



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ- ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕΣΑ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ, ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΛΛΗ ΕΛΕΝΗ-ΕΥΓΕΝΙΑ

Επιβλέπων: Σοφιανός Αλέξανδρος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ- ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**ΤΙΤΛΟΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕΣΑ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥΣ
ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ, ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΑΛΛΗ ΕΛΕΝΗ- ΕΥΓΕΝΙΑ**

Επιβλέπων: Σοφιανός Αλέξανδρος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/..../....

Σοφιανός Αλέξανδρος, Καθηγητής

Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής είναι η διερεύνηση των συνθηκών διέλευσης μέσα από την καρστική κοιλότητα που συναντήθηκε κατά την διάνοιξη σήραγγας εκτροπής νερών, στην Κρήτη και συγκεκριμένα στην περιοχή του Ηρακλείου, από μηχανήμα ολομέτωπης κοπής TBM.

Η διπλωματική εργασία δομείται ως ακολούθως:

- ✓ Στο 1^ο Κεφάλαιο της εργασίας αναφέρονται ιστορικά στοιχεία σχετικά με την ύπαρξη υδραγωγείων στην περιοχή της Κρήτης, και συγκεκριμένα γίνεται μια περαιτέρω εμβάθυνση στο έργο του φράγματος του Αποσελέμη καθώς και της σήραγγας εκτροπής νερού.
- ✓ Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα γενικά στοιχεία του έργου, τα οποία αφορούν τα χαρακτηριστικά της σήραγγας καθώς και γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία που λήφθηκαν από την περιοχή ενδιαφέροντος.
- ✓ Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το μηχανήμα ολομέτωπης κοπής που χρησιμοποιήθηκε, περιγράφοντας τις ιδιαιτερότητες του έργου που επηρέασε τον σχεδιασμό των διαφόρων τμημάτων του TBM καθώς και τις δυσκολίες και τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπίσει το TBM και καθυστέρησαν την ολοκλήρωση της σήραγγας.
- ✓ Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος διέλευσης του TBM από την καρστική κοιλότητα, λαμβάνοντας υπ' όψιν την γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής από τις οποίες προκύπτουν και οι προτάσεις αντιμετώπισης.
- ✓ Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόγραμμα Unwedge, το οποίο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του σπηλαίου. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι βασικές αρχές που ακολουθεί το πρόγραμμα αλλά και τα βήματα των δυνατών αναλύσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν.
- ✓ Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση στο πρόγραμμα Unwedge στο οποίο εξετάζεται η ευστάθεια του καρστικού σπηλαίου της σήραγγας Αποσελέμη. Επίσης γίνεται και αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και σύγκριση μεταξύ τους.
- ✓ Στο 7^ο Κεφάλαιο η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την εξαγωγή συμπερασμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Κύριο Αλέξανδρο Σοφιανό, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση του αλλά και την συνεργασία που ανέπτυξε μαζί μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Κύριους Παύλο Νομικό, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Κωνσταντίνο Λουπασάκη, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. μέλη της κριτικής επιτροπής της διπλωματικής, για τον χρόνο που αφιέρωσαν για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την ανάδοχο εταιρεία του έργου INTRAKAT για όλα τα στοιχεία και τα δεδομένα που μου παρείχε για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση των συνθηκών διέλευσης μέσα από την καρστική κοιλότητα της σήραγγας Αποσελέμη, στην περιοχή της Κρήτης, κοντά στο Οροπέδιο του Λασιθίου που συναντήθηκε κατά την εκσκαφή της σήραγγας, και έχει ως σκοπό την εκτροπή νερών στο φράγμα του Αποσελέμη, από μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM.

Συγκεκριμένα εξετάζεται η ευστάθεια του σπηλαίου μεγάλων διαστάσεων και προστίθενται μέτρα για την δημιουργία ασφαλών συνθηκών κατά την διέλευση του TBM αλλά κυρίως την εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών εργασίας κατά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την προσπέλαση του σπηλαίου από το TBM. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με την βοήθεια του προγράμματος της Unwedge v.4.0 της εταιρείας λογισμικού της RocScience. Έτσι, σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτής της ανάλυσης καθώς επίσης και η αναλυτική παρουσίαση του έργου του Φράγματος του Αποσελέμη και ιδιαίτερα της 3^{ης} εργολαβίας που αφορά την κατασκευή της σήραγγας.

Επιπλέον γίνεται αναφορά στις γεωμορφολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή καθώς επίσης και αναλυτική περιγραφή του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζοντας τις σχεδιαστικές ιδιαιτερότητες του αλλά και τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπίσει κατά την περίοδο κατασκευής της σήραγγας. Τέλος, στην διπλωματική αυτή παρουσιάζονται ο σκοπός του έργου όπως επίσης και τα οφέλη του, κυρίως στην τοπική κοινωνία αλλά και ευρύτερα στην Ελλάδα λόγω της τεχνογνωσίας που αποκτείται στον κλάδο από την κατασκευή σημαντικών έργων σαν και αυτό που παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες και προκλήσεις.

ABSTRACT

The scope of this thesis is the investigation of the existing conditions in the karstic cavern in order for the Tunnel Boring Machine to drive through, in the area of Crete, near to the plateau of Lasithi, that was met during the excavation of a tunnel. Its purpose is the diversion of water in the dam of Aposelemi.

Specifically, in this thesis the stability of the big dimension cavern is examined and measures are proposed for the safe drive of the TBM but most importantly for securing the work conditions for the necessary time period. The simulation is achieved with the help of the program Unwedge v.4.0 which belongs to the RocScience family. Hence, the purpose of this thesis is the presentation of the results of this numerical analysis as well as the presentation of the infrastructure project of Aposelemi's dam and especially of the 3rd construction phase, the construction of the tunnel.

Moreover, in this thesis the geology of the area is mentioned as well as an analytic presentation of the TBM that was used, emphasizing the design particularities and the problems - difficulties that it needed to overcome, over the excavation period. Finally, in this thesis the purpose of this project and its benefits are mentioned, most importantly for the local community but also for the entire country of Greece, because of the knowledge that is obtained from such important and challenging infrastructure projects.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	v
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ix
ABSTRACT	xi
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	xvii
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xxi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ιστορικά στοιχεία.....	1
1.1.1 Μινωικός Πολιτισμός (3200-1100 π.Χ.).....	1
1.1.2 Κλασική και Ελληνιστική Περίοδος (490- 67 π.Χ.)	2
1.1.3 Ρωμαϊκή Περίοδος (67 π.Χ.- 330 μ.Χ).....	3
1.1.4 Βυζαντινή περίοδος και Ενετοκρατία (330-1669 μ.Χ)	4
1.1.5 Οθωμανική και Αιγυπτιακή περίοδος (1669-1898 μ.Χ.)	4
1.1.6 Σημερινή Εποχή (1898- Σήμερα)	5
1.2 Σημασία και χρησιμότητα του φράγματος του Αποσελέμη	6
1.3 Οφέλη του έργου.....	8
1.4 Κατασκευή του έργου.....	8
1.5 Ιστορικό της 3 ^{ης} εργολαβίας	9
2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ	11
2.1 Χαρακτηριστικά της σήραγγας.....	11
2.2 Γενικά- γεωμορφολογικά στοιχεία	13
2.2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί	13
2.2.2 Υπόγεια Υδροφορία	14

2.2.3	Γεωτεχνική Έρευνα	15
3	ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ TBM.....	21
3.1	Κλίση της σήραγγας	23
3.2	Σύστημα επένδυσης	23
3.3	Επιλογή συστήματος τροφοδοσίας (TTC).....	24
3.4	Σχεδιασμός του TBM και του BUS (Back Up System)	26
3.5	Συνεχές σύστημα μεταφοράς (CCS).....	28
3.6	Προβλήματα που αντιμετώπισε το TBM.....	29
3.6.1	«Κρυμμένη Κατολίσθηση» (43-83 m)	29
3.6.2	Παγίδευση του TBM (1404 m).....	31
3.6.3	Αέριο (1528-1622 m)	31
3.6.4	Καρστικό έγκοιλο (2317 m)	31
4	ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΤΟΥ TBM ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ.....	33
4.1	Γενικά	33
4.2	Γεωλογικές Συνθήκες Σπηλαίου	35
4.3	Παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη.....	37
4.4	Πρόταση Αντιμετώπισης	38
4.5	Αλληλουχία εργασιών γεφύρωσης της καρστικής κοιλότητας	39
4.5.1	Διάνοιξη βοηθητικής σήραγγας.....	39
4.5.2	Μόνιμα μέτρα προστασίας του σπηλαίου	41
4.5.3	Πλήρωση κενού για την διέλευση του TBM.....	43
4.5.4	Προώθηση του TBM	44
4.6	Εναλλακτική Πρόταση Αντιμετώπισης	44
4.7	Τελική Λύση	45
5	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ UNWEDGE	49
5.1	Γενικά	49

5.2	Παραδοχές του Προγράμματος.....	50
5.3	Βήματα για ανάλυση στο πρόγραμμα Unwedge	51
5.3.1	Ντετερμινιστική Ανάλυση.....	51
5.3.2	Πιθανοτική Ανάλυση.....	53
5.3.3	Συντελεστής Ασφαλείας.....	56
6	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ.....	57
6.1	Επεξεργασία των μετρήσεων.....	59
6.2	Αριθμητική Ανάλυση Unwedge	61
6.2.1	Γεωμετρία.....	62
6.2.2	Ντετερμινιστική Ανάλυση.....	63
6.2.3	Πιθανολογική Ανάλυση.....	69
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
9	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	87
9.1	Παράρτημα Α: Ντετερμινιστική Ανάλυση	87
9.2	Παράρτημα Β: Πιθανολογική Ανάλυση	94

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Παράδειγμα από το Υδραγωγείο του Τύλισου. (a) Μέρος του κεντρικού αγωγού (b) δευτερεύων αγωγός (Τ.Γ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017).....	2
Εικόνα 2: (a) Περιοχή που χρησιμοποιούταν ως δεξαμενή για την φύλαξη νερού στα Ελεύθερα και (b) σχηματική αναπαράσταση των αγωγών και των δεξαμενών για φύλαξη του νερού στην Αρχαία Κίτσαμο (Τ.Γ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017).....	3
Εικόνα 3: Γέφυρα νερού του Μοροσίτι (Τ.Γ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017)	4
Εικόνα 4: Φράγμα Αποσελέμη (ΦΟΥΝΤΟΥΛΑΚΗ, 2015).....	6
Εικόνα 5: Μηκοτομή της σήραγγας Αποσελέμη (Σ. ΜΙΧΑΣ, Α. ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ, Ν. ΜΑΜΑΣΗΣ, Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ - Ε.Μ.Π., 2015).....	7
Εικόνα 6: Σήραγγα εκτροπής νερού και τροφοδοσία του στις περιοχές του Ηρακλείου και του Αγίου Νικολάου (FLASH NEWS , 2016)	7
Εικόνα 7: Η σήραγγα του Αποσελέμη (JAEGER-BAU, 2016)	11
Εικόνα 8: Τυπική διατομή της σήραγγας Του Αποσελέμη με την προσθήκη του χαλύβδινου σωλήνα (ΚΟΤΣΩΝΗΣ, 2014).....	12
Εικόνα 9: Στοιχεία επένδυσης της σήραγγας (JAEGER-BAU, 2016).....	12
Εικόνα 10: Στρωματογραφία της περιοχής (ΓΙΑΛΥΤΗ, 2016).....	13
Εικόνα 11: Το TBM με διπλή ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στην σήραγγα Αποσελέμη (JAEGER-BAU, 2016).....	21
Εικόνα 12: TBM διπλής ασπίδας (THE ROBBINS COMPANY, 2016).....	22
Εικόνα 13: Μορφή σήραγγας κατά την κατασκευή (αριστερά) και τελική μορφή (δεξιά) (WOLFGANG GUTTER, 2016).....	24
Εικόνα 14: Πλήρωση των νευρώσεων (WOLFGANG GUTTER, 2016).....	25
Εικόνα 15: Χαρακτηριστικά του TBM (ΓΙΑΛΥΤΗ, 2016)	27
Εικόνα 16: Συνεχές Σύστημα Μεταφοράς (CCS) (JAEGER-BAU, 2016).....	29
Εικόνα 17: Κρυμμένη Κατολίσθηση (WOLFGANG GUTTER, 2016).....	30

Εικόνα 18: Κάτοψη καρστικού εγκοίλου (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016).....	32
Εικόνα 19: Μέτρα αντιμετώπισης για το καρστικό έγκοιλο (INTRAKAT, 2016).....	32
Εικόνα 20: Σήραγγα προσαγωγής κατά προσέγγιση στην οποία διακρίνεται η θέση του σπηλαιίου (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)	33
Εικόνα 21: Βάθος της καρστικής κοιλότητας (INTRAKAT, 2016)	34
Εικόνα 22: Αξονική κατά μήκος (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016).....	34
Εικόνα 23: Ακατάστατα στοιβαγμένα τεμάχια μεγάλου μεγέθους (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016).....	36
Εικόνα 24: Έντονα καταπονημένη βραχομάζα εντός του σπηλαιίου (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016).....	37
Εικόνα 25: Κάτοψη στην οποία φαίνεται η παρακαμπτήρια σήραγγα (INTRAKAT, 2016)	40
Εικόνα 26: Διάνοιξη βοηθητικής σήραγγας (INTRAKAT, 2016).....	40
Εικόνα 27: Βοηθητική σήραγγα (JAEGER-BAU, 2016).....	41
Εικόνα 28: Πρώτη φάση, ξεσκάρωμα (INTRAKAT, 2016).....	42
Εικόνα 29: Δεύτερη φάση, τοποθέτηση ικριωμάτων (INTRAKAT, 2016).....	42
Εικόνα 30: Τελική μορφή των μόνιμων μέτρων προστασίας (INTRAKAT, 2016)	43
Εικόνα 31: Φάσεις αγκύρωσης του σπηλαιίου (INTRAKAT, 2016).....	46
Εικόνα 32: Σκαρίφημα επιλεχθείσας λύσης γεφύρωσης του καρστικού. (INTRAKAT, 2016).....	48
Εικόνα 33: Μοντέλο προσομοίωσης στο UNWEDGE (RocScience, 2017).....	49
Εικόνα 34: Αποτύπωση μετρήσεων	59
Εικόνα 35: Κύρια συστήματα ασυνεχειών	60
Εικόνα 36: Πόλοι και επίπεδα των ασυνεχειών	60
Εικόνα 37: Μέσα επίπεδα προσανατολισμού.....	61
Εικόνα 38: Απλοποιημένη γεωμετρία του καρστικού εγκοίλου στην ανάλυση του Unwedge.....	63
Εικόνα 39: Θέση του σπηλαιίου σε σχέση με τον Βορρά (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016).....	63

Εικόνα 40: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 2	65
Εικόνα 41: Συνδυασμός 2.....	66
Εικόνα 42: Μέτρα υποστήριξης για τον συνδυασμό 2.....	68
Εικόνα 43: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 2.....	69
Εικόνα 44: Μέγιστη απαιτούμενη πίεση υποστήριξης.....	71
Εικόνα 45: Μέγιστο βάθος σφήνας στην οροφή	72
Εικόνα 46: Μέγιστο βάρος των σφηνών της οροφής για κάθε τμήμα	72
Εικόνα 47: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας.....	73
Εικόνα 48: Πιθανότητα αστοχίας.....	74
Εικόνα 49: Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας- πίεσης υποστήριξης.....	75
Εικόνα 50: Συσχέτιση Συντελεστή ασφαλείας – βάρους	76
Εικόνα 51: Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας- βάθους.....	76
Εικόνα 52: Συσχέτιση Πίεση υποστήριξης- βάθους.....	77
Εικόνα 53: Πιθανότητα αστοχίας ύστερα από την προσθήκη των μέτρων υποστήριξης. ..	78
Εικόνα 54: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας ύστερα από την προσθήκη των μέτρων υποστήριξης.....	78
Εικόνα 55: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 1	87
Εικόνα 56: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 3	87
Εικόνα 57: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 4	88
Εικόνα 58: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 5	88
Εικόνα 59: Συνδυασμός 1.....	89
Εικόνα 60: Συνδυασμός 3.....	89
Εικόνα 61: Συνδυασμός 4.....	90

Εικόνα 62: Συνδυασμός 5.....	90
Εικόνα 63: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 1.....	91
Εικόνα 64: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 3.....	91
Εικόνα 65: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 4.....	92
Εικόνα 66: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 5.....	92
Εικόνα 67: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 3.....	93
Εικόνα 68: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 4.....	93
Εικόνα 69: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 5.....	94
Εικόνα 70: Σχετική συχνότητα απαιτούμενης πίεσης στα διάφορα τμήματα της οροφής..	94
Εικόνα 71: Σχετική συχνότητα τού βάθους των βραχοσφηνών	95
Εικόνα 72: Σχετική συχνότητα βάρους των βραχοσφηνών	95
Εικόνα 73: Σχετική συχνότητα των συντελεστών ασφαλείας.....	96
Εικόνα 74: Αθροιστική απαιτούμενη πίεση υποστήριξης στα τμήματα της οροφής.....	96
Εικόνα 75: Αθροιστικό βάρος των πιθανών σφηνών στα τμήματα της οροφής.....	97

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σημερινά Υδραγωγεία (Τ.Γ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017)	5
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων (INTRAKAT, 2014)	15
Πίνακας 3: Γεωτεχνικοί σχεδιαστικοί παράμετροι (INTRAKAT, 2014)	19
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά από εργαστηριακές δοκιμές στους σχηματισμούς της ζώνης Τριπόλεως.....	35
Πίνακας 5: Πίνακας καταγραφής ασυνεχειών.....	57
Πίνακας 6: Συνδυασμοί δημιουργίας βραχοσφήνας	64
Πίνακας 7: Συντελεστής ασφαλείας και βάρος για κάθε βραχοσφήνα	66
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά των αγκυρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση	67
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση.....	67

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Το νησί της Κρήτης βρίσκεται στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου και χαρακτηρίζεται από χαμηλή διαθεσιμότητα σε νερό λόγω της έντονης χωρικής και χρονικής διακύμανσης των βροχοπτώσεων. Πρόκειται για ένα νησί το οποίο κατά κύριο λόγο αποτελείται από ορεινές περιοχές με τρία κύρια βουνά (Λευκά Όρη, Ψηλορείτης, και Δίκτη), τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην υδρογεωλογία του νησιού. Έτσι, τεχνολογία με σκοπό τη μεταφορά του νερού, από τις υψηλότερες λεκάνες απορροής στις αστικές περιοχές, που βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα και έχουν χαμηλή διαθεσιμότητα σε νερό, έχει παρατηρηθεί από τους προϊστορικούς χρόνους.

1.1.1 Μινωικός Πολιτισμός (3200-1100 π.Χ.)

Τα υδραγωγεία ήταν χρήσιμα στην Κρήτη λόγω του ανώμαλου εδάφους της από την Μινωική εποχή. Αρκετά υδραγωγεία της Μινωικής εποχής έχουν εντοπιστεί μέχρι σήμερα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι της μινωικής υδραγωγείας: (α) κλειστοί / υπό πίεση τερακότα σωλήνες και (β) ανοιχτοί ή αγωγοί καλυπτόμενοι από τερακότα ή κανάλια διαφόρων διαστάσεων και τμημάτων. Οι κλειστοί αγωγοί από τερακότα χρησιμοποιήθηκαν για τη διανομή του νερού στα Μινωικά "παλάτια". Επιπλέον, σωλήνες από τερακότα βρέθηκαν στο ανάκτορο της Κνωσού καθώς και σε κάποιους άλλους μινωικούς οικισμούς. Πιο φημισμένα είναι τα υδραγωγεία στα Γουρνιά, το Καρφί, την Κνωσό (Μαυροκόλυμπος), Μάλια, Μόχλος και Τύλισος. Η τεχνική των υδραγωγείων αναπτύχθηκε περαιτέρω κατά τη διάρκεια των κλασικών, ελληνοιστικών και ρωμαϊκών χρόνων στην Κρήτη και επεκτάθηκε στην ηπειρωτική Ελλάδα και σε άλλες περιοχές της Μεσογείου και της Εγγύς Ανατολής.



(a)



(b)

Εικόνα 1: Παράδειγμα από το Υδραγωγείο του Τύλισου. (a) Μέρος του κεντρικού αγωγού (b) δευτερεύων αγωγός (T.G. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017)

1.1.2 Κλασική και Ελληνιστική Περίοδος (490- 67 π.Χ.)

Οι υδροτεχνολογίες συμπεριλαμβανομένων των υδραγωγείων που αναπτύχθηκε από τους Μινωίτες και τους Μυκηναίους μεταφέρθηκαν σε γειτονικούς πολιτισμούς, όπως οι Αιγύπτιοι, Δωριείς και αργότερα μεταφέρθηκαν από αυτούς στην Αρχαϊκή και την Κλασική Ελλάδα. Οι κλασικοί Έλληνες κληρονόμησαν τις τεχνολογίες της Μινωικής εποχής και τις ανέπτυξαν περαιτέρω, κυρίως με την αλλαγή της κλίμακας μεγέθους τους από μικρές σε μεγάλες και την εφαρμογή τους, κυρίως στις αστικές περιοχές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα αρχαία υδραγωγεία αντλούσαν το νερό μόνο από τις πηγές, ενώ άλλα παρείχαν ένα συνδυασμό άντλησης νερού από τις πηγές και υπόγειας σύλληψης. Τα αρχαία υδραγωγεία στην Κρήτη είχαν σκόπιμα σχεδιαστεί για να συλλέγουν επιπλέον υπόγειο νερό, προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητά τους και να μειώσουν την επίδραση των περιοδικών διακυμάνσεων στις πηγές το καλοκαίρι.



(a)



(b)

Εικόνα 2: (a) Περιοχή που χρησιμοποιούταν ως δεξαμενή για την φύλαξη νερού στα Ελεύθερα και (b) σχηματική αναπαράσταση των αγωγών και των δεξαμενών για φύλαξη του νερού στην Αρχαία Κίσαμο (T.G. NIKOLAΟΥ, 2017)

1.1.3 Ρωμαϊκή Περίοδος (67 π.Χ.- 330 μ.Χ)

Η κατασκευή υδραγωγείων στο νησί της Κρήτης έφτασε στο απόγειό της στη ρωμαϊκή αυτοκρατορική εποχή, κατά την οποία πολλά από αυτά χτίστηκαν σε μια περίοδο μεγάλης οικονομικής ευημερίας. Τα Ρωμαϊκά υδραγωγεία ήταν αναμφισβήτητα οι πιο συχνές κατασκευές, μεγαλύτερα σε μέγεθος και ικανά να μεταφέρουν μεγαλύτερο όγκο νερού από τις προηγούμενες περιόδους. Τρία αντιπροσωπευτικά παραδείγματα ρωμαϊκών υδραγωγείων είναι η Έλυρος, τα Φαλάσαρνα, και ο Μινώας στη δυτική Κρήτη.



(a)



(b)



(c)

Εικόνα 3: (a) Δεξαμενή στην Έλυρο, (b) Αγωγός στα Φαλάσαρνα και (c) αγωγός στο Μινώα (Τ.Γ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017)

1.1.4 Βυζαντινή περίοδος και Ενετοκρατία (330-1669 μ.Χ)

Από το 961 έως το 1204 μ.Χ., η Κρήτη υπήρξε τμήμα της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας. Η περιοχή του "Χάνδακα" (σημερινό Ηράκλειο) ήταν η έδρα του Δούκα της Κρήτης. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η πόλη ήταν κάτω από την πίεση του νερού. Στο τέλος της βυζαντινής περιόδου η Κρήτη έπεσε στα χέρια των Βενετών. Το 1629, ο Φραγκίσκο Μοροζίνι δήλωσε ότι το μεγαλύτερο μειονέκτημα της πόλης ήταν η έλλειψη νερού. Κατά την περίοδο του 1612-1614, ο Φραγκίσκο Μοροζίνι πήρε το όνομά του ο Δούκας της πόλης (Αγγελάκης et al., 2012). Ήταν ο πρώτος Ενετικός που έδωσε μεγάλη προσοχή στα ζητήματα ύδρευσης. Οδήγησε στην κατασκευή μιας γραμμής 15,64 χιλιομέτρων από τα οποία το νερό μεταφερόταν από τρεις επιφανειακές πηγές στην περιοχή του Καρυδάκι (περιοχή Αρχάνες, νότια της πόλης) στο κέντρο της πόλης.



Εικόνα 3: Γέφυρα νερού του Μοροσίνι (Τ.Γ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017)

1.1.5 Οθωμανική και Αιγυπτιακή περίοδος (1669-1898 μ.Χ.)

Κατά την Οθωμανική περίοδο δεν έγιναν ιδιαίτερες προσπάθειες για να αυξήσουν την ποσότητα του νερού που παρεχόταν στις μεγάλες πόλεις (Ηράκλειο, Ρέθυμνο, Χανιά). Τα Ενετικά υδραυλικά έργα απλά διατηρήθηκαν σε καλή κατάσταση.

Η Αιγυπτιακή κυριαρχία στην Κρήτη ακολούθησε την Οθωμανική περίοδο (1830-1840 μ.Χ.). Οι Αιγύπτιοι διατήρησαν επίσης και λειτουργούσαν τις κατασκευές του νερού που αναπτύχθηκαν από τους Βενετούς. Το πιο γνωστό νέο υδραυλικό έργο που αναπτύχθηκε

από αυτούς ήταν η ανοικοδόμηση του υδραγωγείου Φουντάνα μέσω του οποίου το νερό μεταφερόταν στο Ηράκλειο από την Φουντάνα. Η γέφυρα του νερού στην Αγία Ειρήνη κατασκευάστηκε στο τέλος αυτής της περιόδου. (1839 μ.Χ.).

1.1.6 Σημερινή Εποχή (1898- Σήμερα)

Ο Οργανισμός Ανάπτυξης της Δυτικής Κρήτης ,ΟΑΔΥΚ (τόρα ΟΑΚ, SA) ιδρύθηκε το 1979 από το Υπουργείο Συντονισμού, ως ο πρώτος ελληνικός αναπτυξιακός οργανισμός, με στόχο να συμβάλει στην παροχή νερού στη Κρήτη. Το έργο "Βέλτιστη Αξιοποίηση των Υδατινών Πόρων της Δυτικής Κρήτης» στόχευε στην αξιοποίηση των υπογείων και επιφανειακών υδάτινων πόρων της Δυτικής Κρήτης, ο αρχικός σχεδιασμός ήταν χωρισμένος σε 2 φάσεις και 6 περιοχές ξεκινώντας από τη δυτική ακτή του Καστελιού και τελειώνει στο Ρέθυμνο παρέχοντας πόσιμο και αρδευτικό νερό χρησιμοποιώντας ένα κλειστό, υπό πίεση δίκτυο. Το αρχικό σχέδιο, που εγκρίθηκε από το Υπουργείο Δημοσίων Έργων, περιλάμβανε το κύριο δίκτυο ύδρευσης (103 km), το δευτερεύον δίκτυο διανομής, καθώς και την εκμετάλλευση των πηγών και των γεωτρήσεων νερού. Η γαλλική οργάνωση GERSAR συνέβαλε ως σύμβουλος στο σχεδιασμό του δικτύου. Οι δύο πρώτες φάσεις χρηματοδοτήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων, καθώς και από εθνικά και ευρωπαϊκά κονδύλια. Σήμερα, το δίκτυο περιλαμβάνει 430 χιλιομέτρων από κύρια και δευτερεύοντα δίκτυα νερού, 22 αντλιοστάσια και 25 πηγές νερού στη δυτική Κρήτη. Τα τρέχοντα μεγάλα υδραγωγεία της Κρήτης φαίνεται στον Πίνακας 1: Σημερινά Υδραγωγεία.

Πίνακας 1: Σημερινά Υδραγωγεία (T.G. ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 2017)

Όνομασία	Τοποθεσία	Χρονική Περίοδος
Φράγμα Ποταμών	Αμάρι, Ρέθυμνο	2005-2008
Φράγμα Αποσελέμη	Ηράκλειο	2012-2015
Φράγμα Αποσελέμη	Άγιος Νικόλαος	2012-2015
Φράγμα Αποσελέμη	Σήραγγα με TBM	2012-Σήμερα
Φράγμα Βαλσαμιώτη	Βατόλακκος, Χανιά	2005-2015

1.2 Σημασία και χρησιμότητα του φράγματος του Αποσελέμη

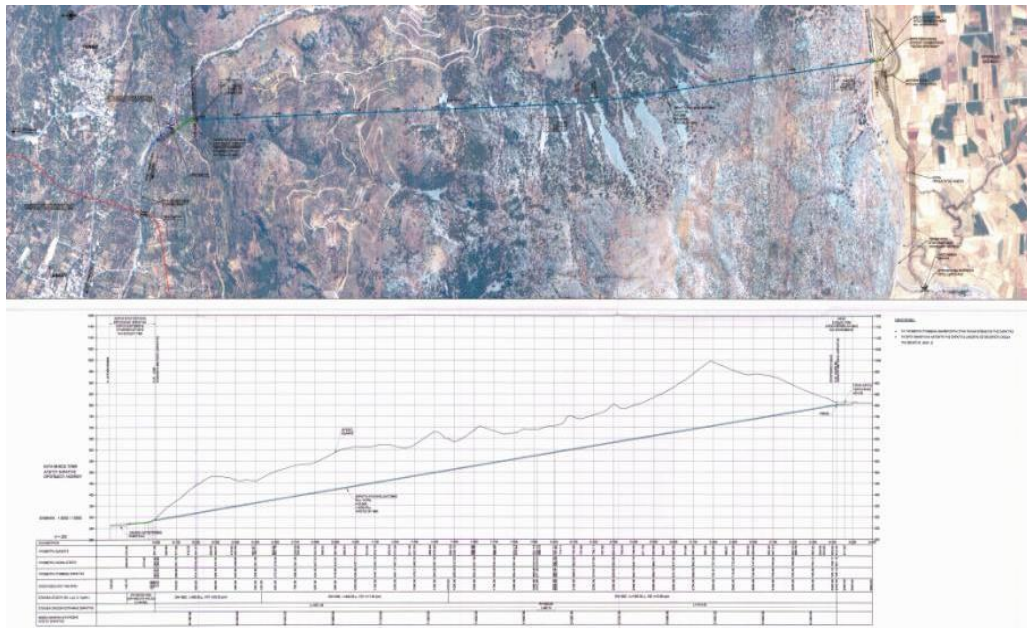
Σκοπός της κατασκευής του φράγματος του Αποσελέμη είναι η επίλυση του έντονου προβλήματος ανεπάρκειας νερού της περιοχής εξυπηρέτησης (Ηράκλειο- Άγιος Νικόλαος), με ενίσχυση του υφιστάμενου συστήματος ύδρευσης με πρόσθετες ποσότητες πόσιμου νερού εγγυημένης ποιότητας 17 εκ. μ³ κατά μέσο όρο ετησίως.



Εικόνα 4: Φράγμα Αποσελέμη (ΦΟΥΝΤΟΥΛΑΚΗ, 2015)

Όσον αφορά την σήραγγα εκτροπής νερών έχει ως στόχο την ενίσχυση του ταμιευτήρα του φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο του Λασιθίου και αφορά την υπογειοποίηση τμήματος αγωγού, με την κατασκευή σήραγγας, μήκους 3.5 χιλιομέτρων.

Το νερό των βροχοπτώσεων θα συλλέγεται στο οροπέδιο Λασιθίου στην Κρήτη και θα μεταφέρεται μέσω της σήραγγας στην τοποθεσία του φράγματος Αποσελέμη με μια υψομετρική διαφορά κατά προσέγγιση 600 μέτρων.



Εικόνα 5: Μηκτομή της σήραγγας Αποσελέμη (Σ. ΜΙΧΑΣ, Α. ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ, Ν. ΜΑΜΑΣΗΣ, Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ - Ε.Μ.Π., 2015)

Το νερό θα παρέχεται μέσα από αντλίες σε μονάδες επεξεργασίας οι οποίες θα τροφοδοτούν τα συστήματα δημόσιας παροχής νερού των νομών Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6. Υπολογίζεται ότι θα παρέχεται πόσιμο νερό σε 264.000 μόνιμους κατοίκους και 125.000 τουρίστες που επισκέπτονται αυτές της περιοχές.



Εικόνα 6: Σήραγγα εκτροπής νερού και τροφοδοσία του στις περιοχές του Ηρακλείου και του Αγίου Νικολάου (FLASH NEWS , 2016)

1.3 Οφέλη του έργου

Η επένδυση στην κατασκευή του έργου που παρουσιάστηκε παραπάνω έχει αρκετά οφέλη όπως αυτά παρουσιάζονται στην συνέχεια:

- ✓ Αρχικά, εξασφαλίζει την Δημόσια Υγεία, παρέχοντας ικανοποιητική ποσότητα και ποιότητα νερού σύμφωνα με την Εθνική και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία.
- ✓ Αποτελεί λύση του χρόνιου προβλήματος ανεπάρκειας πόσιμου νερού, με τον βέλτιστο τρόπο από τεχνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής άποψης, εξασφαλίζοντας εκτός από το δικαίωμα όλων σε νερό, την διατήρηση και περαιτέρω ανάπτυξη των τουριστικών δραστηριοτήτων από τις οποίες εξαρτάται η περιοχή αυτή.
- ✓ Τα έργα θα αποτελέσουν ένα ενιαίο σύστημα υδροδότησης το οποίο θα έχει ως στόχο την αντιμετώπιση του προβλήματος ανεπάρκειας νερού μέχρι το 2035,
- ✓ Γίνεται ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, επιφανειακών και υπόγειων, όπως απαιτεί η αειφόρος ανάπτυξη. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνεται εκμετάλλευση του νερού των βροχοπτώσεων και θα μειωθούν οι γεωτρήσεις που αποδίδουν νερό κακής ποιότητας. Παράλληλα θα μειωθεί η υπεράντληση νερού από τους υπόγειους υδροφόρους και έχει επιπτώσεις στη γεωργία και το περιβάλλον λόγω εξάντλησης των εδαφών.
- ✓ Πέρα από τις υπόλοιπες χρήσεις, το έργο παρέχει και αντιπλημμυρικό χαρακτήρα, καθώς πραγματοποιείται η εκτροπή νερών από περιοχές όπως το Οροπέδιο Λασιθίου, το οποίο σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων κατακλύζεται.
- ✓ Τα έργα είναι απόλυτα συμβατά με την ολοκληρωμένη μελέτη διαχείρισης Υδατικών Πόρων Κρήτης.
- ✓ Τέλος, το κόστος νερού θα είναι προφανώς πολύ χαμηλότερο από το πωλούμενο εμφιαλωμένο.

1.4 Κατασκευή του έργου

Το έργο της ύδρευσης των Νομών Ηρακλείου και του Αγίου Νικολάου από το Φράγμα του Αποσελέμη αποτελείται από 4 εργολαβίες.

1. Κατασκευή φράγματος και συνοδών έργων

2. Διυλιστήριο, Υδραγωγεία προς Ηράκλειο και Άγιο Νικόλαο
3. Σήραγγα TBM οροπέδιου Λασιθίου
4. Εργασίες παρακολούθησης πρώτης πλήρωσης του ταμειυτήρα Αποσελέμη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται εμβάθυνση στην χρήση του TBM για την κατασκευή της σήραγγας που θα εκτρέπει τα νερά από το οροπέδιο Λασιθίου στο φράγμα του Αποσελέμη.

1.5 Ιστορικό της 3^{ης} εργολαβίας

Το 2012, το Ελληνικό Δημόσιο, εκπροσωπούμενο από το Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, απένειμε στην ελληνική κατασκευαστική εταιρία Intrakat το έργο «Υδρευση Ηράκλειου και Άγιου Νικόλαου από το Φράγμα του Αποσελέμη – Έργα ενίσχυσης ταμειυτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου» που αποτελεί την 3^η εργολαβία, στην κατασκευή του έργου του Φράγματος του Αποσελέμη.

Τον Οκτώβριο του 2013, η Intrakat σύναψε σύμβαση παροχής υπηρεσιών με την Jäger Bau GmbH, η οποία περιλαμβάνει την προμήθεια του απαιτούμενου εξοπλισμού για την κατασκευή της σήραγγας καθώς και την παροχή τεχνικών υπηρεσιών όπως εξειδικευμένο προσωπικό.

Τον Νοέμβριο του 2014 το TBM άρχισε να συναρμολογείται όπως αρχικά είχε προγραμματιστεί.

Στις 4 Μαρτίου του 2015 ξεκίνησε η εκσκαφή στην Χ.Θ. 42.5 m όπως ήταν καθορισμένο σε σχηματισμό ασβεστόλιθου, λόγω όμως επιδείνωσης των γεωλογικών συνθηκών το TBM άρχισε την εκσκαφή λίγα μέτρα παρακάτω και συγκεκριμένα στην Χ.Θ. 82.7 m ξεκινώντας τελικά την διάνοιξη στο τέλος του Αυγούστου του 2015.

Την άνοιξη του 2016 αναμενόταν η αποκάλυψη του TBM στο οροπέδιο του Λασιθίου. Παρόλα αυτά λόγω δύσκολων συνθηκών η αποκάλυψη του υπολογιζόταν τον Οκτώβρη του 2016.

Στις 20 Ιουλίου του 2016, το TBM εγκλωβίστηκε σε ένα τεράστιο σύστημα καρστικού εγκοίλου από το οποίο ήταν δύσκολο να εκτιμηθεί ο χρόνος που θα απεγκλωβιζόταν.

Η αποκάλυψη του TBM στο οροπέδιο Λασιθίου αυτήν την στιγμή αναμένεται στην αρχή του καλοκαιριού του 2017.

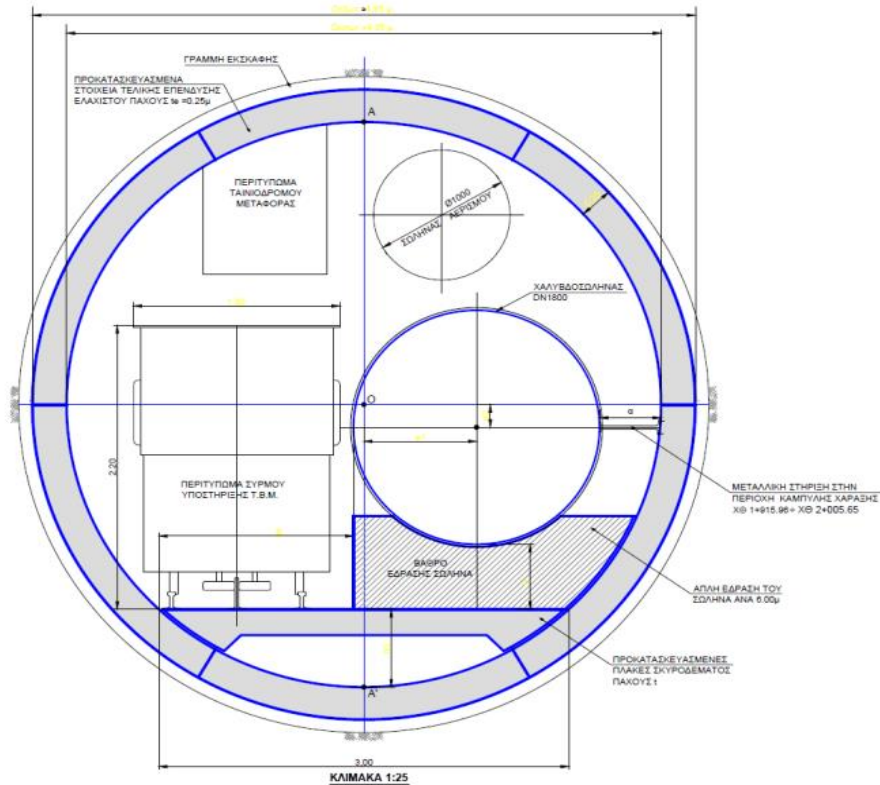
2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

2.1 Χαρακτηριστικά της σήραγγας

Πρόκειται για μια κυκλική διατομή, συνολικού μήκους 3425 m. Το υπερκείμενο της σήραγγας μεταβάλλεται, με ελάχιστο τα 5 m και μέγιστο τα 290 m. Η μηκοτομική κλίση της σήραγγας καθ' όλο το μήκος της ισούται περίπου με 15%. Η εσωτερική διάμετρος της ισούται με 4.35 m (Εικόνα 8), εντός της οποίας θα τοποθετηθεί χαλύβδινος σωλήνας, υψηλής αντοχής διαμέτρου 1.8 m μέσω του οποίου θα μεταφέρεται το νερό και θα καταλήγει στο φράγμα του Αποσελέμη.

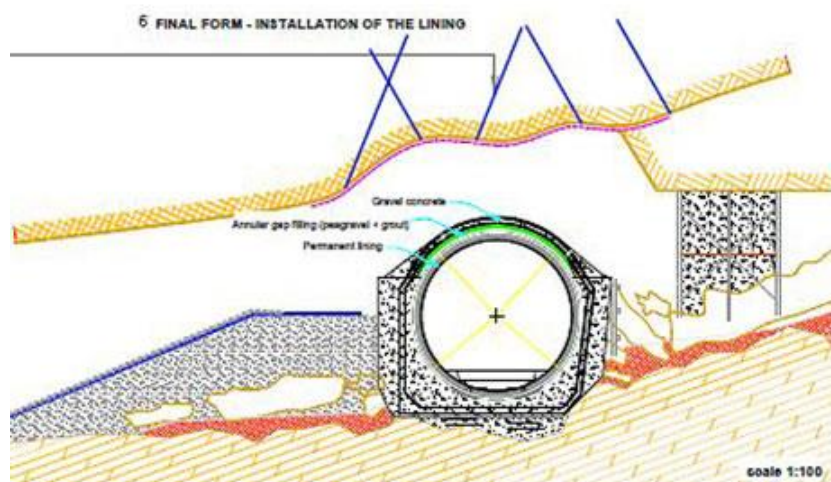


Εικόνα 7: Η σήραγγα του Αποσελέμη (JAEGGER-BAU, 2016)



Εικόνα 8: Τυπική διατομή της σήραγγας Του Αποσελέμη με την προσθήκη του χαλύβδινου σωλήνα (ΚΟΤΣΩΝΗΣ, 2014)

Χρησιμοποιήθηκαν προκατασκευασμένα στοιχεία για την επένδυση με πάχος 20 εκατοστά. Τα οποία αποτελούνται από νοπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας C40/50. Η διάμετρος εκσκαφής της σήραγγας ισούται με 4.93 m. Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται από τα κατόντη προς τα ανάντη (οροπέδιο Λασιθίου).



Εικόνα 9: Στοιχεία επένδυσης της σήραγγας (JAEGER-BAU, 2016)

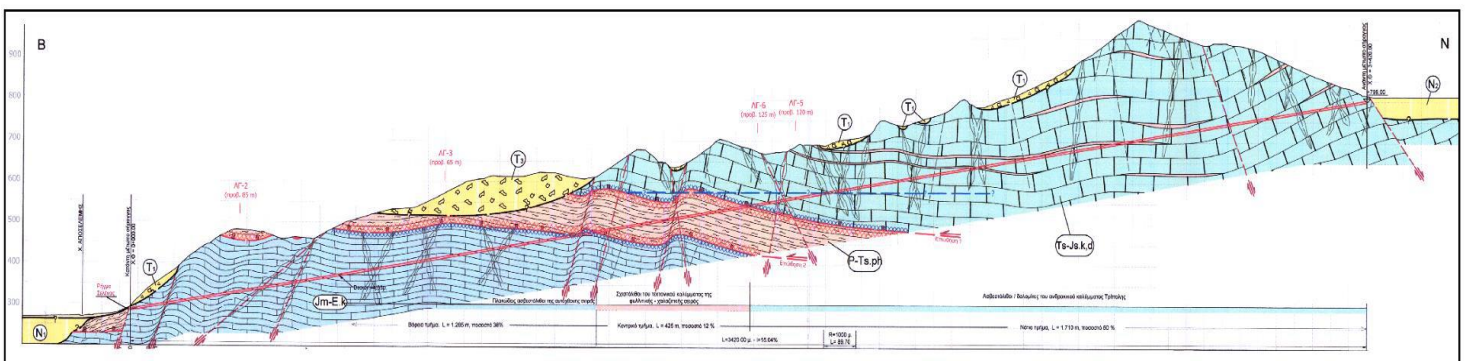
2.2 Γενικά- γεωμορφολογικά στοιχεία

2.2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας αναμένεται να συναντηθούν οι παρακάτω γεωλογικοί σχηματισμοί.

1. Το αυτόχθονο σύστημα πλακωδών ασβεστόλιθων (Plattenkalk). Κατά θέσεις ο ασβεστόλιθος θα συναντάται ως δολομιτωμένος και καρστικοποιημένος. Θεωρείται μακροπέρατος σχηματισμός και το ορατό πάχους του κυμαίνεται περίπου στα 180 m. Ο σχηματισμός αναμένεται να συναντηθεί από την αρχή του τμήματος διάνοιξης- κατάντη μέτωπο έως και για ένα εκτιμώμενο μήκος της τάξης των 1290.
2. Η αλλόχθονη σειρά με σχηματισμούς « Φυλλιτικής- Χαλαζιτικής Σειράς». Ο σχηματισμός αυτός αναμένεται να συναντηθεί περί την Χ.Θ. 1+825 για ένα εκτιμώμενο μήκος της τάξης των 140 με 150 m.
3. Η αλλόχθονη σειρά ασβεστόλιθων, δολομιτικών ασβεστόλιθων και δολομιτών. Ο σχηματισμός αναμένεται να συναντηθεί από την Χ.Θ. 1+ 330 ,για ένα μήκος της τάξης των 1650 -1700 m. με εξαίρεση τα τμήματα που αναμένεται να συναντηθούν οι σχηματισμοί της φυλλιτικής- χαλαζιτικής σειράς, έως το πέρας της σήραγγας (ανάντη μέτωπο).

Στην Εικόνα 9 φαίνονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που υπάρχουν στην περιοχή προσπέλασης της σήραγγας καθώς και τα υπάρχοντα ρήγματα.



Εικόνα 10: Στρωματογραφία της περιοχής (ΓΙΑΛΥΤΗ, 2016)

2.2.2 Υπόγεια Υδροφορία

Η διαμόρφωση της υπόγειας υδροφορίας καθορίζεται από την λιθολογία, την στρωματογραφία, την τεκτονική δομή, την ρωγμάτωση, και την καρτσικοποίηση της βραχομάζας. Με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να δημιουργούνται πολύπλοκα χωροταξικά υδρογεωλογικά περιβάλλοντα. Έτσι, εκτιμήθηκαν οι υδρογεωλογικές συνθήκες σε σχέση με την εξεταζόμενη σήραγγα προσαγωγής.

- ✓ Η Σήραγγα Προσαγωγής τοποθετείται στα υψηλά ενός ικανοποιητικά διαμορφωμένου καρστικού ορεινού περιβάλλοντος, υψηλής περατότητας, με διεξόδους σε χαμηλά υψόμετρα, όπου ευνοείται η σε βάθος υπόγεια κυκλοφορία - αποστράγγιση και έξοδος των νερών σε χαμηλά υψομετρικά σημεία, διαμορφώνοντας γενικά πολύ μικρή υδραυλική κλίση.
- ✓ Κατά θέσεις και κυρίως προς τα ανώτερα υψόμετρα, αναμένεται η ύπαρξη μεμονωμένων επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, μικρού δυναμικού και φορτίου, κυρίως στους ασβεστόλιθους του αλλόχθονου τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τριπόλεως (Ts-Jsk,d), λόγω της εκεί παρουσίας σχετικά αδιαπέρατων κλαστικών παρεμβολών.
- ✓ Οι ταχύτητες της υπόγειας ροής αναμένεται να είναι μεγάλες και η διαμορφούμενη υδροφορία αναμένεται να έχει χαμηλή πιεζομετρική στάθμη, οπωσδήποτε πολύ χαμηλότερη από την ερυθρά της σήραγγας. Υπό τέτοιες συνθήκες, η σήραγγα θα ευρίσκεται εντός της ζώνης κατείσδυσης - μεταβίβασης των υπόγειων νερών προς τον υδροφόρο ορίζοντα και δεν αναμένεται να συναντήσει υπόγεια νερά, παρά μόνο κατά την διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Τα νερά στην ζώνη αυτή μπορεί να εμφανισθούν αιφνίδια, με μεγάλες ταχύτητες, εφόσον συναντηθούν διακριτοί ευμεγέθεις καρστικοί αγωγοί - έγκοιλα.

Κατά συνέπεια, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα εκτιμάται ότι βρίσκεται κατά κανόνα κάτω από το δάπεδο της σήραγγας, εκτός από μικρές περιοχές μεμονωμένων επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, μικρού δυναμικού και φορτίου, κυρίως στους ασβεστόλιθους του αλλόχθονου τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τριπόλεως (Ts- Jsk,d), λόγω της εκεί παρουσίας σχετικά αδιαπέρατων κλαστικών παρεμβολών.

2.2.3 Γεωτεχνική Έρευνα

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωτεχνικής έρευνας σύμφωνα με την Οριστική Μελέτη για το έργο: ΥΔΡΕΥΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ-ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ – ΕΡΓΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΛΑΣΙΘΙΟΥ περιλαμβάνει τις παρακάτω γεωτρήσεις ΛΓ-7, ΛΓ-8, ΛΓ-9, ΛΓ-10 καθώς και τις παλαιότερες γεωτρήσεις στην περιοχή ΛΓ-2, ΛΓ-3, ΛΓ-5, ΛΓ-6 και Γ1-B. Στο Πίνακα 2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά αυτών των γεωτρήσεων, δηλαδή η περιοχή και το βάθος γεώτρησης.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων (INTRAKAT, 2014)

Γεώτρηση	Περιοχή	Βάθος (m)
ΛΓ-7	Κατάντη μέτωπο	25
ΛΓ-2	Βόρειο τμήμα	174.5
ΛΓ-3	Βόρειο τμήμα	149.5
ΛΓ-8	Βόρειο τμήμα	140
ΛΓ-6	Κεντρικό τμήμα	80
ΛΓ-9	Κεντρικό τμήμα	129.5
ΛΓ-5	Κεντρικό τμήμα	47.5
ΛΓ-10	Κεντρικό τμήμα	86.3
Γ1-B	Ανάτη μέτωπο	

Γενικά οι ασβεστόλιθοι και των δύο τύπων παρουσιάζουν καλή γεωτεχνική κατάσταση. Οι έντονα κατακερματισμένες ζώνες αναμένονται να είναι λίγες και περιορισμένες σε έκταση. Παρόλα αυτά λόγω της μεθόδου κατασκευής δεν αναμένεται να αποτελέσουν πρόβλημα κατά την κατασκευή. Το κυριότερο θέμα προς αντιμετώπιση είναι τα υπάρχοντα καρστικά κενά. Ενώ μόνιμα υπόγεια νερά δεν αναμένεται να συναντηθούν παρά μόνο τοπικά.

Τα λατυποπαγή αναμένεται να είναι κατά το πλείστον συμπαγή με ικανοποιητικό χρόνο ανυποστήριξης.

Ο φυλλίτης αναμένεται να έχει ποικίλλουσα συμπεριφορά. Κοντά στις επαφές του με τους ασβεστόλιθους, είτε τους υπερκείμενους της Τρίπολης είτε τους υποκείμενους της Ιόνιας Ζώνης, αναμένεται να είναι διατμημένος και γεωτεχνικά ασθενής λόγω των επωθήσεων. Κοντά στην άνω επαφή του με τους ασβεστόλιθους της Τρίπολης θα είναι επηρεασμένος με τα νερά του επικρεμάμενου ορίζοντα και η ποιότητα τους περαιτέρω υποβαθμισμένη. Αλλού μπορεί να έχει ημιβραχώδη συμπεριφορά που όμως πάντα θα απαιτεί υποστήριξη.

Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων, τους γεωλογικούς σχηματισμούς και την υδρογεωλογία δημιουργήθηκαν οι παρακάτω τεχνικογεωλογικές ενότητες που προβλέπεται να συναντηθούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Επιπλέον στον Πίνακας 3 φαίνονται οι προτεινόμενες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα TE-1

Στην πρώτη ενότητα περιλαμβάνονται σχετικά υγρή έως ελαφρά διακλασμένα και ελαφρά μικροκαρστικοποιημένα τμήματα των ασβεστολίθων της αυτόχθονης σειράς Κρήτης. Αναμένεται σταθερή γενικά συμπεριφορά κατά την εκσκαφή. Ασήμαντες έως χαμηλές πλευρικές πιέσεις. Αντοχή βραχομάζας σημαντικά μεγαλύτερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στην περίμετρο της εκσκαφής. Καμία πρακτικά επιρροή του υπόγειου νερού στην αντοχή της βραχομάζας.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα TE-2

Σε αυτή την ενότητα περιλαμβάνονται τα μέτρια διακλασμένα και μέτρια καρστικοποιημένα τμήματα των ασβεστολίθων της αυτόχθονης σειράς Κρήτης. Πρόκειται για μέτρια τεκτονισμένη βραχομάζα. Αναμένεται περιορισμένη ζώνη παραμόρφωσης της βραχομάζας. Η σύγκλιση εκδηλώνεται μέσα σε λίγες ημέρες. Αντοχή βραχομάζας μεγαλύτερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στην περίμετρο της εκσκαφής. Μέτρια η επιρροή του υπόγειου νερού.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα TE-3

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει αρκετά έως πολύ διακλασμένα και αρκετά έως πολύ καρστικοποιημένα τμήματα των ασβεστολίθων της αυτόχθονης σειράς Κρήτης. Πρόκειται για τεκτονισμένη βραχομάζα. Αναμένεται εκτεταμένη ζώνη παραμόρφωσης της

βραχόμαζας. Αντοχή βραχόμαζας περίπου ίση με τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Μέτρια η επιρροή του υπόγειου νερού.

Τεχνικογεωλογική ενότητα TE-4

Εδώ περιλαμβάνονται οι πολύ ελαφρά έως ελαφρά αποσαθρωμένοι και πολύ ελαφρά έως ελαφρά διακλασμένοι φυλλίτες μικρής έως μέσης αντοχής της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς του αλλόχθονου τεκτονικού καλύμματος. Πρόκειται για μέτρια τεκτονισμένη βραχομάζα. Αναμένεται εκτεταμένη ζώνη παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Αντοχή βραχόμαζας μικρότερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Μέτρια η επιρροή του υπόγειου νερού.

Τεχνικογεωλογική ενότητα TE-5

Σε αυτή την 5^η ενότητα περιλαμβάνονται οι μέτρια αποσαθρωμένοι και μέτρια έως ισχυρά διακλασμένοι φυλλίτες μικρής αντοχής της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς του αλλόχθονου τεκτονικού καλύμματος. Πρόκειται για μέτρια έως ισχυρά τεκτονισμένη βραχομάζα. Αναμένεται εκτεταμένη ζώνη παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Αντοχή βραχόμαζας σημαντικά μικρότερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Σημαντική η επιρροή του υπόγειου νερού.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα TE-6

Σε αυτή περιλαμβάνονται οι μέτρια έως ισχυρά αποσαθρωμένοι και έντονα τεκτονισμένοι – μυλονιτωμένοι φυλλίτες μικρής έως πολύ μικρής αντοχής της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς του αλλόχθονου τεκτονικού καλύμματος. Πρόκειται για ισχυρά τεκτονισμένη βραχομάζα. Αναμένεται εκτεταμένη ζώνη παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Αντοχή βραχόμαζας σημαντικά μικρότερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Σημαντική η επιρροή του υπόγειου νερού.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα TE-7

Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται τα σχετικά υγιή έως ελαφρά διακλασμένα και ελαφρά μικρο-καρστικοποιημένα τμήματα των ασβεστολίθων, δολομιτικών ασβεστολίθων και δολομιτών της αλλόχθονης σειράς του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τριπόλεως. Για την εν λόγω τεχνικογεωλογική ενότητα αναμένεται σταθερή γενικά συμπεριφορά κατά την εκσκαφή. Ασήμαντες έως χαμηλές πλευρικές πιέσεις. Αντοχή βραχόμαζας σημαντικά μεγαλύτερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στην περίμετρο της εκσκαφής. Καμία πρακτικά επιρροή του υπόγειου νερού στην αντοχή της βραχομάζας.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα ΤΕ-8

Περιλαμβάνονται τα μέτρια διακλασμένα και μέτρια καρστικοποιημένα τμήματα των ασβεστολίθων, δολομιτικών ασβεστολίθων και δολομιτών της αλλόχθονης σειράς του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τριπόλεως. Πρόκειται για μέτρια τεκτονισμένη βραχομάζα. Αναμένεται περιορισμένη ζώνη παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Η σύγκλιση εκδηλώνεται μέσα σε λίγες ημέρες. Αντοχή βραχόμαζας μεγαλύτερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στην περίμετρο της εκσκαφής. Μέτρια η επιρροή του υπόγειου νερού.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα ΤΕ-9

Σε αυτή περιλαμβάνονται τα αρκετά έως πολύ διακλασμένα και αρκετά έως πολύ καρστικοποιημένα τμήματα των ασβεστολίθων, δολομιτικών ασβεστολίθων και δολομιτών της αλλόχθονης σειράς του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τριπόλεως. Πρόκειται για τεκτονισμένη βραχομάζα. Αναμένεται εκτεταμένη ζώνη παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Αντοχή βραχόμαζας περίπου ίση με τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Μέτρια η επιρροή του υπόγειου νερού.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα ΤΕ-10

Σε αυτή περιλαμβάνονται τα έντονα τεκτονισμένα και διατμημένα τμήματα των τεκτονικών ζωνών των μεγάλων ρηγμάτων όλων των σχηματισμών της εξεταζόμενης σήραγγας. Αναμένεται να εμφανίσουν γενικά κακή και τοπικά μέτρια γεωμηχανική συμπεριφορά.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα ΤΕ-11

Σε αυτή περιλαμβάνονται τα διατμημένα τμήματα των ζωνών επώθησης και εφίπλευσης των καλυμμάτων της εξεταζόμενης σήραγγας. Αναμένεται να εμφανίσουν γενικά κακή γεωμηχανική συμπεριφορά.

Πίνακας 3: Γεωτεχνικοί σχεδιαστικοί παράμετροι (INTRAKAT, 2014)

Τεχνικογεωλογική ενότητα	GSI	GSI _{design}	σ_{ci} (MPa)	E_i (GPa)	m_i	γ (KN/m ³)	Λόγος Poisson ν
TE-1	50-70	50	45	55	8	27	0.20
TE-2	40-50	40	45	40	7	27	0.25
TE-3	30-40	30	35	28	6	26	0.25
TE-4	20-30	25	9	-	7	25	0.25
TE-5	15-20	15	8	4.5	7	24	0.25
TE-6	10-15	12	7	4	6	23	0.30
TE-7	45-60	45	40	55	8	27	0.20
TE-8	35-40	35	40	40	7	27	0.25
TE-9	25-35	30	30	30	6	26	0.25
TE-10	15-20		-	-	-	-	-
TE-11	10-15		-	-	-	-	-

3 ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ TBM

Το μηχάνημα που επιλέχτηκε για την διάνοιξη της σήραγγας είναι μηχάνημα ολομέτωπης κοπής TBM, με διπλή ασπίδα και διάμετρο κεφαλής 4.93 m. Εξάιρεση από το συνολικό μήκος της διάνοιξης αποτελεί η περιοχή του κατάντη μετώπου το οποίο διανοίχτηκε με συμβατικά μέσα και με την εφαρμογή της μεθόδου NATM.

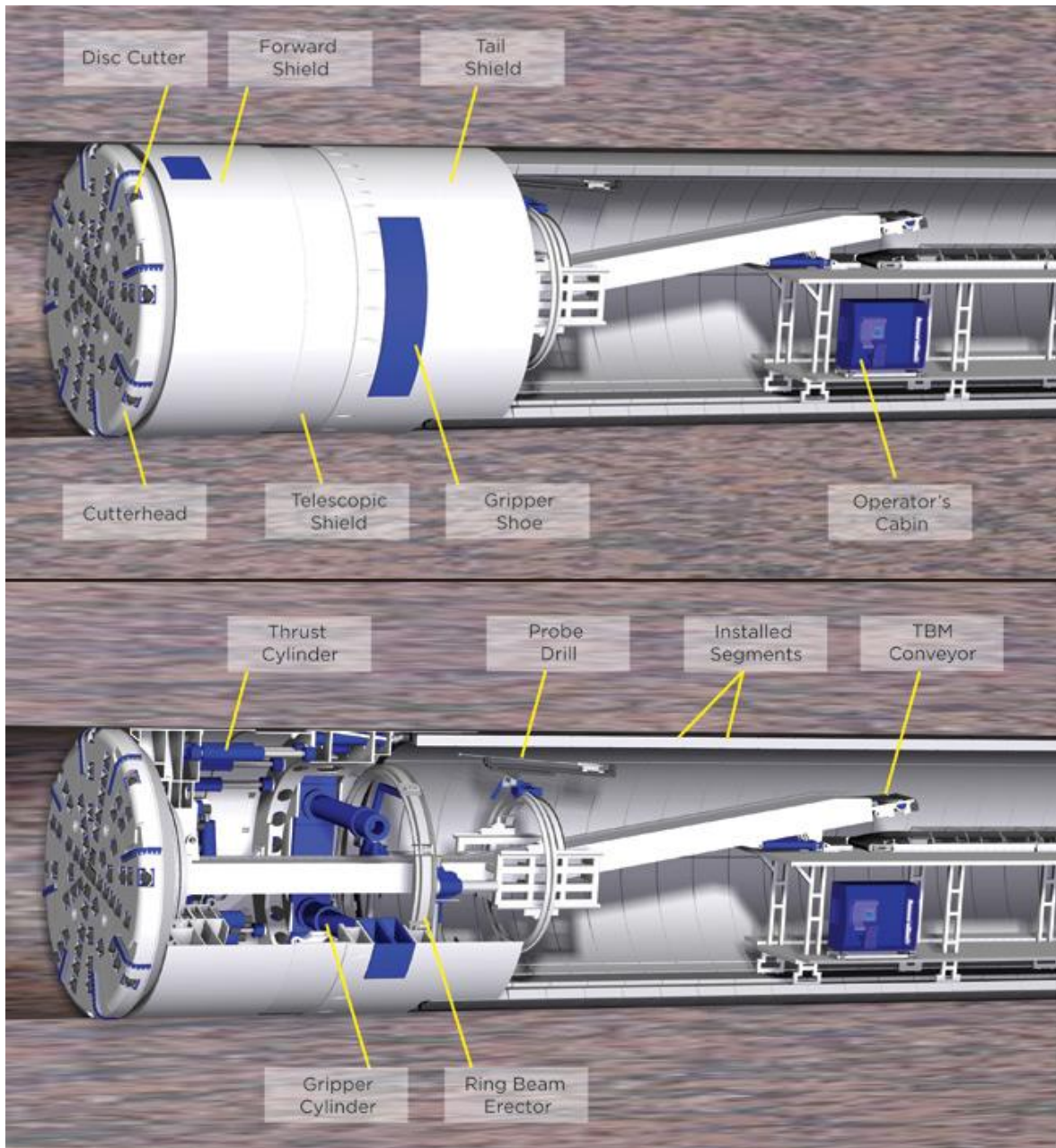
Το TBM διπλής ασπίδας κατά την λειτουργία του παραδίδει ολοκληρωμένη την τελική επένδυση – segments – ταυτόχρονα με την προχώρηση, πρόκειται για μια μεθόδου που εμφανίζει χρονικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων ειδών TBM, καθώς μειώνονται οι αναμενόμενοι χρόνοι αναμονής με την τοποθέτηση της ασπίδας. Στους σχηματισμούς σκληρού βράχου, το TBM διπλής ασπίδας μπορεί να λειτουργεί με πέδιλα και συνεχή προχώρηση με υψηλούς ρυθμούς, ενώ στους ασθενείς φυλλίτες ή σε τυχόν ζώνες με πληρωμένα καρστικά κενά ή κατακερματισμένο ασβεστόλιθο, η ασπίδα θα προσφέρει άμεση υποστήριξη και η λειτουργία της μηχανής θα είναι του τύπου μονής ασπίδας.



Εικόνα 11: Το TBM με διπλή ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στην σήραγγα Αποσελέμη (JAEGER-BAU, 2016)

Η διάνοιξη με την χρήση TBM διπλής ασπίδας προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- ✓ Η κατασκευή της σήραγγας μπορεί να γίνει σε ένα βήμα και σε όλη την απαιτούμενη διάσταση της διατομής.
- ✓ Προσφέρει σταθερή υποστήριξη στην προχωρούσα διάνοιξη.
- ✓ Τοποθέτηση απευθείας μόνιμης υποστήριξης.
- ✓ Η χαλάρωση στην βραχομάζα είναι η ελάχιστη δυνατή.



Εικόνα 12: TBM διπλής ασπίδας (THE ROBBINS COMPANY, 2016)

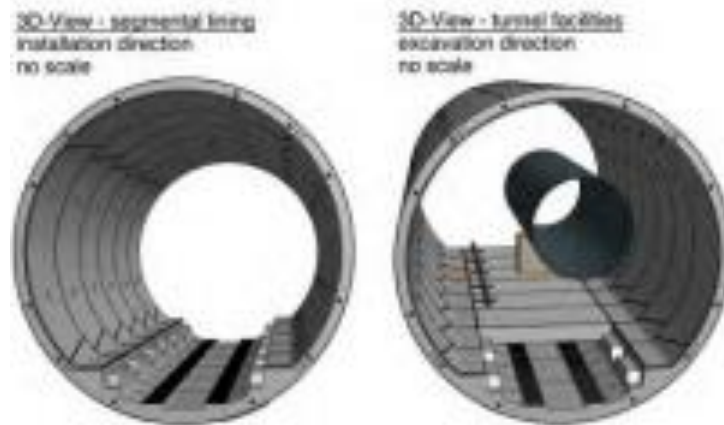
3.1 Κλίση της σήραγγας

Η διάνοιξη της σήραγγας με κλίση 15% δεν είναι κύριος λόγος για τον οποίο η εκσκαφή θεωρείται δύσκολη. Η πρόκληση σε αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν να επιτευχθεί η διαχείριση ενός συστήματος χειρισμού μεταφορέων και ενός τροχοφόρου συστήματος τροφοδοσίας του TBM μέσα στην σχετικά στενή διάμετρο της σήραγγας 4 m. Η Jaeger Bau συμμετείχε ενεργά στην ανάπτυξη του Back-up System, του συστήματος επένδυσης, του συστήματος χειρισμού, αλλά και των προδιαγραφών του φορέα μεταφοράς της σήραγγας.

3.2 Σύστημα επένδυσης

Η πρόκληση του εναλλακτικού σχεδιασμού των στοιχείων επένδυσης (που αναπτύχθηκε από την Vigil Consult ZT) ήταν να πείσει τόσο τον πελάτη όσο και τον ανάδοχο του έργου για τα πλεονεκτήματα ενός ισοδύναμου φτηνότερου και ευκολότερου σε χειρισμό σχεδιασμού παράλληλων δακτυλίων "4 + 0" χωρίς φλάντζες και χωρίς βιδωτή σύνδεση τους έναντι του καθορισμένου κλιμακωτού δακτυλίου "5 + 1".

Το σύστημα επένδυσης που επιλέχθηκε προσφέρει δύο τρεχούμενα δάπεδα για το σύστημα μεταφοράς της σήραγγας: το χαμηλότερο κεντρικό τρεχούμενο δάπεδο για τα στοιχεία επένδυσης τύπου ανάστροφο τόξο κατά την εκσκαφή του TBM και, το ανώτερο πλαϊνό δάπεδο που παρέχεται από μια πρόσθετη ανάστροφη πλάκα κατά τη διάρκεια της φάσης εγκατάστασης των χαλύβδινων σωλήνων και αργότερα για την συντήρηση της σήραγγας για τις διαδρομές του ειδικού μεταφορέα. Η προκατασκευασμένη πλάκα από σκυρόδεμα αποτελεί μέρος του συστήματος επένδυσης και πρέπει να εγκατασταθεί σε δεύτερο στάδιο μετά την ολοκλήρωση των έργων σήραγγας.



Εικόνα 13: Μορφή σήραγγας κατά την κατασκευή (αριστερά) και τελική μορφή (δεξιά)
(WOLFGANG GUTTER, 2016)

3.3 Επιλογή συστήματος τροφοδοσίας (TTC)

Με κλίση 15% δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ένα συμβατικό σύστημα σιδηροτροχιάς για προμήθειες του TBM και υπάρχουν βασικά μόνο δύο ή τρεις επιλογές: σιδηροδρομική σχάρα, τελεφερίκ το οποίο θα λειτουργεί χαμηλά με την βοήθεια βαρούλκου ή αυτοκινούμενος τροχοφόρος μεταφορέας. Η Jaeger Bau αποφάσισε να γίνει χρήση του τροχοφόρου μεταφορέα με αντίστοιχο ορισμό του BUS καθώς και του συστήματος επένδυσης. Το πετρελαιοκίνητο πρωτότυπο μηχάνημα με μήκος 51 μ. και 440 kW diesel, που καθορίστηκε από τον Jaeger Bau, τελικά ήταν και αυτό που προμηθεύτηκε η Intrakat.

Καθώς δεν προϋπήρχε εμπειρία για έναν τέτοιο μεταφορέα με κλίση 15%, η λύση αυτή περιείχε κάποιο κίνδυνο ή εξετάζοντας το πιο θετικά αποτελούσε μια πρόκληση.

Η κύρια ανησυχία αποτελούσε το δυναμικό έλξης του ζευγαριού των στερεών ελαστικών τροχών ("πρέσες στις ταινίες") σε μια επιφάνεια σκυροδέματος με κλίση 15% κάτω από διάφορες συνθήκες (ξηρές, υγρές, μολυσμένες). Μια ορισμένη τραχύτητα παρέχεται για το τμήμα του ανάστροφου τόξου αλλά και της ανάστροφης πλάκας με χύτευση επίπεδων νευρώσεων για περαιτέρω ενίσχυση του σκυροδέματος κατά μήκος των διαδρομών.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής του TTC, ορισμένες τρομακτικές και εξαιρετικά επικίνδυνες ολισθαίνουσες κινήσεις με μπλοκαρισμένους τροχούς εντοπίστηκαν σε λάθη λειτουργίας, καθώς και σε λάθος υδραυλικές ρυθμίσεις. Καθώς ήταν αδύνατη η έγκριση του συνεργείου να δουλέψει σε πραγματικές συνθήκες εργασίας, οι τελικές ρυθμίσεις του υδραυλικού συστήματος μπορούσαν να πραγματοποιηθούν μόνο επί τόπου – σε παρόμοιες

υδραυλικές ρυθμίσεις με αυτές του TBM. Όσο η διαδρομή ήταν ξηρή, η πρόσφυση ήταν επαρκής. Αλλά η κατάσταση άλλαξε όταν η διαδρομή ήταν υγρή, με αποτέλεσμα την ολίσθηση του κινητήριου τροχού, που οδήγησε ακόμη και σε απώλειες παραγωγής επειδή η λειτουργία του TTC έγινε πολύ επικίνδυνη. Διαφορετικοί τύποι προφίλ δοκιμάστηκαν, αλλά μόνο μικρή βελτίωση παρατηρήθηκε. Το νερό μειώνει τον συντελεστή τριβής φυσικά, αλλά όπως αποδείχθηκε αργότερα, το νερό δεν είναι πραγματικά ο κύριος λόγος ολίσθησης. Οι κύριοι παράγοντες είναι το μέγεθος της περιοχής μετάδοσης ισχύος και η τραχύτητα της γραμμής, ιδιαίτερα με τα μάλλον άκαμπτα ελαστικά από καουτσούκ, σε σύγκριση με τα πιο ευέλικτα ελαστικά. Οι διαστάσεις των τσιμεντένιων νευρώσεων κατά μήκος της γραμμής ενδέχεται να μην είναι κατάλληλες για το είδος των ελαστικών, με αποτέλεσμα τη μείωση της περιοχής μετάδοσης ισχύος. Η πολύ ομαλή επιφάνεια σκυροδέματος συνέβαλε επίσης στα προβλήματα έλξης. Τέλος, η απλούστερη λύση ήταν να γεμίσει ο χώρος μεταξύ των νευρώσεων με επισκευαστικό κονίαμα, αυξάνοντας έτσι την περιοχή μετάδοσης ισχύος και την τραχύτητα και συνεπώς και τον συντελεστή τριβής. Ακόμα και το τρεχούμενο νερό στο τραχύ αλλά ομαλό κομμάτι δεν εμπόδισε τη λειτουργία του TTC ακόμη και με πλήρως χρησιμοποιημένα ελαστικά.



Εικόνα 14: Πλήρωση των νευρώσεων (WOLFGANG GUTTER, 2016)

3.4 Σχεδιασμός του TBM και του BUS (Back Up System)

Το Mitsubishi Boretac NFM διπλής ασπίδας TBM μοντέλο 1441 0187 006, που αρχικά κατασκευάστηκε το 1995, ξανακατασκευάστηκε σύμφωνα με την εξέλιξη της τεχνολογίας και παραχωρήθηκε με ένα εντελώς νέο σύστημα BUS ειδικά σχεδιασμένο για τη χρήση στο έργο του Αποσελέμη.

Ο σχεδιασμός του BUS έπρεπε να πληροί τις απαιτήσεις μιας κεκλιμένης σήραγγας 15% με ένα σύστημα συνεχούς μεταφοράς. Ο περιορισμένος ανοιχτός χώρος στην κατασκευή κατέληξε να είναι άλλη μια πρόκληση, για να φιλοξενήσει διάφορα στοιχεία στο BUS. Όπως μεταβλητό μετατροπέα συχνότητας, θάλαμο διάσωσης, Συνεχούς Συστήματος Μεταφοράς (CCS) μονάδες, κ.λπ.

Το λεπτομερές φύλλο του BUS περιλάμβανε ορισμένες σημαντικές απαιτήσεις όπως: Σύστημα ανοικτού τύπου εξέδρας φόρτωσης, Υψηλή σύνδεση εφελκυσμού στην αρπάγη της ασπίδας του TBM, Σύστημα απόδοσης 85 χιλιοστά / λεπτό ή 5 μέτρα / ώρα, Δύο δαχτυλίδια εφοδιασμού, με μήκος 1300 χιλιοστά το καθένα, Κονιάματα και αμμοχάλικο για πλήρωση των κενών των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης, Εγκαταστάσεις για ενεματώσεις, Όσο το δυνατόν πιο γρήγορος χειρισμός των υλικών, Την ικανότητα το TBM να περνά οριζόντια και κάθετα καμπύλες, Ευελιξία όσον αφορά διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, Σχεδιασμό κατάλληλο για συνήθειες εγκαταστάσεις μεταφοράς (όπως φορτηγό, κοντέινερ).

Το BUS με ένα συνολικό μήκος περίπου στα 165 m, είναι ένα συμμετρικό ανοικτό σχήμα Ω ,συστήματος τύπου πύλης με 23 γερανογέφυρες σε όργανα κύλισης με μεγάλους διαστάσεων Vulkollan τροχούς κύλισης στο τμήμα του ανάστροφου τόξου, το οποίο θα είναι μέρος της μετέπειτα σήραγγας. Επιπλέον τροχοί οδηγοί βρίσκονται σε κάθε επίπεδο στην πλευρική επιφάνεια του βραχίονα.

Στην Εικόνα 15 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του TBM

GENERAL SPECIFICATIONS	
MITSUBISHI – BORETEC – NFM Double Shield TBM 1441 / 0187 / 006	
Machine type	Hard rock double shield TBM
Boring diameter	4.930 mm
Cutterhead	flat design with 17" disc cutters complete with wear plate type false face
Cutters	17" (back-loading)
Number of disc cutters	32
Maximum thrust per disc cutter	250 kN
Maximum thrust on the cutterhead	32 x 250 kN = 8.000 kN
Type of cutterhead drive	electric drive with variable speed (frequency variation / VFD)
Cutterhead head speed (VFD)	0 - 9 rpm
Cutterhead drive power	6 x 250 kW = 1.500 kW
Torque (constant torque range)	2.600 kNm @ 0-4.5 rpm
Torque (max. speed, constant power range)	1.300 kNm @ 9 rpm
Unlocking torque	3.900 kNm
Boring stroke main thrust auxiliary thrust	1.300 mm 2.200 mm
Main thrust (telescopic) Number of jacks Max. thrust force	8 15.200 kN @ 350 bar
Auxiliary thrust (segment jack) Number of jacks Max. thrust force	14 25.900 kN @ 350 bar
Grippers Force	30.000 kN
Maximum penetration rate	8 m/h
Conveyor	throughed belt conveyor
Electrical system Input power Main drive motor circuit Pump motor circuit Controls Total installed electric power	15.000 V, 3-phase, 50 Hz 690 V, 3-phase, 50 Hz 400 V, 3-phase, 50 Hz 220/110 V, 50 Hz ≈ 2.350 kVA (≈ 1.880 kW)
Machine weight	≈ 400 t
General lay-out drawing	290 PE 00 005 / B
Year of manufacture / diameter conversion	1995 / 2014

Εικόνα 15: Χαρακτηριστικά του TBM (ΓΙΑΛΥΤΗ, 2016)

3.5 Συνεχές σύστημα μεταφοράς (CCS)

Λόγω της κλίσης του 15%, τη μεταφορά φορτίου κατά μήκος της σήραγγας χειρίζεται ένα Σύστημα Συνεχούς Μεταφοράς (CCS). Άλλα εξαρτήματα είναι ο BackUp μεταφορέας, η εκφόρτωση και η εκτροπή της ζώνης που βρίσκεται χαμηλά και η πλευρική τοποθέτηση της ζώνης αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένης της τάσης προς τα κάτω.

Τα βασικά δεδομένα CCS έχουν ως εξής:

- ✓ Μήκος: 3500 m
- ✓ Πλάτος ιμάντα: 650 mm
- ✓ Ποιότητα ιμάντα: EN 14973 Κλάση 'A'
- ✓ Χωρητικότητα: 300 tph
- ✓ Ταχύτητα: 0-3 m / s
- ✓ Εγκατεστημένη ισχύς: 400kW
- ✓ Κεφάλι παράδοσης: -530 m

Το CCS θα επεκταθεί στο οπίσθιο τμήμα του BUS και αναρτάται συμμετρικά στις αλυσίδες από το στέμμα της σήραγγας.

Το εξαιρετικό χαρακτηριστικό είναι η μεταφορά με κλίση 15% προς τα κάτω, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες δυνάμεις τάσης μέχρι 50 τόνους που πρέπει να φέρει το BUS και η αξιοσημείωτη δύναμη θραύσης των ηλεκτρικών κινητήρων 2 * 200kW.

Σε ένα κεκλιμένο μήκος σήραγγας περίπου 300 m προς τα πάνω, το CCS λειτουργεί αναγεννητικά με τον κινητήρα των 400kW που λειτουργεί ως αναγεννητικό φρένο, τροφοδοτώντας την ηλεκτρική ενέργεια στο τοπικό δίκτυο. Η πρόκληση του συστήματος είναι να φέρει τις δυνάμεις έντασης και τη στέγαση των τεράστιων μονάδων οδήγησης / πέδησης του BUS.



Εικόνα 16: Συνεχές Σύστημα Μεταφοράς (CCS) (JAEGER-BAU, 2016)

3.6 Προβλήματα που αντιμετώπισε το TBM

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής νερού του Αποσελέμη παρατηρήθηκαν ορισμένα απροσδόκητα προβλήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

3.6.1 «Κρυμμένη Κατολίσθηση» (43-83 m)

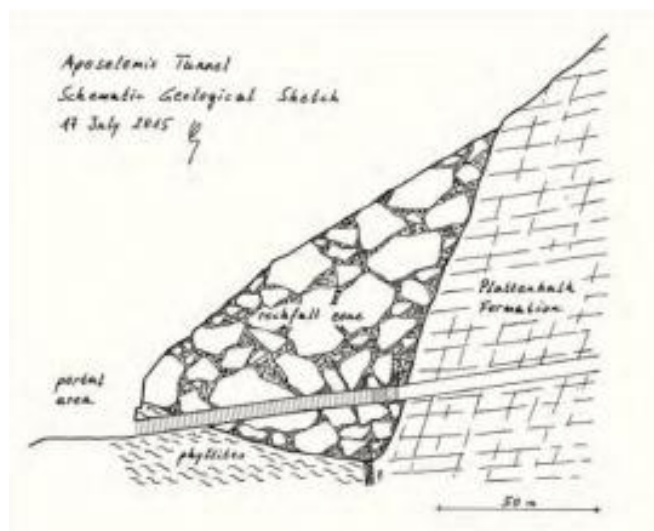
Όπως αποδείχθηκε μετά τα πρώτα μέτρα της ανασκαφής το TBM αντιμετώπισε γεωλογικούς σχηματισμούς που διέφεραν εντελώς από την αρχική πρόβλεψη. Όπως αναμενόταν θα εκκινούσε από την Χ.Θ. 42,5 αλλά λόγω μιας «κρυμμένης κατολίσθησης», η οποία δεν ήταν ορατή στην επιφάνεια, αναγκάστηκε να ξεκινήσει την εκσκαφή από τα 82,7 m.

Μια τέτοια «κρυμμένη κατολίσθηση» δεν είχε προβλεφθεί, αντίθετα αναμενόταν ένας μάλλον ομοιογενής σχηματισμός Plattenkalk με «ευνοϊκές προϋποθέσεις για την διάνοιξη της σήραγγας». Παρόλα αυτά λόγω του αδύναμου σχηματισμού το αποτέλεσμα ήταν μια απροσδόκητη έναρξη του TBM.

Η αποσύνθεση και ο χαλαρός χαρακτήρας της βραχομάζας προκάλεσε πολύ δύσκολες συνθήκες εδάφους, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα μια σειρά από υπερεκσκαφές και καταρρεύσεις της οροφής της σήραγγας αλλά και του μετώπου, χωρίς την ύπαρξη ενδείξεων των δυνάμεων ώσης της κοπτικής κεφαλής του TBM πάνω στο σχηματισμό.

Λαμβάνοντας υπόψη τις υπερεκσκαφές και την κατάρρευση της οροφής και του μετώπου της σήραγγας, καθώς και την απόκλιση της χάραξης μέσα στο τμήμα της «κατολίσθησης» ιδιαίτερα μέτρα υποστήριξης ελήφθησαν για την αντιμετώπιση της τάσης του TBM να «βυθιστεί»:

- ✓ παροχή σωλήνων ενεμάτωσης για το χαλαρό έδαφος στο μπροστινό και πάνω μέρος της κοπτικής κεφαλής
- ✓ εφαρμογή αφρού για να κλείσει η κοπτική κεφαλή αλλά και για την προστασία του TBM από το τσιμεντένεμα
- ✓ τσιμεντενέσεις στο χαλαρωμένο έδαφος μπροστά και κάτω από την κοπτική κεφαλή για να δημιουργηθεί μια σταθερή βάση ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω βύθιση της αλλά και της εμπρός ασπίδας
- ✓ εφαρμογή ενός ξηρού τσιμέντου / μίγμα αμμοχάλικου πάνω από το χαλαρωμένο έδαφος και διαβροχής του ύστερα από την εφαρμογή
- ✓ εφαρμογή αφρού στην υπόλοιπη κοιλότητα στο εμπρός και το άνω μέρος του TBM ώστε να σταθεροποιηθεί η βραχομάζα και να αποφευχθούν φαινόμενα κατάρρευσης, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η τριβή της ασπίδας και πληρούνται τα κενά στο ανάστροφο τμήμα με μπετονίτη
- ✓ σταθεροποίηση μετώπου με αγκύρια γεωραντάρ (GPR) αυξάνοντας την αντοχή του
- ✓ επανεκκίνηση του TBM και εκσκαφή μέσα στο ενεματωμένο με τσιμέντο σχηματισμό και του σταθεροποιημένου μετώπου



Εικόνα 17: Κρυμμένη Κατολίσθηση (WOLFGANG GUTTER, 2016)

3.6.2 Παγίδευση του TBM (1404 m)

Τον Μάρτιο του 2016 στην Χ.Θ. 1404 m, το TBM παγιδεύτηκε λόγω έντονων συγκλίσεων κατά τη μετάβαση από ασβεστόλιθο στους σχηματισμούς της «Φυλλιτικής- Χαλαζιτικής Σειράς». Καθώς το TBM κόλλησε οι ασπίδες έπρεπε να απελευθερωθούν με χειρονακτική εργασία. Ο απαιτούμενος θάλαμος εργασίας ανασκάφτηκε χειρονακτικά με αεροσφυριά και επενδύθηκε από την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Προληπτικά μέτρα για την αντιμετώπιση περαιτέρω πιθανής παγίδευσης/ συμπίεσης του TBM προτάθηκαν ως εξής:

- Αύξηση της διαμέτρου εκσκαφής κατά περίπου 30 mm
- Αδιάκοπη και γρήγορη ανασκαφή για την άμβλυνση της χρονικής εξάρτησης σε σχέση με τη συμπεριφορά της βραχομάζας με μέτρα όπως η συντήρηση, λίπανση της ασπίδας, ελάχιστο ποσοστό προχώρησης 15 m / d για την αποφυγή συγκλίσεων ή συμπίεσης.

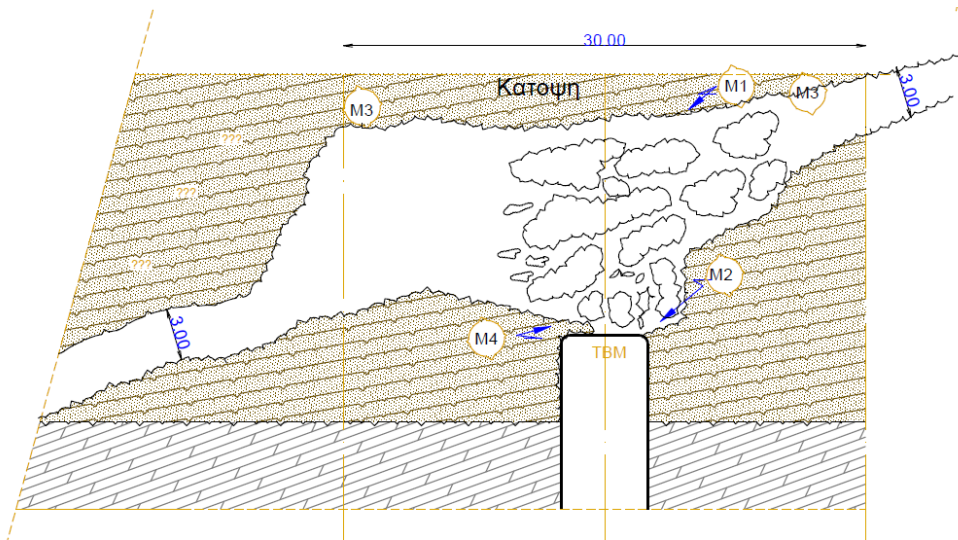
3.6.3 Αέριο (1528-1622 m)

Μεταξύ του τμήματος 1538 και 1622 m η ανασκαφή πέρασε από ιζηματογενές πέτρωμα, πρόκειται για λατυποπαγή σχηματισμό, σε δολομίτη που περιέχει το άκρως τοξικό H₂S αέριο, το οποίο απελευθερώθηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις H₂S 5 ppm (MAC) ή 7,1 mg / m³ υπερέβην αρκετά, με μια τιμή που μετρήθηκε στα 14 ppm. Στη συνέχεια, στη σήραγγα το προσωπικό μπορούσε να εισέρχεται μόνο με ειδικές αναπνευστικές μάσκες. Πρόσθετη εμφύσηση αέρα και συνεχείς μετρήσεις αερίου οδήγησαν σε μια αργή πρόοδο του TBM σε αυτό το τμήμα.

Το κατώτερο όριο έκρηξης του αερίου H₂S είναι 42.5 ppm ή περίπου 10 φορές υψηλότερο από την τιμή MAC, οπότε στην περίπτωση αυτή δεν υπήρχε κίνδυνος έκρηξης.

3.6.4 Καρστικό έγκοιλο (2317 m)

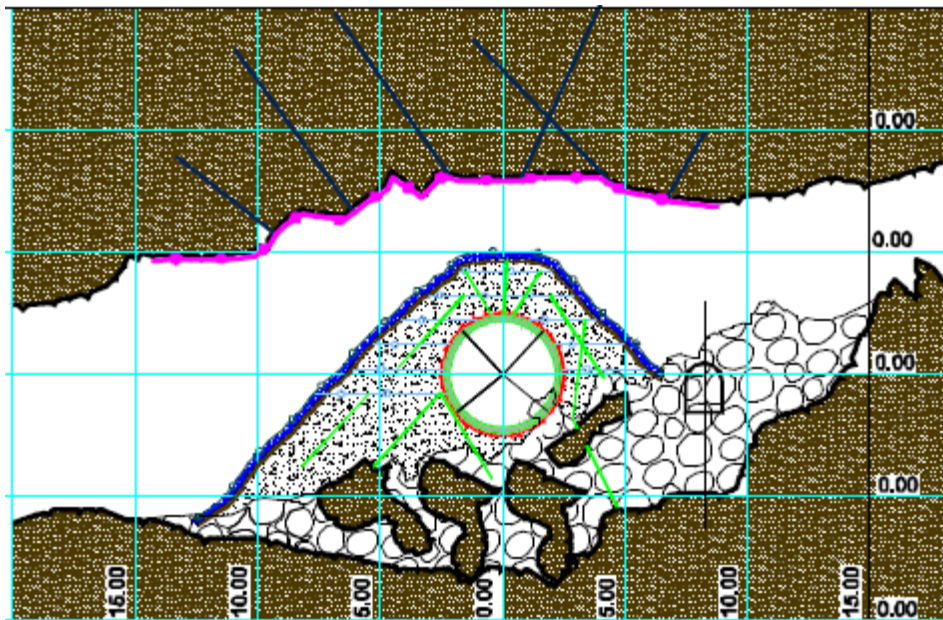
Στον ασβεστόλιθο της ζώνης Τριπόλεως, ως κύριο γεωλογικό σχηματισμό, είχε προβλεφθεί η ύπαρξη διαφόρων μεγεθών καρστικών σπηλαίων. Τον Ιούλιο του 2016 στην Χ.Θ. 2317 m, το TBM αντιμετώπισε ένα τεράστιο καρστικό έγκοιλο.



Εικόνα 18: Κάτοψη καρστικού εγκοίλου (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)

Θεωρήθηκαν τα παρακάτω δύο μέτρα για την προσπέλαση του από το TBM, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το πλήρες γέμισμα / έμφραξη του εγκοίλου ήταν αδύνατο λόγω του γεγονότος ότι είναι ένα λεγόμενο «ζωντανό καρστ» με σημαντική εποχιακή ροή νερού:

1. Εκτεταμένη πλήρωση για δημιουργία και σταθεροποίηση του πρανούς με συρματοκιβώτια και στρογγυλό χαλίκι όπως φαίνεται στη Εικόνα 19.
2. Τεχνητή σήραγγα με χαλύβδινα τόξα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 19: Μέτρα αντιμετώπισης για το καρστικό έγκοιλο (INTRAKAT, 2016)

4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΤΒΜ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ

Όπως έχει προαναφερθεί και στο προηγούμενο Κεφάλαιο το ΤΒΜ κόλλησε στην Χ.Θ. 2+317.5, καθώς συναντήσε μια μεγάλη καρστική κοιλότητα, με αποτέλεσμα να ανασταλούν όλες οι εργασίες. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια περαιτέρω εμβάθυνση σε αυτό το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε εν τέλει επιτυχώς.

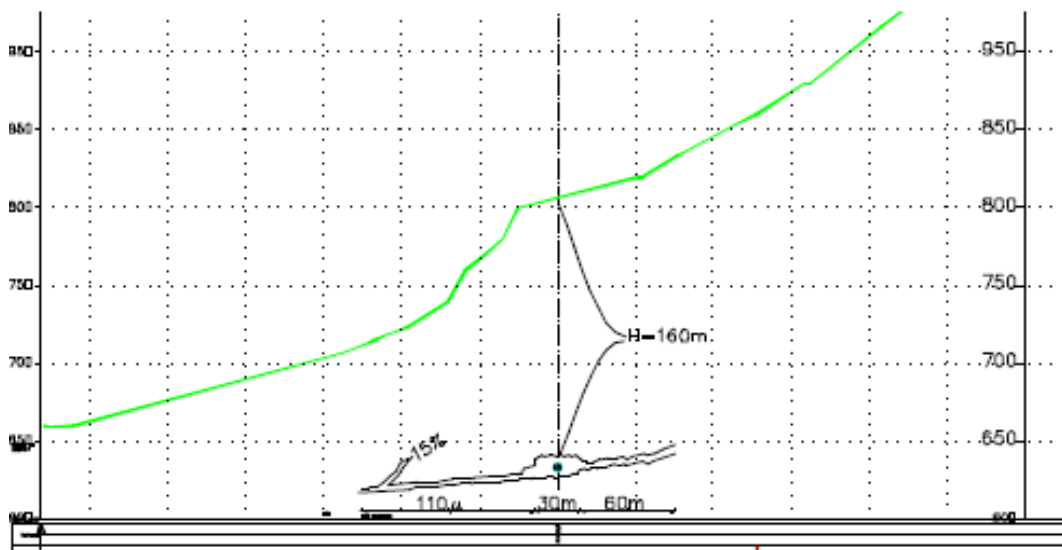
4.1 Γενικά

Όταν το ΤΒΜ βρισκόταν στην Χ.Θ. 2+317.5, και κατά την εκτέλεση των εργασιών διάνοιξης, διαπιστώθηκε αιφνίδια απώλεια πίεσης στο μέτωπο της κοπτικής κεφαλής. Αφού διακόπηκε η προσπάθεια προχώρησης, ακολούθησε διερεύνηση για τα αίτια της απώλειας πίεσης. Διαπιστώθηκε ύπαρξη μιας καρστικής κοιλότητας μεγάλου μεγέθους.

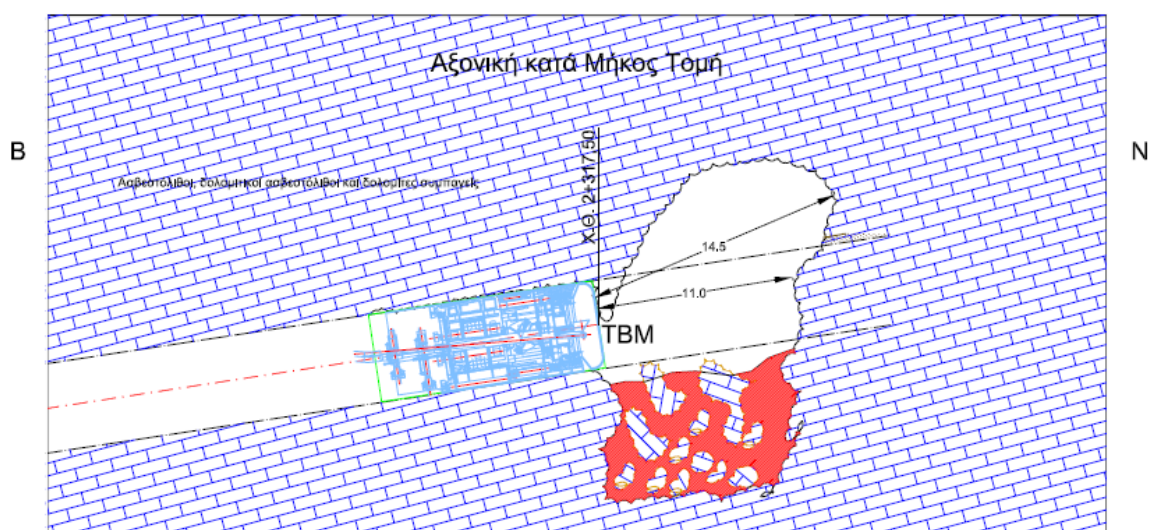


Εικόνα 20: Σήραγγα προσαγωγής κατά προσέγγιση στην οποία διακρίνεται η θέση του σπηλαιού (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)

Για την ακριβή διαστασιολόγηση του σπηλαίου έγιναν προσπάθειες αποτύπωσης, από τις οποίες προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι αυτή η καρστική κοιλότητα αποτελεί διεύρυνση κεκλιμένου καρστικού αγωγού αγνώστου μήκους, το οποίο πιθανότητα δημιουργήθηκε λόγω ύπαρξης ρήγματος. Διαπιστώθηκε ότι το σπήλαιο βρίσκεται σε ένα βάθος 160m από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους ενώ το ελάχιστο πλευρικό μήκος υπολογίστηκε της τάξης των 120m. Το κενό αυτό παρουσιάζει τις παρακάτω διαστάσεις: 30 m πλάτος, 15 m ύψος και 15 m μήκος. Οι συνθήκες αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 21 και Εικόνα 22.



Εικόνα 21: Βάθος της καρστικής κοιλότητας (INTRAKAT, 2016)



Εικόνα 22: Αξονική κατά μήκος (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)

4.2 Γεωλογικές Συνθήκες Σπηλαίου

Το εξεταζόμενο τμήμα που περιλαμβάνει την περιοχή του σπηλαίου δομείται από τους ασβεστολίθους, δολομιτικούς ασβεστολίθους και δολομίτες (Ts-Jsk,d) του αλλόχθονου τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τριπόλεως. Τα κατώτερα τμήματα της σειράς αποτελούνται από ημι-κρυσταλλικούς δολομίτες, παχυστρωματώδεις έως άστρωτους, τεφρού χρώματος, ενώ τα ανώτερα τμήματα αυτής μεταπίπτουν σε ασβεστολίθους και δολομιτικούς ασβεστολίθους, κυρίως παχυστρωματώδεις έως παχυπλακώδεις, τεφρόλευκου έως μελανότεφρου χρώματος. Στους ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες παρατηρούνται επίσης αραιές κλαστικές παρεμβολές αργιλικών σχιστολίθων και αργιλο-μαργαϊκών υλικών, καστανοκίτρινου χρώματος και λεπτού κατά κανόνα πάχους, υπό μορφή ενστρώσεων ή φακών.

Ύστερα από εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν στα δείγματα που λήφθηκαν από τις γεωτρήσεις ΛΓ-6, ΛΓ-9, ΛΓ-10 και Γ1-B, που ανταποκρίνονται στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας και αφορούν σε μεγάλο μέρος τους το αλλόχθονο τεκτονικό κάλυμμα της ζώνης Τριπόλεως προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά από εργαστηριακές δοκιμές στους σχηματισμούς της ζώνης Τριπόλεως

Χαρακτηριστικό	Συμβολισμός	Εύρος Τιμών	Μέση Τιμή
Φαινόμενο Βάρος	γ_{ϕ}	25.36kN/m ³ -27.25kN/m ³	26.82kN/m ³
Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη	σ_{ci}	11.5MPa-79.07MPa	44.88MPa
Μέτρο Ελαστικότητας	E	14.8GPa-83.1GPa	55.6GPa
Λόγος Poisson	v	0.07-0.25	0.18
Δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση (κάθετα στον άξονα)	I_{s50}	0.72 MPa-6.10MPa	3.64MPa
Δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση (παράλληλα στον άξονα)	I_{s50}	3.56MPa-5.21MPa	4.40MPa

Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό Brazilian	σ	3.28MPa-5.28MPa	4.30MPa
Συνοχή	c	130kPa-390kPa	260kPa
Γωνία εσωτερικής τριβής	φ	37.5° -40°	38.75°
Δείκτης φθοράς	CAI	1.90-3.10	2.60

Από παρατηρήσεις εντός του καρστικού σπηλαίου είναι φανερή η παρουσία πολλαπλών ογκωδών τεμαχίων που έχουν πέσει από την οροφή και έχουν στοιβαχτεί ακατάστατα εντός του σπηλαίου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Ακατάστατα στοιβαγμένα τεμάχια μεγάλου μεγέθους (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)

Επίσης, η παρουσία των ρηγμάτων που συναντιόνται εντός του σπηλαίου επηρεάζουν σημαντικά την κατάσταση της βραχομάζας. Η βραχομάζα παρουσιάζεται τοπικά διατμημένη, έντονα διαρρηγμένη, κερματισμένη έως κατακερματισμένη.



Εικόνα 24: Έντονα καταπονημένη βραχομάζα εντός του σπηλαίου (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)

4.3 Παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη

Λόγω των υφιστάμενων συνθηκών, δηλαδή του βάθους του κενού, δεν καθίσταται δυνατή η οποιαδήποτε επέμβαση από την επιφάνεια. Επίσης, η πλήρωση του κενού σε όλο το άνοιγμα του δεν γίνεται να πραγματοποιηθεί λόγω της συσχέτισης του μεγέθους του κενού με αυτό της σήραγγας, καθώς επίσης δεν μπορούσε να διακοπεί η λειτουργία του κενού ως κανάλι αποχέτευσης υδάτων του οροπεδίου. Έτσι, έπρεπε να συνυπολογιστούν κάποιοι παράμετροι, όπως παρουσιάζονται παρακάτω και σύμφωνα με τον ανάδοχο του έργου INTRAKAT, για τον γεωμετρικό σχεδιασμό της γεφύρωσης, των απαιτούμενων δομικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, των εργασιών που θα απαιτηθούν για την βελτίωση των υφιστάμενων γεωτεχνικών συνθηκών του σπηλαίου, αλλά και την μεθοδολογία και τρόπο εκτέλεσης (INTRAKAT, 2016).

- ✓ Η σταθεροποίηση του δαπέδου, η οποία αφορά τόσο την διέλευση του μηχανήματος αλλά και την έδραση των έργων της σήραγγας.
- ✓ Η κατασκευή διατομής γεφύρωσης επαρκούς πλάτους για την ανάληψη των πλευρικών τάσεων που θα αναπτυχθούν κατά την φάση της προώθησης του

μηχανήματος επί της γεφύρωσης και κυρίως αυτών που θα εφαρμοστούν κατά την φάση έναρξης της εκσκαφής με το TBM στο απέναντι μέτωπο.

- ✓ Η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων σταθεροποίησης – αγκύρωσης της διαταραγμένης εκ του ρήγματος οροφής του σπηλαίου στην οποία είναι εμφανής η ύπαρξη μεγάλων διαστάσεων βραχωδών τεμαχίων. Η εξασφάλιση της σταθερότητας της οροφής του σπηλαίου και η αποτροπή του ενδεχόμενου πτώσης ευμεγέθους τεμαχίου επί των κατασκευών είναι απαιτούμενη για την:
 - Ασφαλή εκτέλεση των εργασιών εντός του σπηλαίου κατά την φάση κατασκευής της γεφύρωσης.
 - Για την ασφάλεια των εργαζομένων και του εξοπλισμού κατά την συνέχιση των εργασιών διάνοιξης.
 - Για τη ασφάλεια των μόνιμων έργων της σήραγγας.
 - ✓ Η λήψη ειδικών μέτρων επί των έργων γεφύρωσης για την προστασία από την πιθανή διέλευση υδάτων δια μέσου του σπηλαίου και της επακόλουθης διάβρωσης.
 - ✓ Η λήψη μέτρων για αποφυγή της συνέχισης της επιφανειακής αποσάθρωσης του ρήγματος στην περιοχή διέλευσης των κατασκευών με επακόλουθο την συνέχιση της διεύρυνσης αυτού στο μέλλον κατά την προδιαγραφόμενη ζωή των έργων.
 - ✓ Ο τρόπος και η αλληλουχία των εργασιών γεφύρωσης με δεδομένο την ύπαρξη του εξοπλισμού διάνοιξης και των παρελκόμενων αυτού σε μήκος 180 μέτρων, την αδυναμία εξόδου στο μέτωπο εκσκαφής δια μέσου του TBM, και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του κενού αλλά και του ασβεστόλιθου στην περιοχή του μηχανήματος.

4.4 Πρόταση Αντιμετώπισης

Για την προσπέλαση της καρστικής κοιλότητας από το TBM, προτάθηκε από την ανάδοχο η παρακάτω πρόταση αντιμετώπισης, η οποία έχει σκοπό την ασφαλή διέλευση του TBM καθώς και τις ασφαλείς συνθήκες εργασίας (INTRAKAT, 2016).

1. Χρήση αγκυρώσεων και τσιμεντενέσεων, να πραγματοποιηθούν ώστε να πληρωθούν τα κενά μεταξύ των υφιστάμενων ογκόλιθων, με σκοπό την σταθεροποίηση του δαπέδου για να επιτευχθεί η διέλευση του μηχανήματος.

2. Να χρησιμοποιηθούν μόνιμα μέτρα προστασίας της οροφής, τα οποία θα περιλαμβάνουν αγκύρια τα οποία θα είναι επαρκή σε αριθμό και μήκος. Επιπρόσθετα θα εφαρμοστεί ειδικό πλέγμα προστασίας.
3. Υπολογισμός επαρκούς πλάτους για την γεφύρωση επί του άξονα της σήραγγας όπου εφαρμόζεται η πίεση των πέδινων του TBM.
4. Για την αποτροπή πιθανής απόπλυσης λεπτόκοκκων κατά την φάση ροής υδάτων μέσα από το σπήλαιο, θα χρησιμοποιηθούν υλικά διαχωρισμού ως προστασία που θα καλύψουν όλες τις κατασκευές.
5. Όσον αφορά την προστασία των τοιχωμάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος της γεφύρωσης, τα μέτρα που θα εφαρμοσθούν είναι επιφανειακά και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να γίνει χρήση μικρών αγκυρώσεων.
6. Ωστε να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω μέτρα προστασίας καθώς και η επίτευξη της γεφύρωσης θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η κατασκευή παρακαμπτήριας σήραγγας μικρής διατομής.

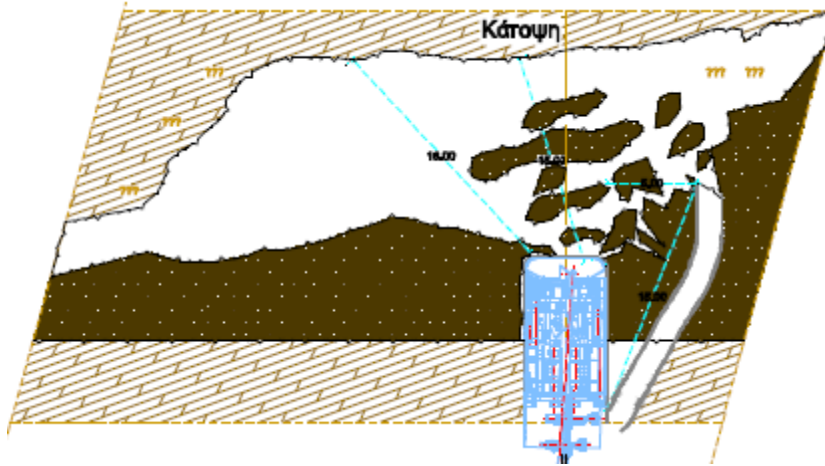
4.5 Αλληλουχία εργασιών γεφύρωσης της καρστικής κοιλότητας

Οι απαιτούμενες εργασίες για την επίτευξη της γεφύρωσης του TBM διακρίνονται σε 4 φάσεις, όπως αυτές ορίζονται από την ανάδοχο του έργου.

1. Διάνοιξη βοηθητικής σήραγγας, διαστάσεων 1.50*2.00m
2. Μόνιμα μέτρα προστασίας της οροφής του σπηλαίου
3. Cover & cut απαιτούμενης διατομής για την διέλευση της σήραγγας εντός σπηλαίου
4. Προώθηση TBM

4.5.1 Διάνοιξη βοηθητικής σήραγγας

Η Διάνοιξη σήραγγας προβλέπεται να γίνει από την περιοχή της οπίσθιας ασπίδας έως την έξοδο στο καρστικό έγκοιλο. Η σήραγγα θα κατασκευαστεί δεξιά του άξονα κατά την χιλιομέτρηση καθώς από εκείνη την πλευρά θα επιτυγχάνετε η έξοδος της εκτός των κατασκευών γεφύρωσης, λόγω της εγκάρσιας κλίσης του εγκοίλου.



Εικόνα 25: Κάτοψη στην οποία φαίνεται η παρακαμπτήρια σήραγγα (INTRAKAT, 2016)

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την χειρονακτική διάνοιξη της σήραγγας διατομής 1.5*2.0 αποτελείται από: διατρητικά χειρός, υδραυλικό εξωλκέα, ειδική μικρή σφύρα κατεδαφίσεων.



Εικόνα 26: Διάνοιξη βοηθητικής σήραγγας (INTRAKAT, 2016)

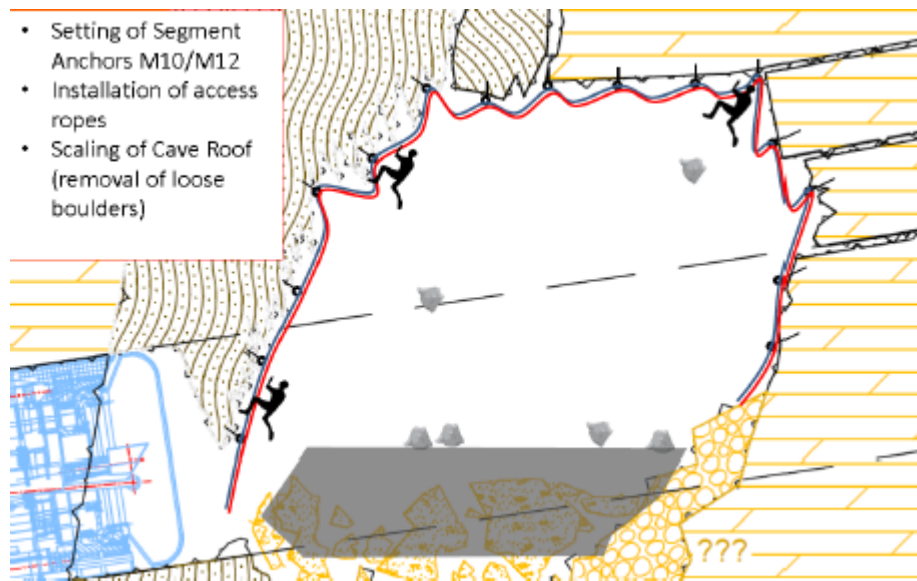


Εικόνα 27: Βοηθητική σήραγγα (JAEGER-BAU, 2016)

4.5.2 Μόνιμα μέτρα προστασίας του σπηλαιίου

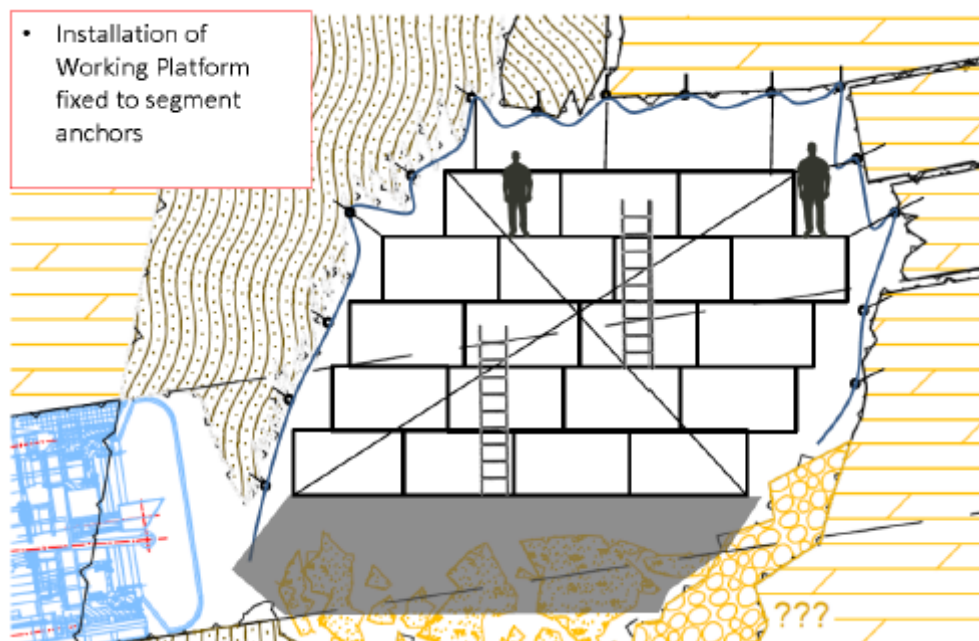
Η εφαρμογή των μόνιμων μέτρων προστασίας της οροφής θα γίνει από ειδικό συνεργείο της Geobrugg.

Σε πρώτη φάση, θα γίνει ξεσκάρωμα και αποκόλληση των χαλαρών τεμαχίων της οροφής που θα πραγματοποιηθεί χειρονακτικά, με αναρρίχηση.



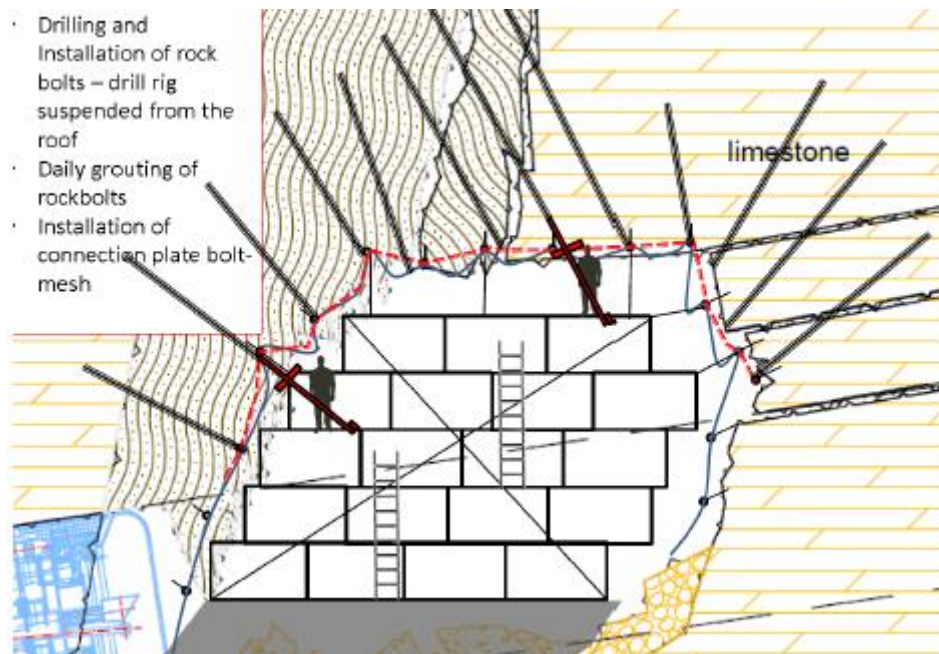
Εικόνα 28: Πρώτη φάση, ξεσκάρωμα (INTRAKAT, 2016)

Σε δεύτερη φάση και αφού έχουν τοποθετηθεί μέτρα προσωρινής προστασίας θα ακολουθήσει η δημιουργία δαπέδου εργασίας για στήσιμο κριωμάτων εργασίας, (θα πραγματοποιηθεί πλήρωση με αμμοχάλικο των εγκοίλων ενδιάμεσα των βράχων). Στην συνέχεια θα τοποθετηθούν τα κριώματα.



Εικόνα 29: Δεύτερη φάση, τοποθέτηση κριωμάτων (INTRAKAT, 2016)

Τέλος θα γίνει η διάνοιξη οπών με διατρητικά χειρός για την τοποθέτηση των αγκυρίων και στην συνέχεια του ειδικού πλέγματος προστασίας.



Εικόνα 30: Τελική μορφή των μόνιμων μέτρων προστασίας (INTRAKAT, 2016)

4.5.3 Πλήρωση κενού για την διέλευση του TBM

Αφού ολοκληρωθεί επιτυχώς η προστασία της οροφής θα κατασκευαστεί το τεχνητό έδαφος μέσα από το οποίο το TBM (με αγκίστρωση και εκσκαφή) θα διέλθει μέσα από την σήραγγα.

Η πλήρωση του κενού θα είναι διατομής τέτοιας έτσι ώστε να διέλθει το TBM με ασφάλεια, θα κατασκευαστεί από κατάλληλα υλικά (χάλκιες – EPS) τα οποία θα ενισχυθούν με τσιμεντενέματα , αγκυρώσεις, πλέγματα , μεταλλικούς δοκούς κλπ.

Η εν λόγω κατασκευή δεν θα φθάνει ως την οροφή του σπηλαιίου καθώς όπως έχει προβλεφθεί πρέπει να υπάρχει αρκετός χώρος που να επιτρέπει την διέλευση των υδάτων. Λόγω της περιοδικής ροής νερού όπως έχει προαναφερθεί η κατασκευή θα καλυφθεί καταλλήλως προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα απόπλυσης.

Τα μέτρα αυτής της φάσης εργασιών έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενη εικόνα στο Κεφάλαιο 3 (Εικόνα 19).

4.5.4 Προώθηση του TBM

Η προώθηση του TBM θα επιτευχθεί με ταυτόχρονη εφαρμογή αγκυρίων υάλου επί του μετώπου τσιμεντενέσεων και εφαρμογή αφρού και εκτοξευόμενου σκυροδέματος εφ' όσον αυτά απαιτηθούν.

4.6 Εναλλακτική Πρόταση Αντιμετώπισης

Σύμφωνα με την 1η έκθεση των καθηγητών του Ε.Μ.Π. (Ε.Μ.Π., 2016) προτάθηκε μια διαφορετική προσέγγιση στην διέλευση του TBM από την καρστική κοιλότητα.

1. Διάνοιξη παρακαμπτήριας σήραγγας και κατασκευή υποστέγου με δοκούς από την έξοδο αυτής ως την κεφαλή του TBM. Η εργασία είναι κοινή και στην πρόταση του Αναδόχου.
2. Δημιουργία τεχνητής σήραγγας διέλευσης TBM, από την πλευρά του θαλάμου που είχε κολλήσει το TBM ως την άλλη πλευρά αυτού. Για την εκπλήρωση αυτής της εργασίας απαιτείται η εκπλήρωση των παρακάτω: 1. Εκσκαφή των ογκόλιθων που έχουν πέσει και βρίσκονται επί του εύρους κατάληψης της υπο διάνοιξης τεχνητής σήραγγας δια χειρός ή με χρήση εκρηκτικών και δημιουργία δαπέδου εργασίας σε υψόμετρο 70εκ κάτω από το υψόμετρο εκσκαφής της σήραγγας. 2. Εισκόμιση των πλαισίων εντός της σήραγγας. 3. Τοποθέτηση του πλαισίου και δέσιμο με το προηγούμενο. 5. Διαμόρφωση καμπύλου δαπέδου εργασίας με σκυρόδεμα 15-20εκ. Ολοκλήρωση βήμα-βήμα των εργασιών ως το πέρας του θαλάμου
3. Συμβατική διάνοιξη σήραγγας στην άλλη πλευρά του θαλάμου μικρού μήκους. Διάνοιξη δια χειρός και με χρήση μικρών μηχανημάτων ή και εκρηκτικών. Εκτέλεση τσιμεντενέσεων κάτω του προσωρινού δαπέδου για πλήρωση των κενών και σταθεροποίηση αυτού ώστε το TBM να διέλθει ασφαλώς. Κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 50εκ σε σχήμα κατάλληλο για την προώθηση του TBM και την εγκατάσταση του segment βάσης.
4. Προχώρηση –ολίσθηση του TBM με ώθηση επί των segments.
5. Επανάραξη εκσκαφής.

4.7 Τελική Λύση

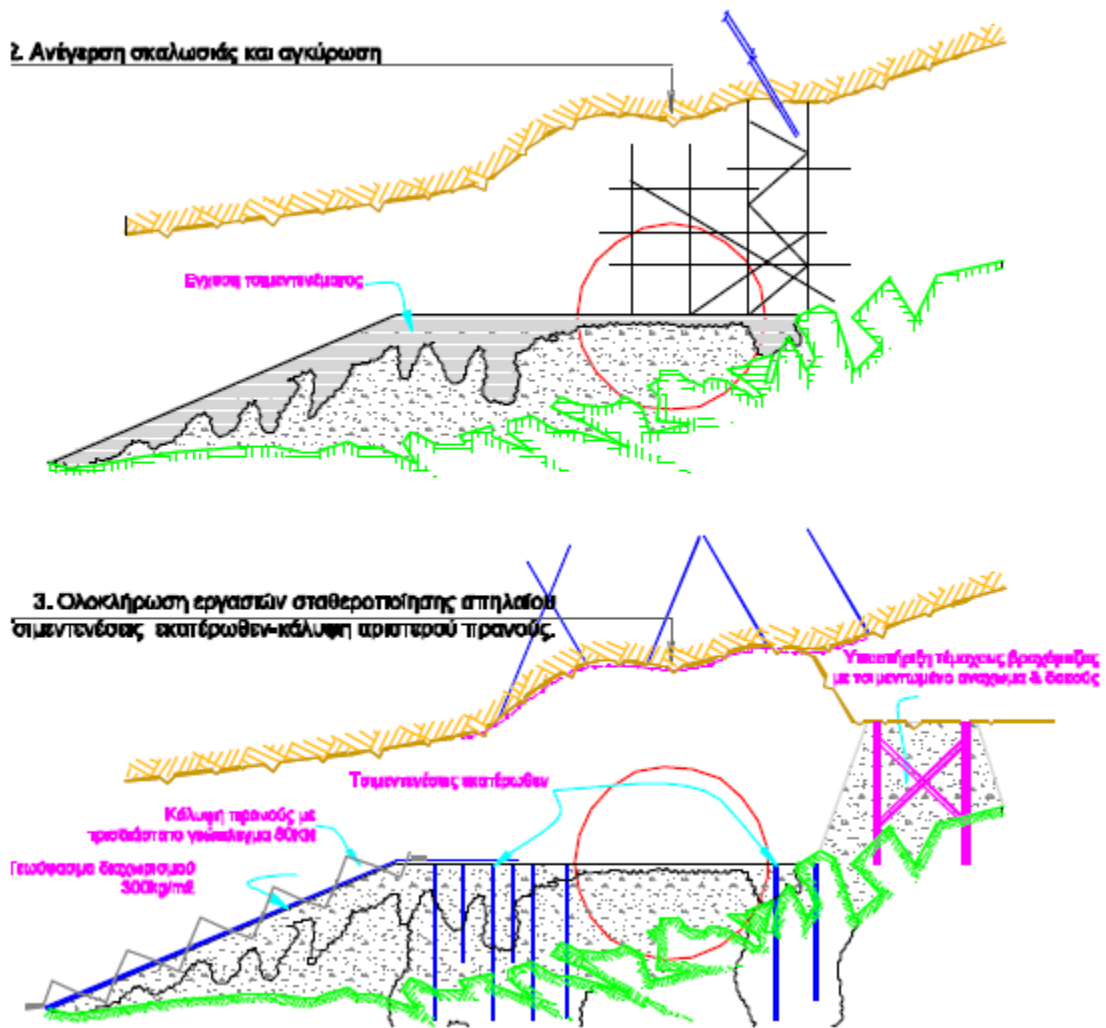
Για την συνέχιση των έργων της σήραγγας επιλέχθηκε τελικά: α) η λήψη μόνιμων μέτρων προστασίας της οροφής του σπηλαίου και β) γεφύρωση αυτού στην περιοχή διέλευσης της σήραγγας με την κατασκευή τεχνικού εδάφους.

Οι εργασίες διαχωρίστηκαν σε :

- ✓ Αγκύρωση-σταθεροποίηση της οροφής του σπηλαίου από ειδικό συνεργείο.
- ✓ Γεφύρωση του σπηλαίου στην περιοχή διέλευσης των έργων με κατασκευή τεχνικού εδάφους διάνοιξης αποτελούμενο από αδρανή υλικά.

1η Φάση: σταθεροποίηση σπηλαίου.

- ✓ Δημιουργία δαπέδου εργασίας εντός του σπηλαίου για την ανάρτηση σκαλωσιάς προκειμένου να εκτελεσθούν οι εργασίες σταθεροποίησης. Για την δημιουργία δαπέδου απαιτήθηκε η έγχυση του υλικού pea gravel που χρησιμοποιείται για την πλήρωση του δακτυλοειδούς κενού της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας. Η έγχυση του υλικού πραγματοποιήθηκε δια σωληνώσεων μέσου των οπών της κοπτικής κεφαλής του TBM, η δε τροφοδοσία από τον εξοπλισμό που βρίσκεται στα B.U του TBM.
- ✓ Ξεσκάρωμα βραχώμαζας με αναρρίχηση και προσωρινή εξασφάλιση ασταθών όγκων με κατάλληλο δέσιμο με χρήση συρματόσχοινων και πλέγματος.
- ✓ Ανέγερση σκαλωσιάς και αγκύρωση σε πρώτη φάση των πιο επισφαλών όγκων.
- ✓ Σταδιακή αγκύρωση των επισφαλών όγκων με αγκύρια Φ40 σε διατρήματα Φ105 και Φ133.
- ✓ Ολοκλήρωση της σταθεροποίησης με την τοποθέτηση αγκυρούμενου πλέγματος με αγκύρια Φ32.



Εικόνα 31: Φάσεις αγκύρωσης του σπηλαίου (INTRAKAT, 2016)

2η Φάση: εργασίες γεφύρωσης

Σύμφωνα με τους σχετικούς υπολογισμούς της αναδόχου (Itrakat 2016), για τη γεφύρωση απαιτείται:

- ✓ Η σταθεροποίηση του δαπέδου εκσκαφής για την παραλαβή των φορτίων
- ✓ Η σταθεροποίηση της επένδυσης για την παραλαβή των πιέσεων ώσης κατά την φάση εκσκαφής.
- ✓ Η πλευρική σταθεροποίηση του αναχώματος και κυρίως του αριστερού τμήματος λόγω γεωμετρίας.

Για την ικανοποίηση των παραπάνω προβλέφθηκαν τα εξής:

- ✓ Η σταθεροποίηση της θεμελίωσης .
- ✓ Η επέκταση καθ ύψους του αναχώματος 1ης φάσης.
- ✓ Η κατασκευή τεχνικού θόλου διαμέτρου κατά 60 εκατ. μεγαλύτερης εκείνης της τελικής επένδυσης της σήραγγας.
- ✓ Η πιθανή κάλυψη του θόλου κατά 1,00 μέτρο με κατάλληλο υλικό

Η αλληλουχία των εργασιών γεφύρωσης ήταν.

1. Σχετική σταθεροποίηση αναχώματος 1ης φάσης :

Μετά την σταθεροποίηση της οροφής και την απομάκρυνση του εξοπλισμού εκτελέστηκαν εργασίες σταθεροποίησης επί του ήδη διαμορφωμένου αναχώματος. Σκοπός ήταν η πλήρωση κενών μεταξύ των υφιστάμενων ογκολίθων και η απόκτηση σχετικής συνοχής του αναχώματος. Αρχικά έγινε έγχυση αραιού τσιμεντενέματος επί της επιφάνειας του αναχώματος. Σε δεύτερο στάδιο εκτελέστηκαν τσιμεντενέσεις οι οποίες εκτελέστηκαν σε όλο το μήκος της γεφύρωσης αλλά σε περιορισμένο πλάτος εκατέρωθεν του ίχνους διάνοιξης.

2. Σταθεροποίηση στην περιοχή διέλευσης – κατασκευή θόλου προστασίας

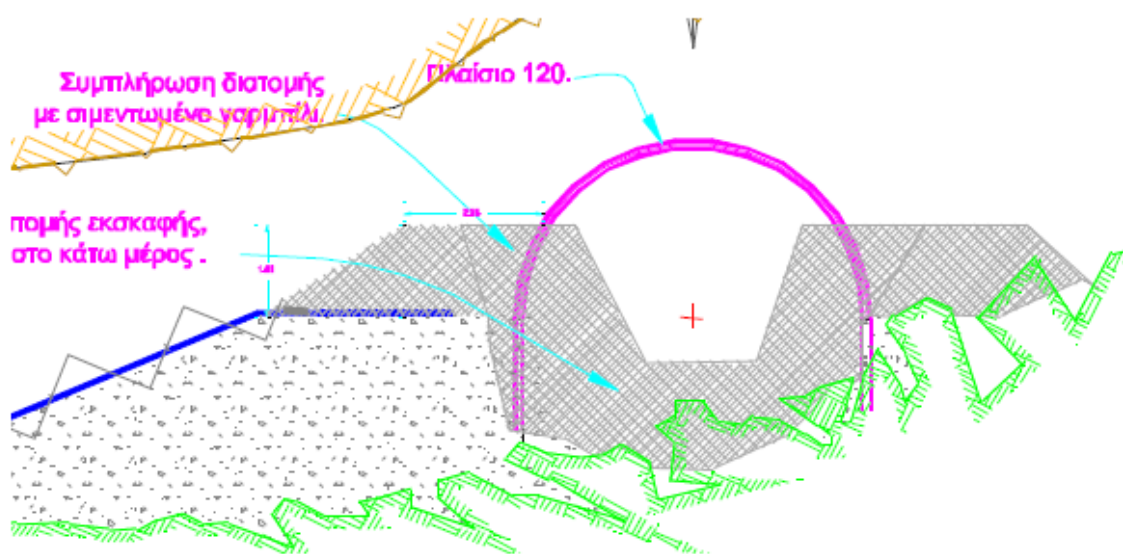
Αποφασίστηκε με βάση τα στοιχεία ερευνητικών διατρήσεων μικρού βάθους κάτω από τη στάθμη της θεμελίωσης. Παράλληλα με την σταθεροποίηση του δαπέδου τοποθετήθηκαν τα πλαίσια για την κατασκευή θόλου προστασίας. Ο θόλος κατασκευάστηκε από μεταλλικά πλαίσια με κατάλληλη σύνδεση μεταξύ τους από μεταλλικές ράβδους (π.χ. διαμέτρου Φ16 ,Φ18) και καλύφθηκε κατάλληλα από λαμαρίνα, μεταλλικό πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ο θόλος κατασκευάστηκε τόσο για την προστασία του αναχώματος κατά την εκσκαφή με TBM αλλά και για την επάρκεια της αγκύρωσης των Grippers της μηχανής για την αποφυγή περιστροφής του μηχανήματος κατά την φάση της εκσκαφής, όσο και για τον εγκιβωτισμό της τελικής επένδυσης λειτουργώντας ως «καλούπι».

3. Πλήρωση διατομής εκσκαφής δια μέσου του θόλου.

Για την διέλευση του TBM μέσου της γεφύρωσης έπρεπε να εξασφαλισθεί επαρκής σταθερότητα του πίσω τμήματος του μηχανήματος (Gripper shield) κατά την φάση εκσκαφής και να δοθεί στο μηχάνημα η δυνατότητα σχετικής ενεργητικής καθοδήγησης. Για αυτόν τον λόγο απαιτήθηκε έδαφος εκσκαφής προκειμένου να υπάρχει επαρκής αντίδραση επί της κοπτικής κεφαλής. Για αυτούς του λόγους η γεφύρωση έπρεπε να

πληρωθεί με κατάλληλο υλικό. Ως υλικό πλήρωσης επιλέχθηκε το τσιμεντωμένο pea gravel. Η εργασία αυτή εκτελέστηκε ταυτόχρονα με την ανέγερση του θόλου.

Άνω του πλαισίου προβλέφθηκε η ανέγερση καλύμματος με κατάλληλο υλικό σε ένα πάχος 1,00-1,50 μέτρο. Η τοποθέτηση αυτού του καλύμματος θα προσφέρει ένα στρώμα απόσβεσης τυχόν καταπτώσεων λίθων από την οροφή του σπηλαίου.



Εικόνα 32: Σκαρίφημα επιλεγθείσας λύσης γεφύρωσης του καρστικού. (INTRAKAT, 2016)

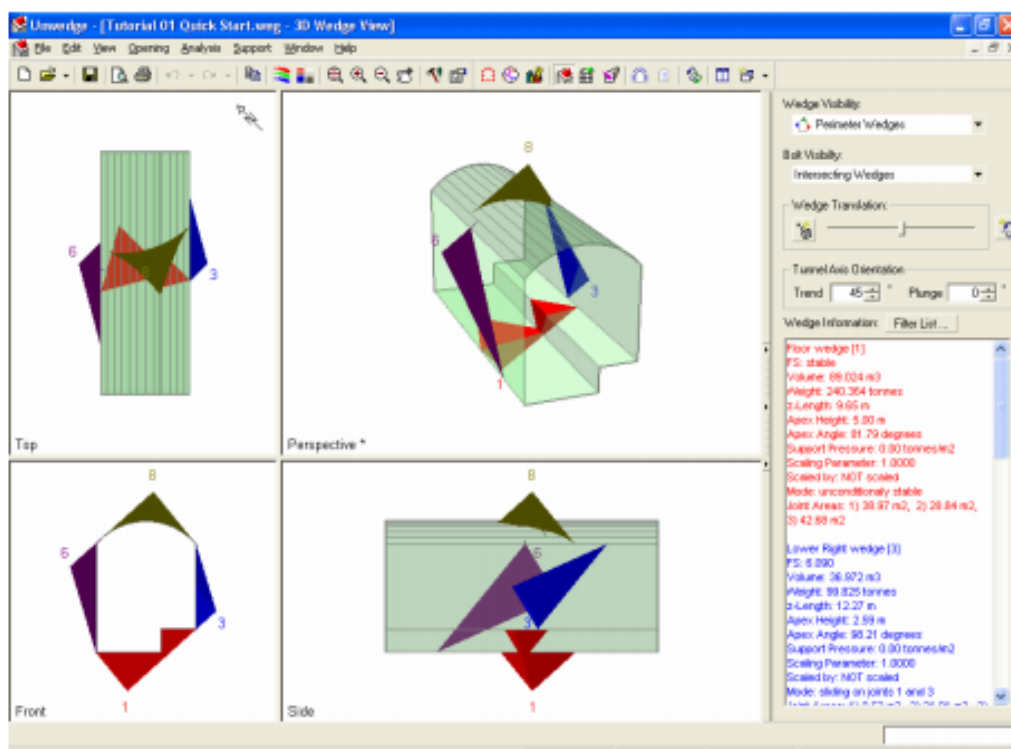
4. Προώθηση και εκσκαφή με TBM

Μετά το πέρας των εργασιών γεφύρωσης επανακολλήθηκε η οπή της οπίσθιας ασπίδας στην περιοχή της παρακαμπτήριας σήραγγας και τοποθετήθηκε στην περιοχή πλαίσιο δοκών έτσι ώστε να παραμείνει ανοιχτή η είσοδος της παρακαμπτήριας σήραγγας. Η προώθηση του TBM εντός της γεφύρωσης έγινε με μικρά βήματα εκσκαφής και έλεγχο της συμπεριφοράς της γεφύρωσης.

5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ UNWEDGE

5.1 Γενικά

Το πρόγραμμα Unwedge της Rocscience Inc. πραγματοποιεί μια 3D ανάλυση, η οποία εξετάζει την σταθερότητα και απεικονίζει της συνθήκες σε υπόγειες εκσκαφές διανοιγμένες μέσα σε βράχο, ο οποίος περιέχει τεμνόμενες ασυνέχειες. Η ανάλυση γίνεται με χρήση συντελεστών ασφαλείας οι οποίοι υπολογίζονται για δυνητικά ασταθής σφήνες. Επίσης μπορεί να γίνει η προσομοίωση στο πρόγραμμα των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης με την χρήση διάφορων μοτίβων, σημειακών αγκυρίων αλλά και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το πρόγραμμα Unwedge χρησιμοποιείται για την γρήγορη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο εκτελεί αναλύσεις λαμβάνοντας υπ' όψιν το συντελεστή ασφαλείας, την τοποθέτηση υποστήριξης και τέλος την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 33: Μοντέλο προσομοίωσης στο UNWEDGE (RocScience, 2017)

5.2 Παραδοχές του Προγράμματος

Υπάρχουν διάφορες παραδοχές και περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την χρήση του προγράμματος Unwedge, όπως αυτοί παρουσιάζονται στην συνέχεια.

- ✓ Το Unwedge θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την ανάλυση αστοχίας σφήνας στην περίμετρο της εκσκαφής μέσα σε σκληρό βράχο, όπου οι ασυνέχειες είναι ανθεκτικές, και όπου δεν συμβαίνει αστοχία λόγω ύπαρξης του εντατικού πεδίου. Θεωρείται ότι οι μετατοπίσεις λαμβάνουν χώρα στις ασυνέχειες, και ότι οι σφήνες κινούνται ως άκαμπτα σώματα χωρίς εσωτερική παραμόρφωση ή ρωγμάτωση.
- ✓ Οι σφήνες στην φύση βρίσκονται ως τετράεδρα, και ορίζονται από τρεις τεμνόμενες ασυνέχειες. Το μέγιστο δυνατόν το οποίο μπορεί να αναλυθεί είναι 3 επίπεδα ασυνεχειών για μια προσομοίωση. Αν αυτά τα κύρια επίπεδα ασυνεχειών είναι περισσότερα από 3 τότε για την ανάλυση θα πρέπει να θεωρούνται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί ανά 3.
- ✓ Όλες οι επιφάνειες ασυνεχειών θεωρούνται απόλυτα επίπεδες.
- ✓ Οι επιφάνειες των ασυνεχειών θεωρείται ότι είναι ανθεκτικές και εκτείνονται μέσα από όλο τον όγκο του εξεταζόμενου σχηματισμού, ως εκ τούτου, οι ασυνέχειες που ορίζουν τη σφήνα δεν τερματίζουν μέσα στην περιοχή όπου σχηματίζονται οι σφήνες. Το αποτέλεσμα είναι ότι καμία νέα ρωγμή δεν απαιτείται για την ανάλυση της κίνησης σφήνας.
- ✓ Οι ασυνέχειες θεωρείται ότι είναι πανταχού παρούσες: δηλαδή, μπορούν να βρίσκονται σε οποιαδήποτε θέση στο βραχομάζας.
- ✓ Η υπόγεια εκσκαφή θεωρείται ότι έχει μια σταθερή διατομή κατά μήκος του άξονά του.
- ✓ Η προεπιλεγμένη ανάλυση βασίζεται στην υπόθεση ότι η μοναδική δύναμη που επιδρά στις σφήνες είναι η βαρύτητα, δηλαδή το βάρος της σφήνας (αυτό σημαίνει ότι το εντατικό πεδίο στην βραχομάζα που περιβάλλει την εκσκαφή δεν λαμβάνεται υπόψη). Παρόλο που αυτή η υπόθεση οδηγεί σε κάποια ανακρίβεια στην ανάλυση, το σφάλμα είναι γενικά συντηρητικό, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οδηγούμαστε σε χαμηλότερο συντελεστή ασφάλειας. Ωστόσο, υπάρχει προαιρετικά η δυνατότητα να συμπεριληφθεί η επί τόπου τάση στις σφήνες με την επιλογή του Field Stress.
- ✓ Το Unwedge πάντα υπολογίζει αρχικά το μέγιστο μέγεθος των σφηνών που μπορούν να σχηματίσουν γύρω από την εκσκαφή. Για να περιοριστεί το μέγεθος

τους σύμφωνα με τις πραγματικές παρατηρήσεις πεδίου (π.χ. ανάλογα με το μήκος του ίχνους των ασυνεχειών), χρησιμοποιείται η επιλογή Scale Wedges.

5.3 Βήματα για ανάλυση στο πρόγραμμα Unwedge

Οι αναλύσεις στο πρόγραμμα του Unwedge διακρίνονται σε Ντετερμινιστικές ή αναλύσεις Πιθανοτήτων. (RocScience, 2017)

5.3.1 Ντετερμινιστική Ανάλυση

Σε μια Ντετερμινιστική ανάλυση θεωρείται ότι όλες οι παράμετροι που εισάγονται στο πρόγραμμα είναι "με ακρίβεια" γνωστές (π.χ., προσανατολισμός ασυνεχειών, δυνάμεις διατμήσεως κλπ.). Το Unwedge υπολογίζει τους παράγοντες ασφαλείας (FS) για κάθε σφήνα για μια ενιαία ρύθμιση της.

Η γενική διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω αποτελεί την τυπική ακολουθία των βημάτων που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση μιας Ντετερμινιστικής ανάλυσης με το Unwedge:

1. Project Settings - πρώτα, επιλέγετε τον τύπο Deterministic Analysis στην καρτέλα General (Γενικά). Επίσης επιλέγετε το επιθυμητό σύστημα μονάδων (metric ή Imperial) και για την ανάλυση των τερματικών σφηνών, πρέπει να έχει επιλεγεί το πλαίσιο ελέγχου Compute End Wedges.
2. Add Opening Section (Προσθήκη ενότητας ανοίγματος / εισαγωγής DXF) – είτε ορίζουμε την διατομή ανοίγματος της ανασκαφής σας με την επιλογή Add Opening Section ή μπορούμε να εισαγάγουμε τις συντεταγμένες από ένα αρχείο DXF. Επίσης σε αυτό το βήμα μπορούμε να καθορίσουμε ή να εισαγάγουμε την επιφάνεια εδάφους.
3. Input Data > Tunnel Axis Orientation, Unit Weight – σε αυτό το βήμα γίνεται η εισαγωγή του προσανατολισμού του άξονα της σήραγγας καθώς και το μοναδιαίο βάρος του βράχου το οποίο βρίσκεται στην καρτέλα General στο παράθυρο του Input Data.
4. Input Data > Joint Orientations – ακολουθεί η εισαγωγή του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην καρτέλα του Joint Orientations του παραθύρου Input Data. Οι

- προσανατολισμοί των ασυνεχειών μπορούν επίσης να εισαχθούν από ένα αρχείο DIPS.
5. Input Data > Joint Properties – σε αυτή την φάση γίνεται εισαγωγή των ιδιοτήτων των ασυνεχειών (αντοχή, πίεση νερού, δομή) στην καρτέλα Joint Properties του παραθύρου Input Data.
 6. Assign Joint Properties - αν οι ασυνέχειες έχουν διαφορετικές ιδιότητες, τότε γίνεται αντιστοιχία των επιθυμητών ιδιοτήτων των ασυνεχειών στην καρτέλα Joint Orientations του παραθύρου Input Data.
 7. 3D wedge view – πραγματοποιείται η προβολή των αποτελεσμάτων σε 3D σφήνα, η οποία παρέχει προοπτικές, κορυφές, εμπρόσθιες και πλευρικές προβολές της ανασκαφής καθώς και όλες τις πιθανές σφήνες που σχηματίζονται. Τα αποτελέσματα μπορούν επίσης να προβληθούν στην Multi Perspective View ή στην προβολή End Wedge View.
 8. Wedge Information - Λεπτομερή αποτελέσματα της ανάλυσης (συντελεστής ασφάλειας, βάρος σφήνας, κλπ.) Διατίθεται στον πίνακα Wedge Information του Sidebar. Επίσης, το Info Viewer παρέχει μια συνοπτική περίληψη των δεδομένων που εισήχθησαν στο μοντέλο όπως επίσης και των αποτελεσμάτων ανάλυσης.
 9. Scale Wedges - από προεπιλογή, το πρόγραμμα Unwedge υπολογίζει αρχικά τις μέγιστες δυνατές διαστάσεις των σφηνών που μπορούν να σχηματιστούν γύρω από την εκσκαφή. Χρησιμοποιώντας την επιλογή Scale Wedges μπορεί να πραγματοποιηθεί μείωση του μεγέθους των σφηνών, σύμφωνα πάντα με τα όσα παρατηρούνται στο πεδίο (π.χ. παρατηρούμενα μήκη ίχνους).
 10. Support Design (Bolts / Shotcrete / Pressure) - εάν υπάρχουν σφήνες που απαιτούν στήριξη για να επιτευχθεί ο συντελεστής ασφάλειας σχεδιασμού, μπορεί να γίνει προσθήκη αγκυρίων, σκυροδέματος, ή στήριξη με πίεση στο μοντέλο, για τον καθορισμό των απαιτούμενων απαιτήσεων στήριξης. Χρησιμοποιώντας την προβολή Perimeter Support Design για τον ορισμό της υποστήριξη γύρω από την περίμετρο της εκσκαφής. Χρησιμοποιώντας την προβολή End Support Design για τον καθορισμό της στήριξης των ακραίων σφηνών της εκσκαφής.
 11. Iterate Support Design – Μπορεί να γίνει χρήση άλλων επιλογών που σχετίζονται με παραμέτρους της υποστήριξης (π.χ. απόσταση μεταξύ των αγκυρίων, μήκος, ιδιότητες) έως ότου να επιτευχθεί ικανοποιητικός σχεδιασμός υποστήριξης για το μοντέλο.

12. Προηγμένα χαρακτηριστικά:

- ✓ Combination Analyzer - αν υπάρχουν περισσότερα από 3 επίπεδα ασυνεχειών που ενδιαφερόμαστε να εξετάσουμε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επιλογή Combination Analyzer η οποία θα αναλύσει αυτόματα όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ανά 3 επίπεδα ασυνεχειών. Μια σύνοψη των αποτελεσμάτων επιτρέπει να προβληθούν ποιοι συνδυασμοί ασυνεχειών είναι οι πιο κρίσιμοι.
- ✓ Field Stress - με την επιλογή Field Stress, μπορεί να συμπεριληφθεί η επίδραση της επί τόπου καταπόνησης στον παράγοντα ασφαλείας των σφηνών.
- ✓ Tunnel Axis Plot - Το γράφημα άξονα της σήραγγας (οριζόντιο, τρισδιάστατο ή 2D διάγραμμα) επιτρέπει την βελτιστοποίηση του προσανατολισμού της σήραγγας σε σχέση με οποιαδήποτε μεταβλητή (π.χ. απαιτούμενη πίεση στήριξης), εντός οποιουδήποτε προσανατολισμού της σήραγγας (trend, plunge).

5.3.2 Πιθανοτική Ανάλυση

Σε μια πιθανοτική ανάλυση, μπορούν να εισαχθούν στατιστικές πληροφορίες ώστε να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα του προσανατολισμού των ασυνεχειών, της δύναμης διάτμησης καθώς και των υπόλοιπων παραμέτρων. Αυτό οδηγεί σε κατανομή συντελεστών ασφαλείας για κάθε σφήνα από την οποία υπολογίζονται οι πιθανότητες αστοχίας (PF).

Η ακόλουθη γενική διαδικασία περιγράφει την τυπική ακολουθία των βημάτων που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση μιας πιθανής ανάλυσης στο Unwedge:

1. Project Settings - πρώτα, επιλέγετε τον τύπο Probabilistic Analysis στην καρτέλα General (Γενικά). Επίσης επιλέγετε το επιθυμητό σύστημα μονάδων (metric ή Imperial) και για την ανάλυση των τερματικών σφηνών, πρέπει να έχει επιλεγεί το πλαίσιο ελέγχου Compute End Wedges. Επιπλέον, σε μια ανάλυση πιθανοτήτων, μπορεί να καθοριστεί μια μέθοδος δειγματοληψίας και ο αριθμός των δειγμάτων, καθώς και Random Number Generator.
2. Add Opening Section (Προσθήκη ενότητας ανοίγματος / εισαγωγής DXF) – είτε ορίζουμε την διατομή ανοίγματος της ανασκαφής σας με την επιλογή Add Opening Section ή μπορούμε να εισαγάγουμε τις συντεταγμένες από ένα αρχείο DXF.
3. Input Data > Tunnel Axis Orientation, Unit Weight – σε αυτό το βήμα γίνεται η εισαγωγή του προσανατολισμού του άξονα της σήραγγας καθώς και το μοναδιαίο

- βάρος του βράχου το οποίο βρίσκεται στην καρτέλα General στο παράθυρο του Input Data.
4. Input Data > Joint Orientations – ακολουθεί η εισαγωγή του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην καρτέλα του Joint Orientations του παραθύρου Input Data. Οι προσανατολισμοί των ασυνεχειών μπορούν επίσης να εισαχθούν από ένα αρχείο DIPS.
 5. Input Data > Joint Properties – σε αυτή την φάση γίνεται εισαγωγή των ιδιοτήτων των ασυνεχειών (αντοχή, πίεση νερού, δομή) στην καρτέλα Joint Properties του παραθύρου Input Data.
 6. Assign Joint Properties - αν οι ασυνέχειες έχουν διαφορετικές ιδιότητες, τότε γίνεται αντιστοιχία των επιθυμητών ιδιοτήτων των ασυνεχειών στην καρτέλα Joint Orientations του παραθύρου Input Data.
 7. Για να διεξαχθεί μια ανάλυση πιθανοτήτων στο Unwedge, τουλάχιστον μία από τις εισαχθείσας παραμέτρους πρέπει να οριστεί ως τυχαία μεταβλητή. Η επιλογή Probabilistic Input Data βρίσκεται στο Statistics menu.
 8. Statistics > Joint Orientations – γίνεται η εισαγωγή της μεταβλητότητας στη διεύθυνση κλίσης και κλίση των ασυνεχειών ή μπορεί να γίνει χρήση μιας κατανομής Fisher.
 9. Statistics > Joint Properties - γίνεται η εισαγωγή της μεταβλητότητας σε όλες τις ιδιότητες των ασυνεχειών (αντοχή εφελκυσμού, phi κ.λπ.).
 10. Γίνεται η επιλογή του Compute για να υπολογιστούν τα αποτελέσματα για μια ανάλυση πιθανοτήτων.
 11. Probability View – Η μετάβαση σε αυτήν την προβολή γίνεται χρησιμοποιώντας το αναπτυσσόμενο μενού στην γραμμή εργαλείων. Έτσι θα εμφανιστεί η Maximum Support Pressure, όπως φαίνεται στην πλαϊνή μπάρα. Για να εμφανιστεί συγκεκριμένο αποτέλεσμα, πρέπει να γίνει η επιλογή του από το αναπτυσσόμενο μενού στη πλαϊνή μπάρα.
 12. Μπορείτε να γίνει η αναπαράσταση ιστογραμμάτων, αθροιστικών διαγραμμάτων ή διαγράμματα διάσπασης από τα αποτελέσματα που ενδιαφέρουν προς μελέτη, χρησιμοποιώντας τα κουμπιά της γραμμής εργαλείων ή το μενού Statistics. Μπορούν επίσης να σχεδιαστούν τα αποτελέσματα μιας συγκεκριμένης δοκιμής (δηλ. Μια "επιλεγμένη σφήνα") κάνοντας δεξί κλικ στο επιθυμητό τμήμα και επιλέγοντας την απαραίτητη γραφική παράσταση.

13. Wedge Information - ο πίνακας πληροφοριών της σφήνας εμφανίζει τα αποτελέσματα της ντετερμινιστικής ανάλυσης. Όταν γίνεται κλικ σε ένα συγκεκριμένο τμήμα, ο πίνακας πληροφοριών σφήνας θα εμφανίσει τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης "επιλεγμένης σφήνας".
14. Scale Wedges - από προεπιλογή, το πρόγραμμα Unwedge υπολογίζει αρχικά τις μέγιστες δυνατές διαστάσεις των σφηνών που μπορούν να σχηματιστούν γύρω από την εκσκαφή. Χρησιμοποιώντας την επιλογή Scale Wedges μπορεί να πραγματοποιηθεί μείωση του μεγέθους των σφηνών, σύμφωνα πάντα με τα όσα παρατηρούνται στο πεδίο (π.χ. παρατηρούμενα μήκη ίχνους).
15. Support Design (Bolts / Shotcrete / Pressure) - εάν υπάρχουν σφήνες που απαιτούν στήριξη για να επιτευχθεί ο συντελεστής ασφάλειας σχεδιασμού, μπορεί να γίνει προσθήκη αγκυρίων, σκυροδέματος, ή στήριξη με πίεση στο μοντέλο, για τον καθορισμό των απαιτούμενων απαιτήσεων στήριξης. Χρησιμοποιώντας την προβολή Perimeter Support Design για τον ορισμό της υποστήριξης γύρω από την περίμετρο της εκσκαφής. Χρησιμοποιώντας την προβολή End Support Design για τον καθορισμό της στήριξης των ακραίων σφηνών της εκσκαφής. Μπορεί επίσης να γίνει προσθήκη της μεταβλητότητας στην υποστήριξη.
16. Statistics > Bolt Properties - Γίνεται η εισαγωγή της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων των αγκυρίων (ικανότητα εφελκυσμού, κλπ.). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μια τυχαία μετατόπιση αγκυρίου, επιλέγοντας το κατάλληλο πλαίσιο.
17. Statistics > Shotcrete Properties - γίνεται η εισαγωγή της μεταβλητότητας σε όλες τις ιδιότητες του σκυροδέματος (διάτμηση, πάχος κτλ.).
18. Προηγμένα χαρακτηριστικά:
 - ✓ Υπολογίστε όλων των συνδυασμών ασυνεχειών - εάν υπάρχουν περισσότερα από 3 επίπεδα ασυνεχειών προς εξέταση, μπορεί να γίνει ανάλυση όλων των πιθανών συνδυασμών ανά 3 επίπεδα ασυνεχειών, επιλέγοντας το πλαίσιο "compute all joint combinations (probabilistic)" στην καρτέλα Joint Orientations του παραθύρου Input Data. Στη συνέχεια, θα είναι δυνατή η προβολή των αποτελεσμάτων (π.χ. Μέγιστη πίεση υποστήριξης) από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς 3 επιπέδων ασυνεχειών στην Probability View.
 - ✓ Field Stress - με την επιλογή Field Stress από τη γραμμή εργαλείων ή το μενού Analysis, μπορεί να συμπεριληφθεί η επίδραση της επιτόπιας καταπόνησης στον

παράγοντα ασφαλείας των σφηνών. Μπορεί επίσης να γίνει προσθήκη μεταβλητότητας σε αυτές τις τιμές, επιλέγοντας το από Statistics > Field Stress.

5.3.3 Συντελεστής Ασφαλείας

Μετά από την εισαγωγή δεδομένων προκύπτουν οι συντελεστές ασφαλείας για κάθε πιθανή σφήνα που μπορεί να υπάρχει στο υπάρχον κενό. Συγκεκριμένα το Unwedge υπολογίζει 3 ξεχωριστούς παράγοντες ασφάλειας:

- i. Συντελεστής ασφαλείας πτώσης
- ii. Συντελεστής ασφαλείας για ανυποστήρικτη περίμετρο
- iii. Συντελεστής ασφαλείας για υποστηριγμένη

Ο συντελεστής ασφαλείας που δίνεται από το πρόγραμμα τελικά είναι αυτός με την μεγαλύτερη τιμή από τους τρεις. Η λογική που εξηγεί αυτό είναι απλή - η υποστήριξη θεωρείται ότι ποτέ δεν θα μειώσει τον συντελεστή ασφαλείας από την ανυποστήρικτη τιμή. Ο συντελεστής ασφάλειας δεν μπορεί ποτέ να είναι μικρότερος από ότι αν η σφήνα πέσει με μόνο στήριξη για τη σταθεροποίησή του.

6 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ

Σύμφωνα με την μελέτη: ΑΥΤΟΨΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ Χ.Θ. 2+317,50 (ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΣΠΗΛΑΙΟ) λήφθηκαν οι παρακάτω μετρήσεις, που φαίνονται στον Πίνακα 5, από επιφανειακές παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και θεωρείται ότι συνεχίζονται εντός του σχηματισμού και συναντούνται στην καρστική κοιλότητα. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν κυρίως διακλάσεις (J) και στρώσεις (B). Παράλληλα παρατηρήθηκε η επιφανειακή ύπαρξη ζώνης ρήγματος η οποία περιέχει στοιχεία προσανατολισμού παράταξη: 065° - 245° και κλίση 85° προς NNA/κα και συμπίπτει με το ρήγμα που συναντάται εντός του σπηλαίου.

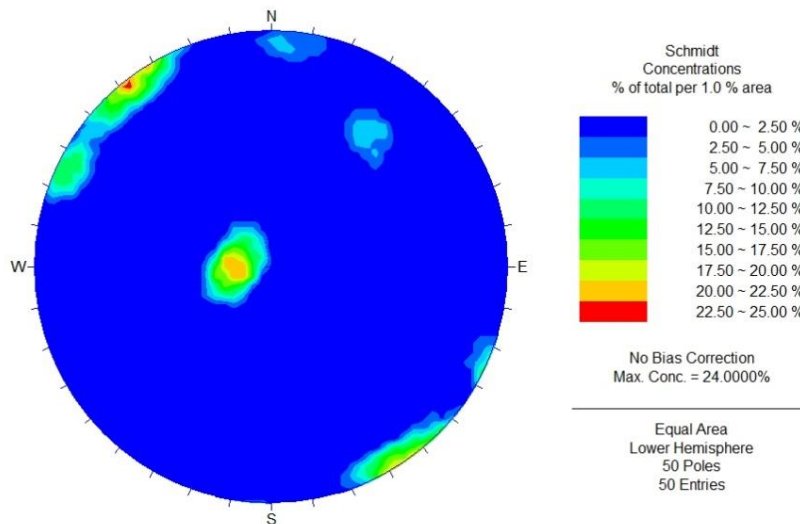
Πίνακας 5: Πίνακας καταγραφής ασυνεχειών (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)

ΕΙΔΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	ΚΛΙΣΗ	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ
J	85	140
J	82	138
B	10	112
B	18	154
B	18	64
J	85	130
J	82	120
B	15	74
J	86	330
J	86	132
J	49	220
B	22	212
J	85	188
J	85	328
J	85	185
J	85	330
B	8	108
B	12	86
J	86	114

B	12	128
J	84	136
B	15	70
J	80	178
J	88	138
B	16	95
J	88	326
J	85	335
B	18	78
J	84	116
J	62	212
B	12	125
J	88	334
J	84	142
B	10	100
J	85	116
J	87	145
J	82	148
J	80	116
J	75	77
J	86	148
J	84	146
J	86	320
B	14	88
J	87	324
J	58	220
B	15	78
J	60	216
J	86	315
J	85	296
J	88	290

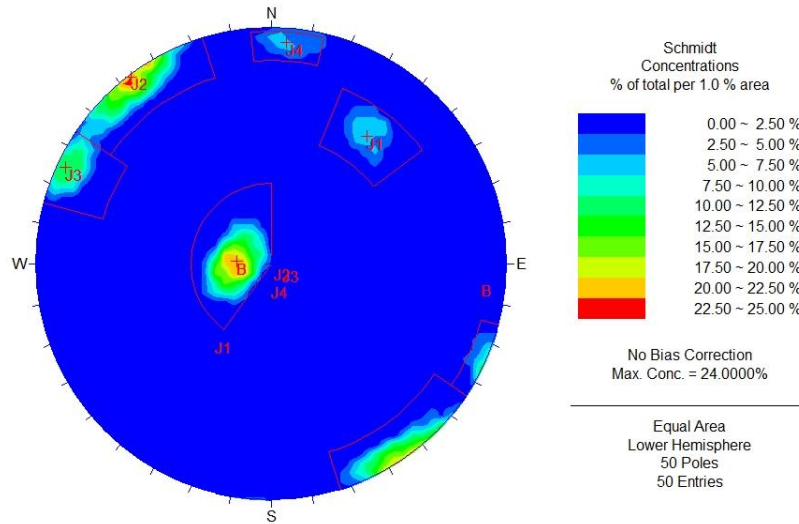
6.1 Επεξεργασία των μετρήσεων

- ✓ Οι παραπάνω μετρήσεις επεξεργάστηκαν με σκοπό την εύρεση των κύριων οικογενειών των ασυνεχειών. Για τον υπολογισμό αυτών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DIPS (RocScience Inc.). Το πρόγραμμα αυτό προσομοιώνει την στερεογραφική προβολή και οι περιοχές διασποράς των πόλων προσδιορίστηκαν σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Έτσι τοποθετώντας όλες τις μετρήσεις που λήφθηκαν στο λογισμικό του DIPS και προγραμματίζοντας το έτσι ώστε η στερεογραφική απεικόνιση να προβάλλεται σε κάτω ημισφαίριο, μέγιστης πυκνότητας των πόλων και να αναπαριστάται σε δίκτυο Schmidt καθώς επίσης και ισοβαρή κατανομή αυτών παίρνουμε την παρακάτω αποτύπωση.



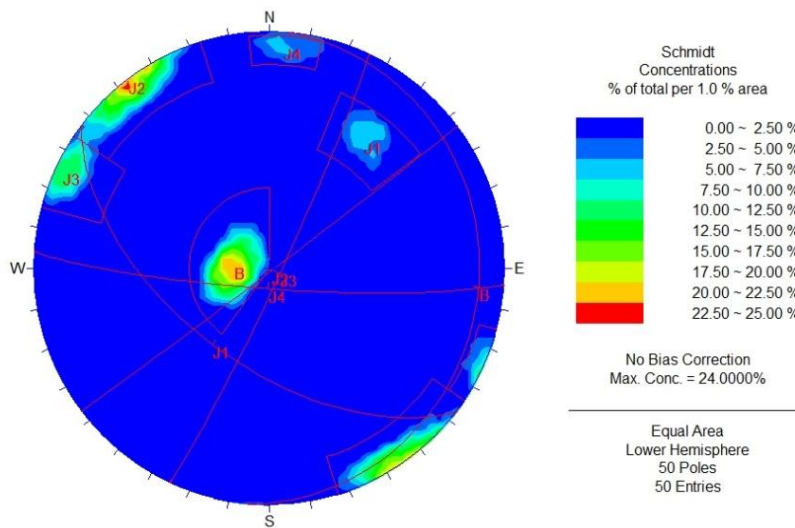
Εικόνα 34: Αποτύπωση μετρήσεων

- ✓ Στην συνέχεια επιλέγουμε τα κύρια συστήματα ασυνεχειών, ανάλογα με το που παρατηρείται μεγαλύτερη πυκνότητα εμφάνισης τους και αποτυπώνεται στο λογισμικό το κέντρο βάρους τους (δηλαδή ο πόλος του) όπως φαίνεται στην Εικόνα 35.



Εικόνα 35: Κύρια συστήματα ασυνεχειών

- ✓ Από τον εντοπισμό των συστημάτων και την εύρεση των πόλων τους βρέθηκαν τα επίπεδα τους όπως αυτά αποτυπώθηκαν στο λογισμικό



Εικόνα 36: Πόλοι και επίπεδα των ασυνεχειών

✓ Έτσι βρέθηκαν τα μέσα επίπεδα προσανατολισμού των ασυνεχειών τα οποία είναι :

Κλίση / Κατεύθυνση Κλίσης

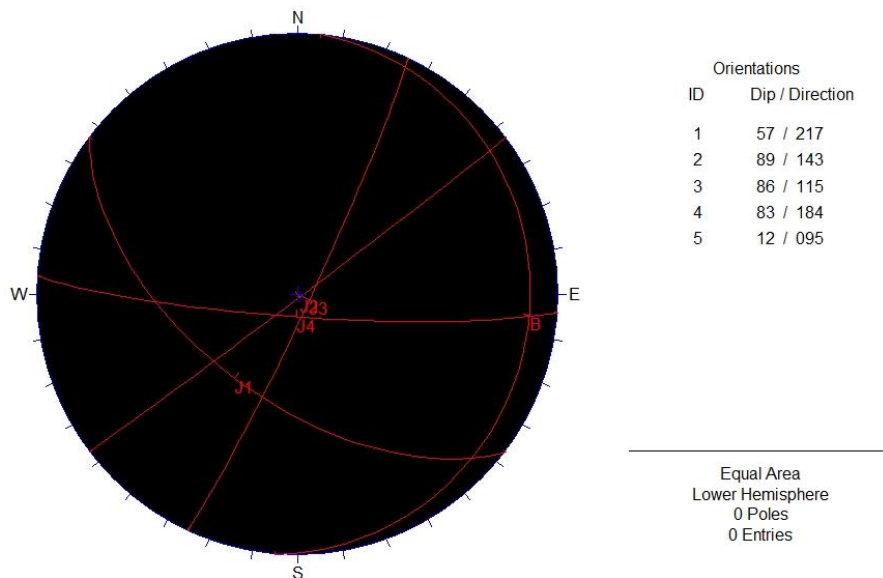
(B): 12°/095°,

(J1): 89°/143°,

(J2): 86°/115°,

(J3): 57°/217°, και

(J4): 83°/184°.



Εικόνα 37: Μέσα επίπεδα προσανατολισμού

6.2 Αριθμητική Ανάλυση Unwedge

Το UNWEDGE χρησιμοποιείται για την αριθμητική μοντελοποίηση όσον αφορά την ανάλυση της δομικής ευστάθειας της καρστικής κοιλότητας που δημιουργούνται από διασταυρωμένες ασυνέχειες (διακλάσεις και στρώσεις) καθώς και από ανασκαμμένη ελεύθερη όψη. Η βαρύτητα και άλλες δυνάμεις προκαλούν βλάβη στις σφήνες οροφής και τοίχου είτε με πτώση, ολίσθηση είτε από περιστροφή μέσα στην μάζα του βράχου.

Η προεπιλεγμένη ανάλυση στο Unwedge βασίζεται στην υπόθεση ότι οι σφήνες υποβάλλονται μόνο σε βαρυτική φόρτιση, λόγω του βάρους της σφήνας. Το εντατικό πεδίο στην βραχομάζα γύρω από την καρστική κοιλότητα αγνοείται, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβεια στα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, το σφάλμα που

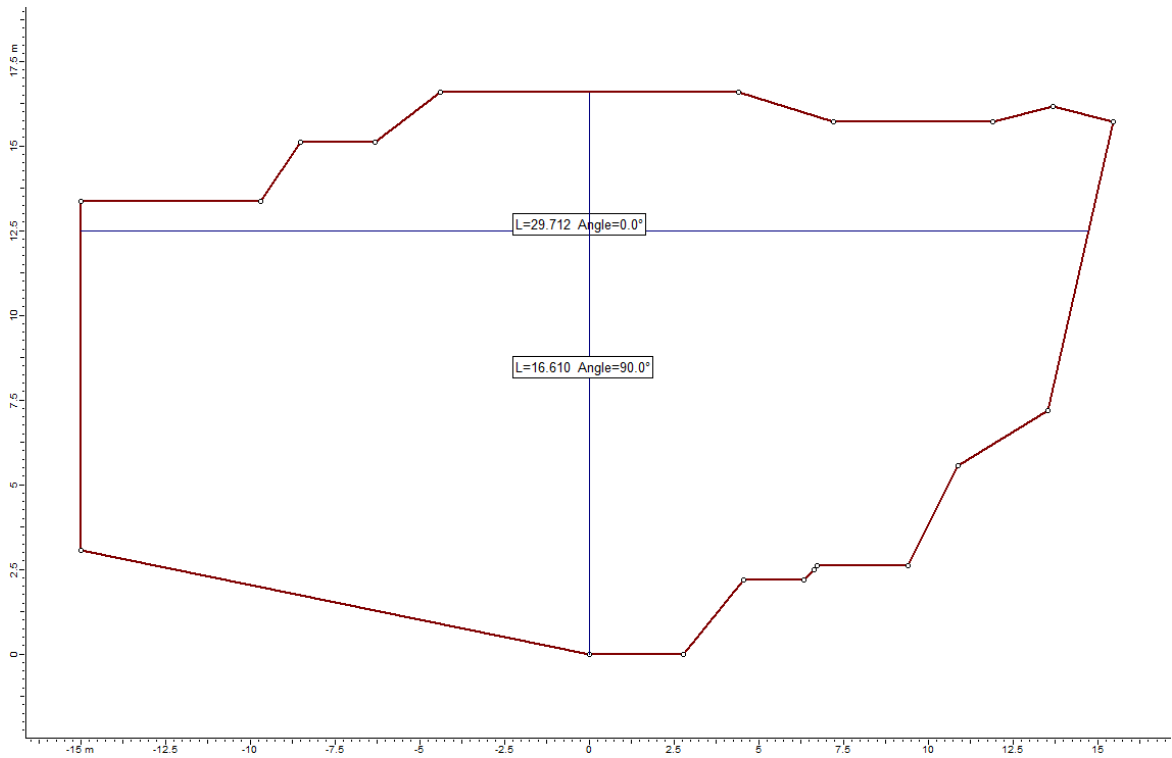
μπορεί να δημιουργηθεί είναι γενικά συντηρητικό καθώς ο συντελεστής ασφαλείας που δίνεται είναι χαμηλότερος.

Ο κύριος στόχος της ανάλυσης στο Unwedge είναι να εκτιμηθεί εάν οι σφήνες είναι πιθανόν να προκαλέσουν αστοχία κατά το στάδιο στο οποίο θα πραγματοποιούνται οι εργασίες για την διέλευση του TBM από το καρστικό έγκοιλο. Η πίεση του νερού ως ιδιότητα των ασυνεχειών θεωρείται μηδενική.

Η σοβαρότητα του κινδύνου αστοχίας αποτελεί συνάρτηση του μεγέθους του σπηλαίου. Το μέγεθος και το βάρος της σφήνας υπολογίζεται αυτόματα από το Unwedge και χρησιμοποιείται για την προεπισκόπηση της σοβαρότητας.

6.2.1 Γεωμετρία

Αρχικά όσον αφορά τον σχεδιασμό της διατομής του σπηλαίου θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει ο αγωγός που προηγείται και συνεχίζει από το σπήλαιο δηλαδή ότι πρόκειται για ένα κλειστό κύκλωμα. Για αυτό τον λόγο οι σφήνες που δημιουργούνται στις πλευρές της διατομής της καρστικής κοιλότητας αγνοούνται. Η διατομή του σπηλαίου ελαφρώς απλοποιείται σε σύγκριση με την αρχική γεωμετρία διατομής (Εικόνα 19) από την οποία πραγματοποιήθηκε η αναπαράσταση του μοντέλου σε κλίμακα 1:100 προκειμένου να διευκολυνθεί η μοντελοποίηση. Η απαλοιφή αυτών των χαρακτηριστικών είναι ασήμαντη στο πλαίσιο της ανάλυσης του Unwedge. Η Εικόνα 38 δείχνει την απλοποιημένη γεωμετρία που χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση.

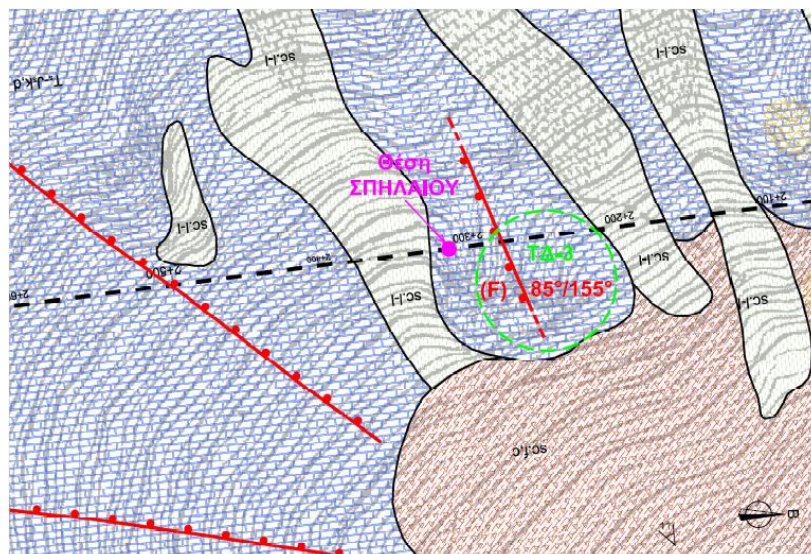


Εικόνα 38: Απλοποιημένη γεωμετρία του καρστικού εγκοίλου στην ανάλυση του Unwedge.

6.2.2 Ντετερμινιστική Ανάλυση

Στο πρώτο αυτό μέρος πραγματοποιώ μια ντετερμινιστική ανάλυση που περιλαμβάνει την εισαγωγή δεδομένων που αφορούν γεωμετρικά δεδομένα, ιδιότητες του σχηματισμού, προσανατολισμός των συνεχειών και ιδιότητες των ασυνεχειών.

Ο άξονας του σπηλαιού έχει διεύθυνση από τον Βορρά 11° (Trend).



Εικόνα 39: Θέση του σπηλαιού σε σχέση με τον Βορρά (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016)

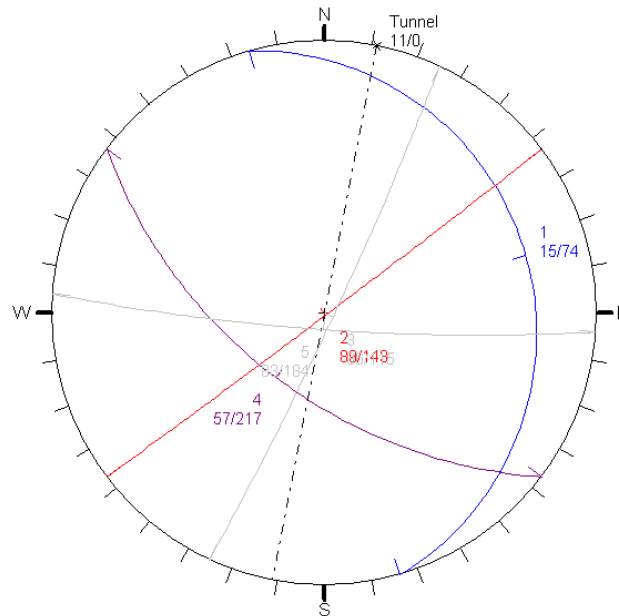
Η ανάλυση πραγματοποιείται για το εξεταζόμενο μήκος των 15m. και ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας που απαιτείται θεωρώ πως πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.5 καθώς πρέπει να παρέχεται η απαιτούμενη ασφάλεια κατά την περίοδο εργασιών για την διέλευση του TBM. Η μονάδα βάρους του σχηματισμού λαμβάνεται ίση με την μέση τιμή 0.02682MN/m^3 που λήφθηκε από εργαστηριακές δοκιμές του σχηματισμού της ζώνης Τριπόλεως σύμφωνα με τον Πίνακα 4. Τέλος η μονάδα βάρους του νερού πάρθηκε ίση με 0.00981MN/m^3 .

Θεωρώντας επίσης ότι οι ασυνέχειες που καταγράφηκαν στην επιφάνεια είναι συνεχείς και διατρέχουν τον σχηματισμό καθ'όλη τη μάζα του (καθώς πρόκειται για ασβεστόλιθο) καταλήγοντας στο σπήλαιο, προστέθηκαν τα στοιχεία προσανατολισμού τους σε αυτήν την ανάλυση. Η αλλαγή που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα σχετίζεται με την στρώση που συναντιέται στο σπήλαιο και τροποποιήθηκαν τα στοιχεία προσανατολισμού της στρώσης σε $15^\circ/074^\circ$, και θεωρήθηκε το μήκος του ίχνους της ασυνέχειας ίσο με το πλάτος του σπηλαίου δηλαδή 30m. Καθώς πρόκειται για παραπάνω από 3 επίπεδα ασυνεχειών χρησιμοποιήθηκε το Combination Analyzer το οποίο εξέτασε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που μπορούν να δημιουργήσουν σφήνα οροφής. Από τους 10 συνδυασμούς διαπιστώθηκε ότι μόνο οι 6 από αυτούς σχηματίζουν σφήνες οροφής οι οποίες κινδυνεύουν να αστοχήσουν δηλαδή έχουν μικρότερο συντελεστή ασφαλείας από τον απαιτούμενο. Παρόλα αυτά επειδή η εξέταση αυτή αφορά τις μέγιστες σφήνες, για αυτό χρησιμοποιήθηκε το Scale Wedges στο οποίο θεωρήθηκε ένα μέγιστο ύψος βραχοσφήνας 5 m. Έτσι, οι δυνατοί σχεδιασμοί σφήνας οροφής που έχουν συντελεστή μικρότερο από τον σχεδιαστικό συντελεστή περιορίστηκαν σε 5.

Πίνακας 6: Συνδυασμοί βραχοσφηνών με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από τον σχεδιαστικό.

Συνδυασμός	Ασυνέχειες		
1	$15^\circ/074^\circ$	$57^\circ/217^\circ$	$86^\circ/115^\circ$
2	$15^\circ/074^\circ$	$89^\circ/143^\circ$	$57^\circ/217^\circ$
3	$15^\circ/074^\circ$	$86^\circ/115^\circ$	$83^\circ/184^\circ$
4	$15^\circ/074^\circ$	$89^\circ/143^\circ$	$83^\circ/184^\circ$
5	$15^\circ/074^\circ$	$57^\circ/217^\circ$	$83^\circ/184^\circ$

Στη παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται χαρακτηριστικά σε στερεογραφική προβολή ο δεύτερος συνδυασμός των 3 επιπέδων ασυνεχειών, οι ασυνέχειες που συμμετέχουν στην δημιουργία της σφήνας παρουσιάζονται με τα χρώματα κόκκινο, μωβ και μπλέ ενώ με γκριζο χρώμα στο φόντο φαίνονται τα άλλα επίπεδα ασυνεχειών τα οποία δεν συμμετέχουν σε αυτήν την δημιουργία σφήνας.



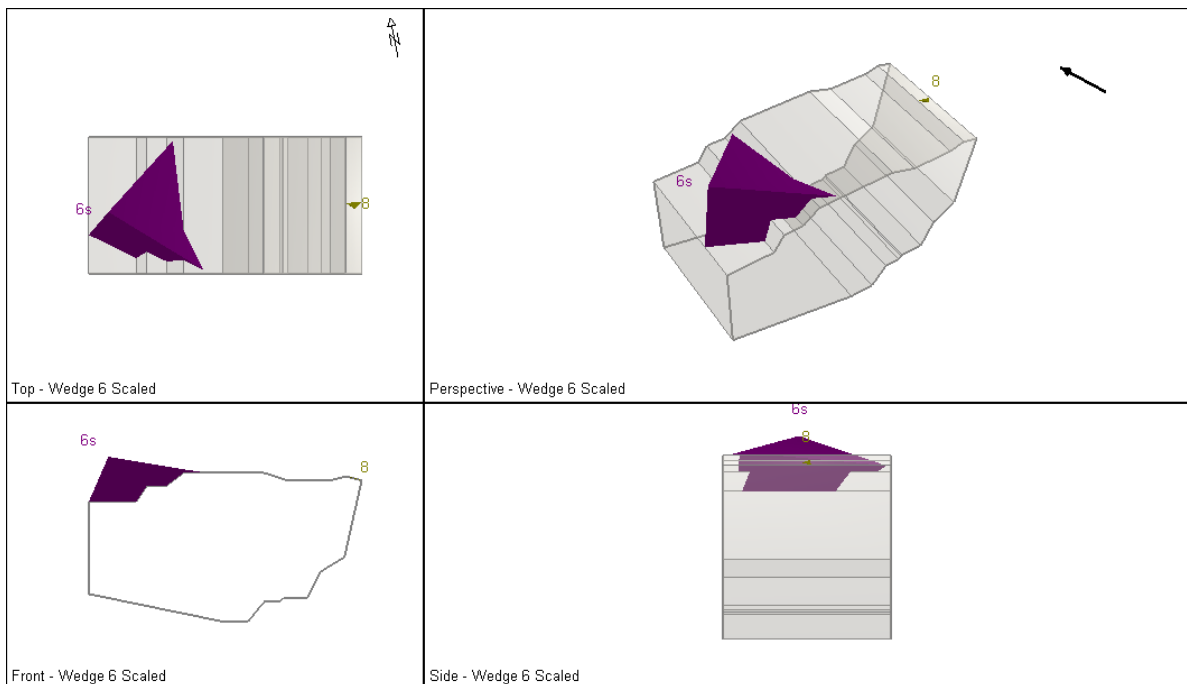
Εικόνα 40: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 2

Στην συνέχεια θεωρώντας ότι όλες οι ασυνέχειες έχουν τις ίδιες ιδιότητες και σύμφωνα με δεδομένα που πάρθηκαν από τον Πίνακα 4 χρησιμοποιήθηκαν οι ελάχιστες τιμές που αφορούν κάθε ιδιότητα, έτσι ώστε να γίνει η δυσμενέστερη ανάλυση όσον αφορά τις βραχοσφήνες. Έτσι, η συνοχή c λήφθηκε ίση με 130 kPa ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ ίση με 37.5° . Τέλος, η εφελκυστική αντοχή των ασυνεχειών μπορεί να είναι πολύ μικρή η μηδενική. Στη προκειμένου περίπτωση η εφελκυστική αντοχή λήφθηκε ίση με 0 όπως επίσης και η πίεση του νερού. Όσον αφορά τις διακλάσεις θεωρήθηκε ότι είναι συνεχείς ενώ η στρώση ότι έχει ένα μήκος ίχνους 30 m.

Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης έδειξαν την αστοχία των 5 βραχοσφηνών. Συγκεκριμένα στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο συντελεστής ασφαλείας και το βάρος κάθε δημιουργημένης βραχοσφήνας για κάθε συνδυασμό.

Πίνακας 7: Συντελεστής ασφαλείας και βάρος για κάθε βραχοσφήνα

Συνδυασμός	Συντελεστής Ασφαλείας	Βάρος (MN)
1	0.000	0.001
2	1.230	4.049
3	1.091	2.650
4	1.163	4.771
5	1.321	4.733



Εικόνα 41: Συνδυασμός 2

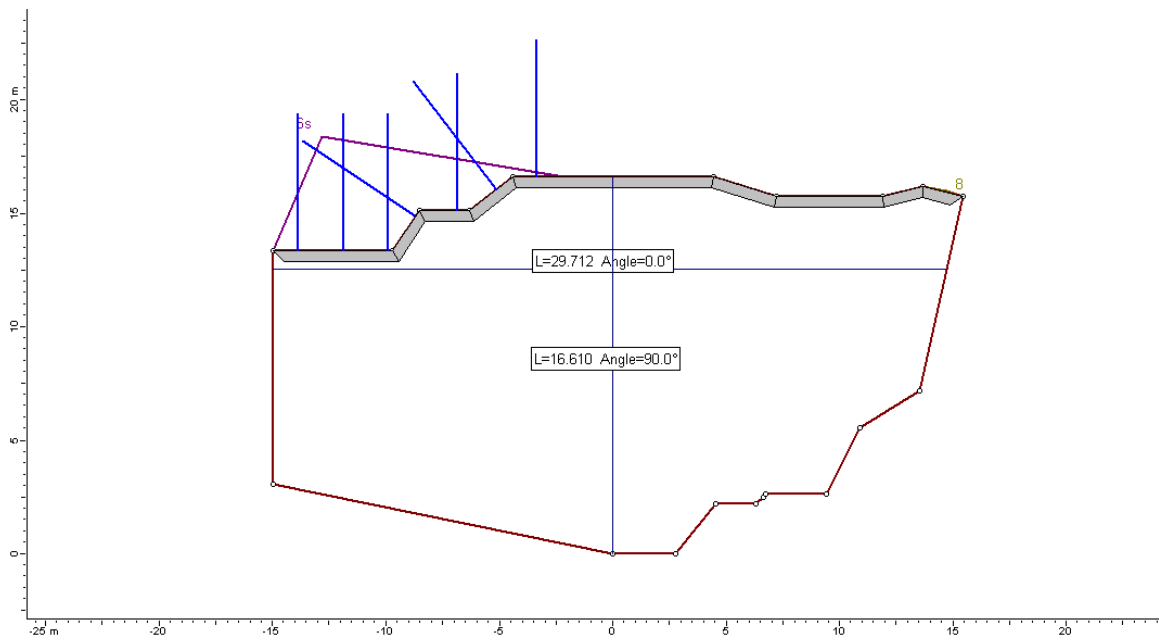
Για την σταθεροποίηση των παραπάνω σφηνών που δημιουργήθηκαν στην ανάλυση μου χρησιμοποιώ τα παρακάτω στοιχεία υποστήριξης ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να ξεπεράσει τον απαιτούμενο σχεδιαστικό συντελεστή 1.5. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια και σκυρόδεμα για την υποστήριξη της οροφής με τα χαρακτηριστικά τους να παρουσιάζονται στους Πίνακας 8 και Πίνακας 9.

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά των αγκυρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση

Χαρακτηριστικό	Είδος/ Τιμή
Τύπος αγκυρίων	Μηχανικά
Μήκος αγκυρίων	6m
Εφελκυστική Αντοχή	0.25 MN
Plate Capacity	0.1 MN
Ικανότητα αγκύρωσης	0.1 MN
Κάναβος	2*2m

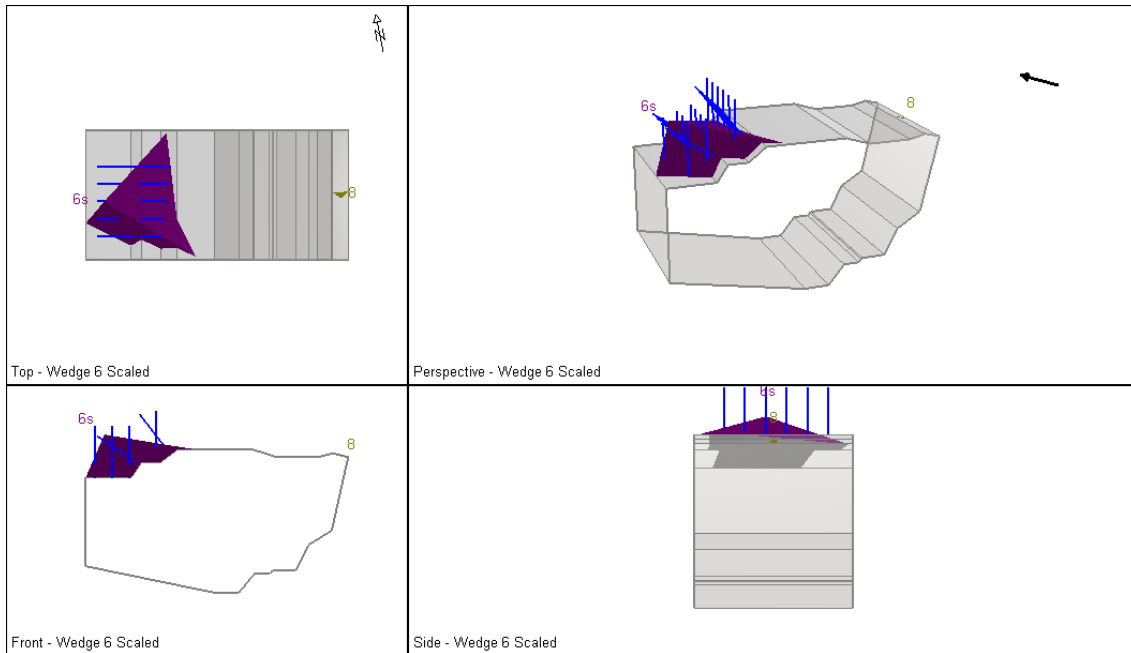
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Πάχος	3 cm
Δύναμη διάτμησης	1 MPa
Μονάδα βάρους	0.026 kN/m ³



Εικόνα 42: Μέτρα υποστήριξης για τον συνδυασμό 2

Ύστερα από την προσθήκη των παραπάνω μέτρων υποστήριξης επιτεύχθηκαν οι απαραίτητοι συντελεστές ασφαλείας, που είναι μεγαλύτεροι του 1.5. Συγκεκριμένα οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν για τους συνδυασμούς 1, 2, 3, 4 και 5 είναι 74.396, 1.781, 2.336, 1.939 και 2.195 αντίστοιχα. Στις Εικόνα 42 και Εικόνα 43 παρουσιάζονται τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και η 3D απεικόνιση των σφηνών σε συνδυασμό με τα μέτρα υποστήριξης και αφορούν τον δεύτερο πιθανό συνδυασμό βραχοσφήνας.



Εικόνα 43: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 2

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται όμοια οι αντίστοιχες εικόνες που αφορούν την απεικόνιση των στερεογραφικών προβολών, των σφηνών και τα μέτρα υποστήριξης για τους Συνδυασμούς 1, 3, 4 και 5.

Από την παραπάνω ανάλυση παρατηρείται ότι οι βραχοσφήνες που δημιουργούνται στην δεξιά περιοχή του σπηλαίου είναι και οι πιο επικίνδυνες, δηλαδή αυτές που παρουσιάζουν τους μικρότερους συντελεστές ασφαλείας. Δηλαδή για τους Συνδυασμούς 1, 3, και 4. Παρόλα αυτά, αυτό δεν σημαίνει ότι οι υπόλοιπες σφήνες που δημιουργούνται δεν είναι επικίνδυνες και για αυτόν τον λόγο εξετάζονται.

Επίσης θεωρείται ότι τα μέτρα που επιλέχθηκαν για την σταθεροποίηση της οροφής είναι επαρκή, καθώς όλες οι πιθανές βραχοσφήνες απέκτησαν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από τον σχεδιαστικό.

6.2.3 Πιθανολογική Ανάλυση

Στο δεύτερο μέρος της ανάλυσης μου πραγματοποιώ μια πιθανολογική ανάλυση, η οποία χρησιμοποιεί την στατιστική κατανομή για αβεβαιότητα κατά την εισαγωγή των δεδομένων. Έτσι, δίνοντας ένα εύρος τιμών σε ορισμένες από τις παραμέτρους η ανάλυση πιθανοτήτων παρουσιάζει τους συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν για κάθε πιθανή σφήνα και από τους οποίους υπολογίζεται η πιθανότητα αστοχίας.

Η διαφορά με την προηγούμενη ανάλυση είναι ότι στην παρούσα προστίθενται τα δύο υπάρχοντα ρήγματα τα οποία έχουν μεταβαλλόμενα στοιχεία προσανατολισμού **F1 85° /065° -245°** και **F2 80° / 045° -225°** .

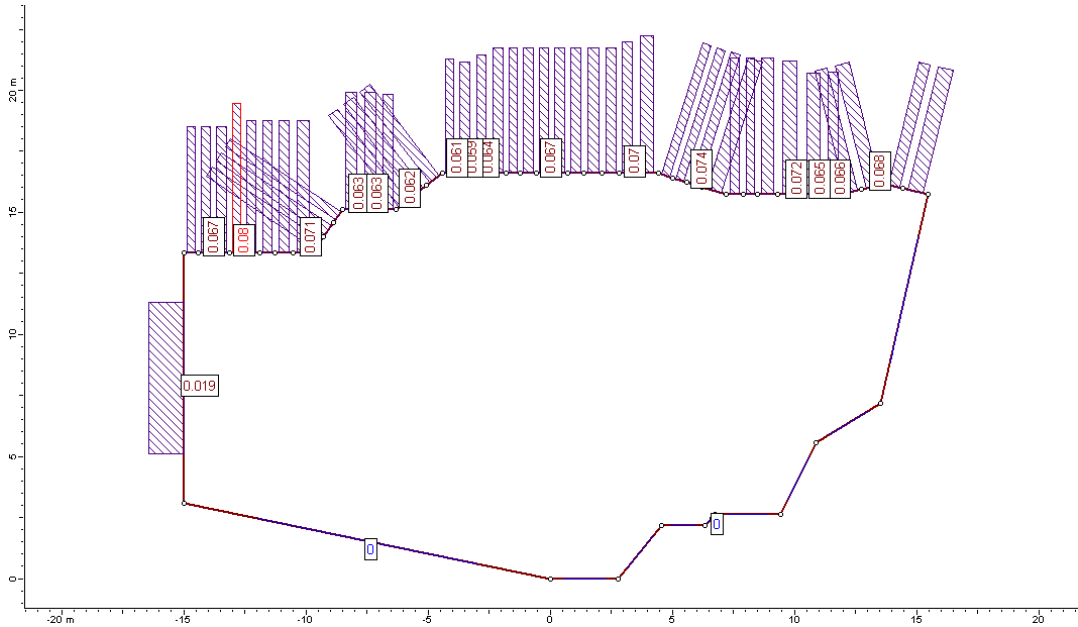
Το μοντέλο Mohr- Coulomb χρησιμοποιείται για τον ορισμό των ιδιοτήτων της διατμητικής αντοχής, δηλαδή την συνοχή (c) και την γωνία τριβής (ϕ). όσον αφορά τις ασυνέχειες τα δεδομένα λήφθηκαν από τον Πίνακα 4 που προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν σε ορισμένες ασυνέχειες του σχηματισμού της ζώνης Τριπόλεως. Όσον αφορά τις παραμέτρους των ρηγμάτων λόγω έλλειψης δεδομένων λήφθηκαν τιμές χαμηλότερες από αυτές των ασυνεχειών. Πιο συγκεκριμένα, οι ιδιότητες των ρηγμάτων λήφθηκαν ως εξής $\phi=30^\circ$ και $c=0$, η πίεση του νερού θεωρήθηκε μηδενική όπως επίσης και η εφελκυστική αντοχή. Τέλος τα ρήγματα θεωρήθηκαν συνεχή. Όσον αφορά τις ιδιότητες των ασυνεχειών διακλάσεις και στρώση παρέμειναν ίδιες με την προηγούμενη ανάλυση (ντετερμινιστική).

Η λατινική μέθοδος του υπερκύβου (Latin Hypercube) είναι μια στατιστική μέθοδος για τη δημιουργία δειγμάτων πιθανής συλλογής. Δηλαδή ο αλγόριθμος δειγματοληψίας διασφαλίζει ότι η λειτουργία κατανομής λαμβάνεται ομοιόμορφα, αλλά εξακολουθεί να έχει την ίδια τάση πιθανότητας. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία η μέθοδος Latin Hypercube χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία δεδομένων εισόδου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Unwedge για μια ανάλυση πιθανοτήτων αφορούν στοιχεία σχετικά με την μέγιστη πίεση υποστήριξης που απαιτείται, την μέγιστη σφήνα που σχηματίζεται (βάρος), το μέγιστο βάθος κάθε σφήνας, τον ελάχιστο παράγοντα ασφαλείας και την πιθανότητα αστοχίας. Τα παραπάνω στοιχεία δείχνουν την πιο κρίσιμη περιοχή, που στην προκειμένη περίπτωση αφορά κυρίως την οροφή του σπηλαίου και τις πλευρές του. Καθώς όμως στην περίπτωση μας υπάρχει ο αγωγός, όπως έχει προαναφερθεί, στην καρστική κοιλότητα θα επικεντρωθώ μόνο στην ευστάθεια της οροφής.

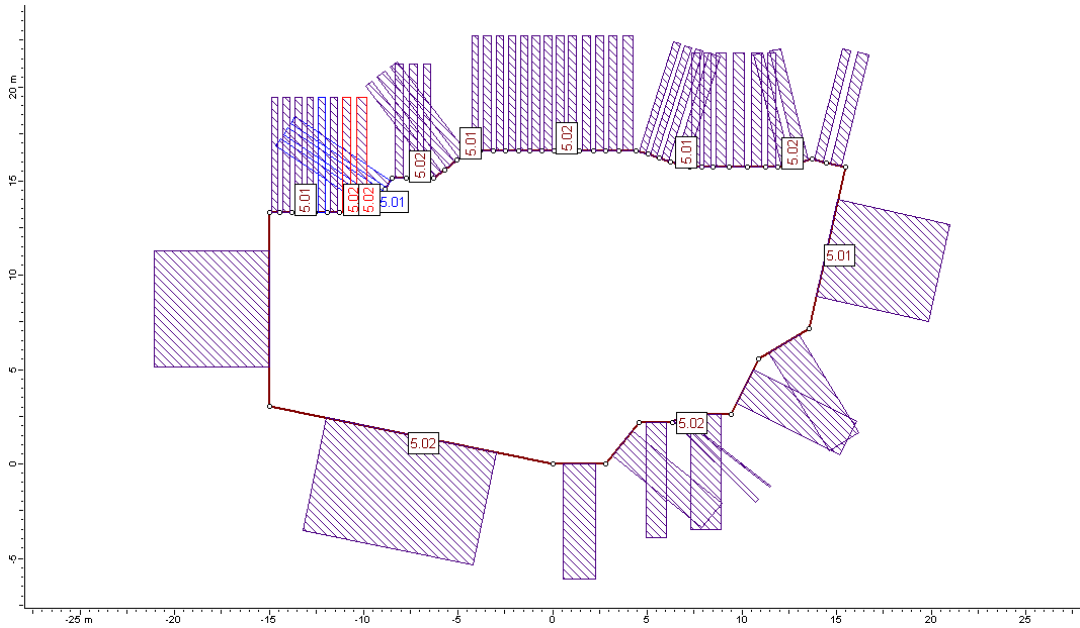
Η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης δίνει το σημείο εκκίνησης για τον σχεδιασμό των πραγματικών συστημάτων στήριξης, δηλαδή των αγκυρίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η εφαρμογή της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης στις πιο κρίσιμες περιοχές για να αστοχήσουν παράγει ένα συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από τον σχεδιαστικό συντελεστή 1.5. Η Εικόνα 44 δείχνει την μέγιστη πίεση υποστήριξης που

απαιτείται και είναι ίση με 0.08MPa (με κόκκινο χρώμα φαίνεται η μέγιστη τιμή). Κατά μέσο όρο η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης είναι ίση με 0.0141MPa.



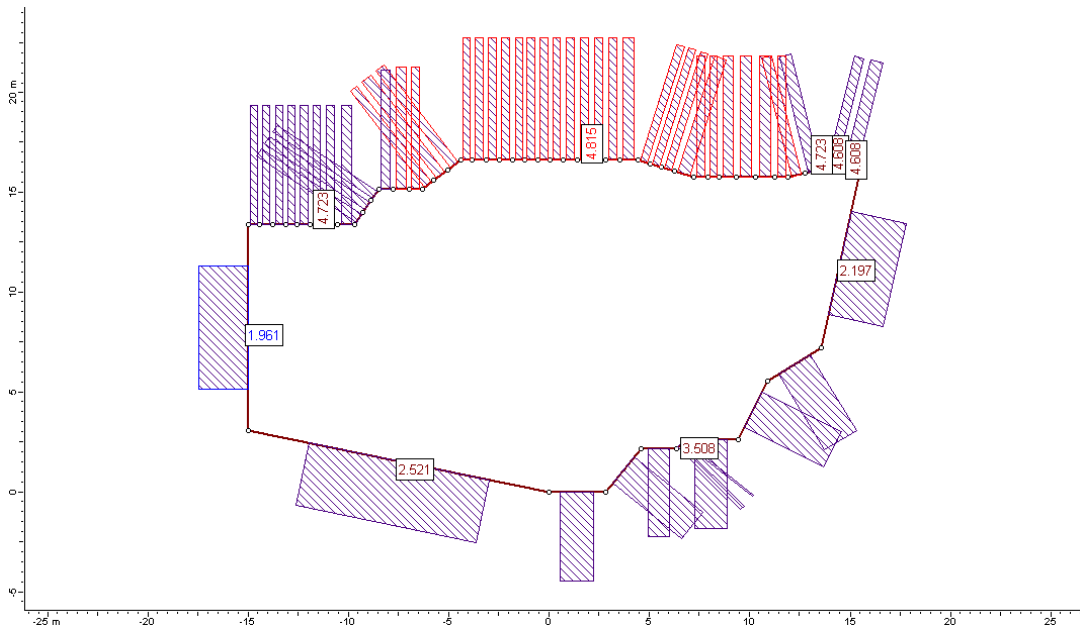
Εικόνα 44: Μέγιστη απαιτούμενη πίεση υποστήριξης.

Η Εικόνα 45 δείχνει το μέγιστο βάθος της σφήνας (m) για κάθε τμήμα. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς έχω βάλει περιορισμό τα 5 m για μέγιστο ύψος της σφήνας τα αποτελέσματα μπορεί να μην είναι ακριβή και να μην ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν. Σύμφωνα λοιπόν με αυτές τις υποθέσεις προκύπτει μέγιστο ύψος σφήνας 5.02m, ενώ ο μέσος όρος του βάθους των δημιουργούμενων σφηνών είναι 2.088m.



Εικόνα 45: Μέγιστο βάθος σφήνας στην οροφή

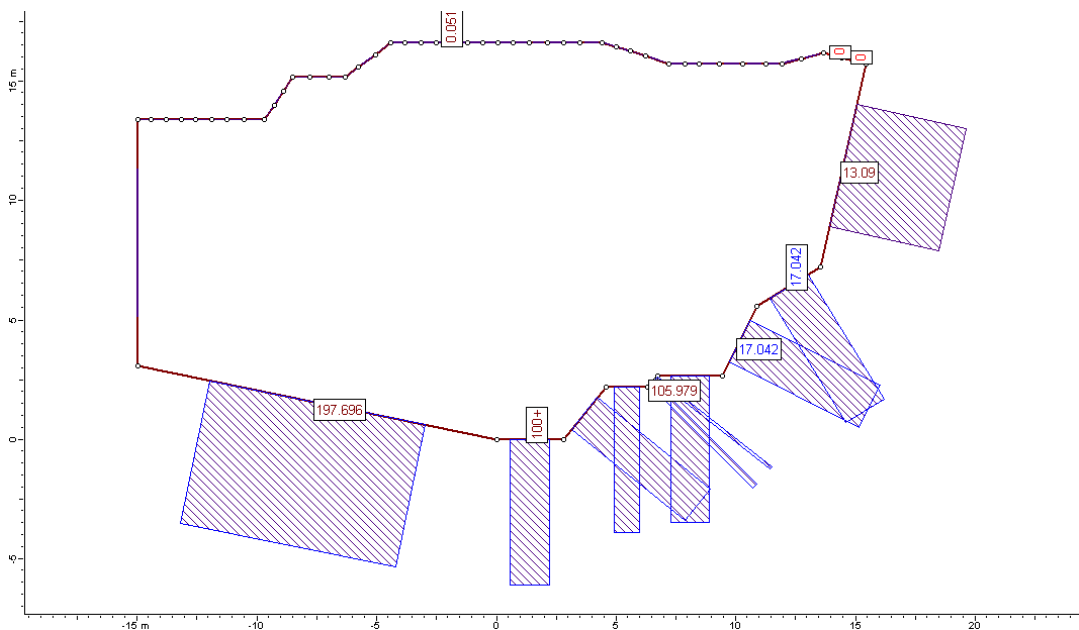
Η Εικόνα 46 δείχνει το μέγιστο βάρος της σφήνας (MN) για κάθε τμήμα της οροφής. Το μέγιστο βάρος σφήνας που καταγράφεται είναι της τάξης των 4.815MN ενώ ο μέσος όρος είναι ίσος με 0.96MN. Η σοβαρότητα του βάρους της σφήνας της οροφής είναι ύψιστης σημασίας για την ασφάλεια των εργαζομένων αλλά και την σταθερότητα του σπηλαιού.



Εικόνα 46: Μέγιστο βάρος των σφηνών της οροφής για κάθε τμήμα

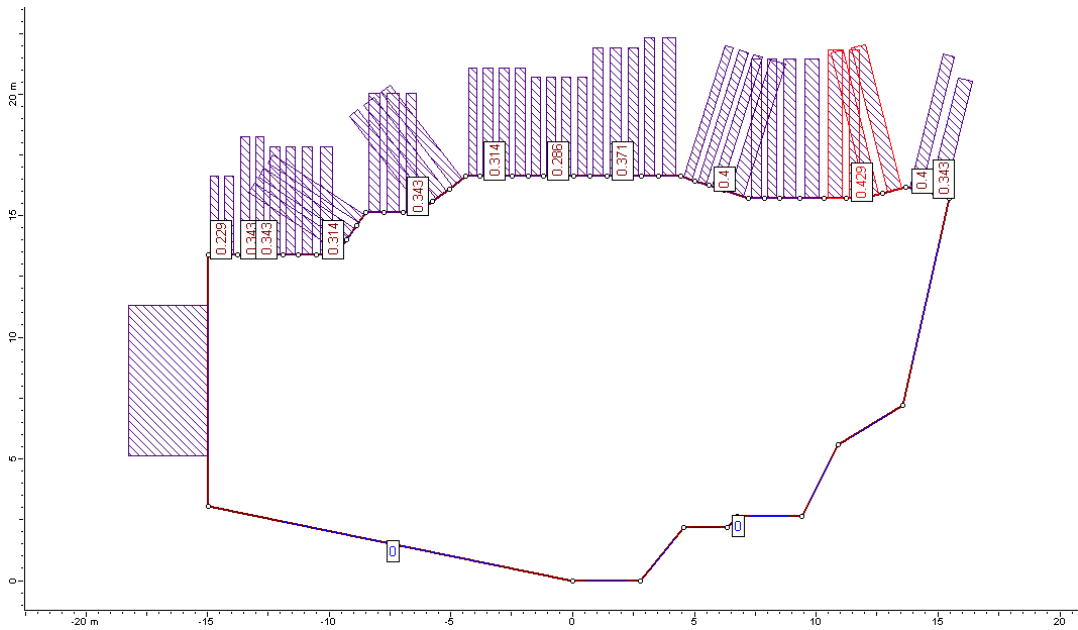
Η Εικόνα 47 δείχνει τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας στα διάφορα τμήματα της οροφής. Στην περίπτωση μας ολόκληρη η στέγη μπορεί να θεωρηθεί κρίσιμη καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι οριακά πάνω από το 0 και συγκεκριμένα 0.051, ενώ το δεξιό τμήμα έχει συντελεστή ασφαλείας 0. Αυτό επιβεβαιώνει και την παρουσία μιας μικρής βραχοσφήνας που παρατηρήθηκε στην ντετερμινιστική ανάλυση και συγκεκριμένα παρουσιάστηκε στους Συνδυασμούς 1 και 2. Ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται ως εξής:

$$\text{Συντελεστής Ασφαλείας} = \frac{\text{Δυνάμεις που αντιστέκονται (τάση διάτμησης/εφελκυσμού, υποστήριξη)}}{\text{Δυνάμεις που υποβοηθούν (βαρύτητα, νερό)}}$$



Εικόνα 47: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας

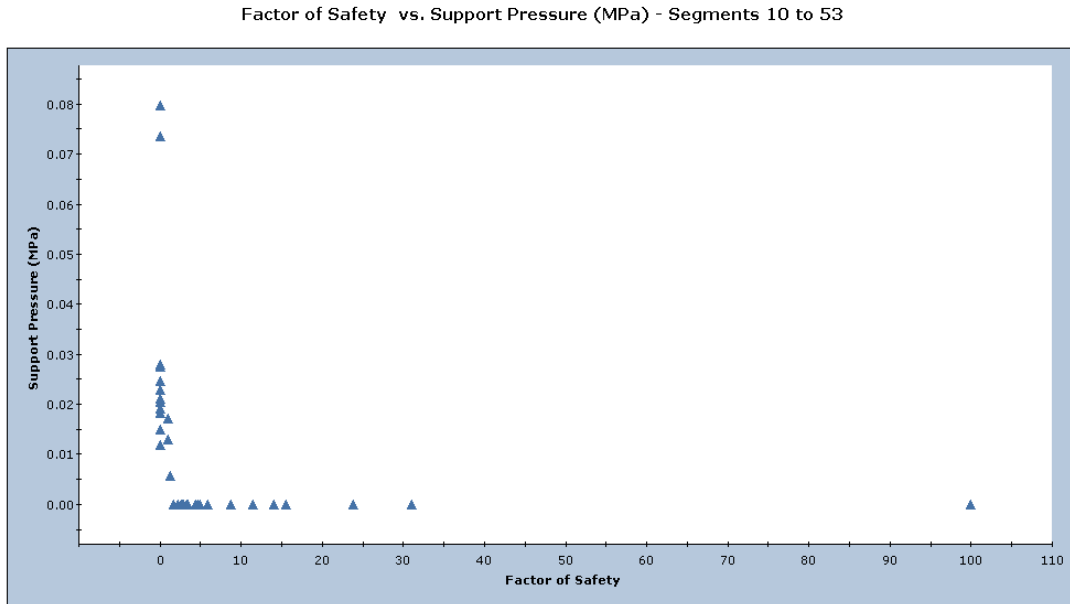
Η Εικόνα 48 δείχνει την πιθανότητα αστοχίας για κάθε τμήμα. Οι κρίσιμες τιμές σημειώνονται με κόκκινο χρώμα. Η πιθανότητα αστοχίας είναι ο λόγος του αριθμού των σφαλμάτων (δηλαδή ο αριθμός των έγκυρων σφηνών με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του σχεδιαστικού) προς τον αριθμό των δειγμάτων (ο οποίος καθορίζεται στις ρυθμίσεις κατά την εισαγωγή των δεδομένων 10000 εν προκειμένω). Δηλαδή είναι η συνολική πιθανότητα αστοχίας της σφήνας για τον σύνολο των πιθανοτικών δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή όλη οροφή κινδυνεύει. Αλλά όπως φαίνεται και στην εικόνα η δεξιά πλευρά του σπηλαίου παρουσιάζει και τις μεγαλύτερες πιθανότητες προς αστοχία (0.429 πιθανότητα).



Εικόνα 48: Πιθανότητα αστοχίας

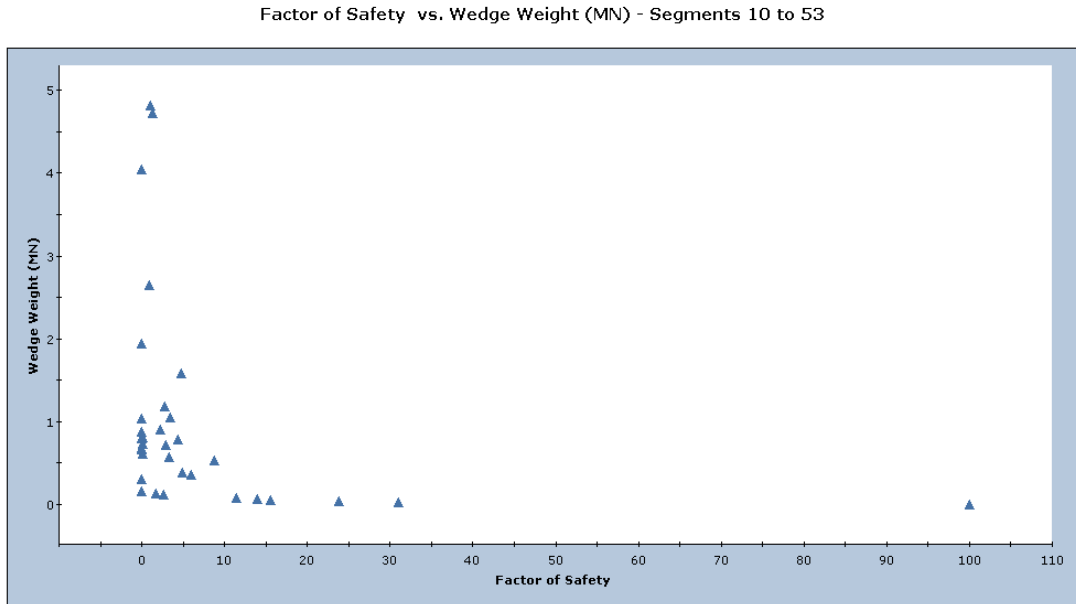
Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται και ιστογράμματα που αφορούν την σχετική συχνότητα σε σχέση με την απαιτούμενη πίεση, το βάρος, το βάθος, και το συντελεστή ασφαλείας σε όλο το τμήμα της οροφής.

Επίσης από το πρόγραμμα προκύπτουν και τα παρακάτω διαγράμματα που αφορούν την συσχέτιση του συντελεστή ασφαλείας με την πίεση υποστήριξης, το βάρος και το βάθος σε διάφορους συνδυασμούς μεταξύ τους. Όλα τα διαγράμματα που παρατίθενται αφορούν μόνο επιλεγμένα τμήματα της οροφής και όχι της υπόλοιπης περιμέτρου του σπηλαιού.



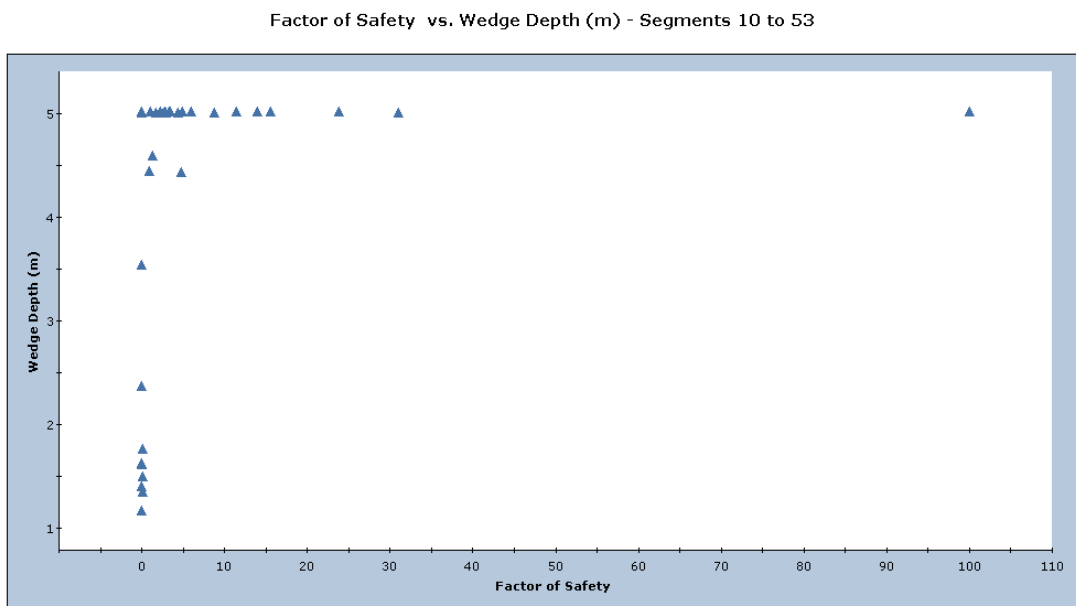
Εικόνα 49: Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας- πίεσης υποστήριξης

Είναι φανερό από το παραπάνω διάγραμμα ότι τα σημεία που φαίνονται να έχουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1.5 είναι και αυτά τα οποία απαιτούν πίεση υποστήριξης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η πίεση υποστήριξης είναι το σημείο εκκίνησης για την προσθήκη πραγματικών συστημάτων υποστήριξης. Η πλειοψηφία των τμημάτων που αστοχούν απαιτεί πίεση υποστήριξης μεταξύ 0.01-0.03 MPa ενώ μόνο δύο τμήματα απαιτούν υποστήριξη περίπου 0.08MPa.



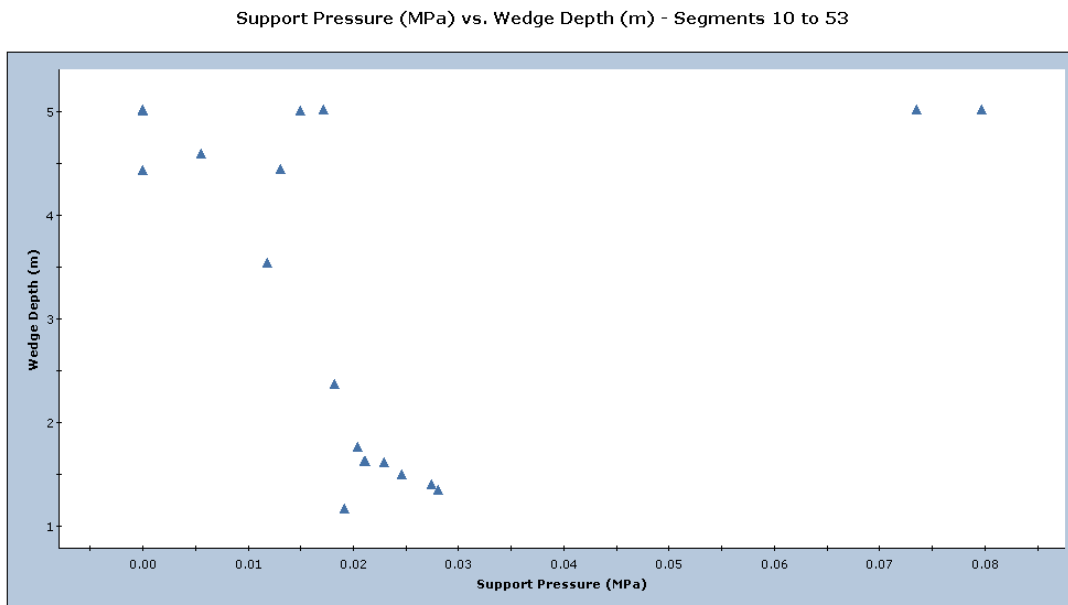
Εικόνα 50: Συσχέτιση Συντελεστή ασφαλείας – βάρους

Από το διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή ασφαλείας με το βάρος είναι φανερό ότι σφήνες με αυξημένο βάρος είναι πιο πιθανόν να αστοχήσουν. Αυτή η συσχέτιση είναι λογική καθώς στην ανάλυση εξετάζονται βραχοσφήνες που αστοχούν στην οροφή και με κύριο παράγοντα το βάρος. Εν αντιθέσει οι σφήνες που δημιουργούνται με μικρότερο βάρος παρουσιάζουν και μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας καθώς είναι πιο εύκολο να συγκρατηθούν.



Εικόνα 51: Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας- βάθους

Από την συσχέτιση του συντελεστή ασφαλείας με το βάθος προκύπτει ότι σφήνες που δημιουργούνται και έχουν μικρότερο βάθος παρουσιάζουν και χαμηλότερους συντελεστές ασφαλείας, σε αντίθεση με σφήνες που δημιουργούνται και έχουν μεγαλύτερο βάθος επιρροής και οι συντελεστές ασφαλείας τους παρουσιάζονται ικανοποιητικοί με εξαίρεση δυο με τρεις σφήνες που έχουν ύψος κοντά στα 5 m.



Εικόνα 52: Συσχέτιση Πίεση υποστήριξης- βάθους

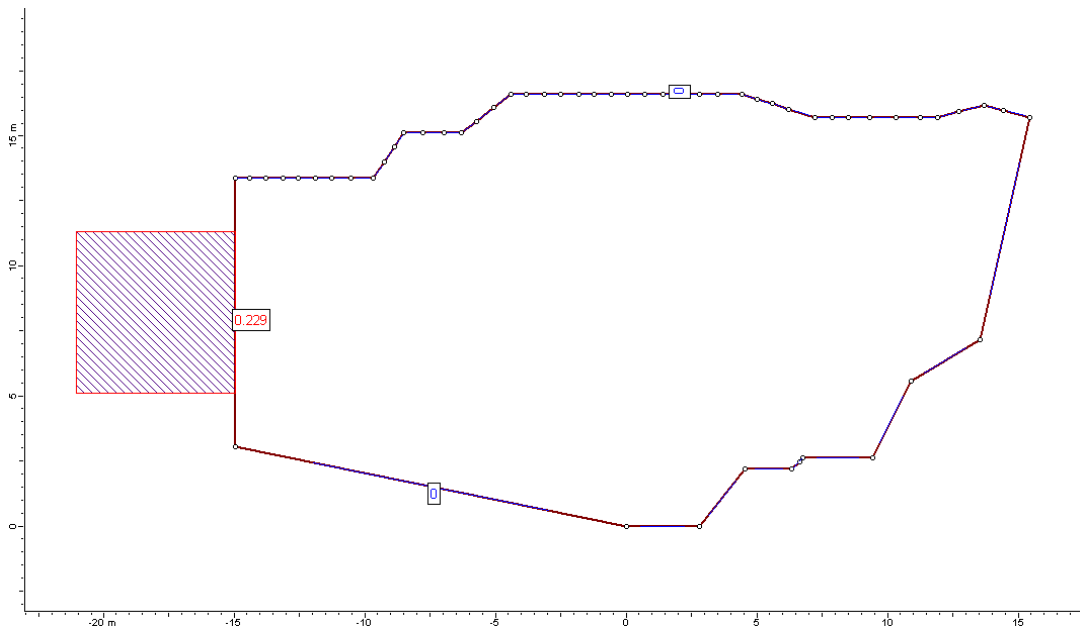
Το προηγούμενο συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από το παραπάνω διάγραμμα στο οποίο φαίνεται ότι οι βραχοσφήνες που απαιτούν την μεγαλύτερη πίεση 0.08MPa είναι οι δύο με το μεγαλύτερο ύψος ενώ οι υπόλοιπες σφήνες που δημιουργούνται με μεγάλο ύψος δεν απαιτούν υψηλή πίεση υποστήριξης αυτό σημαίνει ότι έχουν και μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τις άλλες δυο παρόλα αυτά απαιτούν πίεση υποστήριξης καθώς ο συντελεστής ασφαλείας δεν είναι μεγαλύτερος από τον σχεδιαστικό. Αυτές με το πιο μικρό ύψος είναι και αυτές που απαιτούν μια μέτρια τιμή πίεσης υποστήριξης.

Συνολικά, από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι από τις σφήνες που αστοχούν (δηλαδή αυτές με χαμηλό συντελεστή ασφαλείας) οι δύο φτάνουν σε μεγάλο βάθος και απαιτούν την υψηλότερη τιμή πίεσης υποστήριξης, ενώ οι υπόλοιπες σφήνες που αστοχούν έχουν μικρό έως μέτριο βάθος που κυμαίνεται από 1-2 m και η πίεση υποστήριξης που απαιτείται κυμαίνεται από 0.02MPa έως 0.03MPa.

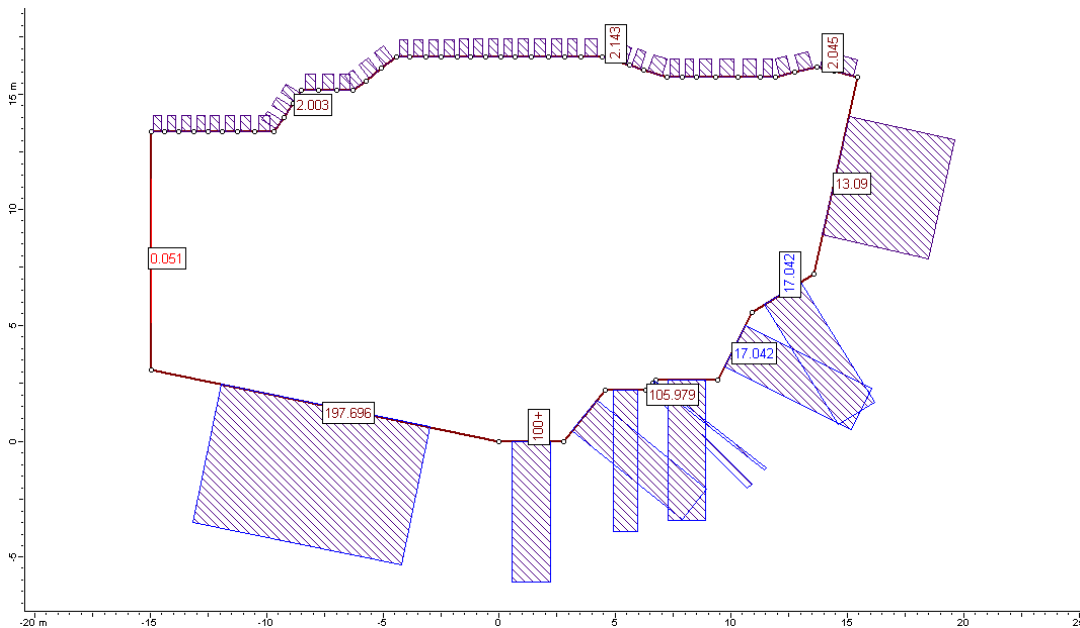
Στην συνέχεια της ανάλυσης πιθανοτήτων έγινε προσθήκη στοιχείων υποστήριξης που παρουσιάζουν ίδιες ιδιότητες με αυτές που εφαρμόστηκαν και στην περίπτωση της

ντετερμινιστικής ανάλυσης τόσο για το σκυρόδεμα όσο και για τα αγκύρια και παρουσιάζονται στους Πίνακες 8 και Πίνακας 9.

Έτσι, τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζουν γενικά τη σταθεροποίηση της οροφής χωρίς πιθανότητα αστοχίας αλλά και αύξηση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας πάνω από 1.5 που είναι και ο σχεδιαστικός συντελεστής όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 53: Πιθανότητα αστοχίας ύστερα από την προσθήκη των μέτρων υποστήριξης.



Εικόνα 54: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας ύστερα από την προσθήκη των μέτρων υποστήριξης

Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι η δεξιά πλευρά της οροφής παρουσιάζει την μεγαλύτερη πιθανότητα για αστοχία. Και στις δύο περιπτώσεις αυτό συμπίπτει με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην έκθεση του (ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2016). Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα η δεξιά πλευρά της οροφής είναι και η πιο επικίνδυνη για αστοχία καθώς διατρέχεται από το ρήγμα F2 και η βραχομάζα σε εκείνη την περιοχή παρουσιάζεται έντονα κατακερματισμένη και διερρηγμένη.

Επίσης, τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν για την σταθεροποίηση της οροφής κρίνονται επαρκή.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής με θέμα την «Μηχανική διάνοιξη μέσα σε καρστικούς σχηματισμούς της σήραγγας Αποσελέμη» προέκυψαν κάποια συμπεράσματα:

- ✓ Στο νησί της Κρήτης, από τα προϊστορικά χρόνια χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνολογίες για να λύσουν το πρόβλημα της χαμηλής διαθεσιμότητας σε νερό. Η εξέλιξη των διαφόρων αυτών μέσων κατέληξε στην χρήση φραγμάτων, στην σημερινή εποχή, όπως αυτό του Αποσελέμη το οποίο στοχεύει στην επίλυση του προβλήματος της ανεπάρκειας πόσιμου νερού στις περιοχές του Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου.
- ✓ Από γεωλογικής πλευράς είναι φανερό ότι η περιοχή ευρύτερα του έργου δομείται κυρίως από διαφόρους τύπους ασβεστολίθων, οι οποίοι παρουσιάζουν γενικά μια καλή γεωτεχνική κατάσταση, αλλά και ύπαρξη ποικίλων καρστικών κενών, τα οποία αποτελούν και το κύριο πρόβλημα προς αντιμετώπιση.
- ✓ Το TBM που χρησιμοποιήθηκε έπρεπε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της σήραγγας, οι οποίες κατά κύριο λόγο αφορούσαν το μέγεθος της (διάμετρος 4 m) και δευτερεύοντα την μεγάλη κλίση της τάξης του 15%. Για αυτό τον λόγο, έπρεπε να γίνει προσεκτική επιλογή των συστημάτων που θα πλαισιώναν το TBM διπλής ασπίδας, δηλαδή το σύστημα επένδυσης, μεταφοράς και τροφοδοσίας.
- ✓ Η επιλογή της μεθόδου προσπέλασης του καρστικού σπηλαίου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιηθεί στο πιο σύντομο δυνατό χρονικό διάστημα, λαμβάνοντας υπ' όψιν την εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών εργασίας αλλά και την προστασία των μέτρων που θα χρησιμοποιηθούν για την γεφύρωση.

Ένα σημαντικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας με βασικό σκοπό την μελέτη ευστάθειας της οροφής της καρστικής κοιλότητας λόγω δημιουργίας επικίνδυνων σφηνών. Για το σκοπό αυτό έγινε προσδιορισμός πιθανών σφηνών και ανάπτυξη σχεδίου υποστήριξης τους. Έτσι, έγινε χρήση του προγράμματος Unwedge v.4.0, το οποίο έχει την δυνατότητα να υπολογίζει τις σφήνες αυτές χρησιμοποιώντας ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών.

- ✓ Το Unwedge αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την εξέταση της ευστάθειας και την προσομοίωση των συνθηκών υπόγειων εκσκαφών.

- ✓ Από την δειγματοληψία των ασυνεχειών που μετρήθηκαν (50 στον αριθμό) προέκυψαν 5 κύριες οικογένειες που συντέλεσαν στην δημιουργία των σφηνών. Με την χρήση του προγράμματος Unwedge είναι φανερό ότι ο κίνδυνος είναι υπαρκτός και η πιθανότητα πτώσης/ αστοχίας διαφόρων μεγεθών τεμαχίων είναι αρκετά πιθανή. Επίσης, η ύπαρξη των δύο υπάρχοντων ρηγμάτων επηρεάζει σημαντικά στην δημιουργία επικινδύνων περιοχών όπως αυτές παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6 (ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ). Η περιοχή που παρουσιάζεται και πιο επικίνδυνη αφορά την οροφή στην δεξιά πλευρά της κοιλότητας.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Unwedge έρχονται σε συμφωνία όπως αυτά παρουσιάζονται στην έκθεση (ΑΥΤΟΨΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ) στην οποία αναφέρονται οι επί τόπου παρατηρήσεις εντός του σπηλαίου. Επιπλέον, το γεγονός ότι υπάρχουν ήδη αρκετά τεμάχια που έχουν πέσει από την οροφή επιβεβαιώνει ότι ο κίνδυνος είναι εμφανής και ότι μέτρα όπως αγκυρώσεις και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, που εφαρμόστηκαν και στην ανάλυση, είναι απαραίτητα να χρησιμοποιηθούν. Έτσι, εξασφαλίζονται οι ασφαλείς συνθήκες εργασίας για το διάστημα που απαιτείται για την διέλευση του TBM.

Το σχετικό “μικρό” σε μέγεθος έργο της σήραγγας Αποσελέμη προσφέρει ένα απροσδόκητα ευρύ φάσμα στον τομέα της κατασκευής σιράγγων παρουσιάζοντας αντίστοιχες προκλήσεις. Ξεκινώντας από την δημοπράτηση του έργου και την σύμβαση που τελικά υπογράφηκε, τις τεχνικές προκλήσεις αλλά και τις πολύ δύσκολες γεωλογικές προκλήσεις όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην αντίστοιχη υποενότητα 3.6 Προβλήματα που αντιμετώπισε το TBM: κρυμμένη κατολίσθηση, έντονες συγκλίσεις, εισβολές αερίου και την μεγάλου μεγέθους καρστική κοιλότητα.

Η Jaeger Bau σε συνεργασία με την ελληνική κατασκευαστική εταιρεία INTRAKAT κατάφερε να αντιμετωπίσει επιτυχώς όλα τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την περίοδο κατασκευής της σήραγγας του Αποσελέμη.

Συμπερασματικά το έργο του Αποσελέμη, πέρα από τα πολλαπλά οφέλη που έχει στην τοπική κοινωνία του νησιού της Κρήτης, προσέφερε μια μεγάλη πηγή γνώσης όσον αφορά την κατασκευή των σηράγγων στον Ελλαδικό χώρο, και συγκεκριμένα στην περιοχή της Κρήτης, όπου επικρατούν παρόμοιες συνθήκες. Έτσι, σε περίπτωση που παρόμοια έργα σκοπεύουν να γίνουν στην περιοχή (όπως σήραγγες), η αποκτηθείσα γεωλογική γνώση θα συνεισφέρει αρκετά για τον εντοπισμό παρόμοιων καρστικών κοιλοτήτων αλλά και με την βοήθεια στοχευόμενων δειγματοληψιών θα είναι δυνατή η επιβεβαίωση τους. Με αυτόν τον τρόπο ο σχεδιασμός των εκάστοτε έργων θα γίνει με τρόπο τέτοιο ώστε να αποφευχθούν όσον δυνατόν περισσότερα προβλήματα.

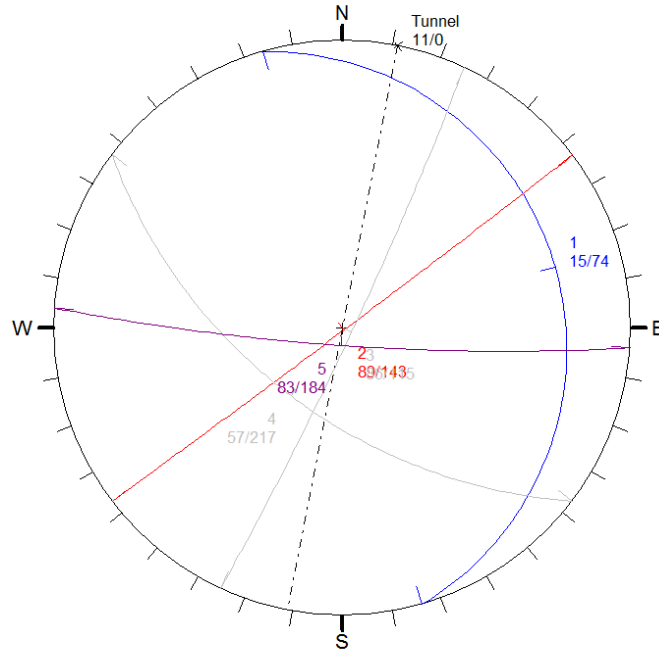
8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *FLASH NEWS* . (2016). Ανάκτηση από <http://flashnews.gr/post/295808/ston-oak-to-fragma-aposelemh-fwto>
2. INTRAKAT. (2014). *ΕΡΓΟ: ΥΔΡΕΥΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ- ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ-ΕΡΓΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟΣΕΛΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΛΑΣΙΘΙΟΥ- ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ- ΑΓΩΓΟΥ ΠΤΩΣΗΣ.*
3. INTRAKAT. (2016). *ΕΡΓΟ: ΥΔΡΕΥΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ- ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ-ΕΡΓΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟΣΕΛΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΛΑΣΙΘΙΟΥ- ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΕΦΥΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΕΓΚΟΙΛΟΥ ΣΤΗΝ Χ.Θ. 2+317.50.*
4. JAEGER-BAU. (2016). *TUNNELBAU AUF KRETA- EUNE HERAUSFORDERUNG IN VIELERLER HINSICHT. SALZBURG.*
5. RocScience. (2017). Dips v. 7.0.
6. RocScience. (2017). Unwedge v.4 .0.
7. T.G. NIKOLAOU, I. C. (2017). *EVOLUTION OF CRETAN AQUEDUCTS AND THEIR POTENTIAL FOR HYDROELECTRIC EXPLOITATION. 4th IWA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations., COIMBRA.*
8. THE ROBBINS COMPANY. (2016). Ανάκτηση από <http://www.therobbinscompany.com/products/tunnel-boring-machines/double-shield/>
9. WOLFGANG GUTTER, G. R. (2016). *TUNNELLING IN CRETE- A CHALLENGING TASK FROM A VARIETY OF ASPECTS. GEOMECHANICS AND TUNNELLING.*

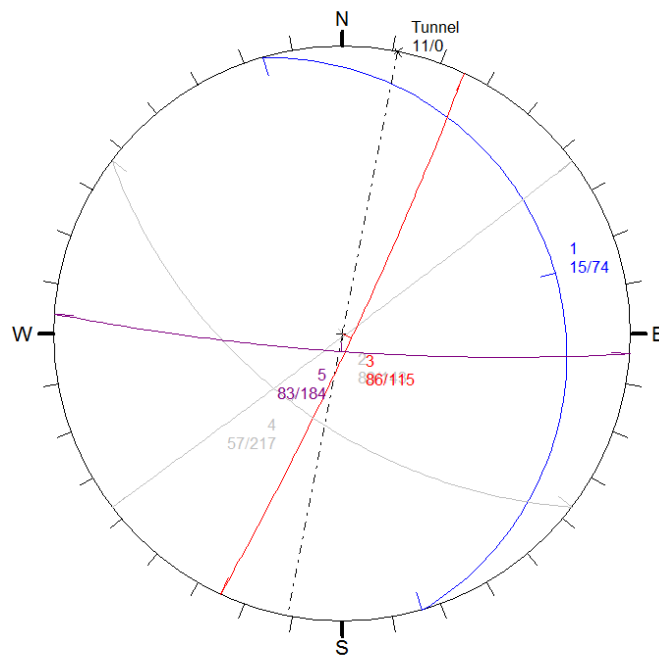
10. ΓΙΑΛΥΤΗ, Ε. (2016). ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΡΥΘΜΟΥ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ ΑΝΙΟΥΣΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ. *ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*. ΧΑΝΙΑ.
11. Ε.Μ.Π., Κ. (2016). *ΕΡΓΟ: ΥΔΡΕΥΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ- ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ-ΕΡΓΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΛΑΣΙΘΙΟΥ- ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΕΓΚΟΙΛΟΣΠΗΛΛΑΙΟ ΣΤΗΝ Χ.Θ. 2+317.50-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ*.
12. ΚΟΤΣΩΝΗΣ, Α. (2014). ΥΔΡΕΥΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ. *ΗΜΕΡΙΔΑ ΤΕΕ/ΤΑΚ*. ΗΡΑΚΛΕΙΟ.
13. Σ. ΜΙΧΑΣ, Α. ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ, Ν. ΜΑΜΑΣΗΣ, Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ - Ε.Μ.Π. (2015). ΥΔΡΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΙ ΠΤΩΣΗΣ. ΑΘΗΝΑ.
14. ΣΟΦΙΑΝΟΣ, Α.Ι. - Ε.Μ.Π. (2016). *ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ*. ΑΘΗΝΑ.
15. ΣΤΕΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ, Κ. (2016). *ΑΥΤΟΨΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ*.
16. ΦΟΥΝΤΟΥΛΑΚΗ, Ε. (2015). *ΧΑΝΙΩΤΙΚΑ ΝΕΑ*. Ανάκτηση από <http://www.haniotika-nea.gr/nero-apo-to-fragma-aposelemi-sto-iraklio-entiposiako-video-apo-psila/>

9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

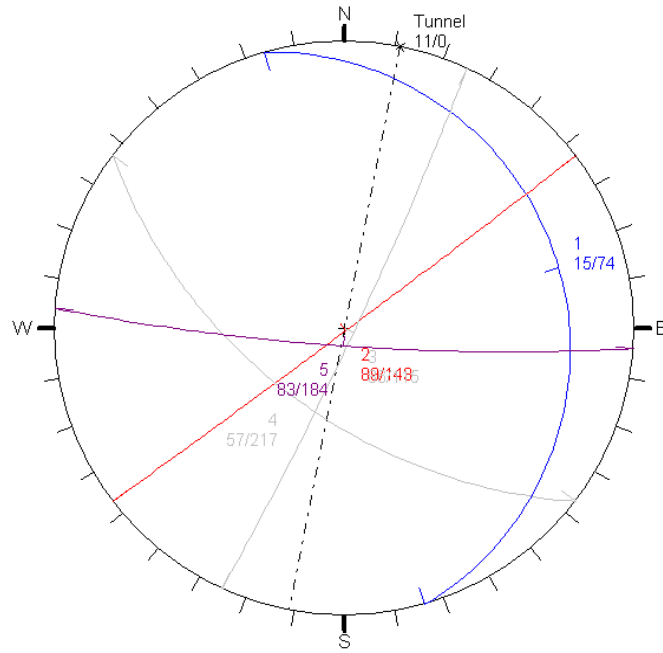
9.1 Παράρτημα Α: Ντετερμινιστική Ανάλυση



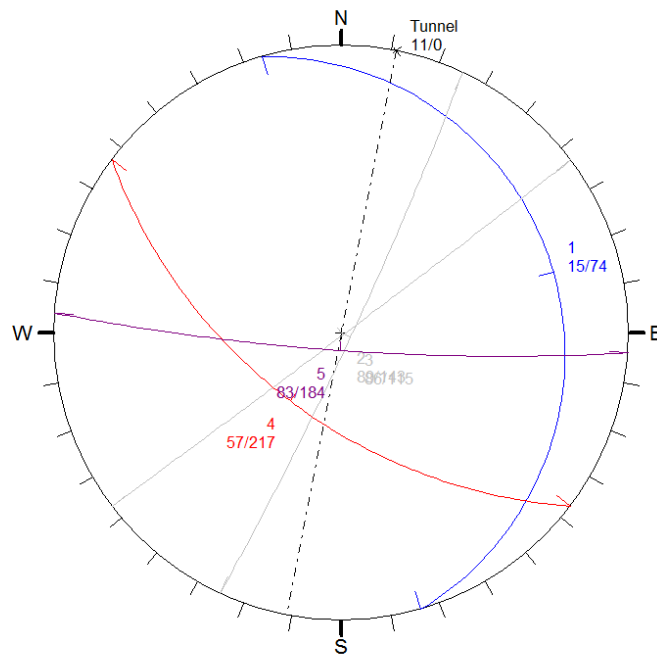
Εικόνα 55: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 1



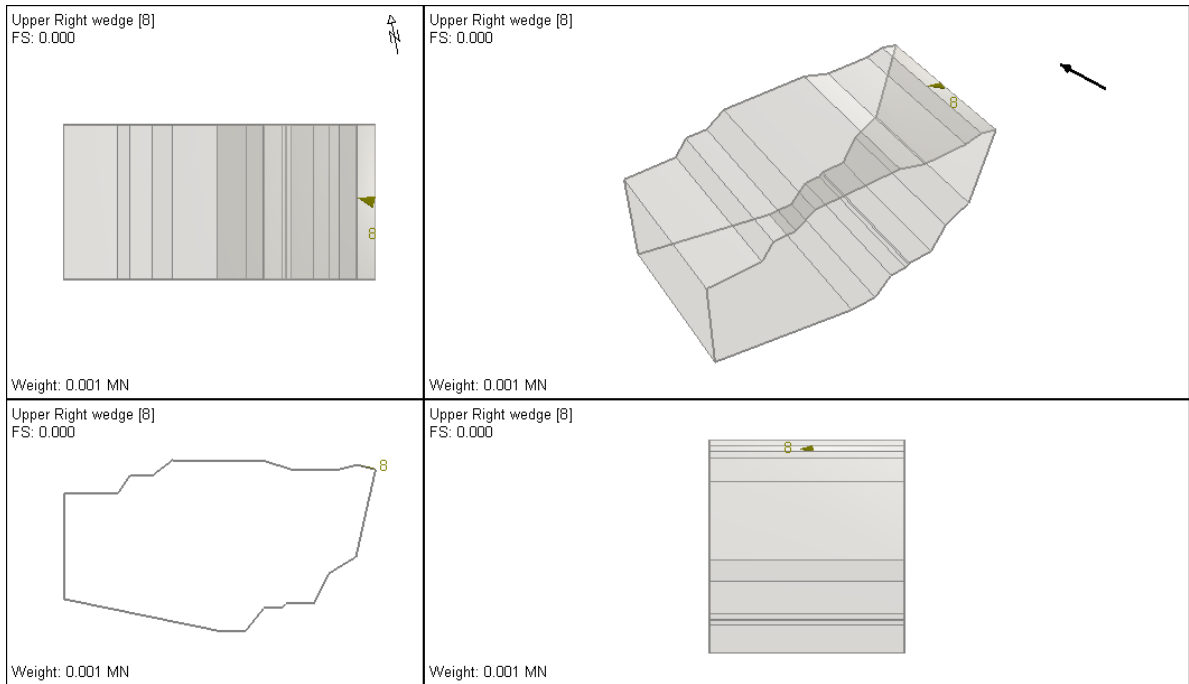
Εικόνα 56: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 3



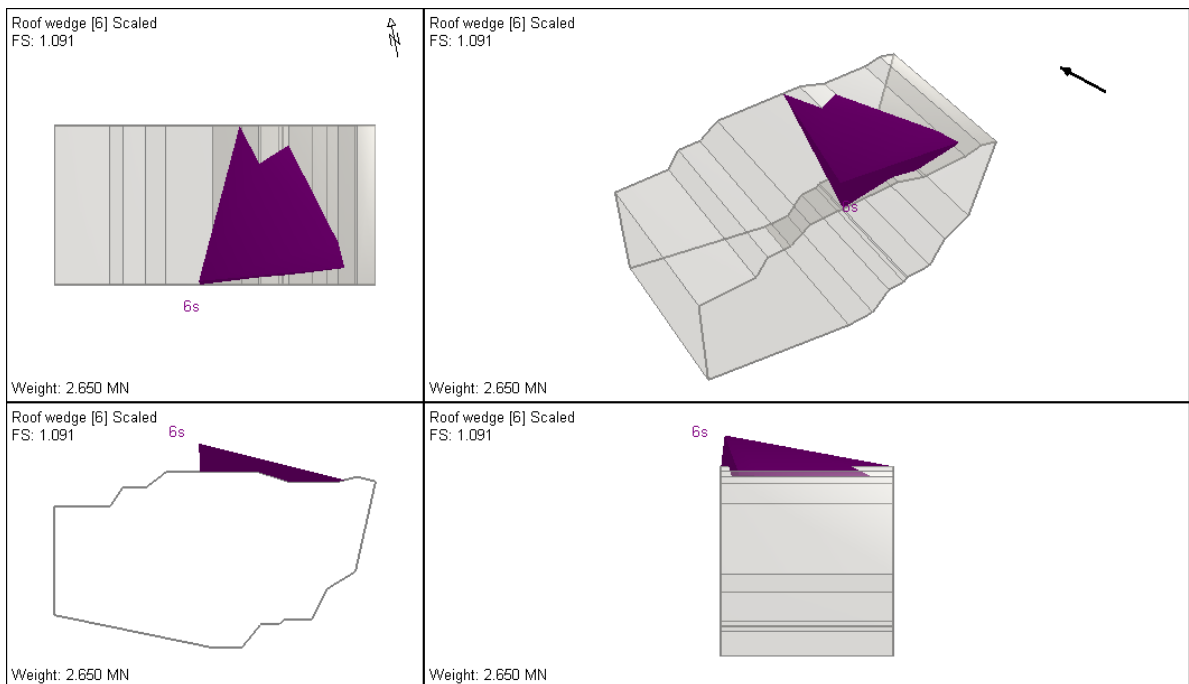
Εικόνα 57: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 4



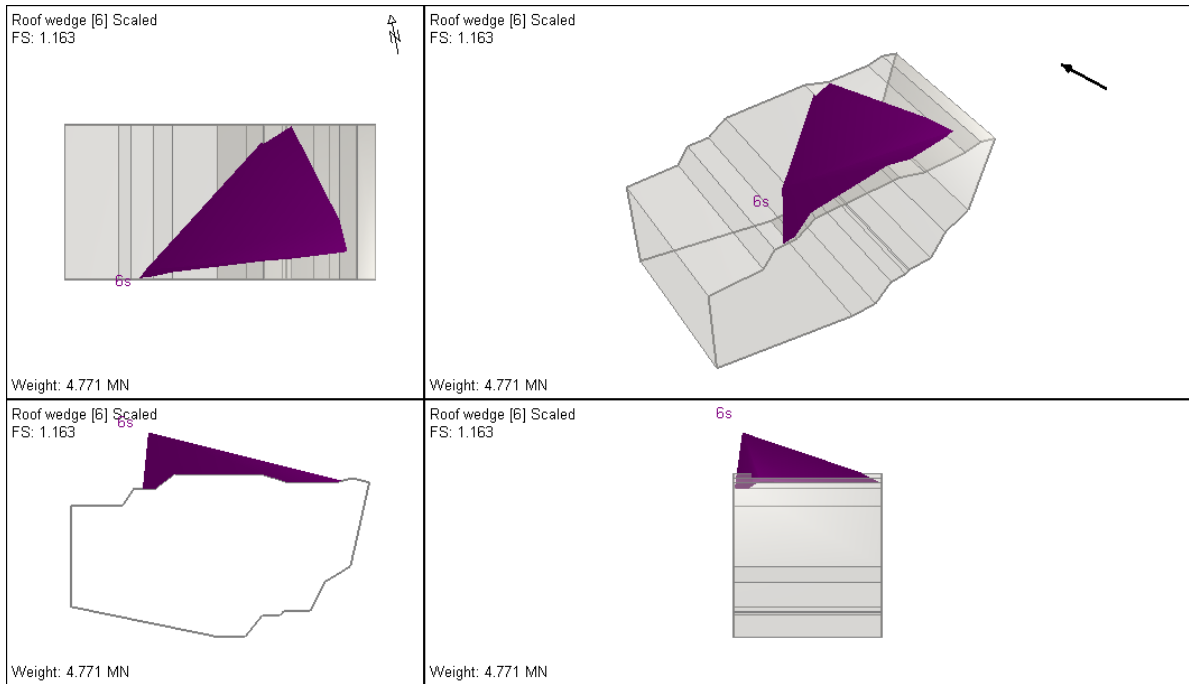
Εικόνα 58: Στερεογραφική προβολή των συνδυασμών που δημιουργούν σφήνα Συνδυασμός 5



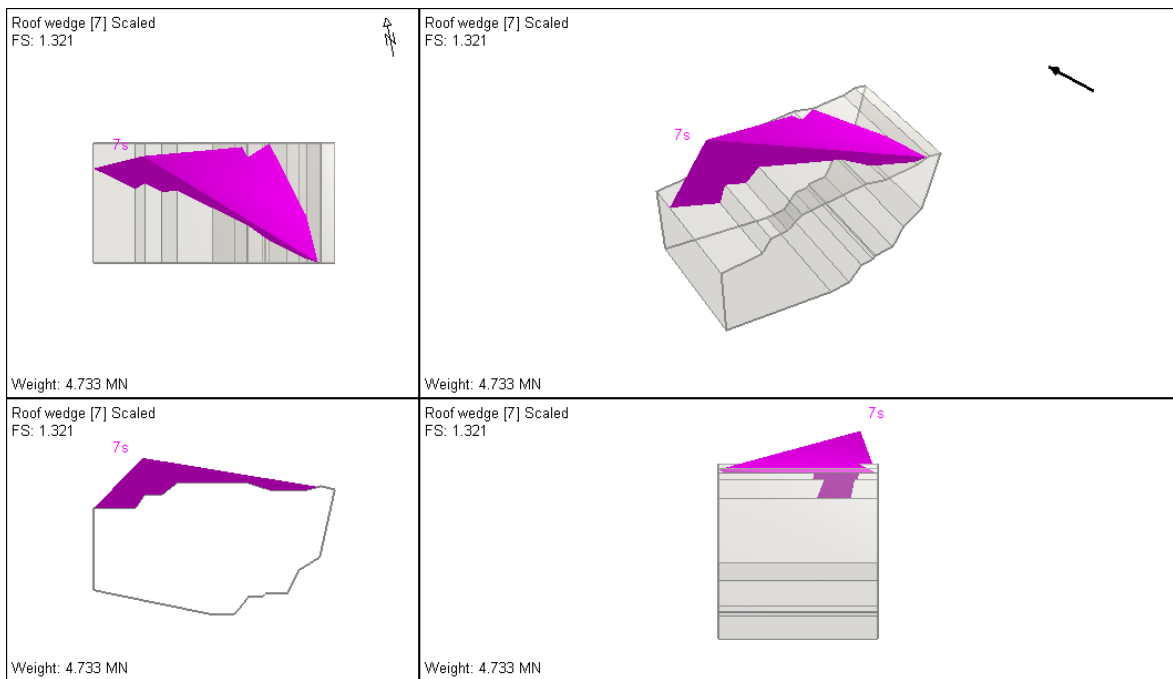
Εικόνα 59: Συνδυασμός 1



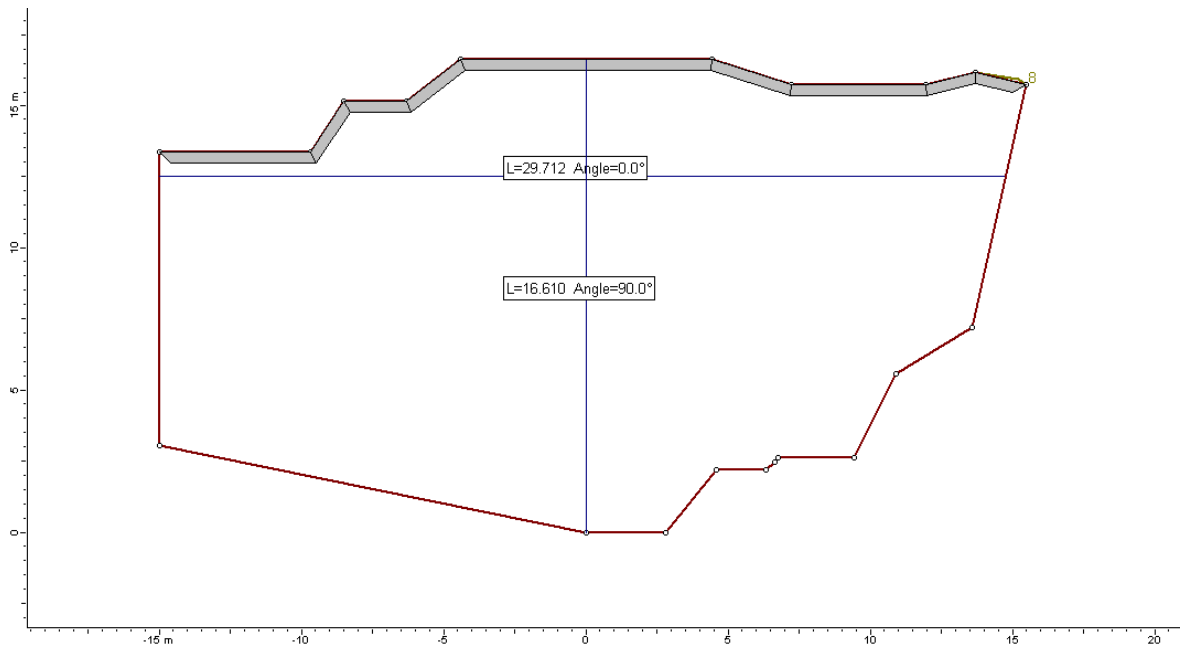
Εικόνα 60: Συνδυασμός 3



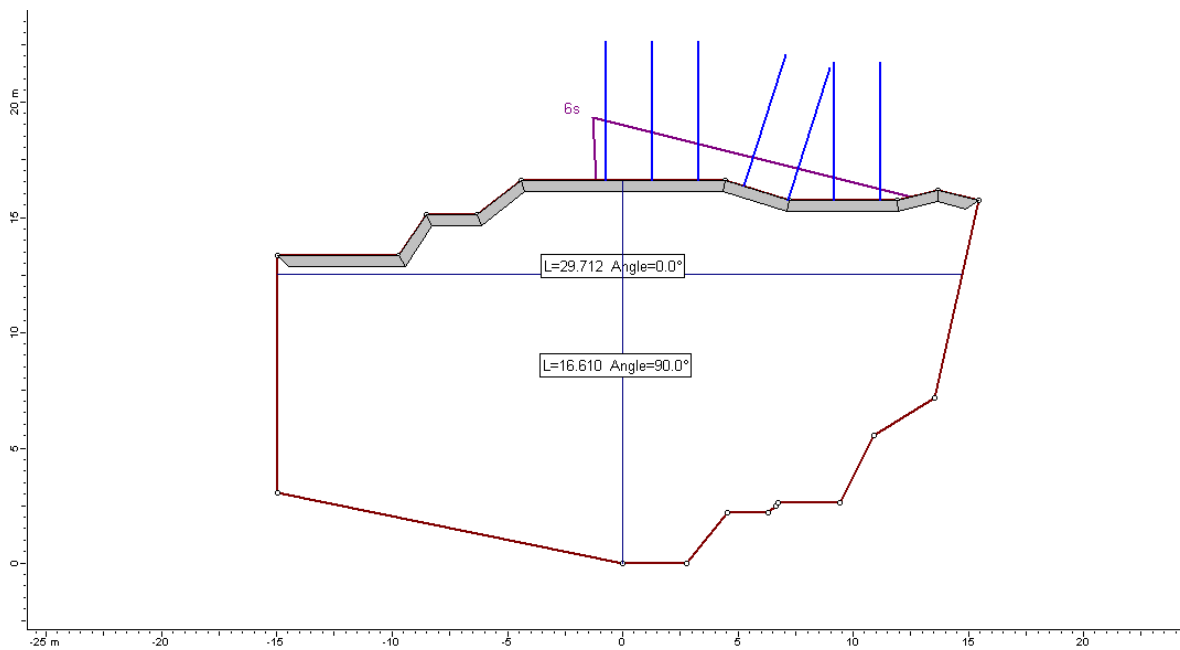
Εικόνα 61: Συνδυασμός 4



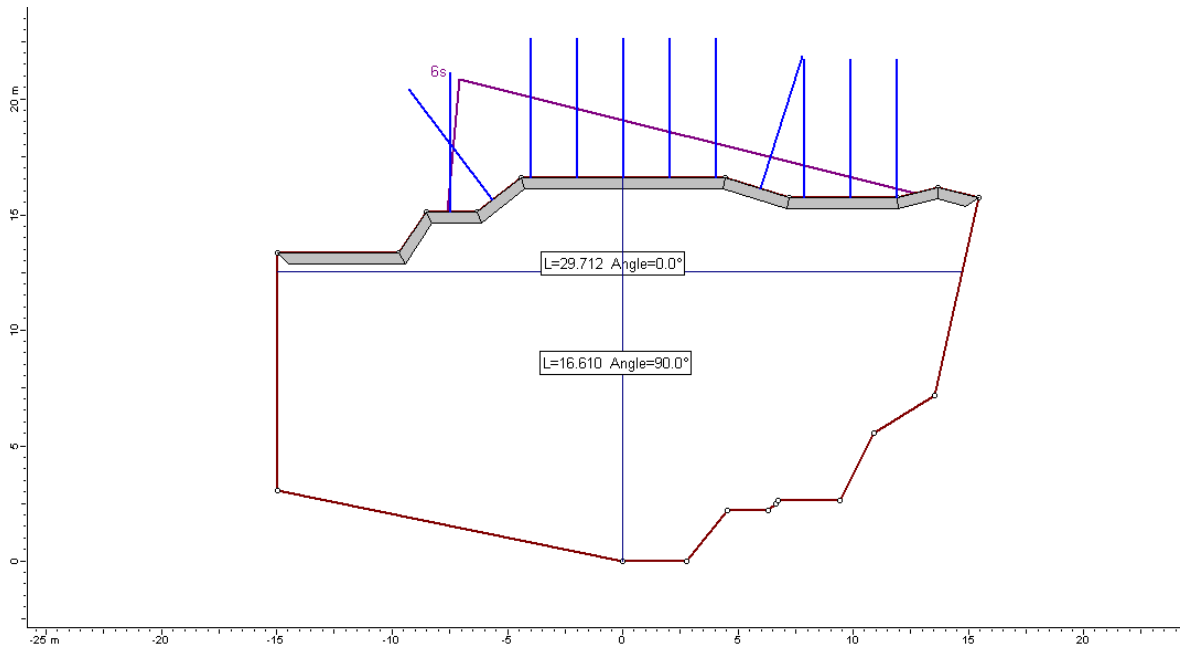
Εικόνα 62: Συνδυασμός 5



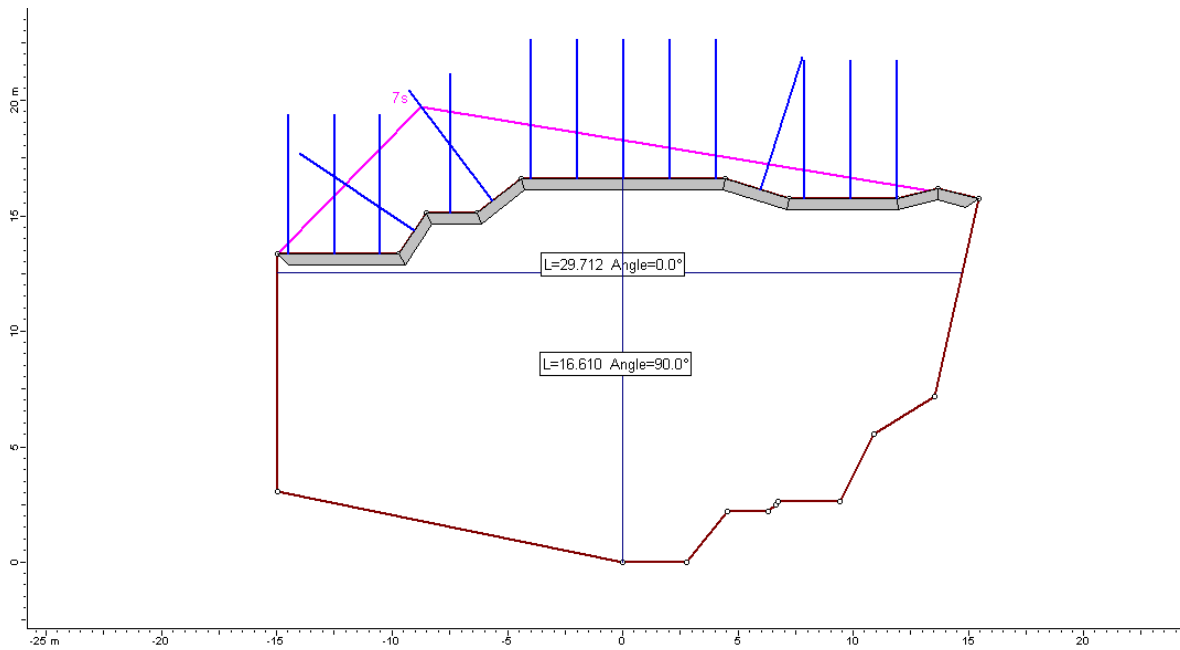
Εικόνα 63: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 1



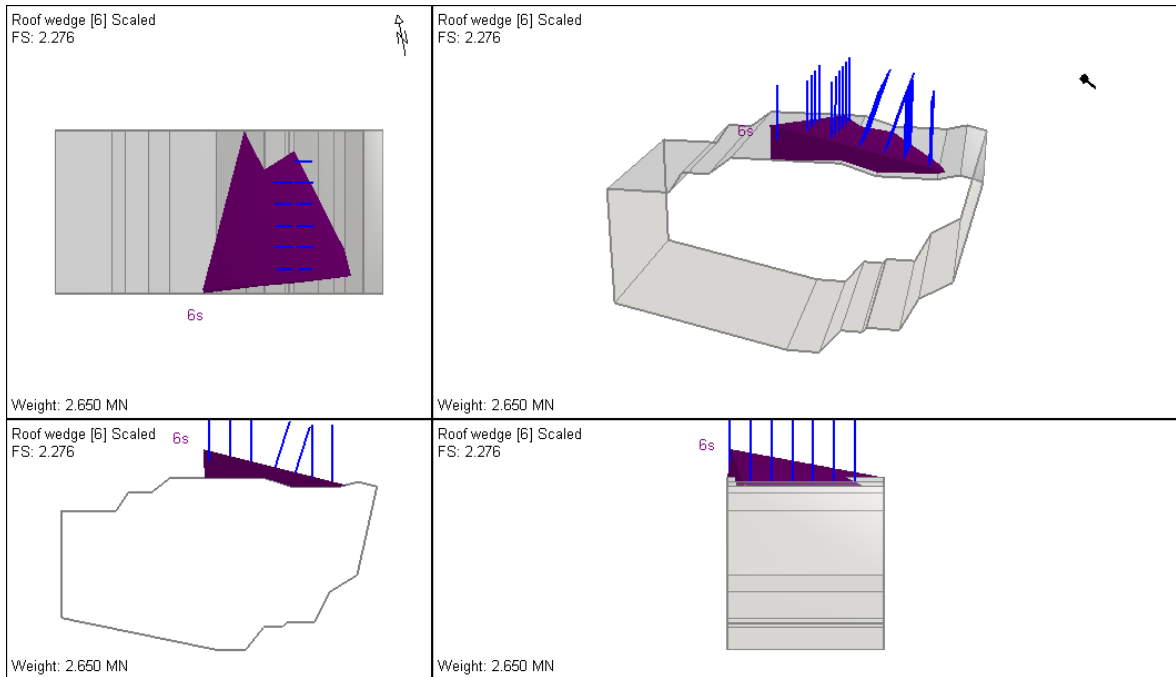
Εικόνα 64: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 3



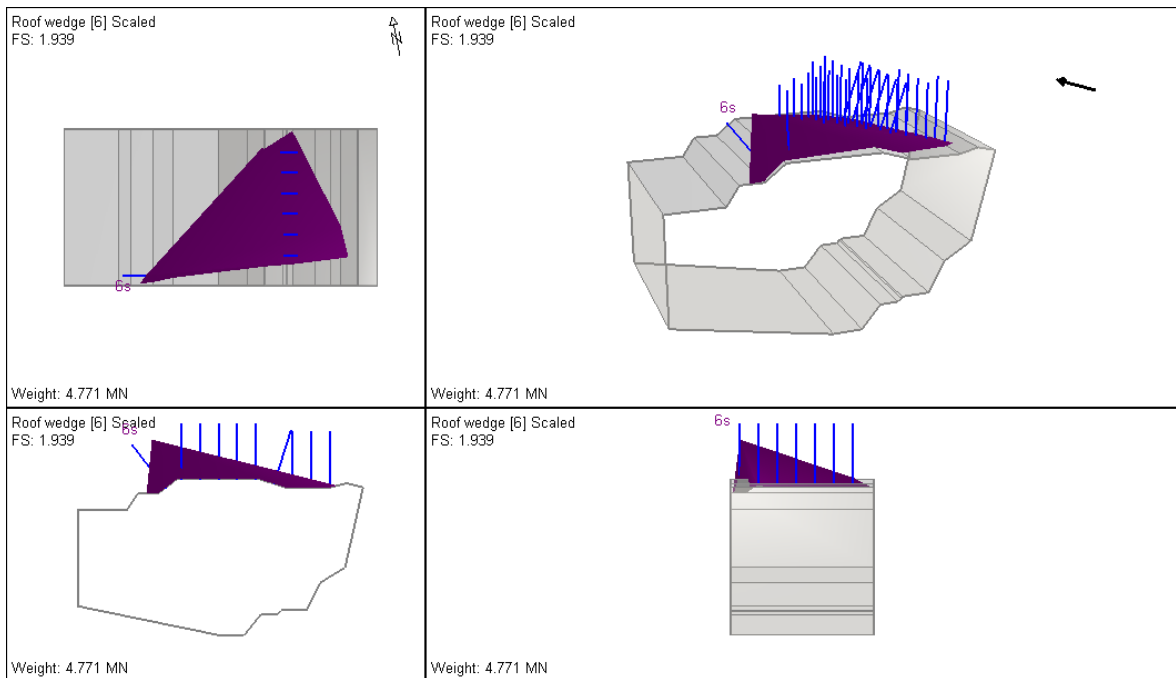
Εικόνα 65: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 4



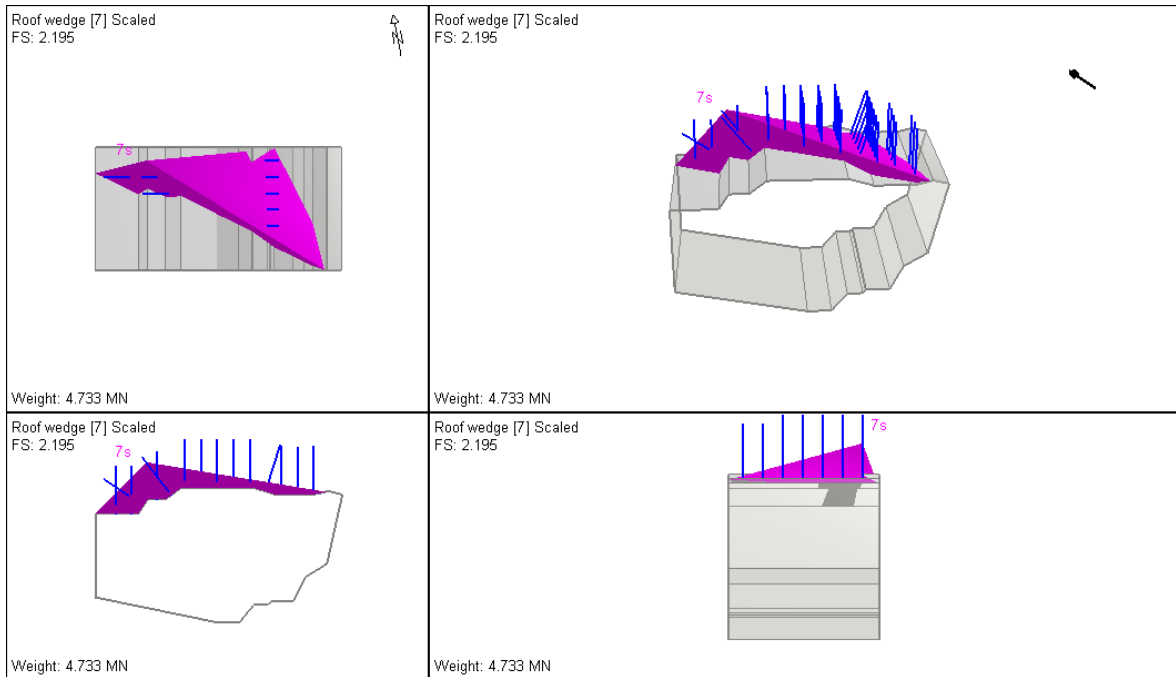
Εικόνα 66: Μέτρα υποστήριξης για τον Συνδυασμό 5



Εικόνα 67: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 3

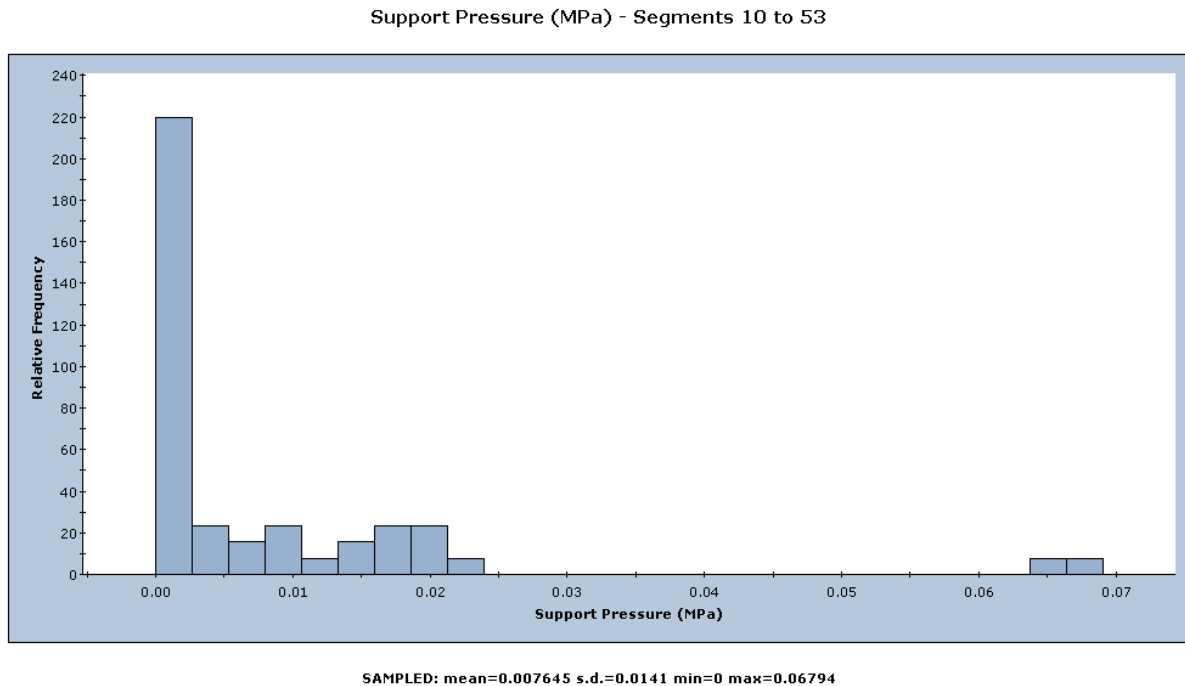


Εικόνα 68: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 4

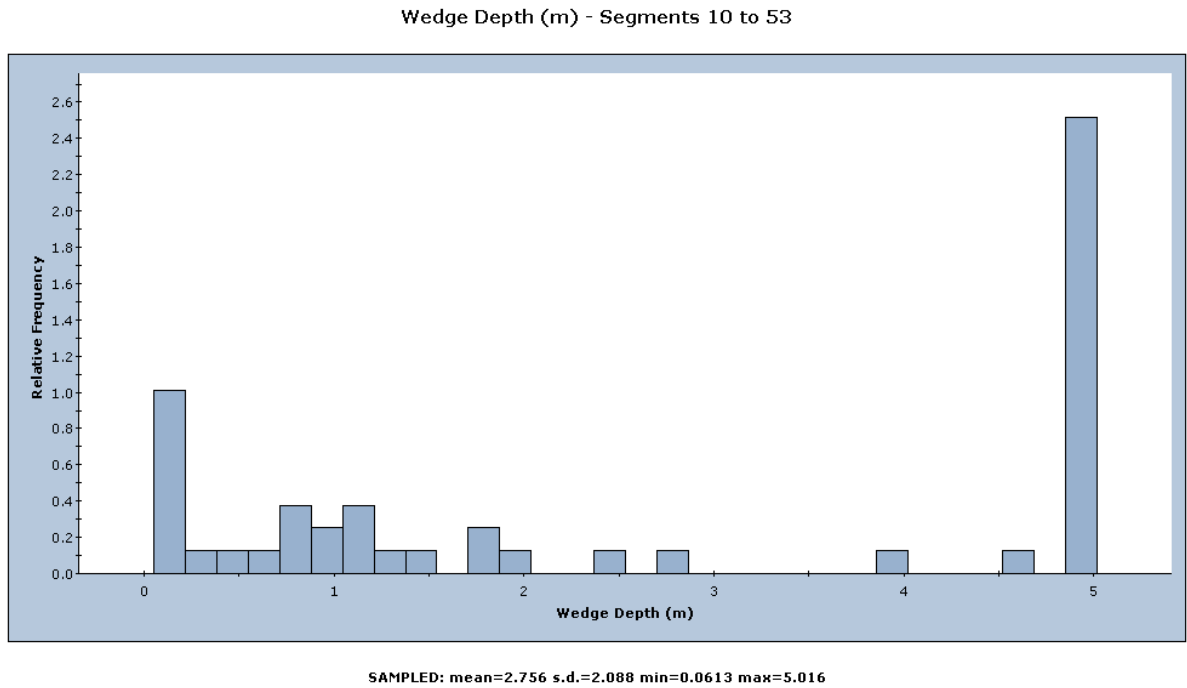


Εικόνα 69: 3D απεικόνιση με τα στοιχεία υποστήριξης για τον Συνδυασμό 5

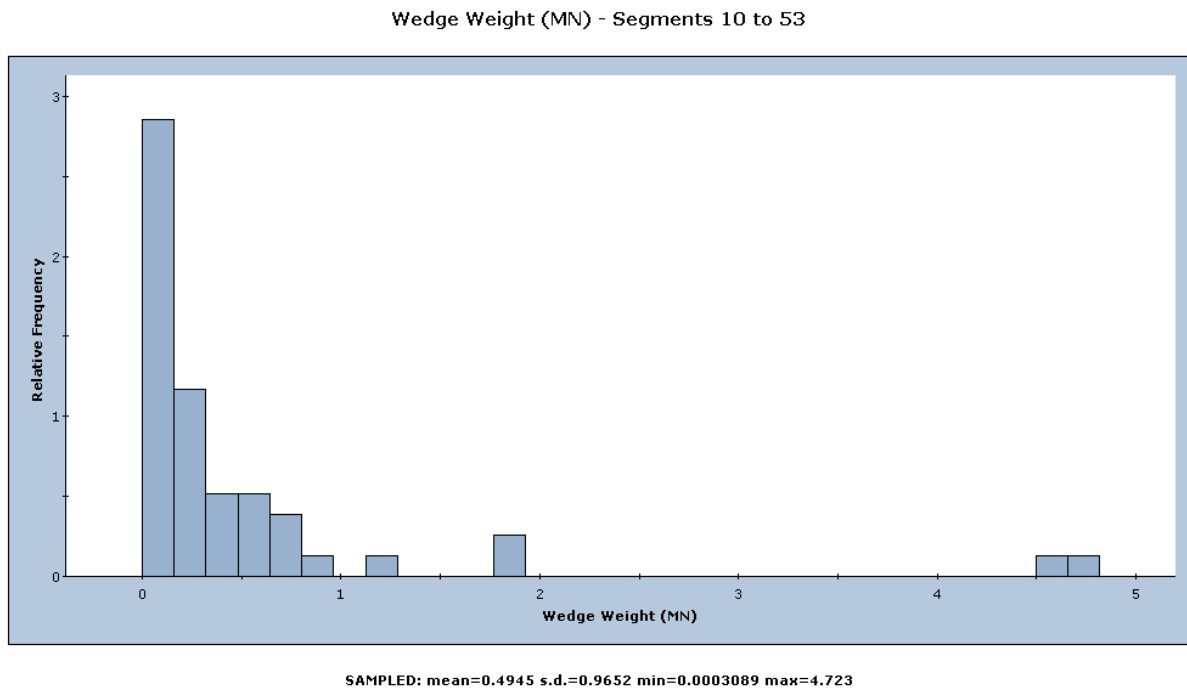
9.2 Παράρτημα Β: Πιθανολογική Ανάλυση



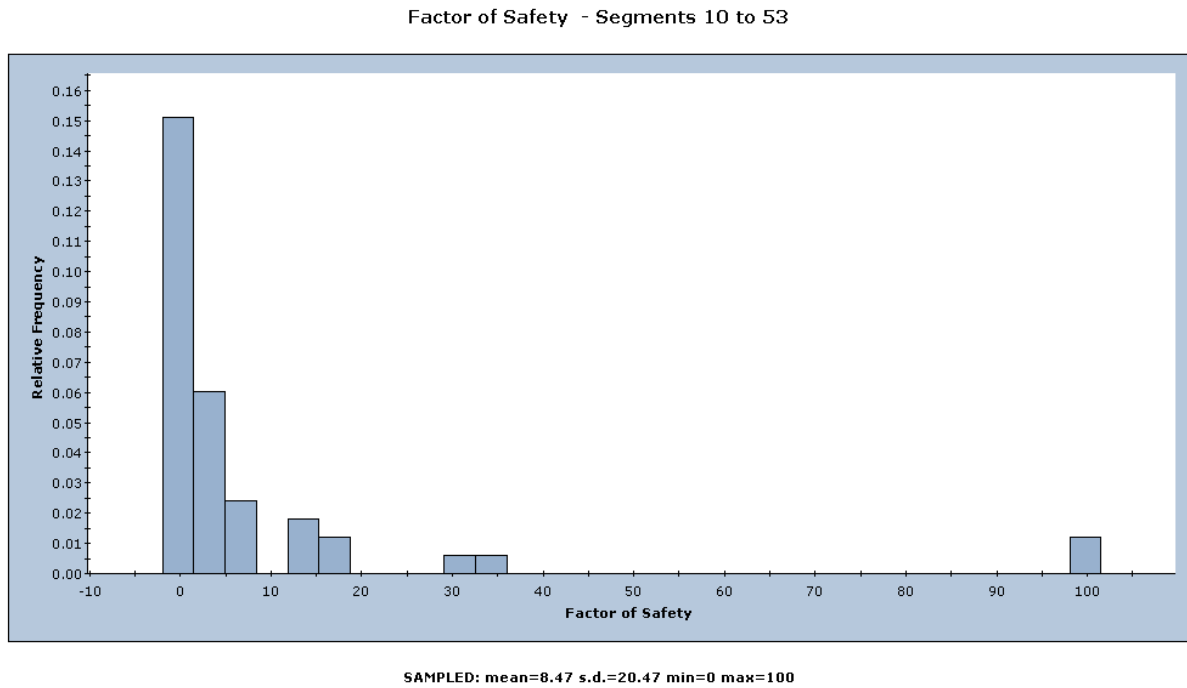
Εικόνα 70: Σχετική συχνότητα απαιτούμενης πίεσης στα διάφορα τμήματα της οροφής.



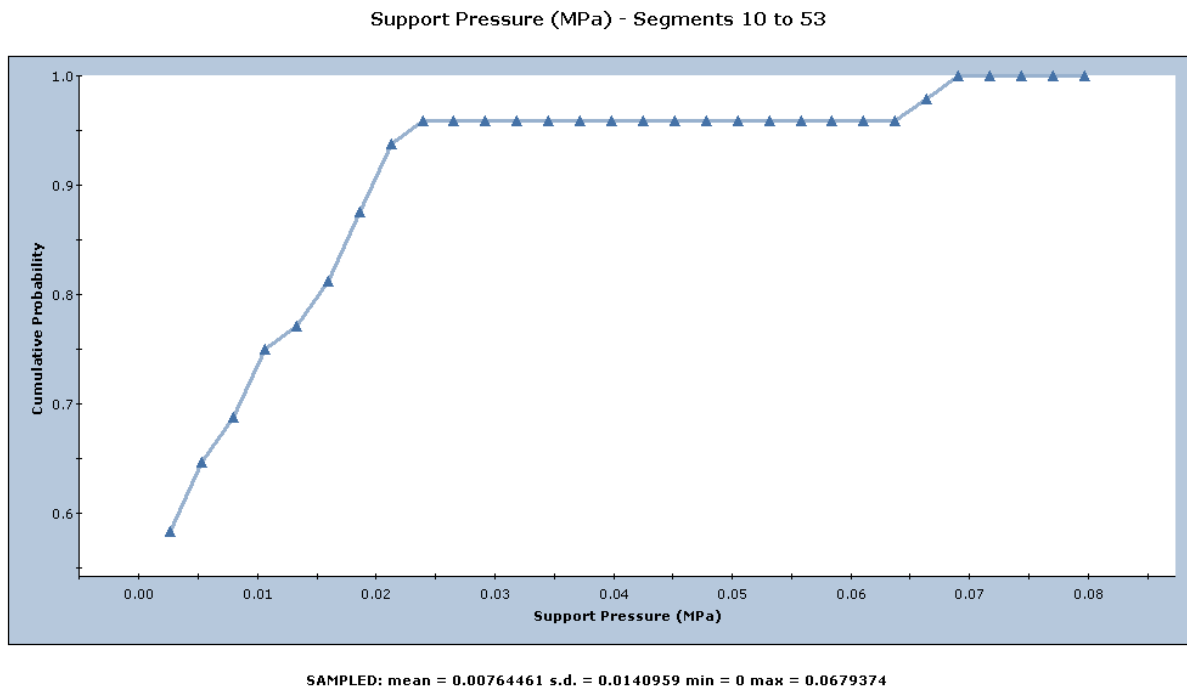
Εικόνα 71: Σχετική συχνότητα τού βάθους των βραχοσφηνών



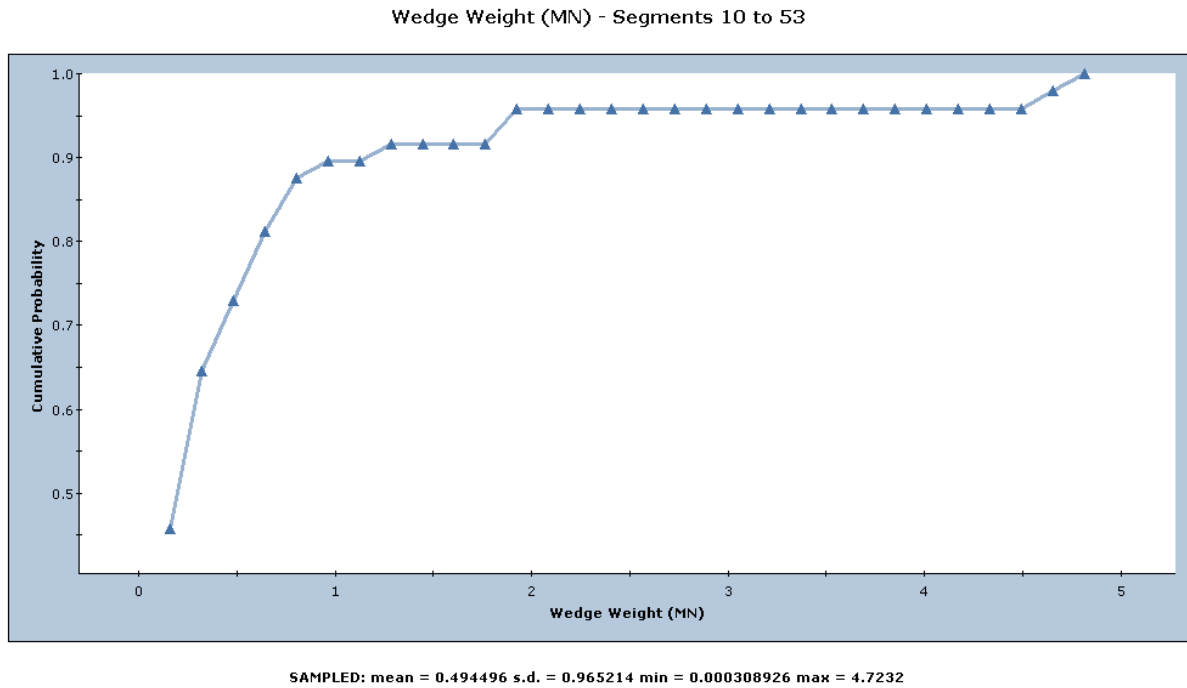
Εικόνα 72: Σχετική συχνότητα βάρους των βραχοσφηνών



Εικόνα 73: Σχετική συχνότητα των συντελεστών ασφαλείας



Εικόνα 74: Αθροιστική απαιτούμενη πίεση υποστήριξης στα τμήματα της οροφής.



Εικόνα 75: Αθροιστικό βάρος των πιθανών σφηνών στα τμήματα της οροφής