

# Λιθόρριπτα Φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος : Εμπειρίες από τον Θεσσαλικό χώρο και σύγχρονη τεχνογνωσία

Ι. Θανόπουλος

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΔΕΗ/ΔΥΗΠ/ΚΕΨΕ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ*

Κ. Αναστασόπουλος

*Πολ. Μηχανικός MSc, ΔΕΗ Α.Ε / ΔΥΗΠ*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στο άρθρο αναπτύσσονται τα κύρια σημεία των αρχών σχεδιασμού λιθόρριπων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD) που κατασκευάστηκαν στην Θεσσαλία και γίνεται προσπάθεια επαναξιολόγησης των, σύμφωνα με την εμπειρία που αποκτήθηκε διεθνώς τα τελευταία χρόνια. Στην περίπτωση του φράγματος Μεσοχώρας, το οποίο υλοποιήθηκε την περίοδο 1992-95 σύμφωνα με την διεθνή πρακτική και τις αρχές σχεδιασμού της εποχής, εντοπίζονται οι κυριότερες «αδυναμίες» του έργου & διατυπώνονται προτάσεις βελτίωσης της συμπεριφοράς του κατά την φάση της πλήρωσης του ταμιευτήρα.

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρκετές εφαρμογές του λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD) συναντώνται στην παγκόσμια κατασκευαστική δραστηριότητα. Εμπειρίες από Φράγματα μεγάλου ύψους όπως το πρόσφατα περατωθέν 200m ύψους Karahnjukar στην Ισλανδία , το Campos Novos ύψους 202m (κατασκευή 2001~2006) και το 185m ύψους Barra Grande στην Βραζιλία, έχουν σημαντικά συμβάλει στην κατανόηση της συμπεριφοράς των υψηλών επιχωμάτων και της πλάκας υπό την φόρτιση του ταμιευτήρα.

Στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στην Θεσσαλία έχουν κατασκευασθεί τα φράγματα Μεσοχώρας (150m) και Παναγιώτικο (45m). Ο σχεδιασμός του έργου Μεσοχώρας έγινε στις αρχές της δεκαετίας του '90 και του έργου Παναγιώτικο προς τα τέλη της. Και στα δύο έργα συναντώνται τα βασικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού των CFRD's όπως αυτά καθορίστηκαν από την εμπειρία των B. Cooke & J. Sherard (Fitzpatrick&al.1985<sup>1</sup>):

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

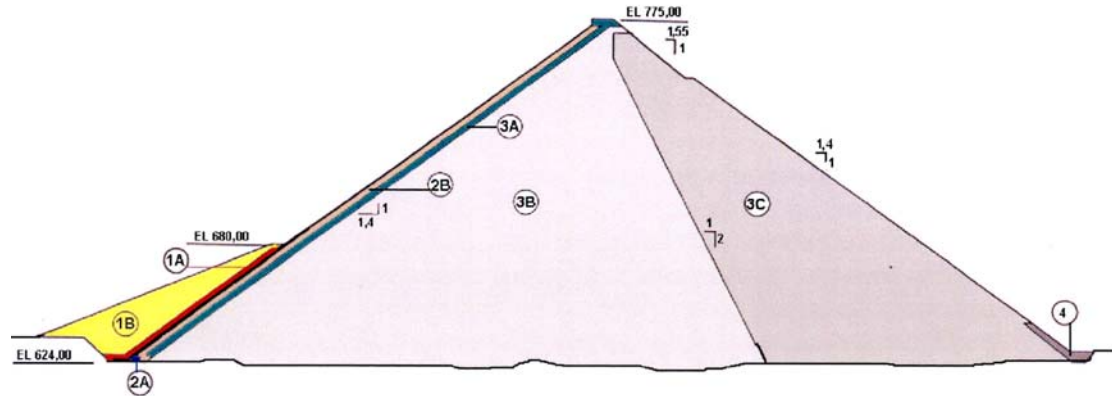
## 2. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΜΕΣΟΧΩΡΑΣ

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 ανοικτής διώρυγας δυνατότητας 3000 m<sup>3</sup>/sec, σήραγγα προσαγωγής, μήκους 7,4 km και σταθμό παραγωγής 2 χ 80MW (Ι. Θανόπουλος, Ν. Καζίλης, Σ. Φελέκος 1992<sup>2</sup>).

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.

Το φράγμα, ύψους 150m (Σχήμα 1) 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 στέγης είναι 775,00m και το μήκος της 300 m. Ο συνολικός

όγκος του επιχώματος είναι περίπου  $5,5 \times 10^6 \text{m}^3$ . Η κλίση ανάντη είναι 1,4:1 (ορ:κατ) ενώ κατάντη 1,4:1 μεταβαλλόμενη προς 1,55:1 στα 40 τελευταία μέτρα προς τη στέψη. Η αλλαγή αυτή έγινε αφού είχε ληφθεί υπόψη η σεισμική καταπόνηση & η ενίσχυση του σεισμικού κύματος κοντά στην στέψη λόγω της στενής κοιλάδας.



1A	Αδιαπέρατα υλικά από δανειοθαλάμους	1B	Τυχαία υλικά .Προϊόντα εκσκαφών η υλικά από δανειοθαλάμους.
2A	Ειδικό υλικό φίλτρου διαβαθμισμένο από αμμογάλικα ποταμού	2B	Αμμογάλικα 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 1: Φράγμα Μεσοχώρας και διαζώνιση

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.

### 2.1. 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 1,7m/hr. Ο ειδικός αναρριχόμενος μεταλλότυπος που κατασκευάστηκε για το έργο (Εικόνα 2) περιελάμβανε διάταξη διανομής του σκυροδέματος, εξέδρες εργασιών συμπύκνωσης και φινιρίσματος και διάταξη συντήρησης.



Εικόνα 1: Ανάντη όψη του φράγματος

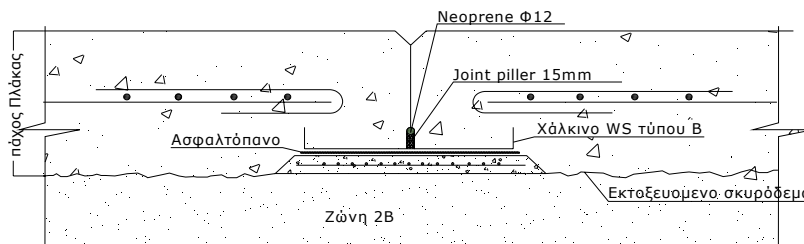


Εικόνα 2 :Μεταλλότυπος

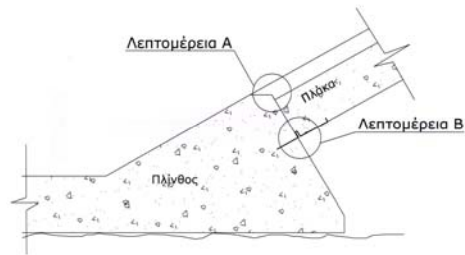
Τριών ειδών αρμοί κατασκευάστηκαν στο έργο

- 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 ασφαλτική μαστίχη τύπου “Igas”
- Αρμός πλάκας τύπου Α, 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 ασφαλτική 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”

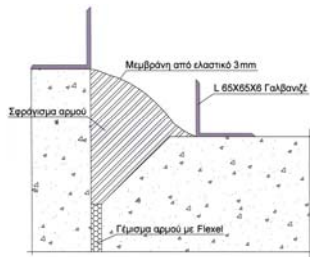
Η τυπική διατομή των αρμών πλίνθου-πλάκας και του αρμού τύπου Β φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 2 και 3 (Λεπτομέρειες Α και Β).



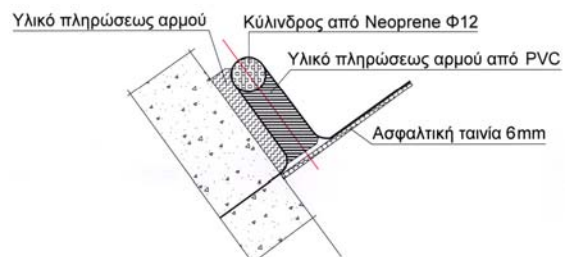
Σχήμα 2 : Αρμός τύπου Β μεταξύ πλακών (θλιπτικός)



Σχ. 3: Τυπική διάταξη αρμού Πλίνθου-Πλάκας



Λεπτομέρεια Α (Σχ. 3)



Λεπτομέρεια Β (Σχ. 3)

Είναι σημαντικό να παρατηρήσει κανείς ότι 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 διείσδυσης των οδηγών τσιμεντοκονίας στο θεωρητικό πάχος της πλάκας.

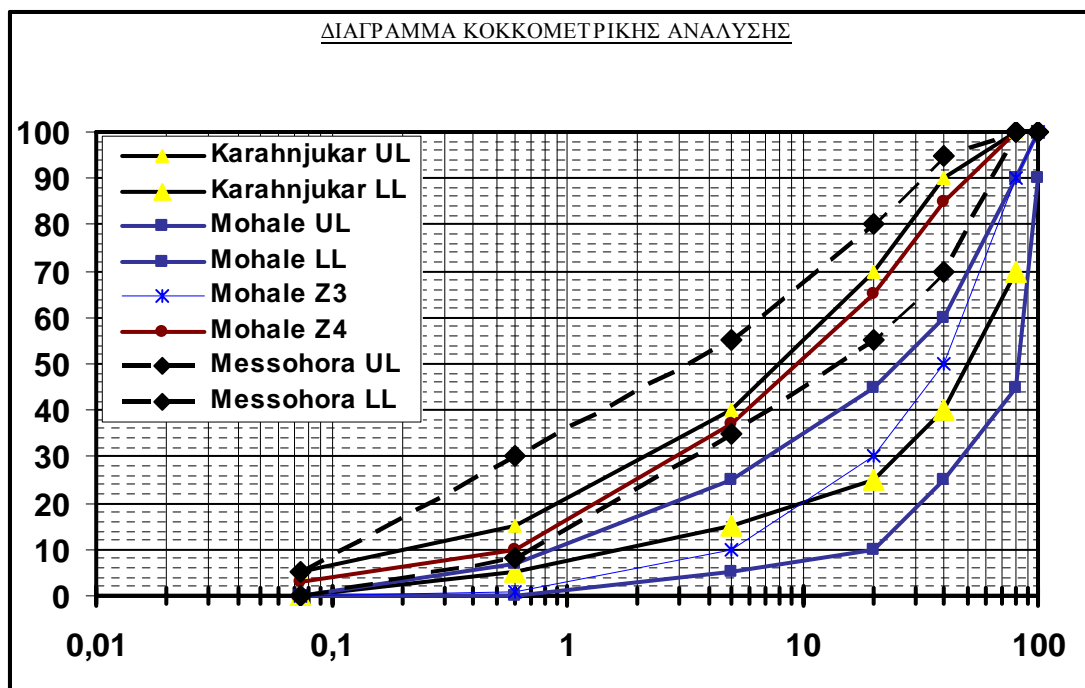
Τα παραπάνω σημεία αποτελούσαν κοινή πρακτική της περιόδου 1990-2000 άλλα έχουν σημαντικές συνέπειες στην αντοχή της πλάκας σε θλιπτική καταπόνηση.

## 2.2 Μεταβατικές Ζώνες Ανάντη

Στην ανάντη επιφάνεια της πλάκας από το κατώτερο σημείο θεμελίωσης της πλίνθου στο υψόμετρο 624m και μέχρι το υψόμετρο 680m τοποθετήθηκε η λεπτόκοκκη ζώνη 1A ως πρόσθετη προστασία έναντι διαρροών (Διερχόμενα στο κόσκινο No200>30%). Το υλοαμμώδες αυτό υλικό αποτελεί μια τρίτη γραμμή άμυνας και έχει προβλεφθεί να διεισδύσει και να φράξει το άνοιγμα μιας πιθανής διαρροής.

Μία ζώνη πλάτους 4m (ζώνη 2B) από επεξεργασμένο καλά διαβαθμισμένο αμμοχάλικο μέγιστου κόκκου 75mm κατασκευάστηκε στην ανάντη παρειά του επιχώματος, πριν την σκυροδέτηση της πλάκας, για να εξασφαλίσει την ομαλή κατανομή των φορτίων της. Η ζώνη αυτή έχει επίσης σαν στόχο να ελέγχει σε κάποιο βαθμό τις διαρροές που πιθανόν να εμφανισθούν από αστοχία κάποιου αρμού της πλάκας (λειτουργία φίλτρου ως προς το υλικό 1A).

Όπως φαίνεται από την κοκκομετρία η ζώνη 2B στο φράγμα Μεσοχώρας είναι σχετικά πλούσια σε άμμο (35~55%), ενώ η αντίστοιχη ζώνη σε πιο σύγχρονα μεγάλα έργα είναι λιγότερο πλούσια σε κόκκους κάτω του No4. (Mohale, Karahnjukar).



Σχήμα 4: Κοκκομετρία ανάντη μεταβατικής ζώνης 2B σε σύγκριση με αυτή άλλων έργων (P. Johannesson 2007<sup>3</sup>)

Εκτός της οριζόντιας συμπύκνωσης της ζώνης 2B με τον 12t δονητικό συμπυκνωτή το υλικό συμπυκνώθηκε και στην ανάντη παρειά με ελαφρύτερο συμπυκνωτή κεκλιμένης επιφάνειας. Κατασκευαστικές πυκνότητες της τάξεως των 2,25 έως 2,30t/m<sup>3</sup> καταγράφηκαν στον ποιοτικό έλεγχο.

Κατάντη του αρμού πλίνθου-πλάκας και σε περιορισμένο πλάτος εκατέρωθεν, τοποθετήθηκε η ζώνη άμμου-αμμοχάλικου 2A με μέγιστο κόκκο 19,5mm ώστε να αποτελέσει φίλτρο συγκράτησης των λεπτόκοκκων της ζώνης 1<sup>A</sup> σε περίπτωση μεγάλων παραμορφώσεων. Η ζώνη 2A αναμείχθηκε με τσιμέντο σε αναλογία 5% για να προσφέρει καλύτερη υποστήριξη της πλάκας στην θέση του περιμετρικού αρμού.

### 2.3 Προσωρινή προστασία ανάντη πρανούς ζώνης 2B

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm εφαρμόστηκε σταδιακά, με την πρόοδο της κατασκευής, ως προστασία της ανάντη επιφάνειας της ζώνης 2B μέχρι την σκυροδέτηση της πλάκας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει αναφορά στις σημαντικές ζημιές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (παραμορφώσεις, ρηγματώσεις, ολισθήσεις) που άρχισαν να εμφανίζονται την Άνοιξη του 1993 στην περιοχή των υψομέτρων 660,00 έως 670,00m και στη συνέχεια και στην υπόλοιπη επιφάνεια της ανάντη παρειάς όσο προχωρούσε η κατασκευή προς την στέψη. Κύριες αιτίες του φαινομένου (J. Thanopoulos, J. Tikof, 1998<sup>4</sup>) φαίνεται να ήταν

- Η παραμόρφωση του επιχώματος,
- Οι διαβρώσεις από απορροές των βρόχινων νερών,
- Κατασκευαστικές ατέλειες και οι
- Καιρικές μεταβολές, ιδιαίτερα οι κύκλοι παγετού-υψηλής θερμοκρασίας.

Κατά τα τελευταία 10 χρόνια περίπου, για την προστασία της ανάντη παρειάς της ζώνης 2B έχει αναπτυχθεί η τεχνική κατασκευής στοιχείων εγκιβωτισμού του υλικού από σκυρόδεμα ανάλογο των κρασπέδων οδοποιίας (extruded curbs). Τα στοιχεία αυτά σκυροδετούνται με συνεχή τρόπο σε οριζόντιες στρώσεις ακολουθώντας την πρόοδο του αναχώματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται εκτός της προστασίας και η καλύτερη συμπύκνωση της ζώνης 2B στο ανάντη όριο.

Προβλήματα στην περίπτωση αυτή είναι:

- Η συνάφεια της πλάκας με τα στοιχεία που πρέπει να ελαχιστοποιείται, με τοποθέτηση υλικού μείωσης της τριβής, ώστε η παραμόρφωση του αναχώματος να μην εισάγει έντονη καταπόνηση στην πλάκα λόγω επιβολής διατμητικών τάσεων.
- Η ακαμψία των στοιχείων που πρέπει να παραμένει σαφώς μικρότερη αυτής του σκυροδέματος της πλάκας.

### 2.3 Λιθορριπή

Το υλικό λιθορριπής των ζωνών 3A, 3B & 3C ήταν υγιές έως ελαφρά αποσθρωμένος ασβεστόλιθος που προερχόταν κυρίως από λατομεία & εκσκαφές του έργου (εκχειλιστής κλπ).

Ο μέγιστος κόκκος & το ύψος στρώσης για την συμπίκνωση φαίνονται στον πίνακα 1, ενώ τα λεπτόκοκκα προδιαγράφονται στο 5% μέγιστο διερχ. στο Νο 200 για όλες τις ζώνες.

Υλικό	Ζώνη	Πάχος Στρώσης(m)	Μέγιστος κόκκος (m)	Επιτόπου Πυκνότητα (t/m <sup>3</sup> )	Συμπύκνωση Διειλεύσεις 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
Ιλυώδης Αργίλος	1A	0.30	#200>30%		Προωθητής
Τυχαία Υλικά	1B	0.30	0.30		4

Πίνακας 1: Ζώνες Φράγματος Μεσοχώρας, Απαιτήσεις προδιαγραφών και επιτόπου πυκνότητες

Οι καταγραφείσες πυκνότητες στην κατασκευή ήταν της τάξης του 1,9 έως 2,0 t/m<sup>3</sup>. Ο δείκτης κενών που αντιστοιχεί στις τιμές αυτές είναι ίσος με 0,38.

Στο σημείο αυτό είναι ενδιαφέρον να συγκριθούν τα δεδομένα των κοκκομετρικών αναλύσεων και συμπυκνώσεων του φράγματος Μεσοχώρας με αυτά αντιστοιχών μεγάλων έργων.

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

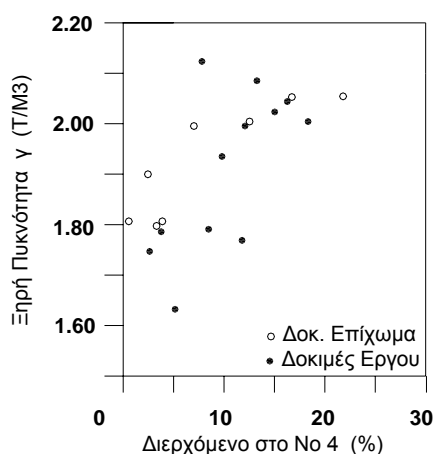
Φράγμα	Κόσκινο mm	Ζώνη 2B	Ζώνη 3C
Karahnjukar	40	<55%	<40%
	5	<30%	<20%
	0,074	<7%	<5%
Mohale	25	<30%	<30%
	0,074	<10%	<10%
Μεσοχώρα	25	<40%	<40%
	0,074	<5%	<5%

Πίνακας 2. Κοκκομετρική διαβάθμιση λιθορριπής, απαίτηση προδιαγραφών (P. Johannesson 2007<sup>3</sup>)

Από την σύγκριση φαίνεται ότι σε μερικά πιο σύγχρονα υψηλά έργα έχει επιτραπεί η χρήση υλικού πλουσιότερου σε λεπτόκοκκα με ευνοϊκές συνέπειες στην πυκνότητα.

Στην περίπτωση του έργου Μεσοχώρας η απουσία λεπτοκόκκων είχε συνέπειες στην πυκνότητα και αυτό επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα του δοκιμαστικού επιχώματος που κατασκευάστηκε στην αρχική φάση των εργασιών με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής των διαφόρων παραγόντων στη συμπίκνωση καθώς και τον 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 5).



Σχήμα 5: Μεσοχώρα: Πυκνότητα επιχώματος και κοκκομετρία (Ι. Θανόπουλος, Ν. Καζίλης, Σ. Φελέκος 1992<sup>2</sup>)

Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι για την καλύτερη συμπίκνωση του υλικού απαιτείται ικανή διαβροχή του, με ποσότητα ύδατος μεταξύ 50 και 100 l/m<sup>3</sup>, 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 του δονητικού οδοστρωτήρα, όπως προδιαγράφεται στη μελέτη, επιτυγχάνεται περί το 85% της μεγίστης ξηράς πυκνότητας, θεωρούμενης ότι αυτή αντιστοιχεί στις 12 διελεύσεις.

## 2. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ CFRD

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 μία σειρά παραμέτρων (ύψος στρώσης, ενέργεια συμπίκνωσης, ποσοστό λεπτοκόκκων) οι οποίες συνοψίζονται τελικά στην τιμή της πυκνότητας ή τον δείκτη κενών του συμπυκνωμένου αναχώματος.

Χαρακτηριστικές τιμές του  $E_{κατ}$  για διάφορα έργα, αντίστοιχα του φράγματος Μεσοχώρας κινούνται μεταξύ 28 και 70MPa

ΦΡΑΓΜΑ	Μέτρο Ελαστικότητας $E_{κατ}$ (MPa)		Μετακίνηση Πλάκας στη στέψη κατά την πλήρωση (cm)
	Ανάντη	Κατάντη	
TSQ-1 (178m)	44	22	95
Xingo (150m)	68	24	36
Ita (125m)	29	20	75
Itapebi (100m)	60	25	40
Segredo (145m)	70-55	45-30	42,3
Foz doAreia(160m)	38	32	70

Πίνακας 4: Μέτρα Ελαστικότητας κατά την κατασκευή και μετακινήσεις πλάκας στην πλήρωση (P. Marques Filho, N. L. De S. Pinto 2005<sup>3</sup>)

Στην διαμόρφωση της τιμής αυτής 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 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 στην ισότροπη κατάσταση φόρτισης.

Παρατηρήσεις σε μία 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 την 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, AquamiIpa)

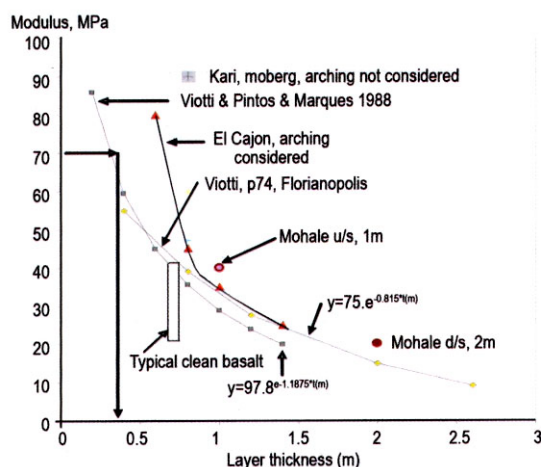
Άλλη αιτία εφελκυστικών ρηγματώσεων που έχει παρατηρηθεί είναι η ανάπτυξη καμπτικών καταπονήσεων στην περιοχή της πλάκας κοντά στην πλίνθο, στην περίπτωση που υπάρχει έντονη μορφολογική μεταβολή του βράχου θεμελίωσης: Πράγματι, όταν το πάχος του επιχώματος μεταβάλλεται πολύ σε μικρή σχετικά απόσταση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

### 3.1. Φράγμα Μεσοχώρας

Οι μέγιστη μετρηθείσα καθίζηση του φράγματος στην διάρκεια της κατασκευής πλησιάζει τα 2,7m και καταγράφηκε στο μέσον περίπου του ύψους, στο όργανο τύπου IDEL που τοποθετήθηκε στην κεντρική διατομή του. Το μέτρο ελαστικότητας στην κατασκευή υπολογίστηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 38 και 45 MPa. Οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχες



ανάλογων έργων που κατασκευάστηκαν με σκληρά, γωνιώδη υλικά λιθορριπής με σχετικά μεγάλο δείκτη κενών, όπως τα υλικά από βασάλτη και ασβεστόλιθο, όπως φαίνεται στο σχετικό διάγραμμα ( P. Johannesson, 2007<sup>3</sup>)



Σχήμα 6: Μέτρο Ελαστικότητας σε σχέση με το ύψος στρώσης: Στατιστικές (P. Johannesson, 2007<sup>3</sup>)

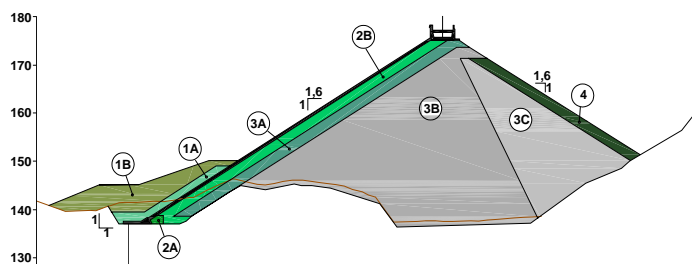
Οι μέγιστη μετρηθείσα καθίζηση του φράγματος στην διάρκεια της κατασκευής πλησιάζει τα 2,7m και καταγράφηκε στο όργανο τύπου IDEL που τοποθετήθηκε στην κεντρική διατομή του. Το μέτρο ελαστικότητας στην κατασκευή υπολογίστηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 38 και 45MPa. Οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχες ανάλογων έργων που κατασκευάστηκαν με σκληρά υλικά λιθορριπής με σχετικά μεγάλο δείκτη κενών, όπως τα υλικά από βασάλτη.

Μετά το πέρας της κατασκευής το επίχωμα συνεχίζει να παραμορφώνεται με ρυθμό μειούμενο με τον χρόνο. Οι μικρές ερπυστικές παραμορφώσεις που έχουν σημειωθεί μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής είναι της τάξεως των 12cm στην διάρκεια 10 ετών. Η τιμή αυτή είναι κοντά στο κάτω όριο μιας σειράς μετρήσεων σε φράγματα στα οποία καταγράφηκε ο ερπυσμός μετά την πλήρωση της λίμνης και έδωσε τιμές από 12 έως 45cm στη διάρκεια 10 ετών.

Για την εκτίμηση των παραμορφώσεων της πλάκας μετά την πλήρωση έγινε μια τρισδιάστατη μη γραμμική προσομοίωση της συμπεριφοράς του επιχώματος κατά την οποία ελήφθησαν υπόψη τα δεδομένα των καταγραφών των μέχρι πέρατος της κατασκευής παραμορφώσεων (P. Dakoulas, Y. Thanopoulos, K. Anastasopoulos 2008<sup>6</sup>). Η ανάλυση έδωσε τιμές της τάξεως των 40cm για την μέγιστη υποχώρηση της πλάκας στο μέσον του ύψους και 30cm περίπου στην στέψη.

## 2.2 Φράγμα Παναγιώτικο

Το φράγμα Παναγιώτικο είναι ένα λιθορριπτο επίχωμα με πλάκα σκυροδέματος ύψους 41m που κατασκευάστηκε στην περιοχή του Δήμου Αφετών στο Πήλιο. Οι ζώνες του επιχώματος είναι ανάλογες των ζωνών της Μεσοχώρας όπως επίσης ανάλογη είναι και η διαμόρφωση των αρμών, αλλά οι κλίσεις των πρανών είναι ηπιότερες, 1,6:1 ανάντη και κατόντη. Ως υλικό λιθορριπής χρησιμοποιήθηκε ελαφρά αποσαθρωμένο γνευσιακό πέτρωμα το οποίο περιείχε μεγαλύτερο ποσοστό λεπτοκόκκων από αυτό της Μεσοχώρας. Στο επίχωμα κρίθηκε αναγκαίο να ενσωματωθούν οριζόντιες στρώσεις υγιούς βραχώδους υλικού σε δύο επίπεδα στην διάρκεια της κατασκευής για την διασφάλιση της ελεύθερης αποστράγγισης.



Σχήμα 7: Τυπική Διατομή Φράγματος Παναγιώτικο

Στο φράγμα δεν είχαν τοποθετηθεί όργανα μέτρησης της καθίζησης κατά την διάρκεια της κατασκευής. Ωστόσο μετρήσεις σε τοπογραφικά βάθρα που έγιναν έδειξαν μικρή παραμόρφωση μετά την πλήρωση της λίμνης, της τάξεως των 2~3cm ενώ δεν παρουσιάστηκαν ρηγματώσεις ή άλλα προβλήματα στην πλάκα.

Αναλύοντας την τελικά καταγραφείσα καθίζηση αλλά και λαμβάνοντας υπόψη την πιο ομαλή κοκκομετρία των υλικών λιθορριπής μπορεί κανείς να εκτιμήσει ότι το μέτρο ελαστικότητας στην κατασκευή του φράγματος είναι αρκετά μεγαλύτερο αυτού της Μεσοχώρας.

Στον κατάντη πόδα του φράγματος υπάρχει μετρητική διάταξη η οποία καταγράφει τις διαρροές από το επίχωμα και την γειτονική περιοχή των αντρευσμάτων. Φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση των παροχών οι οποίες μεταβάλλονται από 8 έως 17lt/sec, με τη στάθμη του ταμιευτήρα, καθώς επίσης και με τη στάθμη ενός πιεζομετρικού φρέατος στο αριστερό αντέρεισμα

Γενικά οι τιμές της παροχής διαρροών είναι μικρές και χρήζουν παρακολούθησης και αξιολόγησης.

#### 4. ΥΨΗΛΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΣΤΕΝΕΣ ΚΟΙΛΑΔΕΣ.

Το 2005 το φράγμα Barra Grande στην Βραζιλία υπέστη μία αστοχία σε έντονη θλιπτική καταπόνηση κατά μήκος του κεντρικού του αρμού στην διάρκεια της πλήρωσής του και ενώ το υδραυλικό φορτίο βρισκόταν στο 85% της μέγιστης τιμής του.

Αντίστοιχη θραύση συνέβη και στο φράγμα Campos Novos στο 90% του μέγιστου φορτίου νερού.

Τον Φεβρουάριο του 2006 παρόμοια αστοχία συνέβη στο Mohale στην Νότιο Αφρική με εκδήλωση φαινομένων διατάραξης του τοίχου στέψεως και του δρόμου. Τα φράγματα αυτά κατασκευάστηκαν σε στενές κοιλάδες με μέτρα συμπίεστικότητας της λιθορριπής μεταξύ 40 & 65MPa.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των έργων αυτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

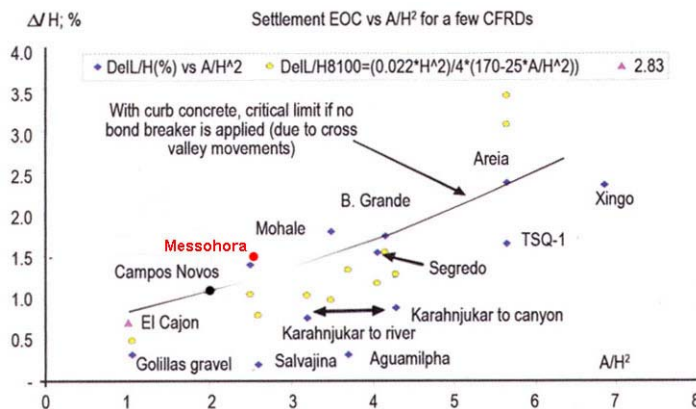
ΦΡΑΓΜΑ	ΥΨΟΣ (m)	$A/H^2$	$E_{κατ}$ (Mpa)
Barra Grande	185	3,1	50
Campos Novos	202	2,6	67
Mohale	145	3,6	40

Πίνακας 5: Παράγοντας μορφής κοιλάδας  $A/H^2$  και  $E_{κατ}$  σε φράγματα με ρηγματώσεις της πλάκας

Ο λόγος  $A/H^2$  της επιφάνειας της πλάκας  $A$  προς το τετράγωνο του ύψους επιλέχθηκε από τους ερευνητές (B.Materon 2006<sup>7</sup>) ώστε να δίνει μία εκτίμηση του πιθανού προβλήματος. Στην περίπτωση που θα είναι  $A/H^2 < 4$  φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική επιρροή του πλάτους κοιλάδας στην συμπεριφορά της πλάκας.

Στο έργο Μεσοχώρας αντιστοιχεί η τιμή  $A/H^2 \sim 2,6$  και σε συνδυασμό με το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας του επιχώματος είναι πολύ πιθανόν να εμφανισθούν κατά την πλήρωση της

λίμνης προβλήματα έντονης θλιπτικής καταπόνησης της κεντρικής περιοχής της πλάκας η και αστοχιών, αντίστοιχα με αυτά των προαναφερομένων έργων.

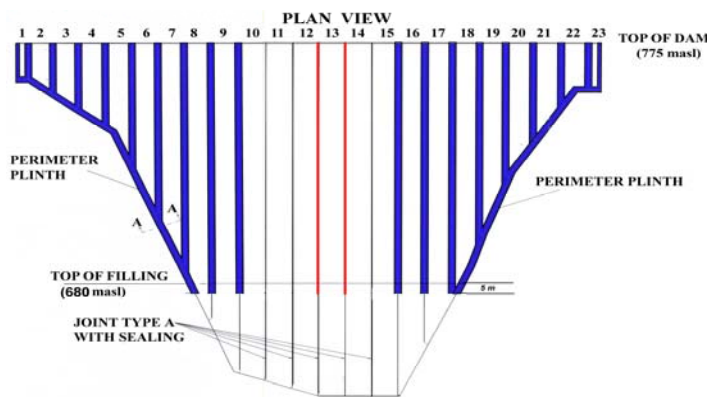


Σχήμα 8: Καθιζήσεις Μεγάλων CFRD σε σχέση με τον παράγοντα  $A/H^2$  (P. Johannesson 2007<sup>3</sup>)

## 5. ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΑΡΜΩΝ & ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΤΩΝ ΘΛΙΠΤΙΚΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ.

Συνεκτιμώντας τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν σε ανάλογα έργα και λόγω του γεγονότος ότι ο ταμιευτήρας Μεσοχώρας δεν έχει πληρωθεί διαμορφώθηκε από τον τον ειδικευμένο οίκο Carpi S.A. (Carpi 2007<sup>8</sup>) σε συνδυασμό με την γνωμάτευση του Σύμβουλου B. Materon μία πρόταση επισκευής και αναβάθμισης της αναμενόμενης συμπεριφοράς της πλάκας που περιλαμβάνει:

- Επισκευαστικές παρεμβάσεις στους αρμούς, τα υλικά των οποίων έχουν υποστεί γήρανση από την έκθεσή τους στις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές. Θα αντικατασταθούν τα υλικά σφράγισης με ένα αξιόπιστο σύστημα κάλυψης με μεμβράνη PVC.
- Διεύρυνση με κοπή δύο κεντρικών αρμών (με κόκκινο χρώμα στο σχήμα9) στο τμήμα τους πάνω από το ανάντι προστατευτικό επίχωμα, ώστε να απορροφηθούν οι θλιπτικές τάσεις. Η κοπή σε εύρος 5cm θα γίνει με δίσκο έως το κάτω όριο της πλάκας χωρίς να επηρεασθεί η στεγανωτική ταινία χαλκού. Ο αρμός θα πληρωθεί με μαστίχη ενώ επιφανειακά θα εφαρμοσθεί το σύστημα προστασίας με PVC.
- Κάλυψη μέρους της επιφάνειας της πλάκας με μεμβράνη για την αντιμετώπιση των αναμενόμενων, πιθανών αστοχιών της από εφελκυσμό λόγω κάμψης κοντά στα αντρείσματα και από θλιπτική αστοχία στο κεντρικό, χαμηλό σημείο της. Με την εφαρμογή μεμβράνης έως το υψόμετρο 735m δεν απαιτείται η ανύψωση του ανάντι προστατευτικού επιχώματος κατά 10 ακόμη μέτρα.



Σχήμα 9: Πρόταση επισκευής αρμών φράγματος Μεσοχώρας

## 6. ΓΕΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ CFRD.

Τα Φράγματα από λιθορριπή με ανάντη πλάκα σκυροδέματος αναπτύχθηκαν έντονα κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Ο τύπος αυτός φράγματος παρουσιάζει αναμφίβολα πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Εύκολη προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες
- Δυνατότητα εργασίας με βροχερό καιρό, γρήγορη κατασκευή
- Μικρότερο όγκο επιχώματος και λίγα υλικά προς μεταφορά από άλλες περιοχές
- Εύκολη συντήρηση και επισκευή σε περίπτωση που απαιτηθεί

Οι θετικές εμπειρίες από την συμπεριφορά πολλών έργων και η σημαντική προσφορά του «πατέρα του CFRD», Barry Cooke, κατά την περίοδο 1980-1999, οδήγησαν στην κατασκευή όλο και περισσότερων φραγμάτων, με ύψη που προσεγγίζουν τα 200m. Έως το τέλος του 2005 περισσότερα από 150 CFRD ολοκληρώθηκαν ή ήταν υπό κατασκευή στην Κίνα, με 37 από αυτά σε ύψη άνω των 100m.

Η αύξηση αυτή του ύψους των έργων αλλά και η υιοθέτηση ταχύτερων ρυθμών κατασκευής με σταδιακή σκυροδέτηση της πλάκας, ανέδειξε κατά τα τελευταία χρόνια προβλήματα έντονης παραμόρφωσης του επιχώματος και αστοχίες στην πλάκα σκυροδέματος:

Οι εφελκυστικές ρηγματώσεις λόγω ανομοιογενών καθιζήσεων που παρουσιάστηκαν σε μερικά φράγματα όπως στα Aquamilra(187m) και TSQ-1(178m) καθώς και οι θλιπτικές αστοχίες στο σκυρόδεμα των Barra Grande(185m), Campos Novos(202m) και σε άλλα έργα που κατασκευάστηκαν σε στενές κοιλάδες, ήταν μερικά φαινόμενα που έδωσαν την ευκαιρία να διερευνηθούν βαθύτερα οι μηχανισμοί και οι παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά.

Η κατασκευή των φραγμάτων CFRD κατά τα τελευταία 40 χρόνια στηρίχτηκε σε εμπειρικά κριτήρια σχεδιασμού και σε επιτυχημένες εφαρμογές. Εν τούτοις οι εξελίξεις στις αναλυτικές μεθόδους προσομοίωσης της τρισδιάστατης συμπεριφοράς είναι σημαντικές και φαίνεται ότι θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο στην μελέτη των μελλοντικών μεγάλων έργων.

Ενδιαφέρον επίσης για τα υψηλά φράγματα έχουν και οι εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών της λιθορριπής σε δοκίμια μεγάλης διαμέτρου, δεδομένου ότι αυτά εξαρτώνται από την μέση τιμή της τάσης  $\sigma_{is}$  που επικρατεί στο επίχωμα. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να μεταβάλλονται οι κλίσεις των πρανών για να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός συντελεστής ασφάλειας. (R. Albert, E. Frossard 2008<sup>9</sup>)

Ορισμένοι πρακτικοί κανόνες είναι ωστόσο χρήσιμο να υιοθετηθούν στον σχεδιασμό των νέων έργων και κάποιες σημαντικές βελτιώσεις έχουν ήδη γίνει σε πρόσφατα κατασκευασμένα φράγματα όπως το Karahnukar(202m) και το Shuibuya(233m). Οι βελτιώσεις αυτές αφορούν σε (MA Hongqi, CAO Keming 2008<sup>10</sup>):

- Αύξηση της ακαμψίας του επιχώματος στην ανάντη περιοχή στα 2/3 της διατομής και στο πάνω 1/4H τμήματος του φράγματος, με βελτίωση της πυκνότητας του. Υιοθέτηση δηλαδή στα τμήματα αυτά καλύτερης διαβάθμισης στην λιθορριπή, στρώσης συμπύκνωσης 0,6~0,8m, περισσότερες διελεύσεις δονητικού οδοστρωτήρα (6~8) και συστηματικής διαβροχής.
- Ενίσχυση της πλάκας ώστε να αντιμετωπίζονται τα φαινόμενα θλιπτικής αστοχίας της. Στο μέτρο αυτό περιλαμβάνονται: Αύξηση του πάχους της, Τοποθέτηση οπλισμού σε 2 εσχάρες και στις παρειές των αρμών, Πρόβλεψη ανοίγματος για απορρόφηση των παραμορφώσεων σε 2 κατακόρυφους αρμούς, Επανασχεδιασμό των λεπτομερειών που αδυνατίζουν το πάχος της πλάκας, κλπ
- Καθορισμό των σταδίων κατασκευής του φράγματος ώστε να προβλέπεται χρόνος για ολοκλήρωση του μέγιστου μέρους των καθιζήσεων πριν την κατασκευή της πλάκας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Fitzpatrick F.D., Bruce A.C., Kinstler F.L., Knoop B.P. (1985): Design of Concrete Faced Rockfill Dams, *p.p. 410, 434 CFRD Design, Construction and Performance Edited by J.B. Cooke & J. Sherard*
2. Ι. Θανόπουλος, Ν. Καζίλης, Σ. Φελέκος (1992): Το Επίχωμα του Λιθόρριπτου Φράγματος με Πλάκα Σκυροδέματος της Μεσοχώρας, 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής
3. Palmi Johannesson (2007): Assessing the performance of high CFRDs: Rockfill properties and creep, *Hydropower & Dams, Issue 5, 2007*
4. J. Thanopoulos, J. Tikof, (1998): Erosion problems of CFRDs during construction: The case of Messochora Dam, *Proceedings of the International Symposium on Dam Safety, ICOLD, Barcelona, June 1998*
5. P. Marques Filho, N. L. De S. Pinto (2005): CFRD dam characteristics learned from experience, *Hydropower & Dams. Issue 1, 2005*
6. P. Dakoulas, Y. Thanopoulos, K. Anastasopoulos (2008): Non-linear 3D simulation of the construction and impounding of a CFRD, *Hydropower & Dams, Issue 2, 2008*
7. B. Materon (2006): Consulting Report on the Messochora Dam behaviour and necessary measures before reservoir filling, *PPC internal report, October 2006*
8. Carpi S. A. (2007) : Carpi patented Geomembrane system, waterproofing of the joints and upstream face, *Proposal to PPC, Report April 2007*
9. R. Albert, E. Frossard (2008): Considerations on materials for high embankment dams, *Hydropower & Dams, Issue 2, 2008*
10. MA Hongqi, CAO Keming (2008): Key technical problems of extra high CFRDs, *State of the Art, Dam Construction in China, Chinese Committee Of Large Dams, 2008.*

# Concrete Faced Rockfill Dams: Examples from Thessaly area and current trends

Yiannis Thanopoulos

*Civil Engineer Phd , Public Power Corporation of Greece / DYHP*

K. Anastassopoulos

*Civil Engineer MSc, Public Power Corporation of Greece / DYHP*

**ABSTRACT:** The main aspects of the design of the Concrete Faced Rockfill Dams build in Greece, in the region of Thessaly, are discussed in the paper. An interpretation of their performance according to recently gained experience in the field of large CFRDams is also attempted. In the case of the 150m high Messochora dam, build in 1992-95 according to the design principles of that period, an effort is made to spot the potential “weaknesses” of the project and to propose the necessary measures to be taken before reservoir filling.