

## ΑΡΓΙΛΙΚΟΙ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ ΤΟΥ ΦΛΥΣΧΗ. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΓΑΔΟΥΡΑ ΡΟΔΟΥ

Μαρίνος Π.<sup>1</sup>, Χριστοδουλοπούλου Τ.<sup>2</sup>, και Περλέρος Β.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Καθηγήτριας ΕΜΠ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, [marinos@central.ntua.gr](mailto:marinos@central.ntua.gr)

<sup>2</sup> Δρ. Τεχν. Γεωλόγος, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΓΓΔΕ, Φαναριωτών 9, 10178, Αθήνα, [tasoulac@yahoo.com](mailto:tasoulac@yahoo.com)

<sup>3</sup> Γεωλόγος, Μελετητής, Διονύσου 56, 15234, Χαλάνδρι, Αθήνα, [perleros@internet.gr](mailto:perleros@internet.gr)

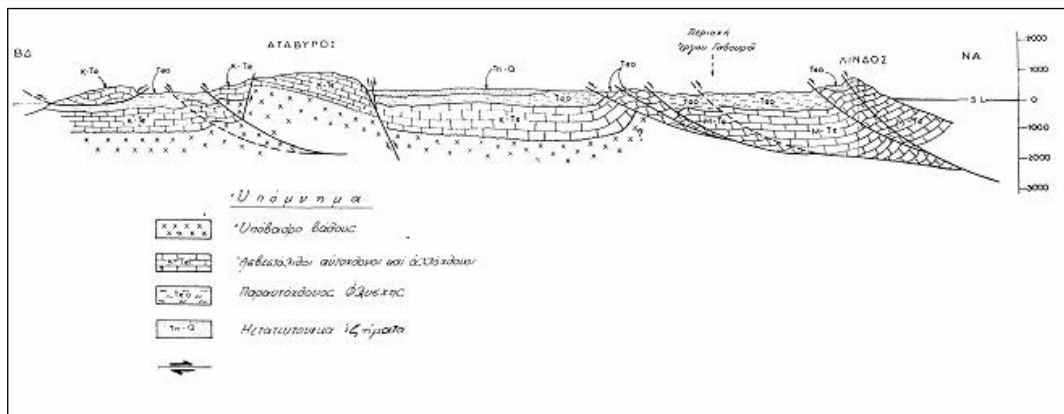
### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στις ιδιαιτερότητες των γεωλογικών-γεωτεχνικών συνθηκών που χαρακτηρίζουν την περιοχή της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Γαδουρά (στη Ρόδο) και στον τρόπο με τον οποίο αξιολογήθηκαν και αντιμετωπίστηκαν κατά την κατασκευή της προσωρινής υποστήριξης. Ο έντονα τεκτονισμένος γεωλογικός σχηματισμός του φλύσχη, που απαντάται στη στενή περιοχή κατασκευής της σήραγγας, χαρακτηρίζεται από την επικράτηση των αργιλικών σχιστολίθων έναντι των ιλυολίθων αλλά και των άλλων δευτερευουσών λιθολογικών μελών του (ψαμμιτικοί οριζόντες, σποραδικοί φακοί γύψου και μικρές ασβεστολιθικές παρεμβολές), καθώς και από την απουσία υδροφορίας με την έννοια του υδροφόρου ορίζοντα. Η αργιλική αυτή φάση του φλύσχη παρουσιάζει έντονη σχιστότητα-φύλλωση (εξαιτίας της ισχυρής τεκτονικής συμπίεσης που οδήγησε στη δημιουργία πολλών εσωτερικών γυαλιστερών επιφανειών μικροδιατμήσεων) και χαοτική δομή (σε θέσεις όπου βρίσκεται σε εναλλαγές με ψαμμίτη και ιλυόλιθο), με αποτέλεσμα την εμφάνιση καταρρεύσεων και αποκολλήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Σύμφωνα με το γεωλογικό-γεωτεχνικό μοντέλο που διατυπώθηκε μετά τις πρώτες εκσκαφές οι αργιλικό σχιστόλιθοι του φλύσχη αποτελούν μία «εδαφικού τύπου» βραχώμαζα που χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές γεωτεχνικές παραμέτρους ( $GSI=15-20$ ,  $m_i=6$ ,  $\sigma_{ci}=5-10$  MPa,  $E_m=300\pm 500$  MPa,  $c'=150\pm 250$  kPa,  $\phi=13^\circ\pm 18^\circ$  και  $\sigma_{cm}=0,40\pm 0,60$  MPa). Με διαμόρφωση κεκλιμένου μετώπου, ενίσχυση από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χρήση αγκυριών fiber glass, η ασθενής βραχώμαζα συμπεριφέρθηκε πολύ καλά στο μέτωπο. Οι «ομπρέλες» των ελαφριών δοκών προπορείας που εφαρμόστηκαν, επίσης, για τη συγκράτηση του μετώπου και του «πυρήνα» μπροστά από το μέτωπο, συνέβαλαν στην ευστάθεια, αν και η επιλογή αυτή ευρίσκετο σε συντηρητική κατεύθυνση. Στο υπόλοιπο κέλυφος (από χαλύβδινα πλαίσια ενσωματωμένα σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα), η εμφάνιση πλευρικών ωθήσεων επέβαλε το άμεσο κλείσιμο της διατομής στο δάπεδο. Για την εκτόνωση της πίεσης των πόρων διανοίχθησαν, τοπικά, ανακουφιστικές οπές.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σήραγγα εκτροπής του φράγματος Γαδουρά αποτελεί τμήμα του έργου της ύδρευσης της πόλης της Ρόδου και των γύρω κοινοτήτων από το φράγμα στον ποταμό Γαδουρά. Πρόκειται για σήραγγα μήκους περίπου 600 m (από ΧΘ 0+100 έως ΧΘ 0+696,73), πεταλοειδούς διατομής, με άνοιγμα εκσκαφής  $D=4.40$  m και καθαρό άνοιγμα, μετά την τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα, 3.50 m. Κατασκευάστηκε για να λειτουργήσει αφενός μεν ως σύστημα εκτροπής αφετέρου δε ως σύστημα υδροληψίας-εκκένωσης, μετά την έμφραξη του στομίου εισόδου.

Η ευρύτερη περιοχή θεμελίωσης των έργων του φράγματος Γαδουρά δομείται γεωλογικά από αλπικά ιζήματα, κυρίως ασβεστολίθους (αυτόχθονους, αλλά και επωθημένους πάνω σε φλύσχη-Σχήμα 1) και φλύσχη, διαφόρων γεωτεκτονικών ζωνών (Πίνδου, Γαβρόβου, Ιονίου), καθώς και από



Σχήμα 1. Γεωλογική τομή της ευρύτερης περιοχής της νήσου Ρόδου (σε Υδροέρυνα, 1980-τεύχος γεωλογικών ερευνών φάσης προμελέτης, από Safor, 1964).

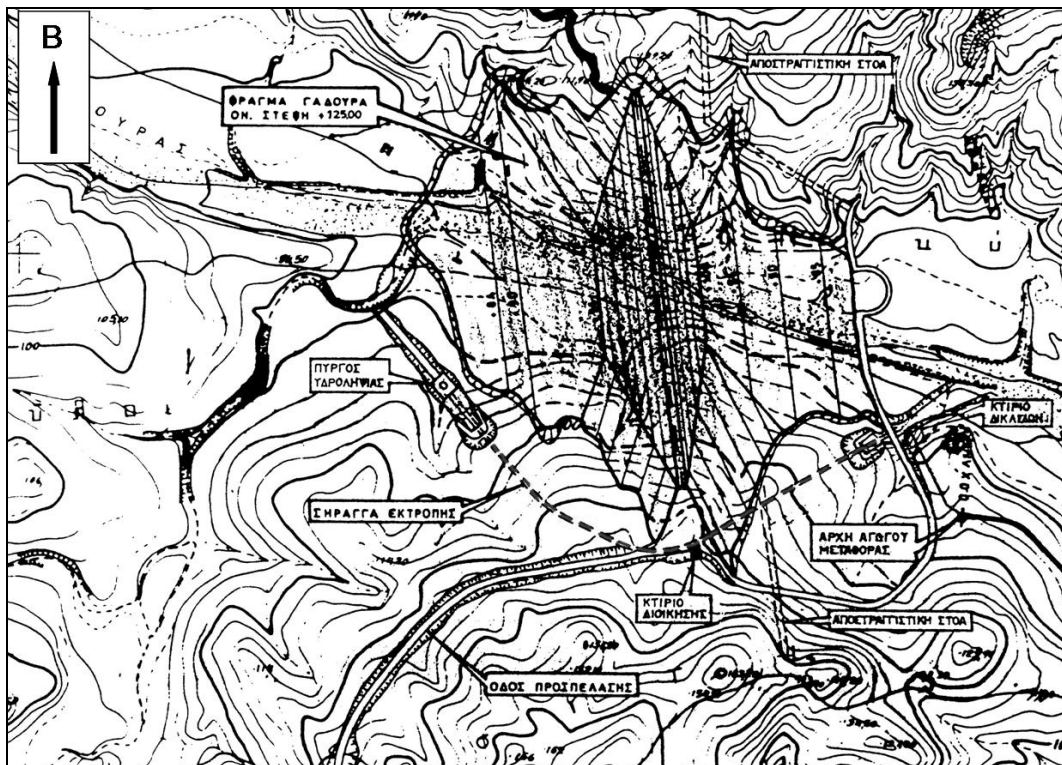
μεταλλικά μολασσικά, νεογενή και τεταρτογενή ιζηματα, που αποτελούνται κυρίως από μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, πλευρικά κορήματα κλιτύος, υλικά αναβαθμιδών και καλύπτουν ασύμφωνα τους αλπικούς σχηματισμούς (Mutti et al., 1970). Εξαιτίας της θέσεώς του στην απόληξη του αιγαίου τόξου, ο φλύσχη έχει υποστεί μικρή μετακίνηση και εξαιρετική παραμόρφωση, με εσωτερική αναδιάταξη της δομής του λόγω του έντονου τεκτονισμού, και χαρακτηρίζεται ως παραυτόχθονος (Mutti et al., 1970). Η πολυπλοκότητα της γεωλογικής δομής έχει εξαιρετικά ενισχυθεί από τη σημαντική νεοτεκτονική δραστηριότητα, κατακόρυφου-παρακατακόρυφου χαρακτήρα (ΒΒΑ-ΝΝΔ, ΑΝΑ-ΔΒΔ διεύθυνσης, καθώς 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 αιγαιική πλάκα και συνοδεύεται από υψηλή σεισμικότητα. Τα αποτελέσματα της νεοτεκτονικής δραστηριότητας μπορούν να παρατηρηθούν στις μορφοτεκτονικές αναβαθμιδές στις πλευρές της λεκάνης του Γαδουρά, αλλά δεν είναι εμφανή στο αντέρεισμα όπου τοποθετείται η σήραγγα λόγω της κάλυψης από τον ελουβιακό μανδύα του φλύσχη.

Ειδικότερα, η περιοχή της σήραγγας εκτροπής συνίσταται, από πλευράς στρωματογραφίας, από τον φλύσχη Λάερμα, της Ιονίου ζώνης, που καλύπτεται επιφανειακά από ελλουβιακό μανδύα αποσάθρωσης και πλευρικά κορήματα κλιτύος, σε πάχος περίπου 4-8 m, ή από αργιλικά, κυρίως, προσχωματικά υλικά. Σε θέσεις πλησίον της κοίτης του ποταμού, απαντώνται αποθέσεις παλιάς αναβαθμιδής που καλύπτουν το σχηματισμό του φλύσχη, ενώ με τη σειρά τους καλύπτονται από πλευρικά κορήματα, όπως π.χ. στην περιοχή του στομίου εξόδου της σήραγγας.

Ο άξονας της σήραγγας εκτροπής τοποθετήθηκε στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος, έξω από το χώρο φόρτισης των αναχωμάτων (κυρίως φράγμα, πρόφραγμα – Σχήμα 2) με μέγιστο πάχος υπερκειμένων υλικών περίπου 47 m. Στο αριστερό αντέρεισμα η μορφολογία όπως και το γεγονός ότι είχαν παρατηρηθεί μικρές ολισθήσεις δεν προκρίθηκε η τοποθέτηση της σήραγγας εκτροπής.

## 2 ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΛΥΣΧΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΕΚΠΟΝΗΘΕΙΣΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ

Η γεωλογική-γεωτεχνική διερεύνηση κατά τη φάση των μελετών (γεωλογικές χαρτογραφήσεις, γεωτρήσεις, ερευνητική στοά μήκους 73 m στο δεξιό αντέρεισμα σχεδόν παράλληλη με τον άξονα της σήραγγας), έδειξε ότι κατά μήκος της σήραγγας εκτροπής θα συναντηθούν κατά κύριο λόγο οι ισχυρά διατμημένοι αργιλικόι σχιστόλιθοι – ιλυόλιθοι του φλύσχη. Κατά θέσεις εντός της μάζας των διατμημένων αργιλικών σχιστόλιθων συναντώνται οριζόντες ψαμμιτών όπως επίσης και φακοί γύψων και ασβεστολίθων. Λόγω της σημαντικής τεκτονικής καταπόνησης, οι αργιλικόι σχιστόλιθοι παρουσιάζονται έντονα πτυχωμένοι και διατμημένοι με φλεβίδια ασβεστίτη και γύψου, με πολλές εσωτερικές επιφάνειες διατμήσεων ποικίλου μεγέθους και προσανατολισμού (τουλάχιστον στην κλίμακα του μετώπου) που φέρουν επιφλοιώματα ορυκτών πολύ πτωχής μηχανικής συμπεριφοράς (διογκούμενα αργιλικά ορυκτά).



Σχήμα 2. Οριζοντιογραφία με τη θέση του άξονα της σήραγγας.

Στην περιοχή της σήραγγας εκτροπής εκτελέστηκαν, στη φάση της μελέτης, εννέα (9) γεωτρήσεις βάθους μέχρι και 70 m περίπου, μία εξ αυτών κεκλιμένη. Με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών υδροπερατότητας (Lugeon, Maag), που εφαρμόστηκαν σε διάφορα βάθη κατά μήκος των γεωτρήσεων, ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας,  $k$ , κυμαίνεται σε τιμές  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  cm/sec, ενώ σε αρκετά μεγάλα βάθη (κυρίως κάτω από 40 m) δεν παρατηρήθηκε σε μερικές περιπτώσεις απώλεια φορτίου. Οι τιμές της τάξης του  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  cm/sec, εξάλλου, χαρακτηρίζουν τα ανώτερα βάθη (μέχρι 20 m περίπου όπου ο βαθμός αποσάθρωσης είναι μεγαλύτερος), ή ζώνες γειτονίας του αργιλικού σχιστολίθου με κερματισμένους ψαμμιτικούς, ασβεστολιθικούς οριζόντες, ή ακόμα και κερματισμένους ιλυολιθικούς πάγκους. Γενικά, ο σχηματισμός του φλύσχη χαρακτηρίζεται από απουσία υδροφορίας ( $k \approx 10^{-6}$  cm/sec) με την έννοια του υδροφόρου οριζοντα, αλλά το νερό υπάρχει «αδιόρατο», λόγω της μικρής περατότητας, υποβαθμίζοντας περαιτέρω την αντοχή του υλικού και εγκαθιστώντας τάσεις πόρων που δεν αποτονώνονται καλά, απαιτούνται συνεπώς ανακουφιστικές οπές στην προσωρινή υποστήριξη. Από τις μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού στις γεωτρήσεις, ο υδροφόρος οριζοντας εξ άλλου εμφανίζεται αρκετά ψηλά, κυρίως μέσα στους σχηματισμούς των κορημάτων-ελλουβιακού μανδύα.

Από τα πρώτα στάδια των μελετών έγινε αντιληπτή η δυσκολία των συνθηκών κατασκευής της σήραγγας εξαιτίας των πολύ χαμηλών γεωμηχανικών χαρακτηριστικών του φλύσχη. Οι γεωτεχνικές παράμετροι που ελήφθησαν στα πλαίσια της οριστικής μελέτης για τον υπολογισμό της αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, με βάση το κριτήριο Hoek & Brown (Hoek & Brown, 1997), για τις τρεις κύριες κατηγορίες πετρωμάτων που απαντώνται στην περιοχή της σήραγγας, ήταν οι εξής: α) ψαμμίτης (fs):  $m_i=19$ ,  $\sigma_{ci}=19$  MPa, GSI=40, β) ιλυόλιθος (fl):  $m_i=9$ ,  $\sigma_{ci}=1.5$  MPa, GSI=35, γ) μέτρια έως ισχυρά αποσαθρωμένοι αργιλικός σχιστόλιθος (fa):  $m_i=4$ ,  $\sigma_{ci}=0.5$  MPa, GSI=22. Με βάση τις αναλύσεις ευστάθειας στους παραπάνω τρεις σχηματισμούς, προτάθηκαν για την προσωρινή υποστήριξη αγκύρια βράχου σε κάρναβο και εκτοξευόμενο σκυροδέμα πάχους 10cm, ενώ για δυσχερείς θέσεις και για τα στόμια εκτός των ανωτέρω μέτρων προστασίας προβλέποντο και πλαίσια ανά 1,0 ή 0,75 m και πάχος ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος 15cm.

### 3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ-ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΦΛΥΣΧΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΟΚΑΛΥΠΤΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Με την έναρξη των εκσκαφών στα στόμια εισόδου και εξόδου της σήραγγας, κατά τη φάση της κατασκευής, η βραχομάζα του φλύσχη αποκαλύφθηκε αποδιοργανωμένη σε μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα στα πρηνή διαμόρφωσης του στομίου εξόδου να σημειωθεί μικρή κυκλοειδής αστοχία.

Ο ισχυρά διατμημένος φλύσχος και ειδικότερα ο ισχυρά συμπιεσμένος αργιλικός σχιστόλιθος-ιλυόλιθος, με έντονη παρουσία αργιλικών ορυκτών στις γυαλιστερές επιφάνειες διάτμησης, διαχωρίζεται εύκολα σε φύλλα πάχους έως και κλίμακας χιλιοστού. Τα φύλλα αυτά λόγω του μικρού τους πάχους και της τεκτονικής συμπίεσης δεν οργανώνονται υποχρεωτικά σε συγκεκριμένο διακριτό προσανατολισμό, αλλά σχηματίζουν τελικώς μία βραχομάζα που μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί με έδαφος. Η «εδαφικού τύπου» αυτή βραχομάζα, με τιμές του γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI) της τάξης του 15 – 20 (με βάση τον πίνακα για την εκτίμηση του GSI σε φλύσχη: Marinós & Hoek, 2001), μεταπίπτει πλέον εκτός «πεδίου Bieniawski» (Μαρίνος, 1994).

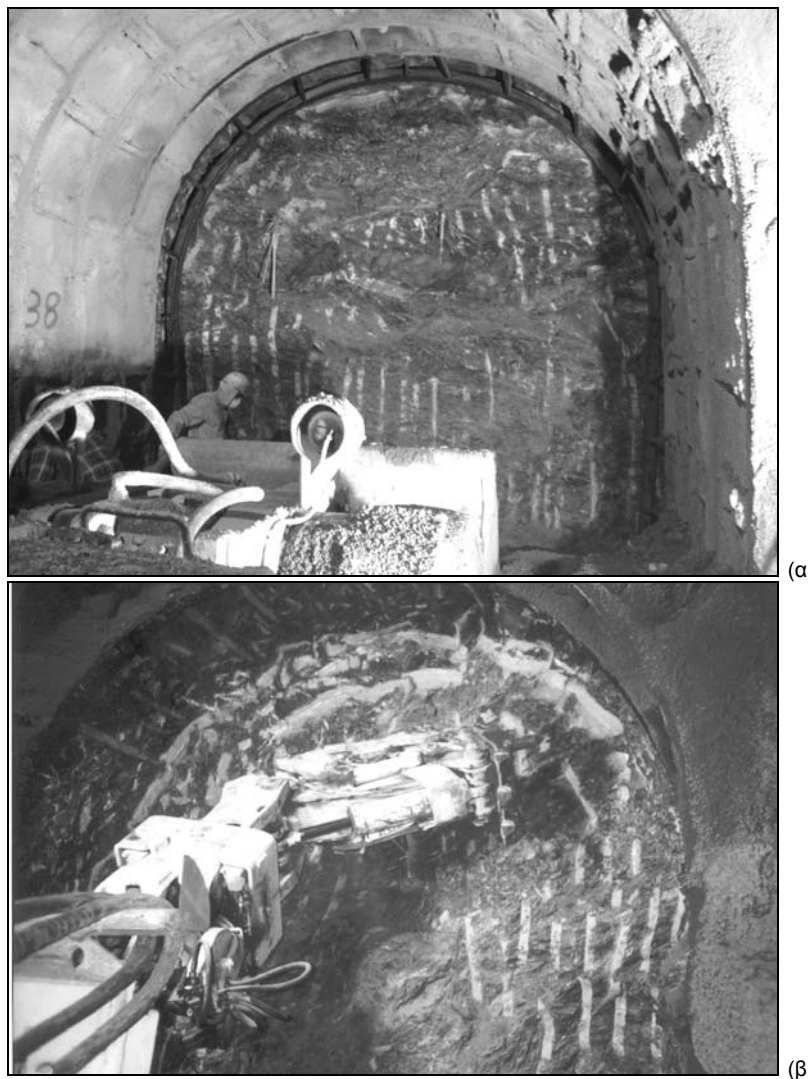
Οι γεωτεχνικές παράμετροι εκτιμήθηκαν ως πολύ χαμηλές (Μαρίνος, 2002-αδημοσίευτη έκθεση). Κατά την εκτίμηση έγινε απομείωση των σταθερών του υλικού  $\sigma_{ci}$  και  $m_i$  από τις εργαστηριακές στις επιτόπου πραγματικές τιμές, λόγω της πίεσης του νερού των πόρων. Συγκεκριμένα, με μία τιμή GSI=15-20, μία τιμή  $m_i=6$  και με αντοχή μονοαξονικής θλίψης  $\sigma_{ci}=5-10$  MPa, το μέτρο παραμόρφωσης, E, κυμαίνεται μεταξύ 300 και 500 MPa, η συνοχή μεταξύ 150 και 250 kPa, η γωνία τριβής  $13^\circ$  έως  $18^\circ$  και η αντοχή της βραχομάζας 0,40 έως 0,60 MPa. Η πτωχής έως πολύ πτωχής, ποιότητας βραχομάζα που εκτιμήθηκε ότι θα συναντήσει η σήραγγα στο μεγαλύτερο τμήμα της, εξαιτίας της πυκνής παρουσίας γυαλιστερών επιφανειών διάτμησης και της χαοτικής δομής, θα δημιουργούσε καταρρεύσεις (υπό μορφή ολίσθησης των φύλλων του αργιλικού σχιστολίθου-ιλυόλιθου, του ενός πάνω στο άλλο) τόσο από το μέτωπο όσο και την κορυφή του στον θόλο, κατά την κατασκευή της σήραγγας. Παρά το γεγονός ότι θα υπάρχουν τμήματα με καλύτερη ποιότητα υλικού, όπως στην περίπτωση που ο φλύσχος παρουσιάζει εναλλαγές διατμημένου αργιλικού σχιστολίθου με σχετικά υγιή ψαμμίτη και ιλυόλιθο, στο μεγαλύτερο τμήμα της ζώνης διέλευσης η αρχική βραχομάζα καταλήγει, λόγω διαφορικής ακαμψίας του σχηματισμού, σε μια μορφή εδάφους-εδαφόμαζας λόγω διάτμησης. Έτσι κάθε δομή βράχου χάνεται και οι ασυνέχειες χάνουν επίσης τον οργανωμένο προσανατολισμό τους. Πρόκειται τελικά περί εδάφους μέσα στο οποίο «επιπλέουν» μικρότερα ή μεγαλύτερα τεμάχια από τον άκαμπτο, «ψαθυρή» συμπεριφοράς, ψαμμίτη ή ασβεστόλιθο. Και στην περίπτωση αυτή το υλικό μεταπίπτει, πάλι εκτός «πεδίου Bieniawski».

Ως εκ τούτου, συζητήθηκε ως ευλόγως συντηρητικό μέτρο μια υποστήριξη προπορείας με βλήτρα προπορείας ή ελαφριούς σωλήνες σχετικά μικρής διαμέτρου (και μετωπικού εύρους περίπου  $120^\circ$ ), αφού εδώ δεν υπάρχει ανάγκη εξασφάλισης της ευστάθειας του μετώπου (και του «πυρήνα» μπροστά από το μέτωπο) από υψηλές τάσεις (που δεν υπάρχουν λόγω του μικρού καλύμματος), αλλά αντιθέτως συγκράτησης του υλικού που καταρρέει λόγω ολίσθησης των «φύλλων» του διατμημένου σχιστολίθου. Το μέτωπο, κατά τη φάση από εκσκαφή σε εκσκαφή, θα συγκρατείτο με διατήρηση κατάλληλης κλίσης στον καθρέπτη και με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η χρήση αγκυρίων fiber glass προτάθηκε μόνο για ειδικές περιπτώσεις (εμφάνιση έντονων απολεπιώσεων και ροής γαιών από το μέτωπο, έντονων θρυμματισμών κ.α.). Η ευστάθεια της εκσκαφής πίσω από το μέτωπο, σε τέτοιου τύπου βραχομάζα και δεδομένης της μικρής διαμέτρου της σήραγγας, θα εξασφαλιζέτο με κέλυφος από πλαίσια ενσωματωμένα σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τα αγκύρια βράχου δεν συνιστώνται στην περίπτωση αυτή. Επιπλέον, η πτωχή ποιότητα του φλύσχη, με παρουσία και διογκούμενων αργιλικών ορυκτών, επιβάλλει το κλείσιμο της διατομής στο δάπεδο.

Με βάση το αναθεωρημένο γεωλογικό-γεωτεχνικό μοντέλο για το φλύσχη, συντάχθηκε μελέτη εφαρμογής (από τον μελετητή του αναδόχου: ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ-ΜΕΤΩΝ Α.Ε., 2002) στην οποία επιλέχθηκαν τρεις χαρακτηριστικές διατομές ελέγχου, Δ1, Δ2, Δ3 (ως οι πιο δυσμενέστερες όσον αφορά στο ύψος των υπερκειμένων και στο γεωμηχανικό χαρακτήρα των υλικών - Hoek & Marinós, 2000), που αντιστοιχούν σε τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες του αργιλικού σχιστολίθου: Δ1: μέτρια αποσαθρ. αργ. σχιστόλιθος-fa,mw, Δ2: ισχυρά αποσαθρ. αργ. σχιστόλιθος-fa,hw, Δ3: αργ. σχιστόλιθος με μεγάλη αποδιοργάνωση-sz. Σε αντιπαραβολή, η οριστική μελέτη έλαβε υπόψη τυπικό φλύσχη με τρεις κύριες κατηγορίες πετρωμάτων: αργ. σχιστόλιθο, ιλυόλιθο και ψαμμίτη. Οι γεωτεχνικές παράμετροι που ελήφθησαν για τον υπολογισμό της αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, στη μελέτη εφαρμογής, είναι: α) για fa,mw: GSI=25,  $\sigma_{ci}=0.7$  MPa,  $m_i=8$ , β) για

fa,hw:  $GSI=20$ ,  $\sigma_{ci}=0.5$  MPa,  $m_i=6$ ,  $\gamma$ ) για sz:  $GSI=10$ ,  $\sigma_{ci}=0.25$  MPa,  $m_i=4$ . Η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος,  $\sigma_{ci}$ , ελήφθηκε πολύ χαμηλή, σε σχέση με την προτεινόμενη στο αναθεωρημένο γεωτεχνικό μοντέλο για το φλύσχη, και αντιστοιχεί σε εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών σε δείγματα ενδεχομένως μη αντιπροσωπευτικά του άρρηκτου σχηματισμού (λόγω της πολύ περιορισμένης δυνατότητας διαμόρφωσης αντιπροσωπευτικού δείγματος από την ιδιαίτερα ασθενή βραχώμαζα), που περιελάμβαναν και ασυνέχειες. Το γεωστατικό πεδίο αντιμετωπίστηκε με δύο τιμές συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων ( $k_o=0,8$  και  $k_o=1,2$ ), ενώ ο ρόλος του υπογείου νερού περιορίστηκε στην εκτίμηση του GSI. Η χρήση ελαφριών δοκών προπορείας μήκους 9 m (σε τόξο  $120^\circ$ ), εκτός των άλλων μέτρων προσωρινής υποστήριξης (πλαίσια ανά 1,0 ή 0,75 m, ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, παθητικές ηλώσεις παρειάς - Σχήμα 4), εφαρμόστηκε και στις τρεις διατομές.

Η μέγιστη αναμενόμενη τιμή σύγκλισης (απόλυτη μετατόπιση) για τις τρεις διατομές Δ1, Δ2, Δ3, μετά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης, εκτιμήθηκε (λαμβάνοντας υπόψη και επί πλέον κάποιες κατασκευαστικές ανοχές) σε 5, 7, 9 cm, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποδεκτές.



Σχήμα 3. Επάνω (α): Αποκόλληση και ολίσθηση τεμάχους ιλυολίθου πάνω σε γυαλιστερή επιφάνεια στο κέντρο του διανοιγμένου μετώπου. Κάτω (β): Εκσκαφή μετώπου σε αργιλικό σχιστόλιθο του φλύσχη, με διαμόρφωση καθρέπτη. Διακρίνεται η έντονη σχιστότητα-φύλλωση, καθώς και η ευκολία εκσκαφής με τα συμβατικά μέσα (βήμα εκσκαφής = 1 m).

#### 4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΛΥΣΧΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

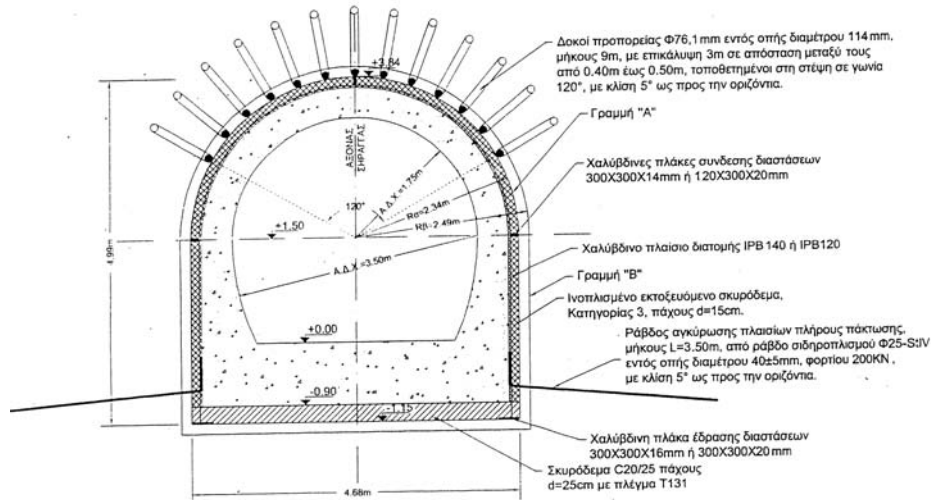
Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας (με εκσκαφή όλου του τμήματος της διατομής) συναντήθηκε φλύσχος «εδαφικού τύπου» με χαοτική αλλά «σφιχτή» δομή, που εμφάνισε υγρασία μόνο τοπικά και φυσικά χωρίς ροή. Χαρακτηριστική ήταν η επικράτηση του έντονα πτυχωμένου και διατμημένου αργιλικού σχιστολίθου, ο οποίος εμφανίστηκε μέτρια και κατά θέσεις ισχυρά αποσασθρωμένος (κυρίως στην περιοχή εξόδου και εισόδου). Στη μάζα του παρατηρήθηκαν φλεβίδια ασβεσίτη και σποραδικοί φακοί γύψου, καθώς επίσης και ογκόλιθοι ασβεστολίθου. Σε πολλές θέσεις κατά μήκος της διάνοιξης παρουσιάστηκε ιδιαίτερα αποδιοργανωμένος, κυρίως σε περιπτώσεις όπου βρισκόταν σε εναλλαγές με ψαμμίτη και ιλυόλιθο. Η διαφορική συμπεριφορά των σχηματισμών στην παραμόρφωση και το ανισότροπο πεδίο των πτυχογόνων τάσεων έχουν δημιουργήσει διατμήσεις μέσα στη μάζα του συστήματος αποδιοργανώνοντας πλήρως τη δομή. Στις θέσεις αυτές παρατηρούνται τεμάχια από θραυσθέντα στρώματα ψαμμίτη ή υγιούς ιλυολίθου να «πλέουν» μέσα σε περιβάλλον συμπίεσμένου πλάστιμου αργιλικού σχιστολίθου ή διατμηθέντος ασθενέστερου ιλυολίθου (χαοτική δομή). Στα σημεία γύρω από τα τεμάχια αυτά ο αργιλικός σχιστόλιθος είναι ισχυρά συμπίεσμένος, με φυλλώδη δομή.

Εξαιτίας της έντονης πτύχωσης, η σχιστότητα ή φύλλωση του αργιλικού σχιστολίθου δεν διατηρεί συγκεκριμένο προσανατολισμό, ακόμα και σε πολύ κοντινές αποστάσεις. Οι αιφνίδιες αλλαγές του προσανατολισμού της σχιστότητας-φύλλωσης κατά την προχώρηση, καθώς επίσης και οι συχνές επιφάνειες μικροδιατμήσεων, οδήγησαν συχνά σε αποκολλήσεις και ολισθήσεις τεμαχίων από το μέτωπο (Σχήμα 3α) και σε μερικές περιπτώσεις από την οροφή (υπερεκσκαφές στο διάστημα με ταξύ των δοκών). Η ασθενής αυτή βραχόμαζα, με διαμόρφωση κεκλιμένου μετώπου (Σχήμα 3β), ενίσχυση από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χρήση αγκυρίων fiber glass, συμπεριφέρθηκε πολύ καλά στο μέτωπο. Οι ομπρέλες των δοκών προπορείας (Σχήμα 4) συνέβαλαν στην ευστάθεια του μετώπου και του «πυρήνα» μπροστά από το μέτωπο, αν και κατά την αποψή μας η επιλογή αυτή ευρίσκετο σε συντηρητική κατεύθυνση αντιμετώπισης της ευστάθειας.

Όσον αφορά στην περιοχή πίσω από το μέτωπο, εφαρμόστηκαν τα μέτρα προστασίας που ήδη αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (πλαίσια ανά 1,0 ή 0,75 m, ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, παθητικές ηλώσεις παρειάς). Η εμφάνιση πλευρικών ωθήσεων, στην βάση των πλευρών του κελύφους που σε μερικές θέσεις προκάλεσαν μικρομετακινήσεις των πλαίστιων πέραν των αναμενόμενων, επέβαλε το άμεσο κλείσιμο της διατομής στο δάπεδο με σκυρόδεμα πάχους 25 cm οπλισμένο με μεταλλικό πλέγμα (Σχήμα 4). Για την εκτόνωση της πίεσης των πόρων διανοίχθηκαν, τοπικά, ανακουφιστικές οπές.

Κατά τη διάρκεια της συνεχούς παρακολούθησης της διάνοιξης εκτελούνταν γεωλογικές χαρτογραφήσεις μετώπου παρειών και οροφής, γινόταν καταγραφή θέσεων εμφάνισης υγρασίας, εκτίμηση του GSI και μέτρηση των συγκλίσεων σε τρία σημεία (στις δύο παρειές και την οροφή). Υγρασία (χωρίς ροή) εμφανίστηκε σε θέσεις όπου παρατηρούντο εναλλαγές του αργιλικού σχιστολίθου με κερματισμένα ψαθυρά υλικά, σε ασβεστολιθικούς ογκόλιθους, σε έντονα τεκτονισμένες και αποσασθρωμένες ζώνες και στην έξοδο όπου συναντήθηκε η παλιά αναβαθμίδα. Ο δείκτης GSI που εκτιμήθηκε για τον αργιλικό σχιστόλιθο, κατά τη διάνοιξη, κυμάνθηκε σε τιμές 10 έως 22. Με το κλείσιμο της διατομής στο δάπεδο, οι συγκλίσεις δεν ξεπέρασαν τις αναμενόμενες.

Η σήραγγα εκσκάφθηκε στο σύνολό της με ειδικό εκσκαφέα και στα σημεία που η βραχόμαζα εμφάνισε υψηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά με μηχανική υδραυλική σφύρα. Σε λιγοστές περιπτώσεις, όπου συναντήθηκαν μικρές ασβεστολιθικές παρεμβολές, έγιναν ελεγχόμενες ανατινάξεις.



Σχήμα 4. Εφαρμοσθείσα τυπική διατομή της σήραγγας. Κάτω: «Οδόντωση» από διαδοχική εφαρμογή δοκών προτορείας.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι διατμημένοι αργιλικόι σχιστόλιθοι, που επικρατούν στο φλύσχη Λάερμα, νήσου Ρόδου (Ιονίου γεωτεκτονικής ζώνης), έναντι του ιλυολίθου ή ψαμμίτη (και της σποραδικής εμφάνισης φακών γύψου και ογκόλιθων ασβεστολίθου), αποτελούν μία ιδιαίτερα ασθενή βραχώμαζα που κατά θέσεις μπορεί να προσομοιωθεί με έδαφος.

Οι ιδιαιτερότητες που χαρακτηρίζουν τη γεωλογική δομή του φλύσχη στη θέση της σήραγγας εκτροπής, του φράγματος Γαδουρά Ρόδου, όπως: α) η έντονη πτύχωση, β) οι πολλές εσωτερικές γυαλιστερές επιφάνειες μικροδιατμήσεων που συχνά προσδίδουν «φυλλώδη» δομή στη βραχώμαζα εξαιτίας της ισχυρής τεκτονικής συμπίεσης και της χαοτικής δομής αντικατοπτρίζονται στα χαμηλά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του, που υποβαθμίζονται περαιτέρω από την παρουσία επιφλοιωμάτων διογκούμενων αργιλικών ορυκτών.

Στα πλαίσια της διαδικασίας επιλογής των παραμέτρων σχεδιασμού σε τέτοια ασθενή βραχώμαζα, από την οποία δεν είναι εύκολο να ληφθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα για εργαστηριακές δοκιμές, δίνονται φάσματα τιμών που ελέγχθησαν με την επιλογή των μέτρων υποστήριξης.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ-ΜΕΤΩΝ Α.Ε., 2002. Μελέτη προσωρινών μέτρων υποστήριξης σήραγγας εκτροπής φράγματος Γαδουρά Ρόδου.
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength, *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomech. Abstracts*, 34(8),1165-1186.
- Hoek, E., and Marinos, P., 2000. Predicting tunnel squeezing in weak heterogeneous rock masses, *Tunnels and Tunnelling International*, November 2000, 45-51 and December 2000, 33-37.
- ΙΓΜΕ, 1989. Σεισμοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- Μαρίνος, Π., 1994. Επί της εφαρμογής της γεωμηχανικής ταξινόμησης Bieniawski σε ασθενείς και ετερογενείς βραχομάζες. Ειδική αναφορά στην περίπτωση του Πινδικού φλύσχη, Γεωλογία σηράγγων και υπογείων έργων-Εμπειρίες από τον ελληνικό χώρο: Πρακτικά Ημερίδας της Ελλ. Επιτροπής Τεχν. Γεωλ. της Ελλ. Γεωλ. Εταιρίας, Εθν. Ιδρ. Ερευνών, 99-113.
- Marinos, P. & Hoek, E. 2001. "Estimating the geological properties of heterogeneous rock masses such as flysch". *Bulletin of the Engineering Geology & the Environment (IAEG)*, 60, 85-92.
- Μαρίνος, Π., 2002. Απόψεις επί των συνθηκών εκσκαφής της σήραγγας εκτροπής, φράγματος Γαδουρά, περιοχή εξόδου. Αδημοσίευτη έκθεση εμπειρογνώμονος Τεχνικού Συμβούλου, Απρίλιος 2002.
- Mutti, E., Orombelli, G. & Pozzi, R., 1970. Geological Studies on the Dodecanese Islands (Aegean Sea), IX. Geological Map of the Island of Rhodes (Greece) – Explanatory notes, *Annales Géologiques des Pays Helléniques*, Mitzopoulos & Marinos (Eds), 1e Série, T. XXII, 79-226.
- ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε., 1980. Μελέτη Υδρεύσεως ευρύτερας περιοχής πόλεως Ρόδου μετά των κοινοτήτων Τριάντα και Κοσκινού, Ερευνητικά-Γεωτεχνικά Έργασια Προμελέτης Φράγματος, Τεύχος 10, Νομαρχιακό Ταμείο Δωδεκανήσου – Τ.Υ.Δ.Κ., 63pp.

## ABSTRACT

### **SHEARD CLAYEY SHALES OF FLYSCH. THEIR BEHAVIOR DURING THE EXCAVATION OF THE DIVERSION TUNNEL OF GADOURA DAM IN RHODES (GREECE)**

Marinos P.<sup>1</sup>, Christodouloupoulou T.<sup>2</sup>, and Perleros B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Professor of National Technical University of Athens, Department of Civil Engineers, marinos@central.ntua.gr*

<sup>2</sup> *Dr. Engineering Geologist, Y.PE.XO.DE./G.G.D.E., Fanarioton Str. 9, 10178, Athens, tasoulac@yahoo.com*

<sup>3</sup> *Geologist, Dionisou Str. 56, 15234, Chalandri, Athens, perleros@internet.gr*

This paper deals with the particular geological-geotechnical conditions that predominate in the construction area of the diversion tunnel of Gadoura dam (in Rhodes) and the way these conditions were taken under consideration during the construction of the temporary support system. The intensely sheared geological formation of flysch that is encountered in the construction area of the tunnel, is characterised by the predomination of clayey shales against siltstones and other lithological members (sandstone horizons, occasional gypsum lenses and limited limestone intercalations) and by the absence of a groundwater table. The main features of this argillaceous facies of flysch are: the schistosity-foliation due to tectonic compression and the chaotic structure, in places where it occurs in alternations with sandstone and siltstone, due to differential deformation of the strata. As a result, squeezing phenomena occurred during the tunnel advance. According to the engineering geology model, which was proposed after the first excavation works, sheared clayey shales compose a "soil type" rockmass specified by very low geotechnical parameters ( $GSI=15-20$ ,  $m_i=6$ ,  $\sigma_{ci}=5-10$  MPa,  $E_m=300\div500$  MPa,  $c'=150\div250$  kPa,  $\varphi=13^\circ\div18^\circ$  και  $\sigma_{cm}=0,40\div0,60$  MPa). Performing a declined surface on the tunnel face, shotcrete and fiber glass anchoring, this weak rockmass was behaved well on the face. The applying of a light forpoling system has contributed to the stabilization of the face and of the cylindrical "core" of rock immediately ahead of the advancing face, although it was a conservative measure. Steel ribs incorporated into shotcrete were used for the support of the tunnel behind the face. Lateral forces were further stabilized by the closure of the invert using reinforced concrete. Weep holes were locally opened for the pore pressure relief.