

## **Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΛΥΣΧΗ ΤΗΣ ΠΙΝΔΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ, ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΖΩΝΗΣ ΕΠΩΘΗΣΗΣ. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ. ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΑΧΕΛΩΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΠΡΟΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑ.**

Σφέικος Α.Ν.<sup>1</sup> Μαρίνος Π.Γ.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε., ΕΥΔΕ- ΟΣΥΕ, Τμ. Κατ. Εργων Τρικάλων, aris3kala@yahoo.gr

<sup>2</sup> Καθηγητής ΕΜΠ, Τμ Πολιτικών Μηχανικών & Centre de Geologie de Univ. De Marme La Valee, France, marinos@central.ntua.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Το έργο της εκτροπής του ποταμού Αχελώου, περιλαμβάνει την κατασκευή διαδοχικών ταμιευτήρων (Μεσοχώρας και Συκιάς) καθώς και την διάνοιξη σήραγγας εκτροπής ωφέλιμης διαμέτρου 6μ & μήκους 17.400μ, για την διοχέτευση του νερού προς τον Θεσσαλικό κάμπο.

Η περιοχή ανάπτυξης των έργων ανήκει γεωμορφολογικά στον ορεινό όγκο της Πίνδου, τα πετρώματα δε που συνιστούν την περιοχή ανήκουν στην ομωλυμη γεωλογική ζώνη. Στο δυτικό τμήμα της ζώνης Πίνδου στην περιοχή Μουζακίου – Δρακότρυπας ασβεστόλιθοι, ραδιοαρίτες (Ιουρασικού) και στρώματα μετάβασης (εναλλαγές ιλυολίθων ασβεστολίθων) βρίσκονται επωθημένα πάνω σε ιλυολίθους και ψαμμίτες της ακολουθίας του φλύσχη της Πίνδου (Τριτογενες). Στην επιφάνεια το επίπεδο κίνησης πάνω στο οποίο πραγματοποιήθηκε η επώθηση των σχηματισμών ορίζεται σαφώς παρουσιάζοντας συγκεκριμένη γεωμετρία. Στους ιλυολίθους και ψαμμίτες του φλύσχη, ζώνες έντονης διάτμησης και κίνησης οριοθετούν την ζώνη επώθησης.

Οι εργασίες διάνοιξης της σήραγγας διαμέσου των ασβεστολιθικών και κερατολιθικών πετρωμάτων εκτελέστηκαν χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Κατά την πρόοδο και μετάβαση στους σχηματισμούς του φλύσχη υπήρξε επιβράδυνση του ρυθμού διάνοιξης. Αυτή μερικά αποδίδεται στην σύσταση και δομή του σχηματισμού, του οποίου οι συχνές και μικρού πάχους πετρογραφικές εναλλαγές καθώς και η διαμπερής ανάπτυξη ζωνών διάτμησης ταπείνωνε την ικανότητα αυτοϋποστήριξης για σύντομο διάστημα.

Μετα την εγκατάσταση των βαρύτερων μέτρων υποστήριξης που προβλεπόταν, ξεκίνησε η ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας στην περιοχή που αναπτύσσονταν η ζώνη εσωτερικής επώθησης.

Η ανάλυση και επεξεργασία των σχετικών καμπύλων έδειξε ότι η βραχομάζα παρέμενε σε δυναμικά ενεργή κατάσταση, περιμετρικά της εκσκαφής. Τέσσερεις μήνες μετά την εκσκαφή, η δυναμική που ασκούσε η βραχομάζα αθροιστικά ξεπέρασε το όριο υποστήριξης των μέτρων υποστήριξης, προκαλώντας βλάβες σε αυτά.

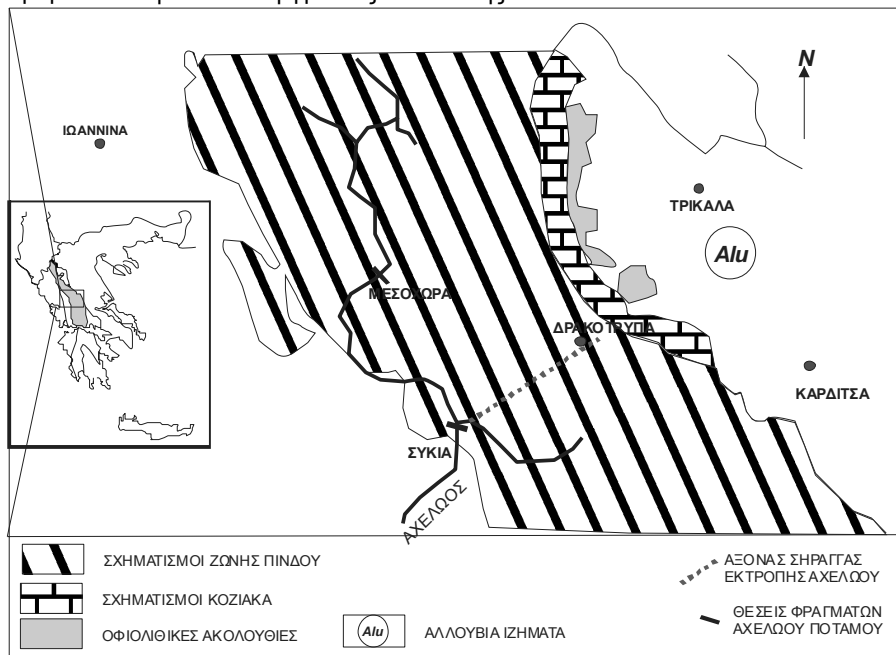
Στην παρούσα εργασία περιγράφουμε τις συνθήκες διάνοιξης της σήραγγας, τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών και τη συμπεριφορά τους όπως ερμηνεύεται απο την ενόργανη παρακολούθηση, γύρω απο τη ζώνη επώθησης. Περιγράφονται οι βλάβες που προκλήθηκαν απο τη σύγκλιση της διατομής και ο τρόπος αποκατάστασης τους.

### **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η Εκτροπή του ποταμού Αχελώου αποτελεί ένα από τα πλέον μακρόπνοα αναπτυξιακά έργα που εκτελούνται στον Ελληνικό χώρο. Παρότι η αρχική ιδέα για την εκτροπή νερού από το πλούσιο υδάτινο δυναμικό της Πίνδου προς τη Θεσσαλική πεδιάδα χρονολογείται από τη δεκαετία του 1930, η μερική υλοποίηση της έγινε στη δεκαετία του 1950 με την κατασκευή του φράγματος Πλαστήρα και την εκτροπή νερού στην περιοχή της Θεσσαλίας. Η υλοποίηση του σχεδίου για την εκμετάλλευση μέρους του υδάτινου δυναμικού του ποταμού στον άνω ρού του ξεκίνησε στη δεκαετία του 1980 με την κατασκευή του φράγματος και του ταμιευτήρα της Μεσοχώρας και συνεχίζεται με την κατα-

σκευή του φράγματος Συκιάς, τη δημιουργία του αντίστοιχου ταμιευτήρα και τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής νερού από αυτόν προς την λεκάνη της Θεσσαλίας.

Ο άξονας διάνοιξης της σήραγγας εκτροπής νερών του Αχελώου, βρίσκεται γεωγραφικά στο κέντρο της οροσειράς της Πίνδου(σχ.1). Η διεύθυνση ανάπτυξης του άξονα εκσκαφής είναι  $58^{\circ}$ – $238^{\circ}$ , με κατεύθυνση εκσκαφής τις  $238^{\circ}$  από το μέτωπο της εξόδου στη Δρακότρυπα. Η υδραυλική αυτή σήραγγα κατασκευάζεται με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά. Το συνολικό μήκος της μαζί με τη σήραγγα προσπέλασης είναι περίπου 18.000 μ με μέση κλίση κατά μήκος 0.2%. Ο άξονας της σήραγγας στην είσοδο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο + 469 m και στην έξοδο σε + 433 m. Ο αρχικός σχεδιασμός προβλέπει την κατασκευή σήραγγας κυκλικής διατομής επενδεδυμένης με σπλισμένο σκυρόδεμα και ωφέλιμης εσωτερικής διαμέτρου 6μ. Στην περιοχή εισόδου της σήραγγας κατασκευάστηκε φρέαρ θυροφραγμάτων ύψους 80 μ. και αντίστοιχα στην περιοχή εξόδου προβλέπεται η κατασκευή φρέατος ανάπαλσης.



Σχ. 1. Χάρτης που δείχνει την γεωγραφική κατανομή των έργων εκτροπής του Αχελώου καθώς και την έκταση της ζώνης Πίνδου και τις σειρές με τις οποίες συνορεύει.

Το μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας διανοίγεται με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής (TBM). Τμήματα της σήραγγας στην περιοχή εξόδου (σήραγγα προσπέλασης και τμήμα της εκτροπής) καθώς και ένα μήκος 2.200 μ της σήραγγας από την πλευρά εισόδου, διανοίχθηκαν εφαρμόζοντας συμβατική μέθοδο διάνοιξης. Το μηχανήμα είναι κατασκευής του οίκου WIRTH ανοικτού τύπου, εφοδιασμένο με ασπίδα προστασίας της κεφαλής και συμπληρωματική μήκους 3μ, στην οροφή για προστασία κατά την εφαρμογή των μέτρων προστασίας. Η κεφαλή περιστρέφεται από ηλεκτρικούς ή εναλλακτικά υδραυλικούς κινητήρες. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες περιστρέφουν την κεφαλή με δύο ταχύτητες. Το TBM σε κάθε βήμα εκσκαφής προωθείται κατά 1,4μ.

Η τήρηση του μηχανήματος επί του προβλεπόμενου άξονα εκσκαφής ελέγχεται ηλεκτρονικά μέσω ενός συστήματος ακτίνος laser.

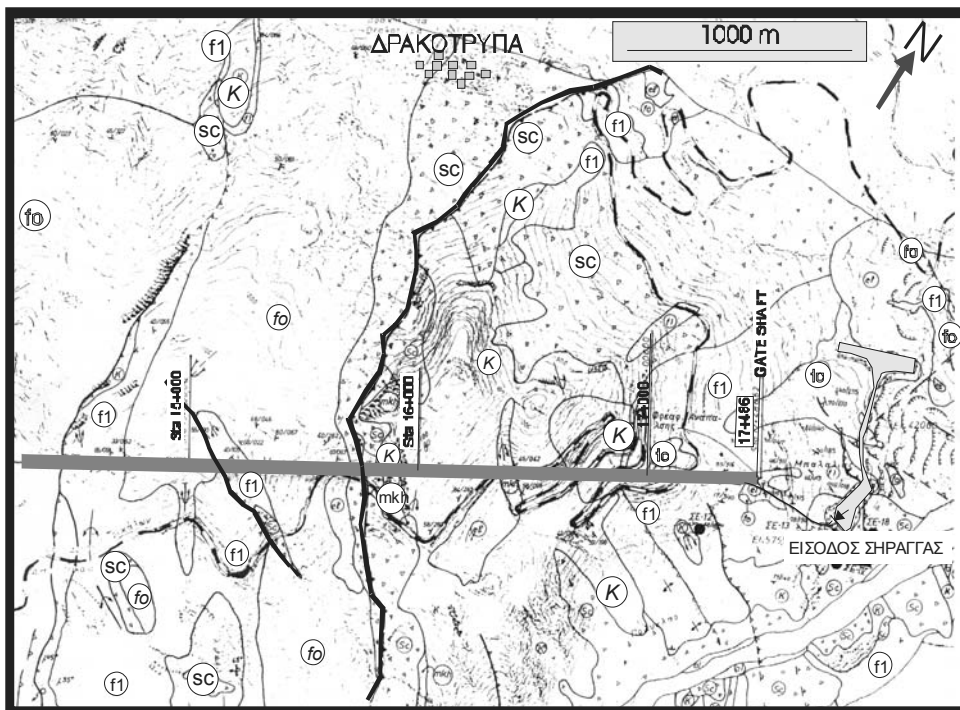
Από το συρμό του TBM τοποθετείται το προκατασκευασμένο τμήμα της τελικής επένδυσης με τη μορφή τόξου στο δάπεδο της σήραγγας, που λειτουργεί σαν υπόβαθρο των κατασκευών που εξυπηρετούν την κυκλοφορία των συρμών.

Η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας γίνεται με την εφαρμογή τυποποιημένων διατομών που περιλαμβάνουν συνδιασμό αγκυρίων, εκτοξευμένου σκυροδέματος και ελαφρών πλαισίων στις τρεις κατηγορίες καλής ποιότητας βραχώμαζας, ενώ στις χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα εφαρμόζονται χαλύβδινα πλαίσια βαρέως τύπου σε αποστάσεις από 1,5 έως 0,5 μ. μεταξύ τους.

Στην εργασία αυτή παραθέτουμε κατασκευαστικά και γεωλογικά δεδομένα από τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής του Αχελώου ποταμού προς τη Θεσσαλία. Το κύριο ενδιαφέρον, εσιάζεται στην περιγραφή της γεωλογικής δομής των πετρωμάτων στο επίπεδο διάνοιξης, την τεκτονική κατάσταση και το συσχετισμό της με τις επιφανειακές δομές. Εστιαζόμαστε στη μηχανική και γεωτεχνική συμπεριφορά του φλύσχη της Πίνδου κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Παραθέτονται τα στοιχεία εκείνα που δείχνουν την επίδραση μιας τεκτονικής δομής μεγάλης κλίμακας στο πέτρωμα, την μεταβολή των μηχανικών του χαρακτηριστικών και την συμπεριφορά του κατά και μετά την εκσκαφή.

## 2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Οι περιοχές στις οποίες αναπτύσσονται τα έργα εκτροπής του Αχελώου γεωλογικά ανήκουν στις εξωτερικές Ελληνίδες ζώνες (Σχ.1). Ειδικότερα ο σχεδιασμός και η χάραξη της σήραγγας εκτροπής, τοποθετεί την διάνοιξη της αποκλειστικά στη γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου. Η ζώνη αναπτύσσεται κατά μήκος των Ελληνίδων, από Βορρά προς Νότο, και καμπτόμενη συνεχίζει με άξονα Α-Δ στην Κρήτη. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στη ζώνη είναι ιζηματογενή διαφόρων αποθετικών συνθηκών και περιβαλλόντων (ραδιολαρίτες ιλυοαργιλλόλιθοι, ιλυοαργιλικό σχίστες, κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθοι, και μεταξύ των εναλλαγές), με ηλικία απόθεσης από το Τριαδικό έως και το Ανώτερο Ηώκαινο (Jacobshagen 1986).



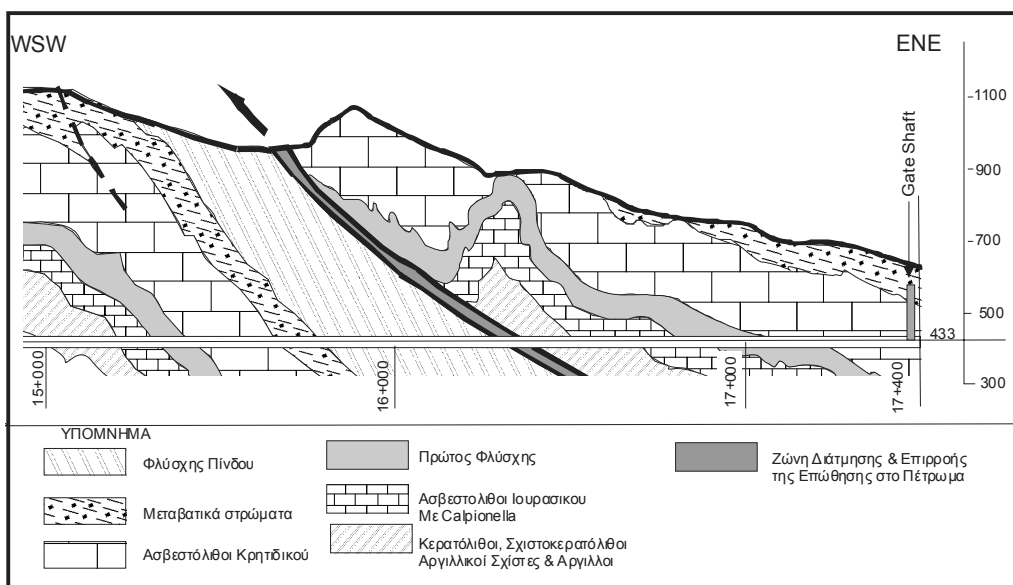
Σχ.2 Γεωλογικό σχαρίφημα της περιοχής εξόδου (Δρακότρυπα) της Σήραγγας εκτροπής. Η γκριζα σκιασμένη περιοχή είναι ο άξονας διάνοιξης. Συμβολισμοί σχηματισμών, fo= φλύσχη Πίνδου, f1=μεταβατικά στρώματα K=ασβεστόλιθοι Κρητιδικού, mkh= σχηματισμός πρώτου φλύσχη, sc= πλευρικά κορήματα (ΔΕΗ, ΙΓΜΕ).

Στο γεωλογικό χάρτη της περιοχής εξόδου της σήραγγας εκτροπής στην περιοχή της Δρακότρυπας (σχ. 2) από τα δυτικά προς τα Ανατολικά απαντώνται ιλυόλιθοι αργιλόλιθοι και ψαμμίτες του φλύσχη της Πίνδου. Οι φλυσχικοί αυτοί σχηματισμοί, δομούν τα ανώτερα στρωματογραφικά και τεκτονικά μέρη στην περιοχή, με ηλικία απόθεσης από το Αν. Κρητιδικό έως Αν Ηώκαινο, ενώ το πάχος τους υπολογίζεται σε 1.200 μ τουλάχιστον (Jacobshagen 1986).

Κανονικά υποκείμενα του φλύσχη εμφανίζονται εναλλαγές στρώσεων, ασβεστολίθων, ιλυολίθων και ψαμμιτών. Αυτοί οι σχηματισμοί περιγράφονται σαν μεταβατικά στρώματα, που αποτίθενται

πριν την τελική απόθεση της ακολουθίας του Φλύσχη, ηλικίας Av. Κρητιδικού. Τα στρώματα αυτά μεταβαίνουν ομαλά προς τους υποκειμένους Κρητιδικούς ασβεστολίθους. Είναι μέσο- πάχου- στρώματῶδες ασβεστόλιθοι με αραιές ενστρώσεις ιλυολίθων και κερατολίθων, ηλικίας Μέσου - Ανω Κρητιδικού. Η ιζηματογενής ακολουθία συνεχίζεται ομαλά με την εμφάνιση τοπικά σε αποσφηνωμένους φακούς των ρυθμικών εναλλαγών ψαμμιτών τουρβιδικής προέλευσης και αργίλλων με παρεμβολές μαργαϊκών ωολιθικών ασβεστολίθων ηλικίας του Κάτω Κρητιδικού που αποτελούν τον σχηματισμό του Πρώτου Φλύσχη.

Στην επιφάνεια, επί του ίχνους του άξονα της σήραγγας εκτροπής περί την ΧΘ 15+750 οι ασβεστόλιθοι του Κρητιδικού και σχηματισμοί του πρώτου Φλύσχη εμφανίζονται επωθημένοι στον Ηνωμένο Φλύσχη της ζώνης Πίνδου (σχ.2 & 3). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιπέδου επώθησης στην περιοχή είναι διεύθυνση κλίσης περί τις  $60^{\circ}$  και γωνία κλίσης  $65^{\circ}$ - $70^{\circ}$ . Οι επωθημένοι σχηματισμοί εμφανίζουν έντονο κατακερματισμό παράλληλα με το επίπεδο κίνησης και σε μία ζώνη πλάτους 5-7 μέτρων. Οι σχηματισμοί του υποκειμένου φλύσχη καλύπτονται απο κορήμματα και εδαφικό μανδύα.



Σχ.3 Σχηματική γεωλογική τομή σύμφωνα με τα στοιχεία της προμελέτης του έργου (ΔΕΗ/ΔΑΥΕ). Ο συμβολισμός των στρωμάτων δείχνει μόνο την πετρογραφική διαφορά. Τα στρώματα εμφανίζονται με σύμφωνες μεταξύ τους παρατάξεις.

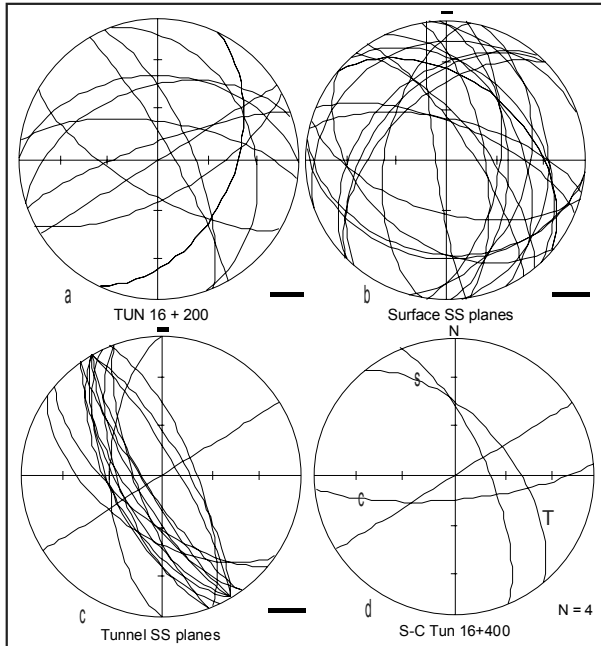
## 2.1 Γεωλογία Σήραγγας

Στην τομή (Σχ.3) δείχνεται η προβλεπόμενη διαδοχή των πετρωμάτων όπως αυτά προέκυψαν απο την επεξεργασία των δεδομένων της επιφανειακής χαρτογράφησης. Σύμφωνα με αυτήν η σήραγγα απο τα Ανατολικά προς Δυτικά θα διανοιγόταν εντός Κρητιδικών ασβεστολίθων, στη συνέχεια εντός σχηματισμών της ακολουθίας του πρώτου φλύσχη και ασβεστολίθους του Ιουραϊκού με καλπιονέλλες, οι οποίοι υπέρκεινται στρωματογραφικά σύμφωνα, τους πολύχρωμους κερατολίθους και αργιλλικούς ιλυολιθικούς πυριτωμένους σχίστες. Διαμέσου μίας μεγα-αντικλινικής δομής και απαντώντας τα πετρώματα σε ανεστραμένη σειρά προβλεπόταν η είσοδος σε σχηματισμούς του φλύσχη της Πίνδου και η διάνοιξη της σήραγγας διαμέσου της ζώνης επώθησης περί την ΧΘ 16+300. Η παρουσία στην επιφάνεια αποδομημένων υλικών των πετρωμάτων του φλύσχη που σχηματίζουν κορήματα και εδαφικό μανδύα δημιούργησε την υπόθεση ότι η ζώνη αυτή συνεχίζεται και στο βάθος.

Κατά την εκκαφή της σήραγγας οι σχηματισμοί που προβλέπονταν απαντήθηκαν με μικρές αποκλίσεις, ως προς το προβλεπόμενο πάχος διάνοιξης. Η διαταραχή της στρωματογραφικής ακολουθίας λόγω της επώθησης, εκδηλώθηκε με την μετάβαση από τους πολυπτυχωμένους κερατολίθους και αργιλλικούς σχίστες του Ιουραϊκού σε ιλυολίθους πηλίτες και ψαμμίτες του

φλύσχη της ζώνης Πίνδου. Η μετάβαση πραγματοποιήθηκε περί την ΧΘ 16+500, μετατοπισμένη κατά 200 μ ανατολικά της αρχικής πρόβλεψης.

Στο επίπεδο διάνοιξης οι πλαστικοί (ως προς τη συμπεριφορά) σχηματισμοί των ιλυολίθων και λεπτόκκοκων ψαμμιτών του φλύσχη, εμφάνιζαν σφικτή δομή με απουσία φαινομένων διάβρωσης και ορυκτολογικής εξαλλοίωσης. Η σποραδική εξαλλοίωση ορυκτών μάλλον αποτελεί τυχαίο γεγονός παρά συστηματική διαφοροποίηση στο πέτρωμα.



Σχ. 4 Προβολές στρωματογραφικών επιφανειών στο επίπεδο διάνοιξης a&c, της επιφανειακής χαρτογράφησης (b) και στο (d) δείχνεται η σχέση ανάπτυξης των επιφανειών διάτμησης(S-C) με την επώθηση (T),

Στο σχηματισμό του φλύσχη αναπτύσσονται έντονα επιφάνειες ασυνέχειας που τέμνουν την στρωματογραφική επιφάνεια. Η γεωμετρική ανάπτυξή τους καθώς και η ανάπτυξη λείων επιφανειών ολίσθησης τις ερμηνεύουν σαν προϊόν έντονης διατμητικής παραμόρφωσης στο σχηματισμό.

Το σχήμα 4 παρουσιάζει ένα παράδειγμα της σχέσης των επιφανειών αυτών κατά την προβολή τους στο δίκτυο. Στην περιοχή οι σχηματισμοί εμφανίζονται με γενική ανάπτυξη της διεύθυνσης κλίσης προς τα Ανατολικά. Πάραυτα η ανάπτυξη έντονων πτυχών κλίμακας μέτρων, προκαλεί τοπικά

μεταβολές στα γεωμετρικά στοιχεία των στρωμάτων (σχ. 4)

### 3 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ

Οι εργασίες διάνοιξης της σήραγγας διαμέσου των ασβεστολιθικών και κερατολιθικών πετρωμάτων εκτελέστηκαν χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Αντίθετα στους σχηματισμούς του φλύσχη υπήρξε επιβράδυνση του ρυθμού διάνοιξης. Αυτή εν πολλοίς οφείλετο στην σύσταση και δομή του σχηματισμού, του οποίου οι συχνές και μικρού πάχους εναλλαγές ιλυολιθικών και πηλιτικών στρωμάτων διαχωριζομένων από χαμηλής αντοχής επιφάνειες καθώς και η διαμπερής ανάπτυξη ζωνών διάτμησης, ταπείνωνε την ικανότητα αυτοϋποστήριξης περιορίζοντάς την ενίοτε στο ελάχιστο. Ευνοείτο δηλαδή μία χαλάρωση και δημιουργία υπερεκσκαφών λόγω βαρύτητας χωρίς τα φαινόμενα αυτά να έχουν υποχρεωτικά σχέση με το τασικό περιβάλλον.

Το τασικό όμως περιβάλλον, λόγω του βάθους της σήραγγας, και η μικρή αντοχή της βραχώμαζας του φλύσχη ευνοούσαν και την ανάπτυξη παραμορφώσεων-συνθλίψεων και συνεπώς ήταν επιβεβλημένη βαριά υποστήριξη. Επιλέχθηκε η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης που περιελάμβαναν πλαίσια HEB140 εκτοξευμένο σκυρόδεμα και πλέγμα ή λαμαρίνες Bernold. Η εφαρμογή βαρέως τύπου διατομής υποστήριξης σε συνδιασμό με την εξαιρετικά χρονοβόρα αποκομιδή των προϊόντων των καταπτώσεων - αποφλοιώσεων κύρια στο τόξο της οροφής της σήραγγας αποτέλεσε τον καθοριστικό παράγοντα για τον χαμηλό ρυθμό προχώρησης.

### 4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

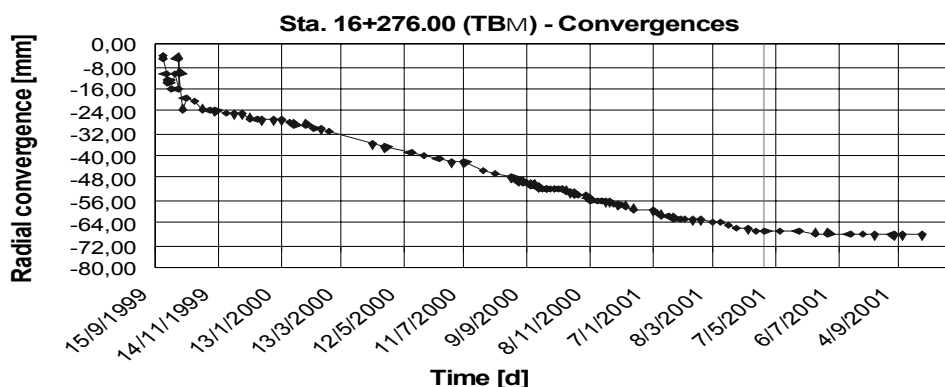
Οι σχηματισμοί του φλύσχη εμφανίστηκαν στην περιοχή, μετά την Χ.Θ 16+500 είτε με παχυστρωματώδη ανάπτυξη της ιλυολιθικής του φάσης, είτε με ρυθμικές εναλλαγές στρώσεων ψαμμίτου με αγγίλλο-ιλυόλιθο πάχους μερικών εκατοστών. Ο σχηματισμός μακροσκοπικά εμφάνιζε σφικτή δομή και ικανοποιητική αντοχή. Στην εκπόνηση της μελέτης του έργου για το σχηματισμό του φλύ-

σχη της Πίνδου θεωρήθηκαν οι εξής γεωτεχνικοί παράμετροι: κατάταξη στο σύστημα (κατα Beniafski 1989) με τιμή RMR=23, RQD=20%, αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη  $\sigma_c = 20$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=2000$  MP (προμελέτη έργου απο την ΔΕΗ 1994).

Ο επιτόπου υπολογισμός της τιμής του RMR κυμαινόταν στην θεωρητικά υπολογισμένη τιμή του 23 καθόσον η απομείωση εξαιτίας έντονης διάτμησης αντισταθμιζόταν απο προσθήκη λόγω της ολικής απουσίας νερού στην περιοχή.

Κατατάσσοντας τον σχηματισμό σύμφωνα με την ταξινόμηση του Geological Strength Index, (Hoek et.al. 1998, Marinou & Hoek, 2000), θα του δινόταν μία τιμή μεταξύ 20 και 25.

Οι παράμετροι που εκτιμήθηκαν για την εξαγωγή των προηγούμενων τιμών αυτών δεν περιελάμβαναν την πλήρη επίδραση της ζώνης επώθησης στο σχηματισμό.



Σχ. 5 Διάγραμμα μεταβολής της τιμής ακτινικής σύγκλισης με το χρόνο, στην περιοχή της επώθησης. Η κάθετη γραμμή πριν την 7-5-01, δείχνει το τέλος του χρόνου επιδιόρθωσης και ενίσχυσης των μέτρων υποστήριξης.

## 5 ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ - ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Η συμπεριφορά της βραχομάζας μετά τη διάνοιξη και η αποκατάσταση της δυναμικής ισορροπίας των τάσεων στη σήραγγα εκτροπής νερών του Αχελώου ελέγχεται με την εγκατάσταση συστημάτων μέτρησης σύγκλισης της διατομής, μηκυσιόμετρων βράχου, κυττάρων μέτρησης φορτίου τόσο σε αγκύρια όσο και σε χαλύβδινα πλαίσια.

Η εγκατάσταση του συστήματος μέτρησης της σύγκλισης της διατομής με μηχανική ταινία περιελάμβανε την τοποθέτηση ακίδων εντός της βραχομάζας σε ελάχιστο βάθος 30 εκ., οι οποίες σχημάτιζαν πεντάγωνο εγγεγραμμένο στην περίμετρο εκσκαφής. Το πεντάγωνο επιλέχθηκε εκ των υστέρων για να καταστεί δυνατή η μέτρηση, αφού η εγγραφή της διατομής του συρμού υποστήριξης σε τρίγωνο ήταν αδύνατη.

Μεταξύ των Χ.Θ. 16+350 και 16+200 τοποθετήθηκαν στη φάση διάνοιξης τρεις σταθμοί μέτρησης σύγκλισεων. Η πύκνωση αυτή έγινε λόγω των δυσκολιών που αντιμετωπίστηκαν κατά την εκσκαφή, κύρια διαμέσου των εναλλαγών ψαμμίτη και ιλυολίθου στον Ηωκαινικό Φλύσχη και γιατί η περιοχή αυτή αποτελούσε την πιθανή περιοχή τομής του επιπέδου επώθησης εντός της ζώνης με τον άξονα διάνοιξης της σήραγγας.

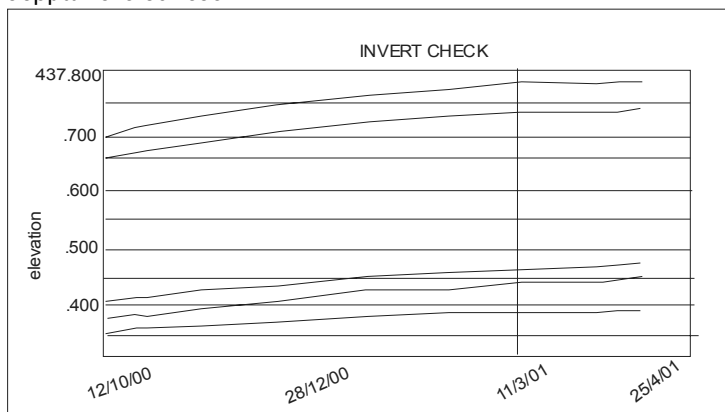
Οι μετρούμενες τιμές των πλευρών του πενταγώνου, ανάγονται σε τιμή ακτινικής σύγκλισης και απεικονίζονται σε διαγράμματα χρόνου σύγκλισης ή αποστασης εκσκαφής – σύγκλισης (σχ.5) .

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία σχετικά ανώμαλη πορεία των τιμών σύγκλισης σε σχέση με το χρόνο, που έγινε έντονα διακριτή μετά από διάστημα 3 μηνών. Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά το στάδιο που οι τιμές σύγκλισης έτειναν ασυπτωτικά προς ισορροπία εκδηλωνόταν ραγδαία μεταβολή με αύξηση της ακτινικής σύγκλισης. Αυτό διαρκούσε ένα διάστημα λήψης μερικών τιμών και ακολουθούσε χρονική περίοδος στην οποία οι μετρούμενες τιμές έδειχναν ασυμπτωτικότητα παρουσιάζοντας τάση αποκατάστασης δυναμικής ισορροπίας (περιοχή  $R_c = -28$ mm στους 3 μήνες απο εκσκαφή στο διάγραμμα). Το φαινόμενο αυτό επαναλήφθηκε τρεις φορές σε διάστημα πλέον

του έτους. Στο διάστημα αυτό άρχισαν να εμφανίζονται και μακροσκοπικές βλάβες στα εγκατεστημένα μέτρα υποστήριξης.

## 6 ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥΣ

Τη χρονική στιγμή 7 μηνών μετά τη διάνοιξη εμφανίσθηκαν ρωγμές στην επιφάνεια του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Η πυκνότητα και το πλάτος των ρωγμών στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα αυξανόταν με την πάροδο του χρόνου, διατηρώντας αναλογία με την μετρούμενη αυξανόμενη ακτινική σύγκλιση. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρήθηκε ότι τα σημεία επαφής και προσαρμογής των προκατασκευασμένων στοιχείων δαπέδου παρουσίαζαν σχετικές μεταξύ των μετακινήσεις. Μετρήθηκαν διαφορικές μετατοπίσεις ως προς τον επιμήκη άξονα τους (άξονας κάθετος στον άξονα της σήραγγας), και ολίσθηση επί της περιμέτρου εκσκαφής. Λαμβάνοντας σημεία στα άκρα των προκατασκευασμένων στοιχείων, ξεκίνησε η μέτρηση των σχετικών διαφορών των υψομέτρων τους, από σημείο βάσης ευρισκόμενο στην απαραμόρφωτη περιοχή. Τα στοιχεία που ελήφθησαν (σχ. 6) και η ερμηνεία τους έδειξε ότι πρόκειται για φαινόμενο οφειλόμενο στην αντίδραση της βραχώμαζας και όχι σε ελλατωματική τοποθέτηση ή επιρροή από την μονοσήμαντη κυκλοφορία των συρμών στο δάπεδο.



Σχ. 6 Διάγραμμα της υψομετρικής μεταβολής των προκατασκευασμένων στοιχείων δαπέδων στην περιοχή της επώθησης, η κάθετη γραμμή δείχνει το χρόνο επιδιόρθωσης.

Στο στάδιο αυτό αποφασίσθηκε η καθαίρεση του ήδη ρωγματομένου εκτοξευμένου σκυροδέματος και η εφαρμογή αντιστοιχου νέου, με πιθανή αύξηση του πάχους του. Η καθαίρεση των πρώτων τμημάτων αποκάλυψε ότι η βλάβες επεκτεινόταν και στα χαλύβδινα πλαίσια που υποστηρίζαν τη διατομή. Εμφανισθήκαν στρεβλώσεις περί τον καμπύλο τους άξονα καθώς και κάμψεις παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας.

Η διαπιστωθήσα έκταση των βλαβών, οδήγησε στην επαναθεώρηση της κατάστασης και διαστασιολογηση εκ νέου της μεθόδου αντιμετώπισης και ενίσχυσης της διατομής. Επιλέχθηκε η διατήρηση των προκατασκευασμένων στοιχείων του δαπέδου στη νέα μετατοπισμένη θέση τους. Η προκαλούμενη μείωση της διατομής υπολογίσθηκε ότι δεν επιρεάζει τις απαιτήσεις του έργου.

Η τελική επιλογή περιελάμβανε τη σταδιακή καθαίρεση όλου του ρωγματομένου Ε.Σ. και εφαρμογή νέου σε μεγαλύτερο πάχος. Την ενίσχυση της υποστήριξης με την τοποθέτηση δευτέρου πλαισίου εσωτερικά του προϋπάρχοντος, το οποίο τοπικά είχε παραμορφωθεί.

Κρίθηκε ορθό η εφαρμογή των ενισχυμένων αυτών μέτρων να επεκταθεί σε μήκος πριν και μετά την περιοχή που εμφανίσθηκαν οι βλάβες. Με την έναρξη των εργασιών επισκευής αυξήθηκε ο ρυθμός μέτρησης των παραμορφώσεων τόσο στην περίμετρο εκσκαφής όσο και στα προκατασκευασμένα στοιχεία του δαπέδου. Κατά την πάροδο του χρόνου και την εφαρμογή των ενισχυμένων μέτρων προστασίας, οι μετρήσεις της σύγκλισης της διατομής και η ισορροπία των στοιχείων έδειξαν μεταναστευτική τάση του ρυθμού παραμόρφωσης προς τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας (ανάντι). Το φαινόμενο αυτό διήρκησε μόνο κατά την περίοδο επισκευής και τερματίσθηκε μέτρα πριν την Χ.Θ. στην οποία ολοκληρώθηκαν τα ενισχυμένα μέτρα υποστήριξης.

Μετά την ολοκλήρωση της πρόσθετης υποστήριξης και των επισκευών στα μέτρα υποστήριξης και στα στοιχεία του δαπέδου, συνεχίστηκε η ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς στην περιοχή. Παρατηρούμε στο διάγραμμα του σχ. 5 ότι από την ολοκλήρωση της επισκευής οι τιμές της ακτινικής σύγκλισης παρέμειναν σχεδόν σταθερές με ασυμπτωτικής μορφής καμπύλη. Θεωρούμε συνεπώς ότι τα πρόσθετα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόστηκαν μεταξύ των Χ.Θ. 16+292 και 16+274 επιφέρανε την αποκατάσταση της δυναμικής ισορροπίας στην περιοχή.

## 7 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα γεωλογικά στοιχεία από την επιφανειακή χαρτογράφηση και τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις προσδιορίζαν περί την ΧΘ 16+250 μία ζώνη εσωτερικής επώθησης των σχηματισμών της Πίνδου. Το επίπεδο επώθησης και η ζώνη παραμόρφωσης που το συνοδεύει αναπτύσσονται παράλληλα με την ανάπτυξη της στρωματογραφικής επιφάνειας των υποκειμένων (επιπευομένων) σχηματισμών. Ταυτόχρονα στους επιπτεούντες σχηματισμούς αναπτύσσονται πτυχές χαρακτηριστικές για την γεωμετρία επωθήσεων. Οι εμπλεκόμενοι στην επώθηση σχηματισμοί (υπερκείμενοι και υποκείμενοι) εμφανίζουν ακραίες διαφορές στις τιμές των φυσικών τους χαρακτηριστικών, με συνέπεια να διαφέρει η μηχανική συμπεριφορά τους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Οι γνώσεις μας σχετικά με το πώς η γεωμετρία της πτύχωσης επιρεάζει και επιδρά στον τρόπο και το σημείο ανάπτυξης μίας διαστρωματικής ζώνης διάτμησης εντός πτυχών που εξελίσσονται σε επωθήσεις, περιορίζονται στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων της παραμόρφωσης στις λιθολογικές ιδιότητες σύμφωνα με τη μηχανική ανάλυση των πτυχών (Ramsey & Huber 1987).

Κατά την εξέλιξη - ανάπτυξη μία ζώνης επώθησης, με την αύξηση της ασκούμενης τάσης εκδηλώνεται μετακίνηση (εκδηλώνεται και σαν πτύχωση ανάλογα με το στάδιο εξέλιξης) λόγω διάτμησης των υπερκειμένων στρωμάτων, ενώ ταυτόχρονα προκαλείται αύξηση των τοπικά συγκεντρωμένων τάσεων. Κατά μήκος της ζώνης επαφής (π.χ η επιφάνεια μίας διαστρωματικά αναπτυγμένης ζώνης διάτμησης) μεταξύ δύο στρωμάτων με διακριτά ακραίες τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών, τα πετρώματα παραμορφώνονται.

Η μετακίνηση λόγω της απλής διάτμησης επικεντρώνεται στο πλέον ασθενές πέτρωμα ή στρώμα που συνορεύει με τη ζώνη επώθησης. Η κίνηση αυτή όχι μόνο επιταχύνει την αποδόμηση του πετρώματος αλλά διαταράσσει και την αρχική κατανομή των τάσεων στην βραχομάζα.

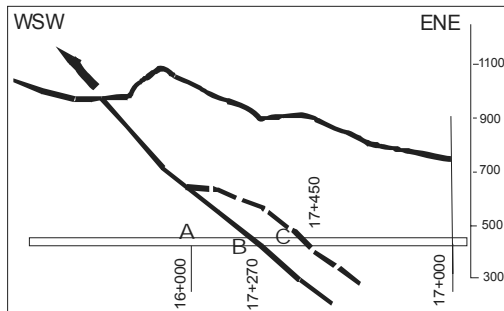
Αυτή η ανακατανομή τάσεων που εκδηλώνεται κατά τη διάνοιξη σηράγγων διαμέσου τέτοιων σχηματισμών οδηγεί σε σύγκλιση. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι παρατηρούμενες τιμές συγκλίσεων είναι υψηλές.

Στην περίπτωση της σήραγγας εκτροπής οι επιπτεούντες σχηματισμοί (ασβεστόλιθοι και πυριτιωμένοι σχίστες) είναι οι πλέον άκαμπτοι ενώ οι υποκείμενοι σχηματισμοί του φλύσχη (ιλυόλιθοι και εναλλαγές με ψαμμίτες) είναι πιο πλαστικοί (και αδύναμοι) στη συμπεριφορά τους. Η εκδήλωση της ζώνης επώθησης στην επιφάνεια συνοδεύεται από ζώνη πάχους μερικών μέτρων στην οποία τα εμπλεκόμενα πετρώματα, κύρια του υποκείμενου σχηματισμού, εμφανίζονται με απώλεια της αρχικής τους υφής και με φτωχές φυσικές ιδιότητες. Στην επιφάνεια, έντονα φαινόμενα διάβρωσης και εξαλλοίωσης έχουν αναπτυχθεί στο ισχυρά καταπονημένο από την τεκτονική πέτρωμα. Η υφή των σχηματισμών στην επιφάνεια, στήριξε την υπόθεση της προέκτασης της ζώνης αυτής και σε βάθος με ανάλογα χαρακτηριστικά. Αναμένετο συνεπώς να συναντηθεί κατά την διάνοιξη, στην Χ.Θ. 16+270 μία ζώνη με βραχόμαζα εξαιρετικά χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών και πιθανόν με εμφάνιση ρέοντος εδάφους.

Αναταού στο επίπεδο της σήραγγας και κατά τη διάνοιξη, οι υπερκείμενοι τεκτονικά σχηματισμοί εμφάνισαν μία ζώνη με υποβαθμισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά λόγω διάτμησης και τεκτονισμού. Η Χ.Θ όπου συναντήθηκε η ζώνη διαχωρισμού των τεκτονικά υπερκειμένων από τους υποκειμένους σχηματισμούς απαντήθηκε κατά 200μ ωρύτερα, προς τα κατόπι (Α) (σχ.7), σε σχέση με την πρόβλεψη της επιφανειακής χαρτογράφησης και ερμηνείας. Οι υποκείμενοι σχηματισμοί (ιλυόλιθοι και ψαμμίτες) εμφάνιζαν μακροσκοπικά τουλάχιστον μηχανική συμπεριφορά καλύτερη από το υποτιθέμενα αναμενόμενο ρέον έδαφος.

Η οριζοντιογραφική μετατόπιση της επιφάνειας επώθησης, ή το μεταβλητό πάχος της ζώνης κατά την σε βάθος ανάπτυξη της ζώνης εμφανίζεται συχνά κατά μήκος της ανάπτυξης επωθήσεων.





Σχ. 7 Σχηματική ανάπτυξη της επώθησης

Ερμηνεύεται μέσω ενός μηχανισμού εκτόνωσης τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της επώθησης και της κίνησης των υπερκείμενων (συχνά άκαμπτων) πετρωμάτων επί της προκαθορισμένης επιφάνειας. Αποτέλεσμα είναι να μετακινούνται οι εύκαμπτοι υποκείμενοι σχηματισμοί και να καταλαμβάνουν χώρους εντός των άκαμπτων υπερκείμενων. Στους χώρους και περιοχές αυτές συνήθως δεν αναπτύσσεται

έντονο δυναμικό πεδίο. Ταυτόχρονα η ανομοιογενής λιθολογική σύσταση του επιπευόμενου σχηματισμού δημιουργεί ζώνες με έντονη διαφορά μηχανικής αντοχής και συμπεριφοράς (εναλλαγές ιλυόλιθου με ψαμμίτη) που επιτείνουν την ανάπτυξη του προηγούμενου μηχανισμού. Ειδικότερα στη περίπτωση της συγκεκριμένης επώθησης στην οποία διαφαίνεται ότι η δημιουργία και εξέλιξη της, πραγματοποιήθηκε κάτω από σχετικά κρύες συνθήκες, καθόσον η ιζηματογενής πετρογραφική υφή διατηρείται και τα ορυκτά δεν εμφανίζονται ανακρυστάλλωμενα λόγω θέρμανσης.

Στο επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας, ζώνες διάτμησης και μετακίνησης εμφανίσθηκαν στους υπερκείμενους σχηματισμούς των ασβεστολιθικών και πυριτιωμένων σχιστολίθων σε έκταση μερικών μέτρων, Χ.Θ. 16+450. Στο υποκείμενο ιλυολιθικό τμήμα του φλύσχη οι ζώνες αυτές αναπτύσσονται συστηματικά για μήκος άνω των 200 μ. Στο διάστημα αυτό η πυκνότητα εμφάνισης των διατμητικών ζωνών με το μήκος δεν ήταν σταθερή.

Με βάση τα στοιχεία της συμπεριφοράς της βραχόμαζας με την πάροδο του χρόνου, πιστεύουμε ότι περι την Χ.Θ. 16+270 η διάνοιξη της σήραγγας έγινε διαμέσου της κύριας επιφάνειας ανάπτυξης της ζώνης επώθησης.

Η συμπεριφορά της βραχόμαζας με τις εκδηλούμενες υψηλές τιμές σύγκλισης, φανερώνει την δυναμικά ενεργή κατάσταση της και την ικανότητα εκτόνωσης συσσωρευμένων τάσεων. Οι τάσεις αυτές προερχόταν, πάντοτε σε συνδιασμό με την τάση που προκαλεί το ίδιο βάρος των υπερκείμενων, τόσο από την άμεσα περιβάλλουσα βραχόμαζα, όσο και από θύλακες συσσωρευμένων τάσεων, τους οποίους διατρέπει στο υπερκείμενο ύψος της, η ζώνη επώθησης.

Ο γεωλογικός σχηματισμός κατά μήκος μίας τεκτονικής ασυνέχειας λόγω της έντονης διατμητικής καταπόνησης του αποτελεί το πιο πρόσφορο χώρο εκτόνωσης τάσεων. Ενισχύεται έτσι η θέση ότι η ζώνη της κύριας επώθησης τέμνει το επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας στην ΧΘ 16+270, όπως θεωρητικά δείχθηκε.

Στο σχ. 7 δείχνουμε την πιθανή γεωμετρία της ζώνης επώθησης. Οι σχηματισμοί στις περιοχές Α και Β έχουν εμφανώς επηρεασθεί από την τεκτονική δυναμική, αλλά η συμπεριφορά τους κατά την εκσκαφή μπορούσε να αντιμετωπισθεί σύμφωνα με τους αρχικούς υπολογισμούς και παραδοχές της μελέτης. Στο τμήμα Β εκεί που διέρχεται ή κύρια επιφάνεια επώθησης οι σχηματισμοί έχουν υποστεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, και κατά μήκος της ζώνης αυτής εξακολουθούν να υπάρχουν συσσωρευμένες τάσεις, που δεν εκτονώθηκαν κατά την πτύχωση του ορογενούς. Η διατάραξη της ασταθούς αυτής δυναμικής ισορροπίας με την εκσκαφή της σήραγγας εκτόνωσε το πεδίο των τάσεων οδηγώντας σε σύγκλιση τη διατομή της σήραγγας.

Η ύπαρξη τεκτονικών δομών σε κλίμακα φλοιού, επιρρεάζουν με σύνθετο και πολύπλοκο τρόπο το δυναμικό πεδίο των τάσεων που δρουν στους σχηματισμούς σε ένα ορογενετικό σύστημα. Η παρεμβολή ζωνών έντονου τεκτονισμού όπως αυτή που περιγράψαμε αποτελεί συχνά πηγή προβλημάτων κατά την εκτέλεση ενός έργου, ειδικά υπογείου, που απαιτούν ιδιαίτερη λύση κάθε φορά. Ίσως είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός τεκτονικού μοντέλλου για τα πετρώματα πάνω στον άξονα της σήραγγας πριν την έναρξη των εργασιών διάνοιξης. Με τον τρόπο αυτό ίσως καταστεί δυνατό να αντιμετωπισθούν συστηματικά πολύπλοκες γεωλογικές συνθήκες σε διάφορα βάθη, πολυπτυχόμενων και πολυεπιωθημένων ορογενετικών συστημάτων.

Η αναγνώριση της υφής και δομής σε ένα πέτρωμα που είναι προϊόν έντονων τεκτονικών δράσεων στο σχηματισμό, προϊδεάζει για τη μεταβολή των φυσικών του ιδιοτήτων. Με την έγκαιρη αναγνώριση αυτών την αξιολόγηση τους και την επιλογή κατάλληλων μέτρων υποστήριξης επιδιώκεται και επιτυγχάνεται η αποφυγή πλήρους αστοχίας της κατασκευής.

Αυτό κατέστη δυνατό και στην περίπτωση της σήραγγας εκτροπής νερών του Αχελώου όπου η έγκαιρη αναγνώριση και αξιολόγηση των τεκτονικών στοιχείων και της υφής του πετρώματος, συνδισμένα με τα στοιχεία του δυναμικού πεδίου (υπερκείμενα) απέτρεψαν την ολική αστοχία της σήραγγας. Κατέστη δε δυνατή, η πραγματοποίηση επισκευών και αντιμετώπιση του φαινομένου, χωρίς να μειωθεί η ασφάλεια του έργου.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν το επιστημονικό προσωπικό που εμπλέκεται στην κατασκευή του έργου τόσο από την επιβλέπουσα υπηρεσία ΕΥΔΕ ΟΣΥΕ της ΓΓΔΕ του ΥΠΕΧΩΔΕ και τους συμβούλους της όσο και από την Ανάδοχο Κοινοπραξία, για την συνεργασία κατά την εκτέλεση των εργασιών.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Beniawski, Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications, John Wiley & Sons 251 p.
- ΔΕΗ/ ΔΑΥΕ 1994 , Έργα Εκτροπής Αχελώου , Σήραγγα εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία, Τεχνικογεωλογική μελέτη. Αθήνα 1994
- Hoek, E. & Brown, E.T.. (1980), Underground Excavations in Rock. Institute of Mining and Metallurgy, London
- Hoek, E. Marinos, P.G. & Benessi, M. (1998), Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athen Schists System of Formations. Jacobshagen, V. 1986 Geologie von Griechenland, Gebr. Borntraeger Berlin
- I.Γ.Μ.Ε. Γεωλογικός Χάρτης 1:50.000 Φύλλο Μουζάκι
- Marinos, P. & Hoek, E. 2000, GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. Of GeoEng 2000, Melbourne, and in www.rocsciences.com
- Ramsey, J., & Huber, M. (1987) Modern Structural Geology, Academic Press,

#### ABSTRACT

## **BEHAVIOR OF PINDOS FLYSCH DURING TUNNELLING THROUGH A THRUST ZONE. DEFORMATION AND ROCK BEHAVIOR. EXPERIENCE FROM THE ACHELOOS RIVER DIVERSION TUNNEL TO THESSALY.**

Sfeikos A.<sup>1</sup> and Marinos P.G.<sup>2</sup>

*1 Min. Of Public Works, Dept. for Acheloos Works, Trikala aris3kala@yahoo.gr*

*2 Professor, Dept. of Civil Engineering NTUA & Centre de Geologie de Univ.De Marme La Valee, France, marinos@central.ntua.gr*

The Acheloos diversion project consists of a series of reservoirs and a diversion tunnel. The tunnel has a designed internal diameter of 6m and a total length of ca. 17 400 m. Through the tunnel waters from the upper Achellos will be transferred to Thessaly. The project area belongs entirely to the Pindos zone. To the west (Mouzaki – Drakotrypa area) limestone, Jurassic chert and transitional strata (limestone and siltstone interchanges) overthrust sandstone and siltstone of the Pindos Flysch association (Paleogene). The thrust plane is well exposed and its geometrical features are clearly defined on the surface. Within silt- and sand- stones of the flysch, the development of shear zones borders the thrust plane. Tunneling through limestone and chert advanced without specific problems. Tunneling through the flysch sequence slowed down the advancing rate. This was partially due to the composition and structure of the formation. The stand-up time was reduced due to compositional changes and the throughout development of shear zones.

Heavy support measures were installed and immediate monitoring began in the area where the thrust zone was developed. Data analysis and its results show that the rock formation remained into a dynamically active status. Four months after the excavation forces acting at the tunnel perimeter, exceeded the support measures bearing ability causing tunnel radial convergence and the development of damages became visible.

In this paper we describe tunneling conditions, the geology and the response of formations during excavation, as this was interpreted by monitoring data. We describe the damages caused as well as the counter measures applied in order to control and terminate the tunnel convergence.