



ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΗΡΑΓΓΑ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΗΡΑΓΓΑ

Στέφανος Δ. Αθανασόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής  
Α. Ι. Σοφιανός  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών**

**Δ.Π.Μ.Σ. «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Διερεύνηση της Ιξώδους Συμπεριφοράς της Βραχόμαζας  
Γύρω από Σήραγγα»**

**ΣΤΕΦΑΝΟΣ Δ. ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Α. Ι. Σοφιανός**

**Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 11 Οκτωβρίου 2010**

**Αλέξανδρος Σοφιανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π. ....**

**Πάυλος Νομικός, Λέκτορας Ε.Μ.Π. ....**

**Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π. ....**

**ΑΘΗΝΑ 2010**

---





# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διάνοιξη ενός υπογείου ανοίγματος διαταράσσει την ισορροπία της βραχώμαζας και ως εκ τούτου το φυσικό εντατικό της πεδίο, οδηγώντας την έτσι σύμφωνα με τους νόμους της μηχανικής των πετρωμάτων, στην αναζήτηση μίας νέας κατάστασης ισορροπίας. Η διατάραξη αυτή και η αναζήτηση στη συνέχεια νέας φυσικής εντατικής κατάστασης, ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα ευστάθειας σε ένα υπόγειο έργο.

Ένα από τα πιθανά προβλήματα ευστάθειας που δύναται να προκληθούν, είναι η ενεργοποίηση του φαινομένου της σύνθλιψης των πετρωμάτων. Δηλαδή, κυρίως λόγω ύπαρξης υψηλών ή ανισοτροπικών (διατροπικών) τάσεων και πτωχής ποιότητας βραχώμαζα, το πέτρωμα μπορεί να εμφανίσει ιξώδη συμπεριφορά και να αρχίσει να έρπει. Η συμπεριφορά αυτή στη μηχανική των πετρωμάτων είναι γνωστή ως «ερπυσμός».

Στα πλαίσια της Εργασίας αυτής, εξετάζεται η ιξώδης, ή αλλιώς ερπυστική, συμπεριφορά που ενδεχομένως παρουσιάζει η βραχώμαζα γύρω από ένα υπόγειο άνοιγμα. Η διερεύνηση που πραγματοποιείται είναι αφενός θεωρητικής φύσης και έγκειται στη βιβλιογραφική έρευνα και αφετέρου, υπολογιστικής και πραγματοποιείται μέσω αριθμητικών αναλύσεων σε κατάλληλο λογισμικό προσομοίωσης γεωτεχνικών προβλημάτων.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο «Τεχνολογία Διάνοιξης Σηράγγων» της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων». Με αφορμή την ολοκλήρωσή της, εκφράζονται κατ' αρχήν ειλικρινείς ευχαριστίες στον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Αλέξανδρο Σοφιανό για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, καθώς και για τις ουσιαστικές συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Λέκτορα Ε.Μ.Π. κ. Παύλο Νομικό τόσο για τη συνεχή και υπομονετική καθοδήγησή του, όσο και για τη σημαντική επιστημονική του συμβολή στα ειδικότερα θέματα της Εργασίας μου.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το συνάδελφο Μηχανικό Μεταλλείων – Μεταλλουργό κ. Βαγγέλη Φραγκόπουλο, μηχανικό της σήραγγας «Μαύρα Λιθάρια» της Ολυμπίας Οδού, για τη σημαντική βοήθεια και τις πολύτιμες πληροφορίες που μου προσέφερε.

Ευχαριστίες οφείλονται και σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Τ.Δ.Σ. για τη δημιουργία ενός ευχάριστου και δημιουργικού κλίματος συνεργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και όλους τους κοντινούς μου φίλους που είτε με βοήθησαν επιστημονικά, είτε μου συμπαραστάθηκαν και με ενθάρρυναν να συνεχίσω.

Στέφανος Δ. Αθανασόπουλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται το θέμα της ιξώδους συμπεριφοράς που ενδεχομένως παρουσιάζει η περιβάλλουσα βραχώμαζα μίας σήραγγας. Σημειώνεται ότι ιξώδη, δηλαδή χρονικά εξαρτώμενη, συμπεριφορά είναι δυνατό να παρουσιάσουν όλα τα πετρώματα. Το ζήτημα όμως είναι το εάν και σε τι βαθμό θα ενεργοποιηθεί η δυνατότητα αυτή των πετρωμάτων να εμφανίσουν ιξώδη συμπεριφορά σε μία συνήθη κατασκευή όπως είναι μία σήραγγα. Σκοπός της Εργασίας αυτής είναι η κατά το δυνατό πληρέστερη προσέγγιση του παραπάνω αντικειμένου, καθώς και ο εντοπισμός και η αποσαφήνιση όλων των στοιχείων που σχετίζονται με αυτό.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας Εργασίας, το οποίο ουσιαστικά αποτελεί και την εισαγωγή στο θέμα που πραγματεύεται, γίνεται μία εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της σύνθλιψης των πετρωμάτων και στο συσχετισμό αυτού με το συγγενές φαινόμενο του ερπυσμού. Στη μηχανική των πετρωμάτων άλλωστε, η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι γνωστή και ως ερπυσμός. Επομένως, μέσω της εκτενούς αυτής αναφοράς στα δύο προαναφερθέντα φαινόμενα, αποσαφηνίζονται θεμελιώδεις έννοιες και δημιουργείται έτσι η θεωρητική βάση της Διπλωματικής αυτής Εργασίας. Παράλληλα, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται και μία αναλυτική περιγραφή του σκοπού της παρούσας Εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 παρατίθενται και επεξηγούνται ορισμένα απλουστευμένα μοντέλα ροϊκής συμπεριφοράς, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αρχική προσέγγιση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού, τόσο των ιξωδοελαστικών, όσο και των ιξωδοπλαστικών πετρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους μέσω κατάλληλου συνδυασμού μηχανικών στοιχείων, ενώ αναλύονται συνοπτικά και οι

καταστατικές εξισώσεις που τα διέπουν. Ένα από τα απλουστευμένα μοντέλα ροϊκής συμπεριφοράς που περιγράφονται είναι το μοντέλο Burgers. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναλύονται ορισμένες κλειστές λύσεις που έχουν αναπτυχθεί για το απλουστευμένο αυτό μοντέλο, ενώ παράλληλα επεξηγούνται και οι παράμετροι ερπυσμού που ουσιαστικά περιγράφουν τη χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών πετρωμάτων, και κατ' επέκταση των ιξωδοπλαστικών. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Εργασίας αυτής, η οποία είχε ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων ερπυσμού στην εκδήλωση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού. Για την παραμετρική αυτή ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν οι κλειστού τύπου επιλύσεις που αναφέρονται παραπάνω, ενώ πραγματοποιήθηκε και μία εκτεταμένη έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία για την αναζήτηση παραμέτρων ερπυσμού διαφόρων πετρωμάτων, τα αποτελέσματα της οποίας επίσης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

Η εκτενέστερη προσέγγιση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού γύρω από σήραγγες, πραγματοποιήθηκε μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Για τη διεξαγωγή των αναλύσεων αυτών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Flac 3D (Itasca, 2006). Το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διαχωρίστηκε σε τρεις επιμέρους φάσεις προσομοιώσεων. Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μία συνοπτική περιγραφή του Flac 3D ως προς τον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζεται γεωτεχνικά προβλήματα, ενώ αναλύεται και η πρώτη φάση των προσομοιώσεων. Στόχοι της φάσης αυτής ήταν αφενός η εκμάθηση του τριδιάστατου κώδικα Flac 3D και αφετέρου, η εξέταση του συνόλου των παραμέτρων που επηρεάζουν τις αριθμητικές αναλύσεις. Η εξέταση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω συγκρίσεων με τις κλειστές λύσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στο τρίτο κεφάλαιο και στο Παράρτημα Α.

Κατά τη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων, η οποία αναλύεται στο Κεφάλαιο 4, πραγματοποιήθηκε μία σειρά παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων με σκοπό τη λεπτομερέστερη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων ερπυσμού στο φαινόμενο της σύνθλιψης. Για τις παραμετρικές αυτές αναλύσεις κατασκευάστηκε μία σειρά

αξισυμμετρικών αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης, τα οποία βασίστηκαν ουσιαστικά στα μοντέλα της πρώτης φάσης προσομοιώσεων. Από τις παραμετρικές αυτές αναλύσεις προέκυψε ένας πολύ μεγάλος όγκος αποτελεσμάτων και σχολίων επ' αυτών. Τα σχόλια και ορισμένα από τα αποτελέσματα αυτά παρατίθενται στο τέταρτο κεφάλαιο, ενώ το σύνολο των υπόλοιπων αποτελεσμάτων επισυνάπτεται στο Παράρτημα Β της Εργασίας.

Η τρίτη και τελική φάση των προσομοιώσεων είχε ως στόχο τη διεξαγωγή προσομοιώσεων για ένα πραγματικό έργο (μελέτη περίπτωσης – case study). Το έργο αυτό είναι η σήραγγα «Μαύρα Λιθάρια» του νέου αυτοκινητοδρόμου «Ολυμπία Οδός», η οποία βρίσκεται υπό κατασκευή. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στοιχεία της σήραγγας αυτής, έτσι όπως αντλήθηκαν από τη μελέτη του έργου (ΟΤΜ, 2009). Αναλύονται ακόμη τα τριδιάστατα μοντέλα που κατασκευάστηκαν για την προσομοίωση της σήραγγας, και τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, και σχολιάζονται ως προς τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν με επιτόπου μετρήσεις του έργου. Σημειώνεται ότι λόγω του όγκου των αποτελεσμάτων και αυτής της φάσης των προσομοιώσεων, ορισμένα από αυτά τα αποτελέσματα επισυνάπτονται στο Παράρτημα Γ της Εργασίας.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας συνοψίζεται το σύνολο των συμπερασμάτων που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Σχολιάζονται τόσο οι διαπιστώσεις από τη βιβλιογραφική και θεωρητική έρευνα που περιλαμβάνει η Εργασία αυτή, όσο και από το σύνολο των τριών φάσεων των αριθμητικών προσομοιώσεων. Τέλος, διατυπώνονται συγκεκριμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με το φαινόμενο του ερπυσμού των πετρωμάτων κατά τη διάνοιξη σηράγγων.



# ABSTRACT

The object of this Thesis is the viscous behaviour that might be presented in the surrounding rock mass of a tunnel. It is noted that viscous, meaning time dependent behaviour, can be presented in all kinds of rocks. However, as far as a tunnel is concerned, the question is if, and to what extent viscous behaviour could be exhibited in rocks of such a common construction. The aim of the Thesis is to provide a complete answer to this question, as well as trace and clarify all the relevant features.

Chapter 1 of the Thesis is an introduction to the object of research through an extensive reference to the squeezing phenomenon and its association with the related one of creep. In rock mechanics, the time dependent behaviour of the rock mass is also known as creep. Therefore, the extensive reference to those two phenomena helps clarify basic concepts, and in that way provide a theoretical basis for the Thesis. In the same chapter, it is also provided a detailed description of the aims set in this Project.

In Chapter 2, certain simplified models of rheological behaviour are presented and analysed. These were used as an initial approach of the squeezing phenomenon caused by creep, in viscoelastic as well as viscoplastic rocks. More specifically, what is analysed is firstly, the way the models function through a suitable combination of mechanic elements, and secondly and more briefly, the constitutional equations that they are ruled by. One of the simplified rheological models which are described is that of Burgers'. A number of closed form solutions developed for this simplified model, are analysed. At the same time, it is explained how the creep parameters describe the time dependent behaviour of the viscoelastic, and by extension, the viscoplastic rocks. Finally, the results of the parametrical analysis realized for this Project, are presented. The aim of this analysis was a research on

the effect creep parameters have when squeezing caused by creep takes place. The closed form solutions already mentioned were used for this parametrical analysis. It should be noted that an extensive research through the international bibliography in order to trace parameters of creep in different rocks, has provided an important amount of information, which is included in this chapter, too.

Numerical analyses helped proceed to a more thorough work on the squeezing phenomenon caused by creep around tunnels. In order to perform the above mentioned analyses, Flac 3D (Itasca, 2006) software simulation was used. The numerical analyses performed in the context of the whole Thesis were divided into three separated phases of simulation. Chapter 3 includes a brief description of Flac 3D, focusing on the way it deals with geotechnical issues, and an analysis of the simulations of the first phase. The aims set in this phase were on the one hand, learning the three-dimensional code Flac 3D and on the other, testing the number of parameters that affect the numerical analyses. This testing was performed by comparing those analyses to the closed form solutions discussed in the previous chapter. The results from these comparisons are presented in Chapter 3 and Appendix A.

Chapter 4 includes a series of parametrical numerical analyses, which were performed during the second phase of simulations in order to research in more details the effect creep parameters have on the squeezing phenomenon. A number of axisymmetric numerical simulation models were designed, based on the models of the first phase of simulation. The outcome of those analyses was a great number of results followed by comments. All of the comments and several results are presented in Chapter 4, while the rest of the results are attached to Appendix B.

The aim of the third, which is the final phase of simulations, was performing a number of them at an actual construction; in other words, working on a case study. The construction used is the tunnel “Mayra Litharia”, which is part of the new motorway “Olympia Odos”, and is still being excavated. Research on this construction (OTM, 2009) has provided information about the specific tunnel, which is included in Chapter 5. Three-dimensional models constructed for the simulation of the tunnel are analysed in the same chapter. Finally, the



results that arose are presented and discussed in connection to the comparisons to the measurements made at the construction. It should be pointed that since there was a great number of results taken in this phase of simulation, too, some of them are attached to Appendix C.

The last chapter of the Thesis includes a summary of the conclusions. More specifically, there is a discussion of the conclusions drawn on the basis of both the bibliographical and theoretical research done for this Project, and the three phases of the numerical simulations. Last but not least, specific proposals are made for further research on the phenomenon of creep in rocks during the excavation of tunnels.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |          |
|---|----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....  | i        |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....  | iii      |
| ABSTRACT .....  | vii      |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....   | xi       |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....  | xvii     |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ .....   | xlix     |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....   | lv       |
| <br>  |          |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή: Το Φαινόμενο της Σύθλιψης των Πετρωμάτων .....</b> | <b>1</b> |
| 1.1 Εισαγωγή .....  | 1        |
| 1.2 Ορισμοί της Σύθλιψης .....  | 2        |
| 1.2.1 Ορισμός κατά Terzaghi .....   | 2        |
| 1.2.2 Ορισμός κατά Gioda .....  | 3        |
| 1.2.3 Ορισμός κατά O'Rourke .....   | 3        |
| 1.2.4 Ορισμός κατά Jethwa .....   | 4        |
| 1.2.5 Ορισμός κατά Kovari .....   | 5        |
| 1.2.6 Ορισμός κατά Einstein .....   | 6        |
| 1.2.7 Ορισμός κατά Aydan et al. ....  | 7        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 1.2.8   | Ορισμός κατά Barla .....   | 8         |
| 1.3   | Το Φαινόμενο της Σύνθλιψης στη Μηχανική των Πετρωμάτων.....                          | 10        |
| 1.3.1   | Ακαριαία Σύνθλιψη .....  | 11        |
| 1.3.2   | Σύνθλιψη λόγω Ερπυσμού .....   | 12        |
| 1.4   | Παράγοντες που Επηρεάζουν το Φαινόμενο της Σύνθλιψης .....                           | 14        |
| 1.5   | Παραδείγματα Σηράγγων υπό Καθεστώς Σύνθλιψης .....                                   | 16        |
| 1.5.1   | Σιδηροδρομική Σήραγγα Καλλίδρομου (Ελλάδα).....                                      | 17        |
| 1.5.2   | Οδική Σήραγγα Τυμφρηστού (Ελλάδα).....   | 20        |
| 1.5.3   | Υδροηλεκτρικό Έργο Khimti (Nepal) .....  | 22        |
| 1.5.4   | Σιδηροδρομική Σήραγγα Furka (Switzerland).....                                       | 24        |
| 1.6   | Αντικείμενο της Παρούσας Εργασίας.....   | 26        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Απλουστευμένα Μοντέλα Ροϊκής Συμπεριφοράς.....</b> |  | <b>29</b> |
| 2.1   | Εισαγωγή.....  | 29        |
| 2.2   | Ελαστικό και Ιξώδες Στοιχείο.....  | 30        |
| 2.2.1   | Ελαστικό Στοιχείο .....  | 31        |
| 2.2.2   | Ιξώδες Στοιχείο .....  | 32        |
| 2.3   | Μοντέλο Maxwell .....  | 33        |
| 2.4   | Μοντέλο Kelvin .....   | 34        |
| 2.5   | Μοντέλο Burgers.....   | 36        |
| 2.5.1   | Συμπεριφορά του Μοντέλου Burgers σε Μονοαξονική Θλίψη .....                          | 38        |
| 2.6   | Μοντέλο CVISC.....   | 40        |
| 2.7   | Κλειστού Τύπου Επιλύσεις για Κυκλική Σήραγγα σε Ιξωδοελαστική Βραχόμαζα Burgers..... | 44        |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.8   | Οι Παράμετροι Ερπυσμού nK, nM και GK .....                  | 50 |
| 2.8.1 | Αναζήτηση Παραμέτρων Ερπυσμού στη Διεθνή Βιβλιογραφία ..... | 51 |
| 2.8.2 | Επίδραση Παραμέτρων Ερπυσμού .....                          | 57 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Το Λογισμικό Προσομοίωσης Flac 3D – Πρώτη Φάση**

|                            |   |    |
|----------------------------|---|----|
| <b>Προσομοιώσεων .....</b> | <b>63</b>   |    |
| 3.1                        | Εισαγωγή .....  | 63 |
| 3.2                        | Λογισμικό Προσομοίωσης Flac 3D .....                      | 64 |
| 3.3                        | Μοντέλα Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων .....                  | 69 |
| 3.3.1                      | Κατασκευή Μοντέλων Επίπεδης Παραμόρφωσης .....            | 70 |
| 3.3.2                      | Βαθμονόμηση Μοντέλων Επίπεδης Παραμόρφωσης .....          | 74 |
| 3.4                        | Αποτελέσματα Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων .....             | 84 |
| 3.5                        | Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων ..... | 97 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Δεύτερη Φάση Προσομοιώσεων – Παραμετρικές Αναλύσεις .....**

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1   | Εισαγωγή .....  | 99  |
| 4.2   | Μοντέλα Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων .....                  | 100 |
| 4.2.1 | Κατασκευή Αξισυμμετρικών Μοντέλων .....                     | 101 |
| 4.2.2 | Βαθμονόμηση Αξισυμμετρικών Μοντέλων .....                   | 106 |
| 4.3   | Αποτελέσματα Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων .....             | 116 |
| 4.4   | Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων ..... | 152 |
| 4.4.1 | Ιξωδοελαστικά Μοντέλα .....                                 | 152 |
| 4.4.2 | Ιξωδοπλαστικά Μοντέλα .....                                 | 159 |
| 4.4.3 | Ιξωδοελαστικά Μοντέλα με Υποστήριξη .....                   | 167 |

|                        |  |            |
|------------------------|--|------------|
| 4.4.4                  | Ιξωδοπλαστικά Μοντέλα με Υποστήριξη .....  | 173        |
| <br>                   |  |            |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.</b>     | <b>Τρίτη Φάση Προσομοιώσεων – Μελέτη Περίπτωσης .....</b>                        | <b>179</b> |
| 5.1                    | Εισαγωγή.....  | 179        |
| 5.2                    | Μελέτη Περίπτωσης: Σήραγγα Μαύρων Λιθαριών – Σύντομη Περιγραφή του Έργου .....   | 181        |
| 5.3                    | Γεωλογικά Στοιχεία Σήραγγας Μαύρων Λιθαριών.....                                 | 182        |
| 5.3.1                  | Λιθοστρωματογραφία.....  | 184        |
| 5.3.2                  | Τεκτονική.....   | 187        |
| 5.3.3                  | Υδρογεωλογία .....   | 187        |
| 5.4                    | Γεωτεχνικά Στοιχεία Σήραγγας Μαύρων Λιθαριών.....                                | 188        |
| 5.5                    | Προσωρινή Υποστήριξη και Κατασκευαστική Διαδικασία Σήραγγας Μαύρων Λιθαριών..... | 194        |
| 5.5.1                  | Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης .....   | 196        |
| 5.5.2                  | Κατασκευαστική Διαδικασία.....   | 199        |
| 5.6                    | Μοντέλα Τρίτης Φάσης Προσομοιώσεων .....   | 203        |
| 5.6.1                  | Κατασκευή Μοντέλων Μελέτης Περίπτωσης.....                                       | 204        |
| 5.6.2                  | Βαθμονόμηση Μοντέλων Μελέτης Περίπτωσης.....                                     | 207        |
| 5.7                    | Αποτελέσματα Τρίτης Φάσης Προσομοιώσεων.....                                     | 214        |
| 5.8                    | Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Τρίτης Φάσης Προσομοιώσεων .....                        | 234        |
| <br>                   |  |            |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.</b>     | <b>Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας .....</b>                                  | <b>239</b> |
| <br>                   |  |            |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..</b> | <b>.....</b>   | <b>247</b> |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....</b> | <b>253</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b> | <b>263</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....</b> | <b>315</b> |





# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|   |    |
|---|----|
| <b>Σχήμα 1.1:</b> Σκαρίφημα κατανομής των κατακόρυφων κυρίων τάσεων (Α) πριν την εκσκαφή, (Β) μετά την εκσκαφή και (Γ) κατά την ακαριαία σύνθλιψη του πετρώματος (Srestha, 2005).....                   | 11 |
| <b>Σχήμα 1.2:</b> Ο ερπυσμός σε σχέση με την πλήρη καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων (Goodman, 1989).....  | 12 |
| <b>Σχήμα 1.3:</b> (Α) Τυπική καμπύλη ερπυσμού του πετρώματος και (Β) διαφοροποίηση της μορφής της καμπύλης ερπυσμού με την εφαρμοζόμενη τάση (Σοφιανός & Νομικός, 2008). ....                           | 14 |
| <b>Σχήμα 1.4:</b> Γεωλογικό σκαρίφημα της ευρύτερης περιοχής του υδροηλεκτρικού έργου Khimti (Galay, 1991). ....  | 22 |
| <b>Σχήμα 1.5:</b> Τμήμα γεωλογικού χάρτη της περιοχής της σήραγγας Furka και μηκοτομή της (Keller & Schneider, 1982).....   | 25 |
| <b>Σχήμα 2.1:</b> Το ελαστικό στοιχείο και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου. ....  | 31 |
| <b>Σχήμα 2.2:</b> Το ιξώδες στοιχείο και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου.....   | 32 |
| <b>Σχήμα 2.3:</b> Το μοντέλο Maxwell και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου. ....  | 33 |
| <b>Σχήμα 2.4:</b> Το μοντέλο Kelvin και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου. ....   | 35 |
| <b>Σχήμα 2.5:</b> Το μοντέλο Burgers και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου. ....  | 37 |
| <b>Σχήμα 2.6:</b> Καμπύλη ερπυσμού πετρώματος υπό μονοαξονική θλίψη, το οποίο συμπεριφέρεται σύμφωνα με το μοντέλο Burgers για αποκλίνουσα τάση και ελαστικά για υδροστατική θλίψη (Goodman, 1989)..... | 39 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Σχήμα 2.7:</b> Το μοντέλο CVISC. (Α) Η ογκομετρική συμπεριφορά του μοντέλου και (Β) η συμπεριφορά του σε αποκλίνουσα φόρτιση (Bonini et al. 2007).....                                   | 41 |
| <b>Σχήμα 2.8:</b> Σκαρίφημα σήραγγας η οποία βρίσκεται σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης (Goodman, 1989).....  | 47 |
| <b>Σχήμα 2.9:</b> Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από επιτόπου μετρήσεις για ασβεστόλιθο (Chin & Rogers, 1987).....          | 54 |
| <b>Σχήμα 2.10:</b> Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από επιτόπου μετρήσεις για τόφο (Chin & Rogers, 1987).....                | 55 |
| <b>Σχήμα 2.11:</b> Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από επιτόπου μετρήσεις για αργιλικό σχιστόλιθο (Chin & Rogers, 1987)..... | 55 |
| <b>Σχήμα 2.12:</b> Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές για χαλαζίτη (Malan et al., 1997).....          | 56 |
| <b>Σχήμα 2.13:</b> Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές για λάβα (Malan et al., 1997).....              | 56 |
| <b>Σχήμα 2.14:</b> Επίδραση της παραμέτρου $G_K$ στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.....   | 58 |
| <b>Σχήμα 2.15:</b> Επίδραση της παραμέτρου $n_K$ στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.....   | 59 |
| <b>Σχήμα 2.16:</b> Επίδραση της παραμέτρου $n_M$ (υψηλές τιμές) στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.....  | 59 |
| <b>Σχήμα 2.17:</b> Επίδραση της παραμέτρου $n_M$ (χαμηλές τιμές) στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.....   | 60 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Σχήμα 3.1:</b> Τυπικό μοντέλο του προγράμματος Flac 3D (Itasca, 2006). .....  | 66 |
| <b>Σχήμα 3.2:</b> Γραμμικό στοιχείο για την προσομοίωση αγκυρίου, με ένα βαθμό ελευθερίας ανά κόμβο (Itasca, 2006). .....  | 68 |
| <b>Σχήμα 3.3:</b> Επίπεδο στοιχείο για την προσομοίωση κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος, με 18 βαθμούς ελευθερίας (Itasca, 2006). .....   | 69 |
| <b>Σχήμα 3.4:</b> Δύο τυπικές γεωμετρίες καννάβου του Flac 3D. (A) Η radial cylinder και (B) η cylindrical shell (Itasca, 2006). .....   | 71 |
| <b>Σχήμα 3.5:</b> Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8B και 9B με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009) και την 3 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Goodman, 1989)..... | 88 |
| <b>Σχήμα 3.6:</b> Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8C και 9C με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 88 |
| <b>Σχήμα 3.7:</b> Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8D και 9D με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 89 |
| <b>Σχήμα 3.8:</b> Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8E και 9E με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 89 |
| <b>Σχήμα 3.9:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16A με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 90 |
| <b>Σχήμα 3.10:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20A με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....  | 90 |
| <b>Σχήμα 3.11:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16B με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....  | 91 |
| <b>Σχήμα 3.12:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17B με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....  | 91 |
| <b>Σχήμα 3.13:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17C με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....  | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα 3.14:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18C με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....   | 92  |
| <b>Σχήμα 3.15:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18D με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 93  |
| <b>Σχήμα 3.16:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19D με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 93  |
| <b>Σχήμα 3.17:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19E με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 94  |
| <b>Σχήμα 3.18:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20E με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 94  |
| <b>Σχήμα 3.19:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16F με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 95  |
| <b>Σχήμα 3.20:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18F με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 95  |
| <b>Σχήμα 3.21:</b> Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 22C και 22D με την 4 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Goodman, 1989). .....  | 96  |
| <b>Σχήμα 3.22:</b> Καμπύλη ερπυσμού ιξωδοπλαστικού μοντέλου 23A. ....   | 96  |
| <b>Σχήμα 3.23:</b> Καμπύλη ερπυσμού ιξωδοπλαστικού μοντέλου 23B. ....   | 97  |
| <b>Σχήμα 4.1:</b> Απειροστό στοιχείο αξισυμμετρικού μοντέλου. ....  | 100 |
| <b>Σχήμα 4.2:</b> Δύο τυπικές γεωμετρίες καννάβου του Flac 3D. (A) Η brick και (B) η cylinder (Itasca, 2006). ....  | 102 |
| <b>Σχήμα 4.3:</b> Στοιχειώδες πρίσμα πάχους $d\theta$ , βάσει του οποίου κατασκευάστηκε ο συνδυαστικός κάνναβος των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων..... | 109 |
| <b>Σχήμα 4.4:</b> Βασική γεωμετρία του συνδυαστικού καννάβου των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων.....  | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα 4.5:</b> Οι συνοριακές συνθήκες των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων στο επίπεδο $\chi\gamma$ .....   | 113 |
| <b>Σχήμα 4.6:</b> Οι συνοριακές συνθήκες των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων στο επίπεδο $\chi\kappa$ .....   | 113 |
| <b>Σχήμα 4.7:</b> Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων.....  | 115 |
| <b>Σχήμα 4.8:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 128 |
| <b>Σχήμα 4.9:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....  | 128 |
| <b>Σχήμα 4.10:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 129 |
| <b>Σχήμα 4.11:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 129 |
| <b>Σχήμα 4.12:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                              | 130 |
| <b>Σχήμα 4.13:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 130 |
| <b>Σχήμα 4.14:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                      | 131 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα 4.15:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                        | 131 |
| <b>Σχήμα 4.16:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 132 |
| <b>Σχήμα 4.17:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 132 |
| <b>Σχήμα 4.18:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 133 |
| <b>Σχήμα 4.19:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 133 |
| <b>Σχήμα 4.20:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 134 |
| <b>Σχήμα 4.21:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 134 |
| <b>Σχήμα 4.22:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 135 |
| <b>Σχήμα 4.23:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                      | 135 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα 4.24:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 136 |
| <b>Σχήμα 4.25:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 136 |
| <b>Σχήμα 4.26:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 137 |
| <b>Σχήμα 4.27:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 137 |
| <b>Σχήμα 4.28:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοελαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                          | 138 |
| <b>Σχήμα 4.29:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 138 |
| <b>Σχήμα 4.30:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                | 139 |
| <b>Σχήμα 4.31:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 139 |
| <b>Σχήμα 4.32:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα 4.33:</b> Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989)..... | 140 |
| <b>Σχήμα 4.34:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 141 |
| <b>Σχήμα 4.35:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 141 |
| <b>Σχήμα 4.36:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 142 |
| <b>Σχήμα 4.37:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 142 |
| <b>Σχήμα 4.38:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 143 |
| <b>Σχήμα 4.39:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 143 |
| <b>Σχήμα 4.40:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 144 |
| <b>Σχήμα 4.41:</b> Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας   |     |



|  |     |
|--|-----|
| παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989). .....  | 144 |
| <b>Σχήμα 4.42:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 145 |
| <b>Σχήμα 4.43:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 145 |
| <b>Σχήμα 4.44:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοπλαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                          | 146 |
| <b>Σχήμα 4.45:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 146 |
| <b>Σχήμα 4.46:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                | 147 |
| <b>Σχήμα 4.47:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 147 |
| <b>Σχήμα 4.48:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 148 |
| <b>Σχήμα 4.49:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 148 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα 4.50:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                    | 149 |
| <b>Σχήμα 4.51:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                      | 149 |
| <b>Σχήμα 4.52:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 150 |
| <b>Σχήμα 4.53:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                | 150 |
| <b>Σχήμα 4.54:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 151 |
| <b>Σχήμα 4.55:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 151 |
| <b>Σχήμα 5.1:</b> Σκαρίφημα τμήματος του αυτοκινητοδρόμου «Ολυμπία Οδός» (Ολυμπία Οδός Α.Ε.). ....   | 181 |
| <b>Σχήμα 5.2:</b> Τμήμα γεωλογικού χάρτη της περιοχής της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (Ι.Γ.Μ.Ε). ....  | 183 |
| <b>Σχήμα 5.3:</b> Χαρακτηριστική διάταξη των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή των ανατολικών στομιών της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009). ....  | 190 |
| <b>Σχήμα 5.4:</b> Χαρακτηριστική διάταξη των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή των δυτικών στομιών της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009). ....   | 190 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα 5.5:</b> Ο συνδυαστικός κάνναβος των μοντέλων μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης προσομοιώσεων, με 46.380 ζώνες και 50.058 κόμβους, και η βασική γεωμετρία του. ....    | 210 |
| <b>Σχήμα 5.6:</b> Σημεία καταγραφής αποτελεσμάτων των μοντέλων μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης προσομοιώσεων. ....  | 214 |
| <b>Σχήμα 5.7:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A. ....                  | 219 |
| <b>Σχήμα 5.8:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. ....                  | 219 |
| <b>Σχήμα 5.9:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A. ....  | 219 |
| <b>Σχήμα 5.10:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. .... | 220 |
| <b>Σχήμα 5.11:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. ....                 | 220 |
| <b>Σχήμα 5.12:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. ....                 | 220 |
| <b>Σχήμα 5.13:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. ....       | 221 |
| <b>Σχήμα 5.14:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. ....       | 221 |
| <b>Σχήμα 5.15:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. ....       | 221 |
| <b>Σχήμα 5.16:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....       | 222 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα 5.17:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. ....   | 222 |
| <b>Σχήμα 5.18:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....   | 222 |
| <b>Σχήμα 5.19:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4), σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A. ....   | 223 |
| <b>Σχήμα 5.20:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4), σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. ....   | 223 |
| <b>Σχήμα 5.21:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. .... | 224 |
| <b>Σχήμα 5.22:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. .... | 224 |
| <b>Σχήμα 5.23:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. ....                      | 225 |
| <b>Σχήμα 5.24:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....                      | 225 |
| <b>Σχήμα 5.25:</b> Σύγκριση της εξέλιξης των μετατοπίσεων στη στέψη (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της  |     |

|   |     |
|---|-----|
| σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B, σε σχέση με τις επιτόπου μετρήσεις της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών.....  | 226 |
| <b>Σχήμα 5.26:</b> Σύγκριση της εξέλιξης των μετατοπίσεων στη στέψη (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B, σε σχέση με τις επιτόπου μετρήσεις της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών..... | 226 |
| <b>Σχήμα 5.27:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.....  | 227 |
| <b>Σχήμα 5.28:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. ....   | 227 |
| <b>Σχήμα 5.29:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.....   | 228 |
| <b>Σχήμα 5.30:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. ....  | 228 |
| <b>Σχήμα 5.31:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.....   | 229 |
| <b>Σχήμα 5.32:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 229 |
| <b>Σχήμα 5.33:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.....  | 230 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα 5.34:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 230 |
| <b>Σχήμα 5.35:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. ....   | 231 |
| <b>Σχήμα 5.36:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. ....   | 231 |
| <b>Σχήμα 5.37:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 232 |
| <b>Σχήμα 5.38:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 232 |
| <b>Σχήμα 5.39:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. .... | 233 |
| <b>Σχήμα 5.40:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. .... | 233 |
| <b>Σχήμα 5.41:</b> Εκτίμηση της χρονικής διάρκειας των ερπυστικών φαινομένων στη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών, με βάση την 4 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989). ....   | 237 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Α.1:</b> Σύγκριση καμπύλων ερπυσμού μοντέλων 8Α και 9Α με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009) και την 3 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Goodman, 1989)..... | 253 |
| <b>Σχήμα Α.2:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17Α με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 254 |
| <b>Σχήμα Α.3:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18Α με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 254 |
| <b>Σχήμα Α.4:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19Α με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 255 |
| <b>Σχήμα Α.5:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18Β με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 255 |
| <b>Σχήμα Α.6:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19Β με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 256 |
| <b>Σχήμα Α.7:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20Β με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 256 |
| <b>Σχήμα Α.8:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16C με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 257 |
| <b>Σχήμα Α.9:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19C με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 257 |
| <b>Σχήμα Α.10:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20C με την 1 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....  | 258 |
| <b>Σχήμα Α.11:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16D με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 258 |
| <b>Σχήμα Α.12:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17D με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 259 |
| <b>Σχήμα Α.13:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20D με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).....   | 259 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα A.14:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16E με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 260 |
| <b>Σχήμα A.15:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17E με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 260 |
| <b>Σχήμα A.16:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18E με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 261 |
| <b>Σχήμα A.17:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17F με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 261 |
| <b>Σχήμα A.18:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19F με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 262 |
| <b>Σχήμα A.19:</b> Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20F με τη 2 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009). .....  | 262 |
| <b>Σχήμα B.1:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 263 |
| <b>Σχήμα B.2:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 263 |
| <b>Σχήμα B.3:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 264 |
| <b>Σχήμα B.4:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 264 |
| <b>Σχήμα B.5:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                              | 265 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Β.6:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 265 |
| <b>Σχήμα Β.7:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                       | 266 |
| <b>Σχήμα Β.8:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 266 |
| <b>Σχήμα Β.9:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 267 |
| <b>Σχήμα Β.10:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 267 |
| <b>Σχήμα Β.11:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 268 |
| <b>Σχήμα Β.12:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 268 |
| <b>Σχήμα Β.13:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 269 |
| <b>Σχήμα Β.14:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                              | 269 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Β.15:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 270 |
| <b>Σχήμα Β.16:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                      | 270 |
| <b>Σχήμα Β.17:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 271 |
| <b>Σχήμα Β.18:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 271 |
| <b>Σχήμα Β.19:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 272 |
| <b>Σχήμα Β.20:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 272 |
| <b>Σχήμα Β.21:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 273 |
| <b>Σχήμα Β.22:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 273 |
| <b>Σχήμα Β.23:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                              | 274 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Β.24:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 274 |
| <b>Σχήμα Β.25:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                      | 275 |
| <b>Σχήμα Β.26:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 275 |
| <b>Σχήμα Β.27:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 276 |
| <b>Σχήμα Β.28:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 276 |
| <b>Σχήμα Β.29:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 277 |
| <b>Σχήμα Β.30:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 277 |
| <b>Σχήμα Β.31:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 278 |
| <b>Σχήμα Β.32:</b> Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                              | 278 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Β.33:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 279 |
| <b>Σχήμα Β.34:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                      | 279 |
| <b>Σχήμα Β.35:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                        | 280 |
| <b>Σχήμα Β.36:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 280 |
| <b>Σχήμα Β.37:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 281 |
| <b>Σχήμα Β.38:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 281 |
| <b>Σχήμα Β.39:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 282 |
| <b>Σχήμα Β.40:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 282 |
| <b>Σχήμα Β.41:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 283 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Β.42:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 283 |
| <b>Σχήμα Β.43:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                      | 284 |
| <b>Σχήμα Β.44:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                        | 284 |
| <b>Σχήμα Β.45:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 285 |
| <b>Σχήμα Β.46:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 285 |
| <b>Σχήμα Β.47:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 286 |
| <b>Σχήμα Β.48:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 286 |
| <b>Σχήμα Β.49:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 287 |
| <b>Σχήμα Β.50:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 287 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα B.51:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 288 |
| <b>Σχήμα B.52:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                      | 288 |
| <b>Σχήμα B.53:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                        | 289 |
| <b>Σχήμα B.54:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 289 |
| <b>Σχήμα B.55:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 290 |
| <b>Σχήμα B.56:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 290 |
| <b>Σχήμα B.57:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 291 |
| <b>Σχήμα B.58:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 291 |
| <b>Σχήμα B.59:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 292 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Β.60:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 292 |
| <b>Σχήμα Β.61:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                      | 293 |
| <b>Σχήμα Β.62:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                        | 293 |
| <b>Σχήμα Β.63:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 294 |
| <b>Σχήμα Β.64:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 294 |
| <b>Σχήμα Β.65:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα). ....   | 295 |
| <b>Σχήμα Β.66:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα). ....  | 295 |
| <b>Σχήμα Β.67:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 296 |
| <b>Σχήμα Β.68:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 296 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα Β.69:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 297 |
| <b>Σχήμα Β.70:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                         | 297 |
| <b>Σχήμα Β.71:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                           | 298 |
| <b>Σχήμα Β.72:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 298 |
| <b>Σχήμα Β.73:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 299 |
| <b>Σχήμα Β.74:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 299 |
| <b>Σχήμα Β.75:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοελαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 300 |
| <b>Σχήμα Β.76:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 300 |
| <b>Σχήμα Β.77:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....       | 301 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα Β.78:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 301 |
| <b>Σχήμα Β.79:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 302 |
| <b>Σχήμα Β.80:</b> Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989). .... | 302 |
| <b>Σχήμα Β.81:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 303 |
| <b>Σχήμα Β.82:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 303 |
| <b>Σχήμα Β.83:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 304 |
| <b>Σχήμα Β.84:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 304 |
| <b>Σχήμα Β.85:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 305 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα Β.86:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 305 |
| <b>Σχήμα Β.87:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 306 |
| <b>Σχήμα Β.88:</b> Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4 <sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989). .... | 306 |
| <b>Σχήμα Β.89:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 307 |
| <b>Σχήμα Β.90:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 307 |
| <b>Σχήμα Β.91:</b> Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοπλαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 308 |
| <b>Σχήμα Β.92:</b> Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 308 |
| <b>Σχήμα Β.93:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 309 |
| <b>Σχήμα Β.94:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 309 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα Β.95:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 310 |
| <b>Σχήμα Β.96:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 310 |
| <b>Σχήμα Β.97:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                     | 311 |
| <b>Σχήμα Β.98:</b> Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                       | 311 |
| <b>Σχήμα Β.99:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....   | 312 |
| <b>Σχήμα Β.100:</b> Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....                                | 312 |
| <b>Σχήμα Β.101:</b> Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 313 |
| <b>Σχήμα Β.102:</b> Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5 <sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού. .... | 313 |
| <b>Σχήμα Γ.1:</b> Σκαρίφημα του αυτοκινητοδρόμου «Ολυμπία Οδός» (Ολυμπία Οδός Α.Ε.).....  | 315 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Γ.2:</b> Οριζοντιογραφία της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009). .....   | 316 |
| <b>Σχήμα Γ.3:</b> Μηκοτομές των δύο κλάδων της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009). .....  | 316 |
| <b>Σχήμα Γ.4:</b> Τυπική διατομή κατηγορίας $M_{II}$ της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2010). .....  | 318 |
| <b>Σχήμα Γ.5:</b> Τυπική διατομή κατηγορίας $M_{III}$ της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009). .....   | 318 |
| <b>Σχήμα Γ.6:</b> Τυπική διατομή κατηγορίας $M_{IV}$ της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009). .....  | 319 |
| <b>Σχήμα Γ.7:</b> Τυπική διατομή κατηγορίας $M_V$ για το μέσο ελάχιστο ύψος υπερκειμένων της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009).....  | 319 |
| <b>Σχήμα Γ.8:</b> Τυπική διατομή κατηγορίας $M_V$ για το μέσο μέγιστο ύψος υπερκειμένων της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009).....   | 320 |
| <b>Σχήμα Γ.9:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A. ....        | 321 |
| <b>Σχήμα Γ.10:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. ....       | 321 |
| <b>Σχήμα Γ.11:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. .... | 322 |
| <b>Σχήμα Γ.12:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. .... | 322 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα Γ.13:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 323 |
| <b>Σχήμα Γ.14:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 323 |
| <b>Σχήμα Γ.15:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A. ....    | 324 |
| <b>Σχήμα Γ.16:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. ....    | 324 |
| <b>Σχήμα Γ.17:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A. ....     | 325 |
| <b>Σχήμα Γ.18:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. ....     | 325 |
| <b>Σχήμα Γ.19:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A. ....     | 326 |
| <b>Σχήμα Γ.20:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A. ....     | 326 |
| <b>Σχήμα Γ.21:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. .... | 327 |

- Σχήμα Γ.22:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B..... 327
- Σχήμα Γ.23:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. .... 328
- Σχήμα Γ.24:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. .... 328
- Σχήμα Γ.25:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. .... 329
- Σχήμα Γ.26:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. .... 329
- Σχήμα Γ.27:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. .... 330
- Σχήμα Γ.28:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. .... 330
- Σχήμα Γ.29:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. .... 331
- Σχήμα Γ.30:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. .... 331

|  |     |
|--|-----|
| <b>Σχήμα Γ.31:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 332 |
| <b>Σχήμα Γ.32:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....  | 332 |
| <b>Σχήμα Γ.33:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B. ....                      | 333 |
| <b>Σχήμα Γ.34:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. ....                      | 333 |
| <b>Σχήμα Γ.35:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. .... | 334 |
| <b>Σχήμα Γ.36:</b> Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. .... | 334 |
| <b>Σχήμα Γ.37:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C. ....                                   | 335 |
| <b>Σχήμα Γ.38:</b> Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. ....                                   | 335 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα Γ.39:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.....   | 336 |
| <b>Σχήμα Γ.40:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B. ....  | 336 |
| <b>Σχήμα Γ.41:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.....  | 337 |
| <b>Σχήμα Γ.42:</b> Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15 <sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C. .... | 337 |



# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

|   |    |
|---|----|
| <b>Εικόνα 1.1:</b> Τμήμα του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλίδρομου, το οποίο έχει καταρρεύσει λόγω σύνθλιψης. ....   | 18 |
| <b>Εικόνα 1.2:</b> Το ενδοτικό – άκαμπτο σύστημα υποστήριξης της σήραγγας Καλλίδρομου. ....   | 19 |
| <b>Εικόνα 1.3:</b> Τμήμα της σήραγγας Τυμφρηστού, το οποίο έχει παρουσιάσει έντονες συγκλίσεις λόγω σύνθλιψης. ....   | 21 |
| <b>Εικόνα 3.1:</b> Ο κάρναβος «radial cylinder» των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης προσομοιώσεων, με 3.600 ζώνες και 7.442 κόμβους. ....                     | 76 |
| <b>Εικόνα 3.2:</b> Τμήμα του καννάβου του μοντέλου 22C με δύο ομάδες ζωνών, της βραχόμαζας («radial cylinder») και της επένδυσης («cylindrical shell»). ....                  | 81 |
| <b>Εικόνα 3.3:</b> Ο κάρναβος «cylindrical shell» των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης 22D, 23A και 23B της πρώτης φάσης προσομοιώσεων, με 9.900 ζώνες και 20.202 κόμβους. .... | 82 |
| <b>Εικόνα 3.4:</b> Τμήμα του καννάβου των μοντέλων 22D, 23A και 23B με δύο ομάδες ζωνών, της βραχόμαζας («cylindrical shell») και της επένδυσης («cylindrical shell»). ....   | 82 |
| <b>Εικόνα 3.5:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης. ....  | 85 |
| <b>Εικόνα 3.6:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης. ....  | 85 |
| <b>Εικόνα 3.7:</b> Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, χωρίς επένδυση. ....  | 86 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Εικόνα 3.8:</b> Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, με επένδυση. ....   | 86  |
| <b>Εικόνα 3.9:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, πριν την επιβολή του φαινομένου του ερπυσμού και την τοποθέτηση της επένδυσης.....  | 87  |
| <b>Εικόνα 3.10:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, μετά την επιβολή του φαινομένου του ερπυσμού και την τοποθέτηση της επένδυσης..... | 87  |
| <b>Εικόνα 4.1:</b> Ο συνδυαστικός κάρναβος των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων, με 3.840 ζώνες και 8.175 κόμβους. ....   | 111 |
| <b>Εικόνα 4.2:</b> Τμήμα του καννάβου των αξισυμμετρικών μοντέλων, με τα επίπεδα στοιχεία κελύφους που προσομοιώνουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. ....  | 114 |
| <b>Εικόνα 4.3:</b> Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των αξισυμμετρικών μοντέλων, χωρίς υποστήριξη. ....   | 117 |
| <b>Εικόνα 4.4:</b> Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των αξισυμμετρικών μοντέλων, με υποστήριξη.....   | 117 |
| <b>Εικόνα 4.5:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με έντονο ερπυσμό, μία ημέρα μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.....                            | 118 |
| <b>Εικόνα 4.6:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με έντονο ερπυσμό, έξι μήνες μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.....                            | 118 |
| <b>Εικόνα 4.7:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με έντονο ερπυσμό, ένα έτος μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.....                             | 118 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Εικόνα 4.8:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη, μία ημέρα μετά το σταμάτημα της εκσκαφής..... | 119 |
| <b>Εικόνα 4.9:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη, έξι μήνες μετά το σταμάτημα της εκσκαφής..... | 119 |
| <b>Εικόνα 4.10:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη, ένα έτος μετά το σταμάτημα της εκσκαφής..... | 119 |
| <b>Εικόνα 4.11:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B).....                                | 120 |
| <b>Εικόνα 4.12:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B).....                                | 120 |
| <b>Εικόνα 4.13:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B).....                                | 120 |
| <b>Εικόνα 4.14:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A). ....                               | 121 |
| <b>Εικόνα 4.15:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A). ....                               | 121 |
| <b>Εικόνα 4.16:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A). ....                               | 121 |
| <b>Εικόνα 4.17:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A). ....                 | 122 |
| <b>Εικόνα 4.18:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A). ....                 | 122 |
| <b>Εικόνα 4.19:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A). ....                 | 122 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Εικόνα 4.20:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B). ..... | 123 |
| <b>Εικόνα 4.21:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα γ των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B). ..... | 123 |
| <b>Εικόνα 4.22:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B). ..... | 123 |
| <b>Εικόνα 4.23:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των<br>ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A). .....                 | 124 |
| <b>Εικόνα 4.24:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα γ των<br>ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A). .....                 | 124 |
| <b>Εικόνα 4.25:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των<br>ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A). .....                 | 124 |
| <b>Εικόνα 4.26:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B). .....                 | 125 |
| <b>Εικόνα 4.27:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα γ των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B). .....                 | 125 |
| <b>Εικόνα 4.28:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B). .....                 | 125 |
| <b>Εικόνα 4.29:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των<br>ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B). .....   | 126 |
| <b>Εικόνα 4.30:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα γ των<br>ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B). .....   | 126 |
| <b>Εικόνα 4.31:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των<br>ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B). .....   | 126 |
| <b>Εικόνα 4.32:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A). .....   | 127 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Εικόνα 4.33:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα $y$ των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A). .....                                    | 127 |
| <b>Εικόνα 4.34:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα $z$ των<br>ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A). .....                                    | 127 |
| <b>Εικόνα 5.1:</b> Εκσκαφή της άνω ημιδιατομής της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών<br>(Κατηγορία M <sub>III</sub> ). .....  | 203 |
| <b>Εικόνα 5.2:</b> Τμήμα του καννάβου των μοντέλων μελέτης περίπτωσης, με τα μέτρα<br>υποστήριξης που εφαρμόστηκαν. ....  | 212 |
| <b>Εικόνα 5.3:</b> Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των μοντέλων<br>της μελέτης περίπτωσης. ....  | 215 |
| <b>Εικόνα 5.4:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών<br>μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής<br>(Μοντέλο Vers.B). .....   | 215 |
| <b>Εικόνα 5.5:</b> Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών<br>μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής<br>(Μοντέλο Vers.B). .....   | 215 |
| <b>Εικόνα 5.6:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα $x$ των<br>μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, κατά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοελαστικό<br>Μοντέλο Vers.B). ..... | 216 |
| <b>Εικόνα 5.7:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα $y$ των<br>μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, κατά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοπλαστικό<br>Μοντέλο Vers.C). ..... | 216 |
| <b>Εικόνα 5.8:</b> Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα $z$ των<br>μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, κατά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοπλαστικό<br>Μοντέλο Vers.B). ..... | 216 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Εικόνα 5.9:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A).....   | 217 |
| <b>Εικόνα 5.10:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A).....  | 217 |
| <b>Εικόνα 5.11:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα γ των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B).....  | 217 |
| <b>Εικόνα 5.12:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα γ των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B).....  | 218 |
| <b>Εικόνα 5.13:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C).....  | 218 |
| <b>Εικόνα 5.14:</b> Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers. C)..... | 218 |

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

|   |    |
|---|----|
| <b>Πίνακας 2.1:</b> Παράμετροι ερπυσμού από τη διεθνή βιβλιογραφία. ....  | 52 |
| <b>Πίνακας 2.2:</b> Ομάδες ενδεικτικών τιμών παραμέτρων ερπυσμού. ....  | 57 |
| <b>Πίνακας 2.3:</b> Παράμετροι ερπυσμού που χρησιμοποιήθηκαν ως «βάση σύγκρισης». ....                                  | 58 |
| <b>Πίνακας 3.1:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 8 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης.....  | 77 |
| <b>Πίνακας 3.2:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 16 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης..... | 78 |
| <b>Πίνακας 3.3:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 17 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης..... | 79 |
| <b>Πίνακας 3.4:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 18 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης..... | 79 |
| <b>Πίνακας 3.5:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 19 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης..... | 79 |
| <b>Πίνακας 3.6:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 20 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης..... | 80 |
| <b>Πίνακας 3.7:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 22 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης..... | 83 |
| <b>Πίνακας 3.8:</b> Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 23 <sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων<br>επίπεδης παραμόρφωσης..... | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Πίνακας 4.1:</b> Ομάδες παραμέτρων ερπυσμού αξιsymμετρικών μοντέλων δεύτερης φάσης προσομοιώσεων.....  | 107 |
| <b>Πίνακας 4.2:</b> Αξιsymμετρικά μοντέλα δεύτερης φάσης προσομοιώσεων, διαχωρισμένα ανά ομάδα παραμέτρων ερπυσμού, είδος μοντέλου επίλυσης και περίπτωση διαδικασίας εκσκαφής.....           | 108 |
| <b>Πίνακας 4.3:</b> Ιδιότητες των μοντέλων Burgers και CVISC, απαραίτητες για τη μοντελοποίηση των αξιsymμετρικών μοντέλων (εξαιρούνται οι παράμετροι ερπυσμού $n_K$ , $n_M$ και $G_K$ )..... | 112 |
| <b>Πίνακας 4.4:</b> Δεδομένα διαδικασίας τοποθέτησης εκτοξευόμενου σκυροδέματος των αξιsymμετρικών μοντέλων.....  | 115 |
| <b>Πίνακας 5.1:</b> Κατηγορίες βραχόμαζας της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009).....  | 193 |
| <b>Πίνακας 5.2:</b> Γεωτεχνικές Παράμετροι των κατηγοριών βραχόμαζας της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009).....   | 193 |
| <b>Πίνακας 5.3:</b> Γεωτεχνικές Παράμετροι της πρόσθετης κατηγορίας βραχόμαζας $M_{II}$ της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2010).....  | 194 |
| <b>Πίνακας 5.4:</b> Μοντέλα μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης προσομοιώσεων, διαχωρισμένα ανά ομάδα παραμέτρων ερπυσμού, είδος μοντέλου επίλυσης και περίπτωση διαδικασίας εκσκαφής.....    | 208 |
| <b>Πίνακας Γ.1:</b> Κριτήρια αναγνώρισης κατηγοριών προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009).....   | 317 |



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή: Το Φαινόμενο της Σύνθλιψης των Πετρωμάτων

### 1.1 Εισαγωγή

Η ευστάθεια ενός υπογείου έργου αποτελεί μία από τις πλέον κρίσιμες παραμέτρους στο σχεδιασμό και στην κατασκευή του. Ένας από τους κύριους παράγοντες που δύνανται να δημιουργήσουν προβλήματα ευστάθειας σε ένα υπόγειο έργο, είναι το επίπεδο της τάσης που αναπτύσσεται γύρω από το άνοιγμα. Η ύπαρξη διατροπικής τάσης ενδέχεται να προκαλέσει την εμφάνιση φαινομένων σύνθλιψης (Squeezing) και έκρηξης βράχου (Rock Bursting) ή άλλων προβλημάτων ευστάθειας (Selmer – Olsen & Broch, 1977). Οι υψηλές τιμές και η ανισοτροπία του εντατικού πεδίου οφείλονται είτε στο μεγάλο ύψος των υπερκειμένων ενός υπογείου έργου, είτε στον τεκτονισμό της περιοχής όπου πραγματοποιείται η διάνοιξή του (Singh & Goel, 2006). Αξίζει να σημειωθεί ότι ειδικότερα όσον αφορά στα φαινόμενα σύνθλιψης, η ποιότητα της βραχώμαζας κατέχει σημαντικό ρόλο στην ένταση της εμφάνισης των προαναφερθέντων φαινομένων, καθώς όσο πιο πτωχή είναι η βραχώμαζα ή ασθενές το πέτρωμα, τόσο επιδεινώνονται τα φαινόμενα αυτά.

## 1.2 Ορισμοί της Σύνθλιψης

Ο όρος «συνθλιβόμενο πέτρωμα» προέρχεται από τις πρωταρχικές διανοίξεις σιδηροδρομικών σηράγγων βάσης στις Άλπεις, μεταξύ του 1860 και του 1910 (Kovari, 2000). Έκτοτε, πληθώρα επιστημόνων έχουν προσπαθήσει να διατυπώσουν τον ορισμό του φαινομένου της σύνθλιψης, καθώς και να αποσαφηνίσουν τους θεμελιώδεις μηχανισμούς που είναι είτε άμεσα, είτε έμμεσα συνδεδεμένοι με το φαινόμενο αυτό. Ακολούθως, παρατίθενται με χρονολογική σειρά μερικοί από τους σημαντικότερους και πιο σαφείς ορισμούς που έχουν διατυπωθεί, σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία.

### 1.2.1 Ορισμός κατά Terzaghi

Σύμφωνα με τον Karl Terzaghi (1946), το συνθλιβόμενο πέτρωμα είναι απλώς ένα πέτρωμα το οποίο έχει αυξημένο ποσοστό περιεκτικότητας σε άργιλο. Η άργιλος ενδέχεται είτε να αποτελεί μέρος του αρχικού σχηματισμού, όπως συμβαίνει σε ορισμένες περιπτώσεις σχιστόλιθου, είτε να αποτελεί προϊόν μεταμόρφωσης του αρχικού σχηματισμού. Το πέτρωμα δύναται να κυριαρχείται από μέλη της ομάδας του καολινίτη, με ικανοποιητικές ιδιότητες ή να έχει τα πτωχά χαρακτηριστικά του μοντμοριλονίτη. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά των συνθλιβόμενων πετρωμάτων ενδέχεται να κυμαίνονται σε ένα ευρύτερο φάσμα, όπως συμβαίνει και με τα χαρακτηριστικά των αργίλων.

Τα συνθλιβόμενα πετρώματα τείνουν να καταλάβουν τον κενό χώρο της εκσκαφής χωρίς αισθητή αύξηση του όγκου τους. Επομένως, για την εμφάνιση του φαινομένου της σύνθλιψης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μέσα στο πέτρωμα υψηλού ποσοστού μικροσκοπικών και υπομικροσκοπικών σωματιδίων μαρμαρυγιακών ή αργιλικών ορυκτών, με περιορισμένη ικανότητα διόγκωσης.

### **1.2.2 Ορισμός κατά Gioda**

Ο όρος σύνθλιψη κατά τον Gioda (1982), χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση του πετρώματος, που λαμβάνει χώρα στην περιοχή γύρω από την εκσκαφή και η οποία προκύπτει από τη συγκέντρωση διατμητικών τάσεων στη ζώνη αυτή. Όταν υφίσταται καθεστώς σύνθλιψης, το πέτρωμα κινείται αργά προς το εσωτερικό της εκσκαφής και σε αρκετές περιπτώσεις αυτό συνδέεται με μία ελάττωση της διατμητικής αντοχής του πετρώματος και την εμφάνιση ιξώδους συμπεριφοράς. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία ανοίγματα στα οποία δεν έχει τοποθετηθεί το σύστημα της υποστήριξης.

### **1.2.3 Ορισμός κατά O'Rourke**

Κατά τον O'Rourke (1984), ως συνθλιβόμενο έδαφος ορίζεται το έδαφος που υφίσταται σημαντική χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση στην περιοχή γύρω από τη σήραγγα, η οποία οφείλεται στην υπέρβαση της αντοχής του εδάφους από την ένταση του φορτίου. Η φόρτιση αυτή πραγματοποιείται λόγω της ανακατανομής των τάσεων που λαμβάνει χώρα γύρω από την εκσκαφή. Η σύνθλιψη του εδάφους έχει ως αποτέλεσμα η υποστήριξη της σήραγγας να δέχεται φορτία, τα οποία δύναται να αυξάνουν για εβδομάδες ή και μήνες και η τιμή τους εν τέλει να είναι πολλαπλάσια της αρχικής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι επωφελές να επιτρέπονται οι μετακινήσεις του εδάφους πριν την τοποθέτηση της υποστήριξης. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η ανακατανομή των τάσεων στο έδαφος χωρίς τον περιορισμό της υποστήριξης, κάτι που συνεπάγεται και μείωση των απαιτήσεων της υποστήριξης. Ωστόσο, είναι πιθανό να αυξηθούν οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από τη σήραγγα.

Επομένως, ο σχεδιασμός μίας σήραγγας σε καθεστώς συνθλιβόμενων εδαφών απαιτεί προσεκτική μελέτη όλων των παραγόντων, όπως είναι οι επιτόπου τάσεις, ο βαθμός της αποσάθρωσης καθώς και η ορυκτολογική σύσταση του εδάφους, η χρονικά εξαρτώμενη

αντοχή του εδάφους και τέλος οι τεχνικές και οι ακολουθίες της εκσκαφής και της υποστήριξης.

#### 1.2.4 Ορισμός κατά Jethwa

Σύμφωνα με τη θεωρία του Jethwa (1986), κατά την κατασκευή ενός υπόγειου ανοίγματος διαταράσσεται το αρχικό εντατικό πεδίο και η βραχώμαζα γύρω από την εκσκαφή καταπονείται λόγω της επίδρασης των τάσεων που αναπτύσσονται. Κατά συνέπεια, προκύπτει μία ακτινική μετατόπιση προς τα μέσα όλων των σημείων της περιφέρειας του ανοίγματος, που αναλαμβάνει να συγκρατήσει το σύστημα της υποστήριξης, το οποίο ως εκ τούτου φορτίζεται. Συνεπώς, τα φορτία που αναπτύσσονται στο πέτρωμα εξαρτώνται από το μέγεθος της μετατόπισης των τοιχωμάτων της σήραγγας.

Στην περίπτωση υγιούς ή εν γένει καλής ποιότητας βραχώμαζας, η μετατόπιση αυτή είναι ελαστικής φύσεως και παραμένει περίπου στο ένα τοις εκατό της ακτίνας της σήραγγας. Αυτού του είδους η μετατόπιση καλείται χρονικά ανεξάρτητη και σχετίζεται με χαμηλού επιπέδου φόρτιση του συστήματος της υποστήριξης από το περιβάλλον πέτρωμα. Η φόρτιση αυτή σταθεροποιείται άμεσα μετά την εκσκαφή.

Αντιθέτως, μία ασθενής ή γενικότερα πτωχής ποιότητας βραχώμαζα, αστοχεί υπό την επίδραση των υψηλών τάσεων, δημιουργώντας μία πλαστική ή κατακερματισμένη ζώνη γύρω από το άνοιγμα. Η βραχώμαζα που έχει αστοχήσει υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες διαρκούν για μήνες. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κατάσταση συνθλιβόμενου πετρώματος και οι μετατοπίσεις υπό αυτές τις συνθήκες είναι κατά κύριο λόγο χρονικά εξαρτημένες. Η φόρτιση του συστήματος της υποστήριξης από το πέτρωμα συνεχίζει να αυξάνει έως ότου ο ρυθμός μεταβολής των μετατοπίσεων μηδενιστεί. Η πίεση που ασκείται στην υποστήριξη σε αυτό το στάδιο καλείται τελική πίεση του πετρώματος. Η διαφορά της τελικής πίεσης του πετρώματος με την αρχική βραχυχρόνια πίεση ονομάζεται πίεση ερπυσμού. Το μέγεθος της πίεσης ερπυσμού υπό συνθήκες σύνθλιψης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από την αρχική πίεση του πετρώματος. Για το λόγο αυτό, τα μέτρα της υποστήριξης θα πρέπει να είναι ικανά να αντέξουν την τελική πίεση του πετρώματος.

### 1.2.5 Ορισμός κατά Kovari

Κατά τον Kovari (1988), για την εκσκαφή η σύνθλιψη του πετρώματος συνεπάγεται τα ακόλουθα:

- ↪ Ευρείες παραμορφώσεις του εδάφους, οι οποίες προκαλούν κλείσιμο της διατομής, ενδεχομένως ακόμη και στο δάπεδο.
- ↪ Παραμορφώσεις οι οποίες διαρκούν για μεγάλη χρονική περίοδο.
- ↪ Εάν οι παραμορφώσεις παρεμποδίζονται, ενδεχομένως να αναπτυχθούν υψηλές πιέσεις στην υποστήριξη.

Η συνθλίβουσα συμπεριφορά γίνεται καλύτερα κατανοητή εάν υποθεθεί ότι το πέτρωμα γύρω από το άνοιγμα βρίσκεται υπό συνθήκες διαρροής. Καθοριστικός παράγοντας είναι η χαμηλή αντοχή του πετρώματος έναντι των υψηλών τάσεων, καθώς το πέτρωμα εντείνεται έως την οριακή του αντοχή και εν τέλει διαρρέει, σε αντίθεση με τη ψαθυρή αστοχία. Αυτό έχει ως επακόλουθο τη διαχρονική ερπυστική συμπεριφορά ή και την αύξηση της πίεσης του πετρώματος.

Ο Kovari στη θεωρία του σημειώνει επίσης τα εξής:

- ↪ Οι συνεχείς υψηλές παραμορφώσεις δεν οφείλονται στη διόγκωση, αφού σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, αυξάνεται ο όγκος του πετρώματος λόγω απορρόφησης νερού.
- ↪ Σε ρωγματωμένες βραχώμαζες δύναται να προκύψουν υψηλές παραμορφώσεις, που περιορίζονται στην οροφή και στα τοιχώματα της σήραγγας, λόγω ανεπαρκούς υποστήριξης. Οι παραμορφώσεις αυτές δεν οφείλονται στη διαρροή του πετρώματος εξαιτίας της υπέρβασης των ορίων αντοχής του, αλλά στη χαλάρωσή του.

↳ Το φαινόμενο της έκρηξης βράχου διαφέρει από το φαινόμενο της σύνθλιψης.

### 1.2.6 Ορισμός κατά Einstein

Σύμφωνα με τον Einstein (1990), με την πάροδο του χρόνου τόσο η διόγκωση όσο και η σύνθλιψη, προκαλούν μία μετακίνηση της περιφέρειας της σήραγγας προς το εσωτερικό της. Η ένταση της μετακίνησης αυτής, καθώς και το μέγεθος των μετατοπίσεων, συχνά διαφέρουν ανάλογα με τη γεωλογία της περιοχής, το αρχικό εντατικό πεδίο και τη διατομή της σήραγγας.

Η διόγκωση οφείλεται στην προσρόφηση νερού από το πέτρωμα και συχνά συμβαίνει χωρίς να παρατηρείται κάποια διαρροή του πετρώματος. Αντιθέτως, η σύνθλιψη είναι ουσιαστικά συνδεδεμένη με τον ερπυσμό, ο οποίος προκαλείται από την υπέρβαση του ορίου διατμητικής αντοχής του πετρώματος. Ωστόσο, σε διογκούμενα πετρώματα η σύνθλιψη μπορεί να έχει και ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου τους. Αντίθετα, οι τάσεις που αναπτύσσονται και η τροποποίηση των πετρωμάτων που προκαλείται από τη διόγκωση, ενδέχεται να έχουν ως αποτέλεσμα μία χρονικά εξαρτώμενη διαρροή του πετρώματος.

Το φαινόμενο της σύνθλιψης μπορεί να εμφανιστεί σε οποιονδήποτε σχηματισμό εδάφους ή βράχου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει ο κατάλληλος συνδυασμός τασικού πεδίου και ιδιοτήτων της βραχώμαζας, που θα ωθήσουν ορισμένες ζώνες γύρω από τη σήραγγα να ξεπεράσουν το όριο της διατμητικής αντοχής του πετρώματος, από το οποίο ξεκινάει ο ερπυσμός.

Ένας ακόμη ορισμός του φαινομένου της σύνθλιψης από τον Einstein είναι ο ακόλουθος: Σύνθλιψη είναι η χρονικά εξαρτώμενη διατμητική μετατόπιση του εδάφους, η οποία προκαλεί το κλείσιμο της περιφέρειας της σήραγγας. Ο μηχανισμός της σύνθλιψης είναι δυνατό να περιλαμβάνει κάποιον από τους παρακάτω υπομηχανισμούς, ή και συνδυασμό αυτών:

↳ Ερπυσμός (ιξώδης συμπεριφορά) των σωματιδίων του άρρηκτου υλικού, όπως είναι οι κόκκοι των πετρωμάτων και των εδαφών. Ο ερπυσμός μεμονωμένων κόκκων

ενδεχομένως να οφείλεται στην ιξώδη συμπεριφορά της κρυσταλλικής δομής του πετρώματος ή στην ασταθή διάδοση των ρωγμών σε αυτό.

↗ Ερπυσμός κατά μήκος των διεπιφανειών των σωματιδίων του άρρηκτου υλικού και ερπυσμός κατά μήκος των μεγαλύτερης κλίμακας ασυνεχειών του πετρώματος, όπως είναι η διαστρωμάτωση, οι επιφάνειες φύλλωσης, οι ρωγμές και τα ρήγματα.

Οι παραπάνω μηχανισμοί περιλαμβάνουν τα τρία στάδια του ερπυσμού (πρωτογενής, δευτερογενής και τριτογενής), καθώς και τους τυπικούς συνδυασμούς αυτών. Συνήθως, οι μηχανισμοί ερπυσμού που σχετίζονται με τη σύνθλιψη είναι ιξωδοπλαστικής φύσεως, σε περιπτώσεις χαμηλών τάσεων όμως, η φόρτιση του εντατικού πεδίου μπορεί να είναι μερικώς αντιστρέψιμη και να προκύψει λ.χ. ιξωδοελαστική συμπεριφορά του πετρώματος.

### **1.2.7 Ορισμός κατά Aydan et al.**

Σύμφωνα με τη θεωρία των Aydan et al. (1993), την οποία έχουν ενστερνιστεί στην Ιαπωνία, όταν μία σήραγγα παρουσιάζει υψηλές παραμορφώσεις κατά την εκσκαφή της, τότε το πέτρωμα στο οποίο πραγματοποιείται η διάνοιξη χαρακτηρίζεται εν γένει διασταλτικό. Συνεπώς, σύνθλιψη θεωρείται σε γενικές γραμμές το έντονο κλείσιμο της σήραγγας, χωρίς να γίνεται κάποια διάκριση σχετικά με το είδος της κίνησης της βραχόμαζας.

Φαινομενολογικά, το κλείσιμο της σήραγγας λόγω σύνθλιψης είναι δυνατό να συνδεθεί με τους ακόλουθους τρεις τύπους αστοχίας του περιβάλλοντος πετρώματος:

1. Πλήρης αστοχία λόγω διάτμησης
2. Αστοχία λόγω λυγισμού
3. Αστοχία λόγω διάτμησης και ολίσθησης

Σημειώνεται επίσης ότι η σύνθλιψη μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει μία ελαστική – ιξωδοπλαστική συμπεριφορά, και προκύπτει μόνο όταν μετά τη διάνοιξη το πέτρωμα διαρρέυσει λόγω της ανακατανομής των τάσεων. Επομένως, πρόκειται για μία φυσική διαδικασία η οποία συνεπάγεται μία μη αναστρέψιμη αύξηση του όγκου του πετρώματος. Αντίθετα, το φαινόμενο της διόγκωσης είναι μία χημική διαδικασία, η οποία έχει να κάνει με την ανταλλαγή ιόντων μεταξύ ορυκτών του πετρώματος και του νερού.

### 1.2.8 Ορισμός κατά Barla

Η διατύπωση του Giovanni Barla για το φαινόμενο της σύνθλιψης, η οποία εκδόθηκε από τη Διεθνή Ένωση Μηχανικής Πετρωμάτων (International Society for Rock Mechanics – I.S.R.M.) το 1995, περιλαμβάνει έναν ορισμό του φαινομένου, καθώς και ορισμένα επεξηγηματικά σχόλια.

Κατά τον Barla, η σύνθλιψη του πετρώματος είναι μία χρονικά εξαρτώμενη υψηλή παραμόρφωση, που συμβαίνει γύρω από τη σήραγγα (με τον όρο σήραγγα εννοούνται γενικά υπόγειες εκσκαφές, συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων υπόγειων θαλάμων) και είναι ουσιαστικά συνδεδεμένη με τον ερπυσμό, ο οποίος προκύπτει από την υπέρβαση της οριακής διατμητικής αντοχής του πετρώματος. Η παραμόρφωση μπορεί να σταματήσει κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή να συνεχιστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τα επεξηγηματικά σχόλια του παραπάνω ορισμού είναι τα εξής:

- ☞ Το φαινόμενο της σύνθλιψης μπορεί να εμφανιστεί τόσο σε εδάφη, όσο και σε πετρώματα, αρκεί να υπάρχει ο κατάλληλος συνδυασμός τασικού πεδίου και ιδιοτήτων της βραχώμαζας, που θα ωθήσουν ορισμένες ζώνες γύρω από την εκσκαφή να ξεπεράσουν το όριο της διατμητικής αντοχής του πετρώματος, από το οποίο ξεκινάει ο ερπυσμός.
- ☞ Το μέγεθος της σύγκλισης του υπογείου ανοίγματος που σχετίζεται με τη σύνθλιψη, ο βαθμός της παραμόρφωσης και η έκταση της ζώνης διαρροής γύρω από το άνοιγμα,



εξαρτώνται από τις γεωλογικές συνθήκες, το επιτόπου εντατικό πεδίο της βραχόμαζας, τη ροή των υπογείων υδάτων, την πίεση των πόρων και τέλος τις ιδιότητες της βραχόμαζας.

- ↪ Η σύνθλιψη της βραχόμαζας μπορεί να προκύψει ως σύνθλιψη άρρηκτου βράχου, ως σύνθλιψη των ασυνεχειών του πετρώματος ή και κατά μήκος της διαστρωμάτωσης, των επιφανειών φύλλωσης, των ρωγμών και των ρηγμάτων.
- ↪ Η σύνθλιψη είναι συνώνυμη με την υπέρβαση της αντοχής του πετρώματος και δεν περιλαμβάνει παραμορφώσεις που εμφανίζονται στις παρειές και στην οροφή του υπογείου ανοίγματος, οι οποίες προκύπτουν από τη χαλάρωση ρωγματωμένης βραχόμαζας. Ακόμη, το φαινόμενο της έκρηξης βράχου δεν ανήκει στην κατηγορία της σύνθλιψης.
- ↪ Γύρω από τη σήραγγα, σε πετρώματα επιρρεπή στη διόγκωση, ενδέχεται να προκύψουν χρονικά εξαρτώμενες μετατοπίσεις, οι οποίες να είναι αντίστοιχων μεγεθών με εκείνες που παρουσιάζονται σε πετρώματα υπό το καθεστώς σύνθλιψης. Το φαινόμενο της διόγκωσης πάντοτε συνεπάγεται αύξηση του όγκου του πετρώματος. Αντιθέτως, στην περίπτωση του φαινομένου της σύνθλιψης κάτι τέτοιο δεν ισχύει, εκτός εάν πρόκειται για πετρώματα που παρουσιάζουν διασταλτική συμπεριφορά. Εντούτοις, αναγνωρίζεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η σύνθλιψη είναι δυνατό να συσχετιστεί με τη διόγκωση.
- ↪ Η σύνθλιψη είναι στενά συνδεδεμένη με την εκσκαφή, τις τεχνικές υποστήριξης και ευρύτερα τις διαδικασίες που ακολουθούνται κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Εάν η τοποθέτηση της υποστήριξης καθυστερήσει, τότε η βραχόμαζα κινείται προς το εσωτερικό του ανοίγματος και παράλληλα πραγματοποιείται μία ανακατανομή των τάσεων γύρω από αυτό. Αντιστρόφως, εάν οι παραμορφώσεις του πετρώματος περιοριστούν, τότε το φαινόμενο της σύνθλιψης θα οδηγήσει σε μία μακροχρόνια συσσώρευση φορτίου στο σύστημα της υποστήριξης.

### 1.3 Το Φαινόμενο της Σύνθλιψης στη Μηχανική των Πετρωμάτων

Το φαινόμενο της σύνθλιψης έχει παρατηρηθεί σε πληθώρα υπογείων έργων σε ολόκληρο τον κόσμο. Είναι προφανές ότι σε κάθε περίπτωση ο τύπος της βραχώμαζας και οι γεωλογικές συνθήκες όπου εμφανίζεται το φαινόμενο διαφέρουν.

Η σύνθλιψη δύναται γενικά να προκύψει σε δύο κύριους τύπους βραχώμαζας και πιο συγκεκριμένα, τα συμπαγή (ή άρρηκτα) ανίκανα ή αδύναμα (εύπλαστα, που τείνουν να παραμορφωθούν) πετρώματα και τα κοκκώδη (ή έντονα ρωγματωμένα) πετρώματα (Nilsen & Palmstrom, 2000). Τα σκληρά πετρώματα αστοχούν έχοντας μέγιστη τροπή μικρότερη του 2 %, ενώ τα ασθενή αστοχούν με μία τροπή της τάξεως του 2 % ή και παραπάνω (A.S.T.M., 1985). Η ύπαρξη κυρίων ασυνεχειών ή πολλών οικογενειών διακλάσεων, δε συνεπάγεται απαραίτητα ότι η βραχώμαζα θα συμπεριφερθεί ως ασυνεχές μέσο (Brady & Brown, 1985). Μία έντονα ρωγματωμένη βραχώμαζα ενδεχομένως να συμπεριφερθεί και ως αδύναμη συμπαγής βραχώμαζα. Σε τέτοιου είδους πετρώματα μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία της πλαστικότητας, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις (Goodman, 1989).

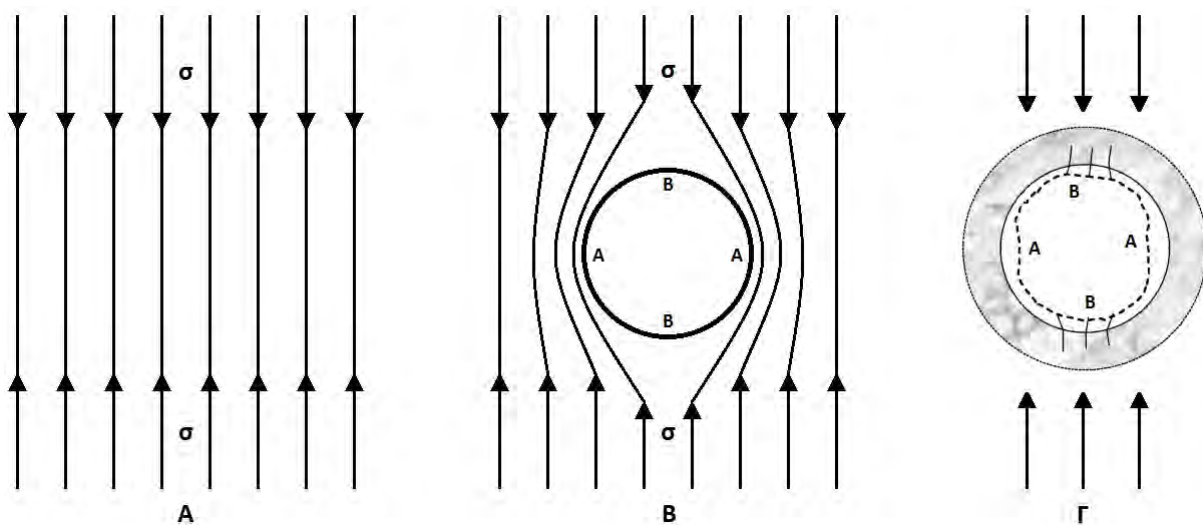
Η σύγκλιση ενός υπογείου ανοίγματος αναλύεται λαμβάνοντας υπόψη την άμεση σύγκλιση λόγω προχώρησης του μετώπου, καθώς και τη χρονικά εξαρτώμενη σύγκλιση λόγω της ροϊκής συμπεριφοράς της βραχώμαζας (Panet, 1996). Μετά την προχώρηση του μετώπου, εάν η τάση που αναπτύσσεται γύρω από το άνοιγμα υπερβεί την αντοχή της βραχώμαζας, τότε ακαριαία ξεκινά η σύνθλιψή της. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για ακαριαία σύνθλιψη. Εάν όμως η αναπτυσσόμενη τάση δε ξεπεράσει την αντοχή της βραχώμαζας, αλλά είναι επαρκής για την πρόκληση ερπυσμού, τότε θα υπάρξουν συγκλίσεις στο άνοιγμα. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για δευτερογενή σύνθλιψη. Επομένως, η σύνθλιψη μπορεί να είναι είτε ακαριαία, είτε δευτερογενής, κάτι που εξαρτάται από το επίπεδο της εφαπτομενικής τάσης, τις ιδιότητες της βραχώμαζας και τη διατομή του υπογείου ανοίγματος (Srestha, 2005).

### 1.3.1 Ακαριαία Σύνθλιψη

Το αδιατάρακτο πέτρωμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε ισορροπία, όπως επίσης και το εντατικό του πεδίο (φυσικό εντατικό πεδίο), του οποίου οι τάσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες (Σχήμα 1.1 Α).

Με τη διάνοιξη ενός υπογείου έργου το εντατικό πεδίο διαταράσσεται, καθώς οι τάσεις δε δύναται να περάσουν μέσα από το άνοιγμα, οπότε αναγκάζονται να ανακαταταναμεθθούν γύρω από αυτό. Η ανακατανομή αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση των τάσεων στην περιφέρεια της εκσκαφής (Σχήμα 1.1 Β). Όταν οι τάσεις που αναπτύσσονται πλέον γύρω από το άνοιγμα υπερβούν την αντοχή της βραχώμαζας, τότε το πέτρωμα συνθλίβεται σχεδόν ακαριαία (Σχήμα 1.1 Γ).

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σκαρίφημα, σε ένα υπόγειο άνοιγμα υπάρχουν υπό φυσιολογικές συνθήκες δύο αντιδιαμετρικά σημεία, όπου η εφαπτομενική συγκέντρωση των τάσεων γίνεται μέγιστη, καθώς και δύο όπου γίνεται ελάχιστη (σημεία Α και Β αντίστοιχα του σκαριφήματος). Η ακαριαία σύνθλιψη προκύπτει στα σημεία εκείνα που υπάρχει η μέγιστη εφαπτομενική συγκέντρωση των τάσεων.

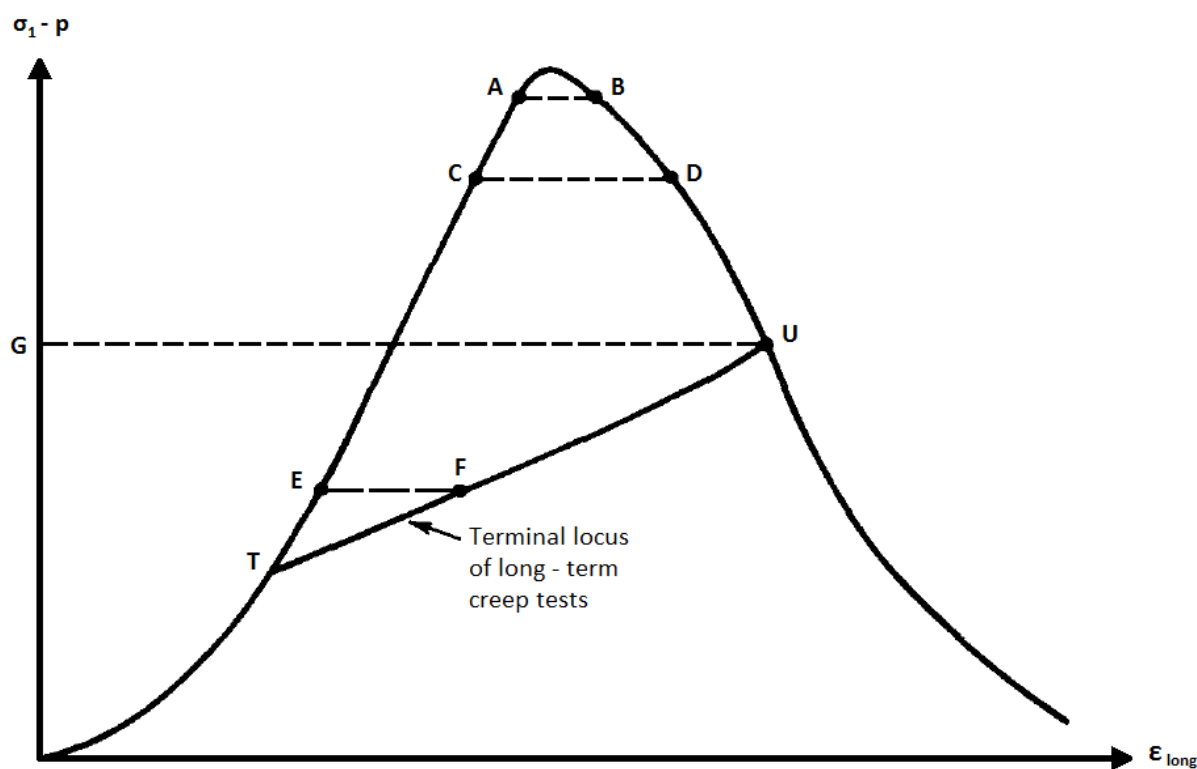


**Σχήμα 1.1:** Σκαρίφημα κατανομής των κατακόρυφων κυρίων τάσεων (Α) πριν την εκσκαφή, (Β) μετά την εκσκαφή και (Γ) κατά την ακαριαία σύνθλιψη του πετρώματος (Srestha, 2005).

### 1.3.2 Σύνθλιψη λόγω Ερπυσμού

Όπως διατυπώνεται και στον ορισμό της σύνθλιψης που έχει εκδοθεί από την I.S.R.M., ο οποίος παρατίθεται σε προηγούμενη παράγραφο, το συγκεκριμένο φαινόμενο έχει να κάνει με μία χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση, ουσιαστικά συνδεδεμένη με τον ερπυσμό, ο οποίος προκύπτει από την υπέρβαση της οριακής διατμητικής αντοχής του πετρώματος.

Σύμφωνα με τον Richard E. Goodman, η πλήρης καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της αστοχίας του πετρώματος λόγω ερπυσμού (1989). Στο Σχήμα 1.2 που ακολουθεί, παρατηρείται ότι η θέση μίας δοκιμής ερπυσμού σε ένα διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων, είναι μία οριζόντια γραμμή. Εάν η αρχική τάση στο πέτρωμα είναι κοντά στο ανώτατο φορτίο, τότε ο ερπυσμός θα τερματιστεί με θραύση όταν η συσσωρευόμενη παραμόρφωση τμήσει στην πλήρη καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων το τμήμα της αστοχίας.



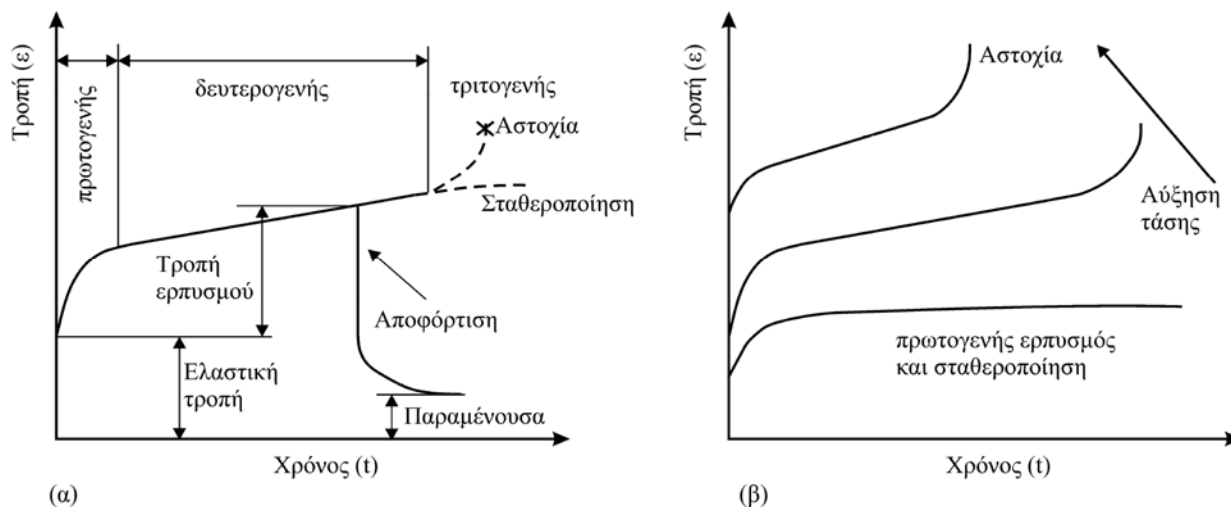
**Σχήμα 1.2:** Ο ερπυσμός σε σχέση με την πλήρη καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων (Goodman, 1989).

Μία δοκιμή ερπυσμού που ξεκινάει στο σημείο A του παραπάνω διαγράμματος, θα τερματίσει με θραύση στο σημείο B, σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Αντίστοιχα, μία δοκιμή ερπυσμού που ξεκινάει στο σημείο C, θα τερματίσει με θραύση στο σημείο D σε ένα αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τέλος, μία δοκιμή ερπυσμού που ξεκινάει στο σημείο E, κάτω δηλαδή από το οριακό επίπεδο τάσης G, θα πλησιάσει το σημείο F και θα σταματήσει έπειτα από μεγάλο χρονικό διάστημα με πεπερασμένη παραμόρφωση χωρίς θραύση. Κάτω από το σημείο T (όριο ερπυσμού) δεν υφίσταται ερπυσμός. Εάν πραγματοποιηθεί μία σειρά από δοκιμές ερπυσμού και στην καθεμία εφαρμοστεί διαφορετικό επίπεδο τάσης (μεταξύ των επιπέδων T και U), τότε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα δημιουργήσουν την καμπύλη TU του παραπάνω διαγράμματος, η οποία αποτελεί την «τερματική θέση των μακροχρόνιων δοκιμών ερπυσμού». Πάνω από το επίπεδο U (ή G), ο ελάχιστος ερπυστικός ρυθμός (δευτερογενής) αυξάνει με το επίπεδο της τάσης και οι δοκιμές ερπυσμού τερματίζουν με τριτογενή ερπυσμό και εν τέλει θραύση, όταν η συσσωρευόμενη παραμόρφωση ανέλθει σε μία πεπερασμένη τιμή (Srestha, 2005).

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η βραχόμαζα είναι δυνατό να φτάσει στην αστοχία παρουσιάζοντας ερπυστική συμπεριφορά, ακόμη και αν δεν έχει αστοχήσει αμέσως μετά την εκσκαφή. Ως προς το Σχήμα 1.2, η αστοχία πραγματοποιείται όταν η γραμμή του ερπυσμού τμήσει την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων στο τμήμα της αστοχίας. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για δευτερογενή σύνθλιψη λόγω ερπυσμού.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η παράθεση και ο σχολιασμός της τυπικής καμπύλης τροπής – χρόνου (καμπύλη ερπυσμού), η οποία προκύπτει από δοκιμές ερπυσμού (Σχήμα 1.3). Η μορφή της καμπύλης αυτής είναι πολλή χαρακτηριστική και είναι παρόμοια για όλα τα πετρώματα. Στις δοκιμές από τις οποίες εξάγεται η καμπύλη του ερπυσμού, επιβάλλεται αρχικά μία τάση με ταχεία αύξηση. Στη συνέχεια η εφαρμοζόμενη τάση διατηρείται σταθερή. Λόγω της ελαστικής αντίδρασης του πετρώματος παρατηρείται μία στιγμιαία τροπή, η οποία ακολουθείται από τον πρωτογενή (μεταβατικό) ερπυσμό (primary ή transient creep), όπου ο ρυθμός μεταβολής της τροπής μειώνεται με το χρόνο. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε ορισμένα πετρώματα ο πρωτογενής ερπυσμός προσεγγίζει ένα σταθερό ρυθμό μεταβολής της τροπής, ο οποίος οριοθετεί τη μετάβαση στο δευτερογενή (σταθερό)

ερπυσμό (secondary ή steady – state creep). Με τη φόρτιση πέρα από κάποιο όριο, το οποίο είναι χαρακτηριστικό για κάθε πέτρωμα, το δευτερογενή ερπυσμό ακολουθεί ο τριτογενής (επιταχυνόμενος) ερπυσμός (tertiary ή accelerated creep). Στο σημείο αυτό ο ρυθμός μεταβολής της τροπής αυξάνεται απότομα και τελικά επέρχεται αστοχία του πετρώματος (Σοφιανός & Νομικός, 2008).



**Σχήμα 1.3:** (Α) Τυπική καμπύλη ερπυσμού του πετρώματος και (Β) διαφοροποίηση της μορφής της καμπύλης ερπυσμού με την εφαρμοζόμενη τάση (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

#### 1.4 Παράγοντες που Επηρεάζουν το Φαινόμενο της Σύνθλιψης

Η εμφάνιση του φαινομένου της σύνθλιψης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, καθένας από τους οποίους είναι και διαφορετικής βαρύτητας. Οι παράγοντες αυτοί έχουν αναγνωριστεί και μελετηθεί από διάφορους ερευνητές σε μελέτες περίπτωσης με τις οποίες έχουν ασχοληθεί. Το σύνολο των παραγόντων αυτών παρατίθεται και αναλύεται συνοπτικά ακολούθως (Steiner, 1996, Aydan et al., 1996, Giorda & Cividini, 1996, Brantmark & Stille, 1996, Brantmark, 1998, Kovari, 2000, Srestha, 2005):

1. Οι συνθήκες της τάσης
2. Η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα της βραχώμαζας

3. Ο τύπος του πετρώματος
4. Η υδατική πίεση και το πορώδες της βραχώμαζας
5. Ο προσανατολισμός της γεωλογικής δομής
6. Οι διαδικασίες κατασκευής και το σύστημα της υποστήριξης

Ο λόγος της αντοχής της βραχώμαζας προς την επιτόπου τάση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Είναι δυνατό επομένως, ασθενή ή ιδιαίτερα στρωματώδη ή κατακερματισμένα πετρώματα να εμφανίσουν σύνθλιψη, ακόμα και με πολύ μικρό ύψος υπερκειμένων, εξαιτίας της πολύ μικρής τιμής του λόγου αυτού. Σύμφωνα με έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί σε σήραγγες της Ιαπωνίας που βρίσκονται υπό το καθεστώς σύνθλιψης, ενδεικτικά αναφέρεται ότι η τιμή του παραπάνω λόγου είναι μικρότερη από 2 (Aydan et al., 1996).

Υψηλές διαχρονικές παραμορφώσεις ή πιέσεις προκύπτουν μόνο σε πετρώματα χαμηλής αντοχής και υψηλής παραμορφωσιμότητας. Σε βραχώμαζες χαμηλής αντοχής εμφανίζονται χαμηλές τιμές του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς την επιτόπου τάση και έτσι προκαλούνται συνθήκες υπέρβασης των τάσεων. Επίσης, είναι προφανές ότι η υψηλή παραμορφωσιμότητα προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις στη βραχώμαζα. Γίνεται αντιληπτό έτσι, ότι οι δύο αυτοί παράγοντες συμβάλλουν ιδιαίτερα στην εμφάνιση του φαινομένου της σύνθλιψης.

Οι φυλλίτες, οι σχιστόλιθοι, οι σερπεντινίτες, οι τόφοι, οι άργιλοι, ορισμένοι τύποι της οικογένειας του φλύσχη και τα διαβρωμένα αργιλικά και μαρμαρυγιακά μεταμορφωμένα πετρώματα, αποτελούν τυπικά παραδείγματα συνθλιβόμενων πετρωμάτων. Ακόμη, σχηματισμοί που έχουν υποστεί έντονο τεκτονισμό είναι πιθανό να εμφανίσουν προβλήματα σύνθλιψης.

Η πιο σημαντική επίδραση του νερού στο φαινόμενο της σύνθλιψης είναι η υψηλή πίεση των πόρων. Η κατανομή των υδατικών πιέσεων στη βραχώμαζα ενδέχεται να είναι αρκετά περίπλοκη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υδατική πίεση αυξάνεται όταν στην περιφέρεια του υπογείου ανοίγματος υπάρχει κάποια ασυνέχεια πληρωμένη με άργιλο. Μείωση της υδατικής πίεσης, ενδεχομένως να έχει ως αποτέλεσμα σε βάθος χρόνου τη μείωση της

πιθανότητας εμφάνισης σύνθλιψης στη βραχώμαζα. Αντιθέτως, αύξηση του πορώδους του πετρώματος προκαλεί μείωση της μηχανικής αντοχής του πετρώματος.

Στην περίπτωση που παράλληλα και πλησίον της περιφέρειας ενός υπογείου ανοίγματος, βρίσκεται μία φυλλώδης ή έντονα στρωματώδης δομή ή ένα ρήγμα, τότε η συνθλίβουσα συμπεριφορά που θα εκδηλωθεί ενδέχεται να είναι αρκετά εντονότερη από αυτήν που θα πρόκυπτε εάν η εν λόγω δομή ή το ρήγμα ήταν κάθετα ως προς τον άξονα του ανοίγματος (John et al., 2005). Επιπλέον, όσον αφορά σε δομικά χαρακτηριστικά όπως τα προαναφερθέντα, τα οποία λαμβάνουν χώρα παράλληλα στο υπόγειο άνοιγμα, ιδιαίτερα σημαντική είναι η κλίση τους ως προς το άνοιγμα.

Σε ένα υπόγειο έργο, η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού διαδικασίας κατασκευής και συστήματος υποστήριξης, πιθανώς να έχει θετικές επιδράσεις ως προς την εμφάνιση του φαινομένου της σύνθλιψης. Γενικώς η υποστήριξη θα πρέπει να ακολουθεί σχεδόν αμέσως μετά την εκσκαφή, η οποία με τη σειρά της θα πρέπει να πραγματοποιείται τμηματικά. Σημειώνεται ότι για τη σταθεροποίηση της βραχώμαζας μετά την εκσκαφή, απαραίτητη είναι έστω μία ελάχιστη πίεση υποστήριξης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα μεταλλικά πλαίσια, σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μία κυκλική διατομή, μπορούν να εξασφαλίσουν αρκετά υψηλές πιέσεις που θα συγκρατήσουν το πέτρωμα έως ότου τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση.

Για την αποτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της σύνθλιψης, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να αξιολογούνται όλοι οι γνωστοί παράγοντες που μπορούν να την επηρεάσουν. Εάν κάποιες παράμετροι δεν είναι δυνατό να αποτιμηθούν ποσοτικά, τότε θα πρέπει να επιχειρείται τουλάχιστον μία ποιοτική ανάλυσή τους.

## **1.5 Παραδείγματα Σηράγγων υπό Καθεστώς Σύνθλιψης**

Από την περίοδο κατασκευής των σιδηροδρομικών σηράγγων βάσης των Άλπεων, μεταξύ του 1860 και του 1910, οπότε και πρωτοεμφανίστηκε ο όρος «συνθλιβόμενο πέτρωμα» σύμφωνα με τον Κοναρί (2000), έχουν υπάρξει πολλά υπόγεια έργα παγκοσμίως στα οποία έχει εμφανιστεί το φαινόμενο της σύνθλιψης. Στις επόμενες παραγράφους



παρατίθενται και αναλύονται συνοπτικά παραδείγματα τέτοιου είδους έργων, τόσο από τον ελλαδικό χώρο, όσο και από το εξωτερικό.

### **1.5.1 Σιδηροδρομική Σήραγγα Καλλίδρομου (Ελλάδα)**

Στο όρος Καλλίδρομο βρίσκεται υπό κατασκευή η μεγαλύτερη σήραγγα της Ελλάδας, συνολικού μήκους 9.034 m. Πρόκειται για μία δίδυμη σιδηροδρομική σήραγγα, τελικής διατομής 58 m<sup>2</sup> και μέγιστου ύψους υπερκειμένων 540 m.

Σύμφωνα με τη γεωλογία της περιοχής, η σήραγγα συναντά Αλπικούς σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης, οι οποίοι αποτελούν και το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής, και Μετα-Αλπικούς σχηματισμούς και αποθέσεις. Στους Μετα-Αλπικούς σχηματισμούς και πιο συγκεκριμένα του Ανώτερου Πλειόκαινου – Ανώτερου Πλειστόκαινου, ανήκει και ο σχηματισμός της αργιλώδους μάργας. Ο σχηματισμός αυτός, ο οποίος συναντήθηκε για 650 m περίπου κατά την κατασκευή της σήραγγας, είναι ιδιαίτερα ετερογενής, με μέτρια έως υψηλή πλαστικότητα και με μεγάλη πιθανότητα σύνθλιψης ή και διόγκωσης.

Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο τμήμα όπου συναντάται η αργιλώδης μάργα, παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα υψηλές μετατοπίσεις αρχικά (της τάξεως των 70 cm) και τελικά κατάρρευση της εκσκαφής για 40 m περίπου (Εικόνα 1.1). Σύμφωνα με έκθεση του Paul Marinou (1/7/2002), αφότου αποκαθίστατο για μικρό χρονικό διάστημα η ισορροπία με την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης, εμφανίζονταν συνεχείς παραμορφώσεις λόγω δευτερογενούς σύνθλιψης (σύνθλιψη λόγω ερπυσμού), οι οποίες οδηγούσαν σε ανεξέλεγκτες παραμορφώσεις.

Μετά την κατάρρευση της σήραγγας δοκιμάστηκαν δύο νέοι τύποι διατομών, μία πλήρως άκαμπτη και μία ενδίδουσα. Η πλήρως άκαμπτη διατομή εξασφάλιζε βήμα προχώρησης της τάξεως του 1 m, με πλήρη εκσκαφή του μετώπου. Η ενδίδουσα επέτρεπε στην εδαφική μάζα να συγκλίνει αρχικά περί το 1 m ακτινικά και στη συνέχεια πραγματοποιούντο το κλείσιμο του «δαχτυλιδιού» της προσωρινής υποστήριξης. Και οι δύο αυτοί τύποι διατομών εμφάνισαν προβλήματα κατά την εφαρμογή τους, αλλά επέτρεψαν στους μηχανικούς και στους γεωλόγους του έργου να αποκομίσουν σημαντικά στοιχεία για

το σχηματισμό της αργιλώδους μάργας και για τη συμπεριφορά των διαφόρων συστημάτων υποστήριξης που εφαρμόστηκαν.



**Εικόνα 1.1:** Τμήμα του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλίδρομου, το οποίο έχει καταρρεύσει λόγω σύνθλιψης.

Βάσει της εμπειρίας που αποκομίσθηκε, σχεδιάστηκε ένας νέος τύπος διατομής που συνδυάζει τις αρχές της ακαμψίας και της ενδοτικότητας των δύο προηγούμενων. Σύμφωνα με το νέο αυτό τύπο, η εκσκαφή ήταν τμηματική (άνω ημιδιατομή και βαθμίδα), με το βήμα προχώρησης να κυμαίνεται μεταξύ 0,70 m και 1 m για την Α φάση και για τη Β φάση να είναι 3 m. Η εκσκαφή της βαθμίδας ακολουθούσε την άνω ημιδιατομή έπειτα από 18 m περίπου ή με το πέρας πέντε ημερών. Με τον τρόπο αυτό, κατέστη δυνατή μια μερική αποτόνωση της βραχώμαζας με μετατοπίσεις της τάξεως των 15 cm, καθώς τα χρησιμοποιούμενα μέτρα υποστήριξης ήταν εν γένει ενδοτικά. Στη βαθμίδα εφαρμόστηκαν

αρχικά τα ίδια μέτρα υποστήριξης με την Α φάση, αλλά στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε ολόκληρη την εκσκαφή ένα δεύτερο σύστημα υποστήριξης, το οποίο ήταν πλήρως άκαμπτο.



**Εικόνα 1.2:** Το ενδοτικό – άκαμπτο σύστημα υποστήριξης της σήραγγας Καλλίδρομου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι καθ' όλη τη διάρκεια της σήραγγας εντός του σχηματισμού της αργιλώδους μάργας, αλλά και μετά την ολοκλήρωσή της, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες οργανομετρήσεις. Στόχος αυτών ήταν ουσιαστικά να επιβεβαιωθεί η ορθή συμπεριφορά του παραπάνω τύπου διατομής. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, αν και παρουσιάστηκε πληθώρα προβλημάτων κατά την κατασκευή (υπερεκσκαφές, καταρρεύσεις του μετώπου, παρουσία ιδιαίτερα μεγάλης ποσότητας υπογείων υδάτων, κ.α.), το διπλό σύστημα υποστήριξης (ενδοτικό – άκαμπτο) που χρησιμοποιήθηκε, κρίθηκε απόλυτα επιτυχημένο. Σημειώνεται ότι με το συγκεκριμένο τύπο διατομής διανοίχθηκαν περί τα 1.100 m και στους δύο κλάδους της σήραγγας.

### 1.5.2 Οδική Σήραγγα Τυμφρηστού (Ελλάδα)

Η οδική σήραγγα Τυμφρηστού μήκους 1.385 m, κατασκευάστηκε στην κεντρική Ελλάδα μεταξύ των νομών Ευρυτανίας και Φθιώτιδας, στην περιοχή «Ράχες Τυμφρηστού» και είναι μέρος της εθνικής οδού Λαμίας – Καρπενησίου.

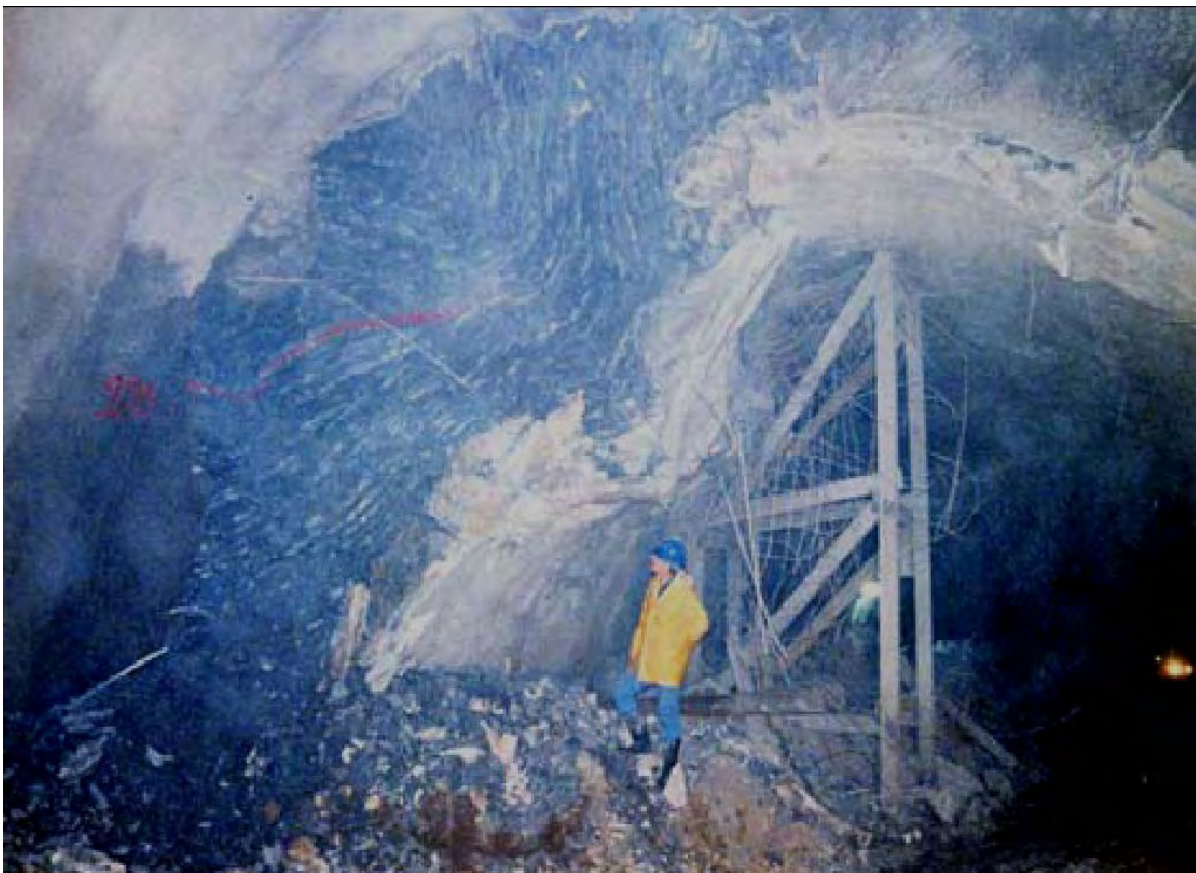
Το έργο ολοκληρώθηκε έπειτα από επτά έτη, με μεγάλες καθυστερήσεις στην κατασκευή του. Οι καθυστερήσεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που παρουσιάστηκαν κατά τη διάνοιξη, τα οποία ήταν χειρότερα των αναμενόμενων και ως εκ τούτου χρειάστηκε να προσαρμοστούν οι μελέτες διάνοιξης, προσωρινής υποστήριξης και τελικής επένδυσης της σήραγγας. Βάσει των αρχικών σχεδίων, η διατομή της σήραγγας ήταν πεταλοειδής. Ωστόσο, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι μεγάλες συγκλίσεις που εμφανίστηκαν κατά την κατασκευή, πραγματοποιήθηκε αλλαγή των σχεδίων και εν τέλει η σήραγγα διανοίχθηκε σχεδόν κυκλική με εφαρμογή κλειστού δαπέδου μορφής ανάστροφου τόξου. Η αλλαγή αυτή είχε ως στόχο την καλύτερη και πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων γύρω από τη σήραγγα.

Σύμφωνα με τη γεωλογία της περιοχής, κατά τη διάνοιξη συναντήθηκαν κυρίως σχηματισμοί της οικογένειας του φλύσχη (ζώνη Ωλονού – Πίνδου) και στις περιοχές των στομιών πλευρικά κορήματα και υλικά επίχωσης. Η εκτεταμένη εμφάνιση λυόλιθων και αργίλων κακής έως πολύ κακής ποιότητας στους σχηματισμούς του φλύσχη, καθώς και ο έντονος τεκτονισμός της περιοχής, προκάλεσαν ιδιαίτερα υψηλές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της διάνοιξης. Από τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν λόγω παραμορφώσεων, ενδεικτικά αναφέρονται η ανύψωση του δαπέδου, το κλείσιμο των παρειών της εκσκαφής και η έντονη στρέβλωση της διατομής. Κατά την εκδήλωση των παραπάνω δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα διόγκωσης και οι υδρογεωλογικές συνθήκες ήταν σε γενικές γραμμές ευμενείς. Οπότε, έπειτα και από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, αποδείχθηκε ότι η βραχώμαζα ήταν υπό το καθεστώς σύνθλιψης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη σήραγγα Τυμφρηστού εκδηλώθηκε τόσο το φαινόμενο της ακαριαίας σύνθλιψης, όσο και αυτό της δευτερογενούς σύνθλιψης. Ακόμη, σε ορισμένες περιπτώσεις δευτερογενούς σύνθλιψης, παρατηρήθηκε μία αρχική αύξηση των



μετατοπίσεων και μία σταθεροποίησή τους έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια μία εκ νέου αύξηση των μετατοπίσεων και μία σταθεροποίησή τους σε υψηλότερο επίπεδο.



**Εικόνα 1.3:** Τμήμα της σήραγγας Τυμφρηστού, το οποίο έχει παρουσιάσει έντονες συγκλίσεις λόγω σύθλιψης.

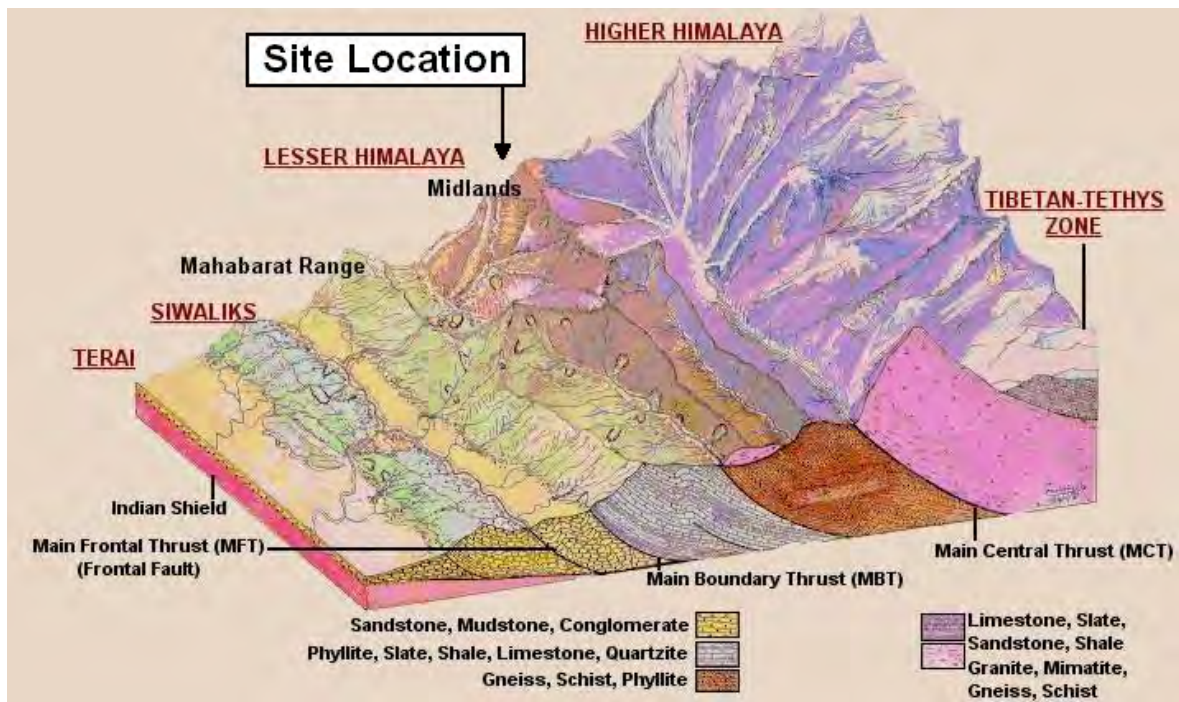
Κατά τη διάρκεια της κατασκευής πραγματοποιήθηκαν συνεχείς οργανομετρήσεις, έτσι ώστε να αποσαφηνιστεί η συμπεριφορά της ιδιαίτερα ετερογενούς φλυσικής βραχώμαζας. Επίσης, δοκιμάστηκαν αρκετοί συνδυασμοί κατασκευαστικών ακολουθιών και τύπων διατομών, έως ότου βρεθεί η κατάλληλη λύση για τη συνθλιβόμενη βραχώμαζα. Οι ερευνητές που προσπάθησαν να εξηγήσουν τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στη σήραγγα Τυμφρηστού, κατέληξαν στο ότι η πολύ μεγάλη παραμόρφωση και η εκδήλωση αστοχιών δεν ήταν αποτέλεσμα μεμονωμένων περιστατικών, αλλά αλληλεπίδραση

διαφόρων παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί ήταν η αντοχή της βραχώμαζας, η διαδικασία εκσκαφής, η ικανότητα του συστήματος υποστήριξης, το επίπεδο της ανηγμένης παραμόρφωσης κατά το κλείσιμο του «δαχτυλιδιού» της υποστήριξης κ.α..

Τέλος, άξιο αναφοράς είναι ότι σύμφωνα με τους Hoek & Marinos (2000), η συμπεριφορά αυτή δε θα μπορούσε να έχει προβλεφθεί, καθώς το συγκεκριμένο έργο ήταν μία από τις πρώτες σήραγγες στην Ελλάδα που διανοίχτηκαν σε φλύσχη.

### 1.5.3 Υδροηλεκτρικό Έργο Khimti (Nepal)

Το υδροηλεκτρικό έργο Khimti βρίσκεται στο Νεπάλ, στην περιοχή Janakpur (πρόποδες Ιμαλαΐων), 100 km ανατολικά του Kathmandu. Έχει κατασκευαστεί κατά μήκος του ομώνυμου ποταμού Khimti, που αποτελεί το φυσικό σύνορο των περιοχών Ramechhar και Dolakha. Μεταξύ των εγκαταστάσεων του έργου υπάρχουν τρεις υπόγειες κατασκευές, δύο σήραγγες 7,9 km και 1,4 km και ένας θάλαμος μήκους 70 m, πλάτους 11 m και ύψους 10 m.



**Σχήμα 1.4:** Γεωλογικό σκαρίφημα της ευρύτερης περιοχής του υδροηλεκτρικού έργου Khimti (Galay, 1991).

Όσον αφορά στη γεωλογία της περιοχής, το έργο χωροθετείται στη ζώνη Midland Schuppen. Κυρίαρχα πετρώματα στη συγκεκριμένη ζώνη είναι ο γνεύσιος, ο οποίος εμφανίζεται αρκετά ισχυρός έως μέτρια αποσαθρωμένος, και ο σχιστόλιθος, ο οποίος παρουσιάζεται ιδιαίτερα πτωχός. Σημειώνεται ότι η περιοχή οριοθετείται από δύο κύρια ρήγματα: το ρήγμα Jiri με διεύθυνση Β – Ν και το ρήγμα Midland με διεύθυνση Α – Δ. Εκτός από αυτά, στην περιοχή εμφανίζονται και αρκετά δευτερεύοντα ρήγματα, για τα οποία αξίζει να αναφερθεί ότι διατρέχονται από χαμηλής ποιότητας αργλικό σχιστόλιθο.

Βάσει της έρευνας που πραγματοποιήθηκε για την κατάταξη της βραχώμαζας και τις απαιτήσεις της υποστήριξης, προέκυψαν πέντε κατηγορίες βραχώμαζας με τις αντίστοιχες τυπικές διατομές. Κατά τη διάνοιξη της μεγαλύτερης εκ των δύο σήραγγων, υπολογίστηκε ότι θα συναντηθεί από εξαιρετικά πτωχό έως πολύ πτωχό πέτρωμα σε ποσοστό περίπου 72 %. Ως εκ τούτου, τα συστήματα υποστήριξης που επιλέχθηκαν ήταν ιδιαίτερα ισχυρά.

Ωστόσο, παρά τα μέτρα που είχαν ληφθεί και το γεγονός ότι ήταν γνωστό πως οι συνθήκες διάνοιξης της θα είναι αντίξοες, κατά την εκσκαφή παρουσιάστηκαν αρκετά τοπικά προβλήματα λόγω δευτερογενούς σύνθλιψης. Πιο συγκεκριμένα, οι παραμορφώσεις προέκυψαν έπειτα από δύο εβδομάδες τουλάχιστον και αφού το μέτωπο είχε προχωρήσει το λιγότερο 20 m. Στις περιοχές εμφάνισης της σύνθλιψης, η παρουσία του σχιστόλιθου και του αποσαθρωμένου γνεύσιου ήταν έντονη, με το ύψος των υπερκειμένων να κυμαίνεται μεταξύ 80 m και 400 m περίπου. Όπου ήταν δυνατό, έγιναν οι απαραίτητες παρεμβάσεις στην υποστήριξη και όπου οι παραμορφώσεις ήταν υψηλές, τοποθετήθηκε νέο, πιο ισχυρό σύστημα υποστήριξης.

Το υδροηλεκτρικό έργο Khimti κατασκευάστηκε σε μία ευρύτερη περιοχή με έντονο τεκτονισμό, λόγω της ορογένεσης των Ιμαλαΐων, και παρουσία πολλών ρηγμάτων. Δεδομένου αυτού, ήταν αναμενόμενο να προκύψουν προβλήματα κατά τη διάνοιξη των υπογείων τμημάτων του έργου. Τα προβλήματα αυτά περιορίστηκαν σε πολύ μεγάλο βαθμό, τόσο λόγω των εκτεταμένων μελετών που είχαν εκπονηθεί, όσο και λόγω των συνεχών οργανομετρήσεων που εκτελέστηκαν κατά την κατασκευή. Εκτός αυτών, η διάνοιξη της σήραγγας των 7,9 km είχε προβλεφθεί να πραγματοποιηθεί με εκσκαφή σήραγγας προπορείας σε όλο το μήκος της. Σύμφωνα με εκθέσεις που έγιναν μετά την ολοκλήρωση του έργου, δύο ήταν οι κυρίαρχοι λόγοι για τους οποίους προέκυψαν παραμορφώσεις λόγω

σύνθλιψης, παρά την πληθώρα των μέτρων που είχαν ληφθεί. Αφενός η συνάντηση σχηματισμών χειρότερης ποιότητας από αυτήν που είχε προβλεφθεί και αφετέρου, το γεγονός ότι η σήραγγα διανοίχθηκε σε πλαγιά, όπου το μέγιστο τοπογραφικό υψόμετρο ήταν μεγαλύτερο από τα άμεσα υπερκείμενα.

#### 1.5.4 Σιδηροδρομική Σήραγγα Furka (Switzerland)

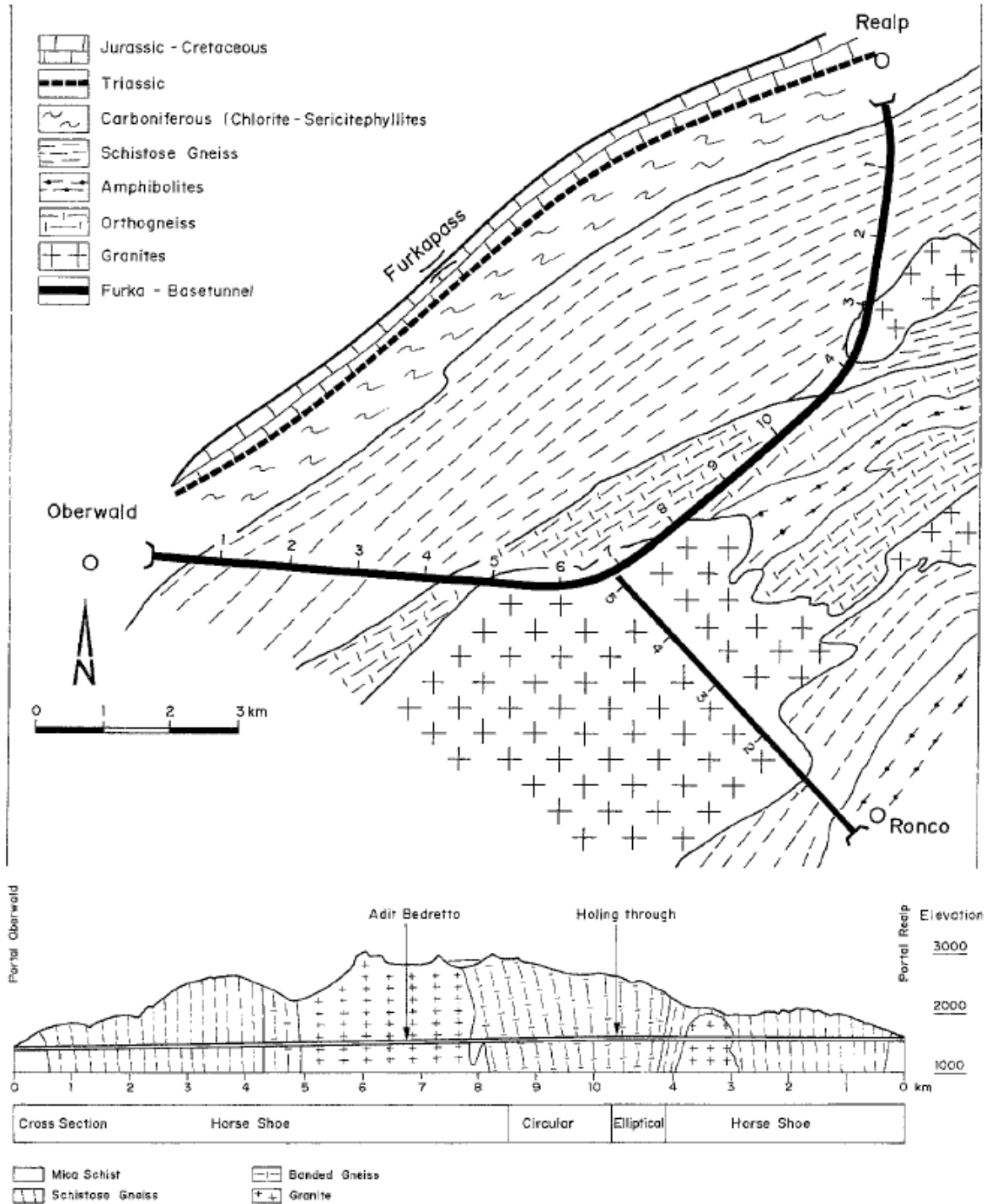
Η σήραγγα βάσης Furka βρίσκεται στην κεντρική Ελβετία και ενώνει τα χωριά Realp (1.538 m) και Oberwald (1.369 m), περνώντας κάτω από έναν από τους υψηλότερους αυχένες των ελβετικών Άλπεων, τον Furkarass (2.431 m). Πρόκειται για μία σιδηροδρομική σήραγγα μονής τροχιάς συνολικού μήκους 15,4 km, η οποία έχει διεύθυνση παράλληλη με την κύρια γεωλογική δομή των Άλπεων. Η κατασκευή της πραγματοποιήθηκε μεταξύ του 1974 και του 1981 και είχε ως στόχο την αντικατάσταση της παλαιότερης σιδηροδρομικής σήραγγας που περνούσε κάτω από τον αυχένα Furkarass και είχε κατασκευαστεί σε ένα υψόμετρο περί τα 2.160 m.

Σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό της σήραγγας, η διατομή της ήταν πεταλοειδής και δε ξεπερνούσε τα 26 m<sup>2</sup>. Κατά το αρχικό στάδιο της διάνοιξης της συναντήθηκαν ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες λόγω σύνθλιψης, καθώς ο άξονας της σήραγγας βρισκόταν σχεδόν παράλληλα με τις απότομες κλίσεις της στρωσιγένειας των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της περιοχής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα στις κατακόρυφες παρειές της σήραγγας να εμφανιστεί αποκόλληση μεγάλων τεμαχών και οι προκύπτουσες δυνάμεις να προκαλέσουν σύγκλιση των μεταλλικών πλαισίων, τα οποία τελικώς κάμπτονταν. Συνεπώς, έπρεπε να γίνει επανεκκαφή της σήραγγας και επανατοποθέτηση νέου συστήματος υποστήριξης.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της σύνθλιψης κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία νέας τυπικής διατομής. Η διατομή αυτή ήταν 36 m<sup>2</sup> και το σχήμα της κατακόρυφη έλλειψη. Στην πράξη αποδείχτηκε πλήρως αποτελεσματική, καθώς τα προαναφερθέντα προβλήματα εξαλείφθηκαν. Ουσιαστικά, οι καμπύλες παρειές της νέας διατομής παρείχαν μεγαλύτερη αντοχή στο σύστημα υποστήριξης έναντι των πλευρικών πιέσεων, λόγω καλύτερης κατανομής των εφαπτομενικών τάσεων. Σύμφωνα με τον Amberg (1983), με τη νέα αυτή



διατομή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα πιο ελαφρύ σύστημα υποστήριξης, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος της κατασκευής.



**Σχήμα 1.5:** Τμήμα γεωλογικού χάρτη της περιοχής της σήραγγας Furka και μηκοτομή της (Keller & Schneider, 1982).

Ακόμη πιο έντονα προβλήματα λόγω σύνθλιψης συναντήθηκαν όταν η εκσκαφή της σήραγγας έφτασε στο μέσο περίπου της απόστασης. Αυτό οφειλόταν αφενός στα μεγάλα ύψη των υπερκειμένων και αφετέρου, στο γεγονός ότι ο άξονας της σήραγγας βρισκόταν παράλληλα με τη σχιστότητα της βραχώμαζας. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω διαρροής του περιβάλλοντος πετρώματος, η τοποθέτηση μεγάλου μήκους αγκυρίων ήταν αδύνατη. Κρίθηκε έτσι απαραίτητη η δημιουργία και νέας τυπικής διατομής. Η νέα διατομή ήταν κυκλική, επιφάνειας  $43 \text{ m}^2$  και σε συνδυασμό με τα αυξημένα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν, κατέστη δυνατή η αντιμετώπιση των φαινομένων σύνθλιψης.

Συμπερασματικά, η εμπειρία από την κατασκευή της σήραγγας Furka αποδεικνύει τη σημασία του ύψους των υπερκειμένων, της τυπικής διατομής, του συστήματος της υποστήριξης και του προσανατολισμού της σήραγγας ως προς τη γεωλογική δομή, στην αντιμετώπιση του φαινομένου της σύνθλιψης.

## **1.6 Αντικείμενο της Παρούσας Εργασίας**

Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι η διερεύνηση της ιξώδους συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από σήραγγα. Η ιξώδης συμπεριφορά είναι ένα εν δυνάμει χαρακτηριστικό όλων των πετρωμάτων. Αναλόγως των συνθηκών που επικρατούν στη βραχώμαζα και όταν σε αυτή επιβληθεί κάποιου είδους τάση, τότε ενδέχεται να ενεργοποιηθεί αυτό το χαρακτηριστικό της και να ξεκινήσει να δρα συναρτησίει του χρόνου. Δηλαδή, υπάρχει η πιθανότητα να αρχίσει η βραχώμαζα να ανταποκρίνεται με αργό ρυθμό σε μεταβολές της επιβαλλόμενης τάσης. Η τάση αυτή προέρχεται είτε από τη διατάραξη του φυσικού εντατικού κατά τη διάνοιξη ενός υπόγειου ανοίγματος, είτε από την επιβολή φόρτισης λόγω μίας άλλου είδους συνήθους κατασκευής. Επομένως, βάσει των παραπάνω προκύπτει ότι η περίπτωση αυτή, της χρονικά εξαρτώμενης συμπεριφοράς της βραχώμαζας, αντιστοιχεί ουσιαστικά στην ιξώδη συμπεριφορά των πετρωμάτων.

Στο σύνολο των παραγράφων του παρόντος κεφαλαίου περιγράφεται αναλυτικά το φαινόμενο της σύνθλιψης των πετρωμάτων, το οποίο μπορεί να είναι τόσο ακαριαίας, όσο και ερπυστικής φύσης. Αναφέρεται επίσης ότι στη μηχανική των πετρωμάτων ως ερπυσμός

ορίζεται η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά της βραχόμαζας, η οποία προκύπτει από την υπέρβαση της οριακής διατμητικής αντοχής του πετρώματος. Συνεπώς, διαπιστώνεται από τα παραπάνω, αλλά και γενικότερα από το σύνολο του περιεχομένου του κεφαλαίου αυτού, ότι το φαινόμενο της σύνθλιψης είναι αλληλένδετο με τον ερπυσμό, ο οποίος με τη σειρά του είναι συνώνυμος με την ιξώδη συμπεριφορά των πετρωμάτων.

Δεδομένου του θέματος που πραγματεύεται η παρούσα Εργασία, αλλά και της αποσαφήνισης ορισμένων βασικών εννοιών όπως οι παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι ουσιαστικός σκοπός της Εργασίας αυτής είναι η κατά το δυνατό πληρέστερη ανάλυση της συνθλιβόμενης συμπεριφοράς των πετρωμάτων κυρίως λόγω ερπυσμού.

Με γνώμονα το σκοπό αυτό, στο ακόλουθο κεφάλαιο πραγματοποιείται ένας αρχικός συσχετισμός της θεωρίας των φαινομένων της σύνθλιψης και του ερπυσμού με την πρακτική εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί για την καλύτερη κατανόηση της χρονικά εξαρτώμενης μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων. Η πρακτική αυτή εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί είναι τα διάφορα προσομοιώματα, ή αλλιώς μοντέλα ροϊκής συμπεριφοράς, τα οποία μέσω κατάλληλου συνδυασμού μηχανικών στοιχείων, προσομοιώνουν την επιθυμητή συμπεριφορά ενός πετρώματος. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία που έχει ως αντικείμενο την ιξώδη συμπεριφορά των πετρωμάτων, αναλύονται ορισμένα απλουστευμένα μοντέλα ροϊκής συμπεριφοράς, τα οποία προσομοιώνουν τα πετρώματα ως ιξωδοελαστικά και ιξωδοπλαστικά υλικά. Μάλιστα, για την περίπτωση των ιξωδοελαστικών πετρωμάτων, παρατίθενται και περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες κλειστού τύπου επιλύσεις που έχουν αναπτυχθεί, και οι οποίες χρησιμοποιούνται γενικά για την αναλυτική επίλυση και ως εκ τούτου την περιγραφή της συμπεριφοράς αυτού του τύπου των πετρωμάτων. Στην Εργασία αυτή χρησίμευσαν τόσο για τη διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων, όσο και για την πραγματοποίηση αριθμητικών προσομοιώσεων. Παράλληλα επεξηγούνται και οι παράμετροι ερπυσμού που ουσιαστικά περιγράφουν τη χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών πετρωμάτων, και κατ' επέκταση των ιξωδοπλαστικών.

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις που προαναφέρονται ουσιαστικά πραγματοποιήθηκαν για την εκτενέστερη προσέγγιση του αντικειμένου της Εργασίας. Το σύνολο αυτών έγινε μέσω του λογισμικού προσομοίωσης Flac 3D (Itasca, 2006), και διαχωρίστηκαν σε τρεις

επιμέρους φάσεις, καθεμία από τις οποίες περιγράφεται στα Κεφάλαια 3, 4 και 5 αντίστοιχα.

Στόχοι της πρώτης φάσης των προσομοιώσεων ήταν αφενός η εκμάθηση του τριδιάστατου κώδικα Flac 3D και της γλώσσας προγραμματισμού FISH και αφετέρου, η εξέταση του συνόλου των παραμέτρων που επηρεάζουν τις αριθμητικές αναλύσεις, καθώς τα μοντέλα της φάσης αυτής αποτέλεσαν ουσιαστικά τη βάση για τη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων (δεύτερη φάση προσομοιώσεων) και τριδιάστατων μοντέλων για τη διεξαγωγή μίας μελέτης περίπτωσης (τρίτη φάση προσομοιώσεων). Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την πρώτη φάση των προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκαν και συγκρίσεις με τις κλειστές λύσεις που αναφέρονται παραπάνω, έτσι ώστε να βαθμονομηθούν τα αριθμητικά μοντέλα ως προς την ακρίβεια της επίλυσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε μία σειρά παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων. Οι παραμετρικές αυτές αναλύσεις είχαν ως στόχο την κατά το δυνατό λεπτομερέστερη εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων στις χρονικά μεταβαλλόμενες μετατοπίσεις μίας σήραγγας η οποία βρίσκεται σε κατάσταση αξονικής συμμετρίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ως παράμετροι ερπυσμού ορίζεται μία ομάδα παραμέτρων, η οποία όπως προαναφέρεται χαρακτηρίζει το πέτρωμα ως προς την ερπυστική του συμπεριφορά, και ουσιαστικά μέσω αυτών των παραμέτρων προβλέπεται το εάν και σε τι βαθμό θα εμφανίσει μία τέτοιου είδους συμπεριφορά.

Τέλος, η τρίτη και τελευταία φάση των προσομοιώσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί ουσιαστικά μία μελέτη περίπτωσης (case study). Πιο συγκεκριμένα, κατά τη φάση αυτή πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις ως προς ένα συγκεκριμένο πραγματικό έργο, έτσι ώστε μέσω συγκρίσεων με επιτόπου μετρήσεις του έργου αυτού, να εξαχθούν συμπεράσματα, τόσο γενικότερα για τη χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά των πετρωμάτων και το φαινόμενο της σύνθλιψης, όσο και ειδικότερα για το σύνολο των προσομοιώσεων της Εργασίας αυτής.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Απλουστευμένα Μοντέλα Ροϊκής Συμπεριφοράς

### 2.1 Εισαγωγή

Οι υπάρχουσες μέθοδοι ταξινόμησης της βραχώμαζας και τα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητάς της, παρουσιάζουν ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα. Βασίζονται σε ελαστοπλαστικές αναλύσεις και δε λαμβάνουν καθόλου υπόψη την παράμετρο του χρόνου.

Ωστόσο, όπως έγινε κατανοητό και από το προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν πετρώματα τα οποία ανταποκρίνονται αργά σε μεταβολές της επιβαλλόμενης τάσης ή τροπής, εμφανίζουν δηλαδή ιξώδη (βισκώδη) συμπεριφορά. Τα πετρώματα που εμφανίζουν τόσο «στιγμαία», όσο και χρονικά εξαρτώμενη ελαστική συμπεριφορά, καλούνται ιξωδοελαστικά και η σχετική θεωρία ιξωδοελαστικότητα (Σοφιανός & Νομικός, 2008). Αντίστοιχα, τα πετρώματα που η τροπή τους χωρίζεται σε ακαριαία και αναστρέψιμη

(ελαστική) και σε χρονικά εξαρτώμενη και μη αναστρέψιμη, ονομάζονται ιξωδοπλαστικά (Boidy et al., 2002) και η σχετική θεωρία ιξωδοπλαστικότητα.

Η θεωρία της ιξωδοελαστικότητας υφίσταται από τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα και εξελίσσεται μέχρι και σήμερα, καθώς βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα υλικών (π.χ. πλαστικά, πολυμερή, ελαστομερή, εδαφικά, μέταλλα, το σκυρόδεμα κ.α.). Αντιθέτως, η θεωρία της ιξωδοπλαστικότητας είναι σχετικά πρόσφατη, καθώς ξεκίνησε να αναπτύσσεται το 1966 από τον Perzyna, ως επέκταση της κλασικής θεωρίας της πλαστικότητας. Η θεωρία της ιξωδοπλαστικότητας έχει αναλυθεί ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών και έχει επεκταθεί στη διερεύνηση της χρονικά εξαρτώμενης συμπεριφοράς των πετρωμάτων από πολλούς ερευνητές. Ενδεικτικά αναφέρονται οι Ladanyi (1993), Cristescu & Gioda (1994), Gioda & Cividini (1996), Cristescu & Hunsche (1998), Boidy et al. (2002) και Pellet et al. (2005).

Για την καλύτερη κατανόηση της χρονικά εξαρτώμενης μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, χρησιμοποιούνται διάφορα προσομοιώματα, τα οποία είναι μηχανικά ανάλογα της συμπεριφοράς των πετρωμάτων (Σοφιανός & Νομικός, 2008). Τα προσομοιώματα αυτά καλούνται «μοντέλα ροϊκής συμπεριφοράς» και αποτελούνται από μηχανικά στοιχεία, όπως ελατήρια (springs), αποσβεστήρες (dashpots) και ολισθητήρες (sliders). Με κατάλληλο συνδυασμό των προαναφερθέντων μηχανικών στοιχείων, είναι δυνατή η προσομοίωση της επιθυμητής συμπεριφοράς ενός πετρώματος, λ.χ. ελαστοπλαστική, ιξωδοελαστική, ιξωδοπλαστική κ.α..

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται συνοπτικά ορισμένα απλουστευμένα μοντέλα ροϊκής συμπεριφοράς, καθώς και συνδυασμοί τους, το σύνολο των οποίων χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τα μοντέλα αυτά σχετίζονται με την ιξωδοελαστική και την ιξωδοπλαστική θεωρία αντίστοιχα.

## **2.2 Ελαστικό και Ιξώδες Στοιχείο**

Το ελαστικό (ελατήριο) και το ιξώδες στοιχείο (αποσβεστήρας) αποτελούν τα δύο κύρια επιμέρους στοιχεία των απλουστευμένων μοντέλων ροϊκής συμπεριφοράς.

### 2.2.1 Ελαστικό Στοιχείο

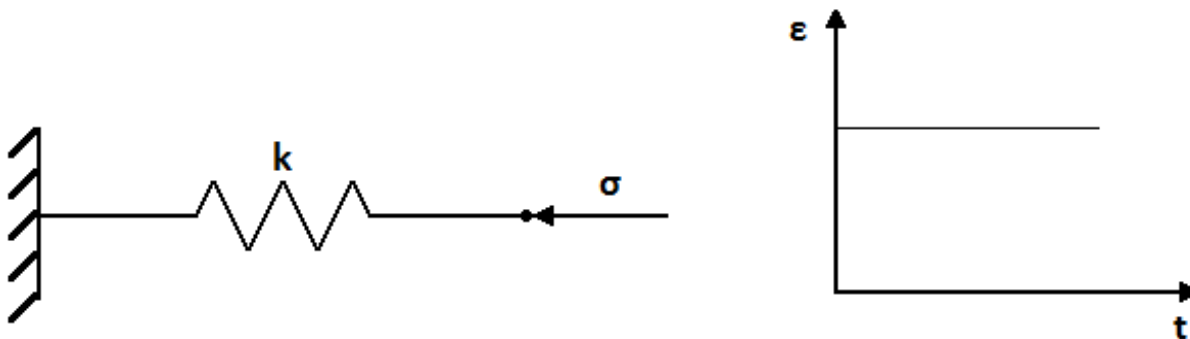
Ελαστικότητα είναι η ιδιότητα των υλικών να εκδηλώνουν το σύνολο των παραμορφώσεων τους ακαριαία με την επιβολή της φόρτισης. Παύση της φόρτισης έχει ως αποτέλεσμα την επιστροφή του υλικού στην αρχική του κατάσταση. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών αυτών προσομοιάζεται με ένα απλό ελατήριο (Σχήμα 2.1). Τα υλικά αυτά ακολουθούν το νόμο του Hooke και η σχέση μεταξύ της τάσης και της τροπής είναι γραμμική και ανεξάρτητη του χρόνου και δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\sigma = k \times \varepsilon \quad (2.1)$$

όπου  $\sigma$  : η τάση που δρα στο ελατήριο

$k$  : η σταθερά του ελατηρίου (ή το μέτρο ελαστικότητας του Young)

$\varepsilon$  : η τροπή



**Σχήμα 2.1:** Το ελαστικό στοιχείο και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου.

Το ελαστικό στοιχείο μόνο του δε δύναται να περιγράψει χρονικά εξαρτώμενες συμπεριφορές πετρωμάτων. Ωστόσο, αποτελεί ένα θεμελιώδες εργαλείο για τον υπολογισμό της αρχικής ελαστικής παραμόρφωσης, η οποία παρατηρείται στην αρχή της εκδήλωσης μίας τέτοιου είδους συμπεριφοράς.

### 2.2.2 Ιξώδες Στοιχείο

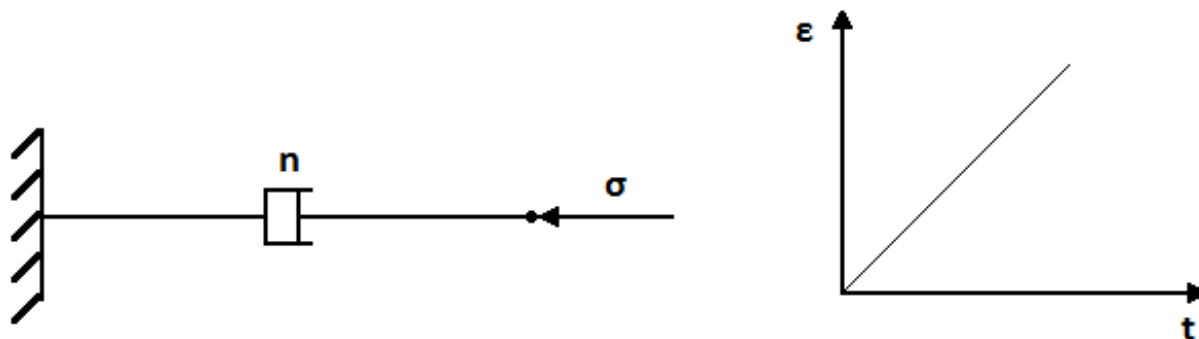
Ιξώδες ονομάζεται το στοιχείο στο οποίο ο ρυθμός μεταβολής της τροπής είναι ανάλογος της εφαρμοζόμενης τάσης. Το μηχανικό του ισοδύναμο είναι ο αποσβεστήρας (Σχήμα 2.2). Τα ιξώδη υλικά είναι γνωστά και ως Νευτώνεια και η μαθηματική σχέση που τα χαρακτηρίζει είναι της μορφής:

$$\sigma = n \times \dot{\epsilon} \quad (2.2)$$

όπου  $\sigma$  : η τάση που δρα στον αποσβεστήρα

$n$  : ο συντελεστής ιξώδους

$\dot{\epsilon}$  : ο ρυθμός μεταβολής της τροπής



**Σχήμα 2.2:** Το ιξώδες στοιχείο και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου.

Το ιξώδες στοιχείο, όπως και το ελαστικό, δεν είναι ικανό να περιγράψει μόνο του χρονικά εξαρτώμενες συμπεριφορές πετρωμάτων, αν και εμπεριέχει τον παράγοντα του χρόνου. Τα μειονεκτήματά του είναι αφενός ότι δε λαμβάνει υπόψη την αρχική ελαστική παραμόρφωση και αφετέρου, το γεγονός ότι δεν εμφανίζει καμία μνήμη. Κάθε νέα φόρτιση δηλαδή, θα προξενήσει νέες τροπές, ανεξαρτήτως από το εάν έχει υπάρξει και προηγούμενη φόρτιση.



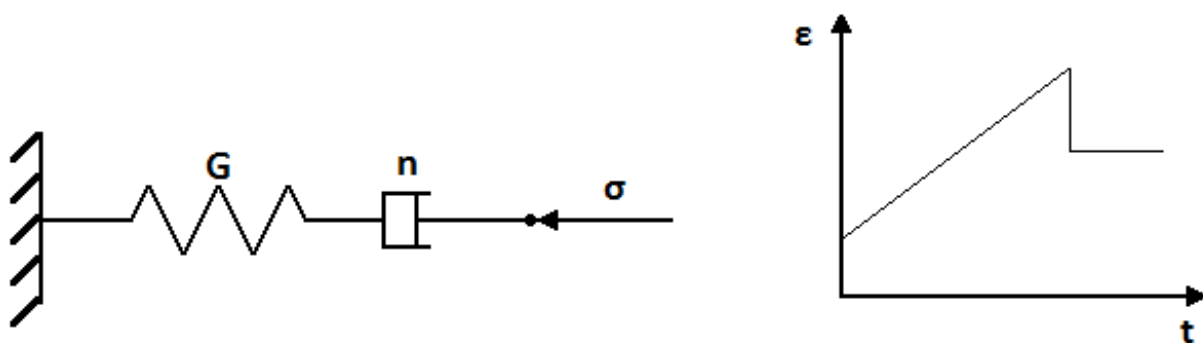
## 2.3 Μοντέλο Maxwell

Το μοντέλο Maxwell αποτελείται από ένα ελαστικό και ένα ιξώδες στοιχείο συνδεδεμένα σε σειρά (Σχήμα 2.3). Η τάση που εφαρμόζεται στα δύο στοιχεία είναι ίδια και η ολική τροπή του μοντέλου ισούται με το άθροισμα των επιμέρους τροπών που αναπτύσσονται σε αυτά, κατά τη σχέση:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2.3)$$

όπου  $\varepsilon_1$  : η παραμόρφωση του ελαστικού στοιχείου ( $\varepsilon_1 = \sigma / G$ )

$\varepsilon_2$  : η παραμόρφωση του ιξώδους στοιχείου ( $\dot{\varepsilon}_2 = \sigma / n$ )



Σχήμα 2.3: Το μοντέλο Maxwell και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου.

Ο ρυθμός μεταβολής της τροπής του μοντέλου Maxwell υπολογίζεται από τον τύπο 2.4 και με ολοκλήρωση της σχέσης αυτής προκύπτει η ολική τροπή του μοντέλου (2.5):

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 \Rightarrow \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{G} + \frac{\sigma}{n} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{G} + \frac{\sigma}{n} \times t + C \quad (2.5)$$

όπου  $\dot{\sigma}$  : ο ρυθμός επιβολής της τάσης που δρα στο μοντέλο

$G$  : η σταθερά του ελατηρίου

$t$  : ο χρόνος

$C$  : σταθερά

Η επιβολή φόρτισης στο μοντέλο Maxwell έχει ως αποτέλεσμα την αρχική ελαστική του παραμόρφωση λόγω του ελαστικού στοιχείου. Με την πάροδο του χρόνου, η συνολική τροπή του μοντέλου αυξάνεται με σταθερό ρυθμό λόγω του ιξώδους στοιχείου. Η παύση της σταθερής φόρτισης έχει ως αποτέλεσμα την αναίρεση της ελαστικής παραμόρφωσης του μοντέλου, ενώ η ιξώδης παραμόρφωση παραμένει (Σχήμα 2.3).

Αν και το μοντέλο Maxwell προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πετρωμάτων, παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Κατ' αρχήν, όπως φαίνεται και στην καμπύλη παραμορφώσεων – χρόνου (Σχήμα 2.3), αδυνατεί να αποτυπώσει την αύξηση της τροπής με συνεχώς μειούμενη κλίση, κάτι το οποίο είναι χαρακτηριστικό του πρωτογενούς ερπυσμού. Επιπλέον, το μοντέλο Maxwell παρουσιάζει τις τυπικές ιδιότητες ενός υγρού, καθώς υπό περιορισμένη τάση έχει τη δυνατότητα απεριόριστης παραμόρφωσης. Η συμπεριφορά αυτή δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πετρωμάτων. Τέλος, το μοντέλο αυτό δε δύναται να περιγράψει τη χρονικά εξαρτώμενη συστολή ενός ιξωδοελαστικού υλικού, εάν κατά τη διάρκεια της αυξανόμενης φόρτισης σταματήσει η επιβαλλόμενη τάση. Με την απομάκρυνση της τάσης, απλώς επιτρέπεται μία άμεση αναίρεση της ελαστικής παραμόρφωσης, η οποία οφείλεται στη συμπεριφορά του ελατηρίου, και δεν εμφανίζεται μία επακόλουθη, μεταβαλλόμενη με το χρόνο παραμόρφωση.

## 2.4 Μοντέλο Kelvin

Το μοντέλο Kelvin αποτελείται από ένα ελαστικό και ένα ιξώδες στοιχείο συνδεδεμένα παράλληλα (Σχήμα 2.4). Η τροπή των δύο στοιχείων είναι ίδια και η ολική τάση που

εφαρμόζεται στο μοντέλο ισούται με το άθροισμα των επιμέρους τάσεων που δρουν σε αυτά, κατά τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.6)$$

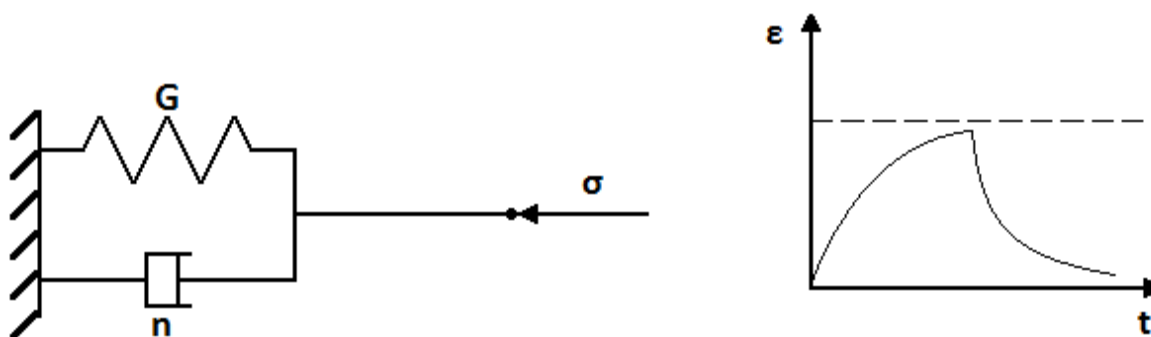
όπου  $\sigma_1$ : η τάση που δρα στο ελαστικό στοιχείο ( $\sigma_1 = G \times \varepsilon$ )

$\sigma_2$ : η τάση που δρα στο ιξώδες στοιχείο ( $\sigma_2 = n \times \dot{\varepsilon}$ )

Με αντικατάσταση των δύο επιμέρους τάσεων στον τύπο 2.6 προκύπτει η διαφορική εξίσωση του μοντέλου (2.7) και με την επίλυσή της η σχέση της τροπής του μοντέλου συναρτήσει του χρόνου (2.8):

$$\sigma = G \times \varepsilon + n \times \dot{\varepsilon} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{G} \times (1 - e^{-G \times t / n}) \quad (2.8)$$



**Σχήμα 2.4:** Το μοντέλο Kelvin και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου.

Ο προσδιορισμός της αρχικής ελαστικής παραμόρφωσης του μοντέλου Kelvin δεν είναι δυνατός, καθώς με την επιβολή φόρτισης το ιξώδες στοιχείο προβάλλει αντίσταση. Με την πάροδο του χρόνου ο αποσβεστήρας αρχίζει να παραμορφώνεται, με αποτέλεσμα ένα μέρος της τάσης που αναλαμβάνει, να μεταβιβάζεται στο ελαστικό στοιχείο ανάλογα με την

παραμόρφωσή του. Το γεγονός αυτό έχει ως επακόλουθο τη μείωση της τάσης του ιζώδους στοιχείου και του ρυθμού παραμόρφωσής του κ.ο.κ.. Συνεπώς, η τάση θα τείνει βαθμιαία να μεταβιβασθεί πλήρως στο ελατήριο και η τροπή θα τείνει ασυμπτωτικά στην ελαστική τροπή (Σχήμα 2.4). Η συμπεριφορά αυτή καλείται καθυστερημένη ελαστικότητα (delayed elasticity).

Όταν στο μοντέλο Kelvin απομακρυνθεί η φόρτιση, τότε η παραμόρφωση έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα τείνει να μηδενιστεί (Σχήμα 2.4), κάτι που δεν ισχύει στην ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πετρωμάτων. Επομένως, πρόκειται για ένα ουσιώδες μειονέκτημα του μοντέλου Kelvin. Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι το γεγονός ότι αδυνατεί να εκφράσει την αρχική ελαστική συμπεριφορά που παρουσιάζει ένα ιξωδοελαστικό υλικό.

## 2.5 Μοντέλο Burgers

Το ιξωδοελαστικό μοντέλο Burgers αποτελείται από ένα μοντέλο Maxwell και ένα Kelvin συνδεδεμένα σε σειρά (Σχήμα 2.5). Η ολική τροπή του μοντέλου Burgers ισούται με το άθροισμα των τροπών των δύο μοντέλων από τα οποία αποτελείται και είναι:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2.9)$$

όπου  $\varepsilon_1$  : η τροπή του μοντέλου Kelvin ( $\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{G_1} \times (1 - e^{-G_1 t/n_1})$ )

$\varepsilon_2$  : η τροπή του μοντέλου Maxwell ( $\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{G_2} + \frac{\sigma}{n_2} \times t$ )

$G_1$  : το μέτρο διάτμησης του μοντέλου Kelvin (σταθερά του ελατηρίου) –  $G_K$

$n_1$  : ο συντελεστής ιζώδους του μοντέλου Kelvin –  $n_K$

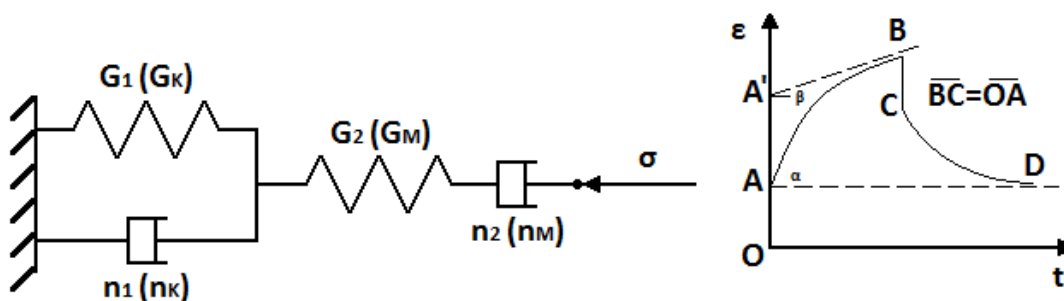
$G_2$  : το μέτρο διάτμησης του μοντέλου Maxwell (σταθερά του ελατηρίου) –  $G_M$

$n_2$  : ο συντελεστής ιζώδους του μοντέλου Maxwell –  $n_M$

Από τη σχέση 2.9 και με αντικατάσταση των δύο επιμέρους τροπών, προκύπτει η τελική μορφή της ολικής τροπής του μοντέλου Burgers:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{G_1} \times (1 - e^{-G_1 \times t / n_1}) + \frac{\sigma}{G_2} + \frac{\sigma}{n_2} \times t \quad (2.10)$$

Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος της παραπάνω εξίσωσης (τροπή μοντέλου Maxwell) αντιπροσωπεύουν την αρχική ελαστική συμπεριφορά και την ιξώδη ροή του μοντέλου Burgers, ενώ ο πρώτος όρος (τροπή μοντέλου Kelvin) την καθυστερημένη ελαστικότητά του.



**Σχήμα 2.5:** Το μοντέλο Burgers και η τροπή του συναρτήσει του χρόνου.

Παραγωγίζοντας τη σχέση 2.10 προκύπτει ο τύπος που εκφράζει το ρυθμό της παραμόρφωσης του μοντέλου:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{n_1} \times (e^{-G_1 \times t / n_1}) + \frac{\sigma}{n_2} \quad (2.11)$$

Σύμφωνα και με την καμπύλη τροπής – χρόνου του μοντέλου Burgers (Σχήμα 2.5), όσο διαρκεί η φόρτιση, ο ρυθμός παραμόρφωσης μεταβάλλεται. Ακολούθως δίνονται οι σχέσεις του αρχικού ( $t = 0$ ) και του τελικού ρυθμού παραμόρφωσης ( $t \rightarrow \infty$ ):

$$\dot{\varepsilon}_0 = \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \times \sigma = \tan a \quad (2.12)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\infty} = \frac{\sigma}{n_2} = \tan \beta \quad (2.13)$$

όπου  $a$  : η κλίση της εφαπτομένης κατά την αρχική παραμόρφωση (για  $t = 0$ )

$\beta$  : η κλίση της ευθείας στην οποία τείνει ασύμπτωτα η παραμόρφωση (για  $t \rightarrow \infty$ )

Στην περίπτωση που σταματήσει η φόρτιση του μοντέλου, τότε η αρχική ελαστική παραμόρφωση αναιρείται και η παραμένουσα παραμόρφωση τείνει να συγκλίνει προς μία μη μηδενική σταθερή τιμή (Σχήμα 2.5). Η συμπεριφορά αυτή πλησιάζει σε μεγάλο βαθμό την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πετρωμάτων. Ακόμη, το μοντέλο Burgers αποτυπώνει τόσο την αρχική ελαστική παραμόρφωση, όσο και την αύξηση της τροπής με συνεχώς μειούμενη κλίση. Με βάση τα ανωτέρω συμπεράσματα, γίνεται κατανοητό ότι το συγκεκριμένο μοντέλο ροϊκής συμπεριφοράς αποτελεί μία πολύ καλή προσέγγιση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων.

### 2.5.1 Συμπεριφορά του Μοντέλου Burgers σε Μονοαξονική Θλίψη

Κατά τον Goodman (1989), η πιο απλή διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί σε εργαστηριακό επίπεδο για την αποτίμηση των ιξωδοελαστικών σταθερών του απλουστευμένου μοντέλου Burgers, είναι μέσω δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια πετρωμάτων. Οι δοκιμές ενδέχεται να διαρκούν ώρες, εβδομάδες ή και περισσότερο και θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας και με σταθερή εφαρμογή τάσης. Η αναλυτική λύση της παραπάνω διαδικασίας είναι η ακόλουθη.

Η αξονική τροπή συναρτήσει του χρόνου  $\varepsilon_1(t)$  ενός μοντέλου Burgers, στο οποίο επιβάλλεται διαρκής αξονική τάση  $\sigma_1$  είναι:

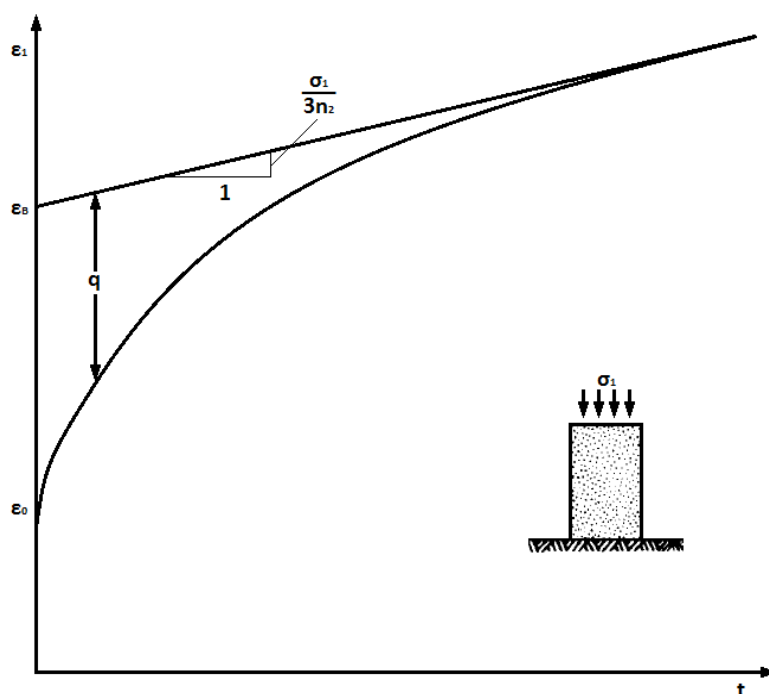
$$\varepsilon_1(t) = \frac{2 \times \sigma_1}{9 \times K} + \frac{\sigma_1}{3 \times G_2} + \frac{\sigma_1}{3 \times G_1} - \frac{\sigma_1}{3 \times G_1} \times e^{-(G_1 \times t / n_1)} + \frac{\sigma_1}{3 \times n_2} \times t \quad (2.14)$$

όπου  $K$  : το μέτρο συστολής ( $K = \frac{E}{3 \times (1 - 2 \times \nu)}$ )

Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα τροπής – χρόνου, το οποίο ανταποκρίνεται στην εξίσωση 2.14. Για  $t = 0$  η άμεση τροπή  $\varepsilon_0$  υπολογίζεται από τον τύπο 2.15, ενώ για πολύ μεγάλο  $t \rightarrow \infty$  τείνει ασύμπτωτα στην ευθεία που ορίζεται ως  $\varepsilon_B$ , σύμφωνα με τη σχέση 2.16, και έχει κλίση  $\sigma_1 / 3 \times n_2$  :

$$\varepsilon_0 = \sigma_1 \times \left( \frac{2}{9 \times K} + \frac{1}{3 \times G_2} \right) \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_B = \sigma_1 \times \left( \frac{2}{9 \times K} + \frac{1}{3 \times G_2} + \frac{1}{3 \times G_1} \right) \quad (2.16)$$



**Σχήμα 2.6:** Καμπύλη ερπυσμού πετρώματος υπό μονοαξονική θλίψη, το οποίο συμπεριφέρεται σύμφωνα με το μοντέλο Burgers για αποκλίνουσα τάση και ελαστικά για υδροστατική θλίψη (Goodman, 1989).

Η απόσταση  $q$  μεταξύ της ασύμπτωτης ευθείας και της καμπύλης ερπυσμού δίνεται από την εξίσωση:

$$\log q = \log\left(\frac{\sigma_1}{3 \times G_1}\right) - \frac{G_1}{2.3 \times n_1} \times t \quad (2.17)$$

Με γραμμική παλινδρόμηση για δεδομένα ζεύγη  $q$  και  $t$  υπολογίζονται οι παράμετροι  $G_1$  και  $n_1$ , ενώ η παράμετρος  $G_2$  προκύπτει από τον τύπο:

$$\frac{\sigma_1}{3 \times G_2} = \varepsilon_B - \sigma_1 \times \left( \frac{1}{3 \times G_1} + \frac{2}{9 \times K} \right) \quad (2.18)$$

Τέλος, εάν πραγματοποιούνται μετρήσεις των αξονικών ( $\varepsilon_1$ ) και των πλευρικών ( $\varepsilon_3$ ) παραμορφώσεων, τότε η τιμή του  $K$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \frac{\sigma_1}{3 \times (\varepsilon_1 + 2 \times \varepsilon_3)} \quad (2.19)$$

## 2.6 Μοντέλο CVISC

Το ιξωδοελαστικό – πλαστικό μοντέλο CVISC, το οποίο έχει δημιουργηθεί από την εταιρεία Itasca (2001), αποτελείται από ένα ιξωδοελαστικό μοντέλο Burgers και ένα πλαστικό στοιχείο (ολισθητήρας) συνδεδεμένα σε σειρά (Σχήμα 2.7). Το πλαστικό στοιχείο βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.

Το μοντέλο CVISC διακρίνεται από μία αποκλίνουσα και μία ογκομετρική συμπεριφορά. Η ογκομετρική συμπεριφορά διέπεται από το γραμμικό νόμο της ελαστικότητας και τον κανόνα της πλαστικής ροής (Σχήμα 2.7 Α). Η αποκλίνουσα χαρακτηρίζεται από το νόμο της

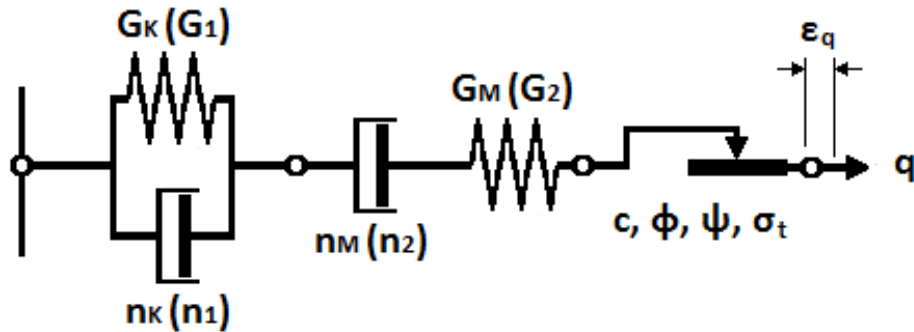


ιξωδοελαστικότητας και όπως και στην περίπτωση της ογκομετρικής συμπεριφοράς, από τον κανόνα της πλαστικής ροής (Σχήμα 2.7 Β).

### A. Ογκομετρική Συμπεριφορά



### B. Συμπεριφορά σε Αποκλίνουσα Φόρτιση



**Σχήμα 2.7:** Το μοντέλο CVISC. (A) Η ογκομετρική συμπεριφορά του μοντέλου και (B) η συμπεριφορά του σε αποκλίνουσα φόρτιση (Bonini et al. 2007).

Δεδομένου του διαχωρισμού που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του μοντέλου CVISC, ισχύουν οι ακόλουθοι τύποι:

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{kk} \Rightarrow \varepsilon_{vol} = \varepsilon_{vol}^e + \varepsilon_{vol}^p \quad (2.20)$$

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \times \frac{\varepsilon_{vol}}{3} \quad (2.21) \quad \text{και} \quad e_{ij} = e_{ij}^{ve} + e_{ij}^p \quad (2.22)$$

$$p = \frac{\sigma_{kk}}{3} \quad (2.23) \quad \text{και} \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \times p \quad (2.24)$$

όπου  $\varepsilon_{vol}$  : η ογκομετρική τροπή

$\varepsilon_{vol}^e$  : η ελαστική συνιστώσα της ογκομετρικής τροπής

$\varepsilon_{vol}^p$  : η πλαστική συνιστώσα της ογκομετρικής τροπής

$e_{ij}$  : η αποκλίνουσα τροπή

$\varepsilon_{ij}$  : η ολική τροπή

$\delta_{ij}$  : το δέλτα του Kronecker

$e_{ij}^{ve}$  : η ιξωδοελαστική συνιστώσα της αποκλίνουσας τροπής

$e_{ij}^p$  : η πλαστική συνιστώσα της αποκλίνουσας τροπής

$p$  : η μέση τάση

$s_{ij}$  : η αποκλίνουσα τάση μίας συνιστώσας του τανυστή της τάσης

$\sigma_{ij}$  : μία συνιστώσας του τανυστή της τάσης

Βάσει των προαναφερθέντων και σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους, γίνεται κατανοητό ότι η ιξωδοελαστική τροπή είναι μόνο αποκλίνουσα και εξαρτάται αποκλειστικά από την αποκλίνουσα τάση  $s_{ij}$ . Αντίθετα, η πλαστική τροπή είναι τόσο αποκλίνουσα, όσο και ογκομετρική και εξαρτάται από την τάση  $\sigma_{ij}$  και τον κανόνα πλαστικής ροής.

Οι σχέσεις που περιγράφουν τα μοντέλα Kelvin και Maxwell, τα οποία συνδεδεμένα σε σειρά συνθέτουν το ιξωδοελαστικό μοντέλο Burgers, αναλύονται σε προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου. Ακολουθούν κατάλληλα τροποποιημένες για την περιγραφή του μοντέλου CVISC:

$$e_{ij}^{ve} = e_{ij}^{veK} + e_{ij}^{veM} \quad (2.25)$$

$$s_{ij} = 2 \times G^K \times e_{ij}^{veK} + 2 \times n^K \times \dot{e}_{ij}^{veK} \quad (2.26)$$

$$\dot{e}_{ij}^{veM} = \frac{\dot{s}_{ij}}{2 \times G^M} + \frac{s_{ij}}{2 \times n^M} \quad (2.27)$$

όπου  $e_{ij}^{veK}$ : η τροπή του μοντέλου Kelvin

$\dot{e}_{ij}^{veK}$ : ο ρυθμός μεταβολής της τροπής του μοντέλου Kelvin

$e_{ij}^{veM}$ : η τροπή του μοντέλου Maxwell

$\dot{e}_{ij}^{veM}$ : ο ρυθμός μεταβολής της τροπής του μοντέλου Maxwell

$\dot{s}_{ij}$ : ο ρυθμός επιβολής της αποκλίνουσας τάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τόσο η ογκομετρική, όσο και η αποκλίνουσα πλαστική συμπεριφορά του μοντέλου CVISC, χαρακτηρίζονται από το γενικό κανόνα της πλαστικής ροής. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το συσχετισμό του μοντέλου με την πλαστικότητα είναι οι εξής:

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \times \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_{vol}^p = \lambda \times \left[ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{22}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} \right] \quad (2.29)$$

$$e_{ij}^p = \lambda \times \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} - \delta_{ij} \times \frac{\varepsilon_{vol}^p}{3} \quad (2.30)$$

όπου  $\lambda$ : ο συντελεστής πλαστικότητας (πολλαπλασιαστής)

$g$ : ο νόμος της πλαστικής ροής

Τέλος, το ελαστικό τμήμα της ογκομετρικής συμπεριφοράς του μοντέλου CVISC περιγράφεται από τον τύπο:

$$p = K \times (\varepsilon_{vol} - \varepsilon_{vol}^p) \quad (2.31)$$

Το μοντέλο CVISC χαρακτηρίζεται συνολικά από εννέα παραμέτρους: το μέτρο συστολής  $K$  (ελαστική ιδιότητα), τα μέτρα διάτμησης Maxwell  $G^M$  και Kelvin  $G^K$ , τους συντελεστές ιξώδους Maxwell  $n^M$  και Kelvin  $n^K$  (ιξωδοελαστικές ιδιότητες), τη συνοχή  $c$ , τη γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ , τη μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό  $\sigma_t$  και τη γωνία διαστολής  $\psi$  (πλαστικές ιδιότητες).

## 2.7 Κλειστού Τύπου Επιλύσεις για Κυκλική Σήραγγα σε Ιξωδοελαστική Βραχόμαζα Burgers

Σύμφωνα με τον Barla (2001), κατά το σχεδιασμό και την ανάλυση σηράγγων υπό το καθεστώς σύνθλιψης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αφενός η διαρρέουσα συμπεριφορά της βραχόμαζας, η οποία καθορίζεται από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής που σχετίζονται με την προκαλούμενη τάση και αφετέρου, η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά της (ερπυσμός). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την αντίδραση της περιβάλλουσας βραχόμαζας κατά την εκσκαφή, σύμφωνα με τις συμπεριφορές αυτές, είναι οι κλειστού τύπου επιλύσεις και οι αριθμητικές αναλύσεις.

Σκοπός της παραγράφου αυτής είναι η περιγραφή ορισμένων εκ των κλειστών λύσεων που υπάρχουν για το απλουστευμένο μοντέλο Burgers. Οι επιλύσεις που παρατίθενται είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι για το απλουστευμένο μοντέλο CVISC δεν έχουν αναπτυχθεί κλειστού τύπου επιλύσεις.

### 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου

Σε μία σήραγγα με υδροστατικό εξωτερικό εντατικό πεδίο, επειδή δεν υπάρχει μεταβολή της μέσης τάσης γύρω από την εκσκαφή, ο όρος  $K$  δεν επιδρά στις μετατοπίσεις. Επομένως, η μετατόπιση των παρειών της σήραγγας δίνεται από την εξίσωση 2.32 (Σοφιανός, 2009):

$$\delta_{\alpha}(t) = \frac{p_0 \times R}{2} \times \left\{ \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_1} \times \left( 1 - \varepsilon^{-G_1 \times t / n_1} \right) + \frac{t}{n_2} \right\} \quad (2.32)$$

όπου  $p_0$  : η πίεση των υπερκειμένων

$R$  : η ακτίνα της σήραγγας

## 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου

Η σχέση 2.32 παίρνει τη μορφή της εξίσωσης 2.33, εάν θεωρηθεί ότι παράλληλα με τη δράση της εκσκαφής υπάρχει και η πίεση της υποστήριξης ( $p_i$ ). Η συνολική μετατόπιση λόγω του εξωτερικού εντατικού πεδίου και της σταθερής πίεσης της υποστήριξης, δίνεται από την επαλληλία των μετατοπίσεων (Σοφιανός, 2009):

$$\delta_i(t) = \frac{(p_0 - p_i) \times R}{2} \times \left\{ \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_1} \times \left( 1 - \varepsilon^{-G_1 \times t / n_1} \right) + \frac{t}{n_2} \right\} \quad (2.33)$$

Η σχέση αυτή τείνει ασύμπτωτα στην ευθεία με απότμηση που προκύπτει από τον τύπο 2.34 και έχει κλίση που υπολογίζεται από την εξίσωση 2.35:

$$\delta_i^B = \frac{(p_0 - p_i) \times R}{2} \times \left( \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_1} \right) \quad (2.34)$$

$$\tan^{-1} \theta = \frac{(p_0 - p_i) \times R}{2 \times n_2} \quad (2.35)$$

Η απόσταση  $q$  μεταξύ της ασύμπτωτης ευθείας και της καμπύλης ερπυσμού δίνεται από τη σχέση:

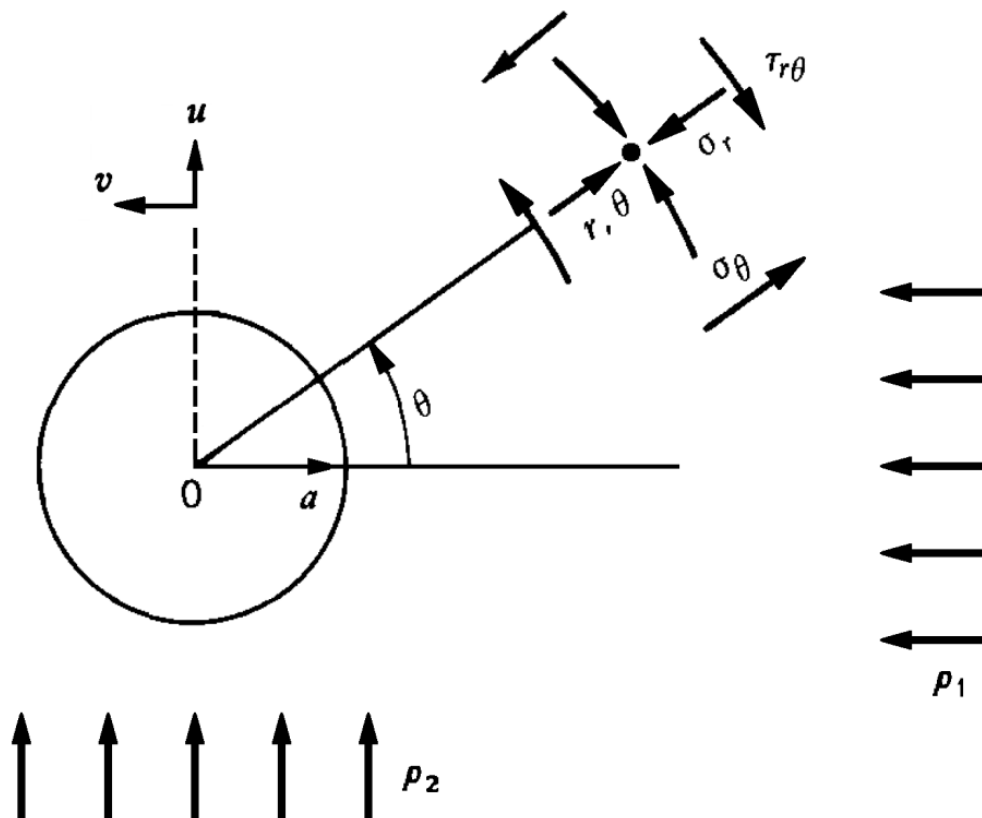
$$\log q = \log \left[ \frac{(p_0 - p_i) \times R}{2 \times G_1} \right] - \frac{G_1}{2.3 \times n_1} \times t \quad (2.36)$$

Οι παράμετροι  $G_1$  και  $n_1$  υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση για δεδομένα ζεύγη  $q$  και  $t$ , ενώ η παράμετρος  $G_2$  προκύπτει από τον τύπο:

$$\frac{(p_0 - p_i) \times R}{2 \times G_2} = \delta_i^B - \frac{(p_0 - p_i) \times R}{2} \times \frac{1}{G_1} \quad (2.37)$$

### 3<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου

Πραγματοποιείται η υπόθεση ότι μία σήραγγα βρίσκεται σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης και ότι έχει εκσκαφθεί σε μία βραχόμαζα η οποία συμπεριφέρεται ελαστικά σε υδροστατική θλίψη και ιξωδοελαστικά σε αποκλίνουσα φόρτιση. Οι κύριες τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου είναι οι  $p_1$  και  $p_2$  (Σχήμα 2.8).



**Σχήμα 2.8:** Σκαρίφημα σήραγγας η οποία βρίσκεται σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης (Goodman, 1989).

Εάν η σήραγγα είναι ανυποστήρικτη (unlined), έτσι ώστε οι συνοριακές συνθήκες στις παρειές της να επιβάλλουν μηδενικές ή σταθερές πιέσεις, τότε οι τάσεις στην ιξωδοελαστική βραχόμαζα δίνονται από τις εξισώσεις 2.38 έως 2.40 (εξισώσεις Kirsch):

$$\sigma_r = \frac{p_1 + p_2}{2} \times \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{p_1 - p_2}{2} \times \left(1 - \frac{4 \times a^2}{r^2} + \frac{3 \times a^4}{r^4}\right) \times \cos 2\theta \quad (2.38)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_1 + p_2}{2} \times \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{p_1 - p_2}{2} \times \left(1 + \frac{3 \times a^4}{r^4}\right) \times \cos 2\theta \quad (2.39)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{p_1 - p_2}{2} \times \left(1 + \frac{2 \times a^2}{r^2} + \frac{3 \times a^4}{r^4}\right) \times \sin 2\theta \quad (2.40)$$

όπου  $\sigma_r$  : η ακτινική τάση

$\sigma_\theta$  : η εφαπτομενική τάση

$\tau_{r\theta}$  : η διατμητική τάση

$a$  : η ακτίνα της σήραγγας

$r$  : η ακτινική απόσταση του σημείου που εξετάζεται (πολικές συντεταγμένες)

$\theta$  : η γωνία από τον οριζόντιο άξονα (πολικές συντεταγμένες)

Εντούτοις η βραχόμαζα παρουσιάζει ερπυσμό, με αποτέλεσμα οι τροπές και οι μετατοπίσεις να μεταβάλλονται με το χρόνο. Στην περίπτωση αυτή, η ακτινική μετατόπιση  $u_r$  ενός σημείου με συντεταγμένες  $r$  και  $\theta$  (Σχήμα 2.8) υπολογίζεται από τη σχέση (Goodman, 1989):

$$u_r(t) = \left( A - C + B \times \frac{d_2}{d_4} \right) \times \frac{m}{q} + \left[ \frac{B \times (d_2/G_1 - d_1)}{G_1 \times d_3 - d_4} - \frac{A - C}{G_1} \right] \times e^{-(G_1 \times t/n_1)} +$$

$$+ B \times \left[ \frac{d_2 \times (1 - m/a) + d_1 \times (m - a)}{G_2 \times (G_1 \times d_3 - d_4)} \right] \times e^{-(a \times t/n_1)} + \frac{A - C + B/2}{n_2} \times t \quad (2.41)$$

όπου

$$A = \frac{p_1 + p_2}{4} \times \frac{a^2}{r} \quad (2.42) \quad \text{και} \quad B = (p_1 - p_2) \times \frac{a^2}{r} \times \cos 2\theta \quad (2.43)$$

$$C = \frac{p_1 - p_2}{4} \times \frac{a^4}{r^3} \times \cos 2\theta \quad (2.44)$$

$$m = G_1 + G_2 \quad (2.45) \quad \text{και} \quad q = G_1 \times G_2 \quad (2.46)$$

$$d_1 = 3 \times K + 4 \times G_2 \quad (2.47) \quad \text{και} \quad d_2 = 3 \times K \times m + 4 \times q \quad (2.48)$$

$$d_3 = 6 \times K + 2 \times G_2 \quad (2.49) \quad \text{και} \quad d_4 = 6 \times K \times m + 2 \times q \quad (2.50)$$

$$a = \frac{3 \times K \times m + q}{3 \times K + G_2} \quad (2.51)$$

#### 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου

Σύμφωνα με τον Goodman (1989), όταν σε μία σήραγγα τοποθετείται ισχυρή υποστήριξη από σκυρόδεμα (stiff lining), έτσι ώστε να παραμένει σε επαφή με το πέτρωμα καθώς αυτό παραμορφώνεται, τότε έχει ουσιαστικά επιβληθεί μία συνοριακή συνθήκη ως προς τη μετατόπιση της βραχόμαζας. Στην περίπτωση αυτή, οι εξισώσεις του Kirsch (2.38, 2.39 και 2.40) που αναφέρονται στην προηγούμενη κλειστή λύση, δεν ισχύουν. Εάν το πέτρωμα συμπεριφέρεται ως μοντέλο Burgers, με την πάροδο του χρόνου θα συσσωρευτεί πίεση στην υποστήριξη, ενώ η διαφορά τάσης στο πέτρωμα θα μειώνεται. Η τελική πίεση της υποστήριξης μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά, υποθέτοντας ότι πρόκειται για έναν κύλινδρο με παχιά τοιχώματα, ο οποίος καταπονείται ομοιόμορφα με μία πίεση που είναι ίση με την αρχική τάση του πετρώματος. Ανάλογα με τις τιμές του ιξώδους του πετρώματος



( $n_1$  και  $n_2$ ), η διαδικασία αυτή μπορεί να χρειαστεί ακόμη και δεκάδες χρόνια για να πραγματοποιηθεί.

Βάσει των προαναφερθέντων, πραγματοποιείται η υπόθεση ότι διανοίγεται σήραγγα σε μία ασυμπίεστη ιξωδοελαστική βραχώμαζα και τοποθετείται ισχυρή ελαστική υποστήριξη από σκυρόδεμα (stiff elastic lining). Αφού κατά πάσα πιθανότητα η υποστήριξη δε θα τοποθετηθεί ακαριαία μετά την εκσκαφή, θεωρείται ότι όταν τελικά γίνει η τοποθέτησή της, έχει ήδη συμβεί η αρχική ελαστική παραμόρφωση της βραχώμαζας. Επομένως, από το μοντέλο παραλείπεται το μέτρο διάτμησης του μοντέλου Maxwell ( $G_2$ ) και πρόκειται ουσιαστικά για το γενικευμένο μοντέλο Maxwell (Goodman, 1989). Οι παράμετροι που απομένουν ( $n_1$ ,  $n_2$  και  $G_1$ ) περιγράφουν τη χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά της βραχώμαζας. Ως  $\nu'$  και  $G'$  ορίζονται οι ελαστικές ιδιότητες του σκυροδέματος, δηλαδή ο λόγος Poisson και το μέτρο διάτμησης αντίστοιχα. Η πίεση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια πετρώματος – σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου προκύπτει από τον τύπο:

$$p_b(t) = p_0 \times (1 + C \times e^{r_1 t} + D \times e^{r_2 t}) \quad (2.52)$$

όπου

$$C = \frac{n_2}{G_1} \times r_2 \times \left[ \frac{r_1 \times (1 + n_1/n_2) + G_1/n_2}{(r_1 - r_2)} \right] \quad (2.53)$$

$$D = \frac{n_2}{G_1} \times r_1 \times \left[ \frac{r_2 \times (1 + n_1/n_2) + G_1/n_2}{(r_2 - r_1)} \right] \quad (2.54)$$

Τα  $r_1$  και  $r_2$  είναι οι δύο πραγματικές λύσεις της δευτεροβάθμιας εξίσωσης:

$$n_1 \times B \times s^2 + \left[ G_1 \times B + \left( 1 + \frac{n_1}{n_2} \right) \right] \times s + \frac{G_1}{n_2} = 0 \quad (2.55)$$

όπου

$$B = \frac{1}{G'} \times \left[ \frac{(1 - 2 \times \nu') \times b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right] \quad (2.56)$$

Δεδομένου ότι η εκσκαφή έχει ακτίνα  $b$  και η υποστήριξη εσωτερική ακτίνα  $a$ , οι τάσεις και η μετατόπιση της υποστήριξης ( $a \leq r \leq b$ ) δίνονται από τις σχέσεις 2.57, 2.58 και 2.59. Αντίστοιχα, οι τάσεις και η μετατόπιση της βραχόμαζας ( $r \geq b$ ) υπολογίζονται από τις εξισώσεις 2.60, 2.61 και 2.62:

$$\sigma_r = p_b \times \frac{b^2}{b^2 - a^2} \times \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2.57) \quad \text{και} \quad \sigma_\theta = p_b \times \frac{b^2}{b^2 - a^2} \times \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2.58)$$

$$u_r = - \frac{b^2 \times r \times p_b \times (1 - 2 \times \nu' + a^2/r^2)}{2 \times G' \times (b^2 - a^2)} \quad (2.59)$$

$$\sigma_r = p_0 \times \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) + p_b \times \frac{b^2}{r^2} \quad (2.60) \quad \text{και} \quad \sigma_\theta = p_0 \times \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) - p_b \times \frac{b^2}{r^2} \quad (2.61)$$

$$u_r = - \frac{b^2}{r} \times p_b \times \left[ \frac{(1 - 2 \times \nu') \times b^2 + a^2}{2 \times G' \times (b^2 - a^2)} \right] \quad (2.62)$$

## 2.8 Οι Παράμετροι Ερπυσμού $n_K$ , $n_M$ και $G_K$

Όπως αναφέρεται και στην 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου που αναλύεται παραπάνω, η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά ενός ιξωδοελαστικού πετρώματος Burgers περιγράφεται ουσιαστικά από τρεις παραμέτρους, τις  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  (ή αλλιώς  $n_1$ ,  $n_2$  και  $G_1$ ). Οι

παράμετροι αυτές, οι οποίες είναι γνωστές και ως «παράμετροι ερπυσμού», έχουν την ίδια έννοια και για το μοντέλο CVISC του κώδικα Flac 3D.

Είναι γνωστό ότι όλοι οι σχηματισμοί διαθέτουν αυτές τις παραμέτρους, δηλαδή μέτρο διάτμησης του Kelvin και συντελεστές ιξώδους του Kelvin και του Maxwell, ανεξαρτήτως εάν παρουσιάζουν ή όχι ερπυστικά φαινόμενα στις συνήθεις κατασκευές. Επειδή όμως το κάθε πέτρωμα έχει τις δικές του χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων αυτών, μόνο μέσω των τιμών του υπάρχει η δυνατότητα να προβλεφθεί εάν θα παρουσιάσει χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά ή όχι, αναλόγως του πόσο υψηλές ή χαμηλές είναι οι τιμές αυτές.

Ο καθορισμός των παραμέτρων ερπυσμού των πετρωμάτων μπορεί να γίνει είτε σε εργαστηριακό επίπεδο προκειμένου για άρρηκτο πέτρωμα, είτε μέσω επιτόπου μετρήσεων (in situ) για τη βραχώμαζα. Η διαδικασία που περιγράφεται στην Παράγραφο 2.5.1 αποτελεί ένα παράδειγμα για το πώς μπορούν να προκύψουν οι παράμετροι ερπυσμού με εργαστηριακές δοκιμές. Αναφορικά με τις επιτόπου μετρήσεις, δύο συνήθη πεδία πραγματοποίησης μετρήσεων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, είναι μέσα σε φρέατα και σε στύλους μεταλλείων. Σημειώνεται ότι σε μη μεταλλευτικές σήραγγες σπάνια γίνονται τέτοιου είδους δοκιμές. Αν και οι επιτόπου μετρήσεις, όπως είναι αναμενόμενο, παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για τη βραχώμαζα και ως εκ τούτου έχουν μεγαλύτερη αξία οι τιμές των παραμέτρων ερπυσμού, δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή οι εργαστηριακές δοκιμές είναι πιο εύκολες, πιο οικονομικές και πιο γρήγορες, συγκριτικά με τις επιτόπου μετρήσεις.

### **2.8.1 Αναζήτηση Παραμέτρων Ερπυσμού στη Διεθνή Βιβλιογραφία**

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία αρκετά εκτεταμένη έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, έτσι ώστε να συγκεντρωθούν παράμετροι ερπυσμού σύμφωνα με το ιξωδοελαστικό μοντέλο Burgers για διάφορα πετρώματα. Κατά την αναζήτηση, παρατηρήθηκε αφενός ότι έχουν γίνει ελάχιστες έρευνες για τον υπολογισμό παραμέτρων ερπυσμού πετρωμάτων και αφετέρου, ότι οι επιτόπου μετρήσεις

σε σχέση με τις εργαστηριακές δοκιμές δεν είναι κατά πολύ λιγότερες, όπως ήταν αρχικά αναμενόμενο.

Παράλληλα με την εύρεση τιμών των παραμέτρων ερπυσμού, συγκεντρώθηκαν και ορισμένα διαγράμματα ερπυσμού διαφόρων πετρωμάτων. Στα διαγράμματα αυτά πραγματοποιείται σύγκριση της θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού βάσει του μοντέλου Burgers και της αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από τις επιτόπου μετρήσεις ή τις εργαστηριακές δοκιμές.

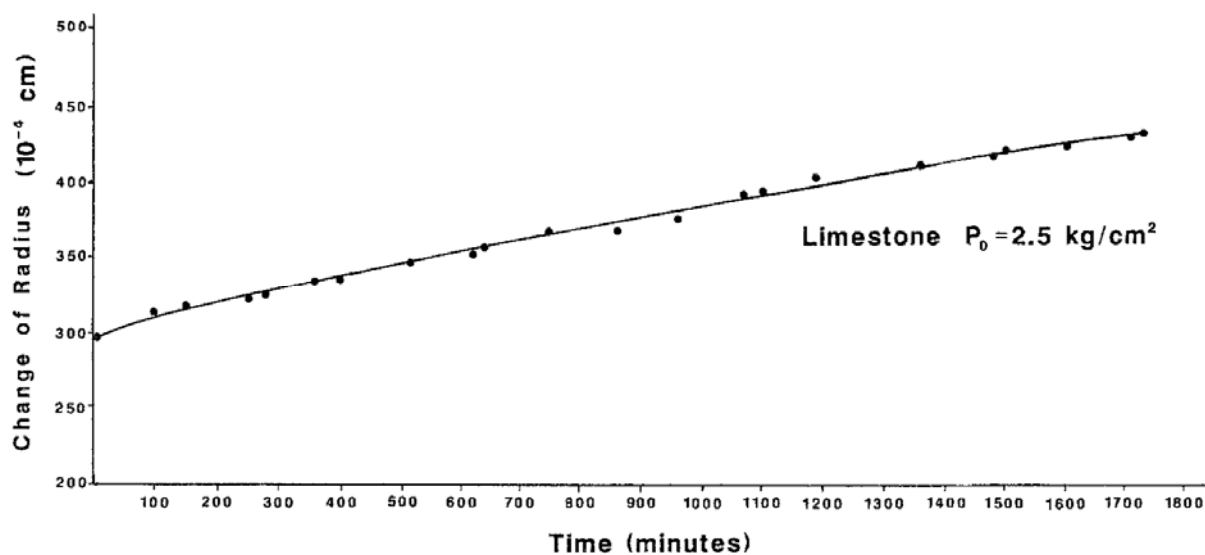
Ακολούθως παρατίθενται ένας πίνακας με τα αποτελέσματα της αναζήτησης, όσον αφορά στις τιμές των παραμέτρων (Πίνακας 2.1), καθώς και ορισμένα από τα διαγράμματα ερπυσμού που συγκεντρώθηκαν (Σχήματα 2.9 έως 2.13).

**Πίνακας 2.1:** Παράμετροι ερπυσμού από τη διεθνή βιβλιογραφία.

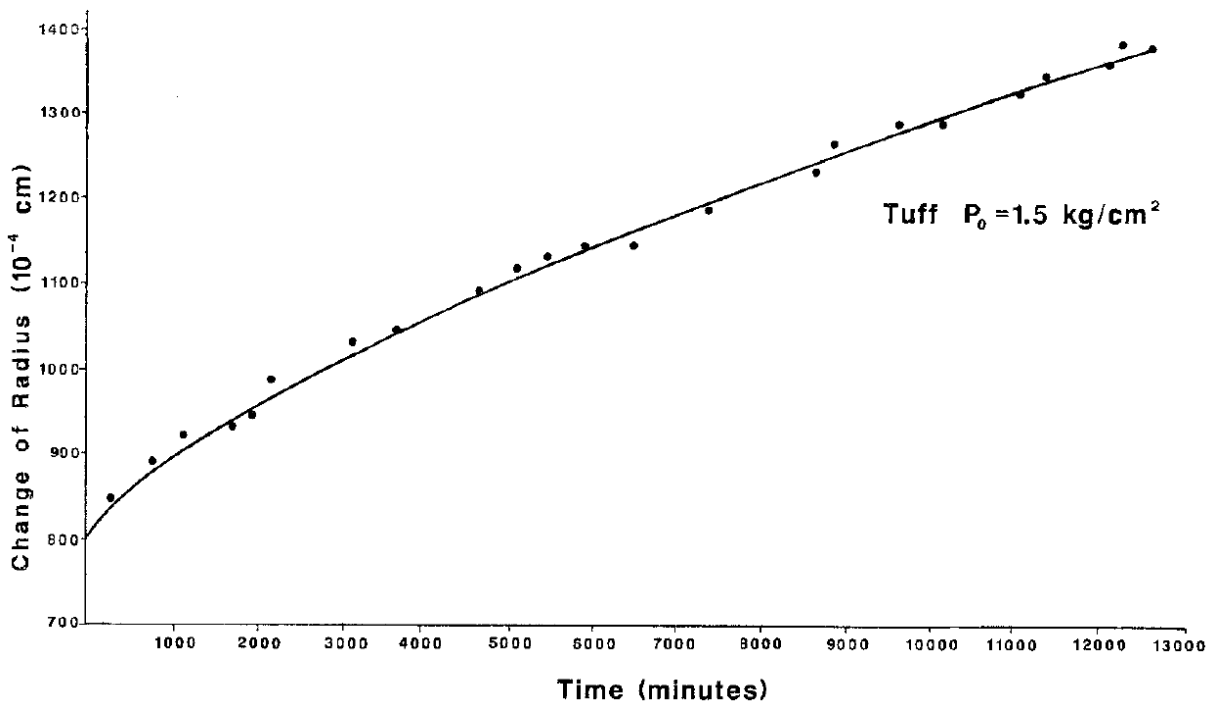
| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΡΠΥΣΜΟΥ (Α) |            |                     |                                       |               |               |                 |                 |
|-------------------------|------------|---------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Ερευνητές               | Χρονολογία | Σχηματισμός         | In Situ / Lab                         | G1 (GK) - Mpa | G2 (GM) - Mpa | n1 (nK) - Mpa*s | n2 (nM) - Mpa*s |
| Rahman et al.           | 1992       | Tar Sands           | Lab                                   | 1,300E+03     | 4,333E+02     | 6,667E+05       | 3,300E+07       |
|                         |            |                     | Lab                                   | 1,300E+03     | 5,333E+02     | 9,333E+05       | 2,500E+07       |
|                         |            |                     | Lab                                   | 2,333E+03     | 3,333E+02     | 1,833E+06       | 1,700E+07       |
|                         |            |                     | Lab                                   | 1,300E+03     | 6,047E+02     | 6,667E+05       | 3,300E+07       |
|                         |            |                     | Lab                                   | 1,300E+03     | 7,442E+02     | 9,333E+05       | 2,500E+07       |
|                         |            |                     | Lab                                   | 2,333E+03     | 4,651E+02     | 1,833E+06       | 1,700E+07       |
| Abass et al.            | 2003       | Khuff               | Lab                                   | 1,103E+05     | 1,999E+04     | 1,655E+07       | 9,101E+08       |
| Bonini et al.           | 2007       | Clay Shales         | Lab                                   | 3,070E+01     | 1,920E+01     | 1,072E+06       | 4,220E+07       |
|                         |            |                     | In Situ                               | -             | 4,000E+02     | 1,072E+06       | 4,800E+10       |
| Chin & Rogers           | 1987       | Clay Shales         | In Situ                               | 8,182E+02     | 1,856E+02     | 2,096E+07       | 9,210E+07       |
|                         |            | Weathered Limestone | In Situ                               | 1,951E+02     | 2,200E+02     | 3,918E+07       | 5,840E+10       |
|                         |            | Weathered Tuff      | In Situ                               | 3,388E+02     | 4,967E+02     | 2,127E+07       | 6,062E+07       |
| Barla                   | 2001       | -                   | Εκτιμήσεις για αριθμητική προσομοίωση | 2,000E+03     | 2,000E+03     | 1,892E+08       | 1,892E+07       |
| Marcato et al.          | 2009       | Deposits and Flysch | In Situ                               | 2,500E+02     | 3,840E+02     | 2,100E+13       | 2,100E+13       |

| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΡΠΥΣΜΟΥ (B) |            |   |  |               |               |                 |                 |
|-------------------------|------------|---|--|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Ερευνητές               | Χρονολογία | Σχηματισμός   | In Situ / Lab                                | G1 (GK) - Mpa | G2 (GM) - Mpa | n1 (nK) - Mpa*s | n2 (nM) - Mpa*s |
| Minkley et al.          | 2001       | Potash  | Lab  | 2,000E+03     | 4,000E+03     | 6,000E+05       | 2,400E+08       |
| Barla et al.            | 2008       | Carboniferous Formation (Schists, Sandstones, Coal, Clay-like Shales & Cataclastic Rocks) | In Situ                                      | 4,981E+02     | 5,764E+02     | 1,346E+08       | 8,824E+08       |
| Ottosen                 | 1986       | Rock Salt   | Lab  | 2,560E+03     | -             | 4,104E+08       | 1,548E+10       |
| Chen & Chugh            | 1996       | Coal  | In Situ                                      | 1,450E+03     | 1,860E+02     | 2,000E+05       | 1,030E+07       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 2,900E+02     | 3,590E+02     | 2,900E+04       | 8,280E+06       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 2,070E+02     | 2,550E+02     | 1,660E+04       | 5,030E+06       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 6,140E+02     | 1,100E+02     | 1,720E+04       | 2,620E+07       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 2,070E+02     | 2,070E+02     | 1,100E+05       | 6,900E+06       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 1,310E+03     | 2,280E+02     | 1,240E+06       | 1,380E+07       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 3,590E+02     | 9,660E+01     | 1,860E+05       | 1,790E+07       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 8,280E+03     | 4,900E+03     | 6,690E+06       | 1,520E+08       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 1,860E+03     | 2,140E+03     | 3,790E+05       | 4,410E+07       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 2,210E+03     | 3,100E+03     | 3,520E+05       | 8,280E+08       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 2,550E+02     | 8,280E+01     | 1,030E+05       | 3,240E+06       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 4,140E+01     | 5,520E+01     | 1,660E+04       | 1,030E+06       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 5,660E+02     | 2,410E+02     | 4,970E+04       | 2,000E+07       |
|                         |            |   | In Situ                                      | 3,660E+02     | 4,140E+02     | 1,520E+05       | 8,280E+06       |
|                         |            |   | Lab  | 4,070E+03     | 1,380E+03     | 2,690E+06       | 6,570E+08       |
|                         |            |   | Lab  | 8,070E+03     | 3,660E+03     | 4,480E+06       | 3,140E+08       |
| Apuani et al.           | 2007       | Gneiss  | Lab  | 1,220E+03     | 1,220E+03     | 1,000E+14       | 1,000E+14       |
|                         |            | Mylonite  | Lab  | 6,730E+02     | 6,730E+02     | 1,000E+13       | 1,000E+13       |
| Goodman                 | 1989       | -   | Εκτιμήσεις για επιβεβαίωση επίλυσης κλειστού | 3,447E+02     | 3,447E+03     | 2,068E+10       | 4,137E+12       |
| Malan et al.            | 1997       | Quartzite   | Lab (σ=107 MPa)                              | 4,667E+05     | -             | 3,240E+09       | 1,620E+11       |
|                         |            | Lava  | Lab (σ=367 MPa)                              | 7,000E+05     | -             | 1,368E+10       | 6,480E+11       |
|                         |            | Hard Surrounding Rock in Deep Level Gold Mine   | In Situ                                      | 1,667E+06     | -             | 9,000E+08       | 8,280E+09       |

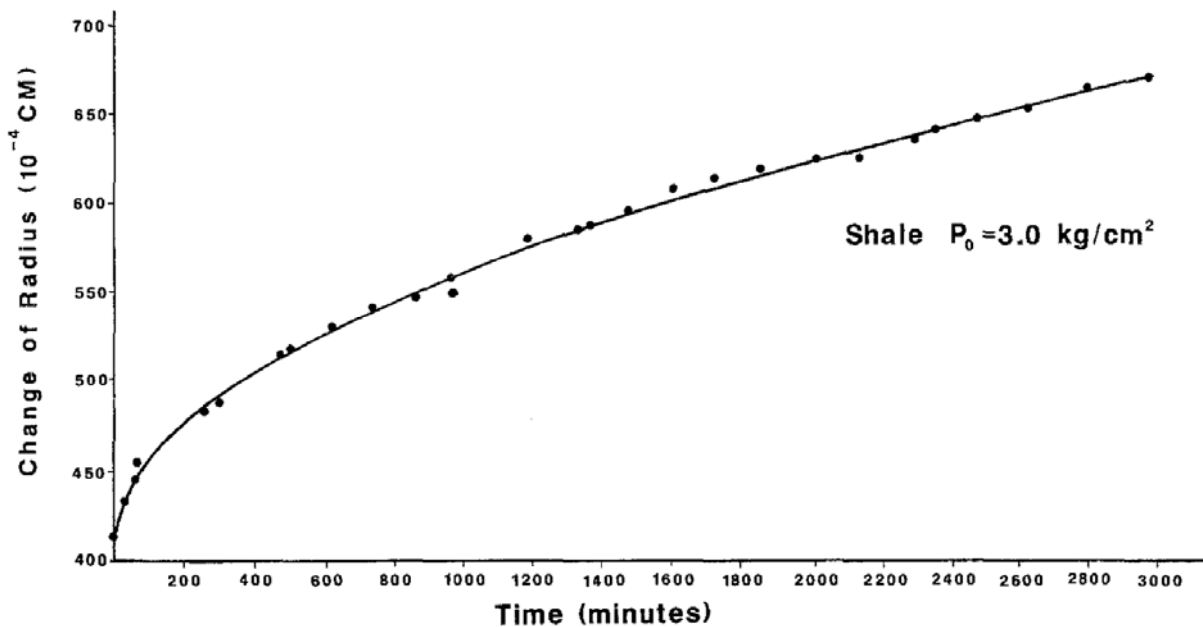
| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΡΠΥΣΜΟΥ (Γ) |            |                                   |               |               |               |                 |                 |
|-------------------------|------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Ερευνητές               | Χρονολογία | Σχηματισμός                       | In Situ / Lab | G1 (GK) - Mpa | G2 (GM) - Mpa | n1 (nK) - Mpa*s | n2 (nM) - Mpa*s |
| Jandakaew               | 2007       | Rock Salt                         | Lab           | 9,100E+03     | 9,000E+02     | 6,394E+05       | 3,205E+04       |
|                         |            |                                   | Lab           | 9,100E+03     | 1,300E+03     | 6,653E+05       | 3,205E+04       |
| Fifer Bizjak & Zupancic | 2007       | Landslide Gravel Material (w=50%) | Lab           | 5,920E-02     | 1,920E-01     | 2,140E+00       | 2,950E+01       |
|                         |            | Landslide Gravel Material (w=40%) | Lab           | 1,530E-01     | 1,110E+00     | 5,020E+00       | 1,300E+03       |
| Shen & Xu               | 2007       | Fresh or Micro-weathering Granite | In Situ       | 7,000E+05     | 5,100E+04     | 3,700E+08       | 9,500E+12       |
|                         |            | Weak-weathering Granite           | In Situ       | 2,000E+05     | 4,000E+04     | 8,500E+07       | 3,500E+12       |
|                         |            | Weak-weathering Granite           | In Situ       | 6,000E+04     | 3,000E+04     | 3,600E+07       | 8,500E+11       |
|                         |            | Weathered Granite (fault area)    | In Situ       | 8,000E+04     | 4,000E+04     | 7,800E+07       | 3,000E+12       |
|                         |            | Weathered Granite (fault area)    | In Situ       | 5,000E+04     | 3,000E+04     | 1,800E+07       | 8,000E+11       |
| Korzeniowski            | 1991       | Dolomite                          | In Situ       | 8,228E+02     | 2,980E+02     | 1,115E+08       | 4,435E+09       |
|                         |            |                                   | In Situ       | 7,404E+02     | 2,528E+02     | 8,900E+07       | 3,984E+09       |
|                         |            |                                   | In Situ       | 7,620E+02     | 4,588E+02     | 7,677E+07       | 4,144E+09       |
|                         |            |                                   | In Situ       | 9,556E+02     | 3,076E+02     | 1,241E+08       | 4,802E+09       |
|                         |            |                                   | In Situ       | 7,448E+02     | 2,176E+02     | 7,628E+07       | 4,332E+09       |



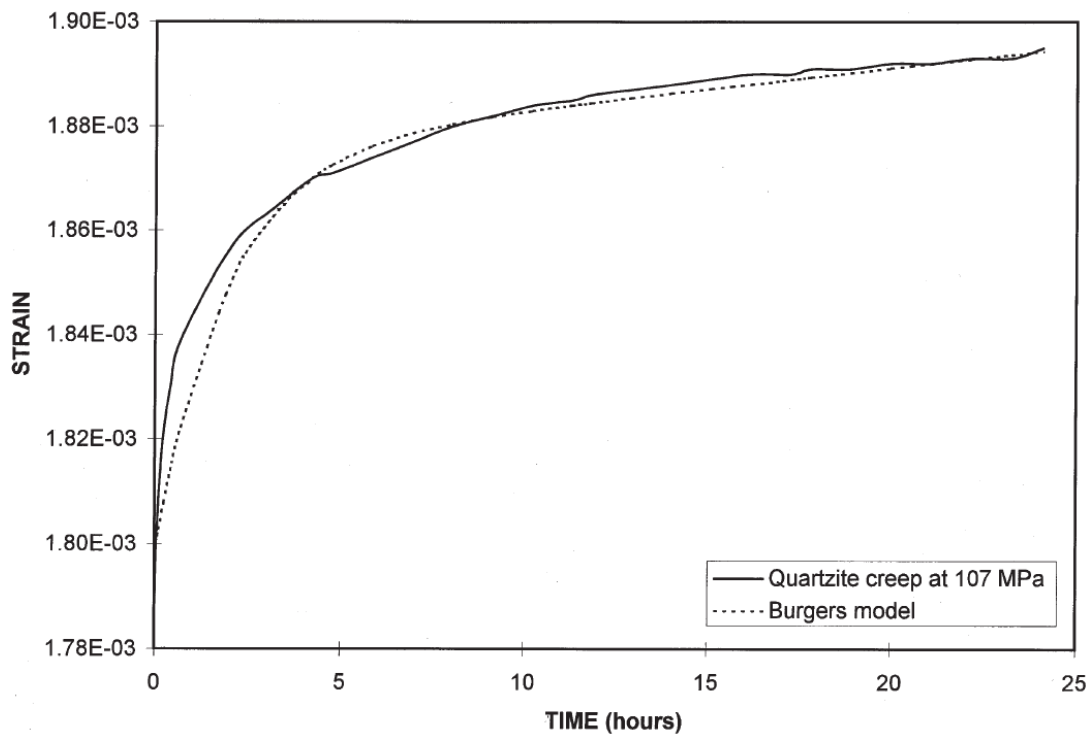
**Σχήμα 2.9:** Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από επιτόπου μετρήσεις για ασβεστόλιθο (Chin & Rogers, 1987).



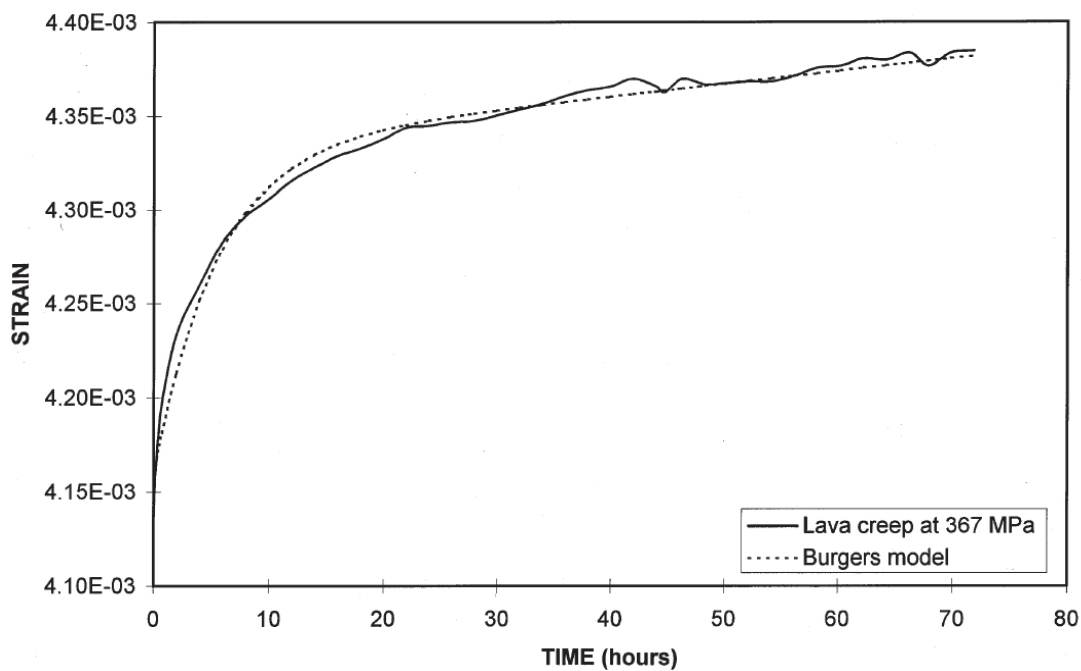
**Σχήμα 2.10:** Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από επιτόπου μετρήσεις για τόφο (Chin & Rogers, 1987).



**Σχήμα 2.11:** Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από επιτόπου μετρήσεις για αργιλικό σχιστόλιθο (Chin & Rogers, 1987).



Σχήμα 2.12: Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές για χαλαζίτη (Malan et al., 1997).



Σχήμα 2.13: Σύγκριση θεωρητικής καμπύλης ερπυσμού (μοντέλο Burgers) και αντίστοιχης καμπύλης που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές για λάβα (Malan et al., 1997).



## 2.8.2 Επίδραση Παραμέτρων Ερπυσμού

Από τις τιμές των παραμέτρων ερπυσμού που συγκεντρώθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία, υπολογίστηκαν τρεις ενδεικτικές ομάδες  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$ , μία με υψηλές τιμές, μία με χαμηλές και μία με μέσες (Πίνακας 2.2). Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι δεν πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των τιμών και ότι τα τρία σύνολα αυτών υπολογίστηκαν εμπειρικά. Οι τιμές αυτές εξήχθησαν με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση της επίδρασης που έχει η καθεμία παράμετρος στην εκδήλωση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.

**Πίνακας 2.2:** Ομάδες ενδεικτικών τιμών παραμέτρων ερπυσμού.

| <b>ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΡΠΥΣΜΟΥ</b> |                      |                        |                        |
|--|----------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Κατηγορία</b>                             | <b>G1 (GK) - Mpa</b> | <b>n1 (nK) - Mpa*s</b> | <b>n2 (nM) - Mpa*s</b> |
| Ομάδα Α<br>(μέσες τιμές)                     | 1,000E+03            | 4,000E+09              | 4,000E+10              |
| Ομάδα Β<br>(υψηλές τιμές)                    | 1,000E+04            | 4,000E+11              | 4,000E+12              |
| Ομάδα Γ<br>(χαμηλές τιμές)                   | 4,500E+02            | 4,000E+07              | 4,000E+08              |

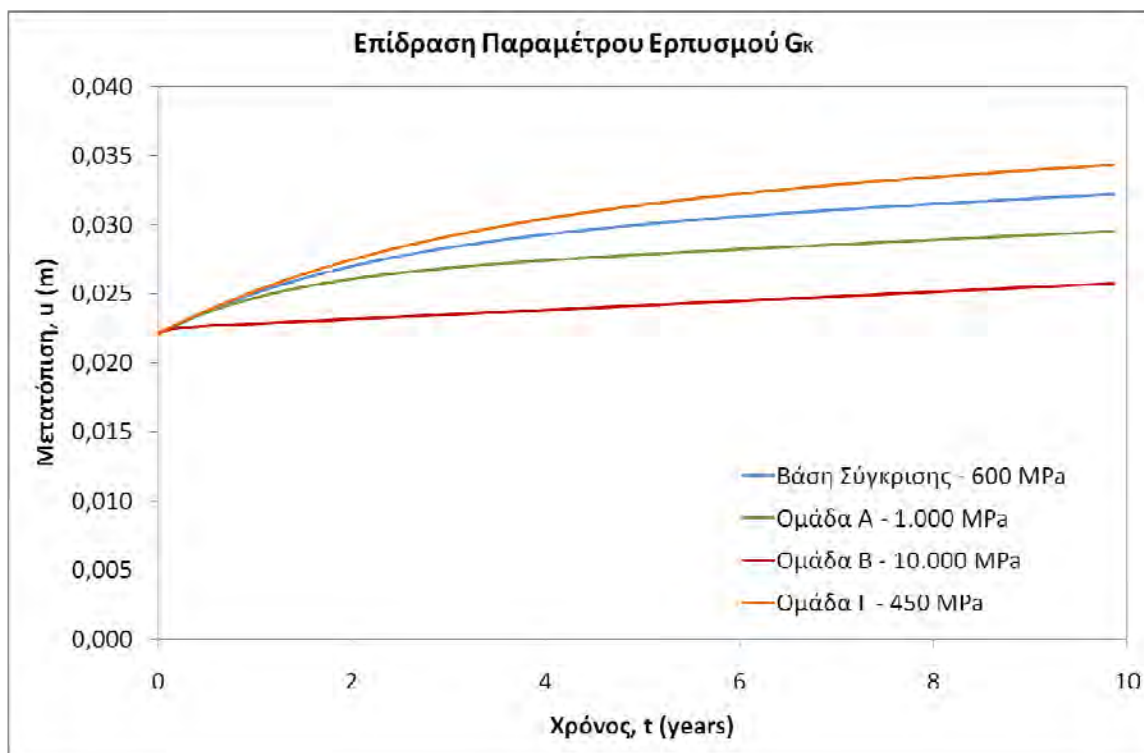
Η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  έγινε με την κατασκευή συγκριτικών καμπύλων ερπυσμού για δέκα έτη σε ανυποστήρικτη σήραγγα, μέσω της 1<sup>ης</sup> Επίλυσης Κλειστού Τύπου, η οποία παρατίθεται σε προηγούμενη παράγραφο (Σοφιανός, 2009). Ως δεδομένα, πέραν των παραμέτρων ερπυσμού του Πίνακα 2.2, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών που αποτελεί και τη μελέτη περίπτωσης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε αφενός η ακτίνα της (6,3 m) και αφετέρου, από την κατηγορία M4 (60 m υπερκείμενα) που παρουσιάζεται στην τεχνική έκθεση της σήραγγας, η πίεση των υπερκειμένων (1,32 MPa) και το μέτρο διάτμησης του Maxwell (188 MPa). Ως «βάση σύγκρισης» των παραμέτρων του παραπάνω

πίνακα χρησιμοποιήθηκε μία τέταρτη ομάδα παραμέτρων ερπυσμού (Πίνακας 2.3), στην οποία ορίστηκαν μέτριες τιμές για τις παραμέτρους  $n_K$  και  $n_M$ , και χαμηλή τιμή για το  $G_K$ .

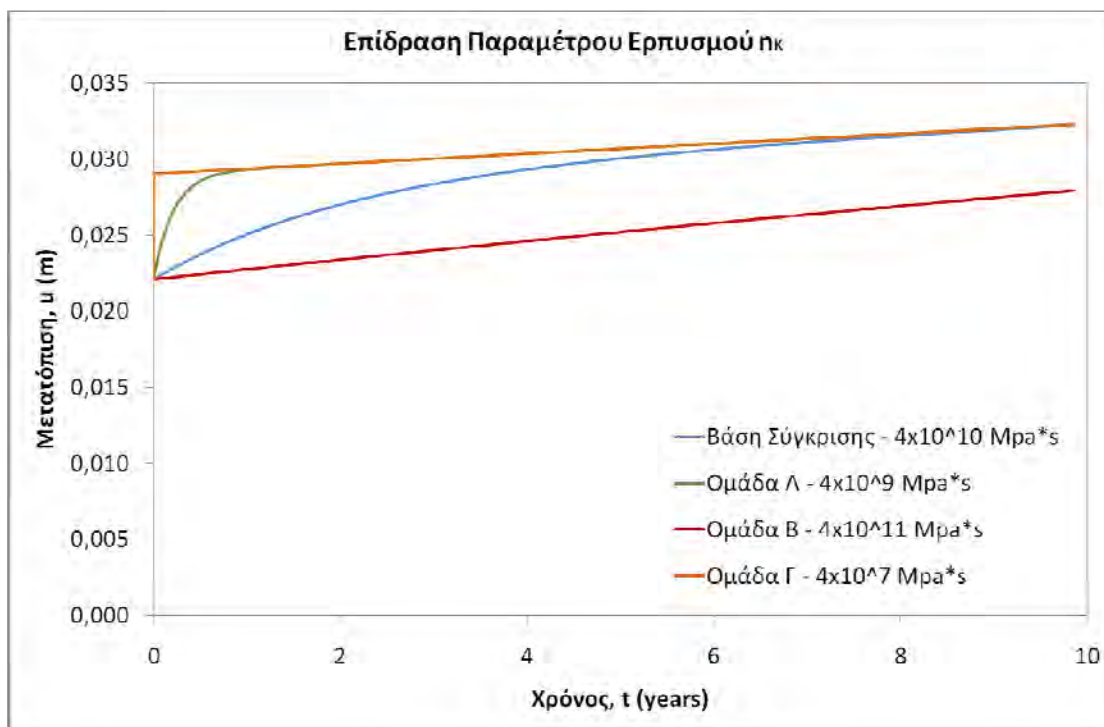
**Πίνακας 2.3:** Παράμετροι ερπυσμού που χρησιμοποιήθηκαν ως «βάση σύγκρισης».

| ΒΑΣΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ |                 |                 |
|----------------|-----------------|-----------------|
| G1 (GK) - Mpa  | n1 (nK) - Mpa*s | n2 (nM) - Mpa*s |
| 6,000E+02      | 4,000E+10       | 4,000E+11       |

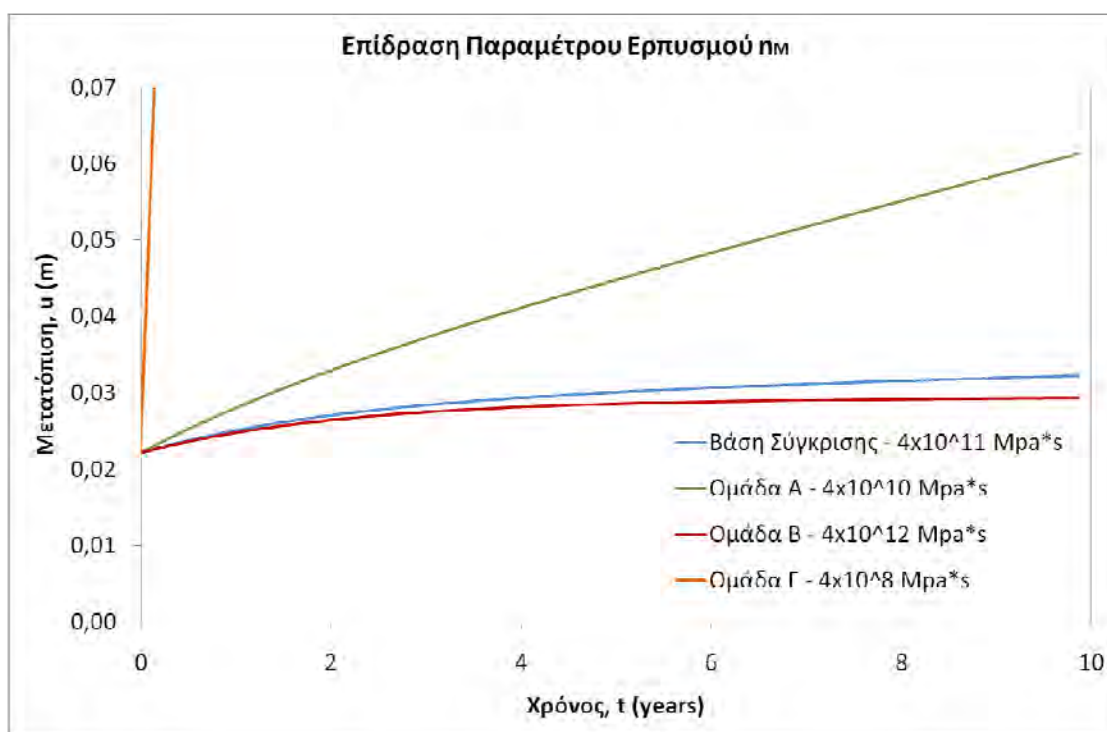
Ακολουθούν τα διαγράμματα με τις καμπύλες ερπυσμού που κατασκευάστηκαν (Σχήματα 2.14 έως 2.17). Σημειώνεται ότι σε κάθε διάγραμμα παραμένουν σταθερές εναλλάξ δύο από τις τρεις παραμέτρους του Πίνακα 2.3, ενώ η τρίτη παράμετρος παίρνει τιμές τόσο από τον Πίνακα 2.2, όσο και από τον Πίνακα 2.3.



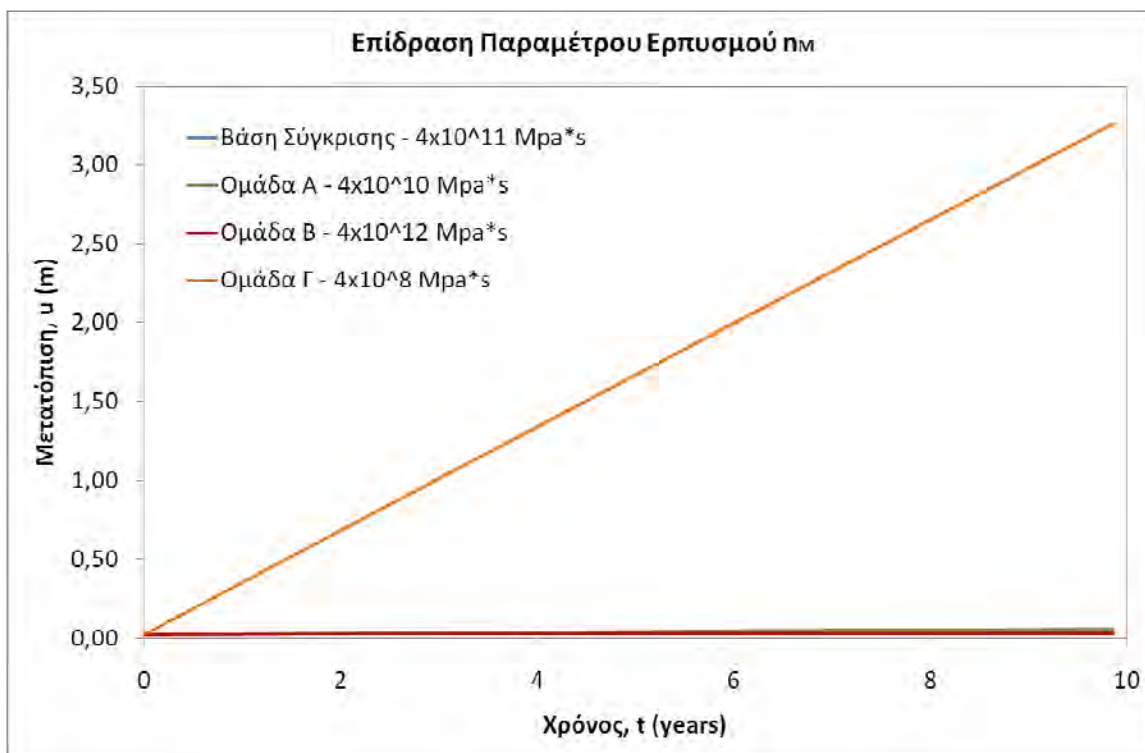
**Σχήμα 2.14:** Επίδραση της παραμέτρου  $G_K$  στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.



**Σχήμα 2.15:** Επίδραση της παραμέτρου  $n_k$  στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.



**Σχήμα 2.16:** Επίδραση της παραμέτρου  $n_M$  (υψηλές τιμές) στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.



**Σχήμα 2.17:** Επίδραση της παραμέτρου  $n_M$  (χαμηλές τιμές) στο φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.

Από τα συγκριτικά διαγράμματα που παρατίθενται παραπάνω, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά στην επίδραση των παραμέτρων  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  στην εκδήλωση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.

Για την παράμετρο  $G_K$ , η οποία εκφράζει τη μετατόπιση λόγω πρωτογενούς ερπυσμού ή αλλιώς το μέγεθος της καθυστερημένης ελαστικότητας, παρατηρείται ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή της τόσο μικρότερες είναι οι μετατοπίσεις. Διαφορετικά, δύναται να ειπωθεί ότι υπό υψηλές τιμές  $G_K$  τα στοιχεία του μοντέλου Kelvin αδρανοποιούνται σε μεγάλο βαθμό, και μόνο αυτά του μοντέλου Maxwell παραμένουν ουσιαστικά ενεργά. Η ελαστική συμπεριφορά επηρεάζεται γενικώς από την παράμετρο  $G_M$ , η οποία όμως δε χρήζει παραμετρικής διερεύνησης. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί ότι ο λόγος  $G_K/G_M$  εκφράζει το μέγεθος του πρωτογενούς ερπυσμού σε σχέση με την ελαστική απόκριση, καθώς όσο υψηλότερες τιμές παίρνει, τόσο πιο έκδηλος είναι ο πρωτογενής ερπυσμός.

Η παράμετρος  $n_K$  εκφράζει το χρόνο εκδήλωσης του δευτερογενούς ερπυσμού ή αλλιώς το ρυθμό της καθυστερημένης ελαστικότητας. Από το Σχήμα 2.15 προκύπτει ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή του  $n_K$ , τόσο περισσότερος χρόνος χρειάζεται για να ολοκληρωθεί το στάδιο του πρωτογενούς ερπυσμού, δηλαδή όπως και στην περίπτωση των υψηλών τιμών του  $G_K$ , το πέτρωμα τείνει προς την ελαστικότητα. Ακόμη, από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι σε περίπτωση ιδιαίτερα χαμηλών τιμών της παραμέτρου  $n_K$  (που τείνουν στο 0), ο πρωτογενής ερπυσμός είναι εκρηκτικός, οπότε πρόκειται για ακαριαία σύνθλιψη, και έπειτα από πολύ μικρό χρονικό διάστημα το πέτρωμα εισέρχεται στο στάδιο του δευτερογενούς ερπυσμού.

Τέλος, από τα Σχήματα 2.16 και 2.17 παρατηρείται ότι η παράμετρος  $n_M$  επηρεάζει το στάδιο του δευτερογενούς ερπυσμού. Πρόκειται δηλαδή για τον παράγοντα που αντιπροσωπεύει το ρυθμό της ιξώδους ροής ενός πετρώματος και σχηματικά αποδίδεται με την κλίση που λαμβάνει η καμπύλη του δευτερογενούς ερπυσμού. Όσο πιο χαμηλή είναι η τιμή του  $n_M$ , τόσο πιο εκρηκτικό είναι το φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού και αντίστοιχα, τόσο μεγαλύτερες οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Το Λογισμικό Προσομοίωσης Flac 3D – Πρώτη Φάση Προσομοιώσεων

### 3.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη χρονικά εξαρτώμενη μηχανική συμπεριφορά της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά την εκσκαφή, είναι και οι αριθμητικές αναλύσεις (Barla, 2001). Οι μέθοδοι αυτές, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αποτελούν πλέον τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επίλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων, καθώς προσφέρουν κατά κανόνα μεγαλύτερη αξιοπιστία και ταχύτητα (Hoek et al., 1991). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αριθμητικές αναλύσεις, μέσω κατάλληλα επιλεγμένων κατά περίπτωση προτύπων (μοντέλων), επιτυγχάνουν την καλύτερη προσέγγιση της συμπεριφοράς του επιτόπου πετρώματος, με παρόντα όλα τα δομικά του χαρακτηριστικά.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αριθμητικών αναλύσεων, οι οποίες δύναται να διαχωριστούν ως εξής (Αγιουτάντης, 1995):

- ↪ Μέθοδοι που θεωρούν το πέτρωμα ως (ισοδύναμο) συνεχές μέσο (equivalent continuum).
  
- ↪ Μέθοδοι που θεωρούν το πέτρωμα, καθ' όλη τη διάρκεια της υπολογιστικής εργασίας, ως ασυνεχές μέσο συνιστάμενο από ένα άθροισμα διακεκριμένων τεμαχίων που διαχωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες (Fairhurst et al., 1990).
  
- ↪ Μέθοδοι που συνδυάζουν τις προηγούμενες δύο κατηγορίες και συνιστούν υβριδικές μεθόδους.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – F.E.M.), των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method – F.D.M.) και των Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method – B.E.M.). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει η μέθοδος των Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method – D.E.M.) και στην τρίτη ανήκουν διάφορες μέθοδοι που συνδυάζουν περισσότερες από μία αριθμητικές μεθόδους, όπως λ.χ. εκείνη των Συνοριακών και Πεπερασμένων Στοιχείων (B.E. / F.E.).

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή αφενός του λογισμικού προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και αφετέρου, των μοντέλων που κατασκευάστηκαν κατά την πρώτη φάση των προσομοιώσεων. Μέσω των μοντέλων αυτών, εξετάστηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν τις αριθμητικές αναλύσεις, ενώ πραγματοποιήθηκαν και συγκρίσεις με κλειστού τύπου επιλύσεις, έτσι ώστε να βαθμονομηθούν τα αριθμητικά μοντέλα ως προς την ακρίβεια της επίλυσης.

### **3.2 Λογισμικό Προσομοίωσης Flac 3D**

Το Flac 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua – Itasca, 2006) είναι ένα τριδιάστατο πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων, το οποίο λειτουργεί βάσει της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Κατά τη μέθοδο αυτή το πέτρωμα θεωρείται ότι



αποτελεί ένα ισοδύναμο συνεχές μέσο, στο οποίο ενσωματώνονται οι ιδιότητες των ασυνεχειών.

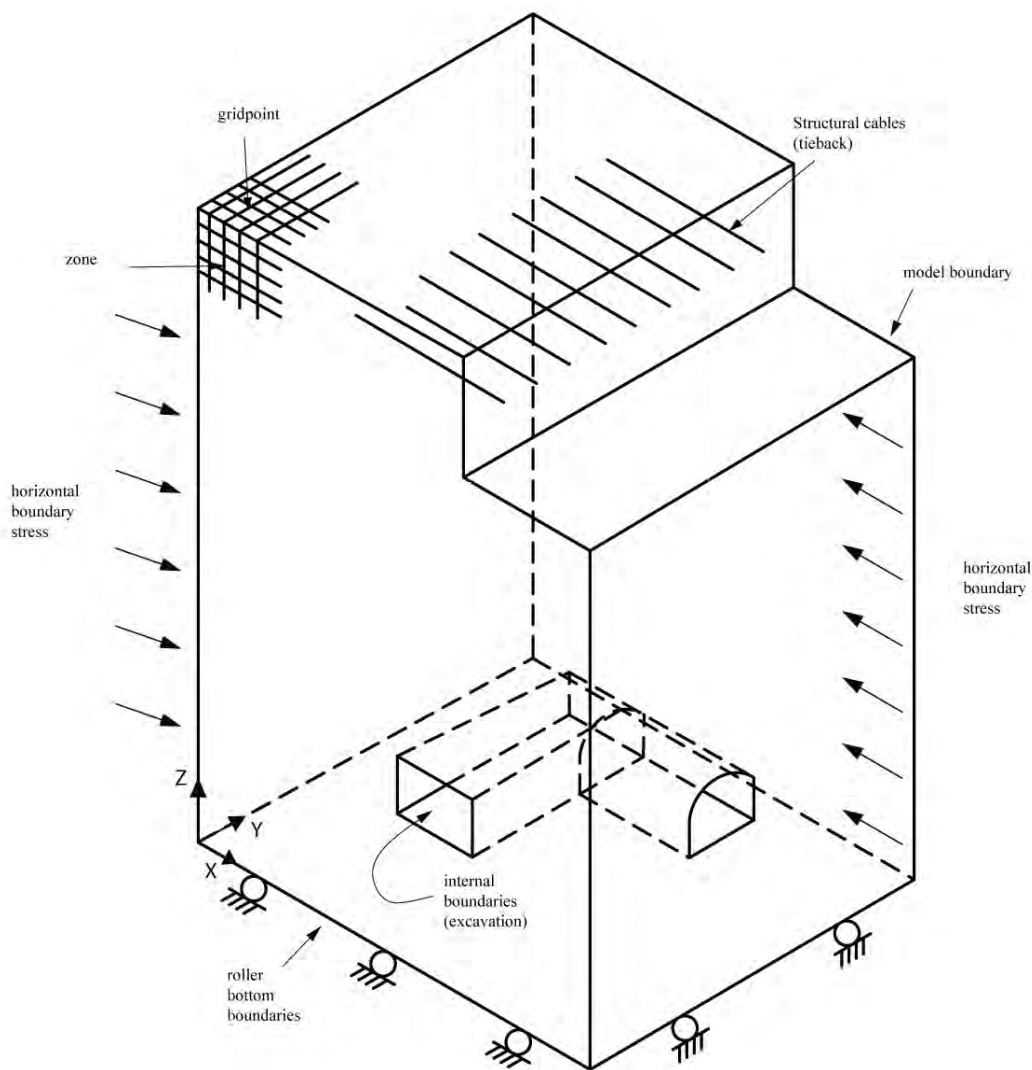
Το Flac 3D περιλαμβάνει στο ίδιο πακέτο χρήσης τα ακόλουθα στοιχεία:

- ✦ Την προ – επεξεργασία ενός προβλήματος (pre – processing), που περιλαμβάνει αφενός τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών και αφετέρου, τον καθορισμό των ιδιοτήτων και συμπεριφορών των υλικών, των συνοριακών συνθηκών, της αρχικής εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης και της αλληλουχίας κατασκευής. Η προ – επεξεργασία του προβλήματος πραγματοποιείται από το χρήστη με την εισαγωγή εντολών (command driven) είτε κατευθείαν στη γραμμή εντολών του προγράμματος, είτε μέσω αρχείου κειμένου. Το πρόγραμμα παρέχει αξιοσημείωτη ευελιξία, κυρίως λόγω της ενσωματωμένης γλώσσας προγραμματισμού του Flac 3D, τη FISH.
- ✦ Τον κώδικα επίλυσης του προβλήματος (solver), ο οποίος όπως σημειώθηκε βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.
- ✦ Τη μετά – επεξεργασία του προβλήματος (post – processing), η οποία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ελέγξει τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, είτε με γραφική απεικόνιση (άμεση ή έμμεση), είτε με αρχεία τύπου ASCII. Όπως στην περίπτωση της προ – επεξεργασίας, έτσι και κατά τη μετά – επεξεργασία του προβλήματος, ο χρήστης διευκολύνεται ιδιαίτερα από την ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού FISH.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών που εφαρμόζει το λογισμικό Flac 3D είναι παραπλήσια με αυτή του διδιάστατου κώδικα Flac 2D της ίδιας εταιρείας. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορές όσον αφορά στην επέκταση του μαθηματικού μοντέλου από τις δύο διαστάσεις στις τρεις. Ο κώδικας μπορεί να αντιμετωπίσει τόσο στατικά, όσο και δυναμικά προβλήματα σε τρεις διαστάσεις (άμεσα ή έμμεσα). Σημειώνεται ότι στο Flac 3D είναι δυνατή η προσομοίωση προβλημάτων επίπεδης παραμόρφωσης, εφαρμόζοντας κατάλληλες

συνοριακές συνθήκες, όπως απαγόρευση της μετατόπισης παράλληλα με το διαμήκη άξονα της σήραγγας, σε μοντέλο που προσομοιώνεται με πάχος μίας ζώνης. Εξάλλου, σε τριδιάστατα προβλήματα η επίδραση της τρίτης διάστασης λαμβάνεται υπόψη με άμεσο τρόπο και όχι έμμεσα, όπως συμβαίνει στους διδιάστατους κώδικες.

Με βάση τη γεωμετρία της περιβάλλουσας βραχώμαζας, τους εδαφικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό προσομοίωση έργου, κατασκευάζεται πλέγμα ζωνών πεπερασμένων διαφορών, αποτελούμενο από τριδιάστατα στοιχεία. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό μοντέλο του Flac 3D.



**Σχήμα 3.1:** Τυπικό μοντέλο του προγράμματος Flac 3D (Itasca, 2006).

Η βραχόμαζα, όπως προαναφέρθηκε, προσομοιώνεται ως ένα συνεχές μέσο με συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες, καθώς διέπεται από γενικές αρχές όπως είναι οι εξισώσεις κίνησης, οι εξισώσεις τάσεων – παραμορφώσεων και το εκάστοτε κριτήριο διαρροής που ακολουθείται. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την προσομοίωσή της μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα κριτήρια διαρροής, όπως λ.χ. ελαστοπλαστικά (π.χ. Mohr – Coulomb), ιξωδοελαστικά (π.χ. Burgers) και ιξωδοπλαστικά (π.χ. CVISC). Με το συνδυασμό όλων αυτών, προκύπτει η κατάστρωση ενός συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες συσχετίζουν μηχανικές μεταβλητές (όπως είναι η τάση) και κινηματικές μεταβλητές (όπως είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης και η ταχύτητα). Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται για δεδομένες γεωμετρίες, ιδιότητες του συνεχούς μέσου, συνοριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες.

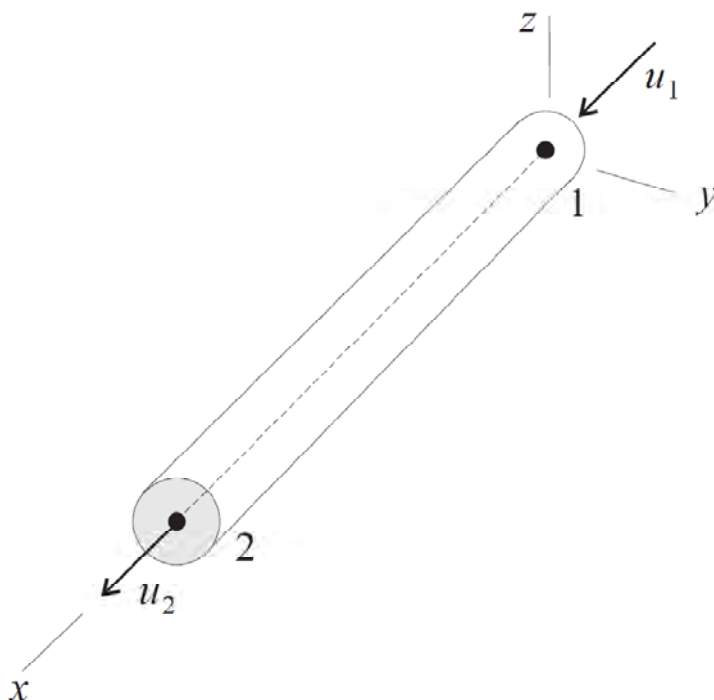
Σε ένα μοντέλο του κώδικα Flac 3D, κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται σύμφωνα με τον προκαθορισμένο νόμο τάσεων – παραμορφώσεων και τις εφαρμοζόμενες συνοριακές συνθήκες (δυνάμεις ή μετατοπίσεις). Τα μέτρα υποστήριξης προσομοιώνονται με ειδικά δομικά στοιχεία. Ενδεικτικά αναφέρονται τα αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης που προσομοιώνονται με ραβδωτά στοιχεία (cable elements) και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που προσομοιώνεται με στοιχεία κελύφους (shell elements). Σημειώνεται ότι στα αγκύρια προσομοιώνεται και η συνάφειά τους με την περιβάλλουσα βραχόμαζα, μέσω της εισαγωγής παραμέτρων αντοχής του ενέματος και της συνάφειας αυτού με το πέτρωμα.

Ακολούθως περιγράφονται συνοπτικά τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

### Αγκύρια

Τα αγκύρια προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία δύο κόμβων, με ένα βαθμό ελευθερίας ανά κόμβο, παράλληλα με τον άξονα του στοιχείου (Σχήμα 3.2). Ένα αγκύριο είναι δυνατό να προσομοιωθεί ως ένα σύνολο τέτοιου είδους γραμμικών στοιχείων. Καθένα από αυτά τα γραμμικά στοιχεία μπορεί να διαρρεύσει λόγω εφελκυσμού ή θλίψης, αλλά δεν μπορεί να αναλάβει καμπτικές ροπές. Τα αγκύρια μπορούν να είναι πακτωμένα στο ένα

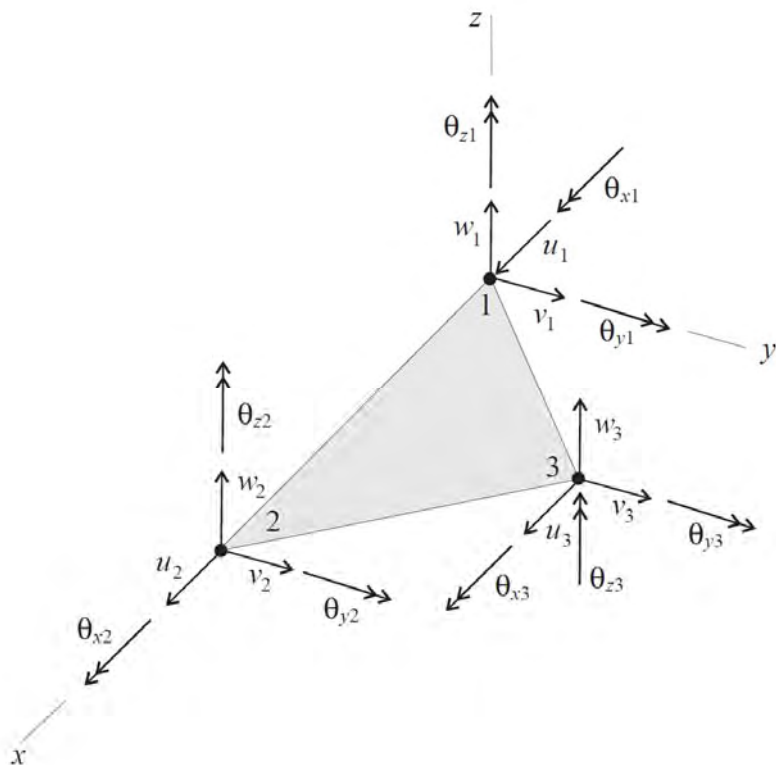
τους άκρο ή ενεματωμένα καθ' όλο το μήκος τους, ενώ μπορούν επίσης να είναι προεντεταμένα ή να φέρουν αξονικό σημειακό φορτίο.



**Σχήμα 3.2:** Γραμμικό στοιχείο για την προσομοίωση αγκυρίου, με ένα βαθμό ελευθερίας ανά κόμβο (Itasca, 2006).

### Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώνεται με επίπεδα στοιχεία κελύφους τριγωνικής μορφής (Σχήμα 3.3). Τα τριγωνικά αυτά στοιχεία έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Ένα σύνολο τέτοιου είδους στοιχείων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω των γειτονικών τους κόμβων, συντελούν ένα φορέα κελυφών που αποτελεί το προσομοίωμα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η συμπεριφορά του φορέα είναι κατά κύριο λόγο γραμμικώς ελαστική. Εντούτοις, είναι δυνατό να εισαχθούν πλαστικές γραμμικές αρθρώσεις μεταξύ των κοινών ακμών των ενωμένων τριγωνικών στοιχείων.



**Σχήμα 3.3:** Επίπεδο στοιχείο για την προσομοίωση κελύφους εκτοξευόμενου σκυροδέματος, με 18 βαθμούς ελευθερίας (Itasca, 2006).

### 3.3 Μοντέλα Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων

Τα μοντέλα της πρώτης φάσης προσομοιώσεων ήταν τα αρχικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν και αποτέλεσαν τη βάση για τη δημιουργία τόσο παραμετροποιημένων μοντέλων (δεύτερη φάση – Κεφάλαιο 4), όσο και μοντέλων για τη μελέτη περίπτωσης (case study) που πραγματοποιήθηκε (τρίτη φάση – Κεφάλαιο 5). Σκοπός του συνόλου των αριθμητικών αναλύσεων της παρούσας Εργασίας ήταν η προσομοίωση του φαινομένου της σύνθλιψης, κυρίως ως προς την ερπυστική του μορφή.

Τα αρχικά μοντέλα προσομοίωσης επιλέχθηκε να προσεγγίσουν το υπό διερεύνηση φαινόμενο ως πρόβλημα μίας κυκλικής σήραγγας, η οποία βρίσκεται σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης. Η προσέγγιση αυτή έγινε με γνώμονα την απλούστευση των αρχικών μοντέλων, καθώς ουσιαστικοί στόχοι της πρώτης φάσης προσομοιώσεων ήταν η

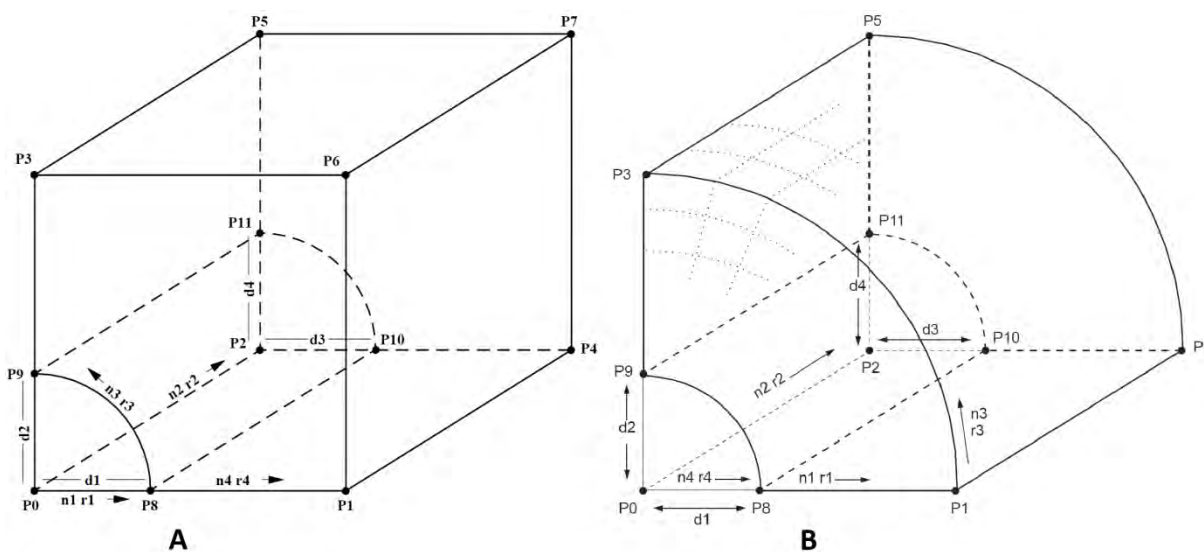
εκμάθηση του τριδιάστατου κώδικα Flac 3D και της γλώσσας προγραμματισμού FISH, η αναζήτηση όλων των απαραίτητων ιδιοτήτων, συνθηκών και παραμέτρων για την προσομοίωση και τέλος, η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των μοντέλων, έπειτα από σύγκριση με κλειστού τύπου επιλύσεις.

### 3.3.1 Κατασκευή Μοντέλων Επίπεδης Παραμόρφωσης

Η πρωτογενής μορφή ενός μοντέλου που πρόκειται να επιλυθεί με τον τριδιάστατο κώδικα Flac 3D είναι ουσιαστικά ένα αρχείο κειμένου, το οποίο περιέχει μία ομάδα εντολών ή και ρουτίνες FISH. Για την κατασκευή του συνόλου των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης προσομοιώσεων ακολουθήθηκε η ίδια σχεδόν αλληλουχία βημάτων, δηλαδή έγινε χρήση συγκεκριμένων τύπων εντολών και της γλώσσας προγραμματισμού FISH. Η αλληλουχία αυτή είναι η εξής:

- ↳ Αρχικά δίνεται η εντολή να εισέλθει στο μοντέλο το φαινόμενο του ερπυσμού (`configure creep`), δηλαδή ολόκληρη η μοντελοποίηση να πραγματοποιηθεί σε ερπυστικό περιβάλλον. Υπάρχει βέβαια η δυνατότητα ο ερπυσμός να απενεργοποιηθεί (`set creep off`) και να επανενεργοποιηθεί (`set creep on`) σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου, αλλά η ύπαρξή του πρέπει να προσδιοριστεί από την αρχή της μοντελοποίησης.
- ↳ Έπειτα, δημιουργείται ο κάρναβος του μοντέλου (`generate zone`), επιλέγοντας τη γεωμετρία του από τα συνολικά δεκατρία πρότυπα που περιλαμβάνει το Flac 3D, και δίνοντας τις απαραίτητες συντεταγμένες (`P0`, `P1`, κ.τ.λ.) και τα βασικά του μεγέθη (`size - n1, n2`, κ.τ.λ., `ratio - r1, r2`, κ.τ.λ. και `dimension - d1, d2`, κ.τ.λ.). Καθεμία από αυτές τις γεωμετρίες αποτελούν ένα σύνολο ζωνών. Το Flac 3D έχει τη δυνατότητα δημιουργίας και συνδυαστικών καννάβων, που δομούνται δηλαδή από περισσότερα του ενός σύνολα ζωνών (γεωμετρίες). Δίνει επίσης τη δυνατότητα στο χρήστη να ομαδοποιήσει (`group`) και να ονομάσει σύνολα ζωνών, ενώ υπάρχει και το ενδεχόμενο

απενεργοποίησης κάποιου συνόλου (`model null`) και επανενεργοποίησης του σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου. Στα αρχικά μοντέλα προσομοίωσης που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωμετρίες καννάβου, κατά κύριο λόγο η γεωμετρία «radial cylinder» (Σχήμα 3.4 A) και δευτερευόντως η γεωμετρία «cylindrical shell» (Σχήμα 3.4 B). Η πρώτη χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την προσομοίωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιήθηκε είτε αντί της radial cylinder, είτε για την προσομοίωση της επένδυσης (liner) ως ξεχωριστού συνόλου ζωνών. Σημειώνεται ότι κατά τη συνήθη πρακτική η επένδυση δεν προσομοιώνεται ως σύνολο ζωνών, αλλά με ξεχωριστά δομικά στοιχεία κελύφους. Στα μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης προσομοιώσεων είτε δε χρησιμοποιήθηκαν καθόλου μέτρα υποστήριξης, είτε προκειμένου για ορισμένα μοντέλα μόνο προσομοιώθηκε η επένδυση ως ζώνη πεπερασμένων διαφορών.



**Σχήμα 3.4:** Δύο τυπικές γεωμετρίες καννάβου του Flac 3D. (A) Η radial cylinder και (B) η cylindrical shell (Itasca, 2006).

⇒ Στη συνέχεια ορίζεται το κριτήριο βάσει του οποίου θα λειτουργήσει το μοντέλο, καθώς και οι απαραίτητες ιδιότητές του. Στην περίπτωση που στο μοντέλο έχουν πραγματοποιηθεί ομαδοποιήσεις, τότε για καθεμία από τις ομάδες θα πρέπει να οριστεί και από ένα κριτήριο με τις αντίστοιχες ιδιότητές του. Ενδεικτικά αναφέρονται

τα ερπυστικά κριτήρια Burgers (`model burger`) και CVISC (`model cvisc`), τα οποία έχουν ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για το κριτήριο Burgers πρέπει να καθοριστούν πέντε παράμετροι, το μέτρο συστολής (`bulk`), τα μέτρα διάτμησης Maxwell (`mshear`) και Kelvin (`kshear`) και οι συντελεστές ιξώδους Maxwell (`mviscosity`) και Kelvin (`kviscosity`). Αντίστοιχα, για το κριτήριο CVISC πρέπει να προσδιοριστούν δέκα παράμετροι, οι πέντε του κριτηρίου Burgers, η συνοχή (`cohesion`), η γωνία εσωτερικής τριβής (`friction`), η γωνία διαστολής (`dilation`), η πυκνότητα (`density`) και η μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό (`tension`).

- ↪ Το επόμενο βήμα είναι να δοθούν όλα τα αρχικά μεγέθη που πρέπει να ισχύουν είτε σε ολόκληρο το μοντέλο, είτε σε συγκεκριμένες ζώνες, καθώς επίσης και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου. Στα μοντέλα της πρώτης φάσης προσομοιώσεων καθορίστηκε το αρχικό εντατικό πεδίο (`initial sxx syy szz`) και σταθεροποιήθηκαν τα σύνορα του μοντέλου (`fix x y z`). Σε ορισμένα από αυτά εφαρμόστηκε και εσωτερική πίεση (`apply nstress`) στο όριο της σήραγγας για να προσομοιωθεί η πίεση της υποστήριξης.
- ↪ Έπειτα από όλα τα παραπάνω βήματα, το μοντέλο είναι έτοιμο να πραγματοποιήσει μία αρχική ελαστική ή ελαστοπλαστική επίλυση (`solve`), αναλόγως εάν η προσομοίωση είναι ιξωδοελαστική ή ιξωδοπλαστική. Η επίλυση στο Flac 3D μπορεί να συνδυαστεί με διάφορες περιοριστικές συνθήκες, έτσι ώστε να καθοριστεί το χρονικό σημείο τερματισμού της. Τέτοιες συνθήκες είναι ο χρόνος (`age`), ο αριθμός των βημάτων (`step`) και ο λόγος (`solve ratio`) της μέγιστης μη εξισορροπημένης δύναμης των κόμβων του πλέγματος σε κάθε χρονικό βήμα, προς την αντίστοιχη μέγιστη δύναμη στην αρχή της επίλυσης. Κατά την αρχική επίλυση των μοντέλων της πρώτης φάσης προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ως περιοριστική συνθήκη το `solve ratio`.



- ↪ Μετά την αρχική επίλυση πρέπει να μηδενιστεί η ταχύτητα (`xvelocity`, `yvelocity` και `zvelocity`) που τυχόν έχουν αναπτύξει τα στοιχεία του μοντέλου λόγω της επίλυσης. Ο μηδενισμός αυτός γίνεται προς όλες τις διευθύνσεις του μοντέλου.
  
- ↪ Στη συνέχεια ορίζεται το χρονικό βήμα βάσει του οποίου θα πραγματοποιηθεί η ερπυστική επίλυση (`set creep dt`). Στην περίπτωση που σε κάποιο σημείο του μοντέλου έχει απενεργοποιηθεί το φαινόμενο του ερπυσμού, πρέπει πρώτα να επανενεργοποιηθεί και έπειτα να οριστεί το χρονικό βήμα επίλυσης. Στα μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης, το βήμα αυτό τέθηκε στο αυτόματο (`set creep dt auto on`), με τον περιορισμό να μη ξεπερνάει μία συγκεκριμένη τιμή (`set creep max`).
  
- ↪ Το επόμενο στάδιο του μοντέλου είναι ουσιαστικά το τελευταίο, καθώς ο χρήστης ορίζει τα αποτελέσματα που θέλει να παραμείνουν στη μνήμη του μοντέλου ως ιστορικό (`history`). Οι δυνατότητες της εφαρμογής αυτής είναι πολύ μεγάλες, αφού κυρίως μέσω αυτής καθίσταται δυνατή η ανασκόπηση της συμπεριφοράς ενός μοντέλου μετά την επίλυσή του. Στα αρχικά μοντέλα προσομοίωσης επιλέχθηκε να γίνει καταγραφή των μετατοπίσεων στο όριο της σήραγγας, του χρόνου επίλυσης ανά βήμα και του πραγματικού χρονικού διαστήματος που εφαρμόστηκε ο ερπυσμός (`crtime`).
  
- ↪ Τέλος, πραγματοποιείται η τελική ερπυστική επίλυση του μοντέλου (`solve`). Στα συγκεκριμένα μοντέλα η ερπυστική επίλυση είχε ως περιοριστική συνθήκη είτε τον αριθμό των βημάτων (`step`), είτε το χρόνο (`age`). Ορισμένα μοντέλα προσομοιώθηκαν με ερπυστική συμπεριφορά διάρκειας ενός έτους και ορισμένα διάρκειας δέκα ετών. Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο μετά την αρχική επίλυση, όσο και μετά την τελική, δόθηκε η εντολή στο μοντέλο να πραγματοποιήσει αποθήκευση (`save`) των δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Όπως προαναφέρεται, τα δεδομένα και τα αποτελέσματα αυτά είναι προσβάσιμα από το χρήστη είτε γραφικά, είτε μέσω αρχείων τύπου ASCII.

### 3.3.2 Βαθμονόμηση Μοντέλων Επίπεδης Παραμόρφωσης

Κατά την πρώτη φάση προσομοιώσεων της Διπλωματικής Εργασίας κατασκευάστηκαν 25 μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης, τα οποία είναι κυρίως είτε ιξωδοελαστικά, είτε ιξωδοπλαστικά. Τα περισσότερα από αυτά έχουν από 4 έως 6 διαφορετικές εκδοχές, δημιουργήθηκαν δηλαδή 25 αντίστοιχες ομάδες αρχικών μοντέλων προσομοίωσης. Το σύνολο αυτό προέκυψε έπειτα από τις διάφορες δοκιμές παραμέτρων και συνθηκών προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν.

Από τα μοντέλα αυτά υπάρχουν ορισμένα που δεν ήταν επιτυχή. Πιο συγκεκριμένα, κάποια δεν ολοκλήρωσαν καν το στάδιο της επίλυσης και κάποια είτε παρέκλιναν των αποτελεσμάτων των κλειστών λύσεων με τις οποίες συγκρίθηκαν (ιξωδοελαστικά μοντέλα), είτε απέδωσαν αποτελέσματα που κρίθηκαν μη ρεαλιστικά, καθώς δεν υπάρχουν κλειστές λύσεις για να συγκριθούν (ιξωδοπλαστικά μοντέλα). Στην πρώτη περίπτωση, ο λόγος που τα μοντέλα δεν μπόρεσαν να επιλυθούν είναι ότι υπήρχε πρόβλημα στις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν, δεν είχε γίνει δηλαδή σωστή χρήση του κώδικα Flac 3D. Στη δεύτερη περίπτωση, το πρόβλημα εντοπίστηκε στις συνθήκες προσομοίωσης που είχαν τεθεί. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση στην οποία τα αποτελέσματα των μοντέλων ήταν μη ρεαλιστικά, αποδείχθηκε ότι το πρόβλημα ήταν στο ίδιο το λογισμικό Flac 3D.

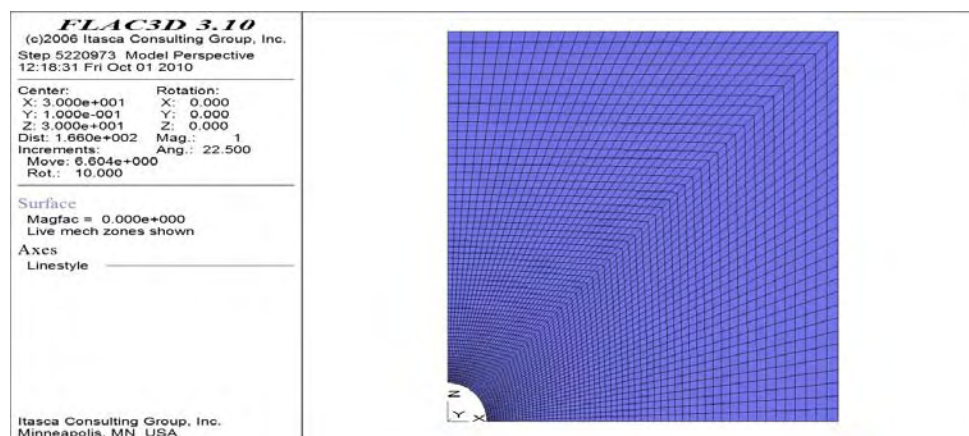
Τα αποτυχημένα μοντέλα που προέκυψαν λόγω των δύο πρώτων περιπτώσεων ήταν λίγο έως πολύ αναμενόμενα, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πρώτη φάση των προσομοιώσεων είχε ως στόχο, τόσο την εκμάθηση του λογισμικού και της γλώσσα προγραμματισμού του, όσο και την αναζήτηση των απαραίτητων συνθηκών προσομοίωσης. Όσον αφορά στην τρίτη περίπτωση, δηλαδή στα ιξωδοπλαστικά μοντέλα, όταν εντοπίστηκε και επιλύθηκε το πρόβλημα που είχε εμφανίσει το Flac 3D, η Διπλωματική Εργασία είχε περάσει ήδη στη δεύτερη φάση προσομοιώσεων. Για το λόγο αυτό άλλωστε, από τα ιξωδοπλαστικά μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης που δεν είχαν επιλυθεί σωστά, προσομοιώθηκαν ξανά μόνο δύο μοντέλα ως επιβεβαίωση. Τα υπόλοιπα εκτιμήθηκε ότι δεν ήταν απαραίτητο να προσομοιωθούν, αφού ούτως ή άλλως είχαν ήδη προσομοιωθεί τα μοντέλα της δεύτερης φάσης, τα οποία ήταν πιο αναλυτικά και πιο σύνθετα.

Τα μοντέλα της πρώτης φάσης προσομοιώσεων στο σύνολό τους περιέχουν σταθερά και μεταβλητά δεδομένα. Τα σταθερά δεδομένα είναι κοινά για όλα τα μοντέλα, σε όλες τις εκδοχές τους, και αφορούν αφενός τις συνθήκες μοντελοποίησης και αφετέρου, κάποια από τα βασικά μεγέθη των μοντέλων. Τα μεταβλητά δεδομένα αφορούν κατά κύριο λόγο τις παραμέτρους ερπυσμού που δοκιμάστηκαν, και δευτερευόντως κάποιες από τις συνθήκες μοντελοποίησης.

Ένα από τα κύρια σταθερά δεδομένα των μοντέλων της πρώτης φάσης προσομοιώσεων είναι ότι έχουν κυκλική διατομή. Η ακτίνα της διατομής επιλέχθηκε να είναι ίση με την ακτίνα της ισοδύναμης κυκλικής διατομής της σήραγγας που αποτελεί τη μελέτη περίπτωσης της παρούσας Εργασίας, η οποία είναι 6 m. Ωστόσο, σε κάποια μοντέλα που προσομοιώθηκαν επακριβώς δεδομένα του Goodman (1989) για την επιβεβαίωση της λειτουργίας των μοντέλων μέσω μίας από τις κλειστές επιλύσεις του, δε χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη ακτίνα. Τα μοντέλα αυτά, τα οποία περιλαμβάνουν και άλλες διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα της πρώτης φάσης προσομοιώσεων, αναλύονται εκτενέστερα στη συνέχεια της παραγράφου.

Τα μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης που κατασκευάστηκαν έχουν σταθερή γεωμετρία καννάβου, τη «radial cylinder» (Σχήμα 3.4 A), η οποία για λόγους απλούστευσης των προσομοιώσεων δεν πολλαπλασιάστηκε έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας πλήρης κύκλος, αλλά παρέμεινε ως είχε. Οι διαστάσεις που δόθηκαν στον κάνναβο είναι 6 ζώνες εντός της εκσκαφής, μία ζώνη κατά τον άξονα  $\gamma$  (πάχος μοντέλου – έμμεση προσομοίωση επίπεδης παραμόρφωσης), 60 ζώνες στην περιφέρεια της εκσκαφής και 60 ζώνες από την παρειά της εκσκαφής μέχρι το σύνορο του μοντέλου. Βάσει των στοιχείων αυτών προέκυψε ένα μοντέλο 3.600 ζωνών και 7.442 κόμβων (Εικόνα 3.1). Αξίζει να αναφερθεί ότι κατ' εξαίρεση κατασκευάστηκαν ορισμένα μοντέλα χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία «cylindrical shell» (Σχήμα 3.4 B), έτσι ώστε να εξεταστεί αφενός το κατά πόσο η γεωμετρία του μοντέλου επηρεάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και αφετέρου, η συμπεριφορά της σήραγγας παρουσία επένδυσης που προσομοιώνεται με ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Η γεωμετρία των μοντέλων αυτών αναλύεται σε επόμενο σημείο της παραγράφου.

Τέλος, δύο ακόμη σταθερά δεδομένα των προσομοιώσεων της πρώτης φάσης είναι η πίεση των υπερκειμένων και η σταθεροποίηση των συνόρων του μοντέλου. Σε όλα τα μοντέλα, εκτός από εκείνα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του Goodman, εφαρμόστηκε μία πίεση υπερκειμένων της τάξης του 1,65 MPa. Η πίεση αυτή αντιστοιχεί στην κατηγορία M4 της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών (μελέτη περίπτωσης), για το μέγιστο ύψος υπερκειμένων που είναι τα 75 m. Όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες των μοντέλων, συνίστανται στην απαγόρευση της μετατόπισης στα πλευρικά τους όρια, και στην παρεμπόδιση της κατακόρυφης μετατόπισης στο κάτω όριο.



**Εικόνα 3.1:** Ο κάνναβος «radial cylinder» των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης προσομοιώσεων, με 3.600 ζώνες και 7.442 κόμβους.

Ακολούθως παρατίθεται ανά ομάδα μοντελοποίησης, το σύνολο των μεταβλητών δεδομένων των επιτυχών μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης. Για καθεμία από τις ομάδες αυτές πραγματοποιείται και μία συνοπτική περιγραφή των δεδομένων της.

### 8<sup>η</sup> Ομάδα

Η πρώτη ομάδα επιτυχών μοντέλων είναι η 8<sup>η</sup> κατά σειρά. Στην ομάδα αυτή των αρχικών μοντέλων προσομοίωσης (5 εκδοχές) εφαρμόστηκε το ιξωδοελαστικό μοντέλο Burgers, για το οποίο χρησιμοποιήθηκε η ομάδα παραμέτρων ερπυσμού που ορίστηκε ως βάση σύγκρισης στη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  (Κεφάλαιο 2 –

Πίνακας 2.3). Για το μέτρο συστολής και το μέτρο διάτμησης του Maxwell, ορίστηκαν τιμές ανάλογες με αυτές της παραμέτρου  $G_K$ . Η αρχική ελαστική επίλυση είχε ως συνθήκη τερματισμού το `solve ratio`, με τιμή  $10^{-5}$ . Στο μοντέλο 8A η ερπυστική επίλυση πραγματοποιήθηκε για 100.000 βήματα, με μέγιστο χρονικό βήμα τα 3.600 sec (μία ώρα). Στην ερπυστική επίλυση του 8B έγινε χρήση της περιοριστικής συνθήκης του χρόνου. Ο ερπυσμός διήρκησε 311.040.000 sec (δέκα έτη), με μέγιστο χρονικό βήμα επίλυσης τα 60 sec (ένα λεπτό). Τα μοντέλα 8C, 8D και 8E είχαν τα ίδια χαρακτηριστικά ερπυστικής επίλυσης με το 8B, με τη διαφορά ότι σε αυτά εφαρμόστηκε εσωτερική πίεση της τάξεως του 0,1 MPa, 0,3 MPa και 0,5 MPa αντίστοιχα. Όλα τα παραπάνω δεδομένα της 8<sup>ης</sup> ομάδας παρουσιάζονται στο συγκεντρωτικό Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 8<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| <b>8<sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων</b> |                            |                              |                                  |                                  |
|--|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>K (MPa)</b>   | <b>G<sub>M</sub> (MPa)</b> | <b>G<sub>K</sub> (MPa)</b>   | <b>n<sub>M</sub> (MPa * sec)</b> | <b>n<sub>K</sub> (MPa * sec)</b> |
| 800  | 400                        | 600                          | 4 * 10 <sup>11</sup>             | 4 * 10 <sup>10</sup>             |
| <b>8A</b>  | Step 100.000               |                              | Creep max 3.600 sec              |                                  |
| <b>8B</b>  | Solve age 311.040.000 sec  |                              | Creep max 60 sec                 |                                  |
| <b>8C</b>  | p <sub>i</sub> = 0,1 MPa   | Solve age<br>311.040.000 sec |                                  | Creep max<br>60 sec              |
| <b>8D</b>  | p <sub>i</sub> = 0,3 MPa   |                              |                                  |                                  |
| <b>8E</b>  | p <sub>i</sub> = 0,5 MPa   |                              |                                  |                                  |

### 9<sup>η</sup> Ομάδα

Τα μοντέλα της 9<sup>ης</sup> ομάδας (5 εκδοχές) ήταν πανομοιότυπα με τα αντίστοιχα της 8<sup>ης</sup>, με τη διαφορά ότι είχαν πολύ μεγαλύτερη τιμή του μέτρου συστολής. Συγκεκριμένα το  $K$  έλαβε την τιμή 800 GPa. Ο στόχος των μοντέλων αυτών ήταν να εξεταστεί η επίδραση του μέτρου συστολής στις επιλύσεις.

16<sup>η</sup> Ομάδα

Στη 16<sup>η</sup> ομάδα μοντέλων (6 εκδοχές) εφαρμόστηκε το μοντέλο Burgers, με παραμέτρους ερπυσμού το πρώτο σύνολο τιμών του Korzeniewski (Κεφάλαιο 2 – Πίνακας 2.1) και μέτρα συστολής και διάτμησης του Maxwell του ίδιου ερευνητή. Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, η αρχική ελαστική επίλυση είχε ως συνθήκη τερματισμού το `solve ratio`, με τιμή  $10^{-5}$ . Η εκδοχή 16A είχε ίδιες ερπυστικές συνθήκες επίλυσης με τα μοντέλα 8A και 9A, δηλαδή επίλυση 100.000 βημάτων, με μέγιστο χρονικό βήμα τα 3.600 sec (μία ώρα). Τα μοντέλα 16B και 16C είχαν μέγιστο χρονικό βήμα ερπυστικής επίλυσης τα 60 sec (ένα λεπτό), με τον ερπυσμό να διαρκεί στο πρώτο 2.592.000 sec (ένας μήνας) και στο δεύτερο 31.104.000 sec (ένα έτος). Οι εκδοχές 16D, 16E και 16F είχαν τα ίδια χαρακτηριστικά ερπυστικής επίλυσης με το μοντέλο 16C, με πρόσθετο χαρακτηριστικό ότι περιελάμβαναν και εσωτερική πίεση, η οποία ήταν 0,1 MPa, 0,3 MPa και 0,5 MPa αντίστοιχα. Το σύνολο των δεδομένων της 16<sup>ης</sup> ομάδας αρχικών μοντέλων προσομοίωσης παρατίθεται στον Πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 16<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| 16 <sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων |                          |                             |                            |                            |
|---|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| K (MPa)   | G <sub>M</sub> (MPa)     | G <sub>K</sub> (MPa)        | n <sub>M</sub> (MPa * sec) | n <sub>K</sub> (MPa * sec) |
| 496,67  | 298                      | 822,8                       | 4,435 * 10 <sup>9</sup>    | 1,115 * 10 <sup>8</sup>    |
| <b>16A</b>  | Step 100.000             |                             | Creep max 3.600 sec        |                            |
| <b>16B</b>  | Solve age 2.592.000 sec  |                             | Creep max 60 sec           |                            |
| <b>16C</b>  | Solve age 31.104.000 sec |                             | Creep max 60 sec           |                            |
| <b>16D</b>  | p <sub>i</sub> = 0,1 MPa | Solve age<br>31.104.000 sec |                            | Creep max<br>60 sec        |
| <b>16E</b>  | p <sub>i</sub> = 0,3 MPa |                             |                            |                            |
| <b>16F</b>  | p <sub>i</sub> = 0,5 MPa |                             |                            |                            |

17<sup>η</sup>, 18<sup>η</sup>, 19<sup>η</sup> και 20<sup>η</sup> Ομάδα

Τα μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης των ομάδων 17, 18, 19 και 20 (6 εκδοχές η κάθε ομάδα) ακολούθησαν τη λογική των αντίστοιχων μοντέλων της 16<sup>ης</sup> ομάδας, αλλά στην καθεμία από αυτές χρησιμοποιήθηκαν με τη σειρά τα υπόλοιπα τέσσερα σύνολα παραμέτρων ερπυσμού του Korzeniewski (Κεφάλαιο 2 – Πίνακας 2.1). Όπως και στη 16<sup>η</sup> ομάδα μοντέλων, τα μέτρα συστολής και διάτμησης του Maxwell ήταν του ίδιου ερευνητή. Οι τιμές του Korzeniewski για τις τέσσερις ομάδες μοντέλων παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.3 έως 3.6.

**Πίνακας 3.3:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 17<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| 17 <sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων |                      |                      |                            |                            |
|---|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| K (MPa)   | G <sub>M</sub> (MPa) | G <sub>K</sub> (MPa) | n <sub>M</sub> (MPa * sec) | n <sub>K</sub> (MPa * sec) |
| 421,33  | 252,8                | 740,4                | 3,984 * 10 <sup>9</sup>    | 8,9 * 10 <sup>7</sup>      |

**Πίνακας 3.4:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 18<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| 18 <sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων |                      |                      |                            |                            |
|---|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| K (MPa)   | G <sub>M</sub> (MPa) | G <sub>K</sub> (MPa) | n <sub>M</sub> (MPa * sec) | n <sub>K</sub> (MPa * sec) |
| 764,67  | 458,8                | 762                  | 4,144 * 10 <sup>9</sup>    | 7,677 * 10 <sup>7</sup>    |

**Πίνακας 3.5:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 19<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| 19 <sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων |                      |                      |                            |                            |
|---|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| K (MPa)   | G <sub>M</sub> (MPa) | G <sub>K</sub> (MPa) | n <sub>M</sub> (MPa * sec) | n <sub>K</sub> (MPa * sec) |
| 512,67  | 307,6                | 955,6                | 4,802 * 10 <sup>9</sup>    | 1,241 * 10 <sup>8</sup>    |

**Πίνακας 3.6:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 20<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| 20 <sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων |                      |                      |                            |                            |
|---|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| K (MPa)   | G <sub>M</sub> (MPa) | G <sub>K</sub> (MPa) | n <sub>M</sub> (MPa * sec) | n <sub>K</sub> (MPa * sec) |
| 362,67  | 217,6                | 744,8                | 4,332 * 10 <sup>9</sup>    | 7,628 * 10 <sup>7</sup>    |

### 22<sup>η</sup> Ομάδα

Στην 22<sup>η</sup> ομάδα μοντέλων της πρώτης φάσης προσομοιώσεων (4 εκδοχές) χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από ένα παράδειγμα του Goodman (Κεφάλαιο 2 – Πίνακας 2.1). Στο παράδειγμα αυτό εφαρμόζεται μία από τις κλειστές λύσεις του για το ιξωδοελαστικό μοντέλο Burgers (Κεφάλαιο 2 – 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου), από το οποίο όμως παραλείπεται το μέτρο διάτμησης του μοντέλου Maxwell ( $G_2$ ), οπότε πρόκειται ουσιαστικά για το γενικευμένο μοντέλο Maxwell. Σκοπός των μοντέλων της ομάδας αυτής ήταν να τεθούν σε εφαρμογή οι συνθήκες προσομοίωσης που είχαν αναδειχθεί ως καταλληλότερες από τις επιλύσεις των προηγούμενων 21 ομάδων μοντέλων και στη συνέχεια να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του παραδείγματος του Goodman.

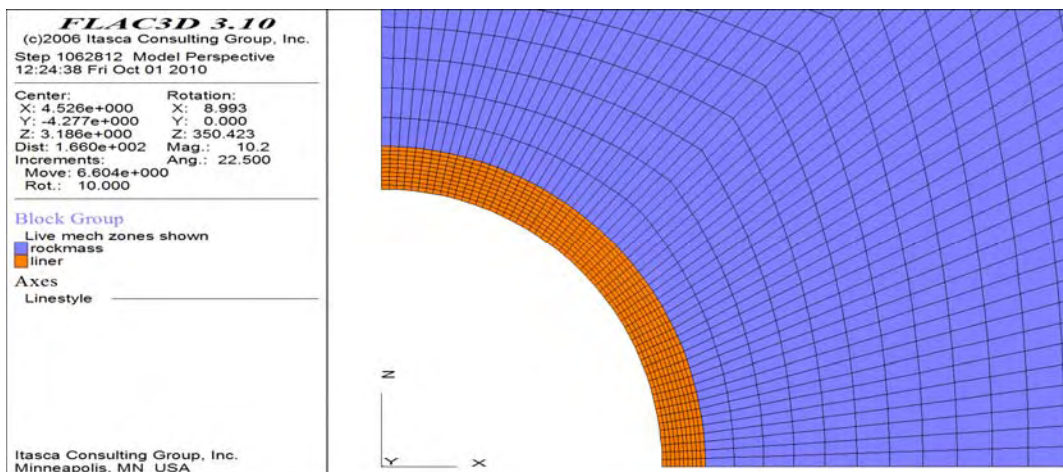
Αποδείχθηκε ότι οι πρώτες δύο εκδοχές που προσομοιώθηκαν είχαν σφάλματα στις χρησιμοποιούμενες εντολές και για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένες εκδοχές δεν αναλύονται περαιτέρω. Όσον αφορά στο μοντέλο 22C, αυτό είχε για τη βραχόμαζα την ίδια γεωμετρία με τα υπόλοιπα μοντέλα, δηλαδή τη «radial cylinder». Επειδή όμως η κλειστή λύση του Goodman περιλαμβάνει και επένδυση (liner), τοποθετήθηκε εσωτερικά της γεωμετρίας αυτής ένα ακόμα σύνολο ζωνών, με γεωμετρία «cylindrical shell». Οι διαστάσεις που δόθηκαν στο δεύτερο αυτό τμήμα του καννάβου ήταν 6 ζώνες εντός της εκσκαφής, μία ζώνη κατά τον άξονα  $\gamma$ , 60 ζώνες στην περιφέρεια της εκσκαφής και 10 ζώνες από την παρειά της εκσκαφής μέχρι την επαφή των δύο τμημάτων του καννάβου. Στην ακτίνα της εκσκαφής (επαφή βραχόμαζας επένδυσης) δόθηκε η τιμή 4,572 m και στην τελική ακτίνα της σήραγγας (εσωτερικά της επένδυσης) η τιμή 3,9624 m. Οι δύο αυτές τιμές προέρχονται από το



παράδειγμα του Goodman. Με βάση τα στοιχεία αυτά, προέκυψε ένα μοντέλο 4.200 ζωνών και 8.662 κόμβων (Εικόνα 3.2).

Είναι ευνόητο, ότι στη βραχόμαζα εφαρμόστηκε το κριτήριο Burgers. Οι παράμετροι ερπυσμού και τα μέτρα διάτμησης του Maxwell και συστολής ήταν από το υπό προσομοίωση παράδειγμα, όπως και οι παράμετροι της επένδυσης όπου εφαρμόστηκαν ελαστικές συνθήκες. Η πίεση των υπερκειμένων που εφαρμόστηκε στο μοντέλο 22C ήταν επίσης από το παράδειγμα αυτό και συγκεκριμένα 6,894757 MPa (μόνο στην ομάδα αυτή χρησιμοποιήθηκε διαφορετική πίεση υπερκειμένων). Σημειώνεται ότι η επένδυση στο μοντέλο αυτό ενεργοποιήθηκε μετά την αρχική ελαστική επίλυσή του.

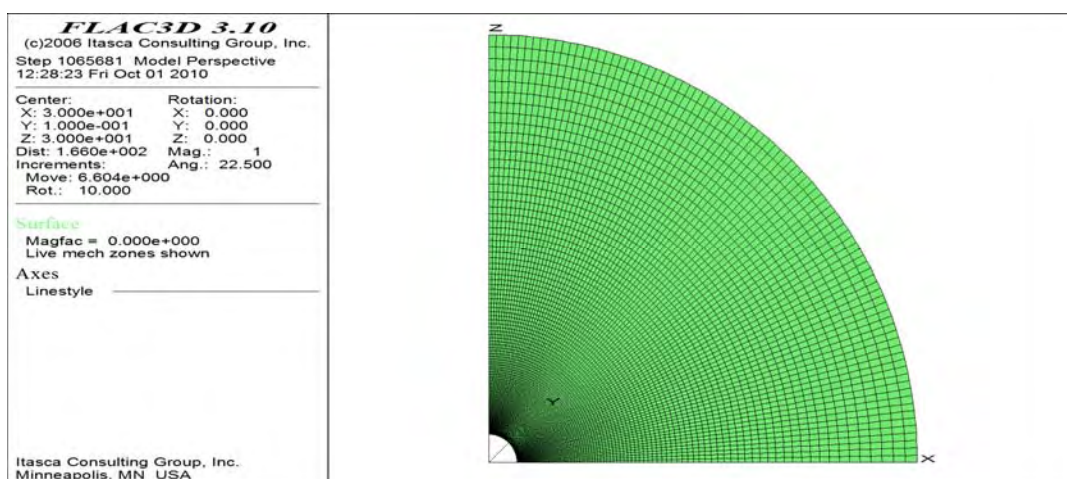
Η ελαστική επίλυση είχε ως συνθήκη τερματισμού το `solve ratio`, με τιμή  $10^{-6}$ , ενώ η αντίστοιχη συνθήκη της ερπυστικής επίλυσης ήταν ο χρόνος, με μέγιστο χρονικό βήμα επίλυσης τα 300 sec (πέντε λεπτά). Ο ερπυσμός διήρκησε συνολικά 311.040.000 sec (δέκα έτη).



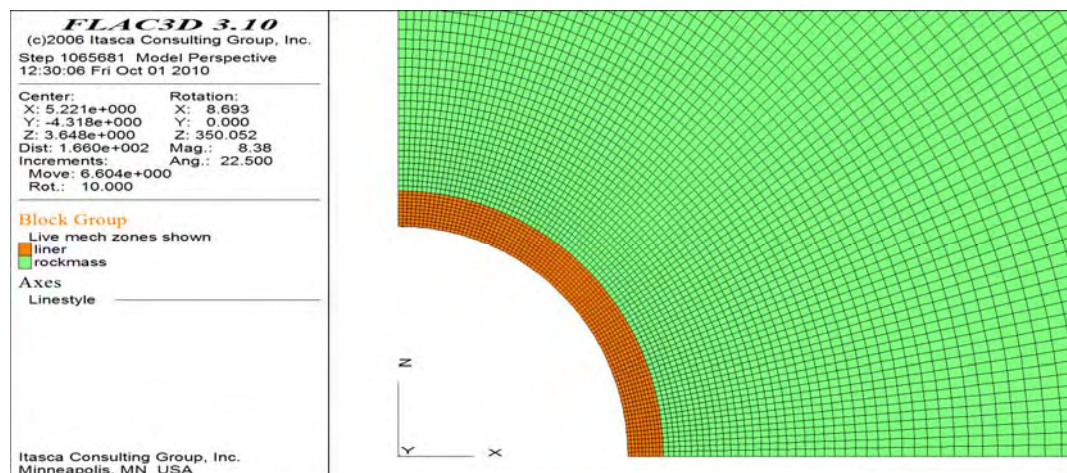
**Εικόνα 3.2:** Τμήμα του καννάβου του μοντέλου 22C με δύο ομάδες ζωνών, της βραχόμαζας («radial cylinder») και της επένδυσης («cylindrical shell»).

Η εκδοχή 22D είχε ακριβώς τα ίδια δεδομένα με την 22C και η μόνη διαφορά των δύο μοντέλων ήταν στη γεωμετρία τους. Στο 22D αντικαταστάθηκε η γεωμετρία «radial cylinder» με τη «cylindrical shell». Οι διαστάσεις που έλαβε η νέα γεωμετρία ήταν 6 ζώνες εντός της εκσκαφής, μία ζώνη κατά τον άξονα γ, 90 ζώνες στην περιφέρεια της εκσκαφής και 100

ζώνες από την επαφή των δύο τμημάτων του καννάβου μέχρι το σύνορο του μοντέλου. Κατ' αντιστοιχία, τροποποιήθηκαν και οι διαστάσεις της γεωμετρίας της επένδυσης. Συγκεκριμένα, οι ζώνες στην περιφέρεια της εκσκαφής αυξήθηκαν από 60 σε 90. Βάσει των παραπάνω, προέκυψε ένα μοντέλο 9.900 ζωνών και 20.202 κόμβων (Εικόνες 3.3 και 3.4). Το σύνολο των δεδομένων της 22<sup>ης</sup> ομάδας αρχικών μοντέλων προσομοίωσης παρατίθεται στο συγκεντρωτικό Πίνακα 3.7.



**Εικόνα 3.3:** Ο κάνναβος «cylindrical shell» των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης 22D, 23A και 23B της πρώτης φάσης προσομοιώσεων, με 9.900 ζώνες και 20.202 κόμβους.



**Εικόνα 3.4:** Τμήμα του καννάβου των μοντέλων 22D, 23A και 23B με δύο ομάδες ζωνών, της βραχώμαζας («cylindrical shell») και της επένδυσης («cylindrical shell»).

**Πίνακας 3.7:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 22<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| <b>22<sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων</b> |   |                            |  |                                  |
|---|---|----------------------------|--|----------------------------------|
| <b>K (MPa)</b>  | <b>G<sub>M</sub> (MPa)</b>                  | <b>G<sub>K</sub> (MPa)</b> | <b>n<sub>M</sub> (MPa * sec)</b>           | <b>n<sub>K</sub> (MPa * sec)</b> |
| 10.000  | 3.447,379                                   | 344,7379                   | 4,13685 * 10 <sup>12</sup>                 | 2,06843 * 10 <sup>10</sup>       |
| <b>R<sub>ΕΚΣΚΑΦΗΣ</sub> (m)</b>                                 | <b>R<sub>ΤΕΛΙΚΟ</sub> (m)</b>               | <b>ρ<sub>0</sub> (MPa)</b> | <b>Solve age (sec)</b>                     | <b>Creep max (sec)</b>           |
| 4,572   | 3,9624                                      | 6,894757                   | 311.040.000                                | 300                              |
| <b>ρ' (kg/m<sup>3</sup>)</b>                                    |   | <b>K' (GPa)</b>            |  | <b>G' (GPa)</b>                  |
| 2.500   |   | 9,19301                    |  | 6,89476                          |
| <b>22C</b>  | Γεωμετρία βραχόμαζας<br>«radial cylinder»   |                            | Γεωμετρία επένδυσης<br>«cylindrical shell» |                                  |
| <b>22D</b>  | Γεωμετρία βραχόμαζας<br>«cylindrical shell» |                            | Γεωμετρία επένδυσης<br>«cylindrical shell» |                                  |

### 23<sup>η</sup> Ομάδα

Τα μοντέλα της 23<sup>ης</sup> ομάδας (2 εκδοχές) είναι τα δύο μοντέλα που επιλύθηκαν με το ιξωδοπλαστικό μοντέλο CVISC. Η γεωμετρία τους ήταν ίδια με το μοντέλο 22D, με τη διαφορά ότι η ακτίνα της εκσκαφής ήταν 6,3 m και η τελική ακτίνα της σήραγγας 6 m (Εικόνες 3.3 και 3.4), τιμές που αποτελούν στοιχεία της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών (μελέτη περίπτωσης). Οι παράμετροι ερπυσμού της βραχόμαζας ήταν αυτές που ορίστηκαν ως βάση σύγκρισης στη διερεύνηση που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2 (Πίνακας 2.3). Για το μέτρο συστολής, τη συνοχή, τη γωνία εσωτερικής τριβής, τη γωνία διαστολής, την πυκνότητα και τη μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη σήραγγα. Η επένδυση, η οποία ενεργοποιήθηκε μετά την αρχική ελαστοπλαστική επίλυση, προσομοιώθηκε με ελαστικές συνθήκες, με βάση χαρακτηριστικά που επίσης ήταν από τη συγκεκριμένη σήραγγα. Όπως και στην ομάδα 22, η αρχική επίλυση είχε ως συνθήκη

τερματισμού το `solve ratio`, με τιμή  $10^{-6}$ . Ο ερπυσμός διήρκησε 311.040.000 sec (δέκα έτη), με μέγιστο χρονικό βήμα επίλυσης τα 300 sec (πέντε λεπτά). Η μοναδική διαφοροποίηση των δύο εκδοχών (23A και 23B) ήταν στο μέτρο διάτμησης του Maxwell. Στο πρώτο μοντέλο δόθηκε η τιμή της 8<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων και στο δεύτερο η τιμή της μελέτης περίπτωσης. Όλα τα παραπάνω δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8.

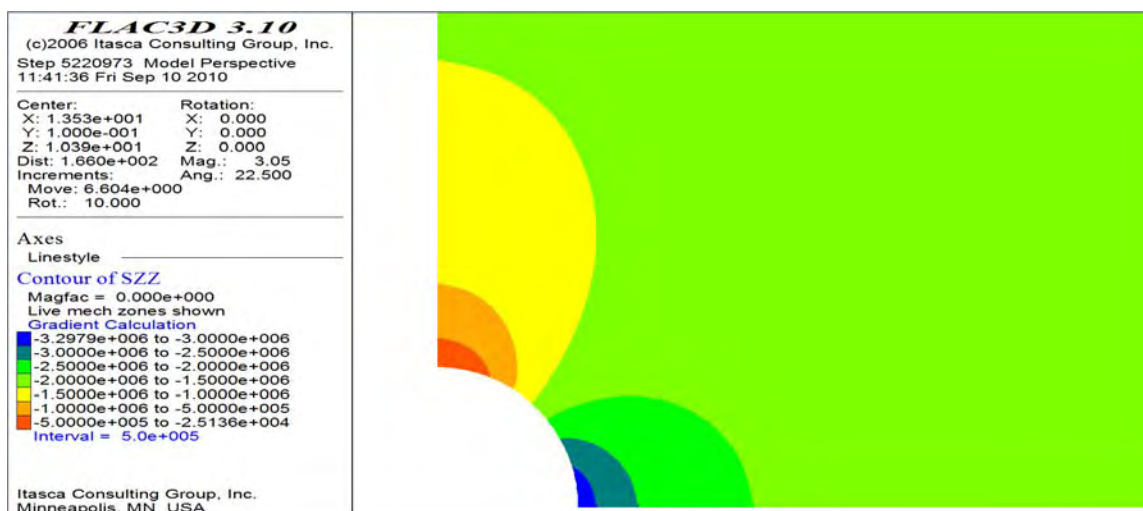
**Πίνακας 3.8:** Δεδομένα παραμέτρων προσομοίωσης της 23<sup>ης</sup> ομάδας μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

| 23 <sup>η</sup> Ομάδα Μοντέλων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων |                            |                                  |                                  |                                 |
|---|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| <b>K (MPa)</b>  | <b>G<sub>K</sub> (MPa)</b> | <b>n<sub>M</sub> (MPa * sec)</b> | <b>n<sub>K</sub> (MPa * sec)</b> | <b>c (kPa)</b>                  |
| 490   | 600                        | 4 * 10 <sup>11</sup>             | 4 * 10 <sup>10</sup>             | 100                             |
| <b>φ (°)</b>  | <b>ψ (°)</b>               | <b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>      | <b>σ<sub>t</sub> (kPa)</b>       | <b>R<sub>εξοκαφής</sub> (m)</b> |
| 32  | 0                          | 2.200                            | c / tan (φ)                      | 6,3                             |
| <b>R<sub>τελικό</sub> (m)</b>                             | <b>Solve age (sec)</b>     | <b>Creep max (sec)</b>           | <b>ρ' (kg/m<sup>3</sup>)</b>     | <b>K' (GPa)</b>                 |
| 6   | 311.040.000                | 300                              | 2.500                            | 20                              |
| <b>G' (GPa)</b>   |                            | <b>Γεωμετρία βραχόμαζας</b>      |                                  | <b>Γεωμετρία επένδυσης</b>      |
| 12  |                            | «cylindrical shell»              |                                  | «cylindrical shell»             |
| <b>23A</b>  | G <sub>M</sub> = 400 MPa   |                                  |                                  |                                 |
| <b>23B</b>  | G <sub>M</sub> = 188 MPa   |                                  |                                  |                                 |

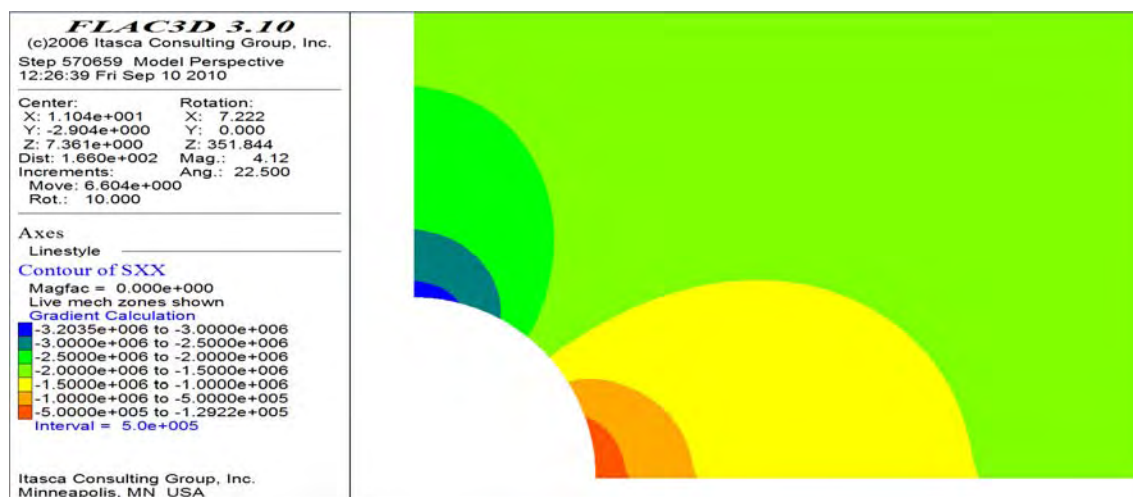
### 3.4 Αποτελέσματα Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων

Τα αποτελέσματα των ιξωδοελαστικών μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης προσομοιώσεων που αναλύονται παραπάνω, συγκρίθηκαν με τις κλειστού τύπου επιλύσεις που αναπτύσσονται στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.7). Αντιθέτως, τα αποτελέσματα των αντίστοιχων ιξωδοπλαστικών μοντέλων δε συγκρίθηκαν με κλειστές

λύσεις, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί, για το μοντέλο CVISC δεν έχουν αναπτυχθεί κλειστού τύπου επιλύσεις. Από το σύνολο των αποτελεσμάτων της πρώτης φάσης προσομοιώσεων κατασκευάστηκαν διαγράμματα καμπύλων ερπυσμού. Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα (Σχήματα 3.5 έως 3.23), ενώ τα υπόλοιπα επισυνάπτονται στο Παράρτημα Α. Ακολούθως παρουσιάζονται και ορισμένες αντιπροσωπευτικές εικόνες των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης (Εικόνες 3.5 έως 3.10).

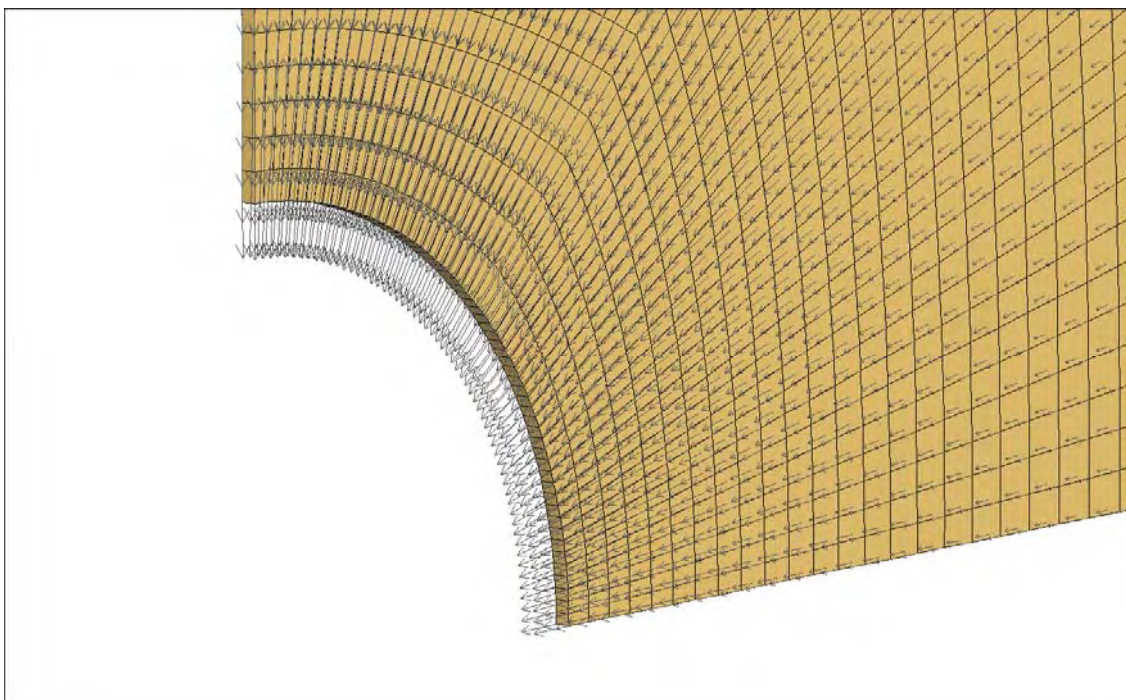


**Εικόνα 3.5:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

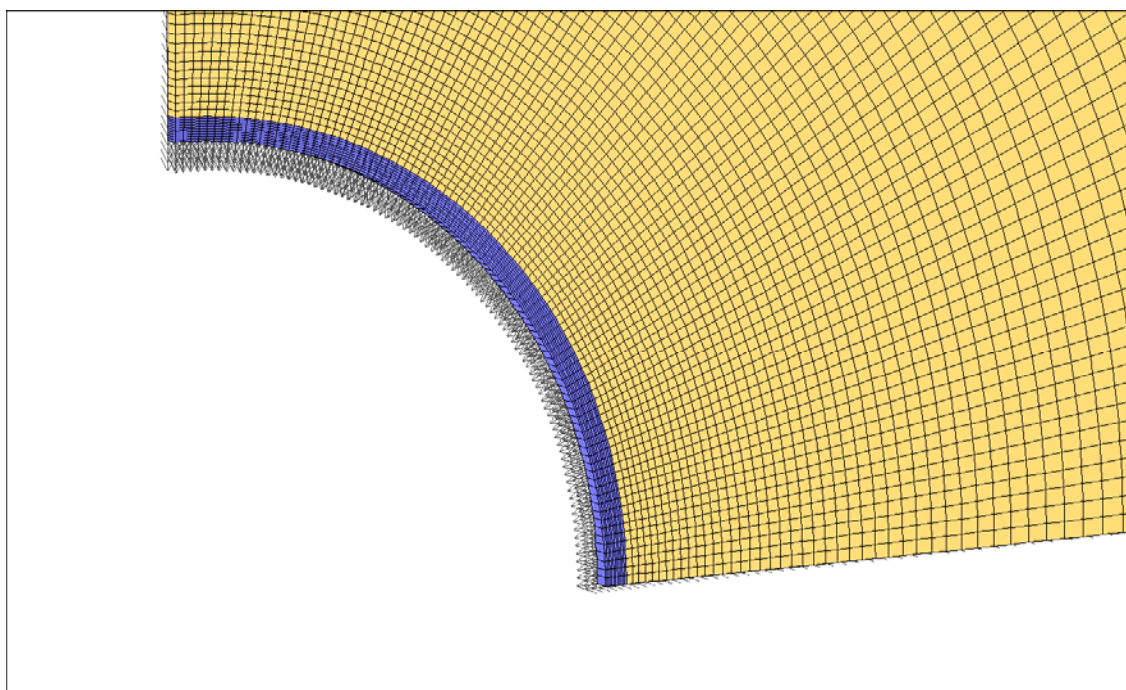


**Εικόνα 3.6:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης.

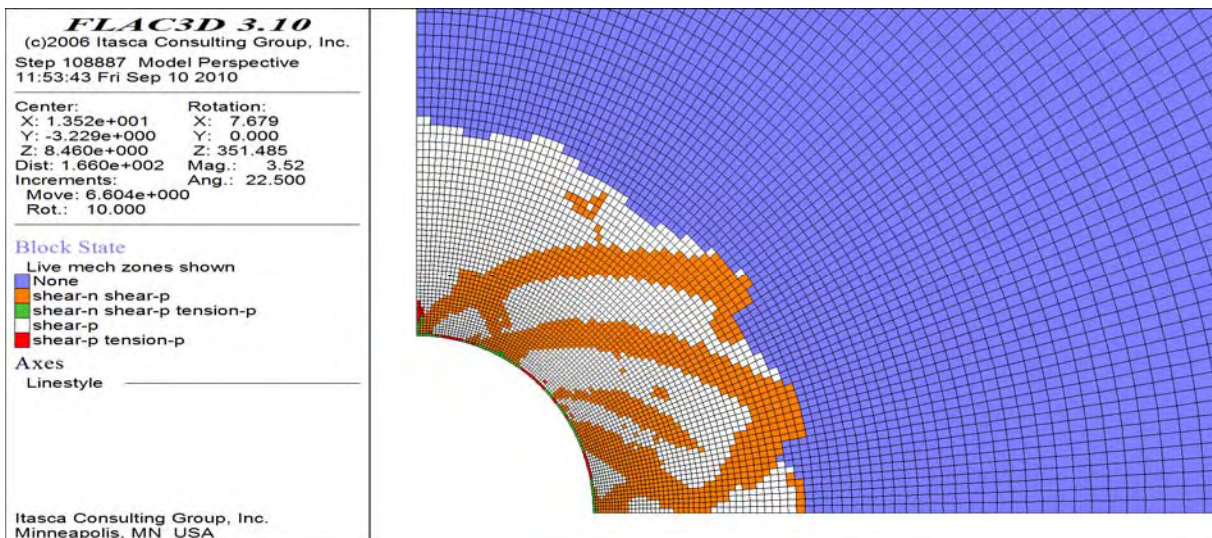




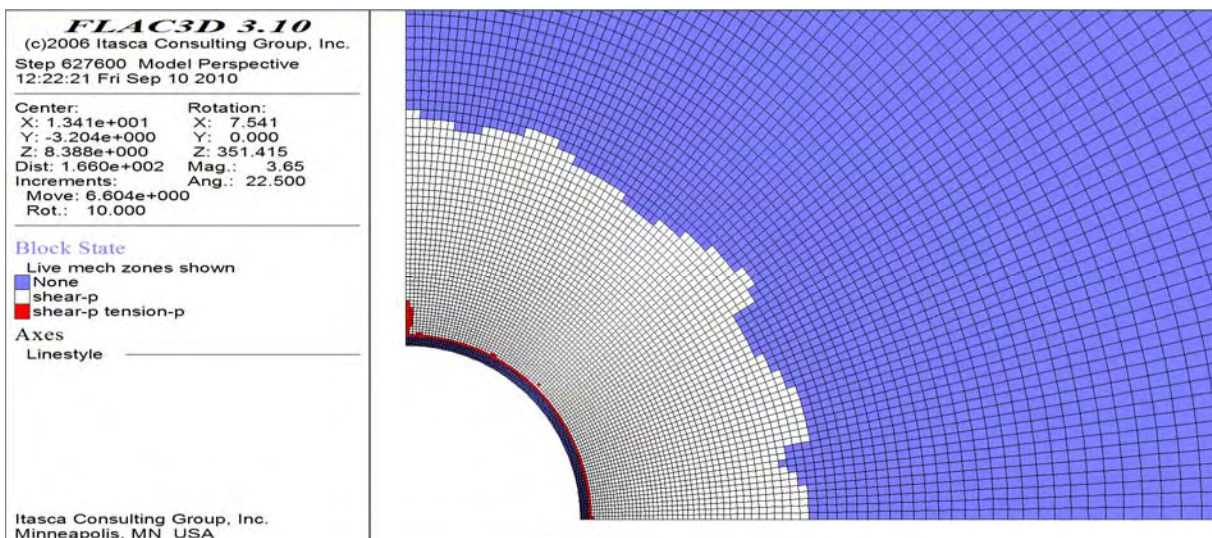
**Εικόνα 3.7:** Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, χωρίς επένδυση.



**Εικόνα 3.8:** Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, με επένδυση.

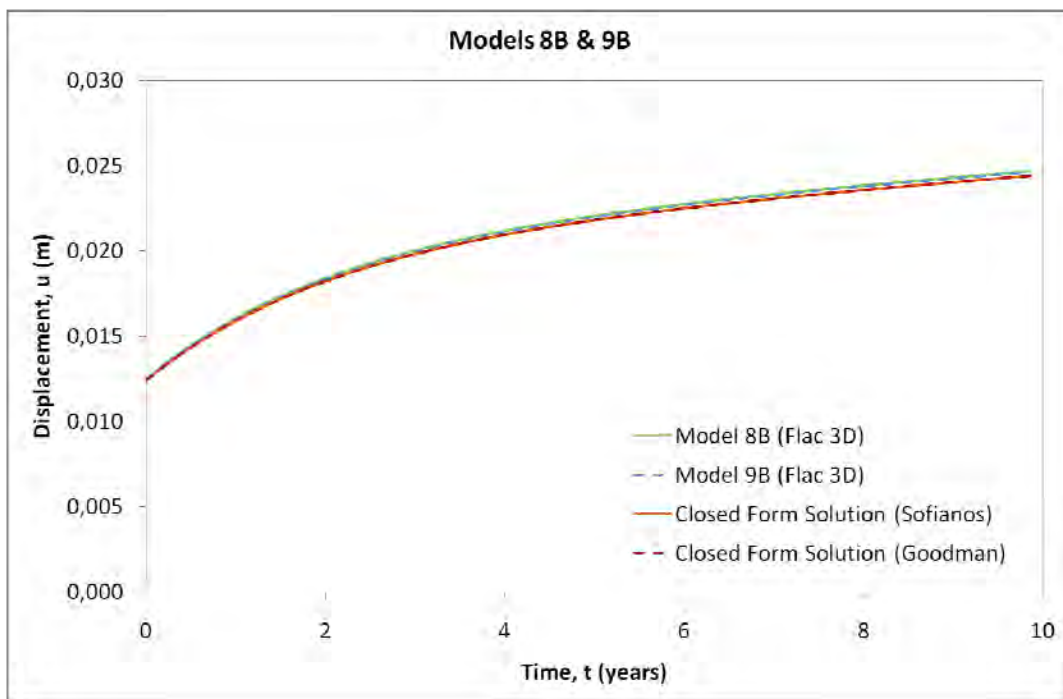


**Εικόνα 3.9:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, πριν την επιβολή του φαινομένου του ερπυσμού και την τοποθέτηση της επένδυσης.

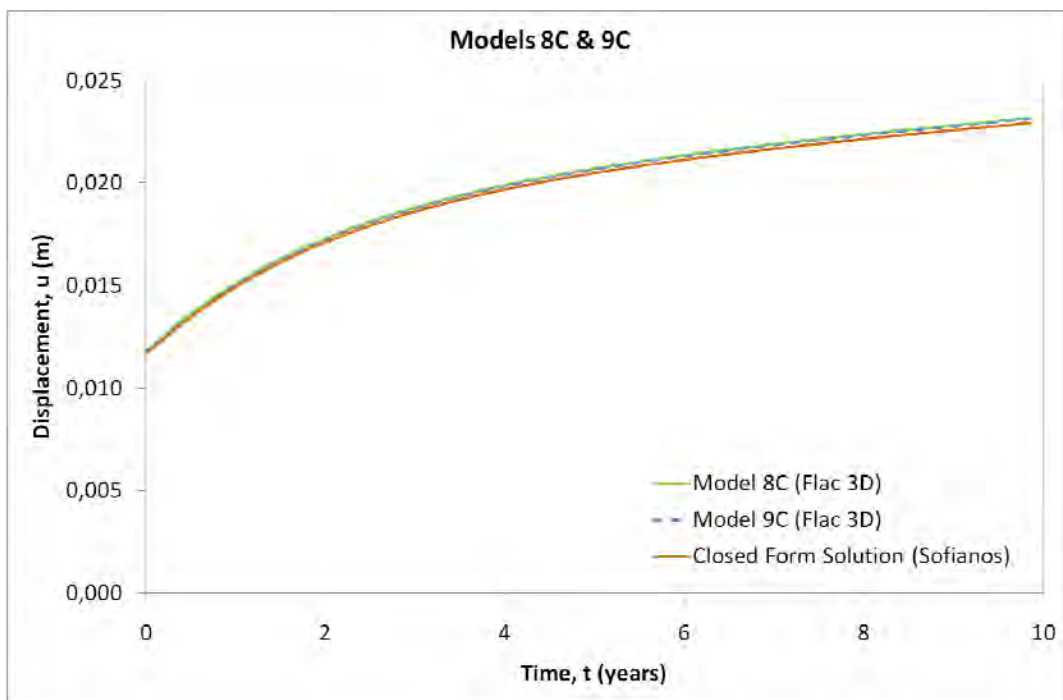


**Εικόνα 3.10:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, μετά την επιβολή του φαινομένου του ερπυσμού και την τοποθέτηση της επένδυσης.



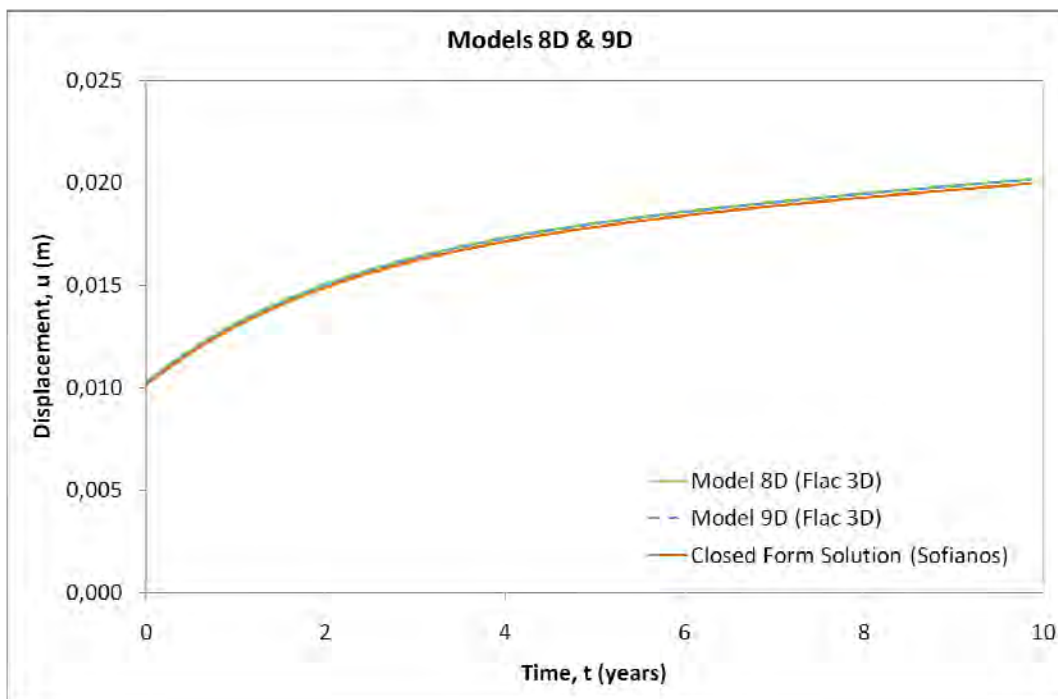


**Σχήμα 3.5:** Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8B και 9B με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009) και την 3<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Goodman, 1989).

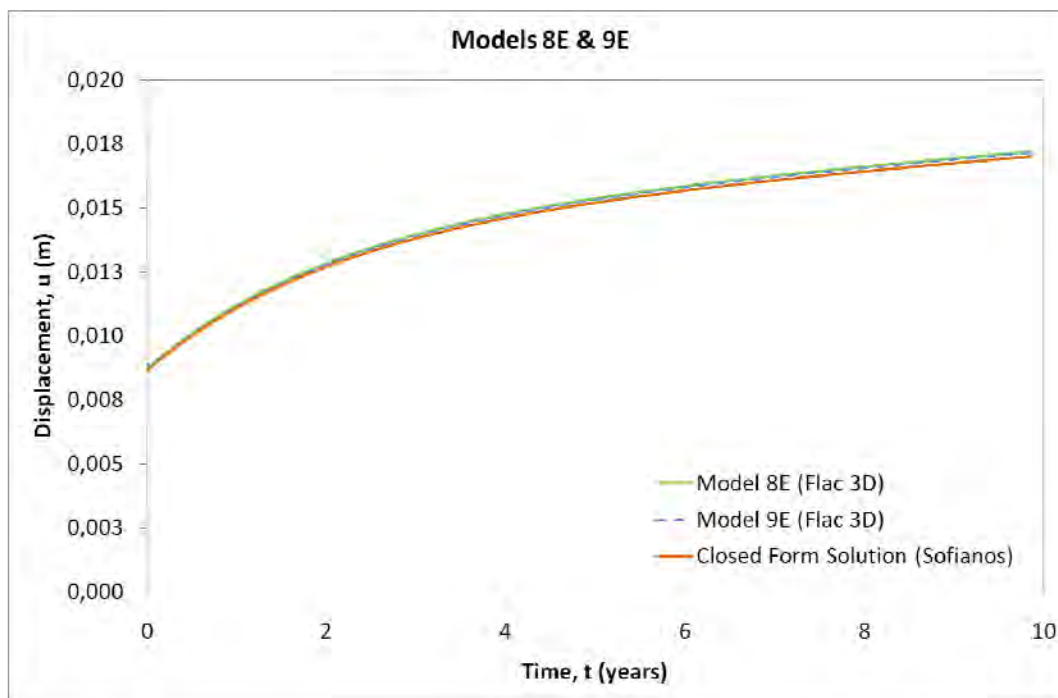


**Σχήμα 3.6:** Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8C και 9C με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

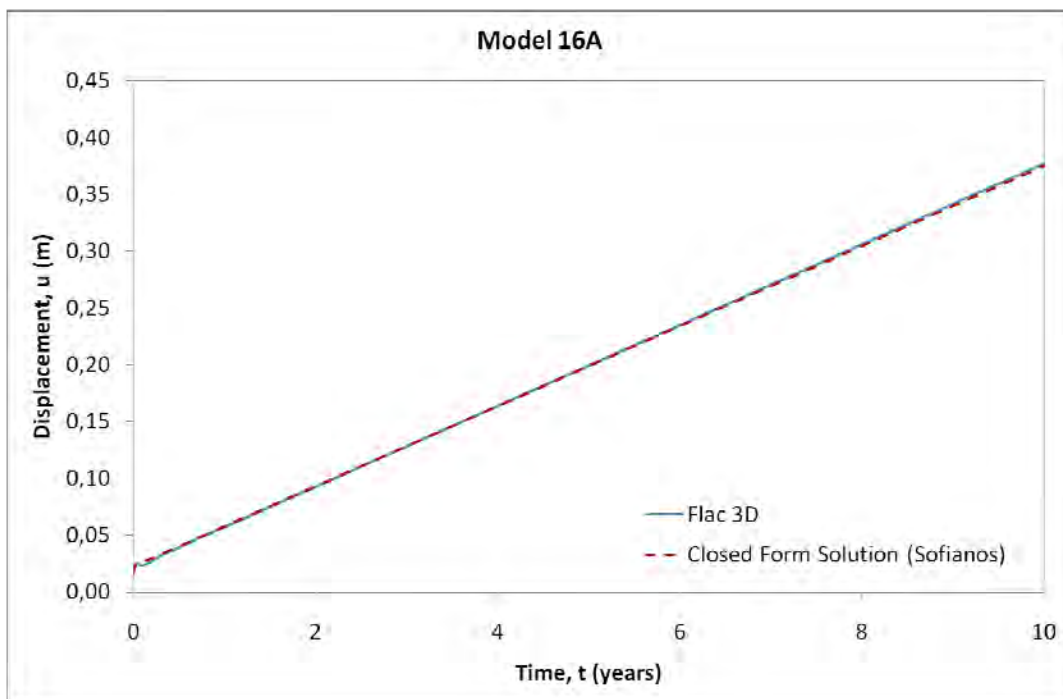




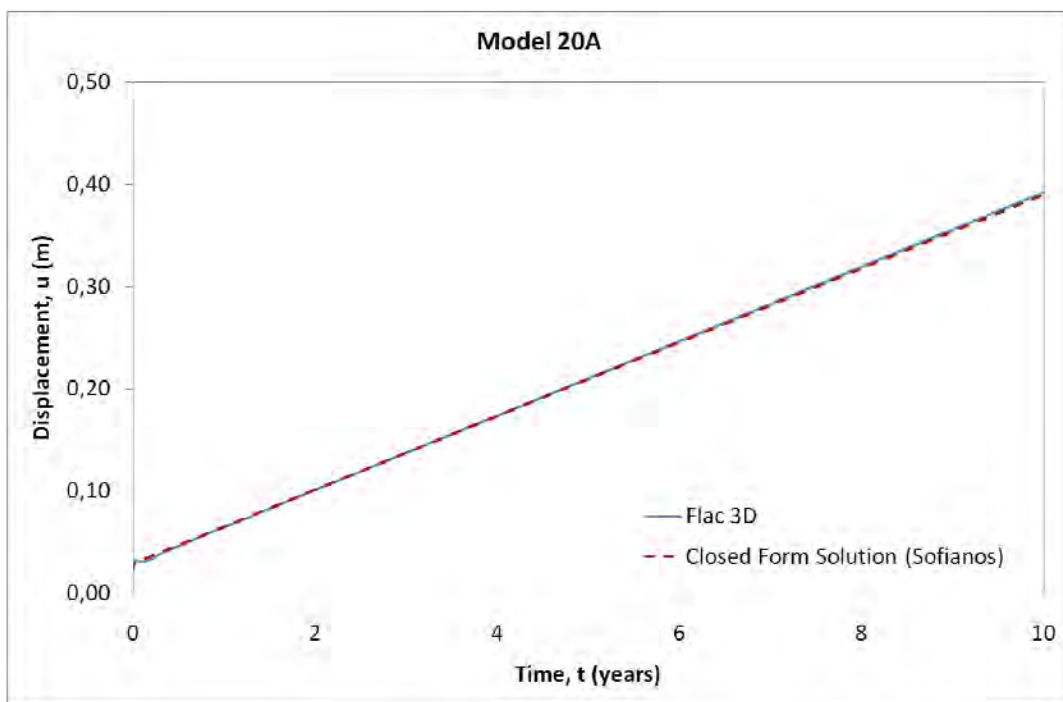
**Σχήμα 3.7:** Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8D και 9D με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



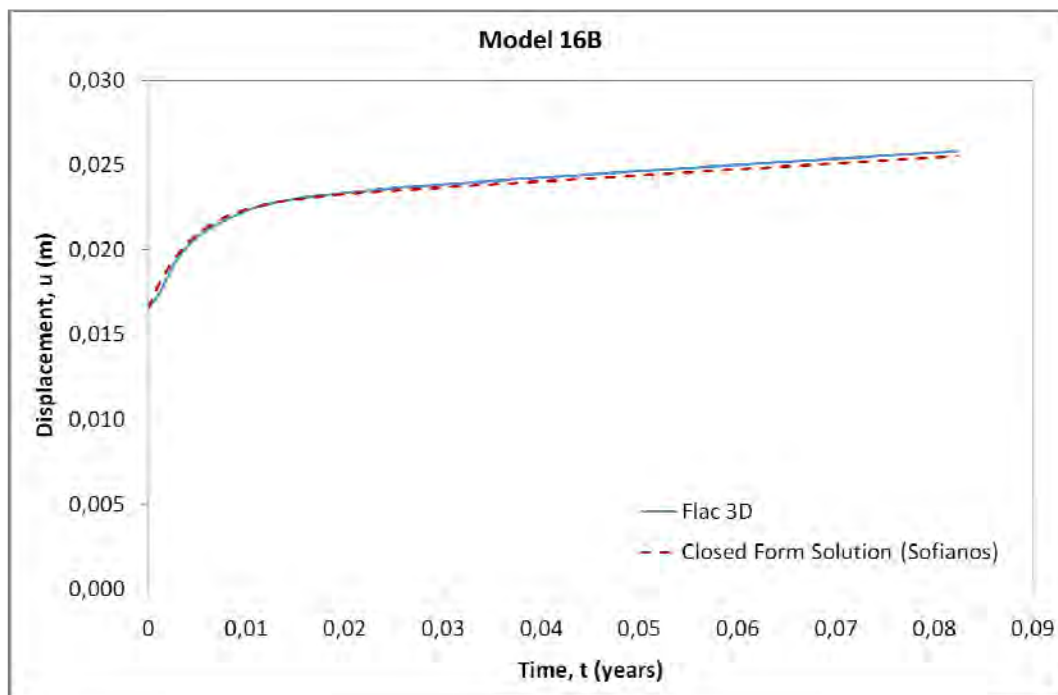
**Σχήμα 3.8:** Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 8E και 9E με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



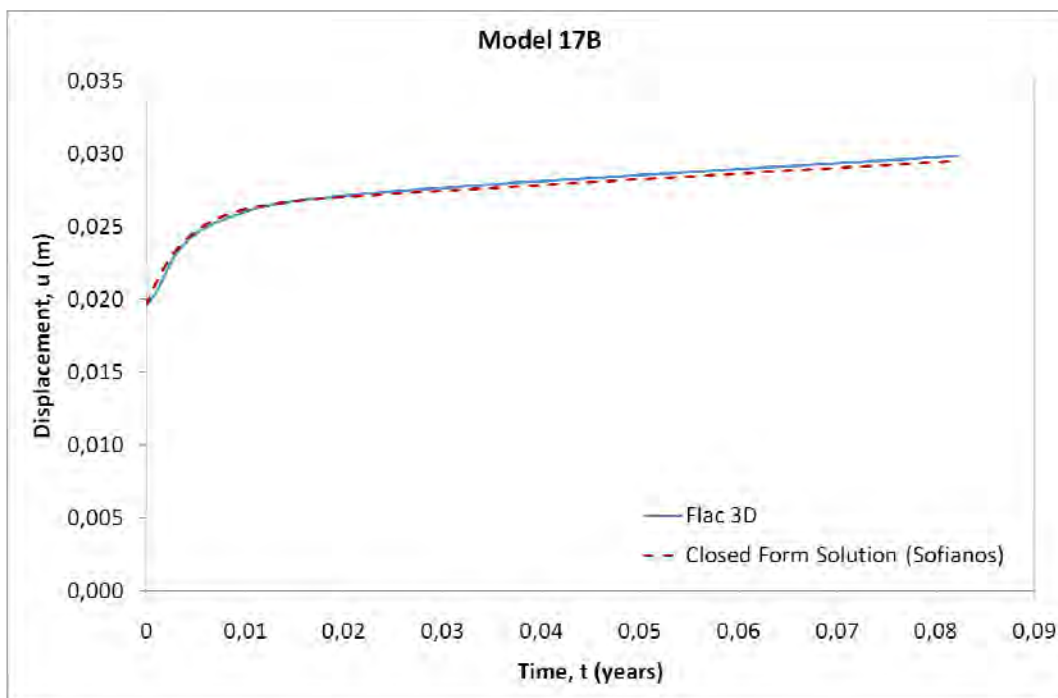
**Σχήμα 3.9:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16A με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



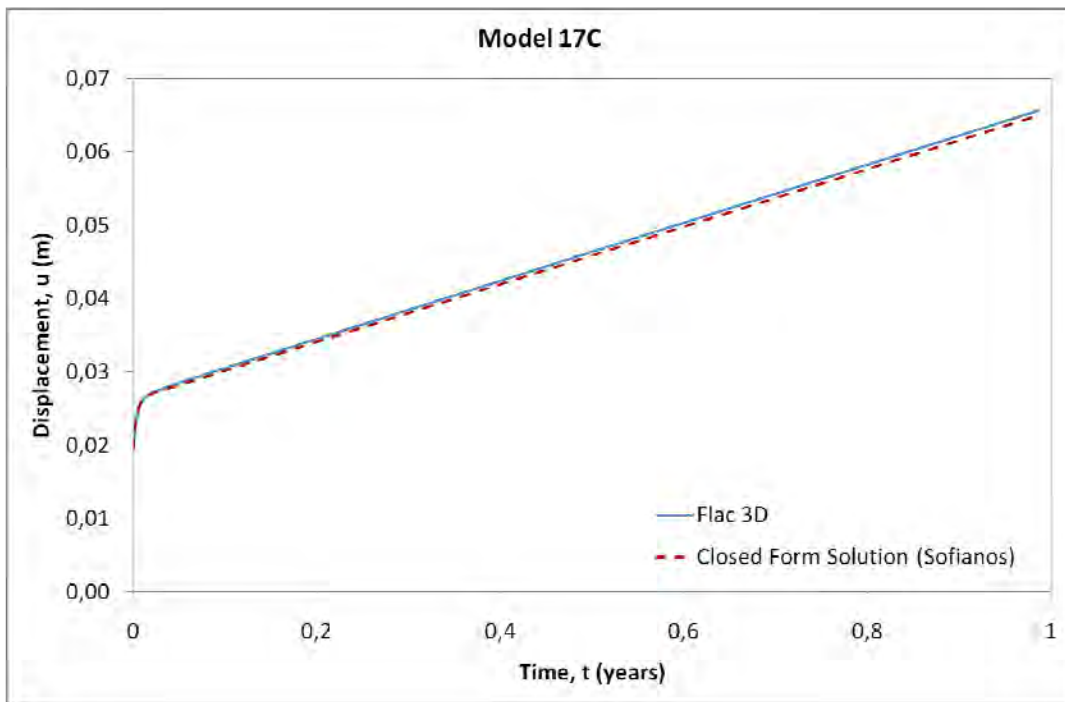
**Σχήμα 3.10:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20A με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



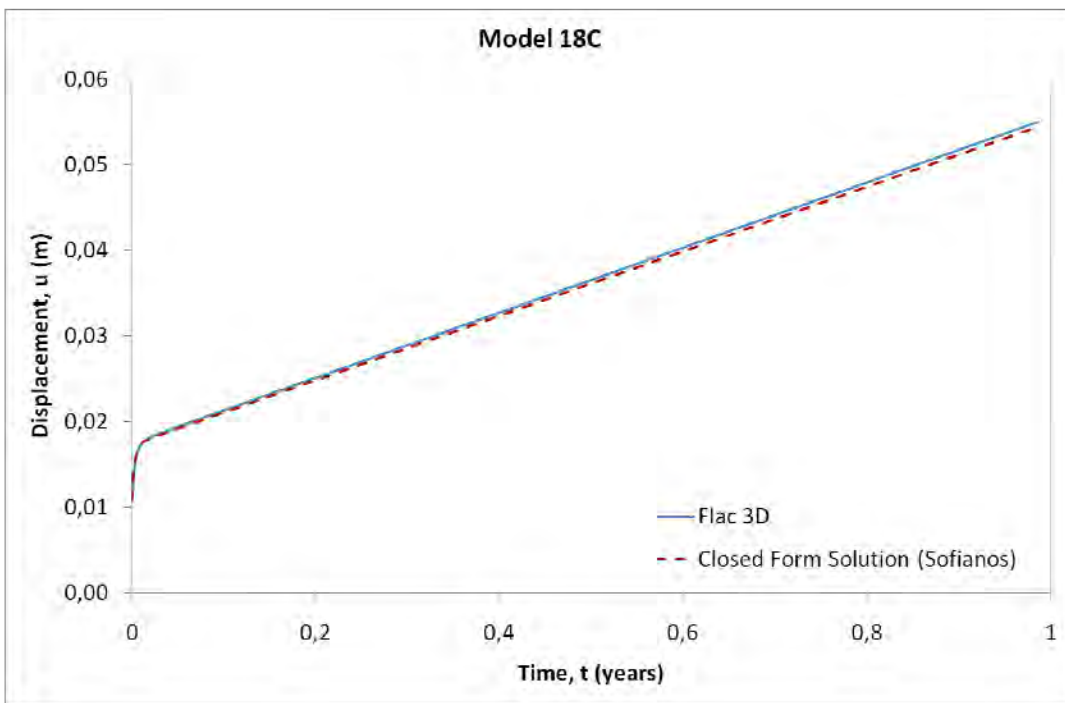
**Σχήμα 3.11:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16B με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



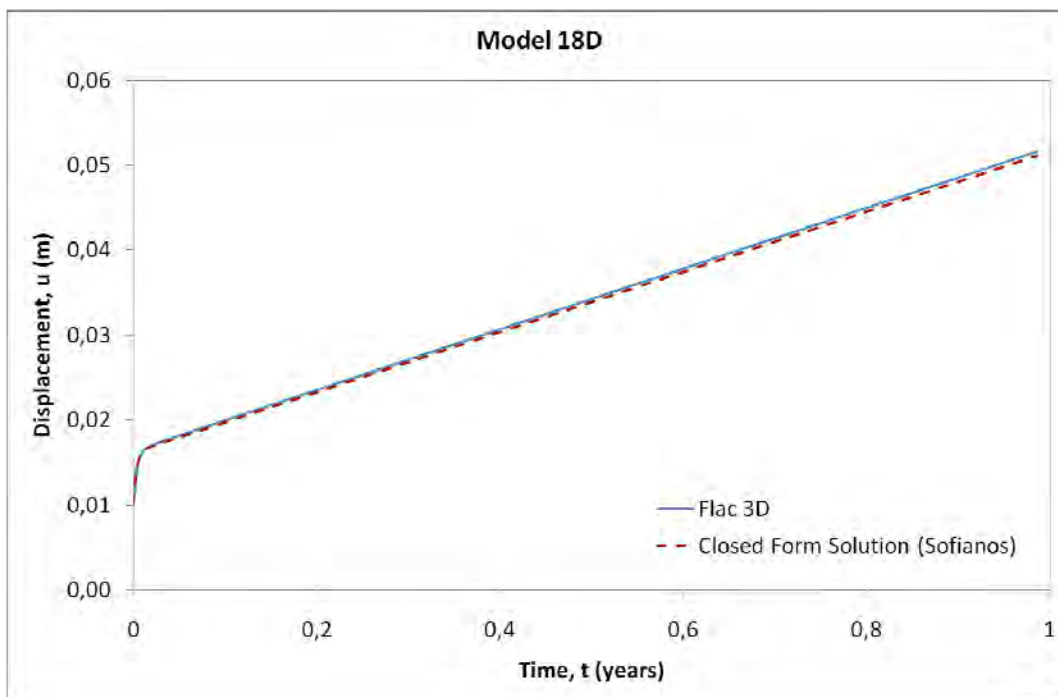
**Σχήμα 3.12:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17B με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



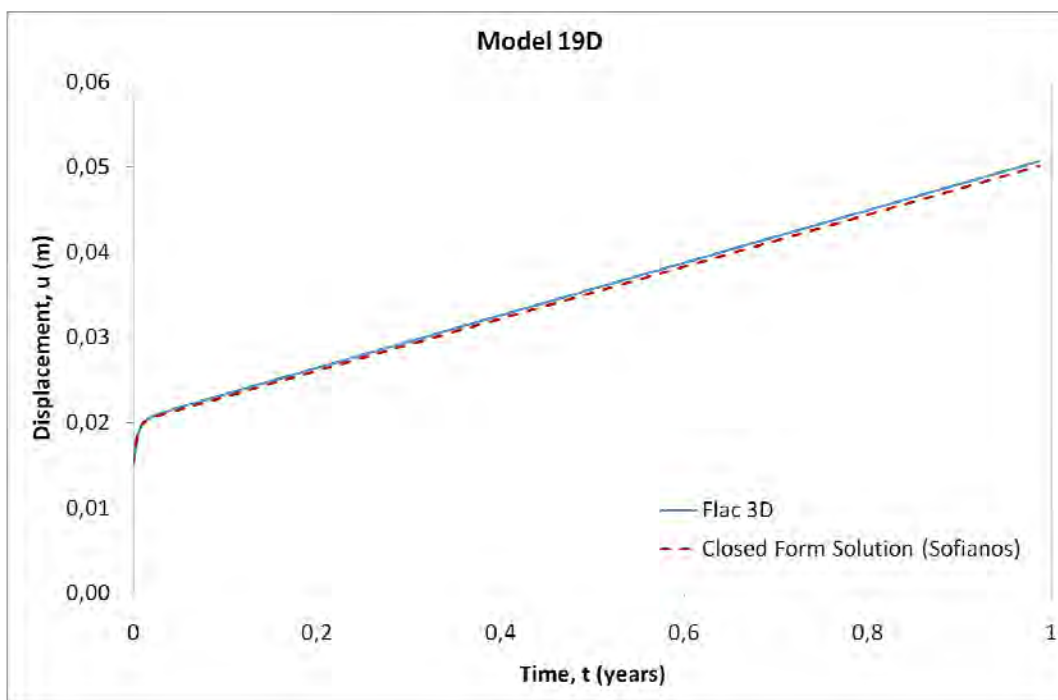
**Σχήμα 3.13:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17C με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



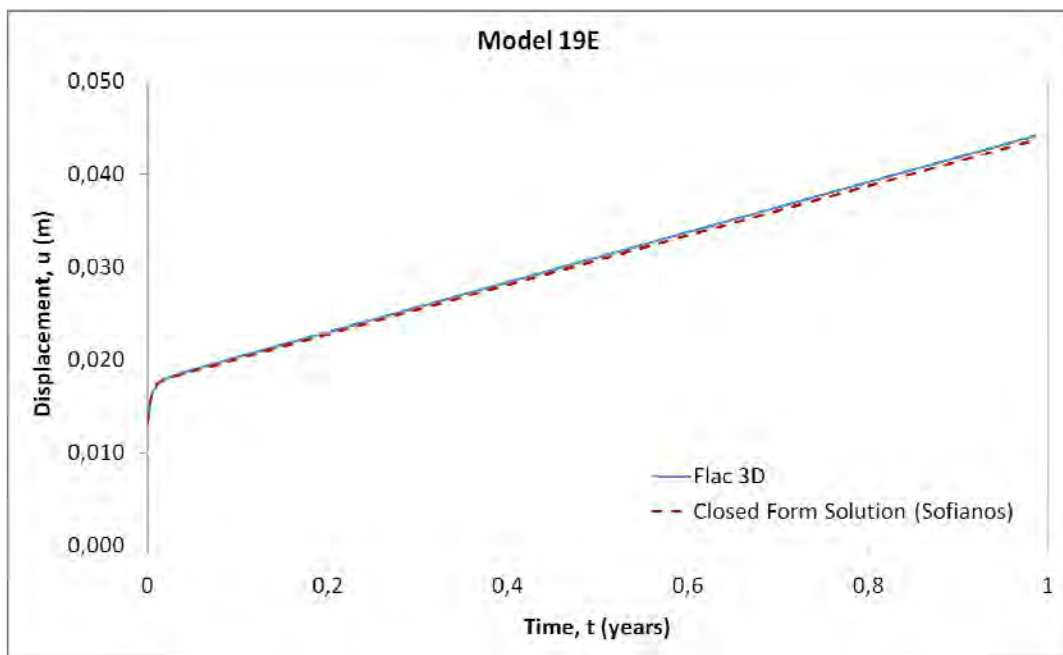
**Σχήμα 3.14:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18C με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



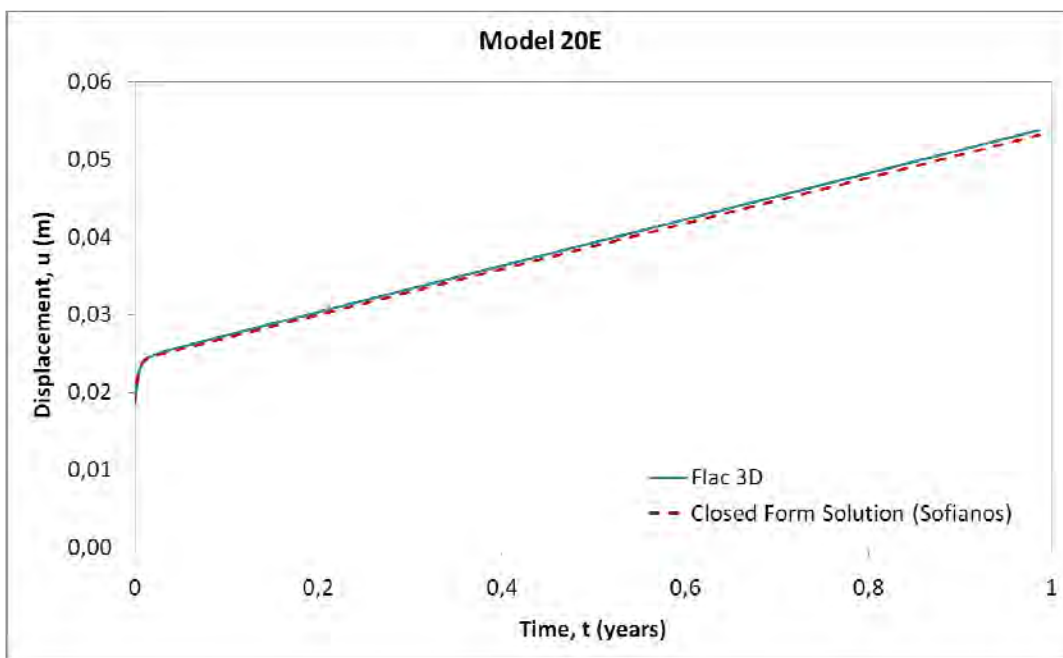
**Σχήμα 3.15:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18D με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



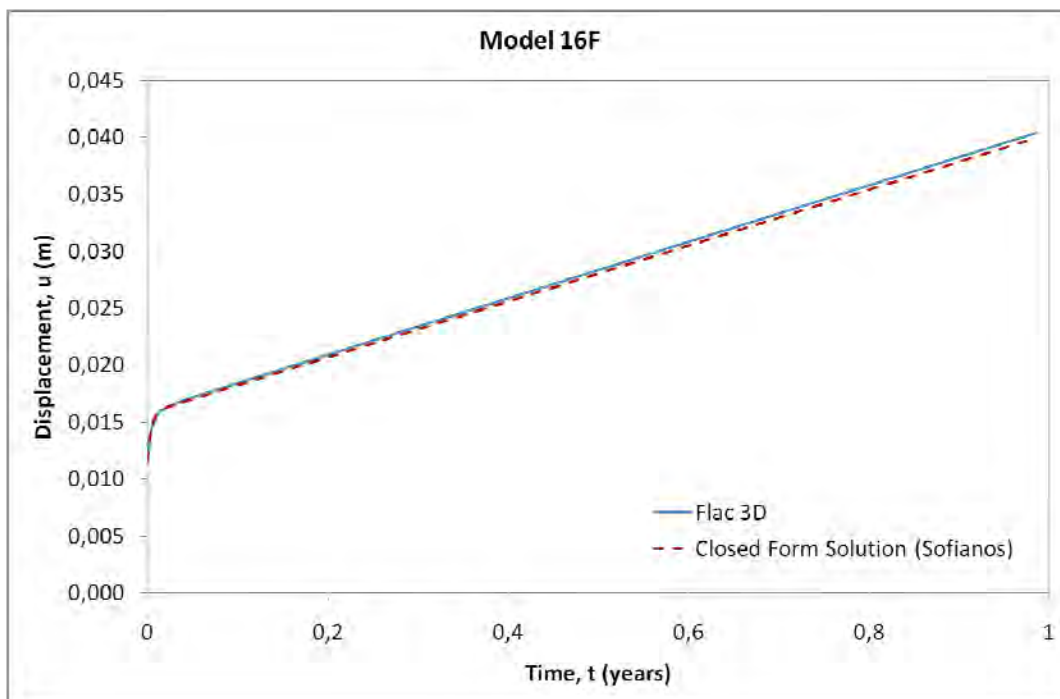
**Σχήμα 3.16:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19D με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



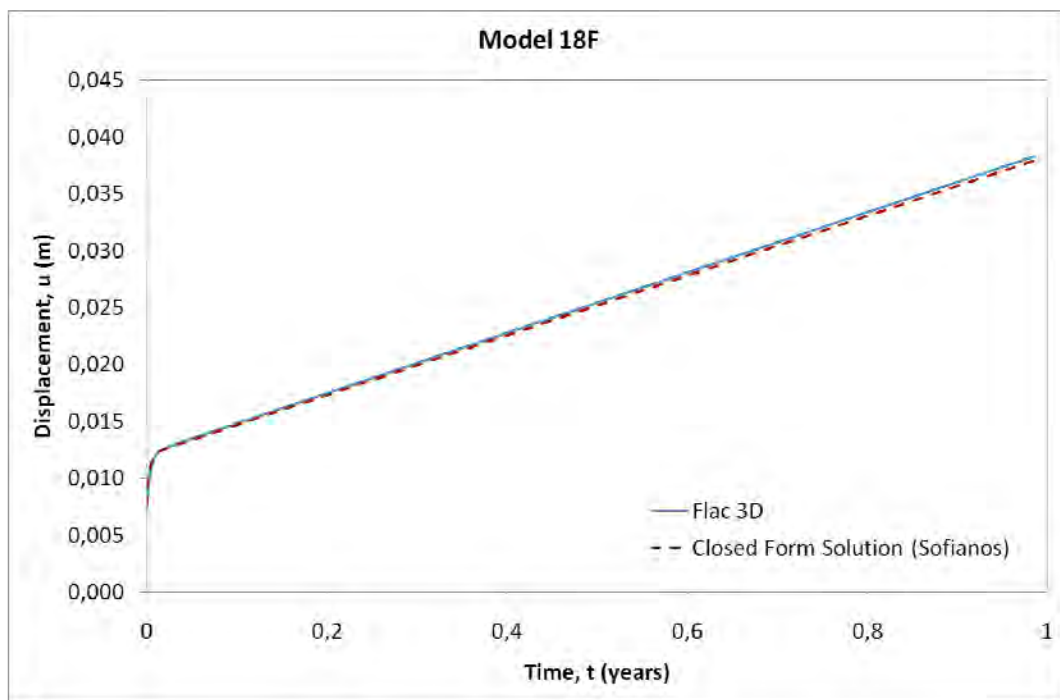
**Σχήμα 3.17:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19E με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



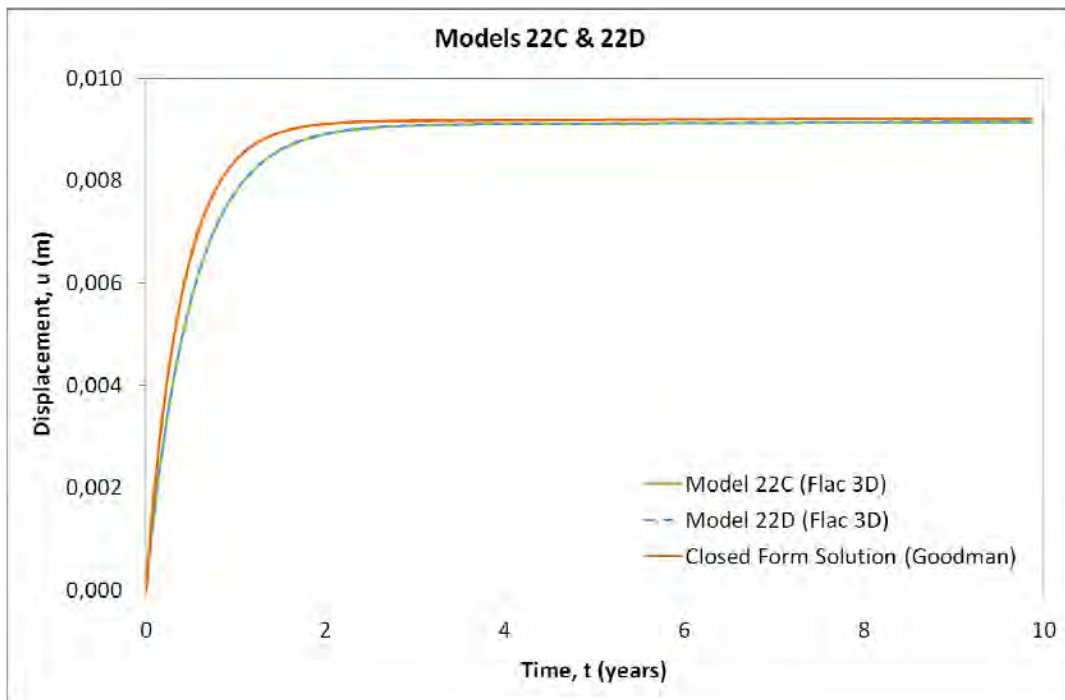
**Σχήμα 3.18:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20E με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



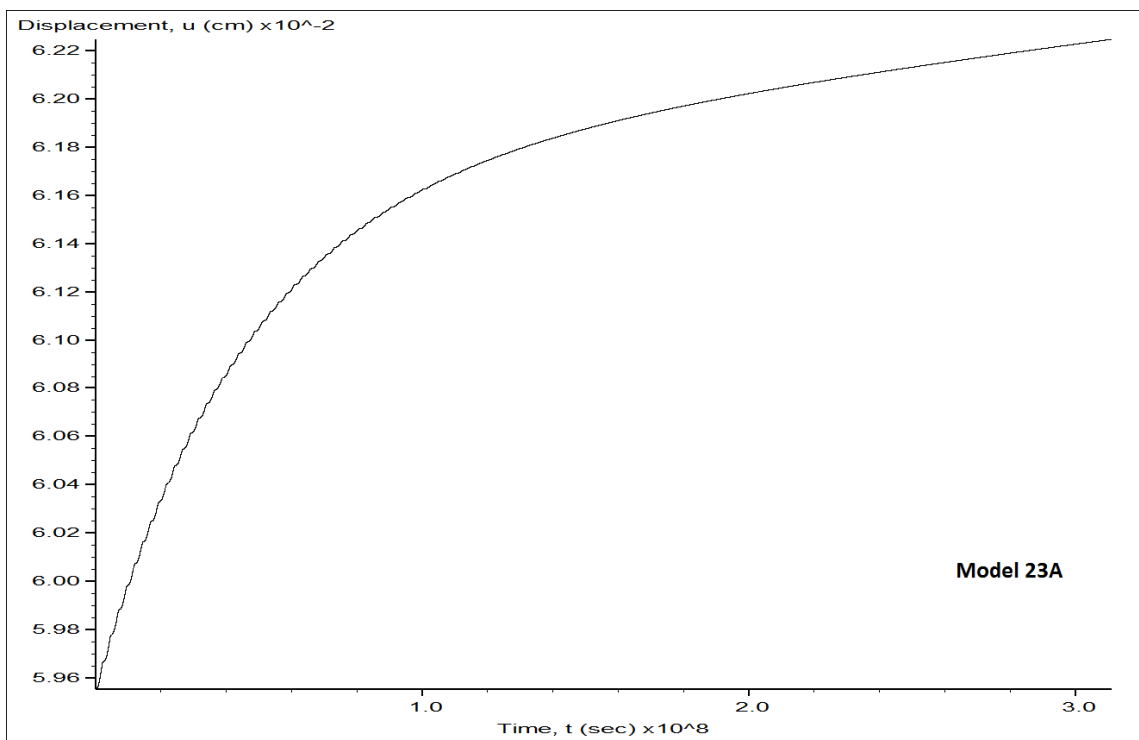
**Σχήμα 3.19:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16F με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



**Σχήμα 3.20:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18F με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

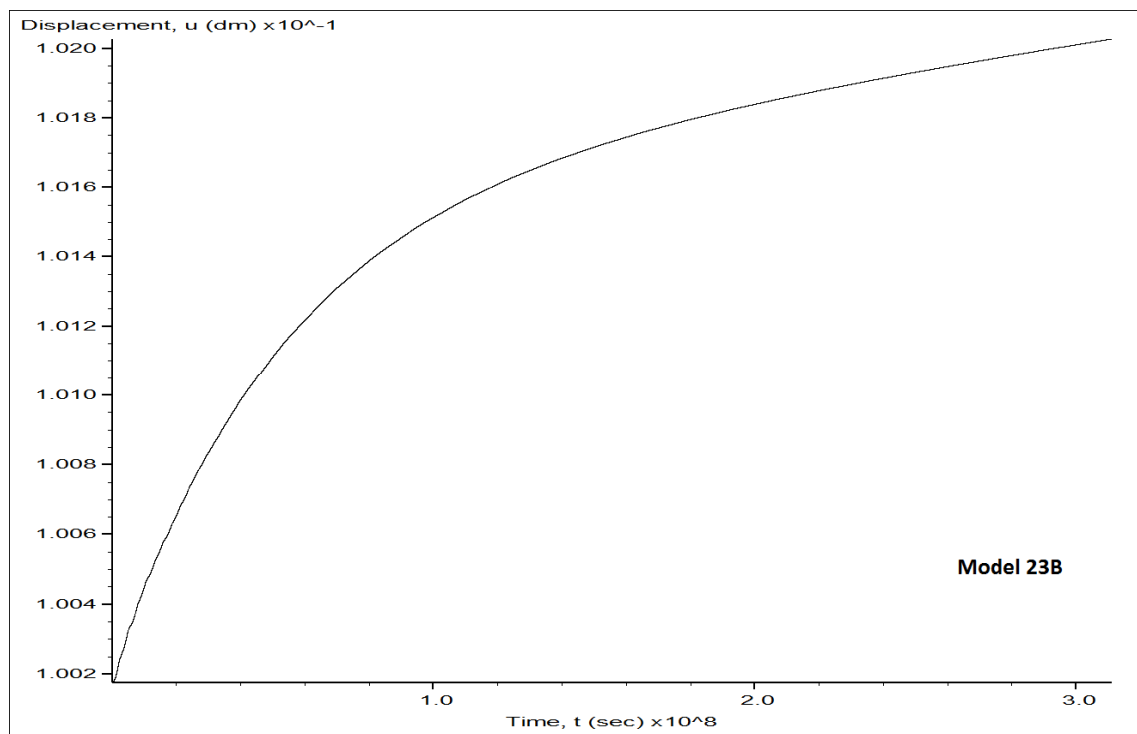


**Σχήμα 3.21:** Σύγκριση καμπυλών ερπυσμού μοντέλων 22C και 22D με την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Goodman, 1989).



**Σχήμα 3.22:** Καμπύλη ερπυσμού ιξωδοπλαστικού μοντέλου 23A.





**Σχήμα 3.23:** Καμπύλη ερπυσμού ιξωδοπλαστικού μοντέλου 23B.

### 3.5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Πρώτης Φάσης Προσομοιώσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι δύο κύριοι στόχοι της πρώτης φάσης των προσομοιώσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ήταν αφενός η αποκόμιση εμπειρίας στο λογισμικό προσομοίωσης Flac 3D και στη γλώσσα προγραμματισμού FISH και αφετέρου, η αναζήτηση όλων των απαραίτητων ιδιοτήτων, συνθηκών και παραμέτρων προσομοίωσης του φαινομένου της σύνθλιψης. Οι στόχοι αυτοί ουσιαστικά αποσκοπούσαν στην καλύτερη διεξαγωγή της δεύτερης και της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων.

Η εκμάθηση του Flac 3D και της FISH επετεύχθη όπως ήταν αναμενόμενο σταδιακά, ακόμη και μέσω των αποτυχημένων μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, τα οποία δεν παρουσιάζονται στην Εργασία.

Το σύνολο των ιδιοτήτων, συνθηκών και παραμέτρων προσομοίωσης που πρέπει να περιλαμβάνει ένα μοντέλο που προσομοιώνει το φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού, προέκυψε ουσιαστικά μέσω της μεθόδου των επαναλαμβανόμενων δοκιμών (trial and

error) κατά την κατασκευή των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης. Ακόμη, από τα αποτελέσματα των επιτυχών μοντέλων που παρατίθενται παραπάνω και στο Παράρτημα Α, καθώς και από τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν με κλειστού τύπου επίλυσεις, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα. Γενικά παρατηρήθηκε ότι οι δύο κλειστές λύσεις του Σοφιανού (2009), χωρίς και με εσωτερική πίεση (Κεφάλαιο 2 – 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου αντίστοιχα), συμπίπτουν σχεδόν απόλυτα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Flac 3D, ενώ το ίδιο ισχύει και για την κλειστή λύση του Goodman (1989) χωρίς υποστήριξη (Κεφάλαιο 2 – 3<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου). Αντιθέτως, για την κλειστή λύση του Goodman (1989) με υποστήριξη (Κεφάλαιο 2 – 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου), παρατηρείται μία ελαφρά απόκλιση (Σχήμα 3.21).

Από τις προσομοιώσεις των μοντέλων των ομάδων 16 έως 20, προκύπτει ότι κατά την ερπυστική επίλυση η περιοριστική συνθήκη του χρόνου (*solve age*) παρέχει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την περιοριστική συνθήκη του αριθμού των βημάτων επίλυσης (*step*). Μάλιστα, όσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο του ερπυσμού, τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το χρονικό βήμα επίλυσης (*creep max*). Επίσης, από τα αποτελέσματα των ομάδων 8 και 9 είναι εμφανές ότι η τιμή του μέτρου συστολής ( $K$ ) δεν παίζει κανέναν απολύτως ρόλο, ενώ το ίδιο ισχύει και για τη γεωμετρίες του καννάβου που δοκιμάστηκαν για την προσομοίωση της βραχόμαζας («radial cylinder» – «cylindrical shell»), κάτι το οποίο είναι εμφανές στο Σχήμα 3.21.

Τέλος, όσον αφορά στα ιξωδοπλαστικά μοντέλα (Σχήματα 3.22 και 3.23), οι ερπυστικές μετατοπίσεις που προέκυψαν είναι αποκλειστικά ιξωδοελαστικές, καθώς όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3.9 και 3.10, η πλαστική περιοχή γύρω από το άνοιγμα δεν εξελίσσεται με το χρόνο.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Δεύτερη Φάση Προσομοιώσεων – Παραμετρικές Αναλύσεις

### 4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενα σημεία της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, σκοπός των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στις συνολικά τρεις φάσεις των προσομοιώσεων, ήταν η προσομοίωση του φαινομένου της σύνθλιψης, κυρίως όσον αφορά στην ερπυστική του φύση.

Η συμβολή των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης προσομοιώσεων, τα οποία αναλύονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, ήταν ιδιαίτερα σημαντική. Αφενός επειδή μέσω αυτών αποκομίσθηκε η εμπειρία χρήσης του τριδιάστατου κώδικα Flac 3D και της γλώσσας προγραμματισμού FISH και αφετέρου, διότι μέσω των μοντέλων αυτών εξετάστηκαν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τις αριθμητικές αναλύσεις.

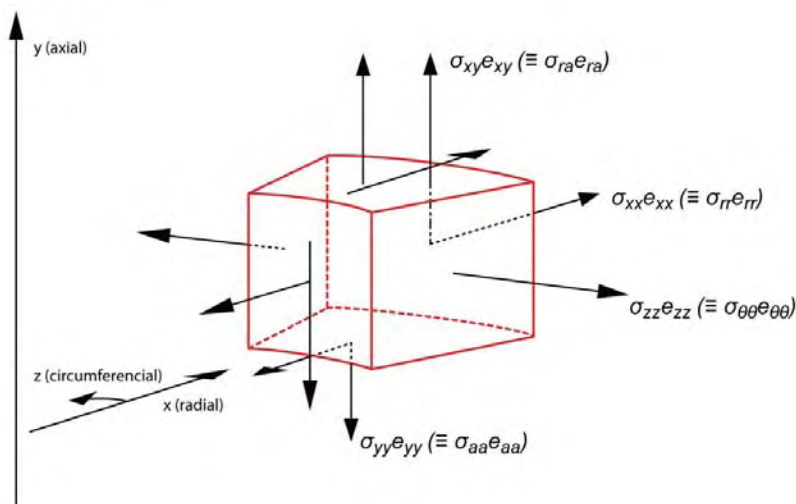
Κατά τη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε μία σειρά παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων με σκοπό την πιο

ενδεδειγμένη εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  στο φαινόμενο της σύνθλιψης. Η εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων αυτών συσχετίστηκε και με την αναζήτηση παραμέτρων ερπυσμού στη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία παρατίθεται στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας Εργασίας (Παράγραφος 2.8).

## 4.2 Μοντέλα Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων

Τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν για την πραγματοποίηση των παραμετρικών αναλύσεων της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων, επιλέχθηκε να προσεγγίσουν το υπό διερεύνηση φαινόμενο ως πρόβλημα μίας αξιsymμετρικής σήραγγας. Μία σήραγγα βρίσκεται σε κατάσταση αξονικής symμετρίας όταν η γεωμετρία, τα φορτία, οι συνοριακές συνθήκες της και τα υλικά που την περιβάλλουν είναι symμετρικά ως προς έναν άξονα.

Για την κατασκευή αξιsymμετρικών μοντέλων είναι απαραίτητη η θεώρηση κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα απειροστό στοιχείο ενός αξιsymμετρικού μοντέλου και επισημαίνονται οι διευθύνσεις των αξόνων, των τάσεων και των παραμορφώσεων του. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι ο άξονας  $y$  είναι ο άξονας symμετρίας του μοντέλου, και ότι οι  $x$  και  $z$  αντιπροσωπεύουν τις ακτινικές και τις εφαπτομενικές συντεταγμένες αντίστοιχα (πολικές συντεταγμένες).



**Σχήμα 4.1:** Απειροστό στοιχείο αξιsymμετρικού μοντέλου.

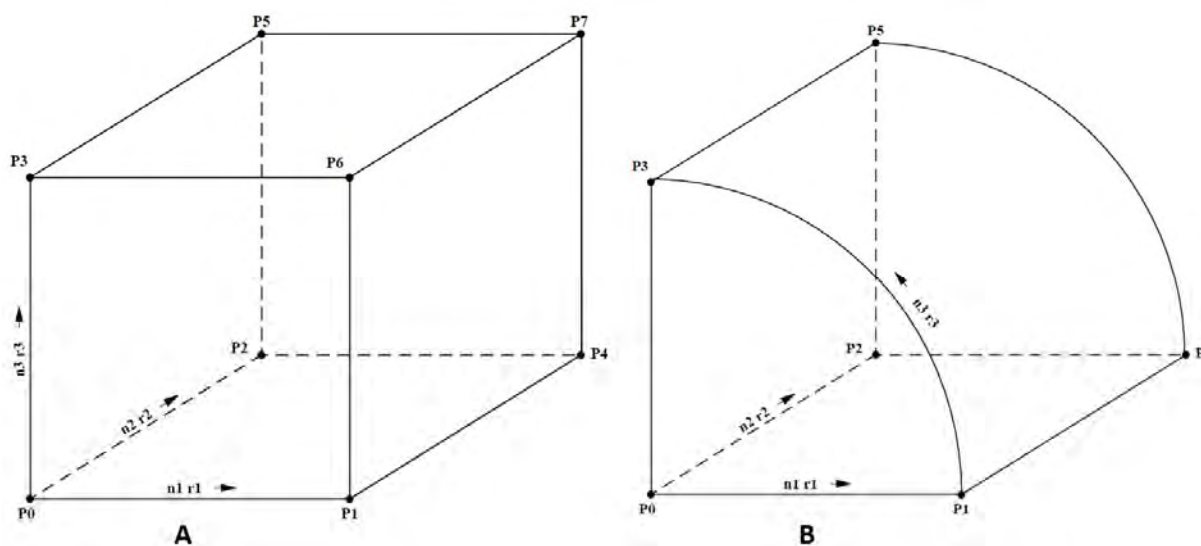
### 4.2.1 Κατασκευή Αξισυμμετρικών Μοντέλων

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την κατασκευή των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων είναι παρόμοια με την αντίστοιχη των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης (Κεφάλαιο 3 – Παράγραφος 3.3.1). Δεδομένου όμως ότι ένα πρόβλημα αξισυμμετρίας είναι πιο σύνθετο, καθώς και ότι ο σκοπός της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων ήταν η διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων, τα αξισυμμετρικά μοντέλα που προέκυψαν εμπεριείχαν αρκετές διαφοροποιήσεις.

Παρακάτω αναλύεται συνοπτικά η αλληλουχία των βημάτων που ακολουθήθηκε κατά την κατασκευή των μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων. Επίσης, επισημαίνονται οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν σε σχέση με την κατασκευή των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης:

- ↳ Όπως και στην περίπτωση των μοντέλων της πρώτης φάσης, αρχικά δίνεται η εντολή να εισέλθει στο μοντέλο το φαινόμενο του ερπυσμού (`configure creep`), με τη διαφορά ότι στο σύνολο των αξισυμμετρικών μοντέλων ο ερπυσμός απενεργοποιήθηκε (`set creep off`) από την αρχή της μοντελοποίησης. Ακόμη, επειδή στα αξισυμμετρικά μοντέλα εφαρμόζεται διαδικασία εκσκαφής, ορίζεται εξαρχής το βήμα της προχώρησης (`define round_length`), το κριτήριο (ιξωδοελαστικό ή ιξωδοπλαστικό) βάσει του οποίου θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση (`define _analysis`) και το εάν κατά την εκσκαφή θα τοποθετηθεί σύστημα υποστήριξης ή όχι (`define _support`).
- ↳ Στη συνέχεια, λόγω της συνθετότητας των αξισυμμετρικών μοντέλων, ορίστηκαν ομαδοποιημένα βασικές παράμετροι (`define _parameters`), οι οποίες είναι απαραίτητες για τη μοντελοποίηση. Ενδεικτικά αναφέρονται οι διαστάσεις της σήραγγας, το ύψος των υπερκειμένων και η πυκνότητα των ζωνών από τις οποίες θα αποτελείτο το μοντέλο, τόσο εντός, όσο και εκτός της εκσκαφής.

↳ Έπειτα, όπως και στα μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης, δημιουργείται ο κάρναβος του μοντέλου (*generate zone*), επιλέγοντας και συνδυάζοντας από τα συνολικά δεκατρία πρότυπα που περιλαμβάνει το Flac 3D. Στα μοντέλα της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων δομήθηκε ένας συνδυαστικός κάρναβος για την προσομοίωση του συνόλου της βραχώμαζας (περιβάλλουσας και προς εκσκαφή), αποτελούμενος από τις πρότυπες γεωμετρίες «brick» (Σχήμα 4.2 A) και «cylinder» (Σχήμα 4.2 B). Λόγω της χρήσης συνδυαστικού κάρναβου, πραγματοποιήθηκε και μία επικόλληση μεταξύ των επιμέρους κάρναβων (*attach face*), έτσι ώστε να αποφευχθούν ασυμφωνίες στις διεπιφάνειές τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι αντίθετα με ορισμένα μοντέλα της πρώτης φάσης, σε κανένα αξισυμμετρικό μοντέλο η επένδυση δεν προσομοιώθηκε ως ξεχωριστό σύνολο ζωνών πεπερασμένων διαφορών.



**Σχήμα 4.2:** Δύο τυπικές γεωμετρίες κάρναβου του Flac 3D. (A) Η brick και (B) η cylinder (Itasca, 2006).

↳ Το επόμενο βήμα είναι να δοθούν όλες οι απαραίτητες ιδιότητες (*define properties*), οι οποίες χρησιμεύουν στο μοντέλο με βάση το οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση (Burgers ή CVISC). Ενδεικτικά αναφέρονται οι παράμετροι ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$ , ο λόγος Poisson και η γωνία εσωτερικής τριβής.

- ↳ Έπειτα ορίζονται οι ομαδοποιήσεις του μοντέλου (`define _groups`), φάση στην οποία ουσιαστικά διαχωρίζεται η περιβάλλουσα βραχόμαζα από την προς εκσκαφή. Στα αξισυμμετρικά μοντέλα το κάθε βήμα προχώρησης της προς εκσκαφή βραχόμαζας ορίστηκε ως ξεχωριστή ομάδα, κάτι που προφανώς δε συνέβη στα μοντέλα της πρώτης φάσης, αφού δεν εμπεριείχαν διαδικασία εκσκαφής. Η αναλυτική αυτή ομαδοποίηση της προς εκσκαφή βραχόμαζας, πραγματοποιήθηκε προκειμένου να είναι ευκολότερη η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης.
- ↳ Στη συνέχεια, όπως και στα μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης των προσομοιώσεων, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου και το σύνολο των αρχικών μεγεθών που πρέπει να ισχύουν (`define boundary_conditions` και `initial_conditions`). Στο σημείο αυτό ενεργοποιείται και το μοντέλο που λειτουργεί κατά την επίλυση, το οποίο έχει προκαθοριστεί από την αρχή της μοντελοποίησης και οι ιδιότητες του οποίου έχουν ήδη προσδιοριστεί σε προηγούμενο στάδιο. Όσον αφορά στα σύνορα του μοντέλου, εφαρμόστηκαν οι κατάλληλες συνθήκες (`nvelocity`, `svelocity`, `dvelocity` και `fix x y z`) όπου χρειαζόταν. Αναφορικά με τα αρχικά μεγέθη, καθορίστηκε απλώς το αρχικό εντατικό πεδίο (`initial sxx syx szz`), όπως δηλαδή και στα μοντέλα της πρώτης φάσης.
- ↳ Ύστερα από όλα τα παραπάνω βήματα, το μοντέλο είναι έτοιμο να πραγματοποιήσει μία αρχική ελαστική ή ελαστοπλαστική (για Burgers ή CVISC) επίλυση (`solve`), προτού ξεκινήσει η διαδικασία εκσκαφής. Η αρχική αυτή επίλυση είναι ιδιαίτερα σημαντική και πραγματοποιείται για να ισορροπήσει το μοντέλο και να λειτουργήσει σωστά κατά την εκσκαφή, που αποτελεί άλλωστε και το βασικότερο στάδιο της μοντελοποίησης. Σημειώνεται ότι κατά την αρχική επίλυση των αξισυμμετρικών μοντέλων δεν τέθηκε περιοριστική συνθήκη, αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι εξ' ορισμού ρυθμίσεις του Flac 3D για να τερματιστεί η επίλυση. Αυτό συνέβη αποσκοπώντας σε υψηλότερη ακρίβεια της επίλυσης, κυρίως λόγω της συνθετότητας των μοντέλων της δεύτερης φάσης, δηλαδή λόγω του συνδυαστικού τους καννάβου και της πληθώρας των δεδομένων τους.

↪ Το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της εκσκαφής (`define _excavation`), η οποία ορίζεται μέσω βρόγχου (`loop`) ρουτινών FISH, αφού αποτελείται από επιμέρους βήματα προχώρησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα αξισυμμετρικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν είτε διέθεταν σύστημα υποστήριξης, είτε όχι. Επίσης, σε αυτά εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές διαδικασίες εκσκαφής. Στην πρώτη πραγματοποιήθηκε μόνο ελαστική / ελαστοπλαστική επίλυση μετά από το κάθε βήμα προχώρησης (και την τοποθέτηση της υποστήριξης εάν υπήρχε). Στη δεύτερη πραγματοποιήθηκε πρώτα ελαστική / ελαστοπλαστική και έπειτα ερπυστική επίλυση. Και στις δύο περιπτώσεις η ελαστική / ελαστοπλαστική επίλυση είχε ως περιοριστική συνθήκη το `solve ratio`. Στη δεύτερη περίπτωση, πριν την πραγματοποίηση της ερπυστικής επίλυσης που είχε ως περιοριστική συνθήκη το χρόνο (`age`), έπρεπε να επανενεργοποιηθεί το φαινόμενο του ερπυσμού (`set creep on`), το οποίο είχε απενεργοποιηθεί από την αρχή της μοντελοποίησης. Ακόμη, έπρεπε να τεθεί το χρονικό βήμα επίλυσης στο αυτόματο (`set creep dt auto on`), με τον περιορισμό να μη ξεπερνάει μία συγκεκριμένη τιμή (`set creep max`). Επομένως, με βάση τα παραπάνω και αναλόγως της ισχύουσας περίπτωσης, για τα μοντέλα της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί βρόγχοι. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις δύο περιπτώσεις όπου η διαδικασία της εκσκαφής περιελάμβανε και ερπυστική επίλυση, στο κλείσιμο του βρόγχου έπρεπε να απενεργοποιείται εκ νέου το φαινόμενο του ερπυσμού, έτσι ώστε να επανενεργοποιηθεί στο επόμενο βήμα προχώρησης, μετά την ολοκλήρωση της ελαστικής / ελαστοπλαστικής επίλυσης. Επιπλέον, στο σύνολο των τεσσάρων περιπτώσεων διαδικασίας εκσκαφής, μετά την ολοκλήρωση της εκάστοτε επίλυσης, δόθηκε η εντολή στο μοντέλο να πραγματοποιήσει αποθήκευση (`save`) των δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Όσον αφορά στα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόστηκαν στους δύο από τους τέσσερις βρόγχους που δημιουργήθηκαν, τοποθετήθηκε μόνο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το οποίο προσομοιώθηκε με επίπεδα στοιχεία κελύφους (`sel shell`). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώθηκε ως ελαστικό και για την εφαρμογή του ήταν απαραίτητος ο καθορισμός του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson (`sel shell`



`property isotropic=(E,ν)`). Σημειώνεται ότι η τοποθέτηση του σκυροδέματος έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε το πάχος (`thick`) και η αντοχή του να αυξάνονται σταδιακά και να φτάνουν τη μέγιστη τιμή μερικά βήματα προχώρησης πίσω από την εκσκαφή, όπως δηλαδή συμβαίνει και κατά τη διάνοιξη και υποστήριξη μίας σήραγγας.

- ↳ Τέλος, τη διαδικασία της εκσκαφής ακολουθεί το στάδιο της τελικής ερπυστικής επίλυσης του μοντέλου (`solve`). Στο τελικό αυτό στάδιο των αξιsymμετρικών μοντέλων, χρησιμοποιήθηκε η ίδια αλληλουχία εντολών με τις δύο περιπτώσεις όπου η διαδικασία της εκσκαφής περιελάμβανε και ερπυστική επίλυση. Δηλαδή, αρχικά επανενεργοποίηση του φαινομένου του ερπυσμού (`set creep on`), έπειτα ορισμός του χρονικού βήματος επίλυσης στο αυτόματο (`set creep dt auto on`), με τον περιορισμό να μη ξεπερνάει μία συγκεκριμένη τιμή (`set creep max`), και τέλος προσδιορισμός της διάρκειας επίλυσης με περιοριστική συνθήκη το χρόνο (`age`). Η διάρκεια της επίλυσης τέθηκε στο ένα έτος και πραγματοποιήθηκε σταδιακά, στην αρχή ανά ημέρα (για την πρώτη εβδομάδα), ύστερα ανά εβδομάδα (για το υπόλοιπο του πρώτου μήνα) και τέλος ανά μήνα (για το υπόλοιπο του ενός έτους). Στο καθένα από τα χρονικά αυτά στάδια (ημέρα, εβδομάδα, μήνας) πραγματοποιήθηκε καταγραφή των μετατοπίσεων (`define _monitoring`) σε πίνακες (`table`), καθώς και αποθήκευση (`save`) των δεδομένων. Στις δύο περιπτώσεις που η διαδικασία της εκσκαφής περιλαμβάνει και τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης, πραγματοποιήθηκε και καταγραφή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο σύνολο των μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων, επιλέχθηκε να μην πραγματοποιηθεί η διαδικασία της εκσκαφής καθ' όλο το μήκος τους. Δηλαδή, τα μεν μοντέλα που η διαδικασία εκσκαφής τους δεν περιλαμβάνει τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης, να μείνουν ημιτελή και ανυποστήρικτα, και τα δε που περιλαμβάνει, ημιτελή και με την παρουσία μόνο προσωρινής επένδυσης. Συνεπώς, κρίθηκε απαραίτητο η παραπάνω διαδικασία καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων των μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων, να εφαρμοστεί και μετά το πέρας του τελευταίου βήματος προχώρησης της εκσκαφής.

Εκτός από τα βασικά αξιsymμετρικά μοντέλα, η μεθοδολογία κατασκευής των οποίων αναλύεται παραπάνω, κατά τη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων δημιουργήθηκε και μια σειρά δευτερευόντων μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά κατασκευάστηκαν για να λειτουργήσουν επικουρικά ως προς τα βασικά, και είχαν ως μοναδικό σκοπό την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των βασικών μοντέλων και την καταγραφή και αποθήκευση επιπλέον δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα ανάκτησης δεδομένων (*restore*) του Flac 3D, καταγράφηκαν και αποθηκεύτηκαν σε πίνακες δεδομένα ως προς τις μετατοπίσεις και τις αξονικές δυνάμεις του σκυροδέματος, οι οποίες αναπτύσσονται σε ένα ενδιάμεσο σημείο της προς εκσκαφή βραχώμαζας, πριν και αφού εκσκαφθεί. Η μεθοδολογία κατασκευής που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια με την αντίστοιχη της καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων των βασικών αξιsymμετρικών μοντέλων.

#### 4.2.2 Βαθμονόμηση Αξιsymμετρικών Μοντέλων

Για την πραγματοποίηση των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν πέντε ομάδες παραμέτρων ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$ , το σύνολο των οποίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1. Η 1<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων είναι αυτή που ορίστηκε ως βάση σύγκρισης στη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  (Κεφάλαιο 2 – Πίνακας 2.3) και χρησιμοποιήθηκε και σε ορισμένα μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης της πρώτης φάσης προσομοιώσεων. Η 2<sup>η</sup>, η 3<sup>η</sup> και η 4<sup>η</sup> ομάδα είναι οι παράμετροι που προέκυψαν εμπειρικά έπειτα από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία (Κεφάλαιο 2 – Πίνακας 2.2). Τέλος, η 5<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων προέκυψε από τη μείωση των τιμών των παραμέτρων ερπυσμού της 4<sup>ης</sup> ομάδας, η οποία έχει τις χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις ομάδες. Σημειώνεται ότι χαμηλότερες τιμές παραμέτρων ερπυσμού σημαίνει γενικά δυσμενέστερες συνθήκες εκδήλωσης του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.

**Πίνακας 4.1:** Ομάδες παραμέτρων ερπυσμού αξιsymμετρικών μοντέλων δεύτερης φάσης προσομοιώσεων.

| Παράμετροι Ερπυσμού Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων |             |                   |                   |
|--|-------------|-------------------|-------------------|
| Ομάδα<br>(Group)                                 | $G_K$ (MPa) | $n_M$ (MPa * sec) | $n_K$ (MPa * sec) |
| 1 <sup>η</sup>                                   | 600         | $4 * 10^{11}$     | $4 * 10^{10}$     |
| 2 <sup>η</sup>                                   | 1.000       | $4 * 10^{10}$     | $4 * 10^9$        |
| 3 <sup>η</sup>                                   | 10.000      | $4 * 10^{12}$     | $4 * 10^{11}$     |
| 4 <sup>η</sup>                                   | 450         | $4 * 10^8$        | $4 * 10^7$        |
| 5 <sup>η</sup>                                   | 200         | $4 * 10^7$        | $4 * 10^6$        |

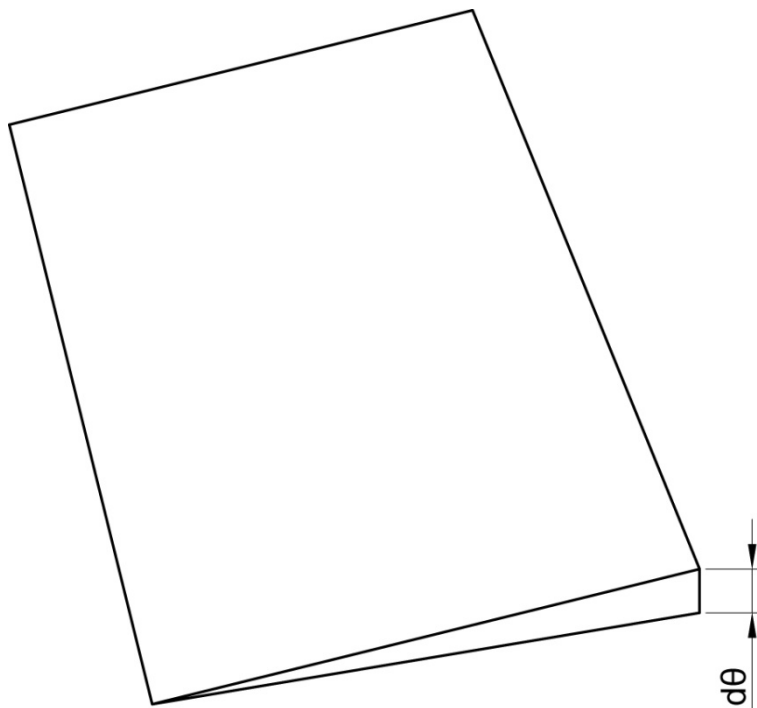
Όσον αφορά στις τρεις πρώτες ομάδες παραμέτρων (1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup>), κατασκευάστηκαν τέσσερα μοντέλα για την καθεμία από αυτές, δύο ιξωδοελαστικά και δύο ιξωδοπλαστικά. Από αυτά, τα δύο (ένα ιξωδοελαστικό και ένα ιξωδοπλαστικό) περιέχουν στη διαδικασία εκκαφής τους μόνο ελαστική / ελαστοπλαστική επίλυση, ενώ τα άλλα δύο περιλαμβάνουν πρώτα ελαστική / ελαστοπλαστική και έπειτα ερπυστική. Για την καθεμία από τις υπόλοιπες δύο ομάδες παραμέτρων (4<sup>η</sup> και 5<sup>η</sup>) κατασκευάστηκαν συνολικά οκτώ μοντέλα, τέσσερα με τα ίδια χαρακτηριστικά των μοντέλων των υπολοίπων τριών ομάδων, και τέσσερα επίσης με τα ίδια χαρακτηριστικά, αλλά και τη διαφοροποίηση ότι περιλαμβάνουν σύστημα υποστήριξης. Το σύνολο των μοντέλων των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων παρουσιάζεται στο συγκεντρωτικό Πίνακα 4.2 που ακολουθεί.

Οι παράμετροι ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$ , έτσι όπως αναλύονται παραπάνω, αποτελούν τα μοναδικά μεταβλητά δεδομένα των αξιsymμετρικών μοντέλων. Εκτός αυτών, τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν είναι πανομοιότυπα, αναλόγως βέβαια και της διαδικασίας εκκαφής που ακολουθήθηκε. Ακολούθως αναπτύσσονται όλα τα σταθερά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση των μοντέλων των παραμετρικών αναλύσεων.

**Πίνακας 4.2:** Αξισυμμετρικά μοντέλα δεύτερης φάσης προσομοιώσεων, διαχωρισμένα ανά ομάδα παραμέτρων ερπυσμού, είδος μοντέλου επίλυσης και περίπτωση διαδικασίας εκσκαφής.

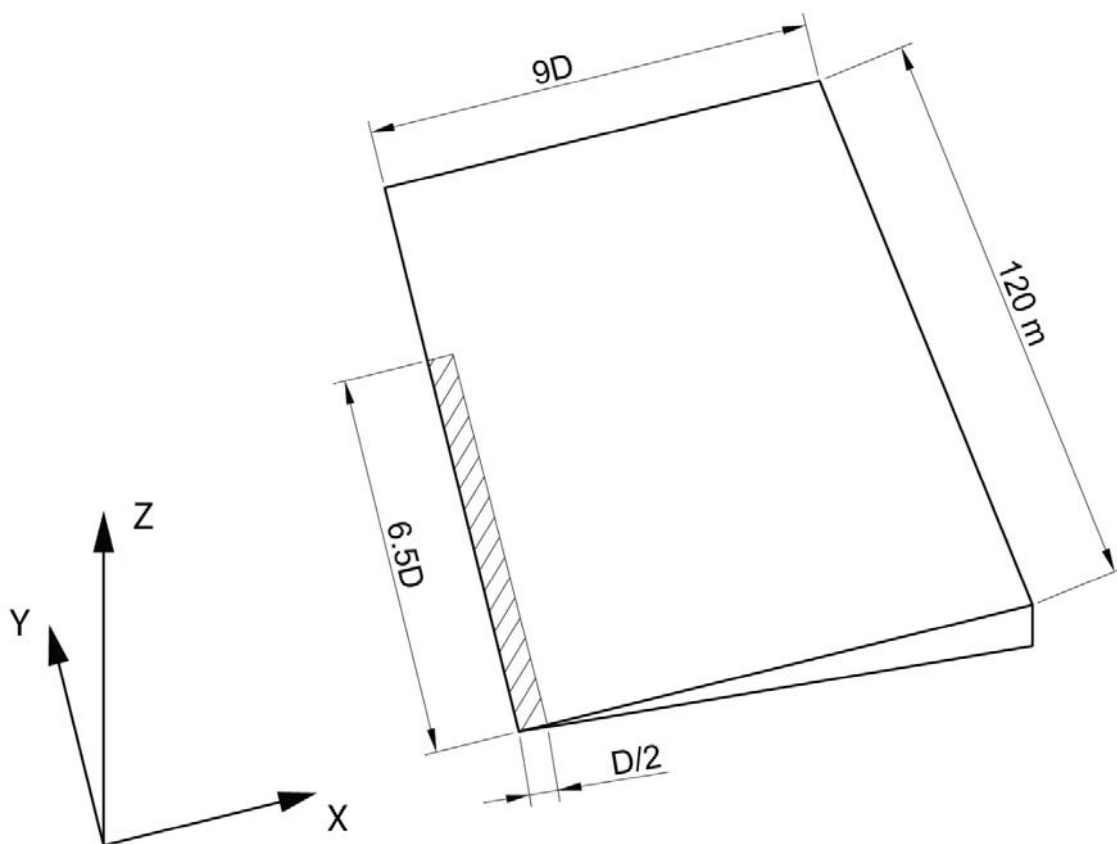
| <b>Αξισυμμετρικά Μοντέλα Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων</b> |  |   |                                       |   |
|---|--|---|---------------------------------------|---|
| <b>Ομάδα παραμέτρων ερπυσμού</b>                          | <b>Είδος μοντέλου</b>                  |   |                                       |   |
|   | <b>Ιξωδοελαστικά (Viscoelastic)</b>    |   | <b>Ιξωδοπλαστικά (Viscoplastic)</b>   |   |
|   | <b>Είδος επίλυσης κατά την εκσκαφή</b> |   |                                       |   |
| 1 <sup>η</sup>  | Ελαστική (Vers.A)                      | Ελαστική & ερπυστική (Vers.B)               | Ελαστοπλαστική (Vers.A)               | Ελαστοπλαστική & ερπυστική (Vers.B)               |
| 2 <sup>η</sup>  | Ελαστική (Vers.A)                      | Ελαστική & ερπυστική (Vers.B)               | Ελαστοπλαστική (Vers.A)               | Ελαστοπλαστική & ερπυστική (Vers.B)               |
| 3 <sup>η</sup>  | Ελαστική (Vers.A)                      | Ελαστική & ερπυστική (Vers.B)               | Ελαστοπλαστική (Vers.A)               | Ελαστοπλαστική & ερπυστική (Vers.B)               |
| 4 <sup>η</sup>  | Ελαστική (Vers.A)                      | Ελαστική & ερπυστική (Vers.B)               | Ελαστοπλαστική (Vers.A)               | Ελαστοπλαστική & ερπυστική (Vers.B)               |
|   | Ελαστική με υποστήριξη (Vers.A)        | Ελαστική & ερπυστική με υποστήριξη (Vers.B) | Ελαστοπλαστική με υποστήριξη (Vers.A) | Ελαστοπλαστική & ερπυστική με υποστήριξη (Vers.B) |
| 5 <sup>η</sup>  | Ελαστική (Vers.A)                      | Ελαστική & ερπυστική (Vers.B)               | Ελαστοπλαστική (Vers.A)               | Ελαστοπλαστική & ερπυστική (Vers.B)               |
|   | Ελαστική με υποστήριξη (Vers.A)        | Ελαστική & ερπυστική με υποστήριξη (Vers.B) | Ελαστοπλαστική με υποστήριξη (Vers.A) | Ελαστοπλαστική & ερπυστική με υποστήριξη (Vers.B) |

Το κυριότερο ίσως σταθερό δεδομένο των μοντέλων της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων είναι η γεωμετρία του καννάβου τους και το σύνολο των παραμέτρων βάσει των οποίων δομείται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για τα μοντέλα αυτά δομήθηκε ένας συνδυαστικός κάνναβος, αποτελούμενος από τις πρότυπες γεωμετρίες «brick» (Σχήμα 4.2 Α) και «cylinder» (Σχήμα 4.2 Β). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τα δύο αυτά πρότυπα κατασκευάστηκε ένα στοιχειώδες πρίσμα πολύ μικρού πάχους ( $d\theta$ ), όπως αυτό του Σχήματος 4.3, το οποίο για λόγους απλούστευσης των προσομοιώσεων δεν πολλαπλασιάστηκε έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας πλήρης κύλινδρος, αλλά παρέμεινε ως είχε. Το πρότυπο «cylinder» χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της προς εκσκαφή βραχώμαζας, δηλαδή μίας σήραγγας κυκλικής διατομής, ως ξεχωριστού συνόλου ζωνών. Με το πρότυπο «brick» δημιουργήθηκαν δύο ακόμα σύνολα ζωνών, ένα για την προσομοίωση της βραχώμαζας που βρίσκεται ακριβώς στην παρειά της εκσκαφής και ένα για την υπόλοιπη περιβάλλουσα βραχώμαζα.



**Σχήμα 4.3:** Στοιχειώδες πρίσμα πάχους  $d\theta$ , βάσει του οποίου κατασκευάστηκε ο συνδυαστικός κάνναβος των αξιsymμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων.

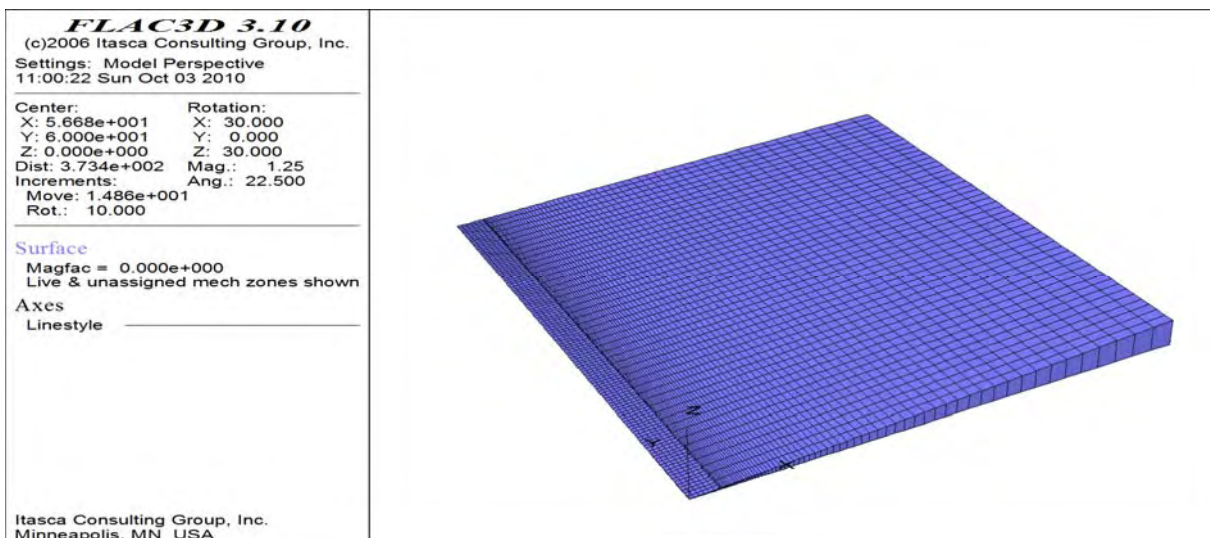
Όσον αφορά στις παραμέτρους με βάση τις οποίες κατασκευάστηκε ο κάνναβος, η ακτίνα της εκσκαφής επιλέχθηκε να είναι ίση με την ακτίνα της σήραγγας που αποτελεί τη μελέτη περίπτωσης της παρούσας Εργασίας, δηλαδή 6,3 m (6 m η τελική ακτίνα και 0,3 m το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος). Το συνολικό μήκος του καννάβου (άξονας  $y$  – άξονας συμμετρίας) ορίστηκε να είναι ίσο με 120 m και το πλάτος του (άξονας  $x$ ) 9 φορές η διάμετρος της σήραγγας, ενώ το μήκος όπου σταμάτησε η εκσκαφή 6,5 φορές η διάμετρος (Σχήμα 4.4).



**Σχήμα 4.4:** Βασική γεωμετρία του συνδυαστικού καννάβου των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων.

Οι διαστάσεις που δόθηκαν στο τμήμα του καννάβου που προσομοιώνει την προς εκσκαφή βραχόμαζα καθορίστηκαν στη μία ζώνη κατά την περιφέρεια του κυλίνδρου, στις 6 ζώνες του 1,05 m κατά τον άξονα  $x$  και στις 120 ζώνες του 1 m κατά τον άξονα των  $y$ . Σημειώνεται ότι το βήμα προχώρησης σε όλα τα αξισυμμετρικά μοντέλα τέθηκε 1 m, όσο

δηλαδή είναι και το μήκος των ζωνών της προς εκσκαφή βραχόμαζας. Το σύνολο ζωνών ακριβώς στην παρειά της εκσκαφής ορίστηκε να έχει μία ζώνη κατά τον άξονα  $x$ , 240 ζώνες του 0,5 m κατά τον  $y$  και μία ζώνη αυξανόμενων διαστάσεων κατά τον  $z$ . Μέσω των αυξανόμενων αυτών διαστάσεων, το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πρότυπο «brick» μετατράπηκε ουσιαστικά σε τραπέζιο παραλληλεπίπεδο, έτσι ώστε σε συνδυασμό με το προηγούμενο τμήμα του καννάβου να δημιουργηθεί το επιθυμητό στοιχειώδες πρίσμα. Το πρίσμα ολοκληρώθηκε με το τρίτο τμήμα του καννάβου, το οποίο προσομοιώνει τη περιβάλλουσα βραχόμαζα. Αναφορικά με τις διαστάσεις αυτού, καθορίστηκε να έχει 48 ζώνες των 2,5 m κατά τον άξονα συμμετρίας, 60 ζώνες κατά τον  $x$  και, όπως και στην περίπτωση του τμήματος του καννάβου που προσομοιώνει την παρειά της εκσκαφής, μία ζώνη αυξανόμενων διαστάσεων κατά τον άξονα  $z$ . Βάσει των στοιχείων αυτών προέκυψε ένα μοντέλο 3.840 ζωνών και 8.175 κόμβων (Εικόνα 4.1). Αξίζει να αναφερθεί ότι στην επικόλληση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των επιμέρους καννάβων ώστε να μην υπάρχουν ασυμφωνίες μεταξύ τους, ορίστηκε μέγιστη απόσταση τα  $10^{-3}$  m και μέγιστη γωνία η  $1^\circ$ . Δηλαδή, επιφάνειες με μικρότερη απόσταση ή και γωνία από τις παραπάνω, επικολλήθηκαν μεταξύ τους.



**Εικόνα 4.1:** Ο συνδυαστικός κάνναβος των αξιsymμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων, με 3.840 ζώνες και 8.175 κόμβους.

Ένα ακόμη σταθερό δεδομένο των μοντέλων των παραμετρικών αναλύσεων είναι το γεγονός ότι οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση τα μοντέλα Burgers και CVISC. Εκτός από τις παραμέτρους ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$ , οι υπόλοιπες ιδιότητες που είναι απαραίτητες για την εφαρμογή των μοντέλων αυτών, αποτελούν σταθερά δεδομένα των προσομοιώσεων. Οι ιδιότητες αυτές αντιστοιχούν στην κατηγορία M4 της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών και παρατίθενται στον Πίνακα 4.3.

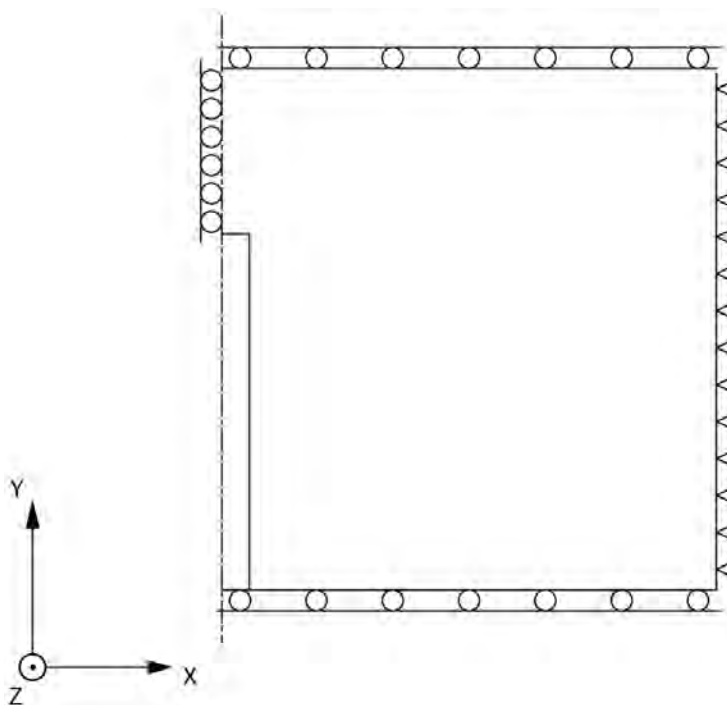
**Πίνακας 4.3:** Ιδιότητες των μοντέλων Burgers και CVISC, απαραίτητες για τη μοντελοποίηση των αξισυμμετρικών μοντέλων (εξαιρούνται οι παράμετροι ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$ ).

| Ιδιότητες Μοντέλων Burgers και CVISC        |                               |                                    |
|---|-------------------------------|------------------------------------|
| <b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>E (MPa)</b>                | <b><math>\nu</math> (Poisson)</b>  |
| 2.200                                       | 500                           | 0,33                               |
| <b>c (kPa)</b>                              | <b><math>\phi</math> (°)</b>  | <b><math>\psi</math> (°)</b>       |
| 100   | 32                            | 0                                  |
| <b>K (MPa)</b>                              | <b><math>G_M</math> (MPa)</b> | <b><math>\sigma_t</math> (kPa)</b> |
| $E / [3 * (1 - 2 * \nu)]$                   | $E / [2 * (1 + \nu)]$         | $c / \tan(\phi)$                   |

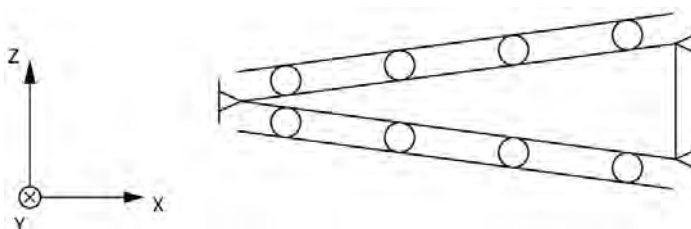
Στα αξισυμμετρικά μοντέλα της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων ορίστηκαν επίσης οι ίδιες συνοριακές συνθήκες και τα ίδια αρχικά μεγέθη. Όπως αναφέρεται και στην περιγραφή της μεθοδολογίας κατασκευής των μοντέλων, καθορίστηκε το αρχικό εντατικό πεδίο της βραχόμαζας, το οποίο ορίστηκε να λάβει την τιμή της πίεσης των υπερκειμένων της κατηγορίας M4 (60 m υπερκείμενα) της σήραγγας που αποτελεί τη μελέτη περίπτωσης, δηλαδή 1,32 MPa. Όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες, εφαρμόστηκαν αυτές που ορίζονται στα εγχειρίδια χρήσης του Flac 3D, σε σχετικό παράδειγμα κυλινδρικής συμμετρίας (Itasca, 2006). Οι συνθήκες αυτές αναπαρίστανται στα Σχήματα 4.5 και 4.6, και



σε γενικές γραμμές σκοπός τους είναι να απαγορεύεται η εφαπτομενική μετακίνηση στο μοντέλο, και να επιτρέπονται μόνο οι ακτινικές μετατοπίσεις.



**Σχήμα 4.5:** Οι συνοριακές συνθήκες των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων στο επίπεδο  $xy$ .

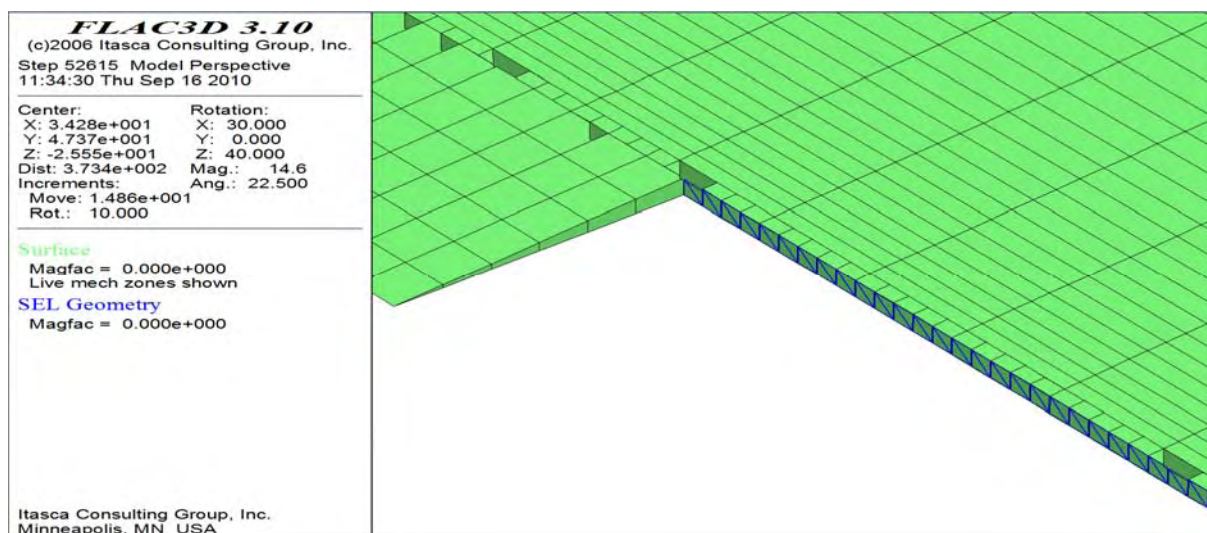


**Σχήμα 4.6:** Οι συνοριακές συνθήκες των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων στο επίπεδο  $xz$ .

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται το σύνολο των 28 μοντέλων που κατασκευάστηκαν κατά τη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων, σύμφωνα με τις παραμέτρους ερπυσμού που τα χαρακτηρίζουν, αλλά και αναλόγως της διαδικασίας εκκαμής τους. Στην ελαστική / ελαστοπλαστική επίλυση, η οποία υπάρχει σε όλα τα μοντέλα, τέθηκε ως συνθήκη

τερματισμού το `solve ratio`, με τιμή  $10^{-6}$ . Στις περιπτώσεις όπου η διαδικασία εκσκαφής περιλαμβάνει και ερπυστική επίλυση, η διάρκεια επίδρασης του φαινομένου ορίστηκε στα 43.200 sec (δώδεκα ώρες) ανά βήμα προχώρησης, με μέγιστο χρονικό βήμα επίλυσης τα 60 sec (ένα λεπτό). Το δωδεκάωρο αυτό αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο βημάτων προχώρησης κατά τη διάνοιξη μίας σήραγγας. Η υπόθεση αυτή έγινε με την παραδοχή ότι πραγματοποιούνται δύο βήματα προχώρησης ανά ημέρα.

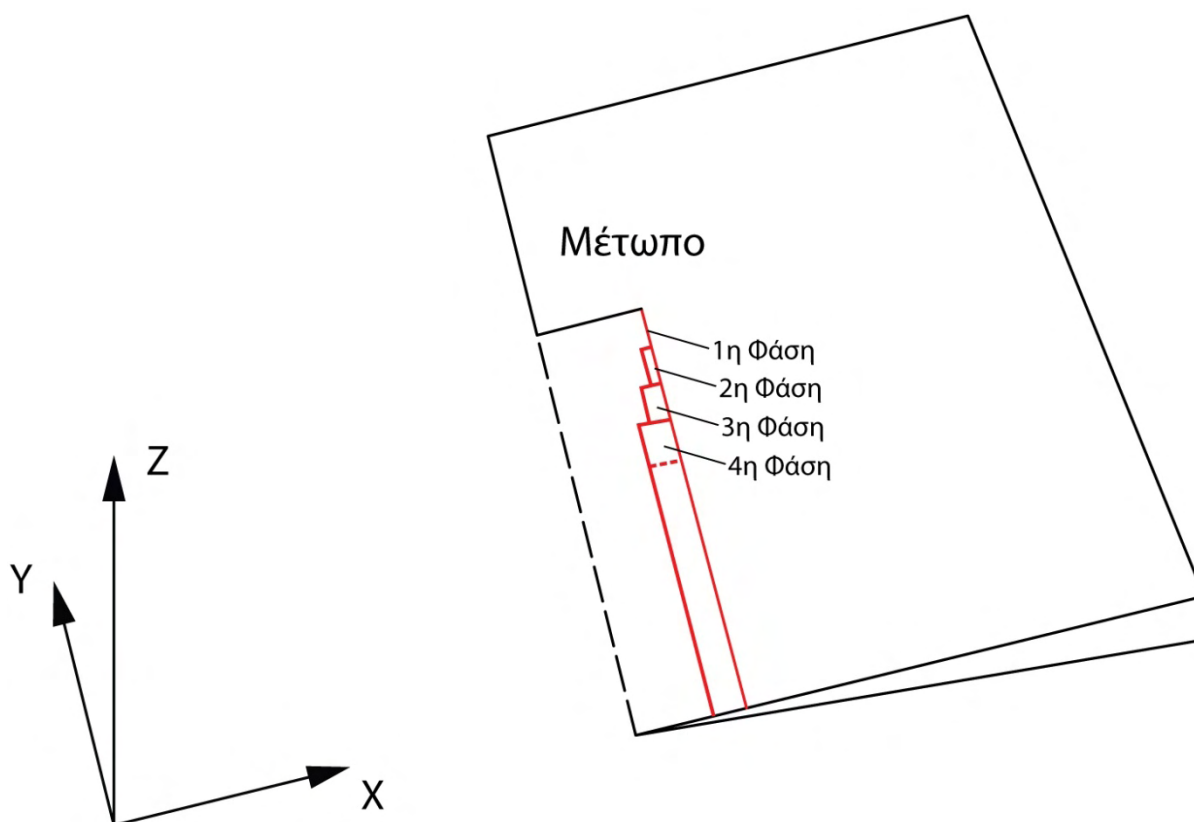
Όπως προαναφέρεται, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι το μοναδικό μέτρο υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκε στα αξιsymμετρικά μοντέλα που περιλαμβάνουν τοποθέτηση συστήματος υποστήριξης στη διαδικασία εκσκαφής τους (Εικόνα 4.2). Στο μέτρο ελαστικότητας και στο λόγο Poisson, τα οποία είναι οι ιδιότητες που απαιτούνται από το λογισμικό `Flac 3D` για την προσομοίωση του σκυροδέματος, δόθηκαν τιμές από τη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών. Από τη σήραγγα αυτή αντλήθηκε επίσης η διαδικασία σύμφωνα με την οποία αυξάνεται σταδιακά το πάχος και η αντοχή του σκυροδέματος καθώς προχωράει η εκσκαφή. Το σύνολο των δεδομένων που αφορούν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρατίθεται στον Πίνακα 4.4, ενώ στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται σχηματικά η σταδιακή τοποθέτησή του.



**Εικόνα 4.2:** Τμήμα του καννάβου των αξιsymμετρικών μοντέλων, με τα επίπεδα στοιχεία κελύφους που προσομοιώνουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

**Πίνακας 4.4:** Δεδομένα διαδικασίας τοποθέτησης εκτοξευόμενου σκυροδέματος των αξιsymμετρικών μοντέλων.

| Διαδικασία Τοποθέτησης Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος |         |                 |            |
|---|---------|-----------------|------------|
| Φάση τοποθέτησης                                  | E (GPa) | $\nu$ (Poisson) | Πάχος (cm) |
| 1 <sup>η</sup>                                    | 7       | 0,2             | 4          |
| 2 <sup>η</sup>                                    | 15      | 0,2             | 14         |
| 3 <sup>η</sup>                                    | 20      | 0,2             | 24         |
| 4 <sup>η</sup>                                    | 30      | 0,2             | 30         |



**Σχήμα 4.7:** Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος των αξιsymμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων.

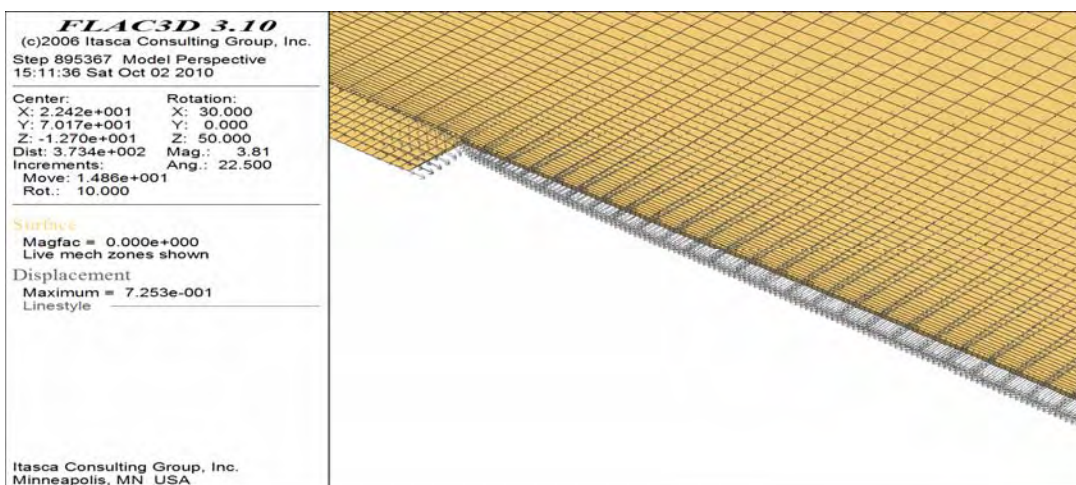
Το τελευταίο σταθερό δεδομένο των μοντέλων των παραμετρικών αναλύσεων είναι η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την τελική ερπυστική επίλυσή τους. Το μέγιστο χρονικό βήμα επίλυσης τέθηκε στα 60 sec (ένα λεπτό) και η συνολική διάρκεια του φαινομένου του ερπυσμού στα 31.104.000 sec (ένα έτος). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επίλυση πραγματοποιήθηκε σταδιακά σε ημέρες, εβδομάδες και μήνες, έως ότου φτάσει στο τελικό στάδιο του ενός έτους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις όπου η διαδικασία εκσκαφής περιλαμβάνει και ερπυστική επίλυση, η διάρκεια του ενός έτους της τελικής ερπυστικής επίλυσης είναι επιπλέον. Δηλαδή, στις περιπτώσεις αυτές η χρονική διάρκεια του φαινομένου του ερπυσμού καθορίστηκε στα 34.646.400 sec (ένα έτος και 41 ημέρες), όπου τα 3.542.400 sec (41 ημέρες) είναι η συνολική διάρκεια των ερπυστικών επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της εκσκαφής.

### 4.3 Αποτελέσματα Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων

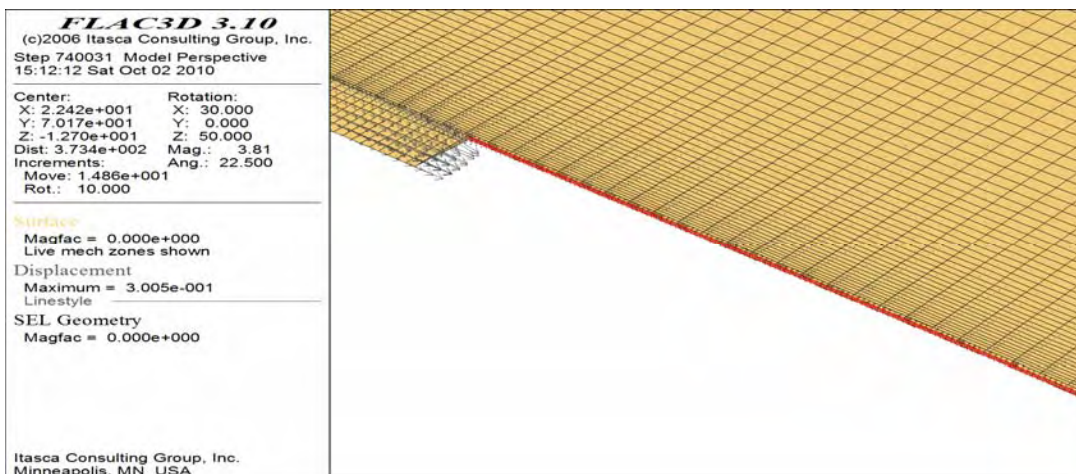
Η δεύτερη φάση των προσομοιώσεων, η οποία είχε ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων ερπυσμού στο φαινόμενο της σύνθλιψης μέσω παραμετρικών αναλύσεων, αποτελεί ουσιαστικά την κυριότερη από τις τρεις φάσεις προσομοιώσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Για το λόγο αυτό, με βάση τα αποτελέσματα του συνόλου των 28 μοντέλων της φάσης αυτής, κατασκευάστηκε ένας μεγάλος αριθμός διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά αποσκοπούν στην κατά το δυνατό πληρέστερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων, και ως εκ τούτου την εκπλήρωση του στόχου της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων που αναφέρεται παραπάνω.

Ακολούθως παρατίθενται τα διαγράμματα των μοντέλων της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (Σχήματα 4.8 έως 4.55), ως ενδεικτικά όλων των αξιsymμετρικών μοντέλων, καθώς η ομάδα αυτή είναι μία από τις δύο ομάδες παραμέτρων ερπυσμού (εκτός της 5<sup>ης</sup> ομάδας), η οποία περιλαμβάνει όλες τις εκδοχές των μοντέλων που κατασκευάστηκαν κατά τη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων. Τα διαγράμματα των υπόλοιπων ομάδων επισυνάπτονται στο Παράρτημα Β της παρούσας Εργασίας. Σημειώνεται ότι ορισμένα από

τα παρακάτω διαγράμματα (και αντίστοιχα του Παραρτήματος Β) αφορούν ένα ενδιάμεσο σημείο της εκσκαφής. Το σημείο αυτό βρίσκεται στην αρχή της διάνοιξης, και για την ακρίβεια στα 30 m από τα συνολικά 82 m στα οποία σταματάει η εκσκαφή, που αντιστοιχεί στο 30° βήμα προχώρησης. Ακόμη, παρουσιάζονται και ορισμένες αντιπροσωπευτικές εικόνες των αξιsymμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων (Εικόνες 4.3 έως 4.34).

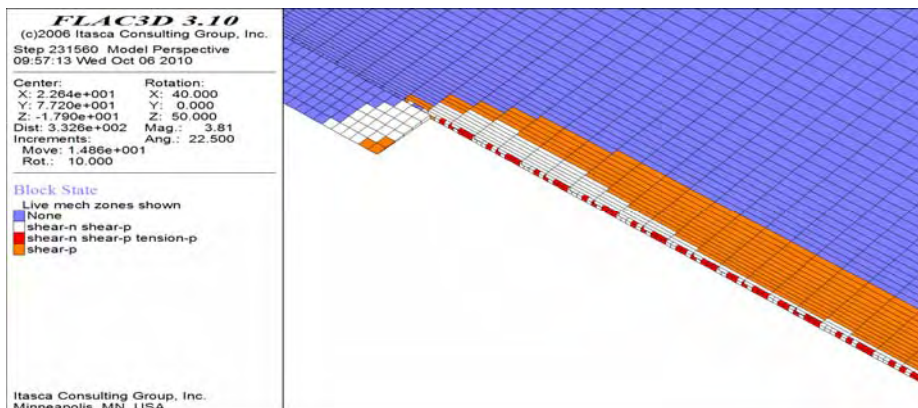


**Εικόνα 4.3:** Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των αξιsymμετρικών μοντέλων, χωρίς υποστήριξη.

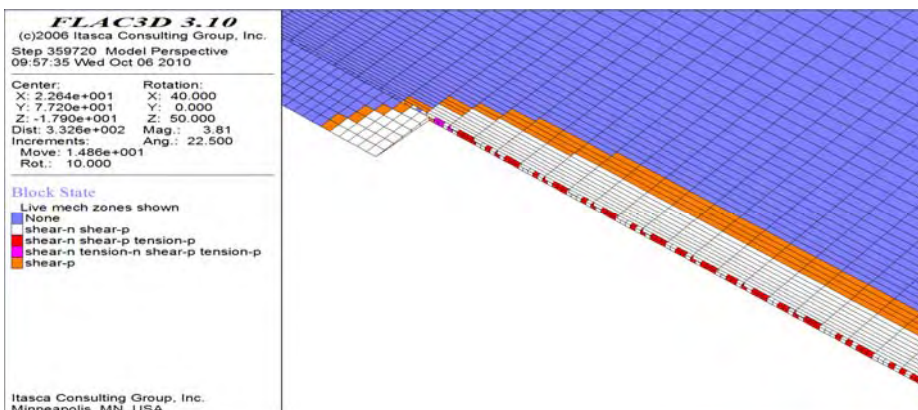


**Εικόνα 4.4:** Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των αξιsymμετρικών μοντέλων, με υποστήριξη.

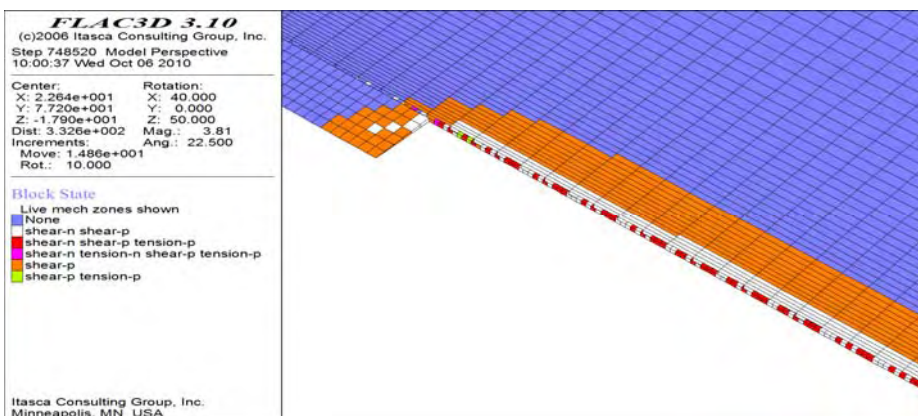




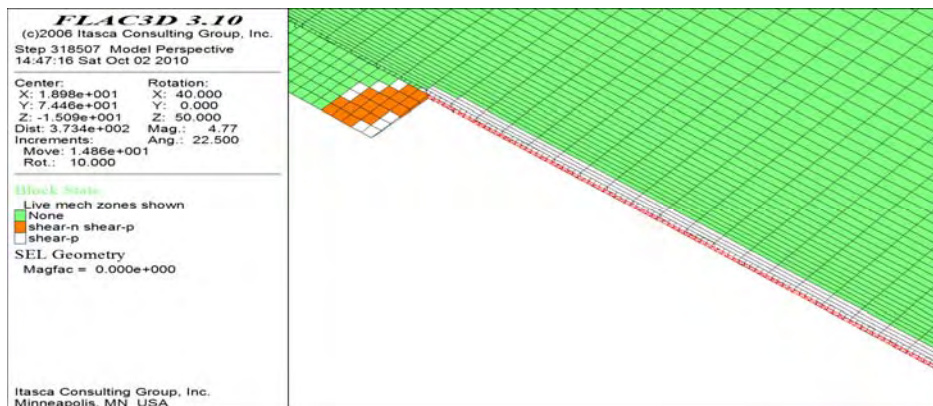
**Εικόνα 4.5:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με έντονο ερπυσμό, μία ημέρα μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.



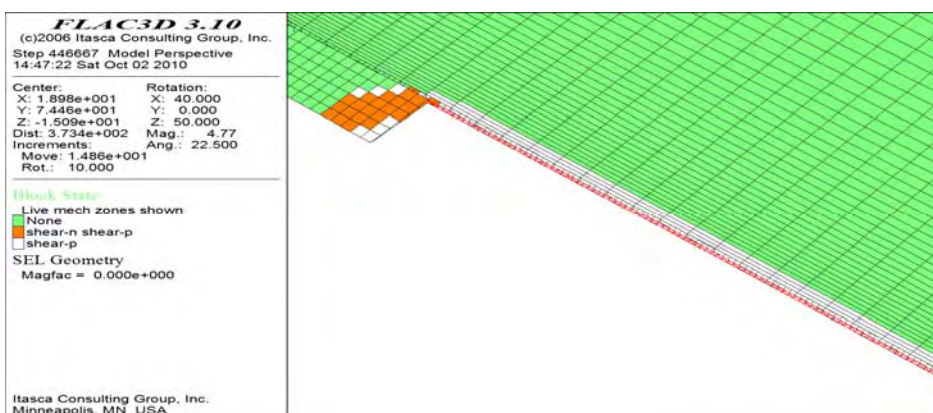
**Εικόνα 4.6:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με έντονο ερπυσμό, έξι μήνες μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.



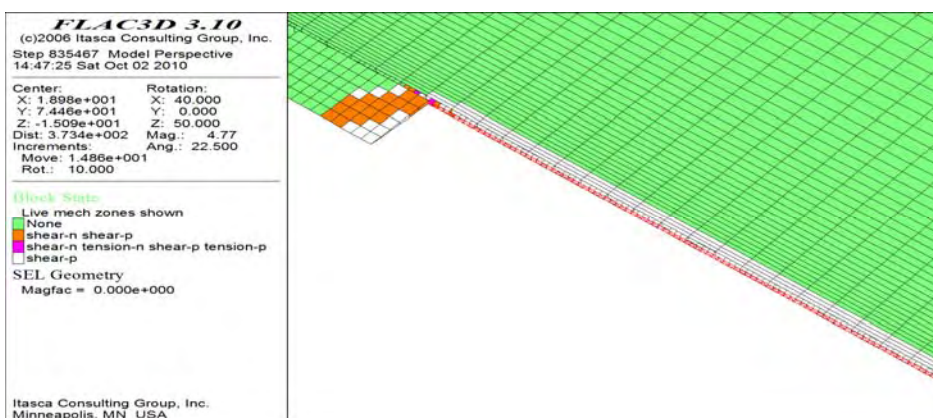
**Εικόνα 4.7:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με έντονο ερπυσμό, ένα έτος μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.



**Εικόνα 4.8:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη, μία ημέρα μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.

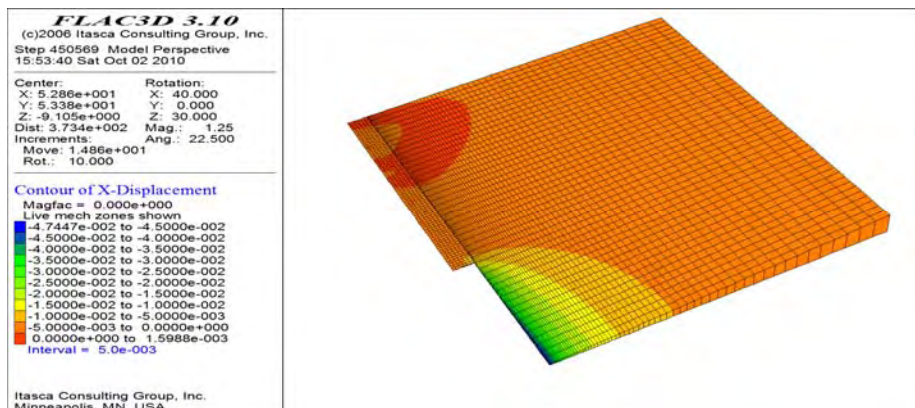


**Εικόνα 4.9:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη, έξι μήνες μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.

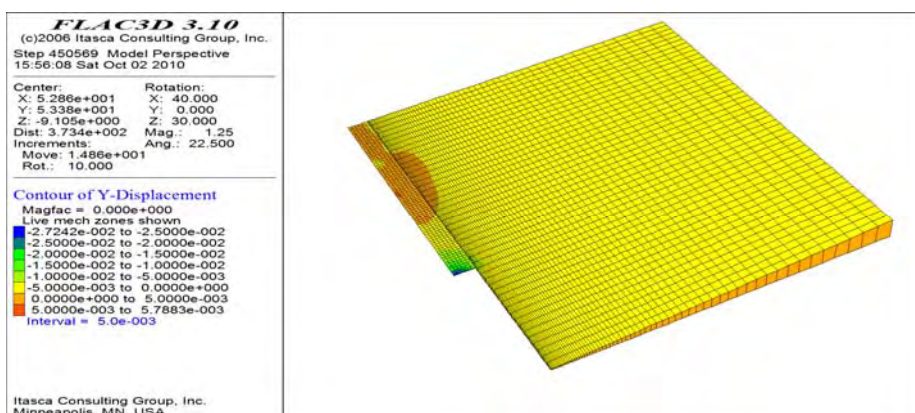


**Εικόνα 4.10:** Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη, ένα έτος μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.

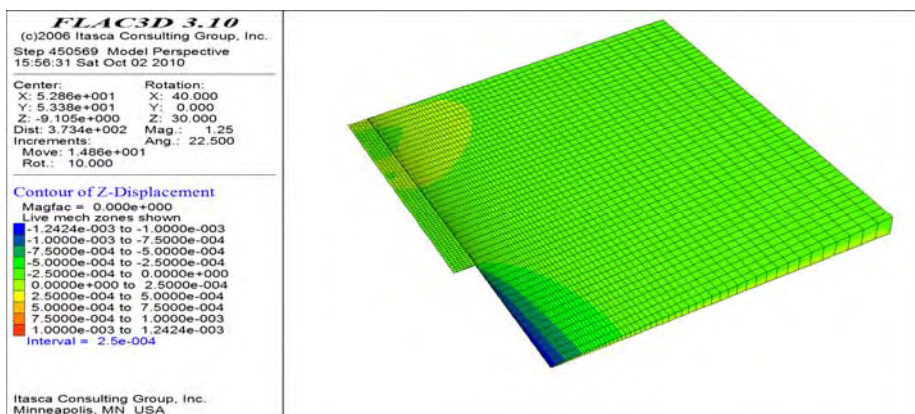




**Εικόνα 4.11:** Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των ιξωδοελαστικών αξιsymμετρικών μοντέλων (Vers.B).

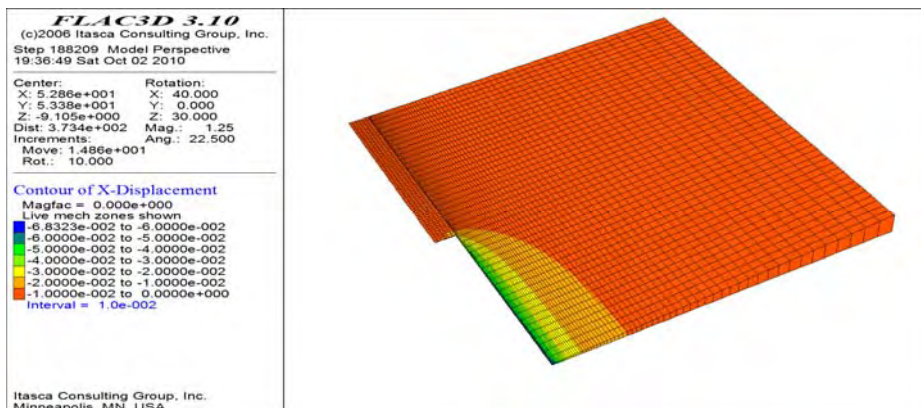


**Εικόνα 4.12:** Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των ιξωδοελαστικών αξιsymμετρικών μοντέλων (Vers.B).

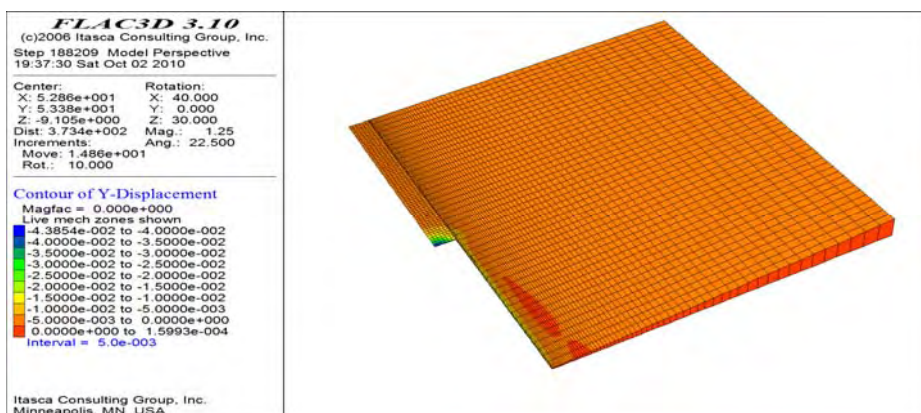


**Εικόνα 4.13:** Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των ιξωδοελαστικών αξιsymμετρικών μοντέλων (Vers.B).

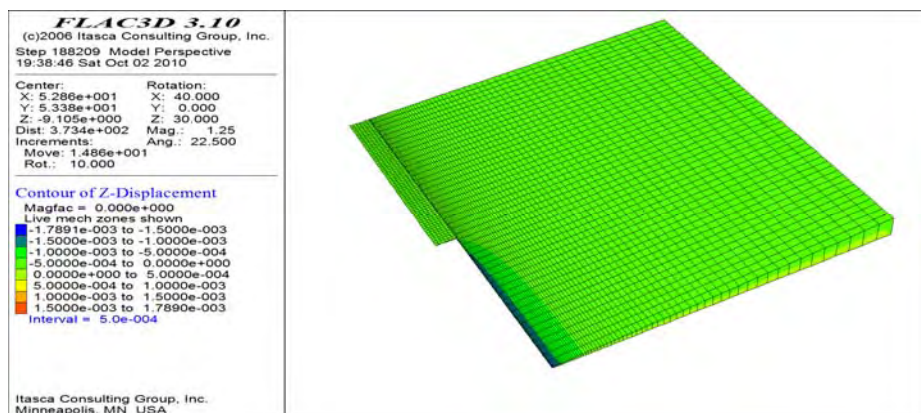




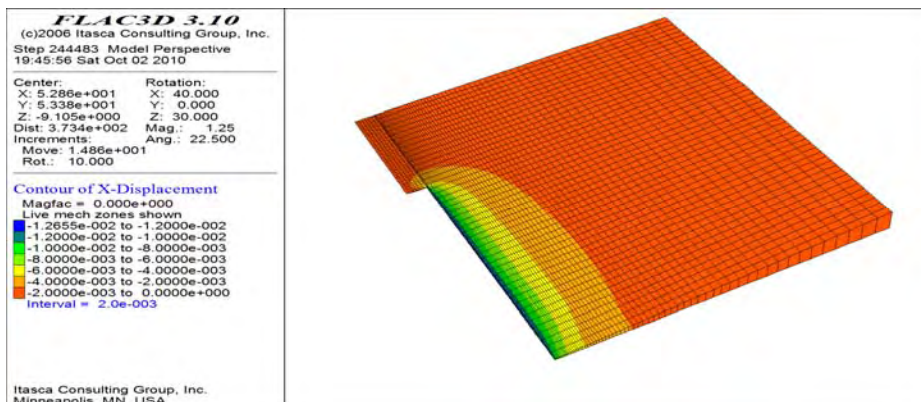
Εικόνα 4.14: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A).



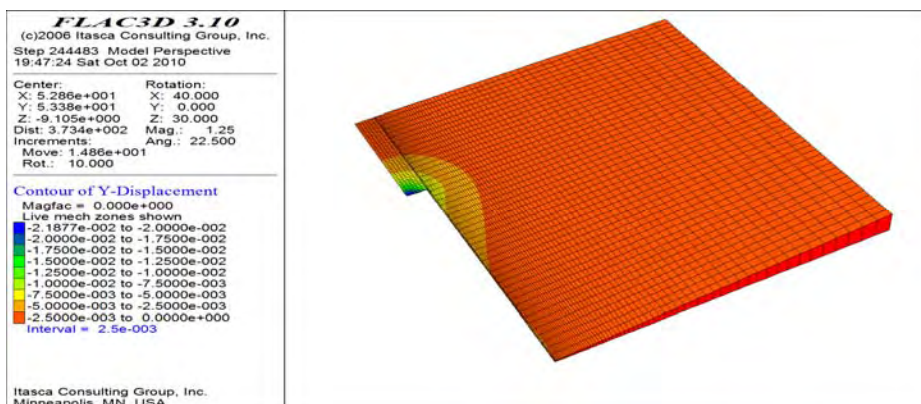
Εικόνα 4.15: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A).



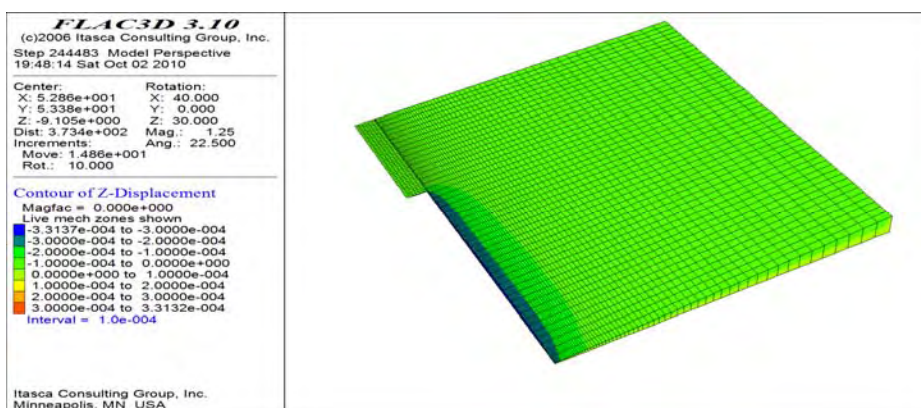
Εικόνα 4.16: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A).



**Εικόνα 4.17:** Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A).

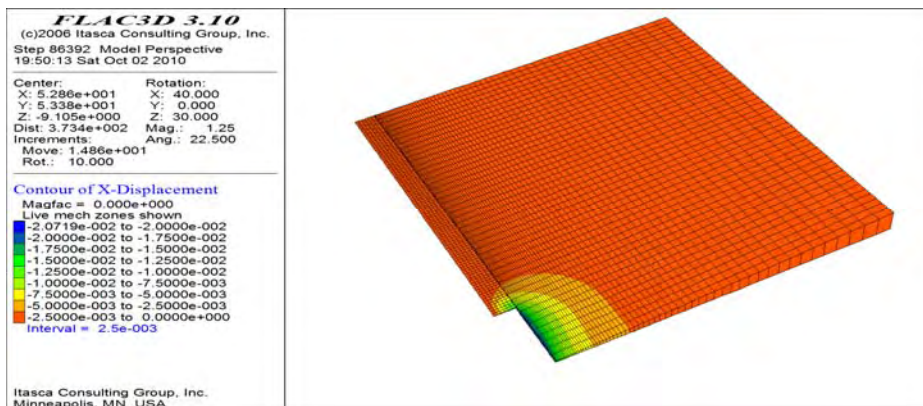


**Εικόνα 4.18:** Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A).

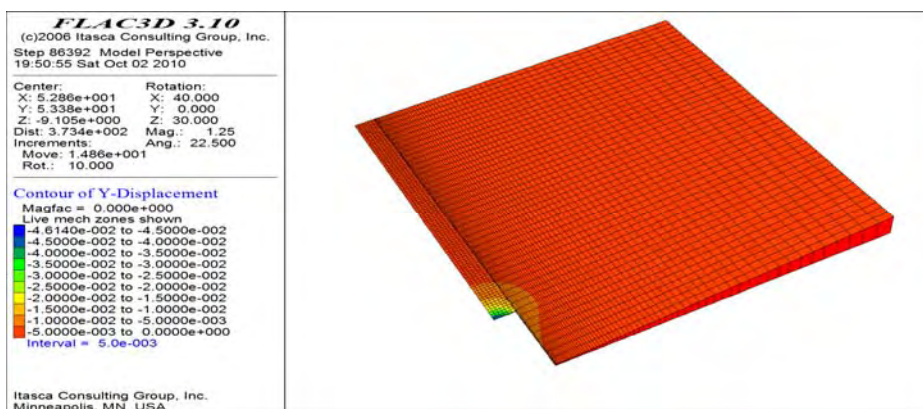


**Εικόνα 4.19:** Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A).

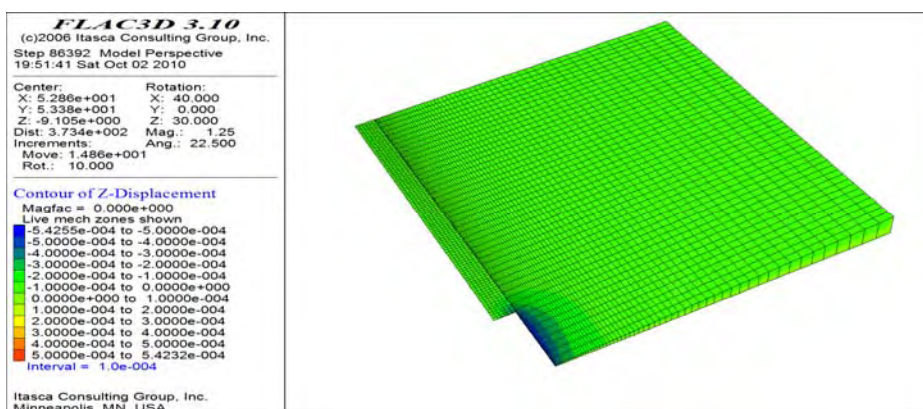




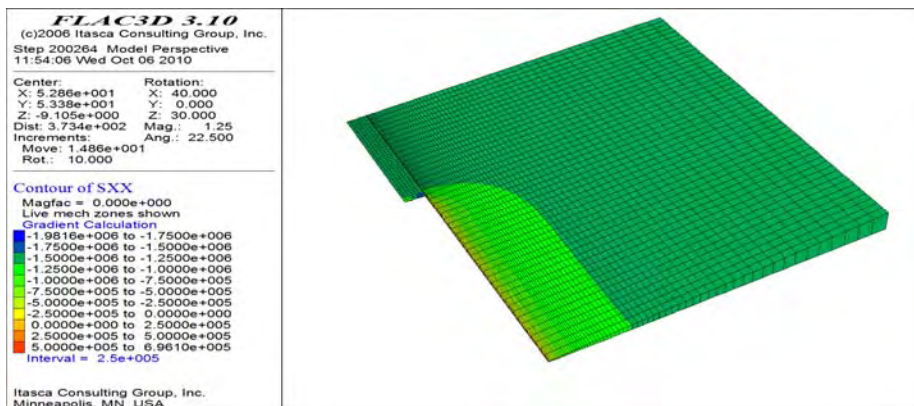
Εικόνα 4.20: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B).



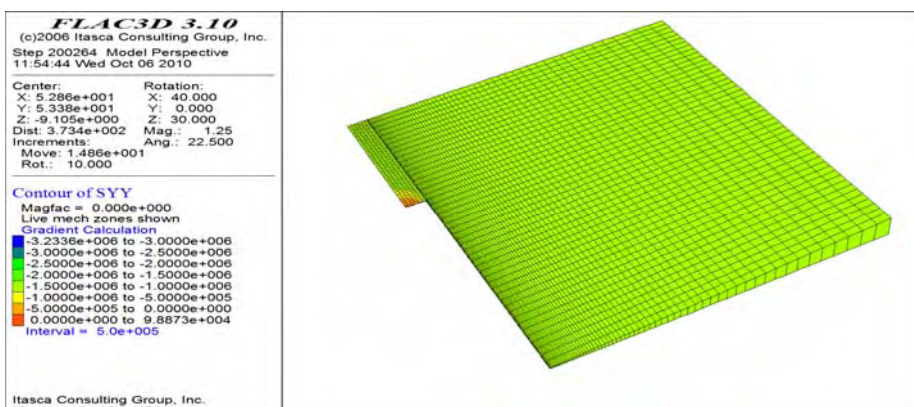
Εικόνα 4.21: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B).



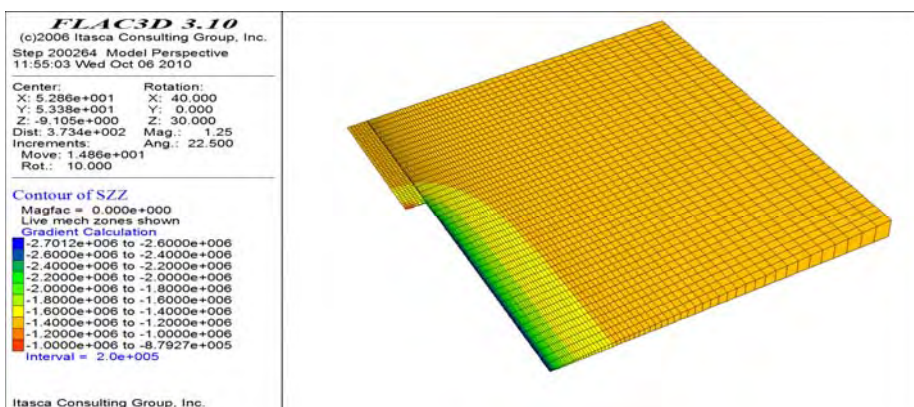
Εικόνα 4.22: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B).



Εικόνα 4.23: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A).

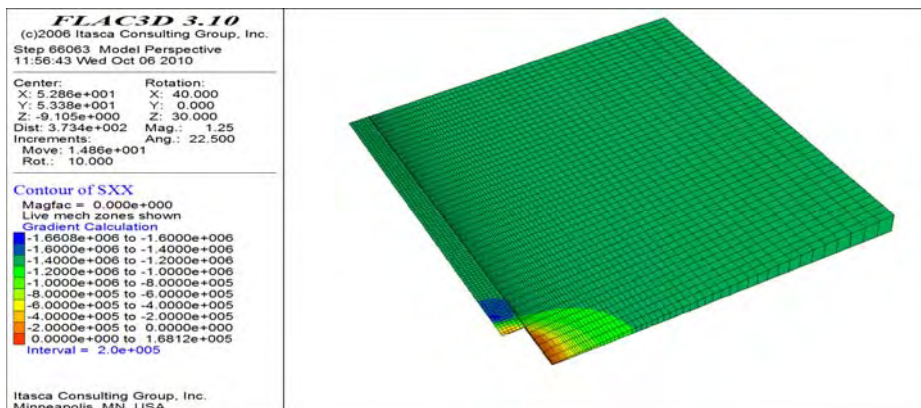


Εικόνα 4.24: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα y των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A).

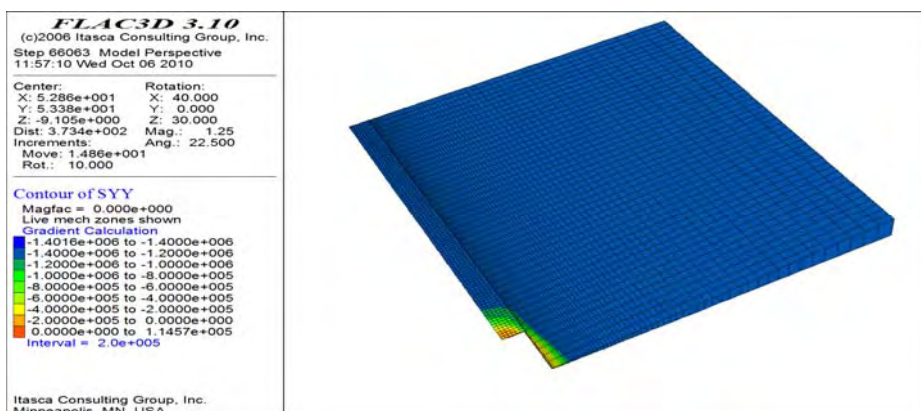


Εικόνα 4.25: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.A).

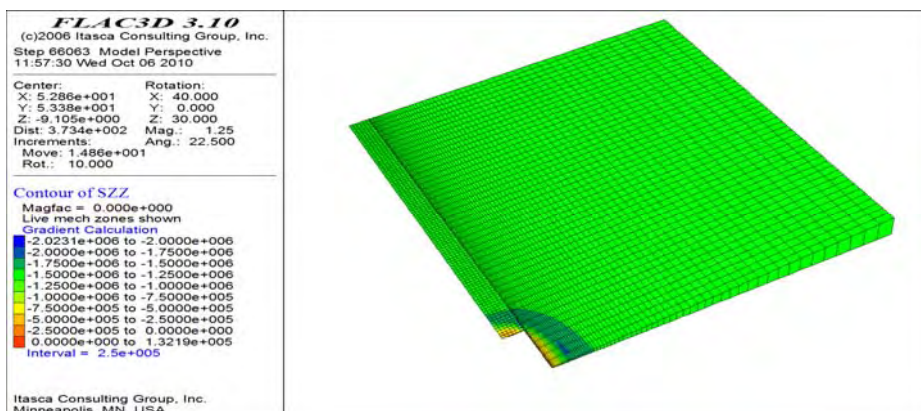




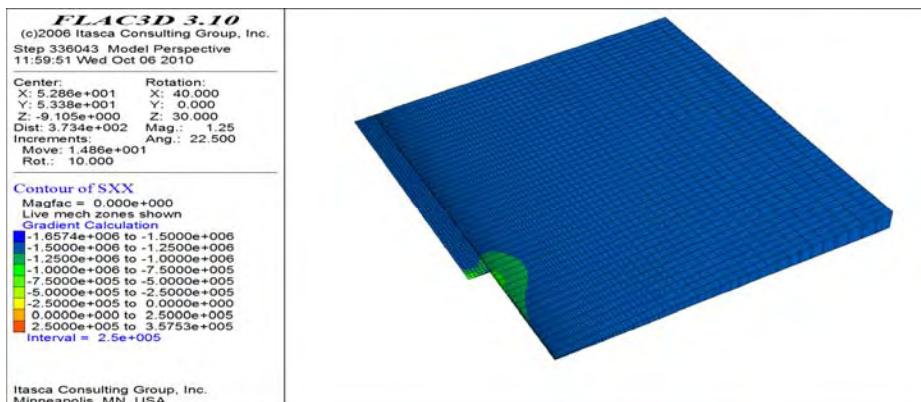
Εικόνα 4.26: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B).



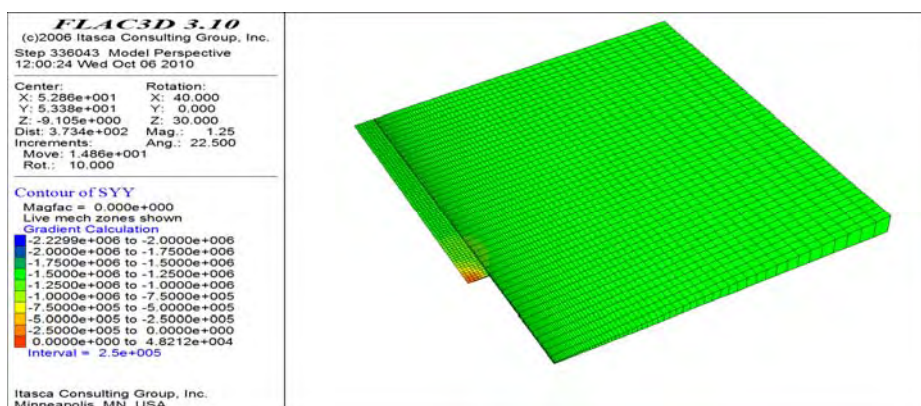
Εικόνα 4.27: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα γ των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B).



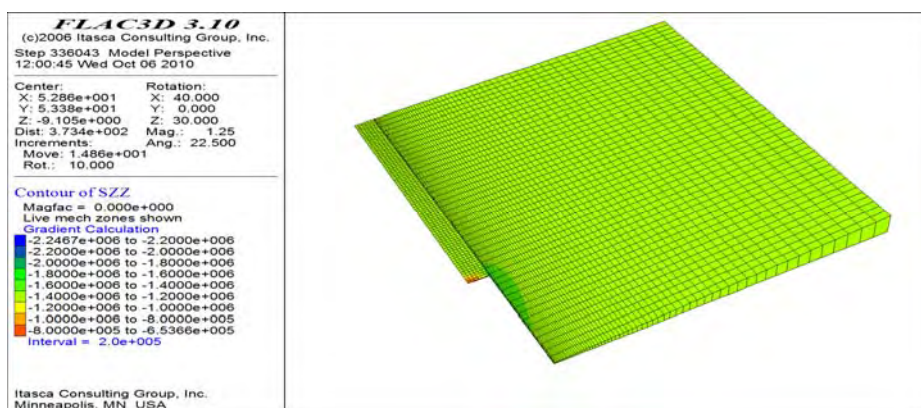
Εικόνα 4.28: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των ιξωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων (Vers.B).



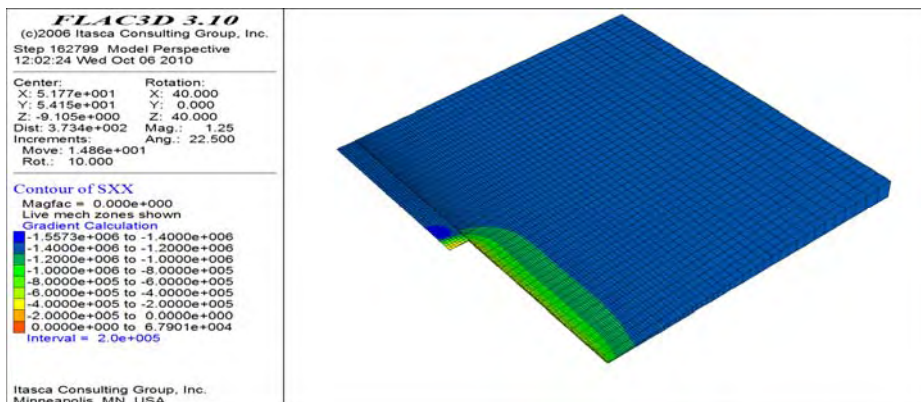
**Εικόνα 4.29:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B).



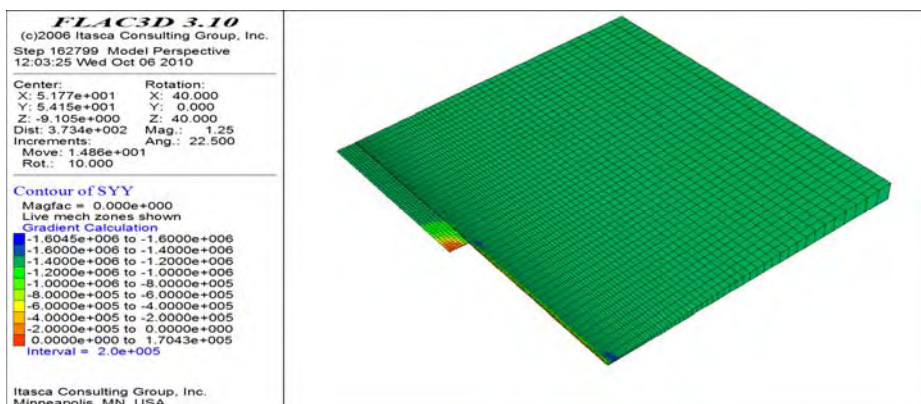
**Εικόνα 4.30:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα y των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B).



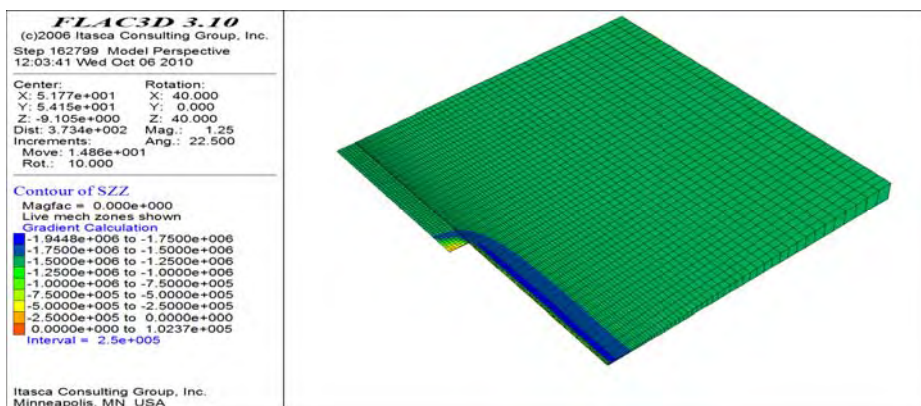
**Εικόνα 4.31:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των ιξωδοελαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.B).



**Εικόνα 4.32:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των ιερωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A).

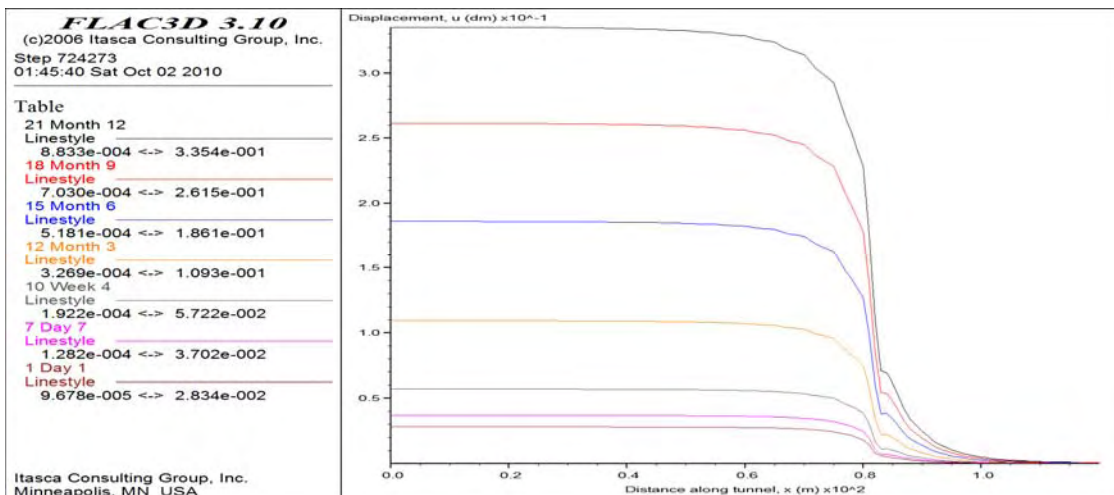


**Εικόνα 4.33:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα y των ιερωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A).

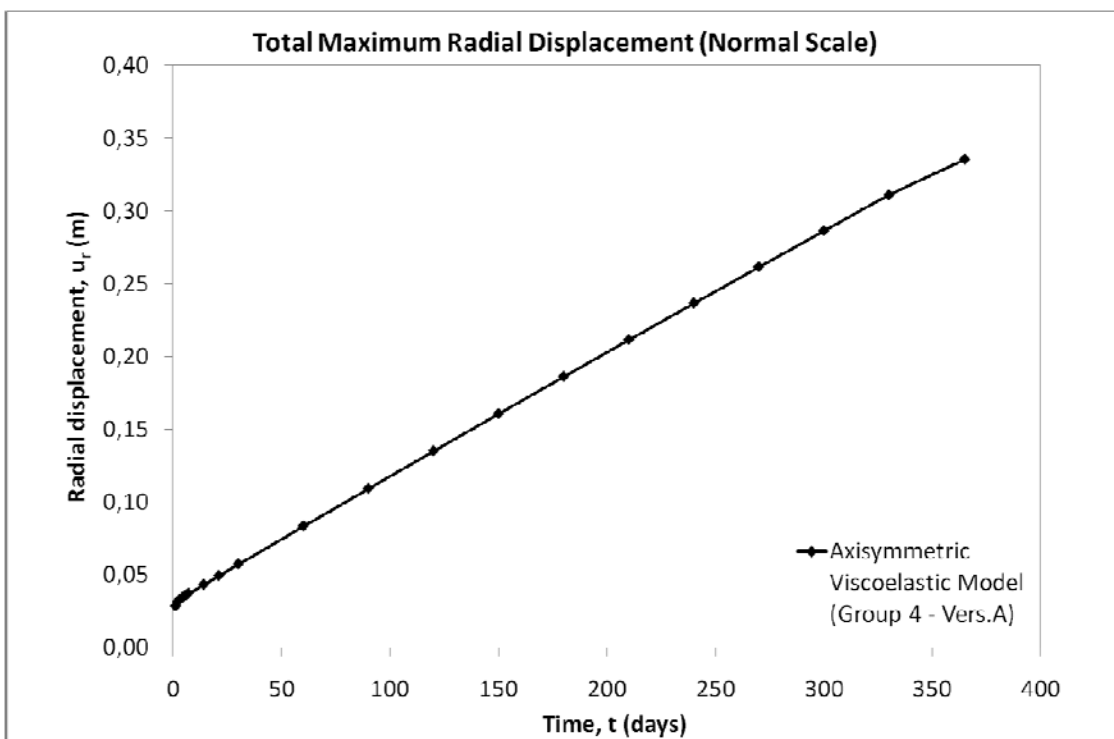


**Εικόνα 4.34:** Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των ιερωδοπλαστικών αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη (Vers.A).



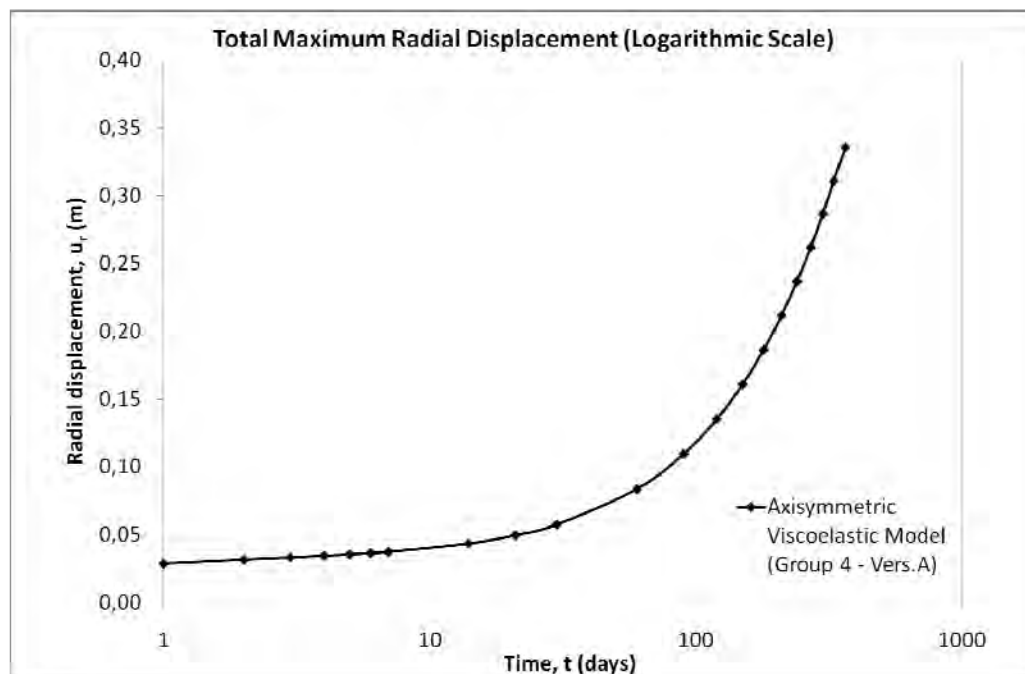


**Σχήμα 4.8:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ’ όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

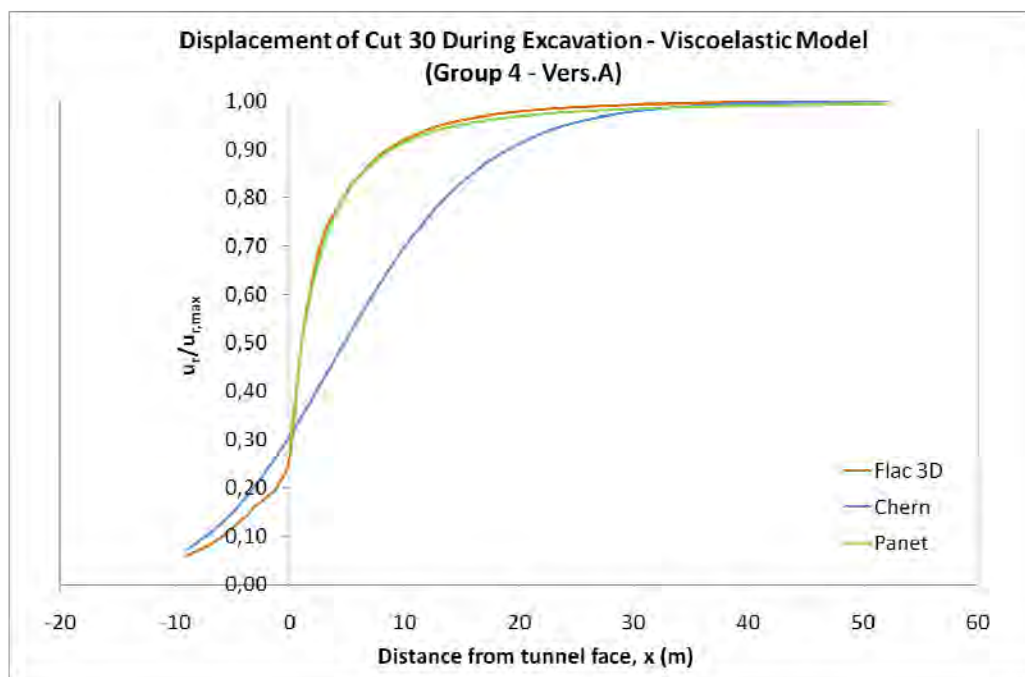


**Σχήμα 4.9:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).

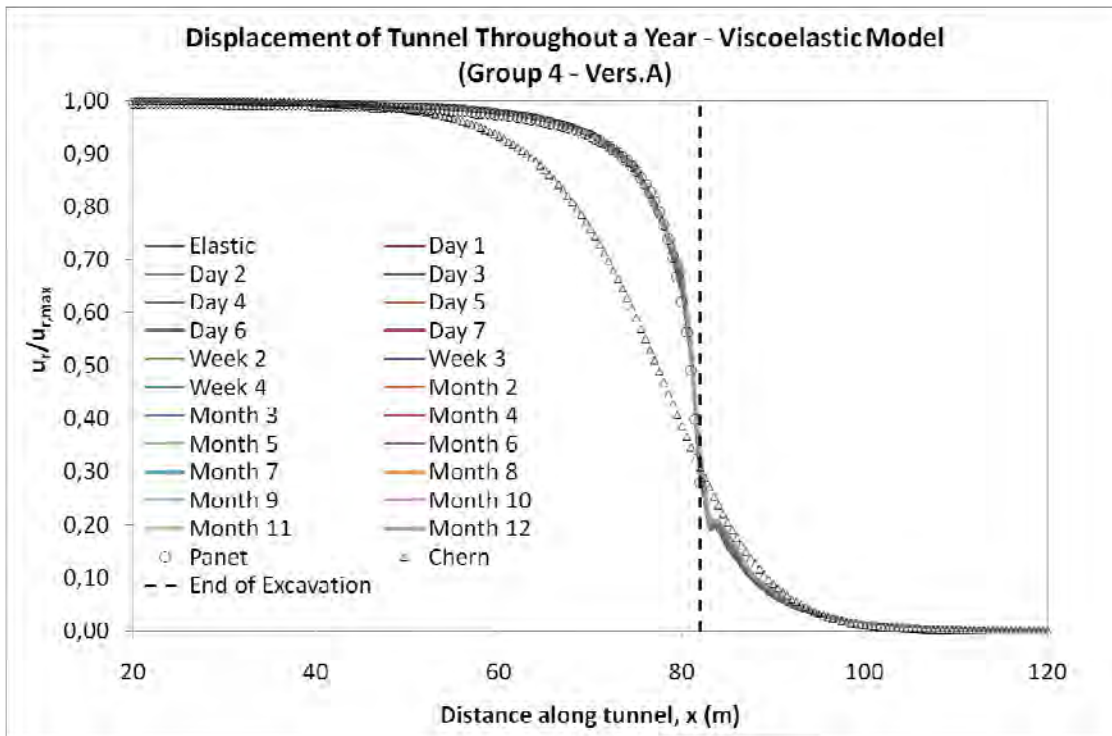




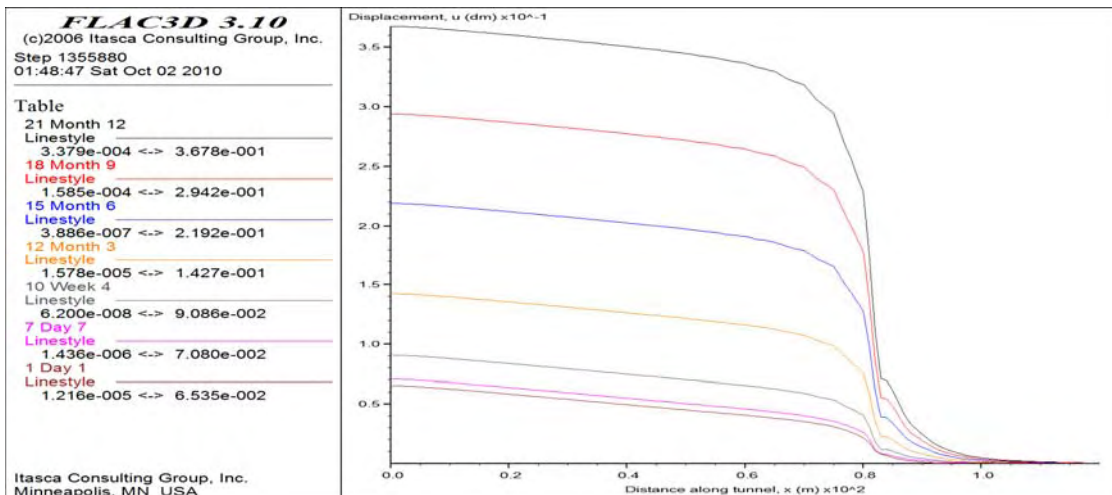
**Σχήμα 4.10:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



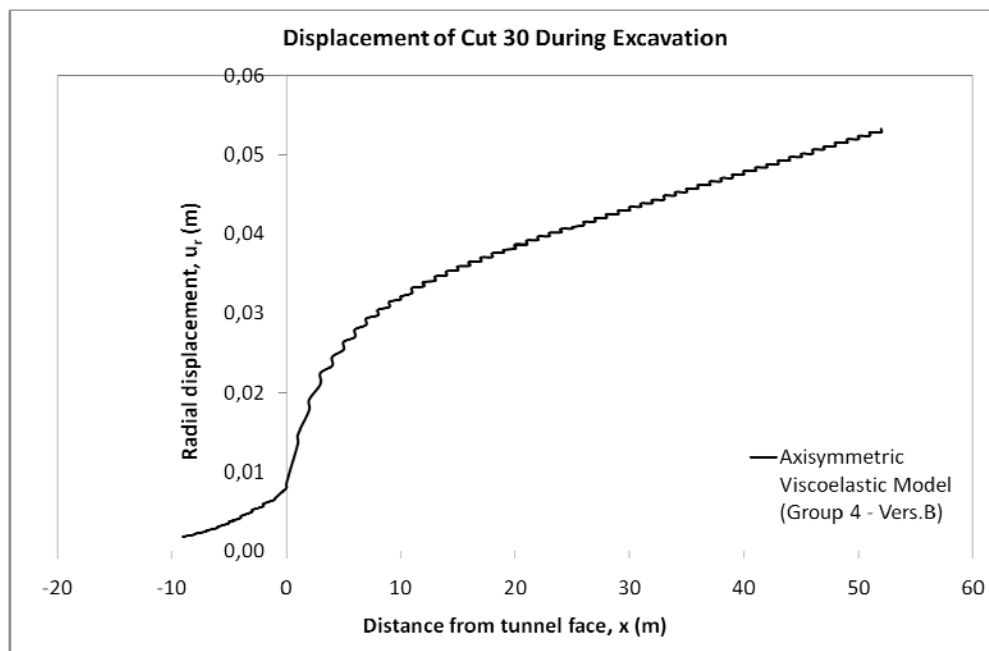
**Σχήμα 4.11:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιαμέσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



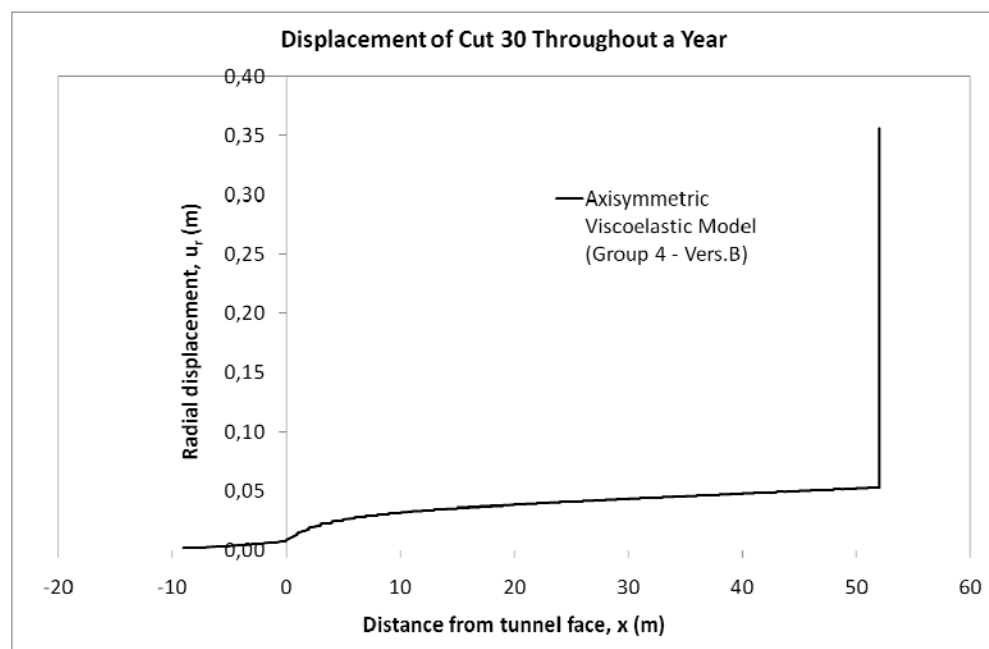
**Σχήμα 4.12:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



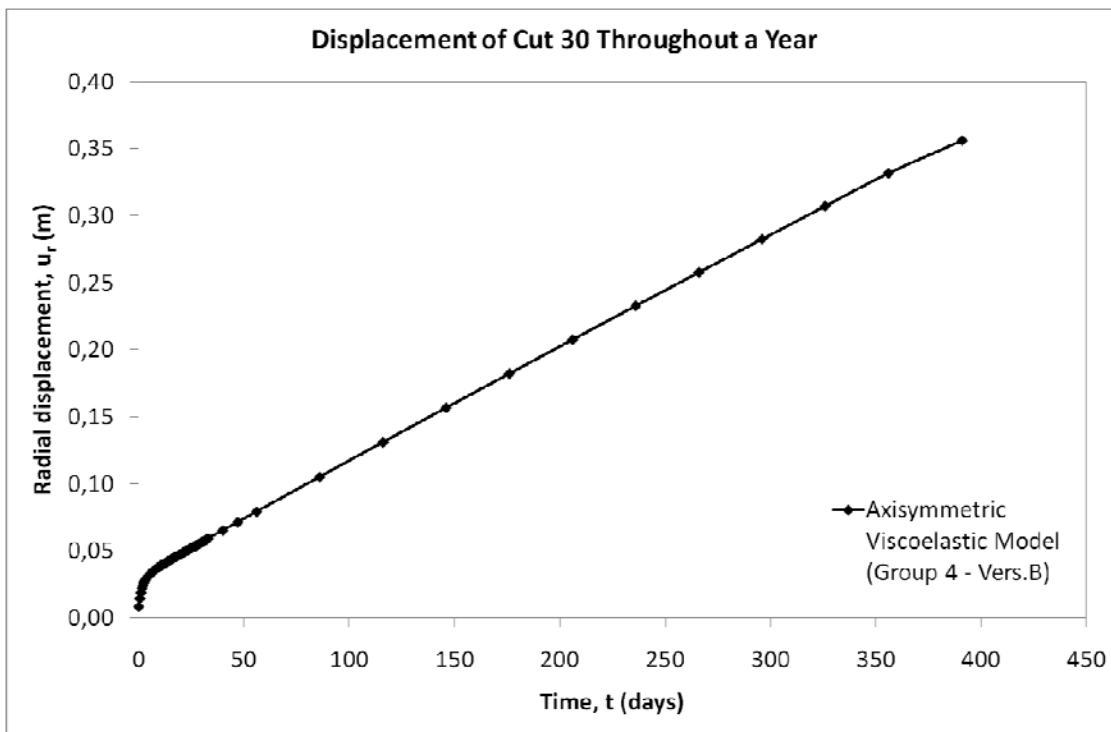
**Σχήμα 4.13:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



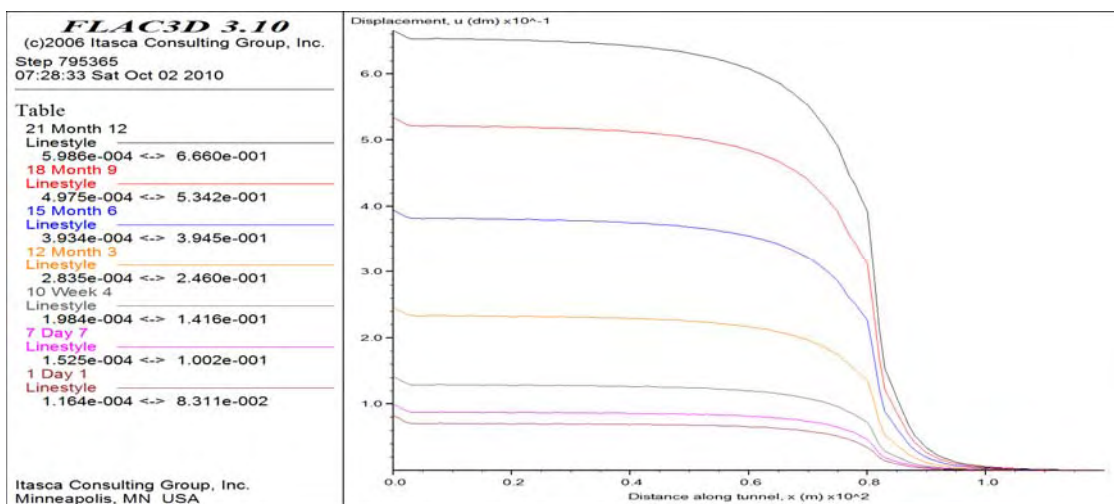
**Σχήμα 4.14:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



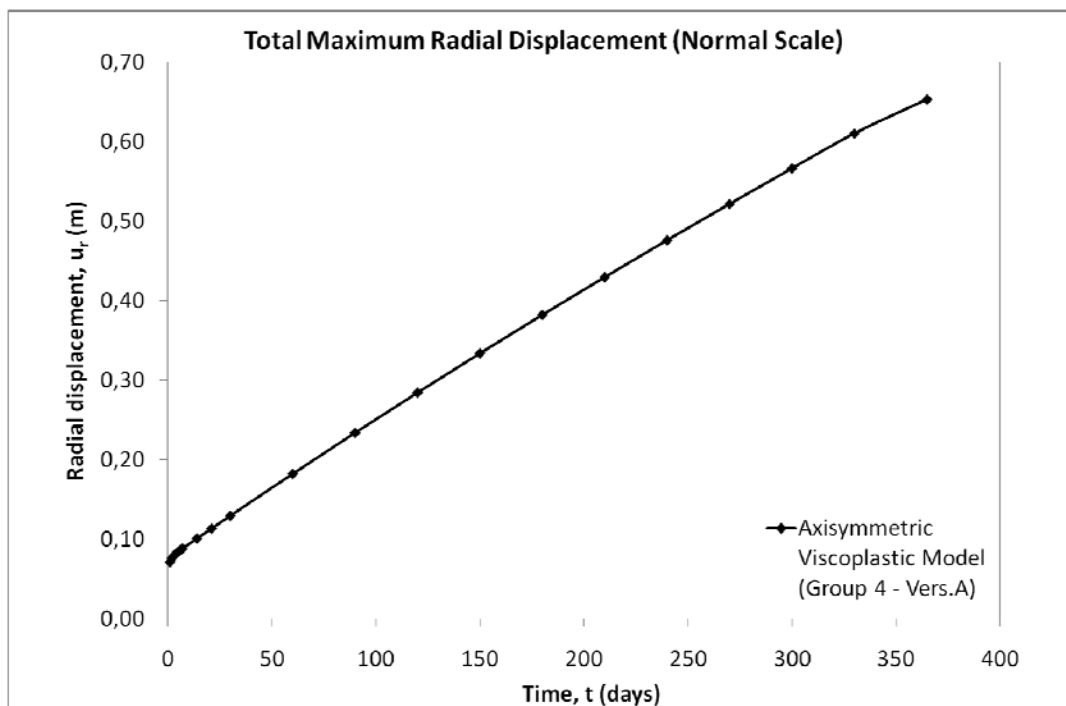
**Σχήμα 4.15:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



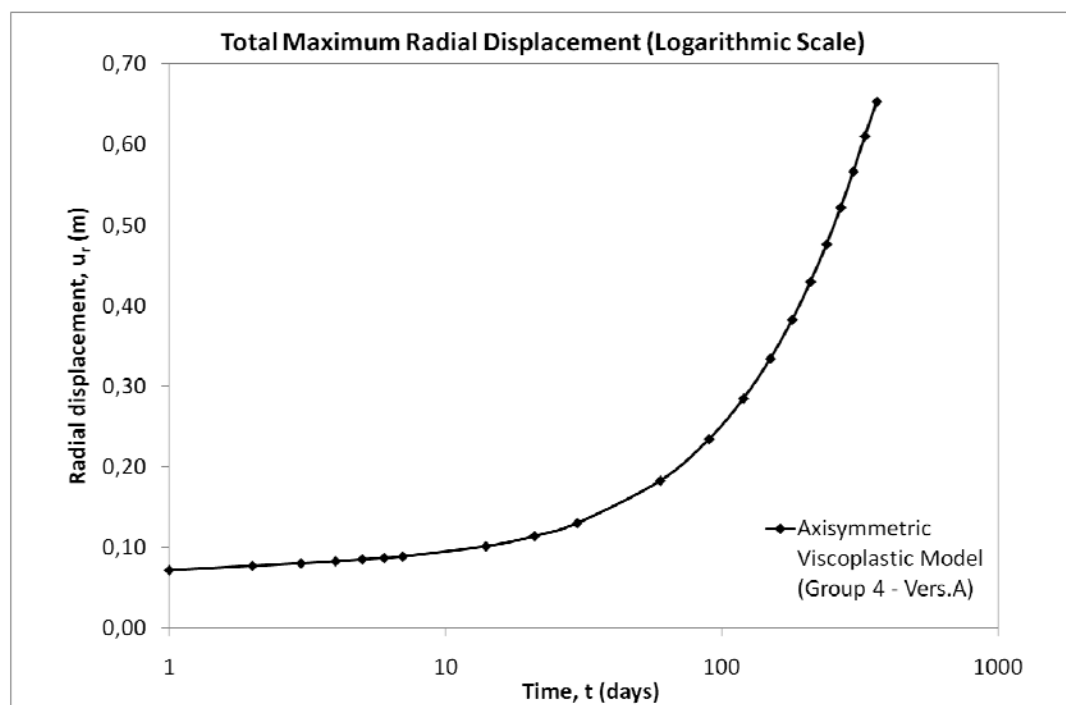
**Σχήμα 4.16:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



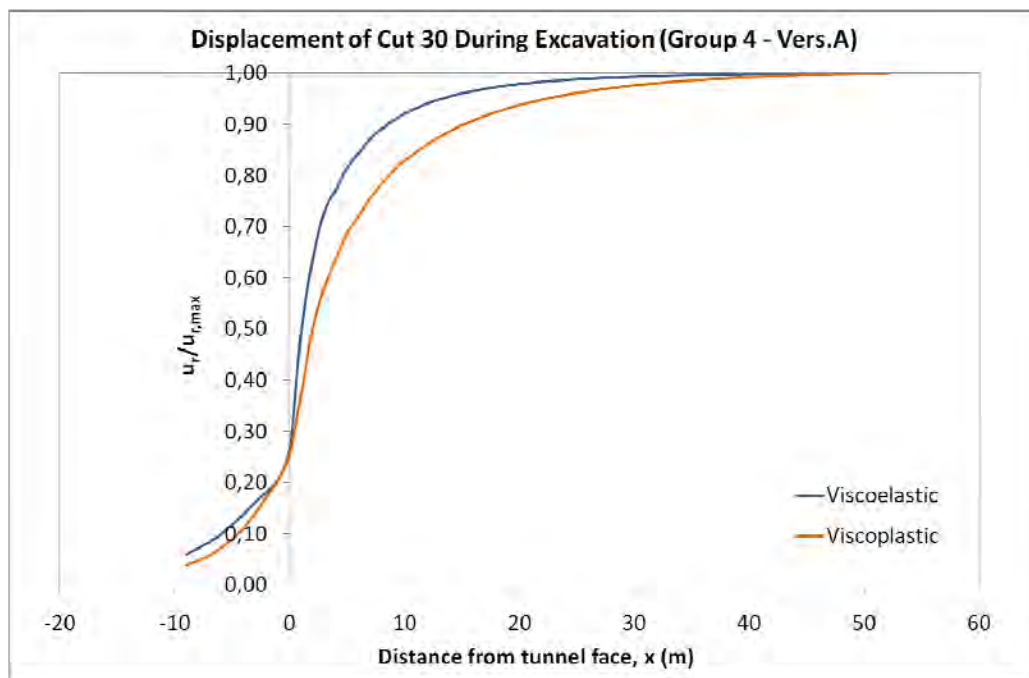
**Σχήμα 4.17:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



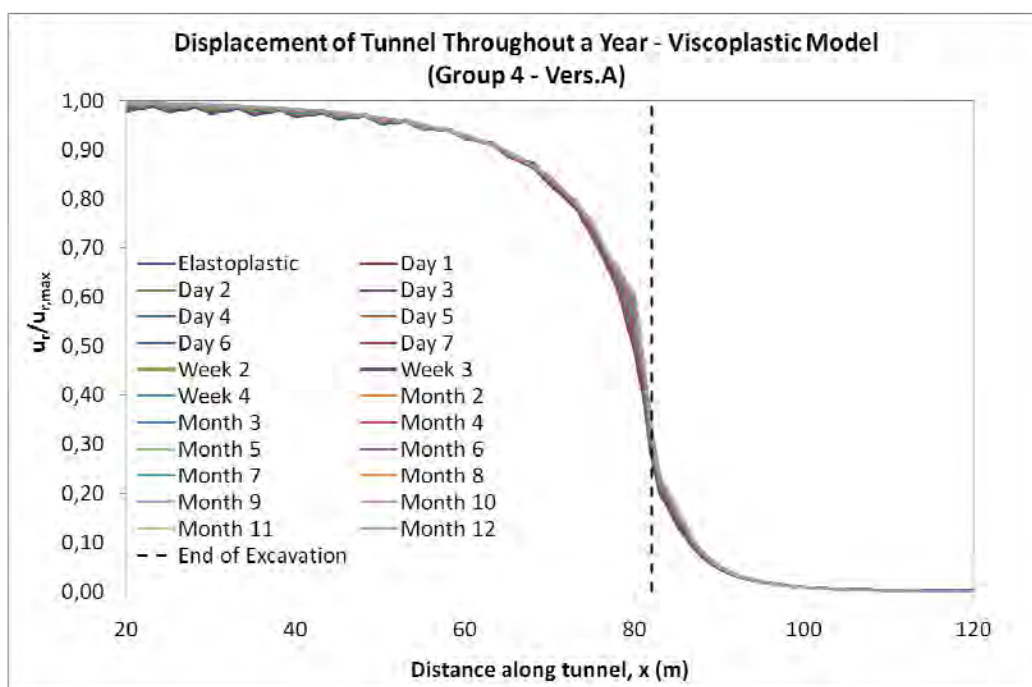
**Σχήμα 4.18:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).



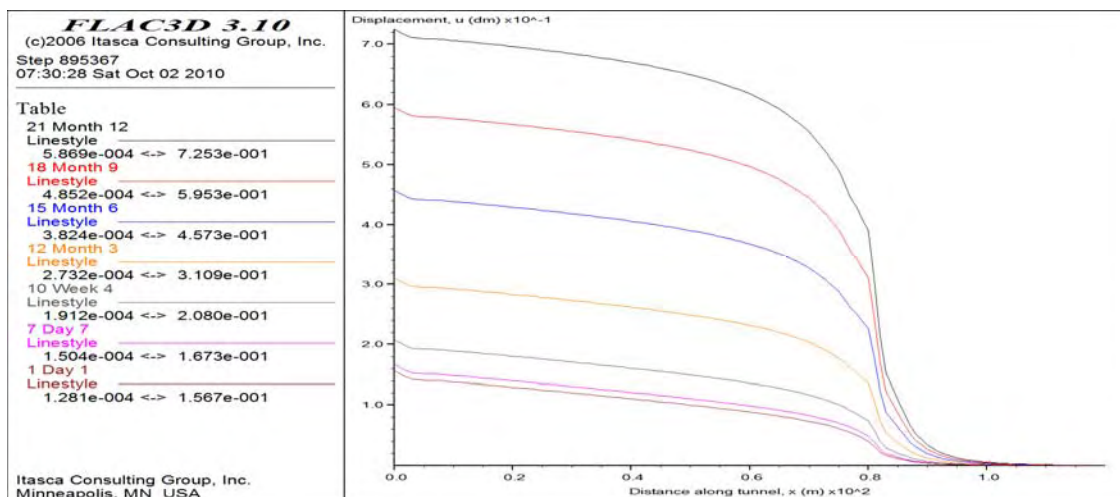
**Σχήμα 4.19:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



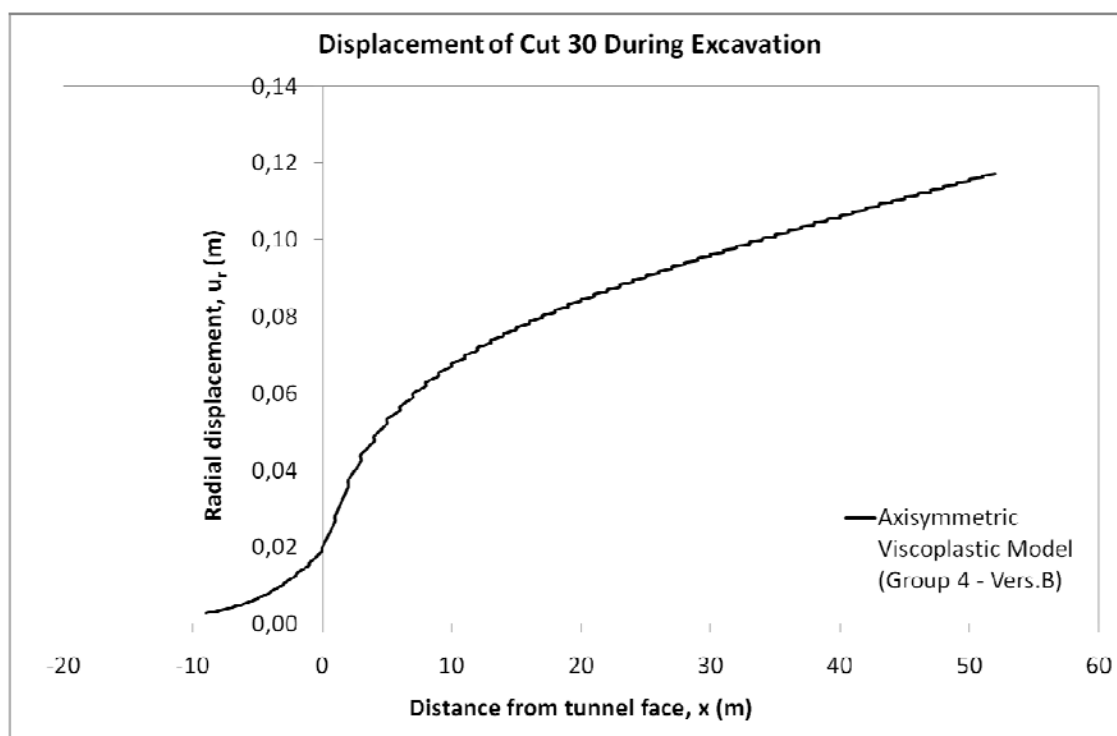
**Σχήμα 4.20:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



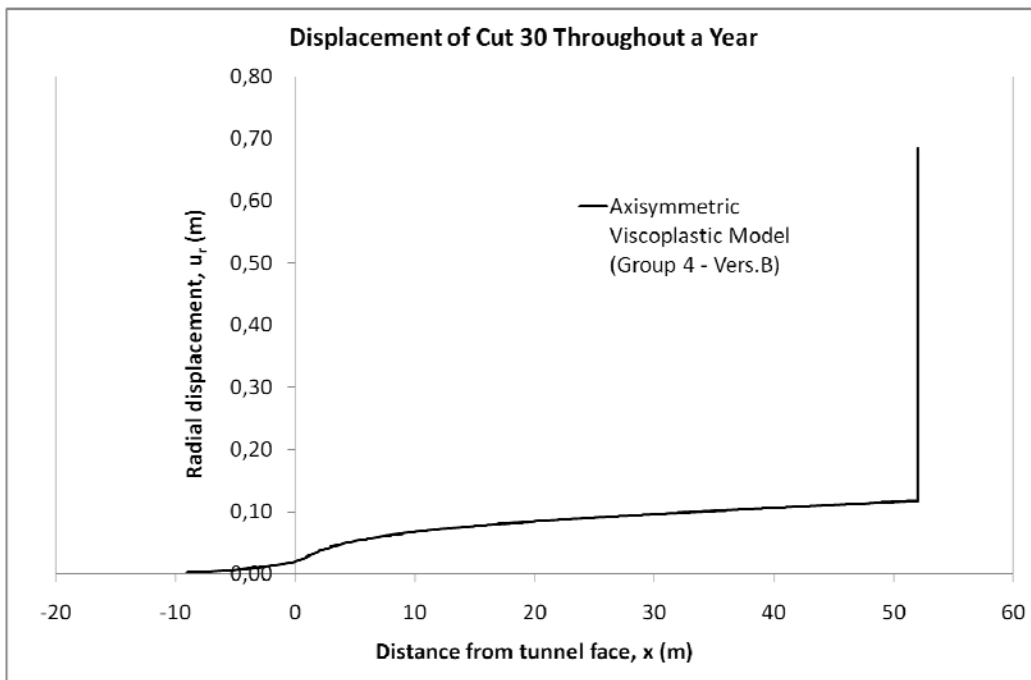
**Σχήμα 4.21:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



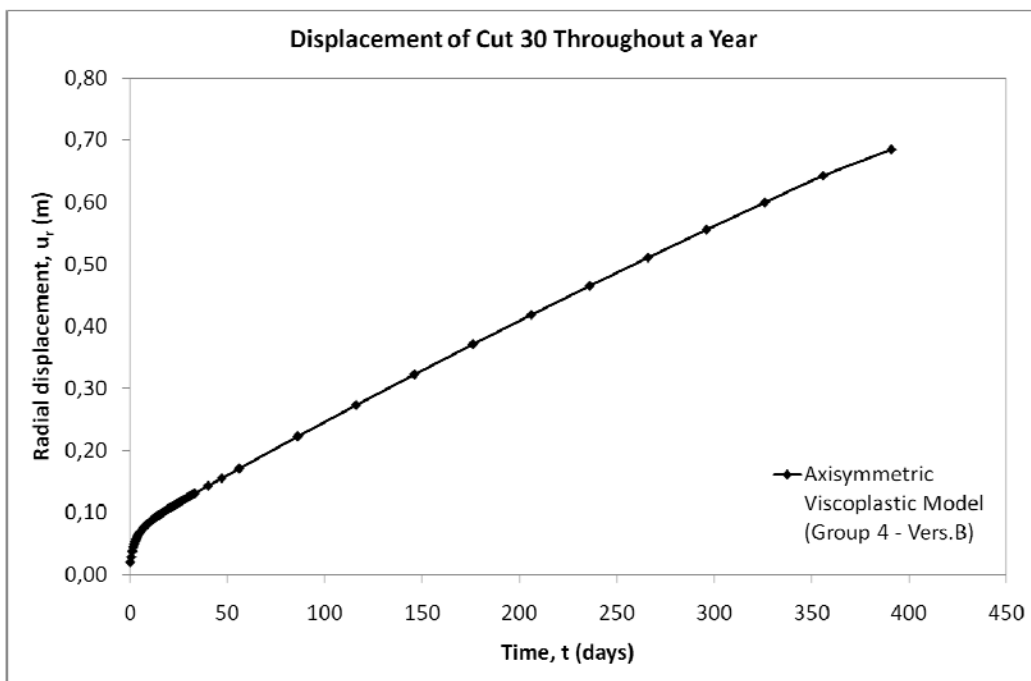
**Σχήμα 4.22:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ’ όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα 4.23:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

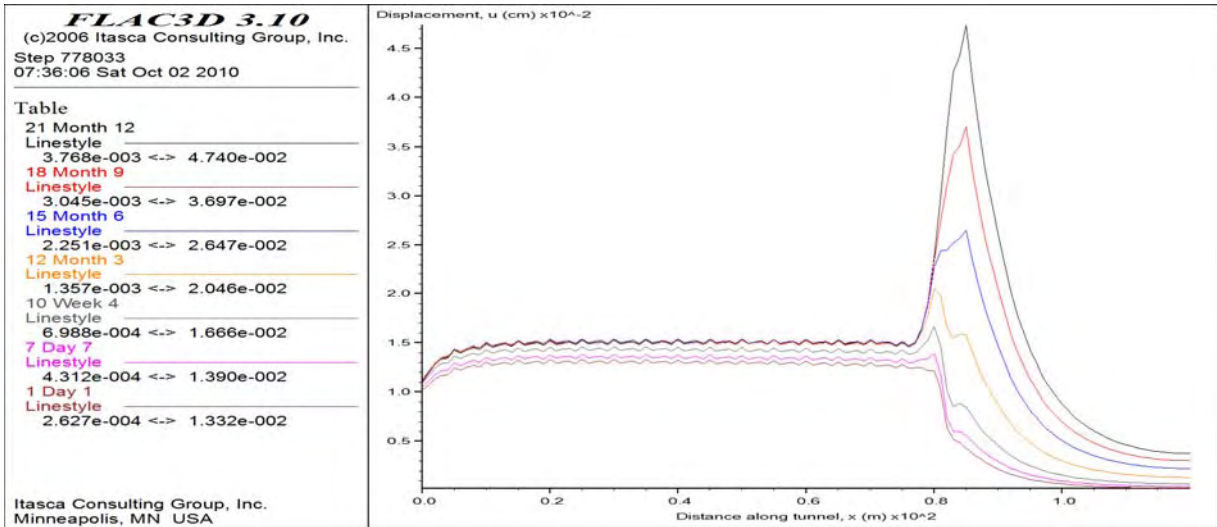


**Σχήμα 4.24:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

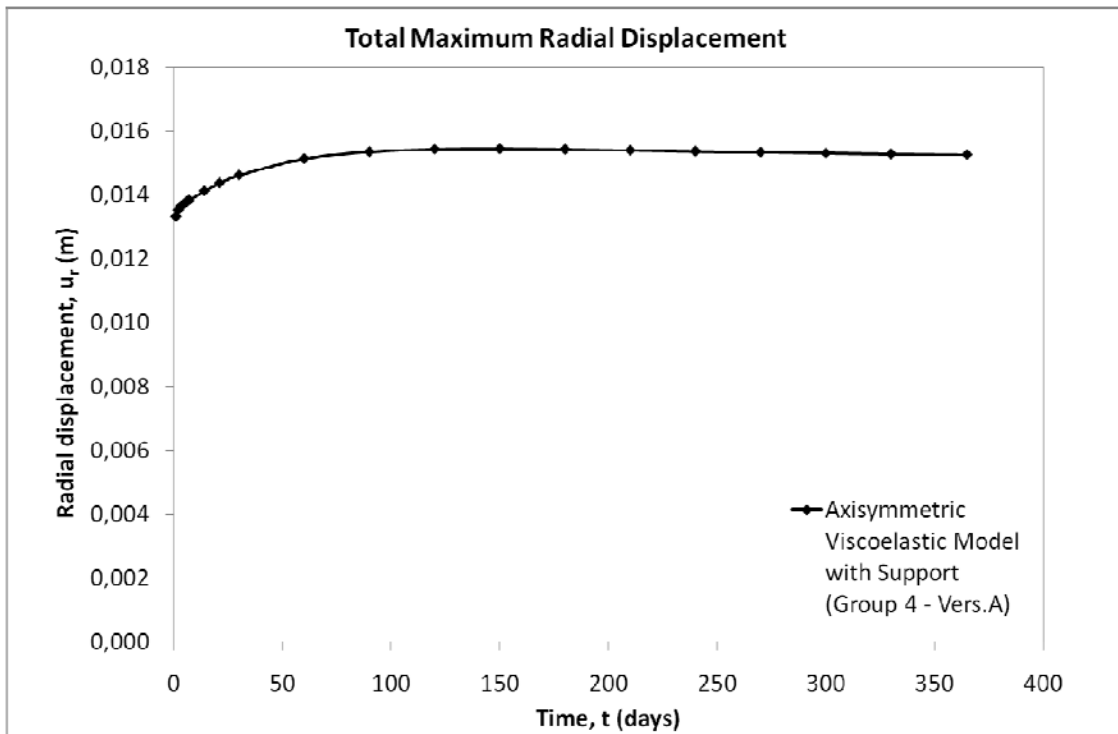


**Σχήμα 4.25:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

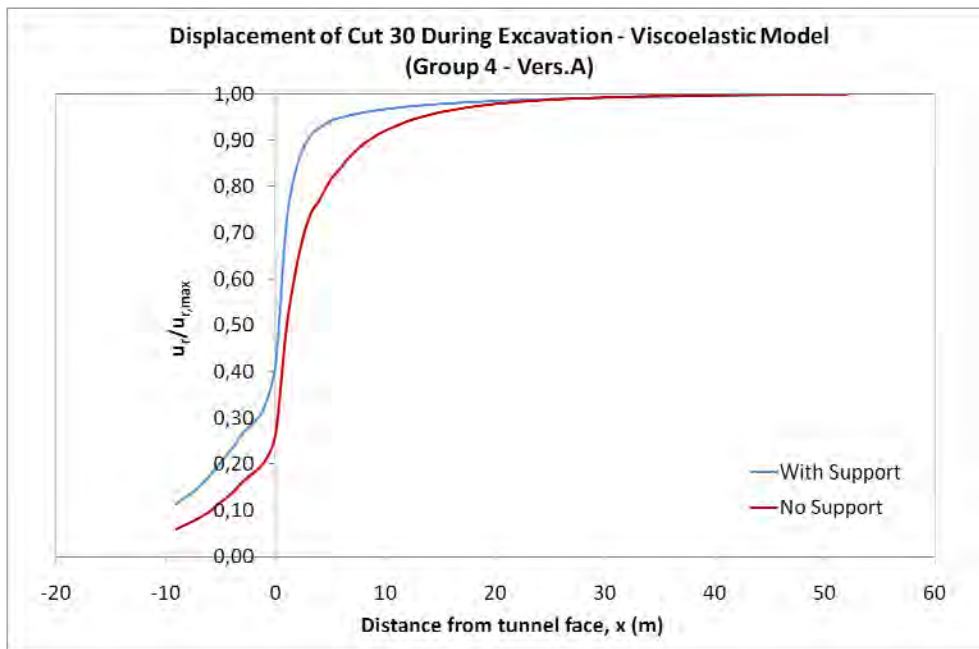




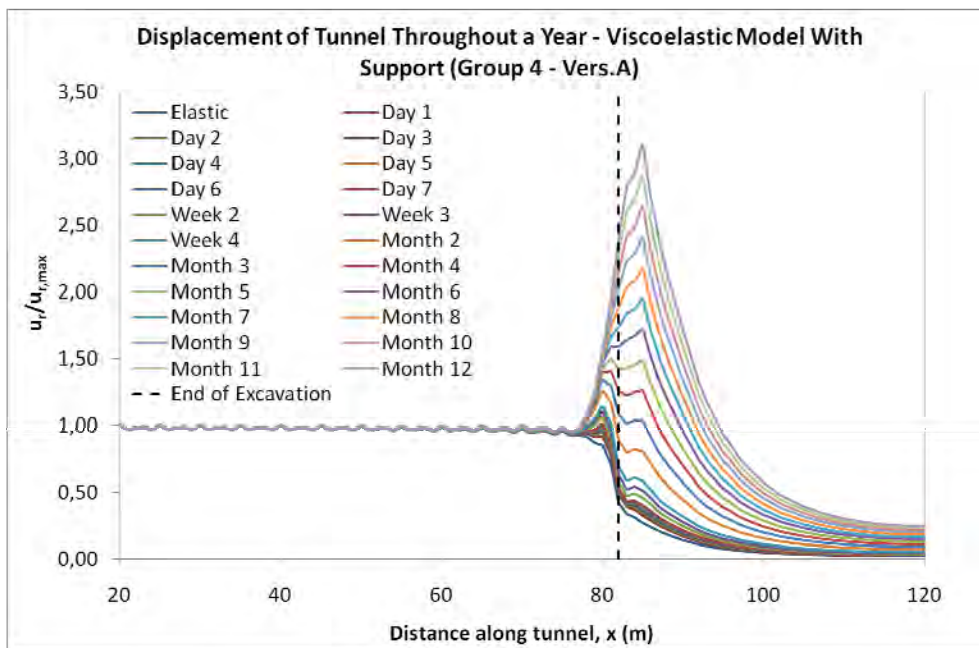
**Σχήμα 4.26:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



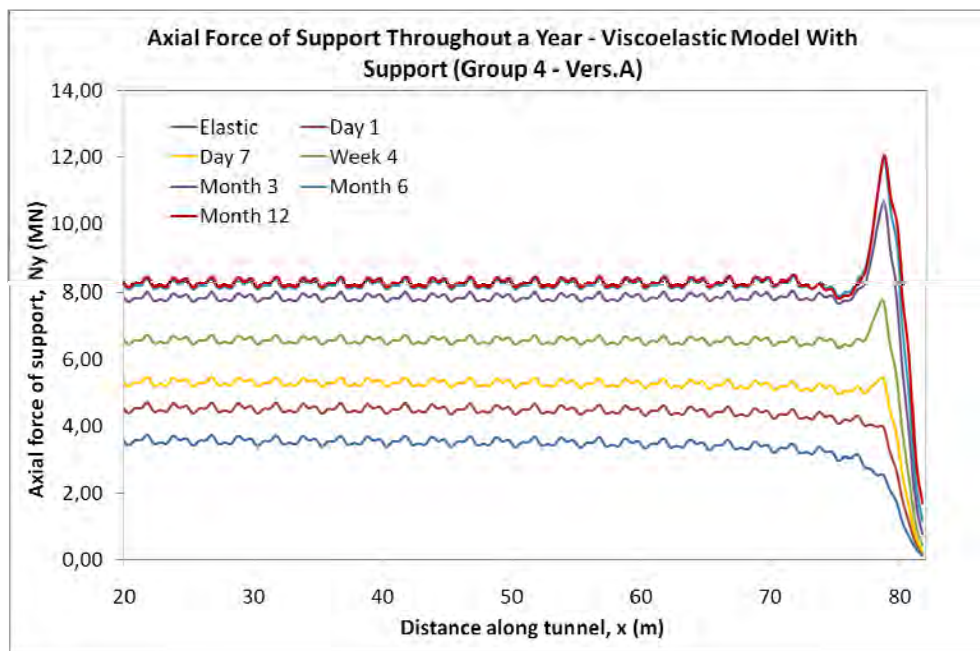
**Σχήμα 4.27:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



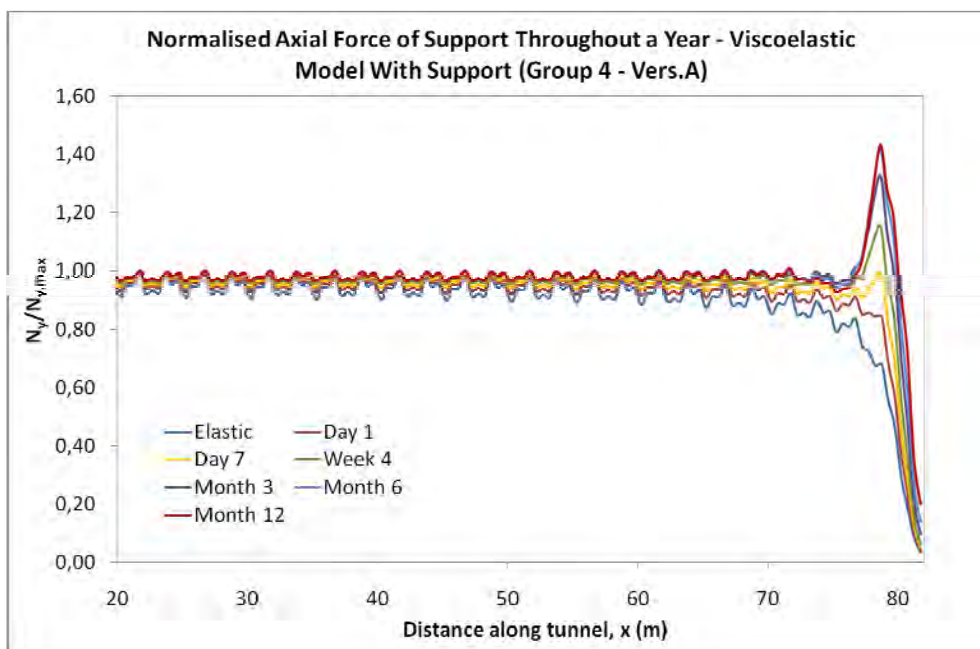
**Σχήμα 4.28:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοελαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



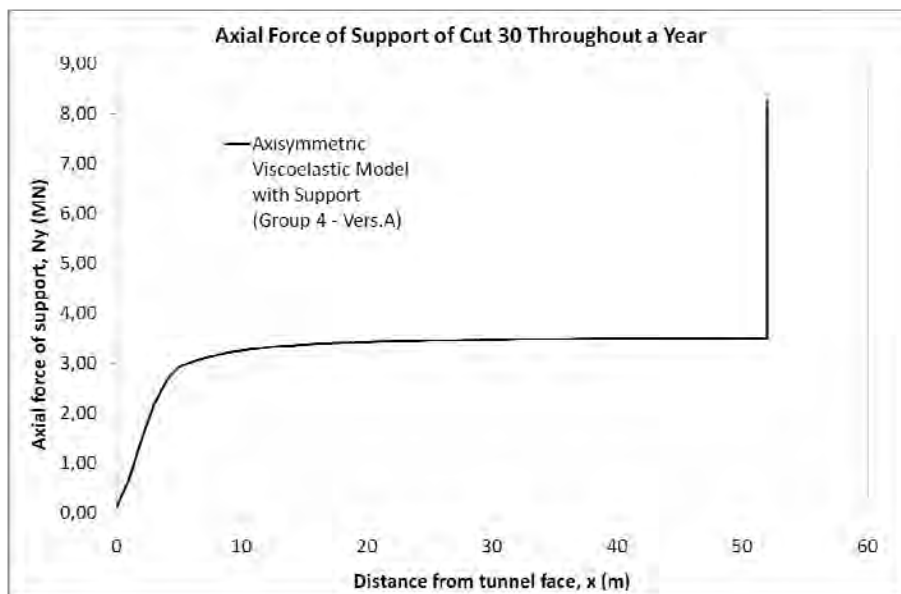
**Σχήμα 4.29:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



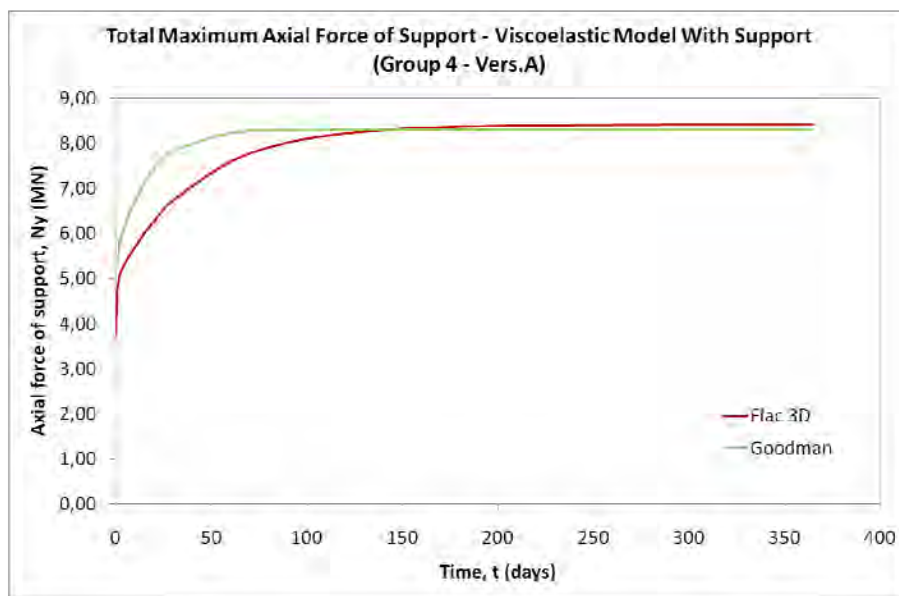
**Σχήμα 4.30:** Εξέλιξη καθ’ όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιζωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



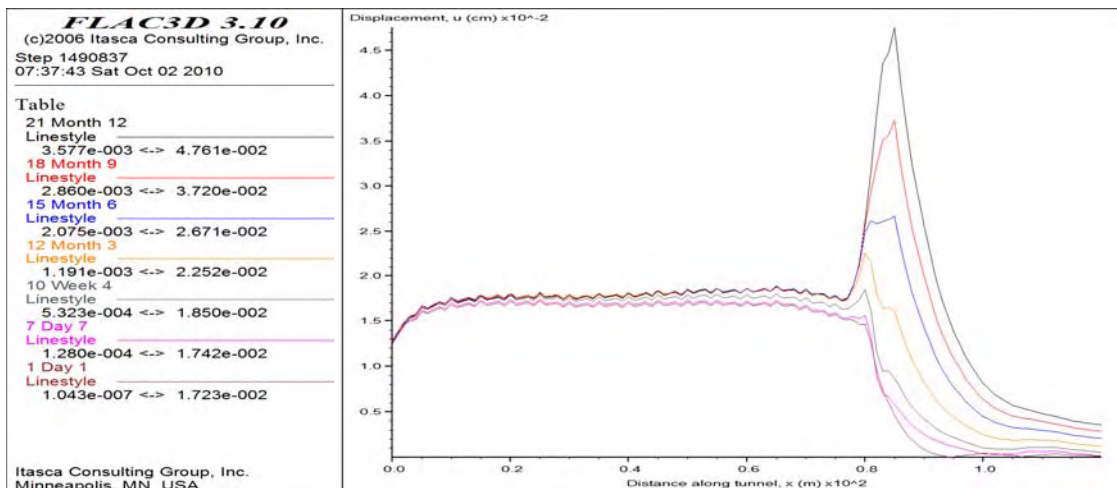
**Σχήμα 4.31:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιζωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



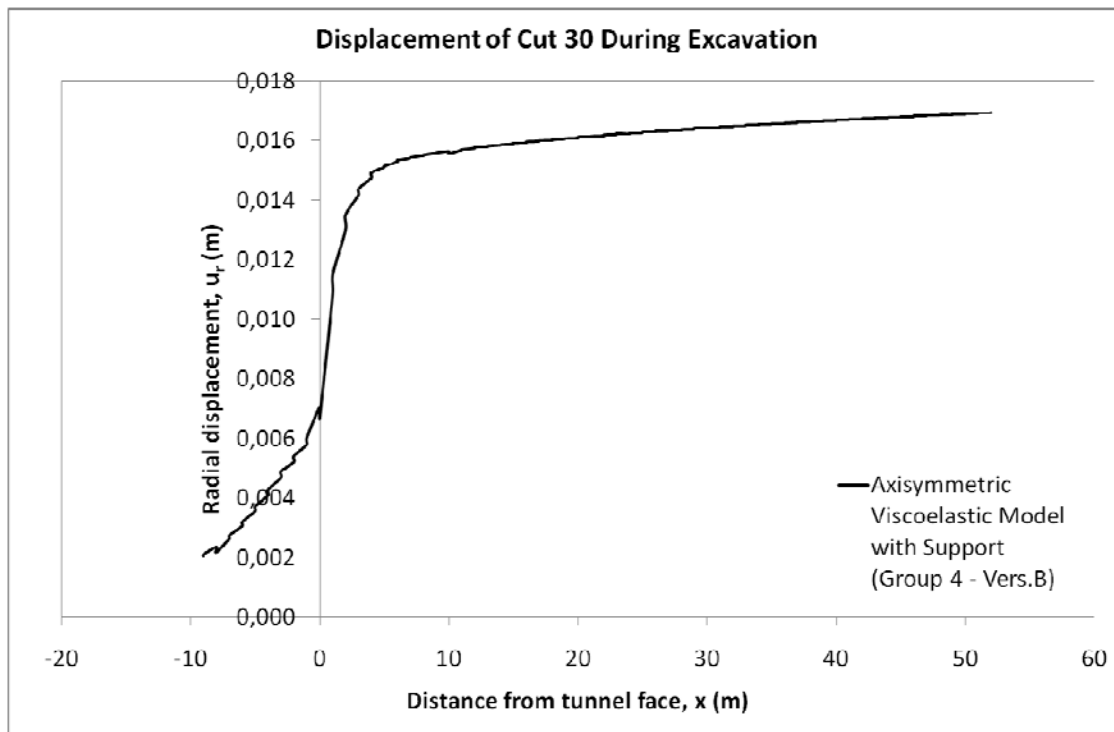
**Σχήμα 4.32:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



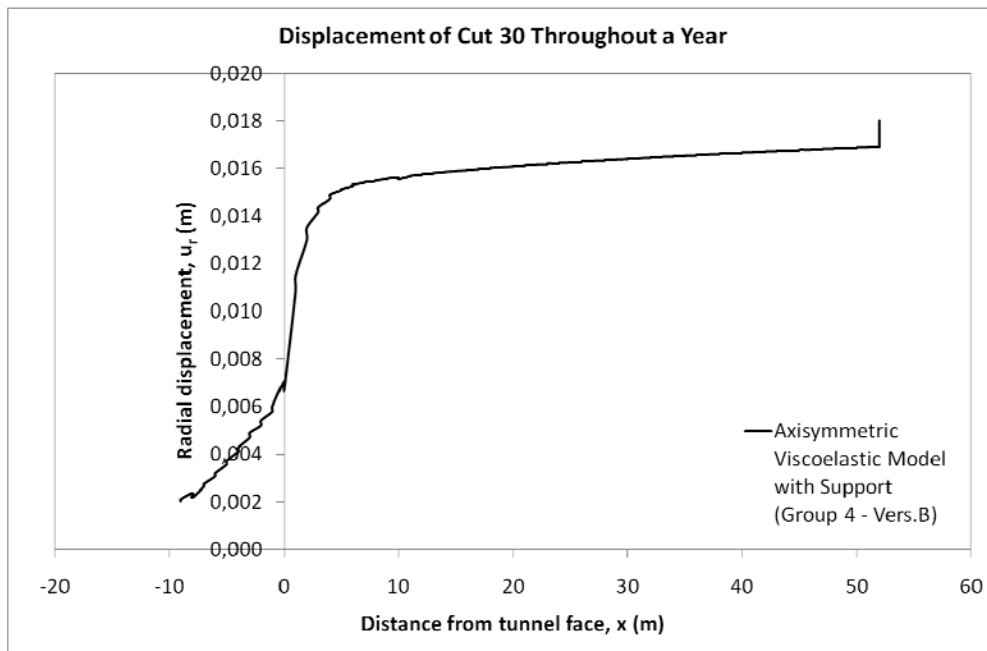
**Σχήμα 4.33:** Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989).



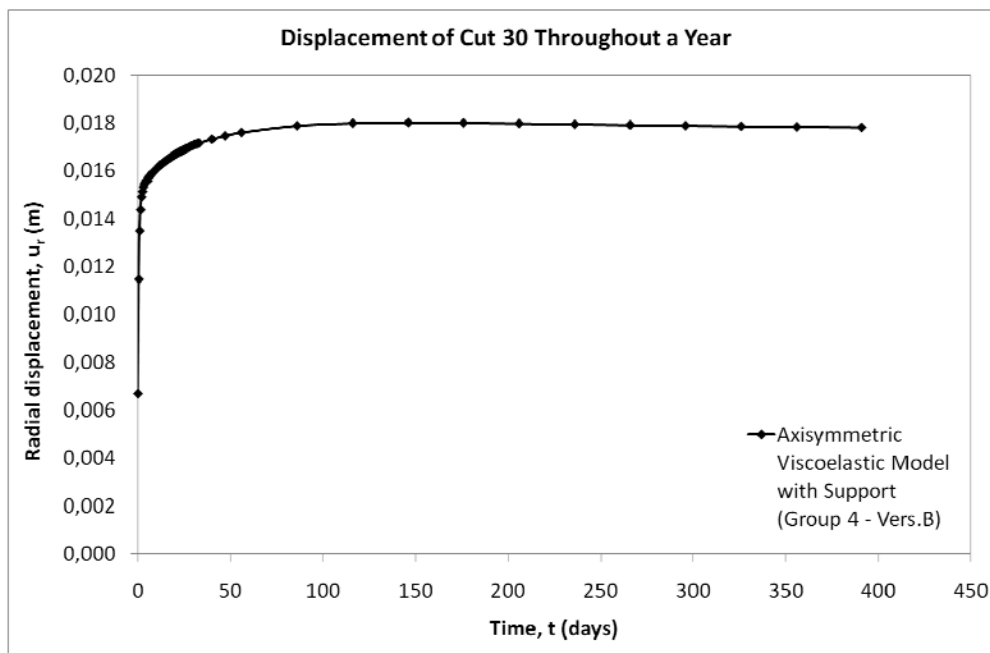
**Σχήμα 4.34:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ’ όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα 4.35:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

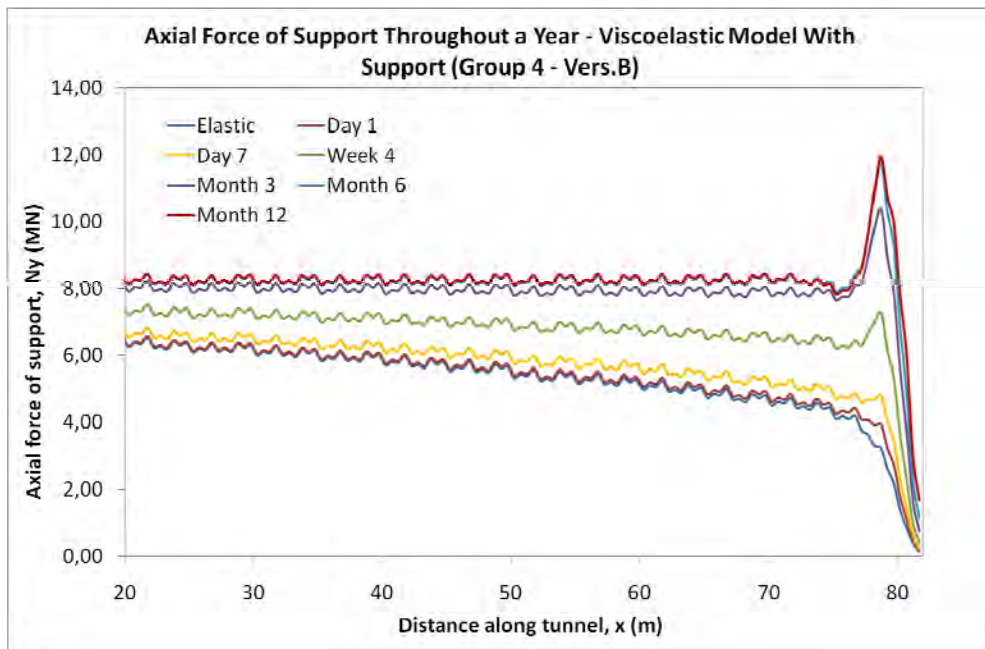


**Σχήμα 4.36:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

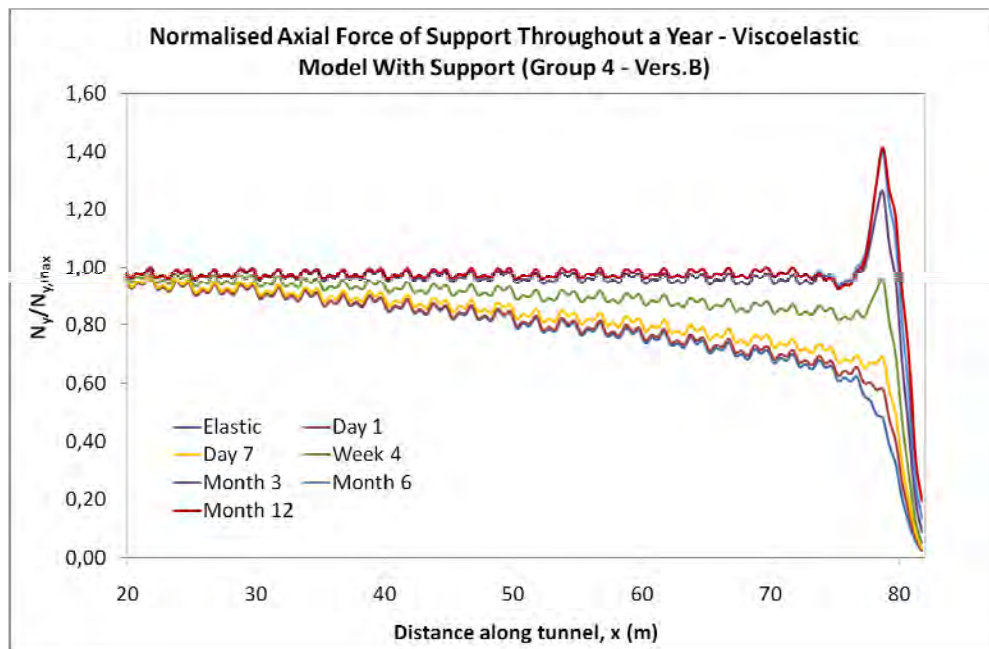


**Σχήμα 4.37:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

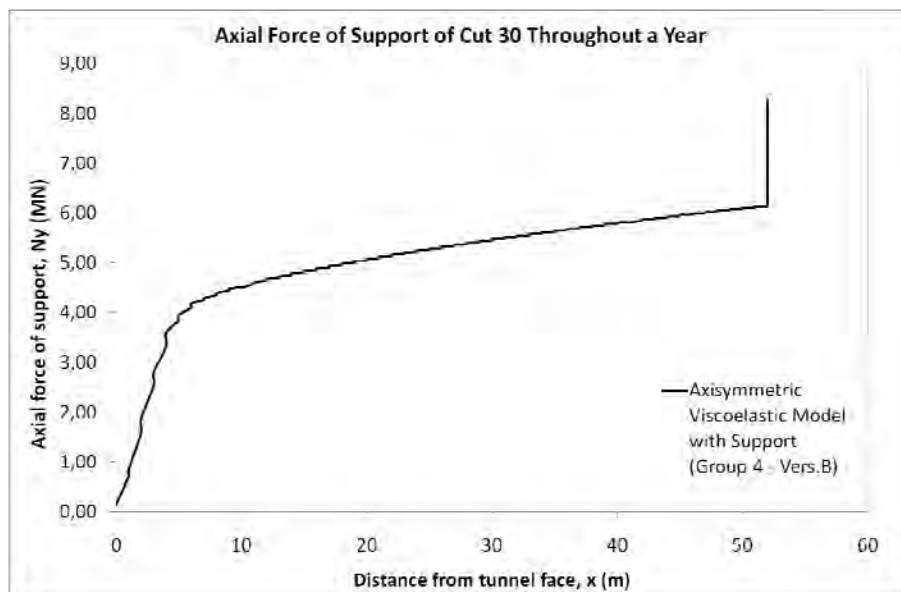




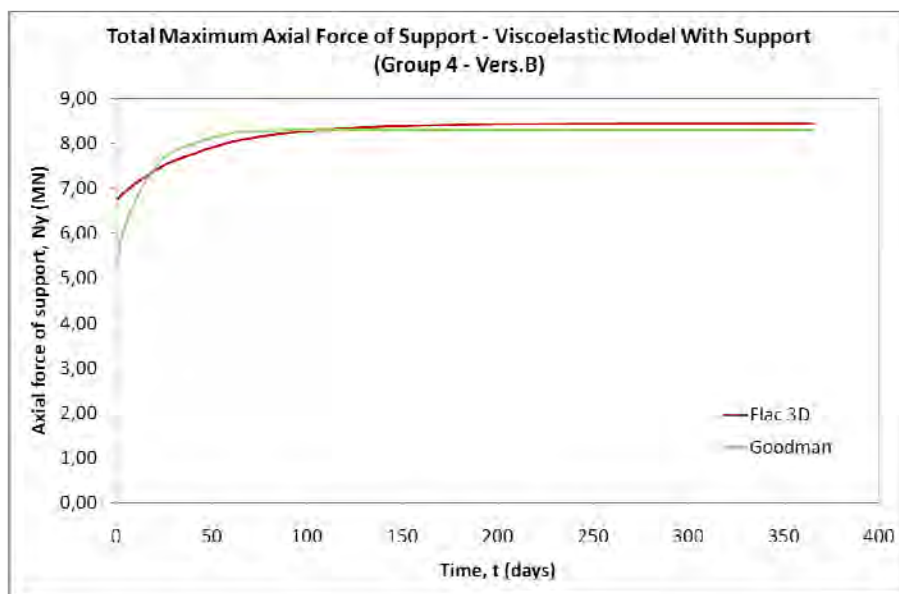
**Σχήμα 4.38:** Εξέλιξη καθ’ όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα 4.39:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

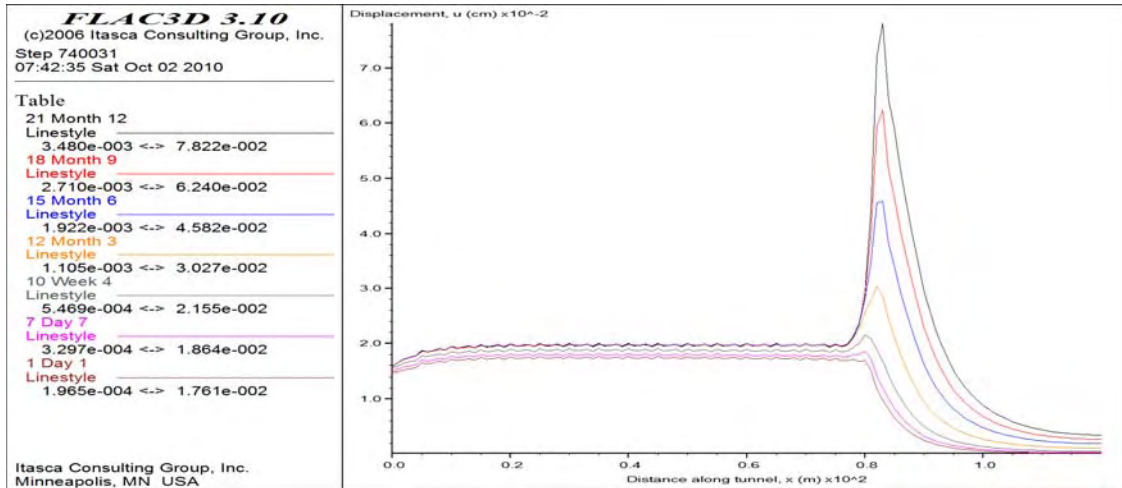


**Σχήμα 4.40:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

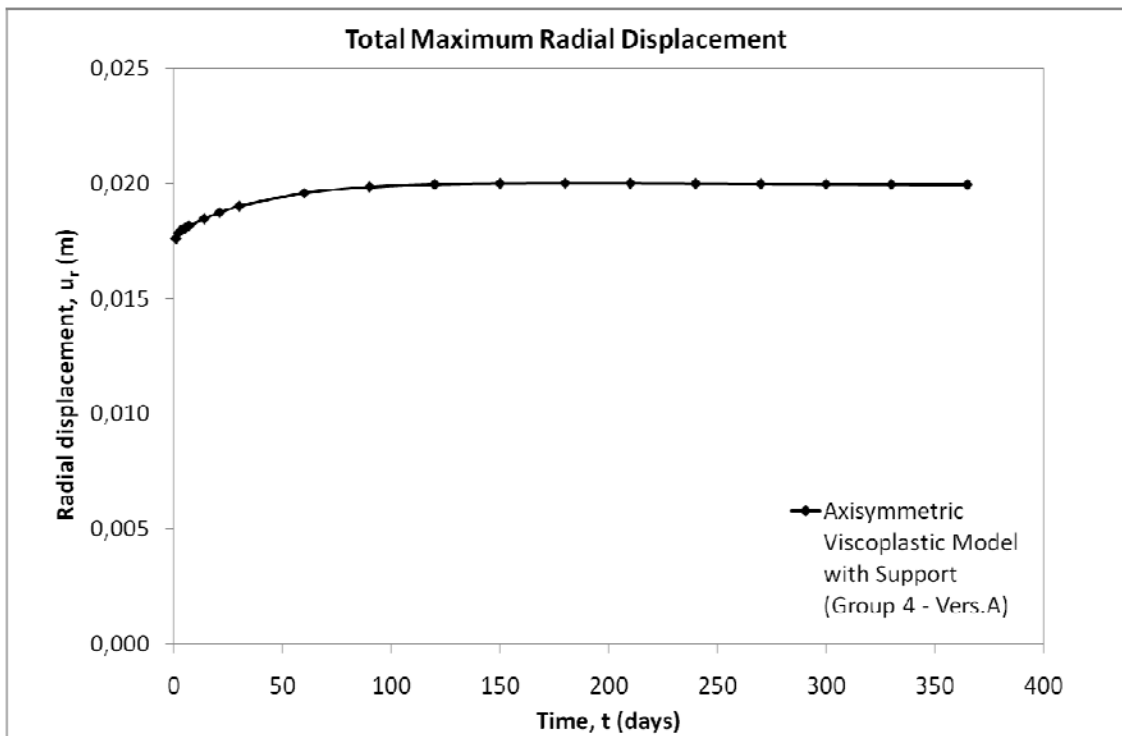


**Σχήμα 4.41:** Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989).

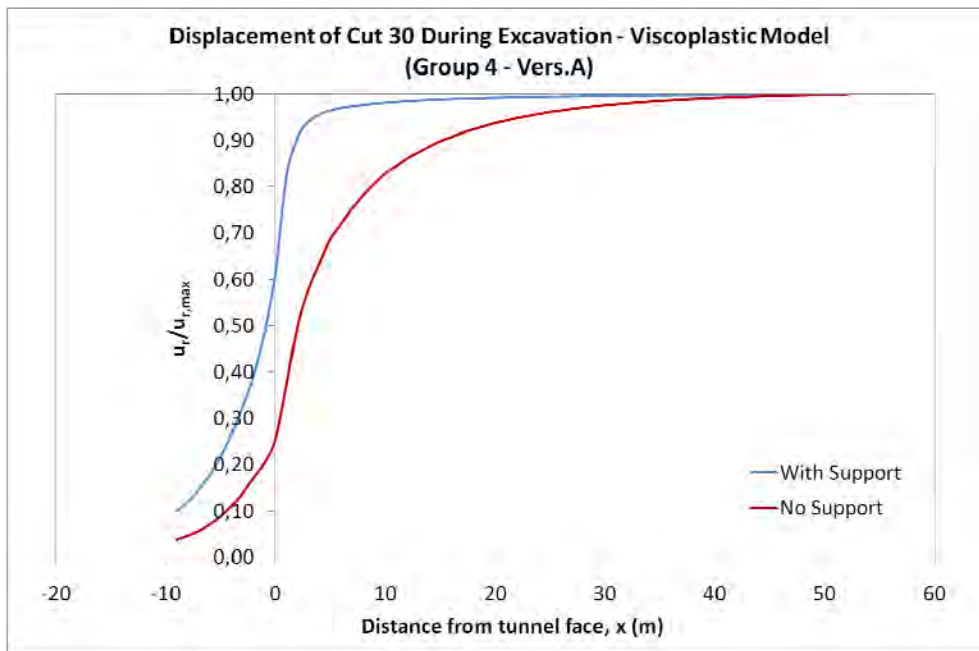




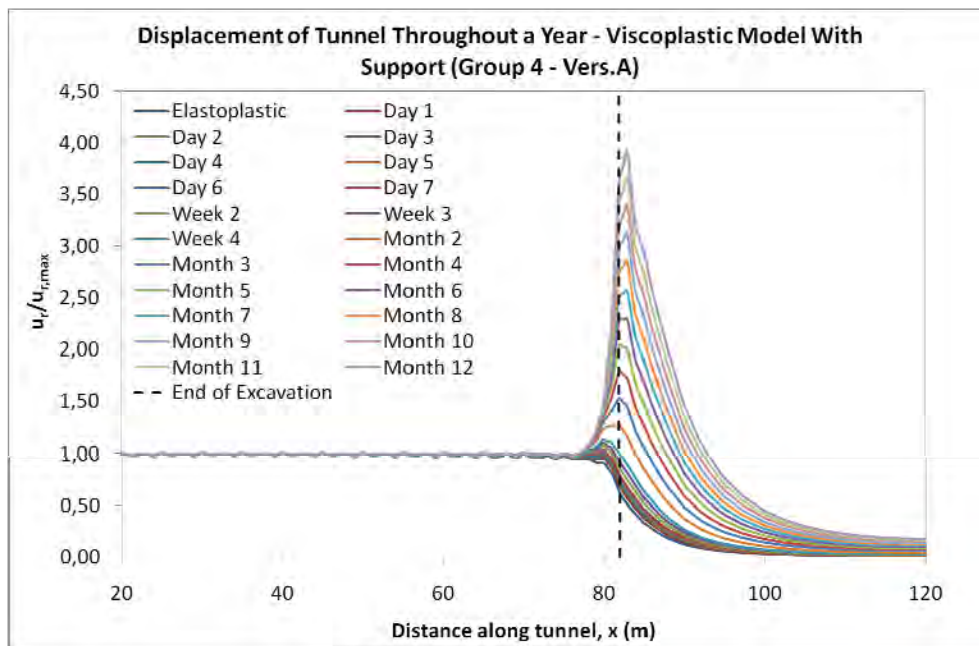
**Σχήμα 4.42:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



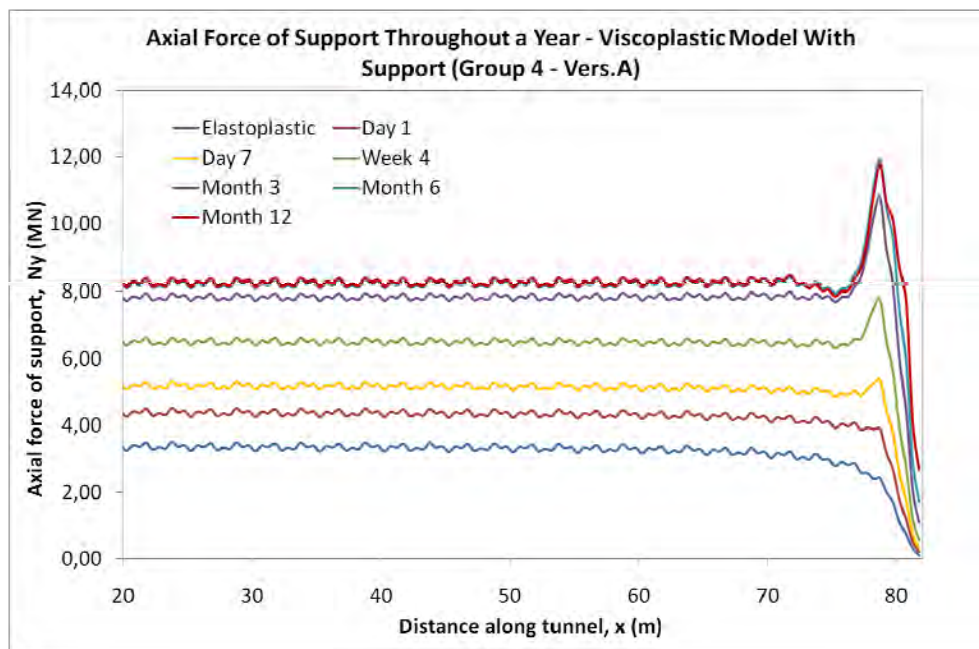
**Σχήμα 4.43:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



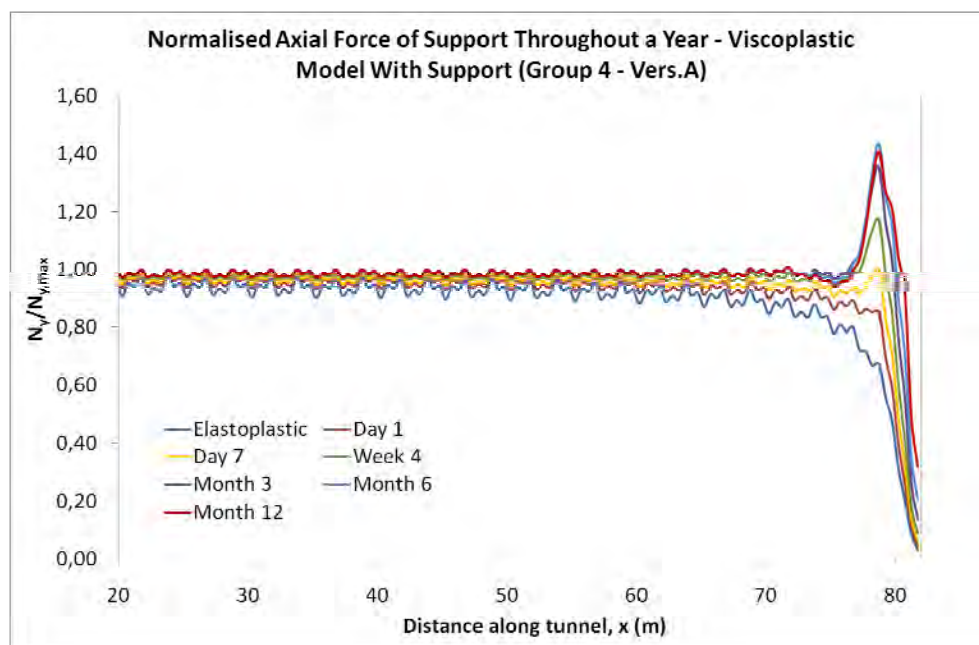
**Σχήμα 4.44:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοπλαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



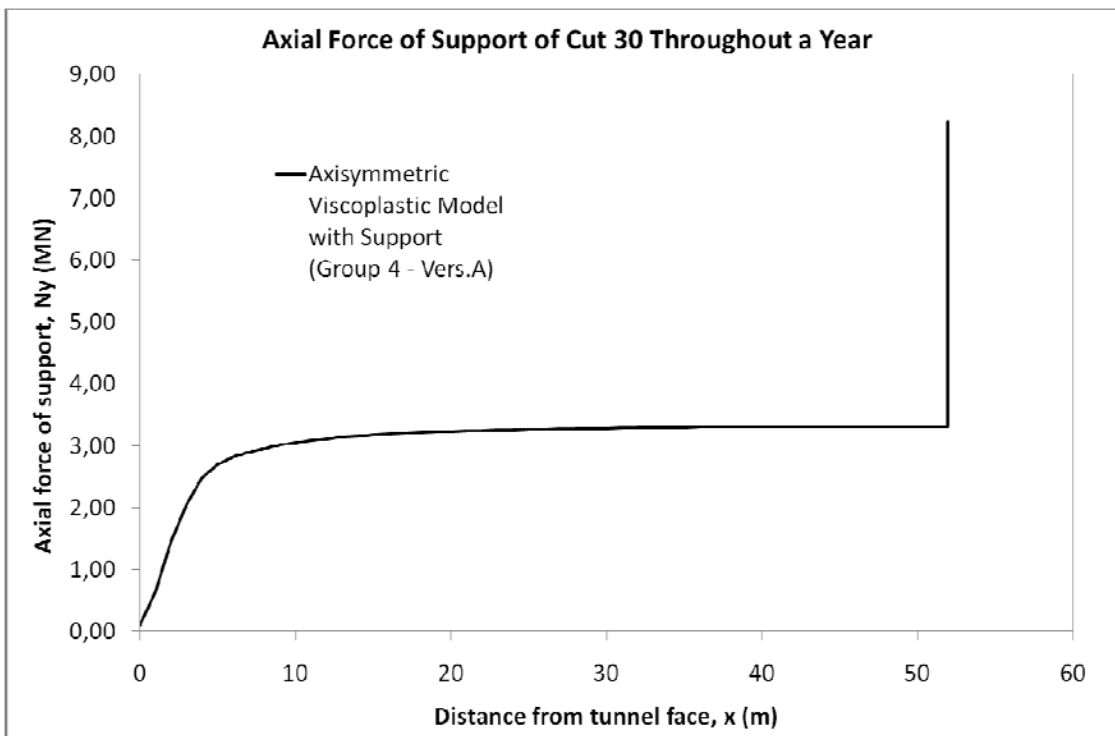
**Σχήμα 4.45:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



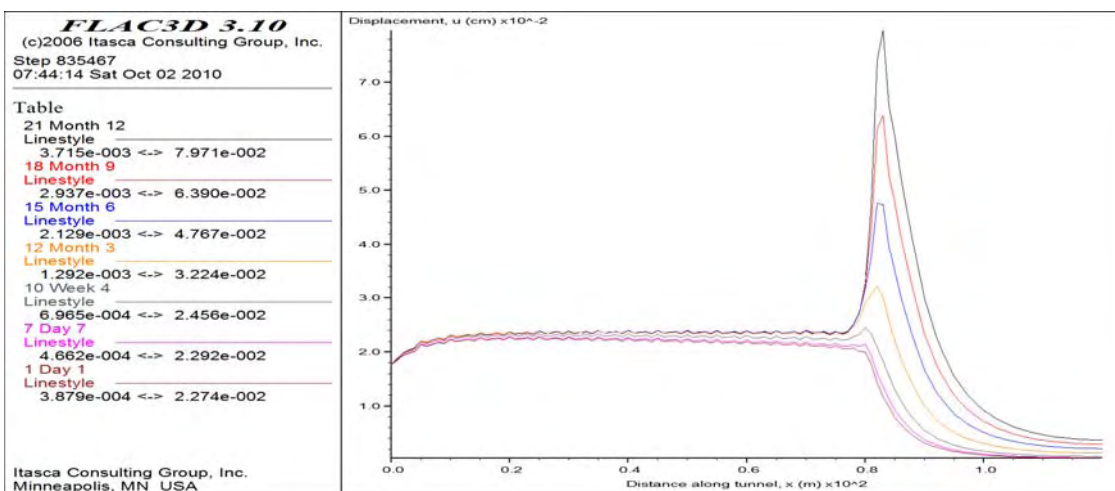
**Σχήμα 4.46:** Εξέλιξη καθ’ όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



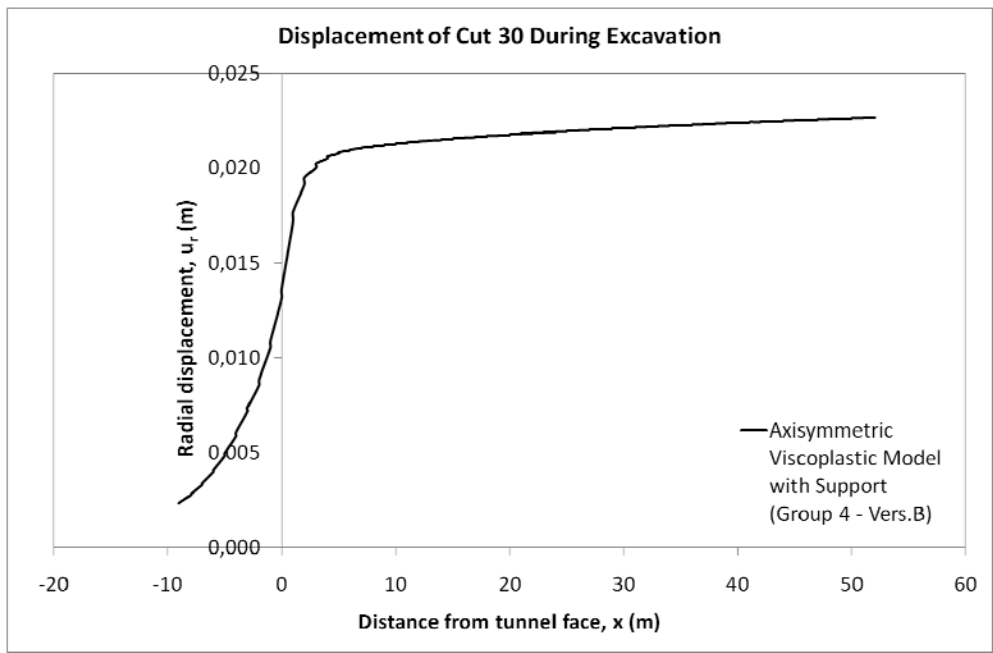
**Σχήμα 4.47:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



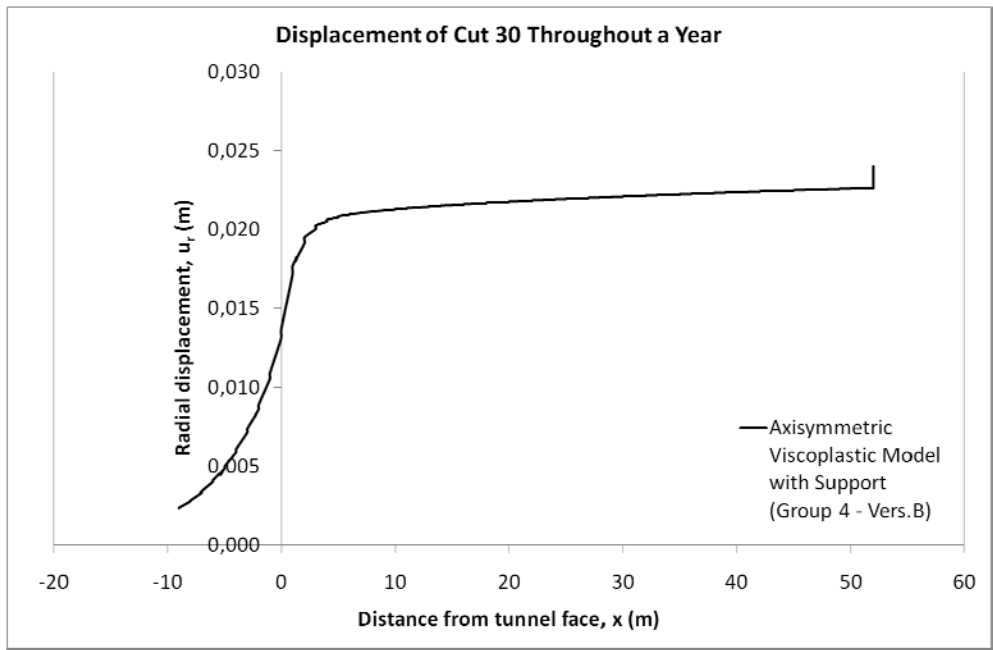
**Σχήμα 4.48:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



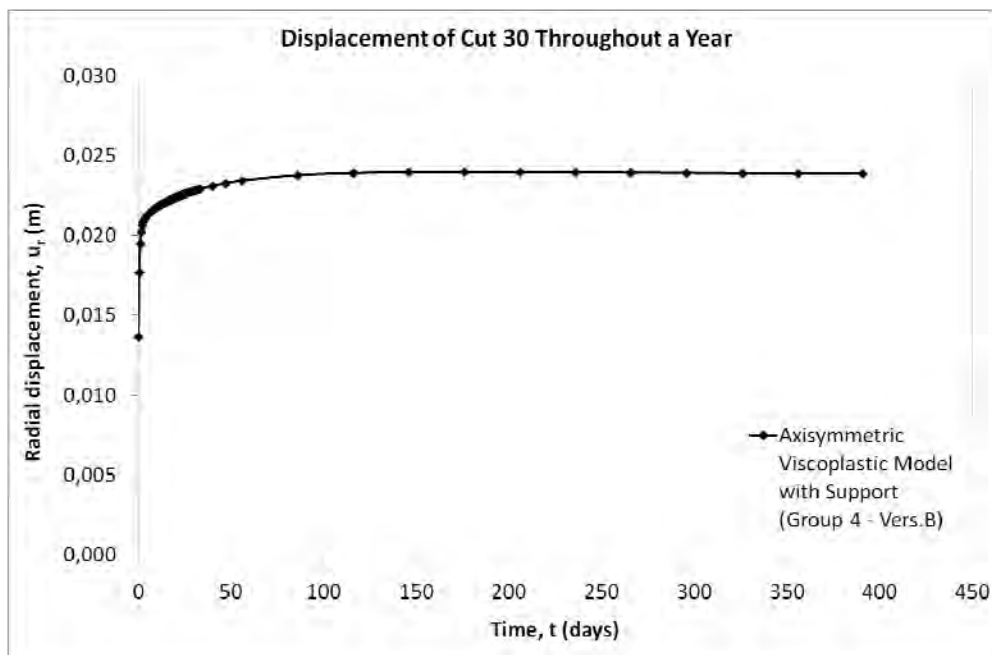
**Σχήμα 4.49:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



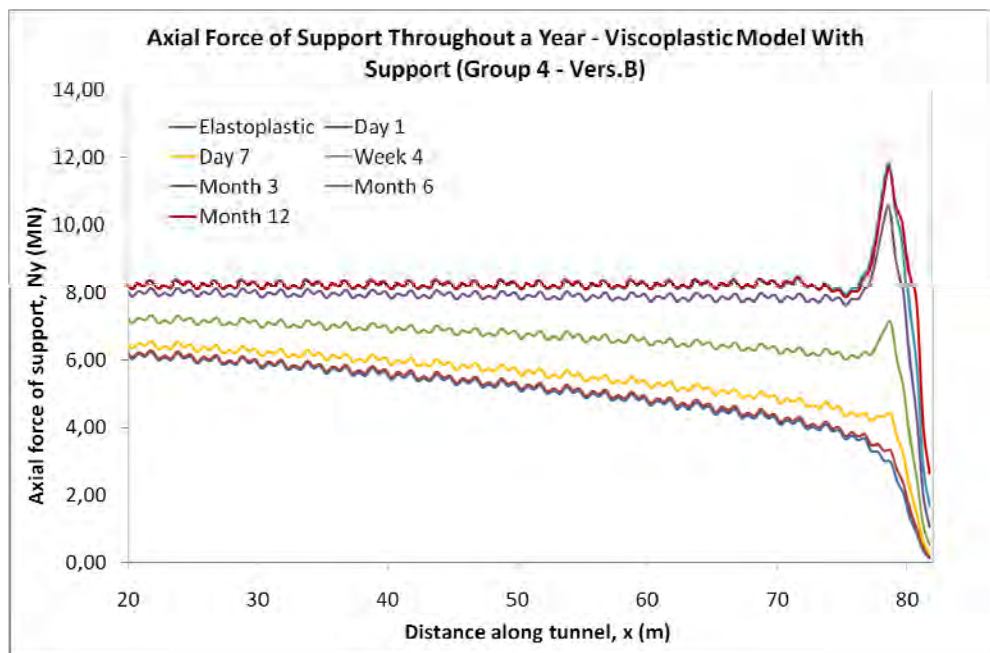
**Σχήμα 4.50:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα 4.51:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

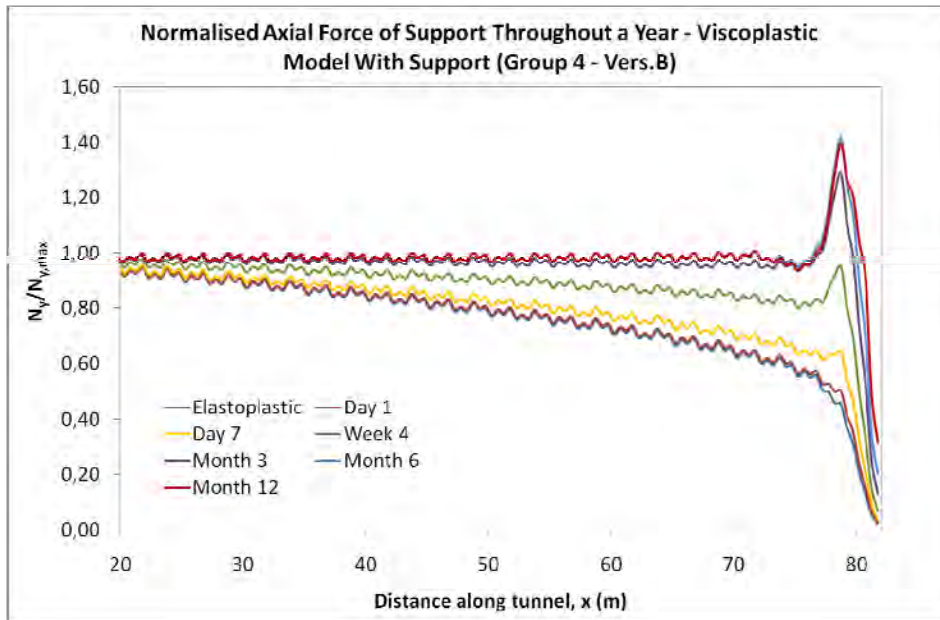


**Σχήμα 4.52:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

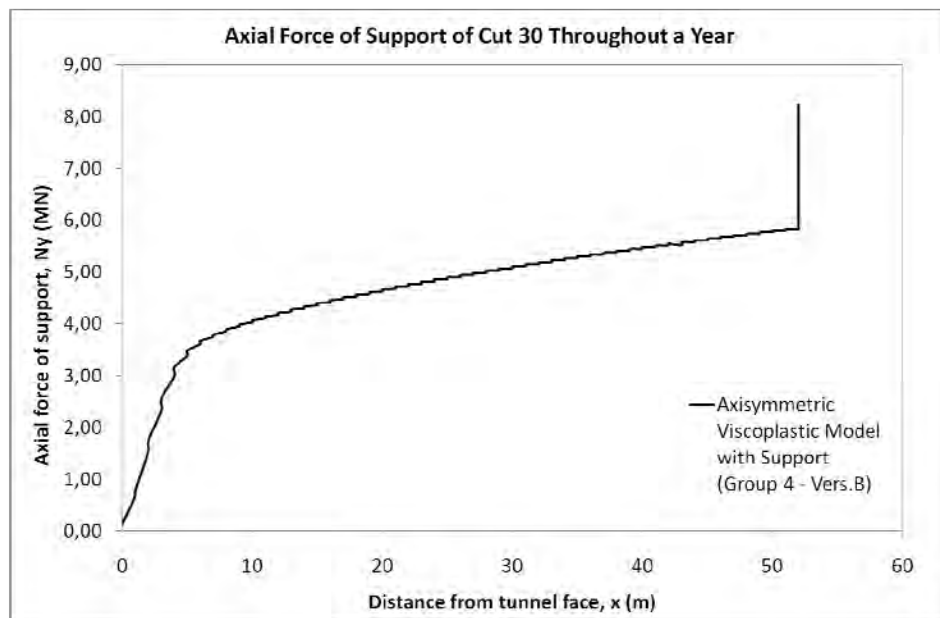


**Σχήμα 4.53:** Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.





**Σχήμα 4.54:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα 4.55:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 4<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

## 4.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Δεύτερης Φάσης Προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται ένας αναλυτικός σχολιασμός του συνόλου των αποτελεσμάτων της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων. Όπως προαναφέρεται, τα αξισυμμετρικά μοντέλα της φάσης αυτής διαχωρίζονται ανά ομάδα παραμέτρων ερπυσμού (1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 4, και 5<sup>η</sup>), ανά είδος μοντέλου (κριτηρίου) επίλυσης (ιξωδοελαστικό ή ιξωδοπλαστικό), ανά είδος επίλυσης κατά την εκσκαφή (ελαστική / ελαστοπλαστική μόνο – Vers.A ή ελαστική / ελαστοπλαστική και ερπυστική – Vers.B) και τέλος, ανάλογα με το εάν περιλαμβάνουν ή όχι σύστημα προσωρινής υποστήριξης. Επομένως, ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων γίνεται με βάση το διαχωρισμό αυτό, και είναι ο ακόλουθος.

### 4.4.1 Ιξωδοελαστικά Μοντέλα

#### 1<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων Ερπυσμού – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.1 έως Β.5)

- ↪ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 20 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 20 m από το μέτωπο).
- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, ταυτίζεται σχεδόν απόλυτα με την καμπύλη του Panet. Η ταύτιση αυτή



ισχύει για ολόκληρη τη σήραγγα και διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια των ερπυστικών μετατοπίσεων.

#### 1<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων Ερπυσμού – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.6 έως Β.9)

- ↗ Σχετικά ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.
- ↗ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
- ↗ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στις δέκα περίπου ημέρες μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου παρατηρείται μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↗ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 89 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας και το υπόλοιπο 11 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 0,5 %.

#### 2<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων Ερπυσμού – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.10 έως Β.14)

- ↗ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 20 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 20 m από το μέτωπο).
- ↗ Συνεχής αλλά σχετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.

- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στις δέκα πρώτες ημέρες που έχει σταματήσει η διάνοιξη, ο ρυθμός εκδήλωσής τους είναι μεγαλύτερος και σταδιακά μειώνεται, ενώ στους τρεις περίπου μήνες το μοντέλο μεταβαίνει στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεων του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, ταυτίζεται σχεδόν απόλυτα με την καμπύλη του Panet. Η ταύτιση αυτή ισχύει για ολόκληρη τη σήραγγα και διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια των ερπυστικών μετατοπίσεων.

#### 2<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων Ερπυσμού – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.15 έως Β.18)

- ↪ Ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.
- ↪ Συνεχής αλλά σχετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στους τρεις περίπου μήνες μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου παρατηρείται μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 81 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας και το υπόλοιπο 19 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του

μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 11,5 %.

### 3<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.19 έως Β.23)

- ↪ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 20 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 20 m από το μέτωπο).
- ↪ Εξαιρετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, παρατηρείται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στον ένα περίπου μήνα που έχει σταματήσει η διάνοιξη, το μοντέλο μεταβαίνει στο δευτερογενή ερπυσμό με εξαιρετικά μικρό ρυθμό αύξησης των μετατοπίσεων, που πρακτικά σημαίνει σταθεροποίηση.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, ταυτίζεται σχεδόν απόλυτα με την καμπύλη του Panet. Η ταύτιση αυτή ισχύει για ολόκληρη τη σήραγγα και διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια των ερπυστικών μετατοπίσεων.

### 3<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.24 έως Β.27)

- ↪ Σχετικά ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.
- ↪ Εξαιρετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.

- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στο μισό περίπου μήνα μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου, παρατηρείται μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό με εξαιρετικά μικρό ρυθμό αύξησης των μετατοπίσεων, που πρακτικά σημαίνει σταθεροποίηση. Συγκριτικά με τα αποτελέσματα του αντίστοιχου μοντέλου Version A, παρατηρείται ότι η χρονική εξέλιξη των μετατοπίσεων κατά τη διάνοιξη οδηγεί τη βραχόμαζα γρηγορότερα στο στάδιο του δευτερογενούς ερπυσμού (μισός μήνας έναντι ενός στο Version A).
  
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, σχεδόν το 100 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 0,3 %.

#### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Σχήματα 4.8 έως 4.12)

- ↪ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 20 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 20 m από το μέτωπο).
  
- ↪ Συνεχής και πολύ μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
  
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Μάλιστα, ο ρυθμός με τον οποίο εκδηλώνονται είναι συνεχώς πολύ υψηλός, ενώ στο δευτερογενή ερπυσμό μεταβαίνει εξαιρετικά γρήγορα, δηλαδή μόλις μερικές ημέρες μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.

- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεων του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, ταυτίζεται σχεδόν απόλυτα με την καμπύλη του Panet. Η ταύτιση αυτή ισχύει για ολόκληρη τη σήραγγα και διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια των ερπυστικών μετατοπίσεων.

#### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Σχήματα 4.13 έως 4.16)

- ↪ Ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, με σημαντικά υψηλότερες τιμές στην αρχή της διάνοιξης σε σχέση με το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή.
- ↪ Συνεχής και πολύ μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Σε μερικές μόλις ημέρες μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου, παρατηρείται μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 15 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 85 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 144 %.

### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.28 έως Β.32)

- ↪ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 20 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 20 m από το μέτωπο).
- ↪ Συνεχής και εξαιρετικά μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Μάλιστα, ο ρυθμός με τον οποίο εκδηλώνονται είναι συνεχώς εξαιρετικά υψηλός.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, ταυτίζεται σχεδόν απόλυτα με την καμπύλη του Panet. Η ταύτιση αυτή ισχύει για ολόκληρη τη σήραγγα και διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια των ερπυστικών μετατοπίσεων.

### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.33 έως Β.36)

- ↪ Ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, με σημαντικά υψηλότερες τιμές στην αρχή της διάνοιξης σε σχέση με το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή.
- ↪ Συνεχής και εξαιρετικά μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι

προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Μάλιστα, ο ρυθμός με τον οποίο εκδηλώνονται είναι συνεχώς πάρα πολύ υψηλός.

- ☞ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 11 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 89 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 1.092 %.

#### 4.4.2 Ιξωδοπλαστικά Μοντέλα

##### 1<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.37 έως Β.41)

- ☞ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).
- ☞ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ☞ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων.
- ☞ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεων του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, αργεί να εξομαλυνθεί σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου ιξωδοελαστικού μοντέλου.

- ↪ Οι καμπύλες του προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (Longitudinal Deformation Profile – L.D.P.), οι οποίες προκύπτουν για διάφορα στάδια του χρονικού διαστήματος του ενός έτους που διαρκούν οι προσομοιώσεις, συμπίπτουν απόλυτα μεταξύ τους.

#### 1<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.42 έως Β.45)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).
- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στο μισό περίπου μήνα μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου, παρατηρείται μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 91 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 9 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 0,8 %.



### 2<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.46 έως Β.50)

- ↗ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).
- ↗ Συνεχής αλλά σχετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↗ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στις δέκα πρώτες ημέρες που έχει σταματήσει η διάνοιξη, ο ρυθμός εκδήλωσής τους είναι μεγαλύτερος και σταδιακά μειώνεται, ενώ στους τρεις περίπου μήνες το μοντέλο μεταβαίνει στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↗ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, αργεί να εξομαλυνθεί σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου ιξωδοελαστικού μοντέλου.
- ↗ Οι καμπύλες του προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.), οι οποίες προκύπτουν για διάφορα στάδια του χρονικού διαστήματος του ενός έτους που διαρκούν οι προσομοιώσεις, συμπίπτουν απόλυτα μεταξύ τους.

### 2<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.51 έως Β.54)

- ↗ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m

περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).

- ↪ Συνεχής αλλά σχετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στους τρεις περίπου μήνες μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου, παρατηρείται μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 84 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 16 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 7 %.

### 3<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.55 έως Β.59)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).
- ↪ Εξαιρετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.

- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, παρατηρείται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στον ένα περίπου μήνα που έχει σταματήσει η διάνοιξη, το μοντέλο μεταβαίνει στο δευτερογενή έρπυσμό με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό αύξησης μετατοπίσεων, που πρακτικά σημαίνει σταθεροποίηση.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, αργεί να εξομαλυνθεί σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου ιξωδοελαστικού μοντέλου.
- ↪ Οι καμπύλες του προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.), οι οποίες προκύπτουν για διάφορα στάδια του χρονικού διαστήματος του ενός έτους που διαρκούν οι προσομοιώσεις, συμπίπτουν απόλυτα μεταξύ τους.

### 3<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.60 έως Β.63)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).
- ↪ Εξαιρετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Στο μισό περίπου μήνα μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου, παρατηρείται

μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό με εξαιρετικά μικρό ρυθμό αύξησης των μετατοπίσεων, που πρακτικά σημαίνει σταθεροποίηση. Όπως και στην περίπτωση του αντίστοιχου ζεύγους ιξωδοελαστικών μοντέλων, παρατηρείται ότι συγκριτικά με τα αποτελέσματα του Version A, στο μοντέλο αυτό η χρονική εξέλιξη των μετατοπίσεων κατά τη διάνοιξη οδηγεί τη βραχόμαζα γρηγορότερα στο στάδιο του δευτερογενούς ερπυσμού (μισός μήνας έναντι ενός στο Version A).

- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 99 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 1 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 0,1 %.

#### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Σχήματα 4.17 έως 4.21)

- ↪ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).
- ↪ Συνεχής και πολύ μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Μάλιστα, ο ρυθμός με τον οποίο εκδηλώνονται είναι συνεχώς πολύ υψηλός, ενώ στο δευτερογενή ερπυσμό μεταβαίνει εξαιρετικά γρήγορα, δηλαδή μόλις μερικές ημέρες μετά το σταμάτημα της εκσκαφής.

- ↗ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεων του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, αργεί να εξομαλυνθεί σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου ιξωδοελαστικού μοντέλου.
- ↗ Οι καμπύλες του προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.), οι οποίες προκύπτουν για διάφορα στάδια του χρονικού διαστήματος του ενός έτους που διαρκούν οι προσομοιώσεις, συμπίπτουν σχεδόν απόλυτα μεταξύ τους.

#### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Σχήματα 4.22 έως 4.25)

- ↗ Ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, με σημαντικά υψηλότερες τιμές στην αρχή της διάνοιξης σε σχέση με το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή.
- ↗ Συνεχής και πολύ μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↗ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Σε μερικές μόλις ημέρες μετά την εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου, παρατηρείται μετάβαση στο δευτερογενή ερπυσμό.
- ↗ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 17 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 83 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του

μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 113 %.

#### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.64 έως Β.68)

- ↪ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως 30 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή (δηλ. σε απόσταση 30 m από το μέτωπο).
- ↪ Συνεχής και εξαιρετικά μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Μάλιστα, ο ρυθμός με τον οποίο εκδηλώνονται είναι συνεχώς εξαιρετικά υψηλός.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, αργεί να εξομαλυνθεί σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου ιξωδοελαστικού μοντέλου.
- ↪ Οι καμπύλες του προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.), οι οποίες προκύπτουν για διάφορα στάδια του χρονικού διαστήματος του ενός έτους που διαρκούν οι προσομοιώσεις, συμπίπτουν σχεδόν απόλυτα μεταξύ τους.

#### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.69 έως Β.72)

- ↗ Ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, με σημαντικά υψηλότερες τιμές στην αρχή της διάνοιξης σε σχέση με το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή.
- ↗ Συνεχής και εξαιρετικά μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά υψηλότερες λόγω πλαστικοποίησης.
- ↗ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, δεν επέρχεται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Μάλιστα, ο ρυθμός με τον οποίο εκδηλώνονται είναι συνεχώς πάρα πολύ υψηλός.
- ↗ Σύμφωνα με στοιχεία του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 16 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 84 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 786 %.

#### **4.4.3 Ιξωδοελαστικά Μοντέλα με Υποστήριξη**

#### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Σχήματα 4.26 έως 4.33)

- ↗ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο

ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.

- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους τρεις πρώτους μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, εξομαλύνεται γρηγορότερα σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου μοντέλου χωρίς υποστήριξη.
- ↪ Συνεχής αύξηση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου, και τελικά σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης έπειτα από έξι περίπου μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↪ Οι αρχικές αξονικές δυνάμεις είναι της τάξης των 3 MN, ενώ κατά τη σταθεροποίησή τους είναι περί τα 8 MN. Η τιμή αυτή της σταθεροποίησής τους ταυτίζεται με την τιμή που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989), και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου. Εντούτοις, για ενδιάμεσους χρόνους η κλειστή λύση του Goodman υπερεκτιμά τις ασκούμενες πιέσεις στην επένδυση.
- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.



#### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Σχήματα 4.34 έως 4.41)

- ↗ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.
- ↗ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.
- ↗ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους τρεις πρώτους μήνες που έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου.
- ↗ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 95 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 5 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 33,8 %.
- ↗ Συνεχής αύξηση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου, και τελικά σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης έπειτα από έξι περίπου μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↗ Οι αρχικές αξονικές δυνάμεις είναι της τάξης των 4 – 6 MN, ενώ κατά τη σταθεροποίησή

τους είναι περί τα 8 MN. Η τιμή αυτή της σταθεροποίησής τους ταυτίζεται με την τιμή που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989), και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου. Η μορφή της καμπύλης των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με το χρόνο του μοντέλου αυτού, πλησιάζει περισσότερο την καμπύλη του Goodman, σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου μοντέλου Version A. Και πάλι όμως, για ενδιαμέσους χρόνους η κλειστή λύση του Goodman υπερεκτιμά τις αναπτυσσόμενες πιέσεις.

- ↪ Ανομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, με σημαντικά υψηλότερες τιμές στην αρχή της διάνοιξης σε σχέση με το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Ομοιομορφία επέρχεται με τη σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης, δηλαδή έπειτα από έξι περίπου μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.

#### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.73 έως Β.80)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους δύο πρώτους μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.

- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, εξομαλύνεται γρηγορότερα σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου μοντέλου χωρίς υποστήριξη.
- ↪ Συνεχής αύξηση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου, και τελικά σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης έπειτα από ένα περίπου μήνα που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↪ Οι αρχικές αξονικές δυνάμεις είναι της τάξης των 3 MN, ενώ κατά τη σταθεροποίησή τους είναι περί τα 8 MN. Η τιμή αυτή της σταθεροποίησής τους ταυτίζεται με την τιμή που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989), και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου. Η μορφή της καμπύλης των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με το χρόνο του μοντέλου αυτού σχεδόν ταυτίζεται με την καμπύλη του Goodman, και μόνο στον πρώτο μισό μήνα παρατηρείται υπερεκτίμηση των ασκούμενων δυνάμεων στην επένδυση από την κλειστού τύπου επίλυση του Goodman.
- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.

#### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.81 έως Β.88)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.

- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.
  
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους δύο πρώτους μήνες που έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου.
  
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, σχεδόν το 100 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 127,6 %.
  
- ↪ Οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση κατά τις πρώτες ημέρες μετά το σταμάτημα της εκσκαφής, παρουσιάζουν μία ανωμαλία η οποία δεν είναι ξεκάθαρο σε τι οφείλεται. Παρ' όλα αυτά, στη μία βδομάδα παρατηρείται ότι εξομαλύνονται και παραμένουν σταθερές με την πάροδο του χρόνου, και πιο συγκεκριμένα είναι της τάξης των 8 MN.
  
- ↪ Η σταθερή τιμή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση, ταυτίζεται με την τιμή που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989), και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου.
  
- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.

#### 4.4.4 Ιξωδοπλαστικά Μοντέλα με Υποστήριξη

##### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Σχήματα 4.42 έως 4.48)

- ↗ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.
- ↗ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.
- ↗ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους τρεις πρώτους μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↗ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, εξομαλύνεται γρηγορότερα σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου μοντέλου χωρίς υποστήριξη. Ακόμη, παρατηρείται ότι μεγαλύτερο μέρος των μετατοπίσεων εκδηλώνεται προτού η εκσκαφή φτάσει στο συγκεκριμένο σημείο.
- ↗ Συνεχής αύξηση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου, και τελικά σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης έπειτα από έξι περίπου μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↗ Οι αρχικές αξονικές δυνάμεις είναι της τάξης των 3 MN, ενώ κατά τη σταθεροποίησή τους είναι περί τα 8 MN. Η τιμή αυτή της σταθεροποίησής τους ταυτίζεται με την τιμή

που προκύπτει από το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο, και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου.

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.

#### 4<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Σχήματα 4.49 έως 4.55)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους τρεις πρώτους μήνες που έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου.
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, το 95 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και το υπόλοιπο 5 % στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 33,8 %.

- ↪ Συνεχής αύξηση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου, και τελικά σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης έπειτα από έξι περίπου μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↪ Οι αρχικές αξονικές δυνάμεις είναι της τάξης των 4 – 6 MN, ενώ κατά τη σταθεροποίησή τους είναι περί τα 8 MN. Η τιμή αυτή της σταθεροποίησής τους ταυτίζεται με την τιμή που προκύπτει από το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο, και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου.
- ↪ Ανομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, με σημαντικά υψηλότερες τιμές στην αρχή της διάνοιξης σε σχέση με το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Ομοιομορφία επέρχεται με τη σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης, δηλαδή έπειτα από έξι περίπου μήνες.

#### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version A (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.89 έως Β.95)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους δύο πρώτους μήνες που έχει σταματήσει η εκσκαφή.

- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιαμέσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεων του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, εξομαλύνεται γρηγορότερα σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη του αντίστοιχου μοντέλου χωρίς υποστήριξη. Ακόμη, παρατηρείται ότι μεγαλύτερο μέρος των μετατοπίσεων εκδηλώνεται προτού η εκσκαφή φτάσει στο συγκεκριμένο σημείο.
- ↪ Συνεχής αύξηση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου, και τελικά σταθεροποίηση της εντατικής κατάστασης έπειτα από ένα περίπου μήνα που έχει σταματήσει η εκσκαφή.
- ↪ Οι αρχικές αξονικές δυνάμεις είναι της τάξης των 3 MN, ενώ κατά τη σταθεροποίησή τους είναι περί τα 8 MN. Η τιμή αυτή της σταθεροποίησής τους ταυτίζεται με την τιμή που προκύπτει από το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο, και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου.
- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.

#### 5<sup>η</sup> Ομάδα Παραμέτρων – Version B (Παράρτημα Β – Σχήματα Β.96 έως Β.102)

- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων από την αρχή της διάνοιξης έως μερικά μέτρα από το σημείο στο οποίο σταματάει η εκσκαφή. Στην περιοχή κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο παρατηρείται έντονη αύξηση αυτών, ειδικά με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Συνεχής αλλά πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της παρουσίας του σκυροδέματος.



- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, επέρχεται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων μετά τους τρεις πρώτους μήνες που έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή του συγκεκριμένου σημείου.
- ↪ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Flac 3D, από τις συνολικές μετατοπίσεις του μοντέλου, σχεδόν το 100 % αυτών εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας. Ακόμη, η διαφορά των μετατοπίσεων στη διάρκεια της εκσκαφής του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο Version A που δεν περιλαμβάνει ερπυστική επίλυση κατά τη διάνοιξη, είναι της τάξης του 119,3 %.
- ↪ Οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση παραμένουν σταθερές με την πάροδο του χρόνου από την πρώτη εβδομάδα και έπειτα, και πιο συγκεκριμένα είναι της τάξης των 8 MN.
- ↪ Η σταθερή τιμή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση ταυτίζεται με την με την τιμή που προκύπτει από το αντίστοιχο ιξωδοελαστικό μοντέλο, και αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου.
- ↪ Σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας. Ανομοιομορφία παρατηρείται μόνο κατά την πρώτη εβδομάδα μετά το σταμάτημα της εκσκαφής, στα 20 m περίπου από το σημείο στο οποίο σταματάει (δηλ. σε απόσταση 20 m από το μέτωπο).



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Τρίτη Φάση Προσομοιώσεων – Μελέτη Περίπτωσης

### 5.1 Εισαγωγή

Από τη δεύτερη φάση των προσομοιώσεων, η οποία αποτελεί και το κυριότερο μέρος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά στην επίδραση των παραμέτρων ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  του ιξωδοελαστικού μοντέλου Burgers στο φαινόμενο της σύνθλιψης, στην ερπυστική του μορφή. Επιπροσθέτως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τη φάση αυτή κατασκευάστηκε ένα πρότυπο μοντέλο προσομοίωσης του υπό διερεύνηση φαινομένου.

Το πρότυπο αξισυμμετρικό μοντέλο της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων, αν και δομημένο με συγκεκριμένες παραδοχές, κρίθηκε ότι δύναται να αποτελέσει ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην πρόβλεψη της διαχρονικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων σε ένα υπόγειο έργο. Άλλωστε, όπως είναι ευρέως γνωστό, η χρήση των αριθμητικών αναλύσεων

γενικότερα, αποτελεί πλέον μία πολύ αξιόπιστη μέθοδο επίλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων.

Παρ' όλα αυτά, τα προβλήματα διάνοιξης σήραγγων στην πραγματικότητα δεν είναι αξισυμμετρικά. Η επίδραση της γεωμετρίας της σήραγγας, του βαρυτικού εντατικού πεδίου και της παρουσίας και άλλων μέτρων υποστήριξης εκτός από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, δε δύναται να μελετηθούν με ένα αξισυμμετρικό μοντέλο προσομοίωσης. Ως εκ τούτου, μελετήθηκε για ένα πραγματικό έργο (μελέτη περίπτωσης – case study) η διαδικασία της διάνοιξης και της υποστήριξής του, μέσω ενός τριδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό και μέσω συγκρίσεων που πραγματοποιήθηκαν με επιτόπου μετρήσεις του έργου, κατέστη δυνατό να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα, τόσο γενικότερα για το υπό διερεύνηση φαινόμενο, όσο και ειδικότερα για το σύνολο των προσομοιώσεων της παρούσας Εργασίας. Η φάση αυτή των αναλύσεων της μελέτης περίπτωσης, αποτελεί ουσιαστικά την τρίτη και τελική φάση των προσομοιώσεων της Διπλωματικής Εργασίας.

Για τη μελέτη περίπτωσης της τρίτης φάσης προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από μία υπό κατασκευή σήραγγα. Με τον τρόπο αυτό προσφέρεται η δυνατότητα να γίνουν οι αναλύσεις πιο διαδραστικές, ώστε ανάλογα με τις συνθήκες που προκύπτουν κατά την εκσκαφή, να προσαρμόζονται κατάλληλα και οι αναλύσεις. Ως μελέτη περίπτωσης της παρούσας Εργασίας επιλέχθηκε η οδική σήραγγα της περιοχής «Μαύρα Λιθάρια», η οποία κατασκευάζεται στα πλαίσια του νέου αυτοκινητόδρομου «Ολυμπία Οδός» της Πελοποννήσου.

Όσον αφορά στην προσομοίωση της σήραγγας των Μαύρων Λιθαριών, χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες παράμετροι ερπυσμού από αυτές των παραμετρικών αναλύσεων. Οι παράμετροι ερπυσμού επιλέχθηκαν με γνώμονα τα δεδομένα της συγκεκριμένης σήραγγας, τα οποία συλλεχθήκαν μέσα από τα διαθέσιμα τεύχη της μελέτης που έχει εκπονήσει η εταιρεία ΟΤΜ Α.Τ.Ε. και τα οποία αναλύονται συνοπτικά ακολούθως, τις επιτόπου προσωπικές παρατηρήσεις και τις συζητήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τους επιβλέποντες μηχανικούς του έργου. Σύμφωνα με αυτά, η διάνοιξη της συγκεκριμένης σήραγγας δεν αναμένετο να παρουσιάσει έντονα ερπυστικά φαινόμενα, οπότε

χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι λίγου και πολύ λίγου ερπυσμού, όπως αναλύεται εκτενέστερα στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

## 5.2 Μελέτη Περίπτωσης: Σήραγγα Μαύρων Λιθαριών – Σύνομη Περιγραφή του Έργου

Η δίδυμη σήραγγα της περιοχής «Μαύρα Λιθάρια» όπως προαναφέρεται, αποτελεί τμήμα του νέου αυτοκινητοδρόμου «Ολυμπία Οδός», ο οποίος θα ενώνει τις περιοχές Ελευσίνα, Κόρινθος, Πάτρα, Πύργος και Τσακώνα (Παράρτημα Γ – Σχήμα Γ.1). Η σήραγγα των Μαύρων Λιθαριών, η οποία βρίσκεται υπό κατασκευή, είναι η υπ' αριθμόν 11 του αυτοκινητοδρόμου και χωροθετείται μεταξύ των περιοχών του Δερβενίου και της Ακράτας (Σχήμα 5.1).



**Σχήμα 5.1:** Σκαρίφημα τμήματος του αυτοκινητοδρόμου «Ολυμπία Οδός» (Ολυμπία Οδός Α.Ε.).

Βάσει της μελέτης (ΟΤΜ, 2009) που έχει πραγματοποιηθεί, τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών είναι τα ακόλουθα:

1. Γενική διεύθυνση του άξονα της σήραγγας → Α – Δ
2. Χωροθέτηση στομίων του βόρειου / δεξιού κλάδου → Χ.Θ. 56+006,44 και 57+206,44

3. Χωροθέτηση στομιών του νότιου / αριστερού κλάδου → Χ.Θ. 56+006,16 και 57+224,86
4. Συνολικό μήκος βόρειου κλάδου → 1.200 m (1.160 m υπόγειο τμήμα και 40 m cut & cover)
5. Συνολικό μήκος νότιου κλάδου → 1.220 m (1.190 m υπόγειο τμήμα και 30 m cut & cover)
6. Μέσο ύψος υπερκειμένων βόρειου κλάδου → 40 m (με μέγιστο 60 m)
7. Μέσο ύψος υπερκειμένων νότιου κλάδου → 60 m (με μέγιστο 70 m)
8. Διάμετρος σήραγγας → 12 m (με προσωρινή υποστήριξη)

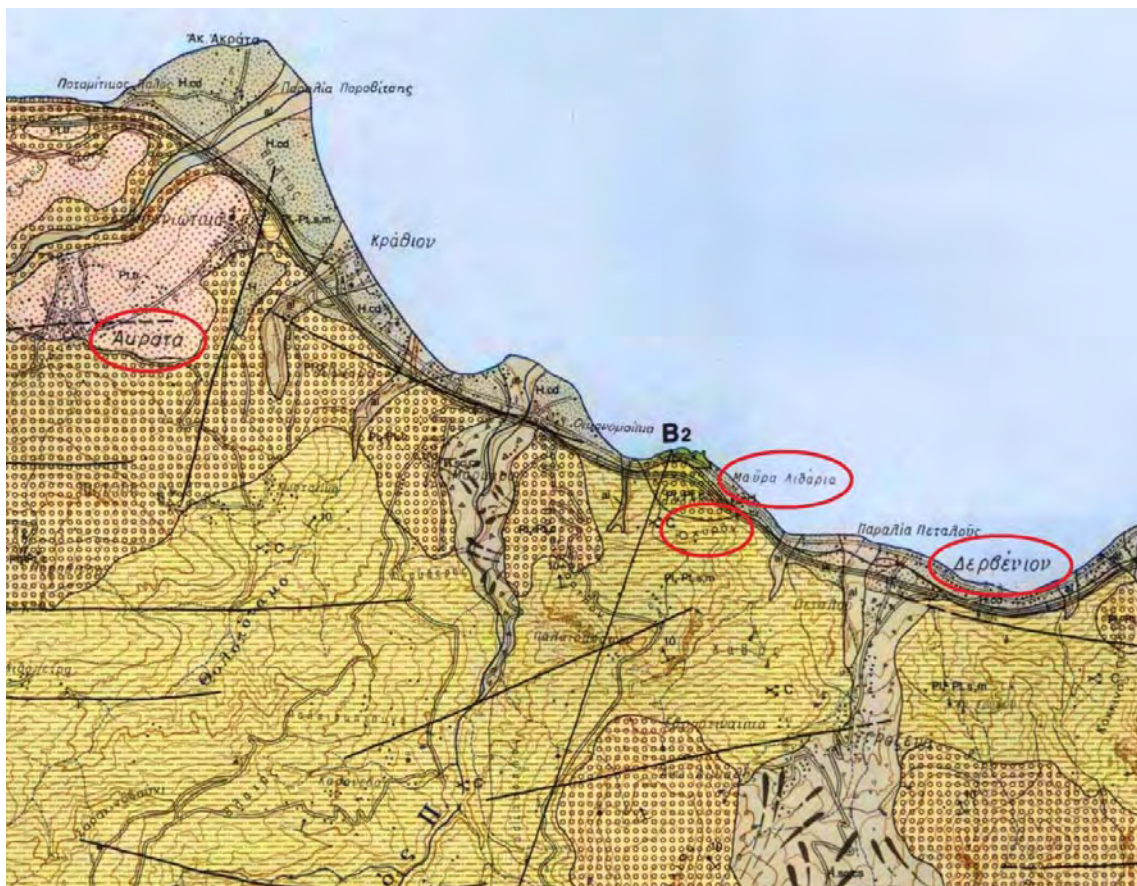
Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Γ επισυνάπτονται η οριζοντιογραφία της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών, καθώς και οι μηκοτομές των δύο κλάδων της (Σχήματα Γ.2 και Γ.3), στις οποίες παρατηρούνται τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

### **5.3 Γεωλογικά Στοιχεία Σήραγγας Μαύρων Λιθαριών**

Η εκσκαφή της σήραγγας 11 της Ολυμπίας Οδού πραγματοποιείται στον παράκτιο λόφο «Οχυρό», πλησίον του Δερβενίου (Σχήμα 5.2). Ο λόφος αυτός δομείται από πλειοκαινικά και πλειστοκαινικά ιζήματα, ενώ στις περιοχές των στομιών εμφανίζονται ολοκαινικές αποθέσεις (πλευρικά κορήματα στα ανατολικά στόμια, και υλικά παλαιών ολισθήσεων και ροών στα δυτικά).

Στην περιοχή όπου πραγματοποιείται η διάνοιξη του κυρίως τμήματος της σήραγγας, κυρίαρχος σχηματισμός είναι οι κυανές μάργες, οι οποίες είναι απολιθωματοφόρες, και στρωσιγενείς. Έχουν επίσης λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών και στρώσεις λιγνίτη ή τύρφης, ενώ περιέχουν και κροκαλοπαγή, κυρίως σε επαφή με ορίζοντες οργανικών απολιθωμάτων. Ο σχηματισμός αυτός αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής, πάνω στο οποίο αποτέθηκαν ασύμφωνα δελταϊκά ριπίδια. Όλοι οι λιθολογικοί σχηματισμοί εμφανίζονται τοπικά αποσαθρωμένοι, γεγονός το οποίο δημιουργεί μία ετερογενή μάζα που συμπεριφέρεται είτε ως βράχος, είτε ως μαλακός βράχος, ή ακόμη και ως έδαφος. Ασυνέχειες υφίστανται, αλλά είναι εν γένει αραιές και με λείες και επίπεδες επιφάνειες, ενώ οι διακεκριμένες

στρώσεις που σχηματίζονται είναι συνήθως παραοριζόντιες, με μία ελαφρά κλίση προς νότο.



**Σχήμα 5.2:** Τμήμα γεωλογικού χάρτη της περιοχής της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (Ι.Γ.Μ.Ε).

Σε μικρότερα βάθη οι μάργες παρουσιάζονται κίτρινες έως ελαφρά κίτρινες, μέτρια αποσπασμένες και ρωγματωμένες και σε εναλλαγές με χαλαρούς ψαμμίτες και αμμώδεις μάργες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην περιοχή των ανατολικών στομιών επικρατούν πλευρικά κορήματα, τα οποία επικάθονται των μαργών. Πρόκειται ουσιαστικά για καστανές άμμους και κροκάλες με χαμηλό ποσοστό περιεκτικότητας λεπτόκοκκων συστατικών. Αντίστοιχα, στην περιοχή των δυτικών στομιών εμφανίζονται υλικά παλαιών διαδοχικών ολισθήσεων και ρών, τα οποία αποτελούνται από άργιλο με κατεστραμμένα θραύσματα συνεκτικών κροκαλοπαγών.

Στη συνέχεια της παραγράφου αυτής πραγματοποιείται μία εκτενέστερη ανάλυση των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών. Η ανάλυση αυτή χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα, τη λιθοστρωματογραφία, την τεκτονική και την υδρογεωλογία.

### **5.3.1 Λιθοστρωματογραφία**

Η περιοχή «Μαύρα Λιθάρια», όπως και όλη η βόρεια παράκτια ζώνη της Πελοποννήσου, ανήκει στο κάτω μέρος τριών κύριων γεωτεκτονικών ενοτήτων της Ελλάδας. Οι ενότητες αυτές από δυτικά προς ανατολικά είναι η Ιόνιος (ή Ανδριατικοϊόνιος), η Τριπόλεως – Γαβρόβου και η Ωλονού – Πίνδου. Στη συγκεκριμένη περιοχή παρατηρείται ότι έχουν αποθεθεί ασύμφωνα ποταμοχειμάρρια και λιμναία ιζήματα, τα οποία είναι ουσιαστικά νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Δεδομένων των παραπάνω και βάσει των γεωλογικών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή της σήραγγας 11 της Ολυμπίας Οδού, οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή των Μαύρων Λιθαριών, με χρονολογική σειρά από τον παλαιότερο προς το νεότερο, είναι οι εξής:

#### Άνω Κρητιδικοί Ασβεστόλιθοι

Πρόκειται για λευκούς, κίτρινους και τεφρούς έως κιτρινότεφρους λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους της γεωτεκτονικής ζώνης της Πίνδου. Εμφανίζονται συμπαγείς και πτυχωμένοι, ενώ παρεμβάλλονται και από ένα πυκνό δίκτυο φλεβών ασβεστίτη. Τοπικά και κυρίως προς τα ανώτερα στρώματά τους, παρατηρούνται αποθέσεις υφάλων. Οι αποθέσεις αυτές εμφανίζονται σε μία στενή περιοχή κοντά στο λιμάνι των Μαύρων Λιθαριών.

#### Κυανές Μάργες

Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από τεφρές έως κυανότεφρες στρωσιγενείς, απολιθωματοφόρες αμμώδεις μάργες. Αυτές περιλαμβάνουν λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών,



στρώσεις λιγνίτη ή τύρφης πάχους 3 – 5 cm και τοπικά ακόμα και 4 m, ενώ περιέχουν και στρώσεις ή φακούς κροκαλοπαγών, κυρίως σε επαφή με οριζόντες οργανικών απολιθωμάτων. Ο σχηματισμός αυτός αντιπροσωπεύει λιμναίες – λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις, οι οποίες αποτελούσαν το υπόβαθρο της περιοχής, πάνω στο οποίο αποτέθηκαν ασύμφωνα δελταϊκά ριπίδια.

#### Κίτρινες Μάργες

Εναλλαγές πάχους έως και 3 m από κίτρινες έως ελαφρά κίτρινες μάργες, αργιλώδεις μάργες, λεπτόκοκκες έως μεσόκοκκες άμμους ή χαλαρούς ψαμμίτες και αμμώδεις μάργες συνθέτουν το σχηματισμό των κίτρινων μαργών. Στα ανώτερα στρώματά τους η ποσότητα των χαλικιών και των κροκάλων αυξάνεται σταδιακά, φτάνοντας το ποσοστό του 30 % έως 40 % και δημιουργώντας έτσι τοπικά πάγκους χαλαρών κροκαλοπαγών. Γενικά εμφανίζονται οξειδωμένες με καστανοκίτρινο χρώμα, ιδιαίτερα σε διατμημένες περιοχές.

#### Κροκαλοπαγή

Πρόκειται για ανοιχτότεφρα συμπαγή πολυγενή κροκαλοπαγή, αποτελούμενα από ασβεστολιθικής προέλευσης και μετρίου μεγέθους (διάμετρος έως 8 cm) κροκάλες, σε εναλλαγές με άμμο, χαλίκια και μάργες. Εντοπίζονται κυρίως στους ανώτερους οριζόντες και έχουν πάχος περί τα 4 m. Τεμάχη και ογκόλιθοι που έχουν προκύψει με ανατροπή από τους ανώτερους στρωματογραφικούς οριζόντες, εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές και κυρίως στην περιοχή των ανατολικών στομιών της σήραγγας.

#### Αποθέσεις Υφάλων

Οι αποθέσεις αυτές περιέχουν μία δομή κοραλλιών, κοράλλινων φυκιών και άλλων οργανισμών, η οποία συνδυάζεται με λεπτομερή ιζήματα και θραύσματα κοχυλιών. Οι αποθέσεις υφάλων της περιοχής των Μαύρων Λιθαριών εμφανίζονται πλησίον του

λιμανιού, μεταξύ των απόλυτων υψομέτρων +2 m και +9,3 m. Ο ύψαλος από τον οποίο προέρχονται δημιουργήθηκε μεταξύ του 10.000 π.Χ. και του 6.000 π.Χ., κατά τη διάρκεια της μεταπαγετωνικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας.

#### Πρόσφατες Παράκτιες Αποθέσεις

Ουσιαστικά ο σχηματισμός αυτός συντίθεται από μη διαστρωματωμένα υλικά θαλάσσιων αποθέσεων, όπως ιλύς, άμμους και επιμηκυμένες κροκάλες διαφόρων μεγεθών. Ακόμη, περιλαμβάνει δελταϊκές αποθέσεις ιλύος, άμμων και λατυπών. Τέλος, στο σχηματισμό αυτό συναντώνται και κροκαλοπαγή, καθώς και ενοποιημένες κροκάλες.

#### Πλευρικά Κορήματα

Τα πλευρικά κορήματα αποτελούνται από καστανές άμμους και κροκάλες με κυμαινόμενο αλλά γενικότερα χαμηλό ποσοστό σε λεπτόκοκκα συστατικά. Περιλαμβάνουν υλικά που έχουν προκύψει με ανατροπή από τους ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες, και πιο συγκεκριμένα τεμάχη και ογκόλιθους συμπαγών κροκαλοπαγών, τα οποία έχουν προέλθει από τοπογραφικά υψηλότερες περιοχές. Εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή των ανατολικών στομιών της σήραγγας και έχουν πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 5 m και 12 m.

#### Υλικά Παλαιών Ολισθήσεων και Ροών

Ο σχηματισμός αυτός εντοπίζεται κυρίως στην περιοχή των δυτικών στομιών της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών. Αποτελείται κυρίως από άργιλο με κατεστραμμένα θραύσματα συνεκτικών κροκαλοπαγών. Το πάχος του είναι της τάξης των 6 m και περιλαμβάνει έναν ενδιάμεσο σκληρότερο και πιο αδρόκοκκο ορίζοντα.

### Υλικά Πρόσφατων Ολισθήσεων

Τόσο τα πλευρικά κορήματα, όσο και τα υλικά παλαιών ολισθήσεων και ρωών υπόκεινται σε δευτερεύουσες αβαθείς ολισθήσεις. Οι δευτερεύουσες αυτές ολισθήσεις εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές του κυρίως και του ανατολικού τμήματος της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών.

#### **5.3.2 Τεκτονική**

Η ευρύτερη περιοχή των Μαύρων Λιθαριών γειτνιάζει άμεσα με τεκτονικές τάφρους που χαρακτηρίζονται από σύγχρονη γεωδυναμική εξέλιξη, όπως η Ελληνική διάυλος από δυτικά και η τάφρος του Κορινθιακού κόλπου από βόρεια. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός την εκδήλωση αυξημένης σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή και αφετέρου, την ύπαρξη έντονων τεκτονικών διεργασιών, αλλά και την εκδήλωση δευτερευόντων φαινομένων όπως λ.χ. κατολισθήσεις, καταπτώσεις, ρευστοποιήσεις κ.τ.λ..

Όσον αφορά στην περιοχή όπου πραγματοποιείται η διάνοιξη της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών, αυτή έχει διαμορφωθεί από τη δράση παράλληλων κανονικών ρηγμάτων ή και διαδοχικών περιστροφικών ολισθήσεων. Στην περιοχή αυτή δρουν ακόμη αρκετές δευτερευούσης σημασίας αβαθείς κατολισθήσεις, οι οποίες όμως εκτιμάται ότι δεν επηρεάζουν τη σήραγγα.

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, εκτιμάται ότι δεν αποκλείεται να δημιουργηθούν προβλήματα λόγω τεκτονισμού κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, αν και το γεγονός αυτό θεωρείται ιδιαίτερα απίθανο.

#### **5.3.3 Υδρογεωλογία**

Από υδρογεωλογικής πλευράς, δεν αναμένεται να δημιουργηθούν προβλήματα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, λόγω του γεγονότος ότι το έργο πραγματοποιείται σε μικρότερο

βάθος από αυτό στο οποίο εμφανίζεται ο υδροφόρος ορίζοντας. Οι κυρίαρχοι σχηματισμοί είναι εν γένει αδιαπέρατοι και η μόνη περίπτωση να εμφανιστούν υπόγεια νερά είναι υπό την παρουσία κροκαλοπαγών ή και ψαμμιτικών ενστρώσεων μέσα στις μάργες. Παρ' όλα αυτά, η οποιαδήποτε παρουσία νερού εκτιμάται ότι θα είναι πολύ μικρής ποσότητας. Σύμφωνα και με τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, μόνο κατά την περίοδο των υψηλών βροχοπτώσεων ενδέχεται να αυξηθεί η ποσότητα των υπογείων υδάτων και πάντα υπό την προϋπόθεση της παρουσίας των σχηματισμών που προαναφέρονται.

#### **5.4 Γεωτεχνικά Στοιχεία Σήραγγας Μαύρων Λιθαριών**

Για την κατασκευή της σήραγγας 11 της Ολυμπίας Οδού στα Μαύρα Λιθάρια πραγματοποιήθηκε μία σειρά γεωτεχνικών ερευνών (ΟΤΜ, 2009), έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι ακριβείς συνθήκες διάνοιξής της και εν συνεχεία να προκύψουν οι ανάλογες κατηγορίες προσωρινής υποστήριξής της.

Το πρόγραμμα των γεωτεχνικών ερευνών της σήραγγας, το οποίο εκπονήθηκε από το Νοέμβριο του 2008 έως τον Ιανουάριο του 2009, περιελάμβανε έξι ερευνητικές γεωτρήσεις στην περιοχή του κυρίως τμήματος της σήραγγας και τρία ερευνητικά φρέατα στην περιοχή των δυτικών στομιών της. Στις έξι αυτές γεωτρήσεις εκτελέστηκαν δοκιμές SPT (Standard Penetration Test) και σε δύο από αυτές δοκιμές PMT (Pressuremeter Test). Επιπλέον, σε αντιπροσωπευτικά δείγματα που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις και τα φρέατα αυτά, πραγματοποιήθηκαν και εργαστηριακές δοκιμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περιοχή είχαν γίνει και στο παρελθόν έξι ακόμα ερευνητικές γεωτρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων λήφθηκαν επίσης υπόψη.

Από τα γενικά γεωλογικά στοιχεία της περιοχής των Μαύρων Λιθαριών που αναλύονται παραπάνω, καθώς και από τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψαν οι ακριβείς σχηματισμοί που αναμένεται να συναντήσει η σήραγγα κατά τη διάνοιξή της. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι οι εξής:

### Μη Διαστρωματωμένες Αποθέσεις / Αδρόκοκκα Υλικά με Συνεκτική Κύρια Μάζα

#### 1. Πλευρικά Κορήματα (Talus Scree – ts)

### Μαργοειδές Υπόβαθρο και Ενστρώσεις

#### 2. Κυανές Μάργες (Blue Marls – ml.b)

- i. Κυανότεφρες Μάργες (Bluish / grey Marls – ml.b)
- ii. Κυανότεφροι Ψαμμίτες (Bluish / grey Sandstones – ml.b.s)
- iii. Κυανότεφρα Κροκαλοπαγή (Bluish / grey Conglomerates – ml.b.c)
- iv. Λιγνίτες (Lignite – ml.b.lg)

#### 3. Κίτρινες Μάργες (Yellow Marls – ml.y)

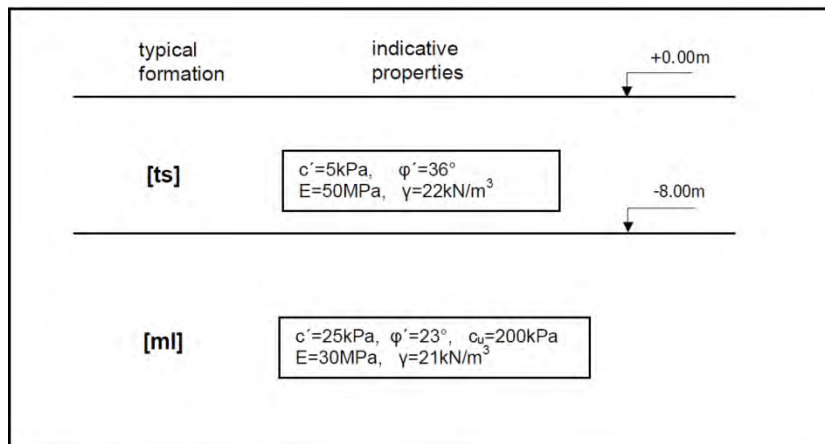
- i. Κίτρινο – καφέ Μάργες (Yellow / brownish Marls – ml.y)
- ii. Κίτρινοι Ψαμμίτες (Yellow Sandstones – ml.y.s)
- iii. Κίτρινα Κροκαλοπαγή (Yellow Conglomerates – ml.y.c)

### Υλικά Παλαιών Ολισθήσεων και Ρωών

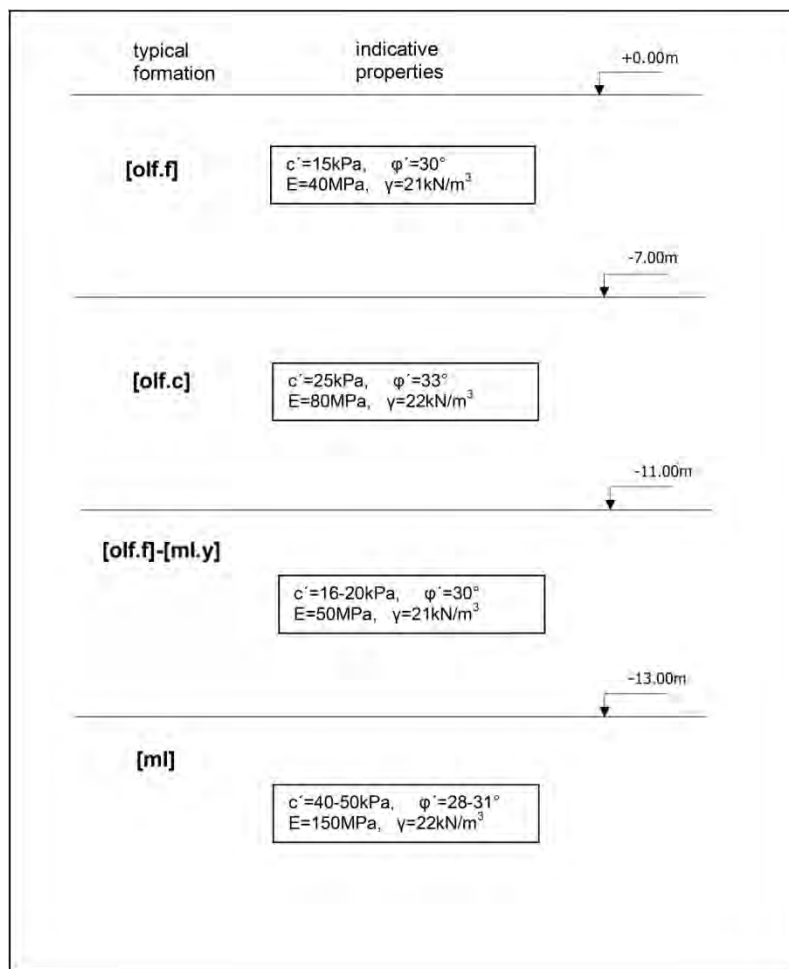
#### 4. Λεπτόκοκκα Υλικά (Fine grained materials – olf.f)

#### 5. Αδρόκοκκα Υλικά (Coarse grained materials – olf.c)

Στις μηκοτομές των δύο κλάδων της σήραγγας 11 που επισυνάπτονται στο Παράρτημα Γ (Σχήμα Γ.3), παρατηρείται η ακριβής θέση των παραπάνω σχηματισμών στην περιοχή όπου πραγματοποιείται η διάνοιξη. Επιπροσθέτως, στα Σχήματα 5.3 και 5.4 επισημαίνεται η διάταξη των σχηματισμών αυτών στις περιοχές των στομιών της σήραγγας.



**Σχήμα 5.3:** Χαρακτηριστική διάταξη των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή των ανατολικών στομίων της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (OTM, 2009).



**Σχήμα 5.4:** Χαρακτηριστική διάταξη των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή των δυτικών στομίων της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (OTM, 2009).

Όπως είναι εμφανές και στις μηκοτομές που επισυνάπτονται, ο κύριος σχηματισμός που αναμένεται να συναντηθεί κατά την εκσκαφή της σήραγγας είναι οι μάργες. Με βάση το σχηματισμό αυτό καθορίστηκαν γεωτεχνικές κατηγορίες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις διάφορες ποιότητες της βραχώμαζας, με τη γεωτεχνική συμπεριφορά και τις κατασκευαστικές απαιτήσεις της καθεμίας από αυτές.

Οι κατηγορίες της βραχώμαζας που δημιουργήθηκαν για τη σήραγγα 11 της Ολυμπίας Οδού είναι τρεις, οι  $M_{III}$ ,  $M_{IV}$  και  $M_V$ . Ακολούθως πραγματοποιείται μία συνοπτική περιγραφή των γεωλογικών χαρακτηριστικών των κατηγοριών αυτών:

#### Κατηγορία $M_{III}$

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τις τεφρές έως κυανότεφρες μάργες με ενστρώσεις ψαμμιτών και στρώσεις ή φακούς κροκαλοπαγών. Το σύνολο των παρεμβολών αυτών μέσα στις μάργες εμφανίζει υψηλότερη αντοχή από αυτές, οι οποίες αποτελούν τον κυρίαρχο σχηματισμό. Ασυνέχειες στην περίπτωση αυτή υφίστανται, αλλά είναι γενικά αραιές και με λείες, επίπεδες επιφάνειες. Οι στρώσεις του μαργαϊκού σχηματισμού είναι εν γένει παραοριζόντιες και με μία ελαφρά κλίση προς νότο.

#### Κατηγορία $M_{IV}$

Στην κατηγορία  $M_{IV}$  ανήκουν οι τεφρές έως κυανότεφρες μάργες με περιορισμένη όμως εμφάνιση ενστρώσεων ψαμμιτών και στρώσεων ή φακών κροκαλοπαγών. Οι ψαμμίτες στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται θρυμματισμένοι, ενώ στα κροκαλοπαγή παρατηρείται μέτριος βαθμός συγκόλλησης. Ακόμη, ο κυρίαρχος σχηματισμός των μαργών παρουσιάζει σχετικά πυκνές ασυνέχειες. Στη  $M_{IV}$  συμπεριλαμβάνονται και κίτρινες έως ελαφρά κίτρινες, μετρίως αποσαθρωμένες και ρωγματωμένες μάργες, οι οποίες εναλλάσσονται με χαλαρούς ψαμμίτες και αμμώδεις μάργες.

### Κατηγορία M<sub>v</sub>

Η κατηγορία M<sub>v</sub> αποτελείται από έντονα θρυμματισμένες (σχεδόν εδαφοποιημένες) τεφρές έως κυανότεφρες μάργες με ενστρώσεις πολύ χαλαρών και μη συγκολλημένων κροκαλοπαγών. Στον κυρίαρχο σχηματισμό εντοπίζονται επίσης και μεγάλου πάχους (έως και 4 m) στρώσεις λιγνίτη ή και τύρφης. Εκτός των παραπάνω, στην κατηγορία αυτή ανήκουν και έντονα αποσαθρωμένες κίτρινες έως ελαφρά κίτρινες μάργες, οι οποίες στις ασυνέχειές τους είναι έντονα οξειδωμένες.

Ως παράμετροι σχεδιασμού των τριών παραπάνω κατηγοριών, δε χρησιμοποιήθηκαν αυτούσια τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, αλλά έγιναν κατάλληλες τροποποιήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων που εξήχθησαν από τις εργαστηριακές δοκιμές μειώθηκαν κατά ένα ποσοστό, το οποίο προέκυψε με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού γεωτεχνικών επιλύσεων. Η ποσοστιαία αυτή μείωση πραγματοποιήθηκε επειδή εάν χρησιμοποιούνταν αυτούσιες οι τιμές των εργαστηριακών δοκιμών, ο σχεδιασμός του έργου δε θα ήταν ρεαλιστικός, καθώς οι πραγματικές γεωτεχνικές παράμετροι της βραχόμαζας διαφέρουν από τις αντίστοιχες των άρρηκτων δειγμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές.

Για τον προσδιορισμό των συνθηκών της βραχόμαζας χρησιμοποιήθηκαν τα συστήματα ταξινόμησης RMR και GSI. Οι βαθμονομήσεις που προέκυψαν από τα δύο αυτά συστήματα ταξινόμησης, χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τα τροποποιημένα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για τον τελικό υπολογισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων των κατηγοριών της βραχόμαζας. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τρεις κατηγορίες που προέκυψαν, συμπεριλαμβανομένων των βαθμονομήσεων των συστημάτων RMR και GSI για την καθεμία από αυτές. Αντίστοιχα, στον Πίνακα 5.2 παρατίθεται το σύνολο των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού που καθορίστηκαν για τις τρεις αυτές κατηγορίες της βραχόμαζας.



**Πίνακας 5.1:** Κατηγορίες βραχόμαζας της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (OTM, 2009).

|                        | RMR range | Equivalent GSI range correlated as GSI=RMR-5 | RMR Characteristic Value | Characteristic GSI Value, deduced from RMR | GSI range evaluated from Hoek-Marinos (2000) graphs | Mean Value of GSI range (as from Hoek-Marinos graph) | GSI overall characteristic value |
|------------------------|-----------|--|--------------------------|--|---|--|----------------------------------|
| <b>M<sub>III</sub></b> | 41-60     | 36-55  | <b>55</b>                | 50   | 50-70   | 60   | <b>55</b>                        |
| <b>M<sub>IV</sub></b>  | 21-40     | 20-35  | <b>38</b>                | 33   | 30-50   | 40   | <b>37</b>                        |
| <b>M<sub>V</sub></b>   | ≤ 20      | <20  | <b>20</b>                | 18   | 15-30   | 23   | <b>20</b>                        |

**Πίνακας 5.2:** Γεωτεχνικές Παράμετροι των κατηγοριών βραχόμαζας της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (OTM, 2009).

| <b>MARL – ΜΑΡΓΑ</b><br>$\sigma_{ci} = 5 \text{ MPa}$ , $m_i = 8$ ,<br>$\gamma = 22 \text{ KN/m}^3$ ,<br>$K_0 = 0.5 \div 1.0$ | <b>Typical High Overburden</b><br>Υψος υπερκειμένων<br><b>H = 60 m</b>    | <b>Typical Low Overburden</b><br>Υψος υπερκειμένων<br><b>H = 20 m</b>     |
|--|---|---|
| <b>M<sub>III</sub></b> RMR <sub>89</sub> = 41÷60<br>characteristic GSI value:<br>GSI = 55                                    | $c' = 150 \text{ kPa}$<br>$\varphi' = 35^\circ$<br>$E = 1500 \text{ MPa}$ | $c' = 100 \text{ kPa}$<br>$\varphi' = 35^\circ$<br>$E = 1500 \text{ MPa}$ |
| <b>M<sub>IV</sub></b> RMR <sub>89</sub> = 21÷40<br>characteristic GSI value:<br>GSI = 38                                     | $c' = 100 \text{ kPa}$<br>$\varphi' = 32^\circ$<br>$E = 500 \text{ MPa}$  | $c' = 60 \text{ kPa}$<br>$\varphi' = 32^\circ$<br>$E = 500 \text{ MPa}$   |
| <b>M<sub>V</sub></b> RMR <sub>89</sub> ≤ 20<br>characteristic values:<br>GSI = 20  | $c' = 60 \text{ kPa}$<br>$\varphi' = 30^\circ$<br>$E = 200 \text{ MPa}$   | $c' = 40 \text{ kPa}$<br>$\varphi' = 30^\circ$<br>$E = 200 \text{ MPa}$   |

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σήραγγα Μαύρων Λιθαριών βρίσκεται υπό κατασκευή. Κατά τη διάνοιξή της παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά της βραχόμαζας είναι γενικώς καλύτερη από την αναμενόμενη. Ως εκ τούτου, καθορίστηκε μία ακόμα κατηγορία βραχόμαζας (M<sub>II</sub>), για την οποία λήφθηκαν υπόψη οι ευμενέστερες συνθήκες που

συναντήθηκαν. Οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού της κατηγορίας  $M_{II}$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

**Πίνακας 5.3:** Γεωτεχνικές Παράμετροι της πρόσθετης κατηγορίας βραχώμαζας  $M_{II}$  της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (OTM, 2010).

| <b>Class M<sub>II</sub> – Typical high overburden 60m</b> |                     |
|---|---------------------|
| $c'$  | 400 kPa             |
| $\varphi$   | 40°                 |
| E   | 2200 MPa            |
| $\gamma$  | 23kN/m <sup>3</sup> |
| $K_o$   | 0.5~1.0             |

## 5.5 Προσωρινή Υποστήριξη και Κατασκευαστική Διαδικασία Σήραγγας Μαύρων Λιθαριών

Η κατασκευαστική διαδικασία και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών καθορίστηκαν σε συνάρτηση με τη γεωτεχνική κατηγοριοποίηση της βραχώμαζας της (OTM, 2009). Ουσιαστικά δηλαδή, προέκυψαν διαφορετικές προτεινόμενες διαδικασίες διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας για καθεμία από τις κατηγορίες της βραχώμαζας που αναλύονται στην προηγούμενη παράγραφο. Για την πραγματοποίηση του συσχετισμού αυτού, λήφθηκαν υπόψη όλων των ειδών τα κριτήρια που συνδέονται με τη συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά τη διάρκεια της κατασκευής, τα οποία μάλιστα δύναται να προσδιοριστούν ακόμα και επιτόπου, εν μέσω της διάνοιξης της σήραγγας. Τα κριτήρια αυτά ήταν τόσο ποσοτικά, όσο κυρίως ποιοτικά, και τα πρώτα μετατράπηκαν και αυτά σε ποιοτικά, όπου αυτό ήταν δυνατό. Το σύνολο των κριτηρίων παρουσιάζεται στον Πίνακα Γ.1 του Παραρτήματος Γ, ενώ ακολούθως παρατίθενται οι βασικές υποθέσεις και τα κύρια δεδομένα από τα οποία προέκυψαν τα κριτήρια αυτά. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας Γ.1

αποτελεί ουσιαστικά τη «φόρμα» συσχετισμού των κατηγοριών της βραχόμαζας με την κατασκευαστική διαδικασία και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.

- ↪ Η συμπεριφορά των σχηματισμών που συναντώνται, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ποιότητα των μαργών και τις ιδιότητές τους, όπως λ.χ. την εμφάνιση και την πυκνότητα των ασυνεχειών τους, το βαθμό της αποσάθρωσής τους κ.α.. Επίσης, εξαιρετικής σημασίας είναι και η έκταση και η κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι ενστρώσεις των ψαμμιτών και οι στρώσεις των κροκαλοπαγών.
- ↪ Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής δεν αναμένονται σημαντικές εισροές υδάτων, καθώς από τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο. Η οποιαδήποτε παρουσία νερών θα συνδυαστεί μόνο με την εμφάνιση ψαμμιτικών ενστρώσεων ή και στρώσεων κροκαλοπαγών. Σε κάθε περίπτωση, το νερό ενδέχεται να επηρεάσει την αντοχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας και ως εκ τούτου, θα πρέπει να υπάρξει η απαραίτητη πρόνοια για την αποστράγγιση των υδάτων κατά τη διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας.
- ↪ Τα υλικά των παλαιών ολισθήσεων και γενικότερα οι τεκτονικές ιδιαιτερότητες της περιοχής (ρήγματα, κατολισθήσεις, ρευστοποιήσεις κ.τ.λ.), λαμβάνονται υπόψη ως κακής ποιότητας υλικά με δυσμενή συμπεριφορά κατά την εκσκαφή.
- ↪ Η εκσκαψιμότητα των σχηματισμών αναμένεται να κυμαίνεται από σχετικά εύκολη έως πολύ δύσκολη (με συνήθη μηχανικό εξοπλισμό). Στην περίπτωση συνάντησης πολύ καλής ποιότητας βραχόμαζας, η χρήση ισχυρότερου μηχανικού εξοπλισμού θα είναι απαραίτητη.
- ↪ Η σταθερότητα του μετώπου, της στέψης, των παρειών της σήραγγας και ενδεχομένως του ανάστροφου τόξου της θα κυμαίνεται αναλόγως της γεωτεχνικής κατηγορίας της βραχόμαζας.

↪ Η ύπαρξη των σχηματισμών των πλευρικών κορημάτων και των υλικών παλαιών ολισθήσεων στην περιοχή της στέψης της σήραγγας ενδεχομένως να διαδραματίσει πολύ σημαντικό ρόλο στη διάνοιξή της, ιδιαίτερα στις περιοχές των στομιών της.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το ύψος των υπερκειμένων δε θεωρήθηκε κρίσιμη παράμετρος για την κατασκευή της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών, καθώς διαφοροποιείται ελάχιστα κατά μήκος της σήραγγας. Για το λόγο αυτό άλλωστε, δε συμπεριλήφθηκε στις ανωτέρω βασικές υποθέσεις και τα κύρια δεδομένα.

### 5.5.1 Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται μία αναλυτική περιγραφή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης που αντιστοιχούν στις κατηγορίες της βραχώμαζας, όπως καθορίστηκαν από τη μελέτη του έργου (ΟΤΜ, 2009). Τα σχέδια των τυπικών διατομών του συνόλου των κατηγοριών παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

#### Κατηγορία M<sub>II</sub>

1. Βήμα προχώρησης 2 – 2,5 m για την άνω ημιδιατομή και 3 – 4 m για τη βαθμίδα
2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 25 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T139, για τη στέψη και τις παρειές της βαθμίδας
3. Πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 4 m, σε πεσσοειδή κάνναβο 3 m επί της περιμέτρου και ανά βήμα προχώρησης (2 – 2,5 m), μόνο για την άνω ημιδιατομή
4. Χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια (Lattice Girders)  $h = 165 \text{ mm}$  (2 Ø25 + 2 Ø25), ανά βήμα προχώρησης (άνω ημιδιατομή και βαθμίδα)
5. Δύο πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου για τη στήριξη των δικτυωτών πλαισίων στη βάση τους, με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 6 m για την άνω ημιδιατομή και 4 m για τη βαθμίδα, ανά βήμα προχώρησης

6. Πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 4 m, ανά βήμα προχώρησης (3 – 4 m), μόνο για τη βαθμίδα
7. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T139, για το ανάστροφο τόξο
8. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο εάν αυτό είναι απαραίτητο
9. Κατασκευή αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο και στην περίμετρο της εκσκαφής (όπου κρίνεται απαραίτητο)

#### Κατηγορία M<sub>III</sub>

1. Βήμα προχώρησης 1,5 – 2 m για την άνω ημιδιατομή και 3 m για τη βαθμίδα
2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 25 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T139, για τη στέψη και τις παρειές της βαθμίδας
3. Πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 4 m, σε πεσσοειδή κάνναβο 3 m επί της περιμέτρου και ανά βήμα προχώρησης (1,5 – 2 m), μόνο για την άνω ημιδιατομή
4. Χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια (Lattice Girders)  $h = 165 \text{ mm}$  (2 Ø25 + 2 Ø25), ανά βήμα προχώρησης (άνω ημιδιατομή και βαθμίδα)
5. Δύο πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου για τη στήριξη των δικτυωτών πλαισίων στη βάση τους, με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 6 m για την άνω ημιδιατομή και 5 m για τη βαθμίδα, ανά βήμα προχώρησης
6. Πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 5 m, ανά βήμα προχώρησης (3 m), μόνο για τη βαθμίδα
7. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T139, για το ανάστροφο τόξο
8. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο εάν αυτό είναι απαραίτητο
9. Κατασκευή αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο και στην περίμετρο της εκσκαφής (όπου κρίνεται απαραίτητο)

### Κατηγορία M<sub>IV</sub>

1. Βήμα προχώρησης 1 – 1,5 m για την άνω ημιδιατομή και 2 – 3 m για τη βαθμίδα
2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T188, για τη στέψη και τις παρειές της βαθμίδας
3. Χαλύβδινες ράβδοι (Ø32, S500) για την προενίσχυση του μετώπου στις 108° του θόλου (ανά 0,3 m) κάθε δεύτερο βήμα προχώρησης, μήκους 6 m
4. Χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια (Lattice Girders)  $h = 165 \text{ mm}$  (2 Ø25 + 2 Ø25), ανά βήμα προχώρησης (άνω ημιδιατομή και βαθμίδα)
5. Δύο πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου για τη στήριξη των δικτυωτών πλαισίων στη βάση τους, με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 8 m για την άνω ημιδιατομή και 6 m για τη βαθμίδα, ανά βήμα προχώρησης
6. Πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου με ράβδους Ø25, S500 και μήκους 6 m, σε πεσσοειδή κάνναβο 1 – 1,5 m και ανά βήμα προχώρησης, μόνο για τη βαθμίδα
7. Προσωρινό ανάστροφο τόξο στην άνω ημιδιατομή, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T188
8. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 25 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T188, για το τελικό ανάστροφο τόξο
9. Ηλώσεις τύπου Fiberglass μήκους 12 m στο μέτωπο, σε κάνναβο 2 x 2 m και με οριακό φορτίο 320 kN
10. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο
11. Κατασκευή αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο και στην περίμετρο της εκσκαφής (όπου κρίνεται απαραίτητο)

### Κατηγορία M<sub>V</sub>

1. Βήμα προχώρησης 1 m για την άνω ημιδιατομή και 2 m για τη βαθμίδα, με κλείσιμο του τελικού ανάστροφου τόξου το πολύ 6 m από τη βαθμίδα)

2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 35 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T188, για τη στέψη και τις παρειές της βαθμίδας
3. Πλήρως τσιμενταρισμένες δοκοί προπορείας – χαλύβδινοι σωλήνες  $\varnothing 114/101$  για την προϋποστήριξη του θόλου, μήκους 12 m και αλληλεπικαλυπτόμενες κατά 4 m
4. Χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια (Lattice Girders)  $h = 230$  mm (4  $\varnothing 25$ ), ανά βήμα προχώρησης (άνω ημιδιατομή και βαθμίδα)
5. Δύο πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου για τη στήριξη των δικτυωτών πλαισίων στη βάση τους, με ράβδους  $\varnothing 25$ , S500 και μήκους 8 m για την άνω ημιδιατομή και 6 m για τη βαθμίδα, ανά βήμα προχώρησης
6. Πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις βράχου με ράβδους  $\varnothing 25$ , S500 και μήκους 6 m, σε κάναβο 1 x 1 m και ανά βήμα προχώρησης, μόνο για τη βαθμίδα
7. Προσωρινό ανάστροφο τόξο στην άνω ημιδιατομή, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 25 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T188
8. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30 cm ενισχυμένο με δύο στρώσεις πλέγματος T188, για το τελικό ανάστροφο τόξο
9. Ηλώσεις τύπου Fiberglass μήκους 12 m στο μέτωπο, σε κάναβο 1,5 x 1,5 m και με οριακό φορτίο 320 kN
10. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5 cm στο μέτωπο ενισχυμένο είτε με ίνες, είτε με πλέγμα, κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης νέας σειράς δοκών προπορείας
11. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σφράγισης σε προηγούμενα βήματα προχώρησης
12. Κατασκευή αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο και στην περίμετρο της εκσκαφής (όπου κρίνεται απαραίτητο)

### 5.5.2 Κατασκευαστική Διαδικασία

Η εκσκαφή της σήραγγας 11 της Ολυμπίας Οδού χωρίζεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη περιλαμβάνει τη διάνοιξη της άνω ημιδιατομής (top heading), ενώ η δεύτερη την εκσκαφή της βαθμίδας (bench) και του ανάστροφου τόξου (invert). Η άνω ημιδιατομή είναι  $65$  m<sup>2</sup> κατά προσέγγιση και έχει ύψος 6,5 m, ενώ η βαθμίδα είναι  $50$  m<sup>2</sup> κατά προσέγγιση και έχει

ύψος 4 m. Δεδομένου του διαχωρισμού αυτού και σύμφωνα με τα μέτρα υποστήριξης που αναλύονται παραπάνω, η κατασκευαστική διαδικασία που ακολουθείται αναλόγως των κατηγοριών  $M_{II}$ ,  $M_{III}$ ,  $M_{IV}$  και  $M_V$ , διαμορφώνεται ως εξής:

### Κατηγορίες $M_{II}$ και $M_{III}$

#### 1. Πρώτη Φάση (Άνω Ημιδιατομή)

- i. Εφαρμογή 1<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm
- ii. Τοποθέτηση πλέγματος T139  
Τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων  
Εγκατάσταση ηλώσεων στο θόλο  
Εφαρμογή 2<sup>ης</sup> – 3<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15 cm  
Εγκατάσταση ηλώσεων στήριξης δικτυωτών πλαισίων
- iii. Τοποθέτηση πλέγματος T139  
Εφαρμογή 4<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 6 cm

#### 2. Δεύτερη Φάση (Βαθμίδα και Ανάστροφο Τόξο)

- i. Εφαρμογή 1<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm
- ii. Τοποθέτηση πλέγματος T139  
Τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων  
Εγκατάσταση ηλώσεων στα πλευρικά τοιχώματα  
Εφαρμογή 2<sup>ης</sup> – 3<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15 cm  
Εγκατάσταση ηλώσεων στήριξης δικτυωτών πλαισίων  
Τοποθέτηση πλέγματος T139  
Εφαρμογή 4<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 6 cm
- iii. Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος δαπέδου



### Κατηγορία Μ<sub>IV</sub>

#### 1. Πρώτη Φάση (Ανω Ημιδιατομή)

Εγκατάσταση των ηλώσεων υποστήριξης μετώπου (κάθε 8 m)

Τοποθέτηση των ράβδων προενίσχυσης στην περίμετρο του θόλου (κάθε δεύτερο βήμα προχώρησης)

i. Εφαρμογή 1<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm

ii. Τοποθέτηση πλέγματος T188

Τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων

Εφαρμογή 2<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm

iii. Εφαρμογή 3<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm

Τοποθέτηση πλέγματος T188

Εγκατάσταση ηλώσεων στήριξης δικτυωτών πλαισίων

Εφαρμογή 4<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 6 cm

iv. Τοποθέτηση πλέγματος T188 και σκυροδέτηση προσωρινού δαπέδου

#### 2. Δεύτερη Φάση (Βαθμίδα και Ανάστροφο Τόξο)

i. Εφαρμογή 1<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm

ii. Τοποθέτηση πλέγματος T188

Τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων

Εφαρμογή 2<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm

Εφαρμογή 3<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm

Εγκατάσταση ηλώσεων σε πεσσοειδή κάρναβο

Εγκατάσταση ηλώσεων στήριξης δικτυωτών πλαισίων

iii. Τοποθέτηση πλέγματος T188

Εφαρμογή 4<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 6 cm

Τοποθέτηση πλέγματος T188 και σκυροδέτηση τελικού δαπέδου

### Κατηγορία M<sub>v</sub>

#### 1. Πρώτη Φάση (Άνω Ημιδιατομή)

Εγκατάσταση των ηλώσεων υποστήριξης μετώπου (κάθε 8 m)

Τοποθέτηση των δοκών προπορείας στην περίμετρο του θόλου

i. Εφαρμογή 1<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm

ii. Τοποθέτηση πλέγματος T188

Τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων

Εφαρμογή 2<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15 cm

iii. Εφαρμογή 3<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm

Τοποθέτηση πλέγματος T188

Εφαρμογή 4<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 6 cm

iv. Τοποθέτηση πλέγματος T188 και σκυροδέτηση προσωρινού δαπέδου

Εγκατάσταση ηλώσεων στήριξης δικτυωτών πλαισίων

#### 2. Δεύτερη Φάση (Βαθμίδα και Ανάστροφο Τόξο)

i. Εφαρμογή 1<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm

ii. Τοποθέτηση πλέγματος T188

Τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων

Εφαρμογή 2<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15 cm

Εφαρμογή 3<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm

Εγκατάσταση ηλώσεων σε κάρναβο 1 x 1 m

iii. Εγκατάσταση ηλώσεων στήριξης δικτυωτών πλαισίων

Τοποθέτηση πλέγματος T188

Εφαρμογή 4<sup>ης</sup> στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 6 cm

iv. Εκσκαφή δαπέδου

Τοποθέτηση πλέγματος T188 και σκυροδέτηση τελικού δαπέδου

Όσον αφορά στην κατασκευαστική διαδικασία των κατηγοριών  $M_{II}$  και  $M_{III}$ , σημειώνεται ότι είναι πανομοιότυπη. Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί ότι τα επιμέρους βήματα των δύο φάσεων της κατασκευής αντιπροσωπεύουν το χρονικό σημείο πραγματοποίησης των εκάστοτε εργασιών σε σχέση με το σημείο του μετώπου, δηλαδή σε σχέση με το βήμα προχώρησης.



**Εικόνα 5.1:** Εκσκαφή της άνω ημιδιατομής της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (Κατηγορία  $M_{III}$ ).

## 5.6 Μοντέλα Τρίτης Φάσης Προσομοιώσεων

Όπως αναφέρεται και στην Εισαγωγή του κεφαλαίου, για τις προσομοιώσεις της μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης δημιουργήθηκε ένα τριδιάστατο μοντέλο στον κώδικα Flac 3D. Το μοντέλο αυτό δομήθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να ληφθούν υπόψη όλες οι συνθήκες και τα δεδομένα που ισχύουν για τη σήραγγα 11 των Μαύρων Λιθαριών. Οι κύριες διαφοροποιήσεις του μοντέλου αυτού σε σχέση με το αξισυμμετρικό μοντέλο εντοπίζονται ουσιαστικά στη γεωμετρία, δηλαδή στον κάρναβο, και στη διαδικασία προσομοίωσης της

εκσκαφής και υποστήριξης. Κατά τα άλλα, η προσέγγιση του φαινομένου της σύνθλιψης έγινε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στα μοντέλα της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων.

Αν και στη συγκεκριμένη σήραγγα δεν αναμένεται να αναπτυχθούν έντονα ερπυστικά φαινόμενα, κύριο στόχο των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης αποτέλεσε ο έλεγχος της λειτουργίας και της ακρίβειας της προσέγγισης με βάση την οποία προσομοιώνεται το φαινόμενο της σύνθλιψης. Επιπροσθέτως, ήταν ο συσχετισμός των γεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών με μία από τις πέντε ομάδες παραμέτρων ερπυσμού  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  των παραμετρικών αναλύσεων της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων. Το σύνολο των παραπάνω πραγματοποιήθηκε μέσω συγκρίσεων με μετρήσεις που έχουν γίνει στην υπό μελέτη σήραγγα.

### 5.6.1 Κατασκευή Μοντέλων Μελέτης Περίπτωσης

Η αλληλουχία των βημάτων κατασκευής των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων, είναι παρόμοια με εκείνη που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των αξισυμμετρικών μοντέλων της δεύτερης φάσης (Κεφάλαιο 4 – Παράγραφος 4.2.1). Οι διαφορές τους δηλαδή εντοπίζονται κυρίως στα βήματα της κατασκευής της γεωμετρίας της σήραγγας και της προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης, τα οποία αποτελούν και τη μεγαλύτερη κατασκευαστική δυσκολία σε ένα τριδιάστατο μοντέλο.

Πιο συγκεκριμένα, στα μοντέλα της δεύτερης και της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων, δεν υπάρχουν ποιοτικές διαφορές στα ακόλουθα στάδια:

1. Ορισμός φαινομένου ερπυσμού (και απενεργοποίησή του), βήματος προχώρησης και κριτηρίου (μοντέλου) επίλυσης
2. Προσδιορισμός βασικών παραμέτρων, απαραίτητων για τη μοντελοποίηση
3. Προσδιορισμός ιδιοτήτων, απαραίτητων για το μοντέλο επίλυσης
4. Ορισμός αρχικών μεγεθών και ενεργοποίηση μοντέλου επίλυσης
5. Πραγματοποίηση αρχικής ελαστικής / ελαστοπλαστικής επίλυσης

Αντιστοίχως, η συνοπτική ανάλυση των βημάτων της αλληλουχίας κατασκευής των μοντέλων της τρίτης φάσης προσομοιώσεων, στα οποία εμφανίζονται ποιοτικές διαφορές, είναι η ακόλουθη:

- ↗ Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μία από τις δύο κύριες διαφοροποιήσεις των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης σε σχέση με τα αξιsymμετρικά μοντέλα, είναι η γεωμετρία του καννάβου τους. Στα μοντέλα της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων δομήθηκε ένας συνδυαστικός κάνναβος, αποτελούμενος από τέσσερις πρότυπες γεωμετρίες του Flac 3D. Οι πρότυπες αυτές γεωμετρίες είναι η «brick» (Κεφάλαιο 4 – Σχήμα 4.2 A), η «cylinder» (Κεφάλαιο 4 – Σχήμα 4.2 B), η «radial cylinder» (Κεφάλαιο 3 – Σχήμα 3.4 A) και η «cylindrical shell» (Κεφάλαιο 3 – Σχήμα 3.4 B). Όπως και στην περίπτωση των μοντέλων της δεύτερης φάσης, ο κάνναβος που κατασκευάστηκε προσομοιώνει το σύνολο της βραχόμαζας, δηλαδή τόσο την περιβάλλουσα, όσο και την προς εκσκαφή. Επίσης, για την αποφυγή ασυμφωνιών στις διεπιφάνειες των επιμέρους καννάβων, πραγματοποιήθηκε μία επικόλληση μεταξύ αυτών, ακριβώς όπως και στην περίπτωση των αξιsymμετρικών μοντέλων. Σημειώνεται ότι η κατασκευή του καννάβου έγινε έτσι, ώστε η προς εκσκαφή βραχόμαζα να αποτελείται από δύο φάσεις (άνω ημιδιατομή και βαθμίδα) και μάλιστα ως διαφορετικό υποσύνολο ζωνών η καθεμία. Τέλος, για τη μορφοποίηση του δαπέδου της κάθε φάσης (προσωρινού και τελικού) σε σχήμα ανάστροφου τόξου, πραγματοποιήθηκαν και ορισμένες μεταφορές συγκεκριμένων κόμβων σε διαφορετική θέση ( $initial\ x\ y\ z\ range\ x'\ y'\ z'$ ).
- ↗ Μία ακόμα ποιοτική, αλλά όχι ουσιαστική διαφορά των μοντέλων δεύτερης και τρίτης φάσης, είναι κατά το στάδιο των ομαδοποιήσεων. Στα μοντέλα μελέτης περίπτωσης πραγματοποιήθηκαν πιο αναλυτικές ομαδοποιήσεις και εκτός από την περιβάλλουσα και την προς εκσκαφή βραχόμαζα, ορίστηκαν και οι δύο φάσεις της διάνοιξης ως ξεχωριστές ομάδες. Για καθεμία από τις δύο αυτές φάσεις ορίστηκαν και επιμέρους ομάδες, ανάλογα με το βήμα προχώρησης της κάθε φάσης.

↪ Η δεύτερη κύρια διαφοροποίηση των μοντέλων της δεύτερης και τρίτης φάσης των προσομοιώσεων είναι στη διαδικασία προσομοίωσης της εκσκαφής και τοποθέτησης της υποστήριξης. Η εκσκαφή των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης ορίστηκε να γίνει τμηματικά, δηλαδή πρώτα να ολοκληρωθεί η εκσκαφή και η τοποθέτηση της προσωρινής επένδυσης της άνω ημιδιατομής και έπειτα, να πραγματοποιηθεί η ίδια διαδικασία για τη βαθμίδα. Η επιλογή της ακολουθίας αυτής έγινε διότι έτσι ορίζεται στη μελέτη της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009). Αξίζει να αναφερθεί ότι στα συγκεκριμένα μοντέλα η διαδικασία της εκσκαφής ολοκληρώθηκε κανονικά καθ' όλο το μήκος του μοντέλου, και δε σταμάτησε σε ένα ενδιάμεσο σημείο, όπως συνέβη στα μοντέλα της δεύτερης φάσης. Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 4 στην αντίστοιχη παράγραφο, για τα αξισυμμετρικά μοντέλα προέκυψαν τέσσερις διαφορετικές διαδικασίες εκσκαφής. Ανάλογα αφενός με το εάν περιλαμβάνουν ή όχι τοποθέτηση συστήματος υποστήριξης και αφετέρου, εάν περιλαμβάνουν ελαστική / ελαστοπλαστική και ερπυστική επίλυση ή μόνο ελαστική / ελαστοπλαστική. Αντιθέτως, επειδή τα μοντέλα της μελέτης περίπτωσης διαθέτουν όλα σύστημα υποστήριξης, προέκυψαν δύο μόνο περιπτώσεις διαδικασίας εκσκαφής, αναλόγως του είδους της επίλυσης. Οι δύο αυτές περιπτώσεις, όσον αφορά στην εφαρμογή της επίλυσης και στην αποθήκευση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων, είναι καθ' όλα όμοιες με τις δύο αντίστοιχες περιπτώσεις των αξισυμμετρικών μοντέλων. Τέλος, το σύστημα υποστήριξης των μοντέλων της τρίτης φάσης ορίστηκε να διαθέτει εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλους πλήρους πάκτωσης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την τοποθέτηση του σκυροδέματος είναι η ίδια με αυτήν που περιγράφεται στην Παράγραφο 4.2.1 για τα μοντέλα της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων. Αναφορικά με τους ήλους πλήρους πάκτωσης, η προσομοίωσή τους γίνεται με γραμμικά στοιχεία δύο κόμβων (`sel cable`). Στους κόμβους αυτούς δίνονται συγκεκριμένες συντεταγμένες (`begin=(x y z)` και `end=(x y z)`), έτσι ώστε να διαμορφωθεί ο απαιτούμενος κάνναβος (απλός ή πεσσοειδής). Ακόμη, για την εφαρμογή των ήλων πλήρους πάκτωσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της διατομής του ήλου, του μέτρου ελαστικότητάς του, της αντοχής του σε εφελκυσμό και σε θλίψη, καθώς και της

αντοχής και της ακαμψίας του ενέματος (`sel shell property xcare, emod, ytens, yco, gr_k, gr_coh`).

- ↳ Η τελευταία διαφορά των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης και των αξισυμμετρικών εντοπίζεται στο στάδιο της τελικής ερπυστικής επίλυσης. Η διαφορά αυτή δεν έγκειται στη διαδικασία της ερπυστικής επίλυσης καθεαυτής, αλλά στην καταγραφή των μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση σε πίνακες. Πιο συγκεκριμένα, στα μοντέλα της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μία πιο αναλυτική καταγραφή των παραπάνω μεγεθών, σε περισσότερα του ενός σημεία της διατομής της εκσκαφής. Η επιλογή αυτή έγινε με γνώμονα το γεγονός ότι ο κάρναβος των μοντέλων αυτών είναι πολύ πιο σύνθετος από τον κάρναβο των μοντέλων της δεύτερης φάσης.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι για τα μοντέλα της μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων κατασκευάστηκαν ορισμένα δευτερεύοντα μοντέλα, αντίστοιχα των δευτερευόντων μοντέλων της δεύτερης φάσης. Όπως αναλύεται και στην Παράγραφο 4.2.1, τα μοντέλα αυτά κατασκευάστηκαν με σκοπό την ανάκτηση, καταγραφή και αποθήκευση πρόσθετων δεδομένων ως προς τις μετατοπίσεις και τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση, σε ένα ενδιάμεσο σημείο της προς εκσκαφή βραχόμαζας (πριν και αφού εκσκαφθεί).

### 5.6.2 Βαθμονόμηση Μοντέλων Μελέτης Περίπτωσης

Κατά την τρίτη και τελική φάση των προσομοιώσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας κατασκευάστηκαν έξι μοντέλα για τις αναλύσεις της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών. Για τα μοντέλα αυτά της μελέτης περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν τόσο σταθερά, όσο και μεταβλητά δεδομένα. Τα μεταβλητά τους δεδομένα είναι το μοντέλο (κριτήριο) επίλυσής τους, οι παράμετροι ερπυσμού τους και τέλος, η διαδικασία εκσκαφής τους.

Από τα έξι μοντέλα που κατασκευάστηκαν τρία είναι ιξωδοελαστικά και τρία ιξωδοπλαστικά. Στα τέσσερα από τα έξι (δύο ιξωδοελαστικά και δύο ιξωδοπλαστικά) χρησιμοποιήθηκε η 2<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων ερπυσμού των παραμετρικών αναλύσεων της δεύτερης φάσης προσομοιώσεων, και στα υπόλοιπα δύο η 3<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων (Κεφάλαιο 4 – Πίνακας 4.1). Τα δύο (ένα ιξωδοελαστικό και ένα ιξωδοπλαστικό) από τα τέσσερα μοντέλα της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, περιέχουν στη διαδικασία εκσκαφής τους μόνο ελαστική και ελαστοπλαστική επίλυση αντίστοιχα, ενώ τα άλλα δύο περιλαμβάνουν πρώτα ελαστική / ελαστοπλαστική και έπειτα ερπυστική. Τα υπόλοιπα δύο μοντέλα, αυτά με τις παραμέτρους της 3<sup>ης</sup> ομάδας, περιλαμβάνουν επίσης τόσο ελαστική / ελαστοπλαστική, όσο και ερπυστική επίλυση στη διαδικασία της εκσκαφής τους. Το σύνολο των μοντέλων της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών παρατίθεται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4:** Μοντέλα μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης προσομοιώσεων, διαχωρισμένα ανά ομάδα παραμέτρων ερπυσμού, είδος μοντέλου επίλυσης και περίπτωση διαδικασίας εκσκαφής.

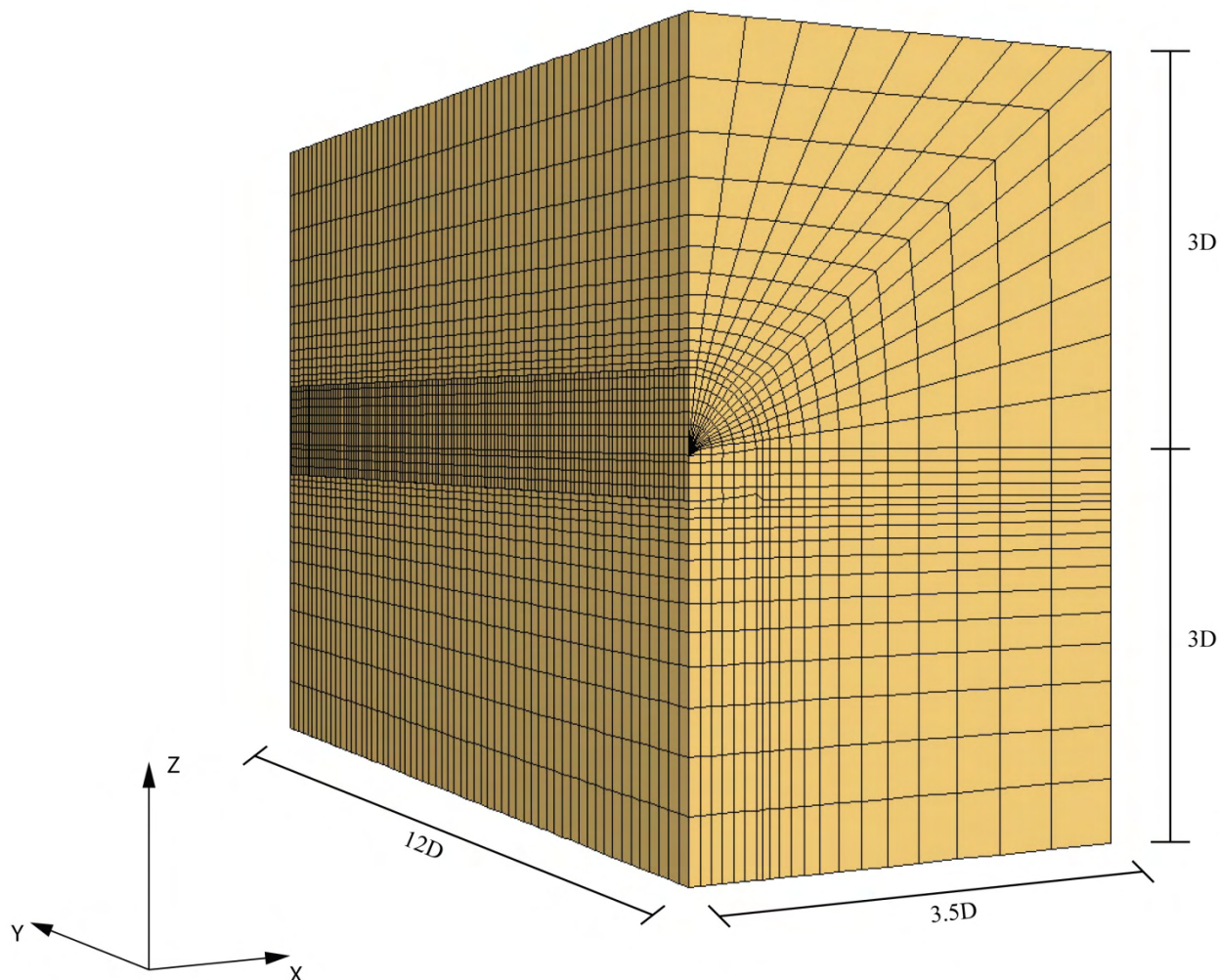
| Μοντέλα Μελέτης Περίπτωσης Τρίτης Φάσης Προσομοιώσεων |                                 |                               |                                     |                                     |
|---|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Ομάδα παραμέτρων ερπυσμού                             | Είδος μοντέλου                  |                               |                                     |                                     |
|   | Ιξωδοελαστικά (Viscoelastic)    |                               | Ιξωδοπλαστικά (Viscoplastic)        |                                     |
|   | Είδος επίλυσης κατά την εκσκαφή |                               |                                     |                                     |
| 2 <sup>η</sup>  | Ελαστική (Vers.A)               | Ελαστική & ερπυστική (Vers.B) | Ελαστοπλαστική (Vers.A)             | Ελαστοπλαστική & ερπυστική (Vers.B) |
| 3 <sup>η</sup>  | Ελαστική & ερπυστική (Vers.C)   |                               | Ελαστοπλαστική & ερπυστική (Vers.C) |                                     |

Όπως είναι φυσικό, τα περισσότερα από τα σταθερά δεδομένα των μοντέλων προέρχονται από τη σήραγγα που αποτελεί τη μελέτη περίπτωσης. Όσον αφορά στη γεωμετρία του συνδυαστικού καννάβου των μοντέλων, για τη δημιουργία της προς εκσκαφή



βραχόμαζας χρησιμοποιήθηκαν από τη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών οι διαστάσεις της διατομής της κατηγορίας  $M_{II}$ . Για την άνω ημιδιατομή έγινε χρήση του προτύπου «cylinder» (Κεφάλαιο 4 – Σχήμα 4.2 Β), ενώ για τη βαθμίδα του «brick» (Κεφάλαιο 4 – Σχήμα 4.2 Α). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα δύο αυτά τμήματα του καννάβου πραγματοποιήθηκαν και ορισμένες μεταφορές κόμβων σε διαφορετική θέση έτσι ώστε να δημιουργηθεί το ανάστροφο τόξο του προσωρινού και του τελικού δαπέδου αντίστοιχα. Περιμετρικά της προς εκσκαφή βραχόμαζας δομήθηκαν δύο ακόμα σύνολα ζωνών πεπερασμένων διαφορών, για την προσομοίωση της βραχόμαζας που αποκαλύπτεται μετά την πραγματοποίηση της εκσκαφής. Τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για τα δύο αυτά σύνολα ζωνών είναι το «cylindrical shell» (Κεφάλαιο 3 – Σχήμα 3.4 Β) για την άνω ημιδιατομή και το «brick» για τη βαθμίδα. Κατ' αντιστοιχία, για την προσομοίωση της υπόλοιπης περιβάλλουσας βραχόμαζας χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο «radial cylinder» (Κεφάλαιο 3 – Σχήμα 3.4 Α) για την πρώτη φάση και το «brick» για τη δεύτερη. Επομένως, με βάση τα παραπάνω η τελική μορφή του καννάβου είναι αυτή του Σχήματος 5.5, δηλαδή ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο.

Εκτός από τις διαστάσεις της διατομής  $M_{II}$  της σήραγγας, οι οποίες επισημαίνονται στα σχετικά σχέδια των τυπικών διατομών που επισυνάπτονται στο Παράρτημα Γ, τα υπόλοιπα απαραίτητα για την κατασκευή του καννάβου μεγέθη, ορίστηκαν υπό το σκεπτικό της απλούστευσης των προσομοιώσεων. Με άλλα λόγια, επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί ο αριθμός των στοιχείων του κάθε μοντέλου και συνεπώς ο χρόνος επίλυσής του, αλλά συγχρόνως η μοντελοποίηση καθεαυτή να είναι επαρκώς αναλυτική. Με γνώμονα το σκεπτικό αυτό, στα μοντέλα της μελέτης περίπτωσης προσομοιώθηκε μόνο η ημιδιατομή της σήραγγας και το αντίστοιχο τμήμα της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Έτσι, σύμφωνα και με το Σχήμα 5.5, το μήκος του καννάβου (άξονας  $y$ ) ορίστηκε να είναι 12 φορές η διάμετρος της σήραγγας, το πλάτος του (άξονας  $x$ ) 3,5 φορές η διάμετρος και το ύψος του (άξονας  $z$ ) 6 φορές η διάμετρος. Σημειώνεται ότι το κέντρο της εκσκαφής ορίστηκε να βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του καννάβου ως προς τον άξονα  $z$  και στην άκρη του ως προς τον άξονα των  $x$ .



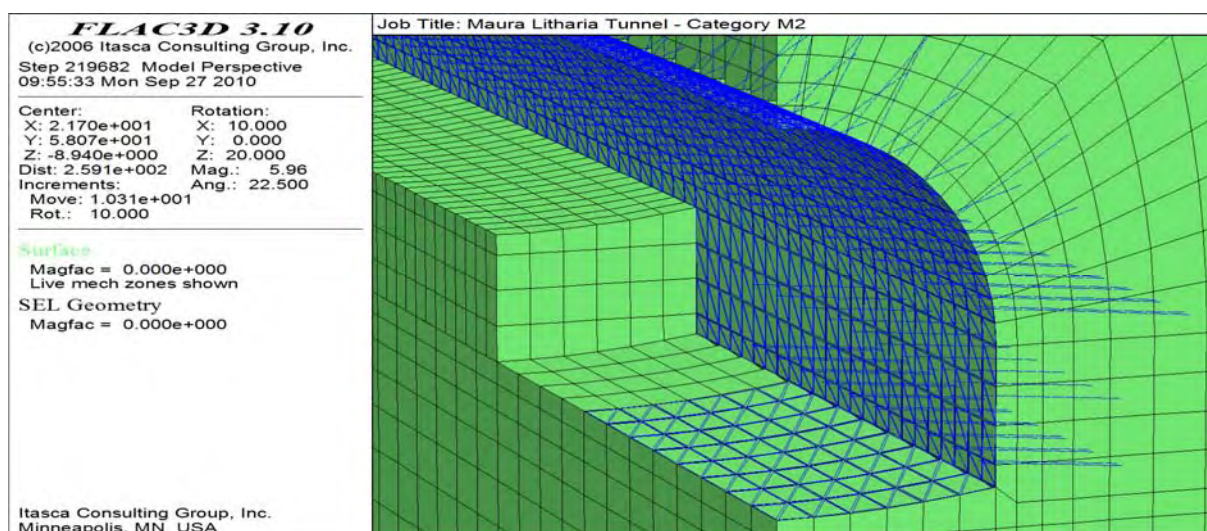
**Σχήμα 5.5:** Ο συνδυαστικός κάνναβος των μοντέλων μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης προσομοιώσεων, με 46.380 ζώνες και 50.058 κόμβους, και η βασική γεωμετρία του.

Όσον αφορά στις διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων του καννάβου, ο κύλινδρος που προσομοιώνει την άνω ημιδιατομή καθορίστηκε να έχει 6 ζώνες του 1,025 m κατά τον άξονα των  $x$ , 120 ζώνες του 1 m κατά τον  $y$  και 15 ζώνες στην περιφέρεια της εκσκαφής. Το περιμετρικό ως προς την άνω ημιδιατομή σύνολο ζωνών ορίστηκε να έχει μια ζώνη 0,6 m κατά τον άξονα  $x$ , 120 ζώνες του 1 m κατά τον  $y$  και 15 ζώνες στην περιφέρεια. Για την υπόλοιπη περιβάλλουσα βραχόμαζα της πρώτης φάσης τέθηκαν 13 ζώνες αυξανόμενου μεγέθους από την εκσκαφή προς τα όρια του μοντέλου, 60 ζώνες των 2 m κατά τον άξονα  $y$  και 15 στην περιφέρεια. Αντίστοιχα, το τμήμα του καννάβου που προσομοιώνει τη δεύτερη φάση ορίστηκε να έχει 6 ζώνες του 1,025 m κατά τον άξονα  $x$ , 4 ζώνες του 1,0575 m κατά

τον  $z$  και 120 ζώνες του 1 m κατά τον  $y$ . Το περιμετρικό ως προς τη βαθμίδα σύνολο ζωνών καθορίστηκε να έχει μια ζώνη 0,6 m κατά τον άξονα των  $x$ , 4 ζώνες του 1,0575 m κατά τον άξονα  $z$  και 120 ζώνες του 1 m κατά τον  $y$ . Ως προς το τμήμα του καννάβου που προσομοιώνει την υπόλοιπη περιβάλλουσα βραχώμαζα της δεύτερης φάσης, αυτό δεν κατασκευάστηκε από ένα μόνο σύνολο ζωνών τύπου «brick», αλλά από τέσσερα. Έτσι, για τα δύο σύνολα που βρίσκονται κάτω από τη βαθμίδα και την περίμετρο της τέθηκαν 6 ζώνες του 1,025 m και μια ζώνη 0,6 m αντίστοιχα κατά τον άξονα  $x$ , 60 ζώνες των 2 m κατά τον άξονα των  $y$  και 13 ζώνες αυξανόμενου μεγέθους από την εκσκαφή προς το κάτω όριο του μοντέλου. Στο σύνολο δεξιά από τη βαθμίδα και την περίμετρό της ορίστηκαν 4 ζώνες του 1,0575 m κατά τον άξονα των  $z$ , 60 ζώνες των 2 m κατά τον  $y$  και 13 ζώνες αυξανόμενου μεγέθους από την εκσκαφή προς το πλαϊνό όριο του μοντέλου. Τέλος, το διαγώνιο ως προς τη δεύτερη φάση σύνολο ζωνών ορίστηκε να έχει 60 ζώνες των 2 m κατά τον άξονα  $y$  και 13 ζώνες αυξανόμενου μεγέθους από την εκσκαφή προς τα όρια του μοντέλου. Βάσει των στοιχείων αυτών προέκυψε ένα μοντέλο 46.380 ζωνών και 50.058 κόμβων (Σχήμα 5.5). Αξίζει να σημειωθεί ότι όπως και στα αξισυμμετρικά μοντέλα, για την επικόλληση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των επιμέρους καννάβων ορίστηκε μέγιστη απόσταση τα  $10^{-3}$  m και μέγιστη γωνία η  $1^\circ$ .

Ακολούθως παρουσιάζεται συνοπτικά το σύνολο των υπολοίπων σταθερών δεδομένων των μοντέλων της τρίτης φάσης προσομοιώσεων, τα οποία προέρχονται από τη σήραγγα 11 της Ολυμπίας Οδού. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα βήματα προχώρησης της πρώτης και της δεύτερης φάσης εκσκαφής που είναι 2 m και 4 m αντίστοιχα, καθώς και η ευρύτερη διαδικασία κατασκευής και υποστήριξης της σήραγγας. Όσον αφορά στο σύστημα της προσωρινής υποστήριξης, εφαρμόστηκαν τα μέτρα της κατηγορίας  $M_{II}$  που περιγράφονται στην Παράγραφο 5.5.1, από τα οποία όμως εξαιρέθηκαν τα χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια και τα πλέγματα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Εικόνα 5.2). Η εξαίρεση αυτή έγινε διότι τα στοιχεία αυτά στην πραγματικότητα δε συνεισφέρουν ιδιαίτερα στην ακαμψία της επένδυσης και συνεπώς δε διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση του φαινομένου της σύνθλιψης. Κατά τα άλλα, η κατασκευαστική διαδικασία που ορίστηκε στα μοντέλα της μελέτης περίπτωσης είναι πανομοιότυπη με

αυτήν που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.5.2 για την κατηγορία  $M_{II}$ . Επιπλέον, από την κατηγορία αυτή λήφθηκαν και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχώμαζας (Πίνακας 5.3), έτσι ώστε οι προσομοιώσεις να συμφωνούν κατά το δυνατό περισσότερο με τη μελέτη της σήραγγας. Οι παράμετροι αυτές, μαζί με τη γωνία διαστολής ( $\psi = 0^\circ$ ) και το λόγο Poisson ( $\nu = 0,33$ ) που δεν αναγράφονται στον παραπάνω πίνακα, χρησιμοποιήθηκαν ως ιδιότητες των μοντέλων Burgers και CVISC, βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε το σύνολο των προσομοιώσεων της τρίτης φάσης. Μέσω των παραμέτρων αυτών καθορίστηκε και το αρχικό εντατικό πεδίο της βραχώμαζας, το οποίο αποτελεί ένα απαραίτητο αρχικό μέγεθος για τη μοντελοποίηση.



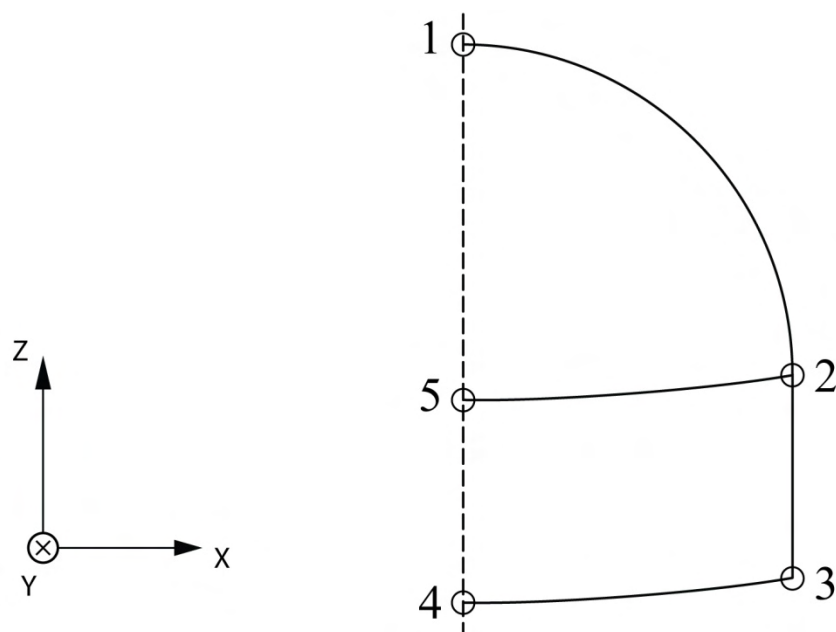
**Εικόνα 5.2:** Τμήμα του καννάβου των μοντέλων μελέτης περίπτωσης, με τα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόστηκαν.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι στα μοντέλα που προσομοιώνουν τη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών επρόκειτο να εφαρμοστεί η κατηγορία  $M_{IV}$  ή και η  $M_V$  αντί της  $M_{II}$ . Οι δύο αυτές κατηγορίες αντιστοιχούν σε χειρότερης ποιότητας βραχώμαζα, άρα και σε δυσμενέστερες συνθήκες διάνοιξης και ισχυρότερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Πρόκειται δηλαδή για συνθήκες μοντελοποίησης πλησιέστερες προς το φαινόμενο της σύνθλιψης, είτε στην ακαριαία, είτε στην ερπυστική του μορφή. Επειδή όμως κατά την εκσκαφή της σήραγγας, η οποία όπως προαναφέρεται βρίσκεται υπό

κατασκευή, παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά της βραχόμαζας είναι καλύτερη από ότι υπολογιζόταν, τελικά χρειάστηκε να αναπροσαρμοστούν οι προσομοιώσεις και έτσι χρησιμοποιήθηκε η κατηγορία M<sub>II</sub>.

Από τα σταθερά δεδομένα των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης που δεν αντλήθηκαν από τη σήραγγα των Μαύρων Λιθαριών, τα περισσότερα ουσιαστικά προέρχονται από τα αξισυμμετρικά μοντέλα της δεύτερης φάσης των προσομοιώσεων. Τα δεδομένα που είναι ίδια με τα αντίστοιχα των αξισυμμετρικών μοντέλων είναι αυτά του σταδίου της ελαστικής / ελαστοπλαστικής και ερπυστικής επίλυσης και της αποθήκευσης των δεδομένων της διαδικασίας εκσκαφής, καθώς και του σταδίου της τελικής ερπυστικής επίλυσης της μοντελοποίησης. Το σύνολο των δεδομένων αυτών παρατίθεται στην Παράγραφο 4.2.2 του Κεφαλαίου 4.

Τα τελευταία σταθερά δεδομένα των μοντέλων της τρίτης φάσης, τα οποία δεν προέρχονται είτε από τη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών, είτε από τα μοντέλα της δεύτερης φάσης, είναι αυτά του σταδίου του ορισμού των συνοριακών συνθηκών του μοντέλου και του σταδίου της καταγραφής και αποθήκευσης των τελικών αποτελεσμάτων αυτού. Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν, αυτές είναι κινηματικές και συνίστανται στην παρεμπόδιση των οριζοντίων μετατοπίσεων στα πλευρικά όρια και την παρεμπόδιση των κατακόρυφων μετατοπίσεων στη βάση του μοντέλου. Όσον αφορά δε στην καταγραφή των μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση κατά το στάδιο της τελικής ερπυστικής επίλυσης, αυτές ορίστηκαν να πραγματοποιηθούν σε συνολικά πέντε σημεία της διατομής της σήραγγας (Σχήμα 5.6). Τα σημεία αυτά είναι στη στέψη της σήραγγας (Σημείο 1), στον πόδα της παρειάς της άνω ημιδιατομής (Σημείο 2), στον πόδα της παρειάς της βαθμίδας (Σημείο 3), στο κέντρο του τελικού ανάστροφου τόξου (Σημείο 4) και στο κέντρο του προσωρινού ανάστροφου τόξου (Σημείο 5).

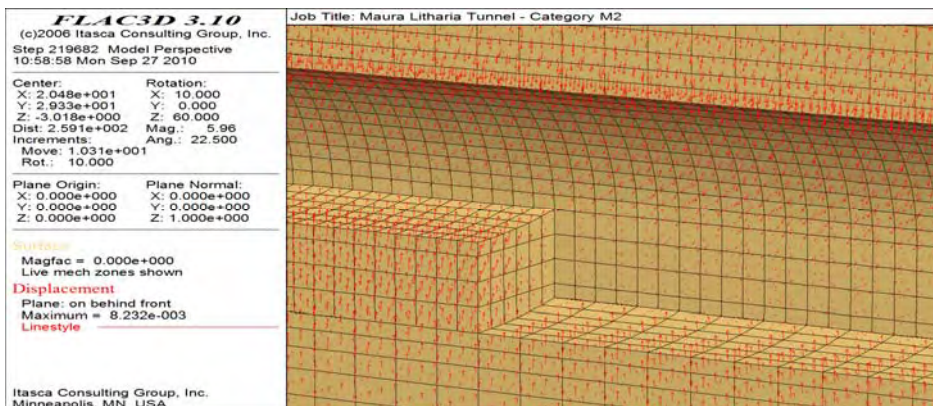


**Σχήμα 5.6:** Σημεία καταγραφής αποτελεσμάτων των μοντέλων μελέτης περίπτωσης της τρίτης φάσης προσομοιώσεων.

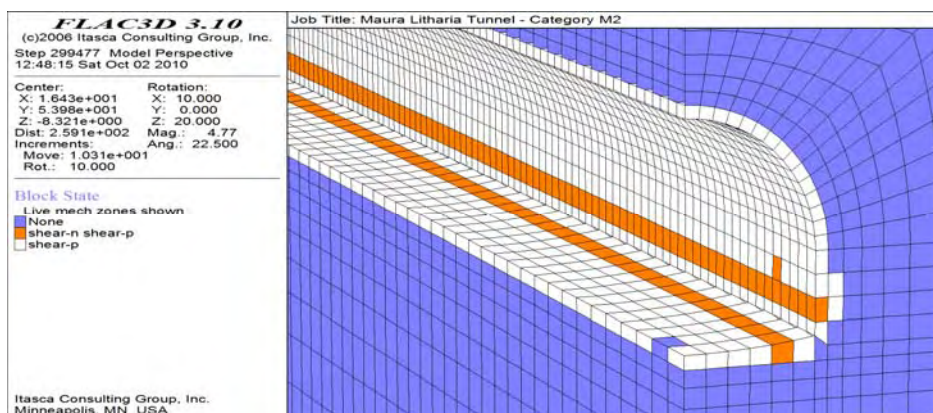
## 5.7 Αποτελέσματα Τρίτης Φάσης Προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή παρατίθεται ένα μέρος των διαγραμμάτων των μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων της επένδυσης που προέκυψαν για το σύνολο των μοντέλων της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων (Σχήματα 5.7 έως 5.40). Τα διαγράμματα αυτά είναι ενδεικτικά και τα υπόλοιπα επισυνάπτονται στο Παράρτημα Γ της παρούσας Εργασίας. Σημειώνεται ότι ορισμένα από τα παρακάτω διαγράμματα (και αντίστοιχα του Παραρτήματος Γ) αφορούν ένα ενδιάμεσο σημείο της εκσκαφής. Το σημείο αυτό βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του καννάβου της προς εκσκαφή βραχόμαζας κατά τον άξονα  $y$  (στα 60 m από τα 120 m), που αντιστοιχεί στο  $30^\circ$  βήμα προχώρησης της πρώτης φάσης διάνοιξης της σήραγγας (βήμα προχώρησης άνω ημιδιατομής 2 m), και στο  $15^\circ$  της δεύτερης (βήμα προχώρησης βαθμίδας 4 m). Μάλιστα, σε κάποια από αυτά τα διαγράμματα πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων προσομοίωσης με τις επιτόπου μετρήσεις της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών. Τέλος, παρουσιάζονται και αντιπροσωπευτικές εικόνες των μοντέλων μελέτης περίπτωσης (Εικόνες 5.3 έως 5.14).

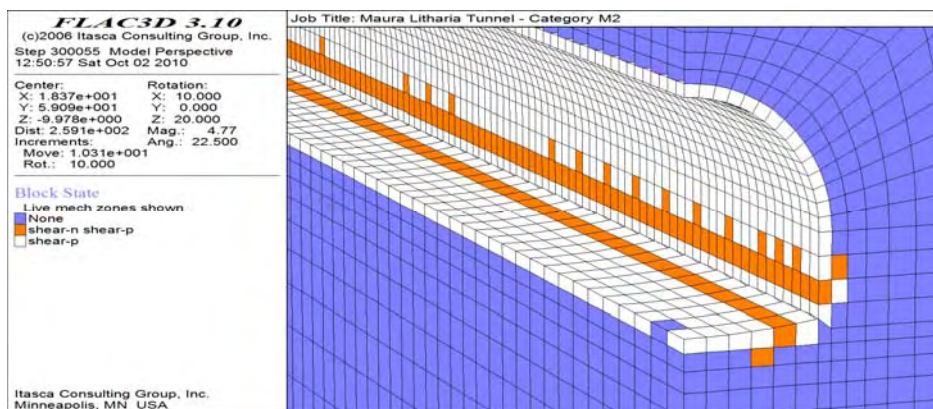




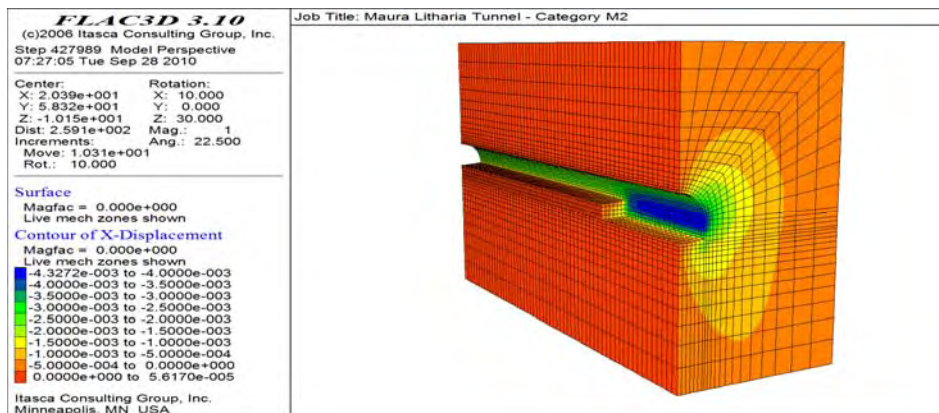
Εικόνα 5.3: Ενδεικτική κατανομή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης.



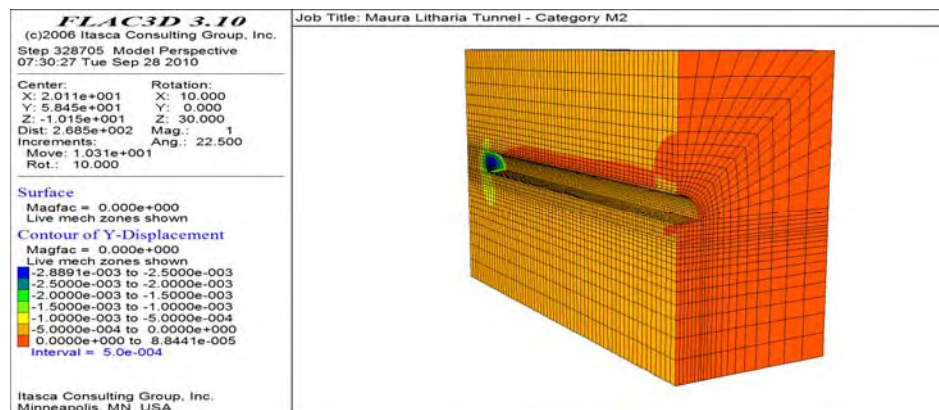
Εικόνα 5.4: Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής (Μοντέλο Vers.B).



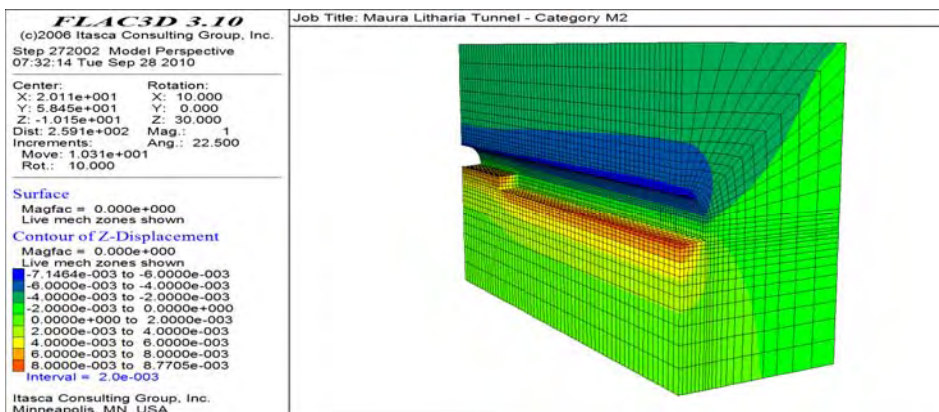
Εικόνα 5.5: Ενδεικτική διαμόρφωση της πλαστικής ζώνης των ιξωδοπλαστικών μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής (Μοντέλο Vers.B).



Εικόνα 5.6: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, κατά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B).

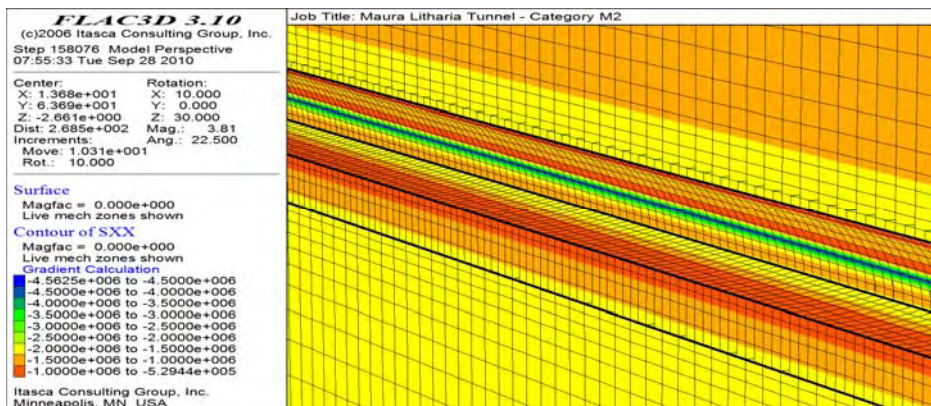


Εικόνα 5.7: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα y των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, κατά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C).

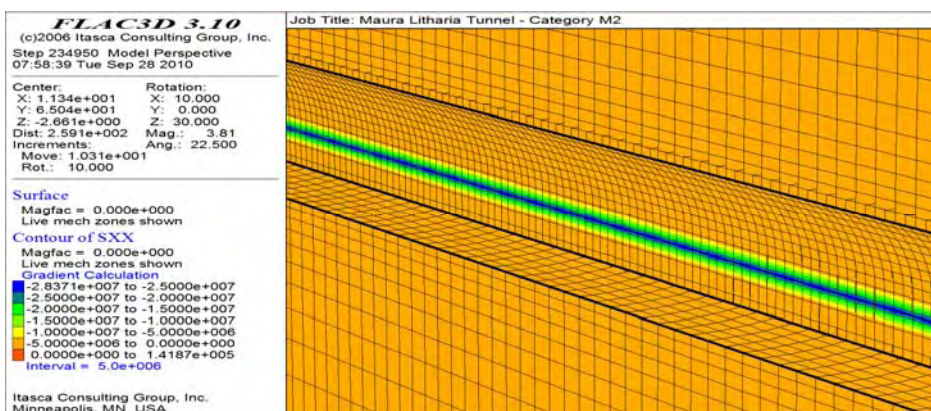


Εικόνα 5.8: Ενδεικτική κατανομή των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα z των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, κατά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B).

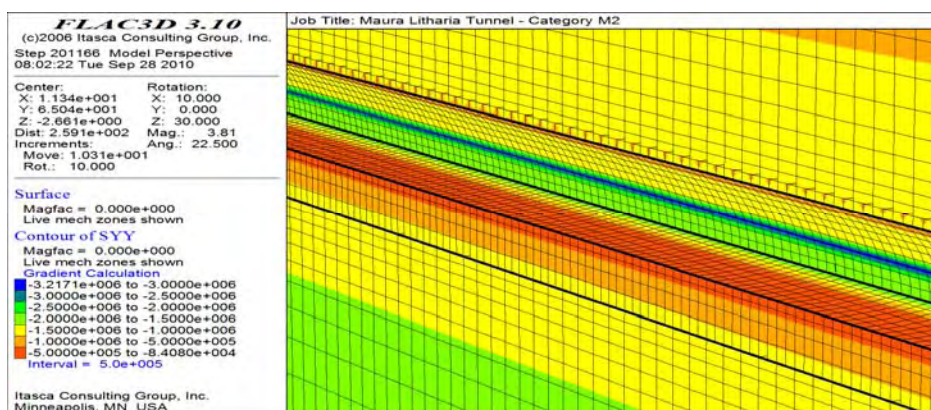




Εικόνα 5.9: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A).

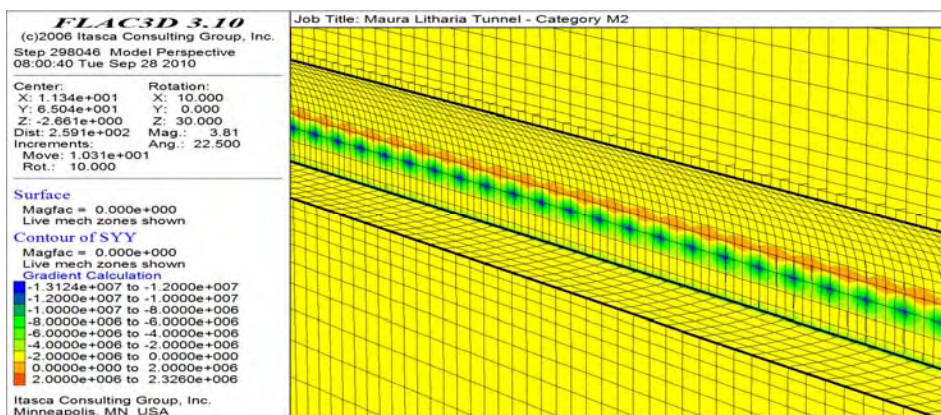


Εικόνα 5.10: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα x των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A).

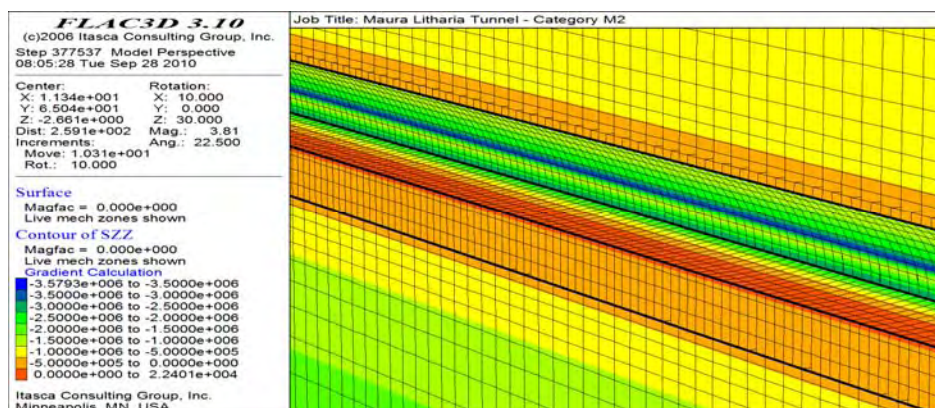


Εικόνα 5.11: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα y των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B).

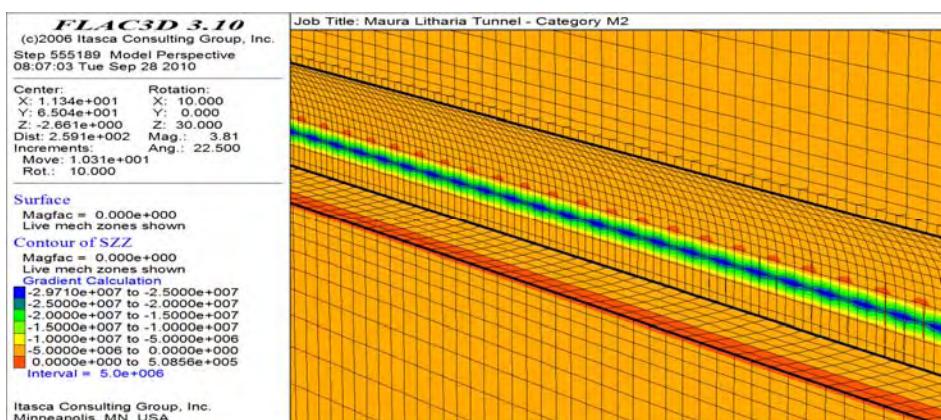




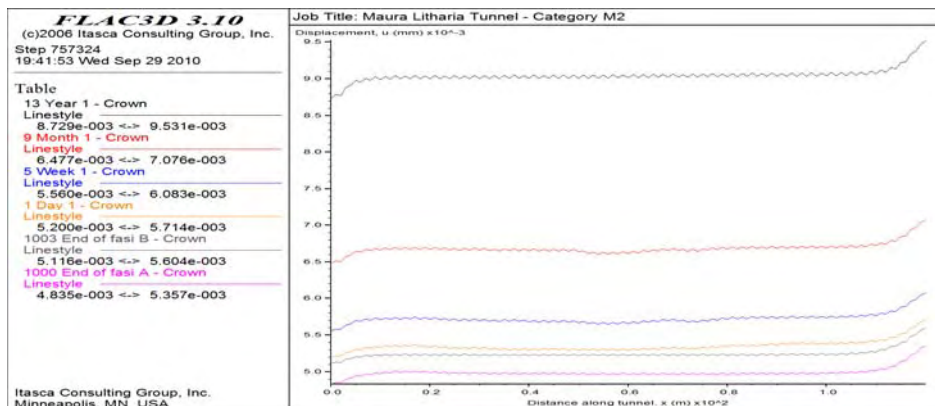
Εικόνα 5.12: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα γ των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B).



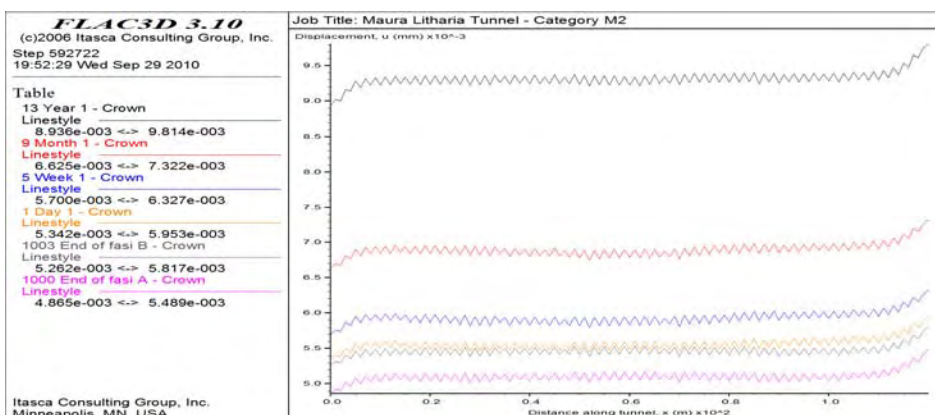
Εικόνα 5.13: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Α φάσης (Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C).



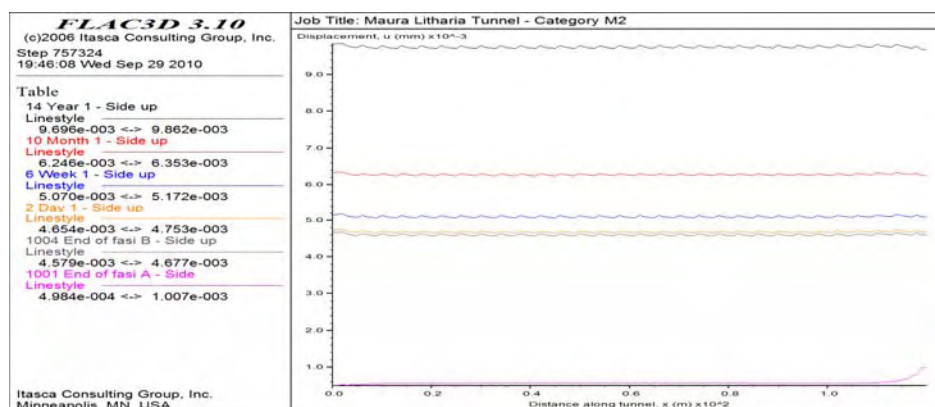
Εικόνα 5.14: Ενδεικτική κατανομή των κυρίων τάσεων κατά τον άξονα z των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, μετά την εκσκαφή της Β φάσης (Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers. C).



Σχήμα 5.7: Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.

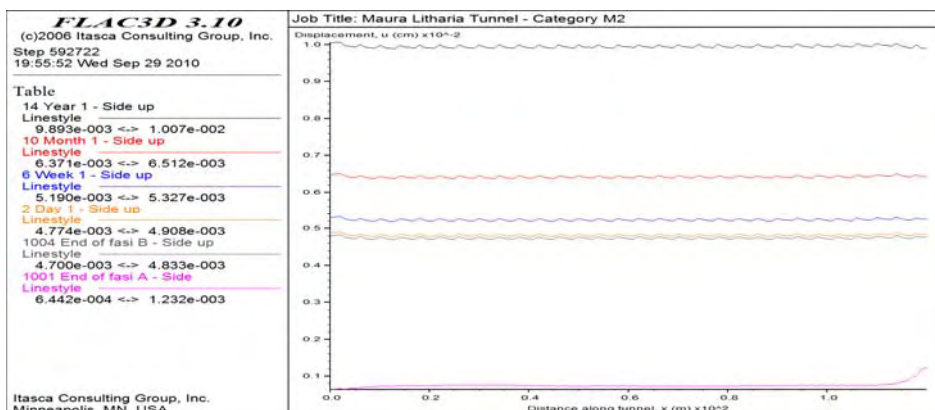


Σχήμα 5.8: Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.

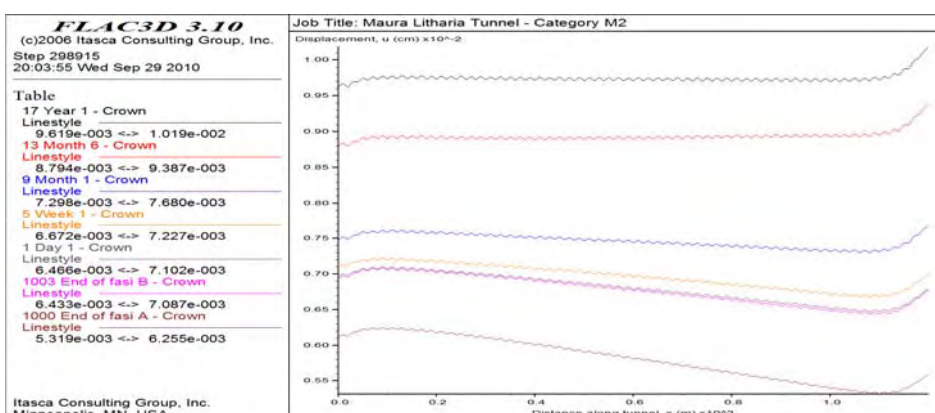


Σχήμα 5.9: Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.

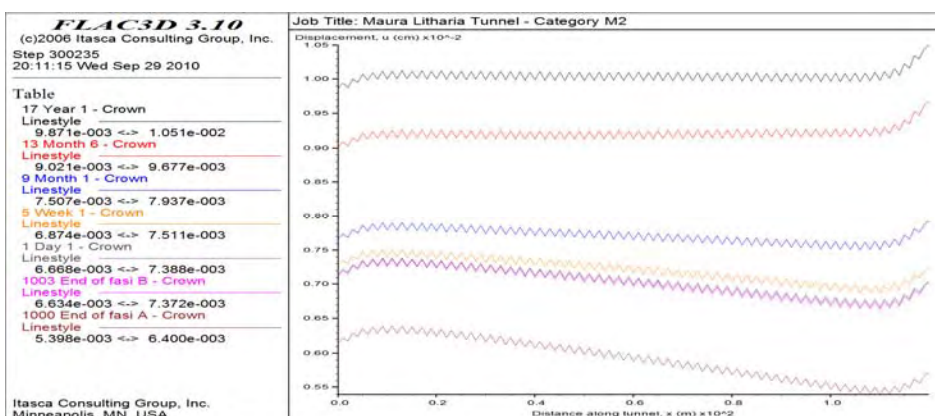




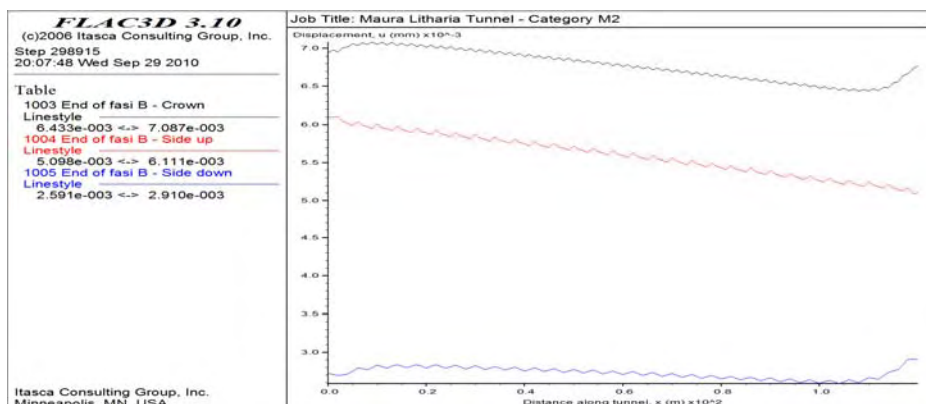
**Σχήμα 5.10:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.



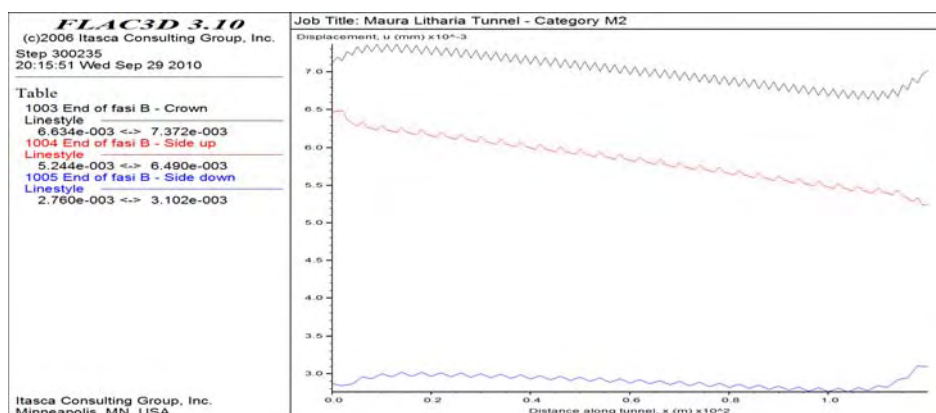
**Σχήμα 5.11:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



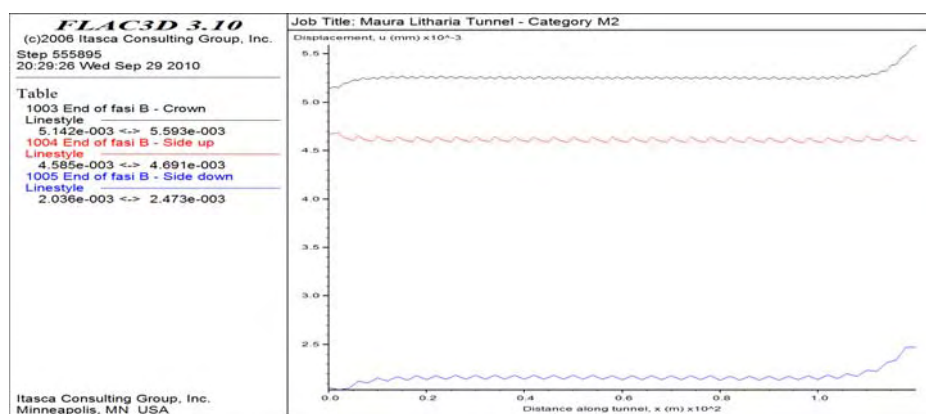
**Σχήμα 5.12:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.



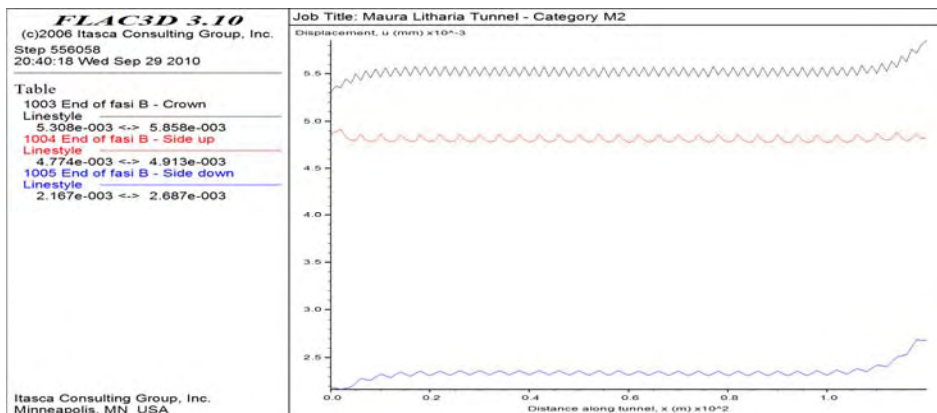
**Σχήμα 5.13:** Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



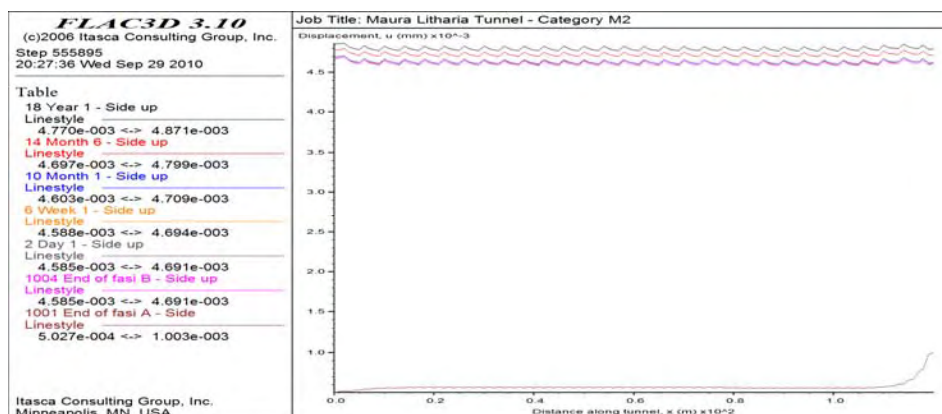
**Σχήμα 5.14:** Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.



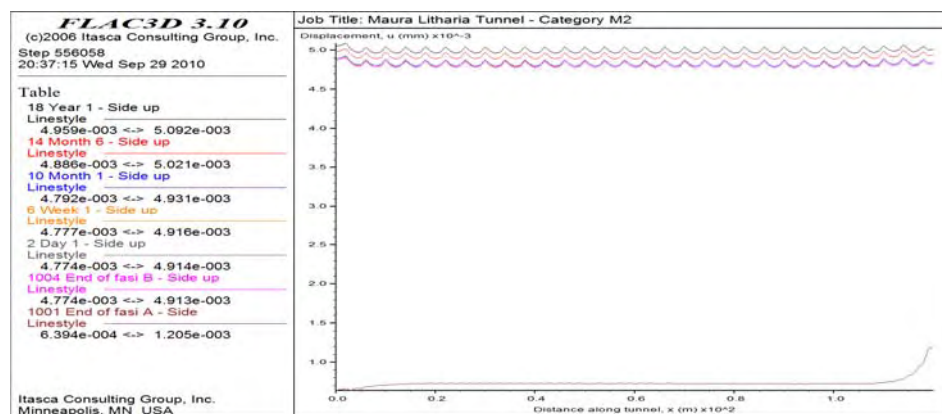
**Σχήμα 5.15:** Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ' όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



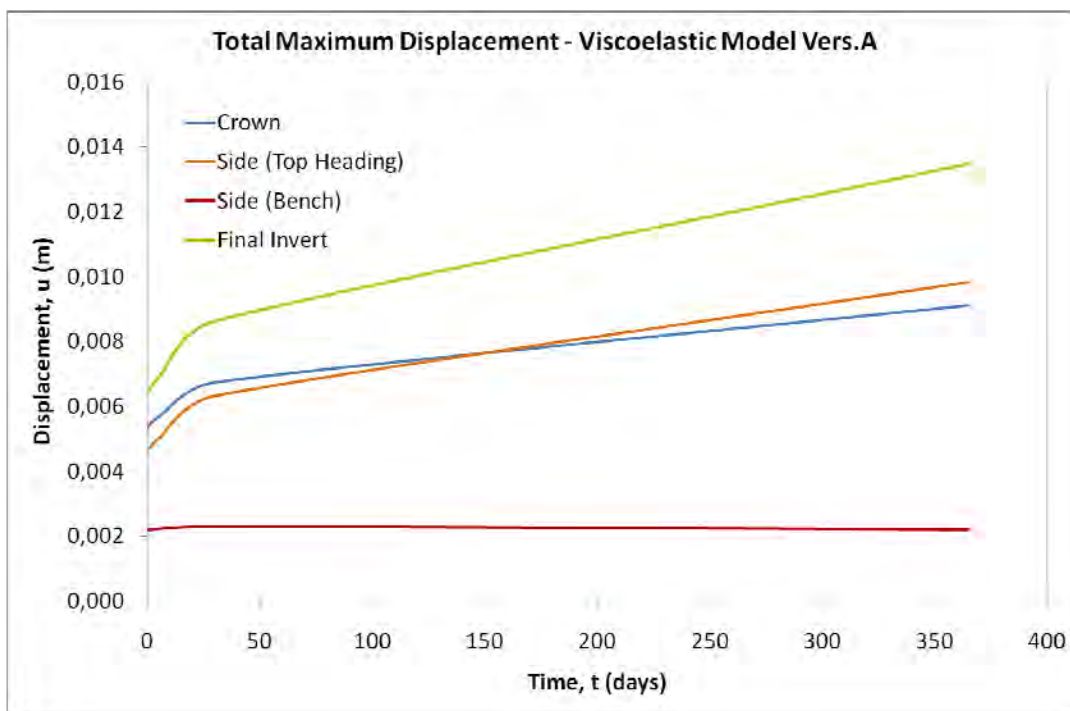
**Σχήμα 5.16:** Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



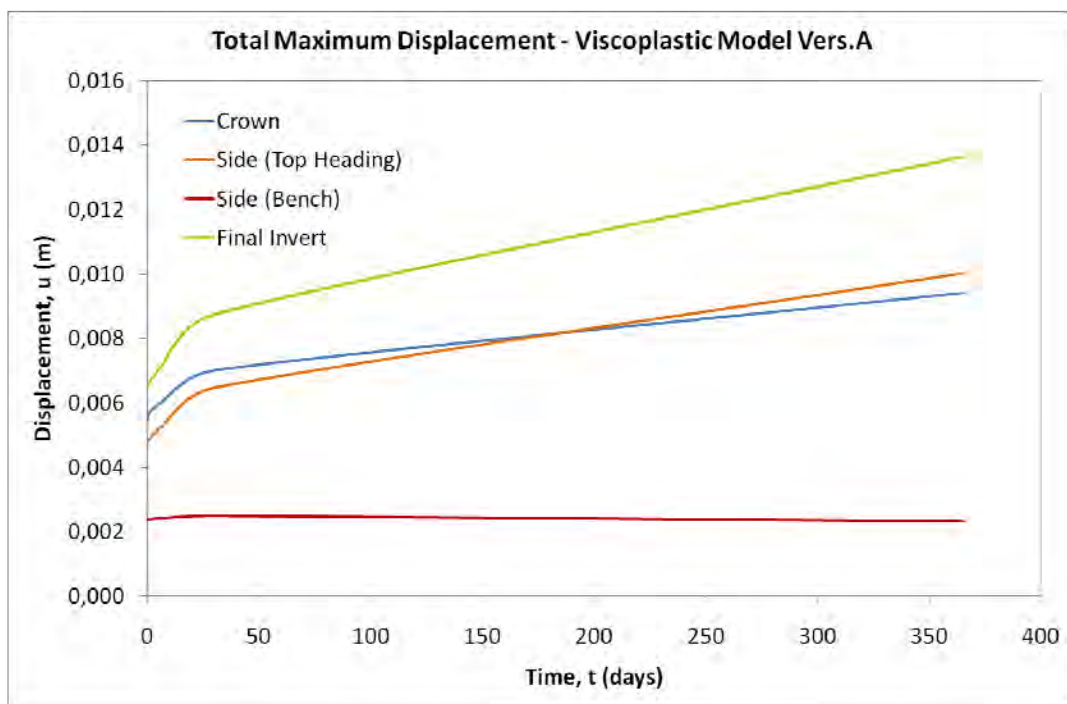
**Σχήμα 5.17:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



**Σχήμα 5.18:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Σχήμα 5.6 - Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.

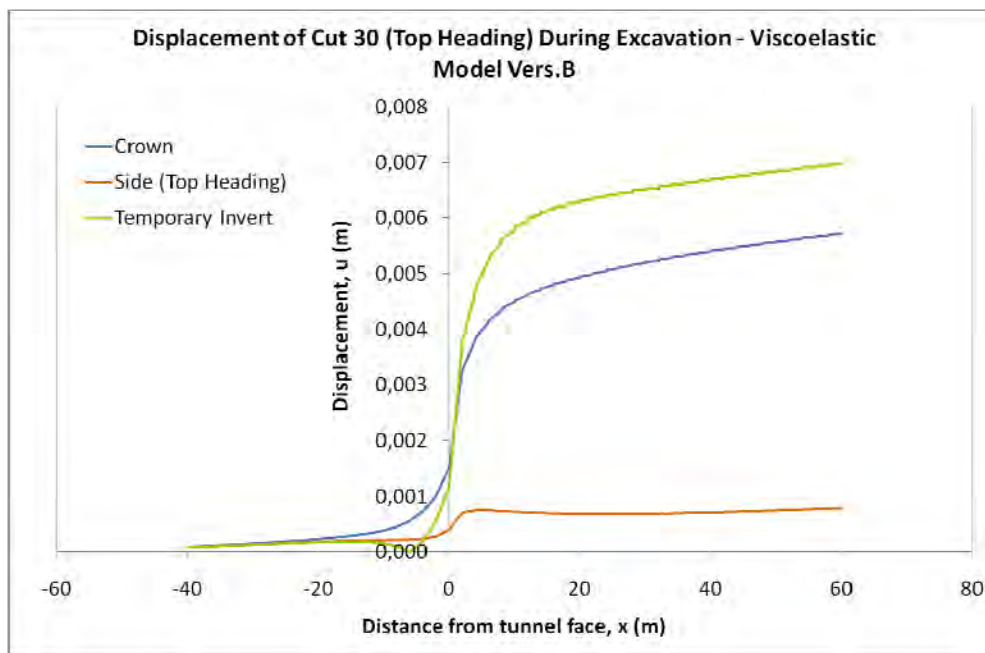


**Σχήμα 5.19:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4), σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.

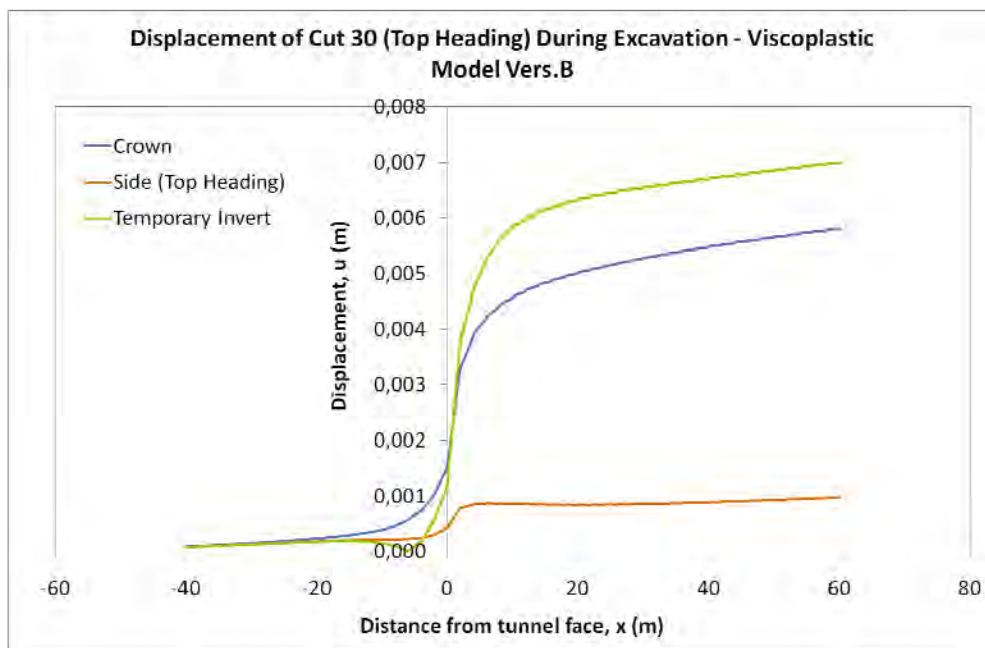


**Σχήμα 5.20:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4), σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.



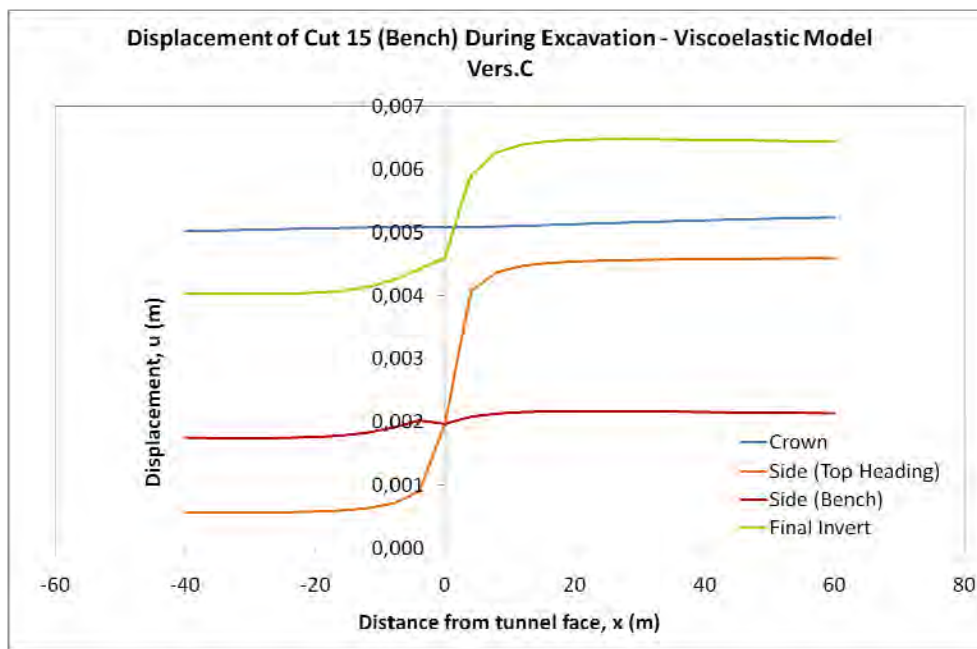


**Σχήμα 5.21:** Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.

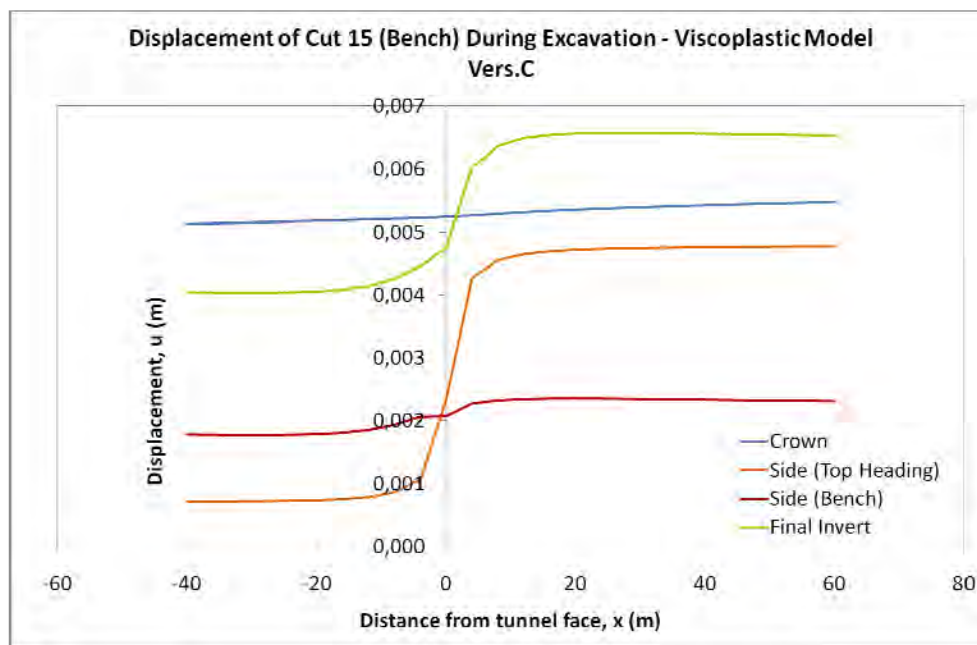


**Σχήμα 5.22:** Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.

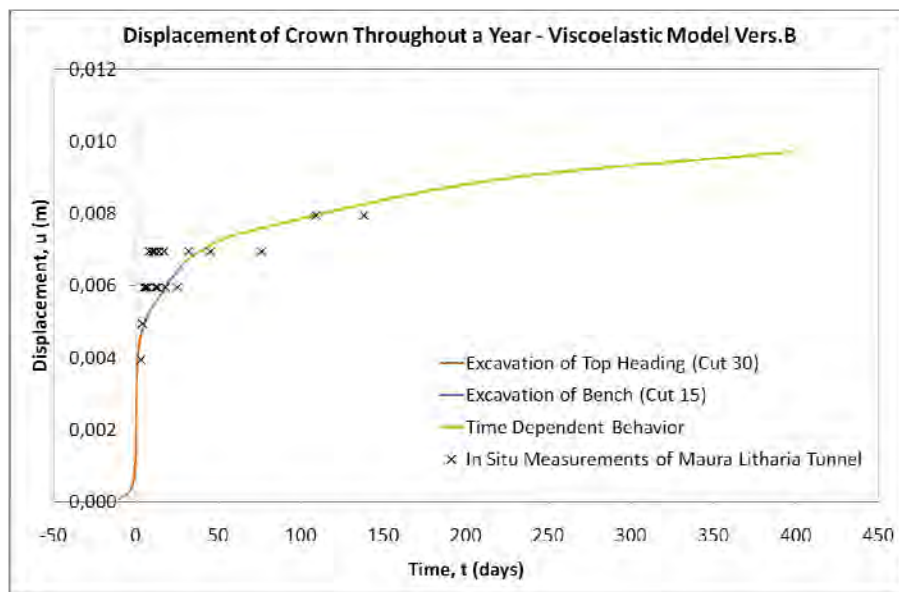




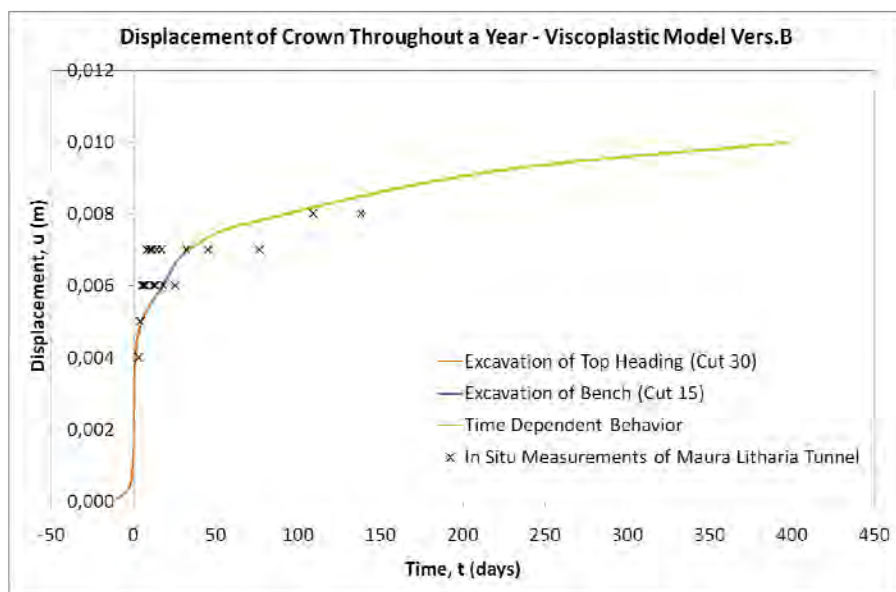
**Σχήμα 5.23:** Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



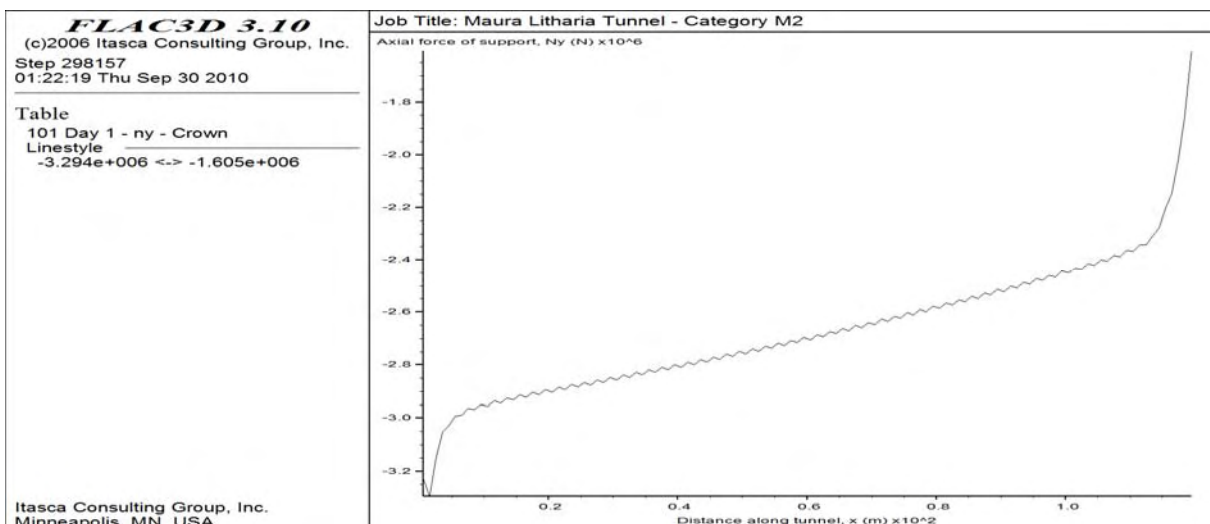
**Σχήμα 5.24:** Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



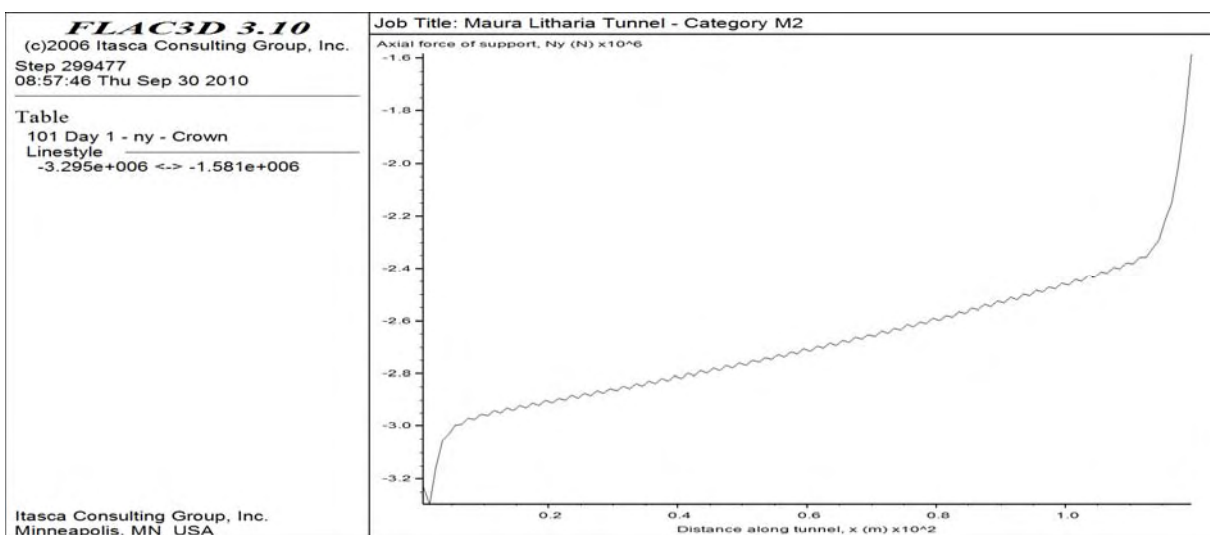
**Σχήμα 5.25:** Σύγκριση της εξέλιξης των μετατοπίσεων στη στέψη (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B, σε σχέση με τις επιτόπου μετρήσεις της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών.



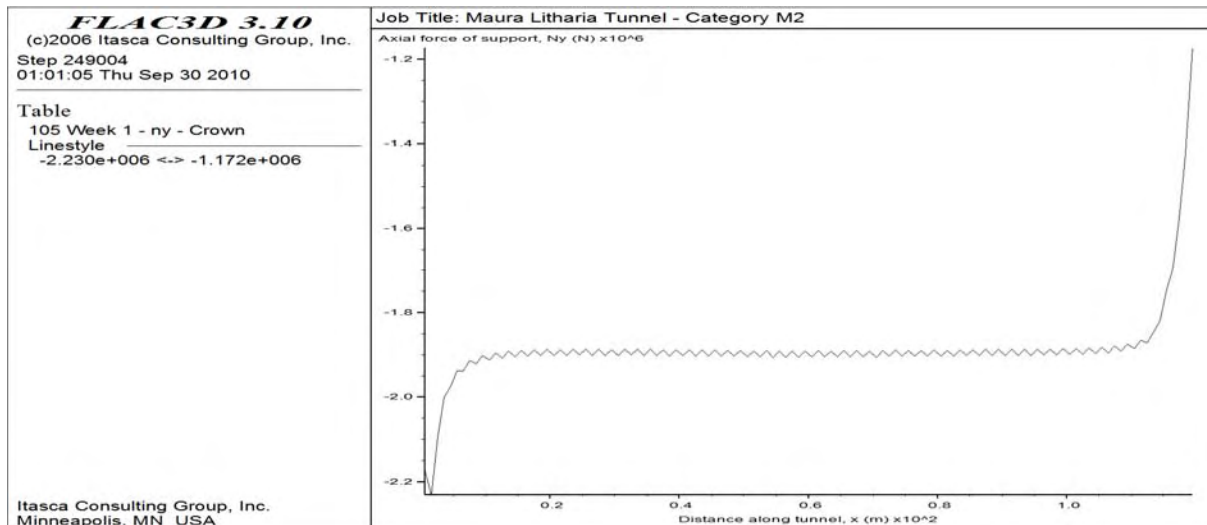
**Σχήμα 5.26:** Σύγκριση της εξέλιξης των μετατοπίσεων στη στέψη (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B, σε σχέση με τις επιτόπου μετρήσεις της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών.



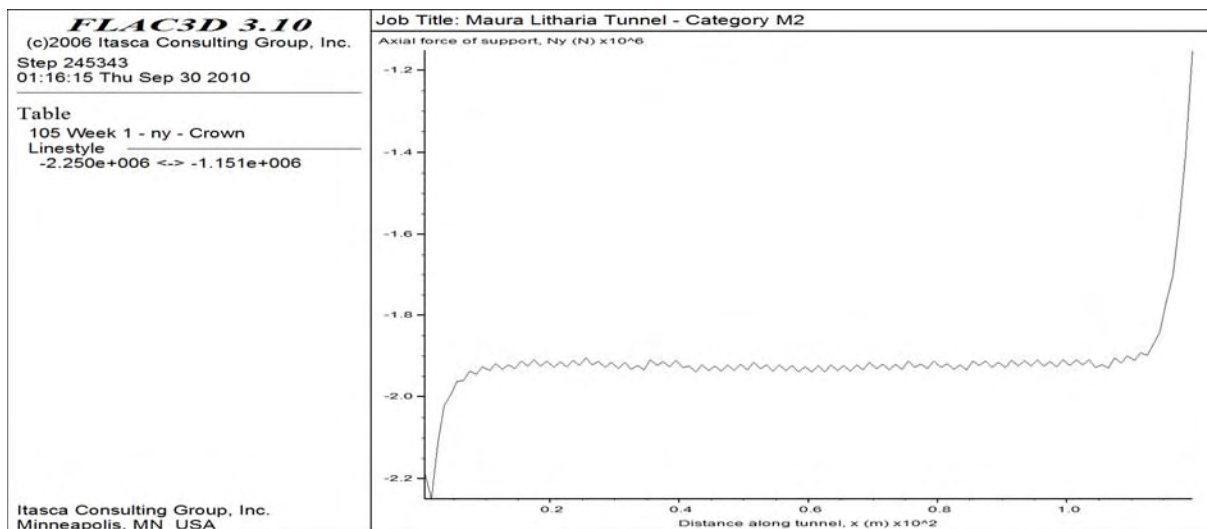
**Σχήμα 5.27:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



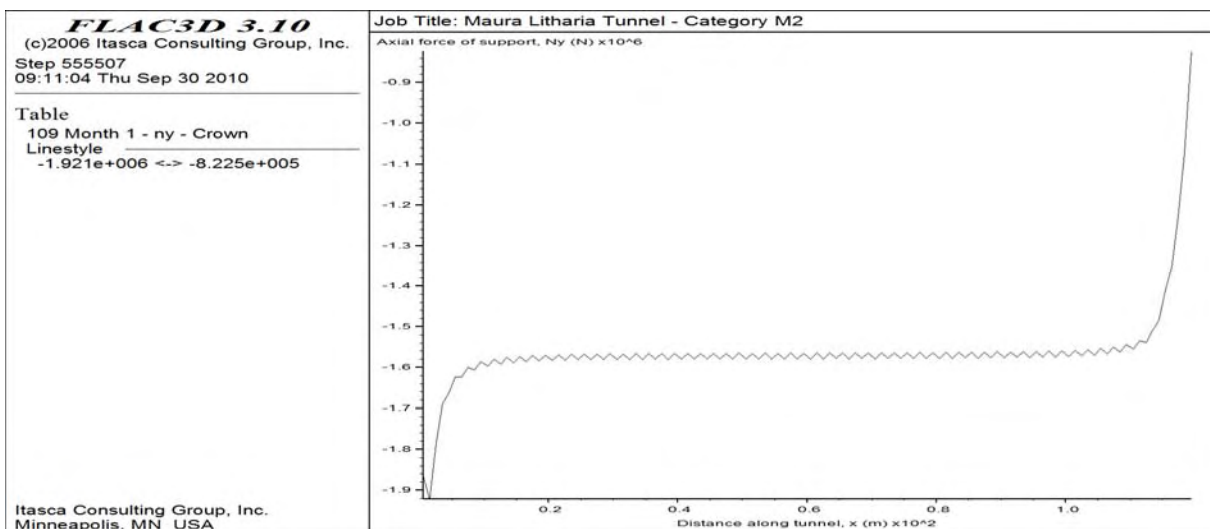
**Σχήμα 5.28:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.



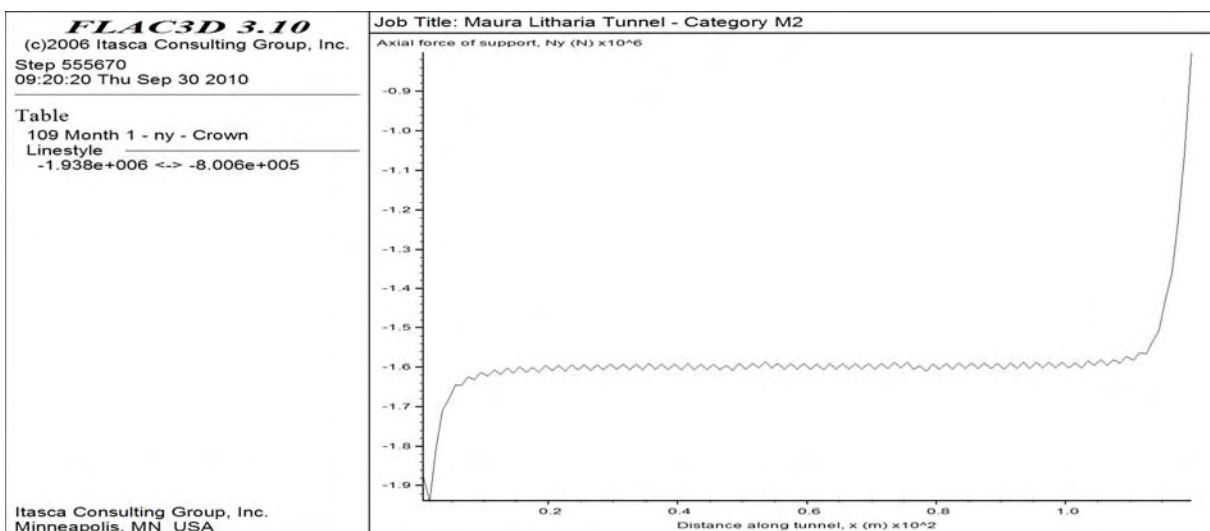
**Σχήμα 5.29:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.



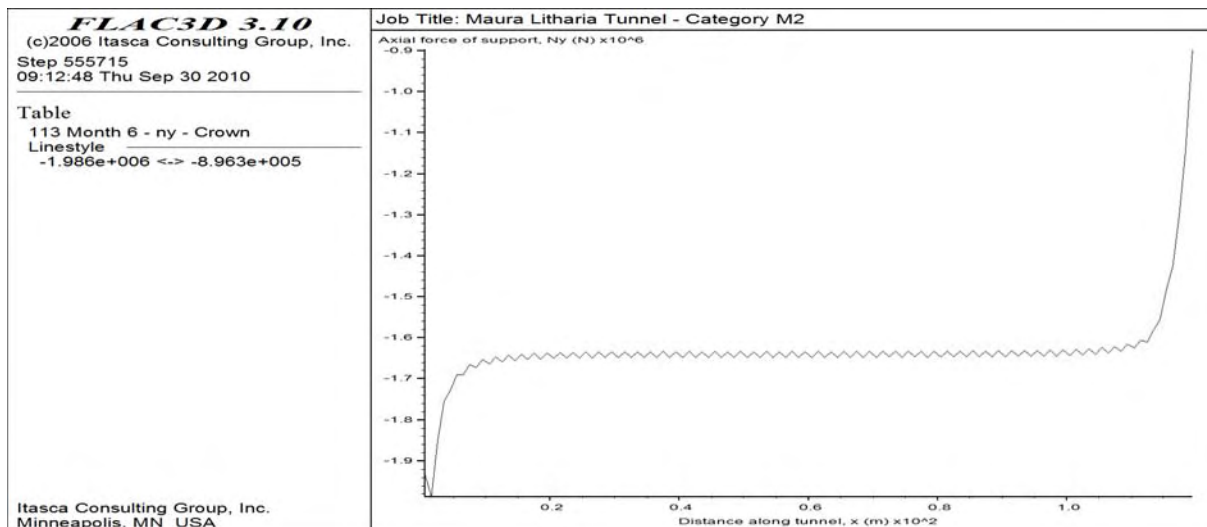
**Σχήμα 5.30:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.



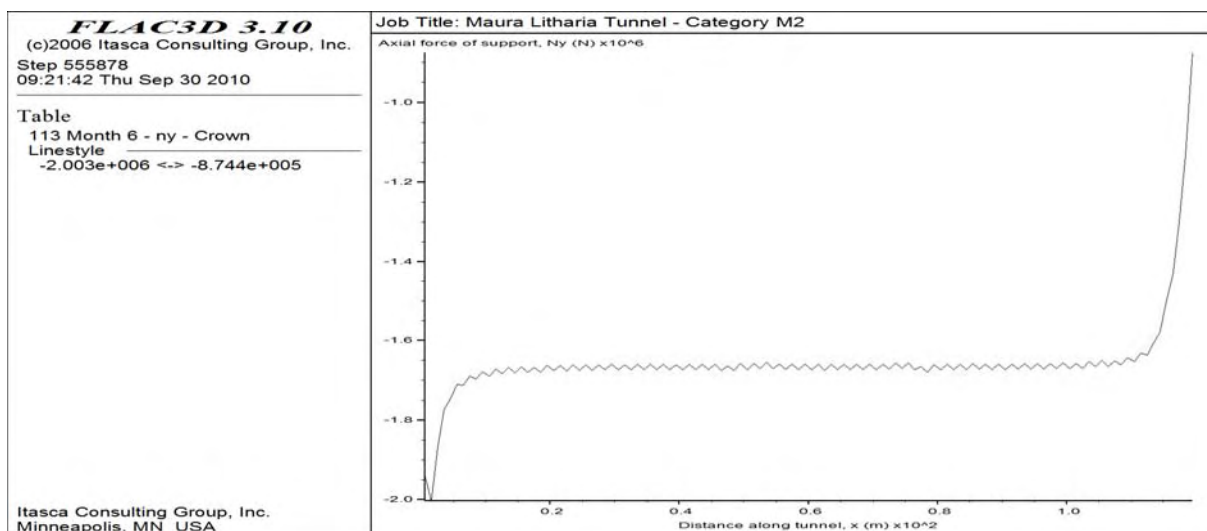
**Σχήμα 5.31:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



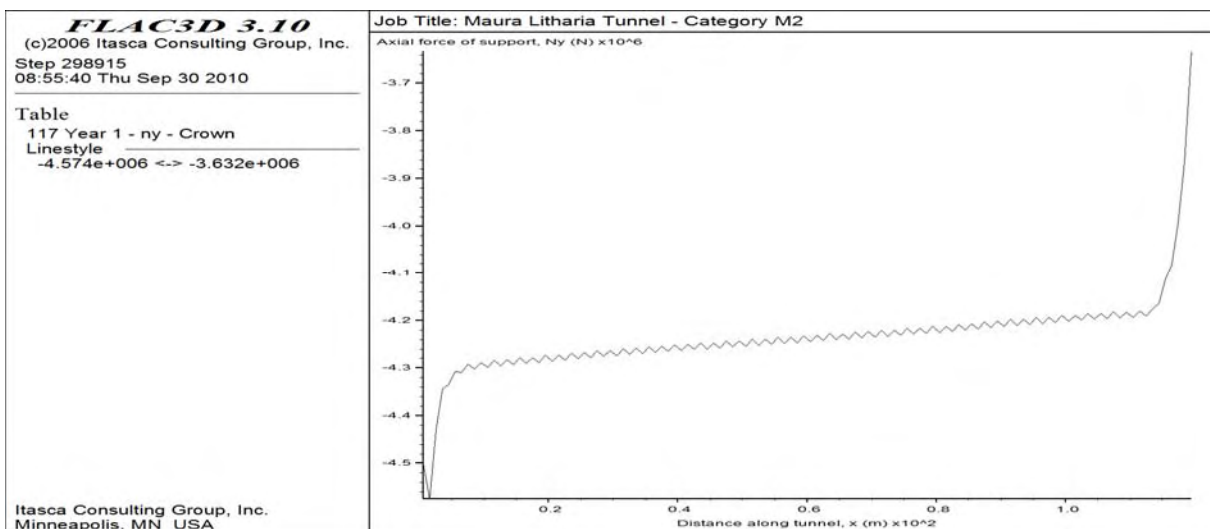
**Σχήμα 5.32:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



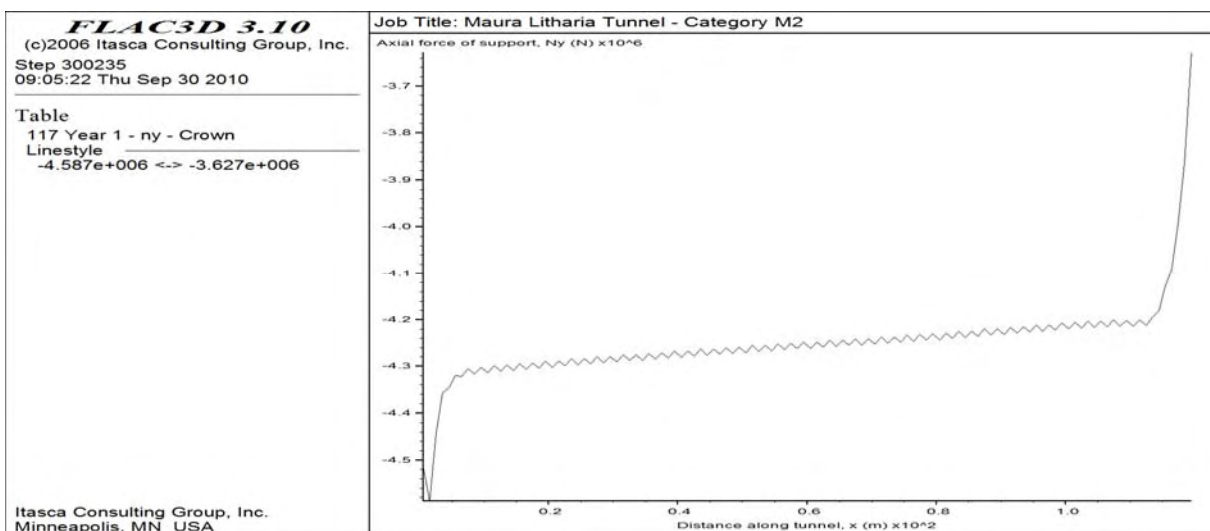
**Σχήμα 5.33:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



**Σχήμα 5.34:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.

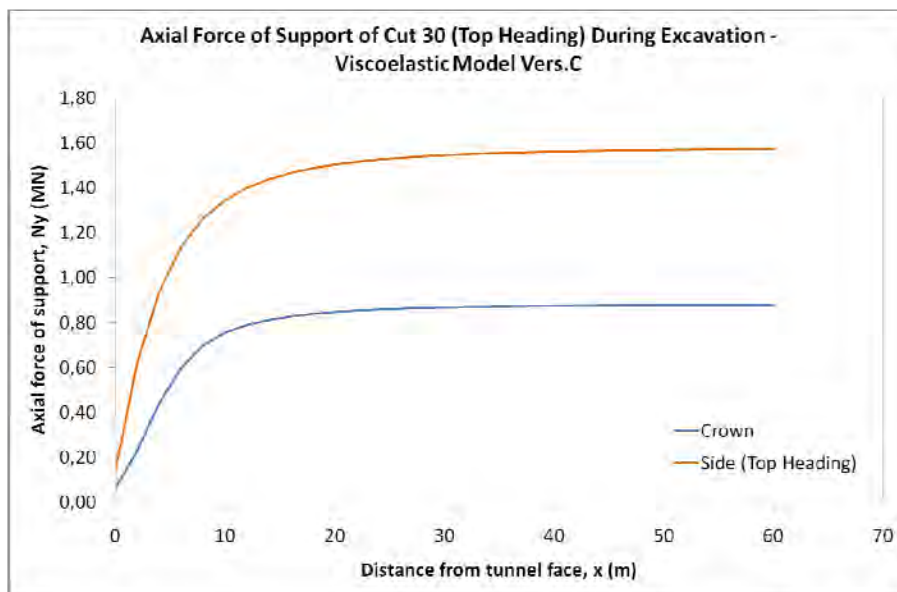


**Σχήμα 5.35:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.

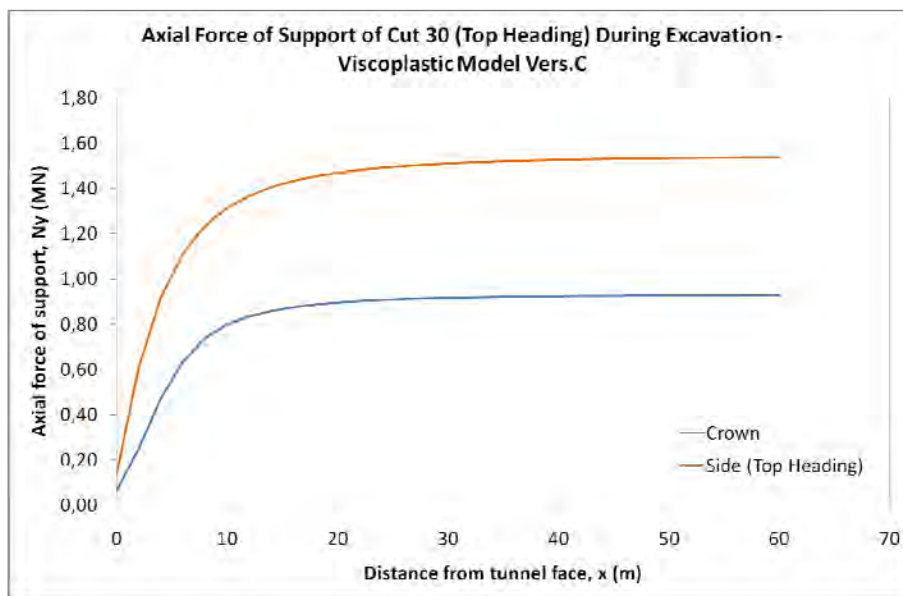


**Σχήμα 5.36:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.



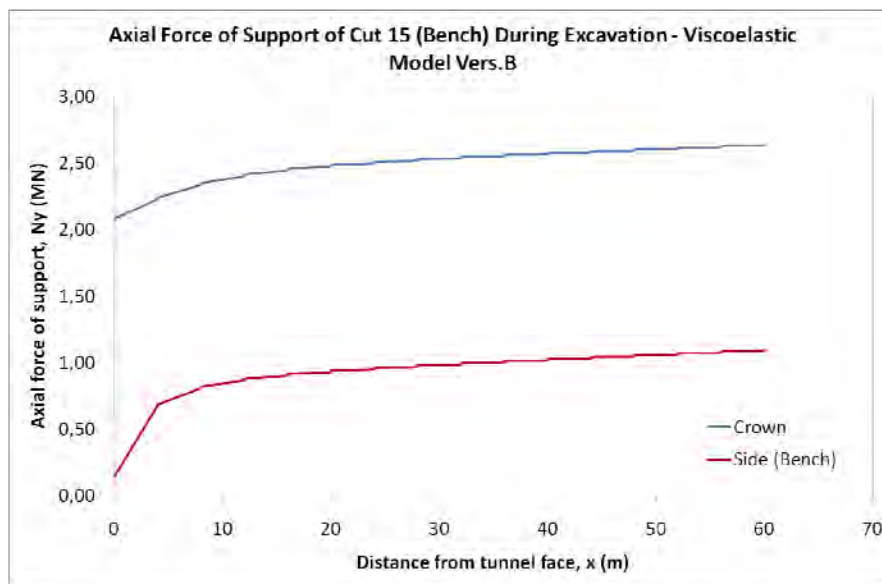


**Σχήμα 5.37:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.

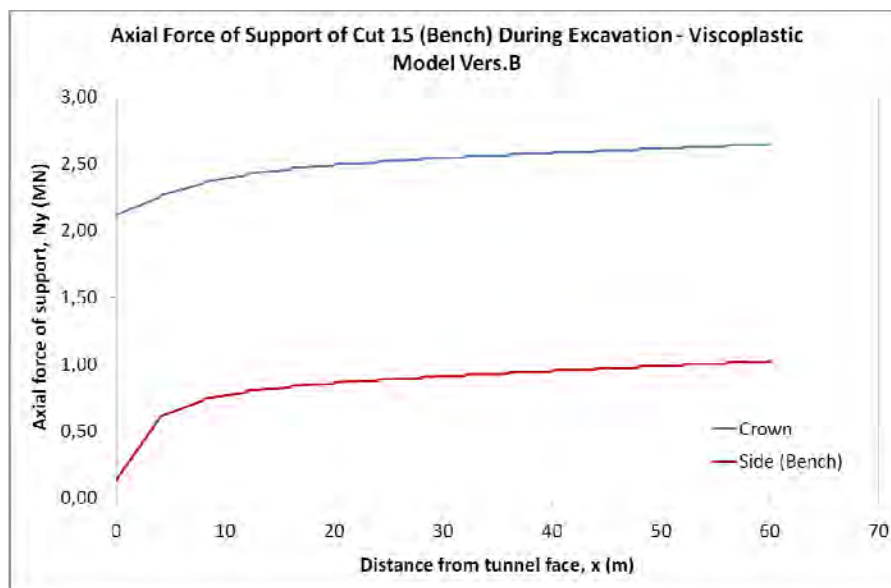


**Σχήμα 5.38:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.





**Σχήμα 5.39:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



**Σχήμα 5.40:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.

## 5.8 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Τρίτης Φάσης Προσομοιώσεων

Από το σύνολο των διαγραμμάτων που παρατίθεται στην προηγούμενη παράγραφο και το Παράρτημα Γ, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των ιξωδοελαστικών και των ιξωδοπλαστικών μοντέλων της μελέτης περίπτωσης είναι παρεμφερή σε όλες τις εκδοχές (Vers.A, Vers.B και Vers.C). Η μικρή διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των αποτελεσμάτων τους οφείλεται ουσιαστικά στην ελαφρά πλαστικοποίηση που παρουσιάζουν τα ιξωδοπλαστικά μοντέλα. Γενικότερα όμως η συμπεριφορά των μοντέλων είναι ίδια, και για το λόγο αυτό ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων τους πραγματοποιείται ανά εκδοχή και ανεξαρτήτως του είδους της ιξώδους συμπεριφοράς που τα διέπει. Επομένως, για την καθεμία από τις τρεις αυτές εκδοχές σημειώνονται τα εξής:

### Version A

Στα μοντέλα αυτά χρησιμοποιείται η 2<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων ερπυσμού (Κεφάλαιο 4 – Πίνακας 4.1). Η διαδικασία της εκσκαφής προσομοιώνεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ερπυσμού. Παρατηρείται:

- ↳ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων και ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.
- ↳ Συνεχής και πολύ μικρή αύξηση των μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου.
- ↳ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων της επένδυσης.

### Version B

Στα μοντέλα αυτά χρησιμοποιείται η 2<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων ερπυσμού (Κεφάλαιο 4 – Πίνακας 4.1). Η διαδικασία της εκσκαφής προσομοιώνεται λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ερπυσμού. Παρατηρείται:

- ↪ Ανομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων και ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση κατά μήκος της σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, με σημαντικά υψηλότερες τιμές στην αρχή της διάνοιξης σε σχέση με το ξετρύπημα.
- ↪ Σταδιακή εξομάλυνση και εν τέλει ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής.
- ↪ Σταδιακή εξομάλυνση και εν τέλει ομοιόμορφη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής.
- ↪ Συνεχής αύξηση των μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις δεν παρατηρείται ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων της επένδυσης.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο σημείο που αντιστοιχεί στο 30<sup>ο</sup> βήμα προχώρησης της πρώτης φάσης διάνοιξης της σήραγγας και στο 15<sup>ο</sup> της δεύτερης, παρατηρείται ότι σε χρονικό διάστημα ενός έτους μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής η μετατόπιση είναι της τάξεως των 10 mm. Το 60 % αυτών είναι κατά τη διάνοιξη της Α φάσης, το 10 % της Β φάσης και το 30 % είναι ερπυστικές μετατοπίσεις (Σχήματα 5.25 και 5.26).

### Version C

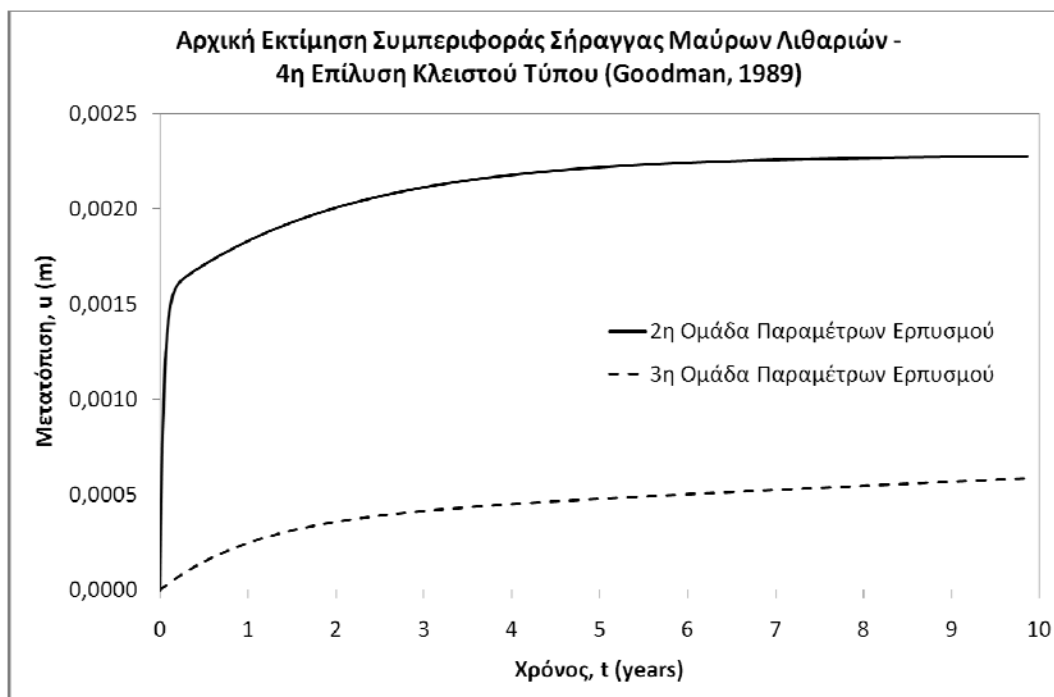
Στα μοντέλα αυτά χρησιμοποιείται η 3<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων ερπυσμού (Κεφάλαιο 4 – Πίνακας 4.1). Η διαδικασία της εκσκαφής προσομοιώνεται λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ερπυσμού. Παρατηρείται:

- ↪ Ομοιόμορφη κατανομή των μετατοπίσεων και ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση, καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.
- ↪ Εξαιρετικά μικρή αύξηση των μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση με την πάροδο του χρόνου.
- ↪ Στο χρονικό διάστημα του ενός έτους που πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, παρατηρείται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων της επένδυσης.
- ↪ Ειδικότερα όσον αφορά στο σημείο που αντιστοιχεί στο 30<sup>ο</sup> βήμα προχώρησης της πρώτης φάσης διάνοιξης της σήραγγας και στο 15<sup>ο</sup> της δεύτερης, παρατηρείται ότι σε χρονικό διάστημα ενός έτους μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής η μετατόπιση είναι της τάξεως των 5,5 mm. Το 90 % αυτών είναι κατά τη διάνοιξη της Α φάσης, το 7 % της Β φάσης και το 3 % είναι ερπυστικές μετατοπίσεις (Παράρτημα Γ – Σχήματα Γ.37 και Γ.38).

Εκτός από τα παραπάνω, αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τις Εικόνες 5.4 και 5.5, η πλαστική ζώνη των ιξωδοπλαστικών μοντέλων δεν εξελίσσεται με το χρόνο.

Όσον αφορά στη σύγκριση των επιτόπου μετρήσεων της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών με τα μοντέλα της τρίτης φάσης προσομοιώσεων της παρούσας Εργασίας, αρχικά χρησιμοποιήθηκε η 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989) με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της φάσης

αυτής, έτσι ώστε να γίνει μία αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς της σήραγγας (Σχήμα 5.41).



**Σχήμα 5.41:** Εκτίμηση της χρονικής διάρκειας των ερπυστικών φαινομένων στη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών, με βάση την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989).

Αν και οι τιμές των μετατοπίσεων που προκύπτουν από την κλειστή λύση του Goodman δε συμπίπτουν ούτε με τις επιτόπου μετρήσεις, ούτε με τα αποτελέσματα των μοντέλων με οποιαδήποτε από τις δύο ομάδες παραμέτρων ερπυσμού που χρησιμοποιήθηκαν, παρατηρείται ότι σύμφωνα με την κλειστή αυτή λύση, οι ερπυστικές μετατοπίσεις δεν πρόκειται να ισορροπήσουν παρά μόνο έπειτα από έξι περίπου έτη. Συνεπώς, βάσει του στοιχείου αυτού, αλλά και των αποτελεσμάτων των τριών εκδοχών των μοντέλων της μελέτης περίπτωσης, προκύπτει ότι οι πλησιέστερες εκδοχές των μοντέλων της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων είναι οι Version A και Version B, οι οποίες περιλαμβάνουν τη 2<sup>η</sup> ομάδα παραμέτρων ερπυσμού των παραμετρικών αναλύσεων (Κεφάλαιο 4 – Πίνακας 4.1).

Από τα Σχήματα 5.25 και 5.26 είναι εμφανές ότι οι παράμετροι αυτές όσον αφορά στα μοντέλα Version B, παρέχουν μία πολύ καλή προσέγγιση των μετατοπίσεων της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών. Για τη σύγκριση των επιτόπου μετρήσεων και των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων, στις τιμές των επιτόπου μετρήσεων προστέθηκαν οι υπολογιζόμενες τιμές των μετατοπίσεων μπροστά από το μέτωπο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλειστή λύση του Goodman χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την εκτίμηση της χρονικής διάρκειας των ερπυστικών μετατοπίσεων της σήραγγας, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα επιβεβαίωσης της σύγκρισης των επιτόπου μετρήσεων με τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων. Σε καμία περίπτωση δε λήφθηκαν υπόψη οι τιμές των μετατοπίσεων που προκύπτουν από την κλειστή λύση του Goodman, καθώς δεν είναι ενδεδειγμένη για τέτοιου είδους προβλήματα όπως αυτό της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών, αλλά πολύ πιο απλουστευμένα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## Συμπεράσματα

## Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση της ιξώδους συμπεριφοράς που ενδεχομένως παρουσιάζει η βραχόμαζα γύρω από σήραγγες. Με τον όρο «ιξώδης συμπεριφορά» νοείται η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά. Στη μηχανική των πετρωμάτων ο όρος αυτός είναι αλληλένδετος με το φαινόμενο του ερπυσμού, το οποίο κατά τον Barla (1995) είναι συγγενές με το φαινόμενο της σύνθλιψης των πετρωμάτων. Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία στα πλαίσια της Εργασίας αυτής διαπιστώθηκε ότι ο ερπυσμός θεωρείται ουσιαστικά ως ένα είδος σύνθλιψης, δηλαδή μία χρονικά εξαρτώμενη σύγκλιση λόγω ροϊκής συμπεριφοράς της βραχόμαζας (Panet, 1996). Το φαινόμενο της σύνθλιψης δύναται να είναι και ακαριαίας φύσης, αλλά στην παρούσα Εργασία εξετάζεται κατά κύριο λόγο η σύνθλιψη λόγω ερπυσμού. Αξίζει να σημειωθεί αφενός ότι στην ελληνική βιβλιογραφία υπάρχουν ελάχιστες αναφορές τόσο στα φαινόμενα της σύνθλιψης και του ερπυσμού, όσο κυρίως στο συσχετισμό τους και αφετέρου, ότι στη διεθνή βιβλιογραφία τα δύο αυτά φαινόμενα και η σύνδεση που υπάρχει

μεταξύ τους αποτελούν ένα σημαντικό πεδίο έρευνας, ιδιαίτερα κατά τις τελευταίες δεκαετίες.

Η αρχική προσέγγιση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού γύρω από σήραγγες πραγματοποιήθηκε μέσω απλουστευμένων μοντέλων ροϊκής συμπεριφοράς, τα οποία χρησιμοποιούνται ως προσομοιώματα, μηχανικά ανάλογα της συμπεριφοράς των πετρωμάτων (Σοφιανός & Νομικός, 2008). Για τη μεν ιξωδοελαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας μελετήθηκε το μοντέλο Burgers, και για τη δε ιξωδοπλαστική το μοντέλο CVISC (Itasca, 2001). Η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών πετρωμάτων Burgers, και κατ' επέκταση των ιξωδοπλαστικών CVISC, περιγράφεται ουσιαστικά μέσω μίας ομάδας παραμέτρων, οι οποίες είναι γνωστές ως παράμετροι ερπυσμού. Η εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας αυτής, για την αναζήτηση παραμέτρων ερπυσμού διαφόρων πετρωμάτων, έδειξε ότι οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι δυνατό να διαφέρουν σημαντικά, αναλόγως του πετρώματος. Ως εκ τούτου, για τη μελέτη του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού, ομαδοποιήθηκαν οι βιβλιογραφικές τιμές που συγκεντρώθηκαν και μέσω εμπειρικών υπολογισμών, δημιουργήθηκαν σύνολα παραμέτρων ερπυσμού που να αντιστοιχούν σε γενικές κατηγορίες βραχόμαζας από άποψη ερπυστικής συμπεριφοράς. Όσον αφορά στα σύνολα αυτά των παραμέτρων, πρόκειται για τέσσερις ομάδες παραμέτρων  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$  που εκφράζουν πολύ έντονη, έντονη, μικρή και πολύ μικρή ερπυστική συμπεριφορά αντίστοιχα.

Εκτός των παραμέτρων ερπυσμού διαφόρων πετρωμάτων, συγκεντρώθηκαν και ορισμένες κλειστές λύσεις που έχουν αναπτυχθεί για το απλουστευμένο μοντέλο Burgers. Μέσω αυτών, και με τη βοήθεια των τεσσάρων ομάδων παραμέτρων ερπυσμού που αναφέρονται παραπάνω, πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική ανάλυση για τη διερεύνηση της επίδρασης καθεμίας από αυτές τις παραμέτρους στις χρονικά μεταβαλλόμενες μετατοπίσεις ανυποστήρικτης σήραγγας. Αναλυτική περιγραφή της επίδρασης των παραμέτρων ερπυσμού γίνεται στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας Εργασίας, αλλά στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι γενικά, όσο χαμηλότερες είναι οι τιμές των  $n_K$ ,  $n_M$  και  $G_K$ , τόσο πιο έντονη είναι η εμφάνιση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού.



Η πιο ενδελεχής εξέταση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού γύρω από σήραγγες, πραγματοποιήθηκε μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Οι αριθμητικές αναλύσεις αυτές έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης Flac 3D (Itasca, 2006), και διαχωρίστηκαν σε τρεις επιμέρους φάσεις. Κατά την πρώτη φάση των προσομοιώσεων, στην οποία κατασκευάστηκε μία σειρά μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης, δόθηκε η δυνατότητα βαθμονόμησης των αριθμητικών μοντέλων σε σχέση με τα αποτελέσματα των κλειστού τύπου επιλύσεων που προαναφέρονται. Μέσω αυτής της βαθμονόμησης, διερευνήθηκαν ουσιαστικά οι βέλτιστες συνθήκες προσομοίωσης της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού για τα μοντέλα Burgers και CVISC. Η σύγκριση αριθμητικών και αναλυτικών επιλύσεων έδειξε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό Flac 3D προσεγγίζουν σχεδόν απόλυτα τα αποτελέσματα των δύο κλειστών λύσεων του Σοφιανού (2009), με και χωρίς εσωτερική πίεση (Κεφάλαιο 2 – 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου αντίστοιχα), και του Goodman (1989) χωρίς υποστήριξη (Κεφάλαιο 2 – 3<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου). Ως προς τις συνθήκες προσομοίωσης, ουσιαστικά εξετάστηκαν όλες οι εναλλακτικές δυνατότητες που παρέχει το λογισμικό σχετικά με τον ερπυσμό, και επιλέχθηκαν εκείνες που τα αποτελέσματά τους συμπίπτουν καλύτερα με τις κλειστές λύσεις με τις οποίες συγκρίθηκαν.

Κατά τη δεύτερη και κυριότερη φάση των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε μία σειρά παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων με αξιsymμετρικά μοντέλα, μέσω της οποίας διερευνήθηκε λεπτομερέστερα η επίδραση των παραμέτρων ερπυσμού στις χρονικά μεταβαλλόμενες μετατοπίσεις σήραγγας, τόσο ανυποστήρικτης, όσο και με υποστήριξη. Επίσης, στην περίπτωση της σήραγγας με υποστήριξη, εξετάστηκαν και οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση. Στις παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις της φάσης αυτής, χρησιμοποιήθηκαν οι τέσσερις ομάδες παραμέτρων ερπυσμού που περιγράφονται παραπάνω, καθώς και μία πρόσθετη που εκφράζει εξαιρετικά έντονη ερπυστική συμπεριφορά. Από τα αποτελέσματα και τα σχόλια των αποτελεσμάτων του συνόλου των αξιsymμετρικών μοντέλων των παραμετρικών αναλύσεων που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας Εργασίας, προέκυψαν ορισμένα πολύ σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία περιγράφονται ακολούθως.

Κατ' αρχήν παρατηρείται ότι στην περίπτωση που η διάνοιξη θεωρηθεί ότι γίνεται τόσο γρήγορα, ώστε να μην επιδρά η ερπυστική συμπεριφορά της ανυποστήρικτης βραχόμαζας (μοντέλα Version A χωρίς υποστήριξη), η κατανομή των μετατοπίσεων είναι πιο ομοιόμορφη σε σύγκριση με την περίπτωση που η ερπυστική συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάνοιξη (αντίστοιχα μοντέλα Version B). Στη δεύτερη περίπτωση η χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά της βραχόμαζας κατά τη διάνοιξη οδηγεί τα σημεία που βρίσκονται μακρύτερα από το μέτωπο της εκσκαφής σε υψηλότερες μετατοπίσεις. Η συμβολή των χρονικά εξαρτώμενων μετατοπίσεων κατά τη διάνοιξη επί των συνολικών μετατοπίσεων, κυμαίνεται στο σύνολο των αξισυμμετρικών μοντέλων Version B χωρίς υποστήριξη, από 11 % έως 100 %, και εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων ερπυσμού της βραχόμαζας. Πιο συγκεκριμένα, για τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε λίγο (καθόλου έντονο) και σχεδόν καθόλου ερπυσμό, το ποσοστό είναι της τάξης του 89 – 100 %. Αντίθετα, για τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε πολύ έντονο και εξαιρετικά έντονο ερπυσμό, το ποσοστό είναι της τάξης του 11 – 17 %. Συγκριτικά με τα μοντέλα Version A, το ποσοστό των μετατοπίσεων των Version B κατά τη διάνοιξη επί των συνολικών μετατοπίσεων, για τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε λίγο (καθόλου έντονο) και σχεδόν καθόλου ερπυσμό, το ποσοστό είναι της τάξης του 0,1 – 0,8 %, ενώ για τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε πολύ έντονο και εξαιρετικά έντονο ερπυσμό, το ποσοστό είναι της τάξης του 113 – 1062 %. Επομένως, βάσει των παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η θεώρηση ερπυστικής συμπεριφοράς κατά τη διάνοιξη οδηγεί τη βραχόμαζα γρηγορότερα στο στάδιο του δευτερογενούς ερπυσμού.

Όσον αφορά στα ιξωδοελαστικά μοντέλα Version A χωρίς υποστήριξη, παρατηρείται απόλυτη ταύτιση των καμπύλων του προφίλ των μετατοπίσεων για όλα τα στάδια του χρονικού διαστήματος του ενός έτους που διαρκούν οι προσομοιώσεις, με την καμπύλη του Panet. Η ταύτιση αυτή ισχύει και για το ενδιάμεσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης. Αντίστοιχα, οι καμπύλες του προφίλ των μετατοπίσεων των ιξωδοπλαστικών μοντέλων Version A για τα διάφορα στάδια του ενός έτους των προσομοιώσεων, συμπίπτουν σχεδόν απόλυτα μεταξύ τους. Συγκρίνοντας γενικότερα τα ιξωδοελαστικά με τα ιξωδοπλαστικά μοντέλα χωρίς υποστήριξη, προκύπτει ότι οι μετατοπίσεις στα

ιξωδοπλαστικά είναι σημαντικά υψηλότερες, αν και δεν παρατηρείται εξέλιξη της πλαστικής τους ζώνης με το χρόνο. Ακόμη, παρατηρείται ότι στα ιξωδοπλαστικά μοντέλα οι καμπύλες των μετατοπίσεών τους σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο, αργεί να εξομαλυνθεί σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη των ιξωδοελαστικών μοντέλων.

Στα μοντέλα που περιλαμβάνουν σύστημα υποστήριξης, τα οποία είναι μόνο για τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε πολύ έντονο και εξαιρετικά έντονο ερπυσμό, παρατηρείται ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που είναι το μοναδικό μέτρο υποστήριξης που χρησιμοποιείται, οδηγεί σε σταθεροποίηση των μετατοπίσεων. Όπως είναι φυσικό, οι καμπύλες του προφίλ των μετατοπίσεων αλλάζουν, αλλά και πάλι παρατηρείται ότι για όλα τα στάδια του χρονικού διαστήματος του ενός έτους των προσομοιώσεων, συμπίπτουν απόλυτα μεταξύ τους. Στην περιοχή του μετώπου βέβαια, το οποίο παραμένει ανυποστήρικτο, παρατηρείται έντονη αύξηση των μετατοπίσεων με την πάροδο του χρόνου. Εντούτοις, είναι δυνατό να ειπωθεί ότι τα μοντέλα με υποστήριξη παρουσιάζουν ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων, κάτι που επιβεβαιώνεται και από την ποσοστιαία συμβολή των χρονικά εξαρτώμενων μετατοπίσεων κατά τη διάνοιξη, επί των συνολικών μετατοπίσεων. Πιο συγκεκριμένα, στο σύνολο των αξισυμμετρικών μοντέλων Version B με υποστήριξη, η ποσοστιαία αυτή συμβολή είναι της τάξης του 95 – 100 %, όταν στα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς υποστήριξη κυμαίνεται από 11 % έως 17 %. Συγκριτικά με τα μοντέλα Version A με υποστήριξη, το ποσοστό των μετατοπίσεων των Version B είναι και πάλι αρκετά υψηλό (34 – 119 %), αλλά κατά πολύ μικρότερο από τα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς υποστήριξη.

Ειδικότερα όσον αφορά στο ενδιαμέσο σημείο στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης στο σύνολο των αξισυμμετρικών μοντέλων με υποστήριξη, παρατηρείται ότι η καμπύλη των μετατοπίσεών του σε σχέση με την απόστασή του από το μέτωπο, εξομαλύνεται γρηγορότερα σε σύγκριση με την ίδια καμπύλη των αντίστοιχων μοντέλων χωρίς υποστήριξη. Ακόμη, στα ιξωδοπλαστικά μοντέλα παρατηρείται ότι μεγαλύτερο μέρος των μετατοπίσεων αυτών εκδηλώνεται προτού η εκσκαφή φτάσει στο συγκεκριμένο σημείο. Συνεπώς, βάσει των παραπάνω, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι τα μοντέλα με υποστήριξη παρουσιάζουν ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων, και συμπεραίνεται η μικρή

επίδραση που έχει το φαινόμενο της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού στις μετατοπίσεις, όταν υφίστανται τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης.

Ως προς τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση των μοντέλων με υποστήριξη, παρατηρείται ότι γενικά παραμένουν σταθερές με την πάροδο του χρόνου και έχουν μία σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας. Η τιμή στην οποία σταθεροποιούνται οι αξονικές δυνάμεις, ταυτίζεται σε όλες τις περιπτώσεις με την τιμή που αντιστοιχεί σε πίεση επί της επένδυσης ίση με την τάση του φυσικού εντατικού πεδίου, η οποία είναι της τάξης των 8 MN. Ειδικότερα στα ιξωδοελαστικά μοντέλα παρατηρείται ότι η καμπύλη της ανάπτυξης των αξονικών δυνάμεων με το χρόνο συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με την καμπύλη που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989). Εντούτοις, η λύση αυτή του Goodman υπερεκτιμά τις αξονικές δυνάμεις κατά τα πρώτα στάδια της ανάπτυξής τους επί της επένδυσης.

Κατά την τρίτη και τελική φάση των προσομοιώσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία σειρά αριθμητικών αναλύσεων για ένα πραγματικό έργο (μελέτη περίπτωσης), τη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών της Ολυμπίας Οδού. Από τις αριθμητικές αναλύσεις αυτές, οι οποίες έγιναν μέσω τριδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης στο λογισμικό Flac 3D, εκτός από τα συμπεράσματα που αφορούν τη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών καθεαυτή, προκύπτουν και ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την προσομοίωση του φαινομένου της σύνθλιψης των πετρωμάτων λόγω ερπυσμού.

Σε ότι αφορά τη σήραγγα Μαύρων Λιθαριών, στα μοντέλα που κατασκευάστηκαν για την προσομοίωσή της, εξετάστηκαν τόσο οι προκύπτουσες μετατοπίσεις που συγκρίθηκαν και με επιτόπου μετρήσεις της σήραγγας, όσο και οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση. Σημειώνεται, ότι για τις αναλύσεις της φάσης αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι ομάδες παραμέτρων που αντιστοιχούν σε λίγο (καθόλου έντονο) και σχεδόν καθόλου ερπυσμό, καθώς κατά τη διάνοιξη της συγκεκριμένης σήραγγας διαπιστώθηκε ότι η βραχόμαζα δεν παρουσιάζει έντονα ερπυστικά φαινόμενα. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι από τα μέτρα υποστήριξης που αναφέρονται στη μελέτη του έργου, στις αναλύσεις της

Εργασίας αυτής προσομοιώθηκαν μόνο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και οι ηλώσεις πλήρους πάκτωσης.

Γενικά ως προς τις μετατοπίσεις που προκύπτουν από τη διάνοιξη της σήραγγας, παρατηρείται ότι είναι εξαιρετικά χαμηλές, δηλαδή τις τάξης των χιλιοστών, με μέγιστη τιμή το 1 cm σε ορισμένα μόνο μοντέλα. Η κατανομή τους είναι εν γένει ομοιόμορφη, και μόνο στα μοντέλα Version B παρατηρείται κατά τον πρώτο μήνα μετά την εκσκαφή ανομοιομορφία που σταδιακά εξομαλύνεται. Στα μοντέλα που επιλύθηκαν με τις παραμέτρους που αντιστοιχούν στον καθόλου έντονο ερπυσμό, παρατηρείται συνεχής αύξηση των μετατοπίσεων, και στο ένα έτος που διαρκούν οι προσομοιώσεις δεν επέρχεται ισορροπία. Αντίθετα, στα μοντέλα με τις παραμέτρους που αντιστοιχούν στο σχεδόν καθόλου ερπυσμό, παρατηρείται ουσιαστικά ισορροπία των ερπυστικών μετατοπίσεων. Ειδικότερα όσον αφορά στο σημείο που αντιστοιχεί στο 30<sup>ο</sup> βήμα προχώρησης της πρώτης φάσης διάνοιξης της σήραγγας και στο 15<sup>ο</sup> της δεύτερης, παρατηρείται στα μεν μοντέλα του καθόλου έντονου ερπυσμού μία μετατόπιση της τάξης των 10 mm (60 % φάση A, 10 % φάση B και 30 % ερπυστικές μετατοπίσεις), και στα δε μοντέλα του σχεδόν καθόλου ερπυσμού μία μετατόπιση της τάξεως των 5,5 mm (90 % φάση A, 7 % φάση B και 3% ερπυστικές μετατοπίσεις). Το σύνολο των παραπάνω επιβεβαιώνει τη θεώρηση ότι η σήραγγα Μαύρων Λιθαριών διανοίγεται σε καθεσώς που δεν παρουσιάζει έντονα ερπυστικά φαινόμενα. Για τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση δεν προκύπτουν ιδιαίτερα συμπεράσματα. Για αυτές μπορεί απλώς να ειπωθεί ότι όπως και οι μετατοπίσεις, παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές και ότι ακόμα και στα μοντέλα που αρχικά παρουσιάζουν ανομοιομορφία (Version B), σε βάθος χρόνου της τάξης των έξι μηνών, εξομαλύνεται. Όσο δε για την αύξηση των τιμών τους, σημειώνεται ότι σε όλα τα μοντέλα είναι ανάλογη των μετατοπίσεων της σήραγγας.

Αναφορικά με τη σύγκριση των επιτόπου μετρήσεων της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών με τα αποτελέσματα των μοντέλων της τρίτης φάσης των προσομοιώσεων, παρατηρείται μία καλή προσέγγιση από τα μοντέλα Version B. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό, καθώς δείχνει ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του φαινομένου της σύνθλιψης λόγω ερπυσμού στο σύνολο των τριών φάσεων

προσομοιώσεων της Διπλωματικής Εργασίας, είναι σε θέση να προσεγγίσει τη συμπεριφορά της βραχόμαζας κατά την κατασκευή. Η σχετικά μεγάλη ακρίβεια που παρατηρείται μεταξύ των αποτελεσμάτων των συγκεκριμένων μοντέλων με τις επιτόπου μετρήσεις, καταδεικνύει ότι η ομάδα παραμέτρων ερπυσμού που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα αυτά (ομάδα παραμέτρων καθόλου έντονου ερπυσμού), μπορεί να συσχετιστεί με τις ισχύουσες γεωτεχνικές συνθήκες της σήραγγας Μαύρων Λιθαριών.

Τέλος, τόσο από το καθεαυτό περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, όσο και από το σύνολο των συμπερασμάτων που παρατίθενται παραπάνω, προκύπτουν οι εξής δύο προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Αφενός διεξαγωγή εκτενέστερης βιβλιογραφικής έρευνας όσον αφορά στις παραμέτρους ερπυσμού, και εν συνεχεία στατιστική επεξεργασία αυτών, με σκοπό τον πιο συστηματικό υπολογισμό ομάδων παραμέτρων ερπυσμού. Αφετέρου, πραγματοποίηση και άλλων αριθμητικών αναλύσεων για πραγματικά έργα με διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες, έτσι ώστε να προκύψουν και επιπλέον συσχετισμοί με τις ομάδες παραμέτρων ερπυσμού που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας Εργασίας.

# BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abass H., Al-Mulhem A. and Khan M. (2003) – “Acid Fracturing or Proppant Fracturing? A Rock Mechanics’ View”, Saudi Aramco Journal of Technology
2. Amberg R. (1983) – “Design and Construction of the Furka Base Tunnel”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 16 (4), pp. 215 – 231
3. Apuani T., Masetti M. and Rossi M. (2007) – “Stress-Strain-Time Numerical Modelling of a Deep-Seated Gravitational Slope Deformation: Preliminary Results”, Quaternary International 171 – 172, pp. 80 – 89
4. ASTM (1985) – “Standard Test Method for Creep of Cylindrical Hard Rock Core Specimens in Uniaxial Compression”
5. Aydan O., Akagi T. and Kawamoto T. (1993) – “The Squeezing Potential of Rock Around Tunnels: Theory and Prediction”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 26 (2), pp. 137 – 163
6. Aydan O., Akagi T. and Kawamoto T. (1996) – “The Squeezing Potential of Rock Around Tunnels: Theory and Prediction with Examples Taken from Japan”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 29 (3), pp. 125 – 143
7. Barla G. (1995) – “Squeezing Rocks in Tunnels”, ISRM News Journal, 3/4, pp. 44 – 49
8. Barla G. (2001) – “Tunnelling under Squeezing Rock Conditions”, available on website [www.polito.it](http://www.polito.it)
9. Barla G., Bonini M. and Debernardi D. (2008) – “Time Dependent Deformations in Squeezing Tunnels”, IACMAG 12<sup>th</sup> International Conference, India

10. Boidy E., Bouvard A. and Pellet F. (2002) – “Back Analysis of Time-Dependent Behaviour of a Test Gallery in Claystone”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17 (2002), pp. 415 – 424
11. Bonini M., Debernardi D., Marla M. and Barla G. (2007) – “The Mechanical Behaviour of Clay Shales and Implications on the Design of Tunnels”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42, pp. 361 – 388
12. Brady B.H.G. and Brown E.T. (1985) – “Rock Mechanics for Underground Mining”, Chapman & Hall, London
13. Brantmark J. (1998) – “Rock Support in Weak Rock – A Study Based on the Uri Project”, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden
14. Brantmark J. and Stille H. (1996) – “Prediction of Squeezing Pressure on the Uri Project, Kashmir, India”, *Proc. ISRM Int. Symp. Eurock 96*, vol. 2, pp. 1025 – 1032, Turin
15. Chen G. and Chugh Y.P. (1996) – “Estimation of In Situ Viscoelastic Parameters of Weak Floor Strata by Plate-Loading tests”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 14, pp. 151 – 167
16. Chin H.P. and Rogers J.D. (1987) – “Creep Parameters of Rocks on an Engineering Scale”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20, pp. 137 – 146
17. Cristescu N.D. and Gioda G. (1994) – “Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials. CISM Courses and Lectures n. 350, Springer – Verlag
18. Cristescu N.D. and Hunsche U. (1998) – “Time Effects in Rock Mechanics”, Wiley & Sons, New York
19. Diasakos N., Amerikanos P., et al. (2010) – “Excavation of Kallidromo Tunnel in Clayey Formations”, *ITA 2010 World Tunnel Congress*, Canada
20. Einstein H.H. (2000) – “Tunnels in Opalinus Clayshale – A Review of Case Histories and new Developments”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (1), pp. 13 – 29
21. Fairhurst C. and Pei J. (1990) – “A Comparison between the Distinct Element Method and the Finite Element Method for Analysis of the Stability of an Excavation in Jointed Rock”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 5, No. 12, pp. 11 – 117



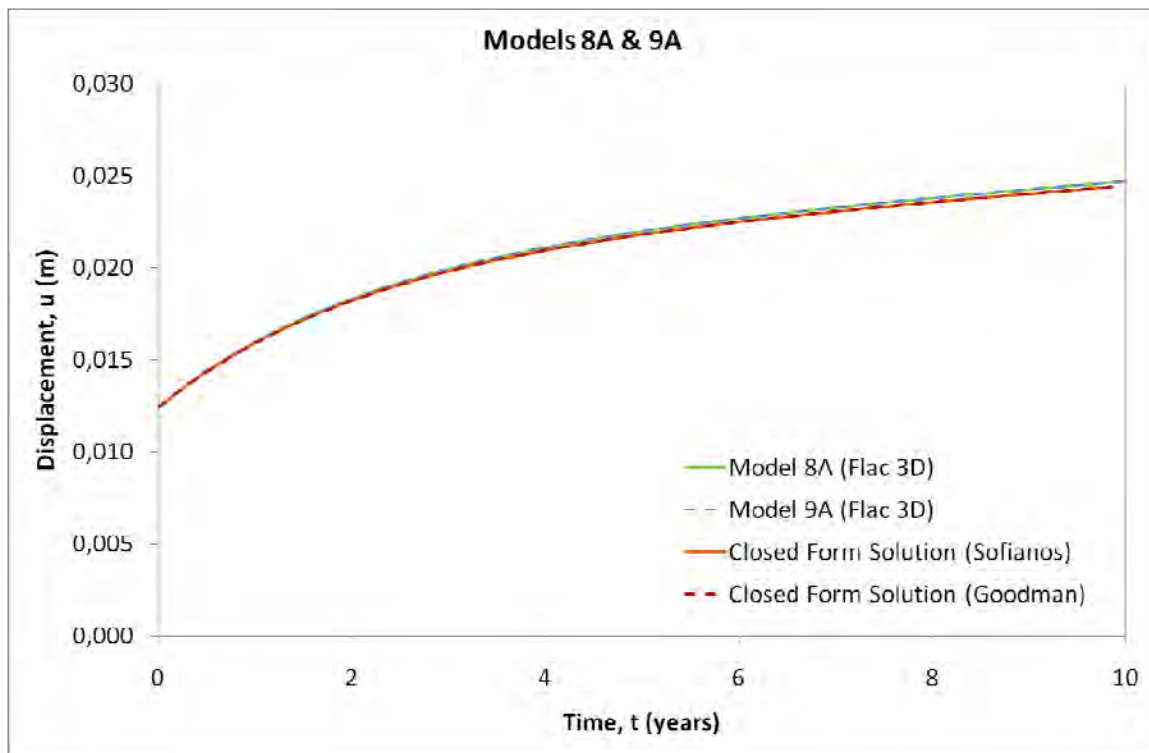
22. Fifer Bizjak K. and Zupancic A. (2007) – “Rheological Investigation for the Landslide Slano Blato Near Ajdovscina, Slovenia”, *Geologija* 50/1, pp. 121 – 129
23. Gioda G. (1982) – “On the Non-Linear ‘Squeezing’ Effects Around Circular Tunnels”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 6, pp. 21 – 46
24. Gioda G. and Cividini A. (1996) – “Numerical Methods for the Analysis of Tunnel Performance in Squeezing Rocks”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29 (4), pp. 171 – 193
25. Goodman R. E. (1989) – “Introduction to Rock Mechanics” – 2<sup>nd</sup> edition, Wiley & Sons, New York
26. Hoek E. and Marinos P. (2000) – “Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses”, *Tunnels and Tunnelling International*, pp. 45 – 51 (part one), pp. 33 – 36 (part two)
27. Hoek E., Grabinsky M.W. and Diederichs M.S., (1991) – "Numerical Modelling for Underground Excavation Design", *Trans. Inst. Min. Metall.*, 100
28. Itasca Inc. (2006) – “Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions”, *Flac 3D Manual*
29. Jandakaew M. (2007) – “Stress-Path Dependency of Rock Salt”, *Rock Mechanics, Fuenkajorn & Phien-wej eds.*, pp. 171 – 188
30. John M. et al. (2005) – “Means and Methods for Tunnelling through Squeezing Ground: A Case History of the Strenger Tunnel, Austria”, *Roc. RETC, USA*
31. Keller F. and Schneider T.R. (1982) – “Geology and Geotechnics of the Furka Base Tunnel”, *Schweiz. Ing. Architekt* 100 (24), pp. 512 – 520
32. Korzeniowski W. (1991) – “Rheological Model of Hard Rock Pillar”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24, pp. 155 – 166
33. Kovari K. (1988) – “Tunnelbau in Druckhaftem Gebirge – Tunnelling in Squeezing Rock”, *Tunnel* 5, pp. 12 – 31
34. Kovari K. (2000) – “Mastering of Squeezing Rock in the Gotthard Base”, *Tunnels and Tunnelling International*, pp. 234 – 238

35. Ladanyi B. (1993) – “Time-Dependent Response of Rock Around Tunnels”, *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon Press J.A. Hudson ed., vol.2, pp. 78 – 112
36. Malan D.F., Vogler U.W. and Drescher K. (1997) – “Time-Dependent Behaviour of Hard Rock in Deep Level Gold mines”, *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, May / June 1997, pp. 135 – 148
37. Marcato G. et al. (2009) – “Assessing the Possible Future Development of the Tessina Landslide Using Numerical Modelling”, *Mountain Risks*, 6<sup>th</sup> Framework Program of the European Commission
38. Minkley W., Menzel W., Konietzky H. and te Kamp L. (2001) – “A Visco-Elasto-Plastic Softening Model and it’s Application for Solving Static and Dynamic Stability Problems in Potash Mining”, available on website [www.itasca-udm.com](http://www.itasca-udm.com)
39. Nilsen B. and Palmstrom A. (2000) – “Engineering Geology and Rock Engineering Handbook No. 2”, Norwegian Group for Rock Mechanics
40. O’Rourke T.D. (1984) – “Guidelines for Tunnel Lining Design”, ASCE
41. Ottosen N.S. (1986) – “Viscoelastic – Viscoplastic Formulas for Analysis of Cavities in Rock Salt”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Ab.*, vol. 23, No. 3, pp. 201 – 212
42. Panet M. (1996) – “Two Case Histories of Tunnels through Squeezing Rocks”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29 (3), pp. 155 – 164
43. Pellet F., Hajdu A., Deleruyelle F. and Bensus F. (2005) – “A Visco-Plastic Model Including Anisotropic Damage for the Time Dependent Behaviour of Rock”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 29, pp. 941 – 970
44. Perzyna P. (1966) – “Fundamental Problems in Viscoplasticity”, *Advances in Applied Mechanics*, vol. 9, Academic Press, New York, pp. 243 – 377
45. Rahman S.S., Kagan M. and Marx C. (1992) – “Prediction of Borehole Stability in Tar Sands with the Use of a Rheological Model”, *Energy Sources*, vol. 14, pp. 225 – 240
46. Selmer-Olsen R. and Broch E. (1977) – “General Design Procedure for Underground Openings in Norway”, *Proc. Int. Symp. Rockstore 77*, Stockholm
47. Singh B. and Goel R.K. (2006) – “Tunnelling in Weak Rocks”, Elsevier, Oxford

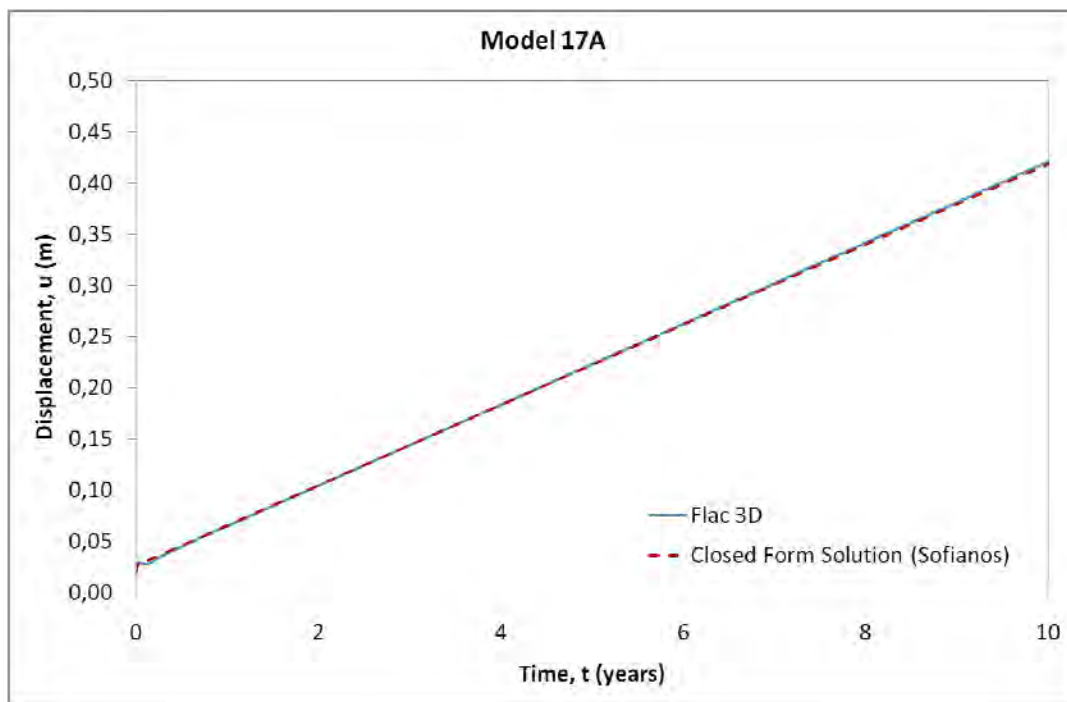
48. Srestha G.L. (2005) – “Stress Induced Problems in Himalayan Tunnels with Special Reference to Squeezing”, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway
49. Steiner W. (1996) – “Tunnelling in Squeezing Rocks: Case Histories”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29 (4), pp. 211 – 246
50. Terzaghi K. (1946) – “Rock Defects and Loads in Tunnel Supports. Rock Tunnelling with Steel Supports”, R.V. Proctor and T.L. White eds., The Commercial Shearing and Stamping Co., Ohio
51. Xu Z. and Shen Z. (2007) – “A Viscoelastic Plastic model for the Three Gorges Dam Foundation Rock”, available on website [www.paper.edu.cn](http://www.paper.edu.cn)
52. Yu C.W. (1998) – “Determination of Creep Characteristics of Soft Rock and Development of Non-Linear Creep Analysis Code for Squeezing Tunnel Problem”, Doctoral Thesis, University of Bradford, UK
53. Αγιουτάντης Ζ.Γ. (1995) – “Εφαρμογή Αριθμητικών Μεθόδων για την Επίλυση Γεωμηχανικών Προβλημάτων”, *Ορυκτός Πλούτος*, 96, σελ. 23 – 24
54. ΟΤΜ Α.Τ.Ε. (2009) – “Δίδυμες Σήραγγες Περιοχής «Μαύρα Λιθάρια». Έκθεση Παρουσίασης και Αξιολόγησης Αποτελεσμάτων Γεωτεχνικής Έρευνας”, Μελέτη Έργου
55. ΟΤΜ Α.Τ.Ε. (2009) – “Σήραγγα 11 στα Μαύρα Λιθάρια. Εκσκαφή & Προσωρινή Υποστήριξη – Τεχνική Έκθεση – Υπολογισμοί”, Μελέτη Έργου
56. Ρόζος Δ. (1989) – “Τεχνικογεωλογικές Συνθήκες στο Νομό Αχαΐας – Γεωμηχανικοί Χαρακτήρες των Πλειοπλειστοκαινικών Ιζημάτων”, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα
57. Σοφιανός Α.Ι. (2009) – “Υποστήριξη Υπογείων Έργων”, Σημειώσεις Μαθήματος Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών
58. Σοφιανός Α.Ι. και Νομικός Π.Π. (2008) – “Προχωρημένη Μηχανική των Πετρωμάτων”, Σημειώσεις Μαθήματος Δ.Π.Μ.Σ. «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»
59. Τσουτρέλης Χ.Ε., Γκίκας Ν.Γ. και Νομικός Π.Π. (1999) – “Σύγκριση Δύο Αριθμητικών μεθόδων κατά τη Μελέτη της Ευστάθειας Σήραγγας Μεγάλης Διατομής”, *Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ*, V, τεύχ. 1 – 2



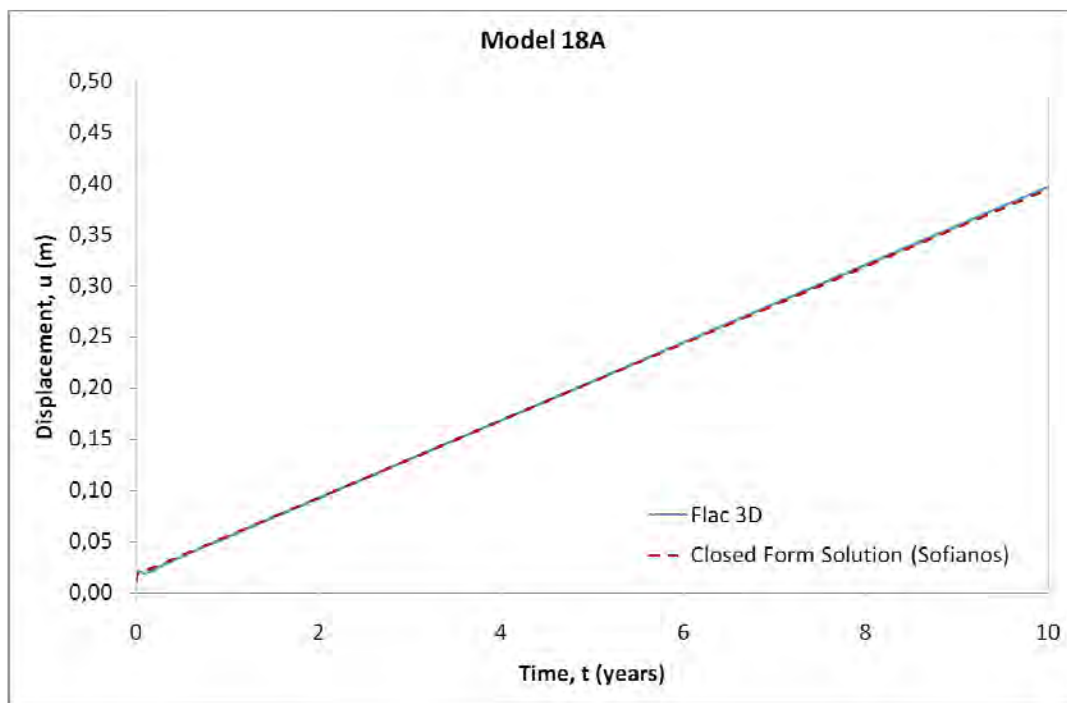
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



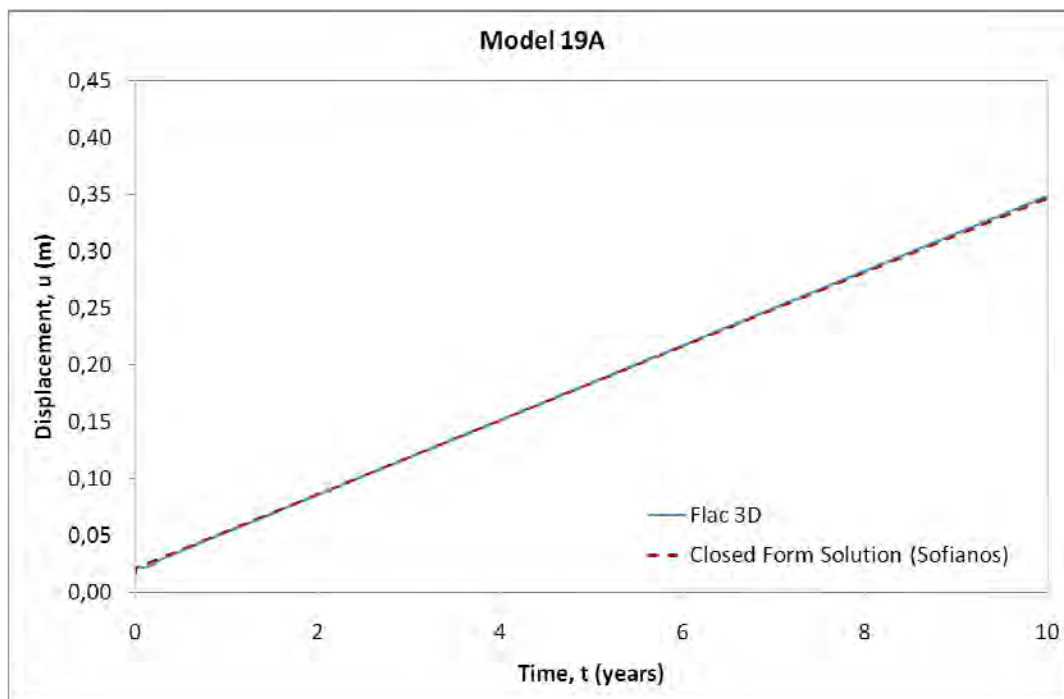
**Σχήμα Α.1:** Σύγκριση καμπύλων ερπυσμού μοντέλων 8Α και 9Α με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009) και την 3<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Goodman, 1989).



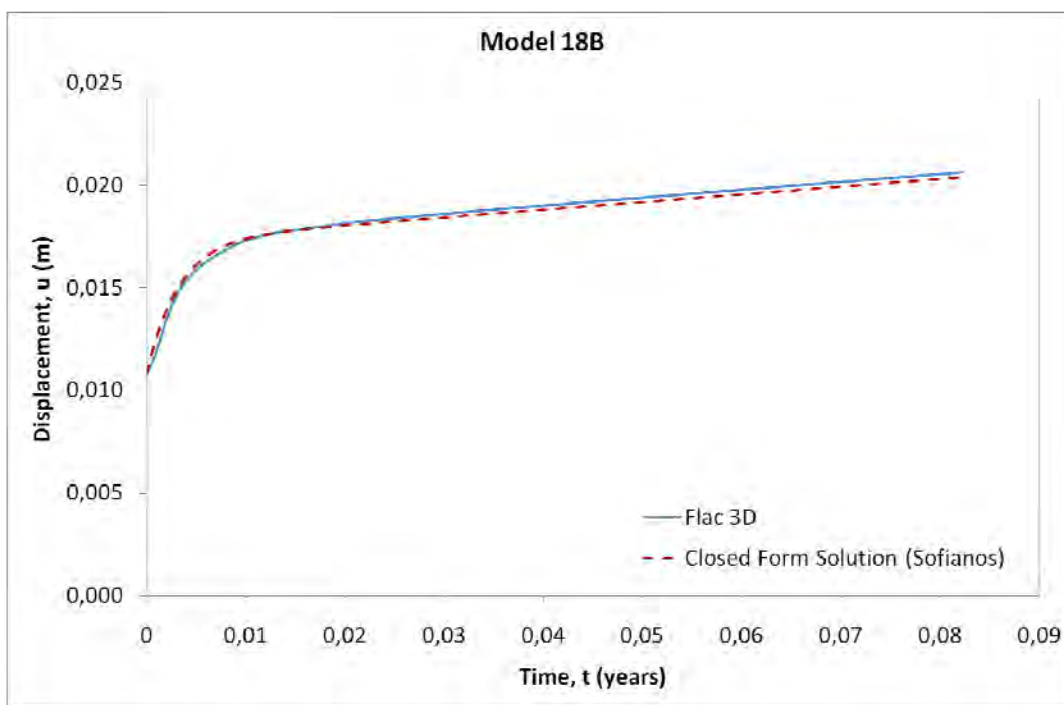
**Σχήμα Α.2:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17Α με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



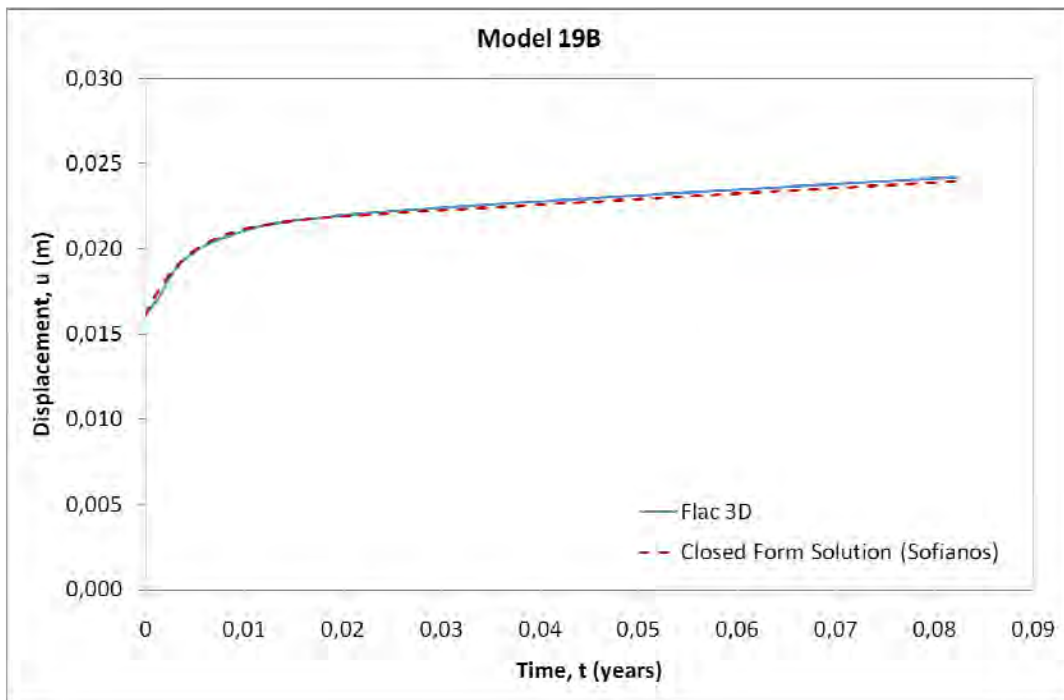
**Σχήμα Α.3:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18Α με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



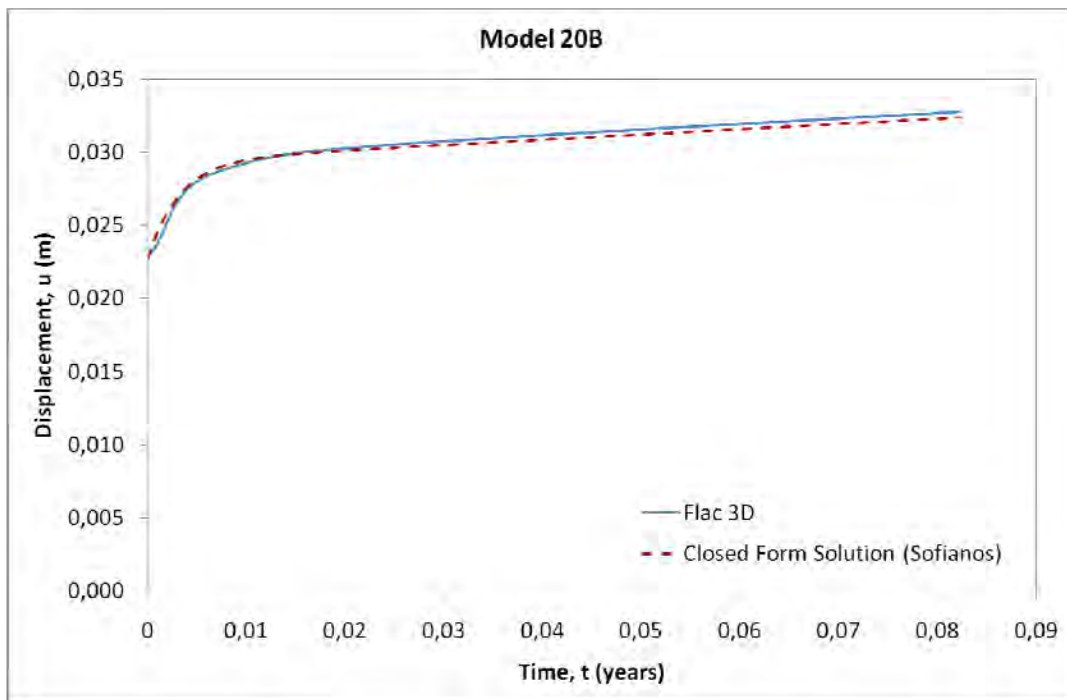
**Σχήμα Α.4:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19Α με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



**Σχήμα Α.5:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18Β με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

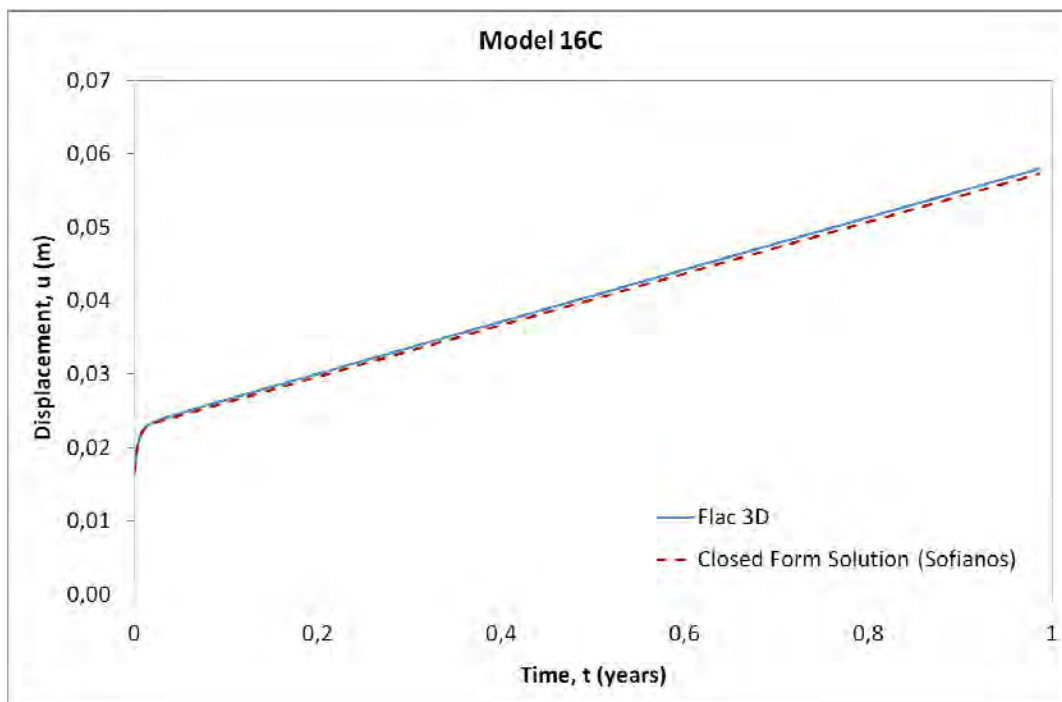


**Σχήμα Α.6:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19B με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

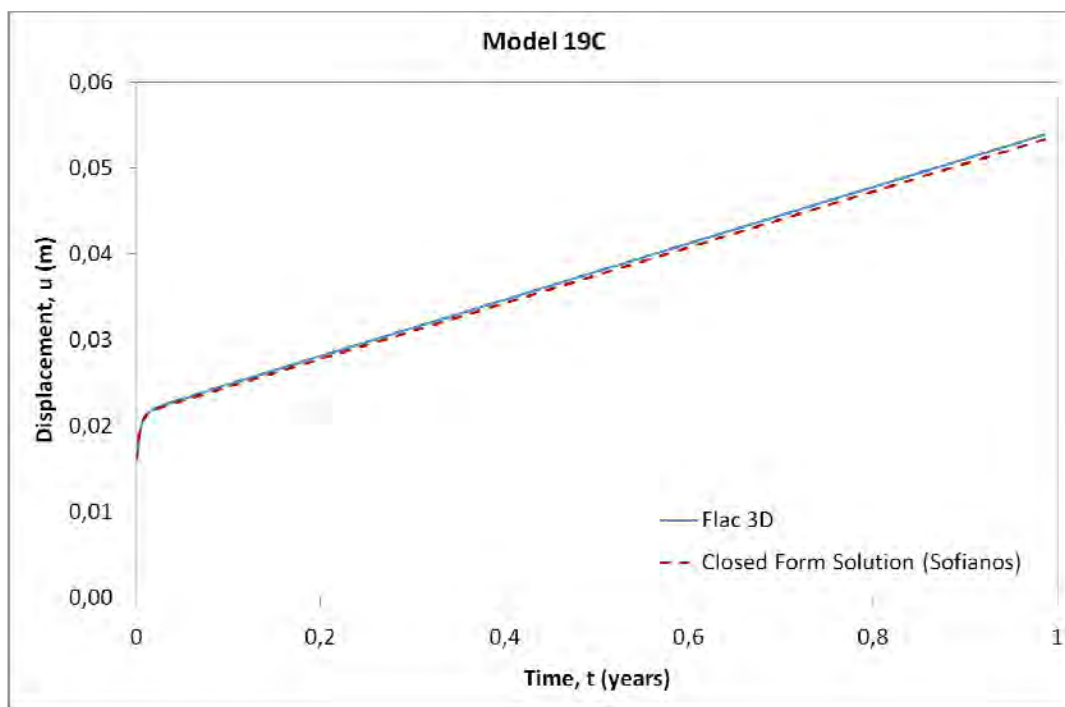


**Σχήμα Α.7:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20B με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

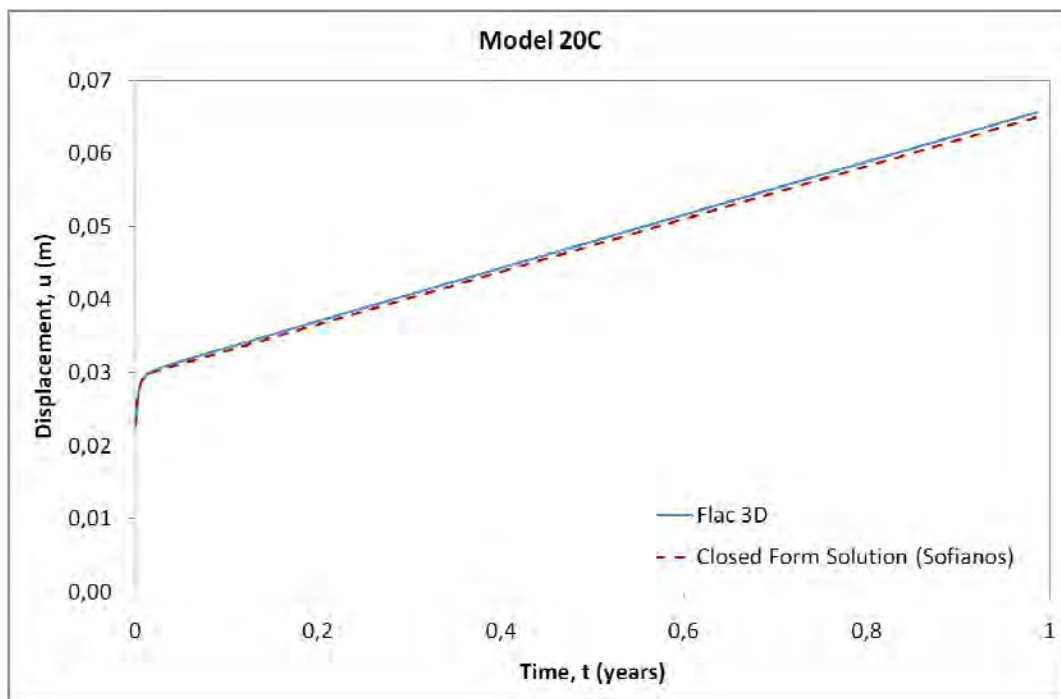




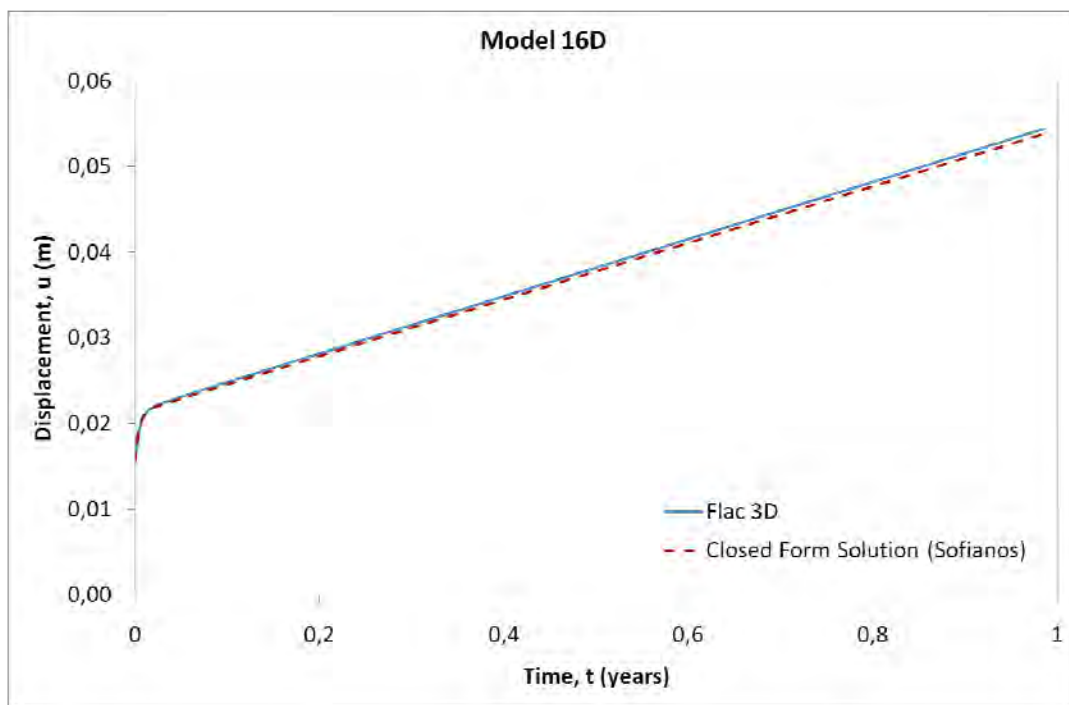
**Σχήμα Α.8:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16C με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



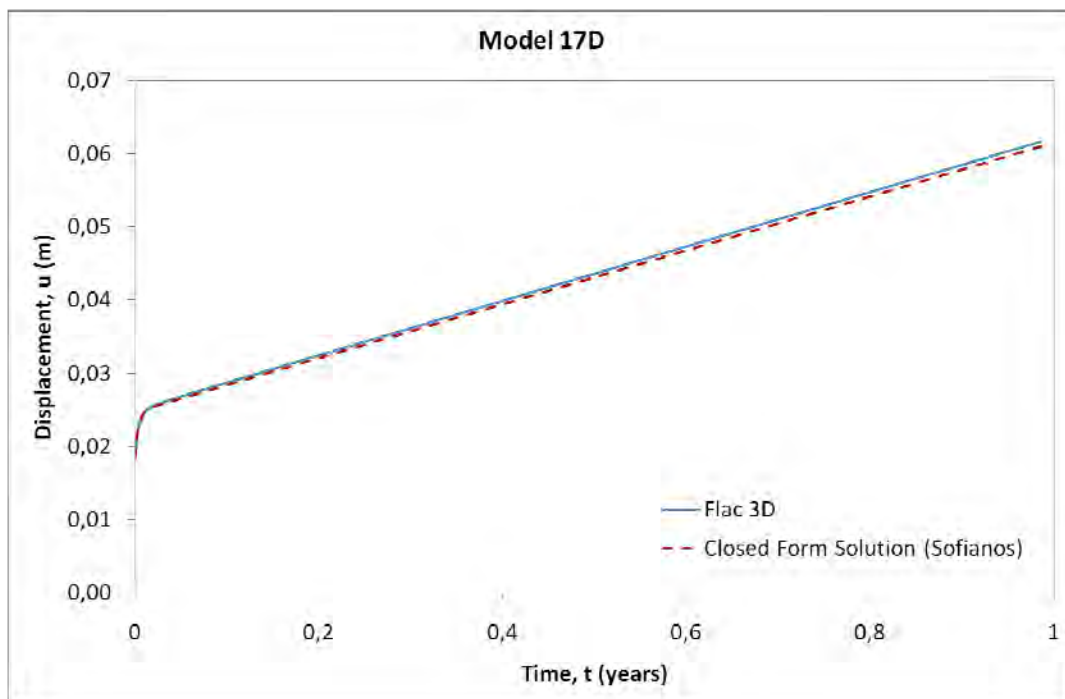
**Σχήμα Α.9:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 19C με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



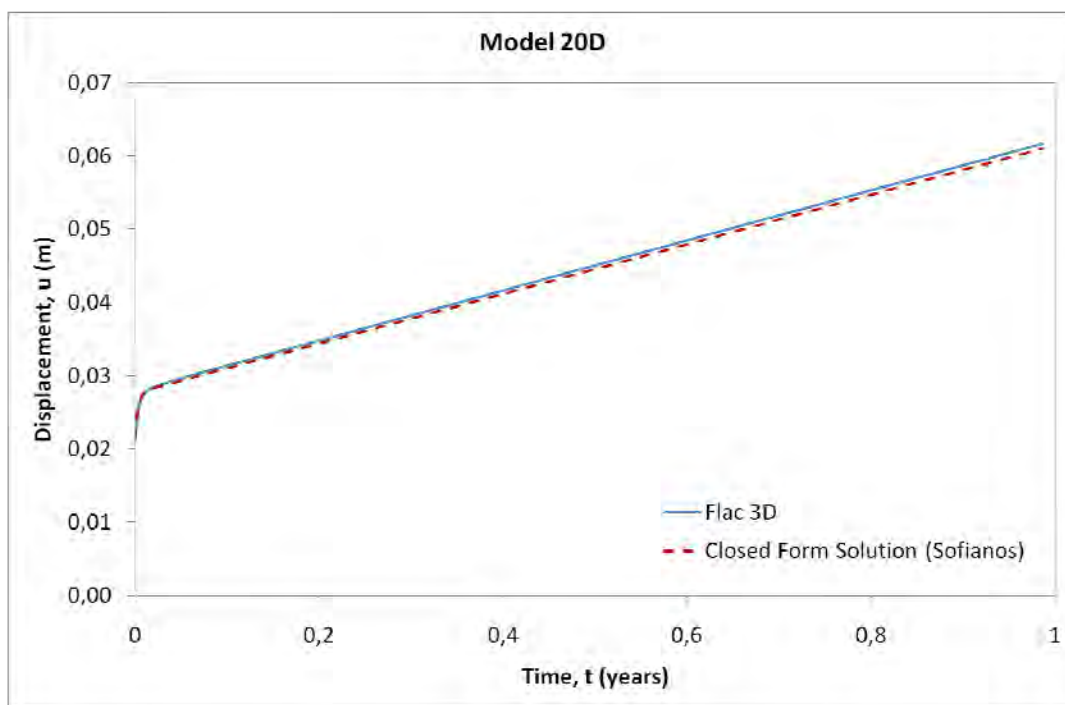
**Σχήμα Α.10:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20C με την 1<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



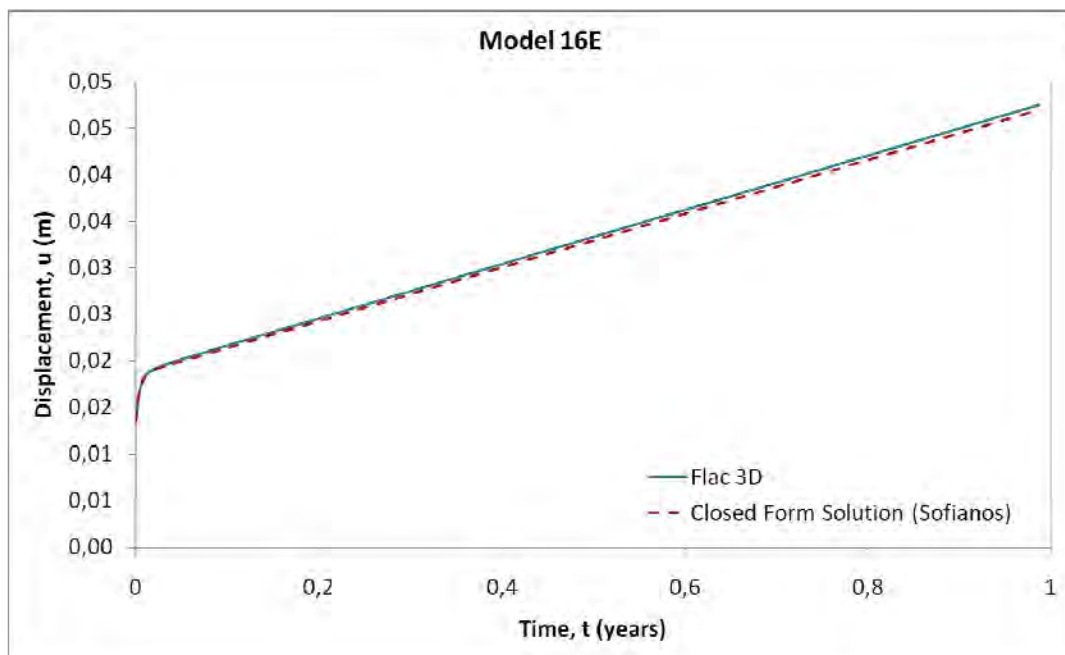
**Σχήμα Α.11:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16D με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



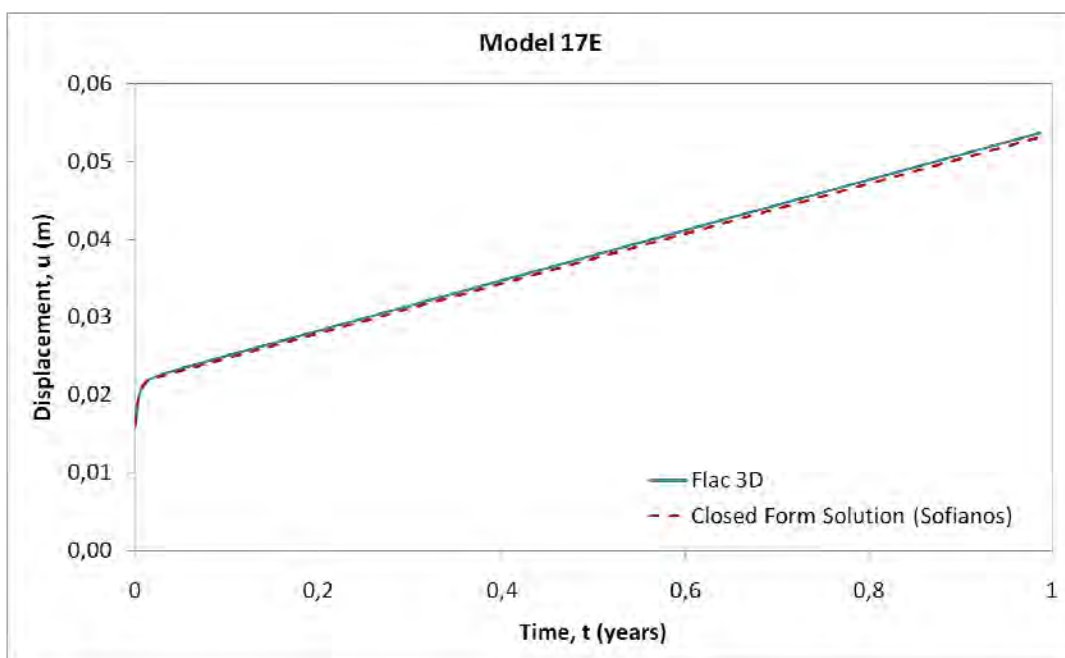
**Σχήμα Α.12:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17D με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



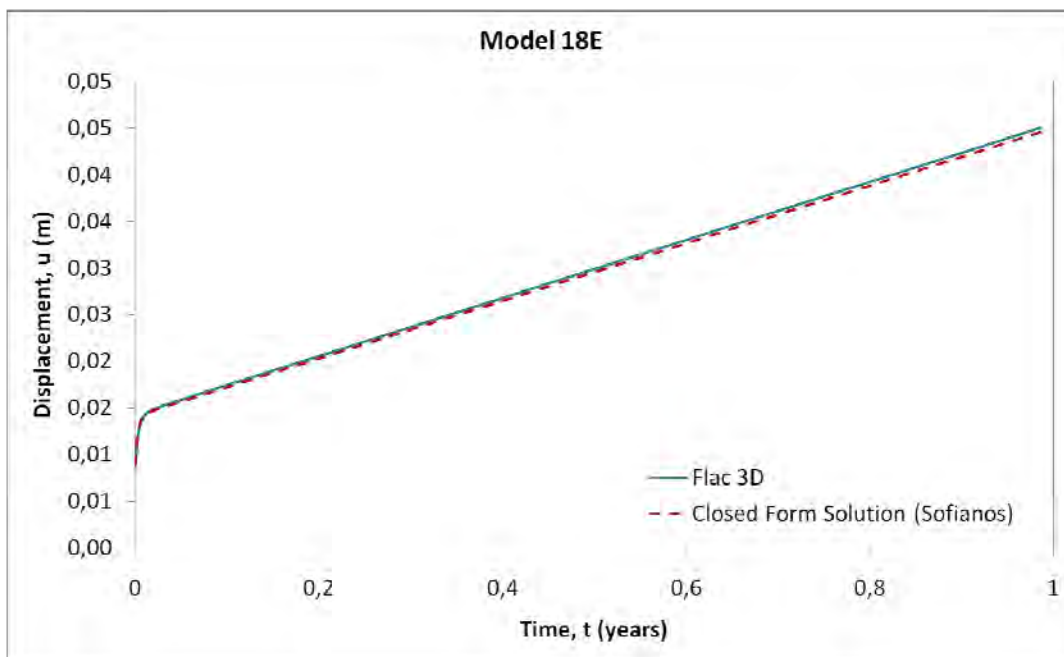
**Σχήμα Α.13:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 20D με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



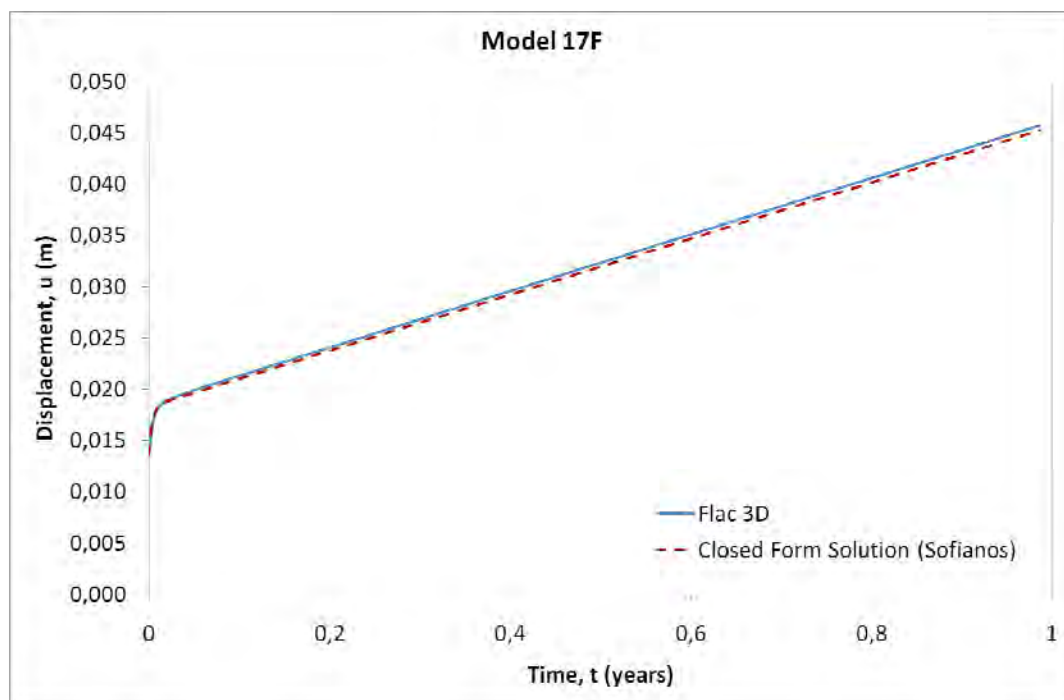
**Σχήμα Α.14:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 16E με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



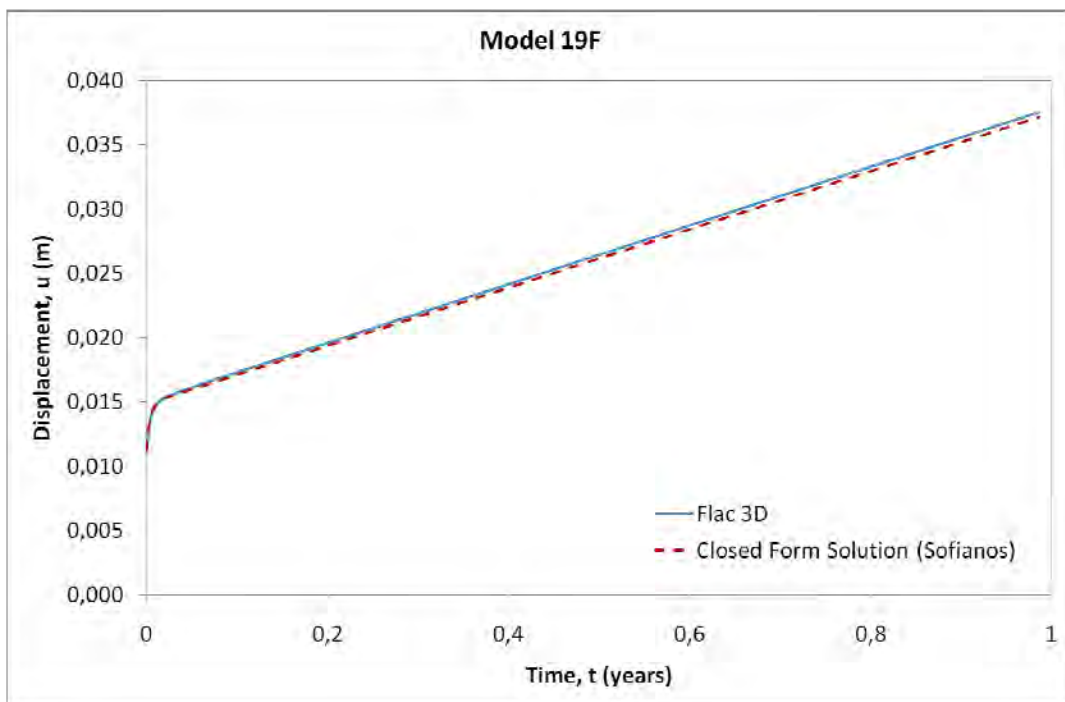
**Σχήμα Α.15:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17E με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



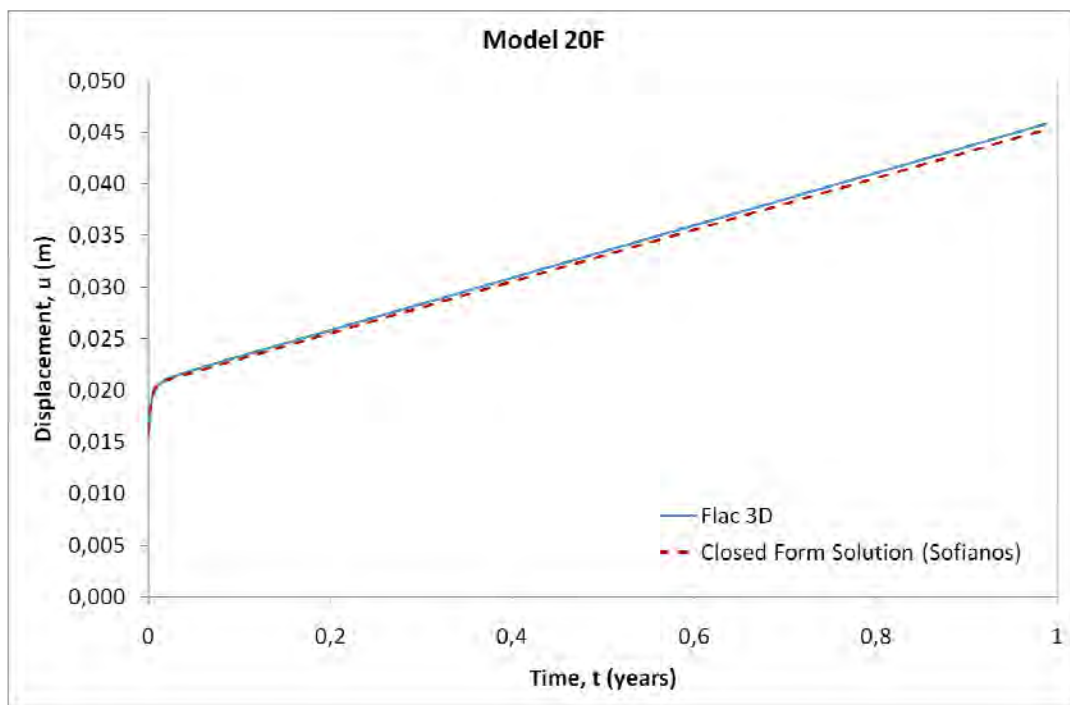
**Σχήμα Α.16:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 18E με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).



**Σχήμα Α.17:** Σύγκριση καμπύλης ερπυσμού μοντέλου 17F με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

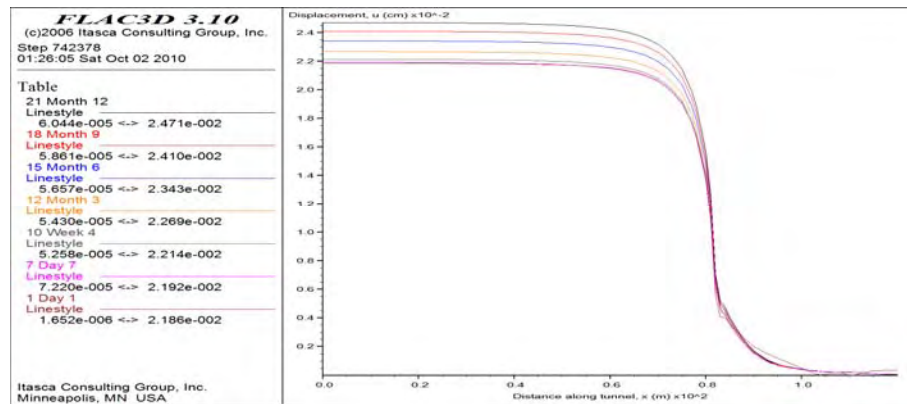


**Σχήμα Α.18:** Σύγκριση καμπύλης ερπισμού μοντέλου 19F με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

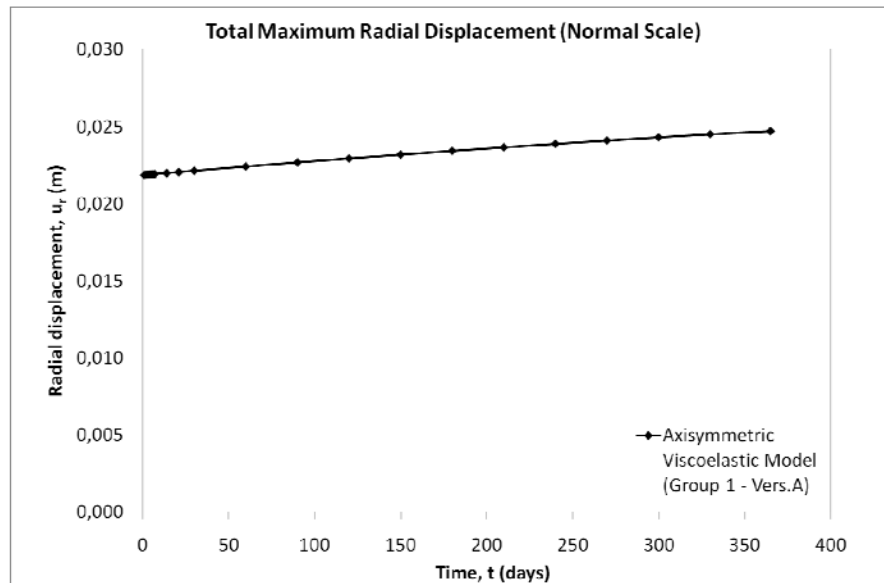


**Σχήμα Α.19:** Σύγκριση καμπύλης ερπισμού μοντέλου 20F με τη 2<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Σοφιανός, 2009).

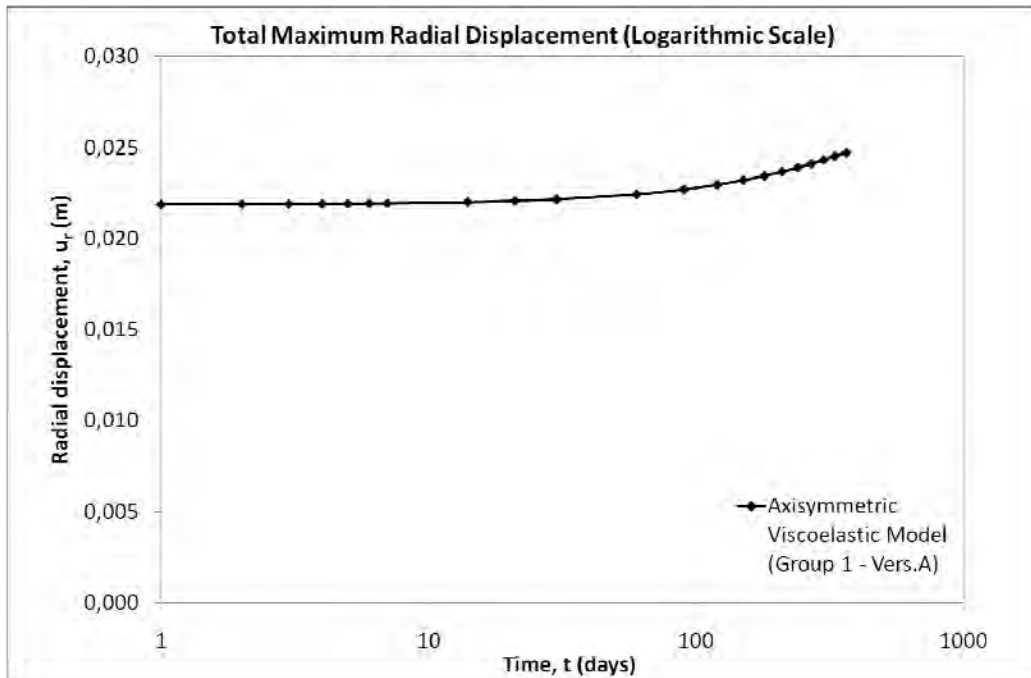
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



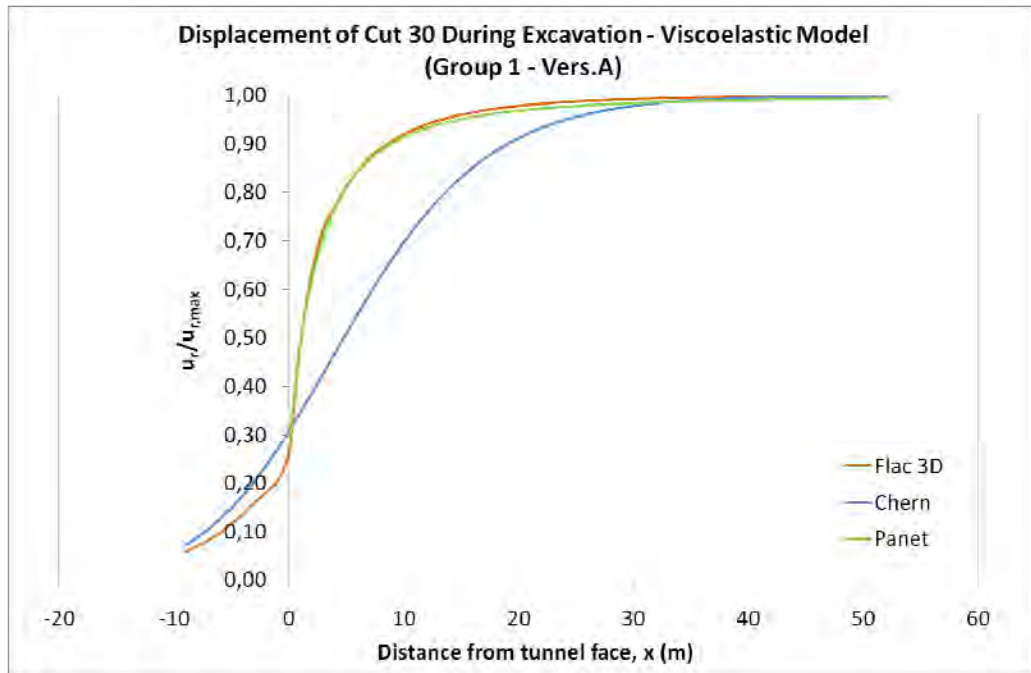
Σχήμα Β.1: Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



Σχήμα Β.2: Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).

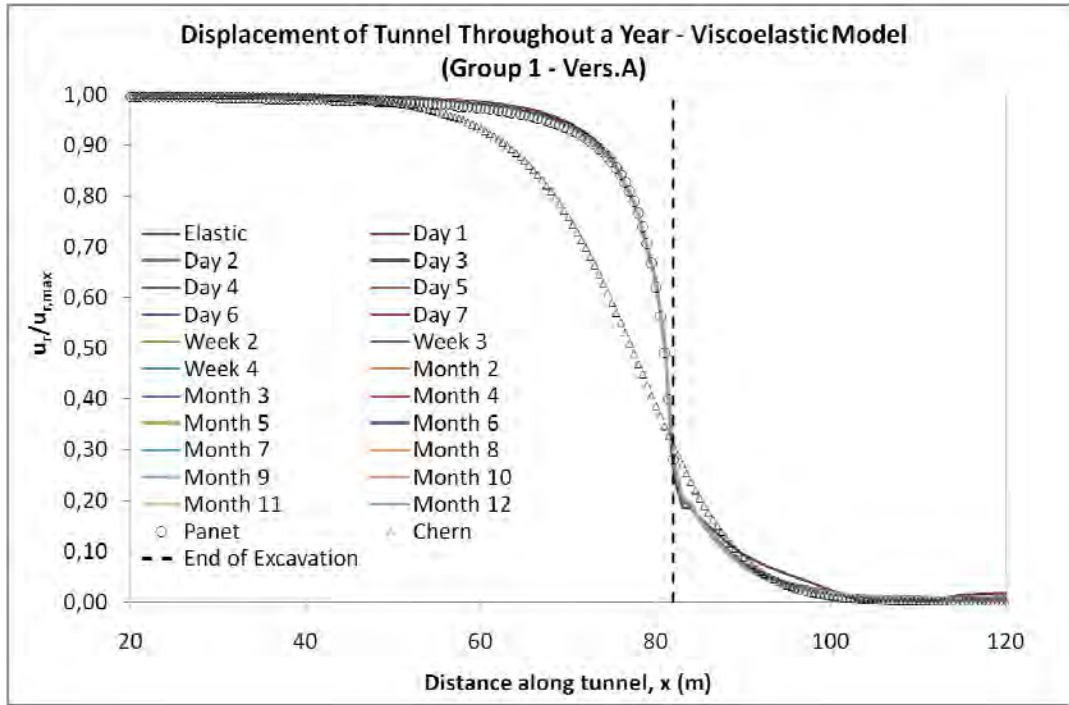


**Σχήμα Β.3:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).

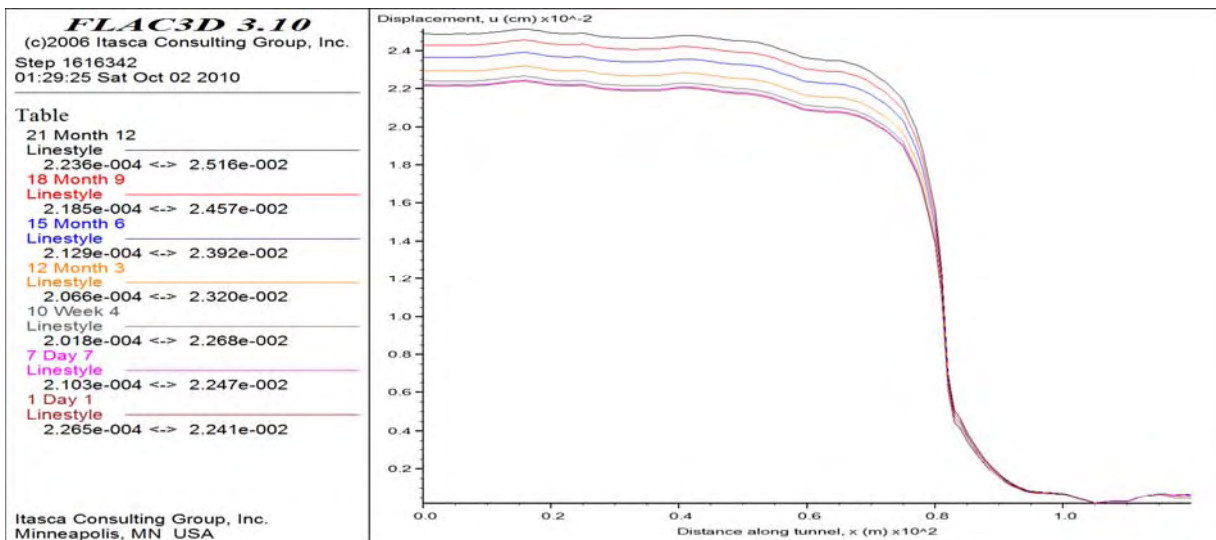


**Σχήμα Β.4:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

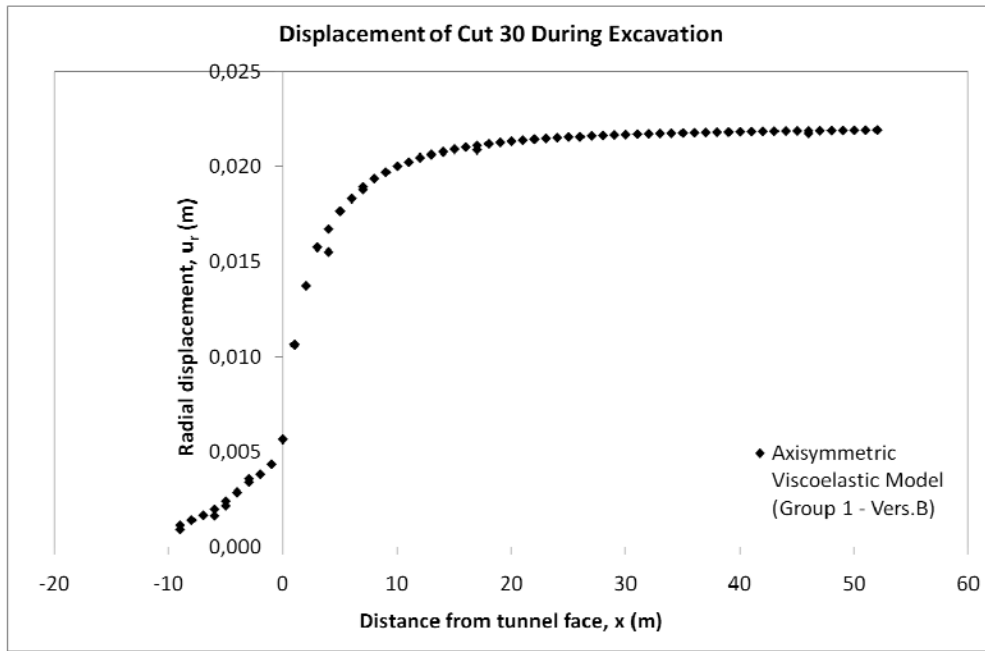




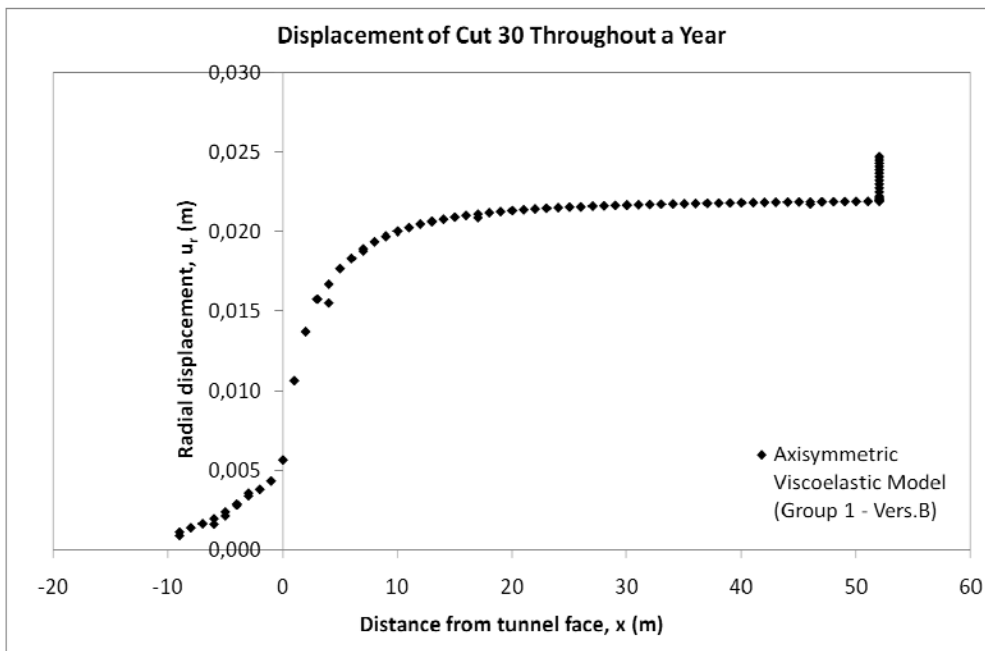
**Σχήμα Β.5:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



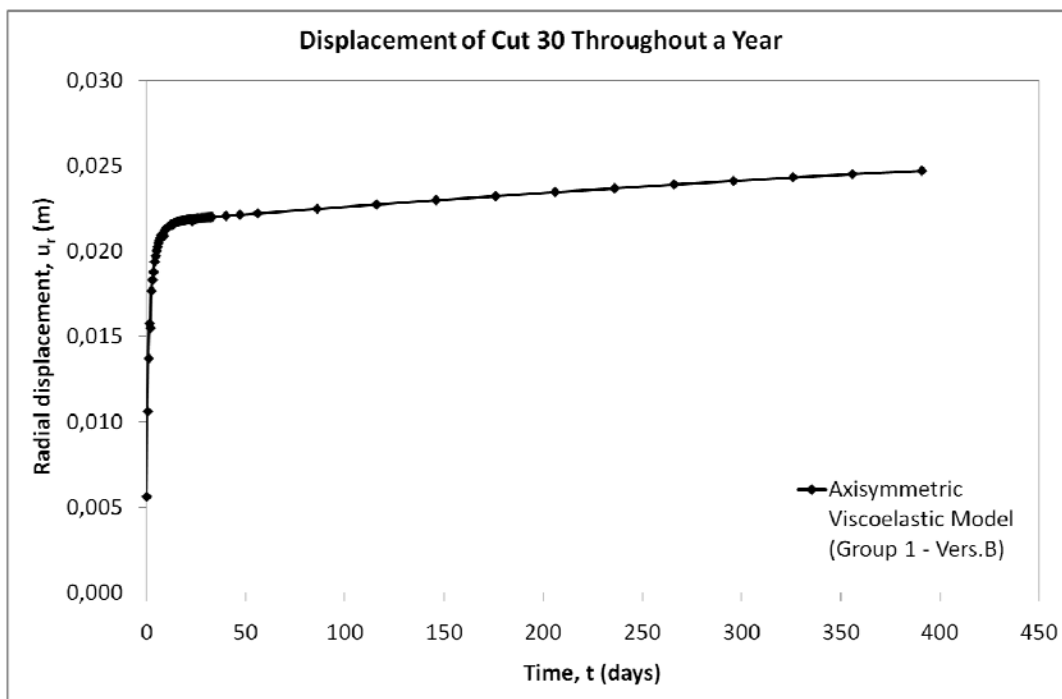
**Σχήμα Β.6:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



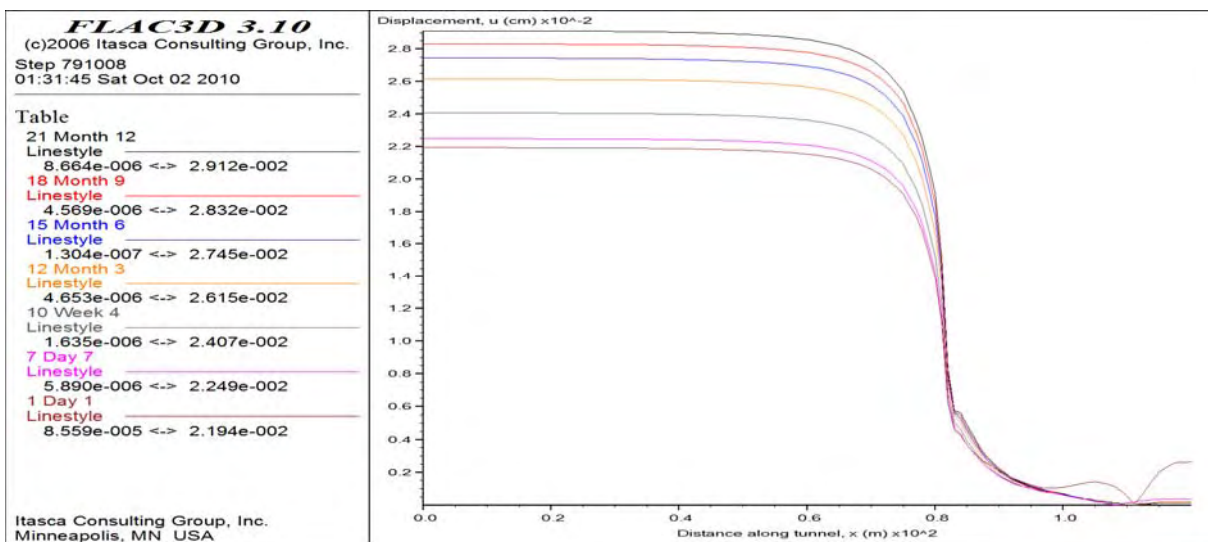
**Σχήμα Β.7:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



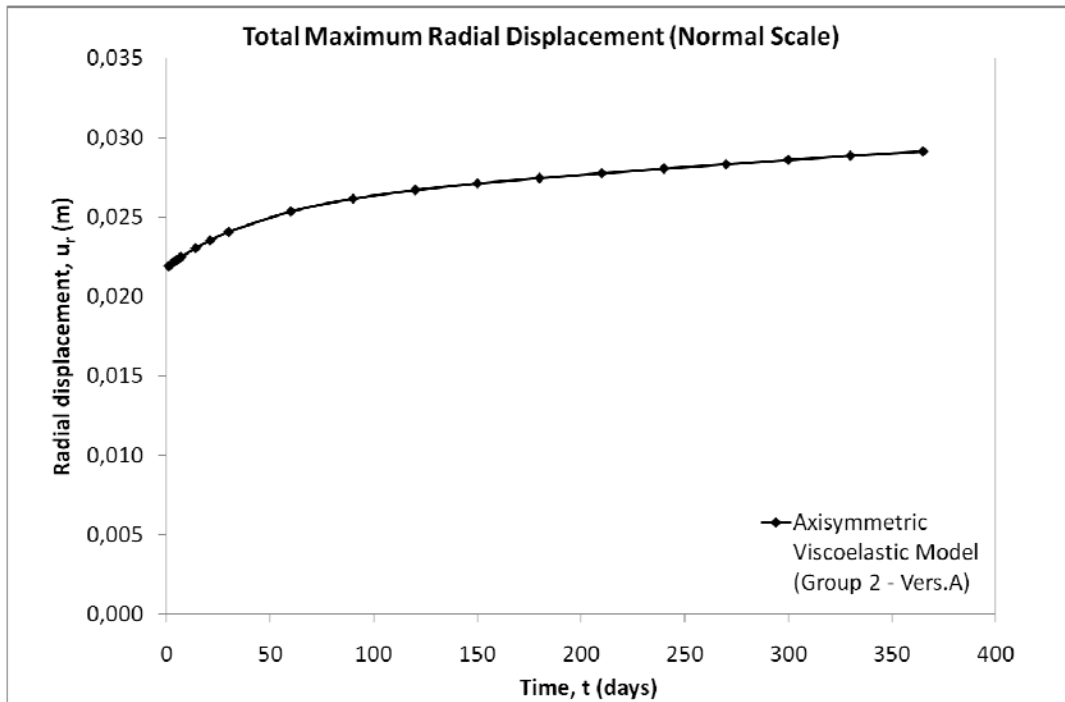
**Σχήμα Β.8:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



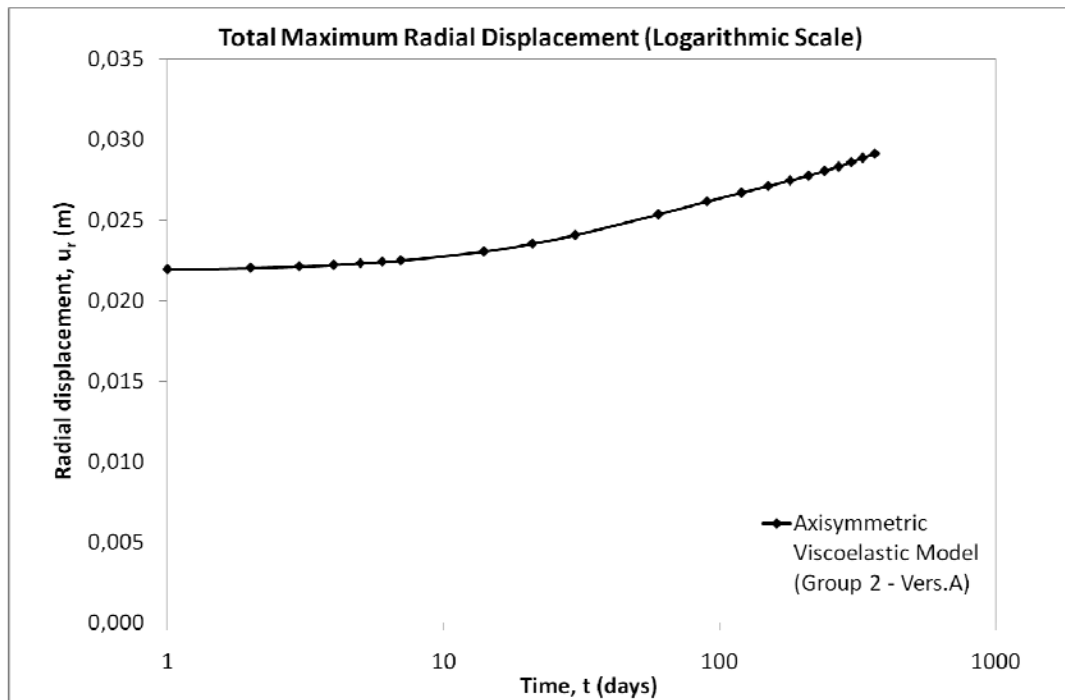
**Σχήμα Β.9:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



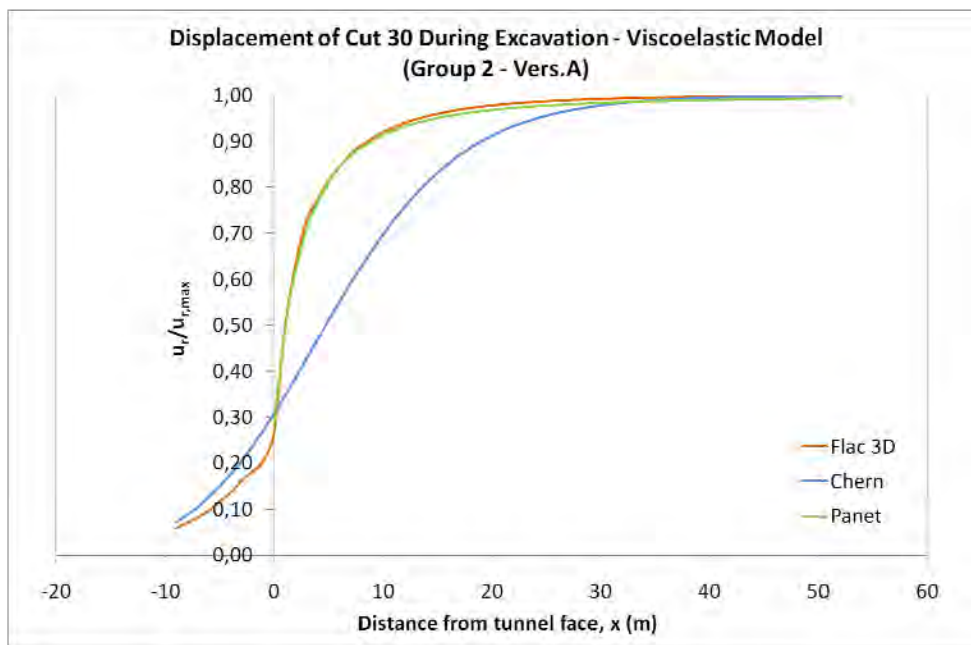
**Σχήμα Β.10:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



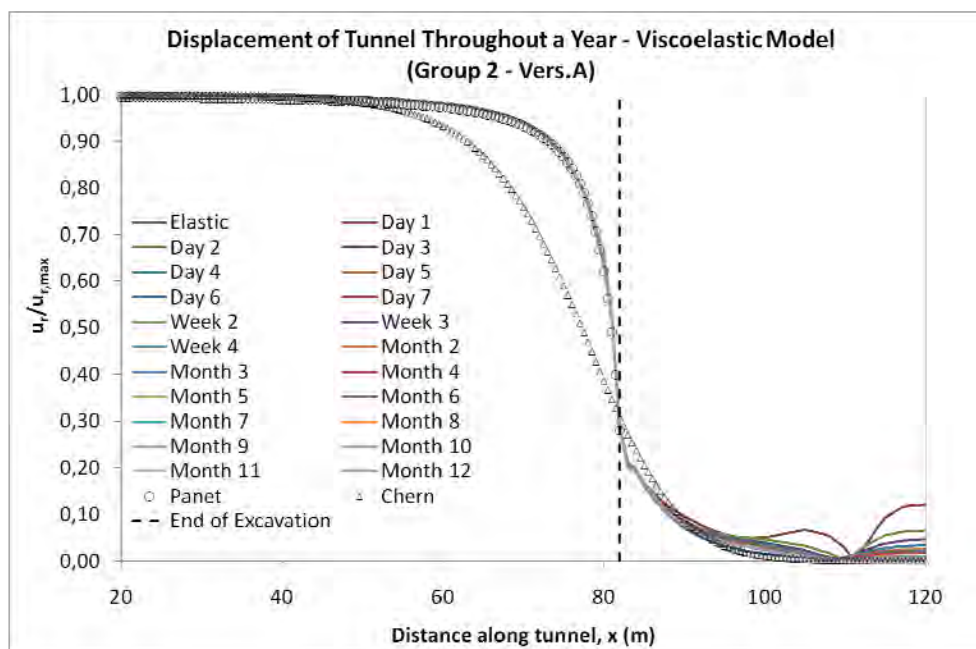
**Σχήμα Β.11:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).



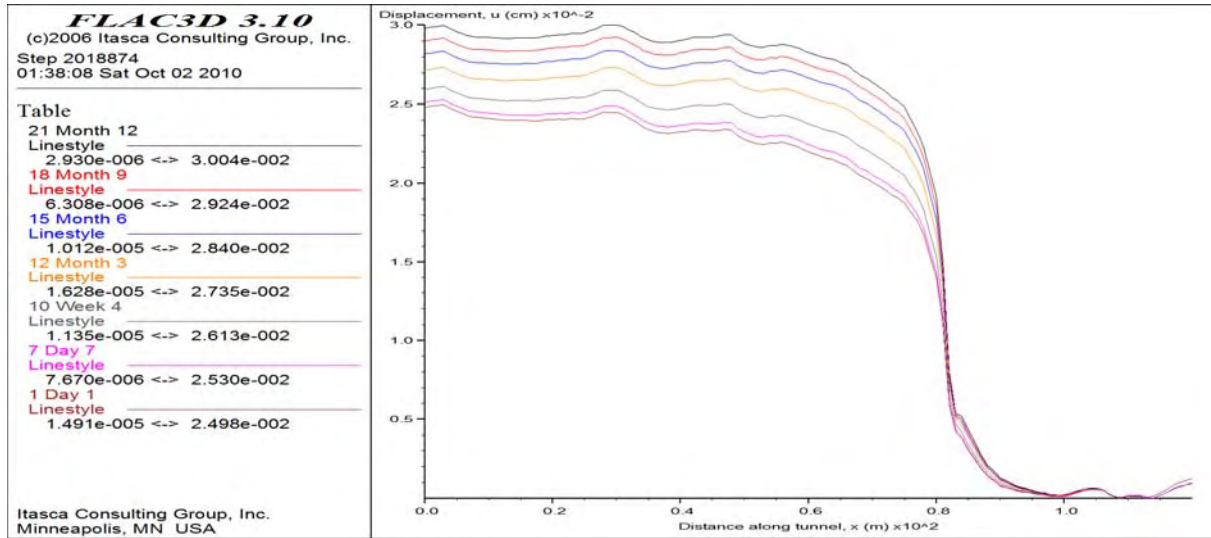
**Σχήμα Β.12:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



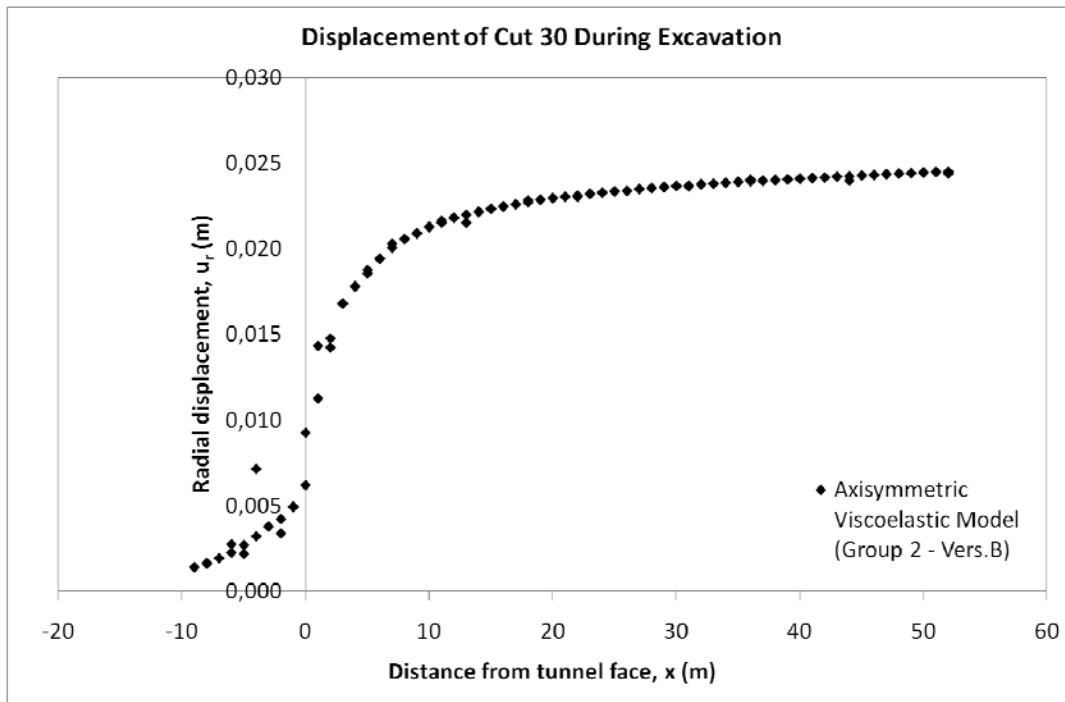
**Σχήμα Β.13:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



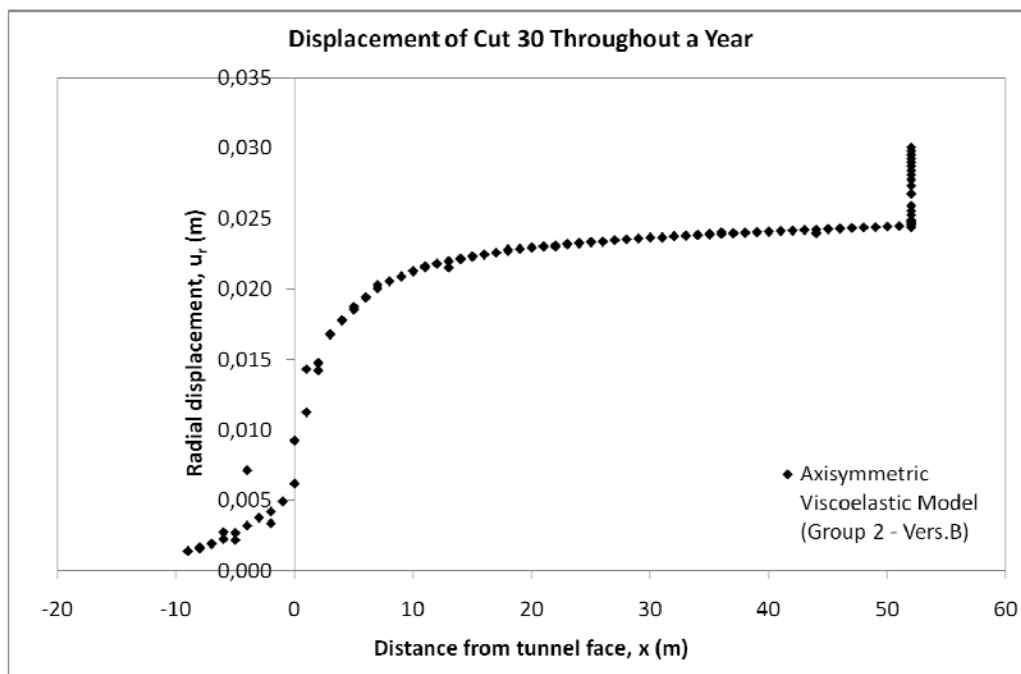
**Σχήμα Β.14:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



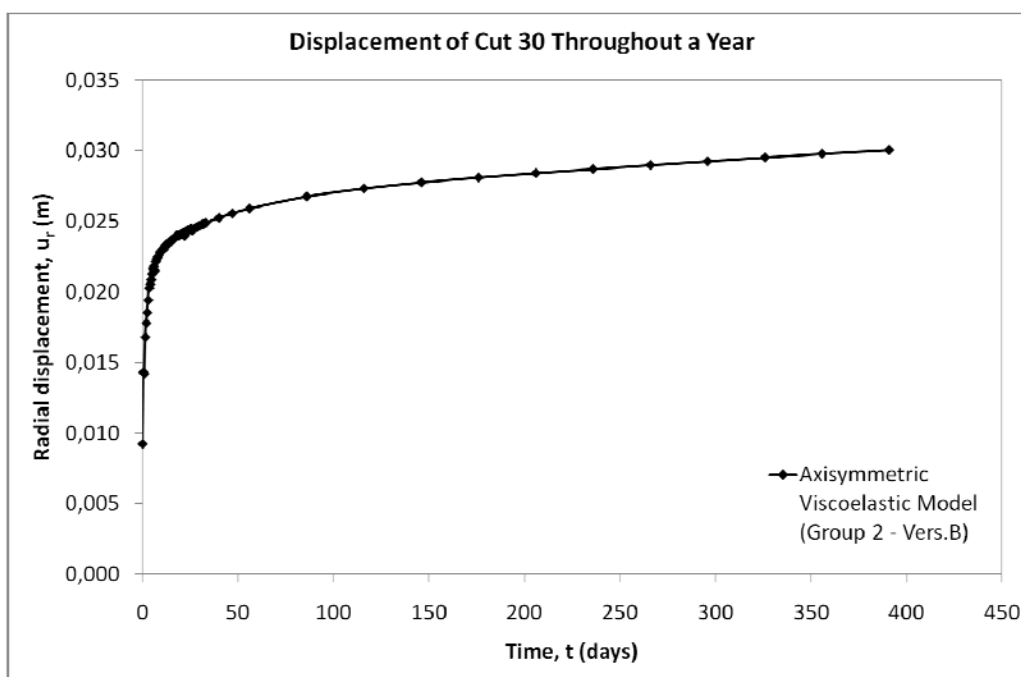
**Σχήμα Β.15:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



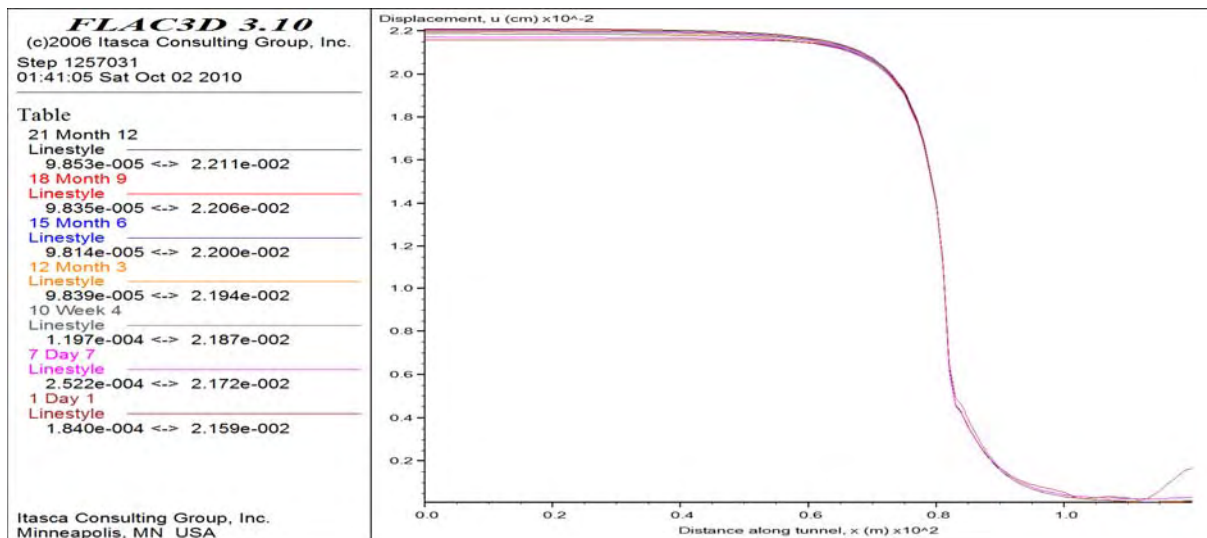
**Σχήμα Β.16:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



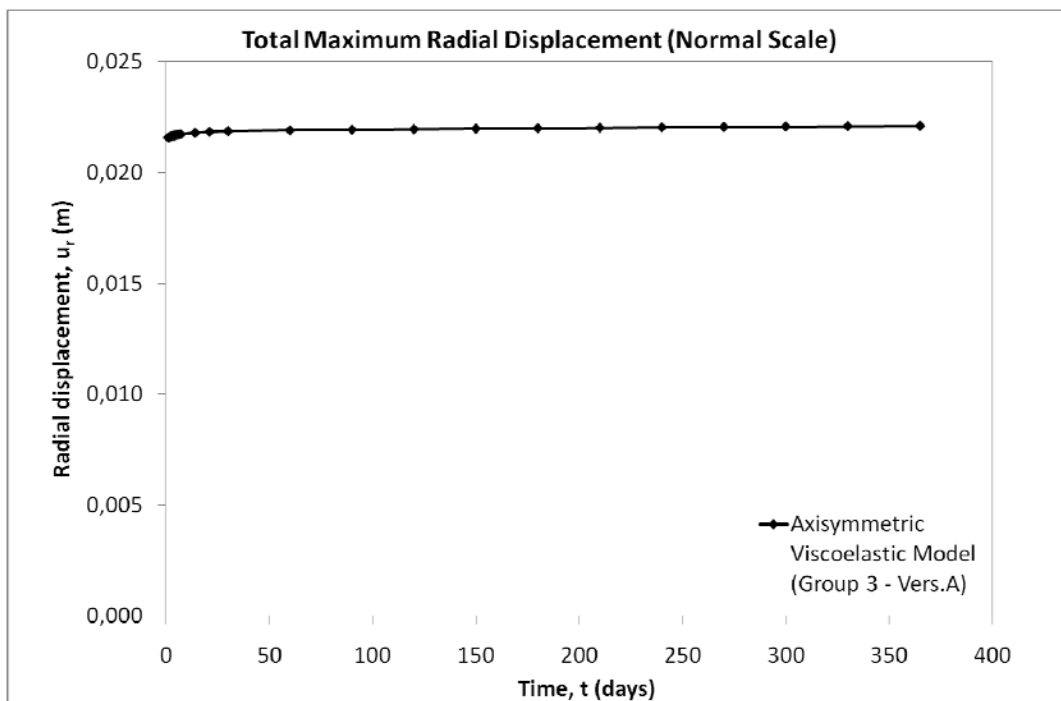
**Σχήμα Β.17:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα Β.18:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

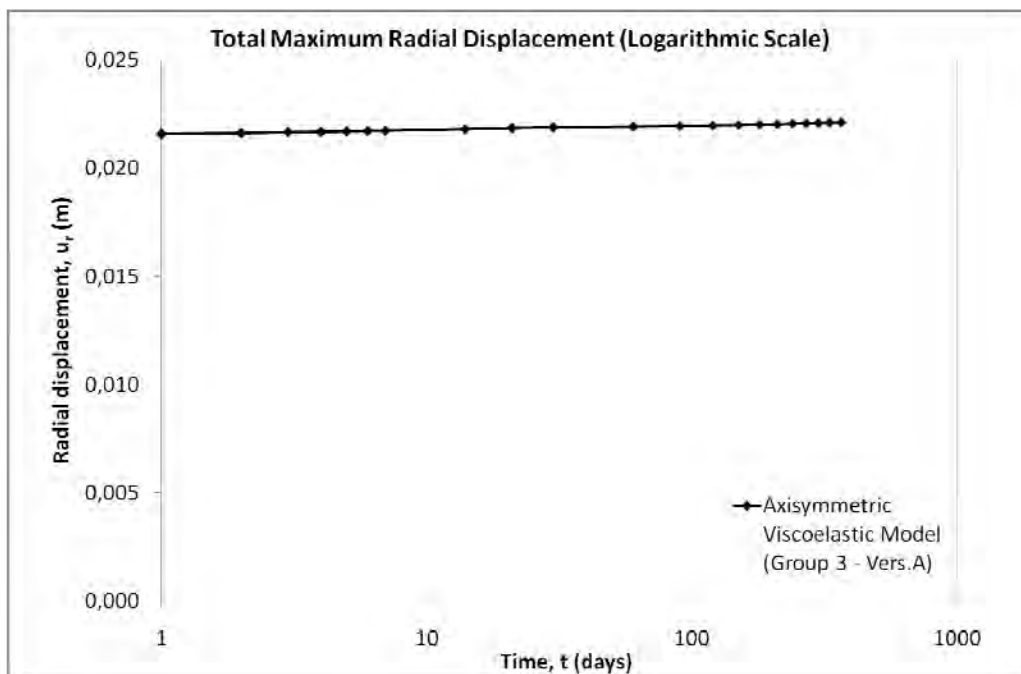


**Σχήμα Β.19:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιζωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

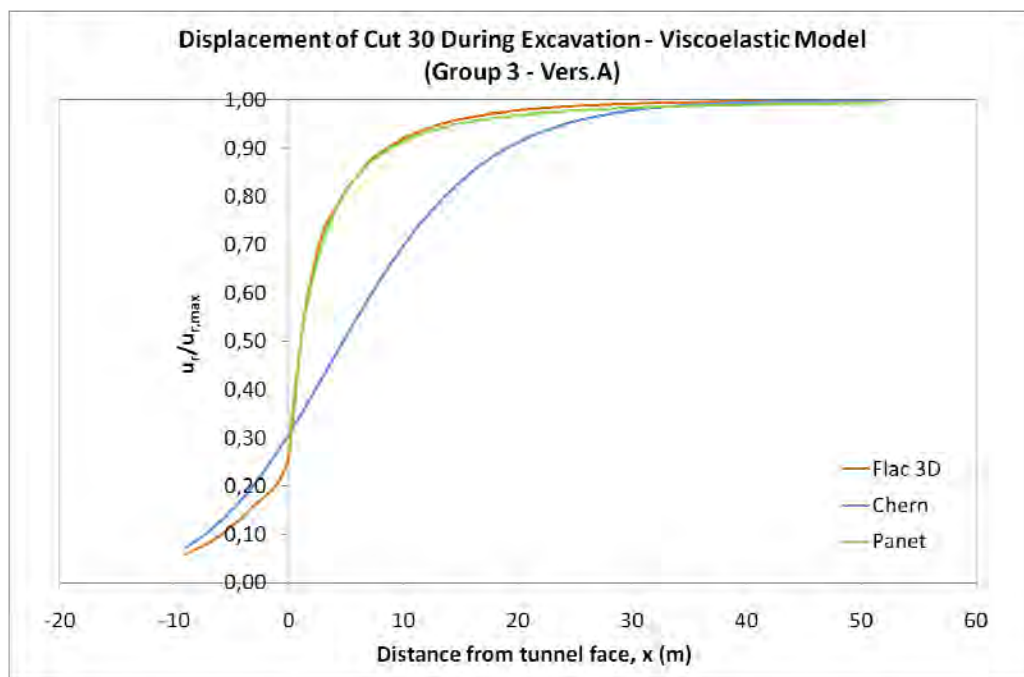


**Σχήμα Β.20:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιζωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).

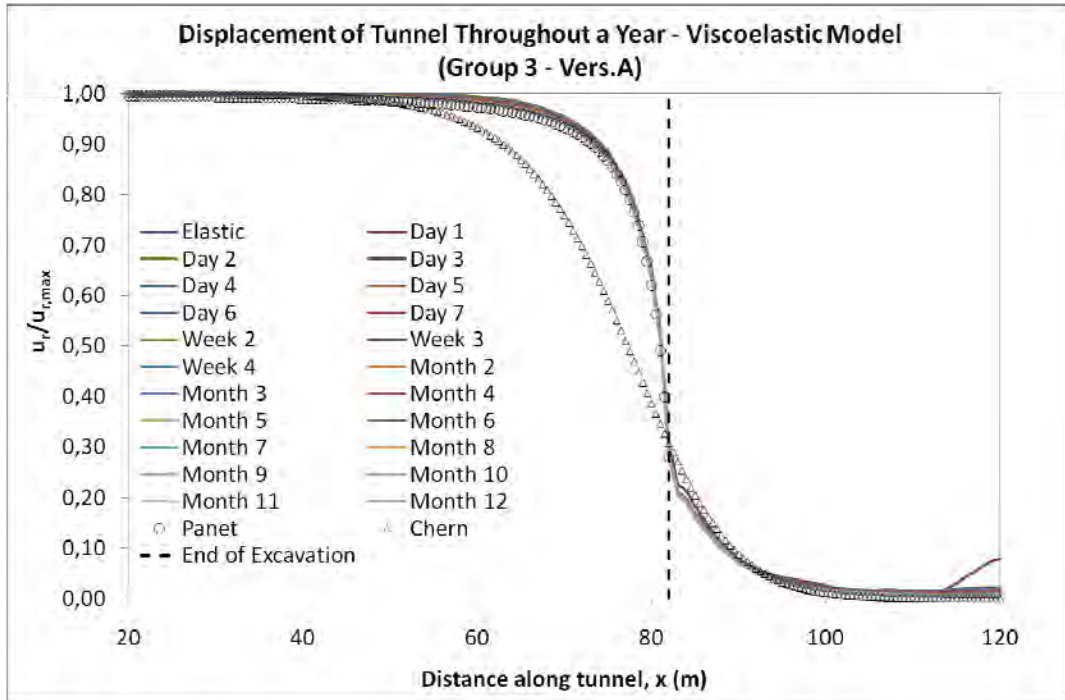




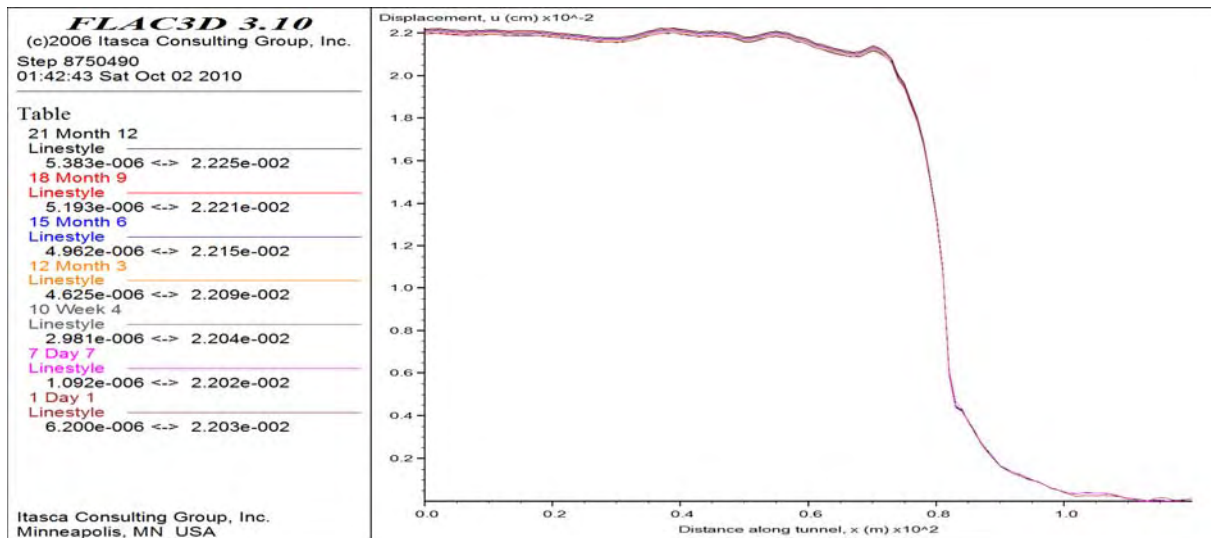
**Σχήμα Β.21:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



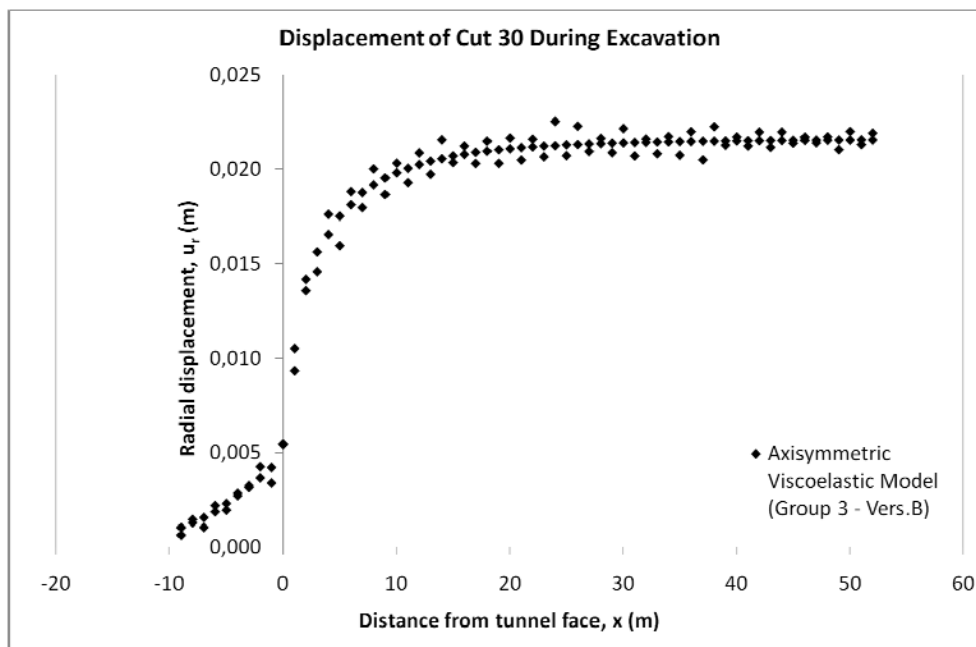
**Σχήμα Β.22:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιαμέσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



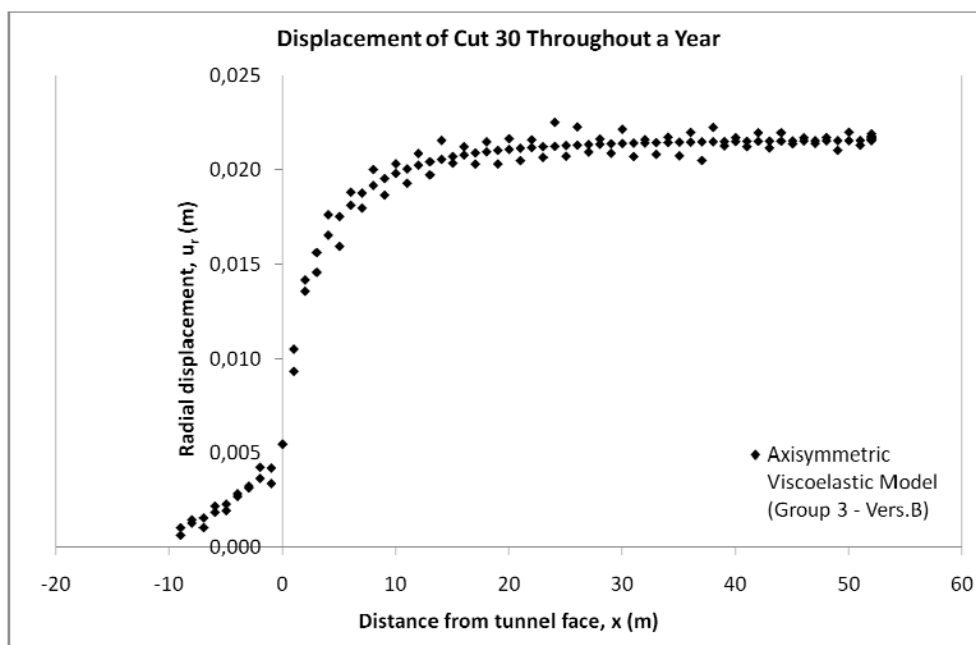
**Σχήμα Β.23:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



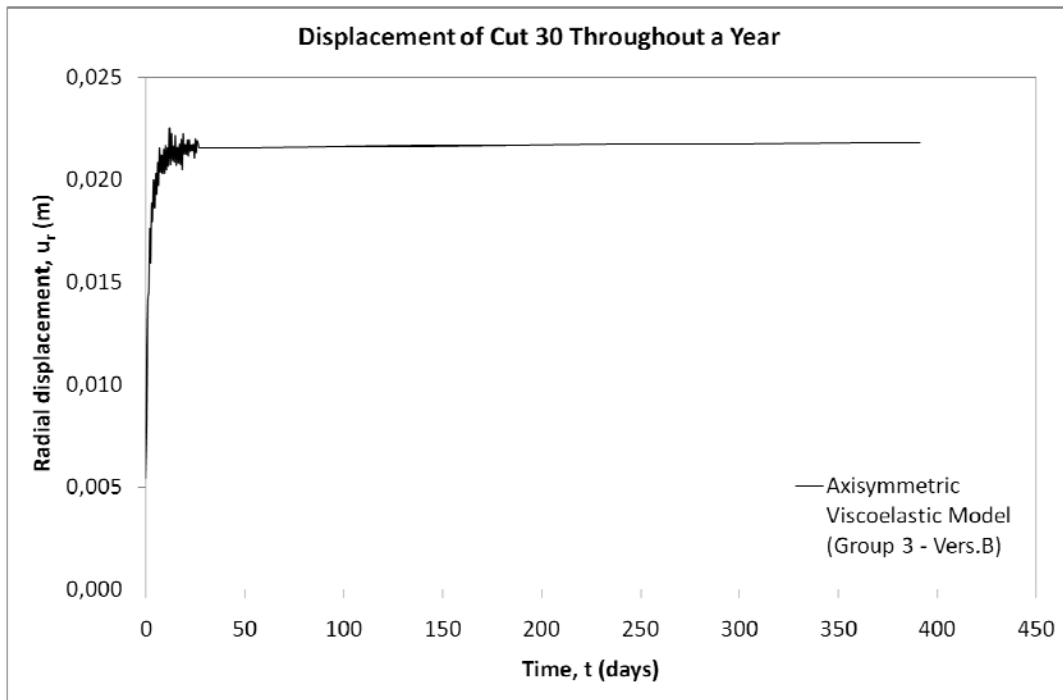
**Σχήμα Β.24:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



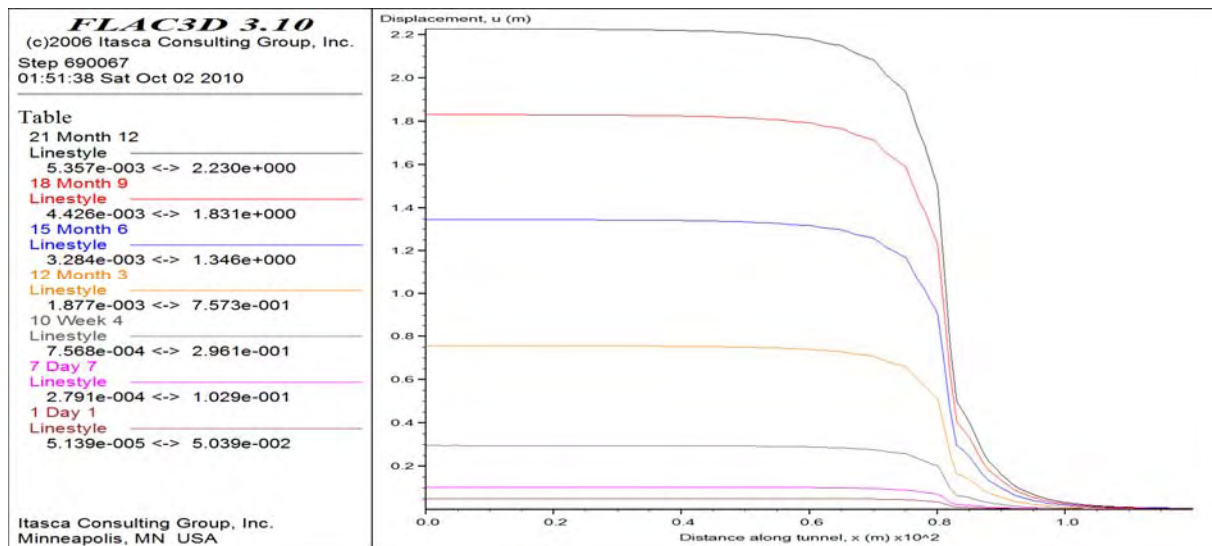
**Σχήμα Β.25:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



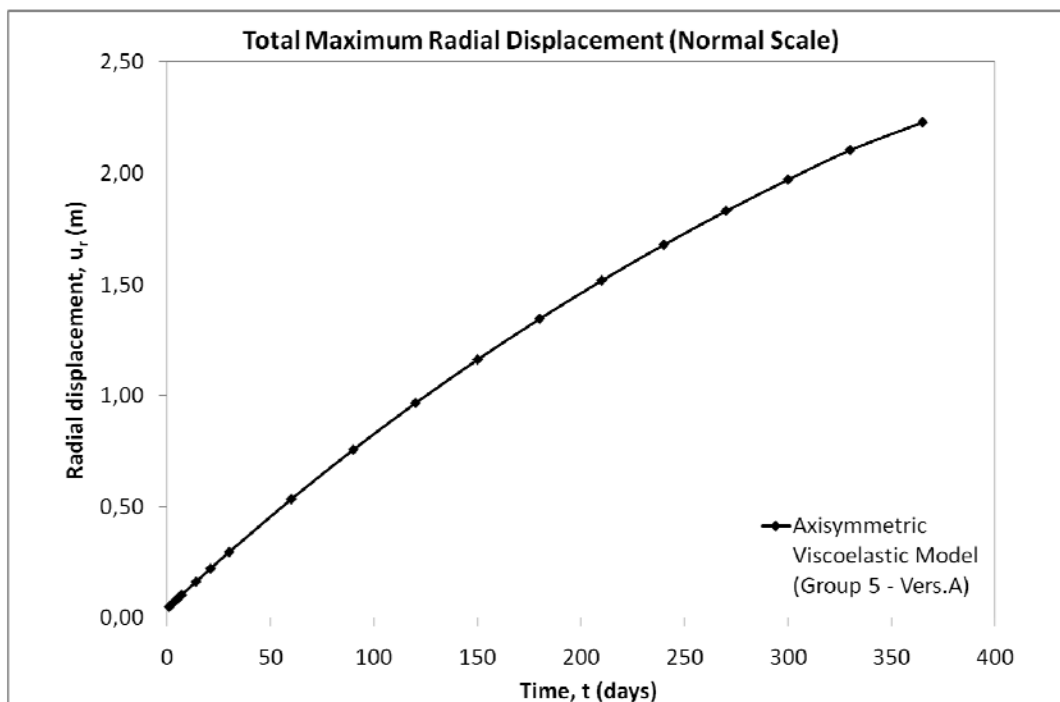
**Σχήμα Β.26:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



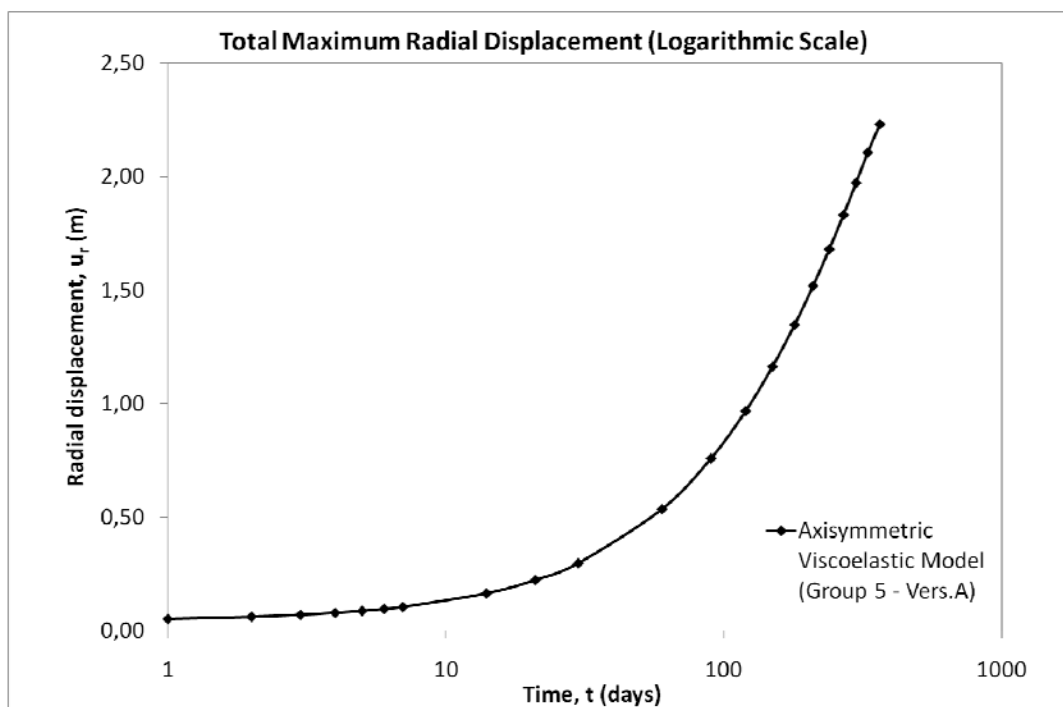
**Σχήμα Β.27:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιαμέσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



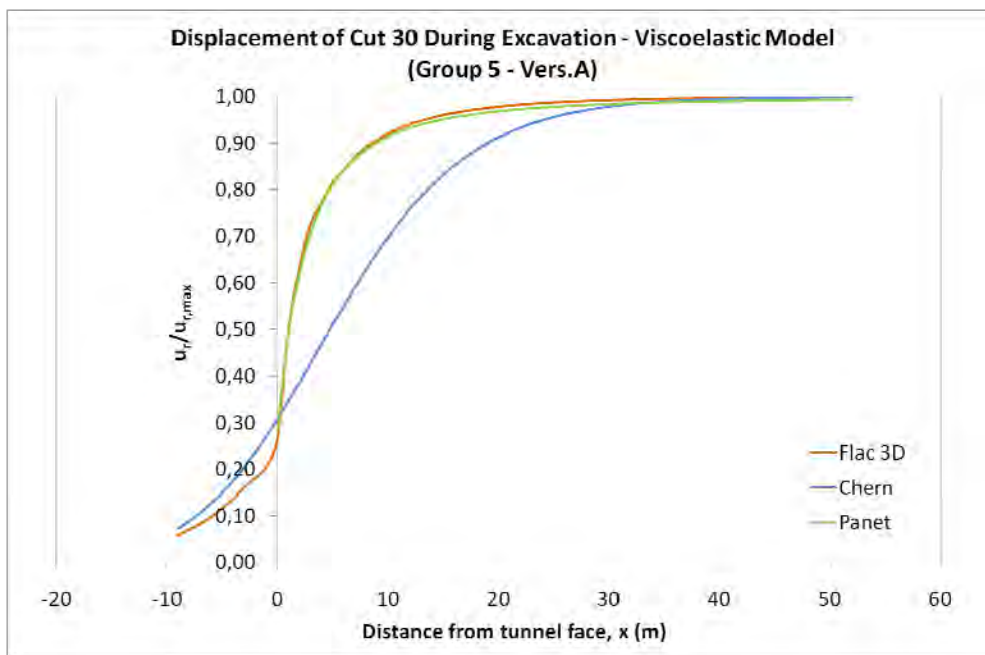
**Σχήμα Β.28:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



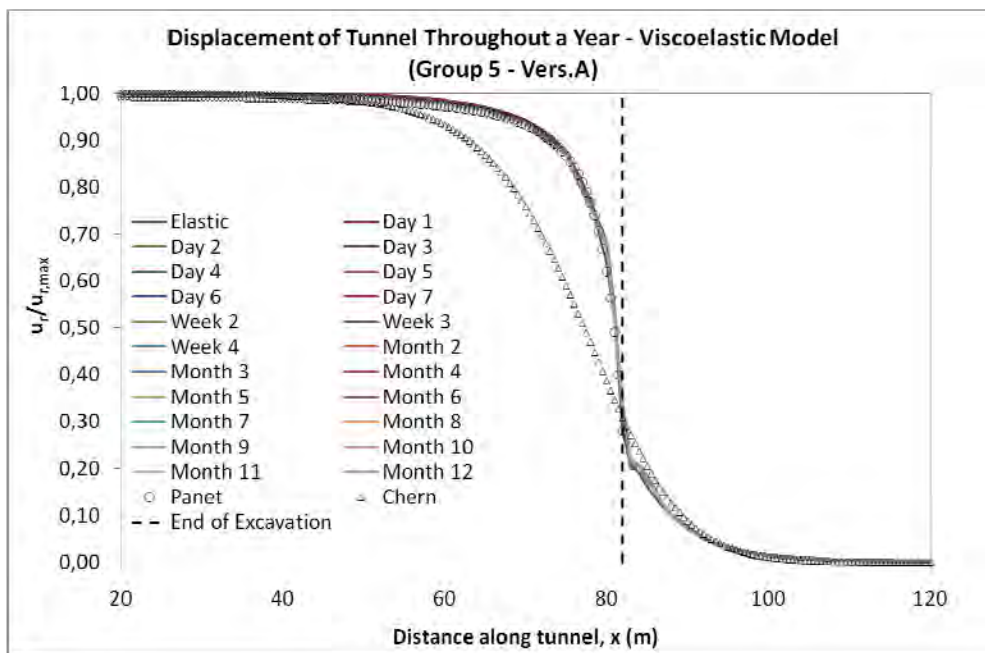
**Σχήμα Β.29:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).



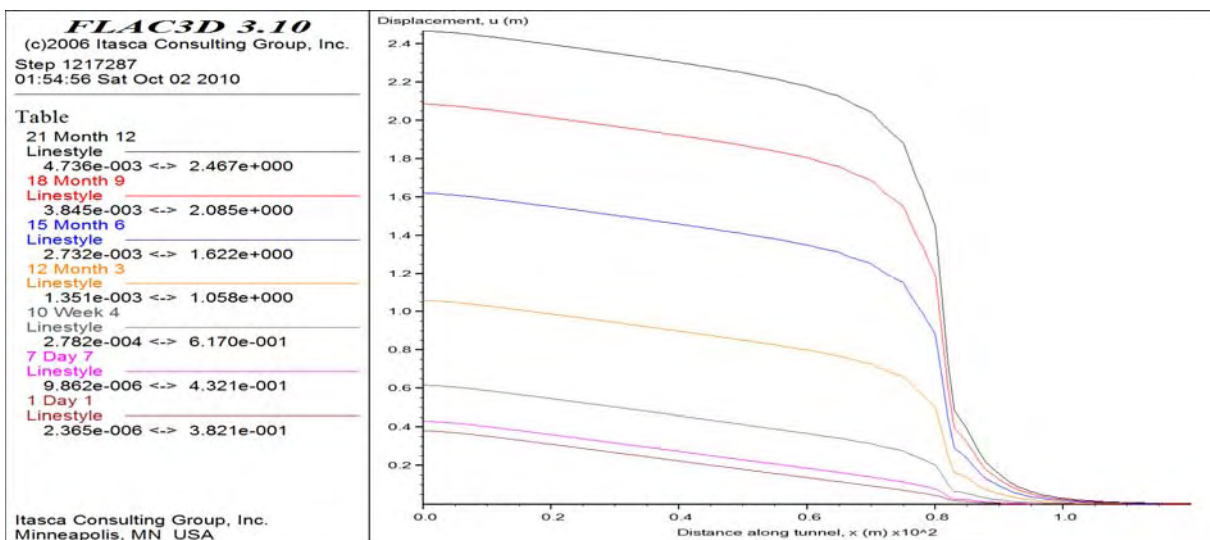
**Σχήμα Β.30:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



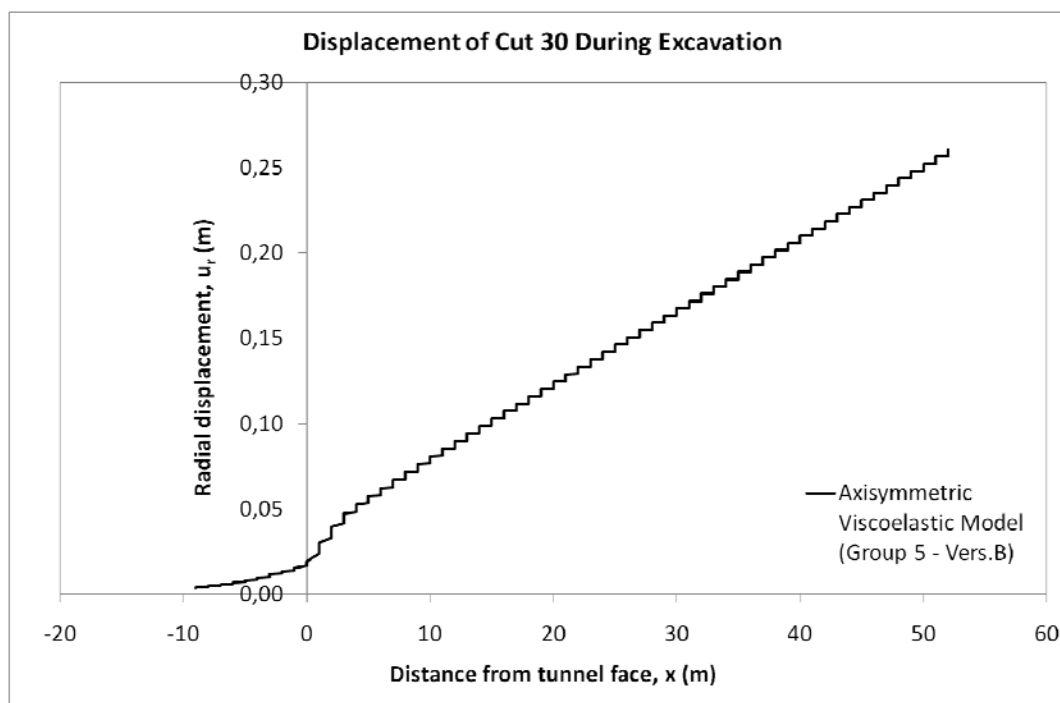
**Σχήμα Β.31:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπισμού.



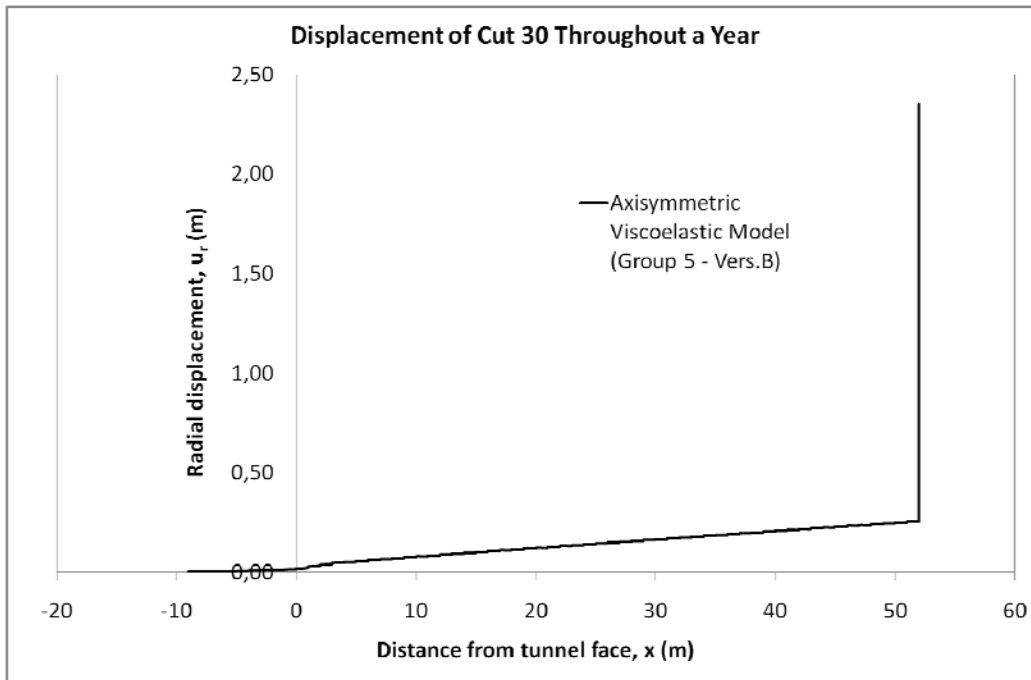
**Σχήμα Β.32:** Σύγκριση με τι καμπύλες του Chern και του Panet των προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπισμού.



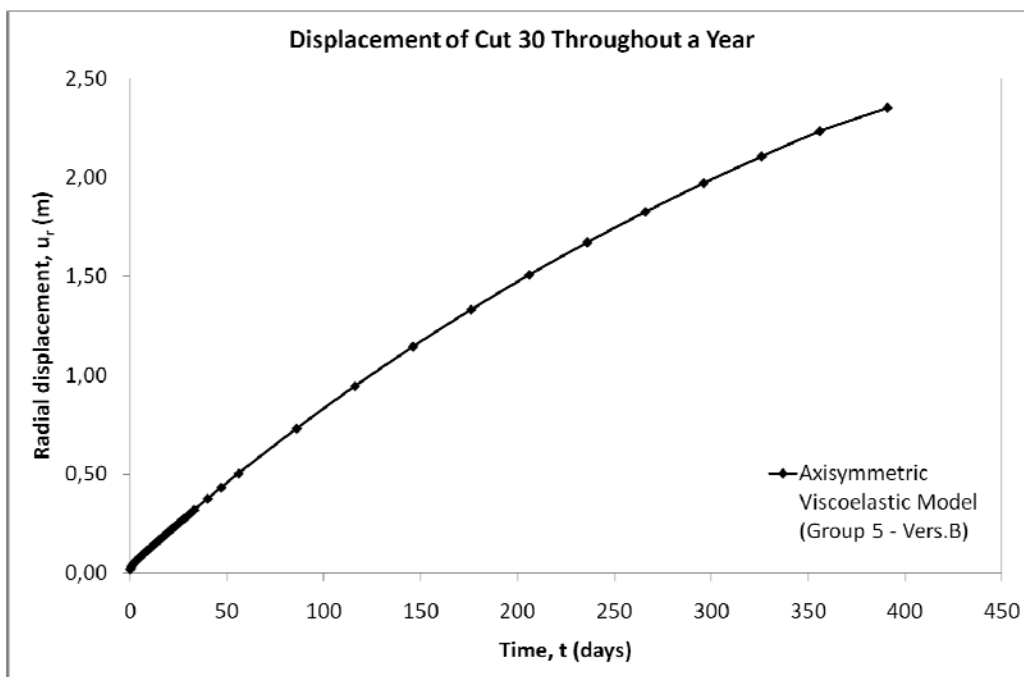
**Σχήμα Β.33:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα Β.34:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιαμέσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

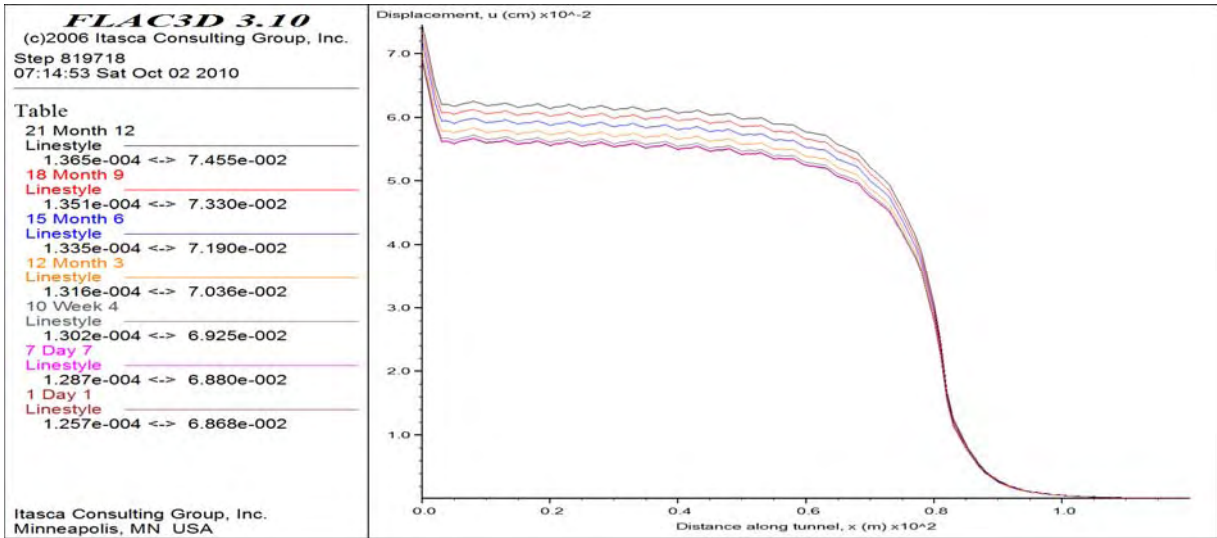


**Σχήμα Β.35:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

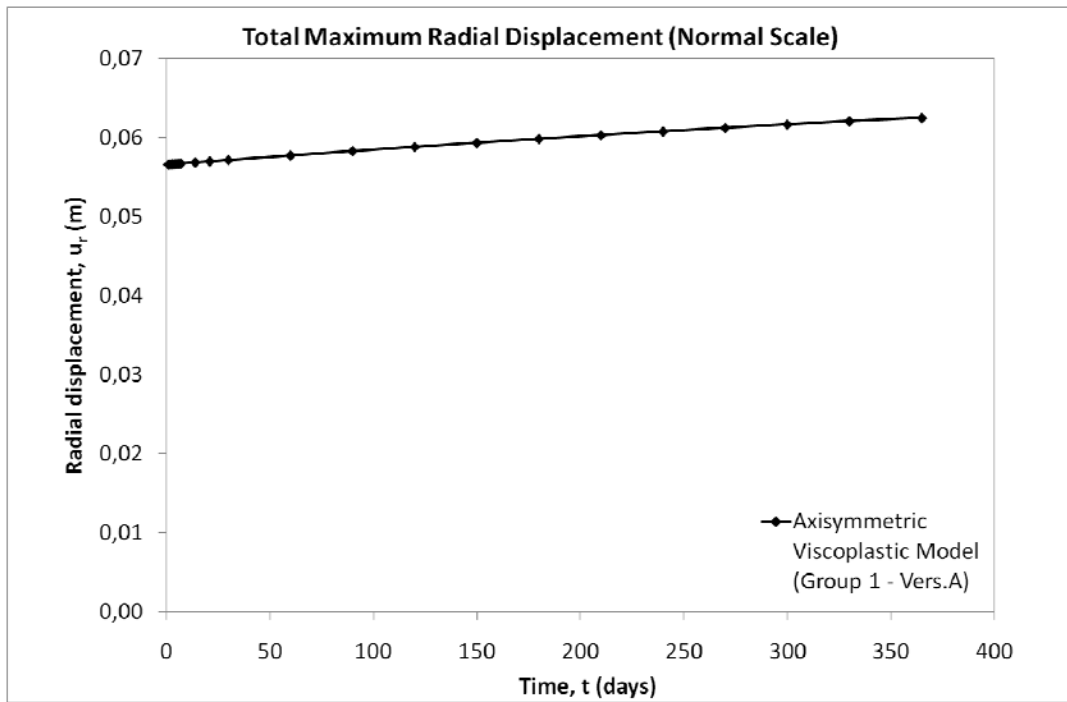


**Σχήμα Β.36:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

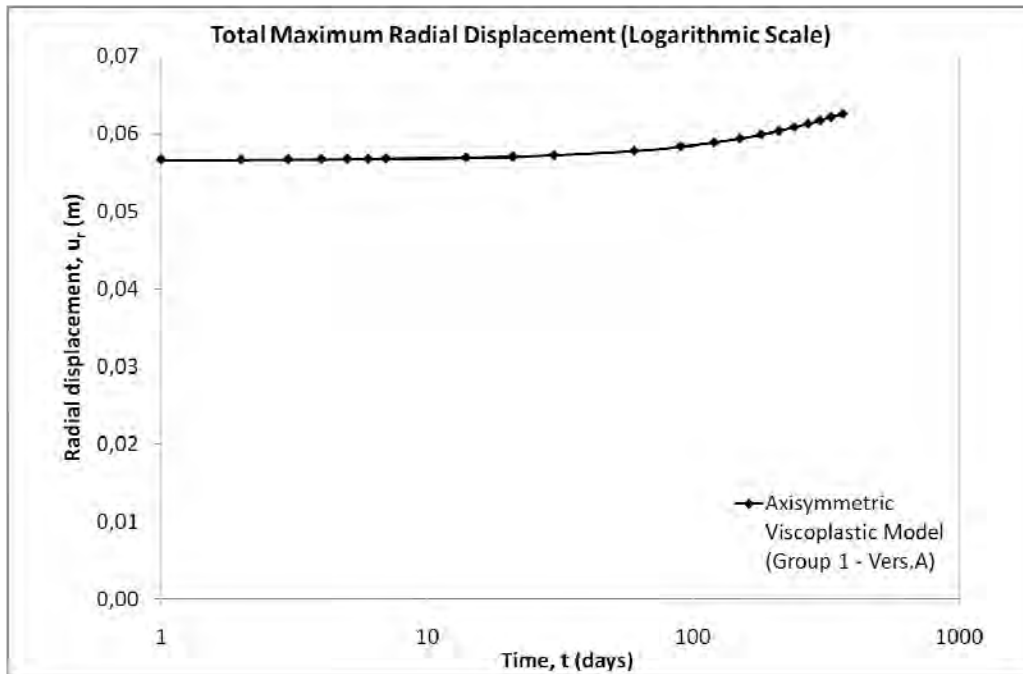




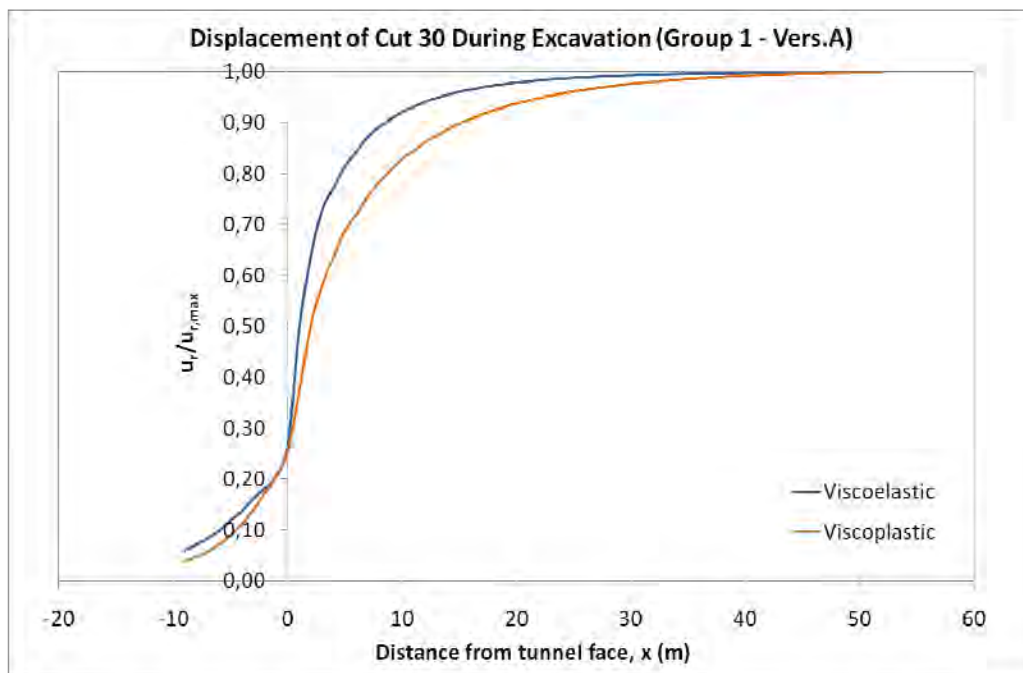
**Σχήμα Β.37:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



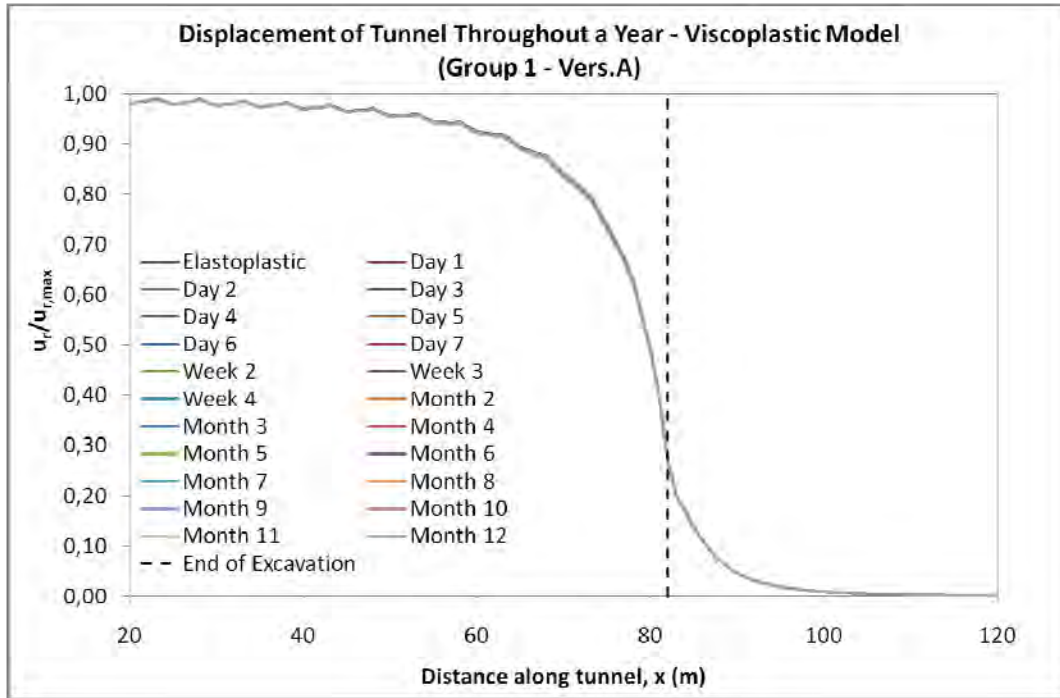
**Σχήμα Β.38:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).



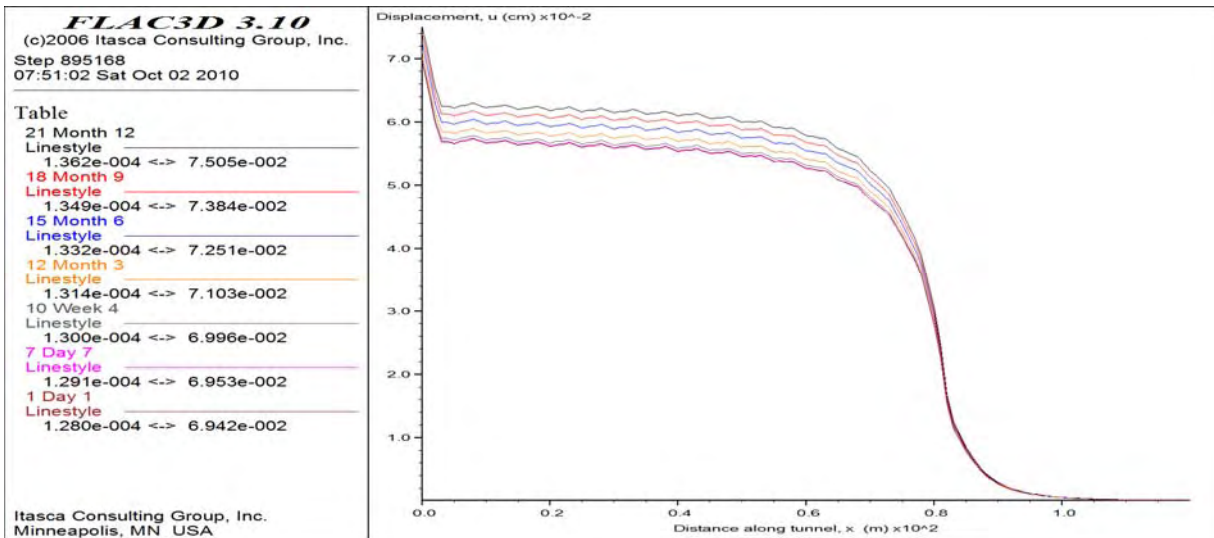
**Σχήμα Β.39:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



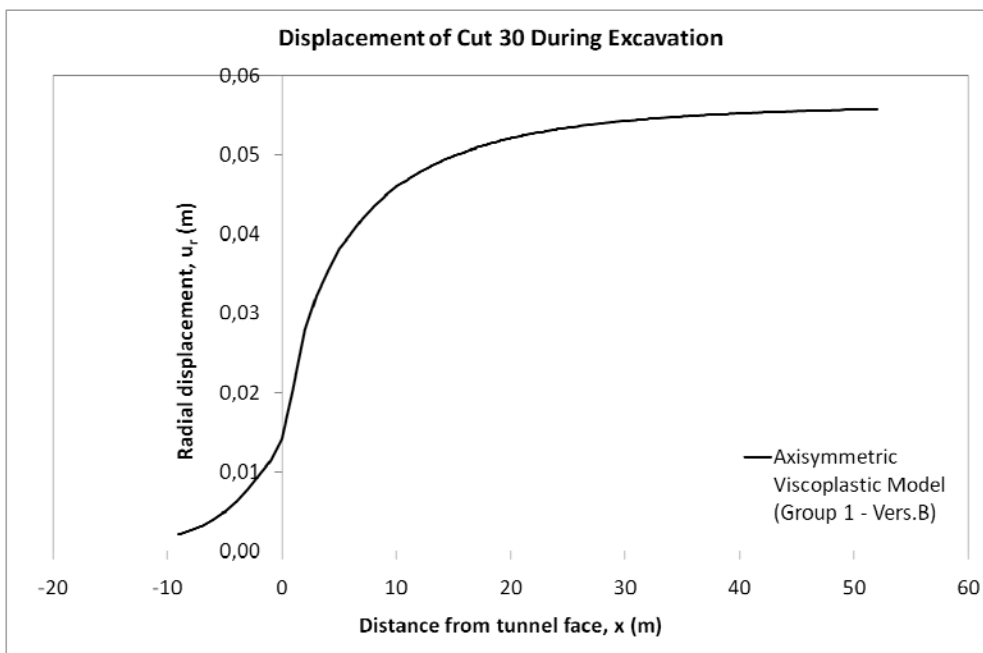
**Σχήμα Β.40:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



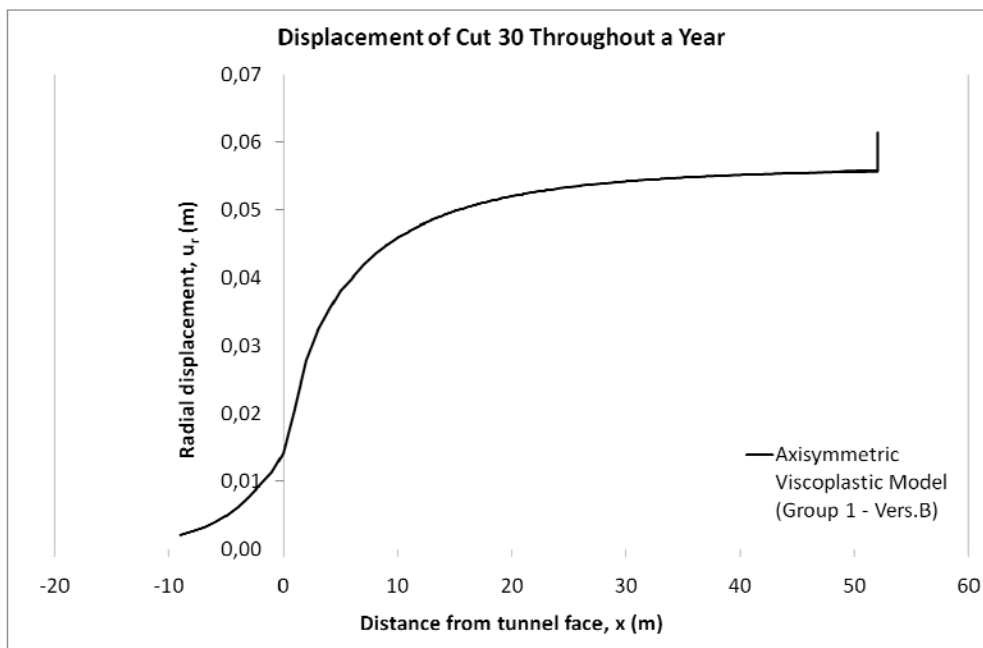
**Σχήμα Β.41:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



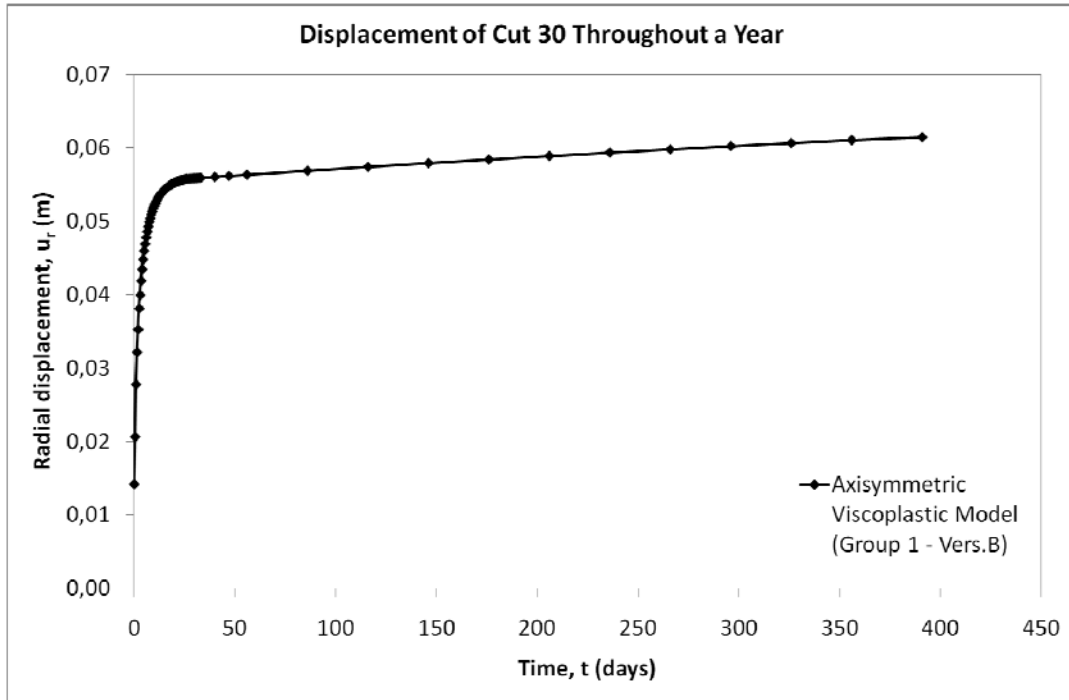
**Σχήμα Β.42:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



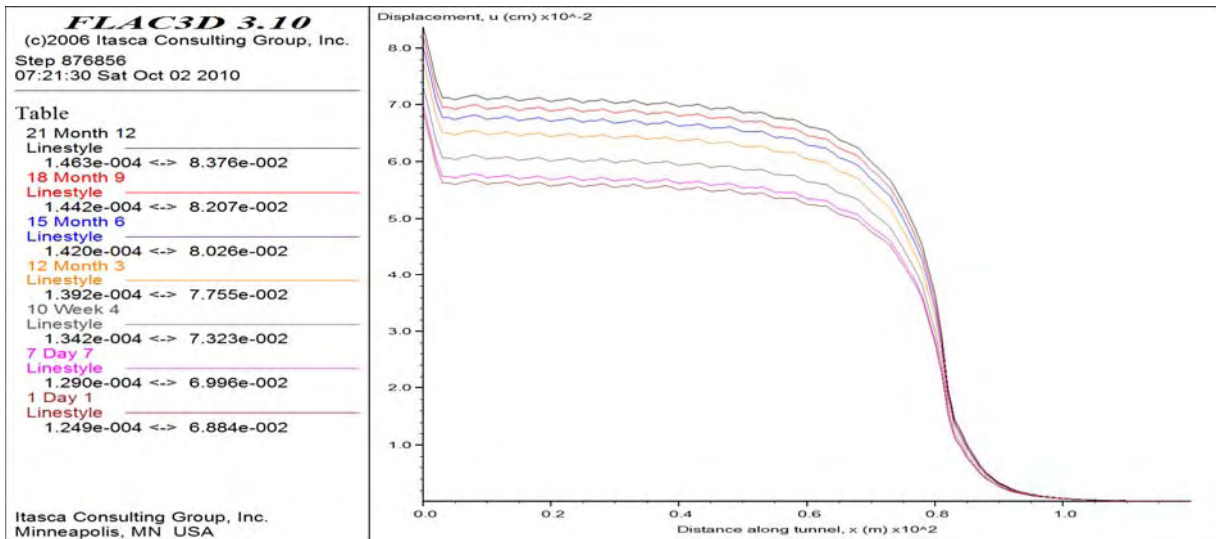
**Σχήμα Β.43:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



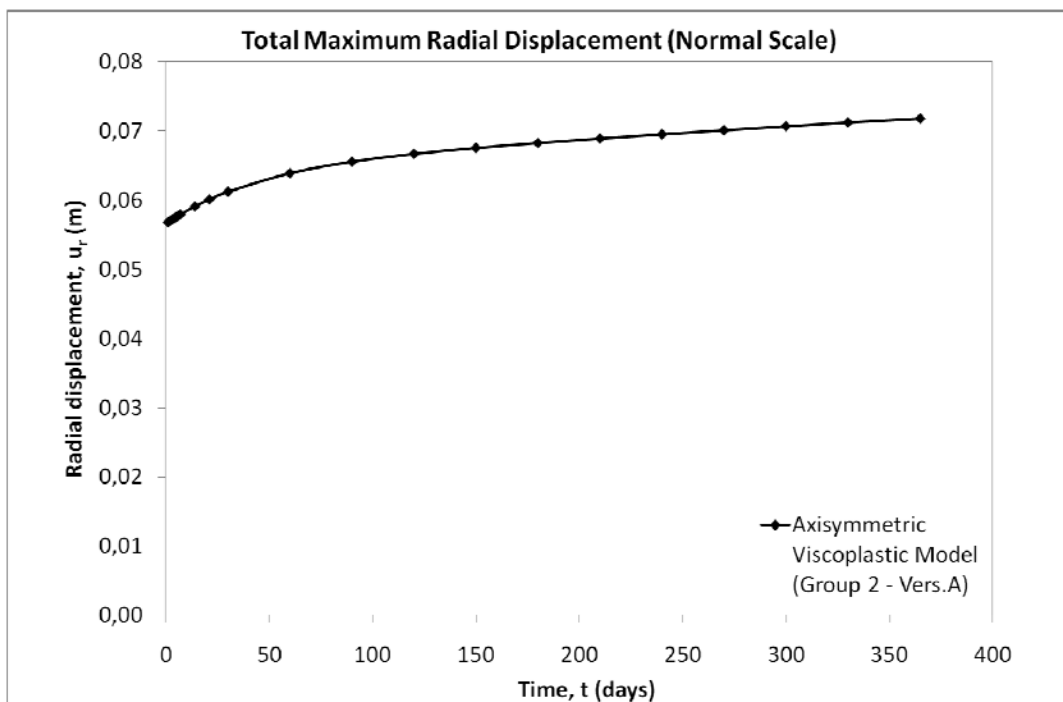
**Σχήμα Β.44:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



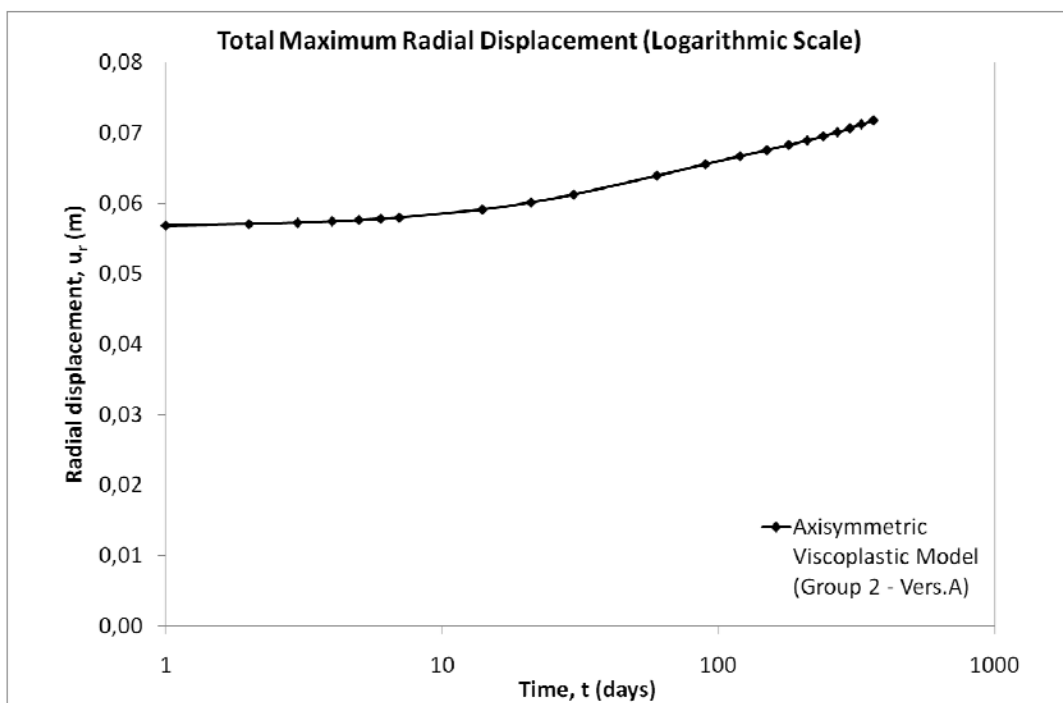
**Σχήμα Β.45:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 1<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



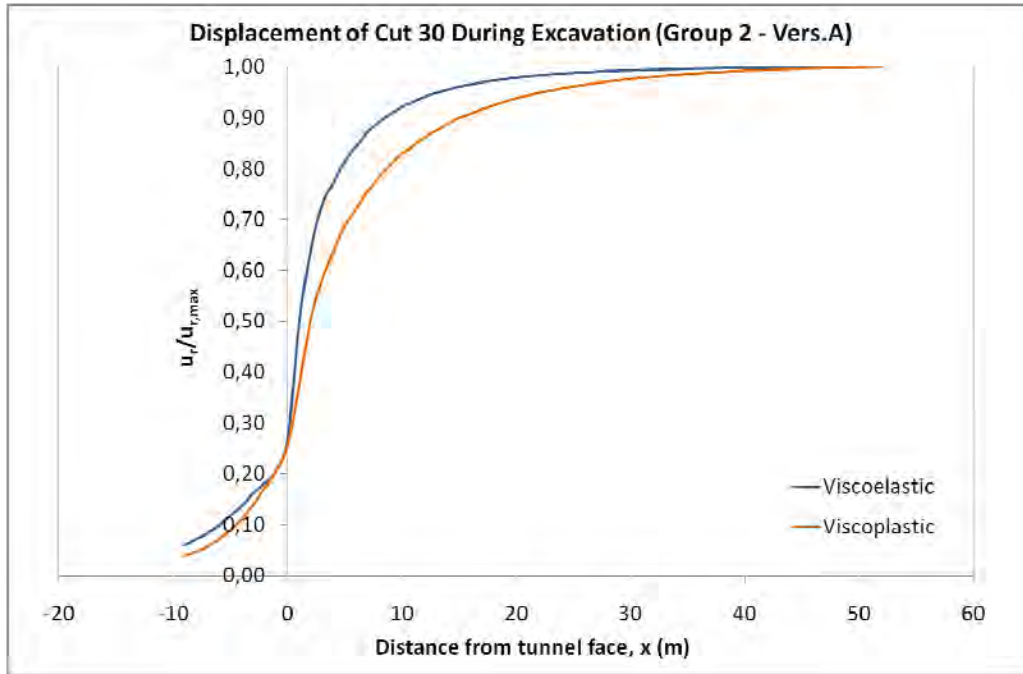
**Σχήμα Β.46:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



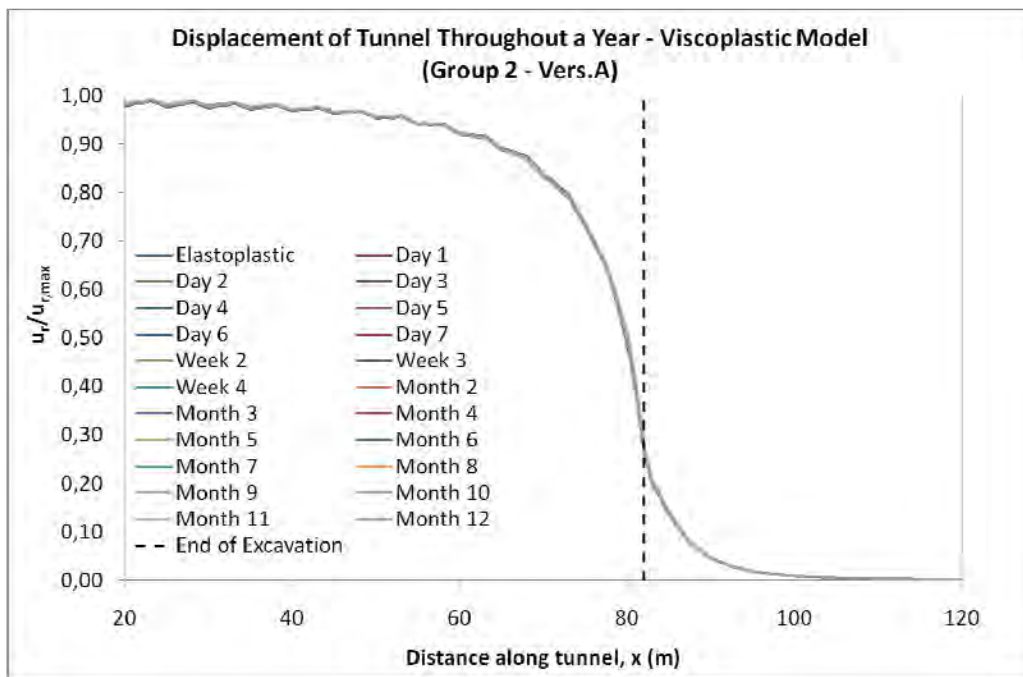
**Σχήμα Β.47:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).



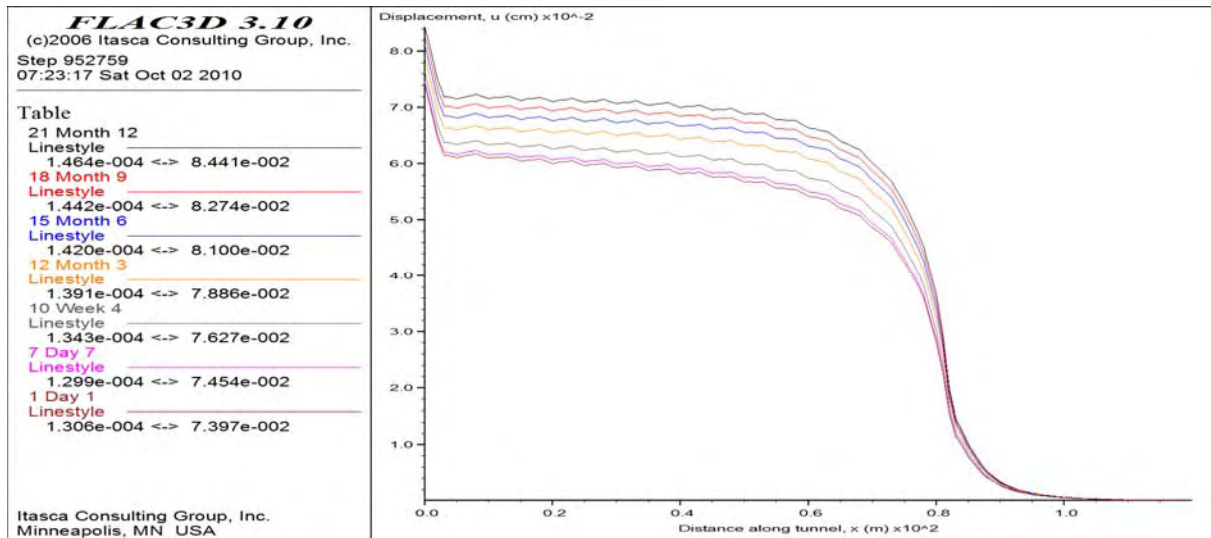
**Σχήμα Β.48:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



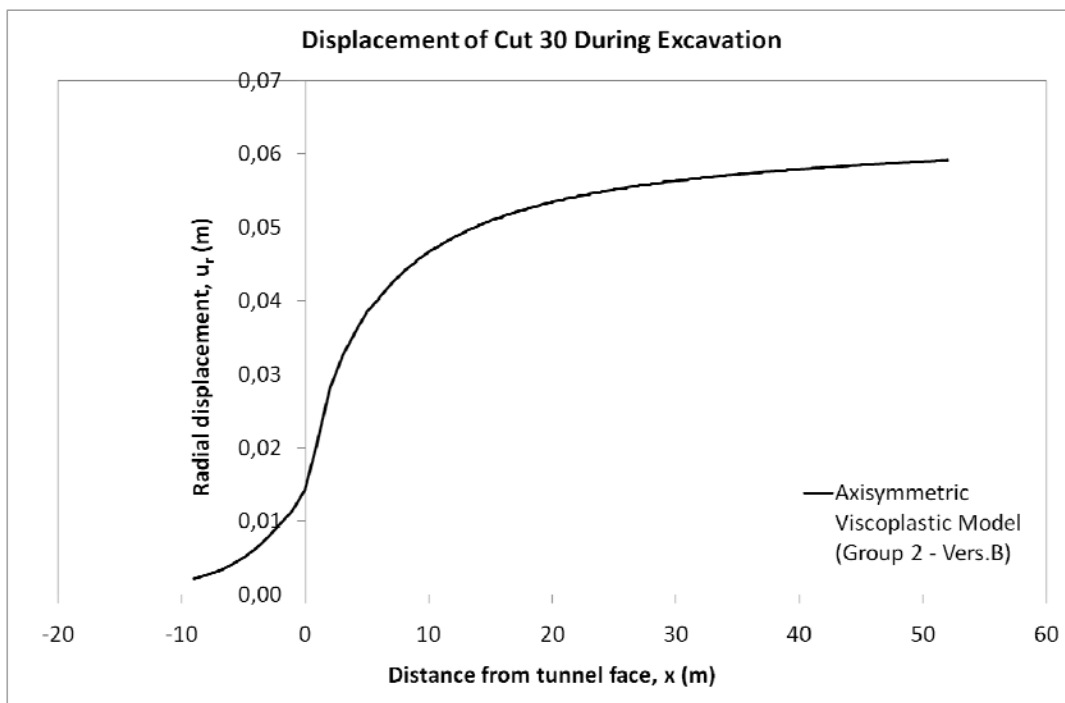
**Σχήμα Β.49:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα Β.50:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

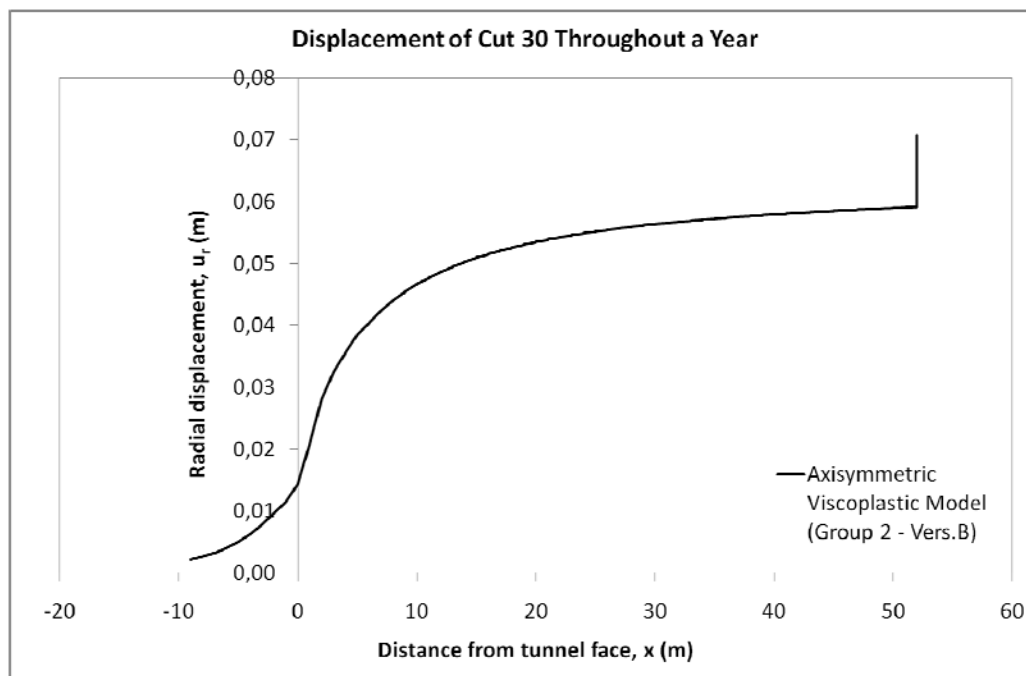


**Σχήμα Β.51:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

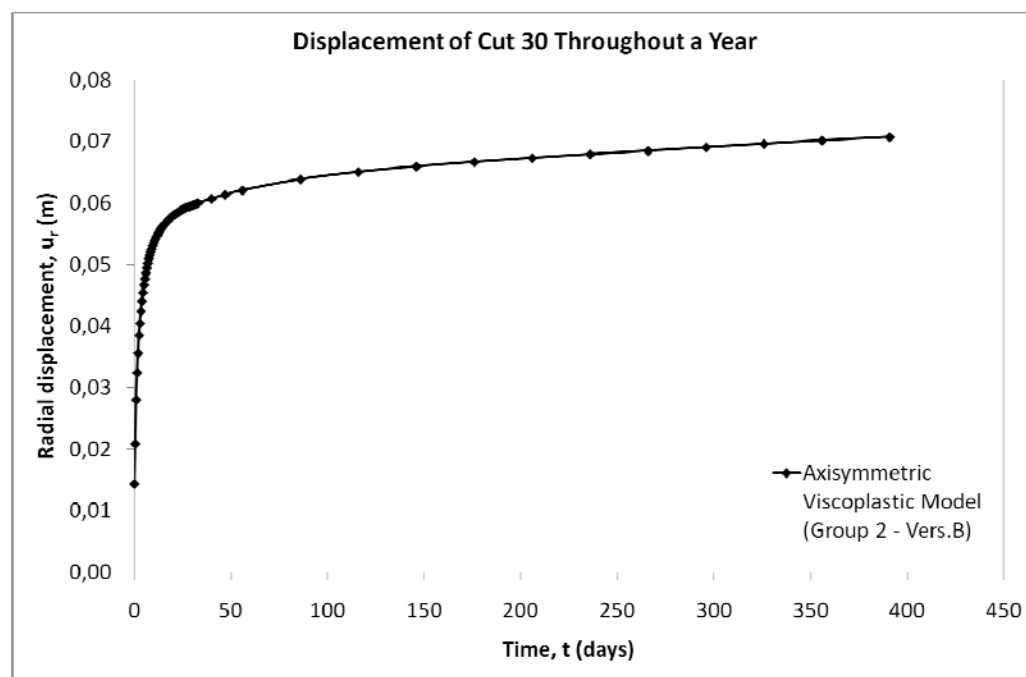


**Σχήμα Β.52:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

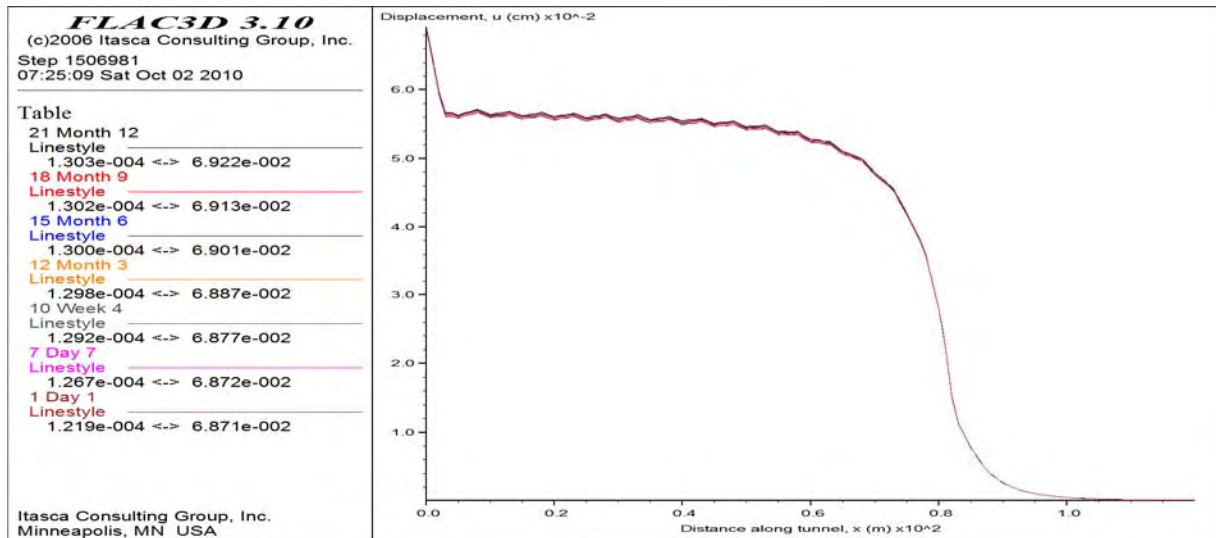




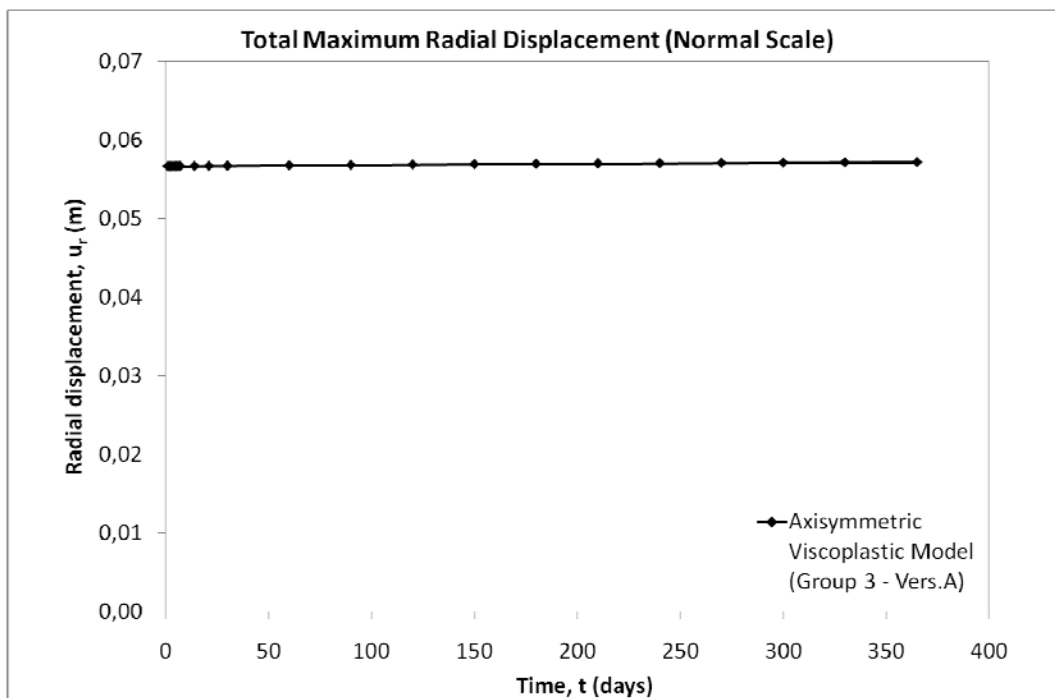
**Σχήμα Β.53:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



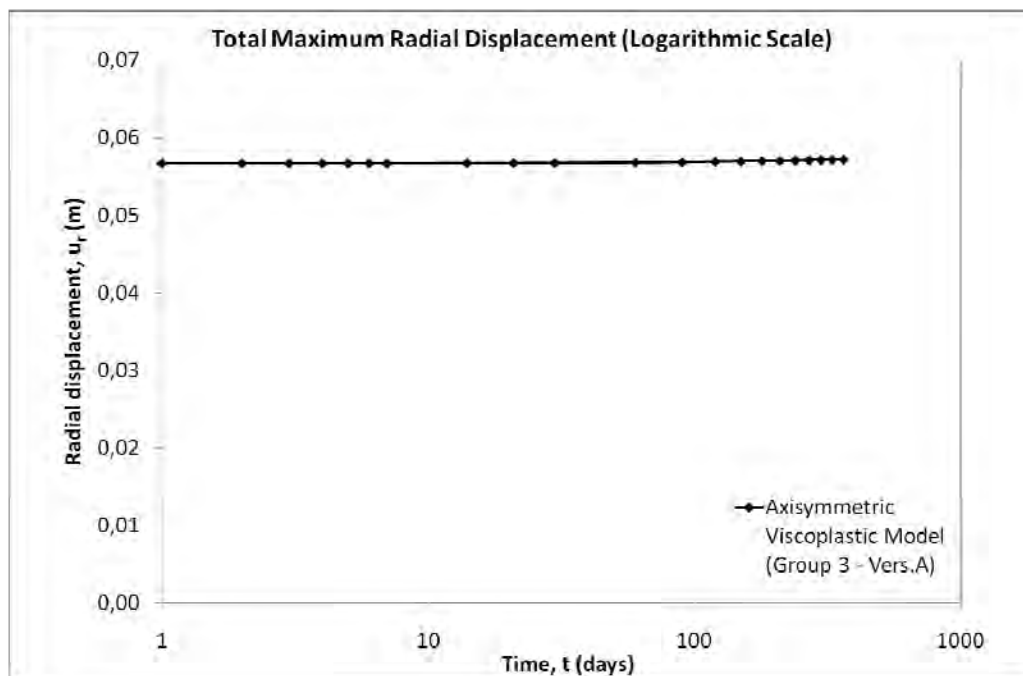
**Σχήμα Β.54:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 2<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



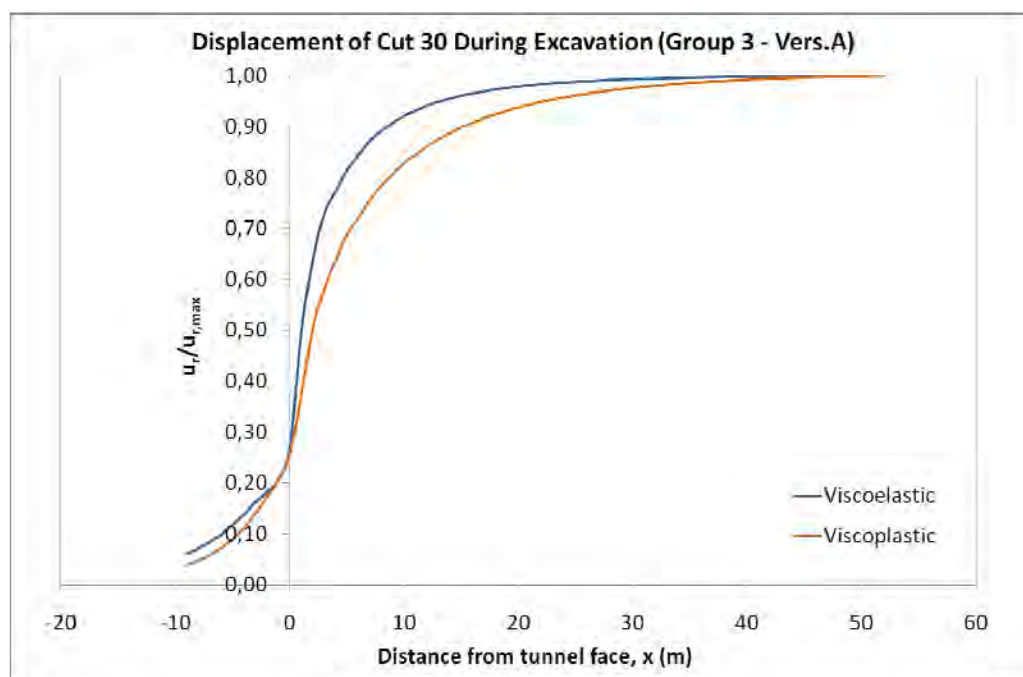
**Σχήμα Β.55:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



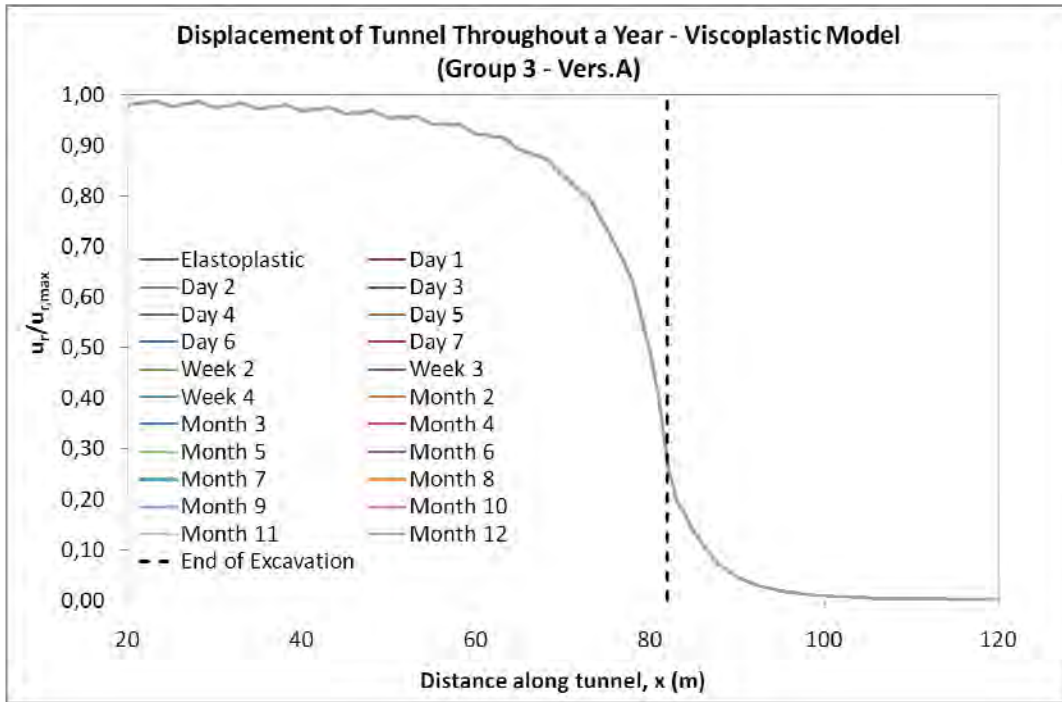
**Σχήμα Β.56:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).



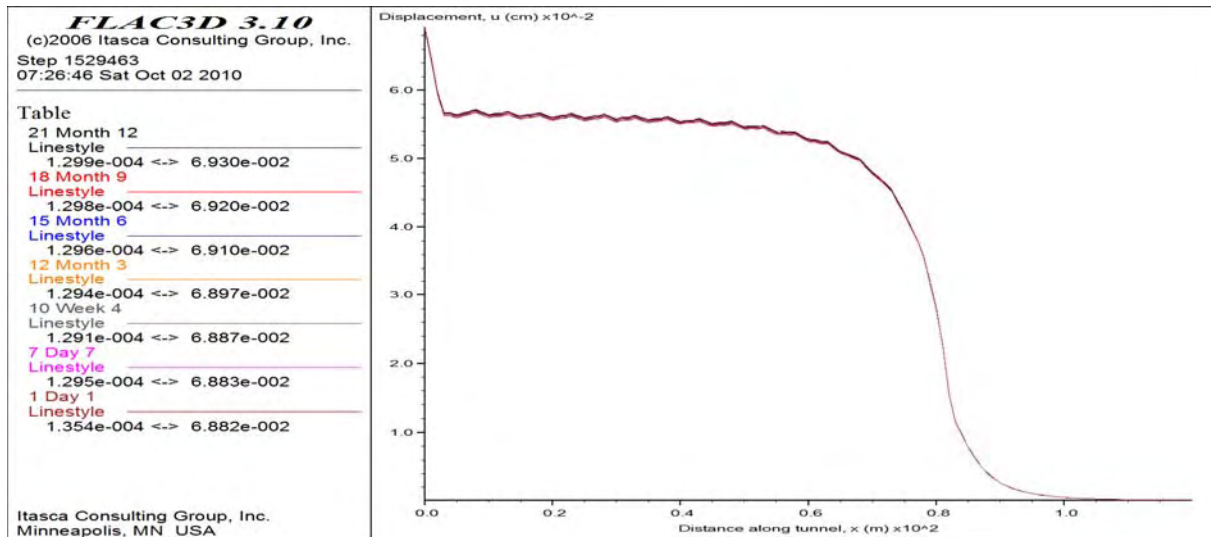
**Σχήμα Β.57:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).



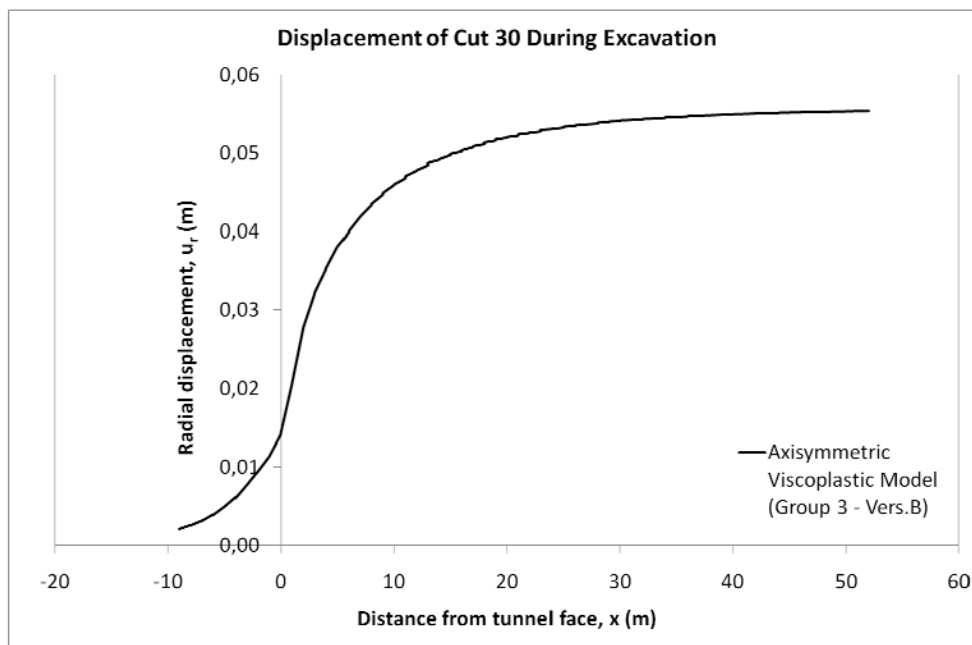
**Σχήμα Β.58:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιαμέσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



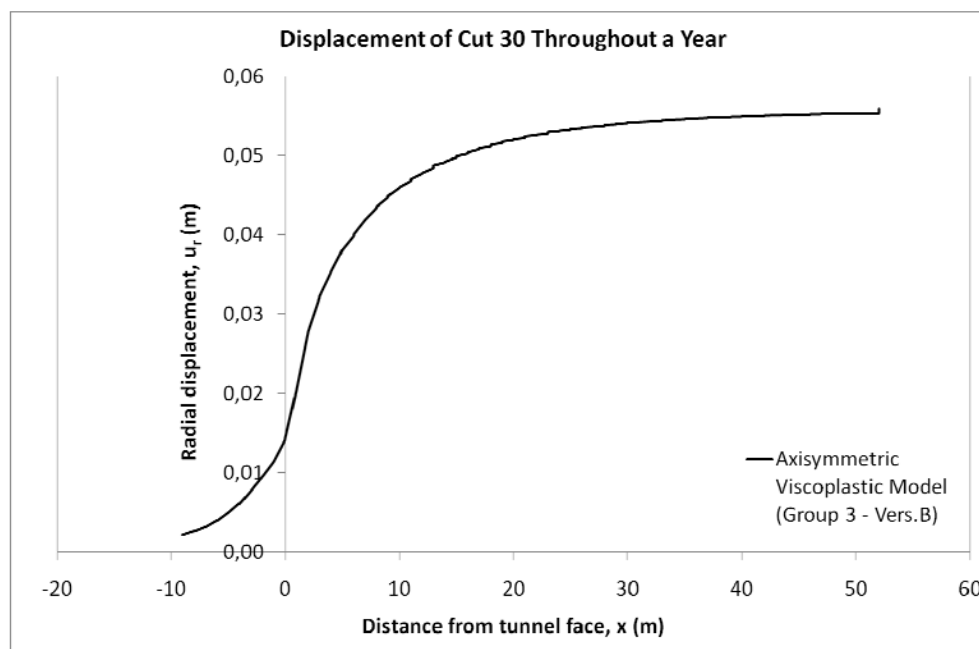
**Σχήμα Β.59:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



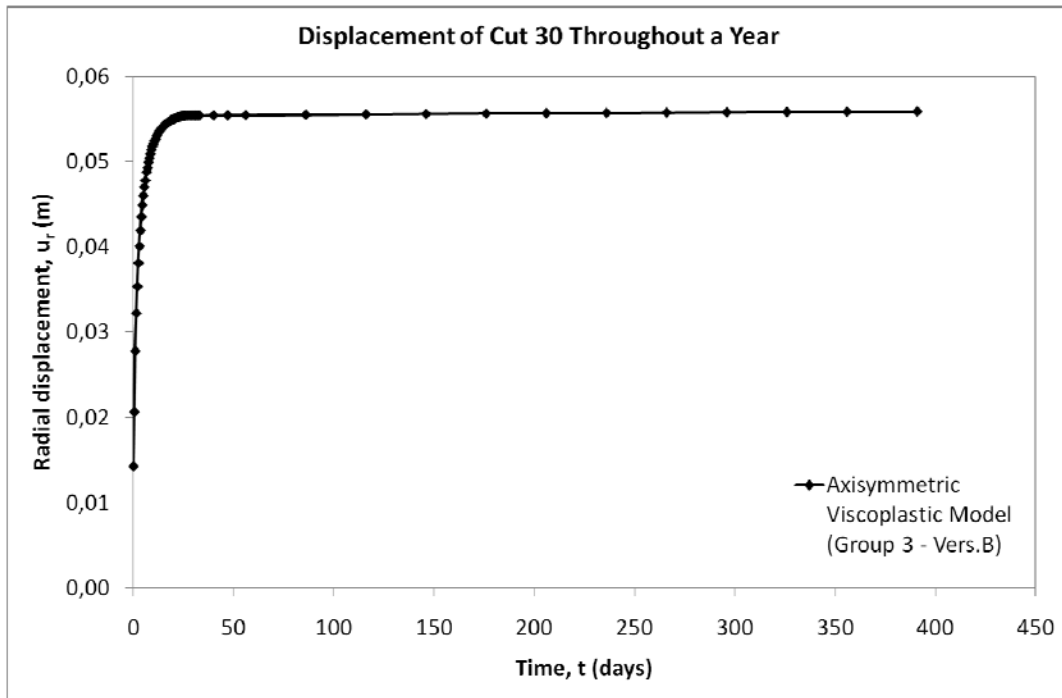
**Σχήμα Β.60:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



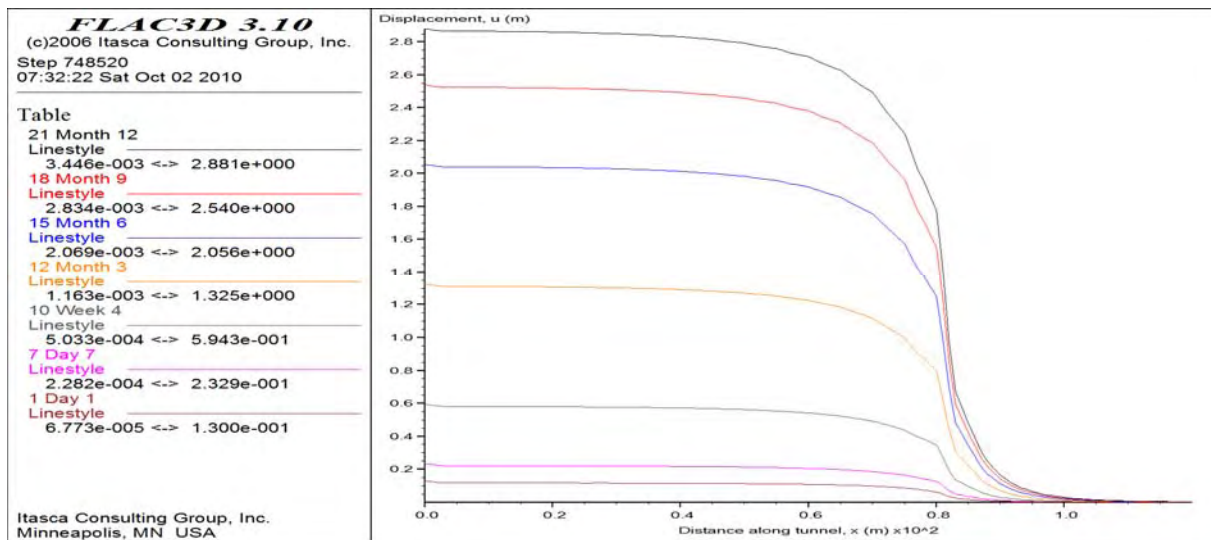
**Σχήμα Β.61:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



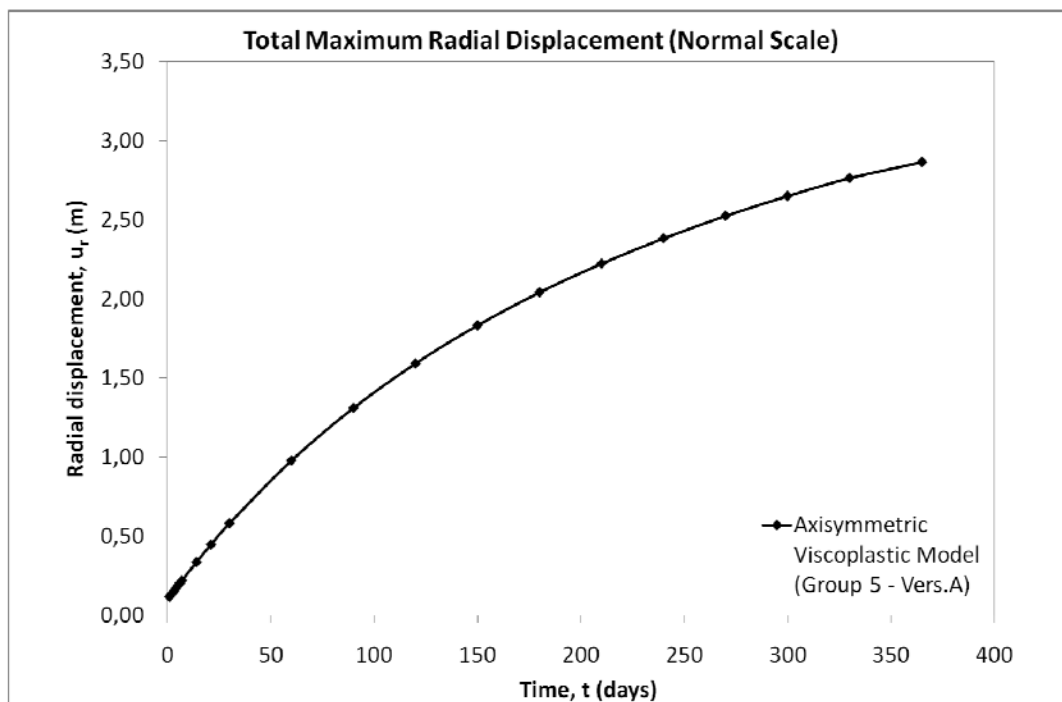
**Σχήμα Β.62:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



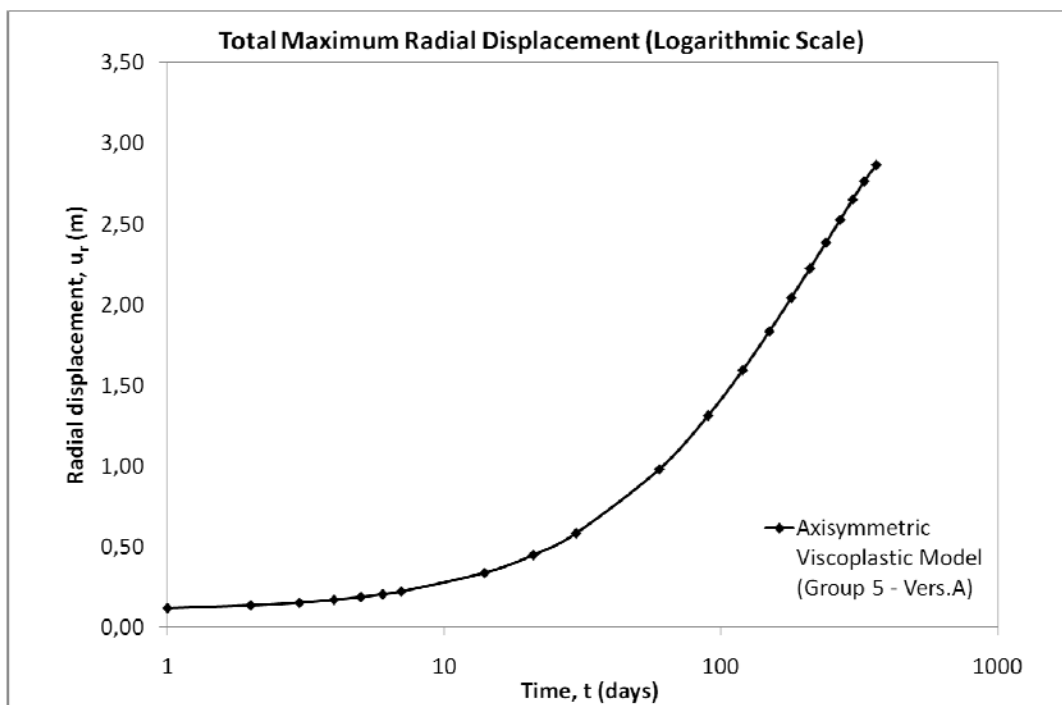
**Σχήμα Β.63:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 3<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



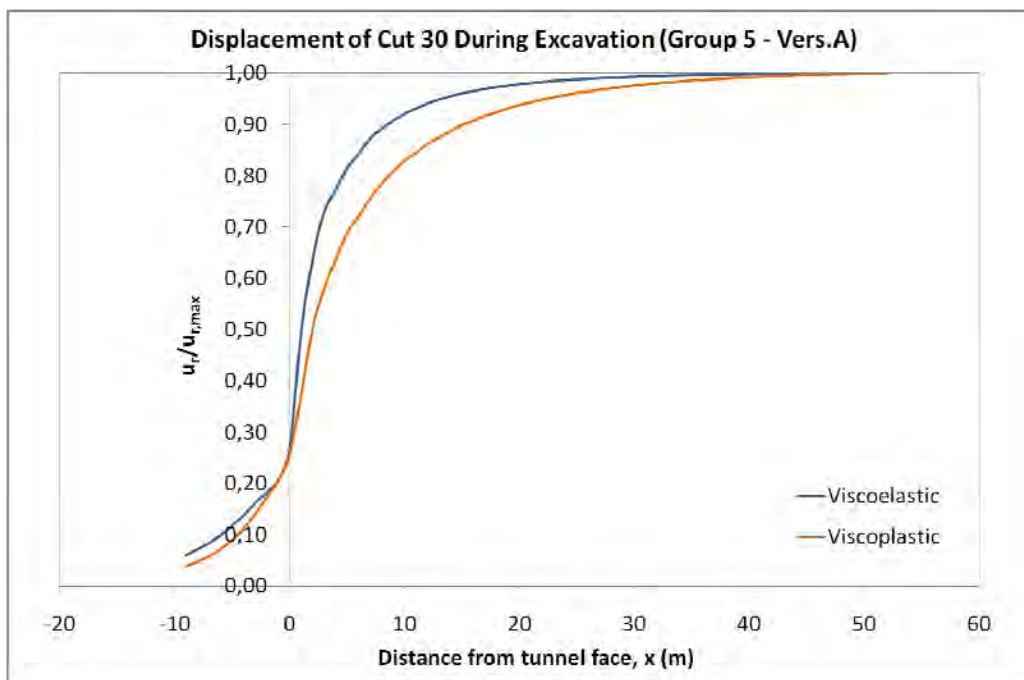
**Σχήμα Β.64:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



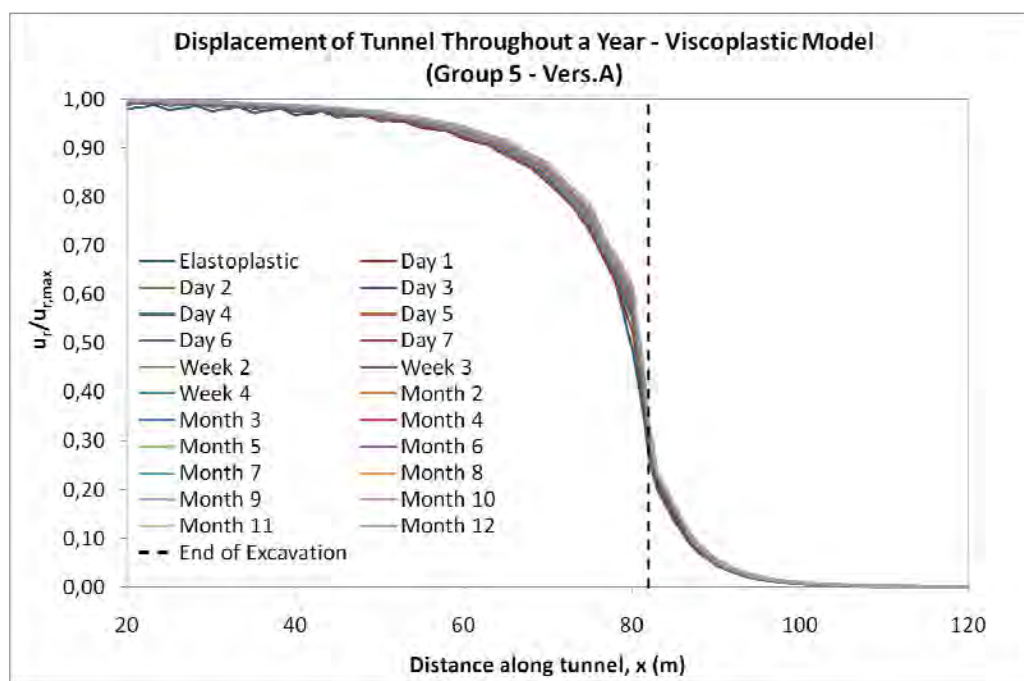
**Σχήμα Β.65:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (κανονική κλίμακα).



**Σχήμα Β.66:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού (λογαριθμική κλίμακα).

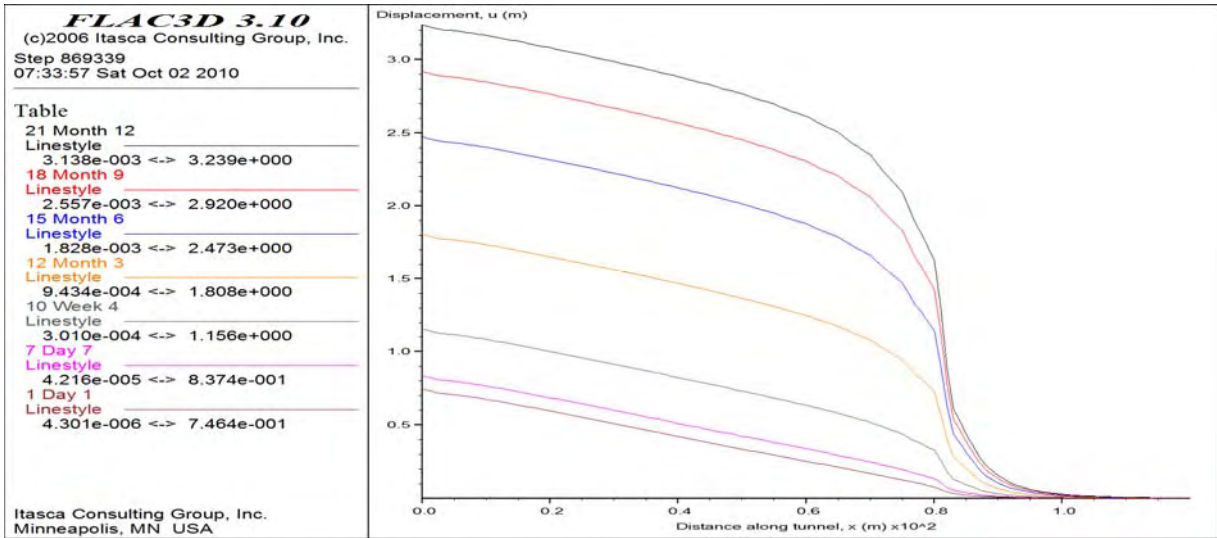


**Σχήμα Β.67:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού και του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

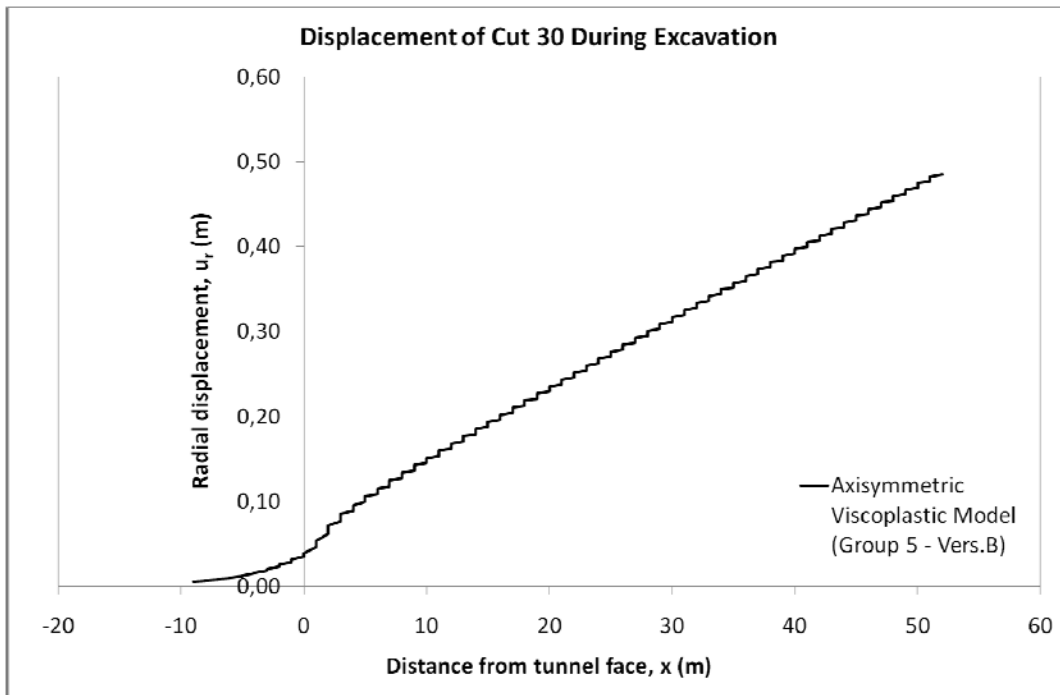


**Σχήμα Β.68:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

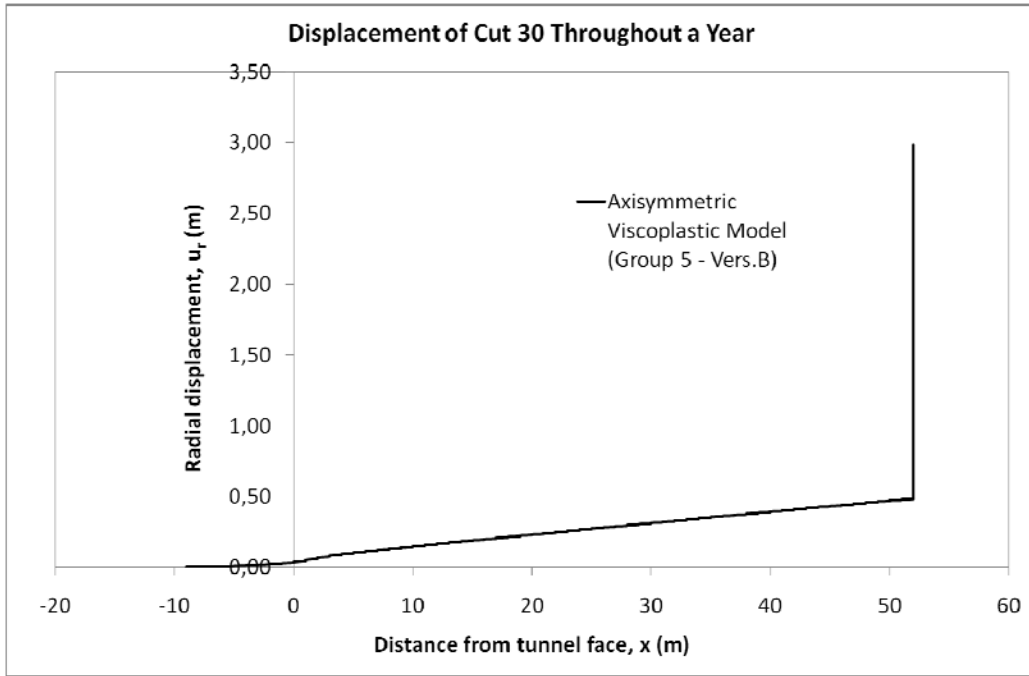




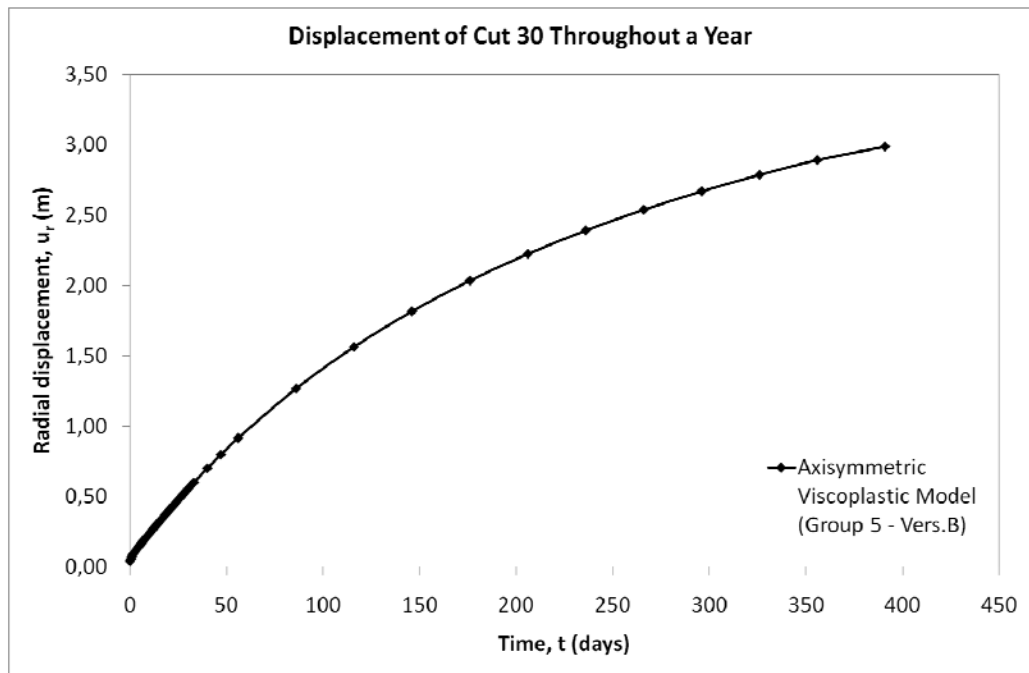
**Σχήμα Β.69:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



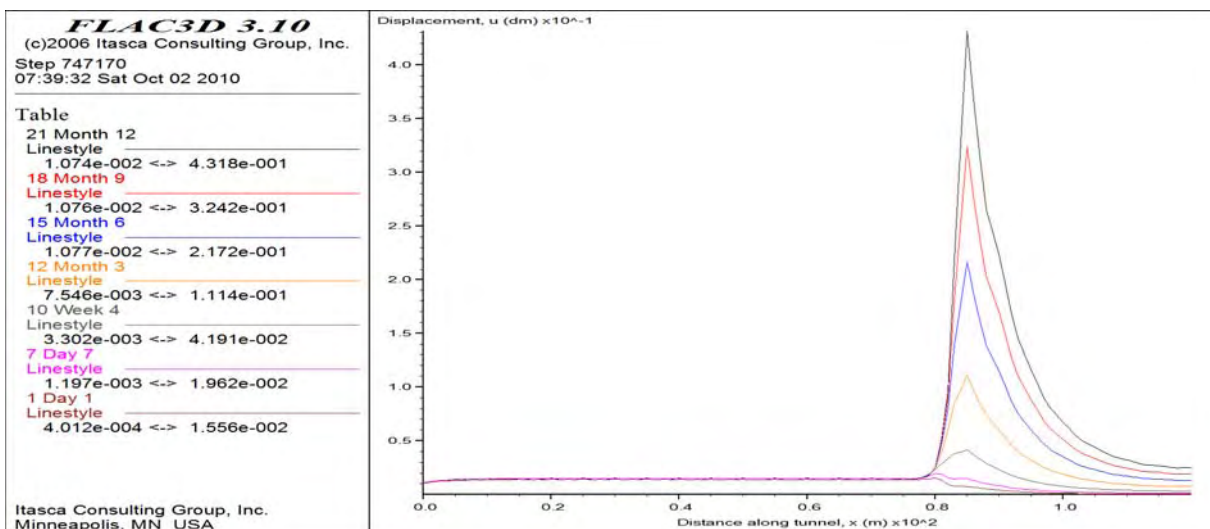
**Σχήμα Β.70:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιαμέσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



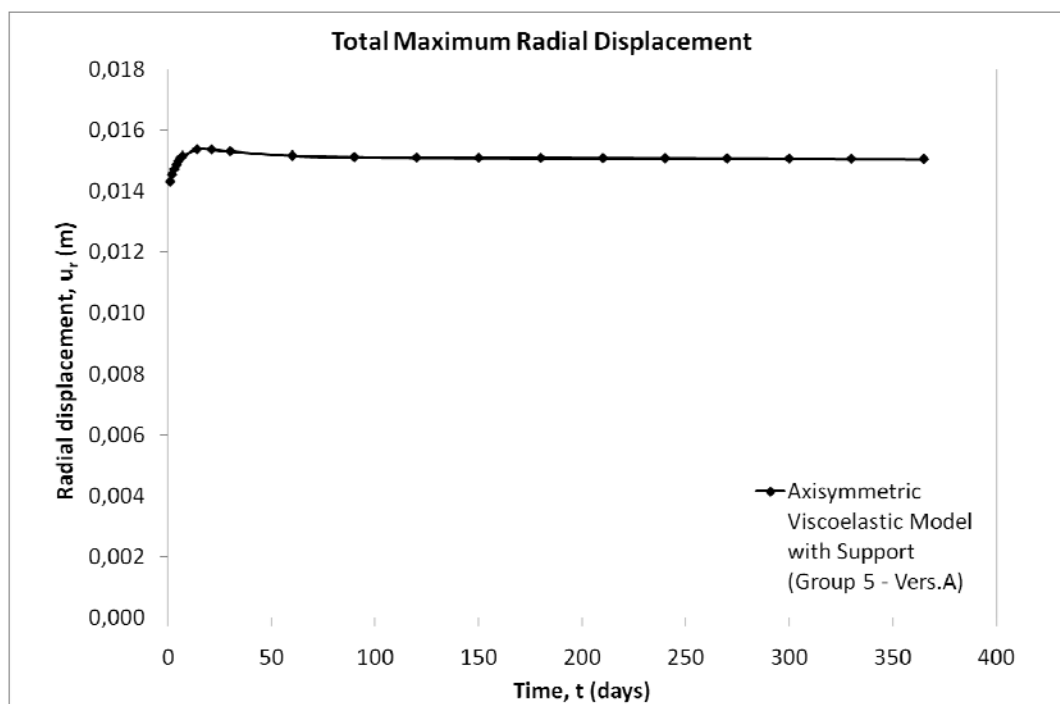
**Σχήμα Β.71:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



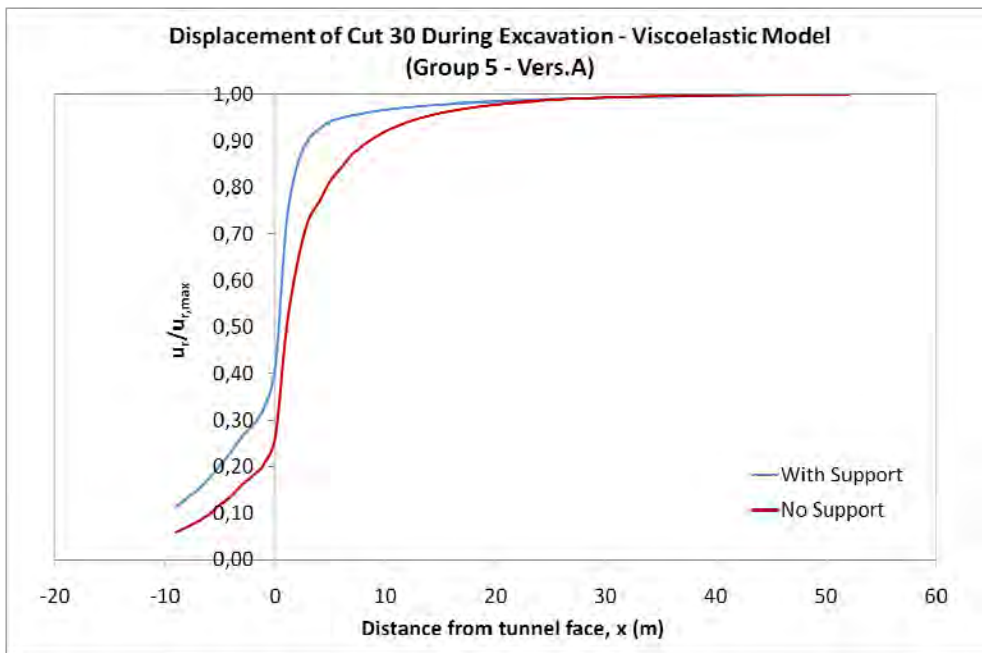
**Σχήμα Β.72:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



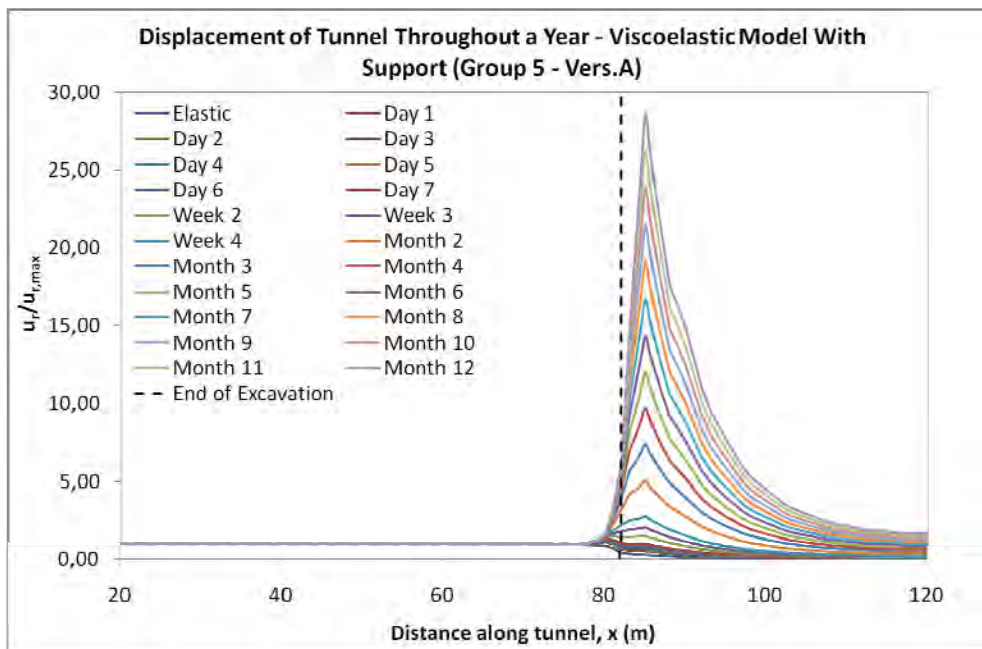
**Σχήμα Β.73:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



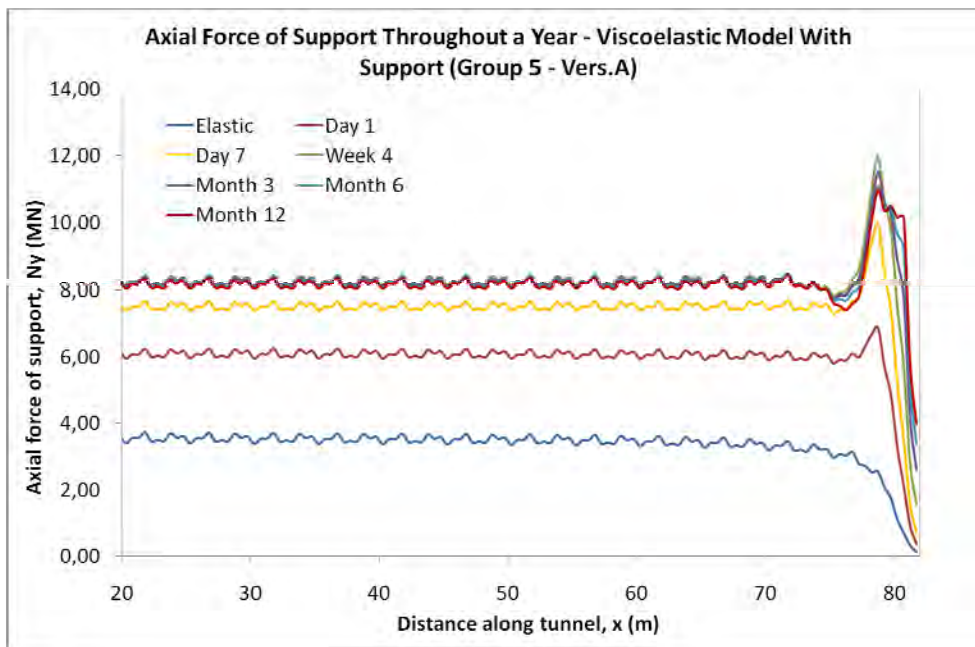
**Σχήμα Β.74:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



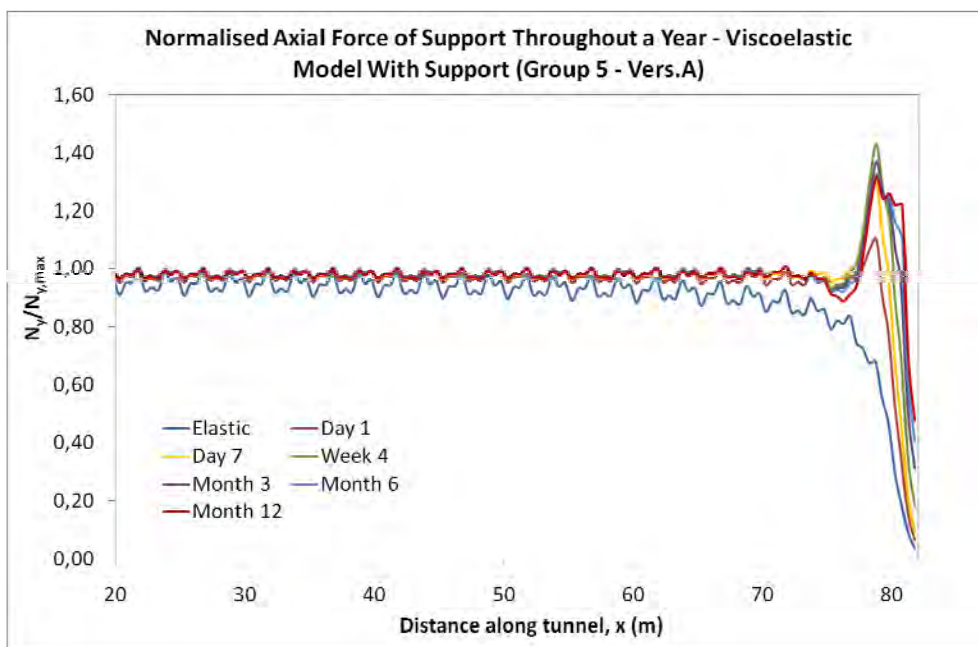
**Σχήμα Β.75:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοελαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



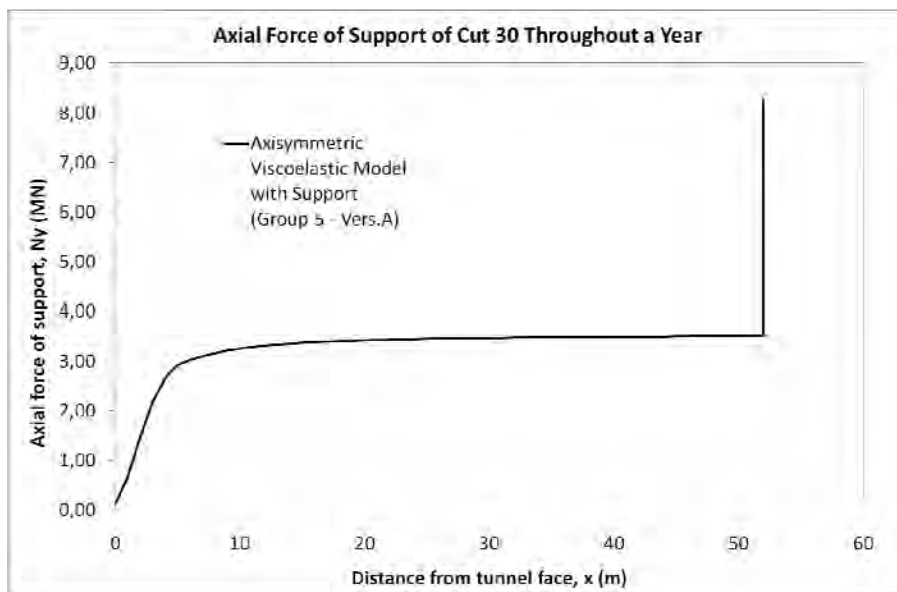
**Σχήμα Β.76:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



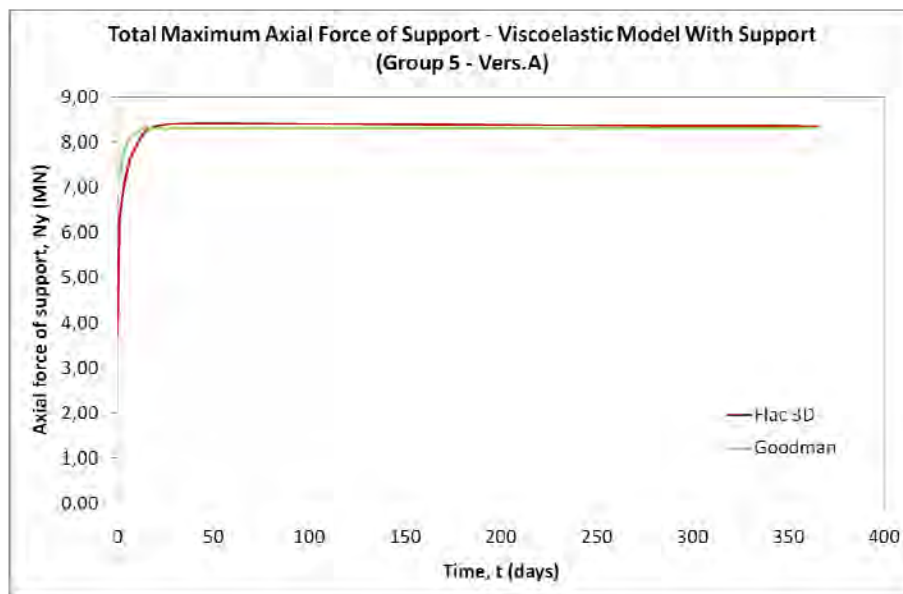
**Σχήμα Β.77:** Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



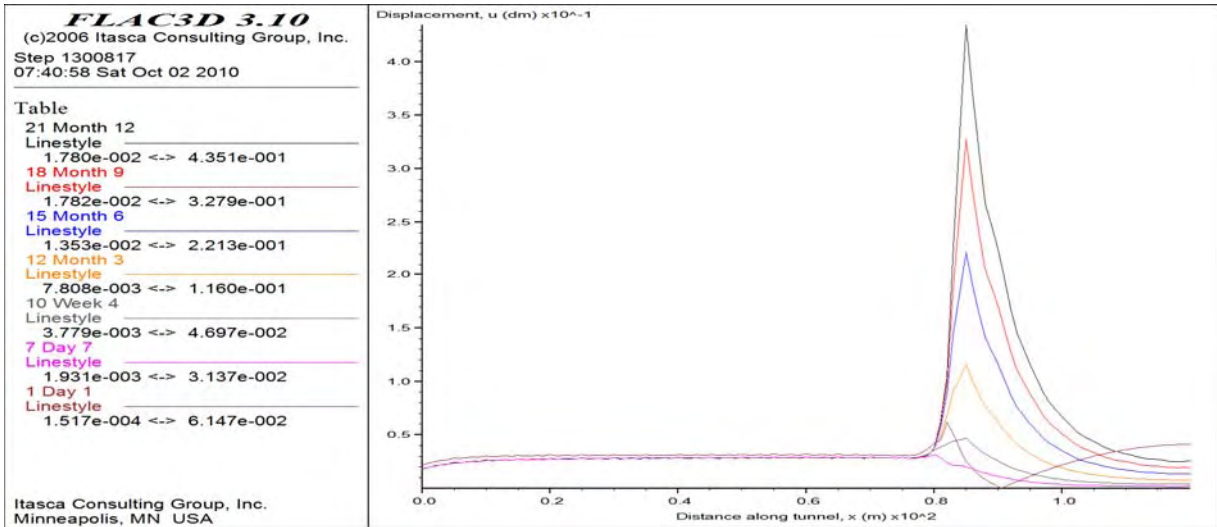
**Σχήμα Β.78:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



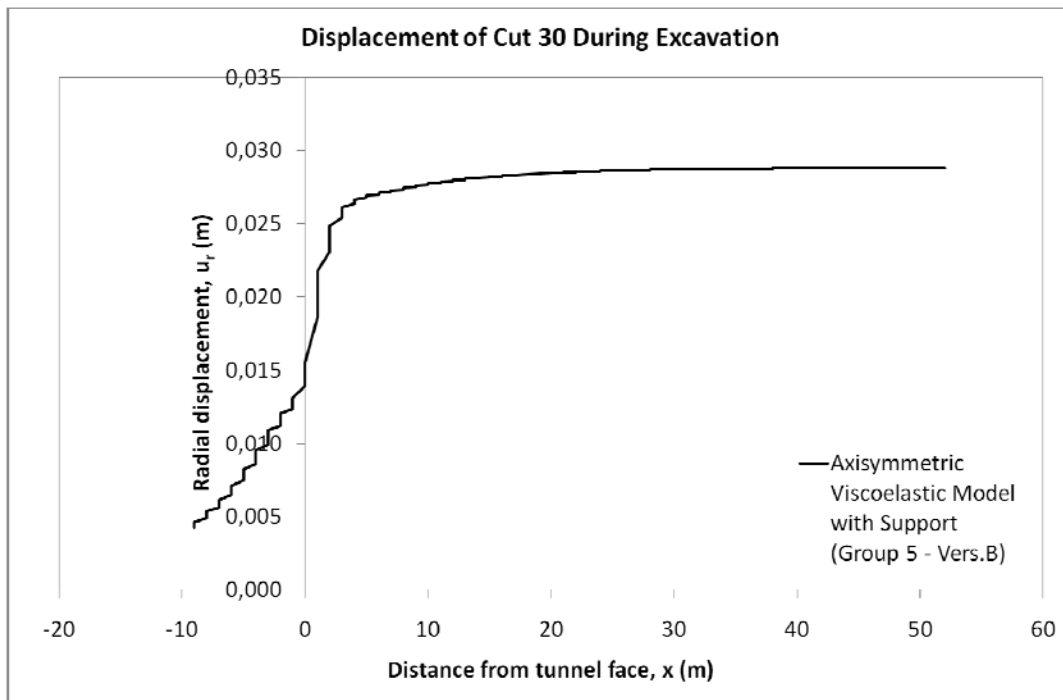
**Σχήμα Β.79:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



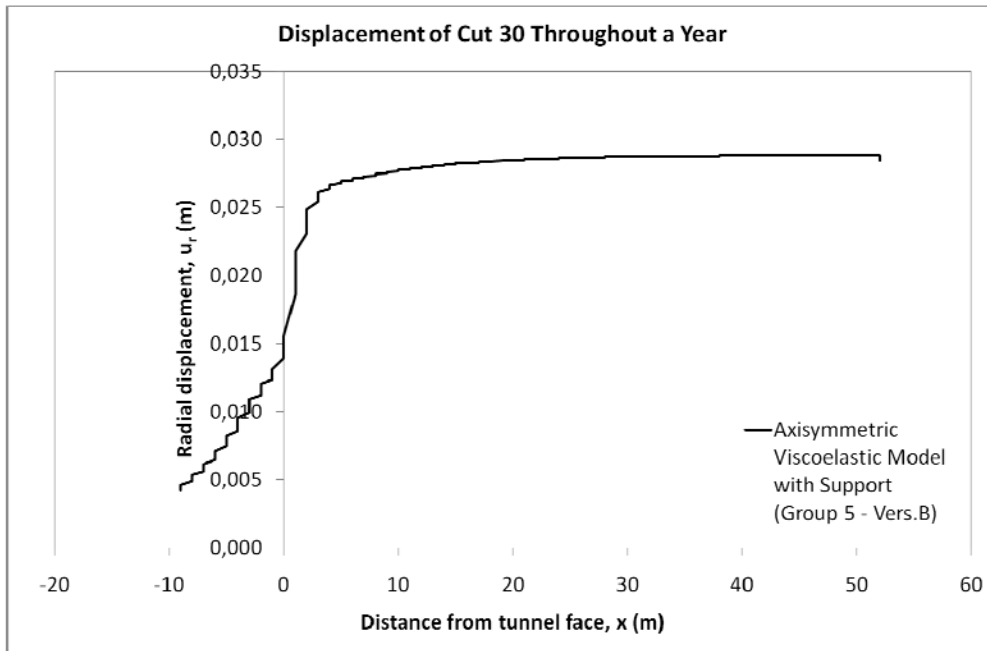
**Σχήμα Β.80:** Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989).



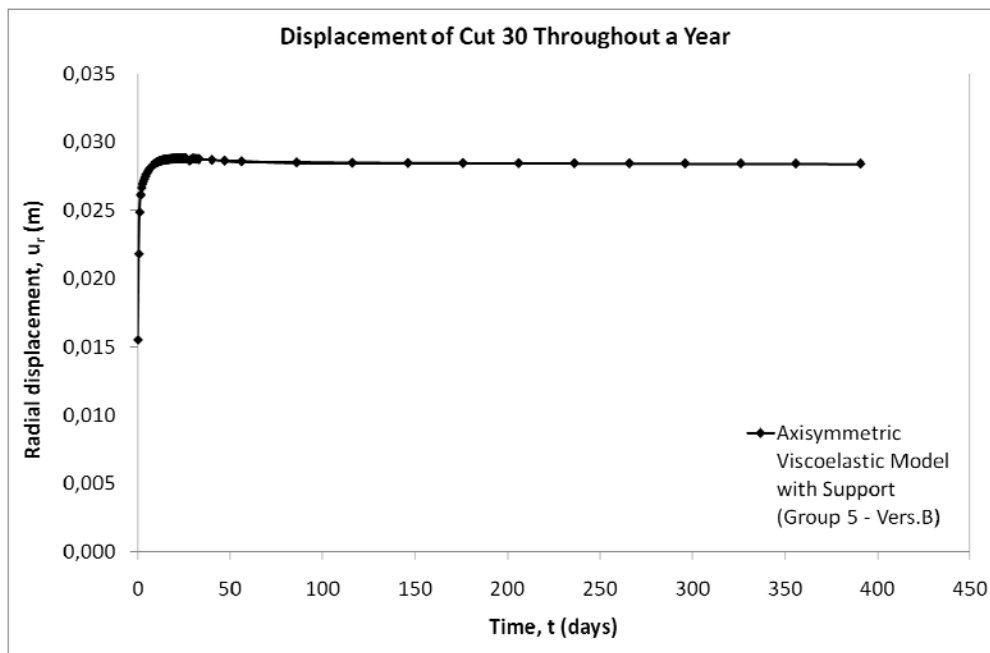
**Σχήμα Β.81:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα Β.82:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

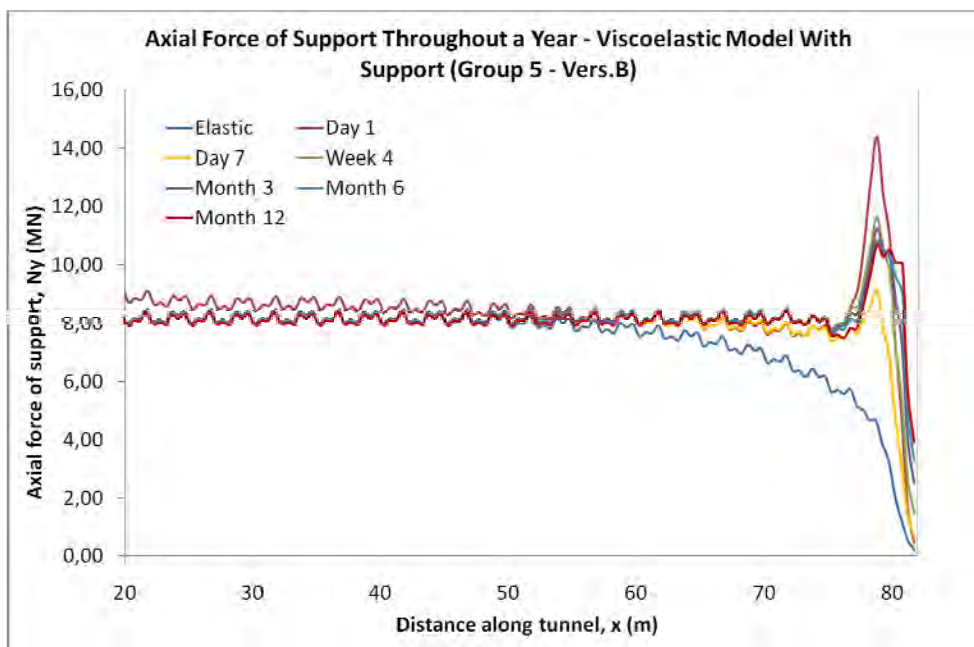


**Σχήμα Β.83:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

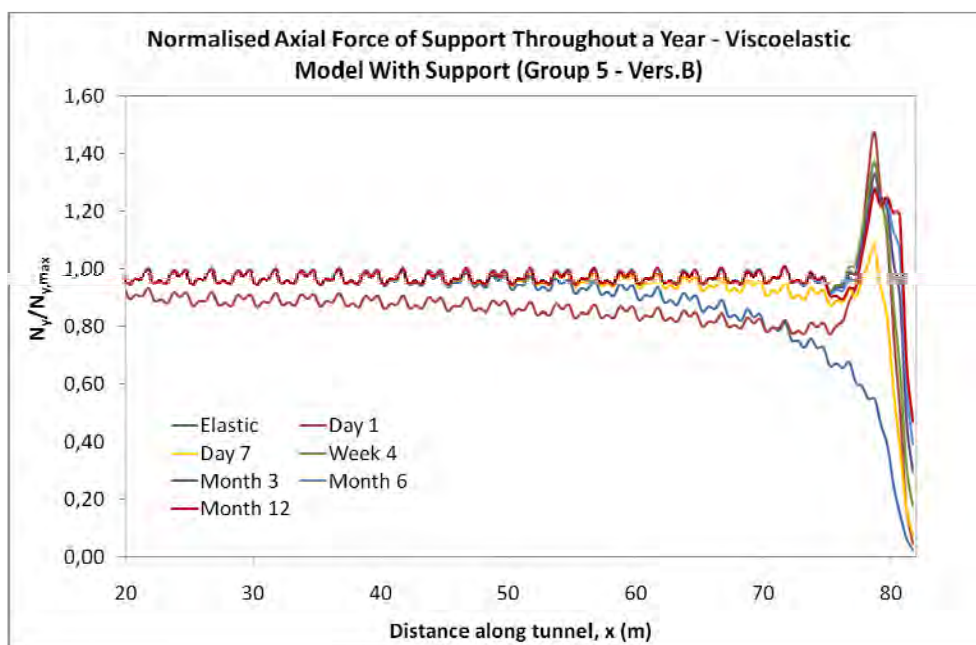


**Σχήμα Β.84:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

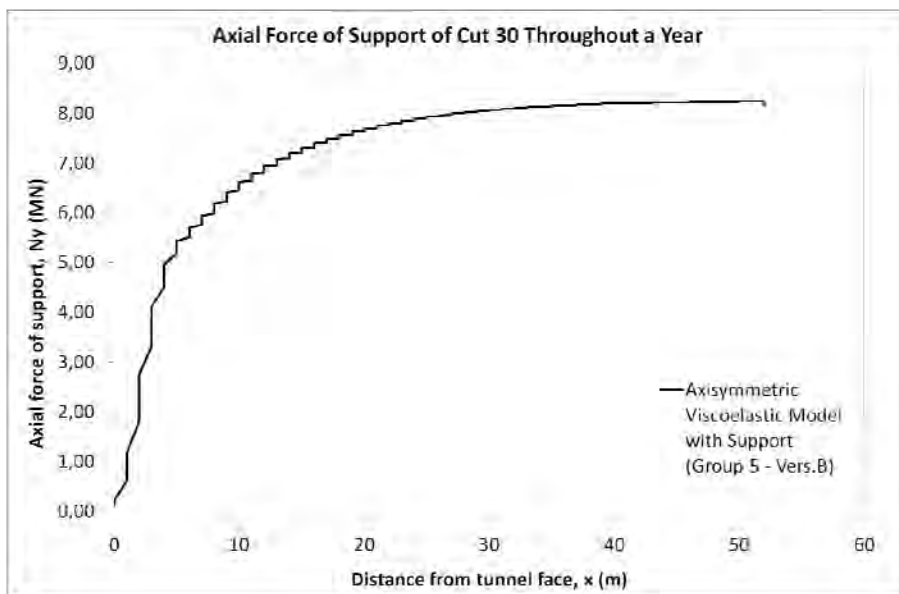




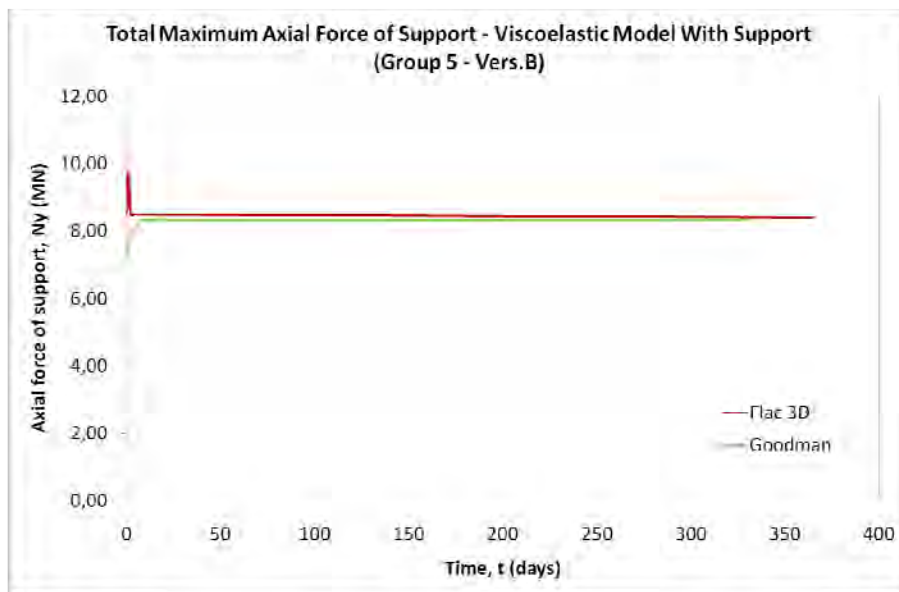
**Σχήμα Β.85:** Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



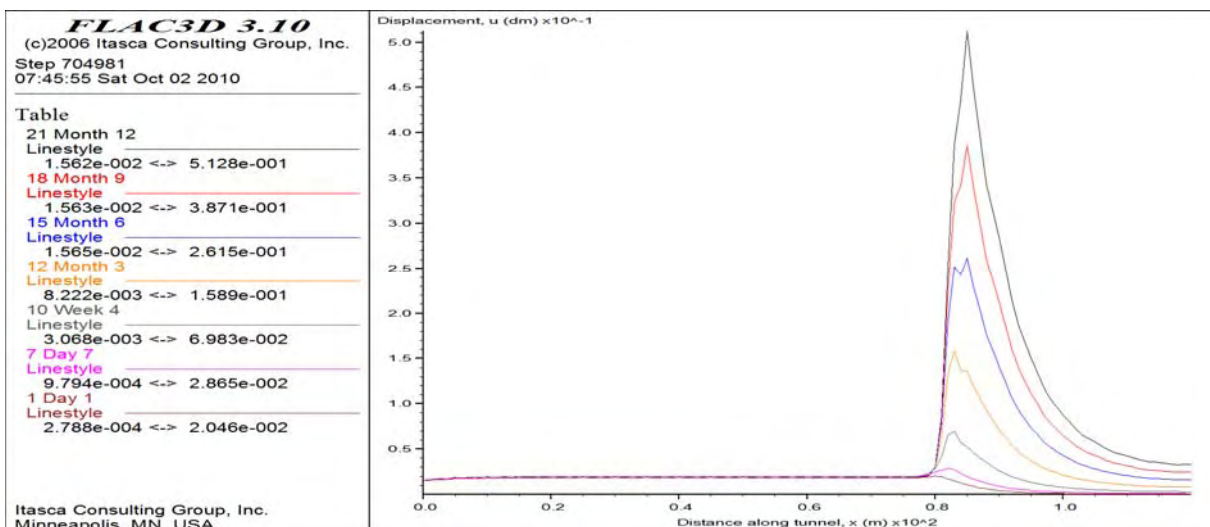
**Σχήμα Β.86:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



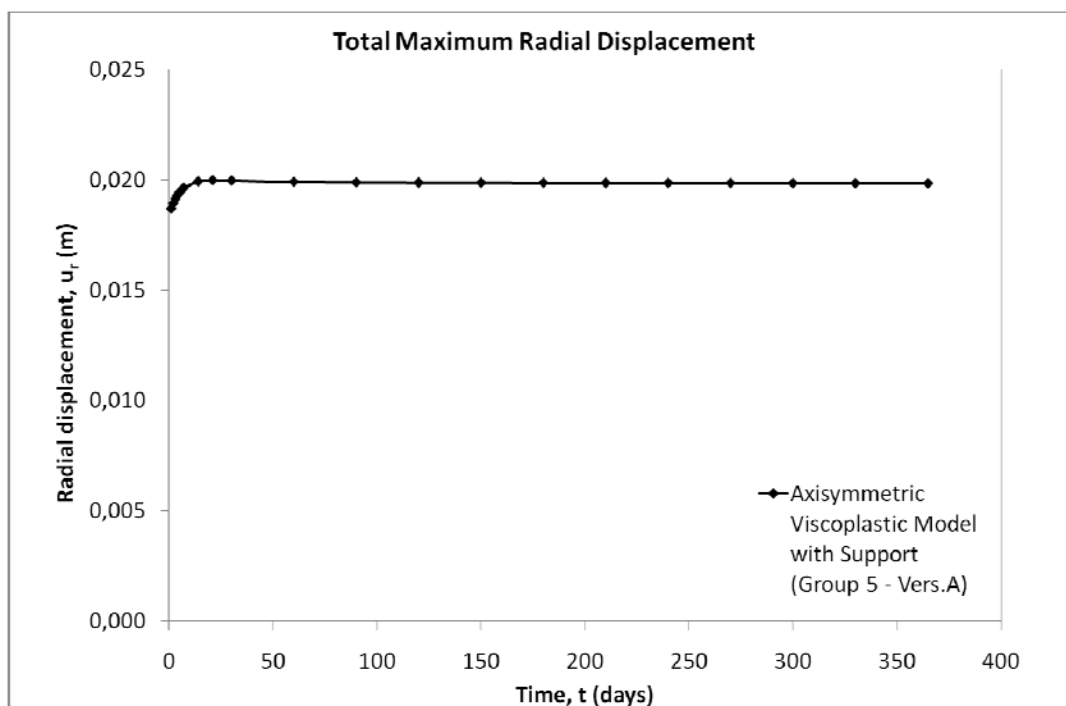
**Σχήμα Β.87:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



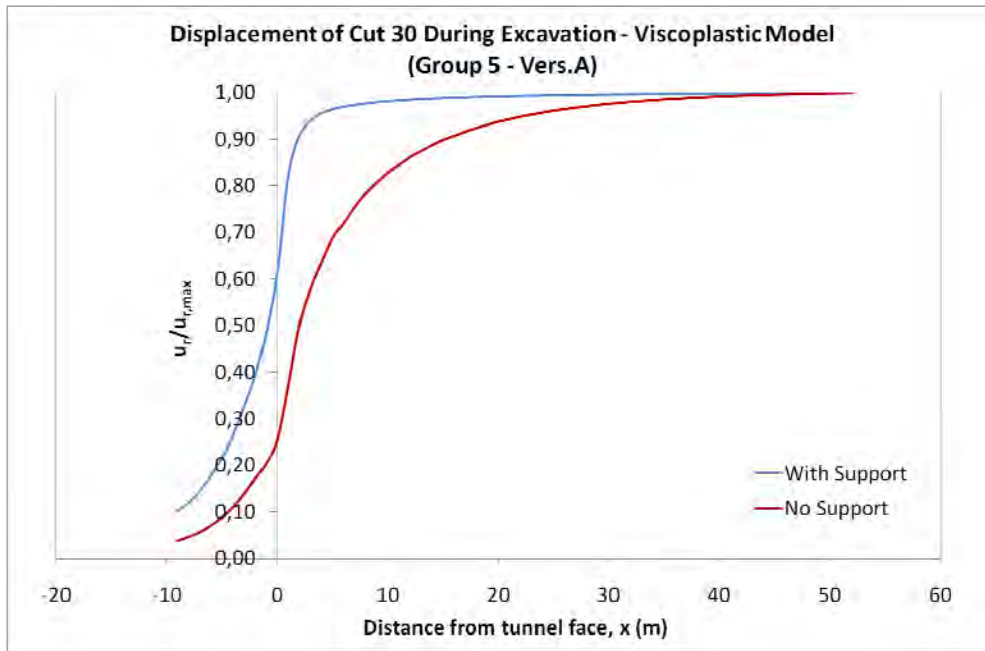
**Σχήμα Β.88:** Σύγκριση της εξέλιξης των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ιξωδοελαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού, με την καμπύλη που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> Επίλυση Κλειστού Τύπου (Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.7) του Goodman (1989).



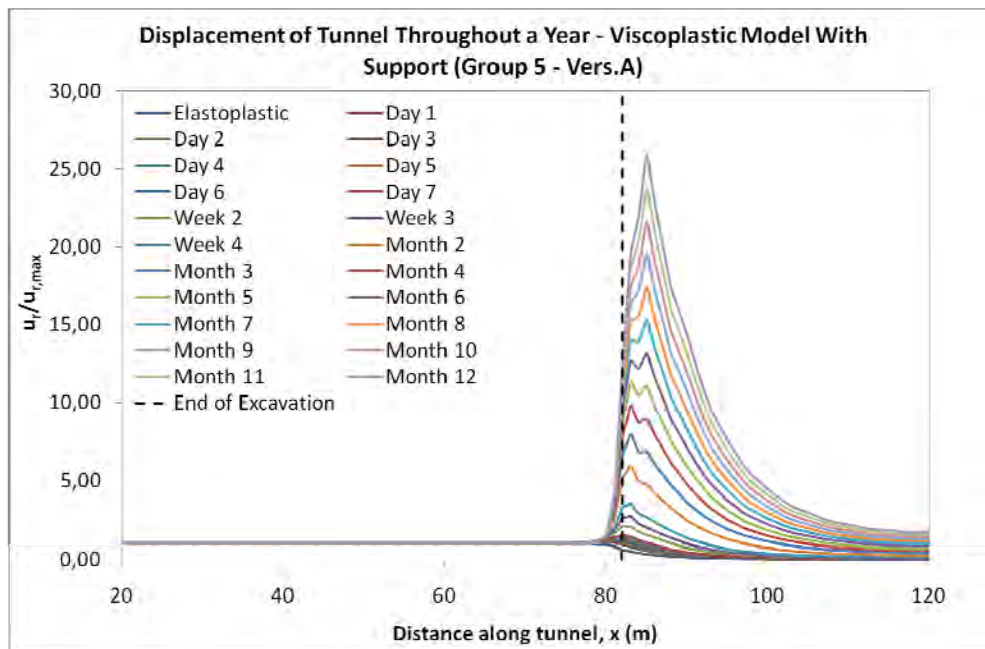
**Σχήμα Β.89:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



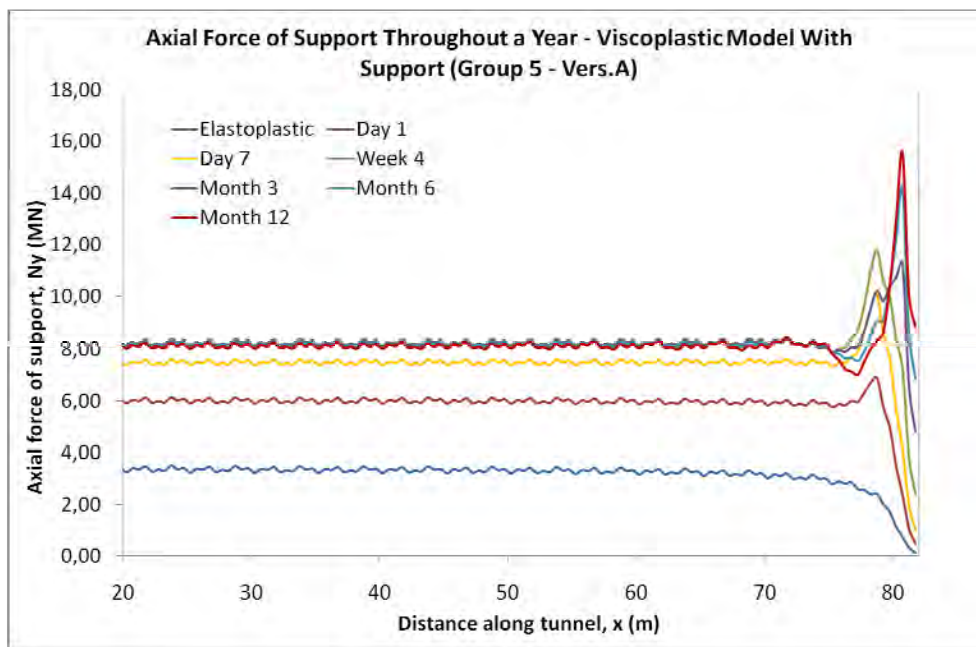
**Σχήμα Β.90:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



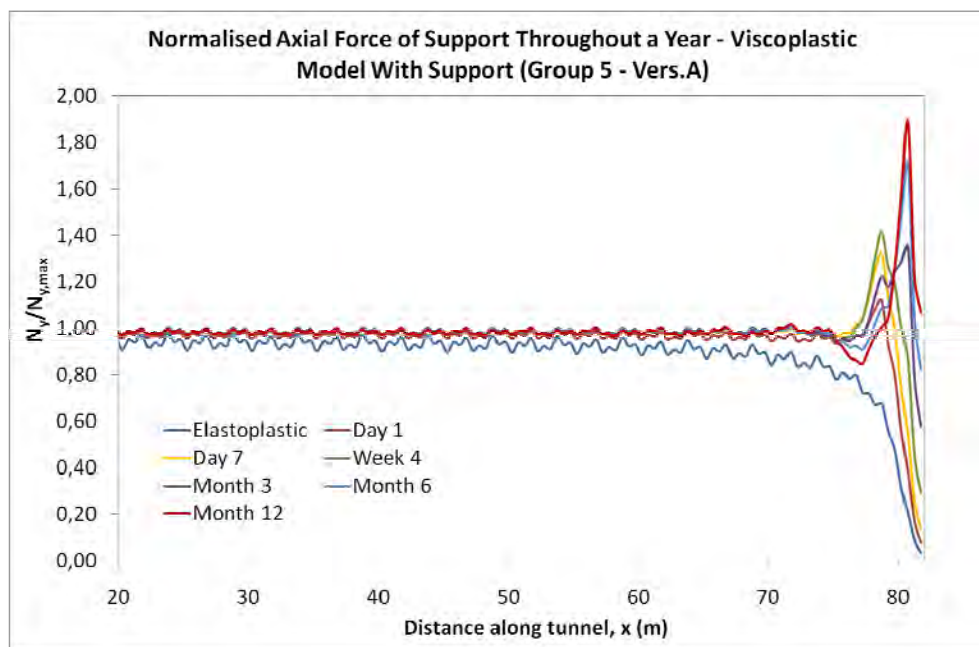
**Σχήμα Β.91:** Σύγκριση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, των ιξωδοπλαστικών μοντέλων Vers.A, με και χωρίς υποστήριξη, της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



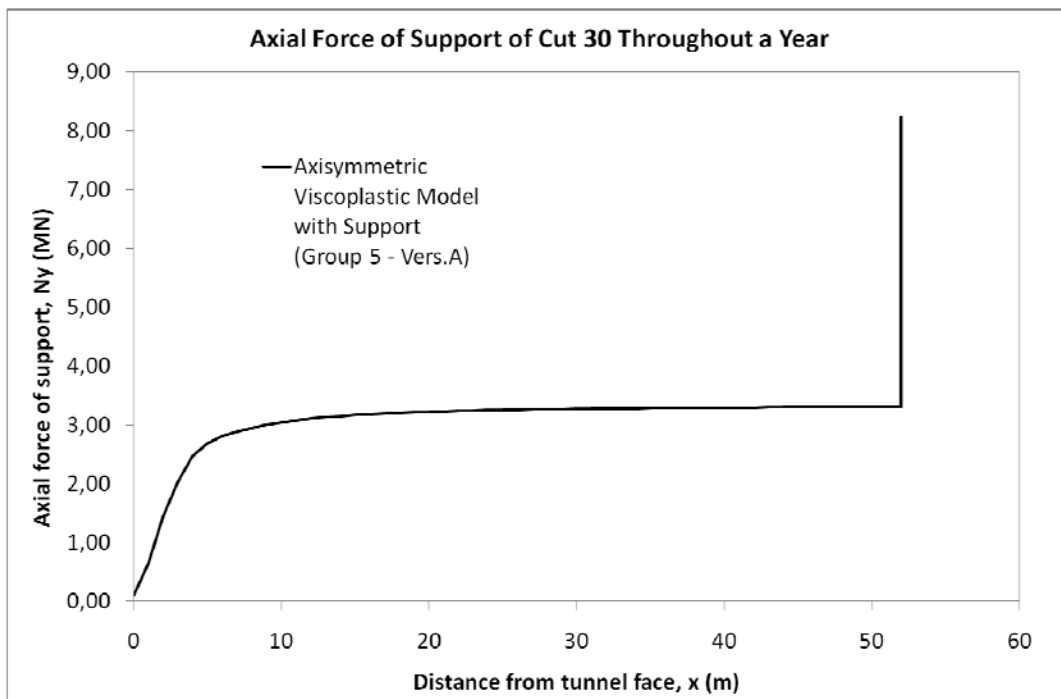
**Σχήμα Β.92:** Προφίλ των μετατοπίσεων της σήραγγας (L.D.P.) για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



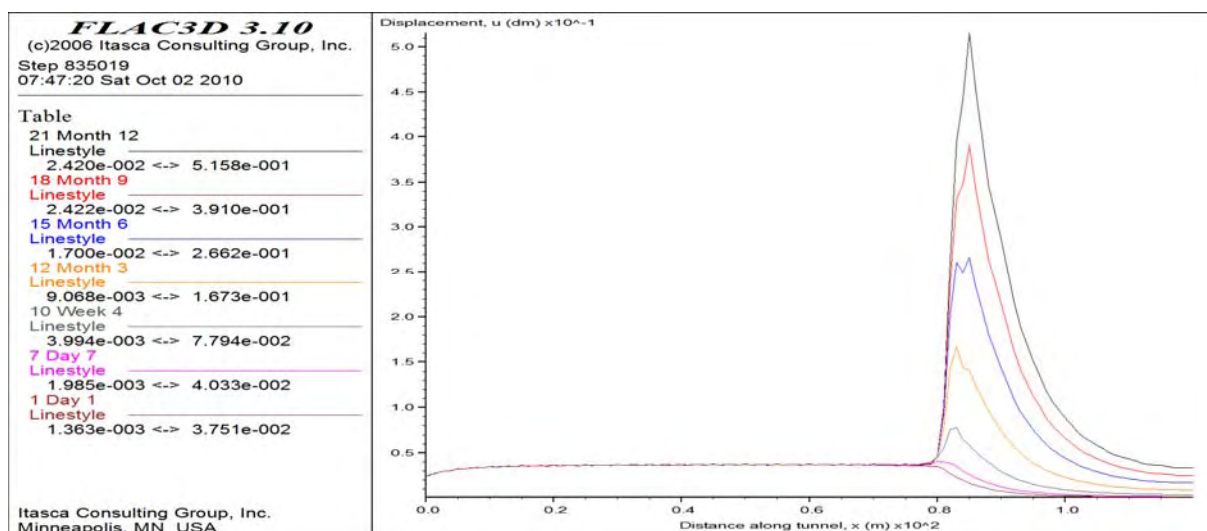
**Σχήμα Β.93:** Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



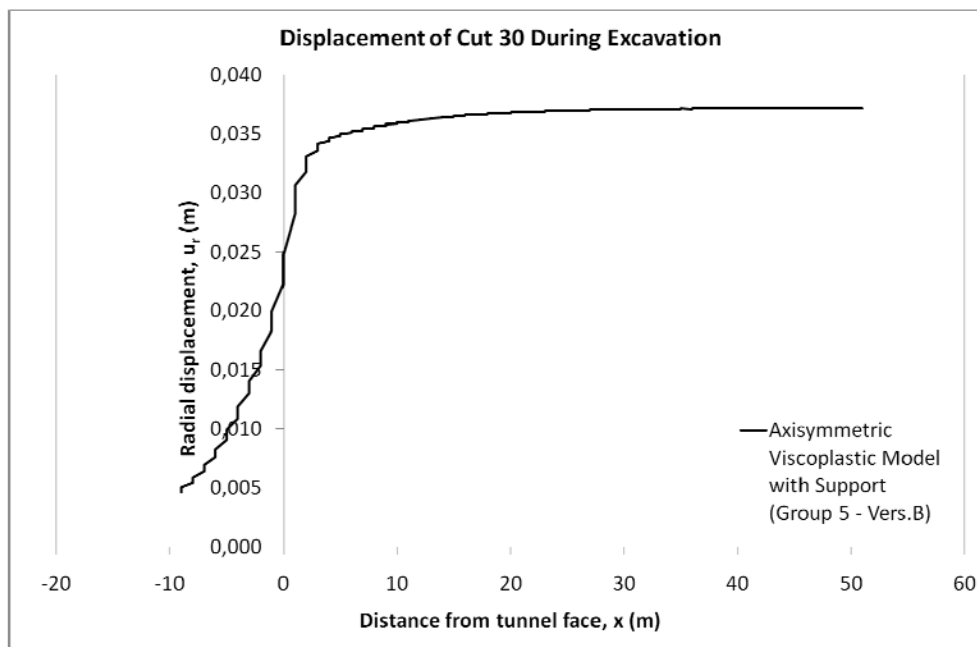
**Σχήμα Β.94:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



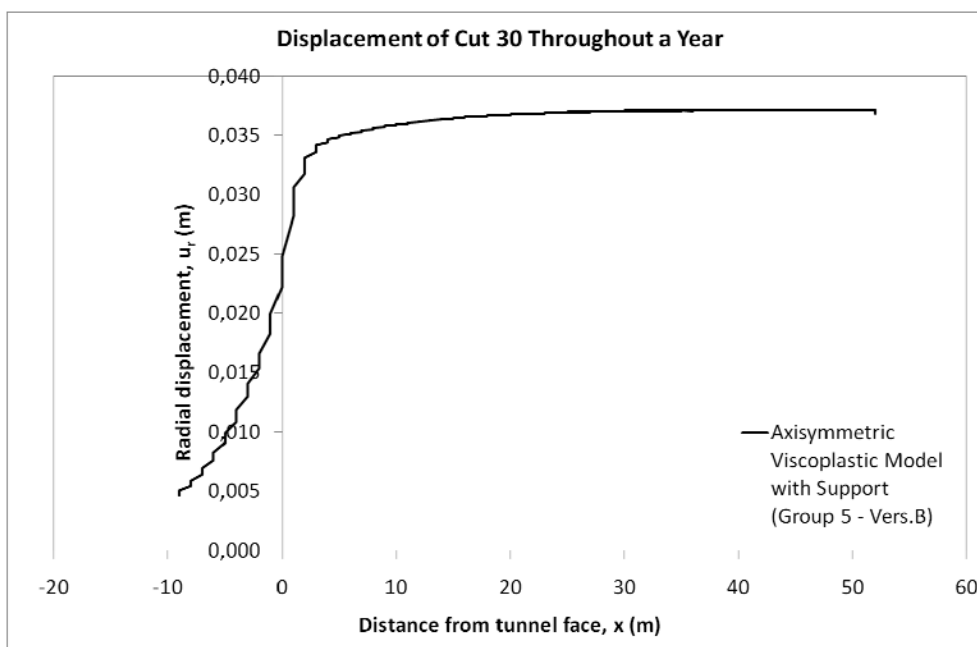
**Σχήμα Β.95:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.A με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



**Σχήμα Β.96:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων καθ' όλο το μήκος της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

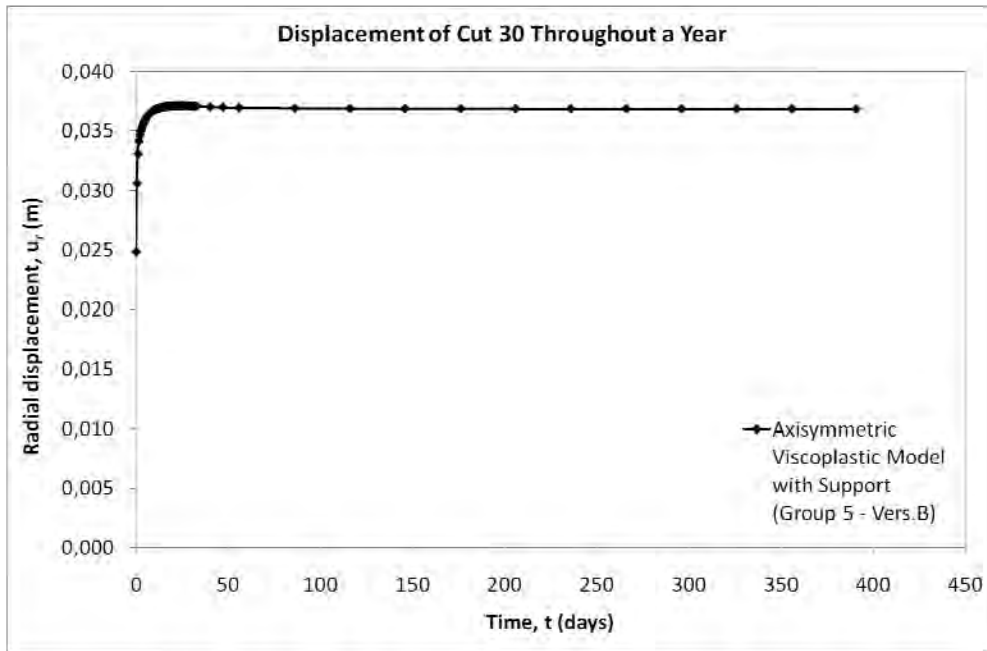


**Σχήμα Β.97:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

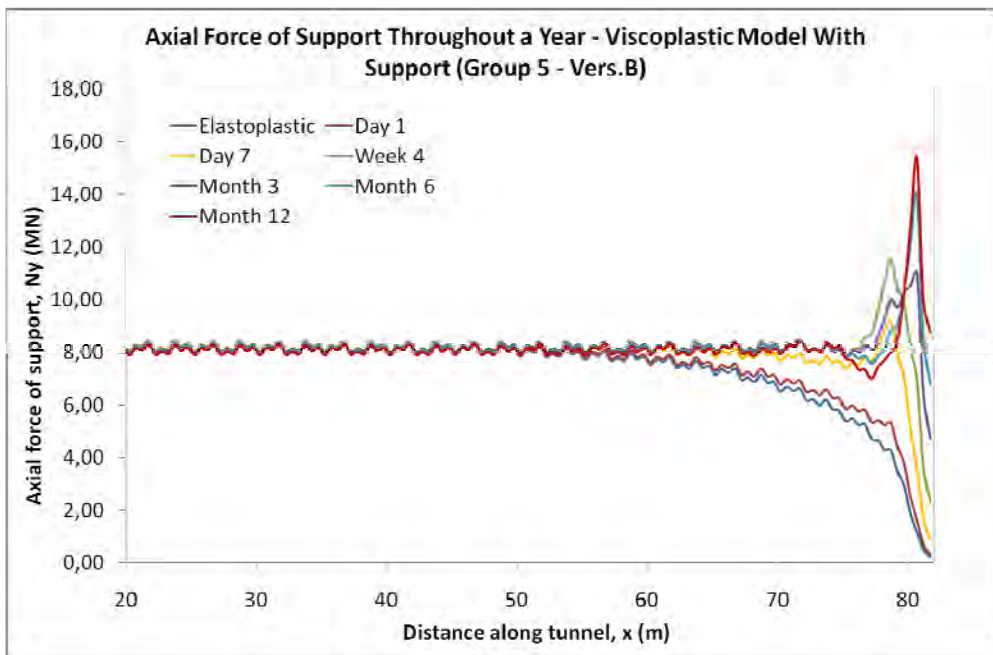


**Σχήμα Β.98:** Διαμόρφωση των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



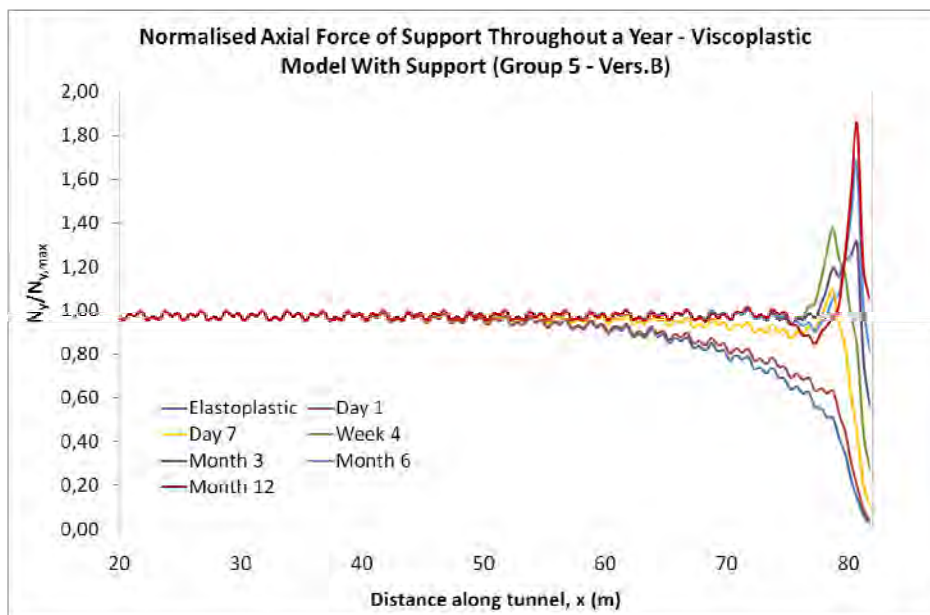


**Σχήμα Β.99:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.

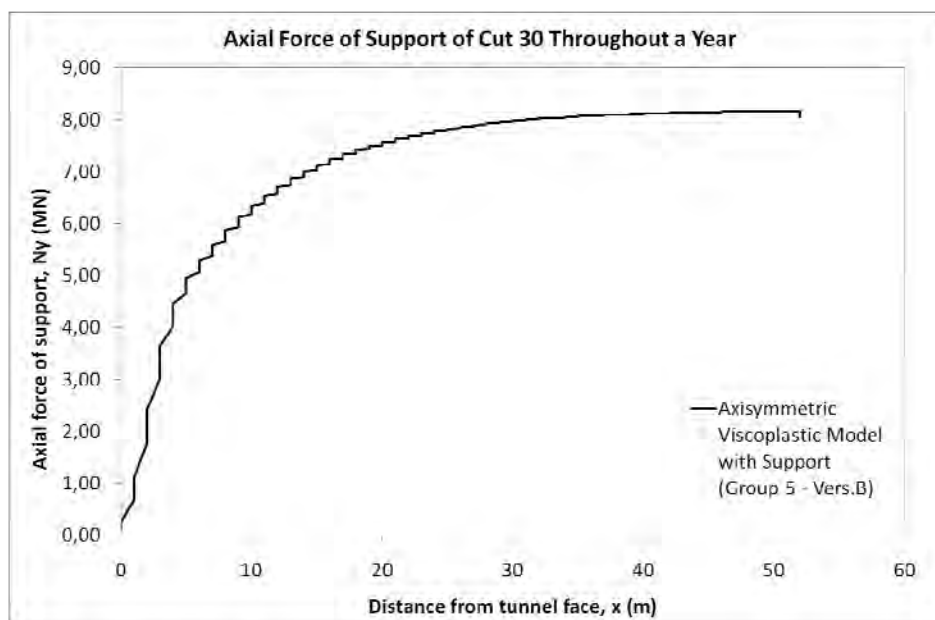


**Σχήμα Β.100:** Εξέλιξη καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.





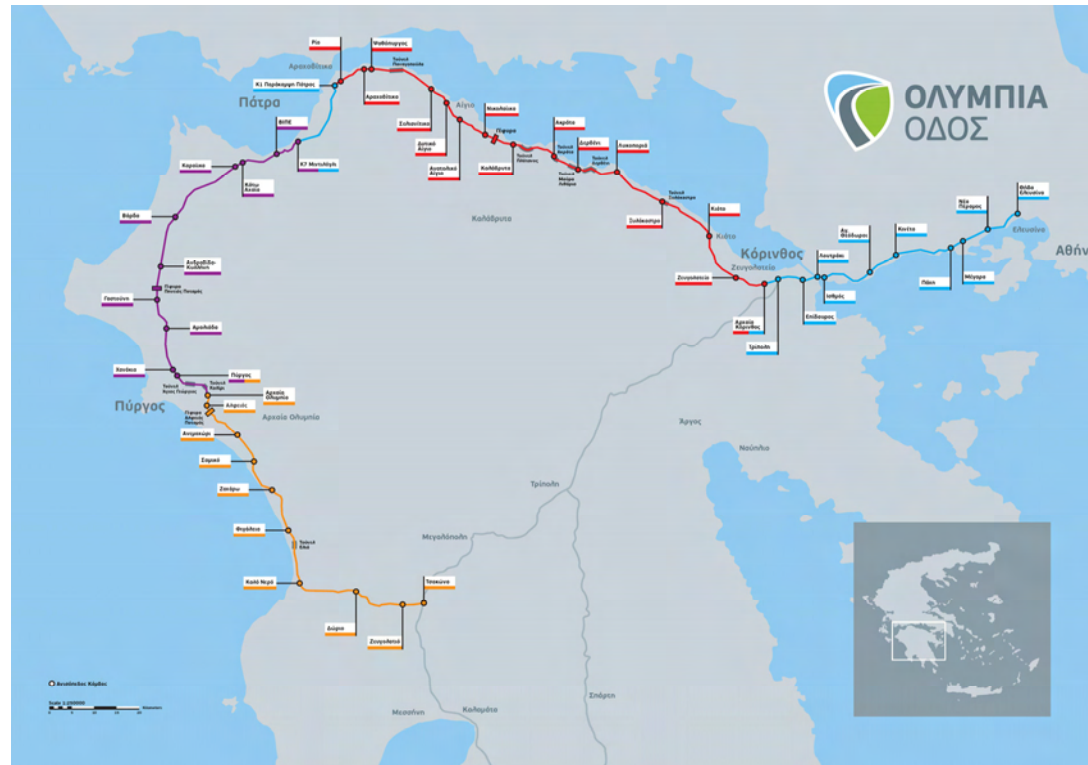
**Σχήμα Β.101:** Προφίλ των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



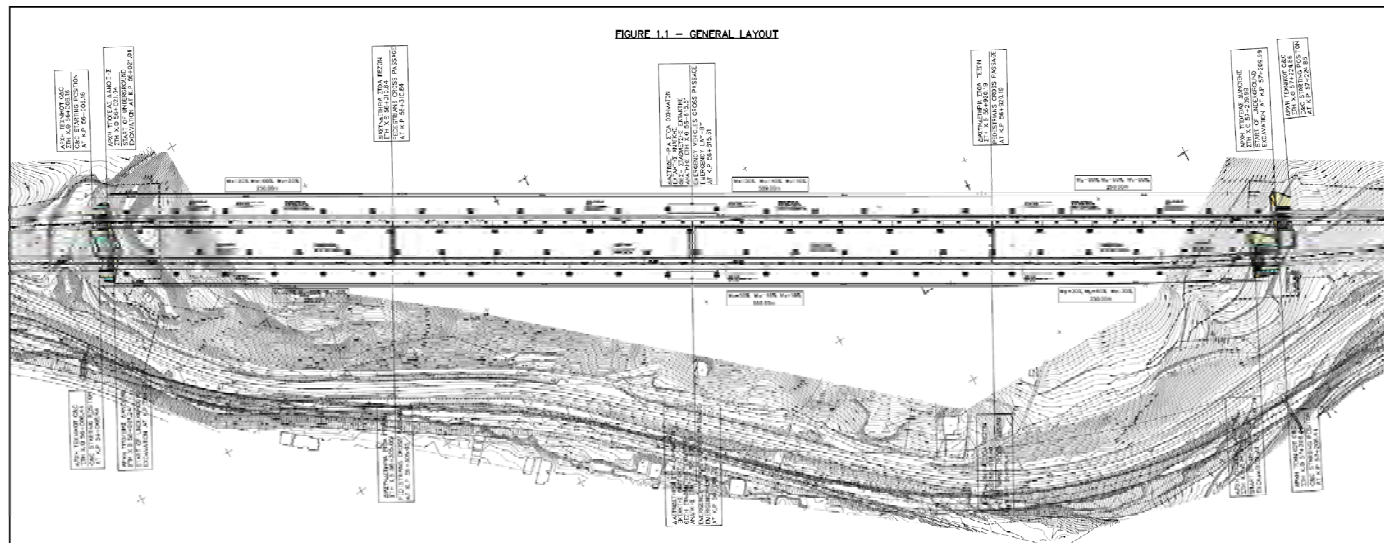
**Σχήμα Β.102:** Διαμόρφωση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση του ενδιάμεσου σημείου στα 30 m από την αρχή της διάνοιξης, για χρονικό διάστημα ενός έτους, του ιξωδοπλαστικού μοντέλου Vers.B με υποστήριξη της 5<sup>ης</sup> ομάδας παραμέτρων ερπυσμού.



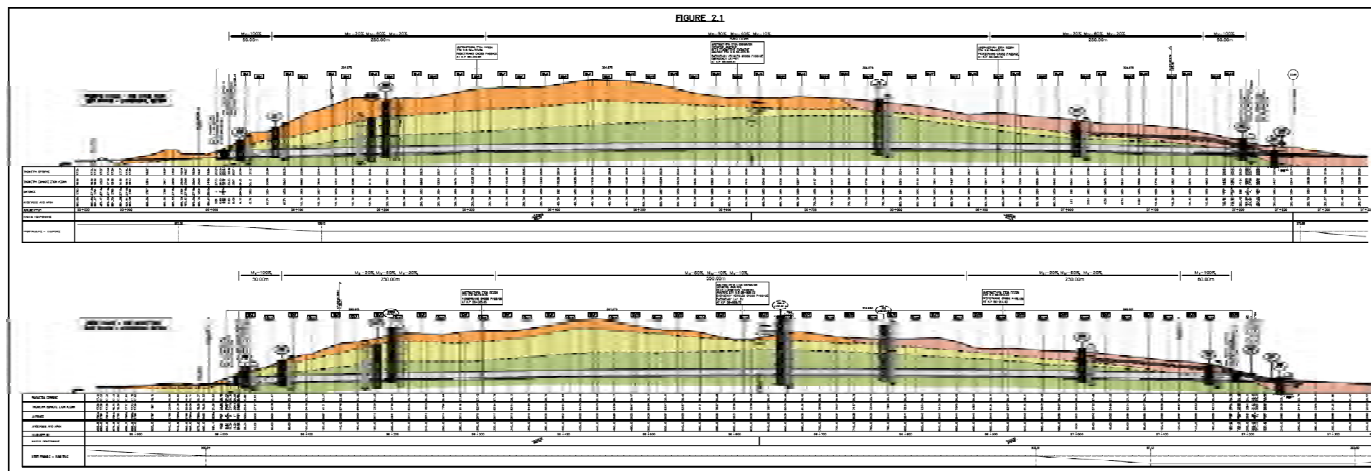
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ



Σχήμα Γ.1: Σκαρίφημα του αυτοκινητοδρόμου «Ολυμπία Οδός» (Ολυμπία Οδός Α.Ε.).

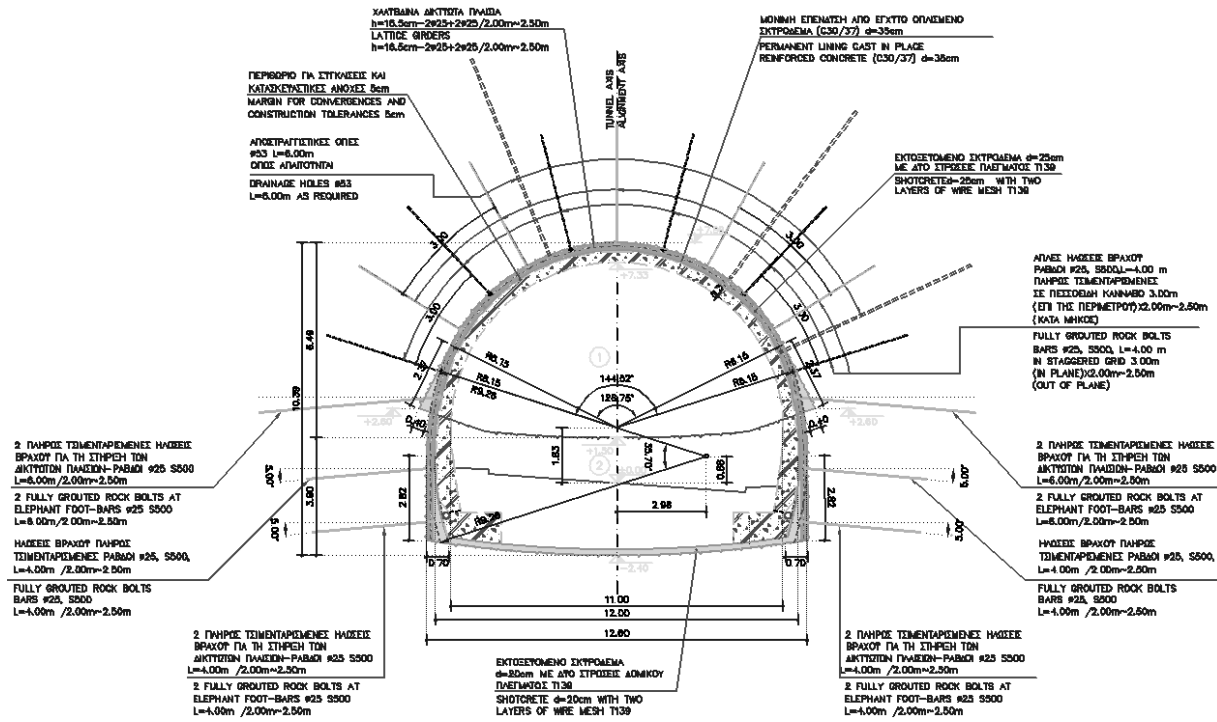


Σχήμα Γ.2: Οριζοντιογραφία της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009).

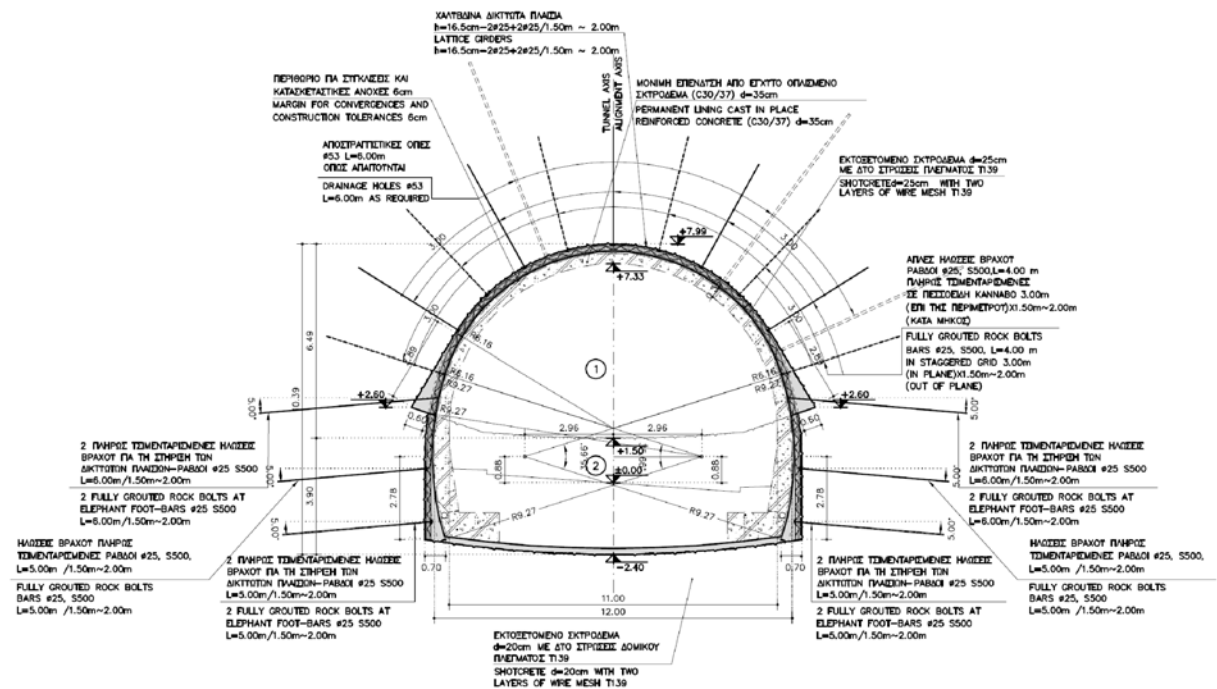


Σχήμα Γ.3: Μηκτομές των δύο κλάδων της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαριών (ΟΤΜ, 2009).

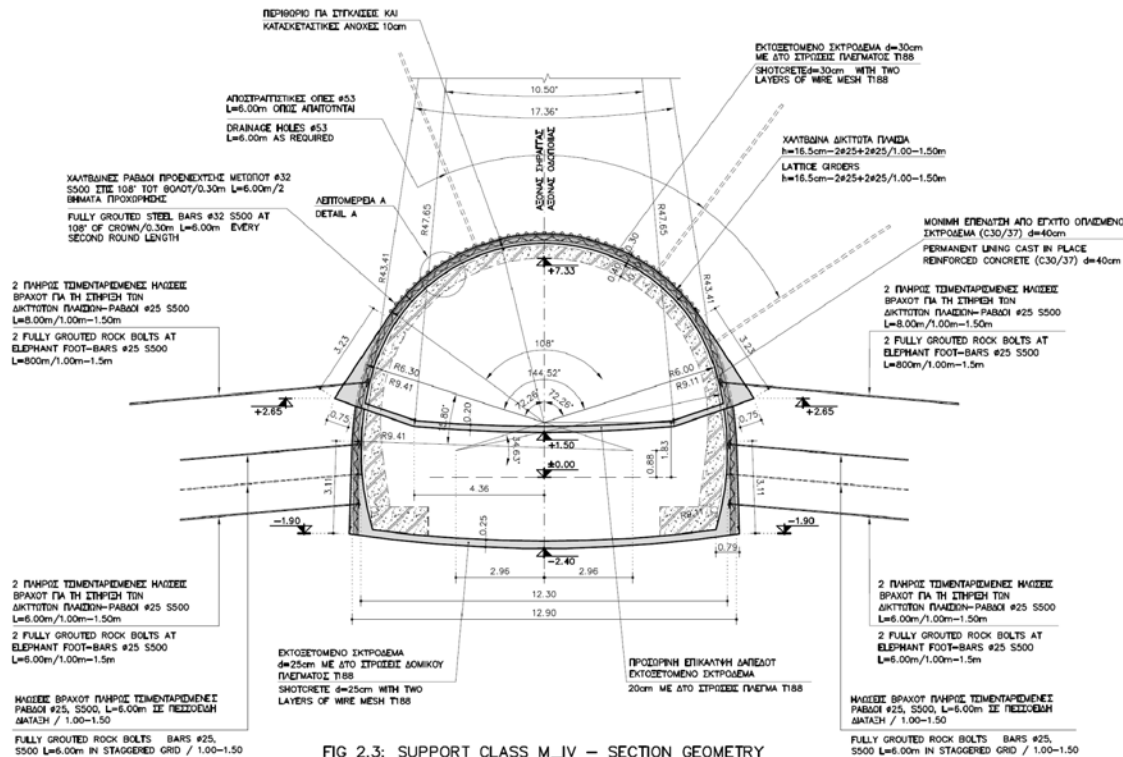




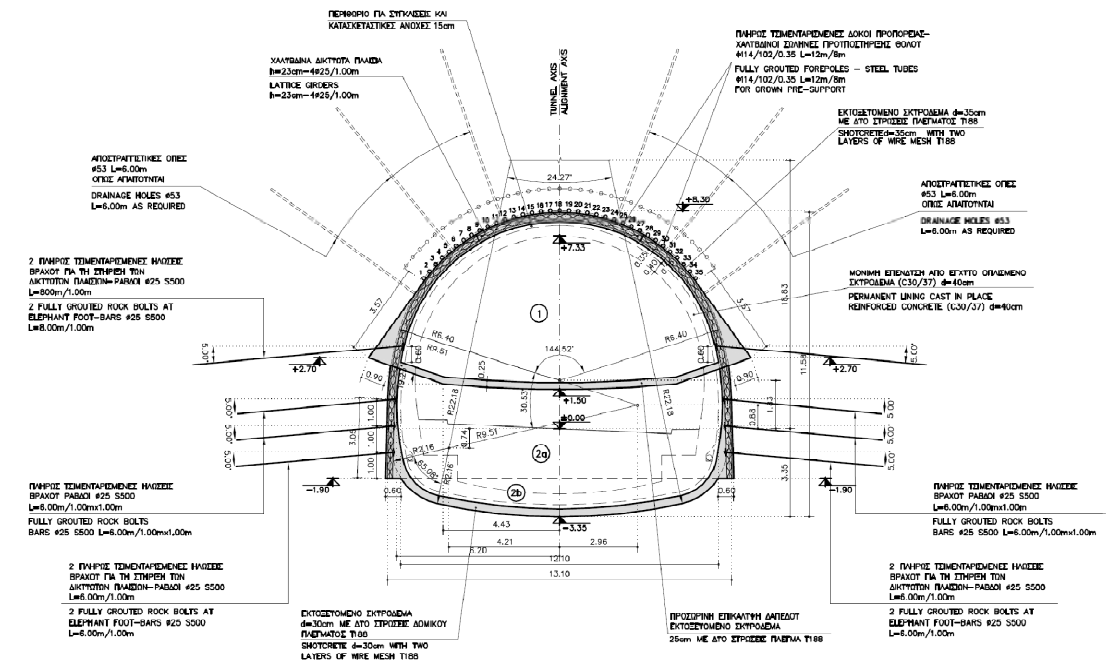
Σχήμα Γ.4: Τυπική διατομή κατηγορίας M<sub>II</sub> της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαρίων (ΟΤΜ, 2010).



Σχήμα Γ.5: Τυπική διατομή κατηγορίας M<sub>III</sub> της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαρίων (ΟΤΜ, 2009).



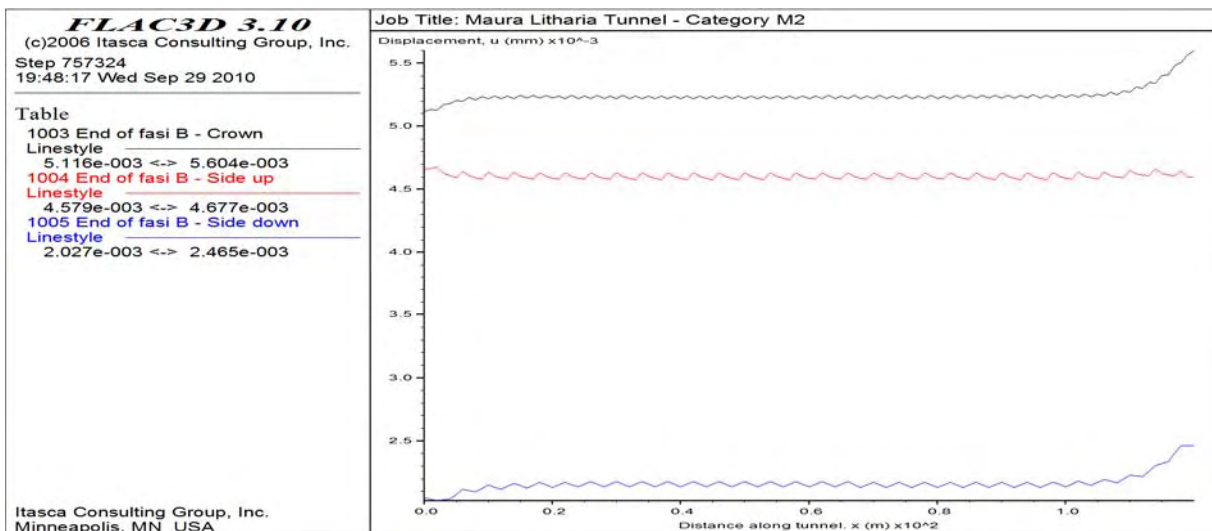
Σχήμα Γ.6: Τυπική διατομή κατηγορίας M<sub>IV</sub> της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαρίων (ΟΤΜ, 2009).



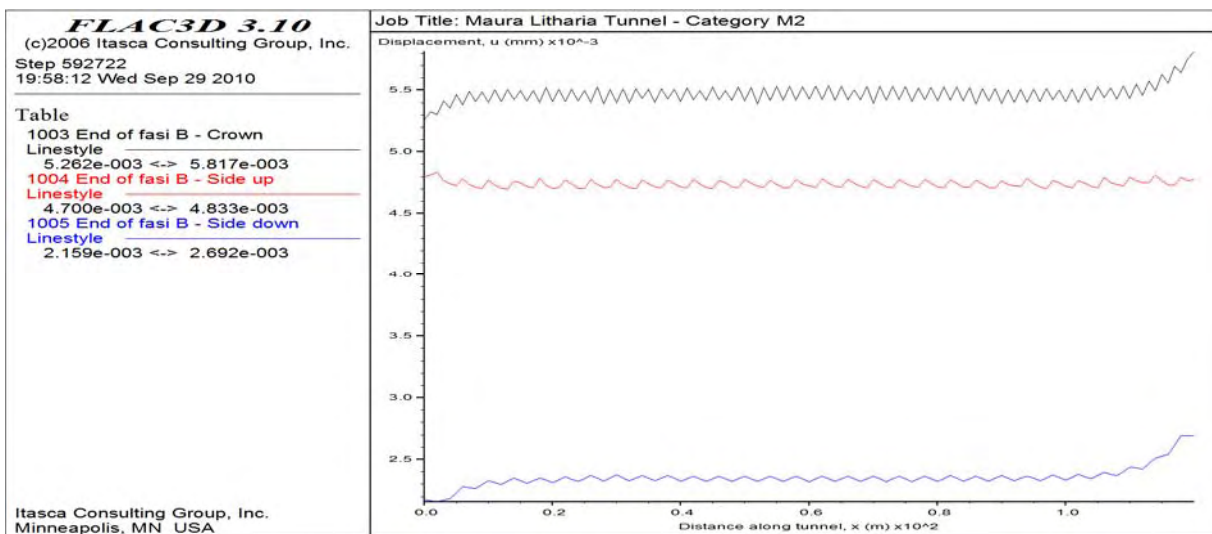
Σχήμα Γ.7: Τυπική διατομή κατηγορίας M<sub>V</sub> για το μέσο ελάχιστο ύψος υπερκειμένων της σήραγγας 11 των Μαύρων Λιθαρίων (ΟΤΜ, 2009).



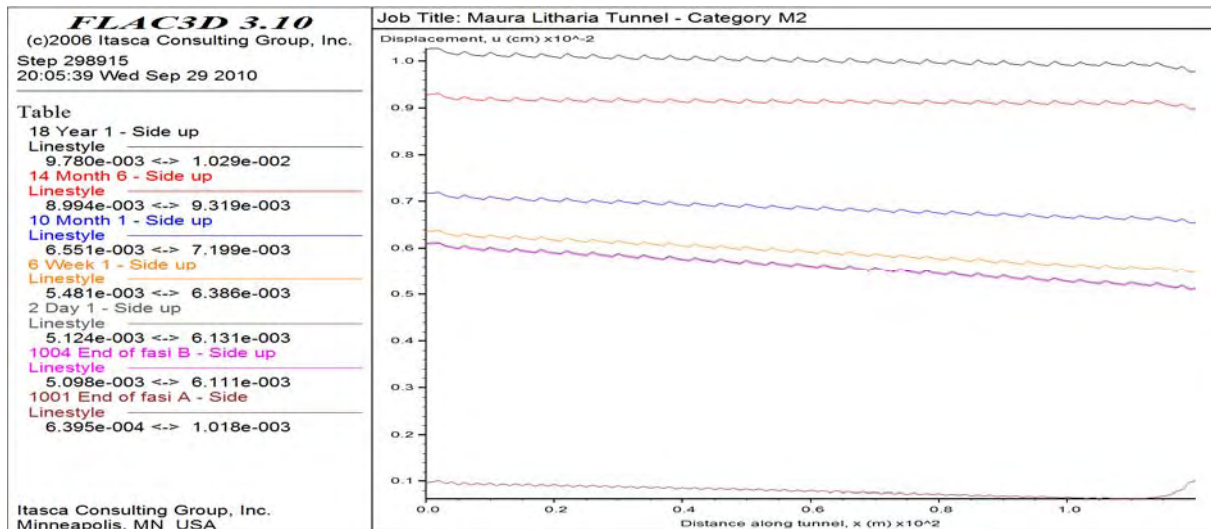




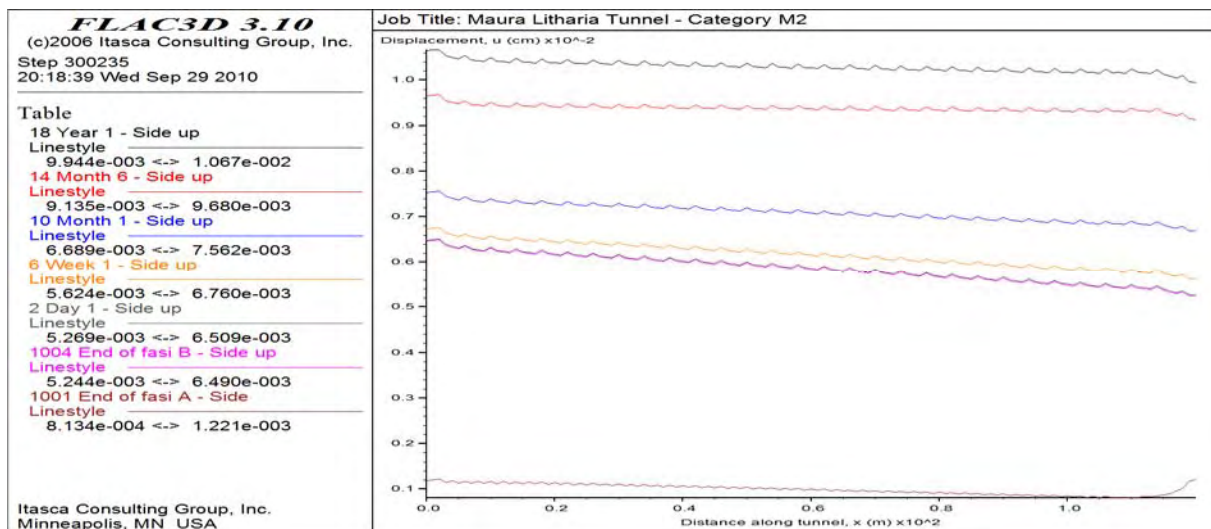
**Σχήμα Γ.9:** Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.



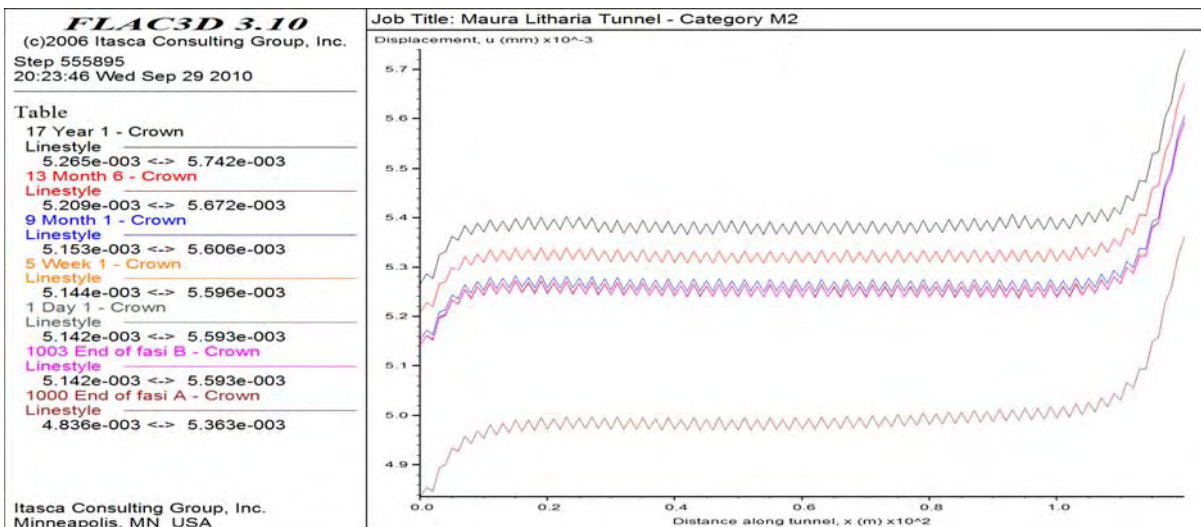
**Σχήμα Γ.10:** Μετατοπίσεις στη στέψη και την παρειά της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 3) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.



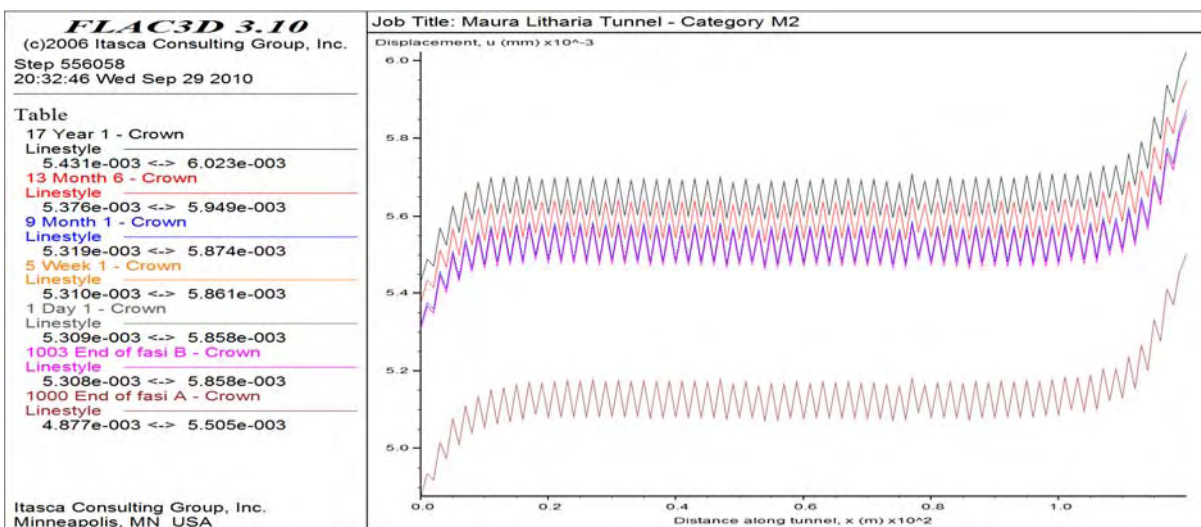
**Σχήμα Γ.11:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



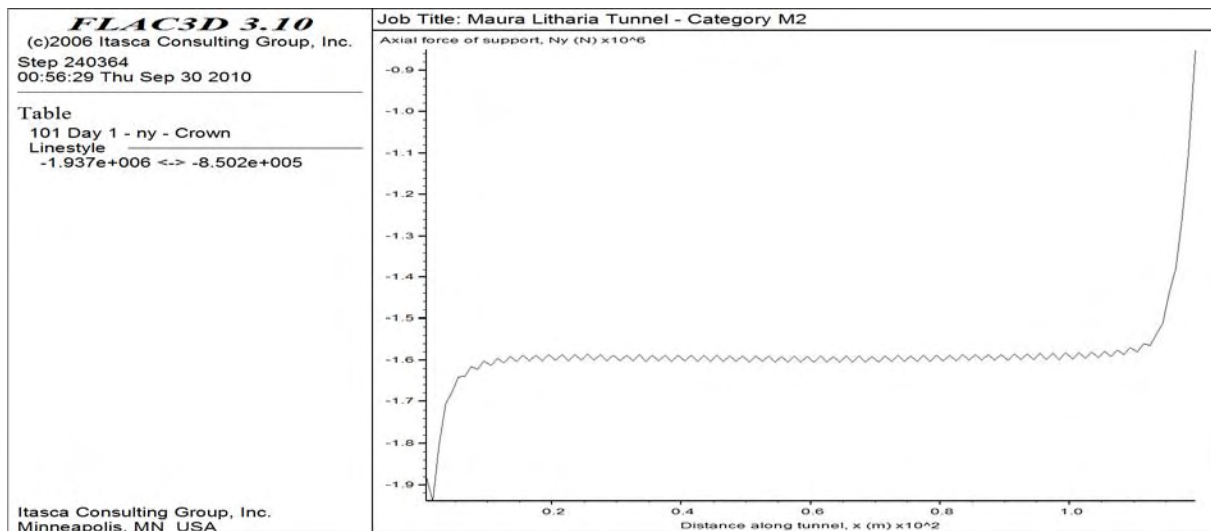
**Σχήμα Γ.12:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στον πόδα της άνω παρειάς της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 2) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.



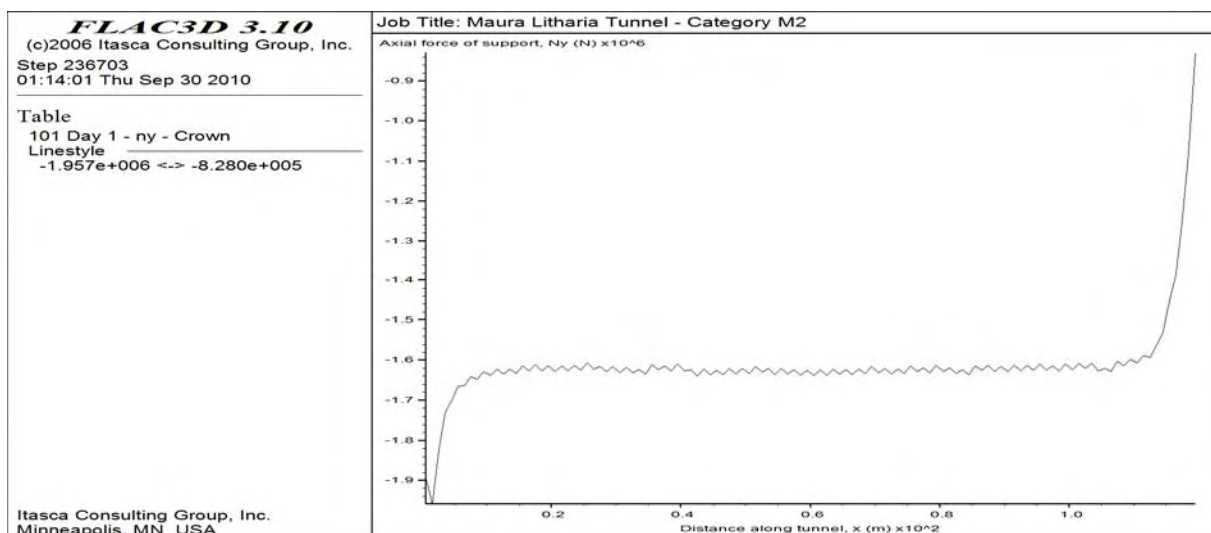
Σχήμα Γ.13: Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



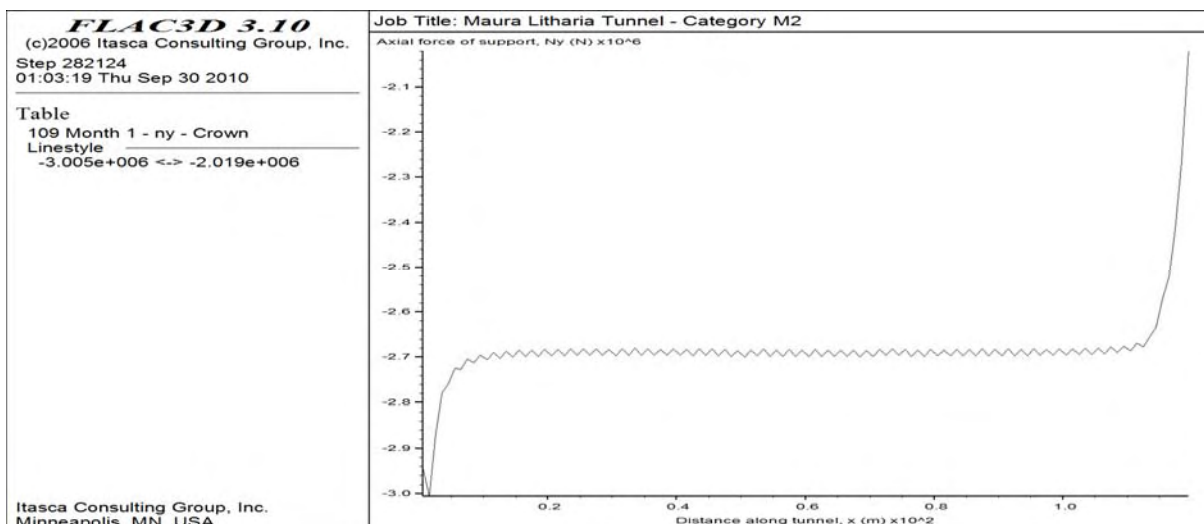
Σχήμα Γ.14: Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



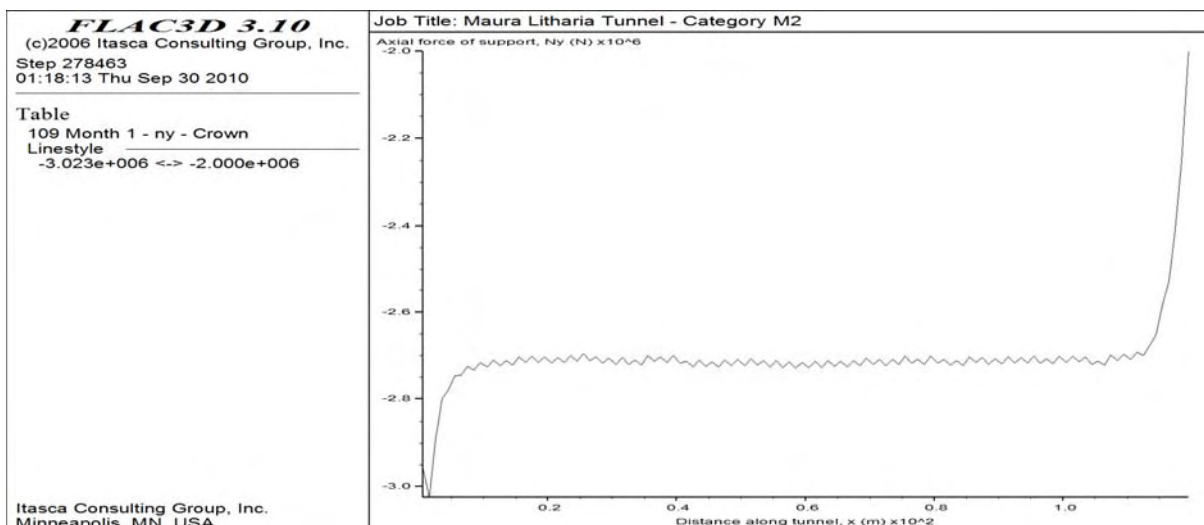
**Σχήμα Γ.15:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.



**Σχήμα Γ.16:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.

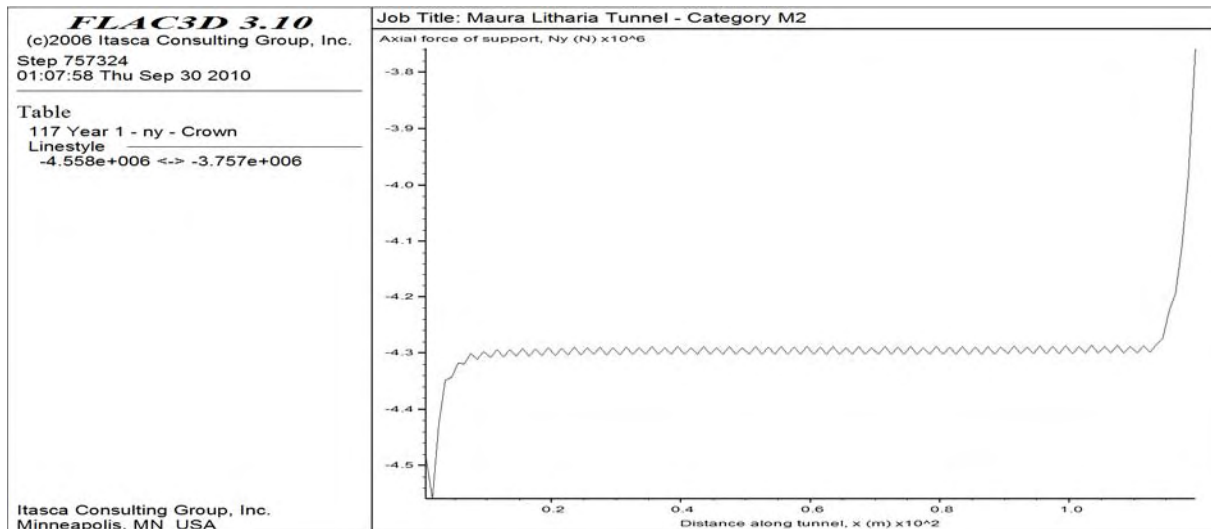


**Σχήμα Γ.17:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.

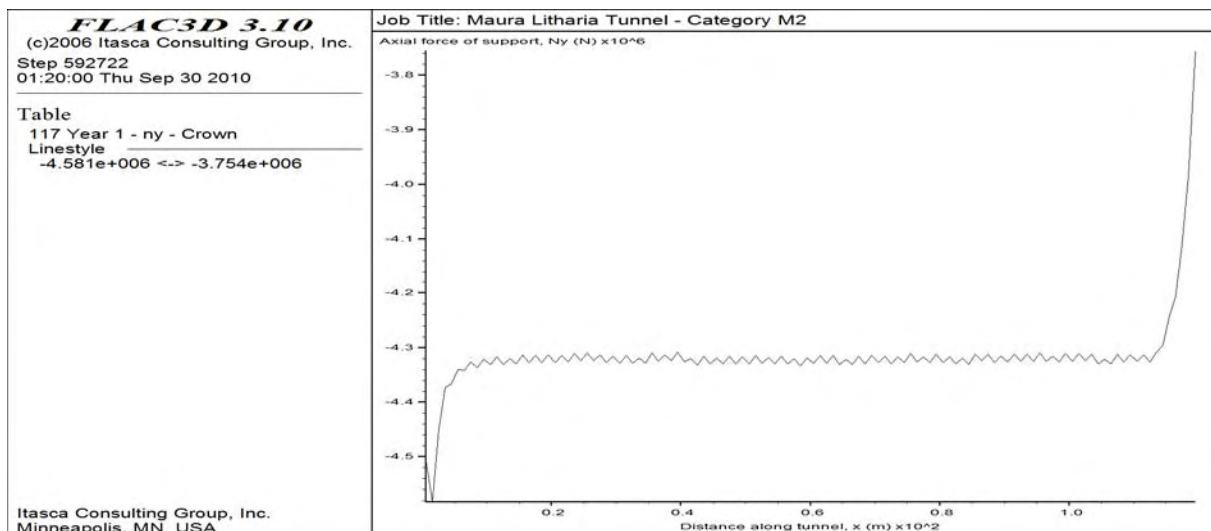


**Σχήμα Γ.18:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.

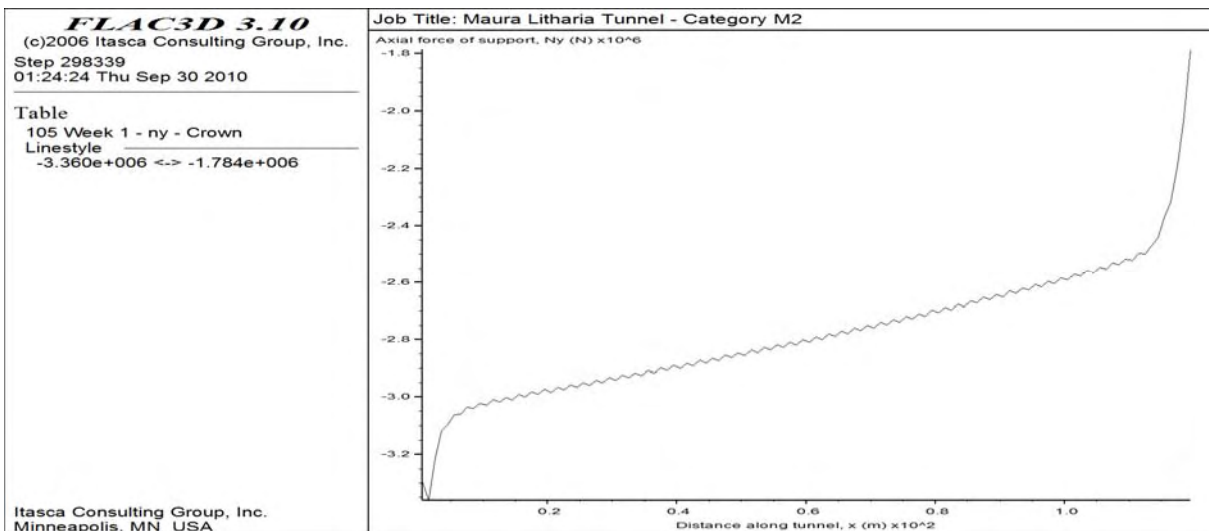




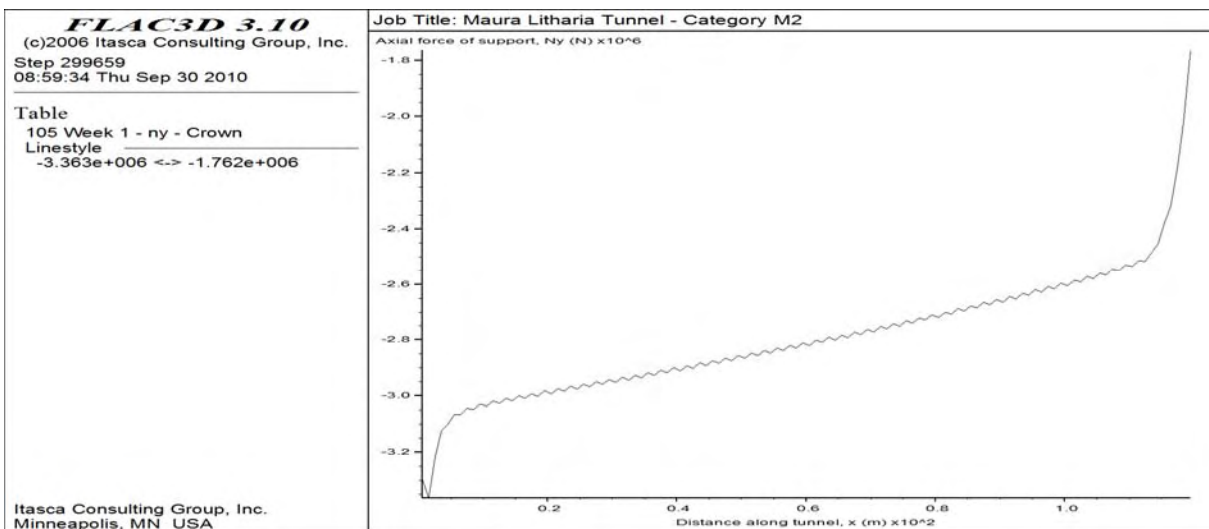
**Σχήμα Γ.19:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.A.



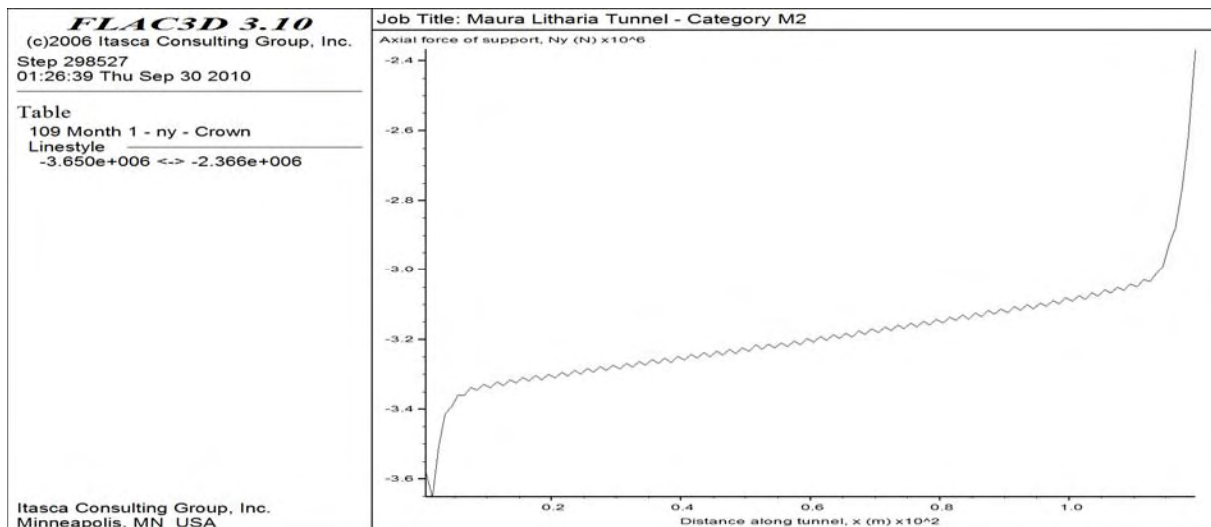
**Σχήμα Γ.20:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.A.



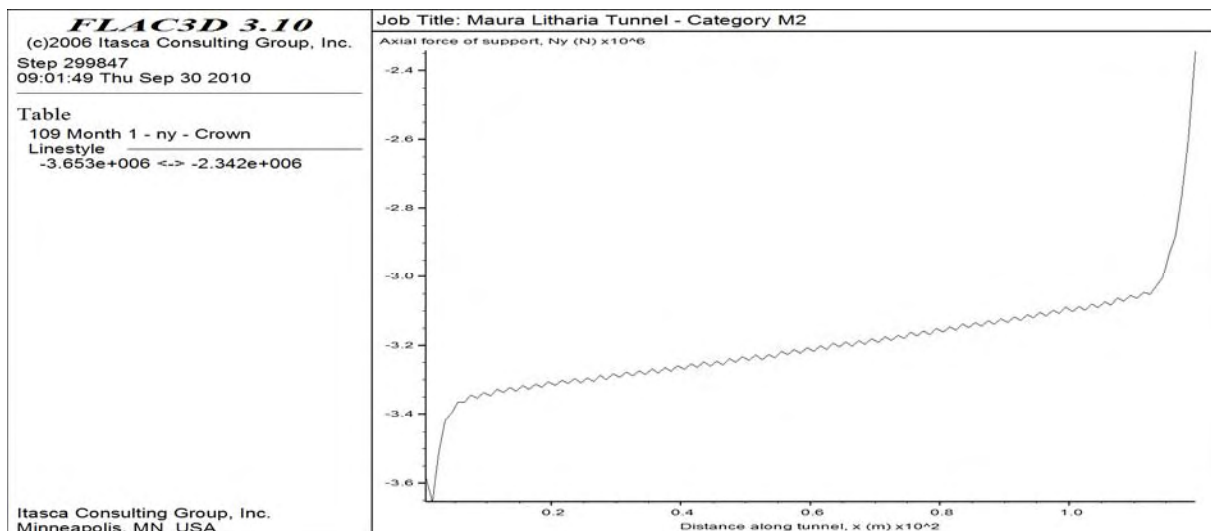
**Σχήμα Γ.21:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



**Σχήμα Γ.22:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.

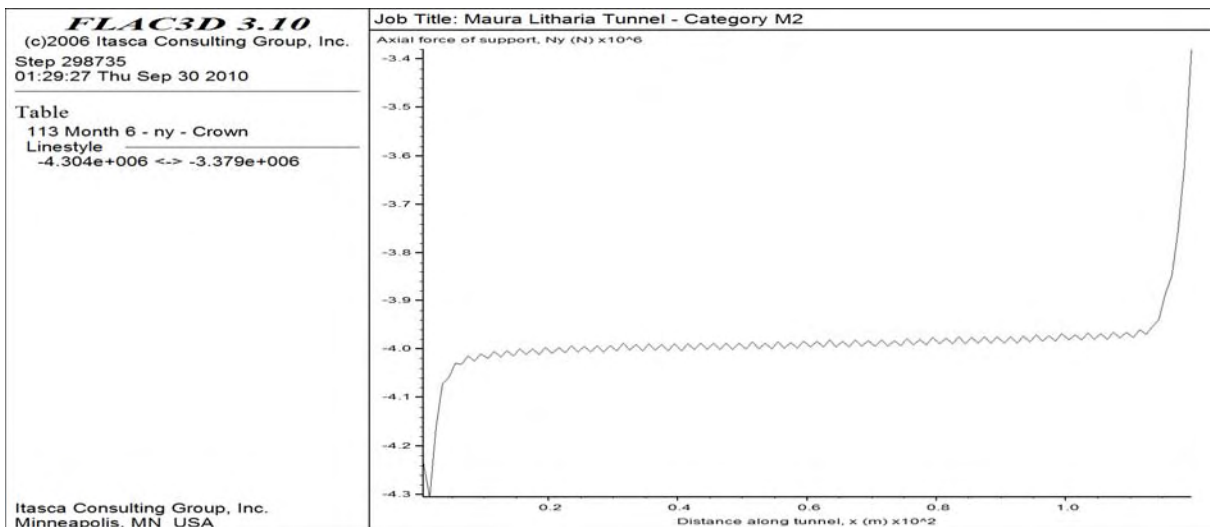


**Σχήμα Γ.23:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.

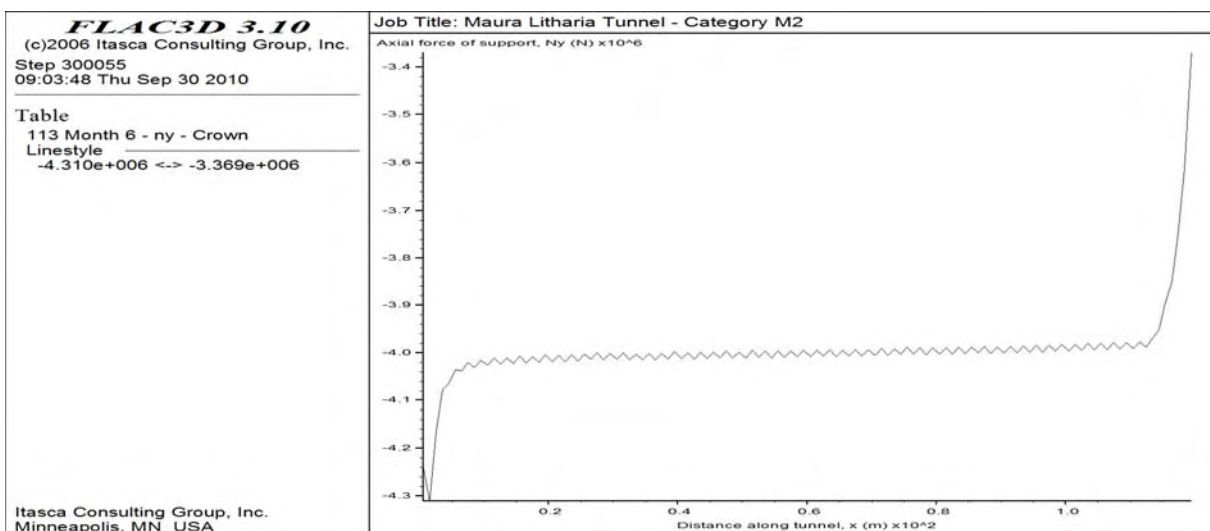


**Σχήμα Γ.24:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.

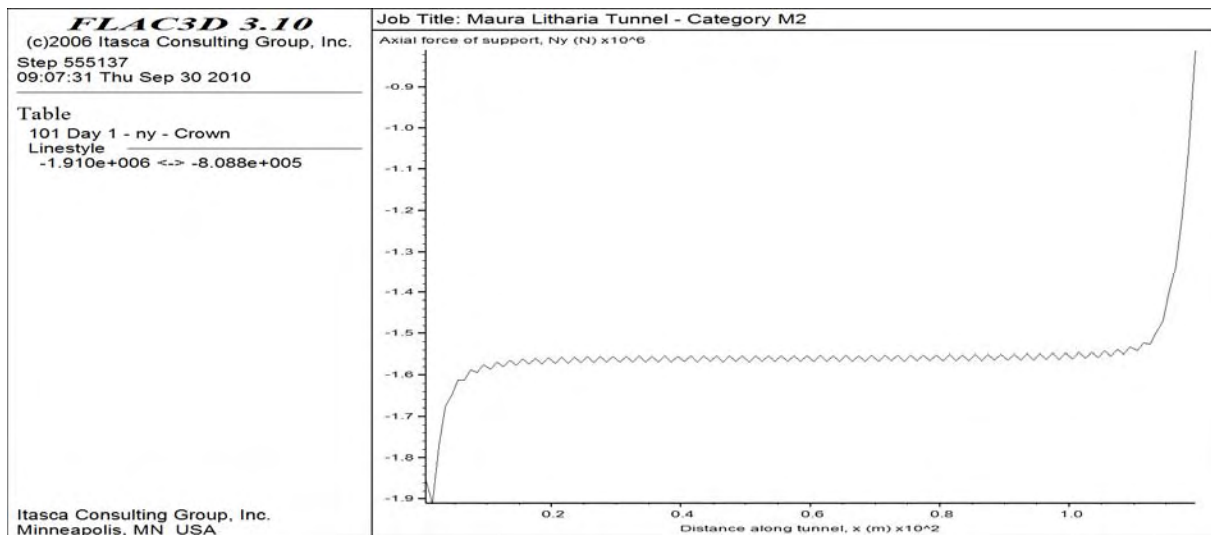




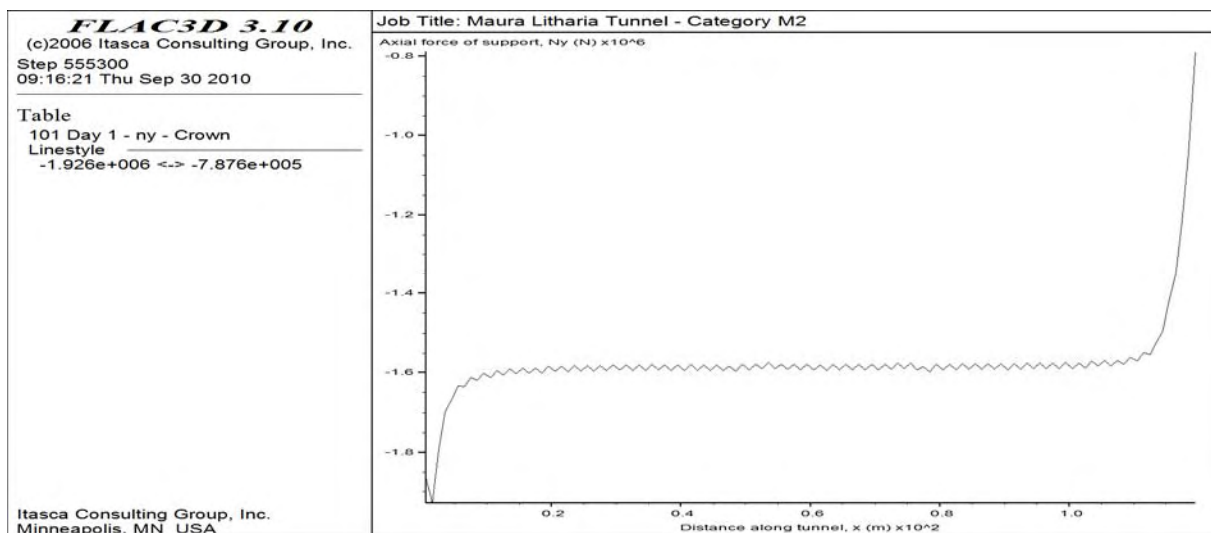
**Σχήμα Γ.25:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



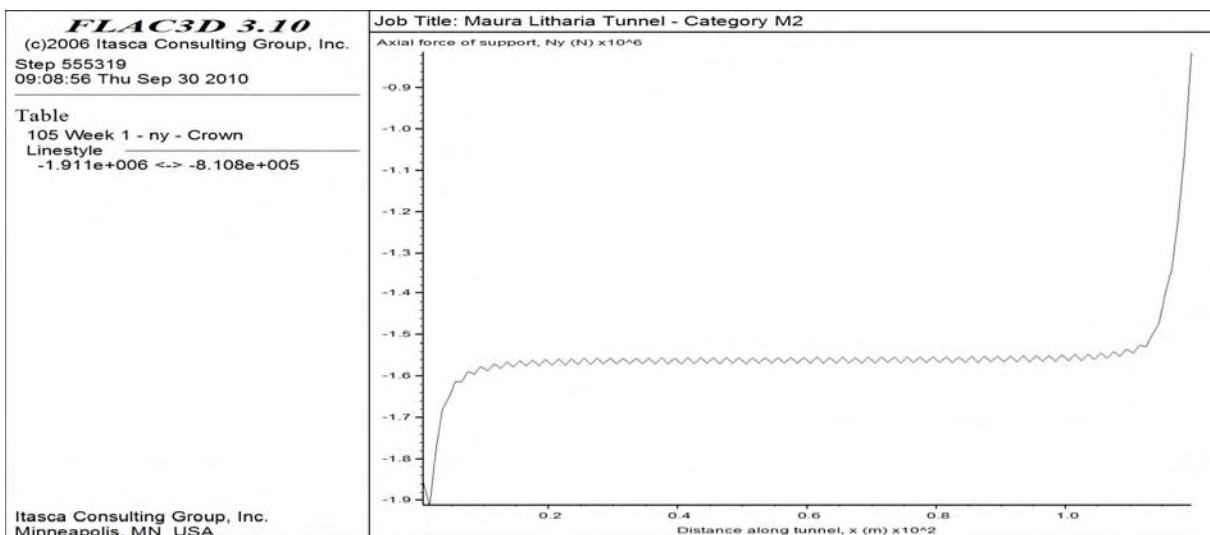
**Σχήμα Γ.26:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, έξι μήνες μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.



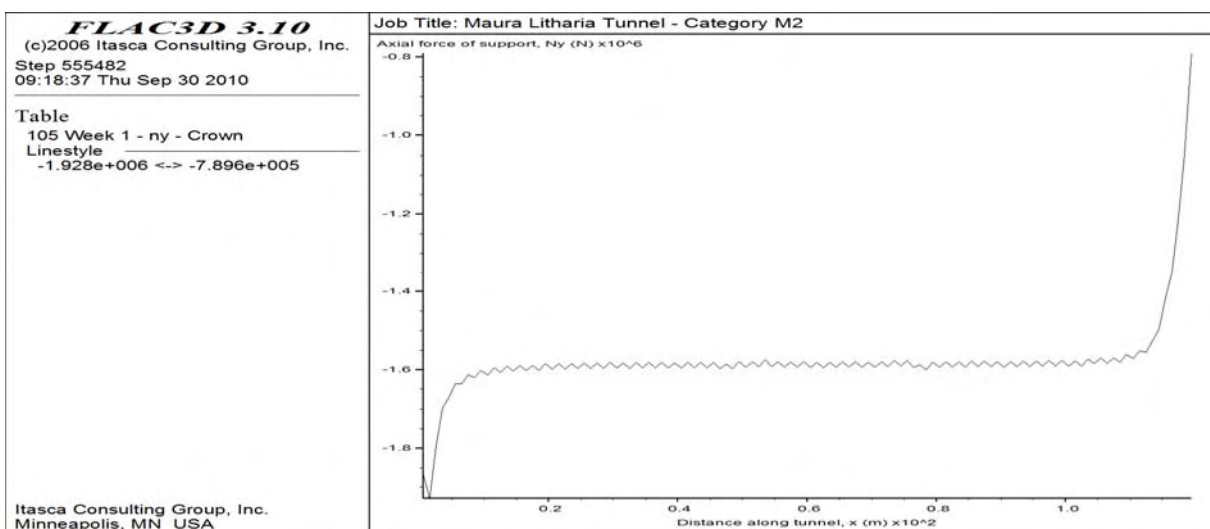
**Σχήμα Γ.27:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



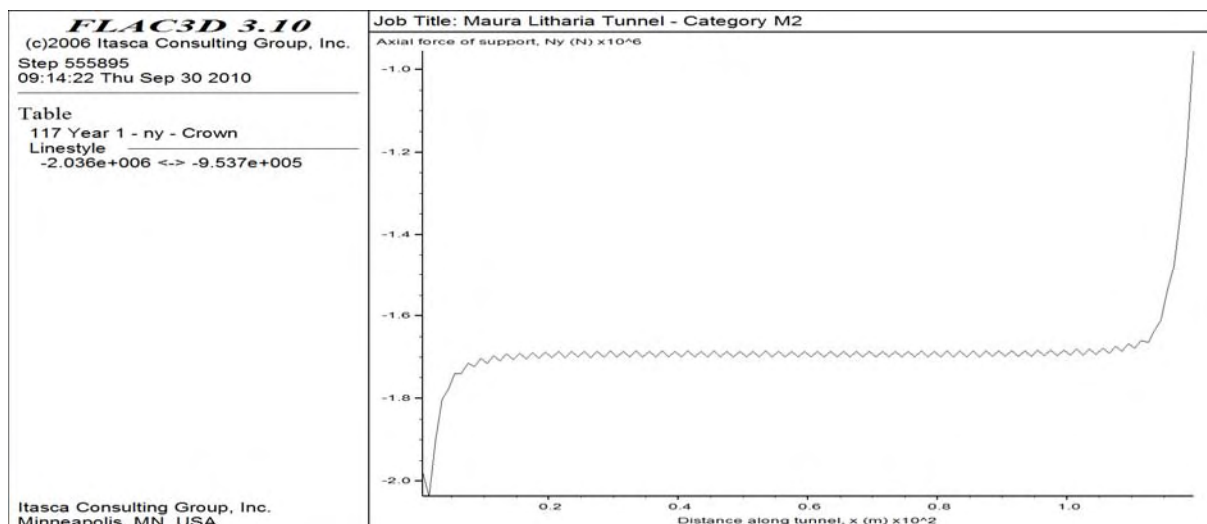
**Σχήμα Γ.28:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, μία ημέρα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



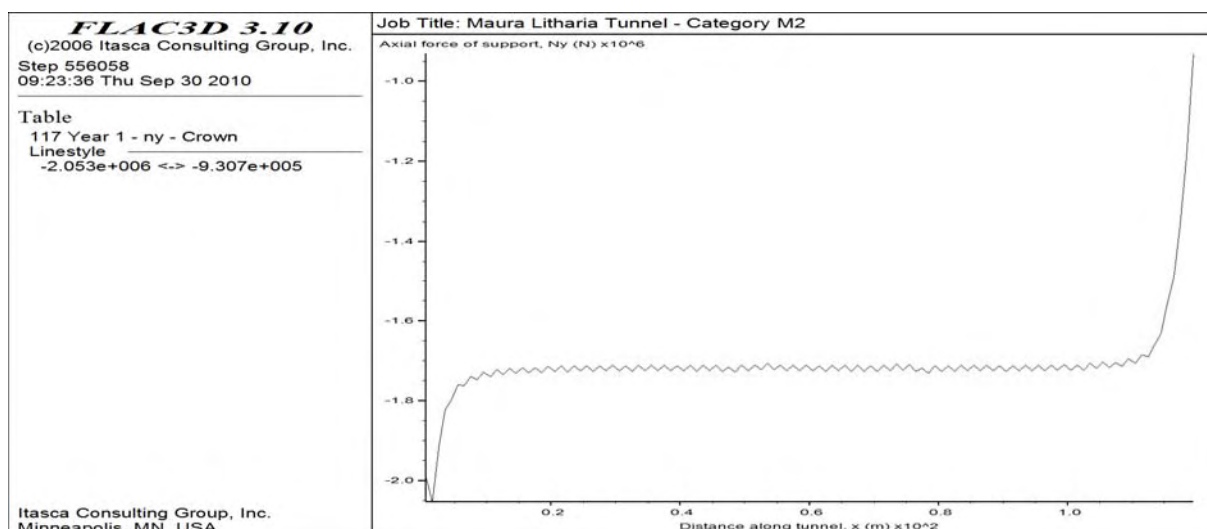
**Σχήμα Γ.29:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



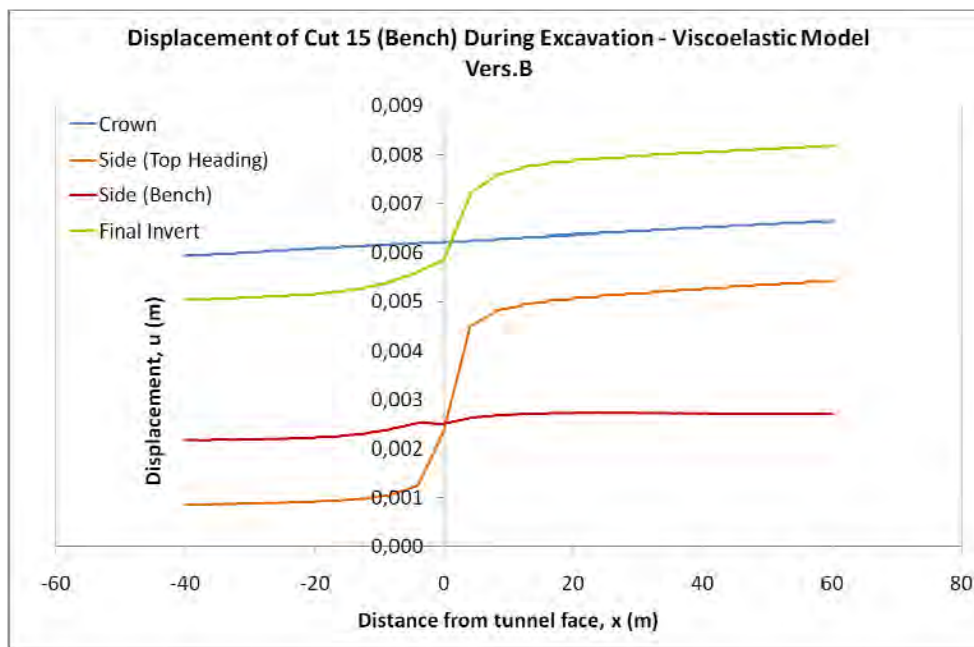
**Σχήμα Γ.30:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ' όλο το μήκος της, μία εβδομάδα μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



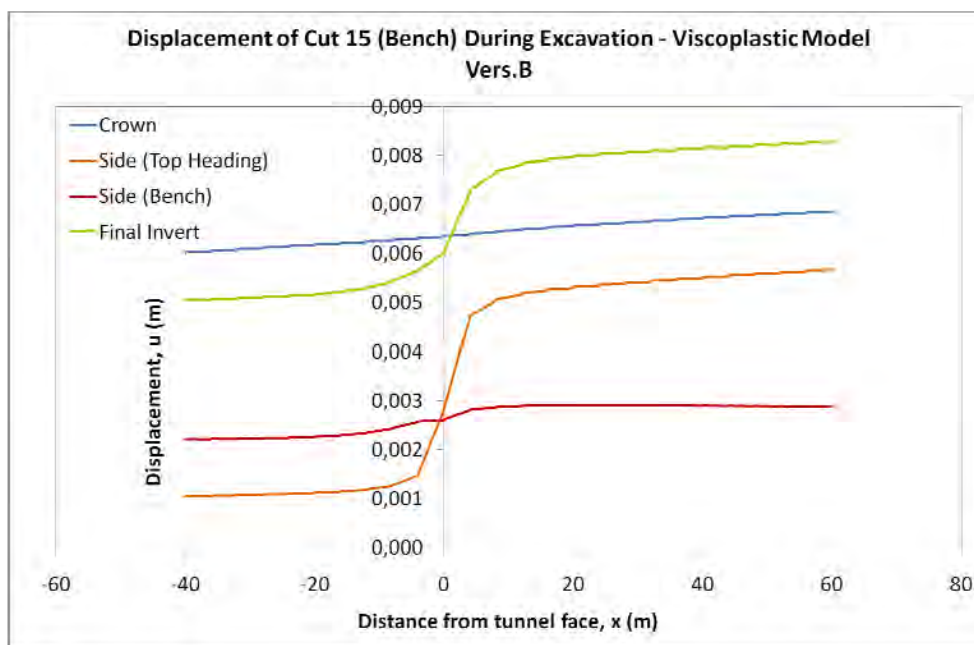
**Σχήμα Γ.31:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



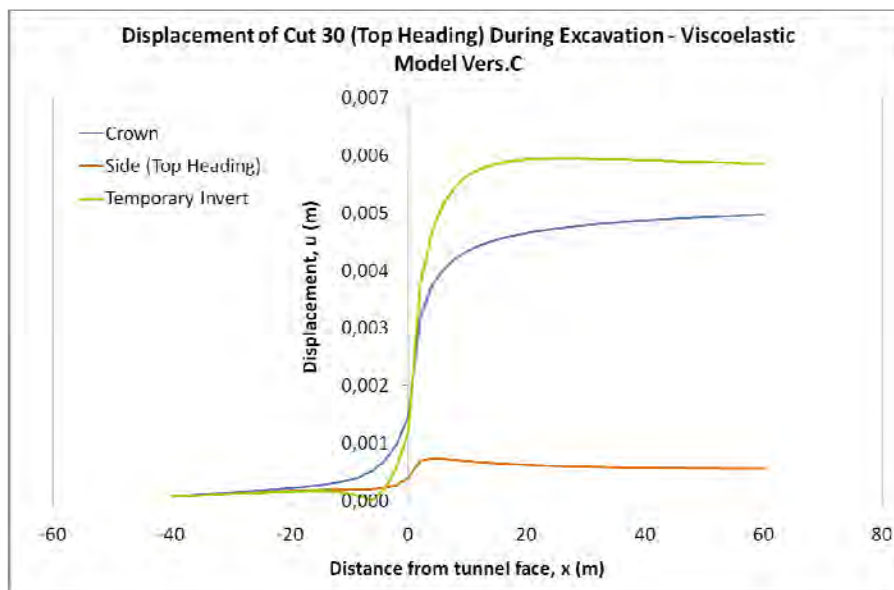
**Σχήμα Γ.32:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη της σήραγγας (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) καθ’ όλο το μήκος της, ένα έτος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



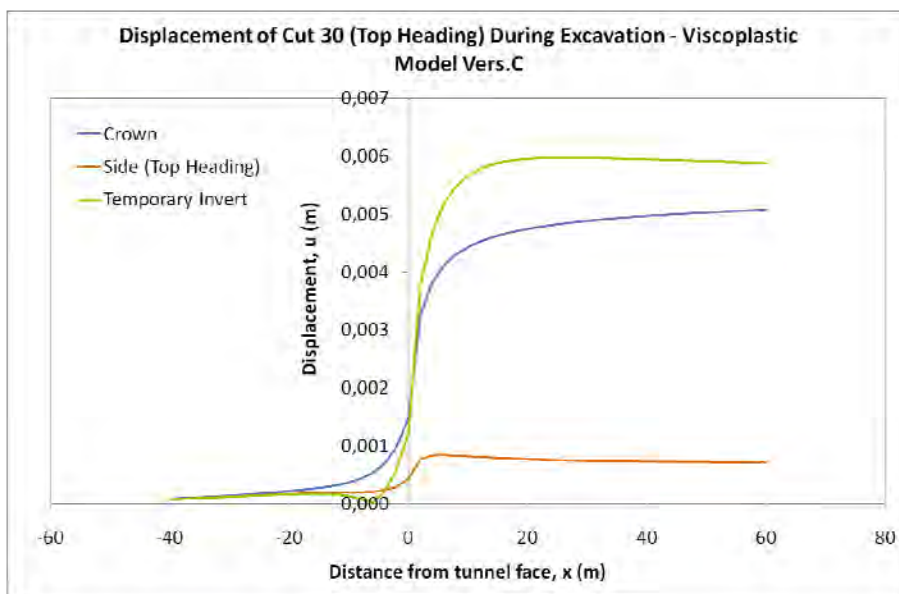
**Σχήμα Γ.33:** Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.



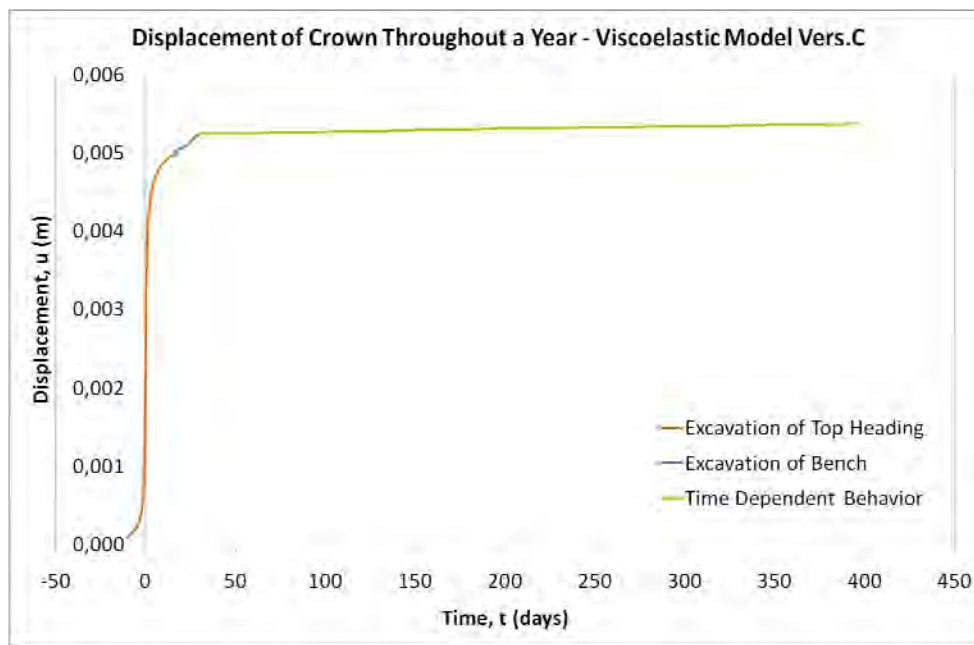
**Σχήμα Γ.34:** Μετατοπίσεις στη στέψη, την παρειά και το δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2, 3 & 4) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.



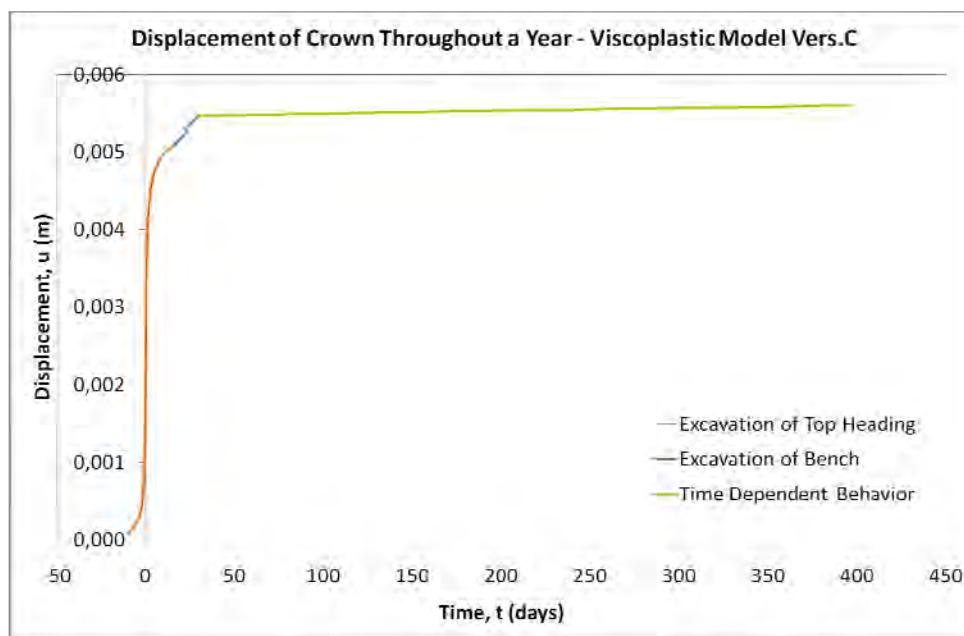
**Σχήμα Γ.35:** Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



**Σχήμα Γ.36:** Μετατοπίσεις στη στέψη, τον πόδα της άνω παρειάς και το προσωρινό δάπεδο (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1, 2 & 5) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, καθ’ όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.

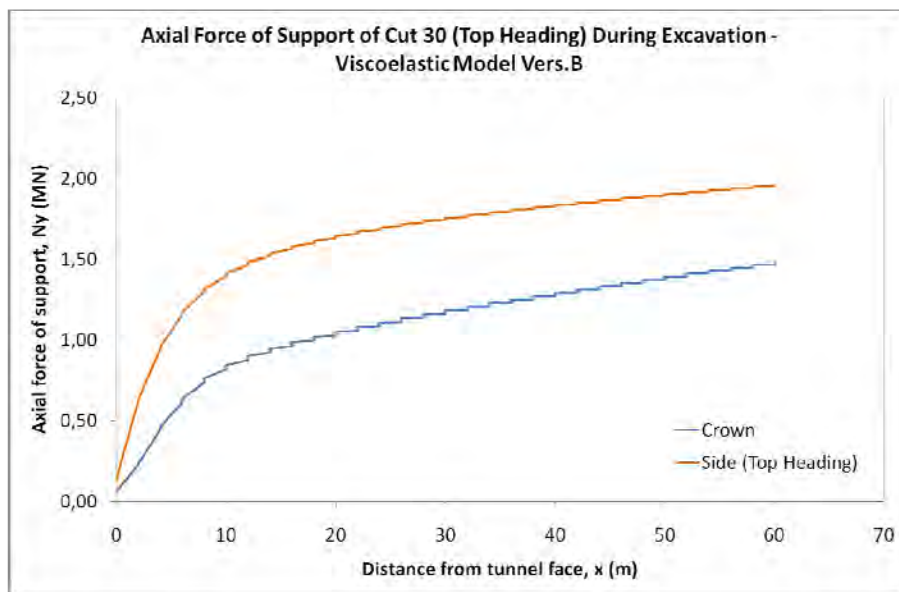


**Σχήμα Γ.37:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.

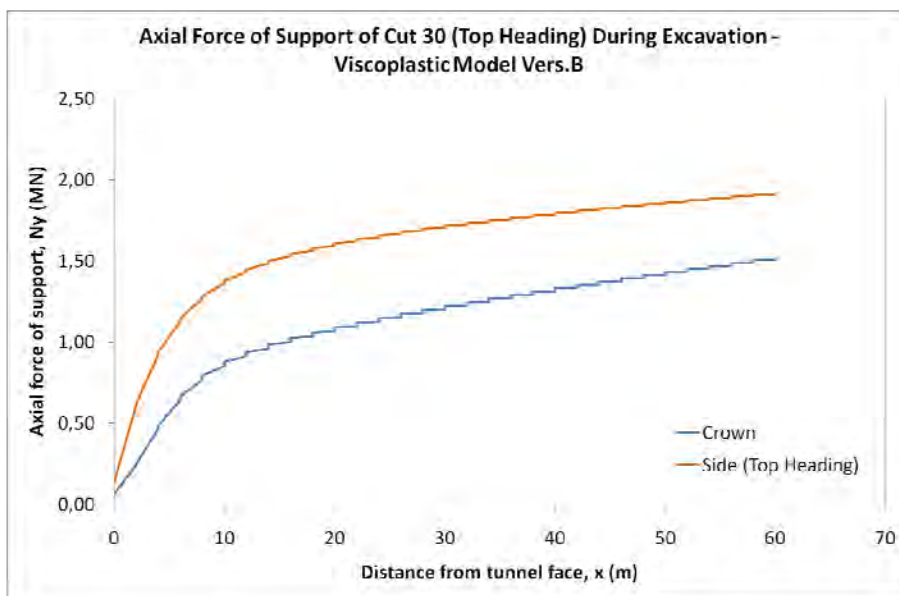


**Σχήμα Γ.38:** Εξέλιξη των μετατοπίσεων στη στέψη (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημείο 1) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης / 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.



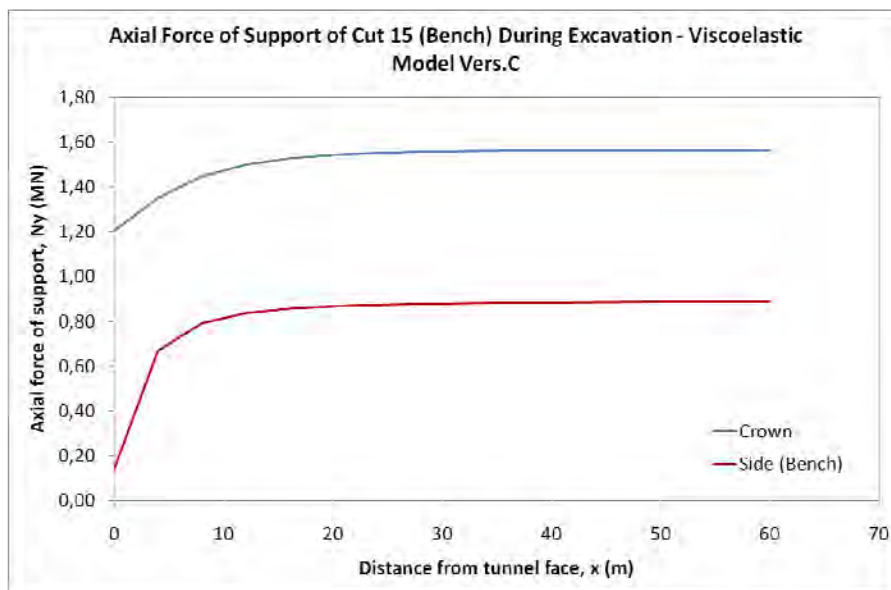


**Σχήμα Γ.39:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.B.

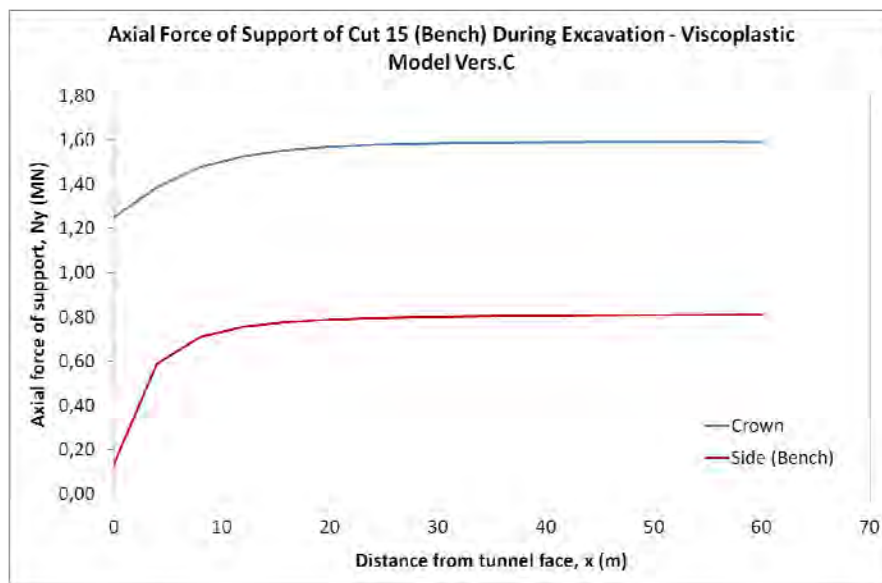


**Σχήμα Γ.40:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της άνω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 2) του 30<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Α φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.B.





**Σχήμα Γ.41:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοελαστικό Μοντέλο Vers.C.



**Σχήμα Γ.42:** Αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην επένδυση, στη στέψη και τον πόδα της κάτω παρειάς (Κεφάλαιο 5 – Σχήμα 5.6 – Σημεία 1 & 3) του 15<sup>ου</sup> βήματος προχώρησης της Β φάσης της σήραγγας, έως την ολοκλήρωση της εκσκαφής της, σύμφωνα με το Ιξωδοπλαστικό Μοντέλο Vers.C.







**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**