

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Μαρία Γ. Λιακοπούλου

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑΣ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ
ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ ΠΑΝΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΒΟΛΟΣ 2012



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 10296/1
Ημερ. Εισ.: 05-03-2012
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2012
ΛΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Μαρία Γ. Λιακοπούλου

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑΣ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ
ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ ΠΑΝΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΒΟΛΟΣ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Πάνο Ντακούλα, αναπληρωτή καθηγητή, για την πολύτιμη καθοδήγησή του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας. Η συμβολή του δεν περιορίστηκε στην απλή μετάδοση γνώσεων, αλλά και στην ουσιαστική βοήθεια και υπομονή του σε κάθε στάδιο της εργασίας.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου και την αδερφή μου, που υπήρξαν συνταξιδιώτες μου όλα αυτά τα χρόνια σπουδών όπου με αμέριστη αγάπη, κατανόηση και στήριξη έφερα εις πέρας αυτό το γοητευτικό ταξίδι γνώσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. Λιθόρριπτα φράγματα με Ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος (ΛΑΠΣ)	2
2. Ορισμός του προβλήματος	2
3. Σκοπός	2
4. Διάρθρωση της διπλωματικής	2
1. ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΛΑΠΣ)	4
1.1 Τύποι φραγμάτων	5
1.2 Λόγοι που συνιστούν την επιλογή λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος	6
1.3 Σχεδιασμός και κατασκευή των λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος	7
1.3.1 Ανάχωμα	7
1.3.2 Πλίνθος	12
1.3.3 Περιμετρικός αρμός	15
1.3.4 Πλάκα σκυροδέματος	17
1.3.5 Τοιχίο στέψης	21
2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΤΗΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ	22
2.1 Εισαγωγή	23
2.2 Καθιζήσεις της λιθορριπής	24
2.3 Καθιζήσεις των επιχωμάτων	26
3. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ	27
3.1 Foz do Areia (160m, Brazil, 1980)	28
3.2 Aguamilpa (187 m, Mexico, 1993)	28
3.3 Segredo (145m, Brazil, 1993)	30
3.4 Xingò (150 m, Brazil, 1994)	30
3.5 Tianshengqiao (178 m, China, 1999)	31
3.6 Ità (125 m, Brazil, 2000)	33
3.7 Machadinho (125 m, Brazil, 2002)	34
3.8 Itapébi (100m, Brazil, 2002)	34
3.9 El Cajon (226 m, Mexico, 1993)	36
3.10 Mohale (145 m, Νότια Αφρική, 2000)	38
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	43
4.1 Καταστατικό προσομοίωμα Duncan	44
4.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	45
4.2.1 Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS	46
5. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΧΩΡΑΣ	48
5.1 Εισαγωγή	49
5.2 Λιθορριπή	50
5.3 Σκυρόδεμα και Αρμοί	52

5.4 Προσομοίωση της κατασκευής	54
5.4.1 Σταδιακή κατασκευή και πλήρωση της λεκάνης	54
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	58
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94
Παράρτημα	97

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Λιθόρριπτα φράγματα με Ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος (ΛΑΠΣ)

Τα φράγματα είναι τεχνικά έργα μεγάλων διαστάσεων τα οποία κατασκευάζονται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος για να ανακόψουν τη συνέχεια της ροής με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική χρήση του.

Σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών, η ύδρευση πόλεων, οικισμών ή βιομηχανικών μονάδων, η διαμόρφωση πλωτών διωρύγων, η ρύθμιση της παροχής φυσικών ρευμάτων (ποταμών), η συγκράτηση πλημμυρών. [1]

Η λειτουργία ενός φράγματος είναι ζωτικής σημασίας για τις περιοχές που επωφελούνται από αυτή. Η κατασκευή και η λειτουργία του προκαλούν επεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον μεγαλύτερες από κάθε άλλο τεχνικό έργο και ο σχεδιασμός του πρέπει να γίνεται προσεκτικά καθώς μια πιθανή αστοχία μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες. [2]

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αυξηθεί παγκοσμίως και με αυξανόμενο ρυθμό τα λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Πρόκειται για κατασκευές επιχωμάτων (συνήθως από λιθορριπή) επί των οποίων εδράζεται μια πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη παρειά, κατασκευασμένη σε λωρίδες με ειδικό εξοπλισμό. Η ασφαλής συμπεριφορά και η ευκολία κατασκευής έχουν οδηγήσει στην αυξανόμενη χρήση αυτού του τύπου φραγμάτων.

Στην Ελλάδα, το πρώτο λιθόρριπτο φράγμα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος που κατασκευάστηκε είναι το φράγμα της Μεσοχώρας (ύψους 150 m). Επιπλέον έχουν κατασκευασθεί σε διάφορα μέρη της Ελλάδας όπως σε Πάτμο, Νάξο, Πήλιο.[3]

2. Ορισμός του προβλήματος

Η παρούσα εργασία γράφτηκε με αφορμή τις αστοχίες πλακών που παρατηρήθηκαν παγκοσμίως σε λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, λόγω της επίδρασης της δυσκαμψίας της λιθορριπής.

3. Σκοπός

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της επίδρασης της αντοχής του σκυροδέματος στην συμπεριφορά της πλάκας για διάφορα επίπεδα δυναμικής καθίζησης.

4. Διάρθρωση της διπλωματικής

Η εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στα λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, παρουσιάζονται οι λόγοι που τα καθιστούν καταλληλότερα από άλλου τύπου φράγματα καθώς και οι αρχές σχεδιασμού και κατασκευής τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην εντατική κατάσταση της πλάκας και τα αίτια των καθιζήσεων της λιθορριπής και των επιχωμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται πληροφορίες για φράγματα σε Βραζιλία, Μεξικό, Κίνα και νότια Αφρική, η πλάκα των οποίων υπέστη ρωγμές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι ανάλυσης για την πρόβλεψη της συμπεριφορά της λιθορριπής και κυρίως του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS στον οποίο βασίζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του φράγματος της Μεσοχώρας.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν από την τρισδιάστατη ανάλυση του φράγματος της Μεσοχώρας για τρεις διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.

Στο όγδοο κεφάλαιο δίδεται η βιβλιογραφία στην οποία στηρίχτηκε η εργασία.

**1. ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ
ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΛΑΠΣ)**

1.1 Τύποι φράγματων

Τα φράγματα ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση το κύριο υλικό κατασκευής τους :

Φράγματα από σκυρόδεμα (δύσκαμπα)

- Βαρύτητας
- Αντηριδωτό
- Τοξωτό
- Σύνθετο αντηριδωτό – τοξωτό

Φράγματα από γεωυλικά (εύκαμπα)

- Χωμάτινο
- Λιθόρριπτο με πυρήνα
- Λιθόρριπτο με Ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος (Λ.Α.Π.Σ.)
- Λιθόρριπτο με ανάντη ασφαλικό τάπητα
- Λιθόρριπτο με κεντρικό ασφαλικό διάφραγμα

Βασικά στοιχεία για την επιλογή τύπου φράγματος είναι η μορφολογία της κοιλάδας, η γεωλογία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων της περιοχής κατασκευής του έργου, η διαθεσιμότητα κατάλληλων υλικών, η διάταξη των επιμέρους κατασκευών του έργου και οι περιορισμοί της μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων.[4]

1.2 Λόγοι που συνιστούν την επιλογή λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα Σκυροδέματος

Τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγάλης ζήτησης για ύδρευση και παραγωγή ενέργειας, υπάρχει μεγάλη δραστηριότητα για την κατασκευή υψηλών λιθόρριπτων φράγματων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που προσφέρουν.

Μπορούν να κατασκευασθούν σε οποιαδήποτε μορφή κοιλάδας και δεν απαιτούν εδάφη θεμελίωσης εξαιρετικής ποιότητας, καθώς οι τάσεις που εισάγουν στη θεμελίωση είναι σχετικά χαμηλές. Δέχονται, χωρίς θραύση, παραμορφώσεις που πιθανόν να προέλθουν από διαφορικές καθιζήσεις ή σεισμικές ωθήσεις. Αυτό σημαίνει ότι έχουν μεγαλύτερες ανοχές έναντι πιθανών υποχωρήσεων της έδρασης και μετακινήσεων των αντρευσμάτων τους. Επίσης, η μεγάλη γωνία διατμητικής αντοχής συμπτυκνωμένων χαλίκων και λιθορριπής επιτρέπουν μεγάλες κλίσεις πρανών. Ακόμα, η σημαντική πίεση του νερού η οποία αυξάνει τη δυσκαμψία και την αντοχή της λιθορριπής.

Καθοριστικό ρόλο παίζει η επάρκεια κοντά στην περιοχή του φράγματος γαιωδών υλικών που χρειάζονται για την κατασκευή τους. Εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης χωματουργικών μηχανημάτων μεγάλης απόδοσης, το κόστος κατασκευής τους, ανά μονάδα όγκου, διαρκώς μειώνεται. Η κατασκευή του επιχώματος είναι δυνατόν να γίνει υπό βροχή, επιτυγχάνοντας οικονομία χρόνου και μάλλον καλύτερη συμπύκνωση. Επίσης, λόγω μεγάλων κλίσεων πρανών υπάρχει οικονομία υλικών. Η κατασκευή είναι ταχύτερη, η λειτουργία ασφαλέστερη και η συντήρηση ευκολότερη. Τέλος, η σεισμική συμπεριφορά φαίνεται να είναι πολύ καλή.

Τα λιθόρριπτα φράγματα ορίζονται ως γεωφράγματα τα οποία έχουν σαν κύριο δομικό στοιχείο τη λιθορριπή. Οι βασικοί τύποι των λιθόρριπτων φραγμάτων είναι:

- Λιθόρριπτα φράγματα με εσωτερικό διαπερατό πυρήνα (ECRD= *Earth core rockfill dam*)
- Λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD= *Concrete faced rockfill dam*)

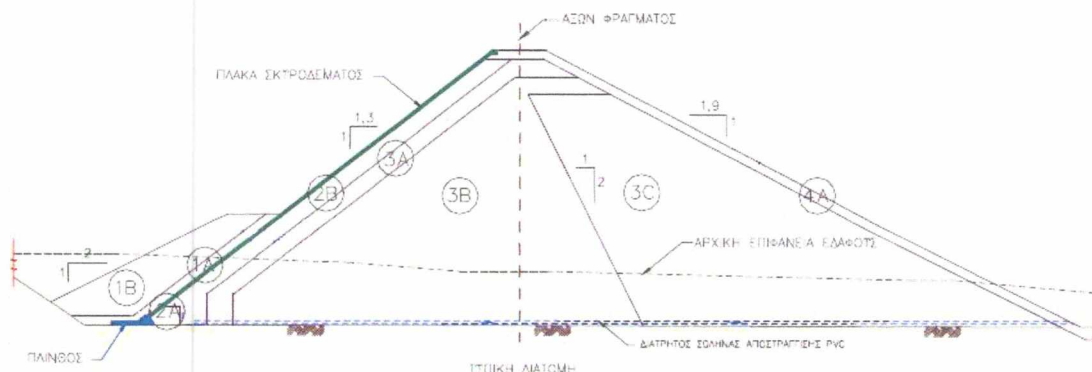
Τα λιθόρριπτα φράγματα με εσωτερικό διαπερατό πυρήνα χαρακτηρίζονται από μια κεντρική πρακτικά διαπερατή ζώνη που ονομάζεται πυρήνας και από δύο ζώνες λιθορριπής που χρησιμεύουν για να εξασφαλίσουν την ευστάθεια του πυρήνα. Οι ζώνες λιθορριπής αποτελούν το σώμα στήριξης του φράγματος. Διαβαθμισμένα φίλτρα μεταξύ του πυρήνα και της λιθορριπής διασφαλίζουν ότι το λεπτόκοκκο αργιλικό υλικό του πυρήνα δε θα ξεπλυθεί στη λιθορριπή. Το νερό διαπερνά την ανάντη πλευρά του φράγματος, αλλά εμποδίζεται η ροή λόγω του αργιλικού πυρήνα. Αναπτύσσεται λοιπόν ένα δίκτυο ροής μέσα στο σώμα του φράγματος.

Στα λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος τοπικά διαθέσιμη λιθορριπή, καλής ποιότητας, μεταφέρεται και συμπιέζεται με τη χρησιμοποίηση βαριών μηχανημάτων. Το αδιαπερατό στοιχείο είναι μια πλάκα σκυροδέματος που τοποθετείται σε μια μεταβατική ζώνη πάνω από το ανάντη πρανές της λιθορριπής. Σε αυτή την περίπτωση δεν αναπτύσσεται δίκτυο ροής μέσα στο φράγμα. [3, 5]

1.3 Σχεδιασμός και κατασκευή των λιθορριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

1.3.1 Ανάχωμα

Ο σχεδιασμός των CFRDs είναι κυρίως εμπειρικός και βασίζεται στην πείρα και στην κρίση του μηχανικού. Ωστόσο, έχουν εξελιχθεί σε ένα στάδιο όπου τα κύρια χαρακτηριστικά του παραμένουν ίδια. Τα τμήματα από σκυρόδεμα για παράδειγμα είναι κοινά για όλα τα CFRDs: η πλίνθος, η πλάκα σκυροδέματος με τους απαραίτητους αρμούς και το τοίχιο στέψης [3]. Η τυπική διατομή ενός CFRD φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Κύριες ζώνες φράγματος τύπου ΛΑΠΣ [4]

Οι κύριες ζώνες φράγματος τύπου ΛΑΠΣ είναι:

- Ζώνη 1A : Λεπτόκοκκο υλικό, κυρίως ιλύς, με πρακτικά μηδενική πλασιμότητα
- Ζώνη 1B : Τυχαία υλικά, χωρίς απαιτήσεις διαβάθμισης ή συμπίκνωσης
- Ζώνη 2A : Λεπτόκοκκο φίλτρο, διαβαθμισμένο υλικό με μέγιστο κόκκο 4.5 mm
- Ζώνη 2B : Φίλτρο, διαβαθμισμένο υλικό με μέγιστο κόκκο 25 mm
- Ζώνη 3A : Λιθορριπή, με μέγιστη διάσταση <0.5 m, καλά συμπτυκνωμένη
- Ζώνη 3B : Λιθορριπή, με μέγιστη διάσταση <1 m, καλά συμπτυκνωμένη
- Ζώνη 3C : Λιθορριπή, με μέτριες απαιτήσεις υλικών και συμπίκνωσης
- Ζώνη 4A : Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς αναχώματος (αν απαιτείται)

1.3.1.1 Τυπική διαζώνιση των ΛΑΠΣ

Ζώνη 1A: Λεπτόκοκκο υλικό

Η Ζώνη 1A κατασκευάζεται ανάντη της πλάκας σκυροδέματος και καλύπτει πλήρως την πλίνθο. Αποτελείται από λεπτόκοκκα υλικά, κυρίως ιλύ, ώστε να έχει πρακτικά μηδενική πλασιμότητα.

Ο ρόλος της είναι να διεισδύει, παρασυρόμενη από το νερό και να εισχωρεί σε κενά ή/και ρωγμές που ενδεχομένως να αναπτυχθούν μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα,

λόγω μετακινήσεων της πλάκας από σκυρόδεμα και διεύρυνσης του περιμετρικού αρμού είτε σε ρωγμές που αναπτύσσονται στην πλάκα λόγω συρρίκνωσης ή/και παραμορφώσεων. Τα υλικά της Ζώνης 1Α πρέπει να έχουν χαμηλή έως μηδενική συνοχή, ώστε να παρασύρονται εύκολα από το νερό και να διεισδύουν στις ρωγμές της πλάκας και του περιμετρικού αρμού. Νοείται ότι δεν απαιτείται συμπίκνωση των υλικών, ώστε να ανταποκρίνονται με μεγαλύτερη ευκολία στο ρόλο τους.

Ζώνη 1B : Τυχαία υλικά

Η Ζώνη 1B διαστρώνεται ανάντη της Ζώνης 1Α και κατασκευάζεται από τυχαία υλικά, χωρίς απαιτήσεις κοκκομετρικής διαβάθμισης, διατμητικής αντοχής, συμπίκνωσης, υγρασίας κλπ. Η Ζώνη 1B κατασκευάζεται αποκλειστικά και μόνο για την προστασία της Ζώνης 1Α από κυματισμούς και διάβρωση λόγω διακυμάνσεων της στάθμης του ταμιευτήρα.

Ζώνη 2Α : Λεπτόκοκκο Φίλτρο

Η Ζώνη 2Α τοποθετείται κατάντη της πλίνθου, κάτω από τον περιμετρικό αρμό και είναι η ζώνη που υποστηρίζει την πλάκα σκυροδέματος στην περιοχή του περιμετρικού αρμού. Στη θέση του αρμού, μεταξύ της πλάκας και της Ζώνης 2Α παρεμβάλλεται στεγανωτική ταινία από χαλκό. Η ταινία δέχεται τα φορτία από την πλάκα ταινία και τα μεταφέρει στη Ζώνη 2Α. Επειδή η ταινία είναι ευαίσθητη στη διάτρηση και προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος αυτός, περιορίζεται ο μέγιστος κόκκος στο υλικό της Ζώνης 2Α στα ~4.5 mm.

Το φίλτρο κατασκευάζεται από διαβαθμισμένα αμμώδη υλικά, είτε από κοσκίνισμα αμμοχαλίκων ποτάμιων αποθέσεων είτε από θραύση βραχωδών υλικών ή κροκαλών.

Ζώνη 2B : Φίλτρο

Η Ζώνη 2B διαστρώνεται στην ανάντη εξωτερική παρειά του φράγματος και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η πλάκα σκυροδέματος. Το υλικό της ζώνης είναι διαβαθμισμένο αμμώδες υλικό, με καθορισμένα αλλά ελαστικά όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η μέγιστη διάσταση κόκκου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 19 και 25 mm, αλλά μπορεί να φθάσει και τα 75 mm.

Προκειμένου να περιοριστούν στο ελάχιστο οι παραμορφώσεις της πλάκας σκυροδέματος μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα, η ζώνη φίλτρου 2B πρέπει να έχει χαμηλό μέτρο παραμορφωσιμότητας και επομένως υψηλό βαθμό συμπίκνωσης.

Η συμπίκνωση της ζώνης αυτής απαιτεί ιδιαίτερες μεθόδους και χρήση ειδικού εξοπλισμού.

Ζώνη 3A : Λιθορριπή

Ζώνη λιθορριπής με μέγιστη διάσταση λίθου 0.5 m. Η Ζώνη 3A λειτουργεί ως μεταβατική ζώνη μεταξύ της ζώνης φίλτρου 2B και της ζώνης λιθορριπής 3B. Όπως και η ζώνη 2B έχει υψηλές απαιτήσεις συμπύκνωσης προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλό μέτρο παραμορφωσιμότητας.

Ζώνη 3B : Λιθορριπή

Ζώνη λιθορριπής με μέγιστη διάσταση λίθου 1 m. Η ζώνη αυτή αποτελεί την κύρια ζώνη του αναχώματος, επειδή παραλαμβάνει τις υδροστατικές πιέσεις του ταμιευτήρα από τις ζώνες 2B και 3A και τις μεταφέρει στη θεμελίωση.

Οι υψηλές απαιτήσεις συμπύκνωσης που ισχύουν για τις Ζώνες 2B και 3A ισχύουν και για τη Ζώνη 3B.

Ζώνη 3C : Λιθορριπή

Η Ζώνη 3C δεν συμμετέχει στην ανάληψη των φορτίων του ταμιευτήρα και απλώς στηρίζει και συγκρατεί τη Ζώνη 3B στη θέση της. Επομένως δεν απαιτείται η ζώνη αυτή να έχει υψηλές μηχανικές ιδιότητες και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί υλικό υποδεέστερων μηχανικών χαρακτηριστικών.

Οι μειωμένες απαιτήσεις της Ζώνης 3C επιτρέπουν την κατασκευή της ζώνης είτε με υλικά χαμηλής διατμητικής αντοχής, είτε την εφαρμογή μειωμένου βαθμού συμπύκνωσης.

Η πρώτη επιλογή επιτρέπει τη χρησιμοποίηση υλικών που είναι ακατάλληλα για την κατασκευή της Ζώνης 3B και τα οποία θα έπρεπε να απορριφθούν. Η δεύτερη επιλογή επιτρέπει τη διάστρωση και συμπύκνωση των υλικών σε στρώσεις πάχους μεγαλύτερο από 1 m, που μπορεί να φθάσει και τα 2 m.

Ζώνη 4A : Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς

Η Ζώνη 4A αποτελεί ζώνη προστασίας του κατάντη πρανούς του αναχώματος, από την διαβρωτική ενέργεια του νερού της βροχής, όπως και στα φράγματα με πυρήνα. Η ζώνη είναι απαραίτητη όταν η Ζώνη 3C δεν έχει τη κατάλληλη κοκκομετρία ώστε να αυτο-προστατεύεται. Η ζώνη 4A κατασκευάζεται με λίθους ή κροκάλες κατάλληλων διαστάσεων, με απαιτήσεις μέγιστης, μέσης και ελάχιστης διάστασης. [4]

1.3.1.2 Ποιότητα και διαβάθμιση του αναχώματος

Δεν υπάρχουν στερεότυπες προδιαγραφές για τα λιθορριπτα φράγματα όπως για τα φράγματα βαρύτητας. Ο βράχος που θα χρησιμοποιηθεί για τη λιθορριπή θα πρέπει να είναι συμπαγής και όχι επιρρεπής σε διάβρωση λόγω αποσάθρωσης. Οι πιο κατάλληλοι τύποι βράχου για τη λιθορριπή είναι οι συμπαγείς πυριγενείς ή μεταμορφωσιγενείς βράχοι.

Η θλιπτική αντοχή των βράχων που χρησιμοποιούνται για τη λιθορριπή των CFRDs κυμαίνεται μεταξύ 100-2500 kg/cm² (πολύ μεγάλο εύρος). Συνηθέστερα απαντώνται βράχοι θλιπτικής αντοχής από 500-1500kg/cm². Θεωρείται όμως ότι σκληροί βράχοι με αντοχή μόλις 300 kg/cm² επαρκούν για τα CFRDs.

Σύμφωνα με τον Cooke κατά την επιλογή του βράχου θα πρέπει απαραίτητα να ελέγχεται και η συμπεριφορά του σε διαβροχή. Αν ο βράχος σπάει και χάνει τη διαπερατότητά του με τη συμπίκνωση, είναι απαραίτητο στο επίχωμα να διαμορφωθούν αποστραγγιστικές ζώνες.

Οι σημαντικότερες ιδιότητες του επιχώματος των CFRDs είναι η χαμηλή του συμπίεστικότητα και η υψηλή τους διατμητική αντοχή. Συνήθως, επιλέγεται λιθορριπή ιδιαίτερα διαπερατή. Για την κοκκομετρία της λιθορριπής ο Cooke διατύπωσε το 1984 τις ακόλουθες προδιαγραφές οι οποίες και ακολουθούνται στα περισσότερα CFRDs :

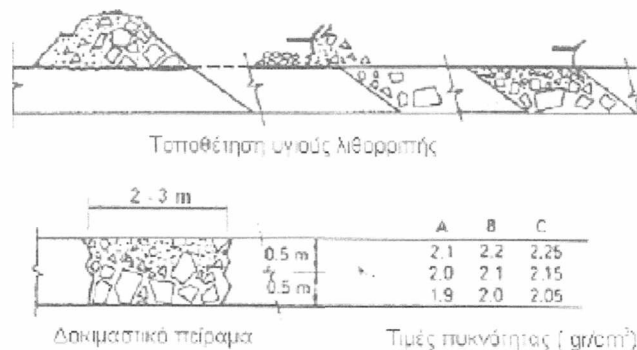
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 50% της λιθορριπής να έχει διάμετρο > 25 mm.
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 6% των κόκκων να είναι άργιλος.
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 10% των κόκκων να είναι μικρότερο των 0.075 mm
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 20% των κόκκων να έχει διάμετρο < 4.76 mm (Fell et al, 2005).[7]

Για την επιλογή της κατάλληλης κοκκομετρίας για τη λιθορριπή λαμβάνονται και οι εξής παράμετροι:

- Το μέγιστο μέγεθος κόκκου καθορίζεται ανάλογα με το πάχος της στρώσης ώστε να εξασφαλίζει ομαλές επιφάνειες. Η κοκκομετρική διαβάθμιση θα πρέπει να καταλήγει σε διαπερατή λιθορριπή.
- Το κοκκώδες υλικό της λιθορριπής θα πρέπει να επιλέγεται ώστε να είναι όσο το δυνατόν διαθέσιμου μεγέθους για να ελαχιστοποιούνται απώλειες λόγω υπέρ/υποδιάστασης.[8]

1.3.1.3 Τοποθέτηση της λιθορριπής

Η εναπόθεση και εξομάλυνση της υγιούς λιθορριπής γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διαχωριστούν τα υλικά, με τις μεγαλύτερες κροκάλες να συσσωρεύονται στη βάση της κάθε στρώσης, και τις μικρότερες στο πάνω τμήμα της στρώσης. Η μέθοδος που εφαρμόζεται φαίνεται στο σχήμα 2.



A= κακώς διαβαθμισμένο υγιές υλικό λιθορριπής με λίγα λεπτόκοκκα

B= σύνηθες υγιές υλικό λιθορριπής

C= καλώς διαβαθμισμένο υγιές υλικό

Σχήμα 2: Η μέθοδος τοποθέτησης της υγιούς λιθορριπής με συνεπακόλουθη μεταβολή της πυκνότητας καθ' ύψος της κάθε στρώσης, ανάλογα με τη διαβάθμιση της λιθορριπής. [9]

Η εμπειρία αποδεικνύει ότι η προτιμώμενη αυτή μέθοδος τοποθέτησης υγιούς λιθορριπής έχει μόνο θετική επίδραση στη συμπεριφορά του φράγματος, καθώς η αλληλεμπλοκή μεταξύ λεπτότερων και πιο χονδρών τεμαχίων εξασφαλίζει στη λιθορριπή την απαιτούμενη διατμητική αντοχή.

1.3.1.4 Προσθήκη νερού στη λιθορριπή

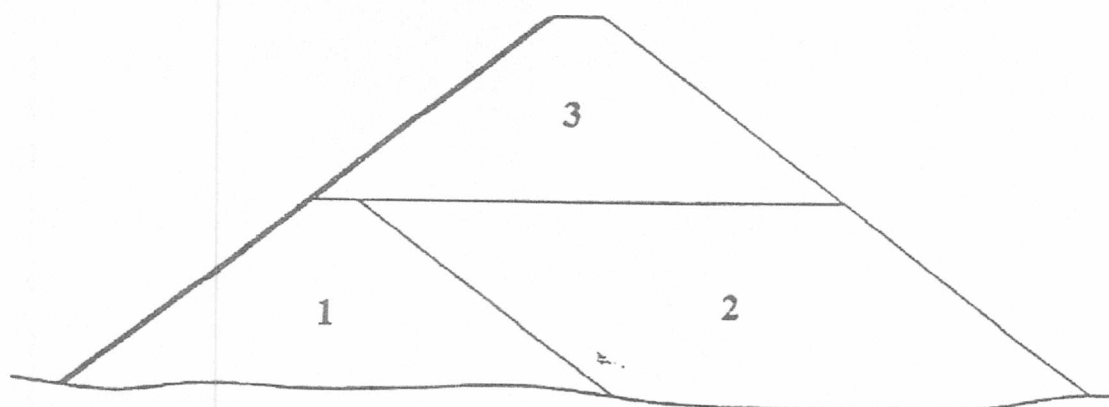
Η προσθήκη νερού στη λιθορριπή βελτιώνει σημαντικά τα χαρακτηριστικά της μειώνοντας τη συμπίεστίότητά της. Ωστόσο, στην περίπτωση σκληρού βράχου με χαμηλή απορροφητικότητα (μικρότερη από 2%), η προσθήκη νερού δεν παρέχει ουσιαστική βελτίωση των ιδιοτήτων της λιθορριπής και παραλείπεται για λόγους οικονομίας. Συχνά παραλείπεται η διαβροχή στην κατάντη ζώνη. Σε κάθε περίπτωση, συνεκτιμώνται τα οφέλη που προβλέπονται για τη διαβροχή της πλάκας και το κόστος της, για να αποφασιστεί αν είναι συμφέρον να διενεργηθεί διαβροχή ή όχι.[10]

1.3.1.5 Κλίση πρανών

Η επιλογή της κλίσης των πρανών εξαρτάται από τρεις παράγοντες. Την ποιότητα του πετρώματος της λιθορριπής, την ποιότητα του πετρώματος θεμελίωσης και τη σεισμικότητα της περιοχής. Κλίσεις 1.3:1 (H:V) εξασφαλίζουν ευστάθεια σε φράγματα από πολύ υψηλής αντοχής βράχο. Πιθανόν, να χρειαστεί και μια μείωση της κλίσης αυτής 1.4:1 σε περίπτωση μείωσης της γωνίας διατμητικής αντοχής με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης. Σε περιοχές με αυξημένη σεισμικότητα ή για λιθορριπές που προέρχονται από πετρώματα χαμηλής αντοχής, επιλέγεται κλίση 1.4:1 για όλο το ύψος του πρανού, ώστε να προκύπτει ικανοποιητικός συντελεστής ασφαλείας.

1.3.1.6 Σταδιακή κατασκευή του αναχώματος

Η κατασκευή των λιθόρριπτων φραγμάτων ενδείκνυται να γίνεται τμηματικά. Τα στάδια κατασκευής μπορούν να γίνουν ξεχωριστά και δεν υπάρχουν περιορισμοί όπως σε άλλους τύπους φραγμάτων. Η αλληλουχία της κατασκευής των τμημάτων του CFRD (πλίνθος, ανάχωμα, πλάκα) μπορεί να προσαρμοστεί στο εκάστοτε φράγμα και είναι πολύ σημαντική για τη συνολική συμπεριφορά του φράγματος. Σε φράγματα που κατασκευάζονται σε πολλά στάδια η τήρηση της αλληλουχίας των βημάτων θα πρέπει να ακολουθείται αυστηρά. Η γενική διάταξη της σταδιακής κατασκευής φαίνεται στο σχήμα 3.

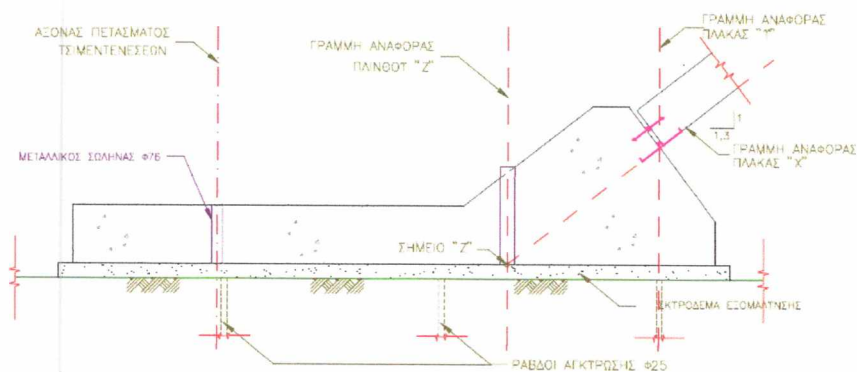


Σχήμα 3: Σταδιακή κατασκευή του αναχώματος [11]

Ωστόσο, πολλές καταγραφές για προβλήματα στην πλάκα πολλών φραγμάτων πριν την έναρξη της λειτουργίας τους, συνέστησαν κατασκευή της πλάκας μετά την τοποθέτηση και του τελευταίου τμήματος της λιθορριπής.

1.3.2 Πλίνθος

Το στεγανό στοιχείο των φραγμάτων ΛΑΠΣ είναι η πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα που διαστρώνεται στο ανάντη πρανές του αναχώματος.



Σχήμα 4: Τυπική διατομή πλίνθου φράγματος τύπου ΛΑΠΣ [12]

Η σύνδεση της πλάκας με τη θεμελίωση και η συνέχιση του στεγανού στοιχείου (πλάκα) με τη στεγανοποιημένη ζώνη της θεμελίωσης (ζώνη εκτέλεσης τσιμεντενέσεων) επιτυγχάνεται με την παρεμβολή του τεχνικού έργου της «πλίνθου», από οπλισμένο σκυρόδεμα, αγκυρωμένου με ράβδους αγκύρωσης στο πέτρωμα θεμελίωσης, όπως δείχνεται στο σχήμα 4.

Η σύνδεση της πλίνθου με την πλάκα επιτυγχάνεται μέσω του περιμετρικού αρμού. Η πλάκα δεν έρχεται σε επαφή με την πλίνθο. Μεταξύ τους μεσολαβεί διάκενο πλάτους 2-3 cm. Ο περιμετρικός αρμός στεγανοποιείται με τοποθέτηση στεγανωτικών ταινιών από χαλκό και πλαστικό καθώς και άλλων υλικών. [6]

1.3.2.1 Θεμελίωση

Η πλίνθος πρέπει να εδράζεται σε σκληρό, μη διαβρώσιμο και ενέσιμο βράχο. Για να επιτευχθεί η θεμελίωση της πλίνθου στο επιθυμητό έδαφος, διενεργούνται εκσκαφές στα αντερείσματα και στην κοίτη. Παρ' όλ' αυτά, επιτυχώς έχουν θεμελιωθεί πλίνθη σε βράχους αποσθρωμένους ή πιο μαλακούς, που ήταν αρκετά επιρρεπείς σε διάβρωση. Και στις δυο περιπτώσεις το μήκος της διαδρομής του διηθούμενου νερού θα πρέπει να αυξηθεί κατά ένα τέταρτο του υδραυλικού φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός στρώματος σκυροδέματος στην τελική επιφάνεια θεμελίωσης, ακριβώς κατάντη της πλίνθου. Επιπλέον, προστίθεται κάποιο υλικό για τη συγκράτηση των υλικών της διάβρωσης.[8]

1.3.2.2 Διαστάσεις

Παραδοσιακά, το πλάτος της πλίνθου σε ένα CFRD σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη τις εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του ύψους της δεξαμενής και της υπάρχουσας γεωλογίας.

$$B = K * H$$

όπου B = το πλάτος της πλίνθου σε m.

K = εμπειρική τιμή που εξαρτάται από την ποιότητα του βράχου θεμελίωσης της πλίνθου και κυμαίνεται μεταξύ 0.05 και 0.1 για φρέσκο και αποσαθρωμένο βράχο αντίστοιχα.

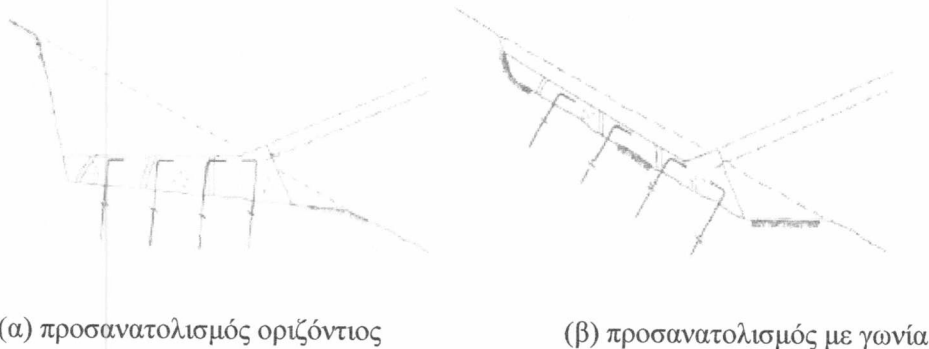
H = υδραυλικό φορτίο σε m.

Στις περιπτώσεις, υγιούς θεμελίωσης της πλίνθου, το πλάτος της, είναι της τάξης του $1/20$ του υδραυλικού φορτίου H . Το ελάχιστο πλάτος που χρησιμοποιείται για την πλίνθο είναι 3 m. Για πολύ χαμηλά φράγματα όμως, θεμελιωμένα σε σκληρό βράχο, το πλάτος της πλίνθου μπορεί μειωθεί ως τα 2m. Στα αντερείσματα το πλάτος της πλίνθου μεταβάλλεται σε ορισμένα βήματα, ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο.[8]

1.3.2.3 Διάταξη

Ανάλογα με την κλίση των πρανών των αντερεισμάτων, και με το είδος του εδάφους ή του διαβρούμενου βράχου που παρεμβάλλεται ως την επιθυμητή θεμελίωση, οι μέθοδοι εκσκαφής και οι προσανατολισμοί της πλίνθου ποικίλουν και επιλέγονται ανάλογα.

Η εκσκαφή του βράχου γίνεται με ανατινάξεις ή με μηχανική εκσκαφή. Η πλίνθος στα αντερείσματα μπορεί να τοποθετηθεί είτε οριζόντια, είτε με γωνία, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.

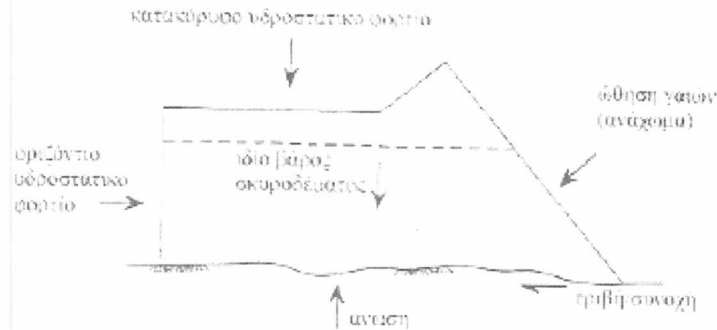


Σχήμα 5: Τυπική τομή της γραμμής πλίνθου στα αντερείσματα [8]

1.3.2.4 Ευστάθεια της πλίνθου

Η πλίνθος κατασκευάζεται έτσι ώστε να αντιστέκεται στην οριζόντια ώθηση του νερού χωρίς την υποστήριξη της λιθορριπής. Σε πλίνθους μέτριου πάχους, ο έλεγχος ευστάθειας παραλείπεται, καθώς η τριβή που αναπτύσσεται επαρκεί για να αντισταθμίσει την ώθηση του νερού. Σε πλίνθους μεγάλου πάχους όμως, αναπτύσσονται μεγάλες ωθήσεις από το νερό και ο έλεγχος ευστάθειας είναι απαραίτητος. Οι δυνάμεις που ασκούνται στην πλίνθο φαίνονται στο σχήμα 6.

Ο έλεγχος ευστάθειας περιλαμβάνει τους ελέγχους ολίσθησης και ανατροπής, όπως και για τα φράγματα βαρύτητας. Η λιθορριπή ,μπορεί να ασκεί ώθηση στην πλίνθο αλλά η ώθηση αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη στον έλεγχο ευστάθειας. Επιπλέον, στην ευστάθεια δεν συμβάλλει ούτε η πλάκα σκυροδέματος, καθώς οι υδροστατικές πιέσεις ανοίγουν τον περιμετρικό αρμό με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ πλίνθου και πλάκας σκυροδέματος. Η άνωση που ασκείται στην πλίνθο θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά κατά πλάτος. [11]



Σχήμα 6: Δυνάμεις που ασκούνται στην πλίνθο [11]

1.3.3 Περιμετρικός αρμός

Οι οργανομετρήσεις στα CFRDs έχουν δείξει ότι οι θλιπτικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% της επιφάνειας της πλάκας σκυροδέματος, εξαιτίας της καθίζησης της λιθορριπής. Μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα παρατηρείται επιπλέον συμπίεση των περισσότερων κατακόρυφων αρμών στην κεντρική περιοχή της πλάκας καθώς αυτή υπόκειται σε θλίψη. Όμως, τόσο στους αρμούς της πλάκας κοντά στα αντερείσματα όσο και στους περιμετρικούς αρμούς αναμένεται να παρατηρηθούν ανοίγματα λόγω εφελκυστικών τάσεων. Συνεπώς, ο περιμετρικός αρμός μεταξύ πλίνθου και πλάκας σκυροδέματος αποτελεί μια πιθανή πηγή διαρροής εάν δεν έχει κατασκευαστεί σωστά. Πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι ελαστικός έτσι ώστε να μπορεί να παραλάβει τις αναμενόμενες μετακινήσεις και στις τρεις διευθύνσεις χωρίς να καταστρέφονται τα στεγνωτικά υλικά.

1.3.4 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. Η κλίση της ανάντη παρειάς του φράγματος διαμορφώνεται έτσι ώστε να συγκρατείται μέσω της τριβής που αναπτύσσεται. Πολύ σημαντικό ρόλο έχουν η αντοχή του σκυροδέματος και η ακεραιότητα των υλικών στεγάνωσης της πλάκας για την ικανοποιητική απόκριση και την ανθεκτικότητα του φράγματος στο χρόνο.

1.3.4.1 Πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του πάχους της πλάκας σκυροδέματος είναι το ύψος του φράγματος, η καλή προσαρμογή των στεγνωτικών υλικών στους αρμούς κυρίως στον περιμετρικό αρμό, και οι κατασκευαστικές δυνατότητες που υπάρχουν. Για να καλυφθούν επαρκώς οι οπλισμοί και να ελαχιστοποιηθούν οι ρωγμές λόγω συστολή ξήρανσης, το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος πλάκας είναι 0.25-0.30m. Συνηθίζεται, το πάχος της πλάκας σκυροδέματος να αυξάνεται προοδευτικά από την ελάχιστη τιμή του στη στέψη του φράγματος ανάλογα με το υδροστατικό φορτίο H.

Έτσι, για φράγματα με συμπυκνωμένη λιθορριπή χρησιμοποιείται πλάκα πάχους $0.3+0.003H$ ή $0.002H$. Σε νεότερα φράγματα μέτριου ύψους έχει χρησιμοποιηθεί και ενιαίο πάχος πλάκας. Μια άλλη πρόταση είναι η χρήση πλακών ενιαίου πάχους 0.25 ή 0.30 m για φράγματα χαμηλού και μέτριου ύψους (το πολύ μέχρι 100 m). Για φράγματα μεγάλης σημασίας ή για πολύ ψηλά φράγματα, το πάχος δίνεται από τον εμπειρικό τύπο $0.3+0.002H$ (m). Τα προτεινόμενα πάχη προϋποθέτουν μια πολύ καλά συμπυκνωμένη μεταβατική ζώνη όπου θα εδραστεί η πλάκα. Εξαιτίας όμως της πιο ανώμαλης επιφάνειας έδρασης στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται λίγο μεγαλύτερα πάχη [10]. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο σχεδιασμός του πάχους της πλάκας σκυροδέματος έχει ακολουθήσει τον παρακάτω εμπειρικό τύπο:

$$T = 0.3 + K * H$$

όπου T= μεταβλητό πάχος της πλάκας σε m

K= εμπειρική τιμή= 0.002 για τα πρόσφατα φράγματα

H= υδραυλικό φορτίο σε m

Για τα CFRDs η εισροή είναι συνυφασμένη με προβλήματα στην πλάκα. Αυτό που πρέπει να αποτραπεί είναι οποιοδήποτε πρόβλημα στην ανάντη πλάκα του σκυροδέματος.

Η σταδιακή αύξηση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος αποσκοπεί στον περιορισμό της υδραυλικής κλίσης διαμέσου της πλάκας σε αποδεκτά όρια. Η κλίση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στους αρμούς και στις τριχοειδείς ρωγμές που

αναπτύσσονται στην πλάκα. Σύμφωνα με τις μελέτες πάνω στη διαρροή διαμέσου λεπτών ρωγμών, συνιστάται ως μέγιστη αποδεκτή τιμή υδραυλικής κλίσης δια μέσου της πλάκας το 200.

Η παραδοσιακή φόρμουλα $0.3+0.002H$ m καλύπτει την παραπάνω απαίτηση μέχρι ενός ορίου [13]. Στα CFRDs με ύψος μικρότερο των 125 m η εφαρμογή του εμπειρικού τύπου δεν δημιουργεί προβλήματα. Σε πάρα πολλά φράγματα άνω των 125 m, η υδραυλική κλίση δια μέσου της πλάκας σκυροδέματος αυξάνει με έναν πιο γρήγορο ρυθμό σε σχέση με το ρυθμό αύξησης του πάχους της που υπολογίζεται με βάση τον παραπάνω εμπειρικό τύπο. Παράλληλα όμως, η παρουσία ρωγμών σε μερικά νέα πολύ ψηλά CFRDs υποδεικνύει το γεγονός ότι η εφελκυστική παραμόρφωση του σκυροδέματος έχει ξεπεράσει την αποδεκτή τιμή ($\epsilon > 0.0001$).

Για τον περιορισμό της εφελκυστικής παραμόρφωσης στο χαμηλότερο κομμάτι της πλάκας μπορούμε είτε να αυξήσουμε το πάχος της πλάκας είτε την αντοχή του σκυροδέματος και τον οπλισμό στις περιοχές όπου αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις. Η χρήση ποζολάνης ως πρόσθετο ή ποζολανικού τσιμέντου βελτιώνει την αντοχή και αυξάνει έτσι το μέτρο ελαστικότητας με οικονομικό τρόπο. Η πείρα έχει αποδείξει ότι το ποζολανικό τσιμέντο έχει αυξήσει κατά 20% σε 60 ημέρες, την αντοχή των 28 ημερών.

Συνεπώς, η χρήση ποζολανικού τσιμέντου συνιστά τα εξής κριτήρια για το πάχος σχεδιασμού της πλάκας σκυροδέματος.

- Για φράγματα ύψους μέχρι 125m: $t = 0.3+0.002H$ (m), $f_{ck} = 20$ MPa στις 60 μέρες

- Για φράγματα ύψους μεγαλύτερου των 125m: $t = 0.3+0.0045H$ (m), $f_{ck} = 25$ MPa στις 60 μέρες.

Αυτός ο σχεδιασμός είναι οικονομικός και αποτρέπει τη δημιουργία ανεπιθύμητων ρωγμών.

1.3.4.2 Οπλισμός

Στην πλάκα των CFRDs αναπτύσσονται κυρίως ορθές τάσεις και σύμφωνα με τις παρατηρήσεις είναι θλιπτικές στην κεντρική ζώνη της πλάκας και εφελκυστικές μόνο κοντά στην πλίνθο.

Παρά το γεγονός αυτό, είναι σκόπιμο να τοποθετείται ο οπλισμός σε όλο το εύρος της πλάκας, για να αντιμετωπιστούν τυχόν απρόβλεπτες εφελκυστικές τάσεις λόγω μεγάλων θερμοκρασιακών μεταβολών ή κατασκευαστικών ατελειών (π.χ. ανομοιόμορφη στήριξη της πλάκας, κλπ).

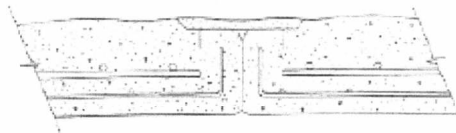
Ο κύριος ρόλος του οπλισμού είναι η κατανομή και ο περιορισμός του εύρους των ρωγμών που αναπτύσσονται στις περιοχές της πλάκας που εφελκύνονται. Για ικανοποιητική συμπεριφορά της πλάκας έναντι εφελκυσμού, επαρκούν οι συνήθεις δομικοί χάλυβες, αλλά κάποιες φορές λόγω χαμηλού κόστους του, χρησιμοποιείται και χάλυβας υψηλότερης αντοχής.

Το ποσοστό οπλισμού για την πλάκα δεν είναι καθορισμένο. Στα πρώτα CFRDs που σχεδιάστηκαν, τοποθετούνταν ποσοστό οπλισμού 0.5% στις δύο διευθύνσεις της πλάκας. Σήμερα το ποσοστό οπλισμού της πλάκας, έχει περιοριστεί στο 0.4%,

συμβάλλοντας στην οικονομία της κατασκευής. Περαιτέρω μείωση του ποσοστού οπλισμού που επιχειρήθηκε πρόσφατα είχε ως αποτέλεσμα εμφάνιση ρωγμών κοντά στην πλίνθο. Επιτρέπεται επομένως, μια μικρή μείωση του οπλισμού μόνο στις θλιβόμενες περιοχές της πλάκας (ποσοστό: 0.3-0.35%).

Όλος ο οπλισμός τοποθετείται στο κέντρο της διατομής της πλάκας σε μια στρώση, καθώς η πλάκα καταπονείται από ορθές κυρίως τάσεις και όχι καμπτικές. Η τοποθέτηση του οπλισμού στο κέντρο εξυπηρετεί και τον έλεγχο ρηγματώσης της πλάκας λόγω συστολής. Η απόσταση μεταξύ των ράβδων θα πρέπει να είναι μικρότερη του πάχους της πλάκας ($15 \leq d \leq 30$ cm). Αύξηση οπλισμού θα πρέπει να γίνεται με αύξηση της διαμέτρου των ράβδων, και όχι με μείωση της απόστασης για λόγους πρακτικούς.[10]

Επίσης, συνηθίζεται η τοποθέτηση ενός δευτερεύοντα επιφανειακού οπλισμού μόνο για την κεντρική περιοχή της πλάκας, για την προστασία των κεντρικών πλακών από θρυμματισμό λόγω της μεγάλης θλίψης των γωνιών τους. Η λεπτομέρεια του δευτερεύοντος οπλισμού φαίνεται στο σχήμα 9.

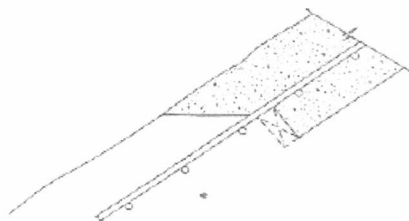


Σχήμα 9: Τυπική τομή κεντρικού κατακόρυφου αρμού συστολής. Διακρίνεται ο δευτερεύον επιφανειακός οπλισμός έναντι θρυμματισμού των γωνιών της πλάκας [11]

1.3.4.3 Αρμοί της πλάκας σκυροδέματος

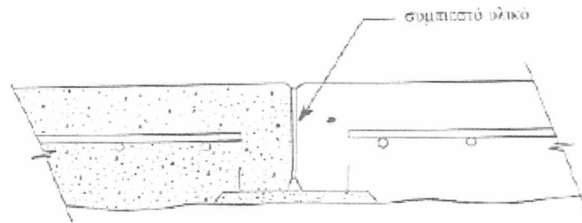
Υπάρχουν δύο είδη αρμών και είναι τα εξής:

1) Κατασκευαστικοί αρμοί: Ο αρμός αυτός είναι απαραίτητος για την 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 (είναι κενός).



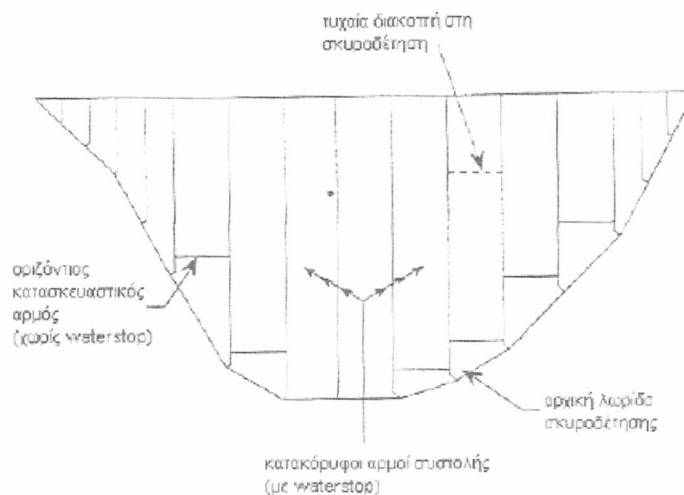
Σχήμα 10: Οριζόντιος κατασκευαστικός αρμός [11]

2) Αρμοί συστολής-διαστολής: Πρόκειται για αρμούς που μπορούν να διαστέλλονται και να συστέλλονται. Αυτό επιτυγχάνεται με την πλήρωση των αρμών με συμπιεστό υλικό. Ο σπλισμός δεν συνεχίζεται μέσα από τον αρμό και επομένως είναι απαραίτητη η χρήση στεγανωτικού υλικού.



Σχήμα 11: Κατακόρυφος αρμός διαστολής-συστολής [11]

Η φύση του σκυροδέματος και οι μέθοδοι κατασκευής της πλάκας απαιτούν την ύπαρξη αρμών. Η πλάκα σκυροδέματος έχει οριζόντιους και κατακόρυφους αρμούς όπως φαίνεται στο σχήμα 12.



Σχήμα 12: Αρμοί της πλάκας σκυροδέματος

(α) Οριζόντιοι αρμοί: Στις νεότερες κατασκευές δεν χρησιμοποιούνται οριζόντιοι αρμοί συστολής – διαστολής (με στεγανωτικά υλικά), καθώς είναι μικρότερη σήμερα η αναμενόμενη παραμόρφωση της πλάκας και μπορεί να διευθετηθεί χωρίς να προκαλείται αύξηση των ρωγμών. Όμως, 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.

(β) Κατακόρυφοι αρμοί: Είναι απαραίτητοι για την κατασκευή της πλάκας, μέσω αυτών μετακινείται ο μεταλλότυπος. Η απόσταση μεταξύ των κατακόρυφων αρμών

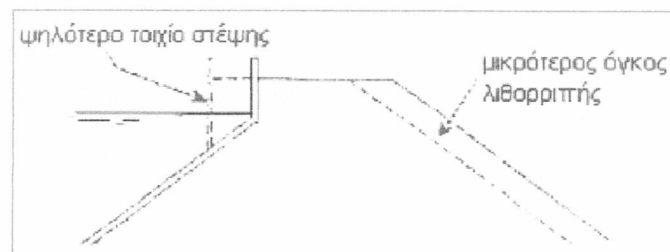
κυμαίνεται από 12 έως 18 m, ανάλογα με το εύρος του μεταλλότυπου που επιλέγεται κάθε φορά ως οικονομικότερος.

Εφόσον οι κατακόρυφοι αρμοί κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπεται και η συστολή και η διαστολή τους, είναι κατάλληλοι και για τις περιοχές που θα δεχτούν εφελκυσμό. Δεν χρειάζεται επομένως να έχουν προβλεφθεί οι εφελκυσόμενες περιοχές.

1.3.5 Τοιχίο στέψης

Στα περισσότερα φράγματα κατασκευάζεται επιπλέον ένα τοιχίο στη στέψη της λιθορριπής (παραπέτο) για τη θραύση των κυματισμών. Σήμερα, για το τοιχίο αυτό προβλέπεται ύψος 3-6m. Ο σχεδιασμός αυτός αποσκοπεί στη μείωση του όγκου της λιθορριπής και έμμεσα στη μείωση του κόστους. Στα ψηλά φράγματα είναι σημαντική η μείωση της απαιτούμενης λιθορριπής εξαιτίας του τοιχίου κυματισμών. Στο σχήμα 13 φαίνεται η μείωση της απαιτούμενης λιθορριπής που επιτυγχάνεται με ψηλότερο τοιχίο στέψης. Επιπλέον, ένα ψηλό τοιχίο στέψης παρέχει έναν βολικό χώρο για την έδραση του εξοπλισμού της πλάκας και τη διέλευση των παρακείμενων οχημάτων. Ακόμα, το τοιχίο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανύψωση παλιότερων φραγμάτων ως και 10 m.

Τα τελευταία χρόνια, για περαιτέρω μείωση του απαιτούμενου όγκου λιθορριπής χρησιμοποιείται και δεύτερο τοιχίο στέψης στα κατάντη. Η κατασκευή δύο τοιχίων στέψης όμως είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και γίνεται προσπάθεια υιοθέτησης των προκατασκευασμένων παραπέτων στα CFRDs. Τα προκατασκευασμένα τοιχία στέψης, δεν συνιστώνται για περιοχές αυξημένης σεισμικότητας.

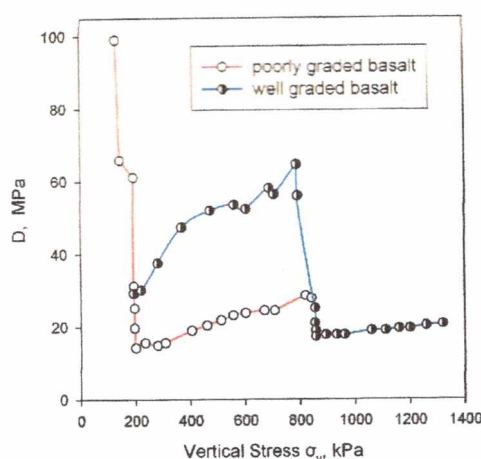


Σχήμα 13: Το ύψος του τοιχίου στέψης

**2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΤΗΣ
ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΤΙΚΗ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ**

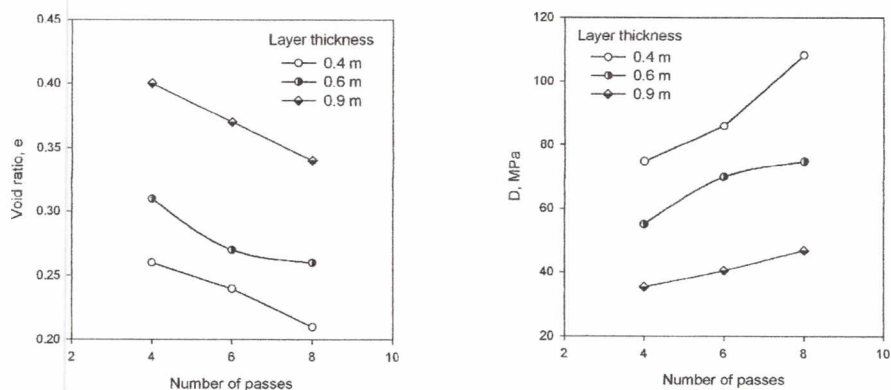
2.1 Εισαγωγή

Στην κατασκευή των CFRDs συχνά έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά πολύ μεγάλης αντοχής όπως ο υγιής βασάλτης (με αντοχή >200 MPa). Το μέτρο ελαστικότητας των υλικών αυτών κατά την κατασκευή είναι αρκετά υψηλό, αλλά κατά την πλήρωση του φράγματος είναι δυνατόν να υποστεί δραστική μείωση. Ένα παράδειγμα κακής συμπεριφοράς τέτοιου υλικού δίνεται στο σχήμα 14 το οποίο παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα για τη μεταβολή του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης δολεριτικού βασάλτη. Στο φράγμα Mohale χρησιμοποιήθηκε καλώς διαβαθμισμένος βασάλτης στην ανάντη ζώνη και κακώς διαβαθμισμένος βασάλτης στην κατάντη ζώνη. Λόγω του γωνιώδους σχήματος και της σημαντικής αλληλεμπλοκής μετά τη συμπύκνωση το κακώς διαβαθμισμένο υλικό έχει μέτρο συμπίεσης $D = 100$ MPa, όμως μετά την αύξηση της κατακόρυφης τάσης σε τιμές άνω των 200 KPa, η τιμή του D μειώνεται δραστικά στα 14 MPa λόγω θραύσης του υλικού. Ο καλώς διαβαθμισμένος βασάλτης έχει αρχική τιμή του D ίση προς 29 MPa, η οποία αυξάνεται μέχρι τα 65 MPa καθώς η κατακόρυφη τάση αυξάνει στα 780 KPa, ενώ αμέσως μετά μειώνεται στην τιμή των 17 MPa. Παρόμοια πτώση του μέτρου ελαστικότητας μετά από κάποια τάση κρίσιμη παρατηρήθηκε επίσης στα φράγματα Karahnjukar, Ita, κλπ.



Σχήμα 14: Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης βασάλτη από το φράγμα Mohale (α) κακή διαβάθμιση (β) καλή διαβάθμιση [5]

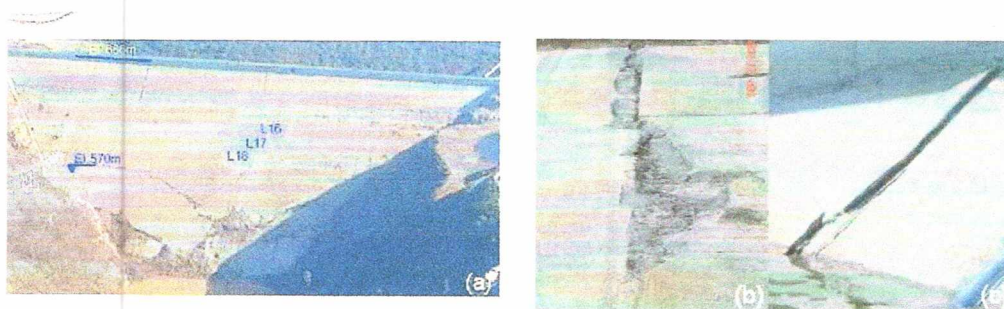
Η χρήση βασάλτη (ή άλλου υλικού) μέσης αντοχής (30-40 MPa), με καλή διαβάθμιση και καλή συμπύκνωση, είναι δυνατόν πέραν της σημαντικής οικονομίας, να αποδώσει μικρότερο λόγο κενών και συνεπώς μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Με κατάλληλη διαβάθμιση και συμπύκνωση είναι δυνατή η μείωση του λόγου κενών e σε τιμές ≤ 0.3 , οπότε η περαιτέρω θραύση του υλικού είναι μικρή, ενώ για $e \leq 0.2$ είναι σχεδόν μηδενική. Στο σχήμα 15 δίνεται η μεταβολή (α) του λόγου κενών e και (β) του μέτρου D ως προς τον αριθμό διελεύσεων του δονητικού συμπυκνωτή (12t) για τρία πάχη στρώσεων από τις δοκιμές συμπύκνωσης ιγνιμβρίτη στο φράγμα El Cajon, το οποίο παρουσίασε εξαιρετική συμπεριφορά.[5]



Σχήμα 15: Φράγμα El Cajon: (α) Λόγος κενών (β) μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης ως προς τον αριθμό διελεύσεων [5]

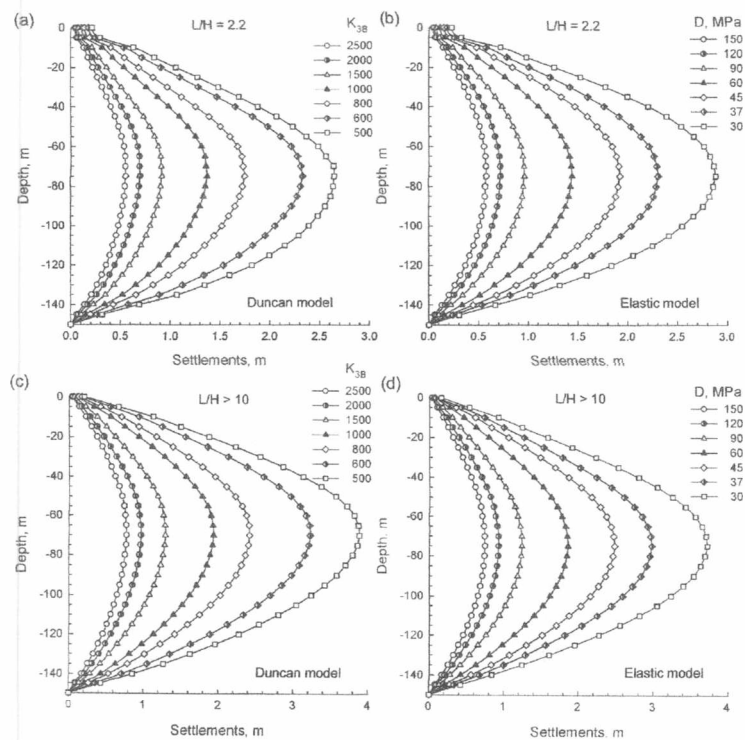
2.2 Καθιζήσεις της λιθορριπής

Οι καθιζήσεις των CFRDs οφείλονται κυρίως στη συμπίεση και τον ερπυσμό της λιθορριπής και του υλικού θεμελίωσης υπό το ίδιο βάρος και το βάρος του νερού και εξαρτώνται από τη φύση του υλικού, την διαβάθμιση και το βαθμό συμπύκνωσης. Επίσης, καθιζήσεις είναι δυνατόν να προκύψουν κατά τη διάρκεια σημαντικής σεισμικής δόνησης λόγω της δυναμικής συνίζησης και της παραμόρφωσης των πρσανών (bulging). Σε παλαιότερα φράγματα, η ελαφρά συμπύκνωση ή η χρήση μεγάλου και ομοιόμορφου μεγέθους λιθορριπής είχε ως συνέπεια την εμφάνιση σημαντικών καθιζήσεων. Σε σύγχρονα φράγματα επιδιώκεται καλή συμπύκνωση με στρώσεις πάχους ≤ 1 m και αρκετές διελεύσεις του συμπυκνωτή. Όμως, με τη συνεχή αύξηση του ύψους των νέων φραγμάτων, αυξάνονται σημαντικά οι τάσεις και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις. Στο σχήμα 16 παρουσιάζονται σημαντικές ρωγμές που εμφανίστηκαν στις πλάκες των φραγμάτων Campos Novos (H=202 m), Barra Grande (H=186 m) και Mohale (H=145 m).

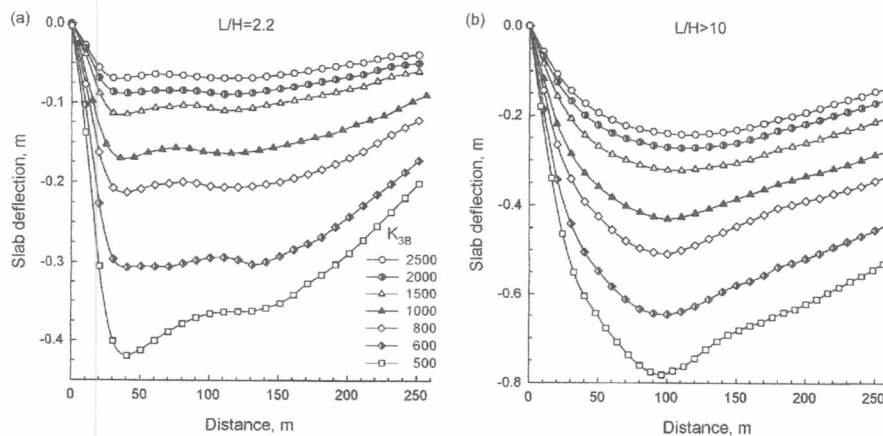


Σχήμα 16: Αστοχίες της πλάκας σκυροδέματος: (a) Campos Novos (b) Barra Grande (c) Mohale [5]

Στην περίπτωση της στενής κοιλάδας, η εγγύτητα των «άκαμπτων» αντρερισμάτων δημιουργεί διαμητικές τάσεις και φαινόμενα αφίδωσης που δεν υπάρχουν σε φράγματα σε ευρείες κοιλάδες με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας. Στο σχήμα 16 δίνονται οι βυθίσεις της πλάκας της λεκάνης για $L/H=2.2$ και $L/H \geq 10$. Λαμβάνοντας τα αποτελέσματα στα σχήματα 16 και 17 συμπεραίνεται ότι για $K_{3B} \geq 1500$ η δυσκαμψία είναι πολύ υψηλή, για $K_{3B} = 800-1000$ υψηλή, για $K_{3B} = 600-800$ μέτρια και για $K_{3B} \leq 500$ χαμηλή.[5]



Σχήμα 16: Καθιζήσεις λόγω κατασκευής στην κεντρική διατομή για διάφορες τιμές δυσκαμψίας: Φράγμα σε στενή κοιλάδα με $L/H=2.2$ (α) Μοντέλο Duncan (β)Ελαστικό μοντέλο. Φράγμα σε ευρεία κοιλάδα με $L/H \geq 10$ (c) Μοντέλο Duncan (d)Ελαστικό μοντέλο.[5]



Σχήμα17: Βύθιση της πλάκας για διάφορες τιμές δυσκαμψίας: (α) Φράγμα σε στενή κοιλάδα με $L/H= 2.2$ (β) Φράγμα σε ευρεία κοιλάδα με $L/H \geq 10$ (Μοντέλο Duncan)[5]

2.3 Καθιζήσεις των επιχωμάτων

Η μέγιστη καθίζηση στην διάρκεια της κατασκευής των επιχωμάτων των λιθόρριπτων φραγμάτων με πλάκα σκυροδέματος καταγράφεται στο μέσον περίπου του ύψους στην μέγιστη διατομή τους και λίγο πιο κατάντη από τον άξονα, λόγω της μικρότερης ακαμψίας της ζώνης 3C. Οι καθιζήσεις και τα συνεπαγόμενα μέτρα «ελαστικότητας» κατά την κατασκευή ($E_{κατ}$) εξαρτώνται από μια σειρά παραμέτρων (ύψος στρώσης, ενέργεια πυκνότητας, ποσοστό λεπτόκοκκων) οι οποίες συνοψίζονται τελικά στην τιμή της πυκνότητας ή τον δείκτη κενών του συμπυκνωμένου αναχώματος. Χαρακτηριστικές τιμές του $E_{κατ}$ για διάφορα έργα κινούνται μεταξύ 28 και 70 MPa.

Στην διαμόρφωση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας σημαντικός είναι ο ρόλος της θραύσης των κόκκων υπό το βάρος των υπερκειμένων στρώσεων λιθορριπής. Το φαινόμενο εμφανίζεται μετά από κάποιο όριο πίεσης (0.5 έως 1 MPa) και αφορά κυρίως σε ανθεκτικού κόκκου υλικά, καθαρής λιθορριπής. Εφόσον ο δείκτης κενών διατηρηθεί σε τιμές κάτω του 0.30 το φαινόμενο βάρος της θραύσης των κόκκων ελαχιστοποιείται.

Με την πλήρωση του ταμιευτήρα η πίεση της λίμνης παραμορφώνει περαιτέρω το επίχωμα. Οι κύριες τάσεις στο σώμα του φράγματος, στην ανάντη περιοχή, τείνουν να γίνουν κάθετες και παράλληλες με την ανάντη παρειά. Η στροφή αυτή στην κατεύθυνση κύριας φόρτισης έχει σαν συνέπεια να εμφανίζεται το επίχωμα περισσότερο άκαμπτο, αφού η διαδρομή του σημείου που απεικονίζει τις ενεργές τάσεις (stress path) πλησιάζει προς την ισότροπη κατάσταση φόρτισης.

Παρατηρήσεις σε μια σειρά φραγμάτων που λειτουργούν οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας κατά την πλήρωση προς αυτό της κατασκευής ($E_{πλ}/E_{κατ}$) είναι της τάξης του 2 έως 2.9.

Η πλάκα παραμορφώνεται κατά την πλήρωση υποχωρώντας σε κατεύθυνση κάθετη προς το επίπεδό της, με τη μέγιστη υποχώρηση να καταγράφεται στο μέσον περίπου του ύψους της. Στην περιοχή της στέψης, λόγω της μικρότερης ακαμψίας του κατάντη τμήματος του φράγματος (ζώνη 3C), παρατηρείται μια πιο έντονη μετακίνηση της πλάκας προς τα κατάντη, συνοδευόμενη από κάποια κάμψη και την εμφάνιση οριζόντιων εφελκυστικών ρηγματώσεων σε ορισμένα έργα, παράλληλων με τη στέψη (TSQ-1, Aquamilpa)

Άλλη αιτία εφελκυστικών ρηγματώσεων που έχει παρατηρηθεί είναι ανάπτυξη καμπτικών καταπονήσεων στην περιοχή της πλάκας κοντά στην πλίνθο, στην περίπτωση που υπάρχει έντονη μορφολογική μεταβολή του βράχου θεμελίωσης: Πράγματι, όταν το πάχος του επιχώματος μεταβάλλεται πολύ σε μικρή σχετικά απόσταση (μορφολογία χαράδρας) τότε η ανισομερής καθίζηση του επιχώματος ευνοεί την ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών παράλληλων με την πλίνθο, σε απόσταση 10 έως 20 m από αυτήν (φράγματα Xingo, Ita, Itapebi). [14]

3. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ

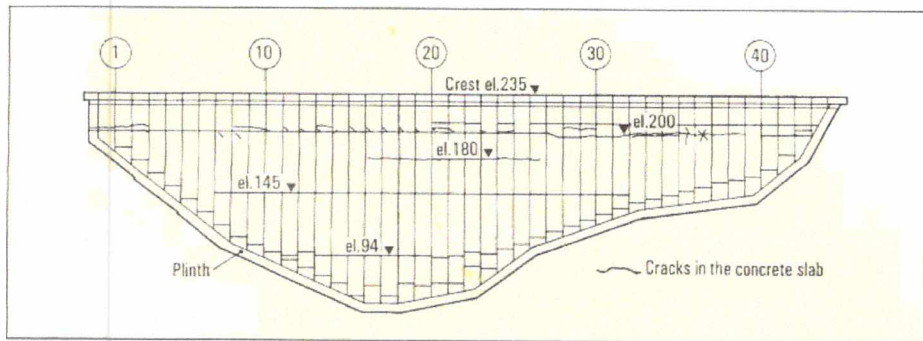
3.1 Foz do Areia (160m, Brazil,1980)

Το Foz do Areia είναι θεμελιωμένο σε βράχο και αποτελείται από βασάλτη πολύ υψηλής αντοχής με περιεκτικότητα 25% σε Breccia. Η λιθορριπή είναι μέτρια διαβαθμισμένη, καλά συμπυκνωμένη με κόκκους έντονα γωνιώδεις. Τα 2/3 του φράγματος καταλαμβάνονται από την κατάντη ζώνη με πιο παχιές στρώσεις και μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Όμως, με την πλήρωση του φράγματος το μέτρο ελαστικότητας σε όλο το εύρος της λιθορριπής φτάνει σε ικανοποιητικό επίπεδο (80 MPa). Οι καθιζήσεις της λιθορριπής περιορίστηκαν πολύ μετά την πλήρωση και έχουν σταθεροποιηθεί.

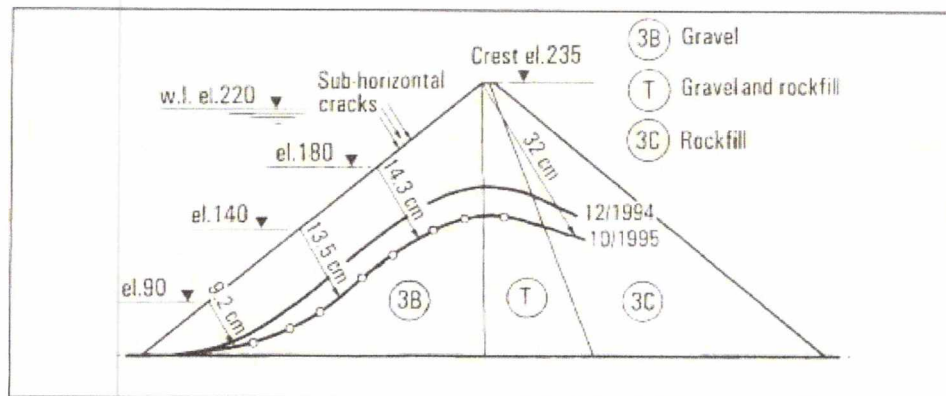
Επειδή η κατασκευή της πλάκας ξεκίνησε πριν ολοκληρωθεί η λιθορριπή και η λειτουργία του φράγματος πριν υποχωρήσουν τα ερπυστικά φαινόμενα, η πλάκα υπέστη μια αρχική παραμόρφωση. Οι μετρήσεις έδειξαν πολύ μεγάλη βύθιση για την πλάκα, η οποία ρηγματώθηκε, λόγω των μεγάλων τάσεων που αναπτύχθηκαν σ' αυτήν από τις παραμορφώσεις της λιθορριπής. Αρχικά, σημειώθηκε εισροή 240 l/s που τελικά σταθεροποιήθηκε στα 70 l/s, 5 χρόνια μετά την πρώτη πλήρωση. Η μικρή εισροή, υποδηλώνει μικρή ρηγμάτωση της πλάκας. [15]

3.2 Aguamilpa (187 m, Mexico, 1993)

Στο φράγμα αυτό παρατηρήθηκε ξαφνική εισροή νερού κατά το τελευταίο στάδιο της πλήρωσης (η εισροή αυξήθηκε από 6 σε 260 l/s). Για να εξηγηθεί αυτό το φαινόμενο διεξήχθησαν έρευνες οι οποίες αποκάλυψαν οριζόντιες ρωγμές στο πάνω μέρος της πλάκας (σχήμα 18) [16, 17]. Προκειμένου να διαπιστωθούν τα αίτια της ρηγμάτωσης μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά του φράγματος. Η λιθορριπή στα ανάντη 2/3 του φράγματος (σχήμα 19) προέρχεται από χαλίκι (ζώνη 3B με $E_{3B} = 260$ MPa) και ανάμικτο χαλίκι με γνιμβρίτη (ζώνη T με $E_T = 130$ MPa), είναι καλά διαβαθμισμένη, πολύ πυκνή και συμπεριφέρθηκε άριστα. Η κατάντη όμως ζώνη 3C, είναι πολύ περισσότερο παραμορφώσιμη ($E_{3C} = 47$ MPa), γιατί αποτελείται από γνιμβρίτη και συμπυκνώθηκε σε στρώσεις πάχους 1.2 m χωρίς προηγουμένως να προστεθεί νερό. Στην κορυφή της λιθορριπής μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής σημειώθηκε μέγιστη καθίζηση 0.185% μετά την 1η πλήρωση της δεξαμενής. Η μέγιστη βύθιση καταγράφηκε στην κορυφή (σχήμα 19) και είναι ίση με 320 mm στη φάση μέγιστης πλήρωσης. [15]



Σχήμα 18: Ρωγμές της πλάκας (οι επιμέρους πλάκες είναι αριθμημένες) [15]



Σχήμα 19: Βύθιση της πλάκας. Η βύθιση μεγιστοποιείται στην κορυφή. [15]

Παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη βύθιση στην κορυφή της πλάκας η οποία αποδίδεται στην ιδιαίτερα παραμορφώσιμη κατάντη ζώνη. Ο λόγος της βύθισης στην κορυφή προς τη βύθιση στο κέντρο της πλάκας είναι 2.2 και η ρηγμάτωση είναι δικαιολογημένη.

Το αρκετά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας των 3B και T, οφείλεται στη χρήση χαλκιού ως λιθορριπής και της συμπύκνωσης σε λεπτές στρώσεις (0.6m και 0.8m αντίστοιχα). Η πολύ μικρή συγκριτικά δυσκαμψία όμως στην κατάντη ζώνη θεωρείται η αιτία ρηγμάτωσης της πλάκας. Τα τόσο διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας μεταξύ γειτονικών ζωνών είχαν ως αποτέλεσμα να αναπτυχθεί απότομη αλλαγή τάσεων στη λιθορριπή και κατά συνέπεια και στην πλάκα. Η λιθορριπή υπέστη μεγάλες μετατοπίσεις που οδήγησαν στην μεγάλη βύθιση της κορυφής της πλάκας (32 cm) και εν συνεχεία στη ρηγμάτωσή της.

3.3 Segredo (145m, Brazil,1993)

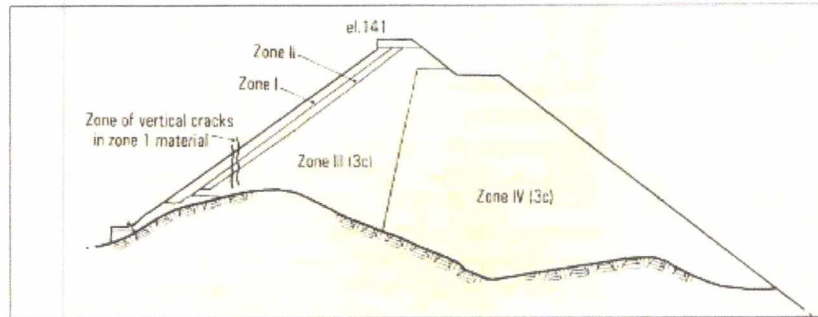
Το Segredo διαθέτει 2 ζώνες υλικών. Η ανάντη ζώνη καταλαμβάνει το 1/3 της λιθορριπής, αποτελείται από βασάλτη μέτριας έως υψηλής αντοχής και στρώσεις πάχους 0.8 m. Για τη συμπύκνωσή της προστέθηκε μεγάλη ποσότητα νερού (25%) και πραγματοποιήθηκαν 6 διελεύσεις από στρωτήρα 10 tn. Τα υπόλοιπα 2/3 της λιθορριπής, κατασκευάστηκαν από βασάλτη πολύ υψηλής αντοχής, στρώθηκαν σε στρώσεις των 1.6 m και η συμπύκνωσή τους έγινε τυπικά με 4 διελεύσεις στρωτήρα 10 tn, αλλά χωρίς να προστεθεί νερό.

Η λιθορριπή του Segredo δεν υπέστη σοβαρή καθίζηση. Η καθίζηση στη στέψη μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής μετρήθηκε ίση με 0.158% και μόλις 0.138% μετά την πρώτη πλήρωση (αλλά και 4 μήνες μετά την πρώτη πλήρωση, υπό την επίδραση ερπυστικών φαινομένων, η καθίζηση στην κορυφή δεν ξεπέρασε τα 34 cm). Η πλάκα όμως υπέστη σημαντική βύθιση (42.7 cm κοντά στην κορυφή και 37.4 cm στο μέσον της), γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα της κατάντη ζώνης. Ωστόσο, η πλάκα δεν ρηγματώθηκε και δεν σημειώθηκε εισροή στο Segredo. [15]

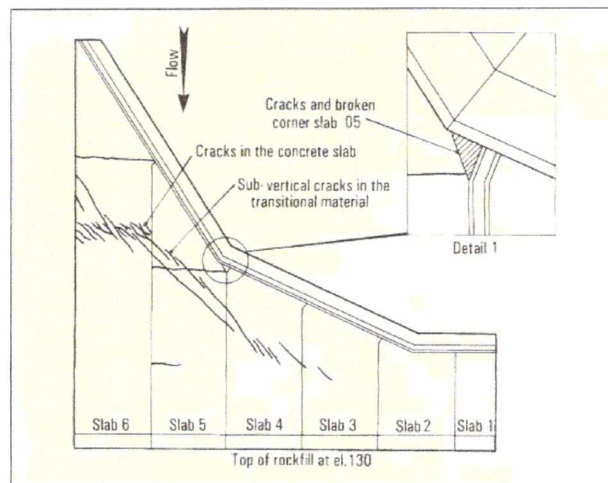
3.4 Xingò (150 m, Brazil, 1994)

Το 150 μέτρων ύψους φράγμα Xingò στη Βραζιλία, ολοκληρώθηκε το 1994. Η λιθορριπή αποτελείται από δύο ζώνες (σχήμα 20). Η ανάντη ζώνη 3B προέρχεται από γνεύσιο συμπυκνωμένο σε στρώσεις πάχους ενός μέτρου ενώ η κατάντη ζώνη 3C συμπυκνώθηκε σε στρώσεις πάχους 2 μέτρων με περιοχές φτωχής ποιότητας βράχου. Το μέτρο ελαστικότητας μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής κυμάνθηκε από 32 MPa στη ζώνη 3B (ανάντη), έως 20-24 MPa στη ζώνη 3C (κατάντη) [15]. Μετά την πλήρωση της δεξαμενής επιτεύχθηκε αρκετά υψηλό μέτρο ελαστικότητας ανάντη στα 76 MPa.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής εμφανίσθηκαν κατακόρυφες ρωγμές στο λεπτόκοκκο συνεκτικό υλικό πάνω από την πλάκα σχεδόν παράλληλα στην πλίνθο στις στάθμες 103 m έως 127 m. Οι ρωγμές αυτές συνδέονται με την ακατάλληλη γεωμετρία του αριστερού αντερείσματος όπως φαίνεται στα σχήματα 21 και 22 αλλά και από την υψηλή παραμορφωσιμότητα του υλικού της ζώνης 3C.



Σχήμα 20: Περιοχές που σημειώθηκαν ρωγμές στο συνεκτικό μεταβατικό υλικό κάτω από την πλάκα κατά τη διάρκεια της κατασκευής [15]



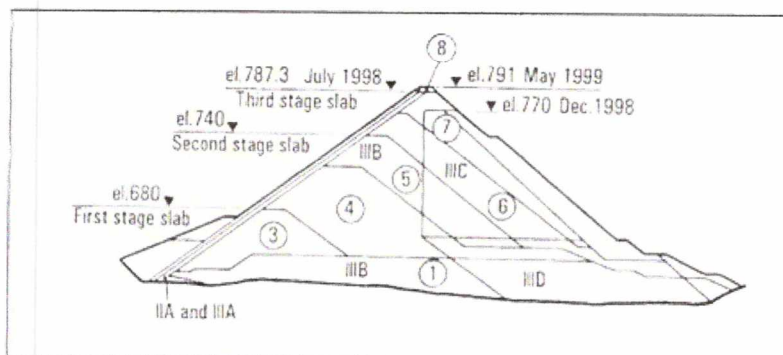
Σχήμα 21: Ρωγμές στο αριστερό τμήμα της πλάκας και το σπάσιμο της γωνίας της πλάκας 5 [15]

Η πλήρωση της δεξαμενής τον Ιούνιο του 1994 έγινε πολύ γρήγορα με τη στάθμη να ανεβαίνει από τα 0 m στα 120 m σε πέντε μέρες. Η διαρροή αυξήθηκε στα 160 l/s και έφθασε τα 195 l/s τον Ιούνιο του 1996. Υποβρύχιες έρευνες έδειξαν την ύπαρξη ρωγμών στο αριστερό αντέρεισμα της πλάκας σκυροδέματος κυρίως στην πλάκα 6. Οι ρωγμές προκλήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής όπως φαίνεται στο σχήμα 21. Στην πλάκα 5, στη σύνδεση με την πλίνθο, μια γωνία της πλάκας βρέθηκε σπασμένη, ενώ μια διαφορική καθίζηση με μέγιστη τιμή τα 30 cm μετρήθηκε μεταξύ των πλακών 4 και 5. Το ατύχημα αυτό σχετίζεται με την απότομη αλλαγή της κλίσης της πλίνθου που επέφερε συγκέντρωση υψηλών εφελκυστικών τάσεων στην περιοχή του πόδα (σχήμα 21). Η διαρροή μειώθηκε ύστερα από προσθήκη εδαφικού υλικού στα ανάντη και σταθεροποιήθηκε στα 150 l/s.[15]

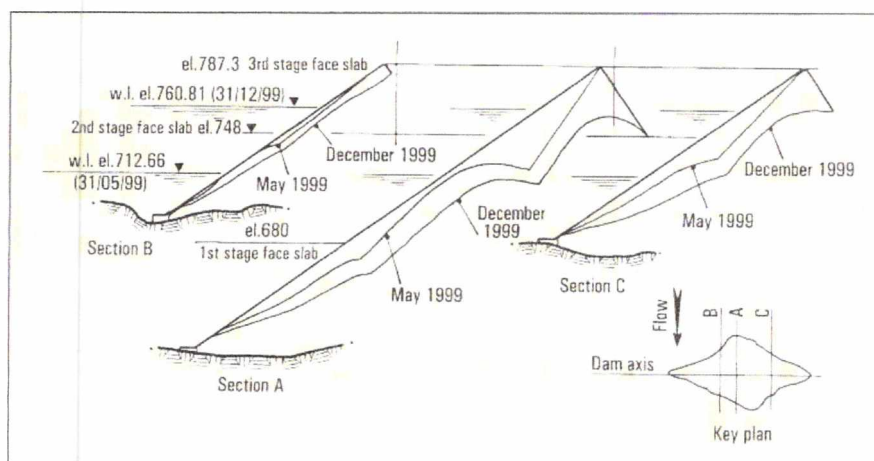
3.5 Tianshengqiao (178 m, China, 1999)

Το 178 μέτρων ύψους φράγμα Tianshengqiao στην Κίνα κατασκευάστηκε σε επτά φάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 22. Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1999. Προηγήθηκε η κατασκευή της ανάντη ζώνης σε τρεις φάσεις για να αποφευχθεί η άμεσα πιθανή

πλημμύρα. Η πλήρωση της δεξαμενής ξεκίνησε 1.3 χρόνια πριν την ολοκλήρωση του φράγματος. Η πλάκα ολοκληρώθηκε το Μάιο του 1999 έχοντας ήδη υποστεί κάποια βύθιση (σχήμα 23).



Σχήμα 22: Tianshengqiao dam: Φάσεις κατασκευής [15]



Σχήμα 23: Η βύθιση της πλάκας στις 2 τελευταίες φάσεις κατασκευής της [15]

Το μέτρο ελαστικότητας κυμάνθηκε από 44 MPa στην ανάντη ζώνη έως 20 MPa στην κατάντη ζώνη, αναλογία 2:1, που είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με το φράγμα Aguamilra. Η μέγιστη βύθιση στην κεντρική διατομή της πλάκας έφθασε τα 114 cm.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής της έβδομης φάσης, κατακόρυφες ρωγμές ποικίλου εύρους εμφανίστηκαν στο συνεκτικό υλικό της μεταβατικής ζώνης στο κεντρικό τμήμα του μετώπου του φράγματος, στις στάθμες 742 m έως 768 m λόγω των εφελκυστικών τάσεων που ασκήθηκαν στην πλάκα κατά την εσπευσμένη κατασκευή του τελευταίου σταδίου (από τα 740 m στα 787.3 m)

Έπειτα η στάθμη της δεξαμενής μειώθηκε από τα 760 m στα 721 m. Οριζόντιες ρωγμές εύρους από 0.1 έως 0.3 mm και περιστασιακά έως 2 mm προκλήθηκαν στην πλάκα. Οι ρωγμές αυτές οφείλονται στην πρόωρη πλήρωση της δεξαμενής μετά το δεύτερο στάδιο και τη γρήγορη περάτωση των σταδίων έξι και επτά.

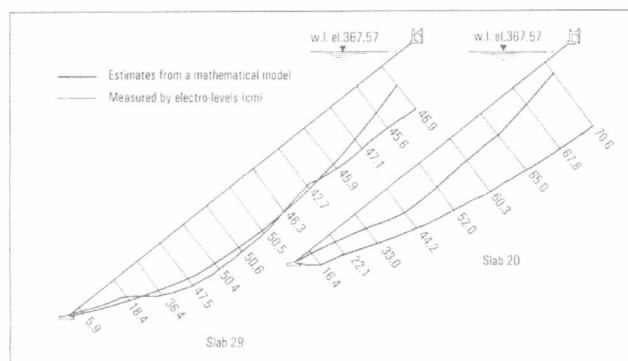
Οι μετρήσεις στη λιθορριπή έδειξαν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις κατά την 1η (πρώρη) πλήρωση. Στην κορυφή του φράγματος σημειώθηκε καθίζηση $>0.52\% = 93$ cm και οριζόντια μετατόπιση 67cm .[15]

3.6 Ità (125 m, Brazil, 2000)

Το 125 μέτρων ύψους φράγμα Ità στη Βραζιλία ολοκληρώθηκε το 2000. Εμφάνισε διαρροή πάνω από 170 l/s ύστερα από την πρώτη πλήρωση η οποία μειώθηκε στα 380 l/s ύστερα από εναπόθεση εδαφικού υλικού στα ανάντη. Η διαρροή τώρα έχει σταθεροποιηθεί περίπου στα 200 l/s. Πριν από τα μέτρα αντιμετώπισης, υποβρύχια έρευνα αποκάλυψε ρωγμές στις πλάκες σκυροδέματος περίπου 10 με 15 μέτρα πάνω και παράλληλα της πλίνθου. Η αριθμητική ανάλυση έδειξε τη σχέση ανάμεσα στην εμφάνιση ρωγμών και την παραμόρφωση μιας μεταβατικής διαπερατής ζώνης μεταβαλλόμενου πάχους κάτω από την πλάκα κοντά στην πλίνθο.

Το ανάντη 1/3 της λιθορριπής είναι κατασκευασμένο από βασάλτη καλά διαβαθμισμένο και συμπυκνωμένο σε στρώσεις των 0.8 m με διαβροχή. Ενώ για την κατάντη ζώνη επιλέχθηκε πιο μαλακή λιθορριπή από βασάλτη και διαμορφώθηκε σε διπλάσιου πάχους στρώσεις 1.6 m, χωρίς προσθήκη νερού και με ελεύθερη εναπόθεση. Ο βασάλτης που χρησιμοποιήθηκε σε όλο το επίχωμα δεν ήταν 100% καθαρός, αλλά περιείχε και Breccia (υλικό με μέτρο ελαστικότητας μόλις 17 MPa). Έτσι, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, για την ανάντη ζώνη το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε 28-39 MPa, για την κατάντη ζώνη μόλις 22 MPa και μετά την 1η πλήρωση 87 MPa και για τις 2 ζώνες.

Η μέγιστη βύθιση που υπέστη η πλάκα ήταν 75 cm στην κορυφή και μικρότερη στο μέσον (σχήμα 24). Η καθίζηση στη στέψη της λιθορριπής μετρήθηκε ίση με 461 mm. Η μεγαλύτερη βύθιση που παρατηρήθηκε στην κορυφή οφείλεται στην ιδιαίτερα παραμορφώσιμη κατάντη ζώνη (ανάλογη περίπτωση με το Aguamilpa) καθώς επίσης και στη στρώση από σαπρόλιθο που τοποθετήθηκε για την εξυγίανση της πλάκας. Παρά τη μεγάλη βύθιση δεν διαπιστώθηκαν ρήγματα στο πάνω μέρος της πλάκας όπως συνέβη στην περίπτωση του Aguamilpa, αλλά μόνο στο αριστερό σύνορο πλάκας-πλίνθου και οφείλονται στην κυρτή επιφάνεια της πλάκας εκεί που συνορεύει με την πλίνθο. [15]



Σχήμα 24: Βύθιση της πλάκας του Ità. [15]

3.7 Machadinho (125 m, Brazil, 2002)

Το 125 μέτρων φράγμα Machadinho ολοκληρώθηκε το 2002 στον ποταμό Pelotas της Ν. Βραζιλίας. Η κατασκευή του διήρκησε 3 χρόνια. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μοιάζουν με αυτά του Ità. Για τις 2 ζώνες (ανάντη και μεταβατική) χρησιμοποιήθηκε βασάλτης σε στρώσεις πάχους 0.8 m, ενώ κατάντη αποσαθρωμένος βράχος σε στρώσεις πάχους 1.6 m. Χρησιμοποιήθηκε λιθορριπή παρόμοιας δυσκαμψίας ανάντη (49 MPa) και κατάντη (56 MPa). Στην μεταξύ των 2 ζωνών διεπιφάνεια δώθηκε εξαιρετικά απότομη κλίση (1.2:1).

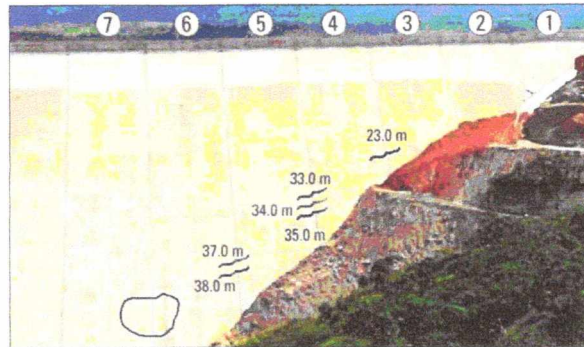
Μετά την 1η πλήρωση της δεξαμενής, η βύθιση στην κορυφή της πλάκας και στο μέσον μετρήθηκε ίση με 37 cm. Στη φάση μέγιστης πλήρωσης, η εισροή ανήλθε στα 850 l/s και μετά από εξυγιαντικά μέτρα περιορίστηκε στα 600 l/s. Υποβρύχιες μετρήσεις που διεξήχθησαν για να διερευνηθεί η αιτία της τεράστιας εισροής δεν διαπίστωσαν ρωγμές στην πλάκα σε στάθμες χαμηλότερες από τη στάθμη της δεξαμενής. Επομένως η εισροή νερού στο φράγμα φαίνεται πως δεν προήλθε από ρωγμές στην πλάκα αλλά πιθανότατα από τον περιμετρικό αρμό, ο οποίος διευρύνεται και είναι δυνατόν να επιτρέπεται εισροή. [15]

3.8 Itapébi (100m, Brazil, 2002)

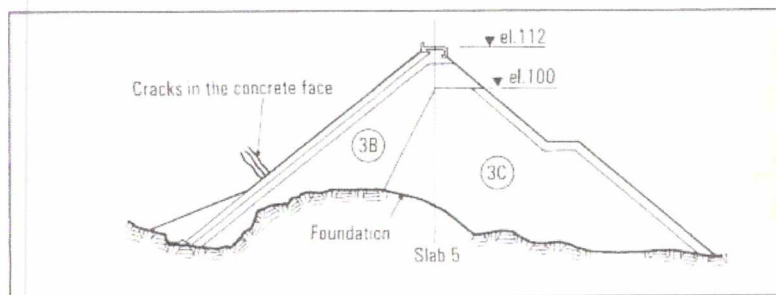
Το Itapébi, φράγμα ύψους 100 μέτρων, ολοκληρώθηκε στη Βραζιλία το 2002. Η διατομή του Itapébi επίσης ακολουθεί την γενική μορφή του Ità.

Η ανάντη ζώνη χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική δυσκαμψία (60 MPa) ενώ πολύ πιο παραμορφώσιμη είναι η λιθορριπή κατάντη (25 MPa). Σημειώνεται ότι η βύθιση στο μέσον της πλάκας 9 (πλάκα πλευρική της μέγιστης διατομής του φράγματος) αυξήθηκε ως τα 30 cm κατά τη διάρκεια της πλήρωσης, αλλά πολύ μικρή αύξηση της βύθισης σημειώθηκε κατά την τελευταία φάση της πλήρωσης. Αντίθετα, η βύθιση στην κορυφή της πλάκας αυξήθηκε δραματικά κατά την ολοκλήρωση της πλήρωσης, φτάνοντας τα 45 cm (σχήμα 27). Η ιδιαίτερα παραμορφώσιμη κατάντη ζώνη (3B) προκάλεσε σημαντική βύθιση στην κορυφή της πλάκας αλλά όχι ρηγματώση. [15]

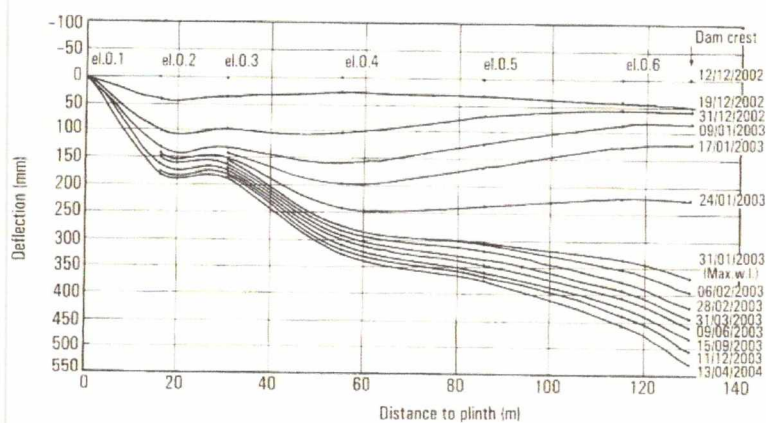
Η εισροή στο Itarébi άγγιξε τα 900 l/s και μειώθηκε στα 150 l/s έπειτα από κατασκευή επιχώματος στην επιφάνεια της πλάκας πάνω από τον πόδα. Υπόγειες μετρήσεις διαπίστωσαν ρωγμές σε 4 πλάκες στα δεξιά, σε μια ζώνη παράλληλα και 10-15 m πάνω από την πλίνθο (βλ. σχήμα 25 και 26). Οι ρωγμές αυτές αποδόθηκαν στην περίπλοκη γεωμετρία του δεξιού συνόρου πλάκας-λιθορριπής που προκάλεσε διαφορικές παραμορφώσεις όπως συνέβη και στην περίπτωση του Xingo.[15]



Σχήμα 25: Itarébi: η θέση των ρωγμών στις πλάκες από σκυρόδεμα. [15]



Σχήμα 26: Itarébi: θέση των ρωγμών και η γεωμετρία της θεμελίωσης. [15]



Σχήμα 27: Itarébi: Μετρήσεις βύθισης της πλάκας 9. [15]

3.9 El Cajon (226 m, Mexico, 1993)

Η θεμελίωση του φράγματος έγινε σε ιγνιμβρίτη από ριοδακτική σύνθεση, από τον οποίο προήλθε επίσης η λιθορριπή μαζί με άλλες αποθέσεις και αποσαθρωμένους βράχους. Στην αριστερή όχθη του El Cajon υπήρχαν αποσυντεθημένοι βράχοι με ασυνέχειες και για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν εκσκαφές και βελτίωση του εδάφους. Έτσι η πλίνθος θεμελιώθηκε σωστά και εξασφαλίστηκε ευστάθεια σε λιθορριπή και πλάκα.

Τα δεδομένα που διατίθενται προέρχονται από δοκιμές πεδίου και εργαστηριακές δοκιμές για την προσέγγιση της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων. Χρησιμοποιήθηκαν δοκιμαστικά διάφορα πάχη στρώσεων, διαφορετικός αριθμός διελεύσεων και διαφορετικά βάρη για το στρωτήρα με στόχο να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή πυκνότητα της λιθορριπής και ταυτόχρονα παρόμοια και ικανοποιητική δυσκαμψία ανάντη και κατόντη. Η διαμόρφωση των ζωνών έγινε με μεγάλη ακρίβεια. Η κατασκευή διήρκησε 2 χρόνια. Οι δοκιμές κατέληξαν σε λιθορριπή πυκνότητας 2370 kg/m^3 με τα εξής μέτρα ελαστικότητας: E_{EOC} : 3B: 90-100 MPa, T: 120-160 MPa, 3C: 70 MPa

Παρατηρείται ότι για λιθορριπή από βράχο μικρής σχετικά πυκνότητας επιτεύχθηκε μετά από πολλές δοκιμές ιδιαίτερα δύσκαμπτη λιθορριπή. Παράγοντες που οδήγησαν σε αυτό ήταν η πολύ καλή κοκκομετρική διαβάθμιση και η καλή ποιότητα της λιθορριπής, η προσθήκη νερού κατά τη διάρκεια της κατασκευής και η χρήση λίγο βαρύτερου στρωτήρα (12 tn) [18]. Το El Cajon αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα για τη διαδικασία κατασκευής του και για την ενόργανη παρακολούθηση του καθώς συμπεριφέρθηκε υποδειγματικά.

Λεπτομέρειες κατασκευής:

Η λιθορριπή

Έγινε γρήγορη τοποθέτηση της λιθορριπής (σε 6 φάσεις), ούτως ώστε να προηγηθεί η φόρτιση και αποφόρτιση του φράγματος πριν τις πλημμύρες. Η κατασκευή του El Cajon άρχισε ακριβώς πριν αρχίσει η υγρή περίοδος στο Μεξικό. Η 1η πλήρωση του φράγματος ξεκίνησε ένα μήνα πριν την ολοκλήρωσή του (Μάϊος 2006) ώστε το φράγμα να προλάβει να αδειάσει μέχρι την έναρξη της υγρής περιόδου (Ιούνιος 2006).

Η μικρή διαφορά των μέτρων ελαστικότητας και για τις 3 ζώνες ($E_T/E_{3B} = 1.2-1.6$ και $E_T/E_{3C} = 2$) επιτεύχθηκε με παρόμοια κοκκομετρική διαβάθμιση και παρόμοιο πάχος στρώσης σε όλες τις ζώνες. Όπως αποδεικνύεται, παρόμοιας ελαστικότητας λιθορριπή επιφέρει μικρότερες παραμορφώσεις στην πλάκα. [18]

Η πλάκα

Η πλάκα κατασκευάστηκε σε 3 στάδια, από πλάκες πλάτους 15 m. Η κατασκευή της ξεκίνησε το 2005, πολύ πριν την ολοκλήρωση της λιθορριπής, όμως δεν υπήρξαν αρνητικές συνέπειες. Ακόμα, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αντιμετωπιστεί έγκαιρα τυχόν κενό μεταξύ πλάκας και προεξέχουσας δοκού σκυροδέματος (extruded curb) που

θα μπορούσε να επιφέρει προβλήματα. Στο τέλος της κατασκευής, σημειώθηκαν πολύ μεγάλες μετακινήσεις στη μεσαία ζώνη T που καλύπτει και το μεγαλύτερο τμήμα του φράγματος. Η καθίζηση που καταγράφηκε στη μεταβατική ζώνη ανήλθε στα 80 cm, παρότι έχει τη μεγαλύτερη δυσκαμψία, διότι η ζώνη αυτή δέχεται τη μεγαλύτερη φόρτιση. [18]

Στους ακόλουθους πίνακες εξετάζεται το El Cajon συγκριτικά με άλλα γνωστά CFRDs που αναλύθηκαν παραπάνω και διαπιστώνεται η συνολικά καλύτερη συμπεριφορά του. Φαίνονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες καθιζήσεις κατά το πέρας της κατασκευής (πίνακας 1) και η εισροή ύδατος (πίνακας 2).[19]

Παρά τις πρόωρες πλημμύρες που καταγράφηκαν, η λιθορριπή του El Cajon υπέστη πολύ μικρότερη καθίζηση από τα υπόλοιπα φράγματα (μέγιστη καθίζηση: 0.004H) Πολύ καλά συμπεριφέρθηκε και η πλάκα του El Cajon, αφού καταγράφηκε πολύ μικρή συγκριτικά,εισροή:150l/s και δεν χρειάστηκε καμία εξυγιαντική μέθοδος στο τέλος.

Πίνακας 1: Μέγιστες καθιζήσεις κατά το πέρας της κατασκευής (%) για 9 φράγματα [19]

Dam	Height (m)	Crest (m)	Length /Height ratio	Rockfill type	Modulus (MPa)	Settlement (m)	Settlement (%H)
Itapebi	120	583	4.8	γεύσιος, διορίτης	60	0	0
Ita	125	880	7	βασάλτης	33	0	0
Machandinho	125	700	5.6	σκόνη άμμου	49	1.6	1.28
Segredo	145	705	5	βασάλτης	42	2.23	1.53
Xingo	150	850	6.1	βασάλτης	32	2.9	2.07
Foz do Areia	160	825	5.2	βασάλτης	38	3.52	2.24
TSQ 1	178	1104	6.2	ασβεστόλιθος	45	3.32	1.87
Aguamilpa	187	642	3.4	αλλουβιακά	260	1.7	0.90
El Cajon	188	550	2.9	ιγνιμβρίτης	110	0.85	0.40

Πίνακας 2: Συνολική εισροή στα 9 CFRDs [19]

Dam	Year of completion	Height (m)	Face slab (m ²)	Initial leakage (l/s)	Specific leakage for 10,000 m ²	Leakage sealing method
Foz do Areia	1980	160	139,000	240	17,3	None
Aguamilpa	1993	187	153,000	260	17	Backfill flyash
Segredo	1993	145	86,000	400	46,5	Silty sand
Xingo	1994	140	122,000	210	17,2	Silty sand
TSQ 1	1999	178	173,000	150	8,7	None
Ita	2000	125	110,000	1700	154,5	Silty sand
Machandinho	2002	125	93,000	850	91,4	n/a
Itapebi	2002	120	67,000	900	134,4	Silty sand
El Cajon	2006	188	113,300	150	13,2	None

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των 9 φραγμάτων που μελετήθηκαν:

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά των 9 CFRDs [19]

	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ 9 ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ: ΛΙΘΟΡΡΙΠΗ							
	μέτρα ελαστικότητας (MPa) EOC/FF			Πάχος στρώσης(m)		Κοκκομετρική διαβάθμιση		
	ανάπτυξη	ενδιάμεσα	κατάληξη	ανάπτυξη	κατάληξη	Cu=D10/D60	Cc=D10/D60	Dmax
Aguamilpa	260	130	47					
Tianshengguiao	92		52	0.6 & 0.8	1.2	85	5.8	600mm
Xingo	49	-	22	1	2	15-20		
Itá	68-32 / 76	-	24 / 76	0.8	1.6	18	80	650mm & 750mm
Machandinho	49	-	56	0.8	1.6	11κ'13.3	16	700mm & 750mm
Itapébi	60		25	0.8	1.6	-	-	-
Segredo	77-55	-	45-30	0.8	1.6	7.4κ'10.2	1.4	-
Foz do Areia	38 / 80	-	32 / 80	0.8	1.6	6	-	600mm
El Cajon	90	120-160	70	0.8	1.4	15-20	-	800mm & 600mm

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά των 9 CFRDs [19]

	ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ			ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ νερό που προστέθηκε	ΚΛΙΣΕΙΣ		περιγραφή της λιθορριπής	
	πορώδες	δείκτης κενών	διελεύσεις κ' βάρος στρωτήρα		ανάπτυξη	κατάληξη	ανάπτυξη	κατάληξη
	Aguamilpa		0.18		4p:10tn	1.5:1	1.4:1	Πυκνά καλά διαβαθμ. χαλίκι +βράχος
Tianshengguiao	19 & 17.5	0.23	6p:16tn	20	1.4:1	1.3:1	συμπαγής γνεύσιος	αδύναμος βράχος
Xingo			4p:10tn	1.5 κ' καθόλου	1.4:1	1.3:1	Γρανιτικός γνεύσιος / συμπαγής και αποσθρωμένος γρανιτικός γνεύσιος	
Itá		0.31		μόνο ανάπτυξη	1.3:1	1.3:1	υψηλής διατμητικής αντοχής βασάλτης	πιο μαλακός βασάλτης
Machandinho	-	-			1.4:1	1.4:1		αποσθρωμένος βράχος
Itapébi								
Segredo	31%	0.27 & 0.37	6 & 4p:10tn	25 κ' καθόλου	1.3:1	1.4:1	βασάλτης υψηλής αντοχής	πολύ υψηλής αντοχής αλλά με 50%Breccia
Foz do Areia			4p:10tn		1.4:1	1.4:1	βασάλτης πολύ υψηλής αντοχής	
El Cajon			6p:12tn				γυμνήριτης	

3.10 Mohale (145 m, Νότια Αφρική, 2000)

Το Mohale αποτελεί αξιοσημείωτο παράδειγμα CFRD εξαιτίας της σφοδρής ρηγμάτωσης της πλάκας του και της ολοκληρωτικής του αστοχίας. Το 2006 μεγάλες πλημμύρες έπληξαν την περιοχή, η στάθμη της δεξαμενής ανυψώθηκε απότομα και σημειώθηκαν σημαντικές καθιζήσεις στη λιθορριπή κοντά στην περιοχή της στέψης. Οι θλιπτικές τάσεις στο κέντρο της πλάκας αυξήθηκαν. Στο μεταξύ η λιθορριπή υπέστη απότομο θρυμματισμό και η πλάκα τελικά αστόχησε.

Η εμπειρία του Mohale θα πρέπει να αξιοποιηθεί στα επόμενα φράγματα και να μην επαναληφθούν τα ίδια λάθη. Είναι σημαντικό επομένως να γίνει μια εκτενής αναφορά στην περίπτωση αυτού του φράγματος.

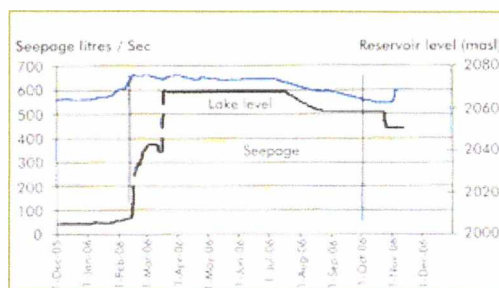


Σχήμα 28: Η υπερχείλιση του Mohale μετά τις πλημμύρες.

Αναλυτικά η χρονική εξέλιξη της ρηγμάτωσης του Mohale:

Το Mohale ολοκληρώθηκε το 2000 στο Lesotho (Ν. Αφρική). Το Φεβρουάριο του 2006, ενώ το φράγμα ήταν ήδη σε λειτουργία, ισχυρές βροχοπτώσεις έπληξαν την περιοχή με αποτέλεσμα την απότομη άνοδο της στάθμης της δεξαμενής και κάποια υπερχείλιση (σχήμα 28). Αυτό επέφερε μεγάλες καθιζήσεις στη λιθορριπή, κατάντη και στην περιοχή της στέψης, και σημαντική αύξηση των θλιπτικών τάσεων στο κεντρικό τμήμα της πλάκας που αστόχησε (σχήμα 31 και 32). Σημειώνεται ότι για συνήθη φράγματα ο λόγος της οριζόντιας μετακίνησης στη στέψη προς την καθίζηση είναι 0.65, ενώ στο Mohale μόλις 0.35.

Η πρώτη ρωγμή σημειώθηκε το Φεβρουάριο του 2006 και προκάλεσε κραδασμό που καταγράφηκε από σειсмоγράφο τοποθετημένο στην πλάκα. Ακολούθησε η αποκόλληση της πλάκας και της προεξέχουσας δοκού σκυροδέματος (extruded curb) που έφερε απότομη μείωση των τάσεων στην πλάκα και άνοιγμα των αρμών. Η εισροή έφτασε τα 600 l/s. Περαιτέρω μετρήσεις που έγιναν έδειξαν ότι αιτία της αρχικής ρηγμάτωσης ήταν η σημαντική θλίψη των μεσαίων πλακών.

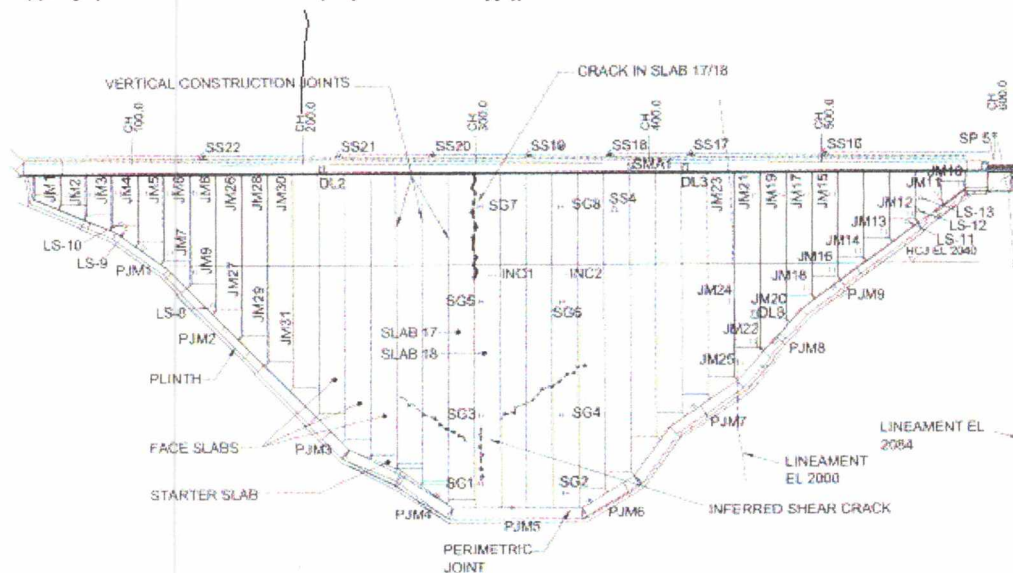


Σχήμα 29: Η εξέλιξη της εισροής στο Mohale σε συνάρτηση με την άνοδο της στάθμης της δεξαμενής [20]

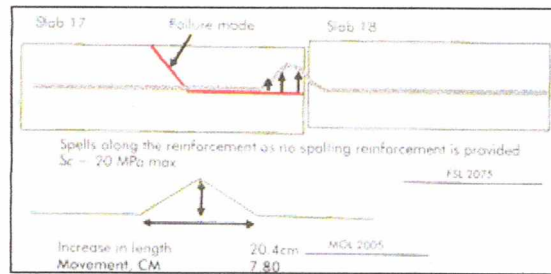


Σχήμα 30: Η κεντρική διατομή του Mohale με λεπτομέρειες της πλίνθου και της κορυφής. [20]

Φαίνεται πως από τη στιγμή που εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή, στα μέσα του Φλεβάρη η εισροή αυξήθηκε ραγδαία. Οι πρώτες ρωγμές της πλάκας φαίνονται στο σχήμα 31, ενώ η προστριβή μεταξύ των πλακών 17 και 18 που προκάλεσε αυτές τις ρωγμές φαίνεται σε λεπτομέρεια στο σχήμα 32.



Σχήμα 31: Ρωγμές της πλάκας [20]



Σχήμα 32: Η σχετική κίνηση των πλακών 17 και 18 [20]

Πώς συμπεριφέρθηκε η λιθορριπή:

Η λιθορριπή του Mohale προέρχεται από δολερητικό 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.

Το μέτρο ελαστικότητας της λιθορριπής υπολογίστηκε με ανάδρομη ανάλυση μέσω των καθιζήσεων ίσο με 32 MPa ανάντη και 24 MPa κατόντη. Επιπλέον, αν η λιθορριπή είχε διαβραχεί επαρκώς, θα υπόκειτο σε λιγότερο ή καθόλου θρυμματισμό. Πιο πλαστικά συμπεριφέρθηκε η λιθορριπή κατά την 1η πλήρωση.

Είναι προφανές λοιπόν ότι η αρχική αιτία των προβλημάτων του Mohale ήταν η ιδιαίτερα παραμορφώσιμη λιθορριπή του. Με τις πλημμύρες, υπέστη τεράστια καθίζηση, και από εκεί ξεκίνησε η καταπόνηση της πλάκας του. Με την αύξηση του φορτίου επήλθε ο θρυμματισμός της λιθορριπής που κατέληξε σε αστοχία του φράγματος. Αποδείχτηκε πως η λιθορριπή θρυμματίστηκε για εξαιρετικά μικρή τάση και μάλιστα ακαριαία εξαιτίας της ξηρής της συμπίκνωσης και της μικρής της δυσκαμψίας. [20]

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ:

Στην περίπτωση του φράγματος Mohale, η ρηγμάτωση και το άνοιγμα αρμών είναι εξίσου σημαντικά αίτια εισροής. Η ρηγμάτωση της πλάκας εισήγαγε περισσότερες παραμορφώσεις στο φράγμα απ' ότι οι καθιζήσεις της ίδιας της λιθορριπής και οι μετατοπίσεις αυτές είναι δυσκολότερο να περιοριστούν. Η εμπειρία του Mohale αξιοποιήθηκε άμεσα στην κατασκευή του Karahnjukar (Ανατολική Ισλανδία, 2009) και έτσι λήφθηκαν ειδικά μέτρα πρόληψης της ρηγμάτωσης της πλάκας.

Από άποψη ανάλυσης, τονίζεται η χρησιμότητα των επί τόπου μετρήσεων που συμπληρώνουν τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Χρειάζεται επιπλέον βελτίωση των εργαστηριακών μεθόδων με βάση δεδομένα παλιότερων μετρήσεων και σαφέστατα η χρήση τρισδιάστατων μη-γραμμικών μοντέλων προσομοίωσης. [20]

Για τον περιορισμό της διεύρυνσης των αρμών προτάθηκε μεγαλύτερη απόσταση ανάμεσα στις πλάκες της θλιβόμενης ζώνης. Οι αρμοί αυτοί δεν θα πρέπει να είναι κενοί αλλά να περιέχουν συμπιεστό υλικό (συμπιεστότητας > 50% και μέτρου ελαστικότητας > 8 MPa) για την αποφυγή της προστριβής των πλακών. Προτάθηκε επίσης, η διαμόρφωση 4 κατακόρυφων αρμών 4 Προηγήθηκε διόρθωση του μέτρου ελαστικότητας λόγω του φαινομένου αψίδωσης (arching) το οποίο εντείνεται από το τριγωνικό σχήμα κοιλάδας. Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε απλοποιητικά από την 2D αριθμητική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ίσο με $(40 \cdot 0.8) = 32$ MPa ανάντη και $(30 \cdot 0.8) = 24$ MPa κατόντη των 50 mm στα κενά μεταξύ των πλακών. Επιπλέον συνιστώνται 7 αρμοί των 25 mm στην οριζόντια διεύθυνση. [20]

ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ:

- Συνιστάται ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή αλληλουχία των εργασιών. Η τοποθέτηση της πλάκας θα πρέπει να γίνεται μετά το πέρας της κατασκευής της λιθορριπής και η πλήρωση της δεξαμενής θα πρέπει να ξεκινά αφού έχουν υποχωρήσει τα φαινόμενα ερπυσμού. Όμως, όταν οι συνθήκες επιβάλλουν την πρόωρη εκτέλεση κάποιων βημάτων, π.χ. στο φράγμα El Cajon, τα μεγάλα προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν με συνεχή παρακολούθηση των παραμορφώσεων και μέτρα ενίσχυσης της πλάκας, η οποία καταπονείται ιδιαίτερα. [15]
- Απότομες κλίσεις των συνοριακών γραμμών μεταξύ των ζωνών ενισχύουν τη ρηγμάτωση και τη διεύρυνση των αρμών. Παρόμοιες συνέπειες θα είχε μια εκσκαφή στα κατόντη ενός φράγματος και δεν συνιστάται.
- Συμπύκνωση με βαρύτερους στρωτήρες από τους τυπικούς (10 tn) δεν εγγυάται μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (περίπτωση Tiangesquiao:στρωτήρας 15 tn).
- Η διαβροχή της λιθορριπής όπου είναι δυνατή (π.χ. λιθορριπές όχι αποσαθρωμένες ή που να μαλακώνουν με την προσθήκη νερού), συντελεί δραστικά στη βελτίωση των ιδιοτήτων της λιθορριπής και της απόκρισης του φράγματος.
- Το τελικό στάδιο της 1ης πλήρωσης αποδεικνύεται ότι είναι το πιο κρίσιμο για το άνω μέρος της πλάκας. Υπάρχουν πολλές καταγραφές για ρηγμάτωση σε αυτή τη χρονική στιγμή (π.χ. φράγμα Itapébi).

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 Καταστατικό προσομοίωμα Duncan

Για την ρεαλιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λιθορριπής και των χαλίκων χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα Duncan [21]. Το προσομοίωμα θεωρεί μία υπερβολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, στην οποία το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Young δίδεται από την σχέση

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2\sigma_3 \sin \phi + 2c \cos \phi} \right]^2$$

όπου σ_1, σ_3 = κύριες τάσεις, K, R_f, n = σταθερές του υλικού, ϕ = γωνία διατμητικής αντοχής, c = συνοχή και p_a = η ατμοσφαιρική πίεση.

Η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την περιβάλλουσα τάση και δίνεται από τον τύπο:

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)$$

όπου ϕ_0 και $\Delta\phi$ = σταθερές του υλικού. Το μέτρο ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση δίνεται:

$$E_{ur} = K_{ur} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n$$

όπου K_{ur} = σταθερά του υλικού που λαμβάνει τιμές $1.2K \leq K_{ur} \leq 3K$.

Επιπλέον, το μέτρο διόγκωσης δίνεται από τη σχέση:

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

όπου K_b, m = σταθερές του υλικού. Τα όρια του B δίνονται από τη σχέση $B = E_t/3(1-2\nu)$. Για δείκτη Poisson $\nu = 0.49$ η μέγιστη τιμή είναι $B_{\max} = 17E_t$, ενώ η ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί σε γεωστατικές συνθήκες

$$B_{\min} = \frac{E_t}{3} * \left(\frac{2 - \sin \phi}{\sin \phi} \right)$$

Το κριτήριο φόρτισης αποφόρτισης καθορίζεται από τη σχέση [22,23] :

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}} \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{1/4}$$

όπου σ_{1f}, σ_{3f} = οι κύριες τάσεις κατά την αστοχία.

Αν $S \geq S_{max}$, χρησιμοποιούνται τα μέτρα φόρτισης (εφαπτομενικό μέτρο Young κλπ), διαφορετικά χρησιμοποιούνται τα μέτρα ελαστικότητας της αποφόρτισης. Το καταστατικό μοντέλο εισήχθη στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2007) με δυνατότητα μετατροπής από τον χρήστη. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων έγιναν συγκρίσεις τους, με τα αποτελέσματα μαθηματικών αναλύσεων και πειραματικών δοκιμών. [24]

4.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method ή FEM) αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των φραγμάτων αυτών με ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Κατά την μέθοδο αυτή, τα διάφορα μέρη της κατασκευής διακριτοποιούνται σε πολύ μικρότερα τμήματα «συνεχούς» μέσου, που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία.

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο προσδιορίζεται από τα σημεία των κορυφών του που ονομάζονται κόμβοι. Για κάθε στοιχείο αναπτύσσεται το μητρώο δυσκαμψίας το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολής των τάσεων εντός του στοιχείου όταν είναι γνωστή η μεταβολή των μετατοπίσεων στους κόμβους. Τα μητρώα δυσκαμψίας όλων των πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος «συναθροίζονται», λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται γειτονικά στοιχεία, και σχηματίζεται το καθολικό μητρώο δυσκαμψίας (global stiffness matrix).

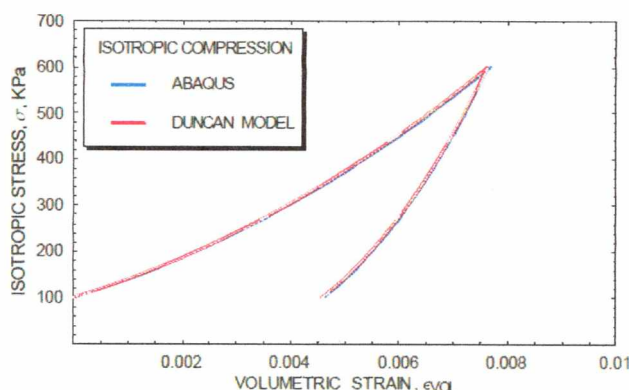
Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται με την εύρεση όλων των μετατοπίσεων των κόμβων της κατασκευής, με τρόπο που να ικανοποιεί την ισορροπία, το συμβιβαστό των παραμορφώσεων, την σχέση τάσης-παραμόρφωσης, τις συνοριακές συνθήκες και τις αρχικές συνθήκες όλου του συστήματος. Για την επίλυση των εξισώσεων ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία ο καταστατικός νόμος χρησιμοποιείται αρκετές φορές. Όσο πιο πολύπλοκο είναι το καταστατικό προσομοίωμα τόσο πιο πολύ υπολογιστικό χρόνο χρειάζεται το σύστημα για να επιλυθεί.

Οι αναλύσεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε 2 ή 3 διαστάσεις. Για την περίπτωση της ανάλυσης λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, που είναι θεμελιωμένα σε σχετικά στενή κοιλάδα, επιβάλλεται η χρήση της τρισδιάστατης ανάλυσης για την πιο ρεαλιστική απεικόνιση του φράγματος και την ορθή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του. Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

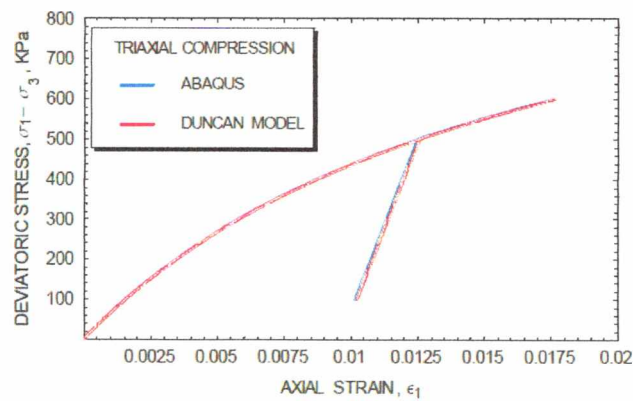
4.2.1 Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS

Πρόκειται για έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που βελτιώνεται συνεχώς κατά τα τελευταία χρόνια, και χρησιμοποιείται σημαντικά σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού, μηχανολόγου, αεροναυπηγού κλπ. Σήμερα το πρόγραμμα ABAQUS παρέχει ένα πολύ ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο για πλήρη προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, της στατικής συμπεριφοράς, της δυναμικής συμπεριφοράς, της ροής διαμέσου του εδάφους, της διάχυσης θερμότητας, κλπ. Το πρόγραμμα διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό έτοιμων καταστατικών προσομοιωμάτων για διάφορα υλικά και διάφορες διεπιφάνειες μεταξύ υλικών. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος είναι ότι επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων καταστατικών προσομοιωμάτων που δημιουργούνται εξολοκλήρου από την χρήστη. Οι αναλύσεις παρέχουν αποτελέσματα με ελεγχόμενη ακρίβεια και μεγάλη ταχύτητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα κρίσιμα για την προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, στατικής ανάλυσης και σεισμικής ανάλυσης των CFRDs και αποτελούν βασικό λόγο επιλογής του συγκεκριμένου λογισμικού.

Προηγούμενη ερευνητική εργασία στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας είχε ως αποτέλεσμα την ενσωμάτωση στον κώδικα ABAQUS μίας σειράς καταστατικών σχέσεων για εδαφικά υλικά, όπως π.χ. το μοντέλο Duncan & Chang [24]. Η ενσωμάτωση καταστατικών σχέσεων υλικών θα πρέπει να επιβεβαιώνεται με συστηματικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς των υλικών σε διαφορετικές πειραματικές δοκιμές και αντίστοιχες μαθηματικές προσομοιώσεις.



Σχήμα 33: Επαλήθευση του καταστατικού μοντέλου Duncan που ενσωματώθηκε στον κώδικα ABAQUS: Αποτελέσματα δοκιμής ισότροπης θλίψης, με κλάδο φόρτισης και αποφόρτισης, από προσομοίωση με τον κώδικα ABAQUS και με το πρόγραμμα Mathematica. [24]



Σχήμα 34: Η επαλήθευση του καταστατικού μοντέλου Duncan που ενσωματώθηκε στον κώδικα ABAQUS: Αποτελέσματα δοκιμής τριαξονικής θλίψης με κλάδο φόρτισης και αποφόρτισης, από προσομοίωση με τον κώδικα ABAQUS και με το πρόγραμμα Mathematica (Dakoulas 2007).

Στο σχήμα 33 συγκρίνεται η αριθμητική προσομοίωση μιας ισοτροπικής τριαξονικής δοκιμής η οποία γίνεται σε ένα δοκίμιο που στερεοποιείται αρχικά σε $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 100$ KPa και εν συνεχεία φορτίζεται ισοτροπικά μέχρι τα 600 kPa. Μετά αποφορτίζεται ισοτροπικά στα 100 KPa. Στο σχήμα παρουσιάζεται η ισοτροπική τάση σ_1 ως προς την ογκομετρική παραμόρφωση ϵ_{vol} . Η μπλε καμπύλη δίνει τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με το ABAQUS, ενώ η κόκκινη καμπύλη δίνει τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης με το Mathematica. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν.

Στο σχήμα 34 συγκρίνεται η αριθμητική προσομοίωση μιας δοκιμής τριαξονικής θλίψης η οποία γίνεται σε ένα δοκίμιο που στερεοποιείται αρχικά σε $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 100$ kPa και εν συνεχεία η κατακόρυφη ορθή τάση αυξάνει μέχρι τα 500 kPa ενώ η οριζόντια παραμένει σταθερή. Μετά η κατακόρυφη ορθή τάση μειώνεται στα 100 kPa, και εν συνεχεία αυξάνει πάλι μέχρι τα 600 kPa. Στο σχήμα παρουσιάζεται η αποκλίνουσα τάση $\sigma_1 - \sigma_3$ ως προς την αξονική παραμόρφωση ϵ_1 . Η μπλε καμπύλη δίνει τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με το ABAQUS, ενώ η κόκκινη καμπύλη δίνει τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης με το Mathematica. Παρατηρείται και πάλι ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν.

5. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΧΩΡΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Το υδροηλεκτρικό έργο της Μεσοχώρας είναι το πρώτο κατά την ροή έργο ταμίευσης και αξιοποίησης των νερών του ποταμού Αχελώου. Περιλαμβάνει ένα λιθόρριπτο φράγμα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, έναν εκχειλιστή τύπου ανοιχτής διώρυγας δυνατότητας 3000 m/s^2 , σήραγγα προσαγωγής μήκους 7.4 km και σταθμό παραγωγής $2 \times 80 \text{ MW}$. [14]

Στη Μεσοχώρα η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου φράγματος υπαγορεύτηκε από τεχνικοοικονομικά κριτήρια, ένα από τα οποία είναι η ανυπαρξία εκμεταλλεύσιμου αργιλικού υλικού στην κοντινή περιοχή του έργου. Η λειτουργία του φράγματος δεν έχει ξεκινήσει ακόμα λόγω περιβαλλοντικών ενστάσεων και επαναπροσδιορισμού ορισμένων περιβαλλοντικών όρων.

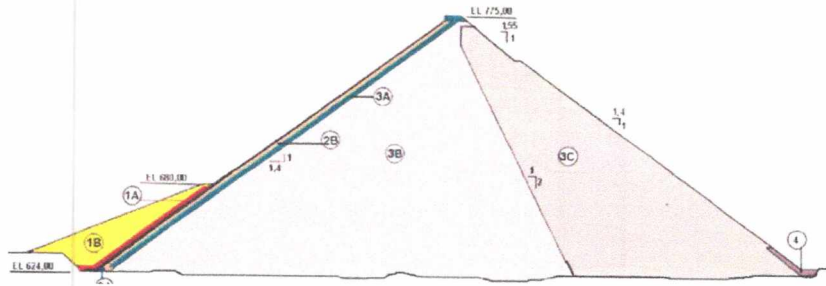
Το φράγμα, ύψους 150 m (σχήμα 35) είναι το πρώτο λιθόρριπτο επίχωμα με πλάκα σκυροδέματος στην Ελλάδα και όταν κατασκευάστηκε ήταν το υψηλότερο φράγμα του τύπου αυτού στην Ευρώπη. Το απόλυτο υψόμετρο της στέψης είναι 775 m και το μήκος της 300m. Ο συνολικός όγκος του επιχώματος είναι περίπου $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η κλίση ανάντη είναι 1.4:1 (H:V) ενώ κατάντη 1.4:1 μεταβαλλόμενη προς 1.55:1 στα τελευταία 40 προς τη στέψη. Η αλλαγή αυτή έγινε αφού είχε ληφθεί υπόψη η σεισμική καταπόνηση και η ενίσχυση του σεισμικού κύματος κοντά στην στέψη λόγω της στενής κοιλάδας.

Οι ζώνες 3B και 3C αποτελούνται από λιθορριπή λατομείου ή αναγκαστικές εκσκαφές, χρησιμοποιώντας στρώσεις πάχους 1 m στη ζώνη 3B και 1.5 m στη ζώνη 3C. Επομένως, η ζώνη 3B είναι σχετικά πιο δύσκαμπτη από τη ζώνη 2C. Η μέση τιμή του λόγου κενών είναι 0,38. Η πλάκα σκυροδέματος έχει τοποθετηθεί πάνω σε μια στρώση πάχους 0.4m καλά διαβαθμισμένου αμμοχάλικου μέγιστου κόκκου 75 mm- ποσοστό άμμου 35-55% (ζώνη 2B). Λόγω της κοκκομετρικής διαβάθμισης και καλύτερης συμπίκνωσης, η ζώνη 2B είναι αρκετά πιο δύσκαμπτη από τη ζώνη 3B. Εκτός της οριζόντιας συμπίκνωσης της ζώνης 2B με τον 12 t δονητικό συμπτυκνωτή, το υλικό συμπτυκνώθηκε και στην ανάντη παρειά με ελαφρύτερο συμπτυκνωτή κεκλιμένης επιφάνειας. Κατασκευαστικές πυκνότητες της τάξεως των 2.25 έως 2.30 t/m^3 καταγράφηκαν στον ποιοτικό έλεγχο.

Κατάντη του αρμού-πλίνθου-πλάκας και σε περιορισμένο πλάτος εκατέρωθεν, τοποθετήθηκε η ζώνη αμμοχάλικου 2A με μέγιστο κόκκο 19.5 mm ώστε να αποτελέσει φίλτρο συγκράτησης των λεπτόκοκκων της ζώνης 1A σε περίπτωση μεγάλων παραμορφώσεων. Η ζώνη 2A αναμείχθηκε με τσιμέντο σε αναλογία 5% για να προσφέρει καλύτερη στήριξη της πλάκας στη θέση του περιμετρικού αρμού.

Μετά την ολοκλήρωση της πλάκας σκυροδέματος, στο κάτω μέρος της κατασκευάστηκε ένα επίχωμα με μέγιστο ύψος 55m για επιπλέον προστασία ενάντια στη διείσδυση ύδατος.

Τα υλικά κατασκευής προέρχονται κυρίως από ασβεστολιθικά λατομεία που βρίσκονται στην κατακλυζόμενη ζώνη. Συνολικά $5.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ λιθορριπής τοποθετήθηκαν στο επίχωμα[25].



1A	Αδιαπέρατα υλικά από δανειοθαλάμους	1B	Τυχαία υλικά Προϊόντα εκσκαφών η υλικά από δανειοθαλάμους.
2A	Ειδικό υλικό φίλτρου διαβαθμισμένο από αμμοχάλικα ποταμού	2B	Αμμοχάλικα ποταμού διαβαθμισμένα και εμπλουτισμένα.
3A	Επιλεγμένο υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.	3B	Υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.
3C	Υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.	4	Επιλεγμένο υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.

Σχήμα 35: Φράγμα Μεσοχώρας και διαζώνιση

5.2 Λιθορριπή

Το υλικό λιθορριπής των ζωνών 3A, 3B, 3C ήταν υγιές έως ελαφρά αποσπασμένος ασβεστόλιθος που προερχόταν κυρίως από λατομεία και εκσκαφές του έργου (εκχειλιστής κ.λ.π).

Ο μέγιστος κόκκος και το ύψος της στρώσης για τη συμπύκνωση φαίνονται στον πίνακα 5, ενώ τα λεπτόκοκκα προδιαγράφονται στο 5% μέγιστο διερχόμενο στο Νο 200 για όλες τις ζώνες.

Πίνακας 5: Ζώνες φράγματος Μεσοχώρας, απαιτήσεις προδιαγραφών και επιτόπου πυκνότητες

Υλικό	Ζώνη	Πάχος Στρώσης(m)	Μέγιστος κόκκος (m)	Επιτόπου Πυκνότητα (t/m ³)	Συμπύκνωση Διελεύσεις Δονητ. Συμπ.
Λιθορριπή	3B	1.0	1.0	1.90	4
Λιθορριπή	3C	1.5	1.5	1.90	4
Επεξεργασμένη Λιθορριπή	3A	0.4	0.4	1.90	4
Επεξεργασμένα Αμμοχάλικα	2B	0.4	0.075	2.25	4
Επεξεργασμένα Αμμοχάλικα	2A	0.4	0.0195	2.20	4
Δυώδης Αργιλος	1A	0.30	#200>30%		Προσθητής
Τυχαία Υλικά	1B	0.30	0.30		4

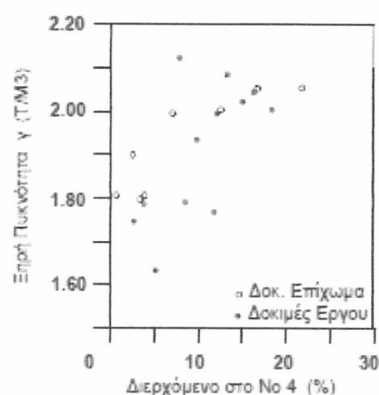
Παρακάτω παρουσιάζονται οι απαιτήσεις των αντίστοιχων ζωνών λιθορριπής για τα έργα Karahnjukar, Mohale και της Μεσοχώρας.

Πίνακας 6: Κοκκομετρική διαβάθμιση λιθορριπής, απαιτήσεων προδιαγραφών [20]

Φράγμα	Κόσκινο mm	Ζώνη 2B	Ζώνη 3C
Karahnjukar	40	<55%	<40%
	5	<30%	<20%
	0,074	<7%	<5%
Mohale	25	<30%	<30%
	0,074	<10%	<10%
Μεσοχώρα	25	<40%	<40%
	0,074	<5%	<5%

Από τη σύγκριση φαίνεται ότι σε μερικά πιο σύγχρονα υψηλά φράγματα έχει επιτραπεί η χρήση υλικού πλουσιότερου σε λεπτόκοκκα με ευνοϊκές συνέπειες στην πυκνότητα. Στην περίπτωση του έργου της Μεσοχώρας η απουσία λεπτόκοκκων είχε συνέπειες στην πυκνότητα και αυτό επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα δοκιμαστικού επιχώματος που κατασκευάστηκε στην αρχική φάση των εργασιών με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής των διαφόρων παραγόντων στη συμπίκνωση καθώς και στον επανέλεγχο των προδιαγραφών.

Στο δοκιμαστικό επίχωμα διερευνήθηκαν ομάδες υλικών με διαφορετική κοκκομετρία και διαπιστώθηκε ότι εκτός της σημαντικής επιρροής των άλλων παραμέτρων (ύψος στρώσης, διελεύσεις δονητικού οδοστρωτήρα, διαβροχή) η ξηρά πυκνότητα του υλικού αυξάνει με την περιεκτικότητα των λεπτόκοκκων υλικών (Σχήμα 36).



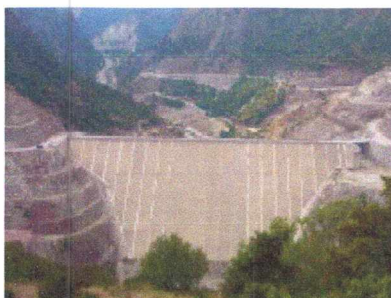
Σχήμα 36: Πυκνότητα επιχώματος και κοκκομετρία [26]

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι για την καλύτερη συμπίκνωση του υλικού απαιτείται ικανή διαβροχή του, με ποσότητα ύδατος μεταξύ 50 και 100 l/m³, ενώ η πυκνότητα του υλικού μειώνεται με την αύξηση του πάχους της στρώσης, αυξάνει δε με τον αριθμό των διελεύσεων του δονητικού οδοστρωτήρα. Με 4 διελεύσεις, όπως προδιαγράφεται στη μελέτη, επιτυγχάνεται το 85 % της μέγιστης ξηράς πυκνότητας, θεωρούμενη ότι αυτή αντιστοιχεί στις 12 διελεύσεις.

5.3 Σκυρόδεμα και Αρμοί

Η ανάντη πλάκα από σκυρόδεμα έχει πάχος $0.3+0.003 H$ (m) όπου H το υδραυλικό φορτίο σε μέτρα νερού (30cm στη στέψη, 75cm στην κοίτη). Ο οπλισμός τοποθετείται στο μέσον της διατομής και έχει επιφάνεια ίση με το 0.4% της διατομής σκυροδέματος. Η πλάκα κατασκευάστηκε μετά την ολοκλήρωση του επιχώματος από σκυρόδεμα C20/25 και έχει κατακόρυφους κατασκευαστικούς αρμούς ανά 15m, χωρίς συνέχεια οπλισμού.

Οι σκυροδετήσεις ήταν συνεχείς, αρχίζοντας από την επαφή με την πλίνθο και καταλήγοντας στην στέψη. Μία περίπου εβδομάδα συνεχούς σκυροδέτησης απαιτείτο για την ολοκλήρωση των μεσαίων πλακών, με μέση ταχύτητα σκυροδέτησης τα 1.7 m/hr. Ο ειδικός αναρριχόμενος μεταλλότυπος που κατασκευάστηκε για το έργο (σχήμα 37,β) περιλάμβανε διάταξη διανομής του σκυροδέματος, εξέδρες εργασιών συμπύκνωσης και φινιρίσματος και διάταξη συντήρησης.



Σχήμα 37: (α) Ανάντη όψη του φράγματος

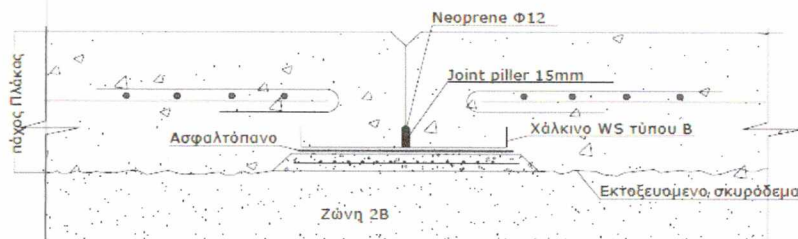
(β) Μεταλλότυπος [14]

Στο έργο κατασκευάστηκαν τριών ειδών αρμοί:

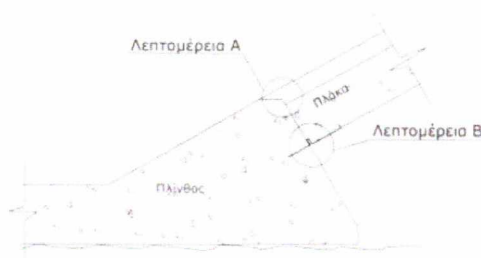
- Περιμετρικός αρμός πλίνθου-πλάκας, με οπλισμό, εκτός από την κεντρική εσχάρα και στις επιφάνειες επαφής των δύο στοιχείων. Στον αρμό ο οποίος αναμένεται να ανοίξει κατά μερικά εκατοστά κατά την πλήρωση της λίμνης, τοποθετήθηκε στεγανωτική ταινία χαλκού στην κάτω παρειά της πλάκας, υλικό τύπου “Flexcell” πάχους 12mm στην επιφάνεια επαφής των σκυροδεμάτων και επιφανειακή σφράγιση με ασφαλική μαστίχη τύπου “Igas”
- Αρμός πλάκας τύπου A, θλιπτικής καταπόνησης, στις 5 κεντρικές θέσεις μεταξύ των πλακών 10 και 12 και 14 και 15. Στον αρμό αυτό υπάρχει η στεγανωτική ταινία χαλκού αλλά δεν τοποθετήθηκε υλικό τύπου “Flexcell” στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των γειτονικών πλακών, καθώς επίσης ούτε έγινε επιφανειακή σφράγιση με ασφαλική μαστίχη τύπου “Igas”

- Αρμός πλάκας τύπου Β, εφελκυστικής καταπόνησης, στις υπόλοιπες θέσεις δεξιά και αριστερά των κεντρικών αρμών προς τα αντερείσματα. Η διάταξη των υλικών στον αρμό αυτό είναι ίδια με αυτή του αρμού τύπου Α με επιπλέον την επιφανειακή σφράγιση με ασφαλτική μαστίχη τύπου “Igas”

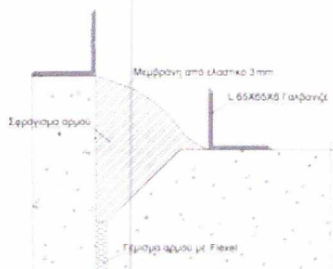
Η τυπική διατομή των αρμών πλίνθου-πλάκας και του αρμού τύπου Β φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 38 και 39 (Λεπτομέρειες Α και Β).



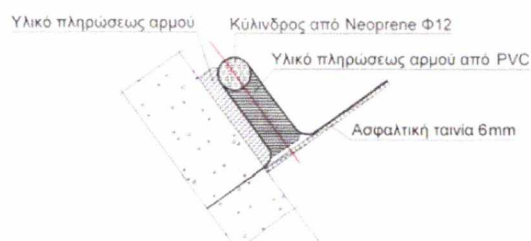
Σχήμα 38 : Αρμός τύπου Β μεταξύ πλακών (θλιπτικός) [14]



Σχήμα 39: Τυπική διάταξη αρμού πλίνθου-πλάκα [14]



Σχήμα 40: Λεπτομέρεια Α



Λεπτομέρεια Β [14]

Στις θέσεις των αρμών σημειώνεται μια απομείωση της διατομής σκυροδέματος λόγω της προς τα πάνω καμπύλωσης πάχους 50mm της διατομής του χαλκού, της διαμόρφωσης της επιφανειακής εγκοπής τύπου V στην πλάκα και της τοπικής διεύθυνσης των οδηγών τσιμεντοκονίας στο θεωρητικό πάχος της πλάκας.

Τα παραπάνω σημεία αποτελούσαν κοινή πρακτική της περιόδου 1990-2000 αλλά έχουν σημαντικές συνέπειες στην αντοχή της πλάκας σε θλιπτική καταπόνηση. [14]

5.4 Προσομοίωση της κατασκευής

Η αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης πραγματοποιείται στα εξής 9 στάδια [25]:

Στάδιο 1: Το επίχωμα κατασκευάζεται σταδιακά με 40 στρώσεις.

Στάδιο 2: Κατασκευάζεται η πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά.

Στάδιο 3: Κατασκευάζεται επίχωμα στο κάτω μέρος της πλάκας από υψόμετρο 625 m ως 680 m.

Στάδιο 4: Πραγματοποιούνται καθιζήσεις λόγω ερπυσμού της λιθορριπής.

Στάδιο 5: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 680 m.

Στάδιο 6: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 725 m.

Στάδιο 7: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 773 m.

Στάδιο 8: Επιβάλλεται δυναμική καθίζηση 0.5 m.

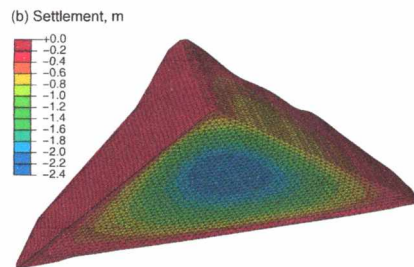
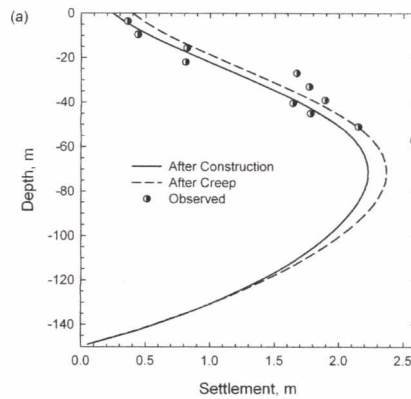
Στάδιο 9: Επιβάλλεται δυναμική καθίζηση 1m.

5.4.1 Σταδιακή κατασκευή και πλήρωση της λεκάνης

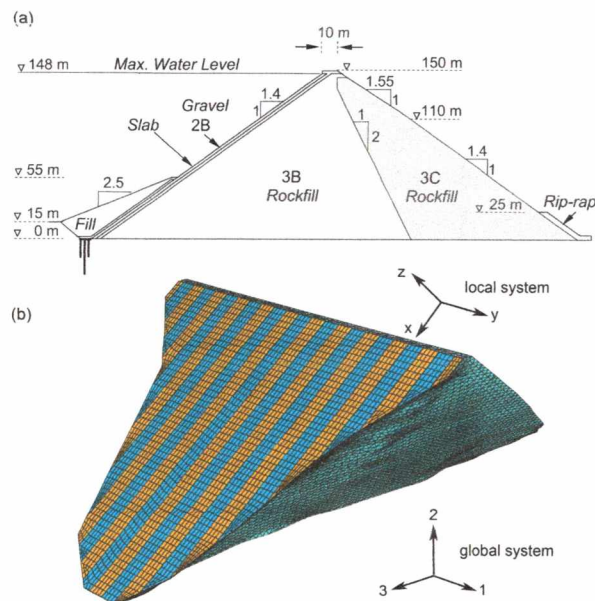
Στάδιο 1: Η σταδιακή κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται θεωρώντας 40 στρώσεις πάχους 3.75 m. Το αριθμητικό προσομοίωμα διακρίτοποιεί με ακρίβεια την 3Δ γεωμετρία του επιχώματος και της επιφάνειας των αντερεισμάτων της κοιλάδας, χρησιμοποιώντας 54302 πεπερασμένα στοιχεία. Εκτός των 40 οριζοντίων στρώσεων της κατασκευής, η διατομή υποδιαιρείται σε τρεις βασικές ζώνες: την ανάντη ζώνη 3B, την κατάντη ζώνη 3C, και την ζώνη χαλικιού 2B. Έτσι, η μέγιστη διατομή του φράγματος χωρίζεται συνολικά σε 120 ζώνες, κάθε μία από τις οποίες διακρίτοποιείται χωριστά με μέγιστη διάσταση στοιχείων περίπου 4 m.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν απευθείας μετρήσεις της δυσκαμψίας της λιθορριπής, οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος πάρθηκαν από δημοσιευμένα δεδομένα για παρόμοια υλικά σε παρόμοια φράγματα (Duncan et al. 1980), και στην συνέχεια βαθμονομήθηκαν οι σταθερές a , ur και b με χρήση των καθιζήσεων που μετρήθηκαν στην μέγιστη διατομή κατά την διάρκεια της κατασκευής. Οι τιμές όλων των παραμέτρων του προσομοιώματος της βασικής ανάλυσης δίδονται στον πίνακα 7. Για την προσεγγιστική προσομοίωση των καθιζήσεων ερπυσμού που μετρήθηκαν μετά την κατασκευή του επιχώματος και την επιβολή της αντίστοιχης παραμόρφωσης στην πλάκα σκυροδέματος, στο Στάδιο 1 επιβλήθηκε το 94% της βαρύτητας, ενώ το υπόλοιπο 6% μετά την κατασκευή της πλάκας και του επιχώματος (Στάδιο 4). Στο σχήμα 41a συγκρίνονται οι υπολογισμένες καθιζήσεις στην κεντρική διατομή του φράγματος στα Στάδια 1 και 4 με τις καθιζήσεις που μετρήθηκαν από το

όργανο IDEL L+IS-1 (σχήμα 42α). Στο τέλος του Σταδίου 1 η μέγιστη καθίζηση είναι 2.25 m και βρίσκεται περίπου στο μέσο του ύψους. Μετά την κατασκευή της πλάκας και του ανάντη επιχώματος, καθώς και την υλοποίηση των καθιζήσεων ερπυσμού (Στάδιο 4) η μέγιστη καθίζηση είναι 2.37 m. Στο σχήμα 41b δίνονται ισοτιμές καθιζήσεων εντός του επιχώματος μετά το τέλος κατασκευής του επιχώματος.



Σχήμα 41: (α) Σύγκριση προβλεπόμενων καθιζήσεων καθ' ύψος του φράγματος μετά την κατασκευή και μετά το στάδιο ερπυσμού με τις μετρήσεις καθιζήσεων στην κεντρική διατομή (β) Καθιζήσεις εντός του επιχώματος κατά το τέλος της κατασκευής



Σχήμα 42: (α) Μέγιστη διατομή και ζώνες υλικών (β) Γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος

Πίνακας 7: Ιδιότητες και παράμετροι των υλικών του φράγματος της βασικής ανάλυσης [25]

	Ζώνη 3B	Ζώνη 3C	Ζώνη 2B
Πυκνότητα ρ , kg/m ³	2150	2150	2150
K	600	450	1200
K_{irr}	1500	1125	3000
K_b	150	112.5	300
n	0.45	0.45	0.45
m	0.22	0.22	0.22
R_f	0.59	0.59	0.59
ϕ_0	51°	51°	51°
$\Delta\phi$	9°	9°	9°
Συντελεστής τριβής σκυροδέματος-χαλίκων, μ		0.7	

Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές και μετά από κάθε ανάλυση η αρχική γεωμετρία του φράγματος τροποποιείται έτσι ώστε μετά την επιβολή του 94% της βαρύτητας η επιφάνεια του ανάντη πρανούς να αποτελεί ένα τέλειο επίπεδο επάνω στο οποίο τοποθετείται η πλάκα στο Στάδιο 2.

Στάδιο 2: Η πλάκα σκυροδέματος αποτελείται από 23 ανεξάρτητες πλάκες και διακριτοποιείται με συνολικά 5640 στοιχεία. Η γεωμετρία του προσομοιώματος της πλάκας είναι ταυτόσημη με την πραγματική γεωμετρία. Το πλάτος κάθε επιμέρους πλάκας είναι 15 m (εκτός από τις δύο πλάκες στα άκρα όπου είναι 6.8 m και 7.7 m αντίστοιχα). Το πάχος της πλάκας είναι 0.3 m στην στέψη, ενώ στη βάση της μέγιστης διατομής είναι 0.74 m. Το πάχος της πλάκας διακριτοποιείται με δύο λεπτά πεπερασμένα στοιχεία ενώ οι άλλες διαστάσεις των στοιχείων κυμαίνονται μεταξύ 2 m και 3.75 m, ώστε ο λόγος των διαστάσεων σε σχέση με το πάχος να είναι αποδεκτός. Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται σαν ελαστικό υλικό με ιδιότητες που δίδονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Ιδιότητες σκυροδέματος [25]

Πυκνότητα ρ , kg/m ³	2350
Μέτρο ελαστικότητας Young, E , GPa	29
Λόγος Poisson, ν	0.2
Συντελεστής τριβής σκυροδέματος-σκυροδέματος, μ_c	0.5

Η διεπιφάνεια στη βάση της κάθε πλάκας αναπτύσσει τριβή με την υποκείμενη στρώση χαλικιού και έχει τη δυνατότητα αποχωρισμού. Το ίδιο συμβαίνει με τη διεπιφάνεια μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων γειτονικών πλακών. Στο βασικό σενάριο ανάλυσης, ο συντελεστής τριβής μεταξύ σκυροδέματος και χαλικιού λαμβάνεται 0,7, ενώ μεταξύ επιφανειών σκυροδέματος 0.5. Στο Στάδιο 2 η πλάκα φορτίζεται από το ίδιο βάρος, και επειδή η τριβή δεν επαρκεί, υποστηρίζεται στο κάτω μέρος της από την πλίνθο.

Στάδιο 3: Κατασκευάζεται επίχωμα στην επιφάνεια της πλάκας από υψόμετρο 625 m έως 680 m με μέγιστο πάχος 25 m στον πόδα της πλάκας (σχήμα 42α). Η

κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται επιβάλλοντας γραμμικά κατανεμημένες ορθές και διατμητικές τάσεις στην κεκλιμένη επιφάνεια κάθε πλάκας.

Στάδιο 4: Η βαρύτητα στο σώμα του φράγματος αυξάνεται από 94% στο 100% σε 10 βήματα με αποτέλεσμα την αύξηση των καθιζήσεων στην στέψη κατά 13.5 cm. Η καθίζηση αυτή είναι ίση με την καθίζηση που μετρήθηκε στη στέψη του φράγματος λόγω ερπυσμού της λιθορριπής.

Στάδιο 5: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 680 m σε 10 βήματα. Ταυτόχρονα οι τάσεις που ασκεί το βάρος του επιχώματος στο Στάδιο 4 μειώνονται λόγω ανώσεως.

Στάδιο 6: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 725 m σε 10 βήματα. Κατά μήκος των διεπιφανειών πλακών-πλίνθου, οι συνοριακές συνθήκες επιτρέπουν την μετακίνηση των πλακών προς το κέντρο του φράγματος, ενώ εμποδίζουν τη μετακίνηση πέραν της πλίνθου.

Στάδιο 7: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 773 m σε 10 βήματα.[25]

Στάδιο 8: Επιβάλλεται δυναμική καθίζηση 0.5 m

Στάδιο 9: Επιβάλλεται δυναμική καθίζηση 1 m

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, μελετούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την τρισδιάστατη ανάλυση του φράγματος της Μεσοχώρας για τρεις διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της κάθε μιας στην εντατική κατάσταση της πλάκας.

Για το λόγο αυτό παραθέτονται αρχικά η εντατική κατάσταση όλης της πλάκας για μηδενική δυναμική καθίζηση, για δυναμική καθίζηση 0.5 m και 1 m. Στη συνέχεια, η μεταβολή της βύθισης και των τάσεων της πλάκας 13 στην κάτω και άνω επιφάνειά της για μηδενική δυναμική καθίζηση συναρτήσει της απόστασης από τον πόδα και τέλος παρουσιάζονται η μεταβολή της βύθισης, των τάσεων και της βλάβης σε εφελκυσμό της πλάκας 13 για δυναμική καθίζηση ίση με 0, 0.5 και 1 m για ποιότητα σκυροδέματος C37, C25 και C45 αντίστοιχα.

Ποιότητα σκυροδέματος C37

Στο σχήμα 41 φαίνεται η βύθιση της πλάκας στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων για διαφορετικές τιμές δυναμικής καθίζησης (S_{dyn}). Όσο αυξάνεται η δυναμική καθίζηση τόσο μεγαλύτερη βύθιση υφίσταται η στέψη του φράγματος. Για μηδενική δυναμική καθίζηση η μέγιστη βύθιση παρουσιάζεται στον πόδα και στο κεντρικό μέρος της πλάκας. Η μέγιστη βύθιση παρατηρείται για $S_{dyn}=1$ m, είναι ίση με 1.31 m και παρουσιάζεται σε μια ζώνη μήκους περίπου 40 m στη στέψη του φράγματος. Η περίμετρος της πλάκας και στις τρεις περιπτώσεις υφίσταται ελάχιστη βύθιση.

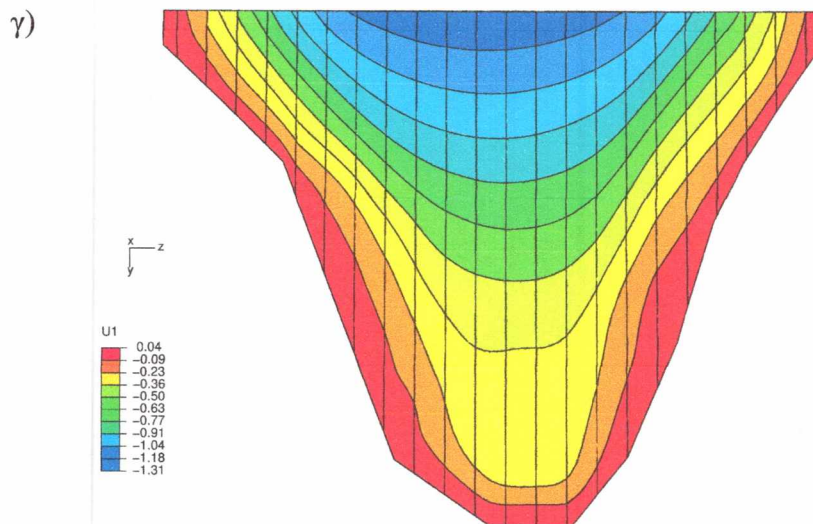
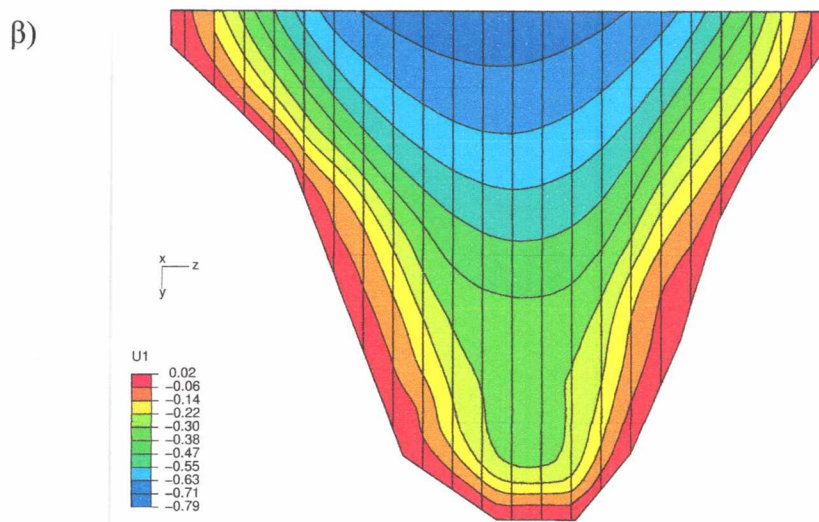
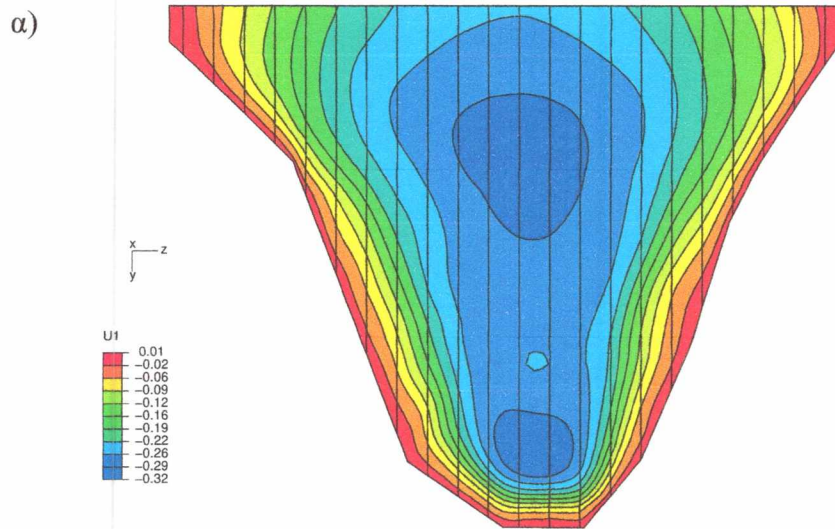
Το σχήμα 42 παρουσιάζει τη μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση y στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Παρατηρείται μετατόπιση της πλάκας προς τη στέψη. Η μέγιστη μετακίνηση αντιστοιχεί σε δυναμική καθίζηση ενός μέτρου, παρουσιάζεται περιμετρικά της πλάκας στο 1/3 της επιφάνειας της πλάκας, κοντά στη στέψη.

Καθώς αυξάνεται η δυναμική καθίζηση, αυξάνεται η τιμή της μετακίνησης, μειώνεται όμως το εύρος της. Για $S_{dyn}=0$ και 0.5 η μέγιστη τιμή της μετακίνησης παραμένει ίδια, διαφοροποιείται όμως η περιοχή στην οποία παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή. Για $S_{dyn} = 0$ εμφανίζεται στον πόδα ενώ για $S_{dyn}=0.5$ περιμετρικά της πλάκας κοντά στη στέψη.

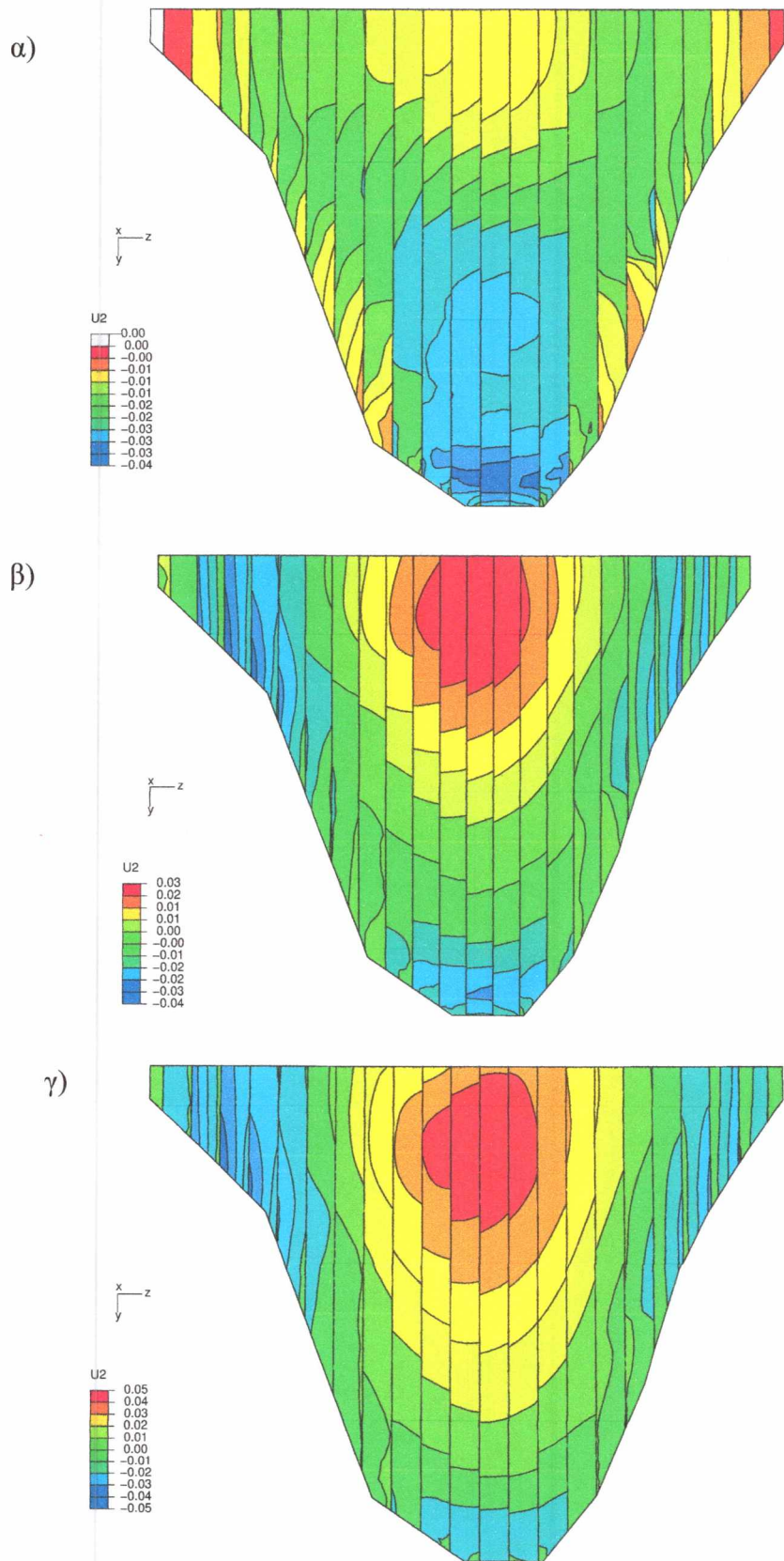
Το σχήμα 43 παρουσιάζει τη μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση z. Λόγω της παραμόρφωσης της υποκείμενης λιθορριπής, παρατηρείται μετακίνηση των πλακών προς την κεντρική διατομή του φράγματος με μέγιστη μετακίνηση 16 cm για ένα μέτρο δυναμικής καθίζησης. Η αντίθετη μετακίνηση του δεξιού και αριστερού τμήματος της πλάκας προκαλεί θλίψη στα κατακόρυφα τοιχώματα προς το κέντρο της πλάκας.

Καθώς αυξάνεται η δυναμική καθίζηση, αυξάνονται και οι τιμές των μετακινήσεων που προκαλούν τη θλίψη στην πλάκα με τις μέγιστες τιμές τους να συγκεντρώνονται κοντά στην άκρη της πλάκας, στη στέψη.

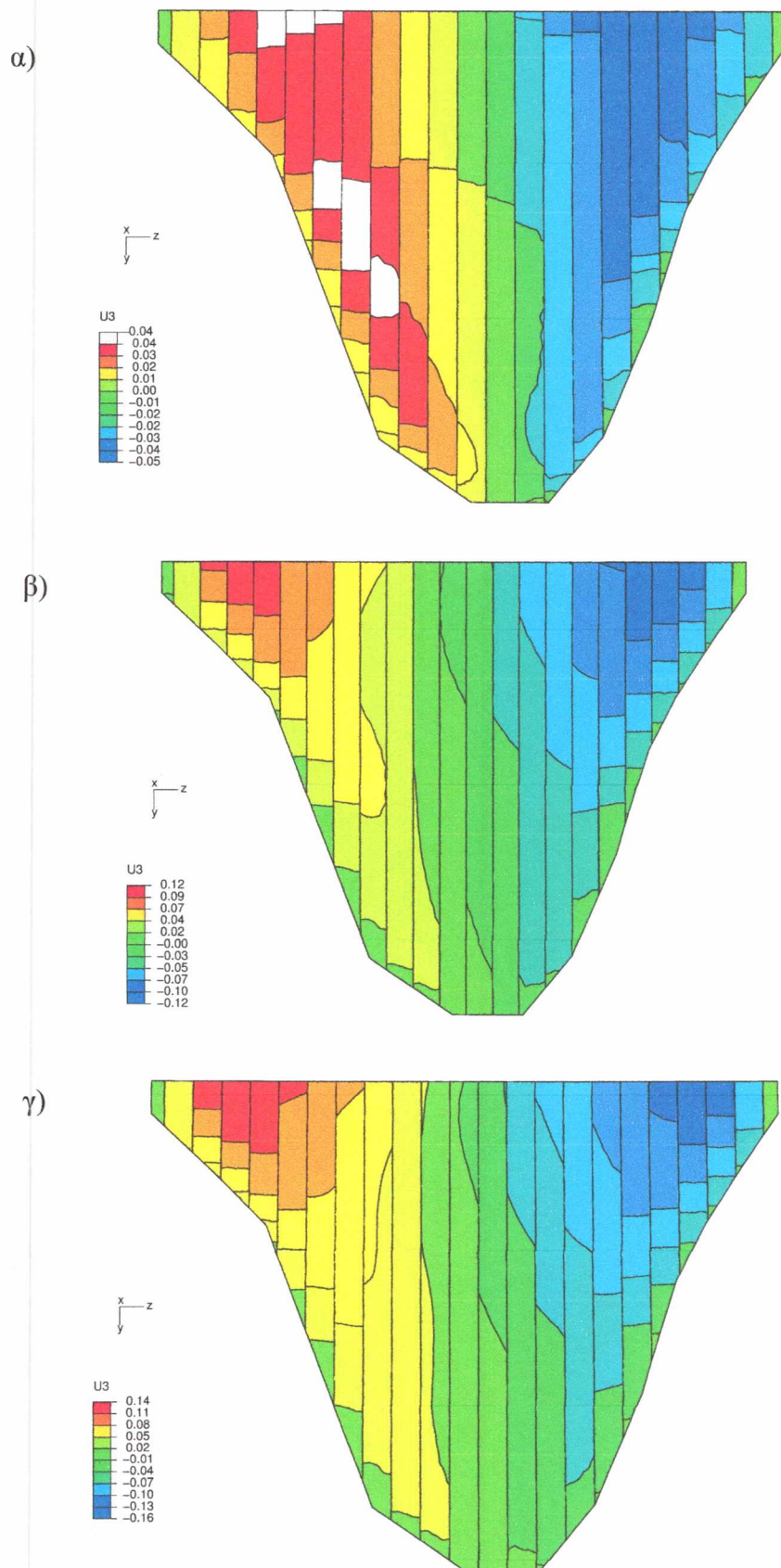
Οι κεντρικές πλάκες μετατοπίζονται ελάχιστα αλλά καταπονούνται περισσότερο σε θλίψη εξαιτίας των σημαντικών μετατοπίσεων των πλευρικών πλακών. Στο κέντρο της πλάκας η μεγαλύτερη μετακίνηση που σημειώνεται είναι περίπου ένα εκατοστό.



Σχήμα 41: Βύθιση της πλάκας για ποιότητα σκυροδέματος C37 α) $S_{dyn} = 0$, β) $S_{dyn} = 0.5$, γ) $S_{dyn} = 1$



Σχήμα 42: Μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση y για ποιότητα σκυροδέματος C37
 α) $S_{dyn} = 0$ β) $S_{dyn} = 0.5$ γ) $S_{dyn} = 1$



Σχήμα 43: Μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C37
 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$

Στο σχήμα 44 φαίνονται οι ελάχιστες κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στην πλάκα. Η επίδραση από άποψη τάσεων είναι μικρή αλλά η ασφάλεια είναι μεγαλύτερη καθώς για αντοχή σκυροδέματος 37 MPa η μέγιστη θλιπτική τάση για $S_{dyn}=1$ m φτάνει την τιμή των 24.2 MPa και εμφανίζεται κοντά στη στέψη του φράγματος. Καθώς αυξάνεται η δυναμική καθίζηση, αυξάνεται το εύρος και η τιμή των θλιπτικών τάσεων.

Στο σχήμα 45 φαίνονται οι μέγιστες κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στην πλάκα. Παρατηρείται ότι και για τις τρεις τιμές καθίζησης, η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής τάσης ισούται ή ξεπερνά ελάχιστα την αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος η οποία παίρνει την τιμή 3.7 MPa. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιμετρικά της πλάκας όπου ξεπερνιέται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος να εμφανίζονται ρηγματώσεις. Για μηδενική δυναμική καθίζηση οι ρηγματώσεις καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος στα άκρα των πλακών, ενώ όσο αυξάνεται η δυναμική καθίζηση η μέγιστη εφελκυστική τάση μειώνεται και περιορίζεται στο αριστερό άκρο της πλάκας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της καθίζησης της λιθορριπής της διατομής του φράγματος, μέσω των σημαντικών δυνάμεων τριβής μεταξύ πλάκας και χαλικιού, μεταφέρει θλιπτικές τάσεις ή μειώνει τις εφελκυστικές τάσεις στην πλάκα.

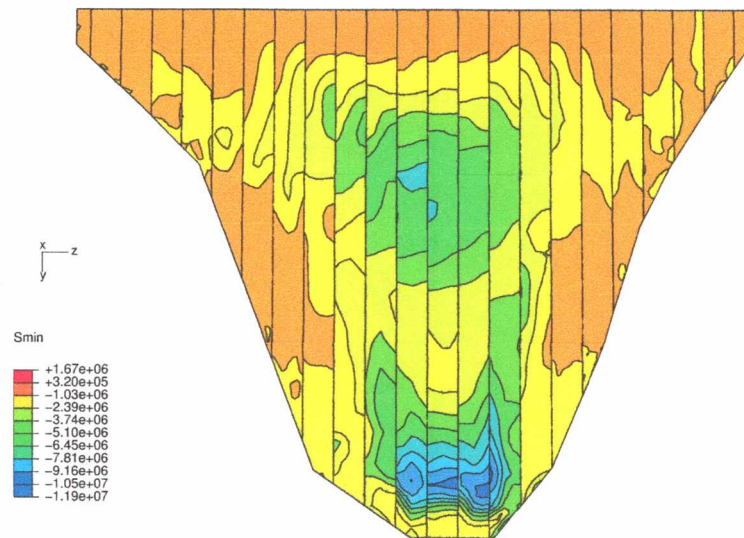
Το σχήμα 46 παρουσιάζει το μέγεθος της βλάβης του σκυροδέματος σε εφελκυσμό. Η μηδενική τιμή δείχνει ότι το σκυρόδεμα δεν έχει υποστεί καμία ρηγμάτωση. Ενώ η τιμή ένα δείχνει πλήρη ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Εδώ, φαίνεται ότι το σκυρόδεμα δεν ρηγματώνεται, παρά μόνο σε μια πολύ μικρή περιοχή στην περίμετρο της πλάκας στη δεξιά πλευρά.

Το σχήμα 47 παρουσιάζει τις ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στην πλάκα κατά τον άξονα y . Οι θλιπτικές τάσεις αναπτύσσονται στο κέντρο και στον πόδα της πλάκας όπου στον πόδα οι μέγιστες τιμές φτάνουν τα 8.31 MPa για ένα μέτρο δυναμικής καθίζησης. Στη στέψη αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις με τις μέγιστες να σημειώνονται περιμετρικά της πλάκας και να παίρνουν την τιμή των 2.6 MPa για δυναμική καθίζηση ενός μέτρου. Με την αύξηση της δυναμικής καθίζησης αυξάνονται οι ορθές τάσεις. Ως αποτέλεσμα αυτών, είναι η δημιουργία θλίψης στην πλάκα από την οποία όμως το σκυρόδεμα δεν κινδυνεύει αφού δεν γίνεται υπέρβαση της θλιπτικής του αντοχής η οποία είναι 37 MPa.

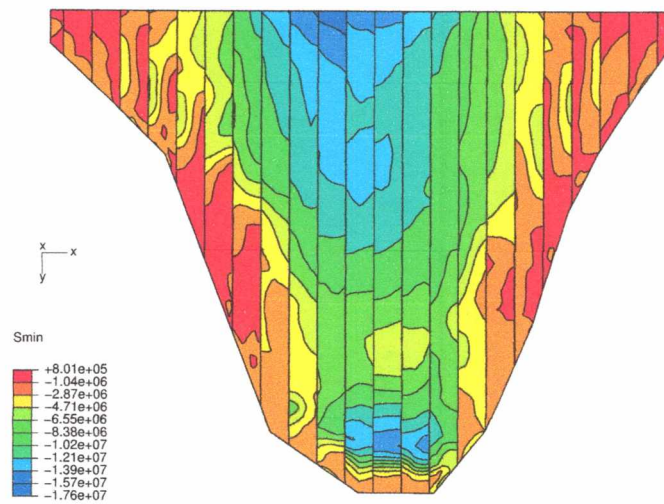
Στο σχήμα 48 παρουσιάζονται οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στην πλάκα κατά τον άξονα z . Στο μεγαλύτερο μέρος της πλάκας αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις σχετικά μεγάλες με μέγιστη τιμή 13 MPa η οποία εμφανίζεται στον πόδα της πλάκας. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι 37 MPa επομένως η πλάκα δεν κινδυνεύει από θλίψη. Εφελκυσμός αναπτύσσεται περιμετρικά της πλάκας, αλλά δεν υπερβαίνει την τιμή 2-3 MPa.

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η δυναμική καθίζηση, αυξάνονται οι τιμές των θλιπτικών τάσεων και μειώνονται οι τιμές των εφελκυστικών τάσεων.

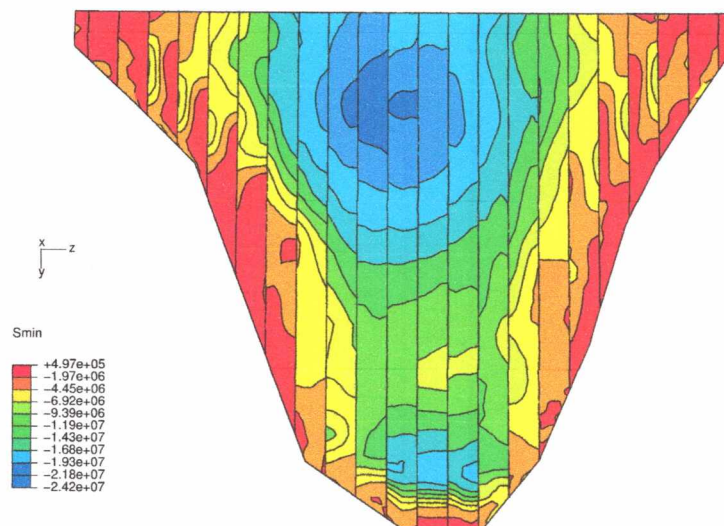
α)



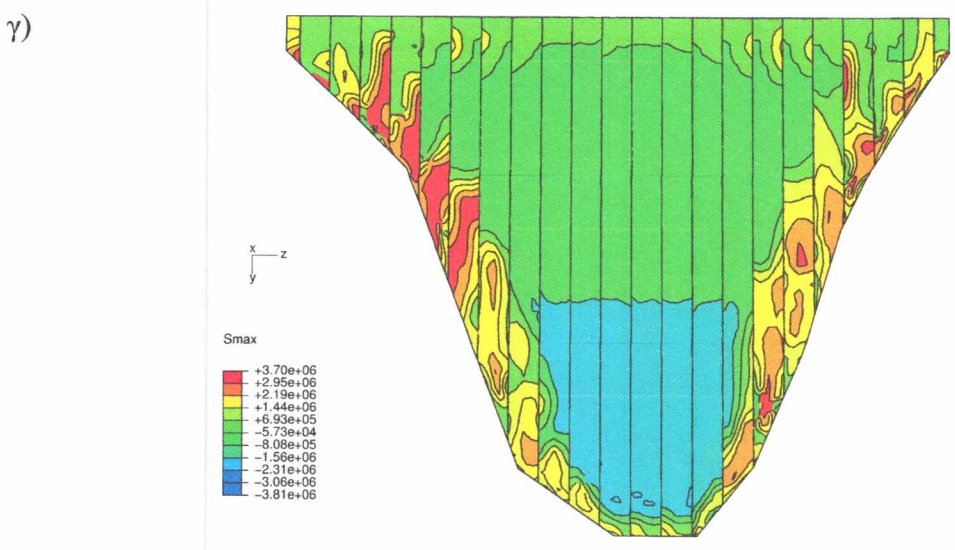
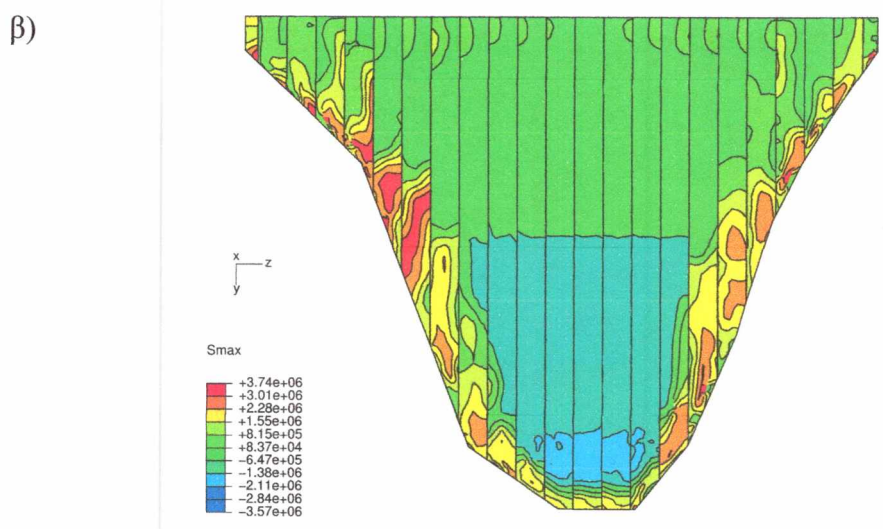
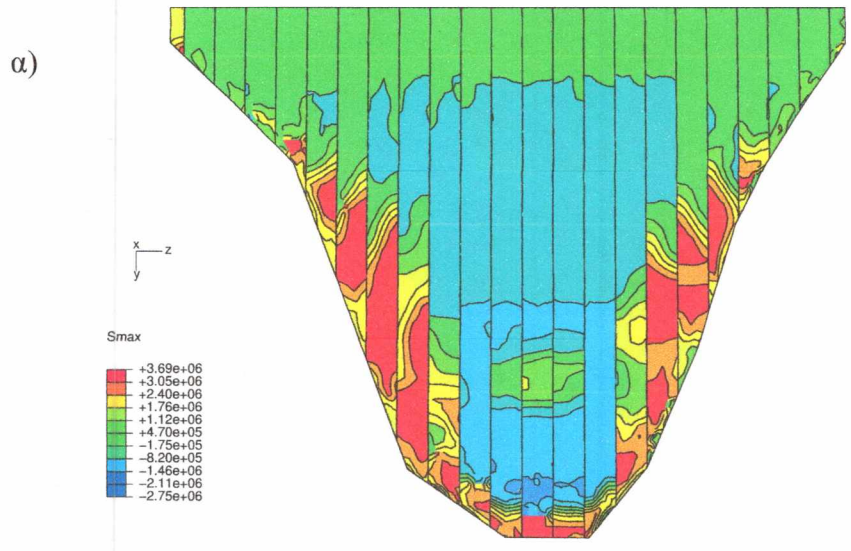
β)



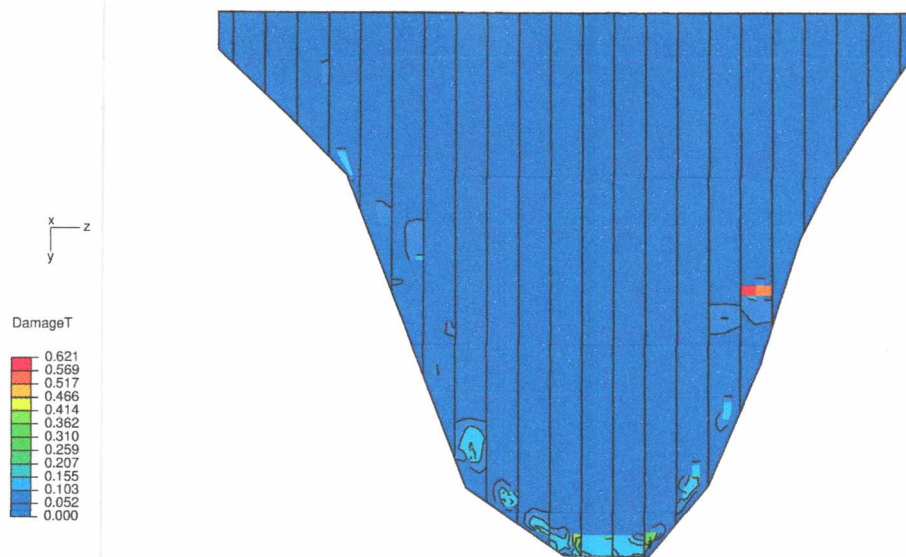
γ)



Σχήμα 44: Ελάχιστη κύρια τάση στην πλάκα στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C37 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



Σχήμα 45: Μέγιστη κύρια τάση στην πλάκα στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C37 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



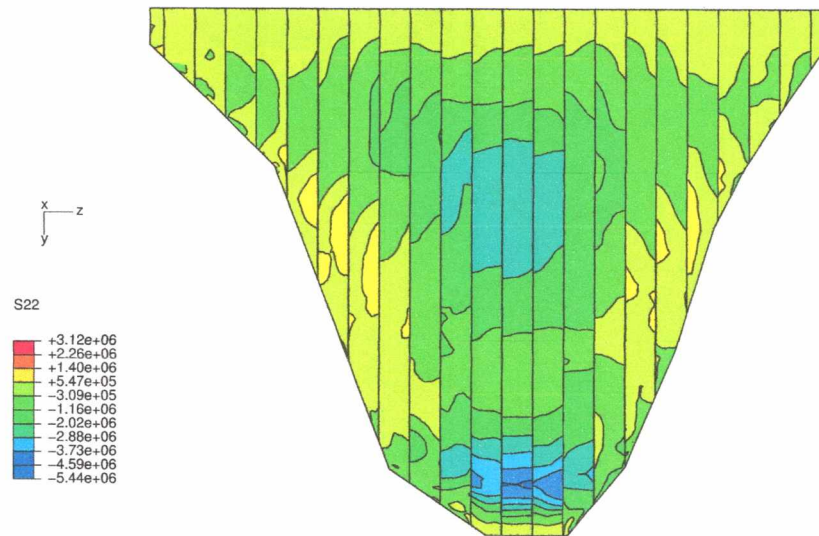
Σχήμα 46: Βλάβη σκυροδέματος στην πλάκα για ποιότητα σκυροδέματος C37 για $S_{dyn} = 0, 0.5, 1$

Στο σχήμα 49 παρουσιάζεται η ελάχιστη κύρια τάση, η μέγιστη κύρια τάση και η ορθή τάση κατά τη διεύθυνση y στην κάτω και άνω επιφάνεια της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για μηδενική δυναμική καθίζηση.

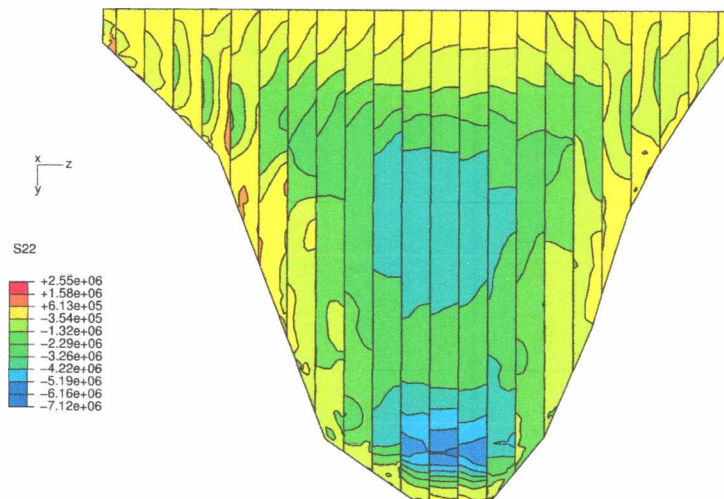
Και στα τρία διαγράμματα παρατηρείται σύγκλιση τιμών μεταξύ κάτω και άνω επιφάνειας της πλάκας. Στον πόδα, η πλάκα είναι σχεδόν πακτωμένη λόγω της μεγάλης δύναμης τριβής. Δεν υπάρχει κάμψη γι' αυτό οι τάσεις στο σημείο αυτό είναι ομοιόμορφες. Όλη η πλάκα θλίβεται.

Οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις εμφανίζονται στα 10 m από τον πόδα και φτάνουν για την ελάχιστη τάση τα 7.5 MPa για την κάτω επιφάνεια και τα 11 MPa για την άνω επιφάνεια. Οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις είναι 3.1 MPa στον πόδα της πλάκας. Η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης διαφοροποιείται σε απόσταση 70 μέτρων από τον πόδα έως τα 110 μέτρα.

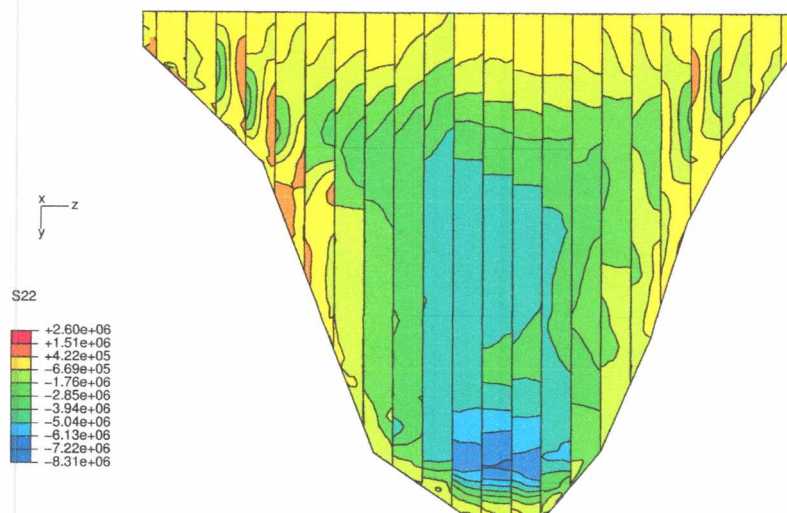
α)



β)

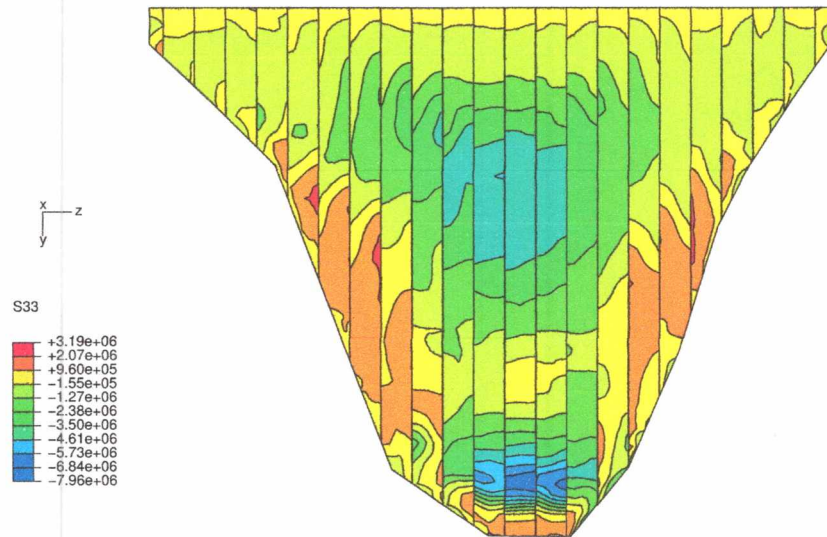


γ)

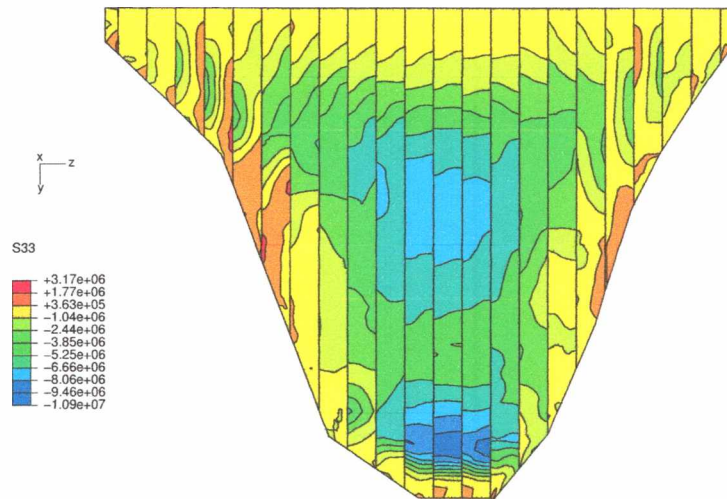


Σχήμα 47: Ορθή τάση που αναπτύσσεται στην πλάκα στην κατεύθυνση y για ποιότητα σκυροδέματος C37 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$

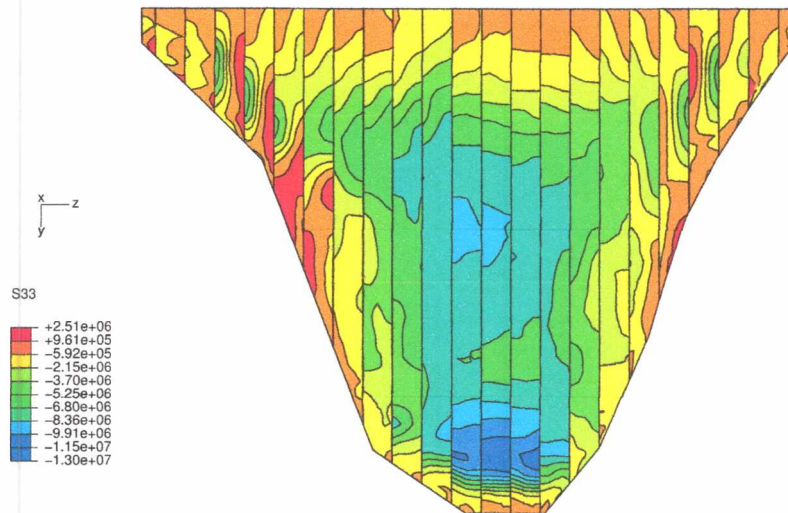
α)



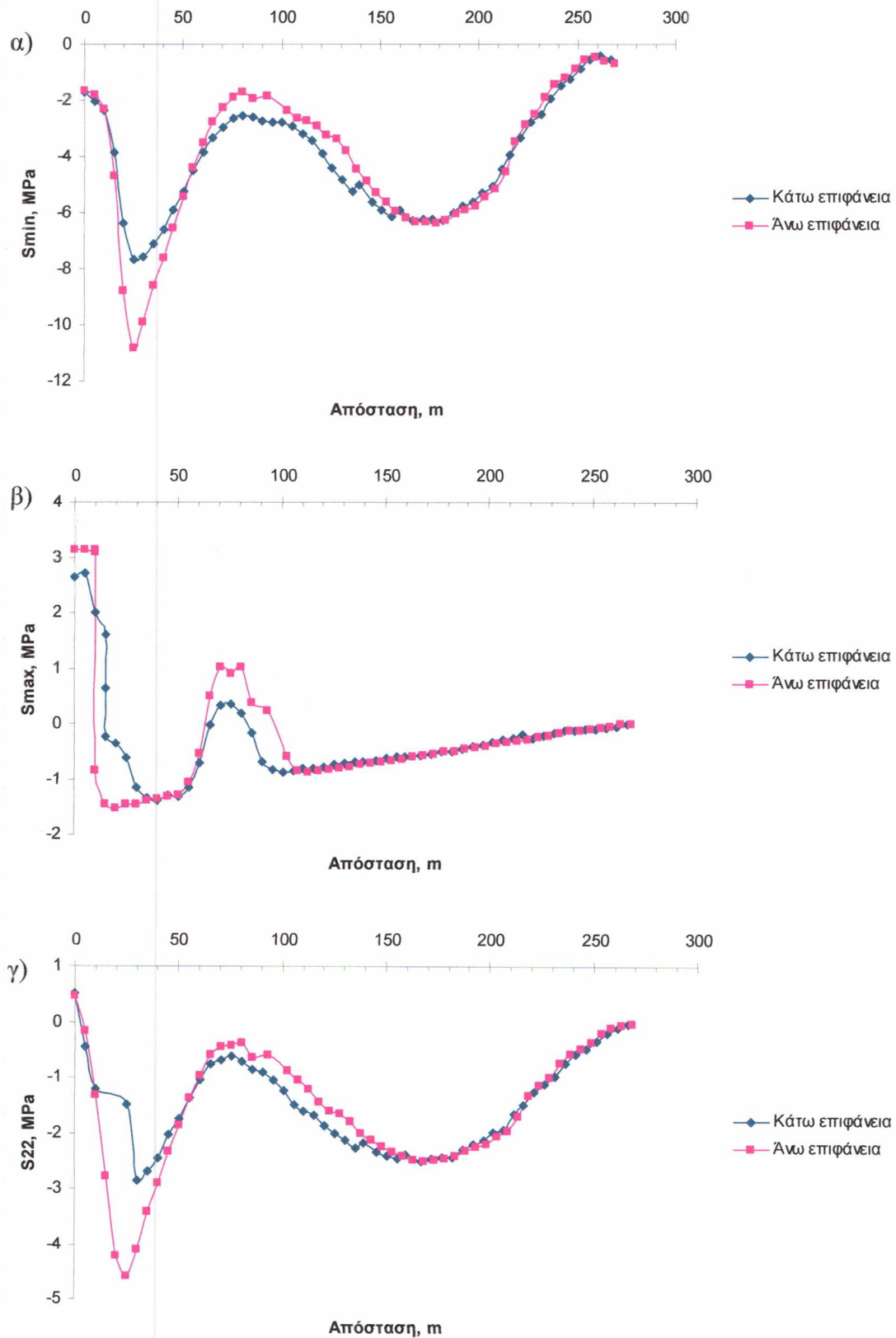
β)



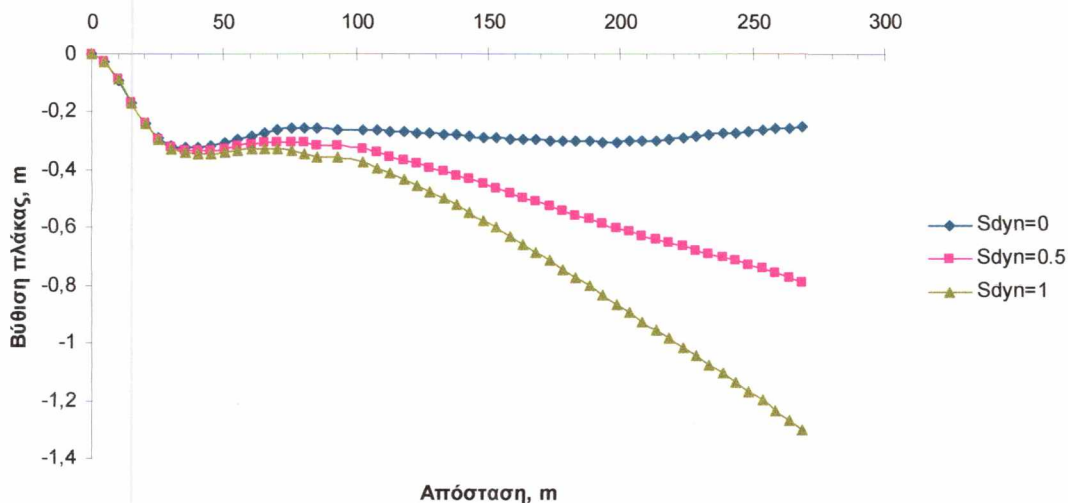
γ)



Σχήμα 48: Ορθή τάση που αναπτύσσεται στην πλάκα στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C37 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



Σχήμα 49: Μεταβολή της α) ελάχιστης κύριας τάσης β) μέγιστης κύριας τάσης και γ) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση y στην κάτω και άνω επιφάνεια εντός της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα της πλάκας για μηδενική δυναμική καθίζηση.



Σχήμα 50: Μεταβολή της βύθισης εντός της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα της πλάκας για δυναμική καθίζηση $S_{dyn}=0, 0.5, 1$

Το σχήμα 50 παρουσιάζει τη μεταβολή της βύθισης εντός της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα της πλάκας για δυναμική καθίζηση μηδενική, μισού μέτρου και ενός μέτρου αντίστοιχα.

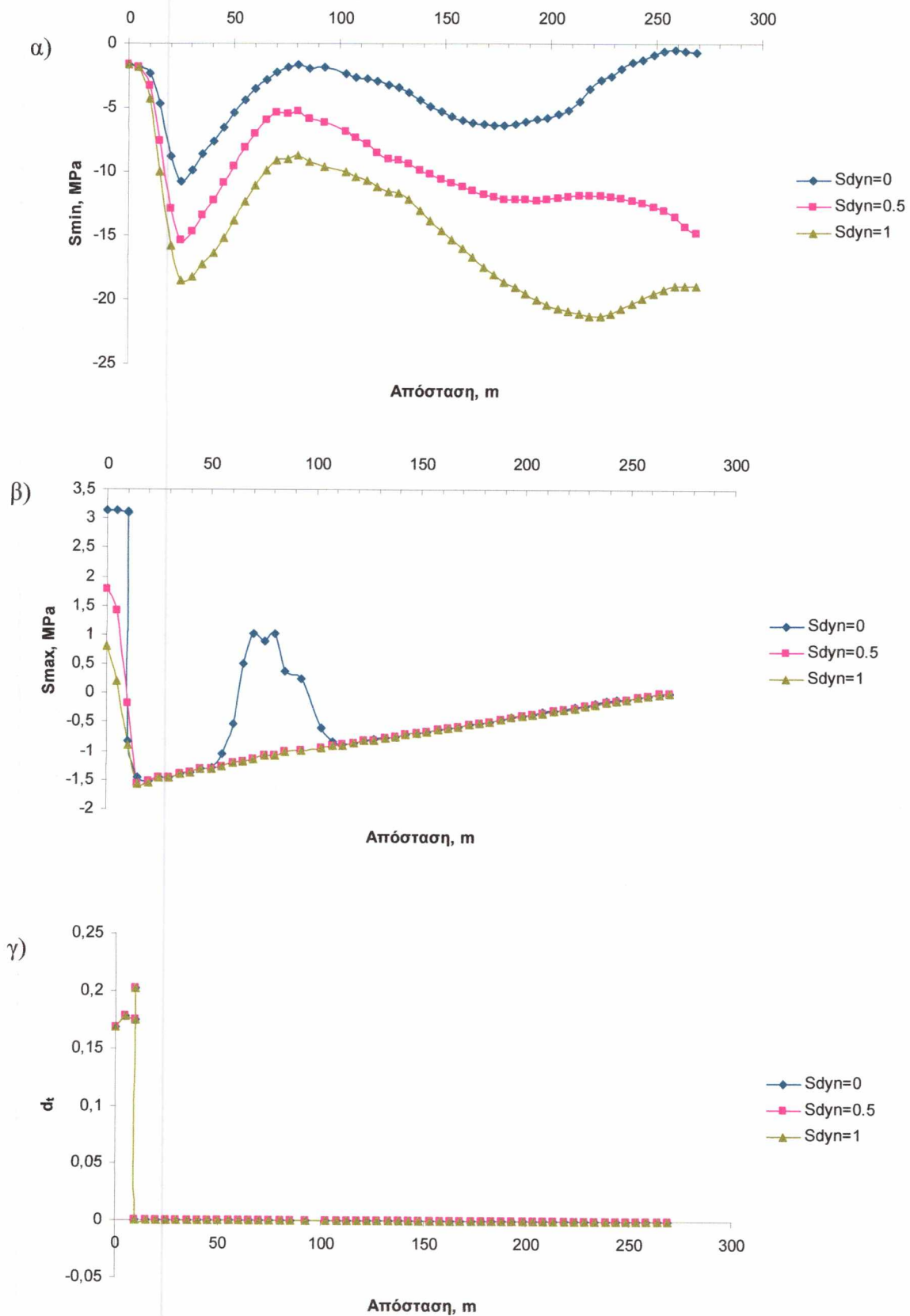
Παρατηρείται σύγκλιση τιμών και για τις τρεις τιμές καθιζήσεων στα πρώτα 40 m από τον πόδα. Κοντά στη στέψη η βύθιση για $S_{dyn}=0$ παραμένει σχεδόν σταθερή ενώ για $S_{dyn}=0.5, 1$ αυξάνει.

Στο σχήμα 51 φαίνεται η μεταβολή της ελάχιστης και μέγιστης κύριας τάσης και της βλάβης του σκυροδέματος σε εφελκυσμό εντός της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα, για δυναμική καθίζηση μηδενική, μισού και ενός μέτρου.

Αναφορικά με την ελάχιστη κύρια τάση, στην περιοχή του πόδα παρατηρείται αύξηση μέχρι τα 30 m όπου εμφανίζεται η μέγιστη θλίψη. Για τα επόμενα 50 m η τιμή της παρουσιάζει μείωση για να μηδενιστεί τελικά στη στέψη του φράγματος.

Αναφορικά με την μέγιστη κύρια τάση, η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στον πόδα όπου μειώνεται απότομα στα επόμενα 10 μέτρα. Για $S_{dyn}=0$ παρουσιάζεται αύξηση των εφελκυστικών τάσεων στα 50 m από τον πόδα έως τα 110 m. Ύστερα, υπάρχει σύγκλιση τιμών και για τις τρεις περιπτώσεις καθιζήσεων οι οποίες τείνουν στο μηδέν.

Στο σχήμα 51γ, η ζημιά που παθαίνει το σκυρόδεμα λόγω εφελκυσμού φτάνει το 17% και σημειώνεται στον πόδα.

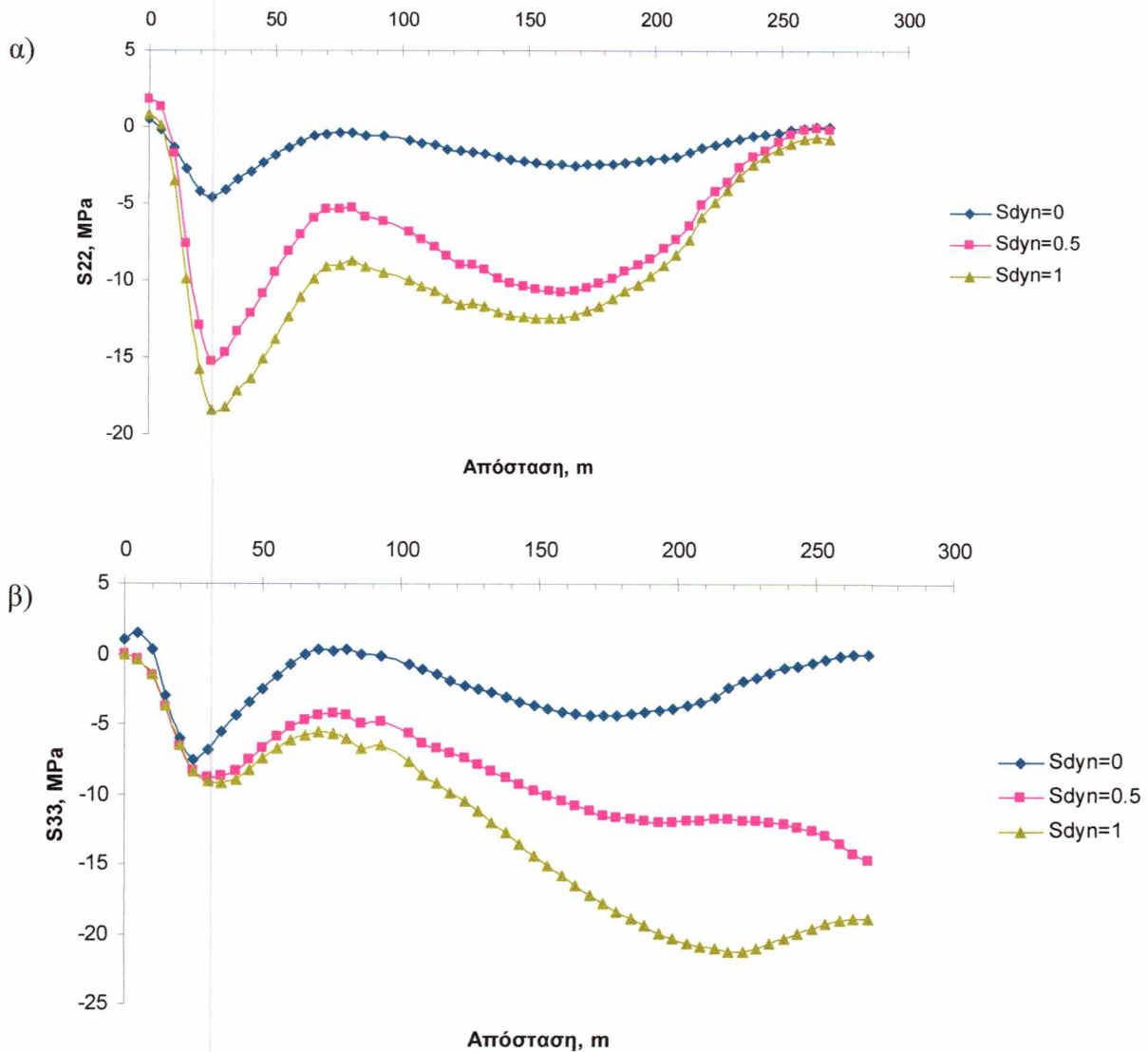


Σχήμα 51: Μεταβολή της α) ελάχιστης κύριας τάσης β) μέγιστης κύριας τάσης και γ) βλάβης σκυροδέματος σε εφελκυσμό στην πλάκα 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση $S_{dyn} = 0, 0.5, 1$ m

Στο σχήμα 52 παρουσιάζεται η ορθή τάση κατά τη διεύθυνση y και z αντίστοιχα εντός της πλάκας 13 για τρεις διαφορετικές τιμές καθίζησης.

Η ορθή τάση κατά τη διεύθυνση y στον πόδα τείνει στο μηδέν και για τις τρεις τιμές καθίζησης. Παρατηρείται απότομη αύξηση της θλιπτικής τάσης στα πρώτα 30 m από τον πόδα, για να αρχίσει έπειτα να μειώνεται και όταν πλησιάσει την στέψη να μηδενισθεί.

Η ορθή τάση κατά τη διεύθυνση z στον πόδα είναι περίπου μηδενική. Τα επόμενα 30 m αυξάνεται η θλιπτική τάση απότομα Όσο αυξάνεται η καθίζηση, αυξάνεται και η ορθή τάση κατά z.



Σχήμα 52: Μεταβολή α) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση y β) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση z στη πλάκα 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση $S_{dyn} = 0, 0.5, 1$ m

Ποιότητα σκυροδέματος C25

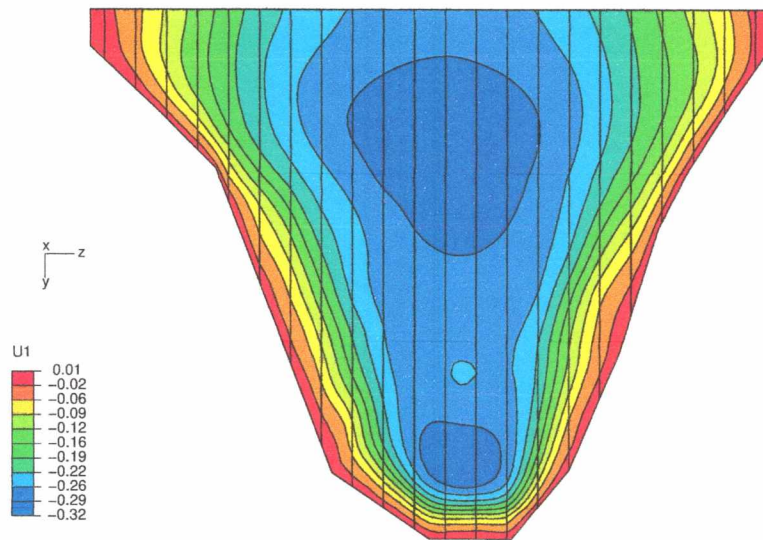
Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τις αναλύσεις είναι παρόμοια με αυτά για το φράγμα με σκυρόδεμα αντοχής 37 MPa. Στο σχήμα 53 φαίνεται η βύθιση της πλάκας στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων για διαφορετικές τιμές δυναμικής καθίζησης (S_{dyn}). Η μέγιστη βύθιση παρατηρείται για $S_{dyn}=1$, είναι ίση με 1.37 m και παρουσιάζεται σε μια ζώνη μήκους περίπου 40 m στη στέψη του φράγματος.

Η μέγιστη μετακίνηση κατά z παρατηρείται για ένα μέτρο δυναμικής καθίζησης και φτάνει τα 16 cm όπως φαίνεται στο σχήμα 54.

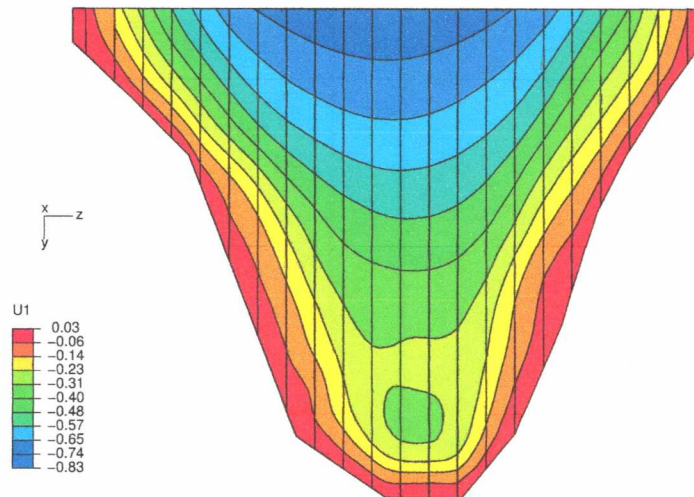
Στο σχήμα 55 φαίνονται οι ελάχιστες κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στην πλάκα. Η μέγιστη θλιπτική τάση εμφανίζεται κοντά στη στέψη του φράγματος και φτάνει την τιμή των 20.6 MPa για $S_{dyn}= 1$ m. Καθώς αυξάνεται η δυναμική καθίζηση, αυξάνεται το εύρος και η τιμή των θλιπτικών τάσεων.

Το σχήμα 56 παρουσιάζει τις μέγιστες κύριες τάσεις. Και στα τρία σχήματα, η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής τάσης ξεπερνά την αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος η οποία παίρνει την τιμή 2.5 MPa. Συνεπώς, περιμετρικά της πλάκας εμφανίζονται ρηγματώσεις. Για μηδενική δυναμική καθίζηση οι ρηγματώσεις καταλαμβάνουν την κεντρική περίμετρο των πλακών, ενώ όσο αυξάνεται η δυναμική καθίζηση η μέγιστη εφελκυστική τάση μειώνεται, περιορίζεται στην περίμετρο κοντά στη στέψη και αυξάνεται το εύρος της.

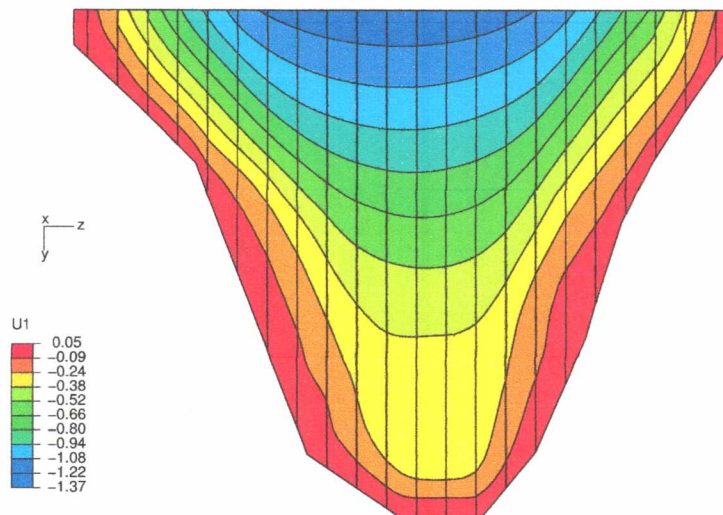
α)



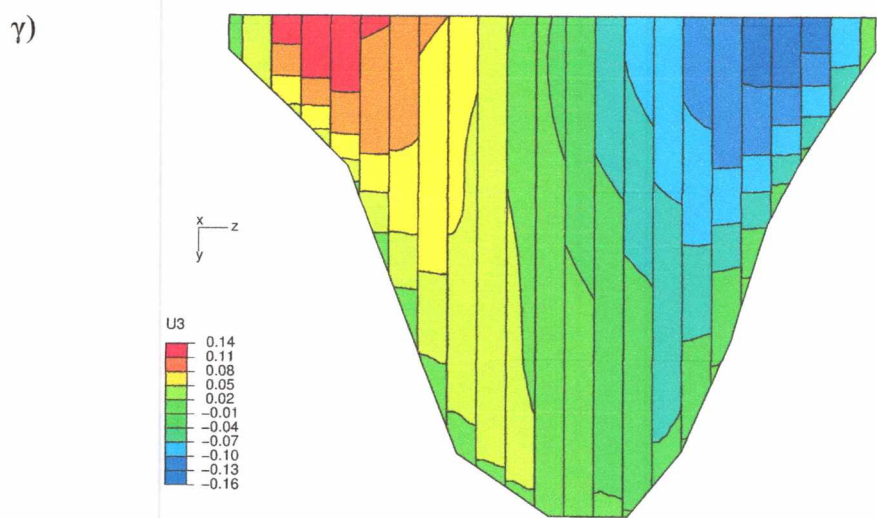
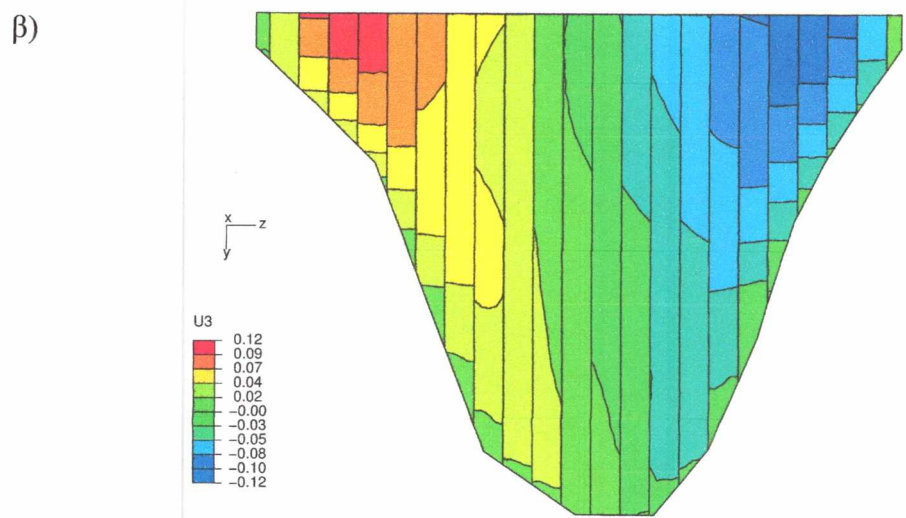
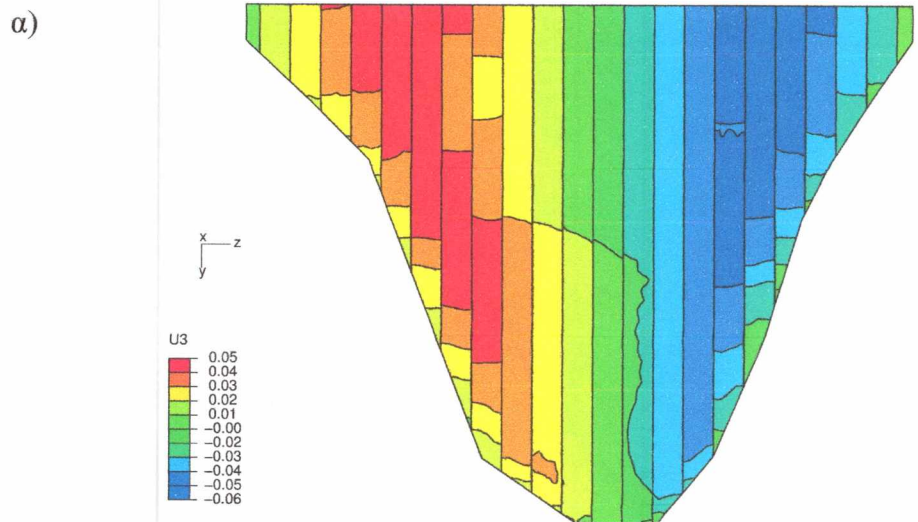
β)



γ)

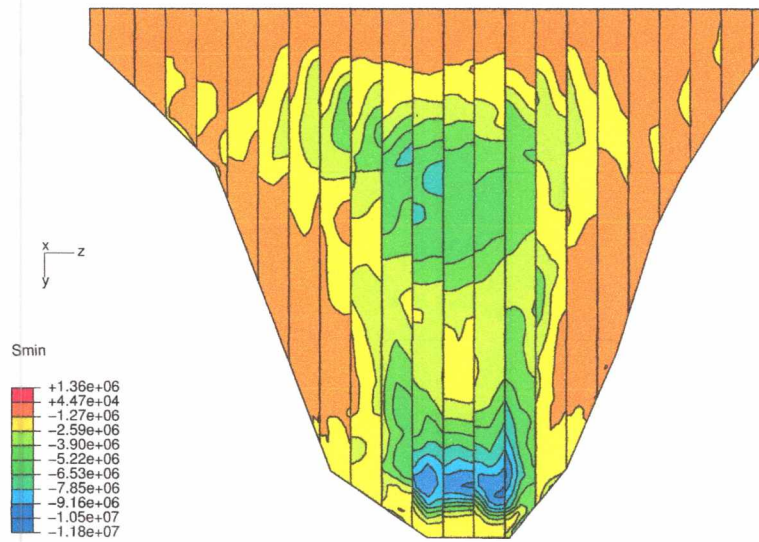


Σχήμα 53: Βύθιση της πλάκας για ποιότητα σκυροδέματος C25 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$

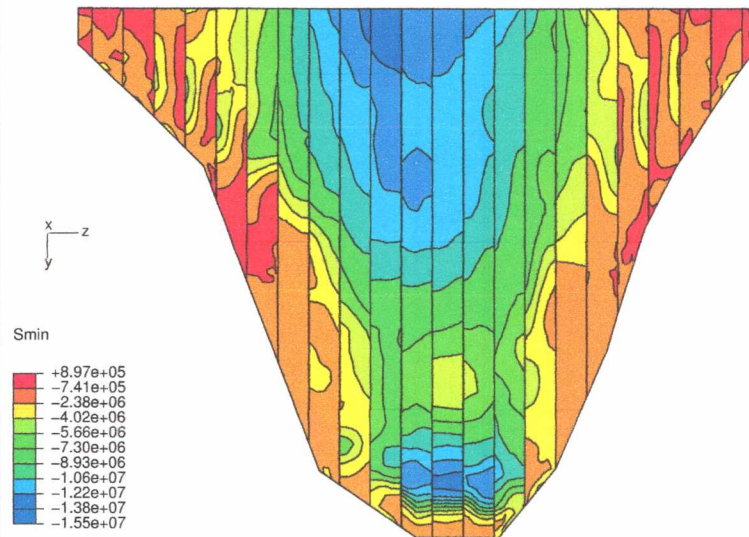


Σχήμα 54: Μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C25
 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$

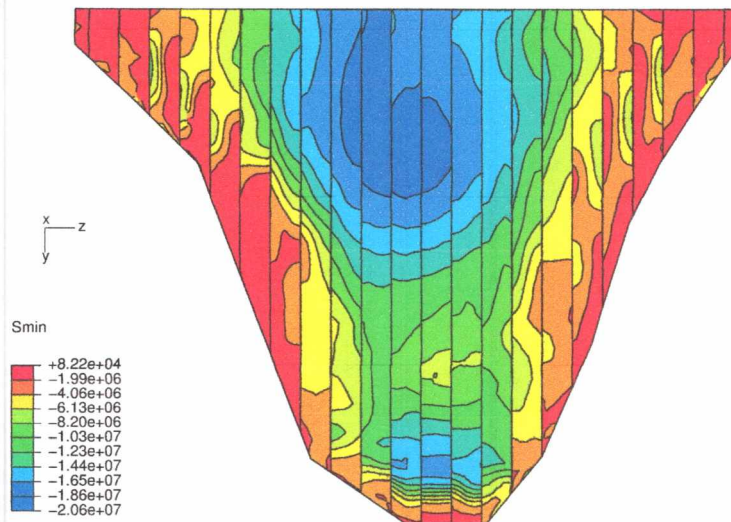
α)



β)

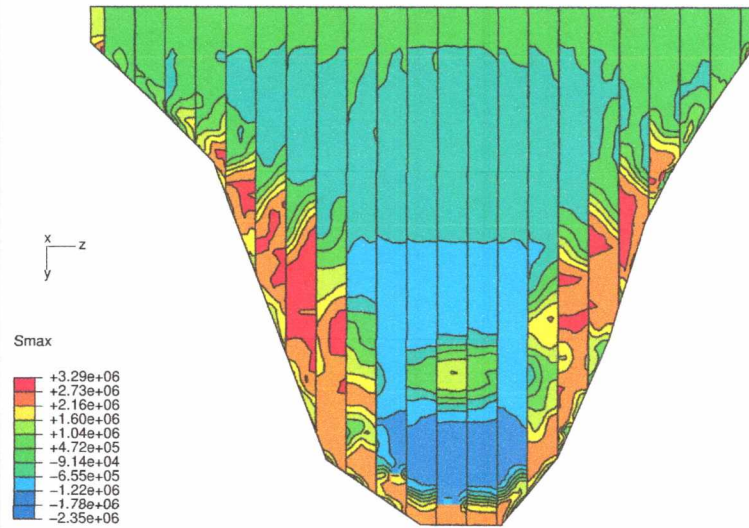


γ)

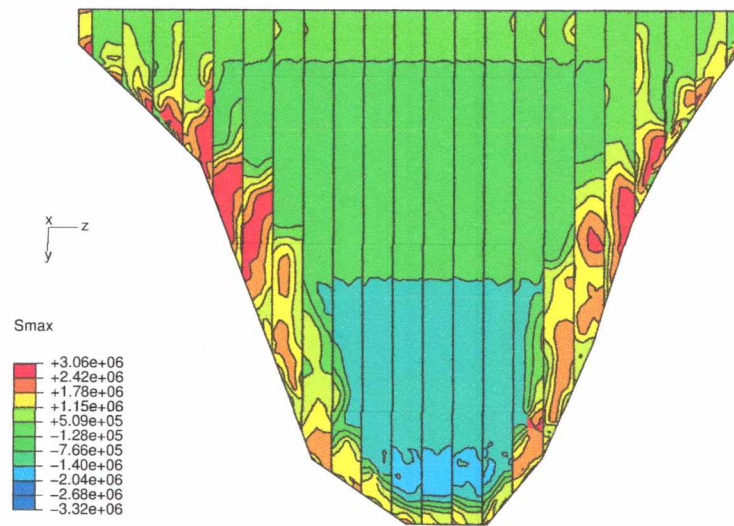


Σχήμα 55: Ελάχιστη κύρια τάση στην πλάκα για ποιότητα σκυροδέματος C25 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$

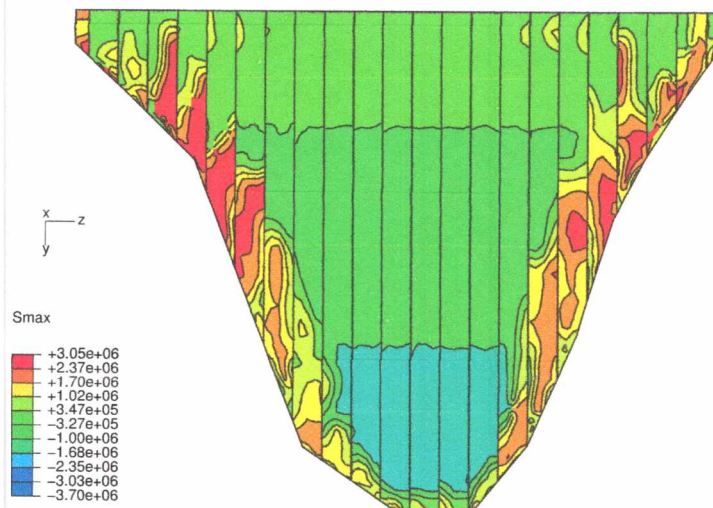
α)



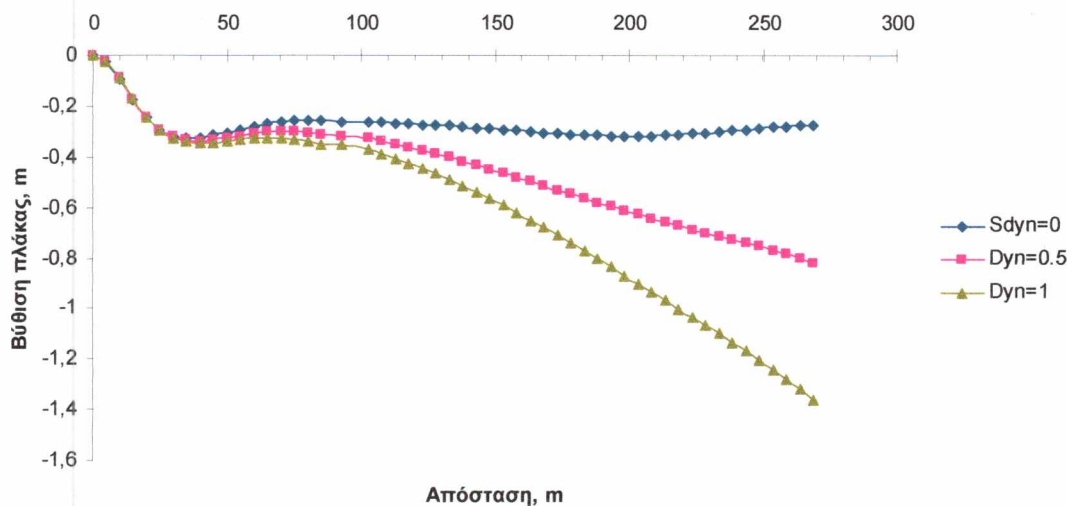
β)



γ)



Σχήμα 56: Μέγιστη κύρια τάση στην πλάκα για ποιότητα σκυροδέματος C25 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



Σχήμα 57: Μεταβολή της βύθισης της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση $S_{dyn}=0, 0.5, 1$

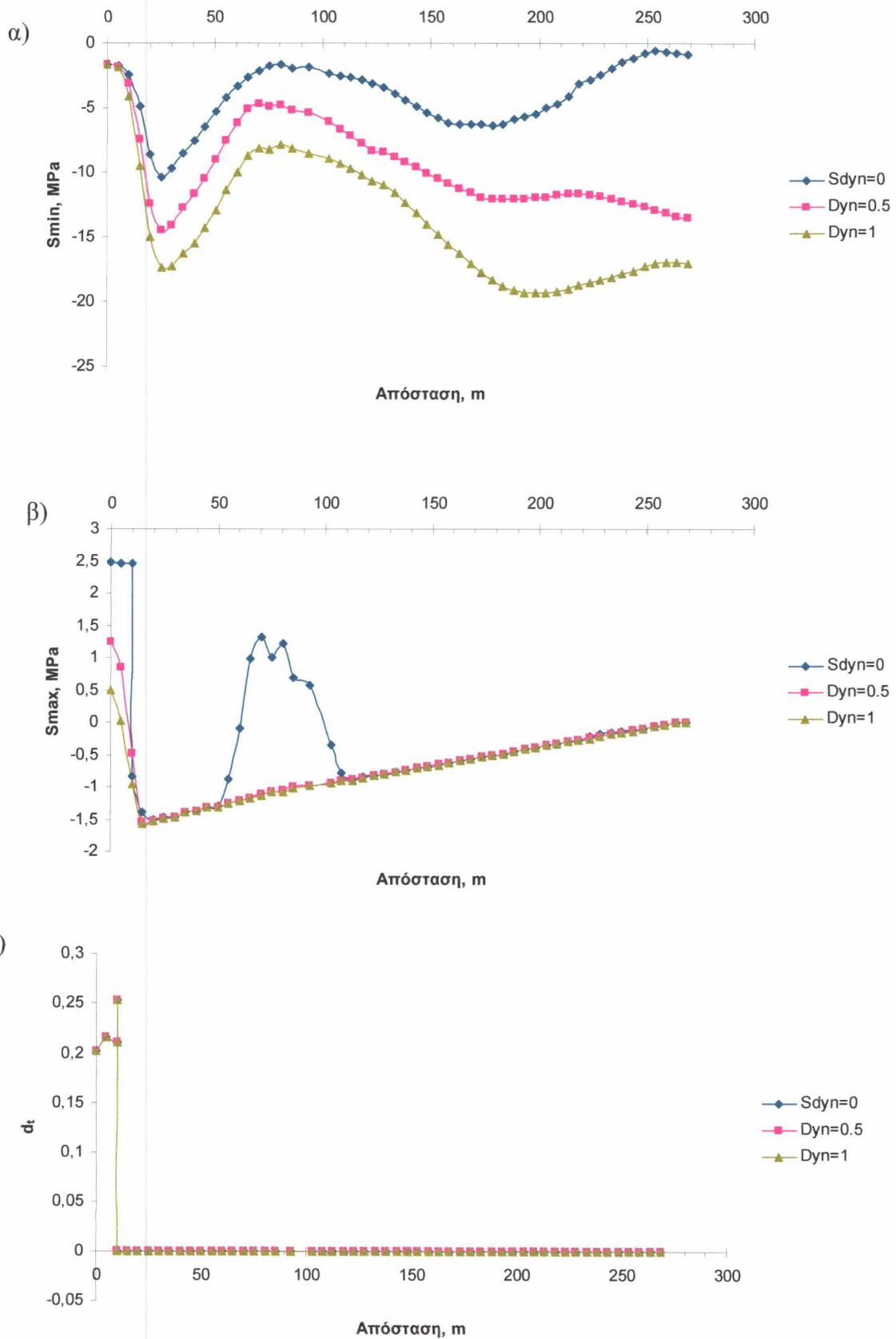
Το σχήμα 57 παρουσιάζει τη μεταβολή της βύθισης της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση μηδενική, μισού μέτρου και ενός μέτρου αντίστοιχα. Οι τιμές συμπίπτουν με αυτές για το σκυρόδεμα αντοχής 37 MPa.

Το σχήμα 58 παρουσιάζει τη μεταβολή της ελάχιστης και μέγιστης κύριας τάσης και της βλάβης του σκυροδέματος σε εφελκυσμό της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για τις τρεις τιμές διαφορετικής καθίζησης.

Συγκριτικά με τα αποτελέσματα για ποιότητα σκυροδέματος C37, οι τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης για $S_{dyn}=0, 0.5$ m συγκλίνουν, ενώ για $S_{dyn}=1$ m παρατηρείται μείωση σε απόσταση 190 m από τον πόδα και έπειτα.

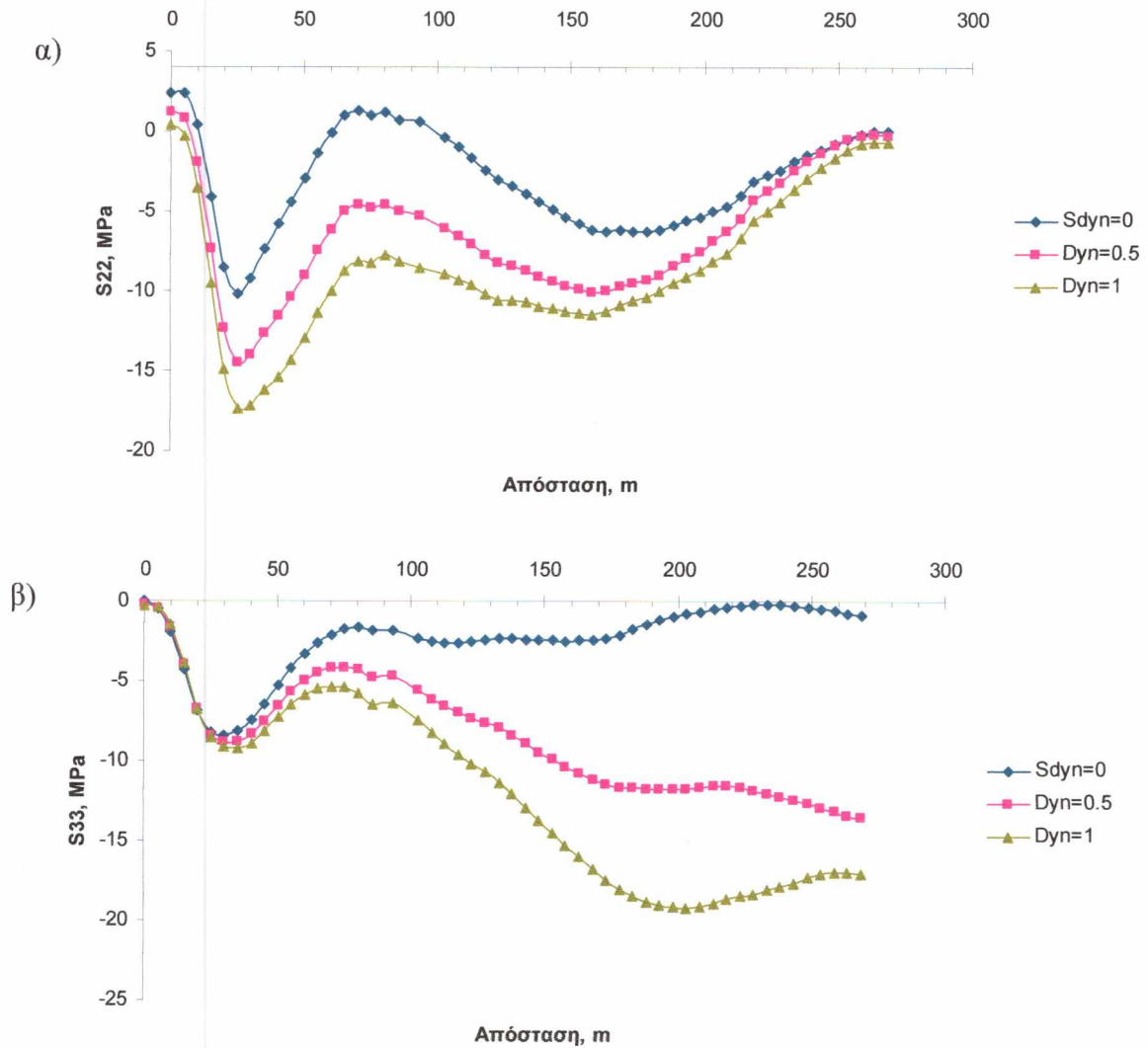
Αναφορικά με τη μέγιστη κύρια τάση, εμφανίζεται στον πόδα και είναι μικρότερη και για τις τρεις τιμές δυναμικής καθίζησης. Για $S_{dyn}=0$ παρουσιάζεται μεγαλύτερο εύρος τιμών για τις εφελκυστικές τάσεις στην περιοχή των 50 m από τον πόδα έως τα 110 m.

Η μέγιστη ζημιά που παθαίνει το σκυρόδεμα λόγω εφελκυσμού σημειώνεται στον πόδα και είναι μεγαλύτερη για δυναμική καθίζηση ενός μέτρου και αντοχή σκυροδέματος 25 MPa απ' ό,τι για αντοχή 37 MPa.



Σχήμα 58: Μεταβολή της α) ελάχιστης κύριας τάσης β) μέγιστης κύριας τάσης και γ) βλάβης σκυροδέματος σε εφελκυσμό στην πλάκα 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση $S_{dyn}=0, 0.5, 1$ m

Στο σχήμα 59 παρουσιάζεται η ορθή τάση κατά τη διεύθυνση y και z αντίστοιχα εντός της πλάκας 13 για τρεις διαφορετικές τιμές καθίζησης. Η μορφή των διαγραμμάτων είναι παρόμοια με αυτή για το σκυρόδεμα αντοχής 37 MPa.



Σχήμα 59: Μεταβολή α) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση y β) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση z της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση Sdyn= 0, 0.5, 1 m

Ποιότητα σκυροδέματος C45

Για αυτήν την ποιότητα σκυροδέματος τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά για το φράγμα με σκυρόδεμα αντοχής 25 και 37 MPa.

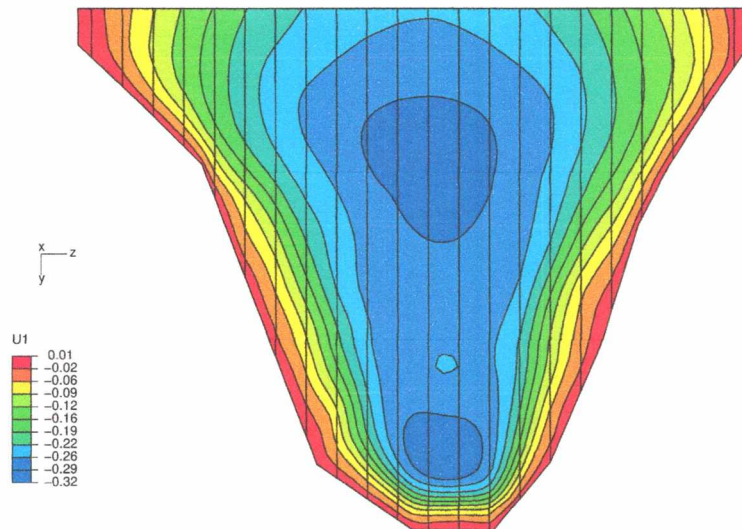
Στο σχήμα 60 φαίνεται η βύθιση της πλάκας στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων για διαφορετικές τιμές δυναμικής καθίζησης ($S_{dynamic}$). Η μέγιστη βύθιση παρατηρείται για $S_{dyn}=0$, είναι ίση με 1.32 m και παρουσιάζεται σε μια ζώνη μήκους περίπου 40 m στη στέψη του φράγματος.

Το σχήμα 61 παρουσιάζει τη μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση z. Παρατηρείται μετακίνηση των πλακών προς την κεντρική διατομή του φράγματος με μέγιστη μετακίνηση 17 cm για ένα μέτρο δυναμικής καθίζησης. Στο κέντρο της πλάκας η μεγαλύτερη μετακίνηση που σημειώνεται είναι περίπου ένα εκατοστό.

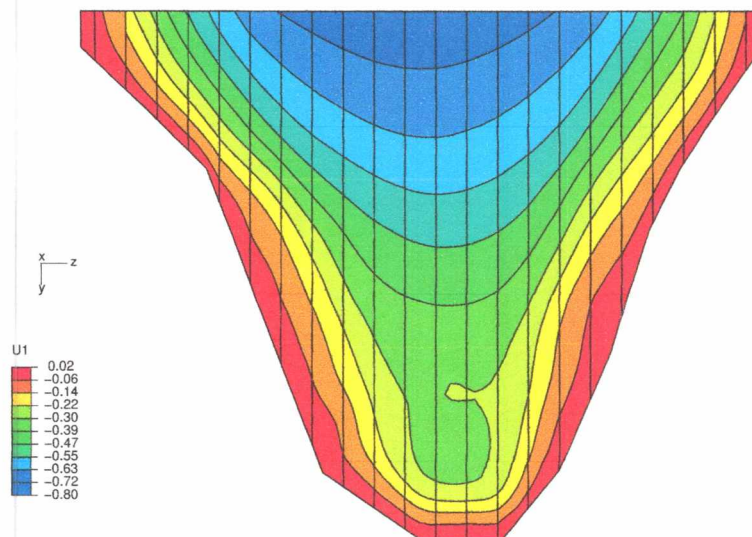
Στο σχήμα 62 φαίνεται η ελάχιστη κύρια τάση (μέγιστη θλίψη) που αναπτύσσεται στην πλάκα. Η μέγιστη θλιπτική τάση είναι 23.8 MPa και εμφανίζεται κοντά στη στέψη του φράγματος για $S_{dyn}= 1$ m. Καθώς αυξάνεται η δυναμική καθίζηση, αυξάνεται το εύρος και η τιμή των θλιπτικών τάσεων αλλά παρουσιάζεται και εφελκυσμός περιμετρικά της πλάκας.

Στο σχήμα 63 φαίνεται η μέγιστη κύρια τάση. Και για τις τρεις τιμές καθίζησης, η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής τάσης ξεπερνά την αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος η οποία παίρνει την τιμή 4.5 MPa. Το μεγαλύτερο μέρος της πλάκας υπόκειται σε θλίψη με μέγιστη τιμή περίπου τα 2 MPa.

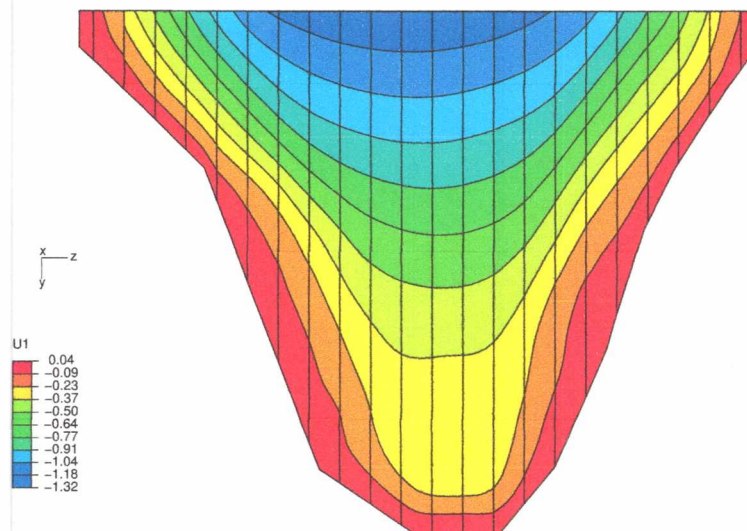
α)



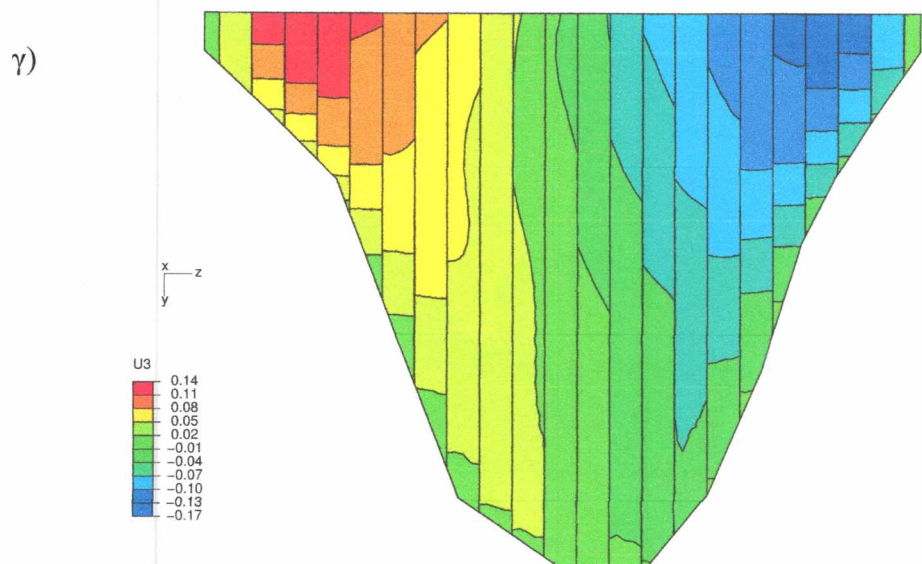
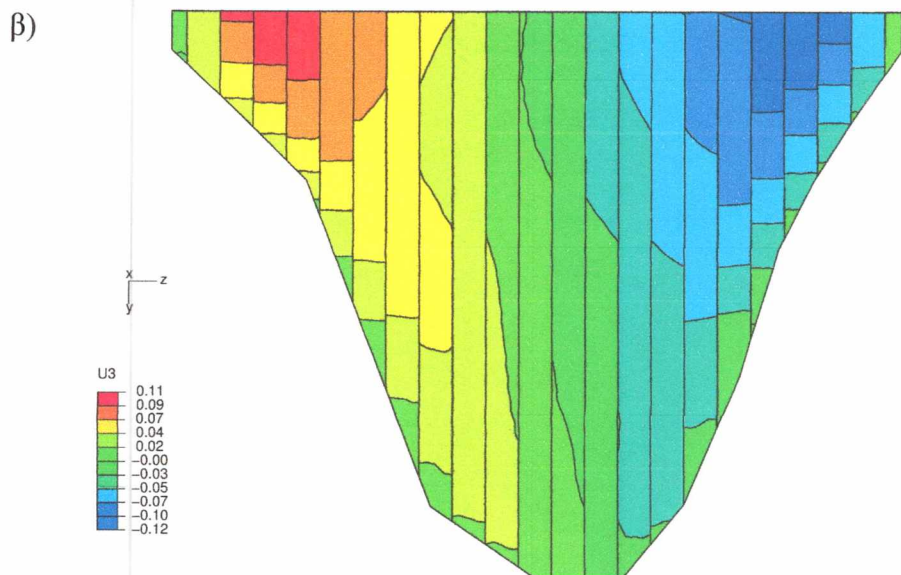
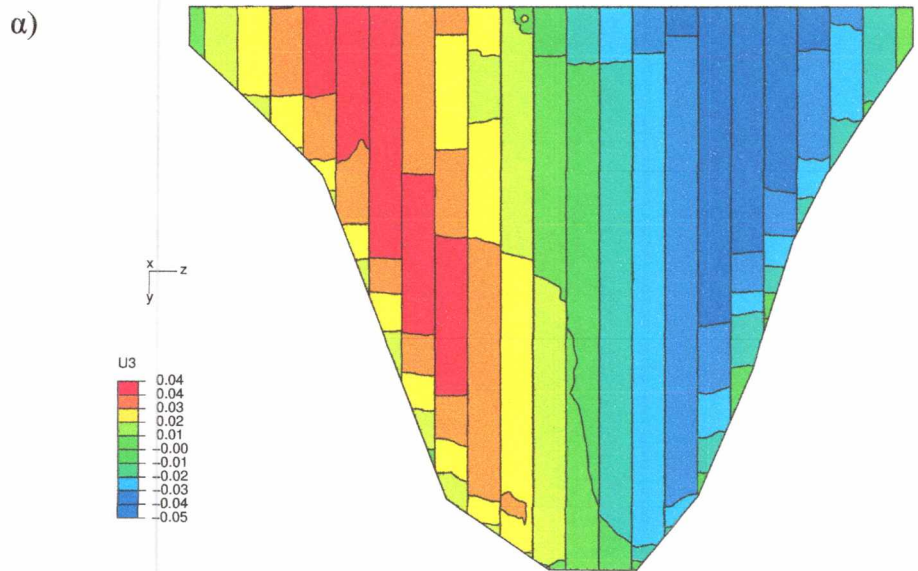
β)



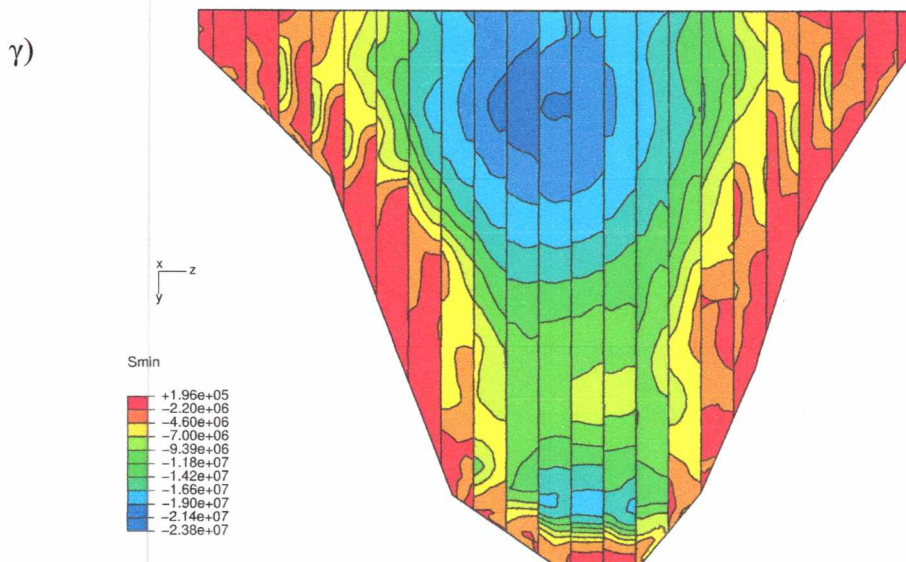
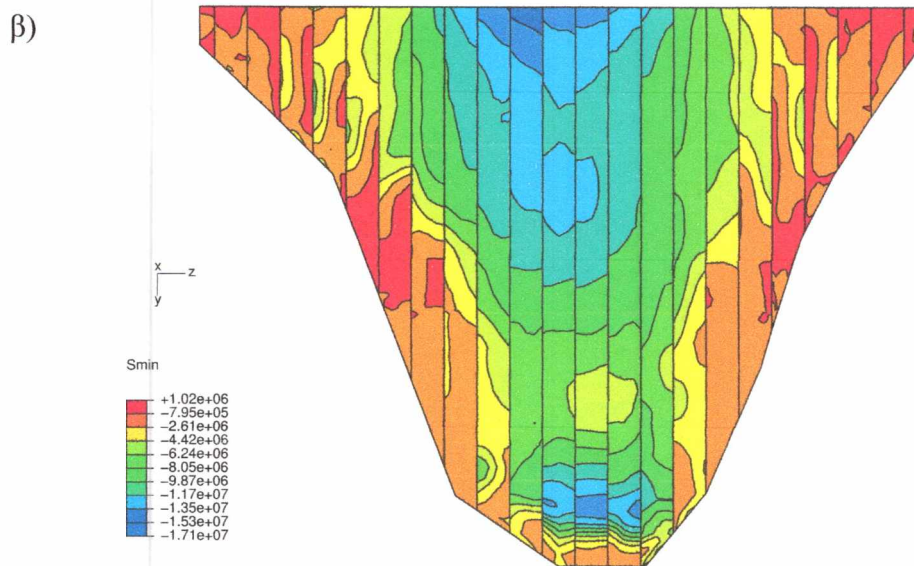
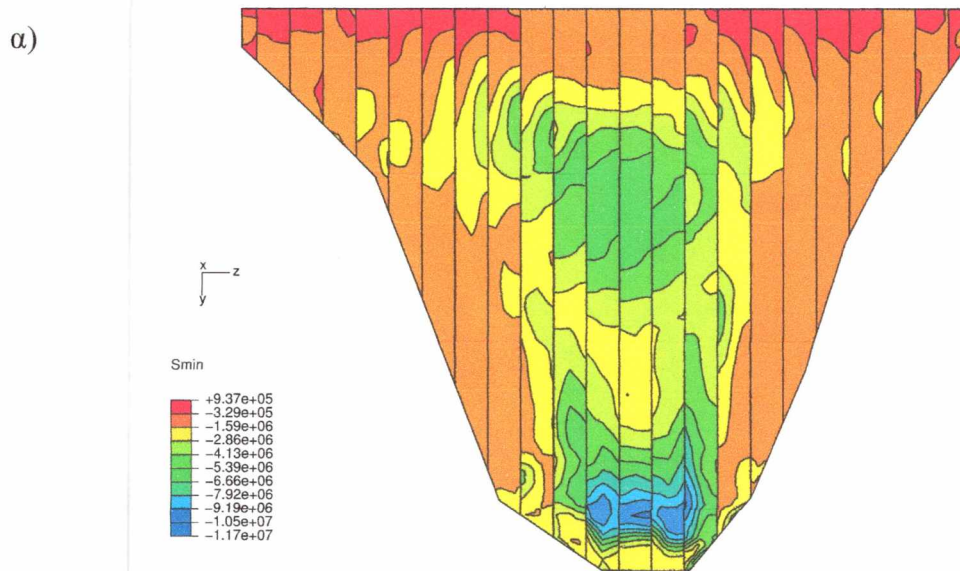
γ)



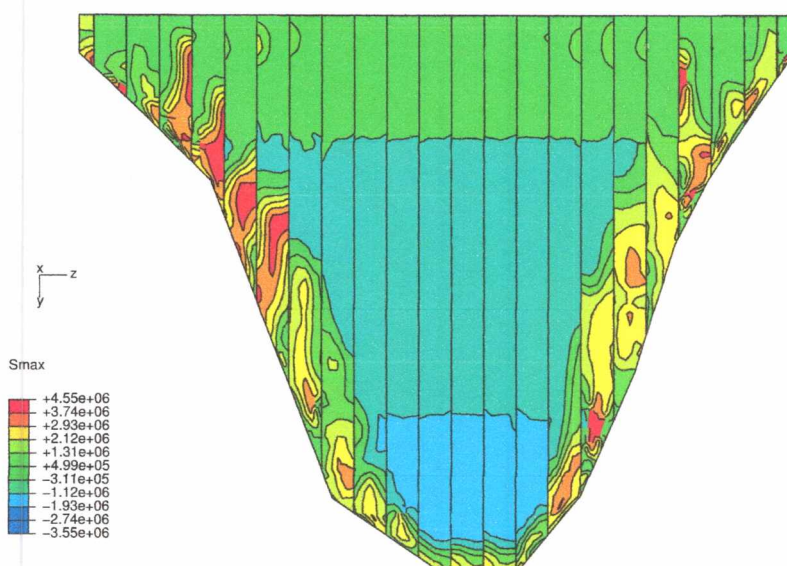
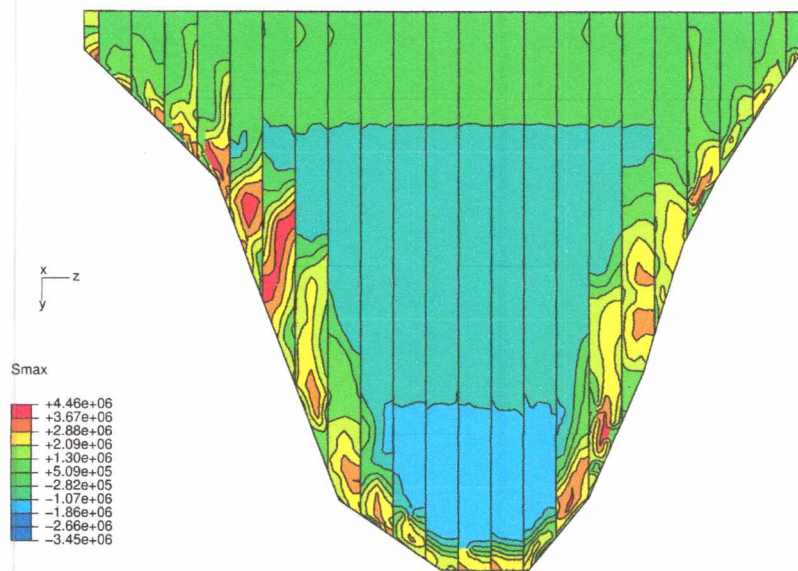
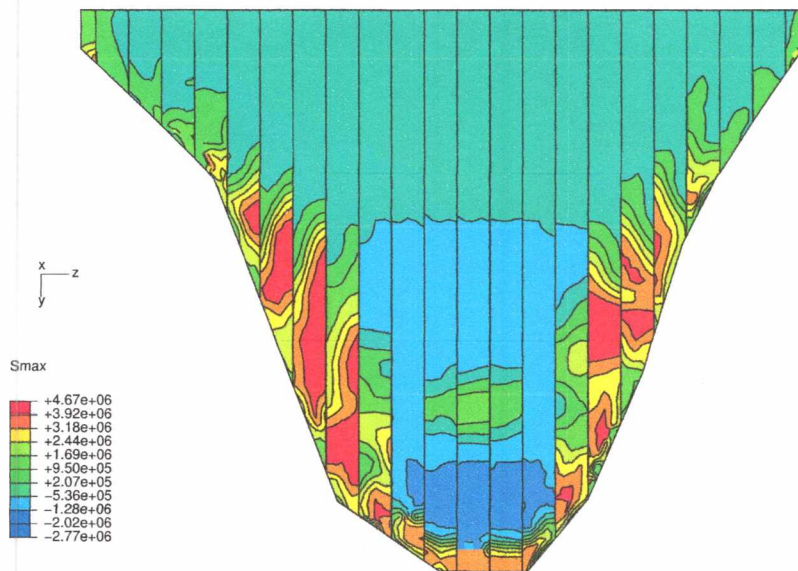
Σχήμα 60: Βύθιση της πλάκας για ποιότητα σκυροδέματος C45 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



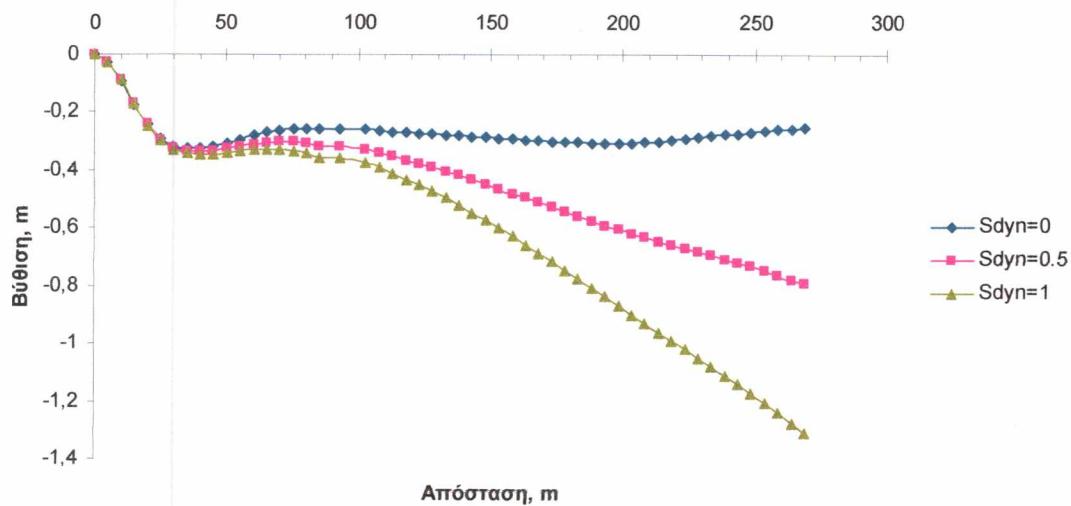
Σχήμα 61: Μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C45 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



Σχήμα 62: Ελάχιστη κύρια τάση στην πλάκα για ποιότητα σκυροδέματος C45 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



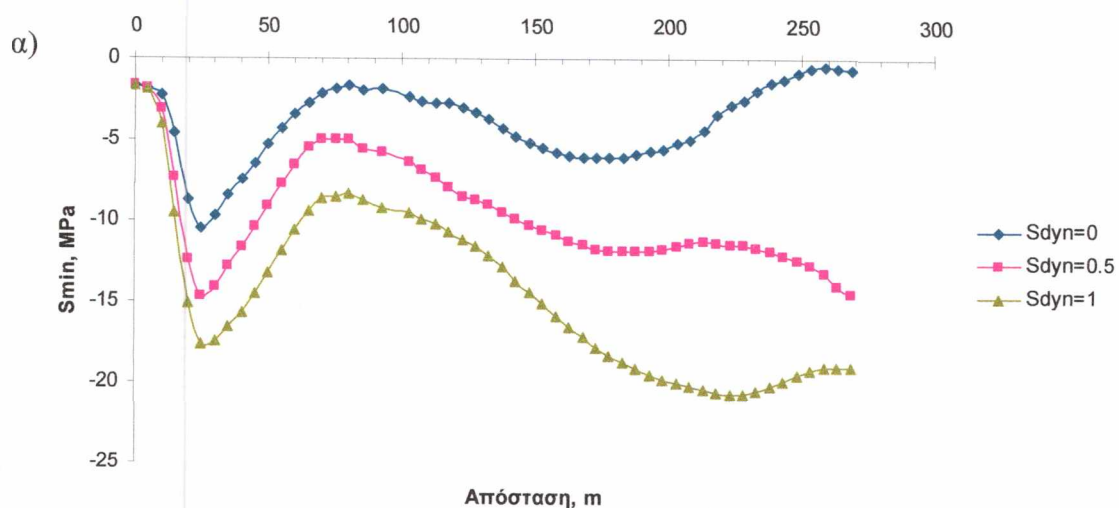
Σχήμα 63: Μέγιστη κύρια τάση στην πλάκα για ποιότητα σκυροδέματος C45 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$

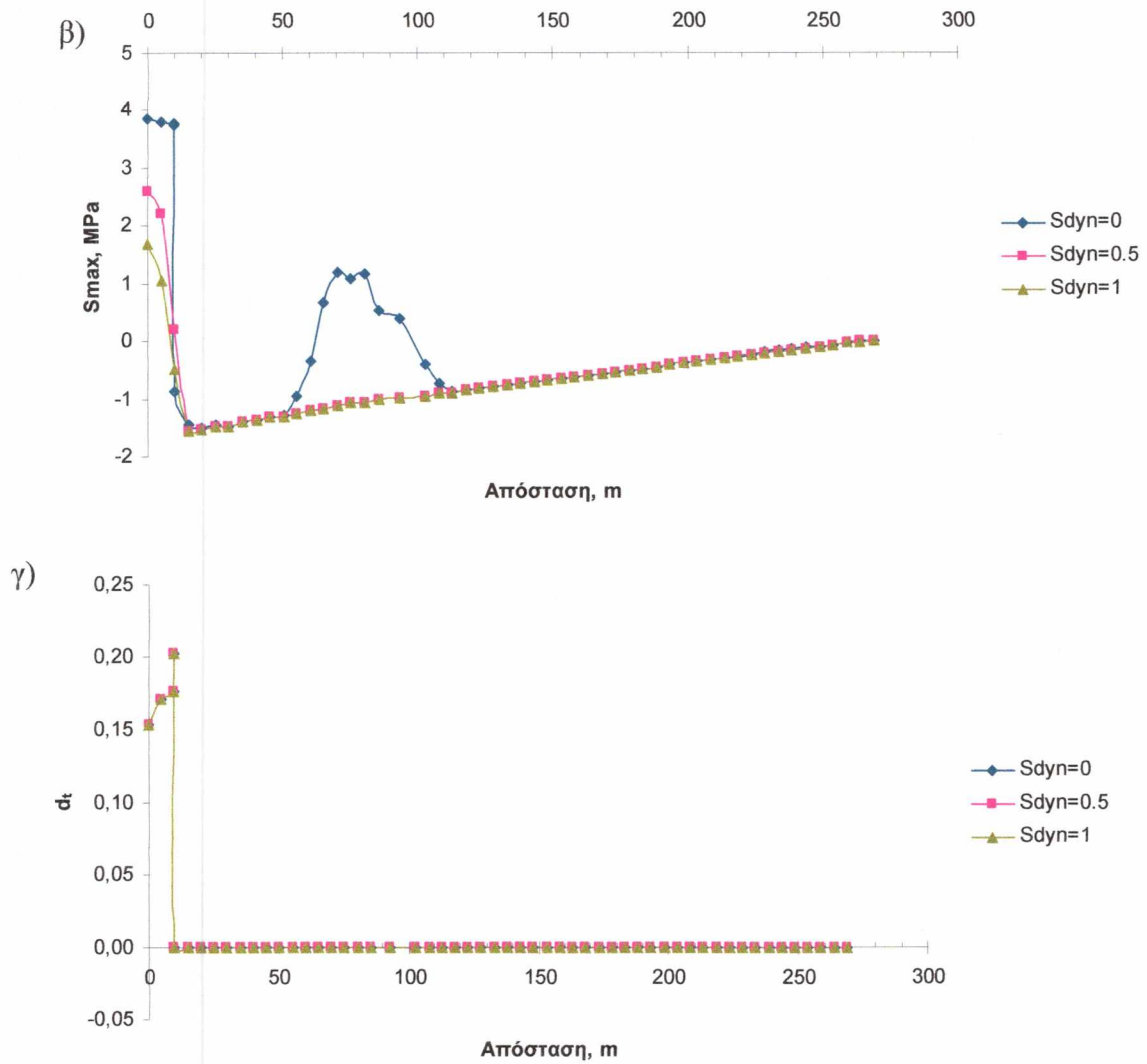


Σχήμα 63: Μεταβολή της βύθισης εντός της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα της πλάκας για δυναμική καθίζηση $S_{dyn} = 0, 0.5, 1$

Οι τιμές της μεταβολής της βύθισης της πλάκας 13 και της ελάχιστης κύριας τάσης που φαίνονται στα σχήματα 63 και 64 αντίστοιχα, συμπίπτουν με αυτές για τα σκυροδέματα C25 και C37. Ενώ η μέγιστη κύρια τάση παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές απ' ό,τι στις άλλες δυο ποιότητες σκυροδέματος.

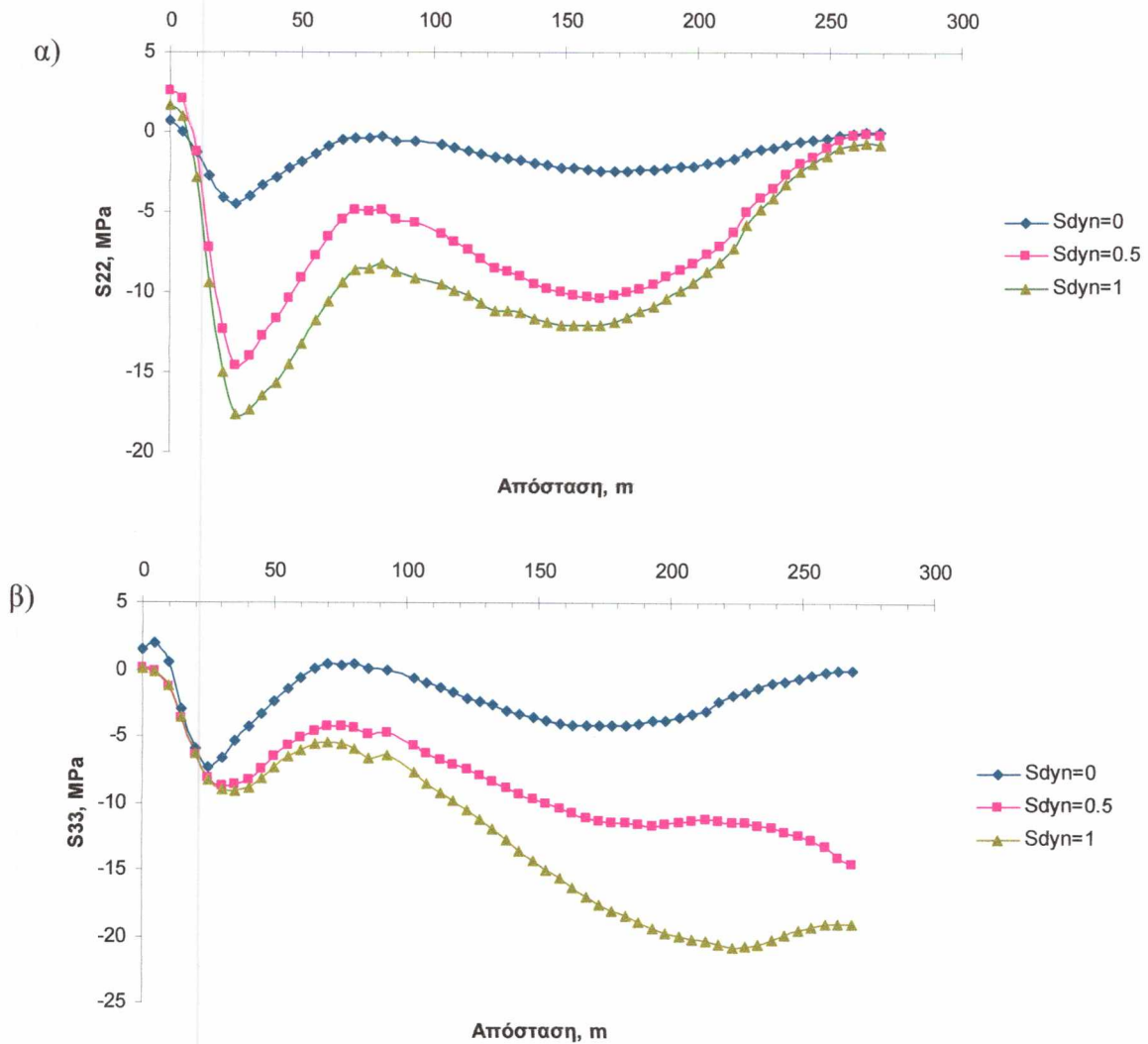
Η βλάβη του σκυροδέματος συμπίπτει με αυτήν για C37 ενώ είναι μικρότερη από αυτήν που παρατηρείται για σκυρόδεμα αντοχής 25 MPa.





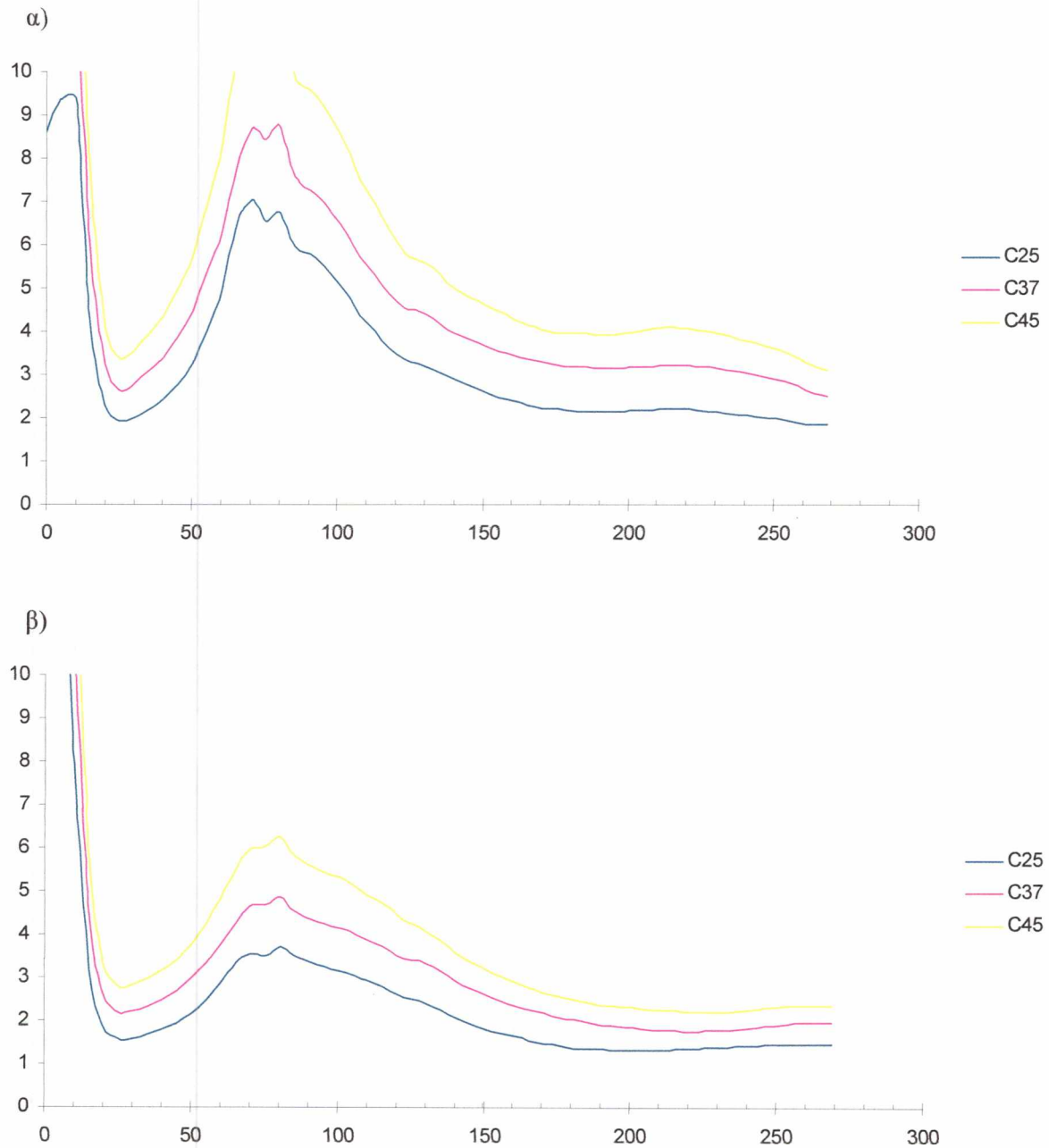
Σχήμα 64: Μεταβολή α) ελάχιστης κύριας τάσης β) μέγιστης κύριας τάσης και γ) βλάβης σκυροδέματος σε εφελκυσμό της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση $S_{dyn} = 0, 0.5, 1$ m

Στο σχήμα 65 παρουσιάζεται η ορθή τάση κατά τη διεύθυνση y και z αντίστοιχα εντός της πλάκας 13 για τρεις διαφορετικές τιμές καθίζησης. Και εδώ τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά των σκυροδεμάτων C37 και C25.



Σχήμα 65: Μεταβολή α) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση y β) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση z της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για δυναμική καθίζηση Sdyn= 0, 0.5, 1 m

Στο σχήμα 60 παρουσιάζεται ο συντελεστής ασφαλείας για την αστοχία του σκυροδέματος σε θλίψη για δυο τιμές δυναμικής καθίζησης.



Σχήμα 60: Συντελεστής ασφαλείας για την αστοχία του σκυροδέματος για δυναμική καθίζηση α) $S_{dyn}=0.5$ m, β) $S_{dyn}=1$ m

Σημειώνεται ότι και στα δυο διαγράμματα ο συντελεστής ασφαλείας είναι αποδεκτός, μεγαλύτερος της μονάδος. Παρατηρείται αύξηση του συντελεστή ασφαλείας όσο αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το φράγμα της Μεσοχώρας και ειδικότερα η ανάντη πλάκα σκυροδέματος. Η ανάλυση έγινε τρισδιάστατα με τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος (C25, C37, C45) και τρία σενάρια δυναμικής καθίζησης ($S_{dyn} = 0, 0.5, 1$ m) προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση των παραπάνω στην εντατική κατάσταση της πλάκας.

Οι αναλύσεις και τα διαγράμματα που προέκυψαν από αυτές, έδειξαν πως η δυναμική καθίζηση επιδρά σημαντικά στην εντατική κατάσταση της πλάκας. Ειδικότερα, έντονη επίδραση παρατηρείται στη βύθιση της πλάκας (U_1), η οποία παρουσιάζει αύξηση καθώς αυξάνεται η δυναμική καθίζηση. Ίδια συμπεριφορά παρουσιάζουν η ορθή τάση και η μετακίνηση κατά y και z (S_{22}, S_{33} και U_2, U_3 αντίστοιχα).

Αναφορικά με τις κύριες τάσεις, υπάρχει μια διαφοροποίηση. Η ελάχιστη κύρια τάση (S_{min}) στη στέψη για $S_{dyn} = 0$ τείνει στο μηδέν, ενώ για $S_{dyn} = 0.5$ και 1 m εμφανίζεται σημαντική θλίψη λόγω αύξησης της S_{33} . Η μέγιστη κύρια τάση (S_{max}) επηρεάζεται καθώς η αύξηση της καθίζησης αυξάνει σημαντικά τις τιμές της με εξαίρεση την περιοχή του πόδα.

Τέλος, στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν η δυναμική καθίζηση φαίνεται να μην επηρεάζει τη βλάβη που υφίσταται το σκυρόδεμα λόγω εφελκυσμού (d_t). Το συμπέρασμα αυτό, είναι ίσως λίγο παραπλανητικό, και οφείλεται στο γεγονός ότι παραλείπεται η δυναμική ανάλυση, οπότε το σκυρόδεμα υφίσταται όλο το ποσοστό της μέγιστης βλάβης πριν την ανάπτυξη της δυναμικής καθίζησης. Όμως στην πραγματικότητα θα αναπτυχθούν σημαντικές εφελκυστικές τάσεις και κατά την διάρκεια σεισμικής δόνησης, κάθε στιγμή που το φράγμα κινείται προς την κατάντη πλευρά. Με την αύξηση της καθίζησης (κατά την διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης), αφενός μεν η θλίψη αυξάνεται, αφετέρου μειώνεται ο εφελκυσμός από τον οποίο κινδυνεύει να αστοχήσει το σκυρόδεμα. Έτσι, μειώνονται οι πιθανότητες να υποστεί βλάβη λόγω εφελκυσμού το σκυρόδεμα κατά την σεισμική δόνηση.

Η δεύτερη παράμετρος που εξετάστηκε, ήταν η επίδραση της ποιότητας του σκυροδέματος. Οι αναλύσεις έδειξαν πως η βύθιση της πλάκας και η μετακίνηση κατά y και z δεν επηρεάστηκαν από την αύξηση της ποιότητας του σκυροδέματος διότι στην παρούσα εργασία τα μέτρα ελαστικότητας ήταν κοινά για τις τρεις ποιότητες σκυροδέματος.

Όμοια συμπεριφορά έδειξε και η ελάχιστη κύρια τάση. Σε αντίθεση, η μέγιστη κύρια τάση (S_{max}) εμφάνισε αυξημένες τιμές στην περιοχή του πόδα λόγω αύξησης της αντοχής σε εφελκυσμό. Η γραμμική μορφή το διαγράμματος οφείλεται στο γεγονός ότι η μέγιστη κύρια τάση είναι η ορθή τάση κάθετα στην πλάκα και δημιουργείται από το βάρος του νερού. Η απότομη αλλαγή στην κλίση του διαγράμματος από τα 50 έως τα 110 m συμβαίνει λόγω διαφοροποίησης της S_{max} η οποία στην περιοχή αυτή αλλάζει κατεύθυνση. Ακόμα, εξετάστηκε η ορθή τάση στις κατευθύνσεις y και z (S_{22} και S_{33} αντίστοιχα). Βάσει των διαγραμμάτων, δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν ομοιομορφία και σύγκλιση τιμών για τις τρεις ποιότητες

σκυροδέματος με εξαίρεση το σκυροδέμα αντοχής 25 MPa το οποίο παρουσιάζει μειωμένες τιμές για $S_{dyn} = 0$ m.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι η επιρροή της ποιότητας του σκυροδέματος στην βλάβη που υφίσταται λόγω εφελκυσμού (d_t). Η αύξηση της ποιότητάς του παίζει σημαντικό ρόλο καθώς επιφέρει βελτίωση της βλάβης στην περίμετρο της πλάκας. Στην πραγματικότητα, η βελτίωση που προκύπτει αν ληφθεί υπόψη και η δυναμική ανάλυση (που παραλείπεται εδώ) είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Το πιο σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις αναλύσεις είναι ότι, λόγω της αύξησης της αντοχής του σκυροδέματος, αυξάνεται ικανοποιητικά ο συντελεστής ασφαλείας της πλάκας, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό αν ληφθούν υπόψη και οι σεισμικές θλίψεις επιπλέον της δυναμικής καθίζησης.

Τέλος, ο σχεδιασμός ενός φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά εφόσον έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι παράμετροι προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής και αποδοτική λειτουργία του. Η τεχνολογία των CFRDs εξελίσσεται συνεχώς και κάθε φράγμα που κατασκευάζεται παρέχει τεχνογνωσία που θα πρέπει να αξιοποιείται άμεσα στα επόμενα φράγματα χωρίς να επαναλαμβάνονται τα κατασκευαστικά σφάλματα του παρελθόντος.

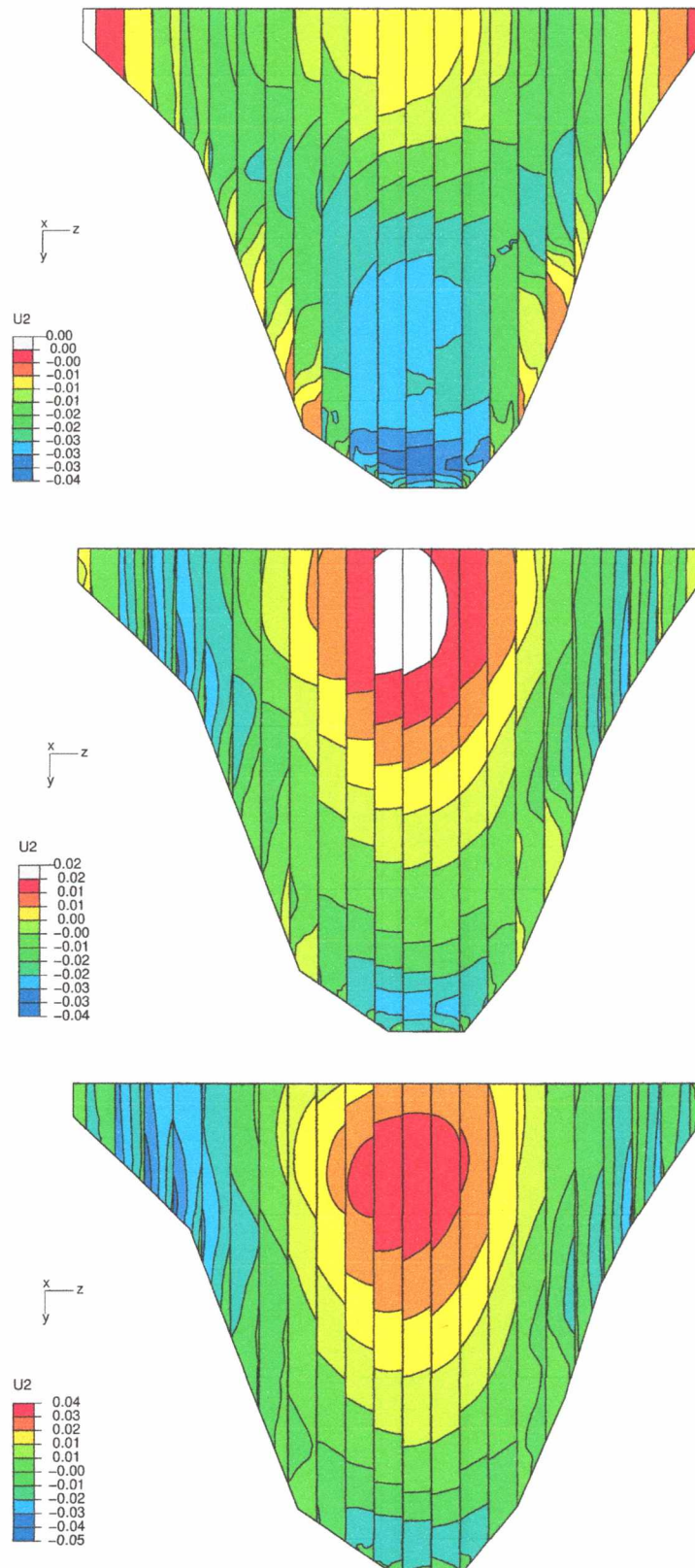
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσόγκας Χ., Τσόγκα Ε., (2009), Υδροδυναμικά έργα- Φράγματα, Εκδ. ΙΩΝ
2. Βούλγαρη Χ., (2011), Φίλτρα φραγμάτων- Καταγραφή στοιχείων από ελληνικά φράγματα. Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό πρόγραμμα σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων
3. Ευαγγέλου Β., (2004), Φράγμα Μεσοχώρας: Τρισδιάστατη δυναμική ανάλυση λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD), Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικός
4. Μουτάφης Ν., (2009) Τεχνολογία Γεωφραγμάτων- Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
5. Ντακούλας Π., (2010), Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην συμπεριφορά φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος, Οκτ. 2010.
6. Cooke J. B., (1982), Progress in rockfill dams (18th Terzaghi lecture), J. Geotech. Engrg., ASCE, 110, 10, 1381-1414
7. Fell R., Mac Gregor P., Stapledon D and Bell G., (2005), Geotechnical engineering of dams, AA. BAKLEMA PUBLISHERS
8. Πουλάκη Α., (2008), Επίδραση της δυσκαμψίας στη συμπεριφορά λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs), Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικός
9. Cooke J. B., (1991), The concrete-faced rockfill dam, Water Power and Dam Construction, 11-14
10. Cooke J. B., Sherard J. L., (1987), Concrete face rockfill dam: II. Design, J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 113, No GT 10, 1096-1112
11. Στεφανάκος Π., Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία: Υδροηλεκτρικά έργα-φράγματα, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
12. ANCOLD (Australian national Committee on Large Dams), (1991), Guidelines on concrete-faced rockfill dams
13. Pinto N. L. de S., (2001), Questions to wonder on designing very high CFRDs, Hydropower and dams, Vol. 8, Issue 5
14. Θανόπουλος Ι., Αναστασόπουλος Κ., (2008), Λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος: Εμπειρίες από τον Θεσσαλικό χώρο και σύγχρονη τεχνολογία
15. Philo P., Pinto N. L., (2005), CFRD dam characteristics learned from experience, Hydropower and dams, Issue One
16. Macedo-Gomes G., Castro-Abonce J. and Montanes-Cataxo L., (2000), Behaviour of Aguamilpa dam
17. Alberto G. A., (1998) Agrietamiento en presas de encrocamiento con cara de concreto, International conference on dams, Mexican society for soil mechanics, Mexico

18. Velasquez A. J. D. and Villegas Lesso, (2007), Behaviour analysis, Electricity federal commission, Mexico, www.waterpowermagazine.com
19. Foster M., Fell R., (2000), The statistics of embankment dam failures and accidents, J. Canadian geotechnics, Vol 37
20. Johannesson P., Toblang S., (2007), Lessons learned from Mohale, International water power and dam construction
21. Duncan J. M. and Chang C. Y., (1970), Nonlinear analysis of stress and strain in soil, J. of Mech. and found div., ASCE, 96, SM5, 1629-1653
22. Clough G. W., (1984), User's manual for program SOILSTRUCT, Virginia, Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia
23. Ebeling R. M., Peters R. F. and Clough G., (1992), User's guide for the increment construction soil-structure interaction program SOILSTRUCT, Waterways experiment station, US Corps of engineers, Technical report ITL-90-6
24. Dakoulas P., (2007), Messochora CFRDam: Slab and dam performance during reservoir filling based on 3D nonlinear analysis, Research report for the public power corporation, University of Thessaly, Volos, Greece
25. Ντακούλας Π., Θανόπουλος Γ., Αναστασόπουλος Κ., (2008), Μη γραμμική 3Δ προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης του φράγματος της Μεσοχώρας, 1^ο Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων, ΤΕΕ, Λάρισα 2008, 315-327.
26. Θανόπουλος Ι., Καζίλης Ν., Φελέκος Σ., (1992), Το επίχωμα του λιθόρριπτου φράγματος με πλάκα σκυροδέματος της Μεσοχώρας, 2^ο Πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής μηχανικής
27. Ντακούλας Π., (2008), Μη γραμμική 3Δ προσομοίωση της κατασκευής, πλήρωσης και σεισμικής απόκρισης φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, 3^ο Πανελλήνιο συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, 5-7 Νοεμβρίου 2008, Άρθρο 2111.

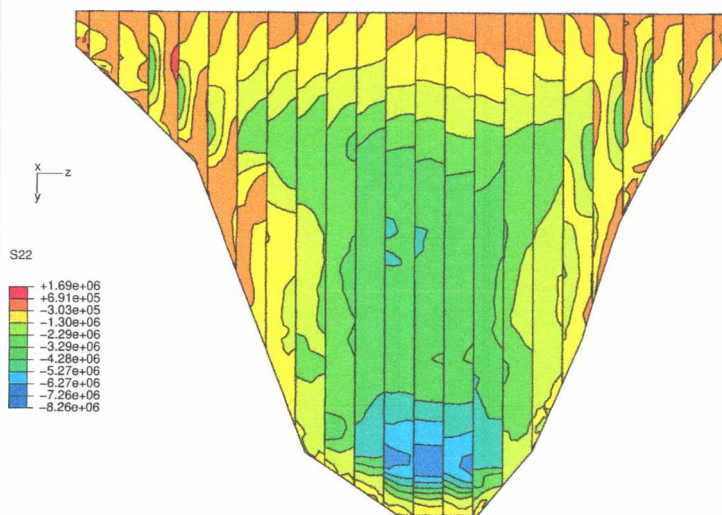
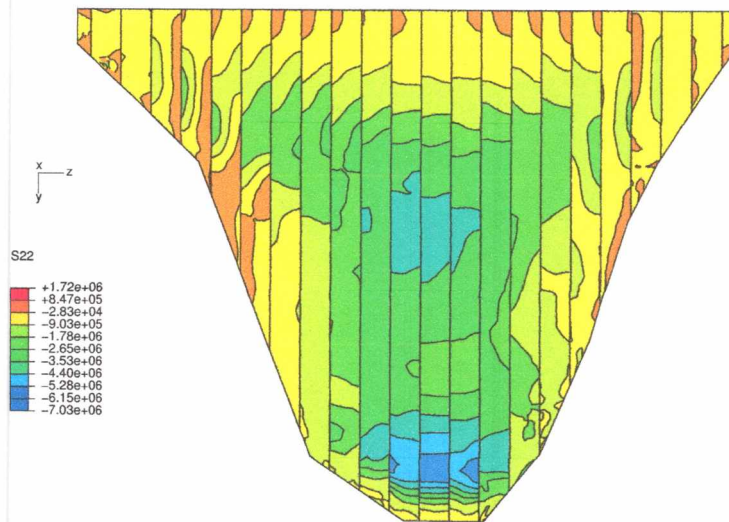
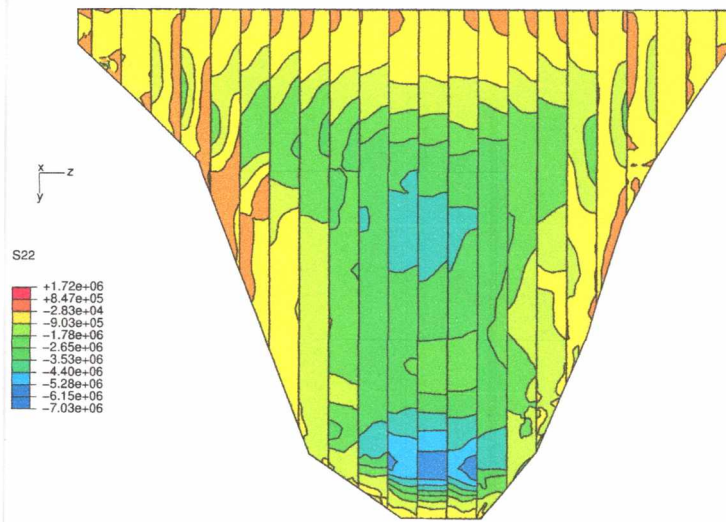
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ποιότητα σκυροδέματος C25

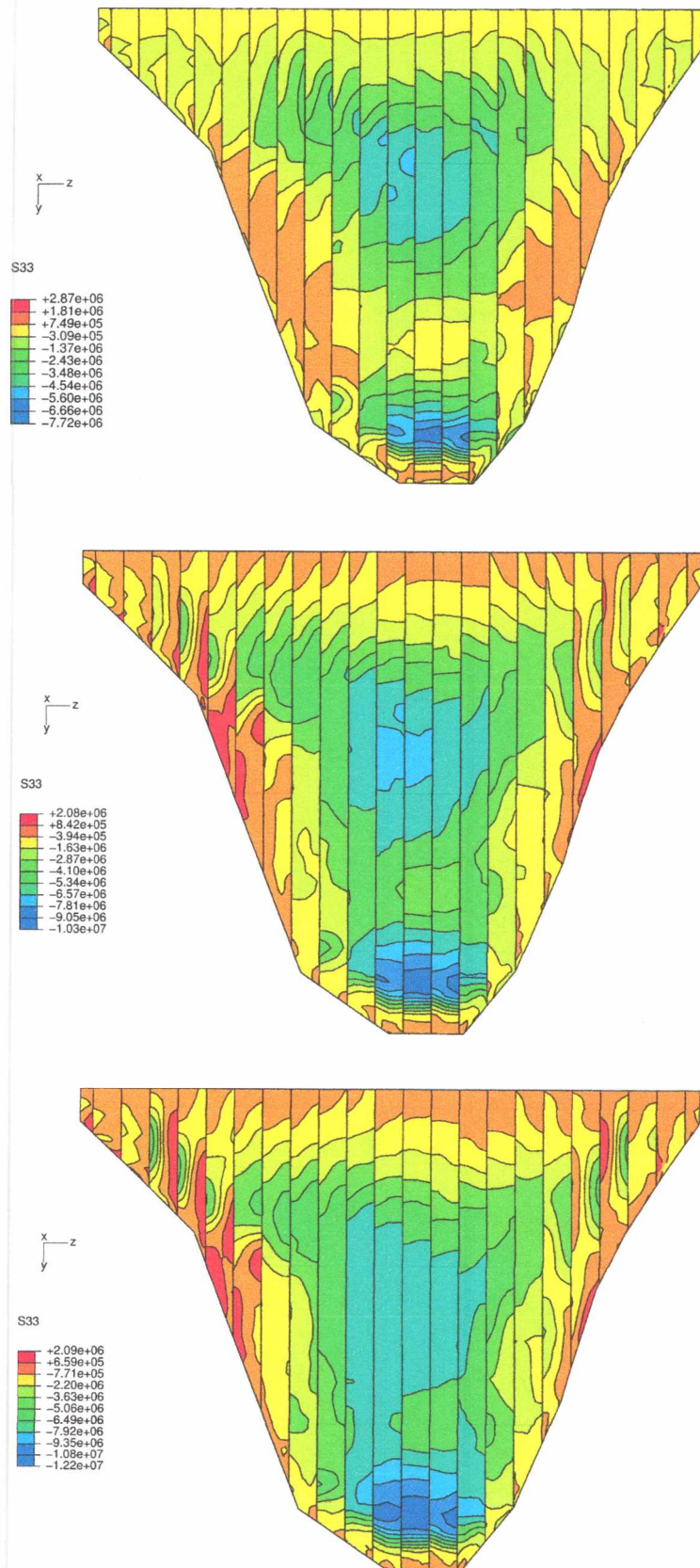


Σχήμα 1: Μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση y για ποιότητα σκυροδέματος C25

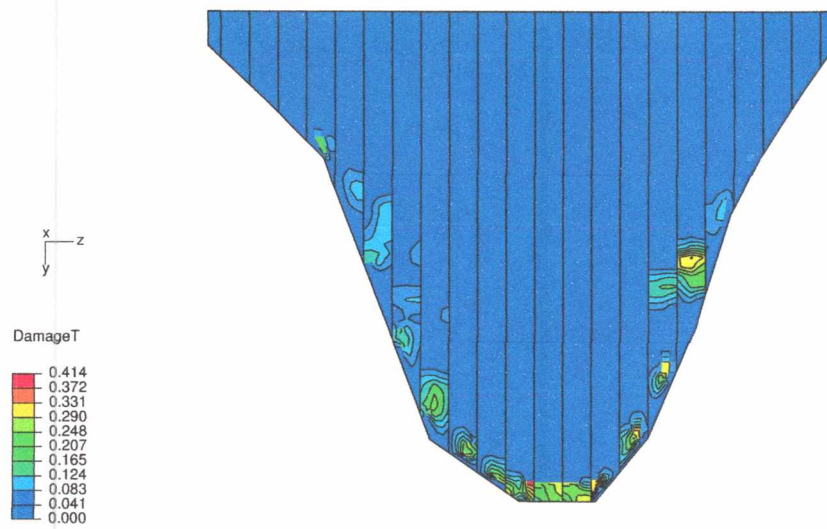
α) $S_{dyn} = 0$ β) $S_{dyn} = 0.5$ γ) $S_{dyn} = 1$



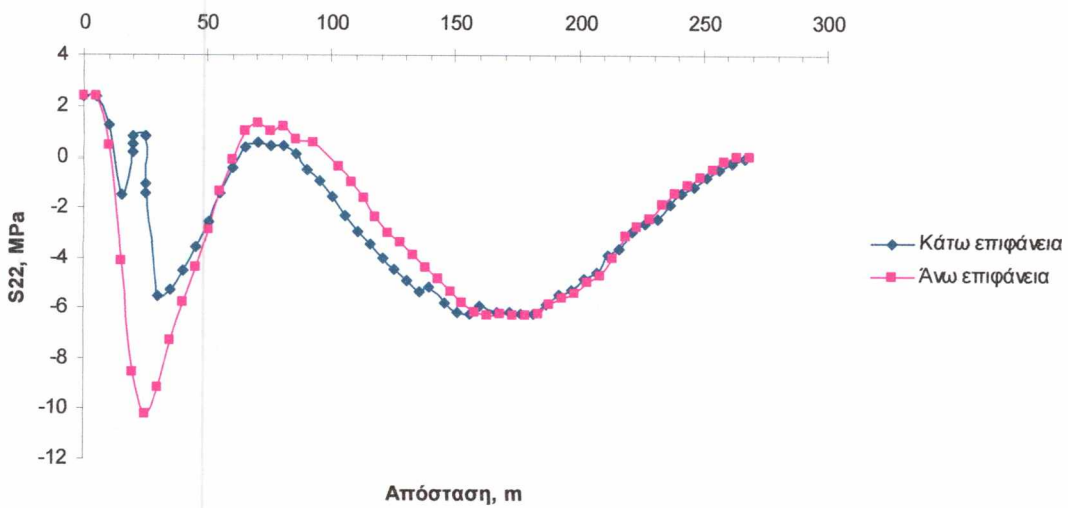
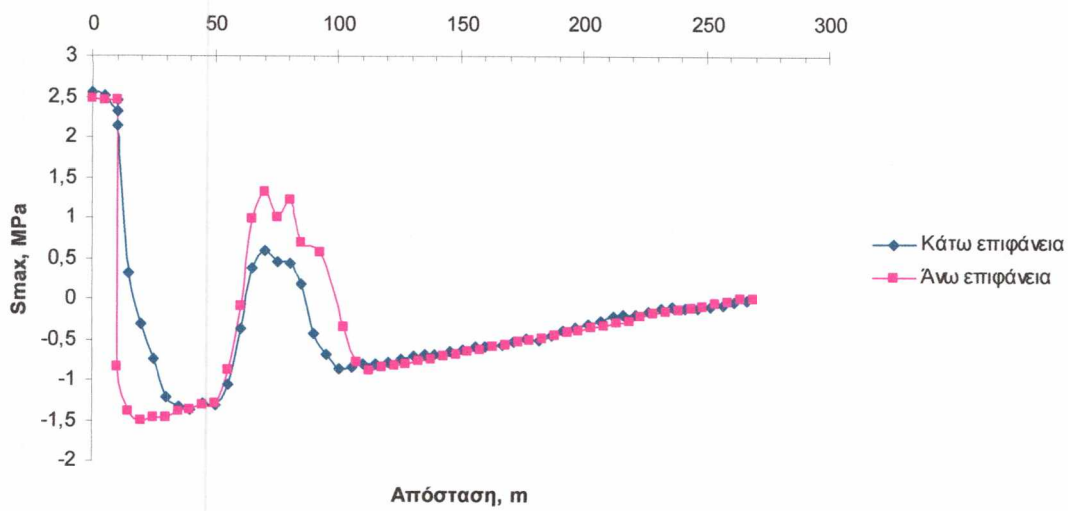
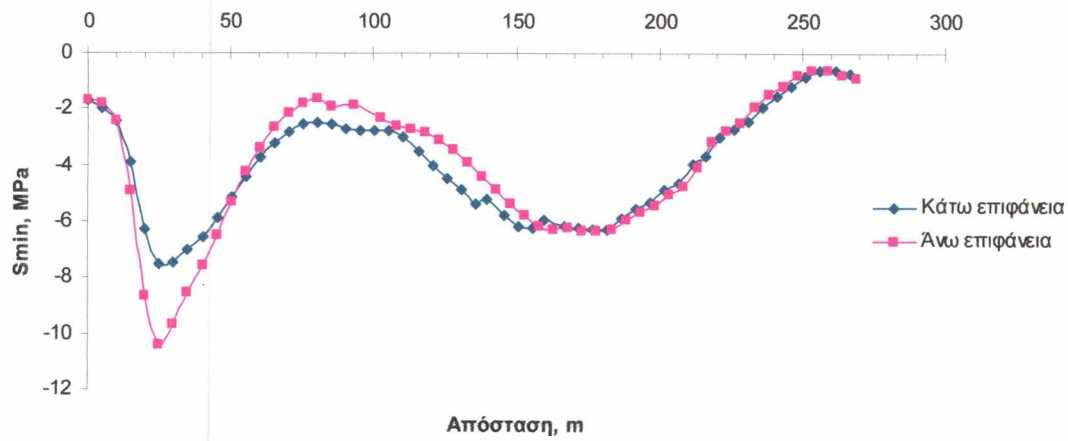
Σχήμα 2: Ορθή τάση που αναπτύσσεται στην πλάκα στην κατεύθυνση y για ποιότητα σκυροδέματος C25 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



Σχήμα 3: Ορθή τάση που αναπτύσσεται στην πλάκα στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C25 α) Sdyn= 0 β) Sdyn= 0.5 γ) Sdyn= 1

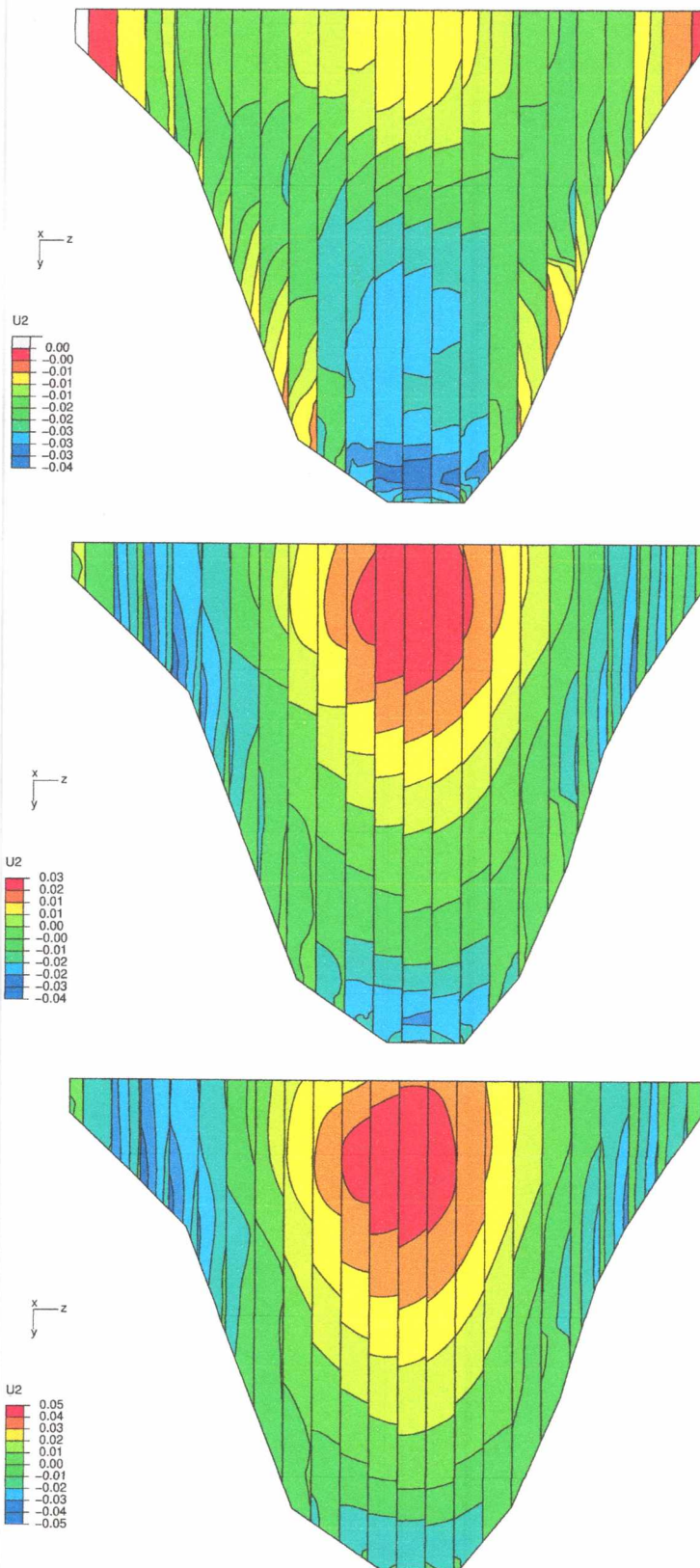


Σχήμα 4: Βλάβη σκυροδέματος στην πλάκα για ποιότητα σκυροδέματος C25 για $S_{dyn} = 0, 0.5, 1$

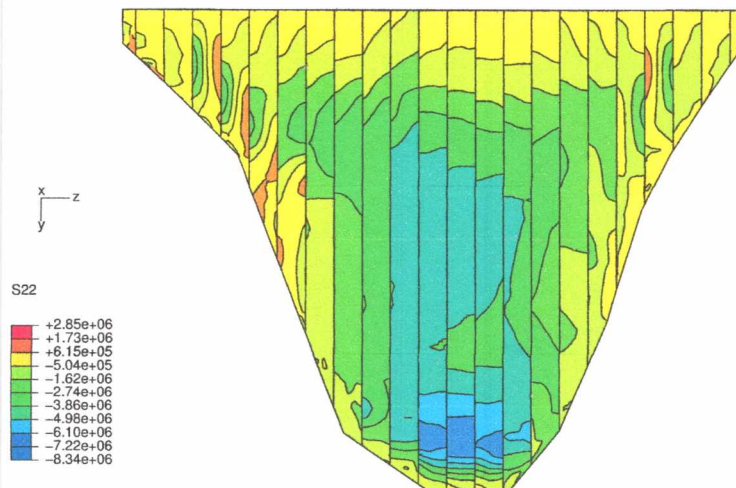
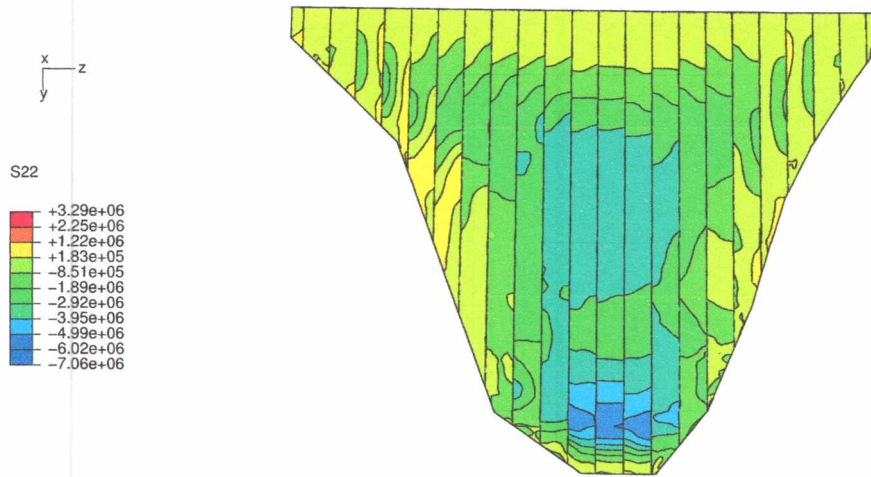
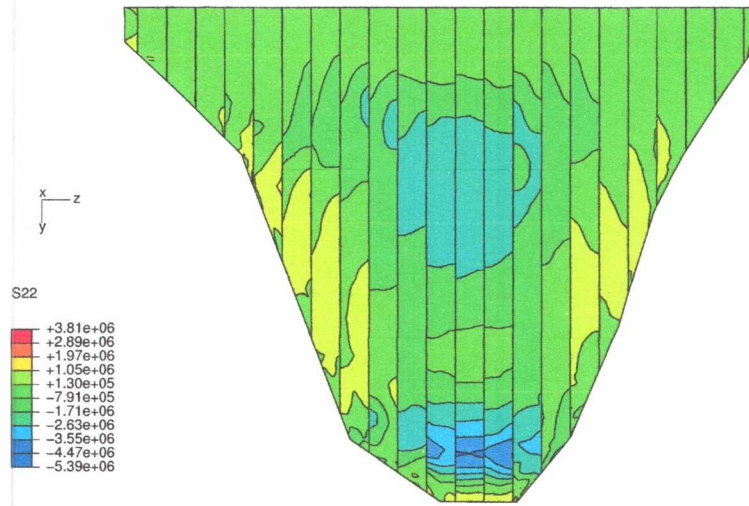


Σχήμα 5: Μεταβολή της α) ελάχιστης κύριας τάσης β) μέγιστης κύριας τάσης και γ) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση y στην κάτω και άνω επιφάνεια εντός της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα της πλάκας για μηδενική δυναμική καθίζηση.

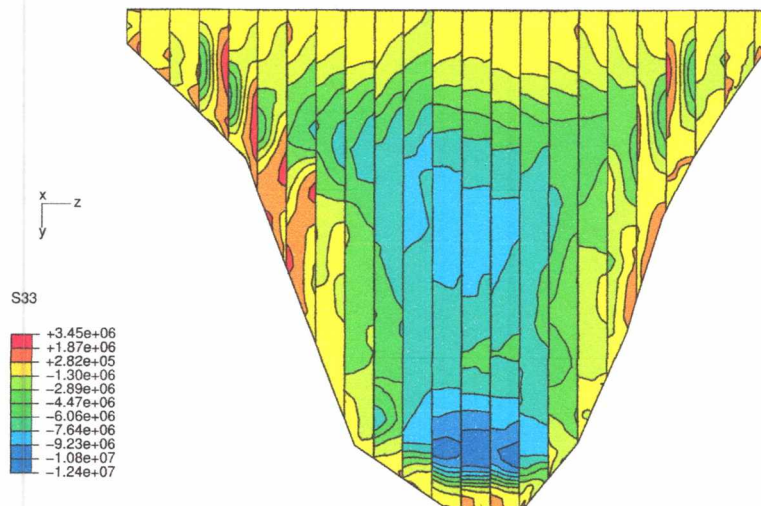
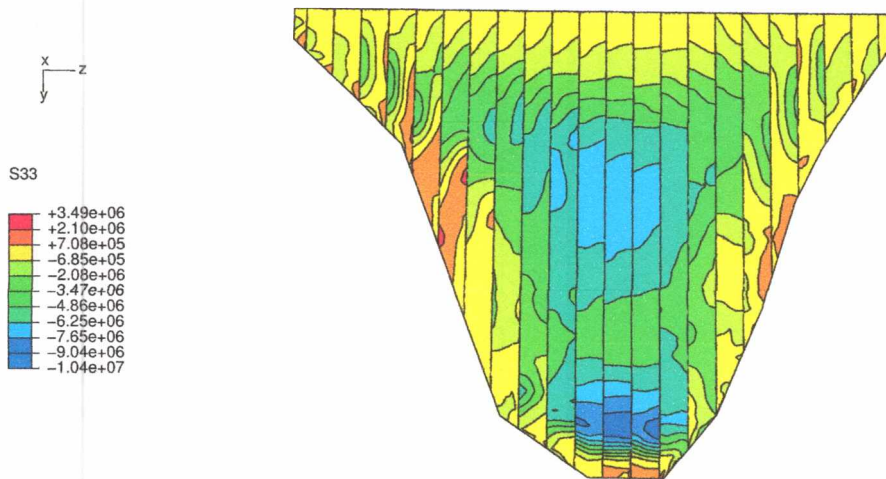
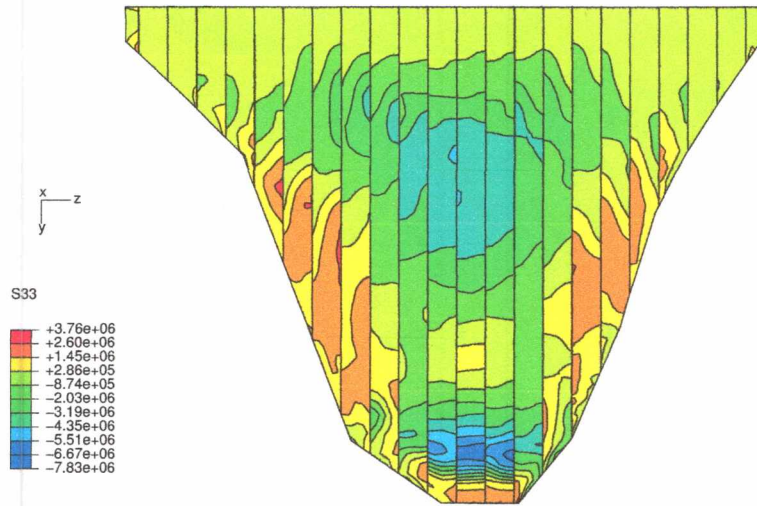
Ποιότητα σκυροδέματος C45



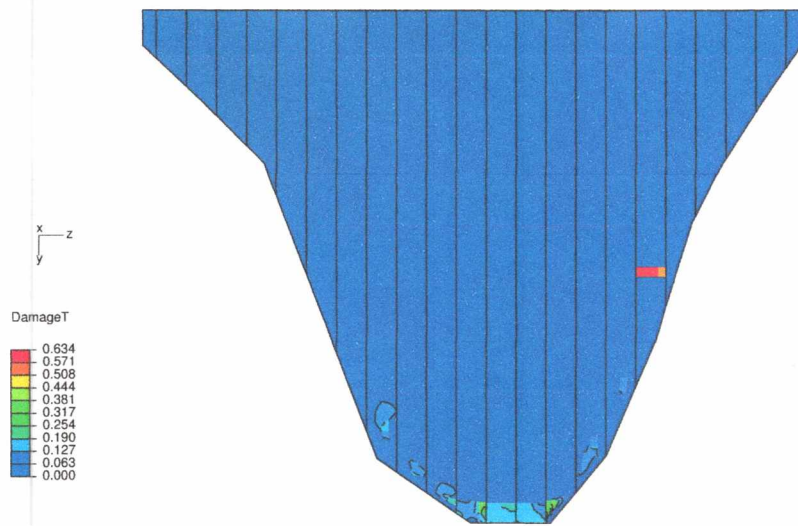
Σχήμα 6: Μετακίνηση της πλάκας στην κατεύθυνση y για ποιότητα σκυροδέματος C45
α) $S_{dyn} = 0$ β) $S_{dyn} = 0.5$ γ) $S_{dyn} = 1$



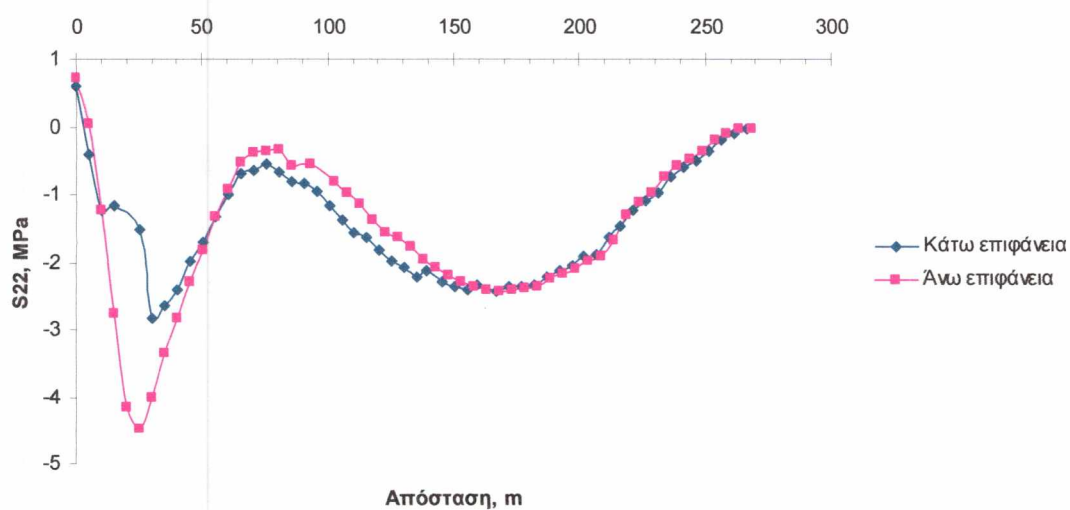
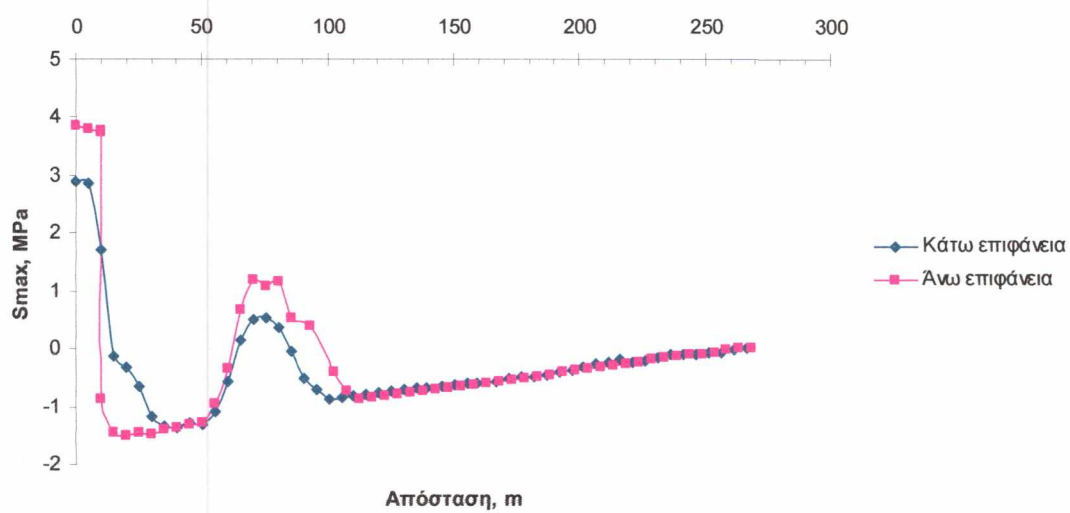
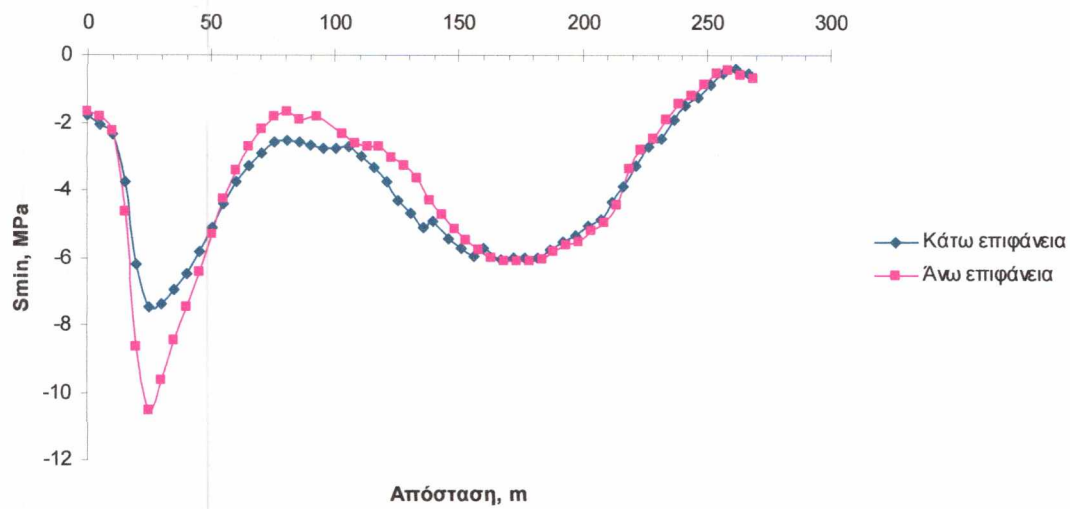
Σχήμα 7: Ορθή τάση που αναπτύσσεται στην πλάκα στην κατεύθυνση y για ποιότητα σκυροδέματος C45 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=$



Σχήμα 8: Ορθή τάση που αναπτύσσεται στην πλάκα στην κατεύθυνση z για ποιότητα σκυροδέματος C45 α) $S_{dyn}=0$ β) $S_{dyn}=0.5$ γ) $S_{dyn}=1$



Σχήμα 9: Βλάβη σκυροδέματος στην πλάκα για ποιότητα σκυροδέματος C45 για $S_{dyn} = 0, 0.5, 1$



Σχήμα 10: Μεταβολή της α) ελάχιστης κύριας τάσης β) μέγιστης κύριας τάσης και γ) ορθής τάσης κατά τη διεύθυνση y στην κάτω και άνω επιφάνεια εντός της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα της πλάκας για μηδενική δυναμική καθίζηση.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000109341