



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ.: «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**Τεχνικογεωλογική Αξιολόγηση Και Έρευνα Επί Της
Γεωτεχνικής Συμπεριφοράς Οφιολιθικών Μαζών Στην
Κατασκευή Υπογείων Έργων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Μπαλαμπάνης

Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλουργός

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ.: «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**Τεχνικογεωλογική Αξιολόγηση Και Έρευνα Επί Της
Γεωτεχνικής Συμπεριφοράς Οφιολιθικών Μαζών Στην
Κατασκευή Υπογείων Έργων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Μπαλαμπάνης,

Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλουργός

Επιβλέπων καθηγητής: Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 21/02/2022

Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Ανδρέας Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Παύλος Νομικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Βασίλειο Μαρίνο για την ανάθεση του συγκεκριμένου ενδιαφέροντος θέματος, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, τον ευχαριστώ θερμά για όλες τις εκπαιδευτικές εμπειρίες εντός και εκτός αίθουσας τις οποίες μας προσέφερε απλόχερα κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Ακόμα, οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον Δρ. Δημήτριο Γεωργίου, Διδάκτορα του Γεωτεχνικού Τομέα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για την αμέριστη βοήθειά, την καθοδήγηση, τον προσωπικό του χρόνο που διέθεσε ώστε να ολοκληρωθεί αυτή η εργασία και την άψογη συνεργασία που είχαμε παρόλο που ήταν εξ αποστάσεως.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Ανδρέα Μπενάρδο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π και Παύλο Νομικό, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., που δέχθηκαν να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα από τα βάθη της καρδιάς μου να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια με κάθε δυνατό τρόπο.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια του τελευταίου εξαμήνου φοίτησης στο πρόγραμμα σπουδών του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί, αρχικά, η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οφιολιθικών μαζών, κατά την διάνοιξη των υπογείων έργων, ταξινομώντας τες στους διαφορετικούς τύπους, που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και ακολούθως, η διενέργεια κατάλληλων αναλύσεων, με απώτερο σκοπό την παράθεση των κατάλληλων διατομών άμεσης υποστήριξης για κάθε έναν τύπο του εν λόγω σχηματισμού.

Για να επιτευχθεί ο ανωτέρω σκοπός, αρχικά, με βάση την βιβλιογραφία από έρευνες και από μελέτες έργων ορίζονται οι διαφορετικές γεωτεχνικές κατηγορίες των οφιολίθων, που είναι πιθανόν να εμφανιστούν στην κατασκευή ενός υπόγειου έργου. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- *Τύπος 1:* Μη σερπεντινωμένος οφιολίθος (περιδοτίτης – γάββρος)
- *Τύπος 2:* Σερπεντινωμένος οφιολίθος (ελαφρά αποσαθρωμένος γάββρος)
- *Τύπος 3:* Έντονα σερπεντινωμένος περιδοτίτης ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου σερπεντινίτη
- *Τύπος 4:* Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης
- *Τύπος 5:* Οφιολιθικά συμπλέγματα με σχιστοκερατόλιθους

Από αυτές επιλέγονται προς ανάλυση οι τρεις (3) πιο κοινά συναντώμενες κατηγορίες οφιολίθων σε υπόγεια έργα, οι οποίοι είναι οι Τύποι 2,3 και 4 των οφιολίθων. Ακολούθως, ποσοτικοποιούνται τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά με απώτερο σκοπό την πραγματοποίηση δισδιάστατων προσομοιώσεων με την χρήση του προγράμματος RS2, της εταιρείας RocScience.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται αφορούν παραμετρικές αναλύσεις πάνω σε μονούς κλάδους σπηραγγών, καθώς θεωρείται πως, η απόσταση των εν λόγω κλάδων είναι τέτοια, ώστε η αλληλεπίδραση τους να μην υφίσταται. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι, πρωτίστως, αναλύσεις σε υπερκείμενα $H = 150$ m και $H = 300$ m για κάθε έναν εξεταζόμενο τύπο οφιολίθου και ακολούθως διενεργούνται αναλύσεις, τόσο ώστε να εξεταστεί η άμεση επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα, ως επιπλέον

επιφόρτισης στην υποστήριξη, όσο ώστε να εξεταστεί η έμμεση επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα μέσω της απομείωσης των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σε μια περιοχή τριγύρω από την σήραγγα

Ακόμα πραγματοποιούνται περαιτέρω αναλύσεις για την περίπτωση διάνοιξης δίδυμων σηράγγων, για τον γεωτεχνικό Τύπο 3 των οφιολίθων, οι οποίες περιλαμβάνουν αναλύσεις για να εξεταστεί η επίδραση των κλάδων, αναλύσεις με άμεση επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα ως επιπλέον επιφόρτιση στην υποστήριξη των δίδυμων σηράγγων και τέλος, αναλύσεις με έμμεση επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στις εκσκαφές, μέσω της απομείωσης των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σε μια περιοχή τριγύρω από τις δίδυμες σήραγγες

Τα αποτελέσματα των ανωτέρω αναλύσεων έδειξαν πως κατά την διάνοιξη μέσα στο οφιολιθικό σύμπλεγμα αναμένονται ελάχιστες συγκλίσεις κατά την διάνοιξη εντός του Τύπου 2 των οφιολίθων, ακόμα αναμένονται μικρές συγκλίσεις κατά την διάνοιξη εντός του Τύπου 3 των οφιολίθων και τέλος, αναμένονται σημαντικές συγκλίσεις κατά την διάνοιξη εντός του Τύπου 4 των οφιολίθων.

Ακόμα, από τις αναλύσεις για να εξεταστεί η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα, είτε άμεσα ως επιπλέον φορτίο, είτε έμμεσα μέσω της απομείωσης των γεωτεχνικών ιδιοτήτων της περιοχής τριγύρω από το άνοιγμα, συμπεραίνεται πως αναμένεται ελάχιστη επίδραση αυτού κατά την διάνοιξη εντός του Τύπου 2 των οφιολίθων, μέτρια επίδραση αυτού κατά την διάνοιξη εντός του Τύπου 3 των οφιολίθων και τέλος αναμένεται μεγάλη επίδραση του υδροφόρου κατά την διάνοιξη εντός του Τύπου 4 των οφιολίθων.

Τέλος, μέσω των αναλύσεων της περίπτωσης των δίδυμων σηράγγων, συμπεραίνεται ότι η επίδραση της διάνοιξης του ενός κλάδου στον άλλον είναι πολύ μικρή, ακόμα πως η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα ως άμεσο φορτίο στις επενδύσεις σήραγγας έχει μέτρια επίδραση στην αύξηση των συγκλίσεων και τέλος η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα ως έμμεσο φορτίο επιφέρει αξιοσημείωτη αύξηση των συγκλίσεων.

Extended Abstract

This dissertation was conducted during the last semester of study in the curriculum of postgraduate program “Design and Construction of Underground Spaces” at the National Technical University of Athens. The purpose of the master's thesis is, firstly, the technical-geological evaluation of the behavior of the ophiolite masses, during the excavation of underground spaces, classifying them in the different types that exist in the literature and then, to perform appropriate analyzes, with the ultimate goal of disclosure of the appropriate direct support measures for each type of ophiolites.

The formation of ophiolites is characterized a particularly heterogeneous formation, because during its creation, complex geological processes occur, in which different formations participate, with variable degree of tectonic stress and with variable the main characteristic of ophiolites, the degree of “serpentinization”.

As analyzed extensively in the following chapters, the formation of ophiolites is divided into five (5) types, depending on the presented geotechnical characteristics. These types are the following:

- *Type 1*: Non serpentinized ophiolites (peridotite – gabbro)
- *Type 2*: Serpentinized ophiolites (slightly disintegrated gabbro)
- *Type 3*: Heavily serpentinized peridotite or serpentinite with possible zones of laminated serpentinite
- *Type 4*: Laminated serpentinite
- *Type 5*: Ophiolite complexes with schists

Based on the geological and geotechnical data of tunnel cases from Greece, namely the Kallidromo tunnel, the Othris tunnel and the Tempi T3 tunnel, which have been opened within the ophiolite complexes and will be developed extensively in Chapter 4, it is concluded that the most common ophiolite types, when opening an underground project, are the Types 2, 3 and 4. It must be noted, however, that the above conclusion is not a panacea for every case of tunnelling in ophiolite formations. In every different case, the appropriate geotechnical and geological surveys must be carried out in detail, in order to gather all the necessary data for the excavating formation.

According to the geotechnical properties that characterize each type of ophiolite and will be developed in Chapter 3, it can be safely concluded that the Type 1 has better

geotechnical characteristics than Type 2, hence the developing conditions of tunnel excavation within the Type 1 are considered more favorable than Type 2, and, so, are expected minimal to zero convergences. Type 5 of ophiolites, based on its geotechnical properties, is considered that the developing conditions of its excavation are identical, either with those of Type 4, if the schist character of the schists prevails, or with those of Type 3, if the rock mass is prevailed by massive pieces of solid ophiolite. Thus, it is finally concluded that the three (3) examined types of ophiolites, clearly describe all possible occurrences of the ophiolite complex, so the proposed measures of immediate support are widely applicable to all types of ophiolites.

The final proposed direct support measures were obtained by performing two (2) analyzes for each category of ophiolites, one (1) for supernatant height of $H = 150\text{m}$ and one (1) for supernatant height of $H = 300\text{m}$. These heights were chosen, as they reflect the usual pressures of the geomaterials during the tunneling in ophiolite formations. It is worth noting that the analyzes were carried out in single tunnels, as it is considered that the distance between the twin tunnels is long enough, that their interaction does not exist. For these analyses the applied direct support measures are mentioned in detail in Paragraph 5.2.3.

In addition to the above basic analyzes, more analyzes were performed to examine the effect of one branch on the opening of the second, in the case of twin tunnels, while analyzes were also performed to examine the effect of the aquifer on the measures of direct support, either directly, through the effect of a distributed load on the direct support, as well as indirectly, through a weakened area (Weak Zone) around the opening. This area is considered to have arisen as there was an increased flow of water and due to the fragmentation of the rock mass brought about the "rinsing" of the geomaterial.

- *For Type 2 of Ophiolites:*

The basic analyzes showed that during the excavation in Type 2 of ophiolites for both supernatural heights, no particular excavation problems are expected, as the rock mass generally has good geotechnical characteristics. Particular attention should be given, in order to control any possible individual gravity failure. Furthermore, the calculations carried out to examine the failure of the tunnel face, showed that the face will remain stable throughout the excavation.

Convergences «u» (cm)		
Spot	Type 2 (150m)	Type 2 (300m)
Crown	0,83	1,77
Right Side	0,73	1,92
Left Side	0,72	1,69
Floor	0,72	1,89

Table 1. Final convergence results for Type 2 of ophiolites for H = 150m and H = 300m.

- For Type 3 of Ophiolites:

The conducted analyzes for the excavation of Type 3 of ophiolites showed that small to moderate convergences are expected for the two supernatural heights, as the rock mass has moderate geotechnical characteristics. Tunneling in this particular type requires a vigilance during the excavation, due to the developing squeezing rock phenomenon. Furthermore, the calculations carried out to examine the failure of the tunnel face, showed that the face will remain stable throughout the excavation.

Convergences «u» (cm)		
Spot	Type 3 (150m)	Type 3 (300m)
Crown	2,67	5,24
Right Side	3,04	5,81
Left Side	3,04	5,80
Floor	4,24	7,80

Table 2. Final convergence results for Type 3 of ophiolites for H = 150m and H = 300m.

- For Type 4 of Ophiolites:

The analyzes carried out during the excavation of Type 4 of ophiolites showed that for the two supernatural heights moderate to increased convergences are expected, especially in the two floors. So, from the conducted analyzes, tunneling in Type 4 of ophiolites requires special care, because this type of ophiolite possesses the poorest geotechnical characteristics and it develops the phenomenon of “squeezing rock”. The

developing convergences will be controlled by the support measures implemented. Furthermore, the calculations carried out to examine the failure of the tunnel face, showed that the face will not remain stable and will fail, which is why fiberglass bolts were applied in the A' phase throughout the excavation.

Convergences «u» (cm)		
Spot	Type 4 (150m)	Type 4 (300m)
Crown	12,29	15,52
Right Side	10,03	9,32
Left Side	10,09	9,32
Floor	31,40	37,41

Table 3. Final convergence results for Type 3 of ophiolites for $H = 150m$ and $H = 300m$.

- For the effect of the distance of the branches:

The effect of the distance of the branches on the tunnelling is examined only for Type 3 with supernatants $H = 300m$, as it possesses the most frequently occurring geotechnical conditions. For the analysis, the centers of the twin tunnels are 40 m apart, as is the case, during the first measures of the twin road tunnels of Mount Othris. From Table 5, it is observed that due to the opening of the second branch (right) there is no significant interaction with the first (left branch). Nevertheless, from Table 4 it is observed that the developing convergences are increased by 1 to 2 cm, compared to the opening of the single branch.

Twin Tunnels of Type 3 (300m)		
Convergences «u» (cm)		
Spot	Left Branch	Right Branch
Crown	6,08	6,18
Right Side	5,88	6,41
Left Side	6,34	5,98
Floor	7,54	7,60

Table 4. Final convergence results of the twin tunnels for Type 3 for $H = 300$.

	Stage	Interaction
Crown	<i>Support A' phase right branch</i>	+0,61 cm
	<i>Support B' phase right branch</i>	+0,25 cm
Sides	<i>Support A' phase right branch</i>	+0,48 cm
	<i>Support B' phase right branch</i>	-0,33 cm
Floor	<i>Support A' phase right branch</i>	-0,42 cm
	<i>Support B' phase right branch</i>	+0,08 cm

Table 5. Interaction in the first branch due to the excavation of the second branch.

- For the effect of the aquifer:

For the analyzes of the two cases of the aquifer, the cases of Type 3 with supernatants $H = 300\text{m}$, of Type 4 with supernatants $H = 300\text{m}$, as well as the case of the twin tunnels of Type 3, developed in the previous paragraph, are selected. These cases represent the most unfavorable cases, which are more likely to occur in tunnel openings. For analyzes with the application of hydrostatic pressure, the aquifer is considered to be located 50 m above the tunnels.

- *For Type 3 of Ophiolites:*

From the analyzes applying hydrostatic pressure, it can be concluded that, in general, when tunneling in this type of rock mass, given the effect of the aquifer on the whole opening, moderate convergences are expected on the sides and the tunnel face.

Type 3 (300m)		
Convergences «u» (cm)		
Spot	Without hydrostatic pressure	With hydrostatic pressure
Crown	5,24	6,78
Right Side	5,81	7,40

Left Side	5,80	7,38
Floor	7,80	10,06

Table 6. Comparative results of final convergences for Type 3 for H = 300m with and without hydrostatic pressure.

From the analyzes, applying the weakened zone, it can be concluded that during the tunneling in this type of rock mass, given the effect of the impairment zone in an area around the opening, moderate to increased convergences are expected on the sides, floor and face of the excavation.

Type 3 (300m)		
Convergences «u» (cm)		
Spot	Without Weak Zone	With Weak Zone
Crown	5,24	7,70
Right Side	5,81	9,49
Left Side	5,80	9,33
Floor	7,80	15,02

Table 7. Comparative results of final convergences for Type 3 for H = 300m with and without the Weak Zone.

○ For Type 4 of Ophiolites:

From the performed analyzes can be concluded that during the excavation in this type of rock mass, given the effect of the aquifer on the whole opening, particularly increased convergences are expected on the sides, floor and tunnel face. The final total convergences of the cases are increased a few tens of centimeters, and so they are not considered acceptable, given the implemented support measures. So, in every case a redesign of the immediate support measures is required.

Type 4 (300m)		
Convergences «u» (cm)		
Spot	Without hydrostatic pressure	With hydrostatic pressure
Crown	15,52	25,55
Right Side	9,32	15,78
Left Side	9,32	15,78

Floor	37,41	48,16
-------	-------	-------

Table 8. Comparative results of final convergences for Type 3 for H = 300m with and without hydrostatic pressure.

From the analyzes performed, it can be concluded that during the excavation in this type of rock mass, given the effect of the weakened zone in an area around the opening, large convergences are expected on the sides, floor and face of the excavation. The final total convergences of the cases are increased of a few tens of centimeters, so they are not considered acceptable, given the implemented support measures. So, in every case a redesign of the immediate support measures is required.

Type 4 (300m)		
Convergences «u» (cm)		
Spot	Without Weak Zone	With Weak Zone
Crown	15,52	21,95
Right Side	9,32	14,34
Left Side	9,32	14,25
Floor	37,41	56,68

Table 9. Comparative results of final convergences for Type 3 for H = 300m with and without the Weak Zone.

- For the twin tunnels of Type 3 of ophiolites:

Taking into account the results of the simulations with the applied support measures, it can be concluded that in general when excavating in this type of rock mass, given the effect of the aquifer onto both openings, moderate convergences are expected on the sides and faces.

Twin Tunnels - Type 3 (300m)				
Convergences «u» (cm)				
	<i>Without hydrostatic pressure</i>		<i>With hydrostatic pressure</i>	
Spot	Left Branch	Right Branch	Left Branch	Right Branch
Crown	6,08	6,18	6,65	6,79

Right Side	5,88	6,41	6,37	7,05
Left Side	6,34	5,98	6,94	6,51
Floor	7,54	7,60	8,42	8,49

Table 10. Comparative results of final convergences for the twin tunnels of Type 3 for $H = 300\text{m}$ with and without hydrostatic pressure.

Taking into account the results of the simulations with the applied support measures, it can be concluded that in general when excavating in this type of rock mass, given the effect of the weakened zone around both openings, moderate convergences are expected on the sides and front and raised to the floor.

Twin Tunnels - Type 3 (300m)				
Convergences «u» (cm)				
	<i>Without Weak Zone</i>		<i>With Weak Zone</i>	
Spot	Left Branch	Right Branch	Left Branch	Right Branch
Crown	6,08	6,18	8,38	8,96
Right Side	5,88	6,41	8,99	9,34
Left Side	6,34	5,98	9,00	10,30
Floor	7,54	7,60	14,00	14,70

Table 11. Comparative results of final convergences for the twin tunnels of Type 3 for $H = 300\text{m}$ with and without Weak Zone.

Finally, from the above analyzes, the proposed direct support measures for Types 2, 3 and 4 of the ophiolites can be defined. These sections are presented in Table 12 and describe the philosophy of the support to be followed.

The proposed measures are developed around the philosophy of heavier, rigid support, which focuses on placing particularly heavy cross-sections of immediate support measures, such as large thickness of shotcrete, high load-bearing frames and better-

quality steel rock bolts, which measures will be able to receive the entire load of the deposited rock mass.

In conclusion, it should be noted that based on the philosophy that describes the opening of each type, each individual case must be investigated in detail, so as to quantify the measures of immediate support. Of course, because each tunnel is considered a different case, where necessary, further support measures can be added and / or modified according to the excavating requirements, in order to increase the safety during the drilling and operation of the underground opening.

Recommended Support Measures			
Ophiolite Type	Geotechnical Behavior	Support Measures	
		Shell	Face
Type 2: Serpentinized ophiolites (slightly disintegrated)	Generally simple excavating conditions, with low pressures and with little to no convergence. Particular attention should be paid to gravitational failures (e.g., wedges)	<ul style="list-style-type: none"> • Application of low thickness shotcrete (e.g., 20cm) • Installation of rock-bolts with relatively sparse grid • If necessary, application of a light steel set (e.g., Lattice - Girder) 	Face support is not considered necessary
Type 3: Heavily serpentinized peridotite or serpentinite with possible zones of laminated serpentinite	Moderate excavating conditions, with increased pressures and with small to moderate convergences. Particular attention should be paid to gravitational failures (e.g., wedges), but also to "squeezing rock" phenomena, due to its increased serpentinization, while the phenomena of floor heave must also be monitored	<ul style="list-style-type: none"> • Application of temporary and final invert • Application of large thickness shotcrete, with further increase of it on the floor • Installation of rock-bolts with relatively dense grid and long length • Application of heavy steel sets (e.g., HEB 160) • Installation of elephantfoot 	Calculation of the face stability must be conducted and where necessary, fiberglass bolts and forepoling umbrella should be applied

<p style="text-align: center;">Type 4: Laminated serpentinite</p>	<p>Difficult excavating conditions, with very high pressures and very large convergences. Particular attention should be paid to the "squeezing rock" phenomena of the rock mass, due to its increased serpentinization, while the effects of floor heave must also be controlled.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Application of temporary and final invert • Application of very large thickness shotcrete, with further increase of it on the floor • Installation of rock-bolts with relatively dense grid, long length and with large bearing capacity • Application of heavy steel sets (e.g., HEB 180) • Installation of elephantfoot 	<p>Fiberglass bolts of large bearing capacity and very dense grid and also forepoling umbrella must be installed</p>
--	--	---	--

Table 12. Immediate support measures of each ophiolite type.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	ii
Extended Abstract	iv
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
1.1 Γενικά Στοιχεία	18
1.2 Αντικείμενο - Σκοπός Διπλωματικής Μεταπτυχιακής Εργασίας	18
1.3 Ακολουθούμενη Μεθοδολογία Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας ..	19
1.4 Άντληση Των Δεδομένων.....	21
2 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ	22
2.1 Μέθοδοι Διάνοιξης.....	22
2.1.1 Διάνοιξη Σηράγγων Με Τη Συμβατική Μέθοδο	22
2.1.2 Εφαρμογή Της Συμβατικής Μεθόδου	26
2.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης.....	29
2.2.1 Επένδυση Από Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα.....	29
2.2.2 Μεταλλικό Πλέγμα Και Μεταλλικές Ίνες Οπλισμού	30
2.2.3 Αγκύρια Βράχου	31
2.2.4 Χαλύβδινα Πλαίσια.....	33
2.2.5 Μέτρα Υποστήριξης Του Μετώπου Της Σήραγγας.....	35
2.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Σηράγγων	37
2.3.1 Πειραματικές Μέθοδοι Ανάλυσης	38
2.3.2 Εμπειρικές Και Ημι-Εμπειρικές Μέθοδοι	38
2.3.3 Αναλυτικές Μέθοδοι	39
2.3.4 Αριθμητικές Μέθοδοι.....	39
2.4 Παράμετροι Σχεδιασμού	41
2.5 Συμπεριφορά Βραχόμαζας - Μηχανισμοί Αστοχίας.....	43
2.5.1 Μηχανισμοί Αστοχίας Ανυποστήρικτης Διατομής.....	44

3	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ & ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.....	48
3.1	Γενικά Στοιχεία	48
3.2	Γεωλογικό Πρότυπο Οφιολίθων	48
3.2.1	Γεωλογικό Περιβάλλον	48
3.2.2	Λιθολογία	49
3.2.3	Τεκτονική	50
3.2.4	Αποσάθρωση	51
3.2.5	Υδρογεωλογικό Καθεστώς.....	52
3.2.6	Οφιολιθικές Εμφανίσεις.....	53
3.3	Τεχνικογεωλογικό – Γεωτεχνικό Πρότυπο Οφιολίθων.....	55
3.3.1	Γενικά Στοιχεία.....	55
3.3.2	Τεχνικογεωλογικά – Γεωτεχνικά Χαρακτηριστικά Οφιολίθων	55
3.3.3	Τεχνικογεωλογικά Χαρακτηριστικά Ανά Τύπο Βραχομάζας	56
3.3.4	Αρχές Ταξινόμησης Βραχομάζας	61
3.3.5	Ταξινόμηση Οφιολίθων Ανά Τύπο Βραχομάζας.....	63
3.3.6	Παράμετροι Αντοχής Και Παραμορφωσιμότητας.....	66
3.3.7	Συμπεριφορά Οφιολίθων Κατά Την Διάνοιξη Σηράγγων.....	69
3.3.8	Διάγραμμα Εκτίμησης της Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς της Βραχομάζας.....	72
4	ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ	77
4.1	Εμπειρίες Διάνοιξης Από Τον Παγκόσμιο Χώρο	77
4.1.1	Η Περίπτωση Της Σήραγγας Komurhan.....	77
4.1.2	Η Περίπτωση Της Σήραγγας Vereina	80
4.2	Εμπειρίες Διάνοιξης Από Τον Ελλαδικό Χώρο.....	82
4.2.1	Η Περίπτωση Της Σήραγγας Του Καλλιδρόμου	82
4.2.2	Η Περίπτωση Της Σιδηροδρομικής Σήραγγας Όθρυος	93
4.2.3	Η Περίπτωση Της Σήραγγας T3 - Πλαταμώνα (Π.Α.Θ.Ε.)	105

4.3	Σύνοψη Τεχνικογεωλογικών Τύπων Σε Οφιολίθους Από Τις Περιπτώσεις Διανοίξεων Στον Ελλαδικό Χώρο.....	119
4.3.1	Σήραγγα Καλλιδρόμου.....	119
4.3.2	Σήραγγα Όθρυος.....	122
4.3.3	Σήραγγα Τ3 – Πλαταμόνα (Π.Α.Θ.Ε.)	125
4.3.4	Εφαρμοσθείσες Διατομές Άμεσης Υποστήριξης Ανάλογα Με Την Κατηγορία Οφιολίθων	128
5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....	133
5.1	Μεθοδολογία Προσομοίωσης.....	133
5.1.1	Γενικά Στοιχεία.....	133
5.1.2	Προσομοίωση Της Διάνοξης.....	133
5.1.3	Προσομοίωση Των Γεωυλικών	134
5.1.4	Προσομοίωση Των Μέτρων Άμεσης Υποστήριξης.....	136
5.2	Παράμετροι Και Παραδοχές Προσομοίωσης.....	139
5.2.1	Γενικά Στοιχεία.....	139
5.2.2	Γεωμετρία της Εκσκαφής.....	144
5.2.3	Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης.....	145
5.3	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	153
5.3.1	Για Τον Τύπο 2 Οφιολίθων	153
5.3.2	Για Τον Τύπο 3 Οφιολίθων	158
5.3.3	Για Τον Τύπο 4 Οφιολίθων	164
5.4	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Προσομοιώσεων	171
5.4.1	Για Τον Τύπο 2 Οφιολίθων	171
5.4.2	Για Τον Τύπο 3 Οφιολίθων	174
5.4.3	Για Τον Τύπο 4 Οφιολίθων	179
5.5	Προβλήματα Προσομοιώσεων	184
5.5.1	Γενικά Στοιχεία.....	184
5.5.2	Για Τον Τύπο 3 Οφιολίθων	186

5.5.3	Για Τον Τύπο 4 Οφιολίθων	190
5.6	Επιπλέον Παραμετρικές Προσομοιώσεις	195
5.6.1	Γενικά Στοιχεία	195
5.6.2	Επίδραση Της Απόστασης Των Κλάδων	195
5.6.3	Επίδραση Του Υδροφόρου Ορίζοντα	203
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	242
6.1	Γενικά Στοιχεία	242
6.2	Προτεινόμενες Διατομές Άμεσης Υποστήριξης	243
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	249

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά Στοιχεία

Στο σύγχρονο αστικό περιβάλλον οι υπόγειες κατασκευές και ειδικότερα οι σήραγγες αποτελούν βασικό στοιχείο που καταδεικνύουν το επίπεδο ανάπτυξης και τεχνολογικής προόδου που έχει συντελεστεί. Η διάνοιξη σηράγγων είναι ένα πολυπαραμετρικό και περίπλοκο έργο, γι' αυτό και το πεδίο εφαρμογής τους είναι διευρυμένο. Συγκεκριμένα, οι σήραγγες κατασκευάζονται στα συγκοινωνιακά δίκτυα με στόχο την απεμπλοκή από τις επιδράσεις δυσμενών γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών (κατολισθήσεις, τεκτονικές ζώνες, ρηξιγενείς ζώνες) και στα αστικά συστήματα μαζικής μεταφοράς (υπόγειος ηλεκτρικός σιδηρόδρομος). Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί πως οι σήραγγες κατασκευάζονται τόσο στα υδραυλικά έργα (υδραγωγεία, συστήματα εκτροπής στους ταμειωτήρες φραγμάτων, αποχετευτικά συστήματα), όσο και στα γεωτεχνικά έργα (συστήματα αποστράγγισης στα πρανή και στις θεμελιώσεις).

Ο σχεδιασμός των σηράγγων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία αποτελείται από πολλά διαδοχικά στάδια. Η γνώση των γεωλογικών συνθηκών της ευρείας περιοχής και οι γεωερευνητικές εργασίες αποτελούν την βάση για τον καθορισμό του γεωλογικού προσομοιώματος της υπό μελέτη σήραγγας. Η ένταξη του προσομοιώματος αυτού στις ανάγκες του μηχανικού, η τεχνικογεωλογική δηλαδή θεώρηση, θα αποτελέσει την βάση για κάθε επόμενο βήμα του σχεδιασμού. Στην συνέχεια ακολουθεί ο προσδιορισμός των μοντέλων της βραχομάζας με την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών των γεωυλικών και τον καθορισμό των παραμέτρων του σχεδιασμού για να ακολουθήσει, το στάδιο της ανάλυσης και διαστασιολόγησης του υπόγειου έργου.

1.2 Αντικείμενο - Σκοπός Διπλωματικής Μεταπτυχιακής Εργασίας

Αντικείμενο και σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί, αρχικά, η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οφιολιθικών μαζών, κατά την διάνοιξη των υπογείων έργων, ταξινομώντας τες στους διαφορετικούς τύπους, που αναφέρονται στην βιβλιογραφία και ακολούθως, η διενέργεια κατάλληλων αναλύσεων, με απώτερο σκοπό την παράθεση των κατάλληλων διατομών άμεσης υποστήριξης για κάθε έναν τύπο του εν λόγω σχηματισμού.

Η επιλογή του συγκεκριμένου γεωλογικού σχηματισμού πραγματοποιήθηκε, καθώς η πλειονότητα των εμφανίσεων αυτού κατά την διάνοιξη υπογείων έργων δημιουργεί εκτενή προβλήματα και αστοχίες κατά την διάνοιξη τους. Άλλωστε, οι οφιολιθικοί σχηματισμοί εντάσσονται εντός της γενικής κατηγορίας των ασθενών και σύνθετων βραχομαζών.

Με τον όρο «ασθενείς βραχώμαζες» νοούνται όλες εκείνες οι βραχομάζες όπου κατέχουν πολύ χαμηλή αντοχή, λόγω πτωχής συγκόλλησης ή/και αυξημένης αποσάθρωσης ή/και έντονης τεκτονικής καταπόνησης. Γενικώς οι βραχώμαζες αυτές κατέχουν πολύ μεγάλο βαθμό κερματισμού και μπορούν να εμφανιστούν και με χαώδεις δομές.

Με τον όρο «σύνθετες βραχώμαζες» νοούνται όλα τα γεωυλικά που εμφανίζουν μια λιθολογική, δομική και γεωτεχνική ανομοιομορφία ή ετερογένεια σε μακροσκοπική κλίμακα. Για παράδειγμα, στον εξεταζόμενο σχηματισμό των οφιολίθων, ενδέχεται να υπάρχουν τεκτονικές εναλλαγές με άλλα γεωυλικά (π.χ. σερπεντινωμένοι περιδοτίτες με σχιστοκερατόλιθους κ.α.).

1.3 Ακολουθούμενη Μεθοδολογία Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Μετά την ανάπτυξη του παρόντος κεφαλαίου, όπου παρουσιάζεται το αντικείμενο της διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας, ο σκοπός της και η πηγή των δεδομένων, στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο περιγράφονται οι αρχές σχεδιασμού που διέπουν την κατασκευή των σηράγγων. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσονται οι μέθοδοι διάνοιξης, που εφαρμόζονται στην σημερινή εποχή, με έμφαση στην συμβατική μέθοδο διάνοιξης (NATM), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Ακόμα, περιγράφονται τα πιο συχνά εφαρμοζόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης, παραθέτονται οι γενικές αρχές των μεθόδων ανάλυσης των σηράγγων, ενώ ακόμα αναπτύσσονται οι πιο σημαντικοί παράμετροι σχεδιασμού των σηράγγων και οι μηχανισμοί αστοχίας που μπορούν να προκύψουν κατά την εκσκαφή.

Στο τρίτο (3^ο) κεφάλαιο αναλύεται ο εξεταζόμενος σχηματισμός των οφιολίθων, τόσο ως προς το γεωλογικό του, όσο και ως προς το γεωτεχνικό του πρότυπο, λαμβάνοντας υπόψιν στοιχεία από διεθνή και εγχώρια βιβλιογραφία, όπως επιστημονικά άρθρα και διδακτορικές διατριβές. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται συνοπτικά το γεωλογικό περιβάλλον, μέσα στο οποίο δημιουργείται ο εν λόγω σχηματισμός, καθώς και

παρατίθενται στοιχεία για την τεκτονική, την αποσάθρωση και το υδρογεωλογικό καθεστώς του. Ακολούθως, παρατίθενται τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του, όπως αυτά αναλύονται σε διεθνή και εγχώρια βιβλιογραφία και ακολούθως αποτυπώνεται ο διαχωρισμός των εμφανίσεων της βραχόμαζας του σε πέντε (5) τεχνικογεωλογικούς τύπους. Τέλος, παρατίθενται στοιχεία για την αντοχή του σχηματισμού και για το μέτρο παραμορφωσιμότητας του, καθώς και στοιχεία για την αναμενόμενη συμπεριφορά κατά την διάνοιξη των σιηράγγων.

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο παρατίθενται παραδείγματα κατασκευής για τις διανοίξεις σιηράγγων εντός των οφιολιθικών σχηματισμών, τόσο από τον παγκόσμιο, όσο και από τον ελλαδικό χώρο και για τον τελευταίο πραγματοποιείται ανάλυση των τύπων συμπεριφοράς των παρατιθέμενων σιηράγγων . Τα δεδομένα των σιηράγγων του ελλαδικού χώρου συνοψίζονται και κατηγοριοποιούνται, σύμφωνα με τους τύπους της οφιολιθικής βραχόμαζας που παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες κατηγορίες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν πραγματικές καταστάσεις οφιολιθικής βραχομάζας και πάνω στις οποίες θα διενεργηθούν, στην συνέχεια της εργασίας, οι προσομοιώσεις.

Το πέμπτο (5^ο) κεφάλαιο πραγματεύεται τις προσομοιώσεις σχεδιασμού και διάνοιξης των σιηράγγων σε διάφορους τύπους των οφιολιθικών βραχομαζών. Αρχικά, γίνεται λόγος για την ακολουθούμενη μεθοδολογία των προσομοιώσεων και ακολούθως παρατίθενται οι παράμετροι και οι παραδοχές των διενεργούμενων προσομοιώσεων, σύμφωνα με τις κατηγορίες της βραχομάζας των οφιολιθικών σχηματισμών, που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, διενεργούνται οι αναλύσεις των εξεταζόμενων περιπτώσεων για δύο (2) περιπτώσεις υπερκειμένων, μια για $H = 150m$ και μια για $H = 300m$, ενώ μετά το πέρας αυτών, διενεργούνται επιπλέον προσομοιώσεις για να διερευνηθεί η επίδραση της απόστασης των κλάδων, για την περίπτωση δίδυμων σιηράγγων, και για να διερευνηθεί η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα.

Τέλος, στο έκτο (6^ο) κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύνοψη όλων των ανωτέρω κεφαλαίων της διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας και ακόμα αποτυπώνονται σχόλια και παρατηρήσεις πάνω στις προαναφερθείσες αναλύσεις. Τέλος, αποτυπώνεται και ο στόχος της εργασίας, μέσω της δημιουργίας ενός πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει τις προτεινόμενες διατομές της άμεσης υποστήριξης για κάθε τύπο

οφιολιθικής βραχομάζας. Πρακτικά, μέσω του πίνακα αυτού, αποτυπώνεται η προτεινόμενη ακολουθούμενη φιλοσοφία των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

1.4 Αντληση Των Δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της παρούσας διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας αφορούν ως επί το πλείστον επιστημονικά άρθρα, διδακτορικές διατριβές, μεταπτυχιακές διπλωματικές εργασίες, καθώς και αποσπάσματα μελετών από κάποια έργα.

Κύριες πηγές πληροφοριών της παρούσας εργασίας αποτελούν επιστημονικά άρθρα, διδακτορικές διατριβές και μεταπτυχιακές διπλωματικές εργασίες, που σχετίζονται με τις σιδηροδρομικές σήραγγες του Καλλιδρόμου και της Όθρυος, καθώς και με την οδική σήραγγα Τεμπών Τ3 (Πλαταμώνα). Σημείο αναφοράς αποτελεί η διδακτορική διατριβή του κ. Βασίλη Μαρίνου (2007), η οποία αντλεί δεδομένα από τις 74 σήραγγες της Εγνατίας Οδού και ταξινομεί τους εμφανιζόμενους σχηματισμούς σε τεχνικογεωλογικούς τύπους με κοινή γεωτεχνική συμπεριφορά. Ένας από τους εμφανιζόμενους σχηματισμούς στις σήραγγες της Εγνατίας Οδού είναι και αυτός των οφιολίθων. Έτσι, με βάση τους τεχνικογεωλογικούς τύπους των οφιολίθων των σηράγγων της Εγνατίας Οδού, συγκρίθηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σηράγγων του Καλλιδρόμου, της Όθρυος και των Τεμπών Τ3 και αντιστοιχίστηκαν στις κατάλληλες γεωτεχνικές κατηγορίες.

Δεδομένα για τη σήραγγα Καλλιδρόμου αντλήθηκαν κυρίως από το επιστημονικό άρθρο των Diasakos N. et al (2010), για την σήραγγα Όθρυος από το επιστημονικό άρθρο των Mourtzas N. & Gkiolas A. (2010) καθώς και από τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Μπαλάση Αι. (2007), ενώ για την σήραγγα Τεμπών Τ3 πληροφορίες αντλήθηκαν κυρίως από τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Τσιρογιάννη Αθ. (2018), καθώς και τμήμα της μελέτης της εν λόγω σήραγγας, τα οποία αντλήθηκαν από τον έντυπο τόπο της εκδρομής του Δ.Π.Μ.Σ. «Σ.Κ.Υ.Ε.» (2014).

Τονίζεται πως εκτός από τις ανωτέρω κύριες πηγές πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκαν και επιπλέον πηγές, οι οποίες έδωσαν είτε επιπλέον πληροφορίες για το εκάστοτε έργο, είτε χρησίμευσαν ως ένας τρόπος ελέγχου της ορθότητας των αρχικών πληροφοριών.

2 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

2.1 Μέθοδοι Διάνοιξης

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη των σηράγγων διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Διάνοιξη με μηχανικά μέσα (χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής – TBM)
2. Διάνοιξη με τη συμβατική μέθοδο (χρήση ανατινάξεων ή μηχανημάτων, τα οποία δεν είναι ολομέτωπης κοπής)
3. Διάνοιξη με την χρήση της μεθόδου Cut&Cover

Από τις παραπάνω τρεις κατηγορίες, ευρεία εφαρμογή κατέχει η διάνοιξη με συμβατικό τρόπο συγκριτικά με τις άλλες δύο. Αυτό συμβαίνει διότι, τόσο η διάνοιξη με τη χρήση ενός μηχανήματος ολομέτωπης κοπής, όσο και με την χρήση της μεθόδου Cut&Cover προϋποθέτει να πληρούνται κάποιες συγκριμένες παράμετροι, για κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση διάνοιξης με ένα TBM, απαιτείται η απουσία ισχυρής ανομοιογένεια των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών, μέσα από τους οποίους θα περάσει το εν λόγω μηχάνημα (π.χ. από συμπαγή βράχο σε αργιλοχάλικες), αλλά και η σήραγγα να κατέχει ένα ευμέγεθες μήκος, συνήθως ανώτερο από 2 χιλιόμετρα, ώστε να κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα η χρήση ενός τέτοιου μηχανήματος. Ενώ για την εφαρμογή της μεθόδου Cut&Cover πρέπει κυρίως τα υπερκείμενα και το μήκος της σήραγγας να κατέχουν χαμηλές τιμές, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί.

Για τους παραπάνω λόγους, η συνέχεια της παρούσας διπλωματικής θα επικεντρωθεί μόνο στην διάνοιξη των σηράγγων με τη χρήση της συμβατικής μεθόδου.

2.1.1 Διάνοιξη Σηράγγων Με Τη Συμβατική Μέθοδο

Η Συμβατική Μέθοδος διάνοιξης σηράγγων αναφέρεται παγκοσμίως και ως NATM (New Austrian Tunneling Method) και βασίζεται στην εφαρμογή ενός συνόλου τεχνικών διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης των τοιχωμάτων των σηράγγων με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και αγκύρια βράχου ή/και μεταλλικά πλαίσια, με εκτεθειμένο μέτωπο και συνεχή παρακολούθηση των συγκλίσεων στην περιφέρεια της σήραγγας. Το όνομα της μεθόδου προήλθε από την διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις κατά τη δεκαετία του 1960, όπου και εφαρμόστηκαν συστηματικά τα ανωτέρω μέτρα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι εν λόγω τεχνικές είχαν εφαρμοστεί και

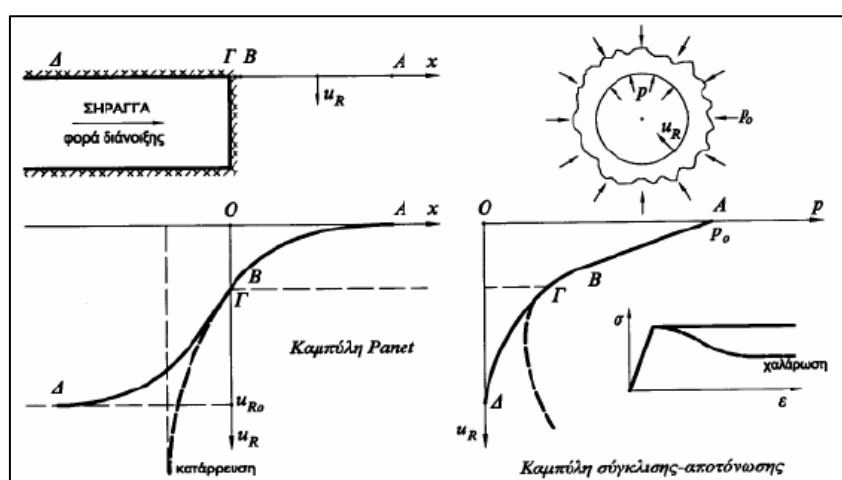
πριν το 1960 σε διάφορα μέρη του κόσμου, αλλά η συστηματοποίηση και η ονομασία τους έγινε από τους Αυστριακούς μηχανικούς Rabcewiz, Muller, Brunner και Pacher.

Στο βιβλίο του ο Σοφιανός (2018) αναφέρει ότι ο Muller (1976), ένας εκ των ιδρυτών της μεθόδου, υπογραμμίζει συνολικά 21 αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος. Από αυτές, οι βασικότερες έξι είναι οι ακόλουθες:

1. Πρέπει να υπάρξει σκόπιμη κινητοποίηση της αντοχής της περιβάλλουσας γεωμάζας της σήραγγας, στη μεγαλύτερη δυνατή έκταση της, μέσω της παραμόρφωσης της, ώστε η προσφερόμενη υποστήριξη να παραλάβει τα μικρότερα δυνατά φορτία
2. Τοποθέτηση κατάλληλης ελαφριάς και εύκαμπτης υποστήριξης, που καθορίζεται από την ταξινόμηση του πετρώματος, με λεπτή πρώτη στρώση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλους, αμέσως μετά την εκσκαφή. Η λεπτή πρώτη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αποσκοπεί στο σφράγισμα των ρωγμών και την προστασία τους από τη διάβρωση και τη χαλάρωση. Λόγω των ερπυστικών παραμορφώσεων του σκυροδέματος, αυτή η λεπτή στρώση πρακτικά δεν αναλαμβάνει φορτία
3. Συνεχής μέτρηση των πιέσεων και των μετακινήσεων αμέσως μετά την τοποθέτηση της πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αν απαιτηθεί, τα αποτελέσματα του ελέγχου αποτελούν την βάση για την αναθεώρηση της αρχικής υποστήριξης και για την ακολουθία των φάσεων της διάνοιξης
4. Κλείσιμο του ανάστροφου τόξου για μηχανική λειτουργία της σήραγγας ως σωλήνα
5. Η μόνιμη επένδυση εκτελείται σε μεταγενέστερο στάδιο
6. Ειδική σύμβαση κατασκευής του έργου που να επιτρέπει αλλαγές στον τρόπο διάνοιξης και υποστήριξης

Η κύρια αρχή σχεδιασμού της μεθόδου NATM είναι η πρώτη. Σχεδιάζοντας τις καμπύλες Panet για κάθε περίπτωση σχεδιασμού μιας σήραγγας, δίνεται η δυνατότητα να προεκτιμάται η σύγκλιση της βραχομάζας προτού εκσκαφθεί. Κατά την διάνοιξη των σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους ξεκινούν σε απόσταση εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει στο συγκεκριμένο σημείο. Περίπου ένα ποσοστό της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης συμβαίνει μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής. Έτσι, με τον σχεδιασμό

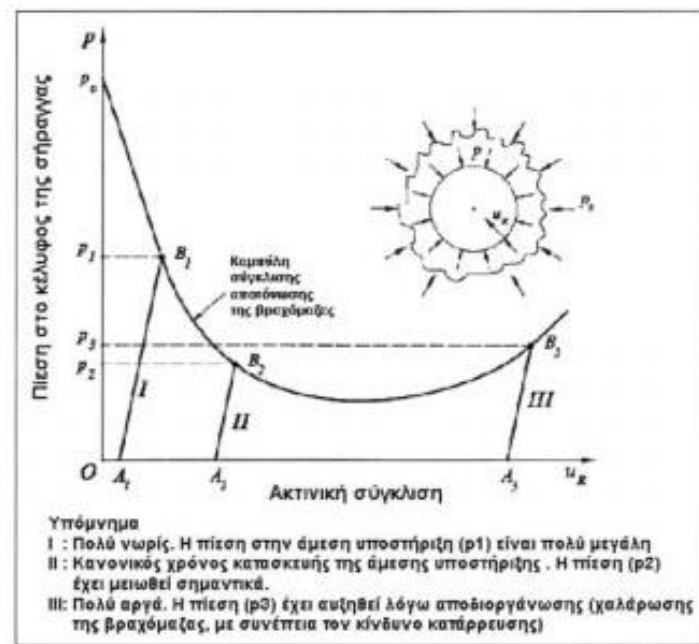
των καμπυλών Panet, μπορεί να αντιστοιχισθεί κάθε σημείο κατά μήκος του άξονα της σήραγγας με μια τιμή σύγκλισης των τοιχωμάτων της. Ακολούθως, για κάθε τιμή σύγκλισης, αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη τιμή πίεσης υποστήριξης «p», μέσω της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης. Η συσχέτιση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής είναι πολύ χρήσιμη, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, που έχει συμβεί πριν από την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Η σύγκλιση αυτή, πριν την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης οδηγεί στην αποτόνωση της βραχομάζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν στα μέτρα υποστήριξης.



Εικόνα 2.1. Καμπύλη Panet και καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης (Καββαδάς, 2005)

Η συμπεριφορά της βραχομάζας καθιστά πολύ σημαντικό τον παράγοντα του χρονικού σημείου τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Στόχος σε όλες τις περιπτώσεις αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης προσωρινής υποστήριξης, η οποία θα τοποθετηθεί την κατάλληλη χρονική στιγμή, ώστε να παραλάβει όσο το δυνατόν μικρότερη πίεση από την περιβάλλουσα βραχομάζα.

Στην ακόλουθη Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται σχηματικά η λογική πορεία της μεθόδου NATM κατά τον σχεδιασμό, ανάλογα με τον χρόνο τοποθέτησης της προσωρινής υποστήριξης.



Εικόνα 2.2. Επίδραση της εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στη βραχόμαζα ανάλογα με τη χρονική στιγμή τοποθέτησης τους. (Καββαδάς, 2005)

- ✓ Θεωρώντας πως τα μέτρα υποστήριξης τοποθετούνται την χρονική στιγμή όπου η ακτινική σύγκλιση θα είναι στο σημείο A_1 , τότε η παραλαμβανόμενη πίεση από την υποστήριξη είναι αρκετά μεγάλη οπότε και απαιτείται η χρήση «βαριάς» υποστήριξης, η οποία είναι αντιοικονομική.
- ✓ Θεωρώντας πως τα μέτρα υποστήριξης τοποθετούνται την χρονική στιγμή όπου η ακτινική σύγκλιση θα είναι στο σημείο A_3 , τότε παρατηρείται πως οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις βαίνουν αυξημένες, οπότε και προκαλείται πλήρης αποδιοργάνωση της βραχόμαζας. Λόγω της αποδιοργάνωσης της βραχόμαζας μπορεί να προκληθεί αστοχία, αλλά ακόμα κ αν δεν προκληθεί, αυξάνεται η ασκούμενη πίεση στην υποστήριξη, οπότε και απαιτείται η χρήση πιο «βαριάς» υποστήριξης, το οποίο είναι αντιοικονομικό.
- ✓ Θεωρώντας πως τα μέτρα υποστήριξης τοποθετούνται την χρονική στιγμή όπου οι ακτινικές συγκλίσεις θα είναι στο σημείο A_2 , τότε οι συγκλίσεις αυτές θα είναι επαρκείς για την αποτόνωση της βραχόμαζας και συγχρόνως εντός των επιτρεπτών ορίων ασφαλείας. Έτσι, η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης είναι η όσο το δυνατόν η ελάχιστη δυνατή.

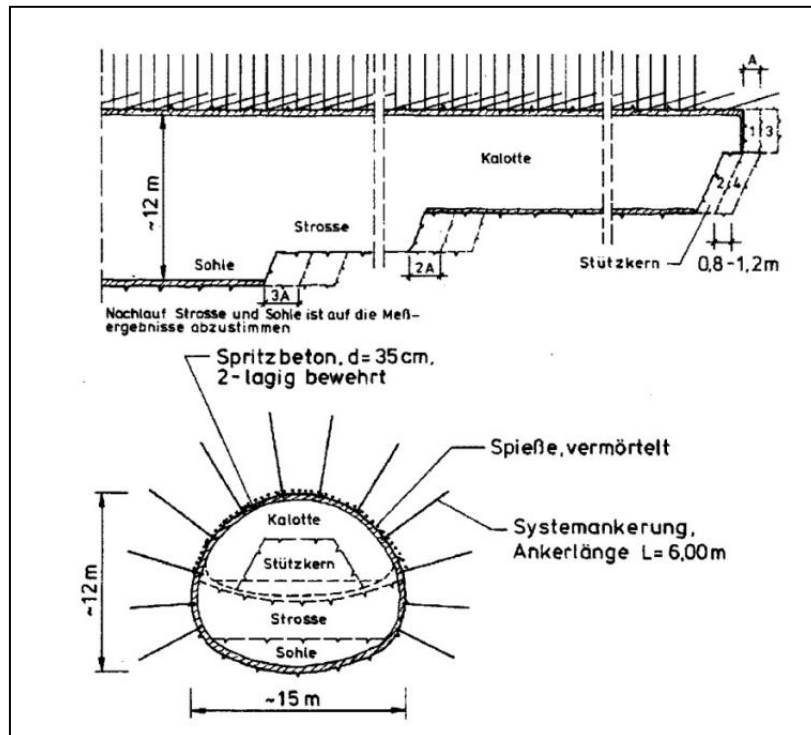
2.1.2 Εφαρμογή Της Συμβατικής Μεθόδου

Η μέθοδος NATM εφαρμόζεται είτε με ολομέτωπη εκσκαφή της διατομής, είτε με ολομέτωπη εκσκαφή της διατομής με προπορευόμενη τη διάνοιξη ερευνητικής στοάς, είτε με προπορευόμενη τη διάνοιξη της άνω ημιδιατομής (top heading), είτε με διάνοιξη και υποστήριξη επιμέρους τμημάτων της διατομής.

2.1.2.1 Εκσκαφή Της Διατομής Σε Φάσεις

Η διάνοιξη με προπορευόμενη την άνω ημιδιατομή ονομάζεται και «βόρεια τεχνική» (Nordische), επειδή εφαρμόστηκε στις Βόρειες χώρες και κυρίως στην Νορβηγία και πλέον κυριαρχεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου NATM. Σύνηθες είναι η άνω ημιδιατομή να προπορεύεται 2 με 10 μέτρα της κάτω ημιδιατομής, ανάλογα και την ποιότητα της βραχώμαζας. Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί από τις παλαιότερες αφού δίνει τη δυνατότητα σύγχρονης εξόρυξης της άνω και κάτω ημιδιατομής, γρήγορης κατασκευής της προσωρινής υποστήριξης και αποφυγής ικριωμάτων. Η ανάπτυξη της εν λόγω τεχνικής έδωσε λύση στα προβλήματα αστάθειας που προέκυπταν είτε στο μέτωπο, είτε ακόμα και στον δακτύλιο της σήραγγας, όπως η ολίσθηση σφηνών, οι καταπτώσεις κ.α.

Σε σήραγγες μεγάλου εύρους, οι οποίες διανοίγονται σε βραχώμαζας με πτωχά χαρακτηριστικά ή σε περιπτώσεις σηράγγων με απαιτήσεις ελάχιστων συγκλίσεων, συνήθης είναι η εκσκαφή πλευρικών στοών στα όρια της διατομής, αρχικά στην μία πλευρά και ακολούθως στην άλλη.



Εικόνα 2.3. Διάνοιξη σε φάσεις της σήραγγας Himmelberg σε κερματισμένο πέτρωμα (Maidl, 2004). Αντίληψη: (Σοφριανός, 2018)

2.1.2.2 Κατασκευή Της Άμεσης Υποστήριξης

Όπως έχει αναφερθεί, η άμεση υποστήριξη εφαρμόζεται σε μικρή απόσταση από το μέτωπο, ώστε ταυτοχρόνως να προλαβαίνει η βραχομάζα να αποδιοργανώνεται στα επιτρεπτά όρια και να παρέχεται η κατάλληλη πίεση υποστήριξης ώστε να αποφευχθούν αστοχίες. Η τοποθέτηση της υποστήριξης σε μικρή απόσταση επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας μικρό βήμα προχώρησης, της τάξης των 1 – 2 m ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας. Όπως είναι φυσικό, όσο πτωχότερη η βραχομάζα, τόσο μικρότερο και το βήμα προχώρησης. Συνηθίζεται το βήμα προχώρησης της δεύτερης φάσης να είναι μεγαλύτερο από το πρώτο.

2.1.2.3 Ολοκλήρωση Του Δακτυλίου Του Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος Στο Σύνολο Της Διατομής

Σε περιπτώσεις πτωχής ποιότητας βραχομάζας είναι σύνηθες να δημιουργείται κλειστός δακτύλιος από την επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μέσω της διαμόρφωσης ανάστροφου τόξου στο δάπεδο, ώστε ολόκληρη η διατομή να λειτουργεί σαν «σωλήνας». Πρακτικά, με την δημιουργία του ενιαίου δακτυλίου μειώνονται οι μετακινήσεις και βελτιώνεται η γενικότερη ευστάθεια της διατομής.

Η διαμόρφωση του ανάστροφου τόξου είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και στην πρώτη φάση εκσκαφής, με την διαφοροποίηση ότι ακολούθως θα καταστραφεί, ώστε να εκσκαφθεί η δεύτερη φάση. Η εφαρμογή αυτού του μέτρου επικεντρώνεται ως επί το πλείστον στις περιπτώσεις βραχομάζας με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά.

2.1.2.4 Γεωτεχνική Παρακολούθηση Της Συμπεριφοράς Των Σηράγγων

Μια αρχική εκτίμηση των συγκλίσεων κατά την διάνοιξη των σηράγγων δύναται να πραγματοποιηθεί κατά την φάση του σχεδιασμού, αντλώντας δεδομένα για την κατάσταση της βραχομάζας από την γεωλογική και τη γεωτεχνική μελέτη, καθώς και από τις επί τόπου παρατηρήσεις. Παρολαυτά, είναι σύνηθες οι εκτιμήσεις αυτές να μην είναι ακριβείς. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, έχουν αναπτυχθεί ειδικοί κώδικες επίλυσης της εκσκαφής των σηράγγων, οι οποίοι δίνουν με αρκετή ακρίβεια τις αναπτυσσόμενες συγκλίσεις. Βέβαια, ακόμα και οι επιλύσεις με τέτοιους κώδικες δεν αντικατοπτρίζουν στο ακέραιο τις πραγματικές συνθήκες διάνοιξης, παρά μόνο δίνουν μια γενική εικόνα.

Η αποδοτικότερη αντιμετώπιση του προαναφερθέντος προβλήματος πραγματοποιείται μέσω της συστηματικής εγκατάστασης ειδικών οργάνων μέτρησης των συγκλίσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα συνεχούς σύγκρισης των τιμών που έχουν υπολογιστεί κατά την μελέτη διάνοιξης και της πραγματικότητας. Η συστηματική εγκατάσταση των οργάνων, ακόμα, δίνει την δυνατότητα να καταγράφεται ολόκληρη η διαδικασία ανακατανομής των τάσεων, δίνοντας σημαντικά στοιχεία, τα οποία ενδέχεται να οδηγήσουν σε αναθεώρηση της αρχικής μελέτης, σε περιπτώσει κάποια ανεξήγητη ανωμαλία στις μετρήσεις.

Παράδειγμα οργάνων μέτρησης των συγκλίσεων αποτελούν οι τοπογραφικοί στόχοι σε συνδυασμό με μετρήσεις από κατάλληλο τοπογραφικό όργανο, καθώς και οι διάφοροι τύποι εκτασιομέτρων (ράβδου, μαγνητικά, ολισθαίνονται κ.α.) τοποθετημένα εντός γεωτρήσεων.

2.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης

2.2.1 Επένδυση Από Εκτοξευόμενο Σκυροδέμα

Το εκτοξευόμενο σκυροδέμα που διαστρώνεται στις παρειές ακριβώς μετά την ολοκλήρωση του εκάστοτε βήματος διάνοιξης αποσκοπεί κυρίως στην συγκράτηση των χαλαρών επιφανειών των πετρωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η κατάλληλη προστασία στους εργαζομένους ώστε να μπορούν να δουλεύουν πολύ κοντά στο μέτωπο. Σε περιπτώσεις ισχυρής βραχομάζας συνήθως η στρώση της επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν υπερβαίνει τα 20 cm, ενώ σε περιπτώσεις ασθενούς βραχομάζας η επένδυση αυτή συχνά υπερβαίνει κατά πολύ τα 20 cm.



Εικόνα 2.4. Εκτόξευση σκυροδέματος. Άντληση: (Σοφινός, 2018)

Η τοποθέτηση της επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρεμποδίζει την πτώση ή την ολίσθηση τεμαχών πετρώματος, αποτρέπει σε μεγάλο βαθμό την εκδήλωση αστοχίας τύπου «καμινάδας», καθώς και δημιουργεί έναν ενιαίο φορέα, ο οποίος παραλαμβάνει φορτία και αντιστέκεται την εμφάνιση έντονων συγκλίσεων. Συνήθης είναι και η τοποθέτηση επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στο μέτωπο εκσκαφής, ώστε να σταθεροποιηθούν τυχόν ασταθείς όγκοι πετρώματος και οι οποίοι δύναται να προκαλέσουν την κατάρρευση του.

Η τοποθέτηση του σκυροδέματος απαιτεί να έχει προηγηθεί ξεσκάρωμα των χαλαρών όγκων πετρώματος, καθώς και εκτενής καθαρισμός των επιφανειών με μίγμα

πεπιεσμένου αέρα και νερού, ώστε να απομακρυνθούν όλα τα ίχνη σκόνης και άλλων επιβλαβών – για το σκυρόδεμα – υλικών. Ακολουθώντας, πραγματοποιείται η επί τόπου, μίξη τσιμέντου, νερού και λεπτόκοκκων αδρανών, ώστε να δημιουργηθεί το σκυρόδεμα και στη συνέχεια αυτό «εκτοξεύεται» με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα στις επιφάνειες. Η μίξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι είτε ξηρή, όπου η ανάμειξη με το νερό γίνεται στο ακροφύσιο, ακριβώς πριν την εκτόξευση, είτε υγρή, όπου η ανάμειξη με το νερό γίνεται στην δεξαμενή παρασκευής του σκυροδέματος.

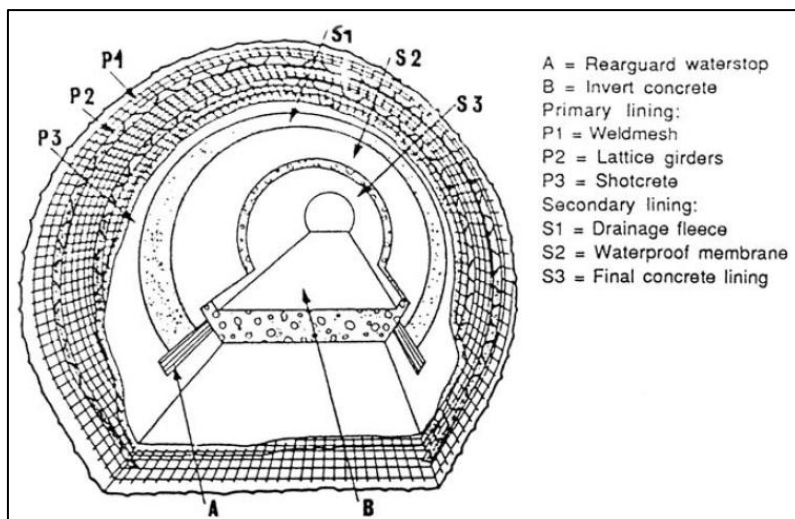
Αξίζει να σημειωθεί πως εκτός από τα κύρια συστατικά, για την παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος προστίθενται και διάφορες άλλες ουσίες, όπως είναι η παιπάλη πυριτίου, ειδικοί επιταχυντές πήξης κ.α. Κάθε τέτοιο συστατικό που προστίθεται δίνει μια παραπάνω ευεργετική ιδιότητα στο σκυρόδεμα, όπως για παράδειγμα η παιπάλη πυριτίου συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και την ταυτόχρονη μείωση της διαπερατότητας του.

2.2.2 Μεταλλικό Πλέγμα Και Μεταλλικές Ίνες Οπλισμού

Με την τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος ή μεταλλικών ινών στο σώμα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, του προσδίδουν εφελκυστική αντοχή και συνεπώς του αυξάνουν την αντοχή σε φορτία καμπτικής ροπής.

Η επιλογή μεταξύ μεταλλικού πλαισίου ή μεταλλικών ινών πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες της κάθε μεθόδου. Τοποθετώντας μεταλλικό πλαίσιο στις παρειές της σήραγγας και στη συνέχεια καλύπτοντας το με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αυξάνονται τα φαινόμενα αναπήδησης του σκυροδέματος, λόγω της αυξημένης ελαστικότητας του μεταλλικού πλέγματος, ενώ ακόμα αυξάνεται και η πιθανότητα ύπαρξης κενών σημείων, μη πληρωμένων με σκυρόδεμα, πίσω από μεταλλικό πλέγμα. Το πρόβλημα αυτό εξαλείφεται με την προσθήκη μεταλλικών ινών στο σκυρόδεμα πριν την εκτόξευση του. Βέβαια, με την προσθήκη μεταλλικών ινών πρέπει να διασφαλίζεται η σωστή ανάμειξη τους, ώστε να προσφέρεται μια ομοιόμορφη αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος.

Γενικότερα, στην υποστήριξη των σηράγγων σε κατακερματισμένες και αποδομημένες βραχομάζες κυριαρχεί η χρήση πλέγματος, καθώς αυτή προσφέρει επιπλέον προστασία από ασταθή τεμάχια, «παγιδεύοντας» τα προτού προκληθεί κάποια μεγάλης κλίμακας αστοχία ή/και τραυματισμός του προσωπικού.

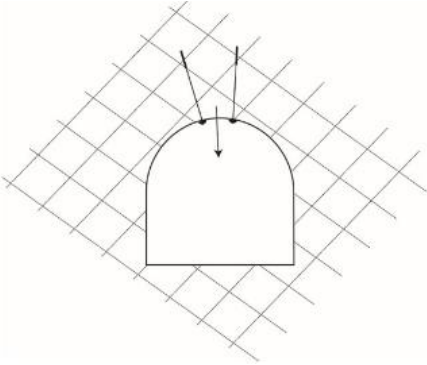
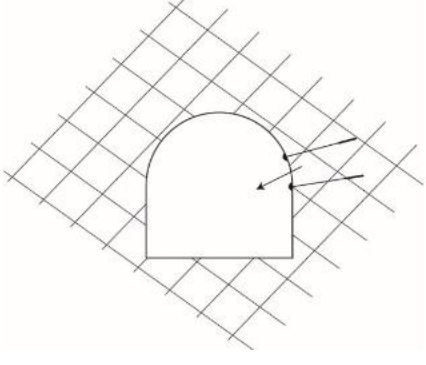

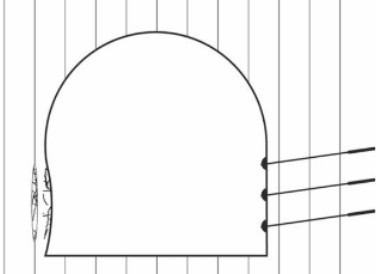
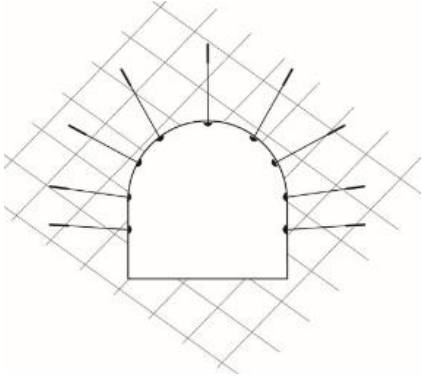
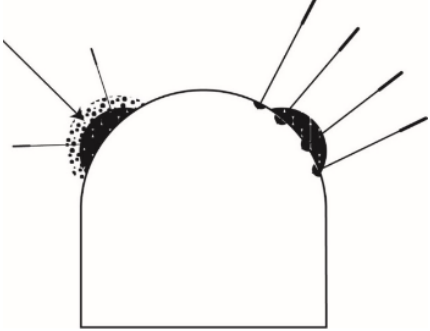
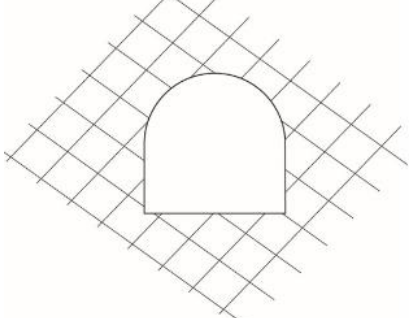
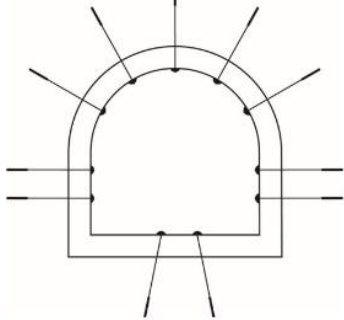


Εικόνα 2.5. Τομή όπου διακρίνεται η αρχική (P3) και η τελική (S3) στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς και η ενσωμάτωση των μεταλλικών πλεγμάτων. (Whittaker & Frith, 1990)

2.2.3 Αγκύρια Βράχου

Με τη δράση τους οι ήλοι συμπλέκουν την βραχώμαζα, αυξάνουν τη διατμητική της αντοχή και μειώνουν τις παραμορφώσεις λόγω ολίσθησης, περιστροφής ή διαρροής. Επίσης, σε περιπτώσεις ογκοτεμαχισμένων πετρωμάτων, τα αγκύρια αναρτούν τα τεμάχια σε βαθύτερα στρώματα. Το υλικό των ήλων είναι χάλυβας, συνήθως B500C ή μεγαλύτερης αντοχής. Σε συνδυασμό με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελούν τα βασικότερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης σηράγγων.

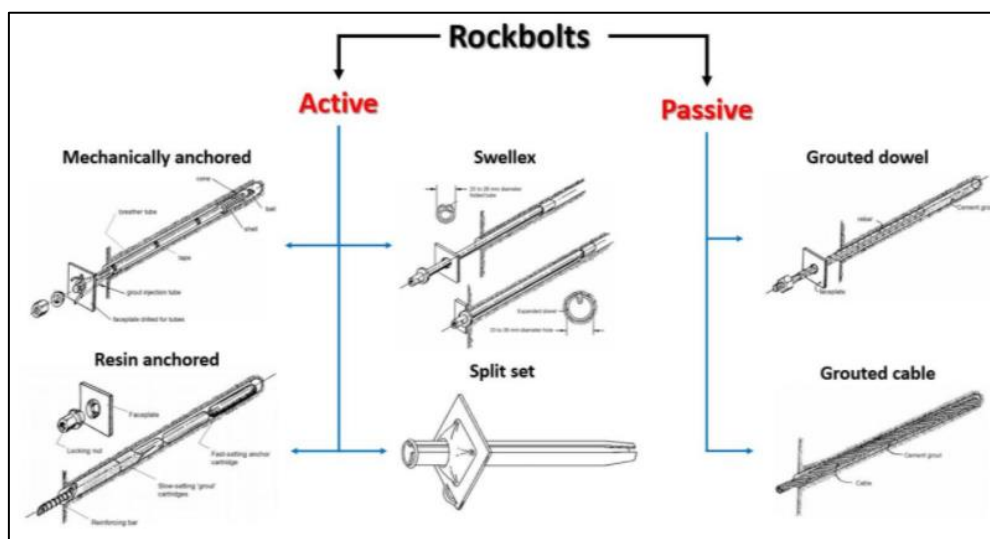
Οι ήλοι τοποθετούνται είτε σποραδικά στις θέσεις που απαιτούνται είτε συστηματικά σε τετραγωνικό ή ρομβικό κάναβο, όταν η απαίτηση είναι γενική. Η πρώτη περίπτωση αφορά ογκοτεμαχισμένα πετρώματα, τα οποία απαιτούν τη στήριξη μεμονωμένων όγκων, ενώ η δεύτερη αφορά τεκτονισμένα πετρώματα, τα οποία απαιτούν γενικευμένη στήριξη. Ο ακόλουθος Πίνακας 2.1 δίνει τους βασικούς θεωρητικούς μηχανισμούς, οι οποίοι δύναται να δρουν σε συνδυασμό σε οποιαδήποτε θέση.

<p>Μεμονωμένα Τεμάχη</p>	<p>Ανάρτηση Τεμαχών</p> 	<p>Αύξηση της αντίστασης σε ολίσθηση τεμαχών</p> 
<p>Στρωσιγενές Πέτρωμα</p>	<p>Δημιουργία ενιαίας δοκού</p> 	<p>Αποτροπή λυγισμού</p> 
<p>Κερματισμένο Πέτρωμα</p>	<p>Δημιουργία φέρουσας ασπίδας</p> 	<p>Αποτροπή αποκολλήσεων</p> 
<p>Ασθενές Πέτρωμα</p>	<p>Ακτινική στήριξη για περιορισμό ζώνης αστοχίας</p> 	<p>Ελεγχόμενη διαρροή συνθλίβοντος πετρώματος</p> 

Πίνακας 2.1. Ενίσχυση υπόγειου ανοίγματος με ηλώσεις (Douglas & Arthur , 1983).

Οι ήλιοι που χρησιμοποιούνται, διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στους ενεργητικούς και στους παθητικούς.

Οι πρώτοι εφαρμόζονται εκεί όπου απαιτείται άμεση δράση των ήλων, χωρίς περαιτέρω παραμόρφωση του πετρώματος. Ακριβώς μετά την τοποθέτησή τους, τους εφαρμόζεται τάση, ώστε να αυξήσουν την διατμητική αντοχή και τη φέρουσα ικανότητα του περιβάλλοντος πετρώματος. Οι δεύτεροι ήλιοι λειτουργούν ως σπλισμός. Η ουσιαστική διαφορά με τους πρώτους έγκειται στο ότι οι ενεργητικοί ήλιοι εφαρμόζουν μια προένταση στο πέτρωμα, ενώ η ενεργοποίηση της τάσης στους παθητικούς ήλιους εξαρτάται από την παραμόρφωση του πετρώματος που θα αναπτυχθεί. Σημειώνεται πως κάθε μια από τις δύο αυτές κύριες κατηγορίες διαχωρίζονται περαιτέρω ανάλογα με τον τρόπο της εσωτερικής σύζευξης, το υλικό της εσωτερικής σύζευξης, τον τρόπο τοποθέτησης (αυτοδιατρούμενο ή μη) κ.α.



Εικόνα 2.6. Διάφοροι τύποι ήλων άμεσης υποστήριξης (RocScience).

Αξίζει να σημειωθεί πως σε καταστάσεις όπου το μήκος των αγκυρίων, που πρόκειται να εγκατασταθούν, είναι μεγάλο, τόσο που οι διαστάσεις της σήραγγας να καθιστούν αδύνατη την τοποθέτηση αγκυρίων με μορφή συμπαγών ράβδων, λύση αποτελούν τα αγκύρια υπό μορφή εύκαμπτων καλωδίων.

2.2.4 Χαλύβδινα Πλαίσια

Ως πλαίσιο χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε δύσκαμπτος στο επίπεδο του, ασυνεχής κατά μήκος του υπόγειου ανοίγματος φορέας, ο οποίος τοποθετείται στα τοιχώματα του για να συνεισφέρει στην υποστήριξη του. Κύριο υλικό κατασκευής τους αποτελεί ο χάλυβας. Τα μεταλλικά πλαίσια ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό

και με άλλα μέτρα υποστήριξης. Η χρήση τους προορίζεται τόσο για την ενίσχυση του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μέσω της ενσωμάτωσης τους σε αυτό, όσο και για την προστασία από καταπτώσεις μεμονωμένων τεμαχίων.

Γενικότερα, διακρίνονται τρεις τύποι πλαισίων. Στον πρώτο τύπο εντάσσονται τα «ολόσωμα μεταλλικά πλαίσια από πρότυπες διατομές», συνηθέστερα διατομής ΗΕΒ, τα οποία είναι ανυποχώρητα και ανθίσταται στην παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας μέχρι του ορίου της φέρουσας ικανότητας τους. Στον δεύτερο τύπο εντάσσονται τα «ολισθαίνοντα μεταλλικά πλαίσια», τα οποία επιτρέπουν την παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας πριν από την επίτευξη της φόρτισης ίσης με την φέρουσα ικανότητα τους. Τέλος, στον τρίτο τύπο εντάσσονται τα «δικτυωτά μεταλλικά πλαίσια» εγκιβωτισμένα σε σκυρόδεμα, τα οποία λειτουργούν ως φορείς οπλισμένου σκυροδέματος.

Τα πλαίσια χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιπτώσεις σηράγγων όπου αναμένονται σημαντικές παραμορφώσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, τα πλαίσια τοποθετούνται όσο το δυνατόν πλησιέστερα και γρηγορότερα στο μέτωπο της εκσκαφής και ακολούθως καλύπτονται από σημαντικό πάχος επίστρωση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η χρήση τους πλεονεκτεί έναντι του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς αυτά είναι ικανά να παραλάβουν άμεσα φορτία και να προσφέρουν σημαντική αντιστήριξη και μείωση των παραμορφώσεων βραχυπρόθεσμα, ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αν και έχει μεγαλύτερη ακαμψία, απαιτεί ένα χρονικό διάστημα, ώστε αυτή να προλάβει να αναπτυχθεί, οπότε και η χρήση του αποσκοπεί στον περιορισμό των παραμορφώσεων μακροπρόθεσμα.

Κύριοι παράγοντες αποτελεσματικότητας των μεταλλικών πλαισίων αποτελούν:

- η κατά το δυνατόν καλύτερη επαφή των πλαισίων με την περιβάλλουσα βραχομάζα, ώστε να μεταφέρονται στη θεμελίωση τα ασκούμενα φορτία δίχως υπερβολική παραμόρφωση
- ο κατά το δυνατόν καλύτερος εγκιβωτισμός των πλαισίων μέσα στο σώμα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε η υποστήριξη να λειτουργεί ως ενιαίο σώμα
- η κατά το δυνατόν ορθότερη θεμελίωση των πλαισίων στο πάτωμα της εκσκαφής, ώστε να μεταφέρονται τα ασκούμενα φορτία και να μην φορτίζουν σε καίρια σημεία τα πλαίσια, προξενώντας αστοχίες.

Το ζήτημα της έδρασης του κελύφους υποστήριξης του θόλου και των παρειών, περιπλέκεται ακόμα περισσότερο κατά την εκσκαφή της σήραγγας σε δύο φάσεις, η οποία πλέον αποτελεί και τον συνηθέστερο τρόπο εκσκαφής. Η έδραση επιτυγχάνεται με τη διεύρυνση της διατομής του πλαισίου στο όριο άνω και κάτω διατομής, με τη χρήση μιας μεταλλικής διατομής, γνωστής και ως «ελεφαντοπόδαρο» (elephant foot).

2.2.5 Μέτρα Υποστήριξης Του Μετώπου Της Σήραγγας

2.2.5.1 Αγκύρια Μετώπου

Ειδική κατηγορία αγκυρίων αποτελούν τα αγκύρια του μετώπου εκσκαφής. Αυτά συνηθέστερα κατασκευάζονται από υαλοϊνες (fiberglass). Τοποθετούνται στο μέτωπο εκσκαφής σχεδόν οριζόντια και παράλληλα στον άξονα της σήραγγας, με σκοπό την ενίσχυση της βραχομάζας μπροστά από το μέτωπο, βελτιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ευστάθεια και μειώνοντας τις παραμορφώσεις της. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς η τοποθέτηση τους «πιέζει» το μέτωπο, δημιουργώντας μια τριαξονική εντατική κατάσταση, η οποία είναι σαφώς πιο ευνοϊκή από την αρχική κατάσταση, όπου η πίεση του μετώπου είναι μηδενική.

Το υλικό κατασκευής τους από τη μια προσφέρει εξαιρετική εφελκυστική αντοχή και ακαμψία και ταυτοχρόνως αμελητέα αντοχή σε κάμψη, προκειμένου να μπορούν εύκολα να καταστρέφονται από τα εκσκαπτικά μηχανήματα κατά την προχώρηση της σήραγγας. Τα αγκύρια μετώπου από fiberglass τυπικώς εμφανίζουν διατομή Φ25 και φέρουσα ικανότητα 200 – 300 kN. Βέβαια, μπορούν να υπάρξουν και περιπτώσεις όπου η χρήση συμβατικών χαλύβδινων αγκυρίων να κρίνεται ορθότερη, καθώς αυτά έχουν αρκετά χαμηλότερη τιμή κτήσης.

Το πλήθος και ο κάρναβος τοποθέτησης των αγκυρίων εξαρτάται από τις επιτόπου συνθήκες, δηλαδή από την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του πυρήνα της προχώρησης, το πεδίο τάσεων κ.α. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται και στο μήκος για την έγκαιρη επικάλυψη των αγκυρίων, προκειμένου να υπάρχει πάντα ικανό μέρος τους μπροστά από τον πυρήνα προχώρησης, ώστε το άκρο τους να είναι πάντα αγκυρωμένο σε μη διαταραγμένο γεωυλικό.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση των αγκυρίων μετώπου δεν ενδείκνυται για την προστασία του μετώπου από καταπτώσεις μικρών τεμαχών βράχου, καθώς αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν είτε με προσεκτικό ξεσκάρωμα, είτε με την επίστρωση

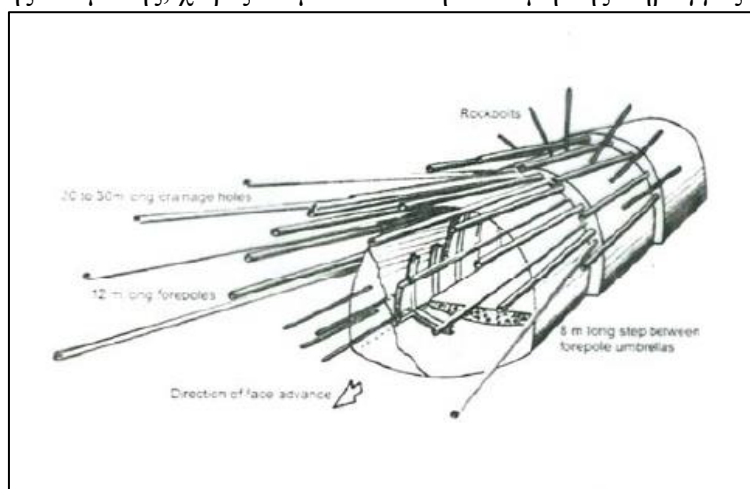
στρώματος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η χρήση των αγκυρίων μετώπου κρίνεται αναγκαία σε περιπτώσεις όπου η βραχομάζα του μετώπου είναι κατακερματισμένη, οπότε και δημιουργούνται προβλήματα καταπτώσεων και καταρροής υλικών.

2.2.5.2 Δοκοί Προπορείας

Η ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας (forepoling) αποτελεί μια αποδοτική μέθοδο εξασφάλισης της ευστάθειας τόσο των μετώπων όσο και των υπερκειμένων της σήραγγας κατασκευών, ιδιαίτερα κατά την εκσκαφή αβαθών σηράγγων. Για την εφαρμογή τους, ανοίγονται οπές στο περίγραμμα του θόλου, μέσα στις οποίες εμπηγνύονται διάτρητοι σωλήνες, εντός των οποίων εισπνέζεται τσιμεντένεμα, το οποίο μέσω των οπών των σωλήνων, διοχετεύεται στην περιοχή γύρω από τις οπές διάτρησης. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια «ομπρέλα» μέσω της οποίας γεφυρώνεται κάθε ανυποστήρικτο τμήμα του θόλου και μεταφέρονται τα φορτία του μετώπου σε απόσταση από αυτό, είτε προς το διανοιγμένο τμήμα, είτε προς το εσωτερικό του γεωλογικού σχηματισμού στον άξονα της σήραγγας.

Στην περίπτωση δομικών ή βαρυτικών αστοχιών σε ψαθυρές ή εύθρυπτες βραχομάζες με χαλαρή δομή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ελαφρά βλήτρα προπορείας (spiles). Πρόκειται για απλές ράβδους οπλισμού ή κοίλες δοκούς μικρής διαμέτρου, οι οποίες τοποθετούνται υπό μικρή γωνία στον θόλο της σήραγγας και πολύ κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής, δημιουργώντας σε αντιστοιχία με πριν μια ελαφριά «ομπρέλα».

Η τοποθέτηση των δοκών ή των βλήτρων προπορείας οφείλει να πραγματοποιείται υπό μικρή έστω γωνία προκειμένου να υπάρχει χώρος κάτω από κάθε «ομπρέλα» για την τοποθέτηση της επόμενης, χωρίς να μειώνεται η διατομή της σήραγγας.



Εικόνα 2.7. Τρισδιάστατη απεικόνιση forepoling (Μαρίνος Π. , Σημειώσεις μαθήματος: Σχεδιασμός Υπογείων Έργων, 2005)

2.2.5.3 Προσωρινό Και Μόνιμο Ανάστροφο Τόξο

Η κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου πραγματοποιείται σε μαλακές και ασθενείς βραχομάζες με σκοπό την δημιουργία προσωρινού κελύφους στην άνω ημιδιατομή, ώστε να αποτραπεί η ανύψωση του πυθμένα και η πιθανή αστοχία του. Αποτελείται συνήθως από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οπλισμένο με μεταλλικό πλέγμα και καταστρέφεται κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής της σήραγγας.

Αφότου ολοκληρωθεί η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής, οι διαστάσεις του ανοίγματος είναι μεγαλύτερες, οπότε και οι συνθήκες δυσμενέστερες. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την ανάγκη για κατασκευή του τελικού ανάστροφου τόξου, το οποίο πρακτικά λειτουργεί όπως και το προσωρινό, με την διαφορά πως το τελικό ανάστροφο τόξο δεν καταστρέφεται, αλλά ενσωματώνεται μαζί με τα λοιπά μέτρα άμεσης υποστήριξης της διατομής.



Εικόνα 2.8. Κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου (Μαρίνος Π. , Σημειώσεις μαθήματος: Σχεδιασμός Υπογείων Έργων, 2005)

2.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Σηράγγων

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης των σηράγγων έχει ως στόχο:

- να ελέγξει ότι η διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής είναι ευσταθής (ότι δηλαδή τόσο το μέτωπο παραμένει ευσταθές, όσο και ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης μπορούν να λάβουν επαρκώς τα φορτία της περιβάλλουσας βραχομάζας)
- να ελέγξει ότι οι συγκλίσεις τόσο του τοιχώματος της σήραγγας, όσο και της επιφάνειας του εδάφους βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων και
- να προσδιορίσει την διαδικασία εκσκαφής (αριθμός και διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής και μέγιστο βήμα προχώρησης), καθώς και το σύστημα

άμεσης υποστήριξης, ώστε να συνδυάζουν ικανοποιητική ασφάλεια με το ελάχιστο δυνατό κόστος

Οι μέθοδοι ανάλυσης χωρίζονται στις πειραματικές μεθόδους, στις εμπειρικές και ημι-εμπειρικές, στις αναλυτικές και στις αριθμητικές μεθόδους.

2.3.1 Πειραματικές Μέθοδοι Ανάλυσης

Οι εν λόγω μέθοδοι ανάλυσης στηρίζονται σε ομοιώματα κατασκευών που δημιουργούνται εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος. Εκμεταλλεύοντας κάποιες φυσικές ιδιότητες, κατασκευάζεται το προσομοίωμα της κατασκευής και εξομοιώνονται οι συνοριακές συνθήκες και πραγματοποιούνται οι εργαστηριακές μετρήσεις.

Οι πειραματικές μέθοδοι ανάλυσης διαιρούνται περεταίρω στις οπτικές, ηλεκτρικές και μηχανικές μεθόδους. Οι κύριες οπτικές μέθοδοι στηρίζονται στις μεθόδους συμβολής (π.χ. κροσσοί *poiré*), στις μεθόδους φωτοελαστικότητας και στη μέθοδο των καυστικών. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι στηρίζονται στην κατασκευή «ηλεκτρικών αναλόγων» από αγώγιμα υλικά, επί των οποίων εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού και μετρούνται τάσεις και ρεύματα. Στις μηχανικές μεθόδους, δύναται η κατασκευή ακριβών μηχανικών μοντέλων υπό κατάλληλη κλίμακα και να πραγματοποιηθούν σε αυτά μετρήσεις με δυναμόμετρα και παραμορφωσιόμετρα.

2.3.2 Εμπειρικές Και Ημι-Εμπειρικές Μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι αποτελούν απλές μεθόδους διαστασιολόγησης των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχόμαζας και πλεονεκτούν ως προς την ευχρηστία και την ταχύτητα, μειονεκτούν ωστόσο ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Οι ημι-εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται σε εμπειρικές μεθόδους για την επιλογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης και την εκτίμηση των φορτίων, που αυτά καλούνται να αναλάβουν. Ακολούθως, εφαρμόζεται στατική επίλυση, ώστε να εξακριβωθεί η ορθότητα των επιλογών σχεδιασμού. Οι ημι-εμπειρικές μέθοδοι πλεονεκτούν ως προς την απλότητα και την ταχύτητα, αλλά μειονεκτούν ως προς την ποικιλία εφαρμογής, καθώς, μπορούν να υπολογίσουν τα φορτία μόνο υπό συγκεκριμένες γεωτεχνικές συνθήκες.

2.3.3 Αναλυτικές Μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι στηρίζονται στην κατάστροψη κατάλληλων εξισώσεων, των οποίων η επίλυση δίνει τις ζητούμενες ασκούμενες δυνάμεις, τάσεις ή παραμορφώσεις, οι οποίες θα αναπτυχθούν σε έναν φορέα, στον οποίο ενεργεί το σύστημα δυνάμεων. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης μπορεί να επιλυθεί περιορισμένος αριθμός προβλημάτων, τα οποία περιγράφονται από απλή γεωμετρία φορέα και απλές συνθήκες φόρτισης. Η εν λόγω ανάλυση συνίσταται κυρίως στο να αναχθεί ο φορέας σε επιμέρους απλά μέρη, καταστρώνοντας και επιλύοντας τις εξισώσεις που τα περιγράφουν. Οι αναλυτικές μέθοδοι χρήζουν ευρείας αποδοχής, καθώς με τη χρήση αυτών διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η λύση ενός προβλήματος από διάφορες παραμέτρους που υπεισέρχονται, ενώ ακόμα καθίσταται ικανή η διάκριση των παραμέτρων σε αυτές με πρωτεύοντα και σε αυτές με δευτερεύοντα σημασία.

2.3.4 Αριθμητικές Μέθοδοι

Καθώς με την χρήση των αναλυτικών μεθόδων η ακρίβεια είναι περιορισμένη, λόγω της σύνθετης μαθηματικής περιγραφής των συνοριακών συνθηκών ή λόγω του ότι η μαθηματική περιγραφή των ιδιοτήτων των υλικών δεν είναι απλή, αναζητούνται προσεγγιστικές λύσεις με υπολογιστικές μεθόδους, οι οποίες εφαρμόζονται κατά την χρήση των αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης των σηράγγων. Οι αριθμητικές μέθοδοι διακρίνονται στις διαφορικές και στις ολοκληρωτικές, ανάλογα με τον χώρο που θεωρούν. Οι πρώτες απαιτούν προσεγγιστική λύση σε ολόκληρη την έκταση του χώρου του προβλήματος, ενώ οι δεύτερες απαιτούν προσέγγιση μόνο στο σύνορο του προβλήματος.

Γενικώς, οι δύο κατηγορίες των αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης μπορούν να συνδυαστούν σε ένα υβριδικό μοντέλο, με το οποίο επιτυγχάνεται η αύξηση των πλεονεκτημάτων της τελικής εφαρμοσθείσας μεθόδου, με ταυτόχρονη μείωση των μειονεκτημάτων της.

2.3.4.1 Διαφορικές Μέθοδοι Ανάλυσης

Στις διαφορικές μεθόδους, το εσωτερικό της βραχομάζας χωρίζεται σε γεωμετρικά στοιχεία, το καθένα από τα οποία έχει κάποιες υποτιθέμενες ιδιότητες. Η συνολική συμπεριφορά και αλληλεπίδραση των στοιχείων αυτών προσομοιώνει τη συμπεριφορά της βραχομάζας. Οι διαφορικές μέθοδοι διαιρούνται στην μέθοδο των πεπερασμένων

διαφορών και στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ανάλογα με το αν γίνονται μαθηματικές προσεγγίσεις για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων ή φυσικές προσεγγίσεις με την διαμέριση του χώρου του προβλήματος σε επί μέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δίνει μια προσεγγιστική λύση σε ένα πρόβλημα με ακριβή μαθηματική περιγραφή και χρησιμοποιείται σε μη-μόνιμα ή δυναμικά προβλήματα.

Πλέον, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί την συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανάλυσης της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή επιλύονται προβλήματα, που χαρακτηρίζονται από μη-γραμμική συμπεριφορά των υλικών, όπως είναι η πλαστικότητα και η ανομοιογένεια. Κατά την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώνονται τα διαδοχικά στάδια της εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας, καθώς και η χρονική καθυστέρηση στην τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης μετά την εκσκαφή κάποιας φάσης. Τόσο η βραχομάζα, όσο και τα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης προσομοιώνονται ως ελαστοπλαστικά υλικά, με κάποια ελαστικά χαρακτηριστικά και ένα κριτήριο αστοχίας που καθορίζει το πέρας της ελαστικής τους συμπεριφοράς.

Αποτέλεσμα της ανάλυσης με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν ο υπολογισμός των παραμορφώσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας, της έκτασης της πλαστικής περιοχής στην βραχομάζα που περιβάλλει τη σήραγγα και της έντασης των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

2.3.4.2 Ολοκληρωτικές Μέθοδοι Ανάλυσης

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, οι ολοκληρωτικές μέθοδοι προσεγγίζουν το θέμα μόνο στο σύνορο ενός στερεού σώματος, όπου και πραγματοποιείται η επίλυση και στη συνέχεια, με ολοκλήρωση, προσδιορίζονται τα ζητούμενα μεγέθη σε οποιοδήποτε σημείο του στερεού σώματος. Λόγω αυτού, μειώνεται σε μεγάλο βαθμό το πλήθος των εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν, καθώς αυτές πλέον καταστρώνονται μόνο στο σύνορο.

Οι ολοκληρωτικές μέθοδοι διαιρούνται περαιτέρω στις άμεσες, συνοριακές ολοκληρωτικές εξισώσεις και στις έμμεσες, στις οποίες υπάγονται η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων και η μέθοδος των ασυνεχειών των μετατοπίσεων. Θεωρώντας πως χρησιμοποιούνται συνοριακές ολοκληρωτικές εξισώσεις για την ανάλυση ενός προβλήματος σήραγγας, ως σύνορα της σήραγγας θεωρούνται πως αποτελούν τα

τοιχώματα της, το μέτωπο της εκσκαφής, οι διεπιφάνειες των ασυνεχειών και των διαφορετικών γεωϋλικών της βραχομάζας, καθώς και η ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους στις περιπτώσεις ρηχών σηράγγων.

2.4 Παράμετροι Σχεδιασμού

Οι παράμετροι σχεδιασμού για την διάνοιξη των σηράγγων αναφέρονται στον καθορισμό των τιμών των ιδιοτήτων του γεωϋλικού, οι οποίες λαμβάνονται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό. Πρωταρχικό ρόλο στην λήψη των κατάλληλων τιμών των ιδιοτήτων έχει η γεωλογική και τεχνικογεωλογική μελέτη, όπου μέσω αυτών προκύπτουν τα εύρη κάθε ιδιότητας και ακολούθως ο μελετητής λαμβάνει, κατά την κρίση του, την πιο αντιπροσωπευτική τιμή. Είναι συχνό φαινόμενο από τα εύρη των τιμών, να λαμβάνονται οι ελάχιστες τιμές, ειδικά όταν οι αβεβαιότητες κατά τη μελέτη είναι υψηλές. Οι κύριοι παράμετροι σχεδιασμού είναι:

- Τιμές Συστημάτων Γεωτεχνικών Ταξινομήσεων

Η χρήση των συστημάτων γεωτεχνικών ταξινομήσεων επικεντρώνεται στην εκτίμηση των παραμέτρων σχεδιασμού της βραχομάζας και για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, στην οποία σχεδιάζεται η διάνοιξη, απομειώνοντας τις αντίστοιχες του άρρηκτου βράχου. Λόγω αυτού, αποτελούν ένα πρώτο εργαλείο ένδειξης της αναμενόμενης συμπεριφοράς της βραχομάζας, καθώς και των αναμενόμενων αστοχιών.

Στη σημερινή εποχή κυριαρχούν τρία συστήματα γεωτεχνικής ταξινόμησης, το RMR, το Q και το GSI. Αν και το κάθε ένα έχει διαφορετικές συνιστώσες για τον υπολογισμό του, το αποτέλεσμα του κάθε ενός δίνει στοιχεία για την συμπεριφορά της βραχομάζας. Γι' αυτό και κρίνεται δόκιμη η εφαρμογή και των τριών συστημάτων, ώστε να συγκριθούν οι τιμές μεταξύ τους και να ληφθούν πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα.

- Ύψος Υπερκειμένων (H)

Το ύψος των υπερκειμένων εδαφών συντελεί στην ασκούμενη κατακόρυφη τάση που θα ασκείται στην στέψη της σήραγγας. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η κατακόρυφη ασκούμενη τάση. Γενικότερα αυτό μεταβάλλεται κατά μήκος του υπογείου έργου, οπότε και γίνονται συντηρητικές παραδοχές, όπου συνήθως λαμβάνεται υπόψιν το μέγιστο ύψος κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας.

- Συντελεστής Γεωστατικών Ωθήσεων (K)

Ο συντελεστής γεωστατικών ωθήσεων αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα, καθώς συμβάλει στον ασκούμενο εντατικό πεδίο (ειδικότερα για τις πλευρικές πιέσεις) που επικρατεί στην περιοχή της σήραγγας, τόσο πριν όσο και μετά την διάνοιξη. Ο προσδιορισμός του εν λόγω συντελεστή έχει ιδιαίτερα μεγάλη αβεβαιότητα. Παρολαυτά, ενώ στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν γενικές συστάσεις για την τιμή του ανάλογα με το ύψος υπερκειμένων και την ποιότητα του γεωυλικού, τελικά αυτός προσδιορίζεται μέσω παραμετρικών αναλύσεων.

ο Αντοχή Άρρηκτου Βράχου Σε Μονοαξονική Θλίψη (σ_{ci})

Η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη λαμβάνεται μέσω κατάλληλης στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονική θλίψης ή σημειακής φόρτισης. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την λήψη των δειγμάτων, ώστε αυτά να αποτελούν τμήμα του άρρηκτου βράχου. Το σ_{ci} και το GSI μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως παράμετροι σχεδιασμού, εφόσον η επίλυση πραγματοποιηθεί με την χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown.

ο Σταθερά Υλικού (m_i)

Το m_i αποτελεί σταθερά του υλικού, καθώς εξαρτάται άμεσα από την πετρογραφική του σύσταση. Η σταθερά αυτή εκφράζει πόσο καλά κλειδωμένοι – συγκολλημένοι είναι οι κόκκοι των ορυκτών στην σύνθεση του άρρηκτου πετρώματος. Η τιμή της προσδιορίζεται μέσω των αποτελεσμάτων τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια άρρηκτου βράχου. Αν δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η τριαξονική δοκιμή, τότε οι τιμές της σταθεράς m_i λαμβάνονται μέσω πινάκων της διεθνούς βιβλιογραφίας και οι οποίες θεωρούνται αξιόπιστες καθώς η συγκεκριμένη σταθερά αποτελεί την παράμετρο με την μικρότερη αβεβαιότητα και την μικρότερη ευαισθησία.

ο Ισοδύναμη συνοχή (c) και ισοδύναμη γωνία τριβής (ϕ)

Για να θεωρηθεί η ισοδύναμη συνοχή και γωνία τριβής παράμετροι σχεδιασμού, πρέπει ο σχεδιασμός να πραγματοποιηθεί με την χρήση του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb. Ο υπολογισμός της ισοδύναμης συνοχής πραγματοποιείται είτε εμπειρικά από τον εκάστοτε μελετητή είτε με βάση την τιμή του GSI, την αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη, τη σταθερά του υλικού και του ύψους των υπερκειμένων, με χρήση της μεθοδολογίας που προτείνεται από τους Hoek, Carranza

– Torres & Corkum (2002). Η ισοδύναμη γωνία τριβής λαμβάνεται κατά κύριο λόγο εργαστηριακά.

ο Αντοχή Βραχομάζας (σ_{cm})

Για να προσδιοριστεί η αντοχή της βραχομάζας, απαιτείται η γνώση της τιμής GSI, της αντοχής του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη και τη σταθερά του υλικού. Οι τιμές αυτές είναι αναγκαίες ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία των τους Hoek, Carranza – Torres & Corkum (2002). Η αντοχή της βραχομάζας δεν εξαρτάται από το ύψος των υπερκειμένων, όμως παρολαυτά αποτελεί μια ιδιότητα «ταυτότητα» για το γεωυλικό.

ο Μέτρο Παραμορφωσιμότητας (E)

Για να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας ή παραμορφωσιμότητας, απαιτείται η γνώση της τιμής GSI, της αντοχής του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη και της τιμής του συντελεστή διαταραχής (D). Οι τιμές αυτές είναι αναγκαίες ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία των τους Hoek, Carranza – Torres & Corkum (2002). Οι Hoek & Diederichs (2006) πρότειναν μια εξίσωση, η οποία προσδιορίζει τον δείκτη E_i , ο οποίος ακολουθεί τη λογική της απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος, όπως συμβαίνει και με την αντοχή της βραχομάζας. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί πως η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μπορεί να ληφθεί και εργαστηριακά.

2.5 Συμπεριφορά Βραχομάζας - Μηχανισμοί Αστοχίας

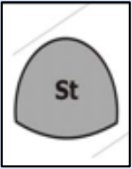

Οι όροι του τίτλου του παρόντος υποκεφαλαίου συμπεριλαμβάνουν όλους τους μηχανισμούς διακινδύνευσης της ευστάθειας της διατομής μιας σήραγγας, είτε όταν αυτή ακόμα βρίσκεται στο στάδιο της διάνοιξης, οπότε και η υποστήριξη δεν έχει εγκατασταθεί, είτε όταν έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης και πλέον η βραχομάζα συμπεριφέρεται ως σύνολο με το κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης. Σκοπός της πρώτης κατηγορίας αποτελεί η εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας, ώστε να αποδοθούν οι κατάλληλοι παράμετροι σχεδιασμού, ενώ σκοπός της δεύτερης αποτελεί ο έλεγχος της συμπεριφοράς του συστήματος του κελύφους προσωρινής υποστήριξης.

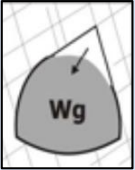
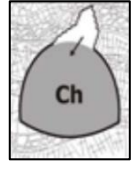
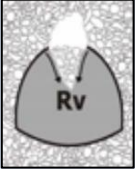


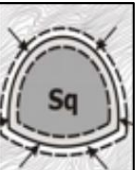
2.5.1 Μηχανισμοί Αστοχίας Ανυποστήρικτης Διατομής

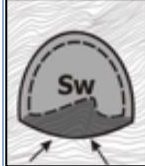
Για την εκτίμηση των μηχανισμών αστοχίας μια ανυποστήρικτης διατομής οι Goricki et al. (2004) και ο Schubert (2004), έπειτα από έρευνες που διεξήγαγαν, συμπεραίνουν πως για την εκτέλεση ενός ορθολογικού σχεδιασμού, είναι να δυνατόν να ακολουθηθεί η εξής διαδικασία:

1. Προσδιορισμός των τύπων βραχομάζας, στους οποίους μπορεί να περιλαμβάνονται υλικά από διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, που όμως έχουν κοινή συμπεριφορά
2. Εκτίμηση της συμπεριφοράς των προαναφερθέντων τύπων βραχομαζών
3. Καθορισμός του συστήματος εκσκαφής και υποστήριξης, βασισμένο πάνω σε τυποποιημένες κατηγορίες συμπεριφοράς
4. Διακριτοποίηση κατά μήκος της σήραγγας περιοχών με κοινά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις εκσκαφής και υποστήριξης και ταυτόχρονη προσαρμογή αυτών με τους περιορισμούς και τα επιτόπου κριτήρια κατασκευής
5. Καθορισμός κατηγοριών εκσκαφής και υποστήριξης

Βασισμένος στην παραπάνω μεθοδολογία ο Μαρίνος Β. (2007) ανέπτυξε μια παρόμοια, η οποία προέκυψε από την αξιολόγηση των 62 σηράγγων της Εγνατίας Οδού, αλλά και από στοιχεία άλλων σηράγγων, τόσο στον Ελλαδικό χώρο, όσο και παγκοσμίως. Σημειώνεται πως χαρακτηριστική παράμετρος για την κατηγοριοποίηση από τον εν λόγω ερευνητή επιλέχθηκε η συμπεριφορά του γεωυλικού. Οι συμπεριφορές που διακρίθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Αναμενόμενη Συμπεριφορά	Συμβολισμός	Συνοπτική Περιγραφή	
Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες	St	Η βραχομάζα είναι συμπαγής με περιορισμένες ασυνέχειες.	
Ψαθυρή θραύση ή εκτίναξη βράχου σε πολύ μεγάλα βάθη	Br	Εκτίναξη βράχου λόγω των μεγάλων ασκούμενων τάσεων, απόρροια του μεγάλου βάθους.	

Σφηνοειδής ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας	Wg	<p>Βραχομάζα μέτρια έως αρκετά κερματισμένη. Η ευστάθεια ελέγχεται από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (π.χ. γωνία τριβής, συνοχή κ.α.).</p> <p>Ασήμαντες Παραμορφώσεις. Ο λόγος της αντοχής της βραχομάζας προς τις επιτόπου τάσεις (σ_{cm}/p_0) είναι μεγάλος ($>0,6-0,7$) και δεν δημιουργούνται συνθήκες παραμόρφωσης ($\epsilon < 1\%$).</p>	
Υπερεκσκαφή ή αστοχία τύπου καμινάδας	Ch	<p>Βραχομάζα έντονα κερματισμένη, διατηρώντας τη δομή της. Το πτωχό αλληλοκλειδώμα των τεμαχίων μεταξύ τους, σε συνδυασμό με τις μικρές πλευρικές τάσεις οδηγούν στην εν λόγω αστοχία.</p>	
Άμεση καταρροή της βραχομάζας στο εσωτερικό της σήραγγας	Rv	<p>Βραχομάζα πλήρως αποδιοργανωμένη/συντετριμμένη/φυλλοποιημένη, με μηδενική πρακτικά συνοχή. Συνήθως έχει μεγάλη έκταση, με άμεση εκδήλωση ελέω του μικρού μεγέθους των τεμαχών και του πτωχού αλληλοκλειδώματος τους.</p>	
Άμεση ροή βραχομάζας και νερού στο εσωτερικό της σήραγγας	Fl	<p>Κερματισμένη βραχομάζα με μικρή ή μηδενική συνοχή και με έντονη παρουσία νερού ανάμεσα στα τεμάχια.</p>	
Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις	Sh	<p>Η εκδήλωση των διατμητικών αυτών παραμορφώσεων παρατηρείται σε μικρή ζώνη πέριξ της σήραγγας. Εμφανίζεται σε βραχομάζες με αντοχή άρρηκτου πετρώματος $< 15\text{MPa}$ και για βάθη συνήθως από 50m και άνω. Ο λόγος σ_{cm}/p_0 είναι συνήθως μικρός (μεταξύ 0,3 και 0,6) και αναμένονται ή παρατηρούνται μέτριες παραμορφώσεις ($1\% < \epsilon < 2,5\%$).</p>	
Σημαντικές παραμορφώσεις - Σύνθλιψη	Sq	<p>Εκδήλωση διατμητικών παραμορφώσεων σε μεγάλη έκταση πέριξ της σήραγγας. Η βραχομάζα αποτελείται από τεμάχια με αντοχή άρρηκτου πετρώματος $< 15\text{MPa}$. Ο λόγος σ_{cm}/p_0 είναι μικρός ($< 0,3$) και αναμένονται ή παρατηρούνται παραμορφώσεις ($\epsilon > 2,5\%$), ενώ μπορεί να εκδηλώνονται παραμορφώσεις και στο μέτωπο.</p>	

Ανισότροπες παραμορφώσεις	Sq_{an}	Παρατηρείται σε ετερογενείς βραχομάζες, όπου είναι ασθενείς και εκδηλώνει ιδιαίτερα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά κατά μήκος συγκεκριμένης διεύθυνσης, τα οποία προκαλούνται είτε από πεδίο ανισότροπων τάσεων ή ενδεχόμενη ανισοτροπία στη δομή της βραχομάζας.	
Διογκούμενο έδαφος	Sw	Η βραχομάζα αποτελείται από σημαντική παρουσία διογκούμενων ορυκτών, όπως ο μοντμοριλονίτης, τα οποία με τη παρουσία νερού, ακόμα και υγρασίας, διογκώνονται και μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές παραμορφώσεις.	
Εκτεταμένη μετακίνηση κυκλοειδούς μορφής σε σήραγγες πρηνούς λόγω θραύσης του πρηνούς	SI	Εκτεταμένη κατολισθητική μετακίνηση ασθενών υλικών στο περιβάλλον της σήραγγας σε κλιτυοσήραγγες.	

Πίνακας 2.2. Κύριες κατηγορίες τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων. (Μαρίνος Β. Π., 2007)

Αξίζει να σημειωθεί πως οι αστοχίες που εντάσσονται στην κατηγορία «SI» αντιμετωπίζονται κατά κύριο λόγο με τους ίδιους τρόπους που αντιμετωπίζεται η ευστάθεια και η αντιστήριξη του πρηνούς που περνά η σήραγγα.

Εκτός από τις ανωτέρω κύριες κατηγορίες τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των γεωυλικών κατά την διάνοιξη των σηράγγων, είναι σύνηθες φαινόμενο η εμφάνιση αστοχιών, οι οποίες περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά από δύο κύριες κατηγορίες, οπότε και πρακτικά περιγράφονται από μία ενδιάμεση κατάσταση. Οι ενδιάμεσες κατηγορίες τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των γεωυλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Αναμενόμενη Συμπεριφορά	Συμβολισμός	Συνοπτική Περιγραφή
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ St και Wg	St-Wg	Αυξημένη πιθανότητα ολίσθησης και κατάπτωσης τεμαχών σε σχέση με τη συμπεριφορά St.

Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Wg και Ch	Wg-Ch	Κυρίως σφηνοειδής ολισθήσεις και καταπτώσεις με ενδεχόμενες εμφανίσεις υπερεκσκαφών τύπου καμινάδας σε θέσεις πιο έντονου κερματισμού.
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Wg και Sh	Wg-Sh	Κυρίως σφηνοειδής ολισθήσεις και καταπτώσεις με ενδεχόμενη εμφάνιση περιορισμένων διατμητικών αστοχιών και μικρών παραμορφώσεων.
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Ch και Wg	Ch-Wg	Κυρίως καταπτώσεις που προοδευτικά αναπτύσσονται και δημιουργούν υπερεκσκαφή τύπου καμινάδας με ενδεχόμενες σφηνοειδείς καταπτώσεις τεμαχών πιο μεγάλου μεγέθους.
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Ch και Sh	Ch-Sh	Κυρίως καταπτώσεις που προοδευτικά αναπτύσσονται και δημιουργούν υπερεκσκαφή τύπου καμινάδας με ενδεχόμενη εμφάνιση περιορισμένων διατμητικών αστοχιών και μικρών παραμορφώσεων στη συνέχεια.
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Ch και Rv	Ch-Rv	Κυρίως καταπτώσεις που προοδευτικά αναπτύσσονται και δημιουργούν υπερεκσκαφή τύπου καμινάδας, που κατά τόπους γεφυρώνονται σε μικρή απόσταση από τη σήραγγα, λόγω της παρουσίας αποδιοργανωμένου υλικού ή απουσίας σημαντικών πλευρικών τάσεων
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Sq και Ch	Sq-Ch	Εφόσον η βραχομάζα δεν έχει τόσο χαμηλές αντοχές άρρηκτου βράχου, αλλά έχει και διατηρεί μια κερματισμένη – μη αποδιοργανωμένη δομή, μπορεί να εκδηλώσει μικροκαταπτώσεις τύπου καμινάδας, ακολουθώντας τον κερματισμό της βραχομάζας.

Πίνακας 2.3. Ενδιάμεσες κατηγορίες τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων. (Μαρίνος Β. Π., 2007)

3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ & ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ

3.1 Γενικά Στοιχεία

Ο όρος «οφιόλιθος» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1813 από τον Γάλλο ορυκτολόγο *Alexandre Brongniart*, σε αναφορές του σε σερπεντινίτες που εμφανίζονταν μέσα σε μίγματα διαφόρων ετερογενών πετρωμάτων. Αργότερα, περί το 1821, ο εν λόγω ερευνητής, διευκρίνισε ότι οι οφιόλιθοι είναι μια σύνθετη ακολουθία πετρωμάτων, η οποία αποτελείται από υπερβασικά πετρώματα, γάββρους, διαβάσες – σπιλίτες και συνυπάρχοντες κερατόλιθους.

Η σύνθεση του όρου προέρχεται από το Ελληνικό «όφις» και «λίθος», διότι η μορφή των πετρωμάτων, που αντιπροσωπεύει, έχουν χρώμα πρασινίζων και υφή στικτή και λεία, ελέω της παρουσίας του σερπεντίνη, προσομοιάζοντας το δέρμα πολλών ερπετών.

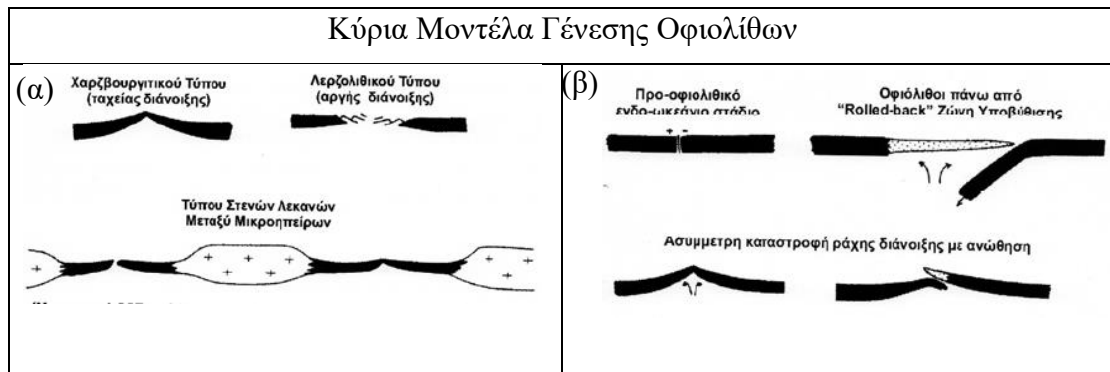
3.2 Γεωλογικό Πρότυπο Οφιολίθων

3.2.1 Γεωλογικό Περιβάλλον

Γενικότερα, η δημιουργία ενός οφιολιθικού συμπλέγματος είναι απόρροια σύνθετων γεωλογικών διεργασιών με διαφορετικούς συμμετέχοντες πετρολογικούς τύπους, βαθμό τεκτονικής καταπόνησης και με κύριο χαρακτηριστικό, τον βαθμό και την έκταση της «σερπεντινίωσης» των περιεχομένων σχηματισμών. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται σαφές πως η αντοχή τόσο του άρρηκτου βράχου, όσο και της βραχομάζας θα λαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τιμών, με συνέπεια να δυσχεραίνονται οι συνθήκες κατά τη διάνοιξη μεγάλων τεχνικών έργων, όπως είναι οι σήραγγες.

Τα κύρια μοντέλα γένεσης των οφιολίθων είναι δύο (Robertson , 2002):

- το μοντέλο καταβύθισης (Supra-Subduction Zone – SSZ), κατά το οποίο ένα τέμαχος του φλοιού καταβυθίζεται κάτω από το έτερο τέμαχος
- το μοντέλο μεσοωκεάνιας ράχης ή διάνοιξης (Mid-Ocean Ridge – MOR), κατά το οποίο οι δύο λιθοσφαιρικές πλάκες «ανοίγουν», ανέρχεται το μάγμα και ψύχεται απότομα λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας στα βάθη των ωκεανών.



Εικόνα 3.1. Μοντέλα γένεσης οφιολίθων (α) Ζώνης καταβύθισης (SSZ) και (β) Μεσοωκεάνιων ραχών (MOR) (Robertson, 2002).

Μετά την δεκαετία του 1990, η ερμηνεία της γένεσης και εξέλιξης των οφιολιθικών συμπλεγμάτων στηρίζεται σε γεωτεκτονικά περιβάλλοντα περιθωριακών λεκανών πάνω από καταβυθιζόμενη λιθόσφαιρα σε ωκεάνιο φλοιό, που αποτελεί συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων μοντέλων. Η ανάπτυξη των μοντέλων αυτών βασίστηκε σε γεωχημικά δεδομένα οφιολιθικών εμφανίσεων προερχόμενα από περιβάλλοντα ενεργών περιθωριακών λεκανών, όπου χαρακτηρίζονται από συνθήκες εφελκυσμού και υψηλής θερμικής ροής (Taylor & Natland, 1995, Moores & Twiss, 1995)

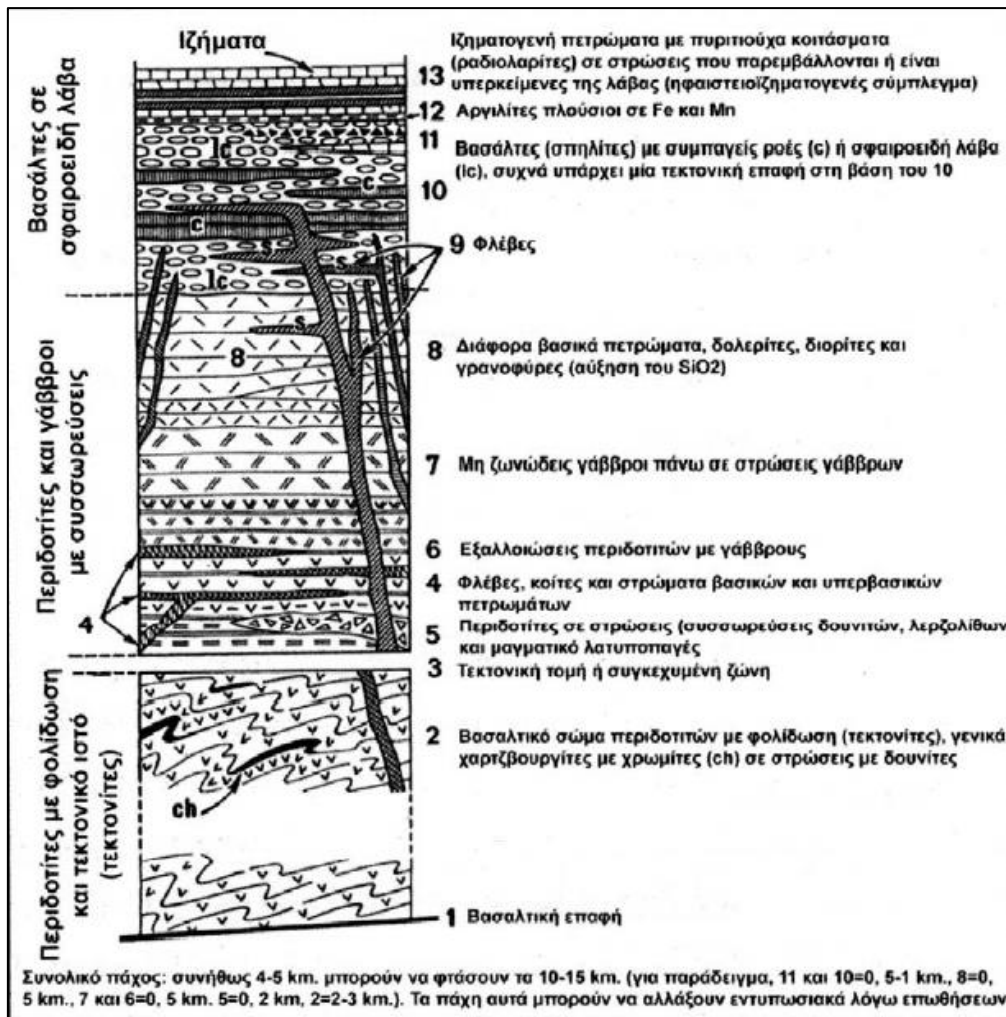
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως οι οφιολιθικοί σχηματισμοί θεωρούνται τμήματα του ωκεάνιου φλοιού, τα οποία δημιουργήθηκαν σε μια ωκεάνια ράχη και στον ανώτερο μανδύα ενός παλαιού ωκεανού και τα οποία ακολούθως επωθήθηκαν στον ηπειρωτικό φλοιό κατά τη διάρκεια της ορογένεσης, δηλαδή κατά τη σύγκρουση μεταξύ δύο ηπείρων ή μεταξύ μιας ηπείρου και ενός νησιωτικού τόξου.

3.2.2 Λιθολογία

Τα οφιολιθικά συμπλέγματα αποτελούνται από μια ευρεία ποικιλία υλικών. Πιο συγκεκριμένα, μια πλήρης λιθοστρωματογραφική διάρθρωση μιας ολοκληρωμένης οφιολιθικής ακολουθίας από τα ανώτερα προς τα κατώτερα μέλη έχει ως εξής:

- Πελαγικές ιζηματογενείς ακολουθίες (κερατόλιθοι, αργιλικοί σχίστες, ασβεστόλιθοι)
- Βασικής σύστασης σύστημα έκχυτων ηφαιστειακών, συχνά με μαξιλαροειδείς δομές (pillow lavas)
- Σύστημα πολλαπλών φλεβών βασικής σύστασης
- Γαββρικά πετρώματα
- Υπερβασικοί σωρείτες
- Υπερβασικοί τεκτονίτες (λερζόλιθοι, δουνίτες)

Στην ακόλουθη Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η θεωρητική απεικόνιση της λιθολογικής στήλης των οφιολιθικών συμπλεγμάτων.



Εικόνα 3.2. Συνθετική και θεωρητική στήλη οφιολιθικού συμπλέγματος (Foucault A., Raoult J.F., 1995)

Γενικότερα, παρατηρείται πως η γεωμετρία του εν λόγω σχηματισμού είναι σημαντικά διαταραγμένη, καθώς, ως επί το πλείστον, τα οφιολιθικά συμπλέγματα εμφανίζονται σε τεκτονικές ζώνες με επαλληλία πολλαπλών επωθήσεων (Skemp & McCaig, 1984).

3.2.3 Τεκτονική

Ο παρατηρούμενος τεκτονισμός των οφιολιθικών συμπλεγμάτων συνδέεται άμεσα με την σερπεντινίωση¹ και τον βαθμό αποσάθρωσης του. Ως γενικότερη νόρμα μπορεί να θεωρηθεί πως ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα, λόγω της φυσικής του σύνδεσης με το ορογενές, κατέχει μεγάλο βαθμό τεκτονισμού, με πολλές λεπιώσεις και διατμήσεις. Με βάση αυτό, στις ενδιάμεσες περιοχές από τις προαναφερθείσες ζώνες τεκτονισμού, η βραχομάζα εμφανίζεται συμπαγής, με μέτριο βαθμό κερματισμού, ενώ στις ζώνες

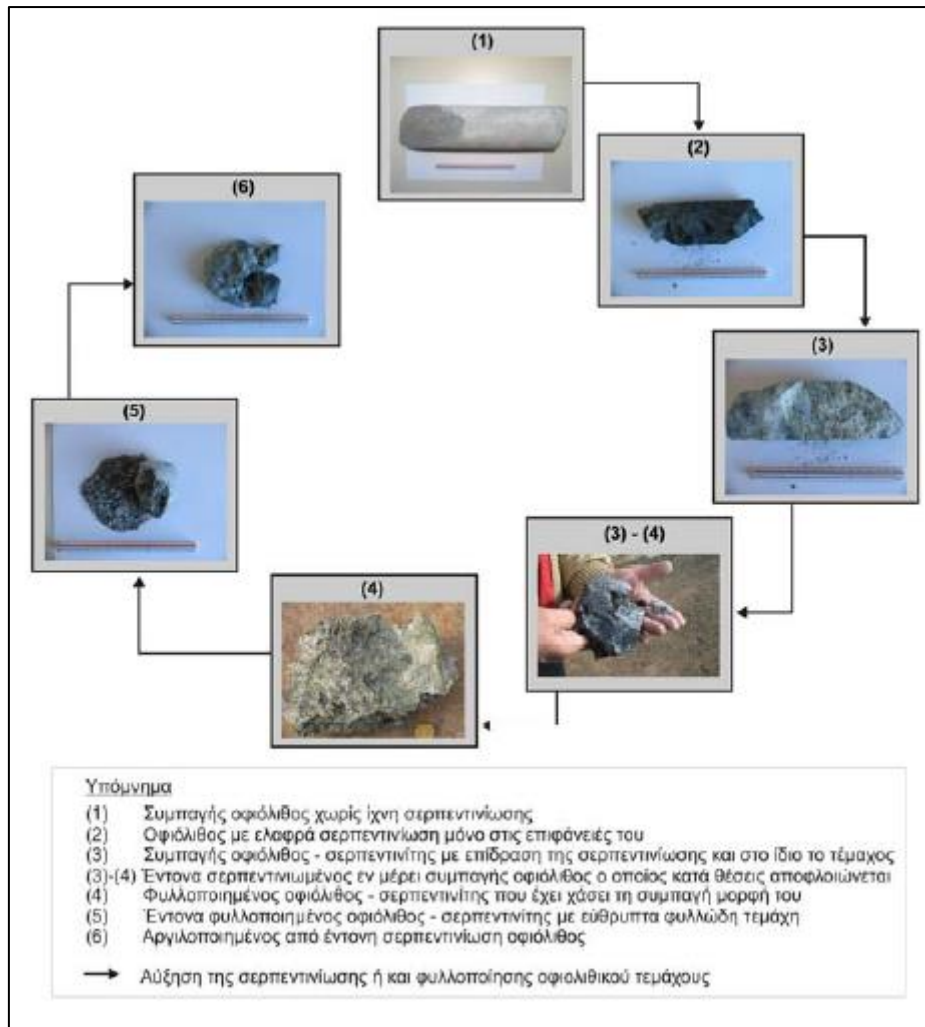
¹ Βλ. επόμενη παράγραφο

τεκτονισμού, η βραχομάζα καλύπτεται από ασυνέχειες με μεγάλη εμμονή και οι οποίες μπορεί να εμφανίζουν σερπεντινίωση. Ειδικότερα, στις περιοχές της βραχομάζας, όπου η σερπεντινίωση είναι ιδιαίτερα έντονη, οι ασυνέχειες χάνουν τον βασικό χαρακτήρα τους, καθώς έχει επέλθει αυξημένη φυλλοποίηση της βραχομάζας. Η εν λόγω φυλλοποίηση οδηγεί στην αργιλοποίηση της βραχομάζας. Αξίζει να σημειωθεί, πως οι παραπάνω περιγραφές της κατάστασης της βραχομάζας, αφορούν τις δύο ακραίες περιπτώσεις και το πιο σύνηθες είναι η βραχομάζα να εμφανίζεται με μια ενδιάμεση δομή, που αποτελεί συνδυασμό των δύο ακραίων, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η εμφάνιση της βραχομάζας με μια εκ των δύο ακραίων περιπτώσεων.

3.2.4 Αποσάθρωση

Η αποσάθρωση στα οφιολιθικά συμπλέγματα οφείλεται κυρίως στον μετασχηματισμό των σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών των πετρωμάτων σε σερπεντίνη και γι' αυτό συχνά καλείται και ως «σερπεντινίωση». Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός του ολιβίνη σε σερπεντίνη, ένα ορυκτό με ιδιαίτερη φυλλώδη ή ινώδη μορφή (ενδογενής σερπεντινίωση). Η εξαλλοίωση αυτή αποτελεί ένα είδος αυτοενυδάτωσης και συμβαίνει στις τελικές φάσεις κρυστάλλωσης του μάγματος και λόγω αυτού, μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα είδος μεταμορφισμού (Foucault & Rault, 1995).

Η σερπεντινίωση μπορεί κάλλιστα να δημιουργηθεί και κάτω από εξωγενείς συνθήκες με μετεωρικό νερό και σε κανονικές διεργασίες αποσάθρωσης. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, το αρχικό περιδοτικό πέτρωμα μετατρέπεται σε μια εδαφική αργιλική μάζα. Οι μορφές αυτές συναντώνται συνηθέστερα στην επιφάνεια του εδάφους, που το πέτρωμα είναι πιο χαλαρό και έτσι διευκολύνεται η αποσάθρωση.



Εικόνα 3.3. Εξέλιξη του βαθμού σερπεντινίωσης σε άρρηκτο οφιολιθικό τέμαχος (Μαρίνος Β. Π., 2007)

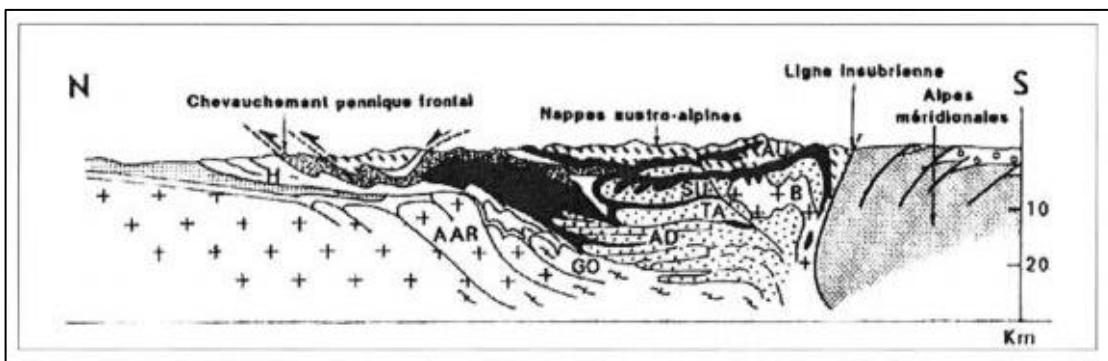
3.2.5 Υδρογεωλογικό Καθεστώς

Όπως έχει αναφερθεί, οι οφιολίθοι απαρτίζονται από ένα ευρύ φάσμα πετρωμάτων, με διακυμάνσεις ακόμα και στην ποιότητα τους. Γενικότερα, τα βασικά και υπερβασικά πετρώματα, τα οποία είναι αδιατάρακτα, χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατα, με τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας της τάξης του 10^{-6} έως 10^{-7} m/sec. Στην περίπτωση που αυτά εμφανίζουν ασυνέχειες εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης και χαλάρωσης, λόγω της επιφανειακής αποσάθρωσης, στα ανώτερα στρώματα τους εμφανίζεται κατά θέσεις αυξημένη διαπερατότητα, η οποία ωστόσο ελέγχεται από την πυκνότητα και την κατάσταση των ασυνεχειών. Παρολαυτά, παρατηρείται συχνά, οι ασυνέχειες, που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, να είναι πληρωμένες με τα αργιλικά υλικά της αποσάθρωσης, με αποτέλεσμα να παρατηρείται, τελικώς, μείωση της διαπερατότητας (Μαρίνος Β. Π., 2007).

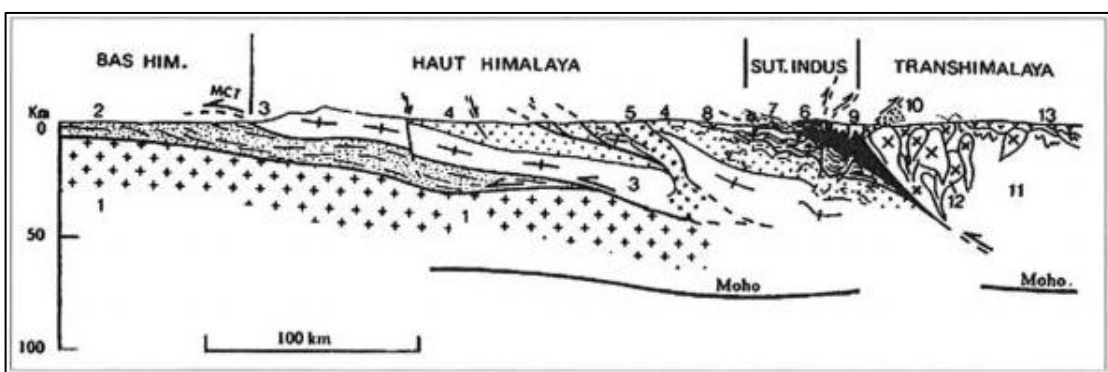
Συγκεντρωτικά, μπορεί να αποφανθεί ότι, η υπόγεια κίνηση του νερού είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάπτυξη κερματισμένων ή αποσαθρωμένων ζωνών στην εσωτερική μάζα των εν λόγω πετρωμάτων, με ανοιχτές διακλάσεις, οπότε και επιτρέπεται η απρόσκοπτη κατείσδυση και σε βάθος κίνηση του νερού. Όμως, οι ζώνες κερματισμού, λόγω της τεκτονικής καταπόνησης τους, λειτουργούν και ως ζώνες αποστράγγισης του επιφανειακού υδροφόρου ορίζοντα, και ως εκ τούτου ο συντελεστής διαπερατότητας να αυξάνεται και να λαμβάνει τιμές από 10^{-3} έως 10^{-5} m/sec (Μαρίνος Β. Π., 2007).

3.2.6 Οφιολιθικές Εμφανίσεις

Οι οφιόλιθοι, σε παγκόσμιο επίπεδο, εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στις περιοχές με έντονο ορογενές, καθώς, όπως αναφέρθηκε σε ανώτερη παράγραφο, σχετίζονται άμεσα με αυτό. Στις περιοχές αυτές, όπως είναι φυσικό, συμπεριλαμβάνονται οι Άλπεις, τα Ιμαλάια και οι Άνδεις. Στις Εικόνες 3.4 και 3.5 παρουσιάζεται το γενικό γεωλογικό μοντέλο των οφιολιθικών σχηματισμών σε κάθε μια από τις παραπάνω οροσειρές.

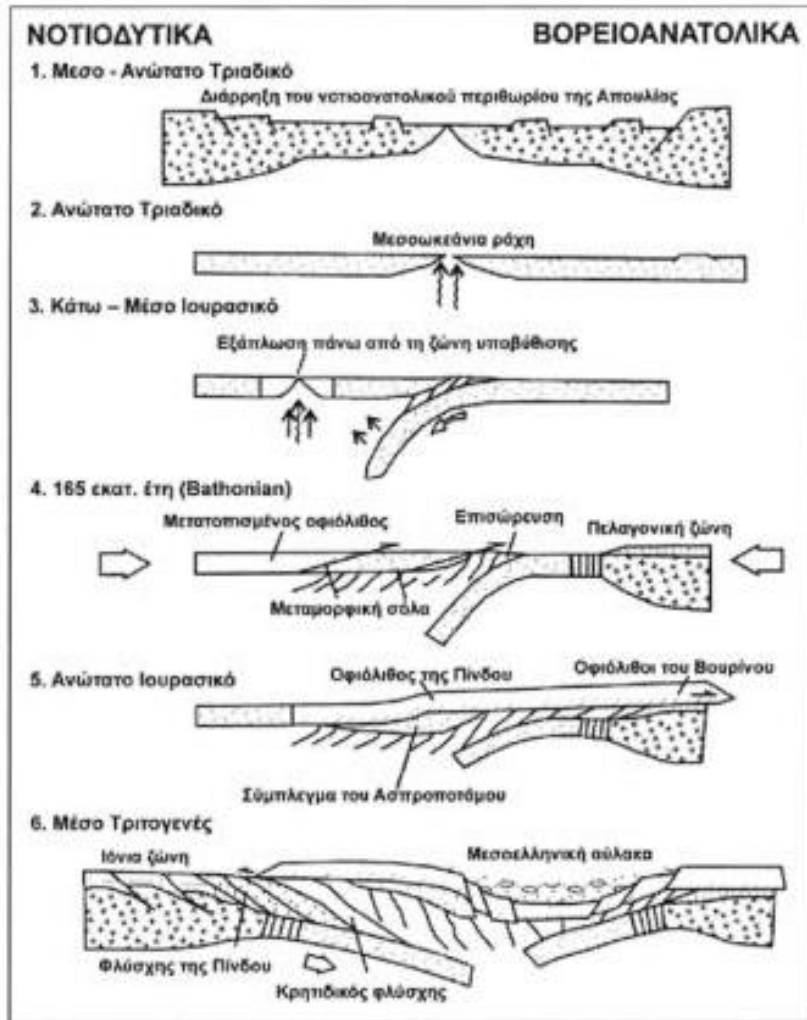


Εικόνα 3.5. Τομή επωθήσεων στις κεντρικές Άλπεις. Καλύμματα οφιολίθων σε μαύρο χρώμα. (Mercier & Vergely, 1999).



Εικόνα 3.4. Απλοποιημένη τομή οφιολίθων (μαύρο χρώμα) στα Ιμαλάια. (Bassoulet et al., 1984).

Στον Ελλαδικό χώρο τέτοιες εμφανίσεις απαντώνται σε όλες τις ορογενετικές ενότητες και κυρίως στον Βουρινό, στην Όρθρυ, στην Πίνδο, στο Βέρμιο και αλλού. Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται το τεκτονικό μοντέλο ανάπτυξης των οφιολίθων στους όγκους της Πίνδου και του Βουρινού.



Εικόνα 3.6. Τεκτονικό μοντέλο των οφιολίθων στους ορεινούς όγκους της Πίνδου και του Βουρινού. Προσαρμοσμένο από Jones et al. 1991 και Pe-Piper & Piper, 2002. Άντληση από (Μαρίνος Β. Π., 2007)

3.3 Τεχνικογεωλογικό – Γεωτεχνικό Πρότυπο Οφιολίθων

3.3.1 Γενικά Στοιχεία

Όπως έγινε κατανοητό από την προηγούμενη ενότητα, ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα αποτελεί ένα πολύπλοκο γεωλογικό περιβάλλον, και ως εκ τούτου, αποτελεί και ένα πολύπλοκο τεχνικογεωλογικό περιβάλλον. Παρότι ένα τέτοιο σύμπλεγμα περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος πετρωμάτων στην μάζα του, αυτά που αναλύονται είναι κυρίως τα περιδοιτικά πετρώματα, τόσο διότι συναντώνται συχνότερα, όσο και επειδή εμφανίζουν την ιδιότητα της «σερπεντινίωσης», οπότε και υπάρχουν διακυμάνσεις στην δομή, την αντοχή και την ποιότητα τους, όπου παρατηρείται, σε μεγάλο βαθμό σερπεντινίωσης, το σύμπλεγμα οριακά να αργιλοποιείται.

Στα οφιολιθικά συμπλέγματα, ακόμα, παρατηρείται το φαινόμενο της μη σταθερής και κανονικοποιημένης διάταξη της ποιότητας τους με αύξηση του βάθους, καθώς δεν είναι εύκολα παρατηρήσιμες οι επαφές των σερπεντινωμένων πετρωμάτων με τα αντίστοιχα υγιή. Αυτό οφείλεται στον μηχανισμό δράσης της σερπεντινίωσης, αφού αυτή δεν συνδέεται άμεσα με καθεστώς τεκτονισμού ή επίδρασης από το μετεωρικό νερό. Το παραπάνω έρχεται σε αντίθεση με τα περισσότερα πετρώματα, που η αύξηση του βάθους συνδέεται με βελτίωση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς τους (Μαρίνος Β. Π., 2007).

3.3.2 Τεχνικογεωλογικά – Γεωτεχνικά Χαρακτηριστικά Οφιολίθων

Με βάση των όσων έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες βραχομαζών στους οφιολίθους με τα ακόλουθα βασικά τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά:

- **Σύνθετη Βραχόμαζα**
 - Η σερπεντινίωση της βραχομάζας προκαλεί αυξημένη πολυπλοκότητα στην οριοθέτηση ζωνών ποιότητας της βραχόμαζας.
 - Συνδέονται τεκτονικά και με άλλα γεωυλικά, όπως οι σχιστοκερατόλιθοι.
- **Ασθενής Βραχομάζα**
 - Σερπεντινίωση – Φυλλοποίηση – Αργιλοποίηση
 - Τεκτονική καταπόνηση

3.3.2.1 Επίδραση της Σερπεντινίωσης

Όσο αφορά την σερπεντινίωση της βραχομάζας, όταν αυτή δεν προέρχεται από μια αυτομεταμόρφωση του σχηματισμού, όπου ολόκληρος ο σχηματισμός έχει μειούμενα χαρακτηριστικά, μπορεί να περιορίζεται στις ασυνέχειες, μετατρέποντας τις σε λείες, ευνοώντας την ολίσθηση τεμαχών, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται το ενδεχόμενο να επεκτείνεται και στο εσωτερικό της βραχομάζας μέσω αυτών, φυλλοποιώντας το σύνολο της βραχομάζας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η βραχομάζα παύει να αποτελείται από τεμάχια περιδοτίτη, αλλά αποτελείται από λεπτά σχιστώδη φύλλα σερπεντινίτη, μειώνοντας, έτσι, έντονα την ποιότητα και την αντοχή της.

3.3.2.2 Επίδραση της Τεκτονικής Καταπόνησης

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα, λόγω της φυσικής του σύνδεσης με το ορογενές, κατέχει μεγάλο βαθμό τεκτονισμού, με πολλές λεπίσσεις και διατμήσεις. Έτσι, στις ενδιάμεσες περιοχές από τις ζώνες τεκτονισμού, η βραχομάζα εμφανίζεται συμπαγής, με μέτριο βαθμό κερματισμού, ενώ στις ζώνες τεκτονισμού, η βραχομάζα καλύπτεται από ασυνέχειες, σερπεντινωμένες ή μη, με μεγάλη εμμونه. Στα σημεία που η σερπεντινίωση είναι ιδιαίτερα έντονη, οι ασυνέχειες χάνουν τον βασικό χαρακτήρα τους, καθώς έχει επέλθει αυξημένη φυλλοποίηση της βραχομάζας, οπότε και η βραχομάζα οδηγείται στην αργιλοποίηση. Μεταξύ των δύο αυτών ακραίων δομών υπάρχουν και οι ενδιάμεσες μορφές, που είναι και οι πιο συνήθεις, όπου η βραχομάζα είναι μέτρια έως πολύ κερματισμένη και η σερπεντινίωση συναντάται μεμονωμένα κατά μήκος των ασυνεχειών.

3.3.2.3 Επίδραση της Τεκτονικής Εναλλαγής με Άλλα Γεωολικά

Η πιο συνήθης τεκτονική εναλλαγή των οφιολίθων είναι με σχιστοκερατόλιθους. Λόγω της τεκτονικής επαφής, οι βραχομάζες παρουσιάζουν έντονη καταπόνηση, ενώ αν και εμφανίζεται σχιστώδης δομή, κατέχουν αυξημένη συνοχή, λόγω της καλής συναρμογής τους. Θεωρώντας τις δύο βραχομάζες ως μια, η δομή της χαρακτηρίζεται από έντονα διαταραγμένη – αποδιοργανωμένη έως φυλλώδης, ανάλογα με την έκταση που καταλαμβάνει η διατμημένη μάζας έναντι των κερματισμένων τεμαχών.

3.3.3 Τεχνικογεωολογικά Χαρακτηριστικά Ανά Τύπο Βραχομάζας

Για να δοθεί η δυνατότητα αξιολόγησης των τεχνικογεωολογικών χαρακτηριστικών των οφιολιθικών βραχομαζών, ο Β. Μαρίνος το 2007 σύλλεξε και ομαδοποίησε τα

δεδομένα σε συγκεκριμένους τύπους, λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Οι κύριοι τύποι βραχομαζών οφιολίθων είναι:

- Μη σερπεντινωμένος οφιολίθος (περιδοτίτης – γάββρος)
- Σερπεντινωμένος οφιολίθος (ελαφρά αποσαθρωμένος γάββρος)
- Έντονα σερπεντινωμένος περιδοτίτης ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου σερπεντινίτη
- Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης
- Οφιολιθικά συμπλέγματα με σχιστοκερατόλιθους

3.3.3.1 Τύπος 1. Μη Σερπεντινωμένος Οφιολίθος (Περιδοτίτης – Γάββρος)

Ο συγκεκριμένος τύπος παρουσιάζεται γενικώς υγής, με αραιό κερματισμό, χωρίς ενδείξεις σερπεντινίωσης. Η αντοχή των άρρηκτων τεμαχών του λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 50 MPa, ενώ η βραχομάζα του εμφανίζεται από ελαφριά έως μέτρια κερματισμένη και γενικότερα, εμφανίζει υψηλές τιμές RQD (>60%). Λόγω των παραπάνω, δικαιολογείται η διαμόρφωση απότομων πρανών στην επιφάνεια, ενώ με αύξηση του βάθους, εμφανίζεται με πιο σφιχτή δομή.

Οι υπάρχουσες ασυνέχειες έχουν τυπική εμμόνη, είναι τραχείες και ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένες, ενώ απουσιάζει, γενικότερα, υλικό πλήρωσης. Συνεπώς, η σερπεντινίωση στον συγκεκριμένο τύπο βραχομάζας, μπορεί να υπάρχει μόνο κατά μήκος των ασυνεχειών, αλλοιώνοντας την δομική ευστάθεια των τεμαχών, όπου υπό κατάλληλες συνθήκες ενδέχεται να ολισθήσουν.



Εικόνα 3.7. Τμήμα περιδοτίτη στην περιοχή Όθρυος, με αδιατάρακτη δομή και μέτρια κατάσταση ασυνεχειών. Αναμενόμενη τιμή GSI = 65. Άντληση από: (Μπαλάση, 2007)

3.3.3.2 Τύπος 2. Σερπεντινωμένος Οφιόλιθος (Ελαφρά Αποσαθρωμένος Γάββρος)

Κατά τον συγγραφέα, ο παρών τύπος εμφανίζεται γενικώς υγιής με μέτριο έως έντονο κερματισμό, ενώ παρουσιάζει σερπεντινίωση κυρίως κατά μήκος των ασυνεχειών του και το φαινόμενο εμφανίζεται σποραδικά και στον άρρηκτο βράχο. Η αντοχή του άρρηκτου βράχου συχνά κυμαίνεται μεταξύ των 30 – 50 MPa και η βραχομάζα συναντάται μέτρια έως αρκετά κερματισμένη και λαμβάνει τιμές RQD που κυμαίνονται από 40% – 60%.

Συχνά η βραχομάζα περιέχει 2 – 3 οικογένειες ασυνεχειών, οι οποίες είναι λείες λόγω της επίδρασης του φαινομένου της σερπεντινίωσης. Παρουσιάζουν μεγάλη εμμονή και το άνοιγμα τους περιέχει υλικό πλήρωσης είτε αργιλικό, είτε τάλκικο, είτε από σερπεντίνη. Το κύριο μέρος της βραχομάζας εμφανίζει σε περιορισμένο βαθμό σερπεντινίωση, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται η δομή της.



Εικόνα 3.8. Κομμάτι συμπαγούς σερπεντινίτη (Marinos et al., 2006)

3.3.3.3 Τύπος 3. Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη

Ο συγκεκριμένος τύπος παρουσιάζει μέτρια έως αυξημένη σερπεντινωμένη/εξαλλοιωμένη και έντονα κερματισμένη βραχομάζα. Το κύριο σώμα του περιδοτίτη διακόπτεται συνεχώς από πολλές μικροζώνες σερπεντινίωσης, ενώ ακόμα εμφανίζονται ζώνες έντονου κερματισμού έως διάτμησης, που συχνά συνοδεύονται από σερπεντινίτη.

Οι ασυνέχειες της δεδομένης βραχομάζας παρουσιάζουν αυξημένη εμμονή συγκριτικά με τους δύο προηγούμενους τύπους, αλλά όχι μεγάλη. Από τα ληφθέντα δείγματα συμπεραίνεται πως ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές RQD. Η αντοχή

των άρρηκτων τεμαχών της συγκεκριμένης βραχομάζας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, καθώς εξαρτάται από τον βαθμό της σερπεντινίωσης και της σχιστοποίησης τους. Τυπικές τιμές αντοχής είναι 30 – 45 MPa για τους σερπεντινίτες και 15 – 30 MPa για τους σχιστώδεις σερπεντινίτες.

3.3.3.4 Τύπος 4. Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης

Στον εν λόγω τύπο βραχομάζας, οι οφιόλιθοι έχουν υποστεί έντονη εξαλλοίωση με ταυτόχρονη αντικατάσταση των αρχικών ορυκτών με φυλλοπυριτικά, τα οποία από την μια παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε επιφανειακές ή μικρού βάθους συνθήκες, αλλά από την άλλη υποβαθμίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, ανάλογα και με την ένταση της εξαλλοίωσης.

Στις ζώνες διάτμησης σερπεντινιτών απουσιάζει η δομή, ενώ η βραχομάζα εμφανίζεται με γωνιώδη τεμάχια και επιτρέπει στο πέτρωμα να θραυτεί περεταίρω σε ολισθηρά και φυλλώδη τμήματα. Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος συναντάται με αυξημένο σφάλμα μετρήσεων και κυμαίνεται από 5 έως 20 MPa.



Εικόνα 3.9. Κομμάτια φυλλοποιημένου σερπεντινίτη (Marinos et al., 2006)

3.3.3.5 Τύπος 5. Οφιολιθικό Σύμπλεγμα με Σχιστοκερατόλιθους

Ο συγκεκριμένος τύπος βραχομάζας, όπως υποδηλώνει και ο τίτλος, αποτελεί ένα μίγμα από οφιολίθους μαζί με κερατόλιθους, ψαμμίτες, ιλυόλιθους και φυλλοπυριτικούς σχιστόλιθους. Η εξαλλοίωση είναι μέτρια και η βραχομάζα παρουσιάζει μια αρκετά συνεκτική δομή, λόγω της καλής συναρμογής των οφιολίθων με τους σχιστοκερατόλιθους μεταξύ τους, δίνοντας μάλιστα και υψηλές τιμές RQD, οι οποίες είναι ψευδείς.

Η βραχομάζα παρουσιάζεται χωρίς εμφανείς ασυνέχειες ή αυτές έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (της τάξης των 3 m). Παρουσιάζεται μια ικανοποιητική γεωτεχνική συμπεριφορά, όταν οι αντοχές των επιμέρους πετρωμάτων είναι υψηλές, αν και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν πως έχουν μειωθεί λόγω της σχιστοποίησης.

Ειδικές Περιπτώσεις

3.3.3.6 Μαξιλαροειδής λάβα (Pillow lavas)

Οι μαξιλαροειδείς λάβες εμφανίζουν γενικώς μέτρια έως καλή συμπεριφορά, με την ποιότητα τους να βελτιώνεται με την αύξηση του βάθους. Η συνολική ποιότητα μειώνεται από το εύθρυπτο ή διατμημένο υλικό που περιβάλλει την κύρια μάζα. Χαμηλής ποιότητας σχηματισμός συνήθως εμφανίζεται σε μικρά υπερκείμενα ή σε ιδιαίτερα τεκτονισμένες περιοχές και παρουσιάζει πιο υποβαθμισμένες μηχανικές παραμέτρους, όσο η αποσάθρωση αυξάνεται. Λόγω της βασαλτικής φύσης του σχηματισμού, παρουσιάζει αρκετά υψηλές μηχανικές παραμέτρους στην άρρηκτη μορφή του (π.χ. αντοχή σε μονοαξονική θλίψη > 100 MPa και m_i με τιμές 25 ± 5), οι οποίες ωστόσο μειώνονται όσο το πέτρωμα κατακερματίζεται. Παρουσιάζονται τιμές του δείκτη GSI συνήθως 25 – 50.

Στο εσωτερικό της μάζας τους ενδέχεται να υπάρχουν επιφάνειες διάτμησης και λόγω αυτού να προκύπτουν δομικές αστοχίες πάνω στις επιφάνειες αυτές. Ακόμα, ενδέχεται να περικλείουν κενά ψύξης που δημιουργήθηκαν κατά τον σχηματισμό τους, αν και αυτά σπανίως παρατηρούνται στα οφιολιθικά συμπλέγματα, εξαιτίας της έντονης τεκτονικής καταπόνησης.

3.3.3.7 Τεκτονικά μίγματα (mélanges)

Τα τεκτονικά μίγματα παρουσιάζουν μια ιδιαίτερα υποβαθμισμένη τεχνικογεωλογική συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στον ισχυρό τεκτονισμό και τη φυλλοποίηση της βραχομάζας τους εξαιτίας της ασαφούς γεωμετρίας, των ασυνεχειών και των «επιπλεόντων» τεμαχών ποικίλης προέλευσης. Έτσι, ο σχηματισμός καθίσταται απρόβλεπτος και δυσχερής στον προσδιορισμό των παραμέτρων του. Οι μηχανικές του ιδιότητες παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές και μπορούμε να προσεγγίσουμε την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με τιμές μικρότερες των 30 MPa, την παράμετρο m_i με τιμές μικρότερες του 10 και το μέτρο ελαστικότητας με τιμές μικρότερες των 10 MPa. Ο δείκτης GSI κατέχει χαμηλές έως πολύ χαμηλές τιμές, συνήθως 15 – 40, ενώ μπορεί

να εμφανιστούν ακόμα χαμηλότερες τιμές, της τάξης του 15 – 20, στη περίπτωση που ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται αποδομημένος ή φυλλώδης.

3.3.4 Αρχές Ταξινόμησης Βραχομάζας



Εικόνα 3.10. Οφιολιθικό *mélange* την περιοχή Όθρυος Δομοκού. Άντληση από: (Μπαλάση, 2007)

3.3.4.1 Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI (Geological Strength Index)

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index), GSI, αποτελεί έναν ποσοτικό δείκτη χαρακτηρισμού της βραχομάζας, με βάση την δομή και την κατάσταση των ασυνεχειών της. Η αρχική του μορφή αναπτύχθηκε από τους Hoek, Wood and Shah (1992) για σκληρά ρωγματωμένα πετρώματα και επεκτάθηκε από τους Marinis and Hoek (2000), ώστε να συμπεριλάβει επιπλέον ασθενείς και ετερογενείς βραχομάζες, όπως αυτή του σχηματισμού του φλύσχη.

Για την εξαγωγή του δείκτη εξετάζεται οπτικά η βραχομάζα, ώστε να διαπιστωθεί η δομή και η κατάσταση των ασυνεχειών της και ακολούθως, συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά αυτά με τις τυπικές περιγραφές και τα αντίστοιχα σκαριφήματα του διαγράμματος GSI, η βραχομάζα βαθμονομείται.

Ο εν λόγω δείκτης εκτός από τη γεωτεχνική ταξινόμηση, εκφράζει αριθμητικά και την απομείωση των σταθερών του υλικού, ανάλογα με την ρωγμάτωση της βραχομάζας, οπότε και αποτελεί σημαντικό δεδομένο για την επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek and Brown.

Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην εφαρμογή του δείκτη GSI, όπως ότι απαιτεί η βραχομάζα να συμπεριφέρεται ισότροπα, χωρίς να υπάρχουν προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας (ολισθήσεις), ώστε να έχει εφαρμογή και το κριτήριο Hoek and Brown. Στην Εικόνα 3.11 παρουσιάζεται η βασική μορφή του δείκτη GSI.

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. <u>Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες.</u> Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το τρανές εκκακφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχομάζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>	<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσθρωμμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσθρωμμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσθρωμμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθησης, πολύ αποσθρωμμένες με συμπυκνή επιφλοκώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθησης πολύ αποσθρωμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>	<p>ΜΕΙΟΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p>			
<p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p> <p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται απο πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p> <p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλειδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων</p> <p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	<p>90</p> <p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p> <p>← ΜΕΙΟΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ</p>				
	90			N/A	N/A
	80				
	70				
	60				
	50				
	40				
	30				
	20				
	10				
	N/A	N/A			

Εικόνα 3.11. Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI. (Hoek & Marinos, 2000) Άντληση: (Μαρίνος, Μαρίνος, & Hoek, 2004)

3.3.5 Ταξινόμηση Οφιολίθων Ανά Τύπο Βραχομάζας

Για την ταξινόμηση των οφιολιθικών συμπλεγμάτων λαμβάνονται πληροφορίες από την εγχώρια και διεθνή βιβλιογραφία, στις οποίες αναλύεται ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός των διαφόρων τύπων βραχομαζών οφιολίθων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η απόδοση μιας εκτίμησης των τιμών του δείκτη GSI για κάθε τύπο βραχομάζας οφιολίθων, όπως αυτές αναλύθηκαν ανωτέρω. Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται σχηματικά το εύρος τιμών GSI για κάθε τύπο βραχομάζας. Κατά τον Μαρίνο Β. (2007), διακρίνονται οι ακόλουθοι τύποι βραχομάζας οφιολίθων.

3.3.5.1 Τύπος 1. Μη Σερπεντινωμένος Οφιολίθος (Περιδοτίτης – Γάββρος)

Στον τύπο αυτό της βραχομάζας παρατηρείται συμπαγής δομή και λίγες ασυνέχειες σε αραιά διαστήματα, ακόμα και στην επιφάνεια και σε τεκτονικές επαφές. Από τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η βραχομάζα λαμβάνει τιμές GSI μεγαλύτερες από 65.

3.3.5.2 Τύπος 2. Σερπεντινωμένος Οφιολίθος – Ελαφριά Αποσαθρωμένος Γάββρος

Όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, λόγω του αυξημένου βαθμού κερματισμού, την εμφάνιση πιο πυκνών διακλάσεων και την αυξημένη σερπεντινίωση στις ασυνέχειες, συγκριτικά με τον Τύπο 1, οι τιμές του δείκτη GSI μπορεί να μειώνονται μέχρι και την τιμή 35. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι σε μια διαταραγμένη βραχομάζα, η σερπεντινίωση είναι πολύ πιθανό να έχει επηρεάσει και θρυμματίσει και τμήματα του άρρηκτου πετρώματος, μειώνοντας εξίσου και τις τιμές αντοχής του .

3.3.5.3 Τύπος 3. Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης Με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη

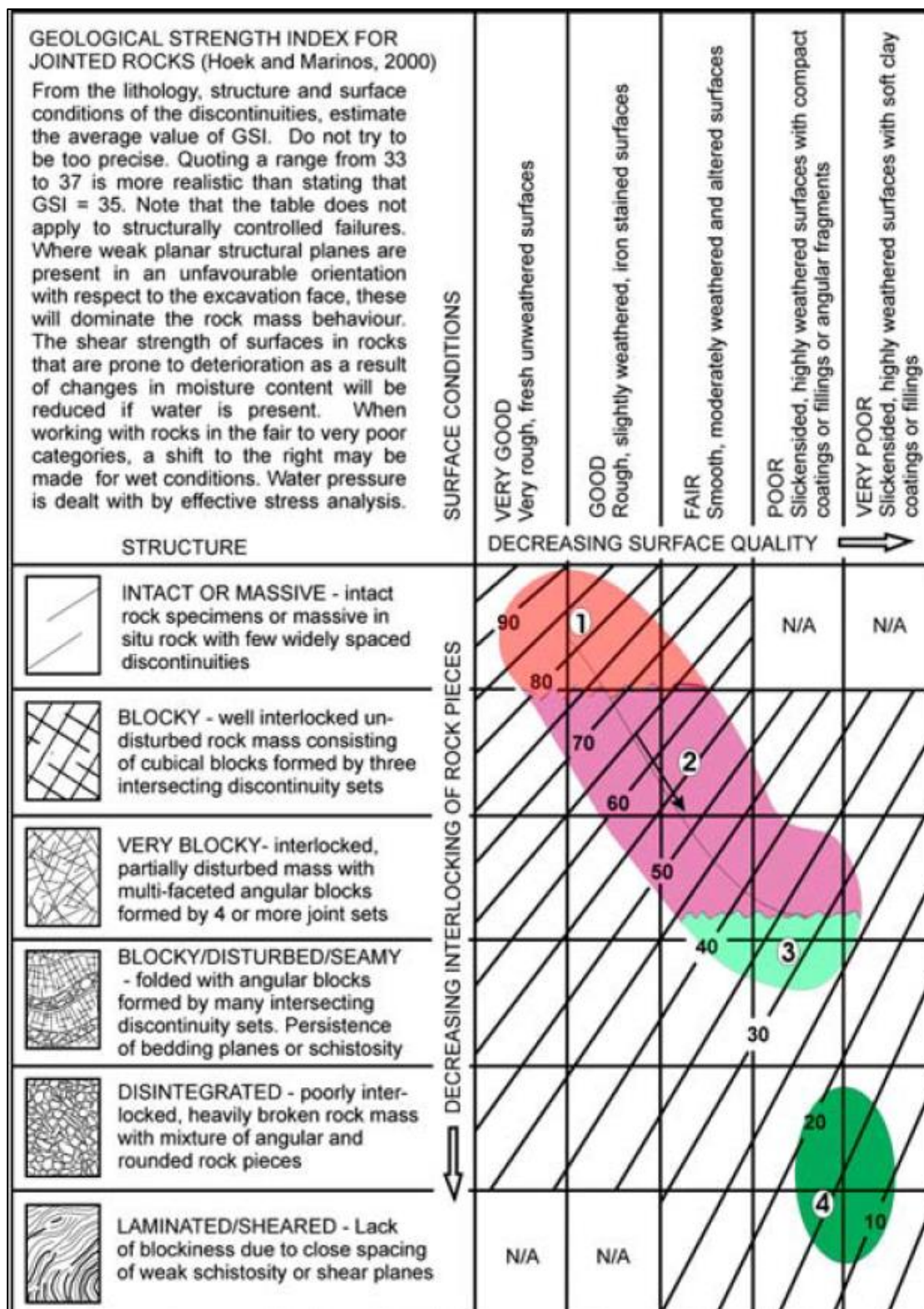
Ο αυξημένος βαθμός εξαλλοίωσης / σερπεντινίωσης και κερματισμού, που εμφανίζεται στην βραχομάζα του συγκεκριμένου τύπου, οδηγεί στην μείωση της αντοχής του άρρηκτου βράχου. Ως εκ τούτου, οι τιμές του δείκτη GSI βαίνουν μειούμενες, συγκριτικά με τους δύο προηγούμενους τύπους, όπου και λαμβάνουν τιμές 30 ή και χαμηλότερες, ανάλογα με την προέλευση της σερπεντινίωσης. Αν η σερπεντινίωση οφείλεται στην διαδικασία αυτομεταμορφισμού του πετρώματος ή σχετίζεται με τεκτονικές συμπίεσεις, τότε η βραχομάζα είναι ακόμα πιο πτωχή, γεγονός που εξηγεί τις χαμηλότερες τιμές του GSI.

3.3.5.4 Τύπος 4. Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης

Οι οφιόλιθοι του συγκεκριμένου τύπου, έχοντας υποστεί έντονη εξαλλοίωση, παρουσιάζουν μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, ανάλογα και με την ένταση της εξαλλοίωσης. Στις ζώνες διάτμησης σερπεντινιτών απουσιάζει η τεμαχώδης δομή, ενώ η βραχομάζα εμφανίζεται με γωνιώδη τεμάχια, όπου επιτρέπει την περεταίρω θραύση του πετρώματος της βραχομάζας σε ολισθηρά και φυλλώδη τμήματα. Οι συνήθεις τιμές του δείκτη GSI κυμαίνονται από 20 και κάτω.

3.3.5.5 Τύπος 5. Οφιολιθικό Σύμπλεγμα Με Σχιστοκερατόλιθους

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, η βραχομάζα εμφανίζεται γενικά φυλλώδης, λόγω της παρουσίας των σχιστοκερατόλιθων, εντός της οποίας συναντώνται ογκώδη οφιολιθικά τεμάχια. Συνεπώς, όσο περισσότερο επικρατεί ο σχιστώδης χαρακτήρας, ελεώ του σχιστοκερατόλιθου, και δεν διακόπτεται από τεμάχια οφιόλιθου, η βραχομάζα εμφανίζεται από έντονα διαταραγμένη έως φυλλώδης, ενώ οι ασυνέχειες της έχουν μέτρια έως πτωχή ποιότητα. Ενδεικτικό εύρος τιμών του GSI είναι από 20 έως 40.



Εικόνα 3.12. Κλίμακες του δείκτη GSI για τους τύπους βραχώμαζας 1 έως 5 σε οφιολιθικά συμπλέγματα. Αντληση από : (Marinos, Hoek, & Marinos, 2006) & (Μαρίνος Β. Π., 2007)

3.3.6 Παράμετροι Αντοχής Και Παραμορφωσιμότητας

Από τα προηγούμενα κεφάλαια του γεωλογικού και γεωτεχνικού μοντέλου των οφιολιθικών συμπλεγμάτων έγινε αντιληπτό πως πρόκειται για έναν σχηματισμό με γεωτεχνικές ιδιότητες, οι οποίες κυμαίνονται από εξαιρετικές έως και πολύ πτωχές, ανάλογα με την έκταση της σερπεντινίωσης ή / και της ζώνης διάτμησης. Τα συνηθέστερα είδη πετρωμάτων, που απαρτίζουν τους οφιόλιθους, είναι οι περιδοτίτες, οι γάββροι, οι σερπεντινωμένοι περιδοτίτες, οι σερπεντινίτες και οι σχιστοποιημένοι και διατμημένοι σερπεντινίτες.

3.3.6.1 Αντοχή

Από τα παραπάνω πετρώματα, οι πρώτοι παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή (σ_{ci}) και ανθεκτικότητα, με την αντοχή του άρρηκτου βράχου να υπερβαίνει πολλές φορές τα 100 MPa, όπου και κατέχει συμπεριφορά ψαθυρού υλικού (Μαρίνος Β., 2007).

Σύμφωνα με δοκιμές του Koumantakis (1982) σε δοκίμια σερπεντινωμένων περιδοτιτών από όλη την Ελλάδα, παρατηρήθηκε μια μέση τιμή αντοχής του άρρηκτου βράχου ίση με 90 MPa. Αντίστοιχες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από τους Diamantis K., Gartzos E. και Migiros G. (2009) πάνω σε σερπεντινωμένους περιδοτίτες, με ποσοστό σερπεντινίωσης > 70%, από την περιοχή του όρους Όρθρυς, έδειξε πως η αντοχή του σχηματισμού λαμβάνει μια μέση τιμή περί τα 60,3 MPa.

Οι Özer & Kamaci (2018) μετά από μετρήσεις σε δοκίμια σερπεντινωμένων περιδοτιτών από την νοτιοδυτική Τουρκία κατέληξαν σε μια μέση τιμή αντοχή αυτών, της τάξης των 89,1 MPa.

Οι Marinos & Tsiambaos (2010) συγκεντρώνοντας όλα τα δεδομένα από την διάνοιξη 62 σηράγγων της Εγνατίας Οδού στην βόρεια Ελλάδα, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η αντοχή των σερπεντινωμένων περιδοτιτών της βόρειας Ελλάδας λαμβάνουν τιμή ίση με 43,3 MPa με τυπική απόκλιση της τάξης των 24,6 MPa.

Κατά τις δοκιμές πάνω σε δοκίμια σερπεντινίτη και σχιστοποιημένου σερπεντινίτη ο Koumantakis (1982) συμπέρανε πως η αντοχή των άρρηκτων δοκιμίων σερπεντινίτη κυμαίνεται περί τα 40 MPa, ενώ αυτή των δοκιμίων σχιστοποιημένου σερπεντινίτη περί τα 30 MPa. Αντίστοιχες δοκιμές των Ozsoy, Yilmaz, & Arman (2010) σε δοκίμια σερπεντινίτη από την περιοχή του Εσκισεχίρ της Τουρκίας, έδωσαν αντοχή των δοκιμίων ίση με 13,47 MPa. Οι δοκιμές των Diamantis & Migiros (2018) σε δοκίμια

σερπεντινιτών με ποικίλο βαθμό σερπεντινίωσης, έδωσαν τιμή αντοχής ίση με 68,1 MPa.

Δοκίμιο	Ερευνητής/τες	Τοποθεσία	Τιμή Αντοχής (MPa)
Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης	Koumantakis (1982)	Ελλάδα	90
Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης	Diamantis K., Gartzos E. & Migiros G. (2009)	Όρος Όθρυς, Ελλάδα	60,3
Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης	Özer & Kamaci (2018)	Νοτιοδυτική Τουρκία	89,1
Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης	Marinos & Tsiambaos (2010)	Βόρεια Ελλάδα	43,3 ± 24,6

Πίνακας 3.1. Συγκεντρωτικός πίνακας αντοχών σερπεντινωμένου περιδοτίτη από διάφορους ερευνητές και περιοχές

Δοκίμιο	Ερευνητής/τες	Τοποθεσία	Τιμή Αντοχής (MPa)
Σερπεντινίτης	Koumantakis (1982)	Ελλάδα	40
Σχιστοποιημένος Σερπεντινίτης	Koumantakis (1982)	Ελλάδα	30
Σερπεντινίτης	Ozsoy, Yilmaz, & Arman, (2010)	Εσκισεχίρ, Τουρκία	13,5
Σερπεντινίτης	Diamantis & Migiros (2018)	Όρος Όθρυς, Ελλάδα	68,1

Πίνακας 3.2. Συγκεντρωτικός πίνακας αντοχών σερπεντινιτών από διάφορους ερευνητές και περιοχές

Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω, παρά την εργαστηριακή μέτρηση της αντοχής των άρρηκτων δοκιμίων, η λήψη μιας αξιόλογης μέτρησης για την αντοχή του πετρώματος είναι αρκετά δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει λόγω της πολύπλοκης δομής των πετρωμάτων που περιέχονται στους οφιολίθους, καθώς στις μετρήσεις που αφορούν δοκίμια με ασυνέχειες ή/και σχιστότητα, όπως αυτό του σχιστοποιημένου σερπεντινίτη, η σχιστότητα επιδρά αρνητικά στην διαδικασία μέτρησης, οπότε και τελικώς υποτιμάται η αντοχή. Γι' αυτό και κατά τους Μαρίνος Β., Μαρίνος Π. και Hoek E. (2005), για να συμπεριληφθεί και η σχιστότητα στην τελικώς

εξαχθείσα τιμή της αντοχής, όπως επιδρά σε πραγματικές συνθήκες, συνίσταται η μείωση της αντοχής του άρρηκτου δοκιμίου κατά 30%.

Η επίδραση της σχιστότητας γίνεται καλύτερα αντιληπτή στο άρθρο των Kurtulus, Bozkurt, & Endes (2012), στο οποίο οι εν λόγω ερευνητές χρησιμοποίησαν δείγματα σερπεντινωμένων υπερβασικών πετρωμάτων από την περιοχή του Εζινέ, στην Βόρειο-Ανατολική Τουρκία. Εφαρμόζοντας την μέθοδο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κάθετα και παράλληλα με την σχιστότητα των δοκιμίων, υπολόγισαν την αντοχή των δοκιμίων. Παρατήρησαν ότι στην περίπτωση της κάθετης, με την σχιστότητα, διάδοσης των κυμάτων, η αντοχή των δειγμάτων λαμβάνει μέση τιμή περί τα $81,5 \pm 23,6$ MPa, ενώ στην περίπτωση της παράλληλης, με την σχιστότητα, διάδοσης των κυμάτων, η αντοχή λαμβάνει μέση τιμή περί τα $26,8 \pm 7,4$ MPa. Παρατηρείται δηλαδή μια μείωση στην αντοχή του σχηματισμού κατά περίπου 67%.

3.3.6.2 Μέτρο Παραμορφωσιμότητας

Σύμφωνα με τον Μαρίνο Β. (2007), έχοντας λάβει υπόψιν του στοιχεία από την βάση δεδομένων «Tunnel Information and Analysis System» για τον σχηματισμό των περιδοτιτών, προέκυψε πως το μέτρο παραμορφωσιμότητας (E_i) αυτών των δοκιμίων λαμβάνει τιμή περί τα 16,9 GPa.

Οι Özer & Kamacı (2018) μέσω δοκιμών υπολογισμού της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων P και S σε δοκίμια σερπεντινωμένων περιδοτιτών από την Νοτιο-Δυτική Τουρκία, συμπέραναν πως το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων αυτών λαμβάνει τιμή περί τα $42,9 \pm 6,68$ GPa.

Οι Diamantis, Gartzos, & Migiros (2014) στο εν λόγω άρθρο τους, χρησιμοποίησαν δοκίμια περιδοτιτών και σερπεντινιτών από την κεντρική Ελλάδα για να υπολογίσουν την μονοαξονική αντοχή και το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_{st}), το οποίο προκύπτει από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης. Οι δοκιμές τους έδειξαν πως οι τα δοκίμια περιδοτιτών είχαν μέτρο παραμορφωσιμότητας $43,9 \pm 14,5$ GPa, ενώ τα δοκίμια σερπεντινιτών είχαν μέτρο παραμορφωσιμότητας $14,3 \pm 5,8$ GPa.

Στο άρθρο των Diamantis & Migiros (2018), το οποίο περιλαμβάνει δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε σερπεντινίτες, με ποικίλο βαθμό σερπεντινίωσης, συμπεραίνεται πως τα δοκίμια που εξετάστηκαν, κατείχαν μέση τιμή μέτρου παραμορφωσιμότητας (E_i) ίση με 14,89 GPa.

Τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν, συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.3.

Δοκίμιο	Ερευνητής/τες	Τοποθεσία	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας (E_i) (GPa)
Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης	Μαρίνος Β. (2007)	Βόρεια Ελλάδα	16,9
Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης	Özer & Kamaci (2018)	Νοτιοδυτική Τουρκία	42,9 ± 6,68
Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης	Diamantis, Gartzos, & Migiros (2014)	Κεντρική Ελλάδα	43,9 ± 14,5
Σερπεντινίτης	Diamantis, Gartzos, & Migiros (2014)	Κεντρική Ελλάδα	14,3 ± 5,8
Σερπεντινίτης	Diamantis & Migiros (2018)	Όρος Όθρυς, Ελλάδα	14,9

Πίνακας 3.3. Συγκεντρωτικός πίνακας αντοχών περιδοτιτών και σερπεντινιτών από διάφορους ερευνητές και περιοχές

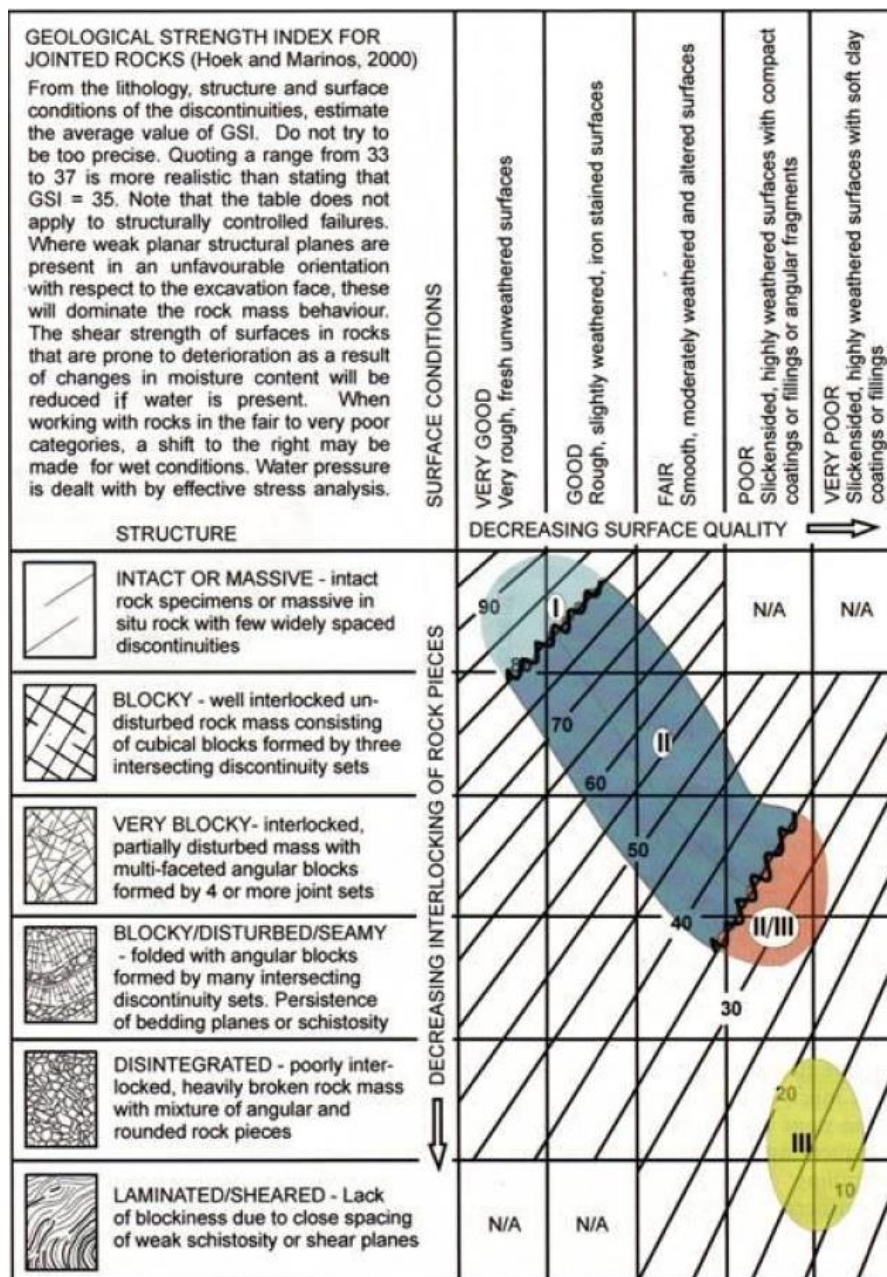
Από τα ανωτέρω παρατιθέμενα αποτελέσματα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι, όπως και για την αντοχή, είναι αρκετά δύσκολο να ληφθεί μια ορθή μέτρηση της τιμής του μέτρου παραμορφωσιμότητας, καθώς σε κάθε ένα δοκίμιο έχει διαφορετική επίδραση ο τρόπος γέννησης του, που εξαρτάται από την τοποθεσία που βρίσκεται, ο βαθμός σερπεντινίωσης/εξαλλοίωσης και η τεκτονική καταπόνηση, όπου αυτή υπάρχει. Συνεπώς, τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να δώσουν μόνο μια ποιοτική ανάλυση της συμπεριφοράς των διαφόρων πετρωμάτων που περιέχονται σε ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα. Λόγου χάρη, ένας περιδοτίτης αναμένεται να δώσει υψηλές τιμές μέτρου παραμορφωσιμότητας και αντοχής, ενώ ένας σερπεντινίτης, όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός σερπεντινίωσης του, τόσο χαμηλότερες τιμές αναμένεται να δώσει ως προς την αντοχή και το μέτρο παραμορφωσιμότητας.

3.3.7 Συμπεριφορά Οφιολίθων Κατά Την Διάνοιξη Σηράγγων

Συνοψίζοντας τις παραπάνω παραγράφους συμπεραίνεται ότι ο σχηματισμός των οφιολίθων μπορεί να εμφανιστεί σε όλες τις δυνατές ποιότητες πετρώματος, από υγιείς περιδοτίτες μέχρι και φυλλοποιημένους σερπεντινίτες, εμφανίζοντας, μάλιστα συχνά,

μη ομαλή εναλλαγή των διαφορετικών ποιοτήτων κατά μήκος ενός έργου. Αυτό έχει ως απόρροια την ανάγκη για ενδελεχή μελέτη των παραμέτρων αντοχής και ποιότητας του οφιολιθικού σχηματισμού στην περιοχή ενδιαφέροντος, ώστε να πραγματοποιηθεί μια όσο το δυνατόν πληρέστερη περιγραφή του σχηματισμού, στην κλίμακα του έργου.

Στην παρακάτω Εικόνα 3.13 αποτυπώνεται η ταξινόμηση των οφιολίθων ως προς την συμπεριφορά τους στις σήραγγες, με την βοήθεια του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Μέσω της προκειμένης ταξινόμησης καθίσταται εφικτή η κατανόηση του εύρους και των εναλλαγών των ιδιοτήτων των οφιολίθων, μεταβαίνοντας με αυτόν τον τρόπο από τον έναν τύπο στον επόμενο ακολουθώντας μια «γεωλογική» λογική.



Εικόνα 3.13. Κατηγοριοποίηση συμπεριφοράς οφιολίθων κατά την διάνοιξη σηράγγων σύμφωνα με το σύστημα GSI (Hoek & Marinos, 2000)

Σύμφωνα με την Εικόνα 3.13 και σε συνδυασμό και με την Εικόνα 3.12, που περιλαμβάνει τις κατηγορίες των οφιολίθων, διακρίνονται οι παρακάτω τέσσερις κατηγορίες συμπεριφοράς στη διάνοιξη των σηράγγων:

- Κατηγορία I. Οι επιτόπου συνθήκες παρουσιάζουν συνήθως ευστάθεια, ενώ οι αστοχίες εμφανίζονται μόνο σε μεγάλα βάθη και αφορούν κυρίως ψαθυρή θραύση ή εκτοξεύσεις βράχων. Οι σχηματισμοί είναι πολύ καλής ποιότητας, με αντοχή που υπερβαίνει τα 50 MPa, δείκτη GSI > 65 και δείκτη m_i μεταξύ 15 – 25.
- Κατηγορία II. Η ευστάθεια ελέγχεται κυρίως από δομικές αστοχίες, όπως η κατάπτωση ή ολίσθηση σφηνών. Η ποιότητα της βραχομάζας είναι υποβαθμισμένη συγκριτικά με τη κατηγορία I. Η αντοχή του σχηματισμού κυμαίνεται από 30 MPa έως 50 MPa, ο δείκτης GSI βαίνει μειούμενος μέχρι και τη τιμή 35, ενώ η τιμή m_i κυμαίνεται περί τα 15.
- Κατηγορία II/III. Η ευστάθεια στη παρούσα κατηγορία ελέγχεται από δομικές αστοχίες ή από ήπια τασική καταπόνηση (παραμορφώσεις). Στην κατώτερη περιοχή της εν λόγω κατηγορίας πιθανές είναι οι παραμορφώσεις ή η αστοχίες στο μέτωπο της εκσκαφής. Η αντοχή της βραχομάζας κυμαίνεται περί τα 30MPa, ο δείκτης GSI βρίσκεται μεταξύ 25 – 35 και η τιμή του m_i είναι περίπου 10 – 15 .
- Κατηγορία III. Η βραχόμαζα στην εν λόγω κατηγορία αστοχεί κυρίως λόγω τασικού πεδίου και παρουσιάζει αυξημένη σύνθλιψη σε βάθος. Συχνές είναι οι αστοχίες του μετώπου. Η αντοχή της βραχόμαζας κυμαίνεται από 5 έως 20 MPa, ο δείκτης GSI βρίσκεται κάτω του 20, ενώ η τιμή του m_i ισούται με περίπου 10.

3.3.8 Διάγραμμα Εκτίμησης της Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς της Βραχομάζας

Σύμφωνα με τον Μαρίνο (2007) προτείνεται ένα σύστημα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς, καθώς και τα εύρη των τεχνικογεωλογικών παραμέτρων σχεδιασμού (γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI και αντοχή άρρηκτου βράχου σ_{ci}) και του ύψους των υπερκειμένων, για κάθε έναν από τους διακριτούς τύπους συμπεριφοράς που αναφέρθηκαν στην ανωτέρω παράγραφο. Πρέπει να σημειωθεί πως το εν λόγω σύστημα δεν εφαρμόζεται σε πολύ μεγάλα βάθη (>1000 m), αφού στις περιπτώσεις αυτές μπορεί μια δομή με προδιάθεση για βαρυτικές αστοχίες (π.χ. σφηνοειδής ολίσθηση) να επηρεαστεί από το υψηλό τασικό πεδίο και να παρουσιάσει παραμορφώσεις.

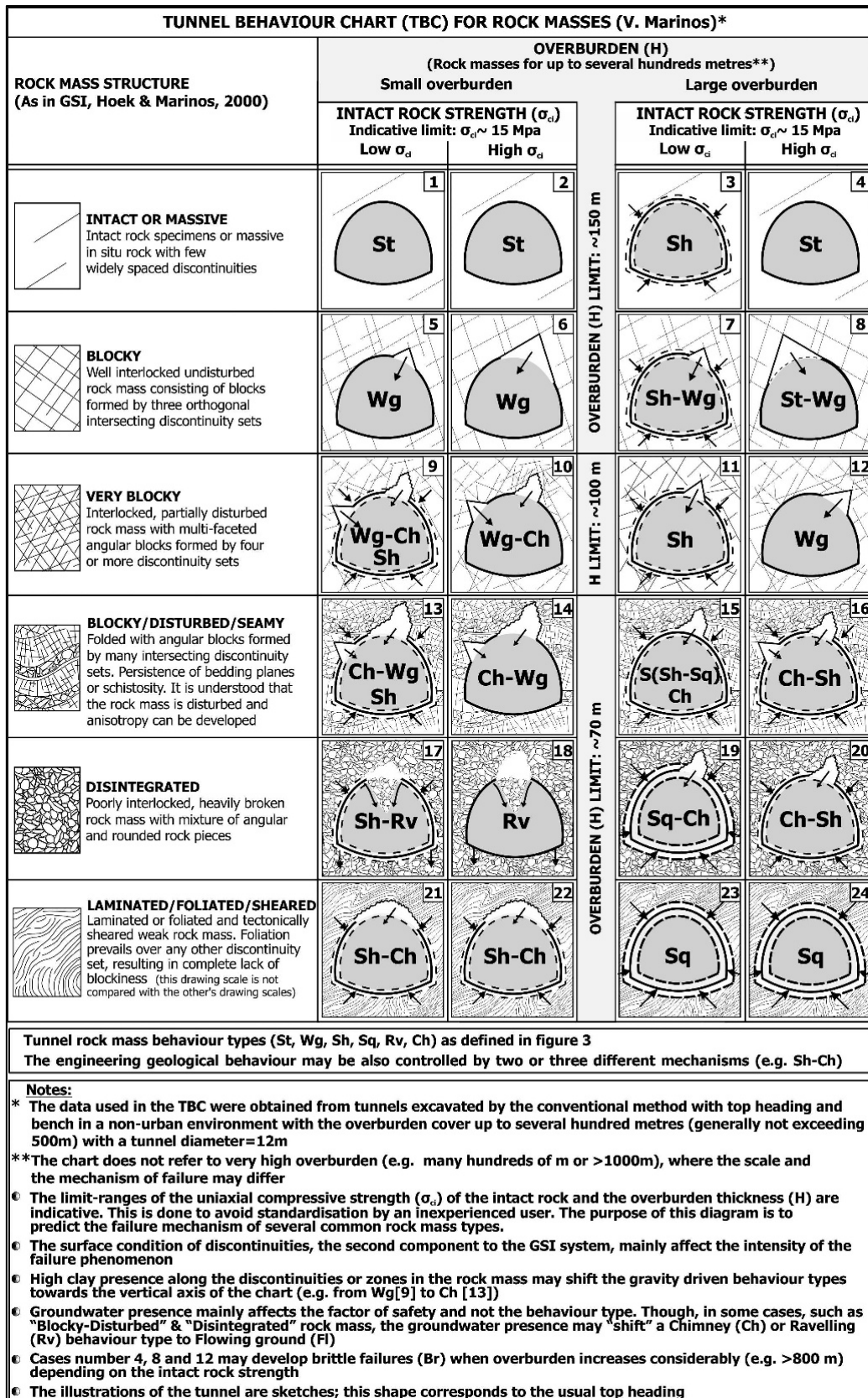
Το προτεινόμενο σύστημα εκτίμησης παρουσιάζεται με τη χρήση ενός διαγράμματος, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 3.14. Σε αυτό αντί του χαρακτηρισμού άμεσα κάποιας ποσοτικής διάκρισης των παραμέτρων σ_{ci} και ύψους υπερκειμένων (H), πραγματοποιείται ποιοτική διάκριση μεταξύ υψηλών και χαμηλών τιμών. Τα όρια των υψηλών και χαμηλών τιμών δίνονται ως εύρη ή ως ελάχιστα – μέγιστα σε πίνακα που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία. Παρολαυτά, τα χρησιμοποιούμενα όρια είναι ενδεικτικά και χρησιμοποιούνται ως μια κατευθυντήρια οδό για την αξιολόγηση.

Το εν λόγω διάγραμμα μπορεί να κατανοηθεί ευκολότερα χρησιμοποιώντας τις εξής παραδοχές:

1. Βασικό εργαλείο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς πρέπει να παραμένει η δομή της βραχομάζας
2. Δεν λαμβάνεται υπόψιν η ποιότητα των ασυνεχειών, αφού αυτή δεν επηρεάζει την αλλαγή του τύπου της συμπεριφοράς, αλλά διευκολύνει τους μηχανισμούς και εντείνει τα χαρακτηριστικά αυτού του ίδιου τύπου αστοχίας
3. Η δημιουργία του διαγράμματος βασίστηκε σε σήραγγες με βάθη από 50 m έως και 600 m. Ως εκ τούτου δεν προτείνεται η χρήση του για σήραγγες με μεγαλύτερα βάθη, καθώς τα αποτελέσματα μπορεί να έχουν μεγάλη απόκλιση
4. Τα όρια των υπερκειμένων όπου αλλάζει η βασική δομή των πετρωμάτων, οπότε και αλλάζει και η συμπεριφορά είναι 150m για τις πολύ καλές δομές, 100m για τις πολύ κερματισμένες και 70m για τις πτωχές δομές

5. Η μετάβαση του τύπου βαρυτικής αστοχίας από απλή κατάπτωση σε δημιουργία υπερεκσκαφών τύπου καμινάδας, προϋποθέτει τον αυξανόμενο κερματισμό των υλικών με σχετικά ψαθυρή συμπεριφορά
6. Για λόγο αντοχής βραχόμαζας προς επιτόπου τάσεις $\sigma_{cm}/p_o < 0,6-0,7$, αναπτύσσονται υπολογίσιμες παραμορφώσεις στο κέλυφος της σήραγγας. Τα σοβαρά προβλήματα προκύπτουν όταν ο λόγος $\sigma_{cm}/p_o < 0,3$
7. Η παρουσία νερού στη βραχόμαζα δεν επηρεάζει την κατηγορία αστοχίας, παρά μόνο μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας

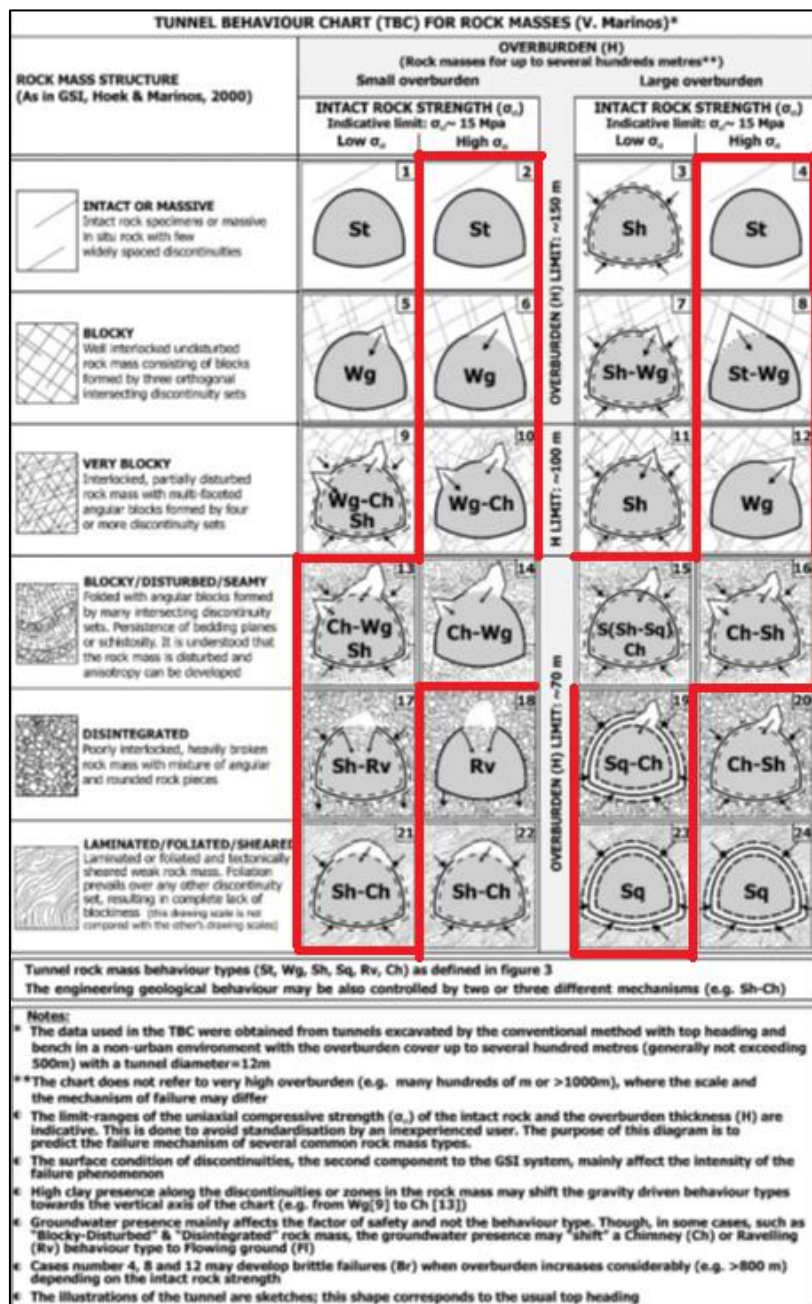
Σημειώνεται πως οι διάφοροι τύποι αστοχιών που παρουσιάζονται στο εν λόγω διάγραμμα έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην [Παράγραφο 2.5](#) της παρούσας διπλωματικής εργασίας.




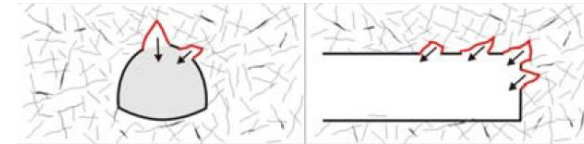
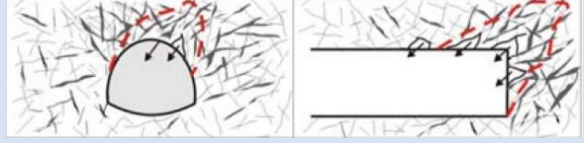
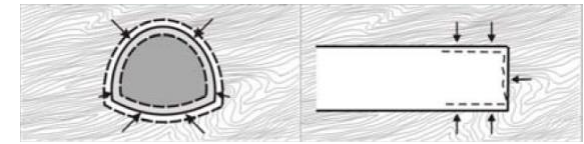

Εικόνα 3.14. Προτεινόμενο διάγραμμα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχομάζας. (Marinos V., 2012)

3.3.8.1 Διάγραμμα Εκτίμησης Της Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς Οφιολίθων

Μιας και η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον σχηματισμό των οφιολίθων, είναι δόκιμο να παρουσιαστεί ένα πιο εξειδικευμένο διάγραμμα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς. Αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.15 και είναι απόρροια της έρευνας του Μαρίνου Β. (2007). Οι πιθανές αστοχίες βρίσκονται εντός των κόκκινων γραμμών. Ακόμα, στον ακόλουθο Πίνακα 3.4 αναφέρεται περιγραφικά η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των οφιολιθικών τύπων, λαμβάνοντας υπόψιν και τα δεδομένα από προηγούμενες ενότητες.



Εικόνα 3.15. Προτεινόμενο διάγραμμα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς του οφιολιθικού συμπλέγματος (Μαρίνος Β., 2007)

Τύπος Βραχομάζας	Περιγραφή	Συμπεριφορά	Σχήμα Πιθανής Αστοχίας
Τύπος 1	Μη σερπεντινωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης – γάββρος)	Η συμπεριφορά της βραχομάζας θεωρείται ισχυρά ανισότροπη. Σε καλής ποιότητας περιδοτίτες αναμένονται απλές συνθήκες διάνοιξης σπράγγων. Η προσοχή στον συγκεκριμένο τύπο επικεντρώνεται στην αποφυγή δομικών αστοχιών από σφήνες. Η παρουσία σερπεντινωμένου υλικού κατά μήκος των ασυνεχειών, προσδίδει χαμηλότερες ιδιότητες τριβής.	
Τύπος 2	Σερπεντινωμένος περιδοτίτης – γάββρος	Η συμπεριφορά της βραχομάζας θεωρείται ανισότροπη. Είναι πιο πιθανές οι ολισθήσεις σφηνών, οι οποίες εξαρτώνται από την γεωμετρία της σήραγγας και των ασυνεχειών, αλλά και από την πτωχότερη ποιότητα των τελευταίων, λόγω της αυξημένης σερπεντινώσεως. Αναμένονται μικρές έως μέτριες εισροές υδάτων. Εμφανίζεται η πιθανότητα μιας εκτεταμένης κατάπτωσης, αν υπάρχει έντονη σερπεντινώση – φυλλοποίηση στις ασυνέχειες. Σε μεγαλύτερα βάθη, η βραχομάζα κατέχει πιο σφικτή δομή, οπότε και οι τυχόν αστοχίες περιορίζονται μόνο σε σφηνοειδείς ολισθήσεις.	
Τύπος 3	Έντονα σερπεντινωμένος περιδοτίτης ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου σερπεντινίτη	Η συμπεριφορά της βραχομάζας χαρακτηρίζεται ως ισότροπη για τις παραμορφώσεις και ανισότροπη για τις καταπτώσεις. Είναι πιθανές οι ολισθήσεις σφηνών, αναλόγως της γεωμετρίας του ορύγματος και των ασυνεχειών, λόγω της πτωχής ποιότητας των τελευταίων. Στις περιπτώσεις ενός έντονα τεμαχισμένου περιδοτίτη ή ασθενέστερου σερπεντινίτη (GSI 25-40), η συμπεριφορά ελέγχεται με ολίσθηση και περιστροφή σε επιφάνειες ασυνεχειών. Λόγω της τεμαχισμένης κατάστασης του σχηματισμού, οι τιμές RQD αναμένονται να είναι πολύ χαμηλές. Ωστόσο, κατά την διάρκεια της εκσκαφής, η σταθερότητα του ανοιγματος μπορεί να ελεγχθεί, εάν διατηρηθεί η βραχομάζα υπό περιορισμό (άμεση υποστήριξη – πυρήνας μετώπου).	
Τύπος 4	Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης	Η βραχομάζα συμπεριφέρεται ισότροπα ως προς τις παραμορφώσεις. Σε σερπεντινίτη χαμηλής ποιότητας, η βραχομάζα χάνει την τεμαχώδη δομή της, είτε λόγω της αποσάθρωσης είτε λόγω διάτμησης της. Παρατηρούνται αυξημένες παραμορφώσεις μέχρι και φαινόμενα σύνθλιψης, αναλόγως του ύψους των υπερκειμένων και της αντοχής της βραχομάζας, που μπορεί, όμως, να είναι περιορισμένης έκτασης, αν περιβάλλονται σε κοντινή απόσταση από καλής ποιότητας περιδοτίτη. Στον συγκεκριμένο τύπο εμφανίζεται ο κίνδυνος αστοχίας του μετώπου.	
Τύπος 5	Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους	Στην περίπτωση που το σύνολο οφιολιθών – σχιστοκερατόλιθων έχει χαοτική δομή, η βραχομάζα, ως προς τις παραμορφώσεις, συμπεριφέρεται ισότροπα. Μπορούν να παρατηρηθούν παραμορφώσεις ευρείας κλίμακας, αναλόγως της πίεσης των υπερκειμένων και της αντοχής του «άρρηκτου» τεμάχους πετρώματος. Έχει παρατηρηθεί πως σε μέτρια υπερκείμενα και σε σχηματισμό καλής συνολικής συνοχής, οι συνθήκες είναι γενικά ευσταθείς. Λόγω της ετερογένειας, δεν εμφανίζονται συγκεκριμένες ασυνέχειες, οπότε και δεν προκαλούνται συγκεκριμένες ολισθήσεις. Αυτές συμβαίνουν σε ακανόνιστα τεμάχια, τα οποία ολισθαίνουν πάνω στις πιο σχιστοποιημένες και ολισθηρές ζώνες.	

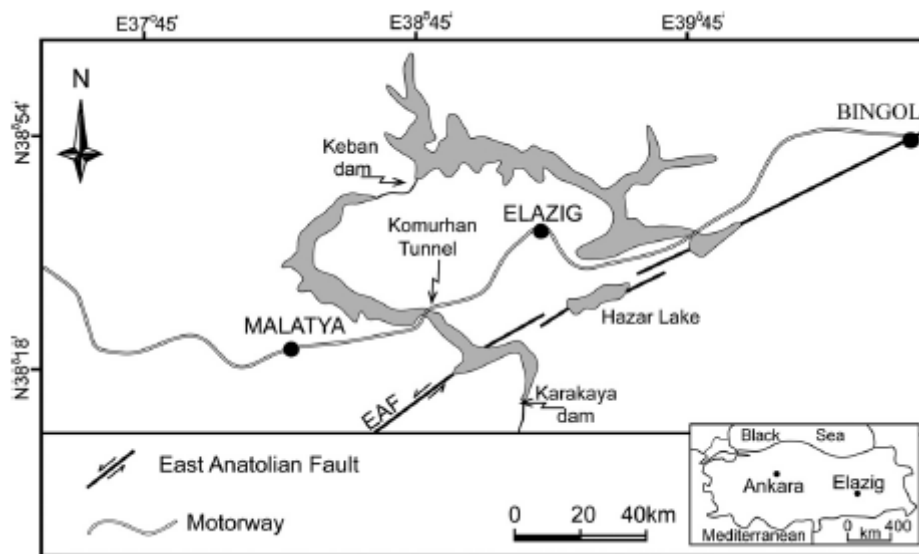
Πίνακας 3.4. Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά και σχηματική οριοθέτηση της συμπεριφοράς των οφιολιθικών τεχνικογεωλογικών τύπων (Μαρίνος Β. Π., 2007).

4 ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

4.1 Εμπειρίες Διάνοιξης Από Τον Παγκόσμιο Χώρο

4.1.1 Η Περίπτωση Της Σήραγγας Komurhan

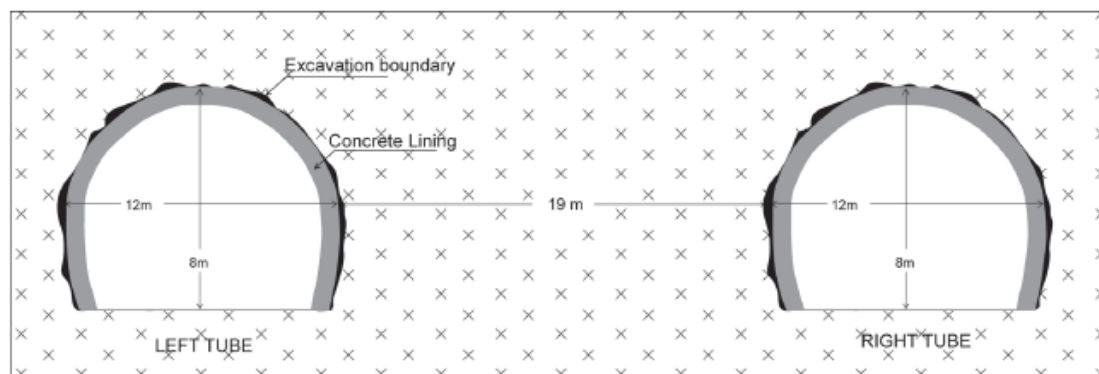
Η σήραγγα Komurhan εντοπίζεται περί τα 50 χλμ. δυτικά από την πόλη Elazig της Ανατολικής Τουρκίας και ο σχεδιασμός της εκπονήθηκε από την Γενική Διεύθυνση Αυτοκινητοδρόμων της Τουρκίας το 2012. Πρόκειται για μία δίδυμη σήραγγα, πεταλοειδούς διατομής, 8 m ύψους και 12 m εύρους, όπου ο κάθε κλάδος της θα έχει συνολικό μήκος 2.370 m. Η εν λόγω σήραγγα διανοίχθηκε εντός των οφιολιθικών σχηματισμών της περιοχής, οι οποίοι απαρτίζονται ως επί το πλείστον από γάββρους και μεταδιορίτες.



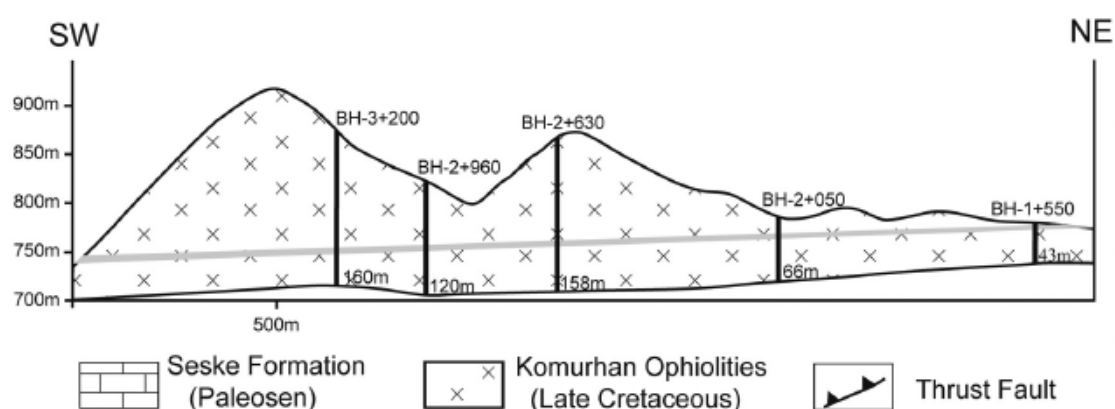
Εικόνα 4.1. Τοποθεσία του έργου. (Yalcin, Gurocak, Ghabchi, & Zaman, 2015)

Έπειτα από δειγματοληψία παρατηρήθηκε ότι οι σχηματισμοί κατείχαν σκούρα γκρι όψη, ενώ τέμονταν από πολλά συστήματα ασυνεχειών, και ως εκ τούτου παρουσίαζαν ένα εύρος στην διάβρωση τους, από λίγο έως μέτρια αποσθρωμένοι. Στα καρότα της γεώτρησης πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός του RQD, όπου παρατηρήθηκε πως πάνω από το 80% των δειγμάτων είχαν τιμή $RQD \geq 50\%$, οπότε και συμπεραίνεται πως

η ποιότητα της βραχομάζας είναι τουλάχιστον μέτρια. Στην Εικόνα 4.3 αποτυπώνονται οι θέσεις από τις οποίες ελήφθησαν τα καρότα των γεωτρήσεων.



Εικόνα 4.3. Όψη σιράγγων. (Yalcin, Gurocak, Ghabchi, & Zaman, 2015)



Εικόνα 4.2. Τομή της σιράγγας. (Yalcin, Gurocak, Ghabchi, & Zaman, 2015)

Ακολούθως, διενεργώντας εργαστηριακές δοκιμές προσδιορίστηκαν κατά προσέγγιση οι ιδιότητες του άρρηκτου βράχου σε κάθε μία από τις γεωτρήσεις, από τις οποίες είναι ασφαλές να ειπωθεί ότι πρόκειται για σχηματισμούς με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα αυτά, μαζί με τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ταξινομήσεων αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.1.

Ιδιότητα	BH1+550	BH2+050	BH2+630	BH2+960	BH3+200
σ_{ci} (MPa)	66,26	74,99	75,13	59,49	67,25
E_i (GPa)	16,73	18,22	12,75	11,33	19,84
ν	0,27	0,24	0,31	0,29	0,23
γ (kN/m ³)	26,1	26,52	26,81	27,64	28,33
RQD(%)	69	48	55	44	54
RMR	60	58	59	55	57
GSI	56	53	54	52	54

Πίνακας 4.1. Ιδιότητες των άρρηκτων βράχων των σχηματισμών που συναντήθηκαν. (Yalcin, Gurocak, Ghabchi, & Zaman, 2015)

Οι μελετητές Yalcin, Gurocak, Ghabchi, & Zaman (2015), οι οποίοι διεξήγαγαν την μελέτη για την διάνοιξη της σήραγγας, με βάση τα προτεινόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης κάθε μεθόδου γεωτεχνικής ταξινόμησης, καθώς και των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, χρησιμοποίησαν ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να προσομοιώσουν τις συνθήκες κατά την διάνοιξη και με αυτόν τον τρόπο να εντοπίσουν τυχόν αστοχίες που ενδέχονταν να προκληθούν. Από τις αναλύσεις τους αυτές προέκυψαν οι αναμενόμενες συγκλίσεις, το αναμενόμενο πάχος πλαστικής ζώνης, καθώς και τα τελικά προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

	Περιοχή				
	BH1+550	BH2+050	BH2+630	BH2+960	BH3+200
Μέτρα υποστήριξης	Συστηματικές ηλώσεις σε κάρναβο 1x1 m ² , μήκους 1 m στην στέψη και 3 m στις παρειές με μεταλλικό πλέγμα. Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 200mm.		Συστηματικές ηλώσεις σε κάρναβο 1x1 m ² , μήκους 1 m στην στέψη και 4 m στις παρειές με μεταλλικό πλέγμα. Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 200mm.		
Πάχος Πλαστικής Ζώνης (m)	0	0	0	0	0
Συνολικές Μετακινήσεις (m)					
Στέψη	$1,8 * 10^{-4}$	$2,85 * 10^{-4}$	$1,8 * 10^{-3}$	$1,05 * 10^{-3}$	$1,8 * 10^{-3}$
Παρειές	$1,14 * 10^{-3}$	$1,9 * 10^{-3}$	$1,14 * 10^{-2}$	$7 * 10^{-3}$	$1,14 * 10^{-3}$

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων σήραγγας. (Yalcin, Gurocak, Ghabchi, & Zaman, 2015)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται πως κατά την διάνοιξη της σήραγγας δεν θα συναντηθούν ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες, αφού οι υπολογιζόμενες συγκλίσεις τείνουν να είναι μη παρατηρήσιμες, ενώ το ίδιο συμβαίνει και για την υπολογιζόμενη έκταση της πλαστικής περιοχής.

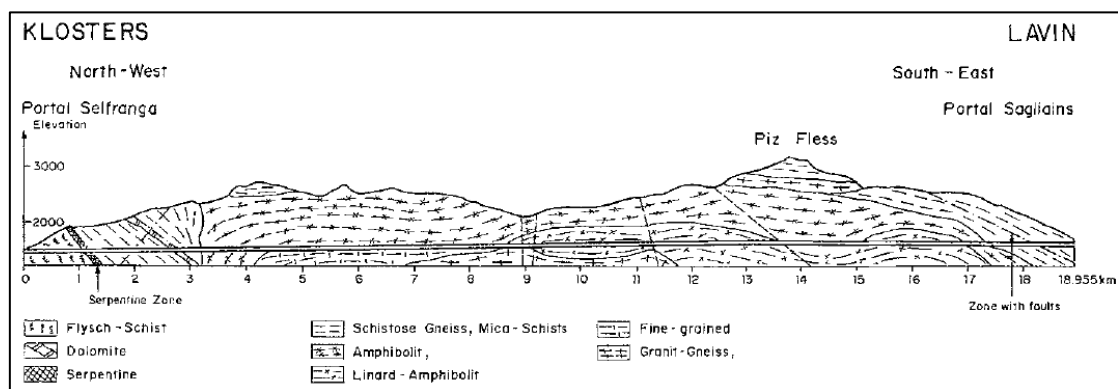
Έτσι, η καλή ποιότητα της βραχομάζας, που περιγράφεται ανωτέρω μέσω των μηχανικών χαρακτηριστικών και των γεωτεχνικών ταξινομήσεων, επαληθεύεται και από τις επιλύσεις των προσομοιώσεων.

4.1.2 Η Περίπτωση Της Σήραγγας Vereina

Η σήραγγα Vereina αποτελεί μια διπλή σιδηροδρομική σήραγγα, μήκους περίπου 20 km, η οποία εντοπίζεται στην ανατολική Ελβετία και συνδέει τις περιοχές Klosters και Lavin. Η γεωλογία της περιοχής αποτελείται από σχηματισμούς, οι οποίοι δημιουργούν συνθήκες αυξημένης πίεσης (squeezing rock), ειδικά στην βόρεια και νότια περιοχή. Η διάνοιξη των σηράγγων θα πραγματοποιούνταν με ολομέτωπη εκσκαφή, σε μία φάση.

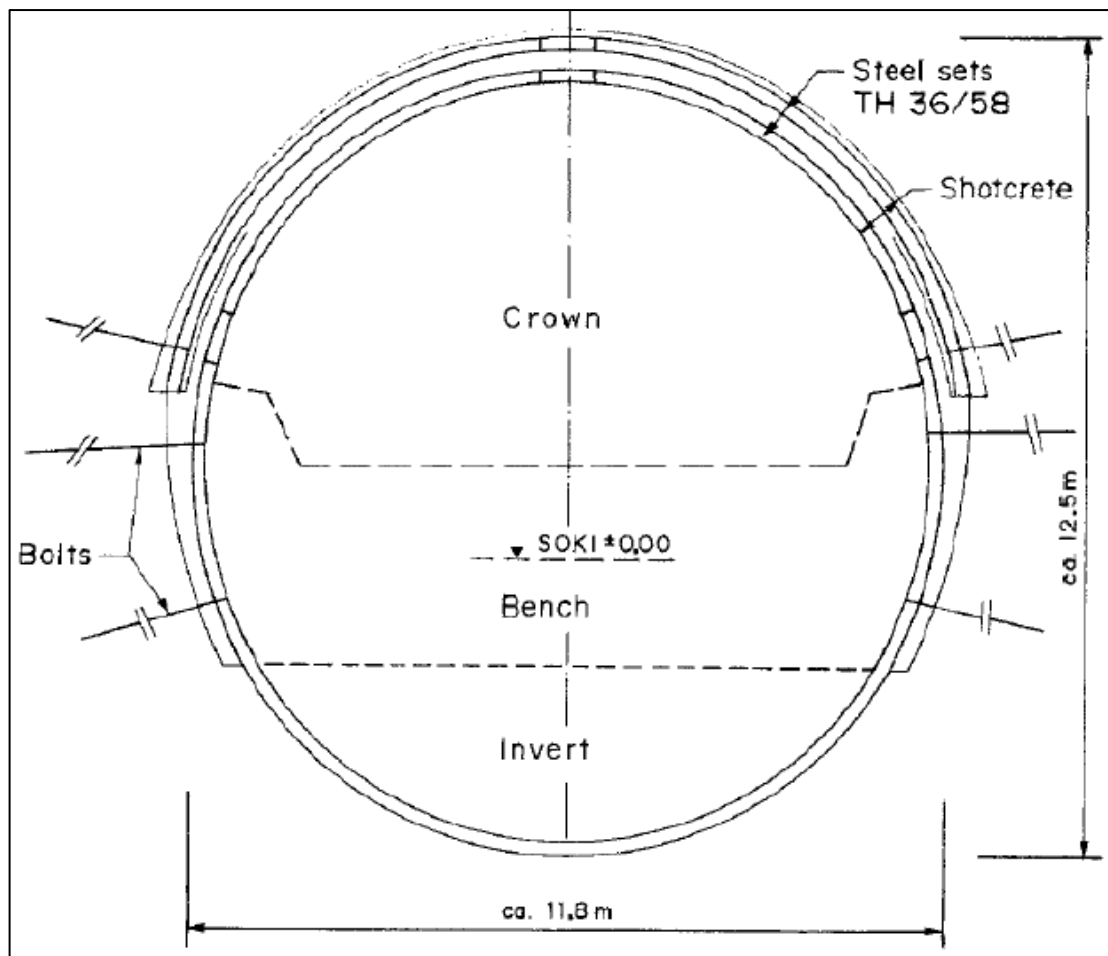
Ο Brunold (1993) εντόπισε στο νότιο τμήμα της σήραγγας (προς το Lavin) μια ζώνη διαταραχής, σε απόσταση 500 με 900 m από το νότιο στόμιο της σήραγγας, η οποία έπρεπε να διασχιστεί. Η ζώνη αυτή περιελάμβανε πολλαπλό αριθμό ρηγμάτων και ειδικά στην Χ.Θ. 887m, εντοπίστηκε μια ζώνη πλάτους περί τα 6 – 7m, αποτελούμενη από αργίλους και ιλύες. Στην Χ.Θ. το ύψος των υπερκειμένων ξεπερνούσε τα 700m, οπότε και ο συνδυασμός των προαναφερθέντων συνθηκών, δημιουργούσε συνθήκες ακραίας πίεσης στην διατομή.

Ο Amberg (1994) διενεργώντας έρευνα στο βόρειο τμήμα της σήραγγας (προς το Klosters) εντόπισε πως ο σχηματισμός που κυριαρχούσε ήταν αυτός των σερπεντινιτών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ο σχηματισμός αυτός ήταν έντονα διαρρηγμένος, περιλαμβάνοντας πολλαπλές ασυνέχειες, με λείες επιφάνειες. Η κατάσταση του σχηματισμού αυτού δημιουργούσε τέτοιες συνθήκες, όπου ο χρόνος αυτοϋποστήριξης της διατομής ήταν πρακτικά μηδενικός.



Εικόνα 4.4. Γεωλογική τομή σήραγγας Vereina.(Keller, 1993). Άντληση από: (Steiner, 1996).

Στις ανωτέρω δυσμενείς συνθήκες του νότιου τμήματος, αφού είχε τοποθετηθεί η προσωρινή υποστήριξη και είχε προχωρήσει η εκσκαφή, προξενήθηκε μια εκτενής αστοχία, η οποία οδήγησε σε αναθεώρηση του τρόπου εκσκαφής. Αυτή εν τέλει διαμορφώθηκε σε τρεις φάσεις εκσκαφής, στέψης, βαθμίδας και ανάστροφου τόξου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5. Διατομή σήραγγας Vereina. (Brunold, 1993). Αντληση από: (Steiner, 1996)

Η αναθεωρημένη προσωρινή υποστήριξη της διατομής περιελάμβανε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια και μεταλλικά ολισθαίνοντα πλαίσια. Ακόμα, κατά την εκσκαφή των σηράγγων, δημιουργούνταν εσκεμμένα υπερεκσκαφή της διατομής, περί τα 30cm, ώστε να δινόταν η δυνατότητα παραμόρφωσης των πλαισίων και να μειώνεται έτσι η απαιτούμενη πίεση της υποστήριξης. Ακόμα, γύρω από της σήραγγας εισπιέστηκε ρητίνη, ώστε να αυξηθεί η συνοχή και η αντοχή της βραχομάζας.

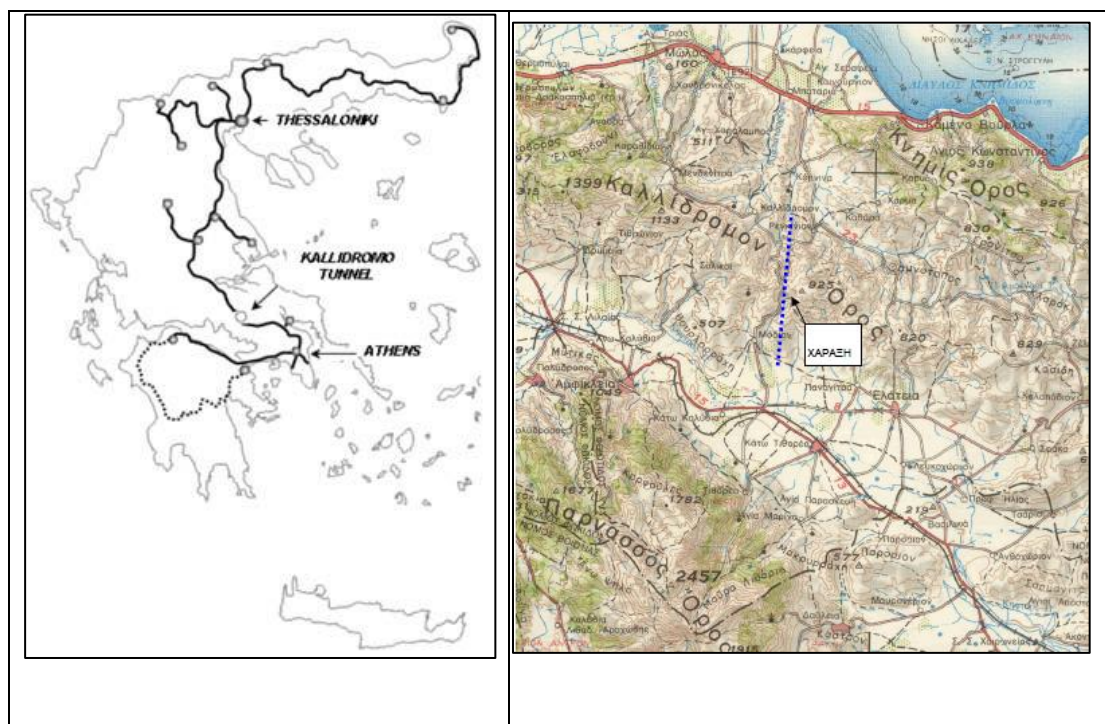
Μετά την διάνοιξη, χρησιμοποιώντας ειδικά όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων της διατομής, παρατηρήθηκε στην στέψη της διατομής του νότιου τμήματος, παραμόρφωση, η οποία άγγιζε μέχρι και τα 35cm, ενώ στις παρειές παρατηρήθηκε σύγκλιση, η οποία ήταν περί το 1/10 της αντίστοιχης στην στέψη.

4.2 Εμπειρίες Διάνοιξης Από Τον Ελλαδικό Χώρο

4.2.1 Η Περίπτωση Της Σήραγγας Του Καλλιδρόμου

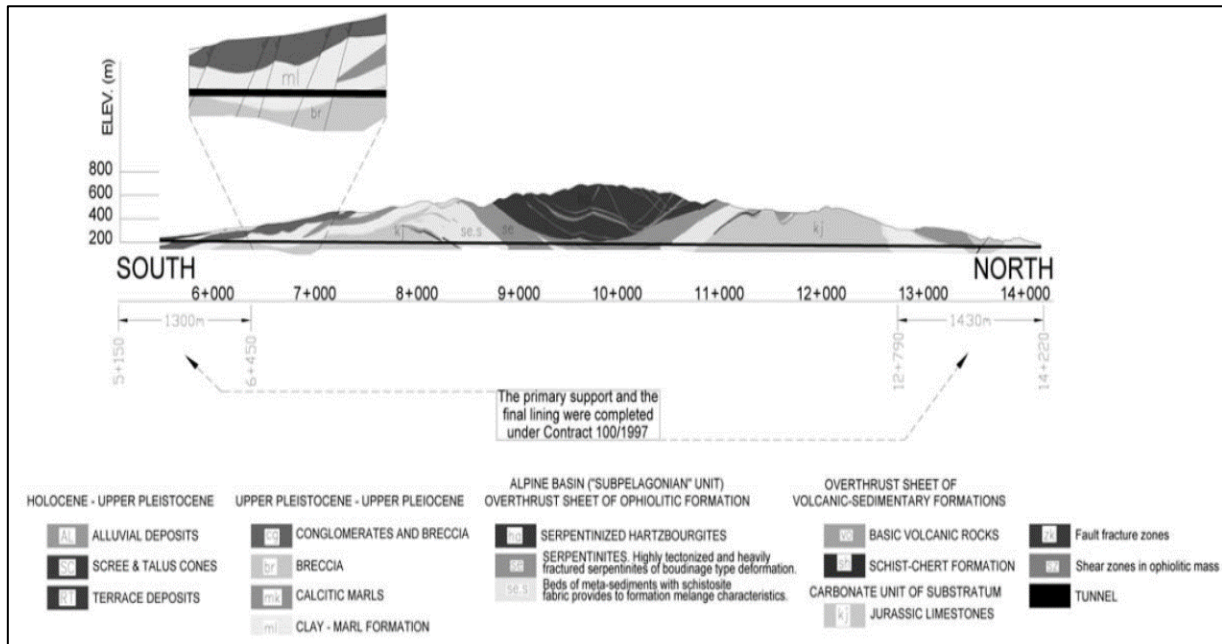
4.2.1.1 Σχεδιαστικά Στοιχεία Σήραγγας

Η σήραγγα του Καλλιδρόμου βρίσκεται στην Στερεά Ελλάδα και διατρέχει τους νομούς Βοιωτίας και Φθιώτιδας. Αποτελείται από δύο δίδυμες σήραγγες κυκλικής διατομής, μονής κατεύθυνσης συνολικού μήκους περί τα 9 χλμ. η κάθε μια. Σκοπός των σήραγγων αυτών είναι η συμμετοχή τους στο νέο σιδηροδρομικό δίκτυο υψηλής ταχύτητας. Οι σήραγγες έχουν ελεύθερο πλάτος περί τα 8,9 m και ελεύθερο ύψος περί τα 9,2 m.



Εικόνα 4.6. Το νέο σιδηροδρομικό δίκτυο και η θέση της σήραγγας του Καλλιδρόμου. (Diasakos, et al., 2010)

Η περιοχή του Καλλιδρόμου αποτελείται κυρίως από αλπικούς σχηματισμούς της πελαγονικής ζώνης, και συγκεκριμένα από ασβεστόλιθους, τεκτονικά καλύμματα ηφαιστιογενών σχηματισμών, οφιολιθικά τεκτονικά καλύμματα κ.α., όπως αποτυπώνονται στην Εικόνα 4.7. Το μέγιστο ύψος υπερκειμένων είναι περί τα 540 m κοντά στο μέσο της σήραγγας και αυτό είναι και το σημείο της σήραγγας όπου θα επικεντρωθεί η ανάλυση.



Εικόνα 4.7. Γεωλογική μηκοτομή σήραγγας Καλλιδρόμου. (Diasakos, και συν., 2010)

Τα οφιολιθικά τεκτονικά καλύμματα αποτελούνται ως επί το πλείστον, από κάτω προς τα πάνω, από σχιστώδεις σερπεντινίτες, σερπεντινίτες και σερπεντινωμένους χαρτζβουργίτες, ενώ ακόμα, σε αυτά προστίθενται και οι ζώνες διάτμησης, καθώς περιλαμβάνουν εδαφοποιημένο οφιολιθικό υλικό. Οι πρώτοι αποτελούν έναν γαιό-ημιβραχώδη σχηματισμό με έντονη ετερογένεια, οι οποίοι έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και ως εκ τούτου παρουσιάζουν φυλλώδη δομή. Οι δεύτεροι αποτελούν έναν βραχώδη σχηματισμό με αρκετά αλληλοτεμνόμενα επίπεδα ασυνεχειών, τα οποία δημιουργούν γωνιώδη τεμάχια με μέτρια αλληλοεμπλοκή. Οι τρίτοι αποτελούν έναν βραχώδη σχηματισμό με μέτρια έως καλή αλληλοεμπλοκή, που διατέμνονται από 4 – 6 οικογένειες ασυνεχειών. Τέλος, οι ζώνες διάτμησης αποτελούνται από εδαφοποιημένα, ασθενώς συγκολλημένα και τεκτονικά διατμημένα υλικά.

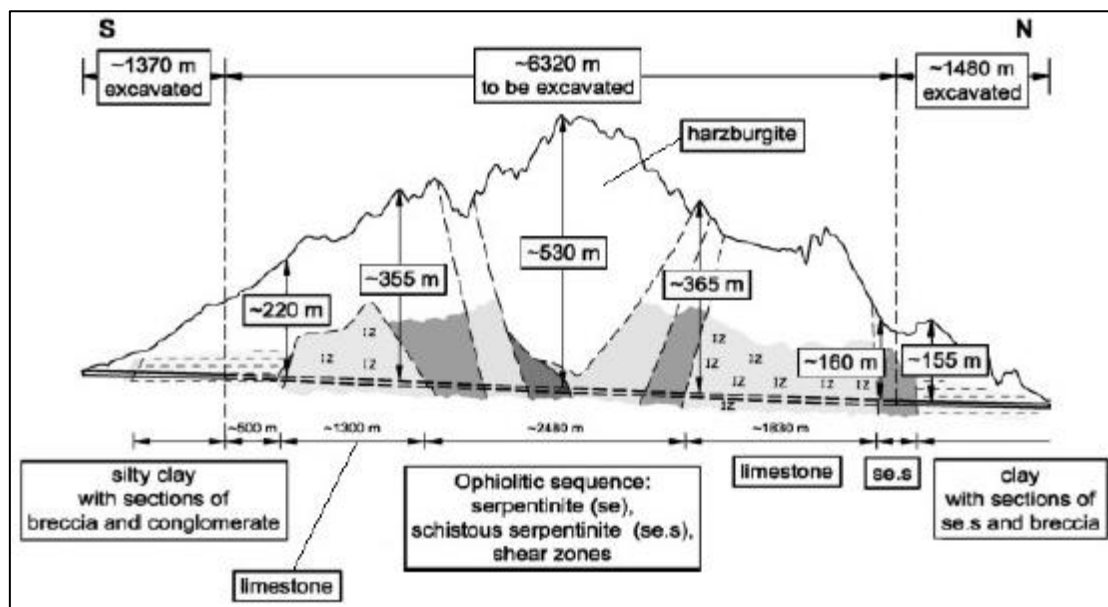
Δεδομένα από εργαστηριακές δοκιμές στα καρότα των γεωτρήσεων δείχνουν την αντοχή των ανωτέρω πετρωμάτων να μειώνεται με το βάθος, καθώς η ποιότητα τους πτωχαίνει, όπως συμπεραίνεται και από την περιγραφή τους.

Σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές, διεξήχθησαν και οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις των άρρηκτων βράχων με τη χρήση των συστημάτων RMR και GSI. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτά αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.3, από όπου μπορεί να επιβεβαιωθεί και η διακύμανση στην ποιότητα τους.

Λιθολογία	T.E - 1	T.E - 2	T.E - 3	T.E - 4
	Σερπεντινωμένοι χαρτζβουργίτες (ha, ha.r)	Σερπεντινίτες (se)	Σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s)	Ζώνη Διάτμησης (sz)
σ_{ci} (MPa)	55	41	19	4,5
RQD (%)	45	36	30	18
RMR	42 – 49 (Μέτρια)	37 – 44 (Πτωχή)	30 – 35 (Πτωχή)	13 – 19 (Πολύ Πτωχή)
GSI	46 – 60	38 – 52	28 – 38	15 – 25
m_i	20	15	8	7
ϕ (°)	42 – 46	35 – 39	23 – 25	10 – 12
E (GPa)	5,56 – 13,2	3,21 - 7,2	1,23 – 2,2	0,28 – 0,5

Πίνακας 4.3. Ιδιότητες των άρρηκτων βράχων των οφιολιθικών σχηματισμών. (Diasakos, και συν., 2010)

Για κάθε διαφορετικό σχηματισμό, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ανήκει και σε μία διαφορετική τεχνικογεωλογική ενότητα της σήραγγας, όπου κάθε μια θα κατέχει και τα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου σχηματισμού.



Εικόνα 4.8. Ιδεατή διαμήκης τομή σήραγγας Καλλιδρόμου. Άντληση: (Ιωαννίδου, 2014)

4.2.1.2 Μέτρα Υποστήριξης

Για την υποστήριξη των σηράγγων του Καλλιδρόμου, μιας και αυτές διανοίχθηκαν σε διαφόρους σχηματισμούς, εφαρμόστηκαν διαφορετικά μέτρα αναλόγως της ποιότητας του σχηματισμού στον οποίο πραγματοποιούνταν η εκσκαφή. Για τον ίδιο λόγο οι τυπικές διατομές των σηράγγων είναι τέσσερις, με τις διαφορές να εντοπίζονται στο δάπεδο, το οποίο άλλοτε είναι κλειστό και άλλοτε ανοιχτό, καθώς και στη φέρουσα ικανότητα της προσωρινής υποστήριξης αναλόγως με τα επιβαλλόμενα φορτία από την περιβάλλουσα βραχομάζα. Οι τυπικές διατομές αυτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.11.

Η εφαρμογή του κλειστού δάπεδού χρησιμοποιήθηκε κατά την διάνοιξη στους οφιολιθικούς και αργιλικούς σχηματισμούς, μετατρέποντας την διατομή της προσωρινής υποστήριξης σε κυκλική, ενώ το ανοιχτό χρησιμοποιήθηκε κατά την διάνοιξη στους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, μετατρέποντας την διατομή σε πεταλοειδή.

Με βάση τις μελέτες χρησιμοποιήθηκαν ενεργητικά και παθητικά μέτρα υποστήριξης της διατομής ώστε να επιτευχθεί η αυτοϋποστήριξη της βραχομάζας, η πρόληψη εκτεταμένων παραμορφώσεων, αλλά και η ελάχιστη πρόκληση διαταράξεων στον περιβάλλοντα χώρο της κατασκευής.

Γενικά, τα βασικά μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν, αποτελούνταν από αυτοδιατρούμενα αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια Lattice-Girder και εκτοξευμένο σκυρόδεμα C30/37 πάχους 35 – 100 cm. Σε θέσεις κατά τις οποίες η βραχομάζα κατείχε πιο πτωχά χαρακτηριστικά, όπως στην περιοχή που κυριαρχούν οι οφιόλιθοι και οι άργιλοι, τα παραπάνω μέτρα αναθεωρήθηκαν και πραγματοποιήθηκε επιπλέον προσωρινή στήριξη μετώπου με χρήση αγκυρίων fiberglass, αλλά και εφαρμόστηκαν πρόσθετα μέτρα υποστήριξης, όπως εφαρμογή δοκών προπορείας (forepolling) και η εφαρμογή ολισθαίνοντων πλαισίων.



Εικόνα 4.9. Νότιο μέτωπο – Ακαμπτη Υποστήριξη Β' Φάση (Ιωαννίδου, 2014)



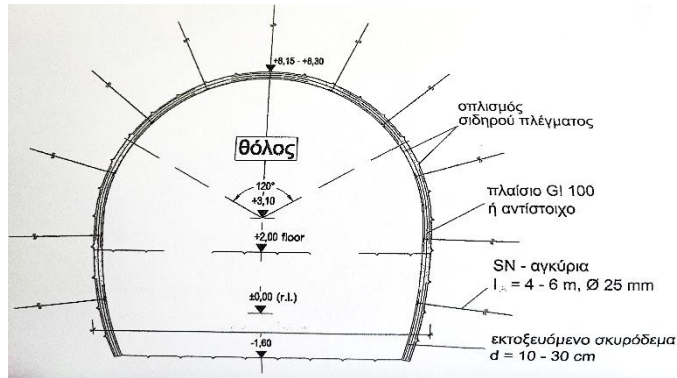
Εικόνα 4.10. Παράδειγμα κατασκευής διατομής ενδοτικού τύπου. (Ιωαννίδου, 2014)

	T.E - 1	T.E - 2	T.E - 2 & T.E - 3	T.E - 3 & T.E - 4
Μέτρα Υποστήριξης	Διατομή Ασβεστολίθου	Διατομή Σερπεντινιτών (se)	Διατομή Ακαμπτης Υποστήριξης Σερπεντινιτών (se), Σχιστώδη Σερπεντινίτη (se.s)	Διατομή Ελεγχόμενης Παραμόρφωσης Σερπεντινιτών (se), Σχιστώδη Σερπεντινίτη (se.s) & Αργίλων
Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Τύπος / Πάχος)	C30/37 10 – 30 cm	C30/37 35 – 60 cm	C30/37 100 cm Με μεταλλικές ίνες	C30/37 45 cm
Αγκύρια (Μήκος/ Διάμετρος / Φέρουσα ικανότητα)	SN, L = 4 – 6 m / Φ25 / 300 kN	Αυτοδιατρούμενα L = 8 -10 m / Φ40 / 300 kN	Αυτοδιατρούμενα, πλήρης πάκτωσης L = 12 m / Φ40 / 140 kN	<ul style="list-style-type: none"> • Ενδοτικά αγκύρια, μήκους ολίσθησης 100 cm, L = 12 m (ελεύθερα 8 m, τσιμεντωμένα 4 m) • Αγκύρια εδάφους, πλήρους τσιμεντενέματος L = 3 m, Φ25, 300 kN
Πλαίσια	L - G 100	L - G 120	Αλληπαλληλες στρώσεις οπλισμού σιδηρού πλέγματος Q188 εντός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος	<ul style="list-style-type: none"> • Ολισθαίνοντα πλαίσια • Σιδηρό πλέγμα Q188 εντός των στρώσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

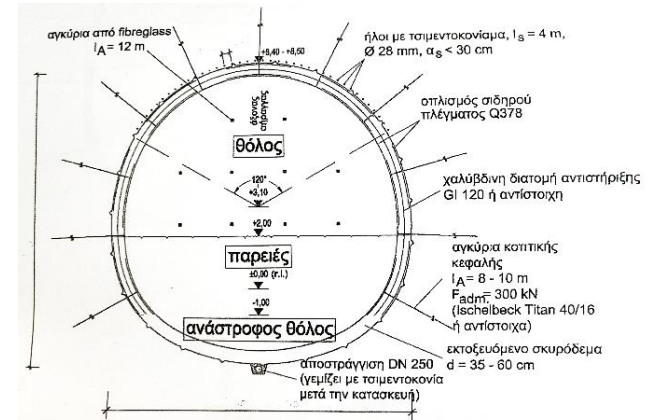
Αγκύρια Μετώπου Fiberglass (Μήκος / Φέρουσα Ικανότητα)	-	L = 12 m / 200 kN Εφαρμογή μόνο στην άνω ημιδιατομή	L = 12 m ανά 8 m / 200 kN Εφαρμογή σε ολόκληρη την διατομή	L = 12 m ανά 6 m / 100 kN Εφαρμογή σε ολόκληρη την διατομή
Επιπλέον Μέτρα Υποστήριξης	-	<ul style="list-style-type: none"> • Ήλοι με τσιμεντοκονίαμα στη στέψη (Forepoling), Φ28, σε γωνία 120°, I_s = 4 m, α_s < 30 cm • Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο • Τελικό Ανάστροφο Τόξο 	<ul style="list-style-type: none"> • Αποστραγγιστικές οπές Φ3, L = 10 m περιμετρικά της διατομής • Ήλοι με τσιμεντοκονίαμα (Forepoling), Φ32, L = 4 m, a = 25 -30 cm, κάθε δεύτερο κύκλο • Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο • Τελικό Ανάστροφο Τόξο 	<ul style="list-style-type: none"> • Αποστραγγιστικές οπές Φ3, L = 10 m περιμετρικά της διατομής • Τα εναπομείναντα διάκενα των ολισθαίνοντων πλαισίων πληρώνονταν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες • Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο • Τελικό Ανάστροφο Τόξο

Πίνακας 4.4. Μέτρα υποστήριξης Σήραγγας Καλλιδρόμου για κάθε διατομή και T.E.

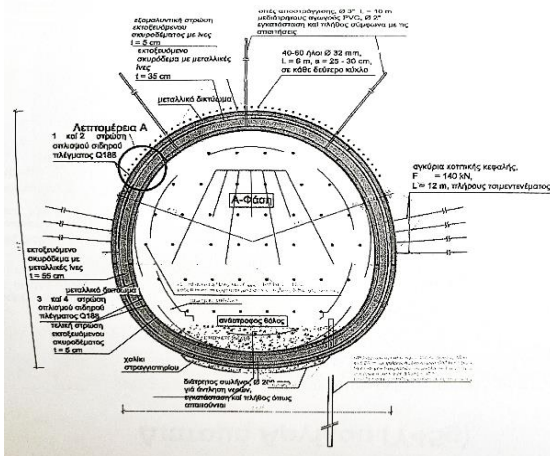
Διατομή Ασβεστολίθου



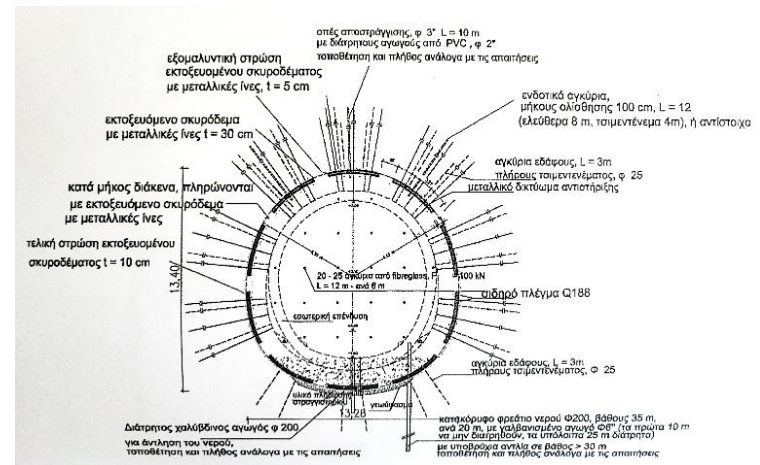
Διατομή Σερπεντινιτών (se)



Διατομή Άκαμπτης Υποστήριξης Σερπεντινιτών (se), Σχιστώδη Σερπεντινίτη (se.s)



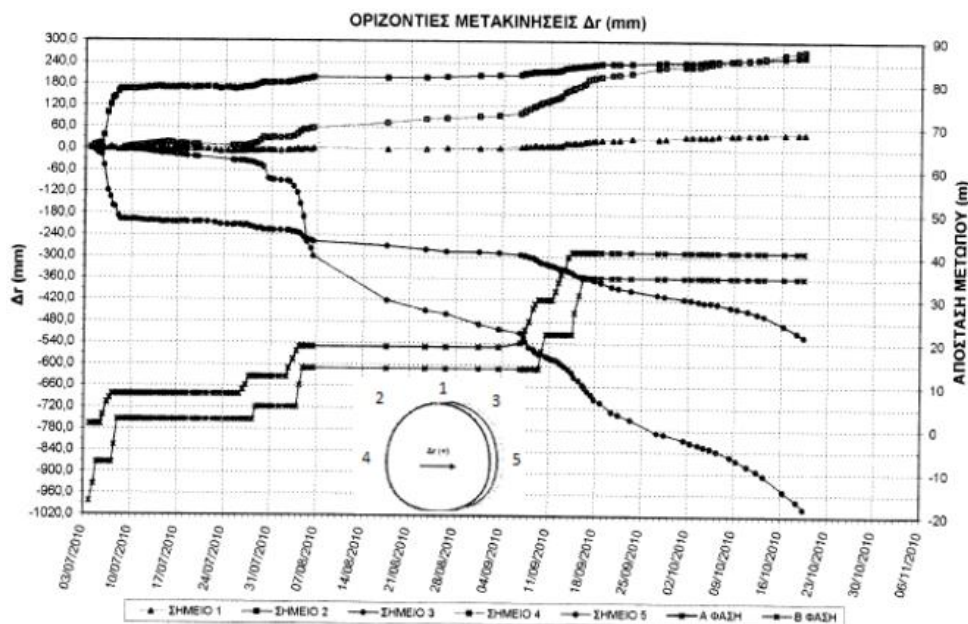
Διατομή Ελεγχόμενης Παραμόρφωσης Σερπεντινιτών (se), Σχιστώδη Σερπεντινίτη (se.s) & Αργίλων



Εικόνα 4.11. Τυπικές διατομές σήραγγας Καλλιδρόμου.

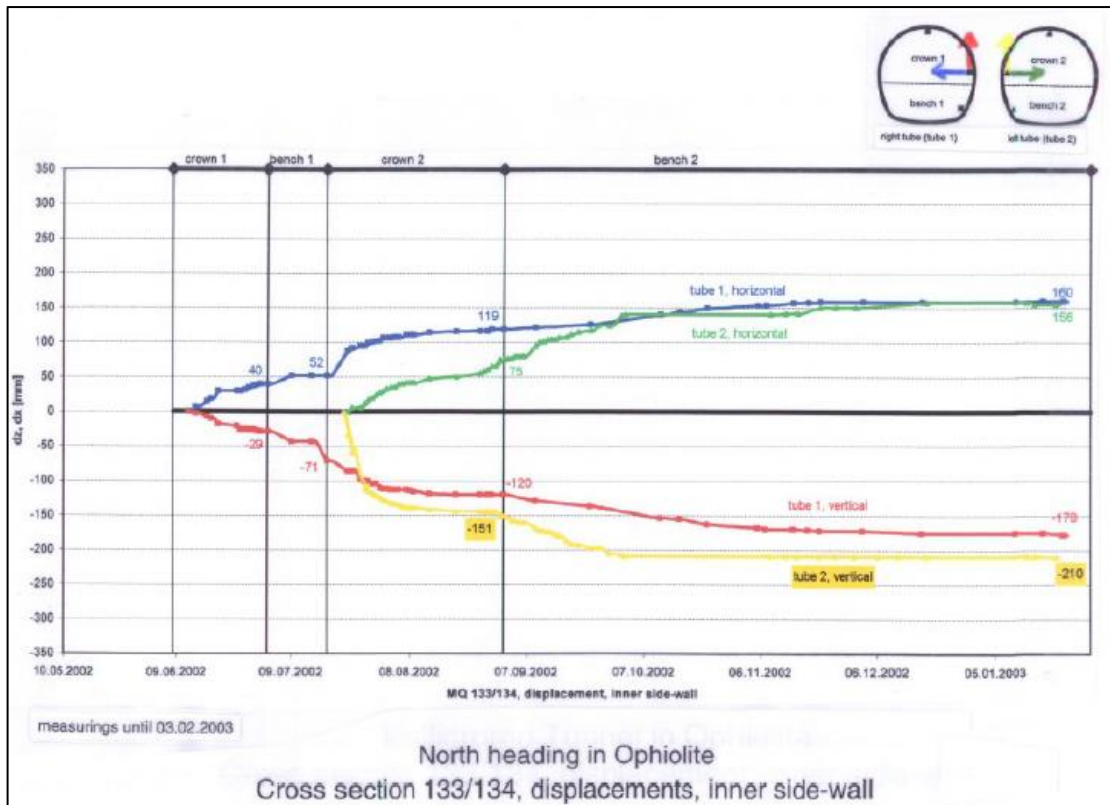
4.2.1.3 Προβλήματα Κατά Την Διάνοιξη

Για να κατανοηθεί περισσότερο η ένταση της σύνθλιψης, η οποία εφαρμοζόταν στην άμεση υποστήριξη, παρατίθεται το διάγραμμα οριζόντιων μετακινήσεων (Εικόνα 4.12) στην Χ.Θ. 9+063.10 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 07/2010 έως 10/2010, το οποίο δημιουργήθηκε μέσω της άντλησης των καταγραφών των εκτασιόμετρων που εγκαταστάθηκαν στην διατομή. Σε αυτό παρατηρείται πως η κάτω δεξιά παρειά της σήραγγας μετακινήθηκε προς το εσωτερικό κατά 997mm.



Εικόνα 4.12. Διάγραμμα οριζόντιων μετακινήσεων στην Χ.Θ. 9+063,10. Άντληση: Ιωαννίδου (2014)

Ακόμα, στην Εικόνα 4.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα των εσωτερικών μετακινήσεων των παρειών και των δύο σηράγγων του βόρειου τμήματος. Σε αυτό παρατηρείτε πως η εκσκαφή του θόλου της αριστερής σήραγγας στη διατομή μετρήσεων 133/134 οδήγησε σε μια αύξηση των οριζόντιων μετακινήσεων του πλευρικού τοιχώματος της δεξιάς σήραγγας από 52 mm έως 119 mm. Το κύριο ποσοστό των μετακινήσεων είναι αποτέλεσμα της εκσκαφής του θόλου. Επιπλέον, η εκσκαφή που ακολούθησε, την αντίστοιχη, εκσκαφή της παρειάς και του ανάστροφου θόλου της δεύτερης σήραγγας επίσης προκάλεσε αύξηση των μετακινήσεων, ωστόσο, η αύξηση ανά μονάδα χρόνου είναι συγκριτικά μικρή. Οι μετακινήσεις σταματήσανε 4 μήνες μετά την εκσκαφή της παρειάς και του ανάστροφου θόλου της δεύτερης σήραγγας. Παρατηρήθηκε αστοχία του εδαφικού τμήματος μεταξύ των δυο παράλληλων σηράγγων με τοπικές αστοχίες του μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι Εικόνες 4.14 και 4.15 αποτυπώνουν σε βάθος την ένταση και έκταση των αστοχιών της άμεσης υποστήριξης των διδύμων σηράγγων κατά την διάνοιξη σε οφιολιθικό περιβάλλον.



Εικόνα 4.13. Βόρειο μέτωπο σε οφιολιθικό σχηματισμό – Εγκάρσια τομή σταθμών 133/134. Αντίληψη: (Ιωαννίδου, 2014)



Εικόνα 4.14. Αστοχία προσωρινής υποστήριξης λόγω αυξημένων συγκλίσεων σε σχιστώδη σερπεντινίτη. Αντίληψη: Ιωαννίδου (2014).



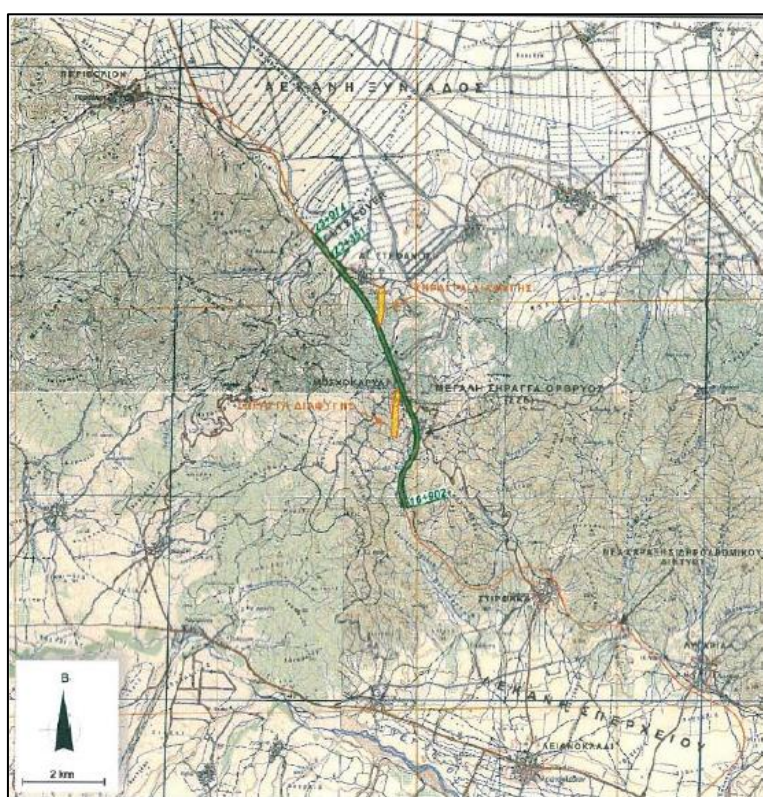
Εικόνα 4.15. Αστοχία σε Σχιστώδη Σερπεντινίτη. Άντληση: (Ιωαννίδου, 2014)

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις αυξημένες συγκλίσεις των παρειών, ένα ακόμα πρόβλημα που προέκυπτε, αποτελούσε η αστάθεια του μετώπου εκσκαφής, η οποία οδηγούσε σε φράξιμο του μετώπου, λόγω κυκλικών ή οριζόντιων ολισθήσεων. Παράλληλα, δημιουργούνταν μεγάλες υπερεκσκαφές στην διατομή των σηράγγων. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση επιπλέον μέσων υποστήριξης του μετώπου, όπως οι δοκίδες προπορίας, τα αγκύρια fiberglass και η εκσκαφή σε μικρότερα τμήματα του μετώπου.

4.2.2 Η Περίπτωση Της Σιδηροδρομικής Σήραγγας Όθρυος

4.2.2.1 Στοιχεία Σήραγγας

Η σήραγγα Όθρυος είναι μια δίδυμη σιδηροδρομική σήραγγα με μέσο μήκος κάθε κλάδου περί τα 7 km, εκ των οποίων τα 6,4 km κατασκευάζονται με υπόγεια διάνοιξη και περίπου 600 m, πλησίον των στομίων, με την μέθοδο της εκσκαφής και επανεπίκωσης (Cut & Cover). Η περιοχή της σήραγγας εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα του όρους Όθρυς, νότια της λεκάνης της Ξυνιάδας και βόρειο-δυτικά της λεκάνης του Σπερχειού. Η σήραγγα έχει διεύθυνση ΝΑ - ΒΔ και αποτελεί τμήμα της νέας διπλής σιδηροδρομικής γραμμής Αθήνας – Θεσσαλονίκης - Εύζωνοι.



Εικόνα 4.16. Γενική θέση της περιοχής του έργου. (Γραφείο Μάλιου ΑΕ, 2006)

Το εν λόγω έργο αποτελείται τόσο από την βασική σήραγγα Όθρυος (SS6), όσο και από κάποιες μικρότερες σήραγγες (SS1, SS2, SS4), οι οποίες διανοίγονται σε μικρότερες Χ.Θ. από την κύρια σήραγγα. Η εν λόγω σήραγγα Όθρυος (SS6) εκτείνεται από την Χ.Θ. 16+924 έως την Χ.Θ. 23+004, με το μέγιστο υπερκείμενο της να αγγίζει τα 370 m.

Ξεκινώντας από το νότιο στόμιο, η σήραγγα διέρχεται από τους σχηματισμούς των βασαλτών – δολεριτών για 1000m, στη συνέχεια ακολουθεί ο σχηματισμός των

σχιστοκερατόλιθων για περίπου 2200m και τέλος ακολουθεί ο σχηματισμός των σερπεντινωμένων περιδοτιτών, που έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση, για τα τελευταία 3000m. Η κατασκευή των διδύμων σιράγγων μονής τροχιάς, καθώς και των δύο σιράγγων προσβολής ενδιάμεσων μετώπων (σήραγγα προσβολής Μοσχοκαρυάς και σήραγγα προσβολής Αγ. Στεφάνου) πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο NATM (Μπαλάση, 2007).

Γενικά στοιχεία για τα γεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά αποτυπώνονται στην μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Αι. Μπαλάση (2007). Σύμφωνα με αυτήν, οι τρεις κατηγορίες των γεωλογικών σχηματισμών που απαρτίζουν τη σήραγγα κατέχουν τα γεωλογικά, γεωτεχνικά και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που αποτυπώνονται στους Πίνακες 4.5 και 4.6.

Χαρακτηριστικά	Γεωλογικός Σχηματισμός		
	Βασάλτες - Δολερίτες	Σχιστοκερατόλιθοι με παρεμβολές οφιολίθων	Περιδοτίτες
Μέση τιμή RQD (%)	39	30	25
Μέση Τιμή GSI	42	35	31
UCS (MPa)	17	16	Βλ. Πίνακα 4.6
E (MPa)	3800	5500	
m_i	25	8	

Πίνακας 4.5. Γεωτεχνικά και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά για τους εμφανιζόμενους σχηματισμούς της σήραγγας Όθρυος (Μπαλάση, 2007).

Λόγω της αυξημένης ποικιλίας και βαθμού σερπεντινώσεως, οι οφιολίθοι χωρίστηκαν περαιτέρω σε 4 κατηγορίες, όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.6. Ο εν λόγω πίνακας περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μία ξεχωριστή κατηγορία περιδοτιτών που εμφανίστηκε κατά μήκος του έργου.

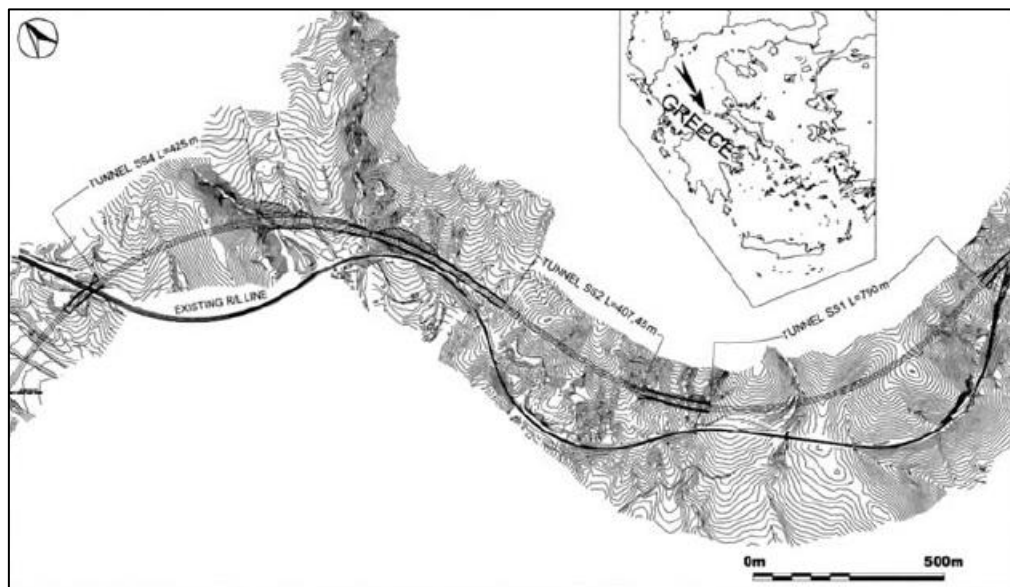
Χαρακτηριστικά	Περιδοτίτες			
	Περιδοτίτες	Σερπεντινωμένοι Περιδοτίτες	Σερπεντινωμένοι Περιδοτίτες προς Σερπεντινίτες	Σερπεντινίτες

Ανατιθεμένη Τιμή GSI	60	50	40	30
UCS (MPa)	57	35	28	22
E (MPa)	15000	12000	7000	6500
m_i	25	20	15	10

Πίνακας 4.6. Γεωτεχνικά και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά για τους εμφανιζόμενους σχηματισμούς των οφιολίθων της σήραγγας Όθρυς (Μπαλάση, 2007).

Όπως είναι φανερό από τους ανωτέρω πίνακες, η σήραγγα Όθρυς (SS6) διαιρείται σε 3 τεχνικογεωλογικές ενότητες, ακολουθώντας τις εναλλαγές των σχηματισμών που υπάρχουν κατά μήκος της.

Πιο λεπτομερή δεδομένα για την διάνοιξη και τα εφαρμοσθέντα μέτρα άμεσης υποστήριξης της σήραγγας αντλούνται από την έκθεση των Mourtzas & Gkiolas (2010), οι οποίοι παρέχουν δεδομένα για την διάνοιξη του υποτμήματος της σήραγγας Λιανοκλάδι – Δομοκός, από την Χ.Θ. 9+685 έως την Χ.Θ. 12+254.



Εικόνα 4.17. Τοποθεσία υποτμήματος από την Χ.Θ. 9+685 έως την Χ.Θ. 12+254. (Mourtzas & Gkiolas, 2010)

Εντός των συγκεκριμένων Χ.Θ. εκσκάπτονται 4 διαδοχικές σήραγγες, οι SS1, SS2, SS3 και SS4. Σημειώνεται πως η σήραγγα SS3 εκσκάπτεται με την μέθοδο Cut & Cover, οπότε και δεν λαμβάνεται υπόψιν. Τα μήκη των σηράγγων SS1, SS2 και SS4 αντίστοιχα είναι 860m, 477m και 495m. Η διατομή των ανωτέρω 3 σηράγγων είναι πεταλοειδής και η εκσκαφή πραγματοποιείται σε δύο φάσεις (άνω και κάτω ημιδιατομή).

Ανάλογα με την γεωλογική και γεωτεχνική συμπεριφορά τους, οι σχηματισμοί κατά μήκος των σηράγγων διαιρέθηκαν σε επτά τεχνικογεωλογικές ενότητες και ακολούθως

οι τεχνικογεωλογικές ενότητες, με κοινά χαρακτηριστικά, ομαδοποιήθηκαν σε κοινές κλάσεις βραχομαζών. Οι επτά τεχνικογεωλογικές ενότητες είναι οι εξής:

- **Τεχνικογεωλογική Ενότητα 1 (TE-1):** Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει ελαφρώς έως εντελώς κατακερματισμένους οφιόλιθους, χαμηλής αντοχής, με RQD μεγαλύτερο από 60%, δείκτη RMR μεταξύ 45 και 65 (κατηγορία II έως III σύμφωνα με τον Bieniawski 1989) και εκτιμώμενο GSI που κυμαίνεται μεταξύ 45 και 55.
- **Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2 (TE-2):** Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει έντονα κατακερματισμένους οφιόλιθους, χαμηλής αντοχής, με RQD μεταξύ 30% και 60%, δείκτη RMR μεταξύ 35 και 45 (κατηγορία III έως IV κατά Bieniawski 1989) και εκτιμώμενο GSI που κυμαίνεται μεταξύ 35 και 45.
- **Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3 (TE-3):** Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει έντονα κατακερματισμένους έως και διαρρηγμένους οφιόλιθους, χαμηλής αντοχής, με RQD μεταξύ 0% και 30%, δείκτη RMR μεταξύ 10 και 35 (κατηγορία IV έως V κατά Bieniawski 1989) και εκτιμώμενο GSI που κυμαίνεται μεταξύ 25 και 35.
- **Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4 (TE-4):** Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει έντονα διαρρηγμένους οφιόλιθους, με τη μορφή χαλικιού με μεγέθη από 0,03 x 0,01m έως 0,07 x 0,05m και δείκτη RMR μικρότερο από 10%. Ο δείκτης GSI κυμαίνεται μεταξύ 20 και 25.
- **Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5 (TE-5):** Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει σχιστοποιημένο, έντονα σπασμένο και εξαλλοιωμένο οφιολιθικό υλικό με γωνιώδη και στρογγυλεμένα κομμάτια οφιόλιθου και ασβεστόλιθου, έντονα πτυχωμένα, με χαοτική δομή. Το γεωυλικό κατά τόπους παρουσιάζει δομή σχεδόν σαν έδαφος. Η εκτιμώμενη τιμή GSI κυμαίνεται μεταξύ 15 και 20.
- **Τεχνικογεωλογική Ενότητα 6 (TE-6):** Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει εξαλλοιωμένο υλικό, με χαρακτηριστικά μυλωνίτη, που σχετίζεται με ζώνες τεκτονικής παραμόρφωσης. Εμφανίζεται με τη μορφή υπό-λεύκης έως υπό-κίτρινης άμμου, με χαμηλή συνοχή. Η εκτιμώμενη τιμή GSI που κυμαίνεται μεταξύ 15 και 20.
- **Τεχνικογεωλογική Ενότητα 7 (TE-7):** Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει ασβεστολιθικά τεμάχια, μέτριας αντοχής, έντονα πτυχωμένα και μέτρια έως έντονα σπασμένα. Ο εκτιμώμενος δείκτης GSI κυμαίνεται μεταξύ 35 και 40. Η γεωτεχνική μονάδα TE-7 συναντάται κυρίως στη σήραγγα SS1.

Για κάθε επιμέρους σήραγγα (SS1, SS2 και SS4) δημιουργήθηκαν επιπλέον ζώνες. Δεδομένα από καρτότα γεωτρήσεων σε κάθε σήραγγα, οδήγησαν τους ερευνητές σε μια ποσοστιαία εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που περιέχονται στην εκάστοτε ζώνη. Αυτή αποτυπώνεται στον Πίνακα 4.7.

Σήραγγα	Περιοχή		Ποσοστό τεχνικογεωλογικών ενοτήτων (%)						
	Χ.Θ. Έναρξης	Χ.Θ. Λήξης	TE-1	TE-2	TE-3	TE-4	TE-5	TE-6	TE-7
SS1	9+685	9+753	32%	35%	25%	3%	4%	1%	-
	9+753	10+040	-	-	25%	8%	64%	2%	1%
	10+040	10+227	-	22%	35%	7%	5%	-	31%
	10+227	10+251	-	5%	10%	12%	72%	-	1%
	10+251	10+433	-	1%	2%	6%	55%	28%	8%
	10+433	10+457	24%	26%	36%	7%	7%	-	-
SS2	10+681	10+735	1%	-	4%	70%	25%	-	-
	10+735	10+922	27%	15%	28%	26%	-	4%	-
	10+922	11+062	19%	30%	42%	3%	6%	-	-
	11+062	11+089	-	5%	-	35%	60%	-	-
SS4	11+800	1+976	50%	10%	37%	-	2%	1%	-
	11+976	12+022	-	-	20%	25%	55%	-	-
	12+022	12+225	18%	35%	36%	5%	1%	5%	-

Πίνακας 4.7. Εκτιμώμενο ποσοστό τεχνικογεωλογικών ενοτήτων σε κάθε σήραγγα. (Mourtzas & Gkiolias, 2010)

Βασισμένοι στα διαθέσιμα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα, οι δύο συγγραφείς ομαδοποίησαν τις προαναφερθέντες τεχνικογεωλογικές ενότητες σε κλάσεις βραχομάζας με αναμενόμενη κοινή συμπεριφορά κατά την διάνοιξη. Οι κλάσεις αυτές είναι:

- ο **Βραχομάζα Κλάσης Α:** Έντονη έως ελαφρώς κατακερματισμένη βραχομάζα. Η κατηγορία Α περιλαμβάνει τις TE-1 και TE-7. Αναμενόμενη σταθερή συμπεριφορά κατά την εκσκαφή, χωρίς χαλάρωση βράχων. Λόγω της γεωμετρίας των ασυνεχειών, ήταν πιθανός ο σχηματισμός σφηνών. Απαίτηση για συστηματική υποστήριξη, για την αποτροπή σφηνοειδών αστοχιών. Δεν αναμενόταν κάποια πρακτική επίπτωση των υπόγειων υδάτων στην αντοχή του

βράχου. Προτεινόμενος τρόπος εκσκαφής με τη χρήση εκρηκτικών. Προτεινόμενες τιμές GSI για την TE-1: 45 – 55 και για την TE-7: 35 – 45.

- **Βραχόμαζα Κλάσης B1:** Έντονα κατακερματισμένη βραχομάζα. Η κατηγορία B1 περιλαμβάνει την TE-2. Οι αναμενόμενες αστοχίες αποτελούνταν από χαλάρωση τεμαχών της βραχομάζας και σχηματισμός σφηνών. Απαίτηση συστηματική υποστήριξη ενάντια σε σφηνοειδή ολίσθηση. Τα υπόγεια ύδατα επιδρούσαν σε μικρό βαθμό στην αντοχή της βραχομάζας. Προτεινόμενος τρόπος εκσκαφής με τη χρήση εκρηκτικών. Προτεινόμενες τιμές GSI για την TE-2: 35 – 45.
- **Βραχόμαζα Κλάσης B2:** Η κατηγορία B2 περιλαμβάνει έντονα κατακερματισμένους έως σπασμένους οφιολίθους, χαμηλής αντοχής. Στην συγκεκριμένη κλάση είναι αυξημένος ο κίνδυνος αστοχίας της διατομής, χωρίς την άμεση εγκατάσταση μέτρων υποστήριξης. Τα υπόγεια ύδατα επιδρούν σε μέτριο βαθμό στην αντοχή της βραχομάζας. Προτεινόμενος τρόπος εκσκαφής με μηχανικά μέσα. Προτεινόμενες τιμές GSI για την TE-3: 25 – 35.
- **Βραχόμαζα Κλάσης C1:** Η κατηγορία C1 περιλαμβάνει την TE-4. Κατά τόπους το γεωολογικό μοιάζει με εδαφικό. Λόγω των ανωτέρω αναμενόταν άμεση παραμόρφωση κατά τη διάνοιξη. Τα υπόγεια ύδατα επιδρούσαν σε μεγάλο βαθμό στην αντοχή της βραχομάζας. Προτεινόμενος τρόπος εκσκαφής με μηχανικά μέσα. Προτεινόμενες τιμές GSI για την TE-4: 20 – 25.
- **Βραχόμαζα Κλάσης C2:** Η κατηγορία C2 περιλαμβάνει την TE-5 και TE-6. Συστηματικά και έντονα τεκτονισμένη και διατμημένη βραχομάζα, πολύ χαμηλής αντοχής και πολύ έντονης διάβρωσης. Αναμενόμενη άμεση παραμόρφωση κατά τη διάνοιξη. Τα υπόγεια ύδατα επιδρούσαν σε μεγάλο βαθμό στην αντοχή της βραχομάζας. Προτεινόμενος τρόπος εκσκαφής με μηχανικά μέσα. Προτεινόμενες τιμές GSI για την TE-5 και TE-6: 15 – 20.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα (T.E.)	Κλάση Βραχομάζας	GSI (design)	σ_{ci} (MPa)	γ (kN/m ³)
1	A	45	20	28
2	B1	35	15	26
3	B2	25	23	26
4	C1	20	7	22
5	C2	15	5	22

6	C2	15	5	22
7	A	45	40	27

Πίνακας 4.8. Τεχνικογεωλογικές ενότητες σήραγγας Όθρυος. (Mourtzas & Gkiolas, 2010)

4.2.2.2 Μέτρα Υποστήριξης

Κατά την Μπαλάση Αι. (2007), μέσω των εκτελούμενων προσομοιώσεων που διενέργησε, τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα είναι τα ακόλουθα:

Μέτρα Υποστήριξης	Γεωλογικός Σχηματισμός		
	Βασάλτες - Δολερίτες	Σχιστοκερατόλιθοι με παρεμβολές οφιολίθων	Περιδοτίτες ²
Βήμα Προχώρησης (m)	1,5	1,0	1,0
Προσωρινός Πυθμένος (m)	0,50	0,50	0,50
Εκτοξεύμενο Σκυρόδεμα (m)	0,20	0,50	0,50
Αγκύρια Παρειών	Πλήρους Πάκτωσης, Φ30, L=4m ανά 1m	Πλήρους Πάκτωσης, Φ30, L=8m ανά 1m	Πλήρους Πάκτωσης, Φ30, L=12m ανά 1m
Αγκύρια Μετώπου Fiberglass	24 τεμάχια, φέρουσας ικανότητας 200kN στην Α φάση εκσκαφής	48 τεμάχια, φέρουσας ικανότητας 200kN στην Α φάση εκσκαφής	48 τεμάχια, φέρουσας ικανότητας 200kN στην Α φάση εκσκαφής
Ελεφαντοπόδαρο	0,70 m, σκυρόδεμα C25/30	0,70 m, σκυρόδεμα C25/30	0,70 m, σκυρόδεμα C25/30
Επιπλέον Μέτρα Υποστήριξης	-	• Ολισθαίνοντα πλαίσια	• Εφαρμογή κενών σκυροδέτησης

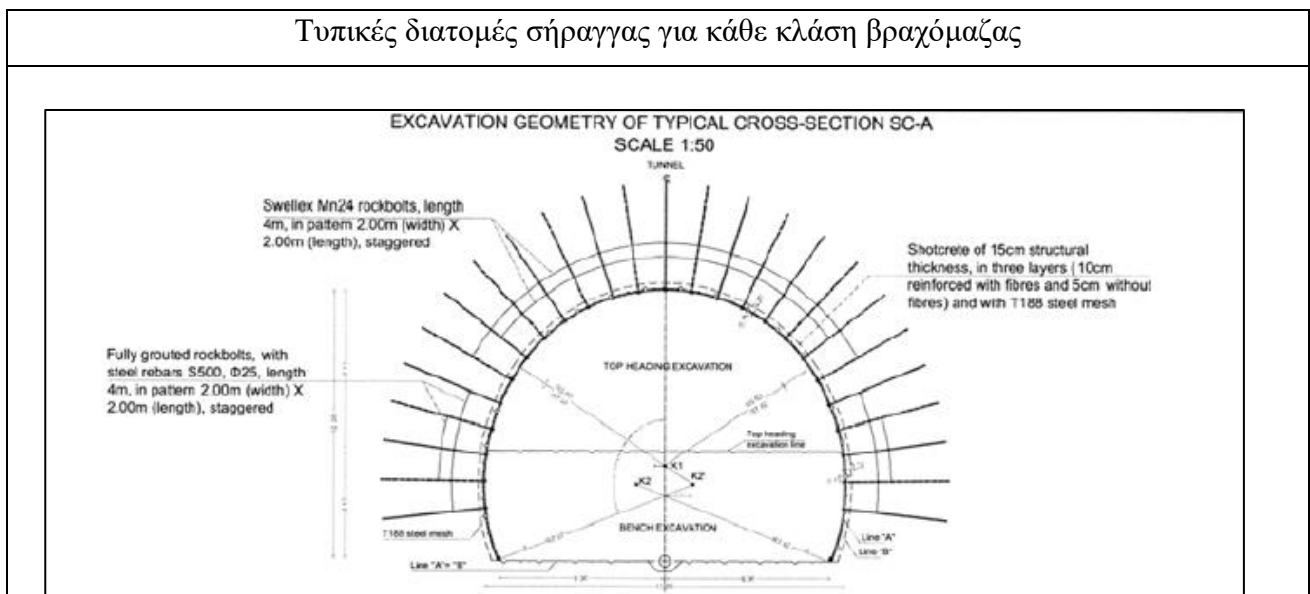
² Αναλόγως της ποιότητας του περιδοτίτη, η φέρουσα ικανότητα των μέτρων υποστήριξης «μειώνεται» στην περίπτωση καλής ποιότητας ή και αυξάνεται στην περίπτωση κακής ποιότητας.

			<p>2%</p> <p>περιμετρικά</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ολισθαίνοντα πλαίσια (όταν η ποιότητα είναι χαμηλή)
--	--	--	--

Πίνακας 4.9. Μέτρα υποστήριξης κύριας σήραγγας (SS6) Όθρυος. (Μπαλάση, 2007)

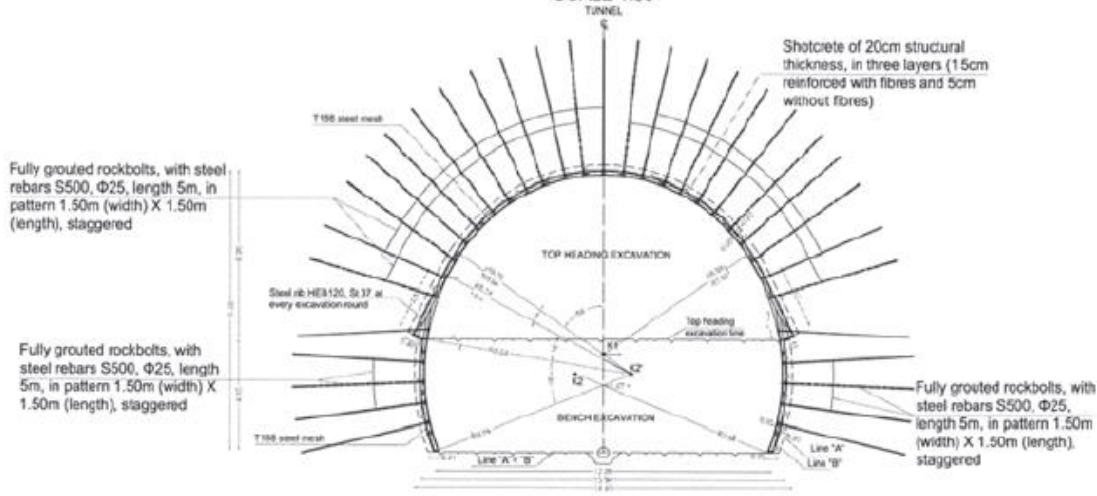
Σύμφωνα με την έκθεση των Mourtzas & Gkiolas (2010), η προσωρινή αντιστήριξη σχεδιάστηκε ώστε να αντιμετωπίσει το σύνολο των αναμενόμενων συνθηκών και περιλαμβάνει σε δυσμενείς συνθήκες στοιχεία προπορείας και ενδοτική αντιστήριξη με παραμορφούμενα (ενδοτικά) αγκύρια και πλαίσια ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την κλάση της βραχώμαζας, τα μέτρα της προσωρινής υποστήριξης αποτυπώνονται σχεδιαστικά στην Εικόνα 4.18 και συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.11.

Τυπικές διατομές σήραγγας για κάθε κλάση βραχώμαζας



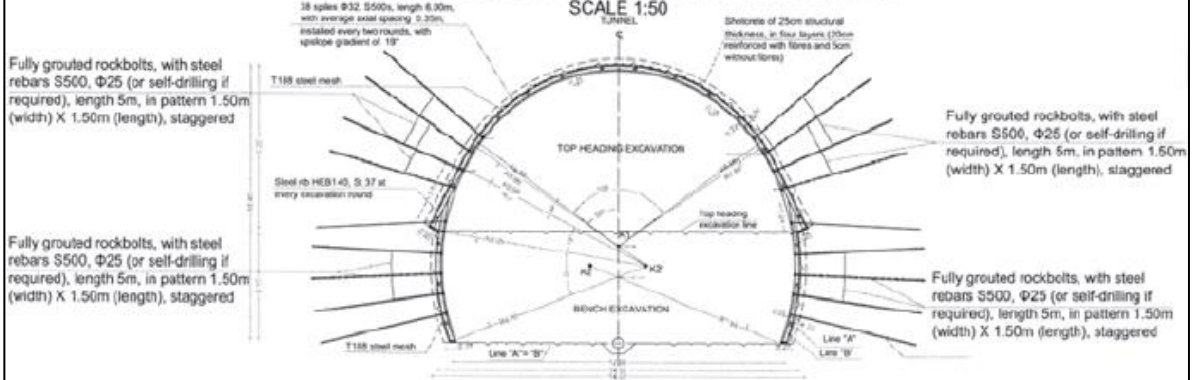
EXCAVATION GEOMETRY OF TYPICAL CROSS-SECTION SC- B1

SCALE 1:50



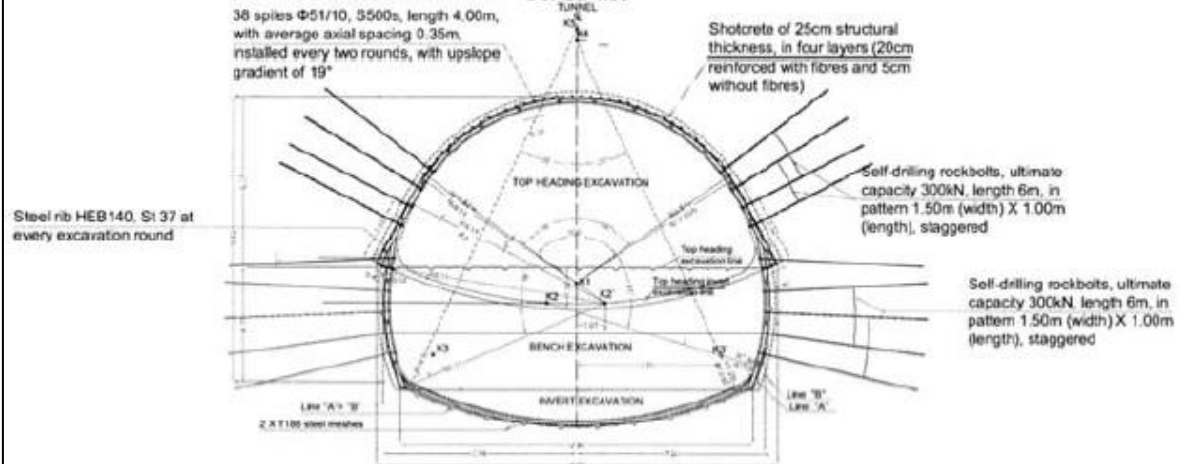
EXCAVATION GEOMETRY OF TYPICAL CROSS-SECTION SC- B2

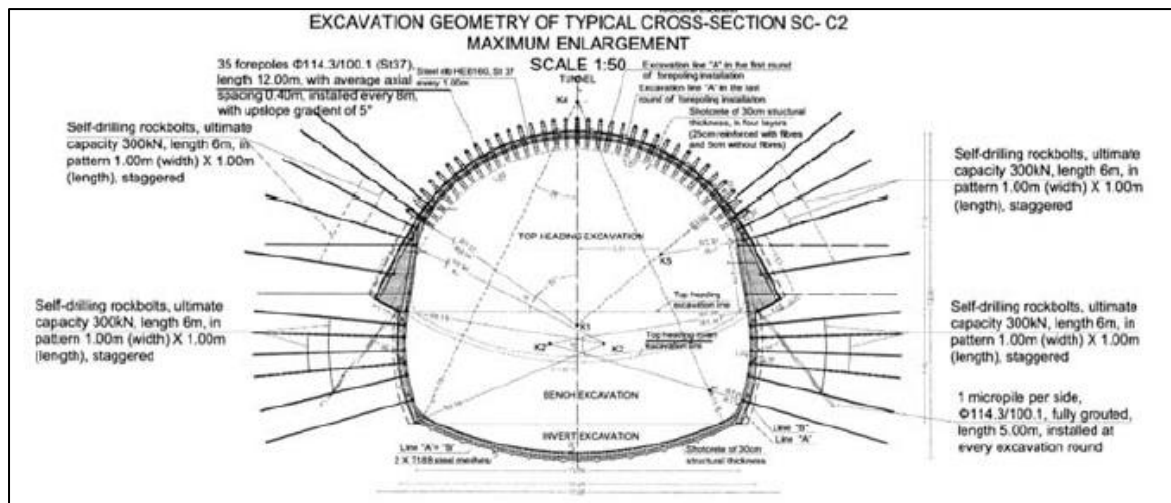
SCALE 1:50



EXCAVATION GEOMETRY OF TYPICAL CROSS-SECTION SC- C1

SCALE 1:50





Εικόνα 4.18. Τυπικές διατομές σήραγγας για κάθε κλάση βραχομάζας (Mourtzas & Gkiolas, 2010).

Μέτρα Υποστήριξης	Κλάση Βραχομάζας				
	A	B1	B2	C1	C2
Εκτοξεύόμενο Σκυρόδεμα (cm)	15	20	25	25	30
Αγκύρια (m)	Swellex MN24 ή/και Fully Grouted Φ25/S500 (L=4m)	Fully Grouted Φ25/S500 (L=5m)	Fully Grouted Φ25/S500 ή αυτοδιατρώμε να, 300 kN (L=5m)	Αυτοδιατρώμε να, 300 kN (L=6m)	Αυτοδιατρώμε να, 300 kN (L=6m)
Μεταλλικά Πλαίσια	-	HEB 120	HEB 140	HEB 140	HEB 160
Ελεφαντοπόδαρο (cm)	-	40	40	40	40 - 115
Εκτοξεύόμενο Σκυρόδεμα Μετώπου (cm)	-	-	5	5	10
Αγκύρια μετώπου	-	-	Έως 9	9	16

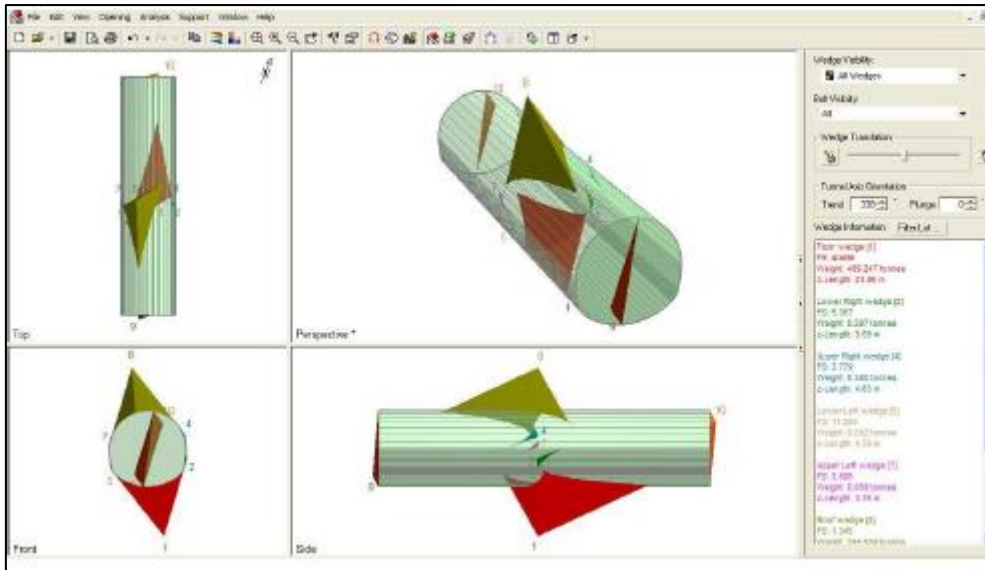
Fiberglass (τεμάχια)					
Πυρήνας Μετώπου	-	-	-	-	Ναι
Δοκοί – ελαφρές ράβδοι προπορείας	-	-	Ελαφρές Ράβδοι – Spiles, σε γωνία 109° (38 steel bars Φ32-St37)	Ελαφρές Ράβδοι – Spiles, σε γωνία 109° (38 steel tubes Φ51/10- St37)	Δοκοί προπορείας - Forepoles (35 steel tubes Φ114/100- St37)
Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο	-	-	-	Ναι	Ναι
Τελικό Ανάστροφο Τόξο	-	-	-	Ναι	Ναι

Πίνακας 4.10. Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας Οθρυος. (Mourtzas & Gkiolas, 2010)

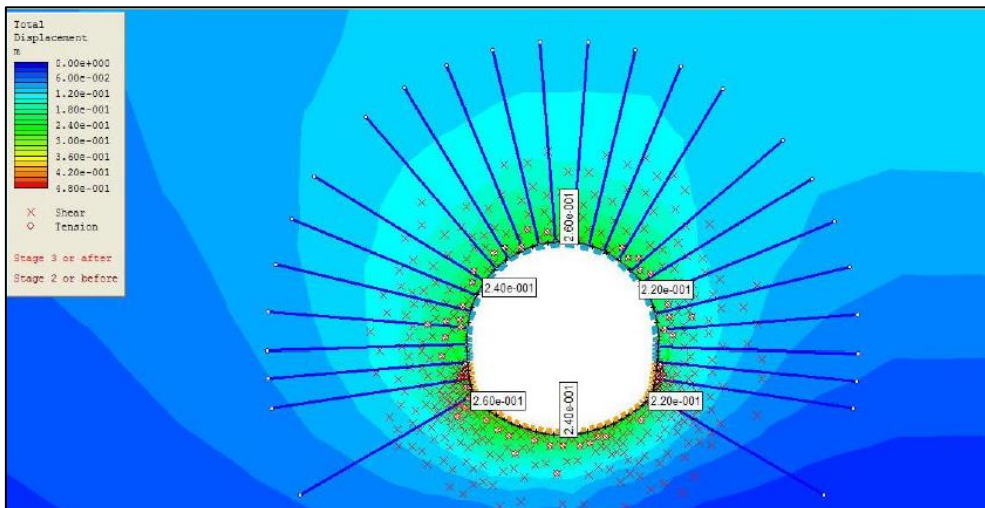
Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της εκσκαφής με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων και υπολογίστηκε πως η αξονική σύγκλιση της σήραγγας για την κλάση βραχομάζας A, B1 και B2 αναμενόταν να ήταν της τάξης των 1 με 2,5 cm, ενώ για την κλάση βραχομάζας C1 και C2 αναμενόταν να ήταν της τάξης των 4 – 6,5cm.

4.2.2.3 Προβλήματα Κατά Την Διάνοιξη

Κατά την διάνοιξη των εν λόγω παραπάνω σηράγγων εμφανίστηκαν προβλήματα τόσο δομικών αστοχιών, τύπου σφήνας, όσο και γενικότερης κατάρρευσης τύπου καμινάδας, αλλά και αρκετά προβλήματα λόγω των φαινομένων «squeezing» που αναπτύχθηκαν. Τα παραπάνω προβλήματα εμφανίζονταν αναλόγως της ποιότητας της βραχομάζας. Έτσι, οι δομικές αστοχίες τύπου σφήνας εμφανιζόταν στην βραχομάζα, που κατείχε καλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, ενώ οι αστοχίες τύπου καμινάδας και οι αυξημένες συγκλίσεις, εμφανίζονταν στις πιο πτωχής ποιότητας βραχομάζες των σερπεντινιτών, όπου κατέληγαν μέχρι και στην γενική αστοχία των μέτρων υποστήριξης. Μια αποτύπωση των δοκιμών αστοχιών και των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων που προέκυπταν, εφαρμόζοντας τα μέτρα υποστήριξης της τελικής μελέτης, αποτυπώνονται στο μοντέλο του λογισμικού Unwedge και στο μοντέλο του λογισμικού RS2 της μεταπτυχιακής διπλωματική εργασία της Αι. Μπαλάση (2007).



Εικόνα 4.20. Αποτύπωση των δημιουργούμενων σφηνών κατά την διάνοιξη. (Μπαλάση, 2007)

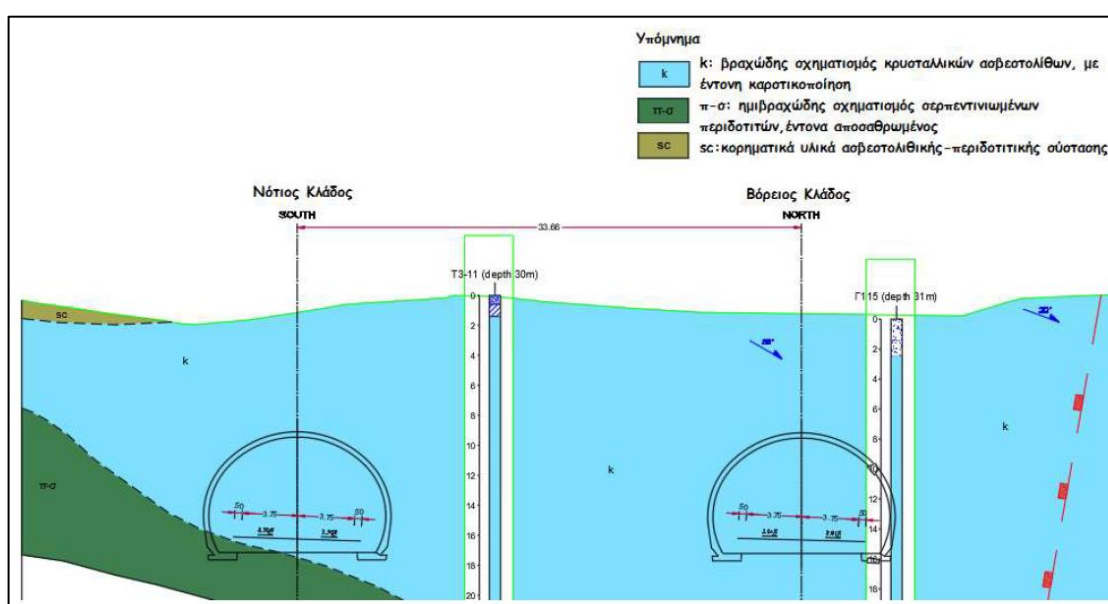


Εικόνα 4.19. Αποτύπωση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την διάνοιξη. (Μπαλάση, 2007)

4.2.3 Η Περίπτωση Της Σήραγγας T3 - Πλαταμόνα (Π.Α.Θ.Ε.)

4.2.3.1 Στοιχεία Σήραγγας

Η σήραγγα T3 των Τεμπών ανήκει στον οδικό άξονα της νέας εθνικής οδού Π.Α.Θ.Ε. Το έργο εντάσσεται στην ευρύτερη περιοχή του Κάτω Ολύμπου, λίγο έξω από τον Πλαταμόνα. Πρόκειται για μια δίδυμη οδική σήραγγα, συνολικού μήκους περί τα 2,8 km, με δύο λωρίδες κίνησης και μία λωρίδα έκτακτης ανάγκης, ανά κλάδο. Η διατομή των σηράγγων είναι πεταλοειδούς σχήματος, με συνολική διάμετρο περίπου 11 m και αξονική απόσταση μεταξύ τους ίση με 25m. Αποτύπωση της διατομής των σηράγγων εμφανίζεται στην Εικόνα 4.21.



Εικόνα 4.21. Διατομή σηράγγων ανοιχτού δαπέδου. Γεωλογική τομή βορείων στομιών. (OMIKRON KAI PA MEΛETHTIKH AE). Αντίληψη από: (Τσιρογιάννη, 2018)

Στην συγκεκριμένη περιοχή συναντώνται σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης που εμφανίζονται ως κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού και ως οφιολιθικό mélange του Προανωκρητιδικού. Οι σχηματισμοί του οφιολιθικού καλύμματος απαρτίζονται από σερπεντινωμένους περιδοτίτες, οι οποίοι υπέρκεινται τεκτονικά των μεταμορφωμένων βασικών οφιολιθικών πετρωμάτων (Τσιρογιάννη, 2018). Λεπτομερέστερα στοιχεία για την γεωλογική μηκοτομή της σήραγγας T3, αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.12.

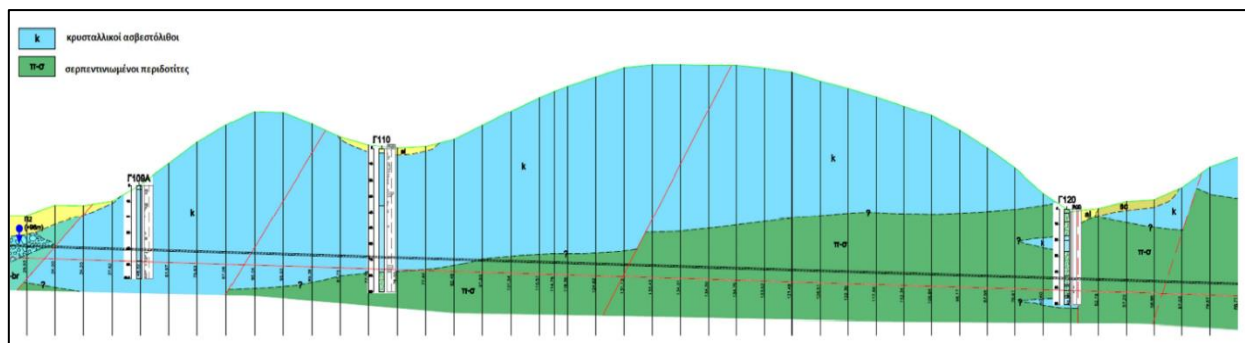
Ο σχηματισμός των οφιολίθων, εμφανίζεται κυρίως ως σερπεντινωμένος περιδοτίτης και κατά τόπους ως σύμπλεγμα αποτελούμενο από περιδοτίτη και σερπεντινωμένο περιδοτίτη και ενίοτε με ασβεστολιθικούς όγκους να επιπλέουν στη μάζα του. Από

δεδομένα γεωτρήσεων αλλά και από τα μέτωπα κατά την διάρκεια της εκσκαφής, οι κυρίαρχες τιμές GSI βρίσκονταν στο εύρος 15 - 20, ενώ ακόμα παρουσιάστηκε και η τιμή GSI = 30, που αντιστοιχεί σε μέτωπα, όπου συναντήθηκε κυρίως πιο υγιής περιδοτιτής. Η αντοχή του σχηματισμού γενικά λαμβάνει χαμηλές τιμές, οι οποίες ισούνται με 5 – 10 MPa, ενώ στις περιπτώσεις του υγιούς περιδοτιτή αυτή αυξάνεται.

Χιλιομετρική Θέση (Χ.Θ.)	Γεωλογικός σχηματισμός	GSI	Υπερκείμενα
11+585 έως 12+010	Ασβεστολιθικά-οφιολιθικά λατυποπαγή	5 – 55	30 m
12+010 έως 12+140	Αλλουβιακές αποθέσεις / ασβεστολιθικά λατυποπαγή	5 – 55	15m
12+140 έως 12+280	Ασβεστολιθικά-οφιολιθικά λατυποπαγή	5 – 55	25m
12+280 έως 12+730	Επαφή κρυσταλλικών ασβεστόλιθων/σερπεντινωμένων περιδοτιτών, κατά μήκος της οποίας απαντήθηκε τεκτονικό λατυποπαγές	5 – 55	40m
12+730 έως 12+870	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	5 – 55	90m
12+870 έως 13+870	Σερπεντινωμένοι περιδοτίτες	5 – 40	140m
13+870 έως 14+340	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	5 – 75	30m
14+340 έως 14+360	Φυλλοποιημένοι σερπεντινωμένους περιδοτίτες	5-15	10m

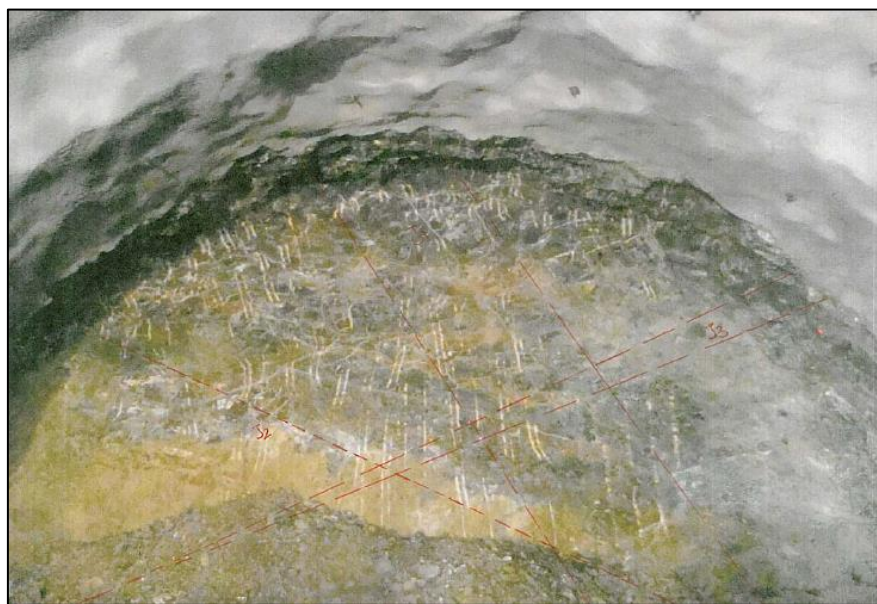
Πίνακας 4.11. Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος του νότιου κλάδου της σήραγγας T3. (Τσιρογιάννη, 2018)

Ο σχηματισμός του κρυσταλλικού ασβεστόλιθου έως μαρμάρου κατείχε κυρίαρχη τιμή GSI = 35, με εμφανείς, ωστόσο, τις διακυμάνσεις ως προς την ποιότητα του, όπου και η τιμή GSI μειώνονταν. Η αντοχή του σχηματισμού κυμαίνεται ποιοτικά στα ίδια επίπεδα με την τιμή GSI και αυτή ανερχόταν κυρίως στα 50 MPa. Βέβαια όσο μειωνόταν ο βαθμός GSI, τόσο μειωνόταν και η αντοχή. Για να κατανοηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό η γεωλογική ακολουθία της περιοχής διάνοιξης της εν λόγω σήραγγας, στην Εικόνα 4.23 παρατίθενται τμήμα της γεωλογικής μηκοτομής του Βόρειου Κλάδου.



Εικόνα 4.23. Απόσπασμα μηκοτομής του Βόρειου Κλάδου (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ). Αντληση από: (Τσιρογιάννη, 2018)

Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε φάσεις, με χρήση της μεθόδου NATM. Με βάση τα δεδομένα, που αντιστοιχούν σε επεξεργασία 311 δελτίων γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπων του βόρειου κλάδου της σήραγγας T3, για τμήμα μήκους 1512m (Χ.Θ. 12+814 έως 14+326), προέκυψε ότι ο τρόπος εκσκαφής περιελάμβανε τόσο τις εκρηκτικές ύλες, όσο και τα μηχανικά μέσα, ενώ συχνά υπήρχε και συνδυασμός αυτών. Αυτό συνέβη λόγω τις αυξημένης μεταβλητότητας των σχηματισμών, αλλά και της ποιότητας τους (Τσιρογιάννη, 2018).



Εικόνα 4.22. Μέτωπο περιδοτίτη με υπερκείμενα ~86m στην Χ.Θ. 13+548m. Αντληση από: (Τσιρογιάννη, 2018)

4.2.3.2 Μέτρα Υποστήριξης

Βάσει των ανωτέρω συνθηκών που επικρατούσαν στις δίδυμες σήραγγες, σχεδιάστηκαν συνολικά 9 διατομές υποστήριξης, ώστε να καλυφθούν οι εν λόγω απαιτήσεις. Κάθε διατομή υποστήριξης μπορεί να θεωρηθεί πως αντιστοιχεί και σε μια τεχνικογεωλογική ενότητα, καθώς μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του εκσκαπόμενου σχηματισμού, συνεπώς και οι απαιτήσεις υποστήριξης. Οι τρεις

πρώτες (3A, 4A και 5A) αναφέρονται σε «ανοιχτή» διατομή σήραγγας, δηλαδή χωρίς κλειστό ανάστροφο τόξο, ενώ οι υπόλοιπες έξι (5B, 6A, 7A, 7AJ, 7B, 7C), αφορούν «κλειστή» διατομή σήραγγας, δηλαδή με κατασκευή κλειστού ανάστροφου τόξου.

Σημειώνεται πως στην κατηγορία 7C εντάσσονται δύο ειδών υποστηρίξεις, μια για την κύρια σήραγγα και μία για την πιλοτική σήραγγα (7C – P), η οποία εκσκάπτεται πρώτη. Η πιλοτική αυτή σήραγγα κατέχει και μικρότερη διατομή και μικρότερο μήκος και στόχο της αποτελεί να σταθεροποιήσει και να υποστηρίξει σε μεγαλύτερο βαθμό το μέτωπο εκσκαφής της κύριας σήραγγας. Τα εφαρμοσθέντα μέτρα άμεσης υποστήριξης αποτυπώνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 3A		
Εφαρμογή	Ασβεστόλιθους με υπερκείμενα H<150m και GSI 55 - 70	
Άνω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	2,50 – 3,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	10 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	Swellex, L = 4 m, 200kN
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	5,00 – 6,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	10 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	Swellex, L = 4 m, 200kN

Πίνακας 4.12. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 3A (Μαρίνος Π. ,2014).

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 4A		
Εφαρμογή	Ασβεστόλιθους με υπερκείμενα H<150m και GSI 40 – 55	
Άνω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	2,00 – 2,50 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	15 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	Swellex, L = 4 m, 200kN
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	4,00 – 5,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	15 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	Swellex, L = 4 m, 200kN

Πίνακας 4.13. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 4A (Μαρίνος Π. ,2014)..

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 5A

Εφαρμογή	Ασβεστόλιθους με υπερκείμενα $H < 100m$ και GSI 25 – 40	
Άνω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	1,50 – 2,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	20 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	SN, L = 4 m, 200kN
	Πλαίσια	L – G 70/20/30
	Επιπλέον Μέτρα (αν απαιτούνταν)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spiles $\Phi 28mm$, με τσιμεντένεμα, L = 2 m, ανά 2 βήματα ▪ 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	3,00 – 4,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	20 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	SN, L = 4 m, 200kN
	Πλαίσια	L – G 70/20/30

Πίνακας 4.14. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 5A (Μαρίνος Π., 2014)..

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 5B		
Εφαρμογή	Ασβεστόλιθους με υπερκείμενα $100m < H \leq 150m$ και GSI 25 – 40	
Άνω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	1,25 – 1,75 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	SN, L = 6 m, 200kN
	Πλαίσια	L – G 70/20/30
	Επιπλέον Μέτρα (αν απαιτούνταν)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ Spiles $\Phi 28mm$, με τσιμεντένεμα, L = 6 m, 90°, ανά 2 βήματα ▪ 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	2,50 – 3,50 m

	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	SN, L = 6 m/4 m, 200kN
	Πλαίσια	L – G 70/20/30
Ανάστροφο Τόξο	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	5,00 – 7,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	20 cm, με ενσωματωμένα 2 x T188 πλέγμα

Πίνακας 4.15. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 5B (Μαρίνος Π. ,2014).

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 6A		
Εφαρμογή	Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα H < 120m και GSI 25 – 40	
Ανω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	1,00 – 1,25 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με μεταλλικές ίνες και πλέγμα T188
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 6 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 140
	Spiles – 90°	Χαλύβδινι ράβδοι Φ51/41mm, L = 6 m, ανά 2 – 3 βήματα
	Επιπλέον Μέτρα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ Πυρήνας αντιστήριξης μετώπου ▪ 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο ▪ Προσωρινό ανάστροφο τόξο με 20 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188 ▪ Αγκύρια fiberglass μετώπου, L = 12m, 250 kN (αν απαιτούνταν)
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	2,00 – 2,50 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με μεταλλικές ίνες και 1 x T188 πλέγμα
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 6 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 140

Ανάστροφο Τόξο	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	4,00 – 5,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	20 cm, με ενσωματωμένα 2 x T188 πλέγμα

Πίνακας 4.16. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 6A (Μαρίνος Π. ,2014).

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 7A		
Εφαρμογή	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα $120m < H < 150m$ και GSI 25 – 40 ➤ Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα $H < 80m$ και GSI 15 – 25 ➤ Αποσυντεθημένους Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα $H < 25m$ και GSI < 15 	
Ανω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 1,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με μεταλλικές ίνες και 1 x T188 πλέγμα
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 8 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 160
	Forepoling – 100°	Χαλύβδινοι σωλήνες Φ114mm, L = 12 m, με αλληλοκάλυψη 4 m
	Επιπλέον Μέτρα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ Πυρήνας αντιστήριξης μετώπου ▪ 5 - 10 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο ▪ Προσωρινό ανάστροφο τόξο με 30 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188 ▪ Αγκύρια fiberglass μετώπου, L = 12m, 250 kN
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 2,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με μεταλλικές ίνες και 1 x T188 πλέγμα
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 6 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 160
Ανάστροφο Τόξο	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 4,00 m

	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με ενσωματωμένα 2 x T188 πλέγμα
	Επιπλέον Μέτρα	Πλαίσιο HEB 160 (προαιρετικό)

Πίνακας 4.17. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 7A (Μαρίνος Π., 2014).

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 7AJ		
Εφαρμογή		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ασβεστόλιθους διαταραγμένους με υπερκείμενα $H \leq 60m$ και GSI 15 – 25 ➤ Αποσαθρωμένους Ασβεστόλιθους και Οφιολιθικά λατυποπαγή με υπερκείμενα $H \leq 45m$ και GSI < 15
Ανω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 1,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με μεταλλικές ίνες και 1 x T188 πλέγμα
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 8 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 140
	Forepoling – 100°	Χαλύβδινοι σωλήνες Φ114mm, L = 12 m, με αλληλοκάλυψη 4 m
	Επιπλέον Μέτρα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ Πυρήνας αντιστήριξης μετώπου ▪ 5 - 10 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο ▪ Προσωρινό ανάστροφο τόξο με 25 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188 ▪ Αγκύρια fiberglass μετώπου, L = 12m, 250 kN
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 2,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με μεταλλικές ίνες και 1 x T188 πλέγμα
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 6 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 140
Ανάστροφο Τόξο	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 4,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με ενσωματωμένα 2 x T188 πλέγμα
	Επιπλέον Μέτρα	-

Πίνακας 4.18. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 7AJ (Μαρίνος Π., 2014).

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 7B		
Εφαρμογή	➤ Ασβεστόλιθους διαταραγμένους με υπερκείμενα $60m < H \leq 150m$ και GSI 15 – 25	
Άνω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 1,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με μεταλλικές ίνες και 1 x T188 πλέγμα, 1 x Φ12/15
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 9 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 160
	Forepoling – 100°	Χαλύβδινοι σωλήνες Φ114mm, L = 12 m, με αλληλοκάλυψη 6 m
	Επιπλέον Μέτρα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ Πυρήνας αντιστήριξης μετώπου ▪ 5 - 10 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο ▪ Προσωρινό ανάστροφο τόξο με 30 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188 ▪ Αγκύρια fiberglass μετώπου, L = 12m, 250 kN
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 2,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με μεταλλικές ίνες, 1 x T188 πλέγμα, 1 x Φ12/15
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 6 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 160
Ανάστροφο Τόξο	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 4,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με ενσωματωμένα 2 x T188 πλέγμα και 1 x Φ12/15
	Επιπλέον Μέτρα	Πλαίσιο HEB 160 (προαιρετικό)

Πίνακας 4.19. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 7B (Μαρίνος Π. ,2014).

Εκσκαφή και Υποστήριξη Κατηγορίας 7C	
Εφαρμογή	➤ Ασβεστόλιθους διαταραγμένους με υπερκείμενα $60m < H \leq 150m$ και GSI 15 – 25

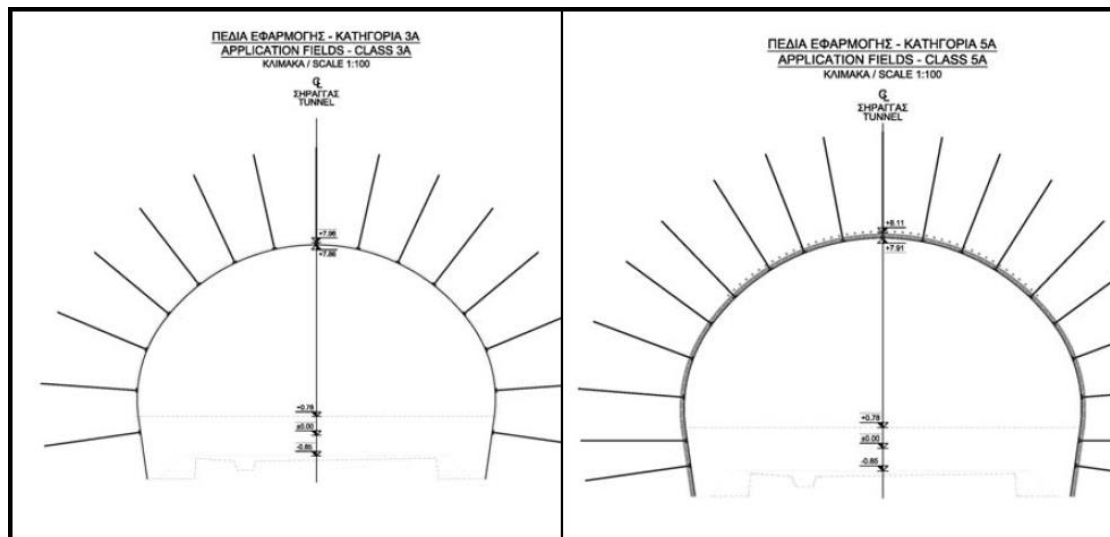
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα $80\text{m} < H < 150\text{m}$ και GSI 15 – 25 ➤ Αποσυντεθημένους Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα $25\text{m} < H \leq 150\text{m}$ και GSI < 15 	
Άνω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 1,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με μεταλλικές ίνες και 1 x T188 πλέγμα, 1 x Φ12/15
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 9 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 160
	Forepoling – 100°	Χαλύβδινι σωλήνες Φ114mm, L = 12 m, με αλληλοκάλυψη 6 m
	Επιπλέον Μέτρα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο ▪ Προσωρινό ανάστροφο τόξο με 30 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188 ▪ Αγκύρια fiberglass μετώπου, L = 12m, 250 kN
Κάτω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 2,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με μεταλλικές ίνες, 1 x T188 πλέγμα, 1 x Φ12/15
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 6 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 160
Ανάστροφο Τόξο	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 4,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	30 cm, με ενσωματωμένα 2 x T188 πλέγμα και 1 x Φ12/15
	Επιπλέον Μέτρα	Πλαίσιο HEB 160 (προαιρετικό)

Πίνακας 4.20. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 7C (Μαρίνος Π. ,2014).

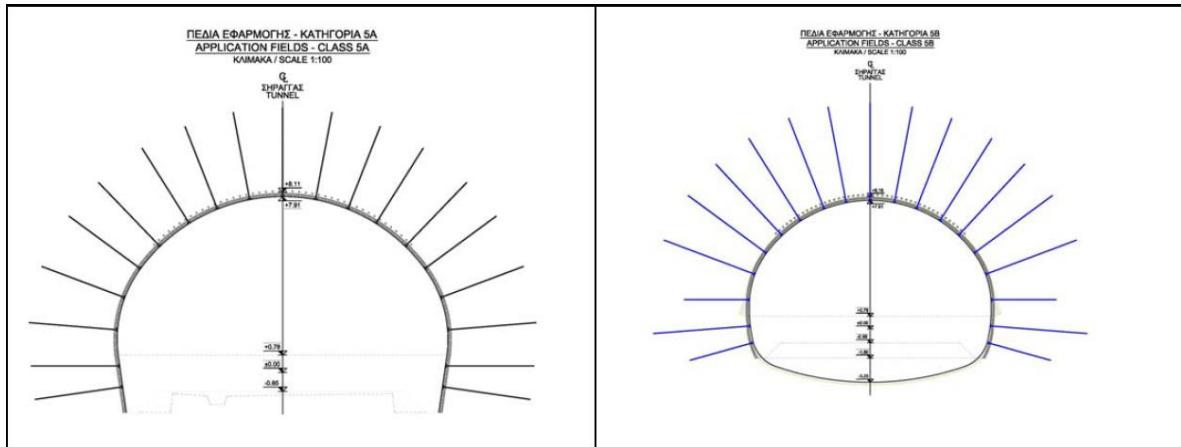
Εκσκαφή και Υποστήριξη Πιλοτικής Σήραγγας Κατηγορίας 7C - P	
Εφαρμογή	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ασβεστόλιθους διαταραγμένους με υπερκείμενα $60\text{m} < H \leq 150\text{m}$ και GSI 15 – 25 ➤ Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα $80\text{m} < H < 150\text{m}$ και GSI 15 – 25

	➤ Αποσυντεθημένους Σερπεντινωμένους Περιδοτίτες με υπερκείμενα 25m <math>< H \leq 150\text{m}</math> και <math>GSI < 15</math>	
Άνω Ημιδιατομή	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 1,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με μεταλλικές ίνες
	Αγκύρια	Αυτοδιατρούμενα, L = 9 m, 200kN
	Πλαίσια	HEB 140
	Forepoling – 90°	Χαλύβδινοι σωλήνες Φ114mm, L = 12 m
	Επιπλέον Μέτρα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο ▪ Αγκύρια fiberglass μετώπου, L = 12m, 250 kN
Ανάστροφο Τόξο	Μέγιστο Βήμα Προχώρησης (Ανυποστήρικτο)	Μέχρι 4,00 m
	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	25 cm, με ενσωματωμένα 2 x T188 πλέγμα

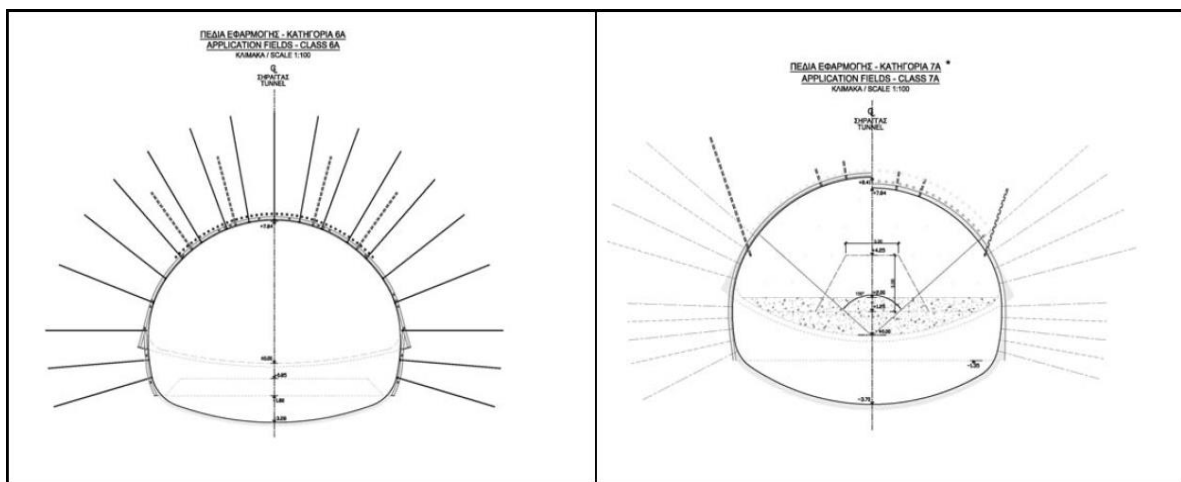
Πίνακας 4.21. Μέτρα άμεσης υποστήριξης για την κατηγορία 7C – P (Μαρίνος Π. ,2014).



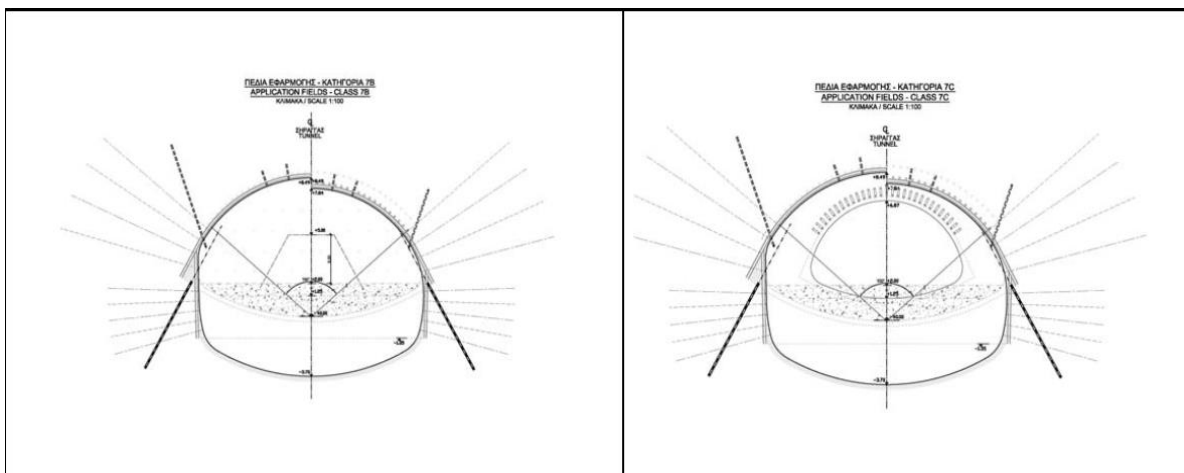
Εικόνα 4.24. Διατομές μέτρων άμεσης υποστήριξης σήραγγας T3. Κατηγορίες 3A & 5A (Μαρίνος Π. ,2014).



Εικόνα 4.27. Διατομές μέτρων άμεσης υποστήριξης σήραγγας T3. Κατηγορίες 5A & 5B (Μαρίνος Π. ,2014).



Εικόνα 4.25. Διατομές μέτρων άμεσης υποστήριξης σήραγγας T3. Κατηγορίες 6A & 7A (Μαρίνος Π. ,2014).



Εικόνα 4.26. Διατομές μέτρων άμεσης υποστήριξης σήραγγας T3. Κατηγορίες 7B & 7C (Μαρίνος Π. ,2014).

4.2.3.3 Προβλήματα Κατά Την Διάνοιξη

Κατά την διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας εμφανίστηκαν φαινόμενα αστάθειας σε ένα συγκεκριμένο τμήμα των νότιων σηράγγων (με πολύ χαμηλά υπερκείμενα) σε πολύ ασθενείς σερπεντινωμένους περιδοτίτες (γεωλογικά τεμαχισμένα υλικά). Η

ανεξέλεγκτη αυτή αστάθεια είχε ως κύριο αποτέλεσμα την κατάρρευση της βόρειας σήραγγας για 40 m (αναπτύχθηκε κενό που κατέστρεψε πλήρως το κύριο κέλυφος στήριξης και γέμισε τη σήραγγα με κερματισμένα υλικά) και δευτερεύοντος, την ανάπτυξη αρκετά σοβαρής παραμόρφωσης, στα ίδια τμήματα στην νότια σήραγγα. Οι παραπάνω αστοχίες, αποτυπώνονται στην Εικόνα 4.28.



Εικόνα 4.28. Αστοχία μετώπου βόρειας σήραγγας Τεμπών T3 (Μαρίνος Π., 2014).

Για την αντιμετώπιση αυτής της πολύ δυσμενούς κατάστασης χρησιμοποιήθηκε μια ειδική μεθοδολογία αποκατάστασης με λεπτομερή σχεδιασμό. Παρακάτω παρατίθενται τα τρία στάδια της στρατηγικής που σχεδιάστηκε για την αποκατάσταση σε αυτήν την κρίσιμη περιοχή:

- Εκσκαφή & πρωτογενής στήριξη μέσα στο υλικό που αστόχησε, στο κατεστραμμένο τμήμα της βόρειας σήραγγας, με εφαρμογή μιας πολύ άκαμπτης πιλοτικής σήραγγας.
- Αποκατάσταση του νότιου τμήματος της σήραγγας στις κανονικές διαστάσεις της, μαζί με την κατεδάφιση της αντίστοιχης πιλοτικής σήραγγας.
- Αποκατάσταση της βόρειας σήραγγας στις κανονικές διαστάσεις της, μαζί με την κατεδάφιση της αντίστοιχης πιλοτικής σήραγγας.



Εικόνα 4.29. Εφαρμογή του σχεδίου αποκατάστασης της αστοχίας (Μαρίνος Π. ,2014)..

4.3 Σύνοψη Τεχνικογεωλογικών Τύπων Σε Οφιολίθους Από Τις Περιπτώσεις Διανοίξεων Στον Ελλαδικό Χώρο

Οι περιπτώσεις διάνοιξης σήραγγων σε οφιολιθικό περιβάλλον στον Ελλαδικό χώρο που παρατέθηκαν ανωτέρω είναι οι:

- Σήραγγα Καλλιδρόμου
- Σήραγγα Όθρυος
- Σήραγγα Τεμπών Τ3 (Πλαταμώνα)

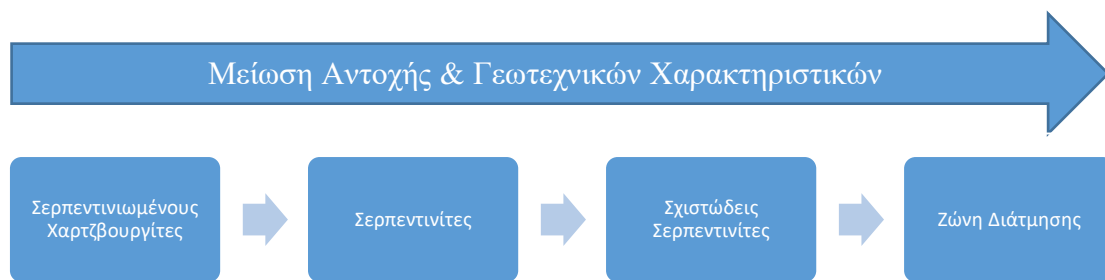
Όπως είναι φυσικό, λόγω της ποικιλότητας δημιουργίας του γεωλογικού περιβάλλοντος, σε κάποιες σήραγγες το οφιολιθικό σύμπλεγμα δεν αποτελούσε τον κυρίαρχο σχηματισμό, αλλά εμφανιζόταν σε συγκεκριμένα τμήματα (μεγάλα ή μικρά) κατά μήκος της γεωλογικής ακολουθίας, ενώ σε κάποιες άλλες αποτελούσε τον κυρίαρχο σχηματισμό, μέσα στον οποίον διανοίχθηκε το μεγαλύτερο τμήμα των σήραγγων.

Περίληπτικά στοιχεία για τις γεωλογικές - γεωτεχνικές συνθήκες και τα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόστηκαν σε καθεμιά από τις προαναφερθείσες σήραγγες περιγράφονται στη συνέχεια.

4.3.1 Σήραγγα Καλλιδρόμου

Στην περίπτωση διάνοιξης της σιδηροδρομικής σήραγγας Καλλιδρόμου, η γεωλογική στήλη του οφιολιθικού τεκτονικού καλύμματος αποτελείται, ως επί το πλείστον, από κάτω προς τα πάνω, από σχιστώδεις σερπεντινίτες, σερπεντινίτες και σερπεντινωμένους χαρτζβουργίτες, όπως αποτυπώνεται και στην ενότητα 4.2.1.

Σύμφωνα με τα εργαστηριακά δεδομένα των υπό εξέταση δοκιμίων, παρατηρήθηκε πως η αντοχή των ανωτέρω πετρωμάτων μειώνεται με το βάθος, ακολουθώντας και την γενικότερη ποιότητα τους, η οποία με την αύξηση του βάθους πτωχαίνει. Συνεπώς, ταξινομώντας τις αντοχές των οφιολιθικών σχηματισμών, κατά φθίνουσα σειρά, προκύπτει η ακόλουθη κατάταξη. Σημειώνεται πως σε αυτήν περιλαμβάνεται και η αντοχή των ζωνών διάτμησης που συναντήθηκαν κατά την διάνοιξη.



Σχήμα 4.1. Αποτύπωση αντοχής οφιολιθικών σχηματισμών σήραγγας Καλλιδρόμου.

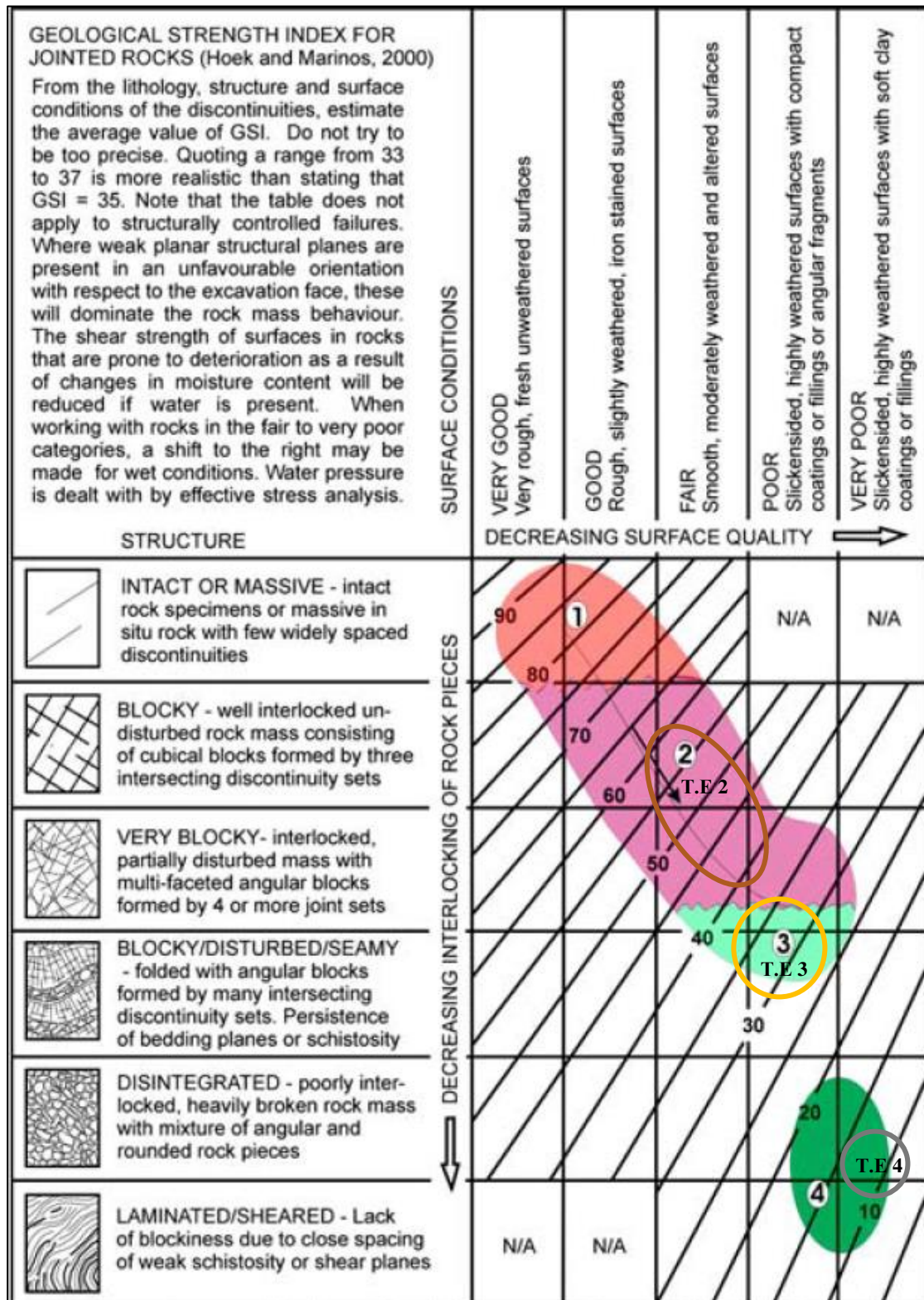
Οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις που διενεργήθηκαν με τη χρήση των συστημάτων RMR και GSI έδωσαν ποιοτικά ίδια αποτελέσματα με αυτά των εργαστηριακών δοκιμών, και σύμφωνα με αυτά επιβεβαιώνεται η διαφορά στην ποιότητα ανάλογα με το βάθος. Τα αποτελέσματα αυτά αποτυπώνονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.3 της ενότητας 4.2.1.

Λόγω των ανωτέρω, η περιοχή της σήραγγας που διανοίγονταν σε οφιολίθους χωρίστηκε σε 4 άτυπες τεχνικογεωλογικές ενότητες, οι οποίες διακριτοποιούνταν μεταξύ τους ανάλογα με τον κυρίαρχο πέτρωμα των οφιολίθων, όπως αποτύπώνονται και στον Πίνακα 4.3, του οποίου βασικά στοιχεία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.23.

Λιθολογία	T.E - 2		T.E - 3	T.E - 4
	Σερπεντινωμένοι χαρτζβουργίτες (ha, ha.r)	Σερπεντινίτες (se)	Σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s)	Ζώνη Διάτμησης (sz)
σ_{ci} (MPa)	55	41	19	4,5
RMR	42 – 49 (Μέτρια)	37 – 44 (Πτωχή)	30 – 35 (Πτωχή)	13 – 19 (Πολύ Πτωχή)
GSI	46 – 60	38 – 52	28 – 38	15 – 25

Πίνακας 4.22. Βασικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των οφιολιθικών σχηματισμών της σήραγγας Καλλιδρόμου. (Diasakos, και συν., 2010)

Θέλοντας να οπτικοποιηθεί η σύνδεση των τεχνικογεωλογικών ενότητων, δημιουργείται το τροποποιημένο διάγραμμα GSI για τον χαρακτηρισμό των οφιολιθικών σχηματισμών της σήραγγας του Καλλιδρόμου, στο οποίο αποτυπώνονται οι ανωτέρω 3 τεχνικογεωλογικές ενότητες. Το διάγραμμα αυτό αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.30.



Εικόνα 4.30. Τεχνικογεωλογικές ενότητες της σήραγγας Καλλιδρόμου στο τροποποιημένο διάγραμμα GSI για οφιολιθικά συμπλέγματα.

Επιδιώκοντας να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ των γενικών τύπων οφιολίθων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.3.5 και αυτών που συναντήθηκαν κατά τη διάνοιξη των σηράγγων Καλλιδρόμου (από το διάγραμμα της Εικόνας 4.18) συμπεραίνεται ότι οι οφιολίθοι στη περίπτωση των σηράγγων του Καλλιδρόμου ταξινομούνται στους τύπους:

- Τύπος 2 - *Σερπεντινωμένος Οφιόλιθος – Ελαφριά Αποσαθρωμένος Γάββρος*
- Τύπος 3 - *Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη*
- Τύπος 4 - *Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης*

Συνεπώς, με βάση τα ανωτέρω θα ήταν δόκιμο να θεωρηθεί πως με αντίστοιχο τρόπο συνδέονται και οι διατομές της άμεσης υποστήριξης, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.9 και στον Πίνακα 4.4 της ενότητας 4.2.1 με τις γενικές κατηγορίες οφιολίθων.

4.3.2 Σήραγγα Όθρυος

Στην περίπτωση διάνοιξης της σιδηροδρομικής σήραγγας Όθρυος, οι οφιολιθικοί σχηματισμοί κατά μήκος των σηράγγων διαιρέθηκαν σε έξι τεχνικογεωλογικές ενότητες ανάλογα με την γεωλογική και γεωτεχνική συμπεριφορά τους, και ακολούθως οι τεχνικογεωλογικές ενότητες, με κοινά χαρακτηριστικά, ομαδοποιήθηκαν σε κοινές κλάσεις βραχομαζών. Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες εκκινούν με τους οφιολιθικούς σχηματισμούς με την καλύτερη ποιότητα και βαίνουν με μειούμενη την ποιότητα και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Αξιόνοντας την δημιουργία μιας σύνδεσης μεταξύ των γενικών τύπων οφιολίθων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.3.5 και αυτών που συναντήθηκαν κατά τη διάνοιξη των σηράγγων Όθρυος και χωρίστηκαν σε τεχνικογεωλογικές ενότητες, συμπεραίνεται ότι οι οφιολίθοι στη περίπτωση των σηράγγων της Όθρυος ταξινομούνται στους τύπους:

Τεχνικογεωλογικές Ενότητες	Κλάση Βραχώμαζας	Τύπος Οφιολίθων
TE-1 & TE-2	A & B1	Τύπος 2 - <i>Σερπεντινωμένος Οφιόλιθος – Ελαφριά Αποσαθρωμένος Γάββρος</i>

TE-3	B2	Τύπος 3 - Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη
TE-4, TE-5 & TE-6	C1 & C2	Τύπος 4 - Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης

Πίνακας 4.23. Σύνδεση οφιολιθικών τύπων με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες της σήραγγας Όθρυος.

Σημειώνεται ότι η TE-7 (που αναφέρεται στην ενότητα 4.2.2) δεν συμπεριλαμβάνεται μέσα στις προαναφερθείσες τεχνικογεωλογικές ενότητες, καθώς αυτή αποτελούνταν ως επί το πλείστον από ασβεστόλιθους.

Οπτικοποιώντας τον Πίνακα 4.24 σε συνδυασμό με το τροποποιημένο διάγραμμα GSI για τους οφιολίθους, δημιουργείται το διάγραμμα GSI για τον χαρακτηρισμό των οφιολιθικών σχηματισμών της σήραγγας της Όθρυος. Το διάγραμμα αυτό αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.31.

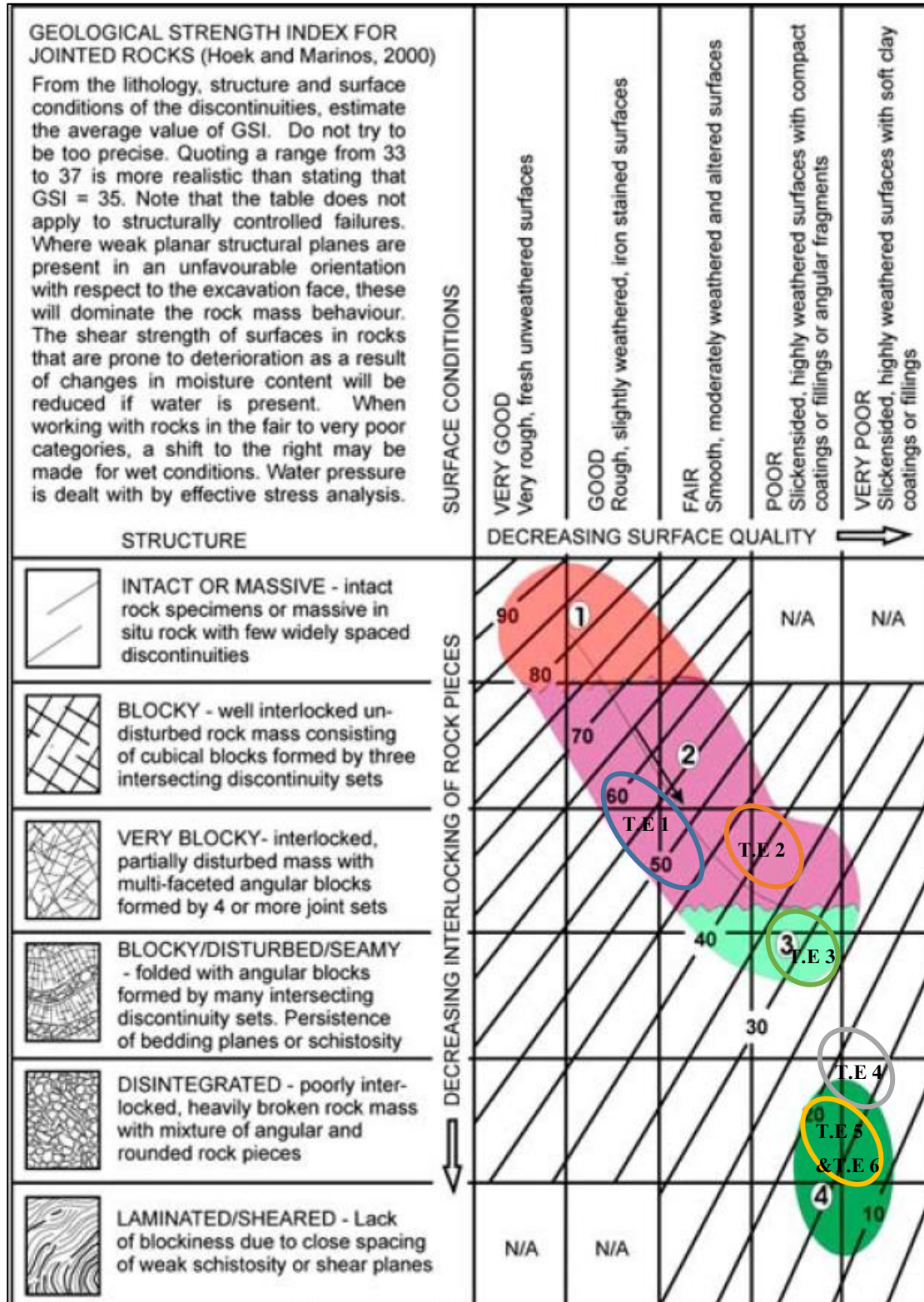
Σύμφωνα με την ανωτέρω σύνδεση, είναι δόκιμο να θεωρηθεί πως με αντίστοιχο τρόπο συνδέονται και οι διατομές της άμεσης υποστήριξης, που παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.9 & 4.10 της ενότητας 4.2.2.

Οι κλάσεις βραχομαζών σε αντιστοιχία με την εκάστοτε τεχνικογεωλογική ενότητα και τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά αποτυπώνονται εκτενώς στους Πίνακες 4.5 – 4.8 της ενότητας 4.2.2. Ο Πίνακας 4.25 παρουσιάζει συνοπτικά τα βασικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των τεχνικογεωλογικών ενότητων της σήραγγας Όθρυος, όπου και παρατηρείται πως οι τιμές του GSI ξεκινούν από τη τιμή 45 για την TE-1 και βαίνουν μειούμενες, ακολουθώντας την πτώση της ποιότητας, λαμβάνοντας την τιμή 15 για την TE-5 & TE-6.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα (T.E.)	Κλάση Βραχομάζας	GSI (design)	σ_{ci} (MPa)	RQD	RMR
1	A	45	20	>60%	45 – 65
2	B1	35	15	30% - 60%	35 – 65
3	B2	25	23	0% - 30%	10 – 35
4	C1	20	7	-	< 10
5	C2	15	5	-	-

6	C2	15	5	-	-
7	A	45	40	-	-

Πίνακας 4.24. Βασικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τεχνικογεωλογικών ενότητων σήραγγας Όθρυος.



Εικόνα 4.31. Τεχνικογεωλογικές ενότητες της σήραγγας Όθρυος στο τροποποιημένο διάγραμμα GSI για οφιολιθικά συμπλέγματα

4.3.3 Σήραγγα T3 – Πλαταμόνα (Π.Α.Θ.Ε.)

Στην περίπτωση διάνοιξης της δίδυμης οδικής σήραγγας Πλαταμόνα - T3 οι εμφανιζόμενοι σχηματισμοί του οφιολιθικού καλύμματος, απαρτίζονται από σερπεντινωμένους περιδοτίτες, οι οποίοι υπέρκεινται τεκτονικά των μεταμορφωμένων βασικών οφιολιθικών πετρωμάτων. Συγκεκριμένα ο σχηματισμός των οφιολίθων εμφανιζόταν κυρίως ως σερπεντινωμένος περιδοτίτης και κατά τόπους ως σύμπλεγμα αποτελούμενο από περιδοτίτη & σερπεντινωμένο περιδοτίτη, ενίοτε με ασβεστολιθικούς όγκους να επιπλέουν στη μάζα του.

Από τα δεδομένα γεωτρήσεων αλλά και από τις επί τόπου μετρήσεις των μετώπων κατά την διάρκεια της εκσκαφής σε σερπεντινωμένους περιδοτίτες έδειξαν πως οι κυρίαρχες τιμές GSI βρίσκονταν στο εύρος 15 - 20, ενώ ακόμα παρουσιάστηκε και η τιμή GSI = 40, που αντιστοιχεί σε μέτωπα, όπου συναντήθηκε κυρίως πιο υγιής περιδοτίτης. Η αντοχή του σχηματισμού γενικά λαμβάνει χαμηλές τιμές, οι οποίες κυμαίνονται με 5 – 10 MPa, ενώ στις περιπτώσεις του πιο υγιούς περιδοτίτη αυτή αυξάνεται.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.3, για να αντιμετωπιστούν οι μεταβαλλόμενες απαιτήσεις υποστήριξης χρειάστηκε να δημιουργηθούν 9 διαφορετικές διατομές μέτρων άμεσης υποστήριξης. Από τις 9 διατομές αυτές μόνο οι 3 αφορούν την υποστήριξη στους οφιολιθικούς σχηματισμούς και είναι οι κατηγορίες 6A, 7A & 7C.

Στον Πίνακα 4.26 αποτυπώνεται η αντιστοίχιση των οφιολιθικών σχηματισμών που συναντήθηκαν με τους γενικούς τύπους οφιολίθων, καθώς και ο διαχωρισμός τους σε τεχνικογεωλογικές ενότητες με βάση τον βαθμό GSI και το ύψος των υπερκειμένων κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Σε αυτόν παρατηρείται ότι οφιολίθοι από διαφορετικούς τύπους συμπεριλαμβάνονται στην ίδια τεχνικογεωλογική ενότητα, καθώς οι γενικότερες γεωτεχνικές συνθήκες στις οποίες συναντήθηκαν κατά την εκσκαφή, τους πρόσδωσαν παρόμοια γεωτεχνική συμπεριφορά.

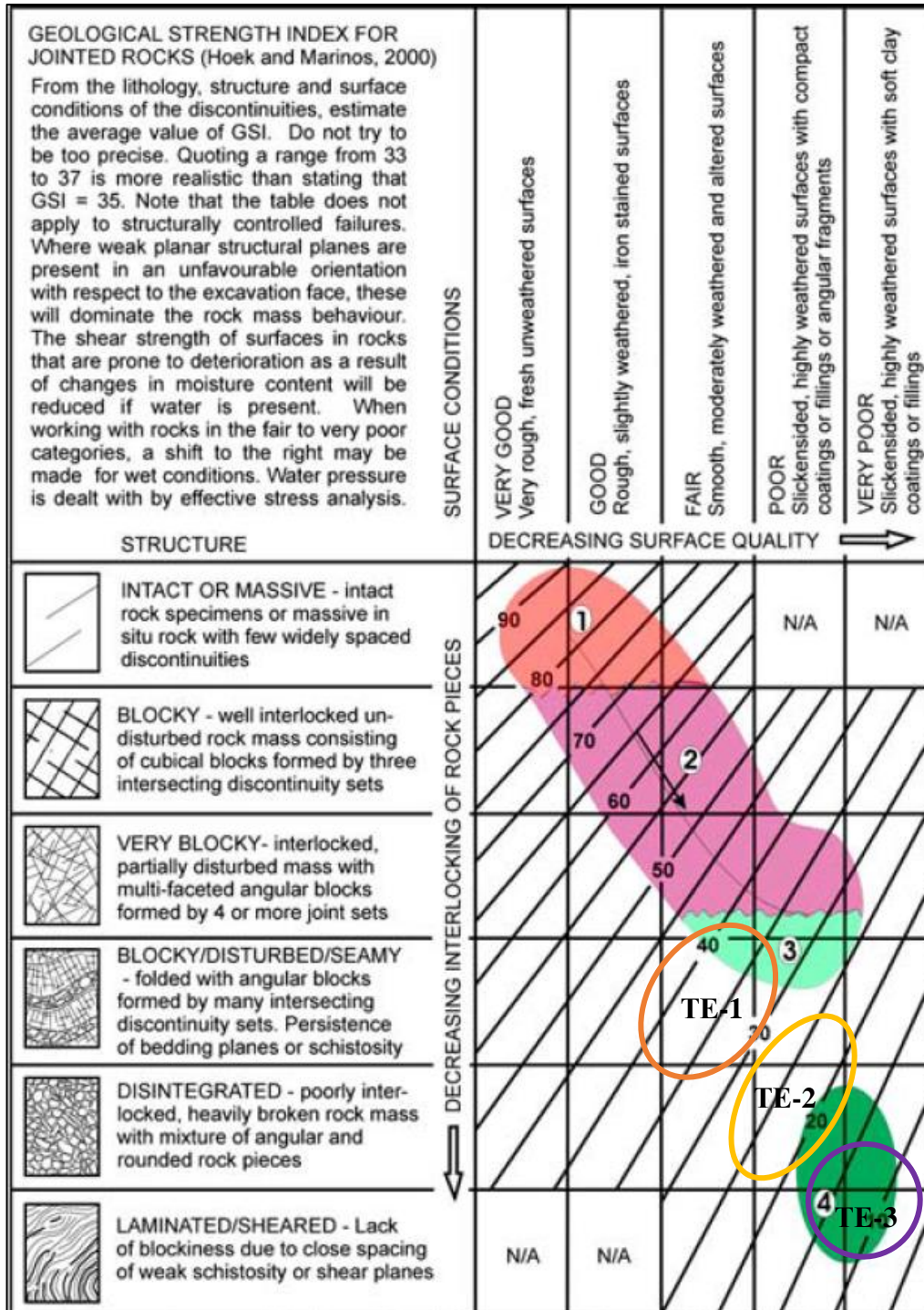
Οφιολιθικός Σχηματισμός	Τύπος Οφιδόλιθου	Κατηγορία Υποστήριξης	Υπερκείμενα	GSI	Τεχνικογεωλογική Ενότητα
Σερπεντινωμένοι Περιδοτίτες	Τύπος 3: Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη	6A	< 120 m	25 - 40	TE-1
		7A	120m < H < 150m	25 - 40	
	Τύπος 4 - Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης	7A	< 80m	15 - 25	TE-2
		7C	80m < H < 150m	15 - 25	
Αποσυντεθειμένοι Σερπεντινωμένοι Περιδοτίτες	Τύπος 4 - Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης	7A	< 25m	< 15	TE-3
		7C	25m < H ≤ 150m	< 15	

Πίνακας 4.25. Τεχνικογεωλογικές ενότητες και τύποι οφιολιθικών σχηματισμών στη σήραγγα Τεμπών T3.

Κάνοντας χρήση του τροποποιημένου διαγράμματος GSI, που παρουσιάζει τις κλίμακες του δείκτη GSI για τους τύπους βραχώμαζας 1 έως 5 σε οφιολιθικά συμπλέγματα, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 3.8, της Παραγράφου 3.3, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι παραπάνω εμφανίσεις των οφιδόλιθων εντάσσονται στις γενικές κατηγορίες:

- Τύπος 3: Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη
- Τύπος 4: Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης

Οι δύο πρώτες τεχνικογεωλογικές ενότητες (TE-1 & TE-2) του Πίνακα 4.25 περιγράφουν βραχομάζα, ενώ η τελευταία (TE-3) περιγράφει εδαφικό υλικό. Αποτυπώνοντας τις εν λόγω τεχνικογεωλογικές ενότητες, όπως αυτές θεωρήθηκαν στον Πίνακα 4.25, δημιουργείται το τροποποιημένο διάγραμμα GSI για τους οφιολίθους της σήραγγας Τεμπών Τ3, στην Εικόνα 4.32.



Εικόνα 4.32. Τεχνικογεωλογικές ενότητες της σήραγγας Τεμπών Τ3 στο τροποποιημένο διάγραμμα GSI για οφιολιθικά συμπλέγματα.

4.3.4 Εφαρμοσθείσες Διατομές Άμεσης Υποστήριξης Ανάλογα Με Την Κατηγορία Οφιολίθων

Τα ανωτέρω γεωτεχνικά και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των τριών σήραγγων του ελληνικού χώρου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδεθούν οι εφαρμοσθείσες διατομές άμεσης υποστήριξης ανάλογα με τον τύπο οφιολίθων που πρόκειται να υποστηρίξουν.

Όπως αναπτύχθηκε στις ανωτέρω ενότητες, κάθε σήραγγα χωρίστηκε σε επιμέρους τεχνικογεωλογικές ενότητες, με κριτήριο τα κοινά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, τα οποία προκύπτουν είτε όταν αλλάζει ο γεωλογικός σχηματισμός, είτε όταν αλλάζει η ποιότητα του ίδιου σχηματισμού, όπως συμβαίνει στους οφιολίθους. Συνεπώς, βραχομάζες με κοινά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά απαιτούν και παρόμοιες διατομές για την άμεση υποστήριξη τους.

Στις τρεις σήραγγες που περιεγράφηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, κυριαρχούσαν, άλλοτε σε μεγαλύτερο και άλλοτε σε μικρότερο ποσοστό, οι εξής τρεις τύποι οφιολίθων:

- *Τύπος 2: Σερπεντινωμένος Οφιόλιθος – Ελαφριά Αποσαθρωμένος Γάββρος*
- *Τύπος 3: Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη*
- *Τύπος 4: Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης*

όπου ο κάθε τύπος αποτελεί πολλές φορές και μια ξεχωριστή τεχνικογεωλογική ενότητα κατά τη διάνοιξη των σηράγγων.

Συγκεντρώνοντας όλα τα χαρακτηριστικά των διατομών άμεσης υποστήριξης για τους τρεις τύπους οφιολίθων που παρουσιάστηκαν, δημιουργούνται οι ακόλουθοι Πίνακες 4.27, 4.28 & 4.29, οι οποίοι περιλαμβάνουν συγκεντρωτικά όλα τα μέτρα άμεσης υποστήριξης ανάλογα με τον τύπο της οφιολιθικής βραχομάζας.

Μέτρα Υποστήριξης	Σήραγγα Καλλιδρόμου	Σήραγγα Όθρους
Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Πάχος)	35 – 60 cm	15 – 20 cm

Αγκύρια (Μήκος/ Διάμετρος / Φέρουσα ικανότητα)	Αυτοδιατρούμενα L = 8 - 10 m / Φ40 / 300 kN	Swellex MN24 ή/και Fully Grouted Φ25/S500 (L=4m ή L=5m)
Πλαίσια	L - G 120	HEB 120
Αγκύρια Μετώπου Fiberglass (Μήκος / Φέρουσα Ικανότητα)	L = 12 m / 200 kN Εφαρμογή μόνο στην άνω ημιδιατομή	-
Επιπλέον Μέτρα Υποστήριξης	<ul style="list-style-type: none"> • Ήλוי με τσιμεντοκονίαμα (Spiles) στη στέψη, Φ28, σε γωνία 120°, $I_s = 4$ $m_{as} < 30$ cm • Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο • Τελικό Ανάστροφο Τόξο 	Ελεφαντοπόδαρο (40 cm)

Πίνακας 4.26. Διατομές άμεσης υποστήριξης για τον Τύπο 2 οφιολίθων στις εξεταζόμενες σήραγγες.

Τύπος 3 – Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη			
Μέτρα Υποστήριξης	Σήραγγα Καλλιδρόμου	Σήραγγα Όθρυος	Σήραγγα Τεμπών
Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Πάχος)	100 cm με μεταλλικές ίνες	25 cm	25-30 cm, με μεταλλικές ίνες και πλέγμα 1 x T188
Αγκύρια (Μήκος/ Διάμετρος / Φέρουσα ικανότητα)	Αυτοδιατρούμενα, πλήρης πάκτωσης L = 12 m / Φ40 / 140 kN	Swellex MN24 ή/και Fully Grouted Φ25/S500 ή/και αυτοδιατρούμενα / 300 kN (L=5m)	Αυτοδιατρούμενα / L = 6- 8 m / 200kN
Πλαίσια	Αλληπαλληλες στρώσεις οπλισμού σιδηρού	HEB 140	HEB 140 ή HEB160

	πλέγματος Q188 εντός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος		
Αγκύρια Μετώπου Fiberglass (Μήκος / Φέρουσα Ικανότητα)	L = 12 m ανά 8 m / 200 kN Εφαρμογή σε ολόκληρη την διατομή	9 τεμάχια	L = 12m / 250 kN (αν απαιτούνταν)
Επιπλέον Μέτρα Υποστήριξης	<ul style="list-style-type: none"> Αποστραγγιστικές οπές Φ3, L = 10 m περιμετρικά της διατομής Ήλοι με τσιμεντοκονίαμα (Spiles), σε γωνία 120°, Φ32, L = 4 m, a = 25 -30 cm, κάθε δεύτερο κύκλο Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο Τελικό Ανάστροφο Τόξο 	<ul style="list-style-type: none"> Ελεφαντοπόδαρο (40 cm πάχος) 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο Ελαφρές Ράβδοι – Spiles, σε γωνία 109° (38 steel bars Φ32-St37) 	<ul style="list-style-type: none"> Forepoling 100° Φ114mm, L=12m, αλληλοκάλυψη 4m Ελεφαντοπόδαρο Πυρήνας αντιστήριξης μετώπου 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο Προσωρινό ανάστροφο τόξο με 20 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188 Τελικό ανάστροφο τόξο με 20 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188

Πίνακας 4.27. Διατομές άμεσης υποστήριξης για τον Τύπο 3 οφιολιθών στις εξεταζόμενες σήραγγες.

Τύπος 4 – Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης			
Μέτρα Υποστήριξης	Σήραγγα Καλλιδρόμου	Σήραγγα Όθρυος	Σήραγγα Τεμπών
Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Πάχος)	45 cm	25 – 30 cm	30 cm, με μεταλλικές ίνες και πλέγμα 1 x T188 και 1 x Φ12/15

<p>Αγκύρια (Μήκος/ Διάμετρος / Φέρουσα ικανότητα)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ενδοτικά αγκύρια, μήκους ολίσθησης 100 cm, L = 12 m (ελεύθερα 8 m, τσιμεντωμένα 4 m) • Αγκύρια εδάφους, πλήρους τσιμεντενέματος L = 3 m, Φ25, 300 kN 	<p>Αυτοδιατρούμενα L = 6 m / 300 kN</p>	<p>Αυτοδιατρούμενα / L = 8-9 m / 200kN</p>
<p>Πλαίσια</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ολισθαίνοντα πλαίσια • Σιδηρό πλέγμα Q188 εντός των στρώσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος 	<p>HEB 140 ή HEB 160</p>	<p>HEB 160</p>
<p>Αγκύρια Μετώπου Fiberglass (Μήκος / Φέρουσα Ικανότητα)</p>	<p>L = 12m ανά 6m / 200 kN Εφαρμογή σε ολόκληρη την διατομή</p>	<p>16 τεμάχια</p>	<p>L = 12m / 250 kN</p>
<p>Επιπλέον Μέτρα Υποστήριξης</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Αποστραγγιστικές οπές Φ3, L = 10 m περιμετρικά της διατομής • Τα εναπομείναντα διάκενα των ολισθαίνοντων πλαισίων πληρώνονταν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες • Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο 	<ul style="list-style-type: none"> • Ελεφαντοπόδαρο (40 -115 cm) • 5 – 10 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μετώπου • Πυρήνας μετώπου • Forepolling (35 steel tubes Φ114/100 - St37) • Προσωρινό ανάστροφο τόξο 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forepoling 100° Φ114mm, L=12m, αλληλοκάλυψη 6m ▪ Ελεφαντοπόδαρο ▪ 5 cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες στο μέτωπο ▪ Προσωρινό ανάστροφο τόξο με 30 cm εκτ.

	<ul style="list-style-type: none"> • Τελικό ανάστροφο Τόξο 	<ul style="list-style-type: none"> • Τελικό ανάστροφο τόξο 	<p>σκυρόδεμα και 2 x T188</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Τελικό ανάστροφο τόξο με 30 cm εκτ. σκυρόδεμα και 2 x T188 και 1 x Φ12/15
--	---	---	---

Πίνακας 4.28. Διατομές άμεσης υποστήριξης για τον Τύπο 4 οφιολίθων στις εξεταζόμενες σήραγγες.

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

5.1 Μεθοδολογία Προσομοίωσης

5.1.1 Γενικά Στοιχεία

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της εκσκαφής και της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων χρησιμοποιούνται ευρέως κάποια προγράμματα Η/Υ. Τα πιο διαδεδομένα αυτών είναι το RS2 της σουίτας RocScience, το PLAXIS και το Sofistik.

Για τις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα RS2. Βασικό πλεονέκτημα του εν λόγω προγράμματος είναι ότι λαμβάνει υπόψιν την αλληλεπίδραση των παραμορφώσεων της βραχομάζας και των μέτρων της άμεσης υποστήριξης. Ακόμα, παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης της βραχομάζας, των μέτρων της άμεσης υποστήριξης, καθώς και της τμηματικής εκσκαφής βάσει των προτιμήσεων του χρήστη.

Λόγω του ότι το περιβάλλον του συγκεκριμένου προγράμματος αποτυπώνεται σε 2 διαστάσεις, η προσομοίωση κάποιων μέτρων υποστήριξης, όπως των ήλων μετώπου fiberglass ή των δοκών προπορείας (forepoling / spiling) τα οποία απαιτούν μια τρισδιάστατη απεικόνιση, ώστε να αποτυπωθούν με ορθότητα, πραγματοποιείται με μετατροπή των χαρακτηριστικών τους, σε χαρακτηριστικά της βραχομάζας ή με μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης, το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια.

5.1.2 Προσομοίωση Της Διάνοιξης

Το επιλεγμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να πραγματοποιήσει τις αναλύσεις του. Με την μέθοδο αυτή καθίσταται δυνατή η προσομοίωση της πλήρους αλληλουχίας των φάσεων διάνοιξης και προχώρησης της εκσκαφής, καθώς και της υποστήριξης και της αλληλεπίδρασης της με τη βραχομάζα. Τα στάδια της προσομοίωσης των διατομών είναι τα ακόλουθα:

1. Στάδιο 1^ο: Γεωστατικό πεδίο

Στο στάδιο αυτό προσομοιώνεται η αρχική εντατική κατάσταση των γεωϋλικών με βάση τις μηχανικές τους ιδιότητες πριν ξεκινήσει η διάνοιξη.

2. Στάδιο 2^ο: Αποτόνωση της βραχομάζας της Α φάσης εκσκαφής

Στο στάδιο αυτό προσομοιώνεται η σύγκλιση της βραχομάζας που συμβαίνει μέχρι την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης στην απόσταση που έχει επιλεγεί από το μέτωπο εκσκαφής, όσο και το βήμα προχώρησης. Η προσομοίωση της σύγκλισης γίνεται με την μέθοδο της χαλάρωσης. Η χαλάρωση επιβάλλεται μέσω του συντελεστή αποτόνωσης «λ» και του υπολογισμού ενός νέου μικρότερου μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας. Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας, η οποία αντιστοιχεί σε μείωση της εσωτερικής πίεσης της βραχομάζας στην υποστήριξη.

3. Στάδιο 3^ο: Εκσκαφή της Α φάσης

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την αφαίρεση του γεωυλικού της αντίστοιχης φάσης και την ταυτόχρονη τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Με την εφαρμογή του συγκεκριμένου τρόπου, τα επιλεγόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης φορτίζονται, εξισορροπώντας την τάση μιας επιπλέον σύγκλισης της βραχομάζας.

4. Στάδιο 4^ο: Αποτόνωση της Β φάσης εκσκαφής

Στο συγκεκριμένο στάδιο ισχύουν τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν στο Στάδιο 2.

5. Στάδιο 5^ο: Εκσκαφή της Β φάσης εκσκαφής και ταυτόχρονη τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Στο συγκεκριμένο στάδιο ισχύουν τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν στο Στάδιο 3.

5.1.3 Προσομοίωση Των Γεωυλικών

Για την προσομοίωση των γεωλογικών σχηματισμών θεωρείται ότι αυτοί καταλαμβάνουν το σύνολο της τυπικής διατομής και χαρακτηρίζονται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν για κάθε σχηματισμό από την επεξεργασία των δεδομένων των προαναφερθέντων υποκεφαλαίων.

Για την προσομοίωση της αποτόνωσης των γεωυλικών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιείται η μέθοδος της χαλάρωσης της βραχομάζας. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

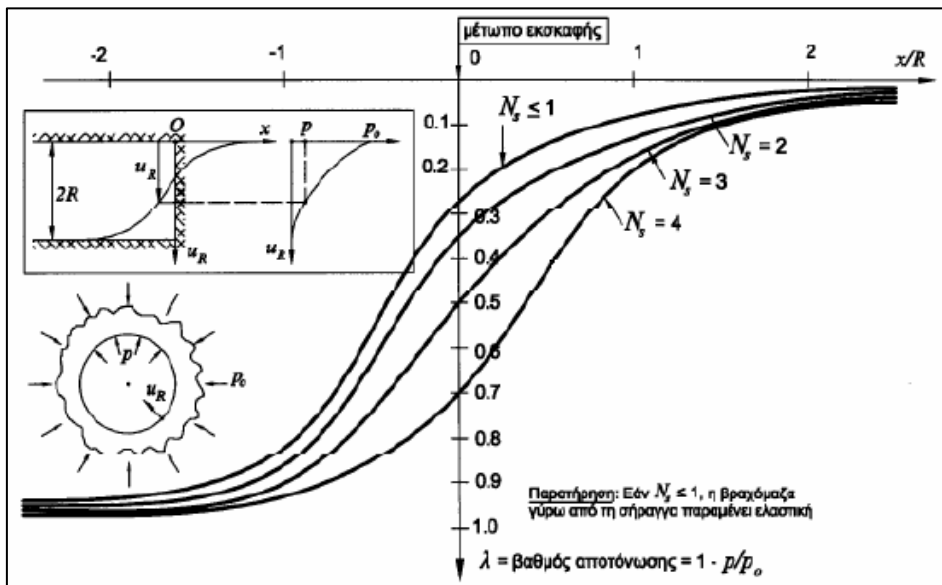
1. Υπολογίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης της βραχομάζας N_s από τον τύπο:

$$N_s = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}}$$

Όπου p_0 είναι η τάση του γεωστατικού πεδίου και σ_{cm} η αντοχή της βραχομάζας για κάθε σχηματισμό.

2. Υπολογίζεται η τιμή του κλάσματος $\frac{x}{R}$, όπου x είναι το βήμα προχώρησης και R η ισοδύναμη διατομή της σήραγγας.

Συνδυάζοντας την τιμή του κλάσματος του βήματος 2 με την αντίστοιχη καμπύλη Panet, που αντιστοιχεί στον συντελεστή N_s , προσδιορίζεται ο βαθμός αποτόνωσης « λ ».



Εικόνα 5.1. Καμπύλες Panet για ανυποστήρικτη σήραγγα και διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Καββαδάς, 2005)

Στην περίπτωση που ο συντελεστής υπερφόρτισης δεν αντιστοιχεί σε κάποια από τις καμπύλες, ο συντελεστής αποτόνωσης « λ » υπολογίζεται αναλυτικά με την μαθηματική σχέση κατά Panet – Chern ως εξής:

$$\lambda = 1 - \frac{2}{(k-1)N_s} \left[\left(\frac{u_R}{u_{R00}} \right)^{\frac{k-1}{k+1}} - 1 \right]^{-1,7},$$

Όπου,

$$K = \frac{1 + \tan \delta}{1 - \tan \delta},$$

δ : η γωνία διασταλτικότητας,

$$k = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi},$$

φ : η γωνία εσωτερικής τριβής

3. Υπολογίζεται η απομείωση του μέτρου ελαστικότητας:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1 - 2\nu)(1 - \lambda)}{(1 - 2\nu) + \lambda}$$

5.1.4 Προσομοίωση Των Μέτρων Άμεσης Υποστήριξης

5.1.4.1 Προσομοίωση Του Σκυροδέματος

Η εφαρμογή του σκυροδέματος πραγματοποιείται περιμετρικά της διατομής εκσκαφής, τόσο με τη μορφή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις εκάστοτε φάσεις διάνοιξης, όσο και με τη μορφή απλού σκυροδέματος κατά την κατασκευή μόνιμου και προσωρινού ανάστροφου τόξου. Συνηθέστερα πλέον το εκτοξευόμενο σκυροδέμα προβλέπεται να είναι ινοπλισμένο.

Επειδή το σκυροδέμα δεν αποκτά ακαριαία τις μέγιστες παραμέτρους αντοχής του, κατά την προσομοίωση του θεωρείται πως το μέτρο ελαστικότητας του τίθεται μειωμένο στο πρώτο στάδιο τοποθέτησης του και σε επόμενο στάδιο αυτό αυξάνεται, ακολουθώντας και την πραγματική του πήξη. Το τελευταίο αποτυπώνεται στο ακόλουθο λογισμό:

1. Ενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με πάχος 50% του τελικού πάχους και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 10% της τελικής (**S1**).
2. Αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο τελικό του πάχος (100%) και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 50% της τελικής (**S2**).
3. Αύξηση της αντοχής (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην τελική του αντοχή (100%) (**S3**).

5.1.4.2 Προσομοίωση Των Στοιχείων Θεμελίωσης Μεταλλικών Πλαισίων (Elephant Foot)

Κατά την ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2, τα ελεφαντοπόδαρα προσομοιώνονται ως ισοδύναμη ενισχυμένη βραχομάζα της οποίας οι παράμετροι, ως επί το πλείστον, καθορίζονται από τις ιδιότητες του σκυροδέματος.

Θεωρείται, λοιπόν, πως το σκυρόδεμα των στοιχείων θεμελίωσης των μεταλλικών πλαισίων είναι της κατηγορίας C30/37, όπως και αυτό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οπότε και κατέχει 30 MPa θλιπτική αντοχή και έστω το 10% αυτής ως εφελκυστική αντοχή, δηλαδή 6 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας του καθορίζεται σε αναλογία 50/50 από αυτό του σκυροδέματος, δηλαδή 15 GPa και αυτό της περιβάλλουσας βραχομάζας της εκάστοτε περίπτωσης. Αυτό συμβαίνει καθώς κατά την κατασκευή των στοιχείων θεμελίωσης των μεταλλικών πλαισίων δημιουργεί ενιαίο φορέα με το περιβάλλον εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αναμειγνύεται με το υλικό της περιβάλλουσας βραχομάζας. Τέλος, ο λόγος Poisson θέτεται ως 0,3 και το ειδικό βάρος στα 25 kN/m³.

5.1.4.3 Προσομοίωση Των Αγκυρίων Μετώπου Fiberglass

Η ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια μετώπου fiberglass βασίζεται στη διατήρηση υψηλής τιμής της τάσης σ_3 και επιλέγεται όταν απαιτείται από τις συνθήκες τις εκάστοτε διατομής. Για την προσομοίωση των αγκυρίων του μετώπου χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο διδακτορικό του Δ. Γεωργίου (2021).

Συμφώνα με τον ανωτέρω συγγραφέα, αρχικά, υπολογίζεται η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής (Ω_h) για το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής ως εξής:

1. Υπολογίζεται ο αδιάστατος συντελεστής εδάφους (Λ_o), ο οποίος είναι κοινός για ρηχές και βαθιές σήραγγες και βάσει αυτού μπορεί να εκτιμηθεί η σταθερότητα του μετώπου εκσκαφής, όπου για τιμές $\Lambda_o \geq 1$ το μέτωπο χαρακτηρίζεται ως ευσταθές ενώ για $\Lambda_o < 1$ ως δυνητικά ασταθές. Ο συντελεστής Λ_o υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\Lambda_F = \frac{3,8 * \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma * H}\right) * \left(\frac{H}{D}\right)^{0,35}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2}{3}\right) * K_o}}$$

Όπου:

- ✓ σ_{cm} : η αντοχή της γεωμάζας, που υπολογίζεται με την χρήση του τύπου (Generalized Hoek & Brown, 2002):

$$\sigma_{cm} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{50}\right) * \exp\left(\frac{GSI}{25,5}\right)$$

Όπου:

σ_{ci} : η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

GSI: ο γεωλογικός δείκτης αντοχής της βραχομάζας

- ✓ γ : το ειδικό βάρος της βραχομάζας
 - ✓ **H**: το ύψος των υπερκειμένων γαιών από τον άξονα της σήραγγας
 - ✓ **D**: η διάμετρος της σήραγγας
 - ✓ **K₀**: ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων
2. Ο αδιάστατος συντελεστής εδάφους (Λ_o) συνδέεται με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής (Ω_h) ως εξής:

$$\Omega_{Fo} = 1,4 * \Lambda_F^{-1,2}$$

3. Υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής μέσω της σχέσης:

$$\lambda_o = 0,25 + 0,75 * \exp(-0,5 * \Lambda_F)$$

4. Υπολογίζεται η μείωση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής με την εφαρμογή αγκυρίων Fiberglass ως εξής:

$$p_{u,FG} = \frac{n * F_u}{A}$$

$$N_{FG} = \left(\frac{p_{u,FG}}{\sigma_{cm}}\right)^{1,35} * \left(\frac{H}{D}\right)^{0,3}$$

$$\frac{\Delta\Omega_F}{\Omega_{Fo}} = 0,35 * N_{FG}^{0,6}$$

Όπου:

- ✓ $p_{u,FG}$: προσφερόμενη πίεση μετώπου λόγω χρήσης αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass
- ✓ σ_{cm} : η αντοχή της βραχομάζας
- ✓ **H**: το ύψος των υπερκειμένων γαιών από τον άξονα της σήραγγας.

- ✓ **D**: η διάμετρος της σήραγγας
- ✓ **n**: ο αριθμός των αγκυρίων
- ✓ **F_u**: δύναμη αστοχίας σε εφελκυσμό, έκαστου αγκυρίου
- ✓ **A**: το εμβαδόν της επιφάνειας προϋποστήριξης με αγκύρια τύπου fiberglass

5. Υπολογίζεται ο νέος βαθμός αποτόνωσης του ενισχυμένου μετώπου (λ_{FG}), μέσω της εξίσωσης:

$$\lambda_{FG} = 0,25 + 0,75 * \exp \left[\left(\frac{\Lambda_o^{-1,2}}{1 - 0,35 * N_{FG}^{0,6}} \right)^{0,833} \right]$$

5.2 Παράμετροι Και Παραδοχές Προσομοίωσης

5.2.1 Γενικά Στοιχεία

Με βάση των όσων έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα στην παρούσα εργασία και ειδικά στο 4^ο κεφάλαιο, επιλέχθηκαν συνολικά τρία προσομοιώματα, ένα για κάθε τύπο οφιολίθων, όπως έχουν διακριτοποιηθεί από τα δεδομένα των σηράγγων και είναι δυνατόν να παρουσιασθεί κατά την διάνοιξη ενός υπογείου έργου, για τα οποία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της προσωρινής τους υποστήριξης.

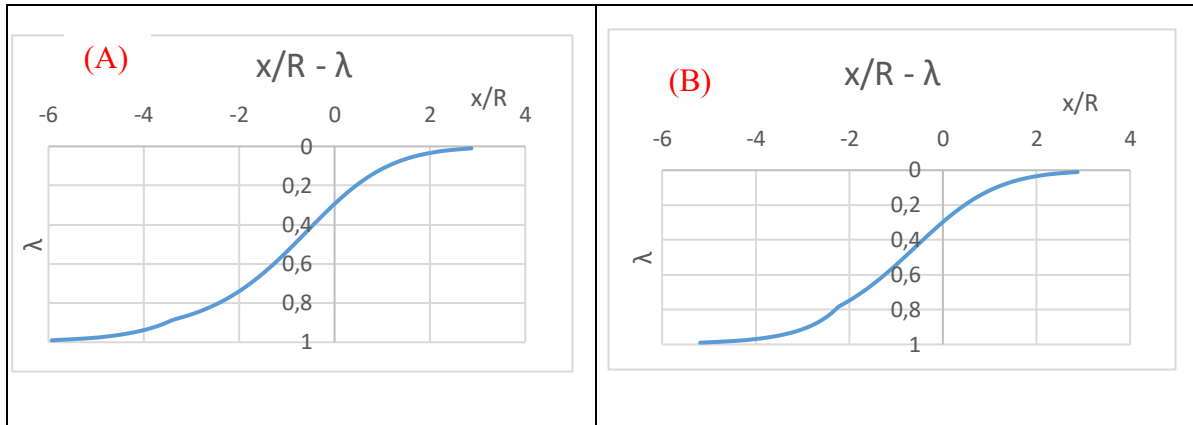
Οι παράμετροι καθενός προσομοιώματος που θα χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Οι εν λόγω παράμετροι προέκυψαν αναλύοντας και ομαδοποιώντας τα δεδομένα των σηράγγων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Σε όλες τις αναλύσεις διατηρούνται σταθερά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων. Με βάση τα συγκεκριμένα μοντέλα και τις παραμέτρους τους θα πραγματοποιηθούν δύο (2) αναλύσεις, μια σε βάθος 150m και μια σε βάθος 300m.

Θεωρώντας, αρχικά, τις παραμέτρους GSI, σ_{ci} , E_i , m_i και γ , σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στα ανωτέρω κεφάλαια για κάθε τύπο οφιολίθων και εισάγοντας τα στο λογισμικό RocData της εταιρείας RocScience, θεωρώντας ύψος υπερκειμένων $H = 150m$ και $300m$, υπολογίζονται οι παράμετροι E_m και ϕ και για τον κάθε τύπο οφιολίθων. Το σ_{cm} κάθε τύπου οφιολίθου υπολογίζεται με την χρήση της μαθηματικής σχέσης σύμφωνα με το Generalized Hoek & Brown (2002), που αναπτύχθηκε ανωτέρω.

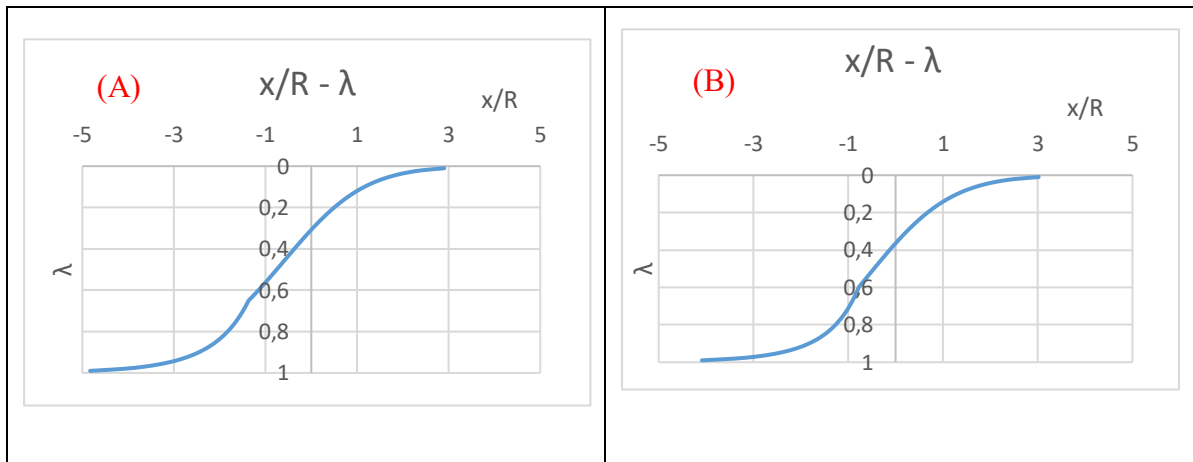
Χαρακτηριστικά	Οφιόλιθοι		
	Τύπος 2: Σερπεντινωμένοι Οφιόλιθοι	Τύπος 3: Έντονα Σερπεντινωμένος Περιδοτίτης ή Σερπεντινίτης με Πιθανές Ζώνες Σχιστοποιημένου Σερπεντινίτη	Τύπος 4: Φυλλοποιημένος Σερπεντινίτης
Ανατιθεμένη Τιμή GSI	50	30	15
σ_{ci} (MPa)	35	28	10
E_i (MPa)	18708	8366	1250
m_i	20	15	10
γ (kN/m³)	26		
σ_{cm} (MPa)	4,97	1,82	0,36
E_m (MPa)	5744	681	46
ϕ (°)	43	33	19
δ (°)	10,75	8,25	4,75
K	1		
ν	0,33		

Πίνακας 5.1 Παράμετροι προσομοιωμάτων των υπό εξέταση τύπων οφιολίθων

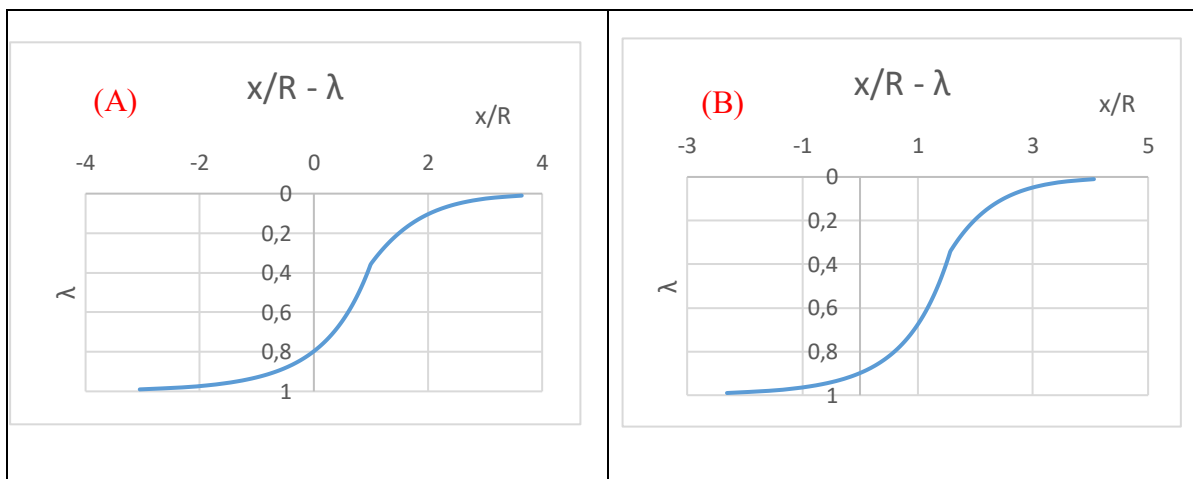
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.1.3, η προσομοίωση των γεωυλικών πραγματοποιείται με τον υπολογισμό ενός νέου μέτρου ελαστικότητας, λαμβάνοντας υπόψιν τον συντελεστή αποτόνωσης του γεωυλικού της εκάστοτε περίπτωσης. Ο συντελεστής αποτόνωσης προκύπτει μέσω των διαγραμμάτων κατά Chern et al. (1998). Τα διαγράμματα αυτά για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στις ακόλουθες Εικόνες 5.2, 5.3 και 5.4



Εικόνα 5.2. Καμπύλες Chern et al. (1998) για τον Τύπο 2 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).



Εικόνα 5.3. Καμπύλες Chern et al. (1998) για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).



Εικόνα 5.4. Καμπύλες κατά Chern et al. (1998) για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

Με βάση τις ανωτέρω δημιουργούμενες καμπύλες και ακολουθώντας την μεθοδολογία της παραγράφου 5.1.3, για συγκεκριμένα τυχαία βήματα προχώρησης, προκύπτει το νέο μέτρο ελαστικότητας (E) της εκσκαπτόμενης βραχομάζας. Σημειώνεται ότι ως αρχικό μέτρο ελαστικότητας (E_0) θεωρείται το E_m της κάθε περίπτωσης, καθώς αυτό περιγράφει καλύτερα τις επί τόπου συνθήκες της βραχομάζας. Τα ανωτέρω

αποτελέσματα αποτυπώνονται στους Πίνακες 5.2 και 5.3, για ύψος υπερκειμένων 150m και 300m αντίστοιχα.

Τύπος Οφιολίθων	Απόσταση από το μέτωπο	Βαθμός αποτόνωσης (λ)	E_0	Περιγραφή
			E	
Τύπος 2	0 m	0,29	5744 MPa	Μέτωπο Εκσκαφής
	3 m	0,42	1562,07 MPa	Βήμα Προχώρησης
Τύπος 3	0 m	0,31	681 MPa	Μέτωπο Εκσκαφής
	1,5 m	0,36	209,23 MPa	Βήμα Προχώρησης
Τύπος 4	0 m	0,80	46 MPa	Μέτωπο Εκσκαφής
	1 m	0,83	2,21 MPa	Βήμα Προχώρησης

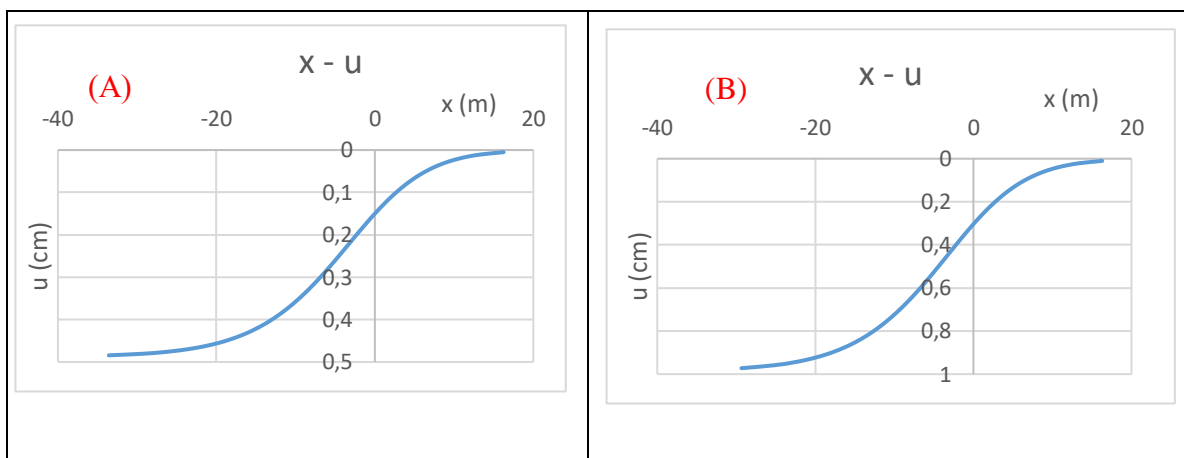
Πίνακας 5.2. Χαρακτηριστικές ιδιότητες γεωολικού για κάθε τύπο οφιολίθων για $H = 150m$.

Τύπος Οφιολίθων	Απόσταση από το μέτωπο	Βαθμός αποτόνωσης (λ)	E_0	Περιγραφή
			E	
Τύπος 2	0 m	0,3	5744 MPa	Μέτωπο Εκσκαφής
	3 m	0,43	1532,7 MPa	Βήμα Προχώρησης
Τύπος 3	0 m	0,36	681 MPa	Μέτωπο Εκσκαφής
	1,5 m	0,43	169,25 MPa	Βήμα Προχώρησης
Τύπος 4	0 m	0,90	46 MPa	Μέτωπο Εκσκαφής

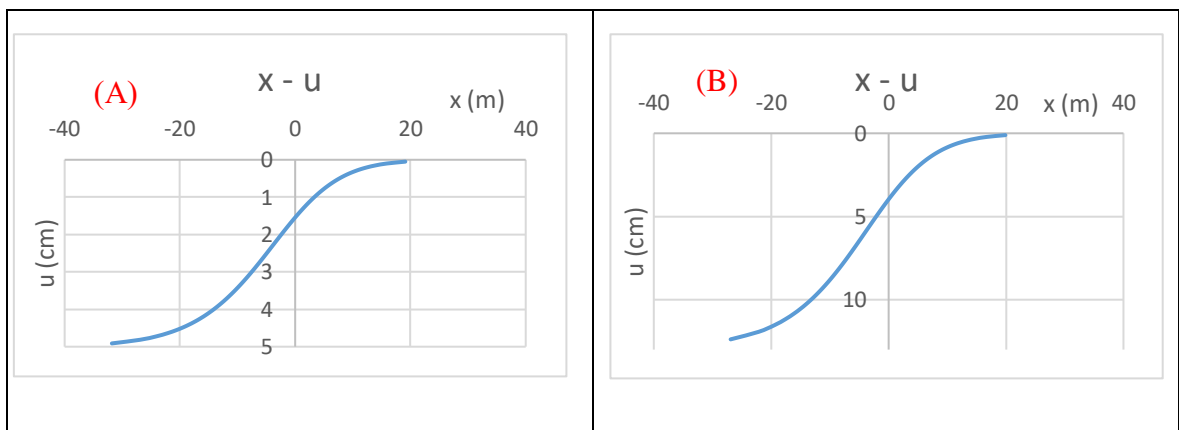
	1 m	0,92	1,08 MPa	Βήμα Προχώρησης
--	-----	------	----------	--------------------

Πίνακας 5.3. Χαρακτηριστικές ιδιότητες γεωυλικού για κάθε τύπο οφιολίθων για $H = 300m$.

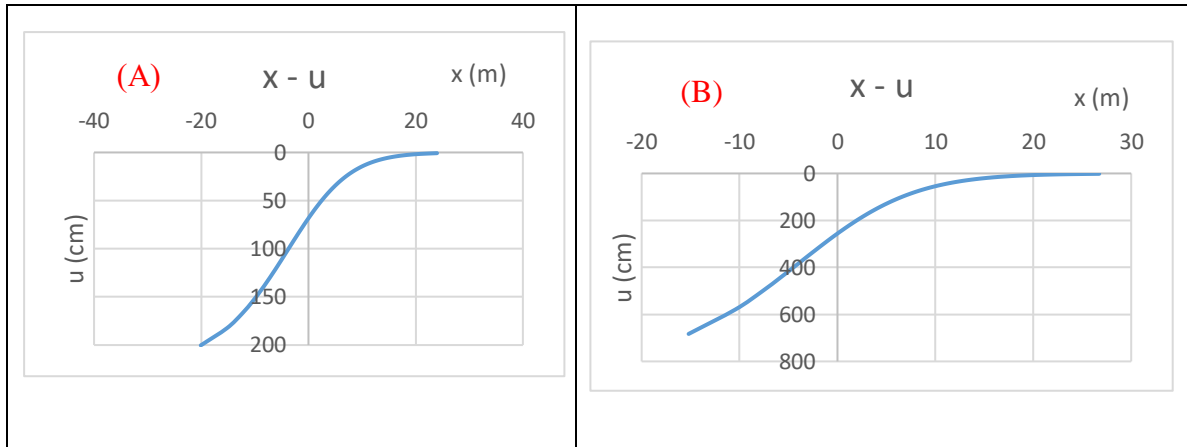
Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία κατά Chern et al. (1998) για την δημιουργία των ανωτέρω καμπυλών, μπορούν να δημιουργηθούν οι αντίστοιχες καμπύλες διαμήκους προφίλ μετακινήσεων (u). Οι εν λόγω καμπύλες διαμήκους προφίλ μετακινήσεων αποτυπώνουν τις συγκλίσεις των σηράγγων της εκάστοτε περίπτωσης αν δεν τοποθετούνταν καθόλου υποστήριξη.



Εικόνα 5.5. Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) κατά Chern et al. 1998 για τον Τύπο 2 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).



Εικόνα 5.6. Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) κατά Chern et al. 1998 για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

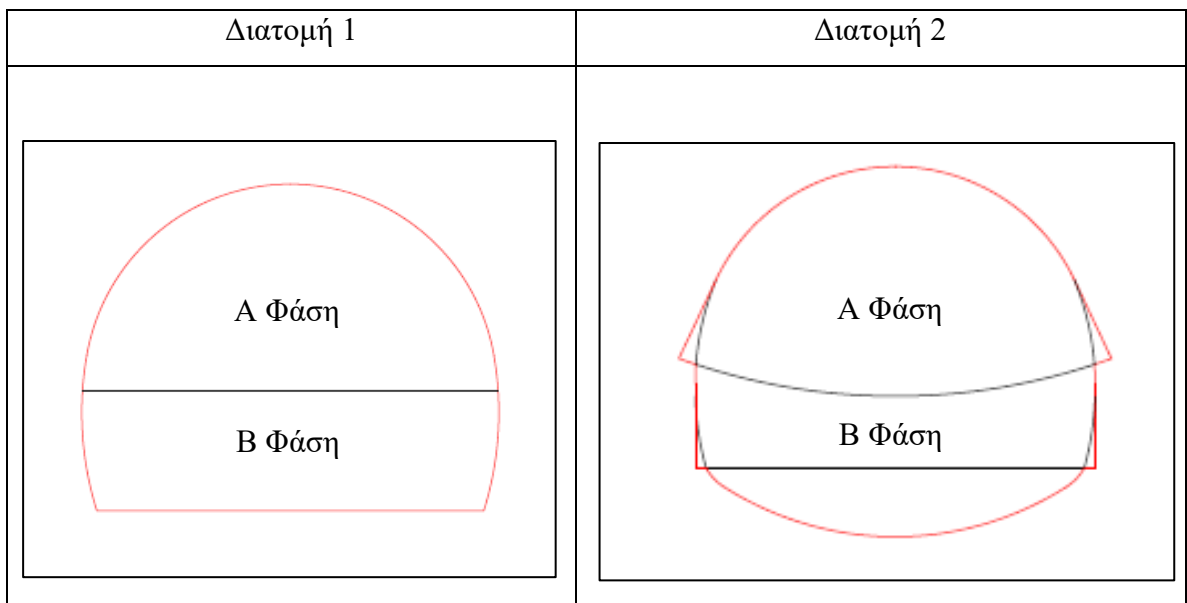


Εικόνα 5.7. Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) κατά Chern et al. 1998 για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

Από τις ανωτέρω καμπύλες συμπεραίνεται πως για κάθε τύπο οφιολίθων, οι συγκλίσεις των ανυποστήρικτων σηράγγων ξεκινάν από κάποια εκατοστά για τον Τύπο 2, που κατέχει τις καλύτερες γεωτεχνικές ιδιότητες και βαίνουν αυξημένες μέχρι και κάποια μέτρα για τον Τύπο 4, που κατέχει τις χειρότερες γεωτεχνικές ιδιότητες. Στην τελευταία περίπτωση, πρακτικά η σήραγγα δεν μπορεί να παραμείνει σταθερή, οπότε και ακολουθεί η κατάρρευση της.

5.2.2 Γεωμετρία της Εκσκαφής

Η γεωμετρία της εκσκαφής επελέγη με βάση την οριστική μελέτη της οδικής σήραγγας Οθρυος του αυτοκινητόδρομου Ε65. Σε αυτήν εντοπίζονται συνολικά 2 διατομές, από τις οποίες, η πρώτη χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διάνοιξης του Τύπου 2 των οφιολίθων και η δεύτερη χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διάνοιξης των Τύπων 3 και 4. Οι εν λόγω διατομές παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8. Χρησιμοποιούμενες διατομές προσομοιωμάτων.

Στις ανωτέρω διατομές εμφανίζονται οι Α και Β φάσεις εκσκαφής, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως στην πρώτη διατομή υπάρχουν ίσια δάπεδα και καθόλου στοιχεία θεμελίωσης μεταλλικών πλαισίων, αφού η συγκεκριμένη διατομή απευθύνεται σε καλής ποιότητας οφιολίθους. Το συνολικό εμβαδόν της πρώτης διατομής ισούται με $100,7 \text{ m}^2$, με εμβαδόν Α φάσης $58,3 \text{ m}^2$ και εμβαδόν Β' φάσης $42,4 \text{ m}^2$ και ισοδύναμη διάμετρο διατομής $D' = 11,32 \text{ m}$. Στην δεύτερη διατομή παρατηρούνται προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο (invert), καθώς και στοιχεία θεμελίωσης μεταλλικών πλαισίων, αφού η εν λόγω διατομή απευθύνεται σε οφιολίθους πτωχής ποιότητας, στους οποίους αναμένονται αυξημένες συγκλίσεις. Το ολικό εμβαδόν της δεύτερης διατομής ισούται με $136,2 \text{ m}^2$, με εμβαδόν Α' φάσης $79,1 \text{ m}^2$ και εμβαδόν Β' φάσης $57,1 \text{ m}^2$ και ισοδύναμη διάμετρο $D' = 13,17 \text{ m}$.

Το περιβάλλον της διάνοιξης προσομοιώνεται με την εφαρμογή ενός ορθογωνίου παραλληλογράμμου σχήματος, οι διαστάσεις του οποίου εξαρτώνται άμεσα από τις διαστάσεις του εκάστοτε ανοίγματος. Ως γενική νόρμα ακολουθείται ότι η απόσταση των δεξιών, αριστερών και άνω ορίων απέχουν έξι (6) διαμέτρους από την εκσκαφή, ενώ η απόσταση των κάτω ορίων απέχουν τέσσερις (4) διαμέτρους από την εκσκαφή. Σημειώνεται πως το άνω όριο των μοντέλων λαμβάνεται στην προαναφερθείσα απόσταση, μόνο όταν η προσομοίωση αφορά βαθιές σήραγγες, οπότε και η πραγματική επιφάνεια του εδάφους απέχει μεγαλύτερη απόσταση από τις έξι (6) διαμέτρους του προσομοιώματος.

Είναι γνωστό ότι στην βραχύμαζα επικρατούν συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης και έτσι τα αριστερά και δεξιά όρια θεωρείται πως μπορούν να κινηθούν μόνο κατακόρυφα, γι' αυτό στηρίζονται σε κυλίσεις, ενώ το κάτω όριο περιορίζεται από αρθρώσεις, οι οποίες απαγορεύουν οποιαδήποτε κίνηση του. Το άνω όριο του μοντέλου λόγω του ότι δεν ταυτίζεται με την επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να κινηθεί μόνο στον κατακόρυφο άξονα.

5.2.3 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης

Για την εφαρμογή της άμεσης υποστήριξης των προσομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης ποικίλου μήκους και φέρουσας ικανότητας, κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος ποικίλου πάχους και κατηγορίας καθώς και πλαίσια με διαφορετική φέρουσα ικανότητα. Οι ιδιότητες των μέτρων άμεσης υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.4, 5.5, 5.6 και 5.7.

Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης (Fully Bonded Bolts)						
	Τύπος 2 (150m)	Τύπος 2 (300m)	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
Διάμετρος (d)	20 mm	20 mm	28 mm	28 mm	32 mm	32 mm
Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa					
Φέρουσα Ικανότητα (P_{u, Tensile})	0,160 MN	0,160 MN	0,310 MN	0,670 MN	0,880 MN	0,880 MN
Μήκος (L)	4 m	6 m	8 m	8 m	10 m	10 m
Κάναβος	1 x 3 m ²	1 x 3 m ²	1,5 x 1,5 m ²	1 x 1,5 m ²	1 x 1 m ²	1 x 1 m ²
Συμπεριφορά	Ελαστική					

Πίνακας 5.4. Ιδιότητες αγκυρίων για κάθε τύπο οφιολίθων.

Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Shotcrete)						
	Τύπος 2 (150m)	Τύπος 2 (300m)	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
Πάχος (t)	20 cm	25 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm
Κατηγορία Σκυροδέματος	C 30/37					
Μέτρο Ελαστικότητας (E_{shotcrete})	15 GPa				20 GPa	
Λόγος Poisson (ν)	0,2					
Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})	30 MPa					
Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})	6 MPa				10,5 MPa	
Ειδικό Βάρος (γ_{shotcrete})	25 kN/m ³					
Συμπεριφορά	Ελαστική					

Πίνακας 5.5. Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος για κάθε τύπο οφιολίθων.

Μεταλλικά Πλαίσια (Steel Sets)

	Τύπος 2 (150m)	Τύπος 2 (300m)	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
Τύπος	-	-	HEB 160	HEB 160	HEB 180	HEB 180
Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa					
Εμβαδόν (A)	-	-	0,005425 m ²	0,005425 m ²	0,006525 m ²	0,006525 m ²
Ροπή Αδράνειας (I)	-	-	2,49 * 10 ⁻⁵ m ⁴	2,49 * 10 ⁻⁵ m ⁴	3.831*10 ⁻⁵ m ⁴	3.831*10 ⁻⁵ m ⁴
Συμπεριφορά	Ελαστική					

Πίνακας 5.6. Ιδιότητες μεταλλικών πλαισίων για κάθε τύπο οφιολίθων.

Επιπλέον Μέτρα Υποστήριξης						
	Τύπος 2 (150m)	Τύπος 2 (300m)	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
<u>Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο</u>						
	-	-	✓	✓	✓	✓
Πάχος (t)	-	-	30 cm	40 cm	60 cm	60 cm
Κατηγορία Σκυροδέματος	-	-	C 30/37			
Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$)	-	-	15 GPa		20 GPa	
Λόγος Poisson (ν)	-	-	0,2			
Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})	-	-	30 MPa			
Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})	-	-	6 MPa		10,5 MPa	
Ειδικό Βάρος ($\gamma_{shotcrete}$)	-	-	25 kN/m ³			
Συμπεριφορά	-	-	Ελαστική			
<u>Τελικό Ανάστροφο Τόξο</u>						
	-	-	✓	✓	✓	✓
Πάχος (t)	-	-	60 cm	70 cm	80 cm	100 cm

Κατηγορία Σκυροδέματος	-	-	C 30/37			
Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$)	-	-	15 GPa		20 GPa	
Λόγος Poisson (ν)	-	-	0,2			
Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})	-	-	30 MPa			
Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})	-	-	6 MPa		10,5 MPa	
Ειδικό Βάρος ($\gamma_{shotcrete}$)	-	-	25 kN/m ³			
Συμπεριφορά	-	-	Ελαστική			
<u>Στοιχεία Θεμελίωσης Μεταλλικών Πλαισίων</u>						
	-	-	✓	✓	✓	✓
Πάχος (cm)	-	-	60			
Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{elep,foot}$)	-		15321,5 MPa			
Λόγος Poisson (ν)	-		0,3			
Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})	-		30 MPa			
Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})	-		6 MPa			
Ειδικό Βάρος ($\gamma_{shotcrete}$)	-		25 kN/m ³			
Συμπεριφορά	-		Ελαστική			
<u>Αγκύρια Μετόπων Fiberglass</u>						
	-		✓	✓		
Κάνναβος	-		1 x 1 m ²		1 x 1 m ²	
Φέρουσα Ικανότητα αγκυρίου $F_{u,FG}$	-		600 kN		550 kN	
Είδος αγκυρίων	-		Ράβδοι Διατομής Y			
Τύπος	-		Y 60F		Y 55F	

Διαστάσεις (A x B)	-	51 x 45 mm
Διάμετρος Οπής	-	12 mm
Συμπεριφορά	-	Ελαστική

Πίνακας 5.7. Ιδιότητες επιπλέον μέτρων υποστήριξης για κάθε τύπο οφιολίθων.

5.2.3.1 Σημειώσεις Επί Των Εφαρμοσθέντων Μέτρων Άμεσης Υποστήριξης

5.2.3.1.1 Για Τα Αγκύρια Βράχου

Στον Πίνακα 5.4 παρατηρείται πως για τους Τύπο 3 (για $H = 300\text{m}$) και Τύπο 4 των οφιολίθων χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια φέρουσας ικανότητας μεγαλύτερης από την συμβατική για την εκάστοτε διάμετρο αγκυρίου. Συγκριτικά με τα χρησιμοποιούμενα αγκύρια για τους άλλους τύπους οφιολίθων παρατηρείται πως για μια μικρή αύξηση της διατομής συμβαίνει μια δυσανάλογη αύξηση της φέρουσας ικανότητας. Αυτό συμβαίνει καθώς για τους Τύπους 2 και 3 χρησιμοποιούνται αγκύρια, τα οποία είναι κατασκευασμένα από συμβατικό χάλυβα, ενώ για τον Τύπο 4 χρησιμοποιούνται αγκύρια, που είναι κατασκευασμένα από ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να είναι ικανά να παραλάβουν μεγαλύτερο φορτίο.

5.2.3.1.2 Για Το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα

Στον Πίνακα 5.5 παρατηρούνται δύο (2) διαφορετικές ποιότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μία με μέτρο ελαστικότητας (E) ίσο με 15 GPa, η οποία εφαρμόζεται στους Τύπους 2 και 3 οφιολίθων ανεξαρτήτων των υπερκειμένων και μια με μέτρο ελαστικότητας (E) ίσο με 20 GPa, που εφαρμόζεται μόνο στον Τύπο 4 των οφιολίθων. Αυτό συμβαίνει, διότι η εν λόγω κατηγορία, σύμφωνα και με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της από τον Πίνακα 5.1, παρουσιάζει πάρα πολύ πτωχές ιδιότητες και έτσι, κρίνεται απαραίτητη η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέσω της προσθήκης ειδικών επιταχυντών κατά την κατασκευή του μίγματος. Ακόμα, για τον ίδιο λόγο, παρατηρείται και αύξηση της εφελκυστικής αντοχής της εν λόγω κατηγορίας σκυροδέματος, η οποία επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση μεγαλύτερου αριθμού μεταλλικών πλεγμάτων.

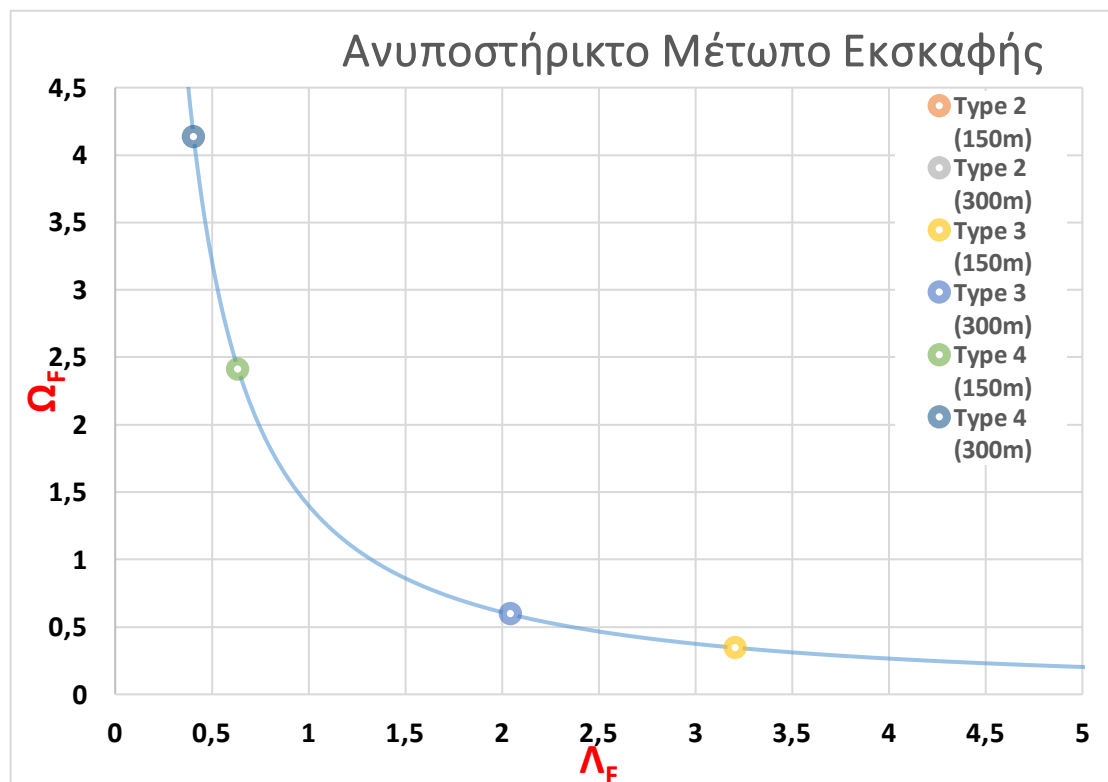
5.2.3.1.3 Για Τα Αγκύρια Μετώπου (Fiberglass Nails)

Ακολουθώντας τα βήματα για τον υπολογισμό της απαίτησης ή μη για υποστήριξη του μετώπου κάθε τύπου οφιολίθου, όπως αναλύονται στην υποπαράγραφο 5.1.4.3, βρέθηκε πως μόνο τον Τύπο 4 υπάρχει ενδεχόμενη αστοχία μετώπου, καθώς το υπολογιζόμενο $\Delta_F < 1$, όπως αποτυπώνεται και στον Πίνακα 5.8.

Ανυποστήρικτο Μέτωπο Εκσκαφής					
Τύπος Οφιολίθων	σ_{cm} (MPa)	Λ_F	Ευστάθεια	Ω_F	λ_0
Type 2 (150m)	4,97	9,28	ΕΥΣΤΑΘΕΣ	0,10	0,26
Type 2 (300m)		5,91	ΕΥΣΤΑΘΕΣ	0,17	0,29
Type 3 (150m)	1,82	3,21	ΕΥΣΤΑΘΕΣ	0,35	0,40
Type 3 (300m)		2,04	ΕΥΣΤΑΘΕΣ	0,59	0,52
Type 4 (150m)	0,36	0,64	ΑΣΤΑΘΕΣ	2,41	0,80
Type 4 (300m)		0,41	ΑΣΤΑΘΕΣ	4,13	0,86

Πίνακας 5.8. Υπολογισμός ενδεχόμενης αστοχίας μετώπου κάθε τύπου οφιολίθων.

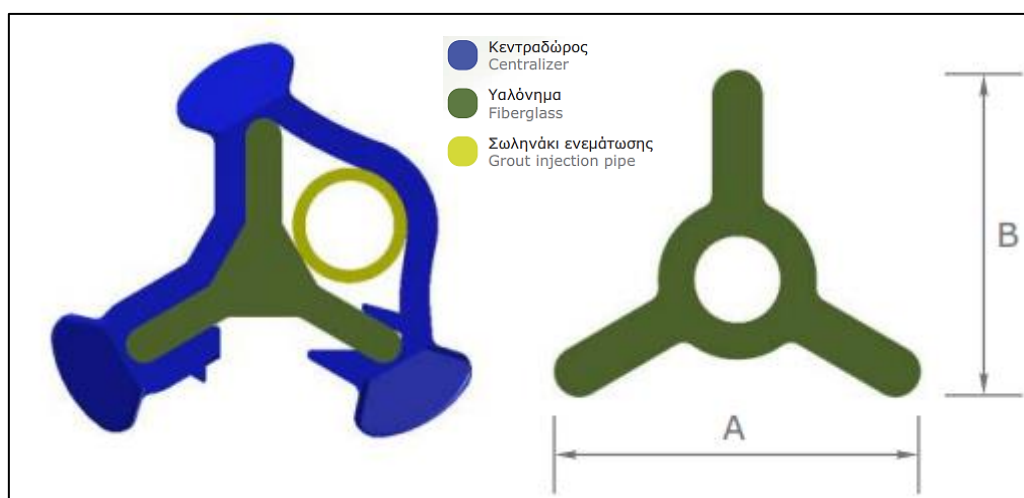
Τα παραπάνω δεδομένα του Πίνακα 5.8 μπορούν να αποτυπωθούν γραφικά πάνω στην καμπύλη της εξώθησης του μετώπου (Ω_F) και του αδιάστατου συντελεστή εδάφους (Λ_F), όπως περιγράφεται στην διδακτορική διατριβή του Δ. Γεωργίου (2021). Το εν λόγω γράφημα αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.1. Σε αυτό παρατηρείται ότι απουσιάζουν οι τιμές « Ω_F » για τον Τύπο 2 των οφιολίθων, καθώς αυτές λαμβάνουν πολύ χαμηλές τιμές,



Σχήμα 5.1. Καμπύλη εξώθησης του μετώπου (Ω_F) και αδιάστατου συντελεστή εδάφους (Λ_F) για ανυποστήρικτο μέτωπο κάθε τύπου οφιολίθων.

οπότε και εντάσσονται εκτός της κλίμακας του γραφήματος. Η απουσία των εν λόγω τιμών δεν επηρεάζει με κάποιον τρόπο την συνέχεια της ανάλυσης.

Για να αντιμετωπιστεί η ενδεχόμενη αστοχία του μετώπου των σηράγγων πρέπει να αυξηθεί η τιμή του αδιάστατου συντελεστή εδάφους (Λ_F). Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη κάποιου μέσου υποστήριξης του μετώπου των σηράγγων. Στην προκειμένη περίπτωση εφαρμόζονται τα αγκύρια μετώπου fiberglass. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται αγκύρια μετώπου ράβδων διατομής τύπου Υ, όπως αποτυπώνονται στην Εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9. Αγκύρια μετώπου διατομής Υ. (ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε., 2022)

Θέτοντας τον κάρναβο των αγκυρίων και επιλέγοντας τις κατάλληλες κατηγορίες αγκυρίων για κάθε περίπτωση, υπολογίζεται η μείωση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής ($\Delta\Omega_F$). Ακολούθως υπολογίζεται η νέα εξώθηση του μετώπου ($\Omega_{F,FG}$) και στη συνέχεια, ο νέος αδιάστατος συντελεστής εδάφους ($\Lambda_{F,FG}$), καθώς και ο νέος συντελεστής αποτόνωσης του μετώπου (λ_{FG}). Τα αποτελέσματα των ανωτέρων συντελεστών αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.9.

Αγκύρια Μετώπου											
Τύπος Οφιολίθων	Κάρναβος	A_{bolt} (m ²)	n	$F_{u,FG}$ (kN)	$\Delta\Omega_F$	$\Delta\Omega_F / \Omega_{F0}$	$\Omega_{F(FG)}$	Λ_{FG}	λ_{FG}	E_{FG} (MPa)	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ
Τύπος 4 (150m)	1	1	80	600	1,99	0,83	0,42	2,75	0,44	11,14	ΕΥΣΤΑΘΕΣ
Τύπος 4 (300m)	1	1	80	550	3,61	0,87	0,52	2,27	0,49	9,49	ΕΥΣΤΑΘΕΣ

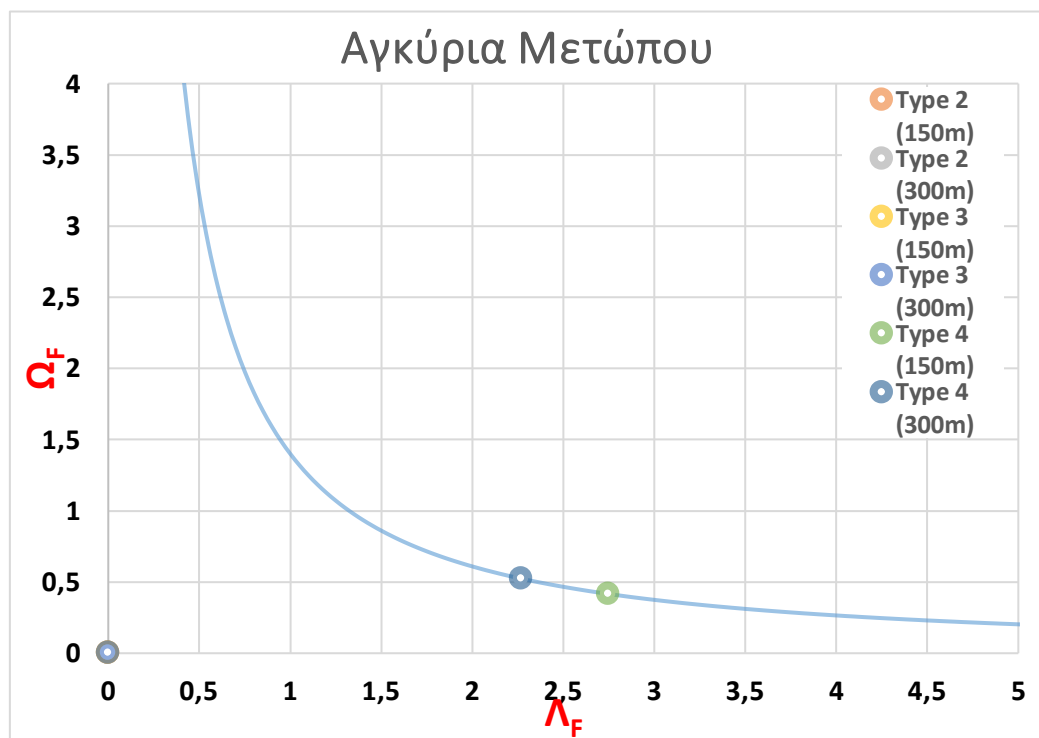
Πίνακας 5.9. Υπολογισμός ευστάθειας μετώπου με την χρήση αγκυρίων fiberglass για τον Τύπο 4 οφιολίθων.

Αντίστοιχα με το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής, μπορεί να δημιουργηθεί η αντίστοιχη καμπύλη της εξώθησης του μετώπου (Ω_F) και του αδιάστατου συντελεστή

εδάφους (Λ_F) και για το υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής με την χρήση των αγκυριών fiberglass. Το εν λόγω διάγραμμα αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.2.

Στο Σχήμα 5.2 οι τιμές των Τύπων 2 και 3 οφιολίθων βρίσκονται στο μηδέν (0), καθώς τα μέτωπα εκσκαφής τους παραμένουν σταθερά, οπότε και δεν πραγματοποιείται η εφαρμογή περαιτέρω μέτρων υποστήριξης μετώπου.

Στον Πίνακα 5.9 ακόμα υπάρχει η στήλη του νέου μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή του μετώπου (E_{FG}). Το συγκεκριμένο μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται με βάση τον νέο συντελεστή αποτόνωσης του μετώπου μετά την υποστήριξη του με τα αγκύρια fiberglass. Το νέο αυξημένο μέτρο ελαστικότητας (E_{FG}) αντικαταστεί το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας του ανοίγματος πριν την ενίσχυση του μετώπου και χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα RS2, ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες της υποστήριξης του μετώπου.



Σχήμα 5.2. Καμπύλη εξώθησης του μετώπου (Ω_F) και αδιάστατου συντελεστή εδάφους (Λ_F) για ανυποστηρίκτο μέτωπο για τον Τύπο 4 οφιολίθων.

5.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

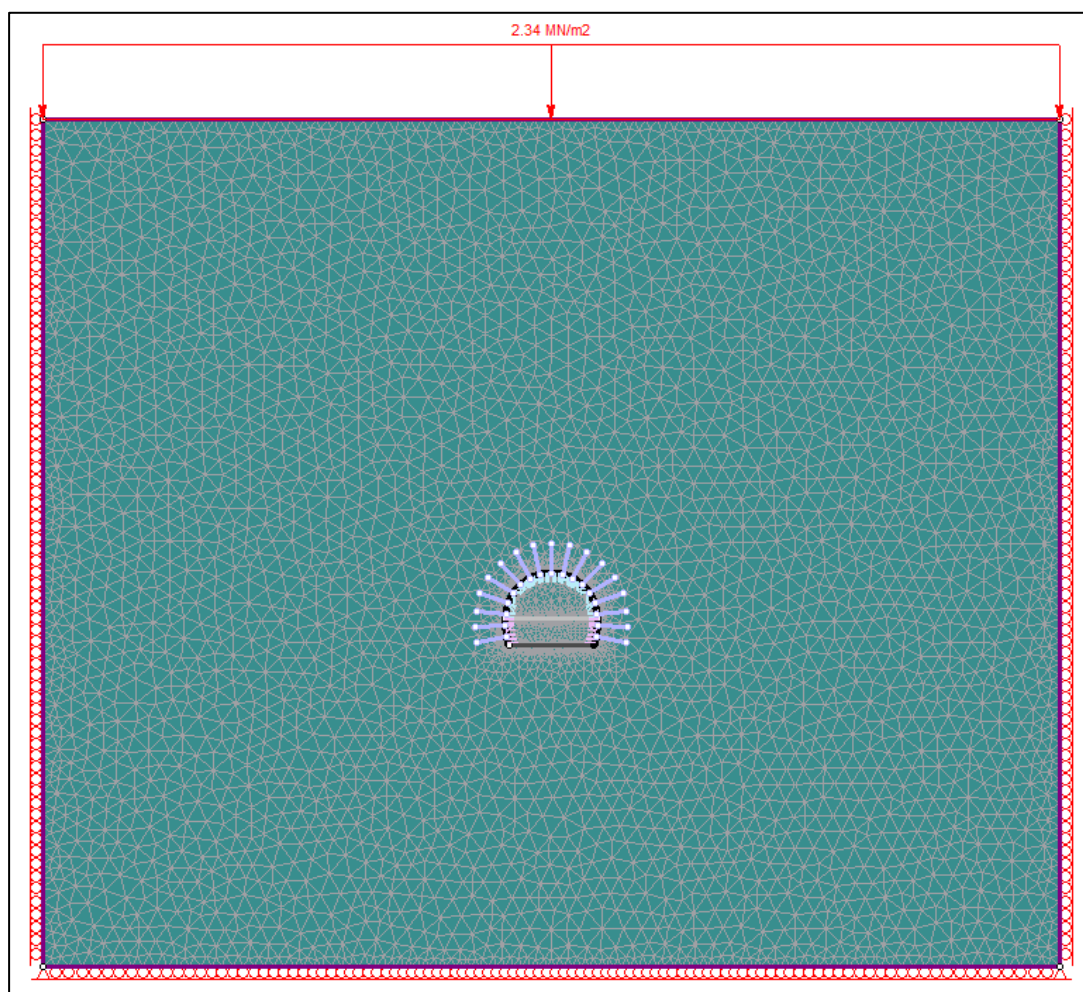
5.3.1 Για Τον Τύπο 2 Οφιολίθων

5.3.1.1 Για Υπερκείμενα $H = 150m$

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για τον συγκεκριμένο τύπο οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.10. Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.10.

Σημείο	Άξονας X	Άξονας Y
1	68	68
2	68	-45
3	-68	-45
4	-68	68

Πίνακας 5.10. Συντεταγμένες Προσομοιώματος Τύπου 2 οφιολίθων.



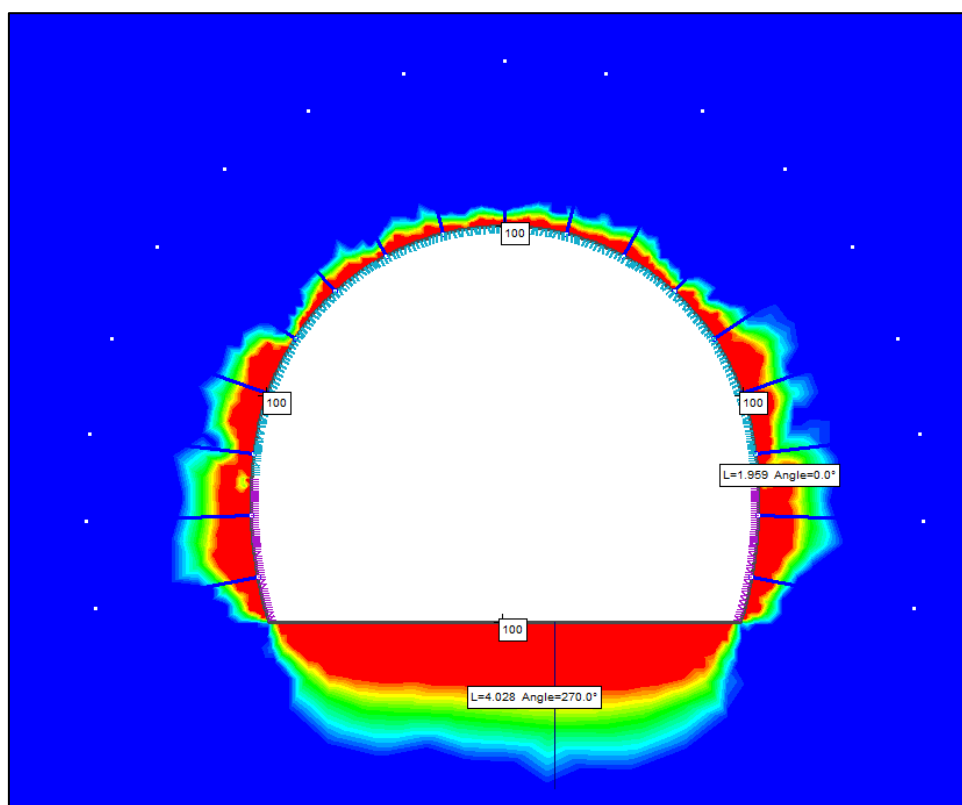
Εικόνα 5.10. Προσομοίωμα Τύπου 2 οφιολίθων με $H=150m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.11, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 2 (150m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
11,32	4,97	1,57	-0,52	-3	0,42	0,33	5744,38	1532,07

Πίνακας 5.11. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 2 οφιολίθων για $H = 150m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 2 m στην στέψη και στις παρειές και περίπου 4 m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.11.



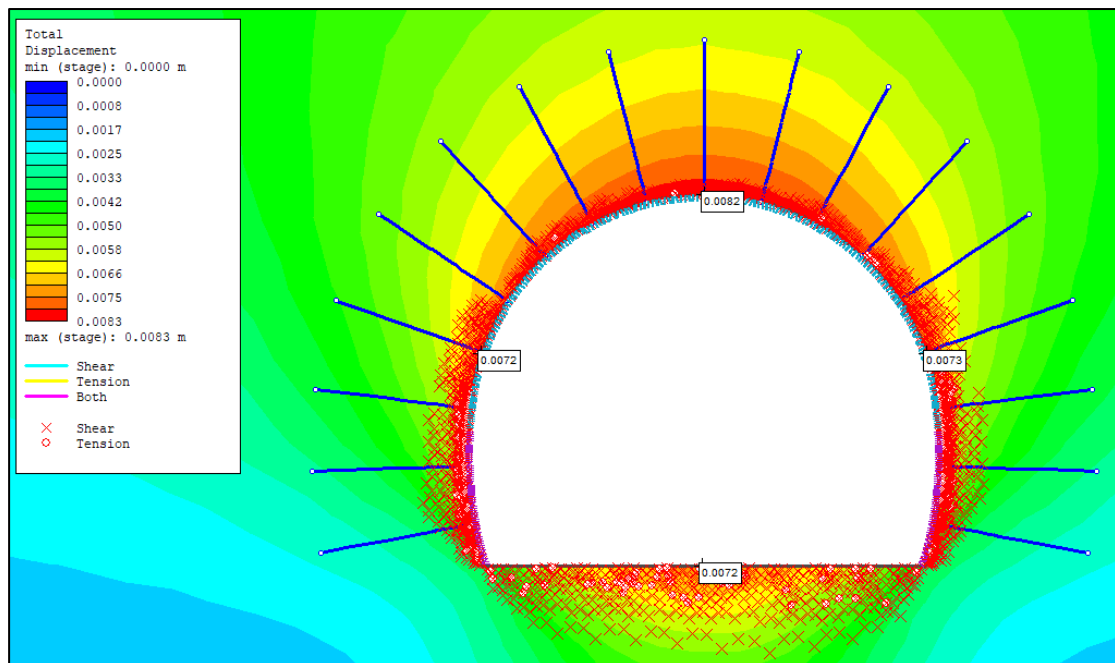
Εικόνα 5.11. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 2 οφιολίθων για $H = 150m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.12 και στην Εικόνα 5.12 και μπορούν να χαρακτηριστούν ως αμελητέες.

Τύπος 2 (150m)

Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	0,83
Δεξιά Παρειά	0,73
Αριστερή Παρειά	0,72
Δάπεδο	0,72

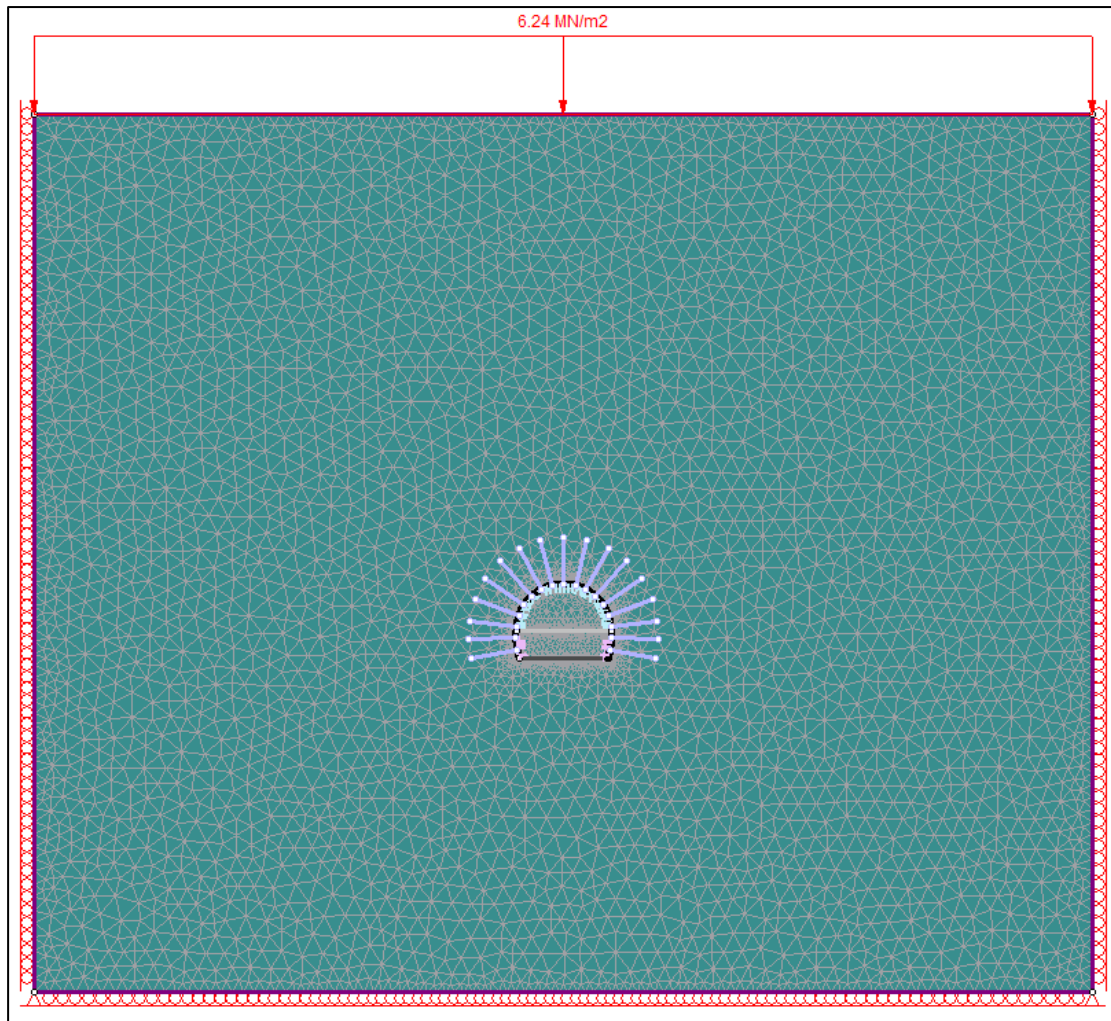
Πίνακας 5.12. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 2 για $H = 150m$.



Εικόνα 5.12. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής και σημεία αστοχίας της βραχώμαζας του Τύπου 2 οφιολίθων για $H = 150m$.

5.3.1.2 Για Υπερκείμενα $H = 300 m$

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.15. Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.10 της προηγούμενης υποπαραγράφου. Αυτά ταυτίζονται καθώς η διατομή της σήραγγας κατέχει την ίδια διάμετρο για τον συγκεκριμένο τύπο οφιολίθων.



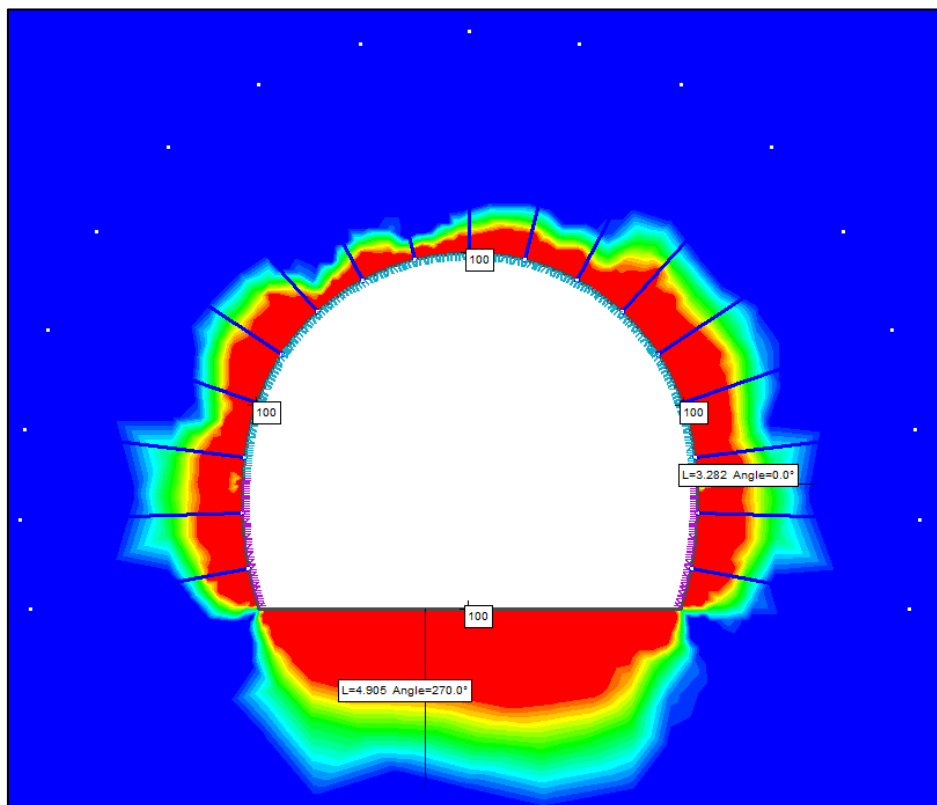
Εικόνα 5.13. Προσομοίωμα Τύπου 2 οφιολίθων με $H=300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.13, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 2 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
11,32	4,97	3,14	-0,54	-3	0,43	0,33	5744,38	1532,7

Πίνακας 5.13. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 2 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 3,5m στις παρειές και περίπου 5m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.16.

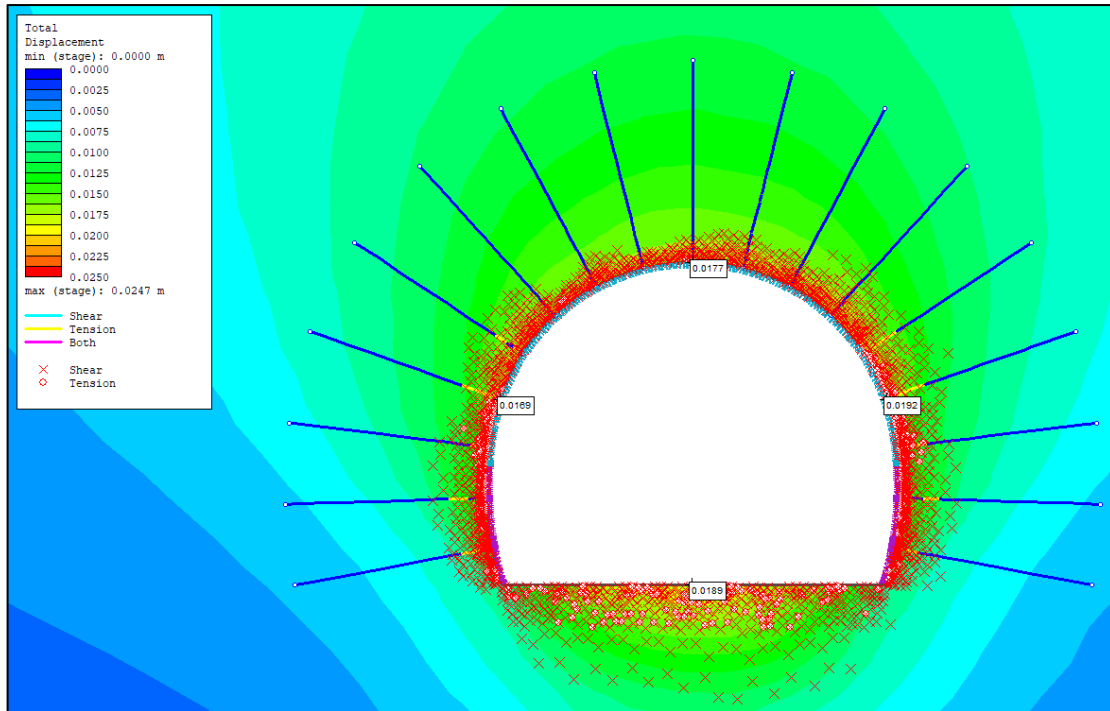


Εικόνα 5.14. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 2 οφιολίθων για $H = 300m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.14 και στην Εικόνα 5.17 και μπορούν να χαρακτηριστούν ως αμελητέες.

Τύπος 2 (300m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	1,77
Δεξιά Παρειά	1,92
Αριστερή Παρειά	1,69
Δάπεδο	1,89

Πίνακας 5.14. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 2 για $H = 300m$.



Εικόνα 5.15. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής και σημεία αστοχίας της βραχόμαζας του Τύπου 2 οφιολίθων για $H = 300m$.

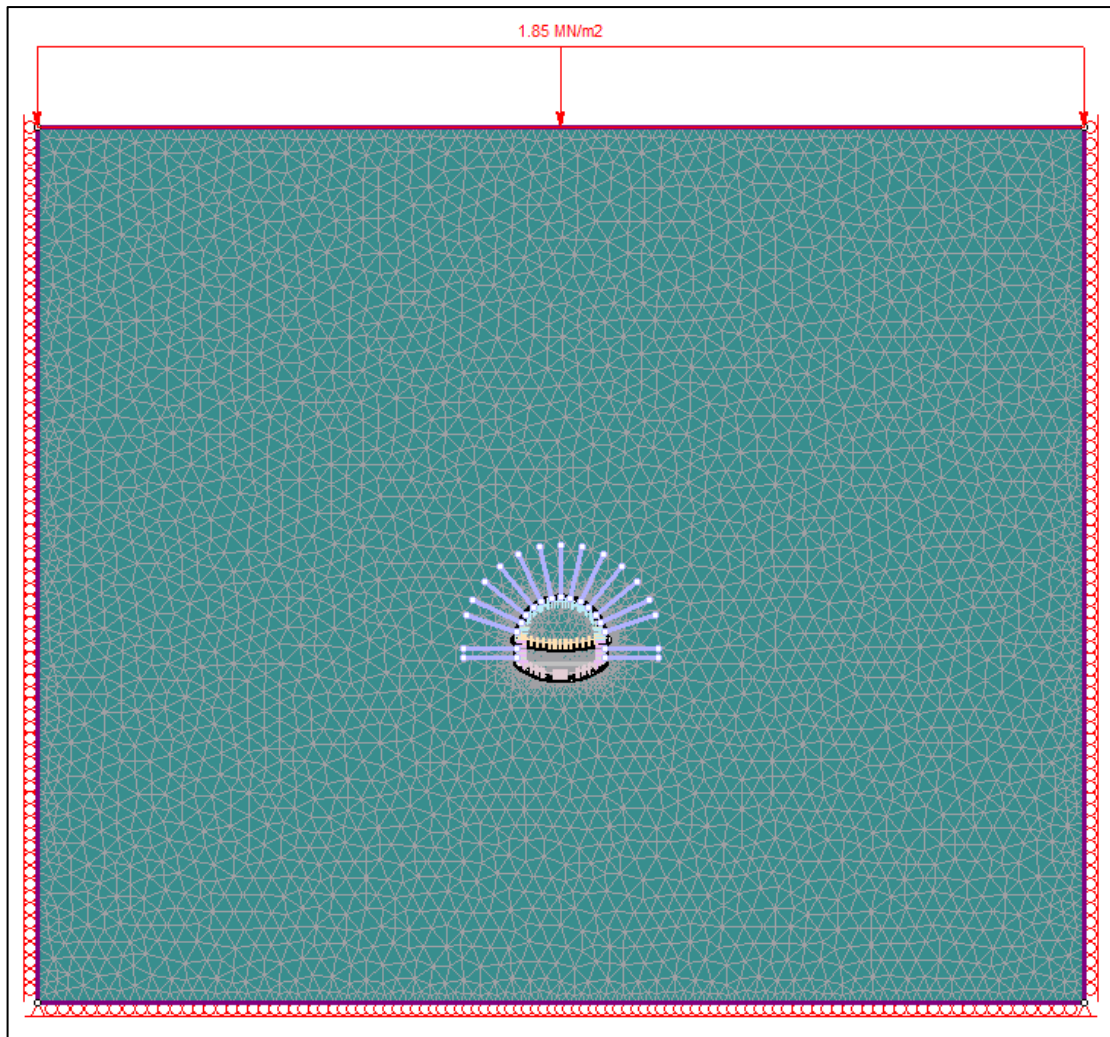
5.3.2 Για Τον Τύπο 3 Οφιολίθων

5.3.2.1 Για Υπερκείμενα $H = 150m$

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για τον συγκεκριμένο τύπο οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.20. Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15.

Σημείο	Άξονας X	Άξονας Y
1	79	79
2	79	-53
3	-79	-53
4	-79	79

Πίνακας 5.15. Συντεταγμένες Προσομοιώματος Τύπου 3 οφιολίθων



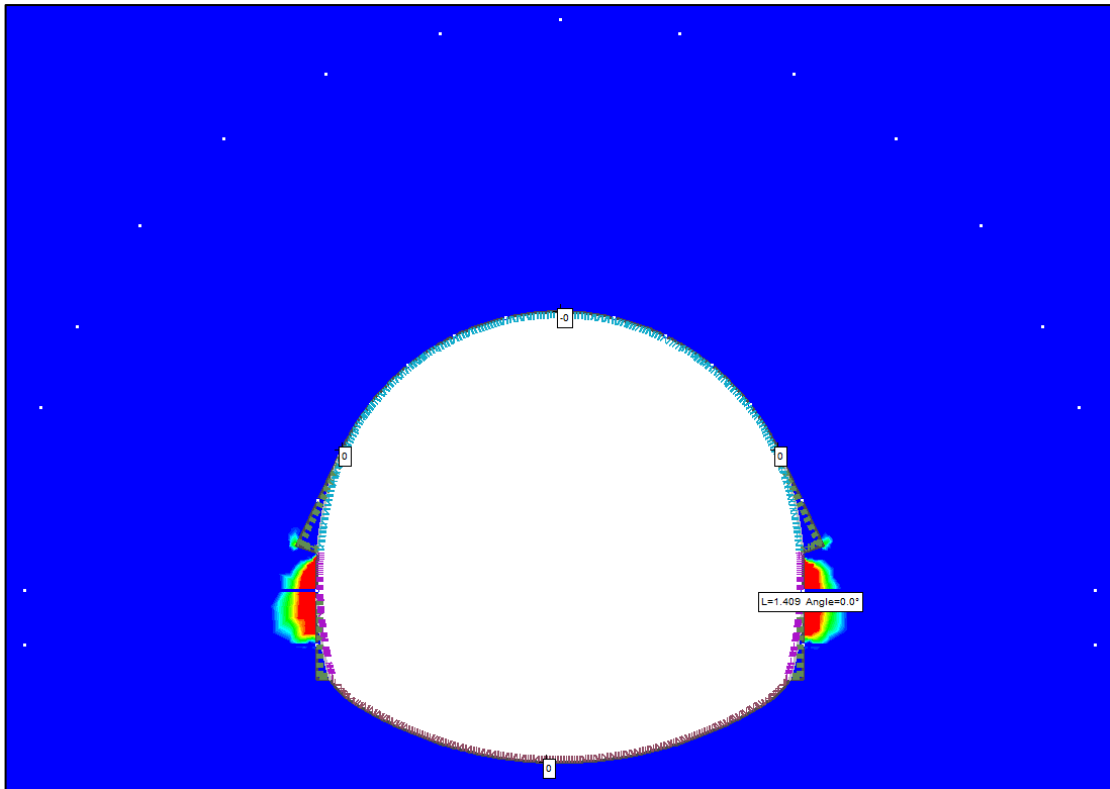
Εικόνα 5.16. Προσομοίωμα Τύπου 3 οφιολίθων με $H=150m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.16, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (150m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	4,29	-0,21	-1,5	0,36	0,33	680,9	209,23

Πίνακας 5.16. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 150m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 1,5m στις παρειές, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.17.

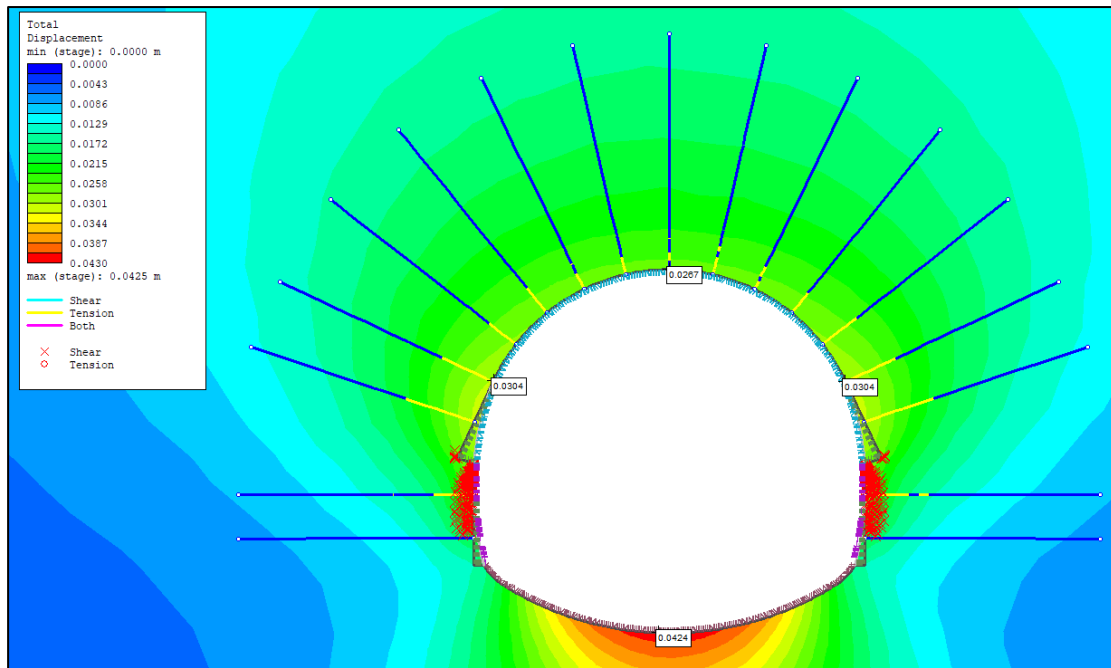


Εικόνα 5.17. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 150m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.17 και στην Εικόνα 5.18.

Τύπος 3 (150m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	2,67
Δεξιά Παρειά	3,04
Αριστερή Παρειά	3,04
Δάπεδο	4,24

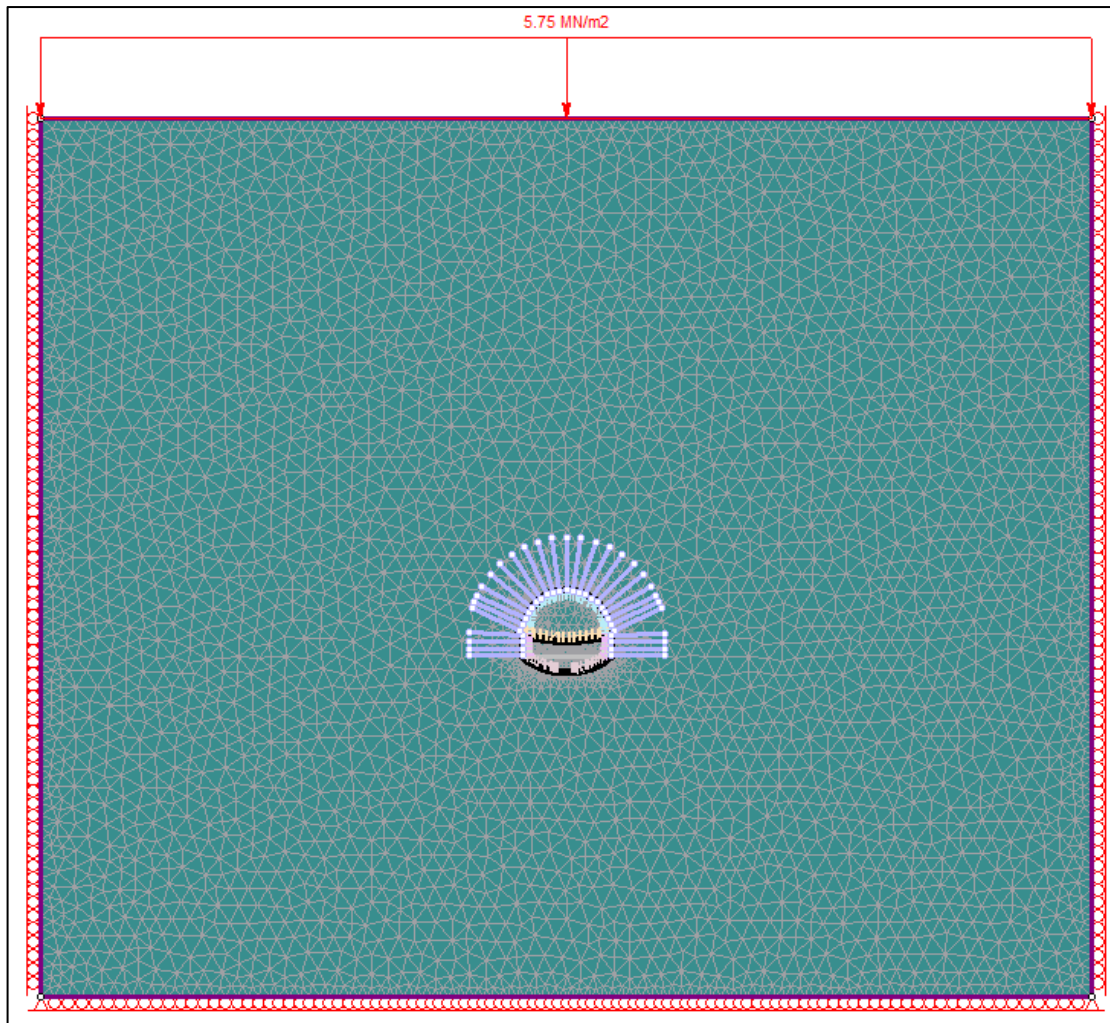
Πίνακας 5.17. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 3 για $H = 150m$.



Εικόνα 5.18. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των αγκυρίων βράχου του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 150m$.

5.3.2.2 Για Υπερκείμενα $H = 300m$

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.19. Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15 της προηγούμενης υποπαραγράφου. Αυτά ταυτίζονται καθώς η διατομή της σήραγγας κατέχει την ίδια διάμετρο για τον συγκεκριμένο τύπο οφιολίθων.



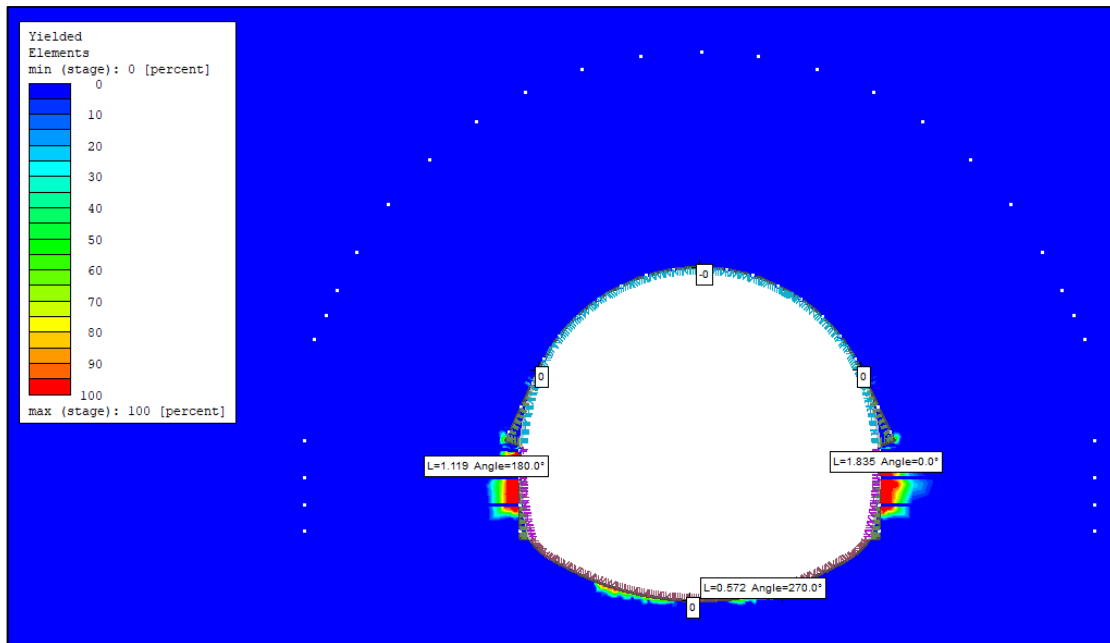
Εικόνα 5.19. Προσομοίωμα Τύπου 3 οφιολίθων με $H=300m$

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.18, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	8,59	-0,23	-1,5	0,43	0,33	680,9	169,25

Πίνακας 5.18. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 1,8m στις παρειές και περίπου 0,3m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.20.

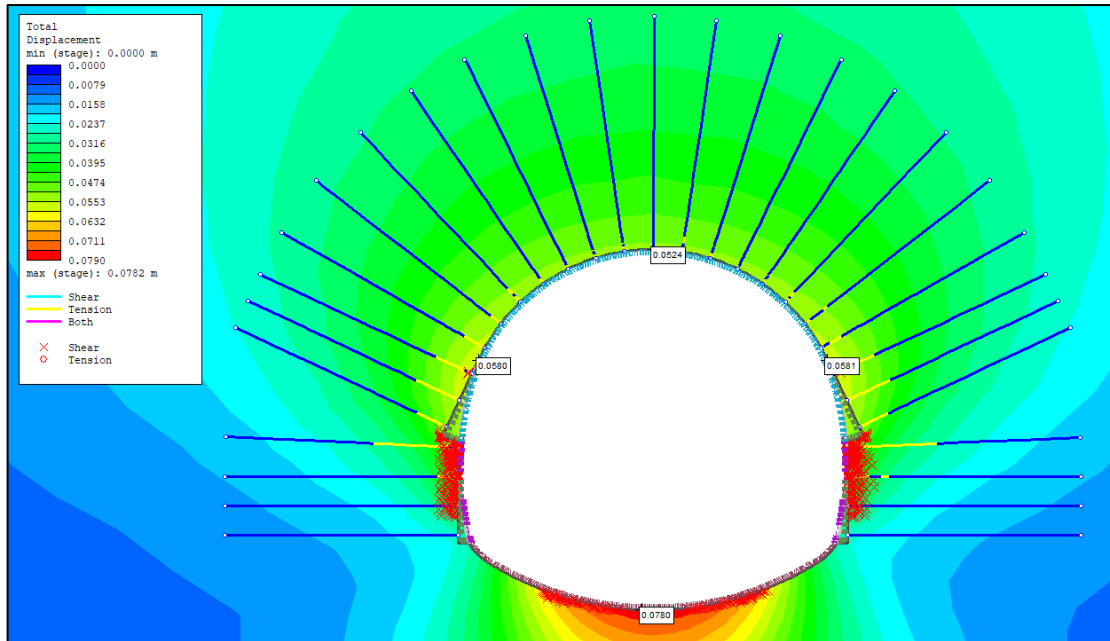


Εικόνα 5.20. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.19 και στην Εικόνα 5.21. Γενικώς, οι εν λόγω συγκλίσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι θα έχουν μικρή επίδραση στην άμεση υποστήριξη και στο άνοιγμα.

Τύπος 3 (300m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	5,24
Δεξιά Παρειά	5,81
Αριστερή Παρειά	5,80
Δάπεδο	7,80

Πίνακας 5.19. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 3 για $H = 300m$.

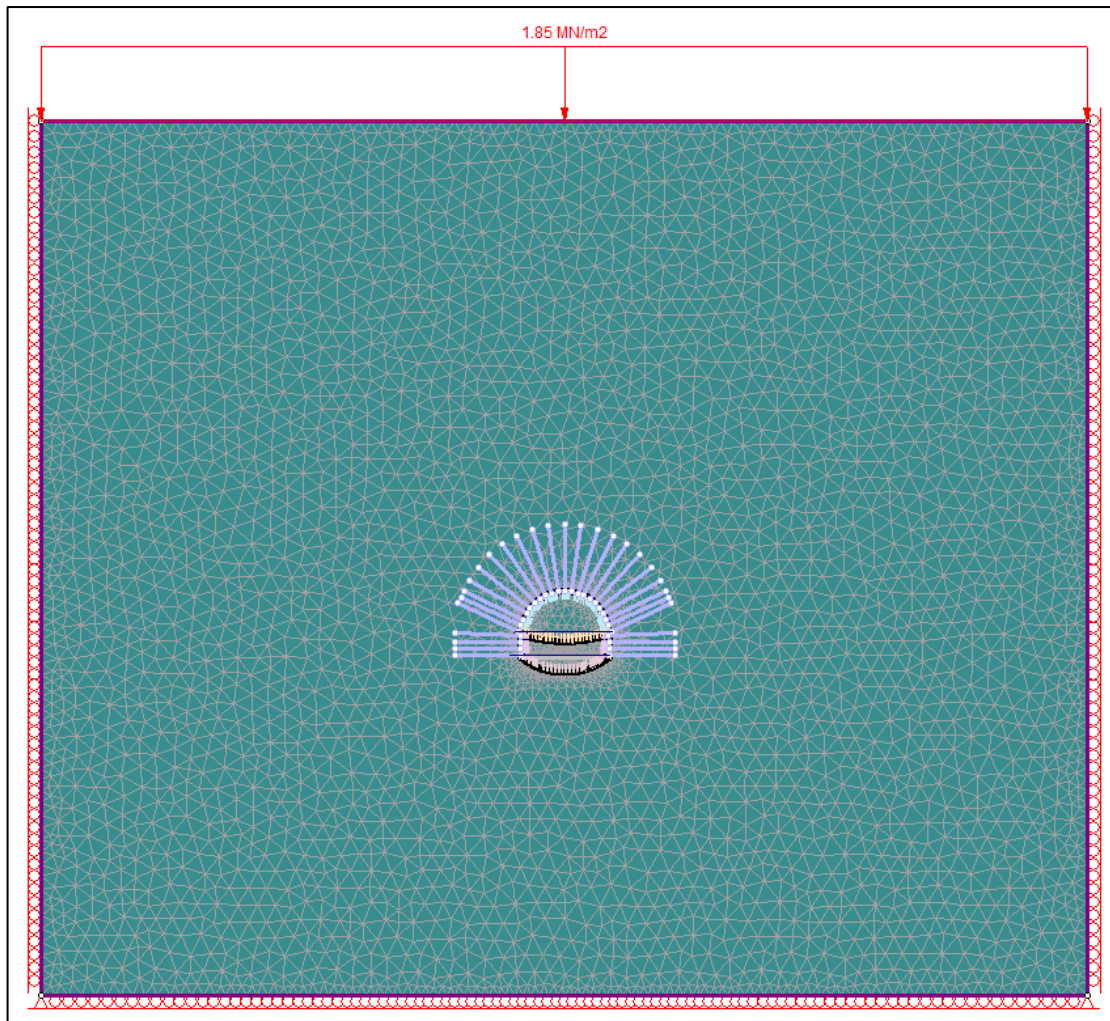


Εικόνα 5.21. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των ακριβίων βράχων του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

5.3.3 Για Τον Τύπο 4 Οφιολίθων

5.3.3.1 Για Υπερκείμενα $H = 150m$

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για τον συγκεκριμένο τύπο οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.22. Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15 της υποπαραγράφου 5.3.2.1. Αυτά ταυτίζονται καθώς οι διάμετροι των σηράγγων και στις 2 περιπτώσεις είναι ταυτόσημες.



Εικόνα 5.22. Προσομοίωμα Τύπου 4 οφιολίθων με $H=150m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.20, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 4 (150m)										
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)	λ_{FG}	E_{FG} (MPa)
13,17	0,36	21,66	-0,16	-1	0,83	0,33	45,6	2,21	0,44	11,14

Πίνακας 5.20. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 150m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 0,5m στις παρειές, ενώ δεν εμφανίζεται πλαστική ζώνη σε άλλο σημείο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.23.

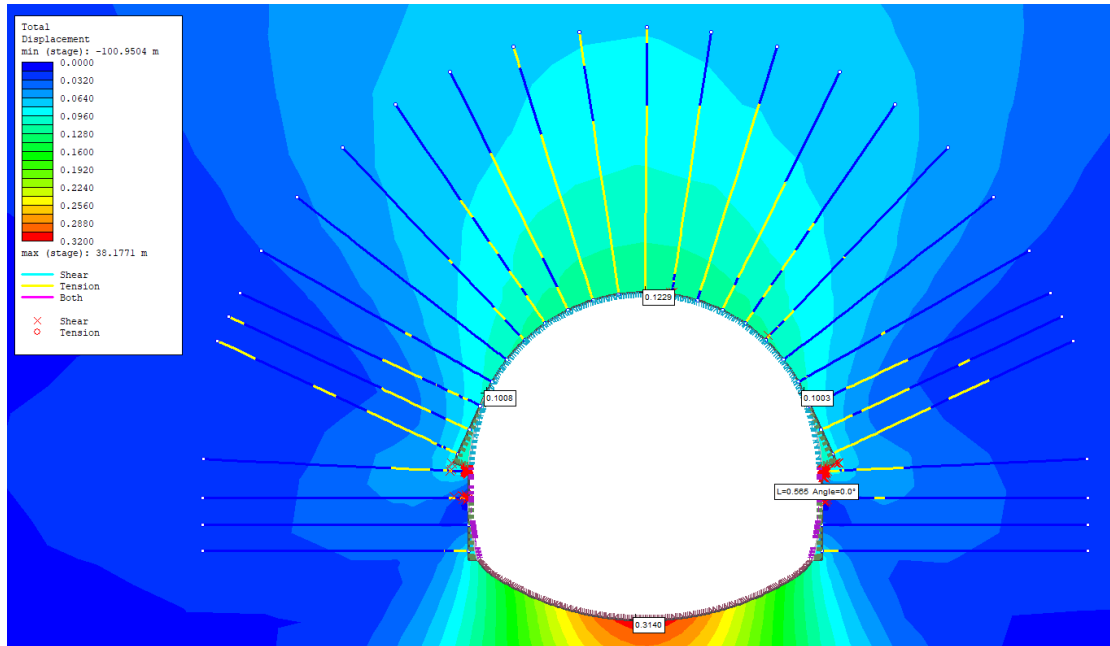


Εικόνα 5.23. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 150m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.21 και στην Εικόνα 5.24. Γενικώς, οι εν λόγω συγκλίσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι θα έχουν αρκετή επίδραση στην άμεση υποστήριξη και στο άνοιγμα. Σημειώνεται πως οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν την ενίσχυση του μετώπου της σήραγγας, συνεπώς χρησιμοποιήθηκε και το αντίστοιχο E_{FG} .

Τύπος 4 (150m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	12,29
Δεξιά Παρειά	10,03
Αριστερή Παρειά	10,09
Δάπεδο	31,40

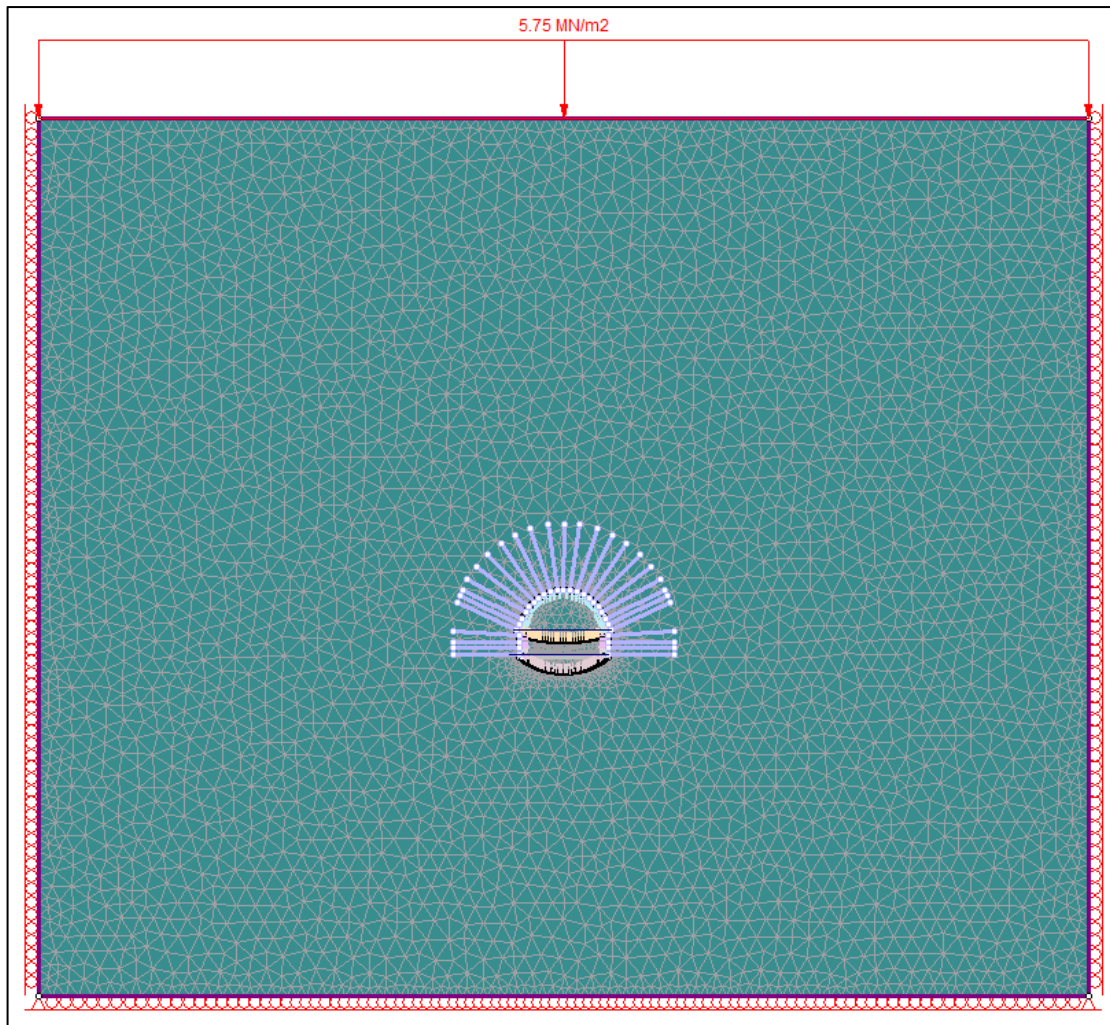
Πίνακας 5.21. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 4 για $H = 150m$.



Εικόνα 5.24. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των ακριβίων βράχου του Τύπου 4 οφιολίθων για $H = 150m$.

5.3.3.2 Για Υπερκείμενα $H = 300m$

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.25. Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15 της υποπαραγράφου 5.3.2.1. Αυτά ταυτίζονται καθώς η διατομή της σήραγγας κατέχει την ίδια διάμετρο και για τον συγκεκριμένο τύπο οφιολίθων.



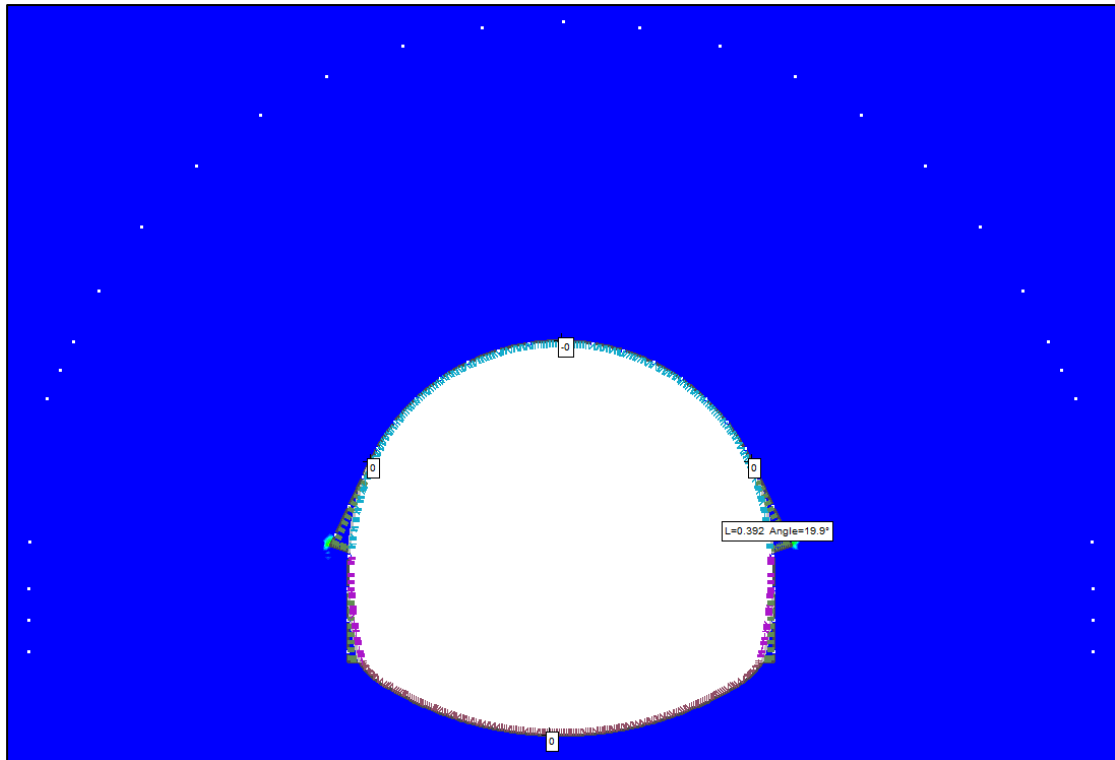
Εικόνα 5.25. Προσομοίωμα Τύπου 4 οφιολίθων με $H=300m$

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.22, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 4 (300m)										
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)	λ_{FG}	E_{FG} (MPa)
13,17	0,36	43,31	-0,11	-1	0,91	0,33	45,6	1,08	0,49	9,49

Πίνακας 5.22. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 0,4 m στις παρειές, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.26.

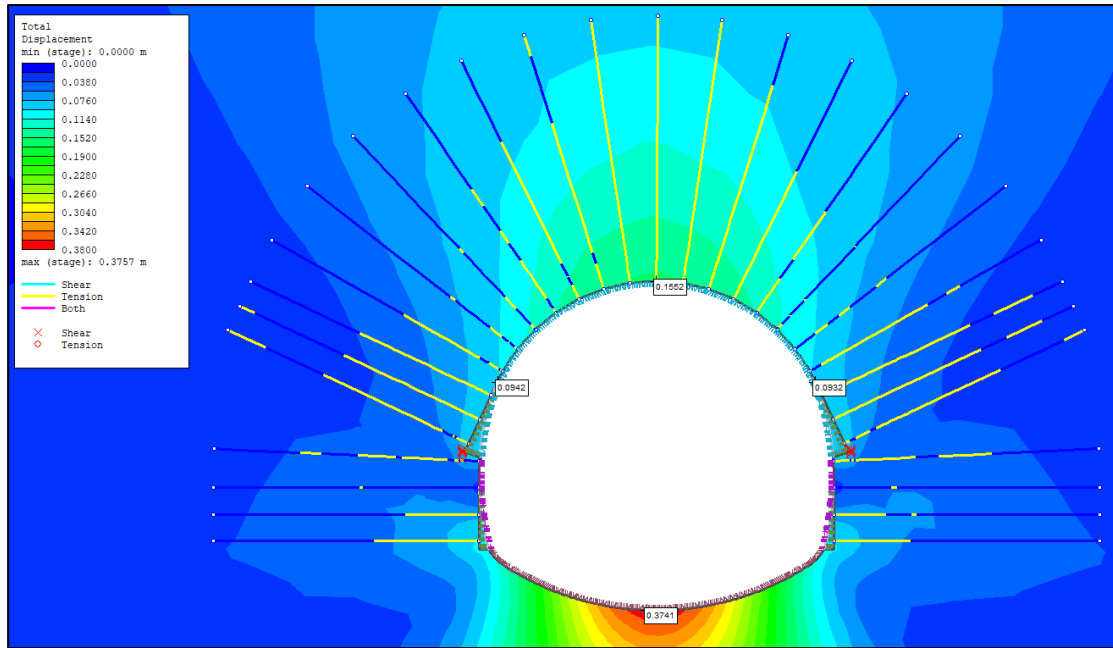


Εικόνα 5.26. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 300m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.23 και στην Εικόνα 5.27. Γενικώς, οι εν λόγω συγκλίσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι θα έχουν μεγάλη επίδραση στην άμεση υποστήριξη και στο άνοιγμα. Σημειώνεται πως οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν την ενίσχυση του μετώπου της σήραγγας, συνεπώς χρησιμοποιήθηκε και το αντίστοιχο E_{FG} .

Τύπος 4 (300m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	15,52
Δεξιά Παρειά	9,32
Αριστερή Παρειά	9,32
Δάπεδο	37,41

Πίνακας 5.23. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 4 για $H = 300m$.



Εικόνα 5.27. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των ακυρίων βράχου του Τύπου 4 οφιολίθων για $H = 300\text{m}$.

5.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Προσομοιώσεων

5.4.1 Για Τον Τύπο 2 Οφιολίθων

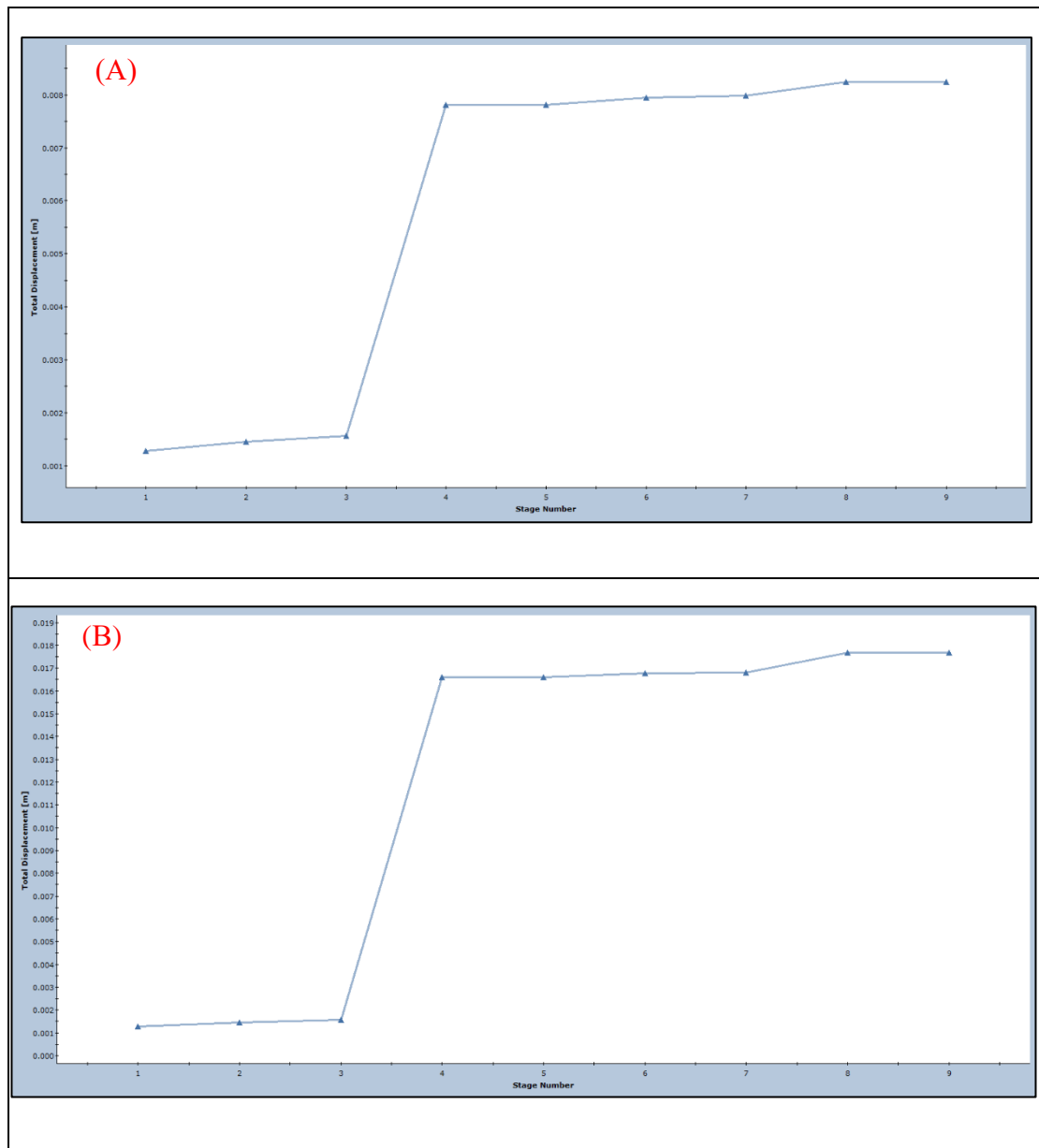
Ο συγκεκριμένος τύπος βραχώμαζας κατέχει καλά μηχανικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, οπότε και δεν αναμενόταν κάποια εκτεταμένη αστοχία κατά την διάνοιξη. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο για υπερκείμενα $H = 150m$, όσο και για $H = 300m$ ([Παράγραφος 5.3.1](#)) με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί με ασφάλεια το συμπέρασμα πως σε γενικές γραμμές κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχώμαζας δεν αναμένεται να συμβεί κάποια εκτεταμένη αστοχία, ούτε στις παρειές, ούτε στο μέτωπο, παρά μόνο ίσως, υπό κατάλληλες συνθήκες, να υπάρξει κάποια βαρυστική μεμονωμένη αστοχία, τύπου ολίσθησης σφήνας.

Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Τύπος 2 (150m)	Τύπος 2 (300m)
Στέψη	0,83	1,77
Δεξιά Παρειά	0,73	1,92
Αριστερή Παρειά	0,72	1,69
Δάπεδο	0,72	1,89

Πίνακας 5.24. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 2 για $H = 150m$ και $H = 300m$.

Το παραπάνω συμπέρασμα μπορεί να παρατηρηθεί στον Πίνακα 5.24 και στην Εικόνα 5.32, στα οποία αποτυπώνονται οι τελικές συνολικές συγκλίσεις σηράγγων στα δύο εξεταζόμενα υπερκείμενα. Αυτές μπορούν να θεωρηθούν ότι πρακτικά δεν θα έχουν καμία επίδραση στο άνοιγμα, αφού λαμβάνουν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση των υπερκειμένων με $H = 150m$ δεν διαρρέει κανένα αγκύριο, ενώ για $H = 300m$ παρατηρείται η διαρροή σε εφελκυσμό μερικών αγκυρίων.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.28 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχώμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής δεν αναπτύσσονται περαιτέρω συγκλίσεις.



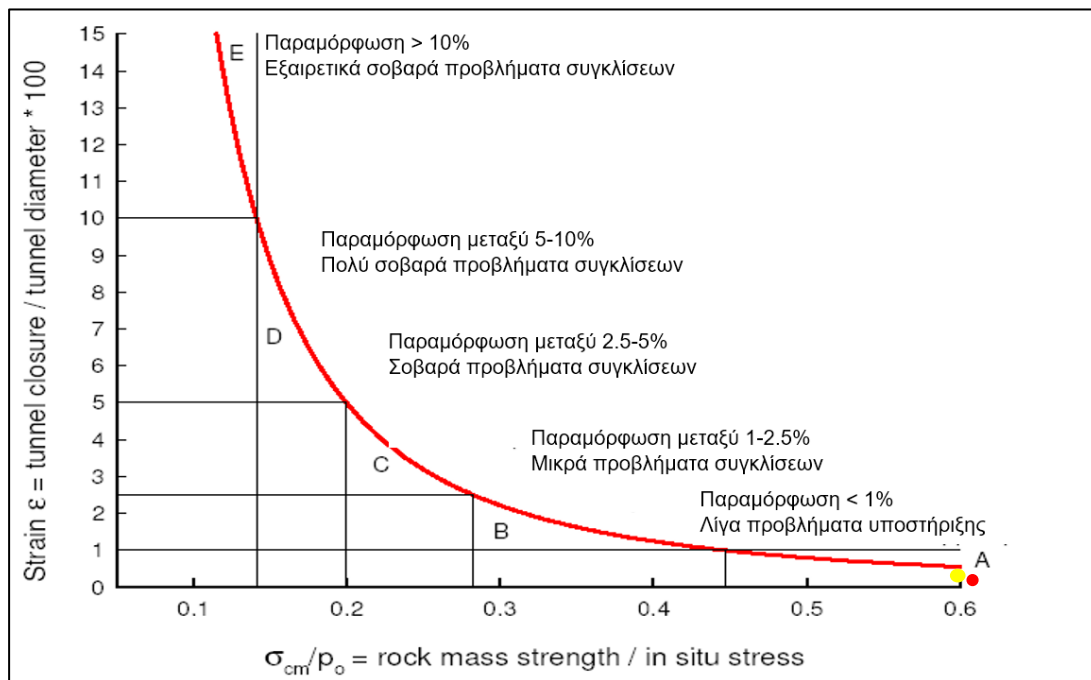
Εικόνα 5.28. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις του Τύπου 2 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.29, θέτοντας όπου «κλείσιμο σήραγγας» την μέση τιμή των ανωτέρω συγκλίσεων. Ο Πίνακας 5.25 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε περίπτωσης υπερκειμένων

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_0
Τύπος 2 (150m)	0,0072	11,32	0,064	1,28

Τύπος 2 (300m)	0,018		0,16	0,64
-------------------	-------	--	------	------

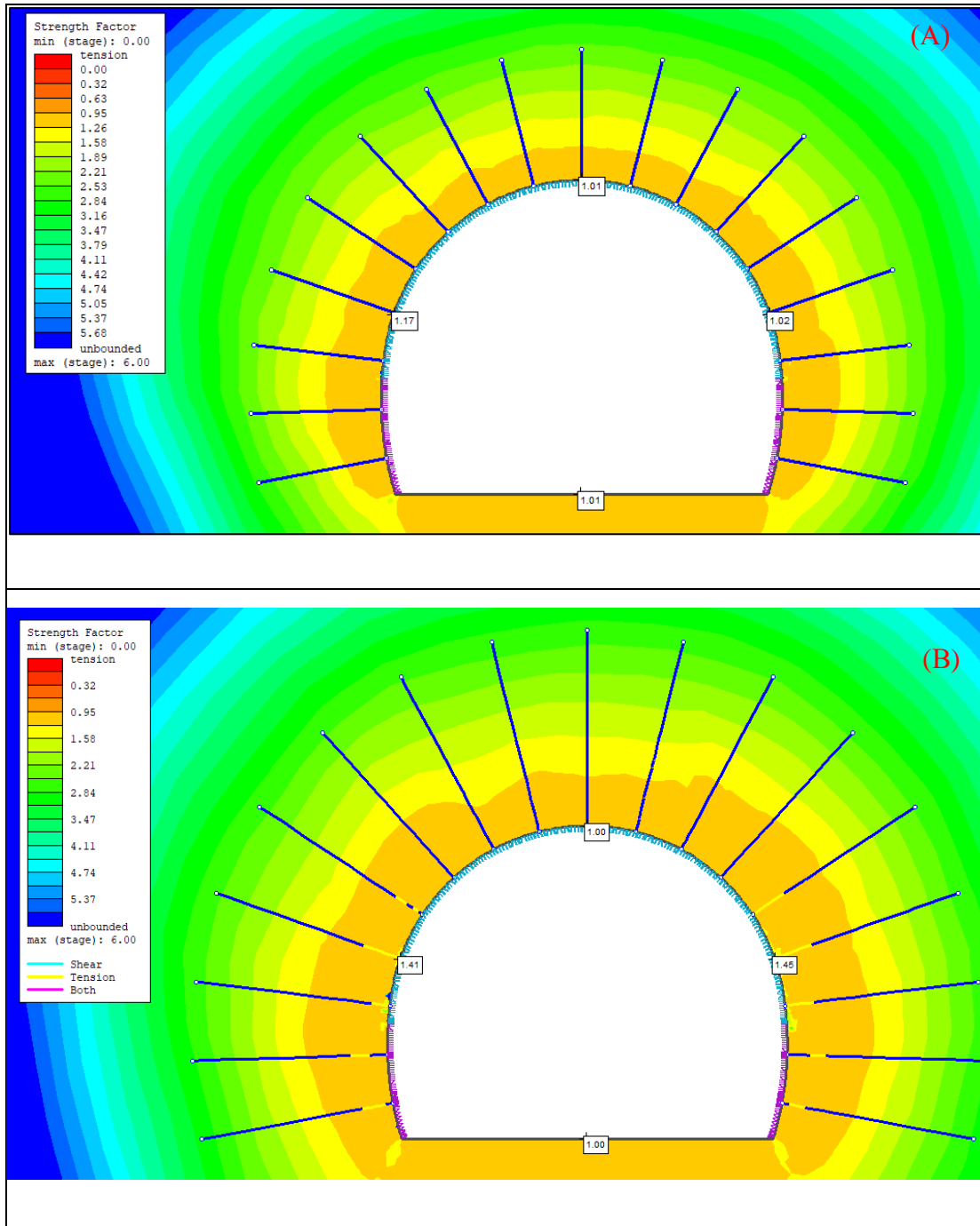
Πίνακας 5.25. Δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 2 οφιολίθων.



Εικόνα 5.29. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)

Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.29 συμπεραίνεται πως και οι δύο σήραγγες βρίσκονται στην περιοχή «Α», όπου η παραμόρφωση είναι <1%, οπότε και δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα υποστήριξης.

Τέλος, στην Εικόνα 5.30 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος της εκάστοτε περίπτωσης, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι οριακά άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας.



Εικόνα 5.30. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοίξεις στον Τύπο 2 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

5.4.2 Για Τον Τύπο 3 Οφιολίθων

Ο συγκεκριμένος τύπος βραχώμαζας κατέχει γενικά μέτρια προς άσχημα μηχανικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, οπότε και αναμένεται κάποια αστοχία ή και αυξημένες συγκλίσεις κατά την διάνοιξη. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο για υπερκείμενα $H = 150m$, όσο και για $H = 300m$ (Παράγραφος 5.3.2) με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην Παράγραφο 5.2.3, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως σε γενικές γραμμές κατά την

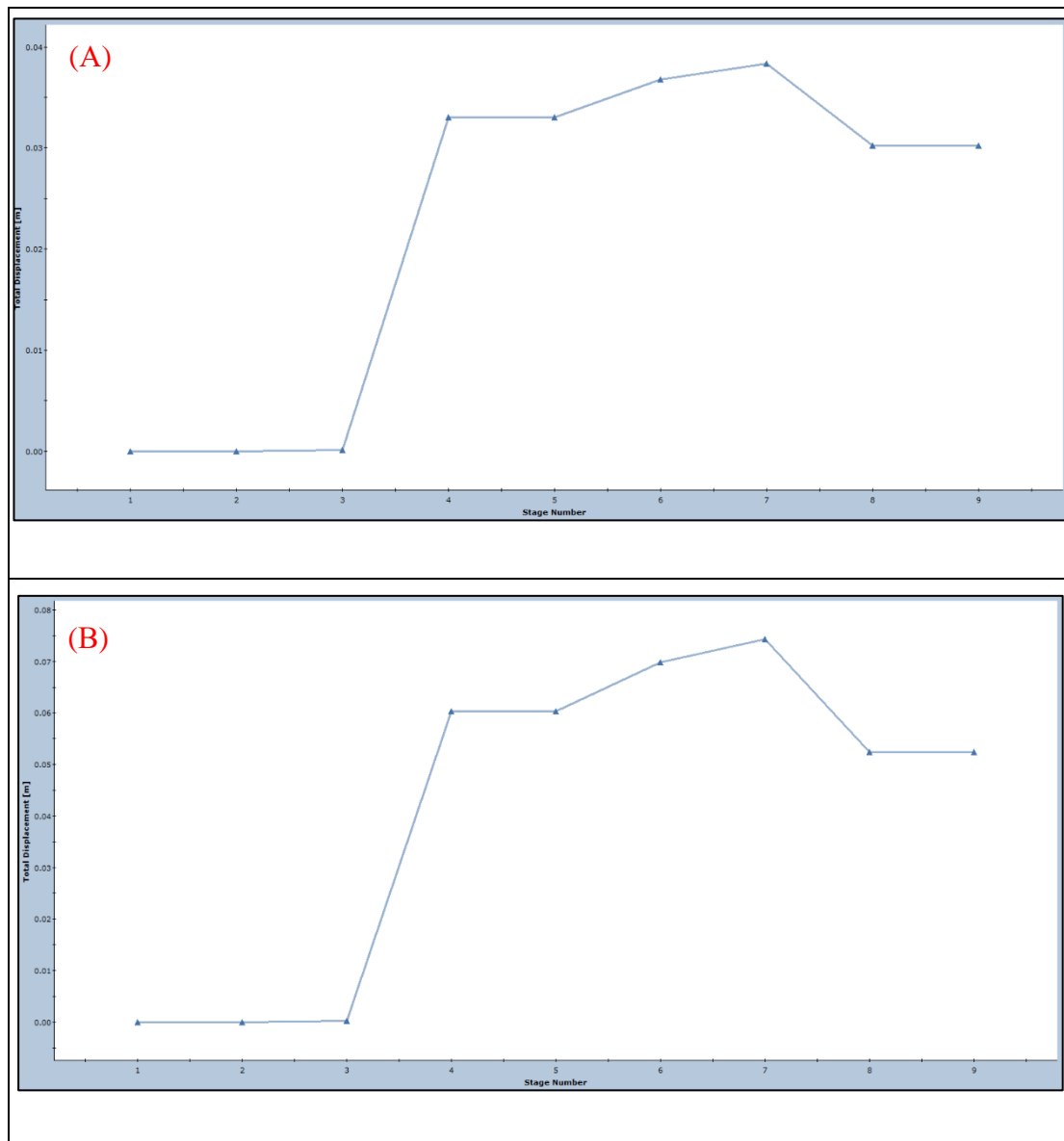
διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχομάζας αναμένονται σχετικά μέτριες συγκλίσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας στις παρειές και στο μέτωπο. Όμως σύμφωνα με την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), υπολογίστηκε ότι το μέτωπο θα παραμείνει ευσταθές, οπότε και δεν απαιτείται κάποια περεταίρω ενίσχυση αυτού.

Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)
Στέψη	2,67	5,24
Δεξιά Παρειά	3,04	5,81
Αριστερή Παρειά	3,04	5,80
Δάπεδο	4,24	7,80

Πίνακας 5.26. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 3 για $H = 150m$ και $H = 300m$.

Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.26, στον οποίο παρατηρείται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των σηράγγων στα δύο εξεταζόμενα υπερκείμενα είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, οπότε και πρακτικά οι συγκλίσεις αυτές είναι ελεγχόμενες, δεδομένου και των εφαρμοσθέντων μέτρων υποστήριξης.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.31 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχομάζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως μια «ανακούφιση» των συγκλίσεων.



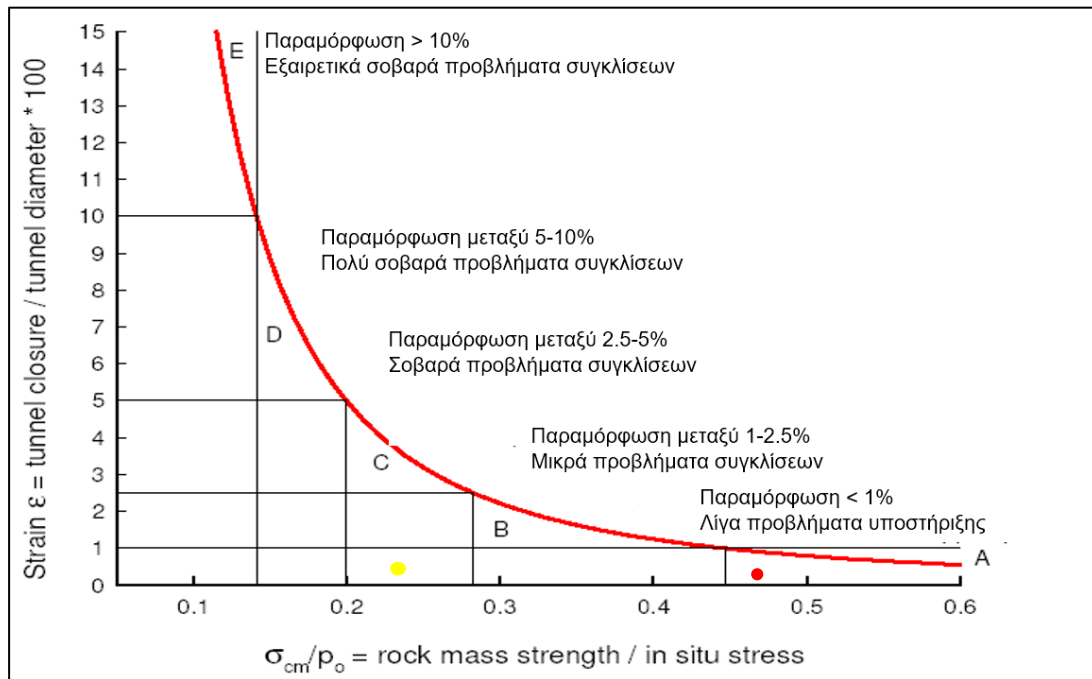
Εικόνα 5.31. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

Από τις Εικόνες 5.18 και 5.21 των Υποπαραγράφων [5.3.2.1](#) και [5.3.2.2](#), αντίστοιχα, παρατηρείται πως κάποια από τα αγκύρια διαρρέουν σε εφελκυσμό, αλλά παρολαυτά οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, το οποίο σημαίνει πως η επάρκεια της υποστήριξης και στις δύο περιπτώσεις είναι ικανοποιητική.

Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.32, θέτοντας όπου «κλείσιμο σήραγγας» την μέση τιμή των ανωτέρω συγκλίσεων. Ο Πίνακας 5.27 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε περίπτωσης υπερκειμένων.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Τύπος 3 (150m)	0,032	13,17	0,25	0,47
Τύπος 3 (300m)	0,062		0,47	0,23

Πίνακας 5.27. Δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 3 οφιολίθων.

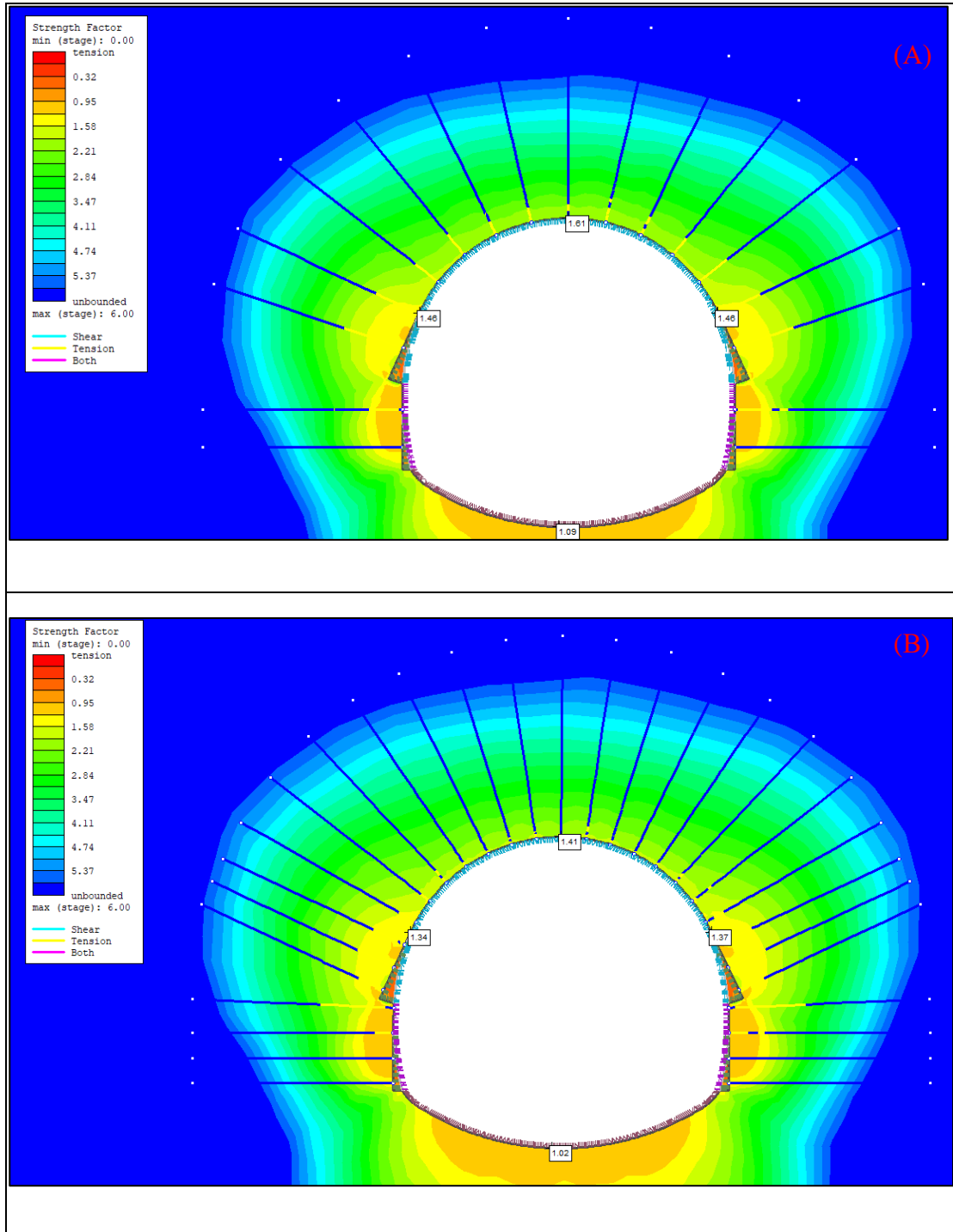


Εικόνα 5.32. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)

Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.32 συμπεραίνεται πως η σήραγγα για την περίπτωση υπερκειμένων $H = 150\text{m}$ βρίσκεται στην περιοχή «Α», όπου η παραμόρφωση είναι $<1\%$, οπότε και δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα συγκλίσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης. Η περίπτωση υπερκειμένων $H = 300\text{m}$ συμπεραίνεται πως βρίσκεται στην περιοχή «C», όπου η παραμόρφωση είναι μεταξύ 2,5 - 5%, οπότε και αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων. Παρολαυτά, καθώς δεν αστοχεί μαζικά η υποστήριξη, δεν κρίνεται αναγκαία η ενίσχυση των μέτρων αυτής, καθώς οι συγκλίσεις είναι ελεγχόμενες.

Τέλος, στην Εικόνα 5.33 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος της εκάστοτε περίπτωσης, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν

θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισοροπίας. Παρολαυτά, εμφανίζονται στα ελεφαντοπόδαρα, σημεία με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», τα οποία όμως δεν συμβάλλουν ώστε να δημιουργηθεί κάποια εκτεταμένη αστοχία.



Εικόνα 5.33. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοίξεις στον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

5.4.3 Για Τον Τύπο 4 Οφιολίθων

Ο συγκεκριμένος τύπος βραχόμαζας κατέχει τα χειρότερα μηχανικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, οπότε και αναμένονταν εκτεταμένες συγκλίσεις και αστοχίες κατά την διάνοιξη. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο για υπερκείμενα $H = 150m$, όσο και για $H = 300m$ ([Παράγραφος 5.3.3](#)) με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχόμαζας αναμένονται αυξημένες συγκλίσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας τόσο στις παρειές, όσο και στο μέτωπο. Το τελευταίο επιβεβαιώνεται και από την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), όπου υπολογίστηκε ότι το μέτωπο και στα δύο (2) εξεταζόμενα υπερκείμενα δεν θα παραμείνει ευσταθές, οπότε και απαιτείται περεταίρω ενίσχυση αυτού.

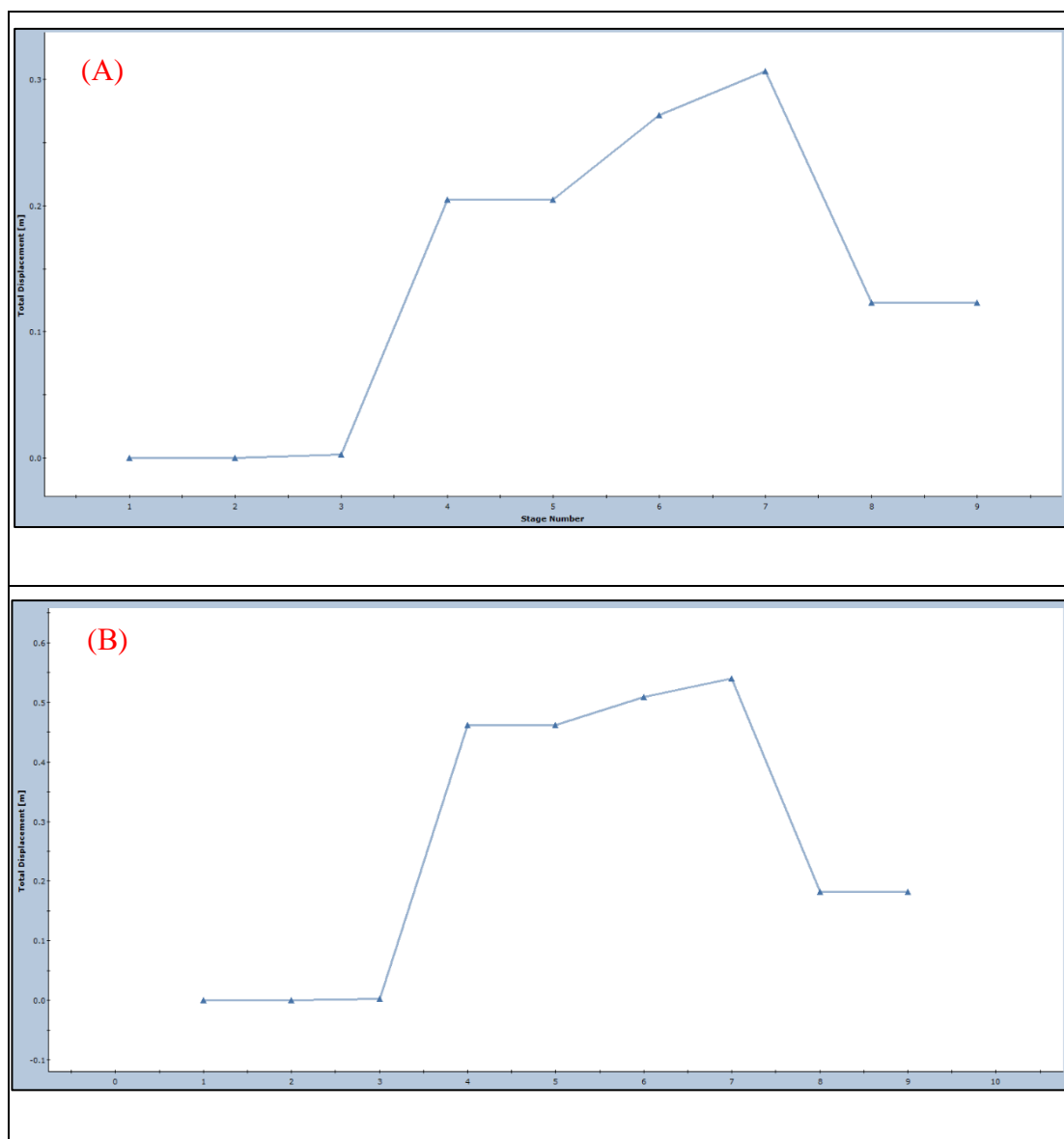
Για την ενίσχυση του επιλέχθηκε η εγκατάσταση αγκυρίων μετώπου fiberglass, τα οποία αποσκοπούσαν στην βελτίωση της βραχόμαζας μπροστά από το μέτωπο, η οποία θα επιδρούσε και γενικότερα στην βελτίωση της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Παρολαυτά, ακόμα και με την χρήση των αγκυρίων fiberglass, οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, όπως αποτυπώνεται και στον συγκεντρωτικό Πίνακα 5.28 και οι οποίες θεωρούνται αποδεκτές από τις απαιτήσεις για την ασφαλή κατασκευή των εν λόγω σηράγγων.

Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
Στέψη	12,29	15,52
Δεξιά Παρειά	10,03	9,32
Αριστερή Παρειά	10,09	9,32
Δάπεδο	31,40	37,41

Πίνακας 5.28. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 4 για $H = 150m$ και $H = 300m$.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.34 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχόμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της

Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως μια «ανακούφιση» των συγκλίσεων.



Εικόνα 5.34. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις του Τύπου 4 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

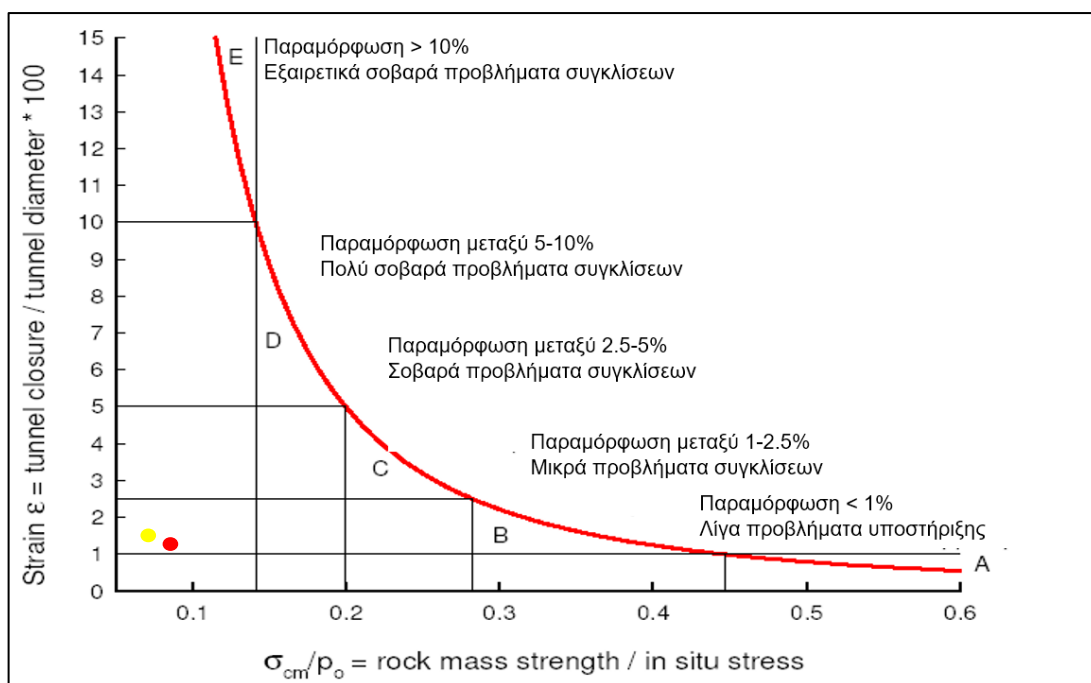
Από τις Εικόνες 5.24 και 5.27 των Υποπαραγράφων [5.3.3.1](#) και [5.3.3.2](#), αντίστοιχα, παρατηρείται πως αρκετά από τα αγκύρια διαρρέουν σε εφελκυσμό, αλλά παρολαυτά οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις κυμαίνονται σε τέτοια επίπεδα, τα οποία βρίσκονται εντός των ορίων αποδοχής. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η επάρκεια της υποστήριξης και στις δύο περιπτώσεις είναι αποδεκτή και δεν απαιτείται η περεταίρω αύξηση αυτών.

Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.35, θέτοντας όπου «κλείσιμο σήραγγας» την μέση τιμή των ανωτέρω συγκλίσεων. Ο Πίνακας 5.29 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον

εντοπισμό της περιοχής κάθε περίπτωσης υπερκειμένων. Η σύγκλιση των δαπέδων δεν λαμβάνεται υπόψιν, καθώς δεν δημιουργεί μεγάλα προβλήματα κατά την εκσκαφή ή ακόμα και αν δημιουργεί, είναι πιο εύκολα επιλύσιμα.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Τύπος 4 (150m)	0,16	13,17	1,21	0,09
Τύπος 4 (300m)	0,18		1,36	0,05

Πίνακας 5.29. Δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 4 οφιολίθων.

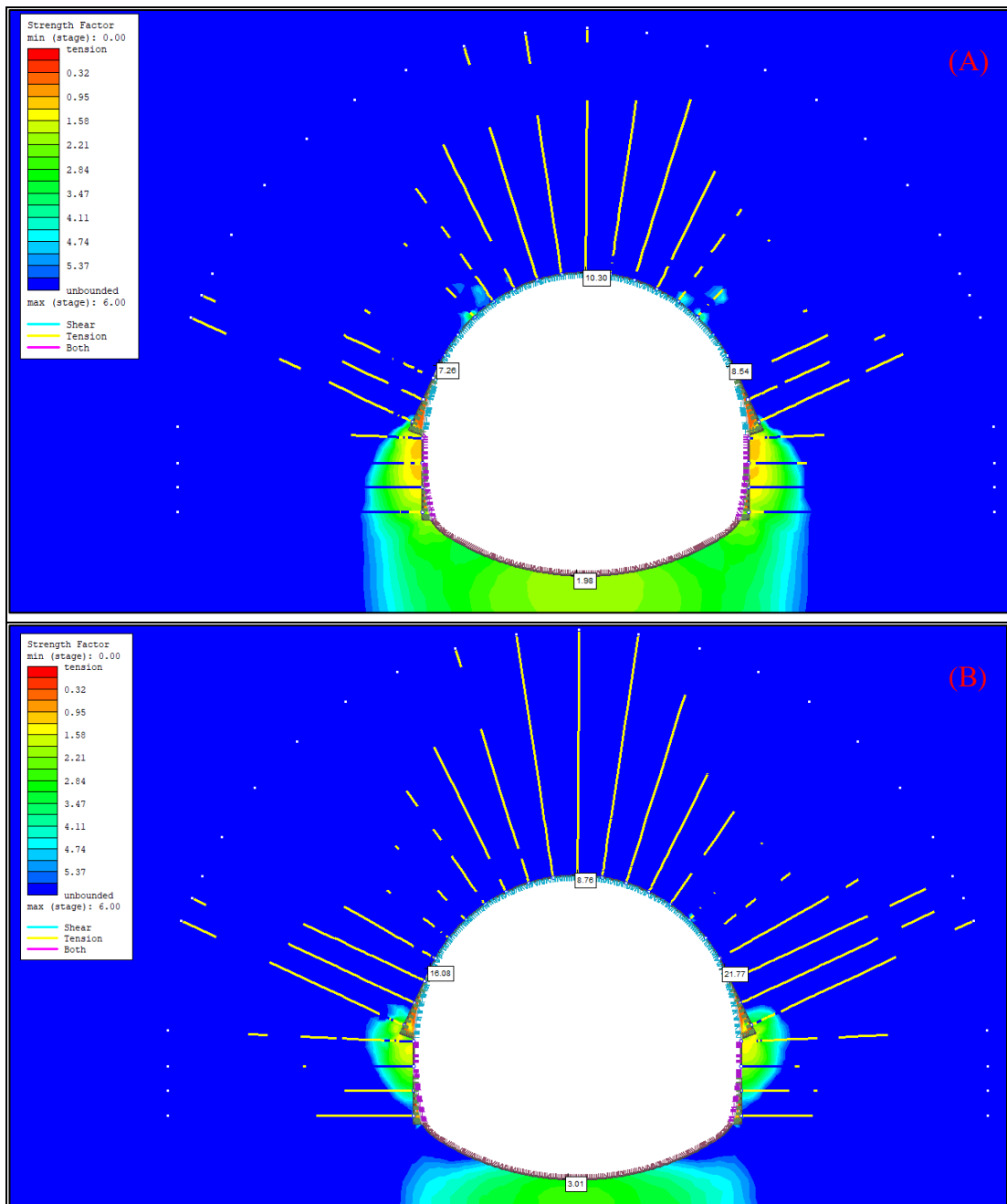


Εικόνα 5.35. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000).

Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.35 συμπεραίνεται πως και οι δύο σήραγγες βρίσκονται στην περιοχή «E», όπου η παραμόρφωση είναι >10% και αναμένονται εξαιρετικά σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων. Οι συγκεκριμένες βραχώμαζες χαρακτηρίζονται και ως «squeezing rock», λόγω των συνθηκών που αναπτύσσονται στις σήραγγες, οι τόσο αποδιοργανωμένες βραχώμαζες τους. Παρολαυτά, από τις αναπτυσσόμενες συγκλίσεις συμπεραίνεται ότι τα εφαρμοσθέντα μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι επαρκή.

Τέλος, στην Εικόνα 5.36 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος της εκάστοτε περίπτωσης, όπου πρακτικά

αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι αρκετά άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, εμφανίζονται στα ελεφαντοπόδαρα, σημεία με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», τα οποία όμως δεν συμβάλλουν ώστε να δημιουργηθεί κάποια εκτεταμένη αστοχία.



Εικόνα 5.36. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοιξεις στον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 150m$ (A) και $H = 300m$ (B).

Εάν απαιτούνταν να μειωθούν περαιτέρω οι συγκλίσεις, πρέπει να εφαρμοστούν περαιτέρω μέτρα υποστήριξης. Τα εν λόγω μέτρα μπορούν να έχουν είτε την φιλοσοφία της «θυσιάζουσας» υποστήριξης είτε μιας ακόμα πιο βαριάς, άκαμπτης υποστήριξης.

Η φιλοσοφία της «θυσιάζουσας» υποστήριξης επικεντρώνεται στη τοποθέτηση μια πιο ελαφριάς υποστήριξης, αρχικά, η οποία ως στόχο έχει να αστοχήσει και να «θυσιαστεί», παραλαμβάνοντας παρολαυτά ένα μέρος του φορτίου της αποτωνούμενης βραχομάζας, με απώτερο σκοπό τα τελικά μέτρα της άμεσης υποστήριξης, και τα οποία τοποθετούνται ώστε να μην αστοχούν, να καταφέρουν να παραλάβουν με επιτυχία το υπόλοιπο φορτίο, επιτυγχάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις μικρότερες δυνατές συγκλίσεις.

Η φιλοσοφία της πιο βαριάς, άκαμπτης υποστήριξης επικεντρώνεται στο να τοποθετηθούν ιδιαίτερα βαριές διατομές άμεσων μέτρων υποστήριξης, όπως μεγάλο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ή/και πλαίσια μεγάλης φέρουσας ικανότητας, ή/και αγκύρια βράχου καλύτερης ποιότητας χάλυβα, οπότε και μεγαλύτερης φέρουσας ικανότητας, τα οποία μέτρα θα είναι ικανά να παραλάβουν ολόκληρο το φορτίο της αποτωνούμενης βραχομάζας. Η συγκεκριμένη φιλοσοφία εφαρμόστηκε έως έναν βαθμό στις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα για τον Τύπο 4.

5.5 Προβλήματα Προσομοιώσεων

5.5.1 Γενικά Στοιχεία

Όπως είναι φυσικό για να προκύψουν τα ανωτέρω τελικά αποτελέσματα, όσον αφορά τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης της εκάστοτε περίπτωσης, διενεργήθηκαν πληθώρα προσομοιώσεων, λαμβάνοντας υπόψιν κάθε φορά διαφορετικές παραμέτρους στα μέτρα της άμεσης υποστήριξης, μέχρις ότου τα αποτελέσματα να είναι αποδεκτά.

Λαμβάνοντας υπόψιν μια περίπτωση, όπου οι παράμετροι του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της φέρουσας ικανότητας των αγκυρίων ήταν διαφορετικά από αυτά των τελικών αποτελεσμάτων, θα πραγματοποιηθεί μια μικρή ανάλυση στα εμφανιζόμενα προβλήματα που προέκυψαν και οδήγησαν στα τελικά αποτελέσματα. Σημειώνεται πως στις περιπτώσεις αυτές δεν υπήρχε καμία υποστήριξη του μετώπου, ενώ τα χαρακτηριστικά των πλαισίων και των ελεφαντοπόδαρων παρέμειναν σταθερά, όπως παρουσιάζονται στους αντίστοιχούς Πίνακες της [Παραγράφου 5.2.3](#). Ακόμα πρέπει να αναφερθεί, πως δεν λαμβάνονται υπόψιν οι προσομοιώσεις στον Τύπο 2, καθώς εκεί τα χαρακτηριστικά είναι τέτοια που δεν χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις με σημαντικές διαφορές.

Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης (Fully Bonded Bolts)				
	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
Διάμετρος (d)	28 mm	28 mm	32 mm	32 mm
Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa			
Φέρουσα Ικανότητα (P_{u, Tensile})	0,310 MN	0,310 MN	0,440 MN	0,440 MN
Μήκος (L)	8 m	8 m	10 m	10 m
Κάνναβος	1,5 x 1,5 m ²	1 x 1,5 m ²	1 x 1 m ²	1 x 1 m ²
Συμπεριφορά	Ελαστική			

Πίνακας 5.30. Ιδιότητες αγκυρίων για κάθε εξεταζόμενο τύπο οφιολίθων

Μεταλλικά Πλαίσια (Steel Sets)				
	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)

Τύπος	HEB 160	HEB 160	HEB 180	HEB 180
Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa			
Εμβαδόν (A)	0,005425 m ²	0,005425 m ²	0,006525 m ²	0,006525 m ²
Ροπή αδράνειας (I)	2,49 * 10 ⁻⁵ m ⁴	2,49 * 10 ⁻⁵ m ⁴	3.831*10 ⁻⁵ m ⁴	3.831*10 ⁻⁵ m ⁴
Συμπεριφορά	Ελαστική			

Πίνακας 5.31. Ιδιότητες μεταλλικών πλαισίων για κάθε τύπο οφιολίθων.

Εκτοξευόμενο Σκυροδέμα (Shotcrete)				
	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
Πάχος (t)	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
Κατηγορία Σκυροδέματος	C 30/37			
Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$)	15 GPa			
Λόγος Poisson (ν)	0,2			
Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})	30 MPa			
Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})	6 MPa			
Ειδικό Βάρος ($\gamma_{shotcrete}$)	25 kN/m ³			
Συμπεριφορά	Ελαστική			

Πίνακας 5.32. Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος για κάθε εξεταζόμενο τύπο οφιολίθων.

Επιπλέον Μέτρα Υποστήριξης				
	Τύπος 3 (150m)	Τύπος 3 (300m)	Τύπος 4 (150m)	Τύπος 4 (300m)
<u>Προσωρινό Ανάστροφο Τόξο</u>				
	✓	✓	✓	✓
Πάχος (t)	20 cm	25 cm	25 cm	30 cm
Κατηγορία Σκυροδέματος	C 30/37			

Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$)	15 GPa			
Λόγος Poisson (ν)	0,2			
Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})	30 MPa			
Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})	6 MPa			
Ειδικό Βάρος ($\gamma_{shotcrete}$)	25 kN/m ³			
Συμπεριφορά	Ελαστική			
<u>Τελικό Ανάστροφο Τόξο</u>				
	✓	✓	✓	✓
Πάχος (t)	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
Κατηγορία Σκυροδέματος	C 30/37			
Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$)	15 GPa			
Λόγος Poisson (ν)	0,2			
Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})	30 MPa			
Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})	6 MPa			
Ειδικό Βάρος ($\gamma_{shotcrete}$)	25 kN/m ³			
Συμπεριφορά	Ελαστική			

Πίνακας 5.33. Ιδιότητες επιπέδων μέτρων υποστήριξης για κάθε εξεταζόμενο τύπο οφιολίθων.

5.5.2 Για Τον Τύπο 3 Οφιολίθων

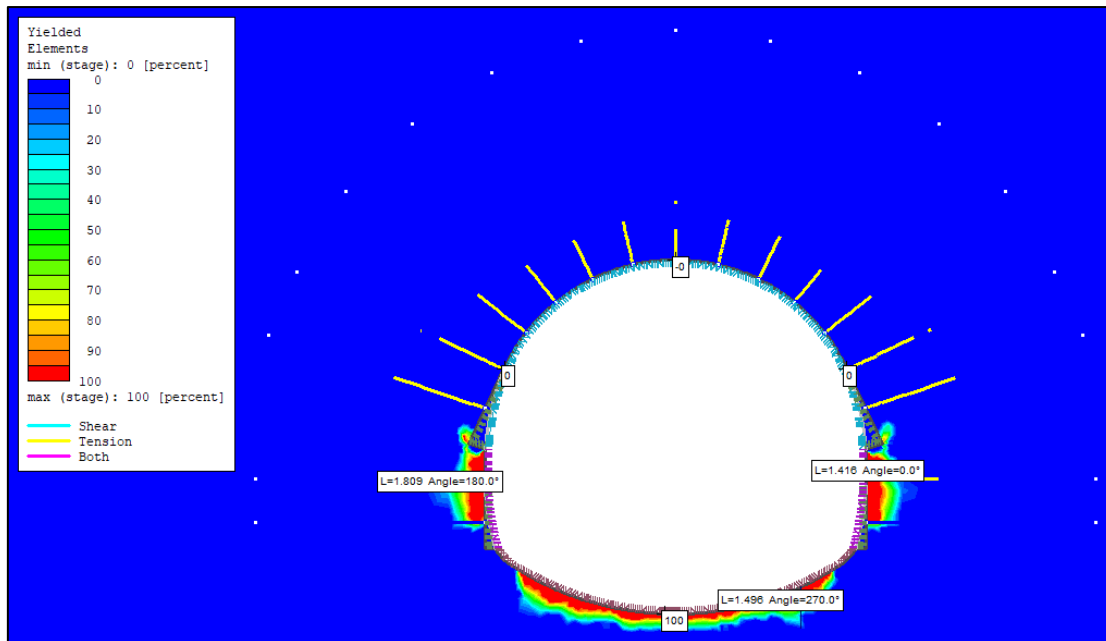
5.5.2.1 Για Υπερκείμενα $H = 150m$

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.16, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (150m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	4,29	-0,21	-1,5	0,36	0,33	680,9	209,23

Πίνακας 5.16. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 150m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 1,8m στις παρειές, ενώ στο πάτωμα περίπου 1,5m, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.37.

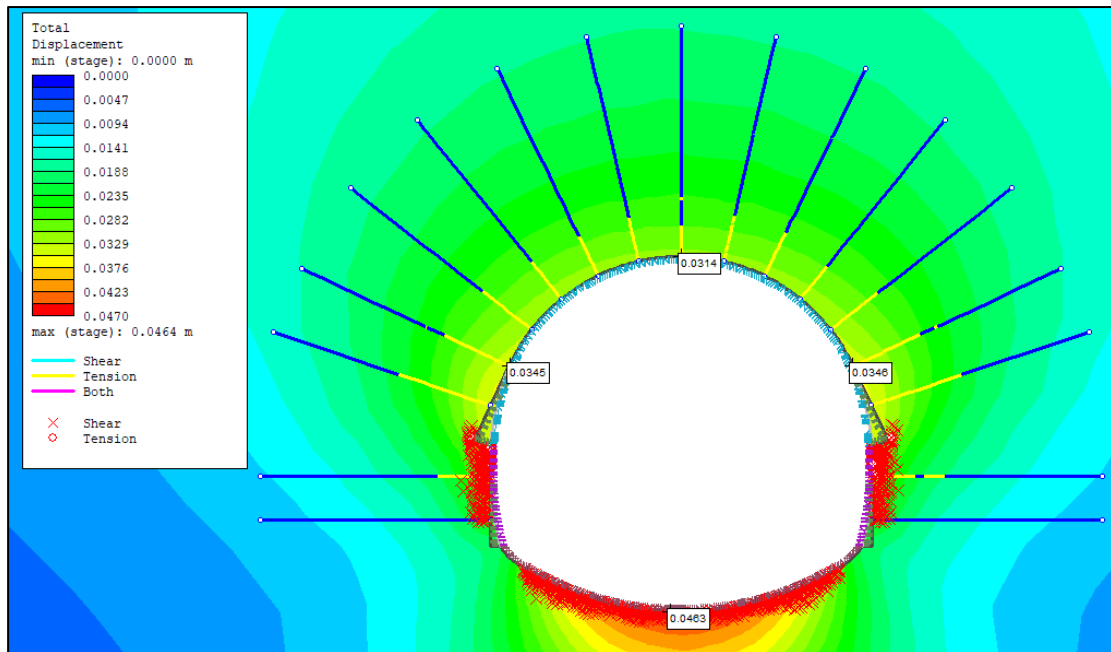


Εικόνα 5.37. Αποτελέσματα πλαστικής ζώνης οφιολιθικού Τύπου 3 ($H = 150m$)

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.34 και στην Εικόνα 5.38. Γενικώς, οι εν λόγω συγκλίσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι θα έχουν αρκετή επίδραση στην άμεση υποστήριξη και στο άνοιγμα. Σημειώνεται πως οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν την ενίσχυση του μετώπου της σήραγγας, συνεπώς χρησιμοποιήθηκε και το αντίστοιχο E_{FG} .

Τύπος 3 (150m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	3,14
Δεξιά Παρειά	3,46
Αριστερή Παρειά	3,45
Δάπεδο	4,63

Πίνακας 5.34. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 3 για $H = 150m$.



Εικόνα 5.38. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βροχόμαζας και σημεία διαρροής των αγκυρίων βράχου του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 150m$.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές το γεγονός πως κατά την εφαρμογή αυτών των μέτρων υποστήριξης, δεν αναμένονται ιδιαίτερες συγκλίσεις, αλλά παρατηρείται εκτενή αστοχία στις παρειές και στο δάπεδο της διανοιγόμενης σήραγγας, καθώς και πως σχεδόν όλα τα αγκύρια θα έχουν διαρρεύσει. Συνεπώς κρίθηκε σωστό να εφαρμοστούν πιο ισχυρά μέτρα άμεσης υποστήριξης, η ανάλυση των οποίων πραγματοποιήθηκε στις [Παραγράφους 5.3.2.1](#) και [5.4.2](#).

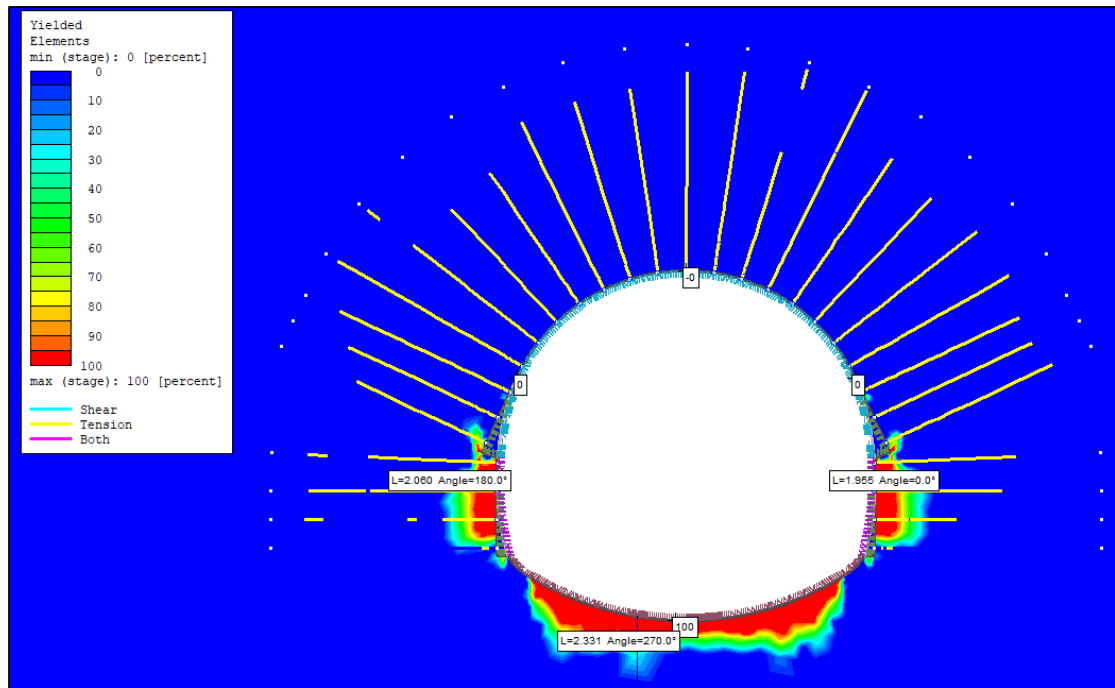
5.5.2.2 Για Υπερκείμενα $H = 300m$

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.18, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	8,59	-0,23	-1,5	0,43	0,33	680,9	169,25

Πίνακας 5.18. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 2m στις παρειές και περίπου 2,4m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.39.

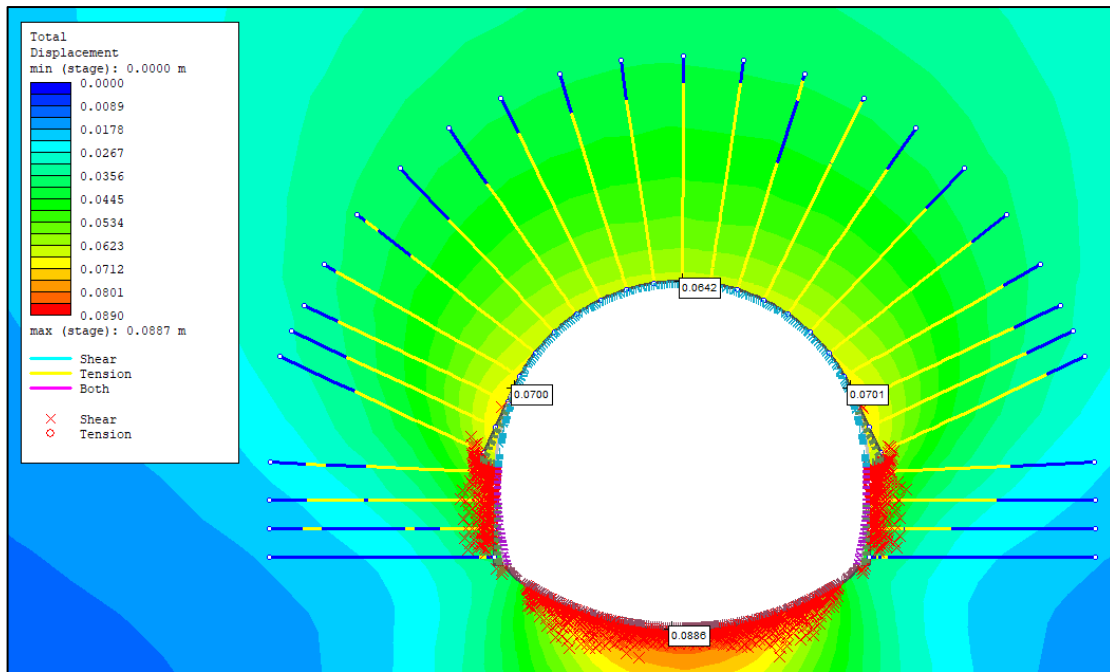


Εικόνα 5.39. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.35 και στην Εικόνα 5.40. Γενικώς, οι εν λόγω συγκλίσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι θα έχουν μικρή επίδραση στην άμεση υποστήριξη και στο άνοιγμα.

Τύπος 3 (300m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	6,42
Δεξιά Παρειά	7,01
Αριστερή Παρειά	7,00
Δάπεδο	8,86

Πίνακας 5.35. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 3 για $H = 300m$.



Εικόνα 5.40. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των ακυρίων βράχου του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές το γεγονός πως κατά την εφαρμογή αυτών των μέτρων υποστήριξης, αναμένονται μέτριες συγκλίσεις, ελαφρώς αυξημένες από αυτές των τελικών αποτελεσμάτων, ενώ ακόμα παρατηρείται εκτενή αστοχία στις παρειές και στο δάπεδο της διανοιγόμενης σήραγγας, καθώς και πως σχεδόν όλα τα ακύρια θα έχουν διαρρεύσει σχεδόν σε ολόκληρο το μήκος τους. Συνεπώς κρίθηκε σωστό να εφαρμοστούν πιο ισχυρά μέτρα άμεσης υποστήριξης, η ανάλυση των οποίων πραγματοποιήθηκε στις [Παραγράφους 5.3.2.2](#) και [5.4.2](#).

5.5.3 Για Τον Τύπο 4 Οφιολίθων

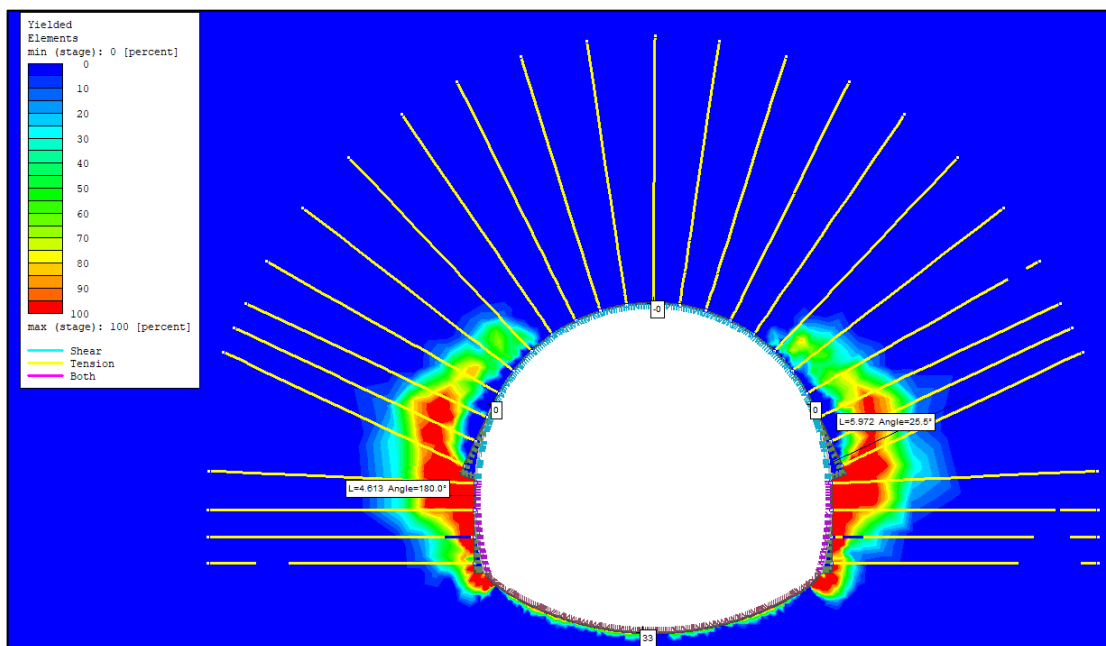
5.5.3.1 Για Υπερκείμενα $H = 150m$

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.20, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 4 (150m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	0,36	21,66	-0,16	-1	0,83	0,33	45,6	2,21

Πίνακας 5.20. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 150m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 6m στις παρειές, και περίπου 0,5 m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.41.

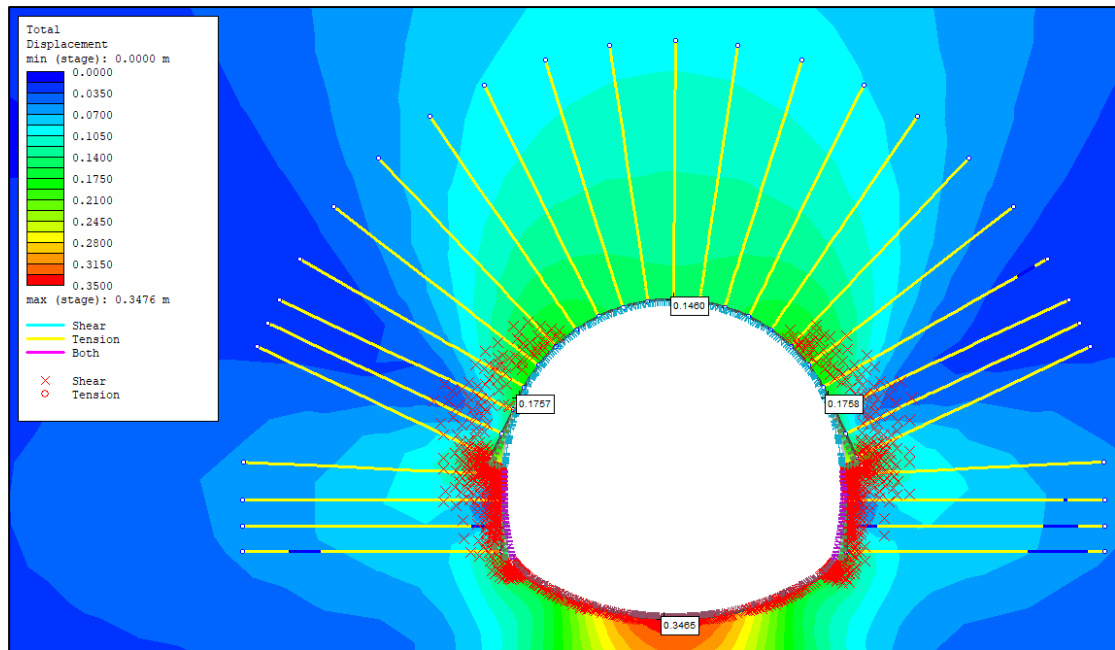


Εικόνα 5.41. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 150m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.36 και στην Εικόνα 5.43. Γενικώς, οι εν λόγω συγκλίσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι θα έχουν αρκετή επίδραση στην άμεση υποστήριξη και στο άνοιγμα.

Τύπος 4 (150m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	14,6
Δεξιά Παρειά	17,58
Αριστερή Παρειά	17,57
Δάπεδο	34,65

Πίνακας 5.36. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 4 για $H = 150m$.



Εικόνα 5.43. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των αγκυριών βράχου του Τύπου 4 οφιολίθων για $H = 150m$.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές το γεγονός πως κατά την εφαρμογή αυτών των μέτρων υποστήριξης, αναμένονται αυξημένες συγκλίσεις, μεγαλύτερες από αυτές των τελικών αποτελεσμάτων, ενώ ακόμα παρατηρείται εκτενή αστοχία σχεδόν σε ολόκληρη την διανοιγόμενη σήραγγα, καθώς και πως σχεδόν όλα τα αγκύρια θα έχουν διαρρεύσει σε ολόκληρο το μήκος τους. Συνεπώς κρίθηκε αναγκαίο να εφαρμοστούν πιο ισχυρά μέτρα άμεσης υποστήριξης, η ανάλυση των οποίων πραγματοποιήθηκε στις [Παραγράφους 5.3.3.1](#) και [5.4.3](#).

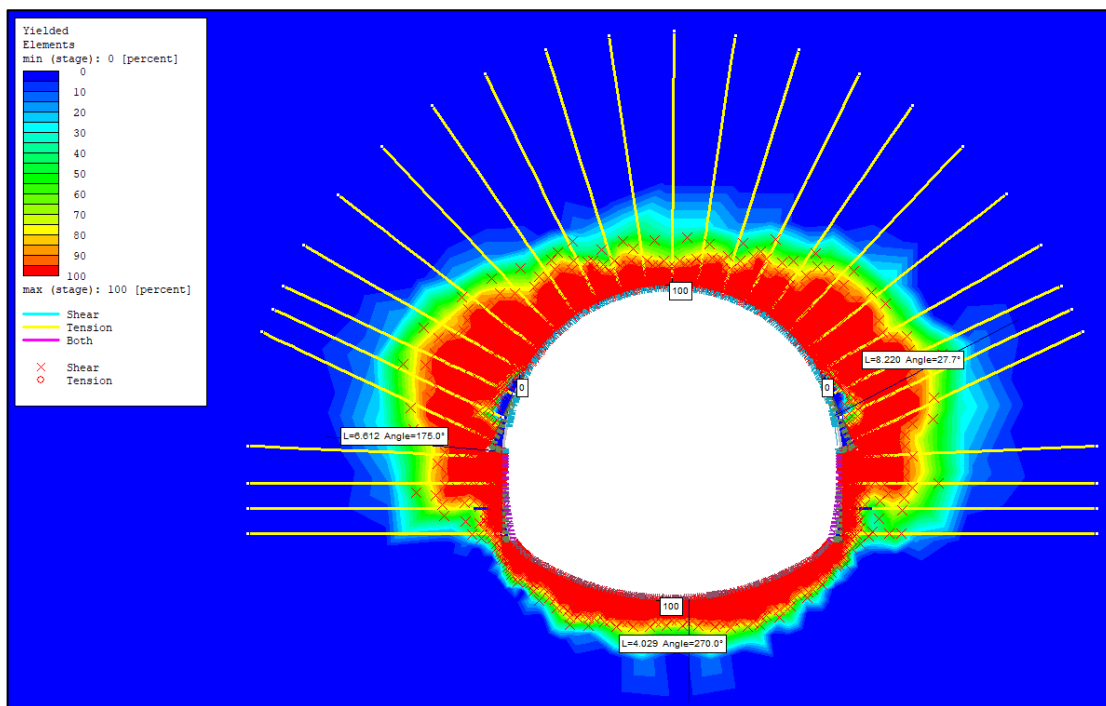
5.5.3.2 Για Υπερκείμενα $H = 300m$

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.22, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 4 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	0,36	43,31	-0,11	-1	0,91	0,33	45,6	1,08

Πίνακας 5.22. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 8,2 m στις παρειές και 4m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.45.

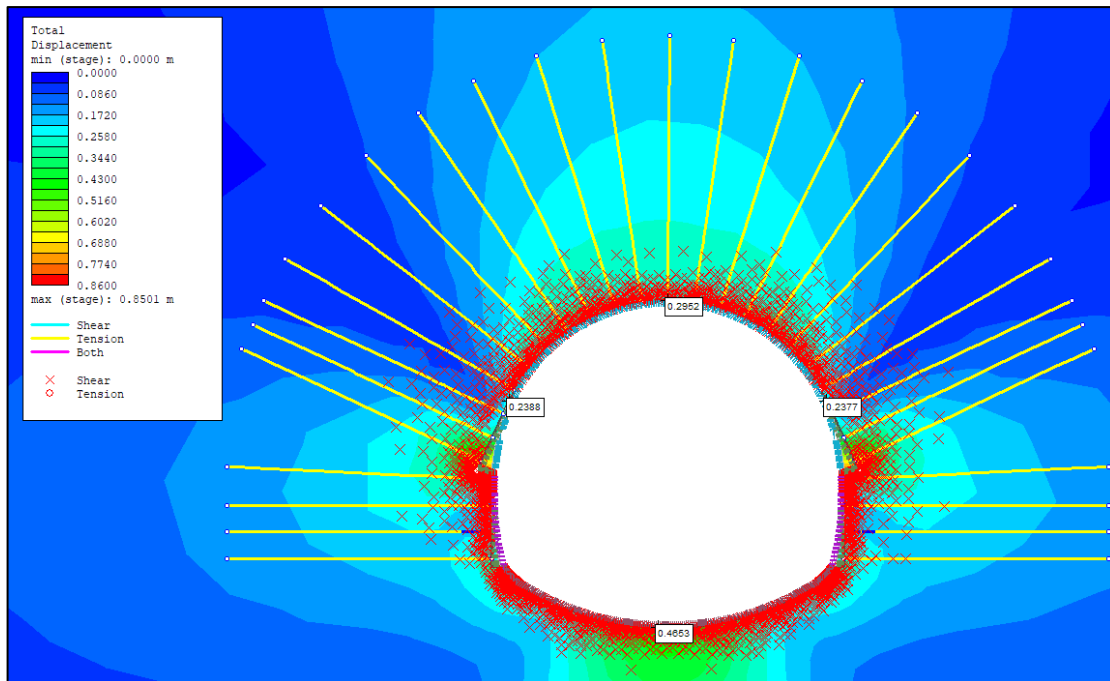


Εικόνα 5.44. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 300m$.

Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.37 και στην Εικόνα 5.46. Γενικώς, οι εν λόγω συγκλίσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι θα έχουν μεγάλη επίδραση στην άμεση υποστήριξη και στο άνοιγμα.

Τύπος 4 (300m)	
Σημείο	Σύγκλιση «u» (cm)
Στέψη	29,52
Δεξιά Παρειά	23,77
Αριστερή Παρειά	23,88
Δάπεδο	46,53

Πίνακας 5.37. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 4 για $H = 300m$.



Εικόνα 5.45. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχόμαζας και σημεία διαρροής των αγκυρίων βράχου του Τύπου 4 οφιολίθων για $H = 300m$.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές το γεγονός πως κατά την εφαρμογή αυτών των μέτρων υποστήριξης, αναμένονται αυξημένες συγκλίσεις, μεγαλύτερες από αυτές των τελικών αποτελεσμάτων, ενώ ακόμα παρατηρείται εκτενή αστοχία στις παρειές της διανοιγόμενης σήραγγα, καθώς και πως σχεδόν όλα τα αγκύρια θα έχουν διαρρεύσει σε ολόκληρο το μήκος τους. Συνεπώς κρίθηκε αναγκαίο να εφαρμοστούν πιο ισχυρά μέτρα άμεσης υποστήριξης, η ανάλυση των οποίων πραγματοποιήθηκε στις [Παραγράφους 5.3.3.2](#) και [5.4.3](#).

5.6 Επιπλέον Παραμετρικές Προσομοιώσεις

5.6.1 Γενικά Στοιχεία

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναλυθούν κάποιες επιπλέον παράμετροι, οι οποίες δεν λήφθηκαν υπόψιν κατά την βασική επίλυση των τριών περιπτώσεων και οι οποίες συμμετέχουν στην ανάπτυξη των παραμορφώσεων των σηράγγων τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα. Αυτές οι παράμετροι είναι:

- η απόσταση μεταξύ των κλάδων και
- η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα

5.6.2 Επίδραση Της Απόστασης Των Κλάδων

5.6.2.1 Γενικά Στοιχεία

Η συγκεκριμένη ανάλυση πραγματοποιείται μόνο για μια περίπτωση οφιολίθων και συγκεκριμένα για τον Τύπο 3 με υπερκείμενα $H = 300\text{m}$. Ο συγκεκριμένος τύπος επιλέχθηκε, καθώς οι γεωτεχνικές του ιδιότητες τείνουν αρκετά στις πραγματικές γεωτεχνικές συνθήκες ενός οφιολιθικού σχηματισμού. Για την εν λόγω ανάλυση επιλέγεται τα κέντρα των δύο δίδυμων σηράγγων απέχουν μεταξύ τους 40 m, όπως συμβαίνει και κατά τα πρώτα μέτρα της περίπτωσης της διάνοιξης των δίδυμων οδικών σηράγγων του όρους Όθρυς. Βέβαια, κατά την συνέχεια της διάνοιξης η απόσταση των δύο κλάδων αυξάνεται στα 60 m, αλλά παρολαυτά, στην ανάλυση που ακολουθεί, λαμβάνεται υπόψιν η απόσταση των 40 m, καθώς αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση.

5.6.2.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης

Για την ανάλυση έγινε χρήση όλων των παραδοχών που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και επίσης και γίνεται χρήση των ίδιων μέτρων υποστήριξης, όπως και για την ανάλυση της μονής σήραγγας του Τύπου 3 των οφιολίθων για ύψος υπερκειμένων $H = 300\text{m}$. Τα συγκεκριμένα μέτρα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 της [Παραγράφου 5.2.3](#).

Επιγραμματικά σημειώνεται πως χρησιμοποιούνται:

- Αγκύρια βράχου $\Phi 28$, φέρουσας ικανότητας 670 kN έκαστο
- Επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C30/37, πάχους 60cm στη στέψη και τις παρειές, 40cm στο προσωρινό ανάστροφο και 70cm στο τελικό ανάστροφο.

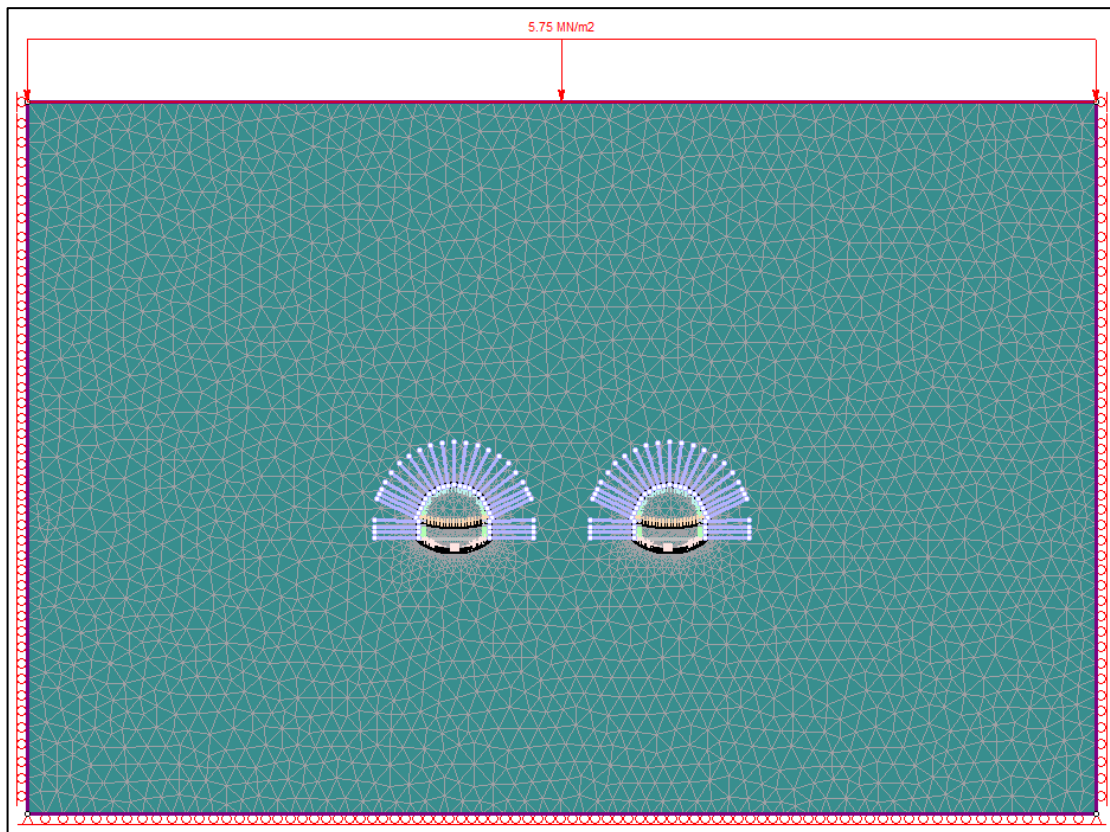
- Στοιχεί Θεμελίωσης Μεταλλικών Πλαισίων πλάτους 60cm

5.6.2.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.46. Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.38.

Σημείο	Άξονας X	Άξονας Y
1	144	79
2	144	-53
3	-79	-53
4	-79	79

Πίνακας 5.38. Συντεταγμένες Προσομοιώματος δίδυμων σιράγγων Τύπου 3 οφιολίθων.



Εικόνα 5.46. Προσομοίωμα δίδυμων σιράγγων Τύπου 3 οφιολίθων με $H=300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στις παραγράφους ανωτέρω, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.18, ο οποίος επαναλαμβάνεται ακολούθως για λόγους πληρότητας, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

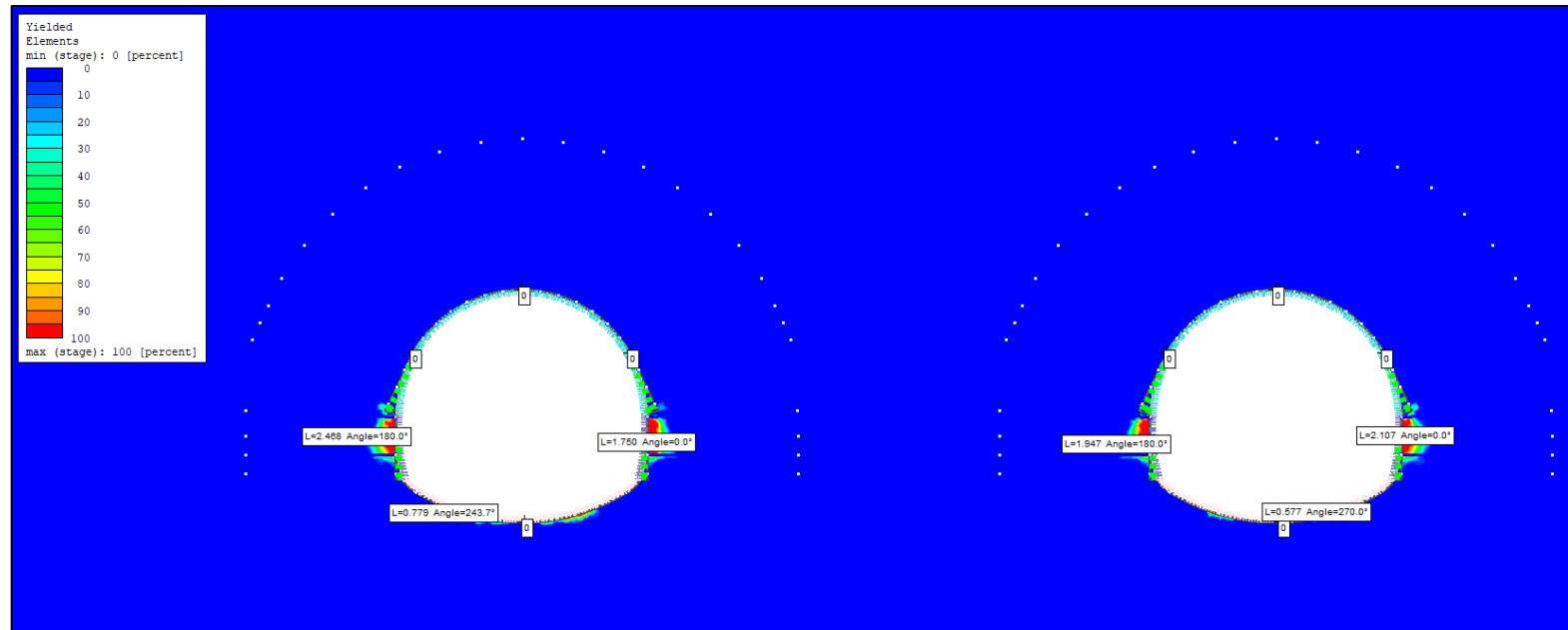
Τύπος 3 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	8,59	-0,23	-1,5	0,43	0,33	680,9	169,25

Πίνακας 5.18. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας των δίδυμων σηράγγων για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

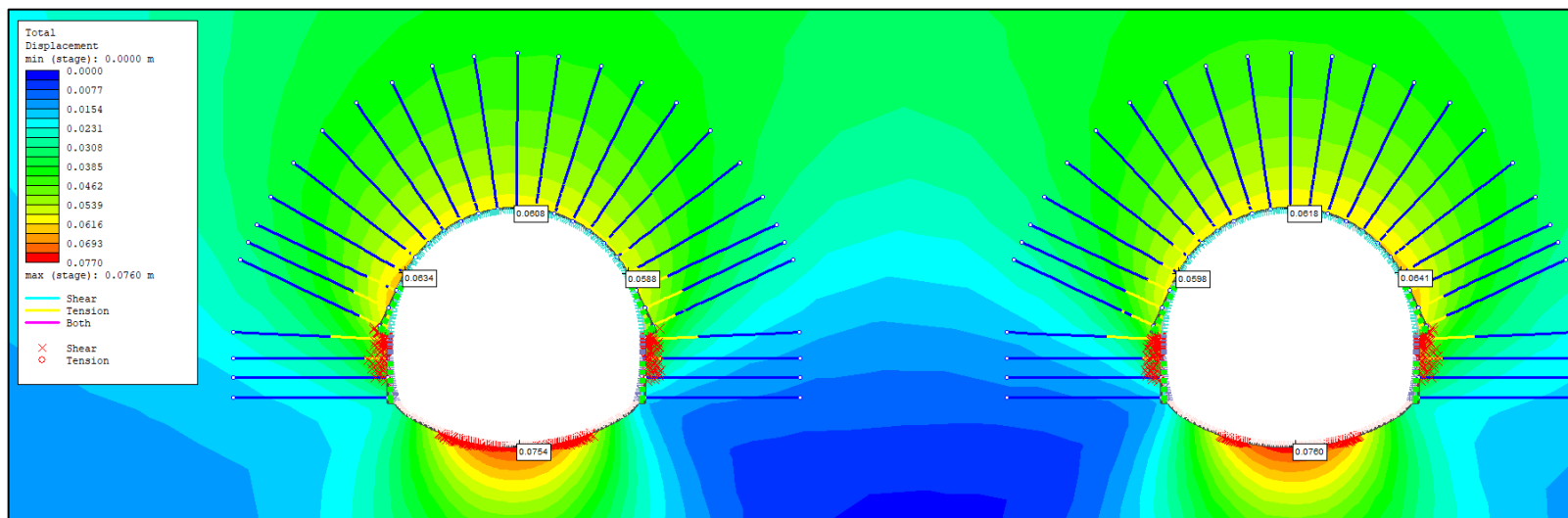
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από τον αριστερό κλάδο ισούται περίπου με 2,5 m στις παρειές και περίπου 0,8 m στο δάπεδο, ενώ στον δεξιό κλάδο ισούται περίπου με 2,1 m στις παρειές και περίπου 0,5m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.47. Οι συνολικές συγκλίσεις του εν λόγω ανοίγματος αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.39 και στην Εικόνα 5.48.

Δίδυμες Σήραγγες Τύπος 3 (300m)		
Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Στέψη	6,08	6,18
Δεξιά Παρειά	5,88	6,41
Αριστερή Παρειά	6,34	5,98
Δάπεδο	7,54	7,60

Πίνακας 5.39. Αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων των δίδυμων σηράγγων για τον Τύπο 3 για $H = 300m$



Εικόνα 5.47. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής των δίδυμων σηράγγων για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.



Εικόνα 5.48. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των ακριρίων βράχου για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

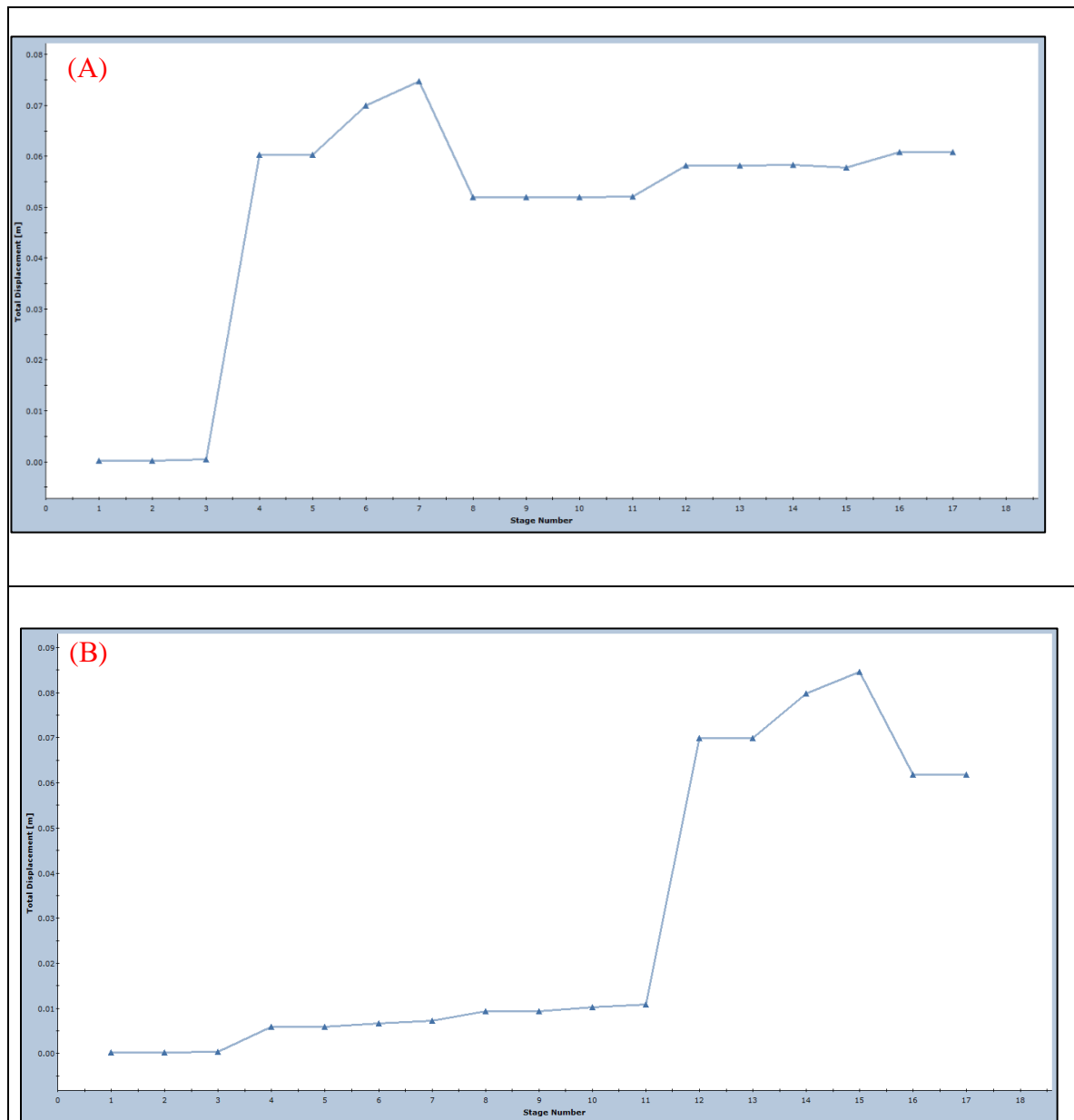
5.6.2.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Αναλύσεων

Ο συγκεκριμένος τύπος βραχόμαζας κατέχει γενικά μέτρια προς άσχημα μηχανικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, οπότε και αναμένεται κάποια αστοχία ή/και αυξημένες συγκλίσεις κατά την διάνοιξη. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της ανωτέρω ανάλυσης για τις δίδυμες σήραγγες με υπερκείμενα $H = 300\text{m}$ μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχόμαζας αναμένονται σχετικά μέτριες συγκλίσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας στις παρειές και στο μέτωπο. Όμως σύμφωνα με την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), υπολογίστηκε ότι το μέτωπο θα παραμείνει ευσταθές, οπότε και δεν απαιτείται κάποια περεταίρω ενίσχυση αυτού.

Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.38, στον οποίο παρατηρείται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των δύο σηράγγων είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, οπότε και πρακτικά οι συγκλίσεις αυτές είναι ελεγχόμενες, δεδομένου και των εφαρμοσθέντων μέτρων υποστήριξης.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.40 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων για τον αριστερό κλάδο αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχόμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως μια «ανακούφιση» των συγκλίσεων, οι οποίες τελικά παραμένουν σταθερές ακόμα και κατά την διάνοιξη του δεξιού κλάδου.

Το πλήθος των συγκλίσεων για τον δεξιό κλάδο αναπτύσσονται κατά το 11^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχόμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης συμβαίνει μια απότομη αύξηση των συγκλίσεων, η οποία, ωστόσο, διαρκεί για τρία στάδια και ακολουθεί μια «ανακούφιση» των συγκλίσεων.



Εικόνα 5.49. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις των δίδυμων σιράγγων Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300\text{m}$ του αριστερού κλάδου (A) και του δεξιού κλάδου (B).

Από την Εικόνα 5.50 παρατηρείται πως κάποια από τα αγκύρια διαρρέουν σε εφελκυσμό, αλλά παρολαυτά οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις κυμαίνονται σε ελεγχόμενα επίπεδα, το οποίο σημαίνει πως η επάρκεια της υποστήριξης και στους δυο κλάδους είναι ικανοποιητική.

Λόγω της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου (δεξιού) δεν προκύπτει κάποια σημαντική αλληλεπίδραση με τον πρώτο (αριστερό κλάδο). Στον Πίνακα 5.40 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση του δεξιού κλάδου στον αριστερό. Από αυτόν παρατηρείται πως η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλάδων είναι πρακτικά μηδενική, καθώς δεν αγγίζει ούτε το 1 cm. Σημειώνεται πως με θετικό πρόσημο νοείται η αύξηση της σύγκλισης ενώ με

αρνητικό η μείωση της, η οποία συμβαίνει λόγω της αποτόνωσης της βραχόμαζας και έχει ως αποτέλεσμα τα μέτρα υποστήριξης να παραλαμβάνουν λιγότερο φορτίο, οπότε και να σταθεροποιούν το άνοιγμα.

	Στάδιο	Αλληλεπίδραση
Στέψη	Υποστήριξη Α' φάσης δεξιού κλάδου	+0,61 cm
	Υποστήριξη Β' φάσης δεξιού κλάδου	+0,25 cm
Παρείες	Υποστήριξη Α' φάσης δεξιού κλάδου	+0,48 cm
	Υποστήριξη Β' φάσης δεξιού κλάδου	-0,33 cm
Δάπεδο	Υποστήριξη Α' φάσης δεξιού κλάδου	-0,42 cm
	Υποστήριξη Β' φάσης δεξιού κλάδου	+0,08 cm

Πίνακας 5.40. Αλληλεπίδραση στον πρώτο κλάδο λόγω της εκσκαφής του δεύτερου κλάδου.

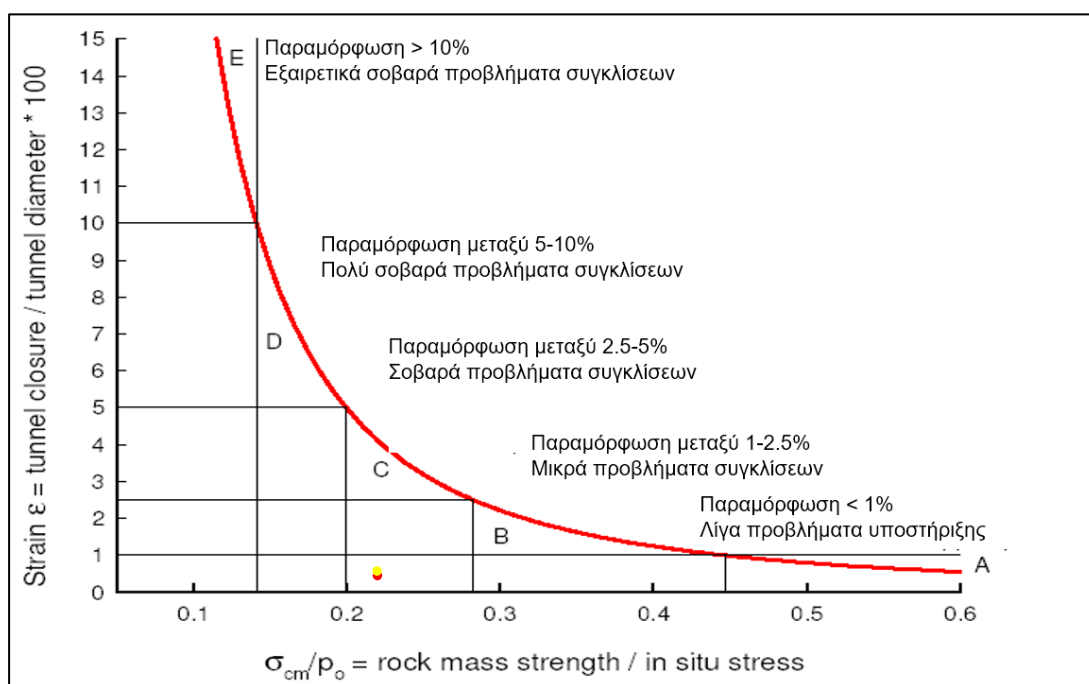
Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.41, θέτοντας όπου «κλείσιμο σήραγγας» την μέση τιμή των ανωτέρω συγκλίσεων της στέψης και των παρειών. Ο Πίνακας 5.41 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε κλάδου.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Αριστερός Κλάδος	0,066	13,17	0,50	0,23
Δεξιός Κλάδος	0,065		0,49	0,23

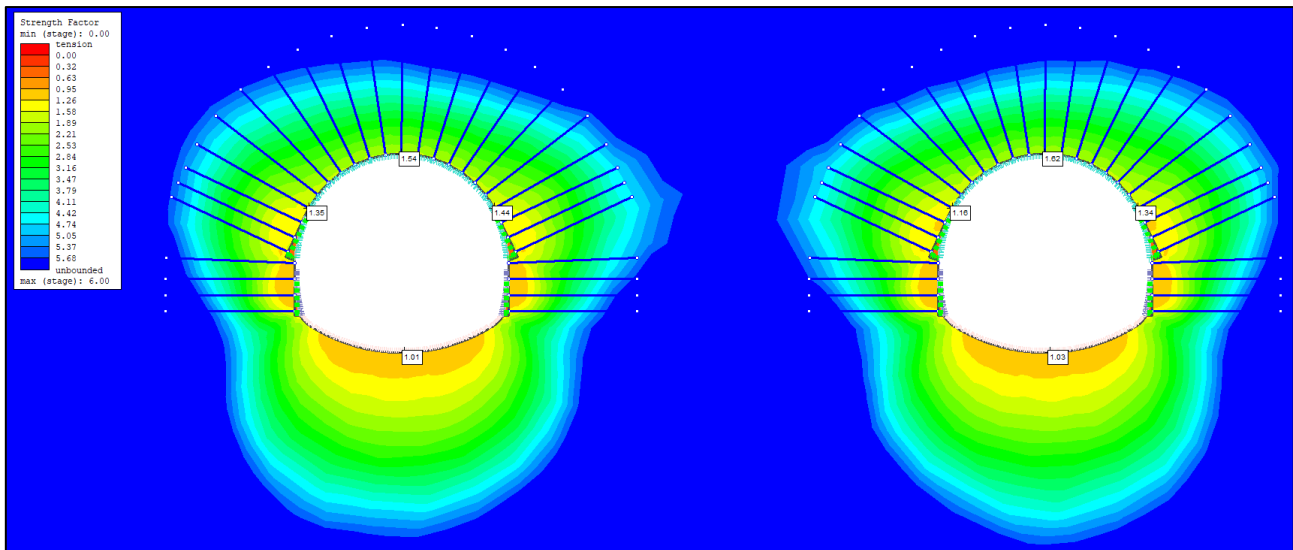
Πίνακας 5.41. Δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 3 οφιολίθων.

Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.50 συμπεραίνεται πως και οι δύο σήραγγες βρίσκονται στην περιοχή «C», όπου η παραμόρφωση είναι μεταξύ 2,5 - 5%, οπότε και αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων. Παρολαυτά, οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές, οπότε και δεν κρίνεται αναγκαία η περεταίρω ενίσχυση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Τέλος, στην Εικόνα 5.51 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος της εκάστοτε περίπτωσης, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, εμφανίζονται στα ελεφαντοπόδαρα, σημεία με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», τα οποία όμως δεν συμβάλλουν ώστε να δημιουργηθεί κάποια εκτεταμένη αστοχία.



Εικόνα 5.50. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)



Εικόνα 5.51. Αποτιμήσεις Strength Factor για τις διανοίξεις των διδύμων σηράγγων στον Τύπο 3 οφιολίθων για τον αριστερό (Α) και τον δεξιό κλάδο (Β).

5.6.3 Επίδραση Του Υδροφόρου Οριζοντα

5.6.3.1 Γενικά Στοιχεία

Η επίδραση του υδροφόρου οριζοντα εξετάζεται τόσο ως προς την επιπλέον φόρτιση που θα επιφέρει στην άμεση υποστήριξη η ύπαρξη του νερού, όσο και ως προς την επίδραση που θα επιφέρει μέσω της μείωσης των γεωτεχνικών ιδιοτήτων της εκάστοτε περίπτωσης, σε μια περιοχή $1,5 \cdot D$ γύρω από την σήραγγα (Weak Zone), λόγω του «ξεπλύματος» των γεωλικών, που ενδεχομένως να προκύπτει από την ροή του νερού.

Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί πως κατά την κατασκευή των σηράγγων πραγματοποιούνται αποστραγγιστικές οπές τριγύρω από τις εκσκαφές, ώστε να αποτονώνεται, όσο το δυνατόν περισσότερο, η πίεση του υδροφόρου οριζοντα, οπότε και τελικά αυτή, ακόμα και να υπάρχει, να μην επηρεάζει ιδιαίτερα την υποστήριξη. Οι αποστραγγιστικές οπές δεν λαμβάνονται υπόψιν στις αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν, ώστε να εξεταστεί το δυσμενέστερο δυνατό σενάριο.

Για τις αναλύσεις των δύο περιπτώσεων του υδροφόρου οριζοντα επιλέγονται οι περιπτώσεις του Τύπου 3 με υπερκείμενα $H = 300m$, του Τύπου 4 με υπερκείμενα $H = 300m$, καθώς και την περίπτωση των διδύμων σηράγγων του Τύπου 3, που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτές οι περιπτώσεις αντιπροσωπεύουν τις δυσμενέστερες περιπτώσεις, που είναι πιο πιθανές να εμφανιστούν σε διανοίξεις σηράγγων.

Ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται πως βρίσκεται 50 m άνω από τις σήραγγες, για τις αναλύσεις με την εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης. Για τις αναλύσεις του «weak zone» θεωρείται μια τετραγωνική ζώνη γύρω από τα ανοίγματα, διαστάσεων 54 x 54 m, η οποία απέχει από το κέντρο του ανοίγματος $1,5 \cdot 13,17 \approx 27,5$ m. Ακόμα, θεωρείται πως έχουν δημιουργηθεί αποστραγγιστικές οπές, οπότε και δεν επιδρά άμεσα ο υδροφόρος ορίζοντας στο άνοιγμα, ως υδροστατική πίεση, αλλά έμμεσα μέσω της χαλάρωσης των υλικών που έχει επιφέρει η ροή του.

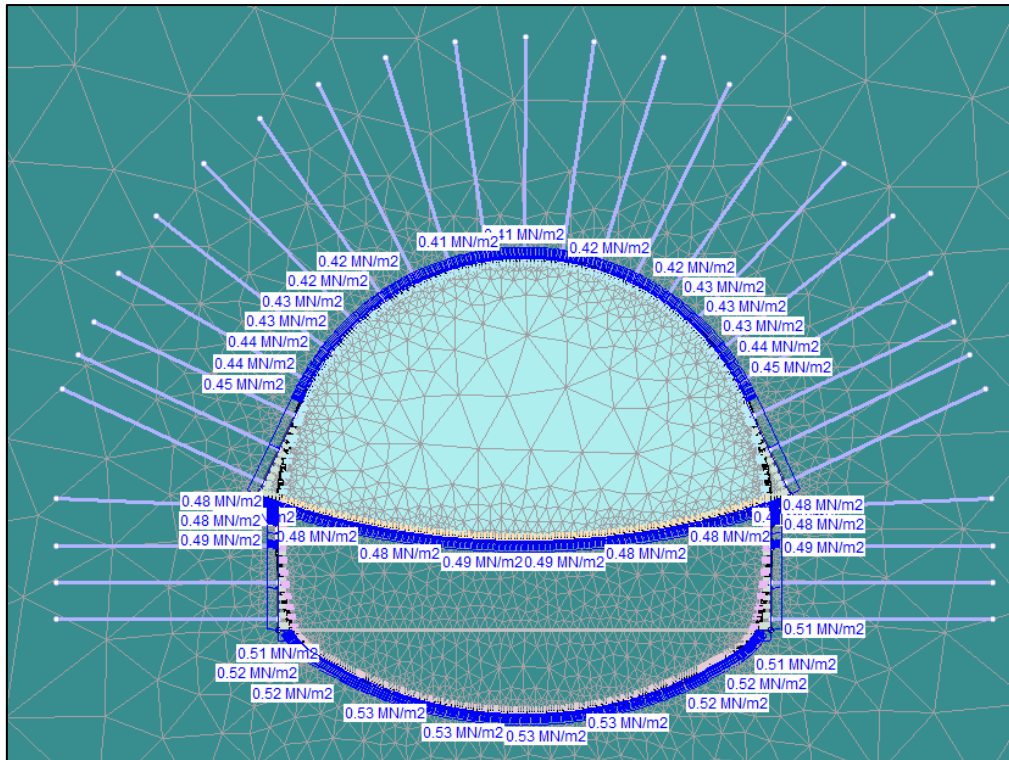
Στις παραδοχές της ανάλυσης της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να προστεθεί ακόμη πως δεν εξετάζεται καμία περίπτωση του Τύπου 2, ο οποίος κατέχει πολύ καλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και ως εκ τούτου, οι επιπλέον υδροστατικές πιέσεις δεν θα επιφέρουν κάποια σημαντική αλλαγή στην ευστάθεια του ανοίγματος. Άλλωστε όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, πραγματοποιούνται αποστραγγιστικές οπές, οπότε και πρακτικά οι υδροστατικές πιέσεις δεν επιδρούν καθόλου στις διατομές του συγκεκριμένου τύπου.

5.6.3.2 Για Τον Τύπο 3 Οφιολίθων ($H = 300$ m)

5.6.3.2.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης Υδροστατικής Πίεσης

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.19 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#). Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.1](#). Πρακτικά, πρόκειται για το ίδιο μοντέλο, με την μόνη διαφορά αυτή της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία εισάγεται στο πρόγραμμα RS2, μέσω της επιβολής ενός ομοιόμορφα κατανομημένου φορτίου γύρω από την εκσκαφή, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.52.

Για τις αναλύσεις θεωρείται πως η επίδραση του υδροφόρου ξεκινά κατά το 2^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της Α' Φάσης εκσκαφής και στη συνέχεια η επίδραση αυτή παραμένει μόνιμα και αφότου το άνοιγμα έχει εκσκαφθεί. Ακόμα, θεωρείται πως χρησιμοποιούνται τα ίδια μέτρα υποστήριξης, όπως και κατά την διάνοιξη σε στεγνές συνθήκες της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#).



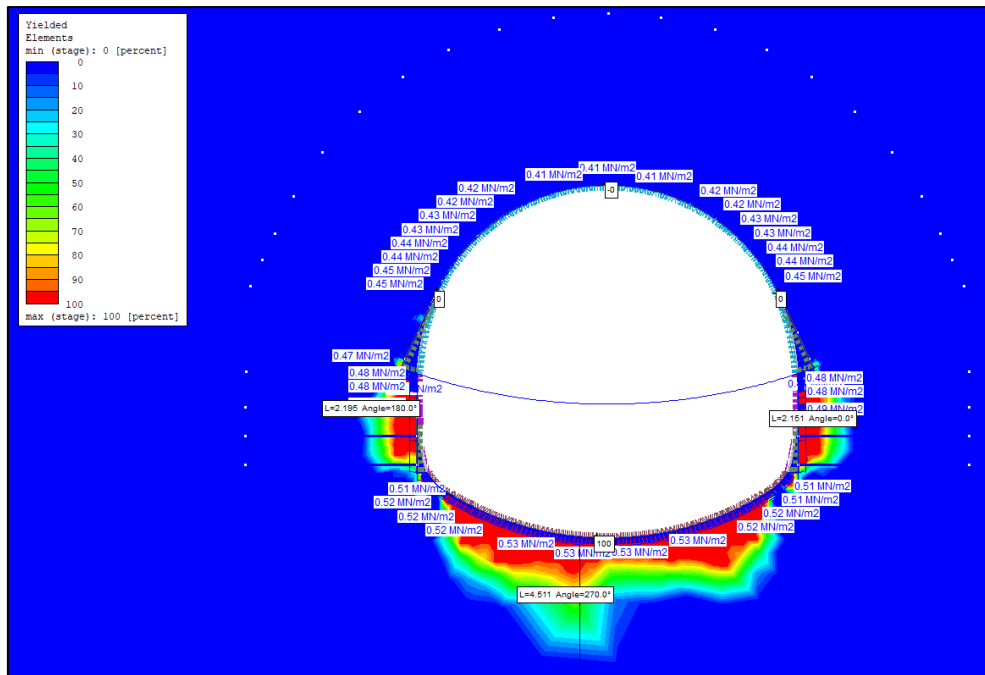
Εικόνα 5.52. Προσομοίωμα με εφαρμοσμένη την υδροστατική πίεση για τον Τύπο 3 των οφιολίθων για $H = 300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στην εν λόγω υποπαράγραφο, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.18 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#), που επαναλαμβάνεται και στη συνέχεια, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	8,59	-0,23	-1,5	0,43	0,33	680,9	169,25

Πίνακας 5.18. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 2,2m στις παρειές και περίπου 4,5m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.53.



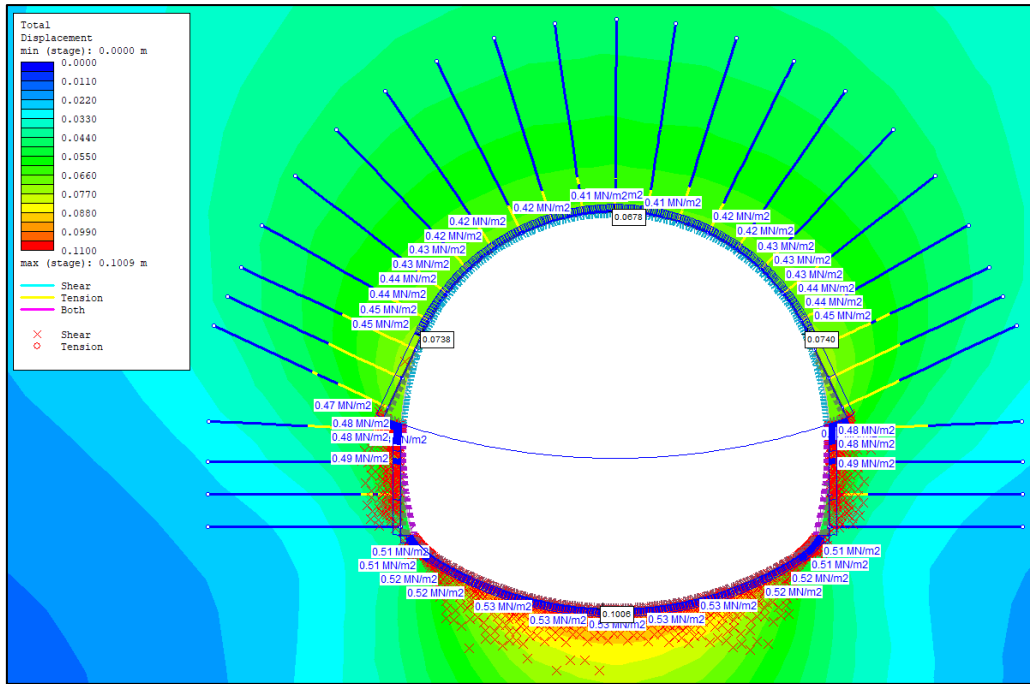
Εικόνα 5.53. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$ για γνρές συνθήκες.

Συγκριτικά με την πλαστική ζώνη της ανάλυσης που δεν λαμβάνει υπόψιν τα υδροστατικά φορτία, συμπεραίνεται πως στην «υδροστατική» ανάλυση υπάρχει ένας διπλασιασμός αυτής στο δάπεδο, ενώ στις παρειές παραμένει σε παρόμοιες τιμές.

Οι συνολικές συγκλίσεις αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.42 και στην Εικόνα 5.54. Παρατηρείται πως από την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα διαρρέει μεγαλύτερος αριθμός αγκυρίων, καθώς και ότι αυξάνονται οι συγκλίσεις της σήραγγας κατά 2 – 3 cm, φτάνοντας την μέγιστη τιμή των 10 cm στο δάπεδο.

Τύπος 3 (300m)		
Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Χωρίς Υδροστατική Πίεση	Με Υδροστατική Πίεση
Στέψη	5,24	6,78
Δεξιά Παρειά	5,81	7,40
Αριστερή Παρειά	5,80	7,38
Δάπεδο	7,80	10,06

Πίνακας 5.42. Συγκριτικά αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 3 για $H = 300m$ με και χωρίς υδροστατική πίεση.



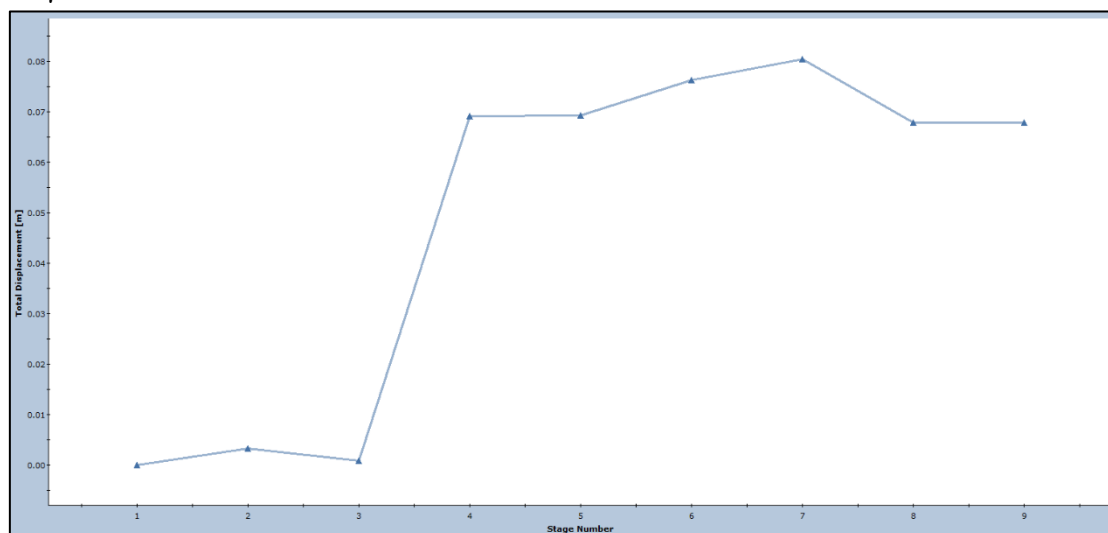
Εικόνα 5.54. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των αγκυριών βράχου για την υδροστατική ανάλυση του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300\text{m}$.

5.6.3.2.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Υδροστατικής Πίεσης

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως σε γενικές γραμμές κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχώμαζας, με δεδομένη την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο σύνολο του ανοίγματος, αναμένονται μέτριες συγκλίσεις στις παρειές και στο μέτωπο. Όμως σύμφωνα με την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), υπολογίστηκε ότι το μέτωπο θα παραμείνει ευσταθές, οπότε και δεν απαιτείται κάποια περεταίρω ενίσχυση αυτού.

Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.41, στον οποίο παρατηρείται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των περιπτώσεων είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, οπότε και θεωρούνται ελεγχόμενες, δεδομένου και των εφαρμοσθέντων μέτρων υποστήριξης. Βέβαια, αν κρινόταν απαραίτητη η περεταίρω μείωση των συγκλίσεων, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τα μέτρα υποστήριξης του Τύπου 4 οφιολίθων για τα υπερκείμενα με $H = 150\text{m}$, χωρίς ωστόσο να απαιτούνταν η τοποθέτηση αγκυριών μετώπου fiberglass.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.55 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχώμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως «ανακούφιση» των συγκλίσεων.



Εικόνα 5.55. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις του Τύπου 3 οφιολίθων με εφαρμογή των υδροστατικών πιέσεων για $H = 300m$.

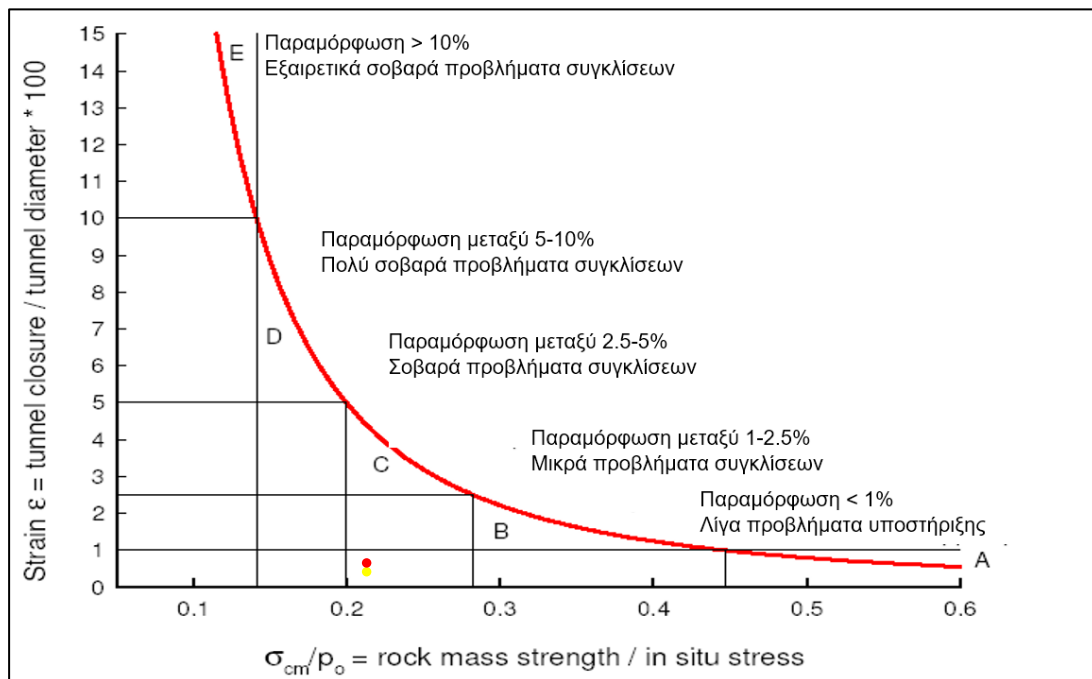
Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.56. Ο Πίνακας 5.43 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε ανάλυσης, με και χωρίς υδροστατικές πιέσεις.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Τύπος 3 χωρίς υδροστατικές πιέσεις (300m)	0,062	13,17	0,47	0,23
Τύπος 3 με υδροστατικές πιέσεις (300m)	0,079		0,6	0,23

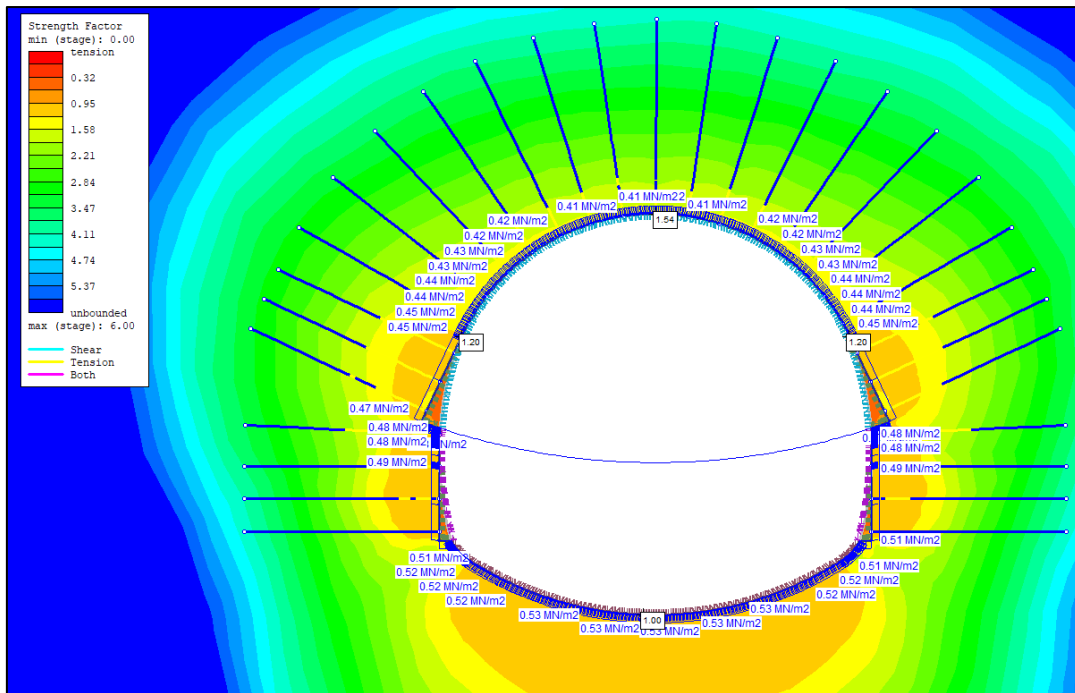
Πίνακας 5.43. Συγκριτικά δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 3 οφιολίθων ($H = 300m$) με και χωρίς εφαρμοσμένη την υδροστατική πίεση.

Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.56 συμπεραίνεται πως η σήραγγα ακόμα και με εφαρμοσμένες υδροστατικές πιέσεις βρίσκεται στην περιοχή «C», όπου η παραμόρφωση είναι μεταξύ 2,5 - 5%, οπότε και αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων. Λόγω της μικρής αύξησης των συγκλίσεων, δεν κρίνεται αναγκαίο να ενισχυθούν περαιτέρω τα μέτρα άμεσης υποστήριξης.

Τέλος, στην Εικόνα 5.57 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, εμφανίζονται στα ελεφαντοπόδαρα, σημεία με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», τα οποία όμως δεν συμβάλλουν ώστε να δημιουργηθεί κάποια εκτεταμένη αστοχία.



Εικόνα 5.56. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)

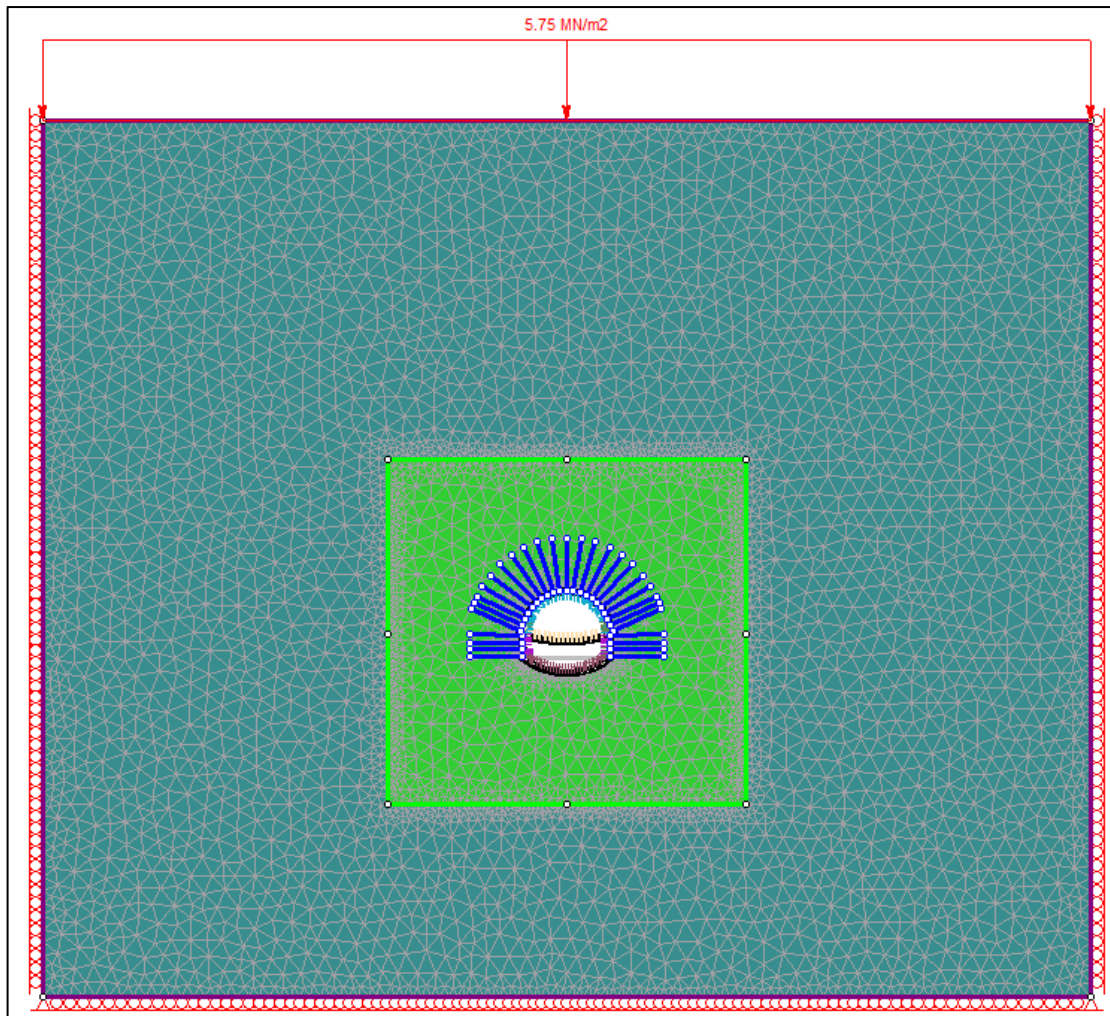


Εικόνα 5.57. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοιξές στον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300$ m με εφαρμοσμένες τις υδροστατικές πιέσεις.

5.6.3.2.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης Ζώνης Μειωμένης Αντοχής

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.58 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#). Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.1](#). Πρακτικά, πρόκειται για το ίδιο μοντέλο, με την μόνη διαφορά αυτή της επίδρασης της ζώνης μειωμένης αντοχής των χαρακτηριστικών (Weak Zone).

Για τις αναλύσεις θεωρείται πως η επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής εφαρμόζεται μετά το πέρας της κανονικής ανάλυσης και συγκεκριμένα, εφαρμόζεται κατά το 10^ο στάδιο της ανάλυσης. Ακόμα, θεωρείται πως χρησιμοποιούνται τα ίδια μέτρα υποστήριξης, όπως και κατά την διάνοιξη σε στεγνές συνθήκες της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#).



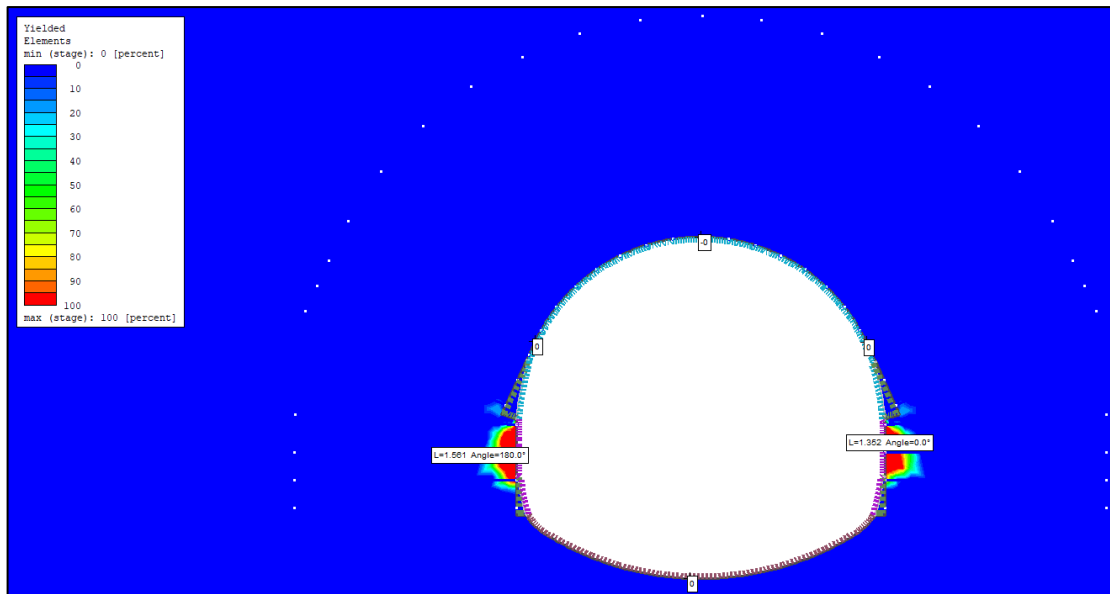
Εικόνα 5.58. Προσομοίωμα με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής για τον Τύπο 3 των οφιολίθων για $H = 300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στην εν λόγω υποπαράγραφο, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.18 της υποπαραγράφου, που αποτυπώνεται και ακολούθως για λόγους πληρότητας της ανάλυσης, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	8,59	-0,23	-1,5	0,43	0,33	680,9	169,25

Πίνακας 5.18. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 1,5m μόνο στις παρειές όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.59.



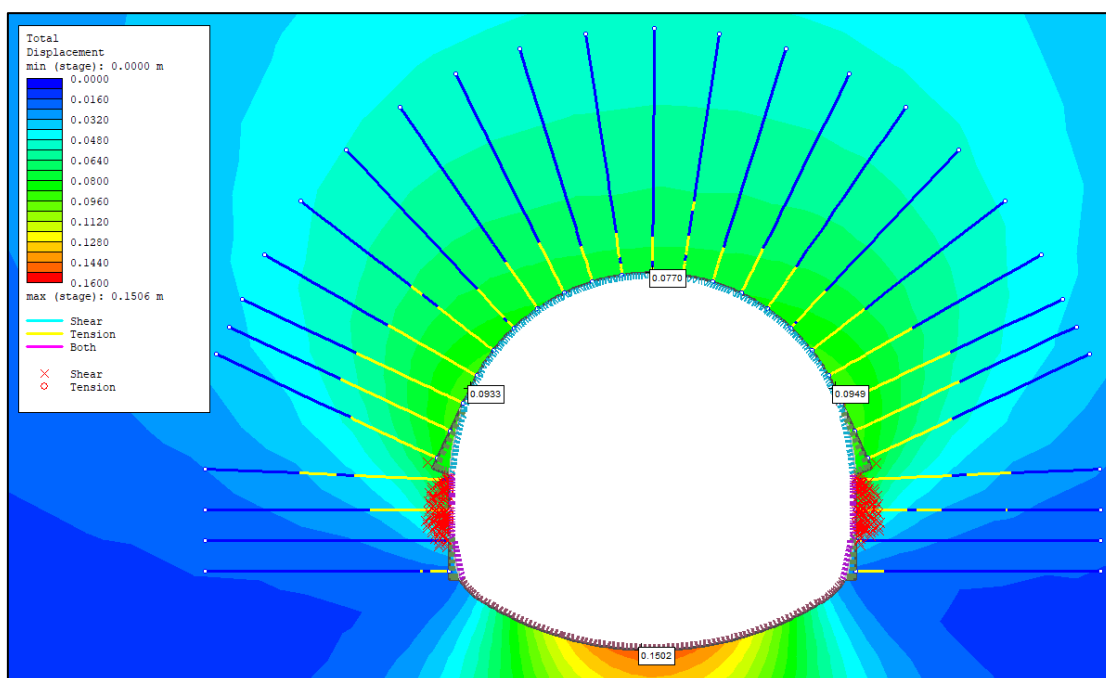
Εικόνα 5.59. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$ με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

Συγκριτικά με την πλαστική ζώνη της ανάλυσης που δεν λαμβάνει υπόψιν την ζώνη μειωμένης αντοχής (Weak Zone), συμπεραίνεται πως πρακτικά αναπτύσσεται το ίδιο μήκος πλαστικής περιοχής τριγύρω από τη σήραγγα.

Οι συνολικές συγκλίσεις αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.44 και στην Εικόνα 5.60. Παρατηρείται πως από την επίδραση της ζώνης απομείωσης λόγω της δράσης του υδροφόρου ορίζοντα, διαρρέει μεγαλύτερος αριθμός αγκυρίων, καθώς και ότι αυξάνονται οι συγκλίσεις της σήραγγας, φτάνοντας την μέγιστη τιμή των 15 cm στο δάπεδο.

Τύπος 3 (300m)		
Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής	Με την ζώνη μειωμένης αντοχής
Στέψη	5,24	7,70
Δεξιά Παρειά	5,81	9,49
Αριστερή Παρειά	5,80	9,33
Δάπεδο	7,80	15,02

Πίνακας 5.44. Συγκριτικά αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 3 για $H = 300m$ με και χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής



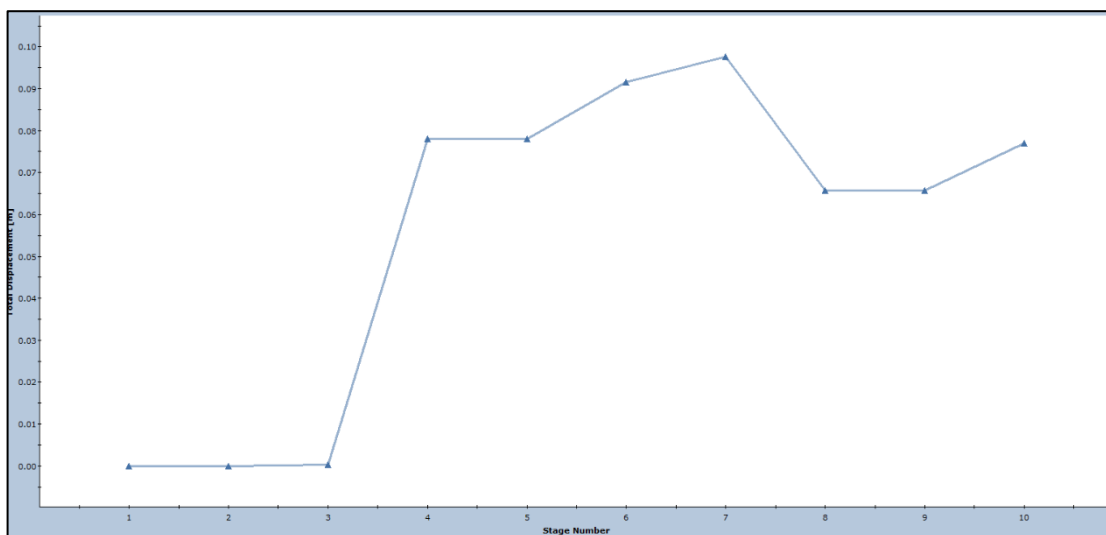
Εικόνα 5.60. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχόμαζας και σημεία διαρροής των αγκυρίων βράχου για την ανάλυση του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300\text{m}$ με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

5.6.3.2.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Της Ζώνης Μειωμένης Αντοχής

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως σε γενικές γραμμές κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχόμαζας, με δεδομένη την επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής σε περιοχή τριγύρω από το άνοιγμα, αναμένονται μέτριες προς μεγάλες συγκλίσεις στις παρειές, στο δάπεδο και στο μέτωπο της εκσκαφής. Σύμφωνα με την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), υπολογίστηκε ότι το μέτωπο θα παραμείνει ευσταθές, οπότε και δεν απαιτείται κάποια περεταίρω ενίσχυση αυτού.

Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.43, στον οποίο παρατηρείται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των περιπτώσεων είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, οπότε και θεωρούνται ελεγχόμενες, δεδομένου και των εφαρμοσθέντων μέτρων υποστήριξης. Βέβαια, θα ήταν προς το μέρος της ασφάλειας να ειπωθεί πως κρίνεται απαραίτητη η μείωση των συγκλίσεων, ειδικά του δαπέδου, οπότε και θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τα μέτρα υποστήριξης του Τύπου 4 οφιολίθων για τα υπερκείμενα με $H = 150\text{m}$.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.61 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχώμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως «ανακούφιση» των συγκλίσεων. Όμως, στο τελικό στάδιο, λόγω της ύπαρξης της ζώνη μειωμένης αντοχής παρατηρείται μια αύξηση των συγκλίσεων, όπως και αναμενόταν.



Εικόνα 5.61. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις του Τύπου 3 οφιολίθων με εφαρμογή της ζώνης μειωμένης αντοχής για $H = 300m$.

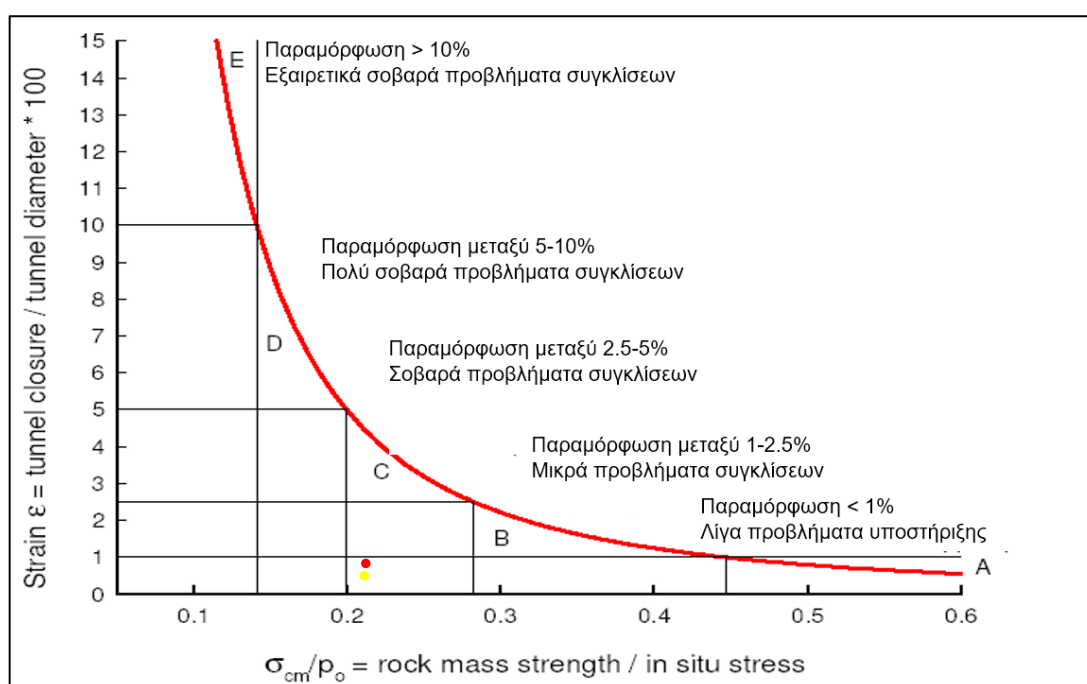
Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.62. Ο Πίνακας 5.45 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε περίπτωσης, με και χωρίς την επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Τύπος 3 χωρίς ζώνης μειωμένης αντοχής (300m)	0,062	13,17	0,47	0,23
Τύπος 3 με ζώνης μειωμένης αντοχής (300m)	0,10		0,79	0,23

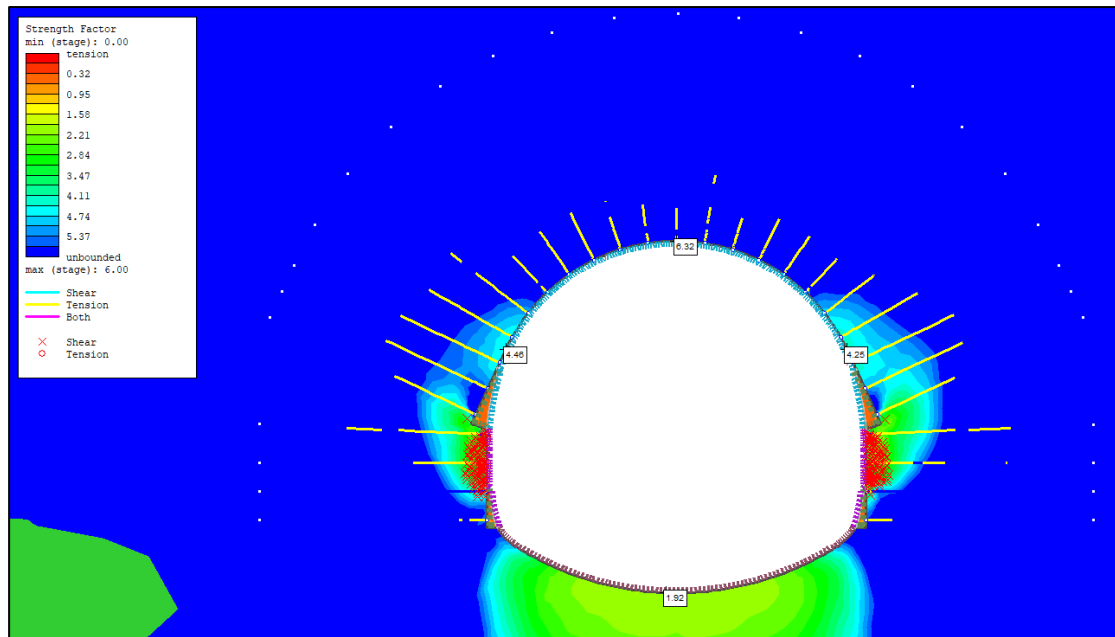
Πίνακας 5.45. Συγκριτικά δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 3 οφιολίθων ($H = 300m$) με και χωρίς εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.62 συμπεραίνεται πως η σήραγγα ακόμα και με εφαρμοσμένη την ζώνη απομείωσης βρίσκεται στην περιοχή «C», όπου η παραμόρφωση είναι μεταξύ 2,5 - 5%, οπότε και αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων. Παρολαυτά, λόγω της ελεγχόμενης αύξησης των συγκλίσεων, συγκριτικά με την αρχική ανάλυση, δεν κρίνεται αναγκαίο να ενισχυθούν περαιτέρω τα μέτρα άμεσης υποστήριξης.

Τέλος, στην Εικόνα 5.63 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι αρκετά άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, εμφανίζονται στα ελεφαντοπόδαρα, σημεία με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», τα οποία όμως δεν συμβάλλουν ώστε να δημιουργηθεί κάποια εκτεταμένη αστοχία.



Εικόνα 5.62. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)



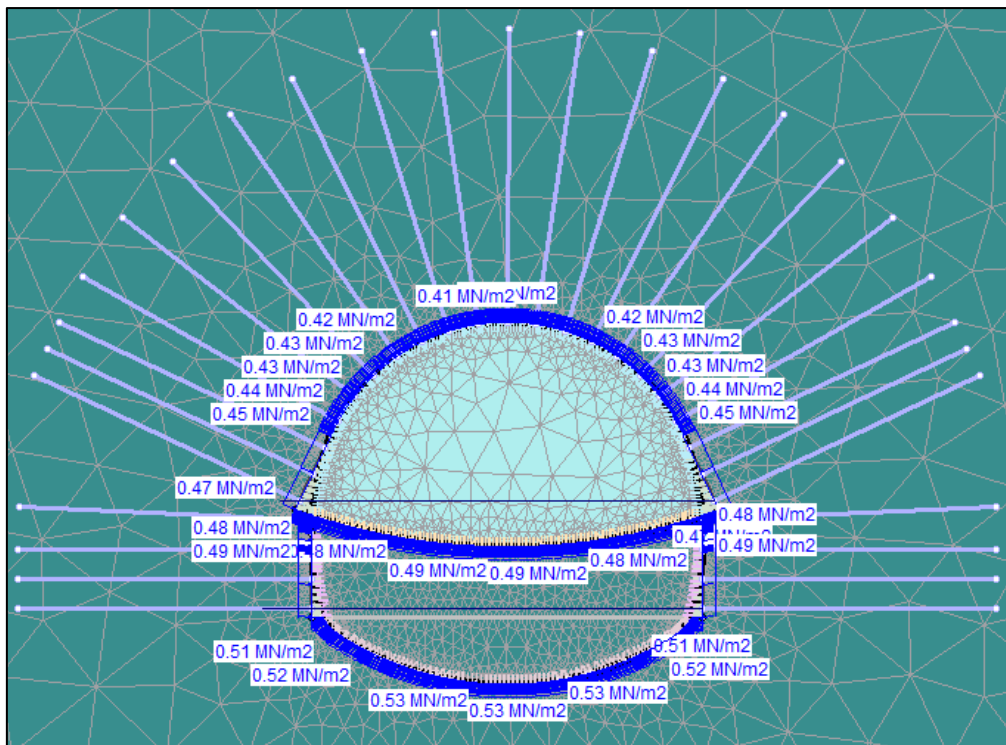
Εικόνα 5.63. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοίξεις στον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300\text{ m}$ με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

5.6.3.3 Για Τον Τύπο 4 Οφιολίθων ($H = 300\text{ m}$)

5.6.3.3.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης Υδροστατικής Πίεσης

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.19 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#). Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.1](#). Πρακτικά, πρόκειται για το ίδιο μοντέλο, με την μόνη διαφορά αυτή της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία εισάγεται στο πρόγραμμα RS2, μέσω της επιβολής ενός ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου γύρω από την εκσκαφή, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.64.

Για τις αναλύσεις θεωρείται πως η επίδραση του υδροφόρου ξεκινά κατά το 2^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της Α' Φάσης εκσκαφής και στη συνέχεια η επίδραση αυτή παραμένει μόνιμα και αφότου το άνοιγμα έχει εκσκαφθεί. Ακόμα, θεωρείται πως χρησιμοποιούνται τα ίδια μέτρα υποστήριξης, όπως και κατά την διάνοιξη σε στεγνές συνθήκες της [Υποπαραγράφου 5.3.3.2](#).



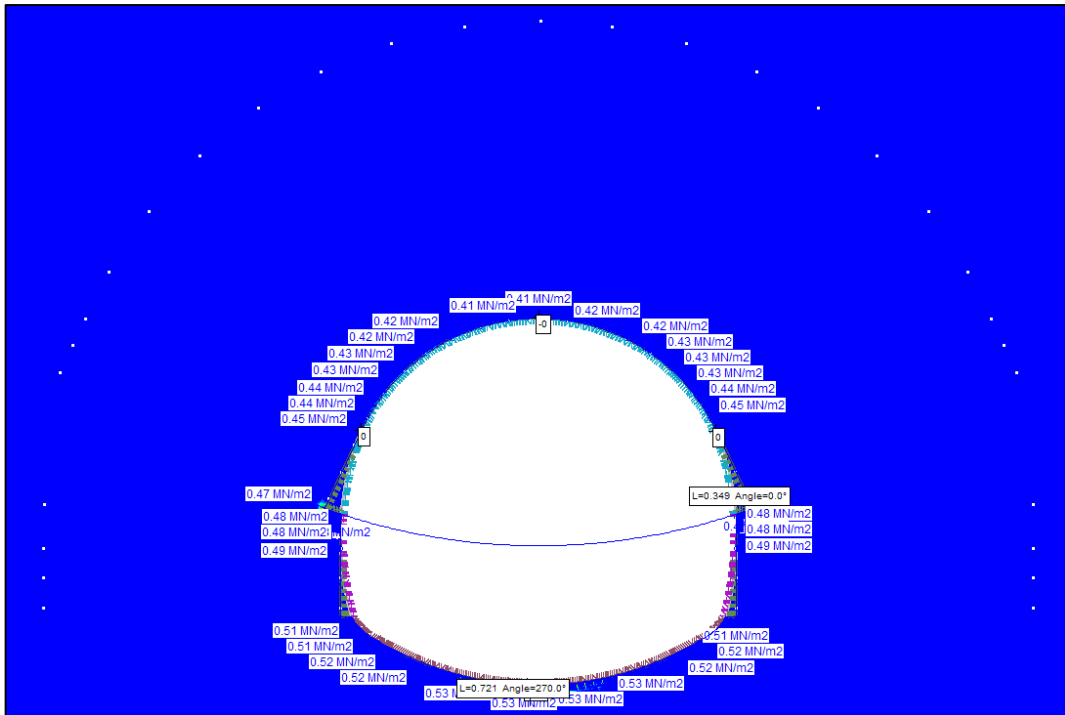
Εικόνα 5.64. Προσομοίωμα με εφαρμοσμένη την υδροστατική πίεση για τον Τύπο 4 των οφιολίθων για $H = 300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στην εν λόγω υποπαράγραφο, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.22 της [Υποπαραγράφου 5.3.3.2](#), που επαναλαμβάνεται και στη συνέχεια, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 4 (300m)										
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)	λ_{FG}	E_{FG} (MPa)
13,17	0,36	43,31	-0,11	-1	0,91	0,33	45,6	1,08	0,49	9,49

Πίνακας 5.22. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή ισούται περίπου με 0,4m στις παρειές και περίπου 0,6m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.65.



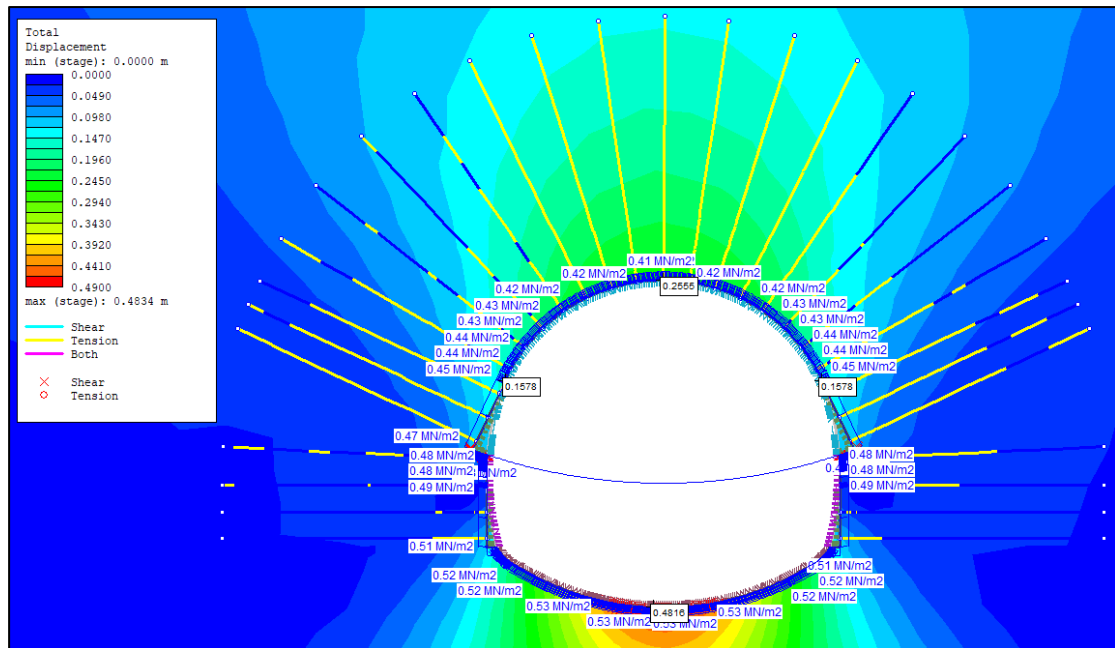
Εικόνα 5.65. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$ για υγρές συνθήκες.

Συγκριτικά με την πλαστική ζώνη της ανάλυσης που δεν λαμβάνει υπόψιν τα υδροστατικά φορτία, συμπεραίνεται πως στην «υδροστατική» ανάλυση υπάρχει μια αύξηση αυτής τόσο στο δάπεδο, όσο και στις παρειές.

Οι συνολικές συγκλίσεις αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.46 και στην Εικόνα 5.66. Παρατηρείται πως από την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα διαρρέει μεγαλύτερος αριθμός αγκυρίων, καθώς και ότι αυξάνονται αρκετά οι συγκλίσεις της σήραγγας, φτάνοντας την μέγιστη τιμή των 48 cm στο δάπεδο.

Τύπος 4 (300m)		
Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Χωρίς Υδροστατική Πίεση	Με Υδροστατική Πίεση
Στέψη	15,52	25,55
Δεξιά Παρειά	9,32	15,78
Αριστερή Παρειά	9,32	15,78
Δάπεδο	37,41	48,16

Πίνακας 5.46. Συγκριτικά αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 4 για $H = 300m$ με και χωρίς υδροστατική πίεση.



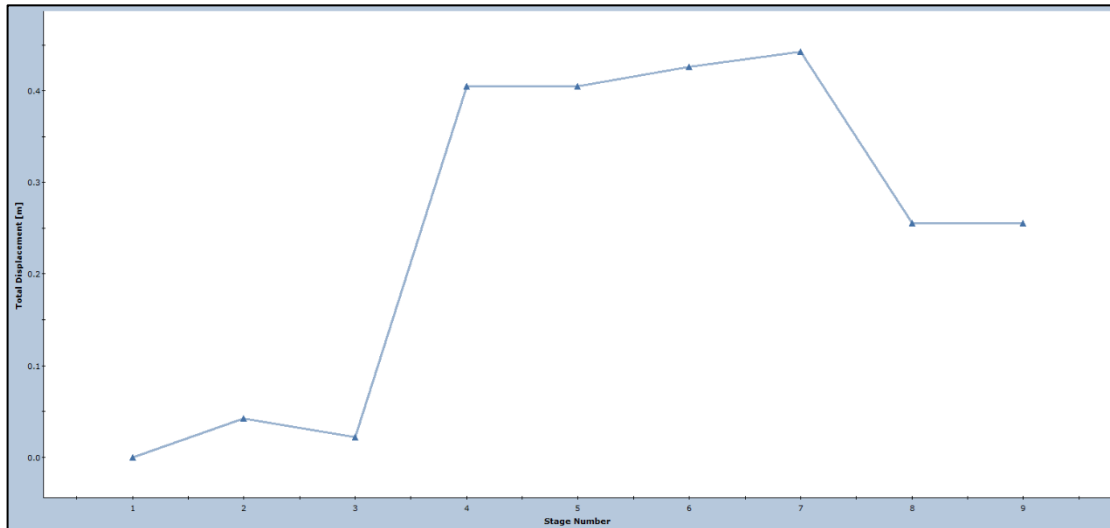
Εικόνα 5.66. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των αγκυρίων βράχου για την υδροστατική ανάλυση του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

5.6.3.3.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Υδροστατικής Πίεσης

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχώμαζας, με δεδομένη την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο σύνολο του ανοίγματος, αναμένονται ιδιαίτερα αυξημένες συγκλίσεις στις παρειές, στο δάπεδο και στο μέτωπο.

Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.45, στον οποίο παρατηρείται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των περιπτώσεων είναι της τάξης των μερικών δεκάδων εκατοστών, οπότε και δεν θεωρούνται αποδεκτές, δεδομένου και των εφαρμοσθέντων μέτρων υποστήριξης.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.67 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχώμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως «ανακούφιση» των συγκλίσεων.



Εικόνα 5.67. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων στην στέγη κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις του Τύπου 4 οφιολίθων με εφαρμογή των υδροστατικών πιέσεων για $H = 300m$.

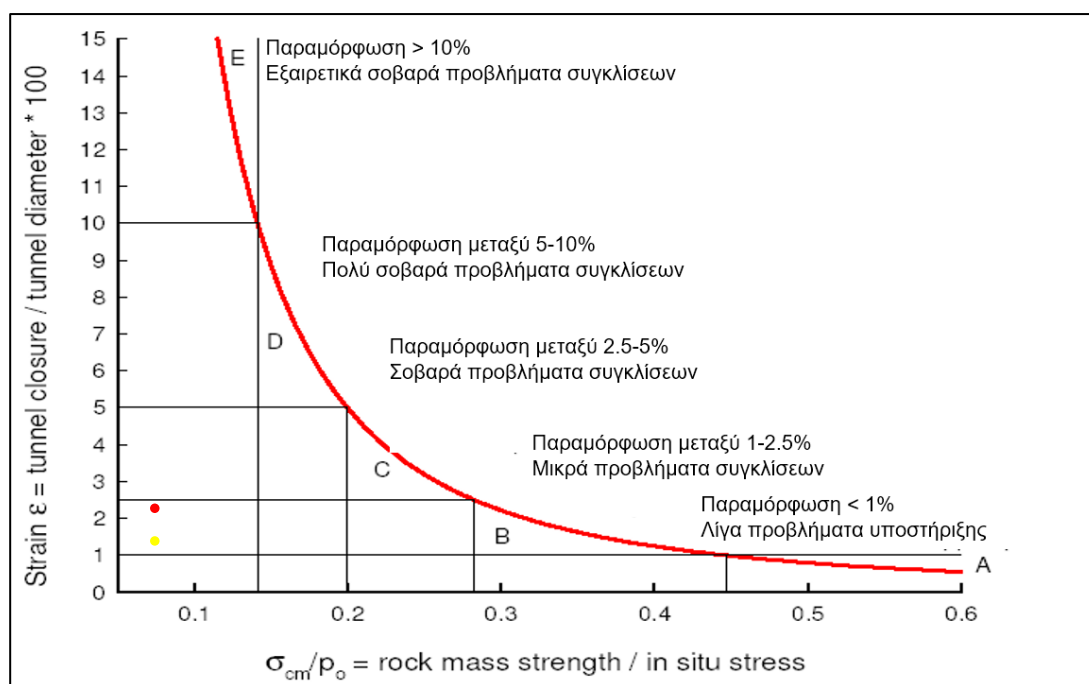
Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.68. Ο Πίνακας 5.47 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε ανάλυσης, με και χωρίς υδροστατικές πιέσεις.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_0
Τύπος 4 χωρίς υδροστατικές πιέσεις (300m)	0,18	13,17	1,36	0,05
Τύπος 4 με υδροστατικές πιέσεις (300m)	0,26		2	0,05

Πίνακας 5.47. Συγκριτικά δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 4 οφιολίθων ($H = 300m$) με και χωρίς εφαρμοσμένη την υδροστατική πίεση.

Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.68 συμπεραίνεται πως η σήραγγα ακόμα και με εφαρμοσμένες υδροστατικές πιέσεις βρίσκεται στην δυσμενέστερη περιοχή «Ε», όπου η παραμόρφωση είναι $>10\%$, οπότε και αναμένονται εξαιρετικά σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων.

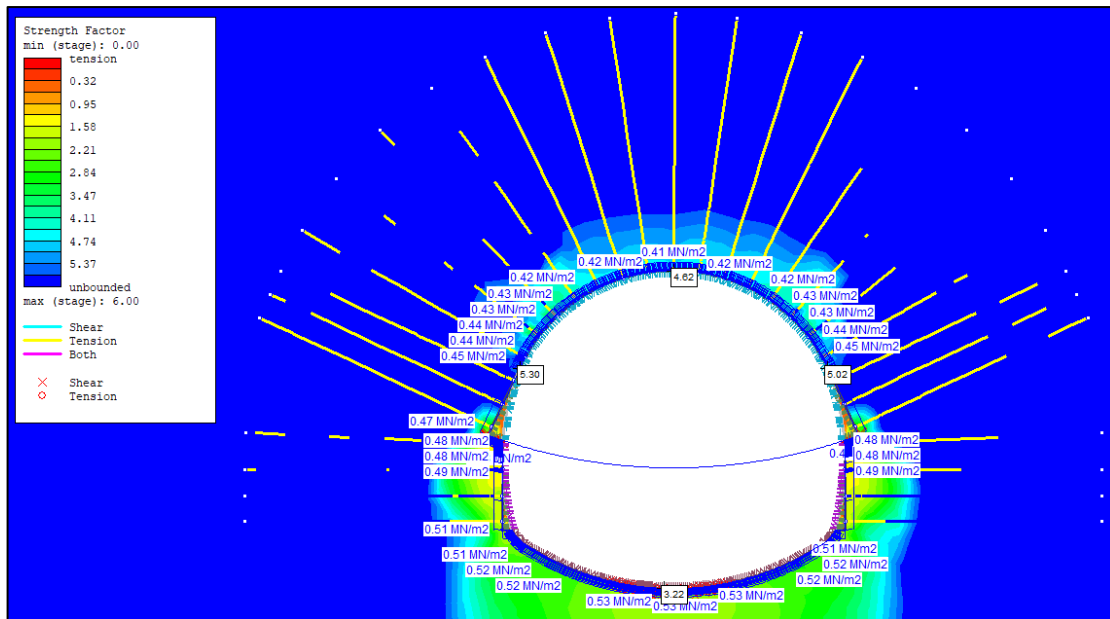
Συνεπώς, με βάση τα ανωτέρω κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω μείωση των συγκλίσεων. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς και με παράλληλη αύξηση της φέρουσας ικανότητας των αγκυρίων. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, πως το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα ξεπέραγε κατά πολύ το 1m σε όλες τις πλευρές της διατομής, οπότε και θα ήταν δόκιμη η εφαρμογή «θυσιάζουσας» υποστήριξης.



Εικόνα 5.68. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)

Τέλος, στην Εικόνα 5.69 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης.

Από αυτές συμπεραίνεται τα μέτρα υποστήριξης στο άνοιγμα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, λόγω της εκτενούς διαρροής σε εφελκυσμό των αγκυρίων και λόγω της εμφάνισης σημείων στα ελεφαντοπόδαρα με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω κρίνεται αναγκαία η επιπλέον εφαρμογή μέτρων υποστήριξης.

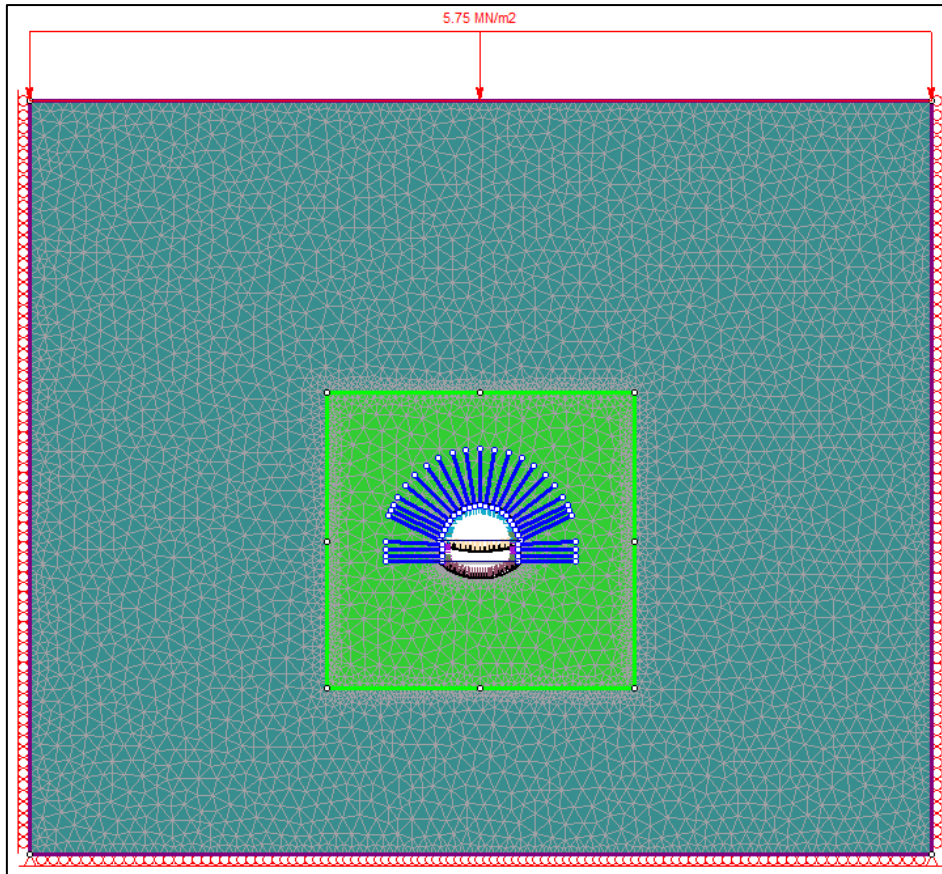


Εικόνα 5.69. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοίξεις στον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 300\text{ m}$ με εφαρμοσμένες τις υδροστατικές πιέσεις.

5.6.3.3.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης Της Ζώνης Μειωμένης Αντοχής

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.19 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#). Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.15 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.1](#). Πρακτικά, πρόκειται για το ίδιο μοντέλο, με την μόνη διαφορά αυτή της επίδρασης της ζώνης μειωμένης αντοχής των χαρακτηριστικών (Weak Zone).

Για τις αναλύσεις θεωρείται πως η επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής εφαρμόζεται μετά το πέρας της κανονικής ανάλυσης και συγκεκριμένα, εφαρμόζεται κατά το 10^ο στάδιο της ανάλυσης. Ακόμα, θεωρείται πως χρησιμοποιούνται τα ίδια μέτρα υποστήριξης, όπως και κατά την διάνοιξη σε στεγνές συνθήκες της [Υποπαραγράφου 5.3.3.2](#).



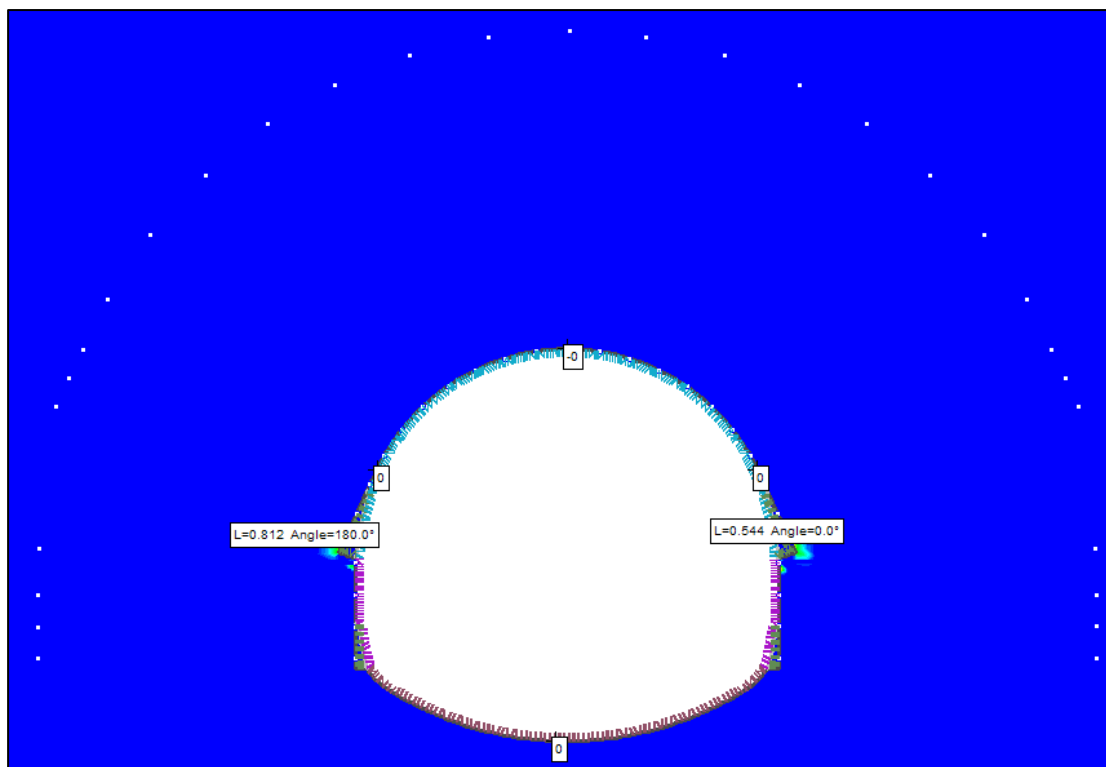
Εικόνα 5.70. Προσομοίωμα με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής για τον Τύπο 3 των οφιολίθων για $H = 300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στην εν λόγω υποπαράγραφο, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.22 της [Υποπαραγράφου 5.3.3.2](#), που αποτυπώνεται και ακολούθως για λόγους πληρότητας της ανάλυσης, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 4 (300m)										
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)	λ_{FG}	E_{FG} (MPa)
13,17	0,36	43,31	-0,11	-1	0,91	0,33	45,6	1,08	0,49	9,49

Πίνακας 5.22. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από την εκσκαφή λαμβάνει μέγιστη τιμή περίπου με 0,8 m μόνο στις παρειές όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.71.



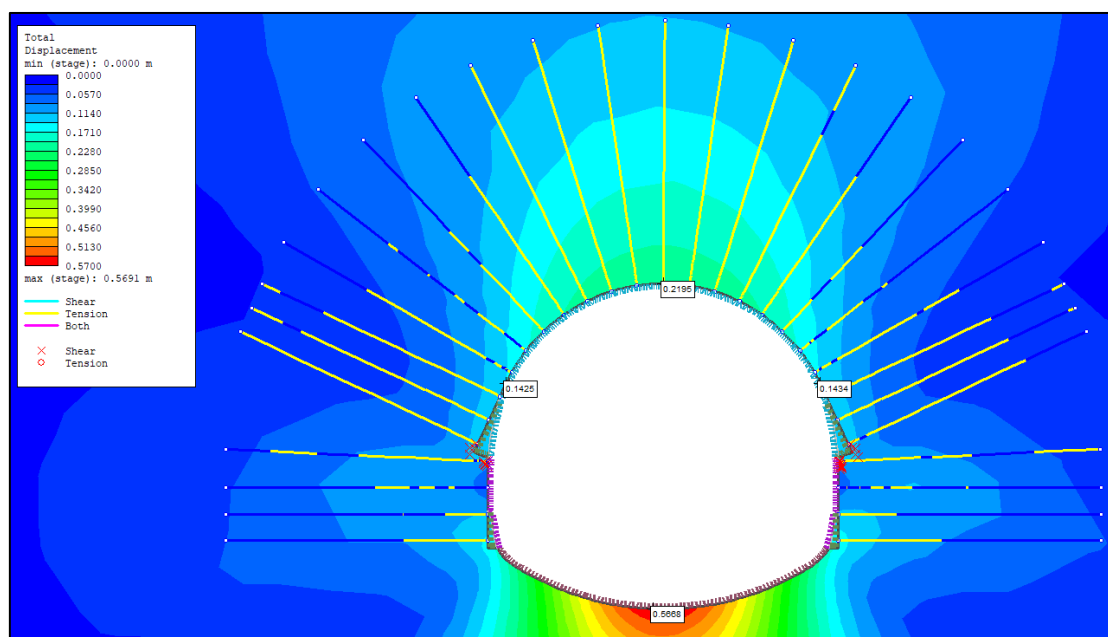
Εικόνα 5.71. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 300m$ με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

Συγκριτικά με την πλαστική ζώνη της ανάλυσης που δεν λαμβάνει υπόψιν την ζώνη μειωμένης αντοχής (Weak Zone), συμπεραίνεται πως υπάρχει μια αύξηση της πλαστικής ζώνης που αναπτύσσεται γύρω από τη σήραγγα.

Οι συνολικές συγκλίσεις αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.48 και στην Εικόνα 5.72. Παρατηρείται πως από την επίδραση της ζώνης απομείωσης λόγω της δράσης του υδροφόρου ορίζοντα, διαρρέει μεγαλύτερος αριθμός αγκυρίων, καθώς και ότι αυξάνονται οι συγκλίσεις της σήραγγας, φτάνοντας την μέγιστη τιμή των 15 cm στο δάπεδο.

Τύπος 4 (300m)		
Σύγκλιση «u» (cm)		
Σημείο	Χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής	Με την ζώνη μειωμένης αντοχής
Στέψη	15,52	21,95
Δεξιά Παρειά	9,32	14,34
Αριστερή Παρειά	9,32	14,25
Δάπεδο	37,41	56,68

Πίνακας 5.48. Συγκριτικά αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τον Τύπο 4 για $H = 300\text{m}$ με και χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής.



Εικόνα 5.72. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των αγκυρίων βράχου για την ανάλυση του Τύπου 4 οφιολίθων για $H = 300\text{m}$ με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

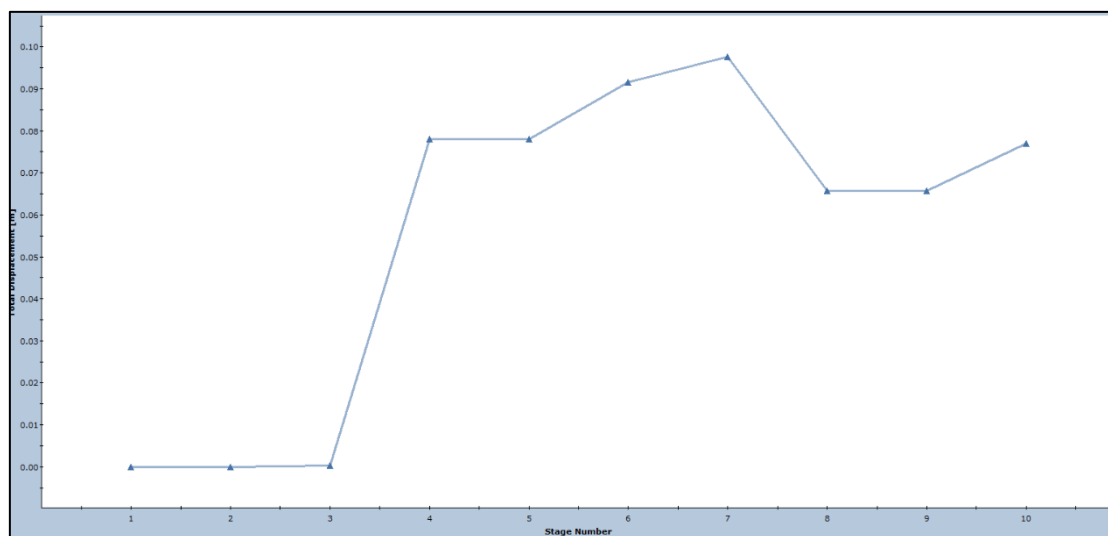
5.6.3.3.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Της Ζώνης Μειωμένης Αντοχής

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχώμαζας, με δεδομένη την επίδραση της ζώνη μειωμένης αντοχής σε περιοχή τριγύρω από το άνοιγμα, αναμένονται μεγάλες συγκλίσεις στις παρειές, στο δάπεδο και στο μέτωπο της εκσκαφής. Σύμφωνα με την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), υπολογίστηκε ότι το μέτωπο θα παραμείνει ευσταθές, με τα εφαρμοσμένα μέτρα υποστήριξης, οπότε και δεν απαιτείται κάποια περεταίρω ενίσχυση αυτού.

Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.47, στον οποίο φαίνεται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των περιπτώσεων είναι της τάξης των μερικών δεκάδων εκατοστών, οπότε και δεν θεωρούνται αποδεκτές, δεδομένου και των εφαρμοσθέντων μέτρων υποστήριξης.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.73 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχώμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως «ανακούφιση» των

συγκλίσεων. Όμως, στο τελικό στάδιο, λόγω της ύπαρξης της ζώνης απομείωσης παρατηρείται μια αύξηση των συγκλίσεων, όπως και αναμενόταν.



Εικόνα 5.73. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις του Τύπου 4 οφιολίθων με εφαρμογή της ζώνης μειωμένης αντοχής για $H = 300m$.

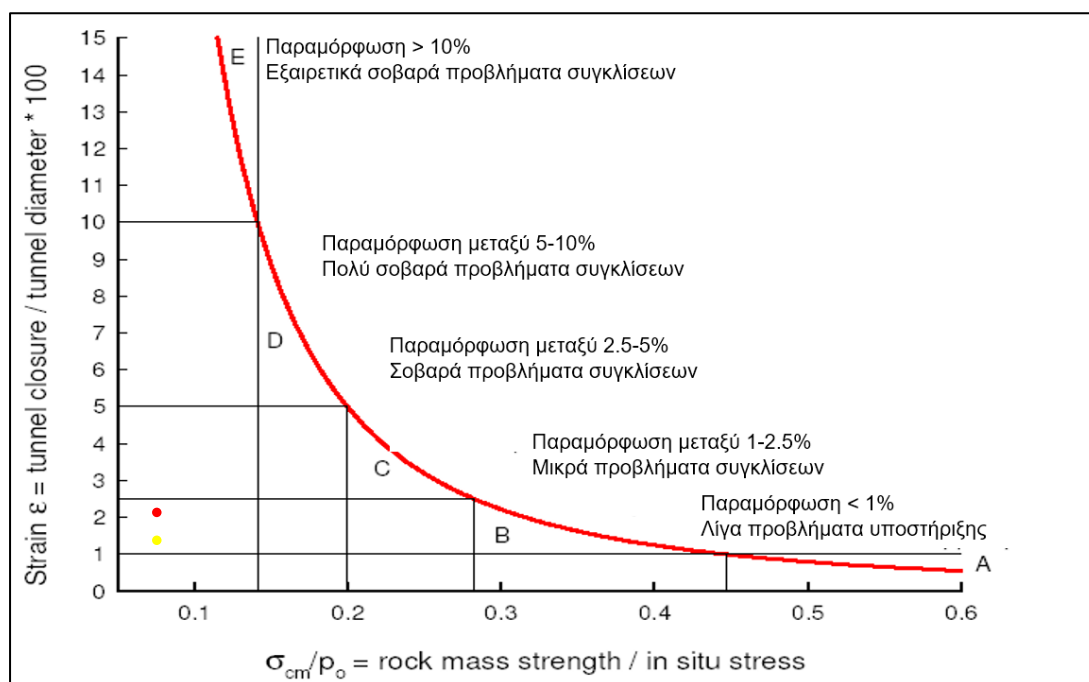
Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.74. Ο Πίνακας 5.49 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε περίπτωσης, με και χωρίς την επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Τύπος 4 χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής (300m)	0,18	13,17	1,36	0,05
Τύπος 4 με την ζώνη μειωμένης αντοχής (300m)	0,27		2,04	0,05

Πίνακας 5.49. Συγκριτικά δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τον Τύπο 4 οφιολίθων ($H = 300m$) με και χωρίς εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

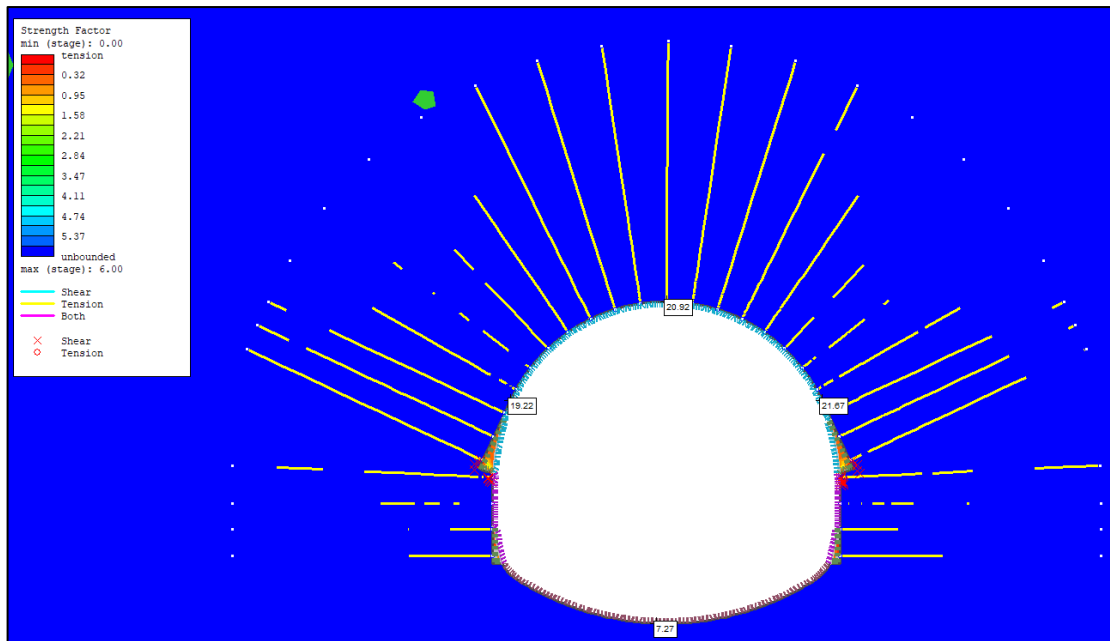
Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.74 συμπεραίνεται πως η σήραγγα ακόμα και με εφαρμοσμένη την ζώνη απομείωσης βρίσκεται στην δυσμενέστερη περιοχή «Ε», όπου η παραμόρφωση είναι $>10\%$, οπότε και αναμένονται εξαιρετικά σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων.

Συνεπώς, με βάση τα ανωτέρω κρίνεται απαραίτητη η περεταίρω μείωση των συγκλίσεων. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς και με παράλληλη αύξηση της φέρουσας ικανότητας των αγκυρίων. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, πως το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα ξεπέρανε κατά πολύ το 1m σε όλες τις πλευρές της διατομής, οπότε και θα ήταν δόκιμη η εφαρμογή «θυσιάζουσας» υποστήριξης.



Εικόνα 5.74. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)

Τέλος, στην Εικόνα 5.75 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται τα μέτρα υποστήριξης στο άνοιγμα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι αρκετά άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, λόγω της εκτενούς διαρροής σε εφελκυσμό των αγκυρίων και λόγω της εμφάνισης σημείων στα στοιχεία θεμελίωσης μεταλλικών πλαισίων με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω κρίνεται αναγκαία η επιπλέον εφαρμογή μέτρων υποστήριξης.



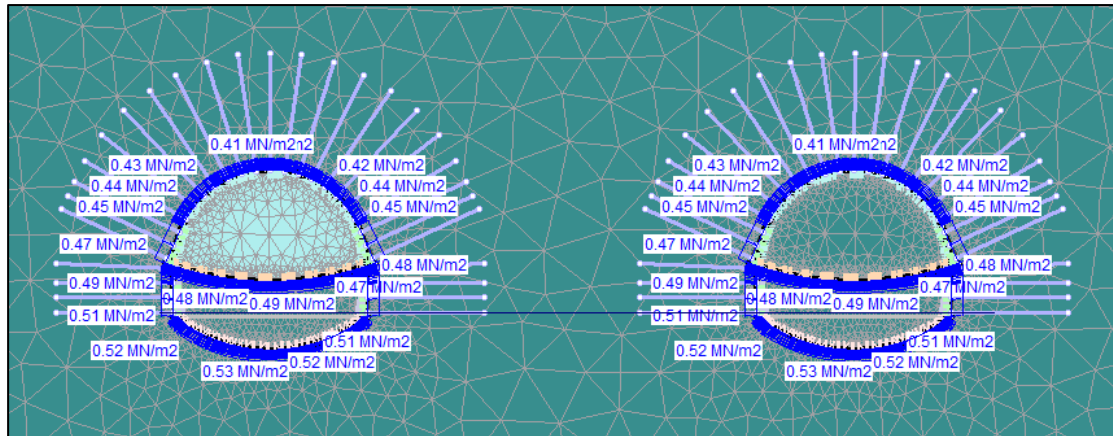
Εικόνα 5.75. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοίξεις στον Τύπο 4 οφιολίθων για $H = 300\text{ m}$ με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

5.6.3.4 Για Τις Δίδυμες Σήραγγες Τύπου 3 Οφιολίθων (300m)

5.6.3.4.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης Υδροστατικής Πίεσης

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.37 της [Υποπαραγράφου 5.5.2.3](#). Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.30 της ίδιας υποπαραγράφου. Πρακτικά, πρόκειται για το ίδιο μοντέλο, με την μόνη διαφορά αυτή της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία εισάγεται στο πρόγραμμα RS2, μέσω της επιβολής ενός ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου γύρω από την εκσκαφή, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.76.

Για τις αναλύσεις θεωρείται πως η επίδραση του υδροφόρου ξεκινά κατά το 2^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της Α' Φάσης εκσκαφής του αριστερού κλάδου και στη συνέχεια η επίδραση αυτή παραμένει μόνιμα και αφότου το άνοιγμα έχει εκσκαφθεί. Ακόμα, θεωρείται πως χρησιμοποιούνται τα ίδια μέτρα υποστήριξης, όπως και κατά την διάνοιξη σε στεγνές συνθήκες της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#).



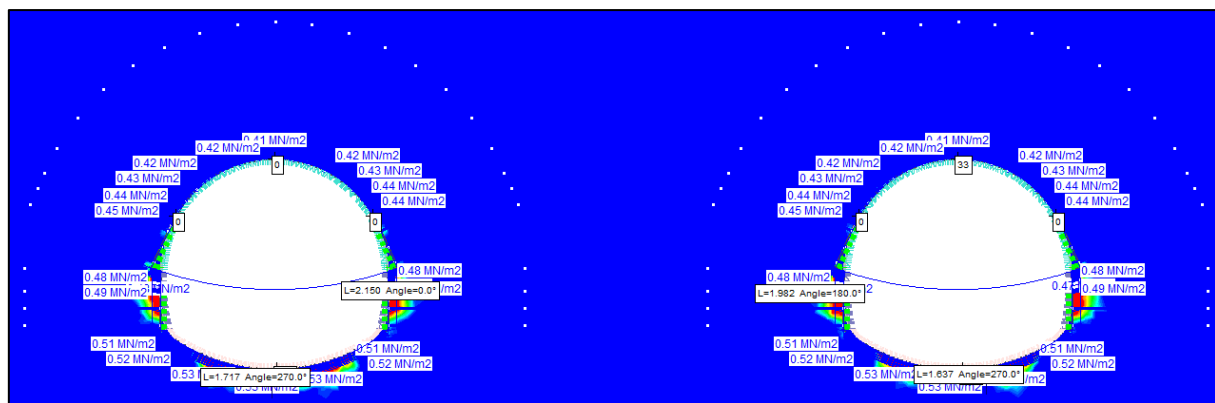
Εικόνα 5.76. Προσομοίωμα με εφαρμοσμένη την υδροστατική πίεση για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 των οφιολίθων για $H = 300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στην εν λόγω υποπαράγραφο, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.18 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#), που επαναλαμβάνεται και στη συνέχεια, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	8,59	-0,23	-1,5	0,43	0,33	680,9	169,25

Πίνακας 5.18. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από τον αριστερό κλάδο ισούται περίπου με 2,2 m στις παρειές και περίπου 1,7 m στο δάπεδο, ενώ στον δεξιό κλάδο ισούται περίπου με 2 m στις παρειές και περίπου 1,5m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.77.



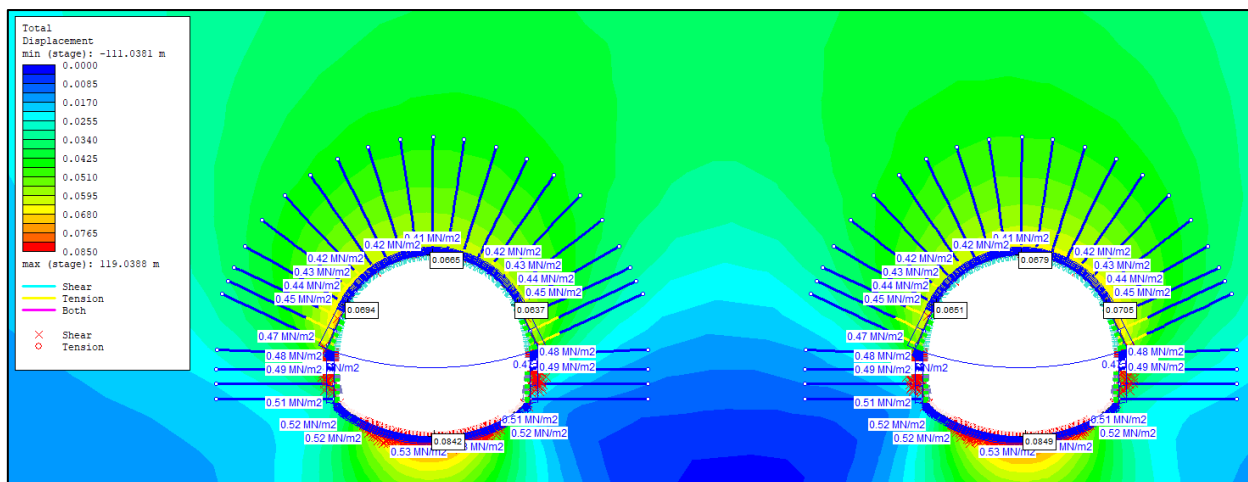
Εικόνα 5.77. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$ για υγρές συνθήκες.

Συγκριτικά με την πλαστική ζώνη της ανάλυσης που δεν λαμβάνει υπόψιν τα υδροστατικά φορτία, συμπεραίνεται πως στην «υδροστατική» ανάλυση υπάρχει μια αύξηση αυτής στο δάπεδο, ενώ στις παρειές παραμένει σε παρόμοιες τιμές.

Οι συνολικές συγκλίσεις αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.50 και στην Εικόνα 5.78 παρατηρείται πως από την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα διαρρέει μεγαλύτερος αριθμός αγκυρίων, καθώς και ότι αυξάνονται οι συγκλίσεις της σήραγγας κατά 1 – 2 cm, φτάνοντας την μέγιστη τιμή των 8,5 cm στο δάπεδο του δεξιού κλάδου.

Δίδυμες Σήραγγες - Τύπος 3 (300m)				
Σύγκλιση «u» (cm)				
	<i>Χωρίς Υδροστατικές Πιέσεις</i>		<i>Με Υδροστατικές Πιέσεις</i>	
Σημείο	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Στέψη	6,08	6,18	6,65	6,79
Δεξιά Παρειά	5,88	6,41	6,37	7,05
Αριστερή Παρειά	6,34	5,98	6,94	6,51
Δάπεδο	7,54	7,60	8,42	8,49

Πίνακας 5.50. Συγκριτικά αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 για $H = 300m$ με και χωρίς υδροστατική πίεση.



Εικόνα 5.78. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των αγκυρίων βράχου για την υδροστατική ανάλυση του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

5.6.3.4.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Υδροστατικής Πίεσης

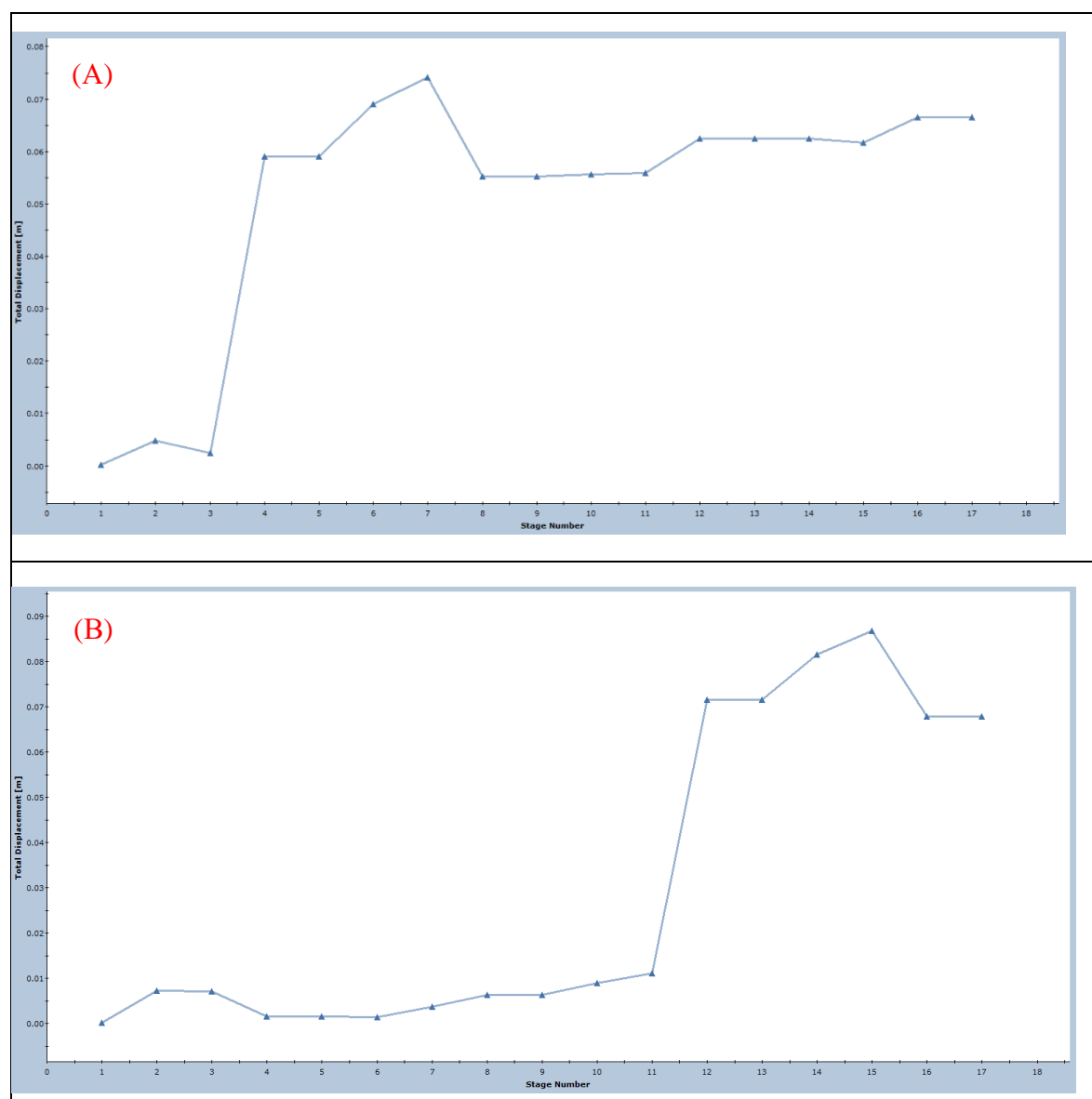
Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως σε γενικές γραμμές κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχώμαζας, με δεδομένη την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο σύνολο των δύο ανοιγμάτων, αναμένονται μέτριες συγκλίσεις στις παρείες και στο μέτωπο. Όμως σύμφωνα με την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), υπολογίστηκε ότι το μέτωπο θα παραμείνει ευσταθές, οπότε και δεν απαιτείται κάποια περεταίρω ενίσχυση αυτού.

Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.49, στον οποίο παρατηρείται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των περιπτώσεων είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, οπότε και θεωρούνται ελεγχόμενες, δεδομένου και των εφαρμοσθέντων μέτρων υποστήριξης. Βέβαια, αν κρινόταν απαραίτητη η περεταίρω μείωση των συγκλίσεων, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τα μέτρα υποστήριξης του Τύπου 4 οφιολίθων για τα υπερκείμενα με $H = 150m$, χωρίς ωστόσο να απαιτούνταν η τοποθέτηση αγκυρίων μετώπου fiberglass. Όμως, η τοποθέτηση τους θα μείωνε τις ασκούμενες τάσεις, οπότε και συνεπώς θα μείωνε και τις προκύπτουσες συγκλίσεις.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.79 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων για τον αριστερό κλάδο αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχώμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως μια

«ανακούφιση» των συγκλίσεων, οι οποίες τελικά παραμένουν σταθερές κατά την διάνοιξη του δεξιού κλάδου.

Το πλήθος των συγκλίσεων για τον δεξιό κλάδο αναπτύσσονται κατά το 11^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχόμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης συμβαίνει μια απότομη αύξηση των συγκλίσεων, η οποία, ωστόσο, διαρκεί για τέσσερα στάδια και ακολουθεί μια «ανακούφιση» των συγκλίσεων.



Εικόνα 5.79. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις των δίδυμων σηράγγων Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300m$ του αριστερού κλάδου (A) και του δεξιού κλάδου (B).

Από την Εικόνα 5.78 παρατηρείται πως κάποια από τα αγκύρια διαρρέουν σε εφελκυσμό, αλλά παρολαυτά οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις κυμαίνονται σε ελεγχόμενα επίπεδα, το οποίο σημαίνει πως η επάρκεια της υποστήριξης και στους δυο κλάδους είναι ικανοποιητική.

Λόγω τις διάνοιξης του δεύτερου κλάδου (δεξιού) δεν προκύπτει κάποια σημαντική αλληλεπίδραση με τον πρώτο (αριστερό κλάδο). Στον Πίνακα 5.51 παρουσιάζεται η αλληλεπίδρασή του δεξιού κλάδου στον αριστερό. Από αυτόν παρατηρείται πως η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλάδων είναι πρακτικά μηδενική, καθώς δεν αγγίζει ούτε το 1 cm. Σημειώνεται πως με θετικό πρόσημο νοείται η αύξηση της σύγκλισης ενώ με αρνητικό η μείωση της, η οποία συμβαίνει λόγω της αποτόνωσης της βραχόμαζας και έχει ως αποτέλεσμα τα μέτρα υποστήριξης να παραλαμβάνουν λιγότερο φορτίο, οπότε και να σταθεροποιούν το άνοιγμα.

	Στάδιο	Αλληλεπίδραση
Στέψη	<i>Υποστήριξη Α' φάσης δεξιού κλάδου</i>	+0,68 cm
	<i>Υποστήριξη Β' φάσης δεξιού κλάδου</i>	+0,41 cm
Παρείες	<i>Υποστήριξη Α' φάσης δεξιού κλάδου</i>	+0,45 cm
	<i>Υποστήριξη Β' φάσης δεξιού κλάδου</i>	-0,18 cm
Δάπεδο	<i>Υποστήριξη Α' φάσης δεξιού κλάδου</i>	-0,42 cm
	<i>Υποστήριξη Β' φάσης δεξιού κλάδου</i>	-0,01 cm

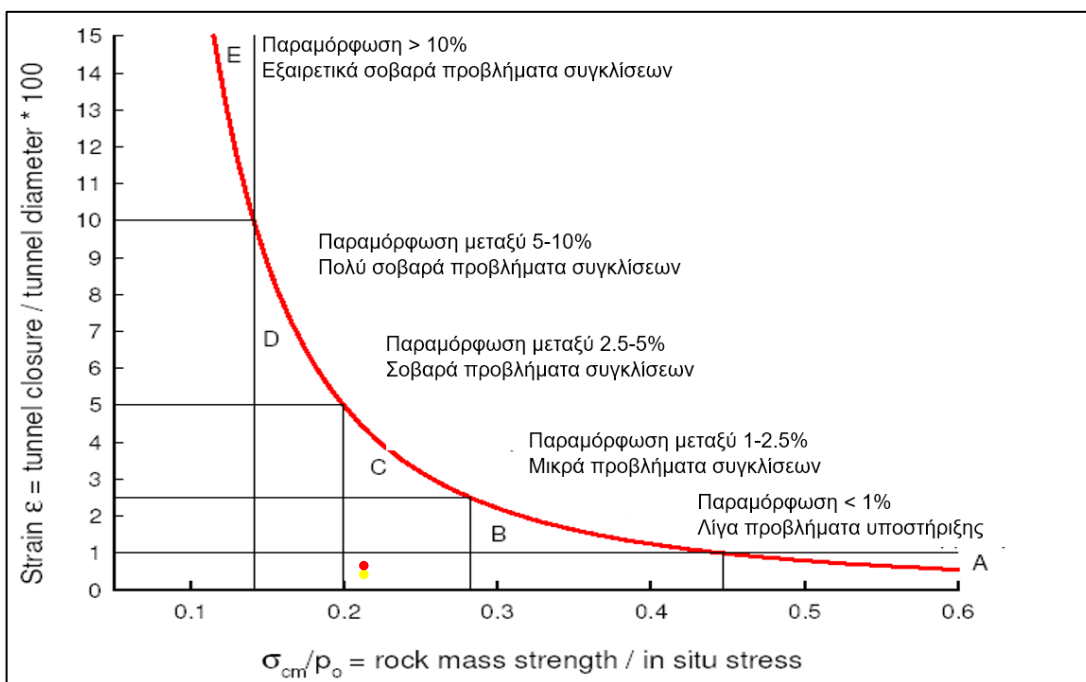
Πίνακας 5.51. Αλληλεπίδραση στον πρώτο κλάδο λόγω της εκσκαφής του δεύτερου κλάδου με επίδραση της υδροστατικής πίεσης.

Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.801. Ο Πίνακας 5.52 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε ανάλυσης, με και χωρίς υδροστατικές πιέσεις. Επειδή οι συγκλίσεις και για τις δύο περιπτώσεις κατέχουν παρεμφερείς τιμές, λαμβάνεται ο μέσος όρος για κάθε περίπτωση, στεγνή και υγρή διάνοιξη, για τις δίδυμες σήραγγες.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Τύπος 3 χωρίς υδροστατικές πιέσεις (300m)	0,065	13,17	0,49	0,23
Τύπος 3 με υδροστατικές πιέσεις (300m)	0,072		0,55	0,23

Πίνακας 5.52. Συγκριτικά δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 οφιολίθων (H = 300m) με και χωρίς εφαρμοσμένη την υδροστατική πίεση.

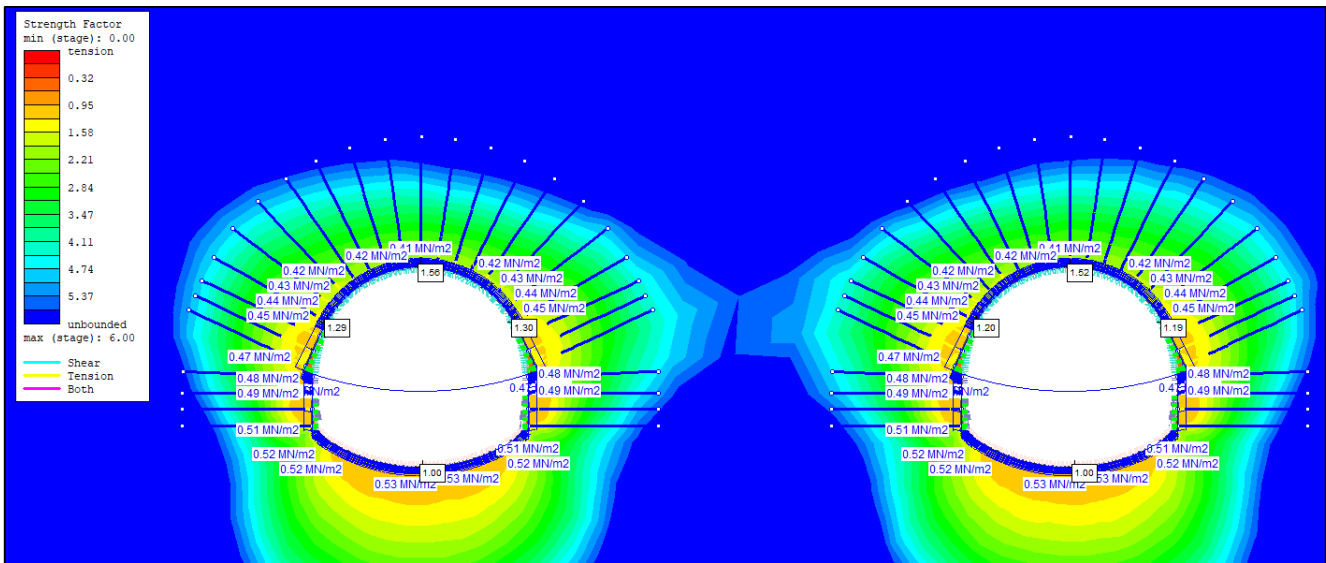
Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.80 συμπεραίνεται πως η σήραγγα ακόμα και με εφαρμοσμένες υδροστατικές πιέσεις βρίσκεται στην περιοχή «C», όπου η παραμόρφωση είναι μεταξύ 2,5 - 5%, οπότε και αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων. Λόγω της μικρής αύξησης των συγκλίσεων, ωστόσο, δεν κρίνεται αναγκαίο να ενισχυθούν περαιτέρω τα μέτρα άμεσης υποστήριξης.



Εικόνα 5.80. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)

Τέλος, στην Εικόνα 5.81 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος της εκάστοτε περίπτωσης, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι οριακά άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, εμφανίζονται στα στοιχεία

θεμελίωσης μεταλλικών πλαισίων, σημεία με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», τα οποία όμως δεν συμβάλλουν ώστε να δημιουργηθεί κάποια εκτεταμένη αστοχία.

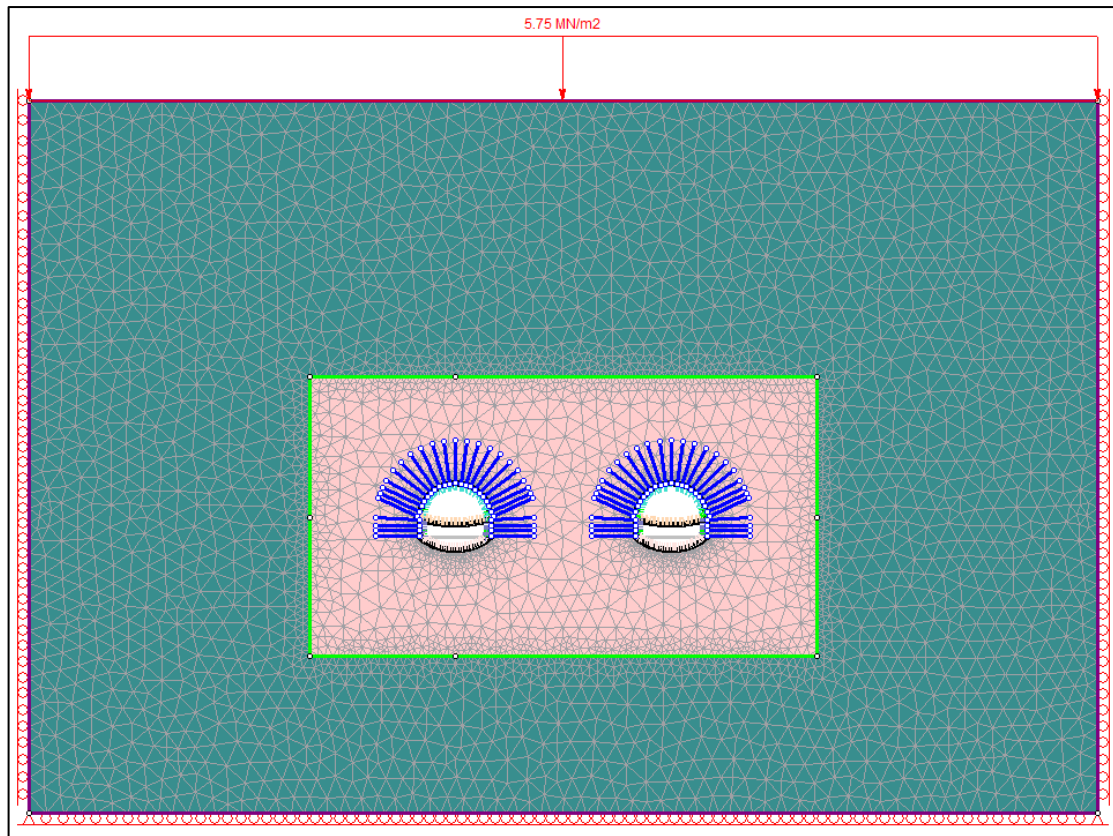


Εικόνα 5.81. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοίξεις των δίδυμων σιράγγων στον Τύπο 3 οφιολίθων για τον αριστερό (Α) και τον δεξιό κλάδο (Β) με εφαρμοσμένη την υδροστατική πίεση.

5.6.3.4.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης Της Ζώνης Μειωμένης Αντοχής

Εισάγοντας όλα τα δεδομένα για την συγκεκριμένη περίπτωση οφιολίθων προκύπτει το προσομοίωμα της Εικόνας 5.37 της [Υποπαραγράφου 5.5.2.3](#). Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.30 της ίδιας υποπαραγράφου. Πρακτικά, πρόκειται για το ίδιο μοντέλο, με την μόνη διαφορά αυτή της επίδρασης του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία εισάγεται στο πρόγραμμα RS2, μέσω της εφαρμογής μιας ζώνης μειωμένης αντοχής γύρω από την εκσκαφή (Weak Zone), όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.82.

Για τις αναλύσεις θεωρείται πως η επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής εφαρμόζεται μετά το πέρας της κανονικής ανάλυσης και συγκεκριμένα, εφαρμόζεται κατά το 18^ο στάδιο της ανάλυσης. Ακόμα, θεωρείται πως χρησιμοποιούνται τα ίδια μέτρα υποστήριξης, όπως και κατά την διάνοιξη σε στεγνές συνθήκες της [Υποπαραγράφου 5.5.2.3](#).



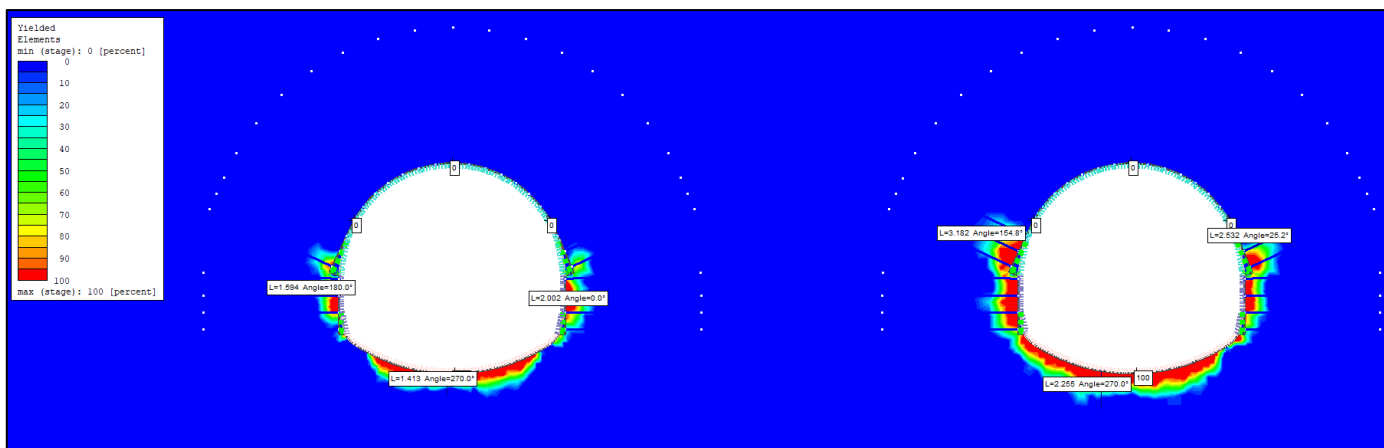
Εικόνα 5.82. Προσομοίωμα με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 των οφιολίθων για $H = 300m$.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στην εν λόγω υποπαράγραφο, καθώς και με τους συντελεστές αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.18 της [Υποπαραγράφου 5.3.2.2](#), που επαναλαμβάνεται και στη συνέχεια, διενεργείται η προσομοίωση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Τύπος 3 (300m)								
D (m)	σ_{cm} (MPa)	N_s	x/R	x (m)	λ	ν	E_o (MPa)	E (MPa)
13,17	1,82	8,59	-0,23	-1,5	0,43	0,33	680,9	169,25

Πίνακας 5.18. Πίνακας συντελεστών αποτόνωσης και απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής γύρω από τον αριστερό κλάδο ισούται περίπου με 2 m στις παρειές και περίπου 1,5 m στο δάπεδο, ενώ στον δεξιό κλάδο ισούται περίπου με 3,2 m στις παρειές και περίπου 2,3m στο δάπεδο, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.83.



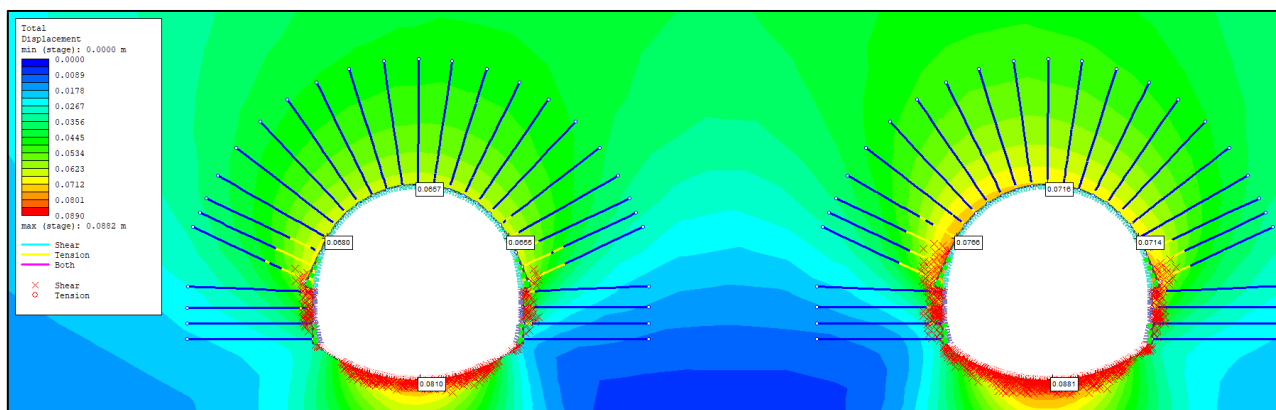
Εικόνα 5.83. Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης περιμετρικά της εκσκαφής για τον Τύπο 3 οφιολίθων για $H = 300m$ με εφαρμοσμένο την ζώνη μειωμένης αντοχής.

Συγκριτικά με την πλαστική ζώνη της ανάλυσης που δεν λαμβάνει υπόψιν τα υδροστατικά φορτία, συμπεραίνεται πως στην ανάλυση με την εφαρμογή της ζώνης απομείωσης, υπάρχει μια αύξηση αυτής τόσο στις παρειές, όσο στο δάπεδο. Η αύξηση κυμαίνεται κοντά στο 1m.

Οι συνολικές συγκλίσεις αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.53 και στην Εικόνα 5.84 παρατηρείται πως από την επίδραση της ζώνη μειωμένης αντοχής διαρρέει μεγαλύτερος αριθμός αγκυριών, καθώς και ότι αυξάνονται οι συγκλίσεις της σήραγγας από 2 έως και 6 cm, φτάνοντας την μέγιστη τιμή των 14,70 cm στο δάπεδο του δεξιού κλάδου.

Δίδυμες Σήραγγες - Τύπος 3 (300m)				
Σύγκλιση «u» (cm)				
Σημείο	Χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής		Με την ζώνη μειωμένης αντοχής	
	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Στέψη	6,08	6,18	8,38	8,96
Δεξιά Παρειά	5,88	6,41	8,99	9,34
Αριστερή Παρειά	6,34	5,98	9,00	10,30
Δάπεδο	7,54	7,60	14,00	14,70

Πίνακας 5.53. Συγκριτικά αποτελέσματα τελικών συγκλίσεων για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 για $H = 300\text{m}$ με και χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής.



Εικόνα 5.84. Τελικές συγκλίσεις περιμετρικά της εκσκαφής, σημεία αστοχίας της βραχώμαζας και σημεία διαρροής των αγκυριών βράχου με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής του Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300\text{m}$.

5.6.3.4.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Της Ζώνης Μειωμένης Αντοχής

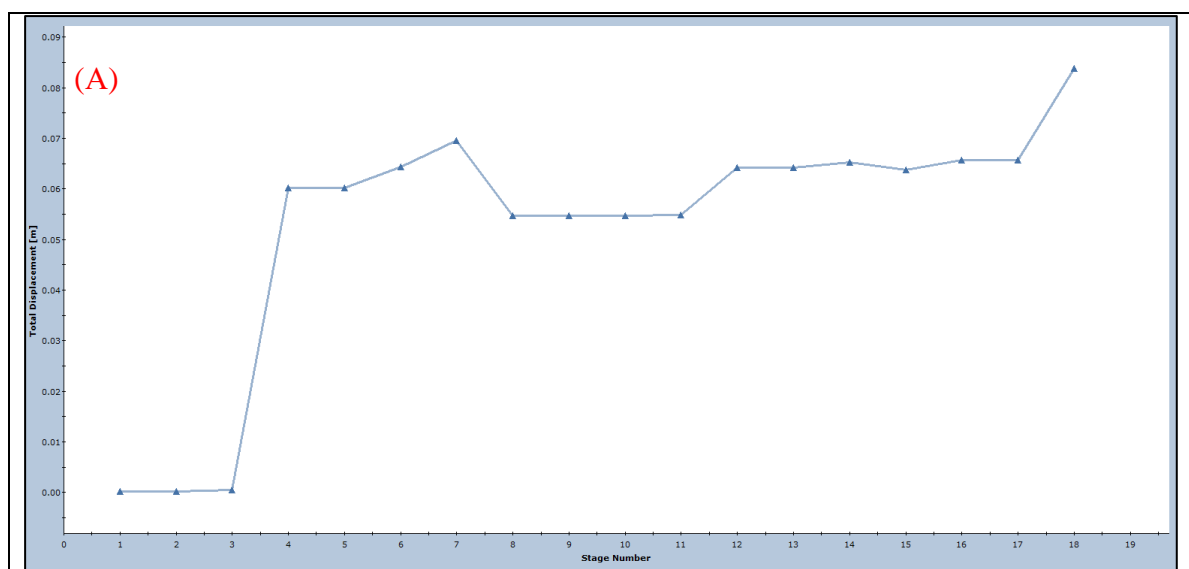
Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως σε γενικές γραμμές κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχώμαζας, με δεδομένη την επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής στο σύνολο των δύο ανοιγμάτων, αναμένονται μέτριες συγκλίσεις στις παρειές και στο μέτωπο και μεγάλες στο δάπεδο. Σύμφωνα με την μεθοδολογία της [Υποπαραγράφου 5.2.3.1.2](#), υπολογίστηκε ότι το μέτωπο θα παραμείνει ευσταθές, οπότε και δεν απαιτείται κάποια περεταίρω ενίσχυση αυτού.

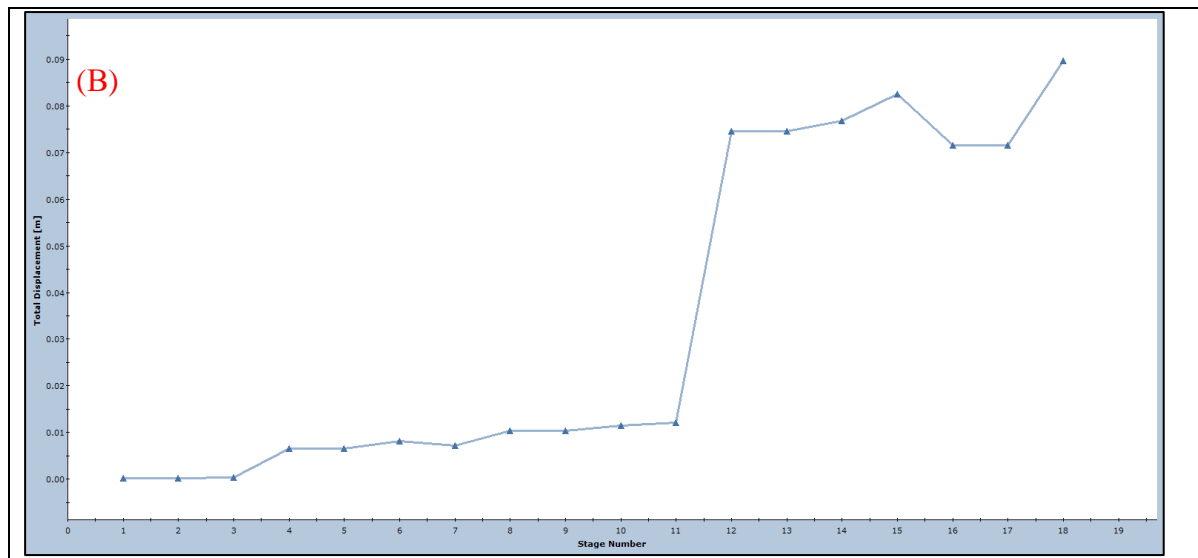
Τα ανωτέρω μπορούν να παρατηρηθούν και στον Πίνακα 5.52, στον οποίο παρατηρείται πως οι τελικές ολικές συγκλίσεις των περιπτώσεων είναι της τάξης των μερικών εκατοστών. Οι συγκλίσεις αυτές βρίσκονται στα όρια για την αποδοχή τους, ειδικά αυτές που αναπτύσσονται στο δάπεδο. Εφόσον κρινόταν απαραίτητη η περεταίρω μείωση των συγκλίσεων, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τα μέτρα υποστήριξης του Τύπου 4 οφιολίθων για τα υπερκείμενα με $H = 150\text{m}$, χωρίς ωστόσο να απαιτούνταν η τοποθέτηση αγκυριών μετώπου fiberglass. Όμως, η τοποθέτηση τους θα μείωνε τις ασκούμενες τάσεις, οπότε και συνεπώς θα μείωνε και τις προκύπτουσες συγκλίσεις.

Στα γραφήματα της Εικόνας 5.85 παρατηρείται πως το πλήθος των συγκλίσεων για τον αριστερό κλάδο αναπτύσσονται κατά το 3^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχώμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά

την εκσκαφή της Β' Φάσης εκσκαφής συμβαίνει μια αύξηση και ακολούθως μια «ανακούφιση» των συγκλίσεων, οι οποίες τελικά παραμένουν σταθερές μέχρι και την έναρξη της διάνοιξης του δεξιού κλάδου, όπου και αυξάνεται. Κατά τη διάρκεια ολόκληρης της εκσκαφής του δεξιού κλάδου, οι συγκλίσεις στον αριστερό παραμένουν σταθερές και τελικώς αυξάνονται με την επίδραση της ζώνης απομείωσης.

Το πλήθος των συγκλίσεων για τον δεξιό κλάδο αναπτύσσονται κατά το 11^ο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο περιγράφει την αποτόνωση της βραχόμαζας της Α' Φάσης εκσκαφής εντός του ανοίγματος, που συμβαίνει λόγω της εκσκαφής της εν λόγω φάσης, ενώ ακόμα, παρατηρείται πως κατά την εκσκαφή της Β' Φάσης συμβαίνει μια απότομη αύξηση των συγκλίσεων, η οποία, ωστόσο, διαρκεί για τέσσερα στάδια και ακολουθεί μια «ανακούφιση» των συγκλίσεων και τελικώς αυξάνονται με την επίδραση της ζώνης μειωμένης αντοχής.





Εικόνα 5.85. Διάγραμμα αναπτυσσόμενων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σε 2 φάσεις των δίδυμων σήραγγων Τύπου 3 οφιολίθων για $H = 300m$ του αριστερού κλάδου (A) και του δεξιού κλάδου (B) με εφαρμογή της ζώνη μειωμένης αντοχής.

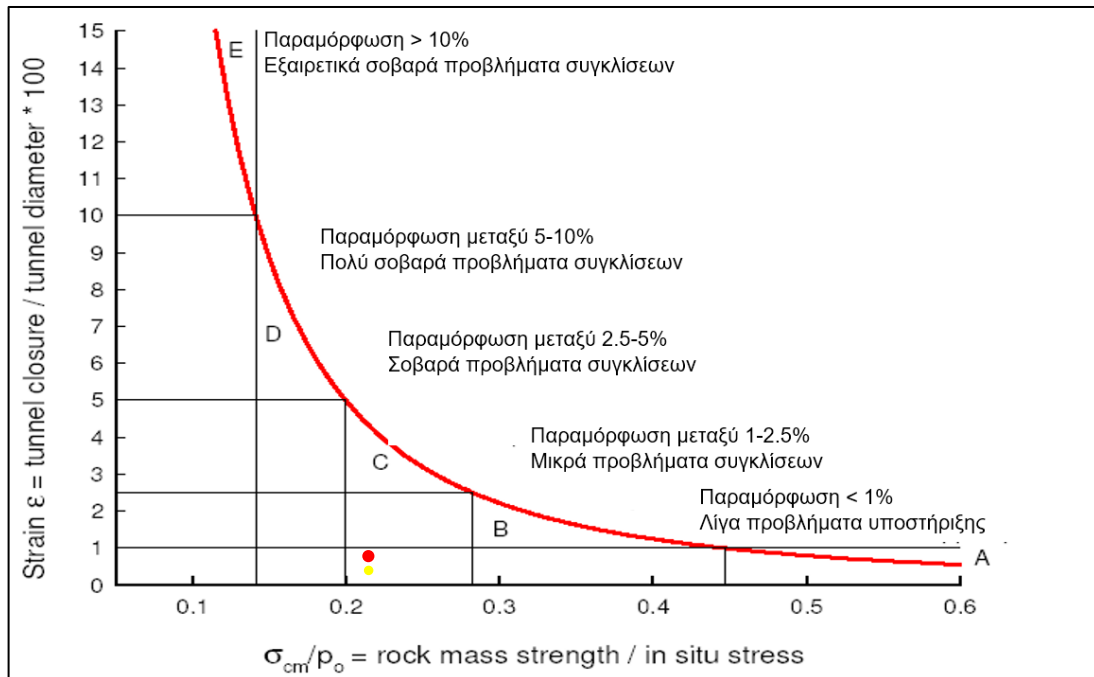
Προς επιβεβαίωση των ανωτέρω, γίνεται χρήση του διαγράμματος των Hoek E. & Marinos P. (2000) της Εικόνας 5.86. Ο Πίνακας 5.54 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τον εντοπισμό της περιοχής κάθε ανάλυσης, με και χωρίς επίδραση της ζώνης απομείωσης. Επειδή οι συγκλίσεις και για τις δύο σήραγγες κατέχουν παρεμφερείς τιμές, λαμβάνεται ο μέσος όρος για κάθε περίπτωση, στεγνή και υγρή διάνοιξη.

	Σύγκλιση «u» (m)	Διάμετρος (m)	$\frac{\text{Σύγκλιση}}{\text{Διάμετρος}} * 100$	σ_{cm}/p_o
Τύπος 3 χωρίς την ζώνη μειωμένης αντοχής (300m)	0,065	13,17	0,49	0,23
Τύπος 3 με την ζώνη μειωμένης αντοχής (300m)	0,108		0,82	0,23

Πίνακας 5.54. Συγκριτικά δεδομένα διαγράμματος Hoek E. & Marinos P. (2000) για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 οφιολίθων ($H = 300m$) με και χωρίς εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

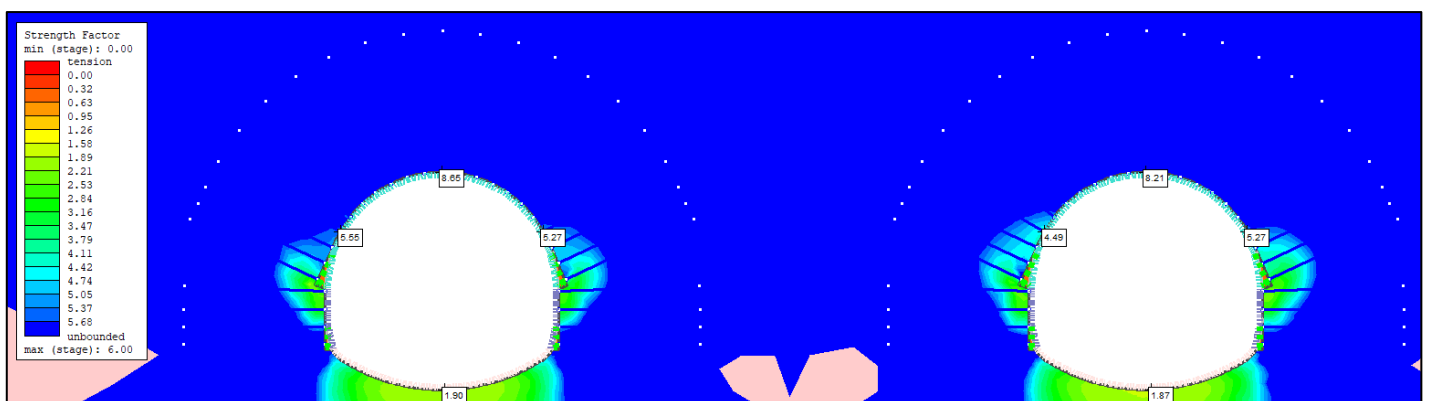
Από το εν λόγω διάγραμμα της Εικόνας 5.86 συμπεραίνεται πως η σήραγγα ακόμα και με εφαρμοσμένες υδροστατικές πιέσεις βρίσκεται στην περιοχή «C», όπου η

παραμόρφωση είναι μεταξύ 2,5 - 5%, οπότε και αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων.



Εικόνα 5.87. Πρόγνωση συνθηκών σύνθλιψης (Hoek & Marinos, 2000)

Τέλος, στην Εικόνα 5.87 αποτυπώνονται οι συντελεστές «Strength Factor» σε συγκεκριμένα σημεία του ανοίγματος της εκάστοτε περίπτωσης, όπου πρακτικά αποτυπώνουν έναν συντελεστή ασφαλείας ως προς την αστοχία του ανοίγματος με τα δεδομένα μέτρα υποστήριξης. Από αυτές συμπεραίνεται ότι και τα δύο ανοίγματα δεν θα αστοχήσουν, καθώς οι τιμές του «Strength Factor» είναι άνω της μονάδας (1), όπου θεωρείται το σημείο ισορροπίας. Παρολαυτά, εμφανίζονται στα στοιχεία θεμελίωσης μεταλλικών πλαισίων, σημεία με χαμηλότερες της μονάδας (1) τιμές του «Strength Factor», τα οποία όμως δεν συμβάλλουν ώστε να προκύψει κάποια γενικότερη αστοχία.



Εικόνα 5.86. Αποτυπώσεις Strength Factor για τις διανοίξεις των δίδυμων σηράγγων στον Τύπο 3 οφιολίθων για τον αριστερό (A) και τον δεξιό κλάδο (B) με εφαρμοσμένη την ζώνη μειωμένης αντοχής.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6.1 Γενικά Στοιχεία

Το θέμα μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορούσε την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οφιολιθικών μαζών, κατά την διάνοιξη των υπογείων έργων, ταξινομώντας τες στους διαφορετικούς τύπους, που αναφέρονται στην βιβλιογραφία και ακολούθως, η διενέργεια κατάλληλων αναλύσεων, με απώτερο σκοπό την παράθεση των κατάλληλων διατομών άμεσης υποστήριξης για κάθε έναν τύπο του εν λόγω σχηματισμού.

Ο σχηματισμός των οφιολίθων αποτελεί έναν ιδιαιτέρως ανομοιογενή σχηματισμό, καθώς κατά την δημιουργία του συμβαίνουν σύνθετες γεωλογικές διεργασίες, με διαφορετικούς συμμετέχοντες, βαθμό τεκτονικής καταπόνησης και με κύριο χαρακτηριστικό, τον βαθμό και την έκταση της «σερπεντινίωσης».

Όπως αναλύθηκε εκτενώς στα ανωτέρω κεφάλαια, ο σχηματισμός των οφιολίθων διακρίνεται στους ακόλουθους πέντε (5) τύπους, αναλόγως των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζει:

- *Τύπος 1:* Μη σερπεντινωμένος οφιολίθος (περιδοτίτης – γάββρος)
- *Τύπος 2:* Σερπεντινωμένος οφιολίθος (ελαφρά αποσαθρωμένος γάββρος)
- *Τύπος 3:* Έντονα σερπεντινωμένος περιδοτίτης ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου σερπεντινίτη
- *Τύπος 4:* Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης
- *Τύπος 5:* Οφιολιθικά συμπλέγματα με σχιστοκερατόλιθους

Με βάση τα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα περιπτώσεων σήραγγων από τον Ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα της σήραγγας Καλλιδρόμου, της σήραγγας Όθρυος και της σήραγγα Τεμπών T3, που έχουν διανοιχθεί εντός των οφιολιθικών συμπλεγμάτων και αναπτύχθηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 4, συμπεραίνεται πως οι πιο συχνά συναντούμενοι τύποι οφιολίθων κατά την διάνοιξη ενός υπόγειου έργου, αποτελούν οι Τύποι 2, 3 και 4. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, πως το ανωτέρω συμπέρασμα δεν αποτελεί πανάκεια και για κάθε περίπτωση διάνοιξης σε οφιολιθικούς σχηματισμούς οπότε και πρέπει να διενεργούνται διεξοδικώς οι κατάλληλες γεωτεχνικές και γεωλογικές έρευνες για κάθε περίπτωση.

Παρολαυτά, σύμφωνα με τις γεωτεχνικές ιδιότητες, που χαρακτηρίζουν τον κάθε τύπο οφιολίθων και αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3, μπορεί να εξαχθεί με ασφάλεια το συμπέρασμα πως ο Τύπος 1 κατέχει καλύτερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά από τον Τύπο 2, οπότε και οι αναπτυσσόμενες συνθήκες της εκσκαφής των σηράγγων εντός του Τύπου 1, θεωρούνται ευνοϊκότερες από του Τύπου 2, οπότε και αναμένονται ελάχιστες έως μηδενικές συγκλίσεις. Αντίστοιχα, ο Τύπος 5, με βάση τις γεωτεχνικές του ιδιότητες, θεωρείται πως οι αναπτυσσόμενες συνθήκες της εκσκαφής του ταυτίζονται, είτε με αυτές του Τύπου 4, αν επικρατεί ο σχιστώδεις χαρακτήρας των σχιστοκερατόλιθων, είτε με αυτές του Τύπου 3, αν επικρατούν στην βραχώμαζα τα ογκώδη τεμάχια συμπαγούς οφιολίθου. Έτσι, τελικώς συμπεραίνεται πως οι τρεις (3) εξεταζόμενοι τύποι οφιολίθων, περιγράφουν με σαφήνεια όλες τις πιθανές εμφανίσεις του οφιολιθικού συμπλέγματος, οπότε και τα προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης βρίσκουν ευρεία εφαρμογή για όλους τους τύπους των οφιολίθων.

6.2 Προτεινόμενες Διατομές Άμεσης Υποστήριξης

- Γενικά Στοιχεία:

Οι τελικές προτεινόμενες διατομές της άμεσης υποστήριξης προέκυψαν διενεργώντας δύο (2) αναλύσεις για κάθε μια κατηγορία οφιολίθων, όπως αυτές περιγράφηκαν ανωτέρω, μια για ύψος υπερκειμένων $H = 150\text{m}$ και μια για ύψος υπερκειμένων $H = 300\text{m}$. Τα ύψη αυτά θεωρήθηκαν, καθώς αποτυπώνουν τις συνθήκες πιέσεις των γεωυλικών κατά την διάνοιξη σε οφιολιθικούς σχηματισμούς. Αξίζει να σημειωθεί πως οι αναλύσεις διενεργούνται σε μονές σήραγγες και με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, που αναφέρθηκαν εκτενώς στην [Παράγραφο 5.2.3](#).

Επιπλέον των ανωτέρω βασικών αναλύσεων διενεργήθηκαν αναλύσεις σε δίδυμες σήραγγες, ώστε να εξεταστεί η επίδραση του ενός κλάδου στην διάνοιξη του δεύτερου, ενώ ακόμα διενεργήθηκαν αναλύσεις για να εξεταστεί η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα πάνω στα μέτρα της άμεσης υποστήριξης, τόσο άμεσα, μέσω της επίδρασης ενός καταναμημένου φορτίου πάνω στην άμεση υποστήριξη, όσο και έμμεσα, μέσω μιας αποδυναμωμένης περιοχής (Weak Zone) τριγύρω από το άνοιγμα. Η περιοχή αυτή θεωρείται πως προέκυψε καθώς υπήρχε αυξημένη ροή νερού και λόγω και του κατακερματισμού της βραχομάζας επέφερε το «ξέπλυμα» του γεωυλικού.

Για τον Τύπο 2 οι ανωτέρω αναλύσεις έδειξαν πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο και για τα δύο ύψη υπερκειμένων, δεν αναμένονται ιδιαίτερα

προβλήματα διάνοιξης, καθώς η βραχομάζα κατέχει γενικώς καλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και η μέση τιμή των συγκλίσεων είναι 0,75 cm και 1,82 cm, αντιστοίχως. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον έλεγχο μεμονωμένων αστοχιών βαρύτητας. Ακόμα, οι διενεργούμενοι υπολογισμοί για να εξεταστεί η αστοχία του μετώπου, έδειξαν πως το μέτωπο θα παραμένει ευσταθές καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής.

Για τον Τύπο 3 οι διενεργούμενες αναλύσεις κατά την διάνοιξη του συγκεκριμένου τύπου οφιολίθων έδειξε πως και για τα δύο ύψη υπερκειμένων αναμένονται μικρές προς μέτριες συγκλίσεις, καθώς η βραχομάζα κατέχει μέτρια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, οπότε και απαιτείται μια επαγρύπνηση κατά την εκσκαφή. Η μέση τιμή των συγκλίσεων είναι 3,25 cm και 6,16 cm, αντιστοίχως. Ακόμα, οι διενεργούμενοι υπολογισμοί για να εξεταστεί η αστοχία του μετώπου, έδειξαν πως το μέτωπο θα παραμένει ευσταθές καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής.

Για τον Τύπο 4 οι διενεργούμενες αναλύσεις κατά την διάνοιξη του εν λόγω τύπου των οφιολίθων έδειξε πως για τα δύο ύψη υπερκειμένων αναμένονται μέτριες προς αυξημένες συγκλίσεις, ειδικά στα δύο δάπεδα, οπότε και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εκσκαφή και κατά την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης. Αυτό συμβαίνει καθώς ο εν λόγω τύπος οφιολίθων κατέχει τα πιο πτωχά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Βέβαια, οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις μπορούν να θεωρηθούν πως είναι ελεγχόμενες με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης. Η μέση τιμή αυτών είναι 15,95 cm και 17,89 cm, αντιστοίχως. Ακόμα, οι διενεργούμενοι υπολογισμοί για να εξεταστεί η αστοχία του μετώπου, έδειξαν πως το μέτωπο δεν θα παραμένει ευσταθές και θα αστοχήσει, γι' αυτό και εφαρμόστηκαν αγκύρια μετώπου από υαλόκαρφα (fiberglass) στην Α' φάση εκσκαφής των δύο διατομών, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής.

Η επίδραση της απόστασης των κλάδων στην διάνοιξη εξετάζεται μόνο για τον Τύπο 3 με υπερκείμενα $H = 300\text{m}$, καθώς αυτός κατέχει τις πιο συχνά εμφανιζόμενες γεωτεχνικές συνθήκες. Για την ανάλυση επιλέγεται τα κέντρα των δύο δίδυμων σηράγγων απέχουν μεταξύ τους 40 m, όπως συμβαίνει και κατά τα πρώτα μέτρα της περίπτωσης της διάνοιξης των δίδυμων οδικών σηράγγων του όρους Όθρυς. Από τον Πίνακα 5.32 παρατηρείται πως λόγω της διάνοιξης του δεύτερου κλάδου (δεξιού) δεν προκύπτει κάποια σημαντική αλληλεπίδραση με τον πρώτο (αριστερό κλάδο). Παρολαυτά, από τον Πίνακα 5.31 παρατηρείται πως οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις

είναι κατά μέσο όρο περίπου 0,5 cm αυξημένες, συγκριτικά με την διάνοιξη του μονού κλάδου.

Για τις αναλύσεις των δύο περιπτώσεων του υδροφόρου ορίζοντα επιλέγονται οι περιπτώσεις του Τύπου 3 με υπερκείμενα $H = 300\text{m}$, του Τύπου 4 με υπερκείμενα $H = 300\text{m}$, καθώς και την περίπτωση των διδύμων σηράγγων του Τύπου 3, που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτές οι περιπτώσεις αντιπροσωπεύουν τις δυσμενέστερες περιπτώσεις, που είναι πιο πιθανές να εμφανιστούν σε διανοίξεις σηράγγων. Ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται πως βρίσκεται 50 m άνω από τις σήραγγες, για τις αναλύσεις με την εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης.

Για τον Τύπο 3 με υπερκείμενα $H = 300\text{m}$, από τις αναλύσεις με εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης στο σύνολο του ανοίγματος, οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις κατέχουν με μέση τιμή ίση με 7,9 cm. Για την ίδια περίπτωση οφιολίθων, από τις αναλύσεις, με εφαρμογή της ζώνης χαλάρωσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχόμαζας οι συγκλίσεις κατέχουν μέση τιμή περίπου ίση με 10 cm.

Για τον Τύπο 4 με υπερκείμενα $H = 300\text{m}$, από τις αναλύσεις με εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης στο σύνολο του ανοίγματος, οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις κατέχουν με μέση τιμή ίση με 26 cm. Για την ίδια περίπτωση οφιολίθων, από τις αναλύσεις, με εφαρμογή της ζώνης χαλάρωσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχόμαζας οι συγκλίσεις κατέχουν μέση τιμή περίπου ίση με 10 cm.

Για τις δίδυμες σήραγγες του Τύπου 3 με υπερκείμενα $H = 300\text{ m}$, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα εφαρμοσθέντα μέτρα υποστήριξης, οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις κατέχουν με μέση τιμή ίση με 7,21 cm. Για την ίδια περίπτωση οφιολίθων, από τις αναλύσεις, με εφαρμογή της ζώνης χαλάρωσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως κατά την διάνοιξη στον συγκεκριμένο τύπο βραχόμαζας οι συγκλίσεις κατέχουν μέση τιμή περίπου ίση με 10,8 cm.

Τελικώς, από τις ανωτέρω αναλύσεις μπορούν να οριστούν οι προτεινόμενες διατομές άμεσης υποστήριξης για τους Τύπους 2, 3 και 4 των οφιολίθων. Οι διατομές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακες 6.1 και περιγράφουν την φιλοσοφία της υποστήριξης, που πρέπει να ακολουθηθεί.

Τα προτεινόμενα μέτρα αναπτύσσονται γύρω από την φιλοσοφία της πιο βαριάς, άκαμπτης υποστήριξης, η οποία επικεντρώνεται στο να τοποθετηθούν ιδιαίτερα βαριές διατομές άμεσων μέτρων υποστήριξης, όπως μεγάλο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πλαίσια μεγάλης φέρουσας ικανότητας και αγκύρια βράχου καλύτερης ποιότητας χάλυβα, οπότε και μεγαλύτερης φέρουσας ικανότητας, τα οποία μέτρα θα είναι ικανά να παραλάβουν ολόκληρο το φορτίο της αποτνωόμενης βραχομάζας.

Εν κατακλείδι, πρέπει να σημειωθεί πως με βάση την φιλοσοφία που περιγράφει την διάνοιξη του εκάστοτε τύπου, ακολούθως πρέπει να διερευνηθεί λεπτομερώς η κάθε ξεχωριστή περίπτωση, έτσι ώστε να οριστούν και ποσοτικά, πλέον, τα εν λόγω μέτρα της υποστήριξης. Βέβαια, επειδή η κάθε διάνοιξη αποτελεί και μια διαφορετική περίπτωση, όπου κρίνεται αναγκαίο, μπορούν να προστεθούν περαιτέρω μέτρα υποστήριξης ή/και να τροποποιηθούν καταλλήλως, ανάλογα με τις απαιτήσεις της διάνοιξης, ώστε να αυξηθεί η ασφάλεια κατά την διάνοιξη και λειτουργία του υπόγειου ανοίγματος.

Διατομές Άμεσης Υποστήριξης			
Τύπος Οφιολίθου	Γεωτεχνική Συμπεριφορά	Μέτρα Υποστήριξης	
		Κέλυφος	Μέτωπο
Τύπος 2: Σερπεντινωμένος οφιολίθος (ελαφρά αποσαθρωμένος γάββρος)	Γενικός απλές συνθήκες διάνοιξης, με χαμηλές πιέσεις και με μικρές έως μηδαμινές συγκλίσεις. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις βαρύτερες αστοχίες (π.χ. τύπου σφήνας).	<ul style="list-style-type: none"> Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος μικρού πάχους (π.χ. 20 cm) Τοποθέτηση σχετικά αραιού κάρναβου αγκυριών Εάν κρίνεται απαραίτητο, εφαρμογή ελαφρού πλαισίου (π.χ. Lattice – Girder) 	Δεν κρίνεται απαραίτητη η υποστήριξη μετώπου

<p style="text-align: center;">Τύπος 3:</p> <p style="text-align: center;">Έντονα σερπεντινωμένος περιδοτικός ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου σερπεντινίτη</p>	<p>Μέτριες συνθήκες διάνοιξης, με αυξημένες πιέσεις και με μικρές έως μέτριες συγκλίσεις. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις δομικές αστοχίες (π.χ. τύπου σφήνας), αλλά και στα φαινόμενα «squeezing» της βραχώμαζας, λόγω της αυξημένης σερπεντινίωσης της, ενώ ακόμα πρέπει να ελεγχθούν τα φαινόμενα ανύψωσης του δαπέδου.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Εφαρμογή διατομής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο • Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μεγάλου πάχους (π.χ. 50 cm), με περεταίρω αύξηση αυτού στο δάπεδο (π.χ. +20 cm) • Τοποθέτηση σχετικά πυκνού κάνναβου αγκυρίων μεγάλου μήκους • Εφαρμογή βαριών πλασιών • Εφαρμογή στοιχείων θεμελίωσης μεταλλικών πλασιών 	<p>Έλεγχος της ευστάθειας του μετώπου και όπου κρίνεται απαραίτητο εφαρμογή αγκυρίων μετώπου fiberglass και ομπρέλας forepoling</p>
--	---	---	---

<p style="text-align: center;">Τύπος 4: Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης</p>	<p>Δύσκολες συνθήκες διάνοιξης, με πολύ μεγάλες πιέσεις και με πολύ σοβαρές συγκλίσεις. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα φαινόμενα «squeezing» της βραχώμαζας, λόγω της αυξημένης φυλλοποίησης της, ενώ ακόμα πρέπει να ελεγχθούν τα φαινόμενα ανύψωσης του δαπέδου</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Εφαρμογή διατομής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο • Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος πολύ μεγάλου πάχους (π.χ. 80 cm), με ιδιαίτερη αύξηση αυτού στο δάπεδο (π.χ. +20 cm) • Τοποθέτηση πυκνού κάρναβου αγκυρίων, μεγάλου μήκους και μεγάλης φέρουσας ικανότητας • Εφαρμογή βαριών πλασιών • Εφαρμογή στοιχείων θεμελίωσης μεταλλικών πλασιών 	<p>Τοποθέτηση αγκύρια μετώπου fiberglass μεγάλης φέρουσας ικανότητας και πολύ πυκνού κάρναβου και εφαρμογή ομπρέλας forepoling</p>
--	--	--	--

Πίνακας 6.1. Διατομές άμεσης υποστήριξης κάθε εξεταζόμενου τύπου οφιολίθου.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Amberg, R. (1994). *Die Bewfaltungung der Serpentinzone in der Zweispurstrecke - Vereina-Tunnel Nord*. Schweiz: Architekt 44.
- Bassoullet, J. (1984). L'Orogene Himalayen au Cre Tace Superieur. *Mem Soc Geol Fr* 147:9-20.
- Brunold, R. (1993). *Probleme bei der Durchorterung von Storzonen auf der Sfidseite*. SIA-FGU.
- Chern, J., Shiao, F., & Yu, C. (1998). An Empirical Safety Criterion For Tunnel Construction. *Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, (σσ. 222-227). Taipei, China.
- Diamantis, K., & Migiros, G. (2018). Estimating the Rock Mass Properties of Ultramafic Rocks in Central Greece Using the Triaxial Tests of Intact Rock and the Geological Strength Index. *Geotech Geol Eng* 37, σσ. 1839-1858.
- Diamantis, K., Gartzos, E., & Migiros, G. (2014). Influence of Petrographic Characteristics on Physico-Mechanical Properties of Ultrabasic Rocks from Central Greece. *Bull Eng Geol Environ* 73, σσ. 1273-1292.
- Diamantis, K., Gartzos, E., & Migiros, G. (2009). Study on Uniaxial Compressive Strength, Point Load Strength Index, Dynamic and Physical Properties of Serpentinities from Central Greece: Test results and Empirical Relations. *Engineering Geology* 108, σσ. 199-207.
- Diasakos, N., Amerikanos, P., Tryfonas, G., Vagirotou, E., Baltzois, V., Bloukas, S., . . . Tsirigotis, N. (2010). *TUNNEL EXCAVATION IN CLAYEY-MARLY FORMATIONS: THE CASE OF KALLIDROMO TUNNEL*. Patras, Greece: Bulletin of the Geological Society of Greece.
- Douglas, T., & Arthur, L. (1983). *A Guide to the Use of Rock Reinforcement in Underground Excavations, R101*. London: CIRIA.
- Foucault, A., & Rault, J. (1995). *Dictionnaire de géologie*. Paris: Masson.

- Goricki, W., Schubert, G., & Riedmueller, G. (2004). New Developments For The Design and Construction of Tunnels in Complex Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2000). Predicting Tunnel Squeezing in Weak Heterogeneous Masses. *Tunn Tunn Int 1. November Issue*, σσ. 45-51.
- Keller, F. (1993). *Geologie des Zugwald und Vereina Tunnels*. Zurich: SIA-FGU.
- Koumantakis, J. (1982). Comportement des peridotites et serpentinites de la Grece en travaux public. Leur propretes physiques et mecaniques. *Bull*, σσ. 53-60.
- Kurtulus, C., Bozkurt, A., & Endes, H. (2012). Physical and Mechanical Properties of Serpentinized Ultrabasic Rocks in NW Turkey. *Pure and Applied Geophysics 169*, σσ. 1205-1215.
- Maidl, B. (2004). Handbuch des Tunnel - und Stollenbaus. *Verlag Glückauf*.
- Marinos, P., & Tsiambaos, G. (2010). Strength and Deformability of Specific Sedimentary and Ophiolitic Rocks. *Bulletin of the Geological Society of Greece*.
- Marinos, P., Hoek, E., & Marinos, V. (2006). Variability of the Engineering Properties of Rock Masses Quantified by the Geological Strength Index: The Case of Ophiolites With Special Emphasis on Tunnelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 129-142.
- Marinos, V. (2012, November). Assesing Rock Mass Behaviour for Tunnelling. *Envirommentan & Engineering Geoscience Vol. XVII, No. 4*, σσ. 327-341.
- Megard, P. (1987). Cordilleran Andes and Marginal Andes. *Geodynamic Series*, σσ. 71-95.
- Mercier, J., & Vergely, P. (1999). *Tectonique*. Paris: Dunod.
- Moores, E. (1982). Origin and emplacement of ophiolites. *Reviews of Geophysics and Space Physics*.
- Moores, E., & Twiss, R. (1995). *Tectonics*. England: W.H. Freeman and Company.
- Mourtzas, N., & Gkiolas, A. (2010). *Tunneling in Ophiolitic Series Formations: Tunnels Of The New High-Speed Railway Double Track Line - Section*

- Lianokladi - Domokos*. Patras, Greece: Bulletin of the Geological Society of Greece.
- Özer, P., & Kamaci, Z. (2018). Engineering Properties of Eğirdir-Kızıldağ Harzburgitic Peridotites in Southwestern Turkey. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESEN)*.
- Ozsoy, E., Yilmaz, G., & Arman, H. (2010). Physical, mechanical and mineralogical properties of ophiolitic rocks at the Yakakayi dam site, Eskisehir, Turkey. *Academic Journals*, 2579-2587.
- Pe-Piper, P. D. (2002). *The igneous rocks of Greece. The anatomy of an orogeny*. Berlin: Gebrueder Borntraeger.
- Robertson , A. (2002). Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. *Lithos*, σσ. 1-67.
- Schubert, W. (2004). Basics and Application of the Austrian Guidline for the Geomechanical Design of Underground Structures. *EUROCK 2004 and 53th Geomechanics Colloquium*. VGE publ.
- Skemp, A., & McCaig, M. (1984). Origins and significance of rocks in an imbricate thrust zone beneath the Pindos ophiolite, northwestern Greece. Στο J. Dixon, & H. Robertson, *Geological evolution of eastern mediterranean*. London: Geological Society.
- Steiner, W. (1996). Tunnelling in Squeezing Rocks: Case Histories. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Taylor, B., & Natland, J. (1995). *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific. Geophysical Monograph*. Union, 88.
- Whittaker, B., & Frith, R. (1990). *Tunnelling. Design Stability and Construction*. Austin/Herford, England.
- Yalcin, E., Gurocak, Z., Ghabchi, R., & Zaman, M. (2015). *Numerical Analysis for a Realistic Support Design: Case Study of the Komurhan Tunnel in Eastern Turkey*. American Society of Civil Engineers.

- Γεωργίου, Δ. (2021). *Υπολογιστική Διερεύνηση Της Ευστάθειας Του Μετώπου Σηράγγων*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε. (2022, Ιανουάριος). *DURGLASS & GLASSPREE Υαλονήματα Fiberglass*. Αθήνα, Ελλάδα.
- Ιωαννίδου, Α. (2014). *Διερεύνηση της Συμπεριφοράς της Σήραγγας Καλλιδρόμου σε Περιοχές Δυσμενών Γεωλογικών Συνθηκών*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Καββαδάς, Μ. (2005). *Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μαρίνος, Β., Μαρίνος, Π., & Hoek, Ε. (2004). *Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI. Εφαρμογή, Συστάσεις, Περιορισμοί και Πεδία Μεταβολών Ανάλογα με τον Τύπο του Πετρώματος*. Θεσσαλονίκη: Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI.
- Μαρίνος, Β. Π. (2007). *Γεωτεχνική Ταξινόμηση και Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά Ασθενών και Σύνθετων Γεωϋλικών Κατά την Διάνοιξη Σηράγγων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μαρίνος, Π. (2005). *Σημειώσεις μαθήματος: Σχεδιασμός Υπογείων Έργων*. Αθήνα.
- Μαρίνος, Π. (2014). *Έντυπος Τόμος Επισκεφθέντων Έργων Εκδρομής Δ.Π.Μ.Σ "Σ.Κ.Υ.Ε."*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μπαλάση, Α.-Μ. (2007). *Συμπεριφορά Οφιολίθων σε Υπόγεια Έργα. Ειδική Αναφορά στη Σιδηροδρομική Σήραγγα Όθρυος (Δομοκού)*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Πομώνης, Π. (2003). *Οι οφιολίθοι της οροσειράς του Κόζιακα. Γεωλογική μελέτη – Πετρογε-νετική εξέλιξη – Γεωτεκτονική ερμηνεία*. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Σοφιανός, Α. Ι. (2018). *Διάνοιξη Σηράγγων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τριανταφύλλου, Μ. Γ. (2016). *Ορυκτολογική, Χημική και Ορυκτοχημική Μελέτη των Υπερβασικών Πετρωμάτων της Περιοχής της Σκούμτσας Γρεβενών και η Καταλληλότητα τους στην Παραγωγή Μπουφρίτη*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Τσιρογιάννη, Α. (2018). *Η Εκσκαψιμότητα των Βραχωδών Σχηματισμών στα Υπόγεια Έργα - Εφαρμογή στις Οδικές Σήραγγες T1,T2,T3 (Π.Α.Θ.Ε.)*. ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Αθήνα: ΕΜΠ.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

1.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	18
1.2	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ - ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
1.3	ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	19
1.4	ΆΝΤΛΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	21
2.1	ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	22
	ΕΙΚΟΝΑ 2.1. ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΑΝΕΤ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ – ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ (ΚΑΒΒΑΔΑΣ, 2005)	24
	ΕΙΚΟΝΑ 2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥΣ. (ΚΑΒΒΑΔΑΣ, 2005).....	25
	ΕΙΚΟΝΑ 2.3. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΕ ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΗΙΜΜΕΛΒΕΡΓ ΣΕ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΟ ΠΕΤΡΩΜΑ (ΜΑΙΔΛ, 2004). ΆΝΤΛΗΣΗ: (ΣΟΦΙΑΝΟΣ, 2018)	27
2.2	ΜΕΤΡΑ ΆΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	29
	ΕΙΚΟΝΑ 2.4. ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ. ΆΝΤΛΗΣΗ: (ΣΟΦΙΑΝΟΣ, 2018)	29
	ΕΙΚΟΝΑ 2.5. ΤΟΜΗ ΟΠΟΥ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Η ΑΡΧΙΚΗ (P3) ΚΑΙ Η ΤΕΛΙΚΗ (S3) ΣΤΡΩΣΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ Η ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ. (WHITTAKER & FRITH, 1990).....	31
	ΕΙΚΟΝΑ 2.6. ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΗΛΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ (ROCSCIENCE).	33
	ΕΙΚΟΝΑ 2.7. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ FOREPOLING (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. , ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΈΡΓΩΝ, 2005)	36
	ΕΙΚΟΝΑ 2.8. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΣΩΡΙΝΟΥ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΟΥ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΤΟΞΟΥ (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. , ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΈΡΓΩΝ, 2005)	37
2.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....	37
2.4	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	41
2.5	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ - ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	43
3.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	48
3.2	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.....	48
	ΕΙΚΟΝΑ 3.1. ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΝΕΣΗΣ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ (Α)ΖΩΝΗΣ ΚΑΤΑΒΥΘΙΣΗΣ (SSZ) ΚΑΙ (Β) ΜΕΣΟΚΑΙΑΝΙΩΝ ΡΑΧΩΝ (MOR) (ROBERTSON , 2002).	49
	ΕΙΚΟΝΑ 3.2. ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟΥ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (FOUCAULT A., RAOULT J.F.,1995)	50
	ΕΙΚΟΝΑ 3.3. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΩΣΗΣ ΣΕ ΑΡΡΗΚΤΟ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟ ΤΕΜΑΧΟΣ (ΜΑΡΙΝΟΣ Β. Π., 2007).....	52
	ΕΙΚΟΝΑ 3.4. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΤΟΜΗ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ (ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ) ΣΤΑ ΙΜΑΛΑΙΑ. (BASSOULET ET AL., 1984).	53
	ΕΙΚΟΝΑ 3.5. ΤΟΜΗ ΕΠΙΘΗΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΆΛΠΕΙΣ. ΚΑΛΥΜΜΑΤΑ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΣΕ ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ. (MERCIER & VERGELY. 1999).....	53

ΕΙΚΟΝΑ 3.6. ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΣΤΟΥΣ ΟΡΕΙΝΟΥΣ ΟΓΚΟΥΣ ΤΗΣ ΠΙΝΔΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΒΟΥΡΙΝΟΥ. ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΑΠΟ JONES ET AL. 1991 ΚΑΙ ΡΕ-PIPER & PIPER, 2002. ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ (ΜΑΡΙΝΟΣ Β. Π., 2007)	54
3.3 ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ	55
ΕΙΚΟΝΑ 3.7. ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΌΘΡΥΟΣ, ΜΕ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ. ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΤΙΜΗ GSI = 65. ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ: (ΜΠΑΛΑΣΗ, 2007)	57
ΕΙΚΟΝΑ 3.8. ΚΟΜΜΑΤΙ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗ (MARINOS ET AL., 2006)	58
ΕΙΚΟΝΑ 3.9. ΚΟΜΜΑΤΙΑ ΦΥΛΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗ (MARINOS ET AL., 2006)	59
ΕΙΚΟΝΑ 3.10. ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟ ΜΕΛΑΝΓΕ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΌΘΡΥΟΣ ΔΟΜΟΚΟΥ. ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ: (ΜΠΑΛΑΣΗ, 2007).....	61
ΕΙΚΟΝΑ 3.11. ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI. (HOEK & MARINOS, 2000) ΆΝΤΛΗΣΗ: (ΜΑΡΙΝΟΣ, ΜΑΡΙΝΟΣ, & HOEK, 2004).....	62
ΕΙΚΟΝΑ 3.12. ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ GSI ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ 1 ΕΩΣ 5 ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΑ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΑ. ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ : (MARINOS, HOEK, & MARINOS, 2006) & (ΜΑΡΙΝΟΣ Β. Π., 2007)	65
ΕΙΚΟΝΑ 3.13. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ GSI (HOEK & MARINOS, 2000)	70
ΕΙΚΟΝΑ 3.14. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ. (MARINOS V., 2012)	74
ΕΙΚΟΝΑ 3.15. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟΥ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (ΜΑΡΙΝΟΣ Β., 2007).....	75
4.1 ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΧΩΡΟ	77
ΕΙΚΟΝΑ 4.1. ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ. (YALCIN, GUROCAK, GHABCHI, & ZAMAN, 2015)	77
ΕΙΚΟΝΑ 4.2. ΤΟΜΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ. (YALCIN, GUROCAK, GHABCHI, & ZAMAN, 2015)	78
ΕΙΚΟΝΑ 4.3. Όψη ΣΗΡΑΓΓΩΝ. (YALCIN, GUROCAK, GHABCHI, & ZAMAN, 2015).....	78
ΕΙΚΟΝΑ 4.4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ VEREINA. (KELLER, 1993). ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ: (STEINER, 1996).....	80
ΕΙΚΟΝΑ 4.5. ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ VEREINA. (BRUNOLD, 1993). ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ: (STEINER, 1996).....	81
4.2 ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ	82
ΕΙΚΟΝΑ 4.6. ΤΟ ΝΕΟ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ Η ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΟΥ ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΟΥ. (DIASAKOS, ET AL., 2010) 82	
ΕΙΚΟΝΑ 4.7. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΗΚΟΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΟΥ. (DIASAKOS, ΚΑΙ ΣΥΝ., 2010)	83
ΕΙΚΟΝΑ 4.8. ΙΔΕΑΤΗ ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΟΥ. ΆΝΤΛΗΣΗ: (ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ, 2014)	84
ΕΙΚΟΝΑ 4.9. ΝΟΤΙΟ ΜΕΤΩΠΟ – ΆΚΑΜΠΤΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ Β' ΦΑΣΗ (ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ, 2014)	86
ΕΙΚΟΝΑ 4.10. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΝΔΟΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ. (ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ, 2014)	86
ΕΙΚΟΝΑ 4.11. ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΟΥ.	89
ΕΙΚΟΝΑ 4.12. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ Χ.Θ. 9+063,10. ΆΝΤΛΗΣΗ: ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ (2014)	90
ΕΙΚΟΝΑ 4.13. ΒΟΡΕΙΟ ΜΕΤΩΠΟ ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ – ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΣΤΑΘΜΩΝ 133/134. ΆΝΤΛΗΣΗ: (ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ, 2014)	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.14. ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΛΟΓΩ ΑΥΞΗΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΙΣΤΩΔΗ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗ. ΆΝΤΛΗΣΗ: ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ (2014).	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.15. ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΕ ΣΧΙΣΤΩΔΗ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗ. ΆΝΤΛΗΣΗ: (ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ, 2014)	92

ΕΙΚΟΝΑ 4.16. ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ. (ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΛΙΟΥ ΑΕ, 2006)	93
ΕΙΚΟΝΑ 4.17. ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ Χ.Θ. 9+685 ΕΩΣ ΤΗΝ Χ.Θ. 12+254. (ΜΟΥΡΤΖΑΣ & ΓΚΙΟΛΑΣ, 2010).....	95
ΕΙΚΟΝΑ 4.18. ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΚΛΑΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (ΜΟΥΡΤΖΑΣ & ΓΚΙΟΛΑΣ, 2010).	102
ΕΙΚΟΝΑ 4.19. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ. (ΜΠΑΛΑΣΗ, 2007).....	104
ΕΙΚΟΝΑ 4.20. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΜΕΝΩΝ ΣΦΗΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ. (ΜΠΑΛΑΣΗ, 2007)	104
ΕΙΚΟΝΑ 4.21. ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΔΑΠΕΔΟΥ. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΒΟΡΕΙΩΝ ΣΤΟΜΙΩΝ. (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ). ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ: (ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗ, 2018)	105
ΕΙΚΟΝΑ 4.22. ΜΕΤΩΠΟ ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗ ΜΕ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΑ ~86Μ ΣΤΗΝ Χ.Θ. 13+548Μ. ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ: (ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗ, 2018).....	107
ΕΙΚΟΝΑ 4.23. ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΜΗΚΟΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΒΟΡΕΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ). ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟ: (ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗ, 2018).....	107
ΕΙΚΟΝΑ 4.24. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ 3Α & 5Α (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. ,2014). 115	
ΕΙΚΟΝΑ 4.25. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ 6Α & 7Α (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. ,2014). 116	
ΕΙΚΟΝΑ 4.26. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ 7Β & 7C (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. ,2014). 116	
ΕΙΚΟΝΑ 4.27. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ 5Α & 5Β (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. ,2014). 116	
ΕΙΚΟΝΑ 4.28. ΑΣΤΟΧΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΒΟΡΕΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΕΜΠΩΝ Τ3 (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. ,2014).....	117
ΕΙΚΟΝΑ 4.29. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (ΜΑΡΙΝΟΣ Π. ,2014)..	118
4.3 ΣΥΝΟΨΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ	119
ΕΙΚΟΝΑ 4.30. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΟΥ ΣΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ GSI ΓΙΑ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΑ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΑ.....	121
ΕΙΚΟΝΑ 4.31. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΌΘΡΥΟΣ ΣΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ GSI ΓΙΑ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΑ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΑ.....	124
ΕΙΚΟΝΑ 4.32. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΕΜΠΩΝ Τ3 ΣΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ GSI ΓΙΑ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΑ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΑ.....	127
5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	133
ΕΙΚΟΝΑ 5.1. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΑΝΕΤ ΓΙΑ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΗΣ Ns (ΚΑΒΒΑΔΑΣ, 2005)	135
5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	139
ΕΙΚΟΝΑ 5.2. ΚΑΜΠΥΛΕΣ CHERN ET AL. (1998) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150Μ (Α) ΚΑΙ H = 300Μ (Β).....	141
ΕΙΚΟΝΑ 5.3. ΚΑΜΠΥΛΕΣ CHERN ET AL. (1998) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150Μ (Α) ΚΑΙ H = 300Μ (Β).....	141
ΕΙΚΟΝΑ 5.4. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΑΤΑ CHERN ET AL. (1998) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150Μ (Α) ΚΑΙ H = 300Μ (Β).	141
ΕΙΚΟΝΑ 5.5. ΔΙΑΜΗΚΕΣ ΠΡΟΦΙΛ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (u) ΚΑΤΑ CHERN ET AL. 1998 ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150Μ (Α) ΚΑΙ H = 300Μ (Β).	143
ΕΙΚΟΝΑ 5.6. ΔΙΑΜΗΚΕΣ ΠΡΟΦΙΛ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (u) ΚΑΤΑ CHERN ET AL. 1998 ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150Μ (Α) ΚΑΙ H = 300Μ (Β).	143

ΕΙΚΟΝΑ 5.7. ΔΙΑΜΗΚΕΣ ΠΡΟΦΙΛ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ (u) ΚΑΤΑ CHERN ET AL. 1998 ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M (A) ΚΑΙ H = 300M (B).	144
ΕΙΚΟΝΑ 5.8. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ.	144
ΕΙΚΟΝΑ 5.9. ΑΓΚΥΡΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ Υ. (ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε., 2022)	151
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	153
ΕΙΚΟΝΑ 5.10. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΥΠΟΥ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=150M.	153
ΕΙΚΟΝΑ 5.11. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	154
ΕΙΚΟΝΑ 5.12. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	155
ΕΙΚΟΝΑ 5.13. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΥΠΟΥ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=300M.	156
ΕΙΚΟΝΑ 5.14. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	157
ΕΙΚΟΝΑ 5.15. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	158
ΕΙΚΟΝΑ 5.16. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=150M.	159
ΕΙΚΟΝΑ 5.17. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	160
ΕΙΚΟΝΑ 5.18. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	161
ΕΙΚΟΝΑ 5.19. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=300M	162
ΕΙΚΟΝΑ 5.20. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	163
ΕΙΚΟΝΑ 5.21. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	164
ΕΙΚΟΝΑ 5.22. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=150M.	165
ΕΙΚΟΝΑ 5.23. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	166
ΕΙΚΟΝΑ 5.24. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	167
ΕΙΚΟΝΑ 5.25. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=300M	168
ΕΙΚΟΝΑ 5.26. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	169
ΕΙΚΟΝΑ 5.27. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	170
5.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	171
ΕΙΚΟΝΑ 5.28. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M (A) ΚΑΙ H = 300M (B).	172
ΕΙΚΟΝΑ 5.29. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000)	173
ΕΙΚΟΝΑ 5.30. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M (A) ΚΑΙ H = 300M (B).	174
ΕΙΚΟΝΑ 5.31. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M (A) ΚΑΙ H = 300M (B).	176
ΕΙΚΟΝΑ 5.32. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000)	177

ΕΙΚΟΝΑ 5.33. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M (A) ΚΑΙ H = 300M (B).	178
ΕΙΚΟΝΑ 5.34. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M (A) ΚΑΙ H = 300M (B).	180
ΕΙΚΟΝΑ 5.35. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000).	181
ΕΙΚΟΝΑ 5.36. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M (A) ΚΑΙ H = 300M (B).	182
5.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	184
ΕΙΚΟΝΑ 5.37. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 (H = 150M)	187
ΕΙΚΟΝΑ 5.38. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	188
ΕΙΚΟΝΑ 5.39. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	189
ΕΙΚΟΝΑ 5.40. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	190
ΕΙΚΟΝΑ 5.41. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	191
ΕΙΚΟΝΑ 5.42. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=150M.	191
ΕΙΚΟΝΑ 5.43. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 150M.	192
ΕΙΚΟΝΑ 5.44. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	193
ΕΙΚΟΝΑ 5.45. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	194
5.6 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	195
ΕΙΚΟΝΑ 5.46. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ H=300M.	196
ΕΙΚΟΝΑ 5.47. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	198
ΕΙΚΟΝΑ 5.48. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	198
ΕΙΚΟΝΑ 5.49. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (A) ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΕΞΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (B).	200
ΕΙΚΟΝΑ 5.50. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000)	202
ΕΙΚΟΝΑ 5.51. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΡΙΣΤΕΡΟ (A) ΚΑΙ ΤΟΝ ΔΕΞΙΟ ΚΛΑΔΟ (B).	203
ΕΙΚΟΝΑ 5.52. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	205
ΕΙΚΟΝΑ 5.53. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M ΓΙΑ ΥΓΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.	206
ΕΙΚΟΝΑ 5.54. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300M.	207

ΕΙΚΟΝΑ 5.55. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	208
ΕΙΚΟΝΑ 5.56. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000)	209
ΕΙΚΟΝΑ 5.57. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΤΙΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ.	210
ΕΙΚΟΝΑ 5.58. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	211
ΕΙΚΟΝΑ 5.59. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	212
ΕΙΚΟΝΑ 5.60. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	213
ΕΙΚΟΝΑ 5.61. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	214
ΕΙΚΟΝΑ 5.62. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000)	215
ΕΙΚΟΝΑ 5.63. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	216
ΕΙΚΟΝΑ 5.64. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	217
ΕΙΚΟΝΑ 5.65. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΓΙΑ ΥΓΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.	218
ΕΙΚΟΝΑ 5.66. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	219
ΕΙΚΟΝΑ 5.67. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΣΤΕΨΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	220
ΕΙΚΟΝΑ 5.68. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000)	221
ΕΙΚΟΝΑ 5.69. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΤΙΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ.	222
ΕΙΚΟΝΑ 5.70. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	223
ΕΙΚΟΝΑ 5.71. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	224
ΕΙΚΟΝΑ 5.72. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	225
ΕΙΚΟΝΑ 5.73. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ $H = 300\text{m}$.	226
ΕΙΚΟΝΑ 5.74. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOEK & MARINOS, 2000)	227

ΕΙΚΟΝΑ 5.75. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300 Μ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	228
ΕΙΚΟΝΑ 5.76. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ.	229
ΕΙΚΟΝΑ 5.77. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ ΓΙΑ ΥΓΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.	229
ΕΙΚΟΝΑ 5.78. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ.	231
ΕΙΚΟΝΑ 5.79. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (Α) ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΕΞΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (Β).	232
ΕΙΚΟΝΑ 5.80. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOK & MARINOS, 2000)	234
ΕΙΚΟΝΑ 5.81. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΡΙΣΤΕΡΟ (Α) ΚΑΙ ΤΟΝ ΔΕΞΙΟ ΚΛΑΔΟ (Β) ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	235
ΕΙΚΟΝΑ 5.82. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ.	236
ΕΙΚΟΝΑ 5.83. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	237
ΕΙΚΟΝΑ 5.84. ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ, ΣΗΜΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ.	238
ΕΙΚΟΝΑ 5.85. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΕ 2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ H = 300Μ ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (Α) ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΕΞΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (Β) ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	240
ΕΙΚΟΝΑ 5.86. ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ STRENGTH FACTOR ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΡΙΣΤΕΡΟ (Α) ΚΑΙ ΤΟΝ ΔΕΞΙΟ ΚΛΑΔΟ (Β) ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	241
ΕΙΚΟΝΑ 5.87. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ (HOK & MARINOS, 2000)	241
6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	242
6.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΆΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	243

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΗΛΩΣΕΙΣ (DOUGLAS & ARTHUR , 1983).	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2. ΚΥΡΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ. (ΜΑΡΙΝΟΣ Β. Π., 2007)	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3. ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ. (ΜΑΡΙΝΟΣ Β. Π., 2007)	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	67

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΩΝ ΚΑΙ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ (ΜΑΡΙΝΟΣ Β. Π., 2007).	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΡΡΗΚΤΩΝ ΒΡΑΧΩΝ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΑΝΤΗΘΗΚΑΝ. (ΥΑΛCIN, GUROCAK, ΓΗΑΒCΗ, & ΖΑΜΑΝ, 2015)	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΗΡΑΓΓΑΣ. (ΥΑΛCIN, GUROCAK, ΓΗΑΒCΗ, & ΖΑΜΑΝ, 2015).....	79
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΡΡΗΚΤΩΝ ΒΡΑΧΩΝ ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ. (ΔΙΑCΑΚΟC, ΚΑΙ ΣΥΝ., 2010).....	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΙ Τ.Ε.	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥC ΕΜΦΑΝΙΖΟΜΕΝΟΥC ΣΧΗΜΑΤΙCΜΟΥC ΤΗC ΣΗΡΑΓΓΑC ΎΘΡΥΟC (ΜΠΑΛΑCΗ, 2007).....	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑCΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙCΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥC ΕΜΦΑΝΙΖΟΜΕΝΟΥC ΣΧΗΜΑΤΙCΜΟΥC ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΤΗC ΣΗΡΑΓΓΑC ΎΘΡΥC (ΜΠΑΛΑCΗ, 2007).....	95
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7. ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟ ΠΟCΟCΤΟ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ CΕ ΚΑΘΕ ΣΗΡΑΓΓΑ. (ΜΟΥΡΤΖΑC & ΓΚΙΟΛΑC, 2010).....	97
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕC ΕΝΟΤΗΤΕC ΣΗΡΑΓΓΑC ΎΘΡΥΟC. (ΜΟΥΡΤΖΑC & ΓΚΙΟΛΑC, 2010)	99
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΚΥΡΙΑC ΣΗΡΑΓΓΑC (SS6) ΎΘΡΥΟC. (ΜΠΑΛΑCΗ, 2007)	100
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟCΩΡΙΝΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΣΗΡΑΓΓΑC ΎΘΡΥΟC. (ΜΟΥΡΤΖΑC & ΓΚΙΟΛΑC, 2010).....	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙCΜΟΙ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟC ΤΟΥ ΝΟΤΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΗC ΣΗΡΑΓΓΑC Τ3. (ΤCΙΡΟΓΙΑΝΝΗ, 2018)	106
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.12. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 3Α (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.13. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 4Α (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014)..	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.14. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 5Α (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014)..	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.15. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 5Β (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.16. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 6Α (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).	111
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.17. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 7Α (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.18. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 7Α1 (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.19. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 7Β (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).	113
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.20. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 7C (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).....	114
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.21. ΜΕΤΡΑ ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 7C – Ρ (ΜΑΡΙΝΟC Π. ,2014).	115
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.22. ΒΑCΙΚΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙCΤΙΚΑ ΤΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙCΜΩΝ ΤΗC ΣΗΡΑΓΓΑC ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΟΥ. (ΔΙΑCΑΚΟC, ΚΑΙ ΣΥΝ., 2010).....	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.23. CΥΝΔΕCΗ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΜΕ ΤΙC ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕC ΕΝΟΤΗΤΕC ΤΗC ΣΗΡΑΓΓΑC ΎΘΡΥΟC.	123
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.24. ΒΑCΙΚΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙCΤΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΑC ΎΘΡΥΟC.	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.25. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕC ΕΝΟΤΗΤΕC ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙCΜΩΝ CΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΕΜΠΩΝ Τ3. ...	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.26. ΔΙΑΤΟΜΕC ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ CΤΙC ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕC ΣΗΡΑΓΓΕC.	129
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.27. ΔΙΑΤΟΜΕC ΑΜΕCΗC ΥΠΟCΤΗΡΙΞΗC ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ CΤΙC ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕC ΣΗΡΑΓΓΕC.	130

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.28. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΣΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ.	132
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΥΠΩΝ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ	140
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	142
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	143
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	146
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	146
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	147
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	149
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟΥ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	150
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΓΚΥΡΙΩΝ FIBERGLASS ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	151
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10. ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	153
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	154
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	155
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	156
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	157
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15. ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	158
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	159
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.17. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	160
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	162
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.19. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	163
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.20. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	165
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.21. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	166
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.22. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	168
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.23. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	169
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.24. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$ ΚΑΙ $H = 300\text{M}$	171
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.25. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 2 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	173
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.26. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$ ΚΑΙ $H = 300\text{M}$	175
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.27. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	177
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.28. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$ ΚΑΙ $H = 300\text{M}$	179
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.29. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	181
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.30. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ	184

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.31. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	185
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.32. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	185
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.33. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΥΠΟ ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	186
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.34. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	187
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.35. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	189
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.36. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΓΙΑ $H = 150\text{M}$	191
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.37. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	193
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.38. ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	196
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.39. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$	197
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.40. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΝ ΠΡΩΤΟ ΚΛΑΔΟ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ.	201
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.41. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ.	201
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.42. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	206
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.43. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ($H = 300\text{M}$) ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	208
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.44. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	212
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.45. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ($H = 300\text{M}$) ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	214
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.46. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	218
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.47. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ($H = 300\text{M}$) ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	220
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.48. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	225
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.49. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΥΠΟ 4 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ($H = 300\text{M}$) ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	226
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.50. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	230
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.51. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΝ ΠΡΩΤΟ ΚΛΑΔΟ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ.	233
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.52. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ($H = 300\text{M}$) ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	234
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.53. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΓΙΑ $H = 300\text{M}$ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	238
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.54. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΟΕΚ Ε. & ΜΑΡΙΝΟΣ Ρ. (2000) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΔΥΜΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ 3 ΟΦΙΟΛΙΘΩΝ ($H = 300\text{M}$) ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.	240
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΤΥΠΟΥ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥ.	248

