



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

## Επίδραση της απόστασης των κλάδων δίδυμης οδικής σήραγγας στη μηχανική της συμπεριφορά

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Σύλλας Μάριος -Ιάσων*

Επιβλέπων: Π. Νομικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## Επίδραση της απόστασης των κλάδων δίδυμης οδικής σήραγγας στη μηχανική της συμπεριφορά

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Σύλλας Μάριος- Ιάσων*

Επιβλέπων: Π. Νομικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .../ ... /2021

Π. Νομικός, Καθηγητής ΕΜΠ, ..... (Υπογραφή)

Α. Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, ..... (Υπογραφή)

Ι. Ζευγώλης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, ..... (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

## Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή.....	8
Τοποθέτηση του προβλήματος.....	8
Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο.....	11
Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας.....	11
Σύστημα RMR ( Bieniawski).....	11
Σύστημα GSI.....	13
Σύστημα Q (NGI ).....	13
Υπολογιστικό Πρόγραμμα RS2 2019.....	14
Στάδια Εκσκαφής – Υποστήριξης.....	15
Ιδιότητες Υλικών Γεωμάζας.....	15
Κριτήρια αστοχίας της βραχώμαζας.....	15
Μοντέλο Mohr – Coulomb.....	16
Κατασκευή προσομοιώματος.....	21
Αλληλεπίδραση γειτονικών υπόγειων ανοιγμάτων.....	24
Δύο παράλληλα κυκλικά ανοίγματα.....	24
Αλληλεπίδραση υπόγειων ανοιγμάτων διαφορετικής διατομής.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσομοίωση δίδυμης οδικής σήραγγας σε ελαστική βραχομάζα.....	26
Παραδοχές κατά την προσομοίωση.....	26
Γεωμετρία αριθμητικών μοντέλων.....	27
Αριθμητικά αποτελέσματα.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προσομοίωση δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε ελαστοπλαστική βραχομάζα.....	33
Παραδοχές της προσομοίωσης.....	33
Γεωμετρία αριθμητικών μοντέλων.....	34
Αριθμητικά αποτελέσματα.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αριθμητική προσομοίωση διάνοιξης και υποστήριξης δίδυμης οδικής σήραγγας Κνημίδας – Διερεύνηση της επίδρασης της απόστασης των δύο κλάδων.....	56

Γενικά Στοιχεία .....	56
Διάταξη Έργου.....	56
Γεωλογικό και Τεκτονικό Περιβάλλον .....	57
Τεχνικόγεωλικές συνθήκες .....	58
Σχεδιασμός Διάνοιξης και Προσωρινής Υποστήριξης .....	59
Διάνοιξη της σήραγγας.....	60
Μοντέλα προσομοίωσης κατηγορίας βραχομάζας III για βάθος 250 m και τάση πεδίου 6,75 MPa ..	61
Αριθμητικά αποτελέσματα .....	64
Μέσω της εντολής Interpret του προγράμματος RS2 πάρθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την μετατόπιση στην στέψη και την παρειά του αριστερού κλάδου, καθώς και την αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα για το 5 <sup>ο</sup> και το 9 <sup>ο</sup> στάδιο του μοντέλου , δηλαδή με την εκσκαφή μόνο του αριστερού κλάδου και με την εκσκαφή και των δύο κλάδων. ....	64
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	76

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αριθμητική προσομοίωση και τα κατασκευαστικά θέματα της διάνοιξης δίδυμων οδικών σηράγγων ανάλογα της απόστασης των δύο κλάδων και των εδαφικών χαρακτηριστικών στο τμήμα το οποίο έγινε η διάνοιξη. Για να διαμορφωθούν τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και στη συνέχεια να γίνει η αριθμητική ανάλυσή τους, χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Rocscience (2019), RS2 2019.

Αρχικά αναλύθηκαν οι συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη των δύο σηράγγων, δηλαδή τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας στην οποία πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση δίδυμης οδικής σήραγγας σε ελαστική βραχομάζα. Κατασκευάστηκαν συνολικά οκτώ (8) αριθμητικά μοντέλα, τέσσερα για δίδυμες σήραγγες κυκλικής διατομής σε τέσσερις (4) διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους και τέσσερα (4) αριθμητικά μοντέλα για δίδυμες σήραγγες πεταλοειδούς διατομής αντίστοιχα.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση δύο (2) δίδυμων οδικών σηράγγων πεταλοειδούς διατομής σε ελαστοπλαστική βραχομάζα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση κατασκευάστηκαν συνολικά σαράντα οκτώ (48) μοντέλα τα οποία καλύπτουν τις τέσσερις (4) διαφορετικές αποστάσεις ανάμεσα στις δύο (2) σήραγγες, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας στην οποία έγινε η εκσκαφή και των επιδράσεων των τριών (3) κύριων τάσεων που επιδρούν πάνω σε αυτές.

Ύστερα μελετήθηκε η επίδραση της απόστασης των δύο κλάδων δίδυμης οδικής σήραγγας. Ακολούθησε η περιγραφή του έργου των σηράγγων της Κνημίδας, η περιγραφή των γεωτεχνικών συνθηκών και των κατηγοριών υποστήριξης. Έγινε αριθμητική προσομοίωση σταδιακής διάνοιξης, υποστήριξης και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Επιλεκτικά μέσω των παραπάνω μοντέλων, αντλήθηκαν συγκεκριμένα συμπεράσματα από τη σύγκριση αριθμητικών προσομοιώσεων.

## ABSTRACT

This dissertation is dedicated to the numerical simulation and the constructional issues of the drilling of two (2) twin road tunnels depending on the distance of the two branches and the territorial characteristics in the section where the drilling took place. The Rocscience (2019), RS2 2019 two-dimensional finite element computer program was used to configure the models used and perform their numerical analysis.

Firstly, the conditions under which the two tunnels were drilled are analyzed, i.e. the geotechnical characteristics of the rock mass in which the drilling took place. In addition, the twin road tunnel was then simulated into an elastic rock mass. A total of eight (8) numerical models were constructed, four for twin tunnels of circular cross-section at four (4) different distances from each other, and four (4) numerical models for twin tunnels of horseshoe cross-section respectively.

Later on, two twin road tunnels of horseshoe cross-section were simulated in elastoplastic rock mass. In this case, a total of forty eight (48) models were constructed which cover the four (4) different distances between the two (2) tunnels, the geotechnical characteristics of the rock mass in which the excavation took place and the effects of the three (3) main trends that affect them.

Finally , the effect of the distance between the two branches of the twin road tunnel was studied. This was then followed by the description of the work of the Knimida's tunnels, the description of the geotechnical conditions and the support categories. Furthermore , a numerical simulation of gradual opening , support and analysis of the results was performed.

Selectively through the above models, specific conclusions were drawn from the comparison of numerical simulations.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

## Τοποθέτηση του προβλήματος

Μία από τις πλέον αναπτυσσόμενες και σημαντικές κατηγορίες έργων μεταλλειολόγου μηχανικού των τελευταίων ετών είναι αυτή των υπόγειων έργων. Η μείωση των αποστάσεων αλλά και του χρόνου μεταφοράς προϊόντων και μετακίνησης των ανθρώπων σε συνδυασμό με την αύξηση της ποιότητας μεταφοράς και ασφάλειας τους καθώς και την ανάγκη για χώρο στα σύγχρονα αστικά κέντρα, συνέβαλλαν δραματικά στην τάση για κατασκευή οδικών έργων όπως για παράδειγμα οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες. Κάθε χρόνο επενδύονται μεγάλα χρηματικά ποσά παγκοσμίως για την κατασκευή των παραπάνω υπογείων έργων. Στην Ελλάδα συνήθως, λόγω νομοθεσίας, οι οδικές σήραγγες αποτελούνται από δύο (2) κλάδους, έναν για κάθε κατεύθυνση. Το μέγεθος της διατομής του κάθε κλάδου εξαρτάται από τις απαιτούμενες λωρίδες κυκλοφορίας, ωστόσο συχνά αντιστοιχεί σε μία ισοδύναμη ακτίνα της τάξης πέντε (5) μέτρων. Η κατασκευή δύο (2) δίδυμων οδικών σηράγγων έχει καθιερωθεί διότι η εκσκαφή δύο κλάδων μικρότερης διατομής είναι συγκριτικά ευκολότερη, τόσο για κατασκευαστικούς όσο και για λόγους ασφαλείας από τη διάνοιξη μίας σήραγγας μεγαλύτερης διατομής. Για παράδειγμα, σε περίπτωση ατυχήματος η ύπαρξη συνδετήριων σηράγγων ανάμεσα στους δύο κύριους κλάδους επιτρέπει την διαφυγή από τον ένα κλάδο στον άλλον.

Ένα από τα κύρια προβλήματα που δημιουργούνται από την κατασκευή δίδυμων σηράγγων, είναι ο προσδιορισμός του βαθμού αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κλάδων κατά τα διάφορα στάδια εκσκαφής τους. Πιο αναλυτικά, είναι σημαντικό να εκτιμήσουμε το μέγεθος διαταραχής που προκαλεί η εκσκαφή του δεύτερου κλάδου στον προπορευόμενο, καθώς κατά την εκσκαφή ενός κλάδου δημιουργείται μία ζώνη διαταραχής γύρω από την κάθε σήραγγα η οποία επηρεάζει την δίδυμή της. Αυτό συμβαίνει διότι αλλάζει το εντατικό πεδίο γύρω από την σήραγγα η οποία εκσκάπτεται. Ο βαθμός διαταραχής που προκύπτει από τα παραπάνω εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους όπως για παράδειγμα το χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί ανάμεσα στη διάνοιξη του κάθε κλάδου, η απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων, η ποιότητα της βραχομάζας στην οποία γίνεται η διάνοιξη κ.α.

Το 1984, ο Bieniawski εξετάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών ανοιγμάτων ως έναν από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την σταθερότητα των σηράγγων. Έτσι κατά τον σχεδιασμό παράλληλων ανοιγμάτων τα οποία εκσκάπτονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και επηρεάζουν το ένα το άλλο πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ τους ως ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που θα πρέπει να αντιμετωπίσουν οι μελετητές του έργου.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμοι ορισμένοι εμπειρικοί κανόνες σχεδιασμού, όπως αυτοί του Σώματος Μηχανικών Στρατού (1978) για το σχεδιασμό δύο ή περισσότερων παράλληλων σηράγγων, που καθορίζουν ότι το ελάχιστο πλάτος του στύλου που πρέπει να μείνει μεταξύ δύο μη υποστηριζόμενων σηράγγων είναι πλάτους 1 έως 1,3 της διαμέτρου της σήραγγας σε καλής ποιότητας βράχο και τριών ή περισσότερων διαμέτρων σε κακής ποιότητας πετρώματα.





Εικόνα 1 Φωτογραφία από τον δεξιό κλάδο της οδικής σήραγγας Κνημίδας σε θέση parking (πηγή: διαδίκτυο)

Επιπλέον, υπάρχουν και θεωρητικές πιο αξιόπιστες προσεγγίσεις όπως αυτή που πρότεινε ο Bray (1987) για την έννοια της ζώνης επιρροής μιας εκσκαφής. Όταν ένα υπόγειο άνοιγμα εκσκάπτεται το πεδίο τάσης επηρεάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η διαταραχή να είναι μεγαλύτερη σε κοντινή απόσταση από το άνοιγμα και μειώνεται γρήγορα μακριά από το άνοιγμα. Η περιοχή που περιβάλλει το άνοιγμα εντός της οποίας η διαταραχή είναι σημαντική ονομάζεται ζώνη επιρροής του ανοίγματος. Οι διαστάσεις της ζώνης εξαρτώνται από τη γεωμετρία του ανοίγματος (μέγεθος, σχήμα κλπ.), τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και τις επί τόπου τάσεις. Αυτή η έννοια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση δύο ή περισσότερων εκσκαφών κοντά μεταξύ τους. Εάν καμία από τις ζώνες επιρροής δεν επικαλύπτει την γειτονική της, τότε η αλληλεπίδραση μεταξύ τους θεωρείται αμελητέα. Συγκεκριμένα, εάν η εκσκαφή, της οποίας τα όρια είναι έξω από την ζώνη της γειτονικής εκσκαφής, σχεδιάζεται αγνοώντας την ύπαρξη της άλλης.

Εν τούτοις, οι παραπάνω προσεγγίσεις μπορούν να προσφέρουν μόνο αρχικές κατευθύνσεις, κάθε περίπτωση μελέτης σήραγγας πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες διάνοιξης.

## Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κλάδων δίδυμων οδικών σηράγγων. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση κυκλικών σηράγγων σε ελαστική βραχομάζα, ενώ στη συνέχεια η περίπτωση σηράγγων πεταλοειδούς διατομής σε ελαστοπλαστική βραχομάζα για διάφορες κατηγορίες βραχομάζας με βάση της ταξινόμηση RMR. Τέλος, η εργασία εστιάζεται στην αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης της δίδυμης οδικής σήραγγας Κνημίδας λαμβάνοντας υπόψη τις γεωτεχνικές συνθήκες στις οποίες διανοίχθηκε η σήραγγα. Όλες οι περιπτώσεις εξετάζονται παραμετρικά ως προς την βραχομάζα και θεωρώντας τέσσερις (4) διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των δύο (2) κλάδων .

Αφού μελετήθηκαν οι παραπάνω παράγοντες, έγινε η αναλυτική περιγραφή τους και έπειτα η αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιώντας τα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μέθοδοι ταξινόμησης της βραχομάζας, τα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις και επεξηγούνται όλες οι θεωρητικές έννοιες που αναφέρθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

### Συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας

Προκειμένου να γίνει σωστή μελέτη και κατασκευή του έργου, είναι απαραίτητο να ποσοτικοποιηθούν οι ιδιότητες της βραχομάζας κατά μήκος της σήραγγας. Έτσι κρίνεται απαραίτητο να γίνει ταξινόμηση της βραχομάζας τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά την κατασκευή του έργου. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση γεωτεχνικών ερευνών. Στη συνέχεια η βραχομάζα κατατάσσεται σε κατηγορίες σύμφωνα με τα γνωστά συστήματα ταξινόμησης.

#### Σύστημα RMR ( Bieniawski)

Το σύστημα RMR ( Rock Mass Rating ) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976 και έλαβε την τελική του μορφή το 1979. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση της βραχομάζας γίνεται με έξι (6) παραμέτρους . Κάθε μία παράμετρος λαμβάνει μία τιμή. Το άθροισμα αυτών των παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR.

Οι παράμετροι παρατίθενται παρακάτω:

Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σci).

Αντοχή σci (MPa)	Δείκτης R1
>250	15
100-250	12-15
50-100	7-12
25-50	4-7
5-25	2-4
1-5	1-2
<1	0

Ο δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD).

Δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD)	Δείκτης R2
>90	20
75-90	17-20

50-70	13-17
25-50	8-13
<25	3

Η συχνότητα των ασυνεχειών ( η απόσταση δηλαδή μεταξύ των ασυνεχειών).

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
>2	20
0.6-2	15-20
0.2	10-15
0.06	8-10
<0.06	5

Η κατάσταση των ασυνεχειών, όσον αφορά στο άνοιγμα, στην τραχύτητα των εκατέρωθεν επιφανειών και στο υλικό πλήρωσεως.

Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείες , χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες , ελαφρά εξαλλοιωμένες , υλικό πλήρωσης <1mm	25
Ελαφρώς τραχείες , πολύ εξαλλοιωμένες , υλικό πλήρωσης <1 mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided),υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

Το υπόγειο νερό και η εικαζόμενη επιρροή του επί της αντοχής και της αστάθειας της βραχώμαζας.

Παρουσία υπόγειου νερού	Δείκτης R5
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Με ροή	0

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών (στρώσεις, διακλάσεις, σχιστότητα) σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου.

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2

Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Ο δείκτης RMR υπολογίζεται ως το άθροισμα των παραπάνω δεικτών . Με βάση της τιμής που προκύπτει , η βραχομάζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες.

Τάξη βραχομάζας	Ποιότητα βραχομάζας	RMR
I	Πολύ καλή	80-100
II	Καλή	61-80
III	Μέτρια	41-60
IV	Φτωχή	21-40
V	Πολύ φτωχή	0-20

Ο παραπάνω δείκτης αναπτύχθηκε εμπειρικά για βραχομάζα καλής ποιότητας (RMR>30) και δεν είναι πρόσφορη για βραχομάζες πολύ χαμηλής ποιότητας.

#### Σύστημα GSI

Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικώς προτάθηκε από τον Hoek το 1995 και ύστερα από βελτιώσεις από τους Hoek, Marinos και Benissi 1998-2000. Στις διάφορες αναθεωρήσεις του δίνει έμφαση και σε σχετικά φτωχότερες ποιότητες βραχομάζας με RMR < 30 αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Διάφοροι μελετητές θεωρούν ότι είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχομάζες με RMR > 40 , δηλαδή οι τιμές GSI είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Το σύστημα GSI παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές του δείκτη και πλεονεκτεί για βραχομάζες με RMR < 40 ενώ ταυτόχρονα παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR .

Το σύστημα GSI είναι βασισμένο στη ταυτόχρονη αξιολόγηση δύο παραμέτρων:

Της δομής της βραχομάζας που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών και της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

#### Σύστημα Q (NGI)

Το 1974 αναπτύχθηκε από τους Barton, Lien and Lunde στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) το σύστημα Q με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη μέθοδο NATM . Η παραπάνω μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q μέσω της σχέσης:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \left(\frac{J_r}{J_n}\right) \left(\frac{J_w}{SRF}\right)$$

Όπου:

RQD = δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας

$J_n$  = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών

$J_r$  = βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών

$J_a$  = βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών

$J_w$  = συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού

SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων ( Stress Reduction Factor)

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που αποτελούν τη βραχόμαζα, ο δεύτερος τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας και ο τρίτος και τελευταίος τις τάσεις που επικρατούν στην βραχόμαζα.

#### Υπολογιστικό Πρόγραμμα RS2 2019

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα RS2 2019 με σκοπό τη μελέτη των τάσεων που αναπτύσσονται στα όρια των σηράγγων κατά την μία προς μία ή και ταυτόχρονη διάνοιξή τους ανάλογα με την απόστασή τους, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Πρόκειται για έναν δισδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Το RS2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα μηχανικών έργων όπως:

- Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης ή αξονοσυμμετρικά προβλήματα
- Ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά υλικών
- Διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις
- Υλικά με διαφορετικές ιδιότητες στη διατομή της ανάλυσης
- Επίδραση στοιχείων υποστήριξης (π.χ. αγκύρια, εκτοξευμένο σκυρόδεμα κ.τ.λ.)
- Σταθερές τάσεις πεδίου ή μεταβαλλόμενες καθ' ύψος της διατομής λόγω βαρύτητας
- Προβλήματα παρουσίας ασυνεχειών στη γεωμάζα
- Προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού (με δυνατότητα ανάλυσης της πίεσης πόρων).
- Προετοιμασία Μοντέλου

Η προετοιμασία του μοντέλου στο πρόγραμμα RS2 2019 πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον, μορφής CAD. Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, ικανής να χειριστεί πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξι κόμβων ή τετραπλευρικά

τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη είτε το ίδιο το βάρος των στοιχείων, είτε οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας, είτε και τα δύο ταυτόχρονα (Χαλαστάνης, 2016).

### Στάδια Εκσκαφής – Υποστήριξης

Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης προσομοιώνονται στο RS2 2019 μέσω σταδίων προσομοίωσης όπου είναι δυνατή η αφαίρεση στοιχείων της γεωμάζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σε κάθε στάδιο προσομοίωσης (Χαλαστάνης, 2016).

### Ιδιότητες Υλικών Γεωμάζας

Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκάρσιως ισότροπο ή ορθότροπο. Προκειμένου να αναλυθεί η πλαστική συμπεριφορά υλικών, διατίθενται διάφορα κριτήρια αστοχίας. Πιο σχετικά με τη συμπεριφορά της βραχομάζας είναι τα κριτήρια Mohr – Coulomb, Hoek – Brown και Drucker – Prager. Υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης δύο ειδών πλαστικής συμπεριφοράς:

1. Ελαστικά – τελείως πλαστικά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές.
2. Ψαθυρά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες των αρχικών.

Οι ιδιότητες των υλικών της γεωμάζας μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της προσομοίωσης. (Χαλαστάνης, 2016)

### Κριτήρια αστοχίας της βραχομάζας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb είναι ευρέως διαδεδομένο στην γεωτεχνική μηχανική και εφαρμόζεται σε εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς. Στο συγκεκριμένο κριτήριο ο συνδυασμός ορθής και διατμητικής τάσης, ο οποίος ευθύνεται για την αστοχία του υλικού, καθορίζεται με βάση το νόμο τριβής του Coulomb. Το ζεύγος των κύριων τάσεων προσδιορίζεται με βάση τον κύκλο του Mohr το οποίο ευθύνεται για τον συνδυασμό της ορθής και της διατμητικής τάσης που θα οδηγήσουν στην αστοχία της βραχομάζας, όπως επίσης και στην διεύθυνση κατά την οποία η βραχομάζα θα αστοχήσει.

Το παραπάνω κριτήριο εφαρμόζεται επιπλέον για κερματισμένες βραχώμαζες ή για την έκφραση αστοχίας σε επίπεδο ασυνέχειας. Με βάση αυτό περιγράφεται ο συνδυασμός της μέγιστης διατμητικής τάσης κατά το επίπεδο της αστοχίας αλλά και της μέγιστης ορθής τάσης κάθετα στο επίπεδο αστοχίας σε ένα ελαστικό χώρο.

### Μοντέλο Mohr – Coulomb

Το μοντέλο Mohr – Coulomb είναι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε αρχικά κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος RS2 2019. Αποτελεί ένα μοντέλο αστοχίας κατά το οποίο η συμπεριφορά του εδάφους θεωρείται γραμμική ελαστική – πλαστική (tutorials RS2 2019).

Το μοντέλο Mohr - Coulomb είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο αστοχίας των γεωυλικών και ειδικότερα των εδαφών (π.χ., Owenand Hinton 1980, Pietruszczak 2010). Οι προδιαγραφές αυτού του μοντέλου και του κριτηρίου απόδοσής του, περιλαμβάνουν την υπόθεση Coulomb, η οποία υποθέτει μια γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής αντοχής σε ένα επίπεδο και της ορθής (κάθετης) τάσης που ενεργεί επ' αυτής:

$$\tau = c - \sigma_n \tan\varphi$$

όπου  $\tau$  είναι η διατμητική αντοχή,  $\sigma_n$  είναι η ορθή τάση (θετική τάση),  $\varphi$  είναι η γωνία εσωτερικής τριβής και  $c$  είναι η συνοχή. (tutorials RS2 2019)

Η μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού που ακολουθεί το μοντέλο Mohr - Coulomb περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως:

- ✓ Ισοτροπική αντοχή σε διάτμηση (κορυφαία και παραμένουσα) που έχει χαρακτηριστική συνοχή-τριβή και αυξάνεται γραμμικά με το επίπεδο καταπόνησης/περιορισμού
- ✓ Αντοχή σε εφελκυσμό (με τη χρήση αποκοπής)
- ✓ Διαστολή (αύξηση όγκου) ή κρίσιμη κατάσταση (σταθερός όγκος) κατά την αστοχία
- ✓ Εξάρτηση της διατμητικής αντοχής στη γωνία Lode (παρατηρήθηκε για τα περισσότερα γεωυλικά (Tutorials RS2 2019))

Το μοντέλο είναι κατάλληλο για τη μελέτη γεωτεχνικών προβλημάτων που δεν περιλαμβάνουν ευρεία μεταβολή της πλευρικής πίεσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μείωσης της διατμητικής αντοχής (SSR), αυτό το μοντέλο μπορεί να αξιολογήσει συντελεστές ασφαλείας ισοδύναμους με αυτούς που υπολογίζονται με βάση την ανάλυση οριακής ισορροπίας (π.χ. με το πρόγραμμα Slide προκειμένου για την μελέτη ευστάθειας πρανών) και σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχουν καλύτερη πρόβλεψη των τρόπων αστοχίας και των συντελεστών ασφάλειας. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για υπολογισμούς μετατόπισης και τάσης σε προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν βραχώδη ή εδαφικά γεωυλικά (tutorials RS2 2019).

Συνδυάζοντας το κριτήριο Coulomb με τον κύκλο του Mohr για την αναπαράσταση της κατάστασης τάσης και λαμβάνοντας υπόψη τις αποδεκτές εντατικές καταστάσεις, το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb όσον αφορά τις κύριες τάσεις μπορεί να εκφραστεί ως:



$$F_s = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) + 1/2 (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi - c \cdot \cos\varphi = 0$$

Ως προς τις αναλλοίωτες της τάσης, το κριτήριο Mohr – Coulomb διατυπώνεται ως:

$$F_s = 1/3 \sin(\varphi) + \sqrt{J_2} [\cos(\theta) - 1/\sqrt{3} \sin(\theta) \sin(\varphi)] - \cos(\varphi) = 0$$

Ή σε άλλους όρους αναλλοίωτων της τάσης:

Όπου:

$$F_s = q + M_p - N_c = 0 \quad (5.4)$$

$$M = 3 \sin\varphi / (\sqrt{3} \cos\theta - \sin\theta \sin\varphi)$$

$$N = 3 \cos\varphi / (\sqrt{3} \cos\theta - \sin\theta \sin\varphi)$$

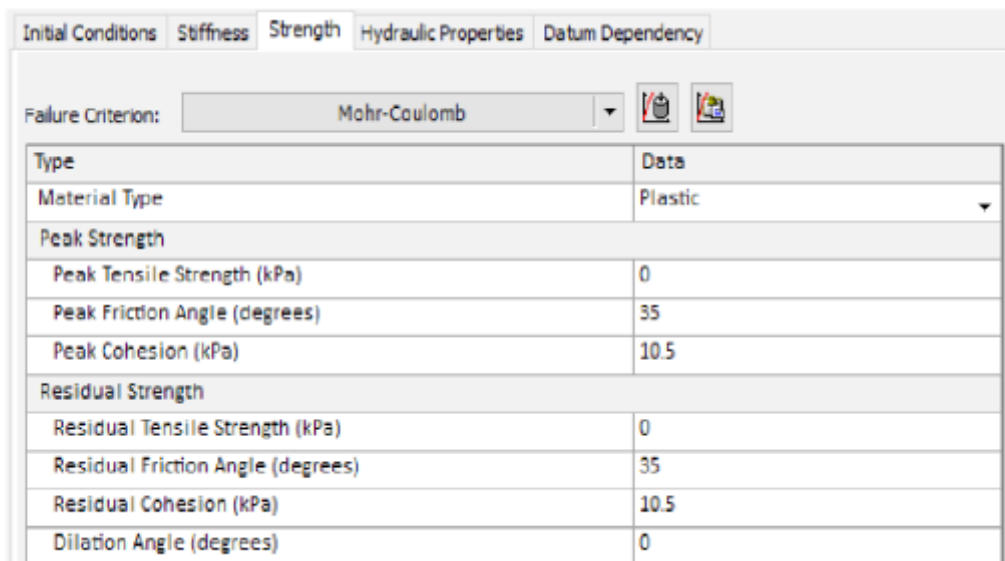
Το RS2 δέχεται κορυφαίες και παραμένουσες τιμές της γωνίας τριβής και της συνοχής. Αυτό σημαίνει ότι μετά την διαρροή η αντοχή του υλικού πέφτει αμέσως από την κατάσταση κορυφαίας αντοχής σε μια χαμηλότερη παραμένουσα τιμή. Το μοντέλο Mohr - Coulomb στα RS2 είναι ένα μοντέλο ελαστικό – ψαθυρό ή πλαστικό γενικά. Στην περίπτωση όπου οι παραμένουσες τιμές είναι οι ίδιες με τις μέγιστες τιμές, η συμπεριφορά είναι ελαστική – τέλεια πλαστική (tutorials RS2 2019).

Η συνάρτηση πλαστικού δυναμικού έχει την ίδια μορφή με την επιφάνεια διαρροής:

$$Q_s = 1/3 \sin(\psi) + \sqrt{J_2} [\cos(\theta) - 1/\sqrt{3} \sin(\theta) \sin(\psi)] = \text{const}$$

όπου  $\psi$  είναι η γωνία διαστολής. Αυτή η παράμετρος θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με τη γωνία τριβής (παραμένουσα) η οποία καθιστά το νόμο ροής συσχετισμένο ή μη. (tutorials RS2 2019)

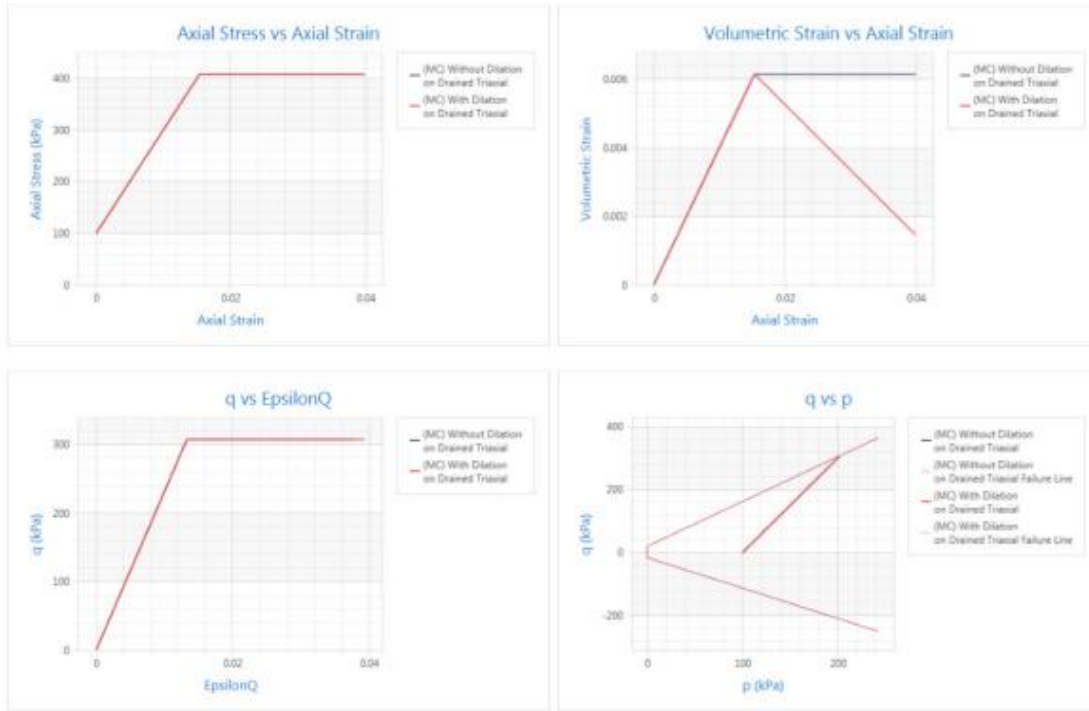
Η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων για τον ορισμό αυτού του καταστατικού μοντέλου στο πρόγραμμα RS2 παρουσιάζεται ως εξής.



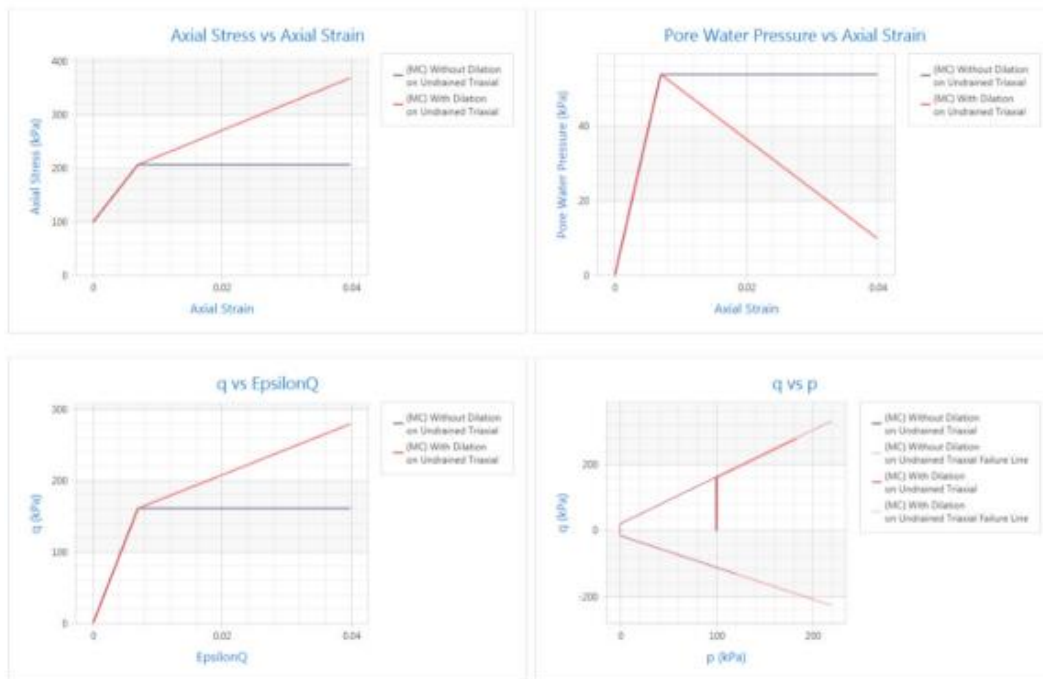
Εικόνα 2 καρτέλα εισαγωγής δεδομένων για ορισμό μοντέλου Mohr-Coulomb ( RS2 2019 tutorials)

Ενδεικτικές διαδρομές τάσεων δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες δίνονται στις εικόνες 3 και 4. Όλες οι δοκιμές αρχίζουν από ένα υδροστατικό περιορισμό των  $p = p' = 100 \text{ kPa}$  (tutorials RS2 2019). Οι διαδρομές των τάσεων των στραγγιζόμενων δοκιμών περιλαμβάνουν μεταβολές της αξονικής τάσης και της ογκομετρικής τροπής με την αύξηση της αξονικής καταπόνησης, μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης με την αποκλίνουσα τροπή και τη διαδρομή τάσης στο επίπεδο  $p - q$ . Η επιφάνεια διαρροής παρουσιάζεται επίσης στο επίπεδο  $p - q$ . Η προσομοιωμένη συμπεριφορά είναι μια ελαστική - τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Η διασταλτικότητα απεικονίζεται στην μεταβολή της ογκομετρικής τροπής με την αξονική τροπή (tutorials RS2 2019).

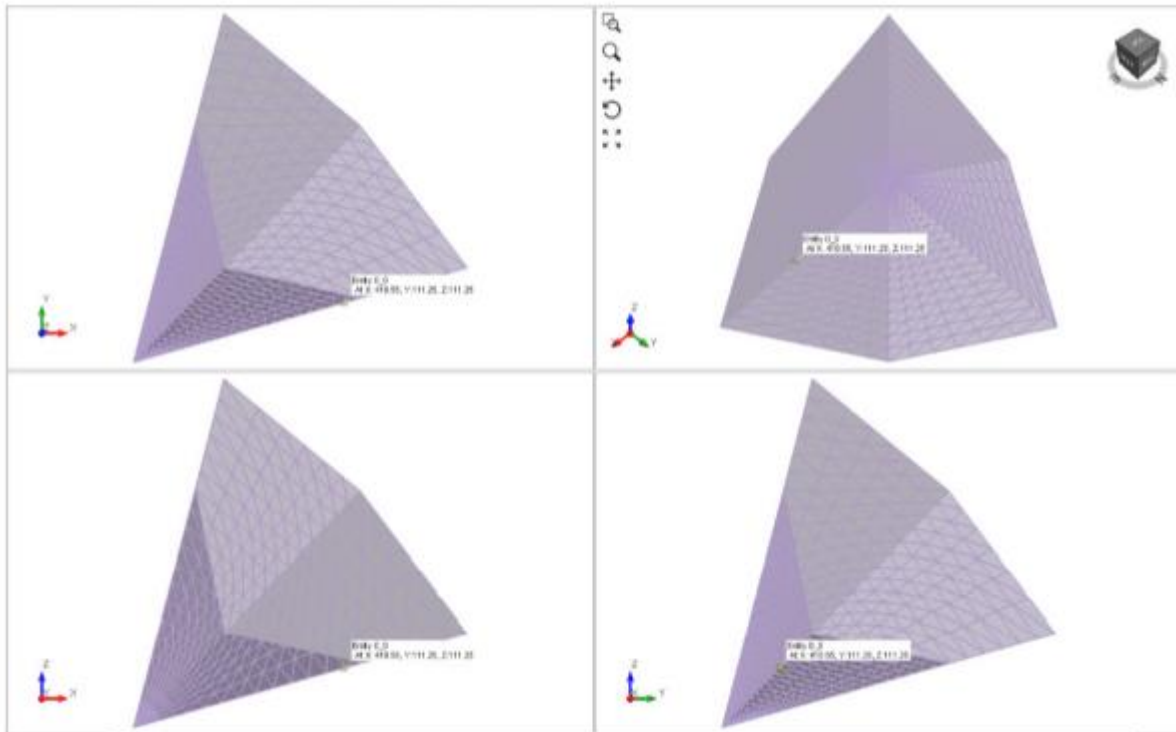
Οι διαδρομές των τάσεων των αστράγγιστων δοκιμών περιλαμβάνουν τη μεταβολή της αξονικής τάσης και της πίεσης του νερού των πόρων με την αυξανόμενη αξονική καταπόνηση, τη μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης με την αποκλίνουσα τάση και τη διαδρομή τάσης στο επίπεδο  $p - q$ . Η επιφάνεια διαρροής παρουσιάζεται επίσης στο επίπεδο  $p - q$ . Η διασταλτική συμπεριφορά απεικονίζεται στο γράφημα της διαδρομής τάσεων στο επίπεδο  $p - q$  που περιλαμβάνει επίσης την επιφάνεια διαρροής. Η δημιουργία αρνητικής πίεσης νερού των πόρων σε υλικό με διαστολή οδηγεί στην αύξηση της ενεργούς μέσης τάσης, καθώς η διαδρομή της τάσης παραμένει στην επιφάνεια της διαρροής και ακολουθείται σε υψηλότερα επίπεδα αποκλίνουσας τάσης (tutorials RS2 2019).



Εικόνα 3 Διαδρομές τάσεων των στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών σε υλικά με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb (RS2 2019 tutorials)



Εικόνα 4 διαδρομές τάσεων των αστραγγιστων τριαξονικών δοκιμών σε υλικά με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb (RS2 2019 tutorials)



Εικόνα 5 Επιφάνεια διαρροής μοντέλου Mohr-Coulomb σε 3D χώρο τάσης ( RS2 2019 tutorials)

Η επιφάνεια διαρροής αυτού του μοντέλου είναι μια γραμμή στο 2D χώρο τάσης όπως φαίνεται στις Εικόνες 3 και 4 και έχει ένα σχήμα εξαγωνικής πυραμίδας σε χώρο τρισδιάστατης τάσης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. Ο ορισμός της επιφάνειας διαρροής περιλαμβάνει τη γωνία του Lode και συνεπώς η προβολή αυτής της επιφάνειας διαρροής στο επίπεδο Π, με την ορθή κατεύθυνση να είναι η διαγώνιος του χώρου τάσης, αποκλίνει από το κυκλικό σχήμα του μοντέλου Drucker - Prager. (tutorials RS2 2019)

Το μοντέλο δέχεται επίσης μια αποκοπή της εφελκυστικής τάσης. Η επιφάνεια διαρροής σε εφελκυσμό είναι αποκομμένη:

$$F_T = \sigma_1 - T = 0$$

Στην παραπάνω σχέση T είναι η εφελκυστική αντοχή του υλικού. Ο νόμος ροής για την εφελκυστική αστοχία είναι συσχετισμένος (tutorials RS2 2019).

Οι παράμετροι τους οποίους και χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι οι παρακάτω:

- φ: Γωνία Εσωτερικής Τριβής (°)

Η γωνία εσωτερικής τριβής φ είναι μία από τις βασικές παραμέτρους για το μοντέλο και υπολογίζεται εργαστηριακά από τριαξονικές δοκιμές από την κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας σε διάγραμμα ορθής τάσης – διατμητικής τάσης. Να σημειωθεί ότι η γωνία τριβής είναι ίση με μηδέν σε αστράγγιστες συνθήκες. (Κοσκινώτης, 2019)

•c: Συνοχή (kN/m<sup>2</sup>)

Η συνοχή  $c$  αποτελεί, επίσης, μία από τις βασικές παραμέτρους για το μοντέλο. Η συνοχή, ομοίως με τη γωνία τριβής  $\phi$ , μπορεί να υπολογιστεί εργαστηριακά από το διάγραμμα ορθής τάσης – διατμητικής τάσης ως η τεταμένη του σημείου τομής της περιβάλλουσας αστοχίας με τον άξονα την διατμητικής τάσης (άξονας τεταμένων). (Κοσκινιώτης, 2019)

•E: Μέτρο Ελαστικότητας (kN/m<sup>2</sup>)

Συνήθως το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω των μονοαξονικών και τριαξονικών θλιπτικών δοκιμών. Να επισημανθεί ότι τα πιο πολλά γεωλικά δεν παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά καθώς αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τη μορφή και το μέγεθος της φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα χρήσης άλλων μέτρων ελαστικότητας. (Κοσκινιώτης, 2019)

•ν: Λόγος του Poisson

Ως λόγος Poisson ορίζεται ο λόγος την πλευρικής προς την εγκάρσια παραμόρφωση. Μπορεί να υπολογιστεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών. (Κοσκινιώτης, 2019)

• $\psi$ : Γωνία Διασταλτικότητας (°)

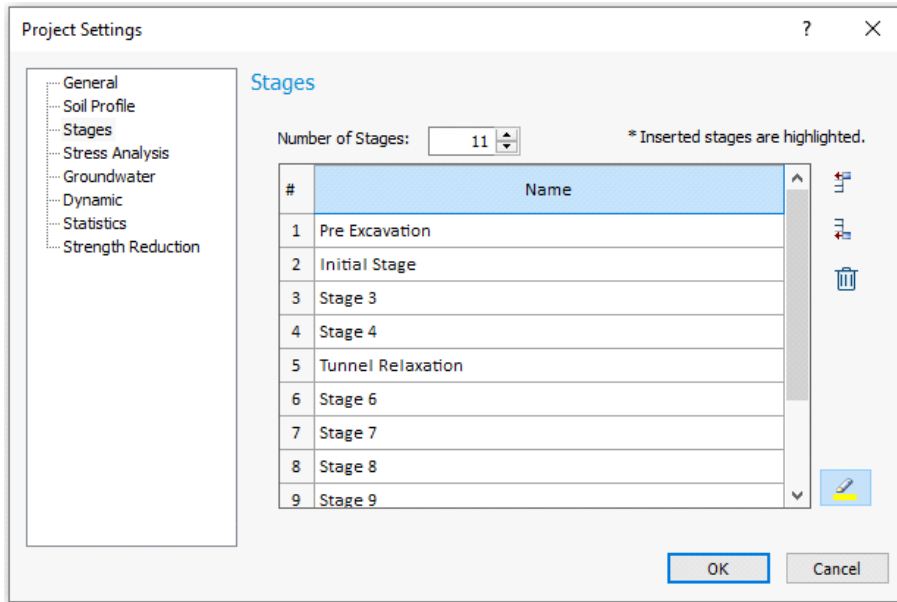
Η γωνία διασταλτικότητας είναι ένας συντελεστής ο οποίος εκφράζει την τάση ενός γεωλικού να διογκώνεται όταν ασκείται σε αυτό διατμητική τάση. Στην περίπτωση των αμμωδών γεωλικών εξαρτάται από την πυκνότητα και τη γωνία εσωτερικής τριβής, ενώ σε αυτή των αργιλικών εδαφών, με εξαίρεση τα έντονα υπερστερεοποιημένα, η γωνία είναι σχεδόν μηδέν (Κοσκινιώτης, 2019).

Τα κύρια πλεονεκτήματα του Μοντέλου Mohr – Coulomb, συγκριτικά με άλλα μοντέλα αστοχίας, είναι το γεγονός ότι η εφαρμογή του είναι απλή και εύχρηστη και ότι οι παράμετροι που απαιτούνται είναι συγκεκριμένες και έχουν ξεκάθαρη φυσική σημασία. (Κοσκινιώτης, 2019)

## Κατασκευή προσομοιώματος

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν 48 μοντέλα τα οποία αποτελούνται από 3 φάσεις. Η διαδικασία για την κατασκευή των μοντέλων που επρόκειτο να αναλυθούν από το λογισμικό είναι η εξής:

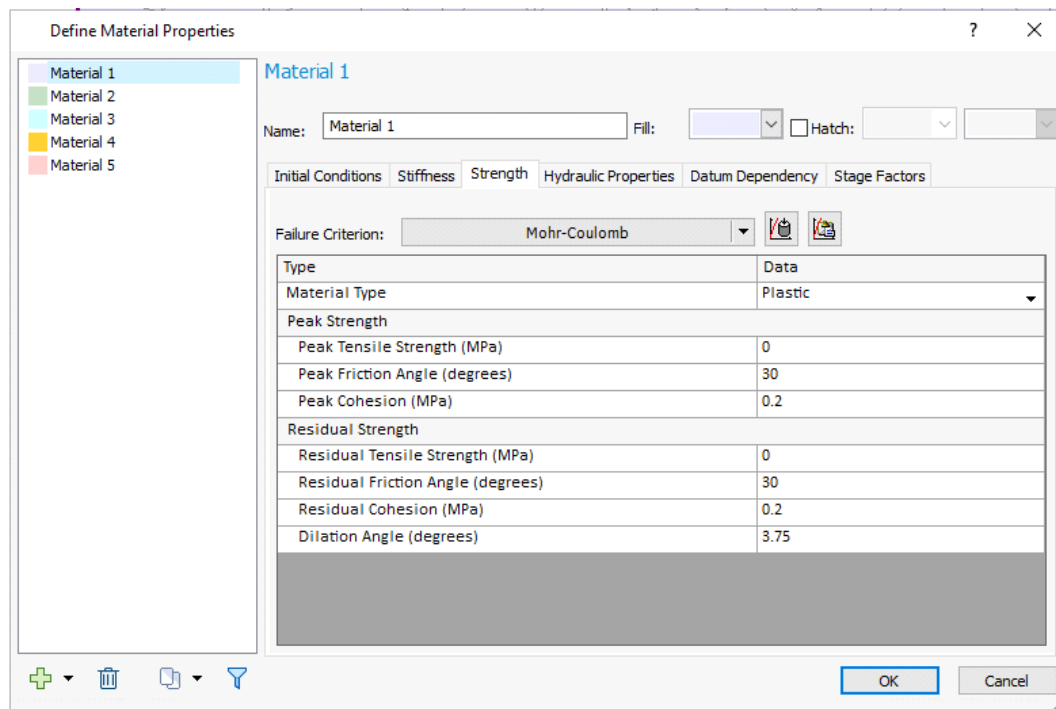
Αρχικά μέσω της εντολής project settings επιλέχτηκε ο αριθμός φάσεων και οι μονάδες μέτρησης των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν .



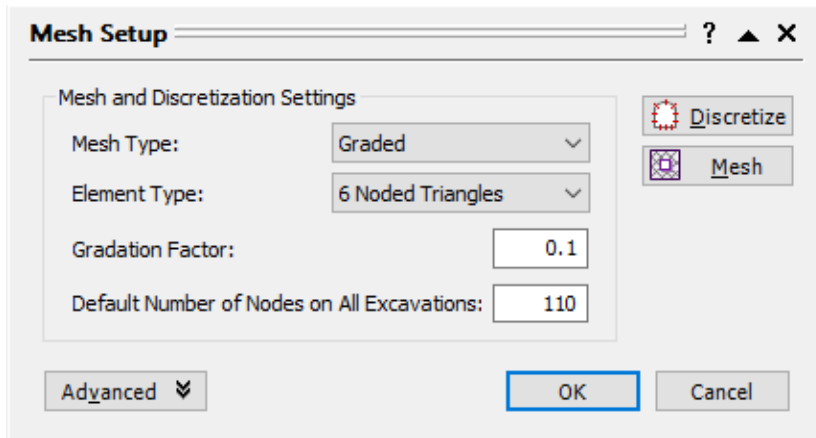
Στη συνέχεια μέσω των εντολών Boundaries – Add External δόθηκαν οι διαστάσεις του προσομοιώματος.

Έπειτα ακολούθησε ο σχεδιασμός των σηράγγων καθώς και των συντεταγμένων αλλά και γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους με τις εντολές Boundaries – Add excavation – i – enter.

Το επόμενο βήμα ήταν να εισαχθούν οι ιδιότητες του υλικού που περιβάλλουν τις σήραγγες με τις εντολές Properties – define materials



Το επόμενο βήμα αποτελείται από τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή έγινε σε δύο βήματα, όπου το πρώτο αφορούσε τη διακριτοποίηση των ορίων και το δεύτερο τη δημιουργία του πλέγματος. Οι εντολές που ακολουθήθηκαν για τα βήματα ήταν Mesh – Mesh setup – Discretize – Mesh – ok . Με τη δημιουργία του πλέγματος , οι κόμβοι στα εξωτερικά όρια είναι προκαθορισμένοι να έχουν μηδενική μετατόπιση .



Στη συνέχεια , με τις εντολές Loading – field stress analysis ορίζουμε τις δυνάμεις που δέχονται οι σήραγγες .

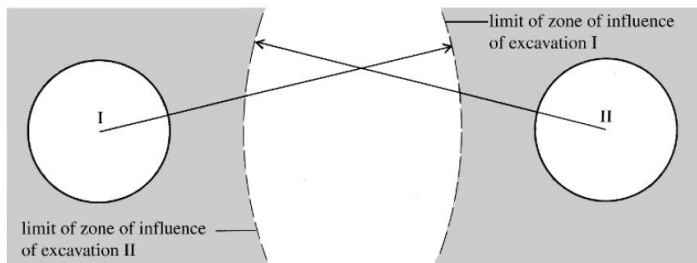


Τέλος γίνεται εκσκαφή των σηράγγων ανάλογα με το στάδιο που εμείς επιλέγουμε . Στα συγκεκριμένα μοντέλα επιλέχτηκε να γίνει εκσκαφή της αριστερής σήραγγας στο δεύτερο στάδιο και στη συνέχεια εκσκαφή της δεξιάς στο τρίτο στάδιο .

## Αλληλεπίδραση γειτονικών υπόγειων ανοιγμάτων

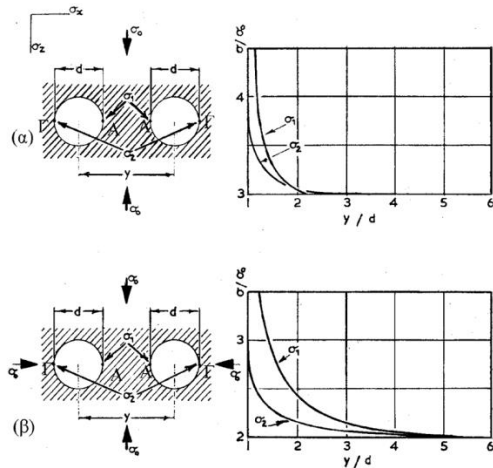
### Δύο παράλληλα κυκλικά ανοίγματα

Όπως αναφέρθηκε, η μεταβολή των εντατικών συνθηκών περίξ των υπογείων ανοιγμάτων λόγω της διάνοιξης ενός γειτονικού ανοίγματος έχει σαν αποτέλεσμα την υπερφόρτιση τους. Προκειμένου για κυκλικά ανοίγματα που διανοίγονται σε ελαστική βραχομάζα σε υδροστατικό ( $K=1$ ) φυσικό εντατικό πεδίο, αποδεικνύεται ότι σε απόσταση  $5 \cdot R$  από το κέντρο τους οι τάσεις διαφέρουν από τις τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίο σε ποσοστό μόλις 4% (Σοφιανός 2015). Συνεπώς, μία υπόγεια εκσκαφή που διανοίγεται σε απόσταση μεγαλύτερη από πέντε ακτίνες μπορεί να σχεδιαστεί ως ανεξάρτητο υπόγειο άνοιγμα (Brady & Brown, 2006). Στην πράξη αυτή η απόσταση δύναται να ακολουθείται επιλέγοντας πάχος βραχοκολώνας μεταξύ των κλάδων δίδυμων σηράγγων ίσο με δύο διαμέτρους (Σοφιανός 2015).



Εικόνα 6 Δύο κυκλικά ανοίγματα που διανοίγονται εκτός της ζώνης επιρροής έκαστου εξ αυτών (Brady & Brown 2006).

Όταν τα ανοίγματα διανοίγονται εντός της ζώνης επιρροής τους, τότε πρέπει να διερευνηθεί η υπερφόρτιση που προκαλεί η παρουσία του ενός στο άλλο. Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να διερευνηθεί με υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις, όπως η αναλυτική λύση του Ling (1944), που όμως είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες στην εφαρμογή τους. Στην παρακάτω εικόνα δίνονται διαγράμματα της αλληλεπίδρασης δύο κυκλικών ανοιγμάτων και της υπερφόρτισης που αυτή προκαλεί για μονοαξονικό και διαξονικό φυσικό εντατικό πεδίο.



Εικόνα 7 Διαγράμματα της αλληλεπίδρασης δύο κυκλικών ανοιγμάτων και της υπερφόρτισης που αυτή προκαλεί για μονοαξονικό και διαξονικό φυσικό εντατικό πεδίο (πηγή: διαλέξεις μαθήματος Υποστήριξη Υπογείων Έργων του κ. Σοφιανού).

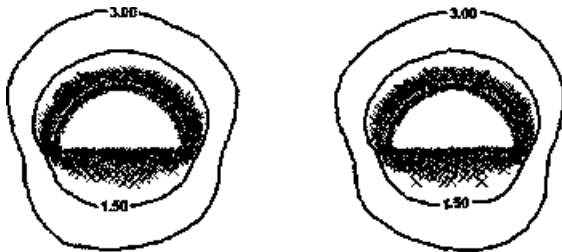


## Αλληλεπίδραση υπόγειων ανοιγμάτων διαφορετικής διατομής

Προκειμένου για υπόγεια ανοίγματα διαφορετικής διατομής από την κυκλική, η αλληλεπίδρασή τους μελετάται κατά κανόνα με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες αναλυτικές λύσεις. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο υπόγειων ανοιγμάτων που διανοίγονται σε ελαστοπλαστική βραχομάζα συναρτήσει της απόστασης μεταξύ τους (Gercek 2005).



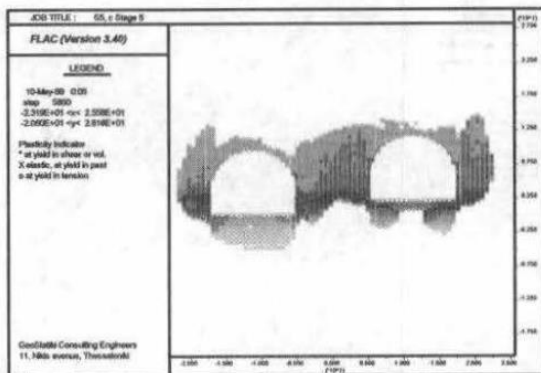
α. πλάτος στύλου ίσο με το πλάτος των δύο ανοιγμάτων



β. πλάτος στύλου ίσο με 1.5 φορά το πλάτος των δύο ανοιγμάτων

Εικόνα 8 Αλληλεπίδρασης δύο υπόγειων ανοιγμάτων και υπερφόρτισης που αυτή προκαλεί για (α) πλάτος στύλου ίσο με το πλάτος των δύο ανοιγμάτων, (β) πλάτος στύλου ίσο με 1.5 φορά το πλάτος των δύο ανοιγμάτων (πηγή: Gercek 2005).

Κατά τους Κωμοδρόμο & Μπουσγολίτη (2001) η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ανοιγμάτων μπορεί να είναι τέτοια ώστε να προκαλεί μέχρι και ενοποίηση της ζώνης διαρροής του γεωυλικού μεταξύ των κλάδων δίδυμης οδικής σήραγγας.



Εικόνα 9 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης της αλληλεπίδρασης δύο υπόγειων ανοιγμάτων (πηγή: Κωμοδρόμος & Μπουσγολίτης 2001).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσομοίωση δίδυμης οδικής σήραγγας σε ελαστική βραχομάζα

### Παραδοχές κατά την προσομοίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η ελαστική συμπεριφορά της βραχομάζας στην περίπτωση σήραγγας κυκλικής διατομής αλλά και πεταλοειδούς διατομής σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων.

Κατά την εφαρμογή δυνάμεων, η βραχομάζα συμπεριφέρεται ελαστικά όταν παραμορφώνεται μέχρι την μέγιστη τιμή της χωρίς να διαρρεύσει και να αστοχήσει. Έτσι συναντιούνται οι μέγιστες τιμές τάσης και παραμόρφωσης κατά την ελαστική συμπεριφορά της.

Οι σήραγγες που θα εξεταστούν έχουν ακτίνα 5 m και οι αποστάσεις μεταξύ των δύο κλάδων κυμαίνονται μεταξύ  $\frac{1}{2}R$  και  $4R$  ( $2.5m < \text{απόσταση } x < 20 m$ ).

Εξετάζονται τρεις (3) περιπτώσεις για τις τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου, με συντελεστή πλευρικών τάσεων  $K=0.5, 1.0, 1.50$ . Οι συνδυασμοί τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου για κάθε περίπτωση είναι οι εξής :

- Για  $K=1.0$

$\sigma_1=\sigma_3=\sigma_z = 5,4\text{MPa}$  (οριζόντια τάση ίση με την κατακόρυφη)

- Για  $K=1.5$

$\sigma_1 = 8,1 \text{ Mpa}$  ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_z = 8,1 \text{ Mpa}$  ( μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)

- Για  $K=0.5$

$\sigma_1=5,4\text{MPa}$  ,  $\sigma_3=\sigma_z=2,7\text{MPa}$  , γωνία 90 μοιρών (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)

Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος και τον συνοριακών συνθηκών είναι τα παρακάτω :

Τύπος : Διαβαθμισμένος

- Είδος διαμέρισης : 6-κομβα τρίγωνα
- Συντελεστής διαβάθμισης : 0,1
- Αριθμός κόμβων στην εκσκαφή : 80

Οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) θα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είδος Ορίου : Ορθογώνιο ( διαστάσεων 90 x60 μέτρων )

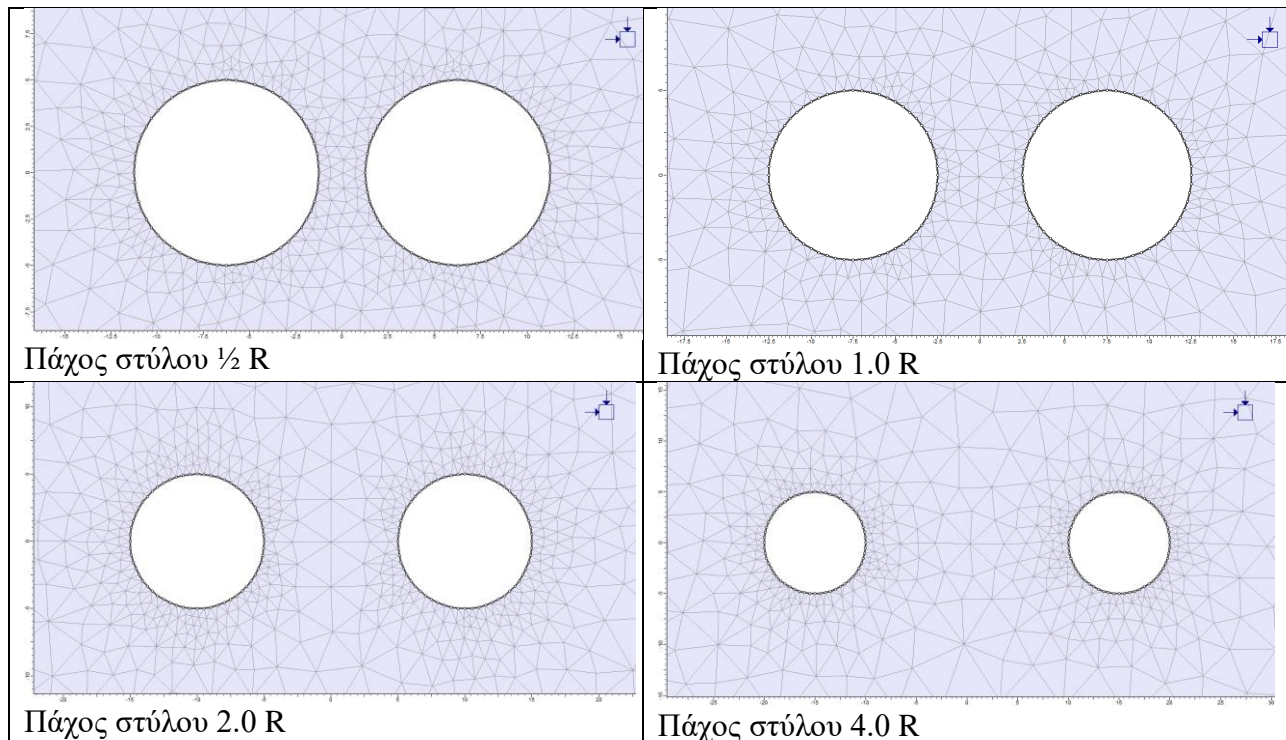
Η μελέτη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας έγινε κατά μήκος της δεξιάς παρειάς της αριστερής σήραγγας και της στέψης της για τις περιπτώσεις της ταυτόχρονης διάνοιξης των σηράγγων αλλά και της μία προς μία διάνοιξής τους .

Τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση κυκλικού αλλά και πεταλοειδούς ανοίγματος είναι τα εξής :

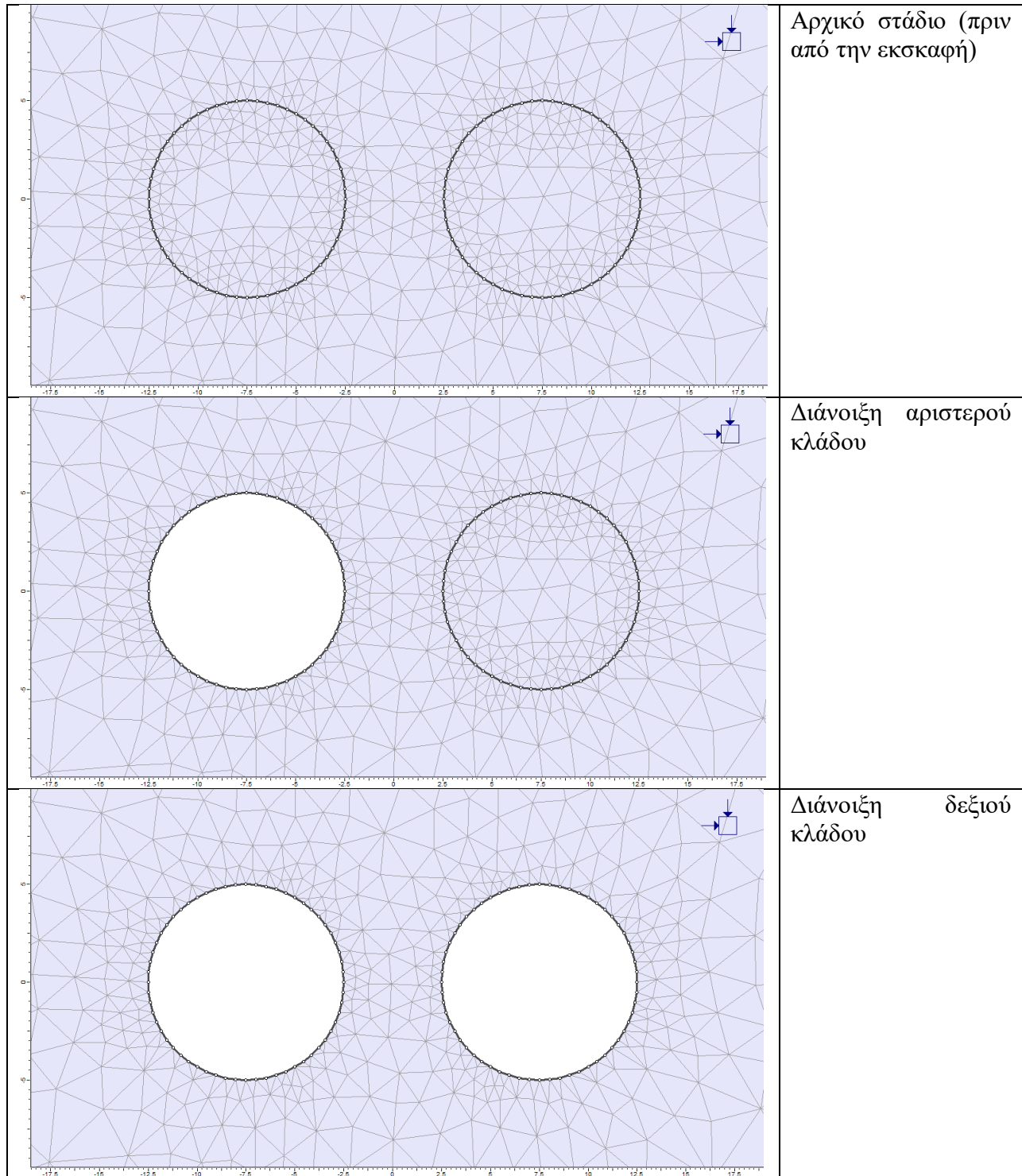
Κριτήρια Αστοχίας	Mohr-Coulomb	
Μέτρο Παραμορφωσιμότητας	7.5	GPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0.3	
Ειδικό βάρος ( $\gamma$ )	0,0027	MN/m <sup>3</sup>
Εφελκυστική Αντοχή ( $\sigma_t$ )	0	MPa
Γωνία τριβής ( $\phi$ )	35	Deg
Συνοχή (c)	10,5	MPa

Γεωμετρία αριθμητικών μοντέλων

Εξετάσθηκαν τέσσερις αποστάσεις μεταξύ των σηράγγων, για πάχη στύλων που κυμαίνονται μεταξύ  $\frac{1}{2}R$  και  $4R$ :

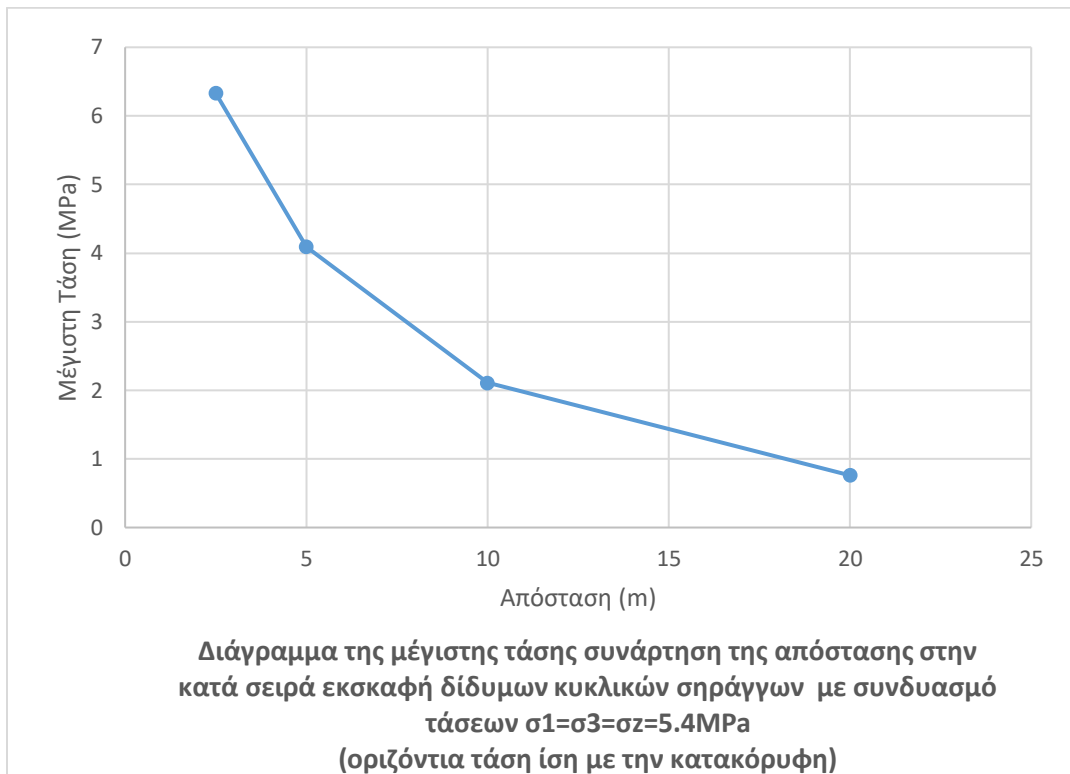


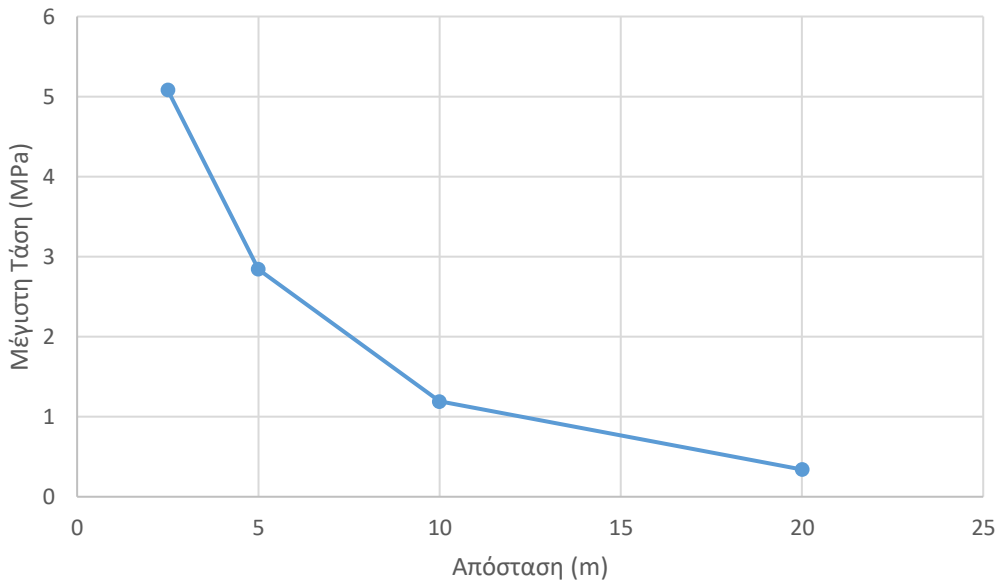
Τα στάδια προσομοίωσης είναι:



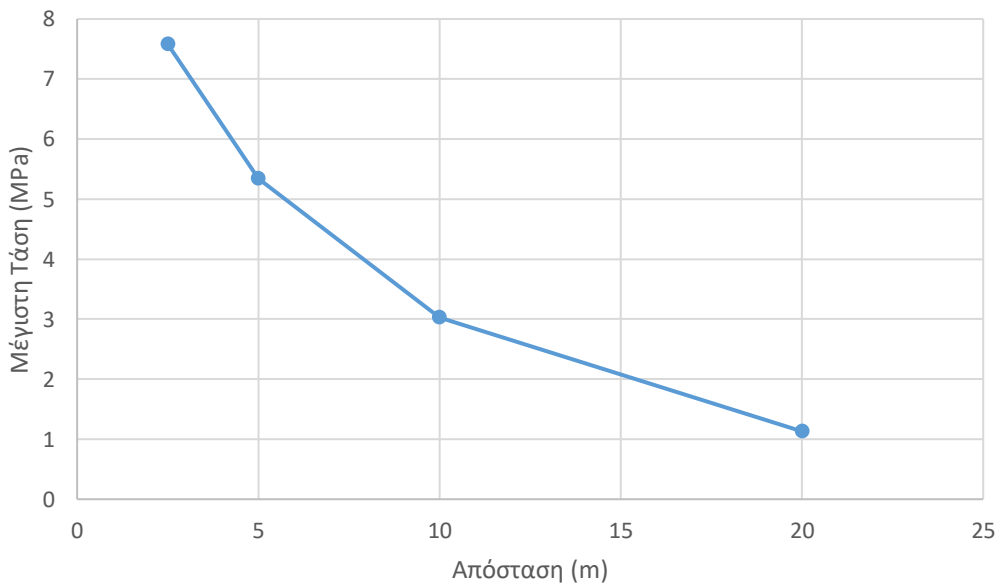
## Αριθμητικά αποτελέσματα

Μέσω των υπολογισμών του προγράμματος RS2 2019 προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την μέγιστη τάση στην παρειά του αριστερού κλάδου, μετά από τη διάνοιξη του δεξιού.

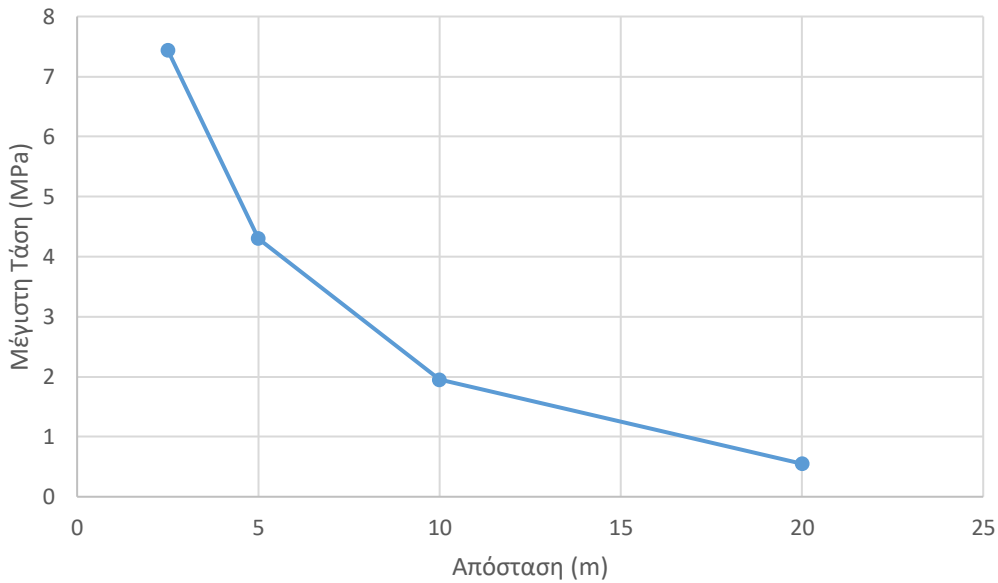




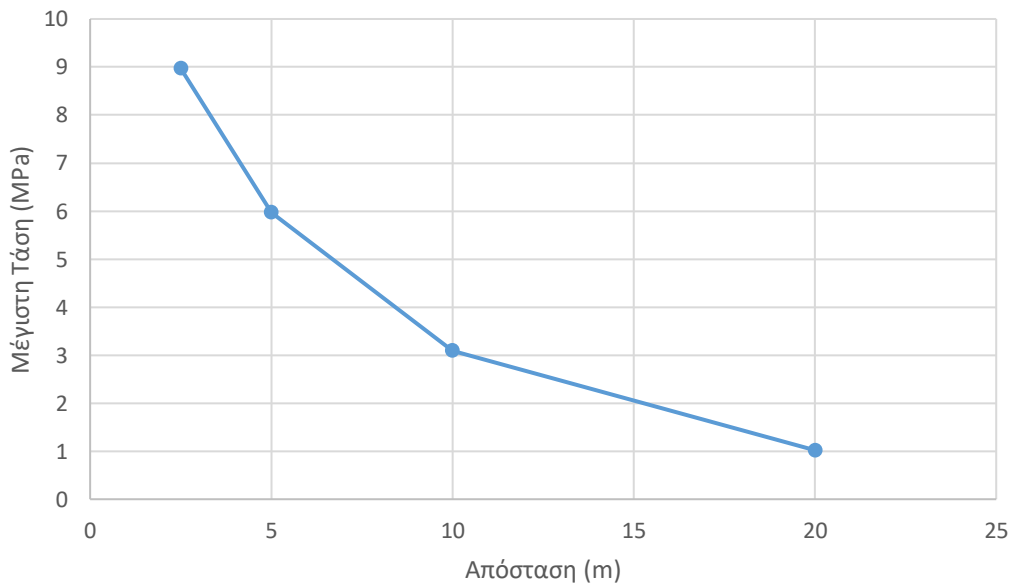
**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων κυκλικών σηράγγων με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=2,7\text{MPa}$   $\sigma_z=2,7\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)**



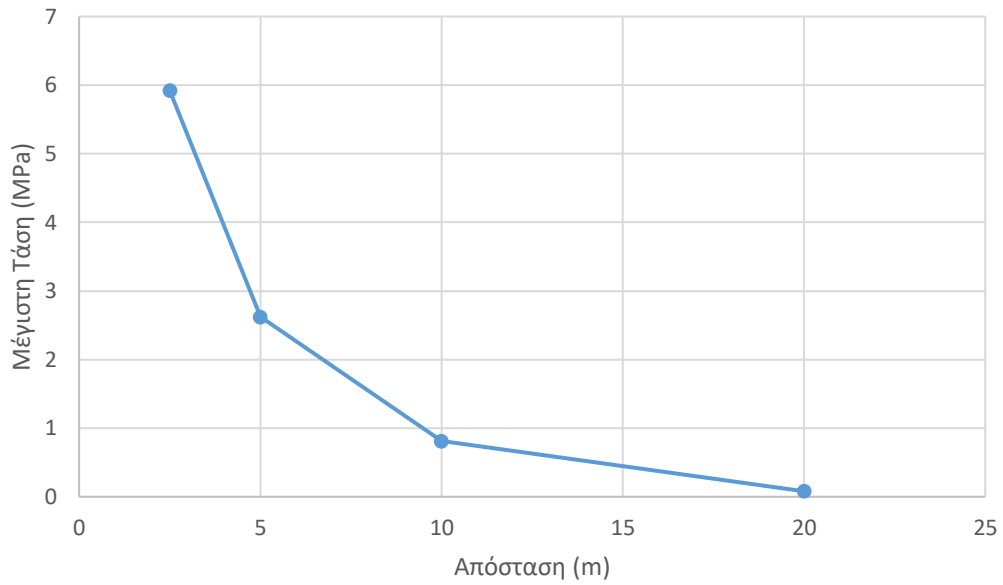
**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων κυκλικών σηράγγων με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=8,1\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$   $\sigma_z=8,1\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)**



**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$   $\sigma_z=5,4\text{MPa}$  (οριζόντια τάση ίση με την κατακόρυφη)**



**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=8,1\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$   $\sigma_z=8,1\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)**



**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=2,7\text{MPa}$   $\sigma_z=2,7\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προσομοίωση δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε ελαστοπλαστική βραχομάζα.

### Παραδοχές της προσομοίωσης

Η βραχώμαζα με την εφαρμογή δυνάμεων κατά την πλαστική συμπεριφορά μπορεί να υπερβεί το όριο διαρροής της και να διαρρεύσει χωρίς την εφαρμογή επιπλέον δυνάμεων και τελικώς να αστοχήσει.

Υπάρχουν δύο είδη πλαστικής συμπεριφοράς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται μόνο η ελαστοπλαστική περίπτωση για σήραγγες πεταλοειδούς διατομής σε τέσσερις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας.

Οι σήραγγες που θα εξεταστούν έχουν ακτίνα 5 μέτρων και η απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων κυμαίνεται μεταξύ 2.5m και 20m .

Εξετάζονται τρεις (3) περιπτώσεις για τις τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου, με συντελεστή πλευρικών τάσεων  $K=0.5, 1.0, 1.50$ . Οι συνδυασμοί τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου για κάθε περίπτωση είναι οι εξής :

- Για  $K=1.0$

$\sigma_1=\sigma_3=\sigma_z= 5,4\text{MPa}$  (οριζόντια τάση ίση με την κατακόρυφη)

- Για  $K=1.5$

$\sigma_1= 8,1 \text{ Mpa}$  ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_z= 8,1 \text{ Mpa}$  (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια )

- Για  $K=0.5$

$\sigma_1=5,4\text{MPa}$  ,  $\sigma_3=\sigma_z=2,7\text{MPa}$  ( μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)

Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος και τον συνοριακών συνθηκών είναι τα παρακάτω :

Τύπος : Διαβαθμισμένος

- Είδος διαμέρισης : 6-κομβά τρίγωνα
- Συντελεστής διαβάθμισης : 0,1
- Αριθμός κόμβων στην εκσκαφή : 80

Οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) θα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είδος Ορίου : Ορθογώνιο ( διαστάσεων 90 x60 μέτρων )

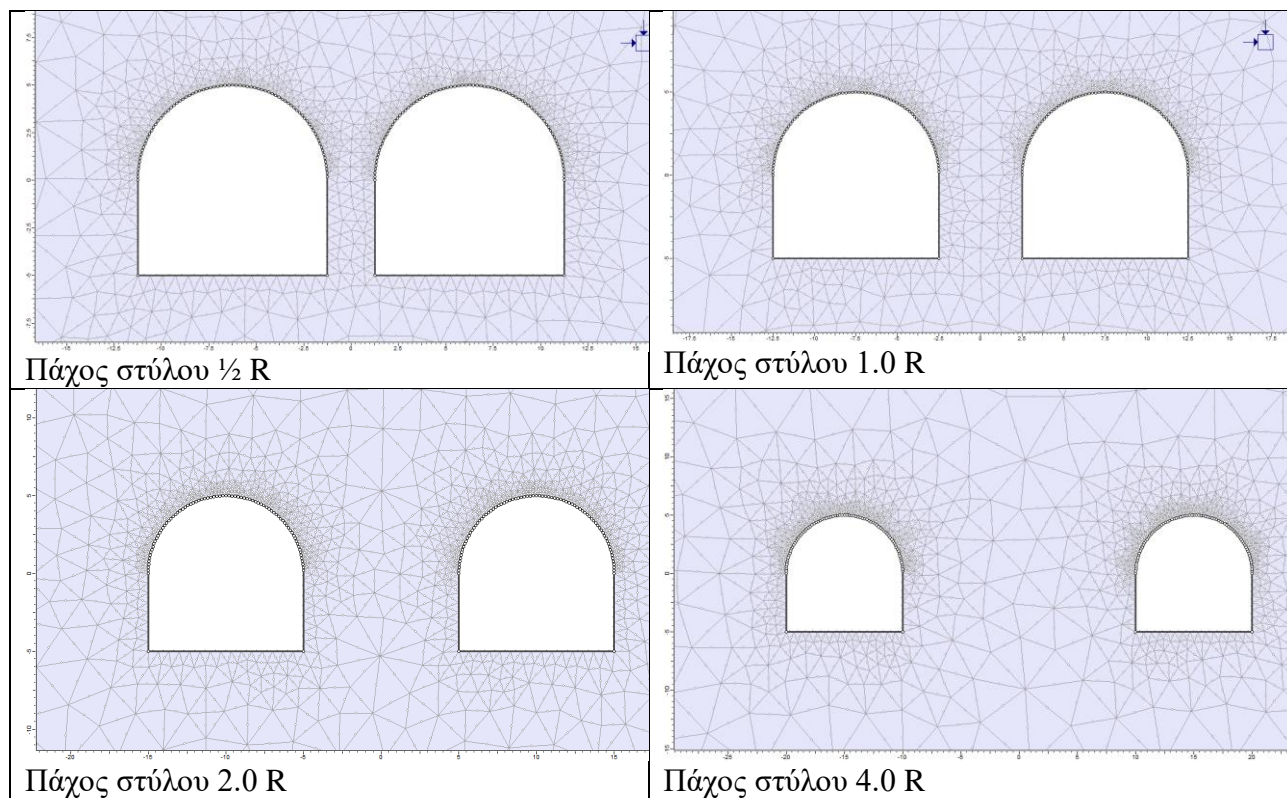
Η μελέτη της συμπεριφοράς της βραχώμαζας έγινε κατά μήκος της δεξιάς παρειάς της αριστερής σήραγγας και της στέψης της για τις περιπτώσεις της ταυτόχρονης διάνοιξης των σηράγγων αλλά και της μία προς μία διάνοιξής τους .

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν οι περιπτώσεις τεσσάρων διαφορετικών βραχομαζών με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

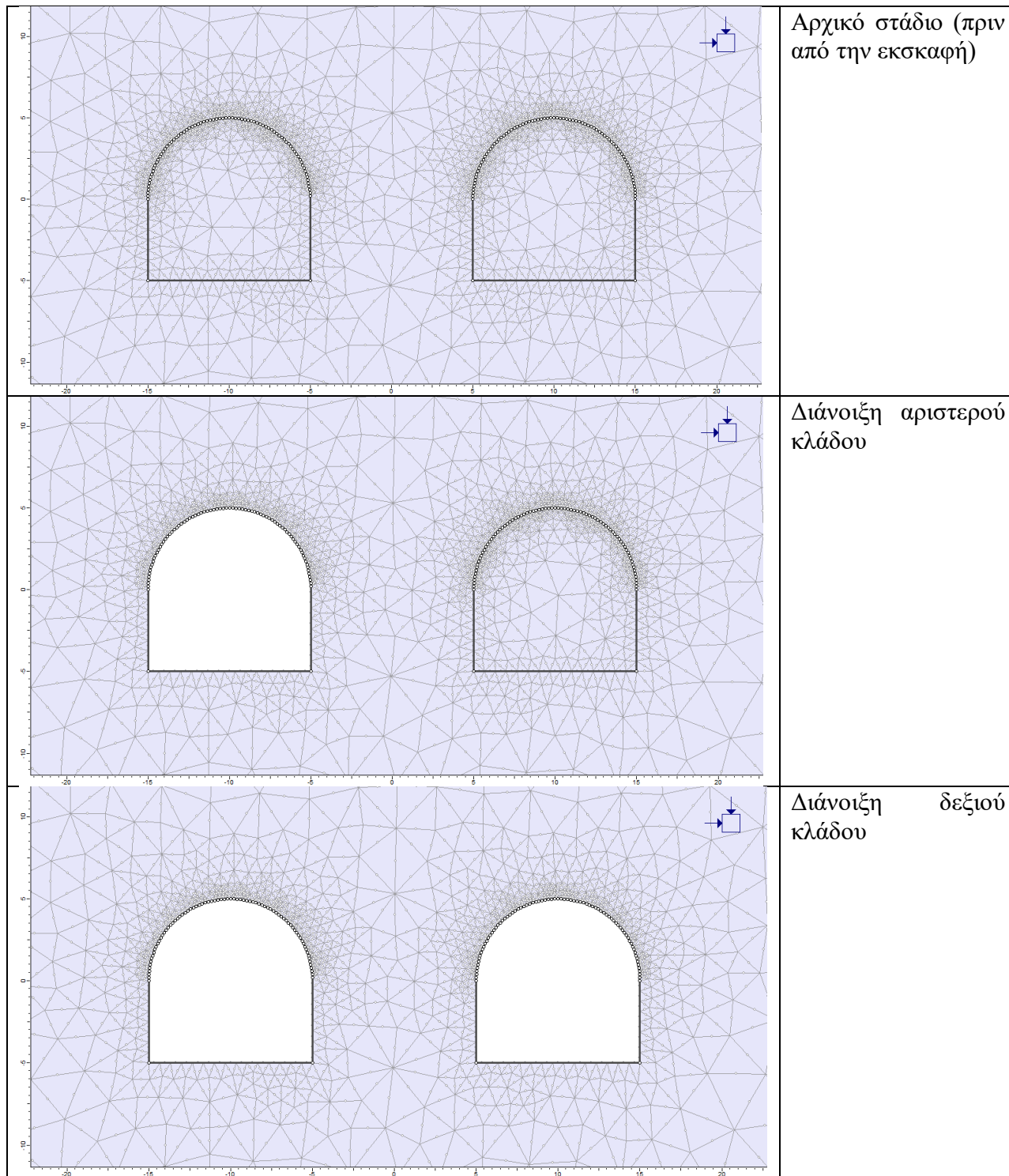
RMR	RMR μέσο	Sm	Φm(μοίρες)	E(Gpa)	ν	δ(μοίρες)
I 80-100	90	500	47	100	0,2	φ/2
60-80	70	350	40	31.62	0,25	φ/4
40-60	50	250	30	10	0,30	φ/8
20-40	30	150	20	3.16	0,35	0

### Γεωμετρία αριθμητικών μοντέλων

Εξετάστηκαν τέσσερις αποστάσεις μεταξύ των σηράγγων, για πάχη στύλων που κυμαίνονται μεταξύ  $\frac{1}{2}R$  και  $4R$ :



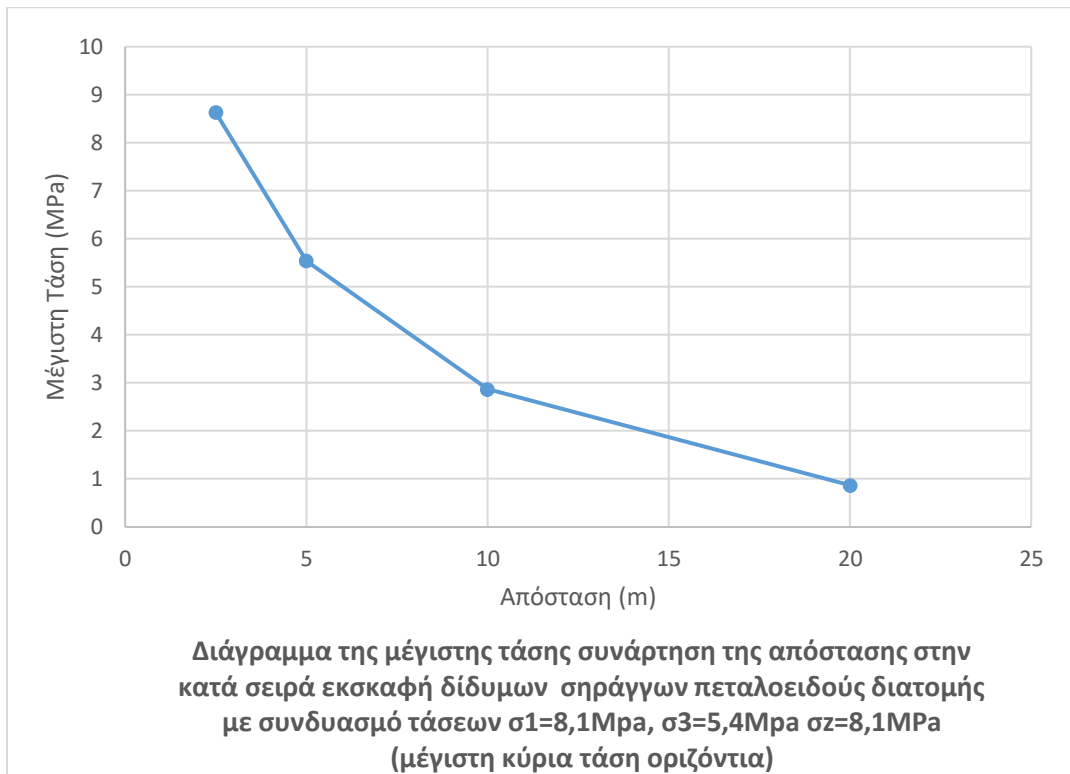
Τα στάδια προσομοίωσης είναι:

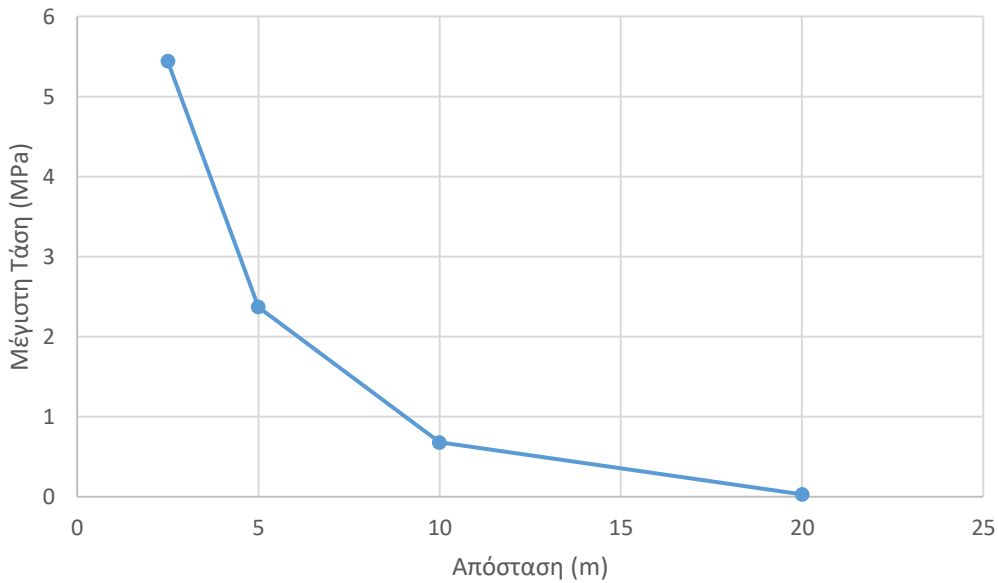


## Αριθμητικά αποτελέσματα

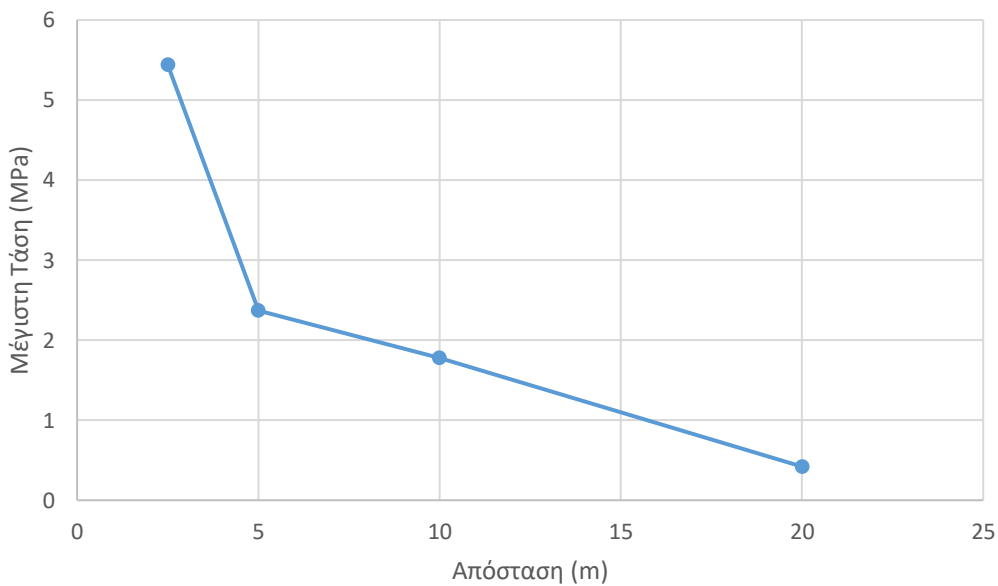
Μέσω των υπολογισμών του προγράμματος RS2 2019 προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα

Για RMR 20-40

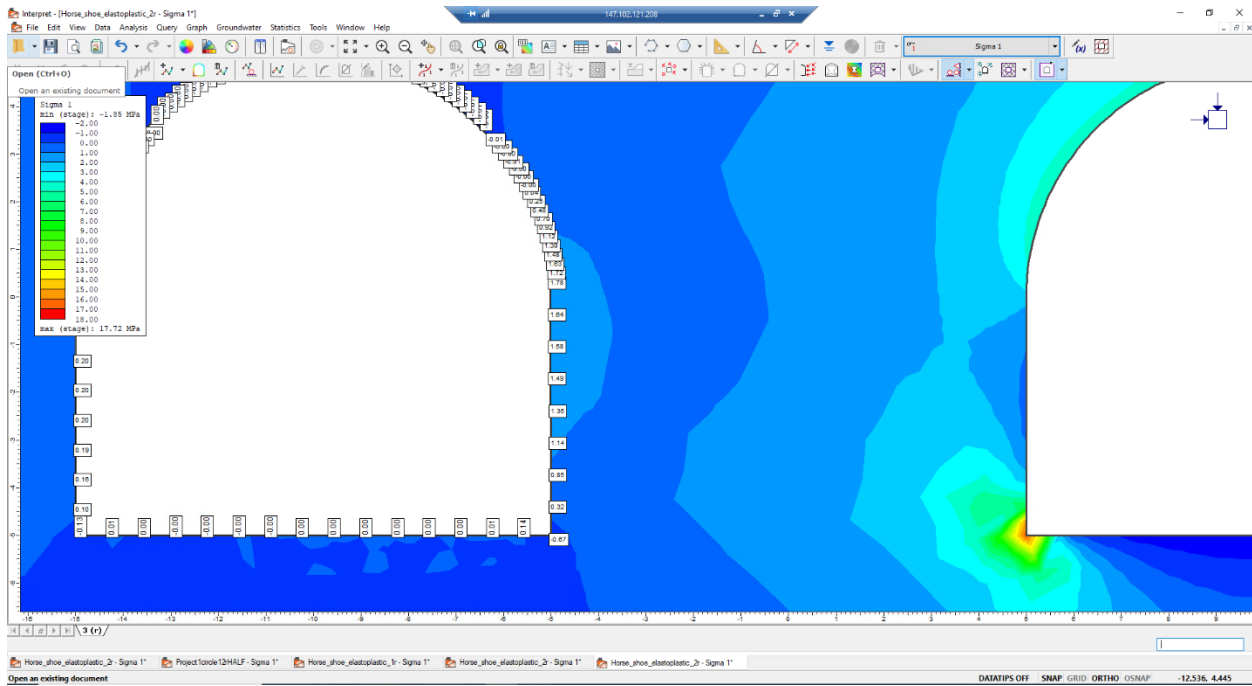
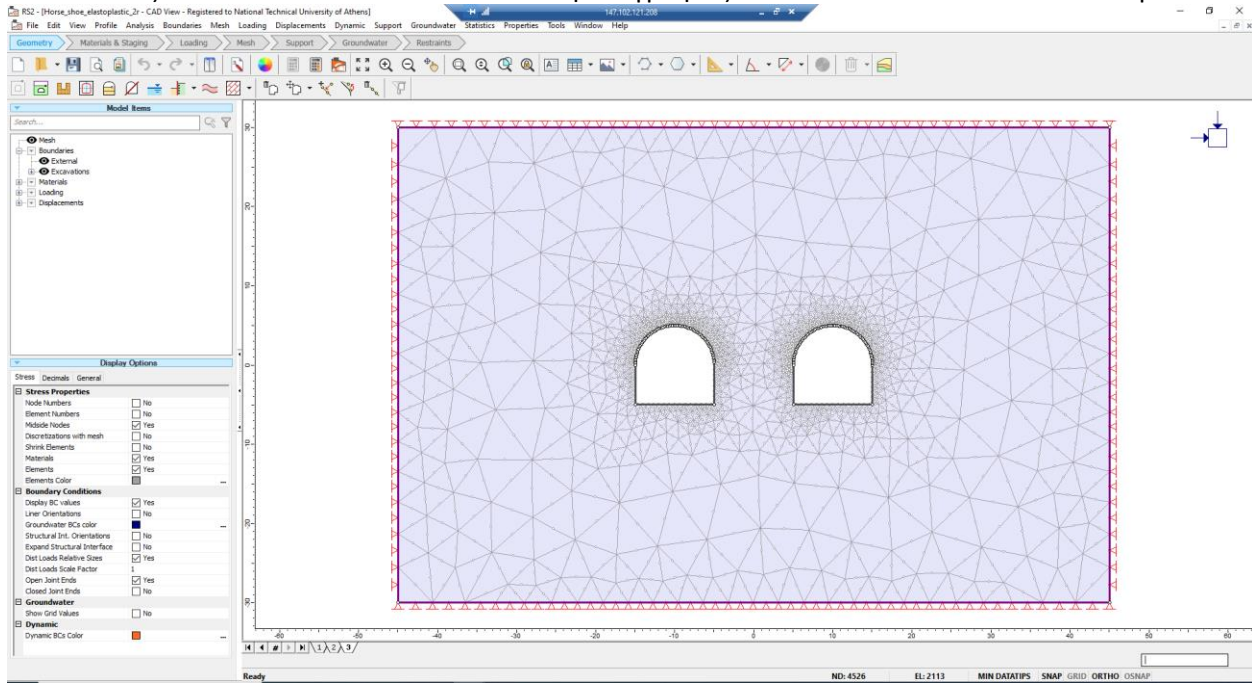




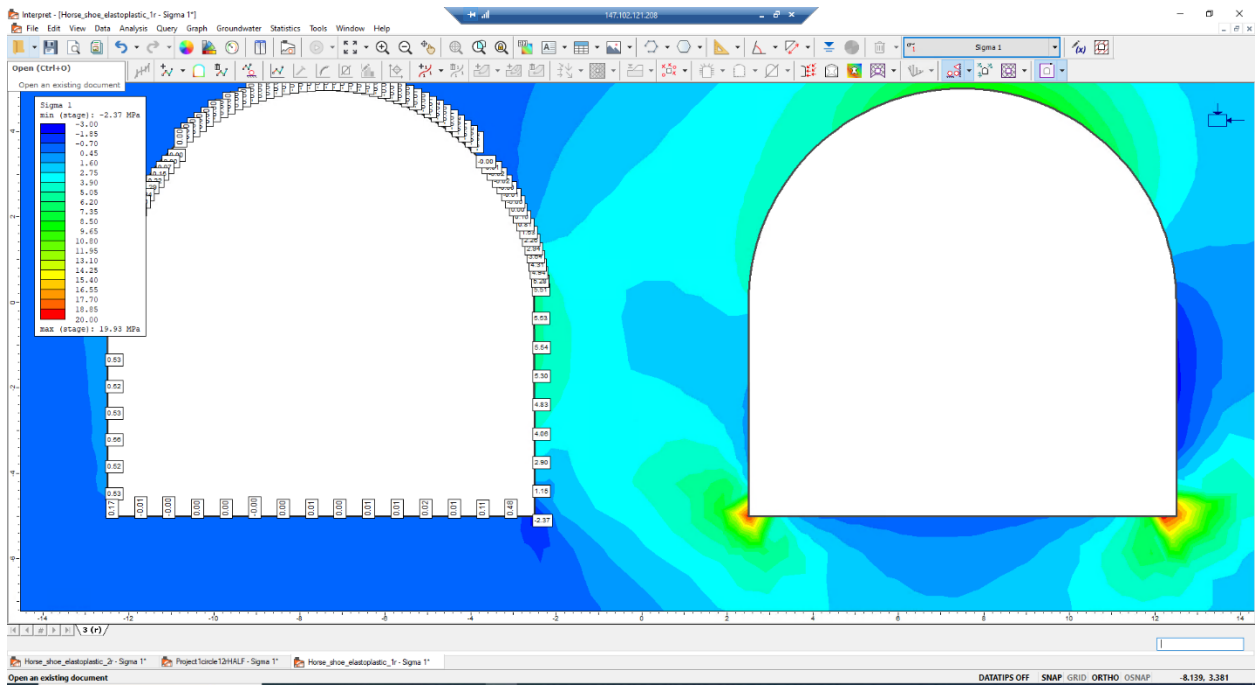
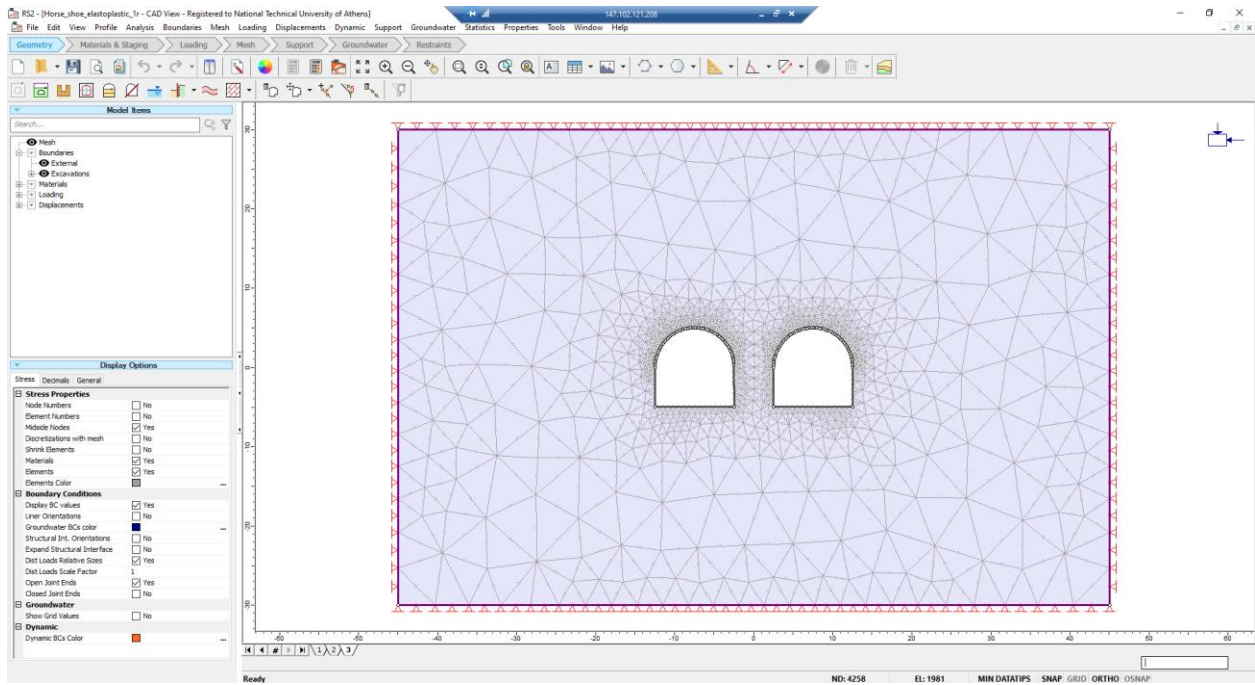
**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=2,7\text{MPa}$   $\sigma_z=2,7\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)**



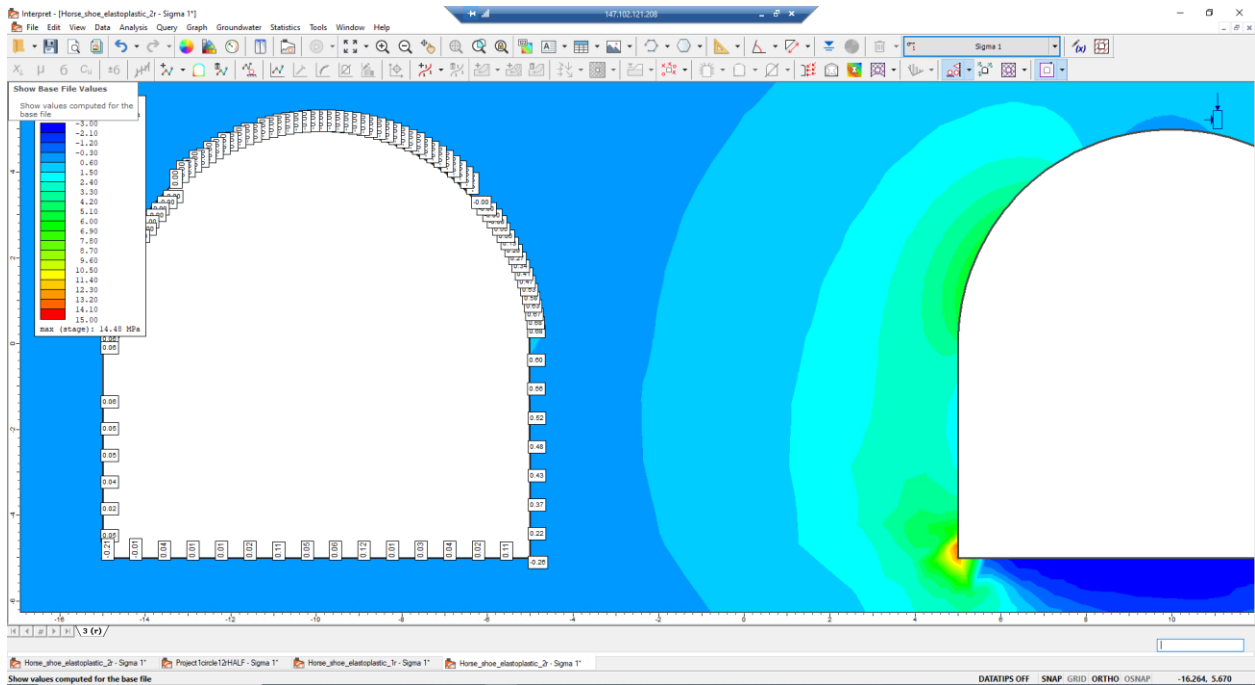
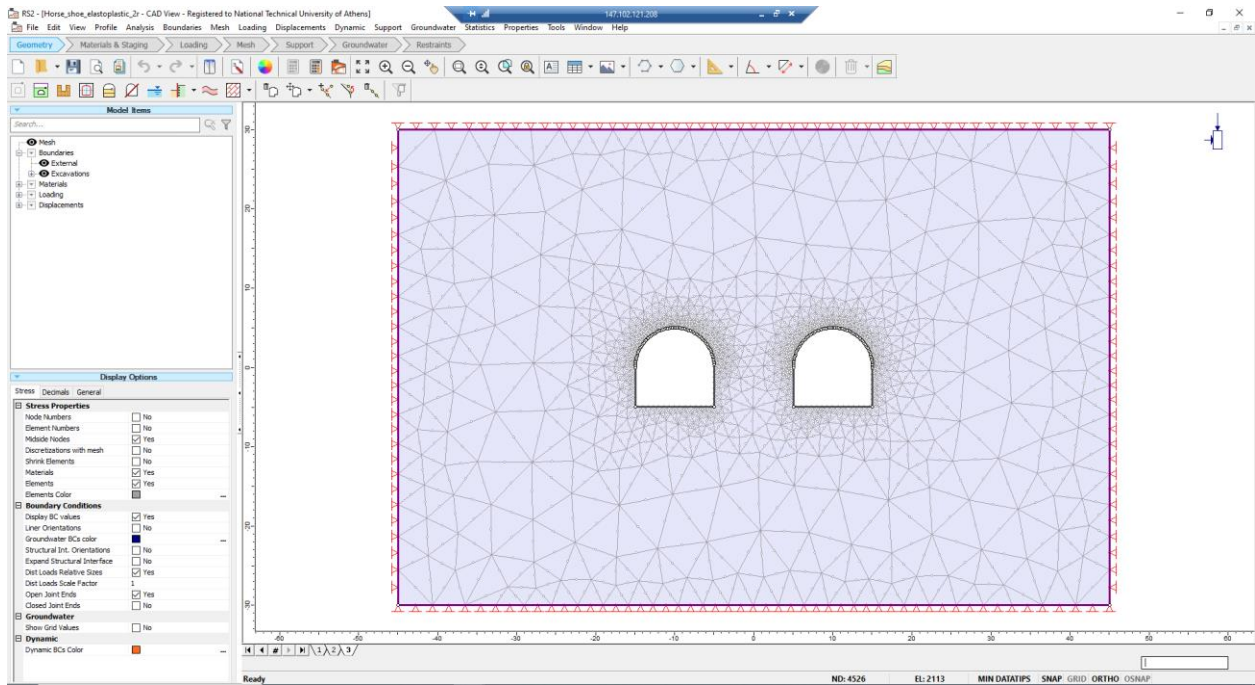
**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$   $\sigma_z=5,4\text{MPa}$  (οριζόντια τάση ίση με την κατακόρυφη)**



Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10 μέτρων για  $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_z = 5,4 \text{ MPa}$  (οριζόντια τάση ίση με την κατακόρυφη)



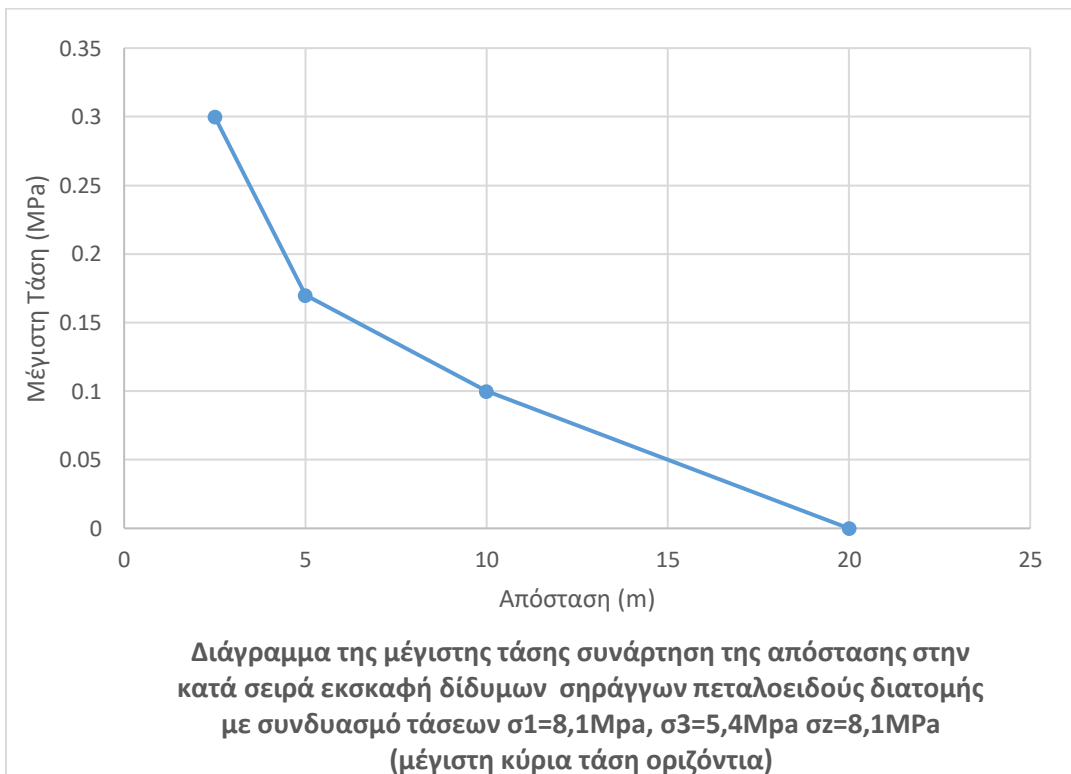
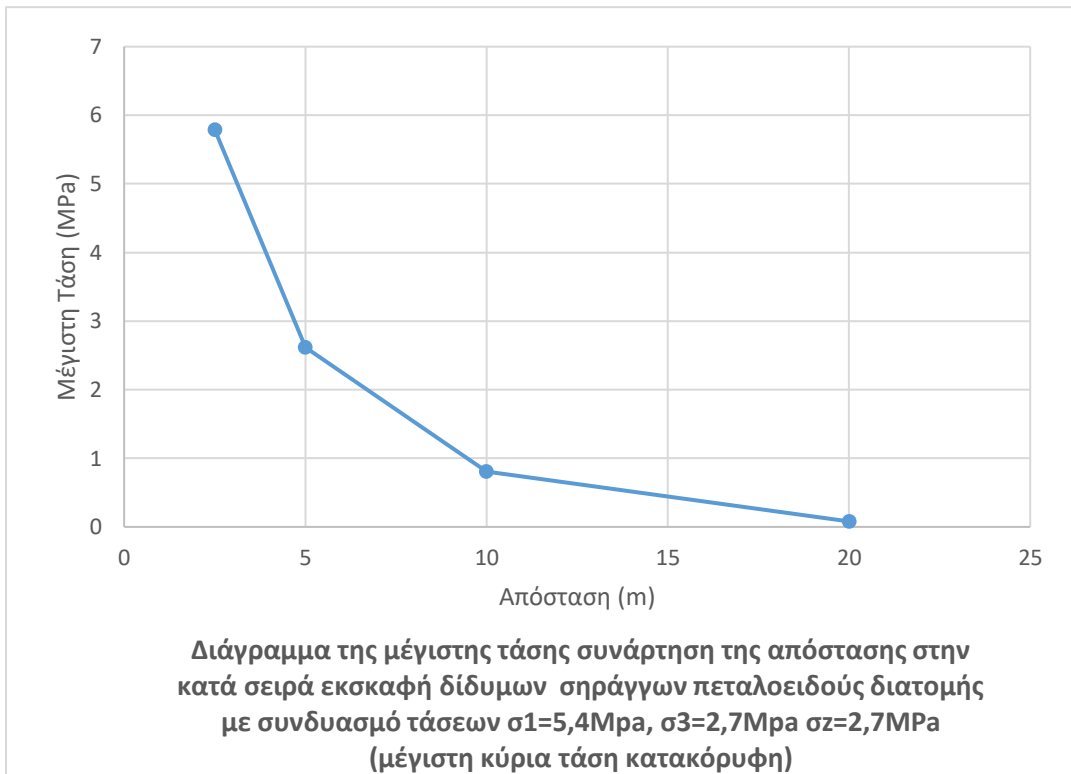
Μοντέλο διδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10 μέτρων για  $\sigma_1=8,1$  MPa  $\sigma_3=5,4$ MPa  $\sigma_z= 8,1$  MPa (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)

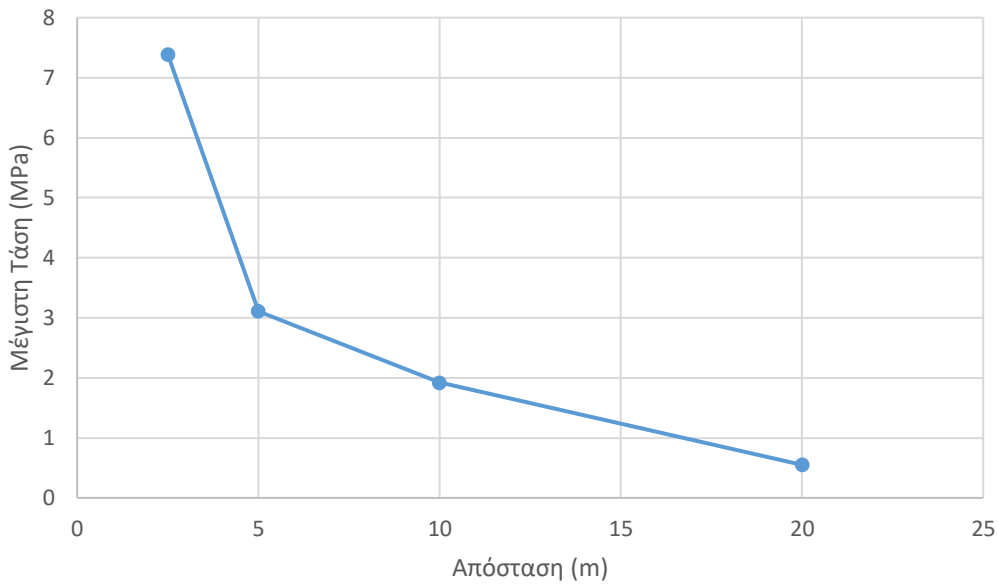


Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10μέτρων για  $\sigma_1=5,4$  MPa  $\sigma_3=2,7$ MPa  $\sigma_z= 2,7$  MPa (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)



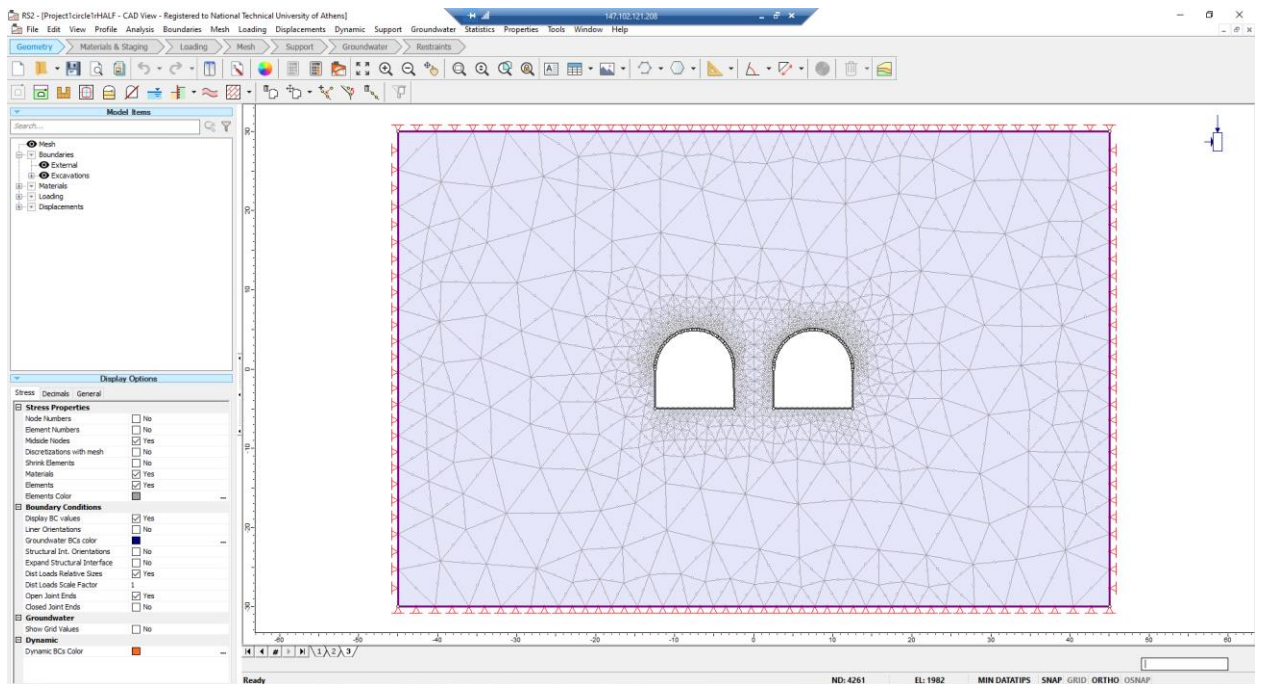
Για RMR 40-60

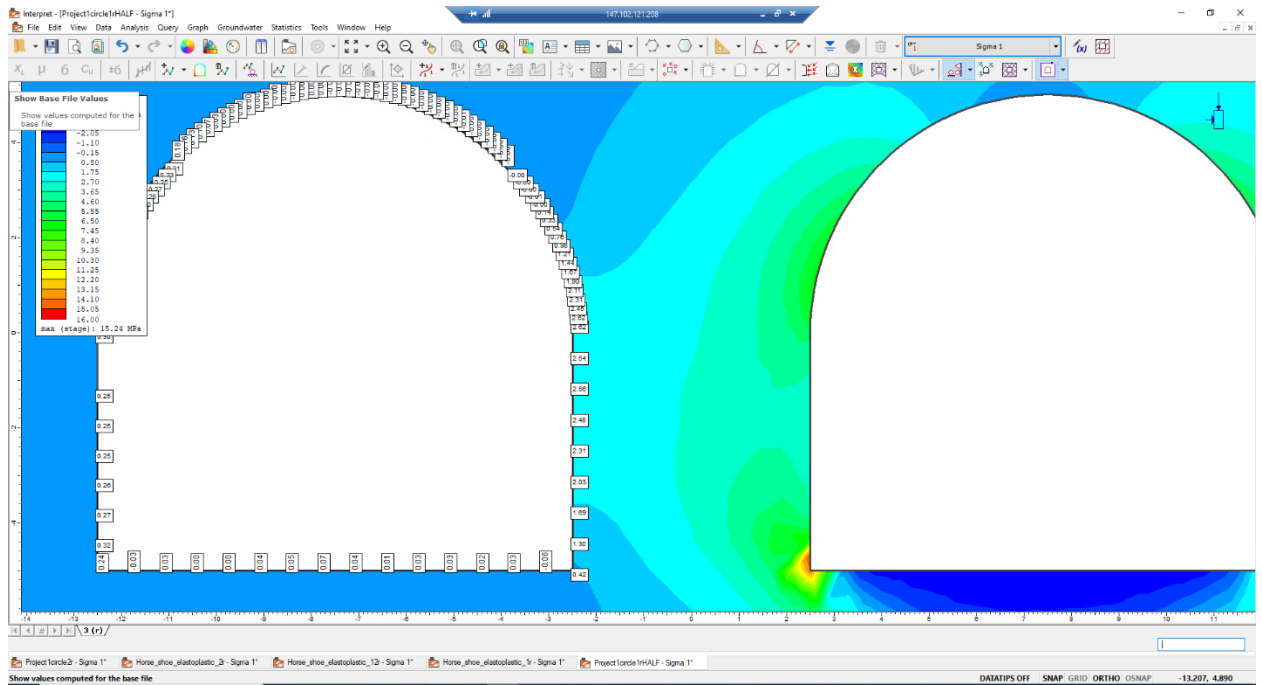




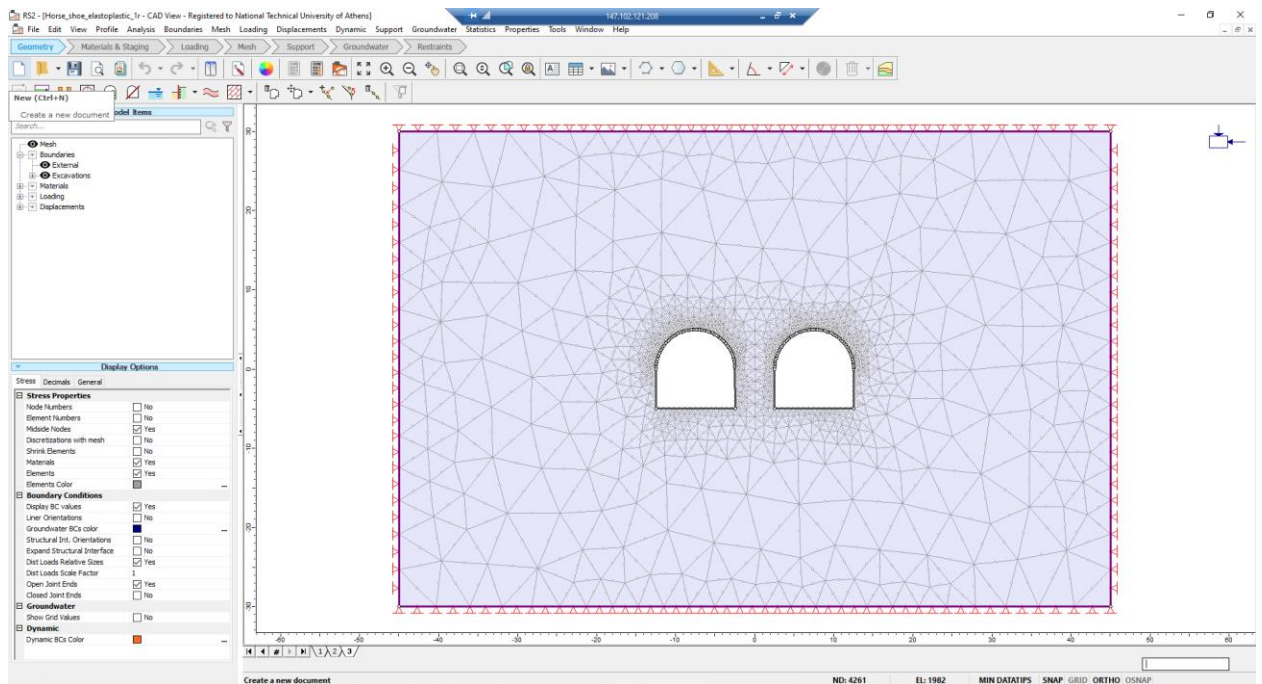
Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$   $\sigma_z=5,4\text{MPa}$  (οριζόντια τάση ίση με την κατακόρυφη)

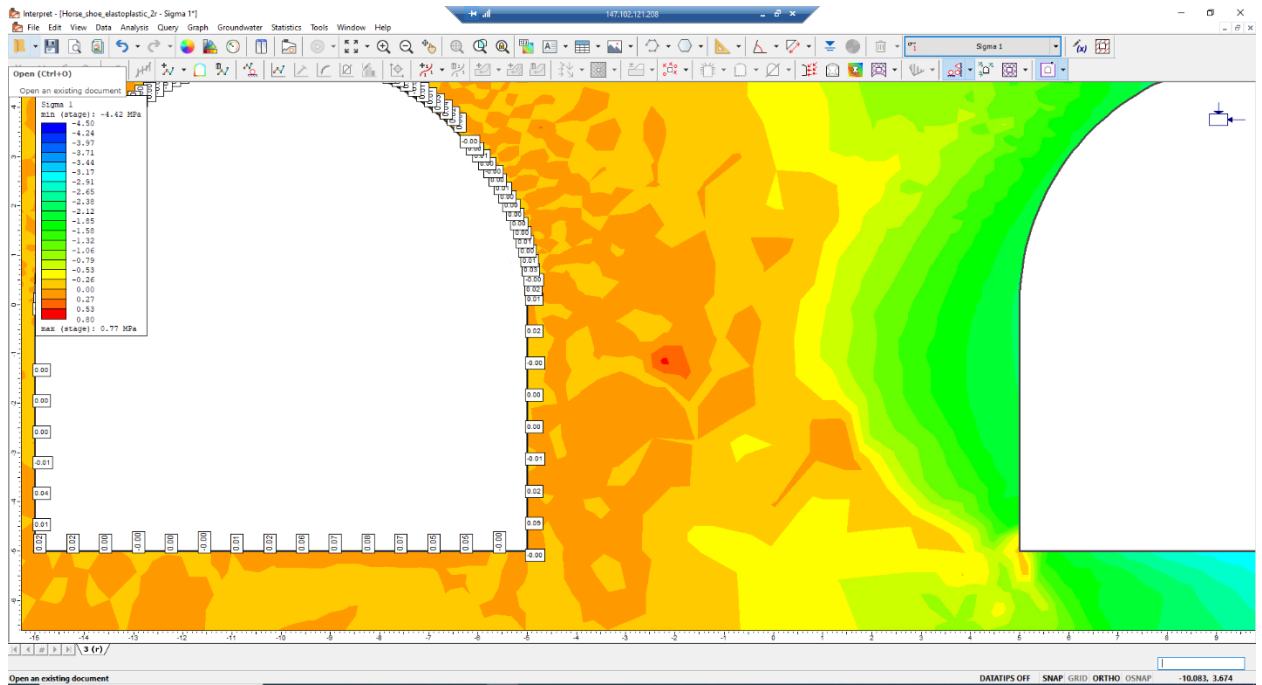
### Ενδεικτικές φωτογραφίες μοντέλων



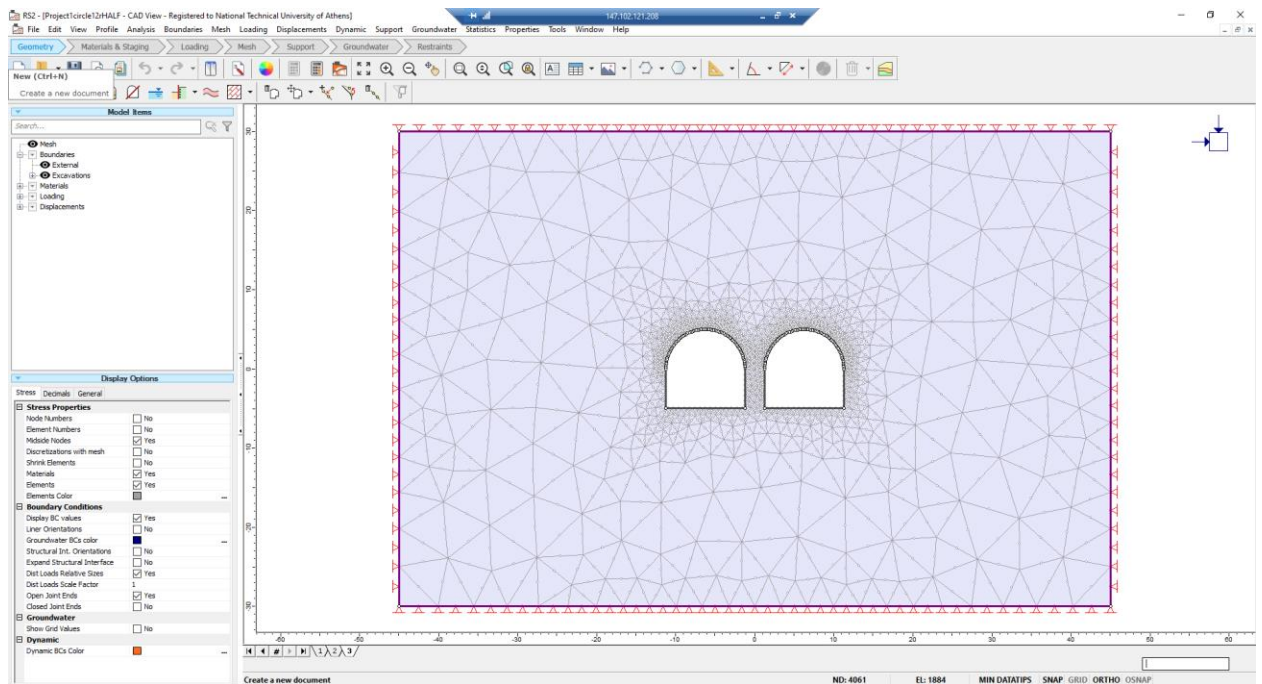


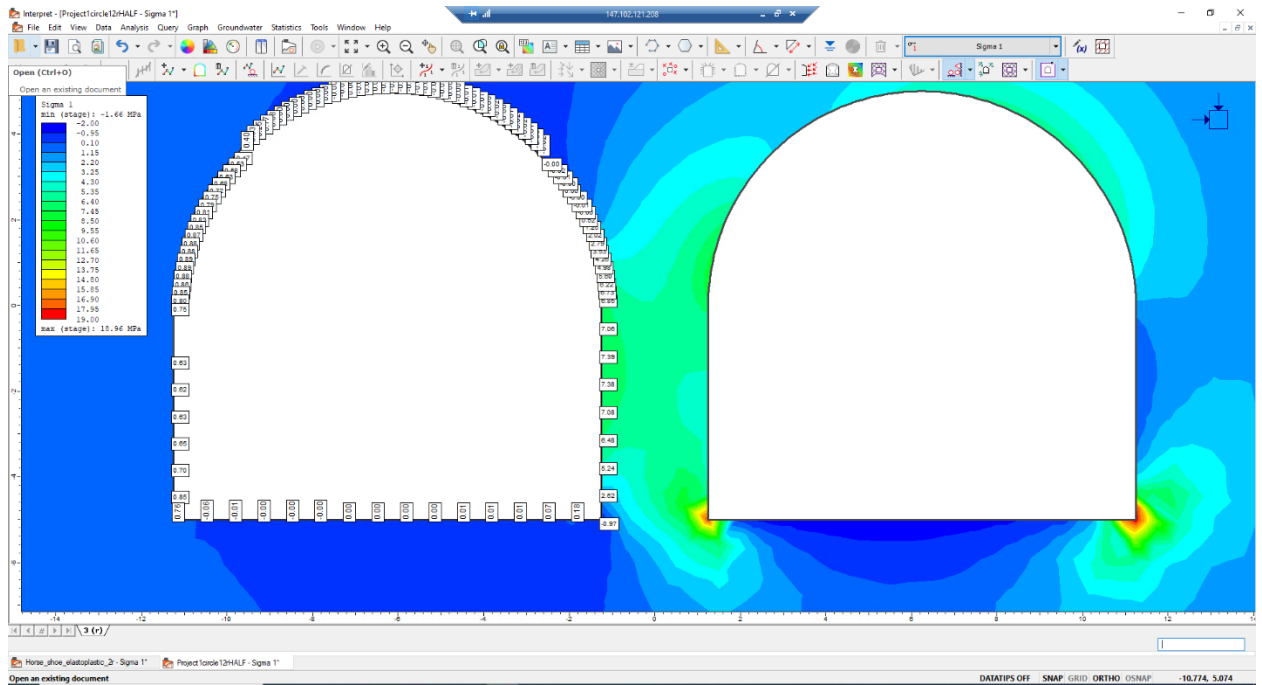
Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 5 μέτρων για  $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_z= 5,4 \text{ MPa}$  (οριζόντια τάση ίση με την κατακόρυφη)





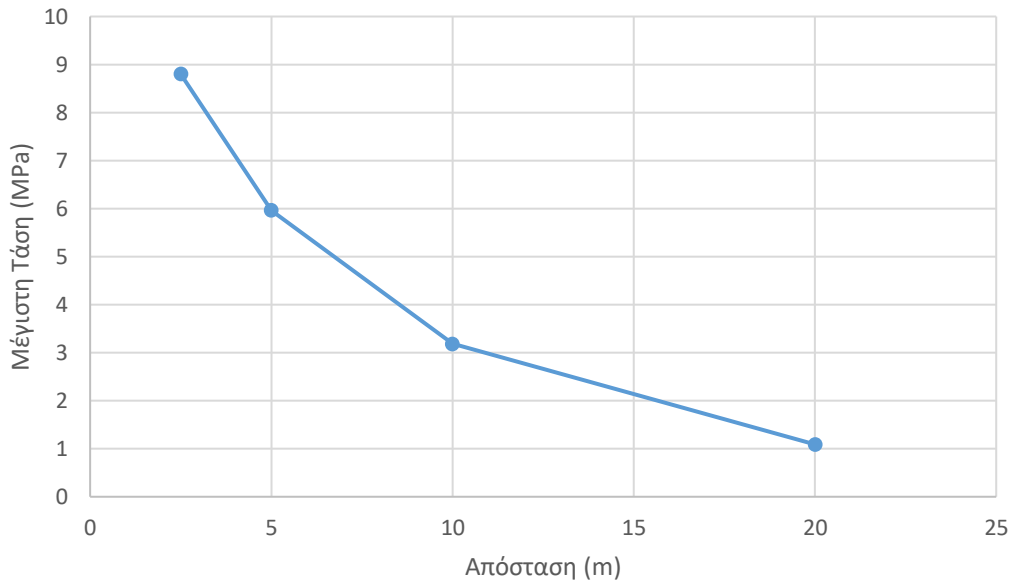
Μοντέλο διδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10 μέτρων για  $\sigma_1=8,1$  MPa  $\sigma_3=5,4$ MPa  $\sigma_z= 8,1$  MPa (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)



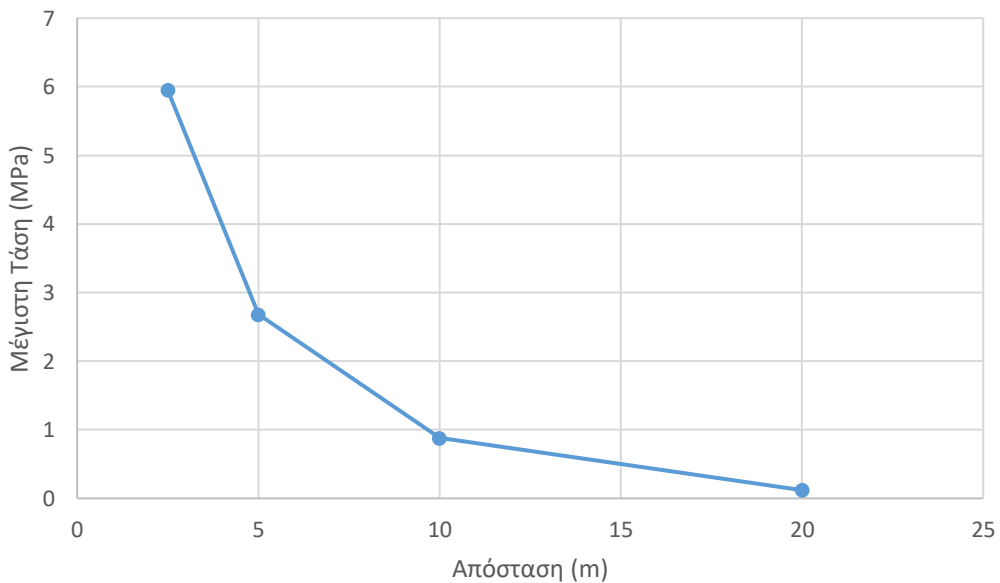


Μοντέλο διδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10 μέτρων για  $\sigma_1=5,4$  MPa  
 $\sigma_3=2,7$ MPa  $\sigma_z= 2,7$  MPa (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)

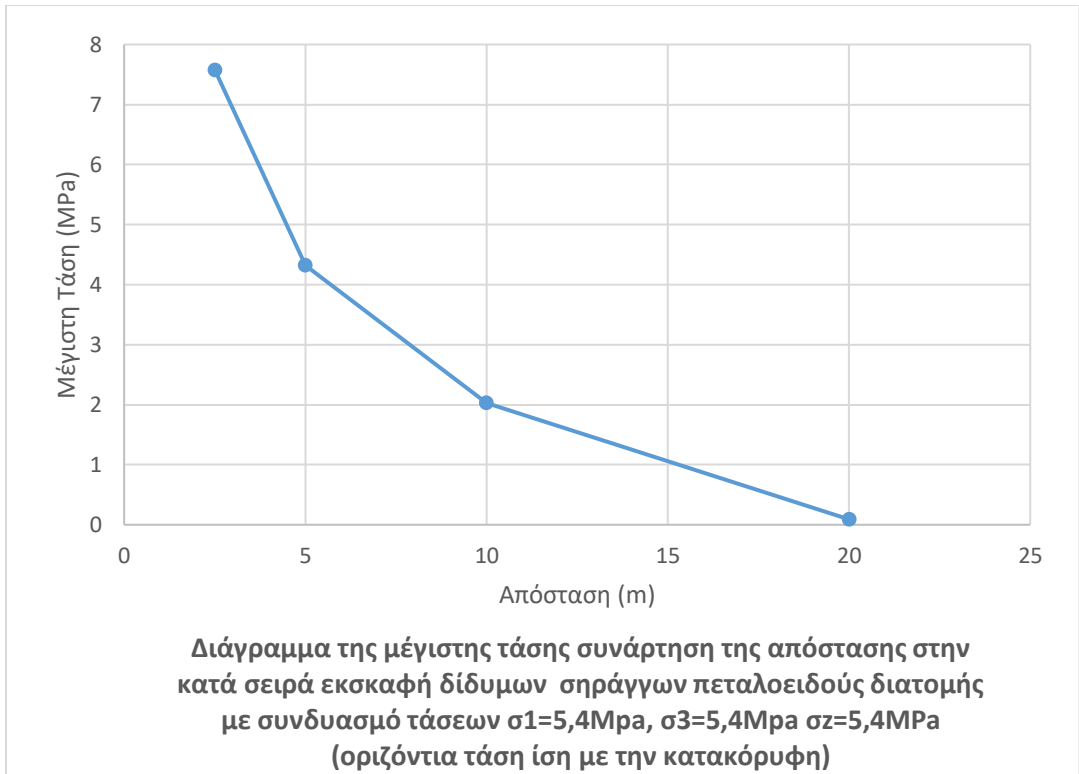
Για RMR 60-80



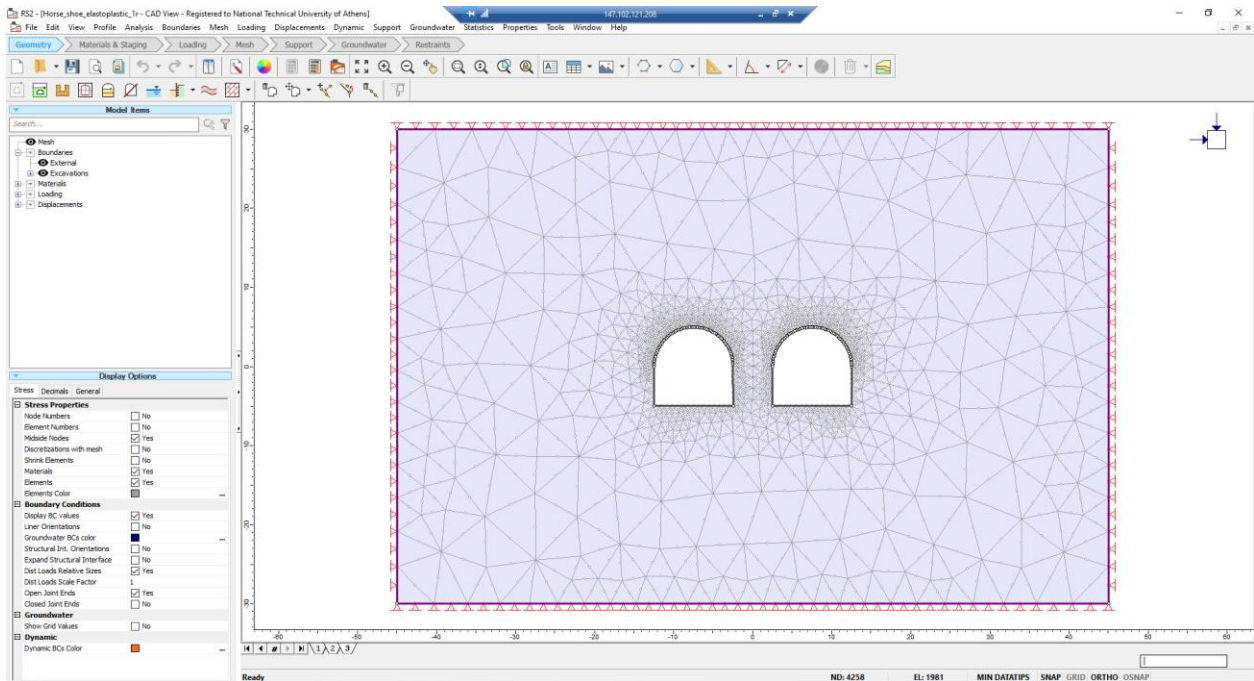
**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=8,1\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$   $\sigma_z=8,1\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)**

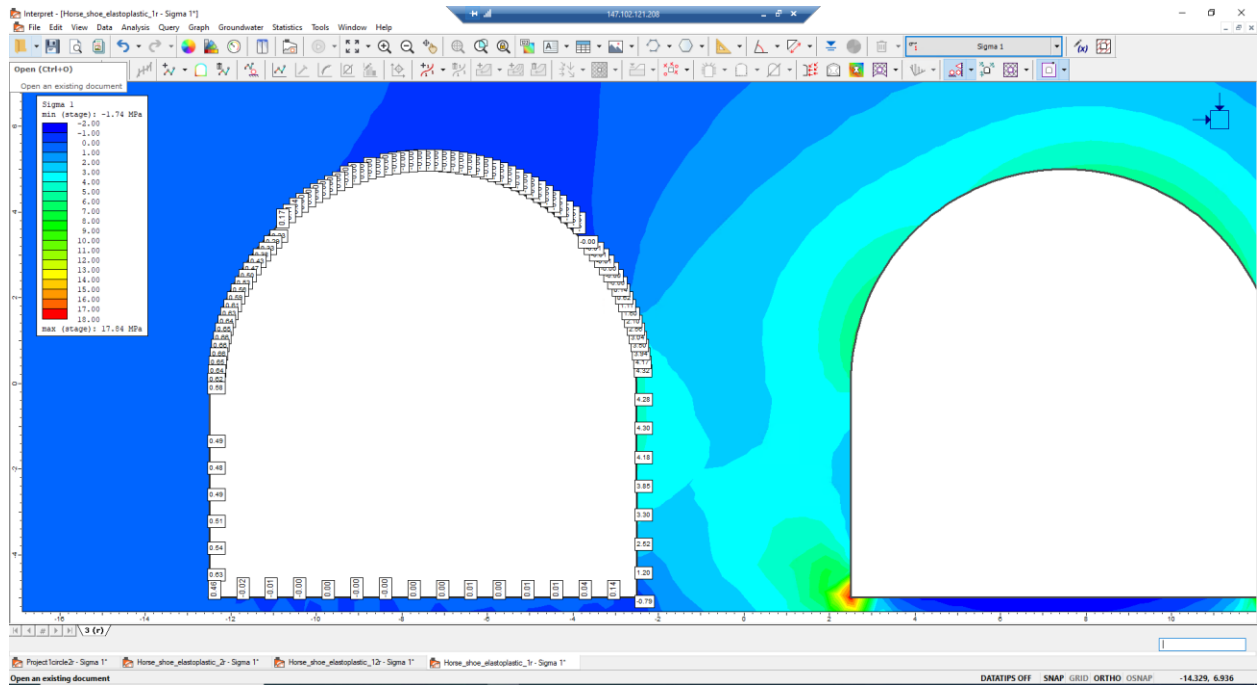


**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=2,7\text{MPa}$   $\sigma_z=2,7\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)**



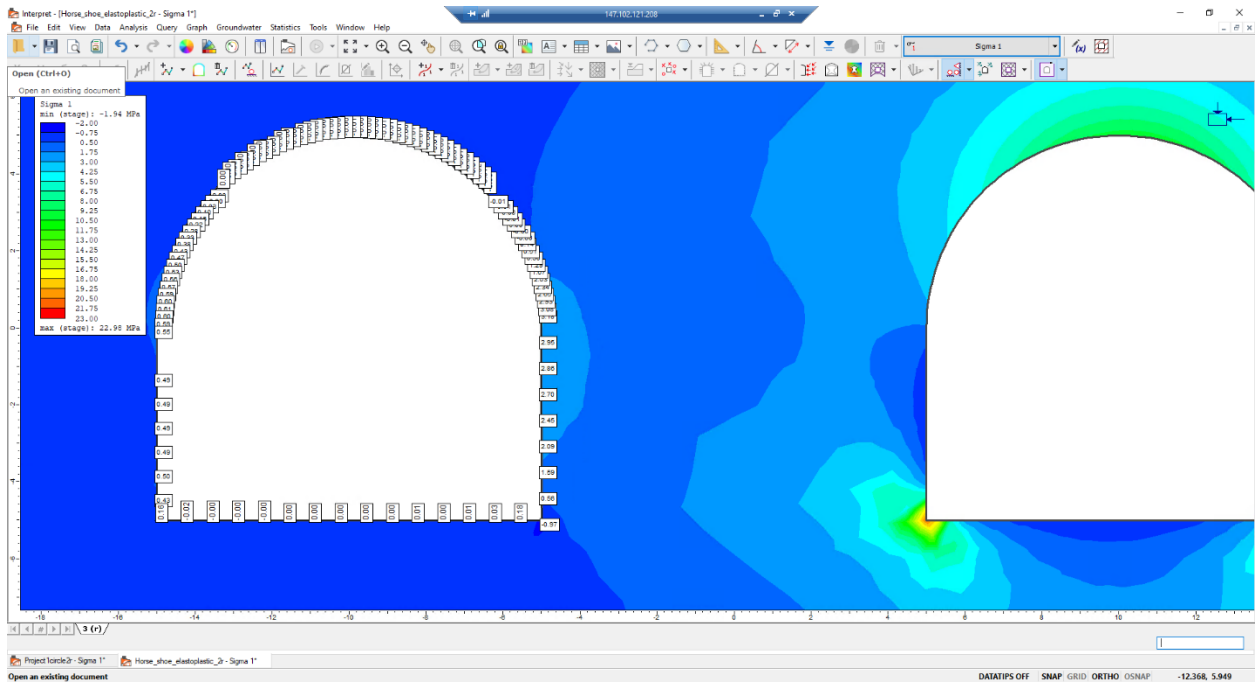
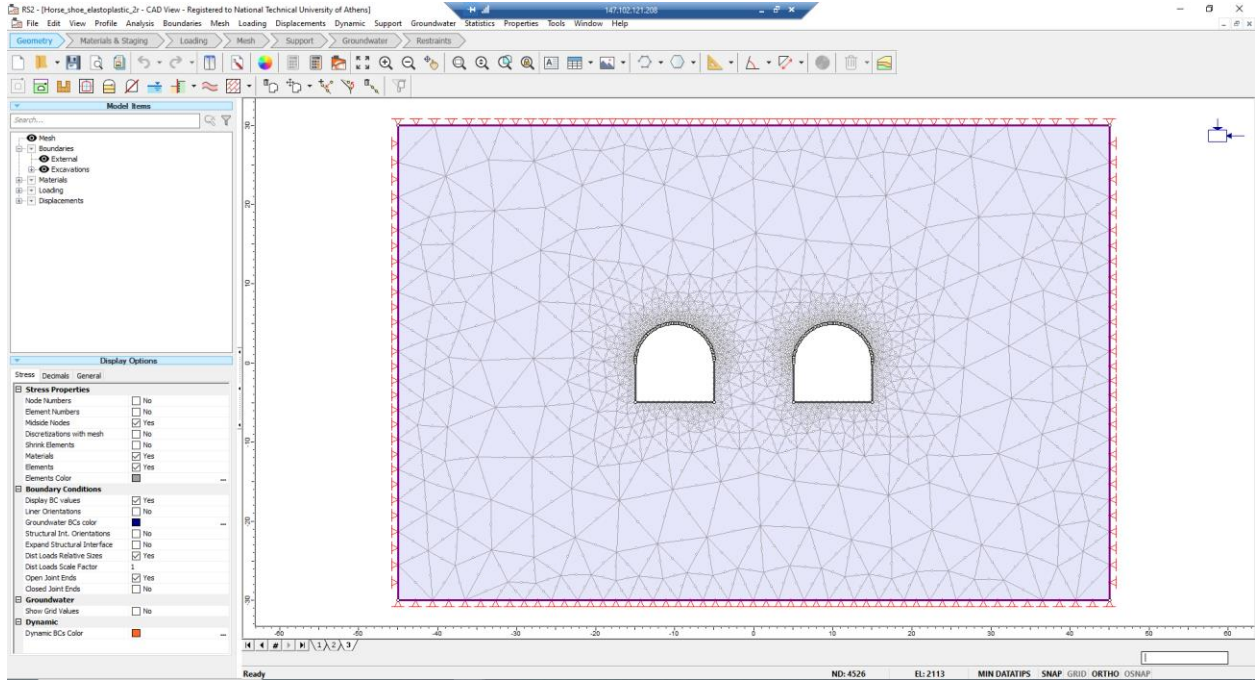
**\*Ενδεικτικές φωτογραφίες μοντέλων**



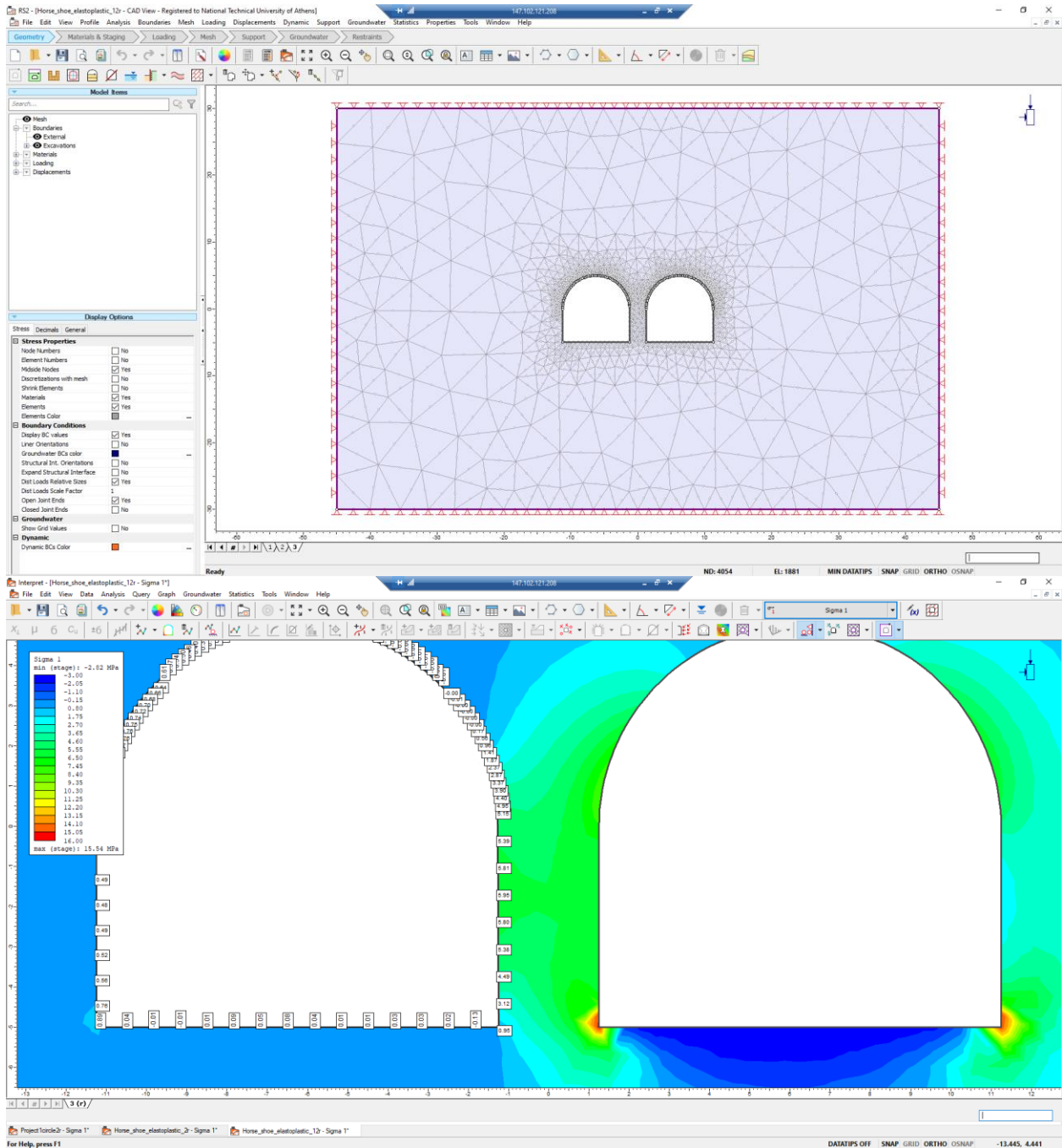


Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10μέτρων για  $\sigma_1=5,4$  MPa  $\sigma_3=2,7$ MPa  $\sigma_z= 2,7$  MPa (μέγιστη τάση κατακόρυφη)



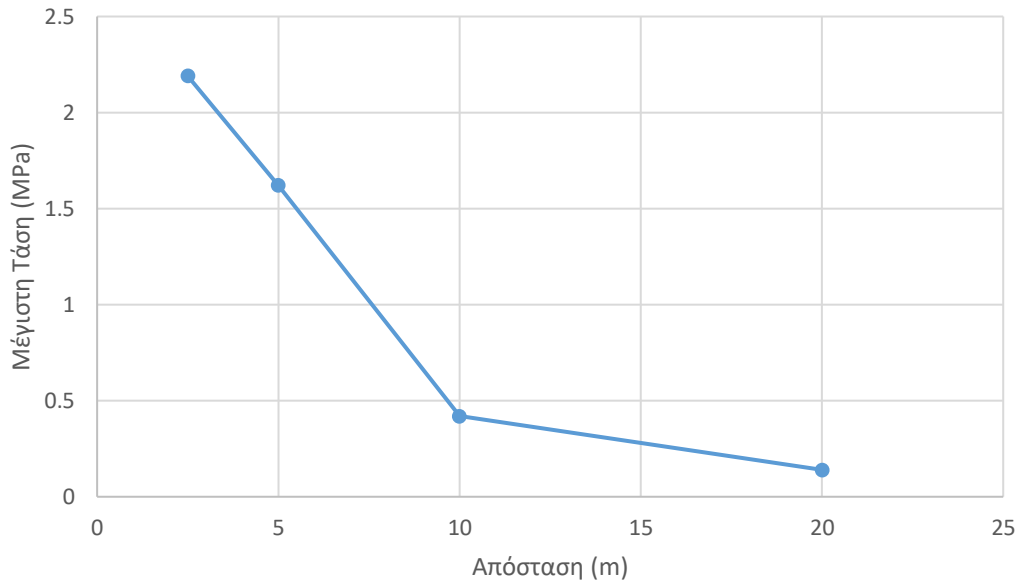


Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10 μέτρων για  $\sigma_1=8,1$  MPa  $\sigma_3=5,4$ MPa  $\sigma_z= 8,1$  MPa (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)

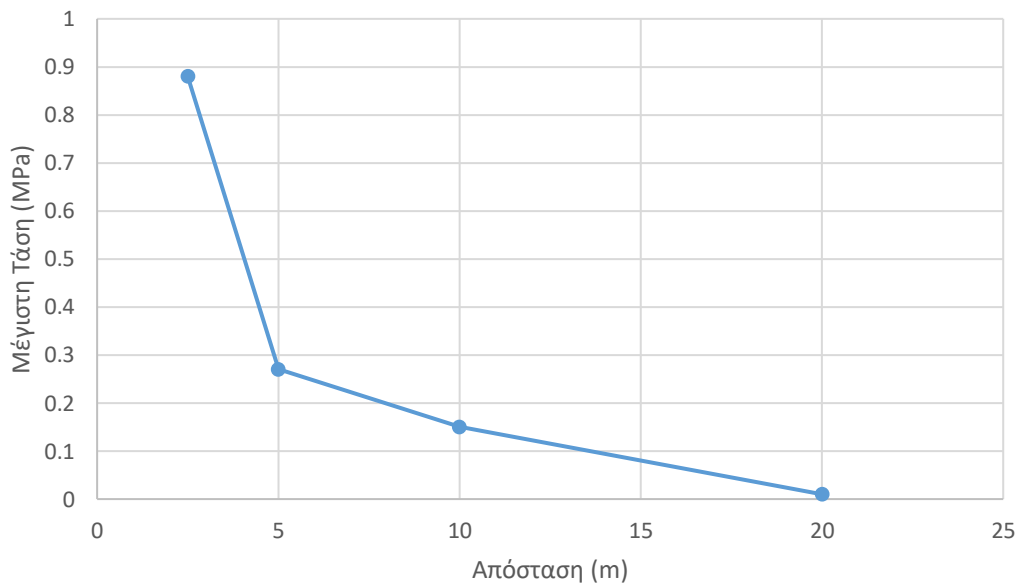


Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 2,5 μέτρων για  $\sigma_1=5,4$  MPa  $\sigma_3=2,7$ MPa  $\sigma_z= 2,7$  MPa (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)

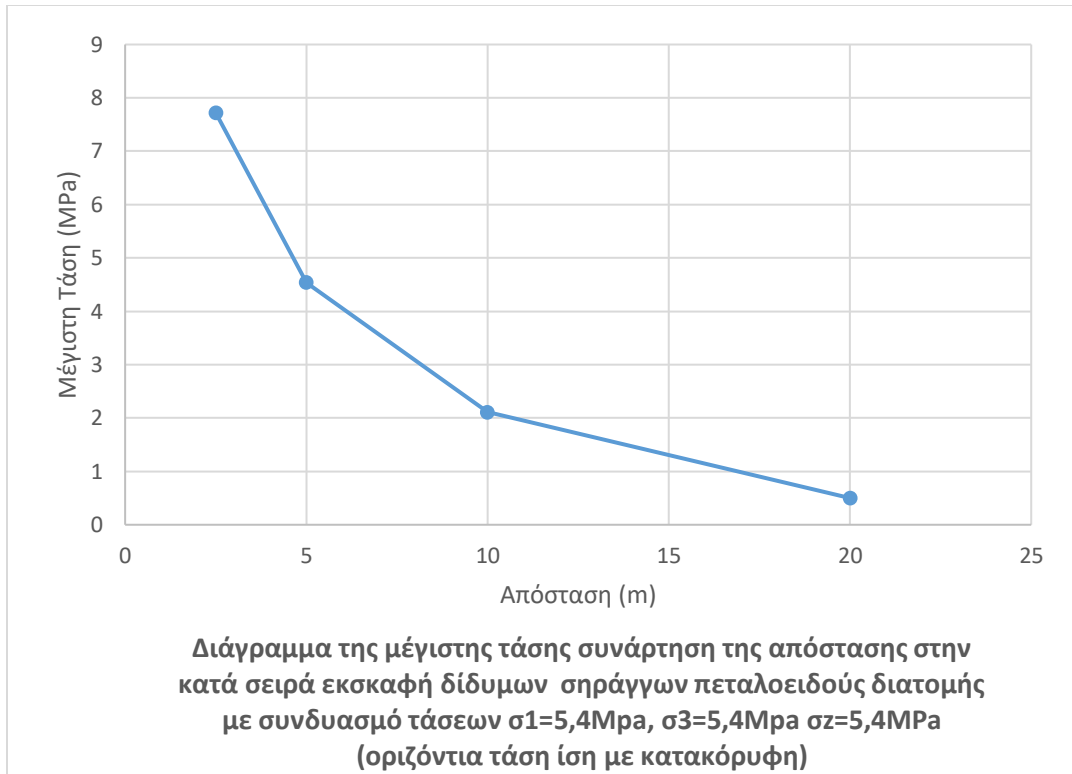
Για RMR 80-100



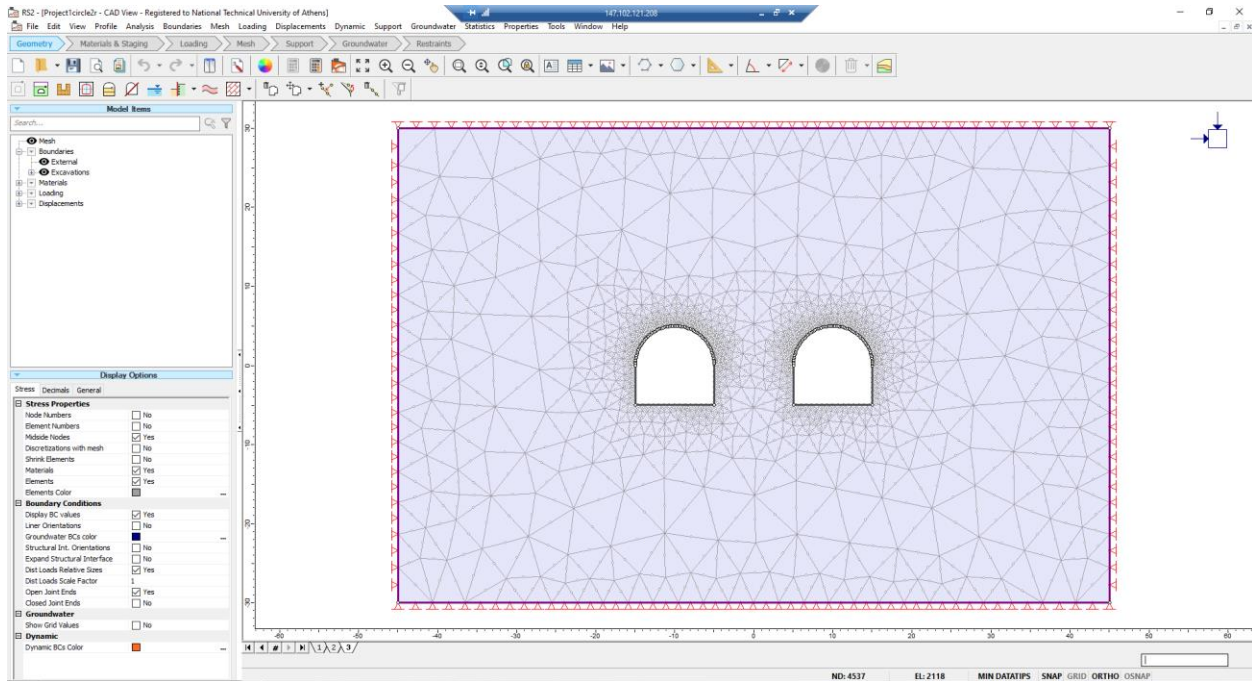
**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=8,1\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=5,4\text{MPa}$   $\sigma_z=8,1\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)**

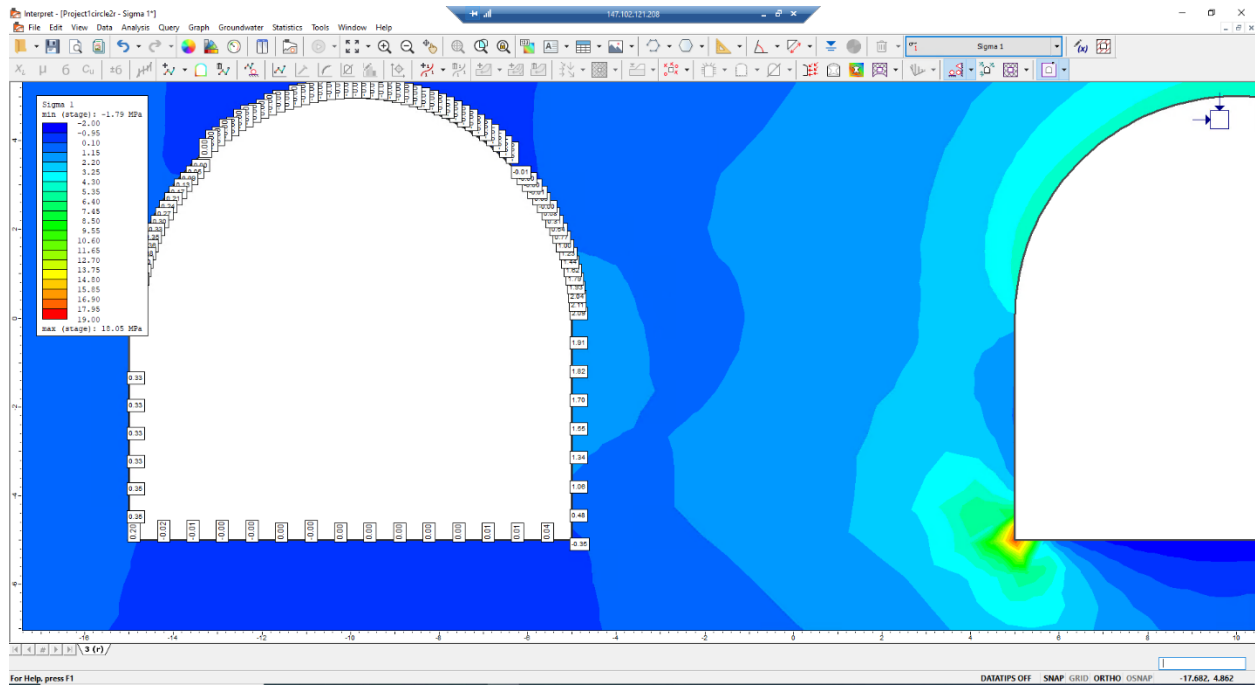


**Διάγραμμα της μέγιστης τάσης συνάρτηση της απόστασης στην κατά σειρά εκσκαφή δίδυμων σηράγγων πεταλοειδούς διατομής με συνδυασμό τάσεων  $\sigma_1=5,4\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=2,7\text{MPa}$   $\sigma_z=2,7\text{MPa}$  (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)**

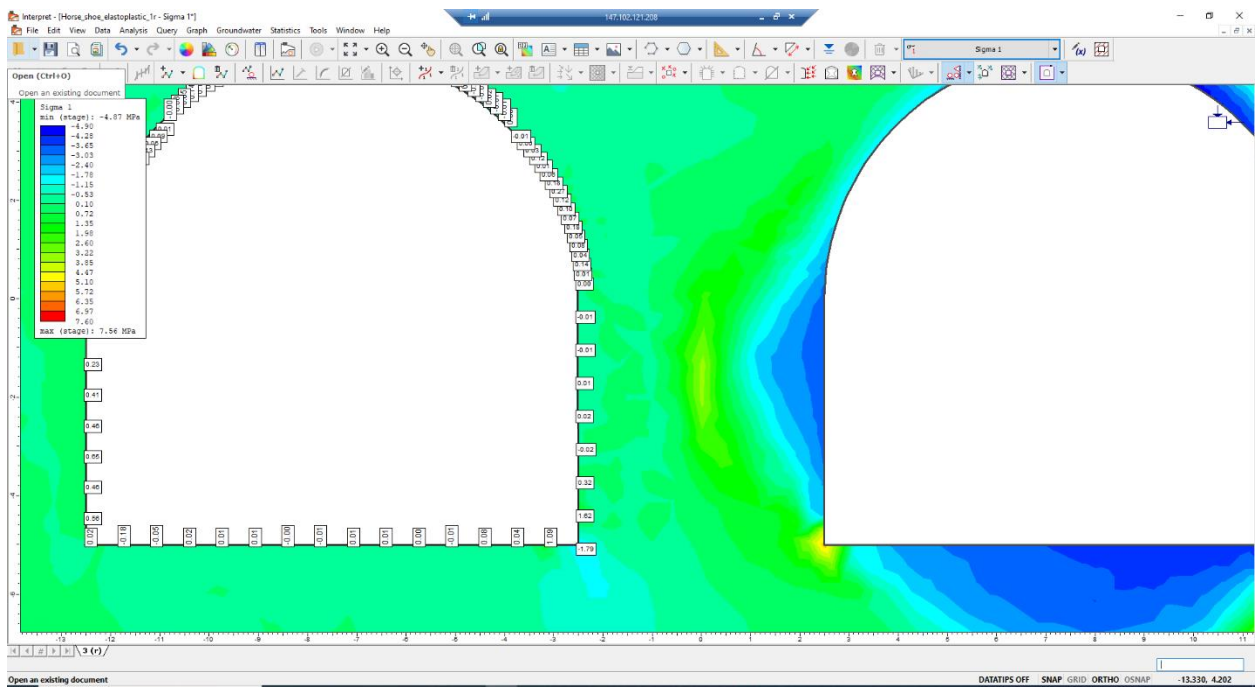
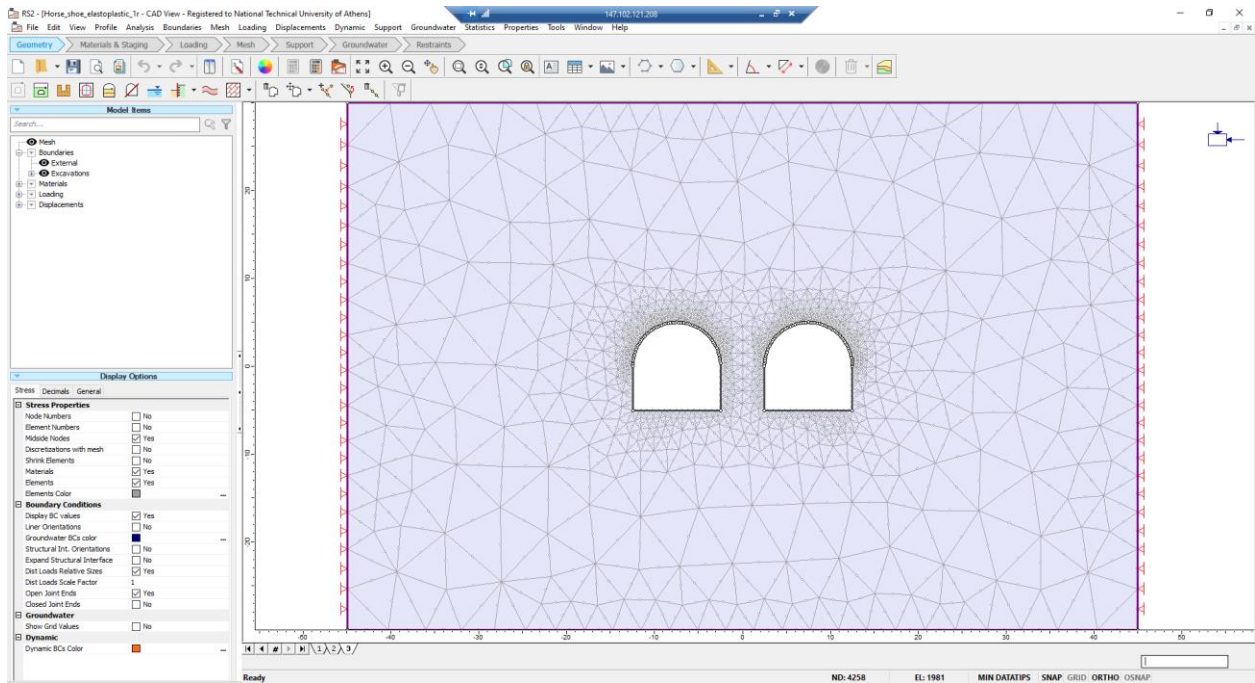


**\*Ενδεικτικές φωτογραφίες μοντέλων**

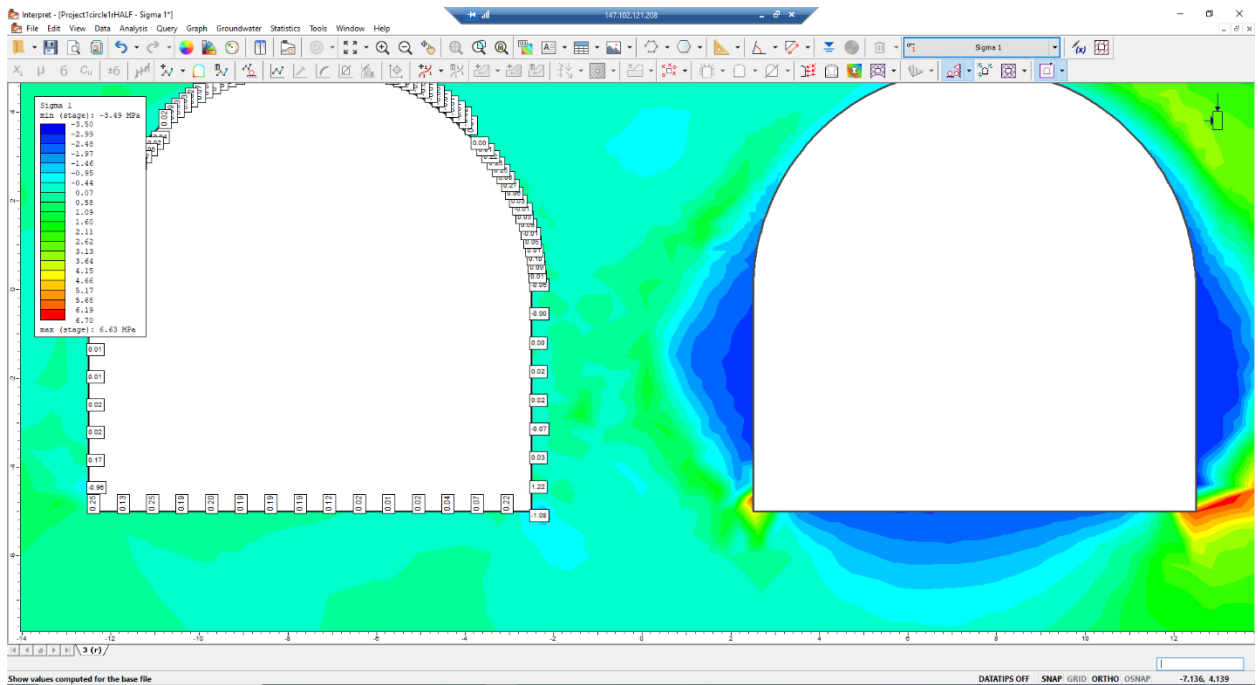
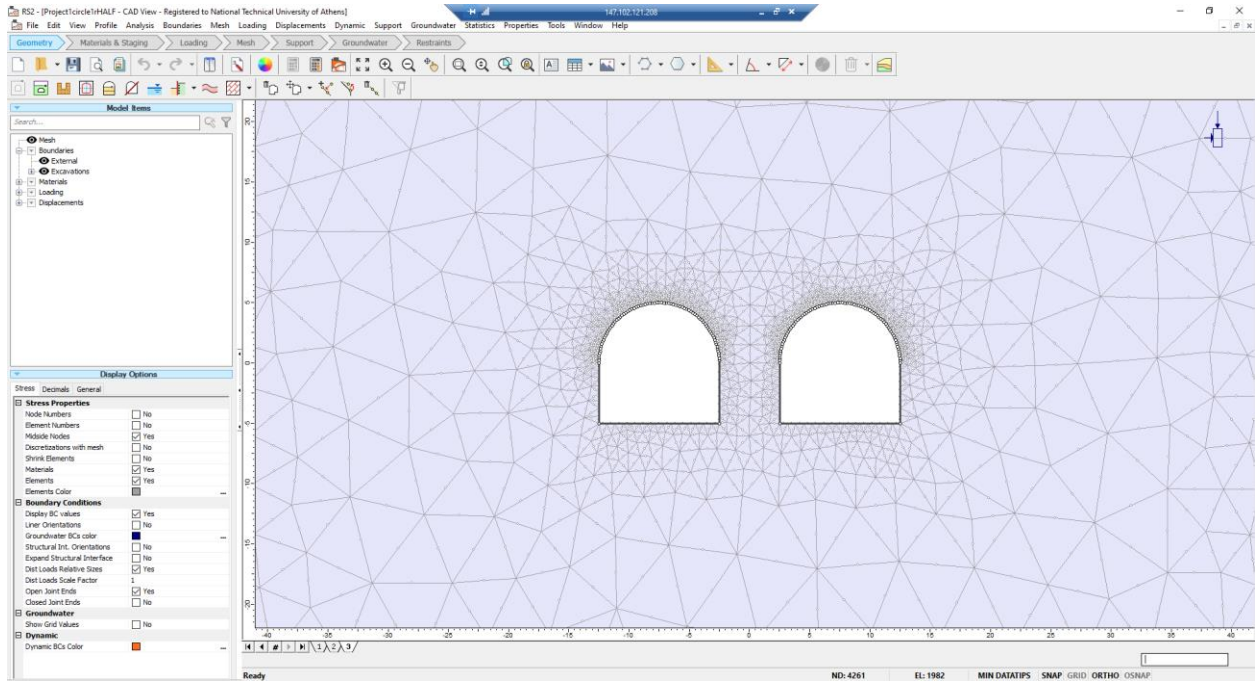




Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 10 μέτρων για  $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_z= 5,4$  MPa (οριζόντια τάση ίση με κατακόρυφη)



Μοντέλο διδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 5 μέτρων για  $\sigma_1=8,1$  MPa  $\sigma_3=5,4$ MPa  $\sigma_z= 8,1$  MPa (μέγιστη κύρια τάση οριζόντια)



Μοντέλο δίδυμης σήραγγας πεταλοειδούς διατομής σε απόσταση 5 μέτρων για  $\sigma_1=5,4$  MPa  $\sigma_3=2,7$ MPa  $\sigma_z= 2,7$  MPa (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αριθμητική προσομοίωση διάνοιξης και υποστήριξης δίδυμης οδικής σήραγγας Κνημίδας – Διερεύνηση της επίδρασης της απόστασης των δύο κλάδων

### Γενικά Στοιχεία

Μέρος της παράκαμψης της πόλης του Αγίου Κωνσταντίνου του Α/Δ ΠΑΘΕ αποτελεί η οδική σήραγγα Κνημίδας , ένα έργο κατασκευασμένο την χρονική περίοδο 2003-2006 με σκοπό την αναβάθμιση του οδικού δικτύου Αθηνών -Λαμίας σε σύγχρονο αυτοκινητόδρομο. Η οδική σήραγγα Κνημίδας μήκους περίπου 2500 μέτρων διασχίζει τον ομώνυμο ορεινό όγκο , ο οποίος δομείται από ασβεστολιθικούς και δολομιτικούς σχηματισμούς .

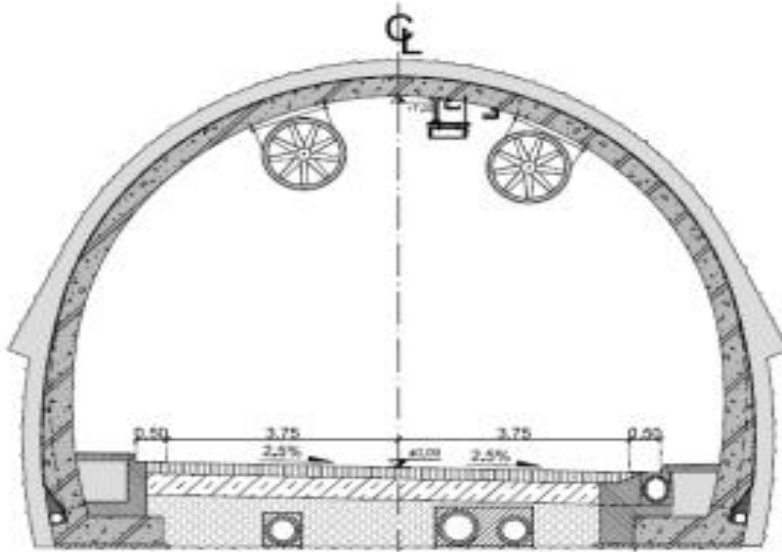
### Διάταξη Έργου

Σύμφωνα με τις αρχές της Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων ( NATM ) ,τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης εφαρμόζονται σε διαδοχικές φάσεις με σκοπό την αποτόνωση των γεωστατικών τάσεων αλλά με τέτοιο τρόπο ώστε ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται έλεγχος των συγκλίσεων , πρόληψη υπερβολικών χαλαρώσεων του πετρώματος αλλά και η εξασφάλιση της ευστάθειας των σφηνών που δημιουργούνται από τις οικογένειες ασυνεχειών και υπόγειας διάνοιξης. Η παραπάνω μέθοδος ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και την διάνοιξη των σηράγγων της Κνημίδας.

Ο σχεδιασμός αποσκοπεί στην πρόβλεψη συστημάτων προσωρινής υποστήριξης για τις επικρατέστερες κατηγορίες βραχομάζας που αναμένεται να συναντηθούν στο υπό διάνοιξη μήκος, και αποτελεί ένα σημείο εκκίνησης για την εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Ανάλογα με τις συνθήκες που θα συναντηθούν αρκετές προσαρμογές θα πρέπει να μπορούν να γίνουν επί τόπου και κατά περίπτωση. Ο σχεδιασμός στο στάδιο της προμελέτης κάλυψε ένα ευρύ φάσμα γεωμηχανικών κατηγοριών και τύπων συμπεριφοράς πετρώματος οι οποίες υιοθετούνται και σε αυτή τη φάση μελέτης.

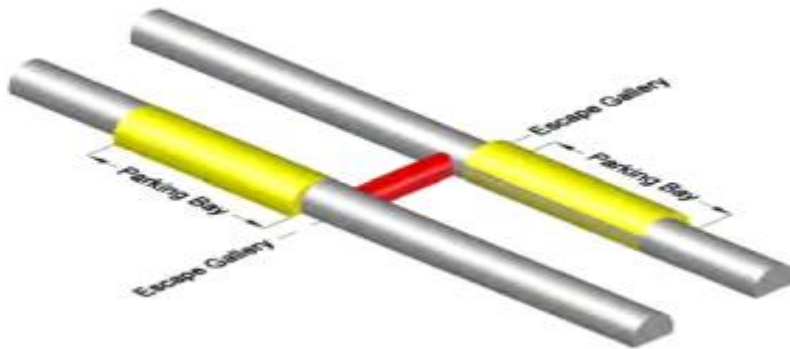
Η διατομή των σηράγγων έχει τυπικό ημικυκλικό σχήμα δίχων οδικών σηράγγων , ακτίνας εσωραχίου στο θόλο 5.25 μέτρων , εξυπηρετώντας δύο λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3,75 μέτρων και πλευρικούς πεζοδιαδρόμους πλάτους ενός μέτρου. Το ύψος του οδικού περιτυπώματος είναι τα 5 μέτρα δίνοντας έτσι επαρκή χώρο για την τοποθέτηση ανεμιστήρων και φωτιστικών σωμάτων στο άνω τμήμα της διατομής .





Εικόνα 10 Διατομή χρήσης σήραγγας Κνημίδας

Στο μεγαλύτερο τμήμα της χάραξης των σηράγγων , η αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων διατηρείται στα 30 μέτρα . Ανά περίπου 350 μέτρα , κατασκευάστηκαν διασυνδετήριες στοές οι οποίες σε περίπτωση ανάγκης εκκένωσης θα εξυπηρετούν στην διαφυγή των χρηστών από τον ένα κλάδο στον άλλο . Επίσης , ανά 800 περίπου μέτρα διαμορφώθηκαν πλευρικές διευρύνσεις των σηράγγων μήκους 50 μέτρων για την δημιουργία εσοχών στάθμευσης έκτακτης ανάγκης .



Εικόνα 11 Εσοχές στάθμευσης έκτακτης ανάγκης και διασυνδετήρια στοά διαφυγής πεζών

## Γεωλογικό και Τεκτονικό Περιβάλλον

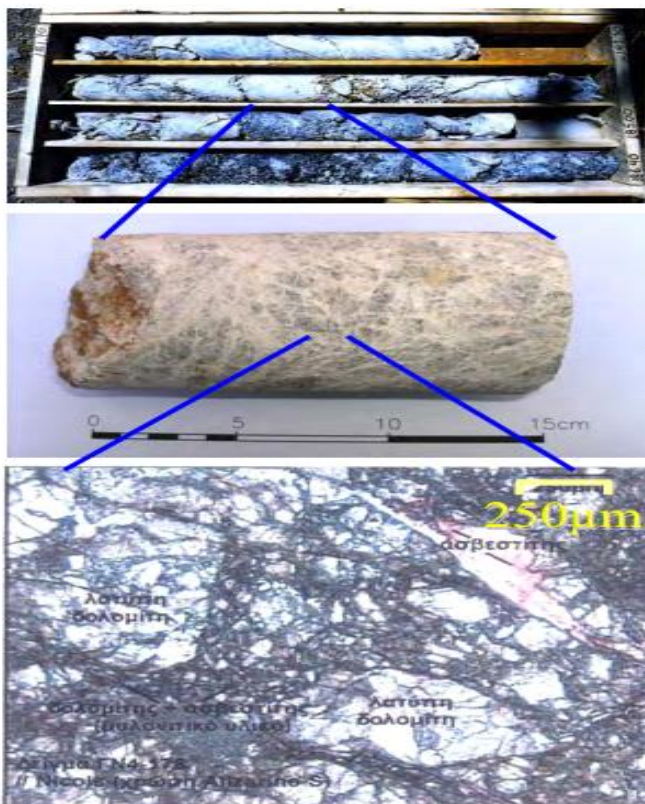
Σε όλη την παραλιακή ζώνη του Αγίου Κωνσταντίνου- Καμένων Βούρλων όπως και νοτιότερα μέχρι την Αρκίτσα , το φυσικό ανάγλυφο είναι έντονο και διαμορφωμένο από την δράση ρηγματών που διαμορφώνουν την τεκτονική τάφρο του βόρειου Ευβοικού. Το ρήγμα τέμνει την χάραξη στην περιοχή του στομίου εισόδου της σήραγγας και λόγω της παρουσίας του στην περιοχή του έργου απαιτήθηκε

μία λεπτομερή θεώρηση της σεισμικής ασφάλειας και αντισεισμικού σχεδιασμού του έργου από τα πρώτα στάδια της μελέτης επιρεάζοντας την τελική επιλογή της χάραξης .

Το γεωλογικό υπόβαθρο μέσα στο οποίο διανοίχθηκε η σήραγγα αποτελείται από ανθρακικούς σχηματισμούς και απο σχηματισμούς ενός επωθημένου συμπλέγματος ηφαιστειοϊζηματογενούς προέλευσης και οφιολιθικής-πηλιτικής σύστασης. Οι δεύτεροι όμως δεν συναντώνται στην στάθμη διέλευσης της σήραγγας αλλά μόνο στην περιοχή του στομίου εξόδου για μερικές δεκάδες μέτρα.

### Τεχνικόγεωλικές συνθήκες

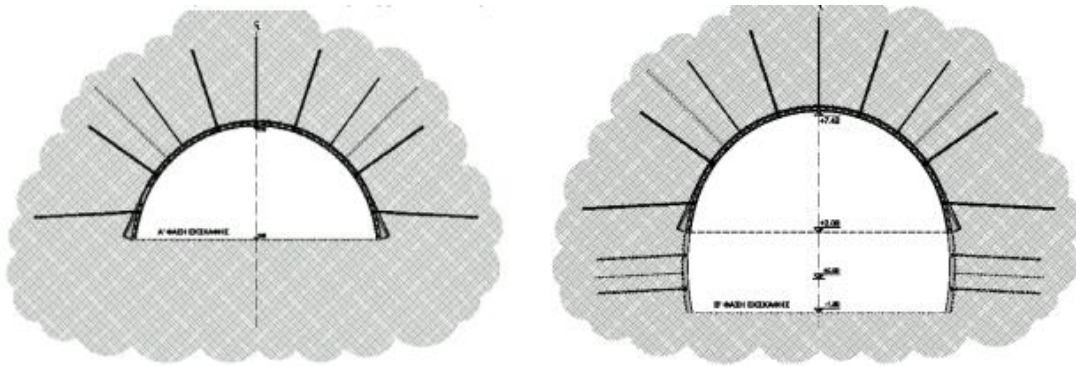
Με βάση τα στοιχεία της γεωτεχνικής διερεύνησης του έργου, εκτιμήθηκε ότι κατά μήκος της υπό διάνοιξη σήραγγας το ασβεστολιθικό-δολομιτικό πέτρωμα θα συναντάτο με μια κυμαινόμενη ποιότητα. Κατά θέσεις και ιδιαίτερα επιφανειακά, ο δολομίτης εμφανίζονταν σχετικά συμπαγής, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη προοδευτικά πιο κερματισμένος. Κατά θέσεις και ιδιαίτερα στην γειτονία του ρήγματος του στομίου εισόδου το πέτρωμα εμφανίστηκε εντελώς κατακερματισμένο και η δειγματοληψία των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν συνίσταντο σε ασύνδετα θραύσματα βράχου μεγέθους χαλικιών. Για την καλύτερη κατανόηση της σύστασης και της μικροδομής του υλικού έγιναν πετρογραφικές αναλύσεις στο υλικό με εξέταση λεπτών τομών στο πολωτικό μικροσκόπιο. Όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν στο μικροσκόπιο διαπιστώθηκε ότι διακρίνονται για μια χαρακτηριστική λατυποποιημένη υφή και ένα κατακλαστικό ιστό, προϊόν διαδοχικών τεκτονικών επεισοδίων και καταπονήσεων της βραχομάζας. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ότι αυτή η κατακλαστική δομή του υλικού επαναλαμβάνεται σε όλες τις κλίμακες, από την κλίμακα του μικροσκοπίου μέχρι την κλίμακα της βραχομάζας, όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες.



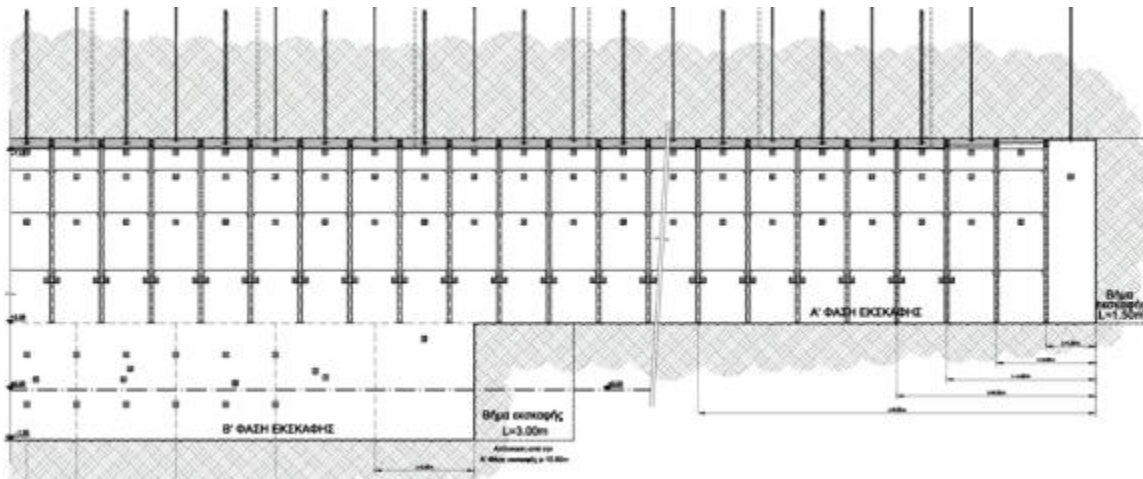
Εικόνα 12 ασβεστολιθικό-δολομιτικό πέτρωμα

### Σχεδιασμός Διάνοιξης και Προσωρινής Υποστήριξης

Κατά τον σχεδιασμό προβλέφθηκε η διάνοξη της σήραγγας με διατρήματα και ανατινάξεις (drill and blast). Η προσωρινή υποστήριξη σχεδιάστηκε με αγκυρώσεις και εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Με βάση το RMR, διακρίθηκαν μια σειρά κατηγοριών βραχομάζας και σχεδιάστηκαν ανάλογα μέτρα προσωρινής υποστήριξης για κάθε μία από αυτές. Στις βραχομάζες καλύτερης ποιότητας, δεν προβλέφθηκαν μέτρα προϋποστήριξης στην περιοχή του μετώπου και το βήμα προχώρησης ορίστηκε 1.50-3.00 m, ενώ στις πτωχότερες ποιότητας βραχομάζες, οι οποίες αντιστοιχούν σε πιο εύθρυπτο και ασταθές πέτρωμα, το βήμα προχώρησης μειώθηκε και προβλέφθηκε η τοποθέτηση ράβδων προαγκύρωσης ή ακόμα και δοκών προπορείας για τις δυσμενέστερες συνθήκες. Κατά την κατασκευή, κυρίως στην περιοχή του στομίου εισόδου απ' όπου διέρχεται η ρηξιγενής ζώνη, εφαρμόστηκαν δοκοί προπορείας, καθώς και στην περιοχή του στομίου εξόδου όπου συναντήθηκε το οφιολιθικό - πηλιτικό σύμπλεγμα. Ανάλογα με το γεωστατικό πεδίο που συναρτάται με το ύψος των υπερκειμένων, κλιμακώνεται και το πάχος της προσωρινής επένδυσης για τη κάθε κατηγορία υποστήριξης. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η διαδικασία διάνοιξης καθώς και τα μέτρα που εφαρμόζονται στην κατηγορία RMR III, η οποία είναι και η επικρατέστερη.



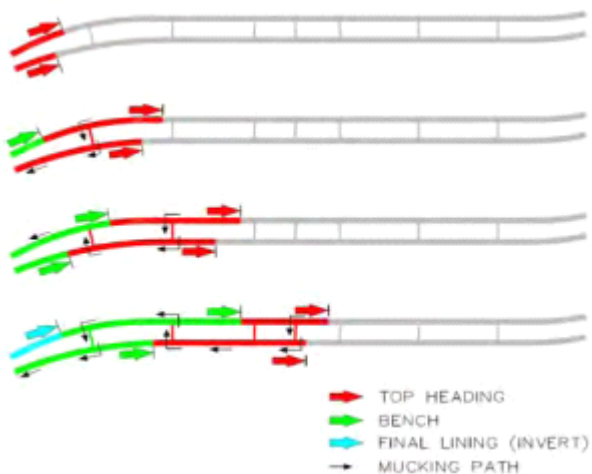
Εικόνα 13 Α' και Β' φάση εκσκαφής



Εικόνα 14 Φάσεις διάνοιξης και μέτρα προσωρινής υποστήριξης

## Διάνοιξη της σήραγγας

Η δίδυμη σήραγγα διανοίχτηκε σχεδόν εξολοκλήρου από το στόμιο εισόδου, λόγω των προβλημάτων της έγκαιρης πρόσβασης στην περιοχή του στομίου εξόδου αλλά και την αδυναμία διάθεσης των υλικών εκσκαφής στην περιοχή αυτή αποφεύγοντας την όχληση της κυκλοφορίας του υφιστάμενου οδικού άξονα. Λόγω της προσβολής από το ένα μόνο μέτωπο, επιβλήθηκε η επιτάχυνση της διάνοιξης με βελτιστοποίηση του κύκλου εργασιών, καθώς και με τη χρήση παραγωγικού μηχανικού εξοπλισμού. Το μεγάλο μήκος της σήραγγας και η σχετική ομοιογένεια των συνθηκών διάνοιξης, ευνόησαν στην επίτευξη υψηλών ρυθμών προχώρησης. Η μέση εβδομαδιαία προχώρηση έφθασε τα 40 m ενώ η μέγιστη εβδομαδιαία τα 84 m. Όπου οι γεωτεχνικές συνθήκες αλλά και οι συνθήκες αυτοευστάθειας του πετρώματος το επέτρεπαν, αυξάνοταν το βήμα προχώρησης στο μέγιστο δυνατόν με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης παραγωγικότητας. Με την πρόοδο του έργου έγινε εφικτή η ανάπτυξη περισσότερων από ένα μέτωπο εργασίας κατά μήκος του κάθε κλάδου, δηλαδή ταυτόχρονη εκσκαφή άνω ημιδιατομής, εκσκαφή βαθμίδας, σκυροδέτησης θεμελίων μόνιμης επένδυσης, σκυροδέτηση θόλου μόνιμης επένδυσης στον ίδιο κλάδο. Για την εξασφάλιση οδών πρόσβασης στα μέτωπα εκσκαφής και αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής, αξιοποιήθηκαν οι διασυνδετήριες στοές όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα χωρίς όμως να παρακωλύονται οι εργασίες.



Εικόνα 15 Σταδιακή ανάπτυξη μετώπων εργασίας και οδοί αποκομιδής υλικών εκσκαφής

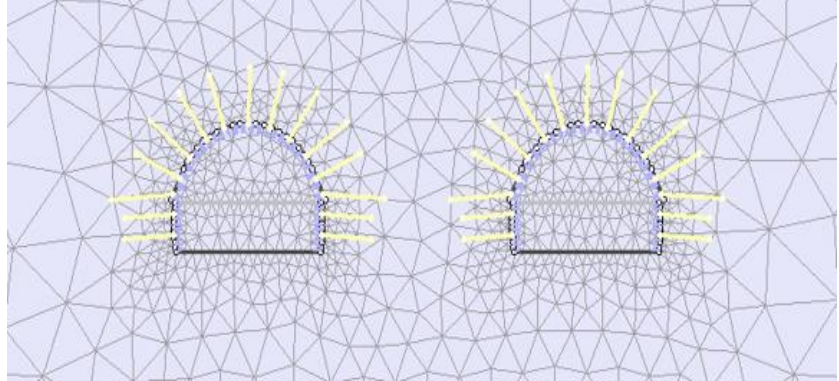
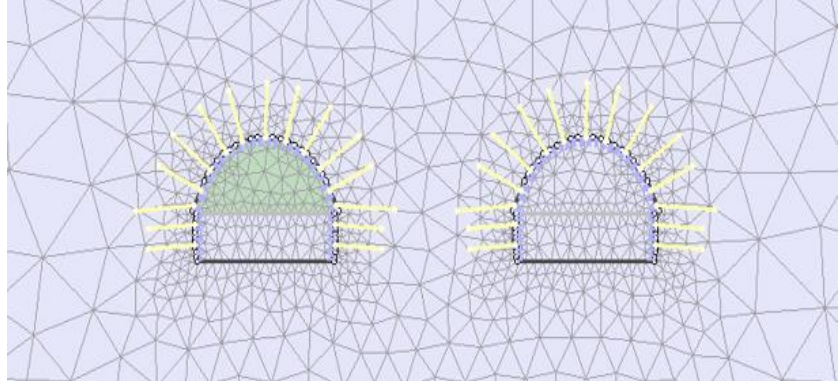
Γενικά, η ποιότητα και η συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την διάνοιξη ήταν καλή και ικανοποιητική. Στο 75% του μήκους, στο μεγαλύτερο δηλαδή μήκος της διάνοιξης εφαρμόστηκαν μέτρα κατηγορίας III (RMR 40-60) ενώ σε πιο μικρά μήκη στα οποία συναντήθηκε πιο κερματισμένη βραχομάζα (RMR 30-40), υποστηρίχθηκαν με μέτρα κατηγορίας IV. Επιπλέον, λόγω της περιορισμένης παρουσίας υπόγειων υδάτων, διευκολύνθηκαν σημαντικά οι εργασίες διάνοιξης.

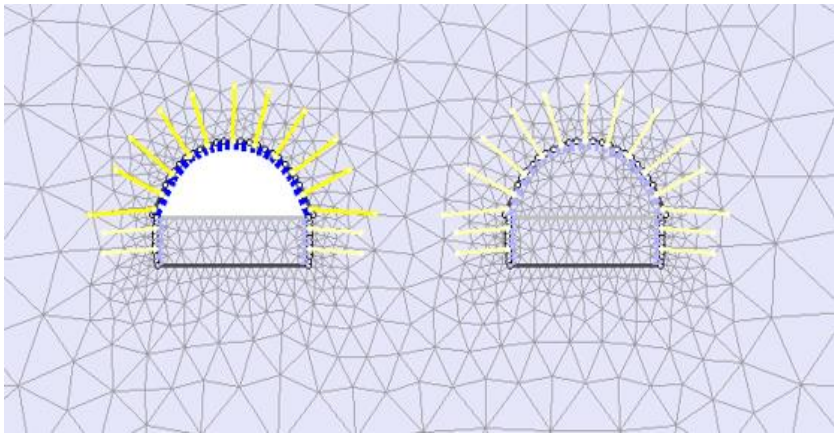
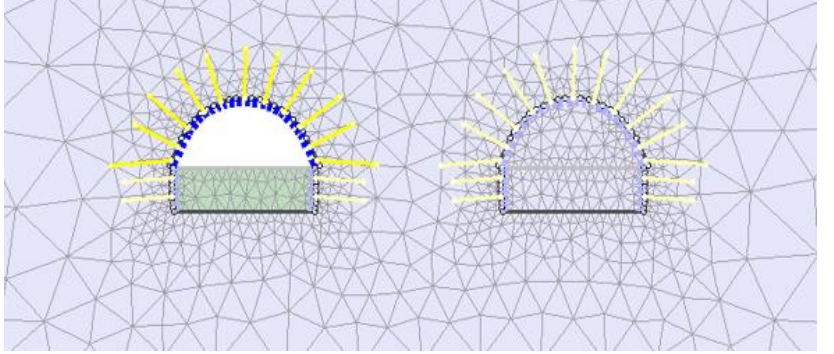
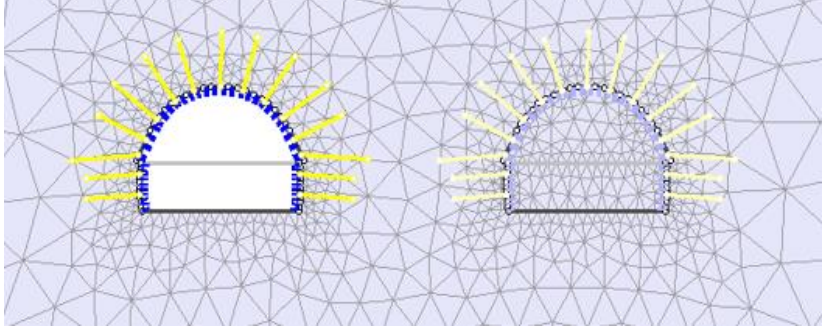
Πιο αναλυτικά, περιορίζεται το βήμα προχώρησης στην πρώτη φάση της εκσκαφής σε 1.5 μέτρα και στην δεύτερη φάση στα 3 μέτρα. Ανάλογα με την τάξη υπερκείμενου, περιλαμβάνονται στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης αγκυρώσεις και 20-30 cm σπλισμένο σκυρόδεμα. Στην δεύτερη φάση

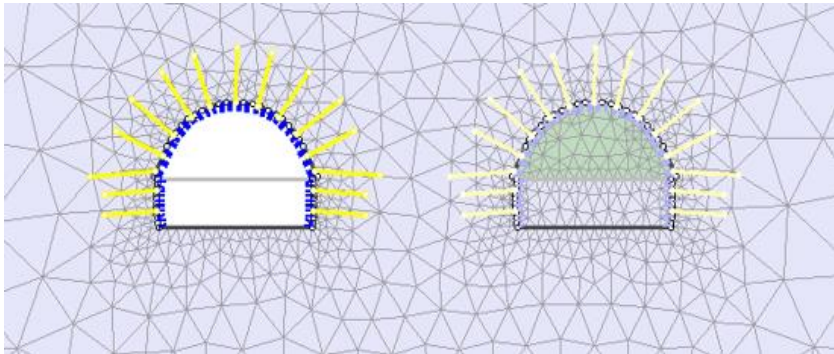
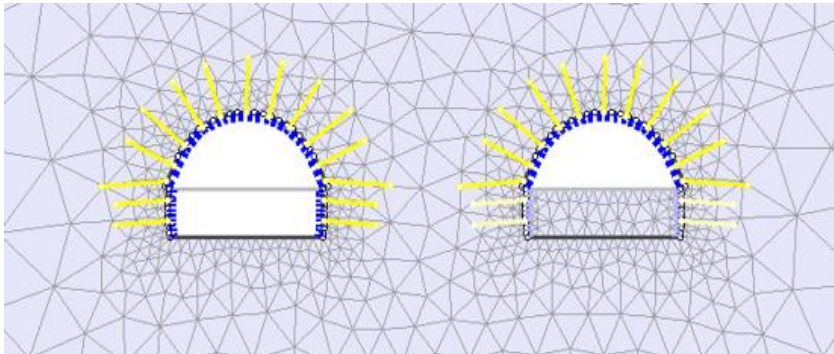
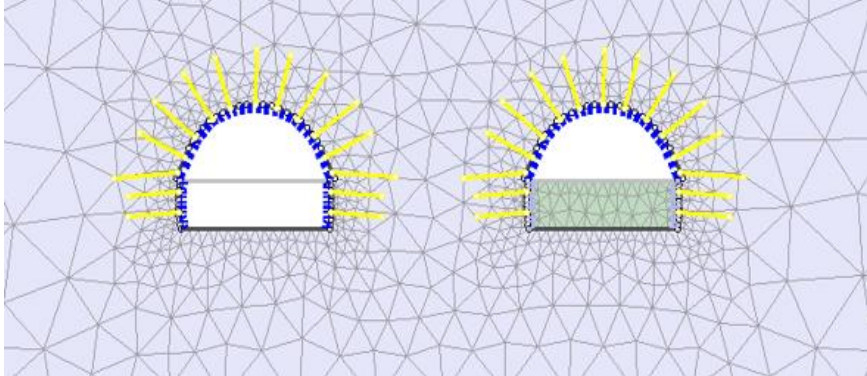
της εκσκαφής έχουμε επέκταση των χαλύβδινων δικτυωτών πλαισίων για την εξασφάλιση καλύτερου ελέγχου γεωμετρίας της επένδυσης της διατομής αλλά και την δημιουργία ενός κελύφους προσωρινής υποστήριξης με κάποια πλαστικότητα .Επιπλέον περιλαμβάνονται αγκύρια άμεσης ενέργειας τοποθετημένα σε μικρή απόσταση από το μέτωπο αλλά και αγκύρια συνεχούς πάκτωσης τα οποία συμπληρώνουν τον κάρναβο και τοποθετούνται όταν το μέτωπο έχει προχωρήσει .

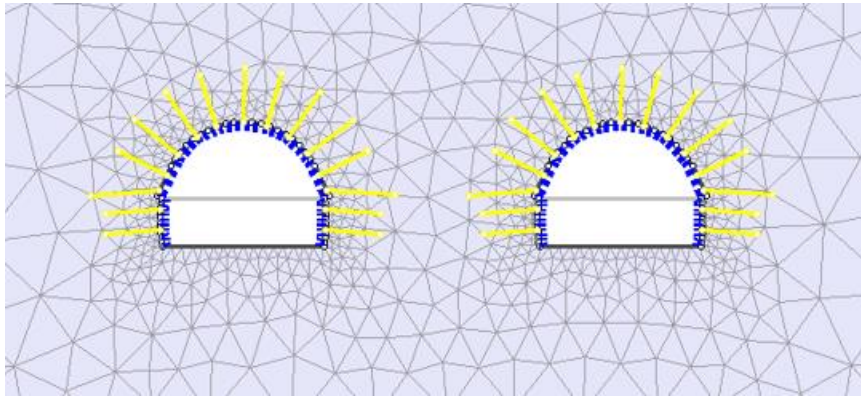
Μοντέλα προσομοίωσης κατηγορίας βραχομάζας III για βάθος 250 m και τάση πεδίου 6,75 MPa

<b>Ανάλυση:</b>	επίπεδη παραμόρφωση
Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων:	500
Ανοχή σφάλματος υπολογισμού:	0,001

<b>Αρχική κατάσταση</b>	
	<p><math>E=3500 \text{ GPa}</math> <math>E'/E = 1</math></p>
<b>Α΄ Φάση εκσκαφής αριστερού κλάδου</b>	<b>Βήμα προχώρησης 1.5 m</b>
	<p>Αποτόνωση άνω ημιδιατομής αριστερού κλάδου <math>E'/E = 0.3</math></p>

	<p>Εκσκαφή άνω ημιδιατομής αριστερού κλάδου</p> <p>και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος <b><math>t_{ολ} = 0.30m</math> <math>E=20GPa</math></b></p> <p>και τοποθέτηση αγκυριών πλήρους πάκτωσης #1.50×3.60m πεσσοειδώς Φ.1 245kN, L=4.00m</p> <p><math>E'/E = 0</math></p>
<p><b>Β' Φάση εκσκαφής αριστερού κλάδου</b></p>	<p><b>Βήμα προχώρησης 3.0 m</b></p>
	<p>Αποτόνωση βαθμίδας αριστερού κλάδου</p> <p><math>E'/E = 0.3</math></p>
	<p>Εκσκαφή βαθμίδας αριστερού κλάδου</p> <p>και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος <b><math>t_{ολ} = 0.30m</math> <math>E=20GPa</math></b></p> <p>και τοποθέτηση αγκυριών πλήρους πάκτωσης #1.50×3.60m πεσσοειδώς Φ.1 245kN, L=4.00m</p> <p><math>E'/E = 0</math></p>

<b>A' Φάση εκσκαφής δεξιού κλάδου</b>	<b>Βήμα προχώρησης 1.5 m</b>
	<p>Αποτόνωση άνω ημιδιατομής δεξιού κλάδου</p> <p><math>E'/E = 0.3</math></p>
	<p>Εκσκαφή άνω ημιδιατομής αριστερού κλάδου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος <math>t_{ολ} = 0.30m</math> <math>E=20GPa</math></p> <p>και τοποθέτηση αγκυριών πλήρους πάκτωσης #1.50×3.60m πεσσσειδώς Φ.1 245kN, L=4.00m</p> <p><math>E'/E = 0</math></p>
<b>B' Φάση εκσκαφής δεξιού κλάδου</b>	<b>Βήμα προχώρησης 3.0 m</b>
	<p>Αποτόνωση βαθμίδας δεξιού κλάδου</p> <p><math>E'/E = 0.3</math></p>



Εκσκαφή βαθμίδας δεξιού κλάδου

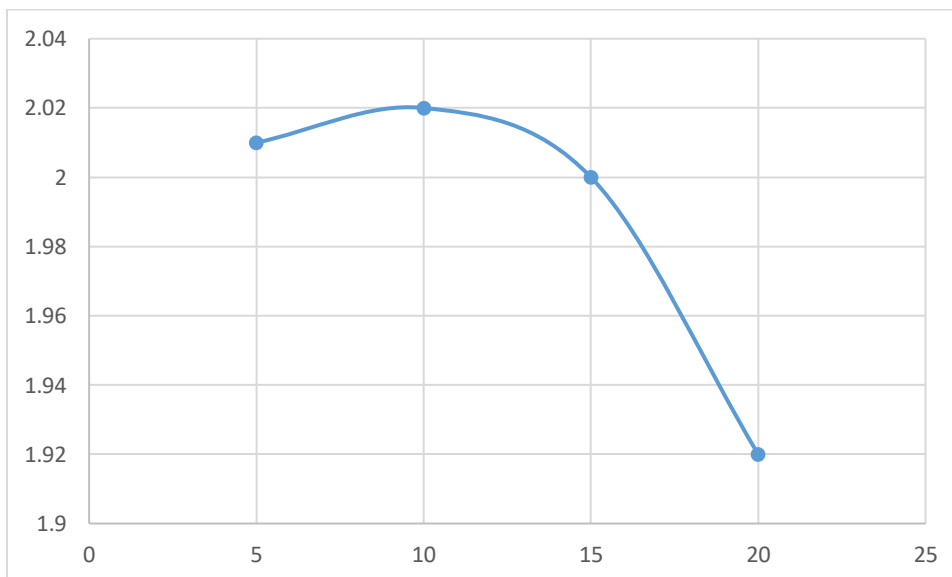
και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος  $t_{ολ} = 0.30m$   $E=20GPa$

και τοποθέτηση αγκυρίων πλήρους πάκτωσης #1.50×3.60m πεσσοειδώς  $\Phi.1$  245kN,  $L=4.00m$

$E'/E = 0$

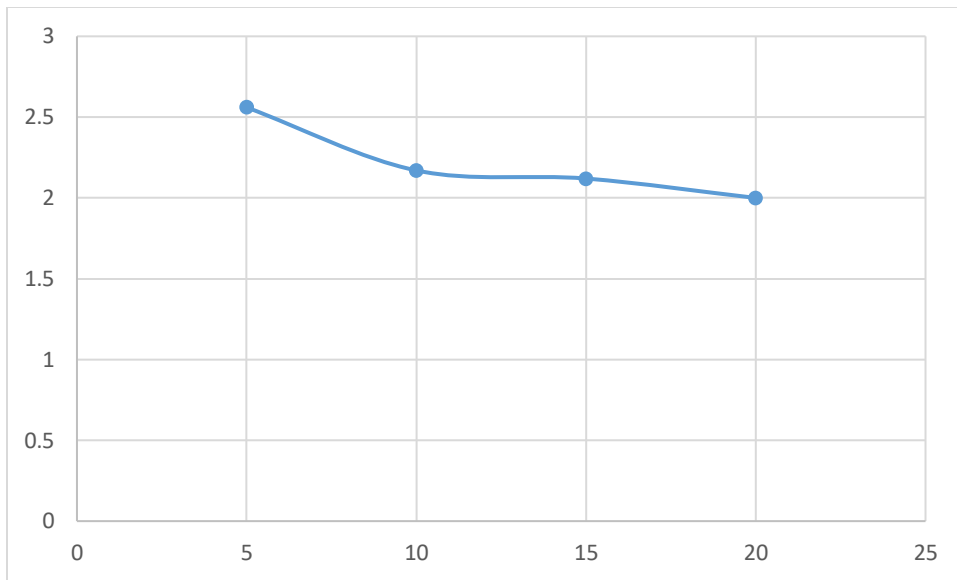
### Αριθμητικά αποτελέσματα

Μέσω της εντολής Interpret του προγράμματος RS2 πάρθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την μετατόπιση στην στέψη και την παρειά του αριστερού κλάδου, καθώς και την αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα για το 5<sup>ο</sup> και το 9<sup>ο</sup> στάδιο του μοντέλου, δηλαδή με την εκσκαφή μόνο του αριστερού κλάδου και με την εκσκαφή και των δύο κλάδων.

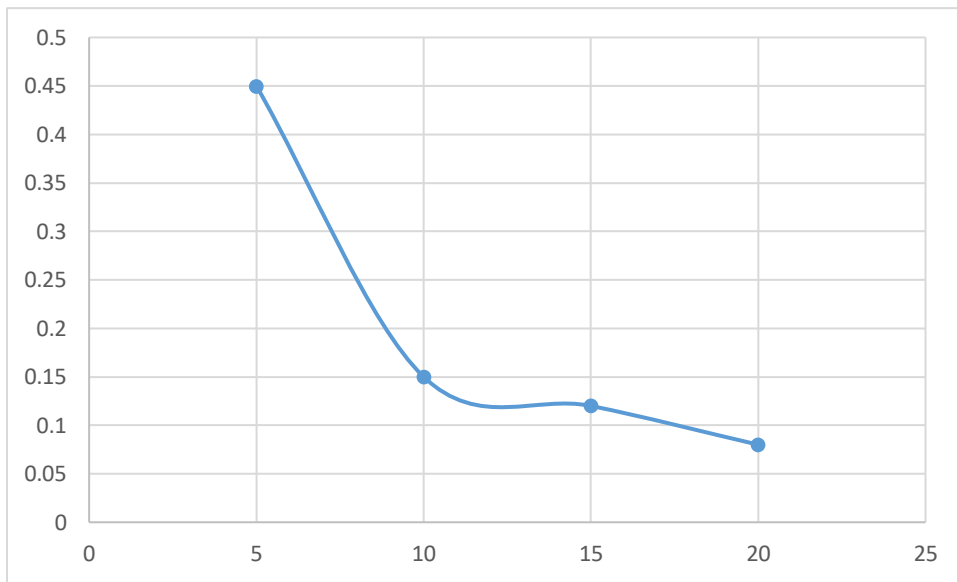


Εικόνα 16 μετατόπιση στην στέψη σε συνάρτηση της απόστασης (5ο στάδιο)

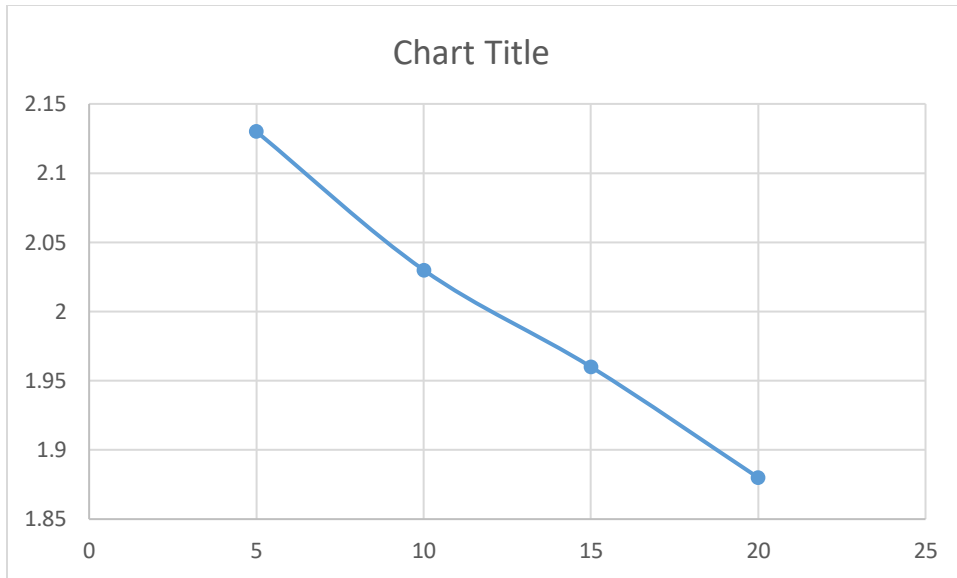




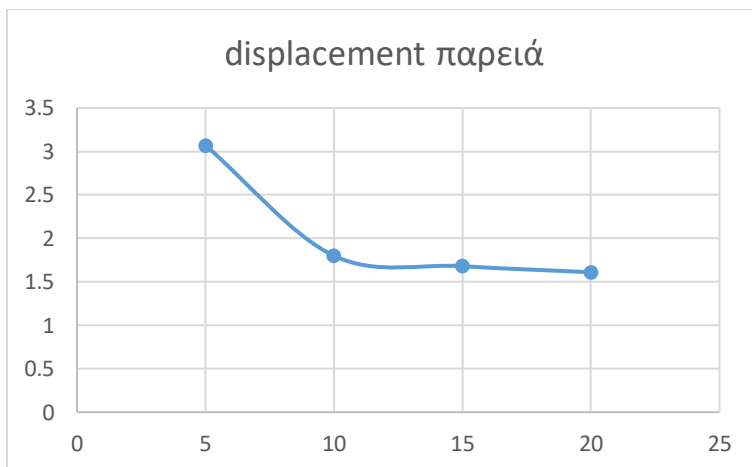
Εικόνα 17 μετατόπιση στην στέψη σε συνάρτηση της απόστασης ( 9ο στάδιο)



Εικόνα 18 διάγραμμα ρυθμού αύξησης της μετατόπισης ανάμεσα στο 5ο και στο 9ο στάδιο σε συνάρτηση της απόστασης

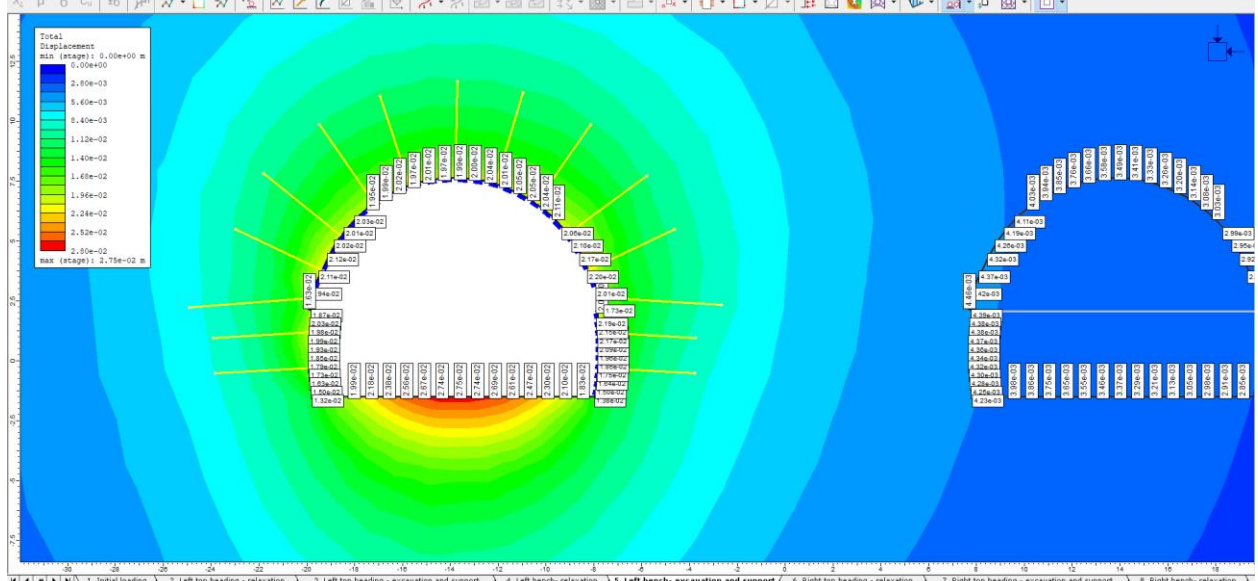
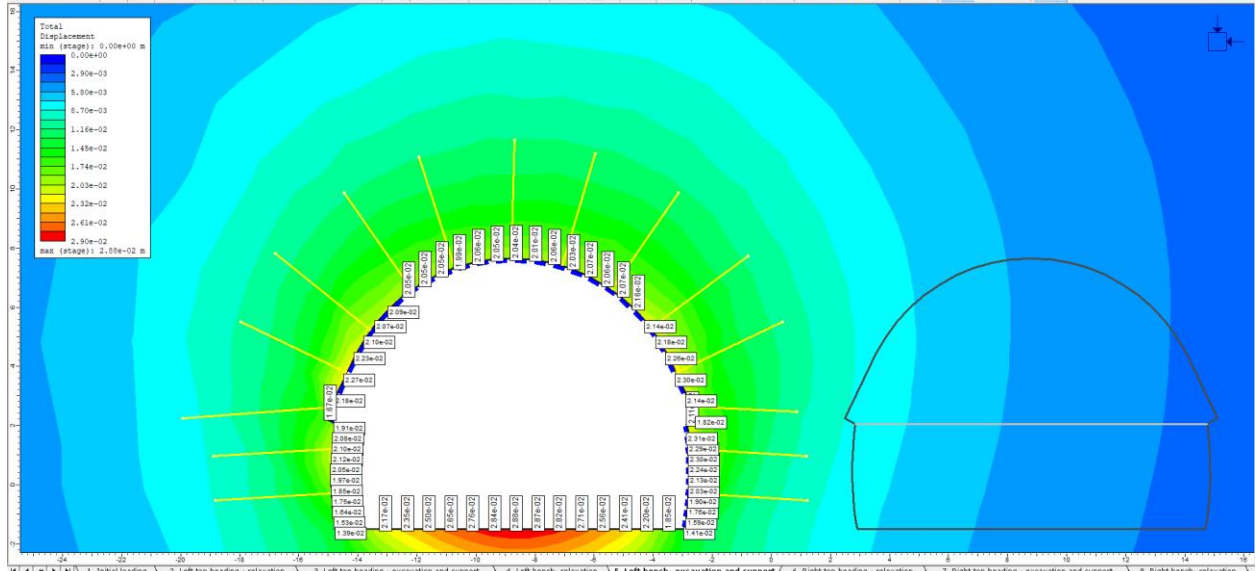


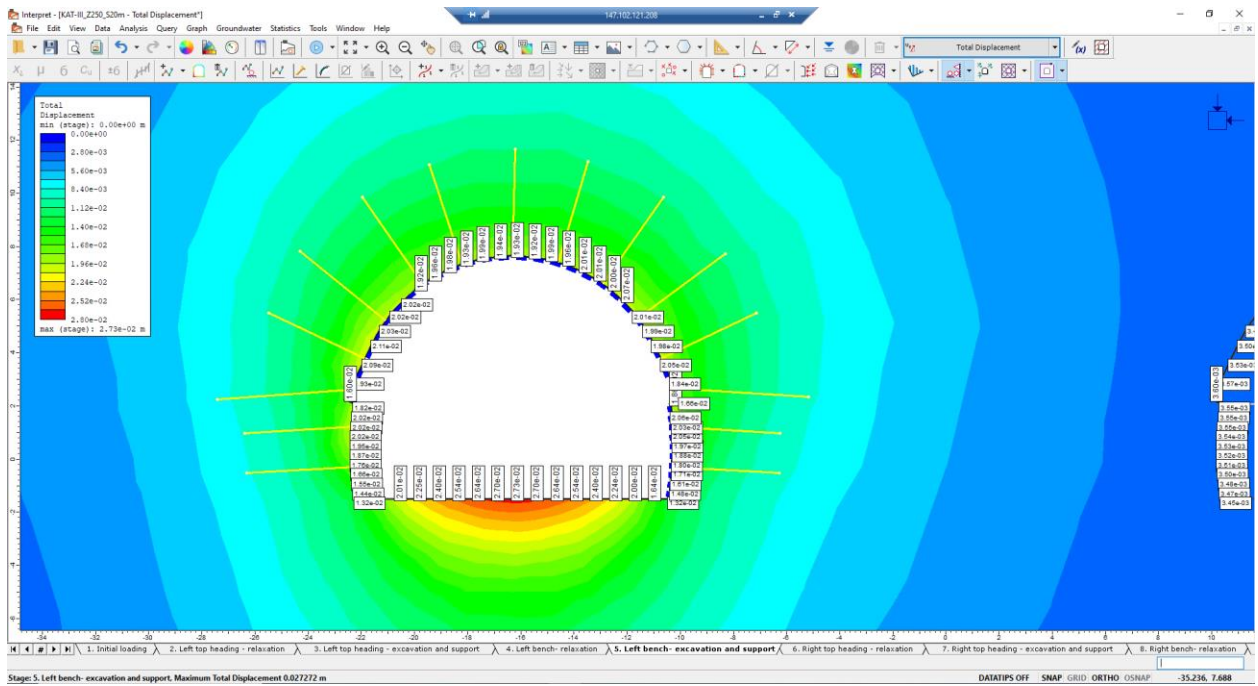
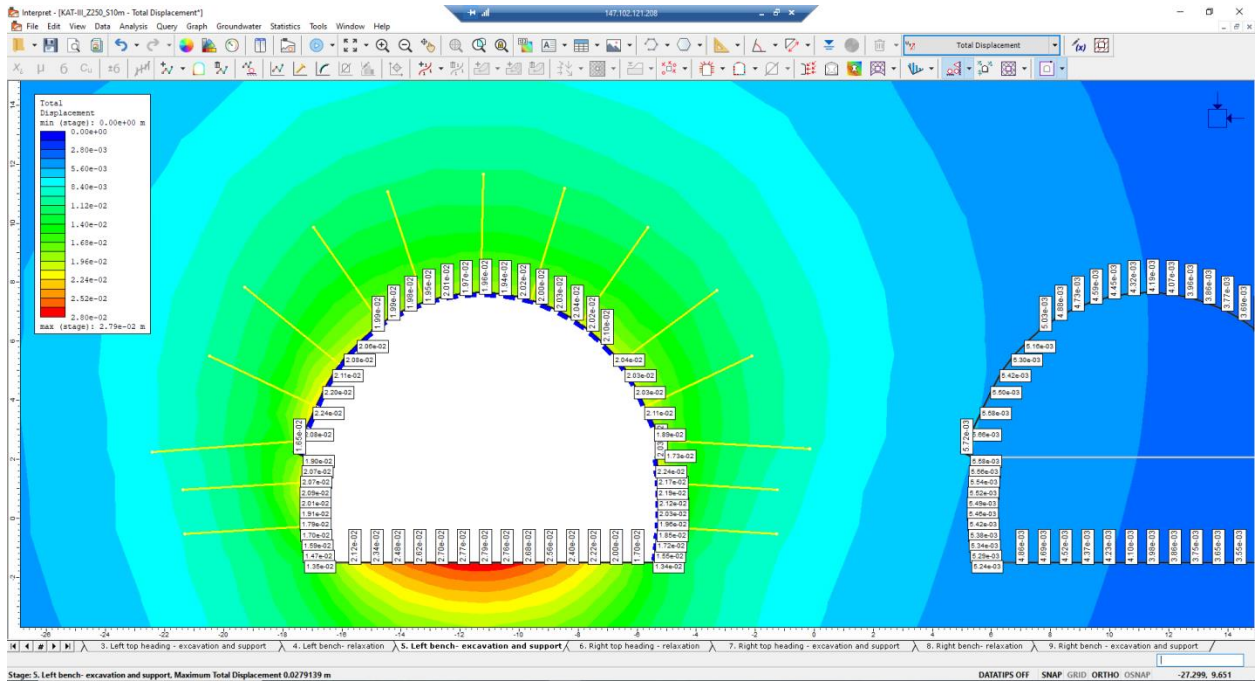
Εικόνα 19 μετατόπιση στην παρειά σε συνάρτηση με την απόσταση (5ο στάδιο)



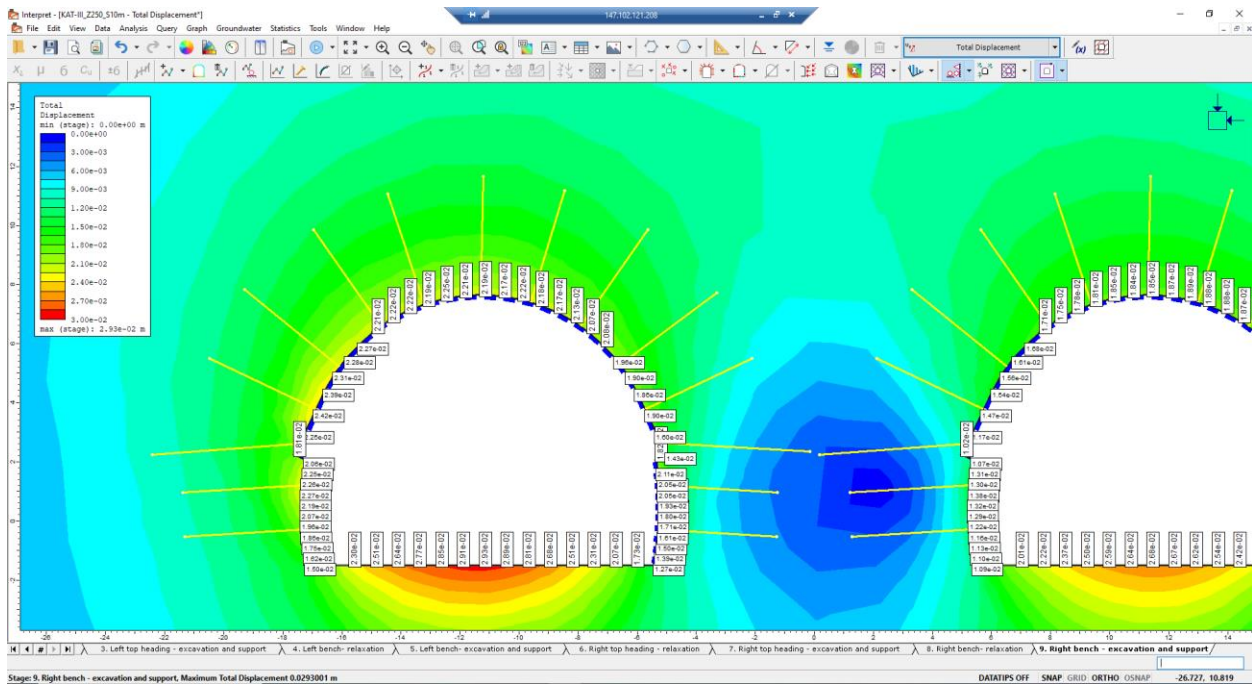
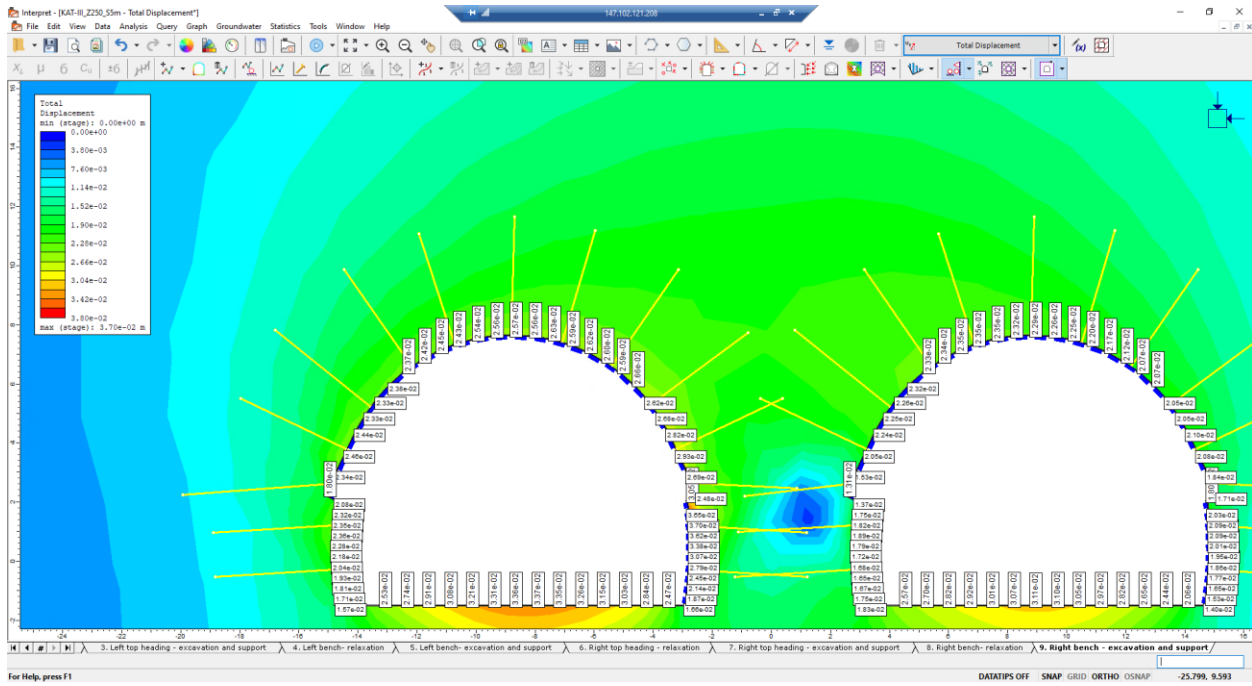
Εικόνα 20 μετατόπιση στην παρειά σε συνάρτηση με την απόσταση (9ο στάδιο)

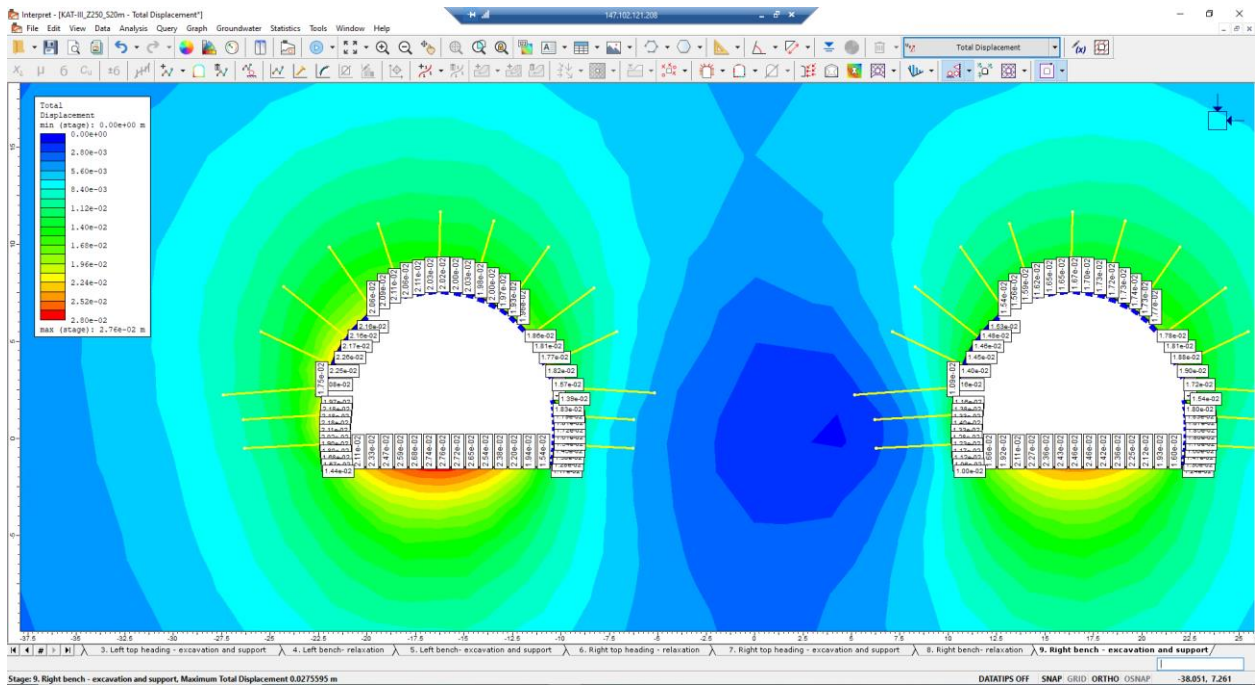
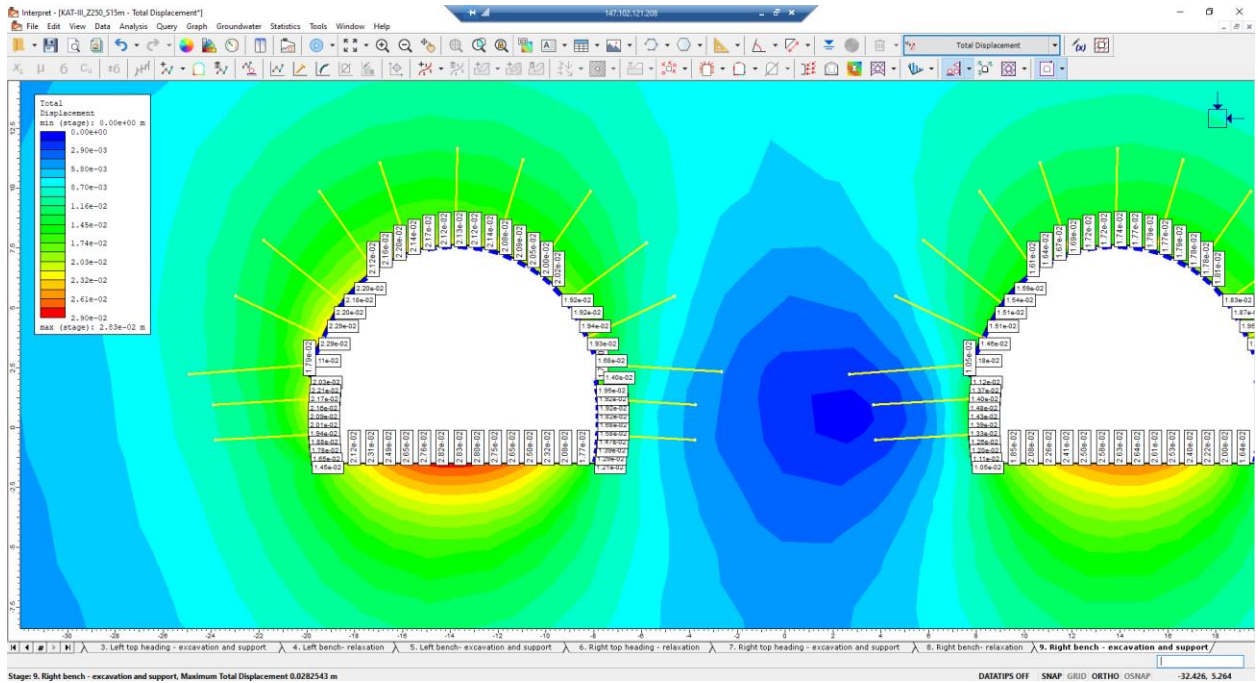
\*Ενδεικτικές εικόνες μοντέλων μετατόπισης για το 5<sup>ο</sup> στάδιο σε απόσταση 5, 10, 15 και 20 μέτρων αντίστοιχα

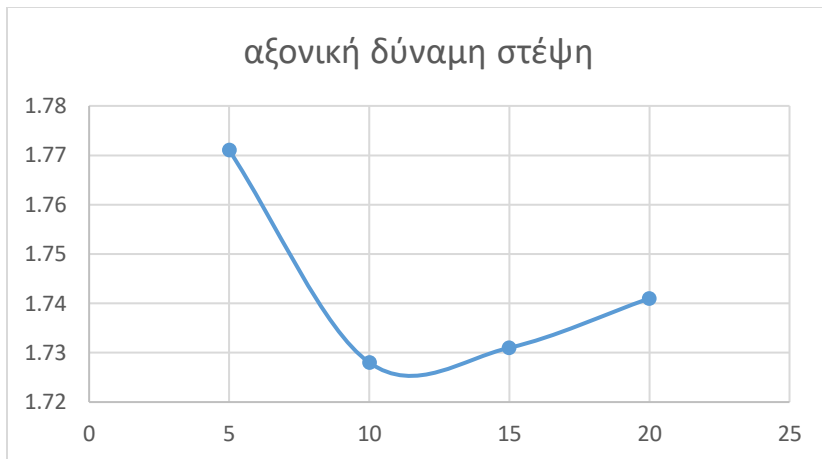




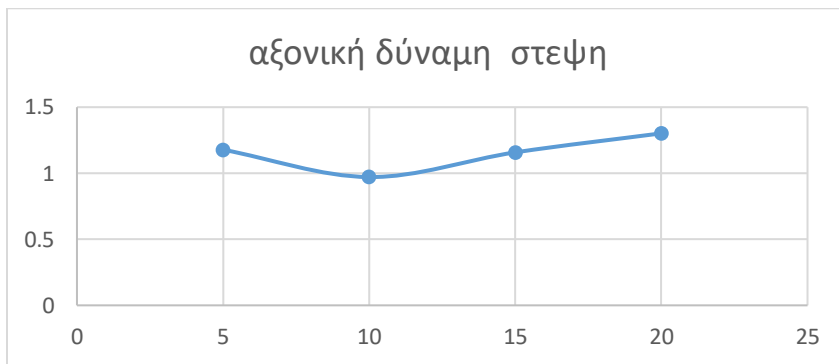
\*Ενδεικτικές εικόνες μοντέλων μετατόπισης για το 9<sup>ο</sup> στάδιο σε απόσταση 5,10,15 και 20 μέτρων αντίστοιχα.



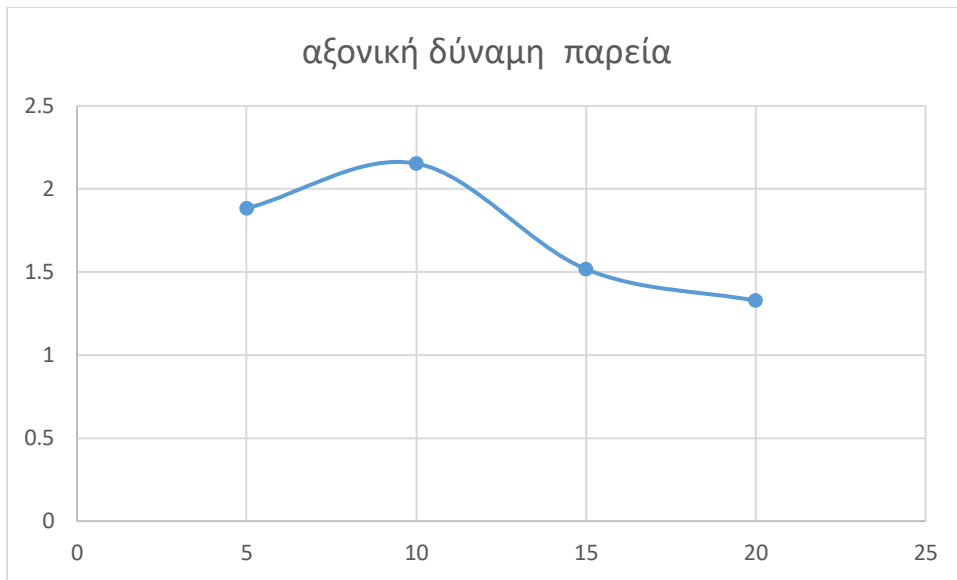




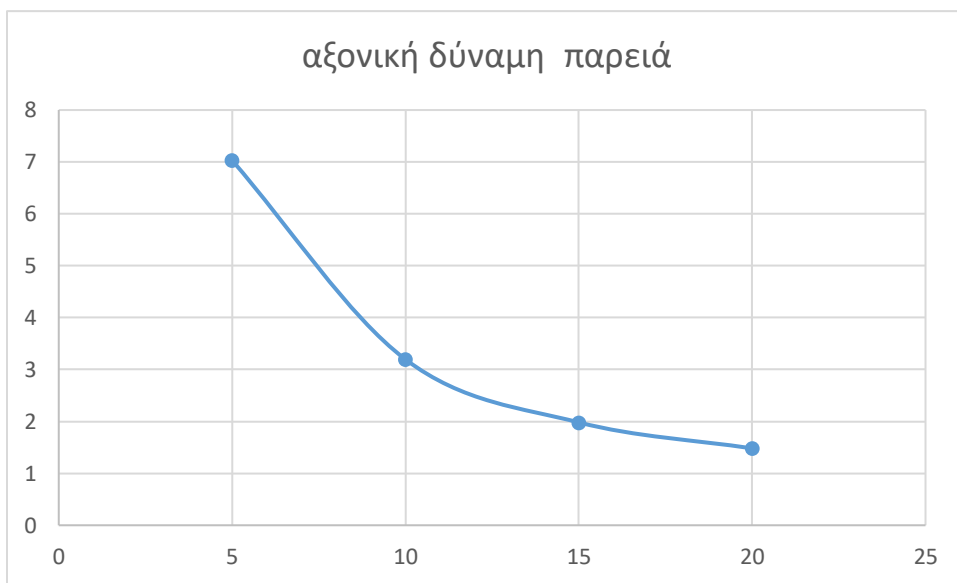
Εικόνα 21 αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα στην στέψη σε συνάρτηση της απόστασης στο 5ο στάδιο



Εικόνα 22 αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα στην στέψη σε συνάρτηση της απόστασης στο 9ο στάδιο



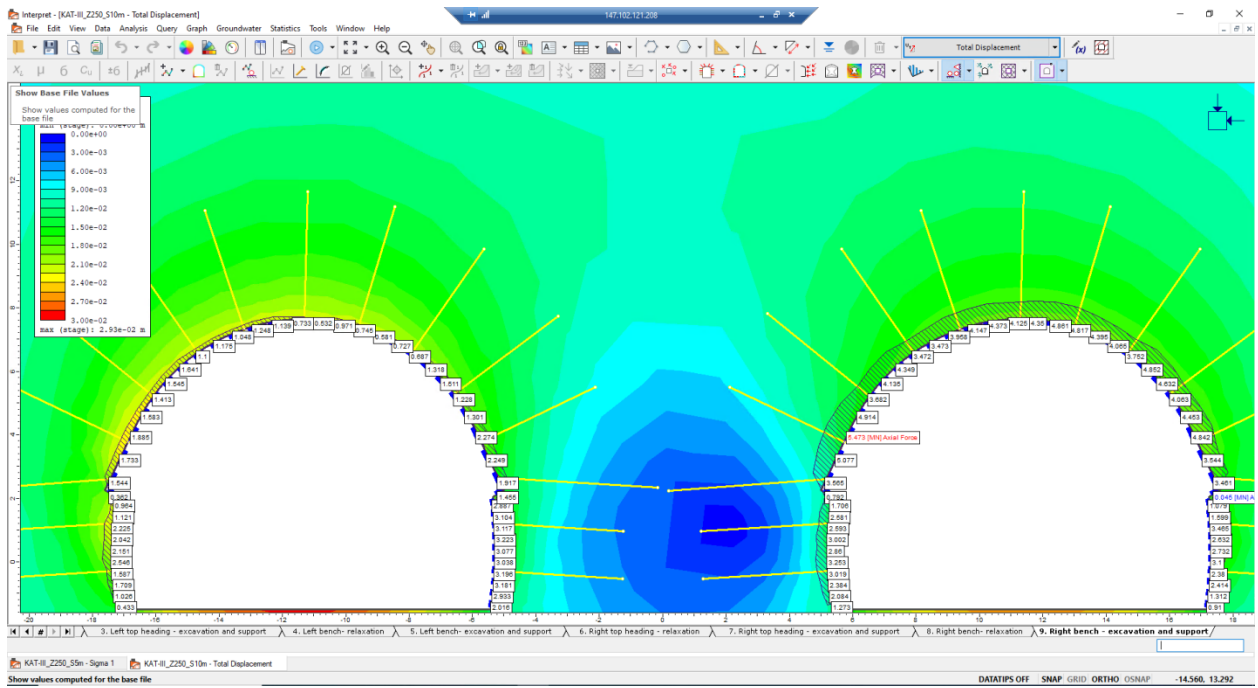
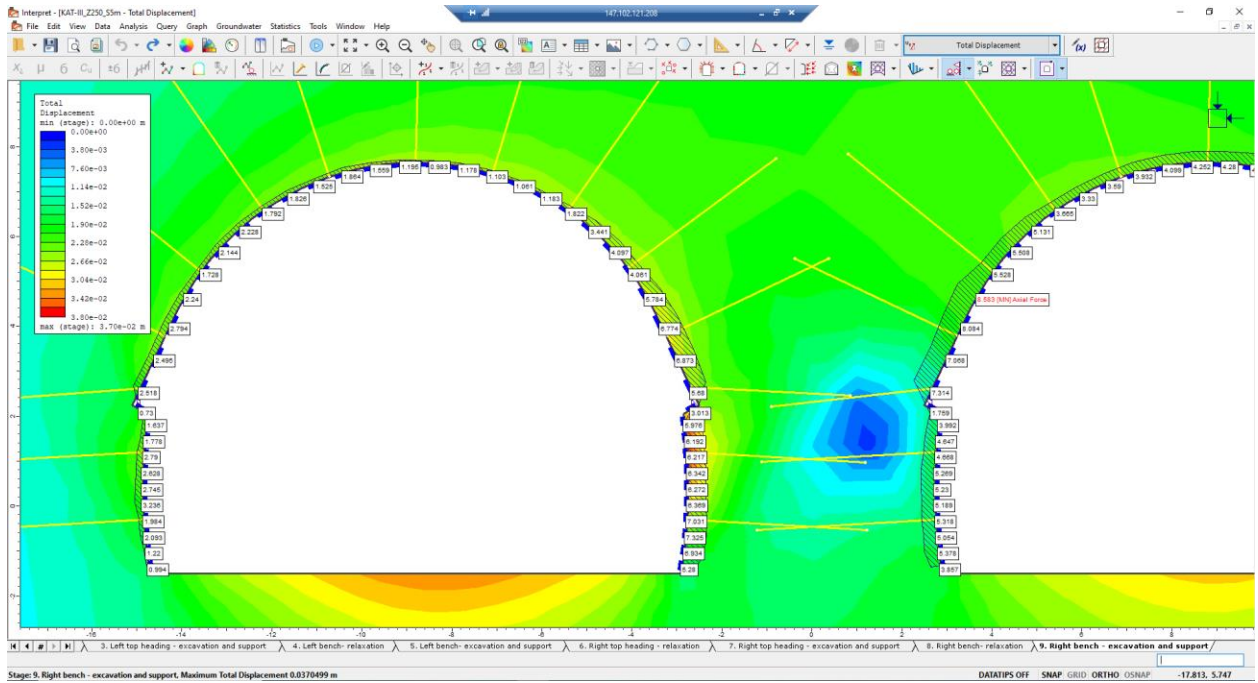
Εικόνα 23 αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα στην παρεία σε συνάρτηση της απόστασης στο 5ο στάδιο

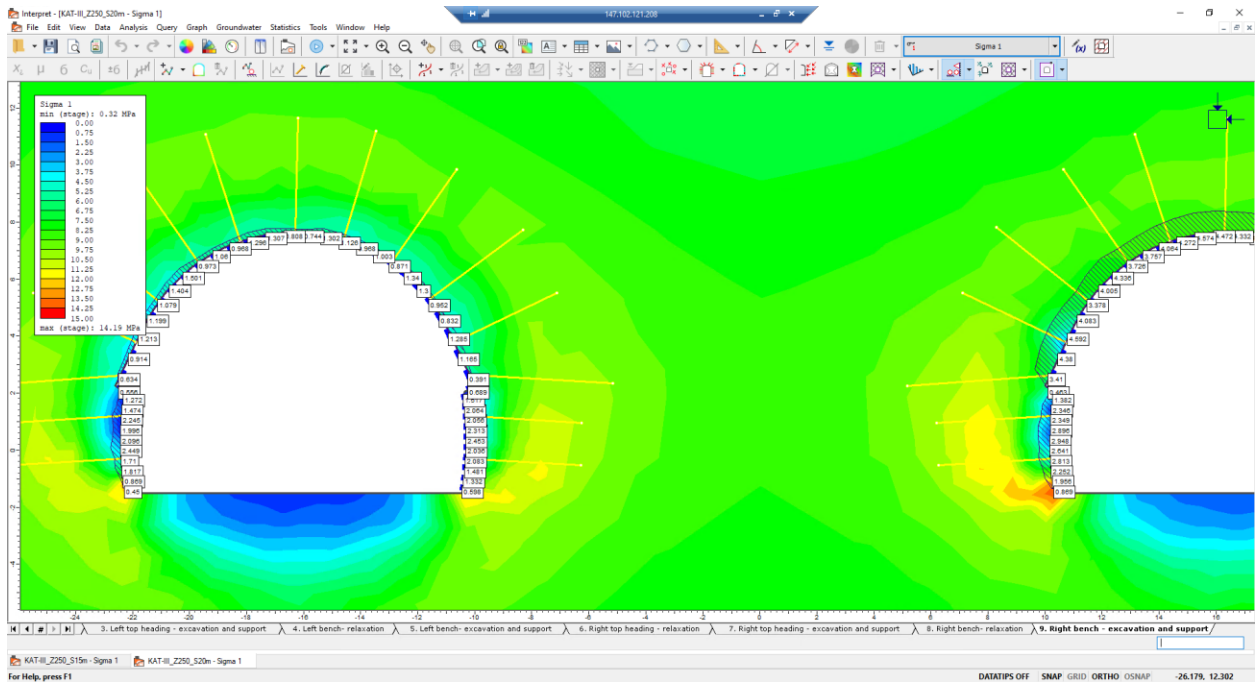
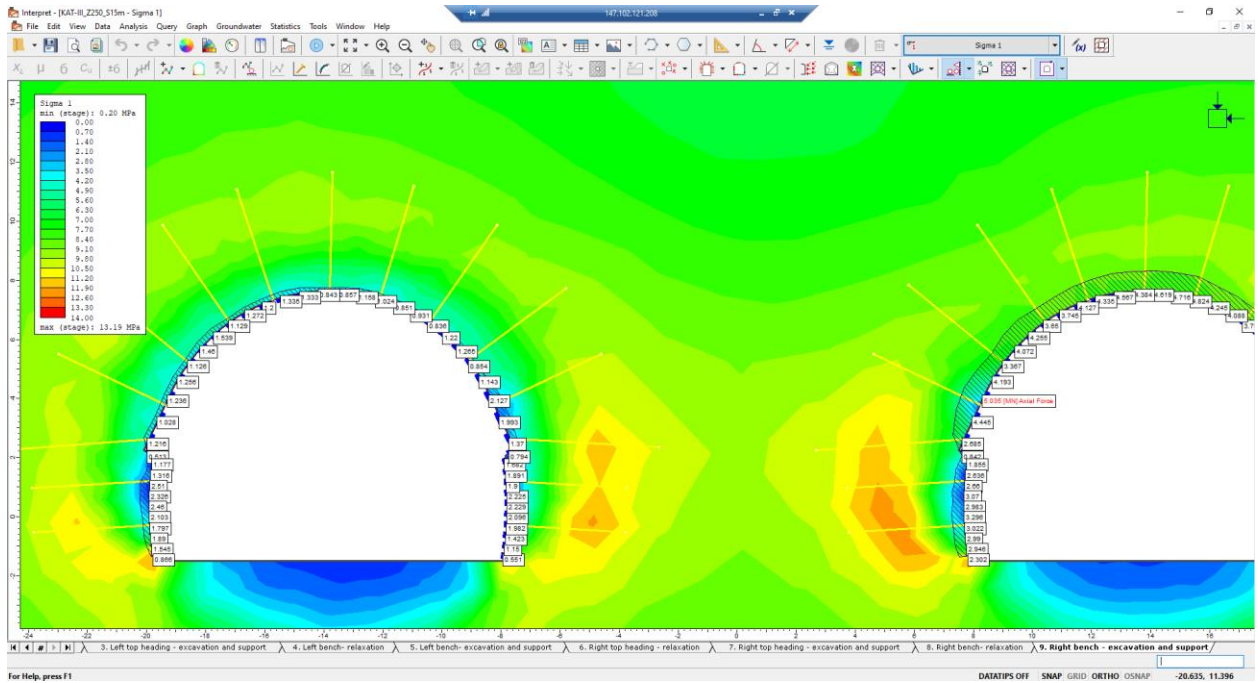


Εικόνα 24 αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα στην παρεία σε συνάρτηση της απόστασης στο 9ο στάδιο

\* Ενδεικτικές εικόνες μοντέλων αξονικής δύναμης στο σκυρόδεμα για το 9<sup>ο</sup> στάδιο σε απόσταση 5,10,15 και 20 μέτρων αντίστοιχα.

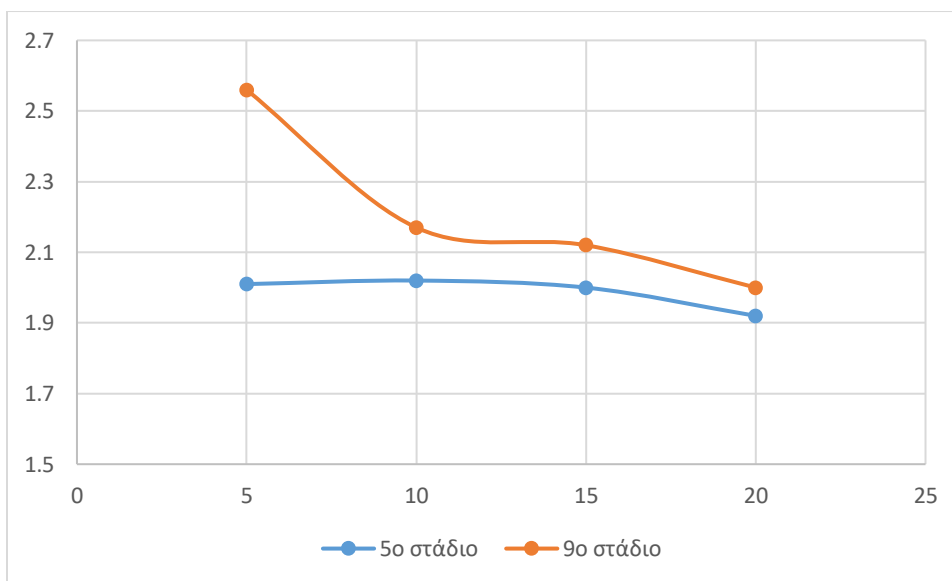






## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σήραγγες αποτελούν τεχνικά έργα με υψηλό βαθμό απαιτήσεων ασφαλείας και λειτουργικότητας, τα οποία αποτελούν επιτακτική ανάγκη για περαιτέρω μελέτη και κατανόηση των κατασκευαστικών θεμάτων που προκύπτουν κατά την διάνοιξη τους. Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την αλληλεπίδραση των δύο γειτονικών κλάδων με στόχο να συμβάλει στην κατανόηση του φαινομένου αυτού. Η προσομοίωση του προβλήματος επιτυγχάθηκε με το πρόγραμμα της Rocscience , RS2. Μέσω της διπλωματικής εργασίας και τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν σε αυτή γίνεται αντιληπτό πως η αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο κλάδων μειώνει εκθετικά την αλληλεπίδρασή τους. Στις εικόνες 17 και 19 παρατηρούμε πως οι καμπύλες των φορτίων που δέχεται το σκυρόδεμα στη στέψη αυξάνεται ελάχιστα με την απόσταση αλλά μειώνεται με μεγάλο ρυθμό στην παρειά. Όπως φαίνεται στην εικόνα 14 του διαγράμματος ο ρυθμός αύξησης της μετατόπισης στη στέψη του αριστερού κλάδου μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων .



Εικόνα 25 διάγραμμα μετατόπισης στην στέψη στο 5ο και στο 9ο στάδιο των μοντέλων που κατασκευάστηκαν

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό πως η μετατόπιση στην στέψη έχει πιο απότομη μείωση στην παρουσία και των δύο κλάδων συγκριτικά με την ύπαρξη μόνο του αριστερού σε συνάρτηση με την απόσταση.

- Γενικά για μικρή απόσταση μεταξύ τους , η αλληλεπίδραση των δύο κλάδων είναι αρκετά έντονη ενώ με την αύξηση του πλάτους του στύλου μεταξύ των κλάδων , η καμπύλη του 9<sup>ου</sup> σταδίου παίρνει πιο χαμηλές τιμές, γεγονός που υποστηρίζει τη μείωση του βαθμού αλληλεπίδρασης . Για μεγάλες αποστάσεις ( 20 και άνω μέτρα ) οι δύο σήραγγες μπορούν να σχεδιαστούν ως δύο ανεξάρτητες κατασκευές
- Με την αύξηση της ποιότητας της βραχομάζας εμφανίζονται μικρότερα μεγέθη στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης
- Η αλληλεπίδραση δύο σηράγγων που διανοίγονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους σε καλής ποιότητας βραχομάζας είναι παρόμοια με την αλληλεπίδραση δύο σηράγγων σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους αλλά σε πτωχότερη ποιότητας βραχομάζας.

Επιπλέον πρέπει να τονιστεί ότι τα συγκεκριμένα συμπεράσματα προκύπτουν μόνο για τα εξεταζόμενα μεγέθη και αντιστοιχούν αποκλειστικά στις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2021. [online] Available at: <[https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3993/1/11\\_chapter10.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3993/1/11_chapter10.pdf)> [Accessed 24 October 2021].

Gerçek, H., 2021. [online] Maden.org.tr. Available at: <[https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/0cbf1a1aa172678\\_ek.pdf](https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/0cbf1a1aa172678_ek.pdf)> [Accessed 24 October 2021].

Rocscience Inc. 2021. *Rocscience Inc.*. [online] Available at: <<https://www.rocscience.com/>> [Accessed 24 October 2021].

Χριστοδούλου, Β. and Christodoulou, V., 2021. *Κατασκευαστικά θέματα και αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης με ΤΒΜ του τμήματος Σταθμός Αγ.Βαρβάρα - Σταθμός Κορυδαλλός, της επέκτασης της Γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας προς Πειραιά*. [online] Dspace.lib.ntua.gr. Available at: <<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/52689>> [Accessed 24 October 2021].

Χαλασάνης Γ. (2016), «Αριθμητική Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς της Βραχώμαζας σε Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις Θαλάμων και Στύλων», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Κωμοδρόμος Α., Μπουσογλίτης Χ. (2001) "Ανάλυση και Σχεδιασμός Δίδυμης Σήραγγας με Εντονο Βαθμό Αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο Κλάδων", 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, τόμος Ι, σελ. 529-536.

Σοφιανός, Α., 2015. Υποστήριξη υπόγειων έργων. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3457>

Brady BHG and Brown ET (2006). *Rock Mechanics for Underground Mining*, Springer.

Gercek, H. (2005), "Interaction between parallel underground openings", Proceedings of the 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, Izmir, Turkey, June.

Ling (1947), On the Stresses in a Plate Containing Two Circular Holes. *Journal of Applied Physics* 19, 77 (1948); <https://doi.org/10.1063/1.1697875>

ΑΛΕΞΑΝΔΡΗΣ Α., ΒΕΤΤΑΣ Π, ΜΑΚΑΝΤΑΣΗΣ Ι. ,ΜΠΟΥΡΝΑΖΟΣ Ι. (2010). Διάνοιξη της Σήραγγας Κνημίδος της παράκαμψης Αγ. Κων/νου του ΠΑΘΕ. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος

Γκρόζος Χ., Τζινιέρης Α. (2005) "Διάνοιξη σήραγγας Κνημίδας". Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών ΕΜΠ.