

Γεωλογικά και Γεωτεχνικά θέματα κατά την κατασκευή του φράγματος Γαδουρά Ρόδου – Τεχνικά στοιχεία του έργου

Π.Μαρίνος

Καθηγητής Τομέα Γεωτεχνικής Σχολής Πολιτικών Μηχικών Ε.Μ.Π., Ειδικός Σύμβουλος Κ/Ξ Γαδουρά Ρόδου

Μ.Καββαδάς

Αναπληρωτής Καθηγητής Τομέα Γεωτεχνικής Σχολής Πολιτικών Μηχικών Ε.Μ.Π., Ειδικός Σύμβουλος Κ/Ξ Γαδουρά Ρόδου

Α.Κοτσώνης

Πολιτικός Μηχανικός, Διευθυντής Δ6 Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε / Γ.Γ.Δ.Ε. / Γ.Δ.Υ.Ε.

Λ.Σωμάκος

Πολιτικός Μηχανικός, Κ/Ξ Γαδουρά Ρόδου

Β.Περλέρος

Γεωλόγος, Κ/Ξ Γαδουρά Ρόδου

Σ.Λαζαρίδου

Πολιτικός Μηχανικός MSc, Κ/Ξ Γαδουρά Ρόδου

Λέξεις κλειδιά: Ρόδος, Γαδουράς, φράγμα, φλύσξης, πίεση πόρων θεμελίωσης, όργανα παρακολούθησης, υλικά αναχώματος, ευστάθεια φράγματος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία παρουσιάζει τα κύρια τεχνικά στοιχεία κατασκευής του φράγματος Γαδουρά Ρόδου με ιδιαίτερη έμφαση στις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες και διερευνήσεις κατά την εξέλιξη της κατασκευής. Αναλύονται στοιχεία σχετικά με τα υλικά κατασκευής του αναχώματος και τις συνθήκες θεμελίωσης, παρουσιάζεται η τελική διαζώνιση του φράγματος, γίνεται παρουσίαση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των υλικών, παρουσιάζονται οι λόγοι εκβάνθωσης της στάθμης θεμελίωσης, η παρακολούθηση της ανάπτυξης πιέσεων πόρων στην θεμελίωση, η παρακολούθηση των καθιζήσεων της θεμελίωσης και των συνιζήσεων του φράγματος κατά την κατασκευή και η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του φράγματος κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα.

1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ

Το φράγμα Γαδουρά βρίσκεται σε απόσταση περίπου 40 km νότια της πόλης της Ρόδου και απέχει περίπου 6,5 km δυτικά από τη γέφυρα Γαδουρά της παλιάς Εθνικής Οδού Ρόδου – Λίνδου.

Κύριος του έργου είναι το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Επιβλέπουσα και Προϊσταμένη Υπηρεσία είναι η Διεύθυνση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης Δ6 και Διευθύνουσα υπηρεσία επί τόπου των έργων η ΕΥΔΕ/Ύδρευση Ρόδου. Η λεκάνη απορροής του φράγματος έχει έκταση 147.7 km² και ταμιευτήρα ωφέλιμης χωρητικότητας 63.5 x 10⁶ m³, βρίσκεται στον ομώνυμο ποταμό και θα υδροδοτήσει αρχικά, με υδραγωγείο μήκους 43.5 km, την πόλη της Ρόδου και παράκτιους οικισμούς. Η μέση ετήσια απόληψη για ύδρευση είναι περίπου 18 x 10⁶ m³. Το υδραγωγείο προβλέπεται να επεκταθεί βόρεια μέχρι τα Καλαβάρδα και νότια μέχρι το χωριό Λαχανιά σε μήκος περίπου 30 km και 35 km αντίστοιχα.

Πρόκειται για χωμάτινο φράγμα με κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα, σώματα στήριξης από αμμοχάλικα κοίτης και ημιπερατά κροκαλοπαγή, μεταβατικές ζώνες από διαβαθμισμένα υλικά κοίτης και εξωτερικές ζώνες προστασίας του ανάντη και κατόντη πρηνούς.

1.1 Μορφολογικά και Υδρολογικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα Γαδουρά

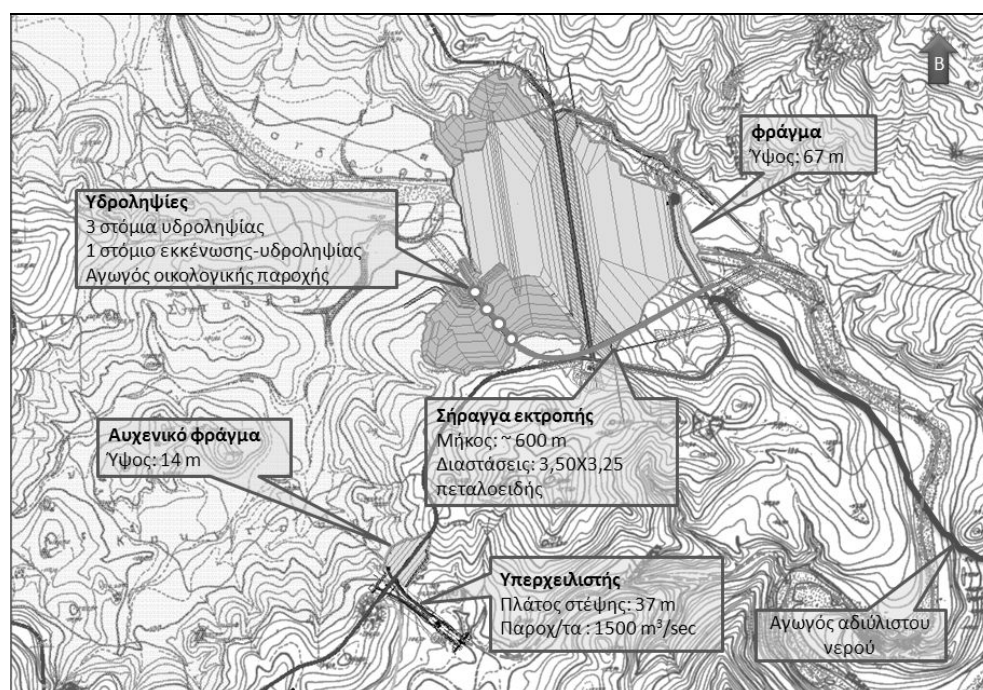
Η λεκάνη απορροής του φράγματος Γαδουρά έχει έκταση 147.7 km², μέσο υψόμετρο 327 m, μέση ετήσια βροχόπτωση 629.7 mm και μέση επιφανειακή κλίση 15-20%. Η μέση ετήσια απορροή του ταμιευτήρα υπολογίστηκε 26 x 10⁶ m³. Η έκταση της λεκάνης Γαδουρά καταλαμβάνεται από γεωργικές εκτάσεις και δάση – ημιφυσικές εκτάσεις σε αναλογία περίπου 50% - 50%.

1.2 Σεισμικότητα ευρύτερης περιοχής των έργων

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Τροποποίηση ΕΑΚ 2000, ΦΕΚ Β'1154/12-8-2003), η περιοχή των έργων ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II με συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης $\alpha = 0.24$.

1.3 Τεχνικά στοιχεία φράγματος και συναφών έργων

Στην εικόνα.1 παρουσιάζεται η γενική διάταξη των έργων του φράγματος Γαδουρά και στον πίνακα 1 δίνονται τα τεχνικά στοιχεία του έργου όπως διαμορφώθηκαν κατά την κατασκευή.



Εικόνα 1: Γενική διάταξη έργων φράγματος Γαδουρά Ρόδου

Πίνακας 1. Τεχνικά Στοιχεία Φράγματος Γαδουρά και Συναφών Έργων

Ταμιευτήρας	
Συνολική χωρητικότητα ταμιευτήρα	67x10 ⁶ m ³
Ωφέλιμη (+117,50)	63.5x10 ⁶ m ³
Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (Α.Σ.Π.).	+122.10
Ανώτατη Στάθμη Λίμνης (Α.Σ.Λ.).	+117.50
Κατώτατη Στάθμη Λίμνης (Κ.Σ.Λ.).	+91.00
Επιφάνεια Λίμνης	4.38 km ²
Φράγμα	
Όγκος	2.567.000 m ³
Ύψος (από τη θεμελίωση)	67.00 m

Φράγμα	
Υψόμετρο θεμελίωσης	+58.00
Υψόμετρο Στέψης	+125.00
Πλάτος Στέψης	10.00 m
Μήκος Στέψης	585.00 m
Κλίση Πραγών	ανάτη 1:2.5 καπάντη 1:2
Κυρίως Ανάντη Πρόφραγμα (Κ.Α.Π.)	
Όγκος	678.000 m ³
Ύψος (από τη θεμελίωση)	27.00 m
Υψόμετρο θεμελίωσης	+71.00
Υψόμετρο Στέψης	+98.00
Πλάτος Στέψης	10.00 m
Μήκος Στέψης	436.90 m
Κλίση Πραγών	1:2
Αυχενικό Φράγμα	
Όγκος	88.400 m ³
Ύψος (από τη θεμελίωση)	14.00 m
Υψόμετρο θεμελίωσης	+111.00
Υψόμετρο Στέψης	+125.00
Πλάτος Στέψης	8.00 m
Μήκος Στέψης	138.30 m
Κλίση Πραγών	1:2
Υπερχειλιστής	
Μέγιστο πλάτος διώρυγας	36.6 m
Υψόμετρο Στέψης	+117.50,
Στέψη διώρυγας προσαγωγής	+115.00
Qεκρ. (1:10.000)	890 m ³ /s
Σήραγγα Εκτροπής (πεταλοειδής διατομή)	
πλάτος / ύψος	3.50 m / 3.25 m
Μήκος σήραγγας	596.75 m
Μήκος εισόδου CUT & COVER	47.50 m
Μήκος εξόδου CUT & COVER	44.23 m
Σύστημα Υδροληψίας	
3 στόμια υδροληψίας-εκκένωσης Φ1000	Y1 = +99.00 Y2 = +104.5, Y3= +111.50
1 στόμιο εκκένωσης-υδροληψίας Φ1200	YE = +90.00
Αγωγός υδροληψίας- εκκένωσης	Φ1200
Αγωγός αποχέτευσης φερτών	Φ600
Αγωγός για την οικολογική παροχή	Φ350

Περιμετρικά του ταμιευτήρα κατασκευάζεται παραλίμνια οδός, συνολικού μήκους περίπου 12.6 km, για την αποκατάσταση της σύνδεσης της μόνιμης οδοποιίας του φράγματος με την υφιστάμενη οδό Λαέρμα-Απόλλωνας. Η κατασκευή του φράγματος Γαδουρά, ολοκληρώθηκε στις 30/7/2007 και στις 27/9/2007 έγινε η έμφραξη της σήραγγας εκτροπής για την πλήρωση του ταμιευτήρα. Η ονομαστική στέψη του αναχώματος είναι στο +125.00. Σύμφωνα με το διάγραμμα υπερύψωσης, κατά το πέρας κατασκευής, το ανάχωμα, στην περιοχή των μέγιστων διατομών έχει στέψη στο +127.00.

1.4 Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων – Οικολογική παροχή

Η έγκριση περιβαλλοντικών όρων για την κατασκευή του Φράγματος Γαδουρά στηρίχθηκε στις σχετικές περιβαλλοντικές μελέτες και προβλέπει συνολικά $5.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά έτος για εξασφάλιση οικολογικής παροχής. Η οικολογική παροχή έχει οριστεί σε $0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ τον Απρίλιο και Μάιο και $0.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ τους υπόλοιπους μήνες.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ

2.1 Γενικά Γεωλογικά στοιχεία

Η ευρύτερη περιοχή θεμελίωσης των έργων του φράγματος Γαδουρά δομείται γεωλογικά από αλπικά ιζήματα, κυρίως φλύσχη και δευτερεύοντος ασβεστολίθους - μεταλλικά μολασσικά, νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα, που αποτελούνται κυρίως από μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, πλευρικά κορήματα κλιτύος, υλικά αναβαθμίδων και καλύπτουν ασύμφωνα τους αλπικούς σχηματισμούς {1}.

Εξαιτίας της θέσεώς του στην απόληξη του αιγιακού τόξου, ο φλύσχη έχει υποστεί εξαιρετική παραμόρφωση, με εσωτερική αναδιάταξη της δομής του λόγω του έντονου τεκτονισμού, και χαρακτηρίζεται ως παραυτόχρονος. Η πολυπλοκότητα της γεωλογικής δομής έχει εξαιρετικά ενισχυθεί από τη σημαντική νεοτεκτονική δραστηριότητα, κατακόρυφου-παρακατακόρυφου χαρακτήρα (BBA-NNΔ, ANA-ΔΒΔ και ΒΔ-ΝΑ, ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης σύμφωνα με το σεισμοτεκτονικό χάρτη της Ελλάδος-ΙΓΜΕ, 1989), που βασικά οφείλεται στη γειτονία της νήσου Ρόδου προς το περιθώριο της ζώνης καταβύθισης της αφρικανικής τεκτονικής πλάκας κάτω από την αιγαιακή πλάκα και συνοδεύεται από υψηλή σεισμικότητα {1}.

Το σύνολο της λεκάνης κατάκλισης αποτελείται από στρώματα του φλύσχη (ιλυόλιθοι – αργιλικόι σχιστόλιθοι και μικρές εμφανίσεις ψαμμιτών) και κατά θέσεις νεογενείς αποθέσεις (Λεβαντίνια κροκαλοπαγή και σχηματισμός Θάρι).

2.2 Ζώνη θεμελίωσης κυρίως φράγματος και συναφών έργων

Η περιοχή θεμελίωσης του φράγματος Γαδουρά δομείται από ισχυρά διατμημένους και καταπονημένους τεκτονικά αργιλικούς σχιστόλιθους και ιλυολίθους του φλύσχη. Οι αργιλικόι σχιστόλιθοι και ιλυόλιθοι του φλύσχη κατά το γεωλογικό παρελθόν βρέθηκαν σε ένα ευρύτερο πεδίο τεκτονικής δράσης που είχε ως αποτέλεσμα την ισχυρή καταπόνηση των αργιλικών – ιλυολιθικών στρωμάτων. Με την ανωτέρω τεκτονική διαδικασία μεταφέρθηκαν και τοποθετήθηκαν μέσα στη μάζα του διατμημένου φλύσχη τεμάχια γύψων προερχόμενοι από άλλες περιοχές. Στην ευρύτερη περιοχή της νήσου Ρόδου δεν έχουν εντοπισθεί θέσεις στις οποίες να αναπτύσσονται γύψοι στην πρωτογενή τους θέση και μορφή. Η τεκτονική αυτή τοποθέτηση των γύψων είχε ως αποτέλεσμα τόσο την τυχαία κατανομή τους στο χώρο, όπως επίσης και την εμφάνιση τους από μικρής διαμέτρου τεμαχίων (της τάξης των ολίγων εκατοστών) έως και ογκολίθων, διαστάσεων της τάξης των δεκάδων μέτρων.

Η προβλεπόμενη, από την Οριστική μελέτη, στάθμη θεμελίωσης ήταν στο υψόμετρο +67.00. Κατά την εκσκαφή της τάφρου πυρήνα, πριν την τελική στάθμη, συναντήθηκαν ογκόλιθοι γύψων σε ένα πλάτος 20.0 m. Μια από τις εμφανίσεις αυτές είχε μήκος περί τα 30.0 m, πλάτος 7.0 m και ύψος περί τα 6.0 m. Η εμφάνιση αυτή ήταν τοποθετημένη κάθετα στον άξονα του φράγματος κάλυπτε όλο το πλάτος της επιφάνειας έδρασης και κρίθηκε απαραίτητη η αφαίρεση της. Δίπλα στην εμφάνιση αυτή υπήρχαν διάσπαρτοι και άλλοι ογκόλιθοι γύψων. Χαρακτηριστικό επίσης στοιχείο αποτέλεσε και το γεγονός της παρουσίας ψευδοκαρστ στους γύψους αυτούς με πλήρωση τους από άμμους και κροκάλες. Η παρουσία των εγκλωβισμένων, στο αδιαπέρατο μέσο, ογκολίθων δεν επηρεάζει την περατότητα του υποβάθρου. Μετά την αφαίρεση των γύψων αυτών, για τη αποφυγή διασωληνώσεων και οδών επιλεκτικής κυκλοφορίας και διαβρώσεων στη βάση του πυρήνα, έγινε εξομάλυνση των επιφανειών έδρασης με τελική επιφάνεια θεμελίωσης το +58.

Η ζώνη θεμελίωσης του αυχενικού φράγματος στην περιοχή του υπερχειλιστή δομείται και αυτή, από ισχυρά ισχυρά διατμημένους αργιλικούς σχιστολίθους – ιλυολίθους του φλύσχη. Κατά την εκσκαφή θεμελίωσης συναντήθηκαν και εδώ, εγκιβωτισμένοι εντός του φλυσχικού περιβάλλοντος, ογκόλιθοι γύψων.

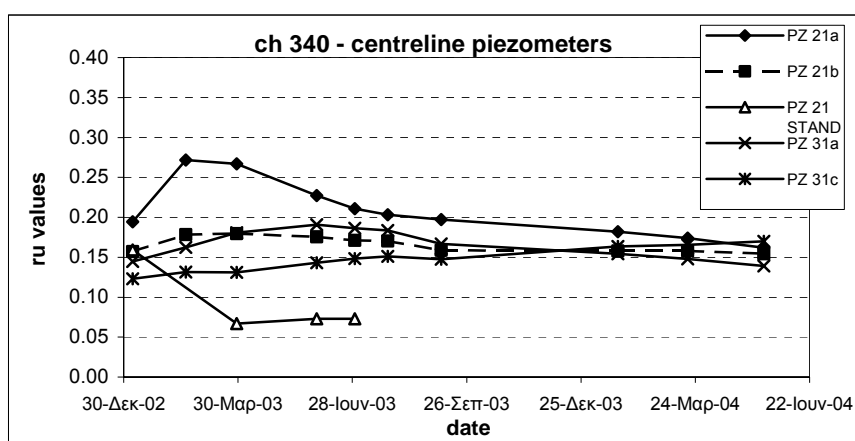
Η σήραγγα εκτροπής στο σύνολό της διέτρησε την ως άνω διατμημένη ασθενή φλυσχική βραχώμαζα. {1}.

3 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΑΦΩΝ ΕΡΓΩΝ

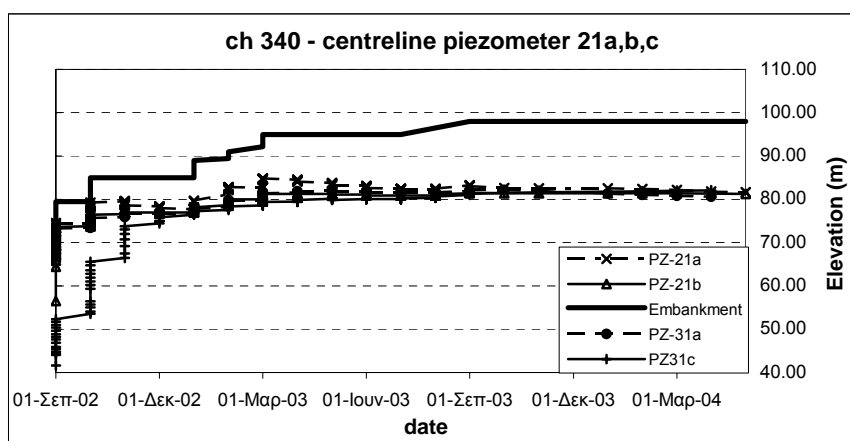
3.1 Ανάπτυξη πιέσεων πόρων στη στάθμη θεμελίωσης – μετρήσεις πιεζομέτρων

Κατά την κατασκευή, εξετάστηκε, λόγω της δομής του υποβάθρου (αργιλικός σχιστόλιθος πολύ μικρής περατότητας), η πιθανότητα ανάπτυξης υψηλών πιέσεων πόρων στη θεμελίωση του φράγματος. Έτσι, στη θεμελίωση του κυρίως ανάντη προφράγματος (ΚΑΠ) και του κυρίως φράγματος τοποθετήθηκαν μια σειρά ηλεκτρικά πιεζόμετρα δονούμενης χορδής και υδραυλικά πιεζόμετρα με κεφαλή τύπου Casagrande. Από τις μετρήσεις στα εγκατεστημένα πιεζόμετρα κάτω από τη βάση του ΚΑΠ προκύπτει ότι, υπό το βάρος του, αναπτύσσονται στο έδαφος θεμελίωσης, μικρές υπερπίεσεις πόρων με τιμές του συντελεστή r_u κυρίως μεταξύ 0.05 και 0.25.

Στα διαγράμματα 1 και 2, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της μεταβολής του συντελεστή r_u κατά τη διάρκεια κατασκευής του ΚΑΠ (πέρας κατασκευής περί το τέλος Μαρτίου 2003) και μετά από αυτήν (έως τέλος Μαΐου 2004) καθώς και η χρονική εξέλιξη του πιεζομετρικού ύψους του νερού με την ανύψωση του ΚΑΠ, στη μέγιστη κεντρική διατομή του προφράγματος (στέγη +98.00).

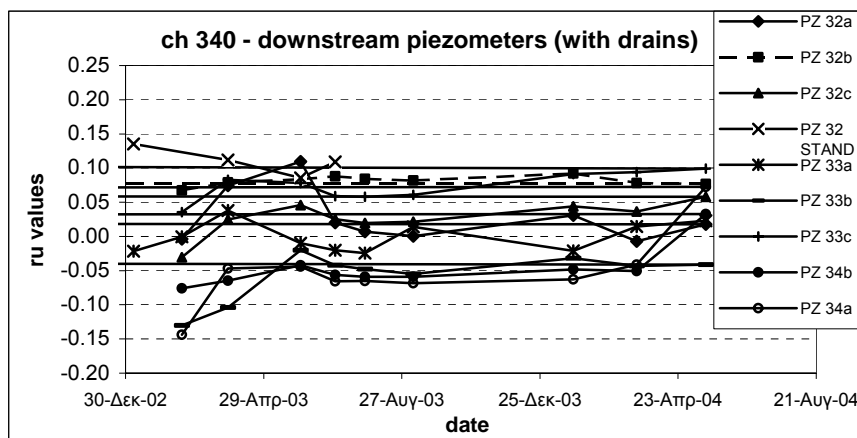


Διάγραμμα 1: Χρονική μεταβολή του συντελεστή r_u στα ηλεκτρικά πιεζόμετρα που είναι εγκατεστημένα στο έδαφος θεμελίωσης, στο κεντρικό τμήμα, του κυρίως ανάντη προφράγματος, στη μέγιστη κεντρική διατομή. Το πιεζόμετρο PZ 21 είναι υδραυλικό πιεζόμετρο. Το ύψος του επιχώματος φαίνεται στο διάγραμμα 2.



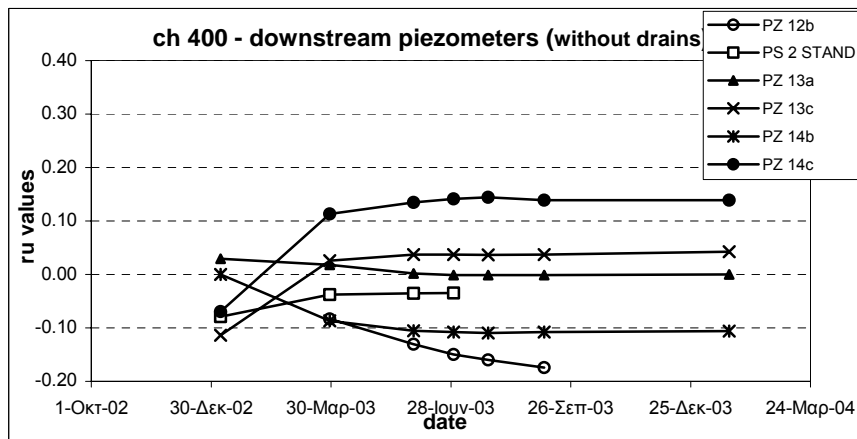
Διάγραμμα 2: Χρονική εξέλιξη μέτρησης της πιεζομετρικής στάθμης στα πιεζόμετρα PZ – 21 (στάθμες +66.53, +56.53), PZ-31 (στάθμες +66.70, +41.60) που είναι εγκατεστημένα στο έδαφος θεμελίωσης, στο κεντρικό τμήμα, του κυρίως ανάντη προφράγματος, στη μέγιστη κεντρική διατομή. Φαίνεται και το, κατά περίπτωση, ύψος του αναχώματος.

Κατά την κατασκευή του ΚΑΠ, σε ένα τμήμα της θεμελίωσης του κατάντη σώματος στήριξης, τοποθετήθηκαν αμμοστραγγιστήρια ώστε, στην περίπτωση καταγραφής μεγάλων υπερπίεσεων πόρων, να προβλεφθεί η τοποθέτηση αμμοστραγγιστηρίων στη θεμελίωση του κατάντη σώματος στήριξης του κυρίως φράγματος. Στα διαγράμματα 3 και 4 φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή r_u με και χωρίς αμμοστραγγιστήρια. Λόγω των μικρών υπερπίεσεων πόρων που καταγράφηκαν και στις δυο περιπτώσεις, κρίθηκε ότι δεν απαιτείται η πρόβλεψη αμμοστραγγιστηρίων.



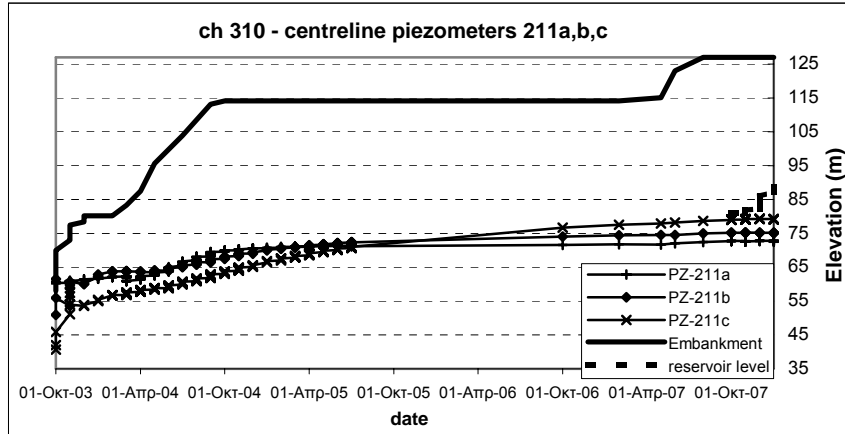
Διάγραμμα 3: Χρονική μεταβολή του συντελεστή r_u στα ηλεκτρικά πιεζόμετρα που είναι εγκατεστημένα στο έδαφος θεμελίωσης, στο κατάντη τμήμα, του κυρίως ανάντη προφράγματος, στη μέγιστη κεντρική διατομή. Στην περιοχή αυτή τοποθετήθηκαν αμμοστραγγιστήρια για την επιτάχυνση της αποτόνωσης των υπερπίεσεων πόρων. Το πιεζόμετρο PZ 32 είναι υδραυλικό πιεζόμετρο με κεφαλή τύπου Casagrande.

Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι το υπόβαθρο θεμελίωσης του φράγματος (αργιλικός σχιστόλιθος), παρ'όλη την μικρή του περατότητα ($k=10^{-6}$ cm/sec), διατηρεί κάποια ανοικτή δομή από την μικροσχιστότητα και τις λεπτές ασυνέχειες, που επιτρέπουν την εκτόνωση των πιέσεων. Οι αρνητικές μετρήσεις οφείλονται σε σφάλμα μέτρησης των οργάνων.



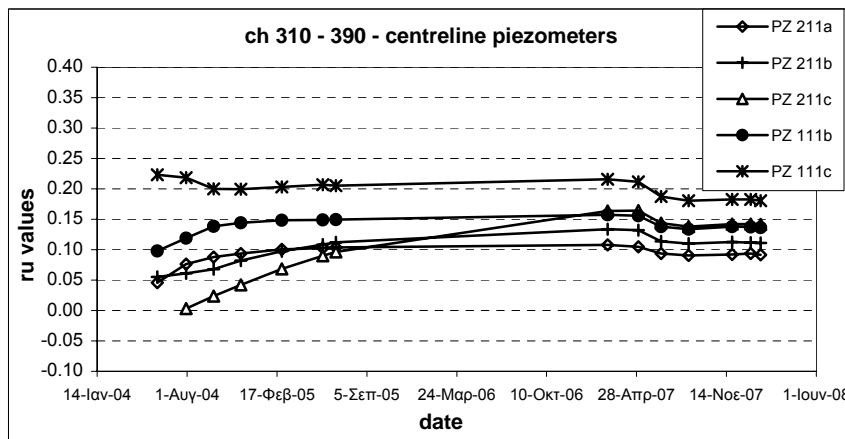
Διάγραμμα 4: Χρονική μεταβολή του συντελεστή r_u στα ηλεκτρικά πιεζόμετρα που είναι εγκατεστημένα στο έδαφος θεμελίωσης, στο κατάντη τμήμα, του κυρίως ανάντη προφράγματος. Στην περιοχή αυτή δεν έχουν τοποθετηθεί αμμοστραγγιστήρια. Το πιεζόμετρο PS 2 είναι υδραυλικό πιεζόμετρο με κεφαλή τύπου Casagrande.

Στο διάγραμμα 5 που ακολουθεί φαίνεται η χρονική εξέλιξη του πιεζομετρικού ύψους του νερού σε πιεζόμετρα που είναι εγκατεστημένα στη θεμελίωση του πυρήνα του κυρίως αναχώματος, από την έναρξη κατασκευής (6/10/2003) μέχρι το πέρας (22/8/2007) και κατά τους πρώτους μήνες πλήρωσης του ταμιευτήρα.



Διάγραμμα 5: Χρονική εξέλιξη μέτρησης της πιεζομετρικής στάθμης στα πιεζόμετρα PZ – 211 που είναι εγκατεστημένα στο έδαφος θεμελίωσης (στάθμες +60.70, +50.90, +40.70) στο άξονα του φράγματος. Φαίνονται το ύψος του αναχώματος και η στάθμη πλήρωσης του ταμιευτήρα.

Κατά την κατασκευή, οι καταγραφές των οργάνων υποδεικνύουν μικρή ανάπτυξη της πίεσης των πόρων του υπεδάφους. Κατά τους πρώτους μήνες ανύψωσης της στάθμης του ταμιευτήρα (10/2007 έως και 01/2008), δεν έχουν καταγραφεί μεταβολές. Αυτό, οφείλεται στην αδιαπερατότητα του υποβάθρου σε συνδυασμό με το μικρό χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από την εκκίνηση της πλήρωσης. Από τις μετρήσεις των πιεζομέτρων στη θεμελίωση του φράγματος ο συντελεστής r_u έχει μέση τιμή περίπου 0.15.



Διάγραμμα 6: Χρονική μεταβολή του συντελεστή r_u στα ηλεκτρικά πιεζόμετρα PZ – 211, PZ – 111 που είναι εγκατεστημένα στο έδαφος θεμελίωσης στον άξονα του φράγματος.

Παρόμοιες ενδείξεις καταγράφηκαν στα εγκατεστημένα, στο εσωτερικό του πυρήνα, πιεζόμετρα. Κατά την πλήρωση, δεν έχουν καταγραφεί μεταβολές της πίεσης πόρων ενώ κατά τη διάρκεια κατασκευής, λόγω της χαμηλής πλαστικότητας του φλύσχη ως υλικό πυρήνα, δεν αναπτύχθηκαν σημαντικές υπερπίεσεις πόρων.

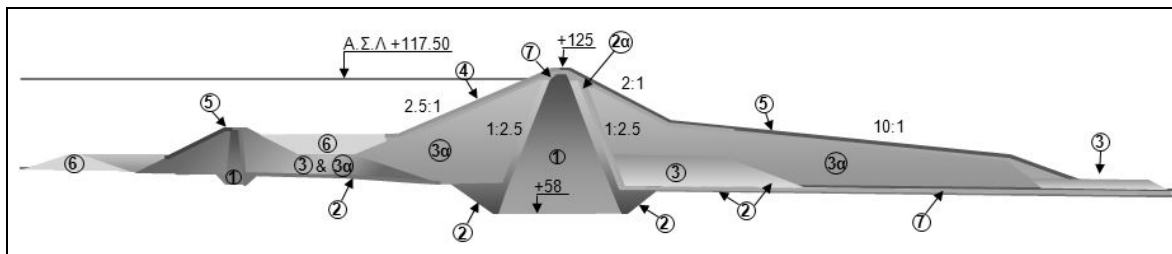
3.2 Στεγανοποίηση υποβάθρου

Από την οριστική μελέτη, δεν προβλεπόταν κουρτίνα στεγανοποίησης του υποβάθρου, λόγω της πολύ μικρής περατότητας των αργιλικών σχιστολίθων. Στη βάση της τάφρου θεμελίωσης του πυρήνα, για την αποφυγή φαινομένων διάβρωσης, κατασκευάστηκε τάπητας 3 σειρών τσιμεντενέσεων, σε πεσσοειδή διάταξη 1.5 x 2.0, βάθους έως 10 m με μέση απορρόφηση της τάξης των 5 kg τσιμεντενάματος ανά μέτρο μήκους οπής και τσιμεντένεμα με αναλογία νερού/τσιμέντου 1:1.

4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΔΙΑΖΩΝΙΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

4.1 Διαζώνιση φράγματος και προφράγματος

Τα υλικά κατασκευής του φράγματος λήφθηκαν από δανειοθαλάμους στη κοίτη, από αναβαθμίδες στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος και του ταμιευτήρα, από τις εκσκαφές ή από λατομεία μέσα στον ταμιευτήρα. Στην εικόνα 2 που ακολουθεί φαίνεται η τελική διαζώνιση του φράγματος Γαδουρά και στον πίνακα 2 περιγράφονται οι ζώνες του φράγματος.



Εικόνα 2: Τυπική Διατομή Φράγματος όπως διαμορφώθηκε κατά την κατασκευή

Πίνακας 2. Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος

Ζώνη	Περιγραφή
1	Αδιαπέρατος πυρήνας
2	Φίλτρο (διαβαθμισμένο αμμοχάλικο)
2α	Λεπτόκοκκο στραγγιστήριο
3	Κελύφη (αμμοχάλικα ποταμού)
3α	Κελύφη (κροκαλοπαγή)
4	Προστασία ανάντη πρανών (λιθορριπή λατομείου)
5	Προστασία κατόντη πρανών (κροκάλες)
6	Αναβαθμίδες (τυχαία υλικά)
7	Στραγγιστήριο (διαβαθμισμένο αμμοχάλικο)

Κατά την κατασκευή, απαιτήθηκε πρόσθετη διερεύνηση για την εύρεση κατάλληλων υλικών για τα σώματα στήριξης και τον πυρήνα του φράγματος. Για τις αναβαθμίδες σταθεροποίησης (ζώνη 6), χρησιμοποιήθηκαν τα προϊόντα των εκσκαφών στη θεμελίωση του φράγματος και των άλλων έργων όπως και υλικά από τους δανειοθαλάμους αμμοχάλικου.

4.1.1 Υλικά πυρήνα - γεωτεχνικά χαρακτηριστικά υλικών

Τα υλικά κατασκευής της ζώνης 1 (αδιαπέρατος πυρήνας) προέρχονται από συμβατικούς δανειοθαλάμους στην περιοχή της λεκάνης κατάκλυσης. Το ποσοστό διερχόμενου υλικού από το κόσκινο Νο 4 (4.76 mm) κυμαίνεται από 89.2 έως 100% και από το κόσκινο Νο 200 (0.074 mm) από 53.9 έως 72.7%. Το όριο υδαρότητας κυμαίνεται από 39.71 έως 45.69% και ο δείκτης

πλαστικότητας από 17.62 έως 24.28%. Τα υπόψη υλικά χαρακτηρίζονται ως ανόργανη άργιλος και ταξινομούνται στην ομάδα CL του χάρτη πλαστικότητας. Η μέγιστη ξηρή πυκνότητα του υλικού, σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή συμπίκνωσης (Standard Proctor) έδωσε τιμές $1.67 \div 1.82 \text{ kg/cm}^3$ και βέλτιστη υγρασία από $16.15 \div 18.96\%$.

Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πυρήνα του ΚΑΠ και του πυρήνα του κυρίως φράγματος από την στάθμη θεμελίωσης (+58.00) μέχρι το +80.80. Λόγω της αύξησης των εκσκαφών για τη θεμελίωση του αυχενικού φράγματος, του ΚΑΠ και του κυρίως αναχώματος, προέκυψε ανεπάρκεια σε υλικά κατασκευής πυρήνα από τους συμβατικούς δανειοθαλάμους. Τα υπολειπόμενα απαιτούμενα $\sim 300.000 \text{ m}^3$, για την κατασκευή του αδιαπέρατου πυρήνα (από την στάθμη +80.80 και μέχρι το τελικό υψόμετρο του πυρήνα στο +122.10), αναζητήθηκαν στην λεκάνη κατάκλυσης των έργων και επιλέχθηκε η χρήση αποσαθρωμένου καστανού φλύσχη από την περιοχή του δεξιού αντερείσματος της λεκάνης.

Στα πλαίσια των διερευνήσεων, εκτελέστηκε δοκιμαστικό επίχωμα συμπίκνωσης του υλικού με την διενέργεια 8, 12 και 16 διελεύσεων του συμπυκνωτή (κατσικοπόδαρο). Τα αποτελέσματα του δοκιμαστικού επιχώματος υπέδειξαν την καταλληλότητα του συγκεκριμένου φλύσχη για υλικό πυρήνα. Ο επιφανειακός φλύσχος που επιλέχθηκε, αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα μικρού πάχους ψαμμίτη, ιλυολιθικού ψαμμίτη, ιλυόλιθου και αργλικού σχιστόλιθου. Από τις δοκιμές κατάταξης και πρότυπης συμπίκνωσης κατά Proctor τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι, ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος: 29-54%, όριο υδαρότητας: 21.5% - 34.5%, δείκτης πλαστικότητας: 4.4% - 14.8%, κατάταξη κατά U.S.C.S.: CL - ML, από την Πρότυπη Δοκιμή Proctor: $w_{opt} = 16 - 17\%$, $\rho_{d,max} = 1.76 - 1.80 \text{ Mg/m}^3$.

Κατά τη διάστρωση και συμπίκνωση, για την επίτευξη μεγαλύτερου βαθμού κορεσμού, τον περιορισμό των καθιζήσεων και την αποφυγή ανεπιθύμητων παραμορφώσεων και ρηγματώσεων (κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα και την αποκατάσταση συνθηκών μόνιμης ροής στον πυρήνα), το υλικό διαβρεχόταν και αναμοχλευόταν για την ομοιόμορφη διανομή της υγρασίας σε επίπεδα της τάξεως του 1-1.5% υψηλότερα της w_{opt} .

4.1.2 Σώματα στήριξης- γεωτεχνικά χαρακτηριστικά υλικών

Τα σώματα στήριξης του ΚΑΠ κατασκευάστηκαν από αμμοχάλικα της κοίτης του χειμάρρου Γαδουρά. Τα σώματα στήριξης του κυρίως φράγματος (και τμήμα του σώματος του ΚΑΠ) κατασκευάστηκαν από Λεβαντίνια κροκαλοπαγή, με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα έως 15% (και ενίοτε 18%), τα οποία περιέχουν και αποσαθρωμένες οφιολιθικές κροκάλες. Για την περαιτέρω εξασφάλιση της στράγγισης του κατάντη σώματος στήριξης, τοποθετήθηκε σε επαφή με το παρακατακόρυφο σύστημα στράγγισης, ζώνη από αμμοχάλικα κοίτης, πάχους 10 m και μήκους, στη βάση, 60 m. Λόγω της κάπως μειωμένης διαπερατότητας των υλικών των σωμάτων στήριξης και προκειμένου να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του ανάντη σώματος έναντι απότομου καταβιβασμού της στάθμης του ταμιευτήρα, τοποθετήθηκε στραγγιστική στρώση πάχους 2.00 m στην ανάντη παρειά κάτω από την ανάντη λιθορριπή και μια οριζόντια στρώση φίλτρου στη στάθμη +106.00.

4.1.3 Φίλτρα και στραγγιστήρια - γεωτεχνικά χαρακτηριστικά υλικών - μέθοδος διάστρωσης

Τα υλικά των φίλτρων και στραγγιστηρίων προέρχονται από την κοίτη του χ. Γαδουρά, μετά από κοσκίνισμα με ταυτόχρονη πλύση. Κατάντη του πυρήνα, κατασκευάστηκαν τρεις κατακόρυφες ζώνες, το κατάντη φίλτρο πάχους 4.00 m και δύο ζώνες στραγγιστηρίου (λεπτόκοκκο και χονδρόκοκκο) πάχους 2.50 m εκάστη. Στη βάση του κατάντη σώματος στήριξης, τοποθετήθηκε αποστραγγιστική στρώση πάχους 1.00 m η οποία περιβάλλεται από άνω και κάτω φίλτρο πάχους 0.50 m.

4.1.4 Ζώνες προστασίας ανάντη και κατάντη πρανούς

Στο ανάντη κεκλιμένο πρανές του φράγματος, τοποθετήθηκε λιθορριπή προστασίας από ασβεστολιθικούς ογκόλιθους του φλύσχη Λαέρμα και από λατομείο παχυστρωματώδους ψαμμίτη. Το κατάντη κεκλιμένο πρανές, προστατεύεται από ζώνη από κροκάλες ποταμού και προϊόντα διαλογής αμμοχάλικων.

4.1.5 Αναλύσεις ευστάθειας φράγματος

Στον πίνακα 3 δίνονται οι παράμετροι σχεδιασμού των ζωνών του φράγματος, όπως λήφθηκαν στη φάση σχεδιασμού και διερεύνησης της ευστάθειας του φράγματος. Στον πίνακα 4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Οι αναλύσεις έγιναν λαμβάνοντας συντηρητικές τιμές του δείκτη r_u , σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των πιεζομέτρων στη θεμελίωση του προφράγματος

Πίνακας 3. Παράμετροι σχεδιασμού των ζωνών του φράγματος για τις αναλύσεις ευστάθειας

Ζώνη	$\gamma\xi$ kN/m ³	$\gamma\kappa$ kN/m ³	E Mpa	ν Poisson	c' (kPa) στατική	c' (kPa) σεισμική	ϕ' (°)	r_u
1	20	20.5	40	0.35	10	15	24	0.40
2	18	20	70	-	0	0	38	0
3α	18	20	50	0.30	0	5	32	0.10
3	18	20	70	0.30	0	0	37	0
6	18	20	20	-	5	5	32	0.10
Υπέδαφος – ανώτερη στρώση έως +61.00		21	30	0.35	5	10	18	0.40
Υπέδαφος – μεσαία στρώση έως +47.00		21	80	0.30	20	25	22	0.35
Υπέδαφος – κατώτερη στρώση από +47.00		22	200	0.30	50	50	25	0.25

Πίνακας 4. Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας

Πέρασ κατασκευής		Συντελεστής ασφάλειας		
Φόρτιση	Πρανές φράγματος	κυκλική επιφάνεια	πολυγωνική επιφάνεια	Ελάχιστος αποδεκτός
Στατική	ανάντη	1.619	1.65	1.30
Στατική	κατάντη	1.440	1.515	1.30
Σεισμική ($\epsilon=0.10$)	ανάντη	1.123	1.08	1.00
Σεισμική ($\epsilon=0.10$)	κατάντη	1.06	1.021	1.00
Λειτουργία		Συντελεστής ασφάλειας		
Φόρτιση	Πρανές φράγματος	κυκλική επιφάνεια	πολυγωνική επιφάνεια	Ελάχιστος αποδεκτός
Στατική	κατάντη	1.643	1.752	1.50
Σεισμική ($\epsilon=0.16$)	κατάντη	1.098	1.091	1.10
Σεισμική ($\epsilon=0.21$)	κατάντη	1.000	1.001	1.00
Ταχύς καταβιβασμός		Συντελεστής ασφάλειας		
Φόρτιση	Πρανές φράγματος	κυκλική επιφάνεια	πολυγωνική επιφάνεια	Ελάχιστος αποδεκτός
Στατική	ανάντη	1.455	1.692	1.40
Σεισμική ($\epsilon=0.10$)	ανάντη	1.156	1.192	1.10
Σεισμική ($\epsilon=0.16$)	ανάντη	1.000	1.082	1.00

4.2 Όργανα παρακολούθησης συμπεριφοράς φράγματος

Κατά την κατασκευή, εγκαταστάθηκαν στη θεμελίωση, το σώμα και τα αντερείσματα του φράγματος όργανα παρακολούθησης της συμπεριφοράς του. Οι μετρήσεις κατά την κατασκευή του ΚΑΠ και του κυρίως αναχώματος λήφθηκαν υπόψη για τον τελικό σχεδιασμό (αναλύσεις ευστάθειας και υπερύψωση στέψης). Μετά το πέρας κατασκευής, το πρόγραμμα παρακολούθησης περιλαμβάνει καταγραφές σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα κατά την πλήρωση, τη λειτουργία και τον καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα παρακολούθησης περιλαμβάνει:

- Μετρήσεις ηλεκτρικών πιεζομέτρων δονούμενης χορδής στη θεμελίωση, στον πυρήνα και στο φίλτρο του Κ.Α.Π. και του κυρίως αναχώματος.
- Μετρήσεις κλισιομέτρων στο Κ.Α.Π. και το κυρίως ανάχωμα.
- Μετρήσεις κλισιομέτρων – καθιζησιομέτρων τύπου IDEL στο Κ.Α.Π. και το κυρίως ανάχωμα
- Μετρήσεις πιεζομέτρων Casagrande στο Κ.Α.Π. και το κυρίως ανάχωμα.
- Μετρήσεις πιεζομέτρων κατακόρυφου σωλήνα και κλισιομέτρων στα αντερείσματα του φράγματος.
- Γεωδαιτικές μετρήσεις για τον έλεγχο κατακόρυφων και οριζοντίων μετακινήσεων στο κυρίως και το αυχενικό φράγμα

4.3 Συνίζηση σώματος φράγματος – υπερύψωση στέψης

Για την εκτίμηση της υπερύψωσης της στέψης του κυρίως αναχώματος, έγινε εκτίμηση των μακροχρόνιων καθιζήσεων του φράγματος. Οι εκτιμήσεις στηρίχθηκαν στα αποτελέσματα των μετρήσεων καθιζήσεων από τα όργανα τύπου IDEL και ανάπτυξης των υπερπιέσεων πόρων από τα πιεζόμετρα στο πρόφραγμα και το κυρίως ανάχωμα. Η συνολική υπερύψωση εκτιμάται από το άθροισμα της μακροχρόνιας υποχώρησης του υπεδάφους και της μακροχρόνιας συνίζησης του σώματος του αναχώματος. Για την εκτίμηση των υποχωρήσεων του υπεδάφους θεμελίωσης, λήφθηκε η τιμή της παραμέτρου πίεσης πόρων $B_i = 0.15$.

Στον πίνακα 5 δίνεται η μετρούμενη κατακόρυφη μετακίνηση από τα όργανα τύπου IDEL και η εκτίμηση του μέτρου συμπίεσης E_{si} στη αντίστοιχη στρώση. Για συνολική επιφόρτιση 67 m από την κατασκευή του αναχώματος, η συνολική καθίζηση εκτιμήθηκε 0.40 m και η μακροχρόνια καθίζηση εκτιμήθηκε της τάξης των 0.30 m.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα μετρήσεων οργάνων IDEL στη θεμελίωση του ΚΑΠ και του φράγματος

Θέση	Χ.Θ.	Πάχος στρώσης θεμελίωσης H_{bi} (m)	Επιφόρτιση h (m)	Καθίζηση s_i (m)	Μέτρο Ελαστικότητας E_{si} (kPa)
Πρόφραγμα	340	5.15	12.24	0.04	26790
Πρόφραγμα	400	5.09	12.43	0.02	53780
Κυρίως Φράγμα	310	8.01	8.84	0.00	120374
Κυρίως Φράγμα	390	14.16	8.73	0.03	70050

Το μεγαλύτερο μέρος της καθίζησης οφείλεται στη μακροχρόνια συνίζηση του πυρήνα του φράγματος. Για την εκτίμηση της συνίζησης του σώματος του φράγματος λήφθηκε $B_i = 0.35$. Ένα μέρος της συνίζησης του αναχώματος, της τάξης των 1.1 m, συντελείται κατά τη διάρκεια της κατασκευής και ένα ποσοστό των καθιζήσεων εκ στερεοποίησης, της τάξης του 0.93 m, θα έχει συντελεστεί μέχρι το πέρας κατασκευής.

Για ύψος αναχώματος 67 m, η συνολική συνίζηση υπολογίστηκε ίση με 3.75 m και η μακροχρόνια συνίζηση ίση με 1.72 m. Από τα παραπάνω προέκυψε η συνολική υπερύψωση του κυρίως αναχώματος ίση με 2.0 m περίπου. Η υπερύψωση αυτή λήφθηκε υπόψη στη διαμόρφωση της τελικής στάθμης της στέψης του φράγματος στο +127.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα μετρήσεων οργάνων IDEL στο εσωτερικό του ΚΑΠ και του φράγματος

Θέση	Χ.Θ.	Πάχος στρώσης θεμελίωσης Hbi (m)	Επιφόρτιση h (m)	Καθίζηση si (m)	Μέτρο Ελαστικότητας Esi (kPa)
Πρόφραγμα	340	12.17	12.24	0.16	12103
Πρόφραγμα	400	12.02	12.43	0.21	9250
Κυρίως Φράγμα	310	24.37	8.84	0.37	7570
Κυρίως Φράγμα	390	24.21	8.73	0.44	6245

4.3.1 Συμπεριφορά φράγματος κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα

Ο ρυθμός πλήρωσης του ταμιευτήρα Γαδουρά από την πρώτη μέτρηση μετά από την έμφραξη της σήραγγας εκτροπής (1/10/2007) και μέχρι τον Ιανουάριο 2008, είναι 2.40 m/month. Κατά τους πρώτους μήνες της πλήρωσης, τα στοιχεία των μετρήσεων των οργάνων παρακολούθησης δεν έδειξαν αξιόλογη μεταβολή από το πέρας κατασκευής.

5 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΥ – ΕΙΔΙΚΟΙ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΚΥΡΙΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Η κατασκευή του φράγματος έγινε από τις εταιρείες ΜΕΤΩΝ Α.Ε., ΑΕΓΕΚ Α.Ε. Σύμβουλος Διαχείρισης είναι η «Κ/Ξ Γαδουρά Ρόδου» (Υδροεξυγιαντική) Λ. Λαζαρίδης, Γραφείο Μαχαίρα, Ο.Τ.Μ., Γ. Καφετζόπουλος – Δ. Μπενάκης, «Γεωμηχανική», Βασίλειος Περλέρος). Ειδικοί Σύμβουλοι για την κατασκευή του φράγματος ήταν οι κ. V. Milligan, Π. Μαρίνος, Μ. Καββαδάς, R. Coxon.

6 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την κατασκευή του φράγματος Γαδουρά Ρόδου και των συναφών έργων, προέκυψαν και αντιμετωπίστηκαν πολλαπλά θέματα τεχνικής, γεωλογικής και γεωτεχνικής φύσεως. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται γεωλογικά και γεωτεχνικά θέματα σχετικά με την κατασκευή του αναχώματος του φράγματος και δίδονται τα κύρια χαρακτηριστικά των υλικών των ζωνών του έργου.

Κατά την εκσκαφή της τάφρου πυρήνα του κυρίως φράγματος, συναντήθηκαν διάσπαρτα τεμάχια γύψου και ασβεστολίθου με αποτέλεσμα την εκβάνθυση της τάφρου κατά 9.00 m από τον αρχικό σχεδιασμό.

Κατά την κατασκευή του κυρίως ανάντη προφράγματος, λόγω της αδιαπέρατης φύσης του υποβάθρου, εγκαταστάθηκαν στη θεμελίωση του πιεζόμετρα τα οποία υπέδειξαν μικρή ανάπτυξη της πίεσης πόρων του υπεδάφους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων λήφθηκαν υπόψη για τη μελέτη ευστάθειας του αναχώματος και εκτιμήθηκε η τελική υπερύψωση της στέψης κατά 2.00 m.

Τους πρώτους τέσσερις μήνες πλήρωσης του ταμιευτήρα, δεν καταγράφηκαν αξιόλογες μεταβολές στις ενδείξεις των εγκατεστημένων οργάνων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Μαρίνος Π., Χριστοδουλοπούλου Τ., Περλέρος Β., Αργιλικόι σχιστόλιθοι του φλύσχη. Συμπεριφορά τους στη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής φράγματος Γαδουρά Ρόδου. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004
2. Αντώνης Κοτσώνης, Λάζαρος Λαζαρίδης, Ύδρευση ευρύτερης περιοχής Ρόδου από το φράγμα Γαδουρά - Κατασκευή φράγματος – Εγκαταστάσεις επεξεργασίας – Έργα μεταφοράς νερού., 2^ο Διεθνές Συνέδριο "Περιβάλλον – Βιώσιμη διαχείριση υδατικών

- πόρων – προηγμένες τεχνολογίες για την εξοικονόμηση ύδατος την 4^η Προγραμματική περίοδο 2007-2013", 2-3/7/2007
3. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ΔΕΥΑ/Δ6, «Υδρευση Ρόδου από το φράγμα Γαδουρά - Εδαφοστατική μελέτη του χωμάτινου αναχώματος», 08/2003

Geological and Geotechnical aspects confronted during the Gadoura Dam construction – Project technical data

P.Marinos

Professor, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering N.T.U.A., Panel Expert of Gadouras Dam J/V

M.Kavvadas

Associate Professor, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering N.T.U.A., Panel Expert of Gadouras Dam J/V

A.Kotsonis

Civil Engineer Director D6 /Hellenic Ministry for the Environment Physical Planning and Public Works / General Secretariat of Public Works

L.Somakos

Civil Engineer, Gadouras Dam J/V

V.Perleros

Geologist, Gadouras Dam J/V

S.Lazaridou

Civil Engineer MSc, Gadouras Dam J/V

Key Words: Rhodes, Gadouras dam, flysch, foundation pore pressures, monitoring, embankment fill materials, dam stability

ABSTRACT: In this paper, the main technical aspects of Gadoura Dam in Rhodes island are presented, focusing on the geological and geotechnical issues which were confronted during construction. Data related to the embankment materials and their geotechnical parameters are analyzed. The foundation preparation and the reasons for deciding to increase the foundation depth during construction are presented. Results from the pore pressure measurements in the foundation are examined. The evolution of the dam settlement and subsidence are also examined. Finally, a general review of the overall dam behaviour during the first impoundment is given.