

Στεγανοποίηση θεμελίωσης Αναρρυθμιστικού Έργου Πουρναρίου

Ν. Ι. Μουτάφης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας ΕΜΠ

Χ. Παπαχατζάκη

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc

Λέξεις κλειδιά: φράγμα, πλαστικό διάφραγμα, στεγανωτικός τάπητας, πιεζόμετρα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η στεγάνωση της θεμελίωσης του Αναρρυθμιστικού Έργου Πουρναρίου, σε αλλουβιακές αποθέσεις, αποτελεί ένα πρωτότυπο συνδυασμό διατάξεων και εφαρμογής στεγανοποιητικών στοιχείων και συγκεκριμένα πετάσματος τσιμεντενέσεων, διαφράγματος τσιμεντομπετονίτη και αργιλικού τάπητα, προσαρμοσμένων στο μορφολογικό ανάγλυφο του υποκείμενου βραχώδους υποβάθρου, που αποτελούσε την παλαιά κοίτη του ποταμού. Παρουσιάζονται οι βασικοί παράγοντες σχεδιασμού του έργου και αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των στεγανωτικών διατάξεων και μεθόδων που εφαρμόστηκαν, όπως προέκυψαν από μακροχρόνια ενόργανη παρακολούθηση του.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

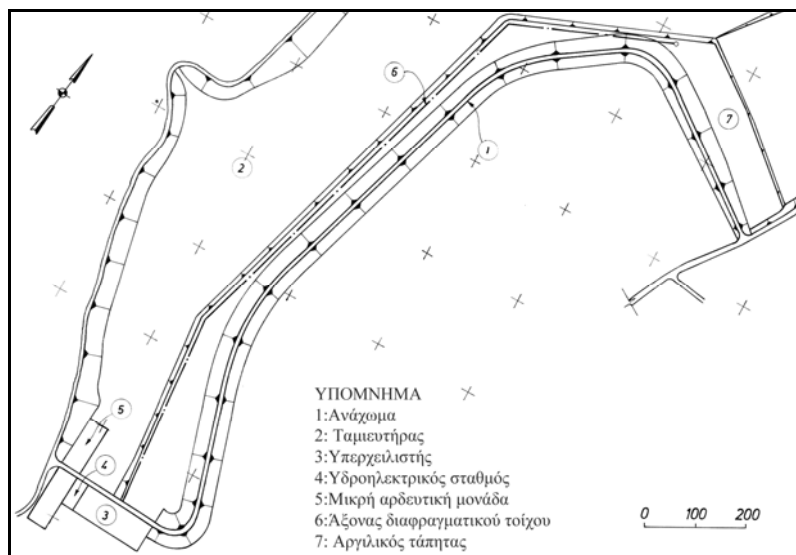
Το Αναρρυθμιστικό Έργο Πουρναρίου (ΑΕΠ), γνωστό και ως Πουρνάρι ΙΙ, βρίσκεται στον ποταμό Άραχθο, κατάντη του ΥδροΗλεκτρικού Έργου (ΥΗΕ) Πουρναρίου και 1.5 km από τις παρυφές της πόλης της Άρτας. Το έργο κατασκευάστηκε για την ημερήσια αναρρύθμιση των εκροών του ΥδροΗλεκτρικού Σταθμού (ΥΗΣ) του Φράγματος Πουρναρίου, ώστε να αντιμετωπίζονται οι απαιτήσεις άρδευσης των κατάντη καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Η αναρρύθμιση αυτή είναι απαραίτητη για την ορθή διαχείριση του ταμιευτήρα του ΥΗΕ Πουρναρίου, καθώς επιτρέπει την απεξάρτηση της λειτουργίας του από την υποχρέωση διάθεσης νερού για αρδεύσεις. Έτσι, στον σχετικά μικρό ταμιευτήρα του ΑΕΠ, με ωφέλιμο όγκο $\sim 3,9 \text{ hm}^3$, συλλέγονται και αποθηκεύονται οι ημερήσιες εκροές του ΥΗΣ Πουρναρίου, οι οποίες στη συνέχεια κατανέμονται, σε 24ωρη βάση, σύμφωνα με τις αρδευτικές ανάγκες αλλά και την υποχρέωση για διατήρηση ελάχιστης οικολογικά αποδεκτής παροχής στην κοίτη του Αράχθου, κατάντη των έργων.

Το ΑΕΠ συνίσταται από τρεις βασικές ενότητες επιμέρους έργων διατεταγμένων εν σειρά: διαζωνισμένο φράγμα ύψους 14 m και μήκους $\sim 2 \text{ km}$, σύστημα υπερχειλίστης και σταθμό παραγωγής. Η γενική διάταξη των έργων δείχνεται στην Εικ. 1. Το ανάχωμα του φράγματος δημιουργεί ταμιευτήρα επαρκούς χωρητικότητας για τις ανάγκες των αρδεύσεων, επιφανείας 0.65 km^2 στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας. Ο υπερχειλιστής είναι μετωπικός, παροχής σχεδιασμού $5800 \text{ m}^3/\text{sec}$, με μήκος στέψης 130 m. Ο σταθμός παραγωγής έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 16,5 MW.

Το έργο σχεδιάστηκε και μελετήθηκε από τη Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων (Δ.Α.Υ.Ε.) της Δ.Ε.Η. Η κατασκευή άρχισε το 1989 και ολοκληρώθηκε το 1998, με ενδιάμεσες εκτεταμένες διακοπές εργασιών, από τις εταιρείες TENET (ανάχωμα) και ΕΤΚΑ & TENET (σταθμός παραγωγής), με επίβλεψη της κατασκευής από τη Δ.Α.Υ.Ε.

Η σχετικά ιδιόμορφη διάταξη των έργων ουσιαστικά υπαγορεύτηκε μετά την αποκάλυψη του βραχώδους υποβάθρου κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις του ποταμού, σε βάθος $\sim 50 \text{ m}$ από την επιφάνεια. Το βραχώδες υπόβαθρο σχημάτιζε παλαιά βαθιά κοίτη του ποταμού, διατεταγμένη έκκεντρα ως προς τη σημερινή κοίτη. Οι δυσκολίες στεγάνωσης των αποθέσεων σε αυτό το βάθος, επέβαλε τη διερεύνηση εναλλακτικών διατάξεων Στο άρθρο αυτό αρχικά γίνεται αναφορά στο

σχεδιασμό και την κατασκευή των διατάξεων στεγανοποίησης της θεμελίωσης του φράγματος συναρτήσει των υπάρχοντων γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών. Στη συνέχεια, επιχειρείται η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας αυτών των στεγανωτικών μέτρων.



Εικόνα 1: Γενική διάταξη του έργου

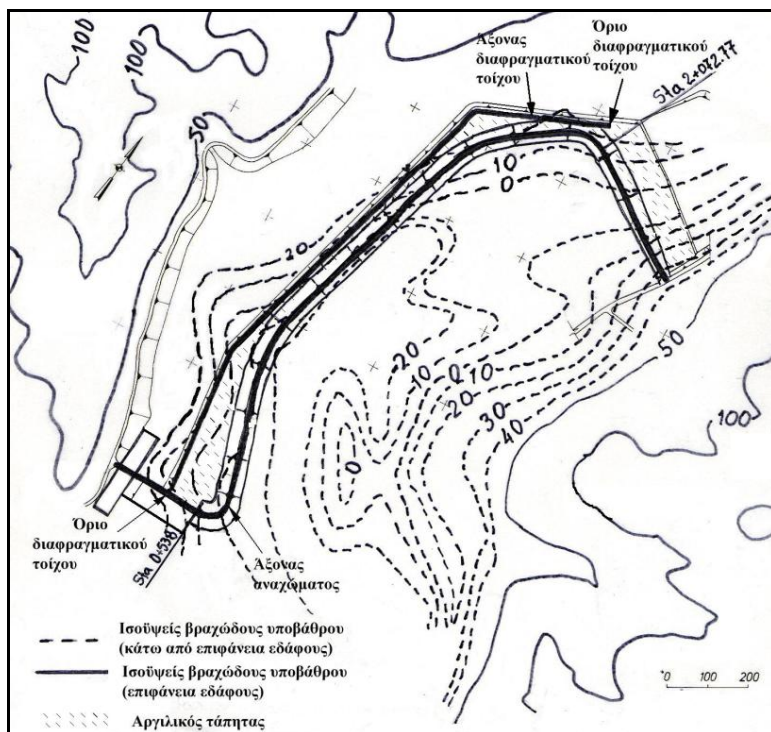
2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Το βραχώδες υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής του έργου είναι σχηματισμός του φλύσχη, με εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολιθών και παρουσιάζει τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του φλύσχη της Ιονίου ζώνης. Στην ευρύτερη περιοχή παρατηρείται σαφής και σταθερή κλίση των στρώσεων, με κατεύθυνση μέγιστης κλίσης προς Β και μέγιστη κλίση της τάξης των 35° . Ο σχηματισμός δεν είναι ιδιαίτερα διαταραγμένος και γενικά εμφανίζει σχετικά χαμηλή διαπερατότητα, της τάξης των 10^{-8} m/s, εκτός από ζώνη κοντά στην επιφάνεια με ανοιχτά τα συστήματα διακλάσεων, όπου η διαπερατότητα είναι σημαντικά υψηλότερη.

Του φλυσχικού υποβάθρου υπέρκεινται ποτάμιες αλλουβιακές αποθέσεις καθώς και υλικά διάβρωσης του φλύσχη σε διάφορους συνδυασμούς. Η διαπερατότητα των αποθέσεων παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις λόγω της ανομοιογένειας των υλικών, τόσο καθ' ύψος όσο και κατά πλάτος. Επί τόπου δοκιμές υδροπερατότητας (εισπίεσης και άντλησης) που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο γεωερευνητικών προγραμμάτων, έδωσαν εύρος διακύμανσης του συντελεστή διαπερατότητας από $0,5 \cdot 10^{-4}$ m/sec (σε αμμοχάλικα) ως 10^{-7} m/sec (σε αργιλο-αμμώδη υλικά) και 10^{-8} m/sec (για υλικά διάβρωσης του φλύσχη). Στο ανάντη άκρο του έργου και στην αριστερή πλευρά της κοίτης, εντοπίστηκε εκτεταμένη αργιλική στρώση, πάχους έως και 7 m, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως δανειοθάλαμος αδιαπέρατου υλικού και ως φυσικός τάπητας για τη στεγάνωση του ταμειυτήρα.

Η μορφολογία του υποκείμενου βραχώδους φλυσχικού υποβάθρου, προσδιορίστηκε, σε υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, με διάνοιξη σημαντικού αριθμού γεωτρήσεων και εκτέλεση εκτεταμένου προγράμματος σεισμικών διασκοπήσεων. Οι ισούψεις του βραχώδους υποβάθρου και η διάταξη του έργου δείχνονται στην Εικ. 2.

Από τη μορφολογία του βραχώδους υποβάθρου προκύπτει ότι πυθμένας της παλιάς κοιλάδας διαμορφώνεται στο υψ. -20, σε αριστερόστροφη καμπή (που επιβεβαιώνεται και από τις κλίσεις των εκατέρωθεν πρανών - απότομα πρανή στη δεξιά πλευρά και ήπια στην αριστερή) και ότι η παλαιά κοίτη είναι μετατοπισμένη κατά 250 m από τη σημερινή, προς την αριστερή όχθη.



Εικόνα 2: Ισοψείς βραχώδους υποβάθρου

Η πρόσφατη κοίτη του ποταμού Αράχθου στην περιοχή του ΑΕΠ διαμορφώθηκε με τις αμμοληπιές που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή του φράγματος Πουρναρίου τη δεκαετία του '70, με αποτέλεσμα στο ανάντη (βόρειο) άκρο του έργου η κοίτη να βρίσκεται περί το υψ. +45 και στο κατόντη (νότιο) άκρο περί το υψ. +31. Θεωρώντας τα υψόμετρα του βραχώδους υποβάθρου της Εικ. 2, προκύπτει ότι το πάχος των αλλουβιακών αποθέσεων στην περιοχή του ΑΕΠ φτάνει τα ~50 m και κατά θέσεις τα 60 m.

Στην περιοχή θεμελίωσης του πυρήνα του φράγματος Πουρναρίου, το βραχώδες υπόβαθρο βρέθηκε περί το υψ. +20. Από το στοιχείο αυτό προκύπτει ότι η παλαιά κοίτη του ποταμού στο βραχώδες υπόβαθρο, διαμορφώθηκε με σχετικά απότομη πτώση από το +20 στο -20, σε μήκος ~1km, ενώ τοπικά καταγράφεται απότομη πτώση 10 m. Κατά μήκος της σημερινής δεξιάς όχθης του ποταμού, όπου ο σχηματισμός του φλύσχη είναι ορατός στην παραλίμνια οδοποιία, δεν εντοπίζεται ψαμμιτική ζώνη μεγάλου πάχους που να δικαιολογεί την απότομη βύθιση της κοίτης του ποταμού. Κατά συνέπεια εκτιμάται ότι η τοπική αυτή διάβρωση οφείλεται ενδεχομένως σε προσωρινή έμφραξη της κοίτης του ποταμού από κατολίσθηση και στη δημιουργία 'τεχνητής' πτώσης νερού που διέβρωσε τοπικά την κοίτη.

3 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΡΓΟΥ

Η διαπίστωση του μεγάλου πάχους των αλλουβίων, σε συνδυασμό με την υψηλή κατά θέσεις διαπερατότητά τους και τελικά η εγγενής δυσκολία πλήρους στεγανοποίησής τους καθ' όλο το βάθος τους, επέβαλε ριζική τροποποίηση του αρχικού σχεδιασμού του έργου. Ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε άξονα φράγματος εγκάρσια στην κοίτη, με κατεύθυνση Α-Δ και σε κατάλληλη θέση κατά μήκος του ποταμού, ώστε αφενός να ελαχιστοποιείται το μήκος του φράγματος και αφετέρου να εξασφαλίζεται ο απαιτούμενος χώρος εκταμίευσης νερού για κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Η στεγανοποίηση της θεμελίωσης προβλεπόταν με κατακόρυφο

πλαστικό διαφραγματικό τοίχο. Η διάταξη αυτή δεν ήταν πλέον υλοποιήσιμη και διερευνήθηκαν εναλλακτικές διατάξεις.

Βασικοί στόχοι επανασχεδιασμού του έργου ήταν:

α) η στεγανοποίηση των αλλουβίων στη θεμελίωση του φράγματος με τοποθέτηση του στεγανοποιητικού στοιχείου (πλαστικός διαφραγματικός τοίχος) σε κατάλληλη θέση, όπου θα ήταν τεχνικά εφικτή η κατασκευή του, δηλαδή σε θέσεις όπου το βάθος των αλλουβίων θα ήταν μικρότερο των 25 m,

β) η ελαχιστοποίηση των προς απαλλοτρίωση και κατάληψη καλλιεργήσιμων εκτάσεων στην αριστερή όχθη του ποταμού, με στόχο να αποφευχθεί αφενός η κοινωνική αναταραχή από τις υποχρεωτικές απαλλοτριώσεις και αφετέρου η πρόσθετη οικονομική επιβάρυνση του έργου,

γ) η εξασφάλιση του απαραίτητου ωφέλιμου όγκου ταμιευτήρα.

δ) η κατασκευή των έργων εκτός κοίτης ποταμού, ώστε να αποφευχθούν τα έργα ελέγχου των νερών.

Ο τελικός σχεδιασμός του έργου κατέληξε σε διάταξη του φράγματος κατά μήκος της αριστερής όχθης του ποταμού, ώστε να εξασφαλίζεται η προβλεπόμενη χωρητικότητα και τοποθέτηση του διαφραγματικού τοίχου ανάντη του φράγματος και εκτός της ζώνης θεμελίωσης του αναχώματος, σε περιοχή όπου είχε καταγραφεί μικρότερο πάχος αλλουβιακών αποθέσεων. Η διάταξη του φράγματος και του διαφραγματικού τοίχου σε σχέση με τις ισοϋψείς του βραχώδους υποβάθρου δείχνονται στην Εικ. 2.

4 ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΕΡΓΟΥ

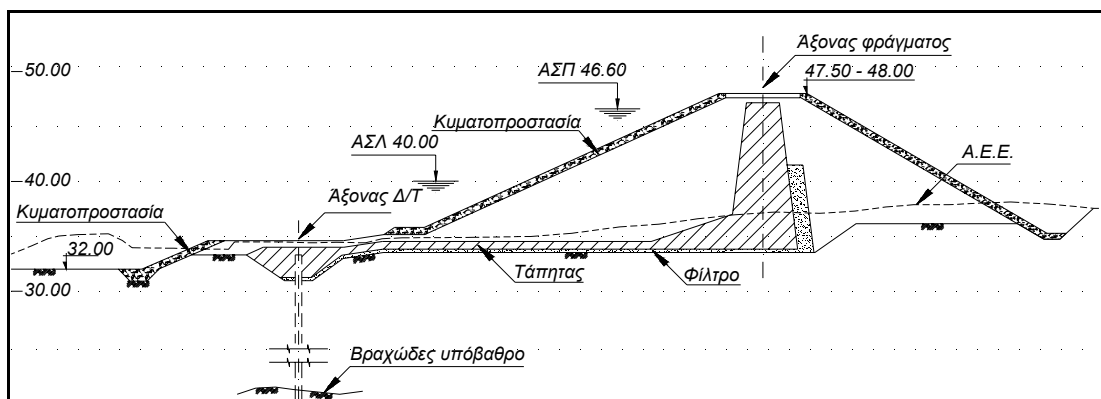
Λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία και τον κυρίως αναρρυθμιστικό χαρακτήρα του έργου, η ύπαρξη απωλειών νερού υπό τη μορφή περιορισμένων διαφυγών από τη θεμελίωση, θα μπορούσε να είναι αποδεκτή, εάν δεν έθετε σε κίνδυνο την ασφάλεια του φράγματος και δε δημιουργούσε προβλήματα στις κατάντη περιοχές, π.χ. ενδεχόμενη διασωλήνωση στα υλικά θεμελίωσης ή δυσμενείς επιπτώσεις στις κατάντη καλλιεργούμενες περιοχές, με άνοδο της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Κατά συνέπεια ο έλεγχος των διαρροών ήταν επιβεβλημένος όχι τόσο για ελαχιστοποίηση της ενδεχομένως διηθούμενης ποσότητας, όσο για εξασφάλιση της ασφάλειας και λειτουργικότητας του έργου. Για τον περιορισμό των διαφυγών αυτών σε αποδεκτά επίπεδα χρησιμοποιήθηκαν τριών ειδών στεγανωτικές διατάξεις και μεθοδολογίες.

Στη Ν περιοχή του Έργου (περιοχή έργων 3, 4 και 5 της Εικ. 1) όπου η θεμελίωση τους έγινε στο βραχώδες υπόβαθρο, κατασκευάστηκε πέτασμα τσιμεντενέσεων ώστε να μειωθεί η δευτερογενής κυρίως διαπερατότητα του φλυσχικού πετρώματος. Η εκτέλεση των τσιμεντενέσεων πραγματοποιήθηκε από την επιφάνεια θεμελίωσης των έργων.

Στο μεγαλύτερο τμήμα του φράγματος, από τον υπερχειλιστή (Χ.Θ. 0+552,30) μέχρι τη Χ.Θ. 2+072.77 (βλέπε Εικ. 2) κατασκευάστηκε κατακόρυφος διαφραγματικός τοίχος (Δ/Τ) από αυτοσκληρυνόμενο μίγμα τσιμέντου - μπετονίτη, πάχους 0.60 m και συνολικού μήκους 1516 m. Οριζοντιογραφικά, η θέση του Δ/Τ επιλέχθηκε να μην ταυτίζεται με τον άξονα του φράγματος αλλά να κατασκευαστεί ανάντη αυτού, όπου το βραχώδες υπόβαθρο βρίσκεται υψηλότερα, ώστε να μειωθεί το απαιτούμενο βάθος του. Η σύνδεση του πυρήνα του φράγματος με το στεγανωτικό διάφραγμα επιτεύχθηκε με την κατασκευή αργιλικού τάπητα, πάχους 0.7 m, όπως δείχνεται στην Εικ. 3.

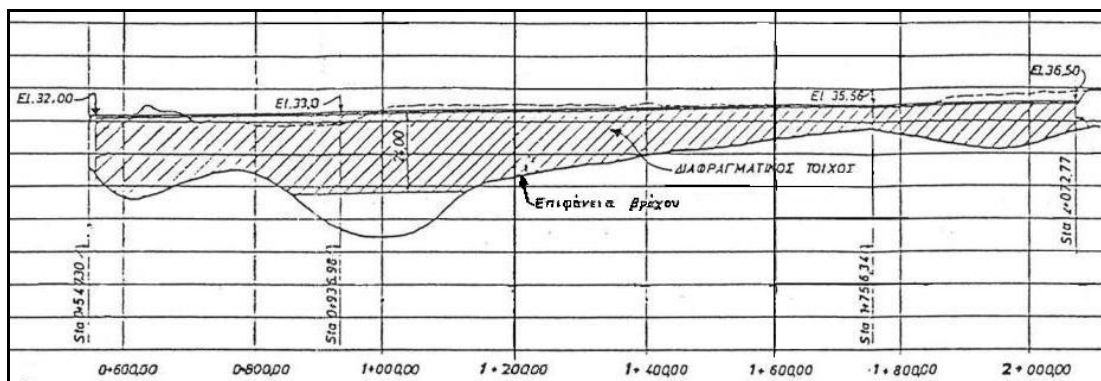
Η σύνδεση του τάπητα με τον πυρήνα του φράγματος διαμορφώθηκε με βαθμιαία αύξηση του πάχους του τάπητα, ώστε να δημιουργηθεί ευρύτερη ζώνη πλαστικά παραμορφώσιμου υλικού. Η σύνδεση του τάπητα με το διαφραγματικό τοίχο διαμορφώθηκε μέσα σε τραπεζοειδή τάφρο επενδεδυμένη με ζώνη φίλτρου και πληρωμένη με αργιλικό υλικό. Με αυτή τη διάταξη δημιουργήθηκε μία συνεχή στεγανή ζώνη αποτελούμενη από τον πυρήνα του φράγματος,

μεταβατικό τμήμα μεταξύ πυρήνα και τάπητα, αργιλικό παρα-οριζόντιο τάπητα, το έργο σύνδεσης τάπητα και διαφραγματικού τοίχου και τέλος τον πλαστικό διαφραγματικό τοίχο (βλ. Εικ. 3).



Εικόνα 3: Διατομή φράγματος στην περιοχή όπου έχει κατασκευαστεί διαφραγματικός τοίχος

Με βάση τεχνικο-οικονομικά κριτήρια της περιόδου εκείνης, το μέγιστο βάθος διάνοιξης του Δ/Τ επιλέχτηκε στα 24 m. Λόγω του βάθους του Δ/Τ που επιλέχτηκε και λόγω της μορφολογίας του βραχώδους υποβάθρου κατά μήκος του άξονα του Δ/Τ, υπήρχαν θέσεις όπου ο Δ/Τ δεν θα έφθανε μέχρι το βράχο. Στη τομή κατά μήκος του άξονα του Δ/Τ, που δείχνεται στην Εικ. 4, φαίνεται μεταξύ των Χ.Θ. 0+850 και Χ.Θ. 1+120 το μη στεγανοποιημένο τμήμα της θεμελίωσης

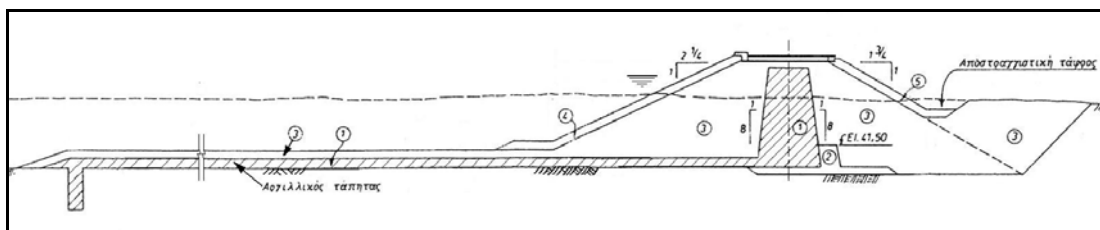


Εικόνα 4: Τομή κατά μήκος του διαφραγματικού τοίχου

Επί πλέον, κατά τη φάση κατασκευής προέκυψαν προβλήματα διάνοιξης του Δ/Τ μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο, λόγω αδυναμίας διάνοιξης των φατνωμάτων μέσα από ζώνες συγκολλημένων αμμοχαλικών (κροκαλοπαγή), σε τρεις θέσεις κατά μήκος του άξονα του Δ/Τ. Τελικά, σε ένα τμήμα συνολικού μήκους 360m (το ~24% του συνολικού μήκους), το διάφραγμα δεν έφτασε μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο.

Στο βόρειο τμήμα του φράγματος (πέρα από τη Χ.Θ. 2.000 - βλ. Εικ. 2) είχε εντοπιστεί, κατά τη φάση της μελέτης του έργου, εκτεταμένη (οριζοντιγραφικά και σε βάθος) ζώνη αργιλικών υλικών, υπερκείμενη των αμμοχαλικών της κοίτης. Ο σχεδιασμός του έργου προέβλεπε την αξιοποίηση της αργιλικής αυτής στρώσης τόσο ως στεγανό στοιχείο της θεμελίωσης του φράγματος (φυσικός αδιαπέρατος τάπητας) όσο και ως δανειοθάλαμος αδιαπέρατου υλικού για την κατασκευή των στεγανών τμημάτων του φράγματος (πυρήνα και τάπητα). Στο τμήμα αυτό του φράγματος, μήκους

~400 m, δεν κρίθηκε σκόπιμη η κατασκευή κατακόρυφου Δ/Τ, αλλά η διάστρωση τάπητα πάνω στις αργλικές αποθέσεις (μετά την εκσκαφή του απαιτούμενου υλικού σε βάθος ~5 m, για χρήση στο ανάχωμα του φράγματος). Τυπική διατομή του φράγματος δείχνεται στην Εικ. 5.



Εικόνα 5: Διατομή φράγματος στην περιοχή όπου έχει κατασκευαστεί μόνο αργλικός τάπητας

Στο ανάντη άκρο του, ο αργλικός τάπητας καταλήγει σε χαλινό βάθους ~2 m. Μεταξύ του τάπητα και της αργλικής στρώσης θεμελίωσης δεν διαστρώθηκε ζώνη φίλτρου.

5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ

Προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα των στεγανωτικών διατάξεων της θεμελίωσης του φράγματος και να παρακολουθείται η διακύμανση της στάθμης νερού στις κατάντη περιοχές, έχει εγκατασταθεί σύστημα πιεζομετρικών οργάνων. Πρόκειται για 36 πιεζομετρικά φρέατα παρακολούθησης στάθμης και 15 πιεζόμετρα αερίου τοποθετημένα στη θεμελίωση του φράγματος. Κατά την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα η καταγραφή των πιεζομέτρων ήταν συχνή, αλλά με την πάροδο του χρόνου η συχνότητα των μετρήσεων μειώθηκε. Οι μετρήσεις των πιεζομέτρων και η αξιολόγηση των μετρήσεων γίνεται από ειδική υπηρεσία της ΔΕΗ.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΓΑΝΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΤΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

6.1 Γενικές παρατηρήσεις

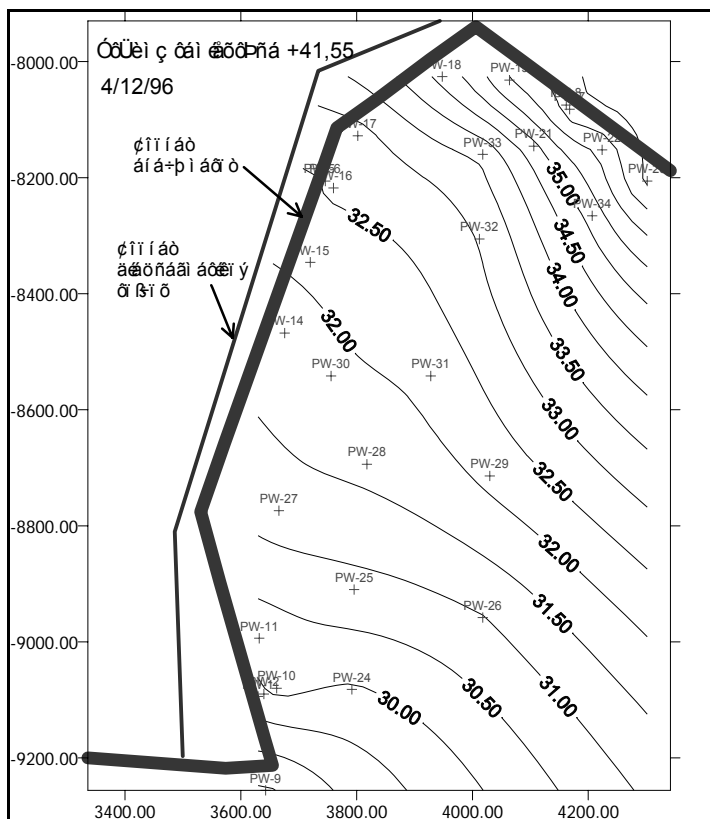
Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των στεγανωτικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο ως προς τη συνεισφορά τους στην ασφάλεια και τη λειτουργικότητά του επιχειρήθηκε με διάφορες μεθόδους {1}. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν στοιχεία από τα γεωερευνητικά προγράμματα και τις δοκιμές που εκτελέστηκαν από τη ΔΕΗ κατά τις φάσεις μελέτης και κατασκευής του έργου {2}, μετρήσεις των εγκατεστημένων οργάνων {3} καθώς και στοιχεία που προκύπτουν από τη διαχείριση των ταμιευτήρων Πουρναρίου και Πουρναρίου II από τη ΔΕΗ. Επίσης λήφθηκαν υπόψη τα στοιχεία καταγραφών και αξιολόγησης των οργάνων {4} καθώς και οι διαφοροποιήσεις από τον αρχικό σχεδιασμό του έργου που προέκυψαν κατά τη φάση κατασκευής.

Σύμφωνα με τις καταγραφές των πιεζομέτρων, η πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα συνοδεύτηκε από άνοδο της στάθμης του υδροφορέα κατάντη του φράγματος (περιοχή καλλιεργήσιμων εκτάσεων) από 4 έως 7 m. Η μέγιστη άνοδος στάθμης, της τάξης των 11 m, παρατηρήθηκε κοντά στο βορειοανατολικό τμήμα του αναχώματος, στην περιοχή που δεν έχει κατασκευαστεί διαφραγματικός τοίχος παρά μόνο αργλικός τάπητας. Παρά την ανύψωση, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα παρέμεινε αρκετά μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και δεν έθεσε σε κίνδυνο τις υπάρχουσες καλλιέργειες, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα των στεγανωτικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν.

6.2 Μορφή πιεζομετρικών καμπυλών

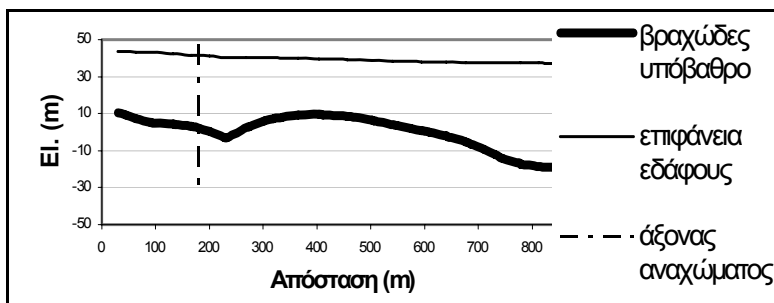
Η επίδραση των έργων στεγάνωσης της θεμελίωσης του ΑΕΠ είναι κατ' αρχάς εμφανής στη διαμόρφωση της πιεζομετρίας στην περιοχή κατάντη του φράγματος. Με βάση τα στοιχεία των

μετρήσεων των πιεζομέτρων, σχεδιάσθηκαν, πιεζομετρικοί χάρτες για διάφορες στάθμες ταμειυτήρα. Στην Εικ. 6 δείχνεται ο πιεζομετρικός χάρτης της 4/12/96, όπως διαμορφώθηκε αμέσως μετά την ολοκλήρωση της πρώτης πλήρωσης του ταμειυτήρα, όταν η στάθμη νερού έφθασε στο υψ. +41,55. Η διεύθυνση της υπόγειας ροής (κάθετη στις ισοπιεζομετρικές γραμμές) είναι από βορρά προς νότο, με στάθμη ελεύθερης επιφάνειας στο βόρειο άκρο στο υψ. +36 και στο νότιο άκρο στο υψ. +29, διαμορφώνοντας μέση κλίση 0,6 %.



Εικόνα 6: Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής κατάντη του φράγματος μετά την πρώτη πλήρωση του ταμειυτήρα. Σημειώνονται οι θέσεις των πιεζομέτρων των οποίων οι μετρήσεις λήφθηκαν υπόψη.

Είναι εμφανές ότι η τροφοδοσία του υπόγειου ορίζοντα γίνεται από την περιοχή που δεν έχει κατασκευαστεί διαφραγματικός τοίχος στη θεμελίωση, παρά μόνο αργιλικός τάπητας. Αντίθετα, οι ισοπιεζομετρικές γραμμές εμφανίζονται κάθετες στο μεγαλύτερο τμήμα του Δ/Τ, υποδεικνύοντας ότι οι όποιες διαφυγές κάτω από αυτό δεν είναι τόσο σημαντικές ώστε να επηρεάσουν εμφανώς τη διεύθυνση των πιεζομετρικών καμπυλών. Σημειώνεται ότι παρόμοια μορφή ισοπιεζομετρικών καμπυλών (και συνεπαγόμενη διεύθυνση της υπόγειας ροής) εμφανίζεται για όλες τις στάθμες του ταμειυτήρα. Επίσης, σε όλους τους πιεζομετρικούς χάρτες, συμπεριλαμβανομένου και αυτού της Εικ. 6, παρουσιάζεται μια έντονη μεταβολή της πυκνότητας (αραιώση) των ισοπιεζομετρικών γραμμών 200m περίπου κατάντη του βόρειου τμήματος του αναχώματος, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε σε μεταβολή της εδαφικής σύστασης και διαπερατότητας του υδροφορέα (από αργιλικές αποθέσεις στα ανάντη σε διαπερατές ποτάμιες αποθέσεις στα κατάντη) είτε στην επίδραση της ταπεινώσης του βραχώδους υποβάθρου στην περιοχή (αύξηση εμβαδού διατομής της ροής) όπως φαίνεται στην Εικ. 7.

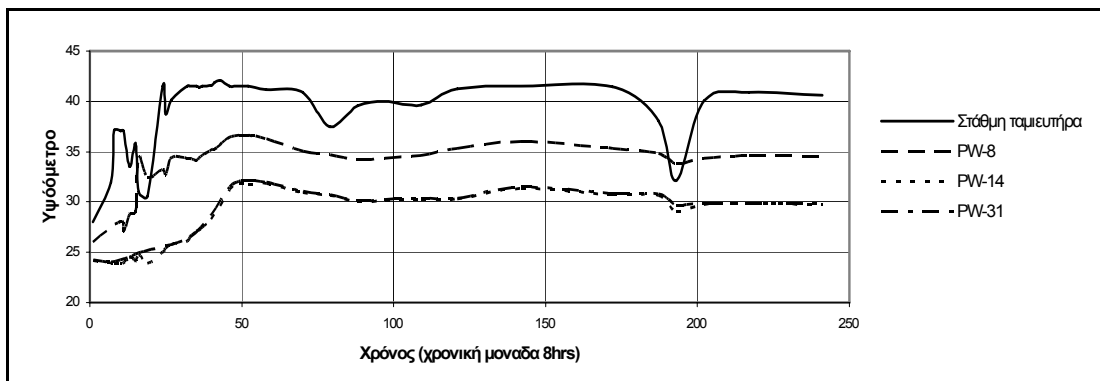


Εικόνα 7: Τομή κάθετη στη διεύθυνση της υπόγειας ροής. Σε απόσταση περίπου 200m από τη θέση του άξονα του αναχώματος (η οποία ταυτίζεται με τη θέση όπου ξεκινάει η βύθιση του υποβάθρου) παρατηρείται αραίωση των ισοπιεζομετρικών καμπυλών.

Στην περιοχή όπου ο Δ/Τ δεν έφθασε μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο (μεταξύ της Χ.Θ. ~+850 και ~+1+100), δεν παρατηρείται εμφανής αλλαγή της πυκνότητας ή της διεύθυνσης των ισοπιεζομετρικών καμπυλών, υποδηλώνοντας ότι οι διαρροές κάτω από τον Δ/Τ είναι σχετικά περιορισμένες.

6.3 Συσχέτιση στάθμης ταμιευτήρα με στάθμη πιεζομέτρων

Ιδιαίτερης σημασίας για την αξιολόγηση των στεγανωτικών έργων της θεμελίωσης είναι η παρακολούθηση των μεταβολών της πιεζομετρίας κατά τη φάση της πρώτης πλήρωσης του ταμιευτήρα (από 18/11/96 ως 1/12/96) και το πρώτο διάστημα κανονικής λειτουργίας του έργου (μέχρι 5/2/97), η οποία είναι δυνατή χάρη στη συχνότατη λήψη μετρήσεων κατά τη φάση αυτή (μέχρι και τρεις φορές ημερησίως). Ενδεικτική απόκριση των πιεζομέτρων στη διακύμανση της στάθμης του ταμιευτήρα δείχνεται στην Εικ. 8, με την παρουσίαση της χρονικής εξέλιξης (σε μονάδες οκταώρου) της στάθμης των πιεζομέτρων Pw-8, Pw-14 και Pw-31 και της στάθμης του ταμιευτήρα.



Εικόνα 8: Διάγραμμα χρονική μεταβολής στάθμης πιεζομέτρων Pw-8, Pw-14 και Pw-31 και του ταμιευτήρα. Ως χρονική μονάδα λαμβάνεται η περίοδος των 8 ωρών.

Οι θέσεις των τριών πιεζομέτρων φαίνονται στην Εικ. 6 και επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν ευρεία περιοχή κατάντη του φράγματος. Η απόκριση των πιεζομέτρων στις μεταβολές της στάθμης του ταμιευτήρα υποδηλώνει την ύπαρξη υδραυλικής επικοινωνίας, με χρονική υστέρηση. Σημειώνεται ότι τα πιεζόμετρα δεν επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο ή την ίδια ένταση από τις διακυμάνσεις του ταμιευτήρα.

Όσον αφορά στη συσχέτιση της χρονοϊστορίας των πιεζομέτρων με αυτή του ταμιευτήρα θα πρέπει να σημειωθούν τα εξής:

- Οι διακυμάνσεις της στάθμης του ταμιευτήρα είναι έντονες σε συχνότητα και εύρος, καθημερινά, λόγω της λειτουργίας των υδροηλεκτρικών μονάδων των σταθμών Πουρναρίου και Πουρναρίου II. Μεταβολές της στάθμης εξελίσσονται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να καταγραφούν ή να αξιολογηθούν, λόγω της χρονικής υστέρησης που έχει παρατηρηθεί. Κατά συνέπεια αξιόπιστα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν μόνο όταν η στάθμη του ταμιευτήρα διατηρείται σταθερή για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να σταθεροποιηθεί η στάθμη στα πιεζόμετρα.
- Η συσχέτιση της στάθμης του ταμιευτήρα με τη στάθμη των πιεζομέτρων δεν είναι πάντα εφικτή καθώς οι μετρήσεις των πιεζομέτρων επηρεάζονται σημαντικά από τις βροχοπτώσεις.

7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Για τον υπολογισμό των συνολικών υπόγειων διαφυγών από τη θεμελίωση του φράγματος, εφαρμόστηκε η μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή διατήρησης της υδατικής μάζας (όγκου) που εισρέει, εκρέει ή αποταμιεύεται στον ταμιευτήρα ενός φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη τις επιφανειακές και υπόγειες εισροές και εκροές, την εξάτμιση, και τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις.

Στην περίπτωση του ΑΕΠ, η μέθοδος αυτή είναι σχετικά εύκολο να εφαρμοσθεί καθώς τα περισσότερα από τα μεγέθη που συμμετέχουν στο υδατικό ισοζύγιο είναι ελεγχόμενα και γνωστά. Οι εισροές και εκροές στον ταμιευτήρα καθορίζονται από τη λειτουργία των δύο υδροηλεκτρικών σταθμών. Η καταγραφή της στάθμης του ταμιευτήρα είναι συνεχής και επομένως είναι δυνατός ο υπολογισμός της μεταβολής του όγκου του αποθηκευμένου νερού μέσω της καμπύλης στάθμης-χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Επί πλέον απαιτείται εκτίμηση του όγκου του νερού που εξατμίζεται από τον ταμιευτήρα, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί με τη σχέση Penman {5} συναρτήσεως των κλιματικών συνθηκών στην περιοχή (θερμοκρασία, υγρασία, κλπ) και της επιφάνειας του ταμιευτήρα.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου για ένα συγκεκριμένο πραγματικό εικοσιτετράωρο, προέκυψε ότι η μέση παροχή των υπογείων διαφυγών από τον ταμιευτήρα του ΑΕΠ είναι της τάξης του $0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$.

8 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΑΠΗΤΑ

Οι διαφυγές από το βόρειο τμήμα του φράγματος, απ' όπου γίνεται κυρίως η τροφοδοσία του κατάντη υδροφορέα, εκτιμήθηκαν με τη βοήθεια αριθμητικών προσομοιωμάτων με το λογισμικό SEEP/W της GEOSLOPE. Προσομοιώθηκε η διήθηση νερού κάτω από τον αργιλικό τάπητα, μέσα από τις αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες στην περιοχή αυτή είχαν σχετικά εμφανή διαστρωμάτωση λεπτόκοκκων υλικών και αμμοχαλικών. Απλουστευτικά θεωρήθηκε ότι οι ζώνες αυτές είναι οριζόντιες και πλήρως διαχωρισμένες μεταξύ τους. Στα γεωυλικά αυτά αποδόθηκαν συντελεστές διαπερατότητας που προέκυψαν τόσο από επιτόπου δοκιμές σε γεωτρήσεις, όσο και από αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού της διαπερατότητας που στηρίζονται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μεταβολή της στάθμης του υδροφορέα {6}. Ειδικά για τη ζώνη των αμμοχαλικών, θεωρήθηκε ότι εμφανίζουν ορθοτροπική διαπερατότητα με λόγο διαπερατοτήτων (οριζόντιας προς κατακόρυφη) μεταξύ 10 και 100.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, οι διαφυγές από την περιοχή του αργιλικού τάπητα και για την ανώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα εκτιμήθηκαν σε $0.3 \text{ m}^3/\text{sec}$.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Ο σχεδιασμός των στεγανωτικών διατάξεων της θεμελίωσης του Φράγματος του ΑΕΠ είναι επαρκής για την ασφάλεια του φράγματος και την προστασία των κατάντη καλλιεργημένων περιοχών.
- Διαφυγές νερού παρατηρούνται κυρίως μέσα από τη θεμελίωση του βόρειου τμήματος του αναχώματος, στο οποίο δεν έχει κατασκευαστεί διαφραγματικός τοίχος παρά μόνο αργιλικός τάπητας.
- Στο υπόλοιπο τμήμα του φράγματος, υπάρχουν ενδείξεις ότι οι διαφυγές από τη θεμελίωσή του είναι περιορισμένες, χωρίς να μπορεί να αποκλειστεί η ύπαρξη μικρών διαφυγών από την περιοχή όπου ο διαφραγματικός τοίχος δεν έχει επεκταθεί μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο.
- Από το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα προκύπτουν συνολικές διαφυγές της τάξης του 0.5 m³/sec. Οι διαφυγές αυτές οφείλονται σε διήθηση μέσω της θεμελίωσης του φράγματος και των έργων υπερχειλίσης και σταθμού παραγωγής, καθώς και λόγω διήθησης από τον πυθμένα του ταμιευτήρα.
- Οι διαφυγές από το τμήμα στεγανοποίησης με αργιλικό τάπητα εκτιμώνται σε 0.3 m³/sec, δηλαδή σε ποσοστό 60% των συνολικών διαφυγών από τον ταμιευτήρα.

10 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Παπαχατζάκη, Ζ.Ρ.2003, Διηθήσεις από το σώμα και τη θεμελίωση γεωφραγμάτων: η περίπτωση του Αναρρυθμιστικού Έργου Αράχθου, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολ. Μηχ. ΕΜΠ.
2. Δ.Α.Υ.Ε., 1985, Τεχνική έκθεση 2^{ου} προγράμματος γεωερευνητικών εργασιών για το Αναρρυθμιστικό Πουρναρίου
3. ΔΑΥΕ, 1992, Τεύχος σχεδίων «Αναρρυθμιστικό Έργο Αράχθου και ΥΗΣ Πουρναρί ΙΙ», Σύμβαση PRD-2S
4. ΚΕΨΕ Κ.Αράχθου, 2002, Τεχνική Έκθεση Γεωτεχνικών Οργάνων για το Αναρρυθμιστικό Έργο Αράχθου και ΥΗΣ Πουρναρί ΙΙ
5. Κουτσογιάνης, Δ. Ξανθόπουλος, Θ. 1999, Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα, Εκδόσεις ΕΜΠ
6. Cedegren, H.P., 1977, Seepage, Drainage & Flow Nets, John Willey & Sons

Foundation water tightness of Pournari re-regulating project

N. I. Moutafis

Civil Eng., B.Sc., M.Sc., Ph.D. Lecturer NTUA

Z. R. Papachatzaki

Civil Eng. NTUA, MSc

Keywords: dam, plastic diaphragm wall, impermeable blanket, piezometers

SUMMARY: The foundation water tightness of Pournari Re-regulating Project on alluvial deposits, is a combination of various arrangements and water tightening elements, consisting of a grout curtain, a cement-bentonite diaphragm wall and an impermeable blanket, attuned to the morphology of the underlying bedrock, that formed the old riverbed. The main design considerations are presented and the effectiveness of the water tightening elements and methods applied is assessed, based on data obtained from long-term monitoring of the dam.