

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΥΠΕ ΠΗΓΩΝ ΑΩΟΥ

Κ. Καραπαντελάκης*

Σ Υ Ν Ο Ψ Η

Η πολύπλοκη γεωλογική δομή της περιοχής στην οποία κατασκευάστηκε το Υδροηλεκτρικό Έργο Πηγών Αώου, σε συνδυασμό και με το πλήθος και το μέγεθος των κατασκευών, είχαν σαν συνέπεια την ποικιλότητα των γεωτεχνικών προβλημάτων που αντιμετώπισε η κατασκευή. Ο έντονος τεκτονισμός και η εξαλλοίωση των επωημένων οφιολίθων, προκάλεσαν σημαντικά προβλήματα ευστάθειας στην εκσκαφή της σήραγγας Εκτροπής καθώς και στο σχεδιασμό του Κύριου φράγματος και την προετοιμασία της τελικής επιφάνειας θεμελίωσής του. Στη θεμελίωση των αυχενικών φραγμάτων, στον Πινδικό φλύσχη, υπήρχαν δυσκολίες στην προετοιμασία τελικής επιφάνειας θεμελίωσης λόγω έντονου τεκτονισμού και επιλεκτικής βαθιάς αποσάθρωσης. Στη σήραγγα προσαγωγής (πινδικός φλύσχος), το υπόγειο νερό, η αποστράγγιση της ζώνης διέλευσης, οι μεγάλες απορροφήσεις τσιμέντου στις τσιμεντέσεις σταθεροποίησης, και η στεγανοποίηση της τελικής επένδυσης ήταν τα κυριότερα προβλήματα.

A B S T R A C T

The complicated geological structure of the area, where the Piges Aeos Hydroelectric Project was constructed, in conjunction with the great number and the size of the structures, resulted in various geotechnical problems faced by the construction. The very fractured and weathered ophiolite, caused serious stability problems of the diversion tunnel driving, as well as the design and foundation of main dam. In the foundation of the saddle dams (Pindus Flysch) the main problem was the difficulty to form the foundation plain. In the power tunnel (Pindus Flysch), the underground water and the great grout absorption in the injections were the major problems.

* "Geotechnical problems in the underground excavations and the dam foundations in the Hydroelectric project Piges Aeos".

* Κ. ΚΑΡΑΠΑΝΤΕΛΑΚΗΣ, Γεωλόγος, Δ Ε Η
ΔΕΗ / ΚΕΦΕ Π-Α, 44 200-ΜΕΤΣΟΒΟ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια να παρουσιασθούν τα γεωτεχνικά προβλήματα που αντιμετώπισαν οι διάφορες κατασκευές του ΥΠΕ Πηγών Αώου και η εμπειρία που αποκομίσθηκε από την αντιμετώπισή τους. Με την έννοια αυτή είναι συνέχεια μιας ανάλογης εισήγησης που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο (4ο) συνέδριο της Ε.Γ.Ε. και αφορούσε τα προβλήματα στεγανότητας και στεγανοποίησης του ίδιου έργου.

Πριν από την αναφορά στα συγκεκριμένα προβλήματα, που θα παρουσιασθούν ταξινομημένα κατά γεωλογικό σχηματισμό και κατά έργο, θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή του ΥΠΕ και της γεωλογίας της περιοχής. Τα στοιχεία αυτά αναφέρθηκαν και στην εισήγηση στο 4ο συνέδριο, κρίνεται όμως αναγκαίο να επαναληφθούν για τους αναγνώστες που δεν τα έχουν υπόψη τους.

Η μοναδική κατασκευή του έργου σε Ιόνιο φλύσχη είναι η σήραγγα φυγής. Η διάνοιξη της αντιμετώπισε πολύ σοβαρά προβλήματα ευστάθειας, που όμως δεν θα εξετασθούν εδώ γιατί υπάρχουν ακόμη συμβατικές εκκρεμότητες.

2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΠΕ ΠΗΓΩΝ ΑΩΟΥ

Το έργο κατασκευάζεται κοντά στις πηγές του ομώνυμου ποταμού, (15) χιλιόμετρα ΒΔ του Ιερισσού και περιλαμβάνει:

- Επτά (7) φράγματα. Ένα (1) κύριο ύψος 30m και έξι (6) αυχεντικά ύψους 20-40m.
- Εννέα (9) σήραγγες, συνολικού μήκους 10 Km με διατομές από έξι (6) έως (45) m².
- Τρία κατακόρυφα φρεάτια συνολικού βάθους 600m διατομές από 13 έως 64 m².
- Υπόγειο συγκρότημα παραγωγής: Σταθμός Παραγωγής όγκου 35.000 m³, θάλαμος μετασχηματιστών όγκου 5.000 m³, δύο θάλαμοι βαλβίδων όγκου 1.500 και 2.000 m³.

Η τεχνητή λίμνη έχει επιφάνεια 11,5 Km² και χωρητικότητα 260 εκατομ. m³. Η ανώτατη στάθμη είναι σε υψόμετρο 1343 m και η υδατόπτωση 680 m. Η εγκατεστημένη ισχύς είναι 210 MW (δύο μονάδες των 105 MW).

3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Η επώθηση των οφιολίθων πάνω στον πινδικό φλύσχη και του πινδικού φλύσχη πάνω στον Ιόνιο, είναι το κυρίαρχο γεωλογικό στοιχείο της περιοχής.

Το αλλόχθονο (επωθημένο) σύστημα καταλαμβάνει ολόκληρη σχεδόν την έκταση του έργου και αποτελείται από αλληπάλληλα λέπια πινδικού φλύσχη και οφιολίθους. Ο αυτόχθονος φλύσχος εμφανίζεται μόνο στα τελευταία δυο χιλιόμετρα της σήραγγας φυγής (σχ. 1).

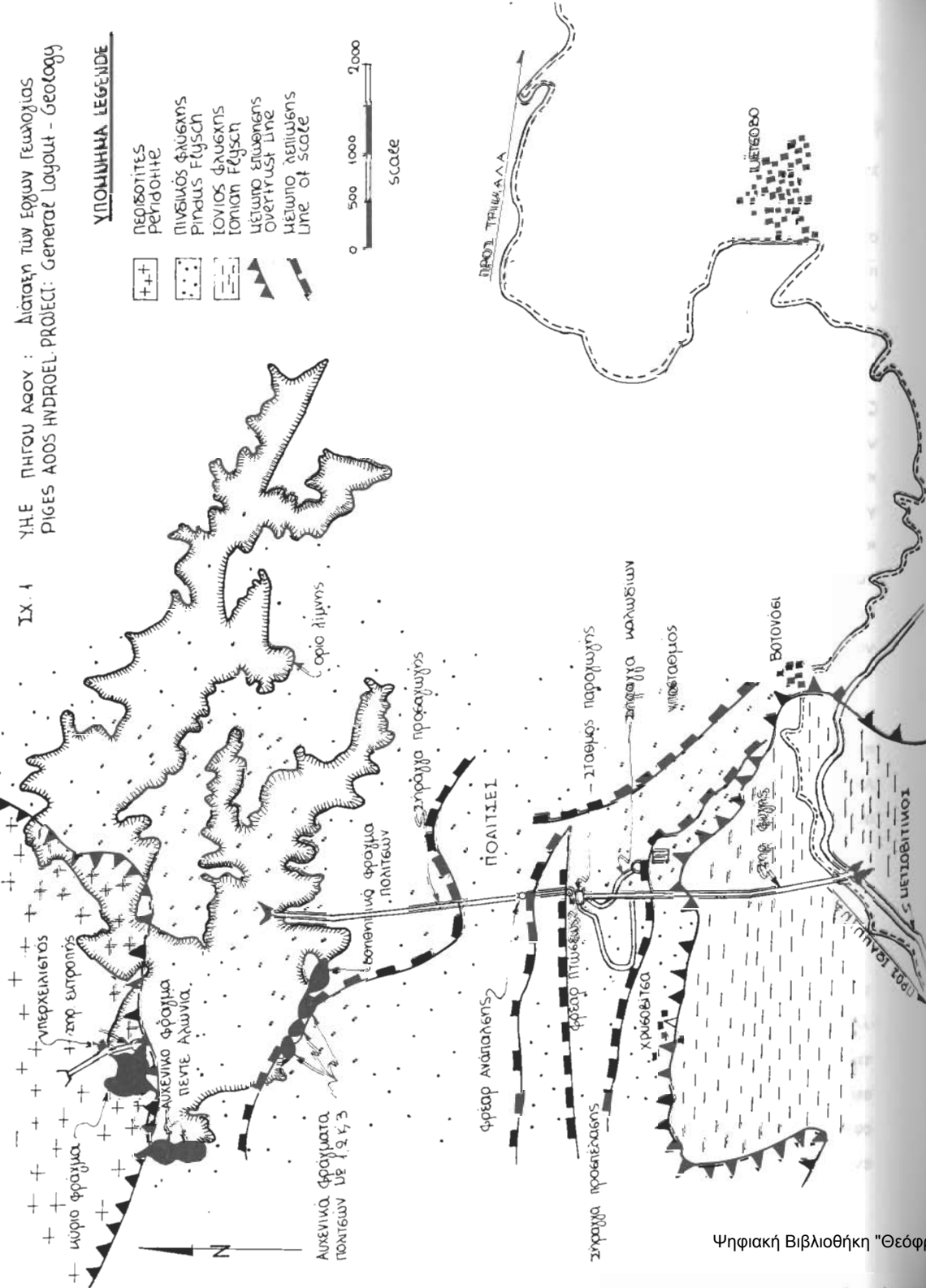
Η λιθοστρωματογραφική σειρά του πινδικού φλύσχη αρχίζει με μια ζώνη ερυθροπηλιτών πάχους 20-40 . Ακολουθεί μια ζώνη εναλλαγών φαμμιτικών και ιλυολιθικών στρωμάτων, πάχους 30-50 , και στη συνέχεια η ζώνη των παχυστωματωδών φαμμιτών με πάχος μεγαλύτερο από 200 . Η σειρά επαναλαμβάνεται σε όλα τα λέπια με κυμαινόμενο πάχος της ανώτερης και της κατώτερης ζώνης. Στη ζώνη των ερυθροπηλιτών που είναι το πιο πλαστικό υλικό της σειράς, εξελήχθησαν οι επωθητικές κινήσεις. Γι' αυτό οι ερυθροπηλιτίτες είναι σχεδόν πάντα έντονα τεκτονισμένοι και διατετηγμένοι.

Ο οφιολιθικός όγκος αποτελείται από μέτρια έως έντονα σερπεντινιωμένους περιδοτίτες. Κοντά στο μέτωπο της επώθησης ο περιδοτίτης είναι έντονα τεκτονισμένος ως μυλωνιτοποιημένος . Ακόμη πιο έντονα τεκτονισμένος είναι και ο φλύσχος κατά μήκος αυτού του μετώπου.

Στον Ιόνιο φλύσχη της περιοχής του έργου επικρατεί η πηλιτική φάση, ενώ συχνά συναντώνται και χαλαρά κροκαλοπαγή με φακοειδή ανάπτυξη και σημαντικές διαστάσεις.

4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΤΟΥΣ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥΣ

Το κύριο φράγμα και η σήραγγα εκτροπής είναι τα κυριότερα έργα που έγιναν στην περιοχή των οφιολίθων. Στα προβλήματα αυτών των έργων θα γίνει εδώ αναφορά. Οι άλλες κατασκευές στους οφιολίθους (σήραγγα Εκχειλιστή, σήραγγες αποστραγγιστικές κ.λ.π.) αντιμετώπισαν ανάλογα προβλήματα μικρότερης όμως έκτασης, γιατί



και οι διαστάσεις τους ήταν μικρότερες.

4.1. ΚΥΡΙΟ ΦΡΑΓΜΑ

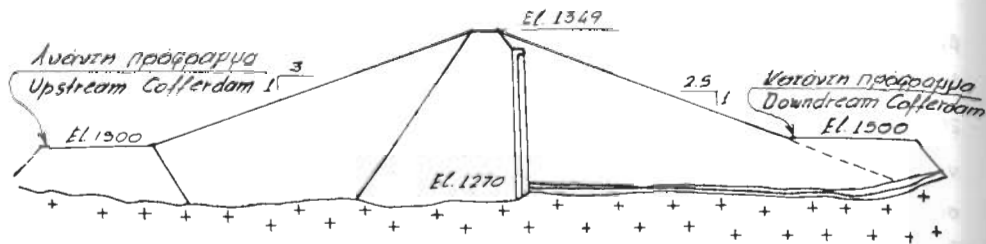
Θεμελιώθηκε σε σερπεντινιωμένους περιδοτίτες. Η θέση του βρίσκεται κοντά στο μέτωπο επώθησης των οφιολίθων πάνω στον πινδικό φλύσχη. Στο αριστερό αντέρεισμα και την κοιτή, που απέχουν 200-400 από το μέτωπο επώθησης, το πέτρωμα είναι έντονα τεκτονισμένο έως μυλωνιτοποιημένο. Ανάλογα υψηλός είναι και ο βαθμός σερπεντινίωσης. Στο δεξιό αντέρεισμα που απέχει περισσότερο από το μέτωπο επώθησης, ο βαθμός τεκτονισμού και σερπεντινίωσης είναι σαφώς ασθενέστεροι.

Η ελαττωμένη διατμητική αποχή του πετρώματος στην κοιτή και το αριστερό αντέρεισμα, ανάγκασαν τον μελετητή να τοποθετήσει προφράγματα στο ανάντη και το κατάντη ποδαρικό του φραγματος. Τα προφράγματα λειτουργούν σαν αντίβαρο και μειώνουν τις διατμητικές τάσεις που μεταβιβάζονται τελικά από το επίχωμα στο πέτρωμα, βελτιώνοντας έτσι την ευστάθεια της θεμελίωσης (σχ.2)

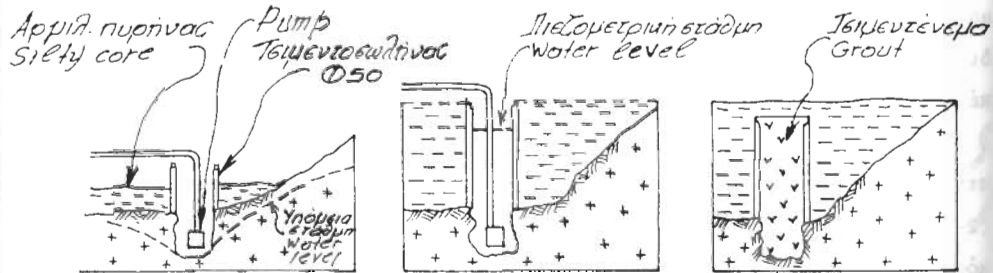
Οι εκσκαφές του θεμελίου του φράγματος περιορίστηκαν στη ζώνη αποσάθρωσης και έντονης χαλάρωσης του πετρώματος (2-4μ από την επιφάνεια). Επιλεκτικά σε ένα σύστημα παρακατακόρυφων ασυνχειών, με παράταξη παράλληλη προς την κοιτή, οι ενδείξεις έντονης χαλάρωσης προχωρούσαν βαθύτερα. Η χαλάρωση αυτή είναι αποτέλεσμα της εκτόνωσης του πετρώματος, προς την πλευρά της κοιτής, με την δράση της βαρύτητας. Λόγω δε και του προσανατολισμού τους οι ασυνέχειες αυτές αποτελούν επικίνδυνους δυνητικούς δρόμους μελλοντικών διαρροών.

Για τους λόγους αυτούς οι εκσκαφές στη ζώνη θεμελίωσης του πυρήνα προχώρησαν πολύ βαθύτερα (7-12 από την επιφάνεια).

Σημαντικό πρόβλημα της κατασκευής ήταν η προετοιμασία της τελικής επιφάνειας θεμελίωσης του φράγματος. Η επιφάνεια θεμελίωσης πρέπει να είναι τελείως καθαρή και αδιάταρακτη. Μια τέτοια επιφάνεια όμως, στο έντονα τεκτονισμένο πέτρωμα του αριστερού αντερείσματος και της κοιτής δεν ήταν



Σχ. 2. Κύριο φράγμα. Τυπική τομή μάδετα στον άξονα
Main Dam. Typical section



Σχ. 3. Κύριο φράγμα: Τσιπείνωση της στάθμης με άντληση και στη συνέχεια θεμελίωση του αργιλλώδους πυρήνα.
 α. Αντληση και θεμελίωση.
 β. Συνέχιση της άντλησης μέχρις ότου το επιχώμα ξεπεράσει το ύψος της πιεζομετρικής στάθμης.
 γ. Πλήρωση του φρέατος με τσιμεντένεμα, συνέχιση του επιχώματος.
 Main Dam: Lowering the water level by pumping and foundation of silty core
 a. Pumping and foundation
 b. Continuation of pumping until the backfill elevation is higher than the piezometric level.
 c. Filling the bit with grout continuation of backfill.

πρακτικά δυνατό να προετοιμασθεί. Η τελική επιφάνεια θεμελίωσης επομένως ήταν αναπόφευκτα σε σημαντικό βαθμό διαταραγμένη. Σε αντιστάθμισμα αυτού του γεγονότος, για να εξασφαλισθεί η στεγανότητα της επαφής βράχου-επιχώματος, επιλέχθηκε για την πρώτη στρώση του επιχώματος μια πιο καθαρή, πιο πλαστική και πιο υγρή άργιλος (2-3% πάνω από τη βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης), ώστε η πρόσφυσή της με το πέτρωμα να είναι καλύτερη.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετώπισε η θεμελίωση του κυρίου φράγματος ήταν το υπόγειο νερό. Εκδηλώσεις υπόγειας υδροφορίας συναντήθηκαν κατά μήκος της επαφής του μωλυνιτοποιημένου στεγανού πετρώματος της κοίτης, με το λιγότερο τεκτονισμένο αλλά πιο υδροπερατό πέτρωμα του δεξιού αντερίσματος.

Δύο είναι τα προβλήματα που προκαλεί η έξοδος υπόγειου νερού στη θεμελίωση αργιλικού επιχώματος. Αυξάνει τοπικά την υγρασία του υλικού του επιχώματος και παρεμποδίζει σημαντικά την συμπίκνυσή του. Το κυριότερο όμως πρόβλημα είναι η άνωση που ασκεί στο κατασκευαζόμενο επίχωμα. Η άνωση είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η πιεζομετρία του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Όσο η άνωση είναι μεγαλύτερη από το υπερκείμενο βάρος του κατασκευαζόμενου επιχώματος, προκαλεί ανύψωση και αποκόλληση της θεμελίωσης και δημιουργεί διασωληνώσεις που μπορεί να αποτελέσουν επικίνδυνους δρόμους διαρροών από τη μελλοντική λίμνη.

Η υδροφορία που συναντήθηκε εδώ δεν ήταν ποσοτικά σημαντική, ήταν όμως διεσπαρμένη. Οι προσπάθειες υδρομάστευσης και απαγωγής του νερού έξω από τον χώρο της θεμελίωσης απέτυχαν επειδή οι πηγές μετατοπιζόταν.

Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με προσωρινή ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, με άντληση. Για τον σκοπό αυτό έγιναν μια σειρά από αβαθή φρέατα κατά μήκος της γραμμής εκδήλωσης της υδροφορίας.

Η άντληση στα φρέατα ήταν συνεχής, για πολλά 24ωρα,

έως ότου το ύψος του κατασκευαζόμενου επιχώματος ξεπέρασε την πιεζομετρική στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Στο σχήμα (3) φαίνεται παραστατικά η όλη κατασκευή.

4.2. ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

Έχει μήκος 6 50m και διατομή 19m² περίπου. Σε όλο το μήκος της διανοίχθηκε σε περιδοτίτες. Η είσοδός της απέχει από το μέτωπο επώθησης 250m περίπου. Στα πρώτα 300m το πέτρωμα ήταν έντονα τεκτονισμένο και σερπεντινιωμένο, στο υπόλοιπο τμήμα τόσο ο τεκτονισμός όσο και ο βαθμός σερπεντινίωσης ήταν σαφώς μικρότερος. Η διάνοιξη της σήραγγας αντιμετώπισε σοβαρά προβλήματα ευστάθειας στα πρώτα 300m, που συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- α. Το ανυποστήριχτο μήκος εκσκαφής, για ολομέτωπη προχώρηση ήταν πολύ μικρό, δεν ξεπερνούσε τα 0,5m.
- β. Ο χρόνος ευστάθειας για ανυποστήρικτη ολομέτωπη εκσκαφή μήκους 0,5m ήταν επίσης μικρός κυμαίνονταν από λίγα λεπτά έως μερικές ώρες.
- γ. Για λόγους ευστάθειας δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοσθεί η κλασική μέθοδος εκσκαφής, με ανατινάξεις, ούτε για μικρά βήματα προχώρησης ούτε ακόμη και για τμηματική εκσκαφή του μετώπου.
- δ. Η προσπάθεια βελτίωσης της ευστάθειας του πετρώματος, με τσιμεντενέσεις πριν από την εκσκαφή δεν απέδωσε, επειδή οι απορροφήσεις τσιμέντου από το πέτρωμα ήταν πολύ μικρές. Επίσης δεν απέδωσε ουσιαστικά μια προσπάθεια προαγγύρωσης του θόλου, γιατί λόγω αστάθειας των τοιχωμάτων των οπών μέσα στις οποίες τοποθετούνταν τα αγκύρια, η πάκτωσή τους με τσιμεντενεμα ήταν συνήθως πλημελής.

Η εκσκαφή στο τμήμα αυτό της σήραγγας έγινε χειρωνακτικά με αερόσφυρες. Εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο σε λίγες περιπτώσεις για μεμονωμένες ανατινάξεις (καβαλάκια). Η προχώρηση του μετώπου έγινε τμηματικά. Σε πρώτη φάση γινόταν μόνο η απαραίτητη εκσκαφή για την τοποθέτηση του πλαισίου και μετά την λήψη των μέτρων προστασίας ολοκληρωνόταν η εκσκαφή του με-

τώπου. Τα μέτρα προστασίας ήταν χαλύβδινα πλαίσια σε αποστάσεις (0,7-1m) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Κατά τη διάνοιξη έγιναν πολλές καταπτώσεις, από τις οποίες τέσσερις σημαντικές σε όγκο (40-50 κυβικά μέτρα). Όλες έγιναν πριν από την τοποθέτηση των μέτρων προστασίας, ενώ αντίθετα μετά την τοποθέτησή τους δεν παρατηρήθηκαν ορατές παραμορφώσεις με μια μόνο εξαίρεση. Η εξαίρεση αφορά ένα δεκάμετρο τμήμα της σήραγγας στα όρια του έντονα τεκτονισμένου με τον λιγότερο καταπονημένο περιδοτίτη. Στο τμήμα αυτό ήταν αυξημένη και η υδροφορία. Εδώ παρατηρήθηκαν σημαντικές συγκλίσεις στα ποδαρικά των πλαισίων και απαιτήθηκαν πρόσθετα μέτρα προστασίας.

Όλες οι καταπτώσεις ήταν εξελεκτικές, άρχιζαν με μικροκαταπτώσεις "σφηνων" από τον θόλο και εξελισσόταν σχετικά γρήγορη, η κατάπτωση ολοκληρωνόταν, στον κύριο όγκο της, σε μια ως δύο ώρες. Το έντονα κερματισμένο και εξαλλοιωμένο πέτρωμα, με τις λείες και στιλπνές επιφάνειες ασυνχειών, όπου ο συντελεστής τριβής είναι πάρα πολύ μικρός, ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητο σε τέτοια εξελεκτικά φαινόμενα.

Με την έναρξη και την εξέλιξη της κατάπτωσης, σπάζει ο δακτύλιος του πετρώματος που περιβάλλει την σήραγγα. Στο δακτύλιο αυτό έχουν μεταβιβασθεί σημαντικές πρόσθετες τάσεις μετά την διάνοιξη της σήραγγας και την ανατροπή της αρχικής εντατικής ισορροπίας. Έτσι ενώ οι απαιτούμενες δυνάμεις αντιστήριξης πριν από την έναρξη της κατάπτωσης ήταν συνήθως μικρές, μετά την έναρξή της αυξανόταν εκθετικά και πολύ γρήγορα δεν ήταν πρακτικά δυνατή η διακοπή της εξέλιξής της. Αποφασιστικής σημασίας επομένως, για την εξασφάλιση ευστάθειας στη σήραγγα, δεν ήταν το είδος των μέτρων προστασίας αλλά ο χρόνος τοποθέτησής τους. Ο χρόνος αυτός, για τον τρόπο με τον οποίο έγινε η εκσκαφή (βήμα προχώρησης 0,7-1m και τμηματική εκσκαφή του μετώπου) κυμάνθηκε από 0,5 έως 2 ώρες.

Για την άρση των μεγάλων καταπτώσεων που έγιναν στη σήραγγα ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Σφράγιση του με-

τώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, σταθεροποίηση της μάζας της κατάρπτωσης με τσιμεντενέσεις και προσεκτική επανεκκαφή με άμεση τοποθέτηση μέτρων προστασίας.

Ο ρυθμός προχώρησης της διάνοιξης, στο προβληματικό αυτό τμήμα της σήραγγας ήταν 1μ/ημέρα.

Στην υπόλοιπη σήραγγα όπου ο περιδοτίτης είχε μέτριο έως ασθενή τεκτονισμό και εξαλλοίωση, η διάνοιξη έγινε με ολομέτωπες ανατινάξεις μήκους 2μ. Τα μέτρα προστασίας ήταν πλαίσια και μόνο τοπικά και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η προχώρηση ήταν 2μ/ημέρα.

5. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΤΟΝ ΠΙΝΔΙΚΟ ΦΛΥΣΧΗ

Σ' αυτό το γεωλογικό σχηματισμό έγιναν οι περισσότερες κατασκευές του Έργου. Συγκεκριμένα, θεμελιώθηκαν τα 6 αυχεντικά φράγματα και κατασκευάστηκε όλο το σύστημα προσαγωγής. Το συγκρότημα του σταθμού παραγωγής και ένα τμήμα της σήραγγας φυγής. Η περιορισμένη έκταση της εργασίας δεν επιτρέπει να εξετασθούν όλα τα προβλήματα που αντιμετώπισαν αυτές οι κατασκευές. Για τον λόγο αυτό θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα προβλήματα και μόνο τα σπουδαιότερα από αυτά θα εξετασθούν κάπως διεξοδικότερα.

5.1. ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΧΕΝΙΚΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Στα αυχεντικά φράγματα των Πέντε Αλωνιών, ΑΦΑ 1 και 2, καθώς και στο ένα από τα αυχεντικά φράγματα των Πολιτσών, ΑΦΠ - 1, που βρίσκονται κοντά ή πάνω σε μέτωπα επώθησης ή λεπίωσης (Σχ. 1) το πέτρωμα (ιλυόλιθος, εναλλαγές, ερυθροπηλίτης) ήταν έντονα κερματισμένο και διατεταμημένο. Η προετοιμασία της τελικής επιφάνειας θεμελίωσης είχε τις δυσκολίες που αναφέρθηκαν και για το κύριο φράγμα. Η αντιμετώπιση ήταν ανάλογη.

Στα άλλα τρία αυχεντικά φράγματα των Πολιτσών (ΑΦΠ 2 και 3 και βοηθητικό). Το κύριο πρόβλημα στη θεμελίωση ήταν η έντονη αποσάθρωση που επιλεκτικά σε ορισμένες ζώνες προχωρούσε πολύ βαθιά κάτω από την τελική επιφάνεια θεμελίωσης.

Οι ζώνες αυτές της έντονης αποσάθρωσης, για τα ΑΦΠ 2 και 3 που θεμελιώθηκαν στις εναλλαγές, ήταν τα σημαντικού πάχους φαμμιτικά στρώματα. Για το βοηθητικό φράγμα, που θεμελιώθηκε σε παχυστρωματώδεις φαμμίτες, ζώνες έντονης και πολύ βαθιάς αποσάθρωσης, υπήρχαν κυρίως κατά μήκος των τεκτονικών επιφανειών (ρήγματα, διακλάσεις).

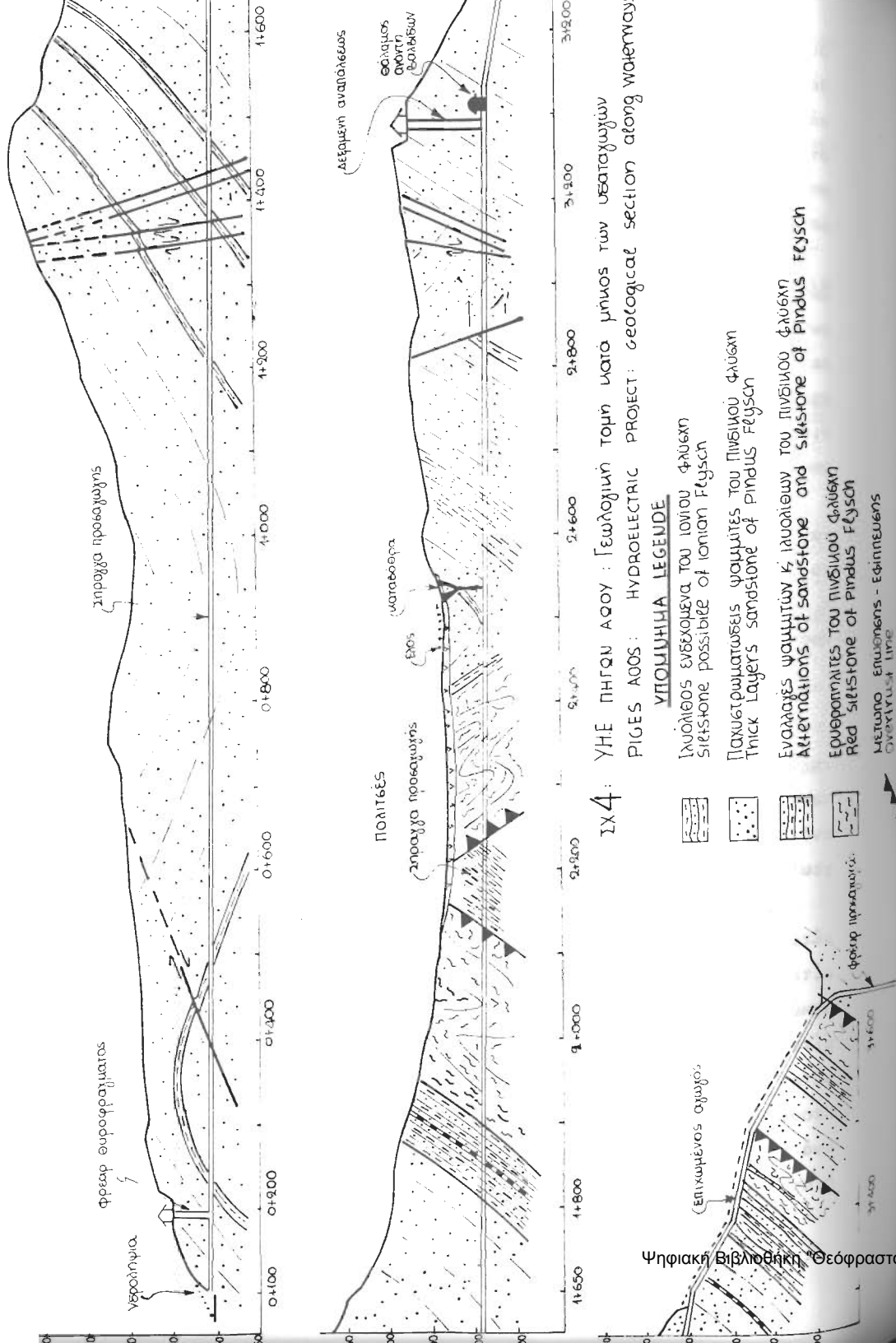
Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με εκσκαφή των αποσαθρωμένων ζωνών, σε βάθος διπλάσιο από το πλάτος τους, και πλήρωση των ορυγμάτων που δημιουργήθηκαν με σκυρόδεμα. Στόχος αυτής της αντιμετώπισης ήταν η εξασφάλιση της ευστάθειας της θεμελίωσης καθώς και η προστασία της από ενδεχόμενες μελλοντικές διαρροές, ενώ για τη στεγανοποίηση το κύριο βάρος έπεσε στις τσιμεντενέσεις που ακολούθησαν.

Το πρόβλημα της στεγανότητας και της στεγανοποίησης ήταν για την περιοχή του Βοηθητικού φράγματος και ίσως για όλο το Έργο, το σπουδαιότερο γεωτεχνικό πρόβλημα που αντιμετώπισε η κατασκευή. Στο θέμα όμως αυτό έγινε εκτεταμένη αναφορά στο προηγούμενο συνέδριο.

5.2. ΣΗΡΑΓΓΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ

Έχει μήκος 3200μ και διατομή 15μ². Το μεγαλύτερο τμήμα της, 2500μ, διανοίχθηκε σε παχυστρωματώδεις φαμμίτες, ενώ η υπόλοιπη σε εναλλαγές (100μ), ερυθροπηλίτες (450μ) και σε ιλυόλιθους, ενδεχόμενα του Ιόνιου φλύσχη, (150μ). Στο σχήμα (4) δίνεται μια γεωλογική τομή σε όλο το μήκος της σήραγγας.

Η διάνοιξη έγινε με ανατινάξεις. Η προχώρηση ήταν ολομέτωπη με βήμα που κυμάνθηκε από 3μ, (στους παχυστρωματώδεις φαμμίτες) μέχρι 1μ (στους ερυθροπηλίτες). Τα μέτρα προστασίας ήταν αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στους παχυστρωματώδεις φαμμίτες και τις εναλλαγές τοποθετήθηκαν 2-5 αγκύρια ανά τρέχον μέτρο σήραγγας και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μόνο τοπικά στο θόλο. Στους ιλυόλιθους και τους ερυθροπηλίτες τα αγκύρια ήταν 5-7 ανά τρέχον μέτρο, και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 5-10cm σε όλη την διατομή. Στο τμήμα από την χιλιομετρική θέση 1900 έως 2150, όπου



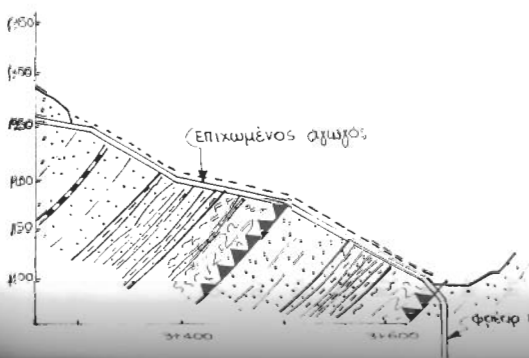
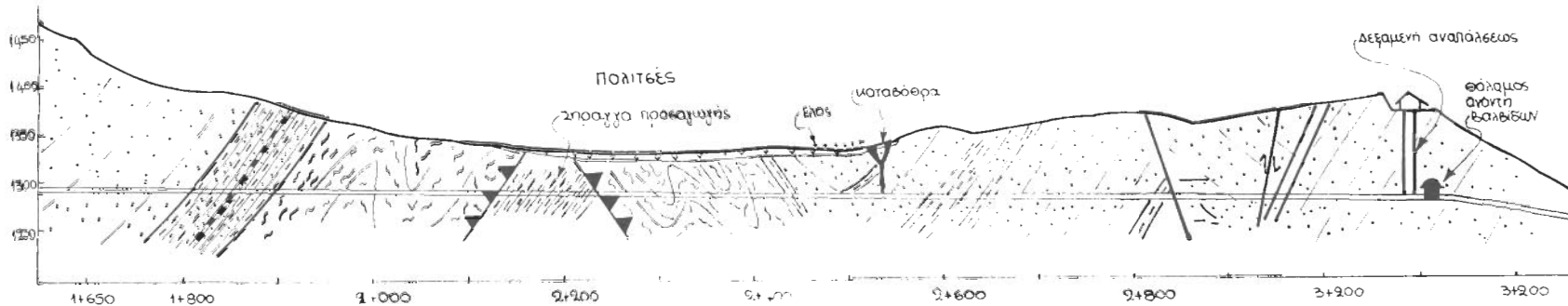
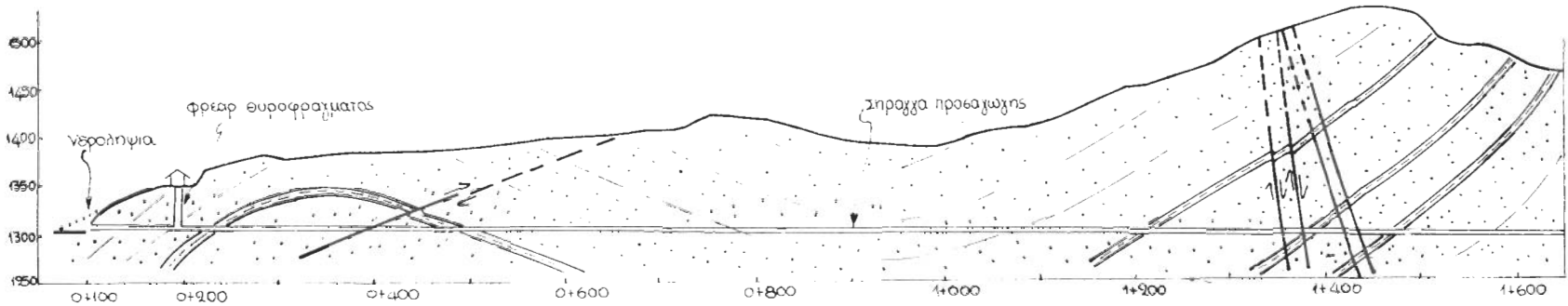
ΣΧ 4: ΥΠΕ ΠΗΓΩΝ ΑΣΟΥ : Γεωλογική τομή κατά μήκος των υεταχωμάτων
 PIGES AOS: HYDROELECTRIC PROJECT: Geological section along waterways

οι ερυθροπηλίτες ήταν έντονα τεκτονισμένοι τοποθετήθηκαν χαλύβδινα πλαίσια με πυκνότητα ένα πλαίσιο ανά τρέχον μέτρο σήραγγας.

Προβλήματα ευστάθειας αντιμετώπισε η διάνοιξη μόνο στους ερυθροπηλίτες και ειδικότερα στο τμήμα όπου ήταν έντονα τεκτονισμένοι. Στο τμήμα αυτό, χιλιομετρική θέση 1900, έγινε και η μοναδική μεγάλη κατάπτωση (150 m³). Η κατάπτωση οφείλεται στο ότι από κεκτημένη ταχύτητα εφαρμόστηκε, στους τεκτονισμένους ερυθροπηλίτες, η μέθοδος προχώρησης που εφαρμόζοταν στους ψαμμίτες (τρίμετρες ολομέτωπες ανατινάξεις). Τα προβλήματα ευστάθειας αντιμετωπίστηκαν με μείωση του μήκους των ανατινάξεων σε 1-2 m και αλλαγή των μέτρων προστασίας.






Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετώπισε η διάνοιξη της σήραγγας, ήταν το υπόγειο νερό στους παχυστρωματώδεις ψαμμίτες. Συναντήθηκαν δυο ψαμμιτικές περιοχές, υδρογεωλογικά ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η μια από αυτές, από την είσοδο της σήραγγας μέχρι τη Χ.Θ. 1900, ανήκει στην υδρογεωλογική λεκάνη του ταμειυτήρα, ενώ η άλλη, από τη Χ.Θ. 2450 έως τη Χ.Θ. 3250 βρίσκεται έξω από την εν λόγω υδρογεωλογική λεκάνη.

Τα ιαυολιθικά στρώματα που παρεμβάλλονται στην ψαμμιτική σειρά χωρίζουν πολλούς επιμέρους υδροφόρους ορίζοντες με μικρή ή καθόλου επικοινωνία μεταξύ τους. Έτσι κάθε φορά που η σήραγγα τρυπούσε ένα ιαυολιθικό στρώμα, σημειωνόταν σημαντικές απότομες εισροές νερού. Οι μεγαλύτερες από αυτές τις εισροές ήταν της τάξης των 200-300 m³/h, που όμως μειωνόταν πολύ γρήγορα για να σταθεροποιηθούν σε λίγες ώρες, σε μια παροχή υποπολλαπλάσια της αρχικής. Αυτό δείχνει πως ο όγκος των επιμέρους υδροφόρων είναι περιορισμένος. Σε μία περίπτωση, στη Χ.Θ. 2550 οι εισροές αιχμής ήταν μεγαλύτερες και σε ποσότητα και σε διάρκεια (2 ημέρες). Στη θέση αυτή η σήραγγα επικοινωνήσε, μέσα από μια καταβόθρα, με το έλος της κοιλάδας των Πολιτών και το αποστράγγισε. Παράλληλα αποστραγγίστηκε και ασθενής φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας των προσχωμάτων της κοιλάδας και δημιουργήσε προβλήματα στις αρδεύσεις. Μετά την σκυροδέτηση της σήραγγας, το έλος και ο υδροφόρος



ΣΧ.4: ΥΠΕ ΠΙΓΩΝ ΑΡΟΥ: Γεωλογική τομή κατά μήκος των υδατοαγωγών
 PIGES AOUS: HYDROELECTRIC PROJECT: Geological section along waterways

ΥΠΟΜΗΧΗΜΑ ΛΕΓΕΝΔΕ

-  Ίαυολίθος ενδεχομενα του Ιονίου φλύσχ
Siltstone possible of Ionian Flysch
-  Παχυστρωματώσεις ψαμμίτες του Πινδιού φλύσχ
Thick layers sandstone of Pindus Flysch
-  Εναλλαγές ψαμμιτών κ' ίαυολίθων του Πινδιού φλύσχ
Alternations of sandstone and siltstone of Pindus Flysch
-  Κόκκινος ίαυολίθος του Πινδιού φλύσχ
Red siltstone of Pindus Flysch
-  Μεταφραγή - επιφραγήματα - επιφραγήματα
Dams - spillways - spillways

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεσσαλονίκης Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

ορίζοντας ξανασηματίσθηκε.

Μετά τη σκυροδέτηση της σήραγγας έγιναν τσιμεντένεσες σταθεροποίησης μήκους 4 m γύρω από αυτή, για τη σταθεροποίηση του πετρώματος που διαταράχθηκε από τη διάνοιξη. Στα φαμμαιτικά τμήματα οι απορροφήσεις των τσιμεντένεσων ήταν υπερβολικά μεγάλες. Η μέση απορρόφηση στους φαμίτες ξεπέρασε τον 1 τόνο τσιμέντου ανά τρέχον μέτρο σήραγγας, ενώ η αντίστοιχη μέγιστη τιμή έφθασε τους 4 τόννους.

Επειδή με βάση τα γεωλογικά στοιχεία και την εξέλιξη της τσιμεντένεσης, σε πολλές περιπτώσεις ήταν σαφές ότι το ένεμα απομακρύνεται από την σήραγγα και ξεφεύγει από τον σκοπό του, μπήκε το πρόβλημα επέμβασης για τον περιορισμό της ακτίνας δράσης της τσιμεντένεσης. Δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο και στην πράξη διάφορα πρόσμικτα του ενέματος (μπετονίτης, υδρούαλος, ιπτάμενη τέφρα) σε διάφορες αναλογίες και συνδυασμούς, για την ρύθμιση κατά βούληση των βασικών ρεολογικών ιδιοτήτων του ενέματος (ιξώδες, χρόνος έναρξης της πήξης). Επίσης δοκιμάστηκαν διάφορες τεχνικές εκτέλεσης της τσιμεντένεσης. Οι δοκιμές οδήγησαν στην ακόλουθη αντιμετώπιση του προβλήματος. Σε περιοχές με υπερβολικές απορροφήσεις οι τσιμεντένεσες έγιναν σε δυο στάδια. Σε πρώτο στάδιο το PACKER τοποθετείται στο μέσο της οπής και γίνεται τσιμεντένεση στο μισό μήκος της με ένεμα υψηλού ιξώδους και ρυθμιζόμενου χρόνου έναρξης της πήξης.

Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ιπτάμενης τέφρας και υδρούαλου σαν πρόσμικτα.

Στόχος της τσιμεντένεσης στο 2ο στάδιο αυτό είναι να φράξουν οι μεγάλες ρωγμές μέσα από τις οποίες απομακρύνεται το ένεμα από την σήραγγα, χωρίς να καταναλωθούν υπερβολικές ποσότητες ενέματος. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται κανονικά η τσιμεντένεση στην υπόλοιπη οπή, με ένεμα χωρίς πρόσμικτα, ώστε το ένεμα να εισχωρήσει και στις λεπτές ρωγμές που προκλήθηκαν από την διάνοιξη και να σταθεροποιήσουν το πέτρωμα.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα αυτής της κατά κάποιο τρόπο πειραματικής εργασίας είναι και οι πολύ θετικές εμπειρίες από την ευρεία χρήση ιπτάμενης τέφρας στα ενέματα. Η τέφρα μπορεί να υποκαταστήσει κατά 50% (τουλάχιστον) το τσιμέντο στα ενέματα, χωρίς να μειώνονται οι αντοχές και η στεγανότητα του τελικού στερεού προϊόντος. Το οικονομικό ενδιαφέρον μιας τέτοιας υποκατάστασης είναι αυτονόητο. Επίσης στα πυκνά ενέματα με τέφρα, δεν μειώνεται ο όγκος τους κατά την πήξη, σε αντίθεση με τα χωρίς τέφρα ενέματα.

Με αυτά τα δεδομένα η χρήση τέφρας έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον για τις τσιμεντένεσες επαφής (πλήρωσης), καθώς και για τις τσιμεντένεσες στεγανοποίησης και σταθεροποίησης σε καρστικά πετρώματα, και γενικότερα σε πετρώματα με μεγάλες απορροφήσεις.

Οι τσιμεντένεσες επαφής και σταθεροποίησης που είχαν σαν κύριο στόχο την σταθεροποίηση, επέδρασαν σημαντικά και στη στεγανοποίηση της σήραγγας, χωρίς όμως να εξασφαλίσουν ικανοποιητική στεγανότητα. Οι εισροές νερού στη σήραγγα από ρωγμές, κατασκευαστικούς αρμούς και διάφορες κακοτεχνίες του σκυροδέματος ήταν σημαντικές, αποδεικνύοντας ότι η στεγανότητα της επένδυσης δεν ήταν ικανοποιητική. Η κατάσταση εξακολουθούσε να μην είναι ικανοποιητική και μετά την αποκατάσταση των κακοτεχνικών στο σκυρόδεμα, που έκανε ο κατασκευαστής σύμφωνα με τις συμβατικές του υποχρεώσεις. Δεδομένου δε ότι η σήραγγα θα βρισκόταν διαρκώς υπό πίεση, μετά την έναρξη της λειτουργίας του έργου, τέθηκε το ερώτημα αν πρέπει να γίνουν πρόσθετα μέτρα στεγανοποίησης, για να περιορισθούν οι διαρροές. Το ερώτημα είχε σημαντικό οικονομικό ενδιαφέρον, επειδή το νερό, λόγω της μεγάλης υδατόπτωσης, είναι πολύτιμο (με 1 m³ νερού θα παράγεται 1,7 kWh).

Το φαμμαιτικό τμήμα της σήραγγας, από την είσοδό της μέχρι την Χ.Θ. 1900, βoίσκεται όπως ήδη προαναφέρθηκε μέσα στην υδρογεωλογική λεκάνη του ταμειυτήρα. Επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος απώλειας νερού από το τμήμα αυτό της σήραγγας και άρα

δεν χρειάζονται πρόσθετα μέτρα στεγανοποίησης.

Στους ιλυόλιθους και τους ερυθροπηλίτες απο τη Χ.Θ.1900 έως τη Χ.Θ. 2450 δεν υπάρχει επίσης κανένας λόγος πρόσθετης στεγανοποίησης γιατί το πέτρωμα που περιβάλλει την σήραγγα είναι στεγανό.

Στο άλλο φαμμιτικό τμήμα της σήραγγας, απο τη Χ.Θ.2450 έως την έξοδό της, που βρίσκεται έξω απο την υδρογεωλογική λεκάνη του ταμειυτήρα, ο κίνδυνος απώλειας νερού είναι σοβαρός και έπρεπε να ληφθούν πρόσθετα μέτρα στεγανοποίησης. Αρχικά έγινε μια πύκνωση στις τσιμεντενέσεις σταθεροποίησης, που αύξησε το αρχικό πρόγραμμα κατά 30% περίπου. Όμως παρά τις σημαντικές απορροφήσεις τσιμέντου, το στεγανωτικό αποτέλεσμα των προσθέτων τσιμεντενέσεων ήταν μηδαμινό. Στη συνέχεια έγινε αποκατάσταση των κακοτεχνιών στο σκυρόδεμα. Ειδικά στο τμήμα αυτό της σήραγγας, στις ρωγμές και τους αρμούς που υδροφορούσαν, πριν απο την αποκατάσταση έγινε στεγανοποίηση με ενέσεις διογκούμενης πολυουρεθάνης.

Επειδή οι ενέσεις αυτές δεν είναι συνηθισμένες στον ελληνικό χώρο, (σε έργα τουλάχιστον της ΔΕΗ για πρώτη φορά χρησιμοποιούνται), θα αναφερθούν μερικά στοιχεία για την εκτέλεση και την αποτελεσματικότητά τους.

Το εμπορικό όνομα της ενέσιμης πολυουρεθάνης που χρησιμοποιήθηκε είναι CONCRETSIVE POLYURETHANE 4058.

Το ένεμα αποτελείται απο δυο παχύρευστα υγρά που αναμιγνύονται λίγο πριν απο την χρήση τους. Το ένα απο τα υγρά χρησιμοποιείται σε μικρές αναλογίες και παίζει ρόλο καταλύτη. Απο τη στιγμή που το ένεμα έλθει σε επαφή με νερό σε ένα έως δέκα λεπτά (ανάλογα με την περιεκτικότητα σε καταλύτη), στερεοποιείται με ταυτόχρονη διογκωση (μέχρι 30 φορές). Το στερεό προϊόν είναι μια σπογγώδης στεγανή μάζα. Το ένεμα διοχετεύεται στις ρωγμές με χειροκίνητη πρέσσα απο τις οπές που έχουν ανοιχτεί σε διάταξη και αριθμό που να εξασφαλίζουν την κυκλοφορία του στον υπό στεγανοποίηση αρμό.

Η αποτελεσματικότητα αυτών των ενέσεων στη στεγανο-

ποίηση ρωγμών που υδροφορούσαν ήταν πολύ ικανοποιητική, όταν επιτυγχανόταν κυκλοφορία του ενέματος στην ρωγμή. Η επίτευξη όμως αυτής της κυκλοφορίας είχε σημαντικές δυσκολίες. Στο συγκεκριμένο έργο η πολυουρεθάνη χρησιμοποιήθηκε για προσωρινή στεγανοποίηση. Δεν έχουμε προσωπική εμπειρία για την ανθεκτικότητά του υλικού στο χρόνο.

Μετά την ολοκλήρωση των πιο πάνω μέτρων οι εισροές στη σήραγγα μειώθηκαν δραστικά και περιορίστηκαν σε σταγονόροια και υγρασία σε αρκετές θέσεις. Τοποθετήθηκαν μανόμετρα σε διάφορα σημεία του τμήματος αυτού και μετρήθηκε η υδροστατική πίεση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Στη Χ.Θ.2550 η πίεση είναι 5,8 ατ και στη συνέχεια μειωνόταν σταδιακά για να φθάσει τις 3,8 ατ στη Χ.Θ. 2830. Στη συνέχεια η πίεση μειώνεται απότομα και στη Χ.Θ.2950, η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα είναι κάτω απο το επίπεδο της σήραγγας. Για το τμήμα επομένως Χ.Θ.2450 έως Χ.Θ.2830 υπάρχει ήδη μια δοκιμή μεγάλης κλίμακας για τη στεγανότητά της. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του Έργου, οι εσωτερικές υπερπίεσεις στο τμήμα αυτό της σήραγγας θα είναι μικρότερες ή ίσες με τις σημερινές εξωτερικές πιέσεις.

Επομένως οι μελλοντικές διαρροές θα είναι μικρότερες ή ίσες με τις σημερινές εισροές, δηλαδή αμελητέες.

Για το υπόλοιπο τμήμα αντίθετα της σήραγγας δεν υπάρχει καμιά ένδειξη για την επάρκεια ή μη της στεγανότητας. Για τον λόγο αυτό στο συγκεκριμένο τμήμα τοποθετήθηκε πρόσθετα ένα ειδικό στεγανωτικό επίχρισμα, στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- J. BRUNN 1952 : Γεωλογικός χάρτης 1:50.000 φύλλο μετσοβο Έκδοση ΙΓΕΥ 1959.
- Δ. ΛΙΑΚΟΥΡΗΣ 1976 : Προμελέτη του υδροηλεκτρικού Έργου Πηγών Αώου. Τεύχος Γεωλογία ΔΕΗ/ΔΜΚΥ.
- ΔΕΗ/ΔΜΚΥ 1978 : Προμελέτη του υδροηλεκτρικού Έργου Πηγών Αώου. Τεύχη 5.