

Διάνοιξη της Σήραγγας Κνημίδος της παράκαμψης Αγ. Κων/νου του ΠΑΘΕ

Tunneling the Knimis Tunnel of the Ag.Konstandinos Deviation of PATHE Motorway

ΑΛΕΞΑΝΔΡΗΣ Α.	Πολιτικός Μηχανικός MSc,DIC,	Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΑΤΕ
ΒΕΤΤΑΣ Π.	Πολιτικός Μηχανικός	Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΑΤΕ
ΜΑΚΑΝΤΑΣΗΣ Ι.	Μεταλλειολόγος Μηχανικός	ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ
ΜΠΟΥΡΝΑΖΟΣ Ι.	Πολιτικός Μηχανικός MSc	ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η δίδυμη σήραγγα Κνημίδος, αποτελεί το σημαντικότερο τεχνικό έργο της παράκαμψης του Αγίου Κωνσταντίνου (Ν.Φθιώτιδας) του ΠΑΘΕ, με μήκος περί τα 2500 m, η οποία διανοίχθηκε την περίοδο 2003-2006. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι γενικές θεωρήσεις σχεδιασμού του έργου, οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες υλοποίησής του, μια σύνοψη της μεθόδου διάνοιξης και των μέτρων προσωρινής υποστήριξης και η υπολογιστική προσέγγιση ελέγχου της επάρκειάς τους. Στην συνέχεια ανακεφαλαιώνεται η εμπειρία από την διάνοιξη των σηράγγων παρουσιάζονται ενόργανες μετρήσεις της συμπεριφοράς τους κατά την διάνοιξη και ελέγχονται αδρά οι αρχικές εκτιμήσεις σχεδιασμού με ανάστροφες αναλύσεις.

ABSTRACT: The Knimis tunnel which is part of the Agios Konstandinos deviation of the PATHE motorway, is a twin tube road tunnel 2500 m long, constructed during 2003-2006. In this presentation, the main tunneling design objectives are described, the geologic and tectonic environment is outlined, and the adopted tunnelling procedures and analytical approach to validate them is presented. Consequently the experiences from the construction are briefed and the monitoring data are described and discussed. Finally the initial calculation assumptions are validated by back analyses.

1. ΓΕΝΙΚΑ

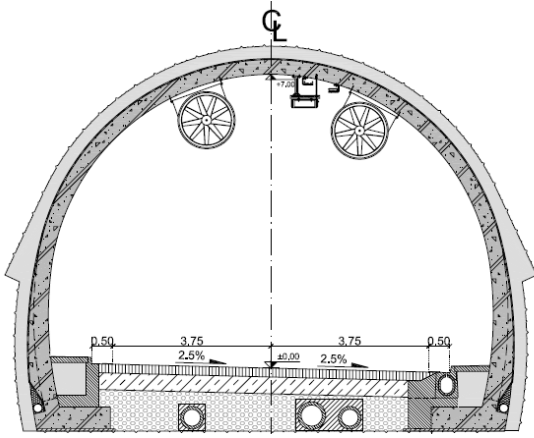
Η οδική σήραγγα Κνημίδος αποτελεί μέρος της παράκαμψης της πόλης του Αγίου Κωνσταντίνου του Α/Δ ΠΑΘΕ, έργο το οποίο κατασκευάστηκε την περίοδο 2003-2006 στα πλαίσια της αναβάθμισης του οδικού άξονα Αθήνα-Λαμία σε σύγχρονο αυτοκινητόδρομο.

Η νέα χάραξη του ΠΑΘΕ στο τμήμα αυτό, παρακάμπτει την στενή παραλιακή ζώνη Αγίου Κωνσταντίνου-Καμένων Βούρλων και ακολουθεί μια ημιορεινή οδευση η οποία περιλαμβάνει την διάνοιξη δύο σημαντικών σηράγγων: της σήραγγας Διχαλορέματος (Αλεξανδρήs κ.α. 2007) και της σήραγγας Κνημίδος. Η δίδυμη σήραγγα Κνημίδος, μήκους 2500 m περίπου, διασχίζει τον ομώνυμο ορεινό όγκο, ο οποίος δομείται από ασβεστολιθικούς και δολομιτικούς

σχηματισμούς Ιουρασικής ηλικίας. Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται οι γενικές θεωρήσεις γεωτεχνικού σχεδιασμού, καθώς και στοιχεία από την κατασκευή των σηράγγων.

2. ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

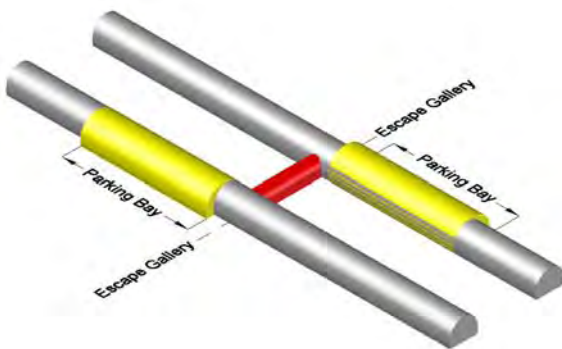
Η διατομή χρήσης των σηράγγων έχει το τυπικό ημικυκλικό σχήμα δίωνων οδικών σηράγγων, με ακτίνα εσωραχίου στο θόλο 5.25 m, που εξυπηρετεί δύο λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3.75 m και πλευρικούς πεζοδιαδρόμους πλάτους 1.00 m. Το ύψος του οδικού περιτυπώματος είναι 5.00 m και υπάρχει επαρκής χώρος για ανεμιστήρες και φωτιστικά σώματα στο ανώτερο τμήμα της διατομής, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διατομή Χρήσης Σήραγγας Κνημίδας
Figure 1. Knimis Tunnel Standard Cross Section.

Η αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων διατηρείται στο μεγαλύτερο τμήμα της χάραξης των σηράγγων περίπου στα 30 m. Ανά 350 m περίπου προβλέφθηκαν διασυνδετήριες στοές οι οποίες εξυπηρετούν την διαφυγή των χρηστών από τον ένα κλάδο στον άλλο σε περίπτωση ανάγκης εκκένωσης λόγω πυρκαγιάς. Επιπροσθέτως μία από τις διασυνδετήριες στοές, στο μέσον του υπόγειου τμήματος, εξυπηρετεί και την διέλευση οχημάτων έκτακτης ανάγκης. Ανά 800 περίπου μέτρα διαμορφώθηκαν πλευρικές διευρύνσεις των σηράγγων μήκους 50 m για την δημιουργία εσοχών στάθμευσης έκτακτης ανάγκης.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η τυπική διάταξη διαμόρφωσης των εσοχών στάθμευσης έκτακτης ανάγκης σε σχέση με την πλησιέστερη διασυνδετήρια στοά, με την οποία αποφεύγεται η διασταύρωση των στοών στην θέση των διευρύνσεων της διατομής.



Σχήμα 2 Εσοχές στάθμευσης έκτακτης ανάγκης και διασυνδετήρια στοά διαφυγής πεζών.
Figure 2. Parking bays and pedestrian cross connecting (escape) gallery.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Το φυσικό ανάγλυφο σε όλη την παραλιακή ζώνη Αγίου Κων/νου – Καμένων Βούρλων, αλλά και νοτιότερα μέχρι την Αρκίτσα, είναι έντονο και έχει διαμορφωθεί από την πρόσφατη δράση κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ έως Α-Δ που διαμορφώνουν την τεκτονική τάφρο του βόρειου Ευβοϊκού. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται μια σύνθετη στερεοφωτογραφία της περιοχής διέλευσης της χάραξης, όπου σημειώνεται το ίχνος του ενεργού ρήγματος Αρκίτσας–Καμένων Βούρλων το οποίο διακρίνεται με σαφήνεια στο φυσικό ανάγλυφο. Το ρήγμα τέμνει την χάραξη στην περιοχή του στομίου εισόδου της σήραγγας και η παρουσία του στην γειτονία του έργου απαίτησε την λεπτομερή θεώρηση της σεισμικής ασφάλειας και αντισεισμικού σχεδιασμού του έργου από τα πρώτα στάδια μελέτης και επηρέασε την τελική επιλογή της χάραξης (Alexandris et al. 1998).



Σχήμα 3. Μορφοανάγλυφο της περιοχής της σήραγγας και ίχνος του ενεργού ρήγματος.
Figure 3. Morphology of the tunnel area and active fault trace.

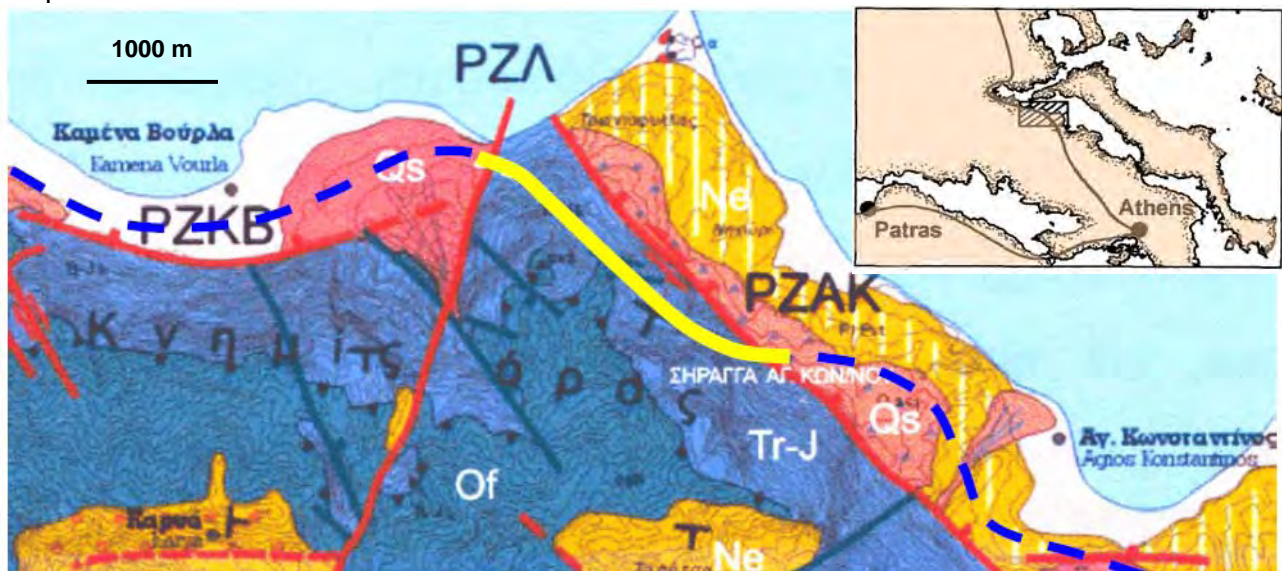
Το ενεργό ρήγμα διαχωρίζει τους σχηματισμούς του γεωλογικού υποβάθρου που αναδύονται στο νότιο τμήμα της παραλιακής ζώνης από τους πιο πρόσφατους νεογενείς (πλειοκαινικούς-πλειστοκαινικούς) σχηματισμούς της παραλιακής ζώνης που καλύπτουν την περιοχή βόρεια του ρήγματος, μέχρι και την θάλασσα.

Το γεωλογικό υπόβαθρο μέσα στο οποίο διανοίχθηκε η σήραγγα, αποτελείται από ανθρακικούς σχηματισμούς της πελαγονικής ζώνης και σχηματισμούς ενός επωθημένου συμπλέγματος ηφαιστειοϊζηματογενούς προ-

έλευσης και οφιολιθικής-πηλιτικής σύστασης οι οποίοι όμως δεν συναντώνται στην στάθμη διέλευσης της σήραγγας παρά μόνο για μερικές δεκάδες μέτρα στην περιοχή του στομίου εξόδου.

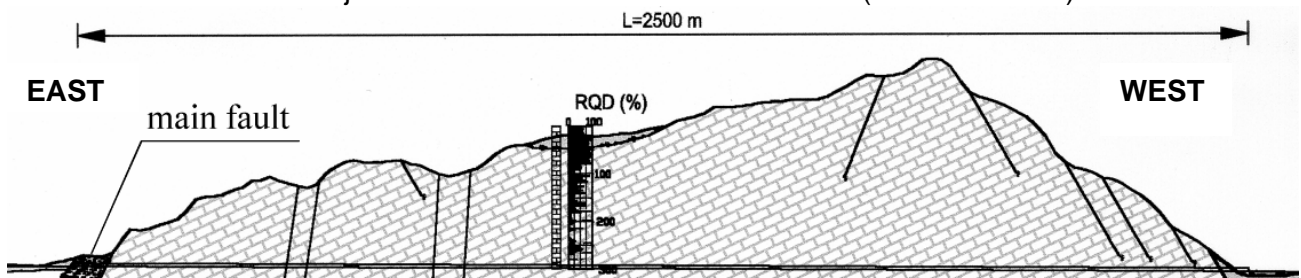
Οι ανθρακικοί σχηματισμοί, που αποτελούν και τον κύριο σχηματισμό που διατρήθηκε, αποτελούνται από ασβεστολίθους και δολομίτες Ιουρασικής ηλικίας, που χαρακτηρίζονται από ισχυρό κερματισμό και διάρρηξη συνεπεία των διαδοχικών φάσεων συμπίεσης και εφελκυσμού που έχουν υποστεί. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται ένας απλοποιημένος γεωλογικός-τεκτονικός χάρτης της περιοχής της σήραγγας (Κράνης Χ. 1999), όπου διακρίνεται η ανάπτυξη του ανθρακικού υποβάθρου, των πιο πρόσφατων αποθέσεων στην παραλιακή ζώνη και των ενεργών ρηγμάτων που διαχωρίζουν τις ενότητες αυτές. Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η μηκοτομή του ορεινού όγκου που διασχίζει η σήραγγα όπου σημειώνεται η θέση του κύριου ρήγματος στην περιοχή του στομίου εισόδου.

Στην περιοχή του στομίου εισόδου όπου η χάραξη διατέμνει το ενεργό ρήγμα, για το οποίο εκτιμήθηκαν αναμενόμενες συνσεισμικές μετακινήσεις 1.5-2.0 m για τον σεισμό σχεδιασμού, εκτελέστηκαν ειδικές εργασίες αποκάλυψης του καθρέπτη του ρήγματος και χαρτογραφησής του (βλ σχ. 6). Η ακριβής γνώση της θέσης του ρήγματος, επέτρεψε στην φάση του σχεδιασμού του έργου την αποφυγή του με μετάθεση των στομίων της σήραγγας προς ανατολάς (βλ. σχήμα 7). Με αυτό τον τρόπο περιορίστηκε δραστικά η έκθεση του τεχνικού σε κίνδυνους πρόκλησης βλαβών από συνσεισμικές διαρρήξεις. Στην περίπτωση ενεργοποίησης του ρήγματος αναμένεται να προκληθούν εύκολα επισκευάσιμες βλάβες στο κατάστρωμα του αυτοκινητοδρόμου και κάποια διατάραξη στα πρανή του ορύγματος που διαμορφώνονται στην θέση αυτή. Αυτές οι βλάβες κρίνονται αποδεκτές για ένα (σχετικά σπάνιο) σεισμικό γεγονός.



Σχήμα 4 Γεωλογικό περιβάλλον και κύριες τεκτονικές δομές της ευρύτερης περιοχής διέλευσης του αυτοκινητοδρόμου. PΖΑΚ (Ρηξιγενή Ζώνη Αγίου Κων/νου) και PΖΚΒ (Ρηξιγενή Ζώνη Καμένων Βούρλων) (Κράνης Χ.1999)

Figure 4. Geological Formations and neotectonic structures of the project area. The tunnel location is noted as well as the major Neotectonic zones PΖΑΚ and PΖΚΒ (Kranis H. 1999)



Σχήμα 5 Γεωλογική μηκοτομή της σήραγγας σημειώνεται η θέση του κύριου ενεργού ρήγματος. Figure 5. Longitudinal section of the tunnel. The location of the main active fault is also noted.



Σχήμα 6. Η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος στην περιοχή του στομίου εισόδου κατά τις εργασίες χαρτογράφησης του.
Figure 6. The fault plane at the entrance portal area, during the site investigation works.



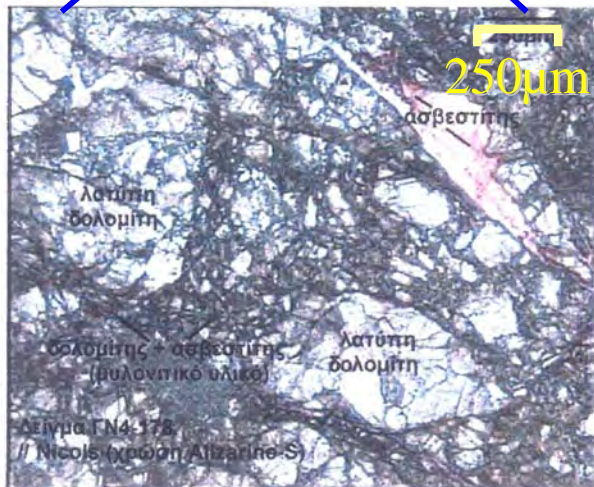
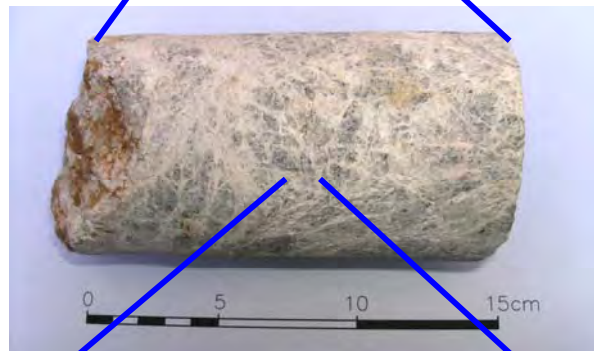
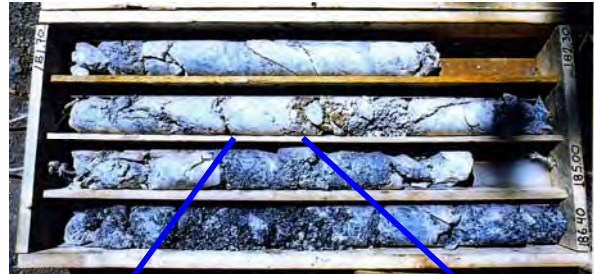
Σχήμα 7. Διαμόρφωση του στομίου εισόδου της σήραγγας πίσω από το ενεργό ρήγμα.
Figure 7. Location of the tunnel portal beyond the active fault trace.

4. ΤΕΧΝΙΚΟ-ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Με βάση τα στοιχεία της γεωτεχνικής διερεύνησης του έργου, εκτιμήθηκε ότι κατά μήκος της υπό διάνοιξη σήραγγας το ασβεστολιθικό-δολομιτικό πέτρωμα θα συναντάτο με μια κυμαινόμενη ποιότητα. Κατά θέσεις και ιδιαίτερα επιφανειακά, ο δολομίτης εμφανίζονταν σχετικά συμπαγής, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη προοδευτικά πιο κερματισμένος. Κατά θέσεις και ιδιαίτερα στην γειτονία του ρήγματος του στομίου εισόδου το πέτρωμα εμφανίστηκε εντελώς κατακερματισμένο και η δειγματοληψία των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν συνίσταντο σε ασύνδετα θραύσματα βράχου μεγέθους χαλικιών.

Για την καλύτερη κατανόηση της σύστασης και της μικροδομής του υλικού έγιναν πετρογραφικές αναλύσεις στο υλικό με εξέταση λεπτών τομών στο πολωτικό μικροσκόπιο. Όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν στο μικροσκόπιο διαπιστώθηκε ότι διακρίνονται για μια χαρακτηριστική λατυποποιημένη υφή και

ένα κατακλαστικό ιστό, προϊόν διαδοχικών τεκτονικών επεισοδίων και καταπονήσεων της βραχομάζας. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ότι αυτή η κατακλαστική δομή του υλικού επαναλαμβάνεται σε όλες τις κλίμακες, από την κλίμακα του μικροσκοπίου μέχρι την κλίμακα της βραχομάζας, όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες του σχήματος 8.



Σχήμα 8. Πυρήνες γεωτρήσεως (άνω) και λεπτή τομή σε πολωτικό μικροσκόπιο (κάτω). Διακρίνεται η επανάληψη του κατακλαστικού ιστού των δειγμάτων σε όλες τις κλίμακες δηλ. μέτρου, εκατοστού χιλιοστού και μικρού.
Figure 8. Photographs of borehole cores (upper images) and a thin section microphotography in polarized light (lower picture). The brecciated structure of the rock sample is observed in a wide range of scales (meter, centimeter, millimetre and micron).

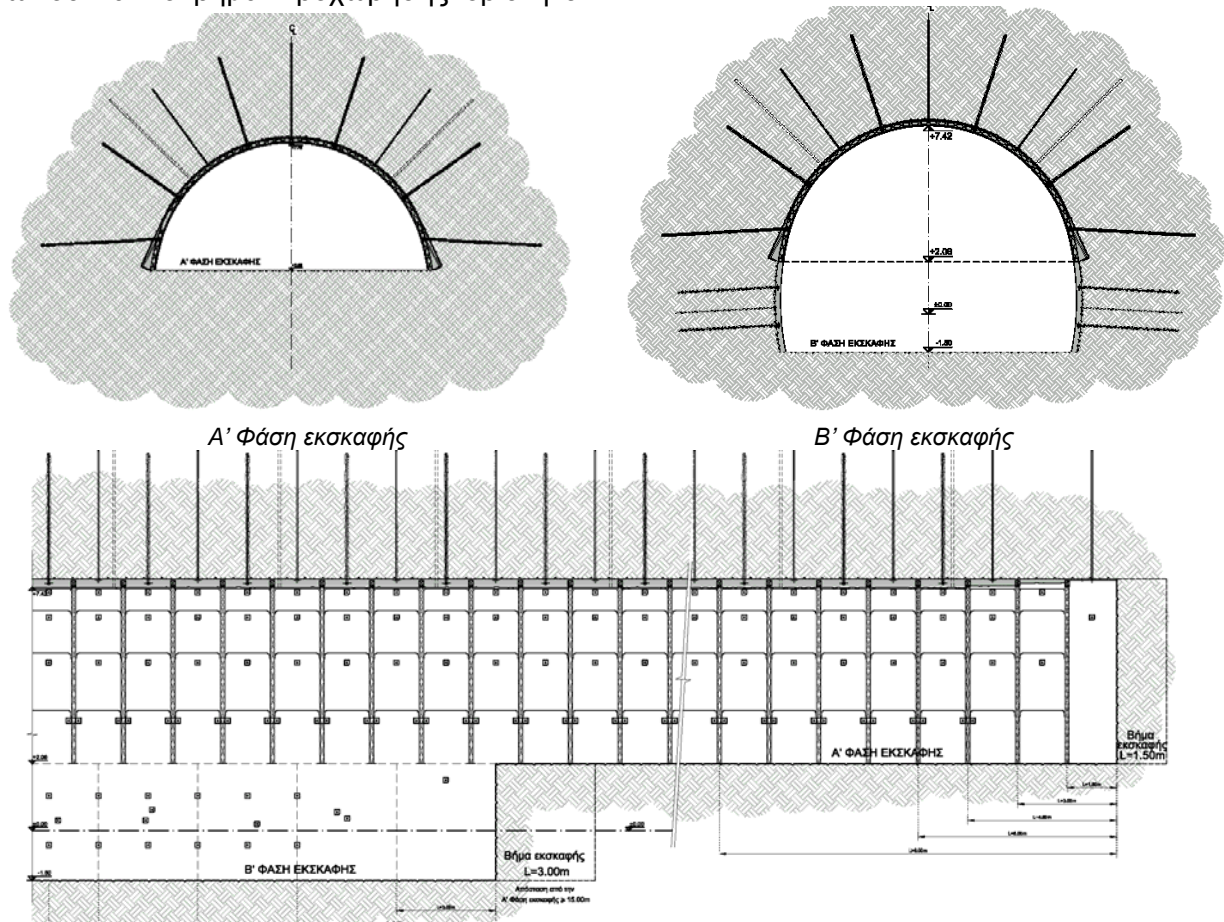
Η κατακλαστική μικροδομή του πετρώματος επηρέασε σημαντικά τις εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης που έγιναν σε δοκίμια $\varnothing 76\text{-}\varnothing 82\text{mm}$, απομειώνοντας δραστικά την αντοχή του «άρρηκτου» βράχου που αποτελεί την βάση για την εκτίμηση παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, με την μέθοδο των Hoek et al. (2002). Οι μετρήσεις κυμάνθηκαν από $2\div 40\text{ MPa}$ και μια τιμή περί τα 20 MPa κρίθηκε, με βάση την στατιστική κατανομή των μετρήσεων, ότι αποτελεί την αντιπροσωπευτική τιμή της αντοχής.

5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ.

Κατά τον σχεδιασμό προβλέφθηκε η διάνοιξη της σήραγγας με διατρήματα και ανατινάξεις (drill and blast) και η προσωρινή υποστήριξη της με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκυρώσεις. Διακρίθηκαν μια σειρά κατηγοριών βραχομάζας με βάση το RMR και σχεδιάστηκαν ανάλογα μέτρα προσωρινής υποστήριξης για καθεμία από αυτές. Στις καλύτερες κατηγορίες βραχομάζας δεν προβλέφθηκαν μέτρα προϋποστήριξης στην περιοχή του μετώπου και το βήμα προχώρησης ορίστηκε

σε $1.50\text{-}3.00\text{ m}$, ενώ στις πτωχότερες κατηγορίες βραχομάζας, που αντιστοιχούν σε πιο εύθρυπτο και ασταθές πέτρωμα, το βήμα προχώρησης μειώθηκε και προβλέφθηκε η τοποθέτηση ράβδων προαγκύρωσης ή ακόμα και δοκών προπορείας για τις δυσμενέστερες συνθήκες. Κατά την κατασκευή, δοκοί προπορείας εφαρμόστηκαν κυρίως στην περιοχή του στομίου εισόδου απ' όπου διέρχεται η ρηξιγενής ζώνη, καθώς και στην περιοχή του στομίου εξόδου όπου συναντήθηκε το οφιολιθικό - πηλιτικό σύμπλεγμα.

Το πάχος της προσωρινής επένδυσης για κάθε κατηγορία υποστήριξης, κλιμακώθηκε ανάλογα γεωστατικό πεδίο, που συναρτάται με το ύψος των υπερκειμένων. Με βάση αναλύσεις συνεχούς μέσου, που έγιναν με το λογισμικό FLAC, ποσοτικοποιήθηκε η εξάρτηση της έντασης της προσωρινής επένδυσης από τις επικρατούσες τάσεις και έγινε η διαστασιολόγηση της. Στο σχήμα 9 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία διάνοιξης και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που εφαρμόζονται στην επικρατέστερη κατηγορία (κατ. III, RMR $40\div 60$).

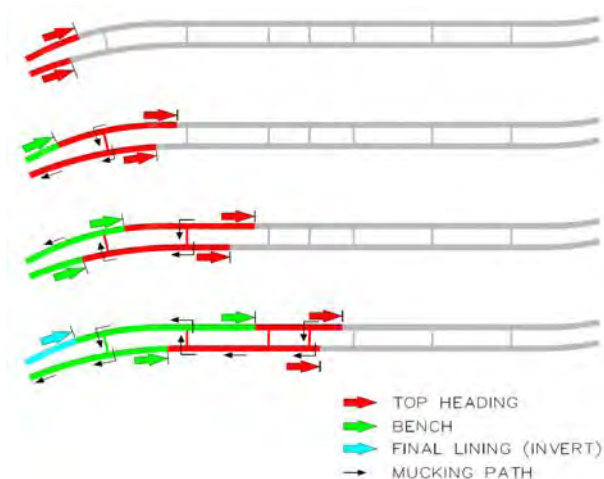


Σχήμα 9. Φάσεις διάνοιξης και μέτρα προσωρινής υποστήριξης (κατηγορία III - RMR = $40\div 60$)
 Figure 9. Tunneling procedure and primary support measures (rock mass class III - RMR = $40\div 60$)

6. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας έγινε σχεδόν εξολοκλήρου από το στόμιο εισόδου, λόγω προβλημάτων έγκαιρης πρόσβασης στην περιοχή του στομίου εξόδου και την αδυναμία διάθεσης των υλικών εκσκαφής στην περιοχή αυτή χωρίς όχληση της κυκλοφορίας του υφιστάμενου οδικού άξονα. Η προσβολή από το ένα μέτωπο μόνον, επέβαλε την επιτάχυνση της διάνοιξης με βελτιστοποίηση του κύκλου εργασιών, και χρήση παραγωγικού μηχανικού εξοπλισμού. Το μεγάλο μήκος της σήραγγας και η σχετική ομοιογένεια των συνθηκών διάνοιξης, επέτρεψαν την επίτευξη σημαντικά υψηλών ρυθμών προχώρησης. Η μέση εβδομαδιαία προχώρηση έφθασε τα 40 m και η μέγιστη εβδομαδιαία τα 84 m. Όπου οι γεωτεχνικές συνθήκες ήταν ευνοϊκές και οι συνθήκες αυτοευστάθειας του πετρώματος το επέτρεπαν, αυξήθηκε το βήμα προχώρησης στο μέγιστο δυνατόν για την επίτευξη της παραπάνω παραγωγικότητας.

Με την πρόοδο του έργου κατέστη εφικτό να αναπτυχθούν κατά μήκος του κάθε κλάδου περισσότερα από ένα μέτωπα εργασίας, δηλαδή ταυτόχρονη εκσκαφή άνω ημιδιατομής, εκσκαφή βαθμίδας, σκυροδέτησης θεμελίων μόνιμης επένδυσης, σκυροδέτηση θόλου μόνιμης επένδυσης στον ίδιο κλάδο. Οι διασυνδετήριες στοές αξιοποιήθηκαν για την εξασφάλιση οδών πρόσβασης στα μέτωπα εκσκαφής και αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής, χωρίς να παρακωλύονται οι εργασίες, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του σχήματος 10.



Σχήμα 10 Σταδιακή ανάπτυξη μετώπων εργασίας και οδοί αποκομιδής υλικών εκσκαφής.
Figure 10 Sequential developments of multiple work faces and mucking paths.

Η ποιότητα της βραχομάζας ήταν γενικά καλή (ίσως καλύτερη από το αναμενόμενο) και η συμπεριφορά της κατά την διάνοιξη ικανοποιητική. Στο μεγαλύτερο μήκος της διάνοιξης (75% του μήκους) εφαρμόστηκαν μέτρα κατηγορίας III (RMR 40-60) ενώ σε μικρότερα μήκη συναντήθηκε πιο κερματισμένη βραχομάζα (RMR 30-40) που υποστηρίχθηκε με μέτρα κατηγορίας IV. Η παρουσία υπογείων υδάτων ήταν πολύ περιορισμένη, κάτι που διευκόλυνε σημαντικά τις εργασίες διάνοιξης. Μόνο τοπικά εκδηλώθηκε στάγδην ροή και σημειώθηκαν κάποιες εποχιακές εισροές από κατεισδύοντα ύδατα. Λόγω της δολομιτικής φύσης των υλικών δεν συναντήθηκαν καρστικά κενά ή σπηλαιώσεις. Στην φωτογραφία του σχήματος 11 παρουσιάζεται μια τυπική εικόνα του πετρώματος στο μέτωπο κατά την διάνοιξη.



Σχήμα 11. Η βραχομάζα στο μέτωπο της σήραγγας κατά την διάνοιξη.
Figure 11. The rock mass at tunnel face.

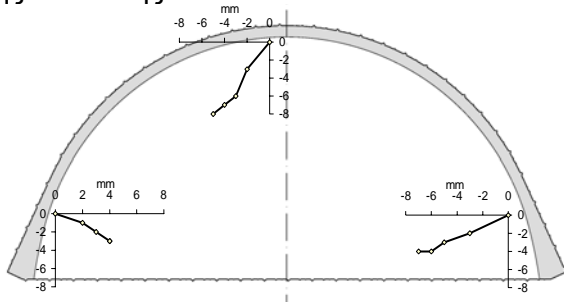
7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Η συμπεριφορά του ανοίγματος κατά την διάνοιξη ελέγχονταν συστηματικά με την τοπογραφική παρακολούθηση οπτικών στόχων που τοποθετούνταν στα τοιχώματα του ανοίγματος κατά το δυνατόν εγγύς του μετώπου. Οι τιμές των μετρούμενων μικρομετακινήσεων ήταν σχεδόν στο σύνολο του μήκους διάνοιξης ελεγχόμενες και μικρότερες των δύο εκατοστών. Ένα παράδειγμα μετρήσεων συγκλίσεων από την προώθηση του μετώπου της άνω ημιδιατομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.

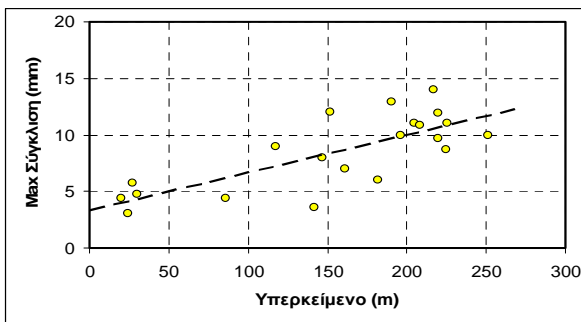
Η μέγιστη τιμή της σύγκλισης εμφανίζει μια εξάρτηση με την τιμή του υπερκειμένου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 13 όπου παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των μετρημένων

μικρομετακινήσεων της επένδυσης συναρτήσει του ύψους υπερκειμένων, για διάνοιξη σε κατηγορία βραχομάζας III (RMR = 40±60).

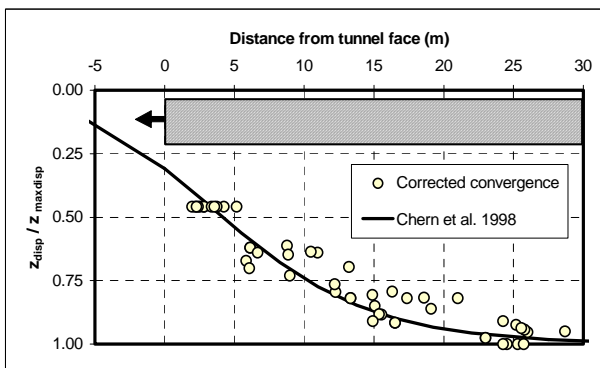
Η εξέλιξη των συγκλίσεων με την προώθηση του μετώπου ακολουθεί ικανοποιητικά την εμπειρική καμπύλη των Chern et al. (1998) όπως φαίνεται και στο σχήμα 14. Οι μετρήσεις έχουν διορθωθεί ώστε να ληφθούν υπ' όψιν οι εκδηλωθείσες μετακινήσεις πριν την πρώτη μέτρηση των στόχων, που εκτιμήθηκαν με βάση την ίδια σχέση του Chern, σε 35%-45% της συνολικής.



Σχήμα 12. Τυπικό διάγραμμα συγκλίσεων (Σταθμός TR 21-Χ.Θ. 0+942-Δεξιός.Κλάδος)
Figure 12. Typical convergence measurements (Station TR 21 Ch. 0+942 RT)



Σχήμα 13. Εξάρτηση της μέγιστης σύγκλισης με το βάθος διάνοιξης (Κατηγορία βραχομ. III)
Figure 13. Correlation of max. tunnel convergence with overburden (rock mass class III)

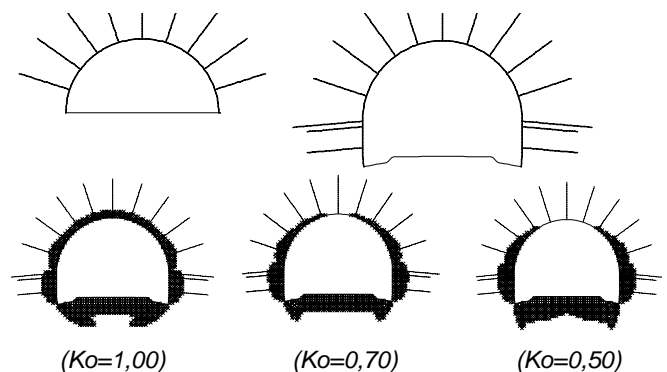


Σχήμα 14. Μηκοτομική εξέλιξη των συγκλίσεων (Διορθωμένες τιμές-Κατηγορία βραχομάζας III)
Figure 14. Longitudinal deformation profiles (Corrected values - rock mass class III)

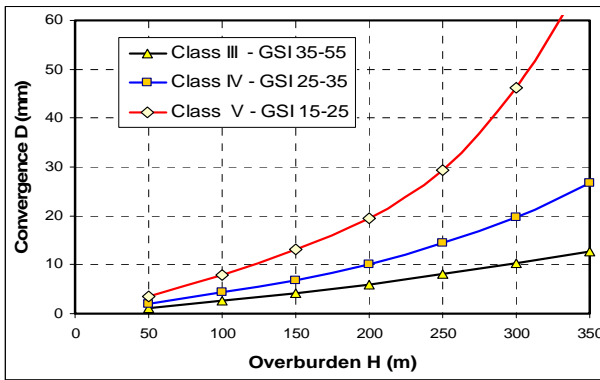
8. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για την τεκμηρίωση της επάρκειας των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, αναφορικά με την δυνατότητα ανάληψης φορτίων και τον έλεγχο των συγκλίσεων του υπόγειου ανοίγματος, καταστρώθηκαν αριθμητικά προσομοιώματα πεπερασμένων διαφορών για κάθε κατηγορία διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης, θεωρώντας τόσο τις θέσεις ελάχιστου (περιοχή στομιών) όσο και μέγιστου υπερκειμένου. Τα αριθμητικά προσομοιώματα ήταν διδιάστατα και αναλύθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC. Οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας προσδιορίστηκαν με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές και εμπειρικά με βάση τον γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI) της κάθε κατηγορίας με την μέθοδο των Hoek et al. (2002).

Στο σχήμα 15 παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα υπολογισμών (εύρος πλαστικοποιημένης ζώνης) για την επικρατέστερη κατηγορία (κατ. III, RMR 40-60), όπου εξετάζονται παραμετρικά οι διάφορες πιθανές εκδοχές αρχικών γεωστατικών τάσεων. Ανάλογα, στο σχήμα 16 παρουσιάζεται η εξάρτηση της μέγιστης σύγκλισης από το ύψος υπερκειμένων, όπου φαίνεται ότι πτωχότερες κατηγορίες βραχομάζας, εάν συναντηθούν σε υψηλά υπερκείμενα, οδηγούν σε μεγάλες συγκλίσεις και συνακόλουθα σε προβλήματα ελέγχου τους. Οι προβλέψεις υποτιμούν κάπως τις εκδηλωθείσες συγκλίσεις (πρβλ σχ. 13) υποδηλώνοντας υπερεκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας ή της αντοχής της βραχομάζας τουλάχιστον της κατηγορίας III για την οποία υπάρχουν αρκετές μετρήσεις.

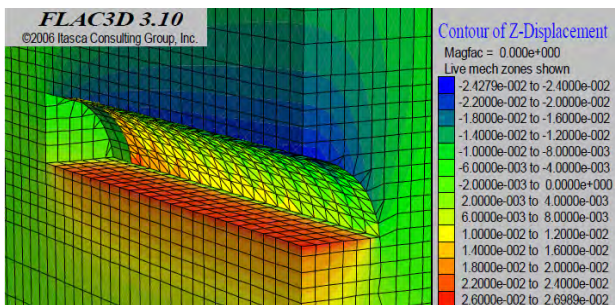


Σχήμα 15 Ανάπτυξη πλαστικοποιημένης ζώνης για διάφορα σενάρια των αρχικών τάσεων (κατ.βραχομαζας III, για υπερκείμενο H=100m)
Figure 15 Development of plastic zone around the underground opening for three in situ stress scenarios (rock class III, H=100 m)

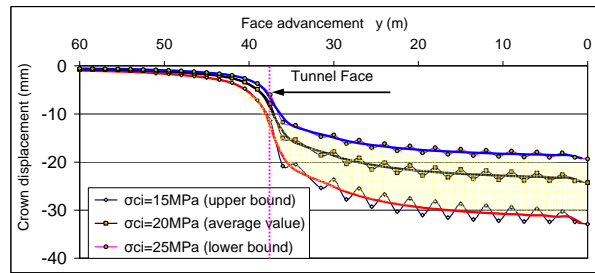


Σχήμα 16. Υπολογιστική πρόβλεψη μέγιστων συγκλίσεων για τρεις κατηγορίες βραχομάζας. Figure 16. Numerical predictions of maximum tunnel convergence for the three rock mass classes foreseen.

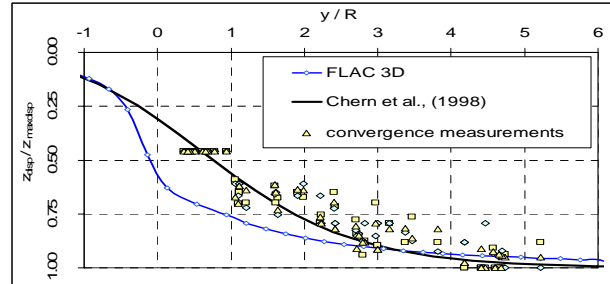
Για τον ακριβέστερη προσομοίωση της διάνοιξης και την σύγκριση της απόκρισης με τις μετρήσεις, καταστρώθηκε ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα της διάνοιξης με το λογισμικό $FLAC^{3D}$ (σχήμα 17) και επιλύθηκε για τις συνθήκες αναφοράς (κατ. III, GSI=45, H=100 m). Ικανοποιητική συσχέτιση των αριθμητικών προσομοιώσεων με τις μετρήσεις (σχήμα 18), προκύπτει μόνο εάν υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας με την πιο πρόσφατη εμπειρική συσχέτιση των Hoek & Diederichs (2006), σύμφωνα με την οποία για $\sigma_c=20MPa$ και GSI=45 το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας είναι $E_m=1150 MPa$, τιμή σημαντικά μικρότερη από την αρχικά εκτιμηθείσα. Παρ' όλα αυτά, όπως φαίνεται από το σχήμα 19 οι αριθμητικές αναλύσεις προβλέπουν μια απότομη ανάσχεση της εξέλιξης των συγκλίσεων με την απομάκρυνση από το μέτωπο αποκλίνοντας από τις προβλέψεις εμπειρικών σχέσεων όπως αυτή των Chern et al. (1998). Αυτό αποδίδεται στον σημαντικό ρόλο φαινομένων ερπυσμού και χαλάρωσης της βραχομάζας στην περιοχή του προωθούμενου μετώπου.



Σχήμα 17. Κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας. Figure 17. Vertical displacements around the opening during tunnel advancement.



Σχήμα 18. Μηκοτομική κατανομή συγκλίσεων. Παραμετρικές αναλύσεις με το $FLAC^{3D}$. Figure 18. Longitudinal deformation profile. Parametric analysis with $FLAC^{3D}$.



Σχήμα 19. Υπολογιστική (3D) και εμπειρική μηκοτομική κατανομή των συγκλίσεων. Figure 19. Numerical (3D) and empirical longitudinal deformation profile.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- Αλεξανδρής Α., Μ. Αμπαριώτη, Ε.Κασιόπη-Γρίβα & Α. Παύλου (2006) Διάνοιξη της Σήραγγας Διχαλορέματος της παράκαμψης Αγ. Κων/νου του ΠΑΘΕ. 5ο Πανελ. Συν. Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη σελ. 399-406.
- Alexandris.A.P., E.A.Protopara, D.J.Papastamatiou (2004) A Highway Section Close to an Active Fault: Seismic Risk and Design Considerations. GeoTrans 2004 Los Angeles USA. ASCE Geot. Special Pub. vol.2 No 126, pp. 1729-1739.
- Κράνης Χ. (1999) Νεοτεκτονική Δραστηριότητα ρηξιγενών ζωνών Κεντροανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Διδ.Διατρ.Παν. Αθηνών.
- Chern, J.C., Shiao, F.Y., Yu, C.W. (1998). An empirical safety criterion for tunnel construction. Proc. of the Regional Symp. on Sedimentary Rock Eng/ring, Taipei, Taiwan pp. 222-227.
- Hoek, E. and Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. Int. J. RockMech. Min. Sci. 43(2), 203-215.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Proc.NARMS-TAC Conference, Toronto, Canada, pp. 267-273.