 44 CFRDs.....	153
Πίνακας 5.8.	Μετρήσεις βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης σε 20 CFRDs.....	158
Πίνακας 6.1.	Απαιτήσεις τοποθέτησης.....	206
Πίνακας 6.2.	Περιγραφή των υλικών των ζωνών του φράγματος Mohale.....	207
Πίνακας 6.3.	Γενικές απαιτήσεις διαβάθμισης για λιθορριπή.....	208
Πίνακας 6.4.	Απαιτήσεις διαβάθμισης για τις ζώνες 5A, 5B και 6A στο φράγμα Mohale.....	208
Πίνακας 6.5.	Συνοπτικές ιδιότητες των υλικών λιθορριπής.....	208

Πίνακας 6.6.	Καθιζήσεις (m) στο τέλος της κατασκευής στις θέσεις μέτρησης από την αριθμητική ανάλυση και μετρήσεις των οργάνων στη 2 ^η ανάγνωση.....	224
---------------------	--	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1.	Διαμόρφωση πλίνθου για (α) το φράγμα Mangrove Creek και (β) το φράγμα Boondooma	13
Σχήμα 2.2.	Διαμόρφωση πλίνθου για (α) το φράγμα Cethana και (β) το φράγμα Reece	14
Σχήμα 2.3.	Λεπτομέρειες αρμών για το φράγμα Aguamilpa σε διάφορες στάθμες και θέσεις των αρμών στην πλάκα σκυροδέματος.....	19
Σχήμα 2.4.	Λεπτομέρειες στέψης για τα φράγματα (α) Golillas (β) Macaqua.....	20
Σχήμα 2.5.	Η τυπική διατομή των CFRDs.....	21
Σχήμα 2.6.	Σταδιακή κατασκευή των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος Foz do Areia, Xingo, Segredo, Ita.....	24
Σχήμα 2.7.	Αστοχίες στην πλάκα σκυροδέματος (α) για το φράγμα Campos Novos και (β) για το φράγμα Zipingpu.....	26
Σχήμα 2.8.	Η επίδραση της περιβάλλουσας τάσης, του σχήματος και της κοκκομετρικής διαβάθμισης στη γωνία τριβής των κόκκων.....	29
Σχήμα 2.9.	Αντιπροσωπευτικό τέμνον μέτρο ελαστικότητας συμπυκνωμένης λιθορριπής κατά το πέρας της κατασκευής σε συνάρτηση με την αντοχή και την κοκκομετρική διαβάθμιση.....	32
Σχήμα 2.10	Σχέση λόγου κύριων τάσεων αστοχίας και περιβάλλουσας τάσης για τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα και για άλλα υλικά.	34
Σχήμα 2.11.	Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των τριών υλικών για περιβάλλουσα τάση 25 kg/cm^2	34
Σχήμα 2.12.	Λόγος κύριων τάσεων κατά την αστοχία ως προς το ποσοστό θρυμματισμού.....	35
Σχήμα 2.13.	Η επίδραση της περιβάλλουσας τάσης στη γωνία διατμητικής αντοχής της λιθορριπής.....	36
Σχήμα 2.14.	Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των τριών υλικών.....	38
Σχήμα 2.15.	Ισοτροπική θλίψη των τριών υλικών λιθορριπής.....	39
Σχήμα 2.16.	Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το υλικό του φράγματος Pyramid: λόγος κύριων τάσεων και ογκομετρική παραμόρφωση ως προς την αξονική παραμόρφωση	40

Σχήμα 2.17.	Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής σε θρυμματισμένο βασάλτη: λόγος κύριων τάσεων και ογκομετρική παραμόρφωση ως προς την αξονική παραμόρφωση.....	41
Σχήμα 2.18.	Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το φράγμα Oroville: λόγος κύριων τάσεων και ογκομετρική παραμόρφωση ως προς την αξονική παραμόρφωση.....	42
Σχήμα 2.19.	Σχέση γωνίας τριβής-μέγιστου κόκκου.....	44
Σχήμα 2.20.	Σχέση αστοχίας ογκομετρικής παραμόρφωσης-περιβάλλουσας τάσης των τριών υλικών λιθορριπής.....	45
Σχήμα 2.21.	Σχέση αστοχίας αξονικής παραμόρφωσης-περιβάλλουσας τάσης των τριών υλικών λιθορριπής.....	46
Σχήμα 2.22.	Σχέση γωνίας τριβής-περιβάλλουσας τάσης των τριών υλικών λιθορριπής.....	47
Σχήμα 2.23.	Η επίδραση της τραχύτητας και της αντοχής στη γωνία τριβής της λιθορριπής.....	48
Σχήμα 2.24.	Κατανομή βύθισης της πλάκας 4 φραγμάτων.....	50
Σχήμα 2.25.	Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υπερβολικού μοντέλου.....	57
Σχήμα 2.26.	Καθορισμός των υπερβολικών παραμέτρων K , n	58
Σχήμα 2.27.	Εργασιμότητα σε σχέση με την περιεκτικότητα ιών για μήτρες με διαφορετικά μέγιστα μεγέθη αδρανών.....	61
Σχήμα 2.28.	Επίδραση της αναλογίας ιών στην εργασιμότητα του σκυροδέματος, όπως μετρήθηκε από το συντελεστή συμπύκνωσης	61
Σχήμα 2.29.	Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σε θλίψη για SFRC.....	62
Σχήμα 2.30.	Επίδραση του W/d στην αντοχή σε κάμψη του κονιάματος και του σκυροδέματος.....	63
Σχήμα 2.31.	Η επίδραση του W/d στη σκληρότητα σε κάμψη του SFRC.....	64
Σχήμα 2.32.	Σχέση φορτίου-παραμόρφωσης από δοκιμή κάμψης SFRC.....	64
Σχήμα 2.33.	Σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	66
Σχήμα 2.34.	Επίδραση της παραμέτρου β στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για SFRC (Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα).....	67

Σχήμα 2.35.	Σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη απλού και ινοπλισμένου σκυροδέματος βασισμένη στο μοντέλο Nataraja et al. (1999).....	68
Σχήμα 2.36.	Σχέση τάσης-παραμόρφωσης από προσομοίωση μονοαξονικής δοκιμής (α) εφελκυσμού και (β) θλίψης, με φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση σε κυβικά δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος (RI=2.5%).....	68
Σχήμα 2.37.	Αρχική συνάρτηση διαρροής στον επίπεδο χώρο των τάσεων.....	70
Σχήμα 3.1.	Χαρακτηριστικά του κριτηρίου αστοχίας στο χώρο των κυρίων τάσεων: οι τροχιές παρουσιάζονται (α) σε οκταεδρικό επίπεδο, και (β) σε τριαξονικό επίπεδο.....	76
Σχήμα 3.2.	Χαρακτηριστικά της συνάρτησης πλαστικού δυναμικού στο χώρο των κυρίων τάσεων: οι τροχιές παρουσιάζονται (α) σε οκταεδρικό επίπεδο, και (β) σε τριαξονικό επίπεδο.....	78
Σχήμα 3.3.	Χαρακτηριστικά της συνάρτησης διαρροής στο χώρο των κυρίων τάσεων: οι τροχιές παρουσιάζονται (α) σε οκταεδρικό επίπεδο, και (β) σε τριαξονικό επίπεδο.....	79
Σχήμα 3.4.	Μοντελοποίηση του έργου κράτυνσης και χαλάρωσης.....	79
Σχήμα 3.5.	Διαξονικές τασικές οδεύσεις για σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκαν από τους Kupfer et al. (1969) και θεωρήθηκε αρχική επιφάνεια διαρροής σε (α) τριαξονικό επίπεδο, και σε (β) διαξονικό επίπεδο.....	82
Σχήμα 3.6.	Αποτελέσματα προφόρτισης με διάτμηση και υπερστερεοποίησης στην επιφάνεια αστοχίας για εδάφη.....	82
Σχήμα 3.7.	Μέση διατμητική τάση έναντι διατμητικής παραμόρφωσης για ελαστικά εγκλείσματα (για λόγο εμβαδού 0.2) ενσωματωμένα σε ένα μητρώο κρυστάλλων που υπόκειται σε απλή ολίσθηση	91
Σχήμα 4.1.	Σχηματική απεικόνιση (α) της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης, και (β) του τριαξονικού επιπέδου με καταστάσεις τάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξήγηση της στρατηγικής υπολογισμού.....	95
Σχήμα 4.2.	Διάγραμμα ροής για την επίλυση του καταστατικού μοντέλου με μία επιφάνεια διαρροής στο μοντέλο υλικών που καθορίζεται από το χρήστη.....	97
Σχήμα 4.2.	(συνέχεια) Διάγραμμα ροής για την επίλυση του καταστατικού μοντέλου με μία επιφάνεια διαρροής στο μοντέλο υλικών που καθορίζεται από το χρήστη.....	98

Σχήμα 4.3.	Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής για την εύρεση του σημείου τομής με την επιφάνεια διαρροής.....	99
Σχήμα 4.4.	Αλγόριθμος με βελτιωμένη διαδικασία για την εύρεση του σημείου τομής με την επιφάνεια διαρροής	100
Σχήμα 4.5.	Αλγόριθμος για το υποβληματικό σχήμα forward Euler για εκτίμηση της νέας κατάστασης τάσεων, πλαστικού έργου και Ιακωβιανού μητρώου.....	104
Σχήμα 4.6.	Αλγόριθμος για τροποποιημένο σχήμα Euler με ενεργό έλεγχο σφάλματος.....	107
Σχήμα 4.7.	Αλγόριθμος για σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με έλεγχο σφάλματος.....	110
Σχήμα 4.8.	Σύγκριση διαφόρων σχημάτων ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό τασικής όδευσης υπό σταθερό όγκο: (α) τασική όδευση στο διάγραμμα $\sigma_3 - \sigma_1$, (β) λεπτομέρεια της τασικής όδευσης, και (γ) ανάπτυξη της παραμέτρου κράτυνσης W_p με τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση	114
Σχήμα 4.9α.	Σύγκριση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης από προσομοίωση δοκιμής τριαξονικής θλίψης με χρήση του προσομοιώματος Lade από την αριθμητική επίλυση του Helwany (2007) και του ABAQUS.....	119
Σχήμα 4.9β.	Σύγκριση της ογκομετρικής παραμόρφωσης από προσομοίωση δοκιμής τριαξονικής θλίψης με χρήση του προσομοιώματος Lade από την αριθμητική επίλυση του Helwany (2007) και του ABAQUS.....	120
Σχήμα 4.10.	Προβλέψεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade και πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ιλο-αργιλώδες υλικού για περιβάλλουσα τάση ίση με 172.37 kPa. (α) Σχέση τάσης-παραμόρφωσης και (β) ογκομετρικές παραμορφώσεις... ..	121
Σχήμα 4.11.	Προβλέψεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade και πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ιλο-αργιλώδες υλικού για περιβάλλουσα τάση ίση με 310.26 kPa. (α) Σχέση τάσης-παραμόρφωσης και (β) ογκομετρικές παραμορφώσεις... ..	122
Σχήμα 4.12.	Προβλέψεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade και πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών πυκνής λεπτόκοκκης πυριτικής άμμου για περιβάλλουσα τάση ίση με 34.24 kPa. (α) Σχέση τάσης-παραμόρφωσης και (β) ογκομετρικές παραμορφώσεις.....	124

Σχήμα 4.13.	(α) Εξαεδρικό στερεό στοιχείο με 8 σημεία ολοκλήρωσης, (β) Εφαρμογή της μη ομοιόμορφης κατακόρυφης παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια τριαξονικής θλίψης, (γ) Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε διαφορετικά σημεία ολοκλήρωσης, (δ) Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης στο σημείο ολοκλήρωσης Νο. 1 για ενεργό συνοχή $\alpha_1 p_\alpha = 0, 1, 2$ kPa.....	128
Σχήμα 5.1.	Πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών θλίψης σε λιθορριπή του φράγματος Oronville: (α) Λόγος τάσεων και (β) Ογκομετρική παραμόρφωση, ως προς την αξονική παραμόρφωση.....	131
Σχήμα 5.2.	Προσομοίωση τριαξονικών δοκιμών θλίψης με το προσομοίωμα Lade σε λιθορριπή του φράγματος Oronville: (α) Λόγος τάσεων και (β) Ογκομετρική παραμόρφωση, ως προς την αξονική παραμόρφωση	131
Σχήμα 5.3.	Προσομοίωση λόγου τάσεων ως προς την αξονική παραμόρφωση τριαξονικών δοκιμών θλίψης με το προσομοίωμα Duncan et al. (1970) σε λιθορριπή του φράγματος Oronville.....	132
Σχήμα 5.4.	Καθιζήσεις σταδιακής κατασκευής με προσομοίωμα (α) Lade και (β) Duncan-Chang.....	134
Σχήμα 5.5.	Κατανομή του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας στη λιθορριπή για μικρές παραμορφώσεις κατά το προσομοίωμα Lade (α) πριν και (β) μετά την πλήρωση της λεκάνης.....	135
Σχήμα 5.6.	Βύθιση πλάκας μετά την πλήρωση: Προσομοίωμα (α) Lade και (β) Duncan-Chang.....	136
Σχήμα 5.7.	Μέγιστη θλίψη μετά την πλήρωση: Προσομοίωμα (α) Lade και (β) Duncan-Chang.....	136
Σχήμα 5.8.	Μέγιστη διατομή και ζώνες των υλικών του φράγματος.....	138
Σχήμα 5.9.	Αριθμητική διακριτοποίηση των τριών ζωνών των υλικών λιθορριπής του φράγματος: Ζώνη χαλίκων 2B, Ζώνη λιθορριπής 3B και Ζώνη λιθορριπής 3C.....	139
Σχήμα 5.10.	Αριθμητική διακριτοποίηση του μισού επιχώματος και της γεωμετρίας της πλάκας για (α) $H=100\text{m}$, (β) $H=200\text{ m}$ και (γ) $H=300\text{ m}$	140
Σχήμα 5.11.	Ισοτροπική θλιπτική δοκιμή: Σύγκριση τάσεων-ογκομετρικών παραμορφώσεων από πειραματικά δεδομένα (Marachi et al., 1969) και προβλέψεις του μοντέλου Lade για (α) λιθορριπή Oronville και (β) λιθορριπή Pyramid.....	142

Σχήμα 5.12.	Λιθορριπή Oroville: Συγκρίσεις αποκλίνουσας τάσης και ογκομετρικής παραμόρφωσης από πειραματικά δεδομένα (Marachi et al., 1969) και προβλέψεις του μοντέλου του Lade προσομοίωσης δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε περιβάλλουσες τάσεις ίσες με 207, 965, 2896 και 4413 kPa.....	144
Σχήμα 5.13.	Λιθορριπή Pyramid: Συγκρίσεις αποκλίνουσας τάσης και ογκομετρικής παραμόρφωσης από πειραματικά δεδομένα (Marachi et al., 1969) και προβλέψεις του μοντέλου του Lade προσομοίωσης δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε περιβάλλουσες τάσεις ίσες με 207, 965, 2896 και 4413 kPa.....	145
Σχήμα 5.14.	Κατανομή της καθίζησης κατασκευής στα έξι φράγματα για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	149
Σχήμα 5.15.	Κατανομή της μέσης κανονικοποιημένης καθίζησης $S/S_{c,max}$ κατά μήκος του ύψους κατά τη διάρκεια της κατασκευής, της πλήρωσης της λεκάνης και της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς (ερπυσμός και πιθανές δυναμικές συνιζήσεις) για τα τρία ύψη φραγμάτων και για τα δύο υλικά λιθορριπής ($S_{c,max}$ είναι η μέγιστη καθίζηση κατασκευής)...	150
Σχήμα 5.16.	Μετρήσεις μέγιστων καθιζήσεων κατασκευής $S_{c,max}$ της λιθορριπής συμπυκνωμένης σε διαφορετικές τιμές λόγου κενών e (Πίνακας 5.7) και προβλέψεις του μοντέλου ως προς το ύψος των φραγμάτων για (α) στενές κοιλάδες ($0.9 < A_s/H^2 < 4$) και (β) πλατιές κοιλάδες ($A_s/H^2 > 4$).....	154
Σχήμα 5.17.	Κατανομή του μέτρου ελαστικότητας του Young E στα έξι φράγματα πριν την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	155
Σχήμα 5.18.	Κατανομή της βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	159
Σχήμα 5.19.	(α) Μετρήσεις και προβλέψεις μοντέλου της μέγιστης βύθισης της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης ως προς το ύψος των φραγμάτων (β) Προβλέψεις της μέγιστης βύθισης της πλάκας ως προς το ύψος των φραγμάτων εξαιτίας υποθετικών μακροπρόθεσμων καθιζήσεων ερπυσμού και δυναμικών συνιζήσεων.....	160

Σχήμα 5.20.	Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	161
Σχήμα 5.21.	Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	162
Σχήμα 5.22.	Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid (αρνητικές τιμές τάσεων υποδεικνύουν θλίψη).....	165
Σχήμα 5.23.	Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	166
Σχήμα 5.24.	Μέγιστες θλιπτικές τάσεις $ \sigma_3 $ στην πλάκα σκυροδέματος σε σχέση με το ύψος των φραγμάτων που προκαλούνται (α) από την πλήρωση της λεκάνης και (β) από συσσωρευμένες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης.....	167
Σχήμα 5.25.	Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά από καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid (αρνητικές τιμές τάσεων υποδεικνύουν θλίψη).....	170
Σχήμα 5.26.	Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	171

Σχήμα 5.27.	Θλιπτική αστοχία των κατακόρυφων αρμών της ανάντη πλάκας του φράγματος Zipingpu, ύψους 156 m κατά τον σεισμό Wenchuan (M=8) της 12-05-2008.....	172
Σχήμα 5.28.	Αστοχία της ανάντη πλάκας σκυροδέματος λόγω θλιπτικών τάσεων (στο 40% του ύψους) κατά την πλήρωση της λεκάνης στο φράγμα Campos Novos, ύψους 202 m.....	172
Σχήμα 5.29.	Κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	174
Σχήμα 5.30.	Κατανομή των παραμορφώσεων ε_3 , ε_{yy} και ε_{xx} μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	175
Σχήμα 5.31.	Κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης μετά από καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίξεσης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	177
Σχήμα 5.32.	Κατανομή των παραμορφώσεων ε_3 , ε_{yy} και ε_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	178
Σχήμα 5.33.	Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	180
Σχήμα 5.34.	Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις ερπυσμού και πιθανής δυναμικής συνίξεσης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.....	181

Σχήμα 5.35.	Μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις U_x στα πάνελ της πλάκας σε σχέση με το ύψος των φραγμάτων για (α) μετά την πλήρωση της λεκάνης και (β) μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.....	182
Σχήμα 5.36.	Κατανομή της βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	184
Σχήμα 5.37.	Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	185
Σχήμα 5.38.	Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	186
Σχήμα 5.39.	Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m για λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	187
Σχήμα 5.40.	Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	188
Σχήμα 5.41.	Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά από καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης για $H=200$ m από λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	189
Σχήμα 5.42.	Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για $H=200$ m κατασκευασμένα από λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	190
Σχήμα 5.43.	Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m και λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32....	191
Σχήμα 5.44.	Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις ερπυσμού και πιθανής δυναμικής συνίζησης για $H=200$ m και λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.....	192
Σχήμα 6.1.	Το φράγμα Mohale όπως φαίνεται από κατάντη στις 13 Φεβρουαρίου το 2006.....	199

Σχήμα 6.2.	Μέγιστη διατομή του φράγματος Mohale με λεπτομέρειες πλίνθου και στέψης.....	199
Σχήμα 6.3.	Πλάκα σκυροδέματος με τη θέση των κύριων οργάνων, όπου διακρίνονται και οι ρηγματώσεις στην πλάκα.....	200
Σχήμα 6.4.	α) Οι πλάκες 17 και 18 μετά την αφαίρεση του σκυροδέματος, β) Η σχετική κίνηση των πλακών 17 και 18.....	201
Σχήμα 6.5.	Στάθμη ταμιευτήρα και διαρροή ως προς τον χρόνο.....	201
Σχήμα 6.6.	(α) Περιγραφή των ζωνών του φράγματος και (β) Περιγραφή του παραπέτου.....	202
Σχήμα 6.7.	Κατασκευαστική ακολουθία. Βήματα 1 έως 7.....	203
Σχήμα 6.8.	Κατασκευαστική ακολουθία. Βήματα 8 έως 14.....	204
Σχήμα 6.9.	Κατασκευαστική ακολουθία. Βήματα 15 έως 20.....	205
Σχήμα 6.10.	(α) Η δοκός σκυροδέματος στη στάθμη 2040 m και (β) Οριζόντιες ρηγματώσεις της πλάκας σκυροδέματος στη στάθμη 2040 m όταν ο ταμιευτήρας έφτασε στη στάθμη 2010 m, περίπου τον Ιανουάριο του 2003.....	206
Σχήμα 6.11.	Καθιζήσεις (σε mm) για τις ζώνες 3 και 4 του φράγματος Mohale ως προς τον αριθμό διελεύσεων του στρωτήρα και το πάχος στρώσης.....	210
Σχήμα 6.12.	Σχέση μέτρου ελαστικότητας και πυκνότητας για την λιθορριπή της ζώνης 3 του φράγματος Mohale.....	210
Σχήμα 6.13.	Μέτρο ελαστικότητας για βασάλτη φτωχής και καλής διαβάθμισης...	211
Σχήμα 6.14.	Σταδιακή κατασκευή της αριθμητικής προσομοίωσης της λιθορριπής του φράγματος Mohale (Βήματα 1-4).....	214
Σχήμα 6.15.	Σταδιακή κατασκευή της αριθμητικής προσομοίωσης της λιθορριπής του φράγματος Mohale (Βήματα 5-8).....	215
Σχήμα 6.16.	Αριθμητική διακριτοποίηση του φράγματος Mohale ύψους 145 m α) Απεικόνιση του φράγματος με τα 36 ανεξάρτητα πάνελ σκυροδέματος και το παραπέτο β) Απεικόνιση της λιθορριπής του φράγματος με την υποκείμενη δοκό σκυροδέματος (extruded curb)...	216
Σχήμα 6.17.	Κατανομή της καθίζησης κατασκευής S_c α) ανάντη του φράγματος και β) κατόντη του φράγματος.....	217

Σχήμα 6.18.	Κατανομή της καθίζησης της πλάκας σκυροδέματος α) μετά την πλήρωση της λεκάνης χωρίς ερπυσμό και β) μετά την πλήρωση της λεκάνης και με ταυτόχρονη δράση ερπυσμού.....	218
Σχήμα 6.19.	Καθιζήσεις της πλάκας σκυροδέματος σε σχέση με την απόσταση από τη στέψη α) μετά την πλήρωση της λεκάνης χωρίς ερπυσμό, β) μετά την πλήρωση της λεκάνης και με ταυτόχρονη δράση ερπυσμού και γ) από τις πραγματικές μετρήσεις που λήφθηκαν στο φράγμα Mohale.....	219
Σχήμα 6.20.	Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 (μέγιστος εφελκυσμός) στην πλάκα σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.....	220
Σχήμα 6.21.	Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.....	220
Σχήμα 6.22.	Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.....	221
Σχήμα 6.23.	Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.....	222
Σχήμα 6.24.	Τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης καθίζησης α) στο αριστερό αντέρεισμα, β) στην κεντρική περιοχή και γ) στο δεξί αντέρεισμα.....	223
Σχήμα 6.25.	Συσχέτιση των καθιζήσεων από την αριθμητική προσομοίωση και των πραγματικών μετρήσεων στη 2 ^η ανάγνωση στο τέλος της κατασκευής.....	225
Σχήμα 6.26.	Σύγκριση των προβλέψεων καθιζήσεων και των πραγματικών καθιζήσεων εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού....	226

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Ορισμός του προβλήματος.

Τα φράγματα είναι τεχνητά εμπόδια σε μια φυσική ροή του νερού, τα οποία κατασκευάζονται για την αποθήκευση του νερού για άρδευση, ύδρευση, υδροηλεκτρική ενέργεια, αναψυχή κ.τ.λ. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το υλικό με το οποίο είναι κατασκευασμένα: α) τα άκαμπτα φράγματα, τα οποία αποτελούνται από μπετόν ή λιθοδομή και β) τα φράγματα επιχώσεως με χύδην υλικό, όπως τα χωμάτινα και τα λιθόρριπτα. Τα κριτήρια επιλογής της μιας ή της άλλης κατηγορίας φραγμάτων για την κατασκευή ενός συγκεκριμένου έργου ποικίλουν. Συνήθως όμως οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν αυτήν την επιλογή είναι γεωλογικοί, τεχνικοί, οικονομικοί και περιβαλλοντικοί.

Τα τελευταία χρόνια, ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη φραγμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή σε παγκόσμια κλίμακα, είναι τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs). Σημειώνεται ότι μόνο κατά την τελευταία δεκαετία, για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών για νερό και παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδιάζονται και κατασκευάζονται όλο και περισσότερα πιο υψηλά φράγματα τύπου CFRD ($H \geq 150$ m) σε διάφορα μέρη του κόσμου. Π.χ. το φράγμα Shuibuya (Κίνα) ύψους 233 m και το φράγμα Nuozhadu ύψους 261.5 m (Κίνα) (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2014). Αυτού του είδους τα φράγματα αποτελούν ίσως και τον πιο οικονομικό τύπο φραγμάτων, λόγω της οικονομίας υλικών και της σχετικά μικρής διάρκειας κατασκευής, με αποτέλεσμα να είναι αρκετά μειωμένο το κόστος κατασκευής τους.

Η εξέλιξη του σχεδιασμού των CFRDs βασίσθηκε μέχρι τώρα κυρίως στην εμπειρία από τη συμπεριφορά των ήδη κατασκευασμένων φραγμάτων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού τους, όπως αυτά καθορίστηκαν από την εμπειρία των B. Cooke και J. Sherard (Fitzpatrick et al., 1985), είναι τα εξής:

- το συμπακνωμένο λιθόρριπτο επίχωμα με τις μεταβατικές ζώνες, ικανό να παροχετεύσει χωρίς προβλήματα μεγάλες ροές διαμέσου του σώματός του χωρίς την ανάπτυξη πίεσης πόρων,
- η πλάκα σκυροδέματος, πάχους μεταβαλλόμενου ανάλογα με το ύψος νερού, με ειδικά σχεδιασμένους κατακόρυφους αρμούς,
- η πλίνθος, εδραζόμενη σε υγιή βράχο, με πλάτος υπολογισμένο ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο και αρμό πλίνθου-πλάκας ικανό να παραλάβει τις παραμορφώσεις.

Τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs) προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα χωμάτινα και τα λιθόρριπτα φράγματα, όπως η προσαρμοστικότητά τους στις γεωλογικές συνθήκες και το βροχερό κλίμα, μικρότερος όγκος των υλικών, μικρότερη ζήτηση για υλικά από μακρινές περιοχές και ταχύτερη διαδικασία κατασκευής. Το πιο σημαντικό όμως, σε αντίθεση με τα χωμάτινα φράγματα, είναι το γεγονός ότι δεν είναι επιρρεπή σε εσωτερική διάβρωση (διασωλήνωση) και η ευστάθειά τους βασίζεται στο ίδιο βάρος τους και όχι στην αντοχή του βράχου του αντερείσματος. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν τα CFRDs μια λογική επιλογή για πολύ υψηλά φράγματα (έως 300 m).

Σχεδιασμένη ως ένα διάφραγμα για να αποτραπεί η διαρροή του νερού στο εσωτερικό του φράγματος, η πλάκα σκυροδέματος αποτελεί αναμφισβήτητο το πιο κρίσιμο στοιχείο στη συμπεριφορά ενός CFRD. Φυσικά, η μηχανική της συμπεριφορά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης της υποκείμενης λιθορριπής. Η παγκόσμια εμπειρία έχει δείξει ότι πολύ καλά κατασκευασμένα CFRDs παρουσιάζουν μια πολύ καλή συμπεριφορά. Σε μερικές περιπτώσεις, ωστόσο, ορισμένα προβλήματα έχουν προκύψει, τα οποία απαιτούν μια βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Για παράδειγμα, κατά την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα, το βάρος του νερού μπορεί να προκαλέσει υπερβολική βύθιση της πλάκας, με αποτέλεσμα τη θλίψη στην κεντρική της περιοχή κι εφελκυστικές τάσεις κατά μήκος της περιμέτρου της (Fell et al., 2014; Filho Marques et al., 2005; Ma et al., 2007). Αυτό σχετίζεται με τη χρήση κακώς διαβαθμισμένης, γωνιώδους λιθορριπής, η οποία μπορεί να προκαλέσει σημαντικές καθιζήσεις, οδηγώντας σε υψηλές θλιπτικές τάσεις και θραύση των πάνελ σκυροδέματος κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών, καθώς επίσης και μετακίνηση των πάνελ στην περίμετρο της πλάκας. Διαρροή νερού λόγω ανοίγματος των αρμών μπορεί να αυξήσει

περαιτέρω τις καθιζήσεις μέσω του ξεπλύματος των λεπτόκοκκων υλικών, προκαλώντας επιπρόσθετη ρηγματώση της πλάκας.

Ένα τέτοιο ενδιαφέρον παράδειγμα αποτελεί το φράγμα Campos Novos (Βραζιλία) ύψους 202 m, κατασκευασμένο σε μια στενή κοιλάδα από λιθορριπή βασάλτη με ένα χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των 50-60 MPa (Cruz et al., 2009; Sobrinho et al., 2007; Xavier, 2009). Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης, ο κεντρικός κατακόρυφος αρμός του φράγματος Campos Novos αστόχησε εξαιτίας της θλίψης κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών. Επίσης, λόγω της θλίψης στη διαμήκη κατεύθυνση των πάνελ, αρκετά πάνελ υπέστησαν μετατόπιση και υπέρθεση από 0.12-0.15 m περίπου στο 30% έως 40% του ύψους του φράγματος σε μήκος 300 m. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του οπλισμού, σπάσιμο των waterstops και σημαντική διαρροή περίπου 1500 l/s. Παρόμοιες αστοχίες της πλάκας σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης έχουν επίσης παρατηρηθεί στα φράγματα Barra Grande (Βραζιλία) και Mohale (Lesotho).

Οι καθιζήσεις λιθορριπής μπορούν να συνεχίζουν να αυξάνονται μετά την πλήρωση της λεκάνης εξαιτίας του ερπυσμού, και για σεισμικές περιοχές πιθανής συσσώρευσης δυναμικών συνιζήσεων (Gazetas et al., 1992; ICOLD, 2010; Wieland, 2009). Ένα πρόσφατο παράδειγμα σεισμικής βλάβης είναι η θλιπτική διατμητική αστοχία κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών στην πλάκα του φράγματος Zipingpu (Κίνα) ύψους 156 m, που προκλήθηκε από τη συνδυαστική δράση των σεισμικών τάσεων και της θλίψης εξαιτίας δυναμικής συνιζήσης κατά τη διάρκεια του σεισμού Wenchuan στις 12 Μαΐου το 2008 (Dakoulas, 2012a,b; Guan, 2009; Wieland, 2009).

Όλες αυτές οι πρόσφατες εμπειρίες καθιστούν εμφανή την ανάγκη ο σχεδιασμός των CFRDs να ξεφύγει από τον έντονο εμπειρισμό και να συμπεριλάβει νέες μεθοδολογίες αριθμητικής προσομοίωσης που σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές και τις επιτόπου μετρήσεις, να επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και την αποτίμηση της επιρροής των σημαντικών παραμέτρων.

1.2 Στόχοι της έρευνας.

Οι αυξανόμενες ανάγκες παροχής ύδατος παγκοσμίως, καθιστούν συχνά αναγκαία τη διερεύνηση της κατασκευής φραγμάτων μεγάλου ύψους. Η ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής είναι ένα βασικό ζήτημα για την ανάλυση και το σχεδιασμό των CFRDs. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η αριθμητική ανάλυση των CFRDs έχει βασιστεί σε απλοποιημένα καταστατικά μοντέλα για λιθορριπή,

όπως το μοντέλο των Duncan και Chang (1970). Το πλεονέκτημά του ήταν η σημαντική συσσωρευμένη εμπειρία σχετικά με τις παραμέτρους του μοντέλου για διάφορους τύπους υλικών λιθορριπής (Duncan et al., 1980), για τις οποίες οι εργαστηριακές δοκιμές είναι δύσκολες. Ωστόσο, αυτό το απλό μοντέλο δεν επαρκεί να αναπαραστήσει σημαντικές πτυχές της συμπεριφοράς του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων της ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων, της διασταλτικότητας και της χαλάρωσης της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων, κ.τ.λ. Ενδεχόμενα αριθμητικά προβλήματα μπορούν επίσης να προκύψουν από την υπόθεση της σταθερής τιμής του λόγου Poisson (Potts and Zdravkovic, 2001). Πιο προχωρημένα γενικευμένα μοντέλα πλαστικότητας έχουν πρόσφατα χρησιμοποιηθεί για πιο ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης και της διασταλτικότητας της λιθορριπής (Xu et al., 2012).

Η συγκεκριμένη διατριβή έχει ως στόχο τη διερεύνηση, με προχωρημένη αριθμητική ανάλυση, της επίδρασης της κλίμακας μεγέθους και της δυσκαμψίας φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs), λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών κατασκευής, ώστε να διασφαλισθεί η δομική ακεραιότητα της πλάκας έναντι θλιπτικής αστοχίας ή εφελκυστικών ρηγματώσεων. Δεδομένου ότι η εμπειρία της συμπεριφοράς πολύ υψηλών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος είναι περιορισμένη, δημιουργείται ένα ρεαλιστικό προσομοίωμα το οποίο επιβεβαιώνεται με βάση την καταγεγραμμένη συμπεριφορά πραγματικών φραγμάτων για ύψη 100, 200 και 300 m. Έτσι εφαρμόζεται η χρήση του ελαστοπλαστικού καταστατικού μοντέλου του Lade στον τρισδιάστατο χώρο των κυρίων τάσεων, ως ένα υλικό που καθορίζεται από το χρήστη, βελτιωμένο με ένα απλό σχήμα βαθμίδας πλαστικότητας, στο γενικευμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2014). Για τη βελτίωση του αντισεισμικού σχεδιασμού φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, διερευνάται η επίδραση του ύψους του φράγματος και της δυσκαμψίας της λιθορριπής σε συνδυασμό με τη στενότητα της κοιλάδας, καθώς και η επίδραση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και της διαμέτρου του οπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση αυτού του προχωρημένου αριθμητικού ελαστοπλαστικού μοντέλου, προκειμένου να διερευνηθεί με έναν αυστηρό τρόπο η συμπεριφορά τριών υψηλών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, ύψους 100, 200 και 300 m σε στενές κοιλάδες τραπεζοειδούς διατομής με λόγο μήκους προς ύψος $L/H = 2$, που υπόκεινται σε πλήρωση της λεκάνης και σε μακροπρόθεσμο ερπυσμό και πιθανές δυναμικές συνιζήσεις. Κάθε ένα από τα τρία φράγματα αναλύεται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικής ποιότητας υλικά λιθορριπής: α) ένα υλικό εξαιρετικής ποιότητας (λιθορριπή

Oroville) και β) ένα υλικό μέτριας ποιότητας (λιθορριπή Pyramid). Η συμπεριφορά της λιθορριπής και της πλάκας σκυροδέματος σε όλες τις περιπτώσεις διερευνάται και αναλύεται βασιζόμενη σε αποτελέσματα αναλύσεων. Τέλος, πραγματοποιείται μία λεπτομερής προσομοίωση ενός πραγματικού φράγματος και η σύγκριση της προβλεπόμενης και της πραγματικής συμπεριφοράς. Η μεθοδολογία λεπτομερούς προσομοίωσης της σταδιακής κατασκευής, πλήρωσης της λεκάνης και των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, αποτελεί σημαντική βελτίωση της υπάρχουσας μεθοδολογίας ως προς την μη-γραμμική, ανελαστική συμπεριφορά του υλικού της λιθορριπής, της ανελαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος και της πραγματικής 3Δ γεωμετρίας της πλάκας. Παλαιότερες αναλύσεις με απλούστερα καταστατικά προσομοιώματα και ενιαία πλάκα σκυροδέματος αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματική συμπεριφορά και δεν είναι κατάλληλα για ασφαλή σχεδιασμό.

Προσομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο τη σταδιακή κατασκευή, την πλήρωση της λεκάνης και τις μακροπρόθεσμες καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης, επιτυγχάνεται μία σημαντική εμβάθυνση της κατανόησης σχετικά με την επίδραση του ύψους των φραγμάτων και της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην ανάπτυξη υψηλών θλιπτικών τάσεων, εφελκυστικών ρηγματώσεων και ανοίγματος των κατακόρυφων αρμών στα πάνελ της πλάκας σκυροδέματος. Οι αριθμητικές προβλέψεις συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου καθιζήσεων λιθορριπής και βυθίσεων πλάκας από παρόμοια φράγματα, αναπαριστώντας ένα ευρύ φάσμα από διάφορα ύψη και πυκνοτήτων λιθορριπής. Τέλος παρατίθενται οδηγίες για το σχεδιασμό φραγμάτων CFRDs μεγάλου ύψους.

1.3 Οργάνωση της διατριβής ανά κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 1. Γίνεται αναφορά στον ορισμό του προβλήματος, στο στόχο της διατριβής και στην οργάνωσή της ανά κεφάλαιο. Αρχικά παρουσιάζονται με συνοπτική περιγραφή κάποια εισαγωγικά στοιχεία αναφορικά με τα φράγματα και τις κατηγορίες φραγμάτων που υπάρχουν. Στη συνέχεια ακολουθεί η εφαρμογή και η εξέλιξη συγκεκριμένου τύπου φράγματος και συγκεκριμένα των CFRDs, για τα οποία θα γίνει λόγος στην παρούσα διατριβή, τα πλεονεκτήματα που έχουν έναντι των άλλων τύπων φραγμάτων καθώς και τα προβλήματα που ανακύπτουν κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή τους. Τέλος παρατίθενται οι στόχοι της παρούσας διατριβής, προκειμένου να

γίνει αντιληπτή η προτεινόμενη μεθοδολογία λεπτομερούς προσομοίωσης της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Κεφάλαιο 2. Αρχικά γίνεται μια περιγραφή της ιστορικής εξέλιξης των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος καθώς και των αιτιών που τα χρήζουν καταλληλότερα έναντι των υπολοίπων κατηγοριών. Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική αναφορά στις βασικές αρχές σχεδιασμού και κατασκευής των CFRDs, όπως επίσης και στους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους, για τη λεπτομερή κατανόηση της σταδιακής τους κατασκευής και των επιρροών τους προκειμένου να μελετηθεί και να διερευνηθεί εις βάθος η συμπεριφορά τους. Επιπλέον παρατίθενται η ανάλυση καταστατικών προσομοιωμάτων για τα αντίστοιχα φράγματα προκειμένου να περιγραφεί η σχέση τάσης-παραμόρφωσης και η χρήση και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος και συγκεκριμένα του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα που χρησιμοποιείται στην πλάκα σκυροδέματος για αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Τέλος, γίνεται μια παρουσίαση του καταστατικού προσομοιώματος ινοπλισμένου σκυροδέματος (Lee and Fenves, 1998).

Κεφάλαιο 3. Παρουσιάζεται αναλυτικά το ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο των Lade et al. (2002), βελτιωμένο με μία μεθοδολογία που βασίζεται στην χωρική μεταβλητότητα της πλαστικής παραμόρφωσης (gradient plasticity), η οποία προτάθηκε από τον Bassani (2001). Η περιγραφή του μοντέλου περιλαμβάνει την ελαστική συμπεριφορά, το κριτήριο αστοχίας, την επιφάνεια πλαστικού δυναμικού και το νόμο διαρροής, το κριτήριο διαρροής και τις σχέσεις έργου κράτυνσης/χαλάρωσης, την εφαρμογή του σε υλικά με ενεργό συνοχή καθώς επίσης και αποτελέσματα προφόρτισης με διάτμηση και υπερστερεοποίησης. Στη συνέχεια παρατίθεται ο βηματικός τύπος του μοντέλου και στο τέλος, αναπτύσσεται η περιγραφή της βαθμίδας πλαστικότητας, η οποία βασίζεται στη θεωρία μικρών παραμορφώσεων, στην κρυσταλλική πλαστικότητα και σύνθετη κράτυνση.

Κεφάλαιο 4. Παρατίθενται διαδικασίες επίλυσης και στρατηγική υπολογισμού για την ενσωμάτωση του προχωρημένου ελαστοπλαστικού μοντέλου Lade et al. (2002) στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2014) για τρισδιάστατη ανάλυση, καθώς επίσης και μια εκτίμηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων σχημάτων ολοκλήρωσης του συγκεκριμένου μοντέλου. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή της βαθμίδας πλαστικής παραμόρφωσης (strain gradient plasticity) στο συγκεκριμένο μοντέλο, ως ένα εργαλείο βελτίωσης ώστε να αποφευχθούν αριθμητικές δυσκολίες σε κρίσιμες θέσεις.

Κεφάλαιο 5. Προσομοιώνεται η σταδιακή κατασκευή, η πλήρωση της λεκάνης και η μακροπρόθεσμη κατάσταση με το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα των Lade et al. (2002), για τρία φράγματα ύψους 100, 200, 300 m χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικής ποιότητας υλικά λιθορριπής: α) ένα υλικό εξαιρετικής ποιότητας (λιθορριπή Oroville) και β) ένα υλικό μέτριας ποιότητας (λιθορριπή Pyramid). Επίσης, διερευνάται η επίδραση του ύψους των φραγμάτων και της δυσκαμψίας της λιθορριπής σε συνδυασμό με τη στενότητα της κοιλάδας, καθώς και η επίδραση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και της διαμέτρου του οπλισμού. Η συμπεριφορά της λιθορριπής και της πλάκας σκυροδέματος διερευνάται και αναλύεται βασιζόμενη σε αποτελέσματα αναλύσεων και συγκρίνονται με διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου από παρόμοια φράγματα.

Κεφάλαιο 6. Παρουσιάζεται η ανάλυση της αστοχίας του φράγματος Mohale. Αρχικά γίνεται αναφορά σε μια γενική περιγραφή του φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος Mohale καθώς επίσης και στο ιστορικό της αστοχίας του. Στη συνέχεια ακολουθεί η εφαρμογή του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος στο μοντέλο του φράγματος Mohale και παρατίθενται μια σειρά από αναλύσεις κι αποτελέσματα, τα οποία συγκρίνονται με τις πραγματικές μετρήσεις του υφιστάμενου φράγματος.

Κεφάλαιο 7. Επιχειρείται μία σύνοψη των συμπερασμάτων και αναφέρονται τα ευρήματα της διδακτορικής διατριβής. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και μπορούν να αποτελέσουν τα επόμενα ερευνητικά βήματα προς την κατεύθυνση που έχει χαραχθεί μέσα από την παρούσα διδακτορική διατριβή.

Βιβλιογραφία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (ΛΑΠΣ).

2.1.1 Ιστορική εξέλιξη φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Σύμφωνα με τον Cooke (1984), η εξέλιξη των λιθορριπτων φραγμάτων μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κύριες περιόδους: την πρώιμη περίοδο (1850-1940), τη μεταβατική περίοδο (1940-1965) και την μοντέρνα περίοδο (από το 1965 μέχρι και σήμερα). Η πρώιμη περίοδος των λιθορριπτων φραγμάτων χρονολογείται την εποχή του Πυρετού του Χρυσού. Οι χρυσοθήρες στις οροσειρές της Καλιφόρνιας ανέπτυξαν την κατασκευή φραγμάτων με εναποθετημένη λιθορριπή και ξυλεία ανάντη, το ύψος των οποίων δεν ξεπερνούσε τα 25 m. Οι κλίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στα επιχώματα ήταν πολύ απότομες από 0.5:1 έως 0.75:1 (οριζόντια:κάθετα). Το πρώτο λιθορριπτο φράγμα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος ήταν το Clatworth Park, το οποίο κατασκευάστηκε στην Καλιφόρνια το 1895. Πιο πρόσφατα ψηλά CFRDs που κατασκευάστηκαν την περίοδο αυτή είναι το φράγμα Dix River στο Kentucky με ύψος 84 m και το Salt Springs στην Καλιφόρνια ύψους 101 m. Παρά την εμφάνιση ορισμένων προβλημάτων διαρροής, το Salt Springs λειτουργεί από το 1931 μέχρι και σήμερα. Τα λιθορριπτα φράγματα κατασκευάζονταν με αδιαπέρατες μεμβράνες στην επιφάνειά τους ως το 1940, όπου άρχισε να διαδίδεται ο σχεδιασμός χωμάτων φραγμάτων (Cooke, 1984).

Κατά τη μεταβατική περίοδο, υπήρχαν ορισμένοι περιορισμοί και προβλήματα σε CFRDs ψηλότερα από 91 m. Η διαθεσιμότητα των κατάλληλων υλικών λιθορριπής αποτέλεσε ένα από τα προβλήματα, δεδομένου ότι η εναποθετημένη λιθορριπή θεωρούνταν ευρέως ότι έπρεπε να είναι κατάλληλου πετρώματος, με αρκετά υψηλή θλιπτική αντοχή. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν η συμπίεστικότητα της λιθορριπής καθώς η εναπόθεσή της γινόταν σε στρώσεις από 18-60 m. Σοβαρά προβλήματα διαρροής παρουσιάζονταν συχνά σε αυτά τα φράγματα εξαιτίας μεγάλων καθιζήσεων του επιχώματος της λιθορριπής κατά την περίοδο πλήρωσης της λεκάνης. Τα σπουδαιότερα CFRDs της περιόδου αυτής ήταν το Lower Bear River No.1 φράγμα, ύψους 75 m, το Lower Bear River No.2 φράγμα, ύψους 46 m και το φράγμα Paradela ύψους 110 m.

Το τελευταίο φράγμα της μεταβατικής περιόδου ήταν το New Exchequer ύψους 150 m, που κατασκευάστηκε στην Καλιφόρνια το 1958. Το φράγμα κατασκευάστηκε με κάποιο τμήμα της λιθορριπής συμπυκνωμένο σε στρώσεις των 1.2-3.0 m και το υπόλοιπο απλά εναποθετημένο σε στρώσεις των 18 m (Cooke, 1984).

Την περίοδο 1955-1965, η αναγκαιότητα δημιουργίας ψηλότερων φραγμάτων, σε συνδυασμό με την έλλειψη βράχων πολύ υψηλής αντοχής για τη λιθορριπή στις περιοχές κατασκευής των φραγμάτων και με την εξέλιξη πιο ήπιων δονητικών μηχανημάτων διάστρωσης, οδήγησαν στη μετάβαση από τη λιθορριπή απλής εναπόθεσης σε συμπυκνωμένη λιθορριπή. Κατά την έναρξη της περιόδου αυτής, η εναπόθεση γινόταν σε στρώσεις των 3 m. Αναφέρεται μάλιστα ότι το 1955 στο φράγμα Ambuklao η εναπόθεση έγινε σε στρώσεις πάχους 0.6 m εξαιτίας της χαμηλής αντοχής και του μικρού μεγέθους των διαθέσιμων κόκκων (Cooke, 1984).

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας επιτεύχθηκαν σημαντικές βελτιώσεις αναφορικά με τον τρόπο σχεδιασμού των CFRDs. Σε αυτό συνετέλεσαν η ανάπτυξη των κυλινδρούμενων δονητικών συμπυκνωτών, επιτυγχάνοντας συμπίκνωση της λιθορριπής σε πολύ λεπτές στρώσεις και χρήση πιο αδύναμων βράχων, καλύτερες λεπτομέρειες των αρμών και το γεγονός ότι η πλάκα έπαψε πλέον να έχει τη μορφή σκακιάρας και κατασκευάζεται με ανερχόμενο μεταλλότυπο, όπου το σκυρόδεμα ρίχνεται στην πλάκα με κινητή φόρμα (slipforming). Χαρακτηριστικό παράδειγμα CFRD με συμπυκνωμένη λιθορριπή αποτελεί το Foz do Areia (ύψους 160 m) στη Βραζιλία.

Μετά το 1990, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι έχει κατασκευαστεί ένας μεγάλος αριθμός φραγμάτων τύπου CFRD με μέσο ύψος γύρω στα 150 m κι έχει αποκτηθεί σημαντική εμπειρία σχετικά με τον τρόπο κατασκευής τους και τα προβλήματα που παρουσιάζουν. Ενδεικτικά φράγματα της περιόδου αυτής είναι τα Segredo (145 m) και Xingo (150 m) στη Βραζιλία καθώς και το Tianshengquiao (180 m) που ολοκληρώθηκε το 1998 στην Κίνα. Στην Ελλάδα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή του φράγματος της Μεσοχώρας, ύψους 150 m, που ολοκληρώθηκε το 1996. Στη σημερινή εποχή η κατασκευή όλο και πιο υψηλών φραγμάτων τύπου CFRD κερδίζει συνεχώς έδαφος έναντι των άλλων τύπων φραγμάτων, ειδικότερα στη Νότια Αμερική και στην Κίνα.

Μερικά από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα CFRDs έναντι της κατασκευής άλλων τύπων φραγμάτων (Gazetas et al., 1992; Ma et al., 2007; Sherard et al., 1987) είναι τα εξής:

- Η μεγάλη τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής συμπτωνωμένων χαλίκων και λιθορριπής, επιτρέπουν μεγάλες κλίσεις πρανών.
- Η σημαντική πίεση του νερού αυξάνει την δυσκαμψία και την αντοχή της λιθορριπής.
- Η κατασκευή του επιχώματος, είναι δυνατόν να γίνει υπό βροχή, επιτυγχάνοντας οικονομία χρόνου και μάλλον καλύτερη συμπύκνωση.
- Λόγω μεγάλων κλίσεων πρανών υπάρχει οικονομία υλικών.
- Απαιτούνται λιγότερα υλικά από μακρινές περιοχές.
- Η κατασκευή είναι ταχύτερη, η λειτουργία ασφαλέστερη και η συντήρηση ευκολότερη.
- Η σεισμική συμπεριφορά φαίνεται να είναι πολύ καλή, όπως π.χ. στο φράγμα Zippingru κατά τον σεισμό της 12-5-2008 (Guan, 2009; Wieland, 2009).

Επίσης, τα CFRDs είναι κατάλληλα για κοιλάδες με βραχώδη θεμελίωση και με πηγή κατάλληλης λιθορριπής. Σε πολλές περιπτώσεις έχουν χαμηλότερο εναλλακτικό κόστος από τα χωμάτινα και λιθόρριπτα φράγματα, όπως έχει συζητηθεί και από τους Sherard et al. (1987) και από τους Fitzpatrick et al. (1985). Ορισμένοι παράγοντες που συνιστούν την κατασκευή ενός CFRD ως οικονομική εναλλακτική λύση είναι: η μικρή διαθεσιμότητα του χωμάτινου υλικού στην περιοχή του έργου, το κλίμα, καθώς οι διατάξεις αυτές ενδείκνυνται σε υγρά κλίματα γιατί επιτρέπουν σύντομη τοποθέτηση της λιθορριπής και έτσι το φράγμα προστατεύεται από ενδεχόμενες πλημμύρες που μπορεί να συμβούν κατά την κατασκευή, η εφαρμογή τσιμεντενέσεων που σε ένα CFRD γίνεται ανεξάρτητα από την κατασκευή του επιχώματος γεγονός που απλοποιεί τη διαδικασία και το χρόνο κατασκευής, η μικρότερη απαιτούμενη ποσότητα λιθορριπής λόγω των πιο απότομων κλίσεων που μπορούν να δοθούν στα CFRDs. Οι Sherard et al. (1987), υπέδειξαν επιπλέον ότι το κόστος της πλάκας σκυροδέματος είναι συχνά μικρότερο σε σύγκριση με τις δαπάνες που απαιτούν τα άλλα είδη φραγμάτων (χωμάτινα, λιθόρριπτα) για αποστραγγιστικά φίλτρα και επιστάμενη ενίσχυση της θεμελίωσής τους. Γι' αυτό και από το 1985 στην Αυστραλία επιλέγεται η μέθοδος των CFRDs για την κατασκευή των περισσότερων ψηλών φραγμάτων. Οι Sherard et al. (1987) επισήμαναν ότι τα CFRDs αποτελούν οικονομικότερη επιλογή για την κατασκευή και χαμηλών φραγμάτων με ευρεία στέψη γιατί λόγω των απότομων κλίσεών τους καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση της κοιλάδας και επομένως, απαιτείται λιγότερη προετοιμασία εδάφους. Επίσης, το γεγονός ότι στα CFRDs δεν απαιτούνται φίλτρα αποστράγγισης καθιστά την τεχνική αυτή πολύ

οικονομική, καθώς τα φίλτρα για τα χαμηλά φράγματα αποτελούν σημαντικό τμήμα του συνολικού κόστους.

2.1.2 Σχεδιασμός και κατασκευή των λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος - Βασικές αρχές.

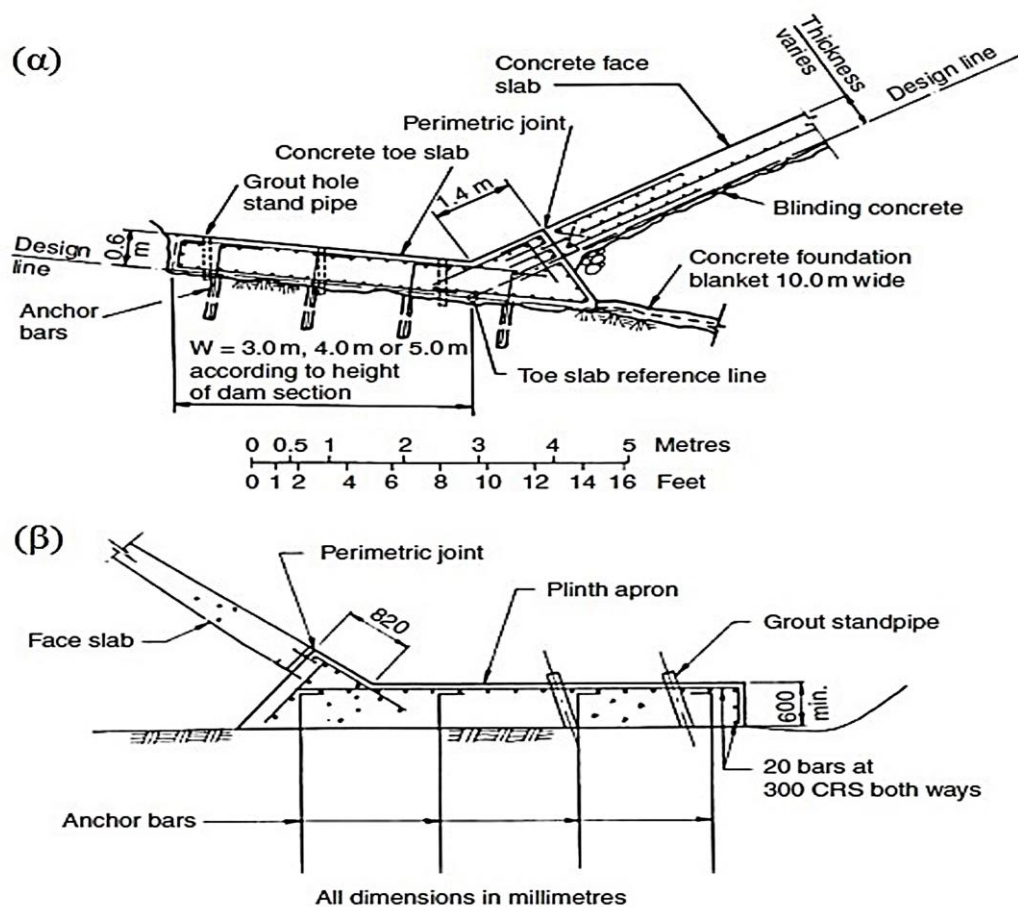
Η κατασκευή των CFRDs βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία, την τεχνογνωσία και την κρίση των μηχανικών. Εδώ, η λιθορριπή αποτίθεται στα κατάντη του υδραυλικού φορτίου της δεξαμενής. Σύμφωνα με τον Cooke (1984), σε αυτό τον τύπο φραγμάτων οι συντελεστές ευστάθειας και ολίσθησης είναι σχετικά υψηλοί. Κανένα λιθόρριπτο φράγμα δεν έχει αστοχήσει λόγω απώλειας ευστάθειας επισημαίνει ο Cooke το 1984, συνεπώς ήταν δύσκολο να προταθεί μια ρεαλιστική μέθοδος στατικής ανάλυσης για τα φράγματα αυτά. Παρακάτω, παρατίθενται συνοπτικά οι βασικές αρχές σχεδιασμού των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

2.1.2.1 Πλίνθος.

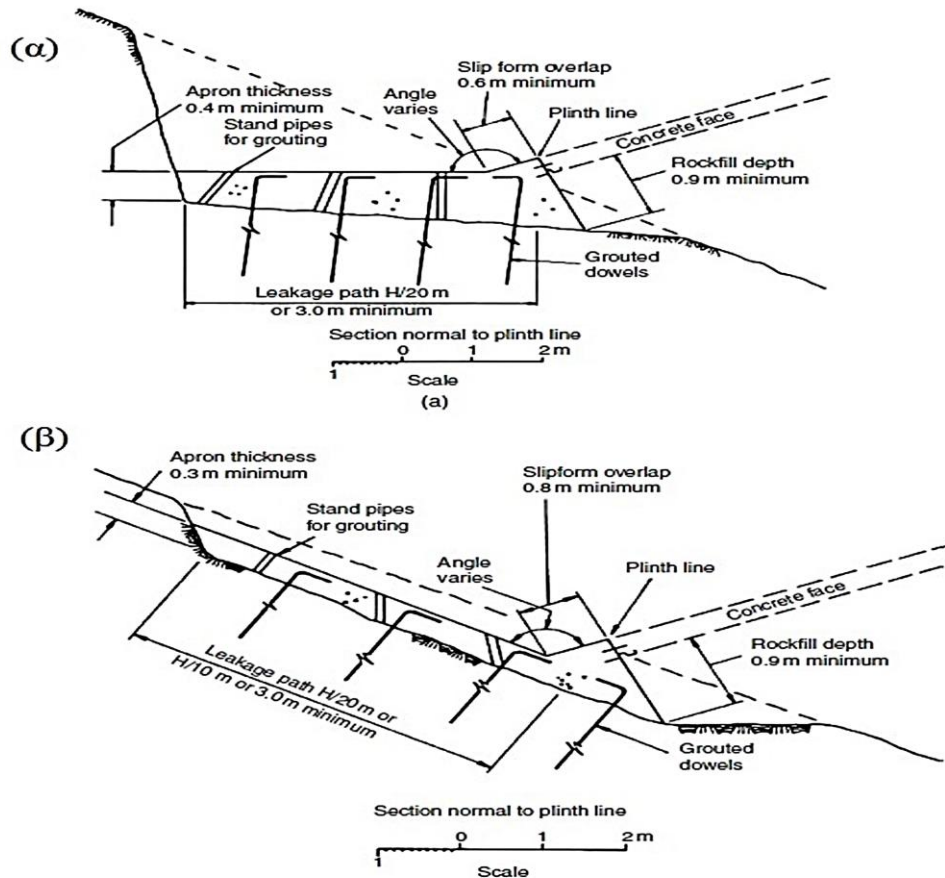
Η κατασκευή της πλίνθου αποσκοπεί στο να παρέχει μια στεγανή σύνδεση μεταξύ της πλάκας και της θεμελίωσης του φράγματος. Θα πρέπει να εδράζεται σε σκληρό, ενέσιμο βράχο, όχι επιρρεπή σε διάβρωση και που να έχει ανασκαφτεί προσεκτικά και καθαριστεί με νερό υπό πίεση. Γι' αυτές τις συνθήκες το πλάτος της πλίνθου είναι της τάξης του 1/20 έως 1/25 του βάθους του νερού (Cooke et al., 1987; ICOLD, 1989b). Οι Marulanda και Pinto (2000) προτείνουν να είναι το 1/10 έως 1/20, ανάλογα με τις συνθήκες του βράχου. Η ICOLD (2010), περιλαμβάνει μια μέθοδο στην οποία υπάρχουν παράμετροι σχετικοί με τη διάβρωση, αλλά οι συγγραφείς γενικά προτιμούν να εξετάσουν το πλάτος της πλίνθου με την ενδεχόμενη διάβρωση του βράχου κάτω από την πλίνθο, λαμβάνοντας υπόψη τον προσανατολισμό και την εμφάνιση ανοιχτών ρηγματώσεων ή χαρακτηριστικών διαβρώσιμων υλικών και να πάρουν τα αντίστοιχα μέτρα για να ελέγξουν τη διάβρωση. Μέχρι το αντέρεισμα του φράγματος, το πλάτος αλλάζει ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο. Αυτό γίνεται σε διάφορα στάδια (όχι βαθμιαία) για κατασκευαστική ευκολία. Το ελάχιστο πλάτος είναι γενικά 3 m, αν και οι Cooke et al. (1987) προτείνουν ότι για φράγματα μικρότερα των 40 m ύψους σε πολύ καλό βράχο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πλάτος πλίνθου 2 m. Οι Cooke (2000), Marulanda και Pinto (2000) και Cruz et al. (2009), υποδεικνύουν ότι μια πρόσφατη εξέλιξη στο σχεδιασμό είναι να ελαττωθεί το μήκος της πλίνθου στα 3 έως 5 m και να διατηρηθεί μια

συνολική κλίση διαρροής κάτω από την πλίνθο χρησιμοποιώντας μια ασύνδετη ενισχυμένη πλάκα κάτω από τη λιθορριπή.

Το ελάχιστο πάχος της πλίνθου είναι ανάμεσα σε 0.3 m και 0.4 m, και σε 0.6 m για φράγματα μεσαίου ύψους, αλλά οι Cruz et al. (2009) υποδεικνύουν ότι μπορεί να είναι έως και 1.00 m για τις χαμηλότερες πλίνθους υψηλών φραγμάτων (>120 m). Το πραγματικό πάχος είναι συνήθως περισσότερο εξαιτίας της ανάγκης πλήρωσης υπερεκσκαφής και αναπλήρωσης τοπογραφικών ανωμαλιών. Στα Σχήματα 2.1 και 2.2 απεικονίζονται κάποιοι σχεδιασμοί πλίνθου που είναι ακόμη τυπικοί για τα CFRDs για τα φράγματα Mangrove Creek, Boondooma, Cethana και Reece.



Σχήμα 2.1. Διαμόρφωση πλίνθου για (α) το φράγμα Mangrove Creek και (β) το φράγμα Boondooma (Mackenzie and McDonald, 1985; Rogers, 1985).



Σχήμα 2.2. Διαμόρφωση πλίνθου για (α) το φράγμα Cethana και (β) το φράγμα Reece (Fitzpatrick et al., 1985).

Η κατασκευή της πλίνθου θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε κατά τον έλεγχο ευστάθειας, ο οποίος συμπεριλαμβάνει τους ελέγχους ολίσθησης και ανατροπής, να είναι σταθερή και να αντιστέκεται στην οριζόντια ώθηση του νερού χωρίς να υποστηρίζεται από τη λιθορριπή. Η ώθηση που δέχεται η πλίνθος από τη λιθορριπή δεν λαμβάνεται υπόψη στον έλεγχο της ευστάθειας. Ο έλεγχος ευστάθειας είναι απαραίτητος σε πλίνθους με μεγάλο πάχος, ενώ αντίθετα μπορεί να παραληφθεί σε πλίνθους μέτριου πάχους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε πλίνθους μεγάλου πάχους αναπτύσσονται μεγάλες ωθήσεις από το νερό ενώ σε πλίνθους μέτριου πάχους η τριβή που αναπτύσσεται επαρκεί για να αντισταθμίσει την ώθηση του νερού. Η πλίνθος δεν αλληλεπιδρά με την πλάκα κι αυτό οφείλεται στην παρουσία του περιμετρικού αρμού, ο οποίος ανοίγει λόγω των υδροστατικών πιέσεων (ANCOLD, 1991).

Η ενόργανη παρακολούθηση των CFRDs έχει δείξει ότι μεγαλύτερο από το 90% της επιφάνειας της πλάκας σκυροδέματος βρίσκεται υπό θλίψη λόγω καθίζησης της λιθορριπής. Μετά την πλήρωση της δεξαμενής, η πλάκα εξακολουθεί να θλίβεται καθώς οι

κατακόρυφοι αρμοί της πλάκας δέχονται επιπλέον συμπίεση. Ωστόσο εφελκυστικές τάσεις μπορεί να προκαλέσουν τη διεύρυνση των κατακόρυφων αρμών καθώς και του περιμετρικού αρμού. Επομένως κατασκευαστικά προβλήματα στον περιμετρικό αρμό μπορεί να αποτελέσουν πηγή διαρροής. Ο περιμετρικός αρμός θα πρέπει οπωσδήποτε να είναι ελαστικός, ούτως ώστε να παραλαμβάνει τις αναμενόμενες μετακινήσεις και στις τρεις διευθύνσεις χωρίς καταστροφή των στεγανωτικών του υλικών. Στις αρχές του 1970, οι αρμοί περιλάμβαναν ένα στεγανωτικό υλικό από πλαστικό (PVC) ή καουτσούκ (rubber) στο κέντρο τους, καθώς επίσης και κάποια συμπιεστά υλικά πλήρωσης ενώ διέθεταν μόνο μια ζώνη άμυνας. Οι αρμοί αυτοί λειτούργησαν καλά για φράγματα ύψους μέχρι 75 m, αλλά παρουσίασαν πολύ μεγάλα ανοίγματα στα πιο ψηλά φράγματα κατά την πλήρωση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα για την εισροή που υπέστησαν μέσω του περιμετρικού αρμού αποτελούν τα φράγματα Alto Anchicaya (που παρουσίασε εισροή ίση προς 1800 l/s μέσω του περιμετρικού αρμού) και το Machandinho (όπου η εισροή έφτασε τα 900 l/s). Η μεγάλη διεύρυνση του αρμού οφειλόταν στη συμπιεστότητα των υλικών πλήρωσης και στην ανεπαρκή προσκόλληση του στεγανωτικού υλικού με το σκυρόδεμα (Θανόπουλος, 2002).

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, σε όλα τα ψηλά φράγματα ο περιμετρικός αρμός αποτελούνταν από 3 στεγανωτικά υλικά. Με το πέρασμα των χρόνων όμως, η παρουσία του κεντρικού στεγανωτικού υλικού (πλαστικό ή καουτσούκ) δημιουργούσε δυσκολίες στην τοποθέτηση του σκυροδέματος με σωστό και συνεχή τρόπο γύρω από αυτό, οδηγώντας τελικά στην εξάλειψή του.

2.1.2.2 Πλάκα σκυροδέματος.

Η πλάκα σκυροδέματος αποτελεί το αδιαπέρατο σύνορο για το φράγμα, κατασκευάζεται σε λωρίδες με ολισθαίνοντα μεταλλότυπο και εδράζεται στην ανάντη παρειά του φράγματος. Οποιαδήποτε εισροή είναι συνυφασμένη με προβλήματα που παρουσιάζονται σε αυτήν. Πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή της πλάκας παίζουν η αντοχή του σκυροδέματος, ο οπλισμός, το πάχος της πλάκας και η ακεραιότητα των υλικών στεγάνωσης της πλάκας για την ικανοποιητική απόκριση και την ανθεκτικότητα του φράγματος στο χρόνο.

Το πάχος της πλάκας προσδιορίζεται από την εμπειρία του παρελθόντος. Οι ICOLD (1989a), Cooke et al. (1987) και Cooke (2000) προτείνουν:

- Για φράγματα χαμηλά και μέτριου ύψους (έως 100 m) να χρησιμοποιείται σταθερό πάχος 0.25 m ή 0.30 m.
- Για υψηλά ή πολύ σημαντικά φράγματα να χρησιμοποιείται το πάχος από την εξίσωση $t = 0.3 \text{ m} + 0.002 H$, όπου H το υδραυλικό φορτίο του νερού σε μέτρα. Αυτά είναι τα ελάχιστα πάχη, για μέσα πάχη θα είναι μεγαλύτερο. Προηγούμενα φράγματα που κατασκευάστηκαν σε συμπιεσμένη λιθορριπή βασίστηκαν στη σχέση από $t = 0.3 \text{ m} + 0.002 H$ έως $t = 0.3 \text{ m} + 0.004 H$, αλλά βελτιωμένες κατασκευαστικές μέθοδοι επέτρεψαν μια μείωση στις παραπάνω τιμές.

Η Hydro Electric Commission (HEC) χρησιμοποίησε ένα πάχος πλάκας των 250 mm σε ένα φράγμα ύψους 75 m, 300 mm για υψηλότερα φράγματα και επιπλέον τοπική αύξηση του πάχους κοντά στον περιμετρικό αρμό (Carter et al., 2000). Οι Cruz et al. (2009) υπέδειξαν ότι για το σχεδιασμό δύο CFRDs περίπου 200 μέτρων ύψους το πάχος είναι $t = 0.30 + 0.002 H$ για μέχρι 100 m ύψους του φράγματος και $0.005 H$ για εκεί όπου το φράγμα είχε ύψος $> 100 \text{ m}$. Αυτό βασίζεται στην απαίτηση μιας σταθερής υδραυλικής κλίσης < 200 και συνδέθηκε με την ανάλυση της διήθησης μέσω ρωγμών πλάκας. Ακριβώς όπως και με το σκυρόδεμα της πλίνθου, είναι σημαντικός ο έλεγχος στις ρωγμές του σκυροδέματος, έτσι ώστε ο σχεδιασμός του μίγματος σκυροδέματος να στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο Portland, σύμφωνα με την ανάγκη να ανταποκριθεί στο σχεδιασμό της αντοχής σε θλίψη. Η χρήση της αντικατάστασης ιπτάμενης τέφρας φαίνεται να έχει πολλά οφέλη, δεδομένου ότι το σκυρόδεμα με περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αδιαπέρατο σε σχέση με το τσιμέντο Portland μόνο. Επίσης, η ιπτάμενη τέφρα βοηθά στη μείωση των θερμοκρασιών αιχμής κατά την τοποθέτηση και συνήθως βελτιώνει την εργασιμότητα για χαμηλότερες αναλογίες νερού/τσιμέντου (Fell et al., 2014).

2.1.2.3 Οπλισμός.

Ο οπλισμός της πλάκας χρησιμοποιείται προκειμένου να κατανεμηθεί και να περιοριστεί το εύρος των ρωγμών που αναπτύσσονται στις περιοχές της πλάκας που εφελκύνονται. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζονται τυχόν απρόβλεπτες εφελκυστικές τάσεις λόγω μεγάλων θερμοκρασιακών μεταβολών ή κατασκευαστικών ατελειών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που έχουν συσσωρευτεί κατά καιρούς από την εμπειρία για τη συμπεριφορά των CFRDs, στην πλάκα σκυροδέματος αναπτύσσονται

κυρίως ορθές τάσεις, οι οποίες είναι θλιπτικές στην κεντρική ζώνη της πλάκας και εφελκυστικές μόνο κοντά στην πλίνθο.

Οι ICOLD (1989a) και Cooke et al. (1987) συνιστούν τη χρήση του 0.4% χάλυβα οπλισμού σε κάθε κατεύθυνση, με πιθανή μείωση σε 0.3% ή 0.35% σε περιοχές της πλάκας που σίγουρα θα είναι σε θλίψη, διατηρώντας παράλληλα το 0.4% εντός περίπου 15 m από την περίμετρο. Ο Cooke (2000, 1999, 1997), συνιστά τη χρήση του 0.3% οριζόντια, 0.4% κάθετα και 0.4% και στις δύο διευθύνσεις εντός 15 m του περιμετρικού αρμού. Ωστόσο και ο ίδιος επισημαίνει ότι πολλές από τις εμπειρίες των ρωγμών σε απόσταση περίπου 20 μέτρων από την περίμετρο και κοντινές αλλαγές στην κλίση της πλίνθου, από σχετικά απότομη σε επίπεδη άνω κλίση, μπορούν να δικαιολογήσουν 0.5% σε κάθε διεύθυνση σε αυτές τις περιοχές. Ο Cooke (2000) συνιστά 0.5% στις περιοχές των μεγάλων μεταβολών στην κλίση της πλίνθου.

Ο χάλυβας οπλισμού τοποθετείται στο κέντρο, σε μία στρώση, εξυπηρετώντας έτσι και τον έλεγχο ρηγμάτωσης της πλάκας λόγω συστολής. Η απόσταση μεταξύ των ράβδων θα πρέπει να είναι μικρότερη του πάχους της πλάκας ($15 \text{ cm} \leq d \leq 30 \text{ cm}$), ενώ αύξηση οπλισμού θα πρέπει να γίνεται με αύξηση της διαμέτρου των ράβδων, και όχι με μείωση της απόστασης για λόγους πρακτικούς. Η περιοχή του χάλυβα υπολογίζεται στο θεωρητικό ελάχιστο πάχος (Cooke et al., 1987; ICOLD, 1989a). Ενίσχυση παρέχεται στην πλάκα και στην πλίνθο στους περιμετρικούς αρμούς, και σε ορισμένες περιπτώσεις εγκάρσια των κατακόρυφων αρμών, όπου είναι πιθανόν να είναι υπό θλίψη, για τον έλεγχο θραύσης (Fell et al., 2014). Τα Σχήματα 2.1 και 2.3 απεικονίζουν αναλυτικά την τοποθέτηση του οπλισμού στην πλάκα σκυροδέματος των CFRDs Mangrove Creek, Boondooma και Aguamilpa.

2.1.2.4 Αρμοί της πλάκας σκυροδέματος.

Η ορολογία των αρμών που γενικά χρησιμοποιείται είναι η εξής:

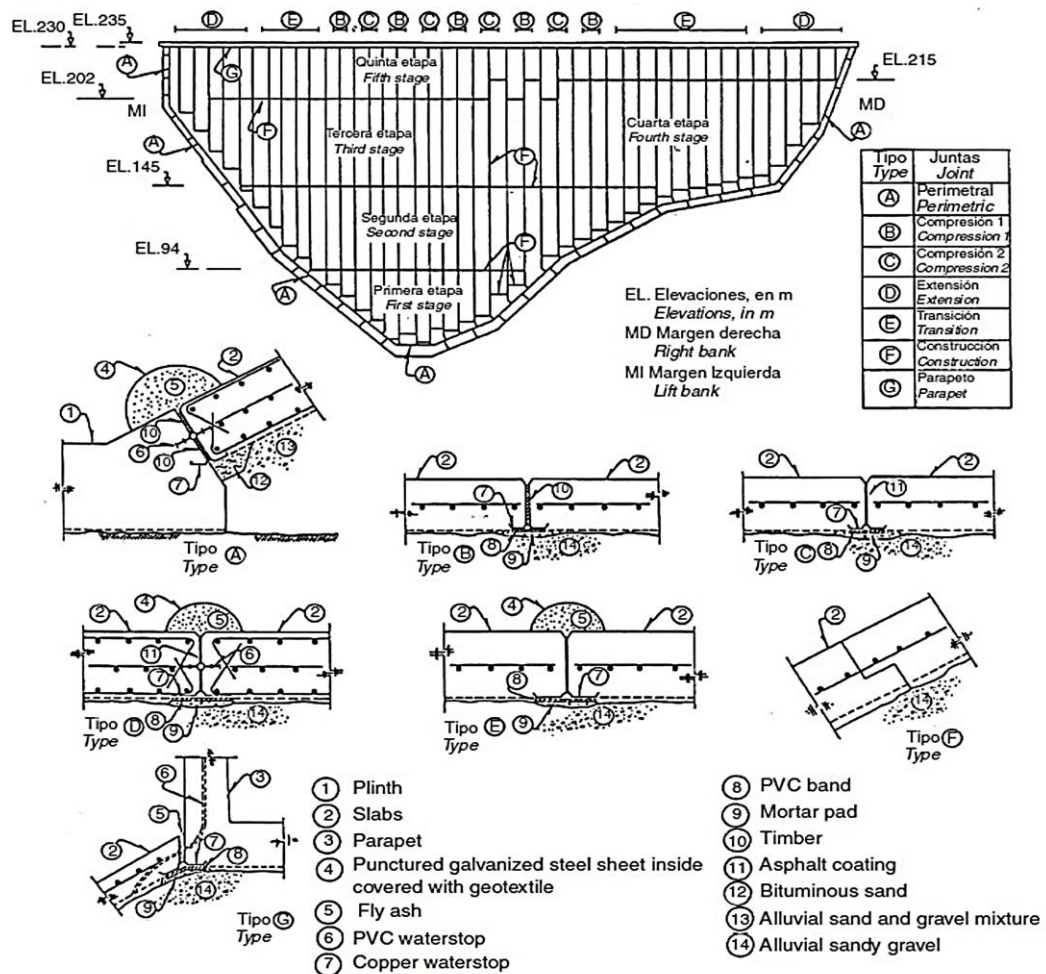
α) Κατασκευαστικοί αρμοί: Ο αρμός αυτός είναι απαραίτητος για τη συνεχή κατασκευή της πλάκας. Η σύνδεση επιτυγχάνεται με συνεχή οπλισμό που διαπερνάει τον αρμό και με την τράχυνση των επιφανειών του αρμού. Στον κατασκευαστικό αρμό δεν χρησιμοποιούνται στεγανωτικά υλικά (ANCOLD, 1991).

β) Αρμοί συστολής-διαστολής: Πρόκειται για αρμούς που μπορούν να διαστέλλονται και να συστέλλονται. Αυτό επιτυγχάνεται με την πλήρωση των αρμών με συμπιεστό υλικό. Ο οπλισμός δεν συνεχίζεται μέσα από τον αρμό, ενώ είναι απαραίτητη η χρήση στεγανωτικού υλικού (ANCOLD, 1991).

Η πλάκα σκυροδέματος έχει οριζόντιους και κατακόρυφους αρμούς. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται λεπτομέρειες αρμών για το φράγμα Aguamilpa σε διάφορες στάθμες και θέσεις των αρμών στην πλάκα σκυροδέματος.

(1) Οριζόντιοι αρμοί: Η ICOLD (1989a) υποδηλώνει ότι η πρακτική του σχεδιασμού εκείνη την εποχή δεν περιλάμβανε οριζόντιους αρμούς, εκτός από τους κατασκευαστικούς αρμούς στους οποίους ο χάλυβας οπλισμού μεταφέρεται μέσω του αρμού, χωρίς υδατοστεγάνωση (waterstops). Αυτή εξακολουθεί να είναι η τρέχουσα πρακτική (Cruz et al., 2009). Η σχετική απόφαση ελήφθη διότι, όταν χρησιμοποιήθηκαν οριζόντιοι αρμοί με υδατοστεγάνωση, ήταν δύσκολο να επιτευχθεί καλής ποιότητας σκυρόδεμα γύρω από την υδατοστεγάνωση και μερικοί αρμοί εμφάνισαν θραύση υπό θλίψη και ήπια περιστροφή. Η Hydro Electric Commission (HEC) διατήρησε έναν οριζόντιο αρμό συστολής για το φράγμα Reece, για τη μείωση θερμικής συστολής και ρηγμάτωσης της πλάκας (Fell et al., 2014). Βοηθητικοί κατασκευαστικοί αρμοί είναι απαραίτητοι όταν κατασκευάζονται οι αρχικές λωρίδες σκυροδέτησης (starter slabs) ως σημείο εκκίνησης για το μεταλλότυπο που θα διαμορφώσει τις κατακόρυφες λωρίδες. Επίσης, οριζόντιοι κατασκευαστικοί αρμοί χρησιμοποιούνται όταν η πλάκα δεν κατασκευάζεται συνεχόμενα, αλλά σε στάδια και με διακοπές (Πουλάκη, 2008).

(2) Κατακόρυφοι αρμοί: Οι κατακόρυφοι αρμοί κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπεται και η συστολή και η διαστολή τους, ενώ είναι απαραίτητοι για την κατασκευή της πλάκας, καθώς μέσω αυτών μετακινείται ο μεταλλότυπος. Οι κατακόρυφοι αρμοί παρέχονται γενικά σε απόσταση 12, 15, 16 ή 18 m ανάλογα με τους κατασκευαστικούς παράγοντες. Για μικρότερα φράγματα, μικρότερο διάστημα είναι επιθυμητό, π.χ. 6 m. Τα περισσότερα CFRDs έχουν κατασκευαστεί με κάθε έναν από τους κατακόρυφους αρμούς να είναι ένας κατασκευαστικός αρμός με ένα waterstop χαλκού στη βάση. (Fell et al., 2014). Οι Cooke et al. (1987) υποστήριξαν την ενίσχυση των αρμών κοντά στα αντερείσματα. Για το φράγμα Aguamilpa και σε πολλά άλλα πρόσφατα φράγματα, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές λεπτομέρειες, ανάλογα με το αν οι αρμοί αναμένονταν να είναι σε εφελκυσμό ή θλίψη. Ενίσχυση έναντι θραύσης παρέχεται στις υψηλές τάσεις που εμφανίζονται στους κεντρικούς κατακόρυφους αρμούς, όπως στο φράγμα Campos Novos (Fell et al., 2014). Οι Cruz et al. (2009) αναφέρουν ότι, μετά τη ζημιά στην πλάκα στα φράγματα Barra Grande, Campos Novos και Mohale ένα υλικό πλήρωσης από ξύλο ή ισοδύναμο υλικό χρησιμοποιήθηκε για την απορρόφηση και την κατανομή θλιπτικών τάσεων σε υψηλά CFRDs, καθώς και σε CFRDs κατασκευασμένα σε στενές κοιλάδες.

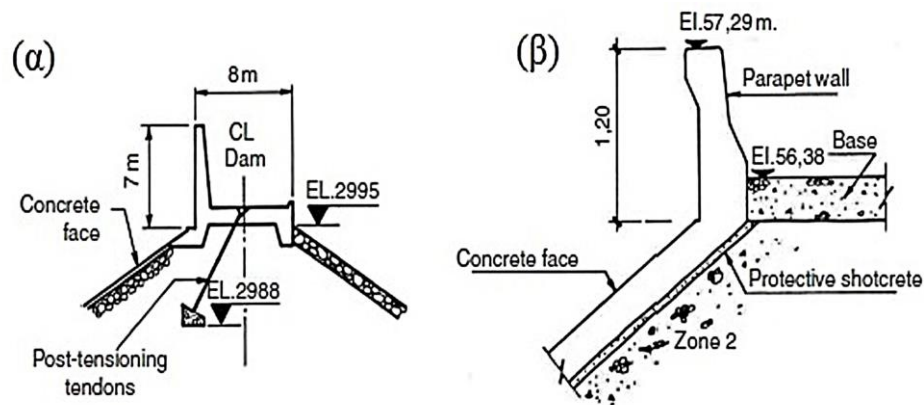


Σχήμα 2.3. Λεπτομέρειες αρμών για το φράγμα Aguamilpa σε διάφορες στάθμες και θέσεις των αρμών στην πλάκα σκυροδέματος (Valencia and Sandoval, 1997).

2.1.2.5 Τοιχίο στέψης.

Συχνά στα περισσότερα φράγματα κατασκευάζεται επιπλέον ένας ενισχυμένος τοίχος αντιστήριξης στη στέψη του φράγματος (παραπέτο), για τη μείωση του όγκου της λιθορριπής και τη θραύση των κυματισμών. Έχουν χρησιμοποιηθεί τοιχία έως 3 με 5 m. Η βάση του τοιχίου είναι συνήθως πάνω από το πλήρες επίπεδο παροχής και το τοιχίο είναι ενωμένο με την πλάκα με έναν εύκαμπτο αρμό. Ο αρμός θα πρέπει να είναι κατακόρυφος, όχι κάθετος στο επίπεδο της πλάκας, έτσι ώστε η διαφορική καθίζηση να μπορεί να παραληφθεί. Το πλάτος της στέψης εξαρτάται από λειτουργικές απαιτήσεις, με ελάχιστη τιμή 5 m. Το τοιχίο στέψης κατασκευάζεται μετά την πλάκα, δίνοντας μία σχετικά ευρεία πλατφόρμα στην οποία θα εργαστεί ενώ η πλάκα είναι υπό κατασκευή (Fell et al., 2014). Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται λεπτομέρειες για τα τοιχία στέψης των φραγμάτων Golillas

και Macaquia. Στο επίχωμα του φράγματος Gouhou (Chen, 1993) συνέβη αστοχία στην πρώτη πλήρωση, όταν η στάθμη του νερού ανέβηκε πάνω από τον αρμό που βρίσκεται μεταξύ της πλάκας και του τοιχίου στέψης. Ο αρμός είχε ανοίξει ως αποτέλεσμα της καθίζησης της πλάκας, η δε κακή κατασκευή του σκυροδέματος φαίνεται να ήταν ένας παράγοντας που συνέβαλε σε αυτό. Το κρίσιμο ζήτημα ήταν η απουσία μιας ελεύθερης ζώνης αποστράγγισης στο φράγμα για να εκκενωθεί η διαρροή.



Σχήμα 2.4. Λεπτομέρειες στέψης για τα φράγματα (α) Golillas (β) Macaquia (Amaya and Marulanda, 1985; Prusza et al., 1985).

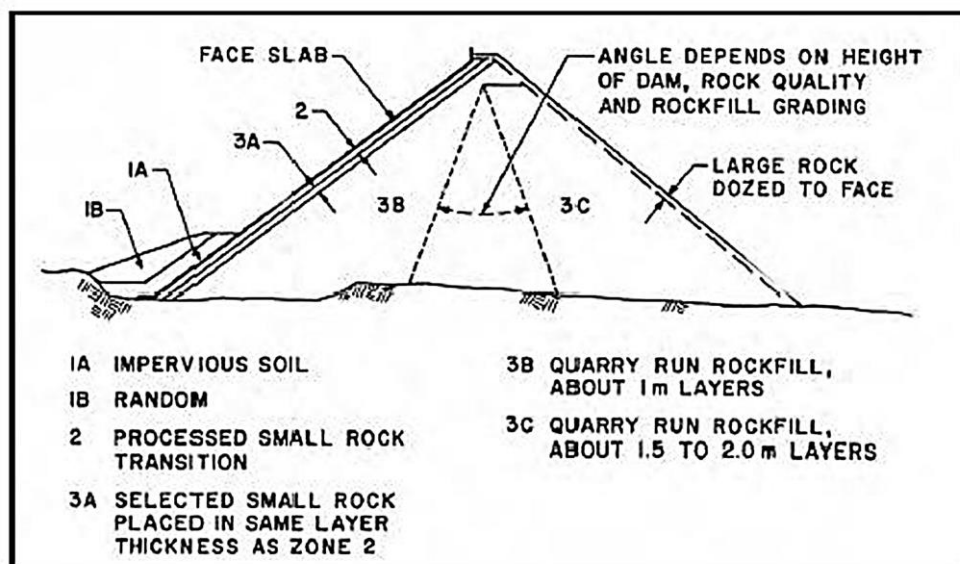
2.1.2.6 Τυπική διαζώνιση των CFRDs.

Η τυπική διαζώνιση των CFRDs δίνεται στο Σχήμα 2.5. Η ζώνη 1Α είναι μια λεπτή στρώση αποτελούμενη από αδιαπέρατο εδαφικό υλικό (συνήθως ιλύς). Στόχος της ζώνης αυτής είναι η προστασία της πλάκας και των αρμών (περιμετρικού και κάθετων αρμών) από την εισροή του νερού. Η ζώνη αυτή, συνήθως προτιμάται σε ψηλότερα φράγματα και δεν είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό των CFRDs. Προφανώς τοποθετείται ως εξυγίανση, αφού παρουσιαστούν προβλήματα (Cooke et al., 1987).

Η ζώνη 2 αποτελείται από πιο λεπτούς κόκκους βράχου ή χαλικιού. Περιέχει συγκεκριμένα κόκκους λιθορριπής διαμέτρου από 7.5 ως 15.0 cm αναμεμιγμένους με 40% άμμο και λεπτόκοκκα. Ο σκοπός της ζώνης αυτής είναι να διαμορφώσει μια αδιαπέρατη και δύσκαμπτη υποστηρικτική ζώνη για την πλάκα αποτρέποντας οποιαδήποτε εισροή μέσω των πιθανών ρωγμών της πλάκας. Η ζώνη 2 συμπυκνώνεται σε στρώσεις πάχους 0.4-0.5 m με 4 διελεύσεις από κυλινδρικό δονητικό συμπυκνωτή 10 tn. Το υλικό της ζώνης 2 γίνεται πιο εργάσιμο και λιγότερο περατό με αύξηση της περιεκτικότητάς του σε λεπτόκοκκα. Σε πολύ υγρά κλίματα όμως, κινδυνεύει από διάβρωση (Cooke et al., 1987).

Το επίχωμα ενός CFRD αποτελείται από τη ζώνη 3, η οποία διαιρείται στις επιμέρους 3Α, 3Β και 3C. Η ζώνη 3Α είναι μεταβατική ανάμεσα στη ζώνη που

υποστηρίζει την πλάκα και στο κύριο σώμα της λιθορριπής. Συμπυκνώνεται σε στρώσεις πάχους 0.4-0.5 m όπως και η Ζώνη 2. Η καλή συμπύκνωση της 3A αποσκοπεί στο να μειωθούν τα κενά στη ζώνη αυτή και να αποφευχθεί ο κίνδυνος να παρασυρθεί το υλικό της ζώνης 2 στο σώμα της λιθορριπής. Η Ζώνη 3B συμπυκνώνεται σε στρώσεις πάχους 0.8-1.0 m με 4-6 διελεύσεις από στρωτήρα 10 tn. Η συμπύκνωση αυτή θεωρείται ότι επιτυγχάνει την ελάχιστη δυνατή συμπίεστικότητα για την ζώνη 3B, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι μετατοπίσεις της πλάκας. Η ζώνη 3C δέχεται ελάχιστο ποσοστό του υδραυλικού φορτίου. Η συμπύκνωση της ζώνης αυτής γίνεται σε στρώσεις 1.0-2.0 m με 4 διελεύσεις από στρωτήρα 10 tn. Το κατάντη τμήμα της ζώνης αυτής αποτελείται από χονδρόκοκκη λιθορριπή (Cooke et al., 1987).



Σχήμα 2.5. Η τυπική διατομή των CFRDs (Cooke et al., 1987).

2.1.2.7 Ποιότητα και διαβάθμιση του επιχώματος.

Η λιθορριπή, θα πρέπει να επιτρέπει την αποστράγγιση για να αποφευχθεί η συσσώρευση της πίεσης των πόρων κατά τη διάρκεια της κατασκευής και να επιτρέπει την ελεγχόμενη απορροή του νερού που θα μπορούσε να διαρρεύσει μέσω της πλάκας. Επίσης, θα πρέπει να έχει ένα αρκετά υψηλό μέτρο ελαστικότητας μέσω καλής συμπύκνωσης στο φράγμα για να περιορίσει τις βυθίσεις της πλάκας υπό το φορτίο του νερού σε αποδεκτές τιμές. Ο ερπυσμός της λιθορριπής θα πρέπει επίσης να είναι αρκετά μικρός για να αποφευχθούν υπερβολικές μακροπρόθεσμες καθιζήσεις. Τέλος, θα πρέπει να είναι ένα εύκολα και οικονομικά διαθέσιμο προϊόν λατομείου για μεγάλου μεγέθους ή μικρότερου μεγέθους βράχους. Για λιθορριπή χρησιμοποιήθηκαν πετρώματα γρανίτη, βασάλτη,

δολερίτη, γνεύσιου, πυκνού ψαμμίτη με χαλαζία και άμμο, πυκνού αμμοχάλικου, δολομητικού κουαρτζίτη, ιλυόλιθου, σχιστόλιθου ή αργιλίτη (Fell et al., 2014).

Η θλιπτική αντοχή των βράχων που χρησιμοποιούνται για τη λιθορριπή κυμαίνεται μεταξύ 100-200 kg/cm² (πολύ χαμηλή) έως 2500 kg/cm² (πολύ υψηλή), η πλειονότητά τους όμως βρίσκεται ανάμεσα στα 500-1500 kg/cm². Σε γενικές γραμμές, σκληρά πετρώματα με ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή ίση προς 300 kg/cm², θεωρούνται επαρκή για τα CFRDs. Λιθορριπή μεγαλύτερης αντοχής δεν δίνει κάποιο τεχνικό πλεονέκτημα, εφόσον η λιθορριπή 300-400 kg/cm² δεν είναι περισσότερο συμπιεστή στο ολοκληρωμένο φράγμα από τους σκληρούς βράχους. Αντίθετα, η χρήση λιθορριπής από βράχο χαμηλής έως μέτριας θλιπτικής αντοχής, έχει πολλά πλεονεκτήματα κόστους, δεδομένου ότι είναι λιγότερο δαπανηρή στην εξόρυξη και στον απαιτούμενο εξοπλισμό (Cooke et al., 1987).

Σύμφωνα με τον Cooke (1984), ένα από τα βασικά στοιχεία για την επιλογή βράχου είναι η συμπεριφορά του κατά τη διαβροχή. Αν μετά τη διαβροχή, η λιθορριπή από έκρηξη είναι αρκετά ισχυρή για να υποστηρίξει τα φορτηγά και στρωτήρα 10 tn, τότε μπορεί να θεωρηθεί ως κατάλληλη για φράγματα λιθορριπής. Αν ο βράχος σπάσει και δεν παραμείνει σε ελεύθερη αποστράγγιση μετά τη συμπύκνωση, είναι αναγκαίο να προβλεφθούν ζώνες σκληρής, διαπερατής λιθορριπής για εσωτερική αποστράγγιση. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες των επιχωμάτων των CFRDs είναι η χαμηλή τους συμπιεστότητα και η υψηλή διατμητική αντοχή. Συνήθως η λιθορριπή είναι εξαιρετικά διαπερατή. Σαν γενικός κανόνας, κάθε λαξευτός σκληρός βράχος με μια μέση κατανομή μεγέθους κόκκων που έχει 20% ή λιγότερο από το λεπτότερο κόσκινο No.4 και 10% ή λιγότερο από το λεπτότερο κόσκινο No.200, θα έχει την απαραίτητη λιθορριπή υψηλής διατμητικής αντοχής και χαμηλής συμπιεστότητας (Cooke et al., 1987).

Σύμφωνα με τον Cooke et al. (1987), σε μια ανθεκτική στρώση λιθορριπής υπό κυκλοφοριακά φορτία που προκαλούνται από βαρέα φορτηγά, τα φορτία των τροχών μεταφέρονται από τον σκελετό λιθορριπής, ενώ σε μια ασταθή επιφάνεια λιθορριπής τα φορτία μεταφέρονται από τα λεπτόκοκκα. Αν υπάρχει μια ασταθής επιφάνεια, το επίχωμα μπορεί να μην έχει τις επιθυμητές ιδιότητες για μια διαπερατή ζώνη λιθορριπής.

2.1.2.8 Τοποθέτηση της λιθορριπής.

Η εναπόθεση και εξομάλυνση της υγιούς λιθορριπής έχει ως στόχο το να διαχωρίσει τα υλικά, ώστε οι μεγαλύτερες κροκάλες να συσσωρεύονται στη βάση της κάθε στρώσης και οι μικρότερες στο πάνω τμήμα της στρώσης (Cooke, 1984; Sherard et al., 1987). Η καλά διαχωρισμένη λιθορριπή έχει μόνο θετική επίδραση στη συμπεριφορά του

φράγματος, καθώς η αλληλεμπλοκή μεταξύ λεπτότερων και πιο χονδρών τεμαχίων εξασφαλίζει στη λιθορριπή την απαιτούμενη διατμητική αντοχή.

2.1.2.9 Κλίση πρανών.

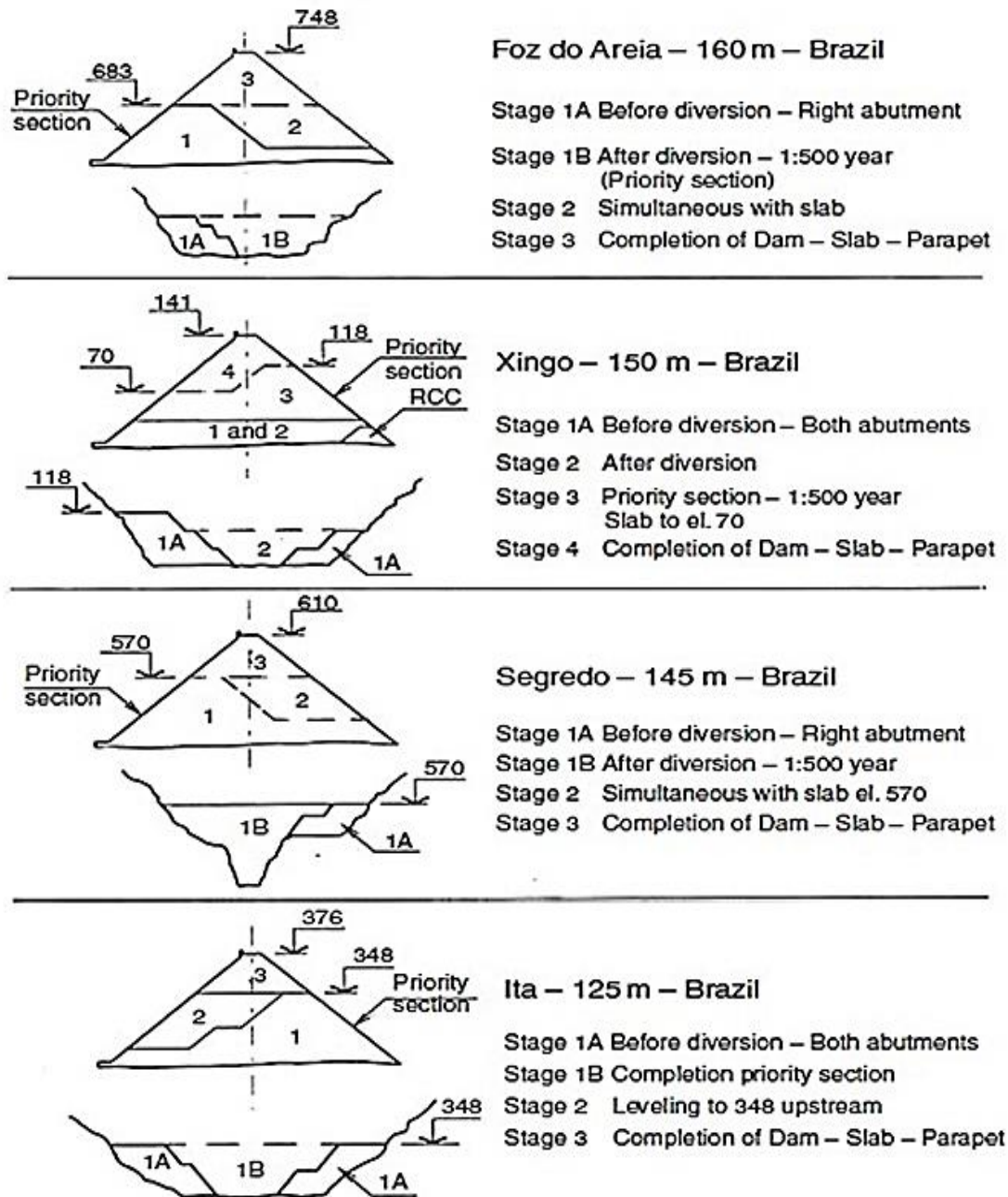
Όταν το CFRD κατασκευάζεται από λιθορριπή σκληρή, ελεύθερης αποστράγγισης, οι ανάντη και κατάντη κλίσεις καθορίζονται σε 1.3H:1V ή 1.4H:1V, που αντιστοιχούν χονδρικά στη γωνία απόθεσης της χαλαρής λιθορριπής. Με κλίσεις εντός του παραπάνω εύρους, εκδορές στις όψεις θα πρέπει να αποτρέπονται. Όταν χρησιμοποιείται χαλίκι για τις ζώνες λιθορριπής του φράγματος, απαιτούνται ήπιες κλίσεις για να αποτρέψουν τις εκδορές στην όψη. Συνήθως υιοθετείται κλίση 1.5H:1V σε αυτές τις περιπτώσεις παρόλο που έχει χρησιμοποιηθεί και κλίση 1.6H:1V (Fell et al., 2014). Ήπιες κλίσεις έχουν υιοθετηθεί κάποιες φορές, όταν έχει χρησιμοποιηθεί λιθορριπή χαμηλής διαπερατότητας, π.χ. στο φράγμα Mangrove Creek (Mackenzie and McDonald, 1985). Αν οι αντοχές της θεμελίωσης το επιτρέπουν, μπορούν επίσης να απαιτηθούν ήπιες κλίσεις. Π.χ. κλίση 2.2H:1V χρησιμοποιήθηκε στο φράγμα Winneke (Casinader and Watt, 1985). Αν χρειαστούν δρόμοι πρόσβασης για τις κατάντη κλίσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απότομες κλίσεις. Π.χ. 1.25H:1V χρησιμοποιήθηκε για το φράγμα Foz do Areia (Pinto et al., 1985).

Όπως επισημαίνεται από τους Sherard et al. (1987) και Fitzpatrick et al. (1985), η ευστάθεια των κλίσεων στο φράγμα συνήθως δεν αναλύεται. Αυτό είναι σε αναγνώριση του γεγονότος ότι καλά σχεδιασμένα και κατασκευασμένα CFRDs δεν έχουν πιέσεις πόρων στη λιθορριπή και θα παραμείνουν σταθερά υπό στατικά φορτία όταν έχουν κατασκευαστεί στις κλίσεις που περιγράφηκαν παραπάνω. Ωστόσο, ορισμένα από τα υφιστάμενα φράγματα με περιορισμένη αποστράγγιση λιθορριπής μπορούν να εμφανίσουν κάποιο βαθμό κορεσμού της λιθορριπής, εάν η πλάκα έχει υποστεί ζημιά, π.χ. σε ένα σεισμό, ειδικά αν δεν υπάρχει ζώνη χαμηλής διαπερατότητας κάτω από την όψη για τον έλεγχο της διοχέτευσης στο επίχωμα (Fell et al., 2014).

2.1.2.10 Σταδιακή κατασκευή του επιχώματος.

Στα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος η κατασκευή του επιχώματος γίνεται σταδιακά. Η αλληλουχία της κατασκευής των τμημάτων του CFRD (πλίνθος, επίχωμα, πλάκα) θα πρέπει να ακολουθείται αυστηρά καθώς διάφορα προβλήματα που εμφανίστηκαν στην πλάκα πολλών φραγμάτων πριν την έναρξη της λειτουργίας τους, συνέστησαν την κατασκευή της πλάκας μετά την τοποθέτηση και του

τελευταίου τμήματος της λιθορριπής. Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζονται σχηματικά οι σταδιακές κατασκευές των φραγμάτων Foz do Areia, Xingo, Segredo και Ita (Βραζιλία), ύψους 160 m, 150 m, 145 m και 125 m αντίστοιχα.



Σχήμα 2.6. Σταδιακή κατασκευή των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος Foz do Areia, Xingo, Segredo, Ita (Materon and Mori, 2000).

2.2 Συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

2.2.1 Πρόσφατα προβλήματα σε ψηλά CFRDs.

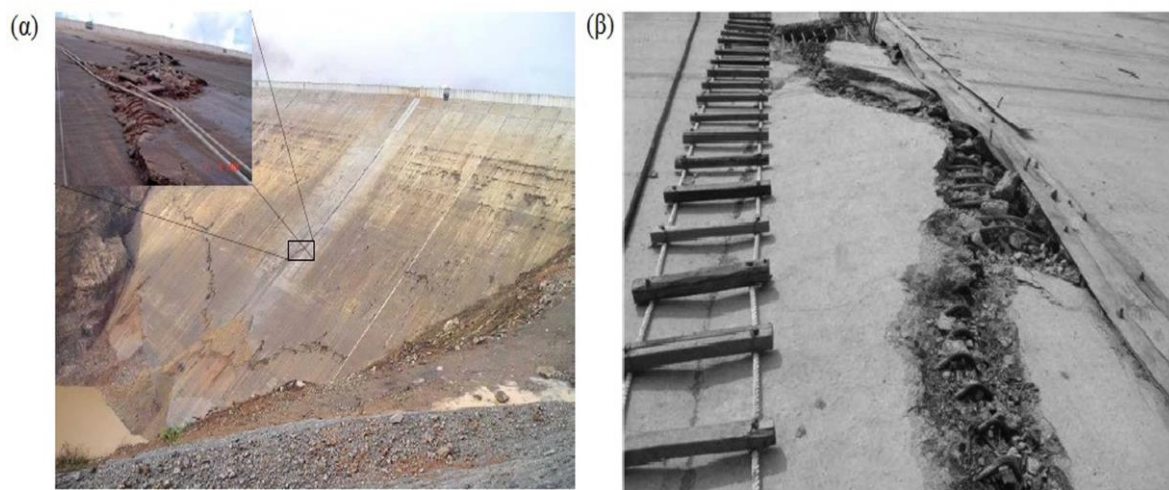
Διάφορα έργα CFRDs σε όλο τον κόσμο έχουν εμφανίσει σημαντικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης. Αυτό είχε ως συνέπεια τη ρηγμάτωση της πλάκας σκυροδέματος, τη διεύρυνση των αρμών και σημαντική αύξηση της εισροής. Τα προβλήματα τα οποία έχουν εμφανισθεί οφείλονται στο γεγονός ότι η κατασκευή των CFRDs βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη εμπειρική τεχνογνωσία και την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των προηγούμενων CFRDs.

Μία από αυτές τις περιπτώσεις αποτελεί το φράγμα Mohale στο Lesotho. Πρόκειται για ένα CFRD ύψους 145 m, το οποίο είχε κατασκευαστεί σύμφωνα με τις ισχύουσες κατευθυντήριες οδηγίες. Η πρώτη πλήρωση της λεκάνης ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2006 μετά την εκδήλωση ισχυρών βροχοπτώσεων. Μετά την ολική πλήρωση, παρατηρήθηκε ρηγμάτωση στην ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Η ρηγμάτωση της πλάκας οδήγησε σε σημαντικό τράνταγμα, το οποίο πιθανόν να έσπασε το δεσμό μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και της υποκείμενης προεξέχουσας δοκού σκυροδέματος. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η διεύρυνση των αρμών, τόσο για τους κατακόρυφους όσο και για τους περιμετρικούς αρμούς σε πλευρικά τμήματα (Johannesson and Tohlang, 2007). Στη συνέχεια η διαρροή αυξήθηκε σημαντικά, και κορυφώθηκε σε κάποια τμήματα στα 600 l/s.

Μια δεύτερη πρόσφατη περίπτωση αφορά στο φράγμα Barra Grande, ύψους 185 m στη Βραζιλία (Pritchard, 2008). Η πλήρωση της λεκάνης ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2005, και από το Σεπτέμβριο παρουσίασε αύξηση στη διαρροή. Η εξήγηση αυτού του γεγονότος δίνεται στη διάρρηξη της πλάκας που αναπτύχθηκε στον κατακόρυφο αρμό, ο οποίος ήταν τοποθετημένος κοντά στο μέσο της διατομής του φράγματος. Η διαρροή στο 92% της χωρητικότητας της δεξαμενής είχε φτάσει στα 428 l/s.

Επίσης, αστοχία παρουσιάστηκε στο φράγμα Campos Novos στη Βραζιλία, ύψους 202 m, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2006. Το φράγμα είναι κατασκευασμένο σε στενή κοιλάδα με λιθορριπή από βασάλτη με μέτρο ελαστικότητας λιθορριπής 50-60 MPa. Το 2005 κατά την πλήρωση της δεξαμενής, ο κεντρικός θλιβόμενος κατακόρυφος αρμός αστόχησε (Σχήμα 2.7α). Αυτό συνοδεύτηκε από τη μετατόπιση και την υπέρθεση των πλευρικών πλακών από 12 έως 15 cm περίπου στο 30% έως 40% του ύψους του φράγματος σε ένα μήκος περίπου 300 m. Υπήρξε παραμόρφωση του οπλισμού, διάρρηξη των χάλκινων ελασμάτων υδατοστεγάνωσης (waterstops) και διαρροή έως 1500 l/s (Cruz et al, 2009; Sobrinho et al., 2007).

Ένα ακόμη ενδιαφέρον παράδειγμα αστοχίας αποτελεί το φράγμα Zipingpu, ύψους 156 m, το οποίο υπέστη ισχυρή δόνηση από το σεισμό Wenchuan το Μάιο του 2008. Το φράγμα ήταν σε απόσταση 17 km από το επίκεντρο του σεισμού. Κατά την διάρκεια του σεισμού καταγράφηκαν εδαφικές επιταχύνσεις άνω των 2g στη στέψη, ενώ υπολογίσθηκε ότι η βάση δέχθηκε μέγιστη επιτάχυνση περίπου 0,5g. Η βλάβη στο φράγμα περιγράφηκε από τους Guan (2009), Chen (2008a, b), Cruz et al. (2009), Wieland (2009) και Xu (2008). Οι πιο σημαντικές βλάβες ήταν στους κατακόρυφους αρμούς που υπέστησαν αστοχία θλιπτικών τάσεων (Σχήμα 2.7β) και σε έναν οριζόντιο αρμό μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου σταδίου της πλάκας. Υπήρχε επίσης πλευρική παραμόρφωση στη στέψη. Η μέγιστη δυναμική συνίζηση στη στέψη του φράγματος εξαιτίας του μεγάλου σεισμικού φορτίου ήταν 735 mm (0,5% του ύψους του φράγματος) και η οριζόντια μετατόπιση κατάντη 180 mm. Η στάθμη του νερού ήταν χαμηλή (54 m κάτω από το επίπεδο στέψης) στο φράγμα τη στιγμή του σεισμού. Η μέγιστη διαρροή ανήλθε από 10 l/s σε 18 l/s (Fell et al., 2014).



Σχήμα 2.7. Αστοχίες στην πλάκα σκυροδέματος (α) για το φράγμα Campos Novos (Pritchard, 2008) και (β) για το φράγμα Zipingpu (Wieland, 2009).

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός CFRD.

Η συμπεριφορά του φράγματος εξετάζεται με στόχο την αποφυγή της ρηγμάτωσης της πλάκας και της υπερχειλίσης του φράγματος. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη συμπεριφορά είναι η κατάσταση των κόκκων της λιθορριπής (κοκκομετρία, βαθμός συμπίκνωσης), η επίδραση του είδους του υλικού της, η κοιλάδα όπου θεμελιώνεται το φράγμα καθώς και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες της πλάκας.

2.3.1 Η επιρροή της λιθορριπής.

2.3.1.1 Αντοχή σε θλίψη.

Συνήθως για τη λιθορριπή χρησιμοποιούνται βράχοι πολύ υψηλής αντοχής, όπως βασάλτης, γνιμβρίτης και ασβεστόλιθος που έχουν αντοχές > 200 MPa και οι οποίοι οδηγούν σε ιδιαίτερα υψηλό κόστος. Οι Sherard και Cooke (1987) επισήμαναν ότι δεν υφίσταται τεχνική ανάγκη ο βράχος που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στη λιθορριπή να έχει υψηλή θλιπτική αντοχή. Σύμφωνα με την εμπειρία τους, λιθορριπή που έχει κατασκευαστεί με θλιπτική αντοχή 30-40 MPa δεν είναι περισσότερο συμπιεστή από εκείνη με μεγαλύτερη αντοχή.

Το μέτρο ελαστικότητας κατά το πέρας της κατασκευής διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την αντοχή του βράχου προέλευσης. Μεγαλύτερης αντοχής βράχοι αποδίδουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας μετά την κατασκευή (Marachi et al., 1972; Nobari et al., 1972). Η επίδραση όμως της αντοχής παύει να είναι σημαντική με την έναρξη της λειτουργίας του φράγματος (Marachi et al., 1972).

Η χρήση βράχου υψηλής αντοχής δεν εγγυάται υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το φράγμα Foz do Areia, του οποίου το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας οφείλεται στη φτωχή κοκκομετρική διαβάθμισή του και στην έλλειψη λεπτόκοκκων στη λιθορριπή (Pinto et al., 1985). Ένας σημαντικός οδηγός για τη συμπεριφορά της λιθορριπής αποτελεί και ο λόγος κενών της συμπιεσμένης λιθορριπής (αξιζει να σημειωθεί ότι το φράγμα Foz do Areia έχει ένα σχετικά υψηλό δείκτη κενών ίσο με 0.33, καθώς οι περισσότερες λιθορριπές έχουν λόγο κενών μικρότερο από 0.25) (Fell et al., 2014). Αντίθετα, χαμηλής αντοχής βράχοι με καλή συμπίκνωση και διάστρωση μπορούν να δώσουν λιθορριπή με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, όπως για παράδειγμα στα φράγματα Kangaroo Greek, Little Para, Mangroove Creek κ.α. (Fell et al., 2014). Στον αντίποδα υπάρχει το παράδειγμα του φράγματος Tianshengquiao, όπου η χαμηλή αντοχή σε συνδυασμό με φτωχή διαβάθμιση και ακατάλληλη συμπίκνωση κατέληξαν σε μια προβληματική λιθορριπή (Johannesson, 2007a).

2.3.1.2 Συμπύκνωση.

Ο ρόλος της συμπύκνωσης της λιθορριπής είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά του επιχώματος. Η εκτεταμένη συμπύκνωση της λιθορριπής των CFRDs ήταν η πρακτική που αύξησε θεαματικά την ασφάλεια αυτού του τύπου φραγμάτων. Παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπύκνωση της λιθορριπής, είναι το πάχος στρώσης, το ποσοστό υγρασίας, και ο αριθμός των διελεύσεων του στρωτήρα κατά τη συμπύκνωση. Συνήθως,

χρησιμοποιείται διαφορετικό πάχος για τη λιθορριπή ανάντη και κατάντη για να επιτυγχάνεται οικονομία. Ο βαθμός συμπίκνωσης εκτιμάται μέσω του λόγου κενών. Διαπιστώθηκε ότι αν ο λόγος κενών διατηρηθεί κάτω του 0.3 τότε ο θρυμματισμός των κόκκων είναι πολύ μικρός, και για δείκτη κενών $e = 0.22$ είναι σχεδόν μηδενικός (Wilkins, 1973). Στην πιο πυκνή λιθορριπή περιορίζονται οι σχετικές κινήσεις των κόκκων και έτσι μειώνεται ο κίνδυνος θρυμματισμού. Για τις κατάντη ζώνες, που είναι πιο επιρρεπείς σε καθιζήσεις, είναι πιο κρίσιμος ο λόγος κενών παρά η κοκκομετρική τους διαβάθμιση γιατί επηρεάζει το μέγεθος της καθίζησης της λιθορριπής (Johannesson, 2007a).

Για καλής ποιότητας λιθορριπή συνιστάται συμπίκνωση με 4-8 διελεύσεις από στρωτήρα 10 tn, καθώς τα βαρύτερα μηχανήματα θρυμματίζουν τη λιθορριπή, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα (Fell et al., 2005). Η συμπίκνωση είναι πιο αποτελεσματική σε λιθορριπές καλύτερα διαβαθμισμένες και λιγότερο γωνιώδεις (Özkuzukiran, 2005).

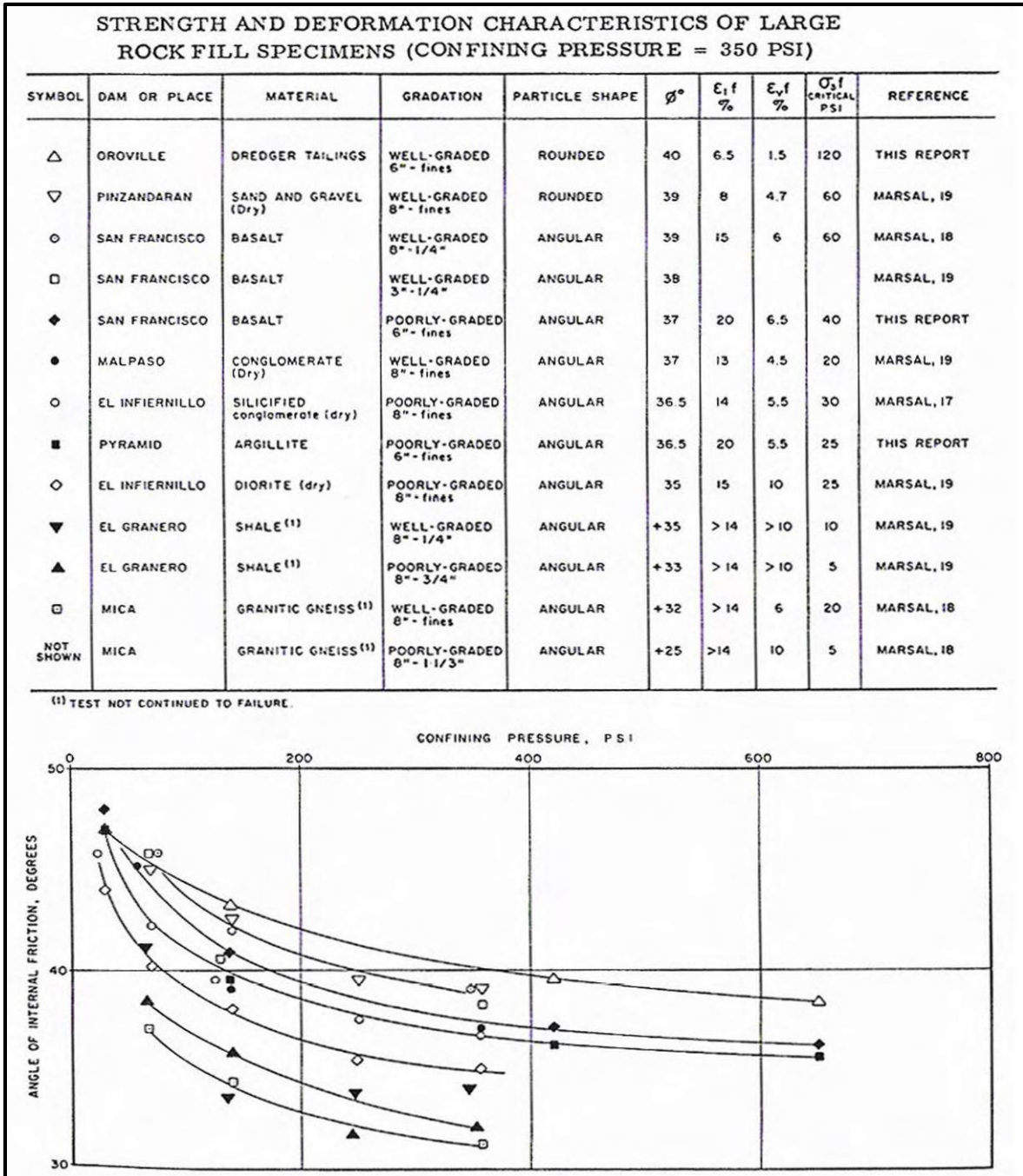
Οι περισσότερες διελεύσεις του στρωτήρα και οι λεπτότερες στρώσεις έχουν ως αποτέλεσμα πυκνότερη και λιγότερο παραμορφώσιμη λιθορριπή, ενώ αυξάνουν σημαντικά τις καθιζήσεις κατά την κατασκευή. Το γεγονός αυτό δεν επιδρά αρνητικά στην ευστάθεια του φράγματος, εφόσον δεν έχει τοποθετηθεί ακόμα η πλάκα στη φάση της συμπίκνωσης.

2.3.1.3 Το σχήμα των κόκκων.

Ο Leps (1970) διαπίστωσε μεγαλύτερη γωνία διατμητικής αντοχής για πιο γωνιώδεις κόκκους, σε μικρές σχετικά τιμές της περιβάλλουσας τάσης. Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 2.8, για μεγάλες τάσεις, όσο πιο γωνιώδης και χονδρόκοκκη είναι η λιθορριπή τόσο μικρότερη είναι η γωνία διατμητικής αντοχής της. Περισσότερο στρογγυλεμένοι κόκκοι έχουν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, σε συνδυασμό με καλή διαβάθμιση και συμπίκνωση. Στο Σχήμα 2.8, παρουσιάζεται επίσης η διαφοροποίηση της μεταβολής της διατμητικής αντοχής των κόκκων ανάλογα με το σχήμα, τη διαβάθμιση και το είδος της λιθορριπής. Φαίνεται πως η επίδραση του σχήματος των κόκκων είναι μικρότερη από την επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης στη γωνία διατμητικής αντοχής. Για λιθορριπές στρογγυλεμένου σχήματος η γωνία τριβής είναι $\sim 40^\circ$ ενώ για πιο γωνιώδεις λιθορριπές είναι $\sim 38^\circ$ (Marachi et al., 1972).

Η στρογγυλεμένη λιθορριπή υφίσταται δυσκολότερα μείωση του όγκου εξαιτίας της συμπίεσης, της αναδιάταξης και του θρυμματισμού των κόκκων και συνεπώς αύξηση της δυσκαμψίας τους. Αντίθετα, οι γωνιώδεις κόκκοι σε υψηλές τάσεις θρυμματίζονται

οδηγώντας σε μεγαλύτερες ογκομετρικές παραμορφώσεις. Επιπλέον, πολύ γωνιώδεις λιθορριπές εμφανίζουν αρχικά (υπό την επιβολή μικρών τάσεων) φαινομενικά μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το πραγματικό (όπως στα φράγματα Mohale και Karahnjukar). Με την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης όμως, λόγω του έντονου θρυμματισμού των γωνιωδών κόκκων, μειώνεται η αλληλεμπλοκή και η λιθορριπή γίνεται τελικά πολύ πιο παραμορφώσιμη. Για το λόγο αυτό, σε αυτές τις περιπτώσεις, προτείνεται ισχυρότερη συμπίκνωση (Johannesson, 2007a).



Σχήμα 2.8. Η επίδραση της περιβάλλουσας τάσης, του σχήματος και της κοκκομετρικής διαβάθμισης στη γωνία τριβής των κόκκων (Marachi et al, 1972).

2.3.1.4 Θρυμματισμός.

Ο θρυμματισμός της λιθορριπής είναι ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε σε πολλά φράγματα, είτε κατά τη διάρκεια της κατασκευής είτε κατά τη λειτουργία κι εντείνεται με την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης. Η αύξηση αυτή σταματάει για μια οριακή τιμή περιβάλλουσας τάσης η οποία είναι ανάλογη με την ποιότητα της λιθορριπής. Το ποσοστό της λιθορριπής που θρυμματίζεται σχετίζεται και με την κοκκομετρία της. Η διατμητική αντοχή των κόκκων μειώνεται όσο διαρκεί ο θρυμματισμός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12 (Marsal, 1967).

Οι στρογγυλεμένοι κόκκοι αναπτύσσουν λιγότερες συγκεντρώσεις τάσεων κι επομένως κινδυνεύουν λιγότερο από θρυμματισμό. Επίσης, περισσότερος θρυμματισμός μπορεί να προκληθεί και για πιο χονδρόκοκκη λιθορριπή. Ο Cooke για καλής ποιότητας λιθορριπές συστήνει διάστρωση από 4-8 διελεύσεις με στρωτήρα 10 tn. Μεγαλύτερου βάρους στρωτήρες ασκούν μεγαλύτερη περιβάλλουσα τάση στη λιθορριπή και ενδεχομένως να τη θρυμματίσουν (Fell et al., 2005). Το μεγαλύτερο βάρος του στρωτήρα δεν βελτιώνει το μέτρο ελαστικότητας της λιθορριπής. Όταν ο θρυμματισμός παρέλθει, η λιθορριπή αποκτά μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας λόγω της καλύτερης αναδιάταξης των κόκκων. Η χρονική στιγμή που θα σημειωθεί λοιπόν ο θρυμματισμός παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του φράγματος. Αν συμβεί κατά τη συμπύκνωση, τότε η λιθορριπή θα είναι πιο καλά συμπυκνωμένη και πιο δύσκαμπτη. Αν όμως η λιθορριπή υποστεί θρυμματισμό από τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία, τότε θα δημιουργηθούν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις στη λιθορριπή κι εγκυμονεί κίνδυνος για την πλάκα σκυροδέματος.

Επιπλέον ο θρυμματισμός όταν ολοκληρωθεί, καθιστά τη λιθορριπή πιο λεπτόκοκκη και επομένως λιγότερο διαπερατή, το νερό εγκλωβίζεται στις θρυμματισμένες περιοχές με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων ή να γίνει απομάκρυνση των λεπτόκοκκων. Αυτό θεωρείται πολύ επικίνδυνο, ειδικά για τη ζώνη όπου εδράζεται η πλάκα. Για το λόγο αυτό η χρήση αποστραγγιστικών ζωνών με φίλτρα κρίνεται επιτακτική ειδικά σε λιθορριπές επιρρεπείς σε θρυμματισμό. Θεωρώντας το ζήτημα του θρυμματισμού συνολικά συμπεραίνεται ότι μπορεί να εκληφθεί υπό προϋποθέσεις ως ένας βελτιωτικός παράγοντας για τη λιθορριπή (Fell et al., 2005).

2.3.1.5 Υλικό της λιθορριπής.

Η θλιπτική αντοχή του βράχου προέλευσης επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της συμπίκνωσης. Το υλικό προέλευσης αποδείχτηκε ότι δεν έχει άμεση επίδραση στη διατμητική αντοχή της λιθορριπής (Marachi et al., 1972; Marsal, 1967).

2.3.1.6 Διαπερατότητα.

Η διαπερατότητα είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των λιθορριπτών φραγμάτων. Εξαιτίας της, τα CFRDs δεν κινδυνεύουν από ρευστοποίηση καθώς δεν εγκλωβίζεται νερό στο εσωτερικό τους και δεν δημιουργούνται υπερπιέσεις πόρων. Μεγαλύτερη διαπερατότητα προβλέπεται για την ανάντη ζώνη του φράγματος, ώστε το νερό που θα εισρεύσει σε περίπτωση ρηγμάτωσης της πλάκας να διαφύγει άμεσα. Για τις υπόλοιπες ζώνες θα πρέπει να ικανοποιούνται τα «κριτήρια φίλτρου» ώστε να αποφεύγεται η απομάκρυνση των μικρότερων κόκκων από την ανάντη προς την κατάντη πλευρά. Έτσι, και στα κατάντη, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση μικρής διαπερατότητας λιθορριπής, γιατί αν το φράγμα υπερχειλίζει και το νερό φτάσει στη στέψη της λιθορριπής, είναι απαραίτητο να διαφύγει μέσα από το σώμα της λιθορριπής και όχι από το κατάντη πρανές, όπως στο φράγμα Gouhou (Fell et al., 2005).

2.3.1.7 Διαβροχή της λιθορριπής.

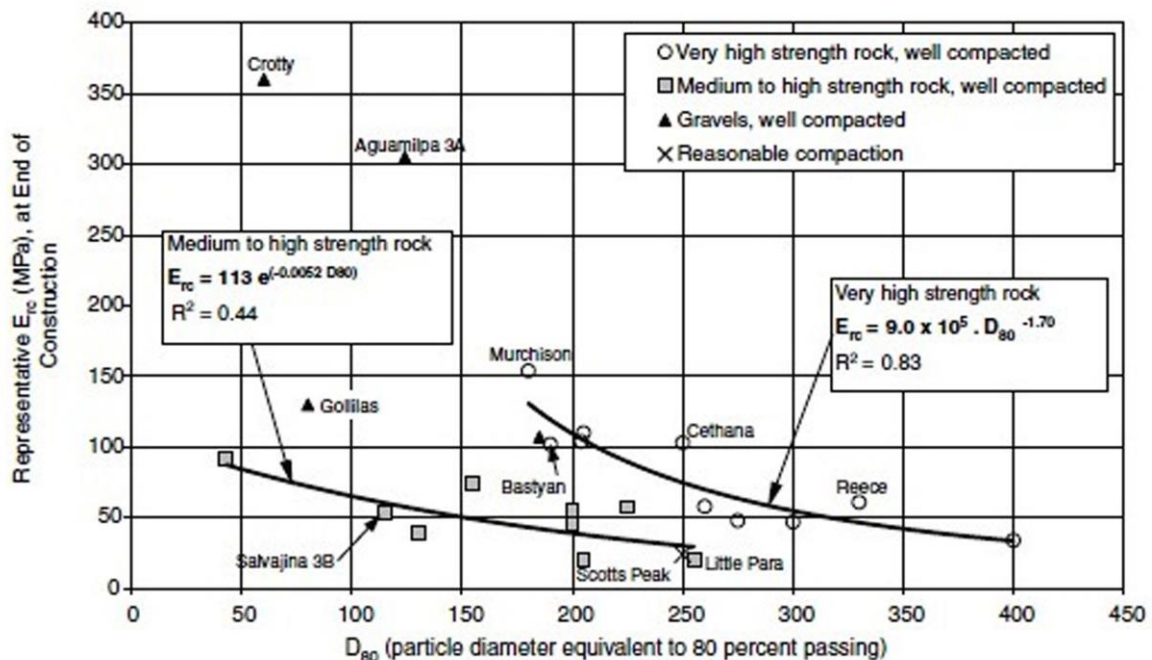
Κατά τη διαβροχή, τα λεπτόκοκκα μαλακώνουν και η θλιπτική αντοχή της λιθορριπής μειώνεται και έτσι το επίχωμα εμφανίζει σχετικά χαμηλές καθιζήσεις μετά την κατασκευή. Ωστόσο, εάν η απορροφητικότητα του νερού από το βράχο που χρησιμοποιείται είναι πολύ χαμηλή, η βελτίωση σε συμπίεστικότητα είναι πολύ μικρή και μπορεί να ληφθεί ως αμελητέα, ιδίως για τα φράγματα μέτριου ύψους και για τη ζώνη 3C. Η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται σε διαβροχή κυμαίνεται μεταξύ 10-20% του όγκου του επιχώματος της λιθορριπής (Özkuzukiran, 2005). Οι Cooke et al. (1987) προτείνουν τις ακόλουθες γενικές αρχές σχετικά με τη διαβροχή της λιθορριπής:

- α) Για τους περισσότερους σκληρούς βράχους και τα CFRDs χαμηλού έως μέτριου ύψους, η προσθήκη του νερού έχει αμελητέα επίδραση στην συμπεριφορά του φράγματος.
- β) Για τα ψηλά φράγματα και για βράχους, που έχουν σημαντικά χαμηλότερη ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή σε κορεσμένη κατάσταση, το νερό πιθανότατα να προστίθεται συστηματικά για το ανάντη κέλυφος (Ζώνη 3B).
- γ) Για βράχους με πιθανές υψηλές περιεκτικότητες σε χώμα και κόκκους μεγέθους άμμου, θα πρέπει σχεδόν πάντα να χρησιμοποιείται νερό. Για ακάθαρτο βράχο, το νερό

μαλακώνει τα λεπτόκοκκα έτσι ώστε μεγαλύτεροι βράχοι να μπορούν να εξαναγκαστούν σε επαφή μεταξύ τους από το δονητικό οδοστρωτήρα.

2.3.1.8 Κοκκομετρία.

Η καλή κοκκομετρία επιφέρει σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής της λιθορριπής. Υπάρχουν περιπτώσεις με πολύ καλά διαβαθμισμένες λιθορριπές που συμπεριφέρθηκαν άριστα παρά την μικρή τους αντοχή. Από το Σχήμα 2.8 προκύπτει ότι η επιρροή της διαβάθμισης της λιθορριπής στη διατμητική αντοχή του υλικού είναι πιο σημαντική από το σχήμα των κόκκων. Για λιθορριπές ίδιου σχήματος η γωνία διατμητικής αντοχής μπορεί να διαφέρει ως και 15° λόγω της διαφορετικής κοκκομετρίας (Marsal, 1967). Η καλή κοκκομετρική διαβάθμιση εξασφαλίζει επαρκή διαπερατότητα και είναι εξίσου κρίσιμη με το λόγο κενών για την ανάντη ζώνη (Johannesson, 2007a). Επιπλέον, διαπιστώνεται η άμεση επιρροή της κοκκομετρίας στη δυσκαμψία της λιθορριπής. Σύμφωνα με το εμπειρικό διάγραμμα των Hunter και Fell (2003) (Σχήμα 2.9) προκύπτει ότι σε μεγαλύτερες τιμές του D_{80} αντιστοιχεί μικρότερη τιμή μέτρου ελαστικότητας. Έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u μειώνεται όταν η τιμή του D_{80} αυξάνεται και η λιθορριπή είναι πιο ομοιόμορφη. Συνεπώς, η πιο φτωχή κοκκομετρική διαβάθμιση (μεγαλύτερο D_{80}) συνεπάγεται και πιο παραμορφώσιμη λιθορριπή.



Σχήμα 2.9. Αντιπροσωπευτικό τέμνον μέτρο ελαστικότητας συμπακνωμένης λιθορριπής κατά το πέρας της κατασκευής σε συνάρτηση με την αντοχή και την κοκκομετρική διαβάθμιση (Hunter and Fell, 2003).

2.3.1.9 Διατμητική αντοχή.

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της διατμητικής αντοχής της λιθορριπής ήταν πάντα ένα σημαντικό και δύσκολο ζήτημα για τους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Δεδομένου ότι σε πολλές συνθήκες υλικών λιθορριπής περιέχονται κόκκοι μεγέθους μέχρι 1200 mm, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμβατικές συσκευές τριαξονικής δοκιμής. Για να πραγματοποιηθούν αυτού του είδους οι τριαξονικές δοκιμές χρειάζονται πολύ μεγάλες συσκευές, οι οποίες είναι πολύ ακριβές κι επομένως δεν είναι διαθέσιμες σε πολλές περιπτώσεις (Özkuzukiran, 2005). Με την εφαρμογή ειδικών δοκιμών, οι Marsal (1967), Marachi et al. (1972) και Varadarajan et al. (2003) διεξήγαγαν κάποιες από τις σημαντικότερες δοκιμές διάτμησης και κατέληξαν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη διατμητική αντοχή της λιθορριπής. Με βάση παρόμοιες δοκιμές, οι Leps (1970) και Barton et al. (1981) πρότειναν μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής. Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής γίνεται μέσω της γωνίας διατμητικής αντοχής ϕ ή μέσω του λόγου των κύριων τάσεων (σ'_1/σ'_3).

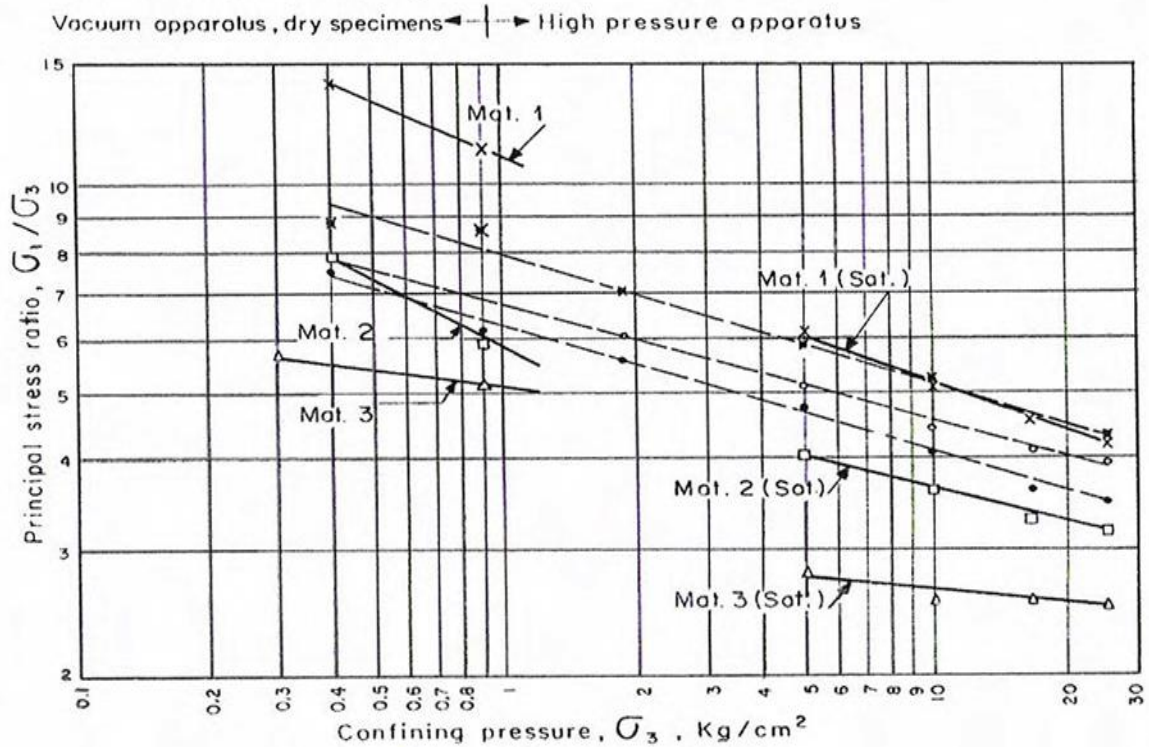
Ο Marsal το 1967 διεξήγε αρκετές τριαξονικές και μονοδιάστατες δοκιμές θλίψης σε δοκίμια λιθορριπής, προκειμένου να χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα στο σχεδιασμό του φράγματος El Infiernillo (Μεξικό), ύψους 148 m. Στις τριαξονικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με 113 cm διάμετρο και 250 cm ύψος, με μέγιστο μέγεθος κόκκου 20 cm. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές αυτές ήταν τρία. Το υλικό 1 αποτελείται από θραύσματα βασάλτη, με αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης $\geq 1000 \text{ kg/cm}^2$, καλής διαβάθμισης. Το υλικό 2 αποτελείται από γρανιτικό γνεύσιο με λεπτές ασυνέχειες σχιστόλιθου, με αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης $\geq 740 \text{ kg/cm}^2$, πολύ καλά διαβαθμισμένο. Το υλικό 3 αποτελείται από γρανιτικό γνεύσιο με λεπτές ασυνέχειες σχιστόλιθου, αλλά πολύ πιο ομοιόμορφο από το υλικό 2. Οι περιβάλλουσες τάσεις που επιβλήθηκαν για τις δοκιμές είναι 0.3, 0.8, 5, 10 και 25 kg/cm^2 .

Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζονται οι σχέσεις του λόγου των κύριων τάσεων αστοχίας και περιβάλλουσας τάσης για τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα και για άλλα υλικά. Είναι εμφανές ότι ο κορεσμός έχει σημαντική επίδραση στη διατμητική αντοχή των υλικών της λιθορριπής. Επίσης, καθώς αυξάνεται η περιβάλλουσα τάση, η διατμητική αντοχή της λιθορριπής μειώνεται σημαντικά (ο σχετικά υψηλός λόγος των κυρίων τάσεων επιτυγχάνεται υπό χαμηλές περιβάλλουσες τάσεις).

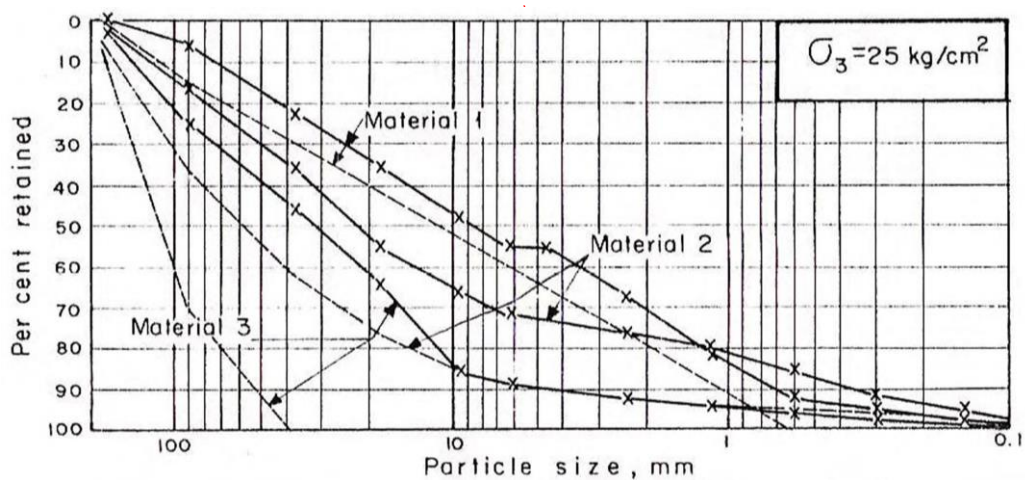
Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζονται οι τελικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών σε περιβάλλουσα τάση 25 kg/cm^2 . Το υλικό 1 υφίσταται θρυμματισμό 12%, το υλικό 2 θρυμματισμό 10-24% και το υλικό 3 θρυμματισμό 23-53% (Marsal, 1967).

M A T E R I A L		Particle Shape	d_{10} mm	C_u	e^*	P_a kg
Crushed, sound basalt	X(1)	Angular	1	19	0.30	860
Quarry-blasted, granitic gneiss	□(2)	Sub-angular	6	14	0.32	130
Quarry-blasted, granitic gneiss	Δ(3)	Sub-angular	53	2.5	0.62	130
Alluvial sand and gravel	✕(P)	Sub-rounded	0.2	105	0.34	580
Quarry-blasted, sound silicified conglomerate	○(I)	Angular	5	15	0.45	230
Quarry-blasted, sound diorite	●(D)	Angular	20	5	0.56	170

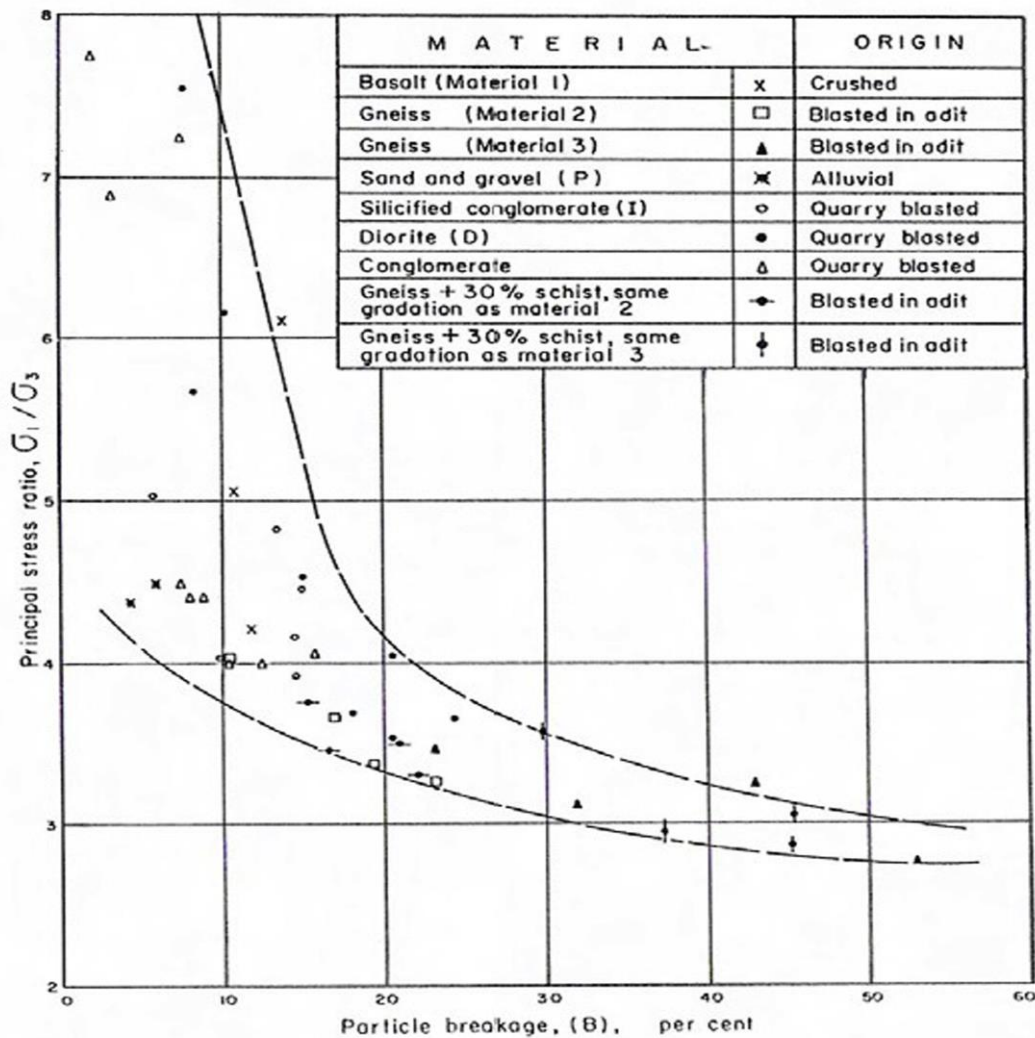
* Void ratio, before testing



Σχήμα 2.10. Σχέση λόγου κύριων τάσεων αστοχίας και περιβάλλουσας τάσης για τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα και για άλλα υλικά (Marsal, 1967).



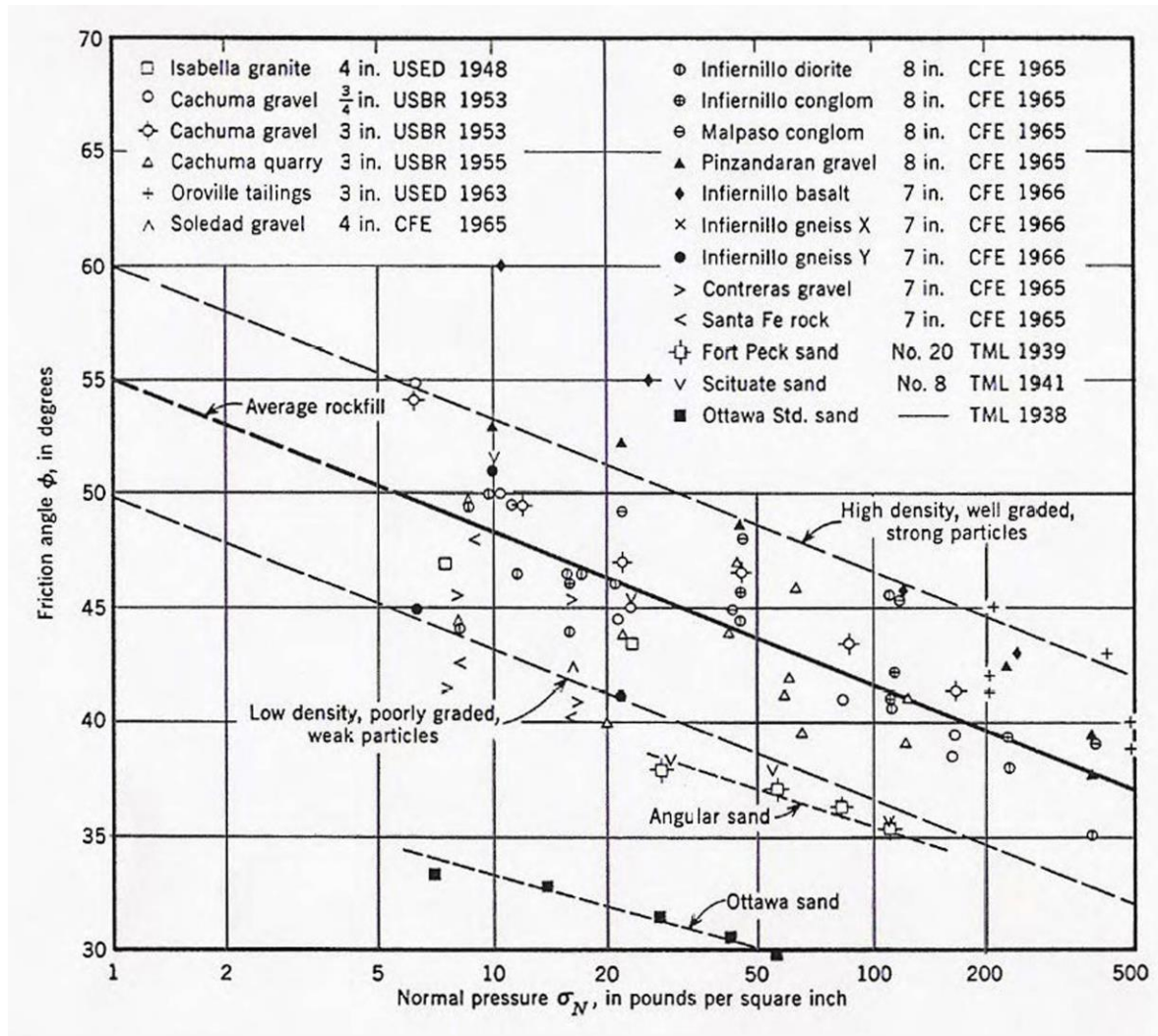
Σχήμα 2.11. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των τριών υλικών για περιβάλλουσα τάση 25 kg/cm² (Marsal, 1967).



Σχήμα 2.12. Λόγος κύριων τάσεων κατά την αστοχία ως προς το ποσοστό θρυμματισμού (Marsal, 1967).

Από τις δοκιμές στα Σχήματα 2.10-2.12, ο Marsal (1967) συμπέρανε ότι η διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη για καλά διαβαθμισμένα και συμπυκνωμένα υλικά ανεξάρτητα της προέλευσης του βράχου. Υλικά με παρόμοια κοκκομετρία ενδέχεται να παρουσιάζουν αρκετά διαφορετική διατμητική αντοχή εξαιτίας της κατάστασης των κόκκων τους. Η διατμητική αντοχή μειώνεται όσο εξελίσσεται ο θρυμματισμός. Όμως και η ευθραυστότητα επηρεάζεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση (Σχήμα 2.11). Η σχέση μεταξύ διατμητικής αντοχής και ποσοστού θρυμματισμού φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.12. Επίσης, ο κορεσμός μειώνει τη διατμητική αντοχή, ιδιαίτερα σε λιθορριπή με φτωχή κοκκομετρική διαβάθμιση.

Το Σχήμα 2.13 απεικονίζει δεδομένα από 15 διαφορετικά υλικά λιθορριπής, τα οποία ο Leps (1970) κατηγοριοποίησε σε 3 κατηγορίες ανάλογα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και τη θλιπτική αντοχή.



Σχήμα 2.13. Η επίδραση της περιβάλλουσας τάσης στη γωνία διατμητικής αντοχής της λιθορριπής (Leps, 1970).

Οι κατηγορίες που καθόρισε ο Leps (1970) ανάλογα με τη θλιπτική αντοχή είναι οι εξής:

1. Αδύναμοι βράχοι: 4-17 MPa
2. Μέτριας αντοχής βράχοι: 17-70 MPa
3. Μεγαλύτερης αντοχής βράχοι: 70-210 MPa

Σύμφωνα με τον Leps (1970), το Σχήμα 2.13 δίνει μια πολύ καλή συνολική άποψη για τη σχέση που συνδέει τη γωνία διατμητικής αντοχής με την ορθή θλιπτική τάση. Όμως, δε διαχωρίζει την επίδραση της σχετικής πυκνότητας, της κοκκομετρικής διαβάθμισης και του βαθμού κορεσμού.

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, ο Leps (1970) συμπέρανε ότι η διατμητική αντοχή επηρεάζεται από τη σχετική πυκνότητα, την κοκκομετρική διαβάθμιση (άμεση επιρροή), την αντοχή θλίψης (αμφίβολη η επιρροή της) και το σχήμα των κόκκων. Πιο συγκεκριμένα ο Leps (1970), κατέληξε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Υπό σταθερή πίεση, η γωνία διατμητικής αντοχής αυξάνεται αναλογικά με τη σχετική πυκνότητα. Η αύξηση είναι περισσότερο αισθητή σε χαμηλά επίπεδα πιέσεων παρά σε υψηλά. Επίσης, για κάθε περιβάλλουσα τάση, η καλύτερη διαβάθμιση (χωρίς προσθήκη λεπτόκοκκων) αυξάνει την γωνία διατμητικής αντοχής.
- Όταν όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες είναι σταθεροί (μέγεθος κόκκου, πυκνότητα, αντοχή, διαβάθμιση), οι πιο γωνιώδεις κόκκοι δίνουν μεγαλύτερες γωνίες τριβής φ (κατά τις 10° - 15°) σε σχέση με τους πιο στρογγυλεμένους. Όταν οι κόκκοι λιθορριπής είναι κορεσμένοι, η αντοχή τους μειώνεται σε σημαντικό βαθμό. Αυτή η μείωση είναι πολύ υψηλότερη σε σχετικά πιο αδύναμους κόκκους.
- Η γωνία διατμητικής αντοχής μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης.

Τα παραπάνω συμπεράσματα έχουν γενική ισχύ, αλλά οι αριθμητικές τιμές αναμένεται να αποκλίνουν αρκετά.

Μια άλλη αξιοσημείωτη μελέτη για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής της λιθορριπής διεξήχθη από τους Marachi et al. (1972). Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια διαμέτρου 36, 12 και 2.8 ιντσών και ασκήθηκαν περιβάλλουσες τάσεις 30, 140, 420, 650 psi (1 MPa = 145,04 psi).

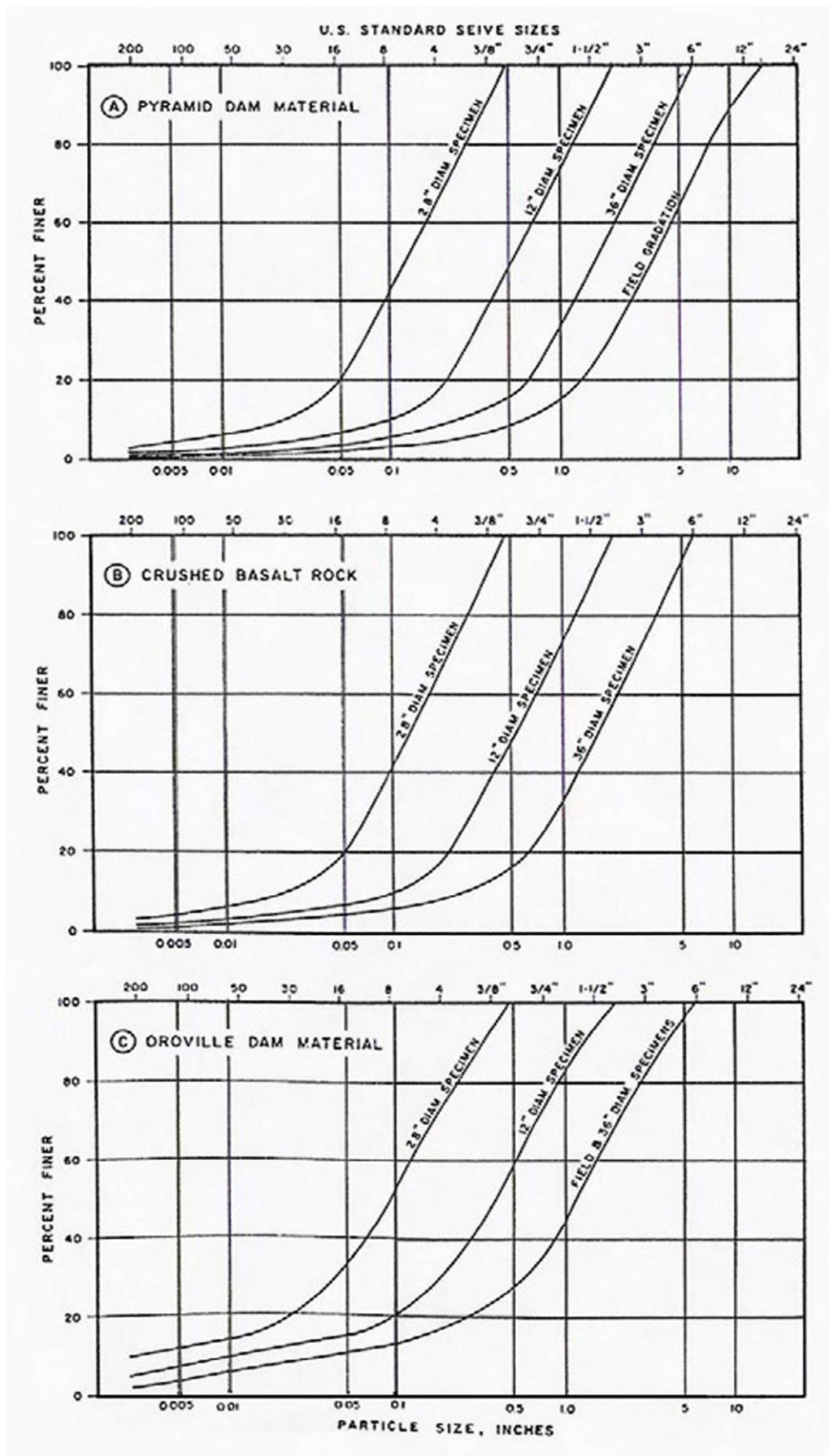
Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά υλικά:

(α) Το πρώτο υλικό ήταν από το φράγμα Pyramid, το οποίο προήλθε από λεπτόκοκκο ιζηματογενές πέτρωμα (αργιλίτη) με ανατινάξεις λατομείου. Οι κόκκοι ήταν πολύ γωνιώδεις, σχετικά αδύναμοι και ανισότροποι ως προς την αντοχή τους.

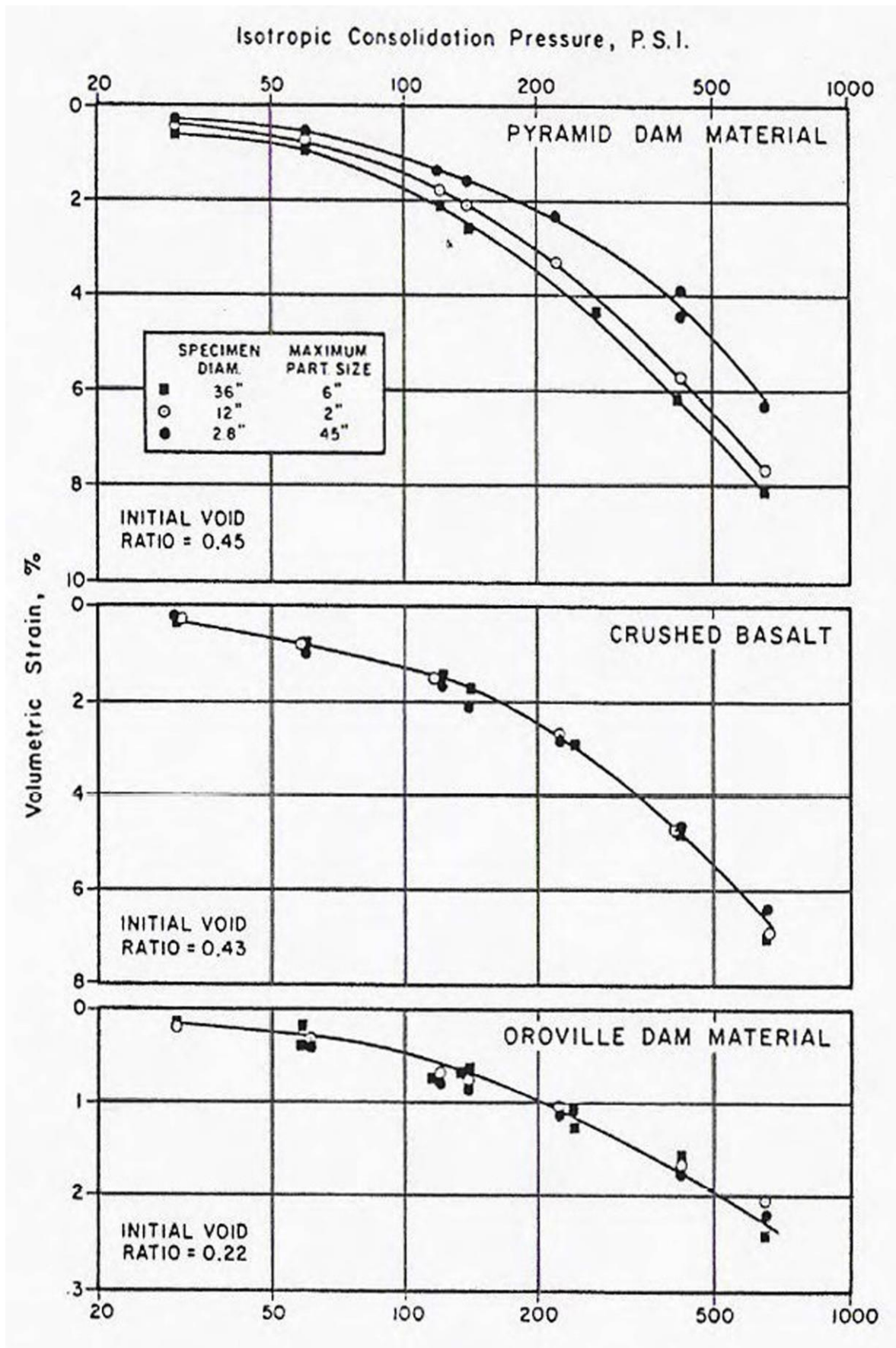
(β) Το δεύτερο υλικό ήταν ένας λεπτόκοκκος ισοτροπικός βασάλτης, ο οποίος προήλθε από ανατινάξεις λατομείου και μετά θρυμματίστηκε σε μικρότερα μεγέθη σε μονάδα θραύσης. Οι κόκκοι της λιθορριπής ήταν γωνιακοί και πολύ υγιείς.

(γ) Το τρίτο υλικό λήφθηκε από το κέλυφος του φράγματος Oroville και αποτελούνταν από ισοτροπικό αμφιβολίτη. Οι κόκκοι, μεγέθους χαλικιού, ήταν καλά στρογγυλεμένοι. Ήταν σχεδόν αδύνατον να σπάσουν με σφυρί οι μεσαίου μεγέθους κόκκοι του χαλικιού.

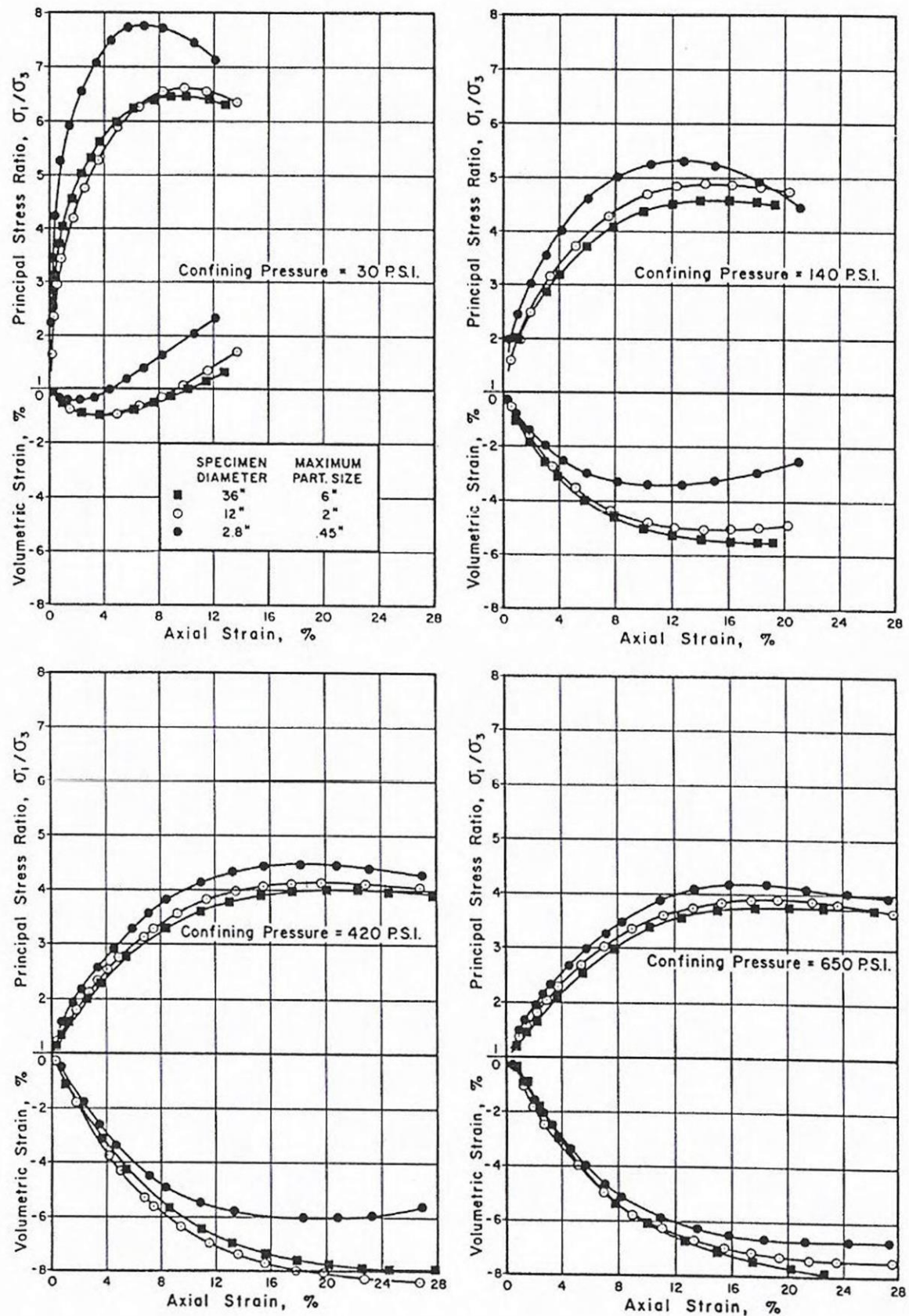
Το υλικό από το φράγμα Pyramid ήταν το καλύτερα διαβαθμισμένο υλικό. Διεξήχθησαν 100 δοκιμές. Στα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε η σχέση της περιβάλλουσας τάσης με την παραμόρφωση (αξονική και ογκομετρική) και τη διατμητική αντοχή (Özkuzukiran, 2005).



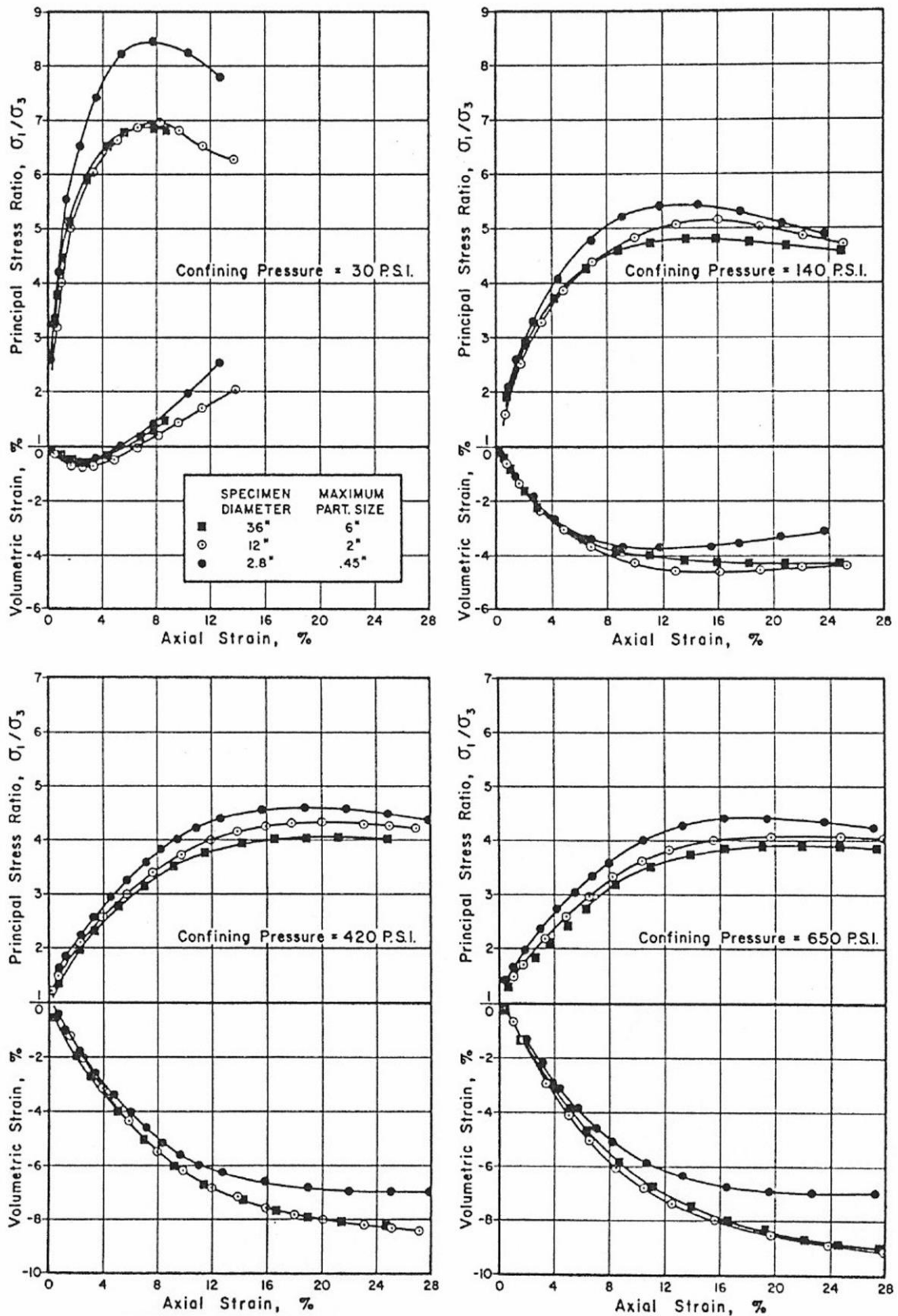
Σχήμα 2.14. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των τριών υλικών (Marachi et al., 1972).



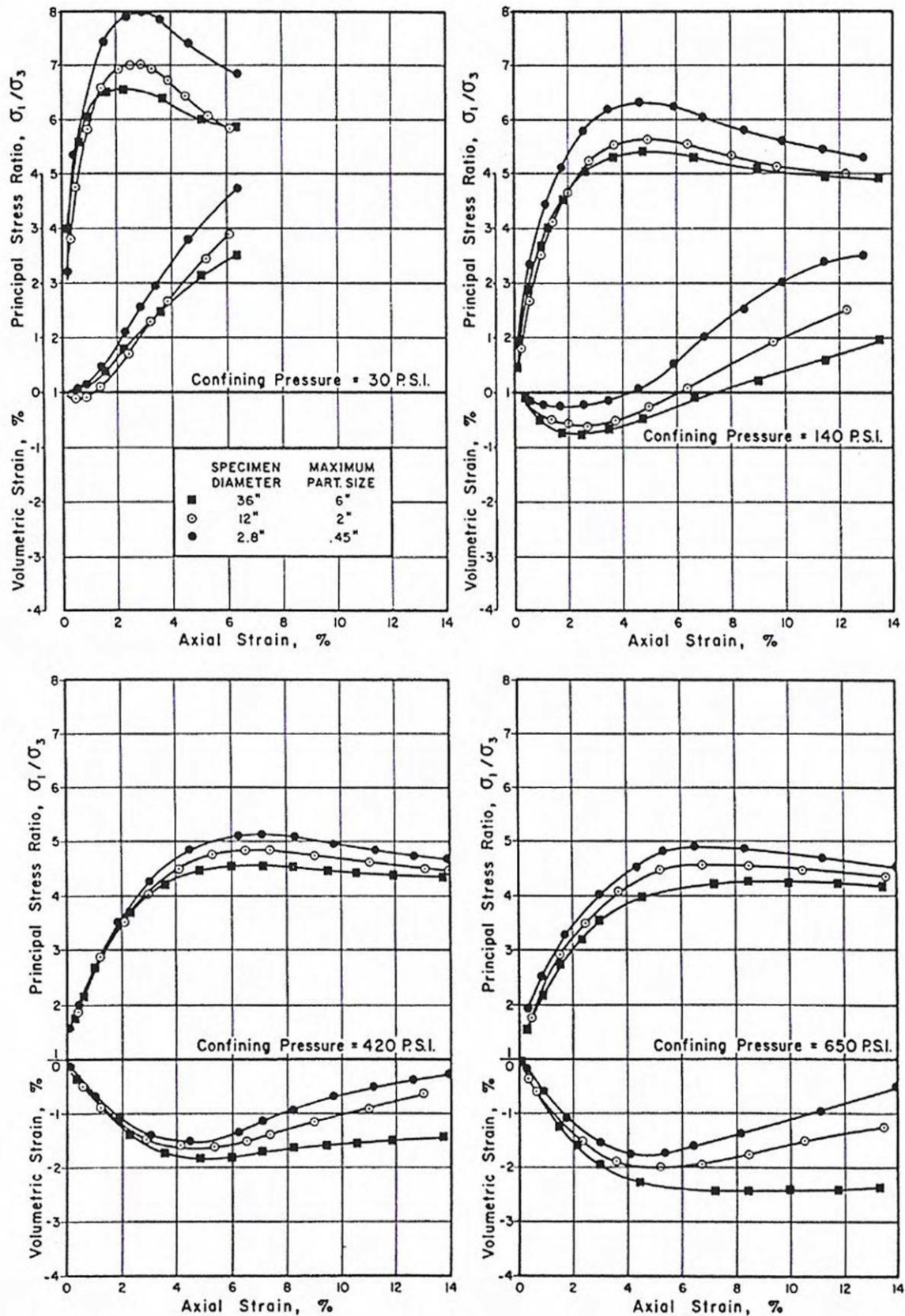
Σχήμα 2.15. Ισοτροπική θλίψη των τριών υλικών λιθορριπής (Marachi et al., 1972).



Σχήμα 2.16. Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το υλικό του φράγματος Pyramid: λόγος κύριων τάσεων και ογκομετρική παραμόρφωση ως προς την αξονική παραμόρφωση (Marachi et al., 1972).



Σχήμα 2.17. Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής σε θρυμματισμένο βασάλτη: λόγος κύριων τάσεων και ογκομετρική παραμόρφωση ως προς την αξονική παραμόρφωση (Marachi et al., 1972).



Σχήμα 2.18. Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το φράγμα Oroville: λόγος κύριων τάσεων και ογκομετρική παραμόρφωση ως προς την αξονική παραμόρφωση (Marachi et al., 1972).

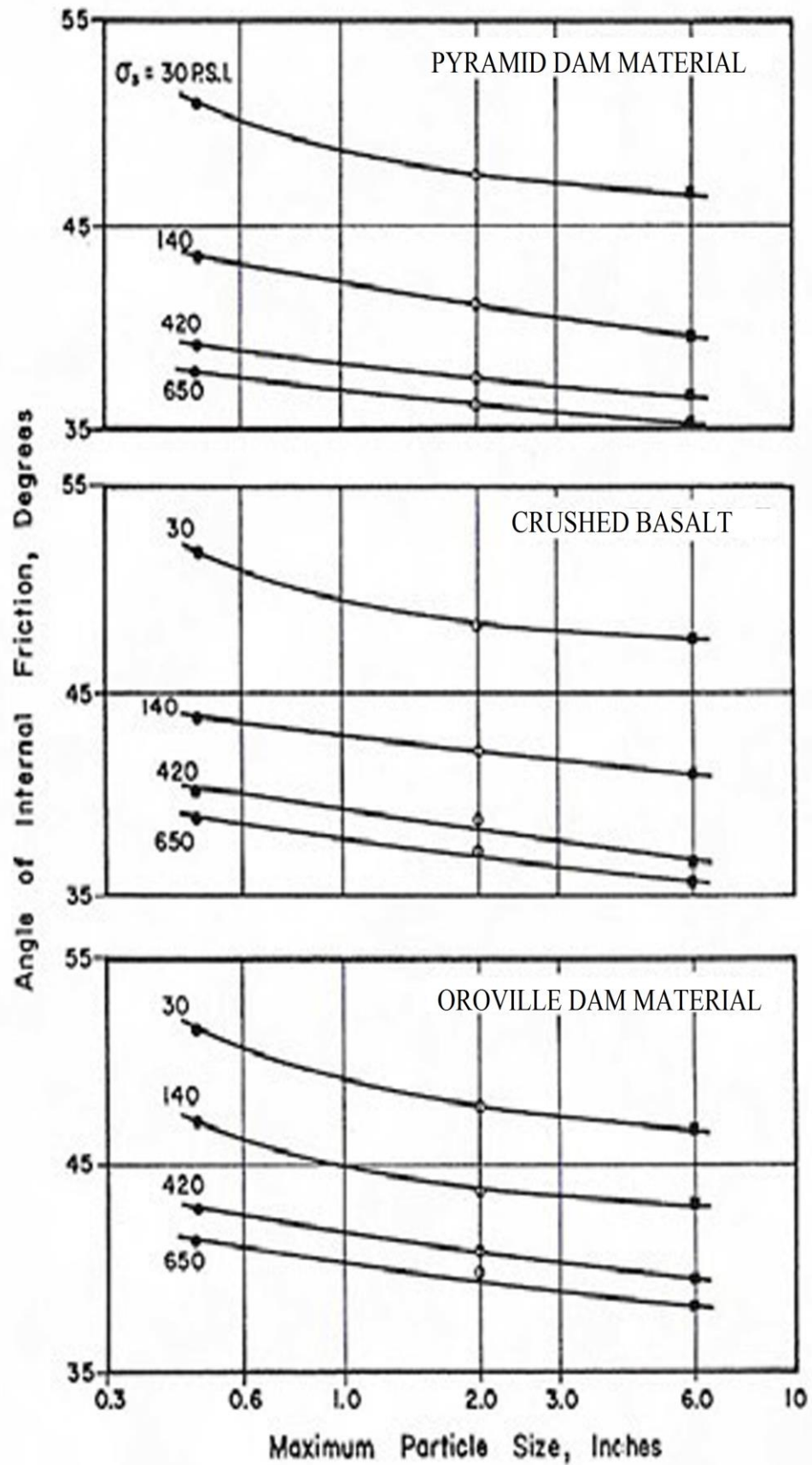
Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των τριών υλικών και των δοκιμίων, ενώ στο Σχήμα 2.15 η συμπεριφορά των υλικών σε ισοτροπική στερεοποίηση.

Στα Σχήματα 2.16, 2.17, 2.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από 40 τριαξονικές δοκιμές σε θλίψη στα τρία υλικά που προαναφέρθηκαν. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής αντοχής (δηλ. του λόγου σ'_1/σ'_3) μειώνεται για μεγαλύτερες περιβάλλουσες τάσεις. Για το ίδιο υλικό η διατμητική αντοχή προκύπτει μεγαλύτερη για λεπτότερους κόκκους και μικρότερη για πιο χονδρούς κόκκους. Σημειώνεται ότι υπό μικρή περιβάλλουσα τάση (30 psi), τα διαγράμματα σταματούν σε παραμόρφωση 6% διότι λόγω της διασταλτικότητας που παρουσιάζει το υλικό σε μικρές τάσεις, δεν είναι δυνατόν να συνεχιστεί η δοκιμή σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις λόγω διαμόρφωσης ζώνης διάτμησης (shear band formation).

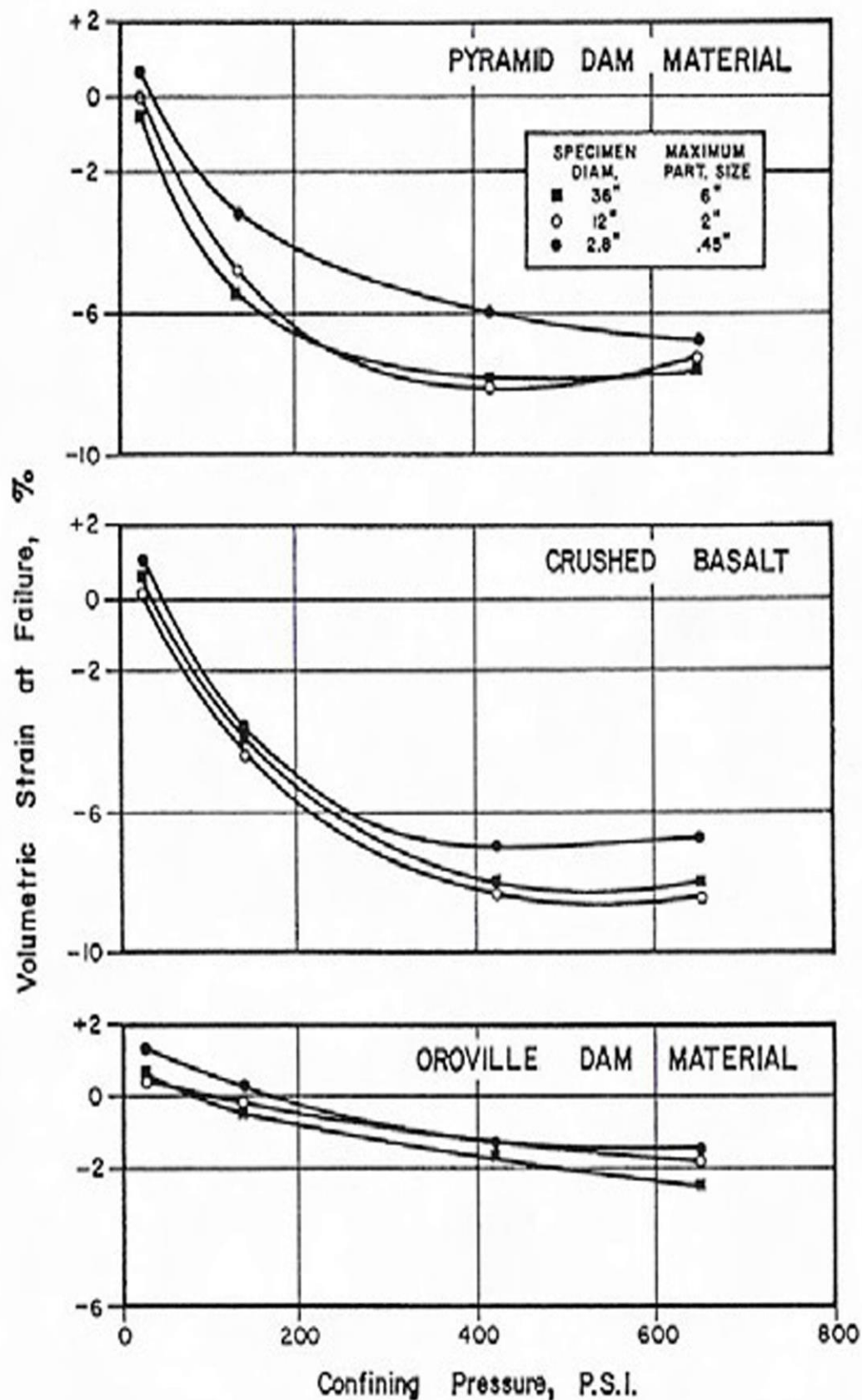
Σύμφωνα με το διάγραμμα γωνίας διάτμησης-μέγιστου κόκκου του Σχήματος 2.19, για λιθορριπές με μέγιστο κόκκο 6 in η γωνία τριβής είναι κατά $3^\circ - 4^\circ$ μικρότερη από εκείνες με μέγιστο κόκκο 0.5 in.

Στα Σχήματα 2.20 και 2.21, παρουσιάζεται η θλιπτική συμπεριφορά των τριών υλικών. Οι ογκομετρικές και αξονικές παραμορφώσεις αυξάνονται με την περιβάλλουσα τάση. Η αύξηση είναι πιο ευδιάκριτη στο χαμηλό εύρος της περιβάλλουσας τάσης απ' ότι στις υψηλότερες τάσεις, που μειώνεται περίπου στα 420 psi.

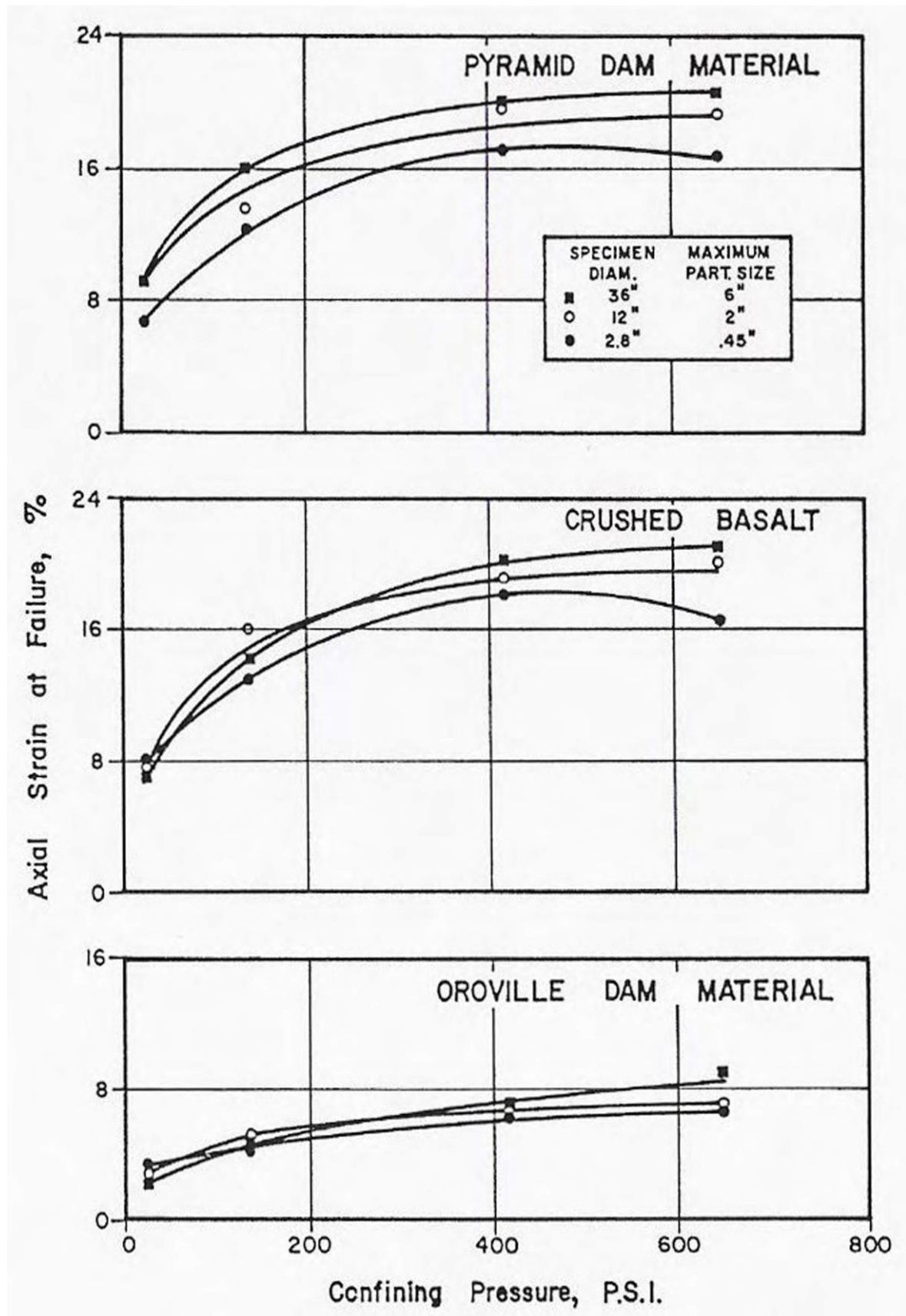
Στο Σχήμα 2.22, η γωνία τριβής μειώνεται με ένα ποσοστό μείωσης καθώς η περιβάλλουσα τάση αυξάνει, αλλά όχι πέρα από τάσεις των 650 psi. Επίσης, μπορεί να διαπιστωθεί ότι, η γωνία τριβής είναι μικρή για μεγάλες δοκιμές και μεγαλύτερη για μικρές δοκιμές.



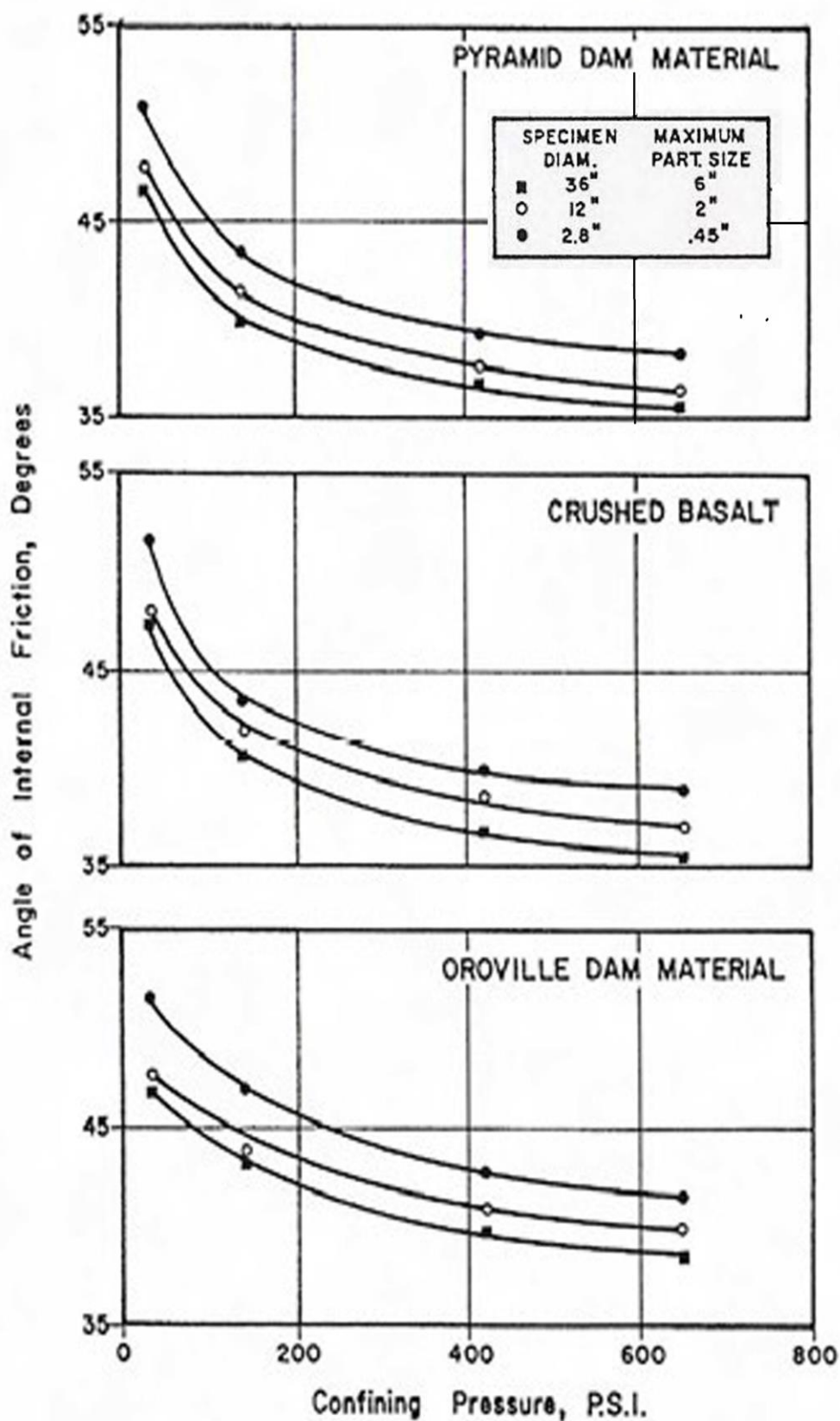
Σχήμα 2.19. Σχέση γωνίας τριβής-μέγιστου κόκκου (Marachi et al., 1972).



Σχήμα 2.20. Σχέση αστοχίας ογκομετρικής παραμόρφωσης-περιβάλλουσας τάσης των τριών υλικών λιθορριπής (Marachi et al., 1972).



Σχήμα 2.21. Σχέση αστοχίας αξονικής παραμόρφωσης-περιβάλλουσας τάσης των τριών υλικών λιθορριπής (Marachi et al., 1972).



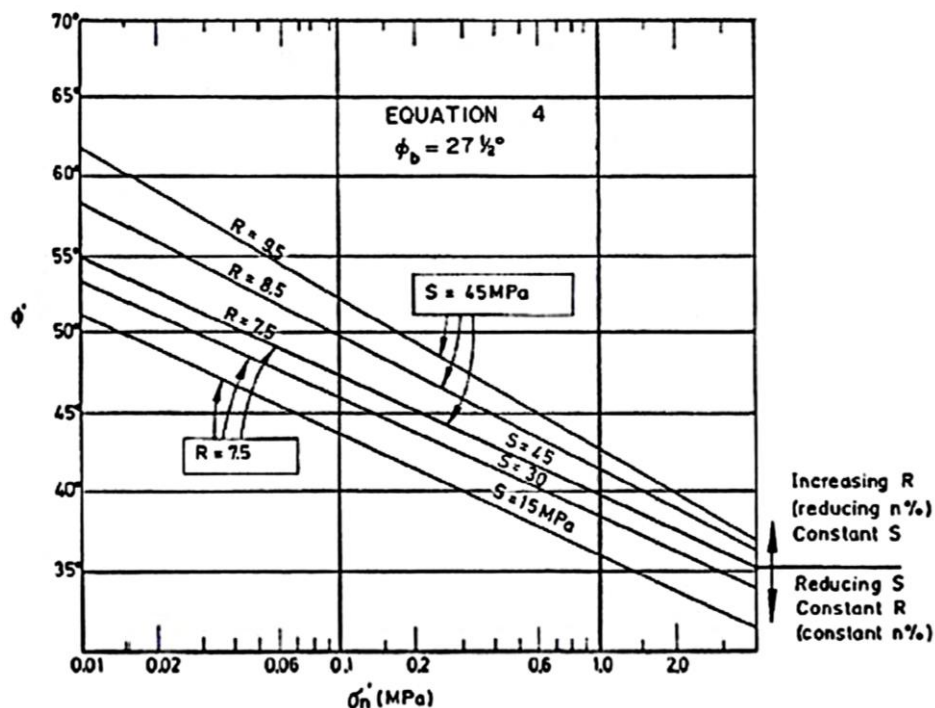
Σχήμα 2.22. Σχέση γωνίας τριβής-περιβάλλουσας τάσης των τριών υλικών λιθορριπής (Marachi et al., 1972).

Στο Σχήμα 2.8 οι Marachi et al. (1972) συγκέντρωσαν περιληπτικά τα αποτελέσματα της έρευνάς τους συσχετίζοντας τη γωνία διατμητικής αντοχής με την εκτιμώμενη οριακή περιβάλλουσα τάση σ_3^f και με τις οριακές αξονικές και ογκομετρικές παραμορφώσεις. Διαπιστώνεται και πάλι η μείωση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης. Ο ρυθμός μείωσης της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης είναι ανάλογος του γωνιώδους των κόκκων και αντιστρόφως ανάλογος της κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η γωνία διατμητικής αντοχής λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για τους πιο στρογγυλεμένους και καλά διαβαθμισμένους κόκκους. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές των Marachi et al. (1972) συμπίπτουν (με απόκλιση μόλις λίγων μοιρών) με αυτά της μελέτης του Marsal.

Οι Barton et al. (1981) πρότειναν μια σχέση για τον υπολογισμό της γωνίας τριβής:

$$\varphi' = R \cdot \log(S/\sigma_n) + \varphi_0 \quad (2.1)$$

όπου φ' : η μέγιστη ενεργός γωνία διατμητικής αντοχής, φ_0 : η αρχική γωνία διατμητικής αντοχής, S : η θλιπτική αντοχή, σ_n : η ενεργός τάση και R : παράμετρος που συνδέεται με την τραχύτητα του υλικού της λιθορριπής. Στο Σχήμα 2.23, η ενεργός γωνία διατμητικής αντοχής είναι ανάλογη της θλιπτικής αντοχής και της τραχύτητας. Η διατμητική αντοχή μειώνεται πιο έντονα για μεγαλύτερη τραχύτητα.



Σχήμα 2.23. Η επίδραση της τραχύτητας και της αντοχής στη γωνία τριβής της λιθορριπής (Barton et al., 1981).

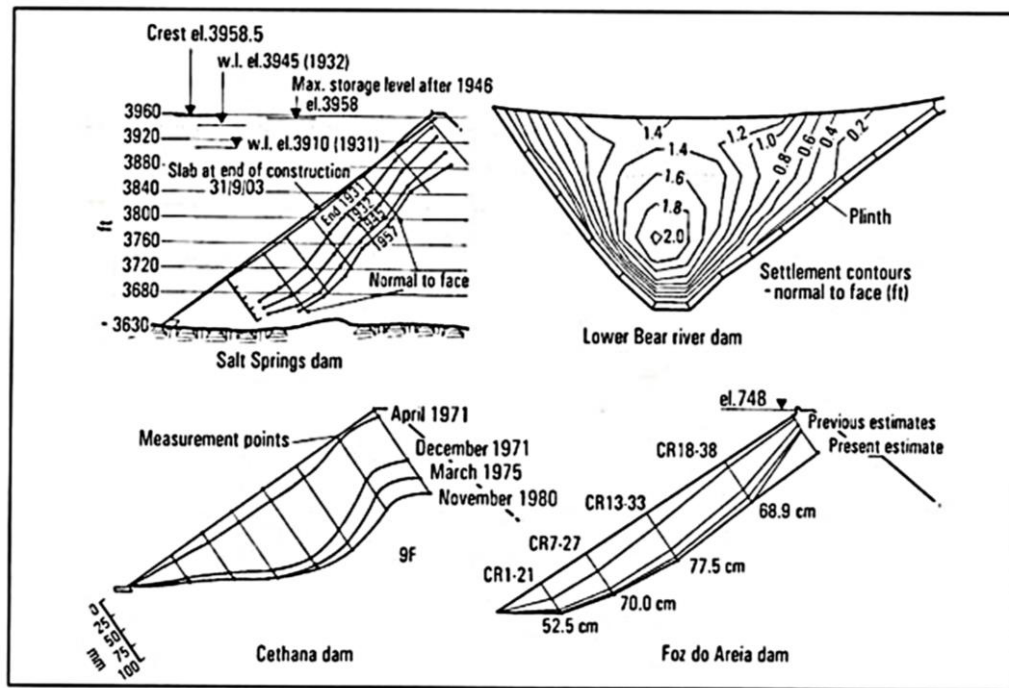
Σύμφωνα με το διάγραμμα των Barton et al. (1981) ισχύει η γραμμική σχέση της γωνίας διατμητικής αντοχής με την περιβάλλουσα τάση που είχε αποδείξει ο Leps (1970), αλλά δεν ισχύει ότι η μεταβολή γίνεται με τον ίδιο ρυθμό για οποιαδήποτε θλιπτική αντοχή της λιθορριπής.

2.3.1.10 Σχέση μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των διαφορετικών ζωνών.

Η κατανομή της βύθισης κατά μήκος της πλάκας επηρεάζεται άμεσα από τη σχέση των μέτρων ελαστικότητας της ανάντη και κατάντη ζώνης του φράγματος. Από τον Πίνακα 2.1, διαπιστώνεται ότι ο λόγος της βύθισης στην κορυφή προς το μέσον της πλάκας είναι ανάλογος του λόγου δυσκαμψίας ανάντη και κατάντη, E_{vu}/E_{vd} . Για παρόμοια δυσκαμψία ανάντη και κατάντη ($E_{vu}/E_{vd} \approx 1$) η κατανομή της βύθισης της πλάκας ακολουθεί τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.24 (από τις πλάκες 4 CFRDs με παρεμφερείς ως προς τη δυσκαμψία λιθορριπές). Μέγιστη βύθιση παρατηρείται στο κέντρο της πλάκας, λίγο χαμηλότερα από το μέσο ύψος της. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία λιθορριπών πολύ διαφορετικής δυσκαμψίας μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την πλάκα σκυροδέματος.

Πίνακας 2.1. Μέτρα ελαστικότητας στα ανάντη (E_{vu}) και κατάντη (E_{vd}) της λιθορριπής και βυθίσεις της πλάκας (στο μεσαίο 1/3 του μήκους της πλάκας: Dm, και στην κορυφή: Dc) στο τέλος της πλήρωσης (Filho Marques and Pinto, 2005).

Dam	Construction moduli (MPa)			Slab deflections (cm)		
	Upstream (E _{vu})	Downstream (E _{vd})	E _{vm} /E _{vj}	Central third (D _m)	Upper (D _c)	D _c /D _m
Aguamilpa	260	47	5.5	14	32	2.3
TSQ-1	44	22	2	45	95	2
Xingó	68	24	2.8	24-27	36	1.4
Itá	29-28	19-20	1.4	65	75	1.1
Machadinho	49	56	0.9	37	37	1
Itapebi	60	25-20	2.4	35	40	1.4
Quebra-Queixo	35	25-20	1.55	13-15	21.3	1.5
Segredo	70-55	45-30	1.8	33.4	42.3	1.3
Foz do Areia	38	32	1.21	77.5	~70 (est)	~0.9



Σχήμα 2.24. Κατανομή βύθισης της πλάκας 4 φραγμάτων (Filho Marques and Pinto, 2005).

2.3.1.11 Χαλίκι.

Ο Cooke (1984) συζητά τη χρήση του χαλικιού (αμμοχάλικο ή αμμοχάλικο με ιλύ) ως λιθορριπή και υποστηρίζει ότι, εάν είναι διαθέσιμο το υλικό αυτό, μπορεί να είναι πολύ κατάλληλο. Επίσης επισημαίνει ότι:

- Το χαλίκι είναι συχνά πιο οικονομικά διαχειρίσιμο από τη λιθορριπή (μικρότερη εκσκαφή και κόστος φόρτωσης, και λιγότερη φθορά στα ελαστικά).
- Συμπυκνωμένα χαλίκια έχουν συνήθως υψηλό μέτρο ελαστικότητας της συμπεστότητας, μέχρι 5 έως 10 φορές μεγαλύτερο από κάποια συμπαγή λιθορριπή. Δεδομένου ότι οι μετακινήσεις της πλάκας ποικίλουν περίπου αντιστρόφως ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητας, και απ' ευθείας με το τετράγωνο του ύψους του φράγματος, πληρώσεις με χαλίκι είναι επιθυμητές για υψηλότερα φράγματα.
- Εάν επιτρέπεται η περιεκτικότητα σημαντικών λεπτόκοκκων, τότε θα απαιτηθούν ζώνες αποστράγγισης και φίλτρα στο σώμα του φράγματος.

Ο Mori (1999) συνιστά ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί προσχωσιγενές χαλίκι στο ανάντη 1/3 του φράγματος για τον περιορισμό της παραμόρφωσης και της ρηγμάτωσης της πλάκας. Οι Amaya και Marulanda (1985) περιγράφουν τη χρήση χαλικιού για το

φράγμα Golillas στην Κολομβία ύψους 125 m. Σε αυτό το φράγμα, το μεγαλύτερο μέρος της πλήρωσης (δηλαδή η ζώνη 2) ήταν από φυσικό χαλίκι ποταμού.

Η Hydro Electric Commission (HEC) της Τασμανίας χρησιμοποίησε χαλίκια για την κατασκευή του φράγματος Crotty το 1991, ύψους 82 m. Τα χαλίκια στο φράγμα Golillas αποτελούνταν από 70% ψαμμίτη, 20% από πυριτικά σχιστόλιθου και 10% από ιλύλιθο και ασβεστόλιθο. Τα χαλίκια πλύθηκαν για τις ζώνες αποστράγγισης στο φράγμα (Fell et al., 2014). Οι Sierra et al. (1985) περιγράφουν τη χρήση των χαλικιών στο φράγμα Salvajina στην Κολομβία. Το φράγμα ύψους 148 m, αποτελούνταν από τη Ζώνη 3Α που ήταν κατασκευασμένη με χαλίκια από ορυχεία χρυσού και βυθοκόρησης για τη ζώνη 2. Τα χαλίκια τοποθετούνται συνήθως σε στρώσεις πάχους 0,6 m και συμπίεζονται με 4 περάσματα χαλύβδινου δονητικού κυλίνδρου βάρους 10 tn, χωρίς να προστίθεται νερό. Το νερό μπορεί να κάνει τη συμπίεση δύσκολη αν τα χαλίκια είναι από ιλύς.

Όπως επισημαίνεται από τον Cooke (1984) το χαλίκι έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορα υψηλά χωμάτινα και λιθορριπτα φράγματα συμπεριλαμβανομένων των Nurek (305 m), Oroville (244 m), Mica (244 m) και Bennett (183 m). Μέτρα ελαστικότητας των 365 MPa για το Oroville και 551-689 MPa για το Bennett επιτεύχθηκαν, παρά τη χρήση μικρότερων κυλίνδρων. Το χαλίκι προτιμάται για ψηλά CFRDs. Επιπλέον για λιθορριπές από χαλίκι συνιστώνται και ηπιότερες κλίσεις (1.5H:1V έως 1.6H:1V). Η χρήση χαλικιού επομένως για την κατασκευή ψηλών φραγμάτων απαιτεί και μεγάλη έκταση (Fell et al., 2005).

2.3.2 Η επιρροή άλλων παραγόντων πέραν της λιθορριπής στην ευστάθεια του φράγματος.

2.3.2.1 Μορφολογία της κοιλάδας.

Αρκετοί συγγραφείς συμπεριλαμβανομένων των Pinto και Filho Marques (1998), και Giudici et al., (2000) έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το σχήμα της κοιλάδας μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στις καθιζήσεις, λόγω των τρισδιάστατων επιπτώσεων που προκαλούν οι ορθές τάσεις προς τις πλευρές της κοιλάδας. Το κυριότερο φαινόμενο που χαρακτηρίζει τις στενές κοιλάδες είναι το φαινόμενο της αψίδωσης (arching). Σε μια τρισδιάστατη κοιλάδα αναπτύσσεται το φαινόμενο της αψίδωσης κατά το οποίο η διάχυση των τάσεων δεν είναι κατακόρυφη, αλλά παρεκκλίνει προς τις πλαγιές, με αποτέλεσμα να μειώνεται η τάση στο κάτω μέρος του φράγματος. Αυτός είναι ο λόγος που η λιθορριπή είναι πολύ πιο εύκολα στηριζόμενη σε μια στενή κοιλάδα απ' ό τι σε μια απείρως

ευρύτερη. Αποδεικνύεται ότι η επίδραση του φαινομένου είναι πιο έντονη στη φάση πλήρωσης της λεκάνης (Chan and Zhang, 2005).

Εκτός από την κλίση των αντρεισμάτων της κοιλάδας, υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της που δρουν επιβαρυντικά στη συμπεριφορά της πλάκας. Παράξενη μορφολογία της κοιλάδας και των αντρεισμάτων (εναλλαγές της κλίσης, ανώμαλη γεωμετρία των επιφανειών) συνιστούν απότομες αλλαγές της κλίσης της πλίνθου και της υποκείμενης δυσκαμψίας, και συχνά προκαλούν κύρτωση στο κάτω μέρος της πλάκας (Fell et al., 2005).

2.3.2.2 Έδαφος θεμελίωσης.

Τα περισσότερα CFRDs είναι θεμελιωμένα σε βραχώδες υπόστρωμα. Υπάρχουν ωστόσο και φράγματα που είναι θεμελιωμένα σε εδαφικές αποθέσεις. Οι Massiéra et al. (2005) συμπεραίνουν ότι η θεμελίωση σε μη βραχώδεις αποθέσεις δεν μεταβάλλει σημαντικά την κατανομή των παραμορφώσεων της πλάκας (οριζόντιων μετατοπίσεων και καθιζήσεων). Διαπιστώνεται ότι οι παραμορφώσεις επιδεινώνονται με την αύξηση του πάχους της μη βραχώδους στρώσης θεμελίωσης, με την αύξηση του ύψους του φράγματος και με τη μείωση της πυκνότητας της εδαφικής αυτής στρώσης. Η θεμελίωση σε κοκκώδεις αποθέσεις φαίνεται ότι επιδεινώνει περισσότερο την κατάσταση για την πλάκα. Οι μέγιστες καθιζήσεις στην περίπτωση αυτή, είναι διπλάσιες απ' ότι για θεμελίωση σε λιθώνες και σημειώνονται πολύ κοντά στον πόδα. Επίσης αυξάνουν με πιο έντονο ρυθμό με την αύξηση του πάχους της κοκκώδους στρώσης και σχετικά πιο απότομα (από ότι για θεμελίωση σε λιθώνες) με την αύξηση του ύψους του φράγματος. Προκύπτει επομένως ότι η αρνητική επιρροή των κοκκωδών αποθέσεων είναι πιο σημαντική για τα πιο ψηλά φράγματα, ενώ η θεμελίωση σε λιθώνες δεν επηρεάζεται από το ύψους του φράγματος. Σαφώς, η θεμελίωση σε μη βραχώδη στρώση, απαιτεί ιδιαίτερη παρακολούθηση και ενίσχυση. Θα πρέπει τέλος να επισημανθεί ότι η κατασκευή των CFRDs σε παγετώδεις και κοκκώδεις αλλουβιακές αποθέσεις αποτελεί καινοτομία για το χώρο των CFRDs. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα που προκύπτουν από σχετικές αναλύσεις, θα πρέπει να επαληθεύονται μέσω επί τόπου μετρήσεων κατά τη φάση κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης τέτοιων φραγμάτων.

2.3.2.3 Η άμεση επιρροή της πλάκας.

Τα χαρακτηριστικά της ίδιας της πλάκας καθώς επίσης και η πρόωρη τοποθέτησή της, αποτελούν σημαντικές αιτίες ρηγμάτωσης. Συγκεκριμένα η κατασκευή της πλάκας θα πρέπει να γίνεται εφ' όσον αρχίσουν να υποχωρούν τα φαινόμενα ερπυσμού κι αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό να αρχίζει αφού έχει ολοκληρωθεί το 75% της λιθορριπής.

Ανάλογα με την αιτία ρηγμάτωσης, οι ρωγμές που παρουσιάζονται στα CFRDs διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Ρωγμές λόγω παραμορφώσεων της λιθορριπής.

Ρηγματώσεις εφελκυσμού εμφανίστηκαν σε κάποια υψηλά CFRDs όπως στα Aguamilpa, Tianshengquiao, Xingo, Ita και Itapebi, όπου οι παραμορφώσεις στη λιθορριπή ήταν μεγάλες κι εξετάστηκε ο βαθμός σύνδεσής τους με τη ρηγμάτωση της πλάκας. Όσες ρωγμές οφείλονται στην παραμόρφωση του ανάντη τμήματος της λιθορριπής είναι περίπου οριζόντιες και εμφανίζονται στο ανώτερο 1/3 της πλάκας. Τέτοια ρήγματα διαπιστώθηκαν στην πλάκα των Aguamilpa και Tianshengquiao (Filho Marques and Pinto, 2005).

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μείωση των παραμορφώσεων στην κορυφή του φράγματος είναι η μετατόπιση προς τα κατάντη της διεπιφάνειας μεταξύ ανάντη και κατάντη ζώνης (3B και 3C). Η τακτική αυτή αρχικά εφαρμόστηκε με επιτυχία στα φράγματα Foz do Areia και Cethana, κι έπειτα στα Campos Novos, Barra Grande (Brazil) και El Cajon (Mexico).

Ρωγμές που σχετίζονται με τη γεωμετρία της θεμελίωσης.

Οι ρωγμές που εντοπίστηκαν στις πλάκες των φραγμάτων Xingo, Ita και Itapebi είναι διαφορετικού τύπου, σχεδόν παράλληλα στην πλίνθο και σε απόσταση 10-20 m απ' αυτήν. Στα Xingo και Itapebi, οι ρηγματώσεις είναι προφανές ότι συνδέονται με τη γεωμετρία της θεμελίωσης της πλάκας. Στο Ita όμως, η αιτία των ρηγματώσεων δεν είναι τόσο εύκολο να καθοριστεί, καθώς η πλάκα ρηγματώθηκε αφού προηγουμένως είχε κυρτώσει. Τα μαθηματικά μοντέλα συνδέουν το κύρτωμα αυτό της επιφάνειας της πλάκας με την παρουσία απότομων μεταβατικών ζωνών κοντά στην πλίνθο. Οι απότομες κλίσεις των μεταβατικών ζωνών γίνονται πιο επικίνδυνες για την πλάκα σε συνδυασμό με τη χρήση πολύ λεπτής λιθορριπής. Απότομες αλλαγές του προσανατολισμού της πλίνθου σε συνδυασμό με λεπτή λιθορριπή μπορεί να προκαλέσουν παρόμοια ρηγμάτωση. Συνεπώς απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή σε φράγματα που κατασκευάζονται σε μη ευνοϊκές συνθήκες θεμελίωσης (Filho Marques and Pinto, 2005).

Ρωγμές που σχετίζονται με την κατάσταση της πλάκας.

Η τραχεία επιφάνεια της πλάκας αποτελεί παράγοντα ρηγμάτωσης καθώς συντελεί σε περισσότερη προστριβή της με τη λιθορριπή.

Ρωγμές λόγω ολίσθησης της λιθορριπής κατά μήκος της πλάκας.

Η ολίσθηση της ανάντη ζώνης αποτελεί αιτία ανάπτυξης τάσεων στην πλάκα. Όμως η ύπαρξη των κατακόρυφων αρμών συντελεί στο να συγκρατούνται οι τάσεις αυτές κάτω από μια οριακή τιμή, ώστε η ολισθαίνουσα λιθορριπή σπάνια να μπορεί να γίνει αιτία ρηγμάτωσης.

Το πρόβλημα της προεξέχουσας δοκού σκυροδέματος (extruded curb).

Σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιείται μια πρόσθετη δοκός σκυροδέματος προσκολλημένη πάνω στην πλάκα (extruded curb). Η δοκός αυτή συγκολλείται στο κάτω μέρος της πλάκας με αποτέλεσμα η πλάκα να ακολουθεί όλες τις παραμορφώσεις της και να δέχεται πολύ μεγάλη φόρτιση από την παραμορφούμενη λιθορριπή.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, για την αποφυγή ενδεχόμενων ρηγματώσεων, η αριθμητική ανάλυση θα πρέπει να επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της κατανομής των τάσεων στην πλάκα σκυροδέματος. Επιπλέον αξίζει να επισημανθεί ότι η πλάκα σκυροδέματος κινδυνεύει από αστοχία και λόγω εφελκυσμού.

2.4 Καταστατικά προσομοιώματα χαλίκων και λιθορριπής.**2.4.1 Εισαγωγή.**

Ένα καταστατικό προσομοίωμα υλικού προκύπτει από μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Οι καταστατικοί νόμοι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά των υλικών της λιθορριπής βασίζονται είτε στη μη γραμμική υποελαστική ανάλυση ή στην ελαστο-πλαστική ανάλυση. Η συμπεριφορά της λιθορριπής είναι ανελαστική, μη γραμμική και σημαντικά εξαρτώμενη από τις τάσεις. Έτσι, η εφαρμογή ενός μη γραμμικού μοντέλου είναι πιο ρεαλιστική για την ανάλυση φραγμάτων λιθορριπής (Özkuzukiran, 2005).

Στην παρούσα διατριβή, θα γίνει ανάλυση για α) το μη-γραμμικό προσομοίωμα των Duncan και Chang (1970), το οποίο λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από την εντατική κατάσταση και τις συνθήκες φόρτισης-αποφόρτισης και έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την ανάλυση φραγμάτων και β) το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα του Lade (Lade et al., 2002) για κοκκώδη υλικά, το οποίο προσομοιώνει με ρεαλιστικό τρόπο τη μη-γραμμική εξάρτηση της δυσκαμψίας από την εντατική κατάσταση

και τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης υπό γενικευμένες τρισδιάστατες συνθήκες φόρτισης, όπως έχει αποδειχθεί από πολυάριθμες συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα. Η διερεύνηση γίνεται με χρήση μη-γραμμικής 3Δ ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, στην οποία προσομοιώνεται η σταδιακή κατασκευή και η ανύψωση του ύδατος (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2014). Κατωτέρω περιγράφεται το προσομοίωμα του φράγματος των Duncan και Chang (1970). Το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα του Lade (Lade et al., 2002) παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής.

2.4.2 Γραμμική ελαστικότητα.

Το πιο βασικό και απλούστερο μοντέλο που χρησιμοποιείται στην εδαφομηχανική είναι το γραμμικό ελαστικό μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό εφαρμόζονται οι γενικευμένοι καταστατικοί νόμοι του Hooke και η συμπεριφορά του υλικού αποδίδεται με δύο παραμέτρους: το μέτρο ελαστικότητας E και το λόγο Poisson ν .

Οι εξισώσεις τάσης-παραμόρφωσης είναι:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_y}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_z}{E} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_x}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_z}{E} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_x}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_y}{E} \quad (2.4)$$

$$\gamma_{yz} = G \cdot \tau_{yz} \quad (2.5)$$

$$\gamma_{xz} = G \cdot \tau_{xz} \quad (2.6)$$

$$\gamma_{yx} = G \cdot \tau_{yx} \quad (2.7)$$

όπου $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: η ορθή τάση στις διευθύνσεις x, y, z .

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: η παραμόρφωση στις διευθύνσεις x, y και z , αντίστοιχα.

γ_{yz} και τ_{yz} : η διατμητική παραμόρφωση και διατμητική τάση στο επίπεδο yz .

γ_{xz} και τ_{xz} : η διατμητική παραμόρφωση και διατμητική τάση στο επίπεδο xz .

γ_{yx} και τ_{yx} : η διατμητική παραμόρφωση και διατμητική τάση στο επίπεδο yx .

G : το μέτρο διάτμησης.

Το μέτρο διάτμησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.8)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης είναι γραμμική, κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας είναι σταθερό σε όλα τα επίπεδα τάσεων. Όμως η πραγματική συμπεριφορά (όπως και η συμπεριφορά του εδάφους) είναι ιδιαίτερα μη γραμμική. Επομένως, η γραμμική ελαστικότητα δεν είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λιθορριπής.

2.4.3 Μη γραμμικά μοντέλα.

Η χρήση μιας υπερβολικής σχέσης τάσης-παραμόρφωσης και η διαφοροποίηση της δυσκαμψίας για τις φάσεις φόρτισης και αποφόρτισης εξασφαλίζουν σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς (Dakoulas, 2007).

Το υπερβολικό μοντέλο Duncan και Chang (1970)

Ο Kondner (1963) απέδειξε ότι οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης άμμου και αργίλου μπορούν να προσεγγιστούν με υψηλή ακρίβεια από την υπερβολή:

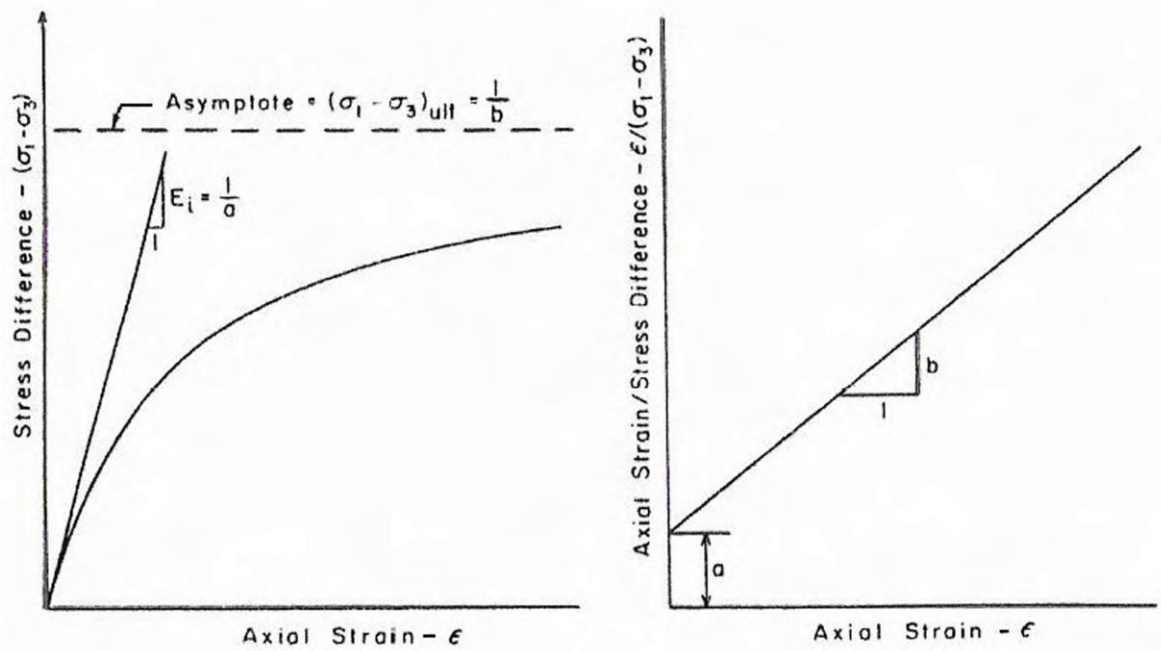
$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{a + b \cdot \varepsilon} \quad (2.9)$$

όπου σ_1 και σ_3 : οι ελάχιστες και μέγιστες κύριες τάσεις, ε : η αξονική παραμόρφωση, a και b οι συντελεστές που προσδιορίζονται από τυπικές τριαξονικές δοκιμές που φαίνονται στο Σχήμα 2.25α ή στο Σχήμα 2.25β για τροποποιημένους άξονες.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25α, η ασυμπτωτική τιμή της αποκλίνουσας τάσης (deviator stress) είναι πάντα πάνω από την υπερβολή και προσδιορίζεται μέσω της θλιπτικής αντοχής του εδάφους ως εξής:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (2.10)$$

όπου $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: η θλιπτική αντοχή, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: η ασυμπτωτική τιμή της αποκλίνουσας τάσης και R_f : ο λόγος των κύριων τάσεων κατά την αστοχία, ο οποίος είναι ανεξάρτητος της περιβάλλουσας τάσης και παίρνει τιμές από 0.75-1.00 για πλήθος εδαφών (Duncan and Chang, 1970).



Σχήμα 2.25. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υπερβολικού μοντέλου (Duncan and Chang, 1970).

Θεωρώντας το αρχικό εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας και τη θλιπτική αντοχή της λιθορριπής, η γενική μορφή της αποκλίνουσας τάσης είναι:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon \cdot R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)f}} \quad (2.11)$$

Η εξίσωση του Kondner (1963) προσομοιάζει αποτελεσματικά τη μη-γραμμική συμπεριφορά των εδαφών και σε αυτήν βασίζεται το υπερβολικό μοντέλο των Duncan και Chang (1970).

Το 1963, ο Janbu πρότεινε τη σχέση (2.12) μεταξύ του αρχικού εφαπτόμενου μέτρου ελαστικότητας και της περιβάλλουσας τάσης:

$$E_i = K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^\eta \quad (2.12)$$

όπου E_i : το αρχικό εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας (kPa), σ_3 : η μικρότερη κύρια τάση (kPa), p_a : η ατμοσφαιρική πίεση (kPa), K : ο συντελεστής δυσκαμψίας και η : ο δείκτης του ρυθμού μεταβολής του E_i με την σ_3 (Duncan et al., 1970). Οι K και η είναι αδιάστατες παράμετροι και υπολογίζονται από το διάγραμμα του Σχήματος 2.26.

Για σταθερή τιμή της σ_3 , το εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας δίδεται από τον τύπο:

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \varepsilon} \quad (2.13)$$

Ο συνδυασμός των σχέσεων 2.11 και 2.13 καταλήγει στην εξής σχέση για το επαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας:

$$E_t = \frac{1/E_i}{\left(\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \cdot \varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}\right)^2} \quad (2.14)$$

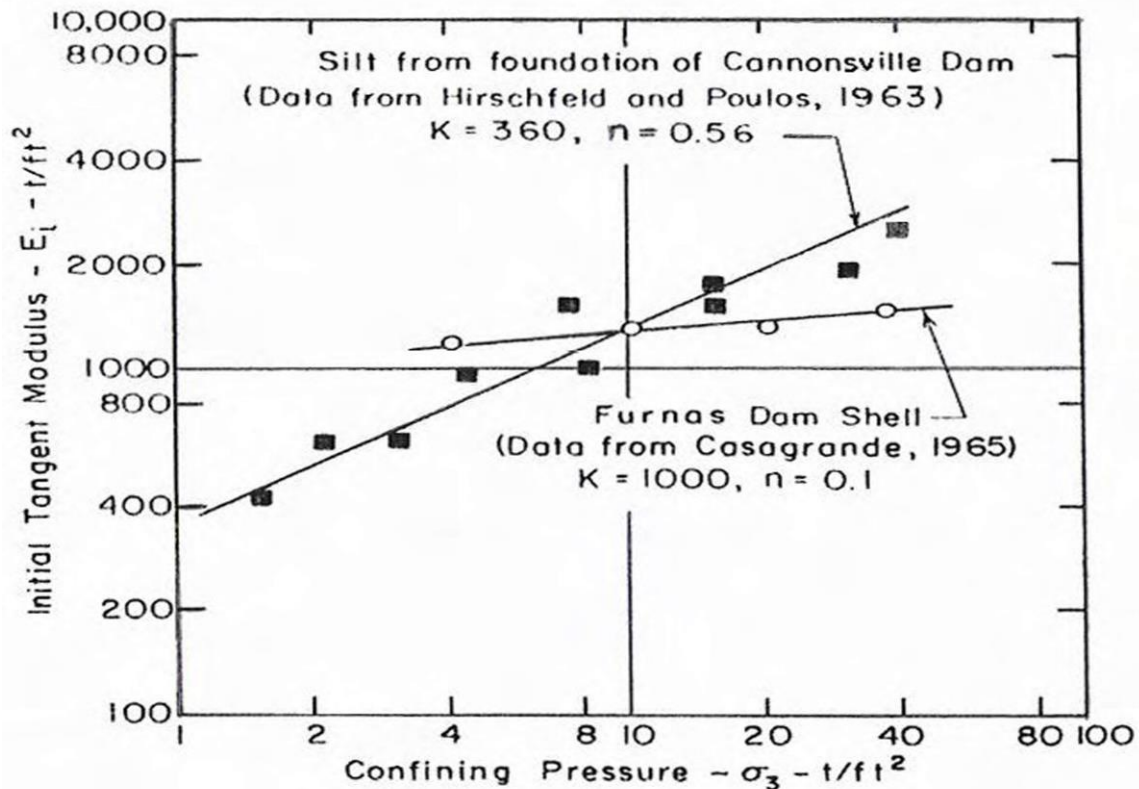
Οι Duncan και Chang (1970) εξάλειψαν την παραμόρφωση στην Εξίσωση 2.14, τροποποιώντας την Σχέση 2.10 σε:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_i \left(1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}\right)} \quad (2.15)$$

Στο υπερβολικό μοντέλο των Duncan και Chang είναι ενσωματωμένο το κριτήριο αστοχίας των Mohr-Coulomb.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \cdot \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2.16)$$

όπου c : η συνοχή, φ : η εσωτερική γωνία τριβής του εδαφικού υλικού. Με συνδυασμό των σχέσεων 2.14, 2.15 και 2.16 κατέληξαν στη σχέση (2.17).



Σχήμα 2.26. Καθορισμός των υπερβολικών παραμέτρων K, n (Duncan and Chang, 1970).

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \cdot \sin \varphi} \right]^2 \cdot K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^\eta \quad (2.17)$$

Η εξίσωση (2.17) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση ολικών και ενεργών τάσεων. Για την αποφόρτιση, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^\eta \quad (2.18)$$

όπου K_{ur} : ο συντελεστής δυσκαμψίας για την αποφόρτιση. Η παράμετρος η είναι ίδια για την πρώτη φόρτιση και τους επόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης.

Οι Kulhawy et al. (1972) ανέπτυξαν μια σχέση για τον εφαπτόμενο λόγο Poisson ν_t που εκφράζεται ως:

$$\nu_t = \frac{G - F \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)}{\left(1 - \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^\eta \left(1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right)} \right)^2} \quad (2.19)$$

όπου G, F, d είναι παράμετροι που υπολογίζονται από τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού με μετρήσεις αλλαγής του όγκου.

Οι Duncan et al. (1980) επανεξέτασαν το μοντέλο και πρότειναν ένα μέτρο διόγκωσης το οποίο να μεταβάλλεται σε σχέση με την περιβάλλουσα τάση σύμφωνα με τη σχέση:

$$B = K_b \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (2.20)$$

όπου B : το μέτρο διόγκωσης, K_b : ο συντελεστής του μέτρου διόγκωσης και m σταθερά. Επιπλέον, διαπίστωσαν ότι για τα μη συνεκτικά εδάφη, όπως είναι η λιθορριπή, το χαλίκι και η άμμος, η γωνία διατμητικής αντοχής φ μειώνεται λογαριθμικά με την περιβάλλουσα τάση ως εξής:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (2.21)$$

όπου φ_0 : η τιμή της φ για $\sigma_3 = p_a$ και $\Delta\varphi$ η μείωση της φ για δεκαπλασιασμό της σ_3 . ($\varphi_0, \Delta\varphi$: σταθερές).

2.5 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

2.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (FRC) μπορεί να οριστεί ως ένα σύνθετο υλικό το οποίο γίνεται με τσιμέντο Portland, αδρανή και ενσωματωμένες διακριτές ασυνεχείς ίνες. Το άοπλο σκυρόδεμα είναι ένα εύθραυστο υλικό, με μικρή αντοχή σε εφελκυσμό και χαμηλή ικανότητα παραμόρφωσης. Ο ρόλος των τυχαία διανεμημένων ασυνεχών ινών είναι να γεφυρώσει κατά μήκος τις ρωγμές και να παρέχει κάποια πλαστιμότητα μετά τη ρηγμάτωση. Αν οι ίνες είναι αρκετά ισχυρές και καλά συνδεδεμένες με το υλικό, τότε το FRC μπορεί να μεταφέρει σημαντικές τάσεις και μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης στο στάδιο μετά τη ρηγμάτωση (Chanh, 2005).

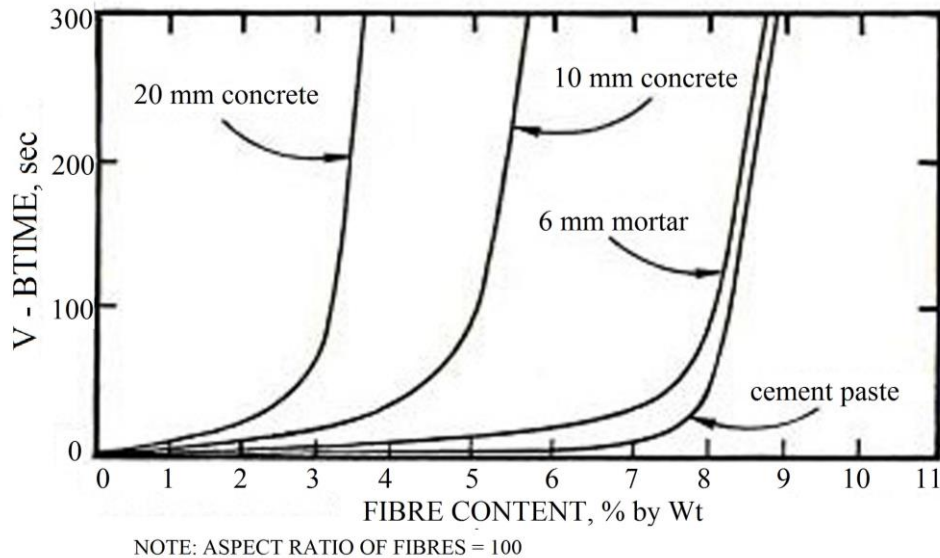
Υπάρχουν φυσικά άλλοι (και πιθανώς φθηνότεροι) τρόποι για την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος. Η πραγματική συμβολή των ινών είναι η αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος υπό οποιοδήποτε τύπο φόρτισης. Δηλαδή, οι ίνες τείνουν να αυξάνουν την παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο και να προσφέρουν μια μεγάλη απορρόφηση ενέργειας στο τμήμα μετά την κορυφή της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης. Όταν η ενίσχυση της ίνας είναι υπό τη μορφή μικρών διακριτών ινών, αυτές δρουν αποτελεσματικά ως άκαμπτα εγκλείσματα στη μήτρα σκυροδέματος. Φυσικά, έχουν έτσι την ίδια τάξη μεγέθους με τα εγκλείσματα αδρανών. Η ενίσχυση με ίνες χάλυβα δεν μπορεί να θεωρηθεί ως άμεση αντικατάσταση του διαμήκη οπλισμού στα οπλισμένα και προεντεταμένα δομικά μέλη. Ωστόσο, η παρουσία των ινών στο σώμα του σκυροδέματος αναμένεται να βελτιώσει την αντίσταση των συμβατικά ενισχυμένων δομικών μελών σε ρωγμές (Chanh, 2005).

2.5.2 Σχεδιασμός μείγματος ενισχυμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα SFRC.

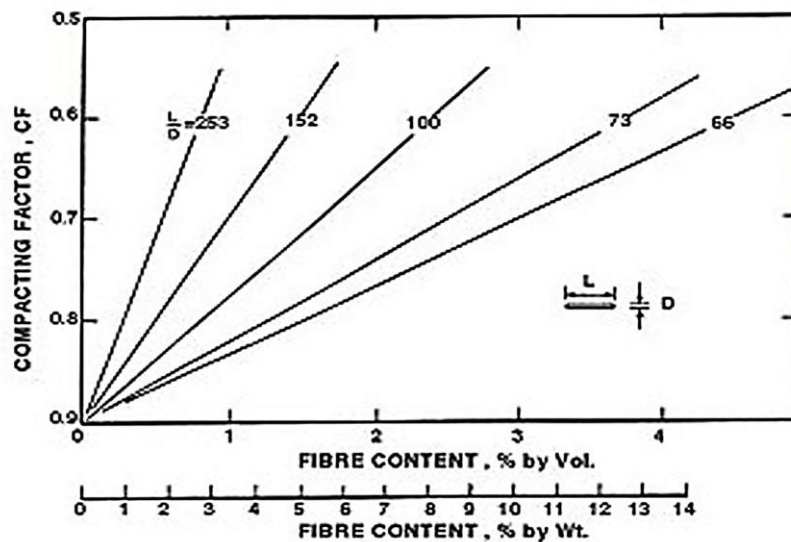
Όπως και με οποιοδήποτε άλλο είδος σκυροδέματος, οι αναλογίες μίγματος για SFRC εξαρτώνται από τις απαιτήσεις για μια συγκεκριμένη εργασία, από την άποψη της αντοχής, εργασιμότητας, και ούτω καθεξής. Αρκετές διαδικασίες για τις αναλογίες μειγμάτων SFRC είναι διαθέσιμες, οι οποίες δίνουν έμφαση στην εργασιμότητα του προκύπτοντος μείγματος. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα ζητήματα που είναι ιδιαίτερα στο SFRC.

Σε γενικές γραμμές, όπως αναφέρει ο Chanh (2005), τα μείγματα SFRC περιέχουν υψηλότερες περιεκτικότητες σε τσιμέντο και υψηλότερες αναλογίες λεπτόκοκκων-χονδρόκοκκων αδρανών απ' ό,τι τα συνηθισμένα σκυροδέματα κι έτσι στον σχεδιασμό μείγματος ότι εφαρμόζεται στο συμβατικό σκυρόδεμα δεν μπορεί να εφαρμόζεται εξ

ολοκλήρου σε SFRC. Συνήθως, για να μειωθεί η ποσότητα του τσιμέντου, έως το 35% του τσιμέντου, μπορεί να αντικατασταθεί με ιπτάμενη τέφρα. Επιπλέον, για να βελτιωθεί η εργασιμότητα των υψηλότερων μειγμάτων όγκου ινών, χρησιμοποιούνται συχνά ρευστοποιητές και ειδικότερα υπερρευστοποιητές σε συνδυασμό με εγκλωβισμένο αέρα.



Σχήμα 2.27. Εργασιμότητα σε σχέση με την περιεκτικότητα ινών για μήτρες με διαφορετικά μέγιστα μεγέθη αδρανών (Endgington et al., 1974).



Σχήμα 2.28. Επίδραση της αναλογίας ινών στην εργασιμότητα του σκυροδέματος, όπως μετρήθηκε από το συντελεστή συμπίκνωσης (Endgington et al., 1974).

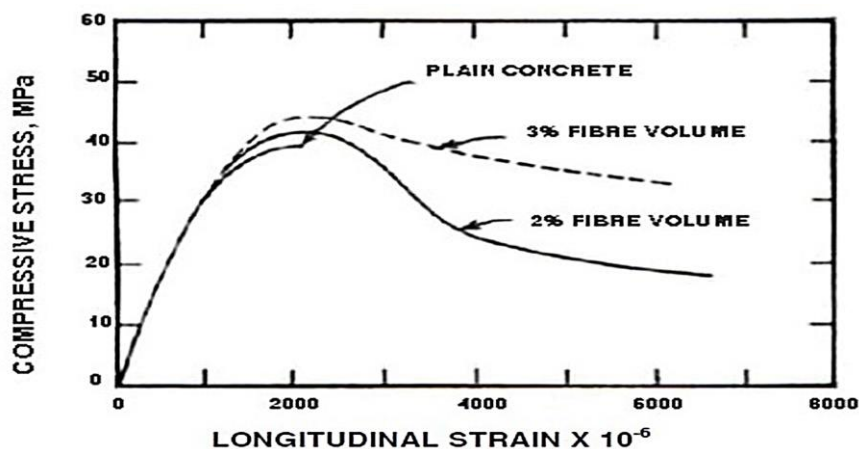
Το Σχήμα 2.27 δείχνει τα αποτελέσματα του μέγιστου μεγέθους αδρανών στην εργασιμότητα. Ο δεύτερος παράγοντας που έχει μια σημαντική επίδραση στην εργασιμότητα είναι η αναλογία διαστάσεων (l/d) των ινών. Η εργασιμότητα μειώνεται με την αύξηση της αναλογίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.28.

2.5.3 Τεχνολογία για παραγωγή SFRC.

Το SFRC μπορεί γενικά να παράγεται με τη χρήση πρακτικής συμβατικού σκυροδέματος, αν και προφανώς υπάρχουν κάποιες σημαντικές διαφορές (Chanh, 2005). Το βασικό πρόβλημα είναι η εισαγωγή επαρκούς όγκου ινών, ομοιόμορφα διασκορπισμένων, για την επίτευξη των επιθυμητών βελτιώσεων στη μηχανική συμπεριφορά, διατηρώντας ταυτόχρονα επαρκή εργασιμότητα στο νωπό μείγμα για την κατάλληλη ανάμειξη, τοποθέτηση και διαμόρφωση. Η απόδοση του σκληρυμένου σκυροδέματος ενισχύεται περισσότερο από ίνες με υψηλότερη αναλογία, δεδομένου ότι αυτό βελτιώνει το δεσμό ίνας-μήτρας. Από την άλλη πλευρά, μια υψηλή αναλογία επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα του νωπού μείγματος. Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα της εργασιμότητας και της ομοιόμορφης κατανομής αυξάνονται με την αύξηση του μήκους των ινών και τον όγκο. Μία από τις κυριότερες δυσκολίες στην απόκτηση μιας ομοιόμορφης κατανομής των ινών είναι η τάση των ινών χάλυβα να συσσωρεύονται σαν μια μπάλα ή να συγκολλούνται.

2.5.4 Στατικές μηχανικές ιδιότητες SFRC.

Θλιπτική αντοχή.



Σχήμα 2.29. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σε θλίψη για SFRC (Johnston, 1974).

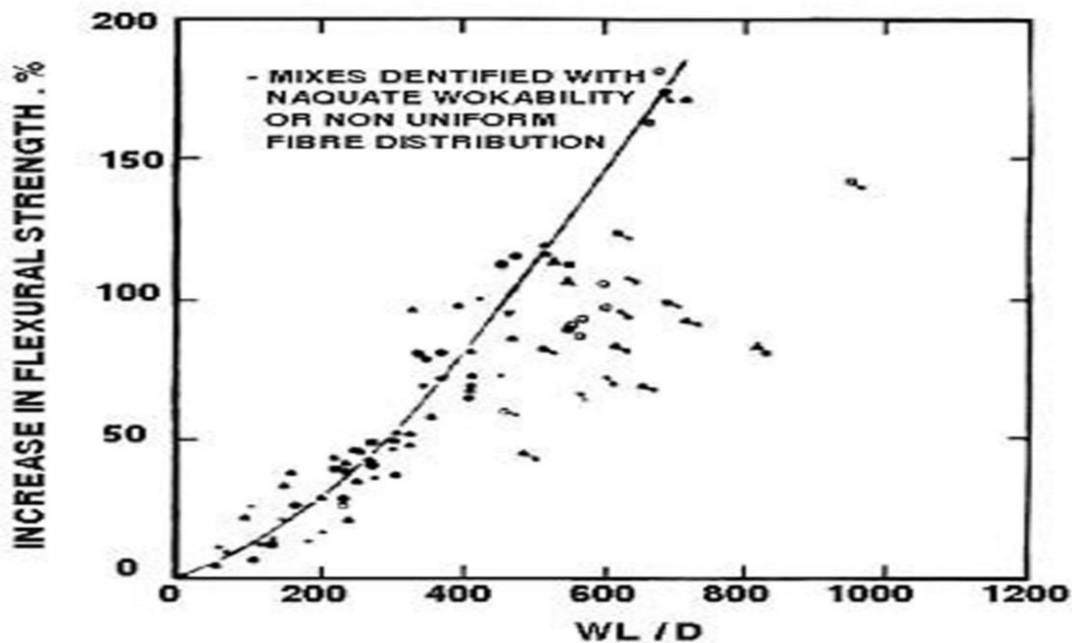
Οι ίνες αυξάνουν ελάχιστα τη στατική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, με αυξήσεις στην αντοχή που κυμαίνονται ουσιαστικά από μηδέν έως 25%. Ακόμη και σε μέλη τα οποία περιέχουν συμβατικό οπλισμό σε αντίθεση με τις ίνες χάλυβα, οι ίνες έχουν μικρή επίδραση στη θλιπτική αντοχή. Ωστόσο, οι ίνες αυξάνουν σημαντικά την ολκιμότητα μετά τη ρηγμάτωση και την απορρόφηση ενέργειας (Chanh, 2005). Αυτό απεικονίζεται γραφικά στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του SFRC σε θλίψη του Σχήματος 2.29.

Εφελκυστική αντοχή.

Ίνες ευθυγραμμισμένες με την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης μπορούν να επιφέρουν πολύ μεγάλες αυξήσεις (έως 133%) σε εφελκυστική αντοχή. Ωστόσο, για τυχαίως κατανεμημένες ίνες, η αύξηση της αντοχής είναι πολύ μικρή. Έτσι, η προσθήκη ινών απλώς για να αυξήσει την άμεση εφελκυστική αντοχή πιθανόν δεν συνιστάται.

Αντοχή σε κάμψη.

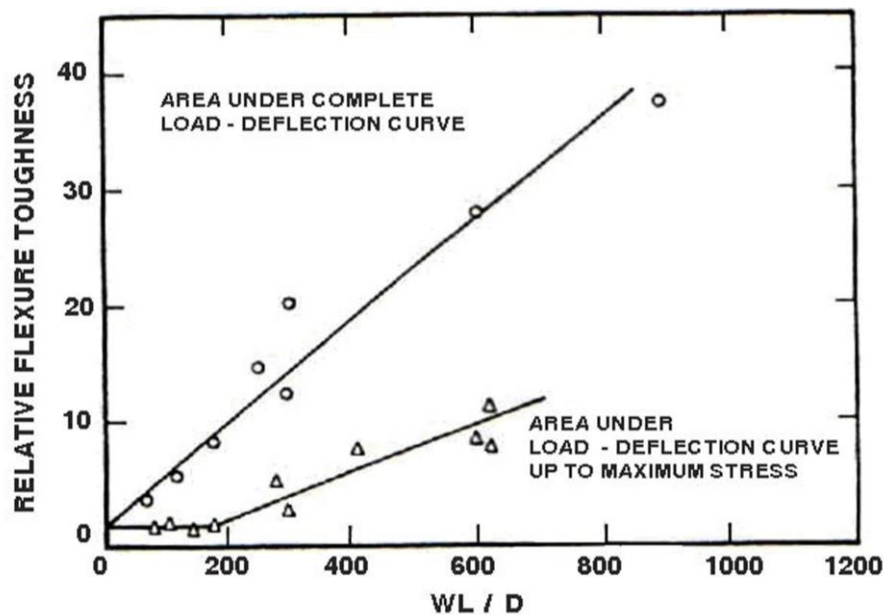
Οι ίνες χάλυβα γενικά βρέθηκαν να έχουν πολύ μεγαλύτερη συνολική επίδραση στην αντοχή σε κάμψη του SFRC απ' ό,τι στη θλιπτική ή εφελκυστική αντοχή, με αυξήσεις άνω του 100% από αυτές που έχουν αναφερθεί. Οι αυξήσεις στην αντοχή σε κάμψη είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες, όχι μόνο στον όγκο των ινών, αλλά επίσης και στην αναλογία των ινών, με την υψηλότερη αναλογία να οδηγεί σε μεγαλύτερες αυξήσεις αντοχής. Το Σχήμα 2.30 περιγράφει την επίδραση των ινών από την άποψη της συνδυαστικής παραμέτρου Wl/d , όπου l/d είναι η αναλογία και το W είναι το ποσοστό βάρους των ινών.



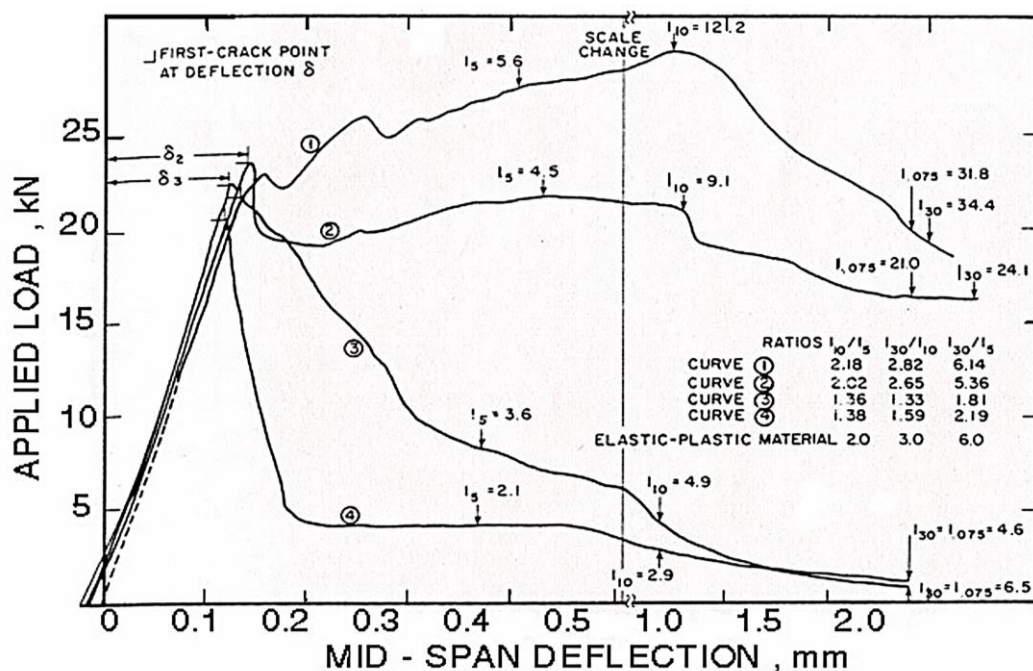
Σχήμα 2.30. Επίδραση του Wl/d στην αντοχή σε κάμψη του κονιάματος και του σκυροδέματος (Johnston, 1974).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ίνες προστίθενται στο σκυρόδεμα όχι για να βελτιώσουν την αντοχή, αλλά κυρίως για να βελτιωθεί η πλαστιμότητα και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Συνήθως, η καμπτική σκληρότητα ορίζεται ως το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης σε κάμψη έως κάποια συγκεκριμένη παραμόρφωση. Πιθανώς, το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μέτρο της σκληρότητας είναι ο

δείκτης σκληρότητας που προτείνει ο Johnston (1974) και ενσωματώνεται σε ASTM C1018. Όπως συμβαίνει με την αντοχή σε κάμψη, η σκληρότητα σε κάμψη αυξάνει επίσης καθώς η παράμετρος Wl/d αυξάνει (Σχήμα 2.31). Οι καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης για διαφορετικούς τύπους και όγκους χαλύβδινων ινών μπορεί να ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.32. Για όλα τα εμπειρικά μέτρα σκληρότητας, οι ίνες με καλύτερα χαρακτηριστικά δεσμού (δηλαδή παραμορφωμένες ίνες ή ίνες με μεγαλύτερη αναλογία) δίνουν υψηλότερες τιμές σκληρότητας απ' ότι οι ομαλές, ευθύγραμμες ίνες στις ίδιες συγκεντρώσεις (Chanh, 2005).



Σχήμα 2.31. Η επίδραση του Wl/d στη σκληρότητα σε κάμψη του SFRC (Johnston, 1974).



Σχήμα 2.32. Σχέση φορτίου-παραμόρφωσης από δοκιμή κάμψης SFRC (Johnston, 1982).

2.5.5 Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος (Nataraja et al., 1999).

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα. Η σύνδεση των χαρακτηριστικών του απλού σκυροδέματος με αυτά του ινοπλισμένου σκυροδέματος γίνεται με τις εξισώσεις των Nataraja et al. (1999), οι οποίες χρησιμοποιώντας την αντοχή σε θλίψη και την αντίστοιχη παραμόρφωση του απλού σκυροδέματος, καταλήγουν στις αντίστοιχες ιδιότητες του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος και στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για το υλικό αυτό.

Από τις εξισώσεις αυτές, διαμορφώνονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για την κάθε επιμέρους αντοχή SFRC που εξετάζεται σε θλίψη και εφελκυσμό. Η αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίζεται ίση με το 1/10 της αντίστοιχης σε θλίψη. Σύμφωνα με τους Nataraja et al. (1999), για σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή έως 50 MPa ισχύουν οι σχέσεις:

Θλιπτική Αντοχή.

$$f'_{cf} = f_c + 2.1604 (RI) , \quad (r = 0.76), \quad (2.22)$$

όπου f_c : η θλιπτική αντοχή του απλού σκυροδέματος σε MPa, f'_{cf} : η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος (SFRC) σε MPa, RI : ο δείκτης οπλισμού ($RI = W_f L_f / D_f$, W_f : το βάρος των ινών από χάλυβα).

Παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση.

$$\varepsilon_{0f} = \varepsilon_0 + 0.0006 RI \quad (r = 0.94), \quad (2.23)$$

όπου ε_0 : η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση για το απλό σκυρόδεμα, ε_{0f} : η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση για SFRC.

Λόγος δυσθραυστότητας.

$$TR_{cf} = TR_c + 0.0978 RI , \quad (r = 0.85), \quad (2.24)$$

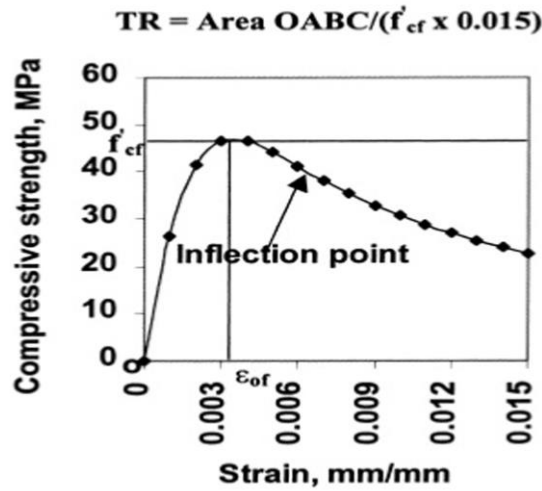
όπου TR_c : η δυσθραυστότητα για το απλό σκυρόδεμα, TR_{cf} : η δυσθραυστότητα για SFRC.

Η σχέση που προτάθηκε από τους Carreira και Chu (1985) για μονοαξονική θλίψη του απλού σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε ως βάση για το SFRC. Οι Ezeldin και Belaguru (1992) έχουν επίσης χρησιμοποιήσει την ίδια σχέση:

$$\frac{f_c}{f'_{cf}} = \frac{\beta \left(\varepsilon_c / \varepsilon_{of} \right)}{\beta - 1 + \left(\varepsilon_c / \varepsilon_{of} \right)^\beta} \quad (2.25)$$

όπου f'_{cf} : η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος, ε_{of} : η αντίστοιχη μέγιστη παραμόρφωση, f_c , ε_c : η τάση και η αντίστοιχη παραμόρφωση του απλού σκυροδέματος, β : παράμετρος του υλικού η οποία εξαρτάται από τη μορφή του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στα σχήματα κατωτέρω, οι ίνες στο σκυρόδεμα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στον φθίνοντα κλάδο της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου β , έχουν βρεθεί σχέσεις οι οποίες συνδέουν το β με το δείκτη οπλισμού και την κλίση E_i στο σημείο καμψής του φθίνοντα κλάδου.



Σχήμα 2.33. Σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Nataraja et al., 1999).

Οι παρακάτω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη σχέση για πτυχωτές ίνες για θλιπτική αντοχή έως 50 MPa.

$$\beta = 0.001E_i + 0.5811, \quad (r = 0.96), \quad (2.26)$$

$$E_i = 1930 RI^{(-0.7406)}, \quad (r = 0.97), \quad (2.27)$$

$$\beta = 0.5811 + 1.93RI^{(-0.7406)} \quad (2.28)$$

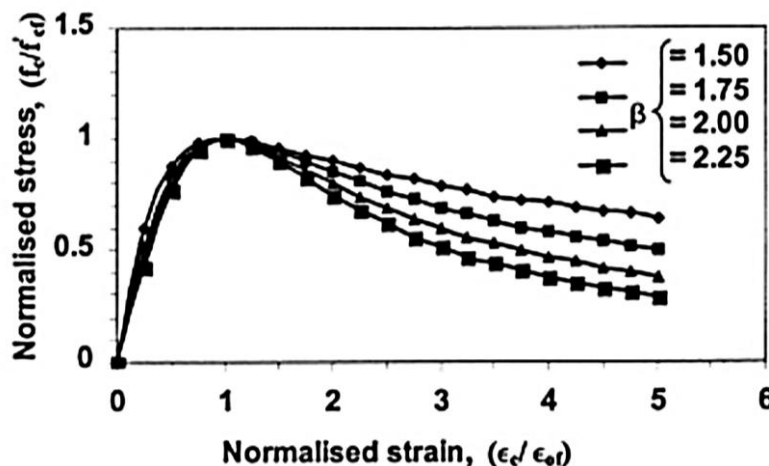
Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για RI έως 3. Για απλό σκυρόδεμα, η τιμή του β μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση που προτάθηκε από τους Carreira και Chu (1985):

$$\beta = \left(\frac{f'_c}{32.4} \right)^3 + 1.55 \quad (2.29)$$

όπου f'_c είναι η θλιπτική αντοχή του απλού σκυροδέματος σε MPa και το β αδιάστατη παράμετρος. Αυτή η σχέση υιοθετήθηκε ως μια συνάρτηση της f'_c , καθώς ο φθίνοντας κλάδος που καθορίζεται από την παράμετρο β έχει μεγάλη εξάρτηση από την f'_c , όπως αναφέρεται από τους Carreira και Chu (1985).

Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι συνήθως μεγαλύτερη από εκείνη του απλού σκυροδέματος. Η εξίσωση 2.23, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της τιμής της παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος, λαμβάνοντας $\epsilon_0 = 0.002$ (Διεθνείς συστάσεις, CEB/FIP).

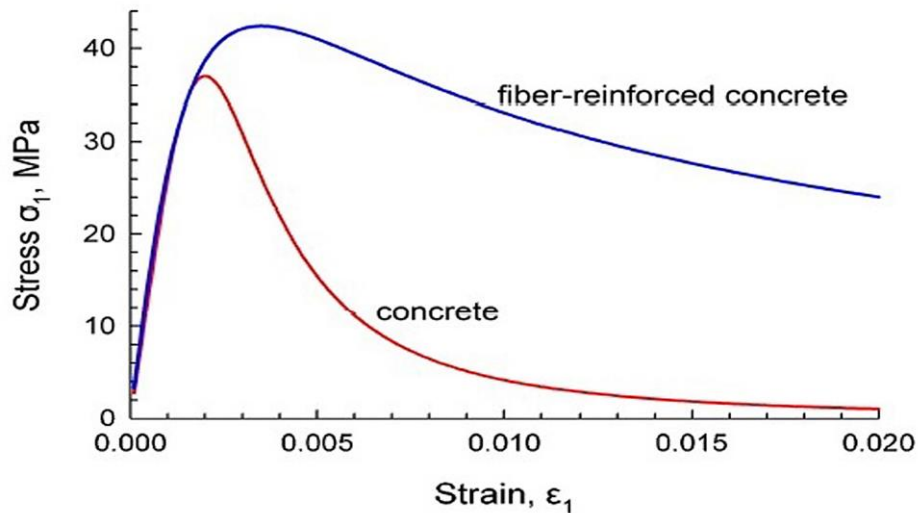
Η εξίσωση 2.25 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει την ολοκληρωμένη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, για διαφορετικές τιμές του β , με έναν πιο κανονικοποιημένο τρόπο. Το β μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας το RI από τις εξισώσεις 2.26 και 2.27. Ο φθίνων κλάδος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης επηρεάζεται από την τιμή του β . Καθώς η τιμή του β μειώνεται, το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης αυξάνεται (Σχήμα 2.34).



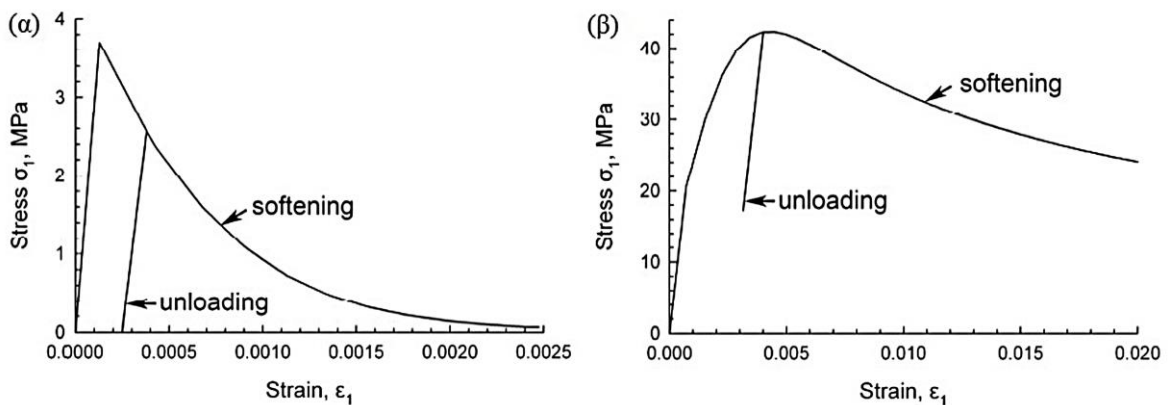
Σχήμα 2.34. Επίδραση της παραμέτρου β στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για SFRC (Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα) (Nataraja et al., 1999).

Στην παρούσα διατριβή το μοντέλο (Nataraja et al., 1999) χρησιμοποιείται για να δώσει την ολοκληρωμένη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του ινοπλισμένου

σκυροδέματος με ίνες χάλυβα. Οι παράμετροι που χρειάζονται είναι ο δείκτης οπλισμού RI , που είναι συνήθως γνωστός στην πράξη, η μέγιστη θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος f'_{cf} και η αντίστοιχη μέγιστη παραμόρφωση ε_{of} . Γνωρίζοντας τη θλιπτική αντοχή του απλού σκυροδέματος, f_c και τον δείκτη οπλισμού, RI , όλοι οι απαιτούμενοι παράγοντες της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα μπορούν να υπολογιστούν κάνοντας χρήση των προτεινόμενων εξισώσεων



Σχήμα 2.35. Σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη απλού και ινοπλισμένου σκυροδέματος βασισμένη στο μοντέλο Nataraja et al. (1999) (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2013).



Σχήμα 2.36. Σχέση τάσης-παραμόρφωσης από προσομοίωση μονοαξονικής δοκιμής (α) εφελκυσμού και (β) θλίψης, με φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση σε κυβικά δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος ($RI=2.5\%$) (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2013).

Στο Σχήμα 2.35 δίνεται η σχέση τάσης-παραμόρφωσης ενός κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος από κανονικό και ινοπλισμένο σκυρόδεμα, με βάση εκτενή πειραματικά δεδομένα και αναλυτικές εκφράσεις από τους Nataraja et al. (1999). Το κανονικό

σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τα δύο δοκίμια έχει θλιπτική αντοχή 37 MPa, ενώ το ινοπλισμένο έχει λόγο RI 2.5%. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.35, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει σημαντικά μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε σύγκριση με το κανονικό σκυρόδεμα και συνεπώς είναι δυνατόν να δεχθεί μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις χωρίς ρηγμάτωση. Αυτή η σημαντική πλαστιμότητα είναι εμφανής και στην περίπτωση της δοκιμής του εφελκυσμού. Εκτός από ίνες χάλυβα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν επίσης ίνες γυαλιού και πολυπροπυλενίου. Για την περίπτωση της ανάντη πλάκας σκυροδέματος, οι ίνες πολυπροπυλενίου έχουν τρία σημαντικά πλεονεκτήματα: μεγαλύτερη πλαστιμότητα, μεγαλύτερο λόγο υστερητικής απόσβεσης και κανένα κίνδυνο διάβρωσης. Στη παρούσα διατριβή, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει πυκνότητα $\rho=2350 \text{ kg/m}^3$, θλιπτική αντοχή ίση προς $f_c = 42 \text{ MPa}$, εφελκυστική αντοχή ίση προς $f_t = 3.7 \text{ MPa}$, μέτρο ελαστικότητας $E=29 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.2$. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δημιουργήθηκε από μίξη κανονικού σκυροδέματος με θλιπτική αντοχή $f_c = 37 \text{ MPa}$ και ινών χάλυβα που αντιστοιχούν σε δείκτη RI 2.5%. Στο Σχήμα 2.36 δίνονται οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης δύο κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος στα οποία γίνεται προσομοίωση μονοαξονικής φόρτισης κάνοντας χρήση του ανωτέρω καταστατικού προσομοιώματος. Για τη δοκιμή εφελκυσμού στο Σχήμα 2.36α, λαμβάνεται υπόψη η συσσωρευμένη βλάβη λόγω ρηγμάτωσης στην απομείωση της δυσκαμψίας, ενώ στη δοκιμή θλίψης δεν λαμβάνεται (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2013).

2.6 Καταστατικό προσομοίωμα ινοπλισμένου σκυροδέματος (Lee and Fenves, 1998).

2.6.1 Καταστατικό μοντέλο πλαστικής βλάβης για σκυρόδεμα.

Στο μοντέλο που προτάθηκε από τους Lee και Fenves (1998), το μοντέλο της πλαστικής βλάβης από τους Lubliner et al. (1989), γνωστό ως μοντέλο Barcelona, επεκτείνεται στο να συμπεριλάβει δύο μεταβλητές βλάβης, μία για εφελκυστική και μία για θλιπτική βλάβη. Οι συναρτήσεις μονοαξονικής αντοχής παραγοντοποιούνται σε δύο τμήματα για να παραστήσουν την ενεργό τάση και την υποβάθμιση της ελαστικής δυσκαμψίας. Η ελαστοπλαστική απόκριση είναι αποσυνδεδεμένη από την απόκριση της υποβάθμισης της βλάβης, οδηγώντας σε μια σχετικά απλή αριθμητική επίλυση.

Καταστατικές σχέσεις.

Στη βηματική θεωρία της πλαστικότητας, ο τανυστής παραμόρφωσης, ε , αναλύεται στο ελαστικό τμήμα, ε^e , και το πλαστικό τμήμα, ε^p , το οποίο για γραμμική ελαστικότητα δίνεται από τις εξισώσεις (Lee and Fenves, 1998):

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon^e + \varepsilon^p \\ \varepsilon^e &= E^{-1} : \sigma\end{aligned}\quad (2.30)$$

όπου η ελαστική δυσκαμψία E είναι ένας τανυστής 4^{ης} τάξης, και σ είναι ο τανυστής τάσης.

Δεδομένου ότι η ενεργός τάση ορίζεται με την αρχική ελαστική δυσκαμψία από την εξίσωση (2.30), τότε:

$$\bar{\sigma} = E_0 : (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (2.31)$$

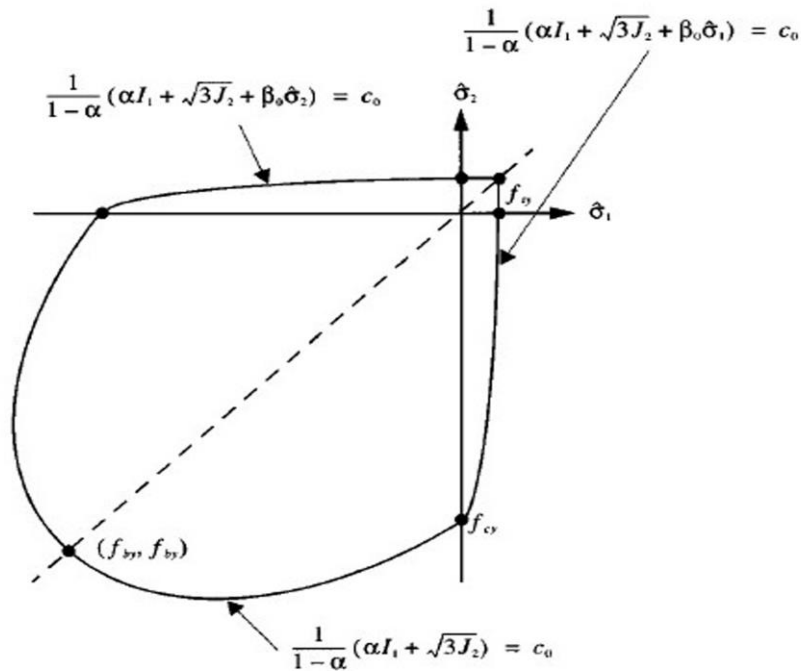
όπου E_0 είναι ο αρχικός τελεστής ελαστικής δυσκαμψίας. Η βαθμωτή υποβάθμιση βλάβης $E = (1 - D)E_0$, χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις. Ανάλογα, η τάση παραγοντοποιείται σε υποβάθμιση δυσκαμψίας και τμήματα ενεργού τάσης:

$$\begin{aligned}\sigma &= (1 - D)\bar{\sigma} \\ &= (1 - D)E_0 : (\varepsilon - \varepsilon^p)\end{aligned}\quad (2.32)$$

Το ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης εκτιμάται από τον νόμο διαρροής, το οποίο καθορίζεται από μια βαθμωτή συνάρτηση πλαστικού δυναμικού, Φ . Η πλαστική παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \nabla_{\sigma} \Phi(\bar{\sigma}) \quad (2.33)$$

όπου $\dot{\lambda}$ είναι μια μη αρνητική συνάρτηση γνωστή και ως παράμετρος πλαστικής συνέχειας.



Σχήμα 2.37. Αρχική συνάρτηση διαρροής στον επίπεδο χώρο των τάσεων (Lee and Fenves, 1998).

Το Σχήμα 2.37, απεικονίζει το αρχικό σχήμα της επιφάνειας διαρροής στον επίπεδο χώρο των τάσεων. Τα β_0 και c_0 δηλώνουν τα β και c , αντίστοιχα, στην αρχική κατάσταση που δεν έχει υποστεί βλάβη.

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, ένας μη συζευγμένος νόμος πλαστικής ροής είναι απαραίτητος για να εξακριβωθεί η κατάλληλη διασταλτικότητα που εμφανίζεται από υλικά με τριβή (Chen et al., 1988). Μια συνάρτηση του τύπου Drucker-Prager χρησιμοποιείται ως συνάρτηση πλαστικού δυναμικού:

$$\Phi = \|s\| + \alpha_p I_1 \quad (2.34)$$

όπου $I_1 = tr(\bar{\sigma})$, και $\|s\| = \sqrt{s:s}$ δηλώνει τη νόρμα της αποκλίνουσας ενεργού τάσης, s . Η παράμετρος α_p επιλέγεται για να δώσει την κατάλληλη διασταλτικότητα για το σκυρόδεμα. Το ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης υπολογίζεται από τις εξισώσεις (2.33) και (2.34):

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} \left(\frac{s}{\|s\|} + \alpha_p I \right) \quad (2.35)$$

Μια άλλη εσωτερική ομάδα μεταβλητών, πέρα από την πλαστική παραμόρφωση, χρειάζεται επιπλέον για να παραστήσουμε τις καταστάσεις βλάβης. Η μεταβλητή βλάβης, κ , θεωρείται ότι είναι η μοναδική απαραίτητη μεταβλητή κατάσταση και η εξέλιξή της εκφράζεται ως:

$$\dot{\kappa} = \dot{\lambda} H(\bar{\sigma}, \bar{\kappa}) \quad (2.36)$$

Για να μοντελοποιηθεί η κυκλική συμπεριφορά του σκυροδέματος, η οποία έχει πολύ διαφορετικές εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές διαρροής, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν δύο μεταβλητές συνοχής στη συνάρτηση διαρροής: c_t , μια μεταβλητή εφελκυστικής συνοχής, και c_c , μια μεταβλητή θλιπτικής συνοχής. Η συνάρτηση διαρροής στο μοντέλο Barcelona, η οποία περιέχει μόνο ισοτροπική κράτυνση στην γνώση της κλασσικής πλαστικότητας, τροποποιείται για να συμπεριλάβει δύο μεταβλητές συνοχής:

$$F(\bar{\sigma}, \kappa) = \frac{1}{1-\alpha} [\alpha I_1 + \sqrt{3} J_2 + \beta(\kappa) < \hat{\sigma}_{\max}] - c(\kappa) \quad (2.37)$$

όπου το $\hat{\sigma}_{\max}$ δηλώνει την αλγεβρική μέγιστη κύρια τάση, και α είναι μια παράμετρος η οποία υπολογίζεται από το αρχικό σχήμα της συνάρτησης διαρροής. Η εξέλιξη της συνάρτησης διαρροής καθορίζεται από τον καθορισμό του β , που είναι μια σταθερά στο μοντέλο Barcelona και η παράμετρος συνοχής, c , τέτοια ώστε:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{c_c(\kappa)}{c_t(\kappa)} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \\ c &= c_c(\kappa) \end{aligned} \quad (2.38)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ελαστοπλαστικό προσομοίωμα για χάλικες και λιθορριπή

3.1 Γενική περιγραφή του μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά ένα ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο ισοτροπικής κράτυνσης με μία επιφάνεια διαρροής, το οποίο έχει αναπτυχθεί στη βάση μιας ενδελεχούς ανασκόπησης κι εκτίμησης των δεδομένων από πειράματα σε υλικά με τριβή όπως άμμο, άργιλο, σκυρόδεμα και βράχο (Kim et al., 1988; Lade et al., 1988a,b). Συγκεκριμένα, πρόκειται για το ελαστοπλαστικό μοντέλο των Lade et al. (2002), το οποίο στην παρούσα διατριβή βελτιώνεται με την εφαρμογή ενός εργαλείου βαθμίδας πλαστικότητας (Bassani, 2001) και στην συνέχεια ενσωματώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2014). Η ενσωμάτωση γίνεται με την βοήθεια μίας υπορουτίνας για ενσωμάτωση καταστατικών σχέσεων υλικών που καθορίζεται από το χρήστη.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί μία ισοτροπική επιφάνεια διαρροής με σχήμα που προσομοιάζει ως μια ασύμμετρη σταγόνα από δάκρυ με τη σημειακή κορυφή στην αρχή του χώρου των κυρίων τάσεων. Αυτή η επιφάνεια διαρροής, διατυπωμένη σε όρους αναλλοίωτων τάσεων, περιγράφει το γεωμετρικό τόπο στον οποίο το συνολικό πλαστικό έργο είναι σταθερό. Το συνολικό πλαστικό έργο (το οποίο οφείλεται σε διατμητικές παραμορφώσεις όπως επίσης και σε ογκομετρικές παραμορφώσεις) χρησιμεύει ως παράμετρος κράτυνσης και χρησιμοποιείται για να ορίσει τη θέση και το σχήμα των επιφανειών διαρροής. Η εφαρμογή μίας μοναδικής επιφάνειας διαρροής αυξάνει την υπολογιστική ταχύτητα, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές μεγάλων υπολογιστικών προβλημάτων με δεκάδες χιλιάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες στοιχεία, όπως στην περίπτωση μεγάλων φραγμάτων. Ο μη συζευγμένος νόμος ροής εκφράζει την πραγματική συμπεριφορά κοκκωδών εδαφικών υλικών και βασίζεται σε μια συνάρτηση πλαστικού δυναμικού, η οποία έχει σχήμα που προσομοιάζει με ένα πούρο με μια ασύμμετρη διατομή (Lade et al., 2002).

Το μοντέλο έχει διαμορφωθεί ώστε η μετάβαση από κράτυνση σε χαλάρωση να εμφανίζεται απότομα στο σημείο μέγιστης αντοχής. Έτσι, η μετάβαση δεν συμπεριλαμβάνει σημεία στα οποία το μέτρο κράτυνσης να είναι μηδέν, ο δε ρυθμός χαλάρωσης μπορεί να ελεγχθεί. Η συνολική μεταβολή της παραμόρφωσης που παρατηρείται σε ένα υλικό όταν φορτίζεται, διακρίνεται στο ελαστικό και στο πλαστικό τμήμα ως εξής:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (3.1)$$

Οι ελαστικές παραμορφώσεις υπολογίζονται από το Νόμο του Hooke, και οι πλαστικές παραμορφώσεις από έναν πλαστικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων. Και οι δύο εκφράζονται σε όρους των ενεργών τάσεων (Lade et al., 2002).

3.2 Ελαστική συμπεριφορά.

Οι μεταβολές των ελαστικών παραμορφώσεων, οι οποίες αποδίδονται κατά την αποφόρτιση, υπολογίζονται από το νόμο του Hooke, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο για τη μη-γραμμική μεταβολή του μέτρου του Young με κατάσταση τάσεων (Lade et al., 1987). Η τιμή του λόγου Poisson, ν , η οποία περιορίζεται ανάμεσα στο 0.15 και 0.5 για τα περισσότερα εδαφικά υλικά, θεωρείται ότι είναι σταθερή. Η διατύπωση για το μέτρο του Young προήλθε από θεωρητικές εκτιμήσεις βασισμένες στην αρχή διατήρησης της ενέργειας. Το μέτρο του Young E , μπορεί να εκφραστεί με ένα νόμο δύναμης, ο οποίος συμπεριλαμβάνει αδιάστατες σταθερές υλικού και αναλλοίωτες τάσεων ως εξής:

$$E = Mp_a \left[\left(\frac{I_1}{p_a} \right)^2 + 6 \left(\frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \right) \frac{J'_2}{p_a^2} \right]^\lambda \quad (3.2)$$

όπου I_1 είναι η πρώτη αναλλοίωτη του τανυστή τάσεων και J'_2 είναι η δεύτερη αναλλοίωτη του αποκλίνοντα τανυστή τάσεων, οι οποίες δίνονται ως εξής:

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (3.3)$$

$$J'_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 \quad (3.4)$$

Η παράμετρος p_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση, η οποία εκφράζεται με τις ίδιες μονάδες όπως οι E , I_1 και $\sqrt{J'_2}$, ενώ ο αριθμός μέτρου M και ο εκθέτης λ είναι σταθεροί, αδιάστατοι αριθμοί. Οι τρεις παράμετροι υλικού ν , M , και λ μπορούν να ληφθούν από απλές δοκιμές

όπως οι τριαξονικές θλιπτικές δοκιμές. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υλικά με ενεργό συνοχή (Lade et al., 2002).

3.3 Κριτήριο αστοχίας.

Ένα γενικό, τριών διαστάσεων κριτήριο αστοχίας έχει αναπτυχθεί για εδάφη, σκυρόδεμα και βράχο (Kim et al., 1984; Lade, 1993, 1984, 1982, 1977). Το κριτήριο εκφράζεται αναφορικά με την πρώτη και τρίτη αναλλοίωτη τάσεων του τανυστή τάσης ως εξής:

$$f_n = \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^m \quad (3.5\alpha)$$

$$f_n = n_1 \text{ στην αστοχία} \quad (3.5\beta)$$

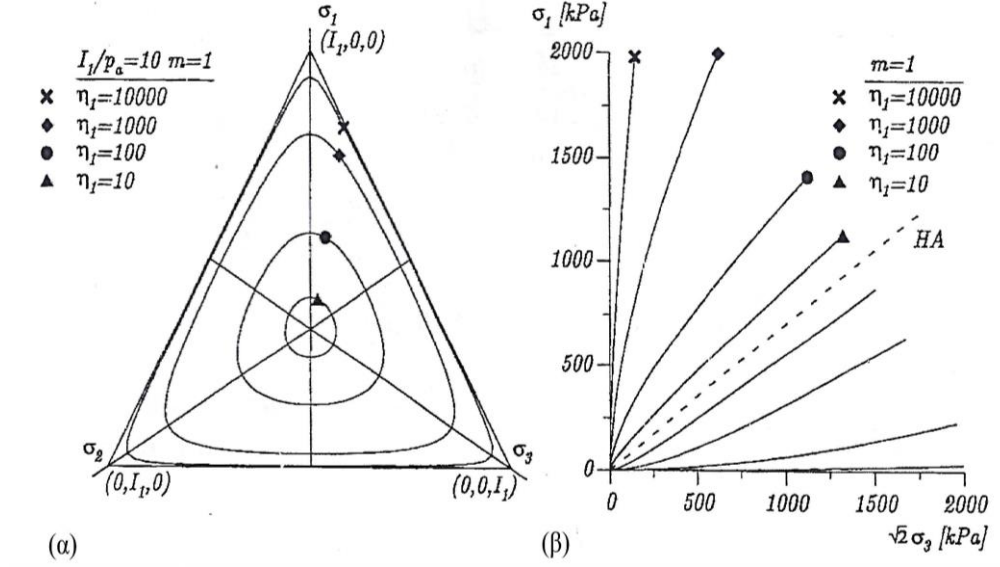
όπου το I_1 δίνεται στην εξίσωση (3.3) και

$$I_3 = \sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{12}\sigma_{23}\sigma_{31} + \sigma_{21}\sigma_{32}\sigma_{13} - (\sigma_{11}\sigma_{23}\sigma_{32} + \sigma_{22}\sigma_{31}\sigma_{13} + \sigma_{33}\sigma_{12}\sigma_{21}) \quad (3.6)$$

Οι παράμετροι n_1 και m είναι σταθεροί αδιάστατοι αριθμοί. Το Σχήμα 3.1 δείχνει ότι στο χώρο των κυρίων τάσεων, το κριτήριο αστοχίας είναι σχηματισμένο ως μια ασύμμετρη σφαίρα με τη σημειακή κορυφή στην αρχή των αξόνων των τάσεων, και το σχήμα της διατομής στο οκταεδρικό επίπεδο είναι τριγωνικό με ομαλά στρογγυλοποιημένες άκρες. Προκειμένου να συμπεριληφθεί η ενεργός συνοχή και ο εφελκυσμός, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκυρόδεμα και βράχο, παρουσιάζεται μια μετακίνηση του χώρου των κυρίων τάσεων κατά μήκος του υδροστατικού άξονα (Kim et al., 1984; Lade, 1993, 1984, 1982). Έτσι, μια σταθερή τάση, ap_a , προστίθεται στις ορθές τάσεις πριν να αντικατασταθεί στην εξίσωση (3.5):

$$\sigma = \sigma + \delta ap_a \quad (3.7)$$

όπου a είναι μια αδιάστατη παράμετρος και δ είναι το δέλτα του Kronecker. Η τιμή του ap_a αντανακλά την επίδραση της εφελκυστικής αντοχής του υλικού. Οι τρεις παράμετροι υλικού, n_1 , m , και a , μπορούν να προσδιοριστούν από αποτελέσματα απλών δοκιμών όπως οι τριαξονικές θλιπτικές δοκιμές (Lade et al., 2002).



Σχήμα 3.1. Χαρακτηριστικά του κριτηρίου αστοχίας στο χώρο των κυρίων τάσεων: οι τροχιές παρουσιάζονται (α) σε οκταεδρικό επίπεδο, και (β) σε τριαξονικό επίπεδο (Lade et al., 2002).

3.4 Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού και νόμος διαρροής.

Οι πλαστικές μεταβολές των παραμορφώσεων υπολογίζονται από το νόμο διαρροής:

$$d\varepsilon^p = d\lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma} \quad (3.8)$$

όπου g_p είναι μια συνάρτηση πλαστικού δυναμικού και $d\lambda_p$ είναι ένας συντελεστής αναλογίας. Μια κατάλληλη συνάρτηση πλαστικού δυναμικού για υλικά με τριβή αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε από τους Kim και Lade (1988). Αυτή η συνάρτηση είναι διαφορετική από τη συνάρτηση διαρροής και επομένως η πλαστική ροή ακολουθεί μη συζευγμένο νόμο. Η συνάρτηση πλαστικού δυναμικού γράφεται αναφορικά με τις τρεις αναλλοίωτες του τανυστή τάσεων ως εξής:

$$g_p = \left(\psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} + \psi_2 \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^\mu \quad (3.9)$$

όπου οι I_1 και I_3 δίνονται στις εξισώσεις (3.3) και (3.6) και η δεύτερη αναλλοίωτη τάσης ορίζεται ως εξής:

$$I_2 = \sigma_{12}\sigma_{21} + \sigma_{23}\sigma_{32} + \sigma_{31}\sigma_{13} - (\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{33}\sigma_{11}) \quad (3.10)$$

Οι παράμετροι υλικού ψ_2 και μ είναι αδιάστατες σταθερές οι οποίες μπορούν να καθοριστούν από τριαξονικές θλιπτικές δοκιμές. Η παράμετρος ψ_1 σχετίζεται με την παράμετρο καμπυλότητας m του κριτηρίου αστοχίας ως εξής:

$$\psi_1 = 0.00155m^{-1.27} \quad (3.11)$$

Η παράμετρος ψ_1 δρα ως ένας παράγοντας στάθμισης ανάμεσα στο τριγωνικό σχήμα (από τον όρο I_3) και το κυκλικό σχήμα (από τον όρο I_2). Η παράμετρος ψ_2 , ελέγχει την τομή με τον υδροστατικό άξονα, και ο εκθέτης μ καθορίζει την καμπυλότητα των μεσημβρινών. Οι αντίστοιχες επιφάνειες πλαστικού δυναμικού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2. Σχηματίζονται ως ασύμμετρα πούρα με παρόμοιες ομαλά στρογγυλοποιημένες τριγωνικές διατομές, αλλά όχι ταυτόσημες με εκείνες για τις επιφάνειες αστοχίας (Lade et al., 2002).

3.5 Κριτήριο διαρροής και σχέσεις έργου κράτυνσης/χαλάρωσης.

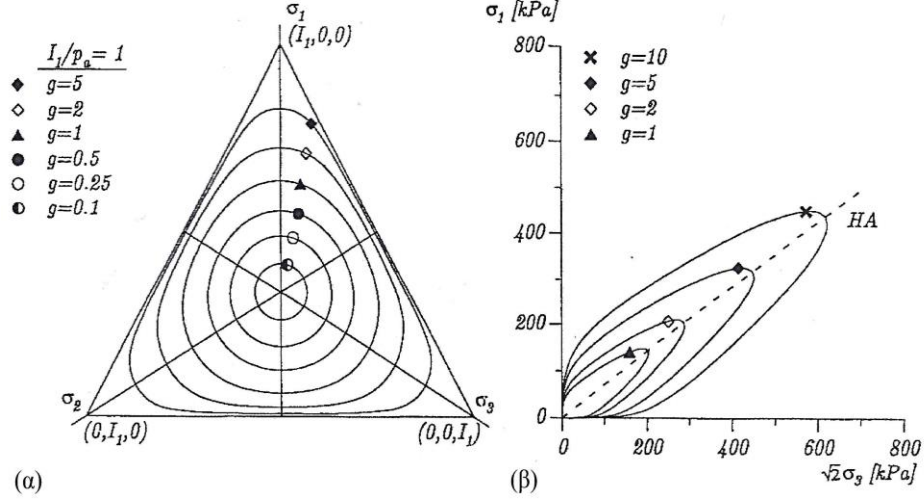
Οι επιφάνειες διαρροής είναι στενά συνδεδεμένες και προέρχονται από επιφάνειες σταθερού πλαστικού έργου (Lade και Kim, 1988a). Η ισοτροπική συνάρτηση διαρροής διατυπώνεται ως εξής:

$$f_p = f'_p(\sigma) - f''_p(W_p) = 0 \quad (3.12)$$

όπου

$$f'_p = \left(\psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^h e^q \quad (3.13)$$

Το h είναι μια σταθερά ενώ το q μεταβάλλεται από μηδέν στον υδροστατικό άξονα σε μονάδα στην επιφάνεια αστοχίας. Οι εκφράσεις για I_1 , I_2 , και I_3 στην εξίσωση (3.13), δίνονται στις εξισώσεις (3.3), (3.10) και (3.6), αντίστοιχα. Η παράμετρος ψ_1 δρα ως ένας παράγοντας στάθμισης ανάμεσα στο τριγωνικό σχήμα (από τον όρο I_3) και το κυκλικό σχήμα (από τον όρο I_2), όπως στην έκφραση για το πλαστικό δυναμικό (3.9).



Σχήμα 3.2. Χαρακτηριστικά της συνάρτησης πλαστικού δυναμικού στο χώρο των κυρίων τάσεων: οι τροχιές παρουσιάζονται (α) σε οκταεδρικό επίπεδο, και (β) σε τριαξονικό επίπεδο (Lade et al., 2002).

Η τιμή του q ποικίλει με επίπεδο τάσεων S ορισμένο ως εξής:

$$S = \frac{f_n}{n_1} = \frac{1}{n_1} \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^m \quad (3.14)$$

όπου f_n είναι η έκφραση για το κριτήριο αστοχίας στην εξίσωση (3.5α) και n_1 είναι η τιμή του f_n στην αστοχία, η οποία δίνεται στην εξίσωση (3.5β). Το επίπεδο τάσεων S μεταβάλλεται από μηδέν στον υδροστατικό άξονα έως μονάδα στην επιφάνεια αστοχίας. Η διακύμανση του q με το S εκφράζεται ως εξής:

$$q = \frac{aS}{1 - (1 - a)S} \quad (3.15)$$

όπου a είναι μια σταθερά. Για κράτυνση, η επιφάνεια διαρροής διογκώνεται ισотροπικά με πλαστικό έργο σύμφωνα με την εξίσωση:

$$f''_p = \left(\frac{1}{D} \right)^{1/\rho} \left(\frac{W_p}{p_a} \right)^{1/\rho} \quad (3.16)$$

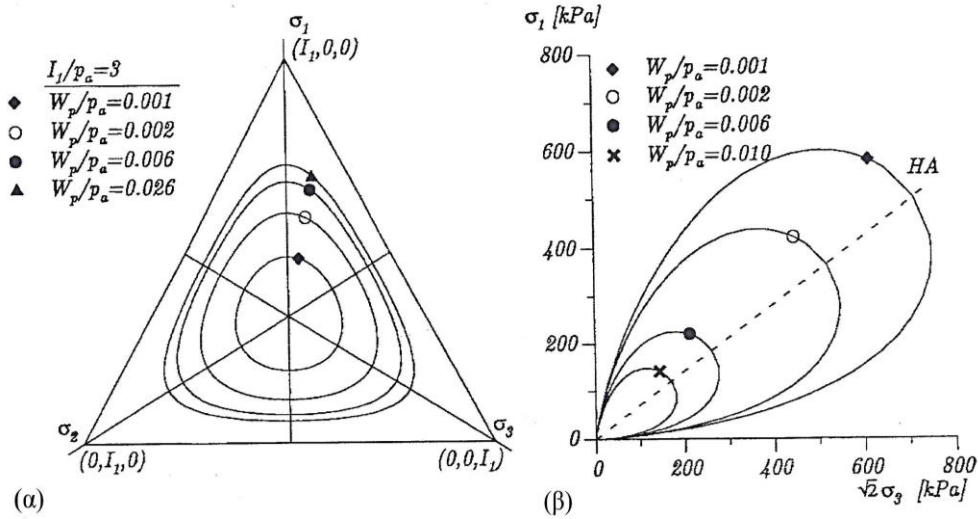
Στην εξίσωση (3.16) οι τιμές του ρ και D είναι σταθερές για ένα δεδομένο υλικό. Έτσι, η f''_p μεταβάλλεται με το πλαστικό έργο μόνο. Οι τιμές των D και ρ δίνονται από τους τύπους:

$$D = \frac{C}{(27\psi_1 + 3)^\rho} \quad (3.17)$$

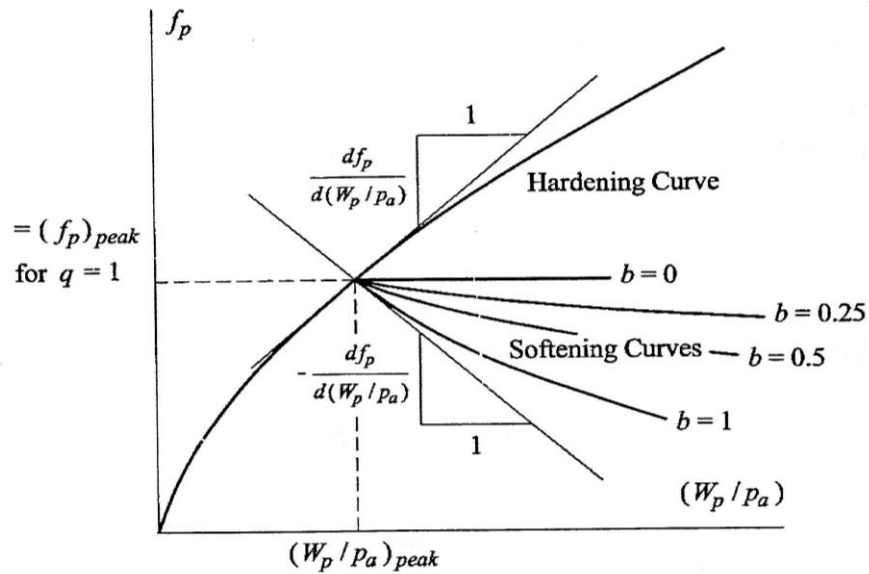
$$\rho = \frac{p}{h} \quad (3.18)$$

Οι παράμετροι C και p στην εξίσωση (3.17) χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν το πλαστικό έργο κατά τη διάρκεια ισοτροπικής θλίψης:

$$W_p = C p_a \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^p \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.3. Χαρακτηριστικά της συνάρτησης διαρροής στο χώρο των κυρίων τάσεων: οι τροχιές παρουσιάζονται (α) σε οκταεδρικό επίπεδο, και (β) σε τριαξονικό επίπεδο (Lade et al., 2002).



Σχήμα 3.4. Μοντελοποίηση του έργου κράτυνσης και χαλάρωσης (Lade et al., 2002).

Οι επιφάνειες διαρροής σχηματίζονται ως ασύμμετρες σταγόνες δακρύων με ομαλά στρογγυλοποιημένες τριγωνικές διατομές και τροχιές στο τριαξονικό επίπεδο, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.3. Καθώς το πλαστικό έργο αυξάνει, η ισοτροπική επιφάνεια διαρροής διογκώνεται μέχρι το τρέχον σημείο τάσεων να φτάσει την επιφάνεια αστοχίας. Η σχέση ανάμεσα στα f''_p και W_p περιγράφεται από μια μονοτονική αυξητική συνάρτηση της οποίας η κλίση μειώνεται με αυξανόμενο πλαστικό έργο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Για χαλάρωση, η επιφάνεια διαρροής μειώνεται ισοτροπικά σύμφωνα με μια εκθετική συνάρτηση απόσβεσης:

$$f''_p = Ae^{-BW_p/p_a} \quad (3.20)$$

όπου A και B είναι θετικές σταθερές, οι οποίες καθορίζονται με βάση την κλίση της καμπύλης κράτυνσης στο σημείο της κορυφής αστοχίας, $S=1$, όπως υποδηλώνεται και στο Σχήμα 3.4. Έτσι:

$$A = [f''_p e^{BW_p/p_a}]_{S=1} \quad (3.21)$$

και

$$B = \left[b \frac{df''_p}{d\left(\frac{W_p}{p_a}\right)} \frac{1}{f''_p} \right]_{S=1} \quad (3.22)$$

όπου το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής f''_p και η παράγωγος $df''_p/d(W_p/p_a)$ λαμβάνονται από την καμπύλη κράτυνσης στην κορυφή της αστοχίας για $S=1$. Η τιμή της df''_p είναι αρνητική κατά τη διάρκεια της χαλάρωσης. Η παράμετρος b είναι μεγαλύτερη ή ίση με το μηδέν, όπου το χαμηλότερο όριο αντιστοιχεί σε εκείνο ενός τέλει πλαστικού υλικού. Χρησιμοποιώντας την έκφραση για το πλαστικό δυναμικό στην εξίσωση (3.9), η σχέση ανάμεσα στη μεταβολή του πλαστικού έργου και το συντελεστή αναλογίας $d\lambda_p$ στην εξίσωση (3.8) μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$d\lambda_p = \frac{dW_p}{\mu g_p} \quad (3.23)$$

όπου η μεταβολή του πλαστικού έργου μπορεί να καθοριστεί από τη διαφορά των εξισώσεων κράτυνσης και χαλάρωσης. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.21) και (3.22) με τη σχέση (3.23) και αντικαθιστώντας αυτή στη σχέση (3.8) παράγεται η έκφραση για τα στοιχειώδη βήματα των πλαστικών παραμορφώσεων (Lade et al., 2002).

3.6 Υλικά με ενεργό συνοχή.

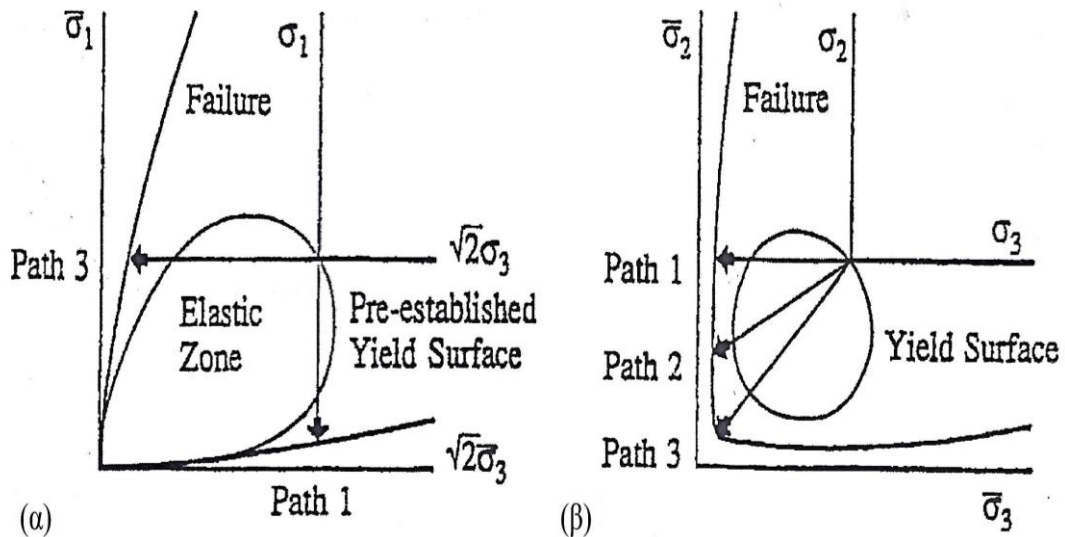
Όπως επεξηγήθηκε και σε συνδυασμό με το κριτήριο αστοχίας, είναι δυνατόν να συμπεριληφθεί η ενεργός συνοχή και αντοχή σε εφελκυσμό, όπως στην περίπτωση σκυροδέματος και βράχου. Αυτό γίνεται μετατοπίζοντας το σύστημα συντεταγμένων στο χώρο των κυρίων τάσεων κατά μήκος του υδροστατικού άξονα π.χ. προσθέτοντας μια σταθερή τάση σε μια ορθή τάση, όπως στην εξίσωση (3.7), πριν την αντικατάσταση στο κριτήριο αστοχίας στην εξίσωση (3.5) (Lade et al., 2002).

Μια παρόμοια τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί για την κατανομή του μέτρου ελαστικότητας (Lade et al., 1987), το πλαστικό δυναμικό (Kim et al., 1988), το κριτήριο διαρροής και το έργο του νόμου χαλάρωσης/κράτνυσης (Lade et al., 1988a). Ασυνέπειες στην πλαστική συμπεριφορά των υλικών με ενεργό συνοχή έχουν ξεπεραστεί με την παραδοχή ότι εκεί υπάρχει μια αρχική επιφάνεια διαρροής, η οποία διέρχεται από την αρχή του πραγματικού χώρου τάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Αυτό συνεπάγεται ότι μόνο ελαστικές παραμορφώσεις συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μεγάλων τμημάτων εφελκυστικού τύπου δοκιμών, στα οποία τα κυρίως τμήματα των τασικών οδεύσεων τοποθετούνται μέσα στην επιφάνεια διαρροής. Έτσι, οι τάσεις που εφαρμόστηκαν κατά μήκος των τασικών οδεύσεων, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 3.5, δεν παράγουν πλαστικές παραμορφώσεις μέχρι να είναι κοντά στην αστοχία. Η ύπαρξη μιας αρχικής επιφάνειας διαρροής εμφανίζεται να προσομοιώνει πειραματικές παρατηρήσεις με καλή ακρίβεια. Η τεχνική της παρουσίασης όλων των υπολογισμών στον μετατοπισμένο χώρο τάσεων παρέχει ένα άνετο εργαλείο για μαθηματική αντιμετώπιση συνεκτικών υλικών. Ακολουθώντας όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς, οι τάσεις τροποποιούνται ξανά για να διατηρήσουν συμβατική φυσική έννοια. Για υλικά μη συνεκτικά στα οποία το α είναι μηδέν, οι υπολογισμοί παρουσιάζονται στον αρχικό χώρο τάσεων (Lade et al., 2002).

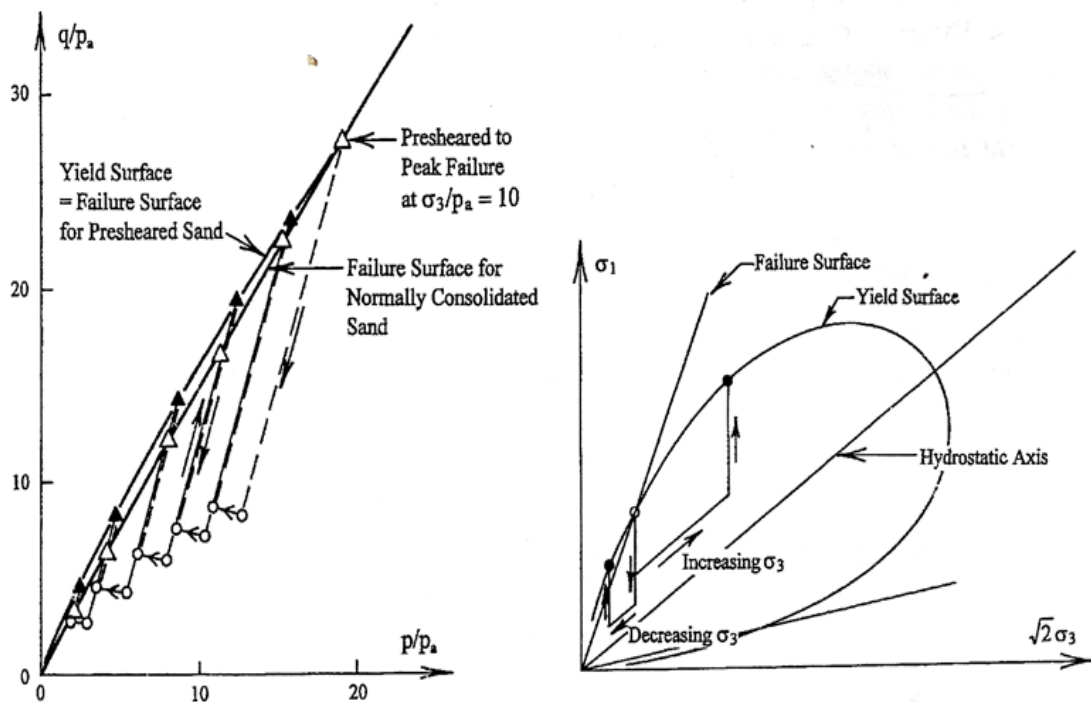
3.7 Αποτελέσματα προφόρτισης με διάτμηση και υπερστερεοποίησης.

Μια πειραματική έρευνα της συμπεριφοράς της άμμου κοντά στην αστοχία διεξήχθη από τους Lade και Prabucki (1995) για να μελετηθεί το σχήμα, η τοποθεσία και η μετακίνηση της πλαστικής επιφάνειας διαρροής στο καθεστώς κράτνυσης και στο καθεστώς χαλάρωσης κοντά στη κορυφή αστοχίας. Η έρευνα επιβεβαίωσε ότι η επιφάνεια διαρροής, ορισμένη ως ένα περίγραμμα σταθερού πλαστικού έργου, καθώς μετρήθηκε από την αρχή των τάσεων, προσομοιώνει τη συμπεριφορά του εδάφους με καλή ακρίβεια υπό καθεστώς κράτνυσης και χαλάρωσης. Βρέθηκε ότι η προφόρτιση με διάτμηση στην κορυφή αστοχίας παρήγαγε αποτελέσματα παρόμοια με την υπερστερεοποίηση που

παρατηρήθηκε σε αργίλους στην περιοχή των χαμηλότερων θλιπτικών πιέσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Η παρατηρούμενη διαρροή προσομοιώθηκε με ακρίβεια από το κριτήριο διαρροής που χρησιμοποιήθηκε στο καταστατικό μοντέλο κράτυνσης με μία επιφάνεια διαρροής (Lade et al., 2002).



Σχήμα 3.5. Διαξονικές τασικές οδεύσεις για σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκαν από τους Kupfer et al. (1969) και θεωρήθηκε αρχική επιφάνεια διαρροής σε (α) τριαξονικό επίπεδο, και σε (β) διαξονικό επίπεδο.



Σχήμα 3.6. Αποτελέσματα προφόρτισης με διάτμηση και υπερστερεοποίησης στην επιφάνεια αστοχίας για εδάφη (Lade et al., 2002).

Οι παράμετροι υλικού που εξαρτώνται πρέπει να βαθμονομηθούν σε αποτελέσματα ισοτροπικών και τριαξονικών θλιπτικών δοκιμών, όπως συνιστάται από τους Lade (1977), Kim και Lade (1988), Lade και Kim (1988a,b).

3.8 Βηματικός τύπος καταστατικού μοντέλου.

3.8.1 Ελαστοπλαστικό μητρώο δυσκαμψίας για το μοντέλο κράτνωσης με μία επιφάνεια διαρροής.

Η εφαρμογή ενός ελαστοπλαστικού μοντέλου σε μια διαδικασία πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί έναν βηματικό τύπο ολοκλήρωσης στον οποίο οι μεταβολές των τάσεων εκφράζονται αναφορικά με τις συνολικές μεταβολές των παραμορφώσεων, ως εξής (Lade et al., 2002):

$$d\sigma = C^{ep} d\varepsilon = (C^e - C^p) d\varepsilon \quad (3.24)$$

όπου C^{ep} είναι το ελαστοπλαστικό μητρώο δυσκαμψίας. Αυτό βρίσκεται μέσω μιας σταδιακής διαδικασίας όπως περιγράφεται από π.χ. τους Zienkiewicz και Taylor (1991), Smith και Griffiths (1988), Chen και Mizuno (1990), Lade και Nelson (1984). Μετά από υπολογισμό του πλαστικού μητρώου δυσκαμψίας η ανωτέρω σχέση γράφεται ως:

$$d\sigma = \left[C^e - \frac{C^e \left(\frac{\partial g_p}{\partial \sigma} \right) \left(\frac{\partial f_p}{\partial \sigma} \right)^T C^e}{\left(\frac{\partial f_p}{\partial \sigma} \right)^T C^e \left(\frac{\partial g_p}{\partial \sigma} \right) + H} \right] d\varepsilon \quad (3.25)$$

Ο όρος στις αγκύλες είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας, C^{ep} , για ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο με μία επιφάνεια διαρροής. Αν το σημείο τάσης είναι στο ελαστικό πεδίο ορισμού, τότε η πλαστική δυσκαμψία, C^p στην εξίσωση (3.24) παραλείπεται, και τα C^{ep} και C^e γίνονται ταυτόσημα. Έχει επισημανθεί ότι το C^p και ως εκ τούτου το C^{ep} είναι ασύμμετρα για μη συζευγμένο νόμο πλαστικής ροής. Ο συντελεστής αναλογίας $d\lambda_p$ στην εξίσωση (3.25):

$$d\lambda_p = \frac{C^e \left(\frac{\partial f_p}{\partial \sigma} \right)^T}{\left(\frac{\partial f_p}{\partial \sigma} \right)^T C^e \left(\frac{\partial g_p}{\partial \sigma} \right) + H} d\varepsilon \quad (3.26)$$

εκφράζεται αναφορικά με τη συνολική μεταβολή παραμόρφωσης στο σχήμα ολοκλήρωσης.

3.8.2 Ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας.

Στην εξίσωση (3.25) το C^e είναι το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας, το οποίο ορίζεται ως εξής (Lade et al., 2002):

$$C^e = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

όπου το μέτρο του Young E δίνεται από την εξίσωση (3.2) και ο λόγος Poisson ν είναι σταθερός.

3.8.3 Παράγωγοι του πλαστικού δυναμικού.

Η συνάρτηση πλαστικού δυναμικού, g_p , δίνεται στην εξίσωση (3.9). Από τότε που η συνάρτηση πλαστικού δυναμικού εκφράζεται με όρους αναλλοίωτων τάσεων, οι παράγωγοι του g_p όσον αφορά τις τάσεις μπορούν να βρεθούν ως εξής (Lade et al., 2002):

$$\frac{\partial g_p}{\partial \sigma} = \frac{\partial g_p}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \sigma} + \frac{\partial g_p}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \sigma} + \frac{\partial g_p}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \sigma} \quad (3.28)$$

στην οποία

$$\frac{\partial g_p}{\partial I_1} = \left(\psi_1(\mu + 3) \frac{I_1^2}{I_3} - (\mu + 2) \frac{I_1}{I_2} + \frac{\mu \psi_2}{I_1} \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^\mu \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial g_p}{\partial I_2} = \frac{I_1^2}{I_2^2} \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^\mu \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial g_p}{\partial I_3} = -\psi_1 \frac{I_1^3}{I_3^2} \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^\mu \quad (3.31)$$

και οι παράγωγοι των αναλλοίωτων τάσεων σε σχέση με τις τάσεις είναι:

$$\frac{\partial I_1}{\partial \sigma} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial I_2}{\partial \sigma} = \begin{bmatrix} -(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ -(\sigma_{33} + \sigma_{11}) \\ -(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \\ 2\sigma_{23} \\ 2\sigma_{31} \\ 2\sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial I_3}{\partial \sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{22}\sigma_{33} - \sigma_{23}^2 \\ \sigma_{33}\sigma_{11} - \sigma_{31}^2 \\ \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2 \\ 2(\sigma_{12}\sigma_{31} - \sigma_{11}\sigma_{23}) \\ 2(\sigma_{23}\sigma_{12} - \sigma_{22}\sigma_{31}) \\ 2(\sigma_{31}\sigma_{23} - \sigma_{33}\sigma_{12}) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

3.8.4 Παράγωγοι της συνάρτησης διαρροής.

Η συνάρτηση διαρροής, f'_p , δίνεται στην εξίσωση (3.13). Χρησιμοποιώντας τον παρακάτω κανόνα, οι παράγωγοι της συνάρτησης διαρροής μπορούν να διατυπωθούν ως εξής (Lade et al., 2002):

$$\frac{\partial f'_p}{\partial \sigma} = \frac{\partial f'_p}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \sigma} + \frac{\partial f'_p}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \sigma} + \frac{\partial f'_p}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \sigma} \quad (3.35)$$

όπου οι παράγωγοι των αναλλοίωτων των τάσεων δίνονται στις εξισώσεις (3.32) – (3.34).

Οι παράγωγοι του f'_p σε σχέση με τις αναλλοίωτες των τάσεων είναι:

$$\frac{\partial f'_p}{\partial I_1} = \left(\frac{3+h}{I_1} + \frac{\partial q}{\partial I_1} \right) f'_p + \frac{I_1}{I_2} \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^h e^q \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial f'_p}{\partial I_2} = \frac{I_1^2}{I_2^2} \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^h e^q \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial f'_p}{\partial I_3} = f'_p \frac{\partial q}{\partial I_3} - \psi_1 \frac{I_1^3}{I_2^3} \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^h e^q \quad (3.38)$$

Υπενθυμίζεται ότι ο εκθέτης q ποικίλει με το πραγματικό επίπεδο τάσεων όπως ορίζεται από τις εξισώσεις (3.14) και (3.15). Οι παράγωγοι του q σε σχέση με τις αναλλοίωτες των τάσεων είναι:

$$\frac{\partial q}{\partial I_1} = \frac{a}{\eta_1(1 - (1 - a)S)^2} \left(\frac{mS\eta_1}{I_1} + \frac{3I_1^2}{I_3} \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^m \right) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial q}{\partial I_3} = -\frac{a}{\eta_1(1 - (1 - a)S)^2} \frac{I_1^3}{I_3^2} \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^m \quad (3.40)$$

3.8.5 Μέτρο κράτνσης.

Το μέτρο κράτνσης δίδεται από τη σχέση (Lade et al., 2002):

$$H = -\frac{\partial f''_p}{\partial W_p} \sigma \frac{\partial g_p}{\partial \sigma} = -\frac{\partial f''_p}{\partial W_p} \mu g \quad (3.41)$$

Η παράγωγος της συνάρτησης διαρροής σε σχέση με το πλαστικό έργο εξαρτάται από το ιστορικό των τάσεων. Οι παράγωγοι καθορίζονται για τις σχέσεις κράτνσης και χαλάρωσης στις εξισώσεις (3.16) και (3.20) ως ακολούθως (Lade et al., 2002):

Για κράτνση:

$$\frac{\partial f_p}{\partial W_p} = \frac{\partial f''_p}{\partial W_p} = \frac{1}{\rho(Dp_a)^{1/\rho}} W_p^{\frac{1}{\rho}-1} \quad (3.42)$$

Για χαλάρωση:

$$\frac{\partial f_p}{\partial W_p} = \frac{\partial f''_p}{\partial W_p} = -\frac{AB}{p_a} e^{-BW_p/p_a} \quad (3.43)$$

Επομένως, οι παραπάνω εκφράσεις αντιπροσωπεύουν το βηματικό τύπο του μοντέλου κράτνσης Lade, με μία επιφάνεια διαρροής και συγκροτούν τις βασικές εκφράσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή για την επίλυση ενός μοντέλου υλικών που καθορίζεται από το χρήστη.

3.9 Βαθμίδα πλαστικότητας.

3.9.1 Γενικά.

Σε πεπερασμένες παραμορφώσεις συνεχούς μέσου, όπως αναφέρεται από τον Bassani (2001), καθώς το υλικό υφίσταται ελαστοπλαστική παραμόρφωση, το υποκείμενο πλέγμα, το οποίο καθορίζει γεωμετρικές παραμέτρους που εισάγουν οι καταστατικές εξισώσεις, θεωρείται ότι παραμορφώνεται μόνο ελαστικά. Αυτή είναι μια προσέγγιση στο γεγονός ότι σε ατομική κλίμακα το πλέγμα παραμορφώνεται ελαστικά εκτός από τον

πυρήνα των εξαρμώσεων. Γενικά, η ελαστική παραμόρφωση από μόνη της δεν είναι συμβατή με μια κανονική μετατόπιση πεδίου, και μπορεί να επηρεάσει έντονα την πλαστική διαρροή. Ασυμβατότητα παραμόρφωσης πλέγματος σημαίνει την παρουσία γεωμετρικών εξαρμώσεων. Διαπιστώνεται ότι στη θεωρία του συνεχούς, μόνο η συνολική παραμόρφωση απαιτείται να είναι συμβατή με μία μόνο τιμή μετατόπισης πεδίου. Η ασυμβατότητα του πλέγματος χαρακτηρίζεται από κάποια ιδιότητα της βαθμίδας του πεδίου της ελαστικής παραμόρφωσης, και αυτή η εσωτερική κλίμακα μήκους της ασυμβατότητας μπορεί να παίζει ένα φυσικό ρόλο σε μια θεωρία βαθμίδας της κρυσταλλικής πλαστικότητας. Αυτό το μέτρο έχει διάσταση του l/μ και, ως εκ τούτου, μια εσωτερική κλίμακα μήκους υλικού πρέπει να εισάγει καταστατικές εξισώσεις που εξαρτώνται από την ασυμβατότητα πλέγματος ή τη φυσική τους εκδήλωση, σχετικά με την παρουσία των γεωμετρικών εξαρμώσεων (Bassani, 2001). Η χρήση ενός τέτοιου εργαλείου βαθμίδας πλαστικότητας, το οποίο βασίζεται στη θεωρία μικρών παραμορφώσεων, στην κρυσταλλική πλαστικότητα και σύνθετη κράτυνση (Bassani, 2001) εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή, για τη βελτίωση του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος των Lade et al. (2002).

3.9.2 Θεωρία μικρών παραμορφώσεων.

Στην απλή θεωρία που προτάθηκε από τους Acharya και Bassani (2000, 1996, 1995) μια συγκεκριμένη βαθμίδα παραμόρφωσης, η οποία είναι ένα μέτρο ελαστικής (ή πλαστικής) ασυμβατότητας, εισάγει τους νόμους διαρροής μόνο μέσω στιγμιαίου ρυθμού κράτυνσης. Συνεπώς, αυτή η απλή θεωρία διατηρεί την κλασσική δομή των βηματικών προβλημάτων συνοριακών τιμών (Hill, 1958) και δεν απαιτεί ανώτερης τάξης τάσεις ή επιπρόσθετες συνοριακές συνθήκες.

Η βασική ιδέα είναι ότι η ελαστική παραμόρφωση του πλέγματος δεν είναι, γενικά, συμβατή με μια κανονική παραμόρφωση, π.χ. αυτή που προέρχεται από μια συνεχή διαφορίσιμη μετατόπιση πεδίου. Από την άλλη πλευρά, η ελαστική παραμόρφωση είναι ικανή να αναπαραστήσει τις «γεωμετρικώς αναγκαίες» εξαρμώσεις (Nye, 1953). Η απλή θεωρία, όπως παρουσιάζεται από το Bassani (2001), βασίζεται στην υπόθεση ότι αυτή η ασυμβατότητα πλέγματος επηρεάζει κατευθείαν τη συμπεριφορά κράτυνσης. Αφού αυτή η ασυμβατότητα χαρακτηρίζεται ουσιαστικά από μια βαθμίδα ελαστικών (ή πλαστικών) πεδίων παραμόρφωσης, όταν ενσωματώνεται μια κλίμακα στην κράτυνση θα πρέπει να είναι με διαστάσεις μήκους.

Η συνολική βαθμίδα μετατόπισης είναι το άθροισμα των ελαστικών και πλαστικών τμημάτων:

$$u_{i,j} = u_{ij}^e + u_{ij}^p \quad (3.44)$$

όπου τα συμμετρικά τμήματα από τα αντίστοιχα στοιχεία των συνολικών, ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων είναι ε_{ij} , ε_{ij}^e και ε_{ij}^p . Αντίστοιχα, ακόμη κι αν η συνολική βαθμίδα μετατόπισης (και συνολικής παραμόρφωσης) είναι συμβατή με μια κανονική παραμόρφωση (με συνεχώς διαφορίσιμη μετατόπιση πεδίου), γενικά ούτε τα ελαστικά ούτε τα πλαστικά τμήματα μεμονωμένα είναι συμβατά.

Με την $u(x)$ να υποδηλώνει έναν αυθαίρετο τανυστή πεδίου δεύτερης τάξης και x_0 ένα σταθερό σημείο, μια εφαρμογή του κλασσικού θεωρήματος των Stokes για απλά συνδεδεμένα πεδία ορίζει ότι το γραμμικό ολοκλήρωμα

$$w_i(x) = \int_{x_0}^x u_{ij}(\tilde{x}) d\tilde{x}_j \quad (3.45)$$

είναι ανεξάρτητο της όδευσης, και ως εκ τούτου $w_{i,j} = u_{i,j}$ στην οποία περίπτωση μπορεί να ειπωθεί ότι το u είναι συμβατό με το w , αν και μόνο αν

$$e_{jkl}u_{il,k} = 0 \quad (3.46)$$

όπου e_{jkl} είναι το εναλλασσόμενο σύμβολο. Το τελευταίο ισχύει εάν το u θεωρείται ότι είναι η συνολική βαθμίδα μετατόπισης, και σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή κάθε μέτρο ασυμβατότητας της ελαστικής παραμόρφωσης θα έχει αντίθετο πρόσημο του αντίστοιχου πλαστικού.

Ο Bassani υιοθετεί το ακόλουθο μέτρο ασυμβατότητας με όρους πλαστικών τμημάτων βαθμίδας μετατόπισης:

$$\alpha_{ij} = e_{jkl}u_{il,k}^p \quad (3.47)$$

Στην απλή θεωρία, αυτό το μέτρο της ασυμβατότητας λαμβάνεται για να επηρεάσει μόνο τον στιγμιαίο ρυθμό κράτυνσης, ενώ ο νόμος ροής είναι αμετάβλητος. Με βάση πειραματικά αποτελέσματα και προσομοίωση (π.χ. Cleveringa et al., 1997), η ασυμβατότητα γενικά θεωρείται ότι αυξάνει το ρυθμό της κράτυνσης.

3.9.3 Κρυσταλλική πλαστικότητα και σύνθετη κράτυνση.

Στη διατύπωση μικρής παραμόρφωσης για κρυσταλλική πλαστικότητα (Bassani, 2001), το πλαστικό τμήμα της βαθμίδας μετατόπισης προκύπτει αποκλειστικά από τις ολισθήσεις $\gamma^{(\beta)}$ σε όλα τα συστήματα ($\beta = 1, N$) και λαμβάνεται ως εξής:

$$u_{ij}^p = \sum_{\beta} \gamma^{(\beta)} m_i^{(\beta)} n_j^{(\beta)} \quad (3.48)$$

όπου τα μοναδιαία διανύσματα $m^{(\beta)}$ και $n^{(\beta)}$, αντίστοιχα, καθορίζουν τη διεύθυνση ολίσθησης και το κανονικό επίπεδο ολίσθησης για το σύστημα β . Από τις εξισώσεις (3.47) και (3.48), προκύπτει ένα φυσικό μέτρο ασυμβατότητας, όπως είναι η πυκνότητα εξάρμωσης του Nye:

$$\alpha_{ij} = e_{jkl} u_{il,k}^p = e_{jkl} \sum_{\beta} \gamma_{,k}^{(\beta)} m_i^{(\beta)} n_j^{(\beta)} \quad (3.49)$$

Με το $\tau_{cr}^{(\beta)}$ να λαμβάνεται ως το μέτρο σκληρότητας στην επιφάνεια ολίσθησης β , ο ρυθμός κράτυνσης κάτω από πολλαπλές παραμορφώσεις ολίσθησης δίνεται από την έκφραση (Bassani and Wu, 1991):

$$\dot{\tau}_{cr}^{(\beta)} = \sum_{\eta} h_{\beta\eta} \dot{\gamma}^{(\eta)} \quad (3.50)$$

όπου $h_{\beta\eta}$ είναι το στιγμιαίο μητρώο κράτυνσης του συστήματος ολίσθησης, το οποίο γενικά, εξαρτάται από τις ολισθήσεις και από τις βαθμίδες τους μέσω του μέτρου των ασύμβατων παραμορφώσεων πλέγματος, π.χ. την πυκνότητα εξάρμωσης α_{ij} .

$$h_{\beta\eta} = h_{\beta\eta}(\{\gamma^{(k)}\}, \alpha_{ij}) \quad (3.51)$$

Οι Bassani et al. (2001) θεώρησαν περιοδικές ρυθμίσεις των ελαστικών κόκκων σε ένα ιξωδοπλαστικό απλό κρυσταλλικό μητρώο το οποίο υπόκειται σε απλή ολίσθηση. Κάτω από μια μακροσκοπική διατμητική φόρτιση απέδειξαν ότι και τα αποτελέσματα του μεγέθους του κόκκου και της μορφολογίας που προβλέφθηκαν από μια προσομοίωση εξάρμωσης (Cleveringa et al., 1997) μπορούν να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια με μια ιξωδοπλαστική θεωρία συνεχούς μέσου, βασισμένη σε ένα ρυθμό κράτυνσης συστήματος ολίσθησης. Διαπιστώνεται ότι οι βαθμίδες ολίσθησης στην κάθετη κατεύθυνση σε ένα ιδιαίτερο σύστημα $(\gamma_{,k} n_k)$ δεν συνεισφέρουν στο RHS της σχέσης (3.49). Επομένως, για

απλή ολίσθηση σε δύο διαστάσεις με $\gamma^{(1)} = \gamma$, $m^{(1)} = e_1$, και $n^{(1)} = e_2$, το μόνο μη μηδενικό μέρος του μέτρου ασυμβατότητας της σχέσης (3.49) είναι:

$$\alpha_{13} = \gamma_{,1} \quad (3.52)$$

Με $\dot{\epsilon}_{cr} = h\dot{\gamma}$, σε αυτό το πρόβλημα ο ρυθμός κράτυνσης του συστήματος ολίσθησης $h = d\tau/d\gamma$ λαμβάνεται ώστε να εξαρτάται και από το γ και από το $\gamma_{,1}$. Η σχέση κράτυνσης δίνεται από τον τύπο:

$$h(\gamma, \gamma_{,1}) = h_0 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} + 1 \right)^{N-1} \left[1 + l^2 (\gamma_{,1}/\gamma_0)^2 \right]^{1/2} \quad (3.53)$$

όπου l είναι η εσωτερική κλίμακα μήκους. Στους υπολογισμούς πεπερασμένων στοιχείων του Bassani (2001), χρησιμοποιήθηκε ο ιξωδοπλαστικός νόμος διαρροής:

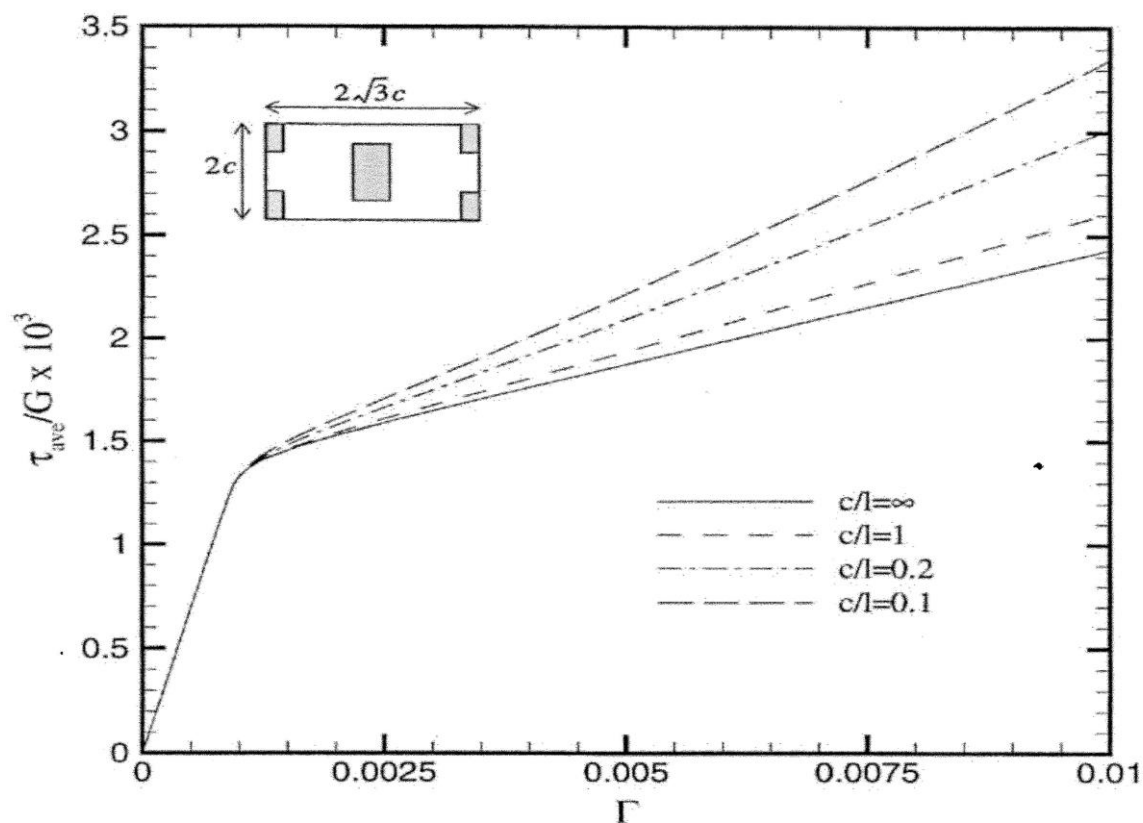
$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} \right) \left(\left| \frac{\tau}{\tau_{cr}} \right| \right)^{(1/m)-1} \quad (3.54)$$

όπου $\tau = \sigma_{12}$ είναι η διατμητική τάση στο σύστημα της ολίσθησης, $\dot{\gamma}_0$ είναι ένας χαρακτηριστικός ρυθμός παραμόρφωσης, m είναι ο εκθέτης κράτυνσης του ρυθμού παραμόρφωσης, και $\tau_{cr} = \tau_0 + \int_0^\gamma h d\gamma$ είναι η σκληρότητα του συστήματος ολίσθησης.

Οι διακριτές προσομοιώσεις εξάρμωσης των Cleveringa et al. (1997) για μια περιοδική διάταξη των ελαστικών κόκκων σε ένα απλό μητρώο κρυστάλλων, το οποίο υπόκειται απλή ολίσθηση, παρουσιάζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά. Για μορφολογίες κόκκων στις οποίες στο μπλοκ ολίσθησης (όπως φαίνεται στο ένθετο του Σχήματος 3.7) η συνολική τάση διαρροής αυξάνει καθώς το μέγεθος του κόκκου μειώνεται για σταθερό κλάσμα όγκου. Για μορφολογίες κόκκων που δεν εμποδίζουν την ολίσθηση, όπου οι ζώνες ολίσθησης μπορούν να διαδοθούν ανεμπόδιστα σε όλο το μίγμα, παρουσιάζεται μικρή συνολική κράτυνση στο αρχικό στάδιο της πλαστικής ροής ακολουθούμενη από κάποια χαλάρωση, εξαιτίας του εντοπισμού της παραμόρφωσης. Αυτές οι τάσεις περιγράφονται καλά από ένα συνεχές μοντέλο χρησιμοποιώντας τις σχέσεις κράτυνσης και διαρροής (3.53) και (3.54).

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων από τους Bassani et al. (2001), στα οποία φαίνεται η μεταβολή της κράτυνσης του υλικού για διάφορες τιμές του λόγου c/l , όπου l είναι ένα εσωτερικό μήκος που εκφράζει την επίδραση του μεγέθους και c είναι το μέγεθος μοναδιαίας κυψελίδας (βλέπε

ένθετο στο Σχήμα 3.7). Είναι φανερό ότι για μια δεδομένη κλίμακα μήκους υλικού l , οι κυψελίδες με μικρότερο μέγεθος c προκαλούν υψηλότερη συνολική κράτυνση.



Σχήμα 3.7. Μέση διατμητική τάση έναντι διατμητικής παραμόρφωσης για ελαστικά εγκλείσματα (για λόγο εμβαδού 0.2) ενσωματωμένα σε ένα μητρώο κρυστάλλων που υπόκειται σε απλή ολίσθηση (Bassani, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ενσωμάτωση του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος στον κώδικα ABAQUS για τρισδιάστατη ανάλυση

4.1 Γενικά.

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διαδικασίες επίλυσης για την ενσωμάτωση του προχωρημένου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος Lade et al. (2002) στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2014) για τρισδιάστατη ανάλυση, καθώς επίσης και μια αποτίμηση της αποτελεσματικότητας διαθέσιμων μεθοδολογιών ολοκλήρωσης για το προσομοίωμα αυτό. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή της βαθμίδας πλαστικότητας στο συγκεκριμένο μοντέλο, ως ένα εργαλείο βελτίωσης ώστε να μειωθούν πιθανές αριθμητικές δυσκολίες σε κρίσιμες θέσεις.

Όπως αναφέρεται από τους Jakobsen et al. (2002), η ενσωμάτωση των πιο προηγμένων και ακριβέστερων ελαστοπλαστικών καταστατικών μοντέλων σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων ενίοτε παραλείπεται λόγω μιας ουσιαστικής αύξησης στα υπολογιστικά κόστη. Προφανώς δεν είναι δυνατόν να λαμβάνονται αναλύσεις βασισμένες σε ποιο ακριβή μοντελοποίηση της πραγματικής συμπεριφοράς υλικών χωρίς απώλεια της αποτελεσματικότητας. Ωστόσο, με μια κριτική αξιολόγηση των χρησιμοποιούμενων σχημάτων ολοκλήρωσης είναι πιθανό να περιοριστούν τα πρόσθετα υπολογιστικά κόστη. Το πρόβλημα της επιλογής των κατάλληλων σχημάτων ολοκλήρωσης είναι διπλό καθώς η ανάλυση συνεπάγεται τη χρήση των σχημάτων ολοκλήρωσης (α) της καταστατικής σχέσης για τον υπολογισμό των ενημερωμένων τάσεων και των παραμέτρων κράτυνσης και (β) για την εξασφάλιση της συνολικής ισορροπίας του συστήματος. Στην τελευταία περίπτωση, το ποσοστό της σύγκλισης και ως εκ τούτου η αποδοτικότητα βασίζονται στον προσδιορισμό της εφαπτομενικής δυσκαμψίας του υλικού (Crisfield, 1991; Simo et al., 1985). Η χρήση του συμβατού μητρώου εφαπτομενικής δυσκαμψίας μπορεί να διατηρήσει την τετραγωνική σύγκλιση που προκύπτει από τη μέθοδο Newton-Raphson. Ωστόσο, αυτό συνεπάγεται ότι το σχήμα ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τη συνολική ισορροπία είναι του τύπου Newton-Raphson. Η μέθοδος της ενημέρωσης τάσεων και οι παράμετροι

κράτυνσης έχουν από την άλλη πλευρά έναν άμεσο αντίκτυπο και για την ακρίβεια αλλά και για την αποδοτικότητα.

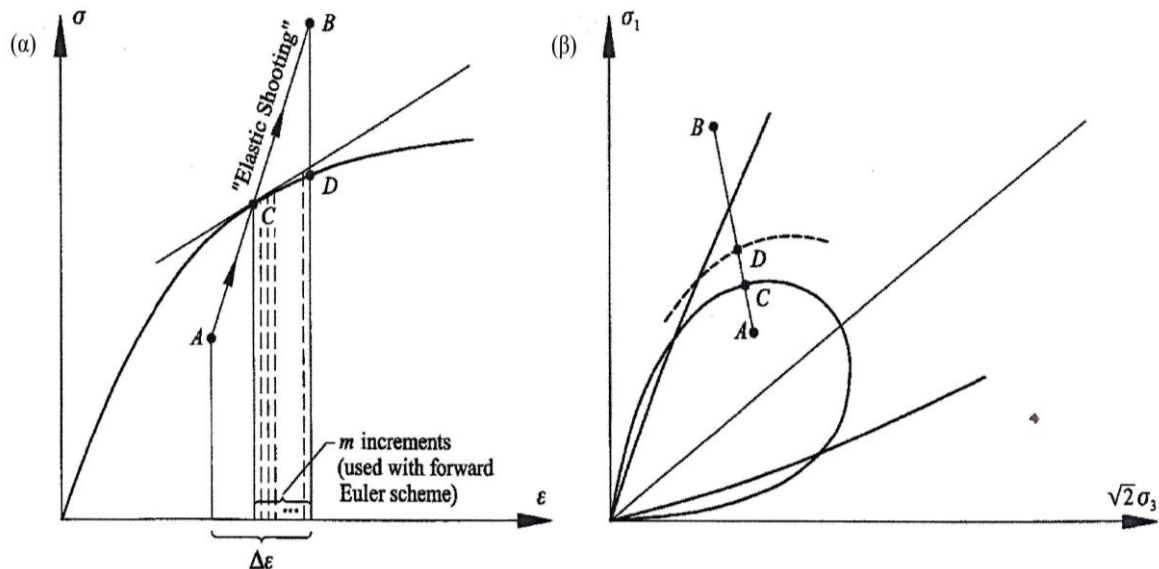
Η επίλυση των μη γραμμικών προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων, η οποία συμπεριλαμβάνει τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών, αποτελείται από βήματα φόρτισης το καθένα από τα οποία περιλαμβάνει επαναλήψεις για να επιτευχθεί ισορροπία ανάμεσα σε εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις στο νέο επίπεδο φόρτισης. Αυτή η καθολική επαναληπτική διαδικασία εκτελείται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS). Ωστόσο, η εκτίμηση των εσωτερικών δυνάμεων και μετατοπίσεων, που χρησιμοποιήθηκαν στις καθολικές επαναλήψεις, εξαρτάται από την χρησιμοποιούμενη σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Ο ρόλος του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος με κράτυνση που καθορίζεται από το χρήστη είναι επομένως διπλός. Πρέπει να παρέχει (α) μια ενημέρωση των τάσεων για εκτίμηση των εσωτερικών δυνάμεων και (β) μια δυσκαμψία υλικού για τη δημιουργία του καθολικού εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για επαναλήψεις ισορροπίας και υπολογισμό του αντίστοιχου πεδίου μετατοπίσεων.

Δεδομένου ότι το ABAQUS χρησιμοποιεί ένα σχήμα ολοκλήρωσης Gauss, για να δημιουργηθεί το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας για κάθε στοιχείο, είναι απαραίτητο να θεωρηθεί ένα μόνο σημείο υλικού εντός ενός στοιχείου. Κάθε φορά που χρειάζονται μια νέα εκτίμηση των ενημερωμένων τάσεων και μια δυσκαμψία υλικού, το μοντέλο υλικών που καθορίζεται από το χρήστη καλείται μία φορά για κάθε σημείο Gauss. Ο προσδιορισμός των ενημερωμένων ποσοτήτων θα εξαρτάται ουσιαστικά από την επιβαλλόμενη μεταβολή της παραμόρφωσης, αλλά καθώς η συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από την όδευση, απαιτείται επίσης η γνώση του ιστορικού τάσεων και παραμορφώσεων. Τα δεδομένα σε κάθε βήμα αποτελούνται από τις παραμέτρους υλικού, τις τρέχουσες τάσεις, το τρέχον μέγιστο πλαστικό έργο, και τις νέες μεταβολές παραμορφώσεων. Η υπορουτίνα τότε παράγει τις έξι νέες τάσεις, το πλαστικό έργο που αντιστοιχεί στη νέα κατάσταση τάσεων, όπως επίσης και το ενημερωμένο εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας, το λεγόμενο Ιακωβιανό μητρώο (Jakobsen et al., 2002; Jakobsen, 1999).

4.2 Μέθοδος υπολογισμού.

Η στρατηγική υπολογισμού απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 4.1 ενώ στο Σχήμα 4.2 δίδεται ένα διάγραμμα ροής. Βασισμένη στις τρέχουσες τάσεις (σ_0 , σημείο A

στο Σχήμα 4.1), στο μέγιστο πλαστικό έργο, $W_{p,0}$, και στις νέες μεταβολές παραμορφώσεων ($\Delta\epsilon$), το σημείο τάσης B υπολογίζεται υποθέτοντας ότι η μεταβολή παραμορφώσεων είναι εντελώς ελαστική (Βήμα 1 στο Σχήμα 4.2). Οι τάσεις στο σημείο B χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της f' , που είναι η τιμή της συνάρτησης διαρροής που αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατάσταση των τάσεων, και σε σύγκριση με την τρέχουσα τιμή της συνάρτησης διαρροής f'' , η οποία υπολογίστηκε από το τρέχον μέγιστο πλαστικό έργο (Βήμα 2). Οι εκφράσεις για το f' και f'' ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 3, αλλά ο δείκτης p έχει παραληφθεί εδώ. Αν η διαφορά είναι μικρότερη από ή ίση με το μηδέν [$f = (f' - f'') \leq 0$], τότε το νέο σημείο τάσης (B) τοποθετείται μέσα από την επιφάνεια διαρροής και η μεταβολή της παραμόρφωσης είναι πράγματι ελαστική. Ο υπολογισμός γι' αυτή τη μεταβολή έχει ήδη εκτελεσθεί και το Ιακωβιανό μητρώο είναι ελαστικό (Βήμα 3a).



Σχήμα 4.1. Σχηματική απεικόνιση (α) της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης, και (β) του τριαξονικού επιπέδου με καταστάσεις τάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξήγηση της στρατηγικής υπολογισμού (Jakobsen et al., 2002).

Αν από την άλλη πλευρά $f = (f' - f'') > 0$, τότε το σημείο B είναι έξω από την τρέχουσα επιφάνεια διαρροής και ένα τμήμα της μεταβολής της παραμόρφωσης είναι πλαστικό. Σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζεται αν η τρέχουσα κατάσταση τάσεων (Σημείο A) τοποθετείται μέσα ή επάνω στην τρέχουσα επιφάνεια διαρροής. Οι τάσεις στο Σημείο A χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της f' και συγκρίνονται με την προηγούμενη υπολογισμένη f'' (Βήμα 3b). Αν $f = (f' - f'') = 0$, τότε το Σημείο A είναι

πάνω στην επιφάνεια διαρροής και συμπίπτει με το Σημείο C στο Σχήμα 4.1, και $\alpha = 0$ (βλέπε Βήμα 4a).

Αν $f = (f' - f'') < 0$ (Βήμα 3b), τότε το σημείο A είναι μέσα από την επιφάνεια διαρροής, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 4.1. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο να καθοριστεί το τμήμα τασικής όδευσης AB, το οποίο είναι καθαρά ελαστικό (AC) καθορίζοντας το λόγο $\alpha = AC/AB$ (Βήμα 4b). Συνεπώς απαιτείται να βρεθεί το Σημείο C, και η τεχνική για να βρεθεί το Σημείο C περιγράφεται παρακάτω.

Έχοντας υπολογίσει τις ελαστικές παραμορφώσεις από το A στο C, το υπόλοιπο τμήμα της συνολικής μεταβολής της παραμόρφωσης (ο υπολογισμός γίνεται στο Βήμα 5), χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τις τάσεις και την παράμετρο κράτυνσης (Βήματα 6-8).

Τρία διαφορετικά σχήματα ολοκλήρωσης επιλύονται: (α) το σχήμα Forward Euler με υποβήματα, (β) το τροποποιημένο σχήμα Euler με έλεγχο σφάλματος, και (γ) το σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με έλεγχο σφάλματος. Αυτές οι τεχνικές αναλύονται παρακάτω. Στο τέλος του καθενός από αυτά τα σχήματα, το μοντέλο υλικών που καθορίζεται από το χρήστη εξέρχεται με τις τάσεις, το Ιακωβιανό μητρώο, και το πλαστικό έργο στο Σημείο D (Βήμα 8).

4.3 Αρχική τομή με την επιφάνεια διαρροής.

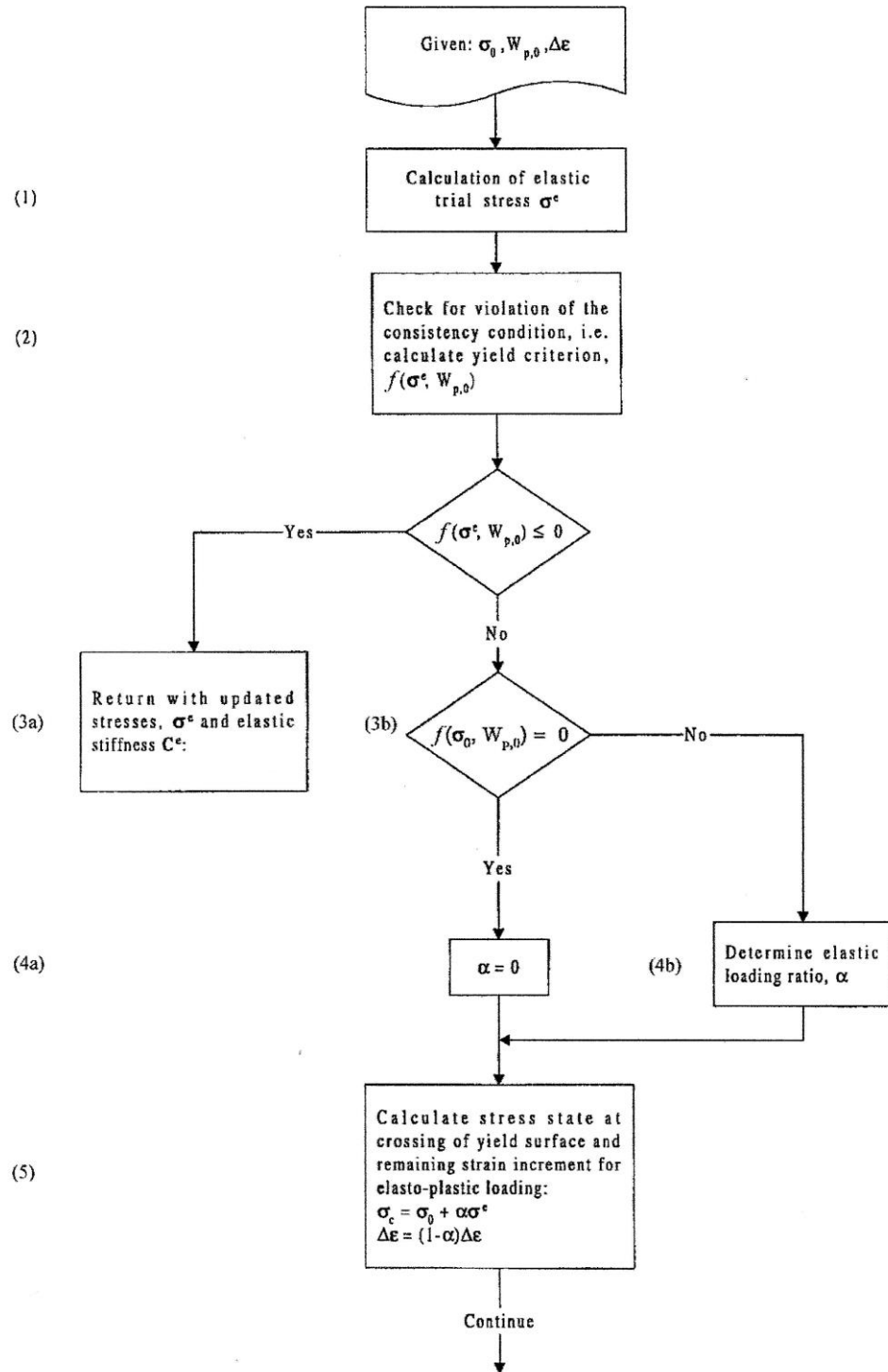
Αν το σημείο τάσεων αλλάζει από μια ελαστική σε μια ελαστοπλαστική κατάσταση, όπως συμβαίνει για προφόρτιση με διάτμηση ή υπερστερεοποιημένα υλικά, τότε είναι απαραίτητο να καθοριστεί το τμήμα της μεταβολής της τάσης που προκαλεί καθαρά ελαστικές παραμορφώσεις, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 4.1. Η τεχνική για να βρεθεί το Σημείο C απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3, υποδεικνύεται στο Βήμα 4b στο Σχήμα 4.2, και περιγράφεται μαθηματικά παρακάτω (Jakobsen et al., 2002).

Η αρχική κατάσταση των τάσεων στο Σημείο A βρίσκεται εντός της επιφάνειας διαρροής που αντιστοιχεί σε:

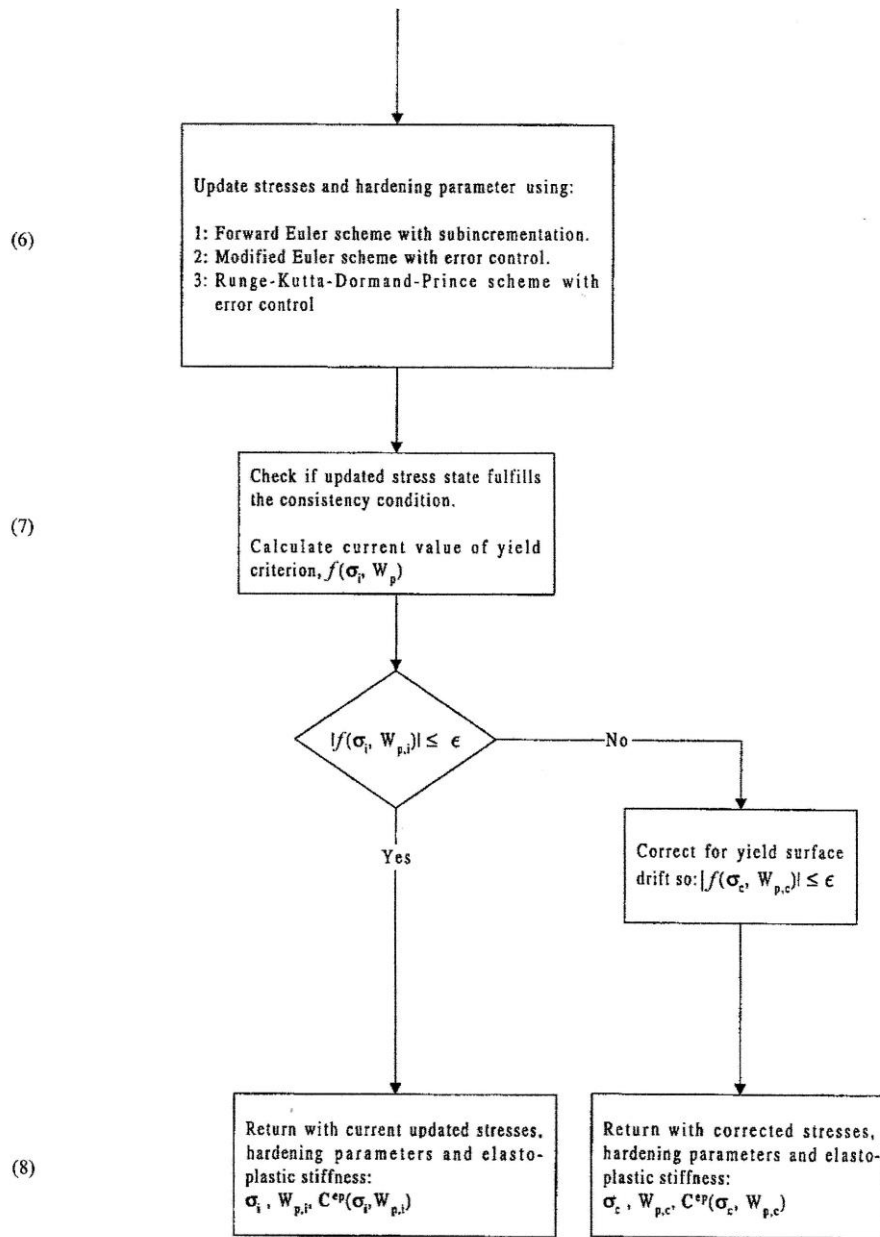
$$f(\sigma_A, W_{p,A}) = f_A < 0 \quad (4.1)$$

Η "ελαστική μετάβαση" από το A στο B παράγει μια ελαστική μεταβολή δοκιμαστικής τάσης υπολογισμένη από το Νόμο του Hooke:

$$\Delta\sigma^e = C^e(\sigma_A)\Delta\varepsilon \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.2. Διάγραμμα ροής για την επίλυση του καταστατικού μοντέλου με μία επιφάνεια διαρροής στο μοντέλο υλικών που καθορίζεται από το χρήστη (Jakobsen et al., 2002).



Σχήμα 4.2. (συνέχεια) Διάγραμμα ροής για την επίλυση του καταστατικού μοντέλου με μία επιφάνεια διαρροής στο μοντέλο υλικών που καθορίζεται από το χρήστη (Jakobsen et al., 2002).

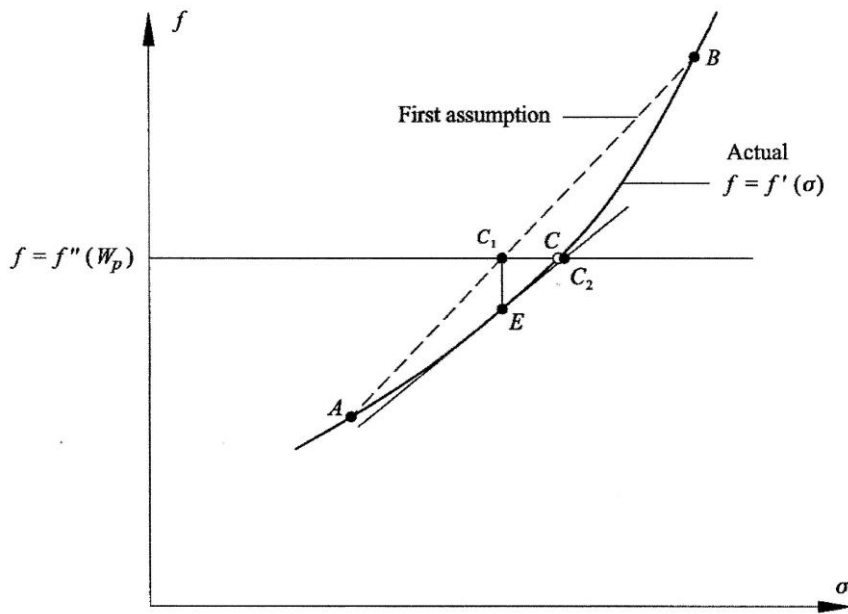
Έτσι, η ελαστική μη-γραμμικότητα αντιπροσωπεύεται στην επίλυση. Ως εκ τούτου, το μέτρο του Young και το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας καθορίζονται στη βάση των εξισώσεων (3.2) και (3.27) του Κεφαλαίου 3. Αν το σημείο τάσεων αλλάζει από μια

ελαστική κατάσταση (Σημείο A) σε μια ελαστοπλαστική κατάσταση (Σημείο B), τότε οι δοκιμαστικές τάσεις στο B μπορούν να παραβούν το κριτήριο διαρροής:

$$f(\sigma_A + \Delta\sigma^e, W_{p,C}) = f(\sigma_B, W_{p,C}) = f_B > 0 \quad (4.3)$$

Είναι παρ' όλα αυτά όμως απαραίτητο να καθοριστεί ένας λόγος α ($0 < \alpha < 1$), που αντιστοιχεί στο τμήμα της μεταβολής της τάσης που βρίσκεται εντός της επιφάνειας διαρροής, ώστε η κατάσταση τάσεων στο Σημείο C να εκπληρώνει το κριτήριο διαρροής:

$$f(\sigma_A + \alpha\Delta\sigma^e, W_{p,C}) = f(\sigma_C, W_{p,C}) = f_C = 0 \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.3. Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής για την εύρεση του σημείου τομής με την επιφάνεια διαρροής (Jakobsen et al., 2002).

Σαφείς εκφράσεις για την τιμή του α μπορούν να καθοριστούν μόνο για απλούς τύπους των συναρτήσεων διαρροής. Μια πρώτη εκτίμηση μπορεί να καθοριστεί από μια απλή γραμμική παρεμβολή στην f :

$$\alpha_0 = -\frac{f_A}{f_B - f_A} \quad (4.5)$$

Η συνάρτηση διαρροής είναι, όμως, έντονα μη γραμμική και η εκτίμηση του α που καθορίζεται από την εξίσωση (4.5) δεν θα ικανοποιεί γενικά το κριτήριο διαρροής:

$$f(\sigma_A + \alpha_0\Delta\sigma^e, W_{p,C}) = f(\sigma_E, W_{p,C}) = f_E \neq 0 \quad (4.6)$$

Μια πιο ακριβέστερη εκτίμηση για το α μπορεί να εξασφαλιστεί από μια επέκταση σειράς Taylor γύρω από το Σημείο E:

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{f_E}{(\partial f / \partial (\sigma_A + \alpha_0 \Delta \sigma^e))^T \Delta \sigma^e} \quad (4.7)$$

Αυτή η προσέγγιση για τον υπολογισμό των τάσεων πάνω στην επιφάνεια διαρροής στο Σημείο C θα είναι πιο ακριβής για μόνο μικρές μεταβολές παραμορφώσεων. Προκειμένου να αποφευχθεί κάποια αρχική μετατόπιση της επιφάνειας διαρροής στα σχήματα ολοκλήρωσης και επαυξάνοντας τις ικανότητες πρόβλεψης στις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων, είναι ορθό να εφαρμοστεί ένα επαναληπτικό σχήμα (Sloan, 1987). Χρησιμοποιώντας την τεχνική Newton-Raphson, για παράδειγμα, οι τάσεις και το α ενημερώνονται όπως αποτυπώνονται στο Σχήμα 4.4. Η επαναληπτική διαδικασία ξεκίνησε με την παραδοχή των αρχικών τάσεων στο Σημείο A και χρησιμοποιώντας το α_0 από την εξίσωση 4.5. Η διαδικασία τερματίζεται όταν το μέτρο του λόγου $\|\sigma_i - \sigma_{i-1}\| / \|\sigma_{i-1}\|$ είναι μικρότερο από ένα επιτρεπτό. Οι μεταβολές ελαστικών τάσεων $\alpha \Delta \sigma^e$ αντιστοιχούν σε μια ελαστική μεταβολή παραμόρφωσης $\alpha \Delta \epsilon$ και η μεταβολή της παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε στην ολοκλήρωση της ελαστοπλαστικής σχέσης τάσης-παραμόρφωσης ισούται με $(1 - \alpha) \Delta \epsilon$.

$$\begin{aligned} & \text{Initial state } \sigma_0, W_{p,0} \\ & \text{If } f(\sigma_0, W_{p,0}) > 0 \\ & \quad \alpha_0 = - \frac{f_A}{f_B - f_A} \\ & \text{Iterations } i=1, 2, \dots, i_{max} \\ & \quad \sigma_i = \sigma_{i-1} + \alpha_{i-1} \Delta \sigma^e \\ & \quad \Delta \alpha_i = - \frac{f(\sigma_i, W_p)}{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_i} \right)^T \Delta \sigma^e} \\ & \quad \alpha_i = \alpha_{i-1} + \Delta \alpha_i \\ & \text{Stop iteration when } \|\sigma_i - \sigma_{i-1}\| / \|\sigma_{i-1}\| \leq \epsilon \\ & \text{Final state } \sigma_C = \sigma_i, \alpha_C = \alpha_i \end{aligned}$$

Σχήμα 4.4. Αλγόριθμος με βελτιωμένη διαδικασία για την εύρεση του σημείου τομής με την επιφάνεια διαρροής (Jakobsen et al., 2002).

4.3.1 Επίδραση προφόρτισης με διάτμηση και υπερστερεοποίησης στην αντοχή του υλικού.

Τα αριθμητικά προβλήματα που εμφανίζονται για υλικά με προφόρτιση με διάτμηση ή υπερστερεοποιημένα υλικά, αντιμετωπίζονται εφαρμόζοντας τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Ωστόσο, σε ειδικές περιπτώσεις η τρέχουσα επιφάνεια διαρροής, η οποία υποδηλώνει το προηγούμενο εμπειρικό υψηλό επίπεδο φόρτισης, εκτείνεται πέρα από την επιφάνεια αστοχίας και στην πραγματικότητα ενισχύει το υλικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 του Κεφαλαίου 3. Έτσι, το υλικό δεν φτάνει σε μια κατάσταση αστοχίας μέχρι να επιτευχθεί η επιφάνεια διαρροής. Αυτό πραγματοποιείται αριθμητικά υπολογίζοντας την τομή της επιφάνειας διαρροής, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, και μετά πραγματοποιώντας ένα έλεγχο αστοχίας.

4.3.2 Η προσαρμογή των ελαστικών τάσεων.

Το μοντέλο κράτυνσης με μία επιφάνεια διαρροής αναπτύχθηκε για υλικά με τριβή, και μόνο συνδυασμοί θετικών κυρίων τάσεων επιτρέπονται, ακόμα και για υλικά με ενεργό συνοχή. Αυτό συνεπάγεται ότι αν οι ελαστικές δοκιμαστικές τάσεις αντιστοιχούν σε μία (ή περισσότερες) αρνητικές ή μηδενικές κύριες τάσεις, τότε πρέπει να προσαρμόζονται κατάλληλα. Το πρόβλημα είναι πιο πιθανό να συμβεί για μεγάλες μεταβολές παραμορφώσεων και κοντά στην αστοχία στην εκτεταμένη περιοχή (Jakobsen et al., 2002).

4.4 Ενημερωμένες τάσεις και παράμετρος κράτυνσης.

Η απαίτηση μιας ακριβούς ολοκλήρωσης του καταστατικού νόμου παραδοσιακά επιτυγχάνεται από τη χρήση ενός backward Euler ή ενός απευθείας σχήματος ολοκλήρωσης (explicit integration scheme) (Abbo et al., 1993; Ortiz et al., 1986; Sloan, 1987). Και οι δύο τύποι σχημάτων έχουν έναν αριθμό από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το σχήμα backward Euler βασίζεται σε μια ελαστική πρόβλεψη και μία πλαστική διόρθωση. Είναι ελκυστικό, επειδή δεν απαιτεί τον υπολογισμό της αρχικής τομής της επιφάνειας διαρροής, εάν το σημείο τάσης περνάει από μια ελαστική σε μια ελαστοπλαστική κατάσταση. Η πλαστική διόρθωση λαμβάνεται λύνοντας ένα μικρό σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων (Crisfield, 1991) μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία εξασφαλίζει ότι συνθήκη συμβατότητας μπορεί να ικανοποιηθεί εντός ανεκτών ορίων. Η προσέγγιση, όμως, έχει μερικά μείζονα μειονεκτήματα. Η

δημιουργία του συστήματος των εξισώσεων γίνεται επίπονη για πιο προηγμένα μοντέλα και η σύγκλιση δεν είναι απαραίτητα εγγυημένη. Το σχήμα backward Euler έχει προφανώς χρησιμοποιηθεί και τεκμηριωθεί μόνο για απλά καταστατικά μοντέλα που έχουν συζευγμένους νόμους ροής (π.χ. von Mises, Tresca, Mohr-Coulomb και Cam-Clay). Πράγματι, οι Abbo και Sloan (1993) έκαναν συγκρίσεις ανάμεσα στο backward Euler και σε σχήματα απευθείας ολοκλήρωσης για μη συζευγμένο μοντέλο Mohr-Coulomb. Ωστόσο, ο χειρισμός του μη συζευγμένου νόμου ροής δεν περιγράφεται καθόλου και τα συμπεράσματα είναι απλώς βασισμένα σε έναν πίνακα που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα. Επί πλέον, αρκετά μοντέλα εδαφών έχουν ένα διαφορετικό κριτήριο αστοχίας και ο αριθμητικός χειρισμός μπορεί να παρεμποδιστεί κοντά στην αστοχία, καθώς η ελαστική δοκιμαστική τάση τέμνει το κριτήριο αστοχίας. Εναλλακτικά, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σχήματα απευθείας ολοκλήρωσης των τύπων forward Euler και Runge-Kutta. Αυτοί οι τύποι ολοκλήρωσης έχουν τα μειονεκτήματα ότι η αρχική διχοτόμηση με την επιφάνεια διαρροής πρέπει να υπολογιστεί εάν ένα σημείο τάσης περάσει από μια ελαστική σε μια ελαστοπλαστική κατάσταση, και δεν εξασφαλίζουν απαραίτητα ότι η συνθήκη συμβατότητας εκπληρώνεται. Η αξιοπιστία αυτών των τύπων μεθόδων μπορεί να βελτιωθεί και τα μειονεκτήματα εξισορροπούνται από την ευρωστία τους.

Όπως ήδη επεξηγήθηκε, το σχήμα ολοκλήρωσης forward Euler είναι μόνο ακριβές για μικρές μεταβολές παραμορφώσεων. Υποδιαίρωντας τη μεταβολή παραμόρφωσης σε ένα καθορισμένο αριθμό υποβημάτων, η ακρίβεια θα βελτιωθεί. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση αποδεικνύεται ότι είναι υπολογιστικά χρονοβόρα (Sloan, 1987). Για τον λόγο αυτό διερευνήθηκαν δυο άλλα σχήματα απευθείας ολοκλήρωσης. Αυτά συμπεριλαμβάνουν μια τελειοποιημένη έκδοση υποβημάτων του σχήματος forward Euler με ενεργό έλεγχο σφάλματος καθώς και ένα προχωρημένο σχήμα Runge-Kutta. Στη συνέχεια παρατίθεται από ένα παράδειγμα, όπου μελετάται η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων (Jakobsen et al., 2002).

4.5 Σχήμα ολοκλήρωσης forward Euler με υποβήματα.

Ακολουθώντας τον προσδιορισμό της τομής με την επιφάνεια διαρροής, όπως περιγράφηκε παραπάνω, ο επόμενος στόχος είναι να υπολογισθεί η ενημερωμένη κατάσταση τάσεων και η παράμετρος κράτυνσης. Ένα κοινώς χρησιμοποιούμενο σχήμα ολοκλήρωσης για ελαστοπλαστικές σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης είναι το σχήμα forward

Euler, όπως περιγράφεται από τους Jakobsen et al. (2002). Στο εξής θεωρείται ότι η αρχική κατάσταση τάσεων τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια διαρροής και ότι η επόμενη μεταβολή τάσης προκαλεί ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις.

4.5.1 Διαδικασία.

Στο σχήμα forward Euler οι τάσεις ενημερώνονται αντικαθιστώντας την απειροελάχιστη ελαστοπλαστική σχέση τάσης-παραμόρφωσης της εξίσωσης (3.25) του Κεφαλαίου 3 από την σχέση:

$$\Delta\sigma = C^{ep}(\sigma_0, W_{p,0})\Delta\varepsilon \quad (4.8)$$

όπου το καταστατικό μητρώο εκτιμάται στην αρχική κατάσταση τάσεων. Καθώς το ελαστοπλαστικό καταστατικό μητρώο εξαρτάται από το ιστορικό τάσεων και παραμορφώσεων, η γραμμική προσέγγιση είναι ακριβής μόνο για πολύ μικρές μεταβολές παραμορφώσεων. Η μέθοδος μπορεί να αλλάξει από μια τμηματική γραμμική ολοκλήρωση όπου η μεταβολή της παραμόρφωσης υποδιαιρείται σε μικρότερα υποβήματα (Chen et al., 1990; Crisfield, 1991; Sloan, 1987; Smith et al., 1988; Zienkiewicz et al., 1991):

$$\delta\varepsilon = \Delta T \Delta\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{m} \quad (4.9)$$

όπου ΔT είναι ένα αδιάστατο βήμα χρόνου σταθερού μεγέθους και η μεταβολή τάσης καθορίζεται ως το άθροισμα από m υποβήματα, $\delta\sigma_i$, στα οποία το καθένα εκτιμήθηκε ως ένα βήμα forward Euler:

$$\delta\sigma_i = C^{ep}(\sigma_0 + \Delta\sigma_{i-1}, W_{p,0} + \Delta W_{p,i-1})\delta\varepsilon \quad (4.10)$$

$$\delta W_{p,i} = \delta\lambda_p(\sigma_0 + \Delta\sigma_{i-1}, W_{p,0} + \Delta W_{p,i-1})(\sigma_0 + \Delta\sigma_{i-1}) \frac{\partial g}{\partial(\sigma_0 + \Delta\sigma_{i-1})} \quad (4.11)$$

όπου

$$\Delta\sigma_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \delta\sigma_j \quad (4.12)$$

$$\Delta W_{p,i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \delta W_{p,j} \quad (4.13)$$

Η μεταβολή της παράμετρου κράτυνσης ισχύει για έργο κράτυνσης και υπολογίζεται από τις εξισώσεις (3.26) και (3.41) του Κεφαλαίου 3, με παραγώγους που

εκτιμήθηκαν στην κατάσταση τάσεων $(\sigma_0 + \Delta\sigma_{i-1})$. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5, το σχήμα forward Euler έχει το πλεονέκτημα ότι είναι απλό και εύκολο να επιλυθεί, σε σύγκριση με άλλα σχήματα.

Ωστόσο, το κριτήριο διαρροής δεν εκπληρώνεται απαραίτητα, και οι μεταβολές τάσεων τείνουν να εκτραπούν από την επιφάνεια διαρροής, π.χ. $f(\sigma_0 + \Delta\sigma, W_{p,0} + \Delta W_p) \neq 0$. Μολονότι η υποδιαίρεση μπορεί να μειώσει την μετατόπιση της επιφάνειας διαρροής, η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδεκτά αποτελέσματα, καθώς το σφάλμα συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια μεταγενέστερων βημάτων φόρτισης (Crisfield, 1991; Potts et al., 1985; Sloan, 1987). Επιπλέον, ο υποβηματικός τύπος έχει το μειονέκτημα ότι χρησιμοποιεί υποβήματα ίσου μεγέθους. Αυτό αποδεικνύεται ότι είναι υπολογιστικά ανεπαρκές καθώς ο αριθμός των υποβημάτων πρέπει να καθοριστεί με συνεχείς δοκιμές, έτσι ώστε το μέγιστο σφάλμα να βρίσκεται μέσα σε ανεκτά όρια.

$$\text{Initial state } \sigma_0, W_{p,0}, \Delta\varepsilon, \delta\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{m}$$

$$\text{Strain subincrements } i=1, 2, \dots, m$$

$$\delta\sigma_i = C^{ep}(\sigma_{i-1}, W_{p,i-1})\delta\varepsilon$$

$$\delta W_{p,i} = \delta\lambda_p(\sigma_{i-1}, W_{p,i-1}, \delta\varepsilon)\sigma_{i-1} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{i-1}}$$

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \delta\sigma_i$$

$$W_{p,i} = W_{p,i-1} + \delta W_{p,i}$$

$$\text{Stop strain subincrementation when } i=m$$

$$\text{Final state } \sigma_i, W_{p,i} \quad C^{ep}(\sigma_i, W_{p,i})$$

Σχήμα 4.5. Αλγόριθμος για το υποβηματικό σχήμα forward Euler για εκτίμηση της νέας κατάστασης τάσεων, πλαστικού έργου και Ιακωβιανού μητρώου (Jakobsen et al., 2002).

4.6 Τροποποιημένο σχήμα forward Euler με έλεγχο σφάλματος.

Προκειμένου να ελαττωθεί η διολίσθηση της επιφάνειας διαρροής και τα υπολογιστικά λάθη του σχήματος forward Euler, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τροποποιημένο σχήμα Euler με ενεργό έλεγχο (Sloan, 1987; Sloan et al., 1992). Αντί να χρησιμοποιηθεί ένας σταθερός αριθμός από υποβήματα ίσου μεγέθους, το μέγεθος των υποβημάτων μεταβάλλεται καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ολοκλήρωσης. Ως εκ τούτου, το μέγεθος κάθε υποβήματος καθορίζεται έτσι ώστε η νέα κατάσταση τάσεων να

εκπληρώνει το κριτήριο διαρροής εντός ανεκτών ορίων και μόνο ο απολύτως απαραίτητος αριθμός υποδιαιρέσεων να εφαρμόζεται.

Το τροποποιημένο σχήμα, όπως αναφέρεται στους Jakobsen et al. (2002), χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι πρώτης και δεύτερης τάξης τύπους Euler για να εκτιμηθεί το σφάλμα που παράγεται από το κανονικό σχήμα forward Euler στο τέλος μιας μεταβολής παραμόρφωσης, $\delta\epsilon = \Delta T \Delta\epsilon$. Η πρώτη εκτίμηση των ανανεωμένων τάσεων και η παράμετρος κράτυνσης στο τέλος της μεταβολής παραμόρφωσης δίνεται από τις σχέσεις:

$$\sigma = \sigma_0 + \delta\sigma^I \quad (4.14)$$

$$W_p = W_{p,0} + \delta W_p^I \quad (4.15)$$

$$\text{όπου} \quad \delta\sigma^I = C^{ep}(\sigma_0, W_{p,0})\delta\epsilon \quad (4.16)$$

$$\delta W_p^I = \delta\lambda_p(\sigma_0, W_{p,0}, \delta\epsilon)\sigma_0 \frac{\partial g}{\partial \sigma_0} \quad (4.17)$$

Μια πιο ακριβής εκτίμηση της ανανεωμένης κατάστασης τάσεων μπορεί να βρεθεί από τις σχέσεις:

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 + \frac{1}{2}(\delta\sigma^I + \delta\sigma^{II}) \quad (4.18)$$

$$\hat{W}_p = W_{p,0} + \frac{1}{2}(\delta W_p^I + \delta W_p^{II}) \quad (4.19)$$

$$\text{όπου} \quad \delta\sigma^{II} = C^{ep}(\sigma_0 + \delta\sigma^I, W_{p,0} + \delta W_p^I)\delta\epsilon \quad (4.20)$$

$$\delta W_p^{II} = \delta\lambda_p(\sigma_0 + \delta\sigma^I, W_{p,0} + \delta W_p^I, \delta\epsilon)(\sigma_0 + \delta\sigma^I) \frac{\partial g}{\partial (\sigma_0 + \delta\sigma^I)} \quad (4.21)$$

Η μέθοδος χρησιμοποιεί δύο εκτιμήσεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού μητρώου σε κάθε υποβήμα. Η διαφορά ανάμεσα στις καταστάσεις τάσεων που δίδεται από τις σχέσεις (4.14) και (4.18) αποτελεί μια εκτίμηση του τοπικού σφάλματος στη σ :

$$\delta\sigma^{I-II} \approx \hat{\sigma} - \sigma = \frac{1}{2}(\delta\sigma^{II} - \delta\sigma^I) \quad (4.22)$$

Αυτή η εκτίμηση σφάλματος χρησιμεύει ως ένας οδηγός για να επιλεγεί το μέγεθος του επόμενου βήματος χρόνου, ΔT , όταν ολοκληρώνεται στη συνολική μεταβολή παραμόρφωσης $\Delta\epsilon$. Έτσι, το σχετικό σφάλμα για ένα υποβήμα καθορίζεται από τη νόρμα:

$$\xi = \frac{\|\delta\sigma^{I-II}\|}{\|\hat{\sigma}\|} \quad (4.23)$$

και το μέγεθος του κάθε βήματος είναι συνεχώς προσαρμοσμένο μέχρι το ξ να είναι μικρότερο από ένα ανεκτό όριο ϵ .

Η ολοκλήρωση ξεκινά επιλέγοντας μια τιμή του αδιάστατου βήματος χρόνου ΔT και υπολογίζοντας τα $\delta\epsilon, \sigma, W_p, \hat{\sigma}, \hat{W}_p, \delta\sigma^{I-II}$ και ξ χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.14)-(4.23). Αν $\xi \leq \epsilon$, τότε οι καινούριες ενημερωμένες τάσεις και η παράμετρος κράτυνσης

λαμβάνονται ως $\hat{\sigma}$ και \hat{W}_p . Διαφορετικά είναι απαραίτητο να μειωθεί το ΔT και να επαναληφθεί ο υπολογισμός. Το μέγεθος του επόμενου αδιάστατου βήματος χρόνου είναι γενικά δοσμένο από τοπική παρέκταση:

$$\Delta T = q \Delta T \quad (4.24)$$

όπου

$$q = 0.9 \left(\frac{\epsilon}{\xi} \right)^{1/2} \quad (4.25)$$

Το μέγεθος της νέας μεταβολής περιορίζεται ως εξής:

$$0.01 \leq q \leq 2 \quad (4.26)$$

Το τροποποιημένο σχήμα Euler με ενεργό έλεγχο σφάλματος περιγράφεται περιληπτικά στο Σχήμα 4.6.

$$\begin{aligned}
 & \text{Initial state } \sigma_0, W_{p,0}, \Delta \varepsilon, \delta \varepsilon_0 = \Delta \varepsilon, q = 1 \\
 & \text{Strain increment } i=1,2,\dots,n \\
 & \delta \varepsilon_i = \min \left[q \delta \varepsilon_{i-1}, 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \delta \varepsilon_j \right] \\
 & \text{do} \\
 & \quad \delta \sigma^I = C^{ep}(\sigma_{i-1}, W_{p,i-1}) \delta \varepsilon_i \\
 & \quad \delta W_p^I = \delta \lambda_p(\sigma_{i-1}, W_{p,i-1}, \delta \varepsilon_i) \sigma_{i-1} \frac{\partial g}{\partial \sigma} \\
 & \quad \delta \sigma_i^{II} = C^{ep}(\sigma_{i-1} + \delta \sigma_i^I, W_{p,i-1} + \delta W_{p,i}^I) \delta \varepsilon_i \\
 & \quad \delta W_{p,i}^{II} = \delta \lambda_p(\sigma_{i-1} + \delta \sigma_i^I, W_{p,i-1} + \delta W_{p,i}^I, \delta \varepsilon_i) (\sigma_{i-1} + \delta \sigma_i^I) \frac{\partial g}{\partial \sigma} \\
 & \quad \delta \sigma_i^{I-II} = \frac{1}{2} (\delta \sigma_i^{II} - \delta \sigma_i^I) \\
 & \quad \hat{\sigma}_i = \sigma_{i-1} + \frac{1}{2} (\delta \sigma_i^I + \delta \sigma_i^{II}) \\
 & \quad \hat{W}_{p,i} = W_{p,i-1} + \frac{1}{2} (\delta W_{p,i}^I + \delta W_{p,i}^{II}) \\
 & \quad \xi_i = \frac{\|\delta \sigma_i^{I-II}\|}{\|\hat{\sigma}_i\|} \\
 & \quad \text{If } \xi_i > \epsilon \text{ then } q = \max \left[0.9 \left(\frac{\epsilon}{\xi} \right)^{\frac{1}{2}}, 0.01 \right]; \delta \varepsilon_i = q \delta \varepsilon_i \\
 & \quad \text{Until } \xi_i \leq \epsilon \\
 & \quad q = \min \left[0.9 \left(\frac{\epsilon}{\xi} \right)^{\frac{1}{2}}, 2 \right] \\
 & \text{Stop strain incrementation when } \sum_{i=1}^n \delta \varepsilon_i = \Delta \varepsilon \\
 & \text{Final state } \hat{\sigma}_i, \hat{W}_{p,i}, C^{ep}(\hat{\sigma}_i, \hat{W}_{p,i})
 \end{aligned}$$

Σχήμα 4.6. Αλγόριθμος για τροποποιημένο σχήμα Euler με ενεργό έλεγχο σφάλματος (Jakobsen et al., 2002).

4.7 Σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με έλεγχο σφάλματος.

Παραλλαγές του σχήματος Runge-Kutta χρησιμοποιούνται ευρέως για ολοκλήρωση. Το κλασσικό σχήμα Runge-Kutta χρησιμοποιεί ένα σχήμα ολοκλήρωσης τέταρτης τάξης με μόνο μία μεταβολή παραμόρφωσης για ενημέρωση τάσεων. Αρκετά υψηλής τάξης σχήματα με υποβήματα έχουν προταθεί (Dormand et al., 1980; England, 1969; Fehlberg, 1970; Sloan et al., 1992). Το σχήμα Runge-Kutta τροποποιήθηκε από τους

Dormand και Prince (1980) και χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή. Το σχήμα χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι τύπων τέταρτης και πέμπτης τάξης για να εκτιμηθούν οι καινούριες ανανεωμένες τάσεις και το έργο της παραμέτρου κράτυνσης. Οι συντελεστές σε αυτούς τους τύπους έχουν επιλεγεί για να ελέγχουν και να ελαχιστοποιούν το σφάλμα, και για να εκτιμηθούν οι καινούριες ανανεωμένες τάσεις και το έργο της παραμέτρου κράτυνσης με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια (Jakobsen et al., 2002):

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{31}{540} \delta \sigma^I + \frac{190}{297} \delta \sigma^{III} - \frac{145}{108} \delta \sigma^{IV} + \frac{351}{220} \delta \sigma^V + \frac{1}{20} \delta \sigma^{VI} \quad (4.27)$$

$$W_p = W_{p,0} + \frac{31}{540} \delta W_p^I + \frac{190}{297} \delta W_p^{III} - \frac{145}{108} \delta W_p^{IV} + \frac{351}{220} \delta W_p^V + \frac{1}{20} \delta W_p^{VI} \quad (4.28)$$

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 + \frac{19}{216} \delta \sigma^I + \frac{1000}{2079} \delta \sigma^{III} - \frac{125}{216} \delta \sigma^{IV} + \frac{81}{88} \delta \sigma^V + \frac{5}{56} \delta \sigma^{VI} \quad (4.29)$$

$$\hat{W}_p = W_{p,0} + \frac{19}{216} \delta W_p^I + \frac{1000}{2079} \delta W_p^{III} - \frac{125}{216} \delta W_p^{IV} + \frac{81}{88} \delta W_p^V + \frac{5}{56} \delta W_p^{VI} \quad (4.30)$$

όπου

$$\delta \sigma^I = C^{ep}(\sigma_0, W_{p,0}) \delta \varepsilon \quad (4.31)$$

$$\delta W_p^I = \delta \lambda_p(\sigma_0, W_{p,0}, \delta \varepsilon) \sigma_0 \frac{\partial g}{\partial \sigma_0} \quad (4.32)$$

$$\delta \sigma^{II} = C^{ep}(\sigma^I, W_p^I) \delta \varepsilon \quad (4.33)$$

$$\delta W_p^{II} = \delta \lambda_p(\sigma^I, W_p^I, \delta \varepsilon) \sigma^I \frac{\partial g}{\partial \sigma^I} \quad (4.34)$$

στην οποία

$$\sigma^I = \sigma_0 + \frac{1}{5} \delta \sigma^I$$

$$W_p^I = W_{p,0} + \frac{1}{5} \delta W_p^I$$

και περαιτέρω

$$\delta \sigma^{III} = C^{ep}(\sigma^{II}, W_p^{II}) \delta \varepsilon \quad (4.35)$$

$$\delta W_p^{III} = \delta \lambda_p(\sigma^{II}, W_p^{II}, \delta \varepsilon) \sigma^{II} \frac{\partial g}{\partial \sigma^{II}} \quad (4.36)$$

στην οποία

$$\sigma^{II} = \sigma_0 + \frac{3}{40} \delta \sigma^I + \frac{9}{40} \delta \sigma^{II}$$

$$W_p^{II} = W_{p,0} + \frac{3}{40} \delta W_p^I + \frac{9}{40} \delta W_p^{II}$$

και περαιτέρω

$$\delta\sigma^{IV} = C^{ep}(\sigma^{III}, W_p^{III})\delta\varepsilon \quad (4.37)$$

$$\delta W_p^{IV} = \delta\lambda_p(\sigma^{III}, W_p^{III}, \delta\varepsilon)\sigma^{III} \frac{\partial g}{\partial \sigma^{III}} \quad (4.38)$$

στην οποία

$$\begin{aligned} \sigma^{III} &= \sigma_0 + \frac{3}{10}\delta\sigma^I - \frac{9}{10}\delta\sigma^{II} + \frac{6}{5}\delta\sigma^{III} \\ W_p^{III} &= W_{p,0} + \frac{3}{10}\delta W_p^I - \frac{9}{10}\delta W_p^{II} + \frac{6}{5}\delta W_p^{III} \end{aligned}$$

και περαιτέρω

$$\delta\sigma^V = C^{ep}(\sigma^{IV}, W_p^{IV})\delta\varepsilon \quad (4.39)$$

$$\delta W_p^V = \delta\lambda_p(\sigma^{IV}, W_p^{IV}, \delta\varepsilon)\sigma^{IV} \frac{\partial g}{\partial \sigma^{IV}} \quad (4.40)$$

στην οποία

$$\begin{aligned} \sigma^{IV} &= \sigma_0 + \frac{226}{729}\delta\sigma^I - \frac{25}{27}\delta\sigma^{II} + \frac{880}{729}\delta\sigma^{III} + \frac{55}{729}\delta\sigma^{IV} \\ W_p^{IV} &= W_{p,0} + \frac{226}{729}\delta W_p^I - \frac{25}{27}\delta W_p^{II} + \frac{880}{729}\delta W_p^{III} + \frac{55}{729}\delta W_p^{IV} \end{aligned}$$

και περαιτέρω

$$\delta\sigma^{VI} = C^{ep}(\sigma^V, W_p^V)\delta\varepsilon \quad (4.41)$$

$$\delta W_p^{VI} = \delta\lambda_p(\sigma^V, W_p^V, \delta\varepsilon)\sigma^V \frac{\partial g}{\partial \sigma^V} \quad (4.42)$$

στην οποία

$$\begin{aligned} \sigma^V &= \sigma_0 - \frac{181}{270}\delta\sigma^I + \frac{5}{2}\delta\sigma^{II} - \frac{266}{297}\delta\sigma^{III} - \frac{91}{27}\delta\sigma^{IV} + \frac{189}{55}\delta\sigma^V \\ W_p^V &= W_{p,0} - \frac{181}{270}\delta W_p^I + \frac{5}{2}\delta W_p^{II} - \frac{266}{297}\delta W_p^{III} - \frac{91}{27}\delta W_p^{IV} + \frac{189}{55}\delta W_p^V \end{aligned}$$

Παρά το ότι η διαδικασία ολοκλήρωσης απαιτεί έξι εκτιμήσεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού μητρώου, το σχήμα γίνεται ταχύτατα ανταγωνιστικό με το τροποποιημένο σχήμα Euler όταν τα επιτρεπτά όρια σφάλματος στενεύουν. Όπως και για το τροποποιημένο σχήμα Euler, το εκτιμώμενο σχετικό σφάλμα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\xi = \frac{\|\hat{\sigma} - \sigma\|}{\|\hat{\sigma}\|} \quad (4.43)$$

Ο συντελεστής που ελέγχει το μέγεθος του επόμενου αδιάστατου βήματος χρόνου αντίθετα δίνεται από τη σχέση:

$$q = 0.9 \left(\frac{\epsilon}{\xi} \right)^{1/5} \quad (4.44)$$

Το σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με ενεργό έλεγχο σφάλματος περιγράφεται περιληπτικά στο Σχήμα 4.7.

$$\begin{aligned}
 & \text{Initial state } \sigma_0, W_{p,0}, \Delta \epsilon, \delta \epsilon_0 = \Delta \epsilon, q = 1 \\
 & \text{Strain increment } i=1,2,\dots,n \\
 & \delta \epsilon_i = \min \left[q \delta \epsilon_{i-1}, \Delta \epsilon - \sum_{j=1}^{i-1} \delta \epsilon_j \right] \\
 & \text{do} \\
 & \quad \text{Stress increments } m=I,II,\dots,VI \\
 & \quad \delta \sigma_i^m = C^{ep}(\sigma_i^{m-1}, W_{p,i}^{m-1}) \delta \epsilon_i \\
 & \quad \delta W_{p,i}^m = \delta \lambda_p(\sigma_i^{m-1}, W_{p,i}^{m-1}, \delta \epsilon_i) \sigma_i^{m-1} \frac{\partial g}{\partial \sigma_i^{m-1}} \\
 & \quad \text{Stop stress incrementation when } j=VI \\
 & \quad \sigma_i = \sigma_{i-1} + \frac{31}{540} \delta \sigma_i^I + \frac{190}{297} \delta \sigma_i^{III} - \frac{145}{108} \delta \sigma_i^{III} + \frac{351}{220} \delta \sigma_i^V + \frac{1}{20} \delta \sigma_i^{VI} \\
 & \quad W_{p,i} = W_{p,i-1} + \frac{31}{540} \delta W_{p,i}^I + \frac{190}{297} \delta W_{p,i}^{III} - \frac{145}{108} \delta W_{p,i}^{IV} + \frac{351}{220} \delta W_{p,i}^V + \frac{1}{20} \delta W_{p,i}^{VI} \\
 & \quad \hat{\sigma}_i = \sigma_{i-1} + \frac{19}{216} \delta \sigma_i^I + \frac{1000}{2079} \delta \sigma_i^{III} - \frac{125}{216} \delta \sigma_i^{III} + \frac{81}{88} \delta \sigma_i^V + \frac{5}{56} \delta \sigma_i^{VI} \\
 & \quad \hat{W}_{p,i} = W_{p,i-1} + \frac{19}{216} \delta W_{p,i}^I + \frac{1000}{2079} \delta W_{p,i}^{III} - \frac{125}{216} \delta W_{p,i}^{IV} + \frac{81}{88} \delta W_{p,i}^V + \frac{5}{56} \delta W_{p,i}^{VI} \\
 & \quad \xi = \frac{\|\hat{\sigma}_i - \sigma_i\|}{\|\hat{\sigma}_i\|} \\
 & \quad \text{If } \xi_i > \epsilon \text{ then } q = \max \left[0.9 \left(\frac{\epsilon}{\xi} \right)^{\frac{1}{2}}, 0.01 \right]; \delta \epsilon_i = q \delta \epsilon_i \\
 & \quad \text{Until } \xi_i \leq \epsilon \\
 & \quad q = \min \left[0.9 \left(\frac{\epsilon}{\xi} \right)^{\frac{1}{2}}, 2 \right] \\
 & \quad \text{Stop strain incrementation when } \sum_{i=1}^n \delta \epsilon_i = \Delta \epsilon \\
 & \quad \text{Final state } \hat{\sigma}_i, \hat{W}_{p,i}, C^{ep}(\hat{\sigma}_i, \hat{W}_{p,i})
 \end{aligned}$$

Σχήμα 4.7. Αλγόριθμος για σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με έλεγχο σφάλματος (Jakobsen et al., 2002).

4.8 Σύγκριση σχημάτων ολοκλήρωσης.

Οι Jakobsen et al. (2002) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα των σχημάτων ολοκλήρωσης που παρουσιάστηκαν ανωτέρω. Γι' αυτό το σκοπό ένα δοκίμιο της άμμου Eastern Scheldt (Jakobsen et al., 1998), υφίσταται τριαξονική θλίψη κάτω από σταθερό όγκο. Η τριαξονική θλίψη ξεκίνησε από μια ανισοτροπική κατάσταση τάσεων του

$$\sigma_0^I = [450 \quad 400 \quad 400 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

με όλες τις τάσεις σε kPa. Η προκύπτουσα τασική όδευση είναι κάπως απλή, επειδή δεν εμπλέκει περιστροφή των κυρίων αξόνων, αλλά ακόμη μια σχετικά μικρή μεταβολή παραμόρφωσης θα μπορεί παρ' όλα αυτά να οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στις κύριες τάσεις. Η προσομοίωση διεξήχθη επιβάλλοντας έναν αριθμό μεταβολών παραμόρφωσης ίσου μεγέθους

$$\Delta \varepsilon^T = 10^{-4} \times [5 \quad -2.5 \quad -2.5 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

χρησιμοποιώντας τα τρία σχήματα ολοκλήρωσης για τον καθορισμό της αντίστοιχης αλλαγής στις τάσεις. Η προκύπτουσα τασική όδευση και η εξέλιξη στην παράμετρο κράτυνσης (Σχήμα 4.8) αποτελούνται από 40 διαδοχικές μεταβολές παραμόρφωσης ίσου μεγέθους. Όλες οι αναγραφόμενες προσομοιώσεις παρουσιάζονται χωρίς διόρθωση για διολίσθηση της επιφάνειας διαρροής.

Το Σχήμα 4.8 δείχνει μια σύγκριση των ενεργών τασικών οδεύσεων για αστράγγιστη τριαξονική θλίψη του στοιχείου της άμμου Eastern Scheldt. Τα σχήματα ολοκλήρωσης τροποποιημένου Euler και Runge-Kutta-Dormand-Prince δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, ενώ το σχήμα ολοκλήρωσης forward Euler παράγει ορατά διαφορετικά αποτελέσματα για μειωμένες τιμές του σ_3 . Αυτή η παρέκκλιση γίνεται λιγότερο ευκρινής στο γραμμικό τμήμα της αστράγγιστης τασικής όδευσης, αλλά η μέθοδος forward Euler γενικά υπερεκτιμά την τελική κατάσταση τάσεων αρκετά. Η εφαρμογή της μεθόδου forward Euler, όμως, βελτιώνεται καθώς ο αριθμός των υποβημάτων στη διαδικασία ολοκλήρωσης αυξάνει. Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν και για την ανάπτυξη της παραμέτρου κράτυνσης W_p , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8γ (Jakobsen et al., 2002).

Οι παραπάνω παρατηρήσεις απεικονίζουν την επίδραση της μεθόδου ολοκλήρωσης για συμπεριφορά υλικών ανεξάρτητη του ρυθμού παραμόρφωσης. Μια μείωση του μεγέθους του $\Delta \varepsilon$ μπορεί να:

- α) Αλλάζει την εμφάνιση της τασικής όδευσης για όλες τις μεθόδους και να οδηγήσει σε αποτελέσματα τα οποία είναι σε καλύτερη συμφωνία με τη "σωστή" λύση.
- β) Μειώσει την ασυμφωνία ανάμεσα στα σχήματα ολοκλήρωσης.
- γ) Μειώσει την υπολογιστική αποδοτικότητα.

Η επιλογή του $\Delta\epsilon$, ως εκ τούτου, θα εξαρτηθεί ουσιαστικά από την απαιτούμενη ακρίβεια της καθολικής λύσης, και ο σκοπός των σχημάτων ολοκλήρωσης απλώς παρέχει μια ακριβής ενημέρωση τάσεων για μια δοσμένη μεταβολή παραμόρφωσης.

Όπως ήδη έχει φανεί, είναι πιθανόν να βρεθούν παρόμοια αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τα τρία διαφορετικά σχήματα. Το υπολογιστικό κόστος συνδέεται στενά με την εκτίμηση του ελαστοπλαστικού καταστατικού μητρώου, και όπως περιγράφηκε παραπάνω, τα σχήματα forward Euler, το τροποποιημένο Euler, και η Runge-Kutta-Dormand-Prince απαιτούν ένα, δύο και έξι εκτιμήσεις ανά υποβήμα, αντίστοιχα. Τα υπολογιστικά κόστη εκτιμήθηκαν παρουσιάζοντας έναν αριθμό από υπολογισμούς, στα οποία οι ενημερωμένες τάσεις πρέπει να βρίσκονται εντός ανεκτών ορίων, ϵ . Αφού δεν είναι διαθέσιμη καμιά αναλυτική λύση για την ολοκλήρωση των σχέσεων του μοντέλου κράτυνσης με μια επιφάνεια διαρροής, οι τάσεις αναφοράς υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με 250 υποβήματα ίσου μεγέθους (Jakobsen et al., 2002).

Πίνακας 4.1. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων ολοκλήρωσης του μοντέλου κράτυνσης με μια επιφάνεια διαρροής χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σχήματα (Jakobsen et al., 2002).

Method	E_{\max}/ϵ			E_{avg}/ϵ		
	$\epsilon=10^{-3}$	$\epsilon=10^{-4}$	$\epsilon=10^{-5}$	$\epsilon=10^{-3}$	$\epsilon=10^{-4}$	$\epsilon=10^{-5}$
FE	1.16 (0.30)	1.16 (0.34)	1.16 (0.31)	0.99 (0.22)	1.00 (0.22)	1.00 (0.23)
ME	0.26 (0.41)	0.41 (0.44)	0.45 (0.45)	0.15 (0.22)	0.22 (0.25)	0.24 (0.26)
RKDP	0.04 (0.04)	0.04 (0.04)	0.13 (0.11)	0.02 (0.01)	0.03 (0.01)	0.10 (0.08)
Method	Maximum number of subincrements			Relative CPU time		
	$\epsilon=10^{-3}$	$\epsilon=10^{-4}$	$\epsilon=10^{-5}$	$\epsilon=10^{-3}$	$\epsilon=10^{-4}$	$\epsilon=10^{-5}$
FE	72	710	7091	9.8	102.9	924.0
ME	10	29	89	0.8	1.6	4.0
RKDP	1	2	3	1.0	1.1	1.1

Σημειώσεις: Οι τιμές που συμβολίζονται με παρενθέσεις (), υποδεικνύουν σφάλματα σε τάσεις μετά τη διόρθωση για ολίσθηση επιφάνειας διαρροής. Forward Euler (FE). Τροποποιημένο Euler (ME). Runge-Kutta-Dormand-Prince (RKDP).

Το σφάλμα σε κάθε μεταβολή $\Delta\epsilon$ για τα διαφορετικά σχήματα μπορεί μετά να εκφραστεί ως εξής:

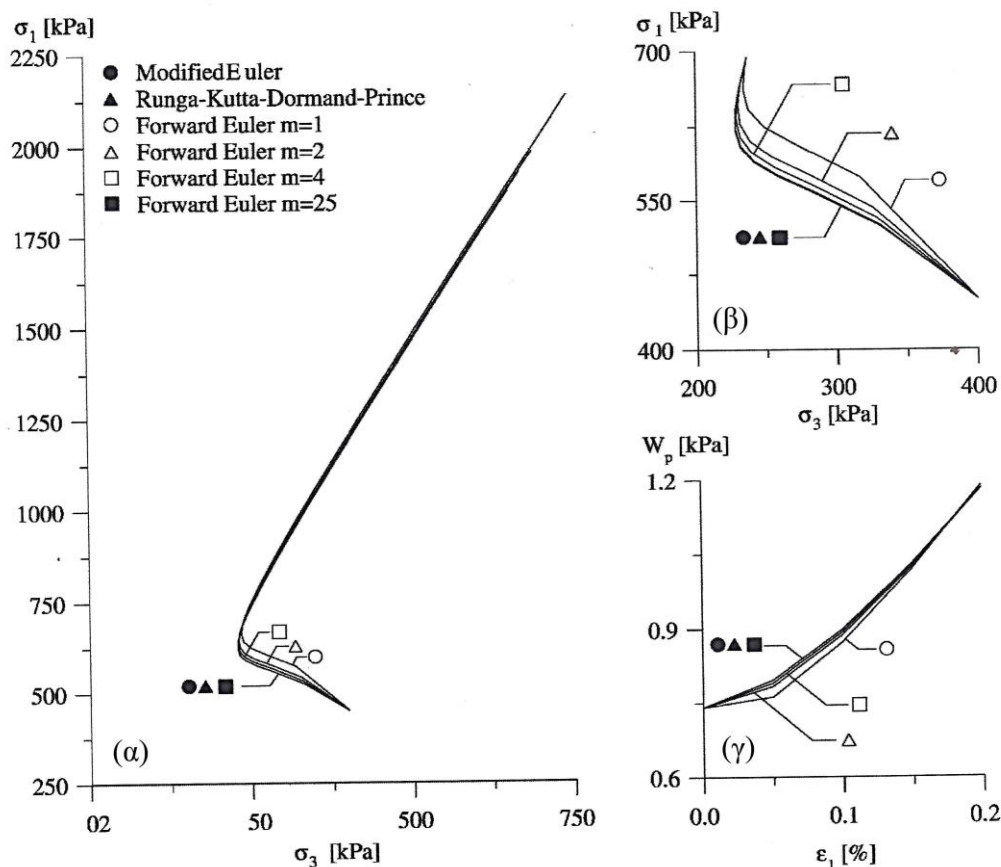
$$E_i = \frac{\|\sigma_i - \sigma_{ref}\|}{\|\sigma_{ref}\|} \quad (4.45)$$

και τα μέσα και μέγιστα σφάλματα κατά μήκος της τασικής όδευσης δίνονται από:

$$E_{avg} = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} E_i \quad (4.46)$$

$$E_{max} = \max E_i \quad \text{για } 1 \leq i \leq 40 \quad (4.47)$$

Ο μέγιστος αριθμός των υποβημάτων εντός μιας ενιαίας μεταβολής παραμόρφωσης και ο συσσωρευμένος σχετικός CPU χρόνος που απαιτείται για την διασφάλιση ενός επιθυμητού ορίου σφάλματος κατά μήκος της τασικής όδευσης στο Σχήμα 4.8, παρατίθενται στον Πίνακα 4.1. Οι προσομοιώσεις έχουν παρουσιαστεί με και χωρίς διόρθωση για ολίσθηση της επιφάνειας διαρροής. Για το σχήμα forward Euler ο αριθμός των υποβημάτων ρυθμίστηκε μέχρι το μέσο σφάλμα να ισούται με ένα επιθυμητό όριο. Τα σχήματα τροποποιημένο Euler και Runge-Kutta-Dormand-Prince χρησιμοποιούν το επιθυμητό όριο σφάλματος για την προσαρμογή του μεγέθους των υποβημάτων. Όπως υποδεικνύεται στον Πίνακα 4.1, οι προσομοιώσεις αποκαλύπτουν ότι τα δύο υψηλότερης τάξης σχήματα έχουν κανονικοποιημένα σφάλματα που είναι ουσιαστικά μικρότερα από τη μονάδα και είναι σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστα από τη διόρθωση της διολίσθησης της επιφάνειας διαρροής. Ωστόσο, η διόρθωση για διολίσθηση της επιφάνειας διαρροής είναι πολύ σημαντική όταν χρησιμοποιείται το σχήμα forward Euler, επειδή μειώνει τα μέγιστα και μέσα σφάλματα σε τάσεις με τουλάχιστον 70%. Επιπλέον, αν η υποδιαίρεση της μεταβολής της παραμόρφωσης είναι ανεπαρκής, η διόρθωση για διολίσθηση της επιφάνειας διαρροής τείνει να ελαττώσει την υπερεκτίμηση της τελικής κατάστασης τάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8 (Jakobsen et al., 2002).



Σχήμα 4.8. Σύγκριση διαφόρων σχημάτων ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό τασικής όδευσης υπό σταθερό όγκο: (α) τασική όδευση στο διάγραμμα $\sigma_3 - \sigma_1$, (β) λεπτομέρεια της τασικής όδευσης, και (γ) ανάπτυξη της παραμέτρου κράτυνσης W_p με τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση (Jakobsen et al., 2002).

Όπως αναμένεται, το σχήμα forward Euler δείχνει μια ανάλογη αύξηση στον μέγιστο αριθμό των υποβημάτων και σχετικό CPU χρόνο με τον περιορισμό του ορίου του σφάλματος. Για το σχήμα του τροποποιημένου Euler ο μέγιστος αριθμός των υποβημάτων και ο σχετικός CPU χρόνος αυξάνεται ελαφρώς με τον περιορισμό του ορίου του σφάλματος, ενώ το σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince επηρεάζεται ελάχιστα. Για όλα τα σχήματα οι πρώτες λίγες μεταβολές (όπου η τασική όδευση αλλάζει κατεύθυνση) είναι αποφασιστικής σημασίας για το μέγιστο αριθμό υποβημάτων που απαιτήθηκαν για την διασφάλιση του ορίου σφάλματος. Έτσι, για τα δυο υψηλότερης τάξης σχήματα ολοκλήρωσης μόνο λίγες από τις επιβαλλόμενες μεταβολές παραμορφώσεων υπόκεινται σε υποβηματισμό.

Συμπερασματικά, το σχήμα ολοκλήρωσης Runge-Kutta-Dormand-Prince υπερτερεί μακράν του τροποποιημένου Euler και του forward Euler από την άποψη και της ακρίβειας

και του υπολογιστικού κόστους, καθώς η απαίτηση για ακρίβεια μεγαλώνει. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα διατριβή το σχήμα ολοκλήρωσης που επιλέγεται για το προηγμένο ελαστοπλαστικό μοντέλο Lade et al. (2002) είναι το Runge-Kutta-Dormand-Prince.

4.9 Ενσωμάτωση του καταστατικού προσομοιώματος Lade στον κώδικα ABAQUS.

Τα πεπερασμένα στοιχεία αποτελούν μια μεθοδολογία επίλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς ενός συνεχούς σώματος. Δεδομένης της γεωμετρίας, των συνοριακών συνθηκών (μετατοπίσεις και φορτία), των καθολικών δυνάμεων (body forces) και των καταστατικών σχέσεων τάσης-παραμόρφωσης του σώματος, υπολογίζονται οι συνοριακές και οι εσωτερικές μετατοπίσεις, παραμορφώσεις και τάσεις. Το συνεχές μέσο προσομοιώνεται από ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους στους κόμβους, συνιστώντας έτσι το διακριτοποιημένο φορέα. Η επίλυση του φορέα δίνει τις παραμορφώσεις και τάσεις σε όλα τα στοιχεία και τις μετατοπίσεις και δυνάμεις σε όλους τους κόμβους (Μπελόκας και Καββαδάς, 2010).

Στα ελαστοπλαστικά καταστατικά προσομοιώματα, όπως το προχωρημένο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα του Lade et al. (2002), είναι δυνατή η ρεαλιστική αριθμητική προσομοίωση της γενικά πολύπλοκης σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων εδαφικών υλικών. Για την επίλυση σύνθετων γεωτεχνικών προβλημάτων απαιτείται η ενσωμάτωση του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος σε ένα κατάλληλο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος στην παρούσα διατριβή είναι το πρόγραμμα ABAQUS (2014). Η ενσωμάτωση του καταστατικού προσομοιώματος Lade έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77. Η σχετική υπορουτίνα UMAT (User Material), αποτελείται από 22 υπορουτίνες. Η δημιουργία του κώδικα καθορίστηκε με βάση το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 4.2 για την επίλυση του καταστατικού μοντέλου. Μέσα στον κώδικα καθορίζονται οι παράμετροι (PROPS) του μοντέλου Lade, οι μεταβλητές κατάστασης (STATEV), καθώς επίσης και κάποιες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα ABAQUS. Οι υπορουτίνες περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο τις καταστατικές εξισώσεις του μοντέλου που αναφέρονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Οι παράμετροι (PROPS) του μοντέλου Lade και οι μεταβλητές κατάστασης (STATEV), που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα FORTRAN 77 για το προχωρημένο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο του Lade στο ABAQUS, είναι οι ακόλουθες:

PROPS(1) : Παράμετρος α του κριτηρίου αστοχίας.

PROPS(2) : Παράμετρος m του κριτηρίου αστοχίας.

PROPS(3)	: Παράμετρος n_1 του κριτηρίου αστοχίας.
PROPS(4)	: Παράμετρος M του μέτρου του Young.
PROPS(5)	: Παράμετρος λ του μέτρου του Young.
PROPS(6)	: Παράμετρος ν του λόγου Poisson.
PROPS(7)	: Παράμετρος ψ_2 της συνάρτησης πλαστικού δυναμικού.
PROPS(8)	: Παράμετρος μ της συνάρτησης πλαστικού δυναμικού.
PROPS(9)	: Παράμετρος C του πλαστικού έργου του νόμου κράτυνσης.
PROPS(10)	: Παράμετρος p του πλαστικού έργου του νόμου κράτυνσης.
PROPS(11)	: Παράμετρος b της συνάρτησης χαλάρωσης.
PROPS(12)	: Παράμετρος h της συνάρτησης διαρροής.
PROPS(13)	: Παράμετρος α της συνάρτησης διαρροής.
PROPS(14)	: Παράμετρος p_a , ατμοσφαιρική πίεση.
PROPS(15)	: Παράμετρος Newton, αριθμός επαναλήψεων.
PROPS(16)	: Παράμετρος TOL1, ανοχή 1.
PROPS(17)	: Παράμετρος TOL2, ανοχή 2.
PROPS(18)	: Παράμετρος ψ_1 της συνάρτησης πλαστικού δυναμικού.
PROPS(19)	: Παράμετρος ρ του πλαστικού έργου του νόμου κράτυνσης.
PROPS(20)	: Παράμετρος D του πλαστικού έργου του νόμου κράτυνσης.
PROPS(21)	: Παράμετρος DI του πλαστικού έργου του νόμου κράτυνσης.
PROPS(22)	: Τελευταίο βήμα της σταδιακής κατασκευής.
STATEV(1)	: Τρέχουσα τιμή της συνάρτησης διαρροής.
STATEV(2)	: Τρέχουσα τιμή της συνάρτησης κράτυνσης/χαλάρωσης.
STATEV(3)	: Τρέχουσα τιμή του πλαστικού έργου.
STATEV(4)	: Τρέχουσα τιμή της σημαίας αστοχίας.
STATEV(5)	: Τρέχουσα τιμή της παραμέτρου A της συνάρτησης χαλάρωσης.
STATEV(6)	: Τρέχουσα τιμή της παραμέτρου B της συνάρτησης χαλάρωσης.
STATEV(7)	: Τρέχουσα τιμή του επιπέδου τάσεων S που σχετίζεται με τη συνάρτηση αστοχίας.
STATEV(8)	: Τρέχουσα τιμή του μέτρου του Young.
STATEV(9)	: Τρέχουσα τιμή του σφάλματος Newton-Raphson.
STATEV(10)	: Τρέχουσα τιμή του σφάλματος Runge-Kutta-Dormand-Prince.
STATEV(11-16)	: Τρέχουσα τιμή των μεταβολών των ελαστικών παραμορφώσεων.
STATEV(17-22)	: Τρέχουσα τιμή των μεταβολών των πλαστικών παραμορφώσεων.

- STATEV(23) : Τρέχουσα τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης.
STATEV(24) : Τρέχουσα τιμή της μέγιστης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης βαθμίδας.

Οι υπορουτίνες και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία του κώδικα σε FORTRAN 77 για το προχωρημένο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο του Lade στο ABAQUS, χρησιμοποιώντας τη βαθμίδα πλαστικότητας και η λειτουργία τους, παρουσιάζονται παρακάτω:

1. FINITIAL : Καθορίζει τις αρχικές εξαρτημένες μεταβλητές κατάστασης STATEV.
2. FINVAR : Ορίζει τις τρεις αναλλοίωτες του τανυστή τάσεων I_1, I_2, I_3 και τη δεύτερη αναλλοίωτη του αποκλίνοντα τανυστή τάσεων J'_2 .
3. PRINCE : Υπολογίζει τις κύριες τάσεις.
4. ELASTIC : Υπολογίζει το ανανεωμένο ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας C^e .
5. FAILURE : Ορίζει το κριτήριο της αστοχίας f_n .
6. CHECKSTRESS : Ελέγχει για αρνητικές ή μηδενικές κύριες τάσεις.
7. YIELD : Καθορίζει την εξίσωση διαρροής f'_p .
8. HARD : Ορίζει την επιφάνεια διαρροής για κράτυνση f''_p .
9. SOFT : Ορίζει την επιφάνεια διαρροής για χαλάρωση f''_p .
10. DHARDENING : Υπολογίζει την παράγωγο της συνάρτησης διαρροής σε σχέση με το πλαστικό έργο για κράτυνση $\frac{\partial f_p}{\partial W_p}$.
11. DSOFTEENING : Υπολογίζει την παράγωγο της συνάρτησης διαρροής σε σχέση με το πλαστικό έργο για χαλάρωση $\frac{\partial f_p}{\partial W_p}$.
12. POT : Καθορίζει τη συνάρτηση πλαστικού δυναμικού g_p .
13. DERFP : Υπολογίζει τις παραγώγους της συνάρτησης διαρροής $\frac{\partial f'_p}{\partial \sigma}$.
14. DHSM : Υπολογίζει την παράγωγο της συνάρτησης διαρροής σε σχέση με το πλαστικό έργο τροποποιημένο με ένα συντελεστή βαθμίδας πλαστικότητας.

15. FNEWTON : Υπολογίζει με τη μέθοδο Newton–Raphson την εύρεση του σημείου τομής με την επιφάνεια διαρροής.
16. RKDP : Χρησιμοποιεί το Σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince με έλεγχο σφάλματος για να εκτιμηθούν οι καινούριες ανανεωμένες τάσεις και το έργο της παραμέτρου κράτυνσης.
17. PLASTIC : Υπολογίζει το ελαστοπλαστικό μητρώο δυσκαμψίας C^{ep} και το συντελεστή αναλογίας $d\lambda_p$.
18. VECMAT : Πολλαπλασιάζει μητρώο (6,6) με διάνυσμα (6).
19. FNORM : Υπολογίζει τη νόρμα του διανύσματος.
20. EFLEX : Υπολογίζει το ανανεωμένο ελαστικό μητρώο ευκαμψίας.
21. GRADIENT : Ορίζει τη βαθμίδα πλαστικότητας.
22. USDFLD : Επαναπροσδιορίζει τις μεταβλητές πεδίου.

4.10 Επιβεβαίωση του καταστατικού προσομοιώματος Lade.

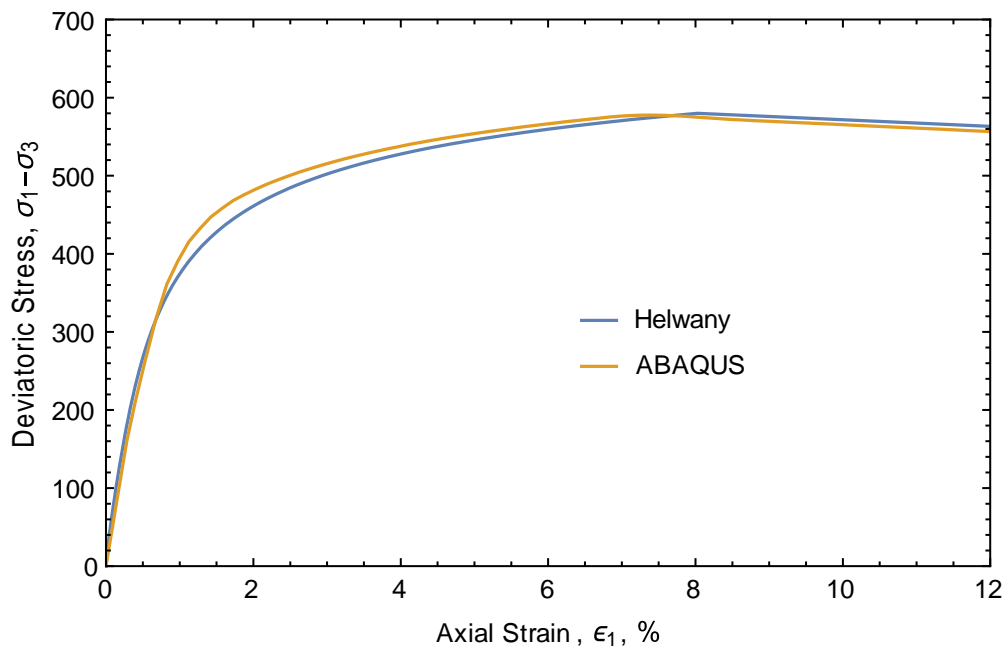
Προκειμένου να επιβεβαιωθεί το καταστατικό προσομοίωμα του Lade, διεξάγονται αρκετές αναλύσεις και τριαξονικές δοκιμές σε κυβικά δοκίμια υλικών λιθορριπής με συγκεκριμένες ιδιότητες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που έχουν προκύψει από υπάρχουσες βιβλιογραφικές αναφορές για το συγκεκριμένο μοντέλο. Παρατηρείται γενικά ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει με ρεαλιστικό τρόπο τη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης και την ογκομετρική παραμόρφωση σε διάφορα επίπεδα τάσεων και για διαφορετικά υλικά, ενώ αντίστοιχα υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου Lade και των αριθμητικών αποτελεσμάτων που υπάρχουν στις βιβλιογραφικές αναφορές. Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω τρεις περιπτώσεις διαφορετικών υλικών που υφίστανται τριαξονικές δοκιμές σε κυβικά δοκίμια για διάφορες περιβάλλοντες τάσεις.

Στην πρώτη περίπτωση ελέγχεται η σχέση τάσης-παραμόρφωσης και η ογκομετρική παραμόρφωση σε μία δοκιμή τριαξονικής θλίψης αναφορικά με μία επίσης αναλυτική λύση του προσομοιώματος Lade από τον Helwany (2007). Ένα δοκίμιο υποβάλλεται αρχικά σε μία ισοτροπική τάση ίσης προς 160 kPa και στην συνέχεια υποβάλλεται σε θλίψη. Οι παράμετροι του προσομοιώματος του εδαφικού υλικού δίδονται στον Πίνακα 4.2. Στο Σχήμα 4.9α παρουσιάζεται η σχέση τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής τριαξονικής θλίψης με χρήση του προσομοιώματος Lade από την αριθμητική επίλυση του

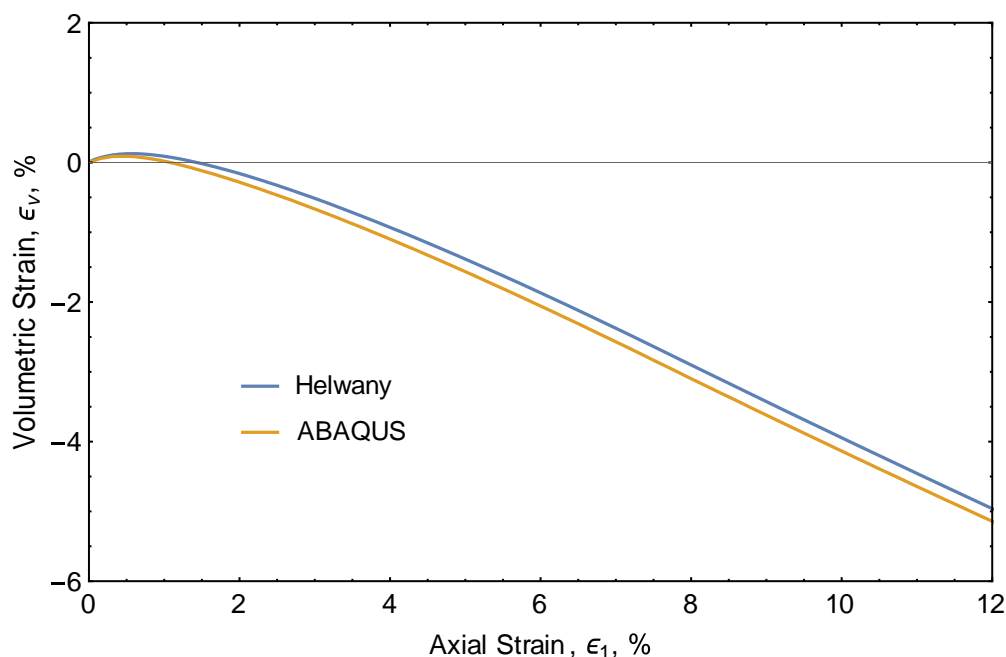
Helwany (2007) και του ABAQUS. Επίσης στο Σχήμα 4.9β παρουσιάζεται η ογκομετρική παραμόρφωση από τις δύο προσομοιώσεις. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των τάσεων και ογκομετρικών παραμορφώσεων ευρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία.

Πίνακας 4.2. Παράμετροι του μοντέλου Lade (Helwany, 2007).

Παράμετρος	M	λ	ν	m	n_1	ψ_2	μ	h	a	C	p	b
Τιμή	458.45	0.414	0.3	0.288	70.19	-3.154	2.061	0.5525	0.6166	0.00013	1.607	0.5



Σχήμα 4.9α. Σύγκριση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης από προσομοίωση δοκιμής τριαξονικής θλίψης με χρήση του προσομοιώματος Lade από την αριθμητική επίλυση του Helwany (2007) και του ABAQUS.

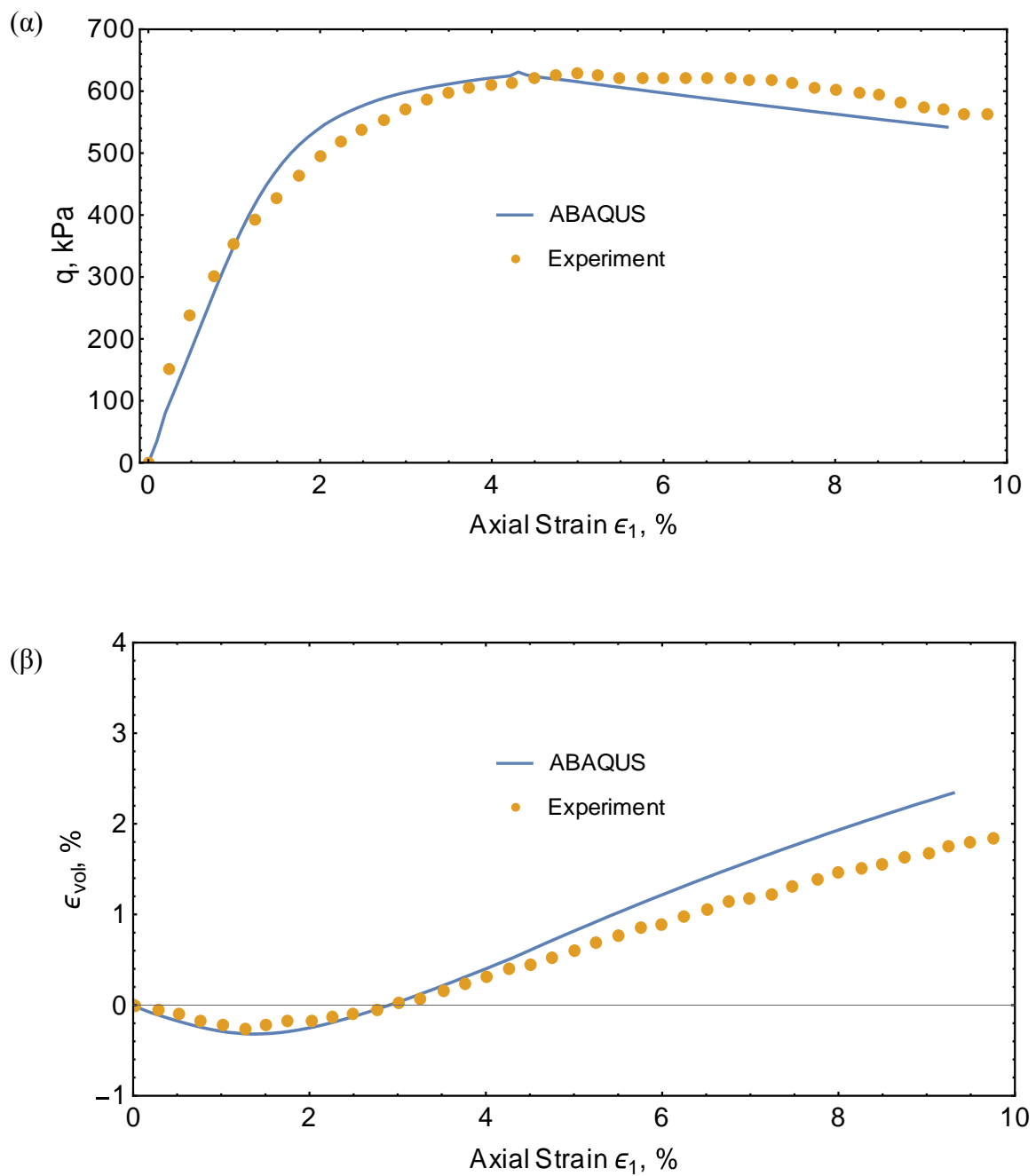


Σχήμα 4.9β. Σύγκριση της ογκομετρικής παραμόρφωσης από προσομοίωση δοκιμής τριαξονικής θλίψης με χρήση του προσομοιώματος Lade από την αριθμητική επίλυση του Helwany (2007) και του ABAQUS.

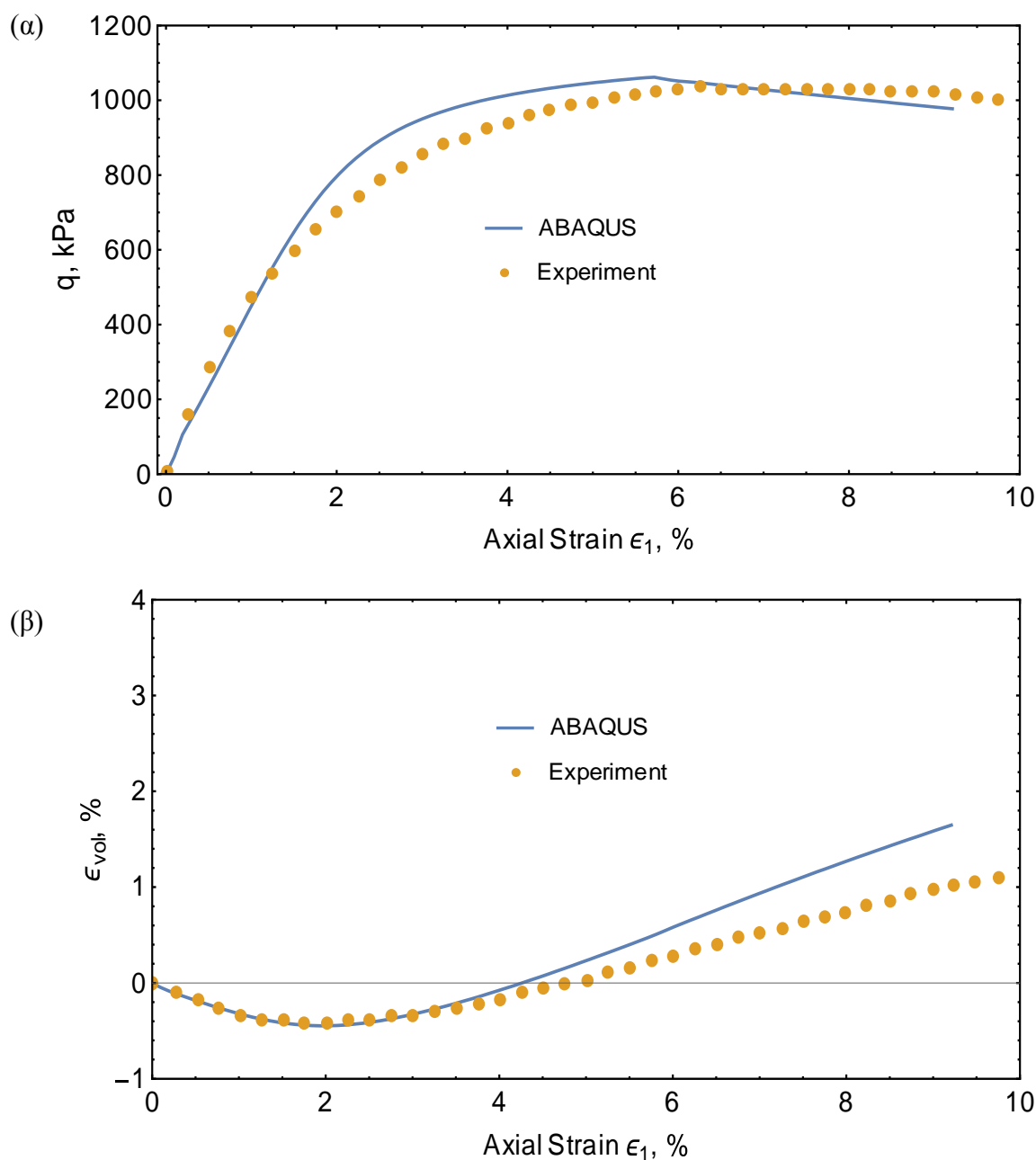
Η δεύτερη περίπτωση αφορά τριαξονική δοκιμή σε κυβικά δοκίμια που έχουν υποβληθεί σε δύο διαφορετικές περιβάλλουσες τάσεις ίσες με 172.37 kPa και 310.26 kPa σε πυκνό ιλο-αμμώδες υλικό με τις παραμέτρους του μοντέλου Lade που αναφέρονται στον Πίνακα 4.3. Στα Σχήματα 4.10 και 4.11 απεικονίζονται οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων από τις τριαξονικές δοκιμές των προβλέψεων του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade που ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που ορίζονται στον Πίνακα 4.3, για περιβάλλουσες τάσεις αντίστοιχα ίσες με 172.37 kPa και 310.26 kPa. Με τη μπλε συμπαγή γραμμή απεικονίζονται τα προβλεπόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δοκιμές και τις αναλύσεις του μοντέλου, ενώ με τους κύκλους τα υπάρχοντα αριθμητικά αποτελέσματα.

Πίνακας 4.3. Παράμετροι του μοντέλου Lade για πυκνό ιλο-αμμώδες υλικό (Helwany, 2007).

Παράμετρος	M	λ	ν	m	n_1	ψ_2	μ	h	a	C	p	b
Τιμή	250	0.21	0.3	0.154	52	-3.42	2.3	0.83	0.25	0.0002	1.6	0.15



Σχήμα 4.10. Προβλέψεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade και πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ιλυο-αργιλώδες υλικού για περιβάλλουσα τάση ίση με 172.37 kPa. (α) Σχέση τάσης-παραμόρφωσης και (β) ογκομετρικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 4.11. Προβλέψεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade και πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ιλυο-αργιλώδες υλικού για περιβάλλουσα τάση ίση με 310.26 kPa. (α) Σχέση τάσης-παραμόρφωσης και (β) ογκομετρικές παραμορφώσεις.

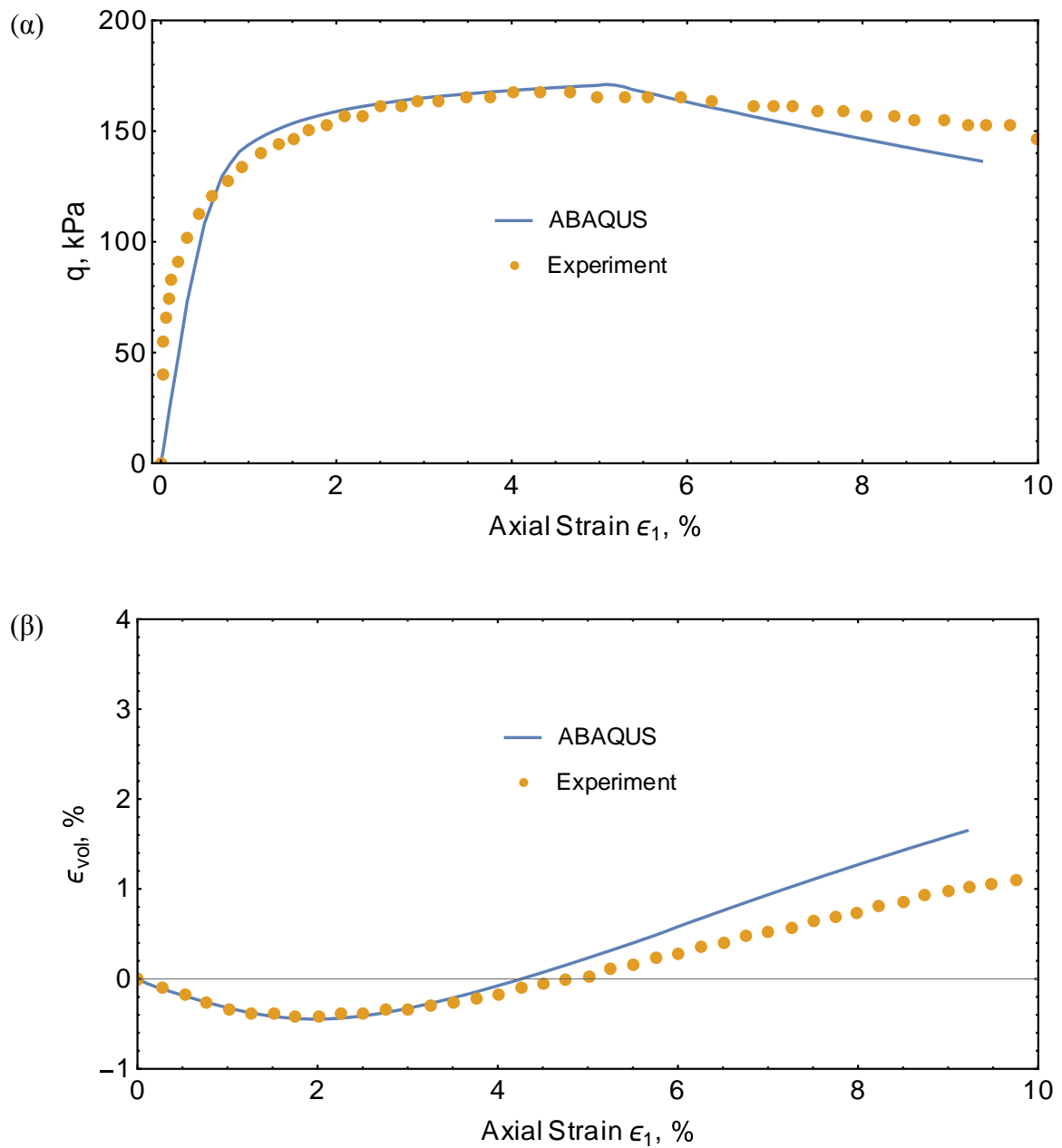
Η τρίτη περίπτωση αφορά τριαξονική δοκιμή σε κυβικό δοκίμιο πυκνής λεπτόκοκκης πυριτικής άμμου που έχει υποβληθεί σε περιβάλλουσα τάση ίση με 34.24 kPa. Οι παράμετροι του μοντέλου Lade δίδονται στον Πίνακα 4.4. Στο Σχήμα 4.12, απεικονίζονται οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων από τις τριαξονικές δοκιμές των

προβλέψεων του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade που ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και τα πειραματικά αποτελέσματα για περιβάλλουσα τάση αντίστοιχα ίση με 34.24 kPa. Με τη μπλε συμπαγή γραμμή απεικονίζονται τα προβλεπόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δοκιμές και τις αναλύσεις του μοντέλου, ενώ με κύκλους τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.

Πίνακας 4.4. Παράμετροι του μοντέλου Lade για πυκνή λεπτόκοκκη πυριτική άμμο (Alsaleh, 2004).

Παράμετρος	M	λ	ν	m	n_1	ψ_2	μ	h	a	C	p	b
Τιμή	292.6	0.25	0.13	0.37	84.1	-3.06	2.2	0.95	0.30	7^{-5}	2.6	0.75

Από τις απεικονίσεις των γραφικών παραστάσεων στα Σχήματα 4.10, 4.11 και 4.12, όπου συγκρίνονται προβλέψεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade και μετρήσεις από πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών, διαπιστώνεται ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει με ένα ρεαλιστικό τρόπο τη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης και την ογκομετρική παραμόρφωση σε διάφορες περιβάλλουσες τάσεις.



Σχήμα 4.12. Προβλέψεις του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Lade και πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών πυκνής λεπτόκοκκης πυριτικής άμμου για περιβάλλουσα τάση ίση με 34.24 kPa. (α) Σχέση τάσης-παραμόρφωσης και (β) ογκομετρικές παραμορφώσεις.

4.11 Εφαρμογή της βαθμίδας πλαστικότητας.

Ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε κοκκώδη υλικά συνδέεται με τη συγκέντρωση της πλαστικής παραμόρφωσης σε στενές ζώνες διάτμησης και διάρρηξης (Hattemleh et al., 2004). Τα δύο αυτά φαινόμενα ελέγχουν τη συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών σε μια ποικιλία γεωτεχνικών εφαρμογών μηχανικής. Στην ανάλυση μεγάλων χωμάτων και λιθόρριπτων φραγμάτων, τέτοιες συγκεντρώσεις πλαστικών παραμορφώσεων μπορούν να αναπτυχθούν κοντά στα αντερείσματα και κατά μήκος των απότομων κεκλιμένων διεπαφών των ζωνών των υλικών διαφορετικής δυσκαμψίας.

Για κοκκώδη υλικά όπως η λιθορριπή, μια εσωτερική κλίμακα μήκους l μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα μέτρο του μεγέθους των κόκκων λιθορριπής. Ένα τέτοιο εσωτερικό μήκος μπορεί να γίνει μια χρήσιμη παράμετρος όταν το υλικό βιώνει έντονη τοπική βαθμίδα παραμόρφωσης. Πράγματι, οι θεωρίες της βαθμίδας παραμόρφωσης ενσωματωμένες στα κλασικά ελαστοπλαστικά καταστατικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά προκειμένου να επιτρέψουν το σχηματισμό ζωνών διάτμησης που είναι ανεξάρτητες του καννάβου (Hattemleh et al., 2004).

Εκτός από τα εμφανή πλεονεκτήματα σε κατάλληλη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης, της διασταλτικότητας και του σχηματισμού των ζωνών διάτμησης, η χρήση των προηγμένων καταστατικών μοντέλων για κοκκώδες υλικό, όπως το μοντέλο του Lade, ενδέχεται να αντιμετωπίσει υπό ορισμένες συνθήκες αριθμητικές δυσκολίες, λόγω της ισχυρής εξάρτησης της δυσκαμψίας του υλικού και χαρακτηριστικών κράτυνσης/χαλάρωσης στην κατάσταση τάσεων. Για παράδειγμα, σε τρισδιάστατη ανάλυση μεγάλων φραγμάτων που περιλαμβάνουν δεκάδες χιλιάδες πεπερασμένα στοιχεία, είναι πιθανό ένας μικρός αριθμός στοιχείων να μπορεί να υποστεί έντονη τοπική βαθμίδα παραμόρφωσης. Η ύπαρξη έστω και ενός στοιχείου κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητικές δυσκολίες που συνδέονται με την αργή σύγκλιση που μπορεί να απαιτήσει σημαντικό υπολογιστικό χρόνο. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους αριθμητικά προβλήματα που προκαλούνται από τοπικές ανωμαλίες, είναι σκόπιμο να υιοθετηθεί μια διορθωτική μεθοδολογία βασισμένη σε βαθμίδα πλαστικότητας, η οποία θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί με ένα «χειρουργικό» τρόπο μόνο για τα συγκεκριμένα στοιχεία που αντιμετωπίζουν τέτοια προβλήματα, χωρίς να επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων στο υπόλοιπο αριθμητικό μοντέλο.

Σε αυτή τη διατριβή, το μοντέλο του Lade ενισχύεται χρησιμοποιώντας βαθμίδα πλαστικότητας ώστε να αποφευχθούν αριθμητικές δυσκολίες σε κρίσιμες θέσεις. Η

ενίσχυση βασίζεται στην προσαρμογή μιας απλής θεωρίας βαθμίδας που παρουσιάστηκε από τον Bassani (2001) και περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής. Η τροποποίηση που υιοθετήθηκε ως μια προαιρετική ενίσχυση, επιτρέπει μια τοπική αύξηση της κράτυνσης σε πεπερασμένα στοιχεία βιώνοντας πολύ έντονη πλαστική βαθμίδα παραμόρφωσης. Η προτεινόμενη μέθοδος έχει ως εξής:

Η συσσωρευμένη ισοδύναμη αποκλίνουσα πλαστική παραμόρφωση e_q^p υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_q^p = \sum \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} \left((de_x^p)^2 + (de_y^p)^2 + (de_z^p)^2 \right) + (de_{xy}^p)^2 + (de_{yz}^p)^2 + (de_{zx}^p)^2 \right)^{1/2} \quad (4.48)$$

όπου de_{ij}^p η μεταβολή της αποκλίνουσας πλαστικής παραμόρφωσης. Με βάση τη βαθμίδα του e_q^p εντός του πεπερασμένου στοιχείου, ένας συντελεστής c_1 υπολογίζεται από την έκφραση:

$$c_1 = \left[1 + l^2 \left(\frac{g_r}{\gamma_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.49)$$

όπου l είναι η εσωτερική κλίμακα μήκους, η οποία μπορεί να είναι η μέση ή μέγιστη διάμετρος κόκκου, γ_0 η παραμόρφωση αναφοράς, που παριστάνει το εύρος της ουσιαστικής ελαστικής περιοχής του υλικού, g_r η νόρμα της βαθμίδας του e_q^p που δίνεται ως εξής:

$$g_r = \left(\left(\frac{\partial e_q^p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial e_q^p}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial e_q^p}{\partial z} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (4.50)$$

Ο συντελεστής c_1 χρησιμοποιείται για να τροποποιήσει τη συμπεριφορά κράτυνσης του υλικού με δύο διαφορετικούς τρόπους:

α) Το μέτρο πλαστικότητας H δίνεται αρχικά από τη σχέση:

$$H = - \frac{\partial f_p^n}{\partial W_p} \mu g \quad (4.51)$$

το οποίο τροποποιείται ως ακολούθως:

$$H^* = \begin{cases} H c_1 & \text{για κράτυνση} \\ H / c_1 & \text{για χαλάρωση} \end{cases} \quad (4.52)$$

και ως εκ τούτου, αυξάνεται το μέτρο κράτυνσης ή μειώνεται το μέτρο χαλάρωσης σε στοιχεία με υψηλές τιμές του g_r .

β) Για τη γενική περίπτωση των συνεκτικών εδαφών, η ενεργός συνοχή α ξαναδιατυπώνεται ως εξής:

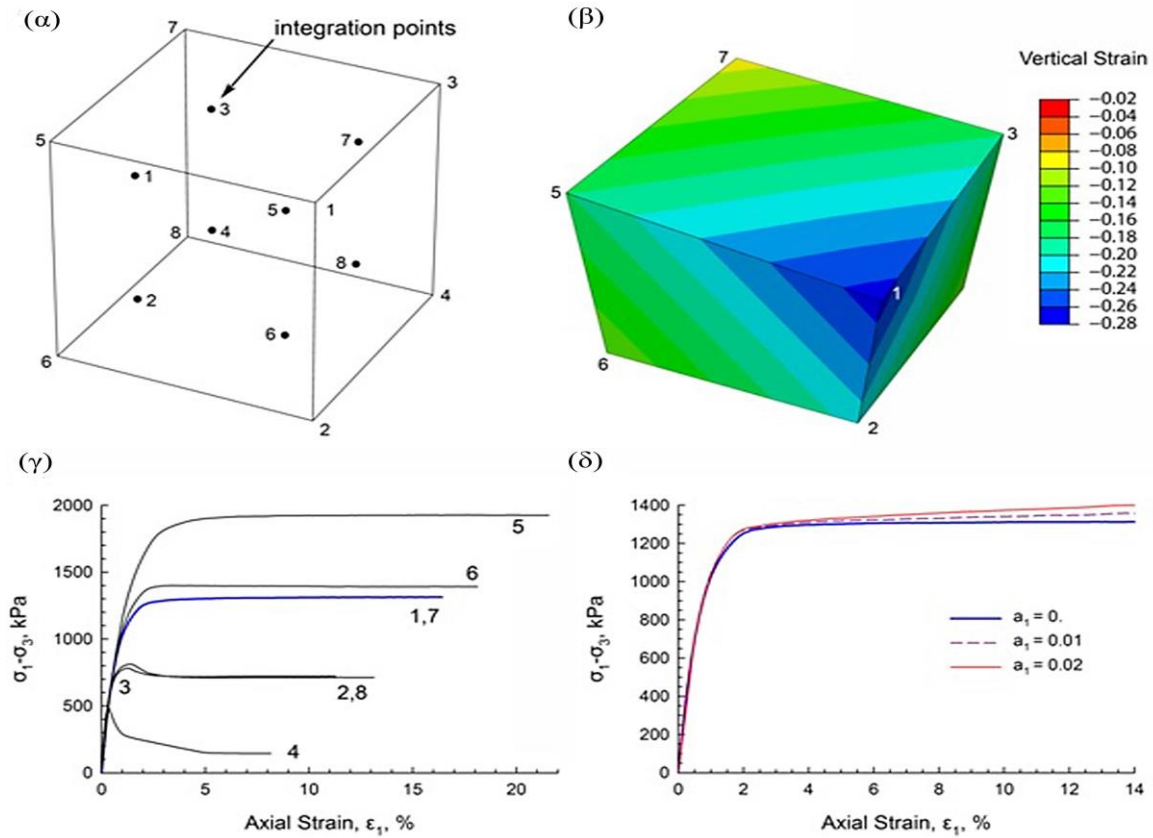
$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 c_1 \quad (4.53)$$

όπου το α_1 λαμβάνει σχετικά μικρές τιμές (π.χ., $\alpha_1 p_a \leq 5 \text{ kPa}$) και χρησιμοποιείται εδώ για να επιτρέψει μια ήπια αύξηση της ενεργούς συνοχής με αυξανόμενες τιμές του c_1 . Για ένα κοκκώδες έδαφος όπως η λιθορριπή, ο όρος συνοχής α_0 είναι ίσος με το μηδέν και ως εκ τούτου $\alpha = \alpha_1 c_1$. Σημειώνεται ότι για σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της ισοδύναμης αποκλίνουσας πλαστικής παραμόρφωσης e_q^p , ο συντελεστής c_1 προσεγγίζει την τιμή του ενός ($c_1 \rightarrow 1$), και ως εκ τούτου η τροποποίηση της βαθμίδας πλαστικότητας δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του στοιχείου. Επίσης, όλα τα στοιχεία με ένα μόνο σημείο ολοκλήρωσης έχουν μηδενική βαθμίδα εντός του στοιχείου, καταλήγοντας στο $c_1 = 1$.

Προκειμένου να καταδειχθεί η επίδραση της ενίσχυσης του μοντέλου που βασίζεται σε βαθμίδα πλαστικότητας, ένα ενδεικτικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13. Ένα κυβικό δοκίμιο του υλικού λιθορριπής που έχει τις ιδιότητες της λιθορριπής του φράγματος Oroville (Πίνακας 5.5) εξετάζεται, αρχικά χωρίς την εφαρμογή του σχήματος βαθμίδας πλαστικότητας. Το δοκίμιο μοντελοποιείται με ένα μόνο εξαεδρικό στοιχείο με 8 σημεία ολοκλήρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13α. Πρώτα, το στοιχείο υποβάλλεται σε μια ισοτροπική τάση ίση με 207 kPa και, στη συνέχεια, σε μη ομοιόμορφη κατακόρυφη μετατόπιση, κατά την οποία η άνω επιφάνεια παραμένει ένα τέλειο επίπεδο. Το Σχήμα 4.13β απεικονίζει την κατανομή της κατακόρυφης τάσης στο τέλος της δοκιμής, ενώ το Σχήμα 4.13γ απεικονίζει τη συμπεριφορά της τάσης-παραμόρφωσης στα 8 σημεία ολοκλήρωσης. Λόγω της επιβαλλόμενης έντονης μη ομοιόμορφης κατακόρυφης μετατόπισης, είναι προφανές ότι η κατάσταση τάσεων και η αντίστοιχη συμπεριφορά κράτυνσης ή χαλάρωσης στα σημεία ολοκλήρωσης ποικίλλει σημαντικά. Η ίδια δοκιμή προσομοίωσης επαναλαμβάνεται, εφαρμόζοντας το σχήμα της βαθμίδας πλαστικότητας, για παραμέτρους του μοντέλου $l=0.2m$, $\gamma_0=0.0025$ και η μεταβλητή τιμή του α_1 . Το Σχήμα 4.13δ δείχνει μια αύξηση της συμπεριφοράς κράτυνσης στο σημείο ολοκλήρωσης 1 με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου α_1 (π.χ., $\alpha_1 = 0, 0.01$, και 0.02 αντιστοιχούν σε μια ενεργό συνοχή $\alpha_1 p_a = 0, 1$, και 2 kPa).

Προφανώς, δοκιμές προσομοίωσης ελεγχόμενης παραμόρφωσης όπως αυτή στο Σχήμα 4.13, δεν προκαλούν αριθμητικά προβλήματα. Ωστόσο, σε μεγάλες εφαρμογές, όπως η ανάλυση ενός φράγματος λιθορριπής, η χρήση του προτεινόμενου συστήματος βαθμίδας πλαστικότητας έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ αποτελεσματική στην πρόληψη

αριθμητικών προβλημάτων που σχετίζονται με το τοπικές ανωμαλίες της γεωμετρίας ή συγκέντρωσης τάσεων.



Σχήμα 4.13. (α) Εξαεδρικό στερεό στοιχείο με 8 σημεία ολοκλήρωσης, (β) Εφαρμογή της μη ομοιόμορφης κατακόρυφης παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια τριαξονικής θλίψης, (γ) Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε διαφορετικά σημεία ολοκλήρωσης, (δ) Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης στο σημείο ολοκλήρωσης No. 1 για ενεργό συνοχή $\alpha_1 p_\alpha = 0, 1, 2$ kPa.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

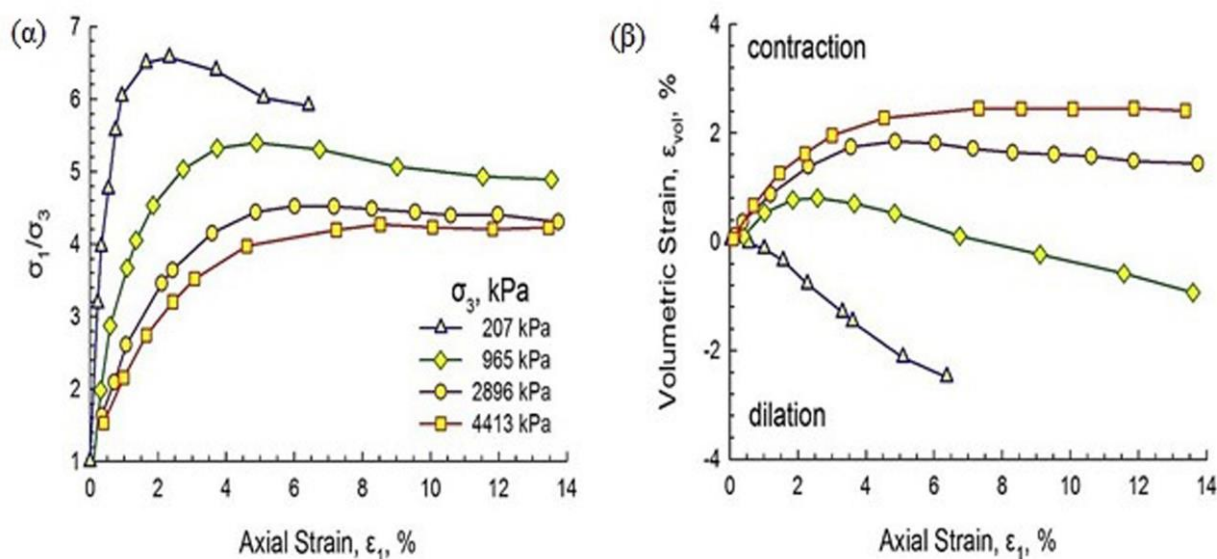
Διερεύνηση της επίδρασης κλίμακας και δυσκαμψίας λιθορριπής στη συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

5.1 Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των μοντέλων Lade και Duncan-Chang.

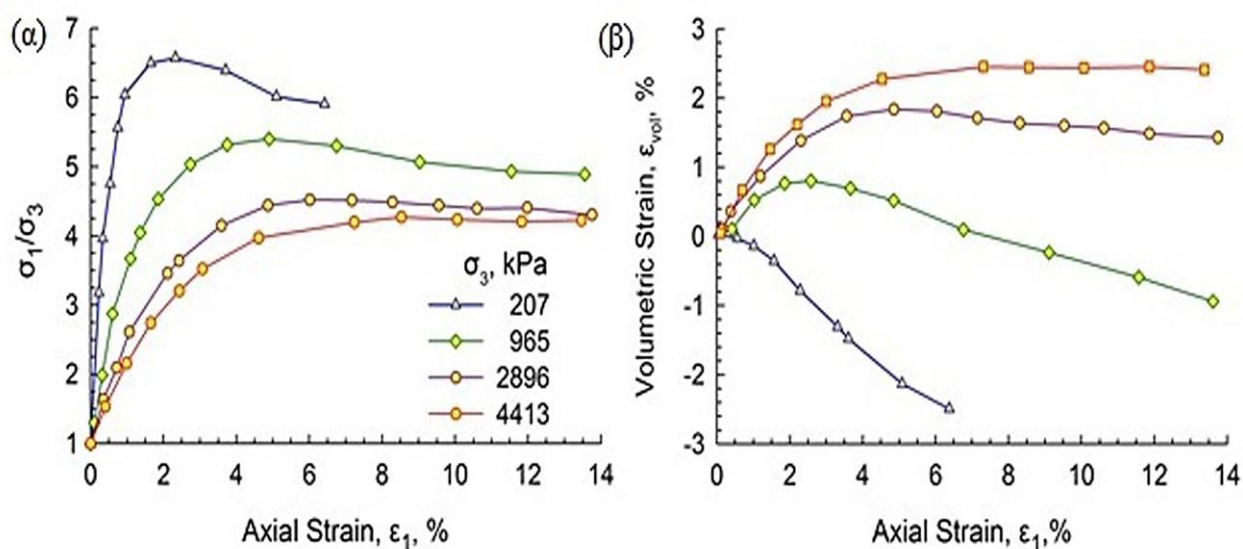
Ένα σημαντικό στοιχείο στη συμπεριφορά του κοκκώδους υλικού είναι η ρεαλιστική αντιπροσώπευση της συστολικής ή διαστολικής παραμόρφωσης υπό διαφορετικές συνθήκες πυκνότητας και περιβάλλουσας τάσης. Με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς διαφορετικών προσομοιωμάτων λιθορριπής, διερευνάται παρακάτω η επίδραση της συμπεριφοράς της λιθορριπής στην εντατική κατάσταση και παραμόρφωση της ανάντη πλάκας φράγματος ύψους 200 m με τη χρήση δύο διαφορετικών προσομοιωμάτων λιθορριπής: (α) του ελαστο-πλαστικού προσομοιώματος Lade, το οποίο ενσωματώθηκε στον κώδικα ABAQUS ως μέρος αυτής της διατριβής και (β) του μη-γραμμικού προσομοιώματος Duncan-Chang το οποίο είναι επίσης ενσωματωμένο στον κώδικα ABAQUS (Dakoulas, 2012a,b; Dakoulas et. al., 2008).

α) Μοντέλο Lade

Στο Σχήμα 5.1 δίνονται πειραματικά αποτελέσματα λιθορριπής από το φράγμα Oroville (Marachi et al., 1972) σε δοκίμια διαμέτρου 0.91 m, στα οποία είναι εμφανής η μεγάλη επίδραση της περιβάλλουσας τάσης στις ογκομετρικές παραμορφώσεις. Σε λιθορριπή με γωνιώδεις κόκκους, οι ογκομετρικές παραμορφώσεις είναι δυνατόν να είναι αρκετά πιο έντονες από αυτές στο Σχήμα 5.1 (Marachi et al., 1972). Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά αυτή επηρεάζει σημαντικά τη βύθιση και εντατική κατάσταση της πλάκας. Το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα του Lade et al. (2002) για κοκκώδη υλικά προσομοιώνει με ρεαλιστικό τρόπο τη μη-γραμμική εξάρτηση της δυσκαμψίας από την εντατική κατάσταση και τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης υπό τριδιάστατες συνθήκες φόρτισης, όπως έχει αποδειχθεί από πολυάριθμες συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα. Είναι επίσης δυνατόν να εκφράσει με ρεαλιστικό τρόπο την μεταβολή της διαστατικότητας του υλικού ως συνάρτηση της σχετικής πυκνότητας και περιβάλλουσας τάσης.



Σχήμα 5.1. Πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών θλίψης σε λιθορριπή του φράγματος Oroville: (α) Λόγος τάσεων και (β) Ογκομετρική παραμόρφωση, ως προς την αξονική παραμόρφωση (Marachi et al., 1972).



Σχήμα 5.2. Προσομοίωση τριαξονικών δοκιμών θλίψης με το προσομοίωμα Lade σε λιθορριπή του φράγματος Oroville: (α) Λόγος τάσεων και (β) Ογκομετρική παραμόρφωση, ως προς την αξονική παραμόρφωση.

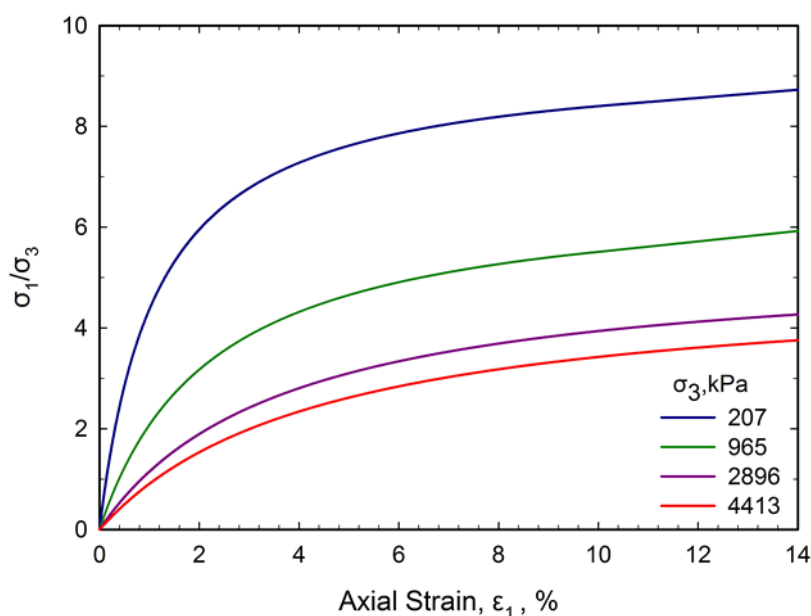
Στο Σχήμα 5.2 δίνεται ο λόγος τάσεων και η ογκομετρική παραμόρφωση από προσομοίωση των δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε διαφορετικές τιμές της περιβάλλουσας τάσης με χρήση το μοντέλο του Lade, όπου είναι εμφανής η επίδραση της περιβάλλουσας τάσης στη διασταλτικότητα.

Στις συγκρίσεις αναλύσεων που παρουσιάζονται κατωτέρω, η βαθμονόμηση των παραμέτρων είναι δυνατόν να γίνει με βάση δεδομένα από συμβατικές τριαξονικές δοκιμές. Εδώ, οι παράμετροι του προσομοιώματος Lade ελήφθησαν ώστε να έχουν δυσκαμψία και αντοχή αντίστοιχες αυτών του προσομοιώματος Duncan και Chang. Σημειώνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας στο προσομοίωμα Lade ισοδυναμεί με το μέτρο ελαστικότητας στην έναρξη αποφόρτισης.

β) Μοντέλο Duncan-Chang

Το προσομοίωμα των Duncan et al. (1970) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την προσομοίωση λιθορριπής σε φράγματα. Βασίζεται σε μία υπερβολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης και λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από την περιβάλλουσα τάση και την κατάσταση φόρτισης/αποφόρτισης. Το βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η συσσωρευμένη εμπειρία σχετικά με τις παραμέτρους διαφόρων ειδών λιθορριπής Duncan et al. (1980) για τις οποίες οι εργαστηριακές δοκιμές είναι σχετικά δύσκολες.

Στο Σχήμα 5.3 δίνεται ο λόγος τάσεων από προσομοίωση των δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε διαφορετικές τιμές της περιβάλλουσας τάσης με χρήση το μοντέλο του Duncan et al. (1970).



Σχήμα 5.3. Προσομοίωση λόγου τάσεων ως προς την αξονική παραμόρφωση τριαξονικών δοκιμών θλίψης με το προσομοίωμα Duncan et al. (1970) σε λιθορριπή του φράγματος Oroville.

Ο Πίνακας 5.1 δίνει τις ιδιότητες και τις παραμέτρους των υλικών οι οποίες έχουν ληφθεί από μετρήσεις σε πραγματικά υλικά και βαθμονομηθεί ως προς τις παραμέτρους δυσκαμψίας για την επιθυμητή καθίζηση κατασκευής.

Δεδομένου ότι το προσομοίωμα Lade έχει περισσότερες παραμέτρους, και συνεπώς περισσότερους βαθμούς ελευθερίας ως προς τον χειρισμό της μεταβολής της διασταλτικότητας του υλικού, η βαθμονόμηση του προσομοιώματος Lade με βάση τη συμπεριφορά του προσομοιώματος Duncan δεν είναι μοναδική. Έτσι αρχικά έγινε η συσχέτιση $M = 3^n K$ και $n = 2\lambda$ (Lade et al., 1987) και στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι υπόλοιπες παράμετροι με βάση τις σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης σε πιέσεις 500 kPa, 1000 kPa και 1500 kPa που προκύπτουν από το προσομοίωμα Duncan. Τέλος, έγινε μία μικρή διόρθωση της δυσκαμψίας ώστε και τα δύο προσομοιώματα να προβλέπουν την ίδια ακριβώς μέγιστη καθίζηση κατασκευής στο φράγμα. Ο Πίνακας 5.2 δίνει τις αντίστοιχες παραμέτρους του προσομοιώματος Lade, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις κατωτέρω αναλύσεις. Σε όλες τις αναλύσεις η πυκνότητα της λιθορριπής είναι $\rho = 2150 \text{ kg/m}^3$.

Πίνακας 5.1. Παράμετροι του προσομοιώματος Duncan-Chang (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2014).

Ζώνη	K	K_{ur}	B	R_f	n	m	ϕ_0	$\Delta\phi$
3B	735.1	1837.9	183.8	0.59	0.45	0.22	51°	9°
2B	1470.3	3675.8	367.6	0.59	0.45	0.22	51°	9°
3C	551.6	1379.0	137.9	0.59	0.45	0.22	51°	9°

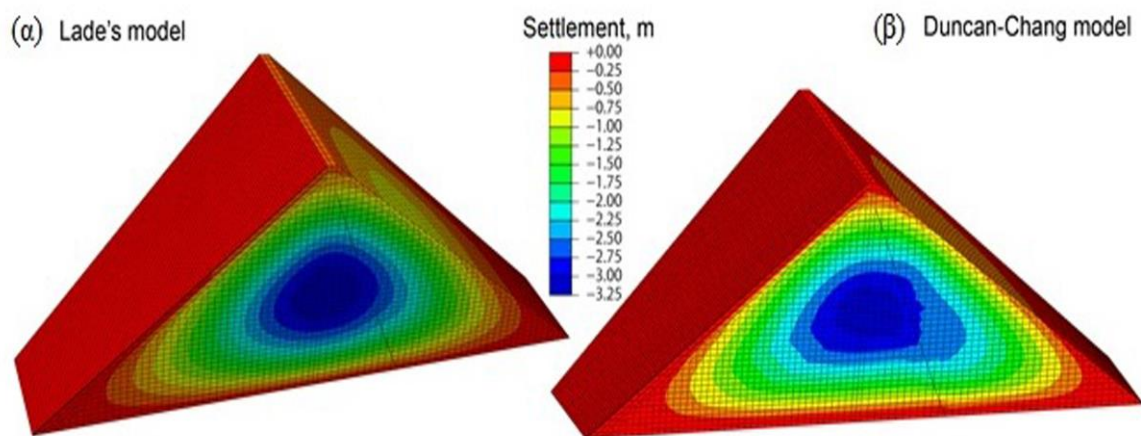
Πίνακας 5.2. Παράμετροι του προσομοιώματος Lade (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2014).

Ζώνη	m	η_1	M	λ	ψ_2	μ	$C \cdot 10^5$	P	b	h	a
3B	0.48	700	500	0.225	-3.06	2.2	7.5	2.6	0.1	0.95	0.1
2B	0.48	700	1000	0.225	-3.06	2.2	7.5	2.6	0.1	0.95	0.1
3C	0.48	700	375	0.225	-3.06	2.2	7.5	2.6	0.1	0.95	0.1

Συγκρίσεις αποτελεσμάτων των μοντέλων Lade και Duncan-Chang.

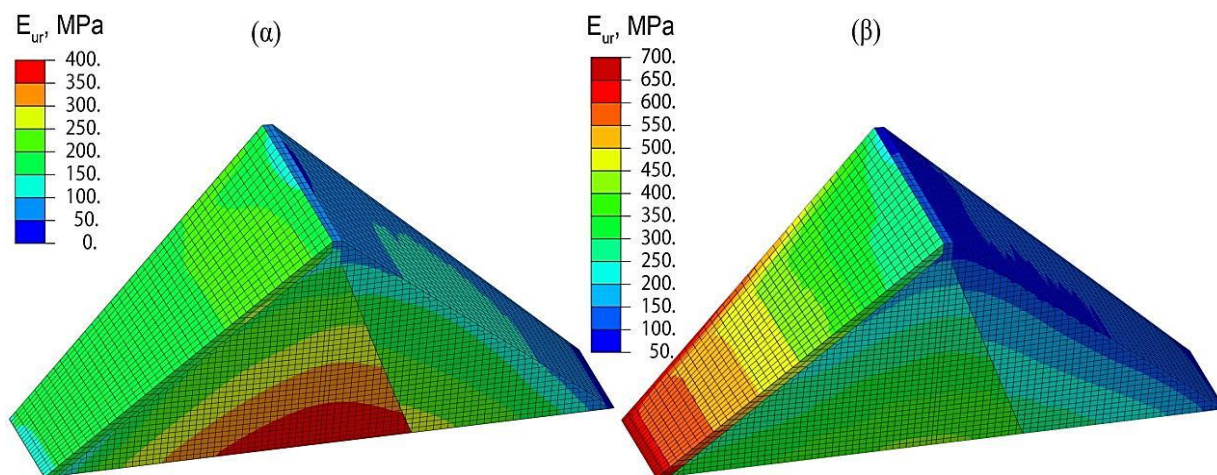
Οι καθιζήσεις λόγω σταδιακής κατασκευής του επιχώματος είναι παρόμοιες για τις δύο αναλύσεις με βάση τα προσομοιώματα Lade και Duncan-Chang, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Η μέγιστη τιμή είναι ίση προς 3.25 m στο μέσο του ύψους του φράγματος. Στην περίπτωση που υπάρχουν πραγματικές μετρήσεις καθιζήσεων

κατασκευής, είναι δυνατόν να γίνει βαθμονόμηση του προσομοιώματος για βελτίωση των προβλέψεων των καθιζήσεων κατά το στάδιο πλήρωσης της λεκάνης. Στην παρούσα εφαρμογή θεωρείται ότι ο λόγος καθιζήσεων κατασκευής ($s/H=1.62\%$) αντιστοιχεί σε μέτρια συμπύκνωση λιθορριπής.



Σχήμα 5.4. Καθιζήσεις σταδιακής κατασκευής με προσομοίωμα (α) Lade και (β) Duncan-Chang (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2014).

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη ρεαλιστική πρόβλεψη των καθιζήσεων της ανάντη πλάκας κατά την πλήρωση της λεκάνης είναι η ορθή αντιπροσώπευση της δυσκαμψίας της λιθορριπής λαμβάνοντας υπόψη τη συνεχώς μεταβαλλόμενη εντατική κατάσταση και τις συνθήκες φόρτισης-αποφόρτισης, ιδιαίτερα στις ανάντη ζώνες 3B και 2B. Σημειώνεται ότι και τα δύο καταστατικά προσομοιώματα παρέχουν την δυνατότητα ορθής προσομοίωσης της δυσκαμψίας. Στα Σχήματα 5.5α και 5.5β δίνεται η κατανομή του ελαστικού μέτρου E_{ur} (μετρούμενου κατά την αποφόρτιση) πριν και μετά την πλήρωση της λεκάνης, αντίστοιχα, όπως προκύπτει από την ανάλυση με χρήση του προσομοιώματος Lade. Η χωρική μεταβολή της δυσκαμψίας οφείλεται τόσο στη μεταβολή της εντατικής κατάστασης όσο και στις διαφορετικές παραμέτρους δυσκαμψίας των υλικών κάθε ζώνης. Μετά την πλήρωση της λεκάνης παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας, ιδιαίτερα στη ζώνη 2B (Σχήμα 5.5β), όπου η μεταβολή της περιβάλλουσας τάσης είναι πολύ σημαντική.

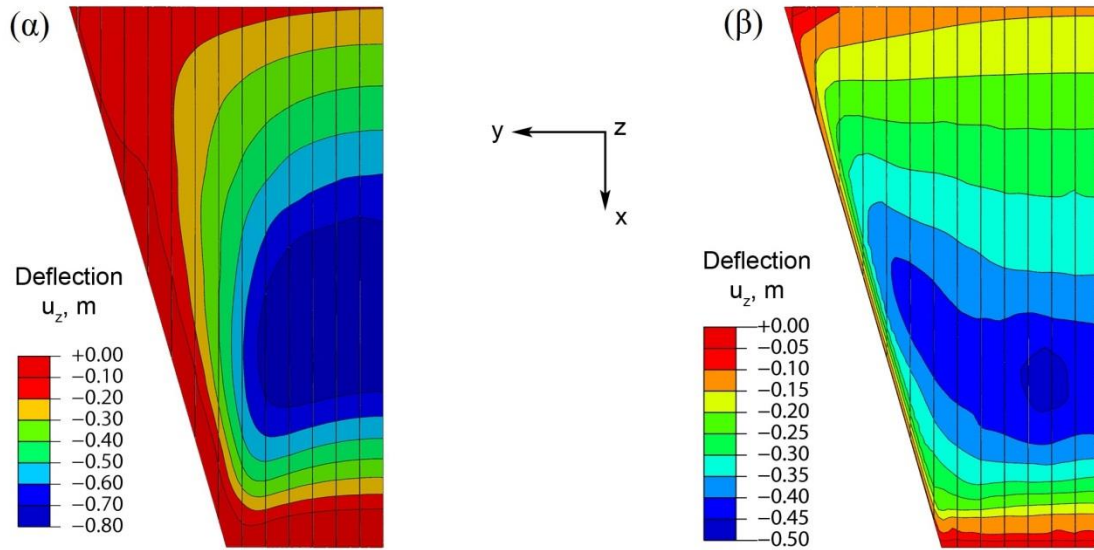


Σχήμα 5.5. Κατανομή του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας στη λιθορριπή για μικρές παραμορφώσεις κατά το προσομοίωμα Lade (α) πριν και (β) μετά την πλήρωση της λεκάνης (Σταυροθεοδώρου κ.α, 2014).

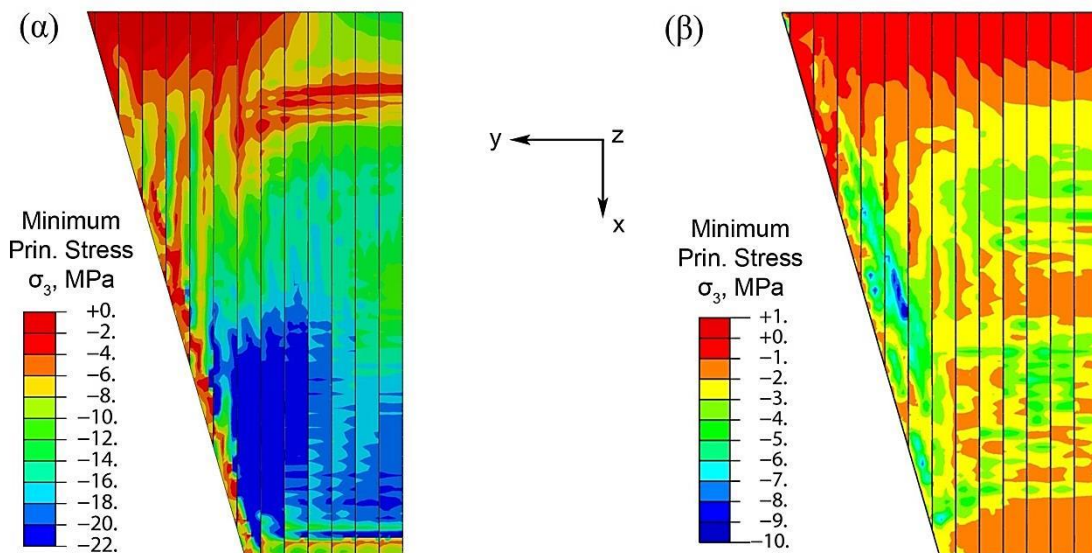
Στα Σχήματα 5.6α και 5.6β, δίνεται η κατανομή της βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης από την ανάλυση με το προσομοίωμα Lade και το προσομοίωμα Duncan-Chang, με μέγιστες τιμές 0.80 m και 0.47 m, αντίστοιχα. Εκτός της σημαντικής απόκλισης στη μέγιστη τιμή, διαφέρει επίσης και η κατανομή των βυθίσεων στις δύο αναλύσεις. Οι διαφορετικές βυθίσεις της πλάκας σκυροδέματος οφείλονται σε δύο λόγους: (α) την περισσότερο συστολική συμπεριφορά που προσομοιώνεται με το μοντέλο Lade σε σχέση με αυτή του μοντέλου Duncan-Chang για τις συγκεκριμένες παραμέτρους που επιλέχθηκαν (β) τη μεγαλύτερη αύξηση δυσκαμψίας στην ανάντη πλευρά που προβλέπει το μοντέλο Duncan-Chang, καθόσον η αύξηση της μέσης τάσης κατά την ανύψωση του νερού οδηγεί σε απομάκρυνση της τασικής όδευσης από την περιβάλλουσα αστοχίας και συνεπώς ενεργοποιεί συνθήκες «αποφόρτισης» με αρκετά μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (Duncan et al., 1980). Το φαινόμενο αυτό πράγματι έχει παρατηρηθεί σε πραγματικά φράγματα στα οποία προκύπτει ότι το ισοδύναμο τέμνον μέτρο ελαστικότητας στην ανάντη ζώνη αυξάνει κατά την πλήρωση της λεκάνης κατά 2.5 έως 3 φορές.

Στα Σχήματα 5.7α και 5.7β, δίνεται η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής τάσης στην άνω επιφάνεια της πλάκας εκφραζόμενη με την ελάχιστη κύρια τάση. Όπως είναι αναμενόμενο λόγω της σημαντικής διαφοράς στις βυθίσεις της πλάκας, οι αντίστοιχες θλιπτικές τάσεις διαφέρουν επίσης σημαντικά ως προς την κατανομή και τις μέγιστες

τιμές, οι οποίες είναι 24 MPa για το μοντέλο Lade και 10 MPa για το μοντέλο Duncan-Chang.



Σχήμα 5.6. Βύθιση πλάκας μετά την πλήρωση: Προσομοίωμα (α) Lade και (β) Duncan-Chang (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2014).



Σχήμα 5.7. Μέγιστη θλίψη μετά την πλήρωση: Προσομοίωμα (α) Lade και (β) Duncan-Chang (Σταυροθεοδώρου κ.α., 2014).

Εκ των ανωτέρω προκύπτει ότι ο τρόπος προσομοίωσης της συμπεριφοράς της λιθορριπής σε φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά και επιτελεσματικότητα της πλάκας. Η ορθή επιλογή των παραμέτρων του καταστατικού προσομοιώματος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πειραματική συμπεριφορά του υλικού σε δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και τριαξονικής θλίψης σε ένα σημαντικό εύρος τάσεων, εξετάζοντας συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης.

Συμπεράσματα από τη σύγκριση των δύο μοντέλων Lade και Duncan-Chang.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διερεύνηση είναι τα εξής:

- Η χρήση διαφορετικών καταστατικών σχέσεων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τη συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής ανάλογα με την ακρίβεια με την οποία προσομοιώνεται η δυσκαμψία σε φόρτιση/αποφόρτιση, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης και η διασταλτικότητα σε μία ευρεία περιοχή τάσεων.
- Το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Lade παρέχει αρκετή ευελιξία για τον χειρισμό της δυσκαμψίας, σχέσης-τάσης παραμόρφωσης και διασταλτικότητας του υλικού και συνεπώς είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής με βάση τα αποτελέσματα κατάλληλων πειραματικών δοκιμών.

5.2 Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

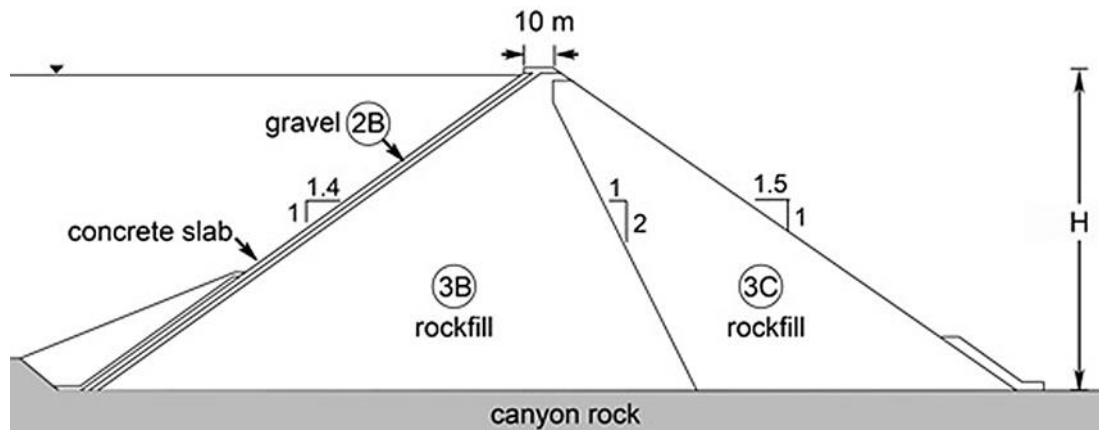
Στην παρούσα διατριβή εφαρμόζεται η χρήση του ελαστοπλαστικού καταστατικού μοντέλου του Lade στον τρισδιάστατο χώρο των κυρίων τάσεων, ως ένα υλικό που καθορίζεται από το χρήστη, βελτιωμένο με ένα απλό σχήμα βαθμίδας πλαστικότητας, σε ένα γενικευμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το ABAQUS (2014). Η μέθοδος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο Lade είναι το σχήμα Runge-Kutta-Dormand-Prince (RKDP), το οποίο όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4), υπερτερεί μακράν των υπολοίπων δύο μεθόδων και σε ακρίβεια και σε υπολογιστικά κόστη.

Αυτό το προχωρημένο αριθμητικό ελαστοπλαστικό μοντέλο χρησιμοποιείται προκειμένου να διερευνηθεί με έναν αυστηρό τρόπο η συμπεριφορά τριών υψηλών

φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, ύψους 100, 200 και 300 m σε στενές κοιλάδες, που υπόκεινται σε πλήρωση της λεκάνης και σε μακροπρόθεσμο ερπυσμό και πιθανές δυναμικές συνιζήσεις. Κάθε ένα από τα τρία φράγματα αναλύεται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικής ποιότητας υλικά λιθορριπής: α) ένα υλικό εξαιρετικής ποιότητας (λιθορριπή Oroville) και β) ένα υλικό μέτριας ποιότητας (λιθορριπή Pyramid). Η συμπεριφορά της λιθορριπής και της πλάκας σκυροδέματος σε όλες τις περιπτώσεις διερευνάται και αναλύεται βασιζόμενη σε αποτελέσματα αναλύσεων.

5.2.1 Γεωμετρία του φράγματος και ζώνες υλικών.

Τα φράγματα τα οποία διερευνώνται θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένα σε στενές κοιλάδες τραπεζοειδούς σχήματος και έχουν λόγο μήκους προς ύψος ίσο με $L/H = 2$ και συντελεστή σχήματος $A_s/H^2 = 2.1$, όπου H : το ύψος του φράγματος, L : το μήκος του φράγματος και A_s : το εμβαδό της πλάκας σκυροδέματος. Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζονται η διατομή και οι ζώνες των υλικών της γεωμετρίας των τριών φραγμάτων.

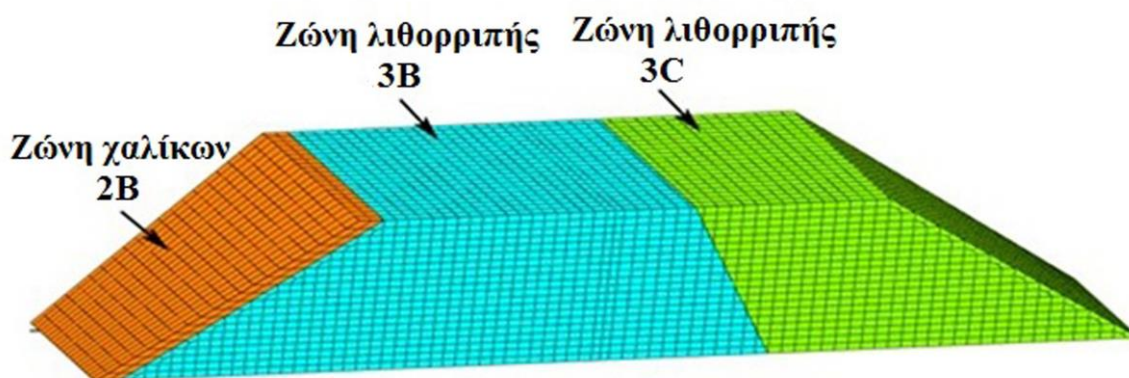


Σχήμα 5.8. Μέγιστη διατομή και ζώνες των υλικών του φράγματος.

Η ανάντη κλίση του επιχώματος είναι 1.4:1, ενώ η κατάντη κλίση είναι 1.5:1. Οι κύριες ζώνες υλικών που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική ανάλυση είναι η ανάντη ζώνη λιθορριπής 3B, η κατάντη ζώνη λιθορριπής 3C και η μεταβατική ζώνη χαλίκων 2B κάτω από την πλάκα σκυροδέματος. Η κλίση που διαχωρίζει τις λιθορριπές 3B και 3C είναι 1:2 και το εύρος της στέψης 10 m. Η ανάντη πλάκα αποτελείται από 14 ανεξάρτητα πάνελ σκυροδέματος για το φράγμα ύψους 100 m, 28 πάνελ για το φράγμα των 200 m και 40 πάνελ για το φράγμα των 300 m. Όλα τα πάνελ πλακών έχουν κοινό πλάτος 15 m και μεταβλητό πάχος, το οποίο δίδεται από την εξίσωση $t = 0.30 + 0.003h$, όπου h είναι το ύψος του υπερκείμενου ύδατος.

5.2.2 Αριθμητική διακριτοποίηση.

Λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία της κατασκευής του φράγματος, προσομοιώνεται το μισό φράγμα για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η διατομή του επιχώματος χωρίζεται σε 3 κύριες ζώνες: α) τη ζώνη λιθορριπής 3B, β) τη ζώνη λιθορριπής 3C και γ) τη ζώνη χαλίκων 2B. Η διαδικασία της σταδιακής κατασκευής προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας 40 στρώσεις των 2.5 m για το φράγμα ύψους 100 m, των 5.0 m για το φράγμα ύψους 200 m και των 7.5 m για το φράγμα ύψους 300 m. Το αριθμητικό μοντέλο αποτελείται από περίπου 50000 πεπερασμένα στοιχεία, από τα οποία το 99% είναι στερεά στοιχεία, με 8 κόμβους, εξαεδρικά, μειωμένης ολοκλήρωσης και το 1% είναι πρισματικά στοιχεία, με 6 κόμβους, τριγωνικά. Τα πρισματικά στοιχεία χρησιμοποιούνται στη διεπιφάνεια των ζωνών 3B και 3C. Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται η διακριτοποίηση των 3 ζωνών των υλικών λιθορριπής.

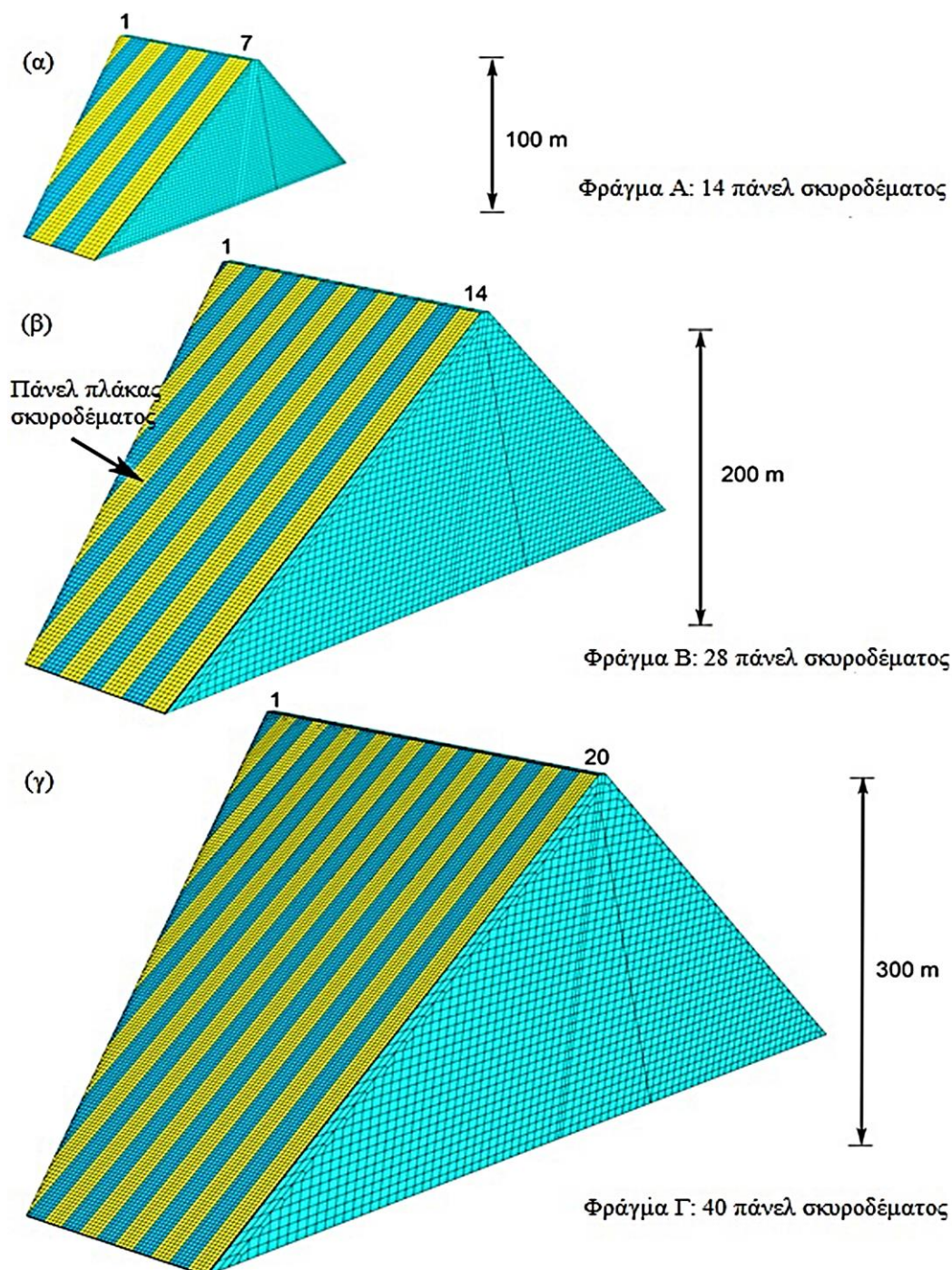


Σχήμα 5.9. Αριθμητική διακριτοποίηση των τριών ζωνών των υλικών λιθορριπής του φράγματος: Ζώνη χαλίκων 2B, Ζώνη λιθορριπής 3B και Ζώνη λιθορριπής 3C.

Τα πάνελ της πλάκας διακριτοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα μεταβλητό πάχος και δύο στρώσεις εξαεδρικών στερεών στοιχείων με οπλισμό από χάλυβα στο μέσο του πάχους της πλάκας. Ο οπλισμός αποτελείται από ράβδους χάλυβα διαμέτρου $\Phi 25$ mm ανά 20 cm απόσταση, στις διευθύνσεις x και y των πάνελ. Επιπλέον, κάθε πάνελ έχει κατάλληλες συνθήκες τριβής και δυνατότητα ανοίγματος ενός κενού στη βάση του που συνδέεται με τη στρώση χαλίκων και στις κατακόρυφες διεπιφάνειές του με τα γειτονικά πάνελ. Ο συντελεστής τριβής μεταξύ σκυροδέματος και χαλικιού είναι $\mu = 0.8$ και ο συντελεστής τριβής μεταξύ σκυροδέματος και σκυροδέματος στους κατακόρυφους αρμούς είναι $\mu_c = 0.5$. Σε κάθε κατακόρυφο αρμό ανάμεσα στα γειτονικά πάνελ, υπάρχει ένα κενό εύρους 1 cm, το οποίο μπορεί να κλείσει κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της

λεκάνης εξαιτίας καθιζήσεων λιθορριπής. Σε πολλά πραγματικά CFRDs, οι κατακόρυφοι αρμοί συνήθως βάζονται με ασφαλτό, χωρίς μια συμπιεστή πλήρωση.

Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζεται η αριθμητική διακριτοποίηση του επιχώματος και των πάνελ της πλάκας σκυροδέματος για τα τρία φράγματα ύψους 100, 200 και 300 m, χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2014).



Σχήμα 5.10. Αριθμητική διακριτοποίηση του μισού επιχώματος και της γεωμετρίας της πλάκας για (α) $H=100\text{m}$, (β) $H=200\text{ m}$ και (γ) $H=300\text{ m}$.

5.2.3 Προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής βασιζόμενη σε εργαστηριακά πειράματα.

Η εμπειρία έχει αποδείξει ότι καλά διαβαθμισμένοι και καλά στρογγυλεμένοι κόκκοι λιθορριπής, συμπίεσμένοι σε μικρούς λόγους κενών (περίπου 0.2) είναι ανώτεροι στις μηχανικές τους ιδιότητες σε σύγκριση με ομοιόμορφους, τριγωνικούς κόκκους λιθορριπής, και για το λόγο αυτό είναι πιο κατάλληλοι στην κατασκευή υψηλών φραγμάτων. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί αυτή η εμπειρική παρατήρηση και να διερευνηθεί η επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής στη συμπεριφορά της πλάκας σκυροδέματος σε υψηλά φράγματα λιθορριπής, θεωρούνται δύο πραγματικά υλικά λιθορριπής (Marachi et al., 1972, 1969):

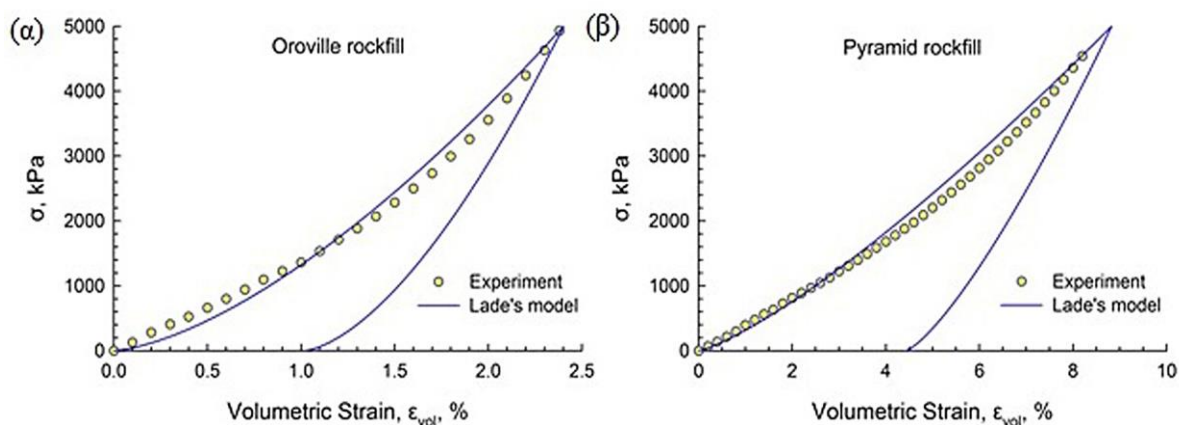
α) Λιθορριπή Oroville: μια λιθορριπή εξαιρετικής ποιότητας αμφιβολίτη από το κέλυφος του φράγματος Oroville. Τα σωματίδιά της είναι καλά στρογγυλοποιημένα, καλά διαβαθμισμένα κι έχουν πολύ υψηλή αντοχή και ισοτροπική συμπεριφορά. Αυτό το υλικό επιλέγεται εξαιτίας της υψηλής του αντοχής και της πολύ χαμηλής συμπιεστότητας, έχοντας ως αποτέλεσμα την τέλεια παρατηρούμενη συμπεριφορά του φράγματος Oroville.

β) Λιθορριπή Pyramid: μια λιθορριπή μέτριας ποιότητας από το κέλυφος του φράγματος Pyramid, το οποίο παράγεται από ανατινάξεις λατομείου λεπτόκοκκου αργιλίτη. Τα σωματίδια λιθορριπής είναι σχετικά γωνιώδη, φτωχά διαβαθμισμένα, αδύνατα και ανισοτροπικά, σε σχέση με την αντοχή τους. Αυτό το υλικό επιλέγεται προκειμένου να αναπαρασταθεί μια λιθορριπή μέτριας έως σχετικά υψηλής συμπιεστότητας.

Η προέλευση των παραμέτρων του μοντέλου του Lade για το καθένα από τα δύο υλικά βασίζεται σε δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα από ισοτροπικές και τριαξονικές θλιπτικές δοκιμές, σε δοκίμια με μέγιστη διάμετρο κόκκου ίση με 0.15 m και διάμετρο κόκκου ίση με 0.914 m (Marachi et al., 1972).

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζεται ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται από τον Helwany (2007). Η ξηρή πυκνότητα, ρ , ο λόγος κενών, e , η σχετική πυκνότητα, D_r , και το ειδικό βάρος, G_s , για τα δύο υλικά λιθορριπής δίνονται στον Πίνακα 5.3, ενώ οι συμπληρωματικές παράμετροι του μοντέλου του Lade δίνονται στον Πίνακα 5.4. Τα Σχήματα 5.11α και 5.11β παρουσιάζουν τα πειραματικά δεδομένα (κίτρινοι κύκλοι) περιβάλλουσας τάσης-ογκομετρικής παραμόρφωσης από τις

ισοτροπικές θλιπτικές δοκιμές σε λιθορριπή Oroville και Pyramid, αντίστοιχα. Οι αριθμητικές προβλέψεις (συμπαγείς μπλε καμπύλες) της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης απεικονίζονται επίσης στα ίδια Σχήματα. Οι ελαστικές παράμετροι λαμβάνονται από τη συμπεριφορά αποφόρτισης-επαναφόρτισης σε τριαξονικές ή ισοτροπικές θλιπτικές δοκιμές. Σε περίπτωση που τα δεδομένα της αποφόρτισης δεν είναι διαθέσιμα, οι παράμετροι M , λ , είναι δυνατόν να εκτιμηθούν κάνοντας μια εύλογη υπόθεση σχετικά με το σχήμα της καμπύλης αποφόρτισης-επαναφόρτισης, με βάση τυπικά πειραματικά δεδομένα κοκκωδών υλικών συμπιεσμένα σε συνθήκες πολύ πυκνής και μέτριας πυκνότητας, αντίστοιχα. Η τιμή του λόγου Poisson έχει ληφθεί ίση με $\nu = 0.24$, λαμβάνοντας υπόψη το σχετικά μικρό εύρος της διακύμανσης. Το Σχήμα 5.11 συγκρίνει πειραματικά αποτελέσματα και προβλέψεις της προσομοίωσης δοκιμής ισοτροπικής θλίψης για λιθορριπή Oroville και λιθορριπή Pyramid.

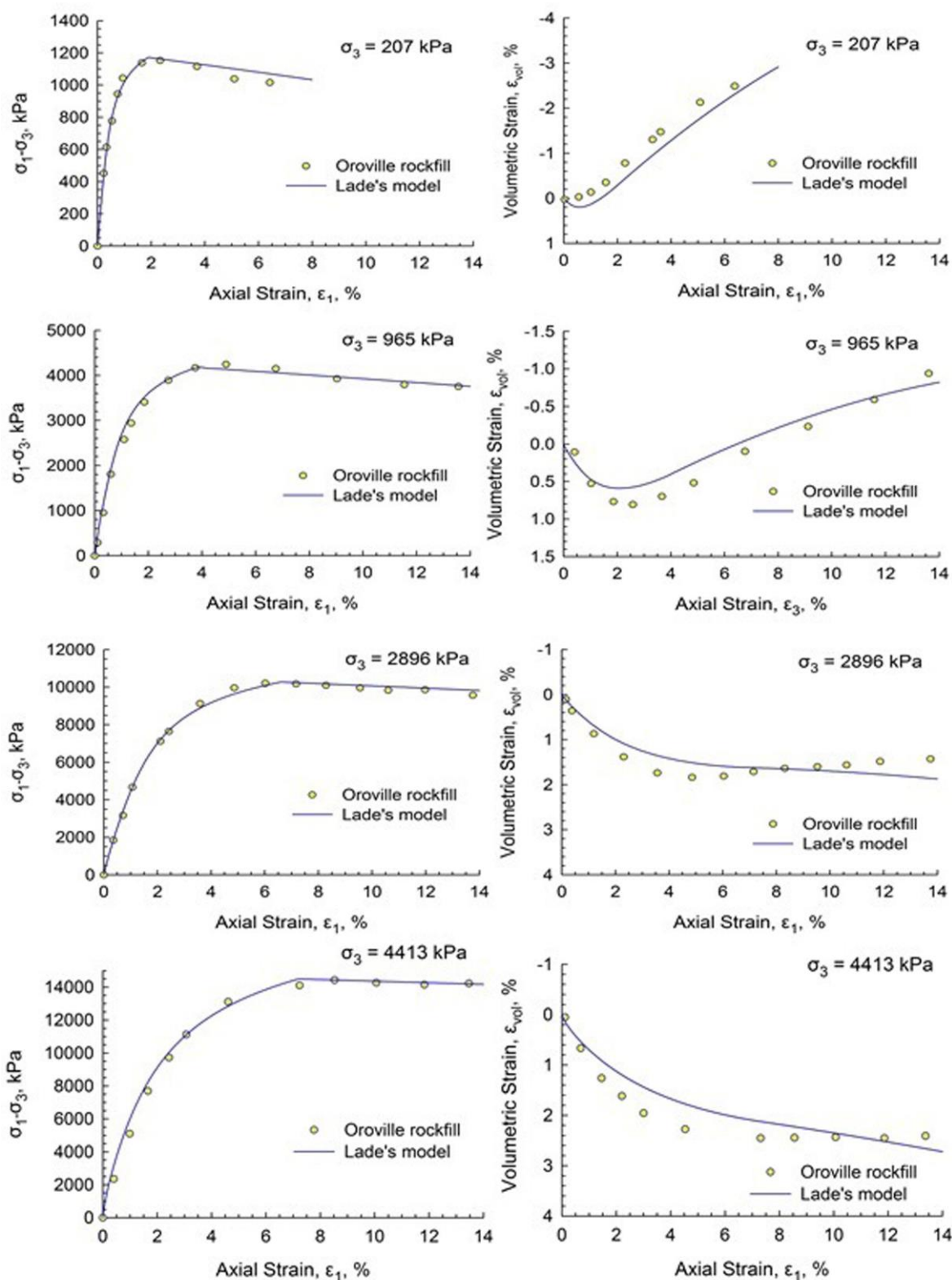


Σχήμα 5.11. Ισοτροπική θλιπτική δοκιμή: Σύγκριση τάσεων-ογκομετρικών παραμορφώσεων από πειραματικά δεδομένα (Marachi et al., 1969) και προβλέψεις του μοντέλου Lade για (α) λιθορριπή Oroville και (β) λιθορριπή Pyramid.

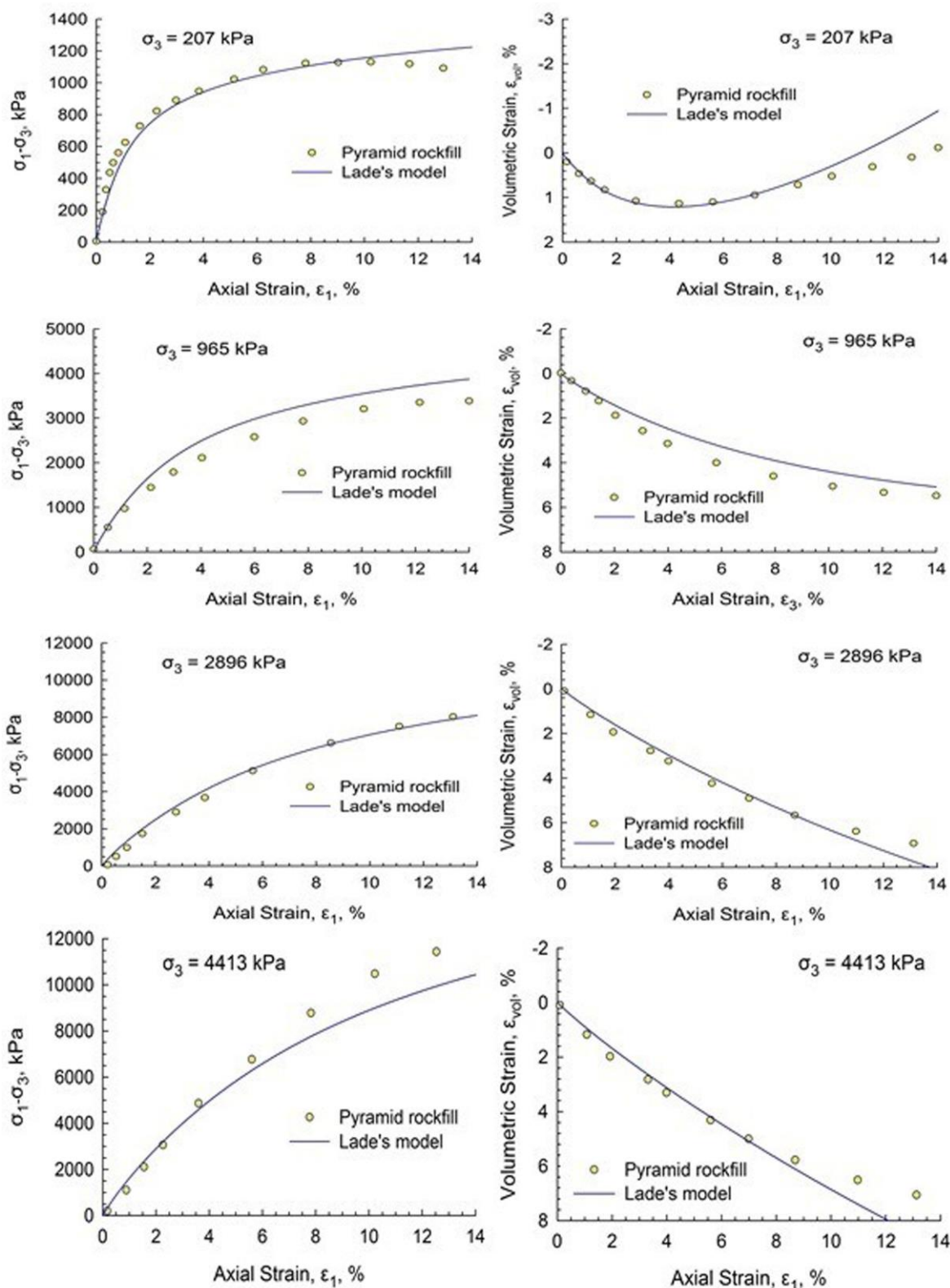
Παρατηρείται ότι η λιθορριπή Oroville εμφανίζει πολύ χαμηλή συμπιεστότητα, με μια ογκομετρική παραμόρφωση 2.4% κατά τη διάρκεια της φόρτισης σε 5000 kPa και 1% κατά την αποφόρτιση (Σχήμα 5.11α). Αντιθέτως, η λιθορριπή Pyramid εμφανίζει μια πολύ υψηλότερη συμπιεστότητα, με μια ογκομετρική παραμόρφωση 8.8% κατά τη διάρκεια της φόρτισης σε 5000 kPa και 4.5% κατά την αποφόρτιση (Σχήμα 5.11β).

Τέσσερις τριαξονικές θλιπτικές δοκιμές χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου που διεξάγονται σε περιβάλλοντες τάσεις ίσες με 207, 965, 2896 και 4413 kPa. Το Σχήμα 5.12 παρουσιάζει τα πειραματικά δεδομένα (κίτρινοι

κύκλοι) και τις προβλέψεις του μοντέλου (συμπαγείς μπλε καμπύλες) στη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης και ογκομετρικών παραμορφώσεων από τις τριαξονικές θλιπτικές δοκιμές της λιθορριπής Oroville. Το Σχήμα 5.13 παρουσιάζει τα πειραματικά δεδομένα (κίτρινοι κύκλοι) και τις προβλέψεις του μοντέλου (συμπαγείς μπλε καμπύλες) της λιθορριπής Pyramid, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.12. Λιθορριπή Oroville: Συγκρίσεις αποκλίνουσας τάσης και ογκομετρικής παραμόρφωσης από πειραματικά δεδομένα (Marachi et al., 1969) και προβλέψεις του μοντέλου του Lade προσομοίωσης δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε περιβάλλουσες τάσεις ίσες με 207, 965, 2896 και 4413 kPa.



Σχήμα 5.13. Λιθορριπή Pyramid: Συγκρίσεις αποκλίνουσας τάσης και ογκομετρικής παραμόρφωσης από πειραματικά δεδομένα (Marachi et al., 1969) και προβλέψεις του μοντέλου του Lade προσομοίωσης δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε περιβάλλουσες τάσεις ίσες με 207, 965, 2896 και 4413 kPa.

Τα αποτελέσματα από τα Σχήματα 5.11, 5.12 και 5.13 δείχνουν ότι το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει με ένα ρεαλιστικό τρόπο τη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης και την ογκομετρική παραμόρφωση σε διάφορα επίπεδα περιβάλλουσας τάσης και για τα δύο υλικά λιθορριπής.

5.2.4 Επίδραση του θρυμματισμού των κόκκων της λιθορριπής.

Είναι πολύ καλά γνωστό ότι η διατμητική αντοχή και η συμπιεστότητα χονδρόκοκκων υλικών όπως η λιθορριπή, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των κόκκων, την κατανομή του μεγέθους, την πυκνότητα του μίγματος και την εφαρμοσμένη κατάσταση τάσεων. Σε υψηλά επίπεδα τάσεων, ο θρυμματισμός των κόκκων μπορεί να αλλάξει σημαντικά τα χαρακτηριστικά των κόκκων και δομής του μίγματος, επηρεάζοντας τις συναφείς μηχανικές ιδιότητες (Frossard et al., 2012). Αυτό το σημαντικό αποτέλεσμα πιθανού θρυμματισμού κόκκων λαμβάνεται υπόψη με κατάλληλη μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς της λιθορριπής σε ένα μεγάλο εύρος περιβάλλουσας τάσης, χρησιμοποιώντας το καταστατικό μοντέλο του Lade, το οποίο έχει εγγενώς την ευελιξία να αναπαριστά τη διατμητική αντοχή και τη μεταβολή της συμπιεστότητας με το θρυμματισμό των κόκκων.

5.2.5 Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του επιχώματος της λιθορριπής.

Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών της λιθορριπής Oronville και Pyramid που χρησιμοποιούνται στα έξι CFRDs είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών που δίνονται στον Πίνακα 5.3, εκτός από την πυκνότητα της λιθορριπής Pyramid. Έχοντας ως βάση την εμπειρία πεδίου, η αναφερόμενη εργαστηριακή τιμή της ξηρής πυκνότητας $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ εμφανίζεται να είναι μικρή ακόμη και για μια λιθορριπή μέτριας συμπίκνωσης. Έτσι, θεωρείται μια τυπική χαμηλή τιμή της πυκνότητας $\rho = 2150 \text{ kg/m}^3$ με περιεκτικότητα σε υγρασία 5% απορροφήσιμη από τον αργιλίτη κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης και ο αναφερόμενος λόγος κενών υπολογίζεται περίπου 0.28.

Και για τα τρία ύψη φραγμάτων και για τα δύο υλικά λιθορριπής, η ζώνη 3B θεωρείται ότι έχει τις ίδιες παραμέτρους του μοντέλου όπως αυτές προέρχονται από τα εργαστηριακά πειράματα, εκτός από μια πολύ μικρή συνοχή 5 kPa που χρησιμοποιείται για να διευκολύνει την αριθμητική ανάλυση του επιχώματος. Τα υλικά στις ζώνες 3C και 2B είναι παρόμοια με εκείνα στη ζώνη 3B, εκτός από τις τιμές των παραμέτρων του

μέτρου ελαστικότητας M , οι οποίες λαμβάνονται ίσες με το 75% και το 150%, αντίστοιχα, της τιμής στη ζώνη 3B. Οι παράμετροι του μοντέλου για τις τρεις ζώνες της λιθορριπής Oroville και Pyramid δίνονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6.

Πίνακας 5.3. Ιδιότητες εργαστηριακών δοκιμίων λιθορριπής.

Property	Oroville rockfill	Pyramid rockfill
Dry density ρ , kg/m ³	2435	1800
Void ratio	0.20	0.45
Specific gravity, G_s	2.94	2.62

Πίνακας 5.4. Παράμετροι του μοντέλου Lade για λιθορριπή Oroville και Pyramid.

Parameter	a_1	m	η_1	M	λ	ν	ψ_2	μ	C	P	b	h	α
Oroville rockfill	0	0.300	167.3	1340	0.19	0.24	-3.06	2.7	$4.2 \cdot 10^{-5}$	1.7	0.2	0.85	0.6
Pyramid rockfill	0	0.239	163.0	700	0.12	0.24	-3.06	3.0	$1.2 \cdot 10^{-4}$	1.8	0.1	0.70	0.8

Πίνακας 5.5. Λιθορριπή Oroville: Παράμετροι του μοντέλου Lade για τα τρία φράγματα.

Zone	a_1	m	η_1	M	λ	ν	ψ_2	μ	C	P	b	h	α
3B	0.05	0.3	167.3	1340	0.19	0.24	-3.06	2.7	$4.2 \cdot 10^{-5}$	1.7	0.2	0.85	0.6
2B	0.05	0.3	167.3	2010	0.19	0.24	-3.06	2.7	$4.2 \cdot 10^{-5}$	1.7	0.2	0.85	0.6
3C	0.05	0.3	167.3	1005	0.19	0.24	-3.06	2.7	$4.2 \cdot 10^{-5}$	1.7	0.2	0.85	0.6

Πίνακας 5.6. Λιθορριπή Pyramid: Παράμετροι του μοντέλου Lade για τα τρία φράγματα.

Zone	a_1	m	η_1	M	λ	ν	ψ_2	μ	C	P	b	h	α
3B	0.05	0.239	163.0	700	0.12	0.24	-3.06	3.0	$1.2 \cdot 10^{-4}$	1.8	0.1	0.70	0.8
2B	0.05	0.239	163.0	1050	0.12	0.24	-3.06	3.0	$1.2 \cdot 10^{-4}$	1.8	0.1	0.70	0.8
3C	0.05	0.239	163.0	525	0.12	0.24	-3.06	3.0	$1.2 \cdot 10^{-4}$	1.8	0.1	0.70	0.8

5.2.6 Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος.

Το καταστατικό μοντέλο πλαστικής βλάβης που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των πάνελ σκυροδέματος είναι των Lee και Fenves (1998). Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της χαλάρωσης της παραμόρφωσης και τη διάκριση ανάμεσα στις μεταβλητές βλάβης για εφελκυσμό και θλίψη. Επιπρόσθετα, ενσωματώνει ένα μηχανισμό υποβάθμισης που αναπαριστά τα αποτελέσματα της βλάβης στην ελαστική δυσκαμψία και στην ανάκτησή της μετά το κλείσιμο της ρηγμάτωσης. Στην παρούσα διατριβή, συνδυάζεται με τη χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο χρησιμοποιείται στην πλάκα, από μια μίξη συμβατικού σκυροδέματος θλιπτικής αντοχής ίσης με 37 MPa και ίνες χάλυβα με ένα δείκτη ινοπλισμού $RI = 2.5\%$ (Nataraja et al., 1999). Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει πυκνότητα $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$, θλιπτική αντοχή 42.4 MPa υπολογισμένη από μια έκφραση των Nataraja et al. (1999), εφελκυστική αντοχή 3.7 MPa, μέτρο ελαστικότητας του Young $E=29 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.2$. Τα μοντέλα Lee και Fenves (1998), Nataraja et al. (1999) και οι αντίστοιχες εξισώσεις τους αναφέρονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

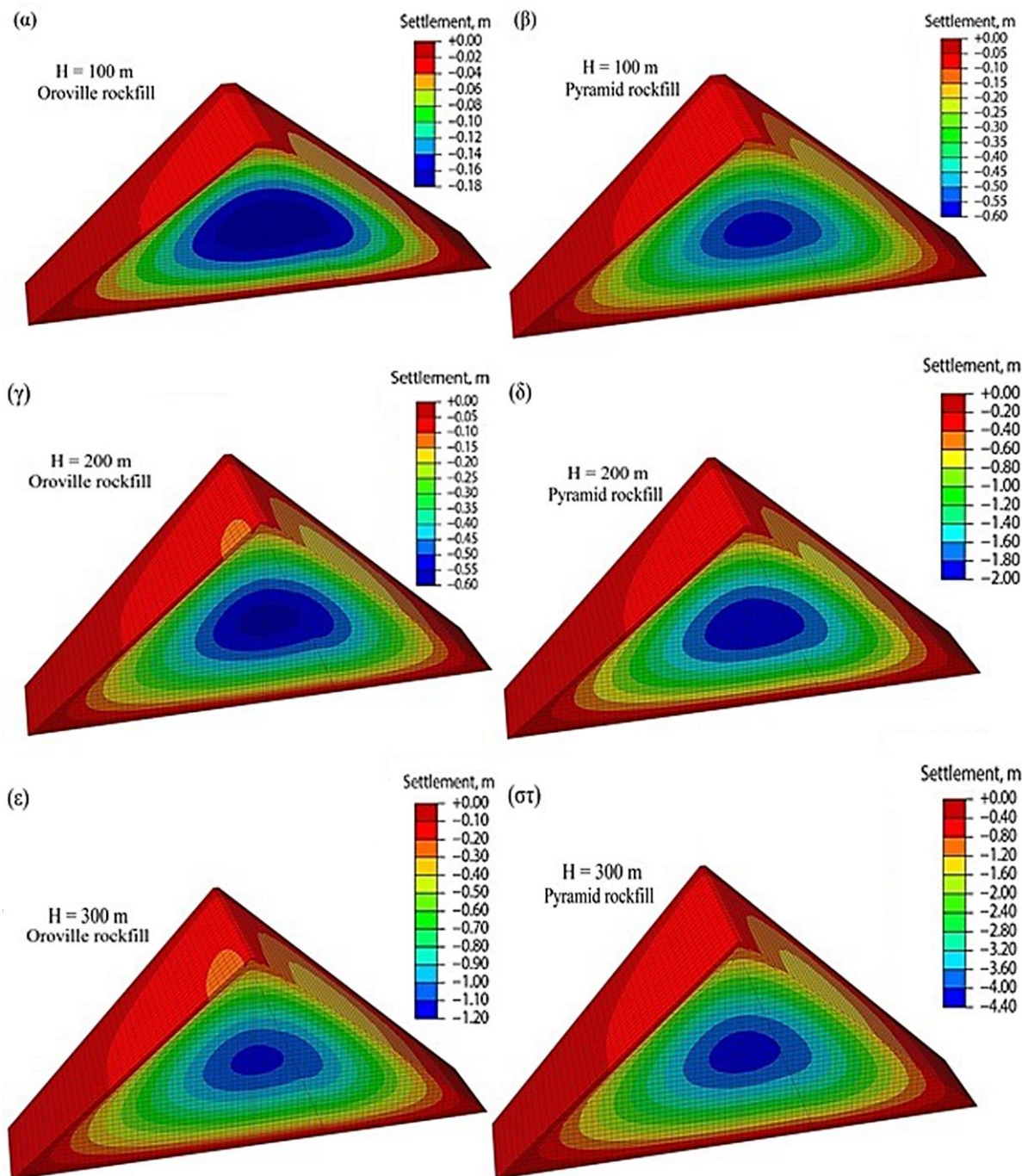
5.3 Προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, πλήρωσης της λεκάνης και μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του φράγματος.

Σε κάθε ένα από τα έξι υπό μελέτη επιχώματα λιθορριπής, η διαδικασία της σταδιακής κατασκευής προσομοιώνεται σε 40 βήματα ως προς το ύψος. Χρησιμοποιώντας μια απλή επανάληψη, οι συντεταγμένες της ανάντη επιφάνειας διορθώνονται έτσι ώστε στο τέλος της σταδιακής κατασκευής, η ανάντη κλίση να σχηματίζει ένα τέλειο επίπεδο. Έτσι, τα πάνελ της πλάκας σκυροδέματος τα οποία είναι τοποθετημένα διαδοχικά πάνω σε αυτή την τέλεια επιφάνεια είναι απαλλαγμένα από κάθε αρχική παραμόρφωση. Η υποστήριξη κατά μήκος της περιμέτρου της πλάκας προσομοιώνεται με την υποστήριξη από την περιμετρική πλίνθο.

Η μέθοδος της βαθμίδας πλαστικότητας ενεργοποιείται προκειμένου να αποφευχθούν αριθμητικές δυσκολίες εξαιτίας της αργής σύγκλισης. Στην πραγματικότητα επηρεάζει μόνο ένα μικρό αριθμό (10 το πολύ) των πλήρως ολοκληρωμένων τριγωνικών πρισματικών στοιχείων, τα οποία είναι τοποθετημένα στη διεπιφάνεια των ζωνών 3B και 3C. Για τις περιπτώσεις των φραγμάτων που γίνεται η ανάλυση, το εσωτερικό μήκος είναι $l = 0.2 \text{ m}$ και η παραμόρφωση αναφοράς είναι $\gamma_0 = 0.0025$. Τα υπόλοιπα στοιχεία του

επιχώματος αποτελούνται από εξαεδρικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης με 8 κόμβους, για τα οποία η βαθμίδα της αποκλίνουσας πλαστικής παραμόρφωσης είναι μηδέν.

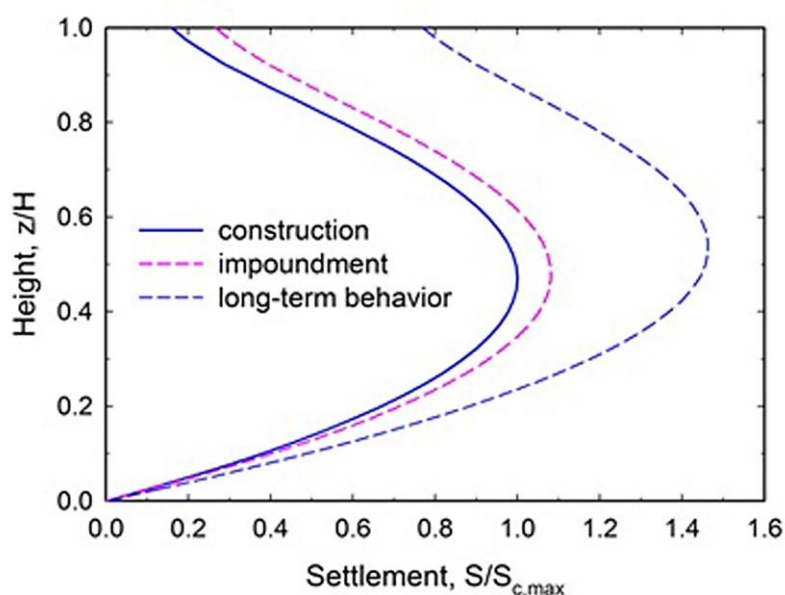
5.3.1 Καθιζήσεις κατασκευής.



Σχήμα 5.14. Κατανομή της καθίζησης κατασκευής στα έξι φράγματα για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.

Στο Σχήμα 5.14 απεικονίζονται οι κατανομές της καθίζησης κατασκευής S_c στο τέλος της σταδιακής κατασκευής των έξι φραγμάτων ύψους 100, 200 και 300 m για τα δύο υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid. Η χρήση της λιθορριπής Oroville οδηγεί σε μέγιστες τιμές $S_c = 0.18\text{ m}$ για το φράγμα ύψους 100 m, $S_c = 0.57\text{ m}$ για το φράγμα ύψους 200 m και $S_c = 1.13\text{ m}$ για το φράγμα ύψους 300 m και εμφανίζονται στο μέσο του ύψους των φραγμάτων, σημειώνοντας μια αναμενόμενη πολύ καλή συμπεριφορά κατά την πλήρωση της λεκάνης. Αντίθετα, η χρήση της λιθορριπής Pyramid οδηγεί σε πολύ υψηλότερες μέγιστες τιμές $S_c = 0.58\text{ m}$ για το φράγμα ύψους 100 m, $S_c = 1.98\text{ m}$ για το φράγμα ύψους 200 m και $S_c = 4.21\text{ m}$ για το φράγμα ύψους 300 m, οι οποίες εμφανίζονται στο μέσο του ύψους των φραγμάτων, υποδεικνύοντας σημαντική βύθιση της πλάκας και υψηλές θλιπτικές τάσεις κατά την πλήρωση της λεκάνης.

Η κατανομή των κανονικοποιημένων καθιζήσεων κατασκευής ($S_c/S_{c,max}$) κατά μήκος του κανονικοποιημένου ύψους (z/H) στο μέσο της διατομής του φράγματος είναι πρακτικά η ίδια και για τις έξι περιπτώσεις αναλύσεων. Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζεται με μια συμπαγή μπλε καμπύλη η κατανομή των κανονικοποιημένων καθιζήσεων κατασκευής για τις έξι περιπτώσεις φραγμάτων.



Σχήμα 5.15. Κατανομή της μέσης κανονικοποιημένης καθίζησης $S/S_{c,max}$ κατά μήκος του ύψους κατά τη διάρκεια της κατασκευής, της πλήρωσης της λεκάνης και της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς (ερπυσμός και πιθανές δυναμικές συνιζήσεις) για τα τρία ύψη φραγμάτων και για τα δύο υλικά λιθορριπής ($S_{c,max}$ είναι η μέγιστη καθίζηση κατασκευής).

Η επίδραση του ύψους του φράγματος και της δυσκαμψίας της λιθορριπής στις μέγιστες κατασκευαστικές καθιζήσεις $S_{c,max}$ απεικονίζονται στο Σχήμα 5.16α, με βάση τις αριθμητικές προβλέψεις των τριών φραγμάτων με λιθορριπή Oroville (μπλε κύκλοι) και των τριών φραγμάτων με λιθορριπή Pyramid (μπλε τρίγωνα). Η σκιαγραφημένη περιοχή αναπαριστά το εύρος της διακύμανσης ανάμεσα στις δύο διαφορετικές ποιότητες λιθορριπής. Επιπλέον, στο Σχήμα 5.16α απεικονίζονται διαθέσιμες μετρήσεις μέγιστων κατασκευαστικών καθιζήσεων από υπαρκτά CFRDs με λόγους κενών e μεταξύ των 0.18-0.25 (ανοιχτοί κύκλοι) και μεταξύ των 0.25-0.31 (ανοιχτά τρίγωνα). Οι κατασκευαστικές καθιζήσεις των φραγμάτων Campos Novos, Barra Grande και Mohale, τα οποία έχουν εμφανίσει αστοχία στην πλάκα σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της πρώτης πλήρωσης, απεικονίζονται επίσης στο ίδιο Σχήμα. Όλες οι μετρήσεις αναφέρονται σε φράγματα κατασκευασμένα σε στενές κοιλάδες, έχοντας ένα συντελεστή σχήματος $0.9 < A_s/H^2 < 4$. Τα ονόματα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες των υλικών και οι μετρημένες κατασκευαστικές καθιζήσεις αυτών των φραγμάτων δίνονται στον Πίνακα 5.7.

Από το Σχήμα 5.16α, διαπιστώνεται ότι τα φράγματα που συμπυκνώνονται σε χαμηλότερους λόγους κενών τείνουν να εμφανίζουν καθιζήσεις που είναι πιο κοντά στα αποτελέσματα της λιθορριπής Oroville, ενώ τα φράγματα που συμπυκνώνονται σε υψηλότερους λόγους κενών τείνουν να εμφανίζουν καθιζήσεις που είναι πιο κοντά στα αποτελέσματα της λιθορριπής Pyramid. Παρά τις χαμηλά παρατηρούμενες τιμές του λόγου κενών στην ανάντη ζώνη για τα φράγματα Campos Novos και Barra Grande (Πίνακας 5.7), η συνολική δυσκαμψία μειώνεται από την παρουσία μιας πιο συμπιεστής κατάντη ζώνης και τις απότομες ανάντη κλίσεις, καταλήγοντας σε κατασκευαστικές καθιζήσεις που είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες στα άλλα φράγματα. Παρόμοιες μεγάλες κατασκευαστικές καθιζήσεις εμφανίζονται επίσης στο φράγμα Mohale εξαιτίας της κατάρρευσης του βασάλτη της λιθορριπής σε υψηλότερες πιέσεις (ICOLD, 2009).

Τα αποτελέσματα καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι για φράγματα που κατασκευάζονται σε στενές κοιλάδες έχοντας ένα ύψος μικρότερο των 120 m, η πυκνότητα συμπύκνωσης δεν είναι πολύ κρίσιμη, εξαιτίας της αυξημένης συνολικής δυσκαμψίας που παρέχεται από την εγγύτητα των δύσκαμπτων βραχωδών αντρεπισμάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι καθιζήσεις είναι γενικά μικρές και μπορούν εύκολα να συμπεριληφθούν από την πλάκα σκυροδέματος και τους κατακόρυφους και περιμετρικούς αρμούς. Αντίθετα, για φράγματα που έχουν ύψος μεγαλύτερο των 150 m, οι αριθμητικές προβλέψεις αυτής της διατριβής οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι κατασκευαστικές

καθιζήσεις αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση του λόγου κενών και του ύψους, ακόμη και στην περίπτωση μιας στενής κοιλάδας.

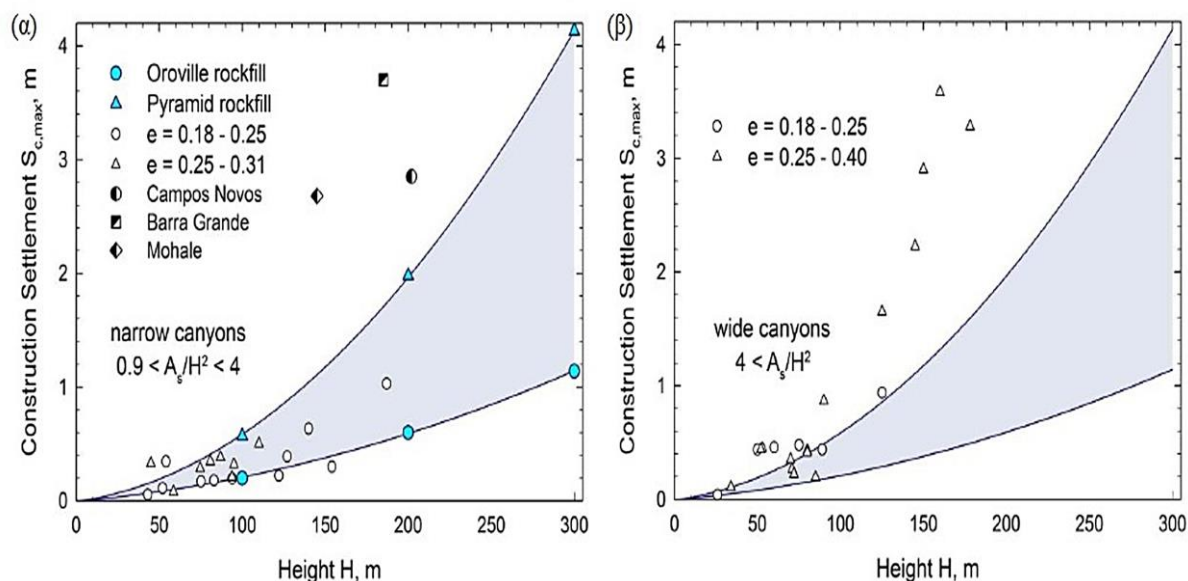
Αδιαμφισβήτητα, οι αριθμητικές προβλέψεις εμφανίζουν μια εξαιρετική συμπεριφορά για την περίπτωση της λιθορριπής Oroville ακόμη και για το φράγμα των 300 m ύψους. Αξίζει να συγκριθεί η μέγιστη καθίζηση με λόγο ύψους $S_{c,max}/H$ που είναι 0.30% για το φράγμα ύψους 200 m με το λόγο $S_{c,max}/H$ του πραγματικού φράγματος Oroville στην Καλιφόρνια (ΗΠΑ) ύψους 244 m (λιθορριπή με χωμάτινο πυρήνα), που έχει μετρηθεί και ισούται με $S_{c,max}/H = 0.31\%$ (Kulhawy et al., 1970). Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμένος λόγος καθιζήσεων για το φράγμα λιθορριπής Pyramid ύψους 200 m, είναι μάλλον μέτριος, $S_{c,max}/H \approx 1.00\%$. Οι λόγοι $S_{c,max}/H$ για τα φράγματα λιθορριπής Oroville και Pyramid ύψους 300 m είναι 0.38% και 1.40%, ενώ για τα φράγματα λιθορριπής Oroville και Pyramid ύψους 100 m είναι 0.18% και 0.58%, αντίστοιχα.

Παρομοίως, το Σχήμα 5.16β απεικονίζει διαθέσιμες μετρήσεις μέγιστων κατασκευαστικών καθιζήσεων από υπαρκτά CFRDs κατασκευασμένα σε πλατιές κοιλάδες (συντελεστής σχήματος $A_s/H^2 > 4$) με λόγους κενών e μεταξύ των 0.25-0.40 (ανοιχτά τρίγωνα). Συγκριτικά, η σκιαγραφημένη περιοχή καθορίζει το εύρος της διακύμανσης που προβλέπεται από την αριθμητική ανάλυση για την τραπεζοειδή κοιλάδα με $A_s/H^2 = 2.1$. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι ακόμη και για σχετικά μικρούς λόγους κενών, οι καθιζήσεις $S_{c,max}$ μπορούν να είναι πολύ υψηλές εξαιτίας συγκεκριμένης μείωσης της συνολικής δυσκαμψίας που δημιουργείται από την εγγύτητα των δύσκαμπτων ορίων σε στενές κοιλάδες. Για παράδειγμα, τα φράγματα Foz do Areia ($e=0.33$, $A_s/H^2 = 5.4$), Tianshenqiao ($e=0.31$, $A_s/H^2 = 4.9$) και Xingo ($e=0.28$, $A_s/H^2 = 6.0$) εμφανίζουν τιμές $S_{c,max}$ ίσες με 3.58 m, 3.28 m και 2.90 m, αντίστοιχα (Πίνακας 5.7). Αυτές οι τιμές $S_{c,max}$ είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες που έχουν προβλεφθεί με λιθορριπή Pyramid, για φράγματα παρόμοιου ύψους με $A_s/H^2 = 2.1$.

Πίνακας 5.7. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες υλικών και καθιζήσεις κατασκευής από 44 CFRDs.

No.	Dam	Height H, m	Length L, m	Shape factor A_s / H^2	Void ratio e	Modulus E_v , MPa	Settl. S_c , m	Reference
1	Aguamilpa	187	486	3.9	0.180	190	1.03*	ICOLD (2010)
2	Crotty	83	240	1.9	0.200	375	0.18	ICOLD (2010)
3	Salvajina	154	355	2.4	0.210	205	0.30	Hunter (2003)
4	White Spur	43	146	2.3	0.215	180	0.06	Hunter (2003)
5	Alto Anchicaya	140	260	1.1	0.220	145	0.63	Cooke (1998)
6	Little Para	54	226	3.4	0.220	38	0.35	Hunter (2003)
7	Bastyan	75	430	3.4	0.230	160	0.17	Knoop et al. (1985)
8	Murchison	94	200	1.9	0.234	190	0.20	Knoop et al. (1985)
9	Golillas	127	113	0.9	0.240	155	0.39	ICOLD (2010)
10	Lower Pieman	122	360	2.5	0.240	160	0.22	Knoop et al. (1985)
11	Daegok	52	190	3.7	0.250	154	0.11	Kim et al. (2008)
12	Wananxi	93.8	210	2.0	0.257	100	0.21	Ren et al. (1993)
13	Cethana	110	215	2.5	0.260	140	0.50	Cooke (1998)
14	Sancheong U	86.9	360	3.1	0.270	92	0.38	Park et al. (2005)
15	Dongbok	45	188	3.5	0.270	26	0.33	Knoop et al. (1985)
16	Chengbing	74.6	232	2.8	0.277	100	0.28	Wu et al. (2000b)
17	Huashan	80.8	160	2.0	0.280	94	0.35	Zhang (1993)
18	Xibeikou	95	222	3.3	0.284	80	0.32	Gao et al. (1993)
19	Guanmenshan	58.5	184	2.4	0.310	58	0.08	Guangtong (2000)
20	Miryang	89	535	6.8	0.180	90	0.44	Kim et al. (2008)
21	Shiroro	125	560	4.2	0.200	76	0.94	Ren et al. (1993)
22	Tullabardine	26	200	8.1	0.230	90	0.04*	Hunter (2003a)
23	Fortuna 1st	60	1056	6.1	0.233	42	0.46	Perdomo et al. (1985)
24	Mackintosh	75	465	4.9	0.240	45	0.48	Humes et al. (2002)
25	Buan	50	282	7.3	0.250	25	0.44	Kim et al. (2008)
26	Mangrove creek	80	384	4.5	0.260	75	0.43	Mackenzie et al. (1985)
27	Sancheong L	70.9	286	6.3	0.270	83	0.27	Park et al. (2005)
28	Kotmale	90	620	7.4	0.270	50	0.87	Gosschalk et al. (1985)
29	Namgang	34	1126	36.2	0.270	47	0.11	Kim et al. (2008)
30	Yangyang	72	347	5.0	0.280	110	0.22	Kim et al. (2008)
31	Xingo	150	850	6.0	0.280	34	2.90	Shi et al. (2000)
32	Tamjin	53	403	10.7	0.280	34	0.45	Kim et al. (2008)
33	Jangheung	52	550	10.7	0.280	34	0.44	Kim et al. (2008)
34	Khao Laem	1133	1000	11.0	0.290	59	1.36	Mahasandana et al. (1985)
35	Sugaroaf	85	1050	11.5	0.302	55	0.20	Hunter (2003)
36	Ita	125	875	7.0	0.308	48	1.65*	ICOLD (2010)
37	Tianshenqiao	178	1168	4.9	0.310	45	3.28	Wu et al. (2000a)
38	Yongdam	70	498	8.8	0.320	52	0.35	Kim et al. (2008)
39	Foz do Aria	160	828	5.4	0.330	47	3.58	Cooke (1998)
40	Segredo	145	705	4.1	0.370	45	2.22	Pinto et al. (1993)
41	Pyonghwa 1st	80	410	7.1	0.400	71	0.41	Kim et al. (2008)
42	Campos Novos	202	590	2.57	0.220	75	2.85	Xavier (2009)
43	Mohale	145	600	3.85	0.260	30-50	2.68	ICOLD (2009)
44	Barra Grande	185	650	3.15	0.240	50	3.70*	Borges (2009)

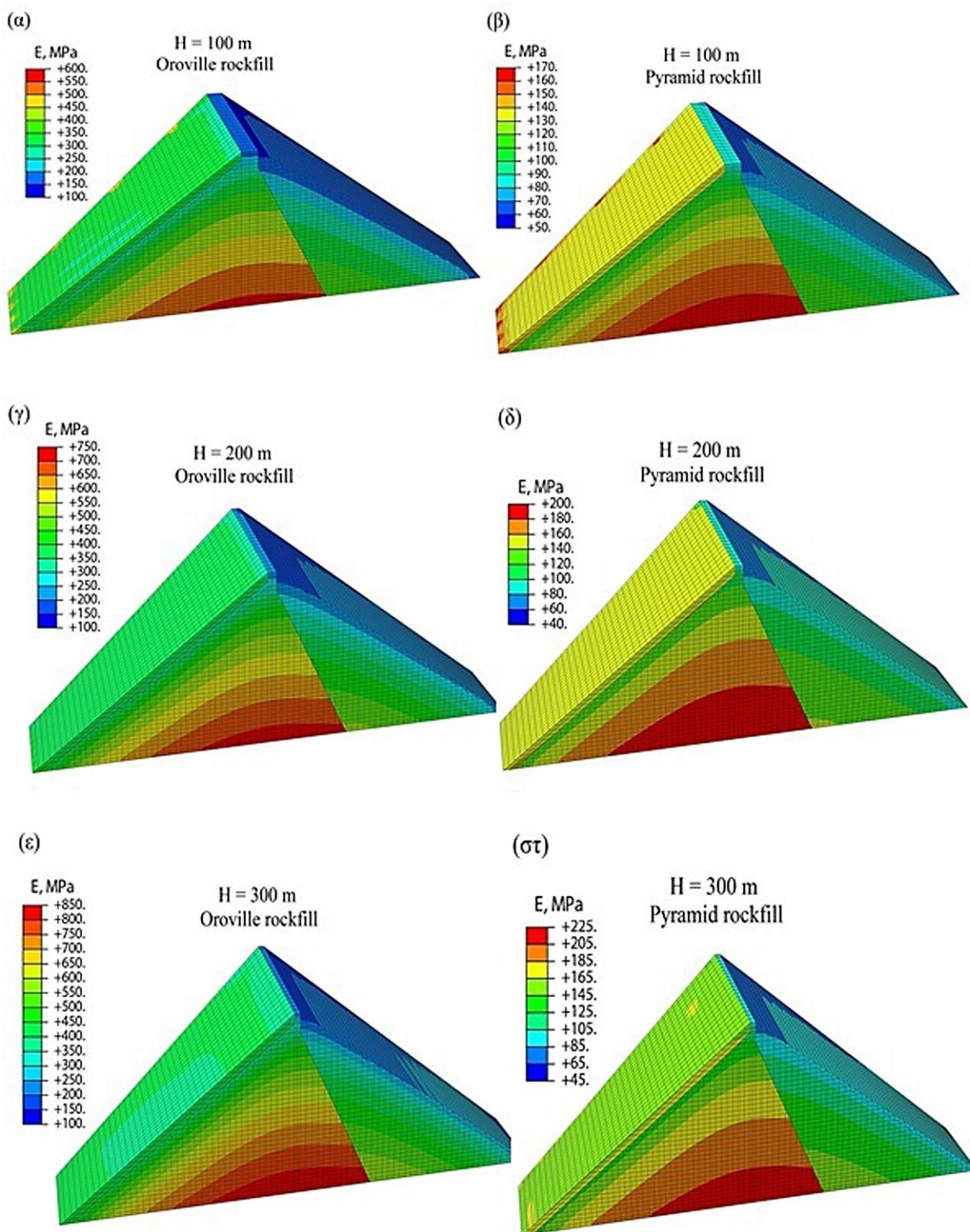
*Estimated based on reported value of 1D compression modulus E_v



Σχήμα 5.16. Μετρήσεις μέγιστων καθιζήσεων κατασκευής $S_{c,max}$ της λιθορριπής συμπυκνωμένης σε διαφορετικές τιμές λόγου κενών e (Πίνακας 5.7) και προβλέψεις του μοντέλου ως προς το ύψος των φραγμάτων για (α) στενές κοιλάδες ($0.9 < A_s/H^2 < 4$) και (β) πλατιές κοιλάδες ($A_s/H^2 > 4$).

5.3.2 Δυσκαμψία λιθορριπής.

Μετά την πλήρωση της λεκάνης, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E αυξάνουν περαιτέρω στην ανάντη ζώνη εξαιτίας της αύξησης της περιβάλλουσας τάσης. Υπενθυμίζεται ότι αυτές οι υψηλές τιμές του E αντιστοιχούν σε καθαρά ελαστική συμπεριφορά (προερχόμενη από τιμές αποφόρτισης/επαναφόρτισης, παρόμοιες με το μέτρο E_{ur} του μοντέλου του Duncan) και δεν μπορούν να συγκριθούν με τις πολύ μικρότερες “ισοδύναμες” τιμές του μέτρου του Young που δίνονται στον Πίνακα 5.7 κι αντιπροσωπεύουν και ελαστική και ανελαστική παραμόρφωση λιθορριπής. Το Σχήμα 5.17 απεικονίζει την κατανομή του εξαρτημένου από τις τάσεις μέτρου του Young E (εξίσωση 3.2) εντός του επιχώματος στο τέλος της κατασκευής για τις λιθορριπές Oroville και Pyramid, εμφανίζοντας μια σημαντική διαφορά στη δυσκαμψία των δύο επιχωμάτων και για τα τρία ύψη φραγμάτων. Διαπιστώνεται ένα εύρος τιμών του μέτρου του Young E για χρήση λιθορριπής Oroville από 120-564 MPa για το φράγμα ύψους 100 m, 136-727 MPa για το φράγμα ύψους 200 m και 147-846 MPa για το φράγμα ύψους 300 m. Αντίστοιχα, για χρήση λιθορριπής Pyramid διαπιστώνεται ένα μικρότερο εύρος από 56-168 MPa για το φράγμα ύψους 100 m, 54-197 MPa για το φράγμα ύψους 200 m και 48-222 MPa για το φράγμα ύψους 300 m.



Σχήμα 5.17. Κατανομή του μέτρου ελαστικότητας του Young E στα έξι φράγματα πριν την πλήρωση της λεκάνης για (α) $H=100$ m με λιθορριπή Oroville, (β) $H=100$ m με λιθορριπή Pyramid, (γ) $H=200$ m με λιθορριπή Oroville, (δ) $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid, (ε) $H=300$ m με λιθορριπή Oroville και (στ) $H=300$ m με λιθορριπή Pyramid.

5.3.3 Καθιζήσεις κατά την πλήρωση της λεκάνης και μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.

Η πλήρωση της λεκάνης προσομοιώνεται από μια σταδιακή αύξηση του επιπέδου του ύδατος της λεκάνης σε διαφορετικά βήματα, κατά τη διάρκεια της οποίας προστίθεται η υδροστατική πίεση που εφαρμόζεται στα πάνελ της πλάκας. Το μέγιστο επίπεδο του ύδατος λαμβάνεται ίσο με 2 m χαμηλότερα από το ύψος του φράγματος. Η κατανομή των κανονικοποιημένων συσσωρευμένων καθιζήσεων $S/S_{c,max}$ μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του κανονικοποιημένου ύψους z/H στο μέσο της διατομής του φράγματος είναι πρακτικά η ίδια για τις έξι περιπτώσεις ανάλυσης των φραγμάτων. Η μέση τιμή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15 με μια διακεκομμένη ροζ καμπύλη. Η αύξηση των καθιζήσεων στο μέσο της στέψης εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης είναι περίπου 0.1 $S_{c,max}$.

Περαιτέρω καθιζήσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης συσσωρεύονται εξαιτίας του συνεχόμενου ερπυσμού της λιθορριπής, ο οποίος συνήθως προβλέπεται εμπειρικά βασισμένος σε ιστορικές καταγραφές παρόμοιων τύπων επιχωμάτων και παρόμοιων μεθόδων κατασκευής. Σημαντικά ποσοστά ερπυσμού μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια και μετά την πρώτη πλήρωση της λεκάνης, ενώ μερικά χρόνια μετά την πλήρωση της λεκάνης, η τιμή γίνεται περίπου σταθερή, σε λογαριθμική κλίμακα χρόνου.

Επιπλέον, για φράγματα σε σεισμικές περιοχές, ισχυρό τράνταγμα του εδάφους μπορεί να προκαλέσει δυναμικές συνιζήσεις, οι οποίες επίσης εξαρτώνται από την ποιότητα της συμπτυκνωμένης λιθορριπής και από το επίπεδο έντασης του σεισμού. Από τη στιγμή που και οι καθιζήσεις ερπυσμού και οι δυναμικές συνιζήσεις καταλήγουν σε μείωση του όγκου της λιθορριπής, συνδυάζονται στην παρούσα διατριβή και χρησιμοποιούνται για να εξεταστεί η επίδραση των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων στη συμπεριφορά της πλάκας. Τέλος, θεωρείται ότι η μέγιστη τιμή των συνδυασμένων καθιζήσεων ερπυσμού και δυναμικών συνιζήσεων που εμφανίζονται στο μέσο της στέψης του φράγματος είναι ίση με το 50% της μέγιστης καθίζησης της κατασκευής $S_{c,max}$, η οποία είναι μετρημένη στο μέσο το ύψους του φράγματος. Αφού το μοντέλο Lade δεν μπορεί στην παρούσα μορφή να προσομοιώσει τον ερπυσμό και τη δυναμική συνίζηση, υιοθετείται μια προσέγγιση, στην οποία τέτοιου είδους καθίζηση προσομοιώνεται με την εισαγωγή ενός τεχνητού κύκλου φόρτισης/αποφόρτισης της δύναμης της βαρύτητας του επιχώματος, μετά από τον οποίο οι στατικές τάσεις επιστρέφουν στις αρχικές τους τιμές και η προκαλούμενη συνολική καθίζηση έχει την επιθυμητή τιμή στο μέσο της στέψης.

Η κατανομή των συσσωρευμένων μακροπρόθεσμων κανονικοποιημένων καθιζήσεων $S/S_{c,max}$ ως προς το κανονικοποιημένο ύψος z/H στο μέσο της διατομής του φράγματος, είναι πρακτικά η ίδια και για τις έξι περιπτώσεις ανάλυσης των φραγμάτων. Η μέση της τιμή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15 με μια διακεκομμένη μπλε καμπύλη. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη μεταβολή της καθίζησης (θεωρείται ίση με $0.5S_{c,max}$) που εμφανίζεται στο μέσο της στέψης και εξαρτάται από την τιμή της $S_{c,max}$, μπορεί να επιβάλλει μια σημαντική αύξηση της θλίψης στην πλάκα σκυροδέματος.

5.3.4 Βύθιση της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.

Το Σχήμα 5.18 απεικονίζει τη βύθιση των πάνελ της πλάκας σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης για τα έξι φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δυο υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid. Στην περίπτωση της χρήσης υλικού λιθορριπής Oroville, οι μέγιστες βυθίσεις είναι 0.07 m για το φράγμα ύψους 100 m, 0.22 m για το φράγμα ύψους 200 m και 0.43 m για το φράγμα ύψους 300 m, παρουσιάζοντας μια τέλεια συμπεριφορά. Στην περίπτωση της χρήσης υλικού λιθορριπής Pyramid, οι μέγιστες βυθίσεις είναι πολύ μεγαλύτερες, 0.22 m για το φράγμα ύψους 100 m, 0.79 m για το φράγμα ύψους 200 m και 1.64 m για το φράγμα ύψους 300 m. Παρά το γεγονός ότι κάθε πάνελ πλάκας είναι μια ανεξάρτητη κατασκευή, η κατανομή της βύθισης για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης είναι αρκετά ομαλή, με τη μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται περίπου στο 40% του ύψους του φράγματος και σχεδόν να μηδενίζεται κοντά στα αντερείσματα.

Το Σχήμα 5.19α απεικονίζει μετρήσεις μέγιστης βύθισης της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης σε σχέση με το ύψος των φραγμάτων από 20 υπαρκτά CFRDs (Πίνακας 5.8) έχοντας λόγους κενών συμπτυκνωμένης λιθορριπής ανάμεσα σε 0.20-0.24 (ανοιχτοί κύκλοι) και ανάμεσα σε 0.26-0.37 (ανοιχτά τρίγωνα). Επίσης απεικονίζει τις προβλεπόμενες καθιζήσεις και για τις έξι περιπτώσεις ανάλυσης, υποδεικνύοντας με μια σκιαγραφημένη περιοχή το εύρος της διακύμανσης ανάμεσα στα υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid. Είναι εμφανές ότι οι πυκνότερες μετρήσεις λιθορριπής (ανοιχτοί κύκλοι) είναι σε καλή συμφωνία με τις προβλέψεις της λιθορριπής Oroville, ενώ οι πιο χαλαρές μετρήσεις λιθορριπής (ανοιχτά τρίγωνα) είναι σε εύλογη συμφωνία με τις προβλέψεις της λιθορριπής Pyramid.

Οι βυθίσεις της πλάκας των φραγμάτων Barra Grande και Mohale, απεικονίζονται στο Σχήμα 5.19α και είναι παρόμοιες με εκείνες που έχουν προβλεφθεί για τα φράγματα με λιθορριπή Pyramid. Παρόλο που οι τελευταίες πλάκες με υψηλής αντοχής ινοπλισμένο

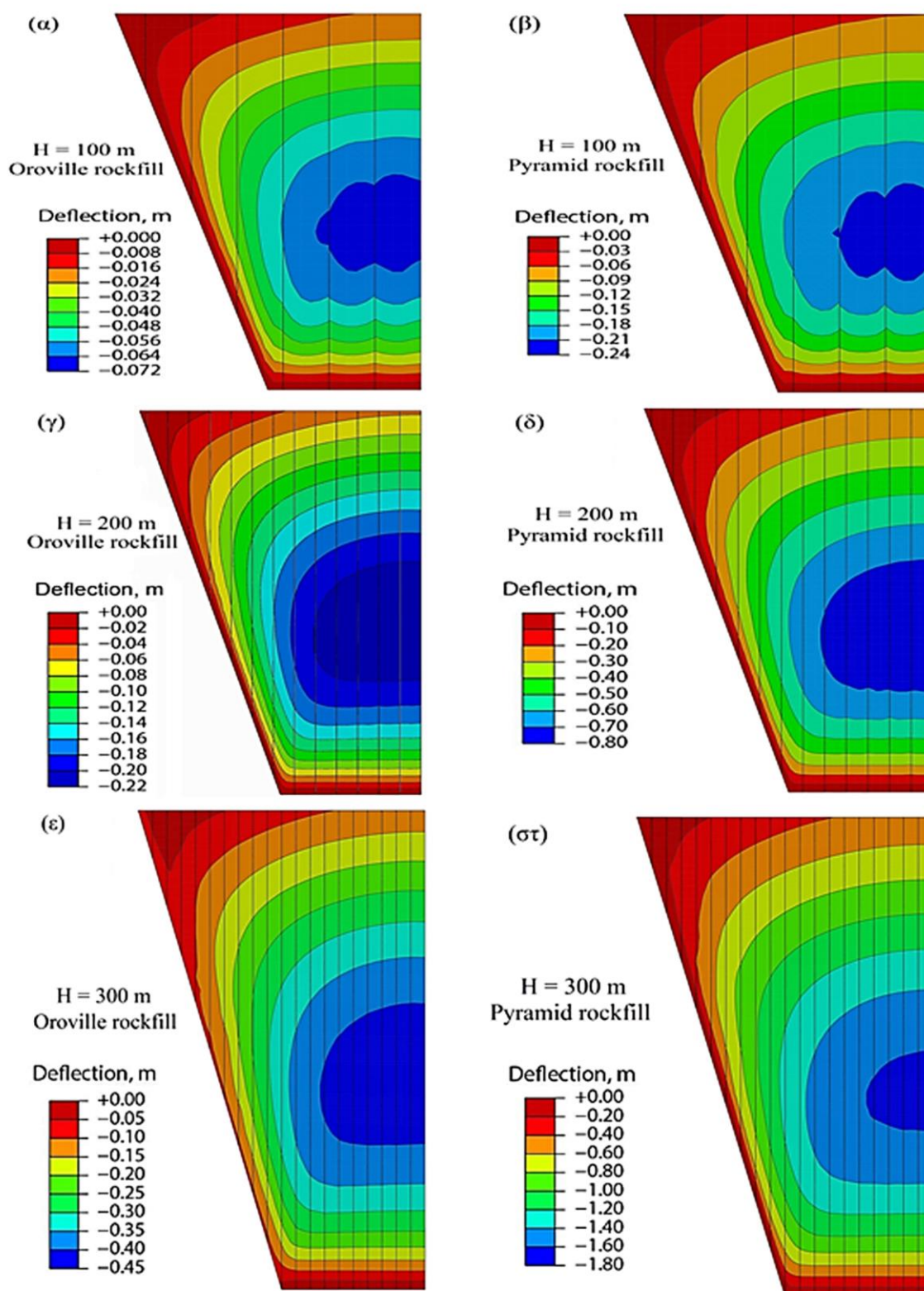
σκυρόδεμα δεν αστοχούν κατά την πλήρωση της λεκάνης, οι πλάκες των φραγμάτων Barra Grande και Mohale αποτελούμενες από ένα χαμηλότερης αντοχής συμβατικό σκυρόδεμα αστόχησαν.

5.3.5 Βύθιση της πλάκας εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.

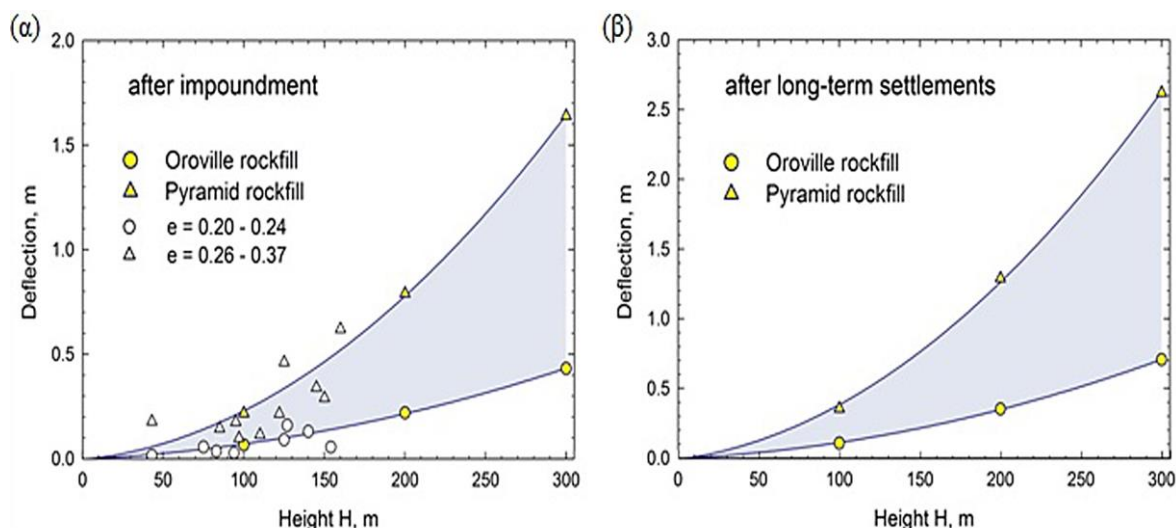
Το Σχήμα 5.19β απεικονίζει αριθμητικές προβλέψεις της μέγιστης συσσωρευμένης βύθισης της πλάκας μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις για τις περιπτώσεις ανάλυσης των φραγμάτων, υποδεικνύοντας με μια σκιαγραφημένη περιοχή το εύρος της διακύμανσης ανάμεσα στα υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid. Είναι εμφανές ότι οι συσσωρευμένες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις προκαλούν σχετικά μικρή επιπρόσθετη βύθιση μόνο στην περίπτωση της λιθορριπής Oroville. Αντίθετα, οδηγούν σε σημαντική βύθιση στα φράγματα ύψους 200 και 300 m, κατασκευασμένα από λιθορριπή Pyramid. Τέτοιες μεγάλες βυθίσεις αναμένονται να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την κατασκευαστική ακεραιότητα της πλάκας.

Πίνακας 5.8. Μετρήσεις βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης σε 20 CFRDs.

No.	Dam	Height H, m	Void ratio, e	Deflection m	Reference
1	Shiroro	125	0.200	0.090	Ren et al. (1993)
2	Crotty	83	0.200	0.035	ICOLD (2010)
3	Salvajina	154	0.210	0.055	Hunter (2003)
4	White Spur	43	0.215	0.015	Hunter (2003)
5	Alto Anchicaya	140	0.220	0.130	Cooke (1998)
6	Bastyan	75	0.230	0.056	Knoop et al. (1985)
7	Marchison	94	0.234	0.028	Knoop et al. (1985)
8	Golillas	127	0.240	0.160	ICOLD (2010)
9	Cethana	110	0.260	0.114	Cooke (1998)
10	Scott's Peak	43	0.266	0.178	Fell et al. 2014
11	Kotmale	97	0.270	0.098	Gosschalk et al. (1985)
12	Xingo	150	0.280	0.290	Shi et al. (2000)
13	Xibeikou	95	0.284	0.175	Gao et al. (1993)
14	Reece	122	0.290	0.215	Fell et al. 2014
15	Winneke	85	0.302	0.145	Fell et al. 2014
16	Ita	125	0.308	0.461	ICOLD (2010)
17	Foz do Aria	160	0.330	0.620	Cooke (1998)
18	Segredo	145	0.370	0.340	Pinto et al. (1993)
19	Mohale	145	0.260	0.470	ICOLD (2009)
20	Barra Grande	185	0.240	0.712	Borges (2009)



Σχήμα 5.18. Κατανομή της βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.

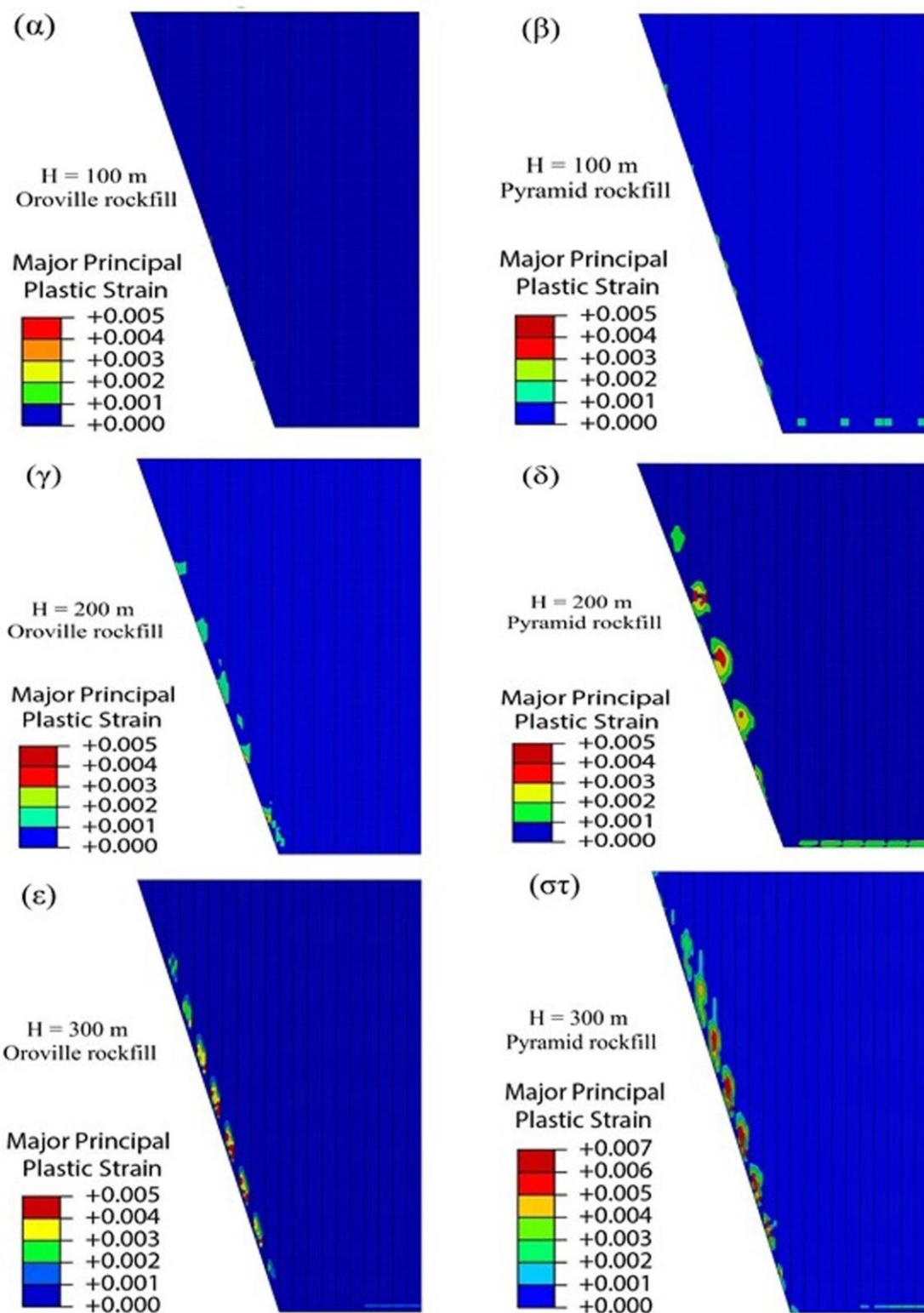


Σχήμα 5.19. (α) Μετρήσεις και προβλέψεις μοντέλου της μέγιστης βύθισης της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης ως προς το ύψος των φραγμάτων (β) Προβλέψεις της μέγιστης βύθισης της πλάκας ως προς το ύψος των φραγμάτων εξαιτίας υποθετικών μακροπρόθεσμων καθιζήσεων ερπυσμού και δυναμικών συνιζήσεων.

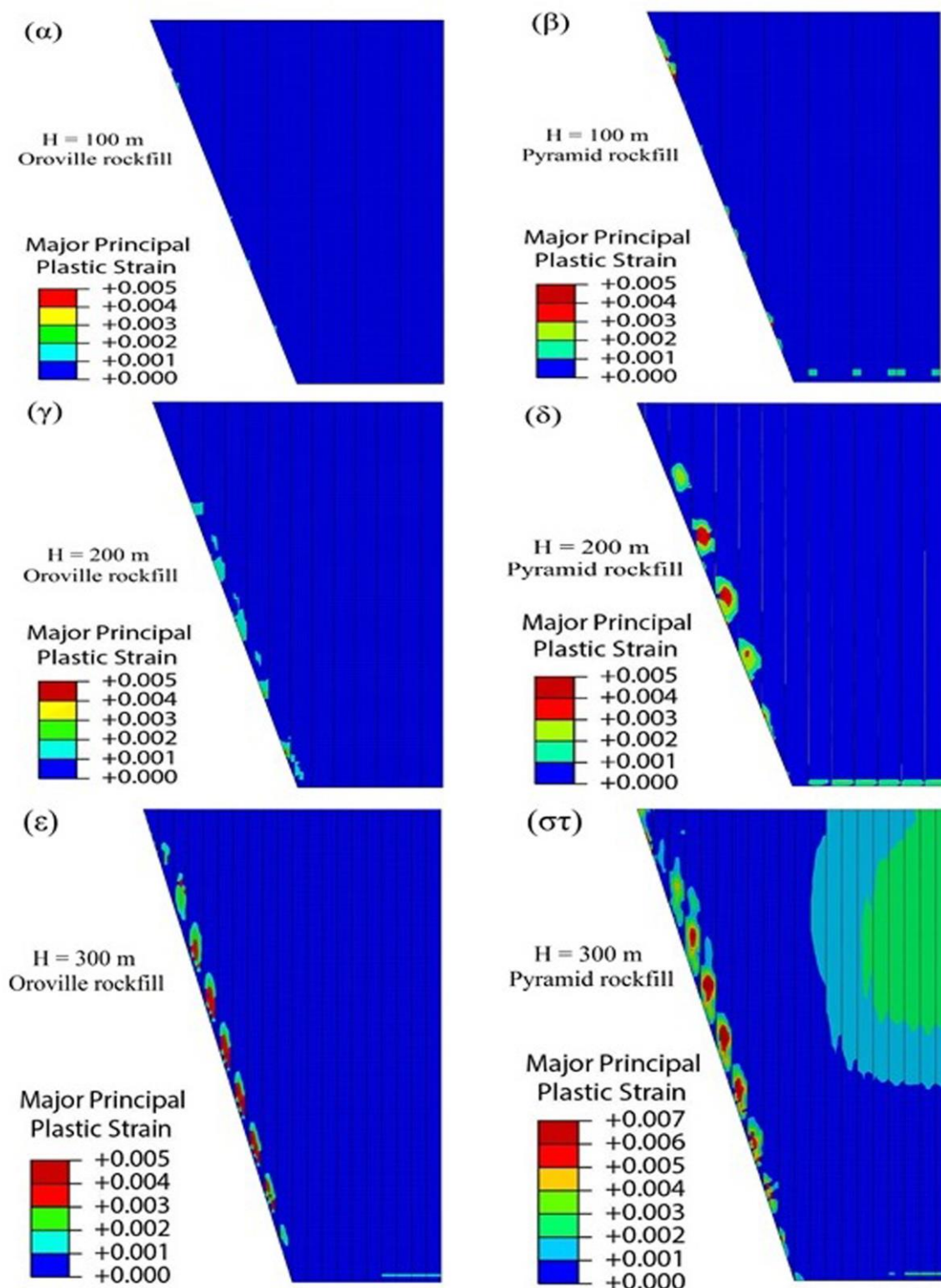
5.3.6 Εφελκυστικές τάσεις και πλαστικές παραμορφώσεις.

Η εκτίμηση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 (μέγιστος εφελκυσμός) μετά την πλήρωση της λεκάνης δείχνει ότι υψηλές εφελκυστικές τάσεις και πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται σε μια ζώνη, κατά προσέγγιση 20 m εύρους, κοντά στο αντέρεισμα. Η παρουσία μιας εφελκυστικής ζώνης που είναι παράλληλη στην πλίνθο είναι σε συμφωνία με την αναφερόμενη ζώνη ρηγμάτωσης εύρους 10 έως 20 m σε υπαρκτά φράγματα, όπως τα Xingo, Itá και Itapebi (Filho Marques et al., 2005). Όπως ήταν αναμενόμενο, υψηλές εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται για τα υψηλότερα φράγματα και για την πιο συμπίεστη λιθορριπή Pyramid.

Για την πιο δύσκαμπτη λιθορριπή Oroville, οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται στο τέλος της πλήρωσης της λεκάνης. Επιπρόσθετες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις τείνουν να μειώνουν τις εφελκυστικές τάσεις και να αυξάνουν τις θλιπτικές τάσεις. Ως εκ τούτου, οι συσσωρευμένες εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης και μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις είναι παρόμοιες. Το Σχήμα 5.20 απεικονίζει την κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης ϵ_1^p για τα φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δυο υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid μετά την πλήρωση της λεκάνης, ενώ το Σχήμα 5.21 αντίστοιχα μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.



Σχήμα 5.20. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.



Σχήμα 5.21. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.

Είναι εμφανές ότι οι μέγιστες κύριες πλαστικές παραμορφώσεις για το φράγμα ύψους 100 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής είναι πολύ μικρές, σχεδόν αμελητέες στο φράγμα με λιθορριπή Oroville και λίγο μεγαλύτερες στο φράγμα με λιθορριπή Pyramid, τόσο στην περίπτωση της κατάστασης του φράγματος μετά από την πλήρωση της λεκάνης όσο και μετά από τις καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια τάση δημιουργίας εφελκυστικών πλαστικών παραμορφώσεων στην πλευρά του αντερείσματος και στον πόδα του φράγματος.

Στο φράγμα των 200 m, η κατανομή των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων δείχνει μεγάλες εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις (και ρηγματώσεις) για το φράγμα με λιθορριπή Pyramid και αμελητέες πλαστικές παραμορφώσεις για το φράγμα με λιθορριπή Oroville τόσο στην περίπτωση της κατάστασης του φράγματος μετά από την πλήρωση της λεκάνης όσο και μετά από τις καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης. Η απεικόνιση της δημιουργίας εφελκυστικών πλαστικών παραμορφώσεων στην πλευρά του αντερείσματος και στον πόδα του φράγματος είναι ιδιαίτερα εμφανής και σε μεγαλύτερο εύρος από το φράγμα των 100 m.

Για το φράγμα των 300 m από λιθορριπή Pyramid, η κατανομή των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων δείχνει μεγαλύτερες εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις (και ρηγματώσεις) εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης σε σύγκριση με τη λιθορριπή Oroville. Σε αυτήν την περίπτωση, οι πλαστικές εφελκυστικές παραμορφώσεις αυξάνουν ελαφρώς μετά την εφαρμογή των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων. Επιπρόσθετα με την περιοχή της ζώνης του αντερείσματος, εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται σε μια μεγάλη κεντρική περιοχή από το μέσο του ύψους του φράγματος και προς την στέψη. Αυτή η εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση προκαλείται από συγκεκριμένη αύξηση των θλιπτικών τάσεων σ_{yy} και σ_{xx} μετά την εφαρμογή μεγάλων μακροπρόθεσμων καθιζήσεων της λιθορριπής Pyramid, προκαλώντας μια προέκταση της πλάκας στην κατεύθυνση κάθετα στην επιφάνειά της.

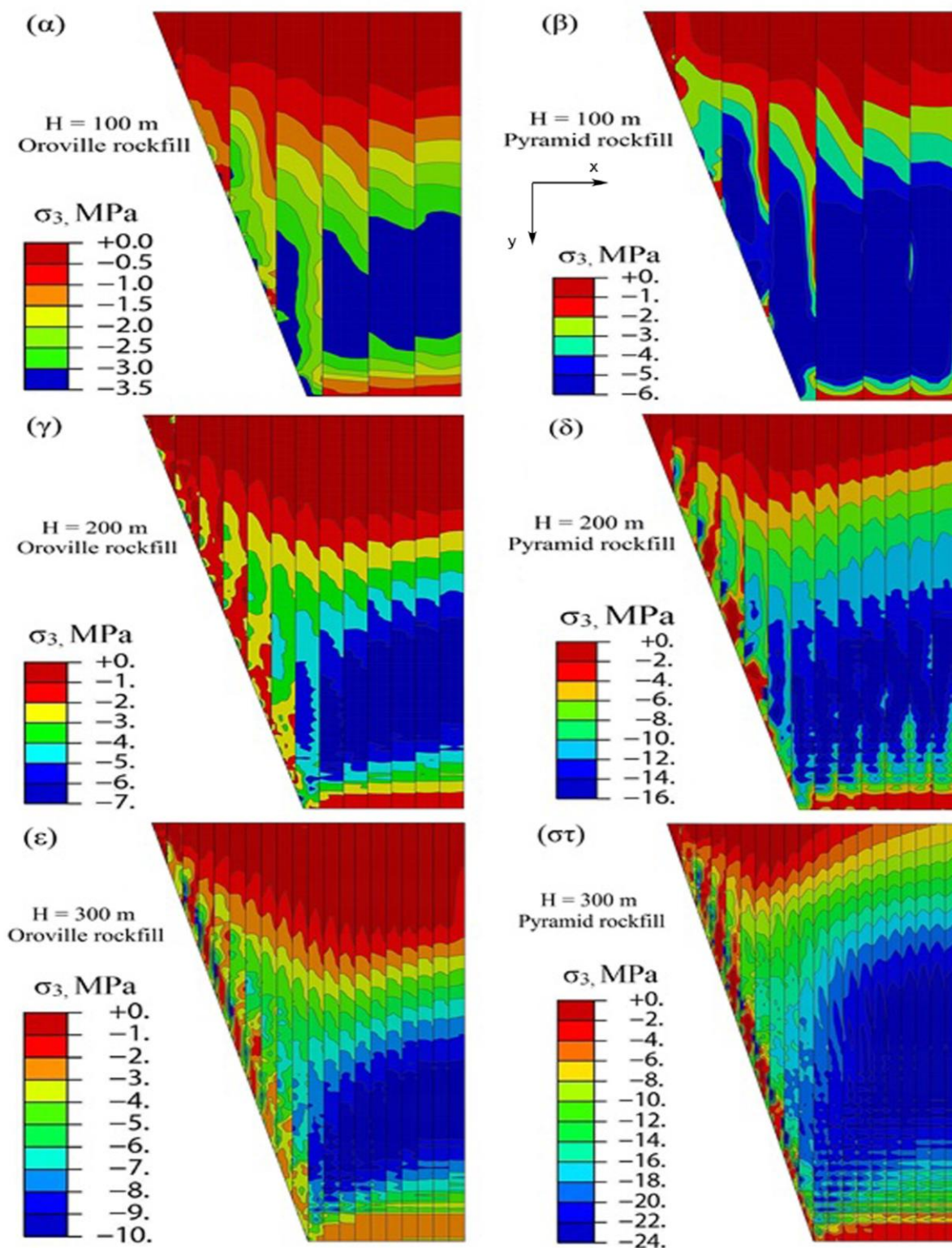
5.3.7 Θλιπτικές τάσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.

Το Σχήμα 5.22 απεικονίζει την κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για τα φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής. Σημειώνεται ότι οι θλιπτικές τάσεις είναι αρνητικές. Οι μικρότερες κύριες τάσεις σ_3 που αναπτύσσονται στην πλάκα εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης

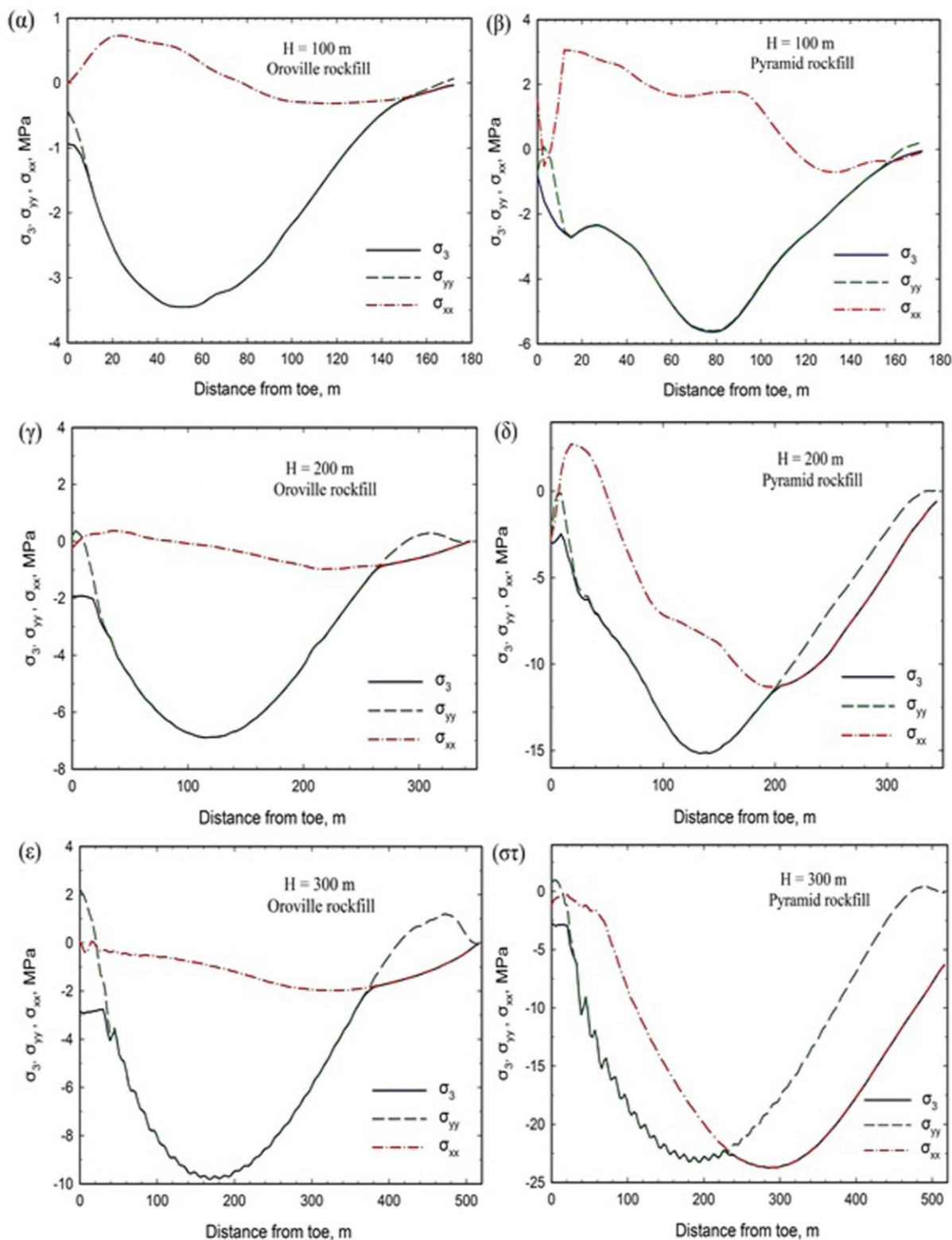
εμφανίζουν μέγιστες τιμές θλίψης για το φράγμα ύψους 100 m μόνο -3.5 MPa για τη χρήση λιθορριπής Oroville και -5.6 MPa για τη χρήση λιθορριπής Pyramid (Σχήματα 5.22α και 5.22β). Οι μέγιστες τιμές θλίψης για το φράγμα ύψους 200 m είναι μόνο -6.9 MPa για λιθορριπή Oroville και -15.2 MPa για λιθορριπή Pyramid, αντίστοιχα (Σχήματα 5.22γ και 5.22δ). Αυτές εμφανίζονται στην κεντρική κυρίως περιοχή περίπου στο 30% με 40% του ύψους του φράγματος. Για το φράγμα ύψους 300 m οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές της σ_3 που εμφανίζονται στα Σχήματα 5.22ε και 5.22στ είναι -9.8 MPa για λιθορριπή Oroville και -23.7 MPa για λιθορριπή Pyramid. Όπως είναι αναμενόμενο, οι υψηλότερες καθιζήσεις της λιθορριπής Pyramid καταλήγουν σε μια σημαντική αύξηση της θλίψης της πλάκας.

Το Σχήμα 5.23 απεικονίζει την κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 κατά μήκος του πάνελ σκυροδέματος, το οποίο βρίσκεται στη μέση της διατομής σε σχέση με την απόσταση από τον πόδα, για τα φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής. Επίσης, απεικονίζονται αντίστοιχα οι κάθετες τάσεις σ_{xx} και σ_{yy} στις πλευρικές (x) και διαμήκεις (y) κατευθύνσεις των πάνελ (οι κατευθύνσεις ορίζονται γραφικά στο Σχήμα 5.22).

Η τιμή της σ_3 στα Σχήματα 5.23α, 5.23γ και 5.23ε για την πιο δύσκαμπτη λιθορριπή Oroville εξαρτάται κυρίως από τη συμβολή της σ_{yy} κατά μήκος του περισσότερου μήκους του πάνελ. Το ίδιο ισχύει και για τα φράγματα ύψους 100 και 200 m με λιθορριπή Pyramid, που απεικονίζονται στα Σχήματα 5.23β και 5.23δ. Αντίθετα, για το φράγμα ύψους 300 m, στο Σχήμα 5.23στ, η κάθετη τάση σ_{xx} που δρα ανάμεσα στα τοιχώματα στους κατακόρυφους αρμούς γίνεται πιο σημαντική από τη σ_{yy} περίπου στο 55% του ύψους της πλάκας. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, η θλίψη στην πλάκα αυξάνει σημαντικά και ως προς το μέγεθός της και ως προς την έκταση της περιοχής που επηρεάζεται. Παρ' όλα αυτά, για όλες τις περιπτώσεις του Σχήματος 5.23, οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις παραμένουν αρκετά κάτω από τη θλιπτική αντοχή κι έτσι μόνο μικρές θλιπτικές πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται μετά την πλήρωση της λεκάνης. Άλλωστε στις αναλύσεις των φραγμάτων έχει χρησιμοποιηθεί ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Η χρήση της κανονικής αντοχής σκυροδέματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολύ υψηλότερες θλιπτικές πλαστικές παραμορφώσεις, τουλάχιστον για το φράγμα των 300 m με λιθορριπή Pyramid.

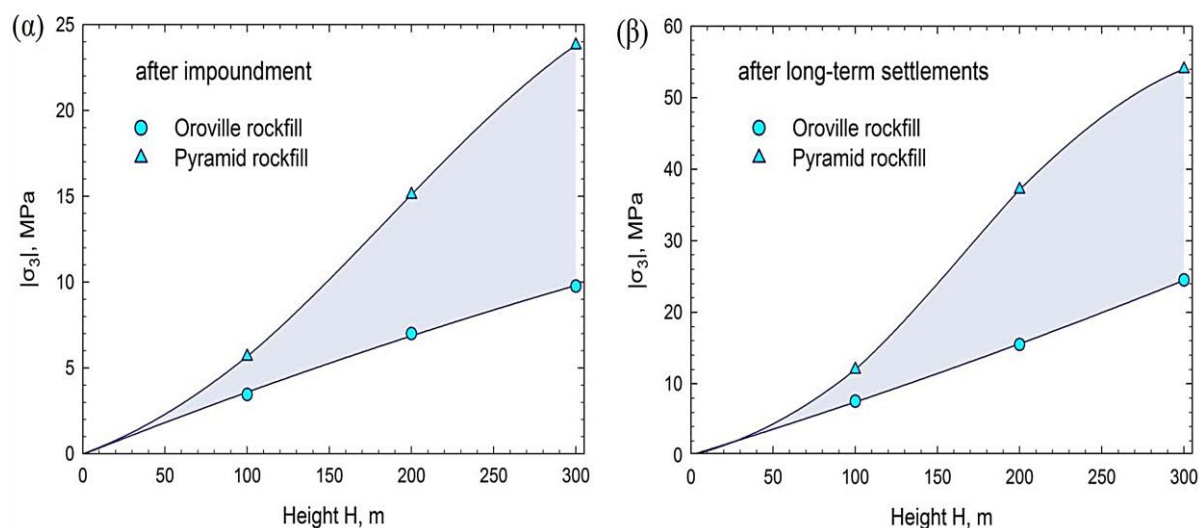


Σχήμα 5.22. Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid (αρνητικές τιμές τάσεων υποδεικνύουν θλίψη).



Σχήμα 5.23. Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.

Το Σχήμα 5.24 απεικονίζει τις μέγιστες θλιπτικές τιμές $|\sigma_3|$ μετά την πλήρωση της λεκάνης σε σχέση με το ύψος των φραγμάτων για υλικά με λιθορριπή Oroville (μπλε κύκλοι) και για υλικά με λιθορριπή Pyramid (μπλε τρίγωνα). Η σκιαγραφημένη περιοχή αναπαριστά το εύρος της διακύμανσης ανάμεσα σε αυτές τις δύο ποιότητες υλικών λιθορριπής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για την πιο δύσκαμπτη λιθορριπή Oroville, η $|\sigma_3|$ αυξάνει γραμμικά με το ύψος των φραγμάτων, αλλά παραμένει μικρή ακόμη και για τα πολύ ψηλά φράγματα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για φράγματα που έχουν ύψος μικρότερο των 100 m, δεν υπάρχει πρακτικά μεγάλη διαφορά στη μέγιστη θλίψη ανάμεσα στα δύο υλικά λιθορριπής. Για την πιο συμπίεστη λιθορριπή Pyramid και ύψη ανάμεσα σε $100\text{ m} < H < 150\text{ m}$, οι θλιπτικές τιμές παραμένουν σχετικά μικρές, αλλά για ύψη $H > 150\text{ m}$ αυξάνουν σημαντικά.



Σχήμα 5.24. Μέγιστες θλιπτικές τάσεις $|\sigma_3|$ στην πλάκα σκυροδέματος σε σχέση με το ύψος των φραγμάτων που προκαλούνται (α) από την πλήρωση της λεκάνης και (β) από συσσωρευμένες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης.

5.3.8 Θλιπτικές τάσεις εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.

Στο Σχήμα 5.25 απεικονίζεται η κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης για τα φράγματα ύψους 100, 200 και 300 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής. Οι μέγιστες τιμές θλίψης για το φράγμα ύψους 100 m είναι μόνο -7.6 MPa για τη χρήση λιθορριπής Oroville και -12.1 MPa για τη χρήση λιθορριπής Pyramid (Σχήματα 5.25α και 5.25β). Οι μέγιστες τιμές θλίψης για το φράγμα ύψους 200 m είναι μόνο -15.4 MPa για λιθορριπή Oroville και -37.1 MPa για λιθορριπή Pyramid, αντίστοιχα (Σχήματα 5.25γ και 5.25δ). Για το φράγμα

ύψους 300 m οι μέγιστες τιμές θλίψης που εμφανίζονται στα Σχήματα 5.25ε και 5.25στ είναι -24.6 MPa για λιθορριπή Oroville και -53.9 MPa για λιθορριπή Pyramid. Παρά τη σημαντική αύξηση τάσεων σε σχέση με την πλήρωση της λεκάνης, στα φράγματα με λιθορριπή Oroville αυτές οι τάσεις είναι πολύ πιο κάτω από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Ειδικά για το φράγμα των 300 m με λιθορριπή Oroville, επιπρόσθετα με τη θλιβόμενη περιοχή περίπου στο 30% με 40% του ύψους του φράγματος, μια δεύτερη περιοχή από υψηλότερες θλιπτικές τάσεις εμφανίζεται κοντά στο μέσο της στέψης. Στα φράγματα με λιθορριπή Pyramid, εμφανίζονται ξανά δύο περιοχές με υψηλή θλίψη, εκ των οποίων η μία προκαλείται από το βάρος του ύδατος περίπου στο 30% με 40% του ύψους του φράγματος και η άλλη κοντά στη στέψη που προκαλείται από μεγάλες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.

Το Σχήμα 5.26 απεικονίζει την κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ σκυροδέματος στο μέσο της διατομής των φραγμάτων σε σχέση με την απόσταση από τον πόδα του φράγματος για όλα τα ύψη φραγμάτων και για τα δύο υλικά λιθορριπής. Τα Σχήματα 5.26α, 5.26γ και 5.26ε περιγράφουν την εξέλιξη των σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} σε σχέση με το ύψος του φράγματος για χρήση λιθορριπής Oroville, παρουσιάζοντας μια εξαιρετική συμπεριφορά ακόμη και για το φράγμα ύψους 300 m.

Παρομοίως, τα Σχήματα 5.26β, 5.26δ και 5.26στ απεικονίζουν την εξέλιξη των τάσεων για τα φράγματα με λιθορριπή Pyramid. Σε αυτή την περίπτωση είναι εμφανές ότι ειδικά τα φράγματα ύψους 200 και 300 m παρουσιάζουν πολύ υψηλές τάσεις που προκαλούνται από τη θλίψη των γειτονικών πάνελ στην ανώτερη κεντρική περιοχή της πλάκας. Παρουσιάζοντας μια προσομοίωση μονοαξονικής δοκιμής θλίψης σε έναν κύβο σκυροδέματος στον οποίο οι δύο οριζόντιες τάσεις είναι ίσες με τις τάσεις σ_{yy} και σ_{zz} που αντιστοιχούν στην πίεση του ύδατος, η μέγιστη τιμή της θλιπτικής τάσης σ_{xx} βρέθηκε ίση με -57.3 MPa, δηλαδή μόνο ελαφρώς μεγαλύτερη από την προαναφερθείσα τιμή των -53.9 MPa. Ως εκ τούτου, παρά την ανάπτυξη πλαστικών θλιπτικών παραμορφώσεων, η πλάκα δεν φτάνει την αντοχή του σκυροδέματος ακόμη και στην ακραία περίπτωση των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.

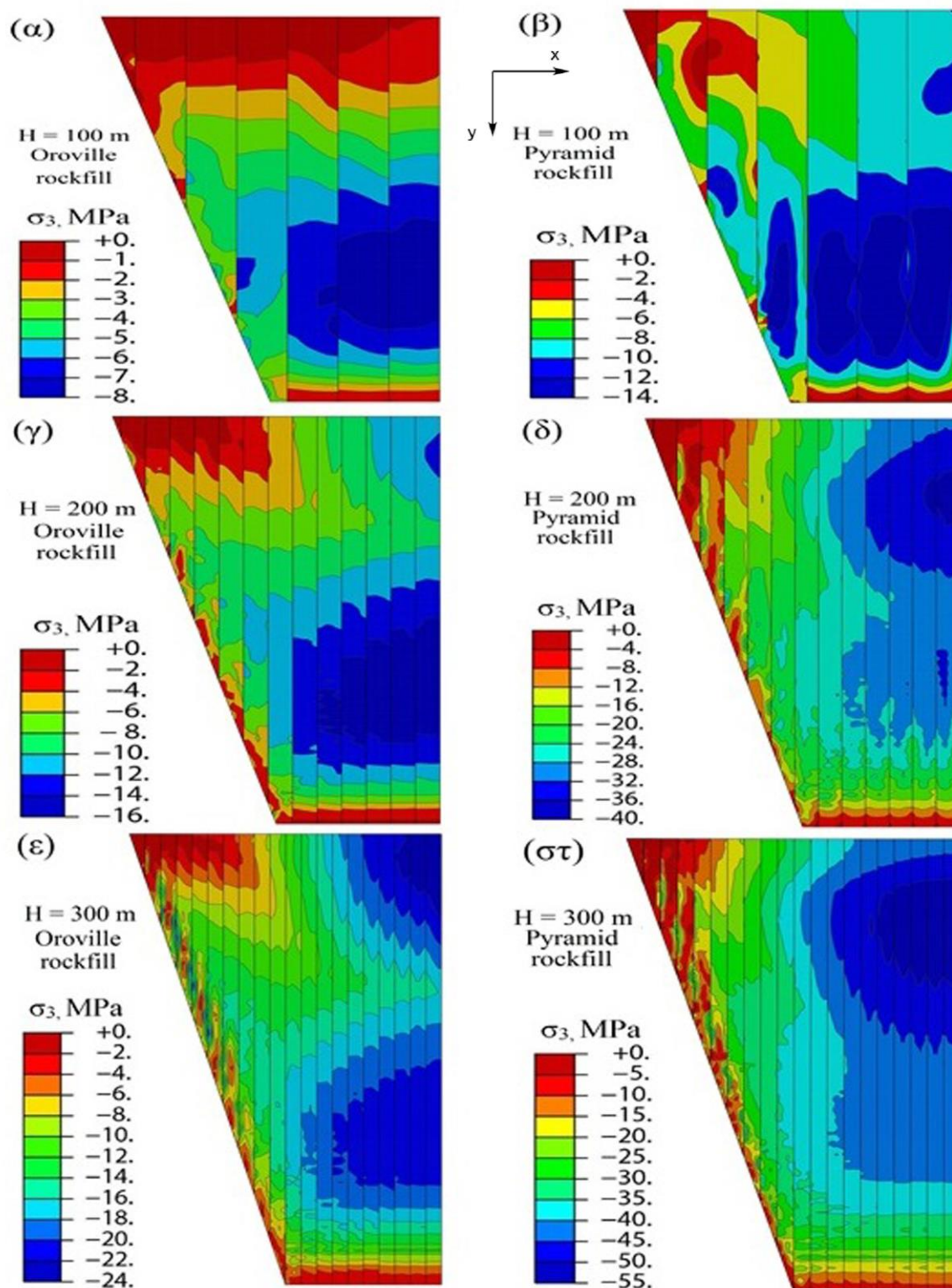
Καθώς στην παρούσα διατριβή έχει χρησιμοποιηθεί υψηλής αντοχής ινοπλισμένο σκυρόδεμα για όλα τα ύψη φραγμάτων και για τα δύο υλικά λιθορριπής, οι υψηλές θλιπτικές τάσεις που απεικονίζονται στα Σχήματα 5.26δ και 5.26στ δεν οδηγούν σε διατμητική αστοχία. Αντίθετα, σε υπαρκτά CFRDs που έχουν κατασκευαστεί με

συμβατικό σκυρόδεμα χαμηλότερης θλιπτικής αντοχής ($f_c = 25 \text{ MPa}$), οι θλιπτικές τάσεις σ_{xx} στα Σχήματα 5.26δ και 5.26στ θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε διατμητική αστοχία κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία και με τον τύπο και την τοποθεσία των διατμητικών αστοχιών των κατακόρυφων αρμών που παρατηρούνται στην περίπτωση του φράγματος Campos Novos. Το γεγονός ότι αυτές οι αστοχίες δεν συμβαίνουν μετά από μερικές μεγάλες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις αλλά κατά τη διάρκεια της πρώτης πλήρωσης της λεκάνης, εξηγείται από την υψηλή συμπίεστικότητα της λιθορριπής του Campos Novos.

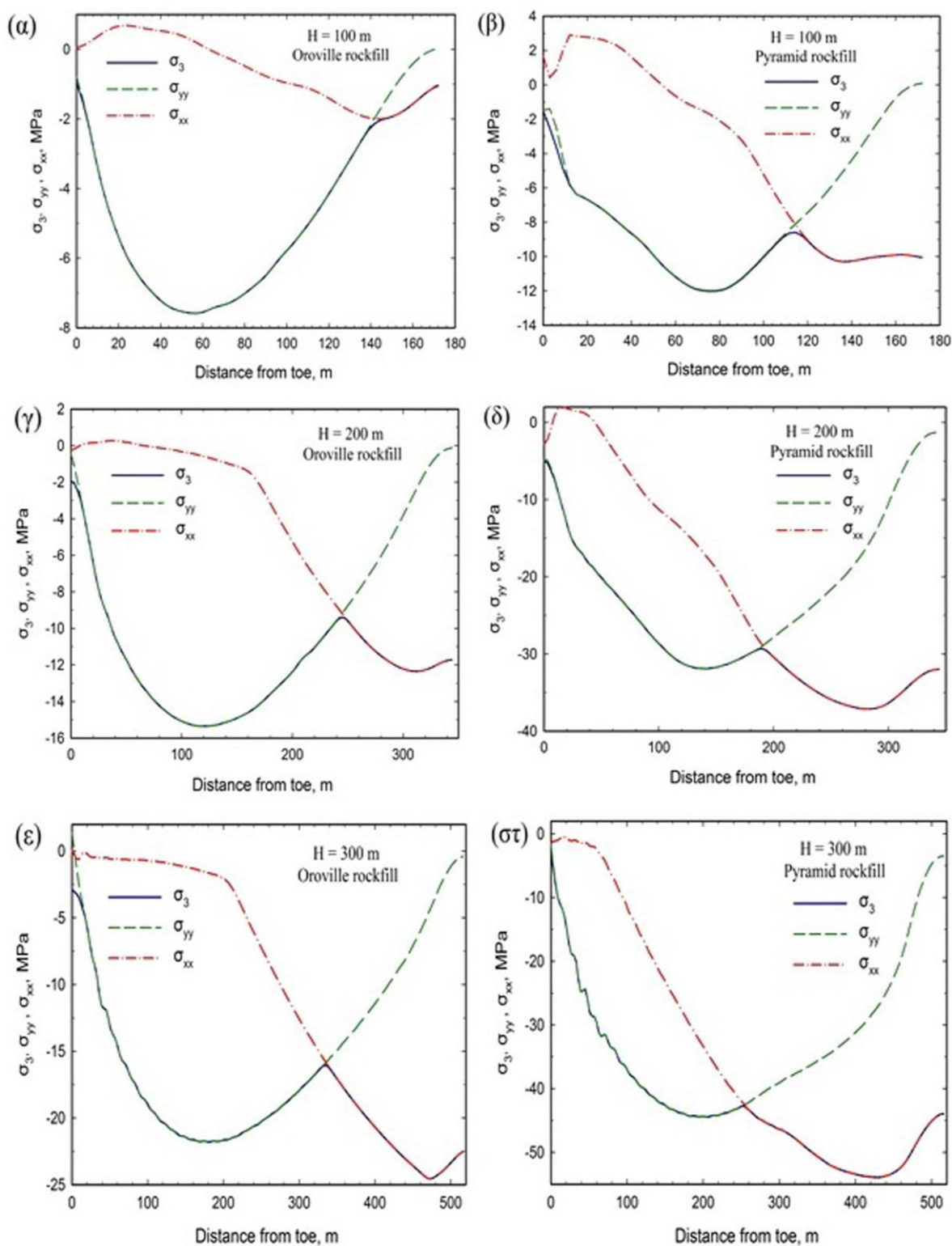
Επιπλέον οι υψηλές θλιπτικές τάσεις σ_{xx} στα Σχήματα 5.26δ και 5.26στ μπορούν να συσχετισθούν με την αστοχία των κατακόρυφων αρμών του φράγματος Ziringru κατά τη διάρκεια του σεισμού του 2008, στον οποίο η λιθορριπή παρουσίασε δυναμική συνίζηση στη στέψη 0.74 m. Κατά τη διάρκεια του σεισμού, οι συνδυασμένες θλιπτικές τάσεις που προκαλούνται από την παροδική κίνηση και τη συσσωρευμένη δυναμική συνίζηση, υπερβαίνουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ($f_c = 25 \text{ MPa}$) του φράγματος Ziringru, οδηγώντας σε εκτεταμένη αστοχία κατακόρυφων αρμών (Guan, 2009), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.27.

Τελικά οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις σ_{yy} δρουν στη διαμήκη κατεύθυνση της πλάκας στα Σχήματα 5.26β, 5.26δ και 5.26στ αγγίζοντας τις τιμές των -12.0, -32.0 και -45.0 MPa, αντίστοιχα, περίπου στο 30% με 40% του ύψους των φραγμάτων. Για κανονικό σκυρόδεμα αυτές οι τιμές μπορούν να προκαλέσουν διατμητική αστοχία κατά μήκος πιθανών οριζόντιων αρμών ή λωρίδων από σκυρόδεμα περίπου παράλληλα με το διαμήκη άξονα του φράγματος. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τις ζώνες θλιπτικής αστοχίας που εμφανίζονται στην πλάκα του φράγματος Campos Novos σε ύψος περίπου 30% με 40% του ύψους του φράγματος (βλέπε Σχήμα 5.28).

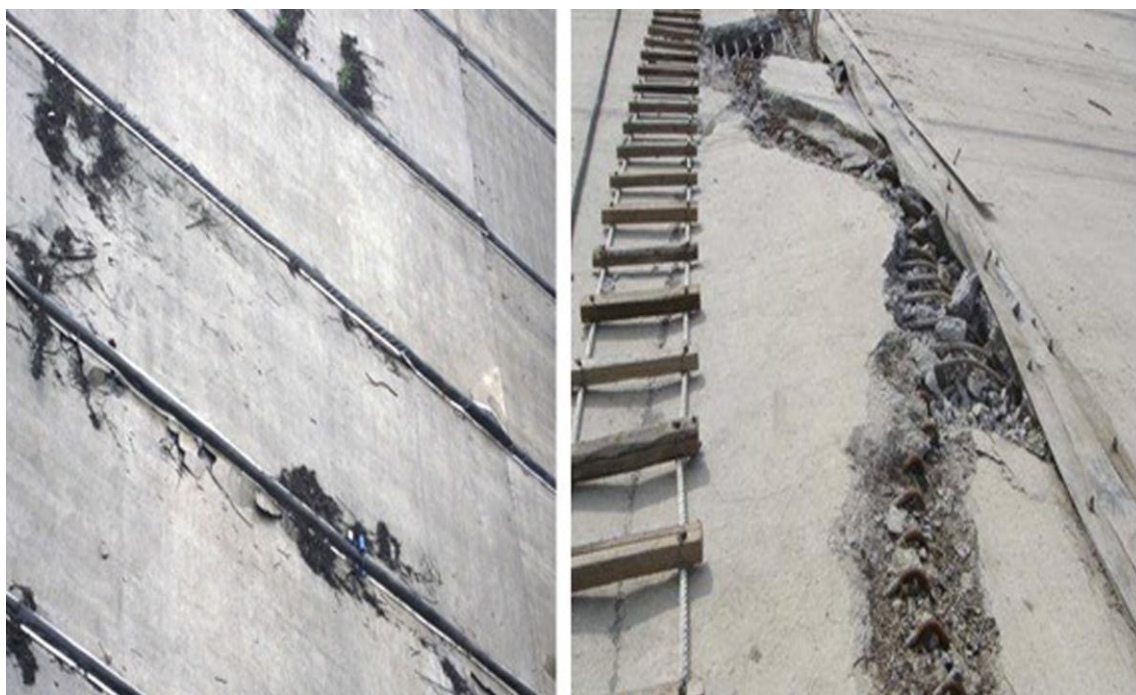
Παρόμοιου τύπου διατμητικές αστοχίες έχουν επίσης παρατηρηθεί στο φράγμα Ziringru κατά τη διάρκεια του σεισμού (Wieland, 2009). Πιο συγκεκριμένα, εξαιτίας των υψηλών θλιπτικών τιμών της σ_{yy} , δημιουργήθηκε σημαντική εξάρθρωση των οριζόντιων κατασκευαστικών αρμών με μέγιστη τιμή ίση προς 0.23 m. Η εξάρθρωση προκάλεσε κάμψη της ράβδου χάλυβα του οπλισμού τύπου "S" στο μέσο της πλάκας No. 8 και ρηγμάτωση και διαχωρισμό από το σκυρόδεμα κάτω από τις ράβδους οπλισμού. Η οριζόντια εξάρθρωση στην πλάκα No. 10 κατέληξε στην αποκοπή των σφραγισμάτων χαλκού ανάμεσα στις πλάκες και την έκθεση των ράβδων οπλισμού στους αρμούς (Guan, 2009).



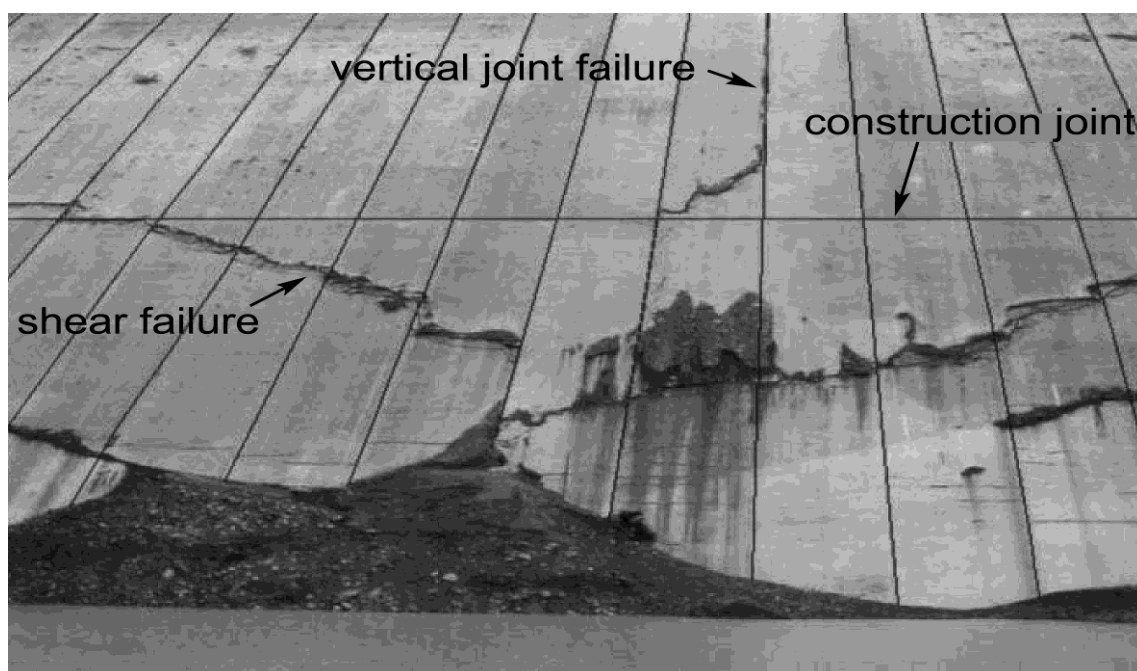
Σχήμα 5.25. Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά από καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid (αρνητικές τιμές τάσεων υποδεικνύουν θλίψη).



Σχήμα 5.26. Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.



Σχήμα 5.27. Θλιπτική αστοχία των κατακόρυφων αρμών της ανάντη πλάκας του φράγματος Zipingpu, ύψους 156 m κατά τον σεισμό Wenchuan ($M=8$) της 12-05-2008 (Wieland, 2009, 2008).



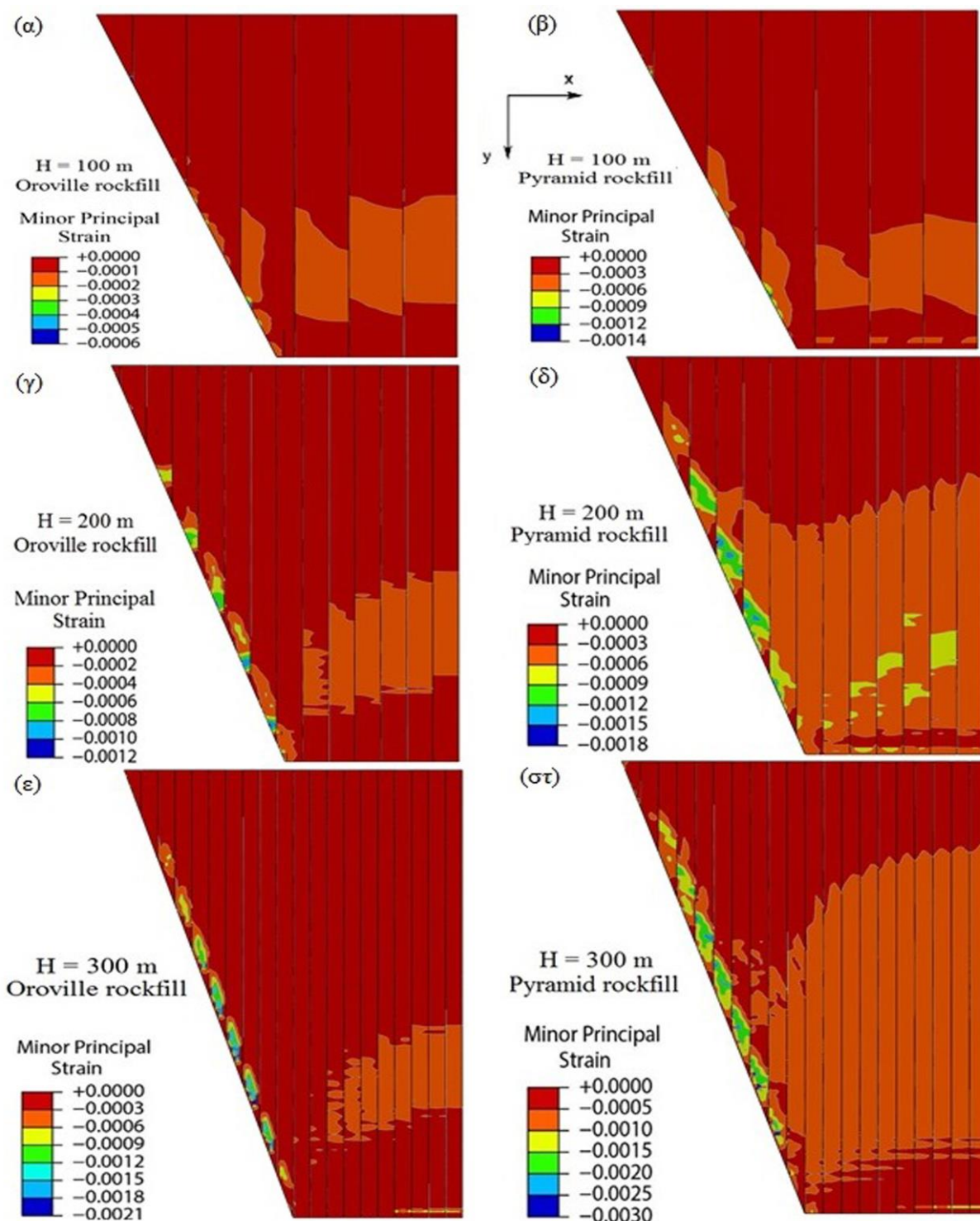
Σχήμα 5.28. Αστοχία της ανάντη πλάκας σκυροδέματος λόγω θλιπτικών τάσεων (στο 40% του ύψους) κατά την πλήρωση της λεκάνης στο φράγμα Campos Novos, ύψους 202 m (Xavier, 2009).

5.3.9 Συνολικές παραμορφώσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.

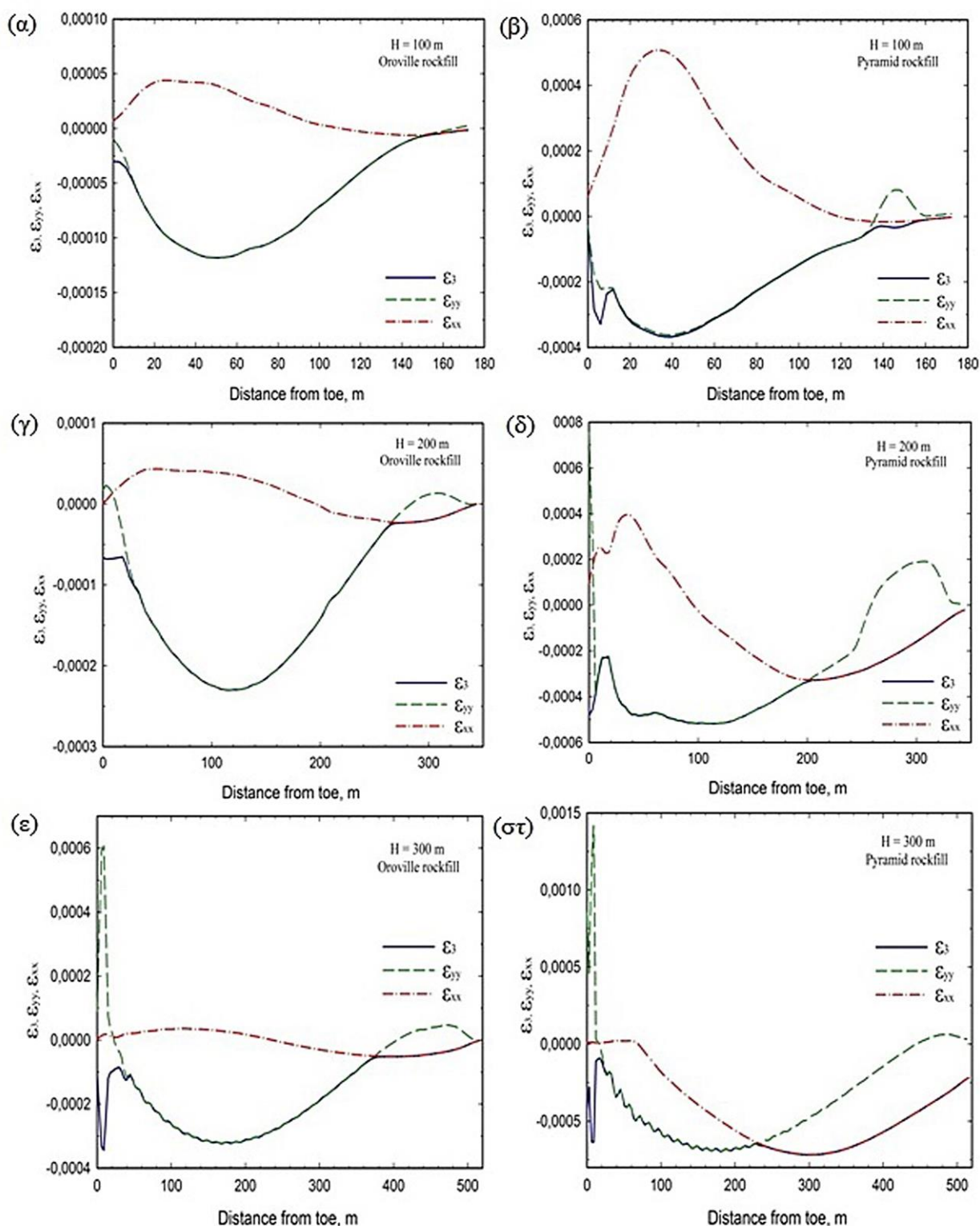
Το Σχήμα 5.29 απεικονίζει την κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης ε_3 για τα φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid μετά την πλήρωση της λεκάνης. Είναι εμφανές ότι οι ελάχιστες κύριες παραμορφώσεις για το φράγμα ύψους 100 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής δείχνουν μια τάση δημιουργίας παραμορφώσεων στην κεντρική περιοχή του φράγματος σε ένα ύψος περίπου στο 30%-40% του ύψους του φράγματος καθώς επίσης και στην πλευρά του αντερείσματος. Αντίστοιχα, παρατηρείται ότι οι τιμές των παραμορφώσεων στο φράγμα με λιθορριπή Pyramid είναι πολύ μεγαλύτερες. Στο φράγμα των 200 m, η κατανομή των ελάχιστων κύριων παραμορφώσεων δείχνει μεγάλες παραμορφώσεις για το φράγμα με λιθορριπή Pyramid συγκριτικά με τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο φράγμα με λιθορριπή Oroville. Η απεικόνιση της δημιουργίας παραμορφώσεων αναπτύσσεται σε πολύ μεγαλύτερο εύρος από το φράγμα των 100 m τόσο στην πλευρά του αντερείσματος όσο και στο κεντρικό τμήμα της πλάκας, με τις μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων να εμφανίζονται στο αντέρεισμα. Για το φράγμα των 300 m από λιθορριπή Pyramid, η κατανομή των ελάχιστων κύριων παραμορφώσεων δείχνει μεγαλύτερες παραμορφώσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης σε σύγκριση με τη λιθορριπή Oroville. Επιπρόσθετα με την περιοχή της ζώνης του αντερείσματος, όπου οι παραμορφώσεις εμφανίζουν και τις μέγιστες τιμές τους, η κεντρική περιοχή των παραμορφώσεων στο φράγμα από λιθορριπή Pyramid διευρύνεται προς τη στέψη του φράγματος. Αυτή η παραμόρφωση προκαλείται από συγκεκριμένη αύξηση των παραμορφώσεων ε_{yy} και ε_{xx} μετά την πλήρωση της λεκάνης της λιθορριπής Pyramid.

Το Σχήμα 5.30 απεικονίζει την κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης ε_3 μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του πάνελ σκυροδέματος, το οποίο βρίσκεται στη μέση της διατομής σε σχέση με την απόσταση από τον πόδα, για τα φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής. Επίσης, απεικονίζονται αντίστοιχα οι κάθετες παραμορφώσεις ε_{xx} και ε_{yy} στις πλευρικές (x) και διαμήκειες (y) κατευθύνσεις των πάνελ (οι κατευθύνσεις ορίζονται γραφικά στο Σχήμα 5.29). Η τιμή της ε_3 στα Σχήματα 5.30α, 5.30γ και 5.30ε για την πιο δύσκαμπτη λιθορριπή Oroville εξαρτάται κυρίως από τη συμβολή της ε_{yy} κατά μήκος του περισσότερου μήκους του πάνελ. Το ίδιο ισχύει και για τα φράγματα ύψους 100 και 200 m με λιθορριπή Pyramid, που απεικονίζονται στα Σχήματα 5.30β και 5.30δ. Αντίθετα, για το φράγμα ύψους 300 m, στο Σχήμα 5.30στ, η κάθετη παραμόρφωση ε_{xx} η οποία δρα ανάμεσα στα τοιχώματα στους

κατακόρυφους αρμούς γίνεται το ίδιο σημαντική με την ε_{yy} περίπου στο 50% του ύψους της πλάκας.



Σχήμα 5.29. Κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.

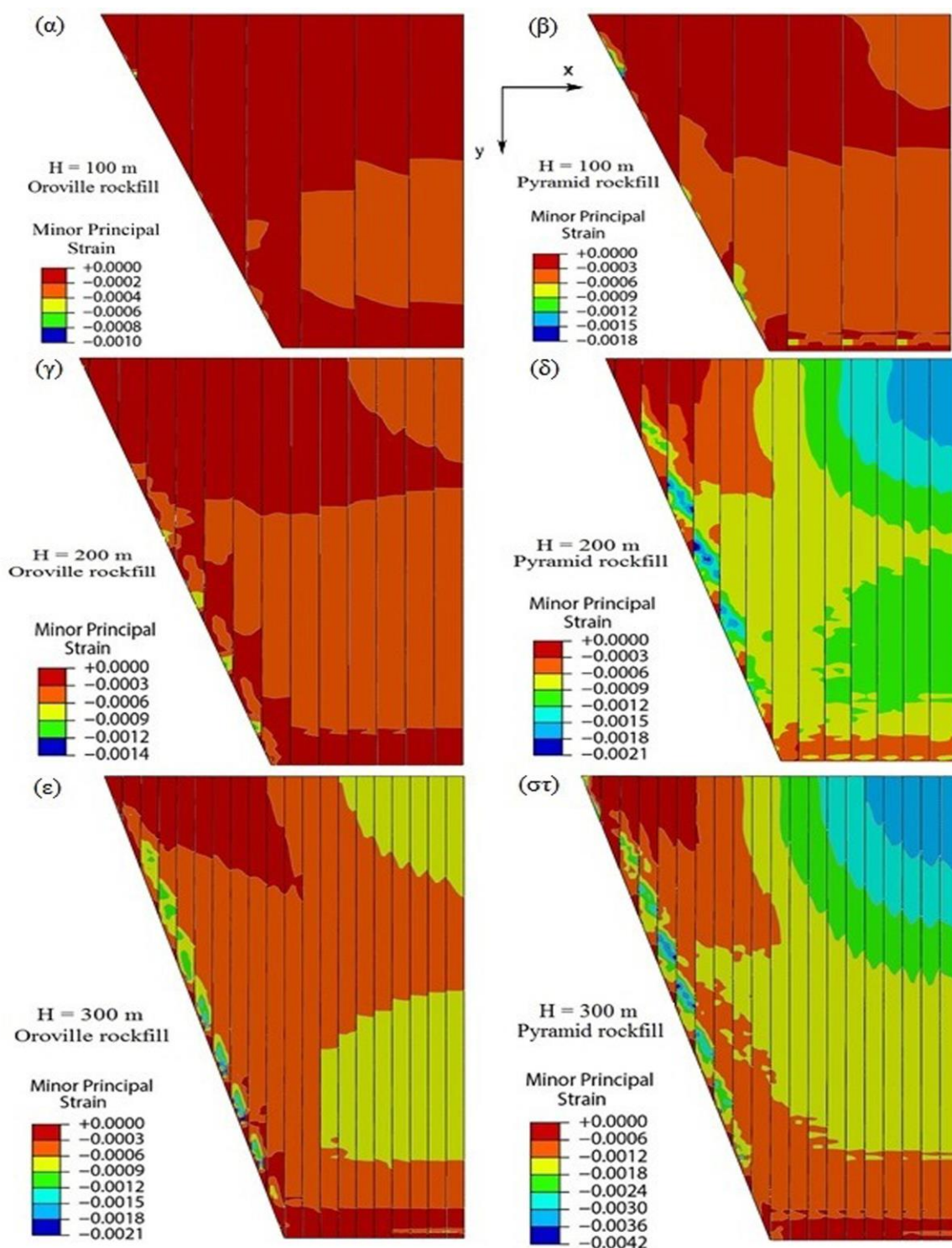


Σχήμα 5.30. Κατανομή των παραμορφώσεων ϵ_3 , ϵ_{yy} και ϵ_{xx} μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.

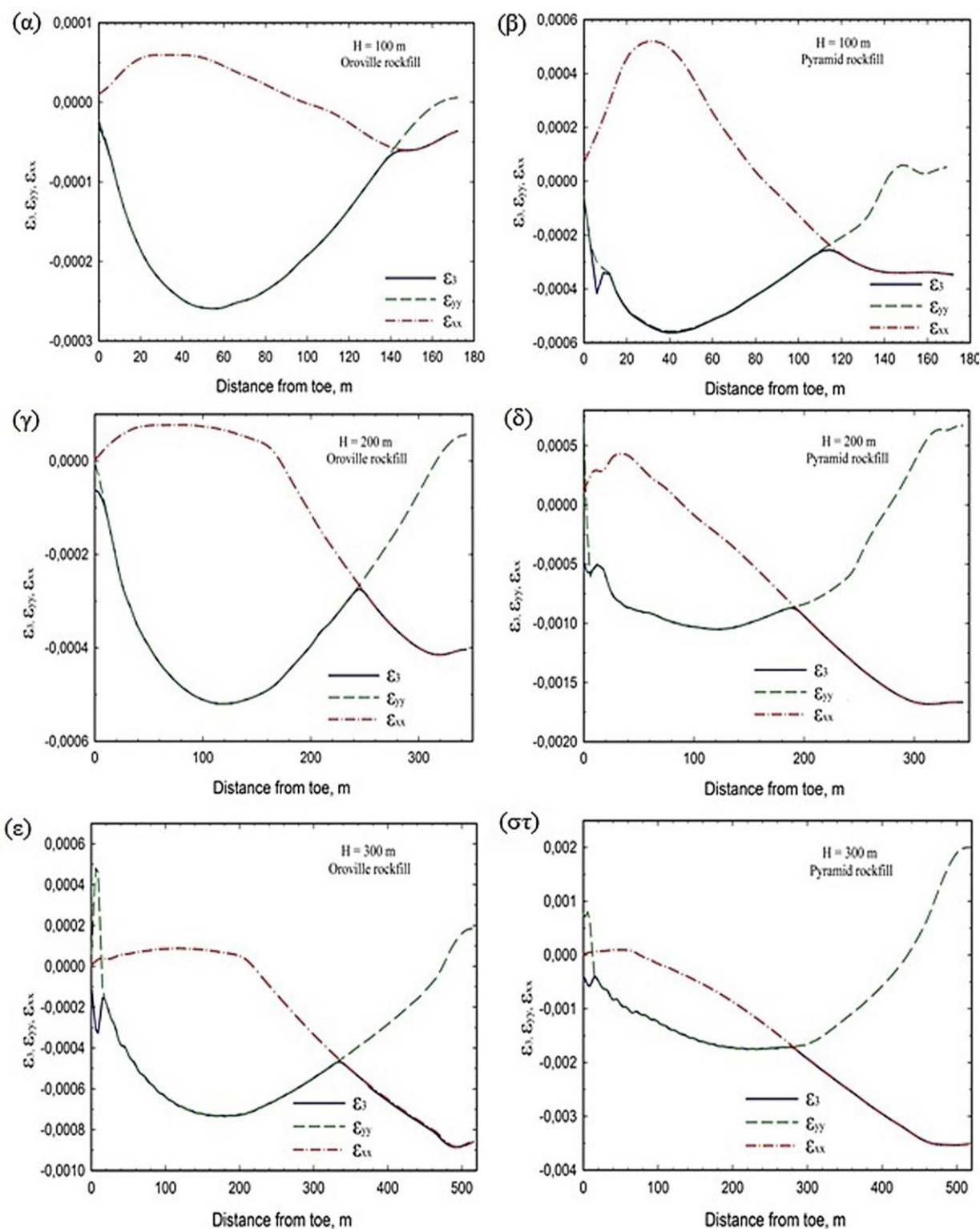
5.3.10 Συνολικές παραμορφώσεις εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.

Το Σχήμα 5.31 απεικονίζει την κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης ε_3 για τα φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δυο υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις. Είναι εμφανές ότι οι τιμές των παραμορφώσεων στα φράγματα με λιθορριπή Pyramid είναι πολύ μεγαλύτερες και για τα τρία ύψη φραγμάτων. Οι ελάχιστες κύριες παραμορφώσεις για το φράγμα ύψους 100 m με λιθορριπή Oroville δείχνουν μια τάση δημιουργίας παραμορφώσεων στην κεντρική περιοχή του φράγματος και ελαφρώς στην πλευρά του αντερείσματος. Αντίστοιχα, για το φράγμα ύψους 100 m με λιθορριπή Pyramid παρατηρείται ότι εκτός από την πλευρά του αντερείσματος και την πιο διευρυμένη κεντρική περιοχή, αναπτύσσονται υψηλές παραμορφώσεις σε μια περιοχή προς τη στέψη. Στο φράγμα των 200 m, η απεικόνιση της δημιουργίας παραμορφώσεων αναπτύσσεται σε πολύ μεγαλύτερο εύρος από το φράγμα των 100 m τόσο στην πλευρά του αντερείσματος όσο και στο κεντρικό τμήμα της πλάκας. Υψηλές παραμορφώσεις αναπτύσσονται στην περιοχή της στέψης και για τα δύο είδη λιθορριπής, ειδικά στο φράγμα με λιθορριπή Pyramid όπου είναι πιο εμφανείς και έντονες. Για το φράγμα των 300 m, υψηλές παραμορφώσεις αναπτύσσονται και στα δύο είδη λιθορριπής στις πλευρές του αντερείσματος, σε μια κεντρική περιοχή περίπου στο 30% με 40% του ύψους του φράγματος και σε μια δεύτερη περιοχή από υψηλότερες παραμορφώσεις που εμφανίζονται κοντά στο μέσο της στέψης από μεγάλες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.

Το Σχήμα 5.32 απεικονίζει την κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης ε_3 μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις κατά μήκος του πάνελ σκυροδέματος, το οποίο βρίσκεται στη μέση της διατομής σε σχέση με την απόσταση από τον πόδα, για τα φράγματα ύψους 100, 200, 300 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής. Επίσης, απεικονίζονται αντίστοιχα οι κάθετες παραμορφώσεις ε_{xx} και ε_{yy} στις πλευρικές (x) και διαμήκεις (y) κατευθύνσεις των πάνελ (οι κατευθύνσεις ορίζονται γραφικά στο Σχήμα 5.31). Η τιμή της ε_3 στα Σχήματα 5.32α, 5.32β και 5.32γ εξαρτάται κυρίως από τη συμβολή της ε_{yy} κατά μήκος του περισσότερου μήκους του πάνελ. Αντίθετα στα Σχήματα 5.32δ, 5.32ε και 5.32στ, η κάθετη παραμόρφωση ε_{xx} που δρα ανάμεσα στα τοιχώματα στους κατακόρυφους αρμούς γίνεται περισσότερο σημαντική από την ε_{yy} περίπου στο 55% του ύψους της πλάκας.



Σχήμα 5.31. Κατανομή της ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης μετά από καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.



Σχήμα 5.32. Κατανομή των παραμορφώσεων ϵ_3 , ϵ_{yy} και ϵ_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.

5.3.11 Μετακινήσεις της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και συμπεριφορά των αρμών.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις U_x των πλακών εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης κατευθύνονται προς το μέσον του φράγματος. Για τα φράγματα ύψους 100 m, όπως άλλωστε φαίνεται και στα Σχήματα 5.33α και 5.33β, οι τιμές των U_x και για τα δύο υλικά λιθορριπής είναι μικρές (< 0.05 m) σε σύγκριση με τα όρια ενός τυπικού waterstop των 0.1 m.

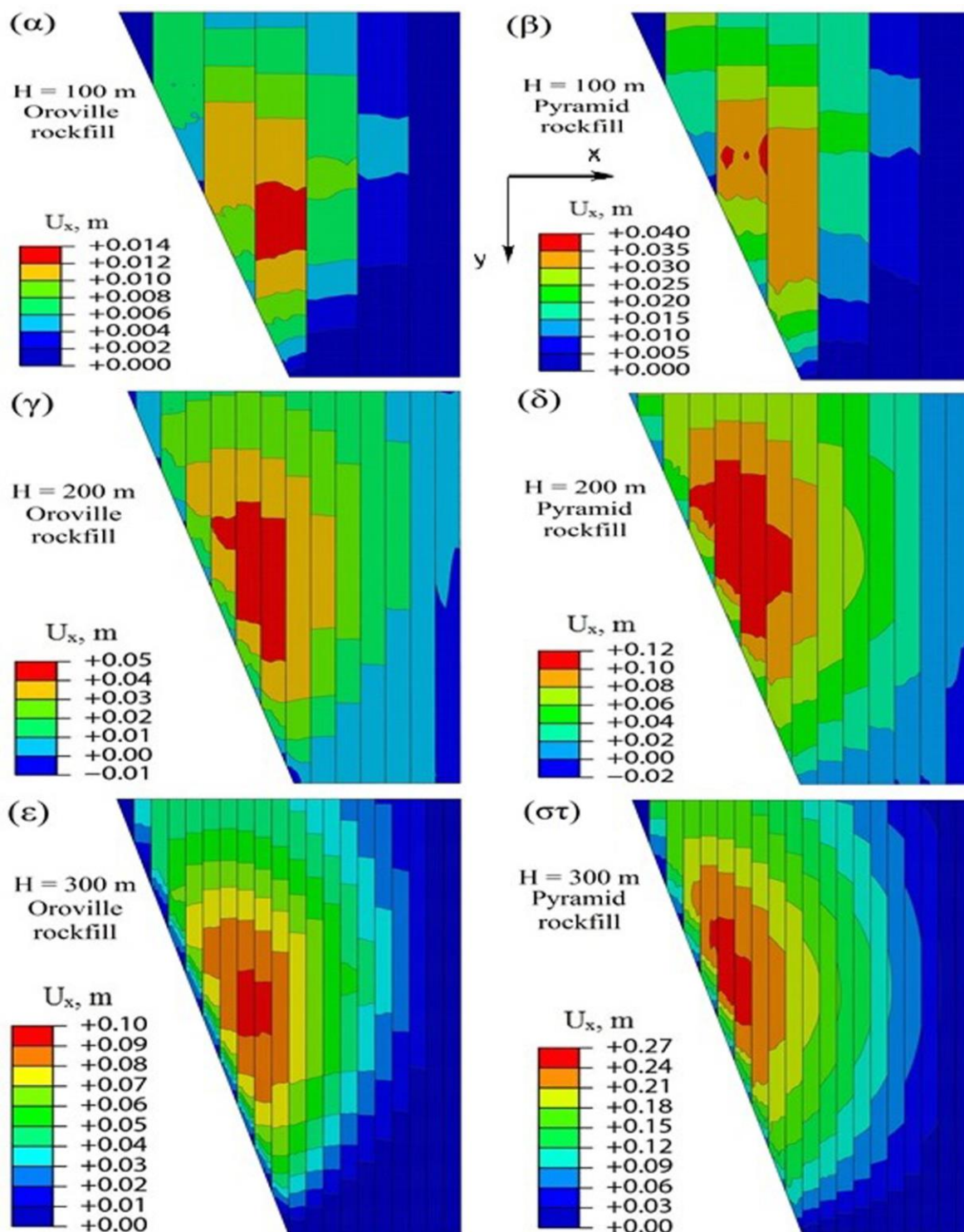
Τα Σχήματα 5.33γ και 5.33ε απεικονίζουν την κατανομή της U_x μετά την πλήρωση της λεκάνης για τα φράγματα ύψους 200 και 300 m με λιθορριπή Oroville. Οι μέγιστες τιμές τους είναι 0.05 m και 0.10 m, αντίστοιχα, και εμφανίζονται κοντά στο αντέρεισμα περίπου στο μέσο του ύψους του φράγματος.

Η διακύμανση της U_x μετά την πλήρωση της λεκάνης σε σχέση με το ύψος των φραγμάτων και για τα δύο υλικά απεικονίζεται στο Σχήμα 5.35α. Για λιθορριπή Oroville, η προβλεπόμενη συμπεριφορά των πάνελ της πλάκας σχετικά με τις οριζόντιες μετακινήσεις είναι εξαιρετική. Αντίθετα, για τη λιθορριπή Pyramid οι τιμές της U_x είναι αρκετά υψηλές στα φράγματα ύψους 200 και 300 m στο στάδιο της πλήρωσης της λεκάνης.

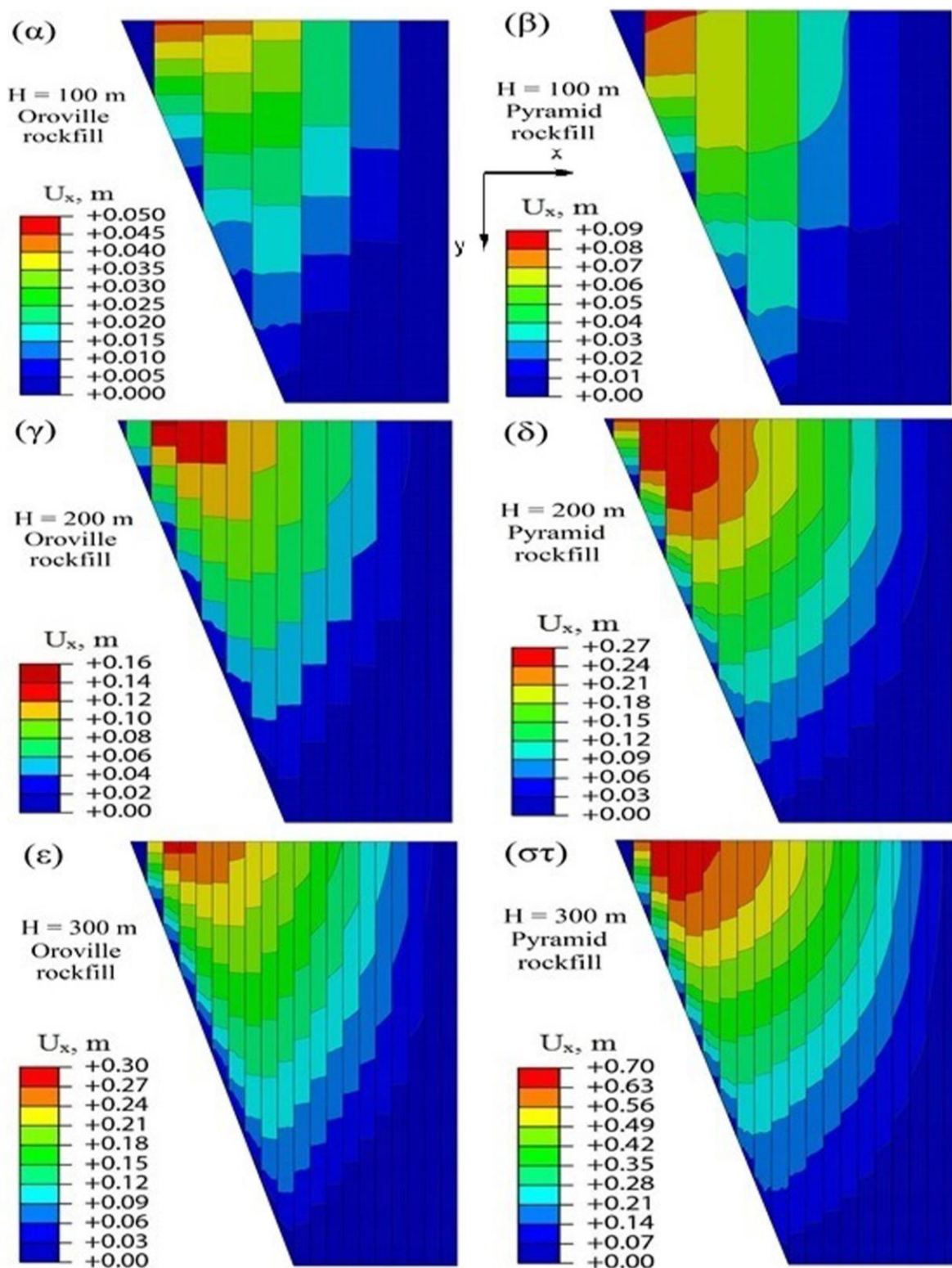
5.3.12 Μετακινήσεις εξαιτίας των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων και συμπεριφορά των αρμών.

Η επίδραση των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων ερπυσμού και πιθανών δυναμικών συνιζήσεων στην οριζόντια μετακίνηση U_x των πάνελ της πλάκας σκυροδέματος για τα φράγματα ύψους 100, 200 και 300 m και για τα δύο υλικά λιθορριπής εμφανίζεται στο Σχήμα 5.34. Για το φράγμα ύψους 100 m οι μέγιστες τιμές είναι 0.05 m και 0.08 m για χρήση λιθορριπής Oroville και Pyramid, αντίστοιχα. Τα Σχήματα 5.34α και 5.34β δείχνουν αυτές τις μέγιστες τιμές. Το φράγμα ύψους 200 m απεικονίζεται στα Σχήματα 5.34γ και 5.34δ για τα δύο υλικά λιθορριπής με μέγιστες τιμές 0.15 m και 0.27 m για λιθορριπή Oroville και Pyramid, αντίστοιχα. Για την πιο κρίσιμη περίπτωση του φράγματος ύψους 300 m οι μέγιστες τιμές είναι 0.29 m και 0.68 m για χρήση λιθορριπής Oroville και Pyramid, αντίστοιχα, και απεικονίζονται στα Σχήματα 5.34ε και 5.34στ. Στην περίπτωση της λιθορριπής Oroville όπου η αναφερόμενη μέγιστη μετακίνηση στους κατακόρυφους αρμούς είναι 0.29 m, η σχετική μετατόπιση στον αρμό είναι περίπου 0.25 m, και συνεπώς

ειδικά waterstops με όριο ανοίγματος αρμού 0.30 m θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να αποτραπεί η διαρροή ύδατος στο εσωτερικό του φράγματος.

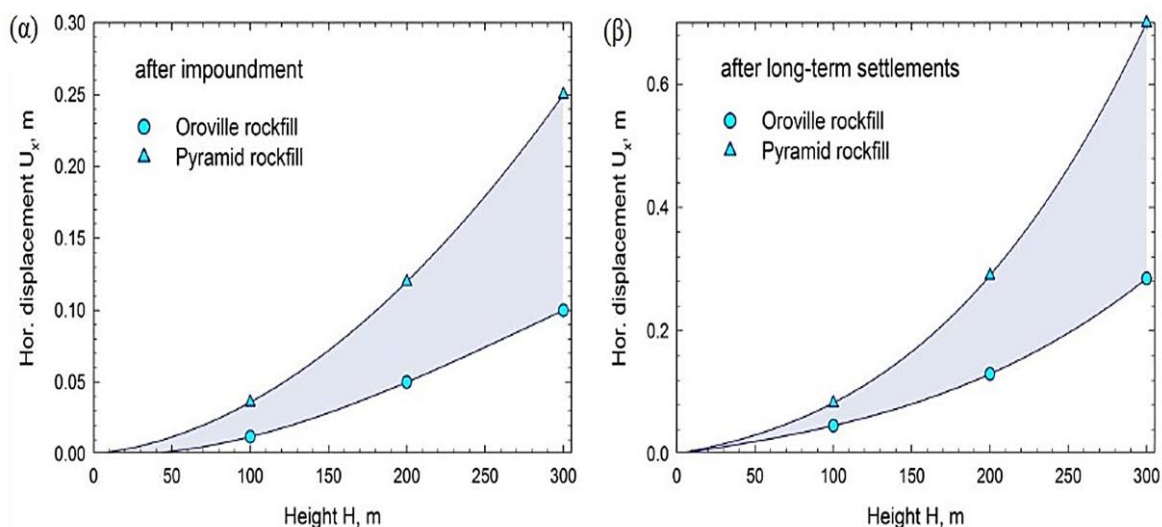


Σχήμα 5.33. Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για (α) H=100 m με λιθορριπή Oroville, (β) H=100 m με λιθορριπή Pyramid, (γ) H=200 m με λιθορριπή Oroville, (δ) H=200 m με λιθορριπή Pyramid, (ε) H=300 m με λιθορριπή Oroville και (στ) H=300 m με λιθορριπή Pyramid.



Σχήμα 5.34. Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις ερπυσμού και πιθανής δυναμικής συνίζησης για (α) $H=100$ m με λιθορριπή Oroville, (β) $H=100$ m με λιθορριπή Pyramid, (γ) $H=200$ m με λιθορριπή Oroville, (δ) $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid, (ε) $H=300$ m με λιθορριπή Oroville και (στ) $H=300$ m με λιθορριπή Pyramid.

Η διακύμανση της U_x εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων σε σχέση με το ύψος του φράγματος και για τα δύο υλικά λιθορριπής απεικονίζεται στο Σχήμα 5.35β. Για την πιο συμπίεστη λιθορριπή Pyramid, οι τιμές της U_x είναι υπερβολικά μεγάλες στο φράγμα ύψους 300 m. Ειδικά waterstops με όριο ανοίγματος αρμού 0.30 m δεν θα είναι ικανά να αποτρέψουν σημαντική διαρροή. Τέτοια διαρροή μπορεί να αυξήσει περαιτέρω τις καθιζήσεις εξαιτίας του ξεπλύματος των λεπτόκοκκων υλικών και να προκληθούν επιπρόσθετες ρηγματώσεις στην πλάκα.



Σχήμα 5.35. Μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις U_x στα πάνελ της πλάκας σε σχέση με το ύψος των φραγμάτων (α) μετά την πλήρωση της λεκάνης και (β) μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.

5.4 Επίδραση της γεωμετρίας της στενής κοιλάδας.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη διατριβή παριστάνουν τη συμπεριφορά φράγματος CFRD σε μια στενή κοιλάδα ($A_s/H^2 = 2.1$), όπου η εγγύτητα των δύσκαμπτων βραχωδών αντρεισμάτων της κοιλάδας τείνει να αυξήσει τη συνολική δυσκαμψία της κατασκευής, καταλήγοντας σε σχετικά μικρότερες καθιζήσεις. Στην περίπτωση μιας πλατιάς κοιλάδας ($A_s/H^2 \geq 4$), οι κατασκευαστικές καθιζήσεις και οι καθιζήσεις πλήρωσης της λεκάνης, η σχετική βύθιση και οι τάσεις στην πλάκα, αναμένονται να είναι υψηλότερες από εκείνες σε μια στενή κοιλάδα. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον κατάλληλο σχεδιασμό των ζωνών του επιχώματος, αποσκοπώντας σε μείωση των καθιζήσεων λιθορριπής, καθώς επίσης και της πλάκας σκυροδέματος, η οποία θα πρέπει να είναι ικανή να δεχτεί μεγαλύτερη παραμόρφωση.

5.5 Επίδραση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και του οπλισμού στη συμπεριφορά λιθορριπής.

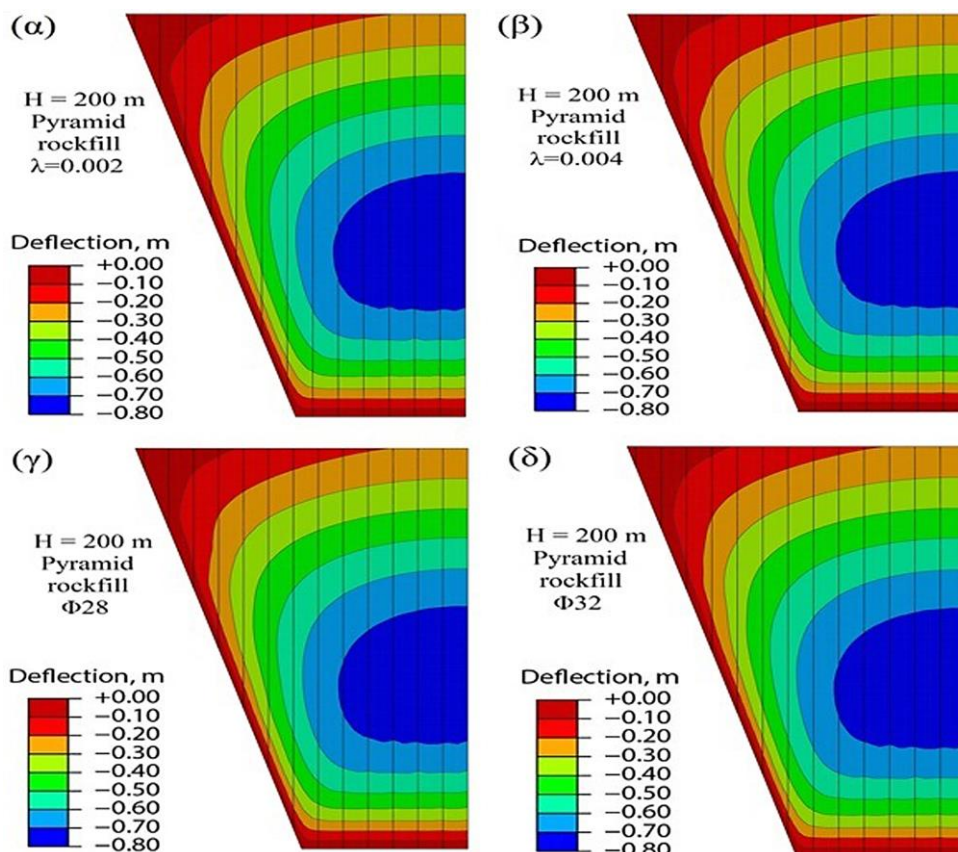
Το πάχος της πλάκας σκυροδέματος στην παρούσα διατριβή με το οποίο έχουν υλοποιηθεί οι αναλύσεις των φραγμάτων, έχει ληφθεί από την εξίσωση $t = 0.30 + 0.003h$, όπου h είναι το ύψος του υπερκείμενου ύδατος. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή του στη συμπεριφορά της λιθορριπής, γίνονται δύο επιπλέον αναλύσεις στο φράγμα ύψους 200 m με λιθορριπή Pyramid. Η επιλογή του συγκεκριμένου φράγματος γίνεται με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση του πάχους της πλάκας σε ένα φράγμα μέσου ύψους, όπως αυτό των 200 m και της δυσμενέστερης από άποψη συμπίεστότητας λιθορριπής, τη λιθορριπή μέτριας ποιότητας Pyramid. Η πρώτη ανάλυση αναφέρεται σε μικρότερο πάχος πλάκας σκυροδέματος, ελαττώνοντας το συντελεστή στην εξίσωση $t = 0.30 + 0.003h$ από 0.003 σε 0.002. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση, το πάχος της πλάκας σκυροδέματος δίνεται από την εξίσωση $t = 0.30 + 0.002h$. Η δεύτερη ανάλυση αναφέρεται σε μεγαλύτερο πάχος πλάκας σκυροδέματος, αυξάνοντας το συντελεστή στην εξίσωση $t = 0.30 + 0.003h$ από 0.003 σε 0.004. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση, το πάχος της πλάκας σκυροδέματος δίνεται από την εξίσωση $t = 0.30 + 0.004h$.

Ο οπλισμός της πλάκας σκυροδέματος, όπως έχει ήδη προαναφερθεί στο παρόν Κεφάλαιο, αποτελείται από ράβδους χάλυβα διαμέτρου Φ25 mm ανά 20 cm απόσταση, στις διευθύνσεις x και y των πάνελ. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή του στη συμπεριφορά της λιθορριπής, δύο επιπλέον αναλύσεις πραγματοποιούνται και εφαρμόζονται αντίστοιχα στο φράγμα ύψους 200 m με λιθορριπή Pyramid. Η πρώτη ανάλυση αναφέρεται σε οπλισμό πλάκας σκυροδέματος Φ28 mm ανά 20 cm απόσταση, στις διευθύνσεις x και y των πάνελ, ενώ η δεύτερη ανάλυση αναφέρεται σε οπλισμό πλάκας σκυροδέματος Φ32 mm ανά 20 cm απόσταση, στις διευθύνσεις x και y των πάνελ.

Στα παρακάτω Σχήματα απεικονίζονται οι αναλύσεις για τις τέσσερις αυτές επιπλέον περιπτώσεις φραγμάτων (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32 και οι συγκρίσεις με το αρχικό φράγμα ύψους 200 m με λιθορριπή Pyramid, με πάχος πλάκας που δίνεται από την εξίσωση $t = 0.30 + 0.003h$ και οπλισμό Φ25 mm ανά 20 cm απόσταση. Οι καθιζήσεις της κατασκευής είναι οι ίδιες με αυτές του Σχήματος 5.14δ, δηλαδή $S_c = 1.98 m$.

Βύθιση της πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.

Στο Σχήμα 5.36 απεικονίζεται η κατανομή της βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Παρατηρείται ότι η βύθιση της πλάκας δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του πάχους της πλάκας και του οπλισμού. Συγκεκριμένα σε σχέση με το Σχήμα 5.18δ η κατανομή της παραμένει η ίδια, καθώς και η αντίστοιχη τιμή της και στις τέσσερις περιπτώσεις ίση με 0.79 m.

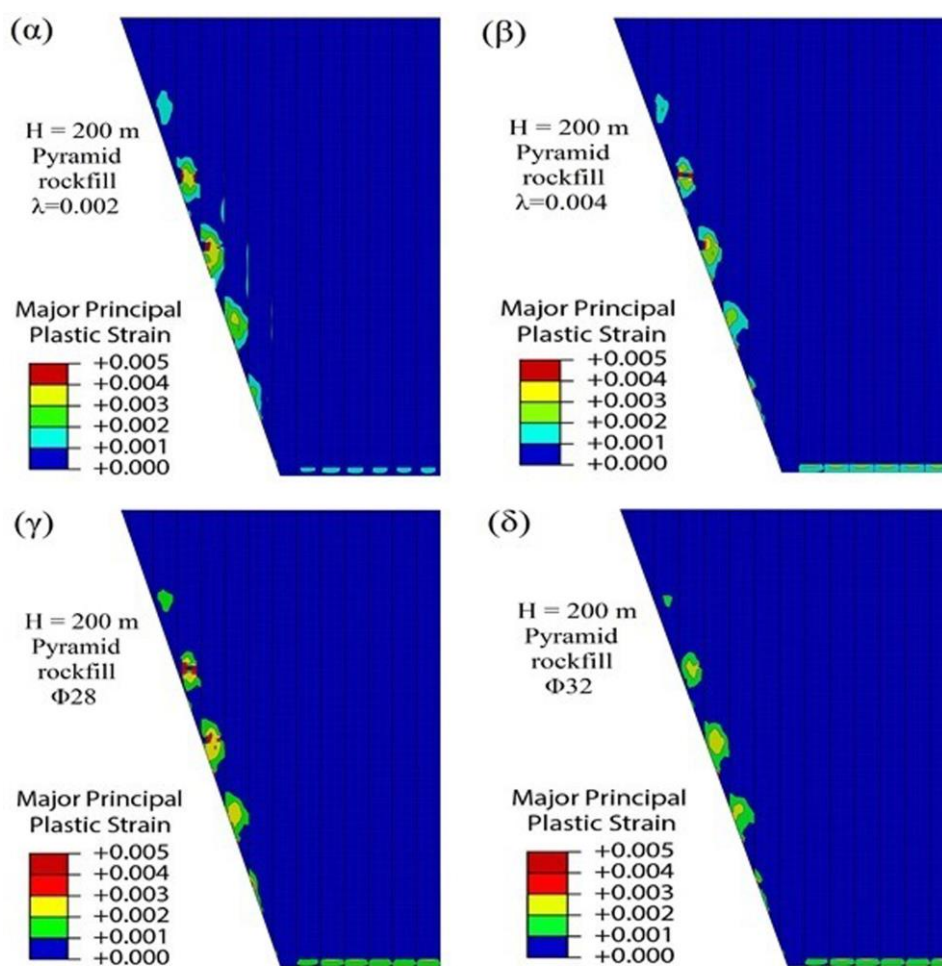


Σχήμα 5.36. Κατανομή της βύθισης της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$.

Εφελκυστικές τάσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.

Στο Σχήμα 5.37 απεικονίζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Στο φράγμα των 200 m, η κατανομή των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων δείχνει μεγάλες εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις (και

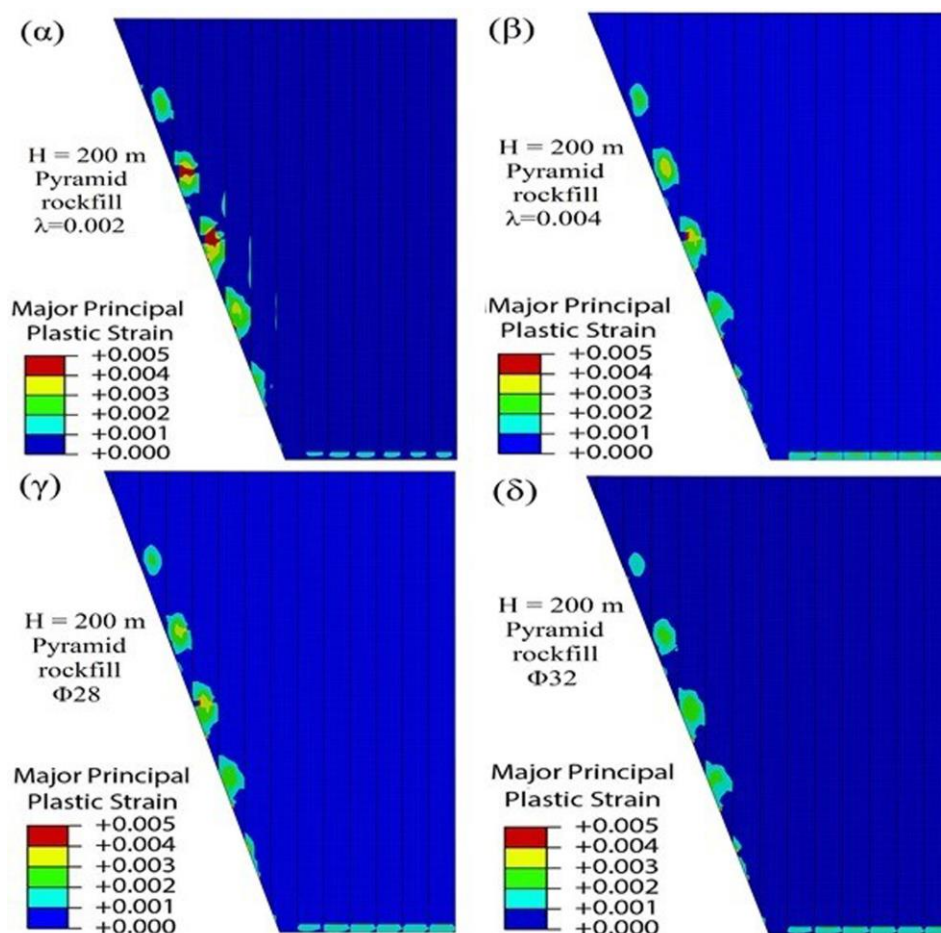
ρηγματώσεις) για το φράγμα με λιθορριπή Pyramid τόσο στην περίπτωση της κατάστασης του φράγματος μετά από την πλήρωση της λεκάνης όσο και μετά από τις καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης. Παρατηρείται ότι συγκριτικά και με το Σχήμα 5.20δ, η μεταβολή στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος επιφέρει μικρές αλλαγές (Σχήματα 5.37α και 5.37β) σε αντίθεση με την αύξηση της διαμέτρου του οπλισμού η οποία βελτιώνει σημαντικά τη μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση (Σχήματα 5.37γ και 5.37δ), ιδιαίτερα με τη χρήση οπλισμού Φ32. Η απεικόνιση της δημιουργίας εφελκυστικών πλαστικών παραμορφώσεων επικεντρώνεται στην πλευρά του αντερείσματος και στον πόδα του φράγματος και είναι ιδιαίτερα εμφανής.



Σχήμα 5.37. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.

Εφελκυστικές τάσεις εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.

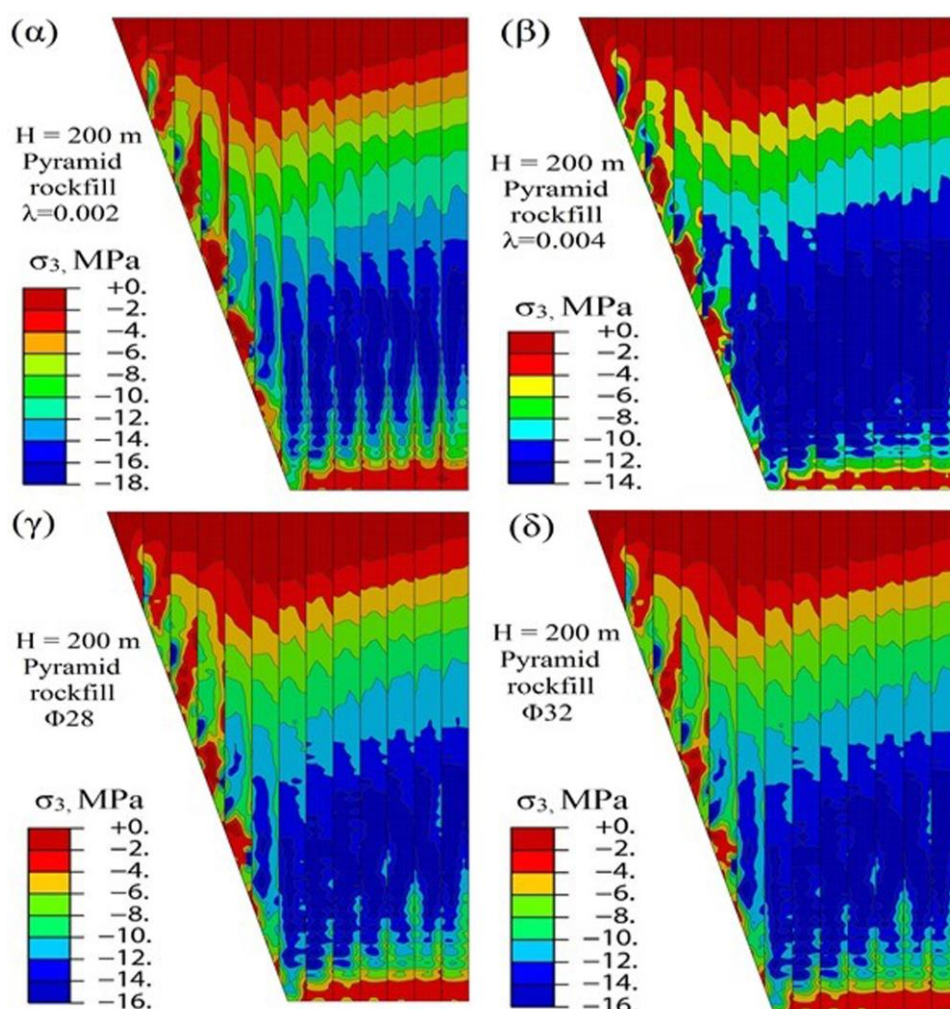
Στο Σχήμα 5.38 απεικονίζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Παρόμοια, παρατηρείται ότι συγκριτικά και με το Σχήμα 5.21δ, η μεταβολή στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις επιφέρει μικρές αλλαγές (Σχήματα 5.38α και 5.38β) σε αντίθεση με την αύξηση της διαμέτρου του οπλισμού η οποία βελτιώνει σημαντικά τη μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση (Σχήματα 5.38γ και 5.38δ), ιδιαίτερα με τη χρήση οπλισμού $\Phi 32$. Η απεικόνιση της δημιουργίας εφελκυστικών πλαστικών παραμορφώσεων επικεντρώνεται κι εδώ αντίστοιχα στην πλευρά του αντερείσματος και στον πόδα του φράγματος και είναι ιδιαίτερα εμφανής.



Σχήμα 5.38. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$.

Θλιπτικές τάσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης.

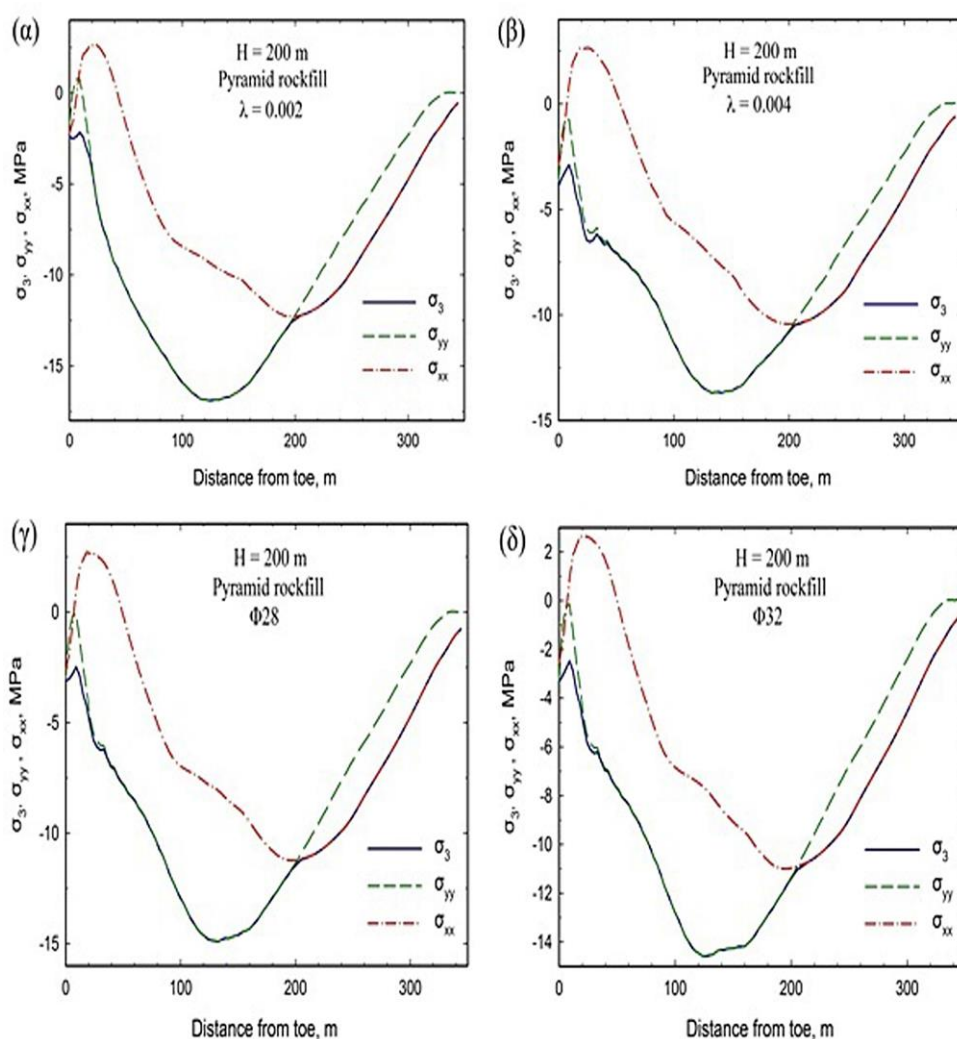
Στο Σχήμα 5.39 απεικονίζεται η κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Οι μικρότερες κύριες τάσεις σ_3 που αναπτύσσονται στην πλάκα εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης εμφανίζουν μέγιστες τιμές θλίψης -16.9 MPa, -13.7 MPa, -14.9 MPa και -14.6 MPa, αντίστοιχα (Σχήματα 5.39α, 5.39β, 5.39γ και 5.39δ). Αυτές εμφανίζονται στην κεντρική κυρίως περιοχή περίπου στο 30% με 40% του ύψους του φράγματος. Συγκριτικά με το Σχήμα 5.22δ, όπου η μέγιστη τιμή θλίψης είναι -15.2 MPa, παρατηρείται μείωση της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 με την αύξηση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και μια πολύ μικρότερη μείωση με την αύξηση της διαμέτρου του οπλισμού της πλάκας σκυροδέματος.



Σχήμα 5.39. Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m για λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$.

Το Σχήμα 5.40 απεικονίζει την κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 κατά μήκος του πάνελ σκυροδέματος, το οποίο βρίσκεται στη μέση της διατομής σε σχέση με την απόσταση από τον πόδα, για φράγματα $H=200$ m κατασκευασμένα από λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Επίσης, απεικονίζονται αντίστοιχα οι κάθετες τάσεις σ_{xx} και σ_{yy} στις πλευρικές (x) και διαμήκειες (y) κατευθύνσεις των πάνελ (οι κατευθύνσεις ορίζονται γραφικά στο Σχήμα 5.22).

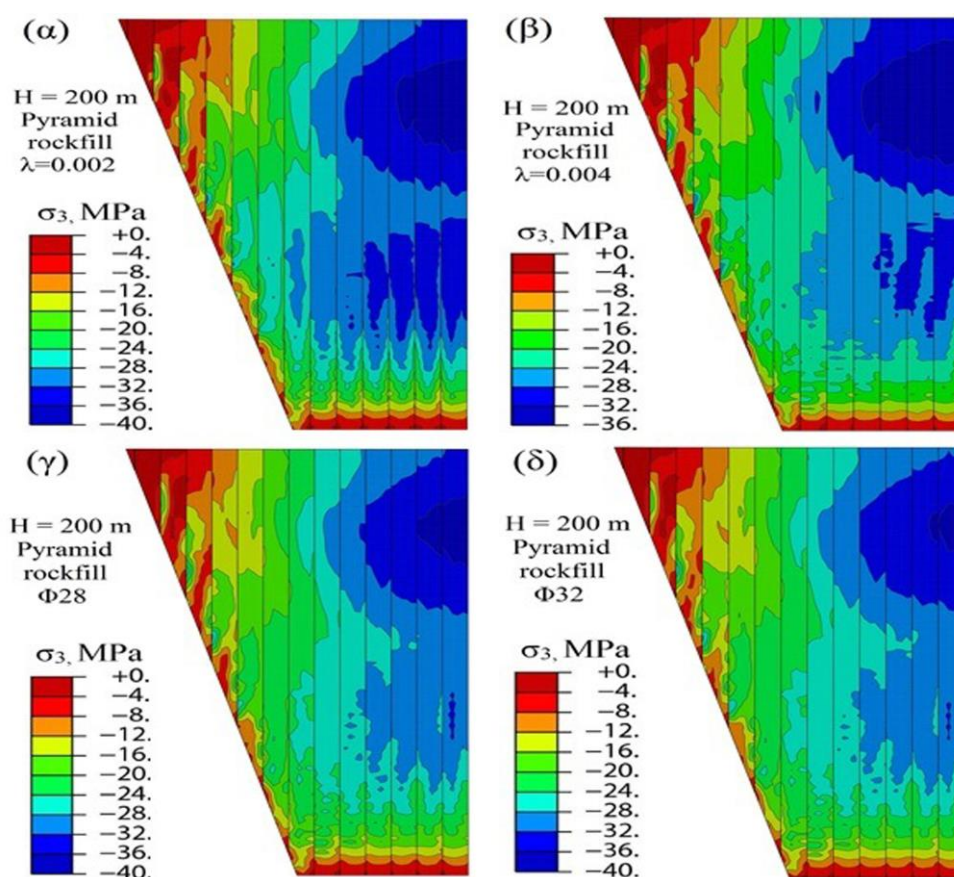
Η τιμή της σ_3 στα Σχήματα 5.40α, 5.40β, 5.40γ και 5.40δ εξαρτάται κυρίως από τη συμβολή της σ_{yy} κατά μήκος του περισσότερου μήκους του πάνελ και παραμένει πολύ καλά κάτω από τη θλιπτική αντοχή.



Σχήμα 5.40. Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} μετά την πλήρωση της λεκάνης κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για $H=200$ m με λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$.

Θλιπτικές τάσεις εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.

Στο Σχήμα 5.41 απεικονίζεται η κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά από καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης για $H=200$ m από λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$ και (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Οι μικρότερες κύριες τάσεις σ_3 που αναπτύσσονται στην πλάκα εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης εμφανίζουν μέγιστες τιμές θλίψης -38.6 MPa, -36.0 MPa, -37.5 MPa και -37.0 MPa, αντίστοιχα (Σχήματα 5.41α, 5.41β, 5.41γ και 5.41δ). Εμφανίζονται ξανά δύο περιοχές με υψηλή θλίψη, η μία προκαλείται από το βάρος του ύδατος περίπου στο 30% με 40% του ύψους του φράγματος και η άλλη κοντά στη στέψη που προκαλείται από μεγάλες μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.

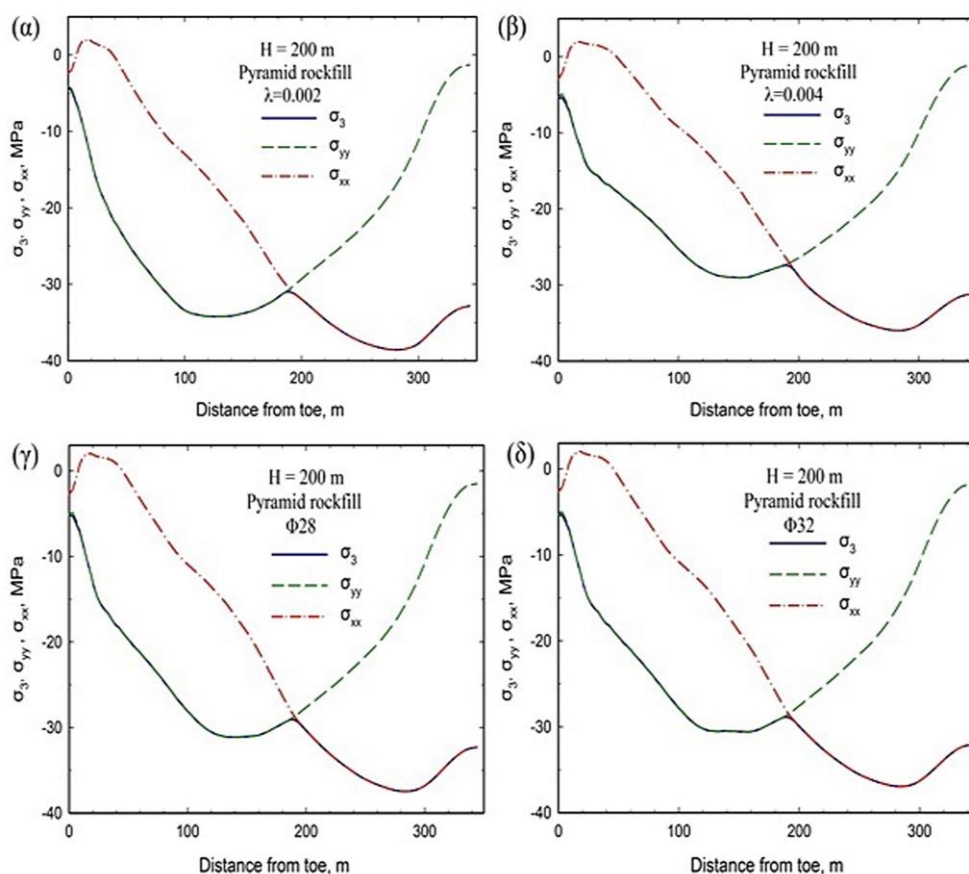


Σχήμα 5.41. Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα μετά από καθιζήσεις ερπυσμού και δυναμικής συνίζησης για $H=200$ m από λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$.

Το Σχήμα 5.42 απεικονίζει την κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ σκυροδέματος στο μέσο της διατομής των φραγμάτων σε σχέση με την απόσταση από τον πόδα του φράγματος για

H=200 m κατασκευασμένο από λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32. Είναι εμφανές ότι τα εξεταζόμενα φράγματα παρουσιάζουν υψηλές τάσεις που προκαλούνται από τη θλίψη των γειτονικών πάνελ στην ανώτερη κεντρική περιοχή της πλάκας. Παρά την ανάπτυξη πλαστικών θλιπτικών παραμορφώσεων, η πλάκα δεν φτάνει την αντοχή του σκυροδέματος ακόμη και στην ακραία περίπτωση των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.

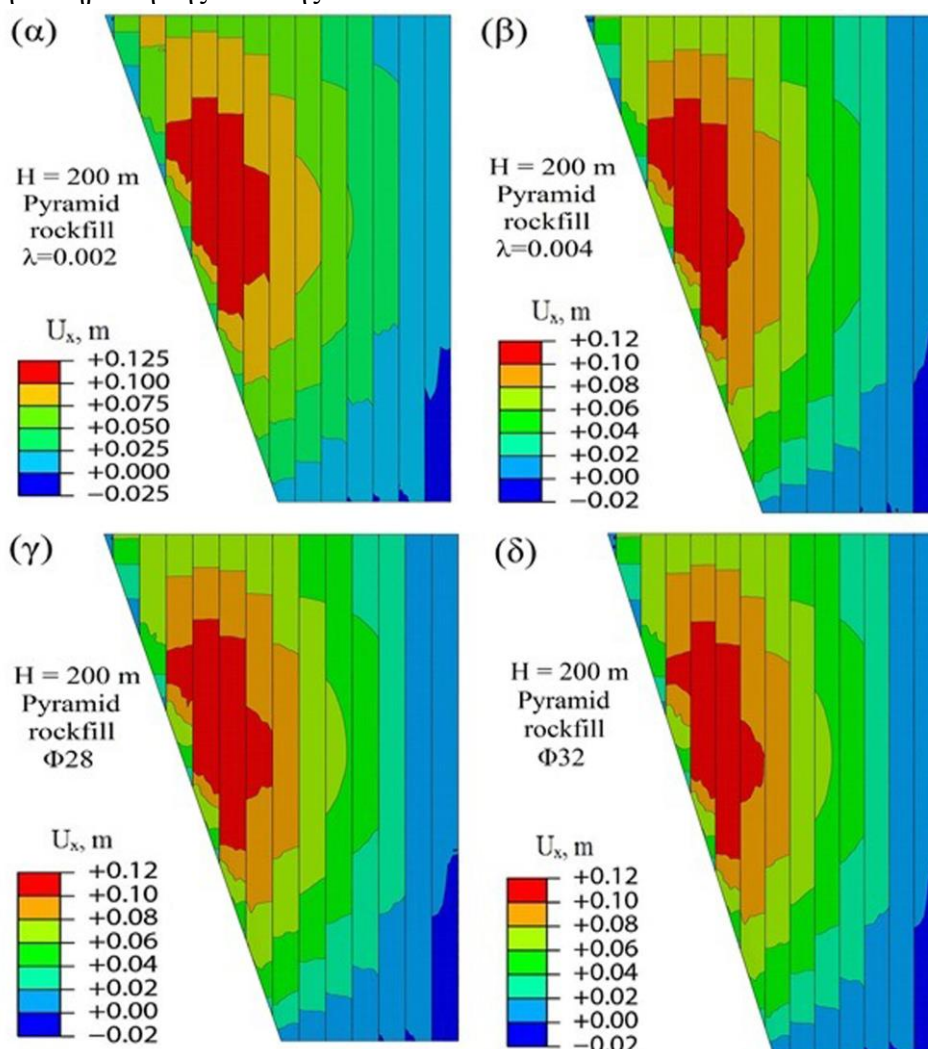
Τέλος, οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις της σ_{yy} στη διαμήκη κατεύθυνση της πλάκας στα Σχήματα 5.42α, 5.42β, 5.42γ και 5.42δ φθάνουν τις τιμές των -35.0, -29.0, -32.0 και -31.0 MPa, αντίστοιχα, περίπου στο 30% με 40% του ύψους των φραγμάτων. Συγκριτικά με το Σχήμα 5.25δ, όπου η μέγιστη τιμή θλίψης είναι -37.1 MPa, παρατηρείται μείωση της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 με την αύξηση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και πολύ μικρότερη μείωση με την αύξηση της διαμέτρου του οπλισμού της πλάκας σκυροδέματος.



Σχήμα 5.42. Κατανομή των τάσεων σ_3 , σ_{yy} και σ_{xx} εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων κατά μήκος του πάνελ στο μέσο της διατομής των φραγμάτων για H=200 m κατασκευασμένα από λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό Φ28, (δ) με οπλισμό Φ32.

Μετακινήσεις πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και συμπεριφορά αρμών.

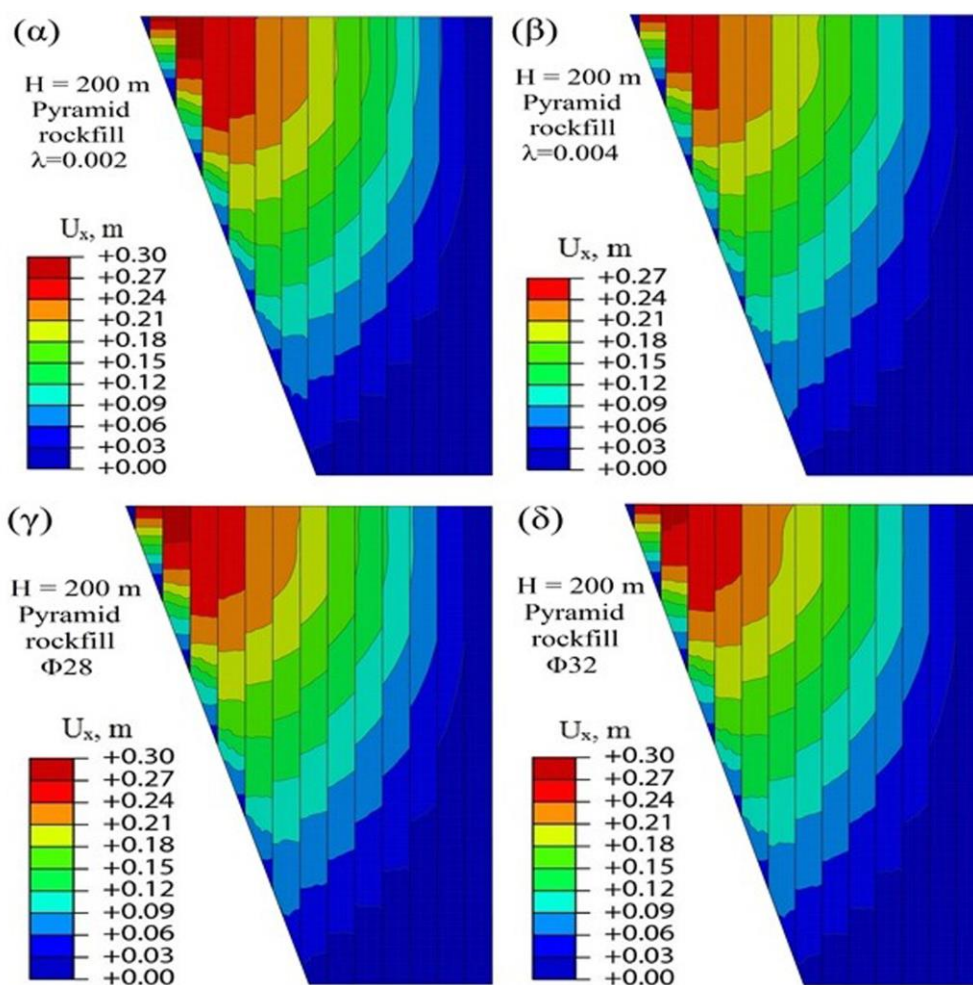
Στο Σχήμα 5.43 απεικονίζεται η κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m και λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Οι οριζόντιες μετακινήσεις U_x των πλακών εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης κατευθύνονται προς το μέσο του φράγματος. Όπως αναμένεται, οι μέγιστες τιμές τους είναι σταθερές 0.12 m σε όλες τις περιπτώσεις, σε πλήρη συμφωνία με τη μέγιστη τιμή 0.12 m του αντίστοιχου προς μελέτη φράγματος στο Σχήμα 5.33δ, κι εμφανίζονται κοντά στο αντέρεισμα περίπου στο μέσο του ύψους του φράγματος. Επομένως, μια αλλαγή στο πάχος της πλάκας και στη διάμετρο του οπλισμού δεν επιφέρει μεταβολές στις οριζόντιες μετατοπίσεις της πλάκας U_x μετά την πλήρωση της λεκάνης.



Σχήμα 5.43. Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης για $H=200$ m και λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$.

Μετακινήσεις της πλάκας εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων και συμπεριφορά αρμών.

Στο Σχήμα 5.44 απεικονίζεται η επίδραση των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων ερπυσμού και πιθανών δυναμικών συνιζήσεων στην οριζόντια μετακίνηση U_x των πάνελ της πλάκας σκυροδέματος για $H=200$ m και λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$. Οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων είναι 0.29 m, 0.27 m, 0.28 m και 0.28 m, αντίστοιχα. Συγκριτικά με τη μέγιστη τιμή 0.27 m του φράγματος των 200 m στο σχήμα 5.34δ, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική επίδραση, απλά μια ελαφρώς αύξηση της μετακίνησης σε περίπτωση μείωσης της πλάκας σκυροδέματος και αύξησης της διαμέτρου του οπλισμού. Ειδικά waterstops με όριο ανοίγματος αρμού 0.30 m θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να αποτραπεί η διαρροή ύδατος στο εσωτερικό του φράγματος.



Σχήμα 5.44. Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις ερπυσμού και πιθανής δυναμικής συνιζήσης για $H=200$ m και λιθορριπή Pyramid (α) με $\lambda=0.002$, (β) με $\lambda=0.004$, (γ) με οπλισμό $\Phi 28$, (δ) με οπλισμό $\Phi 32$.

5.6 Συμπεράσματα.

Μια καινούρια μεθοδολογία για αυστηρή αριθμητική ανάλυση των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος έχει παρουσιαστεί, βασισμένη στο προχωρημένο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο του Lade για λιθορριπή. Τρία φράγματα λιθορριπής με ύψη 100, 200 και 300 m, αντίστοιχα, κατασκευασμένα σε στενές κοιλάδες τραπεζοειδούς σχήματος αναλύονται. Το κάθε φράγμα χρησιμοποιεί δύο υλικά λιθορριπής, ένα εξαιρετικής ποιότητας υλικό και ένα μέτριας ποιότητας, από διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα λιθορριπής για βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου από τα φράγματα Oroville και Pyramid, αντίστοιχα. Τα κύρια συμπεράσματα της διατριβής παρουσιάζονται ακολούθως:

1. Το καταστατικό μοντέλο του Lade που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής, επιτρέπει μια πολύ ρεαλιστική προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων από την άποψη της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης και ογκομετρικών παραμορφώσεων σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλουσών τάσεων σε τριαξονικές δοκιμές θλίψης. Έτσι δημιουργείται μια ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς της λιθορριπής σε ολόκληρο το σώμα του επιχώματος τόσο σε χαμηλά όσο και σε πολύ υψηλά φράγματα.
2. Η χρήση της βαθμίδας πλαστικότητας ως ένα προαιρετικό εργαλείο για αποφυγή αριθμητικών δυσκολιών σύγκλισης σε συγκεκριμένα στοιχεία που υπόκεινται υψηλή διάτμηση, έχει βρεθεί να είναι αρκετά αποτελεσματική σε μείωση υπολογιστικού χρόνου, χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
3. Οι συγκρίσεις καταγεγραμμένων κατασκευαστικών καθιζήσεων από 44 φράγματα σε στενές κοιλάδες (με συντελεστή σχήματος < 4) έδειξαν ότι για λόγο κενών λιθορριπής ανάμεσα στο 0.18 και 0.25 υπάρχει καλή συμφωνία με τις αριθμητικές προβλέψεις της εξαιρετικής λιθορριπής φραγμάτων (Oroville), ενώ για λόγο κενών λιθορριπής ανάμεσα στο 0.26 και 0.31 υπάρχει καλή συμφωνία με τις προβλέψεις της μέτριας λιθορριπής φραγμάτων (Pyramid).
4. Για φράγματα σε στενές κοιλάδες με ύψος μικρότερο των 120 m, η πυκνότητα συμπύκνωσης δεν είναι πολύ κρίσιμη για καθιζήσεις, εξαιτίας της αυξανόμενης συνολικής δυσκαμψίας που παρέχεται από τα δύσκαμπτα βραχώδη αντερείσματα.

Αντίθετα, για φράγματα που έχουν ένα ύψος μεγαλύτερο των 150 m, τα αποτελέσματα αυτής της διατριβής υποδηλώνουν ότι οι κατασκευαστικές καθιζήσεις αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση του λόγου κενών και του ύψους, ακόμη και για στενές κοιλάδες.

5. Η χρήση εξαιρετικής ποιότητας λιθορριπής με λόγους κενών περίπου 0.2 επιτρέπει πολύ μικρές κατασκευαστικές καθιζήσεις, ακόμη και στην περίπτωση των πολύ υψηλών φραγμάτων (300 m).
6. Τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος Campos Novos, Barra Grande και Mohale, τα οποία εμφάνισαν αστοχία στην πλάκα, ανέπτυξαν πολύ υψηλότερες κατασκευαστικές καθιζήσεις από εκείνες που προβλέπονται από τα φράγματα μέτριας λιθορριπής (Pyramid).
7. Οι συγκρίσεις των μετρημένων βυθίσεων πλάκας εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης από 20 υπαρκτά φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος συμπυκνωμένα σε λόγους κενών λιθορριπής ανάμεσα σε 0.20-0.24 και ανάμεσα σε 0.26-0.37, είναι σε καλή συμφωνία με τις προβλεπόμενες βυθίσεις από τα υλικά λιθορριπής Oroville και Pyramid, αντίστοιχα.
8. Η χρήση εξαιρετικής ποιότητας λιθορριπής με λόγους κενών περίπου 0.2 αποφέρει πολύ μικρές βυθίσεις πλάκας ακόμη και στην περίπτωση του φράγματος ύψους 300 m για καθιζήσεις, και κατά την διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης και για μακροπρόθεσμες καθιζήσεις.
9. Σε συμφωνία με παρατηρήσεις στα πραγματικά φράγματα, εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις στην πλάκα αναπτύσσονται σε μια ζώνη εύρους περίπου 20 m κοντά στο αντέρεισμα. Τέτοιες εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις ή ρηγματώσεις είναι μεγαλύτερες για τα ψηλότερα και πιο συμπιεστά φράγματα λιθορριπής.
10. Οι θλιπτικές τάσεις στην πλάκα φτάνουν στη μέγιστη τιμή περίπου στο 40% του ύψους κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης, αλλά μπορούν να φτάσουν και σε μια μεγαλύτερη τιμή κοντά στη στέψη εξαιτίας μακροπρόθεσμων καθιζήσεων. Για τη λιθορριπή εξαιρετικής ποιότητας, οι θλιπτικές τάσεις παραμένουν σε

χαμηλά επίπεδα σε σύγκριση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, σε όλες τις περιπτώσεις.

11. Για τη λιθορριπή μέτριας ποιότητας, οι θλιπτικές τάσεις γίνονται πολύ υψηλές, ειδικά μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις. Σε μια τέτοια περίπτωση, η χρήση κανονικού σκυροδέματος (π.χ. μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $f_c = 25 \text{ MPa}$) για την πλάκα θα μπορούσε να οδηγήσει σε θλιπτική αστοχία. Αυτά τα ευρήματα εμφανίζονται να συμφωνούν με τον τύπο και την θέση των αστοχιών της πλάκας σε υπαρκτά φράγματα, όπως π.χ. το φράγμα Campos Novos (κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης) και το φράγμα Zipingpu (κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού εδάφους επιβάλλοντας δυναμικές συνιζήσεις).
12. Οι οριζόντιες μετακινήσεις της πλάκας που επηρεάζουν την υδατοστεγανότητα στους κατακόρυφους και περιμετρικούς αρμούς, γίνονται μέγιστες κοντά στο αντέρεισμα στη στέψη του φράγματος. Για το φράγμα των 300 m και για το καλύτερο υλικό λιθορριπής, οι μακροπρόθεσμες καθιζήσεις μπορούν να προκαλέσουν διαφορική μετακίνηση που αγγίζει τα 0.29 m, απαιτώντας ένα όριο ειδικού waterstop 0.30 m. Για το φράγμα ύψους 200 m μέτριας λιθορριπής αυτές οι μετακινήσεις φτάνουν το όριο του waterstop, ενώ για υψηλότερα φράγματα γίνονται απαγορευτικές.
13. Τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος που κατασκευάζονται από εξαιρετικής ποιότητας και καλής συμπίκνωσης λιθορριπή, από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και υψηλή ικανότητα waterstop, αναμένονται να παρουσιάσουν πολύ καλή συμπεριφορά μέχρι και το ύψος των 300 m. Αντίθετα, ο σχεδιασμός των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος μέτριας ποιότητας συμπίεστη λιθορριπή, σε ύψη ίσα ή μεγαλύτερα των 200 m δεν συνιστάται.
14. Η επίδραση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και της διαμέτρου του οπλισμού επηρεάζει κυρίως τη μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις (η μεταβολή στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος επιφέρει μικρές αλλαγές σε αντίθεση με την αύξηση της διαμέτρου του οπλισμού η οποία βελτιώνει σημαντικά τη μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση). Επίσης επηρεάζει τη μικρότερη κύρια τάση σ_3 , όπου παρατηρείται μείωση της σ_3 με την αύξηση του

πάχους της πλάκας σκυροδέματος και μια πολύ μικρότερη μείωση με την αύξηση της διαμέτρου του οπλισμού της πλάκας σκυροδέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ανάλυση της αστοχίας του φράγματος Mohale

6.1 Γενική περιγραφή του φράγματος και ιστορικό αστοχίας του.

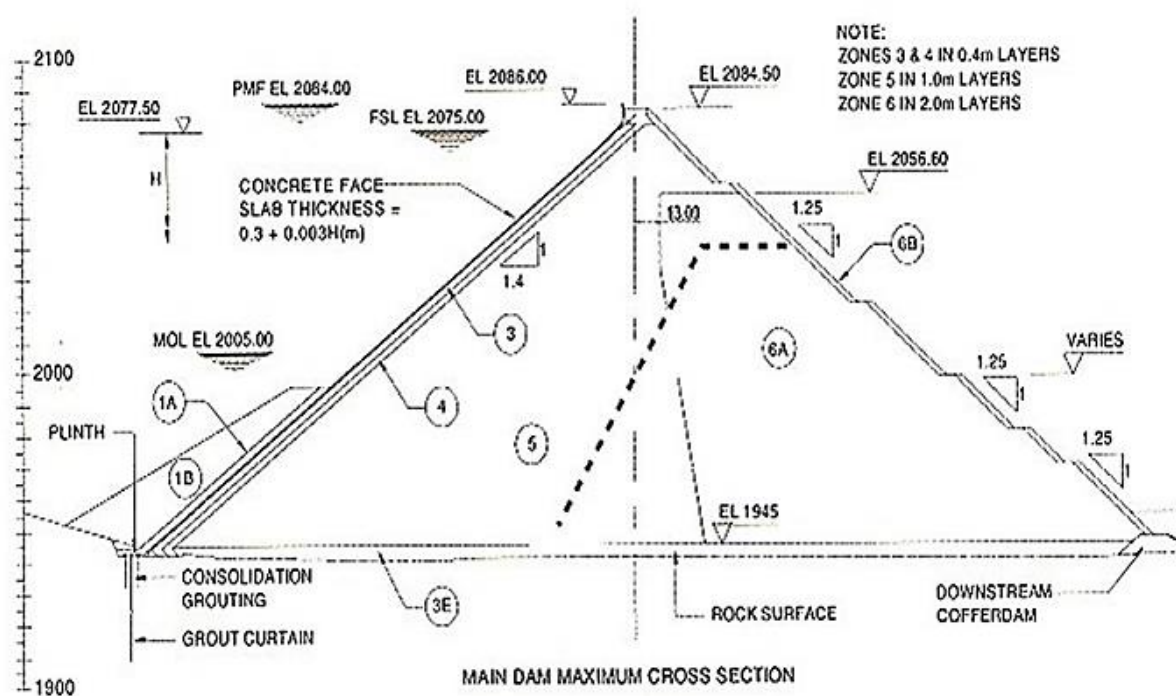
Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά το ιστορικό κατασκευής και αστοχίας ενός φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, του φράγματος Mohale. Στη συνέχεια ακολουθεί αριθμητική ανάλυση με εφαρμογή του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος στο μοντέλο του φράγματος Mohale με στόχο την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και αστοχίας της ανάντη πλάκας σκυροδέματος. Τέλος, έπονται οι συγκρίσεις με τις πραγματικές μετρήσεις του υφιστάμενου φράγματος και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τους Johannesson και Tohlang (2007), το φράγμα Mohale αποτελεί μια αρκετά ιδιαίτερη περίπτωση φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Το φράγμα Mohale έχει ύψος 145 m και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 2000 στο Lesotho (Ν. Αφρική). Το Φεβρουάριο του 2006, οι καταρρακτώδεις βροχές έπληξαν την περιοχή Mohale με αποτέλεσμα την ταχεία ανύψωση της στάθμης της δεξαμενής σε συνθήκες υπερχειλίσσης (Σχήμα 6.1). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές καθιζήσεις στο φράγμα κατάντη και εγκάρσιες μετακινήσεις της στέψης, οι οποίες με τη σειρά τους αύξησαν τις ήδη υψηλές θλιπτικές τάσεις στο κεντρικό τμήμα της πλάκας σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την αστοχία της πλάκας σε θραύση. Στις 13 Φεβρουαρίου το 2006, δεν διαπιστώθηκαν ανωμαλίες στο φράγμα. Την επόμενη ημέρα όμως, αναφέρθηκε μια ρωγμή στην πλάκα σκυροδέματος. Η ρωγμή στην πλάκα οδήγησε σε σημαντικό κραδασμό, ο οποίος πιθανόν να έσπασε το δεσμό μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και της υποκείμενης δοκού σκυροδέματος (extruded curb). Απελευθερώνοντας στη συνέχεια την πλάκα από τη δοκό σκυροδέματος, μειώθηκε σημαντικά η οριζόντια παραμόρφωση της πλάκας και αυξήθηκε η διεύρυνση του αρμού τόσο για τους κατακόρυφους όσο και για τους περιμετρικούς αρμούς στα πλευρικά τμήματα (Johannesson and Tohlang, 2007).

Το Σχήμα 6.2, απεικονίζει τη μέγιστη διατομή του φράγματος με λεπτομέρειες της στέψης και των ζωνών κοντά στον περιμετρικό αρμό της πλίνθου.

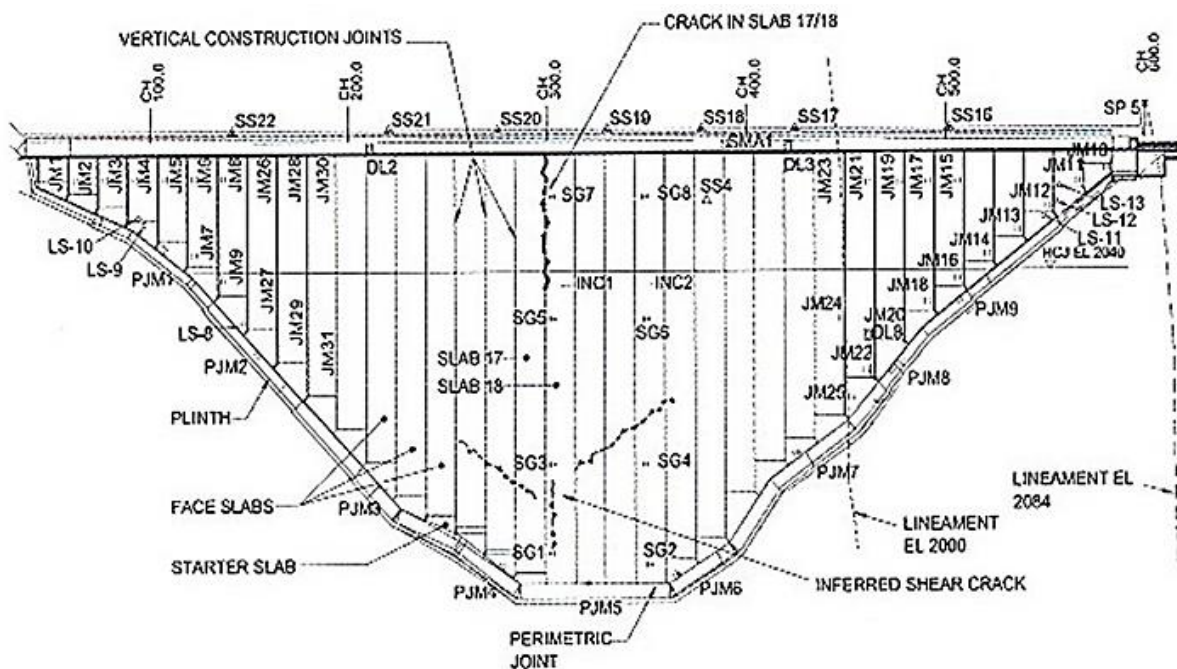


Σχήμα 6.1. Το φράγμα Mohale όπως φαίνεται από κατάντη στις 13 Φεβρουαρίου το 2006 (Johannesson and Tohlang, 2007).

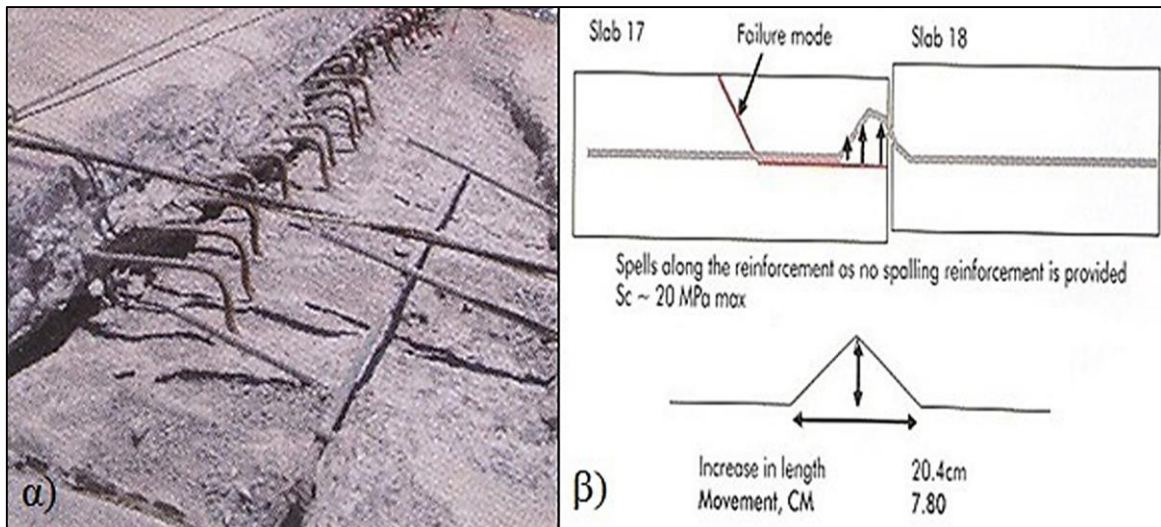


Σχήμα 6.2. Μέγιστη διατομή του φράγματος Mohale με λεπτομέρειες πλίνθου και στέψης (Johannesson and Tohlang, 2007).

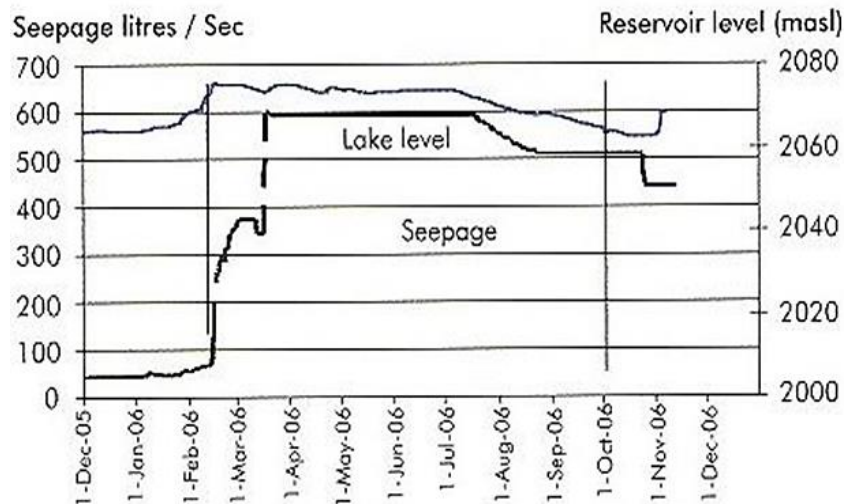
Το Σχήμα 6.3 απεικονίζει την πλάκα σκυροδέματος του Mohale, υποδεικνύοντας τη θέση των κύριων οργάνων της πλάκας. Η θέση της ρωγμής της πλάκας στις 14 Φεβρουαρίου υποδεικνύεται από μια παχιά διακεκομμένη γραμμή. Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οργάνων δείχνει ότι η κύρια θραύση της πλάκας που πραγματοποιήθηκε στις 14 Φεβρουαρίου οφειλόταν στην υψηλή οριζόντια παραμόρφωση ανάμεσα στις πλάκες 17 και 18 (Σχήμα 6.4α). Σημειώνεται ότι για συνήθη φράγματα ο λόγος της οριζόντιας μετακίνησης στη στέψη προς την καθίζηση είναι 0.65, ενώ στο Mohale μόλις 0.35. Με βάση τις μετρήσεις του σχήματος της λυγισμένης ράβδου που λήφθηκε τον Μάρτιο του 2006 (Σχήμα 6.4β), η οριζόντια αλληλοεπικάλυψη ανήλθε σε 78 mm. Η προφανής αλληλοεπικάλυψη των αρμών σκυροδέματος μπορεί να είναι έως 120 mm, ενώ η δεξιά πλάκα 18 ανυψώθηκε περίπου 75 mm πάνω από την πλάκα 17. Η διεύρυνση των κατακόρυφων αρμών του αντερείσματος ανέρχεται σε περίπου 340 mm. Στη συνέχεια η διαρροή αυξήθηκε σημαντικά και κορυφώθηκε σε 600 l/sec (Σχήμα 6.5) (Johannesson and Tohlang, 2007).



Σχήμα 6.3. Πλάκα σκυροδέματος με τη θέση των κύριων οργάνων, όπου διακρίνονται και οι ρηγματώσεις στην πλάκα (Johannesson and Tohlang, 2007).



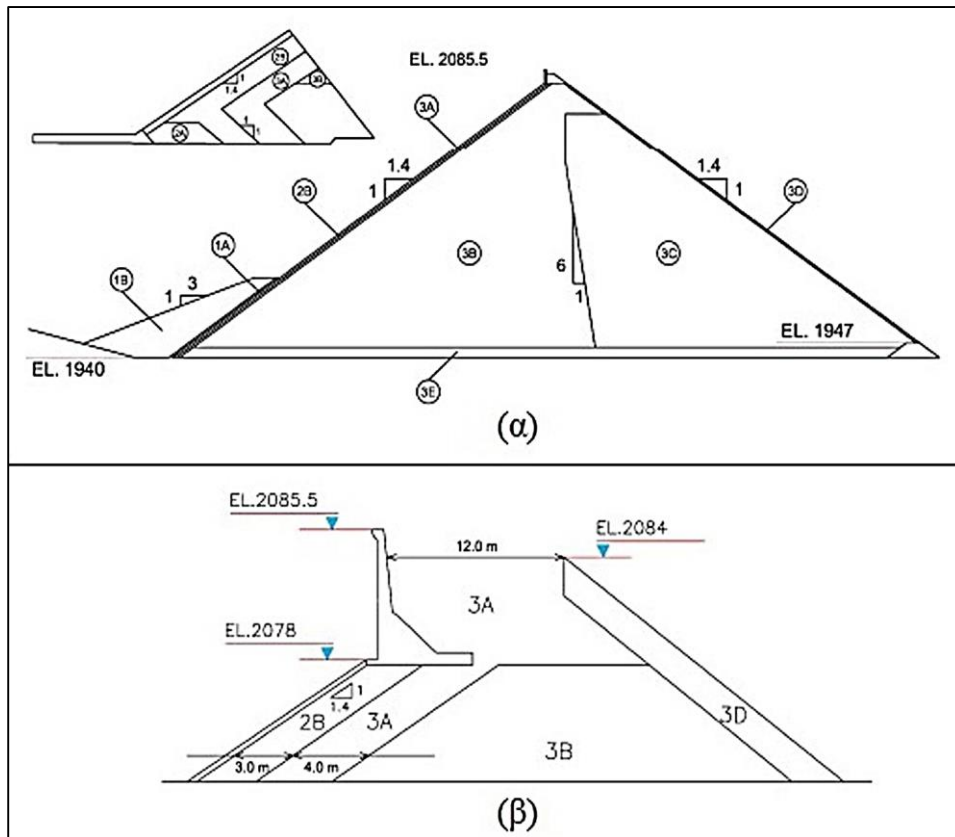
Σχήμα 6.4. α) Οι πλάκες 17 και 18 μετά την αφαίρεση του σκυροδέματος, β) Η σχετική κίνηση των πλακών 17 και 18 (Johannesson and Tohlang, 2007).



Σχήμα 6.5. Στάθμη ταμιευτήρα και διαρροή ως προς τον χρόνο (Johannesson and Tohlang, 2007).

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φράγματος.

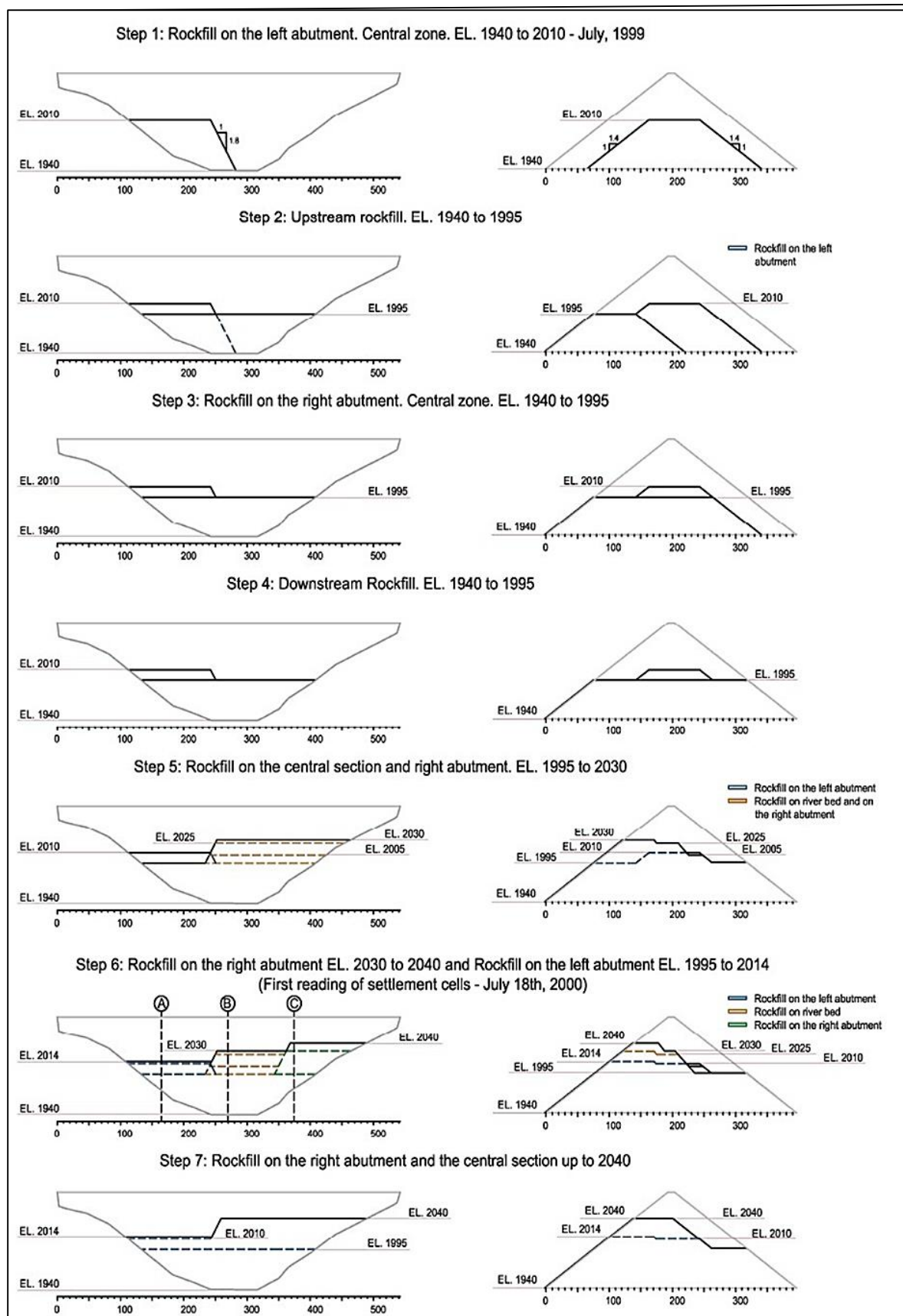
Η διατομή του φράγματος Mohale με τις ζώνες αναφοράς και τις λεπτομέρειες της στέψης, συμπεριλαμβανομένου και του παραπέτου (δηλαδή του τοίχου σκυροδέματος στη στέψη) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6. Οι ανάντη και οι κατόντη κλίσεις είναι 1V:1.40H. Η στέψη έχει μήκος 600 μέτρα και η στάθμη της ανέρχεται στα 2084 m (Marulanda and Anthiniac, 2009). Το πάχος της πλάκας σκυροδέματος καθορίστηκε ως συνάρτηση της υδροστατικής πίεσης, ακολουθώντας την κλασσική εξίσωση $w = 0.30 + 0.003H$, όπου w είναι το πάχος της πλάκας και H το υδροστατικό φορτίο. Ο οπλισμός ήταν 0.4% στην κατακόρυφη διεύθυνση ενώ ο οριζόντιος οπλισμός ανερχόταν σε 0.35% (Johannesson and Tohlang, 2007).



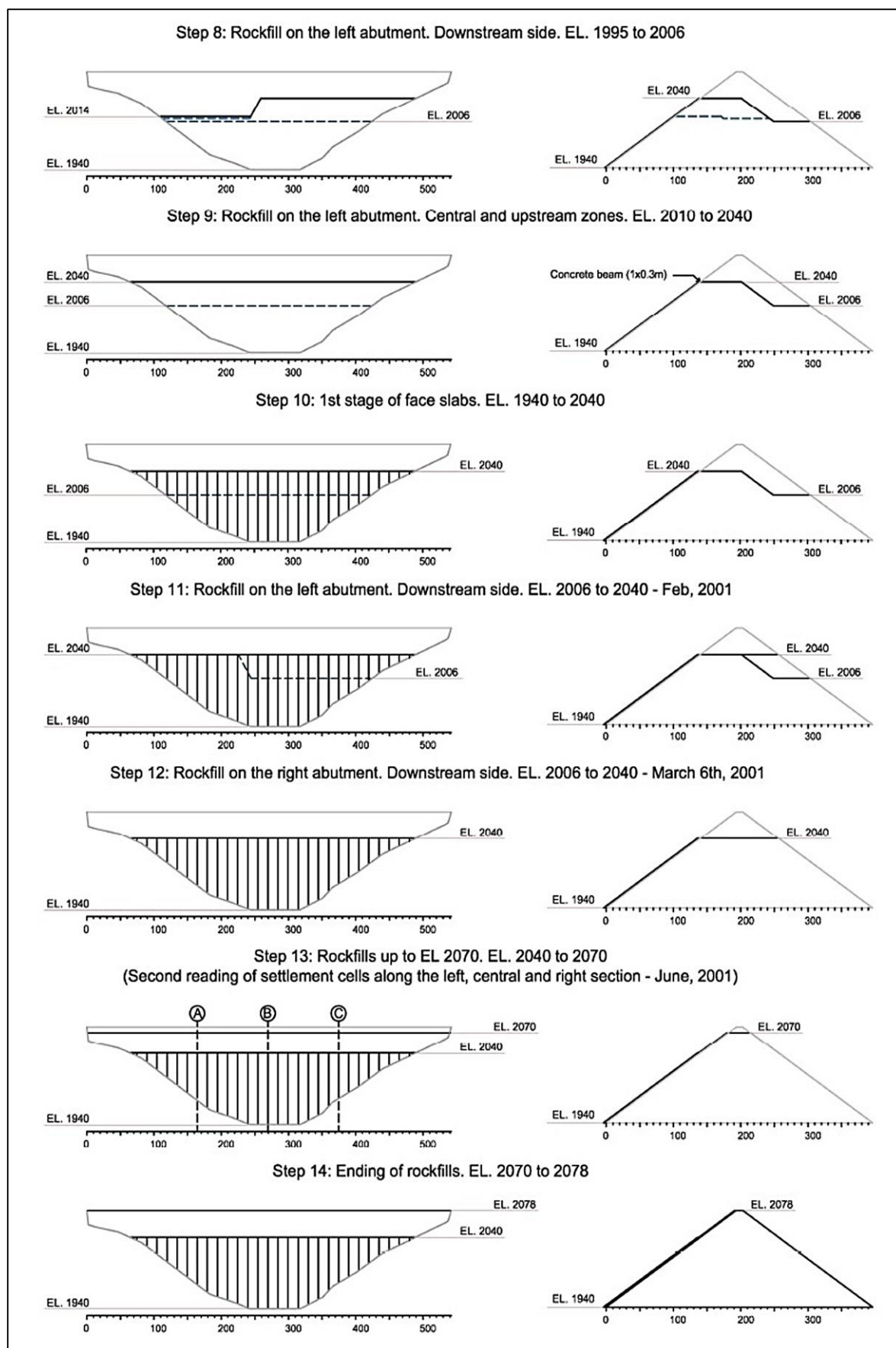
Σχήμα 6.6. (α) Περιγραφή των ζωνών του φράγματος και (β) Περιγραφή του παραπέτου (Johannesson and Tohlang, 2007).

Κατασκευαστική ακολουθία του φράγματος.

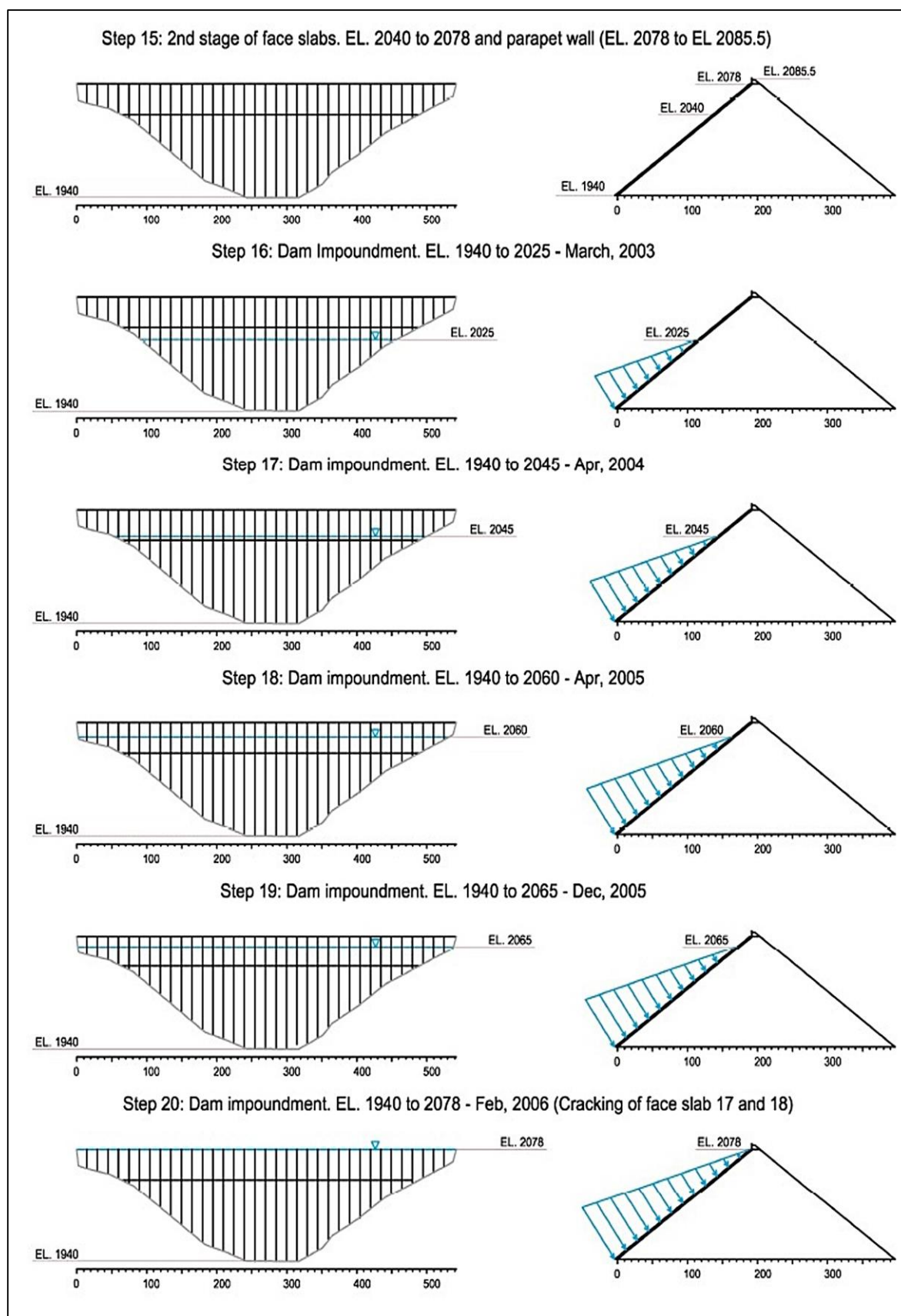
Οι Marulanda και Anthiniac (2009) βασιζόμενοι σε διαθέσιμα κατασκευαστικά δεδομένα, ανέπτυξαν κι απεικόνισαν την απλουστευμένη κατασκευαστική ακολουθία του φράγματος που εμφανίζεται παρακάτω αναλυτικά στα Σχήματα 6.7, 6.8, 6.9 και συμπεριλαμβάνει τα πιο σχετικά κατασκευαστικά στάδια. Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει τα πάχη των στρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τις διαφορετικές ζώνες του φράγματος. Το Σχήμα 6.10α απεικονίζει τη δοκό σκυροδέματος που κατασκευάστηκε στη στάθμη 2040 m. Κατά τη διάρκεια της αρχικής πλήρωσης του ταμιευτήρα αρκετές οριζόντιες ρηγματώσεις εμφανίστηκαν στην πλάκα σκυροδέματος γύρω από αυτή τη στάθμη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.10β. Πιστεύεται ότι αυτές οι ρηγματώσεις σχετίζονται με την τοπική δυσκαμψία εξαιτίας της παρουσίας της δοκού σκυροδέματος (Johannesson and Tohlang, 2007).



Σχήμα 6.7. Κατασκευαστική ακολουθία. Βήματα 1 έως 7 (Marulanda and Anthiniac, 2009).



Σχήμα 6.8. Κατασκευαστική ακολουθία. Βήματα 8 έως 14 (Marulanda and Anthiniac, 2009).



Σχήμα 6.9. Κατασκευαστική ακολουθία. Βήματα 15 έως 20 (Marulanda and Anthiniac, 2009).

Πίνακας 6.1. Απαιτήσεις τοποθέτησης (Gratwick et al., 2000).

Zone	Description	Lift height [m]
1A	Impervious fill	0.3
1B	Random fill	0.6
1C	Impervious fill	0.3
2A	Fine filter	0.4
2B	Durable crushed doleritic basalt	0.4
3A	Selected small quarry run rock	0.4
3B	Quarry run rockfill	1.0
3C	Quarry run rockfill	2.0
3D	Selected durable rock	NA
3E	Quarry run doleritic basalt	1.0/2.0



Σχήμα 6.10. (α) Η δοκός σκυροδέματος στη στάθμη 2040 m και (β) Οριζόντιες ρηγματώσεις της πλάκας σκυροδέματος στη στάθμη 2040 m όταν ο ταμιευτήρας έφτασε στη στάθμη 2010 m, περίπου τον Ιανουάριο του 2003 (Johannesson and Tohlang, 2007).

Χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής του φράγματος.

Η περιγραφή των υλικών των κυρίων ζωνών του φράγματος Mohale εμφανίζεται στον Πίνακα 6.2 συνοπτικά. Πιο αναλυτικά οι ζώνες κατασκευής είναι οι εξής:

Ζώνη 1 - Χαμηλής συνοχής λεπτόκοκκα, που εμπεριέχουν σκόνη πέτρας (από τη μονάδα θραύσης) ή ιπτάμενη τέφρα, και τυπικά παρέχονται πάνω στον περιμετρικό αρμό προκειμένου να σταματήσουν τη ρηγμάτωση και την πρόληψη διαρροών. Στο φράγμα Mohale χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα (Johannesson, 2007a).

Ζώνη 2 - Λεπτόκοκκο φίλτρο στους περιμετρικούς αρμούς, το οποίο θα πρέπει να αποτελείται από μη-πλαστικό, σκληρό και ανθεκτικό βράχο, χωρίς άργιλο και οργανικά, με διαβάθμιση που επιτρέπει τη συγκράτηση του αιωρούμενου φορτίου του ταμιευτήρα και να μην είναι επιρρεπής σε διασωλήνωση μέσω της Ζώνης 3 (Johannesson, 2007a). Στο φράγμα Mohale χρησιμοποιήθηκε δολεριτικός βασάλτης (Johannesson, 2007b).

Ζώνη 3 - Η Ζώνη 3 σχηματίζει ένα μαξιλάρι πάνω στο οποίο εδράζεται η πλάκα σκυροδέματος, παρέχοντας ομαλή κατανομή του φορτίου στην πλάκα. Στο φράγμα Mohale χρησιμοποιήθηκε θρυμματισμένος δολεριτικός βασάλτης (Johannesson, 2007b).

Ζώνη 4 – Η Ζώνη 4 αποτελείται από επιλεγμένο μικρό βράχο λατομείου με μέγιστο μέγεθος κόκκου 300 mm (Johannesson, 2007b).

Ζώνες 5 και 6A – Οι Ζώνες αυτές αποτελούνται από λιθορριπή λατομείου με τα γενικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στους Πίνακες 6.3 και 6.4.

Ζώνη 6B – Χρησιμοποιείται για προστασία από τη διάβρωση αποτελούμενη από δολεριτικό βασάλτη ως λιθορριπή (Johannesson, 2007b).

Πίνακας 6.2. Περιγραφή των υλικών των ζωνών του φράγματος Mohale (Johannesson, 2007b).

Zone	Description
1	Stone powered from crushing plant or fly ash, covered by overburden
2	Fine filter (at perimeter joint), doleritic basalt
3	Crushed doleritic basalt
4	Selected small quarry run rock
5 and 6A	Quarry run rockfill
6B	Erosion protection consisting of doleritic basalt as riprap

Πίνακας 6.3. Γενικές απαιτήσεις διαβάθμισης για λιθορριπή (Gratwick et al., 2000).

Zone	Description	Gradation
1A	Impervious fill	Min 30% passing #200 sieve
1B	Random fill	Semi impervious earthfill
1C	Impervious fill	Max 30% passing #200 sieve
2A	Fine filter	D15=0.3 to 0.7 mm
2B	Durable crushed doleritic basalt	Max. particle size 76 mm
3A	Selected small quarry run rock	Max. particle size 300 mm
3B	Quarry run rockfill	<200: max 10%, <25mm: max 50%
3C	Quarry run rockfill	<200: max 10%, <25mm: max 50%
3D	Selected durable rock	60%>0.6m
3E	Quarry run doleritic basalt	<200: max 5%, <25mm: max 40%

Πίνακας 6.4. Απαιτήσεις διαβάθμισης για τις ζώνες 5A, 5B και 6A στο φράγμα Mohale (Johannesson, 2007b).

Sieve size [mm]	Zone 5A	Zone 5B	Zone 6A
25 mm	< 30%	< 30%	< 30%
0.0075 mm	< 10%	< 10%	< 10%

Πίνακας 6.5. Συνοπτικές ιδιότητες των υλικών λιθορριπής (Marulanda and Anthiniac, 2009).

Material type	γ [Kgf/m ³]	γ_c [Kgf/m ³]	e [-]	n (%)
2A	2493	3000	0.20	16.7
2B	2459	3000	0.22	18.0
3A	2350	3000	0.28	21.9
3B	2230	2800	0.26	20.6
3C	2182	2800	0.28	21.9
3E	2274	3000	0.32	24.2

Η πλάκα σκυροδέματος αποτελείται από συμβατικό σκυρόδεμα C25, με ιπτάμενη τέφρα 30% και λόγο $w/c = 0.45-0.47$ (Johannesson, 2007c). Η θλιπτική αντοχή για το σκυρόδεμα ήταν υψηλότερη από 28 MPa, όμως, βασιζόμενοι στις μετρήσεις των παραμορφώσεων που συζητήθηκαν αργότερα, η αστοχία της πλάκας προέκυψε σε χαμηλότερες τιμές τάσεων (Marulanda and Anthiniac, 2009).

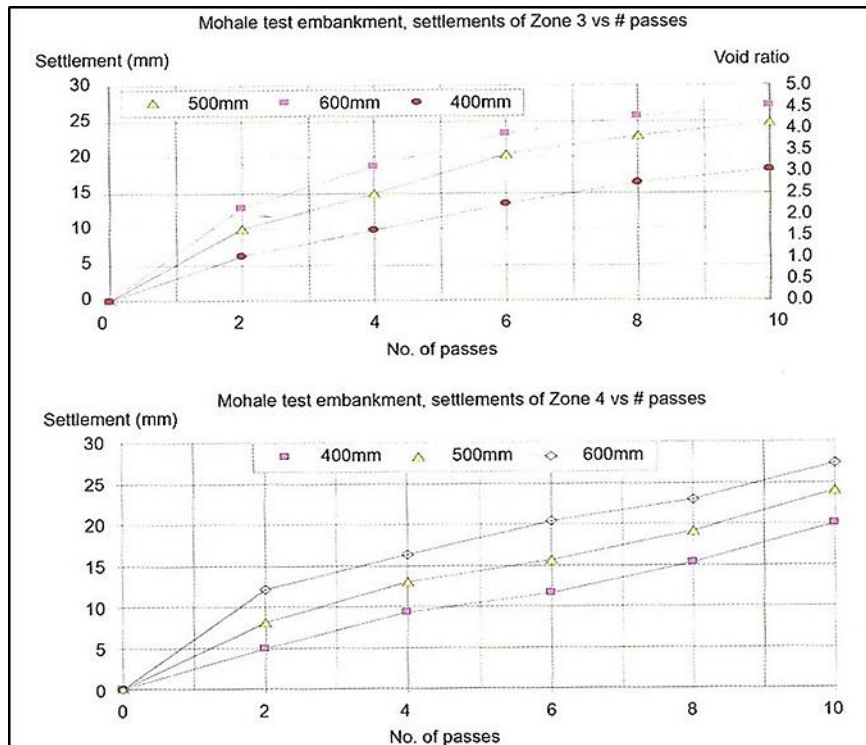
Η συμπεριφορά της λιθορριπής στο φράγμα.

Η λιθορριπή του φράγματος Mohale προέρχεται από δολεριτικό βασάλτη. Ο καθαρός βασάλτης είναι υλικό με πολύ μεγάλη αντοχή και ιδιαίτερα γωνιώδες. Όμως ο βασάλτης με πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκε, είχε μικρότερη αντοχή. Από δοκιμές που έγιναν μετά την αστοχία, διαπιστώθηκε λιθορριπή φτωχής διαβάθμισης και όχι καλά συμπυκνωμένη (η συμπίκνωση έγινε χωρίς διαβροχή και απέφερε μεγάλο δείκτη κενών). Με πολύ καλή διαβάθμιση της λιθορριπής και σωστή συμπίκνωση (με διαβροχή και σε λεπτές στρώσεις $\leq 1\text{m}$ ανάντη) σύμφωνα με τους εμπειρογνώμονες, το ίδιο υλικό θα έδινε πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (Johannesson and Tohlang, 2007). Το μέτρο ελαστικότητας της λιθορριπής υπολογίστηκε με ανάδρομη ανάλυση μέσω των καθιζήσεων ίσο με 32 MPa ανάντη και 24 MPa κατάντη.

Η συμπίκνωση κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

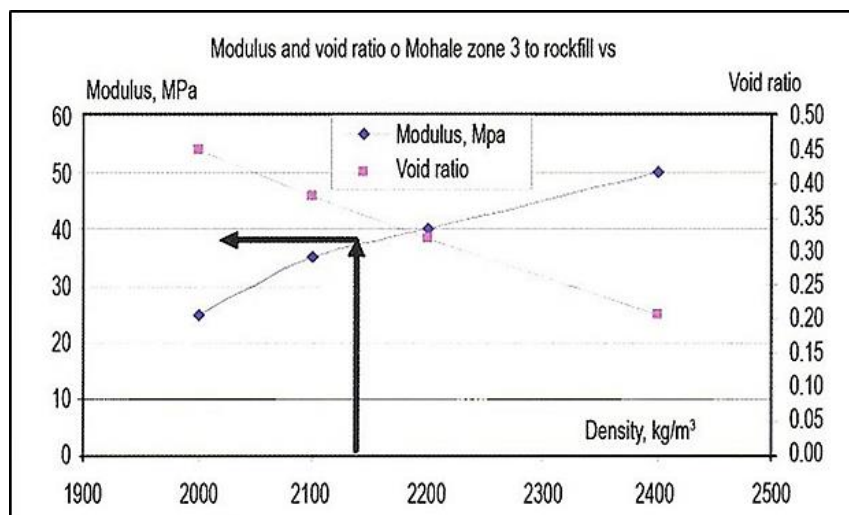
Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, η επιρροή της συμπίκνωσης στη δυσκαμψία της λιθορριπής είναι μεγάλη. Δοκιμές που έγιναν στη λιθορριπή του Karahnjukar οδηγούν στο συμπέρασμα ότι για διπλάσιο αριθμό περασμάτων διάστρωσης (8 αντί για 4 διελεύσεις) επιτυγχάνεται αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα.

Επίσης διαπιστώνεται ότι το πάχος στρώσης, είναι αντιστρόφως ανάλογο με την πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας (Johannesson, 2007a). Η απόκριση αυτή της λιθορριπής είναι αναμενόμενη σε όλα τα CFRDs, καθώς σε παχύτερες στρώσεις, ο στρωτήρας δεν συμπίεζει εξίσου το κάτω τμήμα της στρώσης, κι έτσι μένουν στη λιθορριπή και αραιά τμήματα τα οποία θα είναι σαφώς περισσότερο παραμορφώσιμα. Επίσης, περισσότερες διελεύσεις είναι ευνόητο ότι επιτυγχάνουν καλύτερη συμπίκνωση αναγκάζοντας τη λιθορριπή να συμπυκνώνεται αργά, χωρίς προβλήματα θρυμματισμού, όπως συμβαίνει με τους βαρύτερους στρωτήρες. Περισσότερα περάσματα με το στρωτήρα αυξάνουν σημαντικά τις καθιζήσεις κατά την κατασκευή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, με αποτελέσματα από δοκιμές που έγιναν στο φράγμα Mohale. Το γεγονός αυτό δεν επιδρά αρνητικά στην ευστάθεια του φράγματος, εφόσον δεν έχει τοποθετηθεί ακόμα η πλάκα στη φάση της συμπίκνωσης. Η αύξηση των καθιζήσεων με τις περισσότερες διελεύσεις είναι μεγαλύτερη για τις κατάντη στρώσεις, εξαιτίας της μεγαλύτερης παραμορφωσιμότητας τους (Johannesson, 2007a).



Σχήμα 6.11. Καθιζήσεις (σε mm) για τις ζώνες 3 και 4 του φράγματος Mohale ως προς τον αριθμό διελεύσεων του στρωτήρα και το πάχος στρώσης (Johannesson, 2007a).

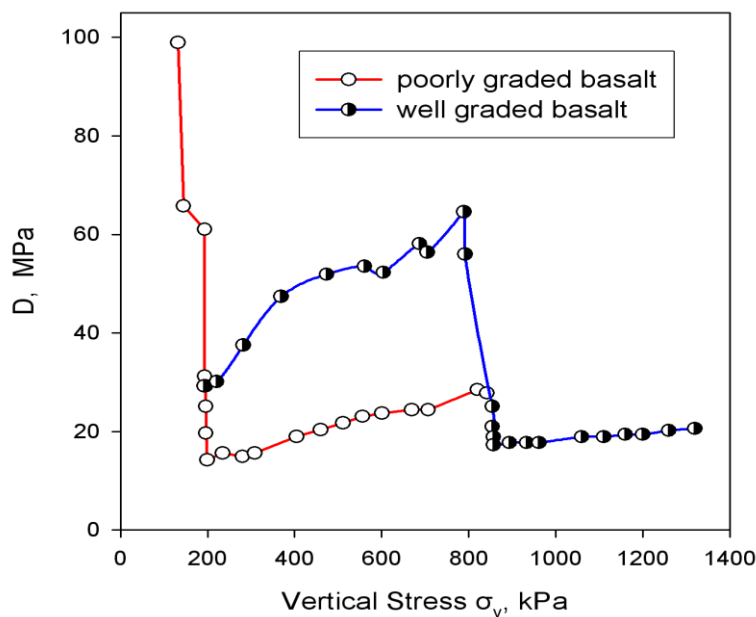
Στο Σχήμα 6.12, παρατηρείται σχεδόν γραμμική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της λιθορριπής του φράγματος Mohale με την αύξηση της πυκνότητας.



Σχήμα 6.12. Σχέση μέτρου ελαστικότητας και πυκνότητας για την λιθορριπή της ζώνης 3 του φράγματος Mohale (Johannesson, 2007a).

Ο θρυμματισμός στη λιθορριπή.

Ο θρυμματισμός που συνέβη στη λιθορριπή από δολεριτικό βασάλτη στο φράγμα Mohale είναι χαρακτηριστικός. Ο βασάλτης είναι υλικό με πολύ υψηλή διατμητική αντοχή κι ένα τέτοιο ατύχημα δεν ήταν αναμενόμενο. Στο θρυμματισμό της λιθορριπής συνετέλεσε η μη καθαρότητα του βασάλτη αποδεικνύοντας την άμεση εξάρτηση του ποσοστού θρυμματισμού από την αντοχή και την καθαρότητα του βράχου προέλευσης. Την προβληματική συμπεριφορά της λιθορριπής του φράγματος Mohale επέτεινε και η φτωχή κοκκομετρική διαβάθμισή της. Μετά τη συμπίκνωση, το μέτρο ελαστικότητας της λιθορριπής ανήλθε στα 100 MPa. Κατά τη λειτουργία όμως και με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου επήλθε έντονος θρυμματισμός της υπό κατακόρυφης τάσης μόλις 0.2 MPa. Δοκιμές που έγιναν σε καλύτερα διαβαθμισμένο βασάλτη κατέδειξαν ότι με καλύτερη διαβάθμιση, ο θρυμματισμός θα συνέβαινε σε μεγαλύτερη κατακόρυφη τάση (0.6-0.8 MPa), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13 (Johannesson and Tohlang, 2007).



Σχήμα 6.13. Μέτρο ελαστικότητας για βασάλτη φτωχής και καλής διαβάθμισης (Ντακούλας, 2010).

Είναι προφανές λοιπόν ότι η αρχική αιτία των προβλημάτων του Mohale ήταν η ιδιαίτερα παραμορφώσιμη λιθορριπή του. Με τις πλημμύρες και την αύξηση του φορτίου, η λιθορριπή υπέστην θρυμματισμό και τεράστια καθίζηση, και από εκεί ξεκίνησε η καταπόνηση της πλάκας. Αποδείχτηκε πως η λιθορριπή θρυμματίστηκε για εξαιρετικά μικρή τάση και μάλιστα ακαριαία εξαιτίας της ξηρής της συμπίκνωσης και της μικρής της δυσκαμψίας (Johannesson and Tohlang, 2007).

6.2 Αριθμητική προσομοίωση του φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος Mohale.

Το προχωρημένο αριθμητικό ελαστοπλαστικό μοντέλο του Lade χρησιμοποιείται προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά της αστοχίας του φράγματος Mohale και να επιτευχθούν οι απαραίτητες συγκρίσεις με τις πραγματικές μετρήσεις του φράγματος. Στην προσομοίωση συμπεριλαμβάνονται οι ζώνες λιθορριπής, τα πάνελ της πλάκας σκυροδέματος, το παραπέτο και η υποκείμενη δοκός σκυροδέματος.

Το φράγμα προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2014). Στην αριθμητική ανάλυση η λιθορριπή που προσομοιώνεται έχει ύψος 138 m ενώ το παραπέτο 6 m. Το εύρος της στέψης είναι 12 m, η ανάντη κλίση του επιχώματος 1.4:1 και η κατόντη επίσης 1.4:1. Οι κύριες ζώνες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική ανάλυση είναι η ανάντη ζώνη λιθορριπής 3B, η κατόντη ζώνη λιθορριπής 3C και οι μεταβατικές ζώνες 2B και 3A κάτω από την πλάκα σκυροδέματος.

Η κατασκευή του επιχώματος έχει υλοποιηθεί σε διάφορα στάδια, σύμφωνα με την ακολουθία που αναγράφεται στα Σχήματα 6.8, 6.9 και 6.10. Η υποκείμενη δοκός σκυροδέματος προσομοιώνεται στο ύψος 100 m (Στάθμη 2040 m). Λόγω των δυσκολιών που παρουσιάζονται στην αριθμητική διακριτοποίηση κάποια από τα ενδιάμεσα στάδια της εναπόθεσης της λιθορριπής παραλείπονται. Στο αριθμητικό προσομοίωμα η λιθορριπή τοποθετείται σε 8 σταδιακά βήματα, τα οποία απεικονίζονται στα Σχήματα 6.14 και 6.15. Σε κάθε βήμα το υλικό εναποτίθεται σταδιακά σε στρώσεις πάχους 4.6 m. Στο Βήμα 1, τοποθετείται η λιθορριπή στο αριστερό αντέρεισμα και στην κεντρική ζώνη από τη στάθμη 1940 έως 2010. Στο Βήμα 2, τοποθετείται η λιθορριπή ανάντη, στο δεξί αντέρεισμα και στην κεντρική ζώνη από τη στάθμη 1940 έως 1995. Στο Βήμα 3, η λιθορριπή τοποθετείται κατόντη από τη στάθμη 1940 έως 1995. Στο Βήμα 4, η λιθορριπή τοποθετείται στο δεξί αντέρεισμα και στην κεντρική ζώνη έως τη στάθμη 2040, ενώ στο αριστερό αντέρεισμα από τη στάθμη 1995 έως 2014. Στο Βήμα 5, η λιθορριπή τοποθετείται στο αριστερό αντέρεισμα και στις ζώνες κεντρικά και ανάντη από τη στάθμη 2010 έως 2040, καθώς και στην κατόντη ζώνη από τη στάθμη 1995 έως 2006. Στο Βήμα 6, η λιθορριπή τοποθετείται έως τη στάθμη 2040 και στο Βήμα 7 μέχρι την τελική στάθμη. Στο Βήμα 8, τελευταίο βήμα, τοποθετούνται η ζώνη 2B, η υποκείμενη δοκός σκυροδέματος και το παραπέτο. Στη συνέχεια, μετά την ολοκλήρωση της εναπόθεσης της λιθορριπής στο σύνολό της, ακολουθούν η τοποθέτηση των ανεξάρτητων πάνελ σκυροδέματος και η φόρτιση του ταμιευτήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πραγματική

κατασκευή, η εναπόθεση της λιθορριπής ακολουθεί τη σταδιακή κατασκευή που περιγράφεται στα Σχήματα 6.8, 6.9 και 6.10, με την πλάκα σκυροδέματος να τοποθετείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την τοποθέτηση της πλάκας έως τη στάθμη 2040, σημείο στο οποίο κατασκευάζεται και η υποκείμενη δοκός σκυροδέματος, και στο δεύτερο στάδιο το υπόλοιπο τμήμα, από τη στάθμη 2040 έως την τελική στάθμη. Στην αριθμητική προσομοίωση, μια σταδιακή κατασκευή της πλάκας δεν είναι εφικτή λόγω των τεχνικών δυσκολιών που εμφανίζονται εξαιτίας των διεπιφανειών.

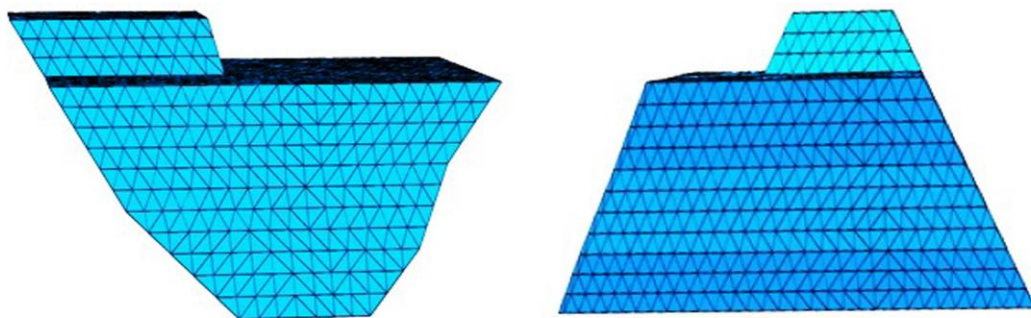
Η ανάντη πλάκα αποτελείται από 36 ανεξάρτητα πάνελ σκυροδέματος τα οποία έχουν ένα πλάτος 15 m και ένα μεταβλητό πάχος, το οποίο δίνεται από την εξίσωση $t=0.30+0.003h$, όπου h είναι το ύψος του υπερκείμενου ύδατος. Τα πάνελ της πλάκας διακριτοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα μεταβλητό πάχος και δύο στρώσεις στοιχείων. Εξαίρεση αποτελούν οι πλάκες 17 και 18, όπου παρατηρήθηκε θλιπτική αστοχία κατά μήκος του αρμού, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν 4 στρώσεις στοιχείων στο πάχος της πλάκας για μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμού.

Ο οπλισμός χάλυβα τοποθετήθηκε στο μέσο του πάχους της πλάκας. Ο οπλισμός αποτελείται από ράβδους χάλυβα διαμέτρου $\Phi 25$ mm ανά 20 cm απόσταση, στις διευθύνσεις x και y των πάνελ. Επιπλέον, κάθε πάνελ έχει κατάλληλες συνθήκες τριβής και δυνατότητα ανοίγματος ενός κενού στη βάση του που συνδέεται με τη στρώση χαλίκων και στις κατακόρυφες διεπιφάνειές του με τα γειτονικά πάνελ. Σε κάθε κατακόρυφο αρμό ανάμεσα στα γειτονικά πάνελ, υπάρχει ένα κενό εύρους 1 cm. Το αριθμητικό μοντέλο αποτελείται από 98904 πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία περιλαμβάνουν στερεά στοιχεία με 8 κόμβους, εξαεδρικά, μειωμένης ολοκλήρωσης, τετραεδρικά στοιχεία με 4 κόμβους, τριγωνικά πρισματικά στοιχεία με 6 κόμβους, καθώς επίσης και επιφανειακά τριγωνικά και τετράπλευρα στοιχεία.

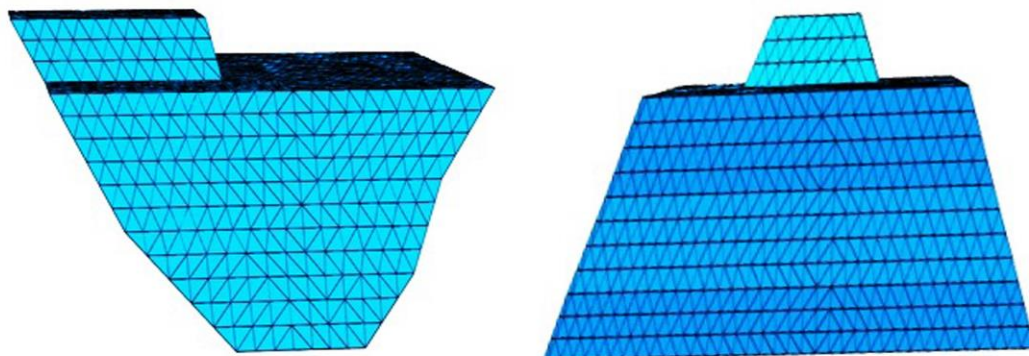
Βήμα 1: Λιθορριπή στο αριστερό αντέρεισμα. Κεντρική Ζώνη. EL. 1940 έως 2010



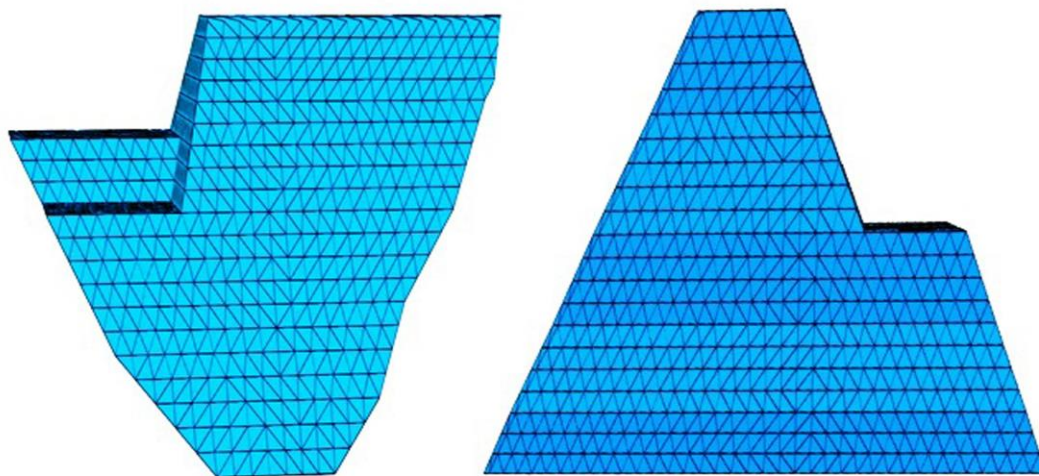
Βήμα 2: Λιθορριπή ανάντη, στο δεξί αντέρεισμα και στην κεντρική ζώνη. EL. 1940 έως 1995



Βήμα 3: Λιθορριπή κατάντη. EL. 1940 έως 1995



Βήμα 4: Λιθορριπή στο δεξί αντέρεισμα και στην κεντρική ζώνη έως 2040. Λιθορριπή στο αριστερό αντέρεισμα EL. 1995 έως 2014



Σχήμα 6.14. Σταδιακή κατασκευή της αριθμητικής προσομοίωσης της λιθορριπής του φράγματος Mohale (Βήματα 1-4).

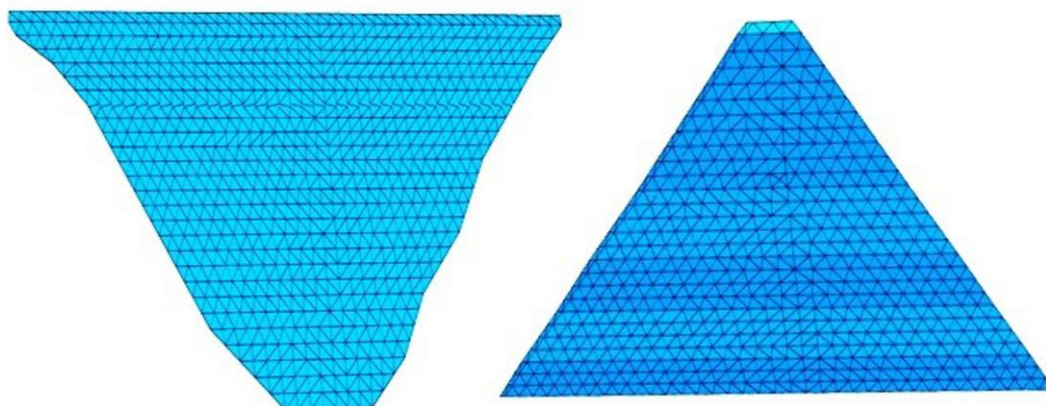
Βήμα 5: Λιθορριπή στο αριστερό αντέρεισμα. Στις ζώνες κεντρικά και ανάντη. EL. 2010 έως 2040. Λιθορριπή κατάντη. EL. 1995 έως 2006.



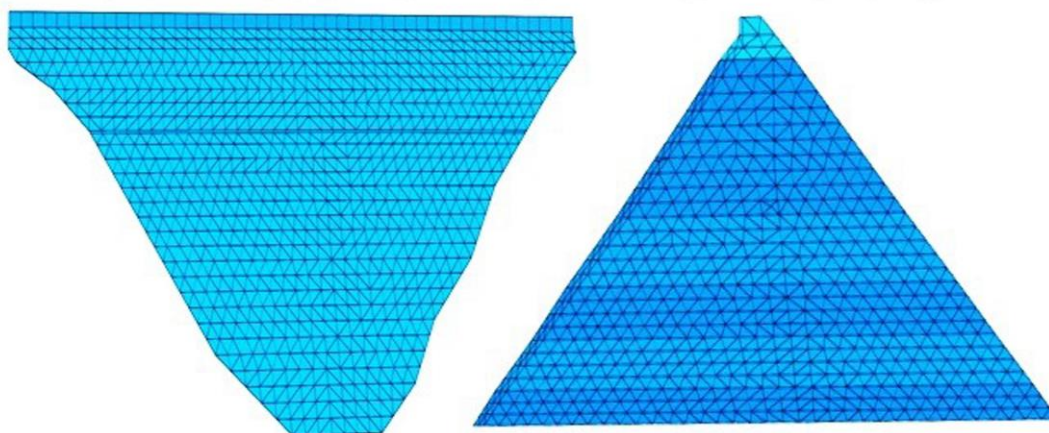
Βήμα 6: Λιθορριπή έως EL. 2040.



Βήμα 7: Τελική στάθμη της λιθορριπής.

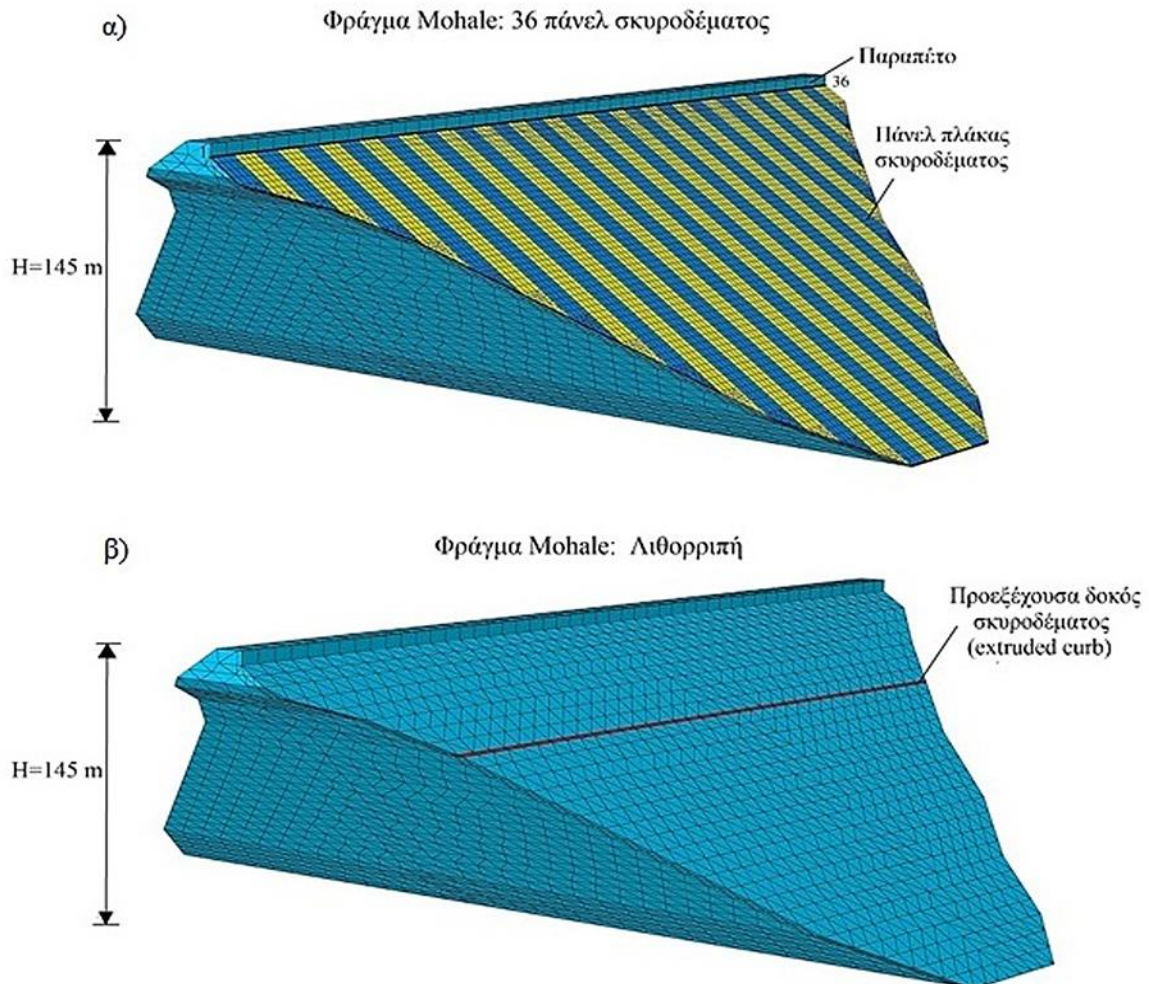


Βήμα 8: Τοποθέτηση της Ζώνης 2B, του παραπέτου και της δοκού σκυροδέματος.



Σχήμα 6.15. Σταδιακή κατασκευή της αριθμητικής προσομοίωσης της λιθορριπής του φράγματος Mohale (Βήματα 5-8).

Στο Σχήμα 6.16 απεικονίζεται η αριθμητική διακριτοποίηση του φράγματος Mohale με τα πεπερασμένα στοιχεία, όπου διακρίνονται η λιθορριπή, τα 36 ανεξάρτητα πάνελ σκυροδέματος, το παραπέτο και η υποκείμενη δοκός σκυροδέματος.

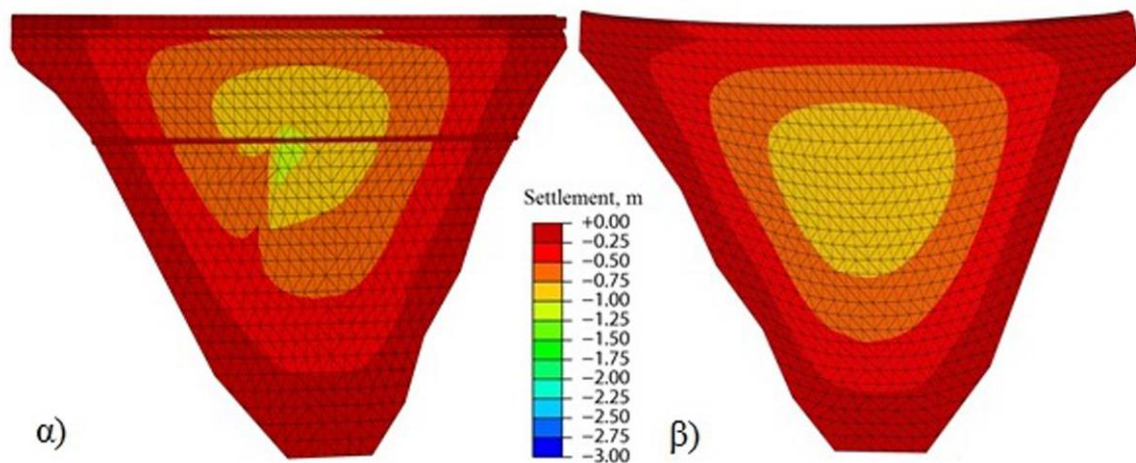


Σχήμα 6.16. Αριθμητική διακριτοποίηση του φράγματος Mohale ύψους 145 m α) Απεικόνιση του φράγματος με τα 36 ανεξάρτητα πάνελ σκυροδέματος και το παραπέτο β) Απεικόνιση της λιθορριπής του φράγματος με την υποκείμενη δοκό σκυροδέματος (extruded curb).

6.3 Αναλύσεις αποτελεσμάτων από την αριθμητική προσομοίωση του φράγματος Mohale με τη χρήση του ελαστοπλαστικού μοντέλου Lade.

Προκειμένου να διερευνηθεί η αστοχία του φράγματος Mohale με τη χρήση του ελαστοπλαστικού μοντέλου Lade, πραγματοποιούνται δύο διαφορετικές αναλύσεις. Η πρώτη ανάλυση διεξάγεται χωρίς την επίδραση του φαινομένου του ερπυσμού, ενώ η δεύτερη με την επίδραση του ερπυσμού. Το φαινόμενο του ερπυσμού της λιθορριπής λαμβάνεται υπόψη καθώς η κατασκευή της πλάκας γίνεται σε δύο στάδια και παράλληλα

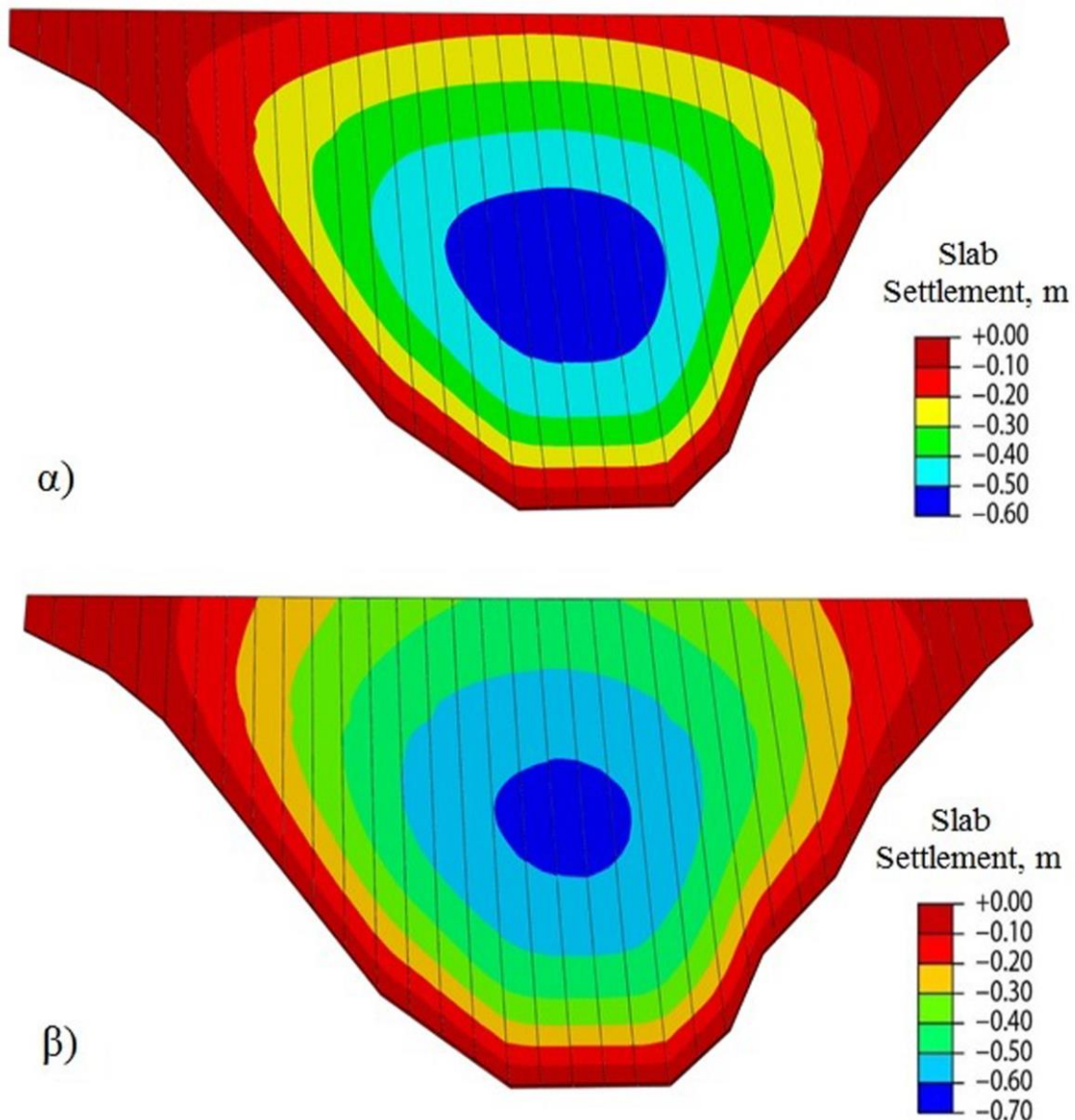
με την τοποθέτηση της λιθορριπής. Η εμπειρία έχει δείξει ότι η τοποθέτηση της πλάκας σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται τουλάχιστον έξι μήνες μετά την εναπόθεση της λιθορριπής κι αφού έχουν αρχίσει να υποχωρούν τα φαινόμενα ερπυσμού. Ο ερπυσμός της λιθορριπής θα πρέπει επίσης να είναι αρκετά μικρός για να αποφευχθούν υπερβολικές μακροπρόθεσμες καθιζήσεις και συνεπώς ενδεχόμενες ρηγματώσεις στην πλάκα σκυροδέματος. Στο Σχήμα 6.17 απεικονίζονται οι κατανομές της καθίζησης κατασκευής S_c στο τέλος της σταδιακής κατασκευής της λιθορριπής α) ανάντη του φράγματος και β) κατόντη του φράγματος. Η μέγιστη καθίζηση της λιθορριπής είναι $S_c = 2.86$ m και είναι σημειακή, ενώ διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερη καθίζηση της λιθορριπής προκαλείται κατόντη του φράγματος και στο μέσο περίπου του ύψους του φράγματος.



Σχήμα 6.17. Κατανομή της καθίζησης κατασκευής S_c α) ανάντη του φράγματος και β) κατόντη του φράγματος.

Στο Σχήμα 6.18 απεικονίζεται η κατανομή της καθίζησης της πλάκας σκυροδέματος α) μετά την πλήρωση της λεκάνης χωρίς ερπυσμό και β) μετά την πλήρωση της λεκάνης και με ταυτόχρονη δράση ερπυσμού. Στην πρώτη περίπτωση, η μέγιστη καθίζηση της πλάκας είναι 0.56 m, ενώ στη δεύτερη που λαμβάνεται υπόψη και ο ερπυσμός 0.62 m. Η κατανομή της καθίζησης και για τις δύο περιπτώσεις ανάλυσης είναι αρκετά ομαλή, με τη μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται περίπου στο 40%-50% του ύψους του φράγματος και σχεδόν να μηδενίζεται κοντά στα αντερείσματα. Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση του ερπυσμού, παρατηρείται ότι στη στέψη του φράγματος, οι καθιζήσεις της πλάκας κυμαίνονται από 0.00 m στα αντερείσματα έως 0.50 m στο κέντρο της πλάκας σε αντίθεση με την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο η

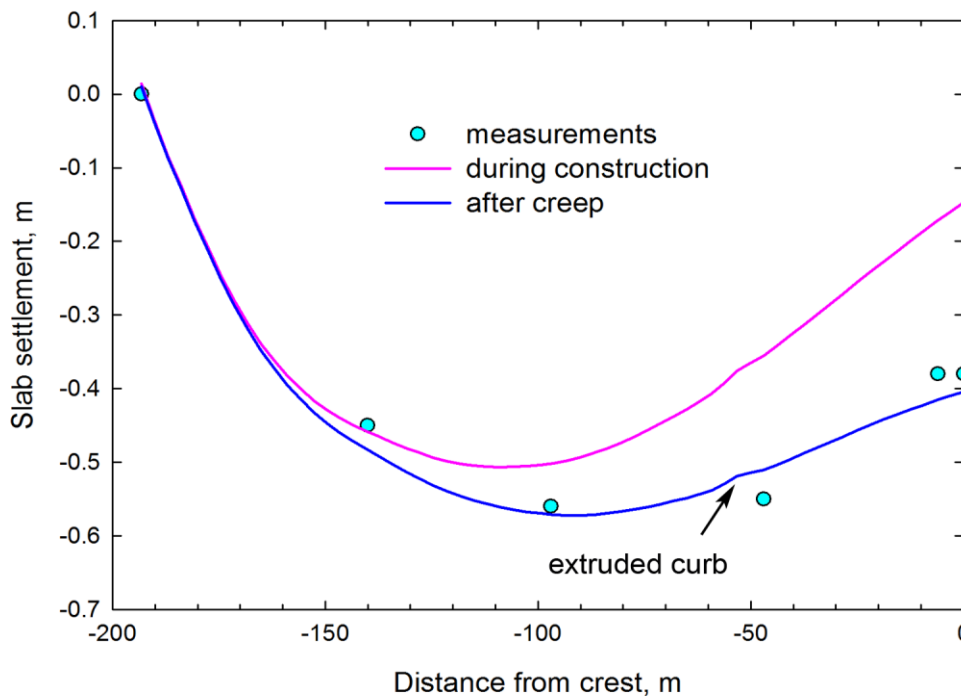
πλήρωση της λεκάνης, όπου οι καθιζήσεις της πλάκας κυμαίνονται από 0.00 m στα αντερείσματα έως 0.20 m στο κέντρο της πλάκας.



Σχήμα 6.18. Κατανομή της καθίζησης της πλάκας σκυροδέματος α) μετά την πλήρωση της λεκάνης χωρίς ερπυσμό και β) μετά την πλήρωση της λεκάνης και με ταυτόχρονη δράση ερπυσμού.

Στο Σχήμα 6.19 απεικονίζονται οι καθιζήσεις της πλάκας σκυροδέματος σε σχέση με την απόσταση από τη στέψη α) μετά την πλήρωση της λεκάνης, β) μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού και γ) από τις πραγματικές μετρήσεις που λήφθηκαν στο φράγμα Mohale (Johannesson and Tohlang, 2007). Η μπλε συμπαγής γραμμή παριστάνει τις καθιζήσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού, η ροζ συμπαγής γραμμή τις καθιζήσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και οι θαλασσί ανοιχτοί κύκλοι

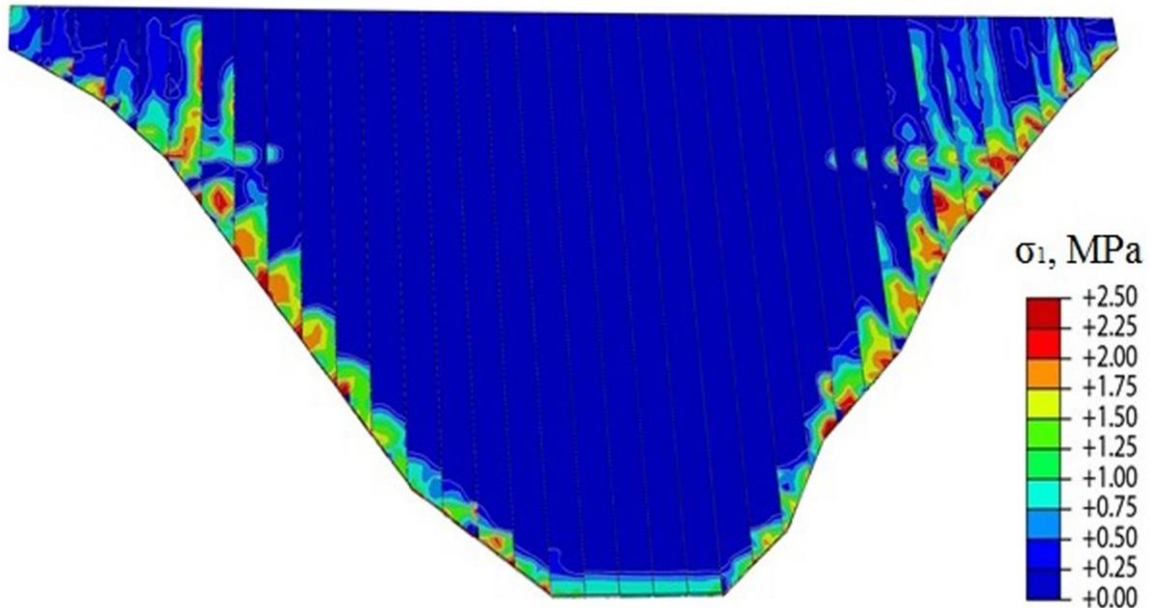
τις πραγματικές μετρήσεις του φράγματος. Παρατηρείται ότι οι πραγματικές μετρήσεις πλησιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προκύπτουν εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού. Μάλιστα διαφαίνεται και το σημείο στο οποίο τοποθετείται η υποκείμενη δοκός σκυροδέματος (extruded curb), το οποίο απεικονίζεται ως μια τοπική ανωμαλία της μπλε συμπαγούς καμπύλης (Σχήμα 6.19). Η προσέγγιση των αποτελεσμάτων λόγω της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού στις πραγματικές μετρήσεις του φράγματος, υποδηλώνουν ότι το πιο πιθανό σενάριο είναι αυτό της παρουσίας ερπυσμού της λιθορριπής κατά αλλά και μετά το στάδιο του θρυμματισμού, και συνεπώς στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση για την οποία έχει ληφθεί υπόψη ο ερπυσμός.



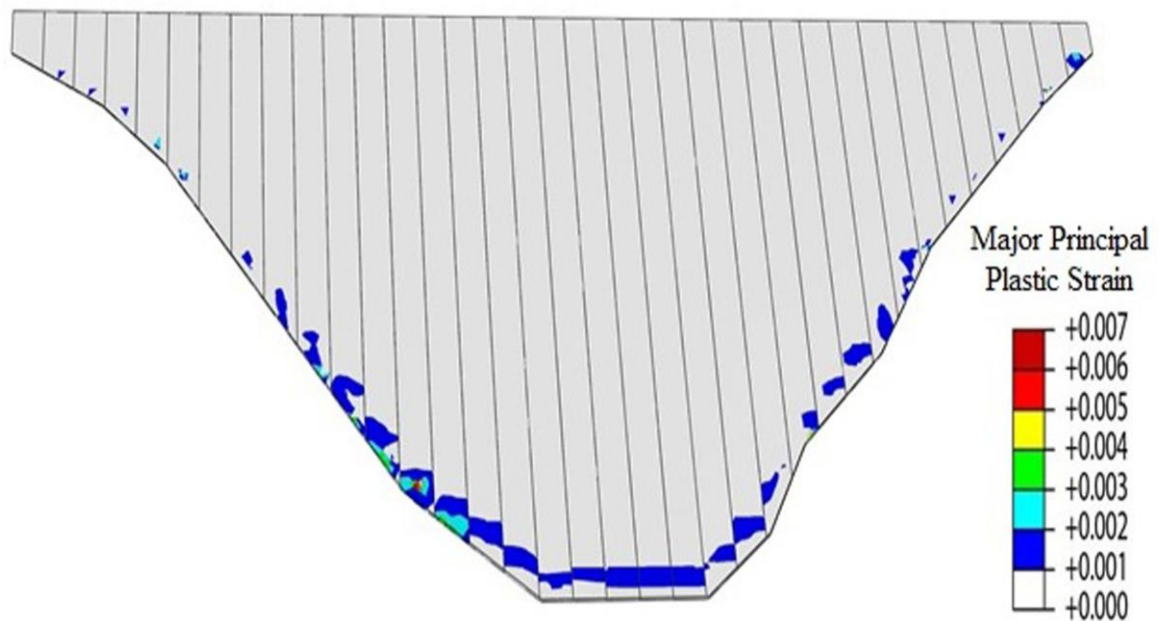
Σχήμα 6.19. Καθιζήσεις της πλάκας σκυροδέματος σε σχέση με την απόσταση από τη στέψη α) μετά την πλήρωση της λεκάνης χωρίς ερπυσμό, β) μετά την πλήρωση της λεκάνης και με ταυτόχρονη δράση ερπυσμού και γ) από τις πραγματικές μετρήσεις που λήφθηκαν στο φράγμα Mohale (Johannesson and Tohlang, 2007).

Στο Σχήμα 6.20, απεικονίζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 (μέγιστος εφελκυσμός) στην πλάκα σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού. Υψηλός εφελκυσμός αναπτύσσεται στην περιοχή των αντερεισμάτων και στον πόδα του φράγματος. Επίσης εμφανίζεται ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο σημείο όπου τοποθετείται η δοκός σκυροδέματος προς την πλευρά των αντερεισμάτων.

Στο Σχήμα 6.21 απεικονίζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού. Η κατανομή των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων δείχνει μικρές εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις κατά μήκος των αντρεισμάτων και του πόδα του φράγματος, οι οποίες σε κάποια τοπικά σημεία δείχνουν μεγαλύτερες εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις (και ρηγματώσεις), κυρίως στο αριστερό αντέρεισμα.

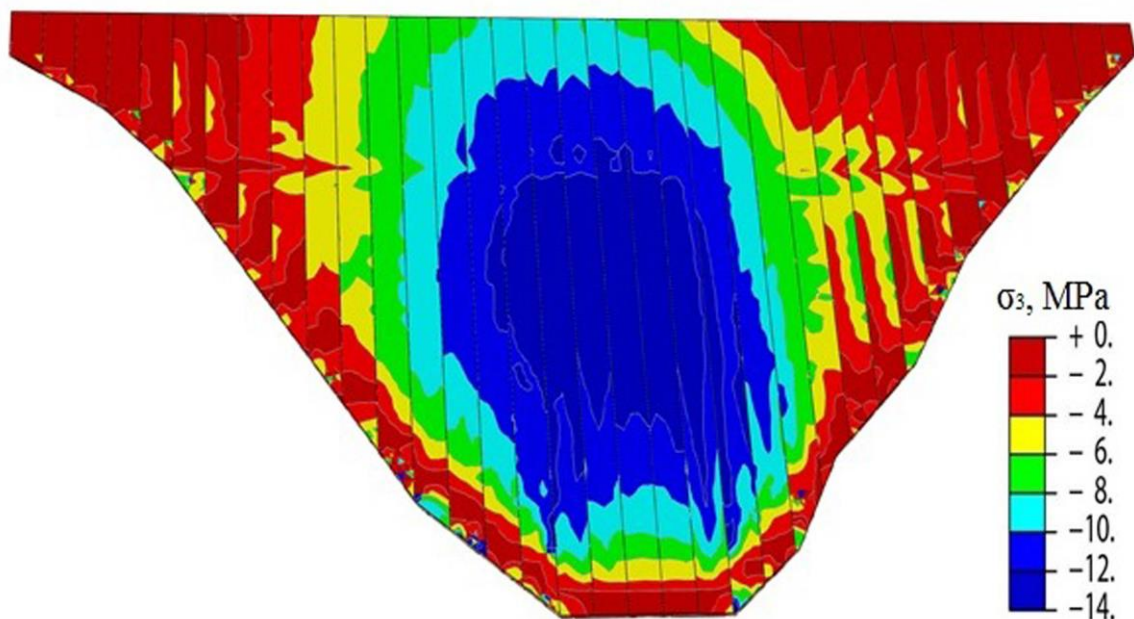


Σχήμα 6.20. Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 (μέγιστος εφελκυσμός) στην πλάκα σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.



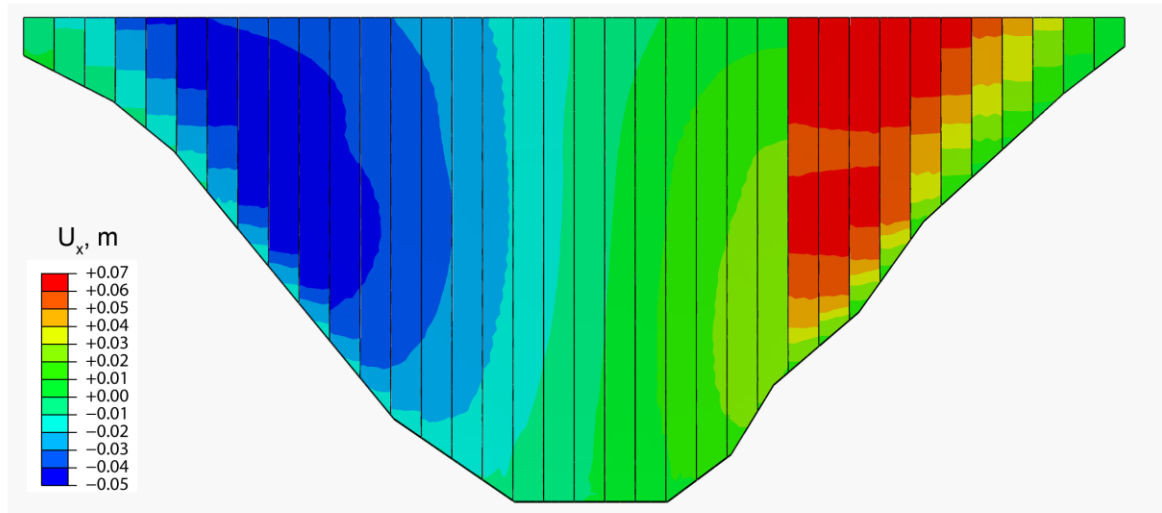
Σχήμα 6.21. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.

Στο Σχήμα 6.22 απεικονίζεται η κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 (που υποδηλώνει τη μέγιστη θλίψη) στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού. Οι μικρότερες κύριες τάσεις σ_3 που αναπτύσσονται στην πλάκα σκυροδέματος, εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού, εμφανίζουν μέγιστες τιμές θλίψης ίσες με -13.7 MPa. Αυτές εμφανίζονται στην κεντρική κυρίως περιοχή του φράγματος, ενώ το σημείο στο οποίο τοποθετείται η δοκός σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα εμφανές από την κατανομή των τάσεων στην περιοχή γύρω από το σημείο αυτό.



Σχήμα 6.22. Κατανομή της μικρότερης κύριας τάσης σ_3 στην πλάκα σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.

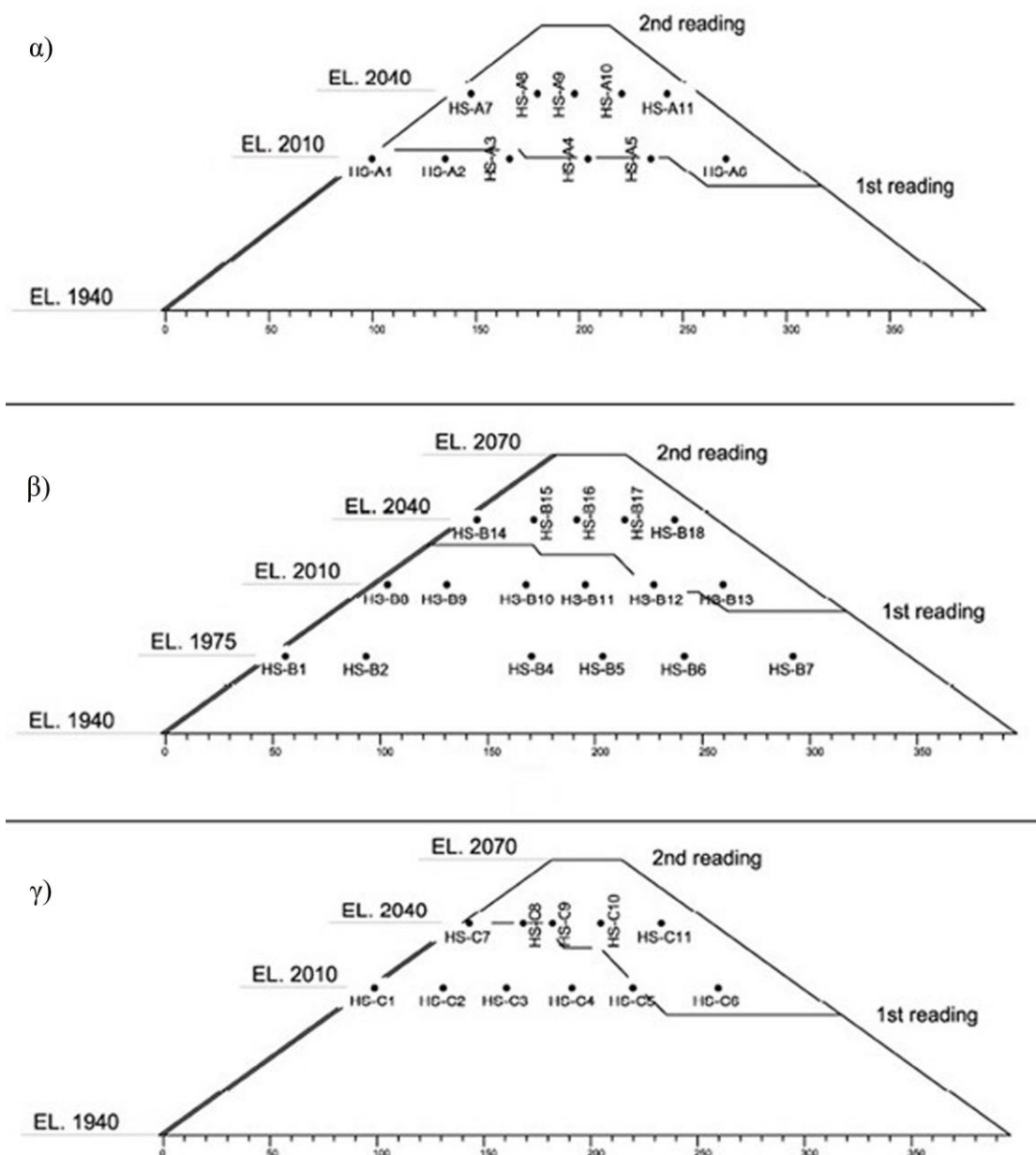
Στο Σχήμα 6.23, απεικονίζεται η κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού. Η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση U_x είναι ίση με 0.06 m κι εμφανίζεται στο δεξιό της πλάκας σκυροδέματος κοντά στην στέψη.



Σχήμα 6.23. Κατανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x στην πλάκα μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού.

6.4 Συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τις πραγματικές μετρήσεις στο φράγμα.

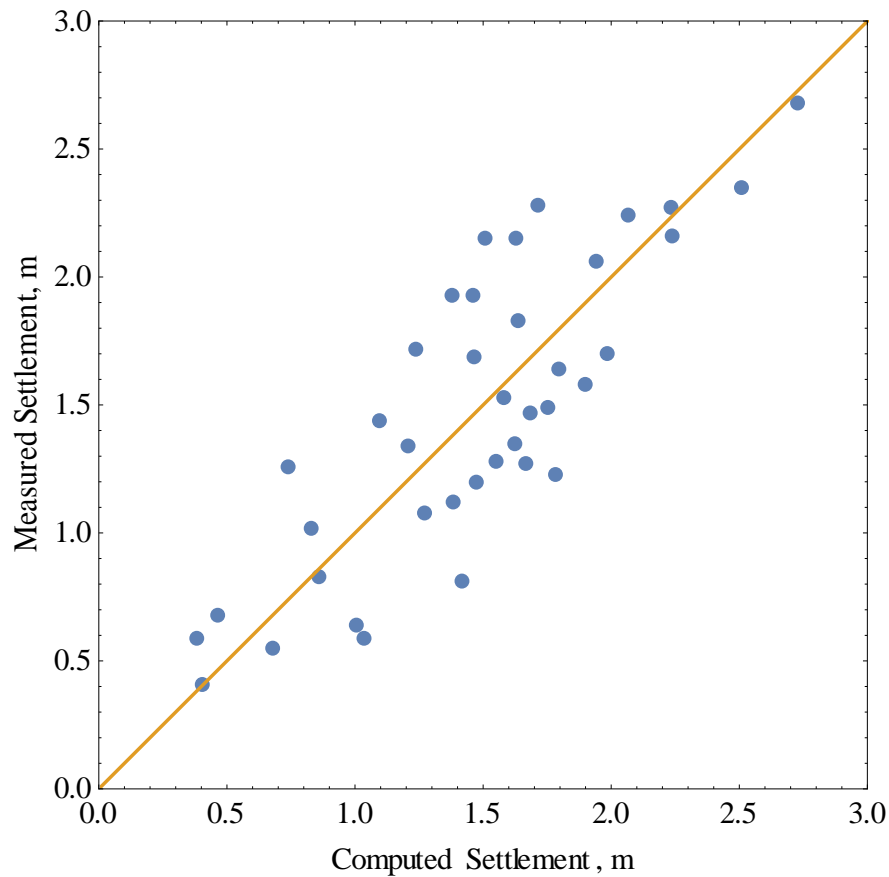
Στο Σχήμα 6.24, παρουσιάζεται η θέση των διαφορετικών οργάνων μέτρησης καθίζησης, κατά μήκος των διατομών A, B, C που υποδεικνύονται στα Βήματα 6 και 13 στα Σχήματα 6.7 και 6.8, αντίστοιχα. Οι αναγνώσεις των μετρήσεων που λήφθηκαν σε αυτά τα όργανα, έγιναν σε δύο διαφορετικά στάδια κατασκευής (Marulanda and Anthiniac, 2009), τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.24. Οι καθιζήσεις στο τέλος της κατασκευής που προβλέπονται από την αριθμητική ανάλυση καθώς επίσης και οι καθιζήσεις στο τέλος της κατασκευής από τα πειραματικά αποτελέσματα στις αντίστοιχες θέσεις αναγράφονται στον Πίνακα 6.6. Από τη συσχέτιση των υπολογιστικών καθιζήσεων και των πραγματικών μετρήσεων στο τέλος της κατασκευής (δεύτερη ανάγνωση) η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.25, διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια σχετικά εύλογη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Κάποιες μεγάλες αποκλίσεις φαίνεται να υπάρχουν κυρίως στα σημεία εκείνα όπου υπάρχει η ζώνη 2B, η δοκός σκυροδέματος και η στάθμη 2010. Οι διαφορές που υπάρχουν αποδίδονται εν μέρει στο γεγονός ότι κατά την αριθμητική προσομοίωση κάποια επιμέρους υποστάδια της εναπόθεσης της λιθορριπής παραλείπονται, λόγω των δυσκολιών στη διακριτοποίηση, καθώς και στο ότι η τοποθέτηση της ζώνης 2B και της υποκείμενης δοκού σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε στο τέλος της κατασκευής, αντί τμηματικά με την εναπόθεση κάθε στρώσης.



Σχήμα 6.24. Τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης καθίζησης α) στο αριστερό αντέρεισμα, β) στην κεντρική περιοχή και γ) στο δεξί αντέρεισμα (Marulanda and Anthiniac, 2009.)

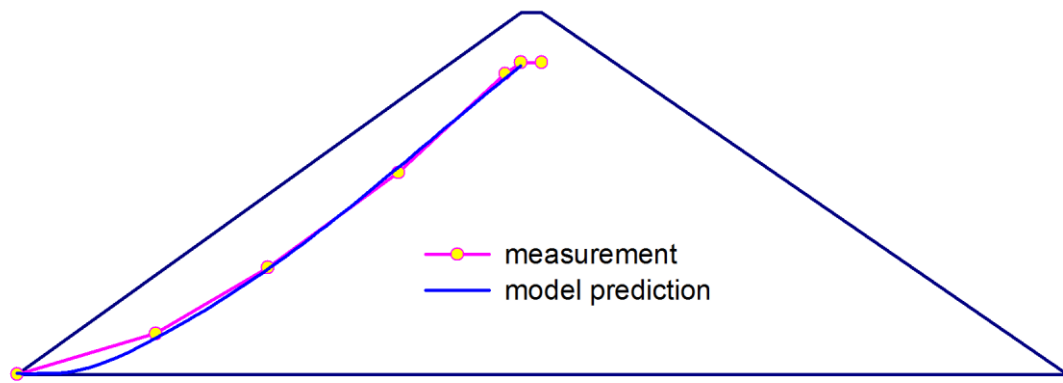
Πίνακας 6.6. Καθιζήσεις (m) στο τέλος της κατασκευής στις θέσεις μέτρησης από την αριθμητική ανάλυση και μετρήσεις των οργάνων στη 2^η ανάγνωση (Marulanda and Anthiniac, 2009).

Αριθμός Μετρήσεων	Θέση Μέτρησης	Καθιζήσεις (m) από αριθμητική ανάλυση	Καθιζήσεις (m) από μετρήσεις οργάνων στη 2 ^η ανάγνωση
1	A1	-0.390	-0.41
2	A2	-0.971	-0.64
3	A3	-1.371	-0.81
4	A4	-1.569	-1.35
5	A5	-1.694	-1.49
6	A6	-1.168	-1.34
7	A7	-0.716	-1.26
8	A8	-1.336	-1.12
9	A9	-1.626	-1.47
10	A10	-1.527	-1.53
11	A11	-1.422	-1.2
12	B1	-0.447	-0.68
13	B2	-1.058	-1.44
14	B4	-1.579	-1.83
15	B5	-1.655	-2.28
16	B6	-1.875	-2.06
17	B7	-1.410	-1.93
18	B8	-0.829	-0.83
19	B9	-1.609	-1.27
20	B10	-2.159	-2.27
21	B11	-2.424	-2.35
22	B12	-2.634	-2.68
23	B13	-1.994	-2.24
24	B14	-1.002	-0.59
25	B15	-1.736	-1.64
26	B16	-2.162	-2.16
27	B17	-1.919	-1.7
28	B18	-1.833	-1.58
29	C1	-0.371	-0.59
30	C2	-0.799	-1.02
31	C3	-1.195	-1.72
32	C4	-1.456	-2.15
33	C5	-1.573	-2.15
34	C6	-1.332	-1.93
35	C7	-0.657	-0.55
36	C8	-1.228	-1.08
37	C9	-1.414	-1.69
38	C10	-1.721	-1.23
39	C11	-1.497	-1.28



Σχήμα 6.25. Συσχέτιση των καθιζήσεων από την αριθμητική προσομοίωση και των πραγματικών μετρήσεων στη 2^η ανάγνωση στο τέλος της κατασκευής (Marulanda and Anthiniac, 2009).

Στο Σχήμα 6.26, καθώς επίσης και στο Σχήμα 6.19, απεικονίζονται οι συγκρίσεις των προβλεπόμενων καθιζήσεων εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού από την αριθμητική προσομοίωση και των πραγματικών καθιζήσεων μετά την πλήρωση της λεκάνης. Με τη μπλε συμπαγή γραμμή παριστάνονται οι προβλέψεις του μοντέλου, ενώ με τη ροζ οι αντίστοιχες μετρήσεις. Οι κύκλοι ανταποκρίνονται στις πραγματικές τιμές καθιζήσεων (βλ. Σχήμα 11, Johannesson and Tohlang, 2007). Παρατηρείται ότι ανάμεσα στις πραγματικές μετρήσεις των καθιζήσεων λόγω πλήρωσης της λεκάνης και στις προβλέψεις του μοντέλου για καθιζήσεις εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία.



Σχήμα 6.26. Σύγκριση των προβλέψεων καθιζήσεων και των πραγματικών καθιζήσεων εξαιτίας της πλήρωσης της λεκάνης και του ερπυσμού.

Οι Johannesson και Tohlang (2007), αναφέρουν μέγιστη θλιπτική τάση για την πλάκα 21 από μετρήσεις, περίπου ίση με -24 MPa (βλ. Σχήμα 41, Johannesson and Tohlang, 2007). Στις αναλύσεις του μοντέλου η μέγιστη θλιπτική τιμή της τάσης είναι ίση με -13.7 MPa και κατανέμεται στο κεντρικό τμήμα της πλάκας σκυροδέματος, το οποίο συμπεριλαμβάνει και την πλάκα 21 (Σχήμα 6.22).

Στα Σχήματα 6.20 και 6.21 απεικονίζονται οι αναλύσεις του μοντέλου για την κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 (μέγιστος εφελκυσμός) στην πλάκα σκυροδέματος μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού και την κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις μετά την πλήρωση της λεκάνης και του ερπυσμού. Η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται κυρίως στην περιοχή των αντερεισμάτων, ενώ υπάρχει και η παρουσία μιας ελαφρώς αύξησης της σ_1 τάσης στην περιοχή όπου τοποθετείται η δοκός σκυροδέματος. Η μέγιστη εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση κατανέμεται στην περιοχή των αντερεισμάτων και στον πόδα και είναι ίση με 0.001, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της στο αριστερό αντέρεισμα σε τοπικά σημεία ίση με 0.007.

Από τις αναλύσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, και παρά τη γενική συμφωνία στις καθιζήσεις κατασκευής και πλήρωσης λεκάνης, δεν προβλέπεται ρηγμάτωση ανάμεσα στις πλάκες 17 και 18, ούτε στο σημείο όπου υπάρχει η δοκός σκυροδέματος, όπως πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχα στο πραγματικό φράγμα. Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στις συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων και των πραγματικών μετρήσεων, αποδίδονται πιθανότατα σε κάποιες αποκλίσεις στον τρόπο σταδιακής κατασκευής/φόρτισης της αριθμητικής προσομοίωσης σε σχέση με την πραγματική υφιστάμενη κατασκευή του φράγματος.

Μία πιο αναλυτική, σε βάθος και μακροσκοπική ανάλυση για την αστοχία του φράγματος Mohale με περισσότερα αποτελέσματα και συγκρίσεις θα πραγματοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο.

6.5 Συμπεράσματα.

- Η ακριβής αριθμητική προσομοίωση ενός φράγματος CFRD με την πραγματική υφιστάμενη κατάσταση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ορθή διεξαγωγή και σύγκλιση των αποτελεσμάτων ανάλυσης.
- Η κατασκευή ενός φράγματος CFRD προϋποθέτει μια συγκεκριμένη αλληλουχία. Η τοποθέτηση της πλάκας σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται μετά την εναπόθεση της λιθορριπής κι αφού έχουν αρχίσει να υποχωρούν τα φαινόμενα ερπυσμού. Ο ερπυσμός της λιθορριπής θα πρέπει επίσης να είναι αρκετά μικρός για να αποφευχθούν υπερβολικές μακροπρόθεσμες καθιζήσεις και συνεπώς ενδεχόμενες ρηγματώσεις στην πλάκα σκυροδέματος.
- Η παρουσία της προεξέχουσας δοκού (extruded curb) δυσχέρανε τη συμπεριφορά του φράγματος.
- Στα στάδια κατασκευής του φράγματος θα πρέπει να λαμβάνονται πραγματικές μετρήσεις και να συγκρίνονται με τις προβλεπόμενες για ορθή παρακολούθηση της συμπεριφοράς του φράγματος και αποφυγή μελλοντικών προβλημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη συμπερασμάτων.

Μια καινούρια μεθοδολογία η οποία βελτιώνει σημαντικά την αριθμητική ανάλυση των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος παρουσιάστηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Η μεθοδολογία βασίστηκε στο προχωρημένο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο του Lade, το οποίο χρησιμοποιεί ισοτροπική κράτυνση και έχει αναπτυχθεί βασισμένο σε σημαντικό αριθμό πειραματικών δεδομένων υλικών των οποίων η αντοχή εξαρτάται από την τριβή, όπως η άμμος, η άργιλος, το σκυρόδεμα και ο βράχος. Το συνολικό πλαστικό έργο (διατμητικών και ογκομετρικών παραμορφώσεων) χρησιμοποιείται ως παράμετρος κράτυνσης για να ορίσει τη θέση και το σχήμα της επιφάνειας διαρροής. Το καταστατικό προσομοίωμα έχει τη δυνατότητα να εκφράσει με ρεαλιστικό τρόπο τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης και τη διασταλτικότητα των υλικών, με κατάλληλη σύνδεση των ογκομετρικών και διατμητικών παραμορφώσεων σε μία πολύ ευρεία περιοχή μεταβολής της περιβάλλουσας τάσης. Επίσης προσομοιώνει με ρεαλιστικό τρόπο την εξάρτηση της δυσκαμψίας του υλικού από την εντατική κατάσταση, λαμβάνοντας υπόψη τη συνεχή μεταβολή της δυσκαμψίας κατά την κατασκευή και φόρτιση του φράγματος.

Το καταστατικό προσομοίωμα του Lade βελτιώθηκε με μία απλή εφαρμογή της βαθμίδας πλαστικότητας με στόχο τον έλεγχο και περιορισμό των τοπικών αριθμητικών προβλημάτων σύγκλισης. Στην συνέχεια, το τροποποιημένο προσομοίωμα ενσωματώθηκε στο γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS για αριθμητική ανάλυση τρισδιάστατων προβλημάτων. Η ενσωμάτωση έγινε με την βοήθεια μίας ειδικής υπορουτίνας για ενσωμάτωση καταστατικών σχέσεων υλικών που καθορίζεται από το χρήστη.

Η νέα μεθοδολογία εφαρμόστηκε για την αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς υψηλών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Στόχος της διερεύνησης είναι η βαθύτερη κατανόηση της επίδρασης του ύψους του φράγματος και της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην επιτελεστικότητα φραγμάτων με ανάντη πλάκα

σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκαν τρία φράγματα λιθορριπής με ύψη 100, 200 και 300 m, αντίστοιχα, κατασκευασμένα σε στενές κοιλάδες τραπεζοειδούς σχήματος. Το κάθε φράγμα κατασκευάστηκε με δύο διαφορετικά υλικά λιθορριπής, ένα εξαιρετικής ποιότητας και ένα μέτριας ποιότητας, από διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα λιθορριπής. Συγκεκριμένα, για βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν πειράματα σε μεγάλα δοκίμια λιθορριπής από τα φράγματα Oroville και Pyramid, αντίστοιχα. Οι προβλεπόμενες καθιζήσεις κατασκευής του φράγματος και οι βυθίσεις της πλάκας σκυροδέματος κατά την πλήρωση της λεκάνης συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις από ένα μεγάλο αριθμό υπαρκτών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Στη συνέχεια, το προχωρημένο αριθμητικό ελαστοπλαστικό προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η αστοχία της ανάντη πλάκας σκυροδέματος του φράγματος Mohale λόγω ισχυρού θρυμματισμού της λιθορριπής βασάλτη κατά την πλήρωση της λεκάνης. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε μία σχετικά απλουστευμένη εξέλιξη του θρυμματισμού του βασάλτη, ενώ μία περισσότερο λεπτομερής προσομοίωση της κατάρρευσης του υλικού θα διερευνηθεί σε άλλη δημοσίευση.

Τα βασικά συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την ερευνητική εργασία της παρούσας διατριβής είναι τα ακόλουθα:

1. Το καταστατικό προσομοίωμα του Lade, το οποίο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λιθορριπής, επιτρέπει μια πολύ ρεαλιστική προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων επί δοκιμίων λιθορριπής από την άποψη της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης και ογκομετρικών παραμορφώσεων. Το γεγονός αυτό είναι προϋπόθεση για μια ρεαλιστική πρόβλεψη των καθιζήσεων της λιθορριπής σε ολόκληρο το σώμα του επιχώματος για υψηλά φράγματα, και παρέχει τη δυνατότητα μίας ακριβούς ανάλυσης της συμπεριφοράς της ανάντη πλάκας σκυροδέματος, η οποία αποτελεί το πλέον κρίσιμο στοιχείο για την επιτελεσματικότητα και ασφάλεια του φράγματος.
2. Η χρήση της βαθμίδας πλαστικότητας ως ένα προαιρετικό εργαλείο για αποφυγή αριθμητικών δυσκολιών σύγκλισης σε συγκεκριμένα στοιχεία που υπόκεινται

υψηλή διάτμηση, έχει βρεθεί να είναι αρκετά αποτελεσματική στη μείωση υπολογιστικού χρόνου, χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

3. Συγκρίσεις καθιζήσεων κατασκευής μεταξύ αριθμητικών προβλέψεων και μετρήσεων από ένα μεγάλο αριθμό υπαρκτών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος σε στενές κοιλάδες καταδεικνύουν μία αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ των προβλέψεων και μετρήσεων. Το γεγονός αυτό αποτελεί μία επιπλέον έμμεση επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του καταστατικού προσομοιώματος της λιθορριπής, πέραν της ορθής λειτουργίας του σε επίπεδο προσομοίωσης εργαστηριακών πειραματικών δοκιμών.
4. Για φράγματα ύψους μεγαλύτερου των 150 m, τα αποτελέσματα αυτής της διατριβής υποδηλώνουν ότι οι κατασκευαστικές καθιζήσεις αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση του λόγου κενών και του ύψους, ακόμη και για στενές κοιλάδες. Η χρήση εξαιρετικής ποιότητας λιθορριπής με λόγους κενών περίπου $e=0.2$ επιτρέπει την ανάπτυξη πολύ μικρών κατασκευαστικών καθιζήσεων, ακόμη και στην περίπτωση πολύ υψηλών φραγμάτων (300 m). Αντίθετα, για φράγματα ύψους μικρότερου των 120 m, η επίδραση του λόγου κενών e , ο οποίος προσδιορίζει την ποιότητα της λιθορριπής, είναι σχετικά πιο μικρή.
5. Η χρήση εξαιρετικής ποιότητας λιθορριπής με λόγους κενών περίπου 0.2 αποφέρει πολύ μικρές βυθίσεις πλάκας ακόμη και στην περίπτωση του φράγματος ύψους 300 m κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης και μετά την ολοκλήρωση των μακροπρόθεσμων καθιζήσεων.
6. Κατά την πλήρωση της λεκάνης αναπτύσσονται εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις στην πλάκα σκυροδέματος σε μια ζώνη εύρους περίπου 20 m κοντά στο αντέρεισμα, σε συμφωνία με υπάρχουσες καταγραφές πραγματικής συμπεριφοράς. Στα υψηλότερα και πιο συμπιεστά φράγματα λιθορριπής αυτές οι εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις ή ρηγματώσεις είναι μεγαλύτερες.
7. Οι θλιπτικές τάσεις στην πλάκα σκυροδέματος φτάνουν στη μέγιστη τιμή περίπου στο 40% του ύψους κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της λεκάνης, αλλά μπορούν

να φτάσουν και σε μια μεγαλύτερη τιμή κοντά στη στέψη υπό την επίδραση μακροπρόθεσμων καθιζήσεων. Για τη λιθορριπή εξαιρετικής ποιότητας, οι θλιπτικές τάσεις παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα σε σύγκριση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αντίθετα για τη λιθορριπή μέτριας ποιότητας, οι θλιπτικές τάσεις γίνονται πολύ υψηλές, ειδικά μετά από μακροπρόθεσμες καθιζήσεις. Σε μια τέτοια περίπτωση, η χρήση κανονικού σκυροδέματος (π.χ. μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $f_c = 25 \text{ MPa}$) για την πλάκα θα μπορούσε να οδηγήσει σε θλιπτική αστοχία. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε ικανοποιητική ποιοτική συμφωνία με τη συμπεριφορά χαρακτηριστικών περιπτώσεων φραγμάτων λιθορριπής στα οποία παρατηρήθηκε αστοχία στην πλάκα σκυροδέματος.

8. Οι οριζόντιες μετακινήσεις της πλάκας, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την υδατοστεγανότητα των κατακόρυφων και περιμετρικών αρμών, γίνονται μέγιστες στην περιοχή του αντερείσματος στη στέψη του φράγματος. Για το φράγμα των 300 m και για εξαιρετικά συμπακνωμένη λιθορριπή, οι μακροπρόθεσμες καθιζήσεις μπορούν να προκαλέσουν διαφορική μετακίνηση που πλησιάζει τα όρια υδατοστεγανότητας. Για το φράγμα ύψους 200 m μέτριας λιθορριπής αυτές οι μετακινήσεις φτάνουν το όριο υδατοστεγανότητας, ενώ για υψηλότερα φράγματα γίνονται απαγορευτικές.
9. Τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος που κατασκευάζονται από εξαιρετικής ποιότητας και καλής συμπύκνωσης λιθορριπή, από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και υψηλή ικανότητα υδατοστεγανότητας, αναμένονται να παρουσιάσουν πολύ καλή συνολική συμπεριφορά μέχρι και το ύψος των 300 m. Αντίθετα, ο σχεδιασμός των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος από μέτριας ποιότητας συμπιεστή λιθορριπή, σε ύψη ίσα ή μεγαλύτερα των 200 m δεν συνιστάται.
10. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης καταδεικνύουν ότι το πάχος της πλάκας σκυροδέματος έχει μικρή επίδραση στην πλαστική παραμόρφωση της πλάκας λόγω εφελκυστικών τάσεων. Σε αντίθεση, η αύξηση της διαμέτρου του

οπλισμού είναι δυνατόν να μειώσει σημαντικά την εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση.

11. Η εφαρμογή του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος Lade για την ανάλυση της αστοχίας του φράγματος Mohale παρουσιάζει μία σχετική συμφωνία μεταξύ προβλέψεων και επιτόπου μετρήσεων αναφορικά με τις καθιζήσεις κατασκευής και την καθίζηση της πλάκας. Όμως η πολυπλοκότητα του τρόπου κατασκευής και η ιδιαιτερότητα του αιφνίδιου τρόπου κατάρρευσης της δυσκαμψίας του υλικού λόγω θρυμματισμού της λιθορριπής οδηγούν σε κάποιες αποκλίσεις σε άλλες παραμέτρους.
12. Η εμφάνιση του ερπυσμού παίζει σημαντικό ρόλο στη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων των αναλύσεων. Ο ερπυσμός της λιθορριπής θα πρέπει να είναι αρκετά μικρός για να αποφευχθούν υπερβολικές μακροπρόθεσμες καθιζήσεις και συνεπώς ενδεχόμενες ρηγματώσεις στην πλάκα σκυροδέματος. Η τοποθέτηση της πλάκας σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται μετά την εναπόθεση της λιθορριπής και αφού έχουν αρχίσει να υποχωρούν τα φαινόμενα ερπυσμού.
13. Η τοποθέτηση της βοηθητικής δοκού σκυροδέματος (extruded curb) δυσχεραίνει τη συμπεριφορά της ανάντη πλάκας του φράγματος και είναι δυνατόν να προκαλέσει την εμφάνιση ρηγματώσεων στο σημείο αυτό.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κατά την τελευταία δεκαετία, για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών για νερό και παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδιάζονται και κατασκευάζονται όλο και περισσότερα πιο υψηλά φράγματα τύπου CFRD ($H \geq 150$ m) σε διάφορα μέρη του κόσμου. Π.χ. το φράγμα Shuibuya (Κίνα) ύψους 233 m και το φράγμα Nuoazhadu ύψους 261.5 m (Κίνα). Αυτού του είδους τα φράγματα αποτελούν ίσως και τον πιο οικονομικό τύπο φραγμάτων, λόγω της οικονομίας υλικών και της σχετικά μικρής διάρκειας κατασκευής, με αποτέλεσμα να είναι αρκετά μειωμένο το κόστος κατασκευής τους. Η παγκόσμια εμπειρία έχει δείξει ότι πολύ καλά κατασκευασμένα CFRDs παρουσιάζουν μια πολύ καλή συμπεριφορά υπό στατική και δυναμική φόρτιση. Σε μερικές περιπτώσεις, ωστόσο, ορισμένα προβλήματα έχουν προκύψει, τα οποία απαιτούν μια βαθύτερη

κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Όλες αυτές οι πρόσφατες εμπειρίες καθιστούν εμφανή την ανάγκη ο σχεδιασμός των CFRDs να ξεφύγει από τον έντονο εμπειρισμό και να συμπεριλάβει νέες μεθοδολογίες αριθμητικής προσομοίωσης που σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές και τις επιτόπου μετρήσεις, να επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και την αποτίμηση της επιρροής των σημαντικών παραμέτρων. Η ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής είναι ένα βασικό ζήτημα για την ανάλυση και το σχεδιασμό των CFRDs. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η αριθμητική ανάλυση των CFRDs έχει βασιστεί σε απλοποιημένα καταστατικά μοντέλα για λιθορριπή.

Δεδομένου ότι η εμπειρία της συμπεριφοράς πολύ υψηλών φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος είναι περιορισμένη, η δημιουργία μιας καινούριας μεθοδολογίας για αυστηρή αριθμητική ανάλυση των φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος που παρουσιάζεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για μελλοντική έρευνα και χρήση. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της λιθορριπής με τη χρήση του συγκεκριμένου ελαστοπλαστικού μοντέλου του Lade, επιτρέπει τη ρεαλιστική προσομοίωση πειραματικών αποτελεσμάτων από την άποψη της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης, ογκομετρικών παραμορφώσεων και κατασκευαστικών καθιζήσεων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς της λιθορριπής σε ολόκληρο το σώμα του επιχώματος ακόμη και για τα πολύ υψηλά φράγματα. Επίσης από τις αναλύσεις στην πλάκα σκυροδέματος προκύπτουν σημαντικές διαπιστώσεις για την πρόβλεψη ρηγματώσεων στην πλάκα, κι αυτό από μόνο του παίζει μεγάλο ρόλο προκειμένου να προσδιορισθούν οι κρίσιμες περιοχές και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις με το συγκεκριμένο μοντέλο έχουν συγκριθεί με καταγεγραμμένες συμπεριφορές και μετρήσεις υπαρχόντων φραγμάτων CFRDs και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έρευνα και ως οδηγός για κατασκευή μελλοντικών υψηλών φραγμάτων CFRDs. Είναι γεγονός ότι η κατασκευή φραγμάτων CFRDs βασίζεται στην υπάρχουσα εμπειρία και σε βιβλιογραφικές αναφορές. Ενδεχομένως η χρήση του ελαστοπλαστικού μοντέλου σε περισσότερα υφιστάμενα φράγματα CFRDs και οι συγκρίσεις των αναλύσεών τους με πραγματικές μετρήσεις να αποτελεί μια ενδιαφέρουσα κι αξιοσημείωτη διερεύνηση για μελλοντική εφαρμογή.

Με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της προτεινόμενης μεθόδου, η παρούσα έρευνα είναι δυνατόν να επεκταθεί στις εξής κατευθύνσεις:

1. Βελτίωση της απλουστευμένης μεθόδου βαθμίδας πλαστικότητας ώστε η ανάλυση να οδηγεί σε αποτελέσματα στις ζώνες έντονης διατμητικής παραμόρφωσης, τα οποία θα είναι ανεξάρτητα από τον μορφή διακριτοποίησης του καννάβου.
2. Επέκταση των καταστατικών σχέσεων για την προσομοίωση της εξέλιξης του φαινομένου του ερπυσμού της λιθορριπής και την καλύτερη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πλάκας σκυροδέματος.
3. Επέκταση των καταστατικών σχέσεων για την προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς του κοκκώδους υλικού με εφαρμογή είτε κινηματικής κράτυνσης ή μίας απλουστευμένης μεθόδου με βάση το προσομοίωμα του Lade.
4. Επανεξέταση της αστοχίας του φράγματος Mohale με περισσότερο λεπτομερή προσομοίωση της αιφνίδιας κατάρρευσης του υλικού της λιθορριπής υπό την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης, καθώς και πιο λεπτομερή προσομοίωση της πλήρους διαδικασίας κατασκευής και φόρτισης. Επίσης επανεξέταση με λεπτομερή αριθμητική προσομοίωση της αστοχίας άλλων φραγμάτων (όπως π.χ. το Campos Novos, το Barra Grande, κλπ) καθώς και της εξαιρετικής συμπεριφοράς φραγμάτων όπως το φράγμα El Cajon.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABAQUS (2014). *Users' Manual*. Simulia, Providence, RI, USA.
- Abbo, A.J. and Sloan, S.W. (1993). *Backward Euler and subincrementation schemes in computational plasticity*. In *Computational Plasticity*, Valliapan et al. (eds). Balkema: Rotterdam.
- Acharya, A. and Bassani, J.L. (2000). Incompatibility and Crystal Plasticity. *J.Mech.Phys.Solids*, 48, 1565–1595.
- Acharya, A. and Bassani, J.L. (1996). *On non-local flow theories that preserve the classical structure of incremental boundary value problems*. In Pineau, A., Zaoui, A. (Eds.), *IUTAM Symposium on Micromechanics of Plasticity and Damage of Multiphase Materials*. Kluwer Academic Publishers, pp. 3–9.
- Acharya, A. and Bassani, J.L. (1995). *Incompatible lattice deformations and crystal plasticity*. In Ghoniem, N.(Ed.), *Plastic and Fracture Instabilities in Materials*, AMD-Vol. 200=MD-Vol.57.ASME: New York, pp.75–80.
- Alsaleh, M. (2004). *Numerical modeling of strain localization in granular materials using cosserat theory enhanced with microfabric properties*. Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA.
- Amaya, F. and Marulanda, A. (1985). *Golilas Dam—design, construction and performance*. In *Concrete Face Rockfill Dams, Design, Construction and Performance*, (eds) Cooke, J.B. and Sherard, J.L. ASCE Geotechnical Engineering Division, 98–120.
- ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams) (1991). *Guidelines on Concrete-Faced Rockfill Dams*.
- Barton, N., and Kjaernsli, B. (1981). Shear Strength of Rockfill. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 107, GT7, 873-891.
- Bassani, J.L. (2001). Incompatibility and a simple gradient theory of plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49, 1983-1996.
- Bassani, J.L., Van der Giessen, E. and Needleman, A. (2001). Size effects in composites: a comparison between nonlocal plasticity and discrete dislocation predictions. *Int.J.Solids Struct*, 38, 833–853.
- Bassani, J.L. and Wu, T.-Y. (1991). Latent hardening in single crystals. *Proc.Roy.Soc.London, A*, (435), 21–41.

- Borges, J.M. (2009). *Barra Grande hydropower plant design, construction and performance. Main Dams in Brasil III, Report*, <http://www.cbdb.org.br/documentos/mbdiii/Barra%20grande.pdf>.
- Carreira, D.J. and Chu, K.H. (1985). Stress-strain relationship for plain concrete in compression. *ACI Journal*, 82(6), 797-804.
- Carter, P., Fitzpatrick, M.D. and Giudici, S. (2000). *J. Barry Cooke and Australian dam engineering. J. Barry Cooke Volume, Concrete face rockfill dams*, Chinese Committee on Large Dams. Beijing.
- Casinader, R.J. and Watt, R.E. (1985). *Concrete face rockfill dams of the Winneke Project, in Concrete Face Rockfill Dams, Design, Construction and Performance*, editors Cooke, J.B. and Sherard, J.L. ASCE Geotechnical Engineering Division, 140–162.
- Chan, Q. and Zhang L.M. (2005). *Three dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturated-unsaturated seepage theory*. Published on the NRC Research Press Web site at <http://cgj.nrc.ca> on 6 April 2006.
- Chanh, N.V. (2005). Steel Fiber Reinforced Concrete. *JSCE-VIFCEA Joint Seminar on Concrete Engineering in Vietnam and Workshop*. Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam.
- Chen, H. (2008a). Consideration of dam safety after Wenchuan earthquake in China. *Proc. 14th World Conf. on Earthquake Engineering, Special Session S13, Seismic aspects of large embankment and concrete dams*, Beijing.
- Chen, S. (2008b). Impact of the “5.12” Wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rockfill dam and its analysis. *Proc. Int. Conf. on Dam Safety Management*, Nanjing.
- Chen, W.F and Mizuno, E. (1990). *Non-linear Analysis in Soil Mechanics*. Elsevier: New York.
- Chen, W.F and Han, D. J. (1988). *Plasticity for Structural Engineers*. Springer, New York.
- Chen, Z. (1993). Breaching of the Gouhou concrete face sand and gravel dam. *Symposium on high rockfill dams*. Beijing, October 1993.
- Cleveringa, H.H.M., Van der Giessen, E. and Needleman, A. (1997). Comparison of discrete dislocation and continuum plasticity predictions for a composite material. *Acta Mater*, 45, 3163–3179.
- Cooke, J.B. (2000). *The high CFRD. J. Barry Cooke Volume Concrete Face Rockfill Dams*. 20th ICOLD Congress. Beijing 2000, 1–4.

- Cooke, J.B. (1999). The development of today's CFRD dam. *Proceedings of the Second Symposium on Concrete Face Rockfill Dams*, Florianopolis, Brazil, Brazilian Committee on Dams. 3–11.
- Cooke, J.B. (1998). Empirical design of the CFRD. *Hydropower and Dams*, 5(6), 24–7.
- Cooke, J.B. (1997). The concrete face rockfill dam. *Seventeenth Annual USCOLD Lecture Series: Non-Soil Water Barriers for Embankment Dams*. San Diego. 117–132.
- Cooke, J.B. and Sherard, J.L. (1987). Concrete-face rockfill dams: II Design. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 10, 1113–1133.
- Cooke, J. B. (1984). Progress in Rockfill Dams, (18th Terzaghi Lecture), *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 110 (10), 1381-1414.
- Crisfield, M.A. (1991). *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*. Wiley: Chichester, U.K.
- Cruz, P.T., Materon, B. and Freitas, M. (2009). *Concrete Face Rockfill Dams*. CRC Press: The Netherlands.
- Dakoulas, P. (2012a). Nonlinear seismic response of tall concrete faced rockfill dams in narrow canyons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34, 11-24.
- Dakoulas, P. (2012b). Longitudinal vibrations of tall concrete faced rockfill dams in narrow Canyons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 44-58.
- Dakoulas, P., Thanopoulos, Y., and Anastassopoulos, K. (2008). Nonlinear 3D simulation of CFR dam construction and reservoir filling. *International Journal of Hydropower and Dams*, Issue 2, 95-101.
- Dakoulas, P. (2007). Messochora CFR Dam: Slab and Dam Performance During Reservoir Filling Based on 3D Nonlinear Analysis. *Research Report for the Public Power Corporation*, University of Thessaly, Volos, Greece.
- Dormand, J.R. and Prince, P.J. (1980). A family of embedded Runge–Kutta formulae. *Journal of Computer Applied Mathematics*, 6, 19–26.
- Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K. and Mabry, P. (1980). *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses*. Report UCB/GT/80-01. Univ. of California. Berkeley, Ca, USA.
- Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *J. of Soil Mech. and Found. Engineering*, ASCE, 96(5), 1629-1653.
- Endginton, J., Hannant, D.J. and Williams, R.I.T. (1974). Steel fiber reinforced concrete. Current paper CP 69/74 Building research establishment Garston Watford.

- England, R. (1969). Error estimate for Runge–Kutta type solutions to systems of ordinary differential equations. *Computer Journal*, 12, 166–170.
- Ezeldin, A.S. and Balaguru, P.N. (1992). Normal and high strength fiber reinforced concrete under compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(4), 415–27.
- Fehlberg, E. (1970). Klassische Runge–Kutta formeln vierter und niedrigerer ordnung mit schrittweiten-kontrolle und ihre anwendungen auf w.armleitungs-probleme. *Computing*, 6, 61–71.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., and Foster, M. (2014). *Geotechnical Engineering of Dams, 2nd Ed.* CRC Press/Balkema: The Netherlands.
- Fell, R., Macgregor, J.P., Stapledon, D.H. and Bell. G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams.* Balkema, Leiden.
- Filho Marques, F. and Pinto, N. (2005). CFRD dam characteristics learned from experience. *Hydropower & Dams*, 12(1), 72–76.
- Fitzpatrick, M.D., Cole, B.A., Kinstler, F.L. and Knoop, B.P. (1985). Design of Concrete-Faced Rockfill Dams. *Proc. of the Symp. Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, ASCE, 410–434.
- Frossard, E., Hu, E.W., Dano, C. and Hicher, P.Y. (2012). Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects. *Géotechnique*, 62(5), 415–427.
- Gao, L.S., Luo, X., and Wen, S. (1993). Application of new nonlinear K–G model in FEM analysis of Xibeikou CFRD and its comparison with field measurements. *In Proc of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams.* Beijing, vol.1., pp.158–175.
- Gazetas, G. and Dakoulas, P. (1992). Seismic Analysis and Design of Rockfill Dams: State of the Art. *J. of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(1), 27–61.
- Giudici, S., Herweynen, R. and Quinlan, P. (2000). HEC experience in concrete faced rockfill dams—past, present and future. *Proceedings, International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams*, Beijing. ICOLD. 29–46.
- Gosschalk, E.M. and Kulasinghe, A.N.S. (1985). *Kotmale dam and observations on CFRD.* *In Concrete face rockfill dams-design, construction, and performance.* Edited by Cooke J.B., Sherard J.L. ASCE: New York, pp. 379–395.
- Gratwick, C., Johannenson, P., Tohlang, S., Tente, T. and Monapathi, N. (2000). Mohale Dam, Lesotho. *Proceedings of the International symposium on Concrete Faced Rockfill Dams*, 19–22 September 2000. Beijing, China.

- Guan, Z. (2009). Investigation of the 5.12 Wenchuan Earthquake damages to Zipingpu Water Control Project and an assessment of its safety state. *Science in China, Series E, Technological Sciences*, 52(4), 820-834.
- Guangtong, H. (2000). Technical study on crest overflow of concrete faced rockfill dams, *In Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams*. Beijing, pp. 283-291.
- Hattemleh, Q.A., Muhunthan, B. and Zbib, H. M. (2004). Gradient plasticity modelling of strain localization in granular materials. *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28, 465-481.
- Helwany, S. (2007). *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*. J. Wiley and Sons. New Jersey: USA.
- Hill, R. (1958). A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *J.Mech.Phys.Solids*, 6, 236–249.
- Humes, C. and Mauro, V. (2002). Design challenges and performance of Brazil's Machadinho CFRD. *Hydropower and Dams*, 9(4), 61-66.
- Hunter, G. and Fell, R. (2003). Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(10), 909-917.
- Hunter, G. (2003). *The pre- and post-failure deformation behavior of soil slopes*. Ph.D. thesis, Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney.
- Θανόπουλος, Ι. (2002). Σημειώσεις του μαθήματος “Φράγματα-Χωμάτινες κατασκευές”, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας.
- ICOLD (2010). *Concrete face rockfill dams: Concepts for design and construction*. International Commission on Large Dams. Paris. Bulletin 141.
- ICOLD Committee on numerical analysis on dams (2009). *10th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*. September 16-18, Paris, France.
- ICOLD (1989a). *Rockfill dams with concrete facing. State-of-the-art*. International Committee on Large Dams, Paris. Bulletin 70.
- ICOLD (1989b). *Tailings dam safety*. Guidelines. International Committee on Large Dams, Paris. Bulletin 74.
- Jakobsen, K.P. and Lade, P.V. (2002). Implementation algorithm for a single hardening constitutive model for frictional materials. *International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics*, 26, 661-681.

- Jakobsen, K.P. (1999). *Application of the single hardening model in the finite element program ABAQUS*. Geotechnical Engineering Group, Department of Civil Engineering, Aalborg University. Aalborg, Denmark.
- Jakobsen, K.P. and Praastrup, U. (1998). Drained triaxial tests on Eastern Scheldt sand. *Aalborg University Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9822.
- Janbu, N. (1963). Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests. *Proc. of the European Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, Germany, vol.4, 19-25.
- Johannesson, P. (2007a). Assessing the performance of high CFRDs: rockfill properties creep. Palmi Associates, USA. *Hydropower & Dams, Issue Five*, 120-127.
- Johannesson, P. (2007b). Modified zoning and compaction requirements for future high CFRDs. *Workshop on High Dam Know-how*, May 22-24, 2007, Yichang, China.
- Johannesson P. (2007c). Slab performance on a few CFRDS and suggested improvements in slab design. *Workshop on High Dam Know-how*, May 22-24, 2007, Yichang, China.
- Johannesson, P. and Tohlang, S. (2007). Lessons learned from Mohale. *International Water Power & Dam Construction*, 16-25.
- Johnston, C.D. (1982). Definition and measurement of flexural toughness parameters for fiber reinforced concrete. *Cem. Concr. Agg.* 1982.
- Johnston, C.D. (1974). *Steel fiber reinforced mortar and concrete. A review of mechanical properties*. In *fiber reinforced concrete ACI – SP 44 – Detroit*.
- Kim, M.K. and Lade, P.V. (1988). Single hardening constitutive model for frictional materials. I. plastic potential function. *Computers and Geotechnics*, 5, 307–324.
- Kim, M.K. and Lade, P.V. (1984). Modelling rock strength in three dimensions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 21, 21–33.
- Kim, Y.S. and Kim, B.T. (2008). Prediction of relative crest displacement of concrete-faced rockfill dams analysed using an artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, 35(6), 313-322.
- Knoop, B.P. and Lack, L.J. (1985). Instrumentation and performance of concrete faced rockfill dams in the Pieman River Power Development. *15th International Congress on Large Dams*. Lausanne, Q.56, R.58, pp. 1103-1120.
- Kondner, R.L. (1963). Hyperbolic Stress-Strain Response. Cohesive Soils. *J.of Soil Mech. And Found. Div.*, ASCE, 89, SMI, 115-143.
- Kulhawy, F. H., and Duncan, J.M. (1972). Stresses and Movements in Oroville Dam. *J.of Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 98, SM7, 653-665.

- Kulhawy, F.H. and Duncan, J.M. (1970). *Nonlinear Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Oroville Dam*. Geotech. Engineering Report No. TE-70-2. University of California. Berkeley, Ca, USA.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H.K. and Rusch, H. (1969). Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the American Concrete Institute*, 66, 656–666.
- Lade, P.V. and Jakobsen, K.P. (2002). Incrementalization of a single hardening constitutive model for frictional materials. *International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics*, 26, 647–659.
- Lade, P.V and Prabucki, M-J. (1995). Softening and preshearing effects in sand. *Soils and Foundations*, 35(4), 93–104.
- Lade, P.V. (1993). *Rock Strength Criteria: The Theories and the Evidence, Vol. I, Chapter 11. In Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice and Projects, Hudson JA, et al. (eds). Pergamon Press: Oxford, pp. 255–284.*
- Lade, P.V. and Kim, M.K. (1988a). Single hardening constitutive model for frictional materials. II. yield criterion and plastic work contours. *Computers and Geotechnics*, 6, 13–29.
- Lade, P.V. and Kim, M.K. (1988b). Single hardening constitutive model for frictional materials. III. comparisons with experimental data. *Computers and Geotechnics*, 6, 30–47.
- Lade, P.V. and Nelson, R.B. (1987). Modelling the elastic behavior of granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11, 521–542.
- Lade, P.V. (1984). *Failure criterion for frictional materials. In Mechanics of Engineering Materials, Desai CS, Gallagher RH (eds). Wiley: New York, pp. 385–402.*
- Lade, P.V. and Nelson, R.B. (1984). Incrementalization procedure for elasto-plastic constitutive model with multiple, intersecting yield surfaces. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 8, 311–323.
- Lade, P.V. (1982). Three-parameter failure criterion for concrete. *ASCE Journal of Engineering Mechanics Division*, 108, 850–863.
- Lade, P.V. (1977). Elasto-plastic stress–strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *International Journal of Solids and Structures*, 13, 1019–1035.
- Lee, J. and Fenves, G.L. (1998). A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 937–956.

- Leps, T.M. (1970). Review of Shearing Strength of Rockfill. *J. of Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 96, SM4, 1159-1170.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Onate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *Int. J. Solids Struct*, 25, 299-326.
- Ma, H. and Cao, K. (2007). Key technical problems of extra-high concrete faced rockfill dam. *Science in China, Series E, Technological Sciences*, 50, 20-33.
- Mackenzie, P.R. and McDonald, L.A. (1985). *Mangrove Creek Dam: Use of soft rock for rockfill*, in *Concrete Face Rockfill Dams. Design, Construction and Performance*, Cooke, J.B. and Sherard, J.L. (eds). ASCE Geotechnical Engineering Division, 208–230.
- Mahasandana, T. and Mahatharadol, B. (1985). Monitoring system of Khao Laem Dam. *15th International Congress on Large Dams*. Lausanne, Q.56, R.1, pp.1-28.
- Marachi, N.D., Chan, C.K. and Seed, H.B. (1972). Evaluation of Properties of Rockfill Materials. *J. of Soil Mech. and Found. Div.* ASCE, New York, 98, 95-114.
- Marachi, N.D., Chan, C.K. and Seed, H.B. (1969). *Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials*. Report TE-69-5. Civil Engineering, University of California. Berkeley, Ca, USA.
- Marsal, R.J. (1967). Large Scale Testing of Rockfill Materials, *J. of Soil Mech. And Found.Div.*, ASCE, 93, SM2, 27-43.
- Marulanda, A. and Pinto, N.L. (2000). *Recent experience on design, construction, and performance of CFRD dams*. In *Concrete Face Rockfill Dams, J. Barry Cooke Volume (Mori, Sobrinho, Dijkstra, Guocheng & Borgatti ed.)*. Beijing, 279–315.
- Marulanda, C. and Anthiniac, P. (2009). Analysis of a concrete face rockfill dam including concrete face loading and deformation. *10th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*. Paris: International Commission On Large Dams-Committee on Computational Aspects of Analysis and Design of Dams.
- Massiera M., Szostak-Chrzanowski A., Vautour J. and Hammamji Y. (2005). *Deformations of CFRDs, resting on soil foundations*. Technical Sciences, Abbrev: Techn. Sc., No 8, Y. 2005.
- Materon, B. and Mori, R.T. (2000). *Concrete face rockfill dams. Construction features*. *Concrete Face Rockfill Dams, J. Barry Cooke Volume*. 20th ICOLD Congress. Beijing 2000, 177–219.

- Mori, R.T. (1999). Deformation and cracks in concrete face rockfill dams. *Proceedings, Second Symposium on Concrete Face Rockfill Dams*, Florianopolis, Brazil, Brazilian Committee on Dams, 49–61.
- Μπελόκας, Γ. και Καββαδάς, Μ. (2010). Εφαρμογή ενός νέου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος: TEE.
- Nataraja, M.C., Dhang, N. and Gupta, A.P. (1999). Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement & Concrete Composites*, 21, 383-390.
- Nobari, E. S., and Duncan, J. M. (1972). Movements in Dams due to Reservoir Filling. *ASCE: Specialty Conf. On Performance On Earth and Earth Supported Structures*, 797-815.
- Ντακούλας, Π., (2010). Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην συμπεριφορά φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος: TEE.
- Nye, J.F. (1953). Some geometrical relations in dislocated crystals. *Acta Metal*, 1, 153–162.
- Ortiz, M. and Simo, J.C. (1986). An analysis of a new class of integration algorithms for elastoplastic constitutive relations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 23, 353–366.
- Özkuzukiran, R.S. (2005). *Settlement behaviour of concrete faced rockfill dams: A case study*. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Park, H.G., Kim, Y.S., Seo, M.W. and Lim, H.D. (2005). Settlement behavior characteristics of CFRD in construction period-Case of Daegok dam. *Journal of Korean Geotechnical Society*, 21(7), 99-105.
- Perdomo, D.A., Vasilescu, M.S. and Ferro, E.A. (1985). *Fortuna concrete face rockfill dam. In Concrete Face Rockfill Dams. Design, Construction, and Performance. Edited by Cooke, J.B., and Sherard J.L.* ASCE: New York, pp. 252-265.
- Pinto, N.L.S. and Filho Marques, P.L. (1998). Estimating the maximum face deflection in CFRDs. *The International Journal on Hydropower & Dams*. Issue 6, 28-31.
- Pinto, N.L.S., Blinder, S. and Toniatti, N.B. (1993). Foz do Areia and Segredo CFRD dams-12 years evolution. *Proc. of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams*. Beijing, Vol.1, pp. 381-398.

- Pinto, N.L.S. and Filho Marques, P.L. (1985). Discussion: Post-construction deformation of rockfill dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111 (12), 1472–1475.
- Potts, D.M. and Zdravkovic, L. (2001). *Finite element analysis in Geotechnical Engineering—Application*. Thomas Telford: London.
- Potts, D.M. and Gens, A. (1985). A critical assessment of methods of correcting for drift from the yield surface in elasto-plastic finite element analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 9, 149–159.
- Πουλάκη, Α. (2008). *Επίδραση της δυσκαμψίας στη συμπεριφορά λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs)*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, Ελλάδα.
- Pritchard, S. (2008). Taking the empirical approach. *International Water Power and Dam Construction*. February 2008.
- Prusza, K., De Fries, K. and Luque, F. (1985). *The design of Macagua concrete face rockfill dam in Concrete Face Rockfill Dams. Design, Construction and Performance*, Cooke, J.B. and Sherard, J.L. (eds). ASCE Geotechnical Engineering Division, 608–656.
- Ren, X. and Lin, Y. (1993). Stress-strain analysis of Wanaxi concrete face rockfill dam. *Proc. of International Symposium on High Earth–Rockfill Dams, China Society for Hydro-Electric Engineering*. Beijing, Vol.1, pp. 399-407.
- Rogers, R.L. (1985). *Boondoomba Dam in Concrete Face Rockfill Dams, Design, Construction and Performance*, Cooke, J.B. and Sherard, J.L. (eds). ASCE Geotechnical Engineering Division, 316–335.
- Sherard, J.L. and Cooke, J.B. (1987). Concrete face rockfill dams: Assessment. *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, 113(10), 1096-1112.
- Shi, J., Zhu, B. and Liang, C. (2000). Characteristics and experience of the design, construction and performance. *Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams, China Society for Hydro-Electric Engineering*. Beijing, pp. 97-105.
- Sierra, J.M., Ramirez, C.A. and Hacas, J.E. (1985). *Design features of Salvajina Dam in Concrete Face Rockfill Dams, Design, Construction and Performance*, Cooke, J.B. and Sherard, J.L. (eds). ASCE Geotechnical Engineering Division, 266–285.
- Simo, J.C. and Taylor, R.L. (1985). Consistent tangent operator for rate-independent elastoplasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 48, 101–118.

- Sloan, S.W. and Booker, J.R. (1992). Integration of Tresca and Mohr–Coulomb constitutive relations in plane strain elastoplasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 33, 163–196.
- Sloan, S.W. (1987). Substepping schemes for the numerical integration of elasto-plastic stress–strain relations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24, 893–911.
- Smith, I.M and Griffiths, D.V. (1988). *Programming the Finite Element Method (2nd Edition)*. Wiley: New York.
- Sobrinho, J.A., Xavier, L.V., Albertoni, C., Correa, C. and Fernandes, R. (2007). Performance and concrete repair at Campos Novos. *Hydropower and Dams*, 14(2).
- Σταυροθεοδώρου, Ε. και Ντακούλας, Π. (2014). Συμπεριφορά μεγάλων φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος κατά την πλήρωση της λεκάνης. *Πρακτικά 7^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής*. Αθήνα: Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής.
- Σταυροθεοδώρου, Ε. και Ντακούλας, Π. (2013). Βελτίωση του αντισεισμικού σχεδιασμού μεγάλων φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. *Πρακτικά 2^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Φραγμάτων και Ταμιεντήρων*. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ΕΕΜΦ).
- Valencia, G.F. and Sandoval, E.M. (1997). Aguamilpa Dam behaviour. *Proceedings, Seventeenth Annual USCOLD Lecture Series, Non-Soil Water Barriers for Embankment Dams*. San Diego, California, 133–147.
- Varadarajan A., Sharma, K. G., Venkatachalam, K., and Gupta, A. K. (2003). Testing and Modeling Two Rockfill Materials. *J. Geotech. Geoenv. Engrg.*, ASCE, 129, 3, 206-218.
- Wieland, M. (2009). Concrete faced rockfill dams in highly seismic regions. *1st Intern. Symposium on Rockfill Dams*, Chengdu, China, October 18-21.
- Wieland, M. (2008). Implications of complex seismotectonic site conditions on seismic design of large dams. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17 (No. S13-052).
- Wilkins, J.K., Mitchell, W.R., Fitzpatrick, M.D. and Liggins, T. (1973). The design of Cethana concrete face rockfill dam. *Proceedings, 11th ICOLD Congress, Rio de Janiero*, 25–43 (Q.42R.3). International Commission on Large Dams, Paris.

- Wu, G.Y., Freitas, M.S.J., Araya, J.A. and Huang, Z.Y. (2000a). Planning and construction of Tianshengqiao1 CFRD (China). *Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams, China Society for Hydro-Electric Engineering*. Beijing, pp.481-495.
- Wu, H., Wu, J., Wang, S., Wu, Q. and Cao, K. (2000b). Ten years surveillance of Chengbing concrete face rockfill dam. *Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams, China Society for Hydro-Electric Engineering*. Beijing, pp. 595-605.
- Xavier, LV. (2009). Campos Novos Hydropower Plant on Canoas River, Main Dams in Brasil III, Report. <http://www.cbdb.org.br/documentos/mbdiii/camposnovos.pdf>.
- Xu, B., Zou, D. and Liu, H. (2012). Three-dimensional simulation of the construction process of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model. *Computers and Geotechnics*, 43, 143–154.
- Xu, Z. (2008). Performance of Zipingpu CFRD during the strong earthquake. *Proc. 10th Int. Conf. on Landslides and Engineered Slopes*, Xian, China.
- Zhang, N. (1993). Design and construction of the Huashan reinforced concrete face rockfill dam. *Proc. of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams, China Society for Hydro-Electric Engineering*. Beijing, Vol.1, pp. 460-468.
- Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (1991). *The Finite Element Method-Vol. 2: Solid and Fluid Dynamics and Non-linearity*. McGraw-Hill: London, UK.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

