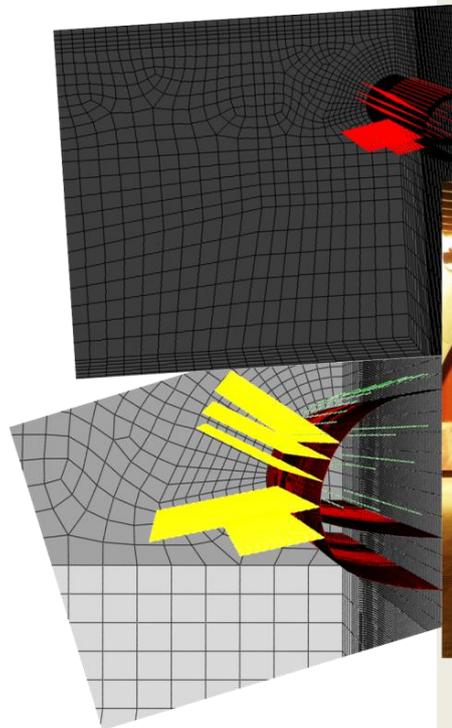




ΜΠΑΡΜΠΑΚΟΥ ΙΩΑΝΝΑ - ΕΙΡΗΝΗ

Εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων της περιβάλλουσας βραχώμαζας από επί τόπου μετρήσεις και 3D αριθμητικές αναλύσεις - Εφαρμογή στην περιοχή Περιστερίου του Αττικού Μετρό.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Μ.Ι. ΚΑΒΒΑΔΑΣ

ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την καθοδήγηση του κ. Μ. Ι. Καββαδά, Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι συμβουλές και οι παρατηρήσεις του υπήρξαν καθοριστικές για την πορεία των εργασιών και των αναλύσεων. Η πνευματική υποστήριξη και οι γνώσεις που μου προσέφερε κατέστησαν πιο ενδιαφέρουσα και πιο εύκολη τη χρονοβόρα αυτή διαδικασία. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά που με εμπιστεύτηκε για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Π. Φορτσάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την συμβολή του στο επιστημονικό αντικείμενο της εργασίας, καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια που προσέφερε σε επιστημονικό και οργανωτικό επίπεδο. Οι πολύ συχνές συναντήσεις μας, αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα στην επιτυχή ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας, ενώ χάριν της προθυμίας και της μεταδοτικότητάς του, αποκόμισα πολύτιμες γνώσεις.

Ολόθερμες ευχαριστίες οφείλω και στον κ. Π. Μαρίνο, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τόσο για τη συνδρομή του στο γνωστικό πεδίο της διπλωματικής μου εργασίας, όσο και στην προθυμία του να με καθοδηγήσει καθ' όλη την πορεία των εργασιών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοινοπραξία των εταιρειών J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε., FCC CONSTRUCCION και την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, για το σύνολο των γεωτεχνικών μελετών που παρείχαν, προς εξασφάλιση πρωτογενών μετρήσεων και λοιπών στοιχείων.

Ειδικότερα, ευχαριστώ θερμά τον κ. Γ. Στούμπο, Τεχνικό Γεωλόγο MSc, Τμήμα Τεχνικής Γεωλογίας Αττικό Μετρό Α.Ε., για τη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, την προθυμία του και τον χρόνο του όσες φορές ζητήθηκε και την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά τη σύνταξη του κειμένου της διπλωματικής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον κ. Ι. Κλάδο, Γεωλόγο Μηχανικό, Διευθυντή Τμήματος Παρακολούθησης Κατασκευών, για τα στοιχεία και τις πληροφορίες που παρείχε, καθώς και για τη φιλοξενία του κατά την επί τόπου επίσκεψη μας στην περιοχή του έργου (Σήραγγα διπλής τροχιάς του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ πλησίον σταθμού "Περιστερί"). Επιπλέον, ευχαριστούμε τους κκ. Ν. Μπούσουλα, Πολιτικό Μηχανικό - Γεωτεχνικό, Προϊστάμενο Τμήματος Γεωτεχνικών Μελετών Αττικό Μετρό Α.Ε και Μ. Νόβακ, Γεωλόγο, Προϊστάμενο Τμήματος Τεχνικής Γεωλογίας Αττικό Μετρό Α.Ε. για την προθυμία τους στην παραχώρηση στοιχείων του έργου.

Για την έμπρακτη και ουσιαστική υποστήριξή τους ευχαριστώ την φίλη και συνάδελφο Δεμερούτη Μαρία για τη συνολική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και την οικογένεια και τους φίλους μου, που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειάς, ειδικά σε περιόδους μεγάλης πίεσης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι γρήγοροι ρυθμοί τις αστικής ανάπτυξης έχουν οδηγήσει στη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για νέες υπόγειες κατασκευές με σκοπό τη διευκόλυνση της ανθρώπινης ζωής. Ένα από αυτά τα υπόγεια έργα αποτελούν οι σήραγγες. Πολλές φορές η κατασκευή σηράγγων γίνεται κάτω από ιδιόμορφες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στις οποίες ο μηχανικός πρέπει να βρει λύση. Όμως με τη βελτίωση της τεχνολογίας σχεδιασμού και κατασκευής και με τη χρήση νέων μεθόδων διάνοιξης και υποστήριξης, έχει καταστεί δυνατή η διάνοιξη σηράγγων σε εδαφικούς σχηματισμούς και συνθήκες που κάποτε η κατασκευή τους είχε αποκλειστεί.

Η μελέτη των φορτίων που ασκούνται στη διατομή άμεσης υποστήριξης των σηράγγων είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που καλούνται να επεξεργασθούν οι μελετητές κατά το σχεδιασμό των υπογείων έργων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της δυσχέρειας των διαθέσιμων μεθόδων να καθορίσουν ικανοποιητικά την αλληλεπίδραση γεωυλικού-μέτρων άμεσης υποστήριξης-φορτίων στο κέλυφος της διατομής και της έλλειψης ευρέως αποδεκτής θεωρητικής προσέγγισης για τον υπολογισμό των φορτίων στη διατομή άμεσης υποστήριξης από το περιβάλλον γεωυλικό.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, σχετικά με την μεταβολή των φορτίσεων που ασκούνται στο κέλυφος της διατομής άμεσης υποστήριξης για συγκεκριμένο έργο, τη Σήραγγα Διπλής Τροχιάς του Σταθμού "Περιστέρι". Με τη βοήθεια του τριδιάστατου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS επιχειρήθηκε η ακριβής προσομοίωση της κατασκευαστικής ακολουθίας και η μελέτη των φορτίων του κελύφους από το περιβάλλον γεωυλικό στο οποίο πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη του έργου. Βασική απαίτηση κατά τον σχεδιασμό ήταν η δημιουργία ενός αριθμητικού προσομοιώματος που να λαμβάνει υπόψη τη στρωματογραφία της μελέτης σχεδιασμού του υπογείου τμήματος, τις πραγματικές κατασκευαστικές συνθήκες και τα στοιχεία των επί τόπου μετρήσεων των πιέσεων περιμετρικά της διατομής, βρίσκοντας τη χρυσή τομή μεταξύ ακρίβειας των αποτελεσμάτων και χρόνου υπολογισμού των αναλύσεων.

Από τις αναλύσεις προέκυψαν αποτελέσματα σχετικά με τις αναπτυσσόμενες πλαστικές παραμορφώσεις, τις ολικές και κατακόρυφες μετατοπίσεις γύρω από τη διατομή της κατασκευής και στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και τις κατανομές των πιέσεων περιμετρικά του κελύφους της διατομής άμεσης υποστήριξης. Αποσκοπώντας στον ακριβέστερο δυνατό καθορισμό της γεωτεχνικής συμπεριφοράς και των τιμών των ζητούμενων γεωτεχνικών παραμέτρων μεταβλήθηκαν συγκεκριμένες παράμετροι όπως ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων K_0 , το μέτρο ελαστικότητας E , το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η συνοχή των σχηματισμών που συναντήθηκαν κατά τη διάνοιξη. Επιπλέον, εκτελέστηκαν αναλύσεις με θεώρηση σταδιακής τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά την προχώρηση και τελικώς μελετήθηκε η επίδραση όλων αυτών στις κατανομές και στις τιμές των φορτίων του κελύφους της άμεσης υποστήριξης. Επισημαίνεται ότι, σε πολύ καλούς σχηματισμούς όπου τα όργανα μέτρησης των καθιζήσεων και των συγκλίσεων δίνουν χαμηλές τιμές όπως και στη συγκεκριμένη εργασία, η δυνατότητα εξέτασης των φορτίων της επένδυσης μέσω των κυψελών πίεσης αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην εξέλιξη του έργου.

Τελικώς αφού επιλέχθηκαν εύλογες γεωτεχνικές παράμετροι για το γεωυλικό εντός του οποίου διανοίγεται η σήραγγα και διερευνήθηκαν τα φορτία επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, επιχειρήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις επί τόπου μετρήσεις των κυψελών πίεσης με τις αντίστοιχες του αριθμητικού προσομοιώματος. Οπότε προέκυψαν οι γεωτεχνικές

παράμετροι των σχηματισμών της περιοχής του έργου κατά μήκος του άξονα δίανοιξης και πάνω από αυτόν.

Υπογραμμίζεται ότι τα επιχειρήματα και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην παρούσα εργασία αποτελούν προσωπικές απόψεις των συγγραφέων και δεν απηχούν την επίσημη άποψη της Αττικό Μετρό Α.Ε.

ABSTRACT

Rapid growth rate of urban development has led to a continuously increasing need for new underground constructions that aim to further improve the living standards. Tunnels are a great example of such underground constructions. Often, tunneling takes place under severe geological and geotechnical conditions where engineering solutions must be found. Most recently, due to the improvement of design and construction equipment and due to the use of new excavation and support methods, tunneling has become feasible in geological formations and geotechnical conditions that used to be impossible in the past.

The study of the pressure developed on the tunnel's temporary support is a complex issue that engineers are required to investigate early during the design phase of underground works. This is mostly because of the large scatter and uncertainty of the load from the surrounding geomaterial, estimated through the available empirical and analytical methods, which usually do not take into account the interaction of the system geomaterial - temporary support – final lining.

This M.Sc. thesis presents the results of numerical analyses performed on the double-track tunnel located near Peristeri station of Attiko Metro. The results show the change of developed pressures on the shell of the temporary support measures of this cross section. Through the use of the 3-dimensional finite element code ABAQUS, a realistic simulation of the construction stages and the pressures on the shell in regards to the surrounding geomaterial was attempted. Therefore a numerical model was created that takes into account the stratigraphy and the laboratory results of the geotechnical evaluation, the actual construction conditions and the in-situ data of field measurements of pressure around the cross-section, finding the right balance between precision of results and calculation time of the analysis.

The analyses obtained results on developing plastic deformations, the total and vertical displacements around the cross-section of the structure as well as the pressure distribution around the temporary support measures of the cross section. In order to achieve realistic estimation of the geotechnical parameters, wide parametric analyses, regarding the stress ratio K_0 , the Young's modulus E , the thickness of the shotcrete and the cohesion of the formations encountered during the excavation process were carried out, aiming to quantify the sensitivity of the geotechnical problem. Furthermore, analyses were performed by sequential construction of shotcrete according to the tunnel advance rate and finally the effect of all these was studied in regards to the distributions and the values of the pressures on the shell of the temporary support.

At this point it should be mentioned that in very good formations where subsidence and convergence measurements give low values as in the present thesis, the analysis of pressure cells results is an important instrument for the advancement of the project.

Finally, after selecting appropriate geotechnical parameters for the geomaterial in which the tunneling was made and after using data about the pressures on the shell of the temporary support, a comparison was attempted between the in-situ measurements from the pressure cells in regards to the corresponding values of the mathematical model. That, in result, lead to the determination of the geotechnical strength parameters in regards to the formations of the area across and above the axis of tunneling construction.

It should be underlined that the arguments and the conclusions which are included in this thesis are personal opinions of the authors and under no circumstances do they reflect the official opinion of Attiko Metro S.A.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύγχρονη εποχή δημιουργεί την ανάγκη συνεχούς ανάπτυξης και κατασκευής υπογείων έργων για την επέκταση των οδικών και συγκοινωνιακών δικτύων. Συνέπεια αυτής της εξέλιξης είναι ότι οι γνώσεις και οι εμπειρίες των μελετητών ανανεώνονται και εμπλουτίζονται. Παράλληλα η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για νέες υπόγειες κατασκευές, επιβάλλει την κατασκευή σηράγγων ακόμα και σε δύσκολες και ιδιόμορφες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, μέσω εκτεταμένων ζωνών από ισχυρά κερματισμένα, τεκτονισμένα και αποδιοργανωμένα βραχώδη. Η συμπεριφορά τέτοιων πετρωμάτων επιδρά άμεσα στη σύλληψη, στο σχεδιασμό και στη μελέτη κατασκευής του έργου και βεβαίως καθορίζει το κόστος αυτού. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι τα υπόγεια έργα είναι ένα πολυδιάστατο πρόβλημα το οποίο δεν μπορεί να προσομοιωθεί μονοσήμαντα, ενώ η γεωλογία θα πρέπει να έχει συνεχή παρουσία κατά την διάρκεια σχεδιασμού και κατασκευής τους.

Στα πλαίσια του εκμηδενισμού των αποστάσεων και της κατασκευής ενός πιο ελκυστικού εθνικού συγκοινωνιακού δικτύου, το Αττικό Μετρό της Αθήνας βοήθησε στην ανάπτυξη του δικτύου και με την πάροδο του χρόνου η επέκτασή του προσελκύει όλο και μεγαλύτερο αριθμό ατόμων που το χρησιμοποιούν ως μέσο μετακίνησης σε καθημερινή βάση. Αποτελείται συνολικά από τρεις γραμμές, οι οποίες επεκτείνονται σταδιακά ούτως ώστε να γίνει εφικτή η μετακίνηση με αυτό το μέσο σε όλο και περισσότερες περιοχές. Ένας από τους νέους σταθμούς που θα προστεθεί μελλοντικά στην υπάρχουσα Γραμμή 2 «από Αγ. Αντώνιο προς Ανθούπολη» είναι αυτός του «Περιστερίου», ο οποίος έχει ολοκληρωθεί και προβλέπεται να εξυπηρετεί συνολικά 75000 άτομα ημερησίως.



Σχήμα 1-1: Χάρτης υφιστάμενων σταθμών του Μετρό Αθηνών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση και επεξεργασία των στοιχείων που αφορούν στην επέκταση της Γραμμής 2 από τον Αγ. Αντώνιο προς την Ανθούπολη, η οποία περιλαμβάνει 2 σταθμούς, του Περιστερίου και της Ανθούπολης.



Σχήμα 1-2: Αποβάθρες του έτοιμου προς παράδοση σταθμού "Περιστερί".

Πιο συγκεκριμένα, θα εκτελεσθούν ανάστροφες αναλύσεις για τον υπολογισμό των φορτίων που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη της διατομής του τμήματος πριν από το σταθμό του Περιστερίου, εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας σε πολύπλοκες γεωτεχνικές συνθήκες με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των εν λόγω αναλύσεων θα προσδιορισθεί το εύρος τιμών των αντιπροσωπευτικών γεωτεχνικών παραμέτρων της σήραγγας. Ειδικότερα, με δεδομένα τα στοιχεία των γεωτεχνικών συνθηκών δηλαδή τη στρωματογραφία της μελέτης σχεδιασμού του υπογείου τμήματος σε συνθήκες αστικού περιβάλλοντος, καθώς και τα στοιχεία μετρήσεων των πιέσεων περιμετρικά της διατομής και των καθιζήσεων επιφάνειας, θα πραγματοποιηθεί η κατ' αρχήν αξιολόγηση των στοιχείων των εν λόγω μετρήσεων και έπειτα ο πλήρης επανυπολογισμός τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αποσκοπώντας στον κατά το δυνατόν ακριβέστερο καθορισμό της γεωτεχνικής συμπεριφοράς και των τιμών των ζητούμενων γεωτεχνικών παραμέτρων. Καθώς το περιβάλλον μέσο εμφανίζει κατά κανόνα μη γραμμική συμπεριφορά, ενώ το είδος, ο χρόνος και ο τρόπος τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης μπορούν να αλλάξουν καθοριστικά την συνολική απόκριση του προβλήματος, επιλέχθηκε η εκτέλεση τριδιάστατων ανάστροφων αναλύσεων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση των στοιχείων της μελέτης και της κατασκευής, τα οποία παραχωρήθηκαν από την Αττικό Μετρό Α.Ε. για την περιοχή ενδιαφέροντος. Θα ληφθούν υπόψιν τα στοιχεία της τεχνικογεωλογικής έρευνας και του προγράμματος γεωτρήσεων οι οποίες εκτελέστηκαν στην περιοχή και προσδιόρισαν τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες. Ακόμα, θα μελετηθούν τα γεωτεχνικά προσομοιώματα και οι τομές των σχηματισμών, όπως προτάθηκαν από τα έγγραφα της γεωτεχνικής αξιολόγησης και της άμεσης υποστήριξης στα πλαίσια της μελέτης του έργου. Έπειτα, θα μελετηθεί ο σχεδιασμός της σήραγγας που σχετίζεται με την επιλογή της καταλληλότερης διατομής κατά θέσεις του έργου και την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων άμεσης υποστήριξης. Στη συνέχεια της πρωτογενούς επεξεργασίας των στοιχείων, θα αποσαφηνισθούν από τα σχέδια της κατασκευής τόσο η κατασκευαστική ακολουθία των εργασιών και η υποστήριξη που χρησιμοποιήθηκε τελικώς, όσο και οι επιτόπου γεωτεχνικές συνθήκες οι οποίες προέκυψαν. Στο τέλος του πρώτου μέρους θα είμαστε σε θέση να κατηγοριοποιήσουμε τους γεωτεχνικούς σχηματισμούς της περιοχής και τις ιδιότητες των μέτρων άμεσης υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας θα μας απασχολήσει η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, αλλά και ο έλεγχος της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων της άμεσης υποστήριξης και της τελικής επένδυσης μέσω των στοιχείων της κατάλληλα εφαρμοσμένης Γεωδομητικής και Δομητικής Παρακολούθησης (ΓΔΠ). Τα έργα κατασκευής του Μετρό πραγματοποιούνται σε αστικό περιβάλλον, συνεπώς η γεωδομητική παρακολούθηση είναι αναπόσπαστο κομμάτι του έργου με τη χρήση πληθώρας ειδικών οργάνων τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής όσο και μετά την ολοκλήρωση του. Στο τμήμα αυτό θα πραγματοποιηθεί σύντομη αναφορά στα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο υπό μελέτη έργο και θα ακολουθήσει εκτενέστερη αναφορά ειδικά στις κυψέλες πίεσης, με τις οποίες, οι όποιες θα αποτελέσουν βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο τρίτο τμήμα της εργασίας με την βοήθεια του τριδιάστατου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS θα επιχειρηθεί ο κατάλληλος σχεδιασμός προσομοιώματος που να ανταποκρίνεται στις πραγματικές επικρατούσες συνθήκες τόσο τις ευρύτερης περιοχής όσο και του ίδιου του έργου. Για την απόκτηση πληρέστερης εικόνας των επί τόπου συνθηκών θα πραγματοποιηθεί επίσκεψη στην περιοχή. Στη συνέχεια με την κατάλληλη προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, των γεωμετρικών στοιχείων της περιοχής του έργου, των εφαρμοζόμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης και έχοντας ως βασική απαίτηση την εξοικονόμηση του υπολογιστικού χρόνου διεξαγωγής των αναλύσεων, το προσομοίωμα θα σχεδιαστεί και θα παρουσιαστεί.

Στην τελική φάση της εργασίας θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα των ανάστροφων παραμετρικών αναλύσεων και συγκεκριμένα τα εύρη των γεωτεχνικών παραμέτρων που θα θεωρηθούν στις αναλύσεις και η επίδραση της μεταβολής αυτών στις τιμές και την κατανομή των φορτίων που ασκούνται περί το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Θα ακολουθήσει η επιλογή των αντιπροσωπευτικών γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών του έργου βάσει των οποίων θα προκύπτουν φορτία στην άμεση υποστήριξη της διατομής που θα συγκλίνουν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν επί τόπου από τις κυψέλες πίεσης. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων θα συγκριθούν και οι καθιζήσεις που θα προκύψουν από τις ανάστροφες αναλύσεις με τις καθιζήσεις που μετρήθηκαν επί τόπου.

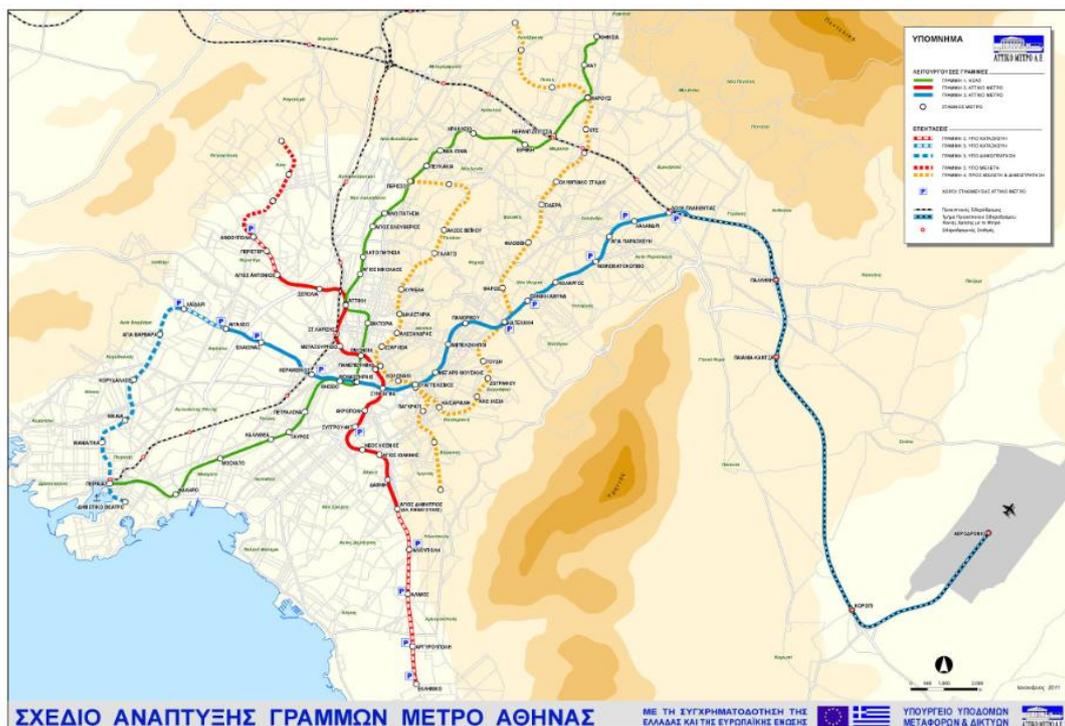
Υπογραμμίζεται ότι τα επιχειρήματα και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην παρούσα εργασία αποτελούν προσωπικές απόψεις των συγγραφέων και δεν απηχούν την επίσημη άποψη της Αττικό Μετρό Α.Ε.

1

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΟΥ

Τα υπόγεια έργα έχουν συντελέσει τόσο στη διευκόλυνση των μετακινήσεων, όσο και στον εκμηδενισμό των αποστάσεων, ενώ παράλληλα οδηγούν στην αποσυμφόρηση του συγκοινωνιακού δικτύου σε καθημερινή βάση. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό εάν αναλογιστούμε την σπουδαιότητα της ύπαρξης του Αττικό Μετρό της Αθήνας. Αναμφισβήτητα, η κατασκευή του συγκεκριμένου έργου λειτούργησε ευεργετικά στην ανάπτυξη της χώρας και η επέκτασή του με την πάροδο του χρόνου προσελκύει όλο και μεγαλύτερο αριθμό ατόμων που το προτιμούν ως μέσο μεταφοράς.

Ο Μητροπολιτικός σιδηρόδρομος της Αθήνας περιλαμβάνει ουσιαστικά ένα σύστημα υπόγειων και επίγειων αστικών σιδηρόδρομων στην Αττική. Σήμερα αποτελείται από τρεις γραμμές: τη γραμμή των Ηλεκτρικών Σιδηροδρόμων Αθηνών-Πειραιώς (Η.Σ.Α.Π) (γραμμή 1) και τις δύο γραμμές της Αττικό Μετρό Εταιρία Λειτουργίας (Α.Μ.Ε.Λ.) (γραμμές 2 & 3). Οι γραμμές 2 & 3 του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας λειτουργούν από το 2000. Η γραμμή 2 εξυπηρετεί 14 σταθμούς και το μήκος της γραμμής είναι 30.4km (Άγιος Αντώνιος- Άγιος Δημήτριος), ενώ η γραμμή 3 περιλαμβάνει 20 σταθμούς και το μήκος της είναι 16.4km. Οι συγκεκριμένες γραμμές παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί (γραμμή 2: κόκκινο χρώμα, γραμμή 3: μπλε χρώμα).



Σχήμα 1-1: Σχέδιο Ανάπτυξης Γραμμών Μετρό Αθήνας.
[Ηλεκτρονική σελίδα Αττικό Μετρό Α.Ε.: <http://www.ametro.gr/page/>]

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι μελλοντικά αναμένεται επέκταση των υφιστάμενων γραμμών του Μετρό, έτσι ώστε να γίνουν εφικτές οι μετακινήσεις και σε μακρινότερες περιοχές. Στον χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζεται το σχέδιο ανάπτυξης των μελλοντικών γραμμών του Μετρό Αθηνών.



Σχήμα 1-2: Σχέδιο Ανάπτυξης Μελλοντικών Γραμμών Μετρό.
[Ηλεκτρονική σελίδα Αττικό Μετρό Α.Ε.: <http://www.ametro.gr/page/>]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση και επεξεργασία των στοιχείων που αφορούν στην επέκταση της Γραμμής 2 από τον Αγ. Αντώνιο προς την Ανθούπολη η οποία περιλαμβάνει 2 σταθμούς, του Περιστερίου και της Ανθούπολης. Πιο συγκεκριμένα η εργασία, θα επικεντρωθεί στην διάνοιξη και κατασκευή του τμήματος πριν από το σταθμό του Περιστερίου. Έτσι, στη συνέχεια κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί περιγραφή ορισμένων γενικών χαρακτηριστικών που αφορούν στη διάνοιξη του συγκεκριμένου υπόγειου ανοίγματος.

Με την επέκταση της γραμμής 2 από τον Αγ. Αντώνιο προς την Ανθούπολη (1.5km) με δύο νέους σταθμούς: Περιστερί και Ανθούπολη, εκμηδενίστηκαν οι αποστάσεις στο Δήμο Περιστερίου, ενώ προβλέπεται - βάσει των μελετών - να εξυπηρετούνται συνολικά 75000 άτομα ημερησίως. Ο σταθμός Περιστερί κατασκευάστηκε κυρίως με την μέθοδο του ανοιχτού ορύγματος στην Λεωφόρο Παναγή Τσαλδάρη στο ύψος του Δημαρχείου Περιστερίου. Ποσοστό περίπου 30% του σταθμού κατασκευάστηκε με την μέθοδο της υπόγειας διάνοιξης προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η όχληση στην κυκλοφορία των οχημάτων, καθώς στο συγκεκριμένο σημείο υπάρχει διασταύρωση 6 δρόμων. Στη νότια πλευρά του σταθμού πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες κατασκευές για τη σύνδεση μελλοντικά με γειτονικό υπόγειο χώρο στάθμευσης. Ο σταθμός αποτελείται από 3 επίπεδα με ίδιο περίπου περίγραμμα συνολικής επιφάνειας 11000τ.μ. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η οριζοντιογραφία της γραμμής 2.



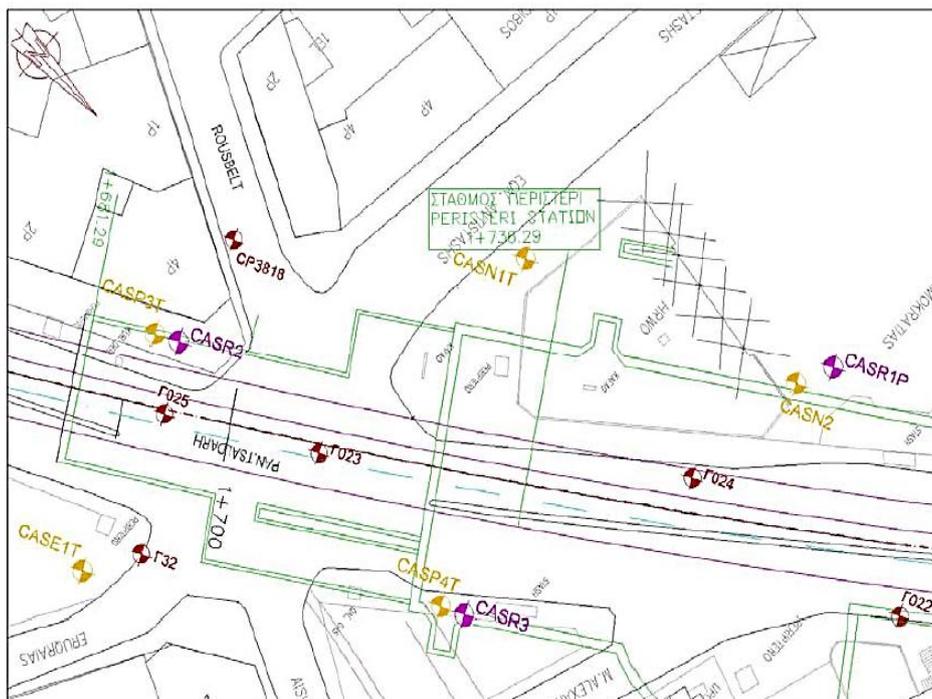
Σχήμα 1-3: Οριζοντιογραφία Γραμμής 2 Αγ. Αντώνιος-Ανθούπολη. [Λογισμικό Google Earth, Ημερομηνία Φωτογραφίας: 20/01/2008]

Η περιοχή μελέτης που θα μας απασχολήσει βρίσκεται κατά μήκος της οδού Παναγή Τσαλδάρη και εκτείνεται από την Χ.Θ. 1+392.50 έως την Χ.Θ. 1+681.29 (αρχή σταθμού Περιστερί). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η περιοχή μελέτης είναι γενικά επίπεδη, χωρίς ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά (πρόκειται για μια τυπική αστική περιοχή). Η σήραγγα προβλεπόταν να κατασκευασθεί με συμβατική διάνοιξη με μηχανικά μέσα και προσωρινή αντιστήριξη σύμφωνα με τις αρχές της «Νέας Αυστριακής Μεθόδου Σηράγγων» (NATM). Σύμφωνα με την αντίστοιχη μελέτη, το πλάτος της σήραγγας θα παρέμενε σταθερό κατά μήκος της χάραξης, ενώ το πάχος των υπερκειμένων της σήραγγας εδαφικών σχηματισμών, από την στέψη αυτής έως την επιφάνεια του εδάφους, αναμενόταν να κυμαίνεται από 11.45 m, στην Χ.Θ. 1+681.29, έως 13.75 m, στην Χ.Θ. 1+392.50.

Εφόσον στην κλίμακα του έργου δεν μεταβάλλονται σημαντικά οι γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης, η μελέτη της έκτασης πέρα από την περιοχή ενδιαφέροντος προσδίδει πληρέστερη εικόνα για το έργο. Συνεπώς πέρα από την περιοχή που θα μελετηθεί, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικά και ορισμένα στοιχεία για την γειτονική περιοχή, η οποία βρίσκεται πλησίον της Πλατείας Δημοκρατίας. Το συγκεκριμένο τεχνικό έργο έχει μήκος 55m περίπου και εκτείνεται από την Χ.Θ. 1+681.29 έως την Χ.Θ. 1+736.29. Η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε με υπόγειες μεθόδους εκσκαφής. Η τελική στάθμη εκσκαφής είναι ενιαία, σε όλη την έκταση του σταθμού (δεν υπάρχουν αναβαθμοί) και βρίσκεται σε βάθος (D) 23 έως 25m, περίπου, από την επιφάνεια του εδάφους, η μέση στάθμη του οποίου λαμβάνεται στο +56.00. Το πλάτος (B) του σταθμού είναι 14.5m, περίπου. Σύμφωνα με την μελέτη της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ το συγκεκριμένο τμήμα προβλεπόταν να κατασκευασθεί χρησιμοποιώντας υπόγειες μεθόδους εκσκαφής σε δύο (2) φάσεις.



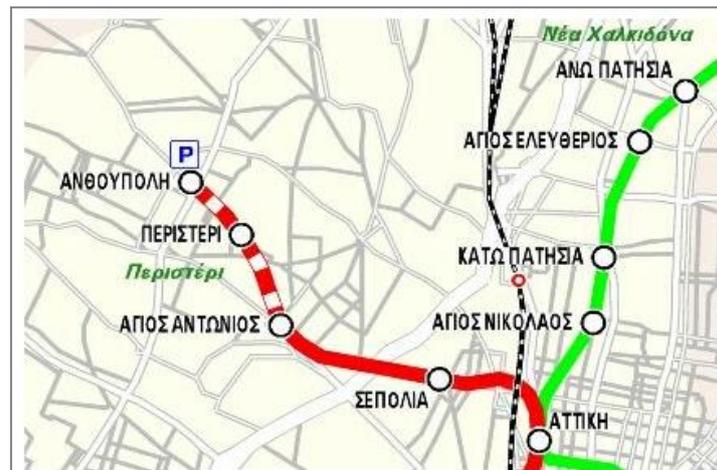
Σχήμα 1-4: Οριζοντιογραφία Γραμμής 2, Αγ. Αντώνιος- Ανθούπολη. [Αριθμός Σχεδίου_2GW0CW180S101C ΣΕΛ.2/4].



Σχήμα 1-5: Οριζοντιογραφία Περιοχής Σταθμού Περιστέρι-Θέσεις Γεωτρήσεων «Υπογείου Τμήματος» του σταθμού. [Αριθμός Εγγράφου_2SW2CW180S903B (Παράρτημα Α)].

Ακολουθώς, κρίνεται αναγκαίο να δοθούν κάποια γενικά στοιχεία του σταθμού Ανθούπολη, που αποτελεί συνέχεια του σταθμού Περιστέρι, ώστε να έχουμε μια καλύτερη εποπτεία της επέκτασης Γραμμής 2 του Μετρό.

Ο σταθμός Ανθούπολη αποτελεί τον δεύτερο σταθμό που κατασκευάστηκε και συνιστά ουσιαστικά τον τερματικό σταθμό της Γραμμής 2.



Σχήμα 1-6: Επέκταση του Μετρό- Στάση Ανθούπολη.

Ο συγκεκριμένος σταθμός κατασκευάστηκε κατά μήκος της οδού Αναπαύσεως (προέκταση της Λεωφόρου Π. Τσαλδάρη) σε θέση αμέσως μετά την διασταύρωση με την Λεωφόρο Θηβών και εκτείνεται από τη Χ.Θ. 2+342.89 έως τη Χ.Θ. 2+490.29. Το συνολικό μήκος του σταθμού είναι περίπου 147m, αυξημένο κατά 37m έναντι του τυπικού μήκους, δεδομένου ότι εντός αυτού ενσωματώνονται και τα δύο φρέατα αερισμού (αποτόνωσης) του. Το βάθος εκσκαφής που απαιτήθηκε για την κατασκευή ήταν περίπου 20m για το κεντρικό τμήμα του σταθμού και 17m για την περιοχή διερεύνησης στην βόρεια πλευρά. Ο κεντρικός υπόγειος θάλαμος διανοίγεται κάτω από τη Λεωφόρο Π. Τσαλδάρη. Η διατομή του Σταθμού στο τμήμα αυτό έχει καθαρό εσωτερικό άνοιγμα 15.2m και ύψος 11.50m, διαστάσεις που οδήγησαν σε μέσο άνοιγμα εκσκαφής 19m περίπου και μέσο ύψος εκσκαφής 14.5m αντίστοιχα. Το μέσο ύψος υπερκειμένων άνωθεν του θόλου της σήραγγας είναι 9m περίπου.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι άνωθεν της υπογείως διανοιγόμενης σήραγγας υπήρχαν υφιστάμενα δίκτυα κοινής ωφέλειας μέχρι μέγιστου βάθους 4m περίπου από την επιφάνεια. Από τα ευρισκόμενα εκατέρωθεν της λεωφόρου κτίρια, το πλησιέστερο και σημαντικότερο από πλευράς μεγέθους βρισκόταν στην νότια πλευρά σε απόσταση πρόσοψης 11m περίπου από τον άξονα της σήραγγας και έχει 4 ορόφους και 1 υπόγειο. Τα υπόλοιπα παρακείμενα κτίρια απείχαν τουλάχιστον 25m από τον άξονα της σήραγγας.

Όπως προαναφέρθηκε η διάνοιξη του θαλάμου έγινε με τμηματική εκσκαφή υπό την προστασία «ομπρέλας» δοκών προπορείας. Στο σύστημα υποστήριξης περιλαμβάνεται η προσθήκη κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος σημαντικής δυσκαμψίας, οπλισμένου με τη χρήση δικτυωτών χαλύβδινων πλαισίων και δομικού πλέγματος. Για την τμηματική εκσκαφή του θόλου κατασκευάζεται ενδιάμεσο τοίχωμα από οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που υποβοηθείται με την εγκατάσταση ηλώσεων υαλοϊνών πλήρους πάκτωσης (fiberglass), ενώ η εξασφάλιση των βάσεων έδρασης των πλαισίων υποβοηθείται από την εγκατάσταση χαλύβδινων ηλώσεων πλήρους πάκτωσης. Η ευστάθεια των μετώπων εκσκαφής καθώς επίσης και η ανάπτυξη των εξωθήσεων τους ελέγχεται από πυκνό κάρναβο ηλώσεων υαλοϊνών πλήρους πάκτωσης.

Για την επιτάχυνση των εργασιών κατασκευής της σήραγγας υπόγειας διάνοιξης κατασκευάστηκε ορθογωνικό φρέαρ πρόσβασης (μέγιστου βάθους 23m) στην περιοχή του δημοτικού πάρκου, καθώς επίσης και σήραγγα μικρού μήκους, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως πρόσβαση για την κατασκευή της κύριας σήραγγας.

2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των βασικών θεωρητικών εννοιών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, με αναφορά σε θεωρητικά στοιχεία Τεχνικής Γεωλογίας (συστήματα βαθμονόμησης βραχώμαζας), Βραχομηχανικής - Εδαφομηχανικής (κριτήρια αστοχίας, καταστατικά προσομοιώματα) και Μηχανικής Σηράγγων.

2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ - ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Η τεχνική της διάνοιξης σηράγγων εξαρτάται σημαντικά από τις επιτόπου συνθήκες της περιοχής. Προκειμένου λοιπόν να γίνει σωστά η μελέτη πρέπει να ποσοτικοποιηθούν οι ιδιότητες της βραχώμαζας που θα συναντηθούν κατά μήκος της σήραγγας. Αυτό γίνεται με βάση τα αποτελέσματα γεωτεχνικών ερευνών και η βραχώμαζα κατατάσσεται σε κατηγορίες σύμφωνα με τα γνωστά συστήματα ταξινομήσεως (RMR, GSI, Q). Στη συνέχεια γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση για τα συστήματα βαθμονόμησης RMR, GSI και Q.

2.1.1 Σύστημα RMR

Σύμφωνα με το σύστημα RMR (Bieniawski, 1974 και τροποποίηση 1979) η ταξινόμηση της βραχώμαζας πραγματοποιείται με έξι παραμέτρους κάθε μια από τις οποίες λαμβάνει μια τιμή. Το άθροισμα των τιμών των έξι παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι: η αντοχή του συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_c), ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD), η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών, η παρουσία υπογείου νερού και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την φορά διάνοιξης του έργου. Με βάση την τιμή του δείκτη RMR η βραχώμαζα κατατάσσεται στις κατηγορίες του πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2-1: Κατάταξη βραχώμαζας με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR.

Κατηγορία βραχώμαζας	Τιμές του δείκτη RMR
Πολύ καλή-I	81-100
Καλή-II	61-80
Μέτρια-III	41-60
Πτωχή-IV	21-40
Πολύ πτωχή-V	0-20

Για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας (RMR<40) η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων της βραχώμαζας συνιστάται να γίνεται άθροιση όλων των παραμέτρων εκτός από την επιρροή του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε

σχέση με την φορά διάνοιξης του έργου, καθώς η επιρροή αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του έργου.

2.1.2 Σύστημα Q (NGI)

Το σύστημα ταξινόμησης Q προτάθηκε από τους Barton et al. (1974) με σκοπό την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας και των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων που διανοίγονται με την "μέθοδο NATM". Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι: ο συντελεστής RQD, ο συντελεστής J_n ανάλογα με τις οικογένειες ασυνεχειών, ο συντελεστής J_r ανάλογα με την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών, ο συντελεστής J_a ανάλογα με την κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών, ο συντελεστής J_w ανάλογα με την ύπαρξη υπογείων υδάτων και ο συντελεστής αναγωγής τάσεων SRF. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q με βάση τον τύπο:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2-1)$$

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συνιστούν την βραχόμαζα, ο δεύτερος λόγος εκφράζει τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας και ο τελευταίος λόγος τις τάσεις που επικρατούν στην βραχόμαζα. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ταξινόμηση της ποιότητας της βραχόμαζας κατά το σύστημα Q.

Πίνακας 2-2: Κατάταξη βραχόμαζας με βάση το σύστημα ταξινόμησης Q.

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Q-Ia	Εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	Πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	Πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	Καλή
4-10	Q-IIIb	Μέτρια
1-4	Q-IVa	Πτωχή
0.1-1	Q-IVb	Πολύ πτωχή
0.01-0.1	Q-Va	Πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	Εξαιρετικά πτωχή

2.1.3 Σύστημα GSI

Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικά προτάθηκε από τον Hoek (1994) και βελτιώθηκε από τους Hoek & Marinos (2000). Το σύστημα βασίζεται στον καθορισμό δύο παραμέτρων: στη δομή της βραχόμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών και στην κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους. Το GSI δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχόμαζες με RMR<40 με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχόμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού. Σχεδιάστηκε ώστε να είναι γενικά συμβατό με το σύστημα RMR για βραχόμαζες με RMR>40. Γενικά, δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Αν οι ασθενείς

2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

2.2.1 Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb

Γενικά

Το κριτήριο Mohr-Coulomb (1776) είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο στην Εδαφομηχανική και είναι εφαρμόσιμο σε εδαφικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς. Με βάση τον νόμο τριβής του Coulomb καθορίζεται ο συνδυασμός της ορθής και της διατμητικής τάσης, ο οποίος θα έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού, ενώ με τον κύκλο του Mohr προσδιορίζεται το ζεύγος των κυρίων τάσεων, οι οποίες θα οδηγήσουν στο συνδυασμό της ορθής και της διατμητικής τάσης που θα καταλήξουν στην αστοχία της βραχώμαζας, καθώς και στην διεύθυνση του επιπέδου κατά το οποίο η βραχώμαζα θα αστοχήσει. Αυτό το κριτήριο είναι εφαρμόσιμο και στη Βραχομηχανική για κερματισμένες βραχώμαζες ή για να εκφράσει την αστοχία σε επίπεδο ασυνέχειας. Ουσιαστικά περιγράφει τον συνδυασμό της μέγιστης διατμητικής τάσης κατά το επίπεδο αστοχίας και της μέγιστης ορθή τάσης κάθετα σε αυτό, σε ελαστικό χώρο.

Μαθηματική Περιγραφή

Η μαθηματική διατύπωση του κριτηρίου αστοχίας σε όρους ορθής και διατμητικής τάσης είναι:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2-2)$$

Όπου:

τ : η διατμητική τάση κατά την αστοχία

σ : η ορθή τάση κατά την αστοχία

Η συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από την γωνία τριβής φ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά, και από την συνοχή c , στην περίπτωση που το υλικό είναι συνεκτικό. Για μη συνεκτικό υλικό θεωρούμε $c=0$.

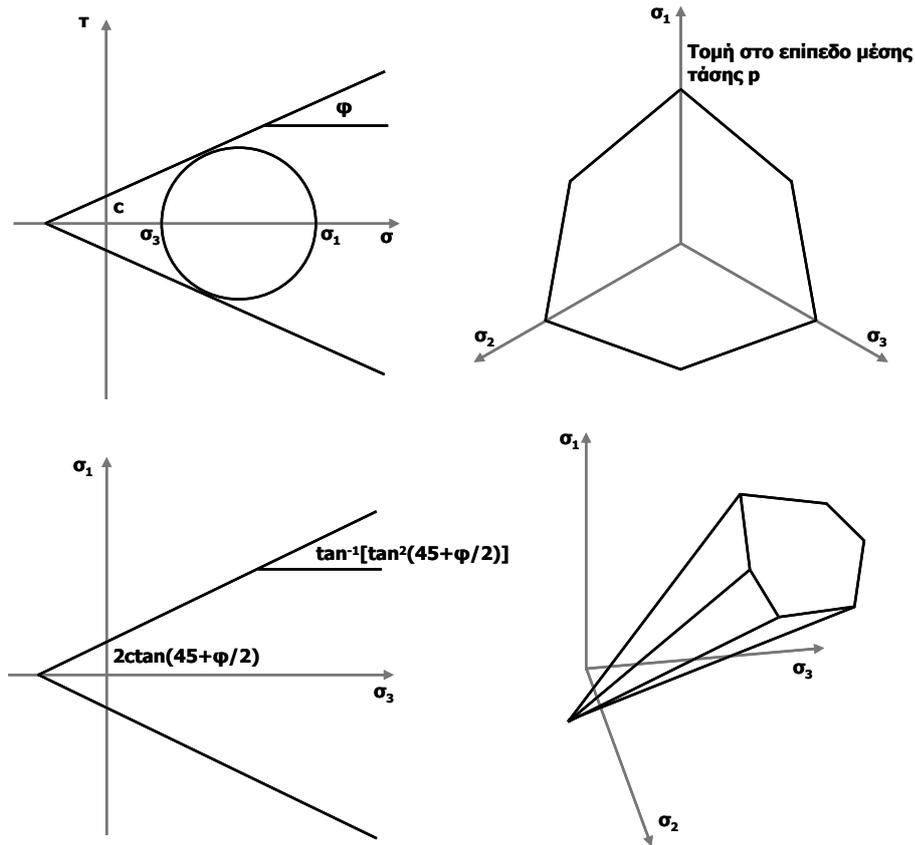
Το κριτήριο εκφράζεται και σε όρους τάσεων με την εξής μορφή:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-3)$$

Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη για $\sigma_3=0$:

$$\sigma_{cm} = 2c \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) = 2c \cdot \sqrt{N_\varphi} \quad (2-4)$$

$$N_\varphi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-5)$$



Σχήμα 2-2: Γραφική απεικόνιση περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb [Coulomb, 1776].

2.2.2 Κριτήριο Αστοχίας Hoek-Brown

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown αρχικά παρουσιάστηκε από τους Hoek & Brown (1980), ακολούθησαν τροποποιήσεις στην έκφραση του από τους Hoek & Brown (1988), Hoek et al. (1992) για να λάβει την τελική του μορφή από τους Hoek et al. (2002). Στη συνέχεια παρατίθεται η έκφραση του κριτηρίου Hoek-Brown (2002) για βραχώμαζες σε όρους κυρίων τάσεων.

$$\sigma'_1 = \sigma'_a + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \frac{\sigma'_a}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \tag{2-6}$$

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \tag{2-7}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-14D}\right) \tag{2-8}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right) \tag{2-9}$$

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (2-10)$$

$$\sigma_t = \frac{-s\sigma_1}{m_b} \quad (2-11)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{(m_b + 4s - a \cdot (m_b - 8s)) \cdot (m_b / 4 + s)^{a-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a)} \quad (2-12)$$

Όπου:

σ'_1 : Μέγιστη κύρια ενεργός τάση κατά την αστοχία.

σ'_3 : Ελάχιστη κύρια ενεργός τάση κατά την αστοχία.

σ_{ci} : Αντοχή άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη. Προσδιορίζεται από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα άρρηκτου βράχου.

GSI: Τιμή βαθμονόμησης της βραχώμαζας στο σύστημα GSI. Εκτιμάται από τα αντίστοιχα διαγράμματα GSI ανάλογα με το γεωλογικό σχηματισμό.

m_i : Σταθερά γεωυλικού, η οποία εξαρτάται από την αλληλεμπλοκή των κόκκων. Υπολογίζεται μέσω τριαξονικών δοκιμών σε δείγματα άρρηκτου βράχου. Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση των αναγκαίων δοκιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που προτείνονται από τους Marinos & Hoek (2001) ανά πετρογραφική σύσταση.

D: Συντελεστής διαταραχής βραχώμαζας, ο οποίος εξαρτάται από τη μεθοδολογία και τη διαδικασία εκσκαφής ή διάνοιξης. Τιμές για το συντελεστή διαταραχής D προτείνονται από τους Hoek et al. (2002) ανάλογα με το είδος του έργου.

σ_c : Αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη. Προκύπτει από την Εξ. (2-6) για $\sigma'_3 = 0$ και $\sigma'_1 = \sigma_{ci}$.

σ_t : Εφελκυστική αντοχή της βραχώμαζας. Προκύπτει από την Εξ. (2-6) για $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$.

σ_{cm} : Συνολική αντοχή βραχώμαζας (Global rock mass strength).

3

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν τα στοιχεία που προέκυψαν κατά την μελέτη της ευρύτερης γεωλογίας της περιοχής καθώς και οι εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή της επέκτασης του μετρό προς το σταθμό Περιστερί. Τα δεδομένα προέκυψαν από εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές οι οποίες εκτελέστηκαν ως μέρος της γεωτεχνικής έρευνας του έργου αυτού.

3.1 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στην ενότητα αυτή απλουστευτικά παρουσιάζονται οι 7 βασικές μελέτες από τις οποίες ελήφθησαν τα περισσότερα στοιχεία και θα κωδικοποιηθούν ώστε να είναι πιο κατανοητές στον αναγνώστη. Αναλυτικά τα στοιχεία που ελήφθησαν για το ΜΕΤΡΟ ΑΘΗΝΩΝ από την Αττικό Μετρό Α.Ε. και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ παραχωρήθηκαν στοιχεία τα οποία αφορούν στο σταθμό "ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ" και στο σταθμό "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ". Για την περιοχή της Ανθούπολης εξετάσθηκε η γεωτεχνική αξιολόγηση όπως συντάχθηκε από τους μελετητές. Για την περιοχή του Περιστερίου τα στοιχεία διαχωρίζονται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά στο κομμάτι που διανοίχθηκε η σήραγγα διπλής τροχιάς (Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29), για το οποίο δόθηκαν στοιχεία τόσο για την μελέτη (γεωτεχνική αξιολόγηση και άμεση υποστήριξη που προτάθηκε) όσο και στοιχεία για την κατασκευαστική ακολουθία (γεωτεχνική αξιολόγηση των επιτόπου συνθηκών, υποστήριξη που χρησιμοποιήθηκε τελικά). Το δεύτερο τμήμα αναφέρεται στην διάνοιξη διευρυμένης διατομής (Χ.Θ. 1+681.29-1+736.29) η οποία πραγματοποιήθηκε πλησίον του σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ". Για το τμήμα της διευρυμένης διατομής εξετάσθηκαν τα στοιχεία της μελέτης του έργου (γεωτεχνική αξιολόγηση και προβλεπόμενη άμεση υποστήριξη), καθώς και τα στοιχεία κατασκευής του έργου (κατασκευαστικά σχέδια και επιτόπου γεωτεχνικές συνθήκες). Πιο συγκεκριμένα οι μελέτες που εξετάσθηκαν ήταν:

1. ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΓΕΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., 22/05/2007 (2GW0CW180S901C).
2. ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", "ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ", ΕΚΘΕΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε.

FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2007, (2TW2CW180S901B).

Στην παραπάνω μελέτη με αυτόν τον κωδικό συμπεριλαμβάνεται η τεχνική έκθεση και τα αντίστοιχα σχέδια που εντάσσονται στη μελέτη.

3. ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ (ΤΕΥΧΟΣ 1/4), Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397R902C).
4. ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΓΔΠ, ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ (Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29), ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ & ΠΕΡΙΤΥΠΩΜΑ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΥΝΑΝΤΗΘΕΙΣΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΜΑΪΟΣ 2010, (2TW2CW180S1011).
5. ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", "ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ" - ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΚΣΚΑΦΗ, ΕΚΘΕΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., 07/11/2007 (2SW2CW180S903B).
6. ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", "ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ" – ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ, ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ, ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε. - ΟΜΙΛΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ Α.Τ.Ε., ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2008,(2SW2CW397F902A).
7. ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΓΔΠ, ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ, ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ (Χ.Θ. 1+681.3 – 1+724.3), ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ & ΠΕΡΙΤΥΠΩΜΑ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΥΝΑΝΤΗΘΕΙΣΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΜΑΪΟΣ 2010, (2SW2CW180S4031).

Για λόγους διευκόλυνσης της συνέχειας του κειμένου τα στοιχεία κατηγοριοποιούνται συνοπτικά, όπως στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 3-1: Κατηγοριοποίηση Στοιχείων Μελέτης και Κατασκευής Επέκτασης Γραμμής 2. [Παραχώρηση από ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε]

ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ	ΜΕΛΕΤΗ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ (Χ.Θ. 2+342.89-2+490.29)		
Γεωτεχνική αξιολόγηση	1 2GW0CW180S901C	-
ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ-ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ (Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29)		
Γεωτεχνική αξιολόγηση	2 2TW2CW180S901B	4 2TW2CW180S1011
Άμεση υποστήριξη	3 2TW2CW397R902C	
ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ-ΔΙΕΥΡΥΜΕΝΗ ΔΙΑΤΟΜΗ (Χ.Θ. 1+681.29.5-1+736.29)		
Γεωτεχνική αξιολόγηση	5 2SW2CW180S903B	7 2SW2CW180S4031
Άμεση υποστήριξη	6 2SW2CW397F902A	

(Στο εξής θα αναφέρονται μέσα στο κείμενο ως: π.χ. Μελέτη-1, Κατασκευή-4)

3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Στη παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα στοιχεία μελέτης και σχεδιασμού που αφορούν στην κατασκευή του Μετρό που βρίσκεται στην περιοχή Περιστερί όπως παραχωρήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ. Πιο συγκεκριμένα, θα ακολουθήσει εκτενέστερη αναφορά στα γεωλογικά - γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής, καθώς επίσης και στα μέτρα άμεσης υποστήριξης που τοποθετήθηκαν με βάση τον σχεδιασμό του έργου.

3.2.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής

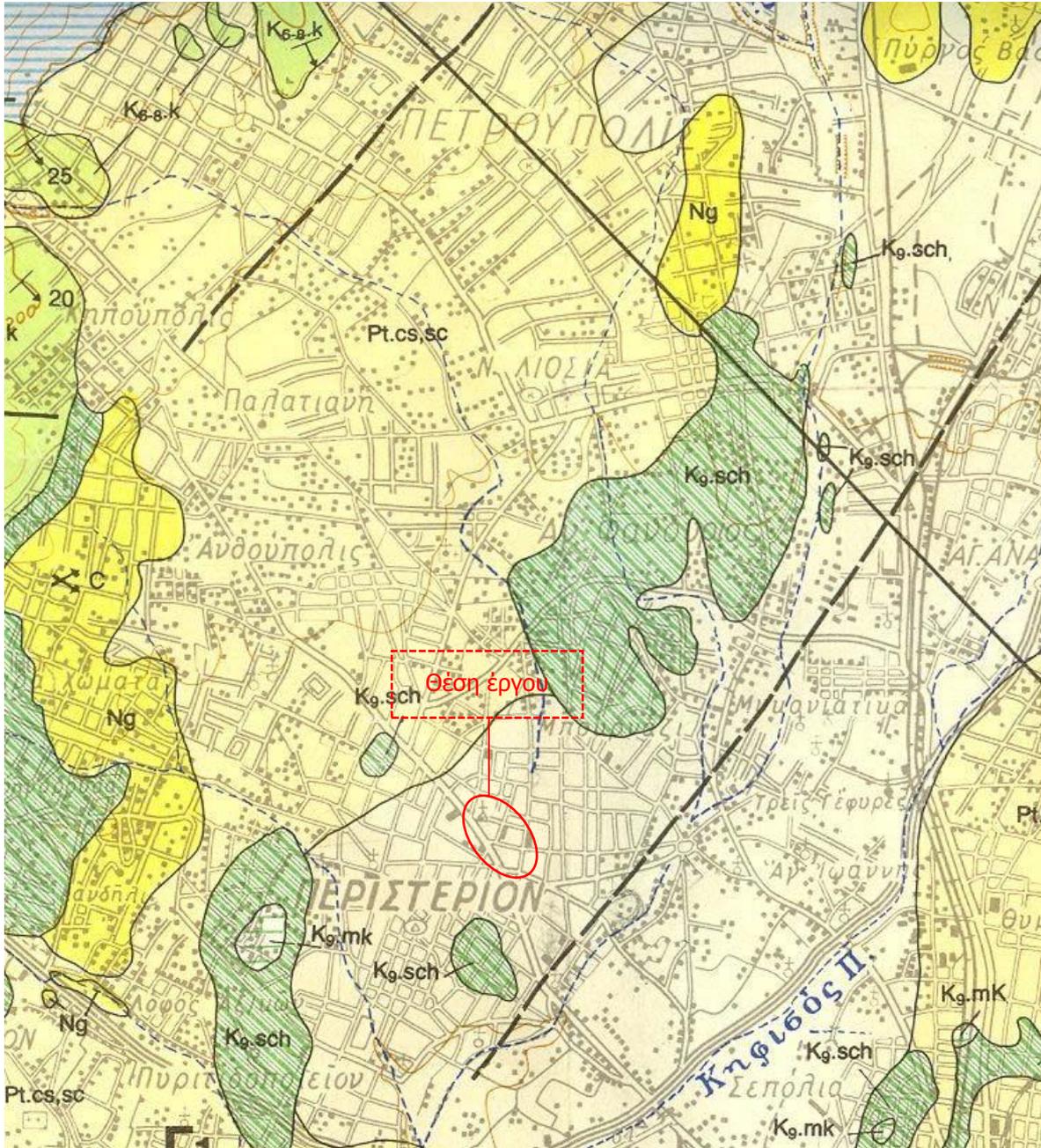
Η ευρύτερη περιοχή μελέτης εντάσσεται στη λεκάνη του Περιστερίου, της οποίας το άμεσο γεωλογικό υπόβαθρο συνίσταται από Αθηναϊκούς σχιστολίθους. Μεγάλα τμήματα των σχιστολίθων καλύπτονται από νεότερης ηλικίας σχηματισμούς του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.

Το ανάγλυφο της περιοχής του Περιστερίου είναι ομαλό με ήπιες κλίσεις πρανών γενικής διεύθυνσης ΒΔ – ΝΑ. Λοφώδεις εξάρσεις παρατηρούνται σε θέσεις ανάδυσης του γεωλογικού υποβάθρου. Ο κύριος ορεινός όγκος, δηλαδή το όρος Αιγάλεω, βρίσκεται σε απόσταση 3.0km, περίπου, από την περιοχή του έργου, με υψόμετρο που ανέρχεται στα 450m και ανάπτυγμα ΝΔ – ΒΑ διεύθυνσης. Το υψόμετρο στη θέση που κατασκευάστηκε το υπόγειο άνοιγμα του σταθμού ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ κυμαίνεται μεταξύ +54.00m και +59.00m. Το χαμηλότερο υψομετρικά μορφολογικό στοιχείο της περιοχής είναι ο Κηφισός ποταμός, ο οποίος στο ύψος της οδού Παναγή Τσαλδάρη έχει υψόμετρο περίπου +44.00m.

Αναλυτικά οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή ενδιαφέροντος και αφορούν στην γεωλογία γενικότερα της γραμμής Αγ. Αντώνιος- Ανθούπολη είναι:

- **Οι Ασβεστόλιθοι του όρους Αιγάλεω.** Τοποθετούνται βόρεια και βορειοδυτικά της θέσης του έργου, με λευκό έως τεφρό χρώμα και είναι συμπαγείς και ανακρυσταλλωμένοι.
- **Οι Σχιστόλιθοι των Αθηνών (K₉.sch).** Συνιστούν το άμεσο υπόβαθρο της περιοχής του έργου. Αποτελούνται από τεφρούς, κυανότεφρους ή υποπράσινους αργιλικούς και ψαμμιτικούς σχιστολίθους ασβεστιτικούς ψαμμίτες και γραουβάκες, με ενστρώσεις ασβεστόλιθων και σχιστωδών μαργών και με μικρά σώματα εκρηξιγενών πετρωμάτων, κυρίως σπιλιτών. Δυτικά του σταθμού «ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ» παρατηρείται ανάδυση των σχιστόλιθων έως την επιφάνεια του εδάφους.
- **Τα Νεογενή ιζήματα (Ng).** Έχουν σημαντική επιφανειακή εμφάνιση δυτικά της θέσης του έργου. Αποτελούνται από εναλλασσόμενα στρώματα, λιμναίας φάσης, μαργών, αργίλων και ψαμμιτών με παρεμβολές κροκαλοπαγών και κοιτάσματα λιγνιτών. Προς τα πάνω εξελίσσονται σε χερσαίους σχηματισμούς, κυρίως από ερυθροπηλούς και κροκαλοπαγή. Επικάθονται των Αθηναϊκών Σχιστόλιθων.
- **Τεταρτογενείς αποθέσεις (Pt.cs,sc).** Ριπίδια χειμάρρων, πλευρικά κορήματα και προσχωσιγενή υλικά κοιλάδων, αποτελούμενα από ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή, ισχυρώς συγκολλημένα από ψαμμιτομαργαϊκό συνδετικό υλικό.

- ο **Αλλουβιακές αποθέσεις (al)** χαλαρών αργιλοαμμωδών υλικών με κροκαλοτύπες και ερυθροπαγή. Οι τεταρτογενείς και αλλουβιακές αποθέσεις συναντώνται επιφανειακά σε όλη την έκταση του έργου με διάφορα πάχη σχηματισμών.



Σχήμα 3-1: Γεωλογικός Χάρτης Περιοχής Μελέτης.
[Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδος, Φύλλο ΑΘΗΝΑΙ – ΕΛΕΥΣΙΣ / ΙΓΜΕ 1986- κλίμακα 1:50.000]

Η τεκτονική της περιοχής χαρακτηρίζεται από αλληπάλληλες εριππεύσεις με κύριες διευθύνσεις των τεκτονικών στοιχείων ΒΑ-ΝΔ. Ιδιαίτερη σημασία για το έργο αποτελεί το πιθανό ρήγμα που βρίσκεται σε διεύθυνση παράλληλη με την κοίτη του ρέματος της Πικροδάφνης και σε απόσταση περίπου 500m νότια από το σταθμό Περιστερίου τέμνοντας κάθετα τον άξονα του μετρό.

Στο υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής περιλαμβάνεται ο Κηφισός ποταμός και το ρέμα της Πικροδάφνης, το οποίο διέρχεται κάθετα στον άξονα του μετρό κοντά στο σταθμό Αγ. Αντώνιος. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών που δομούν την περιοχή μελέτης έχει ως εξής:

- Οι ανθρωπογενείς και ολοκαινικές αποθέσεις παρουσιάζουν μέτρια έως υψηλή υδροπερατότητα λόγω της αδρομερούς φύσης τους σε συνδυασμό με την χαμηλή τους πυκνότητα.
- Τα νεογενή κροκαλοπαγή παρουσιάζουν υψηλό δευτερογενές πορώδες, οπότε επιτρέπουν την κυκλοφορία του υπόγειου νερού μέσα από τη μάζα τους.
- Στον ασβεστίτικο μεταψαμμίτη (ισχυρά και έντονα αποσαθρωμένος) η παρουσία του υπόγειου νερού λαμβάνει την έννοια του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα με διακριτή στάθμη και κυκλοφορία νερού
- Ο σχηματισμός του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου λόγω της μεγάλης ετερογένειάς του, παρουσιάζει ανομοιόμορφη υδρογεωλογική συμπεριφορά. Γενικά θεωρείται αδιαπέρατος λόγω της παρουσίας μεταίλυο λίθων, σχιστόλιθων και αργιλοποιημένων ζωνών αποσάθρωσης, τεκτονισμού και διάτμησης στη μάζα του. Η παρουσία, όμως, μεταψαμμιτών και μεταβατικών ζωνών εναλλαγής μεταψαμμιτών / μεταίλυο λίθων, όπως επίσης και ζωνών κερματισμού διαμορφώνει επιλεκτικές διόδους κυκλοφορίας για το υπόγειο νερό. Στην περιοχή μελέτης παρατηρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας επικρέμαται του Αθηναϊκού Σχιστολίθου, ο οποίος θεωρείται ως πλήρως κορεσμένος στη δυσμενέστερη περίπτωση.

3.2.2 Γεωτεχνική Αξιολόγηση

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του συνόλου των γεωτεχνικών ερευνών που εκτελέστηκαν στην περιοχή του υπόγειου ανοίγματος του σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ", καθώς επίσης και στην γειτνιάζουσα περιοχή. Επικεντρώνεται στις γεωτεχνικές έρευνες που εκτελέστηκαν στο τμήμα του σταθμού που προβλεπόταν να κατασκευασθεί με συμβατική διάνοιξη με μηχανικά μέσα (Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29) και στο τμήμα που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο εκσκαφής και επανεπίχωσης (Χ.Θ. 1+681.29-1+736.29), τόσο πριν την ανάθεση της κατασκευής του έργου, όσο και των συμπληρωματικών ερευνών που εκτελέστηκαν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κρίθηκε αναγκαία η εκτέλεση πρόσθετων γεωτρήσεων προκειμένου να προσδιορισθούν σαφέστερα:

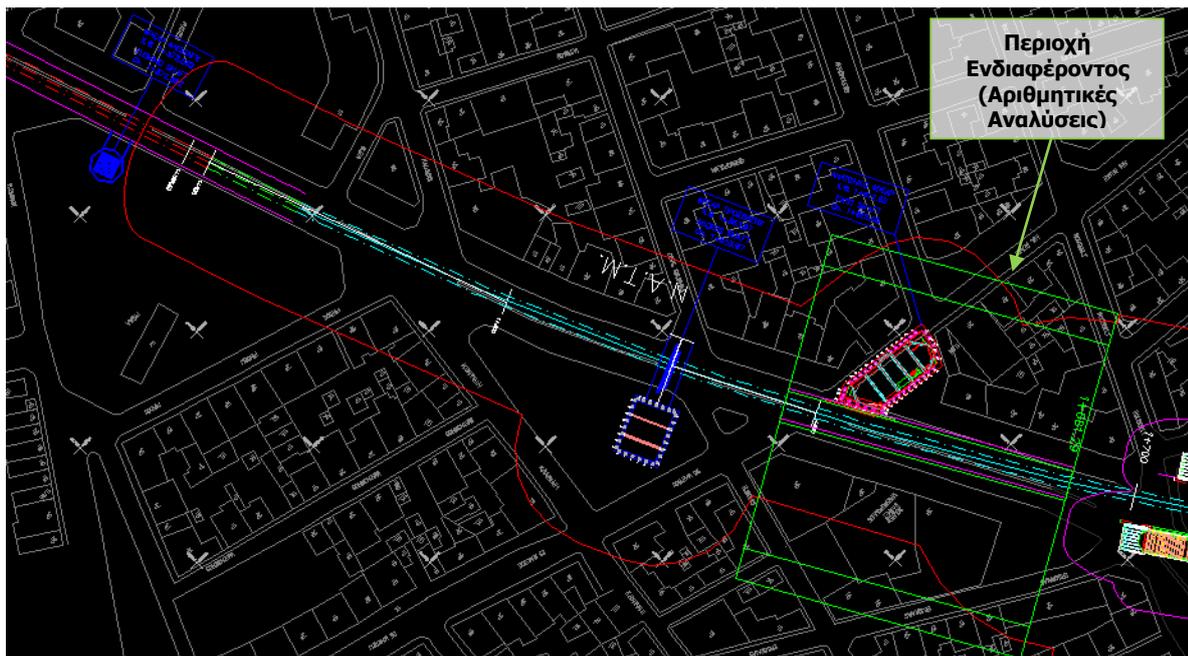
- Η στρωματογραφία στην περιοχή μελέτης, δηλαδή η έκταση και το πάχος της κάθε μιας στρώσης του υπεδάφους.
- Τα φυσικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή.
- Η στάθμη των υπόγειων νερών.

Με τη γνώση των παραπάνω μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος των αναμενόμενων καθιζήσεων, η κατηγορία εδάφους από την άποψη της σεισμικής επικινδυνότητας και να επιλεγεί ο σχεδιασμός του αρτιότερου συστήματος προσωρινής υποστήριξης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, καθώς και οι γεωτεχνικές παράμετροι για τον σχεδιασμό της τελικής της υποστήριξης.

3.2.2.1 Σταθμός Περιστερί – Τμήμα σήραγγας διπλής τροχιάς (Στοιχεία από Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν στοιχεία τα οποία προέρχονται από τη *Μελέτη-2* και αφορούν το τμήμα της σήραγγας διπλής τροχιάς που βρίσκεται λίγο πριν το σταθμό "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ". Όπως έχει ήδη αναφερθεί το συγκεκριμένο τμήμα αφορά άμεσα την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς με βάση τα στοιχεία που προκύπτουν από αυτή τη μελέτη, θα πραγματοποιηθούν στη συνέχεια ανάστροφες αναλύσεις με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού προγράμματος.

Η θέση κατασκευής του συγκεκριμένου υπόγειου τεχνικού έργου ευρίσκεται κατά μήκος της οδού Παναγή Τσαλδάρη και εκτείνεται από την Χ.Θ. 1+392.50 (αρχή εργολαβίας) έως την Χ.Θ. 1+681.29 (αρχή Σταθμού «ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ»). Η περιοχή μελέτης είναι επίπεδη, χωρίς ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά. Ουσιαστικά πρόκειται για μία τυπική αστική περιοχή. Η σήραγγα κατασκευάστηκε με συμβατική διάνοιξη με μηχανικά μέσα και προσωρινή υποστήριξη σύμφωνα με τις αρχές της NATM. Το πλάτος της διατηρείται σταθερό κατά μήκος της χάραξης, ενώ το πάχος των υπερκειμένων της σήραγγας, από τη στέψη έως την επιφάνεια του εδάφους, κυμαίνεται από 11.45m (Χ.Θ. 1+681.29), έως 13.75m (Χ.Θ. 1+392.50).



Σχήμα 3-2: Οριζοντιογραφία τμήματος σήραγγας διπλής τροχιάς. [Στοιχεία από *Κατασκευή-4*].

3.2.2.1.1 Τιμές Σχεδιασμού Γεωτεχνικών Παραμέτρων

Από τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων και των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών κατέστη δυνατή η ομαδοποίηση και ενοποίηση των σχηματισμών, με βάση τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά, σε σύνολο έξι (6) γεωτεχνικών ενοτήτων, οι οποίες συναντώνται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας και είναι οι εξής:

- α. Επιφανειακές Αποθέσεις (αλλούβια) και Τεχνητές Επιχώσεις
- β. Κροκαλοπαγές και (κατά θέσεις) Λατυποπαγές / Ψηφιδοπαγές
- γ. Έντονα αποσαθρωμένος ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης
- δ. Ισχυρός, μέτρια τεκτονισμένος, ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης
- ε. Τεκτονισμένο Λατυποπαγές Μεταψαμμίτη (Εναλλαγές Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου)
- στ. Μεταϊλυολίθος - Αργιλικός Σχιστόλιθος

Σύμφωνα με τη *Μελέτη-2*, οι «Τεχνητές Επιχώσεις» και οι «Επιφανειακές Αποθέσεις», μολονότι από γεωλογική άποψη ανήκουν σε διαφορετική ενότητα, καθώς η προέλευσή τους είναι διαφορετική, γεωτεχνικά περιλαμβάνονται στην ίδια ενότητα, καθώς μοιράζονται κοινά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Συναντώνται, κυρίως, με τη μορφή «καστανής – καστανοκίτρινης, πυκνής ΑΜΜΟΥ με χάλικες» σε όλο το μήκος της χάραξης. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται από 1.60m έως 3.20m.

Το «ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ – ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ», που εμφανίζεται από την Χ.Θ. 1+580 περίπου και μετά, υπόκειται των ανωτέρω επιφανειακών αποθέσεων, έχει χρώμα, κυρίως, τεφρο – καστανότεφρο και απαντάται σε ελαφρά έως έντονα αποσαθρωμένη μορφή. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται από 1.20m έως 2.00m.

Ο έντονα αποσαθρωμένος ασβεστιτικός ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ απαντάται κάτω από τις επιφανειακές αποθέσεις από την αρχή της εργολαβίας (Χ.Θ. 1+392.50) έως και την Χ.Θ. 1+580 περίπου, στην οποία αρχίζει να εμφανίζεται το κροκαλοπαγές. Ο σχηματισμός αυτός, που έχει τεφρό χρώμα κυρίως, εμφανίζει ένα μέγιστο πάχος της τάξεως των 5.80m στην Χ.Θ. 1+392.50, ενώ το ελάχιστο αυτού είναι περίπου 1.30m στην Χ.Θ. 1+566.33.

Ο ισχυρός, μέτρια τεκτονισμένος ασβεστιτικός ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ υπόκειται του έντονα αποσαθρωμένου ασβεστιτικού μεταψαμμίτη. Ο σχηματισμός αυτός εμφανίζεται έως το τέλος των γεωτρήσεων από την περιοχή της αρχής της εργολαβίας έως και την Χ.Θ. 1+570 περίπου. Στην συνέχεια το πάχος του αρχίζει και φθίνει.

Το ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ αρχίζει και αναδύεται από την Χ.Θ. 1+570 περίπου. Έχει τεφροπράσινο χρώμα και το μέσο πάχος του κυμαίνεται στα 14.5m. Ο σχηματισμός αυτός εμφανίζεται και με τη μορφή ισχυρού και του αποσαθρωμένου ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ στα τελευταία μέτρα της χάραξης και συγκεκριμένα από την Χ.Θ. 1+672 περίπου έως το τέλος αυτής (Χ.Θ. 1+681.29), ενώ έχουν πράσινο έως τεφροπράσινο χρώμα.

Ο ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ υπόκειται του Τεκτονικού Λατυποπαγούς Μεταψαμμίτη και έχει σκουρότεφρο χρώμα.

Με βάση την μακροσκοπική εξέταση των δειγμάτων που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις, τις εκτελεσθείσες δοκιμές κατάταξης και κυρίως την τιμή του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (GSI), κατέστη δυνατός ο χωρισμός της γεωλογικής μηκοτομής της χάραξης σε τρία επί μέρους τμήματα με βάση την μελέτη κατασκευής του έργου (*Μελέτη-2*). Το πρώτο τμήμα εκτείνεται από την Χ.Θ. 1+392.50 έως την Χ.Θ. 1+530 περίπου, στο εξής χαρακτηριζόμενο ως Db, το δεύτερο εκτείνεται

από την Χ.Θ. από 1+530 έως την Χ.Θ. 1+600 περίπου, στο εξής χαρακτηριζόμενο ως Da και το τρίτο από την Χ.Θ. 1+600 έως και το τέλος της χάραξης (Χ.Θ. 1+681.29), στο εξής χαρακτηριζόμενο ως Dc.

Έτσι, σύμφωνα με τη μελέτη του έργου, στο τμήμα Dc οι σχηματισμοί του τεκτονικού λατυποπαγούς μεταφωμίτη και του μεταίλυολίθου - αργιλικού σχιστόλιθου διατηρούν δομή «πτωχής» έως «πολύ πτωχής» ποιότητας βραχομάζας και σε μεγάλο ποσοστό εμφανίζονται ως εξαλλοιωμένοι («εδαφοποιημένοι»). Συνεπώς δύναται να θεωρηθεί ότι οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν τα ίδια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και καθίσταται δυνατή η ενοποίησή τους. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι οι εν λόγω σχηματισμοί παρουσιάζουν παρεμφερή τιμή του «Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής» (GSI), ο οποίος για τον μεταίλυόλιθο λαμβάνει τιμή 22 ενώ για τον αργιλικό σχιστόλιθο τιμή 19.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές του δείκτη GSI, σ_{ci} και m_i για κάθε σχηματισμό, καθώς επίσης και οι γεωτεχνικές τομές των τμημάτων Da, Db και Dc αντίστοιχα. Κάθε τμήμα από αυτά μπορεί να χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα ανάλογα με το εύρος του πάχους των σχηματισμών.

Πίνακας 3-2: Τιμές Τεχνικογεωλογικών Παραμέτρων.

Σχηματισμός	Τμήμα	GSI	m_i	σ_{ci} (MPa)	Σχόλια
Κροκαλοπαγές- Λατυποπαγές	-	64	21±3 (κροκαλοπαγή) 19±5 (λατυποπαγή)	20	Προέκυψαν από 4 δοκιμές-μέση τιμή (Hoek&Brown)
Έντονα Αποσαθρωμένος Ασβεστιτικός Μεταφωμίτης	συνήθεις τιμές	27	19±3	2.7	5 δοκιμές-μέση τιμή
	Da (1+530÷1+600)	25	19±3	5.5	2 δοκιμές-μέση τιμή
	Db (1+370÷1+530)	33	19±3	0.42	2 δοκιμές-μέση τιμή
Ισχυρός Ασβεστιτικός Μεταφωμίτης	συνήθεις τιμές	54	19±3	15.77	29 δοκιμές-μέση τιμή
	Da (1+530÷1+600)	58	19±3	17.4	20 δοκιμές-μέση τιμή
	Db (1+370÷1+530)	43	19±3	13.44	8 δοκιμές-μέση τιμή
Τεκτονικό Λατυποπαγές Μεταφωμίτη					
Μεταίλυόλιθος του τεκτονικού λατυποπαγούς μεταφωμίτη	-	22	7	3.02	3 δοκιμές-μέση τιμή
Ασθενής Μεταφωμίτης του τεκτονικού λατυποπαγούς	-	30	11	8.58	1 δοκιμή, λόγω έντονα αποσαθρωμένου σχηματισμού
Ισχυρός Μεταφωμίτης	-	30÷65			5 δοκιμές
Αργιλικός Σχιστόλιθος	-	20	7	(36)*	3 δοκιμές-μέση τιμή

*Σημειακή φόρτιση

Db (Χ.Θ. 1+392.50 ~ 1+530.00)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$	$c'=5 \text{ KPa}$	$\psi'=30^\circ$	$E_{\text{sed}}=25 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=2.3 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$	0.00m
ΕΝΤΟΝΑ ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΟΣ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=24 \text{ KN/m}^3$	$c'=30 \text{ KPa}$	$\psi'=40^\circ$	$E=50 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=1.67 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$	2.40m
ΙΣΧΥΡΟΣ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=25 \text{ KN/m}^3$ $\sigma_1=0.007 \text{ MPa}$ $(E_{\text{sed}}=200 \sim 700 \text{ MPa})$	$c'=100 \text{ KPa}$ $\sigma_c=0.331 \text{ MPa}$	$\psi'=40^\circ$ $\sigma_{\text{cm}}=1.766 \text{ MPa}$ $\bar{E}_{\text{cm}}=400 \text{ MPa}$	$n_b=1.877$	$s=0.0013$ $k=5.64 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.70$	$\alpha=0.511$	6.40m ΤΕΛΟΣ

Σχήμα 3-3: Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Db. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Da1 (Χ.Θ. 1+530.00 ~ 1+565.00)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$	$c'=5 \text{ KPa}$	$\psi'=30^\circ$	$E_{\text{sed}}=25 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=2.3 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$	0.00m
ΕΝΤΟΝΑ ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΟΣ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=24 \text{ KN/m}^3$	$c'=30 \text{ KPa}$	$\psi'=40^\circ$	$E=50 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=1.67 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$	2.40m
ΙΣΧΥΡΟΣ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=25 \text{ KN/m}^3$ $\sigma_1=0.022 \text{ MPa}$ $(E_{\text{sed}}=400 \sim 1000 \text{ MPa})$	$c'=150 \sim 200 \text{ KPa}$ $\sigma_c=0.903 \text{ MPa}$	$\psi'=40^\circ \sim 45^\circ$ $\sigma_{\text{cm}}=3.277 \text{ MPa}$ $\bar{E}_{\text{cm}}=700 \text{ MPa}$	$n_b=2.683$	$s=0.0039$ $k=5.64 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.70$	$\alpha=0.506$	4.40m ΤΕΛΟΣ

Σχήμα 3-4: Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Da1. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Da2 (Χ.Θ. 1+565.00 ~ 1+585.00)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$	$c'=5 \text{ KPa}$	$\psi'=30^\circ$	$E_{\text{sed}}=25 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=2.3 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$	0.00m
ΕΝΤΟΝΑ ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΟΣ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=24 \text{ KN/m}^3$	$c'=30 \text{ KPa}$	$\psi'=40^\circ$	$E=50 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=1.67 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$	2.40m
ΙΣΧΥΡΟΣ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=25 \text{ KN/m}^3$ $\sigma_1=0.022 \text{ MPa}$ $(E_{\text{sed}}=400 \sim 1000 \text{ MPa})$	$c'=150 \sim 200 \text{ KPa}$ $\sigma_c=0.903 \text{ MPa}$	$\psi'=40^\circ \sim 45^\circ$ $\sigma_{\text{cm}}=3.277 \text{ MPa}$ $\bar{E}_{\text{cm}}=700 \text{ MPa}$	$n_b=2.683$	$s=0.0039$ $k=5.64 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.70$	$\alpha=0.506$	4.40m
ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$ $\sigma_1=0.001 \sim 0.002 \text{ MPa}$ $(E_{\text{sed}}=60 \sim 90 \text{ MPa})$	$c'=26 \sim 31 \text{ KPa}$ $\sigma_c=0.024 \sim 0.040 \text{ MPa}$	$\psi'=29^\circ \sim 33^\circ$ $\sigma_{\text{cm}}=0.201 \sim 0.335 \text{ MPa}$ $\bar{E}_{\text{cm}}=80 \text{ MPa}$	$n_b=0.402$	$s=0.0001$ $k=1.74 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.65$	$\alpha=0.544$	20.00m ΤΕΛΟΣ

Σχήμα 3-5: Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Da2. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Da3 (Χ.Θ. 1+585.00 ~ 1+600.00)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΙΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$	$c=5 \text{ KPa}$	$\varphi=30^\circ$	$E_{\text{σελ}}=25 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=2.3 \times 10^5 \text{ m/sec}$	0.00m
ΚΡΟΚΑΛΟΓΑΓΕΣ	$\gamma=24 \text{ KN/m}^3$	$c=50 \text{ KPa}$	$\varphi=40^\circ$	$E=500 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=1.00 \times 10^5 \text{ m/sec}$	2.40m
ΙΣΧΥΡΟΣ ΑΣΘΕΣ ΠΙΠΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=25 \text{ KN/m}^3$ $\alpha_1=0.022 \text{ MPa}$ ($E_{\text{α}}=400 \sim 1000 \text{ MPa}$)	$c=150 \sim 200 \text{ KPa}$ $\alpha_2=0.903 \text{ MPa}$	$\varphi=40^\circ \sim 45^\circ$ $\alpha_{\text{ση}}=3.277 \text{ MPa}$ $E_{\text{ση}}=700 \text{ MPa}$	$m_b=2.683$	$s=0.0039$	$\alpha=0.506$ $k=5.64 \times 10^7 \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.70$	4.00m
ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$ $\alpha_1=0.001 \sim 0.002 \text{ MPa}$ ($E_{\text{α}}=60 \sim 90 \text{ MPa}$)	$c=26 \sim 31 \text{ KPa}$ $\alpha_2=0.024 \sim 0.040 \text{ MPa}$	$\varphi=29^\circ \sim 33^\circ$ $\alpha_{\text{ση}}=0.201 \sim 0.335 \text{ MPa}$ $E_{\text{ση}}=80 \text{ MPa}$	$m_b=0.402$	$s=0.0001$	$\alpha=0.544$ $k=1.74 \times 10^7 \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.65$	13.00m
ΑΡΓΙΛΙΑΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	$\gamma=23 \text{ KN/m}^3$ $\alpha_1=0.001 \text{ MPa}$ ($E_{\text{α}}=60 \sim 150 \text{ MPa}$)	$c=22 \sim 26 \text{ KPa}$ $\alpha_2=0.015 \sim 0.024 \text{ MPa}$	$\varphi=27^\circ \sim 29^\circ$ $\alpha_{\text{ση}}=0.165 \sim 0.201 \text{ MPa}$ $E_{\text{ση}}=100 \text{ MPa}$	$m_b=0.336 \sim 0.402$	$s=0.0001$	$\alpha=0.561 \sim 0.544$ $k=1.34 \times 10^7 \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.65$	28.00m
							ΤΕΛΟΣ

Σχήμα 3-6: Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Da3. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Dc1 (Χ.Θ. 1+600.00 ~ 1+660.00)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΙΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$	$c=5 \text{ KPa}$	$\varphi=30^\circ$	$E_{\text{σελ}}=25 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=2.3 \times 10^5 \text{ m/sec}$	0.00m
ΚΡΟΚΑΛΟΓΑΓΕΣ	$\gamma=24 \text{ KN/m}^3$	$c=50 \text{ KPa}$	$\varphi=40^\circ$	$E=500 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=1.00 \times 10^5 \text{ m/sec}$	2.40m
ΙΣΧΥΡΟΣ ΑΣΘΕΣ ΠΙΠΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=25 \text{ KN/m}^3$ $\alpha_1=0.007 \text{ MPa}$ ($E_{\text{α}}=200 \sim 700 \text{ MPa}$)	$c=100 \text{ KPa}$ $\alpha_2=0.331 \text{ MPa}$	$\varphi=40^\circ$ $\alpha_{\text{ση}}=1.766 \text{ MPa}$ $E_{\text{ση}}=400 \text{ MPa}$	$m_b=1.877$	$s=0.0013$	$\alpha=0.511$ $k=5.64 \times 10^7 \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.70$	4.00m
ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$ $\alpha_1=0.001 \sim 0.002 \text{ MPa}$ ($E_{\text{α}}=60 \sim 90 \text{ MPa}$)	$c=26 \sim 31 \text{ KPa}$ $\alpha_2=0.024 \sim 0.040 \text{ MPa}$	$\varphi=29^\circ \sim 33^\circ$ $\alpha_{\text{ση}}=0.201 \sim 0.335 \text{ MPa}$ $E_{\text{ση}}=80 \text{ MPa}$	$m_b=0.402$	$s=0.0001$	$\alpha=0.544$ $k=1.74 \times 10^7 \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.65$	5.00m
ΑΡΓΙΛΙΑΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	$\gamma=23 \text{ KN/m}^3$ $\alpha_1=0.001 \text{ MPa}$ ($E_{\text{α}}=60 \sim 150 \text{ MPa}$)	$c=22 \sim 26 \text{ KPa}$ $\alpha_2=0.015 \sim 0.024 \text{ MPa}$	$\varphi=27^\circ \sim 29^\circ$ $\alpha_{\text{ση}}=0.165 \sim 0.201 \text{ MPa}$ $E_{\text{ση}}=100 \text{ MPa}$	$m_b=0.336 \sim 0.402$	$s=0.0001$	$\alpha=0.561 \sim 0.544$ $k=1.34 \times 10^7 \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.65$	18.00m
							ΤΕΛΟΣ

Σχήμα 3-7: Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Dc1. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Dc2 (Χ.Θ. 1+660.00 ~ 1+681.29)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$	$c'=5 \text{ KPa}$	$\phi'=30^\circ$	$E_{\text{οεδ}}=25 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=2.3 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$	0.00m
ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ	$\gamma=24 \text{ KN/m}^3$	$c'=50 \text{ KPa}$	$\phi'=40^\circ$	$E=500 \text{ MPa}$	$k_0=0.50$	$k=1.00 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$	2.40m
ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΤΑΦΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=22.5 \text{ KN/m}^3$ $\alpha=0.001 \sim 0.002 \text{ MPa}$ ($E_m=60 \sim 90 \text{ MPa}$)	$c'=26 \sim 31 \text{ KPa}$ $\alpha_c=0.024 \sim 0.040 \text{ MPa}$	$\phi'=29^\circ \sim 33^\circ$ $\sigma_{\text{ση}}=0.201 \sim 0.335 \text{ MPa}$ $E_m=80 \text{ MPa}$	$m_b=0.402$ $\sigma_{\text{ση}}=0.165 \sim 0.201 \text{ MPa}$ $E_m=100 \text{ MPa}$	$s=0.0001$ $k=1.74 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.65$	$\alpha=0.544$	4.00m
ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	$\gamma=23 \text{ KN/m}^3$ $\alpha=0.001 \text{ MPa}$ ($E_m=60 \sim 150 \text{ MPa}$)	$c=22 \sim 26 \text{ KPa}$ $\alpha_c=0.015 \sim 0.024 \text{ MPa}$	$\phi'=27^\circ \sim 29^\circ$ $\sigma_{\text{ση}}=0.165 \sim 0.201 \text{ MPa}$ $E_m=100 \text{ MPa}$	$m_b=0.336 \sim 0.402$ $\sigma_{\text{ση}}=0.165 \sim 0.201 \text{ MPa}$	$s=0.0001$ $k=1.34 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ $k_0=0.50 \sim 0.65$	$\alpha=0.561 \sim 0.544$	13.00m
							ΤΕΛΟΣ

Σχήμα 3-8: Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Dc2. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Πίνακας 3-3: Γεωτεχνικές παράμετροι προσομοιώματος Da3. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Σχηματισμοί	Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Da3								
	Χ.Θ. αρχής	Χ.Θ. τέλους	GSI	σ_{ci} (Mpa)	m_i	E_i (Mpa)	c (Mpa)	ϕ (°)	E_m (Mpa)
Επιφανειακές Αποθέσεις	1+585	1+600	-	-	-	-	0.005	30	-
Κροκαλοπαγές	1+585	1+600	55-80	17.5-23.5	21±3	500	0.22-0.68	60-62	(E=500)
Ισχυρός Ασβεστιτικός Μεταφωμίτης	1+585	1+600	30-70	0.37-50.6	19±3	230-3639	0.023-0.6	25-62	400-1000
Τεκτονισμένος Μεταφωμίτης	1+585	1+600	20-38	8.58	11	-	72	45	60-90
Αργιλικός Σχιστόλιθος	1+585	1+600	12÷33	(36)*	7	-	0.127	50	60-150

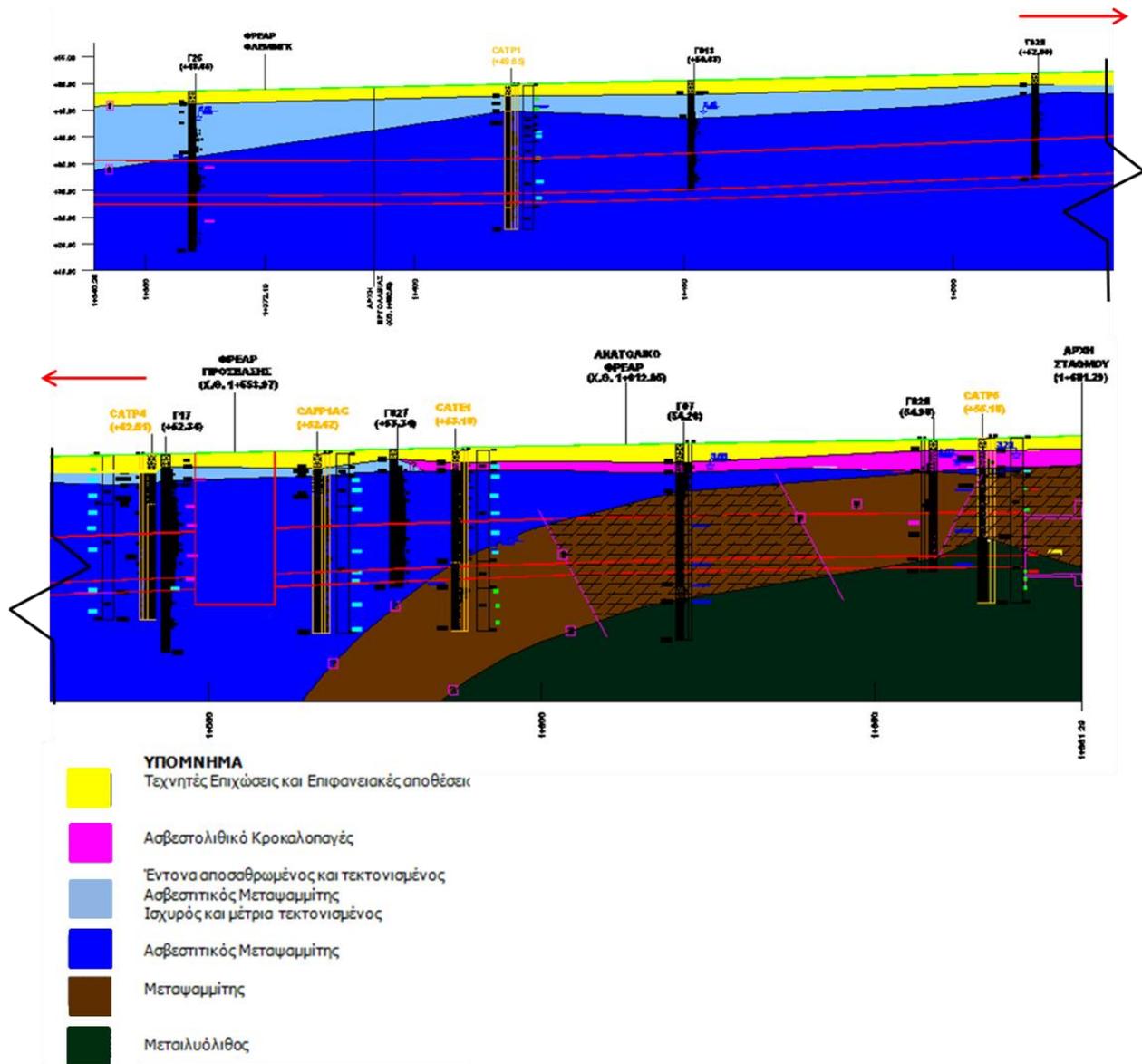
Πίνακας 3-4: Γεωτεχνικές παράμετροι προσομοιώματος Dc1. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Σχηματισμοί	Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Dc1								
	Χ.Θ. αρχής	Χ.Θ. τέλους	GSI	σ_{ci} (Mpa)	m_i	E_i (Mpa)	c (Mpa)	ϕ (°)	E_m (Mpa)
Επιφανειακές Αποθέσεις	1+600	1+660		-			0.005	30	-
Κροκαλοπαγές	1+600	1+660	55-80	17.5-23.5	21±3	500	0.22-0.68	60-62	(E=500)
Ισχυρός Ασβεστιτικός Μεταφωμίτης	1+600	1+660	30-70	0.37-50.6	19±3	230-3639	0.023-0.6	25-62	200-700
Τεκτονισμένος Μεταφωμίτης	1+600	1+660	20-38	8.58	11		72	45	60-90
Αργιλικός Σχιστόλιθος	1+600	1+660	12÷33	(36)*	7	-	0.127	50	60-150

Πίνακας 3-5: Γεωτεχνικές παράμετροι προσομοιώματος Dc2. [Στοιχεία από Μελέτη-2]

Σχηματισμοί	Γεωτεχνικό Προσομοίωμα Dc2								
	Χ.Θ. αρχής	Χ.Θ. τέλους	GSI	σ_{ci} (Mpa)	m_i	E_i (Mpa)	c (Mpa)	ϕ (°)	E_m (Mpa)
Επιφανειακές Αποθέσεις	1+660	1+681.29		-			0.005	30	-
Κροκαλοπαγές	1+660	1+681.29	55-80	17.5-23.5	21±3	500	0.22-0.68	60-62	(E=500)
Τεκτονισμένος Μεταφωμίτης	1+660	1+681.29	20-38	8.58	11		72	45	60-90
Αργιλικός Σχιστόλιθος	1+660	1+681.29	12÷33	(36)*	7	-	0.127	50	60-150

*Σημειακή φόρτιση



Σχήμα 3-9: Μηκοτομή στην περιοχή μελέτης. [Αριθμός Σχεδίου_2GW0CW180S101C ΣΕΛ.1/4].

3.2.3 Άμεση Υποστήριξη περιοχής ενδιαφέροντος

Στο παρόν εδάφιο θα πραγματοποιηθεί περιγραφή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τμήματος της σήραγγας διπλής τροχιάς και του τμήματος διευρυμένης διατομής του σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ". Θα παρουσιασθούν οι τυπικές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε σχηματισμό κατά μήκος των δύο τμημάτων, καθώς επίσης και η κατασκευαστική ακολουθία που υιοθετήθηκε σε κάθε περίπτωση με βάση την μελέτη κατασκευής του έργου.

3.2.3.1 Σταθμός Περιστέρι – Τμήμα σήραγγας διπλής τροχιάς (Στοιχεία από Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29)

Με βάση τα γεωτεχνικά δεδομένα της *Μελέτης-3*, η εκσκαφή της σήραγγας στην περιοχή ανάμεσα στο φρέαρ πρόσβασης προβλεπόταν ότι μπορεί να γίνει με μηχανικά μέσα ("τσάπα" και "σφυρί"). Στις θέσεις με ιδιαίτερα σκληρούς σχηματισμούς η μελέτη προέβλεπε τη χρήση εκσκαφέα σημειακής κοπής τύπου "roadheader". Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, η εκσκαφή με χρήση εκρηκτικών και η εφαρμογή τεχνικών ήπιων και ελεγχόμενων εκρήξεων δεν επιτρεπόταν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης του έργου το σύστημα άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας οριζόταν, ανάλογα με την κατηγορία υποστήριξης, από συνδυασμούς εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αγκυρίων, χαλύβδινων ή δικτυωτών πλαισίων, δοκών προπορείας και ηλώσεων μετώπου, ενώ σε κάποιες κατηγορίες προβλεπόταν και κατασκευή ανάστροφου τόξου δαπέδου.

Κατά τις αναλύσεις της εκσκαφής και της άμεσης υποστήριξης της τυπικής διατομής της σήραγγας, (με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων), χρησιμοποιήθηκαν οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί των εκτιμωμένων γεωτεχνικών συνθηκών με το αντίστοιχο μέγιστο ύψος υπερκειμένων. Η ανάλυση της άμεσης υποστήριξης, σχεδιάσθηκε από την μελέτη ώστε:

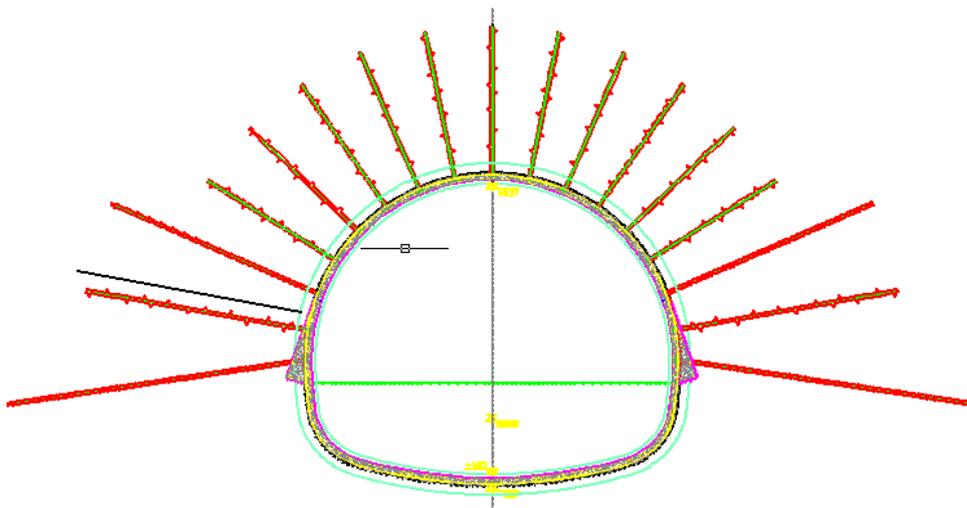
- Οι συγκλίσεις του τοιχώματος να είναι εντός των αποδεκτών ορίων.
- Η έκταση της πλαστικής ζώνης της περιβάλλουσας βραχομάζας να είναι περιορισμένη.
- Το ποσοστό των αγκυρίων, που φθάνουν στο φορτίο διαρροής, να μην υπερβαίνει το 20% (απαιτηση συντελεστή ασφαλείας > 1.30 για την άμεση υποστήριξη).
- Να μην διαρρέει ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς δεν διαθέτει τη δυνατότητα αναδιανομής της έντασης, σε περίπτωση ανάπτυξης πλαστικής άρθρωσης.
- Ταυτόχρονα έγινε προσπάθεια ώστε να μην διαφοροποιείται το σύστημα προσωρινής υποστήριξης σημαντικά, κατά μήκος της σήραγγας, ακόμα και σε ότι αφορά τα επί μέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, αποφεύγοντας ενδεχόμενη υπερδιαστασιολόγηση. Το βασικότερο κριτήριο σχεδιασμού της προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός των παραμορφώσεων κατά την διάνοιξη της σήραγγας

Κατά μήκος της σήραγγας διπλής τροχιάς η μελέτη προέβλεπε τη χρήση τριών τυπικών διατομών εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης (Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης I, II, III), οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Σε γενικές γραμμές οι Τυπικές Διατομές Άμεσης Υποστήριξης I και II είναι σταθερής γεωμετρίας κατά το μήκος διάνοιξής τους, ενώ οι Τυπικές Διατομές Άμεσης Υποστήριξης IIIα, IIIβ, IIIγ και IIIδ είναι μεταβλητής γεωμετρίας λόγω της κατασκευής των δοκών προπορείας. Το άνω μέρος του θόλου είναι ημικύκλιο, εξωτερικής ακτίνας $R1= 4.92m \div 5.04m$. Το υπόλοιπο τμήμα της διατομής (βαθμίδα) είναι πλάτους $9.90m \div 10.04m$ και ύψους $3.27m \div 3.44m$. Η μόνιμη επένδυση έχει το ίδιο πάχος $40cm$. Εξαιρέση αποτελεί Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIγ η οποία και έχει πάχος μόνιμης επένδυσης $60cm$, και κατά συνέπεια η γεωμετρία της προσωρινής αντιστήριξης είναι αυξημένη κατά $20cm$ από τις προαναφερόμενες τιμές. Το αναγκαίο πάχος της άμεσης υποστήριξης εκτιμάται σε $0.15m \div 0.30m$ και η συμβατική σύγκλιση σε $0.07m \div 0.10m$, ενώ δίδεται επιπλέον κατασκευαστική ανοχή $0.05m$ (κατασκευαστικές ανοχές, συγκλίσεις, δυνατότητα αύξησης πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος). Η Α΄ Φάση εκσκαφής αφορά στο άνω τμήμα της διατομής, που είναι ημικυκλικό, και στη συνέχεια ακολουθεί η Β΄ Φάση εκσκαφής, η οποία έχει στρογγυλεμένο ορθογωνικό σχήμα με οριζόντιο άνοιγμα ίσο με το άνοιγμα του άνω τμήματος.

Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης I

Σύμφωνα με τη *Μελέτη-3*, το εκτιμώμενο μήκος εφαρμογής της διατομής προβλεπόταν να είναι περίπου $20m$ στην περιοχή του γεωτεχνικού προσομοιώματος Da1 (από την Χ.Θ. $1+530$ έως την Χ.Θ. $1+565$), όπου και είχε εντοπισθεί η καλύτερη ποιότητα βραχομάζας. Σε γενικές γραμμές η τυπική αυτή διατομή προβλέφθηκε να έχει εφαρμογή σε ποιότητα βραχομάζας $GSI = 50 \div 70$, ενώ μπορεί να εφαρμοσθεί και στην περιοχή του γεωτεχνικού προσομοιώματος Db (από την Χ.Θ. $1+530$ έως την Χ.Θ. $1+ 392.50$), όπου είχε εντοπισθεί καλής ποιότητας βραχώμαζα με εύρη τιμών $GSI = 40 \div 70$. Εκτιμήθηκε ότι στην περιοχή αυτή το μήκος εφαρμογής της μπορεί να έφτανε και τα $50m$. Το ύψος των υπερκειμένων προβλεπόταν να είναι από $10m$ έως $12m$ χωρίς διαφοροποίηση καθ'όλο το μήκος εφαρμογής της.



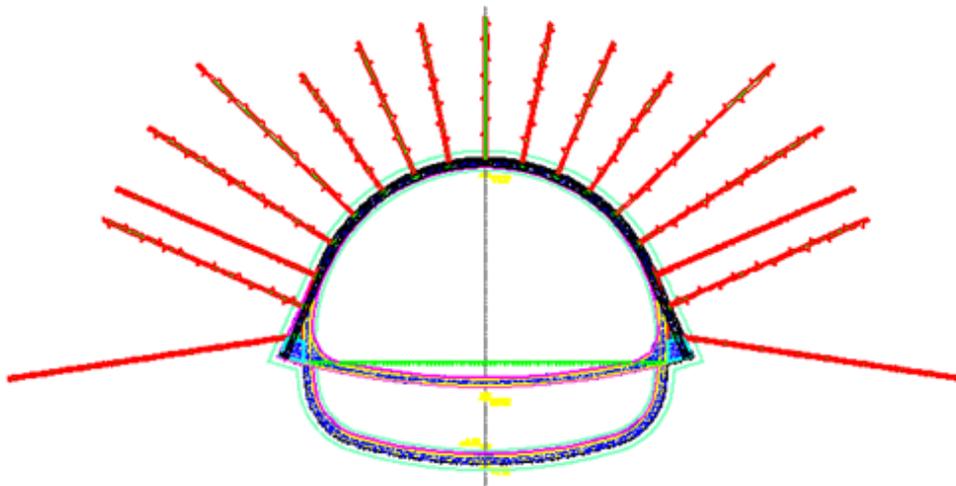
Σχήμα 3-10: Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης I. [Στοιχεία από *Μελέτη-3*]

Η κατασκευαστική ακολουθία της διατομής περιλαμβάνει την εκσκαφή σε δύο φάσεις. Η Α΄ Φάση έχει προχώρηση $2.00m$. Σε αυτή τοποθετείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μετώπου πάχους $5cm$, ινοπλισμένο με $40kg/m^3$ μεταλλικές ίνες, όπου απαιτείται. Η Β΄ Φάση έχει προχώρηση $4.00m$ και η υποστήριξη πραγματοποιείται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους στρώσης $30cm$ και με

αγκύρια πλήρως πακτωμένα σε όλο το μήκος τους με διάμετρο 25mm και φέρουσα ικανότητα 15t ÷ 20t.

Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης II

Σύμφωνα με τη μελέτη, το εκτιμώμενο μήκος εφαρμογής της διατομής προβλεπόταν να έχει μήκος περίπου 20m στην περιοχή του γεωτεχνικού προσομοιώματος Da2 (από την Χ.Θ. 1+565 έως την Χ.Θ. 1+585), όπου και είχε εντοπιστεί η καλύτερη ποιότητα βραχομάζας στη περιοχή της Α΄ Φάσης εκσκαφής. Σε γενικές γραμμές η τυπική αυτή διατομή προβλέφθηκε να έχει εφαρμογή σε ποιότητα βραχομάζας GSI= 40 ÷ 50. Η διατομή αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και στην περιοχή του γεωτεχνικού προσομοιώματος Db από την Χ.Θ. 1+530 έως την Χ.Θ. 1+392.50 όπου είχε εντοπιστεί καλής ποιότητας βραχομάζα με εύρη τιμών GSI= 40 ÷ 70. Εκτιμήθηκε ότι στην περιοχή αυτή το μήκος εφαρμογής της μπορεί να έφτανε και τα 90m. Το ύψος των υπερκειμένων προβλεπόταν να είναι από 10m έως 12m χωρίς διαφοροποίηση καθ'όλο το μήκος εφαρμογής της.



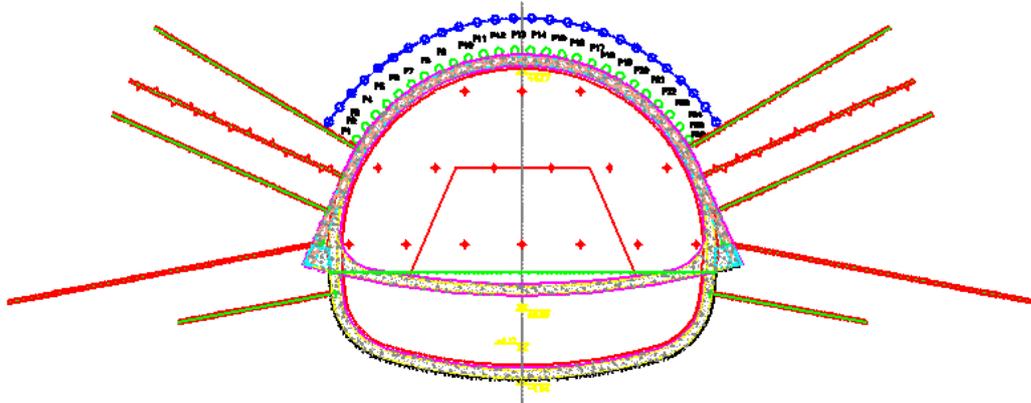
Σχήμα 3-11: Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης II. [Στοιχεία από Μελέτη-3]

Η κατασκευαστική ακολουθία της διατομής περιλαμβάνει την εκσκαφή σε δύο φάσεις. Η Α΄ Φάση έχει προχώρηση 1.50m. Σε αυτή τοποθετείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μετώπου πάχους 5cm, ινοπλισμένο με 40kg/m³ μεταλλικές ίνες, όπου απαιτείται. Η Β΄ Φάση έχει προχώρηση 3.00m και η υποστήριξη πραγματοποιείται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους στρώσης 40cm, με χρήση χαλύβδινου δικτυωτού πλαισίου τριών ράβδων ανά 1.5m και κατασκευή προσωρινού ανάστροφου πυθμένα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά την εκσκαφή του θόλου (Α΄ Φάση), με τοποθέτηση διευρυμένης έδρασης πλαισίου (elephant foot) με δοκό οπλισμένου σκυροδέματος και με αγκύρια πλήρως πακτωμένα σε όλο το μήκος τους με διάμετρο 25mm και φέρουσα ικανότητα 15t ÷ 20t.

Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης III

Η Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης III χωρίζεται σε τέσσερις υποκατηγορίες:

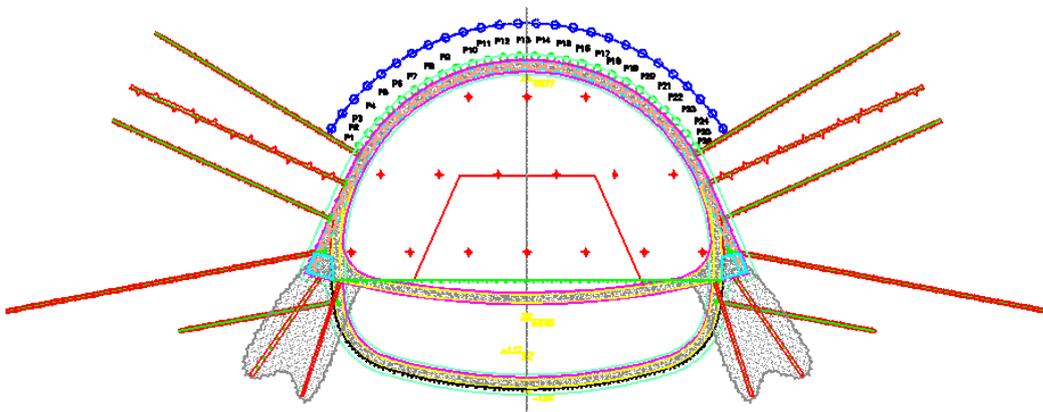
- ο Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIα, η οποία είχε προβλεφθεί να εφαρμοσθεί στις περιοχές που η ποιότητα της βραχομάζας είναι στο εύρος τιμών βραχομάζας $GSI = 15 \div 40$ καθώς και στην περιοχή εκατέρωθεν του θαλάμου πρόσβασης.



Σχήμα 3-12: Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIα. [Στοιχεία από Μελέτη-3]

Η κατασκευαστική ακολουθία της διατομής περιλαμβάνει την εκσκαφή σε δύο φάσεις. Η Α' Φάση έχει προχώρηση 1.00m. Σε αυτή τοποθετούνται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μετώπου πάχους 5cm, ινοπλισμένο με 40kg/m^3 μεταλλικές ίνες, όπου απαιτείται, υαλόκαρφα προενίσχυσης μετώπου μήκους 12m και διάτρητοι σωλήνες προπορείας με τιμμεντένεμα μήκους 12m. Η Β' Φάση έχει προχώρηση 2.00m και η υποστήριξη πραγματοποιείται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους στρώσης 60cm, με χρήση χαλύβδινου δικτυωτού πλαισίου τριών ράβδων ανά 1.5m και κατασκευή προσωρινού ανάστροφου πυθμένα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά την εκσκαφή του θόλου (Α' Φάση), με τοποθέτηση διευρυμένης έδρασης πλαισίου (elephant foot) με δοκό οπλισμένου σκυροδέματος και με αγκύρια πλήρως πακτωμένα σε όλο το μήκος τους με διάμετρο 25mm και φέρουσα ικανότητα $15\text{t} \div 20\text{t}$.

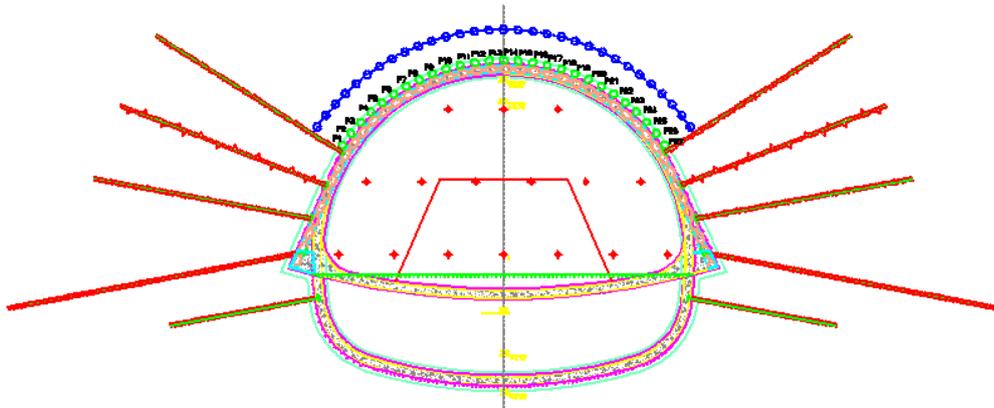
- ο Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIβ, η οποία περιέχει την κατασκευή των τιμμεντένεσων ενίσχυσης θεμελίωσης στην περιοχή της διευρυμένης έδρασης της πεδιλοδοκού και η οποία όπως προβλεπόταν να εφαρμοσθεί στις περιοχές που η ποιότητα της βραχομάζας είναι στο εύρος τιμών βραχομάζας $GSI < 15$, συναρτήσε των αποτελεσμάτων της δομητικής παρακολούθησης.



Σχήμα 3-13: Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIβ. [Στοιχεία από Μελέτη-3]

Η διαφοροποίηση στην κατασκευαστική ακολουθία της διατομής IIIβ από την IIIα, είναι ότι στην περιοχή της διευρυμένης έδρασης του πλαισίου (elephant foot) κατασκευάζονται τσιμεντενέσεις ενίσχυσης θεμελίωσης τύπου "tube a manchette" με τσιμεντένυμα από λεπτόκοκκο τσιμέντο τύπου microsilica, μήκους 2.00m έως 3.00m ανά 1.40m.

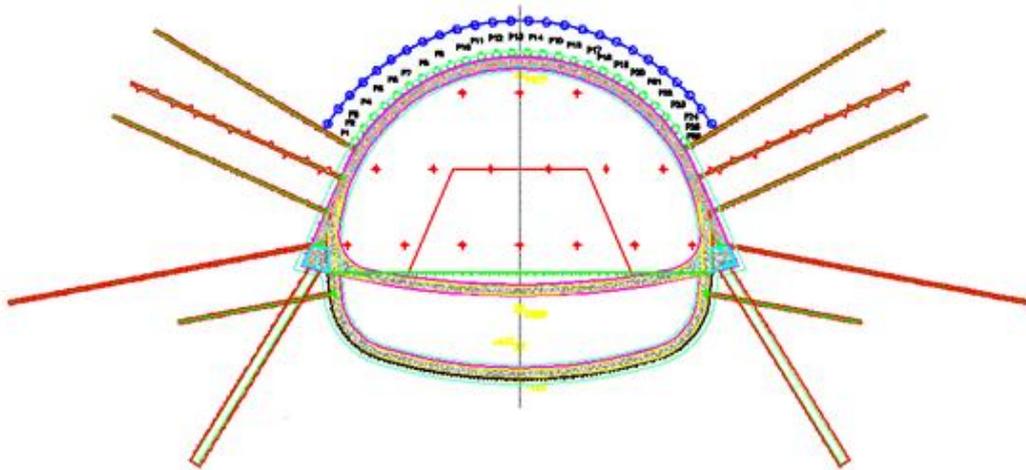
- Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIγ, η οποία και είναι διευρυμένης διατομής και σύμφωνα με τη μελέτη θα κατασκευαζόταν πλησίον του ανατολικού φρέατος αερισμού από την Χ.Θ. 1+600.65 έως την Χ.Θ. 1+624.65, η οποία μπορεί να περιέχει ή όχι την κατασκευή των ενεμάτων στην περιοχή της διευρυμένης έδρασης της πεδιλοδοκού, αναλόγως με το εύρος τιμών της ποιότητας της βραχομάζας ($GSI < 15$ με τσιμεντενέσεις ή μικροπασσάλους - $GSI = 15 \div 40$ χωρίς τσιμεντενέσεις ή μικροπασσάλους).



Σχήμα 3-14: Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIγ. [Στοιχεία από Μελέτη-3]

Η συγκεκριμένη διατομή είναι όμοια με την IIIα και IIIβ, με την διαφοροποίηση ότι το πάχος της μόνιμης επένδυσης είναι 60cm και επομένως η γεωμετρία της άμεσης υποστήριξης είναι μεγαλύτερη κατά 20cm. Η γεωμετρία αυτή σύμφωνα με τη μελέτη θα είχε εφαρμογή σε μήκος 24m στην περιοχή της συναρμογής με το ανατολικό φρέαρ αερισμού.

- Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIδ, η οποία περιέχει την κατασκευή των μικροπασσάλων στην περιοχή της διευρυμένης έδρασης της πεδιλοδοκού, και η οποία προβλεπόταν να εφαρμοστεί, σύμφωνα με την μελέτη κατασκευής, στις περιοχές που η ποιότητα της βραχομάζας είναι στο εύρος τιμών $GSI < 15$.



Σχήμα 3-15: Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIδ. [Στοιχεία από *Μελέτη-3*]

Συνολικά είχε εκτιμηθεί ότι η Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIα θα εφαρμοσθεί σε μήκος περί τα 50m, η Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIβ ή IIIδ σε μήκος περί τα 28m και η Τυπική Διατομή Άμεσης Υποστήριξης IIIγ σε μήκος περί τα 24m.

Στη συνέχεια θα παρουσιασθεί η κατασκευαστική ακολουθία των τυπικών διατομών IIIα και IIIγ που εφαρμόστηκαν στις Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29 όπως σχεδιάστηκαν από την *Μελέτη-3* του έργου και οι οποίες αποτελούν την περιοχή ενδιαφέροντος στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στα σχέδια που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπως προβλέφθηκαν από το σχεδιασμό του έργου.

3.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας παραχωρήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. στοιχεία και σχέδια από την κατασκευή της επέκτασης του μετρό, του τμήματος Αγ. Αντώνιος – Ανθούπολη. Αναμφισβήτητα, τα στοιχεία της μελέτης μιας κατασκευής είναι πολύ σημαντικά και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού ενός έργου. Όμως, είναι γνωστό ότι σε κάθε γεωλογική μελέτη παρατίθενται στοιχεία που προέρχονται συνήθως από γεωτρήσεις που αποτελούν κυρίως σημειακή πληροφορία· γι' αυτό το λόγο είναι πολύ χρήσιμο να συναξιολογήσουμε και τα επί τόπου στοιχεία που προέκυψαν από την κατασκευή του έργου. Έτσι, στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν οι επιτόπου συνθήκες που συναντήθηκαν κατά την κατασκευή του έργου, όπως αναφέρονται στα στοιχεία κατασκευής και τα αντίστοιχα κατασκευαστικά σχέδια της εν λόγω περιοχής.

3.3.1 Σταθμός Περιστερί – Τμήμα σήραγγας διπλής τροχιάς (Στοιχεία από Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29)

Στην ενότητα που ακολουθεί θα πραγματοποιηθεί εκτενής αναφορά των γεωλογικών παραμέτρων που συναντήθηκαν κατά την διάνοιξη του τμήματος της σήραγγας διπλής τροχιάς σύμφωνα με το σχέδιο *Κατασκευής-4*. Η διάνοιξη που εκτελέστηκε με συμβατικά και μηχανικά μέσα πραγματοποιήθηκε για μήκος 154.45m προς τον σταθμό Αγ. Αντώνιο και για μήκος 120.29m προς το σταθμό Περιστερί. Οι εργασίες εκσκαφών διήρκησαν 4 μήνες για την κατεύθυνση προς το σταθμό Αγ. Αντώνιο, 7 μήνες στην κατεύθυνση προς το σταθμό Περιστερί, για την Α' φάση και 3 και 2 μήνες αντίστοιχα για τη Β' φάση εκσκαφής. Η μέγιστη τιμή καθίζησης που σημειώθηκε ήταν 2.9mm κατά τη διάνοιξη προς το σταθμό Αγ. Αντώνιο και 16.5mm στην κατεύθυνση προς τον σταθμό Περιστερί, στο σημείο σύνδεσης με το υπόγειο τμήμα του σταθμού Περιστερί.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της *Μελέτης-2*, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι σχηματισμοί που αναμενόταν να συναντηθούν στην περιοχή ήταν έντονα αποσαθρωμένοι ασβεστιτικός μεταψαμμίτης, ισχυρός μέτρια τεκτονισμένος ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης, τεκτονισμένο λατυποπαγές μεταψαμμίτη (εναλλαγές μεταψαμμίτη – μεταίλουλίθου), μεταίλουλίθος – αργιλικός σχιστόλιθος.

Όπως επισημαίνεται και στα σχέδια κατασκευής της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, στα πλαίσια της κατασκευής οι σχηματισμοί ταξινομήθηκαν σε ενότητες με βάση τις γεωμηχανικές ιδιότητές τους. Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες είναι:

- Τεχνικογεωλογική ενότητα Α (GSI>50): Γεωλικά με βραχώδη συμπαγή δομή, καλών έως υψηλών γεωμηχανικών ιδιοτήτων. Ευσταθής συμπεριφορά κατά την εκσκαφή αλλά με δυσκολίες στην εκσκαψιμότητα λόγω υψηλών αντοχών.
- Τεχνικογεωλογική ενότητα Β (GSI=40-50): Γεωλικά με βραχώδη δομή, μέτριων γεωμηχανικών ιδιοτήτων. Ευσταθής συμπεριφορά κατά την εκσκαφή με καλή εκσκαψιμότητα.
- Τεχνικογεωλογική ενότητα C (GSI=15-40): Γεωλικά με μέτριο έως ασθενή βραχώδη ιστό, μέτριων έως πτωχών γεωμηχανικών ιδιοτήτων. Εύθρυστη έως και καταπίπτουσα συμπεριφορά

με δυσχέρειες κατά την εκσκαφή όπου τα συναντηθέντα γεωυλικά ταξινομήθηκαν με GSI και MR μικρότερο του 25 ($GSI < 25$, $MR < 25$).

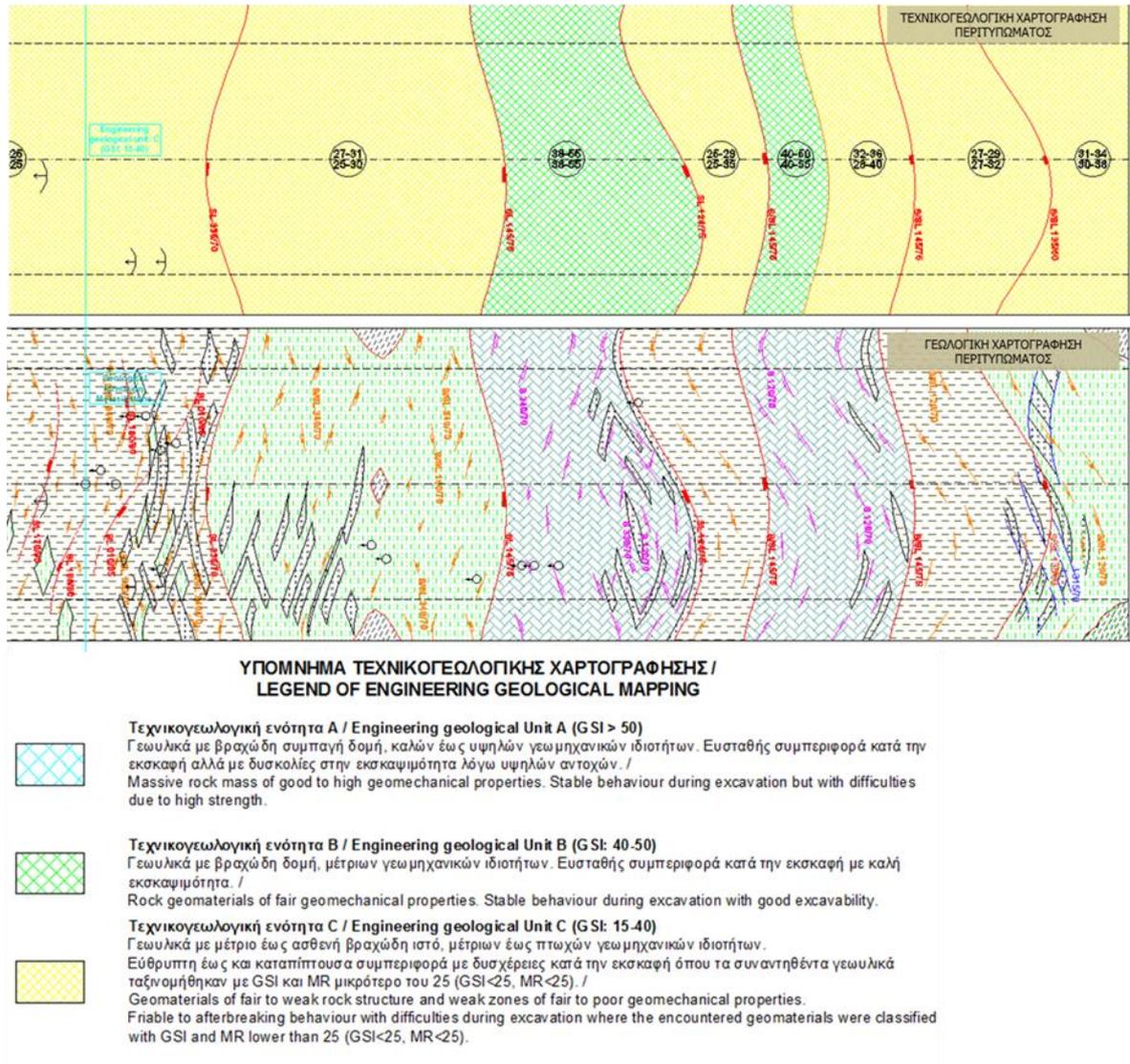
Έπειτα, παρατίθεται ένας συγκριτικός πίνακας των παραμέτρων που υιοθετήθηκαν κατά το σχεδιασμό και των παραμέτρων που εκτιμήθηκαν κατά την κατασκευή του σταθμού Περιστέρι.

Πίνακας 3-6: Σύγκριση Γεωτεχνικών Παραμέτρων Μελέτης και Κατασκευής. [Στοιχεία από τη Μελέτη-2, Κατασκευή-4]

Γεωυλικά	Παράμετροι μελέτης			Παράμετροι κατασκευής	
	GSI	m_i	σ_{ci} (Μρα)	Τεχνικογεωλογικές Ενότητες	GSI
Επιφανειακές Αποθέσεις	-	-	-	-	-
Κροκαλοπαγές	64	21±3	20	Τεχνικογεωλογική ενότητα Α	>50
Ισχυρός Ασβεστίπικος Μεταψαμμίτης	54	19±3	15.77	Τεχνικογεωλογική ενότητα Β	40-50
Τεκτονισμένος Μεταψαμμίτης	27	7 έως 11	8.58	Τεχνικογεωλογική ενότητα C	15-40
Αργιλικός Σχιστόλιθος	20	7	(36) ¹	Τεχνικογεωλογική ενότητα C	15-40

Σύμφωνα με τα στοιχεία που ελήφθησαν από την κατασκευή της σήραγγας διπλής τροχιάς, οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες μπορούν να ταξινομηθούν σε 3 ενότητες όπως παρουσιάζεται και στην απεικόνιση του γεωλογικού περιτυπώματος η οποία ακολουθεί.

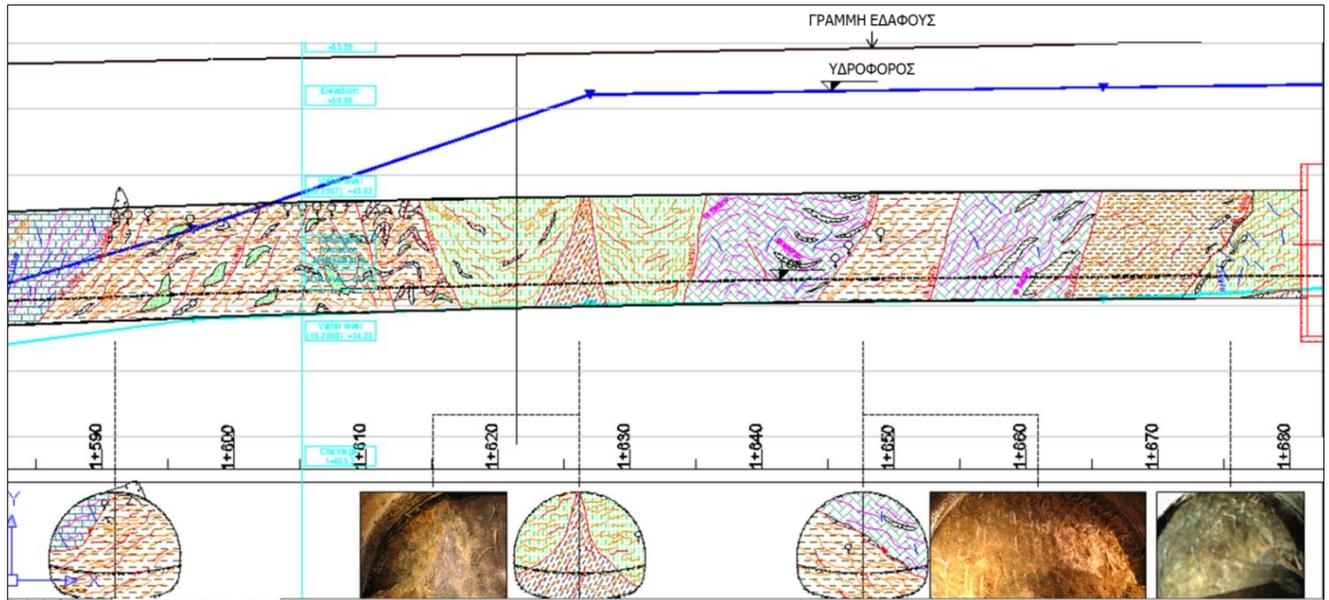
¹ Προέκυψε από δοκιμή σημειακής φόρτισης.



Σχήμα 3-18: Τεχνικογεωλογική και γεωλογική χαρτογράφηση περιτυπώματος. [Στοιχεία από Κατασκευή-4]

Τελικά, με βάση τα δεδομένα από την κατασκευή της σήραγγας, στο μεγαλύτερο τμήμα² η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε εντός της τεχνικογεωλογικής ενότητας C. Όπως προκύπτει από το γεωλογικό περιτύπωμα η τεχνικογεωλογική ενότητα C λαμβάνει τιμές GSI από 15 έως 40. Οι υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν στις θέσεις όπου κυριαρχεί το μεταψαμμιτικό υλικό, το οποίο αυξάνει την αντοχή του σχηματισμού, ενώ οι χαμηλότερες στις θέσεις όπου κυριαρχεί ο μεταϊλυόλιθος. Η τεχνικογεωλογική ενότητα B εμφανίζει τιμές GSI 38-55. Η διαφοροποίηση σε σχέση με την ενότητα C είναι η ύπαρξη ασβεστιτικού μεταψαμμίτη πλέον, ο οποίος εναλλάσσεται με μεταϊλυόλιθο. Ο ασβεστιτικός μεταψαμμίτης αποτελεί σαφώς ισχυρότερο υλικό και λιγότερο αποσαθρωμένο συνεπώς ο συνδυασμός των δύο φάσεων δεν απομειώνει σημαντικά τις ιδιότητες της βραχώμαζας.

² Αναφέρεται στις Χ.Θ. 1+392.5-1+681.29



Σχήμα 3-19: Κατά μήκος γεωλογική τομή και χαρακτηριστικές χαρτογραφήσεις και φωτογραφίες μετώπου σήραγγας. [Στοιχεία από Κατασκευή-4]

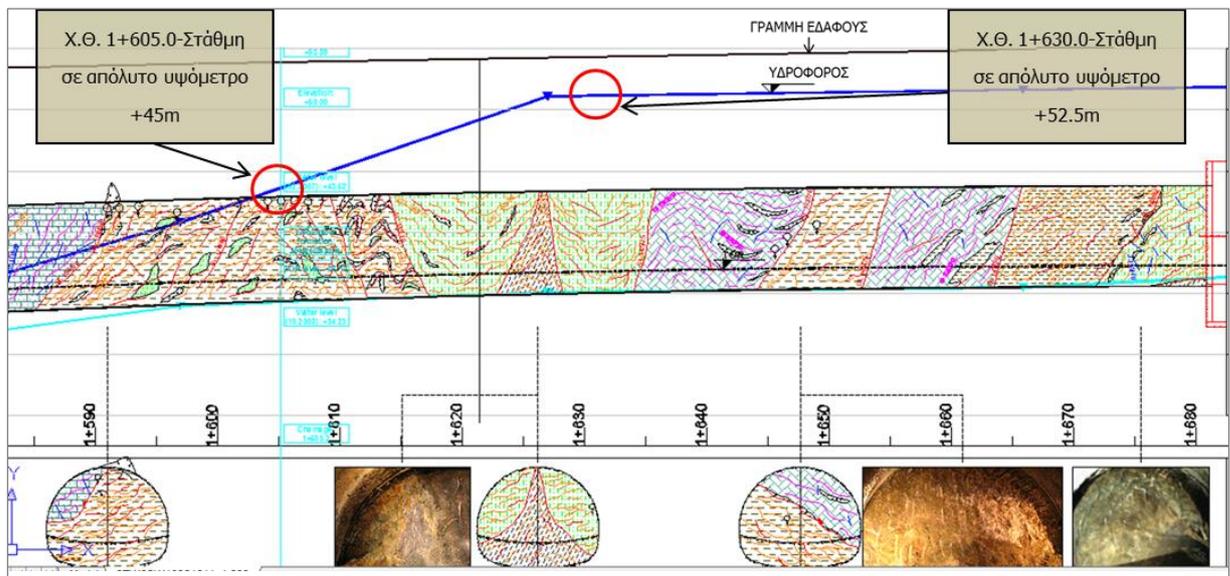
Στο Σχήμα 3-19 παρουσιάζεται η γεωλογική τομή κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας διπλής τροχιάς. Παρατηρείται ότι η διάνοιξη πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο εντός εναλλαγών, είτε μεταψαμμίτη με μεταίλυόλιθο, είτε μεταίλυόλιθου με μεταψαμμίτη. Καθώς μέσα στα γεωυλικά που κυριαρχούν στην περιοχή εντάσσεται ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος (αποτελεί το υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής), ήταν αναμενόμενη η συνεχής εναλλαγή της μεταψαμμιτικής και της μεταίλυολιθικής φάσης του σχηματισμού. Κύριο χαρακτηριστικό του σχηματισμού είναι η έντονη πτύχωση με εναλλαγές υλικών, με άλλοτε πτωχές και άλλοτε μέτριες μηχανικές ιδιότητες, συνθέτοντας έτσι ένα ανομοιογενές περιβάλλον. Σε αυτό το ανομοιογενές περιβάλλον έρχονται να προστεθούν και τμήματα όπου η διάνοιξη λαμβάνει χώρα εντός εναλλαγών ασβεστιτικού μεταψαμμίτη με μεταίλυόλιθο. Το αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη γενικά ανισότροπης συμπεριφοράς. Ωστόσο η συνεχής εναλλαγή των σχηματισμών ακόμη και στην κλίμακα του μέτρου δημιουργεί ένα «ενιαίο σχηματισμό» ο οποίος στην κλίμακα του έργου μπορεί να θεωρηθεί ως «οιονεί» ισότροπος και ομοιογενής, αντιστοιχώντας μέσες σταθμισμένες παραμέτρους μέσω της λογικής του συστήματος GSI.



Σχήμα 3-20: Τιμές του δείκτη GSI όπως μετρήθηκε κατά την κατασκευή της σήραγγας διπλής τροχιάς. Διακρίνονται οι δύο ενότητες στις οποίες κατηγοριοποιήθηκε η περιοχή για τη διευκόλυνση της προσομοίωσης. [Στοιχεία από Κατασκευή-4]

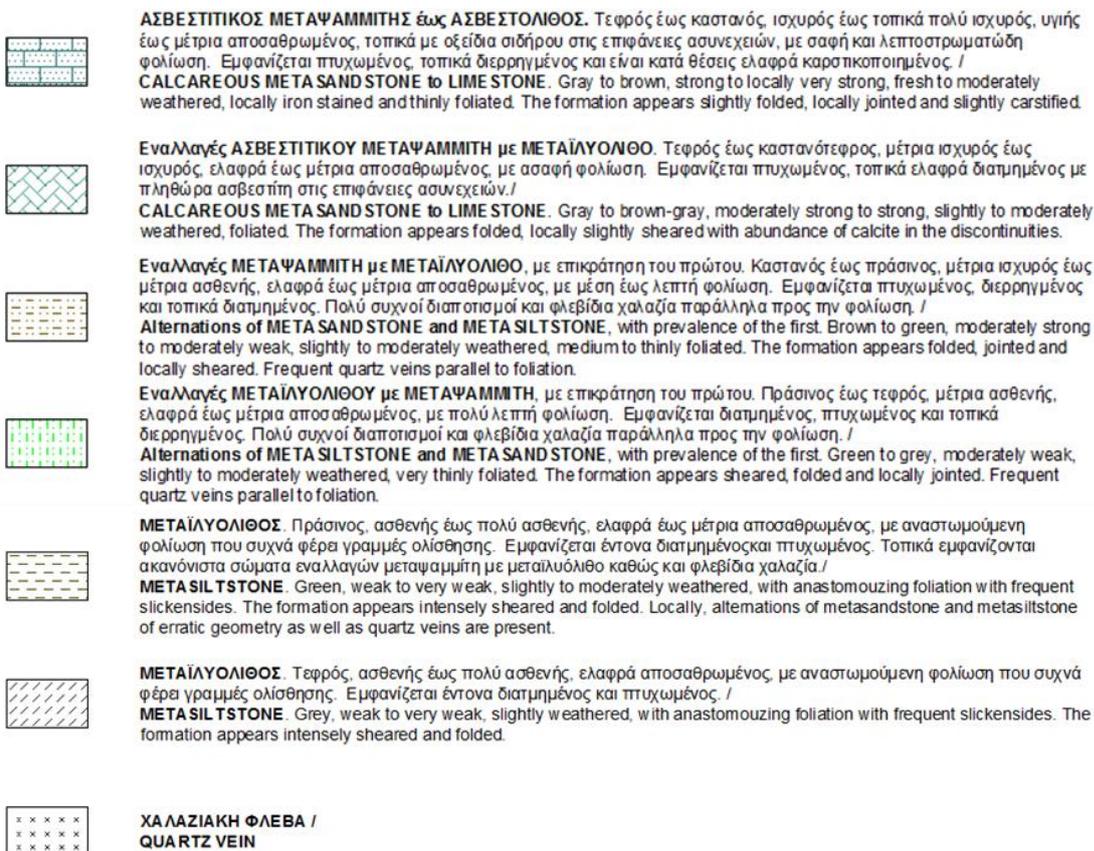
Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι ο «ενιαίος σχηματισμός» χωρίσθηκε σε δύο ενότητες, εκ των οποίων η μία αποτελεί την καλύτερη ενότητα (strong) καθώς παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές GSI σε ορισμένα τμήματα κατά μήκος της διάνοιξης, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές GSI και αποτελεί την πτωχότερη ενότητα (weak).

Εν συνεχεία, από την τομή λαμβάνονται στοιχεία για τη στάθμη του υδροφόρου οριζοντα όπως αυτή συναντήθηκε. Στο Σχήμα 3-21 επισημαίνεται η ανύψωση της στάθμης από την Χ.Θ. 1+605.0 έως τη Χ.Θ. 1+626.00 κατά 7.5m περίπου. Από τη Χ.Θ. 1+630.00 ο υδροφόρος ορίζοντας φαίνεται να σταθεροποιείται σε απόλυτο υψόμετρο 52.5-53.0m. Από την επεξεργασία των στοιχείων μπορεί να υποθεθεί ότι η στάθμη ανυψώνεται απότομα στη θέση 1+605.0 καθώς βρισκόμαστε κοντά στην επαφή ασβεστιτικού μεταψαμμίτη με εναλλαγές μεταψαμμίτη με μεταίλυόλιθο. Ο ασβεστιτικός μεταψαμμίτης είναι πιο περατός σχηματισμός και επιτρέπει τοπικά τον καταβίβαση της στάθμης του υδροφόρου στα κατώτερα στρώματα. Επιπλέον πλησίον βρίσκεται ο άξονας συνδετήριας σήραγγας, η οποία όπως φαίνεται λειτουργεί αποστραγγιστικά στη θέση αυτή. Από τη Χ.Θ. 1+630.00 έως τη Χ.Θ. 1+691.29 ο υδροφόρος κυμαίνεται περί τα 53.00m απόλυτο υψόμετρο. Είναι πιθανό στις θέσεις αυτές να υπάρχει επικρεμάμενος υδροφόρος, καθώς εάν σκεφθούμε τι υπάρχει πάνω από τους σχηματισμούς που διανοίγονται, όπως προέκυψε από τα στοιχεία των γεωτρήσεων της Μελέτης_2, στα 2.5-3.0m βρίσκεται η διεπιφάνεια της στρώσεως των επιφανειακών αποθέσεων με τη στρώση του κροκαλοπαγούς. Οι επιφανειακές αποθέσεις και το κροκαλοπαγές αποτελούν περατούς σχηματισμούς. Με τη λογική αυτή τα επιφανειακά ύδατα εφόσον διαπεράσουν τα ανώτερα περατά στρώματα συναντούν το σχηματισμό των εναλλαγών του ασβεστιτικού μεταψαμμίτη με το μεταίλυόλιθο, το οποίο λειτουργεί ως φυσικός φραγμός στη δίοδο του νερού. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται αύξηση της στάθμης η οποία είναι πιθανώς πλασματική όπως αναλύθηκε παραπάνω.

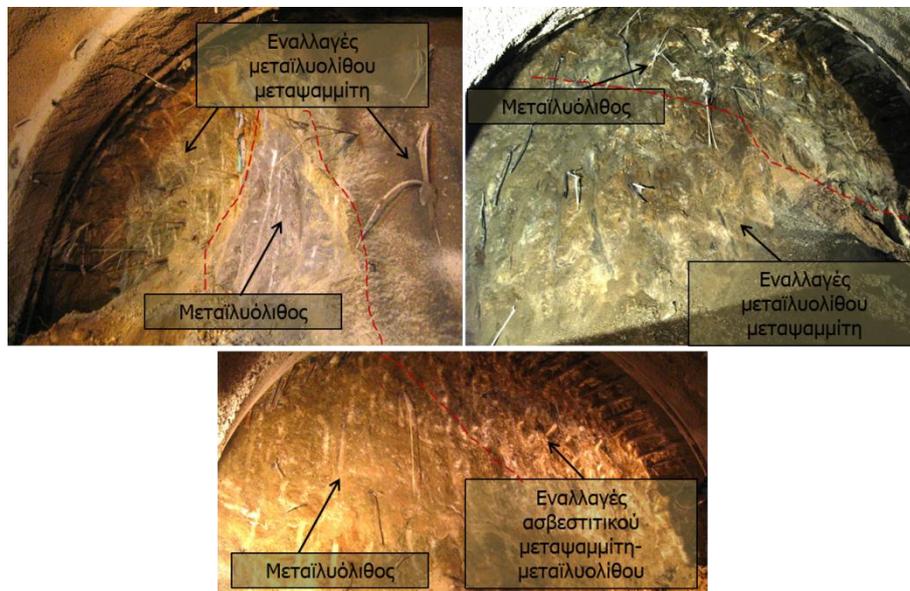


Σχήμα 3-21: Κατά μήκος γεωλογική τομή και στάθμες του υδροφόρου οριζοντα σε χαρακτηριστικές θέσεις. [Στοιχεία από Κατασκευή-4]

Ακολουθεί το υπόμνημα της γεωλογικής χαρτογράφησης στο οποίο παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχηματισμοί.



Σχήμα 3-22: Υπόμνημα Γεωλογικής Χαρτογράφησης από τα στοιχεία κατασκευής. [Στοιχεία από *Κατασκευή-4*]



Σχήμα 3-23: Επαφές σχηματισμών όπως συναντήθηκαν στα μέτωπα κατά τη διάνοιξη. [Στοιχεία από *Κατασκευή-4*]

Τελικώς, στο ανωτέρω σχήμα παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό από τα μέτωπα των επαφών των σχηματισμών όπως αυτές συναντήθηκαν κατά τη διάνοιξη του έργου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι επαφές μεταξύ των σχηματισμών δεν ακολουθούν κάποιο πρότυπο, είναι ακανόνιστες για τους λόγους που αναλύθηκαν σε παραπάνω παράγραφο.

3.4 ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΠΙΣΚΕΨΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και προκειμένου να αποκτηθεί πλήρης εικόνα για την περιοχή μελέτης, κρίθηκε σκόπιμη η επί τόπου επίσκεψη στο σταθμό "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ". Ο Σταθμός "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ", όπως προαναφέρθηκε κατασκευάστηκε κυρίως με τη μέθοδο του ανοικτού ορύγματος στη Λεωφόρο Παναγή Τσαλδάρη στο ύψος του Δημαρχείου Περιστερίου. Ποσοστό περίπου 30% του Σταθμού κατασκευάστηκε με την μέθοδο της υπόγειας διάνοιξης προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η όχληση στην κυκλοφορία των οχημάτων καθώς στο συγκεκριμένο σημείο υπάρχει διασταύρωση 6 δρόμων. Επισημαίνεται ότι στην νότια πλευρά του Σταθμού πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες κατασκευές για την σύνδεση μελλοντικά με γειτονικό υπόγειο χώρο στάθμευσης. Ο Σταθμός αποτελείται από 3 επίπεδα με ίδιο περίπου περίγραμμα συνολικής επιφάνειας 11.000 τμ. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η πλατεία η οποία διαμορφώθηκε κατάλληλα ώστε να κατασκευαστεί ο Σταθμός, καθώς επίσης και η είσοδος αυτού. Από την επίσκεψη στην περιοχή παρατηρήθηκε ότι τα επιφανειακά φορτία που βρίσκονται στην γειτνιάζουσα περιοχή προέρχονται από 2όροφα-3όροφα κτίρια και δεν απαιτούσαν ειδική θεώρηση στον σχεδιασμό του έργου. Η μέθοδος διάνοιξης του σταθμού επιλέχθηκε έτσι ώστε να προκληθούν οι ελάχιστες δυνατές (επιτρεπόμενες) μετακινήσεις στις παρακείμενες κατασκευές και ειδικά στον Ι. Ναό Ευαγγελιστριάς.



Σχήμα 3-24: Εξωτερική όψη και είσοδος του σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ".



Σχήμα 3-25: Ι. Ναός Ευαγγελιστρίας και Δημαρχείο Περιστερίου επί της πλατείας του σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ".

Έπειτα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε εξέλιξη βρίσκεται η εγκατάσταση του συστήματος αυτοματισμού και ελέγχου των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, καθώς επίσης και η εγκατάσταση συστημάτων έλξης και βοηθητικής ισχύος. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η γενικότερη άποψη στο εσωτερικό μέρος του σταθμού και διακρίνονται οι σκάλες εισόδου και εξόδου προς τις αποβάθρες. Βλέπουμε ότι κατά τον σχεδιασμό τους ακολουθήθηκε περίτεχνη αρχιτεκτονική άποψη με θόλους (μέσα από τον θόλο του σταθμού διακρίνεται ο τρούλος της εκκλησίας) που δημιουργούν μια ιδιαίτερη καλαισθησία στον εσωτερικό χώρο.



Σχήμα 3-26: Σκάλες εισόδου – εξόδου σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ".



Σχήμα 3-27: Γενική άποψη εσωτερικά του σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ".



Σχήμα 3-28: Υπόγειο άνοιγμα διευρυμένης διατομής του σταθμού "ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ".

Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαίο να αναφερθεί μία ιδιαίτερα σημαντική αλλά λιγότερο γνωστή παράμετρος του Μετρό της Αθήνας που είναι οι αναπλάσεις χώρων που πραγματοποιεί το Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων και η Αττικό Μετρό Α.Ε. αμέσως μετά την ολοκλήρωση των κατασκευαστικών εργασιών. Καθώς το Μετρό επεκτείνεται, πολλοί Δήμοι που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής των Γραμμών του Μετρό έχουν ενταχθεί στο πρόγραμμα αναπλάσεων περιοχών. Με τις παρεμβάσεις αυτές, το Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων και η Αττικό Μετρό Α.Ε. αναβαθμίζουν σημαντικά την ευρύτερη περιοχή του εκάστοτε Σταθμού του Μετρό, ενώ σε συνδυασμό με το πρόγραμμα ανάδειξης των αρχαιολογικών ευρημάτων σε κατάλληλα διαμορφωμένους υπαίθριους χώρους, βελτιώνουν την εικόνα της πρωτεύουσας αλλά και την καθημερινότητα των πολιτών. Με την ευκαιρία κατασκευής του Σταθμού ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ υλοποιήθηκε η ενοποίηση δύο μικρότερων πλατειών, που προϋπήρχαν εκατέρωθεν της Λ. Παναγή

Τσαλδάρη, σε μία μεγάλη η οποία περιλαμβάνει το ναό της Ευαγγελίστριας, Μητρόπολη του Περιστερίου, καθώς και το νέο Δημαρχείο του Περιστερίου όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Σε μία συνολική επιφάνεια 12 περίπου στρεμμάτων, το μεγαλύτερο τμήμα της οποίας χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του νέου σταθμού ΜΕΤΡΟ, κατασκευάστηκαν σύγχρονα λειτουργικά αρχιτεκτονικά στοιχεία για να απολαμβάνουν τον περίπατό τους οι κάτοικοι του Περιστερίου. Στα στοιχεία περιλαμβάνονται 3500τμ πρασίνου, ένα σιντριβάνι στο μέσον της πλατείας, μοντέρνα κατασκευή και φωτισμός που πλαισιώνει και αναδεικνύει το Ηρώο της πόλης, ένα μεγάλο γυάλινο θόλο διαμέτρου 14m που δεσπόζει σε κεντρικό σημείο διοχετεύοντας άφθονο φυσικό φωτισμό σε δύο επίπεδα του σταθμού και συνδυάζεται με τις καμπύλες του ναού, διαδρόμους και πλακόστρωτα σε μεγάλη έκταση τόσο για ένα περίπατο όσο και για το παιχνίδι των παιδιών. Ο πλούσιος φωτισμός της πλατείας γίνεται από καλαίσθητα, ειδικά μελετημένα φωτιστικά.



Σχήμα 3-29: Κεντρική πλατεία του σταθμού «Περιστέρι». [Αναπλάσεις περιοχών μετρό. Στοιχεία από την ιστοσελίδα της Αττικό μετρό Α.Ε.]

Επίσης, ανάλογη επιφάνεια διαμορφώθηκε και στην περιοχή του ανατολικού φρέατος ως αποτέλεσμα ανάπλασης της πλατείας που προϋπήρχε στο χώρο, τον οποίον χρησιμοποίησε η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ για τις ανάγκες του έργου. Στη συμβολή των οδών Π. Τσαλδάρη και Αιμ. Βεάκη, κατασκευάστηκε μια μικρή πλατεία σε επιφάνεια περίπου 300τμ. όπου το πράσινο υπερτερεί σε επιφάνεια, με σύγχρονες υποδομές φωτισμού, ποτίσματος και όμορφες πλακοστρωμένες επιφάνειες.



Σχήμα 3-30: Πλατεία Ανατολικού Φρέατος του σταθμού «Περιστέρι». [Αναπλάσεις περιοχών μετρό. Στοιχεία από την ιστοσελίδα της Αττικό μετρό Α.Ε.]

4

ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ

Για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, αλλά και τον έλεγχο της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων της άμεσης υποστήριξης και της τελικής επένδυσης απαιτείται η εφαρμογή κατάλληλης Γεωδομητικής και Δομητικής Παρακολούθησης (ΓΔΠ). Στο συγκεκριμένο εδάφιο θα πραγματοποιηθεί σύντομη αναφορά στα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο υπό μελέτη έργο και θα ακολουθήσει εκτενέστερη αναφορά ειδικά στις κυψέλες πίεσης, οι οποίες θα αποτελέσουν βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η χρήση κατάλληλων οργάνων παρακολούθησης σε κάθε έργο καθορίζεται από τις μετακινήσεις και τις παραμορφώσεις που αναμένεται να εκδηλώσουν οι εδαφικοί σχηματισμοί. Αυτό γίνεται σαφές από το γεγονός ότι τα όργανα μέτρησης αλληλεπιδρούν με την εκάστοτε βραχόμαζα. Η παρακολούθηση της μεταβολής των παραπάνω μεγεθών απαιτείται τόσο κατά την κατασκευή του έργου, όσο και κατά τη λειτουργία του.

Συνεπώς, ο προσδιορισμός του κατάλληλου οργάνου παρακολούθησης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν, καθώς και το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του οργάνου. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τον αναμενόμενο χρόνο λειτουργίας των οργάνων, κατά τη φάση της κατασκευής ή και κατά τη διάρκεια ζωής του έργου θα πρέπει να επιλεγθούν κατάλληλα όργανα, καλωδιώσεις και προστατευτικά μέτρα. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην επιλογή του οργάνου παίζουν οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας του χώρου εγκατάστασης.

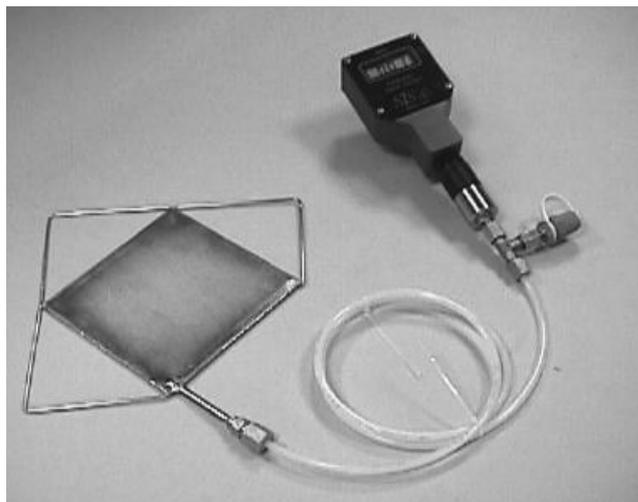
4.1 ΚΥΨΕΛΕΣ ΠΙΕΣΗΣ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Για τις ανάγκες παρακολούθησης των φορτίων που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη και στην τελική επένδυση της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένα όργανα και συγκεκριμένα κυψέλες πίεσης (pressure cells) σε προκαθορισμένες θέσεις στη διατομή της σήραγγας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-1 τυπική διάταξη κυψέλης πίεσης για σήραγγες διανοιγμένες με την μέθοδο NATM.



Σχήμα 4-1: Κυψέλες πίεσης για NATM.
 [Sisgeo, Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company,
 Stress Cells-Instruction Manual, Πηγή: <http://www.sisgeo.com/>]

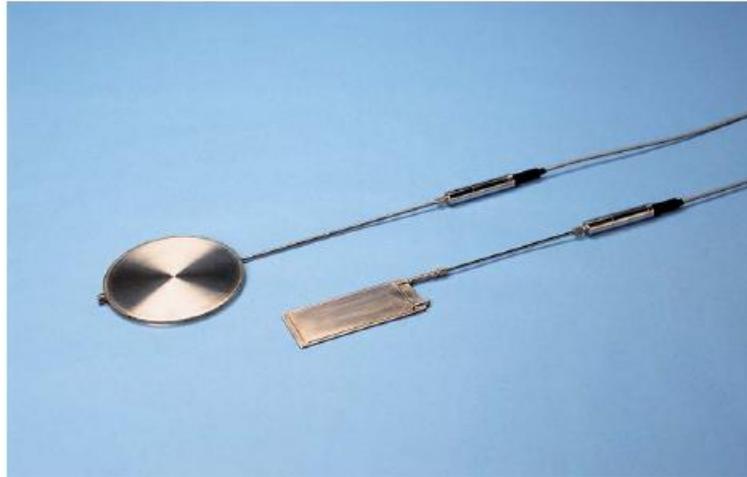
Οι κυψέλες μέτρησης πίεσης αποτελούνται από έναν επίπεδο γρύλο που συνδέεται με έναν υδραυλικό μορφοτροπέα διαφράγματος και στη συνέχεια μέσω εύκαμπτης σωλήνωσης με μια μονάδα ανάγνωσης. Η ορθή τάση που μεταφέρεται από το περιβάλλον πέτρωμα ή σκυροδέμα, μετράται με την εξισορρόπηση της υδραυλικής πίεσης στην κυψέλη από μια πίεση που εφαρμόζεται στην άλλη πλευρά του διαφράγματος. Χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την ορθή τάση σε υλικά όπως επιχώματα, στις διεπιφάνειες μεταξύ υλικών, π.χ. σε επαφή βράχου - σκυροδέματος, καθώς και μέσα στο σκυροδέμα της επένδυσης για να μετρήσουν την αξονική και περιφερειακή τάση.



Σχήμα 4-2: Κυψέλες πίεσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
 [Sisgeo, Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company,
 Stress Cells-Instruction Manual, Πηγή: <http://www.sisgeo.com/>]

Εάν απαιτούνται οι ενεργές τάσεις, πρέπει να εγκατασταθεί ένα πιεζόμετρο παράλληλα με την κυψέλη πίεσης. Σε περίπτωση τοποθέτησης του γρύλου στο σκυροδέμα (κυψέλη μέτρησης πίεσης σκυροδέματος), κατά τη σκλήρυνση αυτό συρρικνώνεται και μπορεί να αναπτυχθεί ένα κενό αέρα στις επιφάνειες του γρύλου. Γι' αυτό, συνδέεται με το γρύλο ένας σωλήνας αντιστάθμισης μέσω του οποίου εγχέεται ένας μικρός όγκος ρευστού, αμέσως μετά την εγκατάσταση, που διαστέλλει το γρύλο. Μια μικρή θετική πίεση αποκαθίσταται μέσα στο γρύλο, και όλες οι επόμενες αναγνώσεις πίεσης αναφέρονται σε αυτήν την αρχική τιμή. Το ρευστό που χρησιμοποιείται για να γεμίσει εξαρτάται από το υλικό στο οποίο εγκαθίσταται. Η συμπιεστότητα πρέπει να είναι παρόμοια με αυτήν του περιβάλλοντος υλικού προκειμένου να δώσει η κυψέλη τη σωστή μέτρηση. Μια κυψέλη

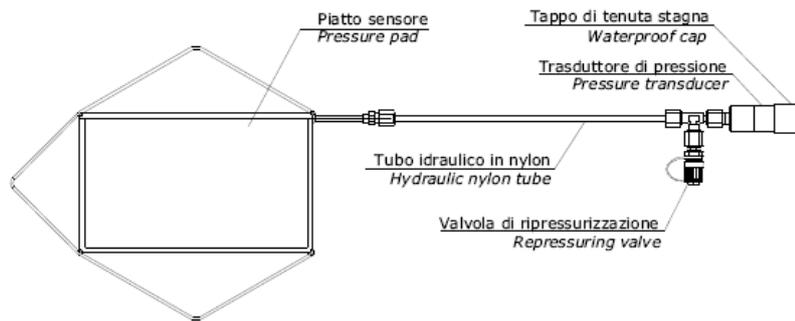
που είναι πάρα πολύ δύσκαμπτη σχετικά με το περιβάλλον πέτρωμα θα καταγράψει μια υπερβολική πίεση, και κάποια που είναι εύκαμπτη θα καταγράψει μια πίεση που είναι πολύ χαμηλή. Όταν εγκαθίστανται σε εδάφη, συνήθως πληρούνται με υδραυλικό έλαιο και εκείνες που εγκαθίστανται σε βράχο ή σκυρόδεμα πληρούνται με υδράργυρο. Η πίεση του ρευστού μετράται με την εφαρμογή μιας πίεσης αέρα ή ελαίου σε ένα από τους δίδυμους σωλήνες που συνδέουν τον υδραυλικό μορφοτροπέα με τη μονάδα ανάγνωσης. Όταν αυτή η πίεση είναι επαρκής για να εξισορροπήσει την πίεση στην κυψέλη, καταγράφεται μια επιστροφή ροής αέρα ή ελαίου στη μονάδα ανάγνωσης.



Σχήμα 4-3: Κυψέλες πίεσης εδάφους και βράχου.
[Sisgeo, Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company,
Stress Cells-Instruction Manual, Πηγή: <http://www.sisgeo.com/>]

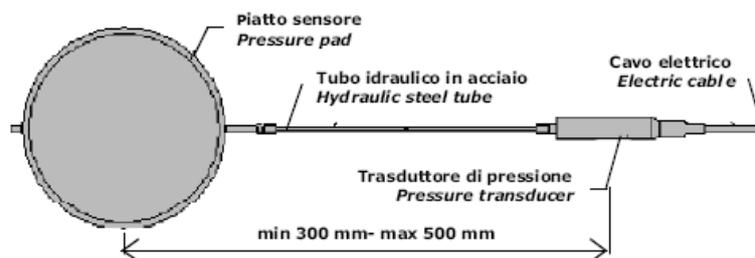
Το σχήμα της κυψέλης μπορεί να είναι τετραγωνικής ή ορθογωνικής μορφής όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται με τη μέθοδο NATM, είτε κυκλικής ή ορθογωνικής μορφής για εδαφικές μετρήσεις γενικότερα. Πιο συγκεκριμένα τοποθετούνται μέσα στο έδαφος ή στο βράχο αντίστοιχα. Επίσης μπορούν να εντοιχιστούν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένο σημείο μεταξύ της επαφής του εδάφους και της υφιστάμενης κατασκευής. Για την βέλτιστη εφαρμογή των κυψελών πίεσης προτείνεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους με βάση τις εδαφικές παραμέτρους του εκάστοτε έργου. Ωστόσο αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, γι' αυτό υπάρχουν προκαθορισμένες φόρμες κυψελών πίεσης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι παρακάτω κυψέλες πίεσης ανάλογα με το σημείο εφαρμογής τους:

- Κυψέλες πίεσης σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ορθογωνικής μορφής 100x200mm και τετραγωνικής μορφής 150x150mm)



Σχήμα 4-4: Κυψέλη πίεσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος ορθογωνικής μορφής.
 [Sisgeo, Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company,
 Stress Cells-Instruction Manual, Πηγή: <http://www.sisgeo.com/>]

- Κυψέλες πίεσης εδάφους (κυκλικής μορφής D230mm ή D500mm και ορθογωνικής μορφής 100x200mm.)



Σχήμα 4-5: Κυψέλη πίεσης εδάφους κυκλικής μορφής.
 [Sisgeo, Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company,
 Stress Cells-Instruction Manual, Πηγή: <http://www.sisgeo.com/>]

4.1.1 Εγκατάσταση οργάνου στη διεπιφάνεια βράχου επένδυσης σήραγγας

Για να πραγματοποιηθεί σωστή εγκατάσταση του οργάνου θα πρέπει να υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ της κυψέλης πίεσης και της επιφάνειας του βραχώδους υλικού. Θα πρέπει να έχει προηγηθεί κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας του βράχου πριν την εγκατάσταση του οργάνου (δημιουργία επίπεδης επιφάνειας). Έτσι μετά την κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας τοποθετείται η κυψέλη πίεσης και επικαλύπτεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την προστασία του οργάνου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Τέλος για την προστασία του υδραυλικού σωλήνα και του μετατροπέα προτείνεται η προστασία τους με την εφαρμογή μεταλλικής επικάλυψης πριν τη λειτουργία τους.

4.1.2 Εγκατάσταση οργάνου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Για να πραγματοποιηθεί σωστή εγκατάσταση του οργάνου θα πρέπει και πάλι να υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ της κυψέλης πίεσης και της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στις σήραγγες οι κυψέλες πίεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση, τόσο των ακτινικών όσο και των εφαπτομενικών τάσεων.

5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το αριθμητικό μοντέλο που δημιουργείται βασίζεται σε ήδη κατασκευασμένο έργο. Η ιδιαιτερότητα σε αυτή την περίπτωση έγκειται στην προσπάθεια να προσομοιωθεί με βέλτιστο δυνατό τρόπο το φυσικό ανάγλυφο και οι επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή, ώστε να πραγματοποιηθούν ανάστροφες αναλύσεις με βάση τις πιέσεις, τις καθιζήσεις και λοιπές μετρήσεις που ασκούνται και έχουν μετρηθεί επί της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Πρωταρχικά, για την κατανόηση των δεδομένων και των παραδοχών βάσει των οποίων καταρτίστηκε το αριθμητικό προσομοίωμα των αναλύσεων, θα γίνει μία σύντομη επισκόπηση του φυσικού προβλήματος. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την προσομοίωση του τριδιάστατου προσομοιώματος. Μέσω των ανάστροφων αναλύσεων που θα πραγματοποιηθούν θα εκτιμηθεί ένα εύλογο εύρος για τις γεωτεχνικές παραμέτρους αντοχής, με βάση μετρήσεις πιέσεων επί της άμεσης υποστήριξης από τις διαθέσιμες μετρήσεις φορτίου (κυψέλες πίεσης-pressure cells) της κατασκευής της σήραγγας. Το αριθμητικό μοντέλο θα σχεδιαστεί περί τη Χ.Θ. 1+636.0 στην οποία έχουν τοποθετηθεί ειδικά όργανα μέτρησης των πιέσεων στη διατομή, οι κυψέλες πίεσης (Βλ. Ενότητα §4.1).

5.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται κατά μήκος της οδού Παναγή Τσαλδάρη στο Περιστέρι και εκτείνεται από τη Χ.Θ. 1+392.5 έως τη Χ.Θ. 1+681.29. Πρόκειται για τμήμα της σήραγγας της Γραμμής 2 “Αγ. Αντώνιος – Ανθούπολη”, του Αττικό Μετρό. Το υπό μελέτη τμήμα είναι διπλής τροχιάς και φθάνει μέχρι το υπόγειο τμήμα του σταθμού “Περιστέρι”. Το αριθμητικό προσομοίωμα θα περιλαμβάνει τις χιλιομετρικές θέσεις 1+593 έως 1+681.29 στις οποίες υπάρχουν μετρήσεις των πιέσεων της τελικής επένδυσης, από ειδικά όργανα μέτρησης, τις κυψέλες πίεσης. Τα στοιχεία που ελήφθησαν από την Αττικό Μετρό για την περιοχή μελέτης, από τις παρατηρήσεις των μελετών και της κατασκευής έχουν παρουσιασθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.1.1 Οριζοντιογραφικά στοιχεία του έργου

Η οριζοντιογραφία της περιοχής του έργου εμφανίζεται στο Σχήμα 5-1. Σε αυτό παρουσιάζεται ο άξονας της σήραγγας (διπλή τροχιά), η αρχή του σταθμού Περιστέρι, καθώς και το Ανατολικό Φρέαρ Αερισμού το οποίο βρίσκεται στην γειτνιάζουσα περιοχή της κατασκευής. Επιπλέον, στο

σχήμα δίνονται πληροφορίες για τα κτίρια της περιοχής παραπλεύρως του άξονα της σήραγγας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή χαρακτηρίζεται από 2όροφα-3όροφα κτίρια τα οποία έχουν χαμηλά φορτία στο επίπεδο έδρασης. Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε κατά μήκος του άξονα της οδού Παναγή Τσαλδάρη, συνεπώς τα φορτία που ασκούνται στην επιφάνεια ακριβώς πάνω από τη σήραγγα είναι γενικά μικρά.



Σχήμα 5-1: Οριζοντιογραφία περιοχής ενδιαφέροντος.

5.1.2 Γεωτεχνικές συνθήκες σύμφωνα με τη μελέτη και την κατασκευή

Από τη μελέτη του έργου και το πρόγραμμα γεωτρήσεων που εκτελέστηκε στην περιοχή, οι σχηματισμοί κατηγοριοποιήθηκαν, (από τον νεότερο προς τον παλαιότερο), σε επιφανειακές αποθέσεις και τεχνητές επιχώσεις, κροκαλοπαγές και έντονα αποσθρωμένο ασβεστιτικό μεταψαμμίτη, τεκτονισμένο ασβεστιτικό μεταψαμμίτη, εναλλαγές μεταψαμμίτη – μεταίλυο λίθου και μεταίλυο λίθου – αργιλικό σχιστόλιθο. Τα πάχη των σχηματισμών όπως προέκυψαν από τη μελέτη φαινόταν να διαφοροποιούνται κατά μήκος των χιλιομετρικών θέσεων. Στο σχήμα που ακολουθεί υπενθυμίζονται προσομοιώματα από τη μελέτη για χαρακτηριστικές χιλιομετρικές θέσεις.

Dc1 (Χ.Θ. 1+600 ~ 1+660)

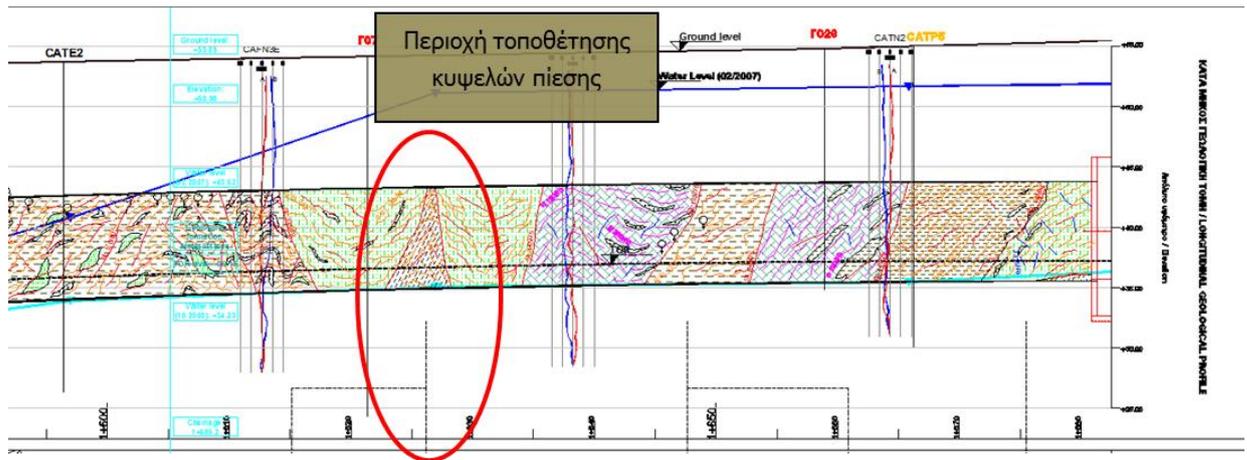
								0.00m
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	$\gamma=22.5\text{kN/m}^3$	$c=5\text{kPa}$	$\varphi=30^\circ$	$E=25\text{MPa}$	$K_0=0.50$	$k=2.3*10^{-5}\text{m/sec}$		2.40m
ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ	$\gamma=24\text{kN/m}^3$	$c=50\text{kPa}$	$\varphi=40^\circ$	$E=500\text{MPa}$	$K_0=0.50$	$k=1.0*10^{-5}\text{m/sec}$		4.00m
ΙΣΧΥΡΟΣ ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=25\text{kN/m}^3$	$c=100\text{kPa}$	$\varphi=40^\circ$	$E_m=400\text{MPa}$	$K_0=0.50-0.70$	$k=5.64*10^{-7}\text{m/sec}$		5.00m
ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=22.5\text{kN/m}^3$	$c=26-31\text{kPa}$	$\varphi=29-33^\circ$	$E_m=60-90\text{MPa}$	$K_0=0.50-0.65$	$k=1.74*10^{-7}\text{m/sec}$		18.00m
ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	$\gamma=23\text{kN/m}^3$	$c=22-26\text{kPa}$	$\varphi=27-29^\circ$	$E_m=60-150\text{MPa}$	$K_0=0.50-0.65$	$k=1.34*10^{-7}\text{m/sec}$		ΤΕΛΟΣ

Dc2 (Χ.Θ. 1+660 ~ 1+681.29)

								0.00m
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	$\gamma=22.5\text{kN/m}^3$	$c=5\text{kPa}$	$\varphi=30^\circ$	$E=25\text{MPa}$	$K_0=0.50$	$k=2.3*10^{-5}\text{m/sec}$		2.40m
ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ	$\gamma=24\text{kN/m}^3$	$c=50\text{kPa}$	$\varphi=40^\circ$	$E=500\text{MPa}$	$K_0=0.50$	$k=1.0*10^{-5}\text{m/sec}$		4.00m
ΤΕΚΤΟΝΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	$\gamma=22.5\text{kN/m}^3$	$c=26-31\text{kPa}$	$\varphi=29-33^\circ$	$E_m=60-90\text{MPa}$	$K_0=0.50-0.65$	$k=1.74*10^{-7}\text{m/sec}$		13.00m
ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	$\gamma=23\text{kN/m}^3$	$c=22-26\text{kPa}$	$\varphi=27-29^\circ$	$E_m=60-150\text{MPa}$	$K_0=0.50-0.65$	$k=1.34*10^{-7}\text{m/sec}$		ΤΕΛΟΣ

Σχήμα 5-2: Γεωτεχνικά προσομοιώματα όπως προέκυψαν από τη μελέτη για την περιοχή προσομοίωσης.

Κατά την κατασκευή οι γεωτεχνικές συνθήκες που συναντήθηκαν συνοψίζονται στο ακόλουθο σχήμα.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ /
LEGEND OF GEOLOGICAL MAPPING

- ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ** έως **ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ**. Τεφρός έως καστανός, ισχυρός έως τοπικά πολύ ισχυρός, υγής έως μέτρια αποσαθρωμένος, τοπικά με οξείδια σιδήρου στις επιφάνειες ασυνεχειών, με σαφή και λεπτοστρωματώδη φολίωση. Εμφανίζεται πτυχωμένος, τοπικά διερρηγμένος και είναι κατά θέσεις ελαφρά καρστικοποιημένος. / **CALCAREOUS META SANDSTONE to LIME STONE**. Gray to brown, strong to locally very strong, fresh to moderately weathered, locally iron stained and thinly foliated. The formation appears slightly folded, locally jointed and slightly carstified.
- Εναλλαγές ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΥ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ με ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟ**. Τεφρός έως καστανότεφρος, μέτρια ισχυρός έως ισχυρός, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος, με σαφή φολίωση. Εμφανίζεται πτυχωμένος, τοπικά ελαφρά διατηρημένος με πληθώρα ασβεστίτη στις επιφάνειες ασυνεχειών. / **CALCAREOUS META SANDSTONE to LIME STONE**. Gray to brown-gray, moderately strong to strong, slightly to moderately weathered, foliated. The formation appears folded, locally slightly sheared with abundance of calcite in the discontinuities.
- Εναλλαγές ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ με ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟ**, με επικράτηση του πρώτου. Καστανός έως πράσινος, μέτρια ισχυρός έως μέτρια ασθενής, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος, με μέση έως λεπτή φολίωση. Εμφανίζεται πτυχωμένος, διερρηγμένος και τοπικά διατηρημένος. Πολύ συχνό διαποτισμό και φλεβίδια χαλαζία παράλληλα προς την φολίωση. / **Alternations of META SANDSTONE and META SILTSTONE**, with prevalence of the first. Brown to green, moderately strong to moderately weak, slightly to moderately weathered, medium to thinly foliated. The formation appears folded, jointed and locally sheared. Frequent quartz veins parallel to foliation.
- Εναλλαγές ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟΥ με ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ**, με επικράτηση του πρώτου. Πράσινος έως τεφρός, μέτρια ασθενής, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος, με πολύ λεπτή φολίωση. Εμφανίζεται διατηρημένος, πτυχωμένος και τοπικά διερρηγμένος. Πολύ συχνό διαποτισμό και φλεβίδια χαλαζία παράλληλα προς την φολίωση. / **Alternations of META SILTSTONE and META SANDSTONE**, with prevalence of the first. Green to grey, moderately weak, slightly to moderately weathered, very thinly foliated. The formation appears sheared, folded and locally jointed. Frequent quartz veins parallel to foliation.
- ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟΣ**. Πράσινος, ασθενής έως πολύ ασθενής, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος, με αναστρωμένη φολίωση που συχνά φέρει γραμμές ολίσθησης. Εμφανίζεται έντονα διατηρημένος και πτυχωμένος. Τοπικά εμφανίζονται ακανόνιστα σώματα εναλλαγών μεταψαμμίτη με μεταίλυολιθο καθώς και φλεβίδια χαλαζία. / **META SILTSTONE**. Green, weak to very weak, slightly to moderately weathered, with anastomosing foliation with frequent slickensides. The formation appears intensely sheared and folded. Locally, alternations of metasandstone and metasilstone of erratic geometry as well as quartz veins are present.
- ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟΣ**. Τεφρός, ασθενής έως πολύ ασθενής, ελαφρά αποσαθρωμένος, με αναστρωμένη φολίωση που συχνά φέρει γραμμές ολίσθησης. Εμφανίζεται έντονα διατηρημένος και πτυχωμένος. / **META SILTSTONE**. Grey, weak to very weak, slightly weathered, with anastomosing foliation with frequent slickensides. The formation appears intensely sheared and folded.
- ΧΑΛΑΖΙΑΚΗ ΦΛΕΒΑ / QUARTZ VEIN**

Σχήμα 5-3: Κατά μήκος γεωλογική τομή όπως προέκυψε από την κατασκευή για την περιοχή προσομοίωσης.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε κατά το μεγαλύτερο ποσοστό εντός της ανώτερης ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστολίθου. Η διατομή ενδιαφέροντος (Χ.Θ. 1+636) βρίσκεται πλησίον της επαφής των εναλλαγών μεταψαμμίτη με μεταίλυολιθο και των εναλλαγών μεταίλυολιθου με μεταψαμμίτη. Για το λόγο αυτό το προσομοίωμα θα κατασκευαστεί έτσι ώστε να λαμβάνει άλλοτε τις ιδιότητες της ασθενέστερης ζώνης και άλλοτε τις ιδιότητες της ισχυρότερης ζώνης, όπως αναλύεται σε επόμενη παράγραφο.

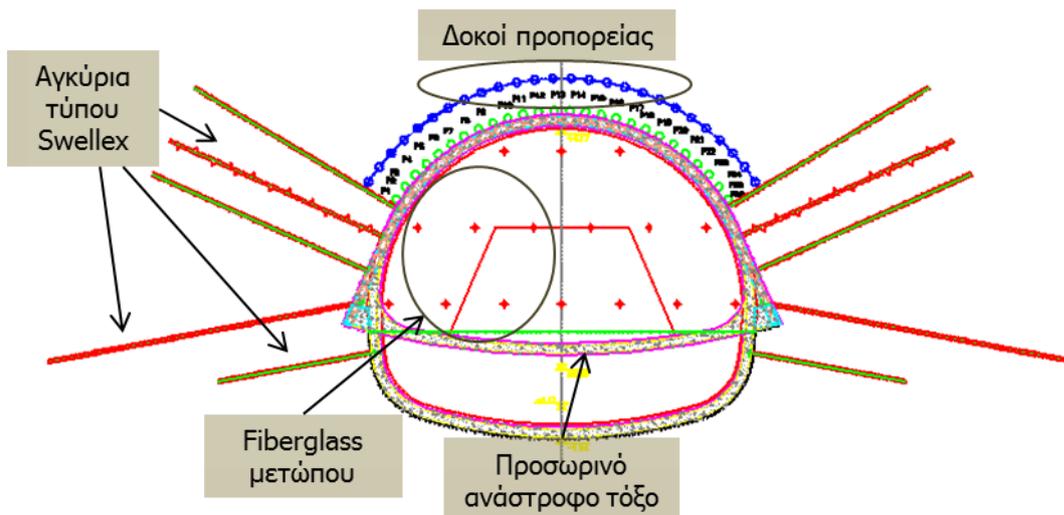
5.1.3 Τυπική διατομή κατασκευής

Σκοπός των ανάστροφων αναλύσεων είναι η εκτίμηση ενός εύλογου εύρους για τις γεωτεχνικές παραμέτρους αντοχής, καθώς και των φορτίων που ασκούνται στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις από την κατασκευή της σήραγγας. Τα κριτήρια επιλογής της διατομής που χρησιμοποιήθηκε στις ανάστροφες αναλύσεις βασιζόντουσαν στο γεγονός ότι εξαιτίας του πλήθους των διατομών που εφαρμόστηκαν κατά την επέκταση της γραμμής 2 και συγκεκριμένα στη σήραγγα διπλής τροχιάς (διατομή I, II, IIIα, IIIβ, IIIγ, IIIδ), που αποτελεί και περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί ο τύπος διατομής που βρίσκεται στην περιοχή όπου εγκαταστάθηκαν οι κυψέλες πίεσης στην άμεση υποστήριξη, ώστε να προκύψει κατάλληλη σύγκριση μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και μετρήσεων που θα προκύψουν από τις ανάστροφες αναλύσεις. Λαμβάνοντας υπόψη, λοιπόν, τα παραπάνω ως αντιπροσωπευτική διατομή επιλέχθηκε η διατομή στη Χ.Θ. 1+636.0, δηλαδή η διατομή IIIα. Καθώς η περιοχή τοποθέτησης των κυψελών πίεσης είναι η Χ.Θ. 1+636.00, τα όρια του αριθμητικού προσομοιώματος πρόκειται να περιορισθούν κάποια μέτρα πίσω και κάποια μέτρα μπροστά από αυτή τη διατομή.

Σε ότι αφορά στη γεωμετρία της διατομής IIIα, πρόκειται για διατομή μεταβλητής γεωμετρίας λόγω της κατασκευής των δοκών προπορείας. Το άνω μέρος του θόλου είναι ημικύκλιο, εξωτερικής ακτίνας $R_1 = 4.92\text{m} \div 5.04\text{m}$. Το υπόλοιπο τμήμα της διατομής είναι περίπου ορθογωνικό πλάτους $9.90\text{m} \div 10.04\text{m}$ και ύψους $3.27\text{m} \div 3.44\text{m}$.

Το πλάτος της διατομής διατηρείται σταθερό κατά μήκος της χάραξης, ενώ το πάχος των υπερκειμένων της σήραγγας, από τη στέψη έως την επιφάνεια του εδάφους, κυμαίνεται από 11.45m (Χ.Θ. 1+681.29), έως 13.75m (Χ.Θ. 1+392.50).

Ακολουθεί το σκαρίφημα της διατομής μέσης διεύρυνσης με τα μέτρα υποστήριξης που τοποθετήθηκαν σε αυτή τη διατομή κατά την κατασκευή του έργου.



Σχήμα 5-4: Σκαρίφημα τυπικής διατομής κατασκευής της μέσης διεύρυνσης της ομπρέλας των δοκών προπορείας.

Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικά της διατομής του έργου στις χιλιομετρικές θέσεις ενδιαφέροντος.

Προχώρηση μετώπου		
A' Φάση Εκσκαφής	Ανά 1m	
B' Φάση Εκσκαφής	Ανά 2m	
Μέτρα Υποστήριξης		
Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	Πάχος 30cm	
Fiberglass	Μήκος 12m	
Forepolling	Μήκος 12m	
Ανάστροφος πυθμένας	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm	
Αγκύρια Swellex	Μήκος Αγκυρίων	Φέρουσα Ικανότητα
	4m	10t
	6m	15t
	8m	20t

Τα παραπάνω στοιχεία έχουν παρουσιασθεί αναλυτικότερα στην παράγραφο 3.2.3.1.

5.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Το αριθμητικό προσομοίωμα σχεδιάζεται μέσω απλοποιήσεων και παραδοχών από το φυσικό προσομοίωμα και από τα στοιχεία της σήραγγας, όπως αυτή κατασκευάστηκε.

Όπως έχει προαναφερθεί για τη δημιουργία του προσομοιώματος έχουν ληφθεί υπόψη στοιχεία από τη γεωλογική μελέτη της σήραγγας, τη γεωτεχνική αξιολόγηση, τη μελέτη άμεσης υποστήριξης, στοιχεία από την κατασκευή (χαρτογραφήσεις μετώπου, καταγραφές φορτίων πίεσης, καθιζήσεων κ.τ.λ.), καθώς και στοιχεία από επί τόπου αυτοψίες. Γνωρίζοντας πλέον τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και έχοντας καταλήξει στην κατάλληλη διατομή, περιγράφεται στη συνέχεια η διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον σχεδιασμό του μοντέλου καθώς επίσης και οι παραδοχές που θεωρήθηκαν ώστε να προσομοιωθεί η κατασκευή όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές επικρατούσες συνθήκες. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά λογισμικών προγραμμάτων (AutoCAD, Ansys, Abaqus) τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Καθίσταται σαφές ότι τα σύγχρονα εξειδικευμένα λογισμικά πακέτα είναι ένα χρήσιμο εργαλείο, ειδικά στη μελέτη μεγάλων υπόγειων έργων και μπορούν να ανεβάσουν την παραγωγικότητα και τη δυνατότητα αντίληψης του έργου σε υψηλό επίπεδο. Η τεχνική αρτιότητα της μελέτης που επιτυγχάνεται με τη χρήση λογισμικών προγραμμάτων, μπορεί να επιφέρει ελαχιστοποίηση του χρόνου κατασκευής και του κόστους ενός έργου, αλλά και καλύτερη συνολική διαχείρισή του.

Επιλέχθηκε η προσομοίωση μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, καθώς πλεονεκτούν σε σχέση με τις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Η διδιάστατη μέθοδος σχεδιασμού σχετίζεται με τις παραμορφώσεις που συμβαίνουν κατά την προώθηση της σήραγγας. Θεωρεί τη σήραγγα σε δύο διαστάσεις και σε κάθε ανάλυση εξετάζεται μια συγκεκριμένη διατομή. Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν μια μεμονωμένη διατομή εντός της

κοιλότητας της σήραγγας, αγνοώντας την επίδραση των τάσεων στις γειτονικές της, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να διεξαχθεί κατάλληλο συμπέρασμα για τις παραμορφώσεις μπροστά και πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Αντίθετα, μέσω των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων προσομοιώνονται και οι τρεις διαστάσεις του προβλήματος. Γίνεται θεώρηση των πραγματικών διαστάσεων της υπό μελέτης σήραγγας και διεξάγονται συμπεράσματα για κάθε σημείο της αλληλουχίας της εκσκαφής. Από τις τριδιάστατες αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μελετώνται τα φορτία που ασκούνται από το περιβάλλον γεωυλικό στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης. Βασικό πλεονέκτημα των τριδιάστατων αναλύσεων είναι ότι τα αποτελέσματα είναι απαλλαγμένα από τις παραδοχές που υιοθετούν οι μέθοδοι αποτόνωσης, η χρήση των οποίων είναι απαραίτητη κατά την εκτέλεση των διδιάστατων αναλύσεων.

5.2.1 Οριοθέτηση προσομοιώματος

Πρωταρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί η συλλογιστική πορεία με την οποία καθορίστηκαν τα όρια του προσομοιώματος. Όσον αφορά στα πλευρικά όρια του μοντέλου, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή της κατασκευής στο περιβάλλον γεωυλικό, τα όρια απομακρύνθηκαν 60m εκατέρωθεν του άξονα της διατομής. Κατά μήκος του άξονα της σήραγγας το προσομοίωμα σχεδιάστηκε να έχει μήκος περίπου 80m, από τις Χ.Θ. 1+593.0 έως 1+680.0. Η συγκεκριμένη απόσταση επιλέχθηκε με βάση τα φυσικά όρια της περιοχής όπου το προσομοίωμα θα ξεκινούσε από τη μια πλευρά εκεί όπου τελειώνει ο ασβεστιτικός μεταψαμμίτης ο οποίος εμφανίζεται ισχυρός και κατά θέσεις αποσαθρωμένος (1+593.0) και από την άλλη πλευρά εκεί όπου ξεκινάει η διευρυμένη διατομή του σταθμού (1+680.0).

Επιπλέον, μηκοτομικά τα όρια επεκτάθηκαν κατά 30m, τα οποία αντιστοιχούν σε τμήμα της διατομής που δεν θα εκσκαφεί καθώς είναι απαραίτητο για τις ανάγκες των πεπερασμένων στοιχείων να υπάρχει τμήμα που δεν μεταβάλλεται. Αναφορικά με την καθ' ύψος διάσταση του προσομοιώματος θεωρήθηκε ύψος υπερκειμένων σταθερό και ίσο με 20m μέχρι τον άξονα της διατομής (ο οποίος τοποθετήθηκε στη θέση (0,0,0) στις συντεταγμένες του προσομοιώματος) η οποία είναι εντός των πραγματικών διαστάσεων των υπερκειμένων του έργου που κυμαίνονταν εντός του εύρους τιμών $18.3m \pm 20.6m$ από την επιφάνεια μέχρι τον άξονα της διατομής. Η προσέγγιση θεωρήθηκε ικανοποιητική καθώς η επιφάνεια στην περιοχή είναι ομαλή. Ενώ, σε βάθος το μοντέλο θεωρήθηκε ότι φθάνει στα -50m. Συγκεντρωτικά οι διαστάσεις του μοντέλου ήταν 120x110x60m (Άξονες x,y,z).



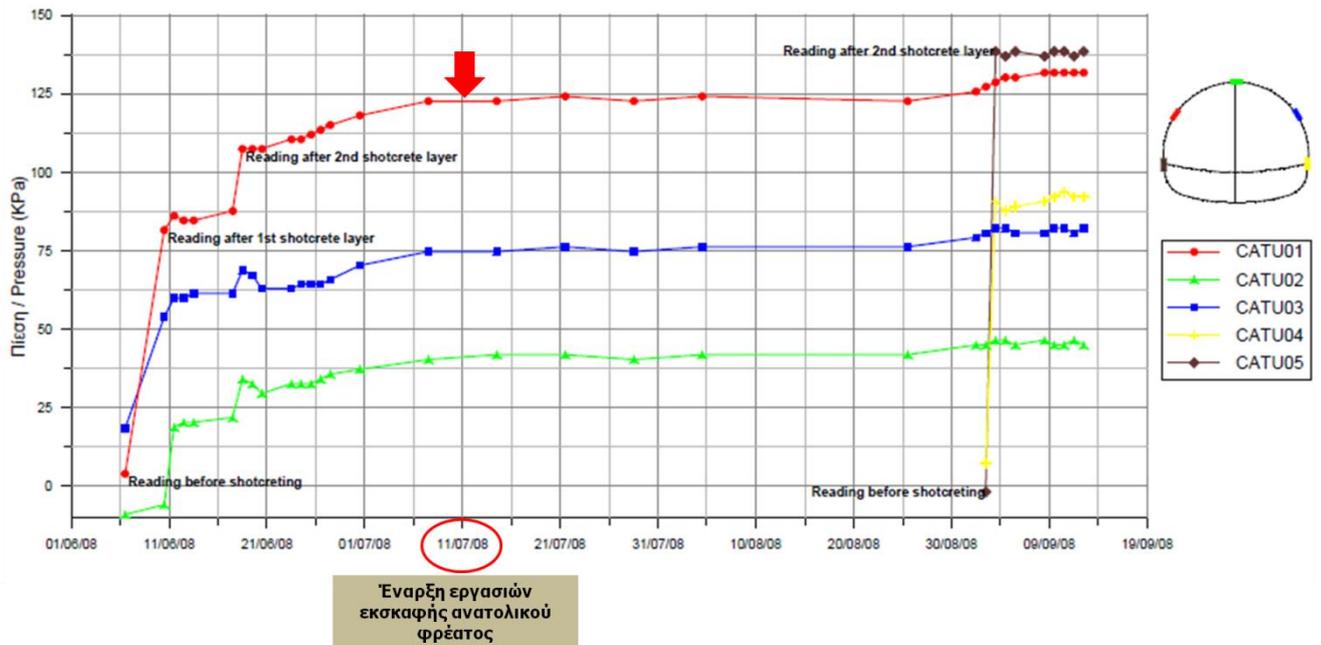
Σχήμα 5-5: Πλευρικά και μηκτομοικά όρια προσομοιώματος.

Επιλογή προσομοίωσης συμμετρικής διατομής

Κατά την προσομοίωση του φυσικού προβλήματος θεωρήθηκε άξονας συμμετρίας ο οποίος ταυτίζεται με τον άξονα διάνοιξης της σήραγγας. Η θεώρηση συμμετρίας στην περιοχή είναι ρεαλιστική, καθώς παρόλο που υπάρχει ασυμμετρία στις επαφές μεταξύ των σχηματισμών κατά μήκος του άξονα διάνοιξης, βρισκόμαστε σε ένα γενικότερο ασαφές γεωλογικά περιβάλλον που αποτελείται από τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο ο οποίος εμφανίζεται κατά θέσεις τεκτονισμένους. Έτσι, στη θέση της διατομής, με βάση τα δεδομένα από την κατασκευή της σήραγγας, το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελείται από ένα γεωλικό (ανώτερη ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) για το οποίο - όπως έχει ήδη αναφερθεί - μπορεί να γίνει εύλογη παραδοχή ότι συμπεριφέρεται ως «οιονεί» ομοιογενές και ισότροπο υλικό εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού. Ουσιαστικά, βρισκόμαστε σε μία γεωλογικά «γκρίζα ζώνη» καθώς δεν μπορεί να προβλεφθεί αν οι εμφανίσεις των σχηματισμών και οι επαφές τους αποτελούν σημειακή ή ευρύτερη κατάσταση στην κλίμακα του έργου. Οι συνεχείς εναλλαγές και η ανομοιογένεια μας οδήγησαν στη θεώρηση μίας μέσης κατάστασης λαμβάνοντας τις μέσες επαφές μεταξύ των σχηματισμών. Λαμβάνοντας τα παραπάνω ως δεδομένα το μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί συμμετρικό χωρίς να αναμένονται σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματική κατάσταση ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Αναμφισβήτητα, ο υπολογιστικός χρόνος αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την επιλογή συμμετρικής διατομής καθώς υπάρχει βέλτιστο όριο πέραν του οποίου περαιτέρω αύξησή του, δεν οδηγεί σε αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Μία πληροφορία που προκάλεσε προβληματισμό στο αν θα έπρεπε το προσομοίωμα να θεωρηθεί συμμετρικό ήταν η διάνοιξη, κατά τη διάρκεια των εργασιών εκσκαφής, του ανατολικού φρέατος

αερισμού στη γειτονική περιοχή της σήραγγας και συγκεκριμένα στη Χ.Θ. 1+612.65. Από παρατηρήσεις των μετρήσεων των πιέσεων σε σχέση με τη χρονική αλληλουχία των εργασιών προέκυψε ότι οι πιέσεις παρέμειναν πρακτικά ανεπηρέαστες από την εκσκαφή του φρέατος. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ότι μετά την έναρξη των εργασιών εκσκαφής του φρέατος οι πιέσεις διατηρούνται πρακτικά σταθερές, ενώ ανεβαίνουν λίγο μετά την έναρξη των εργασιών διάνοιξης της Β' φάσης. Συνεπώς λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας της υποστήριξης του φρέατος προέκυψαν μικρές καθιζήσεις και κατ' επέκταση μικρές πιέσεις οι οποίες δεν επηρέασαν την υφιστάμενη κατάσταση.



Σχήμα 5-6: Εκσκαφή του ανατολικού φρέατος αερισμού. Χρονική αλληλουχία των εργασιών εκσκαφής του και επίδραση αυτών στις πιέσεις της άμεσης υποστήριξης.

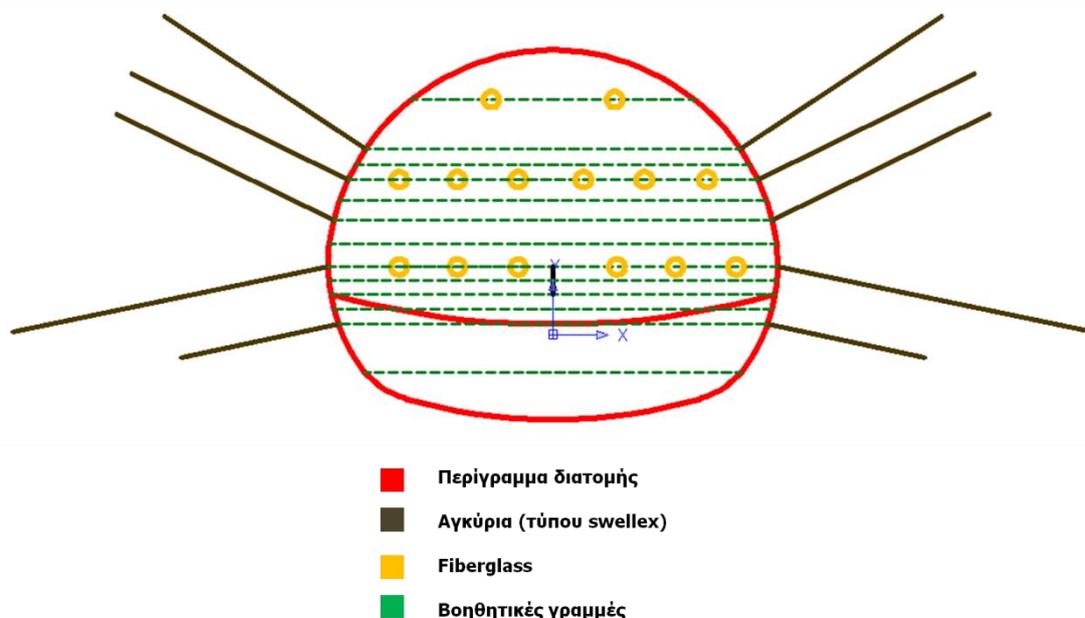
Αναφορικά με τα φορτία που ασκούνται από την επιφάνεια, από την επίσκεψη στην περιοχή παρατηρήθηκε ότι τα φορτία που βρίσκονται στην γειτονιάζουσα περιοχή προέρχονται από 2όροφα-3όροφα κτίρια και δεν απαιτούσαν ειδική θεώρηση στον σχεδιασμό του έργου. Για το λόγο αυτό εξετάστηκε παραμετρικά ένα εύρος τιμών για το φορτίο που ασκείται στην επιφάνεια του εδάφους $0 \div 30 \text{ kPa}$.

5.2.2 Σχεδιασμός- Σύνθεση του αριθμητικού μοντέλου

Για την κατάσταση του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά λογισμικά προγράμματα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί κατάλληλη προσομοίωση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του λογισμικού AutoCAD σχεδιάστηκε η διατομή της σήραγγας, μέσω του λογισμικού ANSYS πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός των ορίων του μοντέλου και κατάλληλη μόρφωση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων και τέλος με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS έγινε διερεύνηση του προβλήματος όπου εξετάστηκε ένας μεγάλος αριθμός αναλύσεων.

5.2.2.1 Λογισμικό Πρόγραμμα Σχεδιασμού Autocad

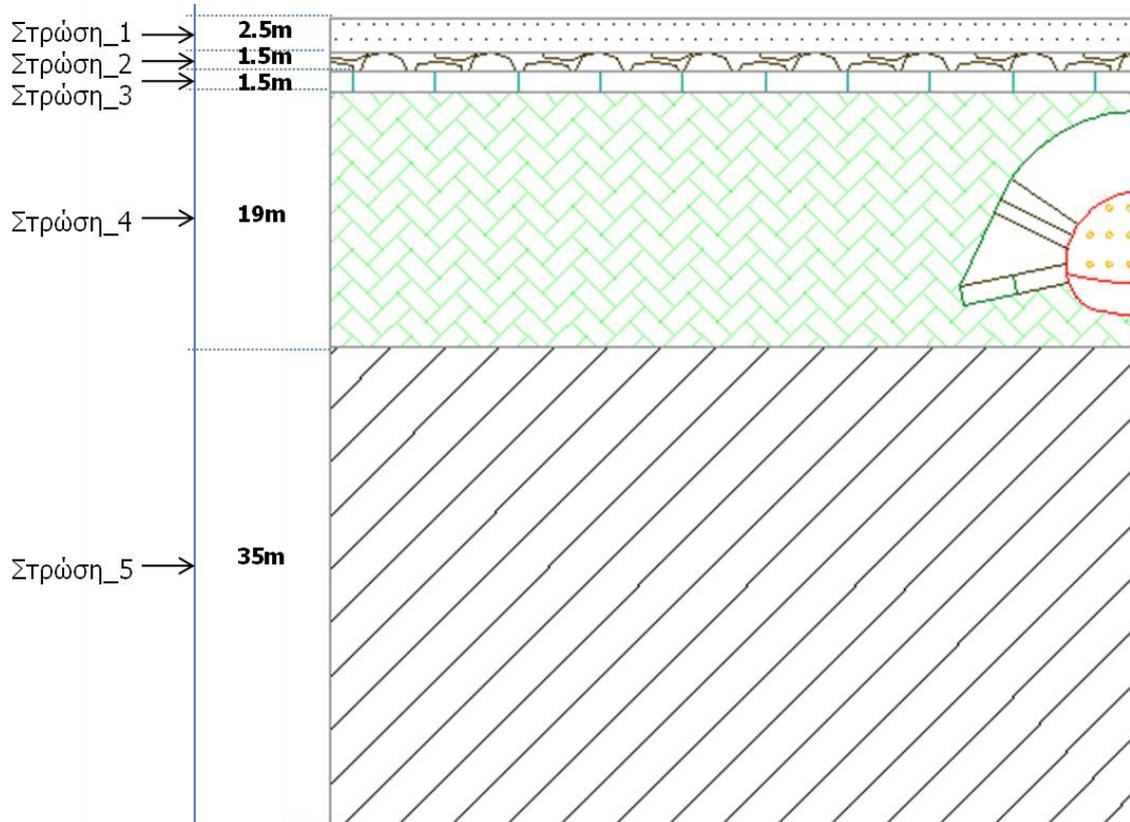
Ο σχεδιασμός της διατομής του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό AutoCAD, μέσω του οποίου δίνεται η δυνατότητα σχεδίασης λεπτομερειών σε δύο διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί σχεδιάστηκε το περίγραμμα της σήραγγας, καθώς επίσης και οι θέσεις όπου θα τοποθετηθούν τα αγκύρια βράχου και τα αγκύρια μετώπου (fiberglass). Επίσης, για την διευκόλυνση της οριοθέτησης που ακολούθησε στο λογισμικό ANSYS, σχεδιάστηκαν και ορισμένες βοηθητικές γραμμές.



Σχήμα 5-7: Διατομή Σήραγγας- λογισμικό AutoCAD.

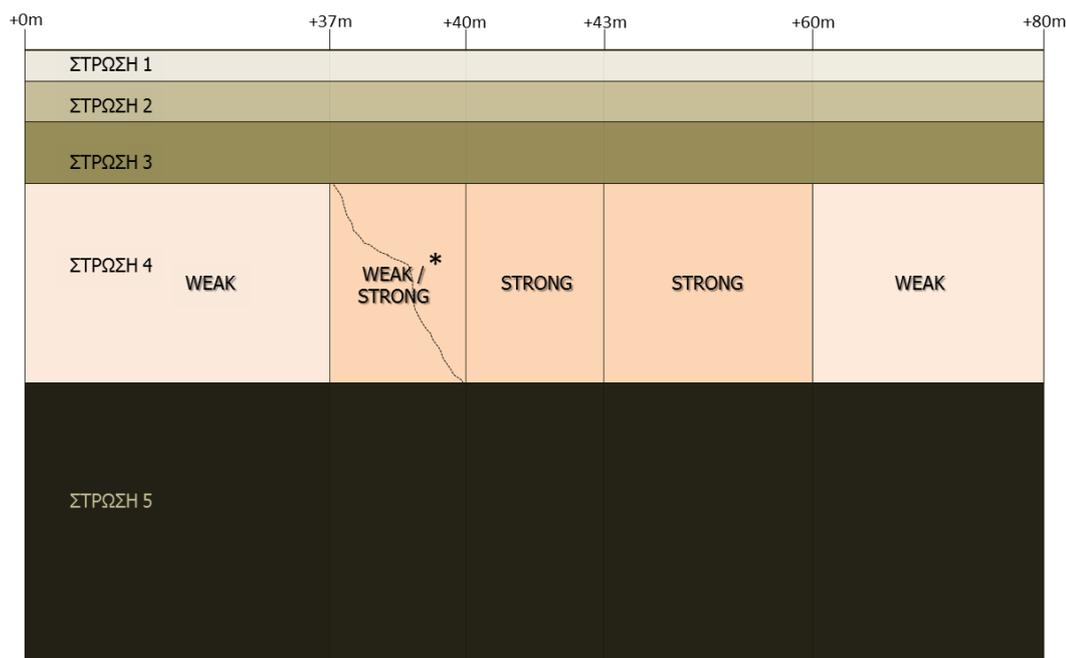
Στην προσπάθεια να οριοθετηθούν και να κωδικοποιηθούν οι σχηματισμοί της περιοχής ώστε να εισαχθούν στο προσομοίωμα κατατάχθηκαν σε 5 κατηγορίες διαφορετικών ιδιοτήτων. Οι επιφανειακές αποθέσεις αποτελούν τη **Στρώση 1** με το πάχος του σχηματισμού να είναι 2.5m. Η **Στρώση 2** περιλαμβάνει το κροκαλοπαγές με πάχος στρώσης 1.5m. Η **Στρώση 3** αποτελείται από τον σχηματισμό του ασβεστιτικού μεταψαμμίτη με πάχος 1.5m. Η **Στρώση 4** αποτελεί και το σχηματισμό ο οποίος θα αποτελέσει τη βάση των ανάστροφων αναλύσεων, καθώς σε αυτή πραγματοποιείται η διάνοιξη της σήραγγας και σε αυτή θα δοθούν εύρη τιμών για τις παραμέτρους του γεωυλικού. Στο προσομοίωμα έχει μέσο πάχος 19m και περιλαμβάνει το σχηματισμό των εναλλαγών μεταψαμμίτη και μεταίλυολίθου και των εναλλαγών μεταίλυολίθου με μεταψαμμίτη. Κατά θέσεις ο σχηματισμός διαθέτει καλύτερες παραμετρικές ιδιότητες ενώ όταν επικρατεί ο μεταίλυολιθικός σχηματισμός οι ιδιότητες απομειώνονται. Συνεπώς, λαμβάνονται δύο ενότητες για τη στρώση 4, η ενότητα με τις αυξημένες ιδιότητες (strong) όταν επικρατεί ο μεταψαμμίτης και η ενότητα με τις πτωχότερες ιδιότητες (weak) όταν κυριαρχεί ο μεταίλυολίθος. Τέλος, η **Στρώση 5** περιλαμβάνει το σχηματισμό του αργιλικού σχιστολίθου (εναλλάσσεται με μεταίλυολίθο) η οποία για το σχεδιασμό του προσομοιώματος θεωρήθηκε ότι έχει πάχος 35m. Σημειώνεται ότι ο σχηματισμός του αργιλικού σχιστολίθου αποτελεί το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής και δεν είναι γνωστό το πάχος του, όμως για την παρούσα εργασία είναι εκτός ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια γίνεται εμφανής

με το παρακάτω σχήμα η θέση της διατομής της σήραγγας αλλά και οι διαφορετικές στρώσεις γεωλικών που υπέρκεινται και υπόκεινται αυτής. Για τους λόγους που θα αναφερθούν παρακάτω οι σχηματισμοί στο προσομοίωμα θεωρούνται πρακτικά οριζόντιοι.



Σχήμα 5-8: Διατομή σήραγγας και στρώσεις γεωλικών-Λογισμικό AutoCAD.

Επιπλέον, αντιστοιχήθηκαν διαφορετικές ιδιότητες και υλικά και κατά μήκος του προσομοιώματος, στη Στρώση 4, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης της καλύτερης ενότητας του σχηματισμού, καθώς εκεί προέκυψαν αυξημένες τιμές GSI σύμφωνα με τα στοιχεία της κατασκευής του έργου. Μηκοτομικά το προσομοίωμα έχει διαχωριστεί σε 5 τμήματα ώστε να υπάρχει ευελιξία στις αναλύσεις και να διαφοροποιούνται οι περιοχές καλύτερης (strong) και πτωχότερης (weak) ενότητας του σχηματισμού.

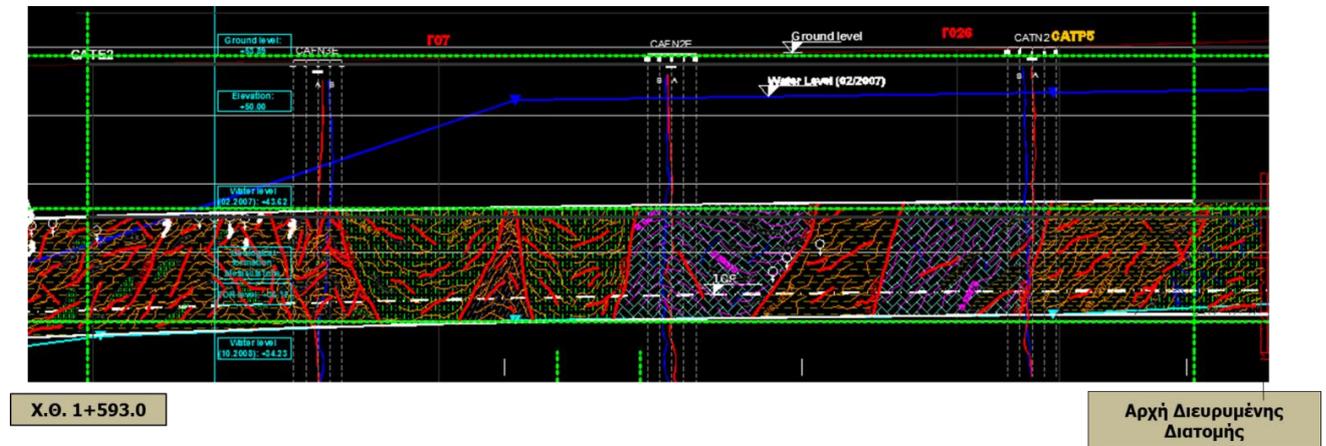


Σχήμα 5-9: Εξέλιξη των σχηματισμών κατά μήκος του άξονα διάνοιξης του προσομοιώματος.
 [* Ο συμβολισμός weak/strong χρησιμοποιείται γιατί στη θέση αυτή έχει δοθεί η δυνατότητα στο σχηματισμό να λαμβάνει είτε ασθενέστερες είτε ισχυρότερες ιδιότητες.]

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί η γεωτεχνική λογική που ακολουθήθηκε με βάση την οποία έγινε η παραδοχή ότι οι σχηματισμοί είναι πρακτικά οριζόντιοι. Όπως προέκυψε από τα στοιχεία των γεωτρήσεων, αλλά και από τα κατασκευαστικά σχέδια μετέπειτα, οι σχηματισμοί των επιφανειακών αποθέσεων και του κροκαλοπαγούς της περιοχής διατηρούν πρακτικά σταθερά πάχη κατά μήκος του υπό μελέτη τμήματος επέκτασης της γραμμής 2. Συνεπώς, η απλοποίηση είναι ρεαλιστική. Για τους υπόλοιπους σχηματισμούς παρόλο που δεν διατηρούν παντού σταθερά πάχη, θεωρήθηκαν τα μέσα πάχη που καταλαμβάνουν, στοχευμένα στην περιοχή μελέτης. Λαμβάνοντας τα στοιχεία από την κατασκευή όπως δηλαδή συναντήθηκαν οι σχηματισμοί, θεωρήθηκε για λόγους προσομοίωσης και μείωσης του υπολογιστικού χρόνου ότι δεν ήταν σημαντική η απόκλιση από την πραγματικότητα.

Ειδικά για τη **Στρώση 4** όπου αποτελεί και το σχηματισμό μέσα στον οποίο διανοίγεται η σήραγγα που μελετάται αποτελείται άλλοτε από εναλλαγές μεταψαμμίτη με μεταίλυόλιθο (καλύτερες ιδιότητες – στο σχήμα ορίζεται ως strong) και άλλοτε από εναλλαγές μεταίλυόλιθου με μεταψαμμίτη (απομειωμένες ιδιότητες – στο σχήμα ορίζεται ως weak). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρόκειται για σχηματισμό ο οποίος είναι εξ αρχής ανομοιογενής και θα ήταν αδύνατο να προσπαθήσουμε να τον προσομοιώσουμε ακριβώς. Η προσέγγιση θεωρώντας τις μέσες εμφανίσεις και μέσες ιδιότητες του σχηματισμού είναι η πιο ασφαλής και προσφέρει τον βέλτιστο συνδυασμό σφάλματος-απόκλισης και υπολογιστικού φόρτου. Επιπλέον, δόθηκε η δυνατότητα στο προσομοίωμα η στρώση 4 να μπορεί να λάβει διαφορετικές ιδιότητες κατά μήκος της εκσκαφής (weak, strong), ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μέσω των ανάστροφων αναλύσεων η ρεαλιστικότερη προσέγγιση. Οι επαφές μεταξύ των διαφορετικών ενοτήτων (weak, strong) της στρώσης 4 θεωρήθηκαν απλοποιητικά ότι είναι κατακόρυφες. Από φωτογραφίες που ελήφθησαν από τα μέτωπα εκσκαφής παρατηρήθηκε ότι οι

επαφές δεν είναι κατακόρυφες όμως η πολύπλοκη συμπεριφορά του φυσικού εδάφους δεν μπορεί να προσομοιωθεί χωρίς σημαντικά σφάλματα στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 5-10: Κατά μήκος γεωλογική τομή όπως προέκυψε από την κατασκευή και αποτύπωση μέσων γραμμών κατά την οριοθέτηση του προσομοιώματος.

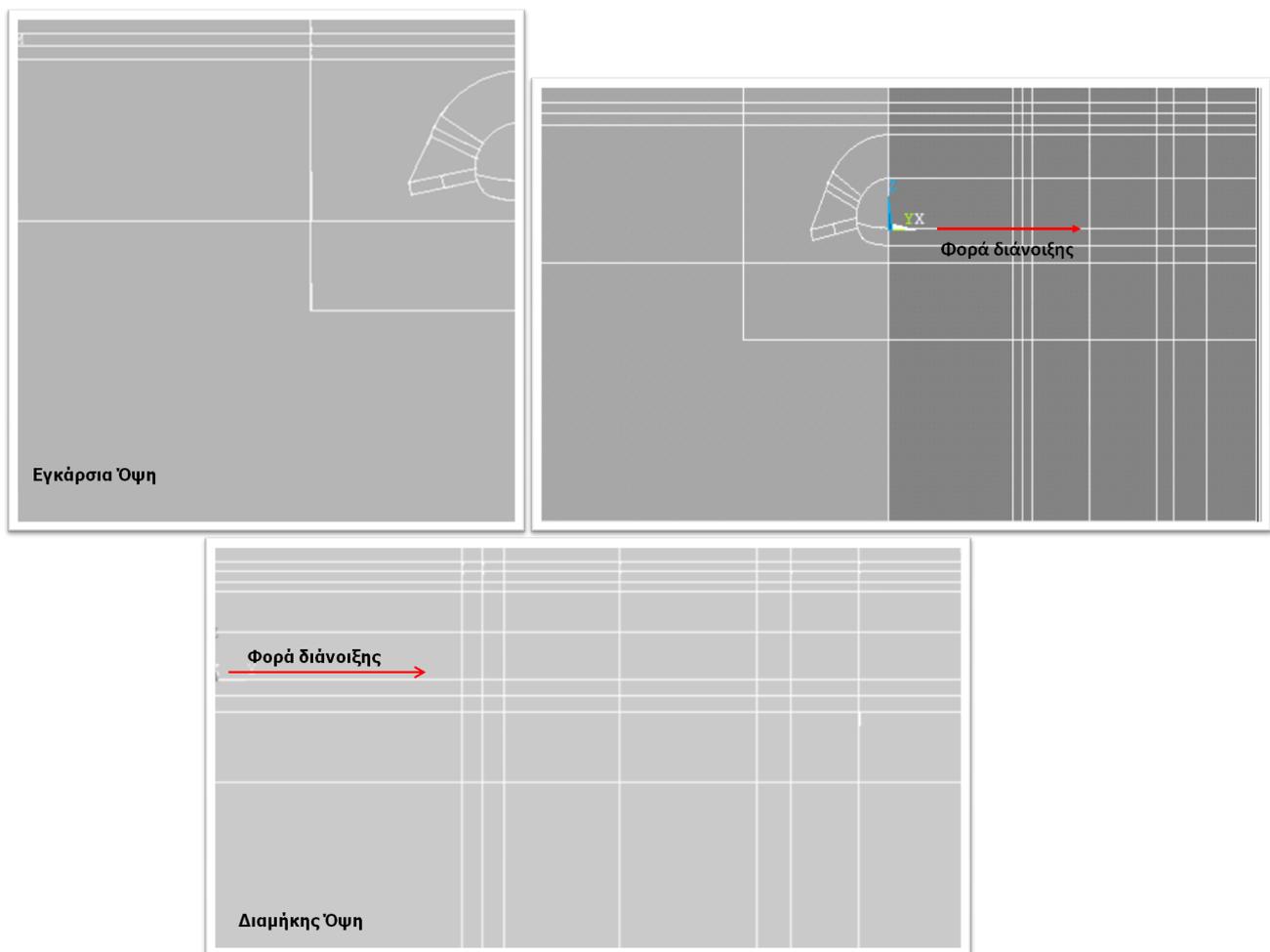
Η γεωτεχνική λογική που ακολουθήθηκε κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου συνοψίζεται με τη βοήθεια του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 5-10). Για την διευκόλυνση κατά τον σχεδιασμό του προσομοιώματος θεωρήθηκαν οι μέσες γραμμές των επαφών των σχηματισμών, αλλά και του περιγράμματος της σήραγγας. Είναι λογικό οι επαφές των σχηματισμών, καθώς και η ίδια η σήραγγα να βρίσκονται υπό κλίση. Όμως, καθώς οι εν λόγω κλίσεις ήταν μικρές επιλέχθηκε να σχεδιαστεί η μέση γραμμή των ορίων του προσομοιώματος όπως αποτυπώνονται στο παραπάνω σχήμα με πράσινες διακεκομμένες γραμμές. Πιο συγκεκριμένα, φαίνονται τα όρια του μοντέλου αριστερά (Χ.Θ. 1+595.99) και δεξιά (Χ.Θ.1+681.0 - αρχή διευρυμένης διατομής) με κάθετες γραμμές, ενώ με οριζόντιες φαίνονται οι μέσες γραμμές του ανοίγματος της σήραγγας.

5.2.2.2 Λογισμικό Ansys

Για το σχεδιασμό της γεωμετρίας, του καννάβου και τη διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία των μοντέλων έγινε χρήση του λογισμικού ANSYS. Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα δόθηκαν αρχικά οι συντεταγμένες του μοντέλου και έπειτα σχεδιάστηκαν οι επιφάνειες και οι όγκοι του. Το μοντέλο που προέκυψε φαίνεται στο Σχήμα 5-11.

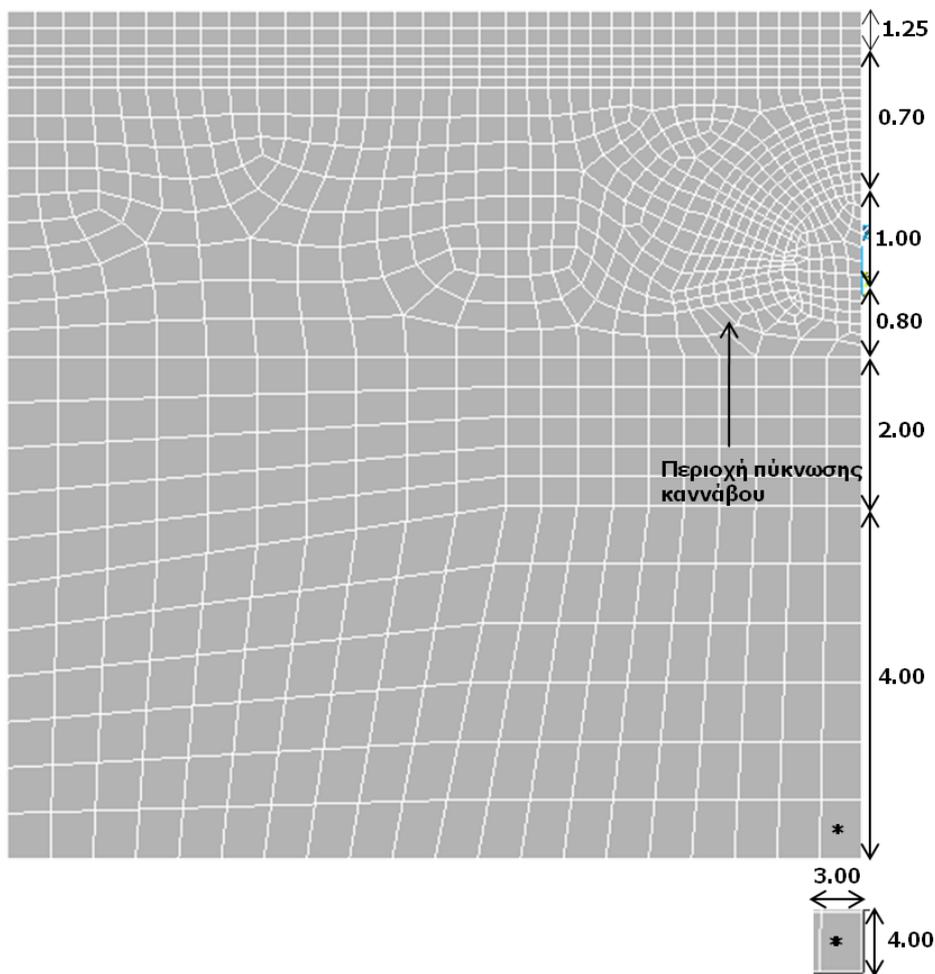
Κατά την διαμόρφωση του μοντέλου σχεδιάστηκε αρχικά η σήραγγα και λόγω συμμετρίας του τριδιάστατου σχήματος προσομοιώθηκε η μισή επιτυχάνοντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικά μικρότερη διάρκεια ανάλυσης. Οι μεγάλες διαστάσεις του τριδιάστατου προσομοιώματος κατέστησαν απαγορευτική την προσομοίωση ολόκληρης της διατομής διάνοιξης καθώς η πολυπλοκότητα του προσομοιώματος αυξάνει σημαντικά την υπολογιστική διάρκεια των αναλύσεων. Συνεπώς, ο βασικός παράγοντας για την επιλογή συμμετρικής διατομής ήταν η μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Ως επίπεδο συμμετρίας θεωρήθηκε το κατακόρυφο που διέρχεται από τον κεντρικό άξονα της σήραγγας. Λόγω των ιδιαίτερα μεγάλων χρονικά απαιτήσεων του προγράμματος για την εκτέλεση των αναλύσεων, έπρεπε να δοθεί μια εναλλακτική λύση που να συνδυάζει τη χαμηλή χρονική διάρκεια των αναλύσεων, με την ορθότητα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Έτσι, μετά από αρκετές δοκιμές καθορίστηκαν οι διαστάσεις του προσομοιώματος,

οι οποίες έχουν παρουσιαστεί αναλυτικότερα σε προηγούμενη ενότητα (§5.2.1), σύμφωνα με τις διαστάσεις της σήραγγας και τις κατανομές των τάσεων γύρω από αυτήν. Για τη δημιουργία του μοντέλου τηρήθηκαν κάποιοι περιορισμοί με βάση τους οποίους ορίστηκαν τα κατάλληλα όρια των διαστάσεων γύρω από την σήραγγα, πετυχαίνοντας έτσι και εξοικονόμηση χρόνου για την λήψη των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, με τον περιορισμό των διαστάσεων στο ελάχιστο επιτρεπτό όριο μειώνονται οι μεγάλες χρονικές απαιτήσεις του προγράμματος. Ανάμεσα στη σήραγγα και στα όρια του προσομοιώματος θα πρέπει να παρεμβάλλονται αρκετά μέτρα εδάφους, ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τις συνοριακές συνθήκες των ορίων. Επίσης, το μήκος της σήραγγας κατά τη φορά διάνοιξης θα πρέπει να είναι τόσο ώστε να μην επηρεάζεται η περιοχή στην οποία λαμβάνονται τα αποτελέσματα από τα πλευρικά όρια. Η κατανομή των ολικών τάσεων μετά την εκσκαφή πρέπει να είναι ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και σε αυτό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο η απόσταση της σήραγγας από το κάτω όριο. Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην επιλογή της απόστασης της σήραγγας από το πλευρικό όριο, ώστε η κατανομή των τάσεων κοντά σε αυτό να εμφανίζεται σχεδόν ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και με όσον το δυνατό μικρότερη τιμή.

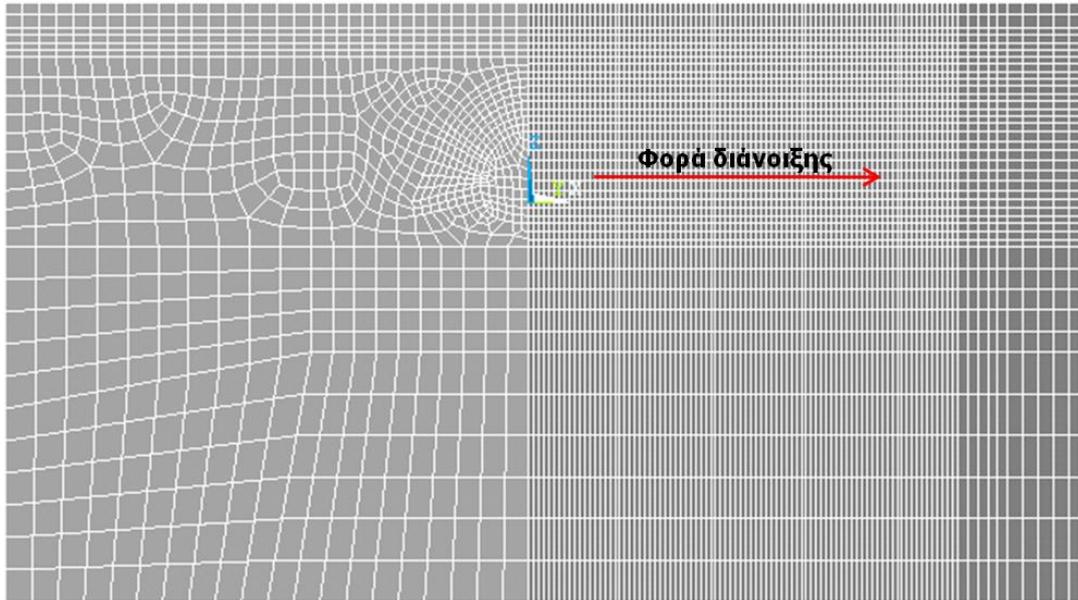


Σχήμα 5-11: Εγκάρσια και Διαμήκης όψη του αριθμητικού προσομοιώματος- Λογισμικό Ansys.

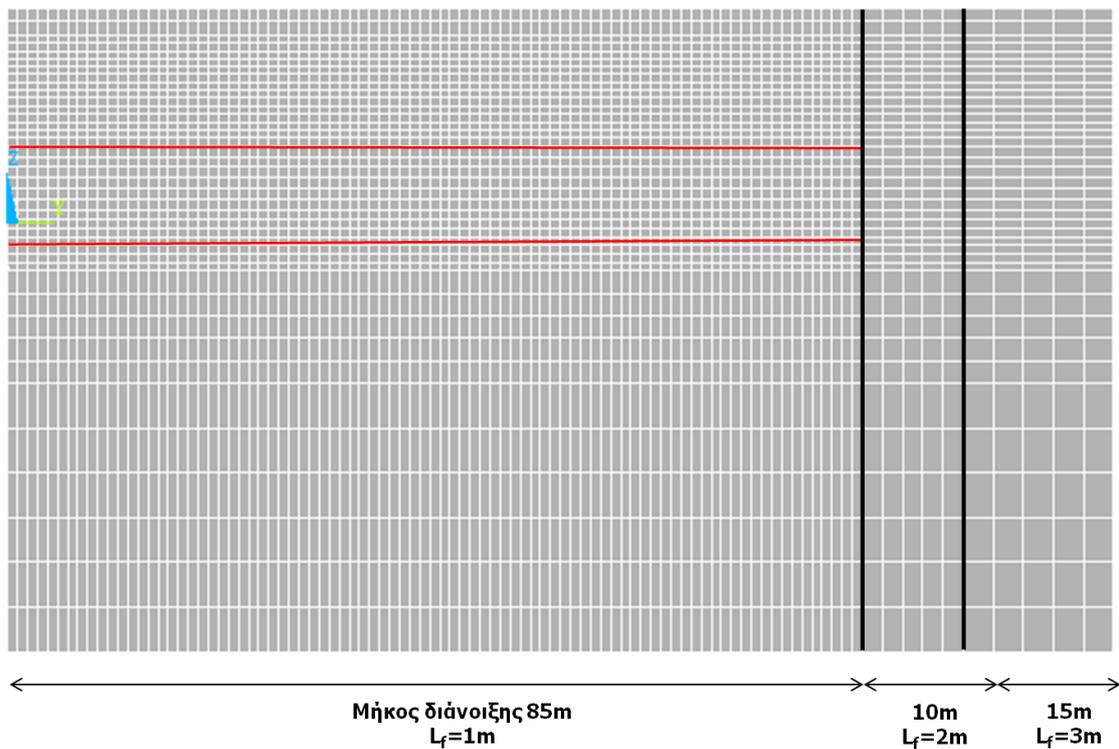
Μέσω του λογισμικού δημιουργήθηκε επίσης, ο κάρναβος των τριδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια εισήχθη στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις. Οι διαστάσεις των προσομοιωμάτων και η πυκνότητα του κάρναβου προέκυψαν κατόπιν παραμετρικής διερεύνησης. Για τη διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία με βάση την οποία ορίζαμε τα σημεία πύκνωσης και αραιώσης του κάρναβου των πεπερασμένων στοιχείων. Βασική αρχή ήταν να μορφωθούν όσο το δυνατόν πυκνότερα στοιχεία στην περιοχή γύρω από το άνοιγμα της σήραγγας. Έτσι, ορίστηκε μια ορθογωνική περιοχή περιμετρικά της διατομής όπου πραγματοποιήθηκε πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια παρατίθενται η διαμήκης και εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος, στην οποία διακρίνεται η περιοχή διαφοροποίησης της πυκνότητας του κάρναβου των πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 5-12, Σχήμα 5-13 και Σχήμα 5-14).



Σχήμα 5-12: Εγκάρσια όψη του αριθμητικού προσομοιώματος με τον κάρναβο των πεπερασμένων στοιχείων, στην οποία διακρίνονται οι περιοχές διαφορετικής πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων -Λογισμικό Ansys.



Σχήμα 5-13: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου, πλάγια όψη-Λογισμικό Ansys.



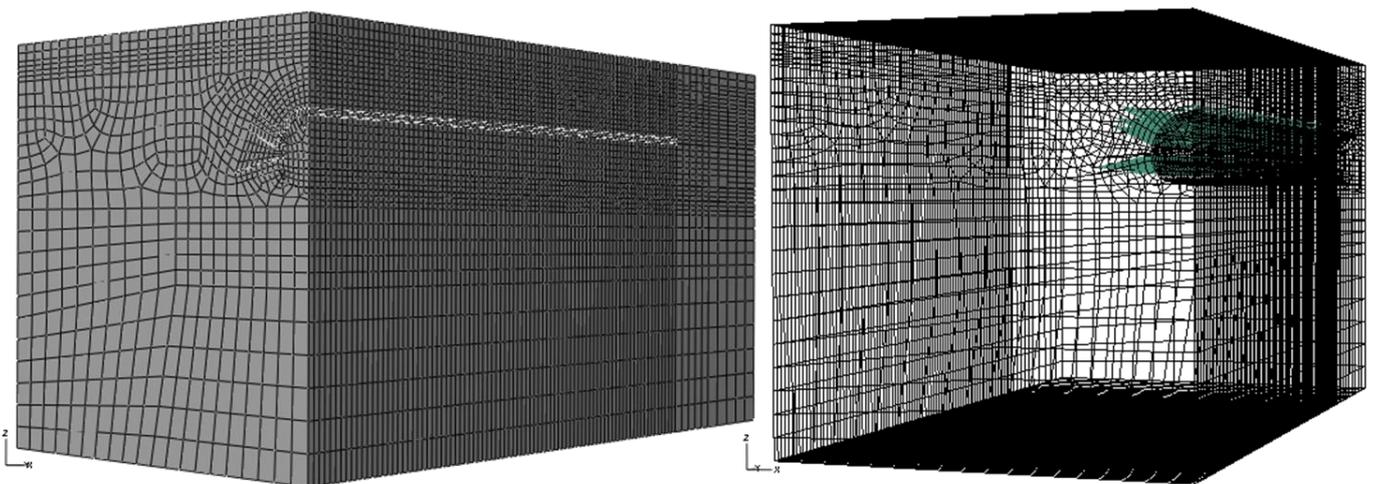
Σχήμα 5-14: Διαμήκης όψη του αριθμητικού προσομοιώματος στην οποία διακρίνονται οι περιοχές διαφορετικής πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων (L_f : Μήκος πεπερασμένου στοιχείου κατά τη διαμήκη διεύθυνση).

5.2.2.3 Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus

Για την διερεύνηση του προβλήματος εξετάστηκε ένας μεγάλος αριθμός αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το συγκεκριμένο λογισμικό θεωρείται κατάλληλο για την προσομοίωση σύνθετων προβλημάτων και την διεξαγωγή απαιτητικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Αποτελεί ένα από τα πιο εξελιγμένα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων με ποικίλες δυνατότητες προσομοίωσης γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων που αφορούν στους μηχανικούς και όχι μόνο.

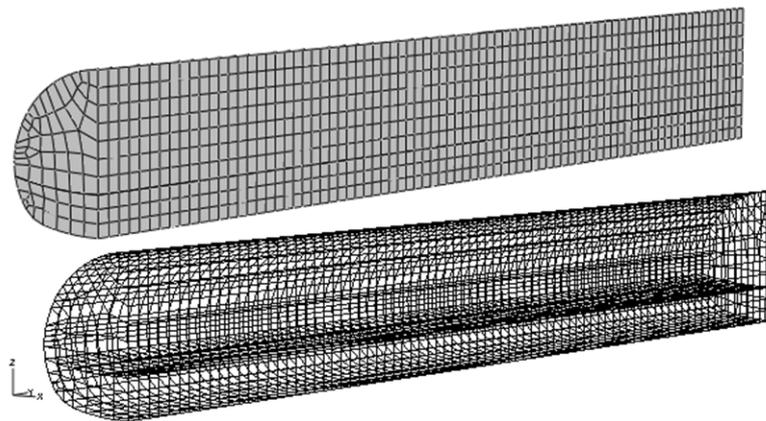
Σε αυτό το σημείο θα ακολουθήσει σύντομη περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν με το εν λόγω λογισμικό. Αρχικά, συντάχθηκε ένα αρχείο (input file) όπου περιγράφονται τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος. Στο input file εισάγονται τα δεδομένα του μοντέλου (model data) και τα δεδομένα της παρούσας κατάστασης ή της κατάστασης που προϋπήρχε (history data). Τα δεδομένα του μοντέλου περιγράφουν τα στοιχεία (elements), τους κόμβους (nodes), τις ιδιότητες του στοιχείου (element properties), το υλικό (material definition) και κάθε στοιχείο που προσδιορίζει το μοντέλο καθαυτό. Στο συγκεκριμένο λογισμικό ο χρήστης κλιμακώνει την «ιστορία» του μοντέλου σε μια αλληλουχία βημάτων (steps). Κάθε βήμα είναι μια περίοδος απόκρισης συγκεκριμένου τύπου, μίας στατικής φόρτισης, μίας δυναμικής απόκρισης κ.τ.λ. Ο προσδιορισμός του βήματος περιλαμβάνει τον τύπο της διαδικασίας (στατική ανάλυση τάσεων, ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, κ.τ.λ.), τις παραμέτρους ελέγχου για την χρονική ολοκλήρωση, τις φορτίσεις και γενικά ζητούμενα στοιχεία. Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η ίδια η ανάλυση μπορεί να διασπαστεί σε δυο βήματα ή περισσότερα έτσι ώστε να δίνεται βαρύτητα στις μεταβλητές που ενδιαφέρουν περισσότερο σε κάθε ένα από αυτά.

Όπως προαναφέρθηκε, για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας, του καννάβου και την διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία των μοντέλων έγινε χρήση του λογισμικού ANSYS. Οι κόμβοι και τα στοιχεία που προέκυψαν από τη δημιουργία του μοντέλου στο ANSYS, εισήχθησαν στην συνέχεια στο input file του ABAQUS κάνοντας την κατάλληλη μετατροπή με την βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel.

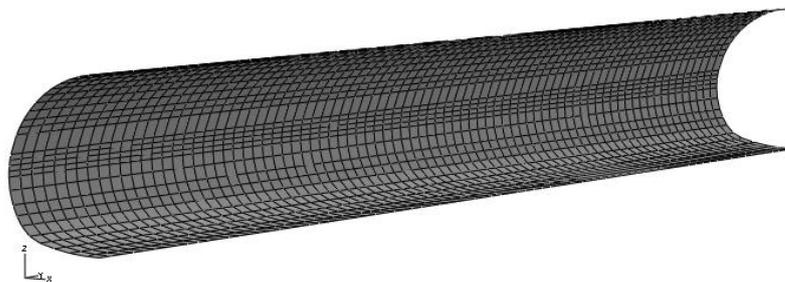


Σχήμα 5-15: Τριδιάστατο Αριθμητικό προσομοίωμα.

Για την προσομοίωση των γεωυλικών που περιβάλλουν τη διατομή χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα εξαπλευρικά οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία με οκτώ σημεία ολοκλήρωσης (C3D8R), για την προσομοίωση του κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος πεπερασμένα στοιχεία κελύφους τεσσάρων κόμβων (S4) και για την προσομοίωση των αγκυριών μετώπου (fiberglass) και αγκυριών βράχου (τύπου swellax) πεπερασμένα στοιχεία δικτύωματος δύο κόμβων (T3D2). Τέλος, για την προσομοίωση της ομπρέλας δοκού προπορείας (forerolling umbrella) χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού (B31). Μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων του κελύφους και των γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων του περιβάλλοντος γεωυλικού διαμορφώθηκε διεπιφάνεια, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης των ορθών και διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτήν. Οι ορθές τάσεις αυτές αποτελούν το φορτίο που καταπονεί την υποστήριξη. Οι δύο εκατέρωθεν πλευρές της διεπιφάνειας θεωρήθηκαν δεσμευμένες μεταξύ τους δίχως τη δυνατότητα ολίσθησης ή/και αποκόλλησης. Στις πλευρικές παρειές των αριθμητικών προσομοιωμάτων τοποθετήθηκαν κυλίσεις και στην κάτω παρειά δεσμεύτηκαν όλες οι μετατοπίσεις των κόμβων.

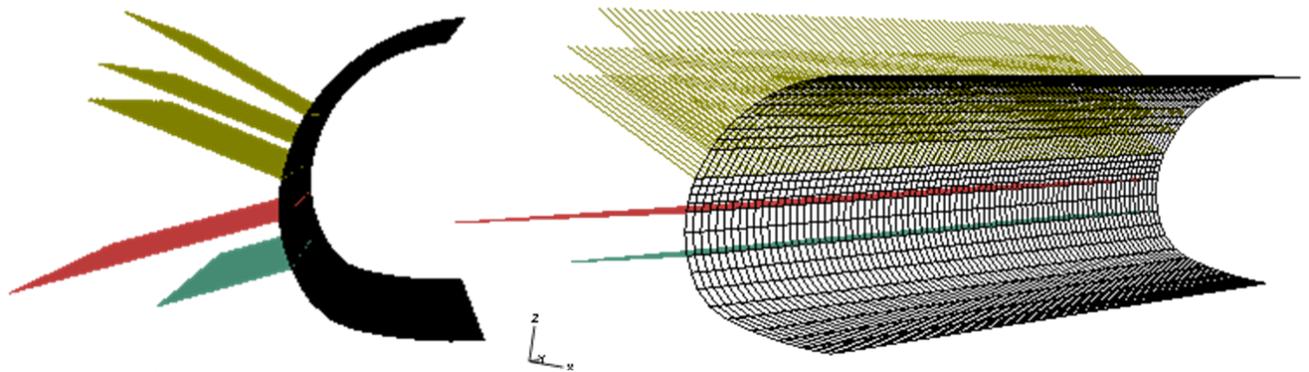


Σχήμα 5-16: Πεπερασμένα στοιχεία εντός της διατομής εκσκαφής, τα οποία αφαιρούνται στα διαδοχικά βήματα προσομοίωσης (Πεπερασμένα στοιχεία εκσκαφής, Α' φάσης και Β' φάσης).



Σχήμα 5-17: Πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης Α' και Β' φάσης, τα οποία ενεργοποιούνται στα διαδοχικά βήματα προσομοίωσης.

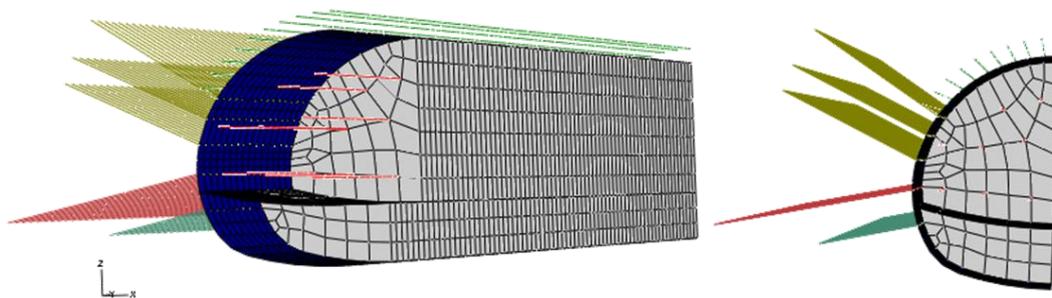
Τα πεπερασμένα στοιχεία των αγκυριών κατασκευάστηκαν και ομαδοποιήθηκαν έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση διαφορετικού μήκους αγκυριών και διαφορετικής φέρουσας ικανότητας αγκυριών. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν αγκύρια μήκους 4.0m, 6.0m και 8.0m με αντίστοιχα φορτία θραύσης 100kN, 150kN και 200kN. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 5-18 και Σχήμα 5-19) φαίνονται οι διαφορετικοί τύποι των αγκυριών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς επίσης και τα πρόσθετα μέτρα υποστήριξης (αγκύρια μετώπου, ομπρέλα δοκών προπορείας και ανάστροφο τόξο) που λήφθηκαν κατά την εκσκαφή της σήραγγας.



Υπόμνημα

- | | |
|---|-------------------------------------|
|  | Αγκύρια μήκους 6m, $F=150\text{kN}$ |
|  | Αγκύρια μήκους 8m, $F=200\text{kN}$ |
|  | Αγκύρια μήκους 4m, $F=100\text{kN}$ |
|  | Κέλυφος Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος |

Σχήμα 5-18: Αγκύρια Βράχου και πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους της άμεσης υποστήριξης τα οποία ενεργοποιούνται με τα βήματα εκσκαφής.

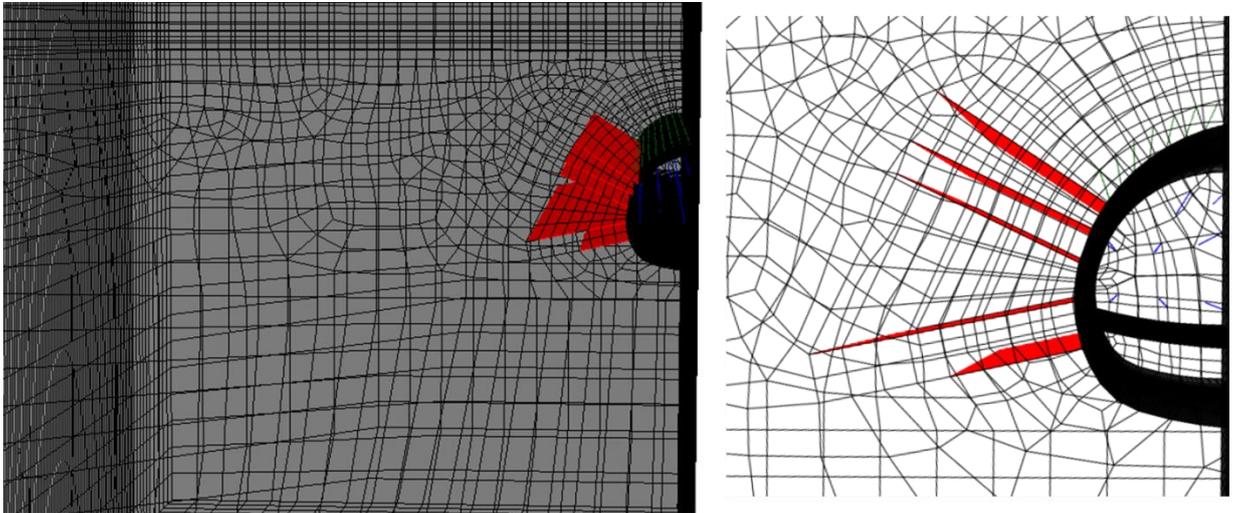


Υπόμνημα

- | | | | |
|---|------------------------------|---|--|
|  | Αγκύρια μήκους 6m |  | Ομπρέλα δοκών προπορείας (forepolling) |
|  | Αγκύρια μήκους 8m |  | Ανάστροφο τόξο (invert) |
|  | Αγκύρια μήκους 4m |  | A' και B' φάση εκσκαφής |
|  | Αγκύρια μετώπου (fiberglass) |  | Κέλυφος Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος |

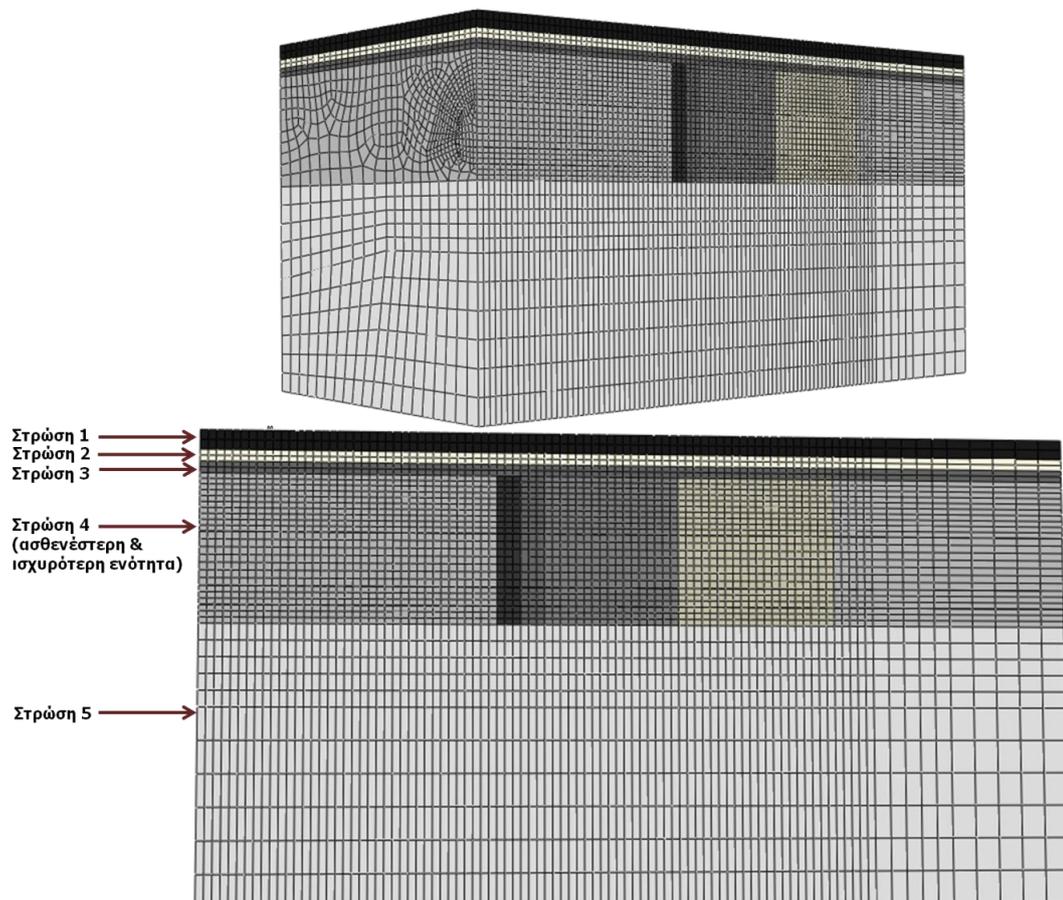
Σχήμα 5-19: Πεπερασμένα στοιχεία A' φάσης εκσκαφής (εκσκαφή 20m) και B' φάσης εκσκαφής (εκσκαφή 15m) σε συνδυασμό με στοιχεία άμεσης υποστήριξης της σήραγγας.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες της διατομής της σήραγγας όπου διακρίνονται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης και το προσωρινό ανάστροφο τόξο από διαφορετική οπτική.



Σχήμα 5-20: Διατομή σήραγγας όπου διακρίνονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης.

Ενώ, στο Σχήμα 5-21 φαίνονται αναλυτικά οι στρώσεις των γεωλικών του αριθμητικού προσομοιώματος τα χαρακτηριστικά των οποίων έχουν αναλυθεί παραπάνω (Παράγραφος §5.2.2).



Σχήμα 5-21: Στρώσεις γεωλικού αριθμητικού προσομοιώματος.

Βήματα Εκσκαφής του αριθμητικού μοντέλου

Στο αριθμητικό μοντέλο που σχεδιάστηκε θεωρήθηκε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τμηματική εκσκαφή της σήραγγας σε Α' και Β' φάση. Προσομοιώθηκαν συνολικά 121 βήματα εκσκαφής. Επισημαίνεται ότι η εκσκαφή της Α' Φάσης γίνεται με φορά $y=0m$ προς $y=110m$ ενώ, η εκσκαφή της Β' Φάσης γίνεται από δύο μέτωπα, το ένα με φορά $y=24m$ προς $y=0m$ και το δεύτερο με φορά από $y=80m$ προς $y=24m$. Έτσι, η κάθε ανάλυση αποτελούνταν συνολικά από 121 βήματα τα οποία ήταν τα εξής:

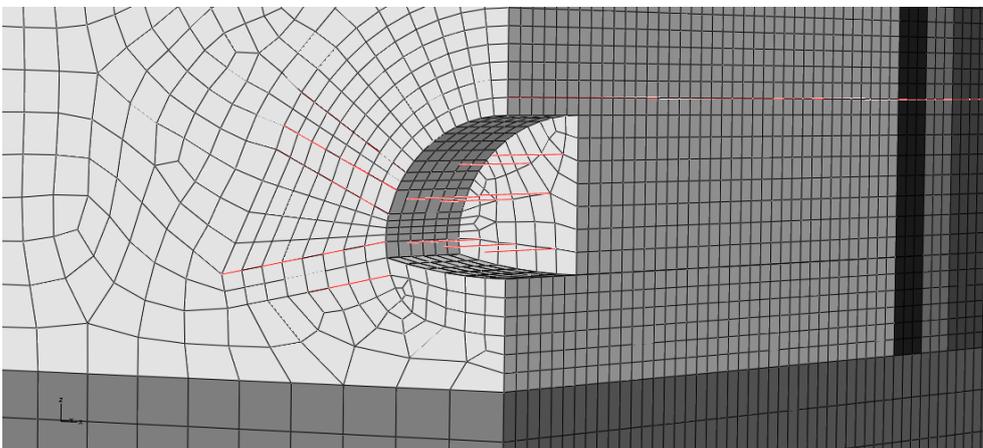
1° Βήμα: Υπολογισμός των γεωστατικών συνθηκών του προβλήματος δηλαδή, των αρχικών τάσεων πριν την κατασκευή της σήραγγας. Παράλληλα με τις γεωστατικές τάσεις προστίθεται το φορτίο το οποίο ασκείται από την επιφάνεια.

2° Βήμα: Ενεργοποίηση της ομπρέλας δοκών προπορείας, των αγκυριών μετώπου και του ανάστροφου τόξου.

3° Βήμα: Εκσκαφή των δύο πρώτων μέτρων του υπόγειου ανοίγματος της Α' φάσης εκσκαφής και ενεργοποίηση της υποστήριξης του πρώτου μέτρου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της ομπρέλας δοκών προπορείας, των αγκυριών μετώπου και του ανάστροφου τόξου.

4° Βήμα: Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της Α' φάσης (με δεδομένη προχώρηση ανά 1m) και ενεργοποίηση της υποστήριξης του προηγούμενου μέτρου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της ομπρέλας δοκών προπορείας, του ανάστροφου τόξου, των αγκυριών μετώπου και των αγκυριών βράχου.

5° Βήμα- 81° Βήμα: Όμοια με το προηγούμενο βήμα.



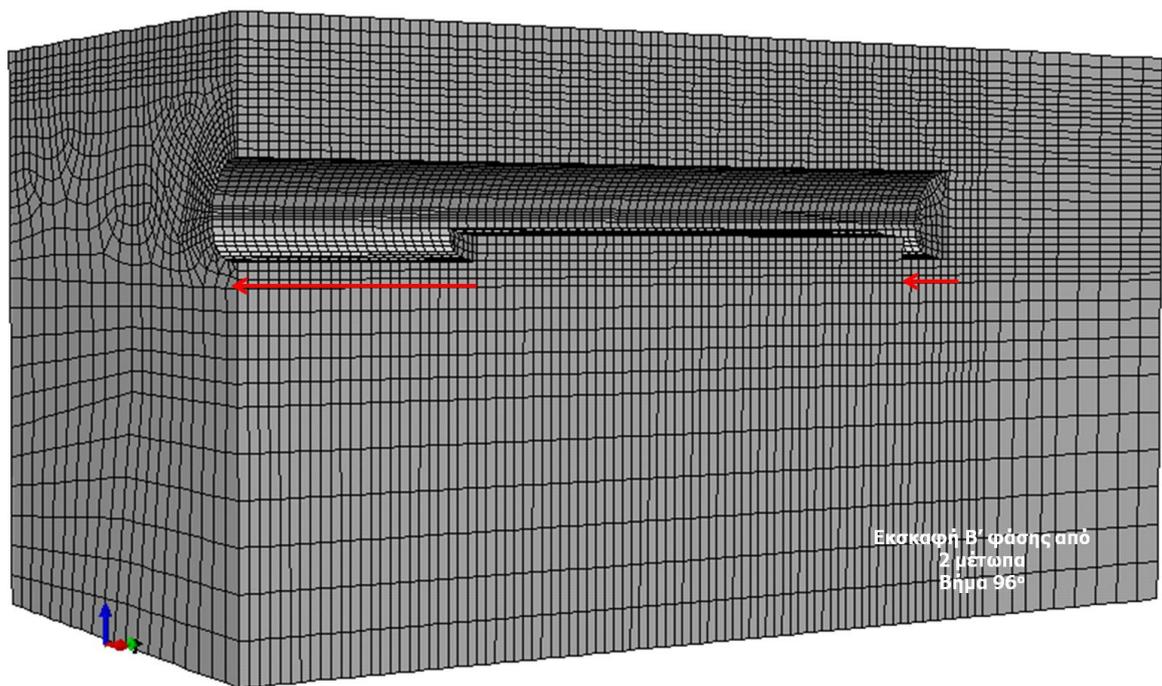
Σχήμα 5-22: Εκσκαφή 6^{ου} βήματος (6m εκσκαφής Α' φάσης) και ενεργοποίηση αντίστοιχων μέτρων άμεσης υποστήριξης.

82° Βήμα: Έναρξη εκσκαφής της Β' φάσης (από τη θέση $y=24m$) με δεδομένη προχώρηση ανά 2m και στη συνέχεια ενεργοποίηση της υποστήριξης του προηγούμενου μέτρου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της ομπρέλας δοκών προπορείας, του ανάστροφου τόξου, των αγκυριών μετώπου και των αγκυριών βράχου.

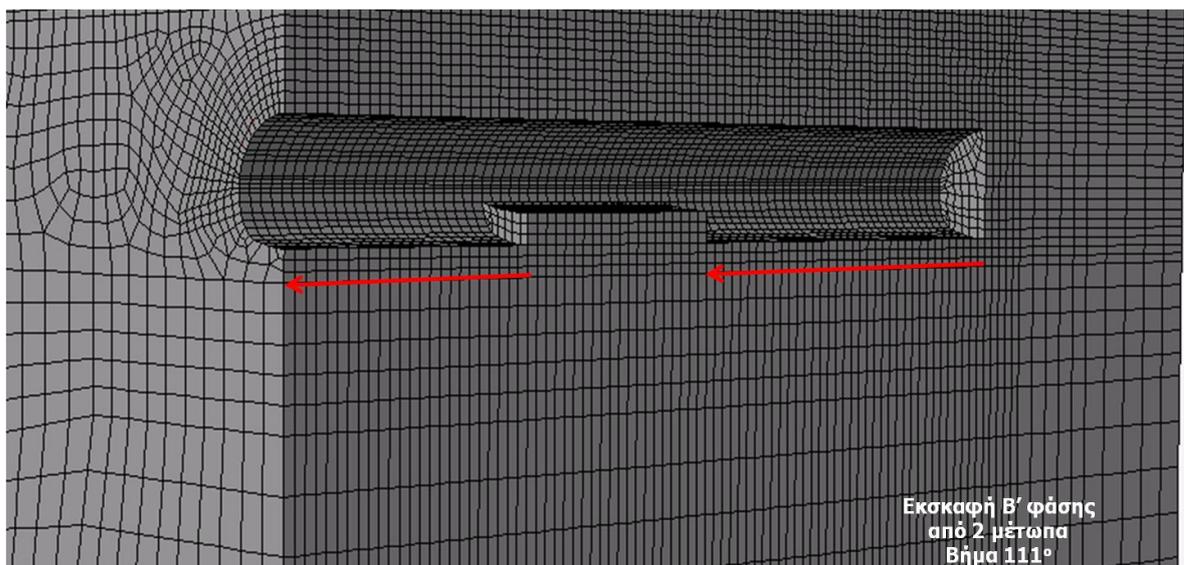
83° Βήμα-93° Βήμα: Όμοια με το προηγούμενο βήμα μέχρι την ολοκλήρωση της εκσκαφής της Β' φάσης (έως τη θέση $y=0m$).

94° Βήμα: Έναρξη εκσκαφής της Β' φάσης (από τη θέση $y=80\text{m}$) με δεδομένη προχώρηση ανά 2m και στη συνέχεια ενεργοποίηση της υποστήριξης του προηγούμενου μέτρου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της ομπρέλας δοκών προπορείας, του ανάστροφου τόξου, των αγκυρίων μετώπου και των αγκυρίων βράχου.

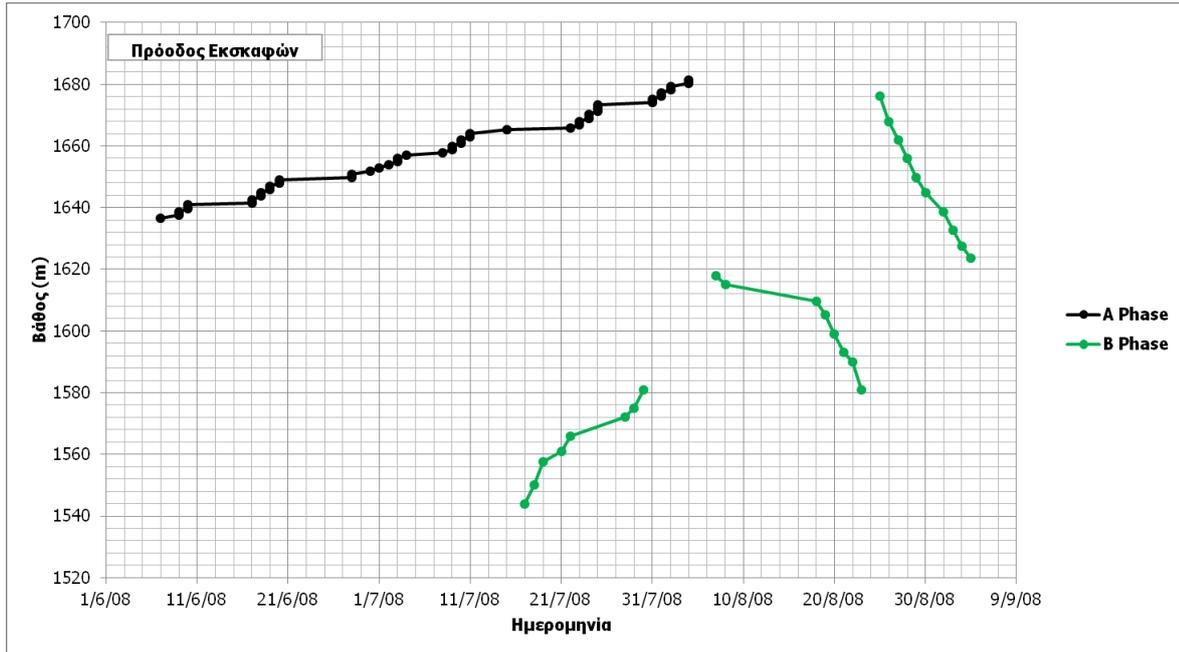
95° Βήμα-121° Βήμα: Όμοια με το προηγούμενο βήμα μέχρι την ολοκλήρωση της εκσκαφής της Β' φάσης (έως τη θέση $y=24\text{m}$).



Σχήμα 5-23: Εκσκαφή 96^{ου} βήματος της Β' φάσης εκσκαφής και ενεργοποίηση αντίστοιχων μέτρων άμεσης υποστήριξης.

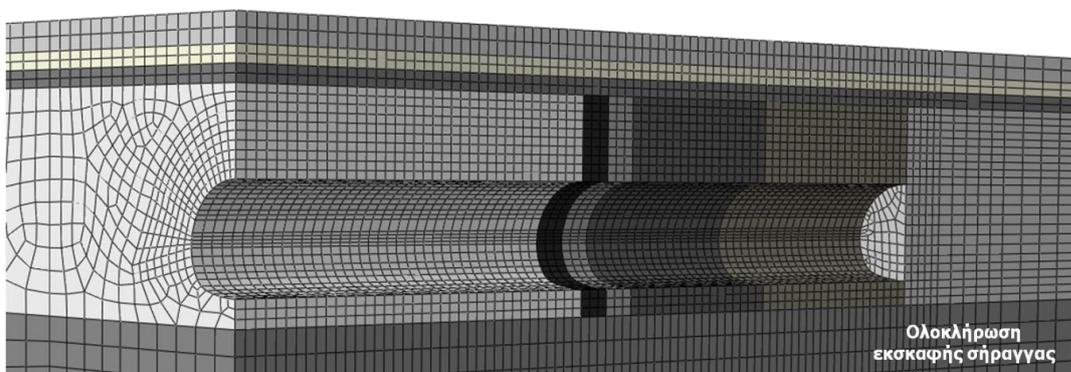
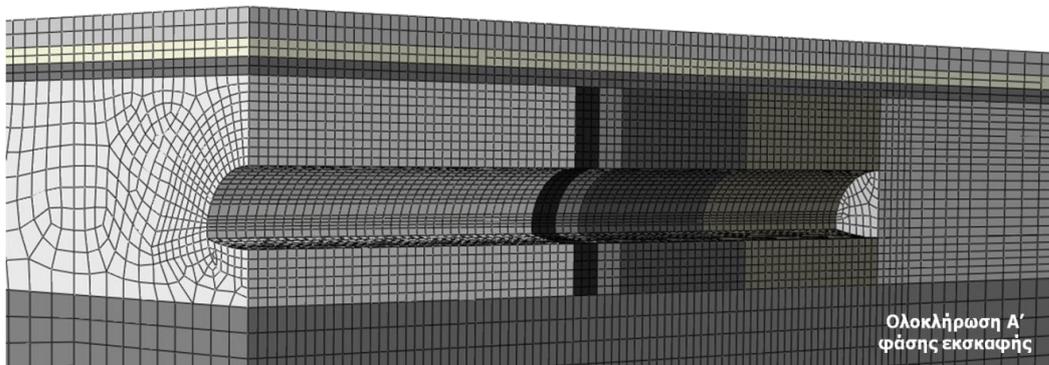


Σχήμα 5-24: Εκσκαφή 111^{ου} βήματος της Β' φάσης εκσκαφής και ενεργοποίηση αντίστοιχων μέτρων άμεσης υποστήριξης.



Σχήμα 5-25: Πρόοδος εκσκαφών έργου Α' και Β' φάσης εκσκαφής.

Στο Σχήμα 5-26 παρουσιάζεται η εικόνα του αριθμητικού προσομοιώματος αρχικά μετά την ολοκλήρωση της Α' Φάσης εκσκαφής, η οποία πραγματοποιείται στο 81° βήμα και έπειτα το αριθμητικό προσομοίωμα μετά την ολοκλήρωση της Β' Φάσης εκσκαφής, η οποία ολοκληρώνει και τη διάνοιξη, στο 121° βήμα.



Σχήμα 5-26: Αριθμητικό προσομοίωμα αρχικά με ολοκληρωμένη την Α' φάση εκσκαφής και έπειτα και με τις δύο φάσεις εκσκαφής.

5.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Οι ανάστροφες αναλύσεις, όπως έχει προαναφερθεί, πραγματοποιήθηκαν με χρήση τριδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Οι γεωτεχνικές παράμετροι της περιβάλλουσας βραχώμαζας ποσοτικοποιήθηκαν αρχικά μέσω των παραμέτρων του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown (GSI , σ_{ci} , m_i , D), ενώ οι αριθμητικές αναλύσεις εκτελέστηκαν με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τα φορτία που αναπτύσσονται στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης είναι:

- Οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας του περιβάλλοντος γεωυλικού. Ο ρόλος του μέτρου παραμορφωσιμότητας εξετάζεται περαιτέρω με τις αριθμητικές αναλύσεις που θα εκτελεστούν.
- Ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων K_0 , ο οποίος επηρεάζει το μέσο εντατικό πεδίο, αλλά και την κατανομή των διεκτροπικών τάσεων.
- Οι γεωτεχνικές συνθήκες στο επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας.
- Η δυσκαμψία του κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης, η οποία επηρεάζει την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση / αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωυλικού και επομένως την τιμή του φορτίου.

Στις ανάστροφες αναλύσεις που εκτελέστηκαν οι παραδοχές που έγιναν είναι οι εξής:

- Το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας για τις στρώσεις 1, 2, 3, και 5 εκτιμήθηκε μέσω της σχέσης που προτείνεται από τους Hoek et al. (2002), καθώς κρίνεται πιο ρεαλιστική για τις πολύ χαμηλές τιμές βαθμονόμησης GSI σε σχέση με την αντίστοιχη που προτείνεται από τους Hoek & Diederichs (2006). Ενώ για τη στρώση 4, όπου διανοίγεται η σήραγγα, διερευνήθηκε ένα εύρος τιμών όπως αναφέρεται στη συνέχεια.
- Όσον αφορά στο συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων, εξετάστηκε συγκεκριμένο εύρος τιμών που κυμαίνεται από $K_0=0.6-0.8$ καθώς θεωρείται ρεαλιστικό συνάδει με τη μελέτη.
- Οι γεωτεχνικές συνθήκες για τις οποίες δίνονται συγκεκριμένα εύρη τιμών όπως παρουσιάζονται στην ενότητα που ακολουθεί.
- Η διαστολικότητα θεωρήθηκε ίση με $3-4\%$, όπου παίζει ελάχιστο ρόλο στους υπολογισμούς γνωρίζοντας ότι δεν υπάρχει μεγάλη πλαστικότητα στην περιοχή μελέτης.
- Το ύψος υπερκειμένων θεωρήθηκε ίσο με 12m από τον άξονα της σήραγγας με βάση τα τοπογραφικά στοιχεία του έργου.

Η δυσκαμψία του κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε σταθερή και περιγράφεται στην επόμενη ενότητα η συλλογιστική πορεία υπολογισμού της.

5.3.1 Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των μέτρων Άμεσης Υποστήριξης

Είναι γνωστό ότι κατά τη διαδικασία σχεδιασμού στις παραμέτρους αντοχής του σκυροδέματος και του χάλυβα αντιστοιχούνται οι χαρακτηριστικές τιμές, δηλαδή τιμές με πιθανότητα υπέρβασης 5%, εισάγοντας έναν επιπλέον «έμμεσο συντελεστή ασφαλείας» στη μελέτη. Ωστόσο, στις ανάστροφες αναλύσεις στις παραμέτρους αντοχής κρίνεται ότι πρέπει να αντιστοιχούνται οι μέσες τιμές για τη ρεαλιστική προσομοίωση του προβλήματος, καθώς η υιοθέτηση χαρακτηριστικών τιμών μπορεί να μεταβάλλει τα αποτελέσματα εξαιτίας της μη γραμμικότητας του προβλήματος. Έτσι, με βάση τις χαρακτηριστικές τιμές των αντοχών για το σκυρόδεμα και το χάλυβα, οι οποίες ορίζονται στη μελέτη μπορεί υπολογιστούν οι μέσες τιμές, οι οποίες τελικά περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς. Στη συνέχεια, παρατίθεται συνοπτικά η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας των μέτρων άμεσης υποστήριξης για την προσθήκη τους στο αριθμητικό προσομοίωμα.

Κέλυφος Εκτοξευόμενου σκυροδέματος-Μεταλλικά Πλαίσια Lattice Girder

Το κέλυφος της υποστήριξης προσομοιώνεται στο αριθμητικό μοντέλο με στοιχεία δοκού (beam elements) ελαστικής - απολύτως πλαστικής συμπεριφοράς, ισοδύναμης διατομής η οποία έχει δυσκαμψία, δυστένεια και αντοχή ίση τις αντίστοιχες τιμές της σύμμικτης διατομής του εκτ. σκυροδέματος και του μεταλλικού πλαισίου.

$$E_{eq} I_{eq} = E_c I_c + E_s I_s \quad (5-1)$$

$$E_{eq} A_{eq} = E_c A_c + E_s A_s \quad (5-2)$$

όπου:

E_{eq}, E_c, E_s : Μέτρο ελαστικότητας ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

I_{eq}, I_c, I_s : Ροπή αδράνειας ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

A_{eq}, A_c, A_s : Εμβαδόν ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

Τα μεταλλικά πλαίσια Lattice Girder αποτελούνται από 4 ράβδους Φ32, ποιότητας S500 (Μέση τιμή $f_s=545\text{MPa}$), $E_s=200\text{GPa}$ με αξονική απόσταση μεταξύ των ράβδων 0.104m.

Το εμβαδόν και η ροπή αδράνειας του χάλυβα είναι αντίστοιχα:

$$A_s = 4\pi \frac{\Phi^2}{4} = 3.2 \times 10^{-3} \text{m}^2, \text{όπου } \Phi=32\text{mm} \quad (5-3)$$

$$I_s = 4\pi \left(\frac{\Phi^4}{64}\right) + 4 \left(\frac{A_s}{4}\right) \left(\frac{s}{2}\right)^2 = 8.905 \cdot 10^{-6} \text{m}^4, \text{όπου } s=0.104\text{m} \quad (5-4)$$

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει σταδιακή ωρίμανση κατά τη διάρκεια της εξέλιξης των συγκλίσεων, κυρίως στο διάστημα αμέσως μετά την τοποθέτηση του και ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη ανάπτυξη της αντοχής και της δυσκαμψίας του εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής τους. Επομένως, κρίνοντας ότι η προσομοίωση της σταδιακής ωρίμανσης εισάγει ένα σημαντικό παράγοντα αβεβαιότητας στους υπολογισμούς οι παράμετροι του εκτ. σκυροδέματος λαμβάνονται

σταθερές και ελαφρώς μειωμένες σε σχέση με τις προβλεπόμενες τιμές από τη μελέτη: $f_{ck}=25\text{MPa}$ και $E_c=30\text{GPa}$.

Τα αντίστοιχα μεγέθη για το εκτ. σκυρόδεμα είναι:

$$A_c = b \times h - A_s = 0.297\text{m}^2, \text{ όπου } b=1.00\text{m}, h=0.30\text{m} \quad (5-5)$$

$$I_c = \frac{b \times h^3}{12} - I_s = 2.24 \times 10^{-3}\text{m}^4, \text{ όπου } s=0.104\text{m} \quad (5-6)$$

Επομένως τα χαρακτηριστικά της ισοδύναμης σύμμικτης διατομής είναι:

$$E_{eq}I_{eq} = E_c I_c + E_s I_s = 69.01 \text{ MPa} \cdot \text{m}^2 \quad (5-7)$$

$$E_{eq}A_{eq} = E_c A_c + E_s A_s = 9546.89 \text{ MPa} \cdot \text{m}^2 \quad (5-8)$$

Επομένως προκύπτει:

$$h_{eq} = \sqrt{\frac{12E_{eq}I_{eq}}{E_{eq}A_{eq}}} = 0.295\text{m}, E_{eq} = 32414.12\text{MPa} \quad (5-9)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{f_c A_c + f_s A_s}{bh_{ισοδ.}} = 36.2\text{MPa}, \rho_{eq} = 2.5 \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \quad (5-10)$$

Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα- Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο (Invert)

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο προσωρινό ανάστροφο τόξο προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (beam elements) ελαστικής - απολύτως πλαστικής συμπεριφοράς, στα οποία αντιστοιχούνται οι παράμετροι:

$$\rho = 2.5 \text{ Mg/m}^3$$

$$E_{\text{elastic}} = 3 \cdot 10^7 \text{ KPa}$$

$$f_{c,m} = 30 \cdot 10^3 \text{ KPa}$$

Ομπρέλα δοκών προπορείας (Forepole Umbrella)

Η χρήση των δοκών προπορείας, ως στοιχείων βελτίωσης των συνθηκών ευστάθειας του μετώπου, είναι απαραίτητο να προσομοιωθεί κατάλληλα, έτσι ώστε να μπορεί να εκτιμηθούν υπολογιστικά:

- Οι «πρόδρομες» συγκλίσεις, άρα και ο βαθμός χαλάρωσης της βραχόμαζας έμπροσθεν του μετώπου της σήραγγας.
- Οι συνολικές συγκλίσεις, μετά την εκσκαφή και τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.
- Τα μέγιστα εντατικά μεγέθη, τα οποία αναπτύσσονται επί των δοκών, κατά την πρόοδο των εργασιών διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας. Με βάση αυτά τα μεγέθη γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι διαστασιολόγησης των διατομών των δοκών προπορείας, αποσκοπώντας στην ικανοποίηση των βασικών κριτηρίων αντοχής και λειτουργικότητάς τους.

Οι ιδιότητες των δοκών προπορείας που εισήχθησαν στο αριθμητικό μοντέλο συγκεντρώνονται παρακάτω.

Τύπος: Κυκλική Κοιλοδοκός, Φ114/100.1, ανά 0.40m

Ποιότητα Χάλυβα: Fe360, $\sigma_{yield}=235\text{MPa}$

$$\rho=7.85 \text{ Mg/m}^3$$

$$E_{elastic}=2 \cdot 10^8 \text{ KPa}$$

$$f_{s,m}=255 \cdot 10^3 \text{ KPa}$$

Αγκύρια μετώπου (Fiberglass)

Οι ιδιότητες των αγκυρίων μετώπου συγκεντρώνονται παρακάτω:

$$\rho=1.8 \text{ Mg/m}^3$$

$$E_{elastic}=1 \cdot 10^8 \text{ KPa}$$

$$f_{s,m}=800 \cdot 10^3 \text{ KPa}$$

Αγκύρια βράχου (τύπου Swellex)

Η διατομή άμεσης υποστήριξης περιλαμβάνει τρία διαφορετικά είδη αγκυρίων μήκους $L=6\text{m}$, σε πεσσοειδή κάρναβο 1.0m (κατά πλάτος) $\times 1.00\text{m}$ (κατά μήκος) στις παρειές (2 & 1 τεμάχια ανά δύο δακτυλίου), μήκους $L=8\text{m}$ στη βάση της Α' φάσης (2 & 2 τεμάχια ανά δύο δακτυλίου) και μήκους $L=4\text{m}$ στις παρειές της βαθμίδας (2 & 2 τεμάχια ανά δύο δακτυλίου) και πλήρως πακτωμένα σε όλο τους το μήκος, διαμέτρου 25mm και φέρουσας ικανότητας $10\text{t} \div 20\text{t}$. Τα αγκύρια στις αριθμητικές αναλύσεις προσομοιώνονται με στοιχεία δικτυώματος (truss elements) ελαστικής - απολύτως πλαστικής συμπεριφοράς. Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοίλης διατομής, υπολογίζεται το εμβαδόν της καθαρής διατομής χάλυβα, και κατόπιν από τη μέγιστη δύναμη που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο αγκυρίου υπολογίζεται η τιμή της οριακής τάσης διαρροής. Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά της κάθε ομάδας αγκυρίων ήταν τα εξής:

Ομάδα αγκυρίων μήκους 4m: Παθητικές αγκυρώσεις ολόσωμης πάκτωσης Φ25, Φέρουσας Ικανότητας 100KN , μήκους 4m , ανά 1m .

$$\rho=7.85 \text{ Mg/m}^3$$

$$E_{elastic}=2 \cdot 10^8 \text{ KPa}$$

$$f_{s,m}=100\text{KN}/(\pi \cdot d^2/4)=203.72 \cdot 10^3 \text{ KPa}$$

Ομάδα αγκυρίων μήκους 6m: Παθητικές αγκυρώσεις ολόσωμης πάκτωσης Φ25, Φέρουσας Ικανότητας 150KN , μήκους 6m , ανά 1m .

$$\rho=7.85 \text{ Mg/m}^3$$

$$E_{elastic}=2 \cdot 10^8 \text{ KPa}$$

$$f_{s,m}=150\text{KN}/(\pi \cdot d^2/4)=305.56 \cdot 10^3 \text{ KPa}$$

Ομάδα αγκυρίων μήκους 8m: Παθητικές αγκυρώσεις ολόσωμης πάκτωσης Φ25, Φέρουσας Ικανότητας 200kN, μήκους 8m, ανά 1m.

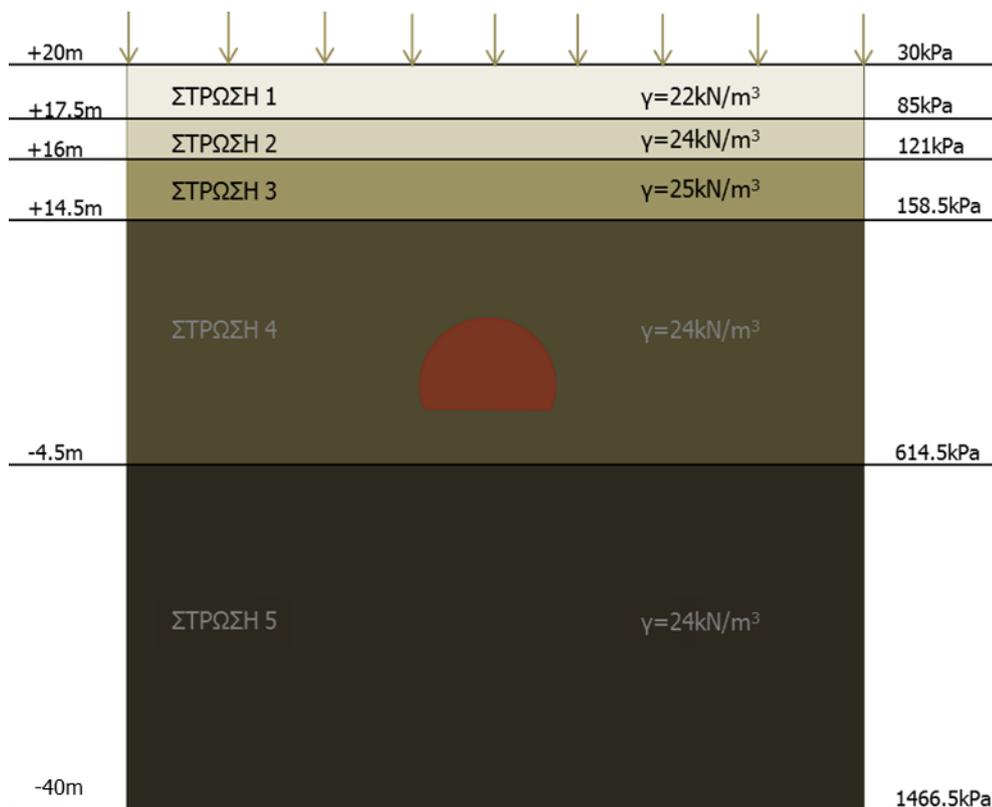
$$\rho = 7.85 \text{ Mg/m}^3$$

$$E_{\text{elastic}} = 2 \cdot 10^8 \text{ KPa}$$

$$f_{s,m} = 200 \text{ kN} / (\pi \cdot d^2 / 4) = 407.44 \cdot 10^3 \text{ KPa}$$

5.3.2 Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των γεωυλικών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η περιοχή μελέτης έχει διαχωριστεί σε πέντε στρώσεις διαφορετικών σχηματισμών καθ' ύψος του προσομοιώματος. Οι σχηματισμοί εμφανίζουν διαφορετικές παραμέτρους αντοχής και όπως είναι λογικό και διαφορετικά ειδικά βάρη (γ). Προκειμένου να προσομοιωθεί η ισοδύναμη πίεση η οποία ασκείται στο άνω τμήμα του προσομοιώματος, υπολογίστηκε πόσο είναι το φορτίο που μεταβιβάζεται από κάθε στρώση στην κατώτερή της. Τα ειδικά βάρη των σχηματισμών, όπως και τα αντίστοιχα φορτία που μεταβιβάζονται παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5-27: Ισοδύναμη πίεση που ασκείται στο άνω τμήμα του προσομοιώματος με βάση τα ειδικά βάρη των σχηματισμών.

Προκύπτει το ισοδύναμο φορτίο των 1466.5kPa το οποίο θα τεθεί στο γεωστατικό βήμα των αναλύσεων.

Κριτήρια Αστοχίας Υλικών

Η συμπεριφορά των γεωυλικών στις αριθμητικές αναλύσεις θεωρήθηκε ελαστική - απολύτως πλαστική και η αντοχή του ποσοτικοποιήθηκε μέσω του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας της κάθε βραχόμαζας υιοθετήθηκαν οι σχέσεις που προτείνονται από τους Hoek et al. (2002) και Hoek & Diederichs (2006). Το εκτοξευόμενο σκυροδέμα της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό.

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζεται το φάσμα των παραμέτρων και των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση των ανάστροφων αριθμητικών αναλύσεων. Αρχικά δόθηκαν εύρη τιμών μόνο για τη στρώση 4. Για τις υπόλοιπες στρώσεις επιλέχθηκαν οι παράμετροι ως συνδυασμός των παραμέτρων που όριζαν τα στοιχεία μελέτης (λαμβάνοντας υπόψη και τη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του έργου) και τα στοιχεία της κατασκευής του έργου.

Οι στρώσεις 1, 2 και 3 λαμβάνουν τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται στους παρακάτω πίνακες και θεωρείται ότι διατηρούν αυτές τις τιμές σταθερές σε όλες τις ανάστροφες αναλύσεις, προκειμένου να προσδιορισθούν οι τιμές των παραμέτρων της στρώσεως 4.

Πίνακας 5-2: Παράμετροι σχηματισμών που εισήχθησαν στις ανάστροφες αναλύσεις – [Στρώση 1].

ΣΤΡΩΣΗ 1		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	
Παράμετροι	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Ισοδύναμη συνοχή (Mohr-Coulomb)	c	10	kPa
Ισοδύναμη γωνία τριβής (Mohr-Coulomb)	ϕ	30	($^{\circ}$)
Ειδικό βάρος γεωυλικού	γ	22	kN/m ³
Διαστολικότητα	δ	3	($^{\circ}$)
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχόμαζας	E_m	30	MPa
Λόγος Poisson βραχόμαζας	ν_m	0.3	-
Πάχος εκτ. σκυροδέματος	d_{shot}	0.3	m

Πίνακας 5-3: Παράμετροι σχηματισμών που εισήχθησαν στις ανάστροφες αναλύσεις – [Στρώση 2].

ΣΤΡΩΣΗ 2		ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ		
Παράμετροι	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες	
Ισοδύναμη συνοχή (Mohr-Coulomb)	c	50	kPa	
Ισοδύναμη γωνία τριβής (Mohr-Coulomb)	ϕ	40	(°)	
Ειδικό βάρος	γ	24	kN/m ³	
Διαστολικότητα	δ	4	(°)	
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας	E_m	500	MPa	
Λόγος Poisson βραχώμαζας	ν_m	0.3	-	
Πάχος εκτ. σκυροδέματος	d_{shot}	0.3	m	

Πίνακας 5-4: Παράμετροι σχηματισμών που εισήχθησαν στις ανάστροφες αναλύσεις – [Στρώση 3].

ΣΤΡΩΣΗ 3		ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ		
Παράμετροι	Συμβολισμός	Εύρος	Μονάδες	
Ισοδύναμη συνοχή (Mohr-Coulomb)	c	200	kPa	
Ισοδύναμη γωνία τριβής (Mohr-Coulomb)	ϕ	45	(°)	
Γεωλογικός Δείκτης αντοχής	GSI	60-80	-	
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σ_{ci}	15	MPa	
Σταθερά Υλικού	m_i	19	-	
Ειδικό βάρος	γ	25	kN/m ³	
Διαστολικότητα	δ	4	(°)	
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας	E_m	1000	MPa	
Λόγος Poisson βραχώμαζας	ν_m	0.3	-	
Πάχος εκτ. σκυροδέματος	d_{shot}	0.3	m	

Πίνακας 5-5: Παράμετροι σχηματισμών που εισήχθησαν στις ανάστροφες αναλύσεις – [Στρώση 4 strong].

ΣΤΡΩΣΗ 4		ΕΝΑΛΛΑΓΕΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ ΜΕ ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟ	
ΙΣΧΥΡΟΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ·STRONG			
Παράμετροι	Συμβολισμός	Εύρος	Μονάδες
Ισοδύναμη συνοχή (Mohr-Coulomb)	c	100	kPa
Ισοδύναμη γωνία τριβής (Mohr-Coulomb)	φ	45	($^{\circ}$)
Γεωλογικός Δείκτης αντοχής	GSI	40	-
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σ_{ci}	10-15	MPa
Σταθερά Υλικού	m_i	10-11	-
Ειδικό βάρος	γ	24	kN/m ³
Διαστολικότητα	δ	4	($^{\circ}$)
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας	E_m	600-1500	MPa
Λόγος Poisson βραχώμαζας	ν_m	0.3	-
Πάχος εκτ. σκυροδέματος	d_{shot}	0.3	m

Πίνακας 5-6: Παράμετροι σχηματισμών που εισήχθησαν στις ανάστροφες αναλύσεις – [Στρώση 4 weak].

ΣΤΡΩΣΗ 4		ΕΝΑΛΛΑΓΕΣ ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ	
ΑΣΘΕΝΕΣΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ·WEAK			
Παράμετροι	Συμβολισμός	Εύρος	Μονάδες
Ισοδύναμη συνοχή (Mohr-Coulomb)	c	70-120	kPa
Ισοδύναμη γωνία τριβής (Mohr-Coulomb)	φ	35-45	($^{\circ}$)
Γεωλογικός Δείκτης αντοχής	GSI	20-30	-
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σ_{ci}	5-10	MPa
Σταθερά Υλικού	m_i	9-11	-
Ειδικό βάρος	γ	24	kN/m ³
Διαστολικότητα	δ	4	($^{\circ}$)
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας	E_m	400-800	MPa
Λόγος Poisson βραχώμαζας	ν_m	0.3	-
Πάχος εκτ. σκυροδέματος	d_{shot}	0.3	m

Η στρώση 4 έχει διαχωριστεί σε 2 ενότητες με διαφορετικά εύρη παραμέτρων τα οποία αναφέρονται στους ανωτέρω πίνακες. Επισημαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας της ισχυρότερης ενότητας, στο αριθμητικό προσομοίωμα λαμβάνει τιμές από $E=600\div 1500\text{MPa}$ ενώ το μέτρο ελαστικότητας της ασθενέστερης ενότητας λαμβάνει τιμές από $E=400\div 800\text{MPa}$. Στο πρώτο στάδιο των ανάστροφων αναλύσεων η στρώση 4 θα θεωρηθεί ότι αποτελείται από μία ενότητα, την ισχυρότερη, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση κατά τη μεταβολή των παραμέτρων. Στη συνέχεια εφόσον ορισθούν οι αντιπροσωπευτικές τιμές των παραμέτρων για την ισχυρή ενότητα θα πραγματοποιηθούν τριδιάστατες αναλύσεις και με τις 2 ενότητες πλέον, διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους της ισχυρότερης ενότητας και μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της ασθενέστερης.

Πίνακας 5-7: Παράμετροι σχηματισμών που εισήχθησαν στις ανάστροφες αναλύσεις – [Στρώση 5].

ΣΤΡΩΣΗ 5		ΕΝΑΛΛΑΓΕΣ ΜΕΤΑΪΛΟΛΙΘΟΥ-ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ	
Παράμετροι	Συμβολισμός	Εύρος	Μονάδες
Ισοδύναμη συνοχή (Mohr-Coulomb)	c	30	kPa
Ισοδύναμη γωνία τριβής (Mohr-Coulomb)	φ	27	($^{\circ}$)
Γεωλογικός Δείκτης αντοχής	GSI	15	-
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σ_{ci}	5	MPa
Σταθερά Υλικού	m_i	5	-
Ειδικό βάρος	γ	24	kN/m ³
Διαστολικότητα	δ	3	($^{\circ}$)
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας	E_m	450	MPa
Λόγος Poisson βραχώμαζας	ν_m	0.3	-
Πάχος εκτ. σκυροδέματος	d_{shot}	0.3	m

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης 5 θεωρήθηκε αυξημένο κατά 3 έως 5 φορές σε σχέση με την αρχική του τιμή, ώστε να ληφθεί υπόψη η δυσκαμψία του σχηματισμού λόγω της αποφόρτισης. Οι τιμές των παραμέτρων της στρώσεως 5 διατηρούνται σταθερές.

6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Έχοντας περιγράψει τη διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για το σχεδιασμό του αριθμητικού προσομοιώματος, σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των ανάστροφων παραμετρικών αναλύσεων. Απώτερος σκοπός των αναλύσεων είναι ο προσδιορισμός εύλογων γεωτεχνικών παραμέτρων του γεωυλικού εντός του οποίου διανοίγεται η σήραγγα, βάσει των οποίων θα προκύπτουν φορτία στην άμεση υποστήριξη της διατομής που θα συγκλίνουν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τις επί τόπου μετρήσεις.

Αρχικά, για την εύρεση των αντιπροσωπευτικών γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων σημαντικό ρόλο διαδραματίζει τόσο η μελέτη των καθιζήσεων που προκαλούνται κατά τη διάνοξη του έργου, όσο και των πιέσεων που ασκούνται περιμετρικά του κελύφους της διατομής άμεσης υποστήριξης. Κατά την μελέτη των στοιχείων του έργου, τα οποία παραχωρήθηκαν από την Αττικό Μετρό, διαπιστώθηκε ότι έχουν προκύψει πολύ μικρές τιμές καθιζήσεων χάρη στις καλές ιδιότητες των περισσότερων σχηματισμών που διέπουν την περιοχή. Για το λόγο αυτό κρίθηκε δύσκολη η αντιπαραβολή των καθιζήσεων που θα προκύψουν από τις ανάστροφες αναλύσεις με τις καθιζήσεις που μετρήθηκαν επί τόπου. Συνεπώς, οι αναλύσεις θα μελετηθούν με γνώμονα τις πιέσεις που θα προκύψουν επί του κελύφους της άμεσης υποστήριξης περί τη διατομή της σήραγγας.

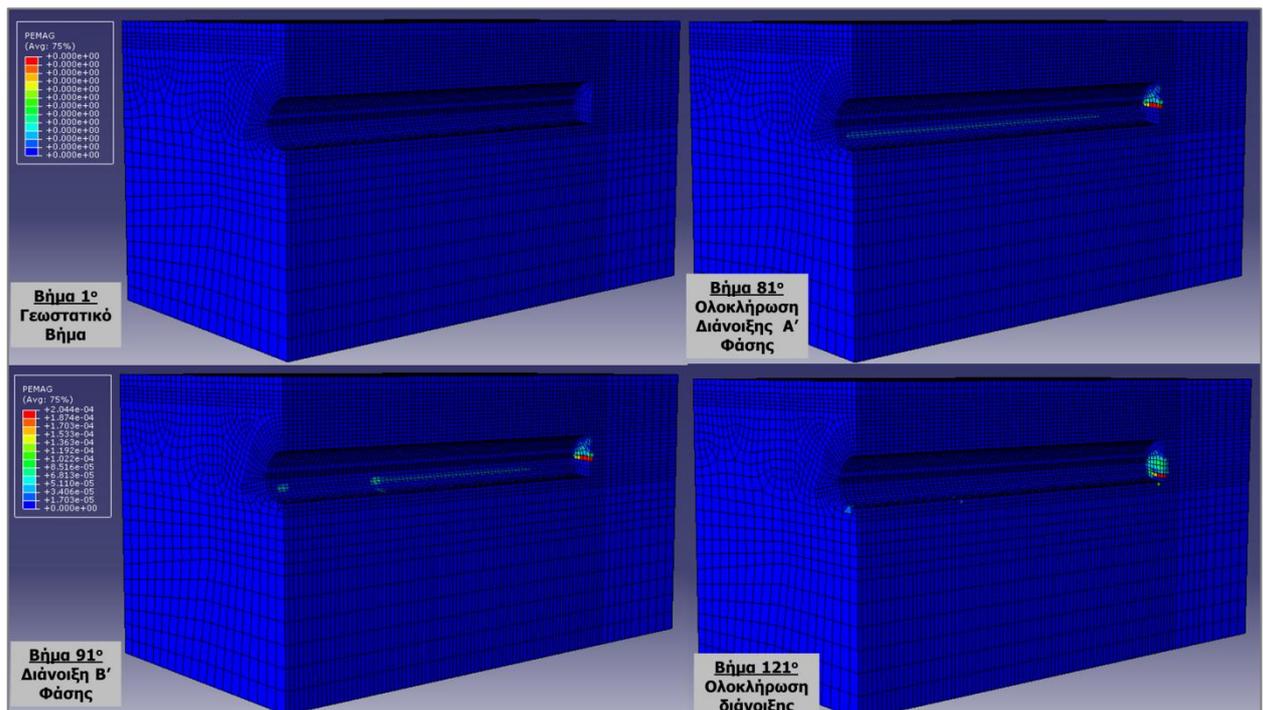
Αναμφισβήτητα, οι γεωτεχνικές παράμετροι αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στη συμπεριφορά των πιέσεων του κελύφους. Ωστόσο, εξαιτίας των αβεβαιοτήτων που υπήρχαν λόγω της πολυπλοκότητας του σχηματισμού εντός του οποίου διανοίγεται η σήραγγα πραγματοποιήθηκαν τρεις ομάδες αριθμητικών αναλύσεων. Στην πρώτη έγινε θεώρηση αμιγώς καλού σχηματισμού διάνοξης ούτως ώστε να διερευνηθεί αρχικά η συμπεριφορά των πιέσεων μεταβάλλοντας κάθε μια από τις γεωτεχνικές παραμέτρους χωριστά, ενώ στην δεύτερη λήφθηκε υπόψη και η ασθενέστερη μορφή του σχηματισμού. Στην τρίτη ομάδα αναλύσεων αφού οδηγηθήκαμε στις γεωτεχνικές παραμέτρους που δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, θεωρήθηκε σταδιακή κατασκευή του Ε.Σ. με αύξηση των ιδιοτήτων του καθώς προχωράει το μέτωπο.

Για την ορθότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αρχικά θα αναλυθεί ο τρόπος και η μορφή που ελήφθησαν από το χρησιμοποιηθέν λογισμικό και έπειτα μέσω εικόνων και διαγραμμάτων θα ακολουθήσει ποιοτική και ποσοτική περιγραφή αυτών.

6.1 ΠΟΙΟΤΙΚΗ – ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Προτού παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων κρίνεται αναγκαίο σε πρώτη φάση να πραγματοποιηθεί παρουσίαση κάποιων βασικών μεγεθών που μπορούν να δοθούν από τον κώδικα FEM Abaqus όσον αφορά στη μορφή των εντατικών μεγεθών κατά μήκος του προσομοιώματος, των πλαστικών παραμορφώσεων στα στοιχεία αυτού όπως και γενικότερες πληροφορίες και παρατηρήσεις για την διεξαγωγή των αναλύσεων. Ουσιαστικά, γίνεται περιγραφή της διαδικασίας με την οποία έγινε ο πρωτογενής έλεγχος και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων στα αντιπροσωπευτικά βήματα της εκσκαφής.

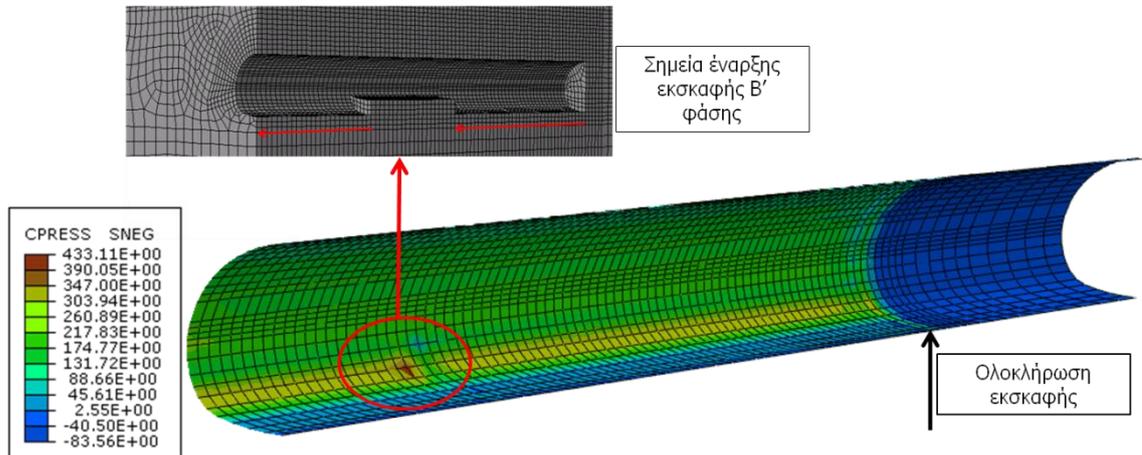
Αρχικά, λαμβάνονται χαρακτηριστικές εικόνες στις οποίες φαίνεται η μεταβολή των πλαστικών παραμορφώσεων όπως αυτές αναπτύσσονται στα πεπερασμένα στοιχεία της διατομής, με τη σταδιακή πρόοδο διάνοιξης της σήραγγας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το 1^ο βήμα στο οποίο δεν έχει ξεκινήσει η εκσκαφή, οπότε απεικονίζεται η αρχική κατάσταση, το βήμα 81^ο όπου έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή της Α' Φάσης και τα βήματα εκσκαφής και ολοκλήρωσης της Β' Φάσης (Βήμα 91^ο και Βήμα 121^ο). Για την διευκόλυνση της παρουσίασης έχουν αφαιρεθεί τα στοιχεία των εκσκαφών Α' και Β' οπότε παρατηρείται ότι όλοι οι σχηματισμοί του προσομοιώματος και τα στοιχεία περιμετρικά της διατομής εμφανίζουν πολύ μικρές τιμές πλαστικών παραμορφώσεων, συνεπώς δεν αστοχούν.



Σχήμα 6-1: Προσομοίωση των πλαστικών παραμορφώσεων σε όλο το αριθμητικό προσομοίωμα με σταδιακή αφαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων εντός τη διατομής εκσκαφής.

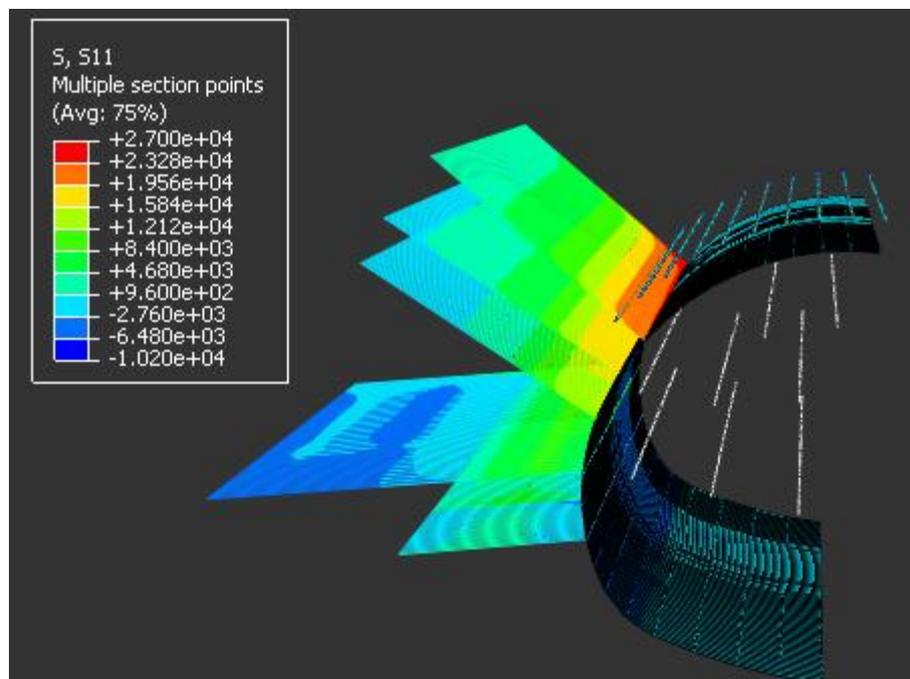
Γενικά παρατηρείται μεταβολή των πλαστικών παραμορφώσεων με την πρόοδο των εργασιών. Οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στα άκρα του δαπέδου της διατομής στη Β' φάση εκσκαφής και αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στο τελικό μέτωπο της διάνοιξης, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, όπου έχουν αφαιρεθεί τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και η διατομή έχει ισορροπήσει. Γενικά οι τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων είναι πάρα πολύ μικρές.

φάσης εκσκαφής, ενώ τοπικά στο σημείο $y=24\text{m}$ εμφανίζεται η μέγιστη πίεση, καθώς εκεί συναντιούνται τα δύο μέτωπα της Β' φάσης εκσκαφής της σήραγγας. Συγκεκριμένα, σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται το πρώτο τμήμα της Β' φάσης εκσκαφής (από $y=80\text{m}$ έως $y=24\text{m}$) και ταυτόχρονα ξεκινάει η εκσκαφή του δεύτερου τμήματος της Β' φάσης (από $y=24\text{m}$ έως $y=0\text{m}$).



Σχήμα 6-4: Φορτία στο κέλυφος της σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής.

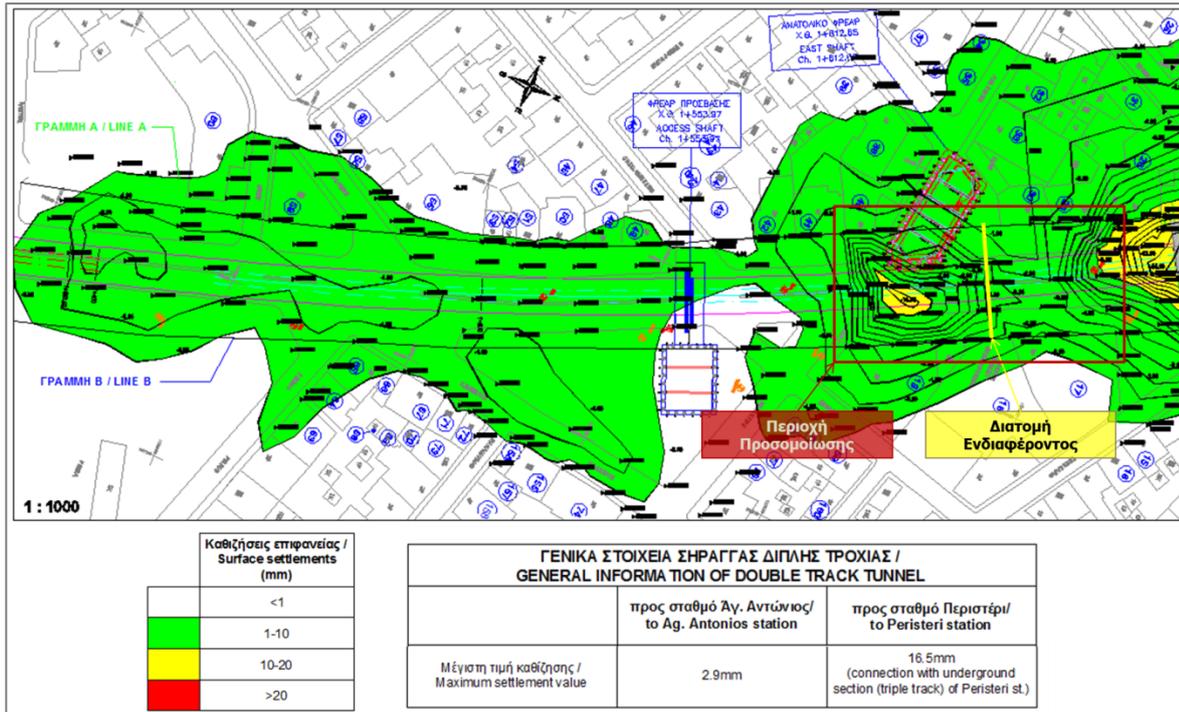
Τέλος, ενδεικτικά παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις στα στοιχεία των αγκυριών βράχου, μετώπου και στην ομπρέλα δοκών προπορείας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις κυμαίνονται γενικά στα κάτω όρια του υπομνήματος (σχεδόν μηδενικές τιμές) και απέχουν από την αστοχία. Την μεγαλύτερη καταπόνηση φαίνεται να την δέχεται η πρώτη σειρά αγκυριών μήκους 6m.



Σχήμα 6-5: Αξονικές Δυνάμεις στα στοιχεία αγκυριών, ομπρέλας δοκού προπορείας και αγκυριών μετώπου μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής.

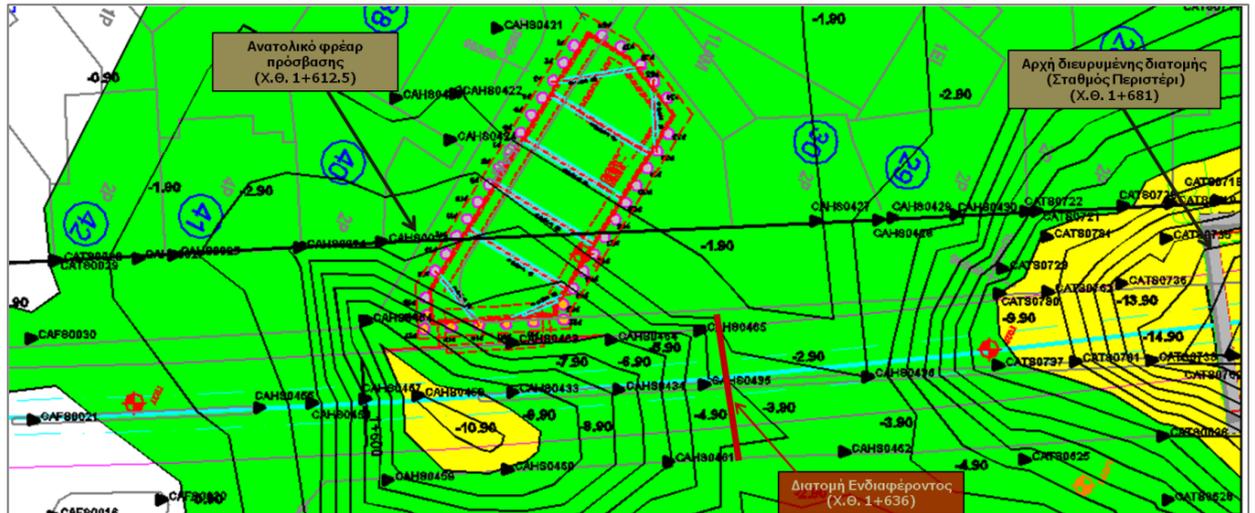
6.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Για τη μελέτη των πιέσεων στο κέλυφος της διατομής της άμεσης υποστήριξης είναι σημαντική η διερεύνηση των καθιζήσεων που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια και μετά την εκσκαφή της σήραγγας διπλής τροχιάς. Σύμφωνα με τα σχέδια της κατασκευής της σήραγγας που μελετάται, (Κατασκευή-7, αναφορά στην παράγραφο 3.1), οι μέγιστες τιμές καθιζήσεων οι οποίες μετρήθηκαν κατά τη γεωδομητική παρακολούθηση του έργου ήταν της τάξεως των 10-20mm. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται το διάγραμμα των καθιζήσεων επιφάνειας κατά μήκος του άξονα διάνοιξης.



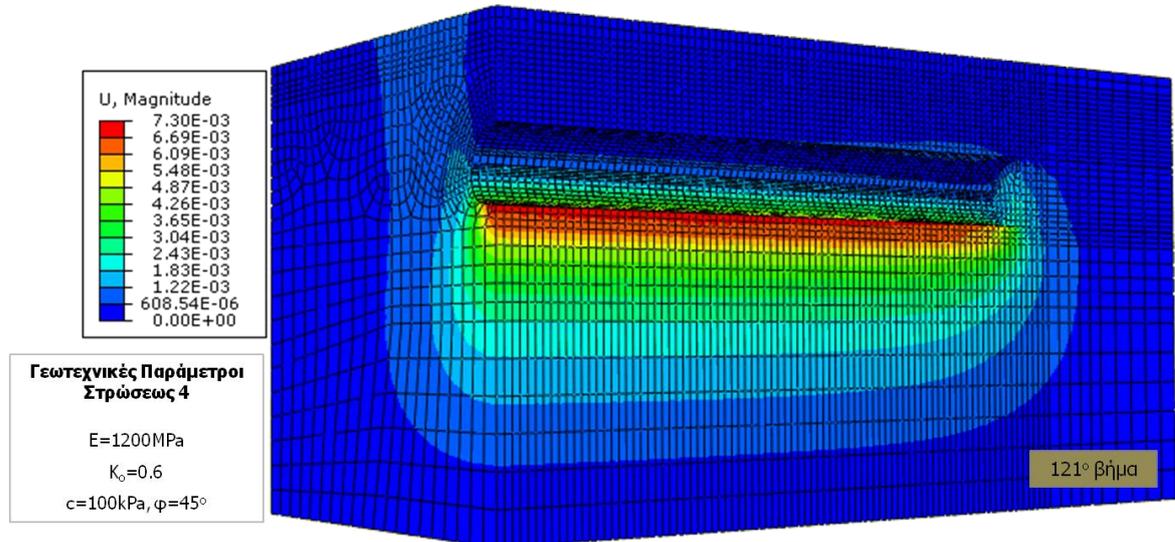
Σχήμα 6-6: Καθιζήσεις επιφάνειας όπως μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας διπλής τροχιάς. [Στοιχεία από Κατασκευή-7].

Στο Σχήμα 6-7 επισημαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος και οι γειτονικές περιοχές του έργου. Παρατηρούμε ότι στη θέση σύνδεσης της σήραγγας διπλής τροχιάς με τη διευρυμένη διατομή του σταθμού "Περιστερί" οι καθιζήσεις λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους η οποία είναι 16.5mm. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι παρά την γειτνίαση του έργου με το ανατολικό φρέαρ πρόσβασης δεν υπάρχει μεγάλη αύξηση στις τιμές των καθιζήσεων όπως επίσης και των πιέσεων (Σχήμα 6-12) σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της Γεωδομητικής Παρακολούθησης.



Σχήμα 6-7: Καθιζήσεις επιφανείας στη διατομή ενδιαφέροντος και πλησίον αυτής, όπως μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας διπλής τροχιάς. [Στοιχεία από Κατασκευή-7].

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ολικές μετακινήσεις με το τέλος της εκσκαφής της σήραγγας, οι οποίες διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα όπως και στο επί τόπου έργο. Όσον αφορά στην κατανομή τους είναι εμφανές ότι οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στο δάπεδο κατά μήκος της διάνοιξης και σταδιακά απομειώνονται όσο απομακρυνόμαστε από αυτό. Αυτό συμβαίνει διότι στην άνω ημιδιατομή έχουν τοποθετηθεί δύσκαμπτα μέτρα υποστήριξης (ομπρέλα δοκών προπορείας, αγκύρια βράχου) τα οποία δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη μετακινήσεων στην βραχώμαζα.

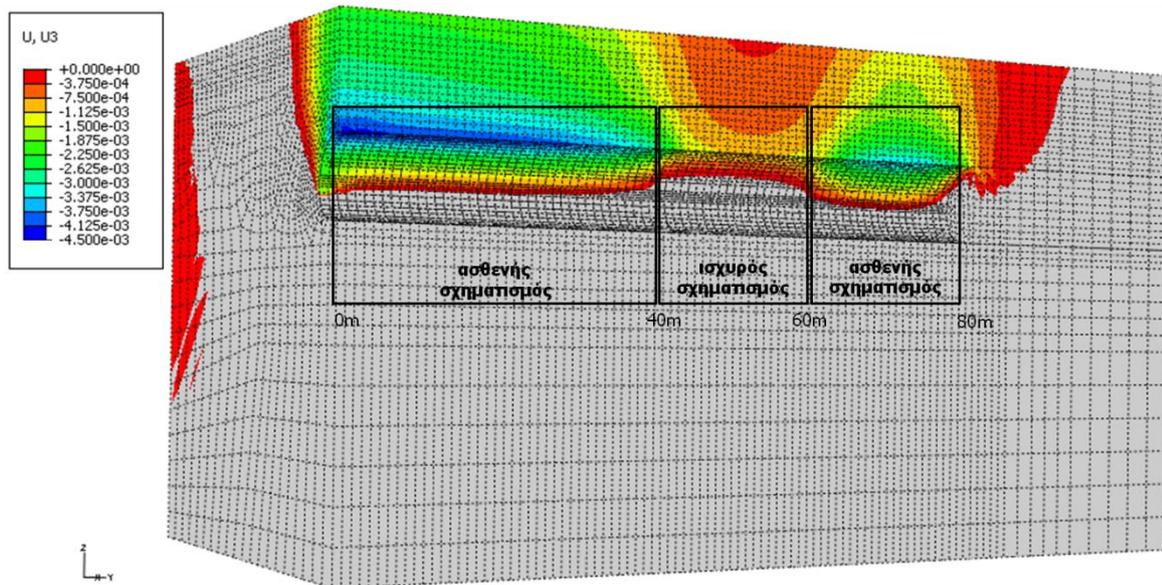


Σχήμα 6-8: Προσομοίωση των ολικών μετακινήσεων του αριθμητικού προσομοιώματος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής.

Ακολούθως, εξετάστηκε η κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων σε όλο το γεωλικό του προσομοιώματος. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται πώς διαμορφώνονται οι καθιζήσεις με την προχώρηση του μετώπου της σήραγγας. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-9 στα σημεία όπου η στρώση που διανοίγεται η σήραγγα εμφανίζει χαμηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά οι καθιζήσεις εξαπλώνονται περισσότερο σε αντίθεση με τα σημεία όπου επικρατεί η ισχυρότερη ενότητα του σχηματισμού. Ωστόσο, είναι προφανές ότι λόγω της άμεσης υποστήριξης που έχει τοποθετηθεί σε

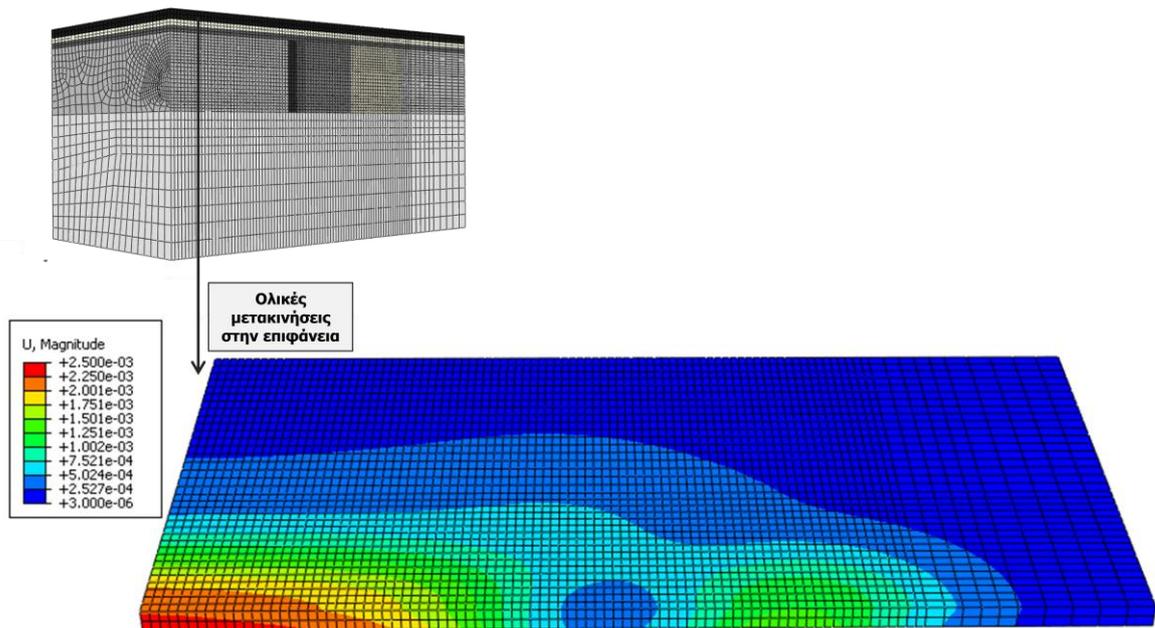
όλο το μήκος διάνοιξης, οι καθιζήσεις διατηρούν μικρές τιμές και είναι εντός επιτρεπτών ορίων. Στην επιφάνεια ειδικά η τιμή τους φτάνει μέχρι 2.5mm, δηλαδή εντός του εύρους τιμών με τις πραγματικές μετρήσεις.

Επίσης, υπενθυμίζεται ότι η προσομοίωση έχει γίνει με βάση το μοντέλο Mohr – Coulomb όπου θεωρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας διατηρείται σταθερό και μετά την αφαίρεση (αποφόρτιση) του υλικού εκσκαφής, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σε ορισμένα σημεία κατακόρυφες μετακινήσεις υπό τη μορφή ανυψώσεων κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα και οφείλεται σε ζητήματα προσομοίωσης.



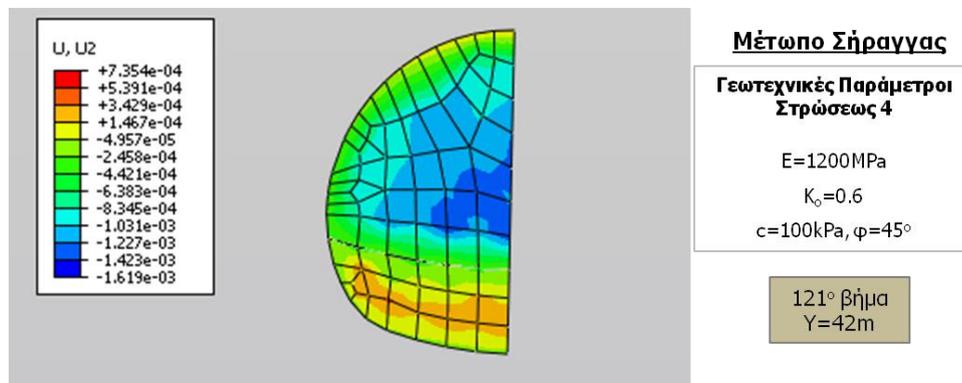
Σχήμα 6-9: Κατακόρυφες μετακινήσεις αριθμητικού προσομοιώματος όταν έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή της σήραγγας.

Επιπρόσθετα, μελετώνται οι ολικές μετακινήσεις στην ανώτερη στρώση του προσομοιώματος. Γενικά, προκύπτει συγκεντρωμένη αύξηση των μετακινήσεων στα σημεία όπου επικρατεί η ασθενής ενότητα του σχηματισμού πλησίον της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας. Ωστόσο, η μέγιστη τιμή των μετακινήσεων διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό επιβεβαιώνει τη μικρή επιρροή της κατασκευής στο περιβάλλον γεωυλικό, καθώς οι ανώτεροι σχηματισμοί της περιοχής χαρακτηρίζονται από καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως είχε προκύψει από τα στοιχεία της μελέτης και της κατασκευής του έργου, οπότε ουσιαστικά λειτουργούν σαν φυσική ομπρέλα προπορείας και δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη καθιζήσεων.



Σχήμα 6-10: Ολικές μετακινήσεις στην επιφάνεια του αριθμητικού προσομοιώματος με την ολοκλήρωση της εκσκαφής.

Τέλος, προκειμένου να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα των μετακινήσεων και κάθετα στο μέτωπο διάνοιξης, παρουσιάζεται η εξώθηση του μετώπου ένα μέτρο πριν την διατομή ενδιαφέροντος (Χ.Θ 1+636) η οποία εμφάνισε γενικά πολύ μικρές τιμές. Σε κάθε περίπτωση τα προφίλ των μετώπων δεν ενέχουν κινδύνους αστοχίας.

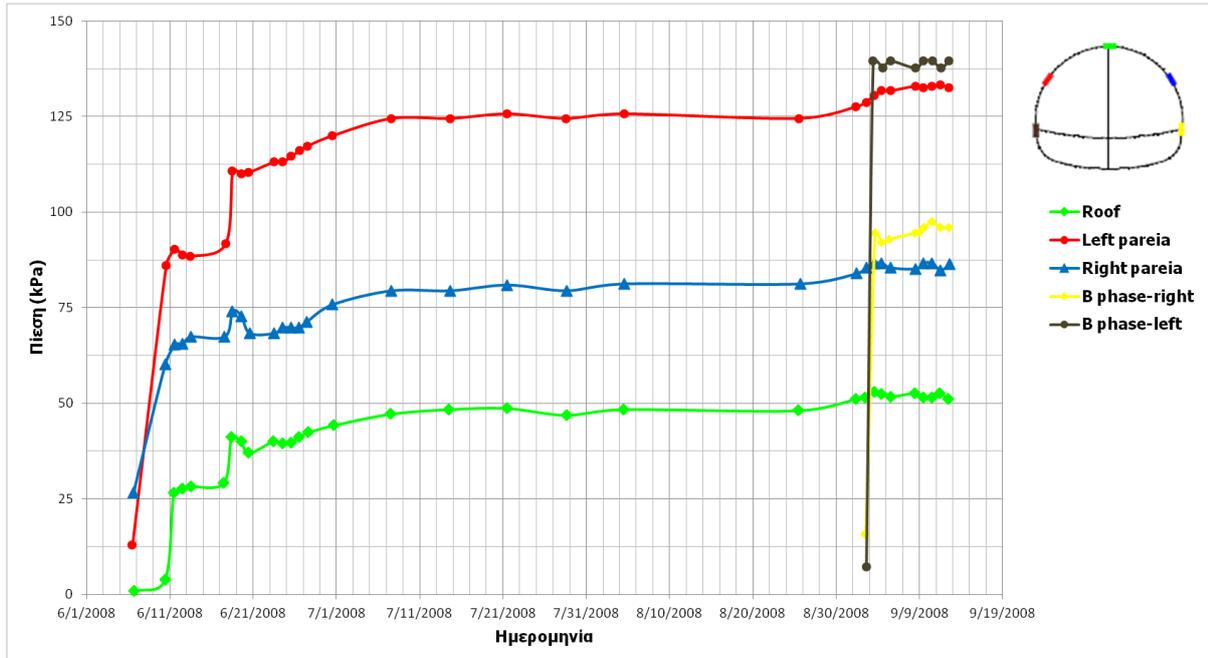


Σχήμα 6-11: Εξώθηση μετώπου του αριθμητικού προσομοιώματος λίγο πριν τη διατομή ενδιαφέροντος.

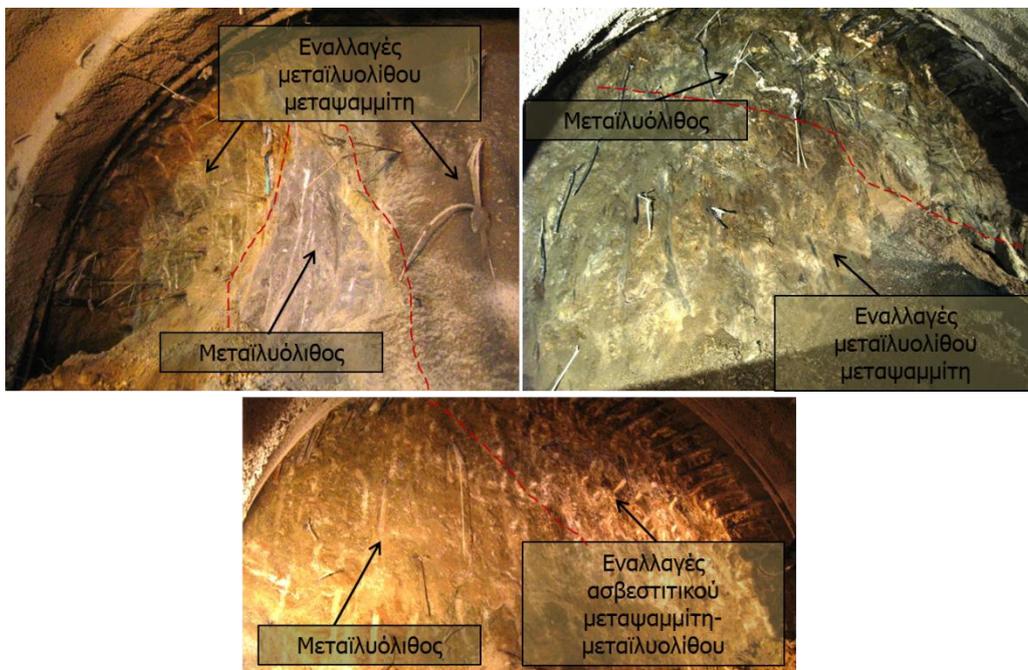
6.3 ΠΙΕΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Με σκοπό τον προσδιορισμό των τιμών των πιέσεων, που θα αποτελούν το κριτήριο των ανάστροφων αναλύσεων έγινε επεξεργασία των μετρήσεων των κυσέλων πίεσης που έχουν ληφθεί από τα στοιχεία της γεωδομητικής παρακολούθησης (ΓΔΠ) του Αττικό Μετρό. Αρχικά, με χρήση του προγράμματος Getdata ψηφιοποιήθηκαν τα διαγράμματα των πιέσεων σε συνάρτηση με την ημερομηνία μέτρησής τους καθώς και η απόσταση προχώρησης από το μέτωπο συναρτήσε των ημερομηνιών διάνοιξης. Προέκυψε το διάγραμμα που ακολουθεί στο οποίο παρατηρείται ότι οι πιέσεις που θα πρέπει να επιτευχθούν στην παρεία κυμαίνονται στο εύρος τιμών 75-125kPa μετά το τέλος της διάνοιξης. Το εύρος είναι μεγάλο καθώς οι τιμές της αριστερής παρειάς διαφέρουν αρκετά

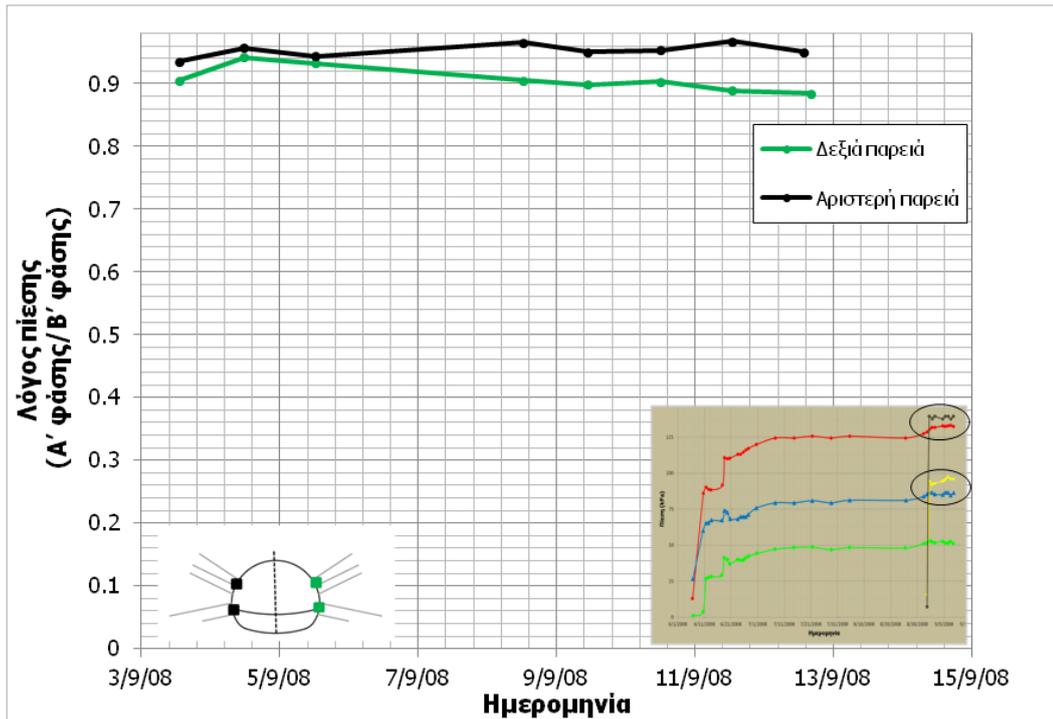
από τις αντίστοιχες της δεξιάς λόγω της ετερογένειας του σχηματισμού, όπως προέκυψε και από τις χαρτογραφήσεις του μετώπου (Σχήμα 6-14). Στην οροφή της διατομής οι πιέσεις κυμαίνονται γύρω στα 50kPa. Γενικά, παρατηρείται ότι ο λόγος των τιμών των πιέσεων της αριστερής παρειάς στην Α και Β φάση όπως και ο λόγος των τιμών των πιέσεων της δεξιάς παρειάς στην Α και Β φάση αντίστοιχα, εμφανίζουν ίδια κατανομή και σταθερό λόγο τιμών ίσο με ~ 0.93 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-14, το οποίο επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των μετρήσεων.



Σχήμα 6-12: Φορτία κυψελών πίεσης άμεσης υποστήριξης (Χ.Θ. 1+636).

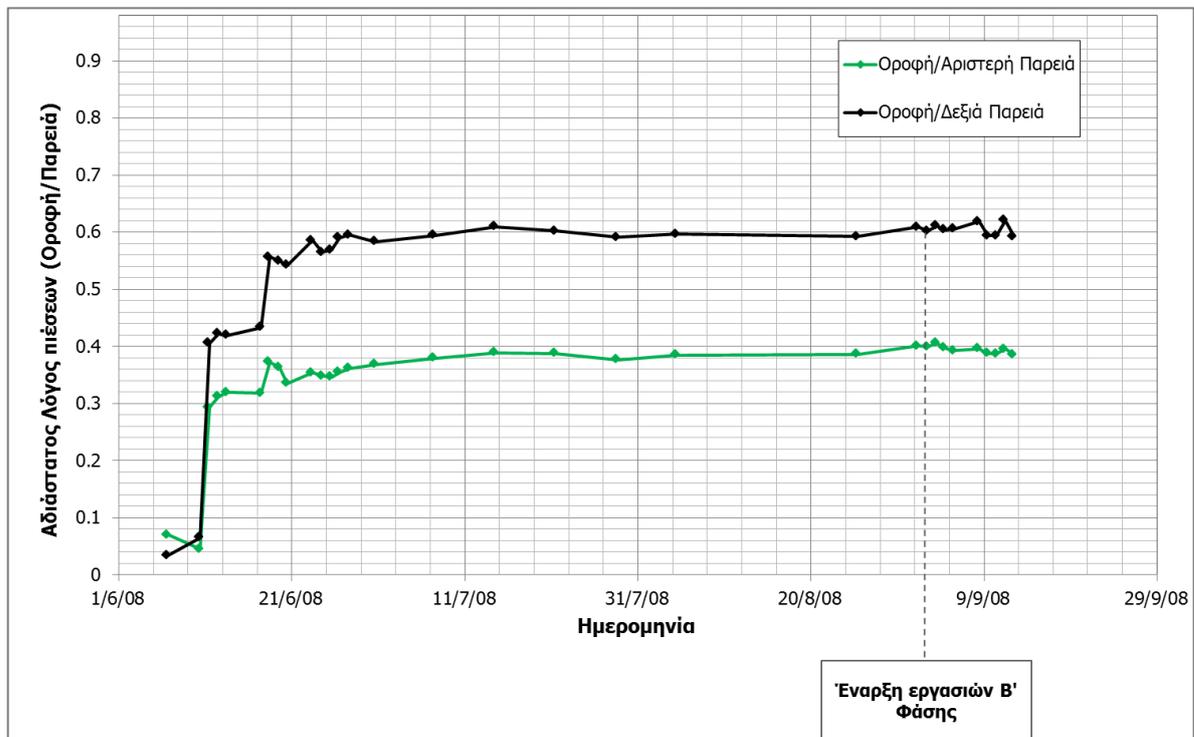


Σχήμα 6-13: Επαφές σχηματισμών όπως συναντήθηκαν στα μέτωπα κατά τη διάνοιξη. [Στοιχεία από Κατασκευή-4]



Σχήμα 6-14: Λόγος τιμών πίεσης κυψελών αριστερής και δεξιάς παρειάς αντίστοιχα (Χ.Θ. 1+636).

Ακόμα συγκρίνοντας τις πιέσεις που μετρήθηκαν στην οροφή με τις πιέσεις που μετρήθηκαν στην παρειά της διατομής, για την αριστερή και τη δεξιά παρειά αντίστοιχα, προκύπτει ότι η κατανομή τους είναι σταθερή, ενώ μεταβάλλονται μόνο οι τιμές των πιέσεων. Το διάγραμμα που ακολουθεί επαληθεύει την αξιοπιστία των μετρήσεων.



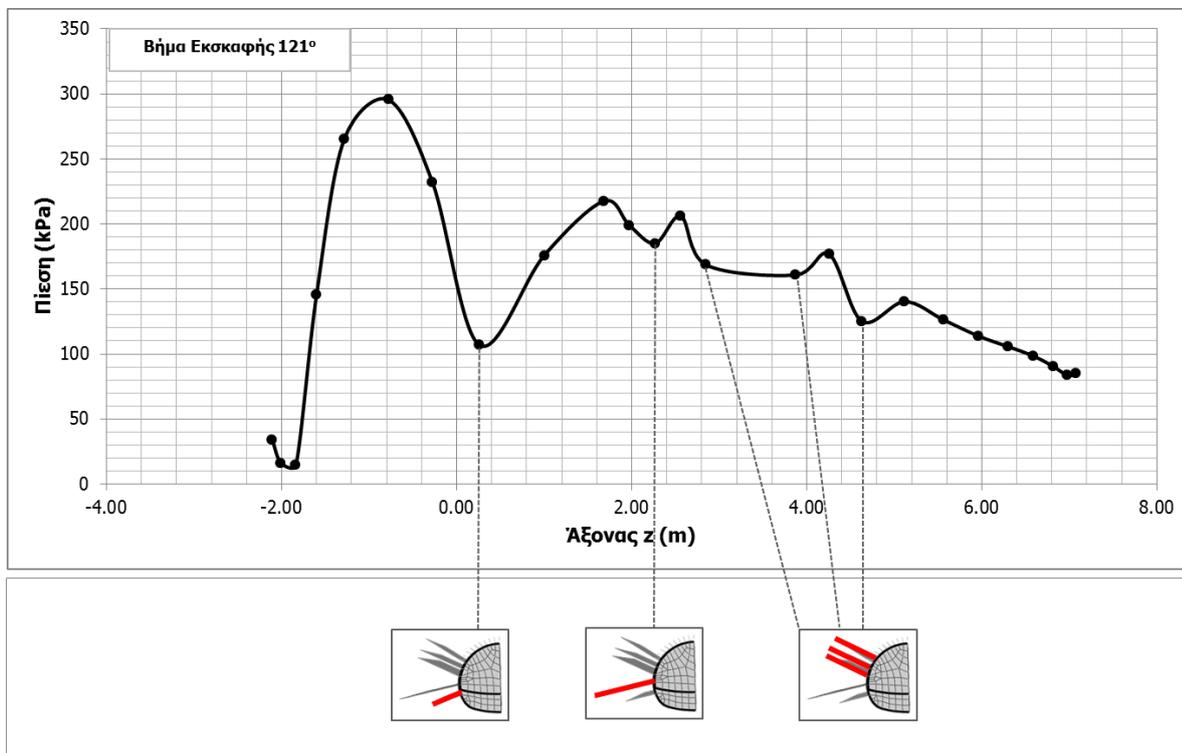
Σχήμα 6-15: Αδιάστατος λόγος τιμών πίεσης κυψελών οροφής σε σχέση με την αριστερή και δεξιά παρειά (Χ.Θ. 1+636).

6.3.1 Παρατηρήσεις επί του διαγράμματος των πιέσεων περί τη διατομή

Για κάθε ανάλυση λαμβάνονται οι τιμές των πιέσεων που ασκούνται σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια του κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος στη διατομή ενδιαφέροντος (Χ.Θ. 1+636.0) η οποία αντιστοιχεί στην τιμή $\gamma=43\text{m}$ του αριθμητικού προσομοιώματος με βάση την οριοθέτησή του. Παρατηρώντας το διάγραμμα πιέσεων του κελύφους συναρτήσει της θέσεως στην περίμετρο της διατομής, εμφανίστηκε ανομοιόμορφη κατανομή των πιέσεων και ειδικά σε συγκεκριμένα σημεία παρουσιάστηκε σημαντική πτώση των τιμών.

Για το λόγο αυτό μελετήθηκε η μεταβολή των πιέσεων και σε παρακείμενες χιλιομετρικές θέσεις από τη διατομή ενδιαφέροντος, όπου προέκυψε ότι τα σημεία μεταβολής των πιέσεων ταυτίζονται σε όλες τις χιλιομετρικές θέσεις - που μελετήθηκαν - κατά μήκος της διάνοιξης. Εξετάζοντας περαιτέρω την ανομοιομορφία του διαγράμματος προέκυψε ότι στις θέσεις αυτές οι κόμβοι στο προσομοίωμα ταυτίζονται με τους κόμβους τοποθέτησης των αγκυριών βράχου, το οποίο είναι λογικό καθώς στις θέσεις αυτές μέρος του φορτίου μεταβιβάζεται στα αγκύρια.

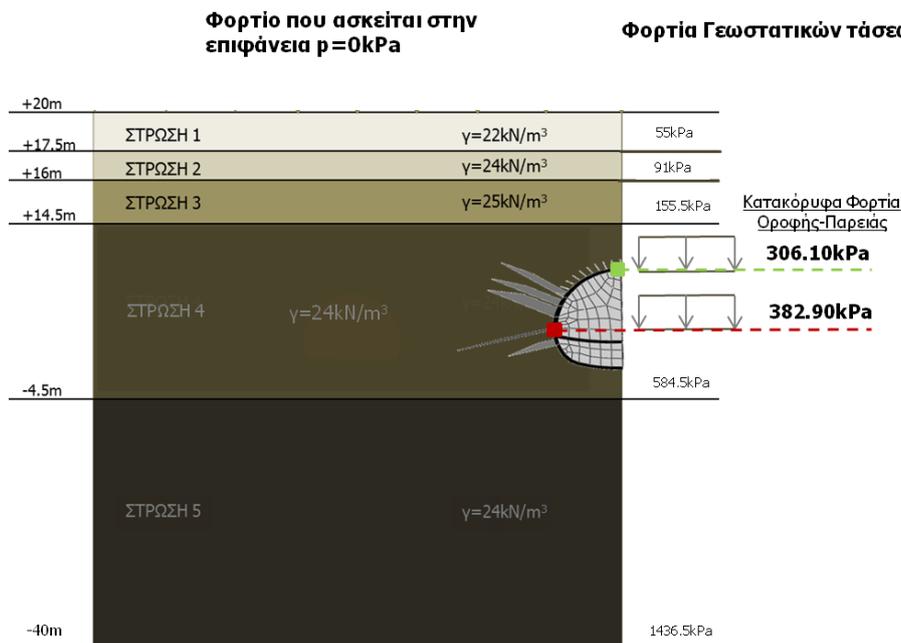
Στο διάγραμμα που ακολουθεί έχουν επισημανθεί τα σημεία τα οποία ταυτίζονται με τους κόμβους των αγκυριών. Το σημείο 1 αποτελεί θέση τοποθέτησης του αγκυρίου βράχου 4m, το σημείο 2 θέση τοποθέτησης αγκυρίου 8m, ενώ το σημείο 3 θέση τοποθέτησης αγκυρίου 6m. Η συγκεκριμένη μορφή διαγράμματος είναι όμοια με αυτές που θα ακολουθήσουν στις επόμενες ενότητες και τα σημεία απότομης μείωσης του φορτίου θα θεωρείται δεδομένο ότι οφείλεται στην ανάληψη μέρους του φορτίου από τα αγκύρια βράχου κατά θέσεις.



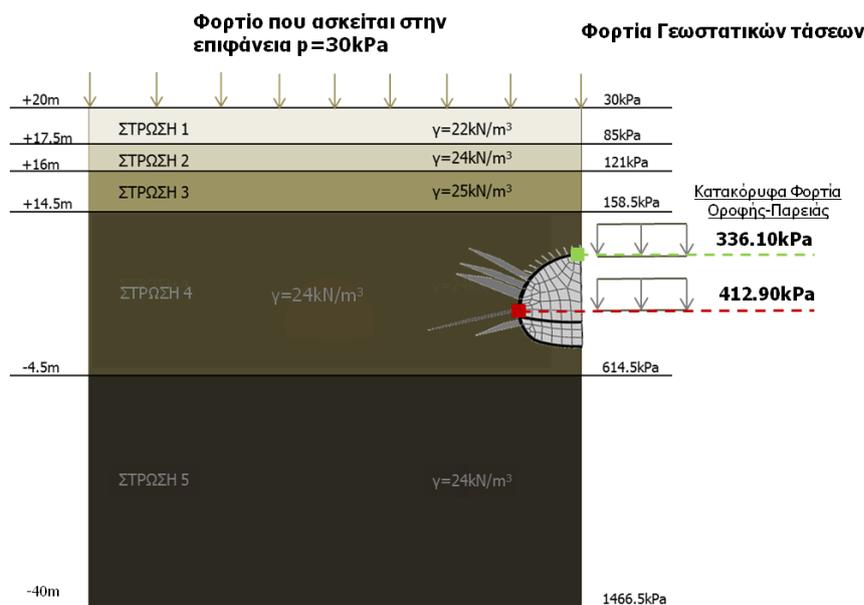
Σχήμα 6-16: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά της διατομής για διάφορες χιλιομετρικές θέσεις κατά μήκος της διάνοιξης όπως προέκυψε μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης στο 121° Βήμα.

6.3.2 Φορτία - Γεωστατικές τάσεις στο άνοιγμα της σήραγγας

Προτού διερευνηθούν τα φορτία που προκύπτουν στο άνοιγμα της σήραγγας από τις παραμετρικές αναλύσεις, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν οι γεωστατικές τάσεις στην οροφή και στην παρειά της σήραγγας για διάφορες τιμές του φορτίου (p) που ασκείται από την επιφάνεια. Έτσι, γνωρίζοντας τις ιδιότητες των υπερκείμενων στρώσεων από τα σημεία ενδιαφέροντος γίνεται υπολογισμός των γεωστατικών τάσεων. Εξετάστηκαν οι τάσεις για τη θεώρηση και μη φορτίου $p=30\text{kPa}$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ακολουθούν στα παρακάτω σχήματα και θα αποτελέσουν ένα αρχικό μέτρο σύγκρισης με τα νέα φορτία που προκύπτουν από το τέλος της εκσκαφής.



Σχήμα 6-17: Γεωστατικές τάσεις στην οροφή και στην παρειά για μηδενικό φορτίο από την επιφάνεια.



Σχήμα 6-18: Γεωστατικές τάσεις στην οροφή και στην παρειά για φορτίο $p=30\text{kPa}$ από την επιφάνεια.

6.4 ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Για την εκτίμηση του εύρους των παραμέτρων οι οποίες θα ήταν αντιπροσωπευτικότερες για το αριθμητικό προσομοίωμα της εργασίας, δημιουργήθηκε μια αρχική ομάδα αναλύσεων που αποτέλεσε τη βάση και σταδιακά διερευνήθηκε πώς επηρεάζουν τις πιέσεις στο κέλυφος της διατομής οι μεταβολές διαφόρων παραμέτρων επί αυτών των αναλύσεων. Οι γεωτεχνικές παράμετροι των στρώσεων 1, 2, 3, 5 που εισήχθησαν στο αριθμητικό προσομοίωμα και παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο §5.3.2 παρέμειναν σταθερές σε όλες τις αναλύσεις. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι διαφορετικές ομάδες αναλύσεων που εκτελέστηκαν σύμφωνα με τις παραμέτρους της στρώσεως 4, εντός της οποίας βρίσκεται η διατομή με τις κυψέλες φορτίου, η οποία υπολογίστηκε για διάφορα εύρη τιμών. Αρχικά, η στρώση 4 θεωρήθηκε ότι αποτελείται μόνο από την ενότητα με τις αυξημένες ιδιότητες (strong) σε όλο το μήκος του προσομοιώματος, ώστε να υπάρξει μία πρώτη εκτίμηση για τα εύρη των παραμέτρων. Στις αναλύσεις θεωρήθηκε φορτίο το οποίο ασκείται από την επιφάνεια ίσο με $p=30\text{kPa}$, καθώς όπως έχει αναφερθεί η δόμηση στην περιοχή περιλαμβάνει 2όροφα και 3όροφα κτίρια. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6-1: Παράμετροι των αντιπροσωπευτικών αναλύσεων οι οποίες εκτελέστηκαν πρωτογενώς.

a/a	K	Strong			Φορτίο στην επιφάνεια (kPa)	Μελέτη Επίδρασης
		E (kPa)	c (kPa)	ϕ (deg)		
1	0.6	600000	100	45	30	Μέτρου Ελαστικότητας E
2	0.6	800000	100	45	30	
3	0.6	1000000	100	45	30	
4	0.6	1200000	100	45	30	
5	0.6	1500000	100	45	30	
7	0.6	1200000	100	45	30	Πάχους Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος
8	0.6	1200000	80	45	30	Γεωτεχνικών Παραμέτρων
9	0.6	1200000	120	45	30	
10	0.7	1200000	100	45	30	Συντελεστή Γεωστατικών Ωθήσεων, K_0
11	0.8	1200000	100	45	30	
12	0.6	1200000	100	45	30	Ανάλυση με πολύ αυξημένες - τριπλάσιες - παραμέτρους (E, c) άνω και κάτω

Η επιλογή του μεγάλου εύρους τιμών του μέτρου ελαστικότητας στις παραπάνω αναλύσεις δεν ήταν τυχαία, αλλά έγινε έπειτα από την εξέταση της συγκεκριμένης παραμέτρου σύμφωνα με εξισώσεις που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και σχολιάζονται στη συνέχεια. Επισημαίνεται η μεγάλη σημασία του μέτρου ελαστικότητας λόγω των μικρών αστοχιών κατά τη διάνοιξη στους σχηματισμούς της περιοχής. Όπως είναι γνωστό κάποια από τις εξισώσεις οδηγούν σε υπερεκτίμηση της παραμέτρου, ενώ άλλα οδηγούν σε μια πιο συντηρητική θεώρηση αυτής. Τα κριτήρια τα οποία λήφθηκαν υπόψη για την εκτίμηση του κατάλληλου εύρους τιμών του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας εκτιμάται με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci}) ή το μέτρο παραμορφωσιμότητας (E_i) του άρρηκτου βράχου σε συνδυασμό με τη βαθμονόμηση της βραχώμαζας (RMR, Q, GSI). Τα τελευταία χρόνια έχει διατυπωθεί πλήθος εξισώσεων από ερευνητές για την εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες από αυτές.

$$\text{Mitri et al. (1994)} \quad E_m = E_i \left[0.5 \left(1 - \cos \pi \frac{\text{RMR}}{100} \right) \right] \quad (6-1)$$

$$\text{Hoek et al. (2002)} \quad E_m (\text{GPa}) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci} (\text{MPa})}{100}} 10^{\left(\frac{\text{GSI}-10}{40} \right)} \quad (\text{Για } \sigma_{ci} \leq 100 \text{MPa}) \quad (6-2)$$

$$E_m (\text{GPa}) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) 10^{\left(\frac{\text{GSI}-10}{40} \right)} \quad (\text{Για } \sigma_{ci} > 100 \text{MPa}) \quad (6-3)$$

$$\text{Sonmez et al. (2004)} \quad E_m = E_i (s^a)^{0.4} \quad (6-4)$$

$$\text{Hoek \& Diederichs (2006)} \quad E_m = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right) \quad (6-5)$$

$$\text{Galera et al. (2007)} \quad E_m = E_i \cdot e^{(\text{RMR}-100)/36} \quad (6-6)$$

Όπου:

E_i : Μέτρο παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου βράχου. Υπολογίζεται από πειράματα άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη. Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση των αναγκαίων δοκιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που προτείνονται από τους Hoek & Diederichs (2006), Β. Μαρίνος (2007) ανά πετρογραφική σύσταση.

σ_{ci} : Αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη.

s, a : Σταθερές του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown.

RMR: Τιμή βαθμονόμησης της βραχώμαζας στο σύστημα RMR.

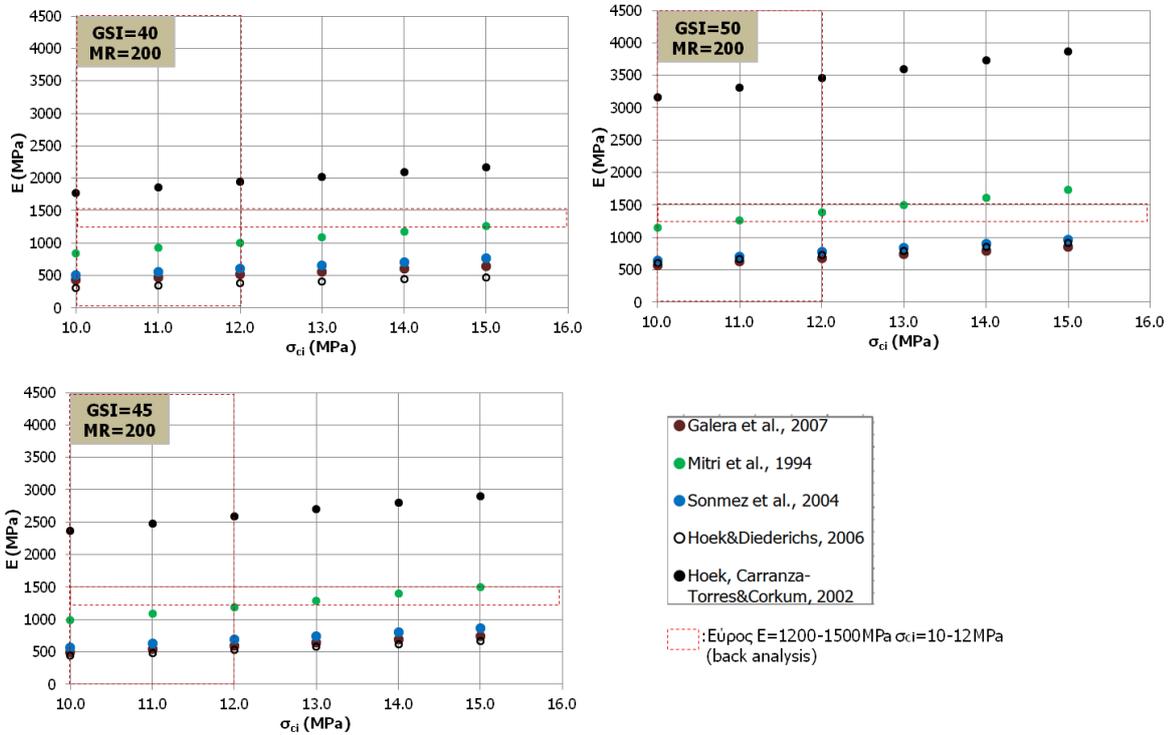
Q: Τιμή βαθμονόμησης της βραχώμαζας στο σύστημα Q.

GSI: Τιμή βαθμονόμησης της βραχώμαζας στο σύστημα GSI. Εκτιμάται από τα αντίστοιχα διαγράμματα GSI ανάλογα με το γεωλογικό σχηματισμό.

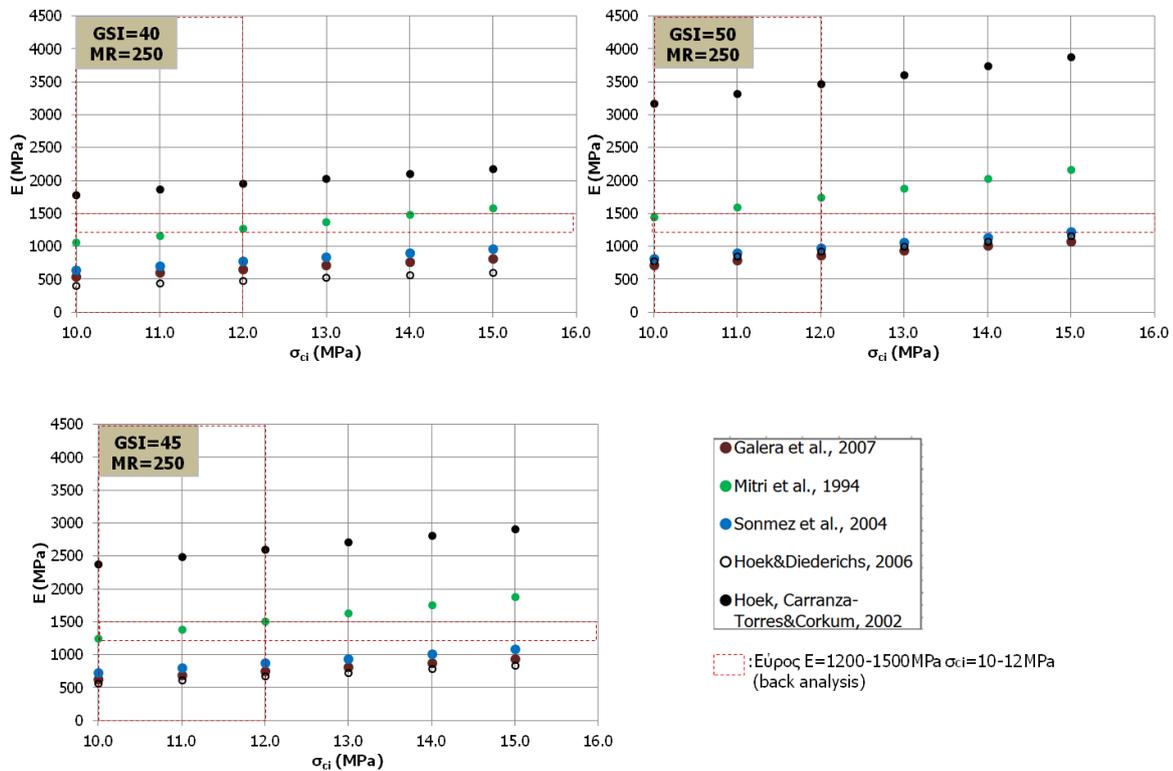
D: Συντελεστής διαταραχής βραχώμαζας, ο οποίος εξαρτάται από τη μεθοδολογία και τη διαδικασία εκσκαφής ή διάνοιξης.

Με βάση τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν μόλις και γνωρίζοντας ότι ο δείκτης GSI του συγκεκριμένου σχηματισμού κυμαίνεται στο εύρος τιμών 40-50, ο δείκτης MR (Modulus Ratio), έπειτα από συσχέτισμό των τιμών για την συγκεκριμένη πετρογραφική σύσταση που δίνονται στη βιβλιογραφία (Hoek & Diederichs (2006), Β. Μαρίνος (2007), Sabatakakis et al, (2008)) κυμαίνεται MR=200-300 και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci}=10-15\text{MPa}$ (

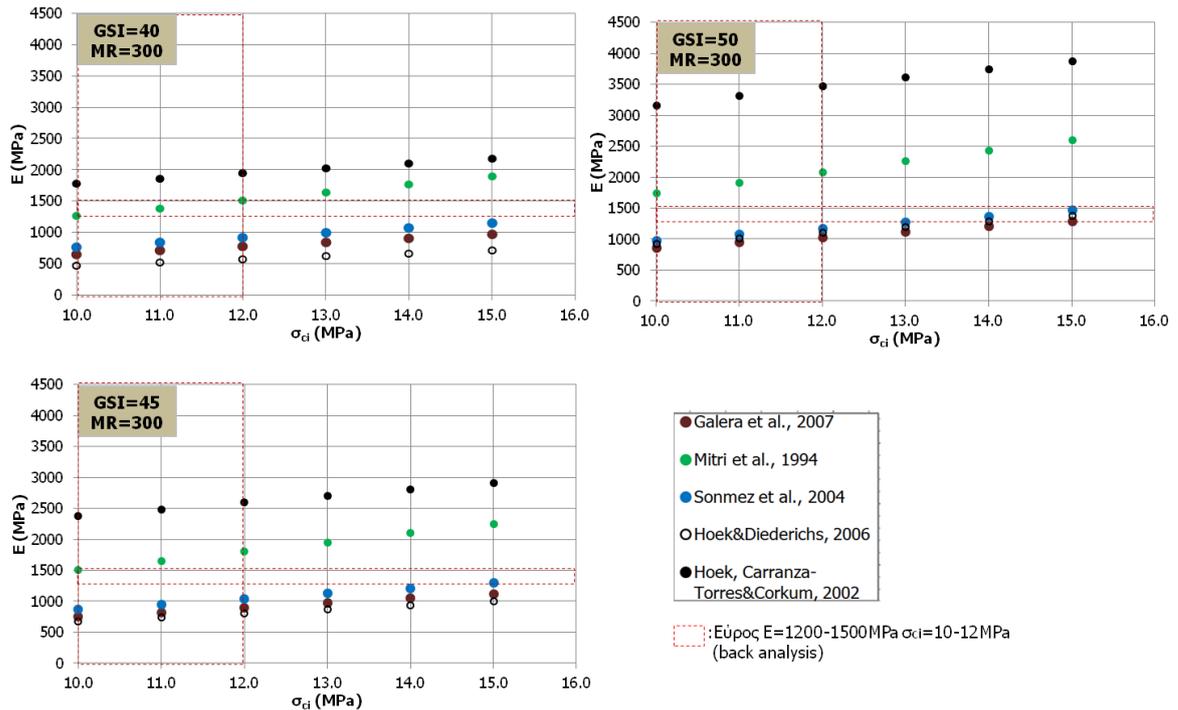
Πίνακας 5-5) προκύπτει το εξής εύρος τιμών του μέτρου ελαστικότητας για κάθε περίπτωση:



Σχήμα 6-19: Εκτίμηση του Μέτρου Παραμορφωσιμότητας- E, για την ομοιογενή βραχώμαζα (ισχυρή ενότητα) βάσει εξισώσεων της βιβλιογραφίας για δείκτη MR(Modulus Ratio)=200.



Σχήμα 6-20: Εκτίμηση του Μέτρου Παραμορφωσιμότητας- E, για την ομοιογενή βραχώμαζα (ισχυρή ενότητα) βάσει εξισώσεων της βιβλιογραφίας για δείκτη MR(Modulus ratio)=250.



Σχήμα 6-21: Εκτίμηση του Μέτρου Παραμορφωσιμότητας- E, για την ομοιογενή βραχώμαζα (ισχυρή ενότητα) βάσει εξισώσεων της βιβλιογραφίας για δείκτη MR(Modulus Ratio)=300.

Παρατηρούμε ότι για μια μέση τιμή του δείκτη $GSI=45$, του $\sigma_{ci}=11MPa$ και του $MR(\text{Modulus Ratio})=250$ το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει, με βάση τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν, τιμές μεταξύ 670-2600MPa. Συνεπώς, επιλέχθηκε εύλογο εύρος τιμών του μέτρου στις αναλύσεις. Με διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζονται οι περιοχές στις οποίες προέκυψαν αντιπροσωπευτικότερα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια. Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι όσο αυξάνει ο δείκτης GSI το εύρος τιμών του μέτρου ελαστικότητας πλησιάζει τις επιλεχθείσες τιμές επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των αναλύσεων. Με ανάλογο τρόπο εκτιμήθηκε και το εύρος του μέτρου ελαστικότητας, στις αναλύσεις που θεωρήθηκε και ύπαρξη ασθενέστερης ενότητας του σχηματισμού.

Στις επόμενες ενότητες θα διερευνηθεί η ποιοτική και ποσοτική επίδραση της μεταβολής διαφόρων παραμέτρων στις πιέσεις επί του κελύφους της διατομής της σήραγγας.

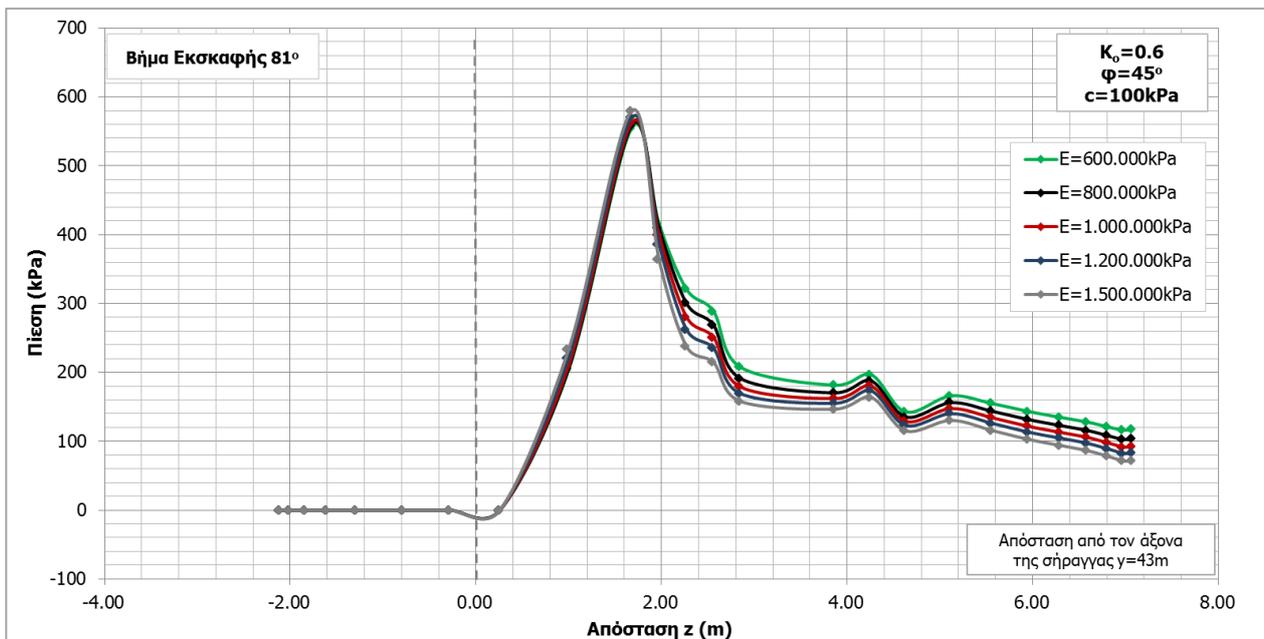
6.4.1 Αναλύσεις με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και ίδιες γεωτεχνικές παραμέτρους

Στο πλαίσιο της αρχικής επεξεργασίας των δεδομένων των αναλύσεων κρίθηκε σκόπιμη η σύγκριση αναλύσεων με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας, ώστε να διερευνηθεί η επιρροή του στη μεταβολή της κατανομής των πιέσεων. Διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους όλων των σχηματισμών και μεταβάλλοντας μόνο το μέτρο ελαστικότητας της στρώσεως 4, που αποτελεί και τη στρώση στην όπου διανοίγεται η σήραγγα, προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα.

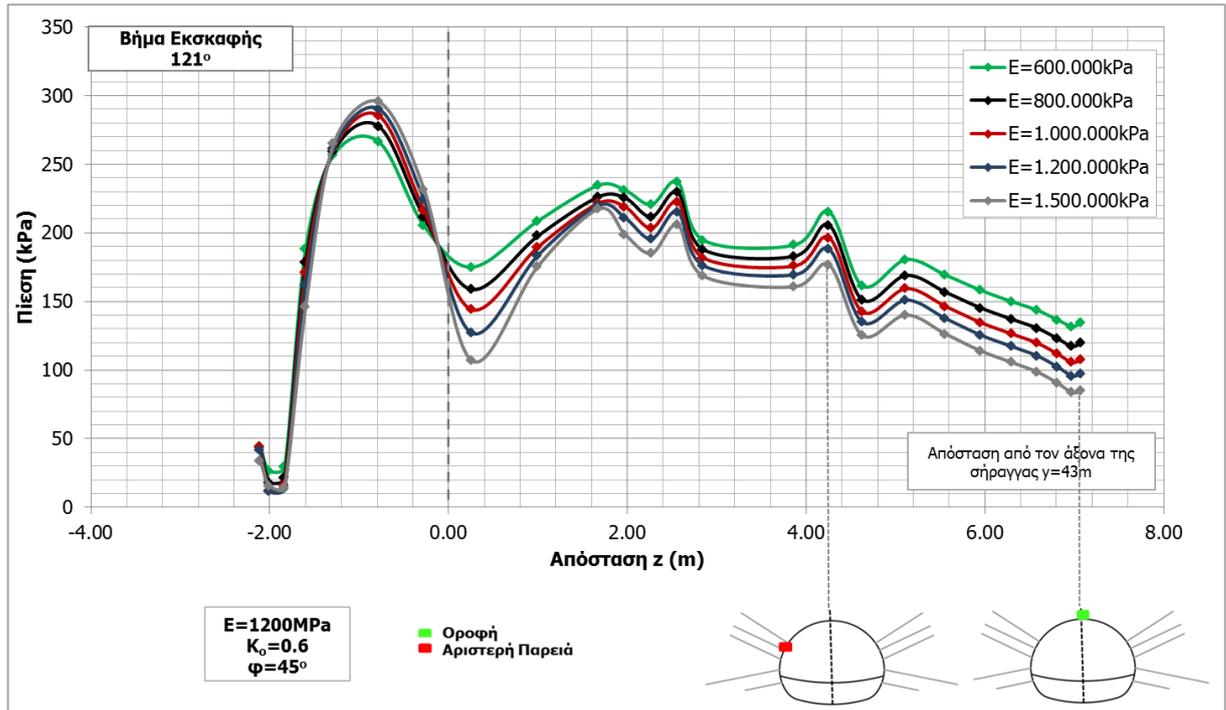
Συγκρίνοντας τις αναλύσεις με χαρακτηριστικά $K_0=0.6$, $c=100kPa$ και $\phi=45^\circ$ και μεταβάλλοντας μόνο το μέτρο ελαστικότητας E, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Αρχικά, είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι η κατανομή των πιέσεων είναι λογική. Με θεώρηση συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων $K_0=0.6$, δηλαδή μικρότερου από τη μονάδα, αναμένονταν μεγαλύτερες πιέσεις στην παρειά του κελύφους από ότι στη στέψη της διατομής. Αυτό ισχύει γιατί κατά την εκσκαφή της σήραγγας μειώνονται οι ακτινικές τάσεις της διατομής. Στην οροφή της διατομής η κατακόρυφη τάση είναι ακτινική, ενώ στην παρειά εφαπτομενική. Στην περίπτωση που το K_0 είναι μικρότερο της μονάδας η οριζόντια τάση είναι μικρότερη από την κατακόρυφη και στην οροφή είναι εφαπτομενική. Συνεπώς, κατά την εκσκαφή στην οροφή της σήραγγας μειώνεται η κατακόρυφη τάση, ενώ η οριζόντια παραμένει ίδια, ενώ στην παρειά η οριζόντια μειώνεται (ήδη ήταν μικρότερη) και η κατακόρυφη μένει ίδια με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διεκτροπική τάση $q=(\sigma_1-\sigma_3)/2$. [Μπαρμπάκου Ι., (2010)]

Όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας, το οποίο λαμβάνει τιμές 600-1500MPa όπως προέκυψε συνδυάζοντας τα στοιχεία της μελέτης και της κατασκευής του έργου, από τις αναλύσεις παρατηρείται ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας οδηγεί σε μείωση των πιέσεων που ασκούνται στο κέλυφος της διατομής άμεσης υποστήριξης.



Σχήμα 6-22: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά της διατομής για διάφορα μέτρα ελαστικότητας της στρώσεως 4, για ομοιογενής σχηματισμό, όπως προέκυψε μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης στο 81° Βήμα.



Σχήμα 6-23: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά της διατομής για διάφορα μέτρα ελαστικότητας της στρώσεως 4, για ομοιογενή σχηματισμό, όπως προέκυψε μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης στο 121° Βήμα.

Ενδεικτικά συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης με μέτρο ελαστικότητας $E=600\text{MPa}$ με την αντίστοιχη ανάλυση με μέτρο ελαστικότητας $E=1200\text{MPa}$, διαπιστώθηκε ότι με την ολοκλήρωση της εκσκαφής η διαφορά στις πιέσεις κυμαίνεται στην τάξη μεγέθους 28% στην οροφή και 13% στην παρειά. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά στην πίεση της παρειάς από 215.4kPa για μέτρο ελαστικότητας $E=600\text{MPa}$ μειώνεται στα 188kPa για μέτρο ελαστικότητας $E=1200\text{MPa}$. Όμοια στην οροφή η πίεση μειώνεται από τα 134.7kPa στα 97.6kPa. Συνεπώς, γίνεται εμφανής η μεγάλη επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στις πιέσεις της σήραγγας. Καθώς οι σχηματισμοί δεν παρουσιάζουν μεγάλη πλαστικοποίηση ήταν αναμενόμενη η μεγάλη επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στις πιέσεις του κελύφους, όπως επιβεβαιώθηκε και εδώ.

Έπειτα, έγινε σύγκριση των πιέσεων στην οροφή και στην παρειά της διατομής με τις αντίστοιχες γεωστατικές τάσεις ώστε να προσεγγισθεί τι ποσοστό αυτών αποτελούν οι πιέσεις που παραλαμβάνονται από το κέλυφος άμεσης υποστήριξης.

Πίνακας 6-2: Συγκριτικός πίνακας μεταβολής των πιέσεων στην οροφή και στην παρειά της διατομής σε σχέση με τις γεωστατικές πιέσεις, μετά το τέλος της εκσκαφής (Χ.Θ. 1+636.0).

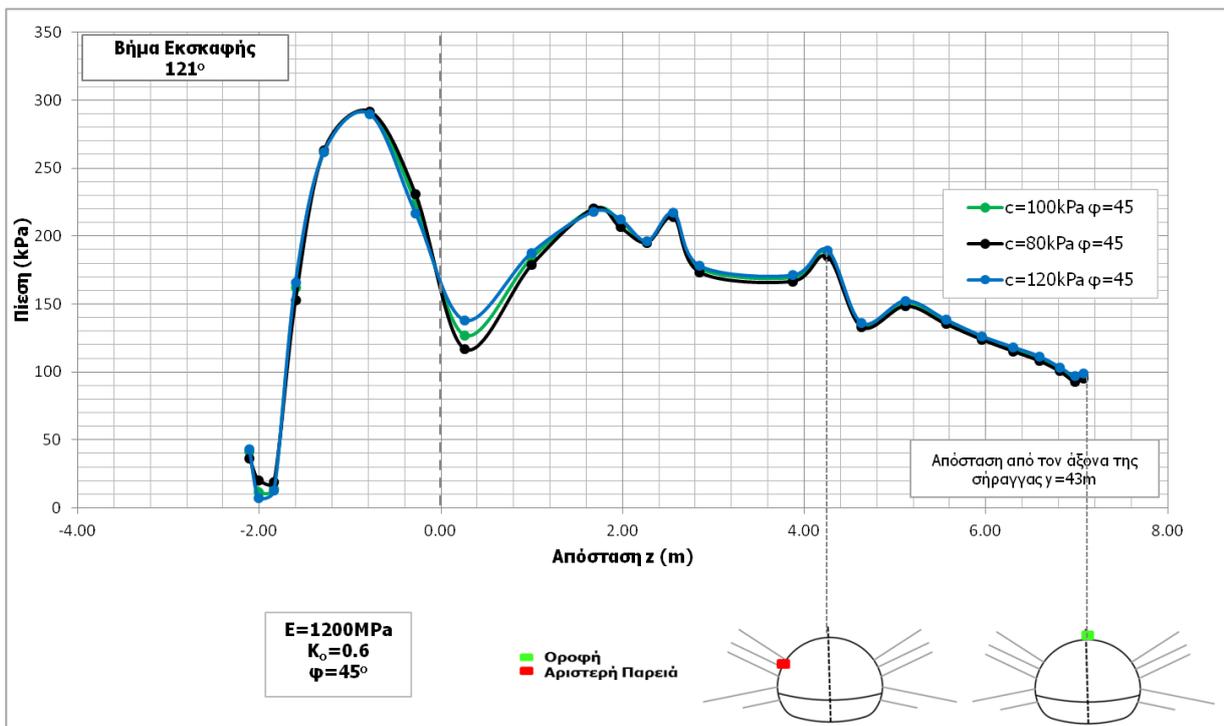
Ανάλυση	Πιέσεις	Οροφή	Παρειά	Ποσοστό γεωστατικών τάσεων (%)	
				Οροφή	Παρειά
-	Γεωστατικές για $p=30\text{kPa}$	336.1kPa	412.9kPa		
a_1	Πιέσεις για $E=600\text{MPa}$	134.7kPa	215.4kPa	40.1%	52.2%
a_2	Πιέσεις για $E=800\text{MPa}$	119.9kPa	205.6kPa	35.7%	49.8%
a_3	Πιέσεις για $E=1000\text{MPa}$	107.8kPa	196.5kPa	32.1%	47.6%
a_4	Πιέσεις για $E=1200\text{MPa}$	97.6kPa	188.1kPa	29.0%	45.6%
a_5	Πιέσεις για $E=1500\text{MPa}$	84.9kPa	176.7kPa	25.3%	42.8%

6.4.2 Σύγκριση πιέσεων για μεταβολή της συνοχής c (λοιπές παράμετροι σταθερές)

Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους όλων των σχηματισμών και μεταβάλλοντας μόνο την παράμετρο της συνοχής (c) της στρώσεως 4, που αποτελεί και τη στρώση όπου διανοίγεται η σήραγγα, εκτιμήθηκε η επίδραση της αντοχής. Γενικά, προέκυψαν πολύ μικρές μεταβολές στις πιέσεις που ασκούνται στο άνοιγμα της σήραγγας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης με μέτρο ελαστικότητας $E=1200\text{MPa}$, $K_0=0.6$, $c=100\text{kPa}$ και $\varphi=45^\circ$ με αντίστοιχες αναλύσεις αυξάνοντας και μειώνοντας την παράμετρο της συνοχής c κρατώντας τα υπόλοιπα στοιχεία σταθερά, προέκυψε ότι οι τιμές των πιέσεων που ασκούνται στο κέλυφος της διατομής δεν διαφοροποιούνται σημαντικά, ενώ παράλληλα διατηρούν κοινή κατανομή.

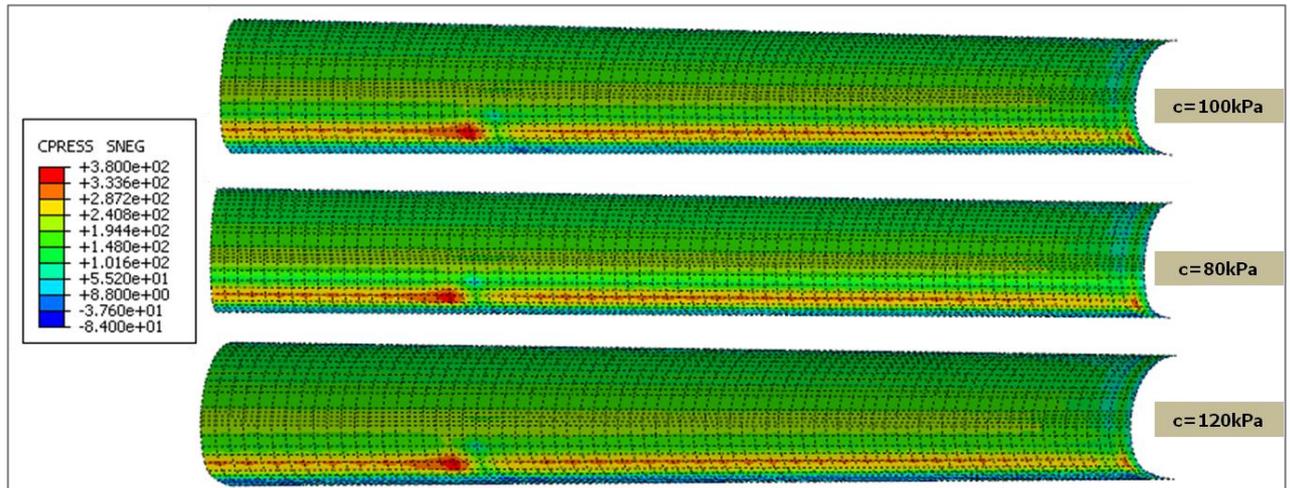
Πιο συγκεκριμένα, τα φορτία μειώνονται με τη μείωση της συνοχής και μάλιστα η μεταβολή τους γενικά δεν υπερβαίνει την τάξη μεγέθους 1.5-3%. Αντίθετα, αύξηση της συνοχής (c), οδηγεί σε πολύ μικρές αυξήσεις (σχεδόν αμελητέες) των πιέσεων η οποία πιθανώς οφείλεται στη μείωση των προσυγκλίσεων και της αποτόνωσης στο μέτωπο. Ωστόσο, η μεγαλύτερη μεταβολή εμφανίζεται στο σημείο όπου τοποθετούνται τα αγκύρια μήκους 4m στην Β' φάση εκσκαφής η οποία είναι της τάξεως 15%. Σε αυτήν την περίπτωση η πίεση στην παρειά (170kPa) εμφανίζεται μεγαλύτερη από την πίεση στην οροφή (98kPa) όπως συμβαίνει συνήθως όταν ο συντελεστής των γεωστατικών ωθήσεων K_0 είναι μικρότερος της μονάδας.

Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα των τριών αναλύσεων όπου απεικονίζεται το βήμα 121° , στο οποίο ολοκληρώνεται η εκσκαφή της σήραγγας, σε απόσταση $\gamma=43\text{m}$ από τον άξονα διάνοιξης, δηλαδή στη διατομή ενδιαφέροντος (Χ.Θ. 1+636) στο οποίο επαληθεύεται η μικρή επίδραση της μεταβολής της συνοχής στις πιέσεις του ανοίγματος της σήραγγας.



Σχήμα 6-24: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά της σήραγγας για διαφορετικές τιμές της συνοχής (c), μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης.

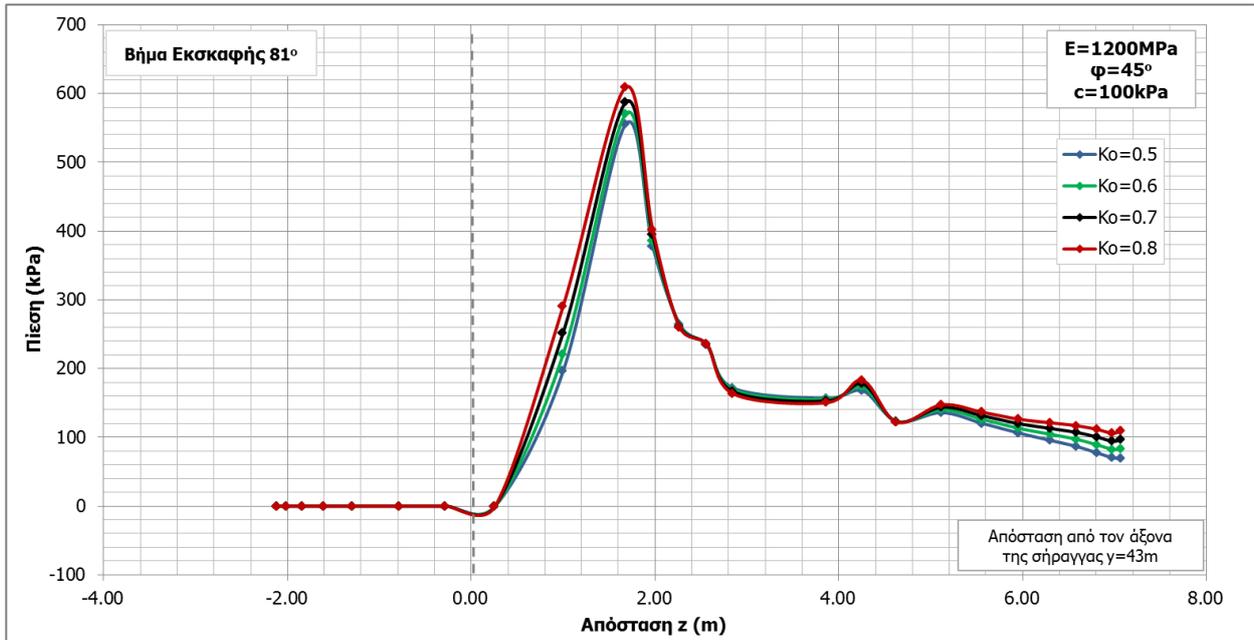
Έπειτα, παρουσιάζονται συγκριτικά προφίλ του κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος των αριθμητικών αναλύσεων για μεταβολή της παραμέτρου της συνοχής. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα τα προφίλ είναι ίδια και δεν εμφανίζονται διαφορές κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας.



Σχήμα 6-25: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά για διαφορετικές τιμές της συνοχής c κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας.

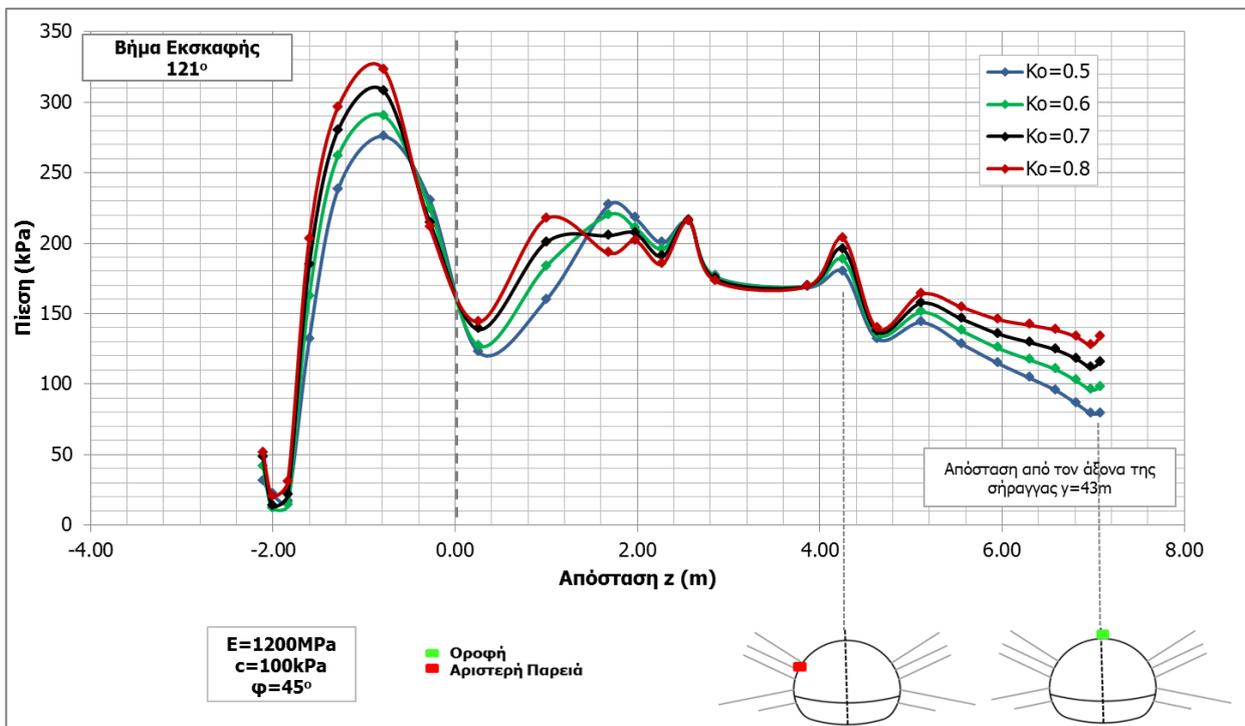
6.4.3 Επίδραση του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων, K_0 στη μεταβολή των πιέσεων

Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους όλων των σχηματισμών και μεταβάλλοντας μόνο το συντελεστή K_0 της στρώσεως 4, που αποτελεί και τη στρώση στην οποία διανοίγεται η σήραγγα, προέκυψαν μεταβολές στις πιέσεις που ασκούνται στο άνοιγμα της σήραγγας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση με μέτρο ελαστικότητας $E=1200\text{MPa}$, $K_0=0.5$, $c=100\text{kPa}$ και $\varphi=45^\circ$, την ανάλυση με τα χαρακτηριστικά $E=1200\text{MPa}$, $K_0=0.6$, $c=100\text{kPa}$ και $\varphi=45^\circ$, την ανάλυση με $E=1200\text{MPa}$, $K_0=0.7$, $c=100\text{kPa}$ και $\varphi=45^\circ$ και την ανάλυση με $E=1200\text{MPa}$, $K_0=0.8$, $c=100\text{kPa}$ και $\varphi=45^\circ$ προέκυψε ότι οι πιέσεις που ασκούνται στο κέλυφος της διατομής διαφοροποιούνται ειδικά μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης εκσκαφής.



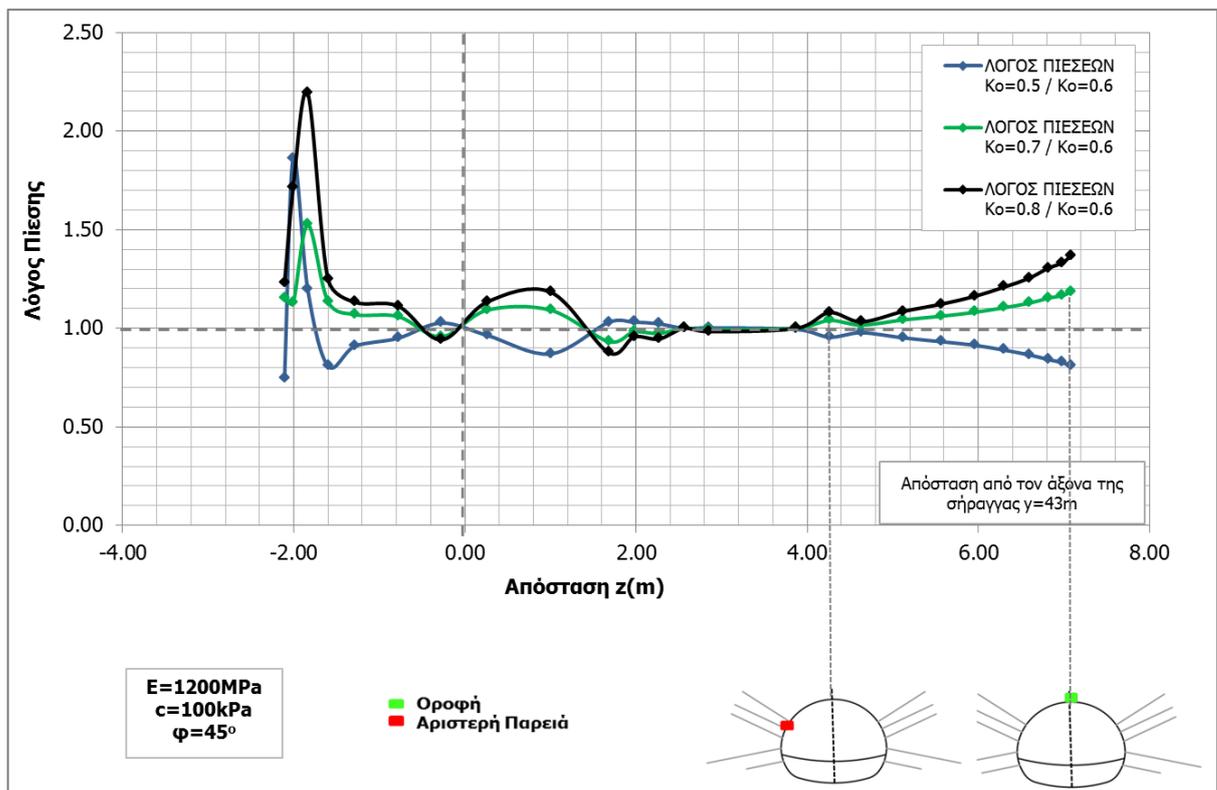
Σχήμα 6-26: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά για διαφορετικές τιμές του συντελεστή K_0 κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας.

Στο 81° Βήμα της εκσκαφής όπου έχει ολοκληρωθεί η διάνοιξη της Α΄ Φάσης η μεταβολή του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων δε μεταβάλλει την κατανομή των πιέσεων, απλά παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση στις τιμές αυτών περιμετρικά. Ισχύει, όπως αναλύθηκε και παραπάνω ότι οι πιέσεις είναι μεγαλύτερες στην παρειά της διατομής από ότι στην οροφή, εφόσον το K_0 κυμαίνεται από 0.5 – 0.8, δηλαδή είναι μικρότερο της μονάδας.



Σχήμα 6-27: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά για διαφορετικές τιμές του συντελεστή K_0 κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας.

Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής παρατηρείται ότι η μεταβολή του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων επηρεάζει τόσο τις τιμές των πιέσεων περιμετρικά όσο και την κατανομή αυτών περί το κέλυφος της διατομής. Πιο συγκεκριμένα, τα φορτία αυξάνονται με την αύξηση του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων K_o , ενώ ενδεικτικά αναφέρεται ότι η πίεση στην παρειά από 188kPa για $K_o=0.6$ αυξάνεται στα 203kPa για $K_o=0.8$ δηλαδή προκύπτει αύξηση 7.5%, ενώ στην οροφή η αύξηση είναι περίπου 27% στο βήμα 121 της εκσκαφής, συγκρίνοντας το $K_o=0.8$ με το $K_o=0.6$ με τις πιέσεις να αυξάνονται από 98kPa στα 133kPa. Εάν συγκρίνουμε το συντελεστή $K_o=0.7$ με το $K_o=0.6$ προκύπτει ποσοστιαία μεταβολή περί το 4% στην παρειά (αύξηση πιέσεων από 188kPa σε 195kPa) και περίπου 15% μεταβολή στην οροφή (πιέσεις από 97kPa σε 115kPa). Αντίθετα εάν συγκρίνουμε τον συντελεστή $K_o=0.6$ με το $K_o=0.5$ προκύπτει ποσοστιαία μεταβολή περί το 4% στην παρειά (μείωση πιέσεων από 188kPa σε 180kPa) και περίπου 18% μεταβολή στην οροφή (πιέσεις από 97kPa σε 79kPa). Ακολουθεί το διάγραμμα του αδιάστατου λόγου των πιέσεων σε διάφορες θέσεις περιμετρικά του κελύφους της διατομής όπου επαληθεύονται οι ανωτέρω παρατηρήσεις.



Σχήμα 6-28: Μεταβολή του αδιάστατου λόγου των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά για διαφορετικές τιμές του συντελεστή K κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας.

Τέλος, συγκρίνοντας τις πιέσεις στην οροφή και στην παρειά της διατομής με τις μέσες γεωστατικές τάσεις στις θέσεις αυτές προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας στον οποίο γίνεται σαφές το ποσοστό των γεωστατικών τάσεων που καλείται να αναλάβει η οροφή και η παρειά σε κάθε περίπτωση μελέτης.

Η μέση γεωστατική τάση $p_{o,mean}$ ορίζεται από τη σχέση $p_{o,mean} = \gamma \cdot h \cdot \left(\frac{1+K_o}{2} \right) = \left(\frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \right)$

όπου $(\gamma \cdot h)$ είναι η γεωστατική τάση στην οροφή και στην παρειά ανάλογα με την περίπτωση μελέτης και το K_o λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 0.8 αντιστοίχως. Η έννοια της μέσης γεωστατικής

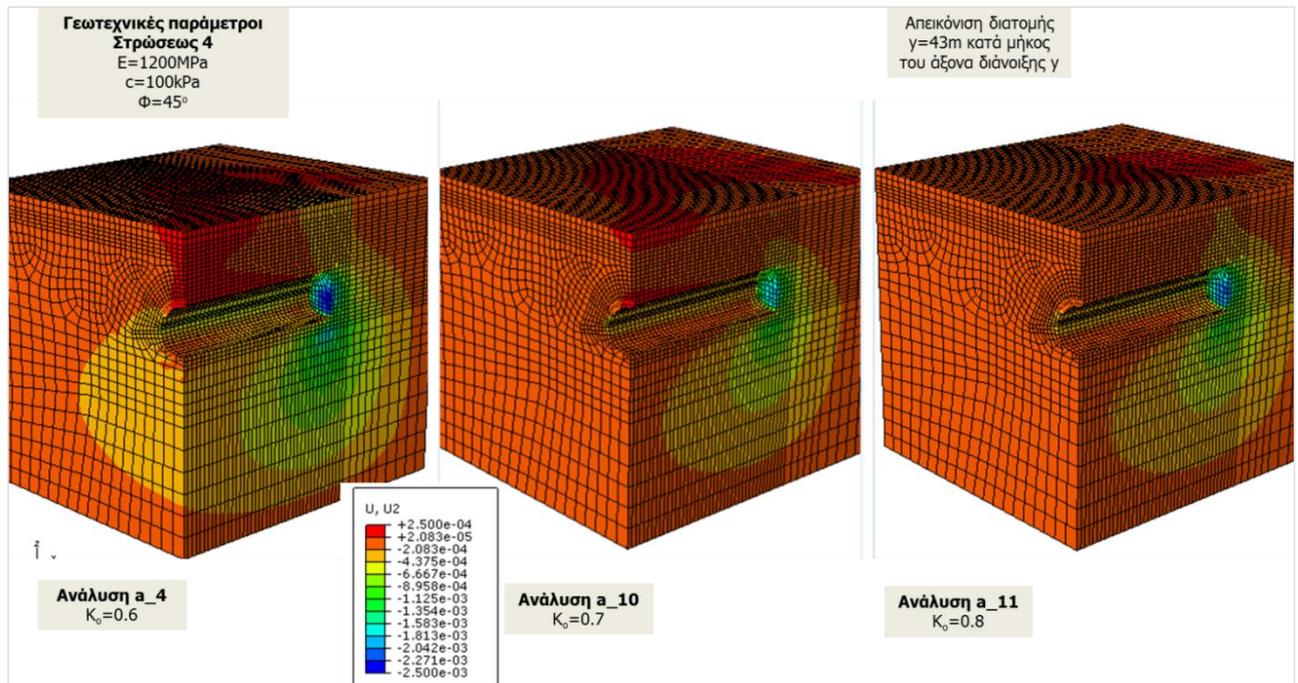
τάσης ανάγει τις πιέσεις στο μέσο γεωστατικό πεδίο. Σε περίπτωση που η αναγωγή των λόγων των πιέσεων γίνει ως προς τη μέση γεωστατική τάση $p_{o,mean}$ ουσιαστικά προκύπτουν ισοδύναμα βάρη εκσκαφής για τα οποία έχουμε το ίδιο μέσο εντατικό πεδίο απαλλαγμένο από την διαφοροποίηση του συντελεστή K_o .

Ειδικότερα όταν ο συντελεστής $K_o=0.6$ η οροφή της διατομής αναλαμβάνει πιέσεις οι οποίες αντιστοιχούν στο 36% των μέσων γεωστατικών τάσεων και η παρειά σε πιέσεις που φθάνουν στο 56.9% των μέσων γεωστατικών ενώ όταν ο συντελεστής $K_o=0.5$ η οροφή και η παρειά αναλαμβάνουν πιέσεις που αποτελούν το 31% και το 58% των μέσων γεωστατικών τάσεων αντίστοιχα. Όσο αυξάνεται το K_o η οροφή της διατομής αναλαμβάνει φορτία τα οποία αποτελούν μεγαλύτερο ποσοστό των γεωστατικών τάσεων με το μέγιστο ποσοστό (περίπου 44%) να προκύπτει όταν ο συντελεστής $K_o=0.8$ ενώ η παρειά αναλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος των γεωστατικών τάσεων όσο το K_o μειώνεται, με μέγιστο ποσοστό 58% όταν το $K_o=0.5$.

Πίνακας 6-3: Συγκριτικός πίνακας μεταβολής των πιέσεων στην οροφή και στην παρειά της διατομής σε σχέση με τις μέσες γεωστατικές τάσεις, μετά το τέλος της εκσκαφής (Χ.Θ. 1+636.0).

Ανάλυση	Πιέσεις	Οροφή	Παρειά	Μέσες γεωστατικές τάσεις ($p_{o,mean}$) για $p=30kPa$		Ποσοστό μέσων γεωστατικών τάσεων %	
				Οροφή	Παρειά	Οροφή	Παρειά
a_504	Πιέσεις για $K_o=0.5$	79.1kPa	179.7kPa	252.1kPa	309.7kPa	31.4%	58.0%
a_4	Πιέσεις για $K_o=0.6$	97.6kPa	188.1kPa	268.9kPa	330.3kPa	36.3%	56.9%
a_10	Πιέσεις για $K_o=0.7$	115.5kPa	195.6kPa	285.7kPa	351.0kPa	40.4%	55.7%
a_11	Πιέσεις για $K_o=0.8$	133.3kPa	203.1kPa	302.5kPa	371.6kPa	44.1%	54.7%

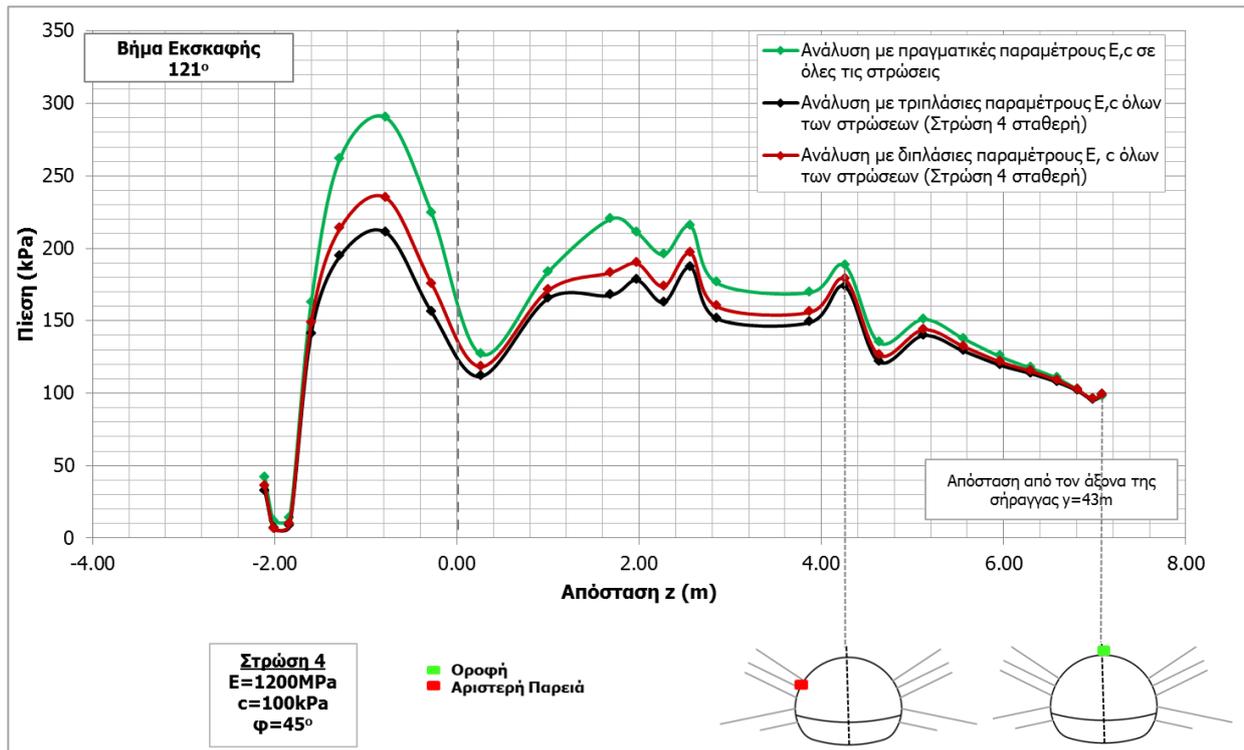
Ακολουθούν εικόνες από την κατανομή των μετατοπίσεων U κατά μήκος του άξονα δianoίξης και συγκεκριμένα απεικονίζεται το προσομοίωμα από τη διατομή $y=43m$ μέχρι το τέλος ($y=110m$) για αναλύσεις με διαφορετικό συντελεστή K_o . Παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις καταλαμβάνουν μεγαλύτερη έκταση και λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές όσο ο συντελεστής K_o μειώνεται (πιο συγκεκριμένα όσο αποκλίνει από τη μονάδα). Παρόλα αυτά οι τιμές των μετατοπίσεων είναι πάρα πολύ μικρές, της τάξεως των 0.3mm.



Σχήμα 6-29: Μεταβολή των μετακινήσεων κάθετα στο μέτωπο κατά μήκος του άξονα διάνοιξης της σήραγγας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή K_0 .

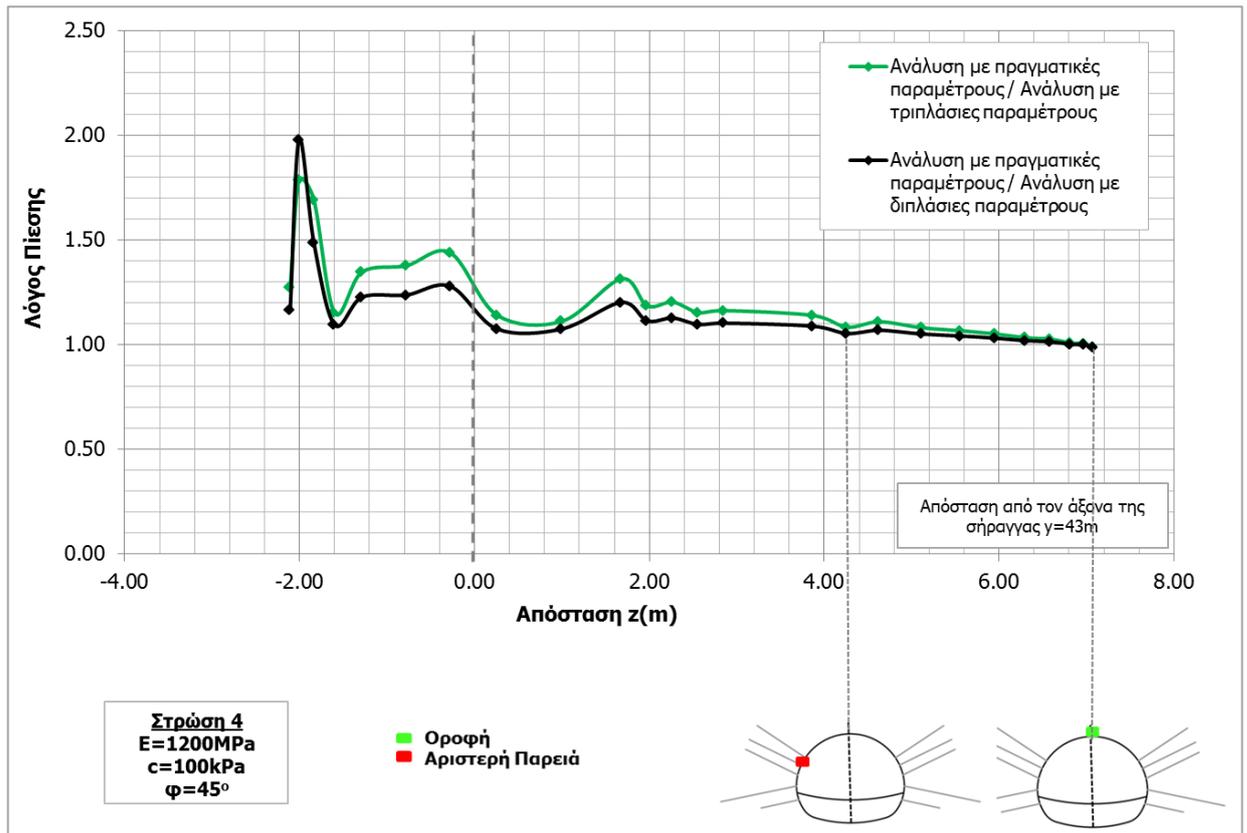
6.4.4 Ανάλυση με αυξημένες παραμέτρους των άνω στρώσεων – Μελέτη ευαισθησίας των αποτελεσμάτων

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και την ανάλυση της ευαισθησίας τους, εκτελέστηκαν και δύο αναλύσεις με θεώρηση διπλάσιων και τριπλάσιων μέτρων ελαστικότητας των σχηματισμών και θεώρηση διπλάσιας και τριπλάσιας συνοχής αντίστοιχα, διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές. Η μεταβολή αυτή θεωρείται μη ρεαλιστική και επιλέχθηκε με σκοπό να μελετηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων της πίεσης του κελύφους της άμεσης υποστήριξης, για την περίπτωση που αλλάξουν οι παράμετροι των άνω στρώσεων (στρώσεις 1,2,3) και της στρώσεως 5.



Σχήμα 6-30: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά της διατομής για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας E και συνοχής c.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η μεταβολή στις γεωτεχνικές παραμέτρους των υπερκειμένων στρώσεων (και της υποκείμενης στρώσης από τη στρώση διάνοιξης) και συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας E και η συνοχή c, δεν μεταβάλλει την κατανομή των πιέσεων στο κέλυφος παρά μόνο τις τιμές των πιέσεων. Η αύξηση των παραμέτρων του μέτρου ελαστικότητας και της συνοχής ουσιαστικά ορίζουν πιο δύσκαμπτους σχηματισμούς. Η αύξηση της δυσκαμψίας οδηγεί σε μικρότερες τιμές πιέσεων περιμετρικά του κελύφους της διατομής. Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου λόγου των πιέσεων των πραγματικών γεωτεχνικών παραμέτρων με τις διπλάσιες και τις τριπλάσιες τιμές αυτών.



Σχήμα 6-31: Μεταβολή του αδιάστατου λόγου των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας E και συνοχής c.

Παρατηρείται ότι η μεταβολή των πιέσεων είναι πρακτικά μηδενική στην οροφή της διατομής, ενώ αυξάνεται όσο κινούμαστε από την οροφή προς την παρειά με τη μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή να φθάνει περίπου στο 43% κοντά στη θέση τοποθέτησης του προσωρινού αναστροφου τόξου για θεώρηση τριπλάσιων παραμέτρων (Απόσταση $z=-2.00\text{m}$). Στην παρειά οι πιέσεις μειώνονται κατά 7.5% στην περίπτωση τριπλασιασμού των παραμέτρων ενώ εάν οι παράμετροι διπλασιαστούν η μείωση των πιέσεων στην παρειά φθάνει το 5%. Το ποσοστό των γεωστατικών τάσεων που αναλαμβάνει η οροφή και η παρειά αντιστοιχεί σε 29% και 42-45% σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης.

Πίνακας 6-4: Συγκριτικός πίνακας μεταβολής των πιέσεων στην οροφή και στην παρειά της διατομής σε σχέση με τις γεωστατικές πιέσεις, μετά το τέλος της εκσκαφής (Χ.Θ. 1+636.0).

Ανάλυση	Πιέσεις	Οροφή	Παρειά	Ποσοστό γεωστατικών τάσεων	
				Οροφή	Παρειά
-	Γεωστατικές για $p=30\text{kPa}$	336.1	412.9	Οροφή	Παρειά
a_4	Πιέσεις για E, c	97.6	188.1	29.0%	45.6%
a_12	Πιέσεις για τριπλάσιες παραμέτρους E, c	98.8	173.7	29.4%	42.1%
a_12x2	Πιέσεις για διπλάσιες παραμέτρους E, c	98.3	178.7	29.2%	43.3%

6.4.5 Ανάλυση με θεώρηση άσκησης μηδενικού φορτίου από την επιφάνεια – Σύγκριση με φορτίο $p=30\text{kPa}$

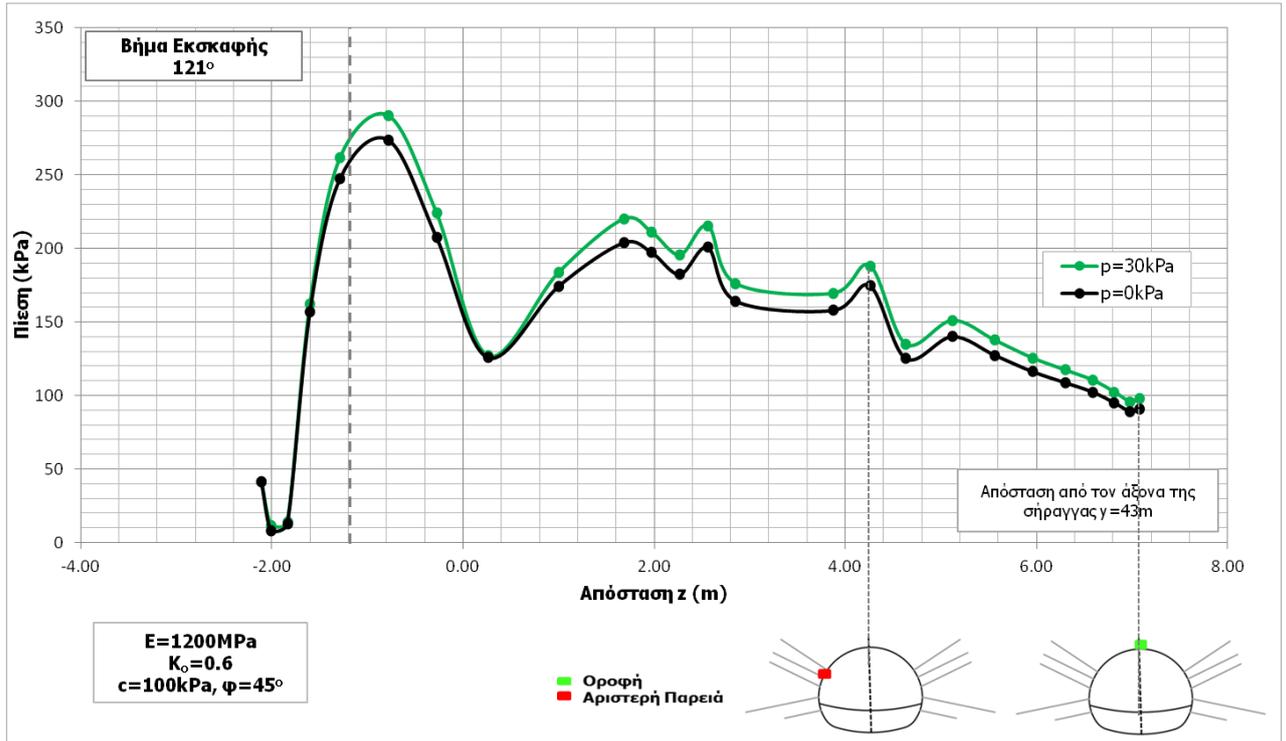
Επιχειρώντας τη διερεύνηση της επιρροής του φορτίου που ασκείται από την επιφάνεια στη διατομή και πώς αυτό επηρεάζει την κατανομή των πιέσεων στο κέλυφος· εκτελέσθηκαν αναλύσεις στις οποίες το φορτίο που ασκείται από την επιφάνεια θεωρήθηκε ίσο με $p=0\text{kPa}$. Καθώς η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε παράλληλα με την οδό Παναγή Τσαλδάρη ίσως είναι πιο ρεαλιστική παραδοχή η θεώρηση μηδενικού φορτίου παρόλο που η δόμηση στην περιοχή περιλαμβάνει Ζόροφα και Ζόροφα κτίρια. Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων στο οποίο έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή της σήραγγας στη διατομή ενδιαφέροντος (Χ.Θ. 1+636).

Το εύρος των παραμέτρων που μελετήθηκαν για τη θεώρηση άσκησης μηδενικού φορτίου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6-5: Παράμετροι των αναλύσεων οι οποίες εκτελέσθηκαν με θεώρηση άσκησης μηδενικού φορτίου από την επιφάνεια.

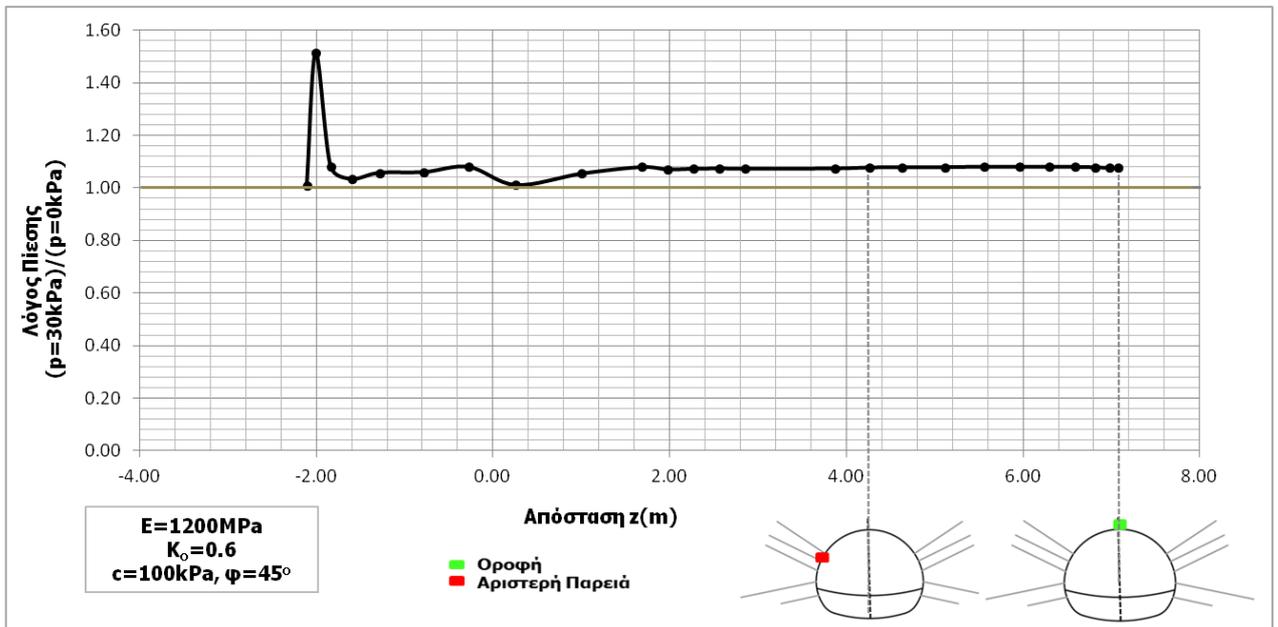
a/a	K_0	Strong			Φορτίο στην επιφάνεια (kPa)	Μελέτη Επίδρασης
		E (kPa)	c (kPa)	ϕ (deg)		
103	0.6	1000000	100	45	0	Μέτρου Ελαστικότητας E
104	0.6	1200000	100	45	0	
105	0.6	1500000	100	45	0	
110	0.7	1200000	100	45	0	Συντελεστή K_0
111	0.8	1200000	100	45	0	

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση με φορτίο στην επιφάνεια 30kPa με την αντίστοιχη ανάλυση με φορτίο 0kPa , διαπιστώθηκε ότι με την ολοκλήρωση της εκσκαφής η ποσοστιαία μεταβολή των πιέσεων κυμαίνεται από 5%-7.50%. Ειδικά στην οροφή και στην παρειά η μεταβολή είναι αντίστοιχα 7%. Συνεπώς, γίνεται προφανής η μικρή επίδραση του φορτίου στην επιφάνεια στα αποτελέσματα των αναλύσεων.



Σχήμα 6-32: Μεταβολή των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για διαφορετικά φορτία που ασκούνται από την επιφάνεια.

Αντίστοιχα, στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται οι λόγοι των πιέσεων, οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι της μονάδας, επαληθεύοντας ότι η μη θεώρηση φορτίου στην επιφάνεια οδηγεί σε μικρότερες πιέσεις στο άνοιγμα της σήραγγας. Γενικά επισημαίνεται ότι η τιμή του λόγου των πιέσεων παραμένει πρακτικά σταθερή.



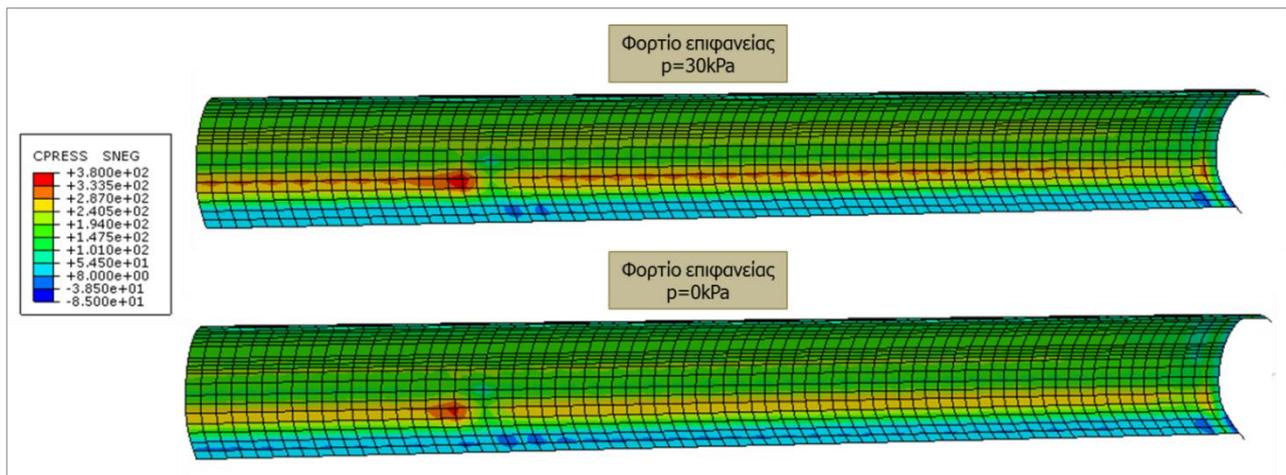
Σχήμα 6-33: Αδιάστατος λόγος μεταβολής των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για διαφορετικά φορτία που ασκούνται από την επιφάνεια.

Πίνακας 6-6: Συγκριτικός πίνακας μεταβολής των πιέσεων στην οροφή και στην παρειά της διατομής σε σχέση με τις γεωστατικές πιέσεις, μετά το τέλος της εκσκαφής (Χ.Θ. 1+636.0).

Ανάλυση	Πιέσεις	Οροφή	Παρειά	Ποσοστό γεωστατικών τάσεων	
				Οροφή	Παρειά
-	Γεωστατικές για $p=30\text{kPa}$	336.1kPa	412.9kPa	Οροφή	Παρειά
a_4	Πιέσεις για $p=30\text{kPa}$	97.6kPa	188.1kPa	29%	45.6%
-	Γεωστατικές για $p=0\text{kPa}$	306.1kPa	382.9kPa	Οροφή	Παρειά
a_104	Πιέσεις για $p=0\text{kPa}$	90.6kPa	174.6kPa	29.6%	45.6%

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η μη θεώρηση επιφανειακού φορτίου επέφερε τα ίδια αποτελέσματα και στις περιπτώσεις όπου αυξομειώθηκε το μέτρο ελαστικότητας στην στρώση όπου διανοίγεται η σήραγγα. Μάλιστα, οι ποσοστιαίες μεταβολές και σε αυτή την περίπτωση κυμαίνονταν στο 5-7.5% δείχνοντας τη μικρή μείωση στις πιέσεις που επιφέρει το μηδενικό φορτίο στην επιφάνεια.

Ακολουθούν εικόνες των πιέσεων του κελύφους της διατομής για φορτίο $p=30\text{kPa}$ και $p=0\text{kPa}$ το οποίο ασκείται από την επιφάνεια, όπως προέκυψαν από το λογισμικό Abaqus. Επαληθεύεται ότι κατά μήκος της διάνοιξης και στις δύο αναλύσεις οι πιέσεις δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις στην κατανομή και στις τιμές τους.

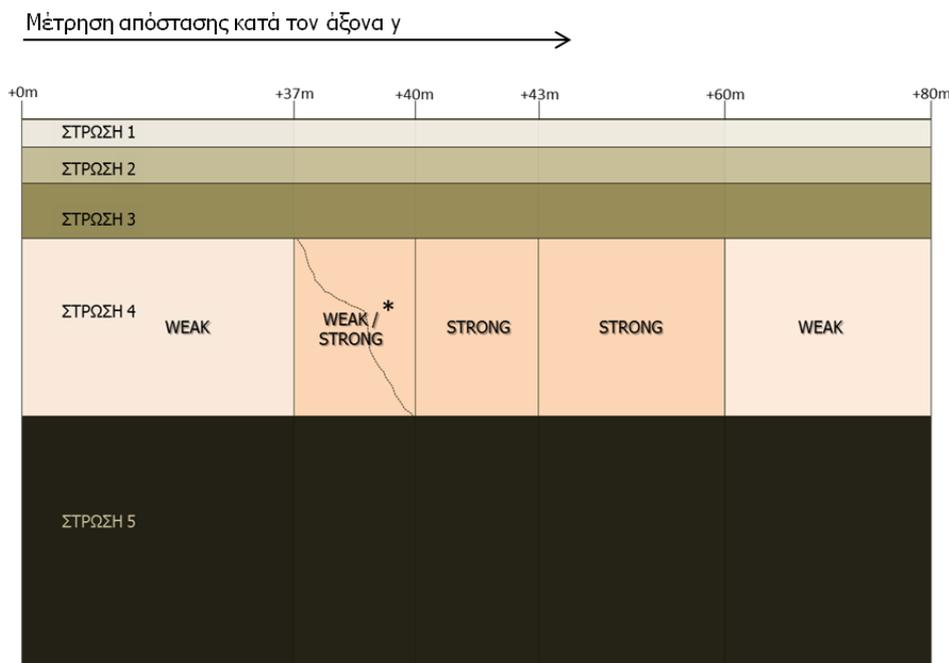


Σχήμα 6-34: Μεταβολή των πιέσεων του κελύφους της διατομής περιμετρικά για διαφορετικές τιμές του φορτίου που ασκείται στην επιφάνεια.

6.4.6 Θεώρηση συγχρόνως ισχυρής και ασθενούς στρώσεως στο επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας

Όπως έχει προαναφερθεί η **Στρώση 4**, όπου περιλαμβάνει και το σχηματισμό μέσα στον οποίο διανοίγεται η σήραγγα που μελετάται, αποτελείται άλλοτε από εναλλαγές μεταψαμμίτη με μεταίλυόλιθο (καλύτερες ιδιότητες – στο Σχήμα 6-35 ορίζεται ως strong) και άλλοτε από εναλλαγές μεταίλυόλιθου με μεταψαμμίτη (απομειωμένες ιδιότητες – στο Σχήμα 6-35 ορίζεται ως weak). Ουσιαστικά, πρόκειται για σχηματισμό ο οποίος είναι εξαρχής ανομοιογενής και θα ήταν αδύνατο να προσπαθήσουμε να τον προσομοιώσουμε ακριβώς. Η προσέγγιση θεωρώντας τις μέσες εμφανίσεις και μέσες ιδιότητες του σχηματισμού είναι η πιο ασφαλής και προσφέρει τον βέλτιστο συνδυασμό σφάλματος-απόκλισης και υπολογιστικού φόρτου. Με αυτόν τον τρόπο δόθηκε η δυνατότητα στο

προσομοίωμα η στρώση 4 να μπορεί να λάβει διαφορετικές ιδιότητες κατά μήκος της εκσκαφής (weak, strong), ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μέσω των ανάστροφων αναλύσεων η ρεαλιστικότερη προσέγγιση. Συνεπώς, ελήφθησαν δύο ενότητες για τη στρώση 4, η ενότητα με τις αυξημένες ιδιότητες (strong) όταν επικρατεί ο μεταψαμμίτης και η ενότητα με τις πτωχότερες ιδιότητες (weak) όταν κυριαρχεί ο μεταίλυόλιθος. Έτσι, αντιστοιχήθηκαν διαφορετικές ιδιότητες και υλικά σε αυτές τις δύο ενότητες. Μηκοτομικά η στρώση διαχωρίστηκε συνολικά σε 5 τμήματα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ώστε να υπάρχει ευελιξία στις αναλύσεις και να διαφοροποιούνται οι περιοχές καλύτερης (strong) και πτωχότερης (weak) ενότητας του σχηματισμού.



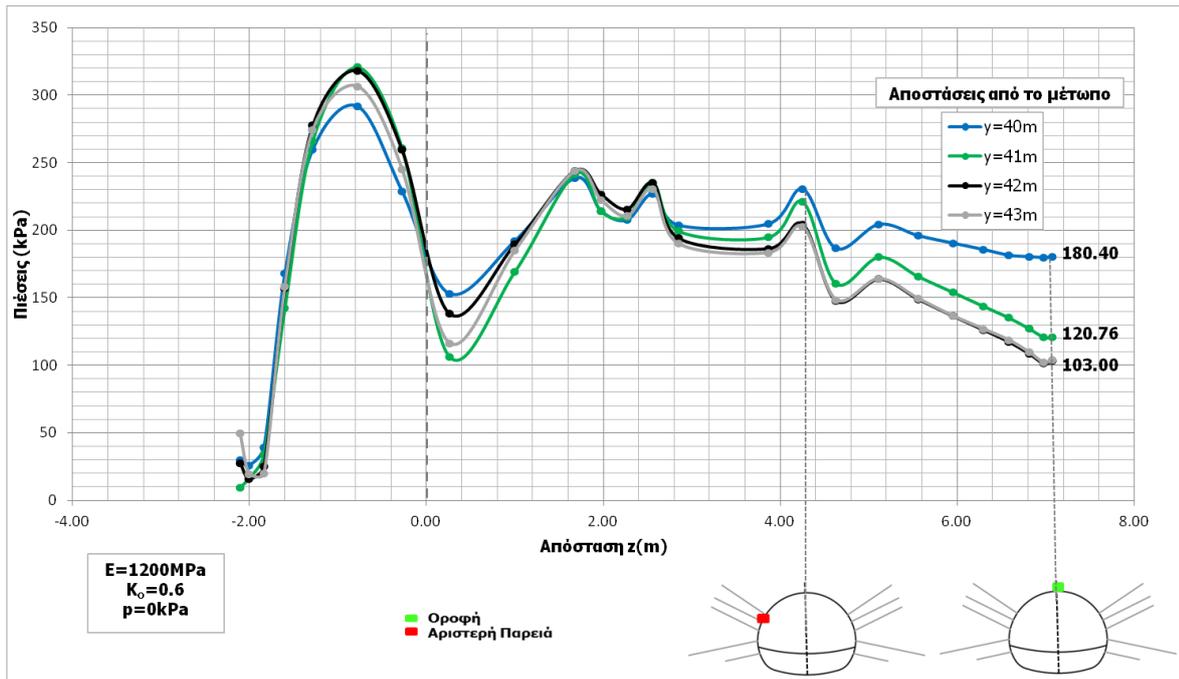
Σχήμα 6-35: Ισχυρότερος και ασθενέστερος σχηματισμός στην στρώση 4 όπου διανοίγεται η σήραγγα.
 [* Ο συμβολισμός weak/strong χρησιμοποιείται γιατί στη θέση αυτή έχει δοθεί η δυνατότητα στο σχηματισμό να λαμβάνει είτε ασθενέστερες είτε ισχυρότερες ιδιότητες.]

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η διαφοροποίηση που επέρχεται στις πιέσεις του κελύφους της άμεσης υποστήριξης όταν λαμβάνεται υπόψη στις ανάστροφες αναλύσεις και η ύπαρξη κατά θέσεις της ασθενέστερης ζώνης στο επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας. Το εύρος των παραμέτρων που μελετήθηκαν για τη θεώρηση συγχρόνως ισχυρής και ασθενούς ενότητας στο επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6-7: Παράμετροι των αναλύσεων οι οποίες εκτελέστηκαν με θεώρηση συγχρόνως ισχυρής και ασθενούς στρώσεως στο επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας [Στρώση 4 weak και strong].

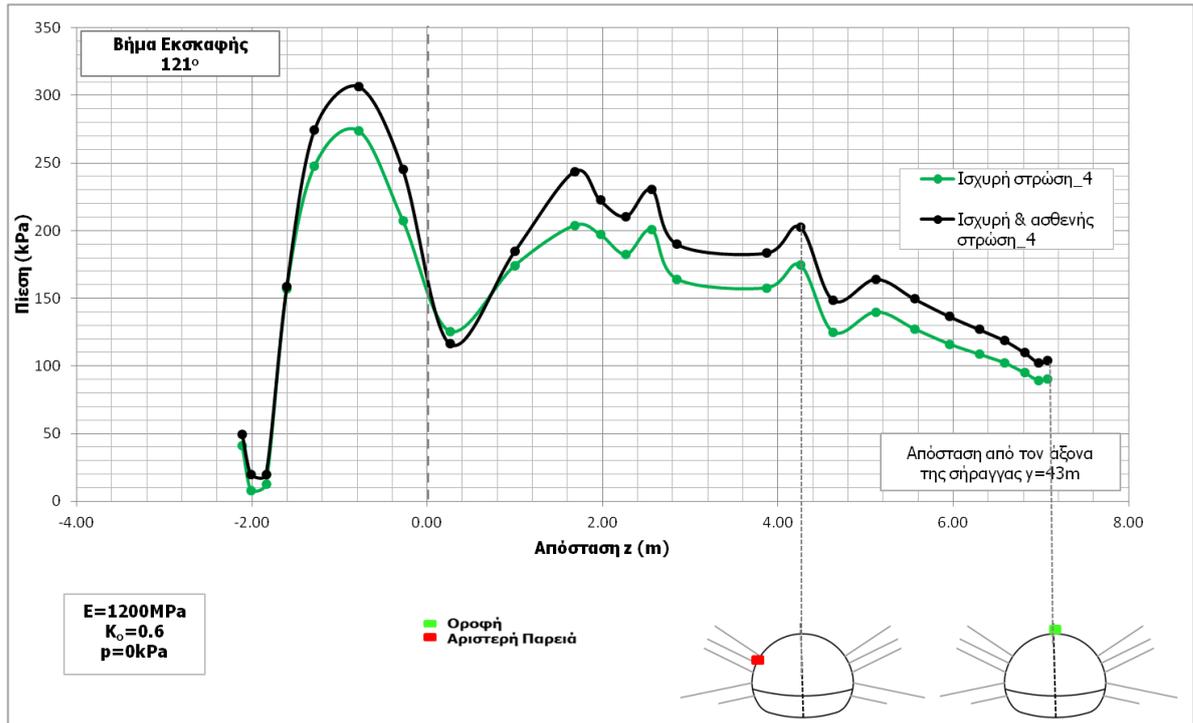
a/a	K_0	Στρώση 4 - Weak			Στρώση 4 - Strong			Φορτίο στην επιφάνεια (kPa)	Μελέτη Επίδρασης
		E (kPa)	c (kPa)	ϕ (deg)	E (kPa)	c (kPa)	ϕ (deg)		
203	0.6	400000	70	40	1000000	100	45	0	Μέτρου Ελαστικότητας E
204	0.6	400000	70	40	1200000	100	45	0	
205	0.6	400000	70	40	1500000	100	45	0	
210	0.7	400000	70	40	1200000	100	45	0	Συντελεστή K_0
211	0.8	400000	70	40	1200000	100	45	0	

Αρχικά, παρουσιάζονται οι πιέσεις περιμετρικά της διατομής σε διαφορετικές χιλιομετρικές θέσεις του μετώπου. Σύμφωνα με το διάγραμμα του επόμενου σχήματος βλέπουμε ότι οι πιέσεις μειώνονται καθώς η διάνοιξη πραγματοποιείται στην ισχυρότερη ενότητα της στρώσεως 4. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στις πιέσεις της οροφής οι οποίες μειώνονται έως και 67% όταν το μέτωπο βρίσκεται μέσα στον σχηματισμό με τις βελτιωμένες ιδιότητες. Γενικά, βλέπουμε ότι οι πιέσεις στις θέσεις $\gamma=42\text{m}$ και $\gamma=43\text{m}$ σχεδόν συμπίπτουν που σημαίνει ότι όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται έστω και λίγο μέσα στην ισχυρή ενότητα του σχηματισμού (στρώση 4 - strong) έχει μικρή επίδραση η ασθενής ενότητα (στρώση 4 - weak) που συναντήθηκε λίγα μέτρα πριν.



Σχήμα 6-36: Μεταβολή των πιέσεων περιμετρικά της διατομής σε διαφορετικά σημεία μετώπου.

Ωστόσο, όσον αφορά στις πιέσεις περιμετρικά της σήραγγας στο μέτωπο όπου έχουν τοποθετηθεί οι κυψέλες πίεσης βλέπουμε, ότι οι ποσοστιαίες μεταβολές είναι μικρές και είναι της τάξεως του 13-16%, με τις πιέσεις που προέρχονται από την θεώρηση ταυτόχρονα ισχυρής και ασθενούς ενότητας να οδηγούν σε μικρή αύξηση των αντίστοιχων πιέσεων από τη θεώρηση ισχυρής ενότητας μόνο. Επίσης, παρατηρείται μικρή μεταβολή στην κατανομή των πιέσεων στο σημείο τοποθέτησης των 4μετρων αγκυριών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο παρακάτω διάγραμμα και στον Πίνακα 6-8.



Σχήμα 6-37: Μεταβολή των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για θεώρηση μόνο ισχυρής και έπειτα ισχυρής & συγχρόνως ασθενούς στρώσεως 4.

Πίνακας 6-8: Συγκριτικός πίνακας μεταβολής των πιέσεων στην οροφή και στην παρειά της διατομής σε σχέση με τις γεωστατικές πιέσεις, μετά το τέλος της εκσκαφής (Χ.Θ. 1+636.0).

Ανάλυση	Πιέσεις	Οροφή	Παρειά	Ποσοστό γεωστατικών τάσεων	
				Οροφή	Παρειά
-	Γεωστατικές για p=0kPa	306.1kPa	382.9kPa	Οροφή	Παρειά
a_104	Πιέσεις για p=0kPa	90.6kPa	174.6kPa	29.6%	45.6%
a_204	Ισχυρή & ασθενής ενότητα	103.93kPa	202.71kPa	33.9%	52.9%

6.4.7 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αναλύσεων Ευαισθησίας

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από κάθε παραμετρική διερεύνηση που εκτελέσθηκε

a/a	K ₀	Στρώση 4 - Weak			Στρώση 4 - Strong			Φορτίο στην επιφάνεια (kPa)	Τελικές πιέσεις όπως προέκυψαν στο πέρας της διάνοιξης		Παρατηρήσεις
		E (kPa)	c (kPa)	φ (deg)	E (kPa)	c (kPa)	φ (deg)		Οροφή (kPa)	Παρεία (kPa)	
1	0.6				600000	100	45	30	134.74	215.37	Ευαισθησία στη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας E. Αύξηση του E επιφέρει μείωση των πιέσεων του κελύφους αλλά δεν μεταβάλλει την κατανομή τους.
2	0.6				800000	100	45	30	119.94	205.63	
3	0.6	Δεν προσομοιώθηκε			1000000	100	45	30	107.82	196.51	
4	0.6				1200000	100	45	30	97.60	188.10	
5	0.6				1500000	100	45	30	84.90	176.69	
7	0.6	Δεν προσομοιώθηκε			1200000	100	45	30	58.95	137.19	Μεγάλη ευαισθησία στη μείωση του πάχους του Ε.Σ. Προκύπτει σημαντική μείωση των πιέσεων. Μελετάται εκτενέστερα.
8	0.6				1200000	80	45	30	95.24	184.95	Μικρή μείωση των πιέσεων όσο μειώνεται η συνοχή c χωρίς διαφοροποίηση στην κατανομή τους, περιμετρικά του κελύφους.
9	0.6	Δεν προσομοιώθηκε			1200000	120	45	30	98.79	189.62	
10	0.7				1200000	100	45	30	115.45	195.64	Ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή K ₀ . Αύξηση του K ₀ επιφέρει αύξηση των πιέσεων του κελύφους με μεταβολή και της κατανομής τους.
11	0.8	Δεν προσομοιώθηκε			1200000	100	45	30	133.25	203.15	
12	0.6	Δεν προσομοιώθηκε			1200000	100	45	30	98.86	173.72	Με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E παρατηρείται μείωση των πιέσεων. Όμως, προκύπτει μικρή μείωση αυτών σε σχέση με τον διπλασιασμό του E που θα έπρεπε να οδηγεί σε μεγαλύτερες μειώσεις
103	0.6				1000000	100	45	0	100.042	182.365	Ευαισθησία στη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας E. Αύξηση του E επιφέρει μείωση των πιέσεων του κελύφους αλλά δεν μεταβάλλει την κατανομή τους. Βασική διαφορά η θεώρηση μηδενικού φορτίου η οποία προκαλεί μικρή μείωση σε όλες τις τιμές των πιέσεων.
104	0.6	Δεν προσομοιώθηκε			1200000	100	45	0	90.633	174.589	
105	0.6				1500000	100	45	0	78.8926	164.028	
110	0.7				1200000	100	45	0	107.139	181.621	Ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή K ₀ . Αύξηση του K ₀ επιφέρει αύξηση των πιέσεων του κελύφους με μεταβολή και της κατανομής τους. Μικρή μείωση στις πιέσεις λόγω μηδενικού φορτίου.
111	0.8	Δεν προσομοιώθηκε			1200000	100	45	0	123.664	188.695	
203	0.6	400000	70	40	1000000	100	45	0	113.453	209.116	Όμοια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες αναλύσεις για p=30kPa.
204	0.6	400000	70	40	1200000	100	45	0	103.931	202.707	
205	0.6	400000	70	40	1500000	100	45	0	91.7389	193.085	
210	0.7	400000	70	40	1200000	100	45	0	125.218	209.552	Όμοια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες αναλύσεις για p=30kPa.
211	0.8	400000	70	40	1200000	100	45	0	146.348	216.029	
304	0.5	Δεν προσομοιώθηκε			1200000	100	45	0	73.6736	167	Ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή K ₀ . Περαιτέρω μείωση του K ₀ επιφέρει μείωση στις πιέσεις του κελύφους.

6.4.8 Σταδιακή κατασκευή του σκυροδέματος κατά την άμεση υποστήριξη της εκσκαφής

Από τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν παραπάνω παρουσιάστηκε μεγαλύτερη μεταβολή στις τιμές των πιέσεων όταν μειώθηκε στο ήμισυ το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό δόθηκε η δυνατότητα στο προσομοίωμα να τοποθετείται σταδιακά το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε δύο στρώματα. Η σταδιακή τοποθέτηση του σκυροδέματος προσομοιώθηκε με τη χρήση μίας υπορουτίνας της Fortran, η οποία προσδίδει διαφορετικές ιδιότητες (πάχος σκυροδέματος και μέτρο ελαστικότητας) στο υλικό σε κάθε βήμα εκσκαφής.

Στο τροποποιημένο προσομοίωμα το κέλυφος της υποστήριξης προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (beam elements) ισοδύναμης διατομής η οποία έχει δυσκαμψία, δυστένεια και αντοχή ίση με τις αντίστοιχες τιμές της σύμμικτης διατομής του εκτ. σκυροδέματος και του μεταλλικού πλαισίου, όπως είχαν υπολογισθεί και στην ενότητα 5.3.1. από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$E_{eq}I_{eq} = E_cI_c + E_sI_s \quad (6-7)$$

$$E_{eq}A_{eq} = E_cA_c + E_sA_s \quad (6-8)$$

όπου:

E_{eq}, E_c, E_s : Μέτρο ελαστικότητας ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

I_{eq}, I_c, I_s : Ροπή αδράνειας ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

A_{eq}, A_c, A_s : Εμβαδόν ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

Τα αντίστοιχα μεγέθη για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπολογίζονται:

$$A_c = b \times h - A_s = 0.197 \text{ m}^2, \text{ όπου } b = 1.00 \text{ m}, h = 0.20 \text{ m} \quad (6-3)$$

$$I_c = \frac{b \times h^3}{12} - I_s = 6.58 \times 10^{-4} \text{ m}^4, \text{ όπου } s = 0.104 \text{ m} \quad (6-4)$$

Επομένως προκύπτουν τα χαρακτηριστικά της ισοδύναμης διατομής, τα οποία τοποθετούνται στις ιδιότητες του σκυροδέματος στο προσομοίωμα:

$$h_{eq} = \sqrt{\frac{12E_{eq}I_{eq}}{E_{eq}A_{eq}}} = 0.295 \text{ m}, E_{eq} = 22228.35 \text{ MPa} \quad (6-5)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{f_c A_c + f_s A_s}{b h_{ισοδ.}} = 26.0 \text{ MPa}, \rho_{eq} = 2.5 \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \quad (6-6)$$

Το ισοδύναμο πάχος της διατομής h_{eq} και η ισοδύναμη τάση σ_{eq} διατηρήθηκαν ίδια με τα ισοδύναμα μεγέθη της περίπτωσης άμεσης τοποθέτησης του Ε.Σ. Η κάθε ανάλυση αποτελούνταν συνολικά από 121 βήματα. Πιο συγκεκριμένα, στο βήμα προχώρησης κ ενεργοποιείται πάχος σκυροδέματος 20cm, ενώ παράλληλα στο βήμα κ-2 ενεργοποιείται και η δεύτερη στρώση σκυροδέματος πάχους 10cm με βελτιωμένες ιδιότητες, καθώς το σκυρόδεμα με την πάροδο του χρόνου θα έχει αυξήσει αντοχή και παράλληλα σε αυτό το βήμα τοποθετείται και το ανάστροφο τόξο. Συνεπώς, σταδιακά ενεργοποιείται όλη η υποστήριξη συνολικού πάχους 30cm. Αναλυτικότερα:

1° Βήμα: Υπολογισμός των γεωστατικών συνθηκών του προβλήματος δηλαδή, των αρχικών τάσεων πριν την κατασκευή της σήραγγας.

2° Βήμα: Ενεργοποίηση της ομπρέλας δοκών προπορείας, των αγκυρίων μετώπου και του ανάστροφου τόξου.

3° Βήμα: Εκσκαφή των δύο πρώτων μέτρων του υπόγειου ανοίγματος της Α' φάσης εκσκαφής και ενεργοποίηση της υποστήριξης του πρώτου μέτρου της 1^{ης} στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, της ομπρέλας δοκών προπορείας, των αγκυρίων μετώπου.

Βήμα κ: Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της Α' φάσης και τοποθέτηση της 1^{ης} στρώσης του Ε.Σ.. Παράλληλα, γίνεται τοποθέτηση της 2^{ης} στρώσης του Ε.Σ. στο κ-2 βήμα και έτσι ολοκληρώνεται ο δακτύλιος ενώ γίνεται παράλληλη τοποθέτηση του ανάστροφου τόξου.

Από κ-81° Βήμα: Όμοια με το παραπάνω.

82° Βήμα-121° Βήμα: Έναρξη εκσκαφής Β' Φάσης και ολοκλήρωση της διάνοιξης όπως έχουν παρουσιασθεί στην ενότητα 5.2.2.3.

Για τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των νέων βημάτων εκσκαφής του προσομοιώματος εκτελέστηκε μία δοκιμαστική ανάλυση με τις ίδιες παραμέτρους, με μία παλαιότερης μορφής για φορτίο επιφανείας $p=0\text{kPa}$. Διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην οποία το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται σε μία στρώση ταυτίζονται με τα αποτελέσματα του νέου προσομοιώματος, εάν και σε αυτό θεωρηθεί ότι η κατασκευή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται σε μία στρώση.

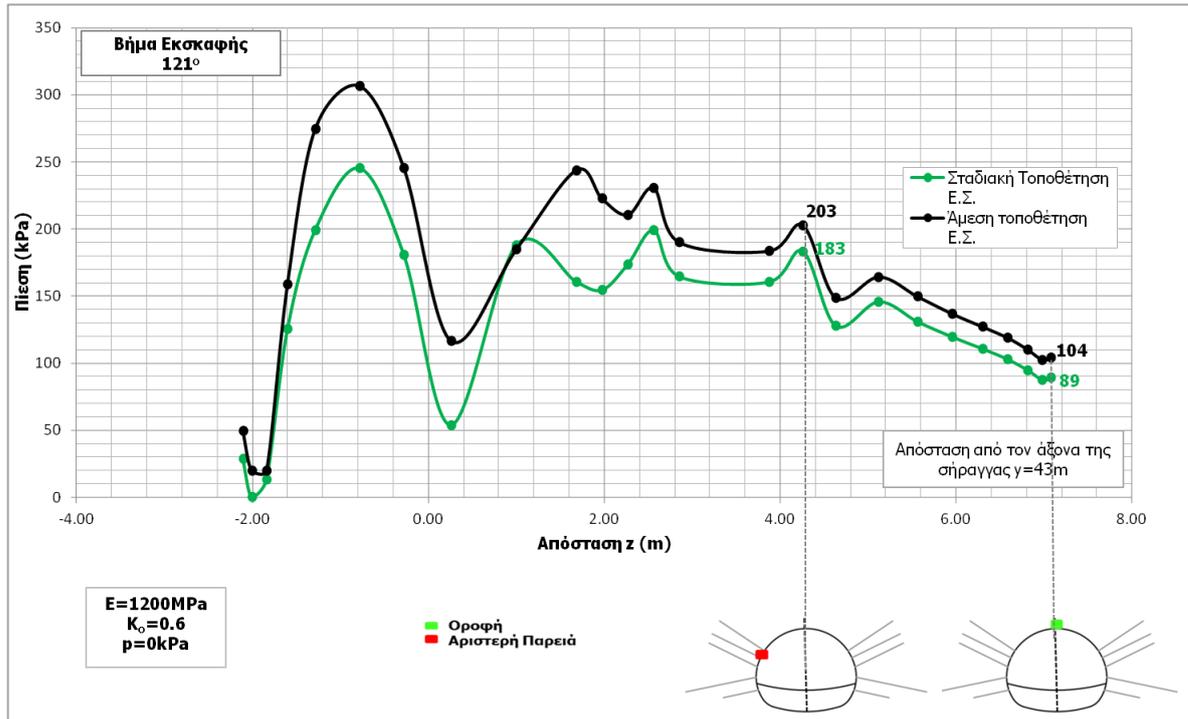
Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι νέες αναλύσεις που εκτελέστηκαν με δεδομένο ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται σε δύο χρόνους (στρώματα-layers) και λαμβάνει σταδιακά την πλήρη αντοχή του. Το εύρος των παραμέτρων που μελετήθηκαν για τη θεώρηση σταδιακής τοποθέτησης του σκυροδέματος παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6-9: Παράμετροι των αναλύσεων οι οποίες εκτελέστηκαν με θεώρηση σταδιακής τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

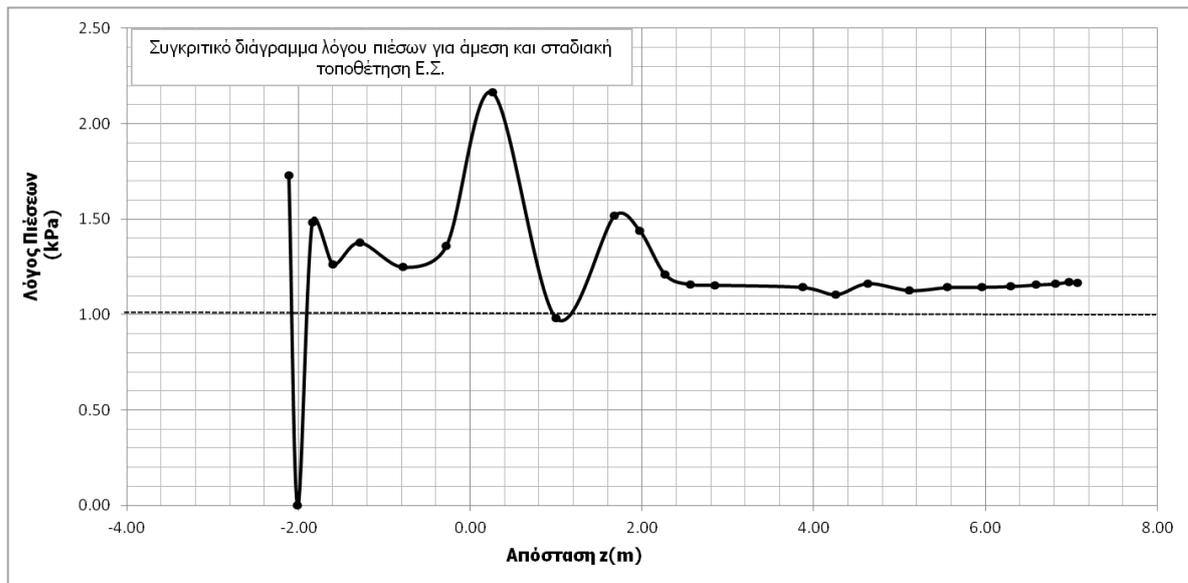
a/a	K ₀	Στρώση 4 - Weak			Στρώση 4 - Strong			Φορτίο στην επιφάνεια (kPa)	Μελέτη Επίδρασης
		E (kPa)	c (kPa)	φ (deg)	E (kPa)	c (kPa)	φ (deg)		
404	0.6	400000	70	40	1200000	100	45	0	Σταδιακής κατασκευής εκτοξευόμενου σκυροδέματος και σταδιακής ανάληψης αντοχής του σε συνδυασμό με διαφορετικούς συντελεστές K ₀ , E
405	0.6	400000	70	40	1000000	100	45	0	
406	0.5	400000	70	40	1000000	100	45	0	
407	0.5	400000	70	40	1200000	100	45	0	

Από την διερεύνηση των αναλύσεων παρατηρείται ότι η σταδιακή τοποθέτηση του Ε.Σ οδηγεί σε μείωση των πιέσεων περιμετρικά της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε μια σειρά αναλύσεων θεωρώντας σταδιακή κατασκευή του Ε.Σ. και επιχειρήθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων με προηγούμενη ομάδα αναλύσεων όπου τοποθετούνταν το συνολικό πάχος του σκυροδέματος.

Στην περίπτωση όπου το μέτρο ελαστικότητας λάμβανε την τιμή $E=1200\text{MPa}$ και ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων ήταν ίσος με $K_0=0.6$ οι πιέσεις μειώθηκαν κατά 15-35% (Σχήμα 6-38) επιβεβαιώνοντας την μεγάλη ευαισθησία των αποτελεσμάτων στον τρόπο τοποθέτησης του Ε.Σ.. Αναμφίβολα, η παρούσα θεώρηση μας οδηγεί πιο κοντά στα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις επί τόπου μετρήσεις πιέσεων των κυψελών.



Σχήμα 6-38: Μεταβολή των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για θεώρηση ολικής και σταδιακής τοποθέτησης του Ε.Σ. με την προχώρηση της εκσκαφής.

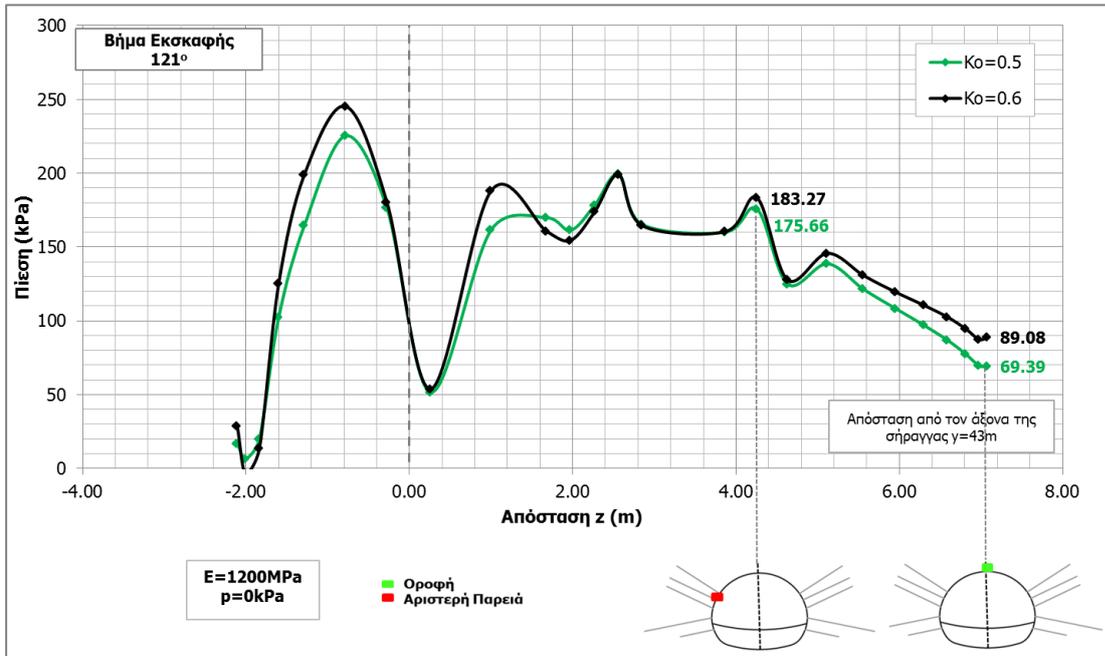


Σχήμα 6-39: Αδιάστατος λόγος μεταβολής των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για θεώρηση ολικής και σταδιακής τοποθέτησης του Ε.Σ. με την προχώρηση της εκσκαφής.

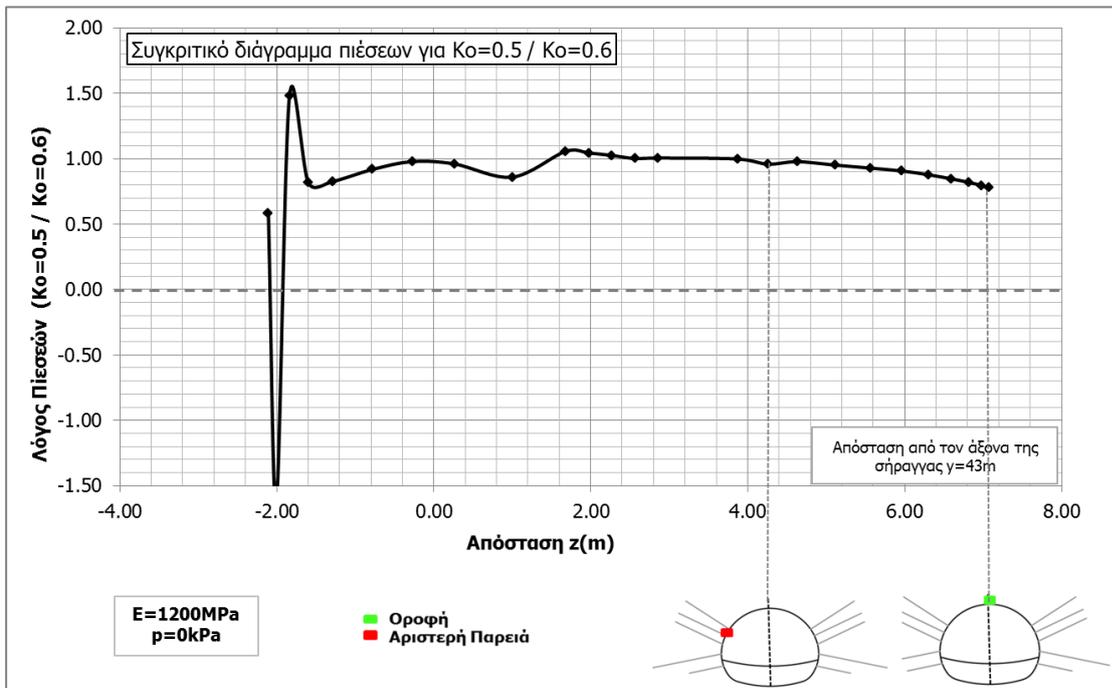
Έχοντας δείξει σε προηγούμενη ενότητα (§6.4.3) τη μεγάλη ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην μεταβολή του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων K_0 πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τη θεώρηση αυτού ίσου με την τιμή $K_0=0.5$. Με βάση την διερεύνηση που ακολουθήθηκε παρατηρήθηκε ότι μείωση του συντελεστή οδηγεί σε μείωση των πιέσεων περί την διατομή.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται η περίπτωση, όπου το μέτρο ελαστικότητας λάμβανε την τιμή $E=1200\text{MPa}$ και ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων ήταν 0.5. Οι πιέσεις μειώθηκαν κατά 22% στην οροφή και κατά 4% στην παρειά σε σχέση με την περίπτωση όπου το K_0 ήταν ίσο με 0.6.

Συνεπώς η θεώρηση σταδιακής τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με παράλληλη μεταβολή του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων μειώνει σημαντικά τις πιέσεις περιμετρικά του κελύφους, το οποίο προσεγγίζει περισσότερο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις επί τόπου μετρήσεις πιέσεων των κυβελών. Από το διάγραμμα του αδιάστατου λόγου των πιέσεων για μεταβαλλόμενο K_0 , γίνεται σαφές ότι η μείωση του συντελεστή επιδρά περισσότερο στις πιέσεις της οροφής από ότι σε κάποιο άλλο σημείο περί τη διατομή.



Σχήμα 6-40: Μεταβολή των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για διαφορετικούς συντελεστές K_0 και θεώρηση σταδιακής τοποθέτησης του Ε.Σ. με την προχώρηση της εκσκαφής.

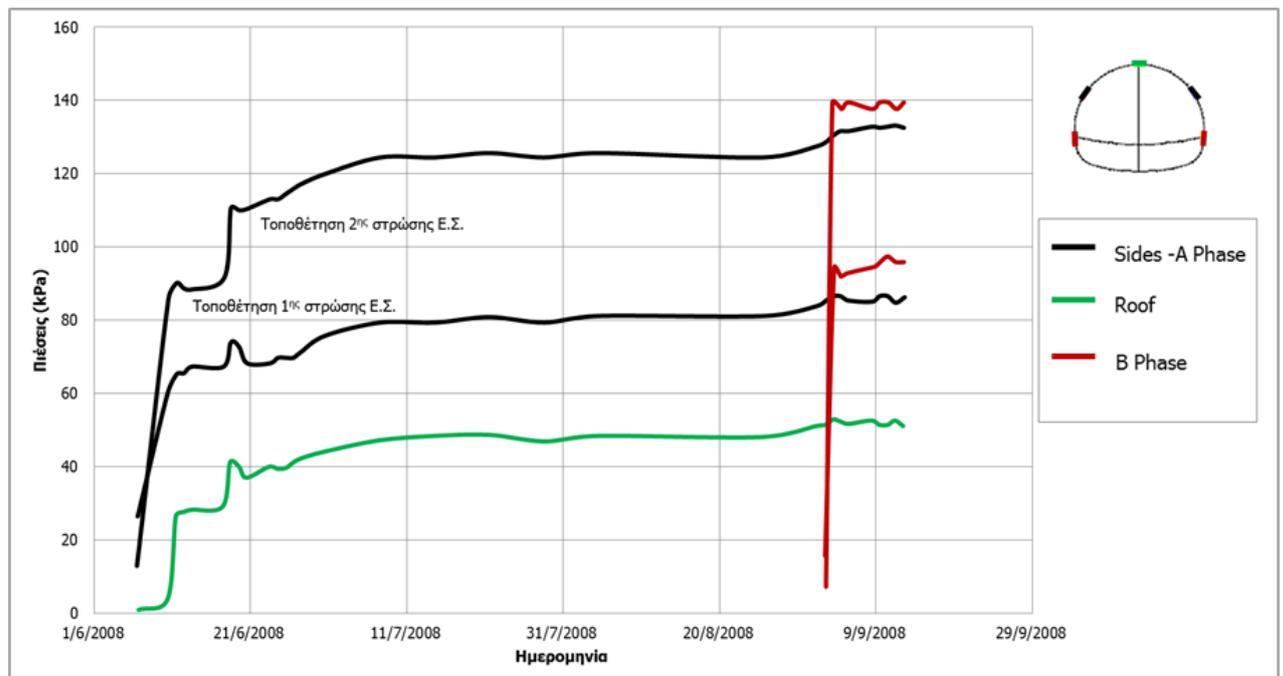


Σχήμα 6-41: Αδιάστατος λόγος μεταβολής των πιέσεων περιμετρικά της διατομής για διαφορετικούς συντελεστές K_0 και θεώρηση σταδιακής τοποθέτησης του Ε.Σ. με την προχώρηση της εκσκαφής.

6.4.9 Χρονική μεταβολή των πιέσεων περιμετρικά της διατομής άμεσης υποστήριξης

Κατά την εκτέλεση των αναλύσεων δόθηκε η δυνατότητα στο προσομοίωμα να εξαγάγει τα αποτελέσματα των πιέσεων του κελύφους στην περίμετρο της διατομής εκσκαφής, συναρτήσει της χρονικής ακολουθίας των βημάτων εκσκαφής. Αντιστοιχίζοντας την παράμετρο του χρόνου του προσομοιώματος (το προσομοίωμα μετρά με βήματα εκσκαφής) με τις πραγματικές ημερομηνίες προχώρησης του μετώπου, σε κάθε φάση εργασιών, προέκυψε το διάγραμμα της κατανομής των υπολογισμένων πιέσεων συναρτήσει των ημερομηνιών εκσκαφής. Φέρνοντας την κατανομή των πιέσεων σε αυτή τη μορφή ήταν πιο εύκολη και ευδιάκριτη η σύγκριση των πιέσεων όπως υπολογίστηκαν από τις ανάστροφες αναλύσεις με τις μετρούμενες επί τόπου πιέσεις από τα ειδικά όργανα, τις κυψέλες πίεσης.

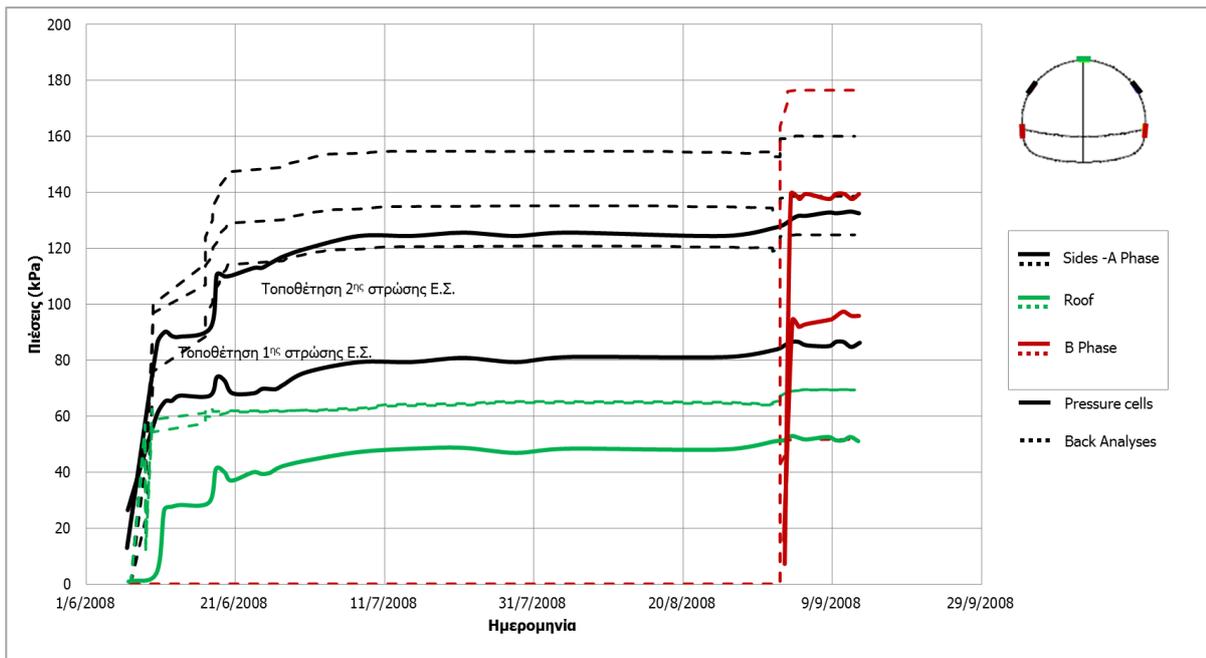
Αναφορικά με το διάγραμμα των πιέσεων, όπως προέκυψε από τις κυψέλες πίεσης στα πλαίσια της γεωμηχανικής και δομητικής παρακολούθησης, παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.3 ότι ενώ οι μετρημένες πιέσεις στην αριστερή παρειά της διατομής διαφέρουν από τις αντίστοιχες στη δεξιά παρειά, ο λόγος των πιέσεων αριστερά και δεξιά διατηρείται πρακτικά σταθερός. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι δεν προκύπτει μεταβολή στη μορφή της κατανομής των πιέσεων στις παρειές κατά την προχώρηση των εργασιών, παρά μόνο διαφορά στις τιμές αυτών. Όμοια συμπεριφορά προέκυψε και στις πιέσεις που μετρήθηκαν από τις κυψέλες πίεσης που είχαν τοποθετηθεί στην οροφή. Σημειώνεται ότι, κατά την πρόοδο των εργασιών και τη σταδιακή τοποθέτηση των στρώσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρείται τοπική αυξομείωση των πιέσεων, καθώς όπως προέκυψε και από αναλύσεις ευαισθησίας (Ενότητα **Error! Reference source not found.**) η μεταβολή του πάχους του σκυροδέματος προκαλεί μεταβολή των τιμών κατά 30-40%. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται η μορφή του διαγράμματος των μετρούμενων πιέσεων.



Σχήμα 6-42: Επί τόπου πιέσεις περιμετρικά της διατομής κατά την προχώρηση της εκσκαφής, όπως προέκυψαν από τις κυψέλες πίεσης.

Για την σύγκριση των πιέσεων με τις μετρούμενες επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι κόμβοι στο προσομοίωμα οι οποίοι προσέγγιζαν τις θέσεις τοποθέτησης των κυψελών πίεσης πάνω στη διατομή της σήραγγας, σύμφωνα με τα στοιχεία των οργανομετρήσεων που μας παραχωρήθηκαν.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα που αντιπροσωπεύει τις κατανομές των πιέσεων, από τα αποτελέσματα μίας ανάστροφης ανάλυσης με τα αποτελέσματα των επί τόπου πιέσεων στην οροφή, στις παρειές και στη θέση κατασκευής της Β' Φάσης, περιμετρικά της διατομής άμεσης υποστήριξης.



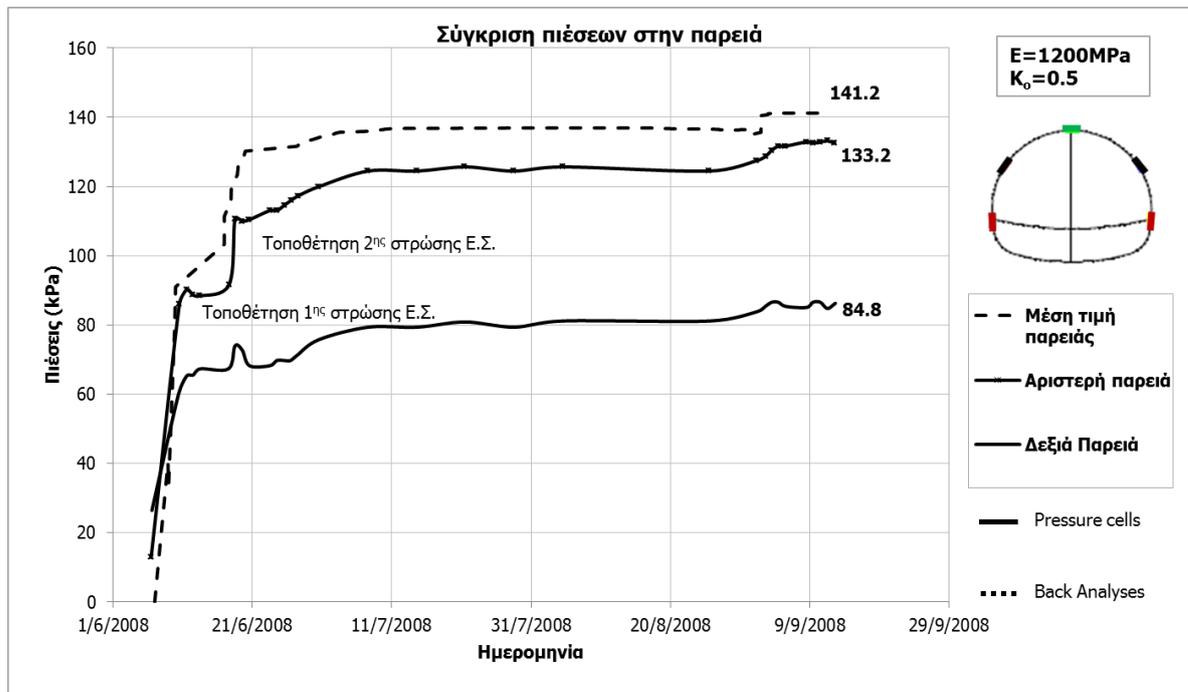
Σχήμα 6-43: Σύγκριση των πιέσεων περιμετρικά της διατομής κατά την προχώρηση της εκσκαφής, όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις με τις μετρημένες πιέσεις από τις κυψέλες πίεσης. Έχει θεωρηθεί σταδιακή τοποθέτηση σκυροδέματος, Ανομοιογενής σχηματισμός στη στρώση 4 (ισχυρή ενότητα με $K_0=0.5$, $E=1500\text{MPa}$) και φορτίο από την επιφάνεια $p=0\text{kPa}$.

Η σύγκριση των διαφορετικών σημείων περιμετρικά της διατομής φανερώνει ότι υπάρχουν αποκλίσεις στις τιμές των πιέσεων όπως υπολογίσθηκαν με την ανάστροφη πορεία σε σχέση με τις μετρημένες τιμές των κυψελών πίεσης. Παρόλα αυτά το αριθμητικό προσομοίωμα έχει αναπαράγει σωστά τη μορφή κατανομής των πιέσεων τόσο στην Α' όσο και στη Β' Φάση εκσκαφής, έχει προσδιορίσει το μηχανισμό με τον οποίο μεταβάλλονται οι πιέσεις περιμετρικά και προσεγγίζει αρκετά τις πραγματικές τιμές.

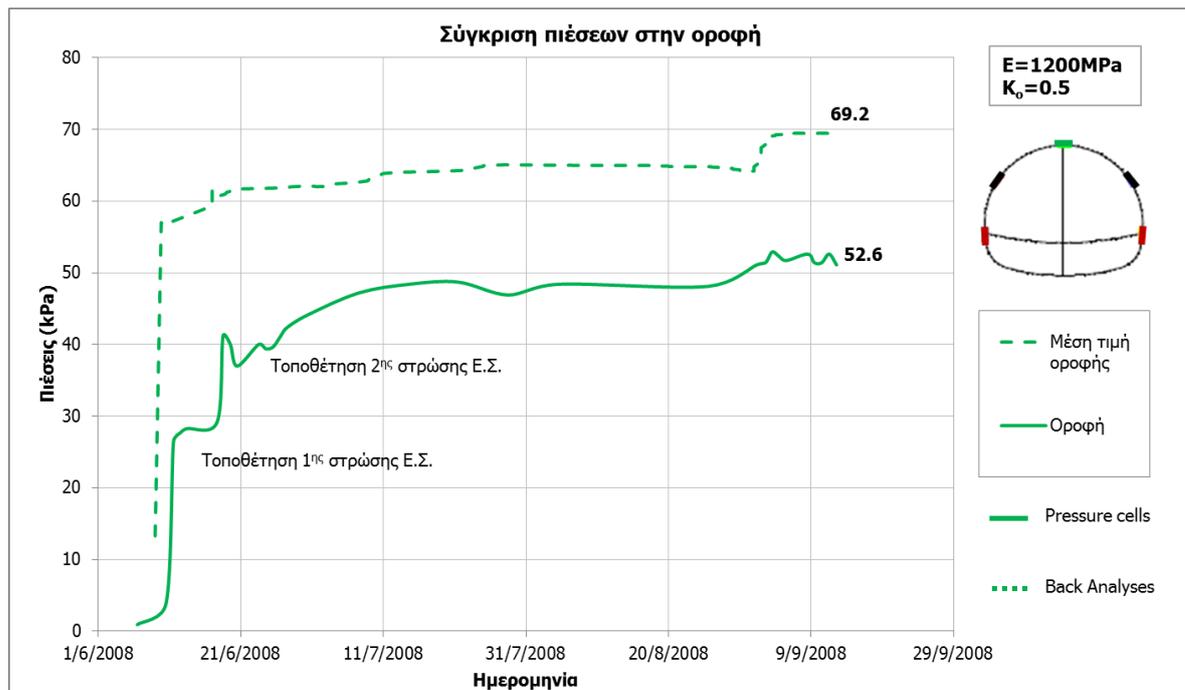
Αναμφίβολα, η προσομοίωση ενός πολυσύνθετου φυσικού προβλήματος μέσω κώδικα πεπερασμένων στοιχείων επιβάλλει την θεώρηση παραδοχών που θα καταστήσουν δυνατό τον υπολογισμό. Επομένως, οι λόγοι για τους οποίους οι τιμές των πιέσεων διαφέρουν εξαρτώνται από τις παραδοχές που έχουν ληφθεί και μπορεί να ποικίλλουν. Η προφανής μη ρεαλιστική παραδοχή ότι το έδαφος είναι ένα ομοιογενές υλικό με οριζόντια στρωμάτωση των σχηματισμών μπορεί να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Επίσης, οι κυψέλες πίεσης μπορεί να έχουν υποεκτιμήσει εξαρχής τις τιμές των πιέσεων εξαιτίας της αρχικής μέτρησης αναφοράς των οργάνων.

Στη συνέχεια, προσπαθώντας να επιτύχουμε συσχέτιση των τιμών υπολογίσθηκαν οι μέσες τιμές των πιέσεων των αναλύσεων από κόμβους περιμετρικά της οροφής και της παρειάς. Η σύγκριση αυτών με τα αντίστοιχα μετρημένα μεγέθη φανερώνει ότι το προσομοίωμα, μέσω ρεαλιστικών τιμών των θεωρούμενων παραμέτρων, συγκλίνει ικανοποιητικά.

Αντιπροσωπευτική ανάλυση με $E=1200\text{MPa}$ και $K_0=0.5$ έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Σχήμα 6-44: Σύγκριση των μέσων πιέσεων στην παρειά της διατομής κατά την προχώρηση της εκσκαφής, όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις και από τις μετρημένες πιέσεις των κυψελών πίεσης.



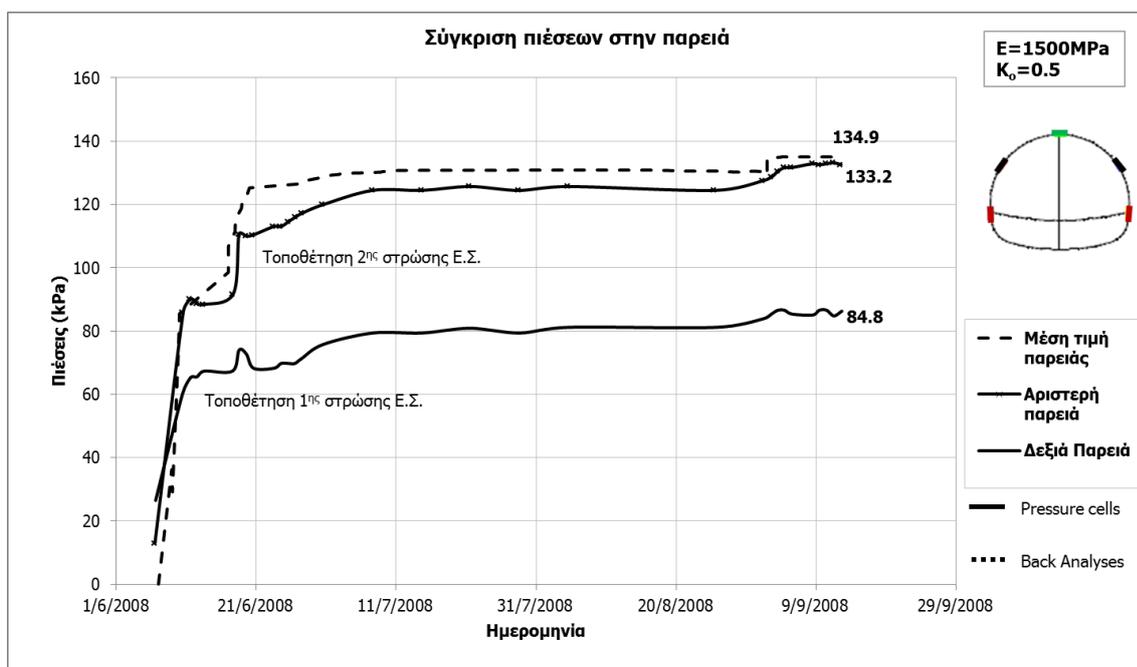
Σχήμα 6-45: Σύγκριση των μέσων πιέσεων στην οροφή της διατομής κατά την προχώρηση, όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις και από τις μετρημένες πιέσεις των κυψελών πίεσης.



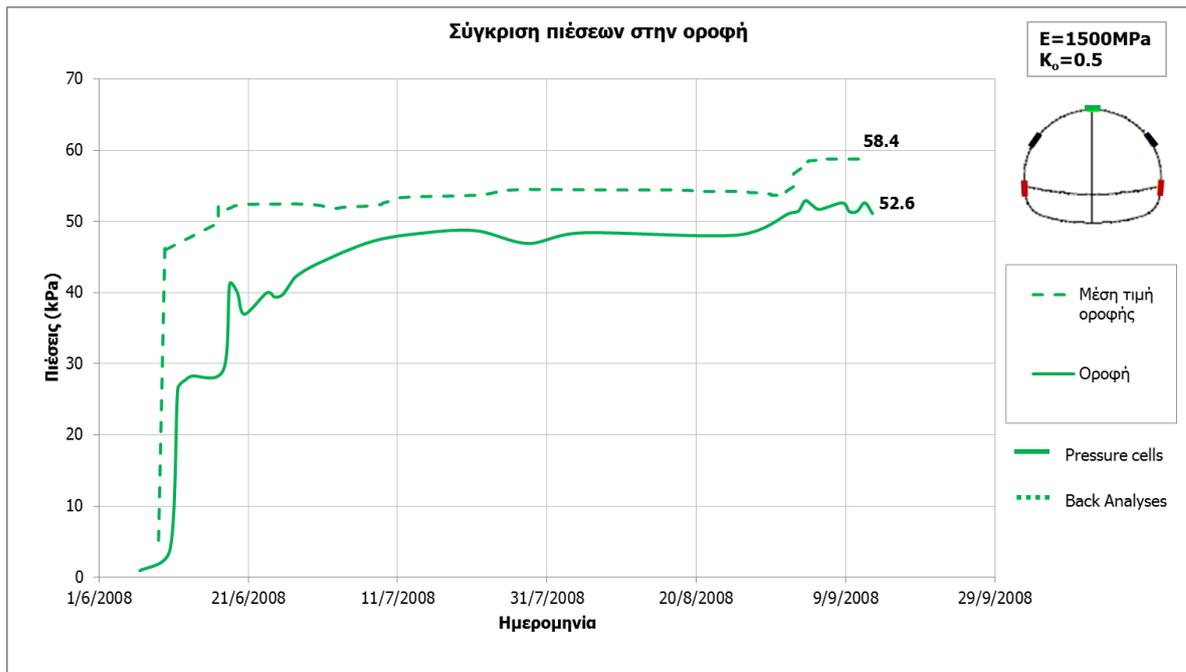
Σχήμα 6-46: Σύγκριση των μέσων πιέσεων κατά την προχώρηση της Β' φάσης εκσκαφής, όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις και από τις μετρημένες πιέσεις των κυψελών πίεσης.

Γνωρίζοντας την μεγάλη ευαισθησία των αποτελεσμάτων στο μέτρο ελαστικότητας και βλέποντας ότι αύξηση αυτού οδηγεί σε μείωση των φορτίων περί τη διατομή, θεωρήθηκε $E=1500\text{MPa}$ που αποτελεί εύλογη παραδοχή, σύμφωνα με εκτίμηση του μέτρου σε προηγούμενη ενότητα (ξ6.4) από εξισώσεις της βιβλιογραφίας.

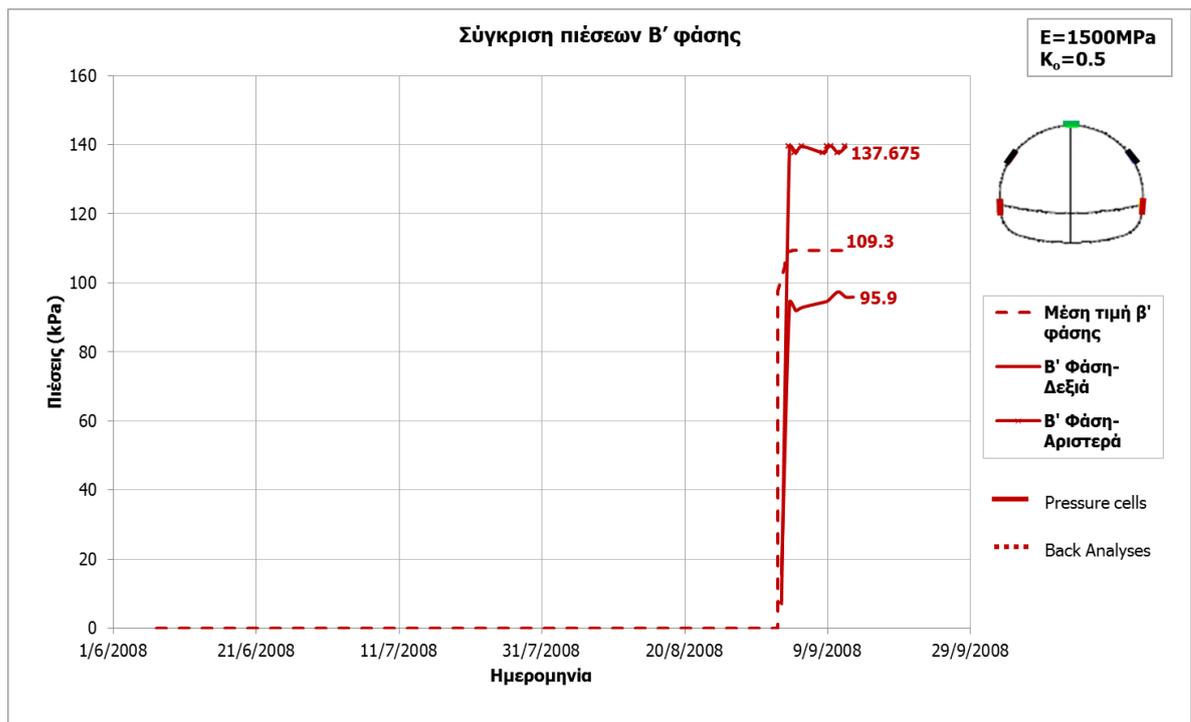
Αντιπροσωπευτική ανάλυση με $E=1500\text{MPa}$ και $K_o=0.5$ έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Σχήμα 6-47: Σύγκριση των μέσων πιέσεων στην παρειά της διατομής κατά την προχώρηση της εκσκαφής, όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις και από τις μετρημένες πιέσεις των κυψελών πίεσης.



Σχήμα 6-48: Σύγκριση των μέσων πιέσεων στην οροφή της διατομής κατά την προχώρηση της εκσκαφής, όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις και από τις μετρημένες πιέσεις των κυψελών πίεσης.



Σχήμα 6-49: Σύγκριση των μέσων πιέσεων κατά την προχώρηση της Β' φάσης εκσκαφής, όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις και από τις μετρημένες πιέσεις των κυψελών πίεσης.

Επιλογικά, κρίνουμε ότι οι τελευταίες αναλύσεις είναι οι αντιπροσωπευτικότερες και συσχετίζονται καλύτερα τις πιέσεις από την ανάστροφη διαδικασία και τις επικρατούσες τιμές. Τα αποτελέσματα εμφανίζουν απόκλιση από τα μετρημένα της τάξεως:

Πίνακας 6-10: Ποσοστιαίες Μεταβολές Πιέσεων κυψελών πίεσης περί τη διατομή με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις.

	E=1500MPa	E=1200MPa
	Ποσοστιαία Μεταβολή	Ποσοστιαία Μεταβολή
Σημείο Τοποθέτησης Κυψέλης		
Αριστερή Παρειά Α' φάσης	2%	6%
Δεξιά Παρειά Α' φάσης	59%	66%
Οροφή	11%	31%
Αριστερή Παρειά Β' φάσης	20%	17%
Δεξιά Παρειά Β' φάσης	14%	15%

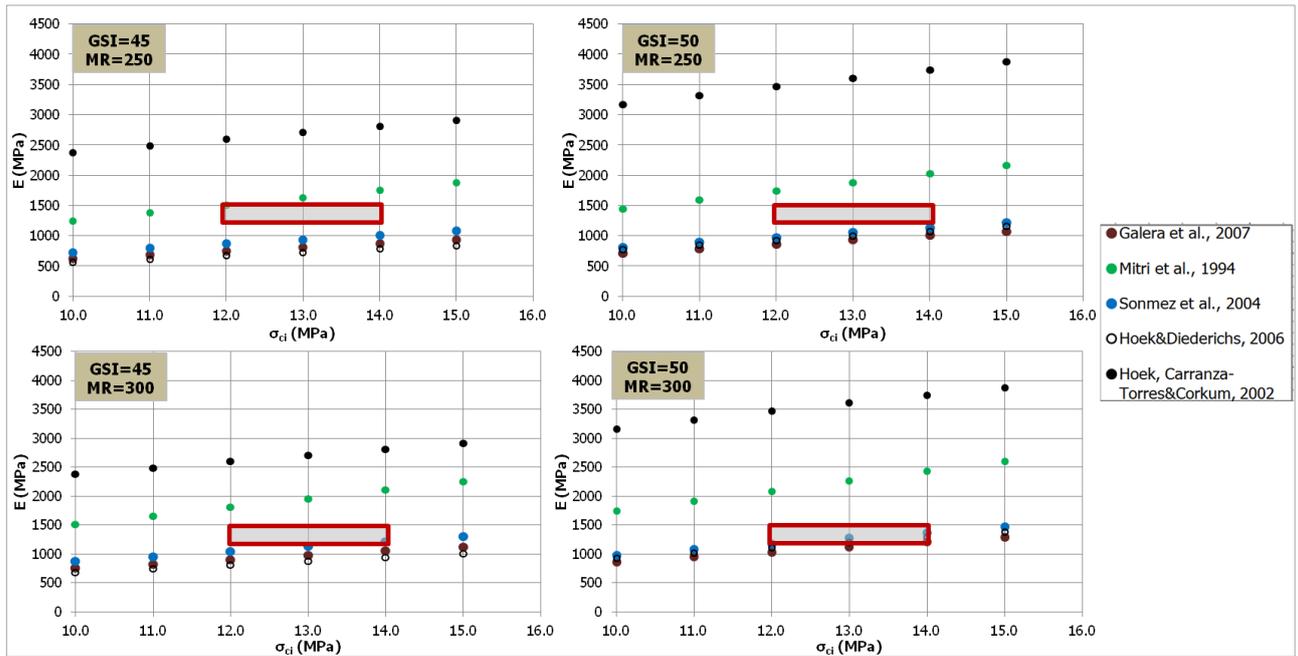
Συναξιολογώντας τις γεωτεχνικές παραμέτρους από τα στοιχεία της μελέτης και της κατασκευής του έργου, θεωρήθηκαν κάποια εύρη τιμών για αυτές. Γενικά, από τις αναλύσεις ευαισθησίας που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της πρωταρχικής παραμετρικής διερεύνησης προέκυψε ότι μόνο το μέτρο ελαστικότητας, E και ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων K_0 , επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

Με βάση τα επιλεγμένα εύρη εκτελέστηκαν οι ανάστροφες αναλύσεις οι οποίες έδωσαν τις ακόλουθες αντιπροσωπευτικές τιμές για το σχηματισμό της ισχυρής και της ασθενούς ενότητας εντός του οποίου πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη της σήραγγας διπλής τροχιάς.

Πίνακας 6-11: Εύρη τιμών γεωτεχνικών παραμέτρων όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις.

	Ισχυρή Ενότητα	Ασθενής Ενότητα
E (MPa)	1200-1500	400
c (kPa)	80-120	70
ϕ (°)	45	40
K_0	0.5-0.6	0.5-0.6

Από τα κριτήρια της διεθνούς βιβλιογραφίας και χρησιμοποιώντας τις γνωστές τιμές των δεικτών GSI των δύο σχηματισμών, από τις επί τόπου μετρήσεις κατά την κατασκευή της σήραγγας, επαληθεύτηκε μεταξύ ποιών ορίων κινείται το αντιπροσωπευτικότερο εύρος του μέτρου ελαστικότητας, E.



Σχήμα 6-50: Εκτίμηση του Μέτρου Παραμορφωσιμότητας - E, για την ισχυρή ενότητα του σχηματισμού διάνοιξης, βάσει εξισώσεων της βιβλιογραφίας για δείκτες MR=250-300 και GSI=45-50. Στα διαγράμματα επισημαίνεται η περιοχή με $\sigma_{ci}=12-14\text{MPa}$.

Με δεδομένο ότι η ισχυρή ενότητα έχει δείκτη GSI=45-50, τα εξεταζόμενα κριτήρια αντιστοιχούν το εύρος αυτό σε μία περιοχή όπου το E κυμαίνεται μεταξύ 1200MPa και 1500MPa, το $\sigma_{ci}=12-14\text{MPa}$ και το MR=250-300, όπως απεικονίζεται παραπάνω. Οι τιμές του μέτρου E από τη βιβλιογραφία συγκλίνουν τις τιμές που προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις και παράλληλα και με τις μετρημένες πραγματικές τιμές του GSI από την κατασκευή.

Ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία, λαμβάνοντας δηλαδή ως δεδομένες τις τιμές των παραμέτρων του GSI, του m_i και του σ_{ci} , εκτιμήθηκαν οι παράμετροι c και φ με τη βοήθεια του λογισμικού Roclab. Τελικώς, παρουσιάζονται συνολικά οι γεωτεχνικές παράμετροι για την ισχυρή και την ασθενή ενότητα του σχηματισμού διάνοιξης, συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω.

Πίνακας 6-12: Εύρη τιμών γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών διάνοιξης, όπως προέκυψαν από τα στοιχεία της μελέτης, της κατασκευής, τις ανάστροφες αναλύσεις και τη διεθνή βιβλιογραφία.

	Ισχυρή Ενότητα	Ασθενής Ενότητα
GSI	45-50	25-30
σ_{ci} (MPa)	12-14	8-10
m_i	10-11	9-10
MR	250-300	250-300
c (kPa)	100-140	60-70
ϕ (°)	45-47	38-40
K_o	0.5-0.6	0.5-0.6

7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από τις ανάστροφες αναλύσεις που εκτελέστηκαν, πραγματοποιήθηκε σωστή προσέγγιση όσον αφορά στο σχεδιασμό και στην προσομοίωση των επιτόπου γεωμετρικών συνθηκών του έργου, αλλά και στην υπολογισθέντων μεγεθών καθιζήσεων, παραμορφώσεων και φορτίων επί της άμεσης υποστήριξης. Η διερεύνηση επικεντρώθηκε στη μεταβολή των γεωτεχνικών συνθηκών των σχηματισμών της περιοχής, των συντελεστών γεωστατικών ωθήσεων, K_0 και των μέτρων ελαστικότητας, E . Για κάποιες παραμέτρους παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή των αποτελεσμάτων και τελικώς οδηγηθήκαμε στη συσχέτιση των φορτίων επί του κελύφους.

Η πραγματική γεωμετρία της υπό μελέτη σήραγγας προσομοιώθηκε μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS από τριδιάστατες αναλύσεις.

Κατά τον πρωτογενή έλεγχο και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων στα αντιπροσωπευτικά βήματα της εκσκαφής αναφορικά με το εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο του προσομοιώματος, παρατηρείται ότι:

- Γενικά, σε όλο το αριθμητικό προσομοίωμα οι ολικές μετακινήσεις και οι καθιζήσεις ήταν μικρές τόσο λόγω του καλού σχηματισμού διάνοιξης, όσο και λόγω των μέτρων υποστήριξης που εφαρμόστηκαν και εμπόδισαν την ανάπτυξη τους. Εμφανίστηκε τοπική αύξηση αυτών στα σημεία όπου η σήραγγα διανοίγεται εντός του ασθενούς σχηματισμού.
- Όλοι οι εδαφικοί σχηματισμοί, καθώς και τα στοιχεία των μέτρων υποστήριξης εμφανίζουν πολύ μικρές τιμές πλαστικών παραμορφώσεων και δεν κινδυνεύουν έναντι αστοχιών. Μάλιστα, η αντοχή των αγκυρίων μετώπου, βράχου και δοκών προπορείας επαληθεύεται και από τις χαμηλές αξονικές δυνάμεις κατά μήκος αυτών.

Έπειτα από επεξεργασία των επί τόπου μετρήσεων των κυψελών πίεσης οι οποίες τοποθετήθηκαν στη Χ.Θ. 1+636 παρατηρήθηκε ότι:

- Οι πιέσεις που αναπτύχθηκαν στην παρεία κυμάνθηκαν στο εύρος τιμών 75-125kPa, ενώ στην οροφή γύρω στα 50kPa.
- Ελέγχοντας την αξιοπιστία των οργάνων μέτρησης υπολογίσθηκε ο λόγος των πιέσεων της κυψέλης της οροφής προς την αριστερή και έπειτα προς τη δεξιά παρεία αντίστοιχα. Προκύπτει ότι η κατανομή τους είναι σταθερή ενώ μεταβάλλονται μόνο οι τιμές των πιέσεων. Όμοια,

εξετάζοντας τους λόγους των πιέσεων της αριστερής παρειάς στην Α και Β φάση, όπως και τους λόγους της δεξιάς παρειάς στην Α και Β φάση αντίστοιχα, εμφανίζουν ίδια κατανομή και σταθερό λόγο τιμών ίσο με ~ 0.93 .

Συνοψίζοντας όσα διαπιστώθηκαν από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων στις πιέσεις περί τη διατομή στα προηγούμενα κεφάλαια, βλέπουμε ότι:

- Οι πιέσεις της παρειάς εμφανίστηκαν μεγαλύτερες από τις πιέσεις στην οροφή σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις, καθώς ο συντελεστής K_0 είναι μικρότερος της μονάδας. [Φορτοάκης Π., (2012)].
- Εκτελώντας αναλύσεις ευαισθησίας για τις παραμέτρους: συνοχή, φορτίο επιφάνειας, συντελεστή K_0 προέκυψε ότι η επίδρασή τους είναι δευτερεύουσας σημασίας και δεν μεταβάλλουν σημαντικά τις πιέσεις. Σημαντικότερες παράμετροι προέκυψε ότι είναι το μέτρο ελαστικότητας E και το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με σταδιακή αύξηση του πάχους.
- Η εκτίμηση του εύρους διακύμανσης του μέτρου ελαστικότητας έγινε βάσει εξισώσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και για μια μέση τιμή του δείκτη $GSI=45$, του $\sigma_{ci}=11\text{MPa}$ και του $MR=250$ το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει τιμές μεταξύ 670-2600MPa. Συνεπώς, επιλέχθηκε εύλογο εύρος τιμών του μέτρου στην ισχυρή ενότητα. Αναμφίβολα κάποιες από τις εν λόγω εξισώσεις υπερεκτιμούν ή υποεκτιμούν αντίστοιχα το E .
- Μεταβάλλοντας το πάχος του Ε.Σ. στο κέλυφος και στο ανάστροφο τόξο της διατομής προκύπτουν μεγάλες διαφορές στις τιμές των πιέσεων. Συγκεκριμένα, μειώνοντας το πάχος στο μισό, οδηγούμαστε στο ήμισυ των αρχικών τιμών, διατηρώντας σταθερή κατανομή. (Πίνακας 7-1)

Πίνακας 7-1: Επίδραση της (ποσοστιαίας) μεταβολής διαφόρων παραμέτρων, στις τιμές των πιέσεων επί του κελύφους της διατομής μετά το πέρας της εκσκαφής.

Μεταβολή Παραμέτρου	Αρχικά	Τελικά	Οροφή	Παρεία
Πάχος Ε.Σ. (cm)	30	15	-40%	-27%
Συνοχή, c (kPa)	100	120	3%	3%
	100	80	3%	3%
Συντελεστής K_0	0.6	0.5	-18%	-4%
	0.6	0.8	27	7.5
Φορτίο από επιφάνεια (kPa)	30	0	-7%	-7%
Σχηματισμός	Ομοιογενής	Ανομοιογενής	13%	14%

- Συμπεριλαμβάνοντας κατά θέσεις και την ύπαρξη της ασθενέστερης ενότητας του σχηματισμού διάνοιξης μεταβάλλονται τα αποτελέσματα. Οι πιέσεις μειώθηκαν, καθώς η διάνοιξη πραγματοποιείται στην ισχυρότερη ενότητα της στρώσεως 4. Συγκεκριμένα, οι πιέσεις της οροφής μειώνονται έως και 67% όταν το μέτωπο βρίσκεται μέσα στον σχηματισμό με τις βελτιωμένες ιδιότητες. Γενικά, όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται έστω και λίγο μέσα στην ισχυρή ενότητα, οι πιέσεις σχεδόν συμπίπτουν οπότε η επιρροή της ασθενέστερης ενότητας είναι πολύ μικρή. Συγκριτικά με τις αναλύσεις με ομοιογενή σχηματισμό, προκύπτει αύξηση των πιέσεων της τάξεως των 13-16%.

- Εκτελώντας ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων με θεώρηση πιο δύσκαμπτων σχηματισμών άνω και κάτω του επιπέδου διάνοιξης, ουσιαστικά μέσω του τριπλασιασμού των γεωτεχνικών παραμέτρων, προέκυψε πολύ μικρή επίδραση με μείωση των πιέσεων μόνο στην παρειά κατά 5%.
- Λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική παράμετρο του πάχους του Ε.Σ. έγινε σταδιακή κατασκευή του σκυροδέματος κατά την άμεση υποστήριξη της εκσκαφής. Τα αποτελέσματα των πιέσεων εμφανίστηκαν μειωμένα κατά 15-35% σε σχέση με την άμεση τοποθέτηση του Ε.Σ.
- Συμπερασματικά, οι αντιπροσωπευτικότερες παράμετροι του σχηματισμού εντός του οποίου διανοίγεται η σήραγγα είναι:

Πίνακας 7-2: Εύρη τιμών γεωτεχνικών παραμέτρων όπως προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις.

	Ισχυρή Ενότητα	Ασθενής Ενότητα
E (MPa)	1200-1500	400
c (kPa)	80-120	70
φ (°)	45	40
K_o	0.5-0.6	0.5-0.6

Με βάση τις παραμέτρους αυτές, η απόκλιση από τις πραγματικές μετρήσεις είναι:

Πίνακας 7-3: Ποσοστιαίες και Απόλυτες διαφορές των πιέσεων κυψελών πίεσης περί τη διατομή με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής.



E=1500MPa

E=1200MPa

Σημείο Τοποθέτησης Κυψέλης	Τελική Μέτρηση Κυψέλης	E=1500MPa		E=1200MPa	
		Ποσοστιαία Διαφορά	Απόλυτη Διαφορά	Ποσοστιαία Διαφορά	Απόλυτη Διαφορά
Αριστερή Παρειά Α' φάσης *	125kPa	2%	2kPa	6%	8kPa
Δεξιά Παρειά Α' φάσης *	75kPa	59%	50kPa	66%	56kPa
Οροφή	50kPa	11%	5kPa	31%	16kPa
Αριστερή Παρειά Β' φάσης	140kPa	20%	-29kPa	17%	-24kPa
Δεξιά Παρειά Β' φάσης	100kPa	14%	13kPa	15%	18kPa

*Ως τιμή πίεσης στην παρειά έχει ληφθεί η μέση τιμή των πιέσεων των παρακείμενων κόμβων.

- Παρατηρείται ότι ενώ οι ποσοστιαίες διαφορές φαίνονται μεγάλες, επειδή οι τιμές των πιέσεων είναι μικρές, οι απόλυτες διαφορές τους δεν είναι σημαντικές.
- Τέλος επισημαίνεται ότι, σε πολύ καλούς σχηματισμούς όπου τα όργανα μέτρησης των καθιζήσεων και των συγκλίσεων δίνουν χαμηλές τιμές όπως και στη συγκεκριμένη εργασία, η

δυνατότητα εξέτασης των φορτίων της επένδυσης μέσω των κυψελών πίεσης αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην εξέλιξη του έργου.

Σε αυτό το σημείο θεωρείται σκόπιμη η παράθεση κάποιων προτάσεων σχετικά με την διενέργεια περαιτέρω έρευνας και παραμετρικών αναλύσεων βάσει των συμπερασμάτων που προέκυψαν, ώστε να γίνει ακόμα σωστότερη προσομοίωση του προβλήματος. Ιδιαίτερο λοιπόν ενδιαφέρον θα παρουσίαζε:

- Η διεξαγωγή ανάστροφων αναλύσεων χωρίς τη θεώρηση συμμετρικής διατομής και συμμετρικής φόρτισης.
- Η προσπάθεια πιο λεπτομερούς προσομοίωσης της πολύπλοκης γεωλογίας της περιοχής, μέσω της μελέτης ειδικά των επαφών των σχηματισμών.
- Η διερεύνηση της επιρροής του υδροφόρου ορίζοντα και η πραγματική στάθμη του.
- Η διερεύνηση της αρχικής μέτρησης αναφοράς των κυψελών πίεσης, καθώς ενδέχεται να χάνουν μέρος του φορτίου μέχρι να γίνει η τοποθέτηση και να ξεκινήσει η μέτρηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ- ΑΝΑΦΟΡΕΣ **Ελληνική Βιβλιογραφία**

- [1] ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ Α. Γ. (2006). "Σημειώσεις Επί Τόπου Δοκιμές". ΕΜΠ.
- [2] ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ Β.Ν. (2000). "Χρήση Γεωτεχνικών Οργάνων- Οργανομετρήσεις".
- [3] ΚΑΒΒΑΔΑΣ Μ. (2005). "Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων". ΕΜΠ.
- [4] ΜΑΡΙΝΟΣ Β. (2007). Διδακτορική Διατριβή "Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων". ΕΜΠ, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα.
- [5] ΜΑΡΙΝΟΣ Π. (1993). "Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού".
- [6] ΜΑΡΙΝΟΣ Π. (1998). "Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Μηχανικού".
- [7] ΜΑΡΙΝΟΣ Π. (2008). "Αντίγραφα διαφανειών για το κεφάλαιο: Βράχος-Ασυνέχεια-Βραχώμαζα. Παράμετροι Σχεδιασμού".
- [8] ΜΠΑΡΜΠΑΚΟΥ Ι. (2010). Διπλωματική Εργασία "Μελέτη των φορτίων επί της τελικής επένδυσης για αβαθείς σήραγγες". ΕΜΠ.
- [9] ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Β. (2010). Στοιχεία του μαθήματος "Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων". ΕΜΠ.
- [10] ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Β. (2004). Στοιχεία του μαθήματος "Βραχομηχανική-Σήραγγες". ΕΜΠ.
- [11] ΡΟΖΟΣ Δ. " Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Ι-Ηλεκτρονικές Σημειώσεις". Διάλεξη 12^η.
- [12] ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ Κ. Γ. (2007). "Μέθοδοι διερευνήσεως του υπεδάφους"- Σημειώσεις. ΕΜΠ.

 **Διεθνής Βιβλιογραφία**

- [1] ABAQUS 6.9 Documentation. (2009). SIMULIA, United States of America.
- [2] BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1975). "Estimation of Support requirements for underground excavations". Proceedings of the 16th Symposium on Rock Mechanics, pp. 163-177, University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- [3] BIENIAWSKI Z.T. (1973). "Engineering classification of jointed rock masses". Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs, 15, pp. 335-344.

- [4]BIENIAWSKI Z.T. (1974). "Estimating the strength of rock materials". Journal Of South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 74, pp. 312-320.
- [5]BIENIAWSKI Z.T. (1989). "Engineering rock mass classification". New York, Wiley.
- [6]COULOMB, C.A. (1776). " Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture". Mem. Acad. Roy. Div. Sav., 7, pp. 343-387.
- [7]HOEK E. & BROWN E.T. (1980a). "Underground Excavations in Rock". London: Institution of Mining and Metallurgy.
- [8]HOEK, E. & BROWN E.T. (1980b). "Empirical strength criterion for rock masses". Journal of Geotechnical Engineering Division, 106 (GT9), pp. 1013-1035.
- [9]HOEK E. & BROWN E.T. (1988). "The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update". Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium (Curran, J.H. (ed.)). Civil Engineering Department, University of Toronto, Toronto, pp. 31-38.
- [10] HOEK E., WOOD D. & SHAH S. (1992). "A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses". Proceedings of rock characterization, Symposium International Society of Rock Mechanics: Eurock '92 (Hudson, J. (ed.)), pp. 209-213.
- [11] HOEK E., CARRANZA-TORRES C.T., CORKUM B. (2002). "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition". Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, p. 267-73.
- [12] HOEK E. & DIEDERICHS M.S. (2006). "Empirical estimation of rock mass modulus". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, pp.203-215.
- [13] LUGEON M. (1933). "Barrages et Géologie". Rouge et Gie., Lausanne.
- [14] MAAG E. (1941). "Methode zur feldmässigen Bestimmung der Wassedurchlässigkeit". Strasse u. Verkehr., 19, Solothurn.
- [15] MARINOS P. & HOEK E. (2000). "GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation". Proceedings of the GeoEng2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, pp. 1422-1446, Technomic publishers, Lancaster, Pennsylvania.
- [16] MITRI H.S., EDRISSI R. & HENNING J. (1994). "Finite element modeling of cable bolted slopes in hard rock underground mines". SME Annual Meeting, Albuquerque, New Mexico, pp. 14-17.

- [17] SABATAKAKIS N., KOUKIS G., TSIAMBAOS G. & PAPANAKLI S. (2008). " Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks". Engineering Geology, 97, pp.80-90.
- [18] SISGEO. "Stress cells – Instruction Manual".
- [19] SISGEO. "Product Catalogue 2008".
- [20] SONMEZ H., GOKCEOGLU C. & ULUSAY R. (2004). "Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1 (5), pp. 849-857.

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

- [1] Ηλεκτρονική σελίδα Αττικό Μετρό Α.Ε.: <http://www.ametro.gr/page/>
- [2] Ηλεκτρονική σελίδα εταιρείας SISGEO: <http://www.sisgeo.com/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στοιχεία έργου Ανθούπολης

- ο ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΓΕΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. , FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., 22/05/2007 (2GW0CW180S901C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΓΕΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟ Χ.Θ. 2+325 ΕΩΣ Χ.Θ. 2+500 (ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ), ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΘΕΣΕΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ – ΜΗΚΟΤΟΜΗ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., 22/05/2007 (2GW0CW180S101C, ΣΕΛ.3/4).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΓΕΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟ Χ.Θ. 2+751 ΕΩΣ Χ.Θ. 2+780 (ΤΕΡΜΑΤΙΚΟ ΦΡΕΑΡ), ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΘΕΣΕΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ – ΜΗΚΟΤΟΜΗ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., 22/05/2007 (2GW0CW180S101C_4, ΣΕΛ.4/4).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΓΕΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟ Χ.Θ. 2+325 ΕΩΣ Χ.Θ. 2+500 (ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ), ΔΙΑΤΟΜΕΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., 22/05/2007 (2GW0CW180S303C, ΣΕΛ.1/1).

Στοιχεία έργου Περιστερίου- Σήραγγα Διπλής Τροχιάς

- ο ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", "ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ", ΕΚΘΕΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2007,(2TW2CW180S901B).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΓΕΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟ Χ.Θ. 1+340.28 ΕΩΣ Χ.Θ. 1+681.29 (ΦΡΕΑΡ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ), ΔΙΑΤΟΜΕΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., 22/05/2007 (2GW0CW180S301C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ (ΤΕΥΧΟΣ 1/4), Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397R902C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΕΚΘΕΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟ Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29 (ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ),ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2007, (2TW2CW180S701B).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΕΚΘΕΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟ Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29 (ΣΗΡΑΓΓΑ

ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ), ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΘΕΣΕΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ - ΜΗΚΟΤΟΜΗ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2007, (2TW2CW180S101B).

- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΓΔΠ, ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ (Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29), ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ & ΠΕΡΙΤΥΠΩΜΑ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΥΝΑΝΤΗΘΕΙΣΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΜΑΪΟΣ 2010, (2TW2CW180S1011).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙα ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C305C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΤΕΡΜΑΤΙΚΟ ΦΡΕΑΡ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2HW4CW415C1011).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΦΡΕΑΡ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2IW2CW415C1011).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΦΡΕΑΡ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2MW2CW415C1011).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ – ΣΗΡΑΓΓΑ C/C - ΔΥΤΙΚΟ ΦΡΕΑΡ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2SW2CW415C1011).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ - ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2SW2CW415C1031).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ - ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ – ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΣΤΟΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΒΑΘΡΑ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2SW2CW415C1061).

- ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2SW3CW415C1011).
- ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ (Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29), ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΓΔΠ "ΩΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΗΚΕ", Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009, (2TW2CW415C1011).
- ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ (ΤΕΥΧΟΣ 2/4), Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397F903C).
- ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ (ΤΕΥΧΟΣ 3/4), Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397F904C).
- ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ (ΤΕΥΧΟΣ 4/4), Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397F905C).
- ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ Ι ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C303C).
- ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C304C).
- ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙβ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C306C).

- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙγ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C307C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙδ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C308C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΜΗΚΟΤΟΜΗ, ΜΗΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C402C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙα, ΙΙΙβ & ΙΙΙδ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C502C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙγ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C503C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΣΥΝΟΨΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ ΤΟΠΙΚΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C504C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C505C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C506C).

- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C507C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ (1^{ης} ~ 4^{ης}) ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙα, ΙΙΙβ & ΙΙΙδ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C508C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ (5^{ης} ~ 8^{ης}) ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙα, ΙΙΙβ & ΙΙΙδ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C509C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ (1^{ης} ~ 4^{ης}) ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙα, ΙΙΙβ & ΙΙΙδ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C510C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ (5^{ης} ~ 8^{ης}) ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΙΙΙα, ΙΙΙβ & ΙΙΙδ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C511C).
- ο ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 "ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ", ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ, Χ.Θ. 1+392.50 – Χ.Θ. 1+681.29, ΓΕΩΤΕΧΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ, Κ/Ξ J&P - ΑΒΑΞ Α.Ε. FCC CONSTRUCCION, ΠΑΝΓΑΙΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2008, (2TW2CW397C701C).