

# Φράγμα Κανναβιού Νέες Τεχνικές Σχεδιασμού και Κατασκευής στα Λιθόριπτα Φράγματα Το πρώτο Λιθόριπτο Φράγμα με Ανάντη Πλάκα στην Κύπρο

Δ. Αντωνίου

*Πολιτικός Μηχανικός: Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρος*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Το φράγμα Κανναβιού είναι ένα λιθόριπτο φράγμα με ανάντη πλάκα (CFRD) με ξεχωριστή σημασία στο υδατικό ισοζύγιο του προγράμματος διαχείρισης νερού στην Κύπρο. Είναι το πρώτο φράγμα αυτού του τύπου που κατασκευάστηκε στην Κύπρο. Γι αυτό το λόγο, αλλά και για τις πρωτοποριακές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του, συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον.

Το παρόν άρθρο παρουσιάζει τις νέες αυτές μεθόδους στην κατασκευή του Φράγματος Κανναβιού, τη μέθοδο ελέγχου των κολλήσεων της χάλκινης στεγανοποιητικής λωρίδας (copper waterstop) καθώς και μια συγκριτική ανάλυση της μεθόδου GIN που χρησιμοποιήθηκε στις τσιμεντενέσεις κουρτίνας και τάπητα, σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο. Οι εμπειρίες από τη εφαρμογή της είναι πολλές και σημαντικές.

Παρουσιάζεται επίσης το ολοκληρωμένο σύστημα γεωτεχνικών οργάνων που τοποθετήθηκαν στο φράγμα για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του, τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όσο και της μελλοντικής λειτουργίας του. Τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα, με μια εκτίμηση της συμπεριφοράς του φράγματος, αναλύονται στο παρόν άρθρο.



Εκόνα 1. Γενική όψη του Φράγματος.

## 1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Το φράγμα Κανναβιού βρίσκεται στον ποταμό Έζουσα 40 km. Βόρεια της πόλης της Πάφου στη δυτική Κύπρο. Είναι το δεύτερο σε ύψος φράγμα στην Κύπρο και το τέταρτο σε χωρητικότητα.

Η κατασκευή του ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2000 και συμπληρώθηκε με επιτυχία το Μάρτιο του 2006. Η αποθήκευση νερού στον ταμιευτήρα, ο οποίος είναι χωρητικότητας 18 Ε.Κ.Μ., άρχισε τον Οκτώβριο του 2005.

Ο σχεδιασμός του Έργου έγινε από το Βρετανικό οίκο Howard Humphreys and Partners σε συνεργασία με τον Κυπριακό οίκο Ι. Θεοφίλου και Συνεργάτες. Ανάδοχοι του Έργου ήταν η κοινοπραξία της Ελληνικής εταιρείας ΑΕΓΕΚ με τις Κυπριακές CYBARCO και Αδελφοί ΙΑΚΩΒΟΥ ΑΤΔ..

Το ύψος του φράγματος είναι 70m., το μήκος στέψης 600 m και ο συνολικός όγκος του αναχώματος 1.800.000 m<sup>3</sup>. Η κλίση της ανάντη πλάκας είναι 1Κ: 1.40 και της κατόντη όψης 1Κ:1.70. Η θεμελίωση του φράγματος είναι σε ηφαιστειογενή μαξιλαροειδή λάβες της σειράς του Τροόδους.

Ολόκληρη η ανάντη πλάκα εδράζεται σε όλο το μήκος της βάσης της στην πλίνθο, η οποία είναι θεμελιωμένη σε υγρή βράχο κατηγορίας II η III και το υπόλοιπο φράγμα σε βράχο η αλλούβια. Στην κοίτη του ποταμού στον πόδα του φράγματος και σε ένα μήκος ίσο με το πλάτος της ζώνης 3B, τα αλλούβια έχουν αφαιρεθεί. Στην υπόλοιπη περιοχή ενσωματώθηκαν στο φράγμα.

Η πλίνθος από ενδυναμωμένο σκυρόδεμα είναι πάχους 0.5 m και πλάτους από 5.0 m έως 11.2 m. Είναι αγκυρωμένη στα θεμέλια με αγκύρια διαμέτρου 40 mm. Αυτή αποτελεί την πλατφόρμα για τις τσιμεντενέσεις οι οποίες σε αυτά τα φράγματα βρίσκονται ανάντη του αναχώματος.

Στη γραμμή της κουρτίνας υπάρχουν 500 γεωτρήσεις βάθους 40 m. Ανάντη και κατόντη της κουρτίνας υπάρχουν δύο γραμμές με 500 γεωτρήσεις η κάθε μια για τις τσιμεντενέσεις τάπητα βάθους 10 m. Οι αρχικές αποστάσεις των γεωτρήσεων είναι 3 m μειωμένες σταδιακά με την πρόοδο των εργασιών στα 1.5 m στις δευτερεύουσες κ.ο.κ. (split spacing). Οι όγκοι των ενεμάτων ήταν γενικά χαμηλοί όπως αναμένετο από τα αποτελέσματα των αρχικών δοκιμών στις πρωτεύουσες γεωτρήσεις.

Ο υπερχειλιστής του φράγματος βρίσκεται στο δεξιό αντέρισμα και είναι τοποθετημένος σε μια μεγάλη βάθους εκσκαφή που έγινε σε ανυψωμένες αλλουβιακές εναποθέσεις και βράχο. Είναι δυναμικότητας 750 m<sup>3</sup> ανά δευτερόλεπτο, η οποία είναι η μέγιστη πιθανή πλημμύρα. (probable maximum flood). Είναι τύπου ελεύθερης ροής πάνω από τον υπερχειλιστή πλάτους 60m.

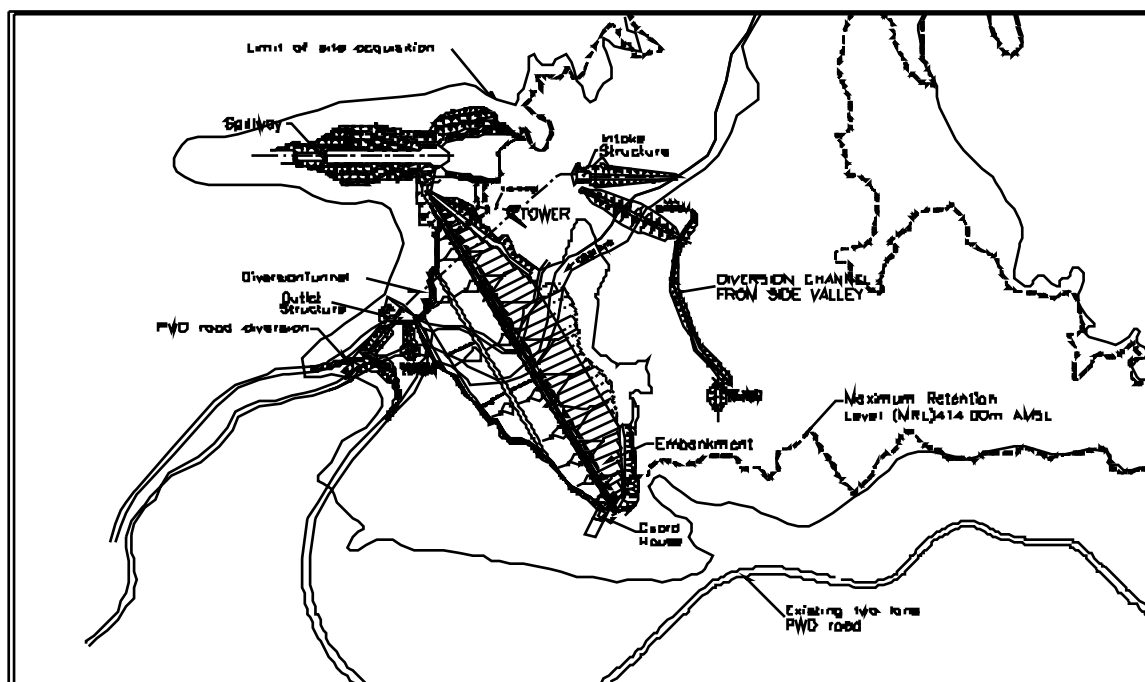
Η σήραγγα εκτροπής καθώς και ο πύργος υδροληψίας βρίσκονται επίσης στο δεξιό αντέρισμα και αποτελούνται από τη σήραγγα μήκους 340 m, με δύο αγωγούς διαμέτρου 1000 και 700 mm και βαλβίδες ελέγχου ροής.

Η μέθοδος GIN που χρησιμοποιήθηκε είναι μια σχετικά νέα μέθοδος τσιμεντενέσεων, η οποία προβλέπει πολύ ψηλές πιέσεις, σταθερό λόγο νερού τσιμέντου στο ένεμα και τον αριθμό GIN ο οποίος αποφασίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του βράχου. Στο φράγμα Κανναβιούς ο αριθμός GIN ήταν από 500 έως 2000 και οι πιέσεις από 10 έως 30 ατμόσφαιρες, εξαρτώμενες από τη θέση το βάθος και την ποιότητα του βράχου. Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα εντοπισμού και καταγραφής τυχόν μετακινήσεων της πλίνθου λόγω των ψηλών πιέσεων, είχε σχεδιασθεί και εγκατασταθεί στην πλίνθο. Το σύστημα αυτό ήταν ικανό να αισθανθεί μετακινήσεις μεγέθους 1.0 mm και η λειτουργία της αντλίας εισπίεσης του ενέματος διακοπτόταν αυτόματα ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημιά στην πλίνθο.

Η συνολική επιφάνεια της ανάντη πλάκας είναι 42.000 m<sup>2</sup> και το πάχος της αυξάνεται από 0.3 m στη στέψη, στα 0.45 m στο πιο βαθύ σημείο με τη εξίσωση  $d = 0.3 + 0.002H$ . Το σκυρόδεμα της πλάκας είναι κατηγορίας C25 με μέγιστο μέγεθος αδρανών 40 mm και μέσο όρο ποζολανικού τσιμέντου 350 κιλά ανά m<sup>3</sup>. Οπλισμός 0.4% έχει χρησιμοποιηθεί στις δύο κατευθύνσεις στη μέση της πλάκας. Τα πάνελ έχουν σκυροδετηθεί σε πλάτη 15 m.

Οι νέες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της πλάκας περιλαμβάνουν τη χρήση του αυτοαναρριχώμενου καλουπιού (self climbing top shutter) με συνεχή τροφοδοσία σκυροδέματος σε όλο το πλάτος του πάνελ, την ταχεία μετακίνηση του στη στέψη του φράγματος καθώς και το ειδικά κατασκευασμένο σύστημα μεταφοράς και τοποθέτησης του σπλισμού. Όλα μαζί συνετέλεσαν στην παραγωγή ενός πολύ καλού αποτελέσματος και πέτυχαν την πολύ ψηλή επίδοση των 3.5 m/ώρα, στη σκυροδέτηση της πλάκας.

Η πρωτοποριακή μέθοδος ελέγχου των συγκολλήσεων της χάλκινης στεγανοποιητικής λωρίδας (copper waterstop), με τη χρήση κενού αέρος, αποτελεί σταθμό στην κατασκευή των λιθόριππων φραγμάτων με ανάντη πλάκα.



Εικόνα 2. Γενική κάτοψη Έργου.

## 2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

### 2.1 Γενικά

Η ανάντη επιφάνεια του φράγματος είναι καλυμμένη με την πλάκα, η οποία και αποτελεί το κύριο υδατοστεγανοποιητικό στοιχείο του έργου. Η πλάκα είναι πάχους 0.3 m στη στέψη αυξανόμενη κατά 2.0 mm για κάθε μέτρο κάτω από αυτή. Η σκυροδέτηση της έγινε σε πάνελ των 15 m. Συνολικά έχουν σκυροδετηθεί 40 πάνελ, 36 με τη χρήση του αυτοαναρριχώμενου καλουπιού και 4 (δύο στο κάθε αντέρισμα) με καλούπι επιφανείας, λόγω του μικρού μήκους των.

Η ποιότητα του σκυροδέματος τόσο της πλίνθου, όσο και της πλάκας πρέπει να είναι της καλύτερης δυνατής ποιότητας και μακροβιότητας, επειδή ακριβώς αυτά τα δύο στοιχεία του φράγματος είναι τεράστιας σημασίας για την ασφάλεια και σωστή λειτουργία του. Ένας μεγάλος αριθμός δοκιμαστικών μειγμάτων σκυροδέματος προηγήθηκε πριν την κατάληξη στο τελικό που χρησιμοποιήθηκε. Το σκυρόδεμα για την κατασκευή της πλάκας πρέπει να έχει τέτοια δυνατότητα ροής, ώστε να μπορεί να ρέει μέσα στις χωλέτρες κατά μήκος της κλίσης μέχρι να φτάσει στο

καλούπι και να μπορεί να δονείται κανονικά, αλλά και να παίρνει τέτοια αρχική αντοχή στον ακριβώς κατάλληλο χρόνο ώστε να επιτρέπει τη συνεχή κίνηση του καλουπιού.



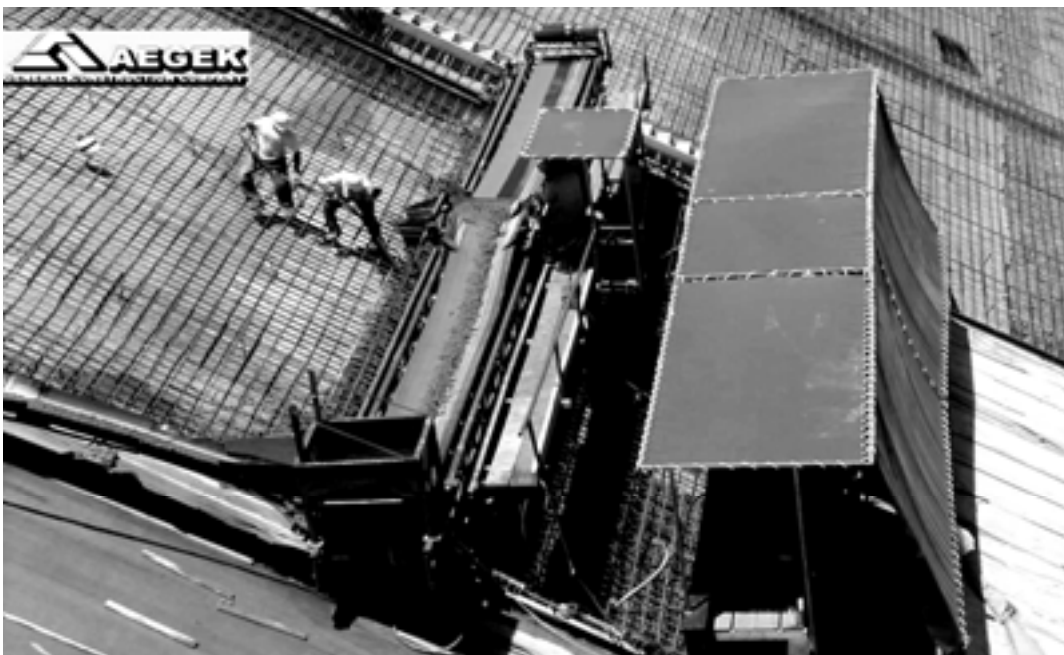
Εικόνα 3. Τοποθέτηση οπλισμού ανάντη πλάκας.

Η σκυροδέτηση της πλάκας ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2004 και τέλειωσε με επιτυχία το Δεκέμβριο του ίδιου χρόνου. Η σειρά των εργασιών που ακολουθήθηκαν στην εργασία αυτή είναι ως ακολούθως:

- Ακριβής αποτύπωση της ανάντη επιφάνειας και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είχε τοποθετηθεί για την προστασία της στη διάρκεια της κατασκευής του επιχώματος. Λόγω των μετακινήσεων που συμβαίνουν με την ανύψωση του επιχώματος και την αύξηση των φορτώσεων, είναι απαραίτητο να επανέρθει η ανάντη επιφάνεια στην αρχική θεωρητική της θέση, ώστε να σκυροδετηθεί η πλάκα στις σωστές της διαστάσεις και μέσα στις επιτρεπόμενες αποκλίσεις. Η εργασία αυτή γίνεται με το χέρι και είναι συνήθως δύσκολη και χρειάζεται μεγάλη προσοχή και προσπάθεια.
- Μια δεύτερη ομάδα ακολουθεί με την τοποθέτηση σκυροδέματος σε μορφή δοκών κατά μήκος των αρμών, όπου θα τοποθετηθούν οι χάλκινες στεγανοποιητικές λωρίδες. Η ακρίβεια αυτής της εργασίας είναι πολύ σημαντική γιατί υπαγορεύει την τελική μορφή της πλάκας.
- Παράλληλη τοποθέτηση του οπλισμού. Οι σχάρες του οπλισμού, οποίες είχαν προπαρασκευασθεί, μεταφέρονταν στη θέση τους με ειδικά κατασκευασμένο βαγόνι το οποίο ταξίδευε κατά μήκος της πλάκας σε σιδηροδοκούς. Η τοποθέτηση τους ξεκινούσε από τη βάση της πλάκας και προχωρούσε προς τη στέψη.
- Ακολούθως ξεκινούσε η σκυροδέτηση των πάνελ, η οποία γινόταν με συνεχή σειρά. Με αυτό τον τρόπο χρειαζόταν πλευρικό καλούπι μόνο στη μια πλευρά, ενώ στην άλλη το σκυρόδεμα χυνόταν στο ήδη σκυροδετημένο προηγούμενο πάνελ. Το αυτοαναρριχόμενο καλούπι κινείτο πάνω σε σιδηροδοκούς τοποθετημένους στη μια πλευρά στο σκυρόδεμα του προηγούμενου πάνελ και στην άλλη στο πλευρινό καλούπι.



Εικόνα 4. Γενική όψη εργασιών ανάντη πλάκας.



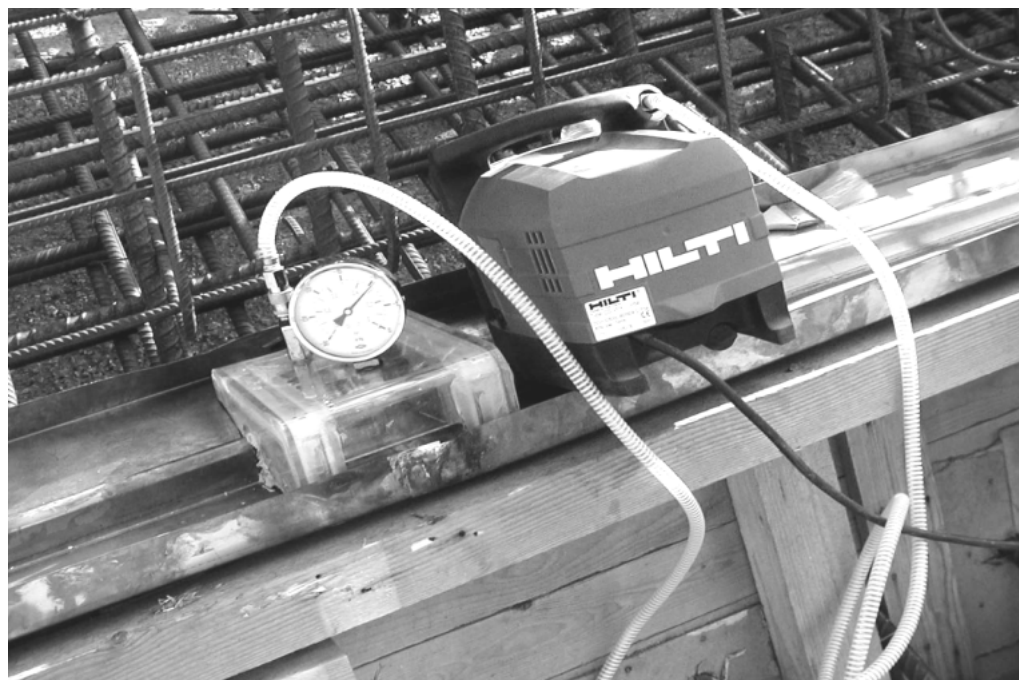
Εικόνα 5. Σκυροδέτηση ανάντη πλάκας.

Η χάλκινη υδατοστεγανοποιητική ταινία ήταν σε κομμάτια μήκους 6m. και τοποθετείτο από τη βάση προς τη στέψη με την πρώτη κόλληση στην ταινία κατά μήκος του περιμετρικού αρμού της πλίνθου. Όλες οι κολλήσεις γίνονταν από πολύ έμπειρους συγκολλητές οι οποίοι είχαν προηγουμένως πιστοποιηθεί και των οποίων η εργασία είχε αυστηρά ελεγχθεί.

Για τον έλεγχο των κολλήσεων, πέραν από τον οπτικό έλεγχο, έπρεπε δειγματοληπτικά να αφαιρείται η κόλληση και να στέλλεται σε εξειδικευμένα εργαστήρια για τους αναγκαίους ελέγχους, όπως ακτίνες X, διαπερατότητα, ύπαρξη πόρων κλπ. Αυτό σήμαινε την αφαίρεση και

επανακόλληση της ένωσης, απώλεια χρόνου αλλά πάνω από όλα το μη έλεγχο του τελικού αποτελέσματος της κόλλησης.

Για τον σκοπό αυτό ένα ειδικό σύστημα ελέγχου αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στο εργοτάξιο το οποίο έφερε θαυμάσια αποτελέσματα. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα ελέγχου επιτόπου όλων των κολλήσεων, με ένα πιο «αυστηρό» τρόπο. Το σύστημα έβαζε όλη την κόλληση κάτω από υποπίεση 0.3 αμ. Για περίοδο 15 λεπτών. Αν η κόλληση ήταν καλή και η υποπίεση στο χώρο γύρω από την κόλληση δεν μειωνόταν, τότε η κόλληση θεωρείτο καλή. Σε αντίθετη περίπτωση που υπήρχε πτώση της πίεσης η κόλληση επαναλαμβανόταν. Με τον τρόπο αυτό ελέγχθηκαν όλες οι ενώσεις (750), 10 εκ των οποίων αστόχησαν τον έλεγχο και αφαιρέθηκαν.



Εικόνα 6. Έλεγχος κολλήσεων χαλκού με Vacuum Box.

## 2.2 Σκυροδέτηση

Η σκυροδέτηση της πλάκας ήταν συνεχής από τη βάση μέχρι τη στέψη ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία «ψυχρών αρμών». Το πλάτος του καλουπιού ήταν 15 m. Τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος έπρεπε να ήταν τέτοια που να επιτρέπουν τόσο τη συνεχή ροή του στο καλούπι και τη δόνηση του, αλλά και τη βέλτιστη ταχύτητα κίνησης του καλουπιού. Η για πρώτη φορά χρησιμοποίηση του πλευρικού διανομέα σκυροδέματος και ο μηχανισμός αυτοαναρρίχησης του καλουπιού, έφερε πολύ καλά αποτελέσματα τόσο στην ποιότητα όσο και στην ταχύτητα σκυροδέτησης της πλάκας. Ο αρχικός προγραμματισμός προέβλεπε μια μέγιστη ταχύτητα σκυροδέτησης γύρω στα 2.2-2.5 μέτρα ανά ώρα, η οποία τελικά ανήλθε στα 3.6 μέτρα ανά ώρα.

Μαζί με την κίνηση του καλουπιού ξετυλιγόταν και η σακούλα που βρισκόταν στο κάτω μέρος τυλιγμένη σε μορφή ρολού και έτσι επιτυγχάνετο η άμεση κάλυψη του σκυροδέματος σε όλο το πλάτος. Σε απόσταση 7 μέτρων ακολουθούσε διάτρητος πλαστικός σωλήνας ο οποίος διέβρεχε τη σακούλα. Με αυτό τον τρόπο η πλήρης κατάβρεξη του σκυροδέματος ξεκινούσε αμέσως μετά που αυτό έπαιρνε την αρχική σκλήρυνση του.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα κατάβρεξης όλων των συμπληρωμένων πλακών, με κεντρικό αγωγό παροχής νερού κατά μήκος της στέψης, κρατούσε το σκυρόδεμα βρεγμένο για τις πρώτες 28 ημέρες.

Όλοι οι κάθετοι αρμοί της πλάκας καθώς και ο περιμετρικός αρμός, είχαν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σαν αρμοί διαστολής. Όλοι είχαν γεμίσει με το ειδικό μάζιχο i-gas στο πάνω μέρος και καλυφθεί με την προστατευτική λωρίδα Hyralon, η οποία στηριζόταν εκατέρωθεν του αρμού με δύο μεταλλικές πλάκες.

Στην κατασκευή φραγμάτων τύπου CFRD, έχει μεγάλη σημασία το σύστημα αποστράγγισης του ανάντη μέρους του αναχώματος, το οποίο θα λειτουργήσει κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης της πλάκας, να σχεδιαστεί και να κατασκευασθεί σωστά. Μετά το ξεκίνημα της σκυροδέτησης της πλάκας πρέπει να αποφευχθεί η δυνατότητα δημιουργίας εσωτερικών πιέσεων εντός του αναχώματος, γιατί αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα μέχρι και αστοχία της πλάκας. Στο φράγμα της Κανναβιούς αυτό επιτεύχθηκε με την τοποθέτηση ειδικών φίλτρων στο ανάντη μέρος του αναχώματος, με αποστραγγιστικούς σωλήνες δια μέσου και κάτω από την πλίνθο. Αυτοί γέμισαν στο τέλος με τσιμεντένεμα.

### 3 ΥΛΙΚΑ ΑΝΑΧΩΜΑΤΟΣ

Το ανάχωμα χωριζόταν στις ζώνες 2A, 2B, 2C, 3A, 3B, 3C και 3D.

Όλα τα υλικά κατασκευής του αναχώματος προήλθαν από δύο λατομεία εντός της λίμνης του φράγματος. Το ένα λατομείο βρισκόταν εντός των διαβασικών υλικών και παρήγαγε τα υλικά των ζωνών 3A και 3B και το δεύτερο βρισκόταν στις πιο μαλακές μαξιλαροειδείς λάβες και παρήγαγε τα υλικά για τη ζώνη 3C.

Οι ζώνες 2A, 2B και 2C που αποτελούσαν ζώνες φίλτρων διάφορων διαστάσεων και κοκκομετρήσεων, ανάλογα με τη θέση των στο ανάχωμα, προήλθαν από αλλουβιακά υλικά από την κοίτη του ποταμού μετά από κοσκίνισμα.

Η Ζώνη 2B η οποία ήταν κάτω από την πλάκα είχε υλικά μέγιστου κόκκου 75 mm. και λεπτά (63mm) μέχρι 8%. Τοποθετείτο σε στρώσεις πάχους 0.4 m και συμπιέζετο με 6 διελεύσεις κυλίνδρου των 10 τόνων. Η ανάντη κλίση του αναχώματος συμπιέζετο με 4 διελεύσεις μιας δονούμενης πλάκας πριν την τοποθέτηση της προστατευτικής στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 50 mm.

Η Ζώνη 3B αποτελεί το κυρίως ανάντη μέρος του αναχώματος. Το υλικό της ζώνης αυτής αποτελείται από καλό σκληρό διαβασικό υλικό από το Λατομείο Α. Τοποθετείτο σε στρώσεις πάχους 0.8 m και η συμπίεση της γινόταν με 6 διελεύσεις δονητικού κυλίνδρου 19 τόνων. Κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης και διάστρωσης, προστείθοντο 100 λίτρα νερού ανά κυβικό μέτρο υλικού για την καλύτερη συμπίεση και διάστρωση.

Η Ζώνη 3A είναι μια μεταβατική ζώνη από την 2B στην 3B και είναι πλάτους 4.0 m. Αποτελείται από το ίδιο υλικό όπως η 3B, με μέγιστη διάμετρο υλικού 200 mm. Το πάχος της στρώσης ήταν 0.4 m με συμπίεση 6 διελεύσεων δονητικού κυλίνδρου 10 τόνων.

Η Ζώνη 3C αποτελεί το κυρίως κατάντη μέρος του φράγματος και το υλικό της προερχόταν από το Λατομείο Β. Το πάχος της στρώσης ήταν 0.5 m. και η συμπίεση γινόταν με 6 διελεύσεις δονητικού κυλίνδρου 19 τόνων. Προστίθετο επίσης νερό μέχρι 12% κατά τη διάστρωση.

Η ζώνη 2A ήταν πλάτους 2.0m και ύψους 3.0 m ήταν ακριβώς κάτω από την πλίνθο και κατά μήκος του περιμετρικού αρμού. Το υλικό ήταν από κοσκινισμένα αλλούβια μέγιστου κόκκου 20 mm. Και μέγιστο ποσοστό σκόνης 10%.

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

Εικόνα 7. Τυπική διατομή Φράγματος.

#### 4 ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Το φράγμα κτίστηκε σε δύο στάδια, ώστε να τηρηθεί το πρόγραμμα εργασιών, οι ανάγκες για βέλτιστη λειτουργία των μηχανημάτων και χρήση των υλικών. Η εκτροπή του ποταμού δια μέσου της σήραγγας εκτροπής ξεκίνησε πριν το χειμώνα 2001-2002 και μετά την ολοκλήρωση των δύο προφραγμάτων στην κυρίως και πλευρική κοίτη. Το κυρίως πρόφραγμα περιελάμβανε την κατασκευή ενός μόνιμου διαφραγματικού τοίχου δια μέσου των βάθους 15 m αλλουβιακών εναποθέσεων. Αυτό αντικαταστάθηκε τελικά με την εφαρμογή της μεθόδου “jet grouting” σε δύο γραμμές και τη δημιουργία “τοίχου” πλάτους 0.8 m.

Η κατασκευή του φράγματος ξεκίνησε στο κατάντη μέρος, με την απ'ευθείας τοποθέτηση υλικών εκσκαφής από το αριστερό αντέρισμα. Ακολούθως το ανάχωμα συμπληρωνόταν με υλικά λατόμευσης. Η τοποθέτηση γινόταν μέχρι 20-30 m από την ανάντη κλίση, ώστε να αφήνεται αρκετός χώρος και να μην εμποδίζεται η κατασκευή της πλίνθου.

Μετά την ολοκλήρωση της πλίνθου ξεκίνησε η δεύτερη φάση με την οποία συμπληρωνόταν ολόκληρη η διατομή του φράγματος. Η κατασκευή συμπληρώθηκε τέλος Ιουνίου 2004.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής τόσο του αναχώματος όσο και των άλλων κατασκευών, διενεργείτο αυστηρός έλεγχος ποιότητας σε όλα τα υλικά. Ο έλεγχος περιλάμβανε δοκιμές για: πυκνότητα, κοκκομέτρηση, διαπερατότητα, μηχανικές ιδιότητες

#### 5 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του φράγματος τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όσο και μελλοντικά, διάφορα γεωτεχνικά όργανα που μετρούν σημαντικές παραμέτρους έχουν τοποθετηθεί σε τρεις κύριες διατομές.

Σημεία μετρήσεως επιφανειακών μετακινήσεων τοποθετήθηκαν σε δύο υψόμετρα στη κατάντη κλίση, κατά μήκος της στέψης και σε τρία υψόμετρα στην ανάντη πλάκα του φράγματος.

Για κατακόρυφες μετακινήσεις στο εσωτερικό του αναχώματος τοποθετήθηκαν υδραυλικά καθιζήμετρα τύπου υπερχειλίσης (hydraulic settlement cell). Τα υψόμετρα νερού στα θεμέλια και οι πιέσεις πόρων στο φράγμα μετρούνται με ανοικτές γεωτρήσεις (standpipe piezometers) και με ηλεκτρικά πιεζόμετρα παλλόμενου καλωδίου (vibrating wire piezometers).

Για τη μέτρηση των μετακινήσεων του περιμετρικού αρμού σε τρεις κατευθύνσεις, σε σχέση με την πλάκα, μια σειρά από ηλεκτρικά όργανα (vibrating wire joint meter) έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος του αρμού.

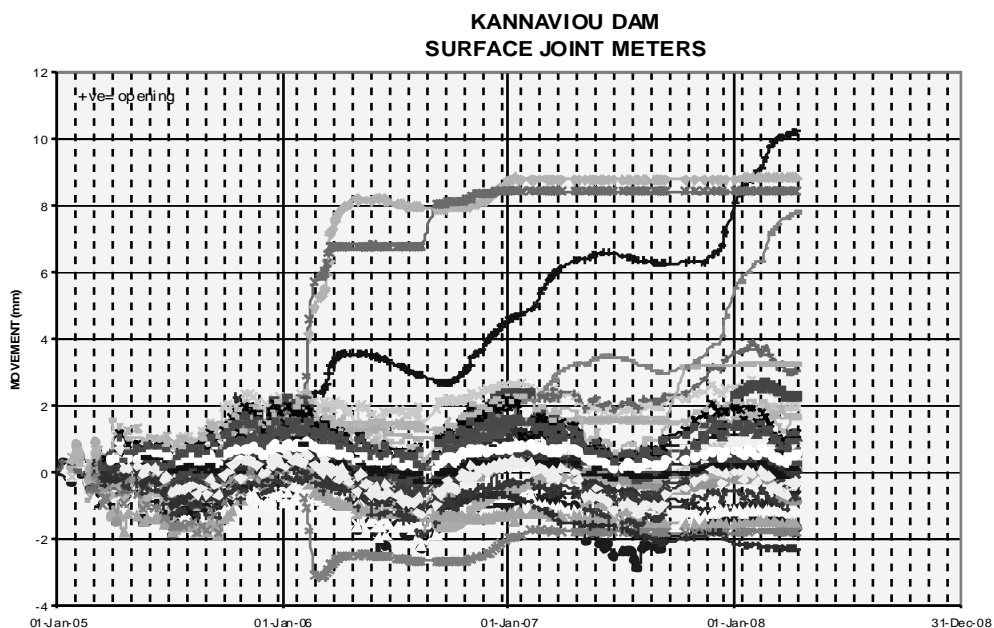
Από τις μετρήσεις των καθιζήσεων στο πάνω μέρος του φράγματος, που έγιναν κατά τη διάρκεια της κατασκευής, φάνηκε ότι η μέγιστη καθίζηση ήταν 160 mm στη ζώνη 3B και 200 στη ζώνη 3C. Από τις μετρήσεις αυτές και τις τάσεις από τα υπερκείμενα φορτία, οι συντελεστές παραμόρφωσης των υλικών υπολογίστηκαν να είναι 90 MPa και 50 MPa για τις ζώνες 3B και 3C αντίστοιχα.

Οι οριζόντιες επιφανειακές μετακινήσεις στην κατάντη κλίση ήταν της τάξης των 10-20mm και οι καθιζήσεις μέχρι 50 mm.

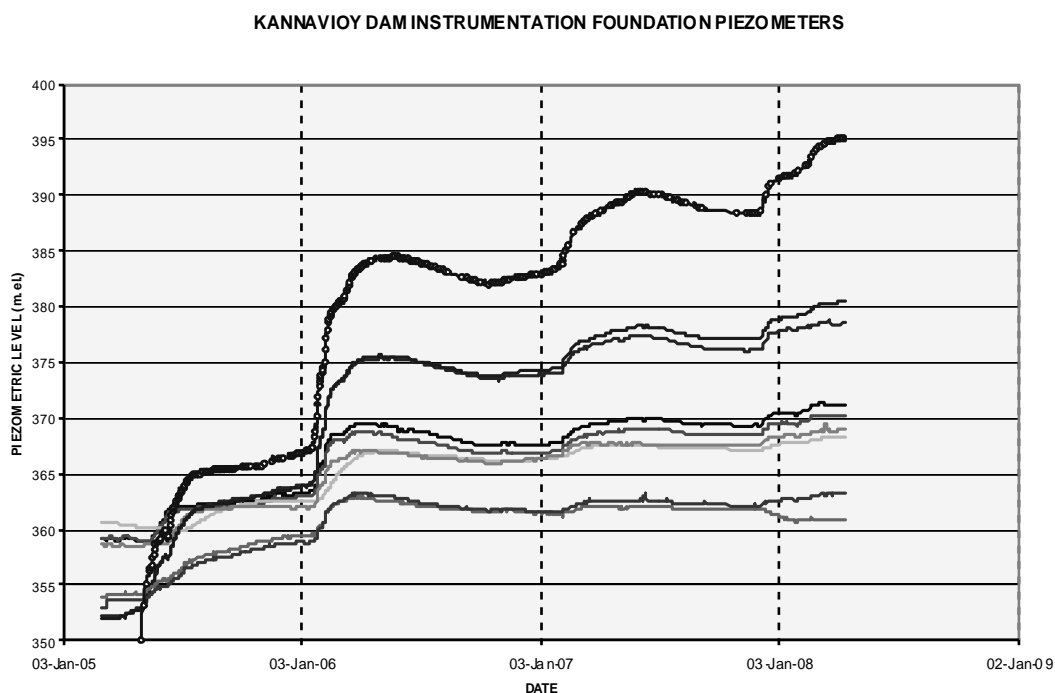
Μετά την αρχή του πρώτου γεμίσματος του ταμιευτήρα, και την εφαρμογή των επιπλέον πιέσεων στην ανάντη πλάκα, μερικοί από τους αρμούς άρχισαν να δείχνουν τάσεις ανοίγματος. Τα μεγέθη



φυσικά παρέμειναν σε χαμηλά επίπεδα μέχρι 7-8 mm, τα οποία είναι εντός των αναμενόμενων μετακινήσεων. Φάνηκε επίσης ότι μέρος των μετακινήσεων που μετρήθηκαν ήταν λόγω θερμοκρασιών μεταβολών και συρρίκνωσης του σκυροδέματος.



Γράφημα 1. Μετακινήσεις Αρμών Ανάντη Πλάκας.



Γράφημα 2. Ηλεκτρικά Πιεζόμετρα Θεμελιώσεων.

## 6 ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΣ GIN

### 6.1 Γενικά

Για τις τσιμεντένεσεις στη κουρτίνα του φράγματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος GIN, με όσο το δυνατό χρήση ενός μείγματος και σταθερών παραμέτρων GIN, για την παραγωγή υψηλής ποιότητας, μακράς διάρκειας ζωής και εισησιέσεις με ελεγχόμενο τρόπο.

### 6.2 Μείγματα

Για τη μέθοδο GIN χρησιμοποιείται μόνο ένα μείγμα το οποίο πρέπει να είναι σταθερό (stable) και με χαμηλό ιξώδες (cohesion). Μετά από πολλές δοκιμές, τόσο στο εργαστήριο, όσο και σε δοκιμαστικές γεωτρήσεις σε διάφορα μείγματα και με διαφορετικά πρόσμεικτα (superplasticizers), χρησιμοποιήθηκε ένεμα αναλογίας νερού/ τσιμέντου 0.7, με 1% μπεντονίτη (στο βάρος του τσιμέντου) και 0.7% υπερ-ρευστοποιητή (T sircon S1).

Κανονικά η χρήση μπεντονίτη σε μείγματα τσιμεντένεσεων πρέπει να αποφεύγεται, γιατί έχει δυσμενή αποτελέσματα στη διαπερατότητα του ενέματος. Επειδή όμως το τσιμέντο που υπάρχει στην Κυπριακή αγορά έχει σχετικά χαμηλό δείκτη λεπτότητας, (Blain fineness) γύρω στα 2800 cm<sup>2</sup>/gr, η χρήση μπεντονίτη κρίθηκε απαραίτητη για να καταστεί το μείγμα σταθερό (stable) με βαθμό διαχωρισμού κάτω από 5% που ήταν το επιτρεπτό όριο. Τυπικές ιδιότητες του μείγματος που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Μείγματος

Typical properties of grout mix	
Cement – Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	2850
Water-cement ratio	0.7:1
Superplasticiser	0.7% T sircon S1 (by weight of cement)
Marsh funnel flow time (s)	35 - 38
Plate cohesion (Pa)	7.0 - 7.6
Settlement (2 h)	Max 5%
Density (t/m <sup>3</sup> )	1.65 - 1.66
Strength (N/mm <sup>2</sup> )	7 day 15 28 day 20

### 6.3 Η Κουρτίνα

Η κουρτίνα βρίσκεται στο ανάντη μέρος της πλίνθου και έχει μήκος 680 m. αποτελείται από μια κεντρική γραμμή γεωτρήσεων βάθους 20 μέχρι 40 m και δύο πλευρικές γραμμές 10 m, εκατέρωθεν. Οι αποστάσεις μεταξύ των πρωτεύουσών γεωτρήσεων ήταν 6 m και με τη μέθοδο του διαχωρισμού (split spacing) οι αποστάσεις μειώνονταν στις δευτερεύουσες, τριτεύουσες κ.ο.κ.

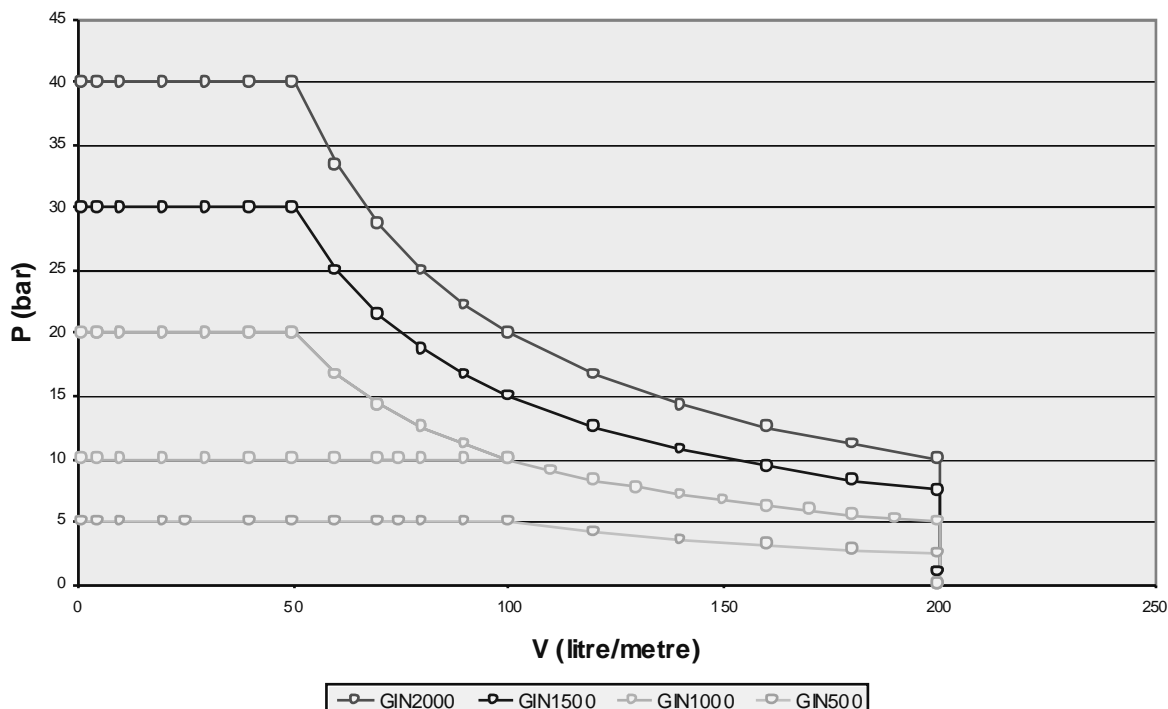
Η ανάγκη για τριτεύουσες βασιζόταν στα αποτελέσματα των δευτερευουσών, με βάση το κριτήριο  $V_{lim} = 0.53 \text{ GIN}/P_{max}$ . Χρησιμοποιήθηκε η καθοδική μέθοδος με στάδια 5.0 m. Μετά από τα πρώτα αποτελέσματα αυτό διαφοροποιήθηκε για το πρώτο στάδιο κάτω από την πλίνθο, το οποίο μοιράστηκε σε δύο, 0-2 m και 2-5 m. Αυτό σε συνδυασμό με σχετική αύξηση της πίεσης στόχευε στην επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερων αποτελεσμάτων στην περιοχή αμέσως κάτω από την πλίνθο. Επιτυχής συμπλήρωση κάθε κομματιού της κουρτίνας θεωρείτο όταν τα τελικά αποτελέσματα των δοκιμών πίεσης νερού (water tests) στις γεωτρήσεις ελέγχου ήταν κάτω από 2 Lugeons.

#### 6.4 Η Μέθοδος GIN ( Grouting Intensity Number)

Η μέθοδος GIN είναι μια σχετικά νέα μέθοδος στις τσιμεντενέσεις. Βασίζεται στη χρήση ενός μείγματος, ψηλών πιέσεων και της παραμέτρου GIN. Η παράμετρος αυτή είναι το γινόμενο  $P \times V$ . ( Πίεση-bar x Όγκο ενέματος- ltr/m) Οι πιέσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μέχρι 25 bar, η παράμετρος GIN από 500-1500 και ο μέγιστος όγκος ενέματος 250 ltr.

Μια τυπική συμπεριφορά ενός σταδίου στη μέθοδο GIN αξιολογείται από το P-V διάγραμμα. Είναι όμως χρήσιμο να λαμβάνει κανείς υπόψη και την αλλαγή στη ικανότητα διαπερατότητας κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της εισπίεσης. Η διαπερατότητα ορίζεται σαν ο λόγος  $Q/P$  όπου Q είναι ο ρυθμός ροής σε ltr/min. Αξιολογούνται επίσης οι μεταβολές με το χρόνο των παραμέτρων P, Q, V και διαπερατότητας. Μια τέτοια αξιολόγηση δείχνει όχι απλά τον όγκο του ενέματος που δέχθηκε η βραχομάζα, αλλά και φαινόμενα όπως το άνοιγμα υφιστάμενων ρωγμών (hydro-jacking) ή τη δημιουργία νέων (hydro-fracturing), όπου οι πιέσεις είναι αρκετά ψηλές για να τα προκαλέσουν. Μόνο σε λίγες περιπτώσεις φάνηκε να προκαλείται η δημιουργία νέων ρωγμών κατά τη διάρκεια των εργασιών των τσιμεντενέσεων.

Γενικά από το σύνολο των αποτελεσμάτων σε πολύ λίγες περιπτώσεις (7.2%) υπήρξαν στάδια που έφτασαν στο GIN. Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούσαν στην περιοχή, χωρίς συγκεκριμένο και συνεχές σύστημα επιπέδων ή άλλων ασυνεχειών. Ο αριθμός των σταδίων όμως όπου υπήρξε διάνοιγμα των ρωγματώσεων ήταν πολύ μεγαλύτερος (70%).



### Γράφημα 3. Καμπύλες GIN

Τα ίδια τα αποτελέσματα των όγκων ενέματος που είχε δεχθεί η βραχομάζα, ήταν γενικά πολύ χαμηλά, όπως ήταν πάλι αναμενόμενο. Γύρω στο 80% των σταδίων πήρε τσιμέντο κάτω από 20 kg/m. Κάποια πολύ μεμονωμένα στάδια είχαν αρκετά ψηλές απορροφήσεις πάνω από 100 και ακόμα λιγότερες πέραν των 200 kg/m.

Η αποτελεσματικότητα της κουρτίνας και της μεθόδου GIN μπορεί να κριθεί από:

- Μεμονωμένα στάδια με ψηλές απορροφήσεις
- Η χρήση των καμπύλων GIN βεβαιώνει ότι οι ρωγματώσεις παραμένουν γεμάτες με ένεμα και μειώνεται η πιθανότητα επιστροφής στην αρχική κατάσταση ( relaxation).
- Τα αποτελέσματα των δοκιμών με νερό στις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις ελέγχου στο τέλος της εργασίας, δείχνουν ένα αριθμό μόνο 3% πάνω από 2 Lugeons, σε σύγκριση με 12.6% πάνω από 5 και 17.8% πάνω από 2 πριν.
- Η χρήση τόσο του Vmax αλλά και πιο παχύρρευστου ενέματος δεν επιτρέπει στο ένεμα να ταξιδεύει σε περιοχές μακριά από τον άξονα της κουρτίνας και έτσι μειώνει τη σπατάλη τσιμέντου.
- Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις δείχνουν την ύπαρξη καλής ποιότητας ενέματος σε αρκετές περιπτώσεις κατά μήκος της κουρτίνας.

Πίνακας 2. Παράμετροι GIN

GIN parameters					
Set	Location	Depth (m)	GIN (bar l/m)	Pmax (bar)	Vmax (l/m)
1	Side valley	0-5	500	8	150
		5-10	1000	20	200
		>10	1500	25	250
2	Main valley	0-2	500	10	150
		2-5	1000	15	200
		5-10	1000	20	200
		>10	1500	25	250
3	Main valley	0-2	1000	10	200
		2-5	1500	20	250
		5-10	1500	20	250
		>10	1500	25	250
4	Abutments	0-2	1000	10	200
		2-5	1500	15	250
		5-10	1500	20	250
		>10	1500	25	250



Εικόνα 8. GIN Grouting.

## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το Φράγμα Κανναβιούς είναι το πρώτο CFRD φράγμα που κατασκευάζεται στην Κύπρο. Τόσο ο σχεδιασμός του, όσο και η κατασκευή του απετέλεσαν μια πρόκληση για τη χρήση νέων μεθόδων στην αντιμετώπιση των διαφόρων προβλημάτων που παρουσιάστηκαν. Η μέθοδος Jet grouting, η κατασκευή και χρήση του Vacuum Box για τον έλεγχο των κολλήσεων χαλκού, αλλά και η εφαρμογή της μεθόδου GIN στις τσιμεντενέσεις κουρτίνας αποτελούν μερικές από τις νέες εφαρμογές στην κατασκευή τέτοιων φραγμάτων.

Η ολοκληρωμένη ενοργάνωση του με σύγχρονα όργανα μετρήσεως όλων των σημαντικών παραμέτρων που βοηθούν στη σωστή και πλήρη αξιολόγηση της συμπεριφοράς του, τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής όσο και μετά, καθιστά το Φράγμα Κανναβιούς ένα από τα νέα και σύγχρονα φράγματα που αποτελούν ορόσημο στην κατασκευή CFRD.