ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ - ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

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

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΡΦΗΣ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΠΟ ΑΟΠΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ1 ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΤΕΜΠΩΝ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Κουράσης Γεώργιος

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ. , Πολιτικός Μηχανικός Τ.Ε.

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

Αθήνα, Ιούνιος 2015

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ - ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

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

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΡΦΗΣ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΠΟ ΑΟΠΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ1 ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΤΕΜΠΩΝ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Κουράσης Γεώργιος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / / 2015

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

Παύλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. .....

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. .....

Copyright © Γεώργιος Κουράσης, 2014-2015

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η Προσομοίωση και διερεύνηση μορφής ρωγμάτωσης μόνιμης επένδυσης οδικής σήραγγας από άοπλο σκυρόδεμα, περίπτωση σήραγγας Τ1 κοιλάδας Τεμπών.

Αρχικά στο 1^{ο} κεφάλαιο, με τίτλο «το έργο της σήραγγας Τ1 της κοιλάδας Τεμπών», παρατίθενται εισαγωγικές έννοιες όπως η επωνυμία του έργου, η γεωγραφική θέση, η σκοπιμότητα έργου, τα γενικά χαρακτηριστικά του, οι γεωλογικές συνθήκες της σήραγγας (μορφολογία της περιοχής διέλευσης, γεωλογικές συνθήκες – στρωματογραφία), και τέλος η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των διατομών μόνιμης υποστήριξης σήραγγας.

Στο 2^{ο} κεφάλαιο «εφαρμογή επένδυσης του έργου με άοπλο σκυρόδεμα και προσομοίωση υλικών», γίνεται αναφορά στην άοπλη τελική επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα (αίτια στροφής στην εφαρμογή άοπλης έναντι οπλισμένης τελικής επένδυσης, τύποι-καλούπια τοποθέτησης έγχυτου σκυροδέματος), πραγματοποιείται η μελέτη διατομής μόνιμης επένδυσης - δεδομένα για το σκυρόδεμα (χαρακτηριστικά σκυροδέματος, συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε)), η μελέτη διατομών μόνιμης επένδυσης – προσομοίωση του σκυροδέματος (καταστατική προσομοίωση σκυροδέματος με το λογισμικό ANSYS, η περιγραφή της αστοχίας του σκυροδέματος, η περιγραφή του τρόπου σχηματισμού και μεταφοράς φορτίου μέσω των ρωγμών, η διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης (nonlinear analysis)), και τέλος η μελέτη διατομών μόνιμης επένδυσης – ιδιότητες βραχομάζας (καταστατική προσομοίωση βραχόμαζας με το λογισμικό ANSYS).

Στο 3^{ο} κεφάλαιο τα «προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων», αναλύονται τα γενικά στοιχεία για τα προγράμματα αυτά. Έπειτα παρουσιάζεται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, πραγματοποιείται εισαγωγή στο παραθυρικό περιβάλλον του ANSYS, προσομοίωση διατομής μόνιμης επένδυσης με το ANSYS APDL (1^{ο} στάδιο: εισαγωγή σχήματος διατομής με την αλληλουχία Keypoints-Lines-Areas-Volume, 2^{ο} στάδιο: ορισμός δεδομένων στοιχείων (Element Type) και χαρακτηριστικών υλικών (material props), 3^{ο} στάδιο: διακριτοποίηση όγκου (Volume) με την δημιουργία κανάβου (Mesh), 4^{ο} στάδιο: προσομοίωση περιβάλλουσας βραχομάζας μέσω ελατηρίων, 5^{ο} στάδιο: στήριξη συνολικού φορέα και εφαρμογή φορτίων).

Το θέμα του 4^{ου} κεφαλαίου είναι η «παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης και σχολιασμός αυτών». Αναλύεται η τελική επένδυση κατηγορίας σκυροδέματος C30/37 και C25/30, και τέλος πραγματοποιείται σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο 5^{ο} και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές εξελίξεις από την προσομοίωση και την διερεύνηση μορφής ρωγμάτωσης μόνιμης επένδυσης σήραγγας από άοπλο σκυρόδεμα, περίπτωση σήραγγας Τ1 κοιλάδας Τεμπών.

ABSTRACT

The subject matter of this thesis is the simulation and investigation form the permanent lining cracking of unreinforced concrete tunnel, tunnels T1 Tempi valley.

Initially the first chapter, 'the work of the tunnel T1 Valley Tempi' out introductory concepts such as the name of the project, location, feasibility work, the general characteristics of the geological conditions of the tunnel (morphology transit area, geological conditions - stratigraphy), and finally the geometry and characteristics of permanent tunnel support sections.

In the second chapter presents the 'project investment ways in cast concrete'. Record the unreinforced final lining of cast concrete (turn causes the application unarmed against armed final investment types-fitting molds cast concrete), carried out the study section (s) of permanent investment - Data for concrete (concrete characteristics, stress-strain relationship (σ-ε)), the study of permanent investment profiles - simulation of concrete (registered concrete simulation with ANSYS software, the description of the failure of the concrete, a description of the formation and cargo through the cracks, the non-linear resolution process (nonlinear analysis)), and finally the study permanent liner diatomaceous - rock mass properties (registered simulate rock mass with the ANSYS software).

In the third chapter of the 'finite element programs', analyzes the general elements for these programs. Then presents the finite element program ANSYS, import shall be the window environment of ANSYS, permanent liner section simulation with ANSYS APDL (1st stage: profiled introduction to the sequence Keypoints-Lines-Areas-Volume, 2nd stage: definition of data elements (Element Type) and characteristics of materials (material props), 3rd stage: discretization volume (Volume) to create grid (Mesh), 4th stage: simulation surrounding rock mass by springs, 5th stage: total body support and application loads).

The theme of the fourth chapter is the 'presentation of analysis results and discussion thereof'. Analyzed the final investment category concrete C30 / 37 and C25 / 30, and finally a comparison and discussion of the results.

In the fifth and final chapter presents the results, conclusions and future developments of the simulation and investigation form the permanent lining cracking of unreinforced concrete tunnel, tunnels T1 Tempi valley.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Ε.Μ.Π. Αποφοιτώντας από το συγκεκριμένο πρόγραμμα έχω να εκφράσω θετικά σχόλια για την παροχή γνώσεων -θεωρητικών και πρακτικών- με τελικό σκοπό την επιστημονική ανάπτυξη και προετοιμασία διπλωματούχων μηχανικών για την στελέχωση τεχνικών θέσεων.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σοφιανό Αλέξανδρο καθηγητή του τομέα μεταλλευτικής Ε.Μ.Π. για την αποδοχή του για συνεργασία και υποστήριξη για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επίσης, άξιοι ευχαριστιών είναι η κ. Παρασκευή - Γιούτα Μήτρα (Ε.Τ.Ε.Π. τομέα μεταλλευτικής Ε.Μ.Π.) και ο κ. Κουρετζής Γεώργιος (λέκτορας του πανεπιστημίου Newcastle Αυστραλίας) οι οποίοι ανταποκρίθηκαν πλήρως σε κάθε αίτημα μου και επίλυσαν οποιαδήποτε απορία που είχα.

Κλείνοντας, θα ήθελα να εκφράσω τα ευχαριστήρια στην οικογένειά μου που παρόλα τα προβλήματα που προέκυψαν το τελευταίο διάστημα, μου συμπαραστάθηκε και με υποστήριξε (τόσο ψυχολογικά όσο και υλικά) για την περάτωση των σπουδών μου. Επιθυμώ λοιπόν να αφιερώσω στον πατέρα μου την προσπάθεια που έκανα για την παρούσα εργασία.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 1

ABSTRACT 3

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 5

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ 6

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ-ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ 9

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 10

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 15

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^{ο}: ΤΟ ΕΡΓΟ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ1 ΤΗΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΤΕΜΠΩΝ 16

1.1 ΕΠΩΝΥΜΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ 16

1.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ 16

1.3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΕΡΓΟΥ 17

1.4 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 18

1.5 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 18

1.5.1 Μορφολογία της περιοχής διέλευσης 19

1.5.2 Γεωλογικές συνθήκες – Στρωματογραφία 19

1.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΟΝΙΜΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 22

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{ο}: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ ΜΕ ΑΟΠΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ 25

2.1 ΆΟΠΛΗ ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΓΧΥΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 25

2.1.1 Αίτια στροφής στην εφαρμογή άοπλης έναντι οπλισμένης τελικής επένδυσης 25

2.1.2 Τύποι-καλούπια τοποθέτησης έγχυτου σκυροδέματος 26

2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ - ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 32

2.2.1 Χαρακτηριστικά σκυροδέματος 32

2.2.2 Συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε)..... 32

2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 36

2.3.1 Καταστατική προσομοίωση σκυροδέματος με το λογισμικό ANSYS..... 36

2.3.2 Περιγραφή της αστοχίας του σκυροδέματος..... 37

2.3.3 Περιγραφή του τρόπου σχηματισμού και μεταφοράς φορτίου μέσω των ρωγμών..... 40

2.3.4 Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης (nonlinear analysis) 41

2.4 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ..... 43

2.4.1 Καταστατική προσομοίωση βραχόμαζας με το λογισμικό ANSYS 44

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{ο}: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 49

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 49

3.2 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS 49

3.2.1 Εισαγωγή στο παραθυρικό περιβάλλον του ANSYS..... 52

3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ANSYS APDL..... 55

3.3.1 1^{ο} Στάδιο: Εισαγωγή σχήματος διατομής με την αλληλουχία Keypoints-Lines-Areas-Volume. 56

3.3.2 2^{ο} Στάδιο: Ορισμός δεδομένων στοιχείων (Element Type) και χαρακτηριστικών υλικών (Material Props). 63

3.3.3 3^{ο} Στάδιο: Διακριτοποίηση όγκου (Volume) με την δημιουργία κανάβου (mesh)..... 65

3.3.4 4^{ο} Στάδιο: Προσομοίωση περιβάλλουσας βραχομάζας μέσω ελατηρίων. 67

3.3.5 5^{ο} Στάδιο: Στήριξη συνολικού φορέα και εφαρμογή φορτίων 78

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΥΤΩΝ 86

4.1 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C30/37 86

4.2 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C25/30 89

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 93

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ 96

5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΟΠΛΟΥ ΕΝΑΤΙ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ..... 96

5.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ 97

5.3 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ 98

5.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ 99

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ-ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Πίνακας 2.1: Γεωλογική κατανομή-συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας Τ1..... 20

Πίνακας 2.1: Χρόνοι αφαίρεσης μεταλλότυπων. 29

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος για κατηγορία αντοχής C30/37. 32

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος κατά την διάρκεια αφαίρεσης μεταλλότυπου (ξεκαλούπωμα) για κατηγορία αντοχής C30/37. (Hochtief Design). 35

Πίνακας 2.4: Ιδιότητες βραχόμαζας όπου τοποθετείται η τύπου 1 μόνιμη επένδυση..... 43

Πίνακας 2.5: Ιδιότητες βραχόμαζας όπου τοποθετείται η τύπου 2 μόνιμη επένδυση..... 44

Πίνακας 2.6: Ιδιότητες βραχόμαζας (παραμετρικών αναλύσεων) όπου τοποθετείται η τύπου 2 μόνιμη επένδυση..... 44

Πίνακας 2.7: Δεδομένα εισόδου στοιχείου COMBIN39. 45

Πίνακας 2.8: Τιμές συνολικών ελατηριακών σταθερών Ki κάθε επιφάνειας. 48

Πίνακας 3.1: Εισαγωγή σχήματος διατομής με την αλληλουχία Keypoints-Lines-Areas-Volume. 56

Πίνακας 3.2: Τιμή χωρίς συντελεστή σε σχέση με το είδος φόρτισης..... 83

Πίνακας 4.1: Δεδομένα σκυροδέματος σύμφωνα με τον ισχύοντα EC-2. 89

Πίνακας 4.2: Εύρος ρωγματωμένης περιοχής στις πλαϊνές παρειές και Εμφάνιση ρωγμών στην εξωτερική παρειά της οροφής σε σχέση με την Κατηγορία σκυροδέματος..... 94

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Δορυφορική φωτογραφία τοποθεσίας έργου. 16

Εικόνα 1.2: Γεωγραφική τοποθεσία έργου. 17

Εικόνα 1.3: Γεωλογική οριζοντιογραφία σήραγγας Τ1. 21

Εικόνα 1.4: Γεωλογική μηκοτομή δεξιού κλάδου σήραγγας Τ1. 21

Εικόνα 1.5: Γεωλογική μηκοτομή αριστερού κλάδου σήραγγας Τ1. 21

Εικόνα 1.6: Τυπική δομή επένδυσης σήραγγας (βραχόμαζα, προσωρινή υποστήριξη και τελική επένδυση). (Hochtief Consult). 22

Εικόνα 1.7: Διατομή τελικής επένδυσης Τύπου 1 άοπλου σκυροδέματος. 23

Εικόνα 1.8: Διατομή τελικής επένδυσης Τύπου 2 άοπλου σκυροδέματος με ανάστροφο τόξο. 24

Εικόνα 1.9: Διατομή τελικής επένδυσης Τύπου 3 οπλισμένου σκυροδέματος με ανάστροφο τόξο. 24

Εικόνα 2.1: Κατανομή του πάχους στην κλείδα και της ποσότητας οπλισμού των διατομών τελικής επένδυσης ως προς το δείκτη των γεωτεχνικών συνθηκών σc/po. 26

Εικόνα 2.2: Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος. 28

Εικόνα 2.3: Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος πριν την είσοδό του στη σήραγγα. 31

Εικόνα 2.4: Μεταλλότυπος ολόσωμης επένδυσης με σκυρόδεμα (χωρίς αρμό διακοπής). 31

Εικόνα 2.5: Διάγραμμα σχεδιασμού σκυροδέματος C30/37 για μόνιμα και κινητά (μεταβλητά) φορτία. 34

Εικόνα 2.6: Διάγραμμα σχεδιασμού σκυροδέματος C30/37 για τυχηματικές δράσεις φορτίων. 35

Εικόνα 2.7: Διάγραμμα σχεδιασμού σκυροδέματος C30/37 για την περίπτωση αφαίρεσης μεταλλοτύπων (ξεκαλουπώματος). 36

Εικόνα 2.8: Στοιχείο COMBIN39 (nonlinear spring). 45

Εικόνα 3.1: Περιβάλλον ANSYS APDL. 52

Εικόνα 3.2: Παράθυρο αποτελεσμάτων (Output Window) ANSYS APDL. 54

Εικόνα 3.3: Οι εντολές του προεπεξεργαστή ANSYS APDL (preprocessor). 55

Εικόνα 3.4: Διατομή τελικής επένδυσης που πρόκειται να προσομοιωθεί. 56

Εικόνα 3.5: Εισαγωγή Keypoint 1. 57

Εικόνα 3.6: Σύνολο Keypoints μετά την εισαγωγή τους. 58

Εικόνα 3.7: Ακτίνες καμπύλων τμημάτων διατομής (άνω τόξα). 58

Εικόνα 3.8: Ακτίνες καμπύλων τμημάτων διατομής (κάτω τόξα). 59

Εικόνα 3.9: Εισαγωγή τόξων διατομής (ορισμός 3 σημείων και ακτίνας). 59

Εικόνα 3.10: Αποτέλεσμα εισαγωγής τόξου ακτίνας R=4,8m με κέντρο το σημείο 2. 60

Εικόνα 3.11: Καμπύλα τμήματα σχήματος διατομής. 60

Εικόνα 3.12: Τελικό σχήμα-περίγραμμα διατομής. 61

Εικόνα 3.13: Δημιουργία επιφανειών επιλέγοντας γραμμές του σχήματος. 61

Εικόνα 3.14: Παραγωγή επιφάνειας στο αριστερό πέδιλο της διατομής επένδυσης. 62

Εικόνα 3.15: Παραγωγή τελικών επιφανειών διατομής. 62

Εικόνα 3.16: Επιλογή επιφανειών απ τις οποίες πρόκειται να δημιουργηθεί ο όγκος (Volume). 63

Εικόνα 3.17: Κατασκευή τελικού όγκου (Volume) πάχους (Z=1,00 m). 63

Εικόνα 3.18: Επιλογή στοιχείου (Element SOLID65) για την επένδυση από σκυρόδεμα. 64

Εικόνα 3.19: Εισαγωγή πυκνότητας (Kg/m^3) άοπλου σκυροδέματος. 64

Εικόνα 3.20: Εισαγωγή σταθερών E (Pa), ν άοπλου σκυροδέματος κατηγορίας C30/37. 65

Εικόνα 3.21: Εισαγωγή δεδομένων αντοχής (Pa) σε θλίψη, εφελκυσμό για το άοπλο σκυρόδεμα C30/37. 65

Εικόνα 3.22: Ορισμός μεγέθους κανάβου διακριτοποίησης (mesh) όγκου. 66

Εικόνα 3.23: Αποτέλεσμα διακριτοποίησης (mesh) όγκου επένδυσης. 66

Εικόνα 3.24: Λεπτομέρεια διακριτοποίησης όγκου επένδυσης (αριστερό πέδιλο). 67

Εικόνα 3.25: Εμφάνιση αρίθμησης επιφανειών. 68

Εικόνα 3.26: Επιλογή επιφάνειας A17. 68

Εικόνα 3.27: Επιλογή κόμβων που ανήκουν στην επιφάνεια A17. 69

Εικόνα 3.28: Εμφάνιση επιλεγμένων κόμβων. 69

Εικόνα 3.29: Εμφάνιση λίστας επιλεγμένων κόμβων. 70

Εικόνα 3.30: Δημιουργία καρτεσιανού τοπικού συστήματος συντεταγμένων στην επιφάνεια A17. 71

Εικόνα 3.31: Καρτεσιανό τοπικό σύστημα -11- στην επιφάνεια A17. (Το καθολικό σύστημα φαίνεται στο δεξιό τμήμα). 71

Εικόνα 3.32: Καρτέλα επιλογής κόμβων προς αντιγραφή. 72

Εικόνα 3.33: Καρτέλα επιλογής στοιχείων αντιγραφής κόμβων. 73

Εικόνα 3.34: Ορισμός κυλινδρικού τοπικού συστήματος -12- συντεταγμένων για τα καμπύλα τμήματα. 73

Εικόνα 3.35: Αποτέλεσμα αντιγραφής κόμβων εξωτερικών επιφανειών επένδυσης (διακρίνεται και η ομαλότητα της αντιγραφής στα καμπύλα τμήματα του περιτυπώματος).. 74

Εικόνα 3.36: Ορισμός δεδομένων εισόδου (Real Constants) για το element COMBIN39, συγκεκριμένα των ελατηρίων της επιφάνειας A17. 75

Εικόνα 3.37: Ορισμός στοιχείου (element) COMBIN39 πριν την δημιουργία του. 75

Εικόνα 3.38: Εισαγωγή εντολής (στη γραμμή εντολών) για την δημιουργία element ελατηρίου. 76

Εικόνα 3.39: Εισαγωγή εντολής (στη γραμμή εντολών) για την δημιουργία element ελατηρίου. 77

Εικόνα 3.40: Τελική δημιουργία ομάδων ελατηρίων προσομοίωσης γεωυλικού. 77

Εικόνα 3.41: Λεπτομέρεια ελατηρίων στο αριστερό θεμέλιο (foot). Με κόκκινο χρώμα διακρίνονται τα ελατήρια τριβής της διεπιφάνειας θεμελίου – βράχου. 78

Εικόνα 3.42: Καρτέλα επιλογής κόμβων προς δέσμευση Β.Ε. 79

Εικόνα 3.43: Επιβολή πάκτωσης στους ελεύθερους κόμβους. 79

Εικόνα 3.44: Πάκτωση ελεύθερων κόμβων (κάτω αριστερά ελατήρια). 80

Εικόνα 3.45: Συνολική πάκτωση φορέα με σκοπό την στήριξή του. 80

Εικόνα 3.46: Ορισμός συμμετρικών συνθηκών στην διατομή. 81

Εικόνα 3.47: Πτυσσόμενο μενού (στο αριστερό τμήμα) επιβολής φορτίων κατασκευής. 81

Εικόνα 3.48: Φόρτιση επένδυσης από την περιβάλλουσα βραχόμαζα. 82

Εικόνα 3.49: Φόρτιση θεμελίων (footings) λόγω επίστρωσης (οδόστρωμα). 83

Εικόνα 3.50: Εφαρμογή βαρύτητας (m/s^2) στην κατασκευή (εισάγεται με θετικό πρόσημο κατά Y). 84

Εικόνα 3.51: Εφαρμογή φορτίου – πίεσης (σε Pa) από την περιβάλλουσα βραχόμαζα. 84

Εικόνα 3.52: Εφαρμογή φορτίου – πίεσης (σε Pa) στις επιφάνειες θεμελίων. 85

Εικόνα 3.53: Εφαρμογή φορτίων στην επένδυση -τύπου 1- κατηγορίας σκυροδέματος C30/37. 85

Εικόνα 4.1: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης λόγω εφαρμογής των φορτίων (αυτόματη κλίμακα απεικόνισης). 86

Εικόνα 4.2: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης σε σχέση με την αρχική μη παραμορφούμενη (διακεκομμένη γραμμή). 87

Εικόνα 4.3: Τάσεις που εφαρμόζονται στην διατομή (Stress Intensity). 87

Εικόνα 4.4: Ρωγμάτωση του σκυροδέματος στις εσωτερικές παρειές της διατομής. 88

Εικόνα 4.5: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην αριστερή εσωτερική παρειά. 88

Εικόνα 4.6: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην δεξιά εσωτερική παρειά. ... 89

Εικόνα 4.7: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης λόγω εφαρμογής των φορτίων (αυτόματη κλίμακα απεικόνισης). 90

Εικόνα 4.8: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης σε σχέση με την αρχική μη παραμορφούμενη (διακεκομμένη γραμμή). 90

Εικόνα 4.9: Τάσεις που εφαρμόζονται στην διατομή (Stress Intensity). 91

Εικόνα 4.10: Τάσεις που εφαρμόζονται στην διατομή-αξονομετρική απεικόνιση (Stress Intensity). 91

Εικόνα 4.11: Ρωγμάτωση του σκυροδέματος στις εσωτερικές παρειές και στο πάνω τμήμα της διατομής. 92

Εικόνα 4.12: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην αριστερή εσωτερική παρειά. 92

Εικόνα 4.13: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην δεξιά εσωτερική παρειά. . 93

Εικόνα 4.14: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην εξωτερική παρειά της οροφής. 93

Εικόνα 4.15: Εύρος ρωγματωμένης περιοχής πλευρικών παρειών χωρίς εμφάνιση ρωγμών στην οροφή για κατηγορία σκυροδέματος C30/37. 94

Εικόνα 4.16: Εύρος ρωγματωμένης περιοχής πλευρικών παρειών με εμφάνιση ρωγμών και στην οροφή για κατηγορία σκυροδέματος C25/30. 95

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (σ-ε) σύμφωνα με τον EC-2 για μη γραμμική (nonlinear) στατική ανάλυση..... 33

Σχήμα 2.2: Τρισδιάστατο (3D) στοιχείο σκυροδέματος (SOLID 65)..... 37

Σχήμα 2.3: Διατομή επιφάνειας αστοχίας στο αποκλίνον επίπεδο. 38

Σχήμα 2.4: Δισδιάστατη επιφάνεια αστοχίας για εντατικές καταστάσεις διαξονικές ή σχεδόν διαξονικές (σ2=0). 39

Σχήμα 2.5: Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης. 42

Σχήμα 2.6: Δημιουργία «substeps» για την βαθμιδωτή εφαρμογή του φορτίου στην κατασκευή. 43

Σχήμα 2.7: Περιπτώσεις καμπυλών δύναμης-μετατόπισης (F-D) για το στοιχείο COMBIN39. 46

Σχήμα 2.8: Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης (F-D) των ελατηρίων βραχομάζας:..... 46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΤΟ ΕΡΓΟ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Τ1 ΤΗΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΤΕΜΠΩΝ

1.1 ΕΠΩΝΥΜΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

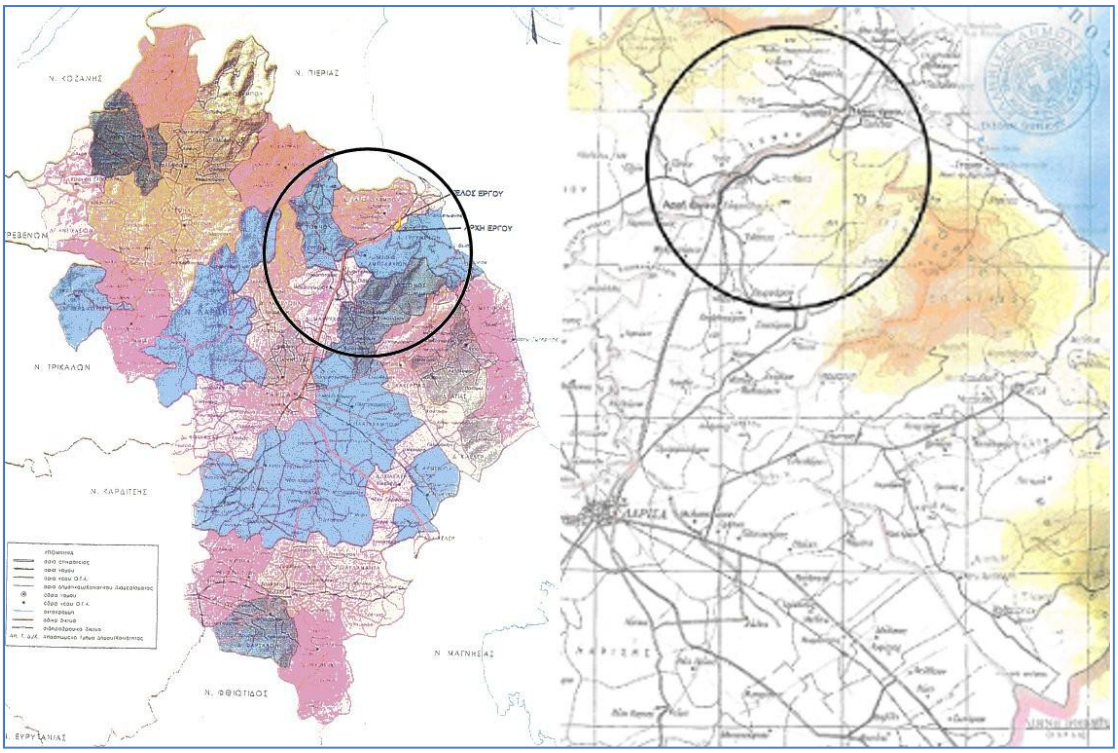
Το έργο πάνω στο οποίο εκπονήθηκε η παρούσα εργασία, φέρει την ακόλουθη επωνυμία: «Μελέτη – Κατασκευή – Χρηματοδότηση – Λειτουργία - Συντήρηση και Εκμετάλλευση του έργου τμήματος Ράχες Μαλιακού – Κλειδί Ημαθίας του αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ» (Ν. 3605/2007) και βρίσκεται στο «Υπό - τμήμα πέρας κόμβου Τεμπών - Αρχή κόμβου Ραψάνης».

1.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Η νέα χάραξη καθ' όλο το μήκος της διασχίζει τους νομούς Λαρίσης και Πιερίας, οπότε ένα μέρος της υπάγεται στο νομό Λαρίσης κι ένα μέρος της στο νομό Πιερίας αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, η νέα χάραξη του τμήματος Τεμπών βρίσκεται στο νομό Λαρίσης και διέρχεται εντός των διοικητικών ορίων των δήμων Μακρυχωρίου, Κάτω Ολύμπου, Ευρυμενών και της Κοινότητας Αμπελακίων, ενώ γειτνιάζει με τον δήμο Γόννων, όπως αυτοί διαμορφώθηκαν μετά την εφαρμογή του σχεδίου «Καποδίστριας»(Ν. 2539/97). Η θέση του έργου για το τμήμα Τεμπών φαίνεται στην εικόνα.

Εικόνα 2.1: Δορυφορική φωτογραφία τοποθεσίας έργου.

Πηγή: Google Maps.



Εικόνα 2.2: Γεωγραφική τοποθεσία έργου.

1.3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΕΡΓΟΥ

Το έργο αντικαθιστά το αντίστοιχο τμήμα της Εθνικής Οδού στην περιοχή των Τεμπών και του Πλαταμώνα. Αποτελεί βασικό τμήμα του αυτοκινητόδρομου Λάρισας – Κατερίνης του οδικού άξονα Πάτρα - Αθήνα - Θεσσαλονίκη – Εύζωνοι (ΠΑΘΕ) και εντάσσεται στο πρωτεύον εθνικό οδικό δίκτυο της χώρας. Η σκοπιμότητά του ταυτίζεται με τη σκοπιμότητα κατασκευής της ΠΑΘΕ. Η σύνδεσή του με το υπόλοιπο δίκτυο θα πραγματοποιείται με τους κόμβους Τεμπών και Ραψάνης στην είσοδο και στην έξοδο των Τεμπών, με τον κόμβο Πλαταμώνα και τη διασταύρωση Σκοτίνας.

Με το συγκεκριμένο έργο ελαχιστοποιείται αρκετά ο απαιτούμενος χρόνος διαδρομής Λάρισας - Κατερίνης και κατά συνέπεια μεταξύ όλων των διαμερισμάτων της Ηπειρωτικής Ελλάδας εκατέρωθεν αυτού του οδικού τμήματος, των οποίων η σύνδεση απαιτεί τη χρήση του.

Η σημασία του όλου έργου του αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ είναι προφανής:

1. ως έργο εθνικής εμβέλειας, αφού αποτελεί τον βασικό συγκοινωνιακό άξονα που συνδέει τη Νότια με τη Βόρεια Ελλάδα και στη συνέχεια με Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη και

2. κυριότερο όλων, μειώνει σημαντικά τον βαθμό επικινδυνότητας που χαρακτηρίζει το κρίσιμο πέρασμα των Τεμπών και του Πλαταμώνα.

1.4 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η σήραγγα Τ1 βρίσκεται στην κοιλάδα των Τεμπών. Έχει συνολικό μήκος 1.900 m και δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση. Ανά 300 m περίπου θα κατασκευασθούν εγκάρσιοι διάδρομοι προσπέλασης.

Η εκσκαφή της σήραγγας διεξάγεται με ελεγχόμενες ανατινάξεις, περιορισμένη χρήση εκρηκτικών ή με μηχανικά μέσα, ανάλογα με την ποιότητα πετρώματος που συναντάται. Οι ανατινάξεις γίνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται όσο το δυνατόν η διαταραχή και χαλάρωση του πετρώματος πέρα από τις προβλεπόμενες από τη μελέτη γραμμές εκσκαφής. Η εκσκαφή της σήραγγας διεξάγεται σε δύο φάσεις.

Η αλληλουχία εργασιών οι οποίες πρόκειται να γίνουν κατά την διάνοιξη της σήραγγας βασίζεται στη Νέα Αυστριακή Μέθοδο Διάνοιξης Σηράγγων (NATM) και συνοπτικά είναι οι εξής:

- ✓ Διάτρηση
- ✓ Γόμωση-πυροδότηση
- ✓ Φόρτωση-μεταφορά προϊόντων εκσκαφής
- ✓ Ξεσκάρωμα επισφαλών τεμαχών πετρώματος
- ✓ Τοποθέτηση πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (πάχους ανάλογα με την κατηγορία βραχόμαζας, σύμφωνα με την οριστική μελέτη)
- ✓ Γεωλογική χαρτογράφηση
- ✓ Διάτρηση - τοποθέτηση αγκυρίων
- ✓ Τοποθέτηση πλαισίων ανάλογα με τις κατηγορίες βραχόμαζας που προβλέπονται
- ✓ Τοποθέτηση υπόλοιπων στρώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- ✓ Διάτρηση-τοποθέτηση δοκών προπορείας (forepoling) αν απαιτείται
- ✓ Έλεγχος εκσκαφών, συγκλίσεων, παραμορφώσεων

1.5 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

1.5.1 Μορφολογία της περιοχής διέλευσης

Γεωμορφολογικά η κοιλάδα των Τεμπών αναπτύσσεται μεταξύ των ορεινών όγκων του Ολύμπου και της Όσσας, έχοντας γενική διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ. Η γεωμορφολογική εξέλιξη της κοιλάδας των Τεμπών επέδρασε καθοριστικά στην διαμόρφωση του ανάγλυφου και των συνθηκών ευστάθειας της περιοχής. Στο σύνολό της η περιοχή χαρακτηρίζεται από αστάθεια των τεχνητών και φυσικών κλιτύων, η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην έντονη και γρήγορη μορφολογική εξέλιξη της περιοχής.

1.5.2 Γεωλογικές συνθήκες – Στρωματογραφία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την κοιλάδα των Τεμπών ανήκουν στις τεκτονικές ενότητες της Όσσας και των Αμπελακίων.

Η ενότητα της Όσσας, η οποία συναντάται και στο μεγαλύτερο τμήμα της κοιλάδας αποτελείται κυρίως από φυλλίτες και από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, ενώ η ενότητα των Αμπελακίων συναντάται στο αρχικό τμήμα της κοιλάδας και σε μεγαλύτερα υψόμετρα.

Αποτελείται κυρίως από σχιστόλιθους, αμφιβολίτες και αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους με ενστρώσεις μαρμάρων. Στην ενότητα αυτή εντοπίζεται επίσης ένα ετερογενές σύμπλεγμα σχιστόλιθων, μαρμάρων και περιδοτιτών, που βρίσκονται επωθημένοι στους προηγούμενους σχηματισμούς.

Όσον αφορά στις γεωλογικές συνθήκες της σήραγγας Τ1 οι οποίες προέκυψαν από τις γεωλογικές μελέτες, όπως φαίνεται και στην γεωλογική οριζοντιογραφία του σχήματος, η σήραγγα στο μεγαλύτερο μέρος της διασχίζει την ενότητα Αμπελακίων, συναντώντας στρώσεις βραχωδών σχηματισμών, κυρίως μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων, μαρμαρυγιακών αμφιβολιτικών σχιστόλιθων και αμφιβολιτικών σχιστόλιθων, ενώ περίπου από τη Χ.Θ. 3+155 του αριστερού κλάδου (σχήμα) και 3+160 του δεξιού (σχήμα), εισέρχεται στην ενότητα της Όσσας, όπου συναντά διαδοχικά σχηματισμούς κρυσταλλικών μαρμάρων, σχιστόλιθου κι εν τέλει, φυλλίτη.

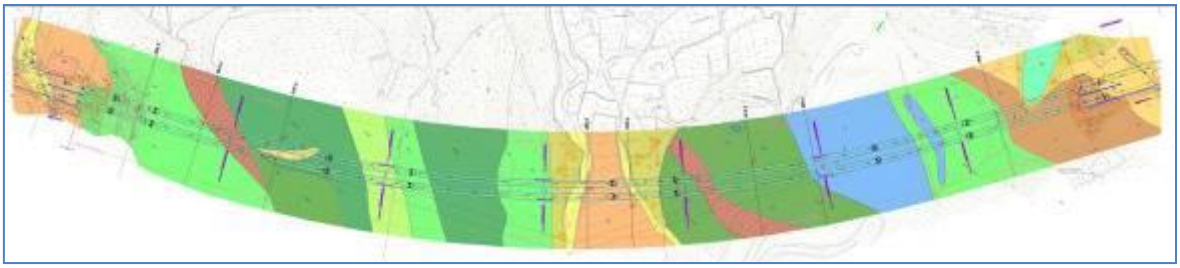
Οι γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος του τμήματος της σήραγγας παρουσιάζονται σε διακριτά τμήματα, ξεκινώντας από το νότο προς τον βορρά. Ο παρακάτω πίνακας με τις περιγραφές δίνει μια επισκόπηση των γεωλογικών συνθηκών κατά μήκος της σήραγγας ως μια σύντομη περίληψη του περιεχομένου της γεωτεχνικής έκθεσης.

Πίνακας 2.1: Γεωλογική κατανομή-συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας Τ1.

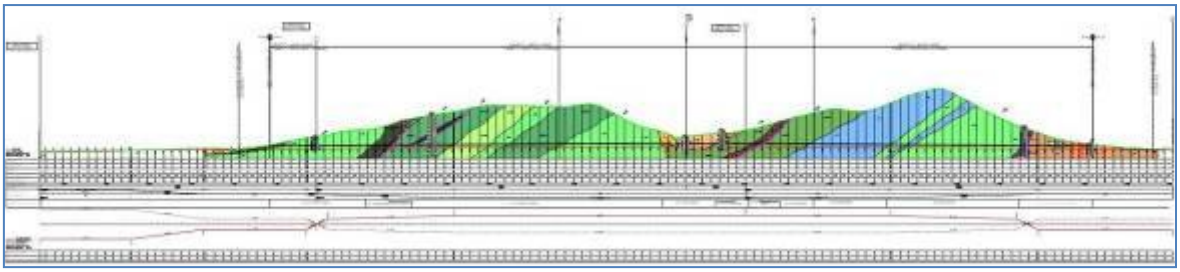
Από Χ.Θ.	Έως Χ.Θ.	Τμήμα	Λιθολογία	GSI	Υπερκείμενο ύψος (m)
1+940	1+950	1a	Αποσαθρωμένος μαρμαρυγιακός αμφιβολιτικός σχιστόλιθος	-	15
1+950	2+110	1b	Μαρμαρυγιακός αμφιβολιτικός σχιστόλιθος	50-70	30
2+110	2+170	2	Αποδομημένα λατυποπαγή	-	40
2+170	2+310	3	Αμφιβολίτες, αμφιβολιτικός σχιστόλιθος	35-80	70
2+310	2+400	4	Μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος	15-70	80
2+400	2+450	5	Μαρμαρυγιακός αμφιβολιτικός σχιστόλιθος	50-70	80
2+450	2+570	6	Αμφιβολίτες, αμφιβολιτικός σχιστόλιθος	55-80	80
2+570	2+810	7	Μαρμαρυγιακός αμφιβολιτικός σχιστόλιθος	35-70	50
2+810	2+825	8	Πρασινίτες	15-70	20
2+825	2+930	9	Αλουβιακές αποθέσεις, κορήματα	-	20
2+930	3+000	10	Πρασινίτες	15-70	25
3+000	3+050	11	Αποδομημένα λατυποπαγή	-	30
3+050	3+160	12	Πρασινίτες	50-70	60
3+160	3+400	13	Μάρμαρο	60-85	100
3+400	3+630	14	Μαρμαρυγιακός αμφιβολιτικός	35-70	130

			σχιστόλιθος		
3+630	3+660	15	Αποσαθρωμένος φυλλίτης και μάρμαρο	-	40
3+660	3+785	16	Φυλλίτες με παρεμβολή μαρμάρου	15-45	15

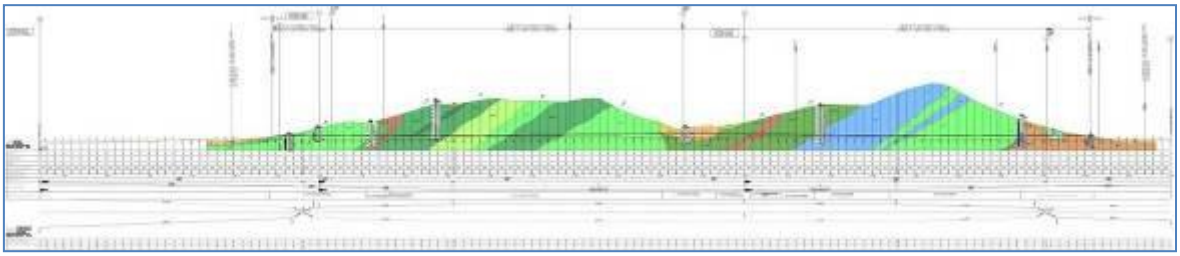
Πηγή: Π. Γ. Μαρίνος. (2013-2014). Σήραγγες Τεμπών - Πλαταμώνα.



Εικόνα 2.3: Γεωλογική οριζοντιογραφία σήραγγας Τ1.



Εικόνα 2.4: Γεωλογική μηκοτομή δεξιού κλάδου σήραγγας Τ1.

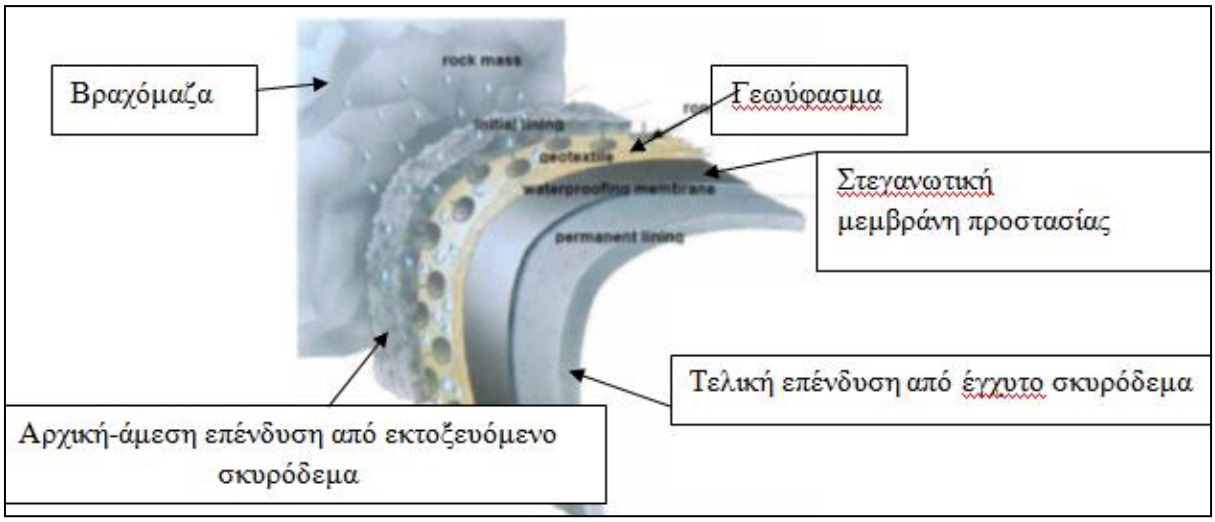


Εικόνα 2.5: Γεωλογική μηκοτομή αριστερού κλάδου σήραγγας Τ1.

1.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΟΝΙΜΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η εκσκαφή των διατομών της σήραγγας διεξάγεται σύμφωνα με τα σχέδια της μελέτης και ελέγχονται κάθε φορά. Κατά τη διαστασιολόγηση της σήραγγας έχουν ορισθεί λεπτομερώς τα στοιχεία εκείνα που καθορίζουν τη γεωμετρία των χαρακτηριστικών γραμμών της διατομής της σήραγγας και οι οποίες διαφέρουν για κάθε τυπική διατομή.

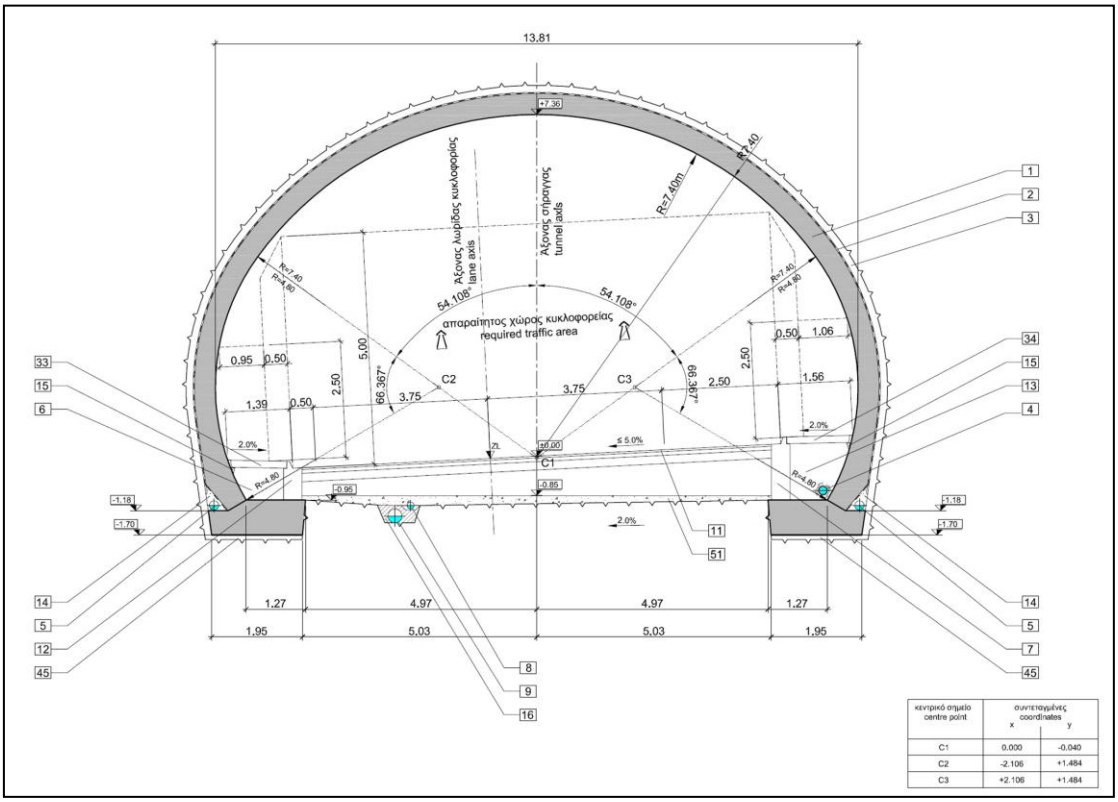
Η επένδυση της σήραγγας έχει σχεδιαστεί ως -διπλής δομής- επένδυση, αρχικά γίνεται η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την πρώτη και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας μετά την εκσκαφή και μετά τοποθετείται μόνιμη τελική επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα. Μεταξύ της αρχικής στρώσης επένδυσης και της τελικής-μόνιμης, τοποθετείται στεγανωτική μεμβράνη και ένα σύστημα αποστράγγισης στο κάτω μέρος και των δύο πλευρών τοιχωμάτων, που βοηθούν στην προστασία της κατασκευής από εισροή νερού.



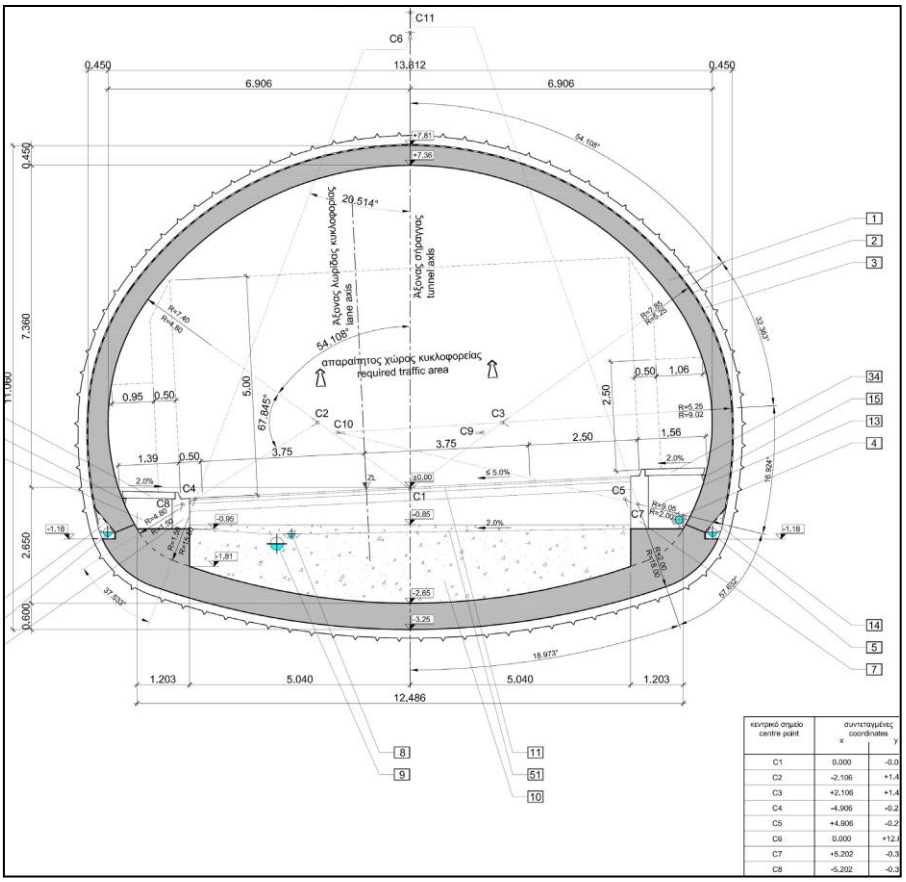
Εικόνα 2.6: Τυπική δομή επένδυσης σήραγγας (βραχόμαζα, προσωρινή υποστήριξη και τελική επένδυση). Πηγή: Hochtief Consult.

Ανάλογα με τις γεωτεχνικές συνθήκες που συναντήθηκαν μέσα στην σήραγγα, σχεδιάστηκαν τρεις διατομές τελικής επένδυσης, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους στην ύπαρξη ανάστροφου τόξου και στα πάχη σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, για περιοχές της σήραγγας με ήπιες (μη δυσμενείς) γεωτεχνικές συνθήκες (Τύποι υποστήριξης 3Α, 4Α, 5Α), η τελική επένδυση (Τύπος 1) είναι άοπλη χωρίς ανάστροφο τόξο. Για χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες (Τύπου υποστήριξης 6Α), χρησιμοποιείται άοπλη τελική επένδυση (Τύπος 2) με

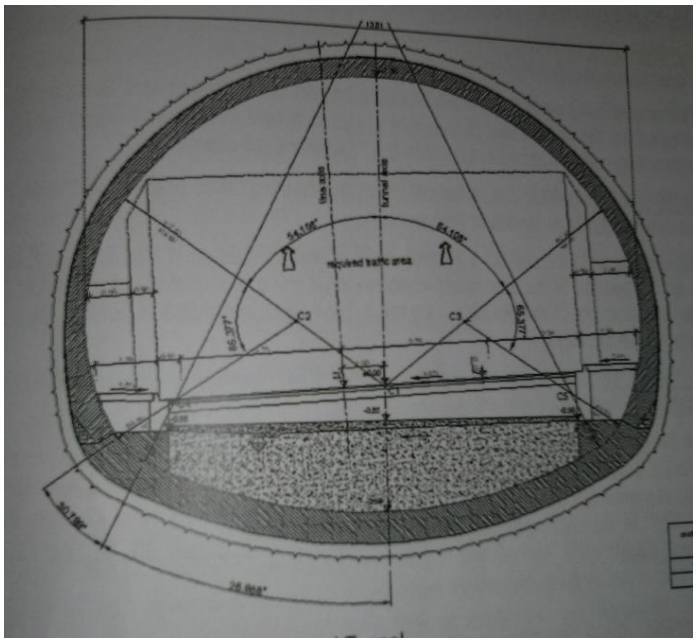
ανάστροφο τόξο. Τέλος, μια οπλισμένη διατομή τελικής οπλισμένης επένδυσης (Τύπος 3) με ανάστροφο τόξο χρησιμοποιείται για τις δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες (Τύπου υποστήριξης 7Α). (Εικόνες: 1.7, 1.8, 1.9).



Εικόνα 2.7: Διατομή τελικής επένδυσης Τύπου 1 άοπλου σκυροδέματος.



Εικόνα 2.8: Διατομή τελικής επένδυσης Τύπου 2 άοπλου σκυροδέματος με ανάστροφο τόξο.



Εικόνα 2.9: Διατομή τελικής επένδυσης Τύπου 3 οπλισμένου σκυροδέματος με ανάστροφο τόξο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{ο}: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ ΜΕ ΑΟΠΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 ΆΟΠΛΗ ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΕΓΧΥΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1.1 Αίτια στροφής στην εφαρμογή άοπλης έναντι οπλισμένης τελικής επένδυσης

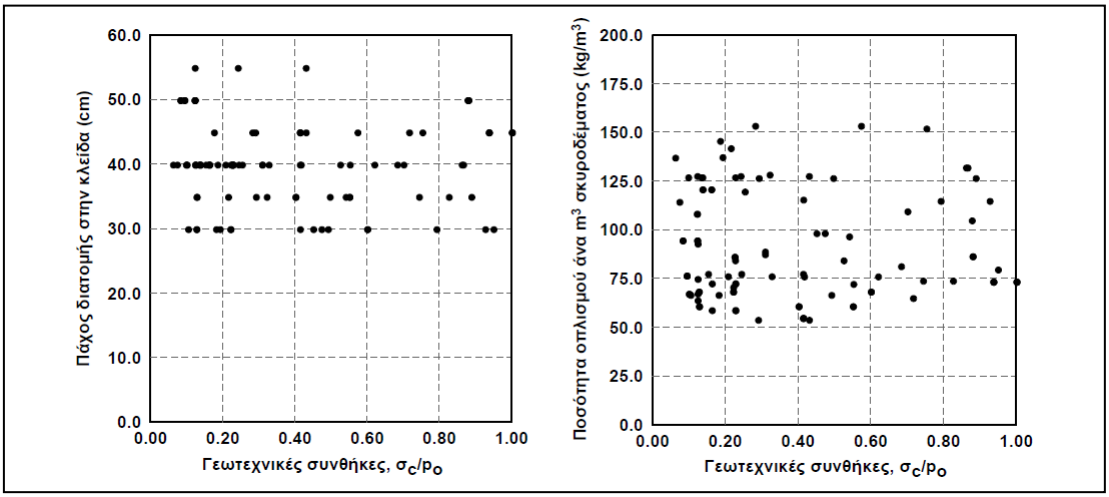
Οι λόγοι που έχουν στρέψει τους μελετητές αλλά, κυρίως τους χρηματοδότες και κατασκευαστές, στην κατασκευή τελικών επενδύσεων άοπλου σκυροδέματος έναντι οπλισμένων είναι κυρίως οικονομικοί. Μία τελική επένδυση που έχει σχεδιαστεί να γίνει από οπλισμένο σκυρόδεμα, ακόμα και αν τα φορτία που καλείται να αναλάβει είναι σχετικά μικρά, έχει ένα κόστος κατασκευής λόγω του «σιδερώματος» της τελικής επένδυσης (όσον αφορά στην κατασκευαστική διαδικασία), αλλά και στο κόστος του οπλισμού. Το κόστος του σκυροδέματος είναι και αυτός ένας παράγοντας, αλλά δευτερευούσης σημασίας, κυρίως γιατί είναι κοινός παράγοντας και για το οπλισμένο αλλά και για το άοπλο σκυρόδεμα.

Η τοποθέτηση σίδηρο-οπλισμού (σιδέρωμα) στον σιδερότυπο ή ξυλότυπο είναι μια διαδικασία που απαιτεί καταρτισμένα εργατικά χέρια, συνεπώς και αυξημένο εργατικό κόστος (τοποθέτηση οπλισμού σε σωστές αποστάσεις, σωστή περίσφιγξη οπλισμού κλπ.). Πέρα από το κόστος μόρφωσης του οπλισμού της επένδυσης, η όλη διαδικασία που ακολουθείται από τον οπλισμό μέχρι την τελική σκυροδέτηση μέσα στη σήραγγα είναι πολυσύνθετη και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να δημιουργηθεί καθυστέρηση του έργου λόγω της μη εναρμόνισης όλων των παραγόντων που απαιτούνται για την εύρυθμη λειτουργία του έργου. Από την άλλη μεριά, μία άοπλη τελική επένδυση, όσον αφορά την κατασκευαστική διαδικασία, η μόνη διαδικασία που απαιτείται για την μόρφωση της, είναι η κατασκευή του ξυλότυπου ή σιδερότυπου και η σκυροδέτηση αυτού.

Επίσης, μία άλλη λεπτομέρεια που απαιτεί η κατασκευή οπλισμένης επένδυσης, είναι η τήρηση κατάλληλης επικάλυψης του σίδηρο-οπλισμού, με σκοπό την προστασία έναντι διάβρωσης και συνεπώς οξείδωσης του οπλισμού.

Το επόμενο σχήμα στην εικόνα 2.1 δείχνει την κατανομή του πάχους στην κλείδα και της ποσότητας οπλισμού των διατομών τελικής επένδυσης ως προς το δείκτη

γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/p_o (όπου σ_c η αντοχή βραχόμαζας και $p_o=\gamma \cdot H$ η τάση πεδίου) για διάφορες σήραγγες της Εγνατίας οδού.



Εικόνα 2.1: Κατανομή του πάχους στην κλείδα και της ποσότητας οπλισμού των διατομών τελικής επένδυσης ως προς το δείκτη των γεωτεχνικών συνθηκών σ_c/p_o.

(Η γεωστατική τάση po έχει υπολογιστεί για το άνω όριο του προτεινόμενου εύρους εφαρμογής ύψους υπερκειμένων).

Πηγή: TIAS (Marinos V. et al).

Παρατηρούμε ότι όταν έχουμε σχετικά καλές γεωτεχνικές συνθήκες ($\sigma_c/p_o > 0,6$) αναμένουμε μικρές παραμορφώσεις και συνεπώς ελαφρότερη όπλιση διατομής καθώς το πέτρωμα «αυτουποστηρίζεται». Όμως για τις συνθήκες αυτές (για τις σήραγγες της Εγνατίας οδού), βλέπουμε ότι τοποθετείται κάποιος «ελάχιστος» οπλισμός στην τελική επένδυση της τάξης των 60-70 Kg/m3 πράγμα που συνυπολογίζοντας και το κόστος του οπλισμού μπορεί να οδηγήσει στην επιλογή άοπλης τελικής επένδυσης.

2.1.2 Τύποι-καλούπια τοποθέτησης έγχυτου σκυροδέματος

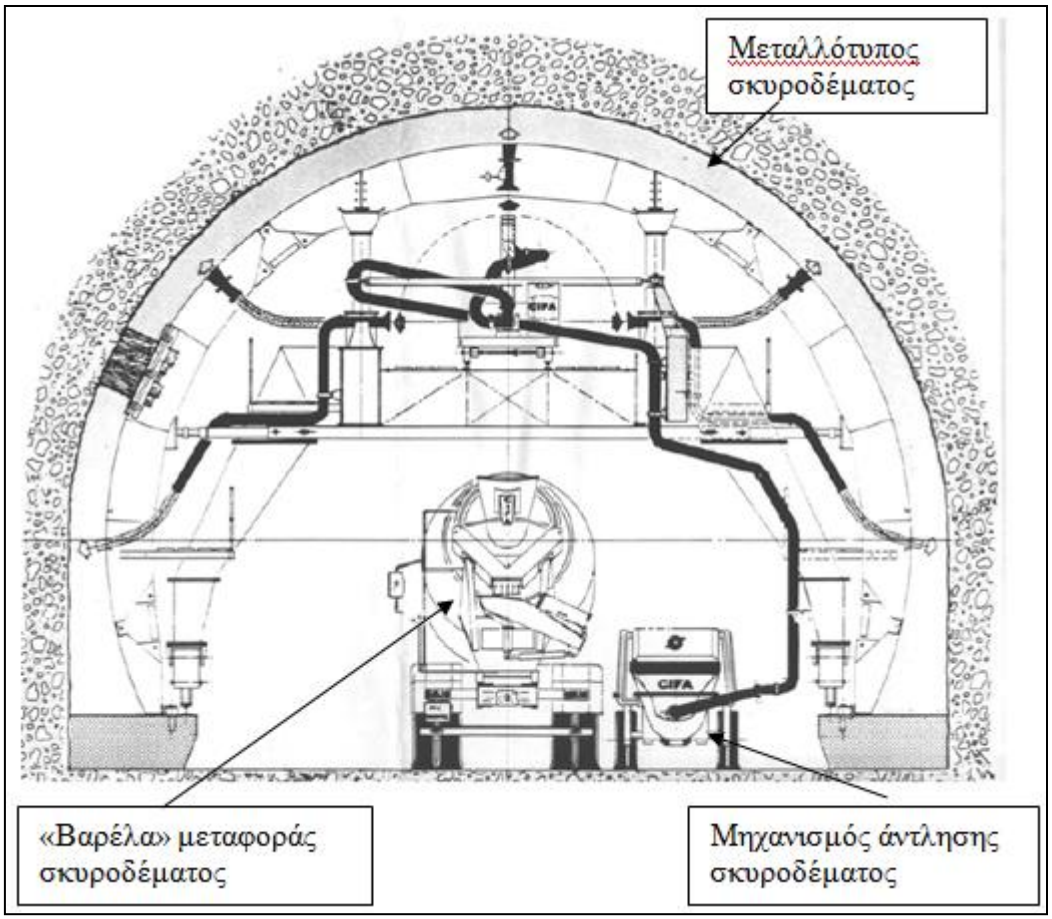
Η κατασκευή τους μόνιμης επένδυσης μιας σήραγγας τυποποιείται στο μέγιστο δυνατό βαθμό για λόγους οικονομίας χρόνου, χρήματος και διασφάλισης ποιότητας. Η πλέον επιτυχής μέθοδος για την ικανοποίηση των επιδιώξεων αυτών τους επί τόπου σκυροδετούμενες επενδύσεις είναι η χρήση μηχανικά ή/και υδραυλικά πτυσσόμενου μεταλλοτύπου που φέρει χαλύβδινη επένδυση. [Α. Ι. Σοφιανός. (2014). Κεφάλαιο 7, Μόνιμη

Επένδυση από Έγχυτο Σκυρόδεμα. Σημειώσεις Μαθήματος Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων Δ.Π.Μ.Σ. ΣΚΥΕ.].

Ο μεταλλότυπος πρέπει να είναι ισχυρός και ανάλογης μορφής και κατασκευής, ώστε να αντέχει τους πιέσεις που ασκούνται κατά την έγχυση και δόνηση του σκυροδέματος, να συγκρατείται χωρίς μετακινήσεις στην σωστή του θέση και να αποδίδει επακριβώς, σύμφωνα με τα σχέδια τους Μελέτης, το περιτύπωμα τους σήραγγας. Εκτός των άλλων ο μεταλλότυπος δεν πρέπει να επιτρέπει τη διαρροή κονιάματος. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευής αναγνωρισμένων εργοστασίων, υδραυλικού ή μη συστήματος, εξασφαλίζουν ταχεία και ευχερή τοποθέτηση τους ακριβείς θέσεις και ευχερή αφαίρεση και μετατόπιση άνευ κρούσεων και καταπονήσεων του σκυροδέματος.

Οι τύποι επιτρέπουν την κάτωθεν τούτων δίοδο εργοταξιακών ή άλλων οχημάτων, συρμών, κλπ., όπως επίσης, αν χρειάζεται, και την δίοδο τους μεταφερόμενης μονάδας τύπου. Ο μεταλλότυπος διαθέτει ειδικό φορείο μεταφοράς του επί τροχών και κινείται επί σιδηροτροχιών που έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα στο δάπεδο ή στα πέδιλα των σηράγγων. Ο μεταλλότυπος δύναται να αποτελείται από τμήματα ή στοιχεία τα οποία θα συνθέτουν τον τύπο αυτό.

Ο μεταλλότυπος φέρει σε κάθε πλευρά του σειρά ανοιγμάτων. Τα ανοίγματα αυτά επιτρέπουν τη σκυροδέτηση, την προσπέλαση για τη δόνηση και την επιθεώρηση του διαστρωνόμενου σκυροδέματος πίσω από το μεταλλότυπο. Ο σωλήνας προσκόμισης του σκυροδέματος πρέπει να μπορεί να εισέρχεται στο άνοιγμα χωρίς πρόβλημα, και τους να εξασφαλίζεται η επιθεώρηση του διαστρωνόμενου σκυροδέματος από το επόμενο άνοιγμα καθώς και η ελεύθερη πτώση του σκυροδέματος από ύψος που δεν θα υπερβαίνει το 1 m. Τα υπόψη ανοίγματα έχουν κατάλληλες διαστάσεις (π.χ. 0.45 m x 0.90 m με τη μεγάλη διάσταση παράλληλη τους τον άξονα τους σήραγγας) και οι θύρες τους ανοίγονται από εξέδρες, για άνετη και ασφαλή προσπέλαση και επιθεώρηση. Ο οριζόντιος άξονας των ανοιγμάτων τους κάτω σειράς ευρίσκεται περίπου 1.80 m πάνω από το διαμήκη αρμό κατασκευής του πυθμένα τους επένδυσης. Τα κέντρα των ανοιγμάτων κάθε επόμενης σειράς απέχουν 1.80 m περίπου από τον οριζόντιο άξονα τους αμέσως υποκείμενης σειράς. Τα ανοίγματα διατάσσονται πεσσοειδώς, απέχουν μεταξύ τους 2.50 m περίπου, από κατακόρυφο άξονα σε άξονα και προβλέπονται 2 σειρές ανοιγμάτων κοντά στην κορυφή του μεταλλότυπου.



Εικόνα 2.2: Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος.

Η θερμοκρασία του σκυροδέματος κατά την έγχυση (BTS-ICE, 2000) πρέπει να είναι μεταξύ 25 και 5 ^{o}C. Το νωπό σκυρόδεμα έρχεται στη θέση τοποθέτησής του με βαρέλα (Εικόνα 2.2) συνήθως, η οποία τροφοδοτεί αντλία, που στη συνέχεια μέσω δακτυλίου διανομής το αντλεί στο μεταλλότυπο. Ο δακτύλιος διανομής έχει σκοπό την ισόρροπη διανομή του νωπού σκυροδέματος στο μεταλλότυπο. Η συμπύκνωση του σκυροδέματος επιτυγχάνεται με τη χρήση δονητών που είναι εγκατεστημένοι στο μεταλλότυπο.

Ο Ανάδοχος συμπεριλαμβάνει στην «Έκθεση Μεθοδολογίας Εκτέλεσης Σκυροδέτησης» πλήρη τεχνικά στοιχεία (λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια, μελέτη αντοχής του, στήριξής του κλπ.). Ο μεταλλότυπος σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανταποκρίνεται πλήρως και επακριβώς στις προβλέψεις της Μελέτης. Η επιλογή της σκυροδέτησης της διατομής σε μία φάση (συνολική διατομή) ή σε δύο (πρώτα σκυροδέτηση πυθμένα και σε επόμενη φάση σκυροδέτηση παρειών και θόλου), καθορίζεται στη μεθοδολογία σκυροδέτησης με βάση τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας και τη στατική μελέτη της μόνιμης επένδυσης.

Στη μελέτη και κατασκευή του μεταλλότυπου λαμβάνεται υπόψη ότι ο άξονας της χάραξης στις σήραγγες έχει και καμπύλα τμήματα, ώστε να προβλέπονται οι απαιτούμενες προσθήκες και προσαρμογές (πχ. προσθήκη στο μεταλλότυπο μεταλλικών σφηνών) για την διαμόρφωση των καμπυλών. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη φωλεών Η/Μ εγκαταστάσεων, φρεατίων καθαρισμού, διευρύνσεων (π.χ. σε θέσεις πλατυσμάτων στάθμευσης, φωλεών προσωπικού σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες, θέσεων «ωστικών ανεμιστήρων- Jet Fans» και των τμημάτων προσαρμογής αυτών κλπ.) και άλλων, ώστε να προβλέπεται η δυνατότητα ανάλογων προσθηκών και προσαρμογών στο μεταλλότυπο ή συνδυασμός αυτού με άλλους τύπους.

Πριν από την χρησιμοποίηση του μεταλλότυπου για την διάστρωση του σκυροδέματος η επιφάνειά του καθαρίζεται επιμελώς, ώστε να είναι απαλλαγμένη από επιστρώσεις κονιάματος ή άλλα ξένα υλικά. Επίσης πριν από την διάστρωση του σκυροδέματος, η επιφάνεια του μεταλλότυπου επαλείφεται με ειδικό λάδι που συνίσταται από ραφιναρισμένο ορυκτέλαιο ειδικής σύνθεσης με ένα ή περισσότερα συστατικά που είναι κατάλληλα για τον επιδιωκόμενο σκοπό.

Για την διευκόλυνση επίτευξης ικανοποιητικής προόδου, αλλά και για να καθίσταται δυνατή η ταχεία επισκευή των τυχόν ατελειών της επιφανείας του σκυροδέματος, ο μεταλλότυπος αφαιρείται αμέσως μόλις το σκυρόδεμα αναπτύξει επαρκή αντοχή, ώστε να αποφεύγονται ραγίσματα, θρυμματισμοί, φουσκώματα κλπ. του σκυροδέματος. Η αφαίρεση του μεταλλότυπου συνήθως γίνεται μετά την παρέλευση 10 – 12 ωρών (ανάλογα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος) και πάντως σε διάστημα όχι μικρότερο από 8 ώρες, εκτός εάν εφαρμόζονται ειδικές εγκαταστάσεις και τρόποι ωρίμανσης (π.χ. ατμός κ.λπ.). Η ανάπτυξη της ελάχιστης απαιτούμενης αντοχής, προβλέπεται στη Μελέτη, για την αφαίρεση του μεταλλότυπου και ελέγχεται με θραύση τριών (3) τουλάχιστον δοκιμίων για κάθε φάτνωμα. Σε περίπτωση χαμηλών θερμοκρασιών, η αφαίρεση του μεταλλότυπου βραδύνει, προκειμένου να αποκτήσει το σκυρόδεμα την απαιτούμενη αντοχή.

Πίνακας 2.1: Χρόνοι αφαίρεσης μεταλλότυπων.

Τύπος τσιμέντου	**Ν/Τ**	**Απαιτούμενος χρόνος σκλήρυνσης σε ημέρες για θερμοκρασία σκυροδέματα::**		
		5 °C	**12 °C**	**20 °C**
Z 25	0.4	4	2.5	1.5

	0.6	9	5	3
	0.8	15	9	5
Z 35 L	0.4	2	1.5	1
	0.6	5	3.5	2
	0.8	7	5	3
Z 35 F, Z 45 L	0.4	1	0.75	0.5
	0.6	2	1.5	1
	0.8	4	3	2
Z 45 F, Z 55	0.4	0.5	0.25	0.25
	0.6	0.75	0.5	0.5
	0.8	1	0.75	0.75

Πηγή: (Α. Ι. Σοφιανός Κεφάλαιο 7, Μόνιμη Επένδυση από Έγχυτο Σκυρόδεμα Σημειώσεις).

Ο χρόνος αφαίρεσης του μεταλλοτύπου εξαρτάται από τον τύπο του τσιμέντου, τη σύνθεση του σκυροδέματος, τη θερμοκρασία σκυροδέτησης, τις συνθήκες ωρίμανσης, και τη διαδικασία κατασκευής. Το DIN1045 μπορεί μόνον χονδρικά να ληφθεί υπόψη. Ο Πίνακας 1 δίνει την επίδραση του τύπου του τσιμέντου, του λόγου N/T, και της θερμοκρασίας σκυροδέτησης, στο χρόνο επίτευξης μιας αντοχής σκυροδέματος 5MPa, που δύναται να θεωρηθεί ως μία ελάχιστη αντοχή ξεκαλουπώματος.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη συσχέτιση της αντοχής των δοκιμίων με αυτή που πραγματικά έχει αναπτυχθεί στον φορέα, λόγω της μεγάλης διαφοράς στις διαστάσεις μεταξύ των δοκιμίων και του πάχους της διατομής της σήραγγας. Με δεδομένο το μεγάλο πάχος της μόνιμης επένδυσης, αναμένεται, λόγω έκλυσης θερμότητας, να αναπτυχθεί στο σκυρόδεμα πολύ υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τα δοκίμια τα οποία έχουν ήδη ληφθεί. Αυτή η ανάπτυξη της θερμοκρασίας στο σκυρόδεμα έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής του αντοχής.

Αν υπάρχει λοιπόν ιδιαίτερος λόγος, τοποθετούνται θερμοστοιχεία εντός της διατομής της σήραγγας, έτσι ώστε να γίνεται άμεσος συσχετισμός της αντοχής των δοκιμίων που έχουν ληφθεί με την αντοχή του σκυροδέματος της μόνιμης επένδυσης, σε συνάρτηση με την διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ αυτών. Η αφαίρεση του μεταλλότυπου μπορεί να πραγματοποιείται εφόσον η αντοχή του σκυροδέματος φτάσει την επιτρεπόμενη τιμή της.

Το σκυρόδεμα εγχέεται σε τμήματα μήκους 8 έως 12.5m, σύμφωνα με το μήκος του μεταλλότυπου (Εικόνα 2.1). Για μικρές διατομές, χρησιμοποιείται μεταλλότυπος πλήρους κυκλικής διατομής ((Εικόνα 2.1), δηλαδή ο θόλος και το ανάστροφο κατασκευάζονται ενιαία χωρίς κατασκευαστικό αρμό μεταξύ τους. Για μεγαλύτερες διατομές, εφόσον απαιτείται επένδυση του ανάστροφου, αυτή κατασκευάζεται πρώτη, και ακολουθεί η έγχυση σκυροδέματος στο μεταλλότυπο του θόλου.

Το ανοικτό μέτωπο του μεταλλότυπου πρέπει να κλείνει προκειμένου να συγκρατείται το νωπό σκυρόδεμα εντός αυτού. Το μέτωπο αυτό δεν έχει σταθερό πάχος, κυμαίνεται δε ανάλογα με το βαθμό υπέρ- ή υπό-εκσκαφής. Το κλείσιμο επιτυγχάνεται συνήθως με ξυλοδεσιά. Μπορεί να επιτευχθεί επίσης με χρήση ειδικών προκατασκευασμένων στοιχείων κλεισίματος του μετώπου, που προσφέρουν ορισμένοι κατασκευαστές μεταλλοτύπων.

Εικόνα 2.3: Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος πριν την είσοδό του στη σήραγγα.

Εικόνα 2.4: Μεταλλότυπος ολόσωμης επένδυσης με σκυρόδεμα (χωρίς αρμό διακοπής).

2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ - ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.2.1 Χαρακτηριστικά σκυροδέματος

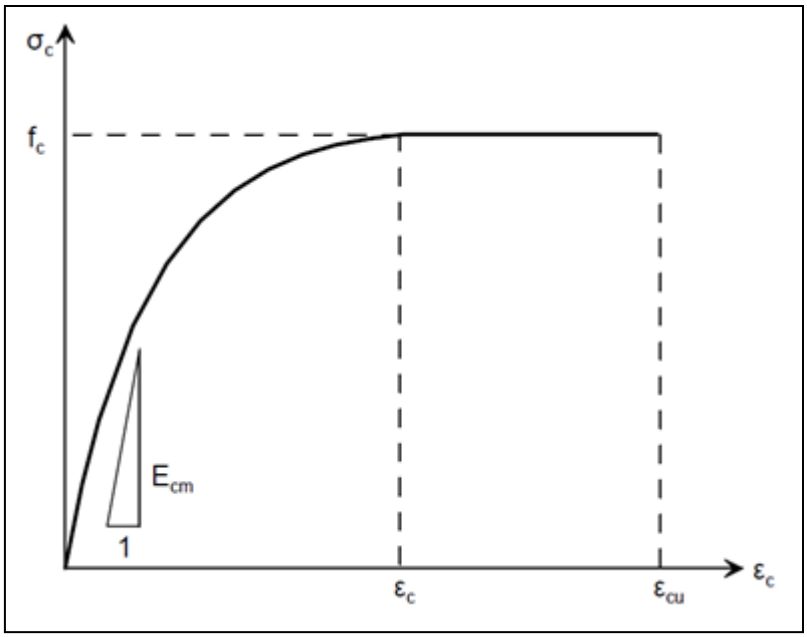
Η παρούσα διπλωματική εργασία - μελέτη για την μόνιμη επένδυση, έχει γίνει αρχικά για κατηγορία σκυροδέματος C30/37. Σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό EC-2 (Ευρωκώδικα 2), για την συγκεκριμένη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος ισχύουν τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος για κατηγορία αντοχής C30/37.

Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος	**Τιμές για κατηγορία αντοχής C30/37**
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου (28 ημέρες) (MPa)	f_{ck}= 30
Μέση θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου (MPa)	f_{cm}= 38
Μέση αξονική εφελκυστική αντοχή (MPa)	f_{ctm}= 2,9
Χαρακτηριστική αξονική εφελκυστική αντοχή (MPa)	$f_{ctk,0.05}$= 2,0
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	E_{cm}= 32
Συντελεστής poisson (αρωγμάτωτου σκυροδέματος)	v= 0,2
Θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος για την μέγιστη τάση (%)	ε_c= 2,2
Θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος για την μέγιστη τάση (%)	ε_{cu}= 3,5
Συντελεστής θερμικής διαστολής ($1/^0C$)	α= 10^{-5}

2.2.2 Συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε)

Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων (για μη-γραμμική στατική ανάλυση) σύμφωνα με τον EC-2, είναι η εξής:



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (σ-ε) σύμφωνα με τον EC-2 για μη γραμμική (nonlinear) στατική ανάλυση.

Για σχεδιαστικούς σκοπούς, στις παραπάνω τιμές θα πρέπει να συνεκτιμηθούν και οι συντελεστές ασφαλείας γ_c= 1,50 και γ_c= 1,20 για μεταβλητές και τυχαίες δράσεις αντίστοιχα. Επιπλέον, ειδικά για τα τμήματα από άοπλο σκυρόδεμα, εξαιτίας της μειωμένης πλαστιμότητάς τους, η αντοχή σχεδιασμού σε θλίψη και εφελκυσμό του σκυροδέματος εκτιμάται ως:

Εξίσωση 2.1: Εκτίμηση της αντοχής σχεδιασμού σε θλίψη και εφελκυσμό του σκυροδέματος (με τον συντελεστή: acc,pl).

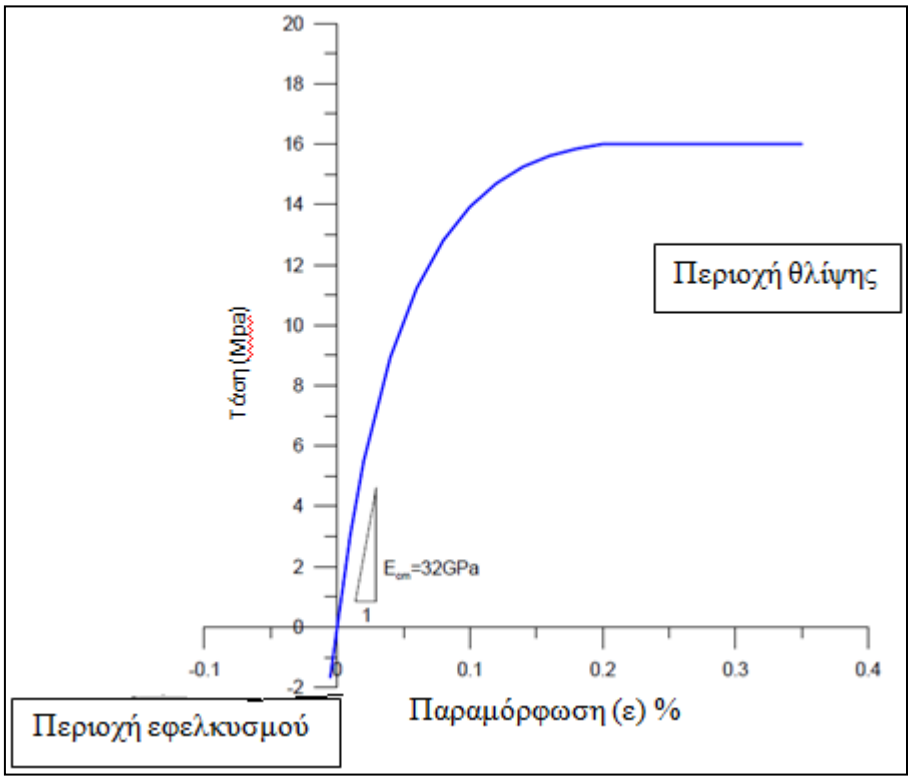
—

Εξίσωση 2.2: Εκτίμηση της αντοχής σχεδιασμού σε θλίψη και εφελκυσμό του σκυροδέματος (με τον συντελεστή: act,pl).

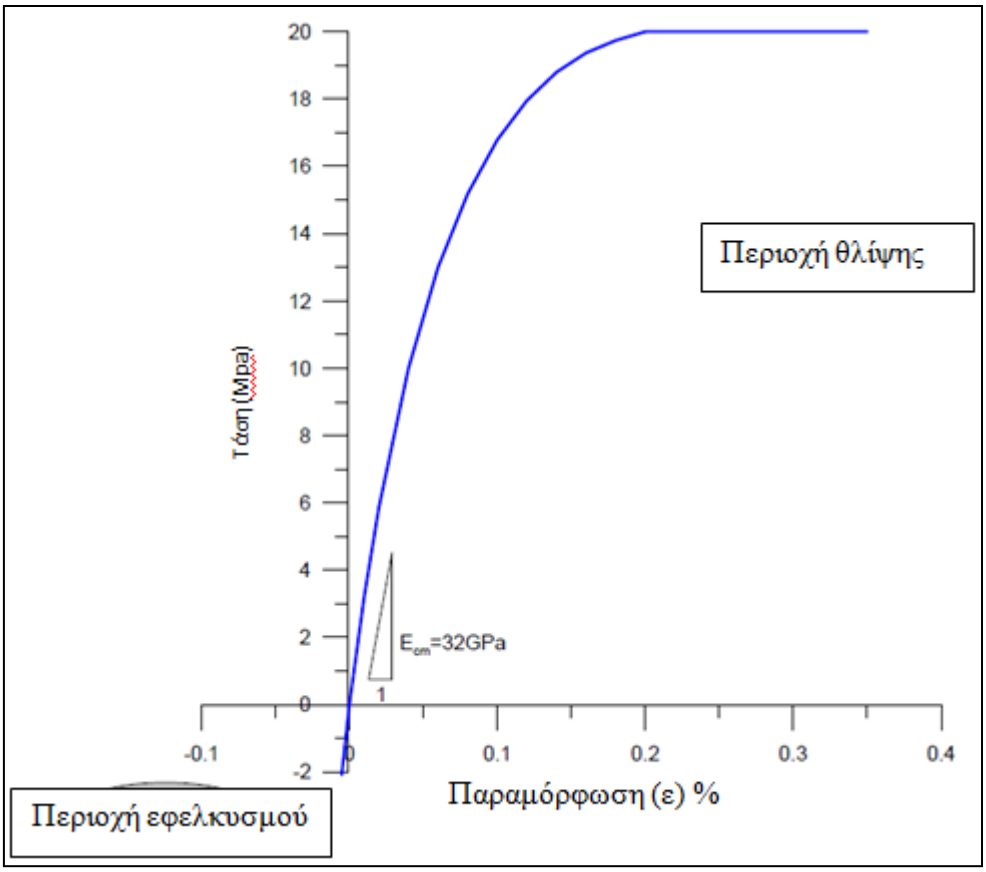
—

Όπου οι προτεινόμενες τιμές για τους συντελεστές acc,pl και act,pl είναι περίπου 0,8. Επίσης, σύμφωνα με το κεφάλαιο 12 (άοπλες και ελαφρώς οπλισμένες κατασκευές) του EC-2, οι εφελκυστικές τάσεις στον σχεδιασμό μπορεί να θεωρηθούν ότι αποτελούν την γραμμική επέκταση του διαγράμματος (σ-ε) για το σκυρόδεμα στην περιοχή εφελκυσμού,

μέχρι την μέγιστη τάση (αντοχή) που δίνει η εξίσωση (2.2). Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα διαγράμματα σχεδιασμού για το σκυρόδεμα είναι τα εξής:



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα σχεδιασμού σκυροδέματος C30/37 για μόνιμα και κινητά (μεταβλητά) φορτία.



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα σχεδιασμού σκυροδέματος C30/37 για τυχηματικές δράσεις φορτίων.

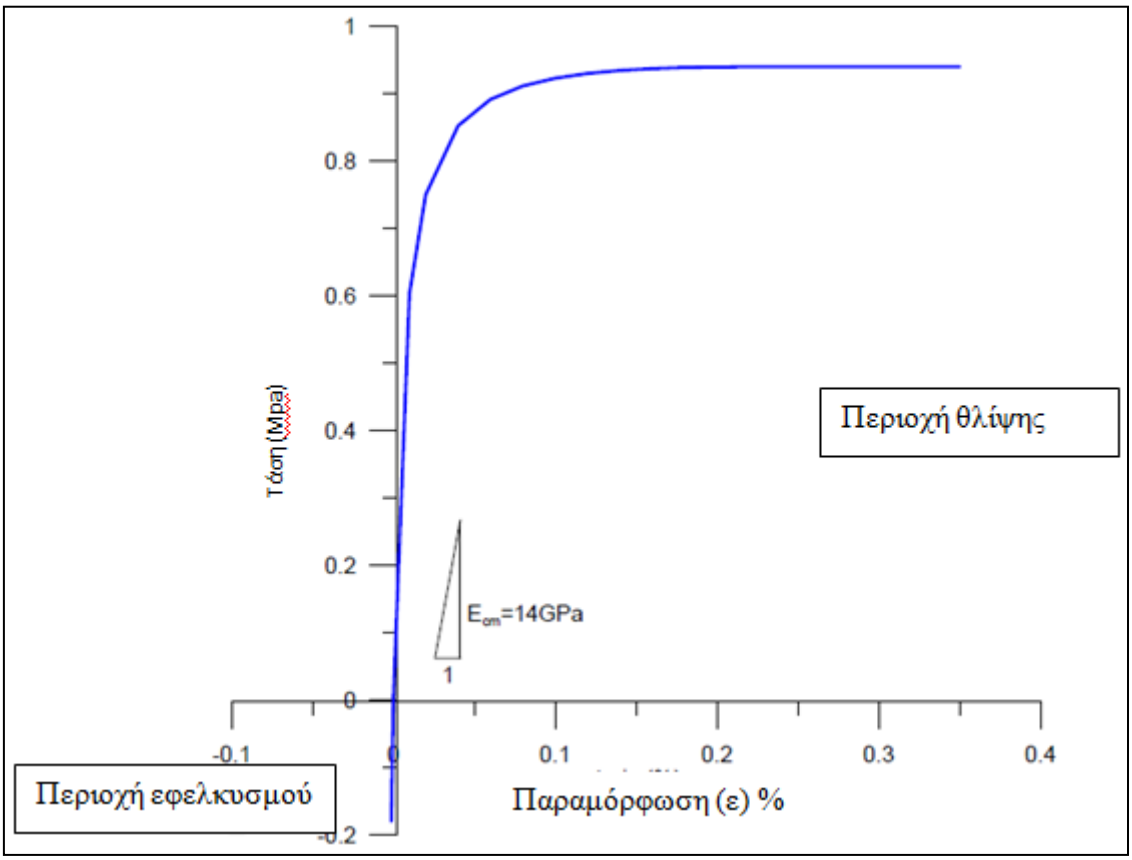
Τα παραπάνω ισχύουν για την απόκριση τάσης-παραμόρφωσης (σ-ε) για σκυρόδεμα κανονικής ωρίμανσης (28 ημερών). Ωστόσο, θα πρέπει να εξεταστούν επίσης και οι ιδιότητες του σκυροδέματος κατά την στιγμή του ξεκαλουπώματος (δηλαδή για ωρίμανση < 28 ημερών). Για την περίπτωση αυτή, οι ιδιότητες του σκυροδέματος είναι:

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος κατά την διάρκεια αφαίρεσης μεταλλότυπου (ξεκαλούπωμα) για κατηγορία αντοχής C30/37. (Hochtief Design).

Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος	**Τιμές για κατηγορία αντοχής C30/37**
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου (αφαίρεση μεταλλότυπου) (MPa)	f_{ck}= 2,00
Θλιπτική αντοχή σχεδιασμού κυλινδρικού δοκιμίου (MPa)	f_{cd}= 0,94
Χαρακτηριστική αξονική εφελκυστική αντοχή (MPa)	$f_{ctk,0.05}$= 0,33
Εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού κυλινδρικού δοκιμίου (MPa)	f_{ctd}= 0,18
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	E_{cm}= 14,1

Συντελεστής poisson (αρωγμάτωτου σκυροδέματος)	ν= 0,2
Θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος για την μέγιστη τάση (%)	ε_c= 2,2
Θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος για την μέγιστη τάση (%)	ε_{cu}= 3,5
Συντελεστής θερμικής διαστολής ($1/^0C$)	α= 10^{-5}

Η διαγραμματική απεικόνιση τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε) για την περίπτωση της αφαίρεσης μεταλλότυπων (ξεκαλούπωμα), είναι:



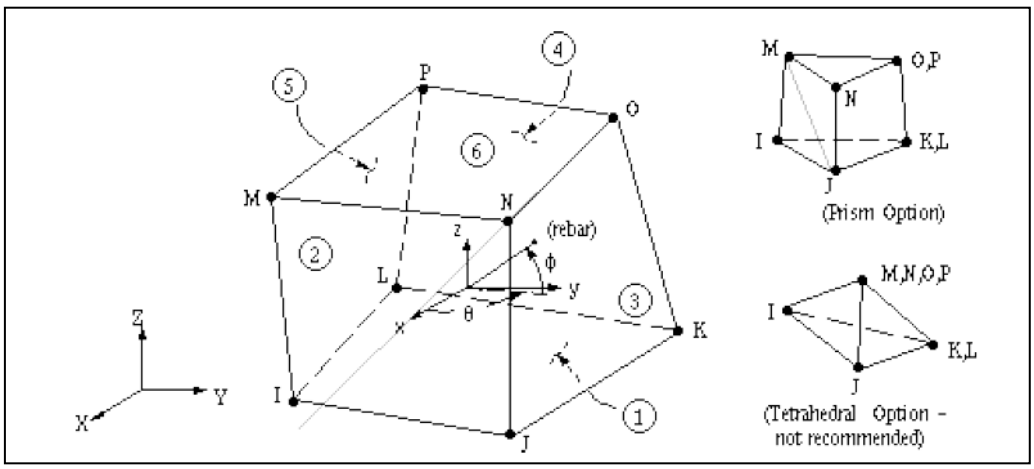
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα σχεδιασμού σκυροδέματος C30/37 για την περίπτωση αφαίρεσης μεταλλοτύπων (ξεκαλουπώματος).

2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.3.1 Καταστατική προσομοίωση σκυροδέματος με το λογισμικό ANSYS

Το ANSYS διαθέτει ένα τρισδιάστατο στερεό ισοπαραμετρικό στοιχείο (element) οκτώ κόμβων, το SOLID65 (βλ. Σχήμα 2.2), για την μόρφωση προσομοιωμάτων

πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) σκυροδέματος αλλά και άλλων ψαθυρών υλικών. Το προσομοίωμα λαμβάνει υπ όψη του τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος (cracking) λόγω εφελκυστικών και αντίστοιχα την θραύση (crushing) λόγω θλιπτικών τάσεων. Η συμπεριφορά του υλικού μπορεί να είναι μη-γραμμική ενώ μπορούν να ληφθούν υπ όψη, εκτός από τη ρηγμάτωση και τη θραύση και οι πλαστικές παραμορφώσεις καθώς και οι παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού. Το στοιχείο έχει την δυνατότητα να ενσωματώνει στον όγκο ράβδους οπλισμού κατανεμημένες στο εσωτερικό του (smeared reinforcement) με προσανατολισμό σε τρείς τυχαίες διευθύνσεις, τροποποιώντας κατάλληλα το μητρώο δυσκαμψίας. Με αυτό τον τρόπο ο χάλυβας μπορεί να παραλαμβάνει αξονικά φορτία (θλιπτικά ή εφελκυστικά), όχι όμως διατμητικά, και να παραμορφώνεται πλαστικά. Εναλλακτικά και για μεγαλύτερη ευχέρεια και ακρίβεια οι οπλισμοί μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο διακριτά, με ραβδωτά στοιχεία συνδεόμενα στους κόμβους των στοιχείων του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.2: Τρισδιάστατο (3D) στοιχείο σκυροδέματος (SOLID 65).

2.3.2 Περιγραφή της αστοχίας του σκυροδέματος

Το στοιχείο SOLID 65 έχει τη δυνατότητα να περιγράψει την αστοχία τόσο σε εφελκυσμό (crack) όσο και σε θλίψη (crush). Στον εφελκυσμό η συμπεριφορά του σκυροδέματος θεωρείται γραμμικά ελαστική και ορίζεται εισάγοντας την αντίστοιχη παράμετρο οριακής εφελκυστικής αντοχής (uniaxial cracking stress) στην ιδιότητα του υλικού concrete. Σε θλίψη η συμπεριφορά του σκυροδέματος ορίζεται εκτός της ιδιότητας του υλικού concrete, εισάγοντας μια μη-γραμμική καταστατική σχέση με βάση το υλικό multilinear kinematic hardering. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ένα κριτήριο αστοχίας σε πολυαξονική κατάσταση τάσεων. Το ANSYS χρησιμοποιεί το κριτήριο των Willam &

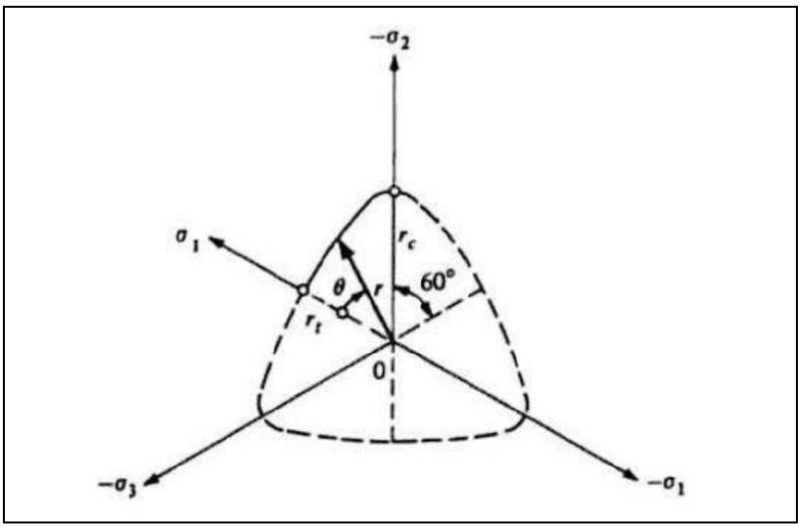
Warnke (1975) το οποίο εισάγεται με την ιδιότητα υλικού concrete για το στοιχείο SOLID 65. Το κριτήριο αυτό ορίζεται από πέντε παραμέτρους και αποτελεί εξέλιξη από τους ίδιους συγγραφείς ενός αρχικού τριπαραμετρικού μοντέλου ώστε να εφαρμόζεται εξίσου σε περιοχές χαμηλών και υψηλών θλιπτικών τάσεων. Η καμπύλη αστοχίας παράγει το κριτήριο των πέντε παραμέτρων έχει καμπύλες γενέτειρες και μη κυκλικές διατομές. Η επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται σας έλλειψη, κάθετα στον ισοτασικό άξονα (σm), όπου το εύρος της τm καθορίζεται από τα όρια της έλλειψης στις 0° και 60° κάθετα στο αποκλίνον επίπεδο της σm (βλ. Σχήμα 2.3). Τα όρια της έλλειψης ακολουθούν (σε κατάκλιση) τις σχέσεις (2.3) και (2.4) που ακολουθούν. Η γραμμική σχέση των μέσων συστατικών της τάσης σm, τm αντικαθίσταται από μια γενικότερη έκφραση, όπου τα εφελκυστικά και θλιπτικά ακραία επίπεδα δίνονται από τις σχέσεις [W.F. Chen, Plasticity in Reinforced Concrete (1982)]:

Εξίσωση 2.3: Τα εφελκυστικά και θλιπτικά ακραία επίπεδα, για $\theta=0^0$.

για $\theta=0^o$.

Εξίσωση 2.4: Τα εφελκυστικά και θλιπτικά ακραία επίπεδα, για $\theta=60^o$.

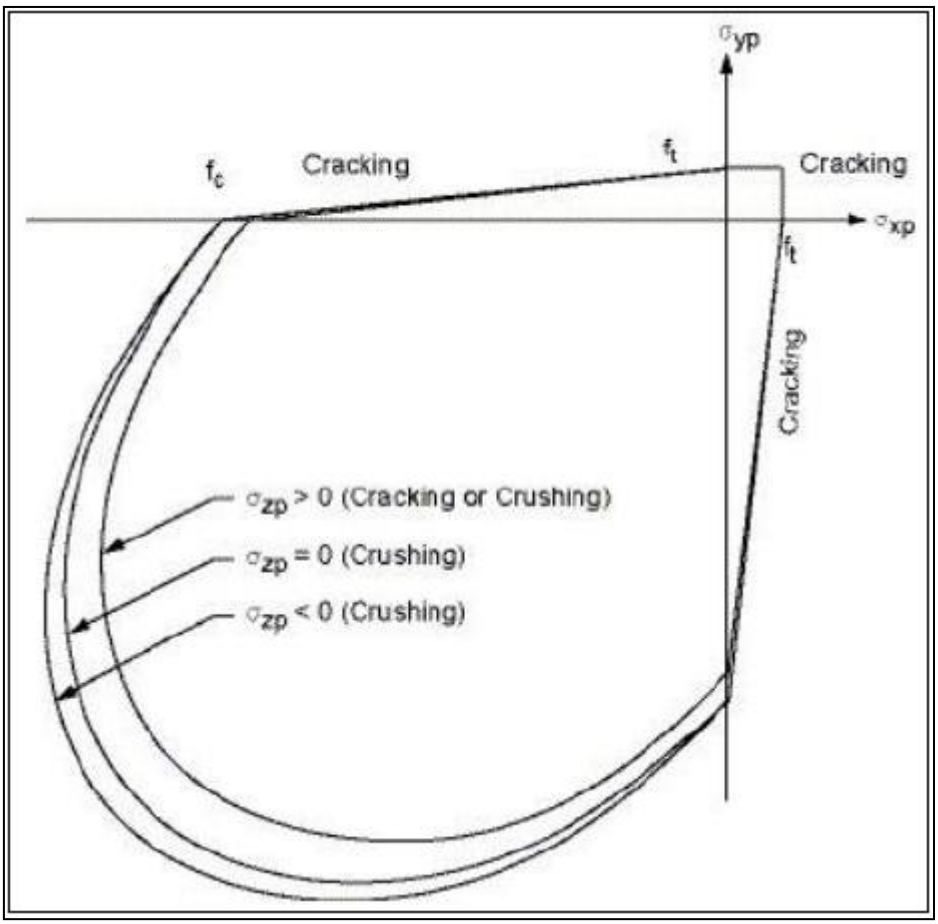
για $\theta=60^o$.



Σχήμα 2.3: Διατομή επιφάνειας αστοχίας στο αποκλίνον επίπεδο.

Οι παράμετροι που πρέπει να εισαχθούν στο ANSYS για να οριστεί το κριτήριο αστοχίας είναι οι εξής:

- μονοαξονική εφελκυστική αντοχή (uniaxial tensile cracking stress).
- μονοαξονική θλιπτική αντοχή (uniaxial crushing stress).
- θλιπτική αντοχή υπό διαξονική ένταση (biaxial crushing stress).
- αντοχή σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (ambient hydrostatic stress state), όπου ορίζονται οι επόμενες δύο παράμετροι
- διαξονική θλιπτική αντοχή στο παραπάνω υδροστατικό πεδίο τάσεων (uniaxial crushing stress under the ambient hydrostatic stress rate).
- μονοαξονική θλιπτική αντοχή στο παραπάνω υδροστατικό πεδίο τάσεων (uniaxial crushing stress under the ambient hydrostatic stress rate).



Σχήμα 2.4: Δισδιάστατη επιφάνεια αστοχίας για εντατικές καταστάσεις διαξονικές ή σχεδόν διαξονικές (σ2=0).

Αν οι πιο σημαντικές μη μηδενικές κύριες τάσεις είναι στις διευθύνσεις σ_{xp} και σ_{yp} οι τρείς επιφάνειες που εμφανίζονται είναι για σ_{zp} λίγο μεγαλύτερο του 0, σ_{zp} ίσο με το 0

και σ_{zp} λίγο μικρότερο του 0 (Σχήμα 2.5). Αν και οι τρείς επιφάνειες, που φαίνονται σαν προβολές στο επίπεδο $\sigma_{xp} - \sigma_{yp}$, είναι σχεδόν ίσες και η τρισδιάστατη επιφάνεια αστοχίας είναι συνεχής, ο τρόπος αστοχίας του υλικού είναι συνάρτηση του προσήμου του σ_{zp}. Για παράδειγμα, αν τα σ_{xp} και σ_{yp} είναι και τα δύο αρνητικά (θλίψη) και το σ_{zp} είναι θετικό (εφελκυσμός), προβλέπεται ρηγμάτωση κάθετα στην διεύθυνση του σ_{zp}. Αν, αντίθετα, το σ_{zp} είναι 0 ή αρνητικό, το υλικό θεωρείται πώς αστοχεί σε σύνθλιψη [ANSYS Theory Reference, (1998)]. Μόλις οι τάσεις φτάσουν την επιφάνεια αστοχίας συμβαίνει μια απότομη πτώση και μηδενίζονται, ενώ στον εφελκυσμό μπορεί να οριστεί και «strain softening» μέσω της παραμέτρου tensile crack factor, της ιδιότητας υλικού Concrete.

Σε πολλές εφαρμογές επιλέγεται η απενεργοποίηση της δυνατότητας σύνθλιψης του σκυροδέματος θέτοντας f_c= -1.0 στην ιδιότητα υλικού Concrete, για να αποφευχθούν πρόωρες αστοχίες των στοιχείων στα σημεία επιβολής των φορτίων. Στην παρούσα εργασία όμως δεν την απενεργοποιούμε.

2.3.3 Περιγραφή του τρόπου σχηματισμού και μεταφοράς φορτίου μέσω των ρωγμών

Το πρόγραμμα ANSYS έχει την δυνατότητα σχηματισμού ρωγμών με κατάλληλη διαμόρφωση του μητρώου δυσκαμψίας του στοιχείου (διανεμημένες ρωγμές). Σε κάθε στοιχείο πραγματοποιείται έλεγχος ρηγμάτωσης και θραύσης στα οκτώ σημεία ολοκλήρωσης. Ρηγμάτωση ή θραύση ξεκινά όταν η μέγιστη ή η ελάχιστη (ή ο συνδυασμός τους κατά το κριτήριο Willam) κύρια τάση του στοιχείου, σε κάποιο σημείο ολοκλήρωσης, ξεπεράσει την εφελκυστική ή θλιπτική επιφάνεια αστοχίας του σκυροδέματος (το κριτήριο εξαρτάται από το αν η σ_2 είναι θετική ή όχι). Σχηματίζεται τότε μια ρηγματωμένη περιοχή εντός του στοιχείου με διεύθυνση κάθετη στην αντίστοιχη κύρια τάση, οι τάσεις ανακατανέμονται τοπικά, ενώ δημιουργείται μια αδύναμη περιοχή στη διεύθυνση της κύριας τάσης. Το στοιχείο είναι έτσι μη γραμμικό και απαιτεί επαναληπτική διαδικασία επίλυσης.

Το μέγεθος της διατμητικής τάσης που μεταφέρεται κατά μήκος της ρωγμής μπορεί να ποικίλει από πλήρη διατμητική μεταφορά έως μηδενική. Μέσω της ιδιότητας υλικού Concrete που αντιστοιχεί στο στοιχείο SOLID 65, εισάγονται δύο συντελεστές μεταφοράς της διατμητικής τάσης, ένας για ανοικτή (β_t) και ένας για κλειστή (β_c) ρωγμή. Οι τιμές των συντελεστών κυμαίνονται από 0 έως 1, όπου το 0 αντιστοιχεί σε μηδενική μεταφορά και το 1 σε πλήρη μεταφορά τέμνουσας. Από τούς [Kachlakev D., Miller T., Yim

S. and Chansawat K., (2001)] προτείνονται ενδεικτικές τιμές β_t=0,3 και β_c=1, αλλά έγκυρες είναι και οι ενδιάμεσες τιμές έως β_t=0,2 και β_c= 0,6. Καθώς οι τιμές των παραπάνω συντελεστών επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ειδικά στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης, ενώ επηρεάζουν επίσης και τη δυνατότητα σύγκλισης κατά την επαναληπτική διαδικασία, η επιλογή τους χρήζει διερεύνησης και σύγκρισης αποτελεσμάτων με πειραματικά αποτελέσματα. Έπειτα από το σχηματισμό μίας πρώτης ρωγμής, τάσεις εφαπτομενικές στο επίπεδο της ρωγμής μπορεί να προκαλέσουν τη δημιουργία και δεύτερης ή κατόπιν τρίτης ρωγμής στο εκάστοτε σημείο ολοκλήρωσης. Μετά τη σύνθλιψη το σκυρόδεμα θεωρείται πως έχει χάσει τη δυσκαμψία του προς όλες τις διευθύνσεις.

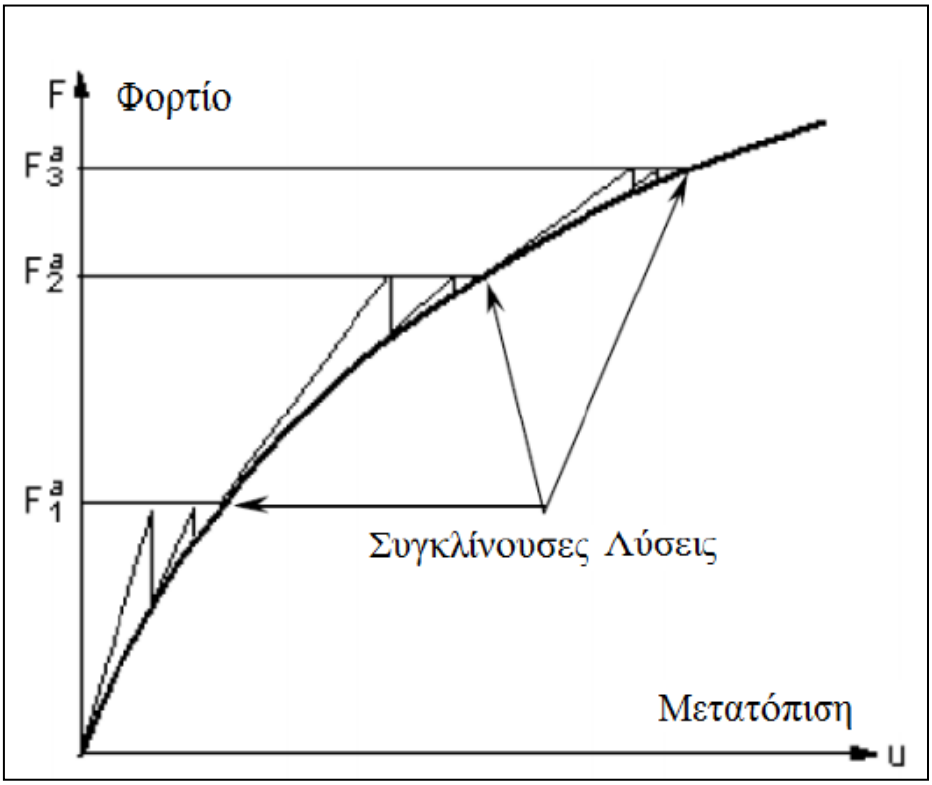
2.3.4 Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης (nonlinear analysis)

Όπως είναι γνωστό, στην περίπτωση της γραμμικής ελαστικότητας κατά την επίλυση της εξίσωσης P=K·u, κάθε αύξηση του διανύσματος των δυνάμεων P συνεπάγεται μια γραμμική αύξηση των μετακινήσεων u. Αντίθετα, σε μη-γραμμικά προβλήματα η σχέση P=K·u μετασχηματίζεται σε ΔP= K·Δu όπου το K πια δεν είναι γραμμικός τελεστής αλλά είναι μεταβλητός, εξαρτώμενος από τη φόρτιση και Δu είναι μια στοιχειώδης μετακίνηση που οφείλεται στη στοιχειώδη μεταβολή της δύναμης ΔP. Δεδομένης της μεταβολής της δυσκαμψίας είναι φανερό πως σε κάθε διαδοχικό βήμα υπεισέρχεται ένα σφάλμα κατά τον υπολογισμό των μετακινήσεων (Σχήμα 2.5).

Έτσι προκύπτει ένα έλλειμμα ισορροπίας το οποίο ισοσκελίζεται με την εισαγωγή της ισοδύναμης P_{equiv} , διαδικασία που επαναλαμβάνεται έως ότου το σφάλμα γίνει αρκετά μικρό, τόσο ώστε να εμπίπτει στα προδιαγεγραμμένα κριτήρια σύγκλισης. Από αριθμητικής άποψης η διαδικασία αυτή περιγράφεται από τη μέθοδο Newton-Raphson η οποία μπορεί να είναι πλήρης ή τροποποιημένη υπό την έννοια ότι υπολογίζεται κάθε φορά ένα επικαιροποιημένο μητρώο δυσκαμψίας K ή χρησιμοποιείται το αρχικό σε κάθε βήμα αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή συνοψίζεται ως εξής [Μ. Παπαδρακάκης, (2001), Ανάλυση Φορέων με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχειών]:

- επίλυση του συστήματος ΔP=K·Δu
- υπολογισμός μετακινήσεων Δu
- υπολογισμός των αντίστοιχων παραμορφώσεων Δε

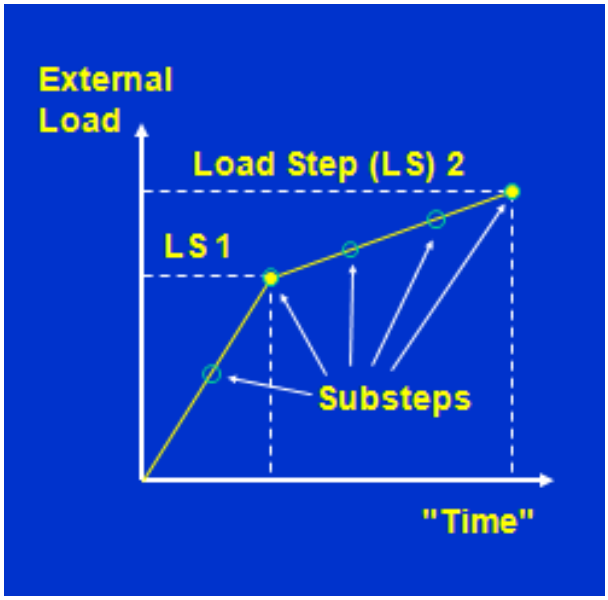
- θεώρηση ότι έστω η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων ήταν γραμμική ώστε να ισχύει $\varepsilon_{NL}=\varepsilon_L$
- υπολογισμός των αντίστοιχων τάσεων σ_{NL}
- υπολογισμός τάσεων εκτός ισορροπίας $\Delta\sigma=\sigma_L-\sigma_{NL}$
- δεδομένου ότι η δυσκαμψία και ότι , εισαγωγή των τάσεων σ_{NL} και υπολογισμός του ισοδύναμου φορτίου P_{equiv}
- εισαγωγή τάσεων εκτός ισορροπίας Δσ και υπολογισμός δύναμης εκτός ισορροπίας $\Delta P=P_{out\ of\ balance}$
- έλεγχος ότι η ανηγμένη δύναμη εκτός ισορροπίας αποδεκτού ορίου σφάλματος το οποίο αποτελεί κριτήριο σύγκλισης.
- εάν δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση τότε συνεχίζονται οι επαναλήψεις έως ότου συμπληρωθεί το μέγιστο αποδεκτό όριο επαναλήψεων οπότε και η ανάλυση θεωρείται αποκλίνουσα και τροποποιείται η διαδικασία (μικρότερο βήμα, αλλαγή αλγορίθμων επίλυσης, κ.λπ.).



Σχήμα 2.5: Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης.

Στη μη-γραμμική ανάλυση ορίζουμε ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο αριθμό βημάτων (substeps) κατά τα οποία εφαρμόζεται η δύναμη ή η εξαναγκασμένη μετατόπιση.

Αν το μοντέλο συγκλίνει η μεταβολή της δύναμης που εφαρμόζεται θα αυξάνεται μέχρι το μέγιστο που επιτρέπεται. Αν η σύγκλιση είναι προβληματική η μεταβολή της δύναμης μειώνεται στο ελάχιστο που μπορεί.



Σχήμα 2.6: Δημιουργία «substeps» για την βαθμιδωτή εφαρμογή του φορτίου στην κατασκευή.

Πηγή: ANSYS Training Manual.

2.4 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Σύμφωνα με το σχεδιασμό που έγινε από την Hochtief Construction CoMPany, ο τύπος 1 τελικής επένδυσης (ανοιχτού τύπου) θεωρείται ότι τοποθετείται σε βραχόμαζα τύπου RMT116 (ή καλύτερο) με βασικές ιδιότητες, όπως περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.4: Ιδιότητες βραχόμαζας όπου τοποθετείται η τύπου 1 μόνιμη επένδυση.

Ιδιότητες βραχόμαζας	Τιμές για τύπου 1 μόνιμη επένδυση
Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας E_{rm} (MPa)	1000
Συντελεστής οριζόντιων τάσεων K_0	0,60
Λόγος poisson v_{rm}	0,30

Ο τύπου 2 τελικής επένδυσης (κλειστού τύπου) θα εγκατασταθεί σε Βραχόμαζα RMT106 με βασικές ιδιότητες όπως περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.5: Ιδιότητες βραχόμαζας όπου τοποθετείται η τύπου 2 μόνιμη επένδυση.

Ιδιότητες βραχόμαζας	Τιμές για τύπου 2 μόνιμη επένδυση
Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας Erm (MPa)	300
Συντελεστής οριζόντιων τάσεων K_0	0,60
Λόγος poisson v_{rm}	0,25

Σε σχετική μελέτη που εκπονήθηκε από συναδέλφους μηχανικούς, για τον τύπο 2 τελικής επένδυσης, εξετάστηκαν επιπλέον τέσσερεις (4) περιπτώσεις, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Δυο (2) απ αυτές τις παραμετρικές αναλύσεις αναφέρονται στην εγκατάσταση της επένδυσης τύπου 2 σε ομοιογενείς συνθήκες μετώπου της σήραγγας, καθώς οι υπόλοιπες δύο (2) αφορούν την εγκατάσταση του τύπου 2 επένδυσης σε μικτές συνθήκες μετώπου. Οι ιδιότητες της βραχομάζας που λαμβάνονται υπόψη σε αυτές τις παραμετρικές αναλύσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (στην παρούσα εργασία θα παραληφθεί):

Πίνακας 2.6: Ιδιότητες βραχόμαζας (παραμετρικών αναλύσεων) όπου τοποθετείται η τύπου 2 μόνιμη επένδυση.

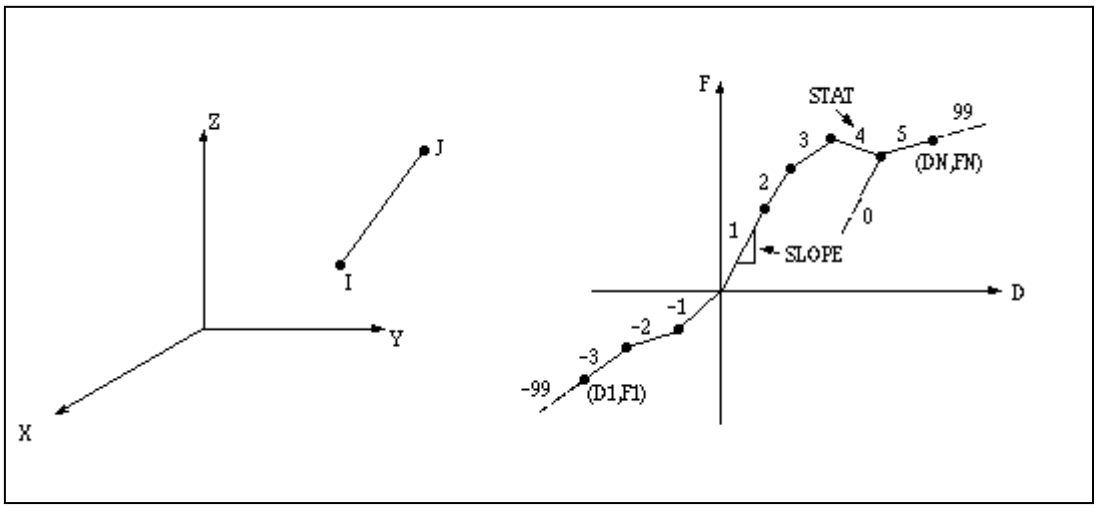
Α/Α Παραμετρικής ανάλυσης	Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας στον θόλο (vault) της σήραγγας E_{rm} (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας στο ανάστροφο τμήμα (invert) της σήραγγας E_{rm} (MPa)	Συντελεστής οριζόντιων τάσεων K_0	Λόγος poisson v_{rm}
I	800 (ομοιογενείς)		0,60	0,25
II	150 (ομοιογενείς)		0,60	0,25
III	1000	300	0,60	0,25
IV	150	1000	0,60	0,25

Τα χαρακτηριστικά αντοχής της βραχομάζας δεν εξετάζονται εδώ, δεδομένου ότι τα φορτία της βραχομάζας στην τελική επένδυση θα πρέπει να ληφθούν, τόσο για τους τύπους επένδυσης 1 και 2, απευθείας από το τελικό σχεδιασμό της Hochtief.

2.4.1 Καταστατική προσομοίωση βραχόμαζας με το λογισμικό ANSYS

Το λογισμικό ANSYS διαθέτει το στοιχείο (element) COMBIN39 (nonlinear spring). Το στοιχείο COMBIN39 είναι στοιχείο μονής κατεύθυνσης με μη γραμμική

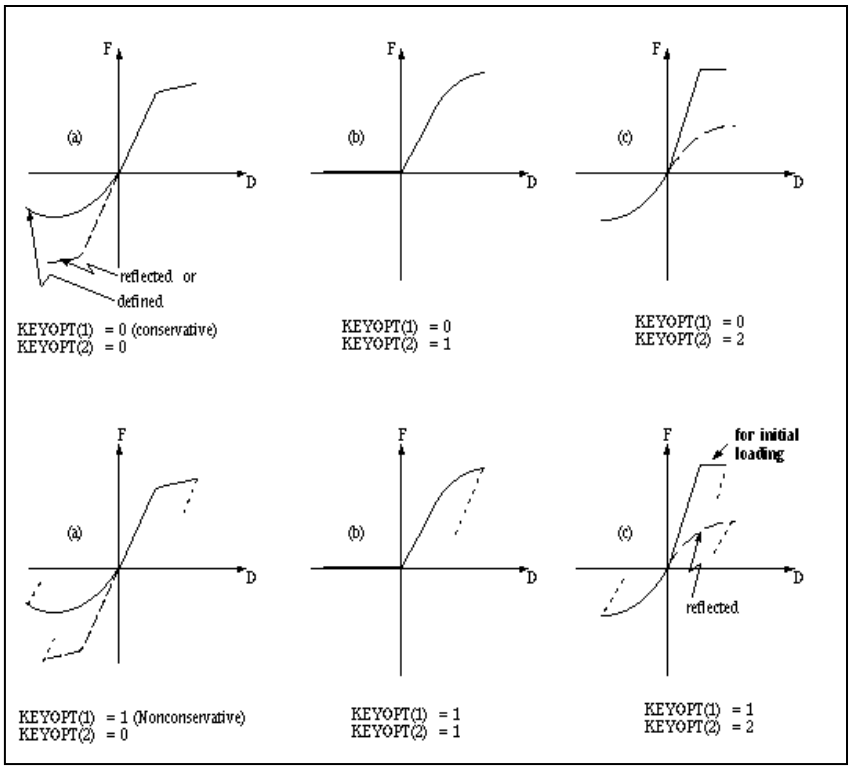
γενικευμένη ικανότητα δύναμης-παραμόρφωσης (F-D) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε ανάλυση. Το στοιχείο έχει μεγάλη ικανότητα μετατόπισης για την οποία μπορεί να υπάρχουν δύο ή τρεις βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο (i,j). Επίσης, δεν έχει μάζα ή θερμοχωρητικότητα.



Εικόνα 2.8: Στοιχείο COMBIN39 (nonlinear spring).

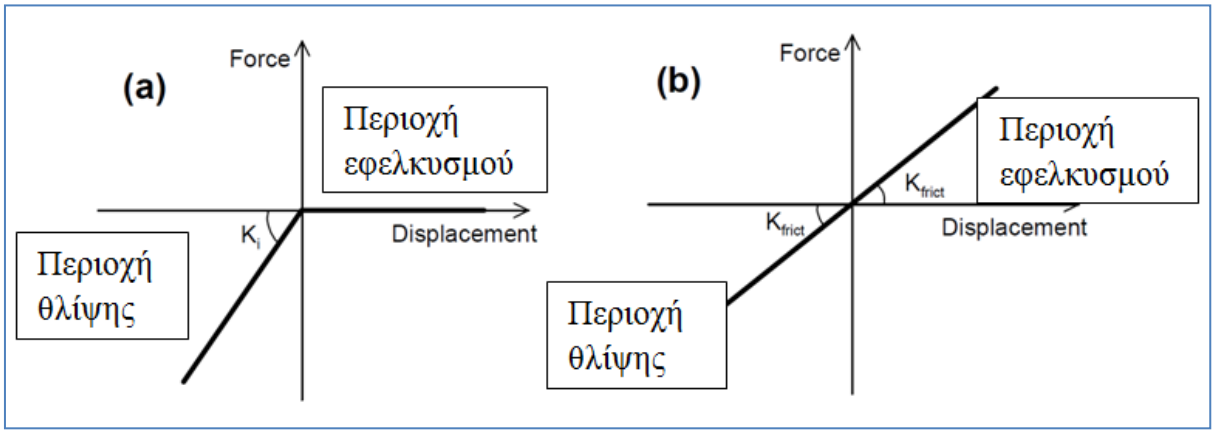
Πίνακας 2.7: Δεδομένα εισόδου στοιχείου COMBIN39.

Element Name	COMBIN39
Nodes	I, J
Degrees of Freedom	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ, PRES, or TEMP. Make 1-D choices with KEYOPT(3). Make limited 2- or 3-D choices with KEYOPT(4).
Real Constants	D1, F1, D2, F2, D3, F3,D4, F4, ...D20, F20
Material Properties	None
Surface Loads	None
Body Loads	None
Special Features	Nonlinear, Stress stiffening, Large displacement
KEYOPT(1)	0 - Unload along same loading curve 1 - Unload along line parallel to slope at origin of loading curve
KEYOPT(2)	0 - Compressive loading follows defined compressive curve (or reflected tensile curve if not defined) 1 - Element offers no resistance to compressive loading 2 - Loading initially follows tensile curve then follows compressive curve after buckling (zero or negative stiffness)
KEYOPT(3)	(KEYOPT(4) overrides KEYOPT(3)) 0, 1 - UX (Displacement along nodal X axes) 2 - UY (Displacement along nodal Y axes) 3 - UZ (Displacement along nodal Z axes) 4 - ROTX (Rotation about nodal X axes) 5 - ROTY (Rotation about nodal Y axes) 6 - ROTZ (Rotation about nodal Z axes) 7 - PRES 8 - TEMP
KEYOPT(4)	0 - Use any KEYOPT(3) option 1 - 3-D longitudinal element (UX, UY and UZ) 2 - 3-D torsional element (ROTX, ROTY and ROTZ) 3 - 2-D longitudinal element. (UX and UY) Element must lie in an X-Y plane
KEYOPT(6)	0 - Basic element printout 1 - Also print force-deflection table for each element (only at first iteration of problem)



Σχήμα 2.7: Περιπτώσεις καμπυλών δύναμης-μετατόπισης (F-D) για το στοιχείο COMBIN39.

Για την περίπτωσή μας, η εισαγωγή των δεδομένων (Real Constants) στο ANSYS για το στοιχείο COMBIN39 θα πρέπει να γίνει με την μορφή καμπυλών (F-D) με αύξουσα σειρά δεδομένων (από τις αρνητικές τιμές προς τις θετικές). Η μορφή των καμπυλών είναι η εξής:



Σχήμα 2.8: Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης (F-D) των ελατηρίων βραχομάζας:

(a) καμπύλα τμήματα για τους δύο τύπους 1 και 2 μόνιμης επένδυσης, (b) η τριβή που παρουσιάζεται στα πέδιλα (Footings) του τύπου 1 μόνιμης επένδυσης. (Η θλίψη είναι αρνητικού πρόσημου).

Η σταθερά K_i των ελατηρίων είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων της βραχόμαζας, καθώς και της γεωμετρίας του κάθε τμήματος της διατομής. Για τα καμπύλα τμήματα των διατομών, οι σταθερές ελατηρίου υπολογίζεται ως εξής:

Εξίσωση 2.5: Υπολογισμός σταθερών ελατηρίων για τα καμπύλα τμήματα των διατομών.

, (KN / τρέχον μέτρο)

Όπου:

E_{rm}= Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας (ανάλογα την περίπτωση τύπου επένδυσης).

v_{rm}= Λόγος poisson (ανάλογα την περίπτωση τύπου επένδυσης).

R= Η μέση ακτίνα των καμπύλων τμημάτων της επένδυσης.

Σημειώνεται εδώ ότι οι τιμές του K που προέρχεται από την παραπάνω σχέση αντιστοιχούν στη δύναμη που εφαρμόζεται επί της επενδύσεως ανά τρέχον μέτρο κατά μήκος της διατομής. Έτσι, η τιμή του K που αποδίδεται σε κάθε ελατήριο θα πρέπει να διαιρεθεί με τον αριθμό των ελατηρίων ανά τρέχον μέτρο.

Ειδικά για την επένδυση τύπου 1, με στόχο τη προσομοίωση αλληλεπίδρασης θεμελίων-βραχόμαζας (Rockmass-Footings), η σταθερά K_i της πλευράς της βάσης των κάτω ελατηρίων υπολογίζεται μέσω της σχέσης [Vesic, A.B. (1961). Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solids].

Εξίσωση 2.6: Υπολογισμός της σταθερά Ki της πλευράς της βάσης των κάτω ελατηρίων.

(KN / τρέχον μέτρο)

Όπου:

E_{rm}= Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας (τύπος 1 μόνιμης επένδυσης).

v_{rm}= Λόγος poisson (τύπος 1 μόνιμης επένδυσης).

B= Το πλάτος του τμήματος της επένδυσης τύπου 1 (θεμελίου) που έρχεται σε επαφή με την βραχόμαζα.

Για την εξίσωση 2.6 μόνιμης επένδυσης που εξετάζουμε εμείς, από τα παραπάνω προκύπτουν οι εξής τιμές σταθερών K_i:

Πίνακας 2.8: Τιμές συνολικών ελατηριακών σταθερών Ki κάθε επιφάνειας.

Τμήμα Διατομής	Ki (KN/m)
Άνω τόξα (R=7,4 m)	103950
Κάτω τόξα (R= 4,8 m)	160256
Εξωτερική πλευρά θεμελίου (B=0,5 m)	1834862
Κάτω πλευρά θεμελίου (B=2,0 m)	458715
Εσωτερική πλευρά θεμελίου (B=0,75 m)	1223241
Διεπιφάνειας (τριβής)	366972

Γνωρίζοντας οπότε τη συνολική σταθερά για μία επιφάνεια, μπορούμε να διαιρέσουμε την σταθερά αυτή με τον αριθμό των κόμβων (nodes) που ανήκουν στην επιφάνεια αυτή ώστε να προκύψει η σταθερά K για το κάθε ένα ελατήριο (αφού σε κάθε κόμβο θα τοποθετηθεί ένα ελατήριο).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{ο}: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την προσομοίωση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός των εργασιών σε διακεκριμένα στάδια:

1ο. Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

2ο. Στάδιο → Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων.

3ο. Στάδιο → Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών.

4ο. Στάδιο → Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό – μη γραμμικό – μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

5ο. Στάδιο → Ανάγνωση και γραφική αναπαράστασή των αποτελεσμάτων.

Τα παραπάνω στάδια, υπάρχει δυνατότητα και ίσως κάποιες φορές αναγκαιότητα, να μην πραγματοποιηθούν όλα στο ίδιο λογισμικό.

3.2 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS

Το λογισμικό ANSYS δίνει στο χρήστη την δυνατότητα υλοποίησης όλων των παραπάνω σταδίων, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι κάποια από τα προαναφερθέντα στάδια δεν μπορούν να υλοποιηθούν σε άλλα περιβάλλοντα και τα αποτελέσματά τους να εισαχθούν, στη συνέχεια, στο ANSYS.

Τα στάδια μπορούν να υλοποιηθούν με πολλές μεθοδολογίες εντός του περιβάλλοντος του ANSYS. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε ορισμένες επιλογές ώστε να γίνει κατανοητή η πολύπλευρη αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων.

1ο. Στάδιο: Κατασκευή γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας μέσα στο περιβάλλον του ANSYS μπορεί να γίνει, γενικά, με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να δημιουργηθούν διαδοχικά σημεία

(keypoints), γραμμές (lines), επιφάνειες (areas) και τέλος όγκοι (volumes). Ο δεύτερος τρόπος είναι να κατασκευαστούν όγκοι ή επιφάνειες είτε από σημεία, χωρίς τη δημιουργία γραμμών, είτε απευθείας ορίζοντας τις διαστάσεις τους. Το τελευταίο μπορεί να φανεί πολύ εύχρηστο σε περιπτώσεις που θέλουμε να κατασκευάσουμε γνωστά γεωμετρικά σχήματα, όπως κύκλους, κυλίνδρους, ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α. Στην περίπτωση που η γεωμετρία δημιουργηθεί σε άλλο σχεδιαστικό περιβάλλον η εισαγωγή της ANSYS γίνεται με τη μορφή αρχείου *.igs. Τέλος η κατασκευή της γεωμετρίας μπορεί να γίνει στον προεπεξεργαστή κάποιου άλλου προγράμματος που δίνει αρχείο εισόδου για περιβάλλον Ansys.

2ο. Στάδιο: Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι μονοσήμαντα ορισμένες αλλά θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τις μονάδες. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι όλες οι μονάδες είναι στο S.I. εκτός αν τις ορίσουμε εμείς διαφορετικά. Δεν συνιστάται να γίνει αλλαγή μονάδων γιατί υπάρχει σημαντικός κίνδυνος λάθους. Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα των υλικών αλλά και από το είδος της επίλυσης που μας ενδιαφέρει να κάνουμε. Η επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από την επίλυση που θα κάνουμε, αυτό δε σημαίνει ότι δεν έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής τους στη συνέχεια. Το σημαντικό είναι να έχουμε καταλήξει στη διάστασή τους και στο είδος της καταπόνησης.

3ο. Στάδιο: Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών

Αφού έχει γίνει η επιλογή του στοιχείου μένει να γίνει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Η πιο απλή δυνατότητα είναι να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές είναι αυτόματη δημιουργία πλέγματος (δεν προτείνεται στις περισσότερες περιπτώσεις), ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές ή ορισμός μεγέθους στοιχείων (μέγιστο μέγεθος πλευράς ή ακμής) καθώς και η επιλογή του Smart Size η οποία κάνει προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία, δηλαδή μικραίνει τα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και το αραιώνει στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερα ανάγκη για λεπτή διαμέριση. Αφού καταλήξουμε στις παραπάνω επιλογές ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος Γενικά οι δυνατότητες του

προγράμματος είναι πάρα πολλές και μπορούν να δώσουν πάρα πολλά και πολύ διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα ανάλογα με τις παραμέτρους που θα ορίσουμε. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί το πρόγραμμα να γνωρίζει τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε, την ακρίβεια ή και το χρόνο επίλυσης που επιθυμούμε, άρα πρέπει να επέμβουμε στις προεπιλογές που έχει.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα να μην οριστούν γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου στο περιβάλλον του ANSYS και στη συνέχεια να γίνει η διακριτοποίηση, αλλά να κατασκευαστούν απευθείας κόμβοι και πεπερασμένα στοιχεία ή να εισαχθούν αφού έχουν υπολογιστεί με κάποιο άλλο προεπεξεργαστή.

Η επιβολή των οριακών συνθηκών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στα σημεία όπου μπορούν αυτές να επιβληθούν. Μπορούν να επιβληθούν είτε σε γεωμετρικά στοιχεία (σημεία, γραμμές, επιφάνειες) είτε σε στοιχεία του πλέγματος.(κόμβους, στοιχεία). Όταν επιβάλλονται σε γεωμετρικά στοιχεία γίνεται αυτόματα η μεταφορά τους σε στοιχεία του πλέγματος πριν από την επίλυση.

4ο. Στάδιο: Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό – μη γραμμικό – μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση

Η επιλογή του τρόπου επίλυσης έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Συνήθως μια γραμμική στατική ανάλυση μικρών μετατοπίσεων καλύπτει τις ανάγκες μας.

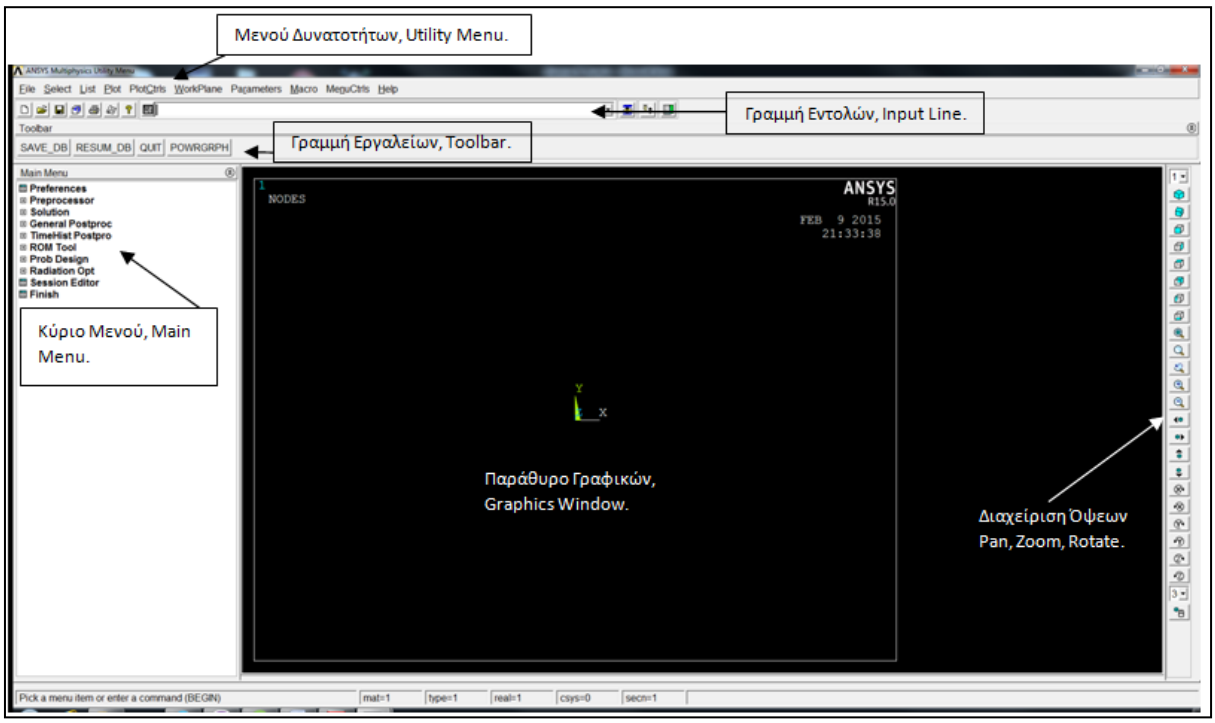
Παρόλα αυτά είναι δυνατό θέλουμε να διερευνήσουμε κάποιο μεταβατικό φαινόμενο ή τα υλικά που χρησιμοποιούνται να έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Ακόμα συμβαίνει συχνά όταν αντιμετωπίζουμε προβλήματα λυγισμού και πτύχωσης τα οποία είναι μη γραμμικά. Όσον αφορά την επίλυση προσφέρονται πολλές δυνατότητες οι οποίες έχουν να κάνουν με διαφορετικούς αλγόριθμους επίλυσης, που δεν θα δώσουν διαφορετικό αποτέλεσμα, αλλά θα έχουν διαφορετικό χρόνο επίλυσης. Υπάρχουν επιλύτες που χρησιμοποιούν περισσότερο τον σκληρό δίσκο για ενδιάμεσα αρχεία ή την φυσική μνήμη. Είναι προφανές ότι αφού η ταχύτητα της μνήμης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σκληρού δίσκου αυτή η μέθοδος είναι και πιο γρήγορη. Υπάρχει όμως περίπτωση να μην υπάρχει διαθέσιμη η απαιτούμενη για το πρόβλημα φυσική μνήμη ή για ορισμένες ειδικές περιπτώσεις να μην είναι όλοι οι επιλύτες ικανοί να αντιμετωπίσουν τη φύση του προβλήματος.

5ο. Στάδιο: Ανάγνωση και γραφική αναπαράστασή των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα μετά από την επίλυση καταγράφονται σε ένα αρχείο (*.rst). Η ανάγνωσή τους είναι ένα ζήτημα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κάποιος τα αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα αποτελέσματα στους κόμβους (Nodal Solution) και τα αποτελέσματα στα στοιχεία (Element Solution).Στους κόμβους γίνεται δίνεται η τιμή του μέσου όρου που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία είναι κοινός και έχει συνεχή τιμή ενώ στα πεπερασμένα στοιχεία έχουμε μία τιμή ανά στοιχείο (στα ισοπαραμετρικά μπορούμε να επιλέξουμε επιπλέον αποτελέσματα στα σημεία Gauss). Ακόμα, υπάρχει και η επιλογή του Element Table μέσω του οποίου μπορούμε να κάνουμε ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων βγάζοντας μέσους όρους (Element Table Average). Η τελευταία επιλογή προτείνεται σε περιπτώσεις όπου έχουμε συγκεντρωμένα φορτία και μπορεί να δημιουργηθούν τοπικά μέγιστα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

3.2.1 Εισαγωγή στο παραθυρικό περιβάλλον του ANSYS

Μετά την εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται το παραθυρικό περιβάλλον του ANSYS, η μορφή του οποίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.1: Περιβάλλον ANSYS APDL.

Το πρόγραμμα του ANSYS αποτελείται από δύο παράθυρα: α) Βασικό και β) Αποτελεσμάτων (Output window). Στο βασικό παράθυρο, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, υπάρχουν 5 περιοχές.

Utility Menu (Μενού Δυνατοτήτων): Περιέχει τις λειτουργίες που υπάρχουν στο ANSYS, όπως διαχείρισης αρχείων, επιλογής οντοτήτων, διαχείρισης γραφικών και παραμέτρων.

Input Line (Γραμμή Εντολών): Επιτρέπει την απευθείας πληκτρολόγηση εντολών. Επίσης περιλαμβάνει συστάσεις για τη σύνταξη των εντολών.

Toolbar (Γραμμή Εργαλείων): Η γραμμή εργαλείων περιέχει κουμπιά με τις πιο συνηθισμένες εντολές του ANSYS

Main Menu (Κύριο Μενού): Το κύριο μενού περιέχει τις κύριες εντολές του ANSYS, που χωρίζονται σε τέσσερα βασικά μέρη. Στον προεπεξεργαστή (preprocessor), στην επίλυση (solution), στον μετεπεξεργαστή (general postprocessor) και τον βελτιστοποιητή σχεδίου (design optimizer). Οι περισσότερες επιλογές για τη δημιουργία ενός μοντέλου γίνονται από αυτό το μενού

Graphics Window (Παράθυρο Γραφικών): Εδώ εμφανίζονται όλα τα γραφικά και γίνονται όλες οι επιλογές που αφορούν γεωμετρικές οντότητες.

Στο **Παράθυρο Αποτελεσμάτων** (Output Window) εμφανίζονται στοιχεία για τις εντολές που εκτελούνται στο βασικό παράθυρο και βρίσκεται συνήθως πίσω από το βασικό παράθυρο.

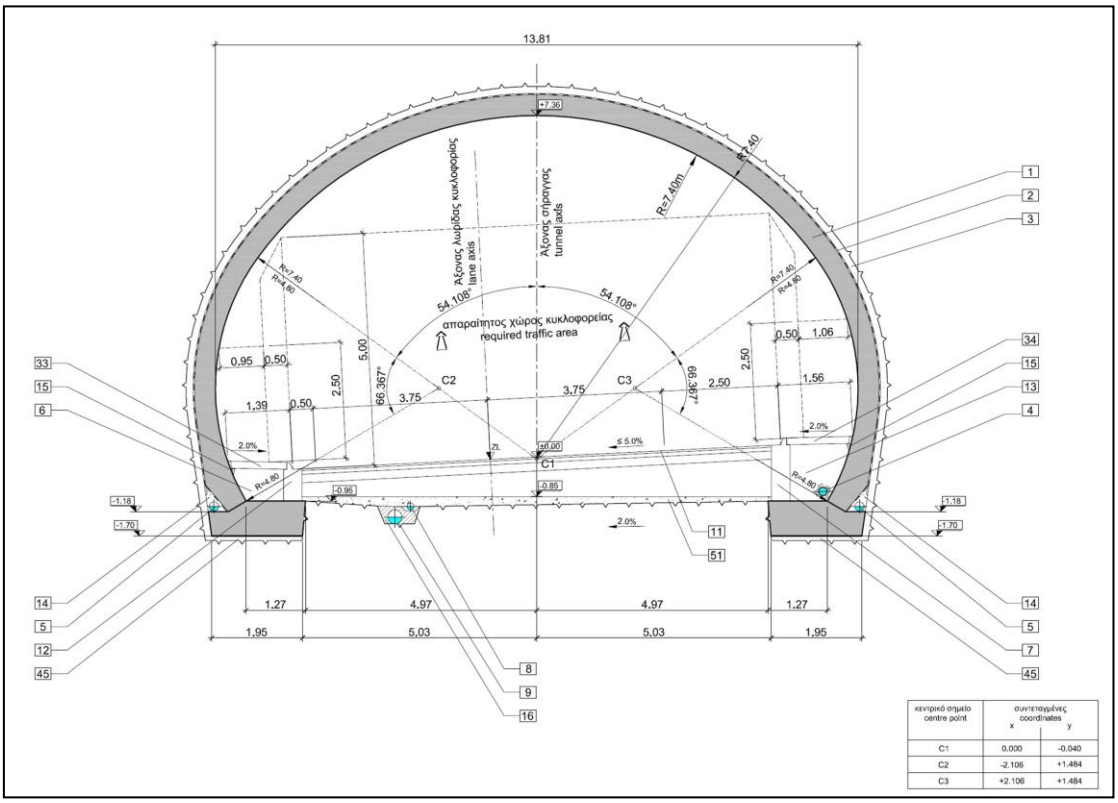
Εικόνα 3.2: Παράθυρο αποτελεσμάτων (Output Window) ANSYS APDL.

Εικόνα 3.3: Οι εντολές του προεπεξεργαστή ANSYS APDL (preprocessor).

3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ANSYS APDL

Τελικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση διατομής μόνιμης επένδυσης, με σκοπό επεξεργασία της και εξαγωγή συμπερασμάτων. Έτσι, θα κάνουμε την προσομοίωση της διατομής -τύπου 1- μόνιμης επένδυσης (ανοιχτού τύπου). Την πορεία της προσομοίωσης θα την παρουσιάσουμε σε βήματα (συνοδευόμενα με

αντίστοιχες εικόνες) ώστε μελλοντικά αυτό να διευκολύνει συναδέλφους μηχανικούς, σε διάφορες εφαρμογές με το λογισμικό ANSYS APDL.



Εικόνα 3.4: Διατομή τελικής επένδυσης που πρόκειται να προσομοιωθεί.

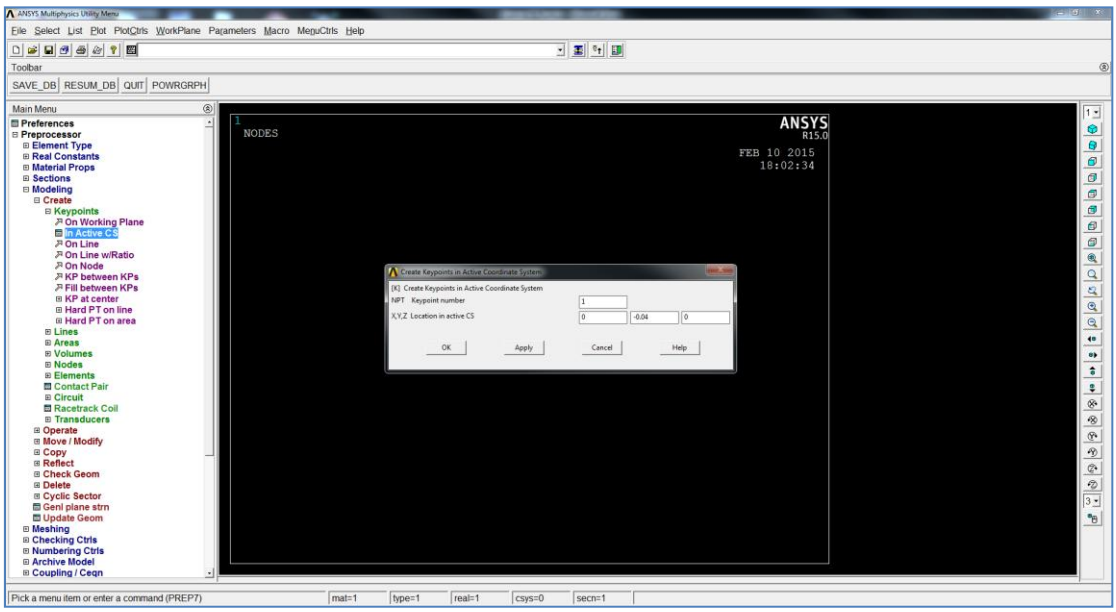
3.3.1 1° Στάδιο: Εισαγωγή σχήματος διατομής με την αλληλουχία Keypoints-Lines-Areas-Volume.

Κατά το 1° Στάδιο: Εισαγωγή σχήματος διατομής με την αλληλουχία Keypoints-Lines-Areas-Volume, υλοποιείται ο παρακάτω πίνακας 3.1:

Πίνακας 3.1: Εισαγωγή σχήματος διατομής με την αλληλουχία Keypoints-Lines-Areas-Volume.

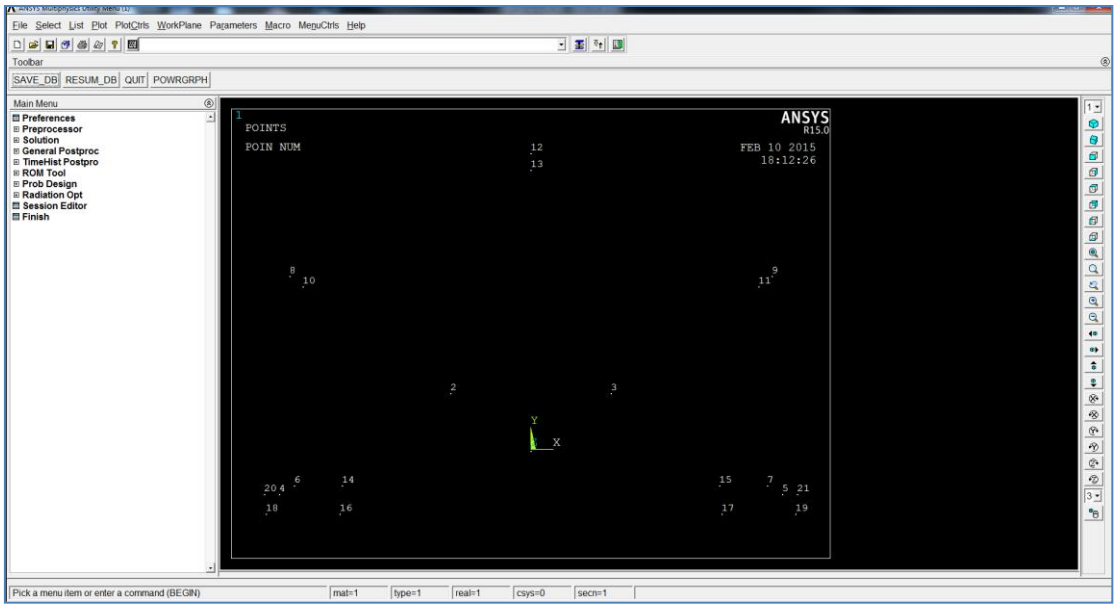
Keypoint	x	y	z
1	0,00	-0,04	0,00
2	-2,11	1,48	0,00
3	2,11	1,48	0,00
4	-6,63	-1,18	0,00
5	6,63	-1,18	0,00
6	-6,24	-0,95	0,00
7	6,24	-0,95	0,00
8	-6,36	4,56	0,00

9	6,36	4,56	0,00
10	-6,00	4,30	0,00
11	6,00	4,30	0,00
12	0,00	7,81	0,00
13	0,00	7,36	0,00
14	-4,97	-0,95	0,00
15	4,97	-0,95	0,00
16	-5,03	-1,70	0,00
17	5,03	-1,70	0,00
18	-6,98	-1,70	0,00
19	6,98	-1,70	0,00
20	-7,02	-1,18	0,00
21	7,02	-1,18	0,00

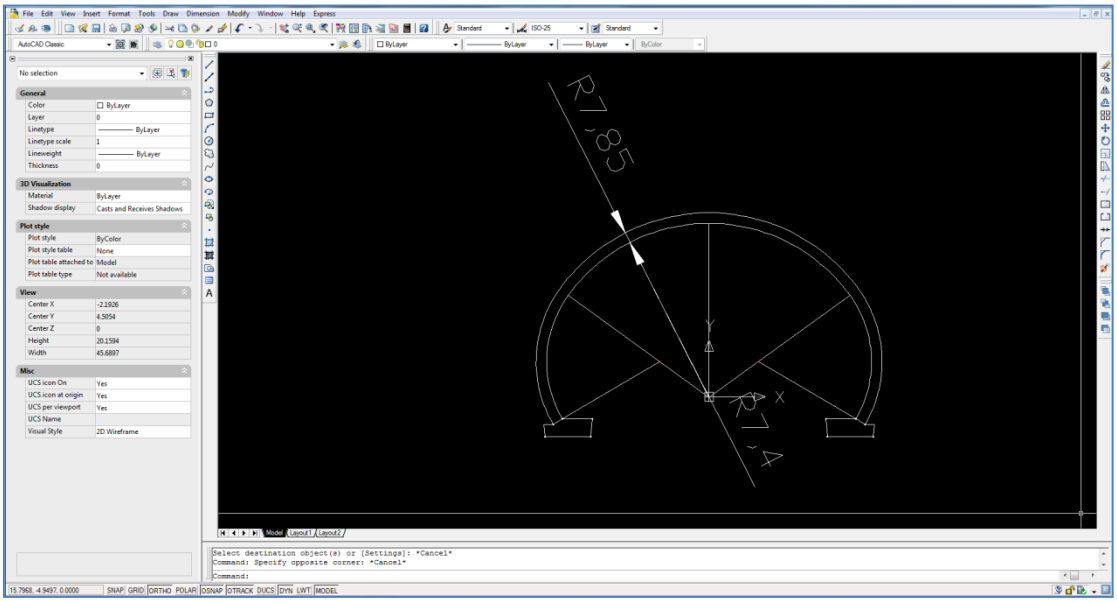


Εικόνα 3.5: Εισαγωγή Keypoint 1.

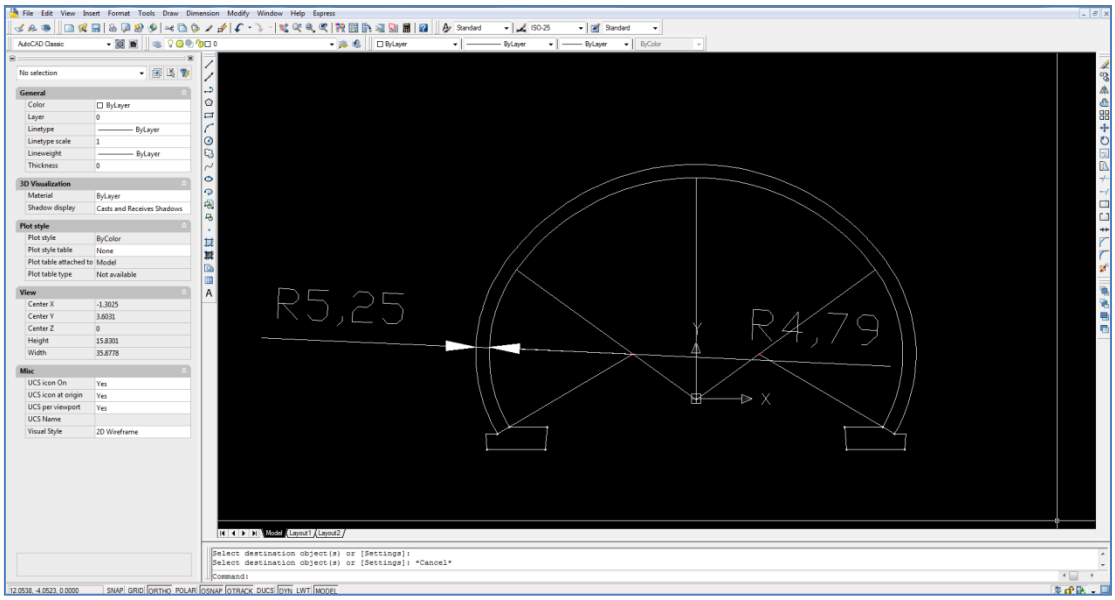
Όμοια, αφού εισάγουμε και τα υπόλοιπα Keypoints, λαμβάνουμε την εξής εικόνα 3.6:



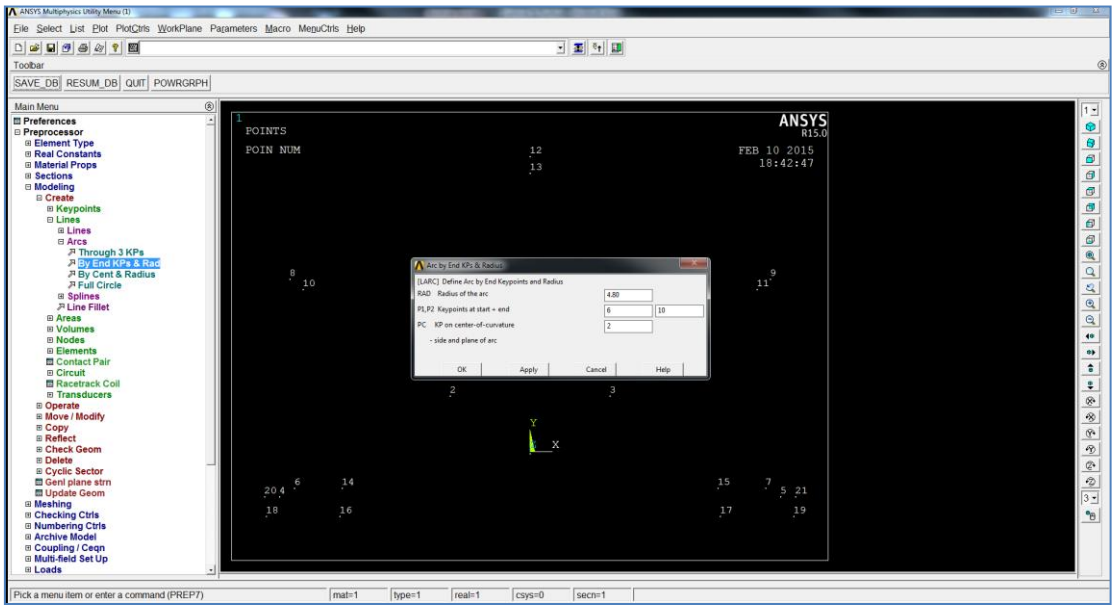
Εικόνα 3.6: Σύνολο Keypoints μετά την εισαγωγή τους.



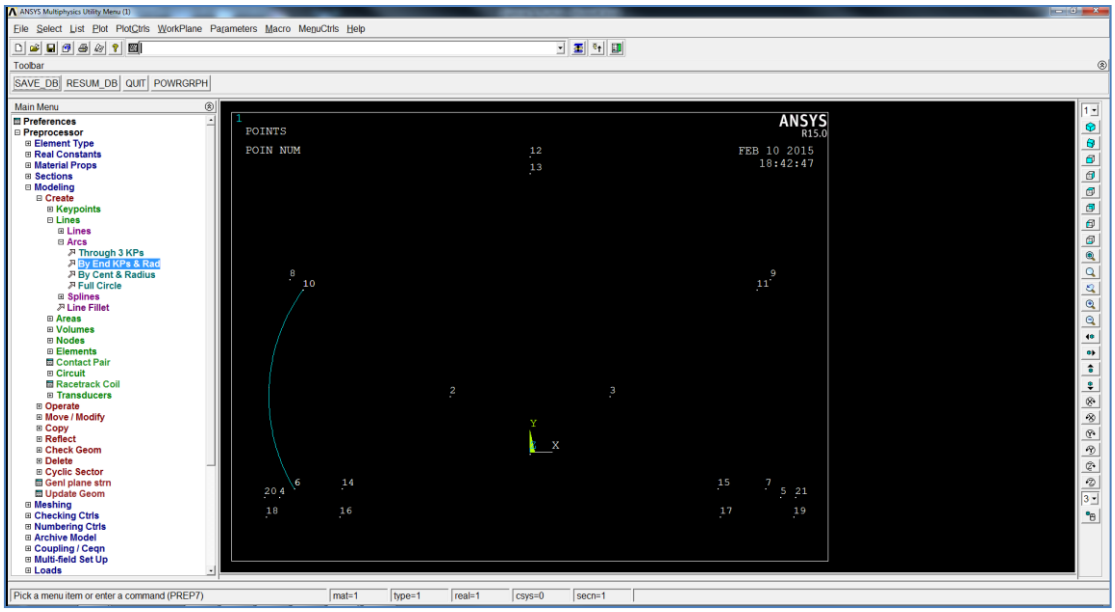
Εικόνα 3.7: Ακτίνες καμπύλων τμημάτων διατομής (άνω τόξα).



Εικόνα 3.8: Ακτίνες καμπύλων τμημάτων διατομής (κάτω τόξα).

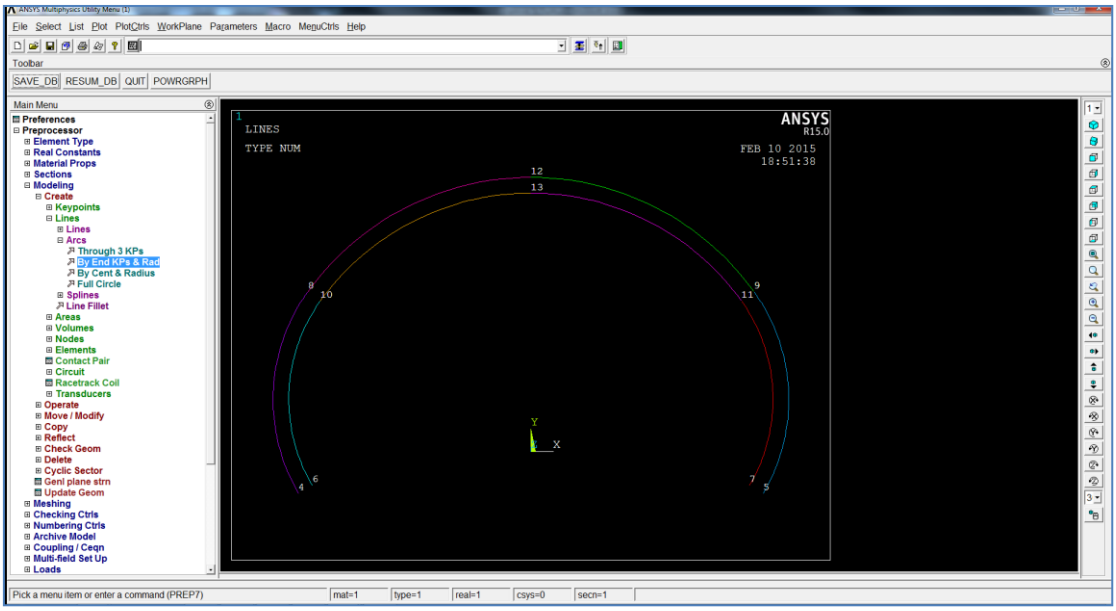


Εικόνα 3.9: Εισαγωγή τόξων διατομής (ορισμός 3 σημείων και ακτίνας).



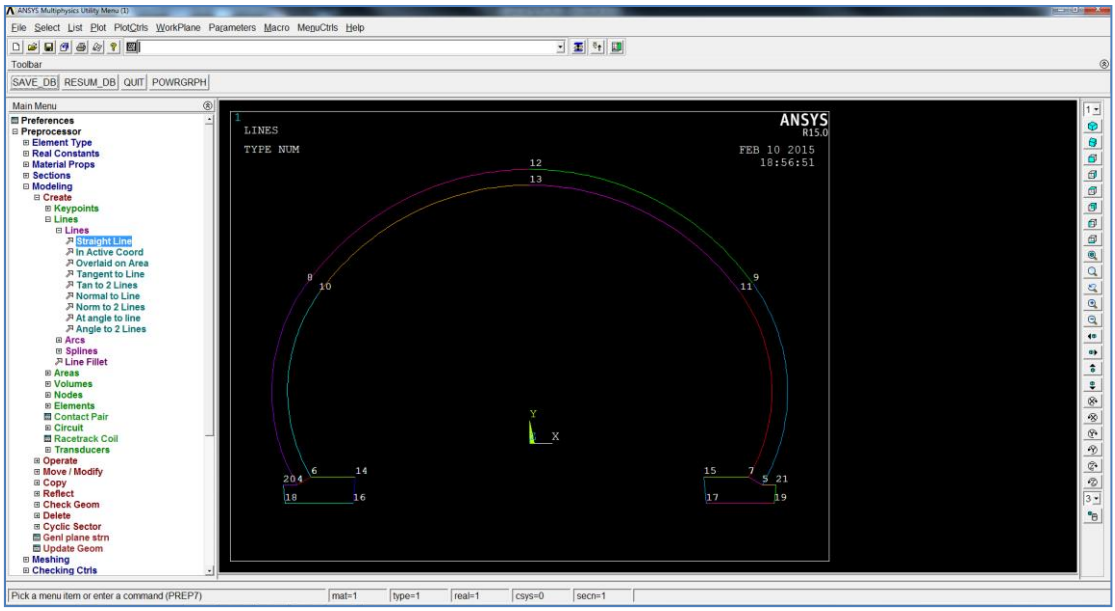
Εικόνα 3.10: Αποτέλεσμα εισαγωγής τόξου ακτίνας R=4,8m με κέντρο το σημείο 2.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και για τα υπόλοιπα τμήματα, προκύπτει η εξής εικόνα 3.11:



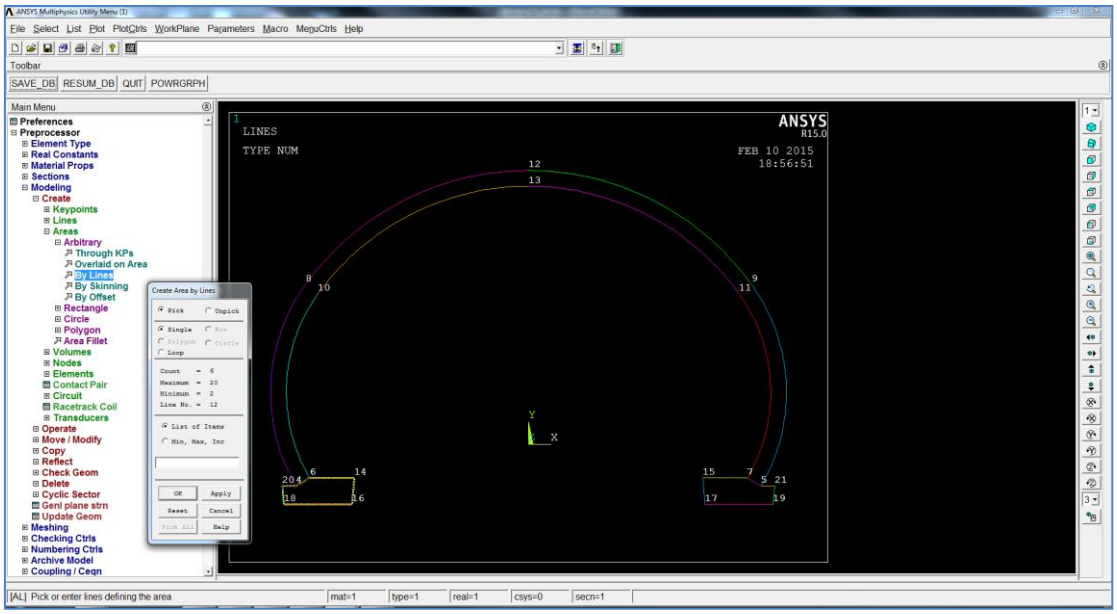
Εικόνα 3.11: Καμπύλα τμήματα σχήματος διατομής.

Για τον σχεδιασμό των υπόλοιπων γραμμικών τμημάτων του σχήματος-περιγράμματος της διατομής χρησιμοποιούμε την εντολή Straight Line από το μενού και σχεδιάζουμε γραμμές μεταξύ συγκεκριμένων Keypoints.

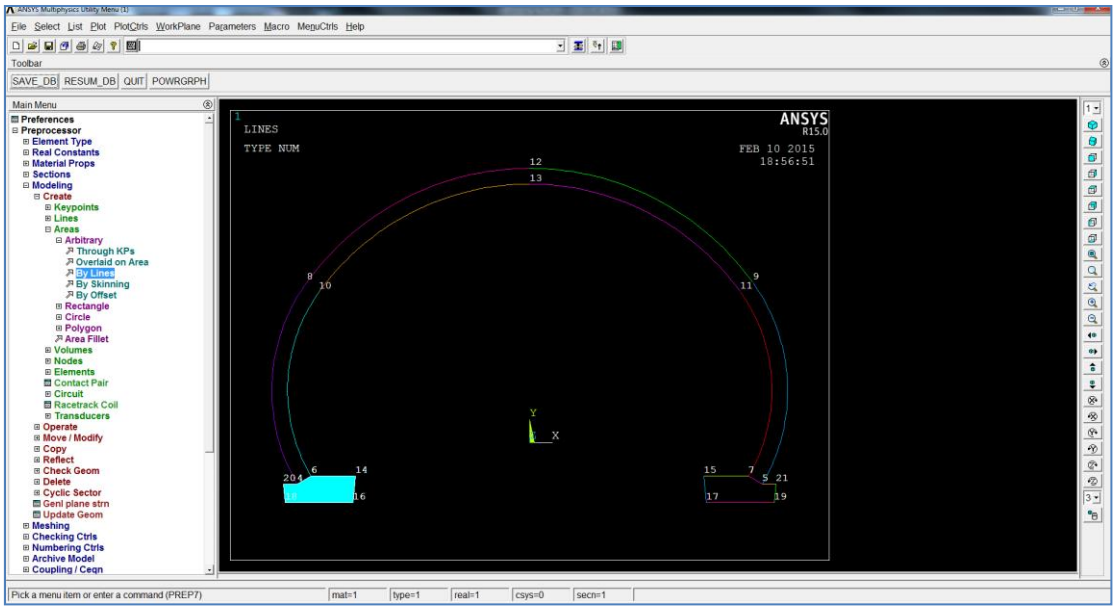


Εικόνα 3.12: Τελικό σχήμα-περίγραμμα διατομής.

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός επιφανειών (Areas) με βάση το γραμμικό σχήμα που ορίσαμε.

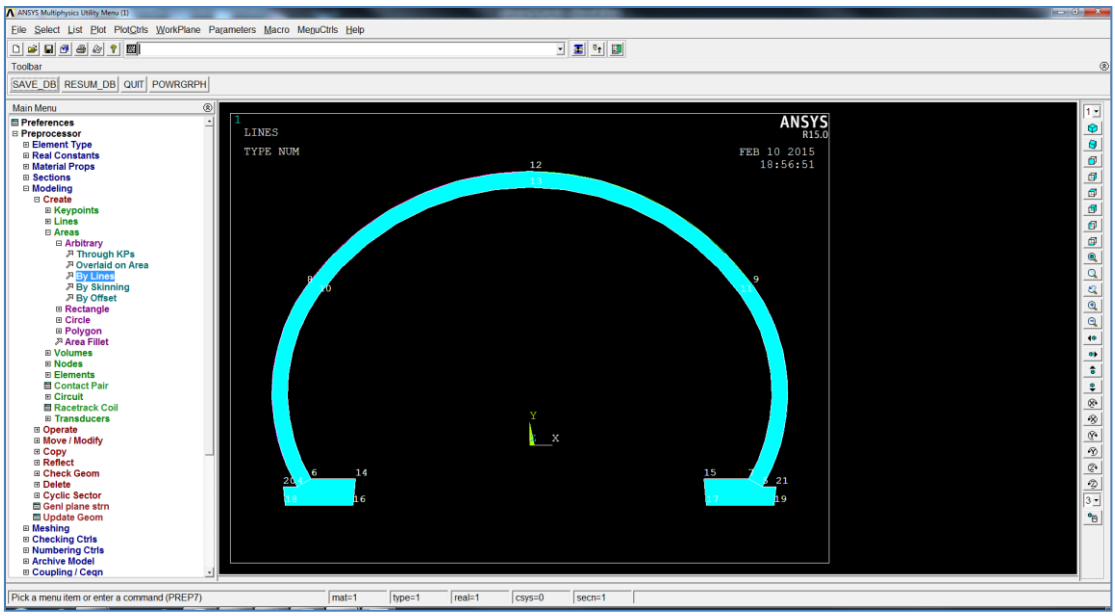


Εικόνα 3.13: Δημιουργία επιφανειών επιλέγοντας γραμμές του σχήματος.



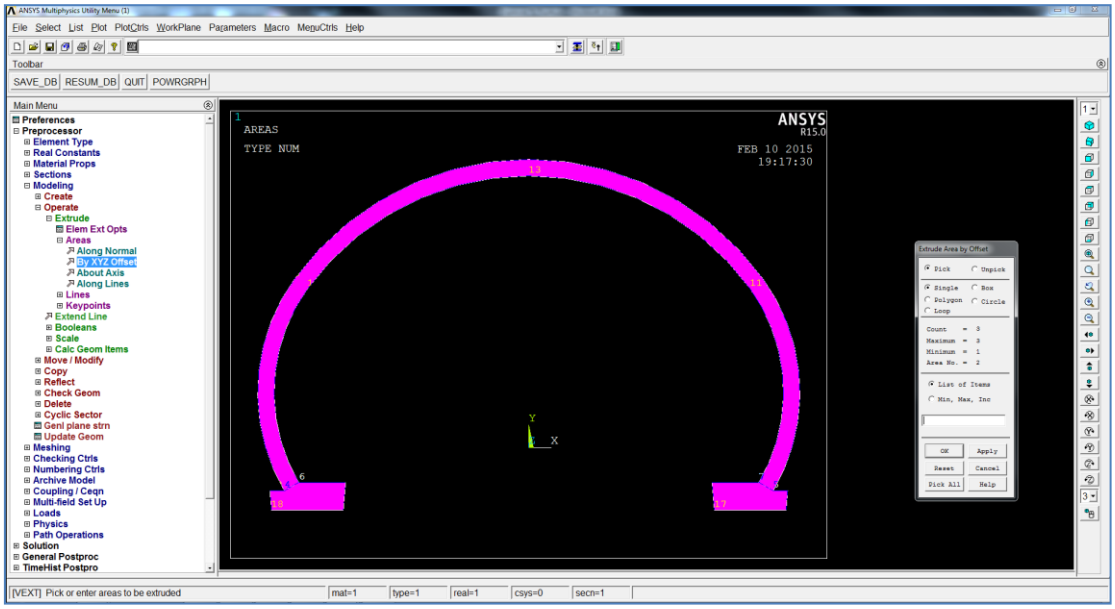
Εικόνα 3.14: Παραγωγή επιφάνειας στο αριστερό πέδιλο της διατομής επένδυσης.

Όμοια, ακολουθώντας την ίδια εντολή και για τις υπόλοιπες γραμμές, παράγουμε το σχήμα με τις επιφάνειες της εικόνας 3.15:

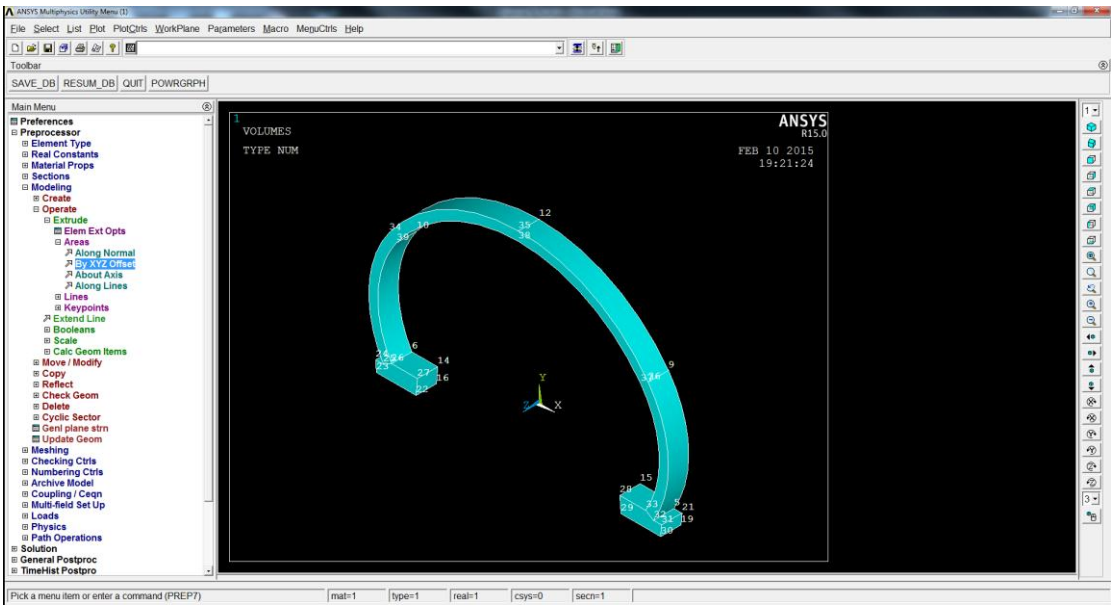


Εικόνα 3.15: Παραγωγή τελικών επιφανειών διατομής.

Για να ολοκληρώσουμε το 1° στάδιο θα πρέπει μέσα από τις επιφάνειες (Areas) που δημιουργήσαμε να κατασκευάσουμε τον όγκο (Volume) της διατομής μας. Αυτό, θα το επιτύχουμε χρησιμοποιώντας της εντολή Extrude Areas by XYZ Offset ορίζοντας μόνο την απόσταση 1 m κατά τον Z άξονα (Z=1). Αφού πρώτα επιλέξουμε όλες τις επιφάνειες (Areas).



Εικόνα 3.16: Επιλογή επιφανειών απ τις οποίες πρόκειται να δημιουργηθεί ο όγκος (Volume).

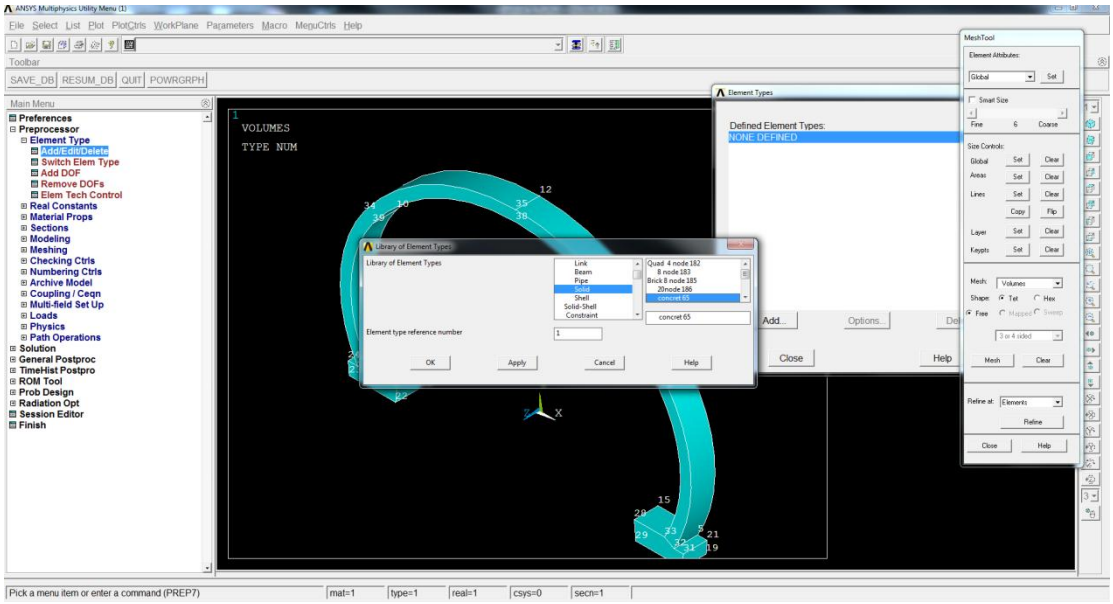


Εικόνα 3.17: Κατασκευή τελικού όγκου (Volume) πάχους (Z=1,00 m).

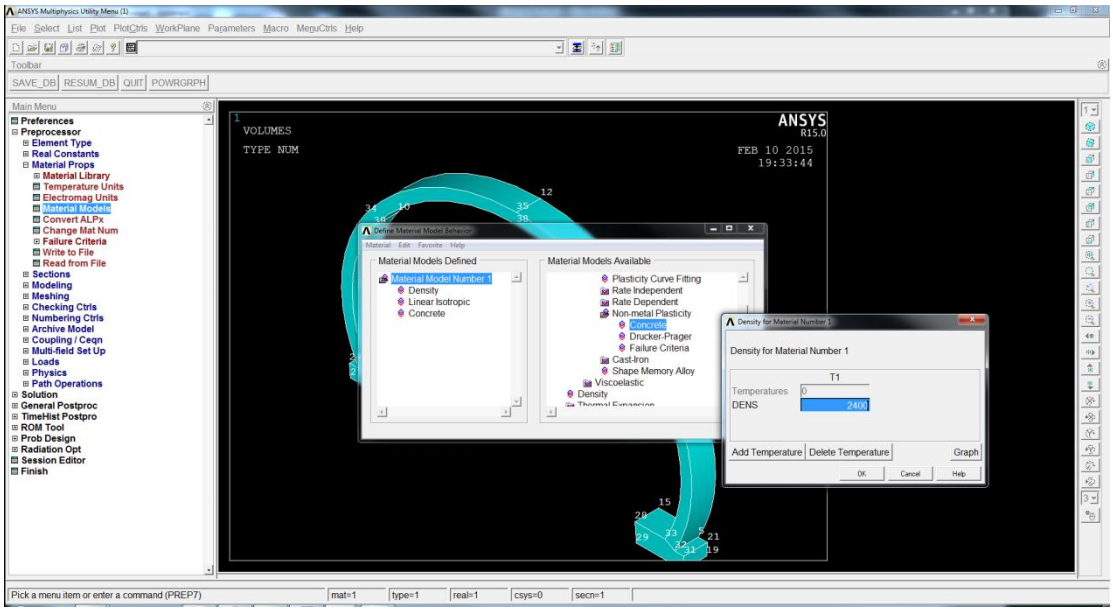
3.3.2 2° Στάδιο: Ορισμός δεδομένων στοιχείων (Element Type) και χαρακτηριστικών υλικών (Material Props).

Κατά το στάδιο αυτό θα ορισθούν τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στο παρόν μοντέλο. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιήσουμε το στοιχείο (element) SOLID 65 αφού ολόκληρος ο όγκος της επένδυσης

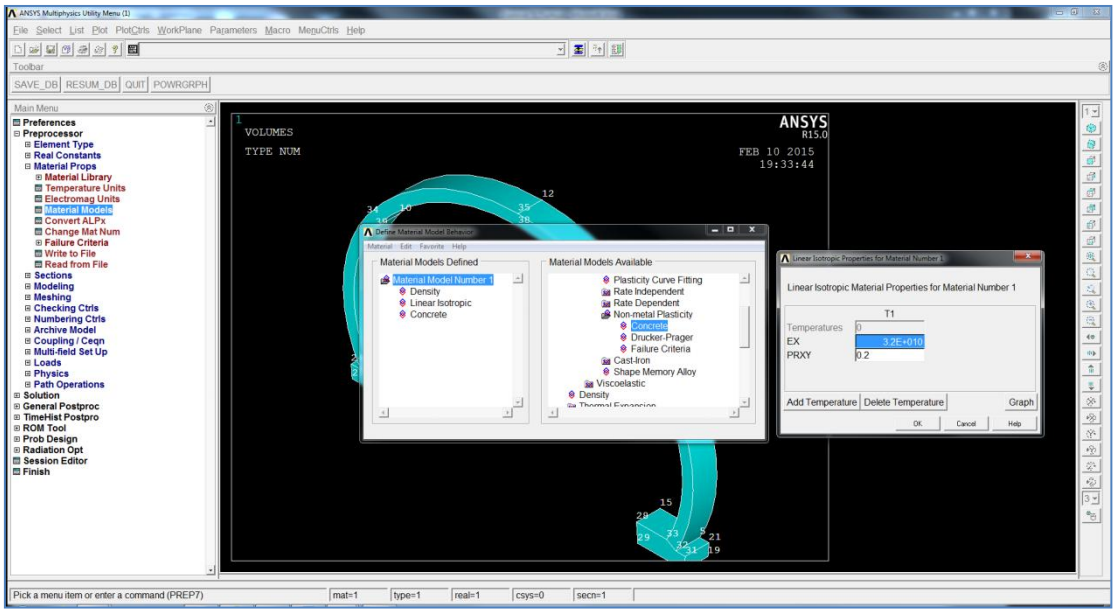
αποτελείται από άοπλο σκυρόδεμα (Unreinforced Concrete). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δώσουμε στις μονάδες εισαγωγής καθώς όλες θα είναι στο σύστημα S.I.



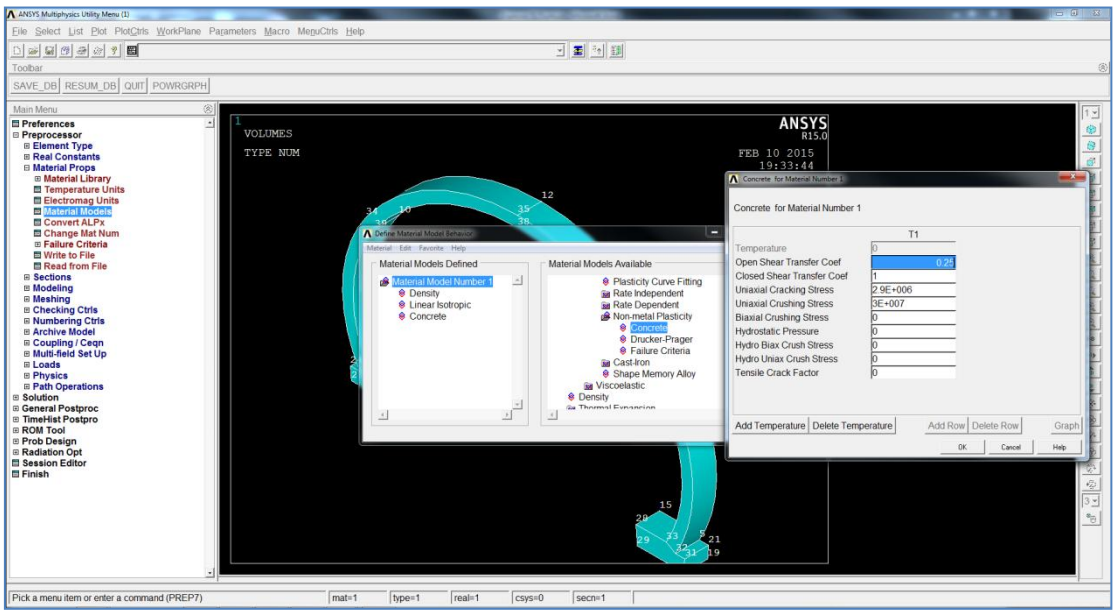
Εικόνα 3.18: Επιλογή στοιχείου (Element SOLID65) για την επένδυση από σκυρόδεμα.



Εικόνα 3.19: Εισαγωγή πυκνότητας (Kg/m^3) άοπλου σκυροδέματος.



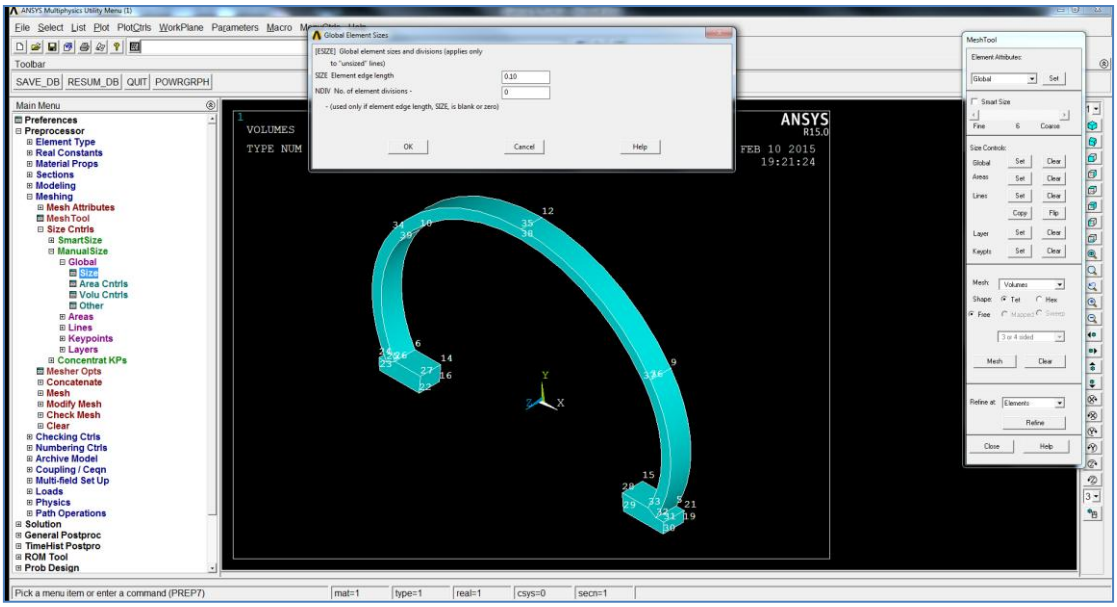
Εικόνα 3.20: Εισαγωγή σταθερών E (Pa), ν άοπλου σκυροδέματος κατηγορίας C30/37.



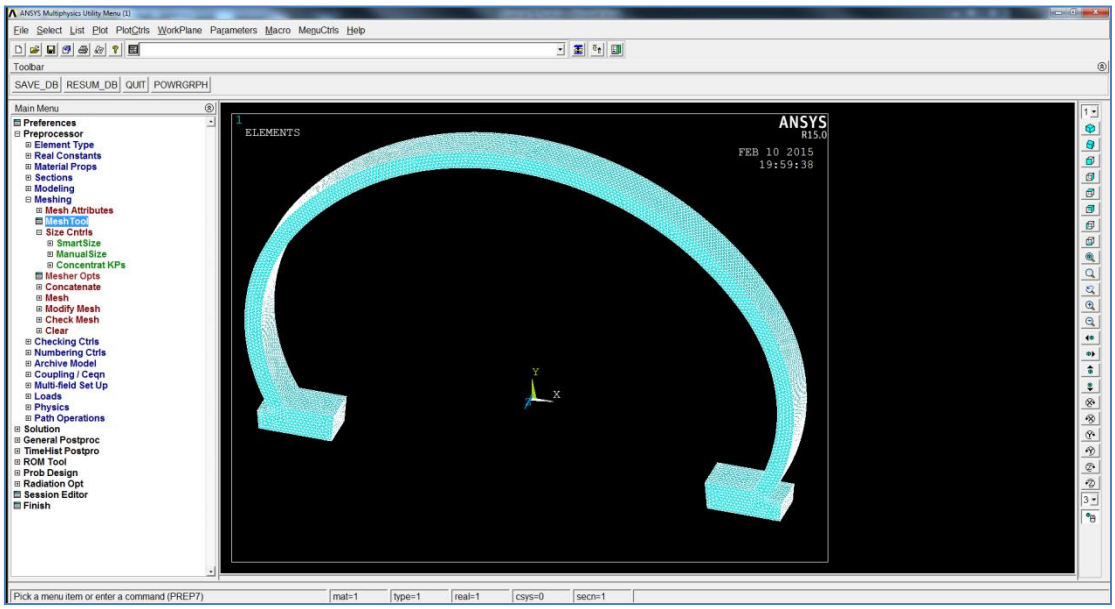
Εικόνα 3.21: Εισαγωγή δεδομένων αντοχής (Pa) σε θλίψη, εφελκυσμό για το άοπλο σκυρόδεμα C30/37.

3.3.3 3° Στάδιο: Διακριτοποίηση όγκου (Volume) με την δημιουργία κανάβου (mesh).

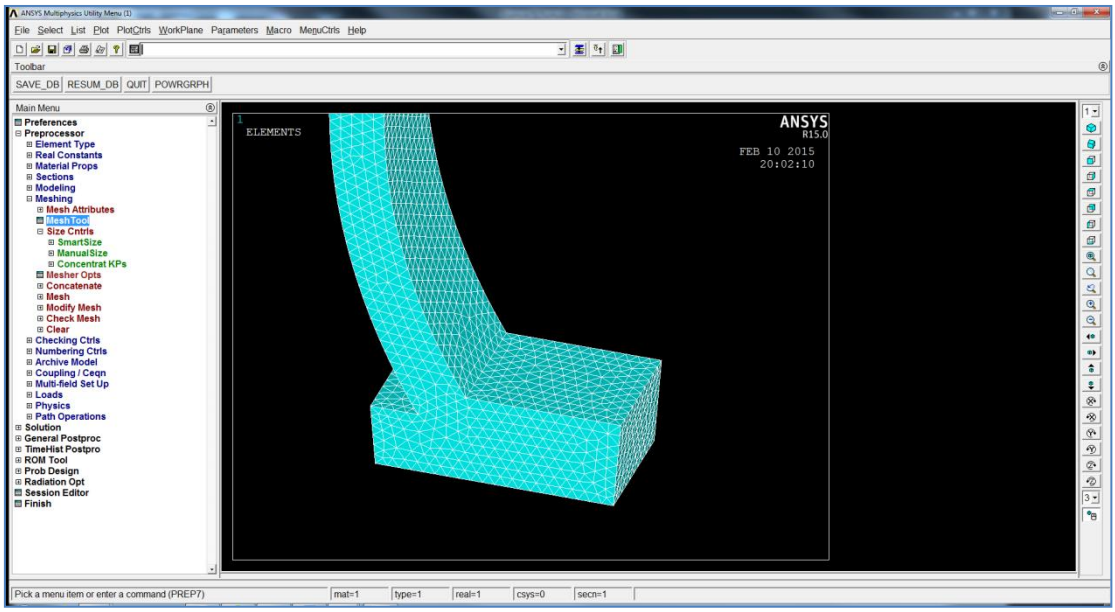
Κατά το 3° στάδιο κάνουμε την διακριτοποίηση του όγκου που δημιουργήσαμε πριν μέσω κανάβου (meshing). Το μέγεθος (Size) του κανάβου θα ορισθεί από τον χρήστη (Manual Size) και θα είναι 0,10 m.



Εικόνα 3.22: Ορισμός μεγέθους κανάβου διακριτοποίησης (mesh) όγκου.



Εικόνα 3.23: Αποτέλεσμα διακριτοποίησης (mesh) όγκου επένδυσης.



Εικόνα 3.24: Λεπτομέρεια διακριτοποίησης όγκου επένδυσης (αριστερό πέδιλο).

3.3.4 4° Στάδιο: Προσομοίωση περιβάλλουσας βραχομάζας μέσω ελατηρίων.

Κατά το στάδιο αυτό θα δημιουργήσουμε στοιχεία (elements) που προσομοιώνουν την βραχόμαζα γύρω από την επένδυση. Αποτελεί ένα σχετικά πολύπλοκο στάδιο με αλληλουχία ενεργειών.

Για την δημιουργία των ελατηρίων θα χρησιμοποιήσουμε το στοιχείο (element) COMBIN39 όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το στοιχείο αυτό απαιτεί δύο (2) άκρα-κόμβους (i, j). Ο ένας κόμβος του ελατηρίου θα ανήκει στην επένδυση από σκυρόδεμα και ο άλλος κόμβος θα ανήκει στο περιβάλλον γεωυλικό. Ουσιαστικά, τα ελατήρια αυτά προσομοιώνουν την συνάφεια μεταξύ επένδυσης και βράχου.

Για να δημιουργήσουμε τους κόμβους επί του περιβάλλοντος γεωυλικού, θα πρέπει να αντιγράψουμε τους αντίστοιχους κόμβους της εξωτερικής παρειάς της επένδυσης (που έρχεται σε επαφή με το βράχο). Για να συμβεί αυτό θα επιλέγουμε τους κόμβους που ανήκουν σε κάθε εξωτερική επιφάνεια της επένδυσης και θα τους κάνουμε αντιγραφή (Copy) κατά 1 m ώστε να δημιουργηθούν οι αντίστοιχοι «απέναντι» κόμβοι.

Πρώτη ενέργεια αυτού του σταδίου αποτελεί η αρίθμηση των επιφανειών που έχει κάνει το λογισμικό. Την εμφανίζουμε από το μενού PlotCtrls → Numbering →Area numbers.

Εικόνα 3.25: Εμφάνιση αρίθμησης επιφανειών.

Οι εξωτερικές επιφάνειες της επένδυσης που μας ενδιαφέρουν είναι οι εξής: A17, A18, A19, A14, A5, A6, A7, A23, A24, A25. Οι συγκεκριμένες επιφάνειες έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον γεωυλικό. Για να δούμε πόσοι και ποιοι κόμβοι (Nodes) ανήκουν στην επιφάνεια A17, κάνουμε τα εξής:

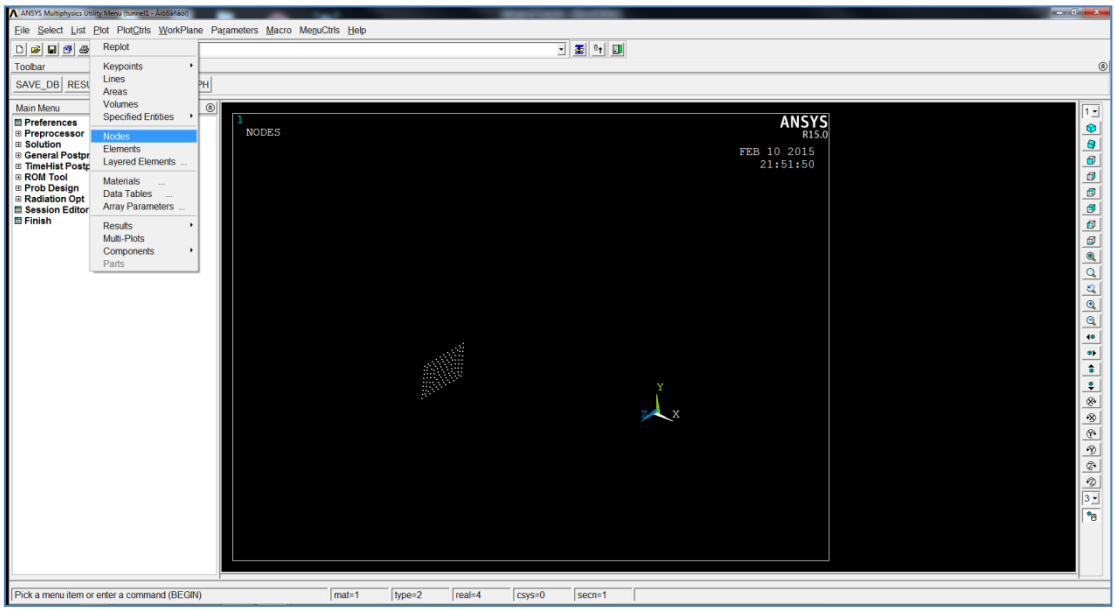
Επιλέγουμε την επιφάνεια 17 από το μενού Select → Entities → Areas By Num/Pick.

Εικόνα 3.26: Επιλογή επιφάνειας A17.

Στη συνέχεια, επιλέγουμε τους κόμβους (Nodes) που ανήκουν στην επιφάνεια που επιλέξαμε, ως εξής από το μενού: Select → Entities → Nodes Attached to Areas, all.

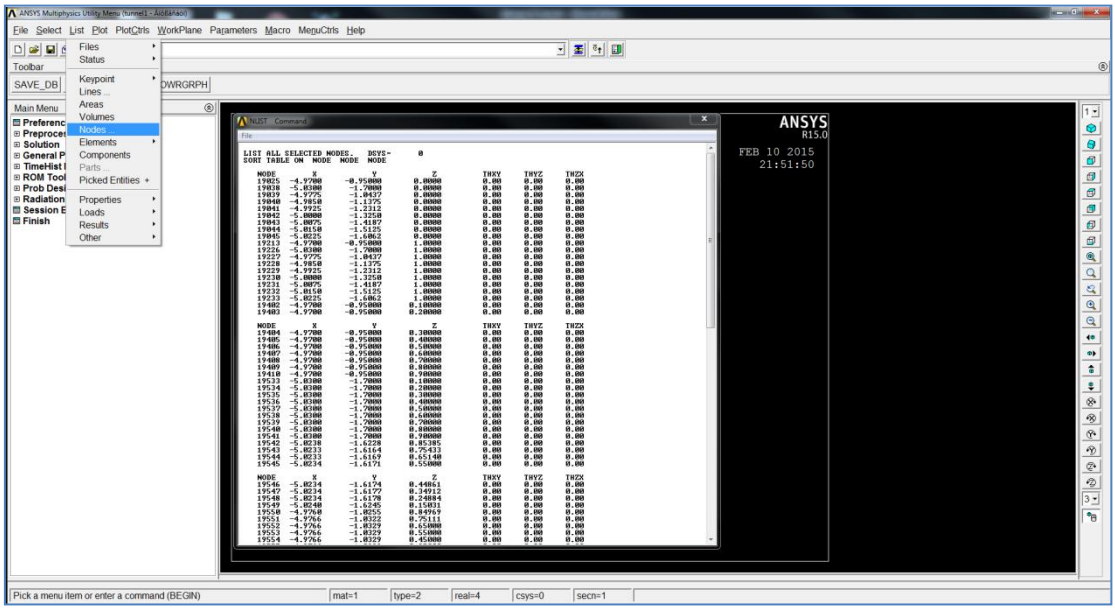
Εικόνα 3.27: Επιλογή κόμβων που ανήκουν στην επιφάνεια A17.

Στη συνέχεια με την εντολή Plot → Nodes, εμφανίζουμε τους επιλεγμένους κόμβους.



Εικόνα 3.28: Εμφάνιση επιλεγμένων κόμβων.

Με την εντολή List → Nodes εμφανίζουμε την λίστα των κόμβων ενδιαφέροντος. Στην λίστα φαίνεται η αρίθμηση των κόμβων και οι συντεταγμένες τους. Μπορούμε αν επιθυμούμε να αποθηκεύσουμε την λίστα στο αρχείο μας.

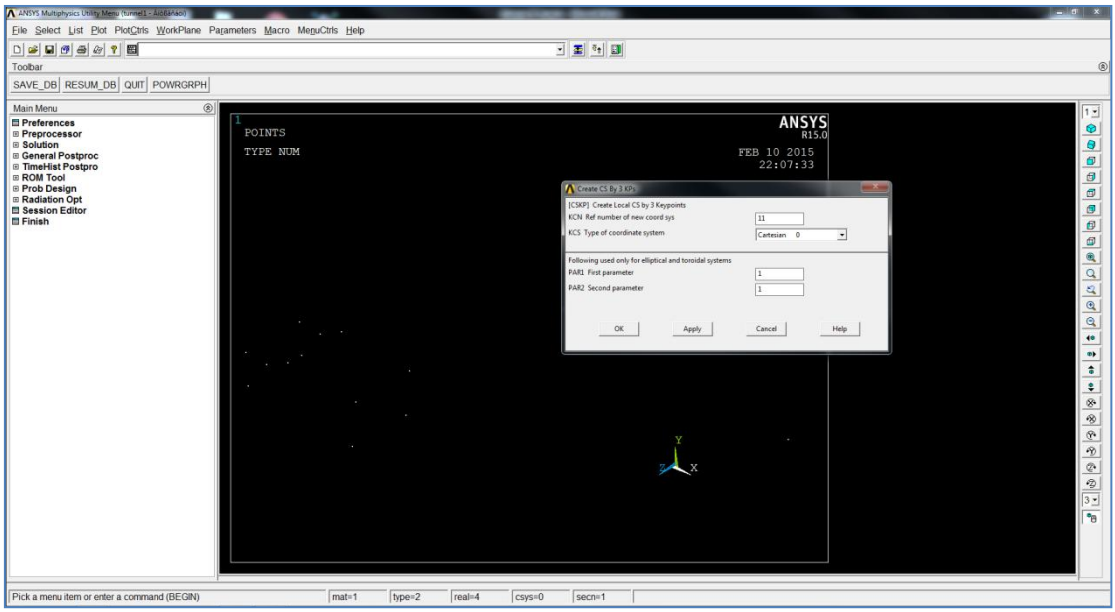


Εικόνα 3.29: Εμφάνιση λίστας επιλεγμένων κόμβων.

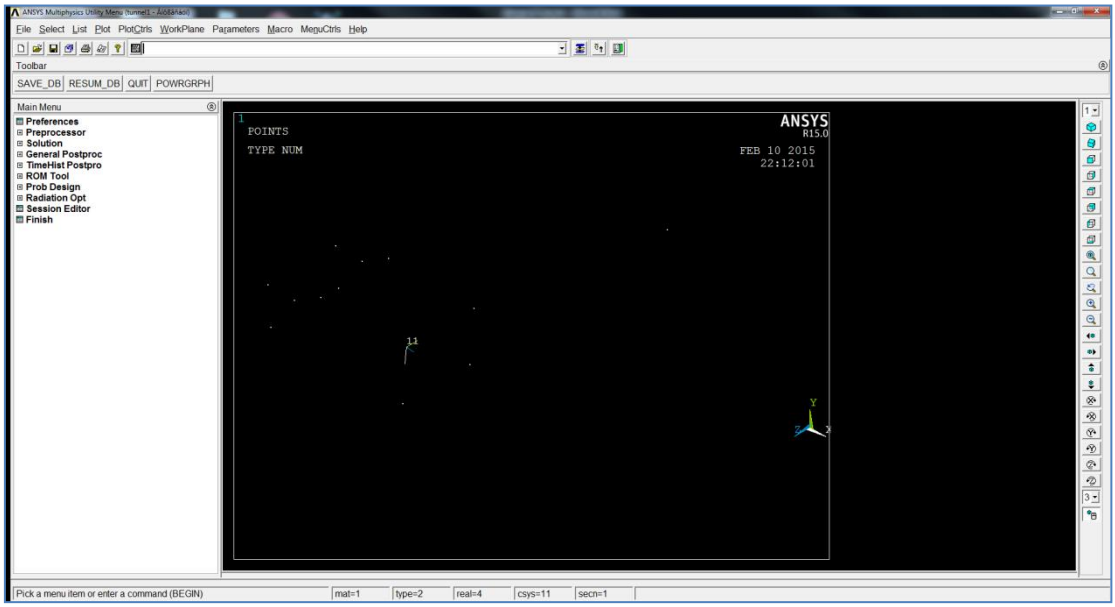
Σύμφωνα με την παρούσα λίστα βλέπουμε ότι η επιφάνεια A17 αποτελείται από 110 κόμβους (19025 ο αρχικός και 19615 ο τελικός της λίστας).

Εμείς, τώρα θα πρέπει να αντιγράψουμε τους κόμβους αυτούς κατά L= 1,00 m ώστε να γίνουν αντίστοιχοι κόμβοι επί της βραχόμαζας.

Για να αντιγράψουμε αυτούς τους κόμβους θα πρέπει να ορίσουμε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων διότι η επιφάνεια A17 έχει ορισμένη κλίση. Το τοπικό σύστημα το δημιουργούμε ως εξής: WorkPlane → Local Coordinate Systems → Create Local CS → By 3 Keypoints.



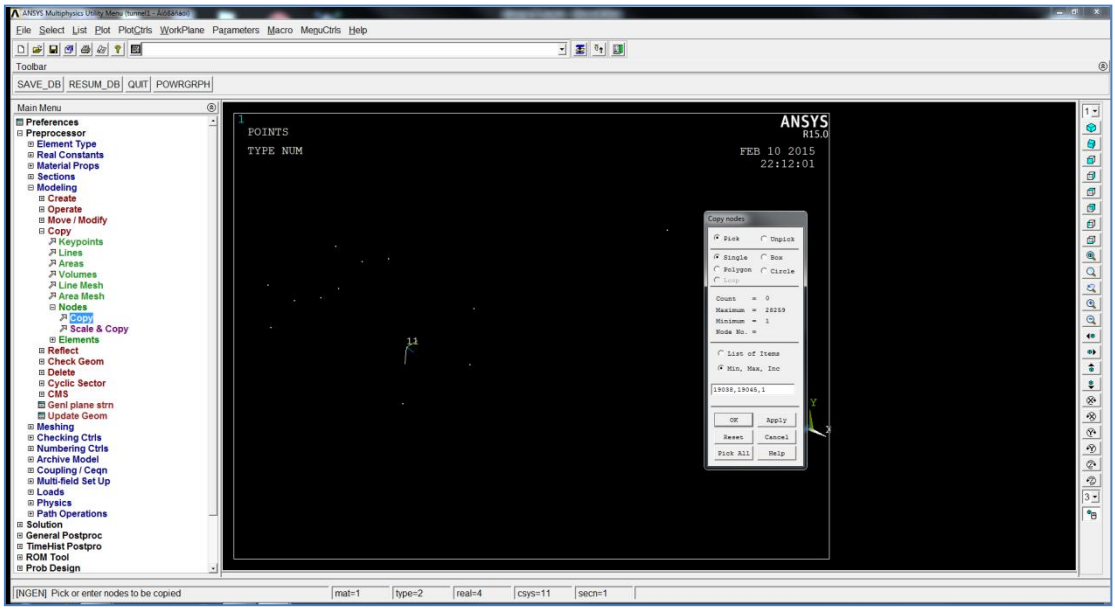
Εικόνα 3.30: Δημιουργία καρτεσιανού τοπικού συστήματος συντεταγμένων στην επιφάνεια A17.



Εικόνα 3.31: Καρτεσιανό τοπικό σύστημα -11- στην επιφάνεια A17. (Το καθολικό σύστημα φαίνεται στο δεξιό τμήμα).

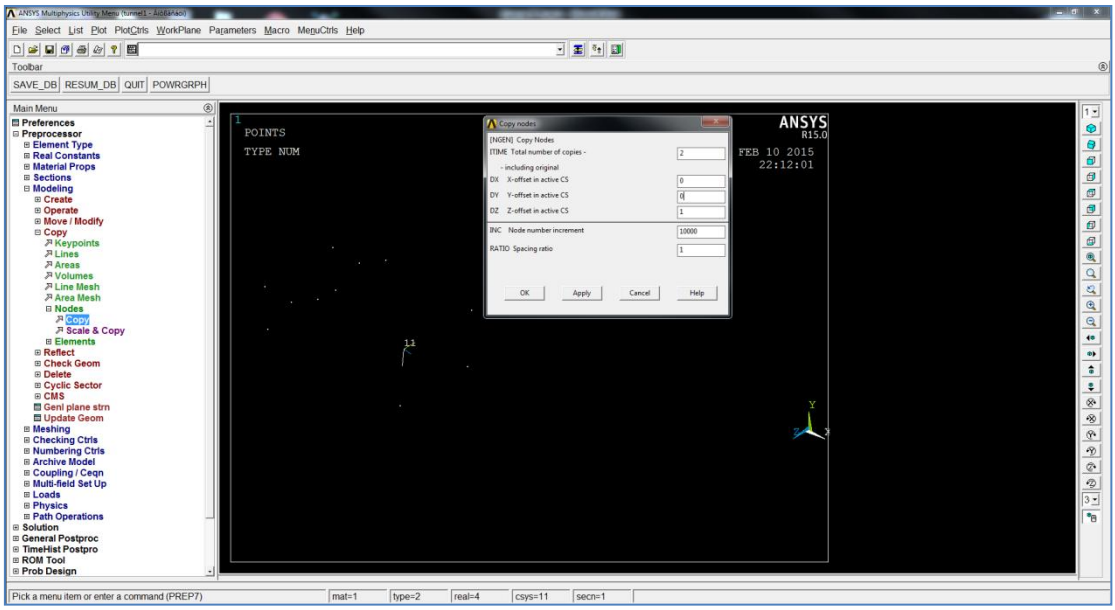
Μετά την δημιουργία του τοπικού συστήματος μπορούμε πλέον να αντιγράψουμε τους κόμβους της επιφάνειας A17 σύμφωνα με αυτό. Για να ενεργοποιήσουμε το τοπικό σύστημα -11- που δημιουργήσαμε, επιλέγουμε στο μενού WorkPlane → Change Active CS to → Specified Coord System, επιλέγουμε το σύστημα 11 και πατάμε OK.

Για να αντιγράψουμε τους κόμβους, επιλέγουμε από το μενού στα αριστερά Modeling → Nodes → Copy και εμφανίζεται η εξής καρτέλα στην οποία ορίζουμε τους αρχικούς κόμβους που επιθυμούμε να αντιγράψουμε.



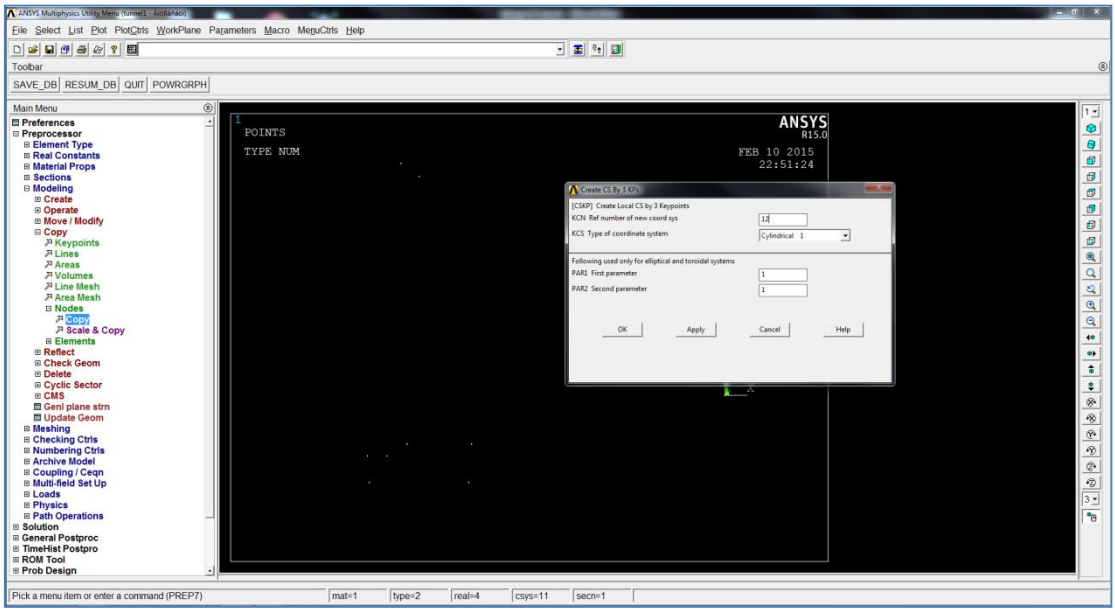
Εικόνα 3.32: Καρτέλα επιλογής κόμβων προς αντιγραφή.

Αφού ορίσουμε τους κόμβους πατάμε OK. Στη συνέχεια το λογισμικό μας εμφανίζει μια άλλη καρτέλα που μας ζητάει να ορίσουμε την απόσταση της αντιγραφής (Εμείς θέλουμε Z=1 m κατά το τοπικό σύστημα), καθώς και την διαφορά σε αρίθμηση που θα έχουν οι «απέναντι» κόμβοι σε σχέση με τους αρχικούς. (Εμείς ορίζουμε οι «απέναντι» κόμβοι να διαφέρουν κατά +10000 από τους αρχικούς. Δηλ. αν ο αρχικός είναι ο 19038 ο «απέναντι» είναι ο 29038). Πατώντας OK, το λογισμικό κάνει την αντιγραφή των κόμβων σύμφωνα με το τοπικό πλέον σύστημα.



Εικόνα 3.33: Καρτέλα επιλογής στοιχείων αντιγραφής κόμβων.

Ενεργώντας όμοια, αντιγράφουμε τους κόμβους όλων των επιφανειών (εξωτερικών παρειών) της επένδυσης που επιθυμούμε. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι τοπικό σύστημα συντεταγμένων (κυλινδρικό πλέον και όχι καρτεσιανό) απαιτείται και για την αντιγραφή των κόμβων των καμπύλων εξωτερικών επιφανειών της επένδυσης (περιτύπωμα επένδυσης).



Εικόνα 3.34: Ορισμός κυλινδρικού τοπικού συστήματος -12- συντεταγμένων για τα καμπύλα τμήματα.

Το «πολύπλοκο» κομμάτι του σταδίου αυτού είναι το να αντιληφθούμε την ανάγκη ορισμού τοπικών συστημάτων που θα γίνει η αντιγραφή των κόμβων, διότι αν

βασιστούμε στο καθολικό σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων δεν πρόκειται να γίνει σωστά η αντιγραφή των κόμβων.

Με τον τρόπο αυτό αντιγράφουμε τους κόμβους που επιθυμούμε και λαμβάνουμε το εξής αποτέλεσμα:

Εικόνα 3.35: Αποτέλεσμα αντιγραφής κόμβων εξωτερικών επιφανειών επένδυσης (διακρίνεται και η ομαλότητα της αντιγραφής στα καμπύλα τμήματα του περιτυπώματος).

Μπορούμε πλέον μετά την ενέργεια της αντιγραφής των κόμβων να δημιουργήσουμε τα ελατήρια (COMBIN39 elements) μεταξύ των κόμβων. Αρχικά θα τοποθετήσουμε τα ελατήρια που αντιστοιχούν στην επιφάνεια A17. Για την τοποθέτηση του element COMBIN 39 αρχικά ορίζουμε τις ιδιότητες που επιθυμούμε για την συγκεκριμένη ομάδα ελατηρίων (Real Constants). Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται με την μορφή καμπυλών Δύναμης – Μετατόπισης (F-D) με την τοποθέτηση δεδομένων κατά αύξουσα σειρά. (Πρέπει να δοθεί επίσης προσοχή στις μονάδες δύναμης και μετατόπισης κατά την εισαγωγή).

Εικόνα 3.36: Ορισμός δεδομένων εισόδου (Real Constants) για το element COMBIN39, συγκεκριμένα των ελατηρίων της επιφάνειας A17.

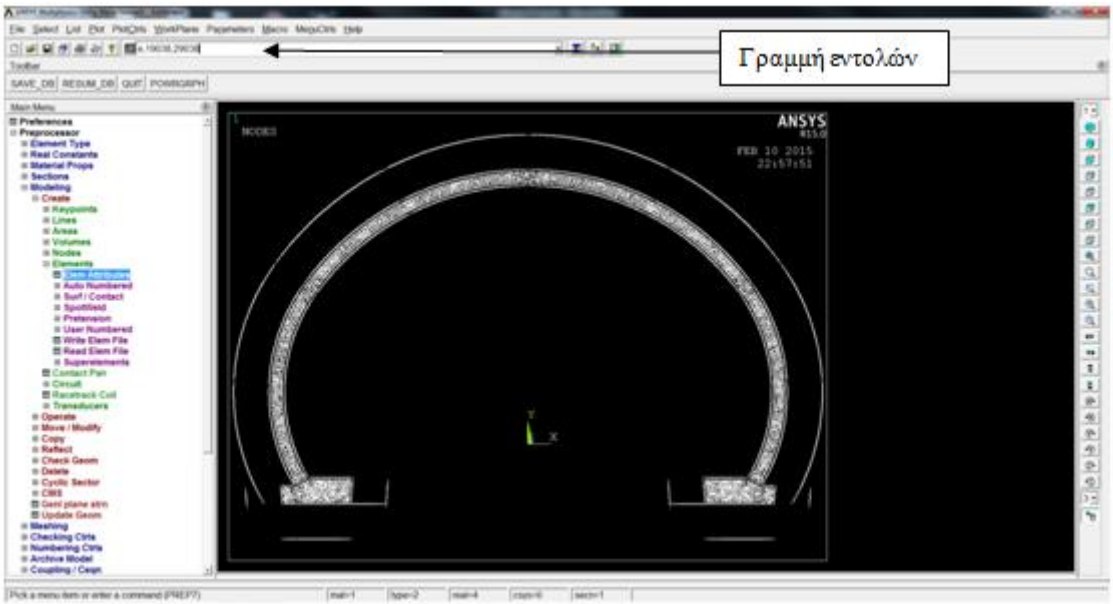
Προτού δημιουργήσουμε τα ελατήρια θα πρέπει να ορίσουμε το element που αντιστοιχεί στα ελατήρια διότι το λογισμικό μπορεί να λάβει από μόνο του κάποιο άλλο element π.χ. SOLID 65 που το είχαμε από πριν. Αυτό επιτυγχάνεται από το πτυσσόμενο μενού στα αριστερά Create → Elements → Elem Attributes.

Εικόνα 3.37: Ορισμός στοιχείου (element) COMBIN39 πριν την δημιουργία του.

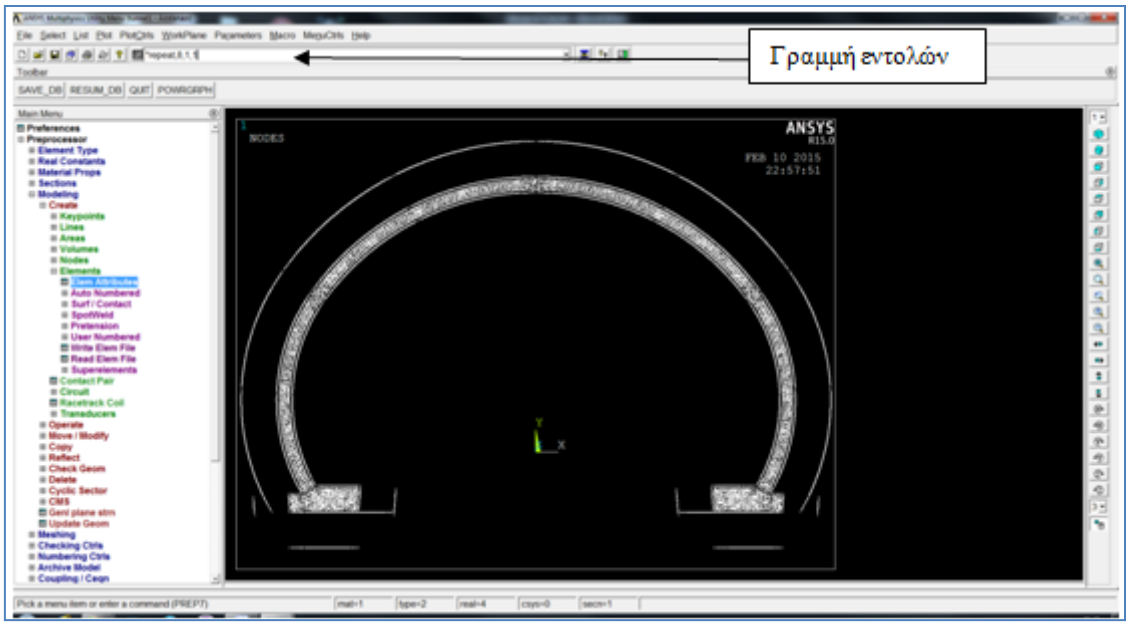
Πλέον είμαστε σε θέση να τοποθετήσουμε τα ελατήρια (COMBIN39) μεταξύ των κόμβων για την επιφάνεια A17. Ένας τρόπος για να το κάνουμε αυτό είναι μέσω της

γραμμής εντολών. Συγκεκριμένα στην γραμμή εντολών πληκτρολογούμε την εντολή element ως e,i,j και πατάμε enter (όπου i,j οι κόμβοι μεταξύ των οποίων θα φτιαχτεί το πρώτο ελατήριο για παράδειγμα e,19038,29038 δημιουργείται ελατήριο μεταξύ των κόμβων 19038 και 29038).

Αφού λοιπόν δημιουργηθεί το πρώτο ελατήριο πληκτρολογούμε ξανά στην γραμμή εντολών την εντολή repeat ως *repeat, k, l, m (όπου k οι φορές που θέλουμε να γίνει η επανάληψη, l και m ο ρυθμός αύξησης των κόμβων i,j). Με αυτές τις δύο εντολές τοποθετούμε τα ελατήρια για όλες τις επιφάνειες που επιθυμούμε.

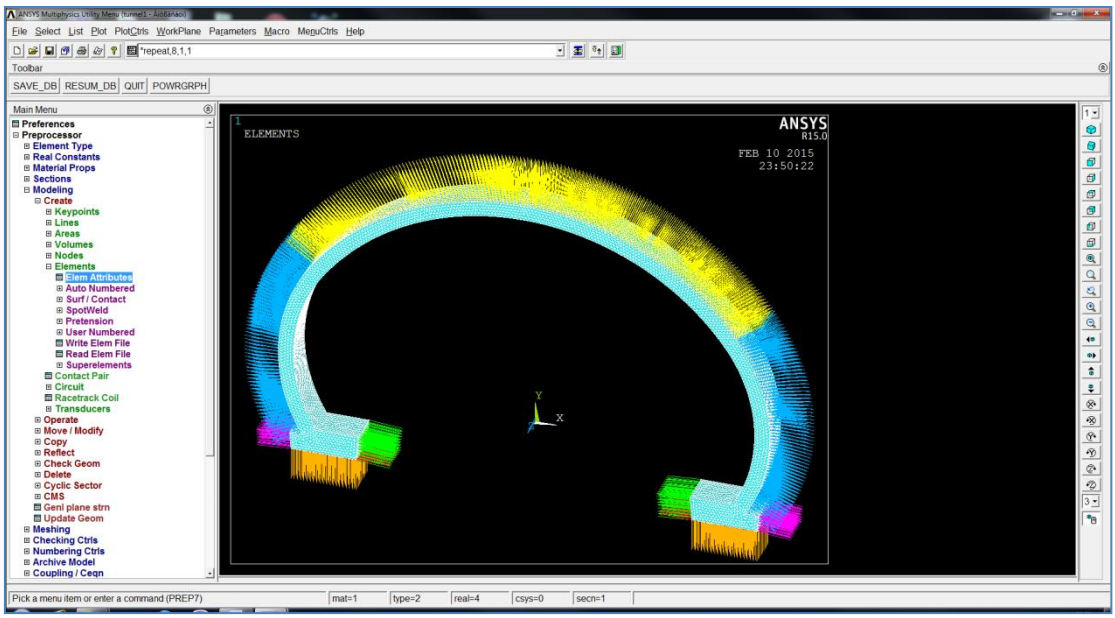


Εικόνα 3.38: Εισαγωγή εντολής (στη γραμμή εντολών) για την δημιουργία element ελατηρίου.

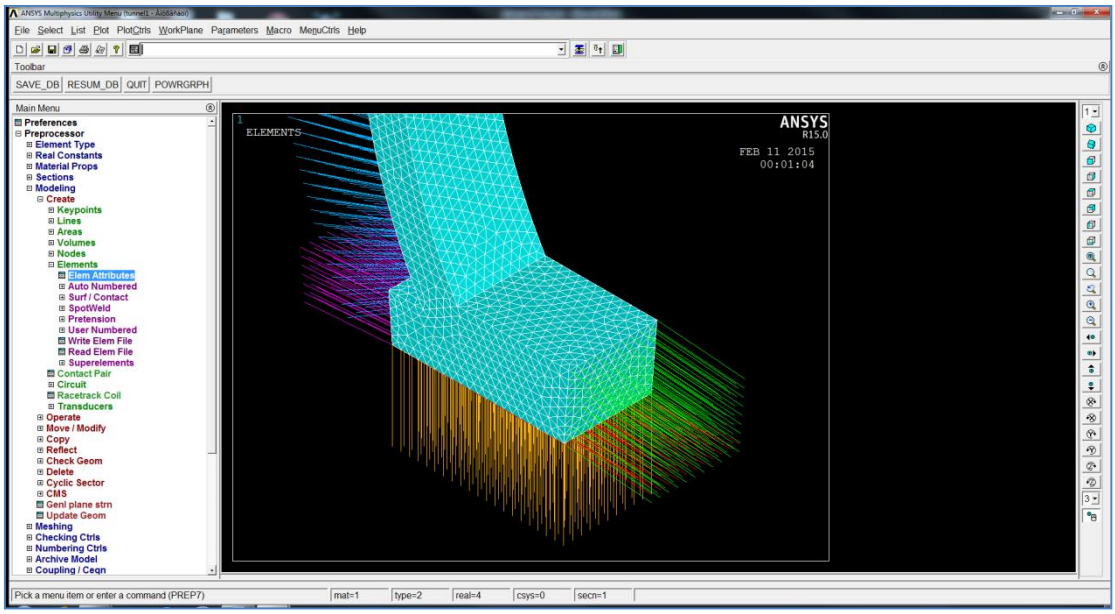


Εικόνα 3.39: Εισαγωγή εντολής (στη γραμμή εντολών) για την δημιουργία element ελατηρίου.

Με το ίδιο σκεπτικό, δημιουργούμε όλες τις ομάδες ελατηρίων με διαφορετικές ιδιότητες - Real Constants - (διαφορετικά χρώματα) που επιθυμούμε για κάθε επιφάνεια:



Εικόνα 3.40: Τελική δημιουργία ομάδων ελατηρίων προσομοίωσης γεωυλικού.



Εικόνα 3.41: Λεπτομέρεια ελατηρίων στο αριστερό θεμέλιο (foot). Με κόκκινο χρώμα διακρίνονται τα ελατήρια τριβής της διεπιφάνειας θεμελίου – βράχου.

Για να αλλάξουμε χρώμα στα ελατήρια, ώστε να ξεχωρίζουν οι ομάδες μεταξύ τους, ακολουθούμε τις εξής εντολές από το μενού: PlotCtrls → Style → Colors→ Picked Entity Colors. Και ορίζουμε το χρώμα της αρεσκείας μας για τα στοιχεία (elements) που επιθυμούμε.

3.3.5 5^{ο} Στάδιο: Στήριξη συνολικού φορέα και εφαρμογή φορτίων

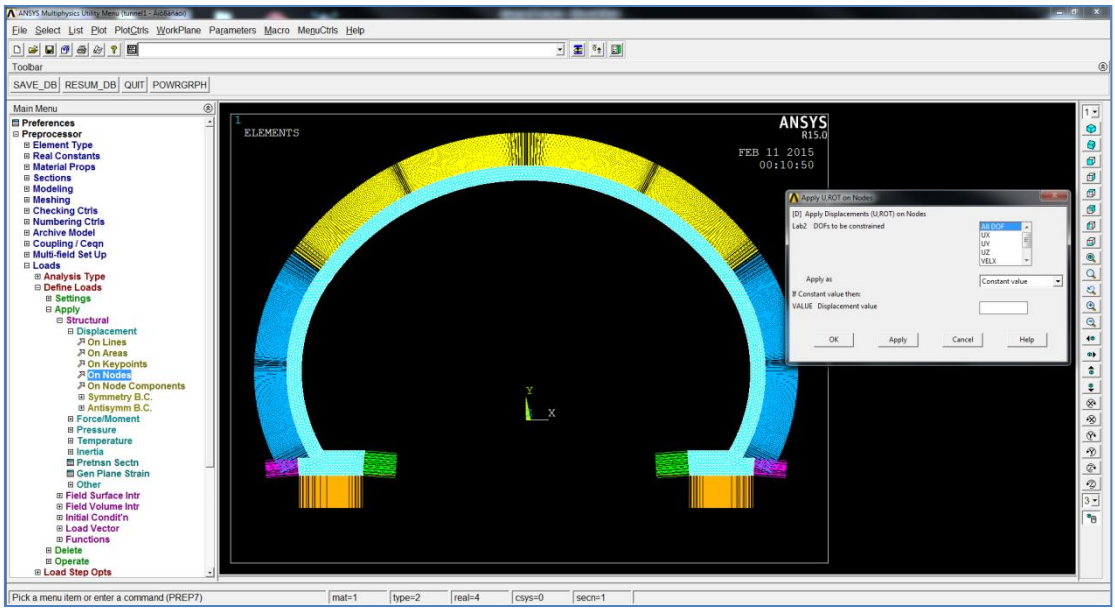
Για να δεχτεί ο φορές που μοντελοποιήσαμε φορτία και να μπορεί στη συνέχεια να επιλυθεί, θα πρέπει να τον στηρίξουμε στους ακραίους (εξωτερικούς - ελεύθερους κόμβους) και να ορίσουμε τυχόν συνθήκες συμμετρίας - αντισυμμετρίας. Αυτό θα επιτευχθεί με την επιλογή των ελεύθερων κόμβων και την δέσμευση των Β.Ε. με πακτώσεις.

Από το πτυσσόμενο μενού λοιπόν στα αριστερά της οθόνης, επιλέγουμε:

Loads → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On nodes και στη συνέχεια εμφανίζεται η καρτέλα επιλογής των κόμβων (ελεύθερων) που θέλουμε να δεσμεύσουμε. Έστω ότι θέλουμε να δεσμεύσουμε τους ελεύθερους κόμβους της επιφάνειας Α18 (πορτοκαλί κάτω αριστερά ελατήρια). Στην καρτέλα επιλογής κόμβων εισάγουμε τους ελεύθερους «απέναντι» κόμβους και μετά πατάμε OK.

Εικόνα 3.42: Καρτέλα επιλογής κόμβων προς δέσμευση Β.Ε.

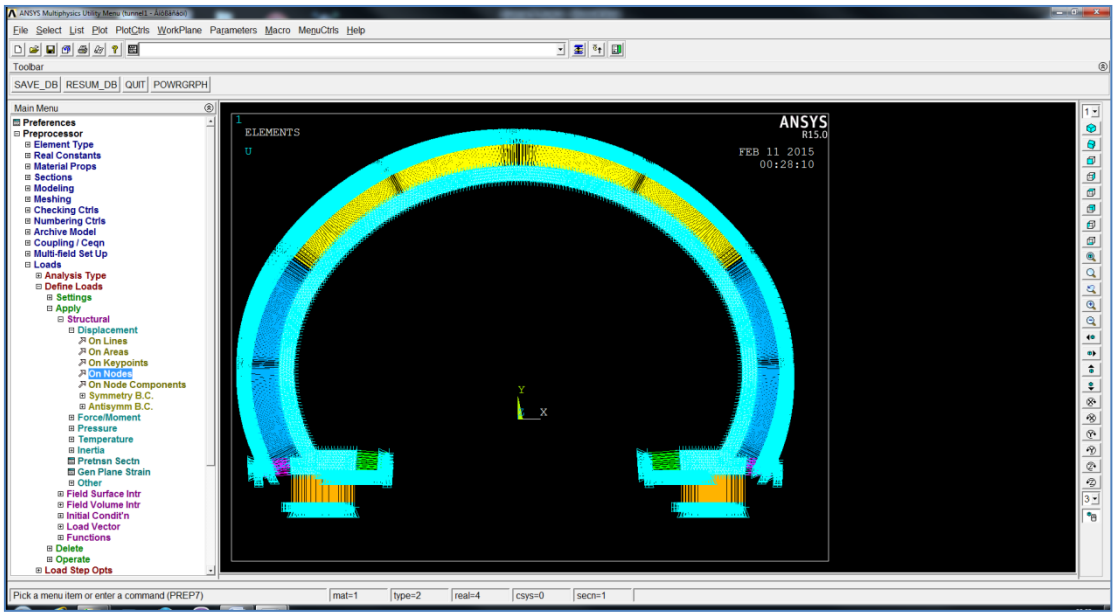
Στην επόμενη καρτέλα που μας εμφανίζεται επιλέγουμε να γίνει δέσμευση όλων των Β.Ε. (δημιουργία πάκτωσης) και πατάμε OK.



Εικόνα 3.43: Επιβολή πάκτωσης στους ελεύθερους κόμβους.

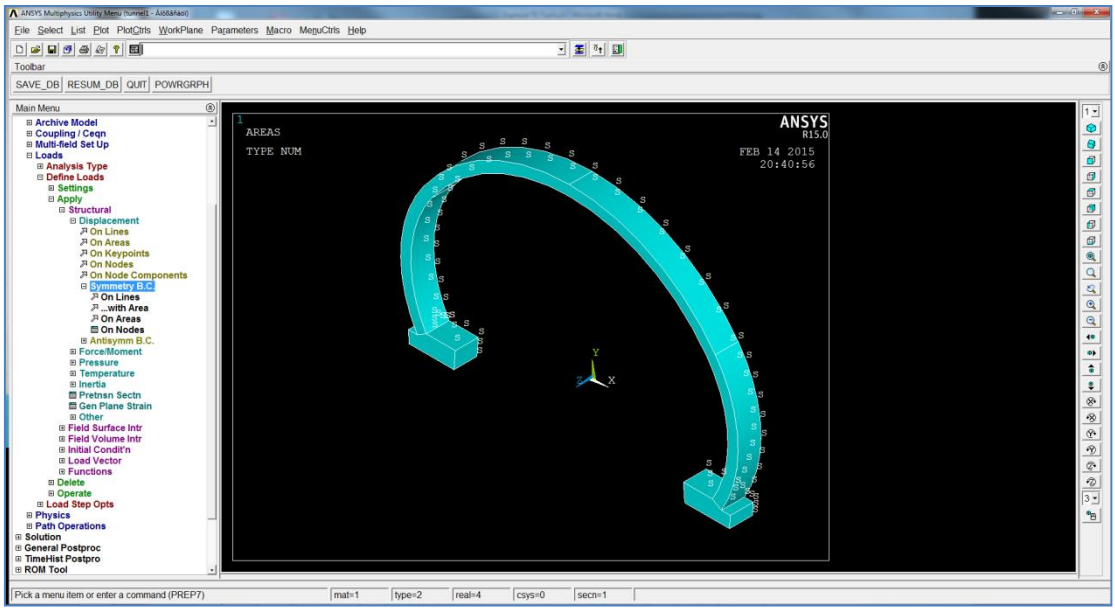
Εικόνα 3.44: Πάκτωση ελεύθερων κόμβων (κάτω αριστερά ελατήρια).

Όμοια, αν επιλέξουμε όλους τους ελεύθερους κόμβους των ελατηρίων, θα έχουμε τον εξής πακτωμένο φορέα:



Εικόνα 3.45: Συνολική πάκτωση φορέα με σκοπό την στήριξή του.

Στην παρούσα μελέτη, επειδή εξετάζουμε μία ακραία διατομή πάχους 1 m και όχι μόνο μία «καλουπιά» θα πρέπει να ορίσουμε συνθήκες συμμετρίας διότι η διατομή συνεχίζει.

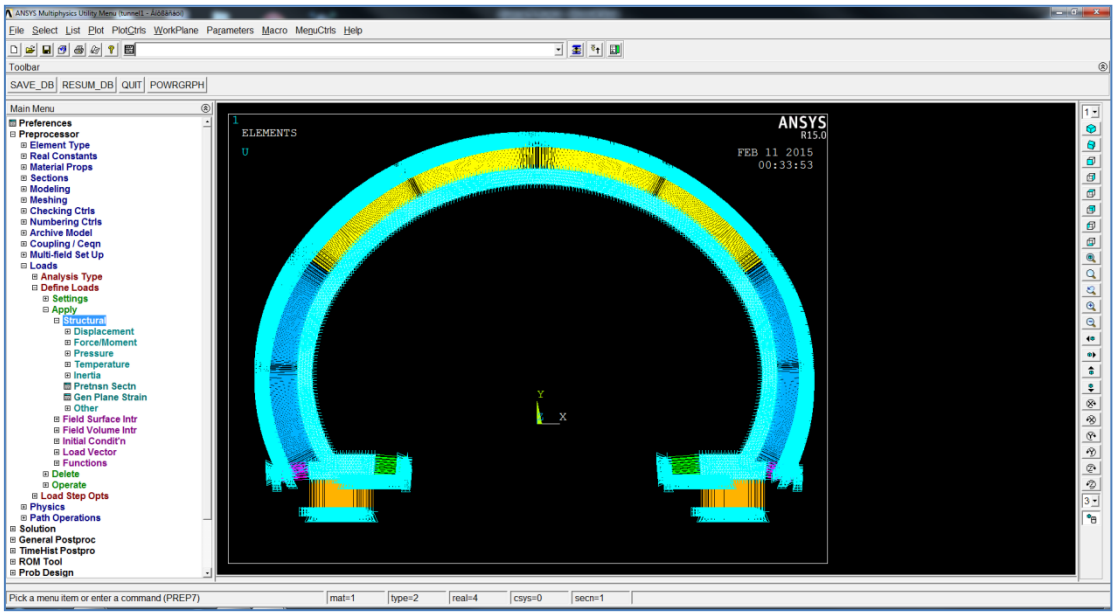


Εικόνα 3.46: Ορισμός συμμετρικών συνθηκών στην διατομή.

Αφού λοιπόν στηρίξαμε και τον φορέα μας, αυτός πλέον είναι έτοιμος να δεχτεί διάφορα φορτία. Τις διάφορες φορτίσεις τις επιβάλουμε στον φορέα μας από τις επιλογές του πτυσσόμενου μενού στα αριστερά:

Loads → Define Loads → Apply → Structural

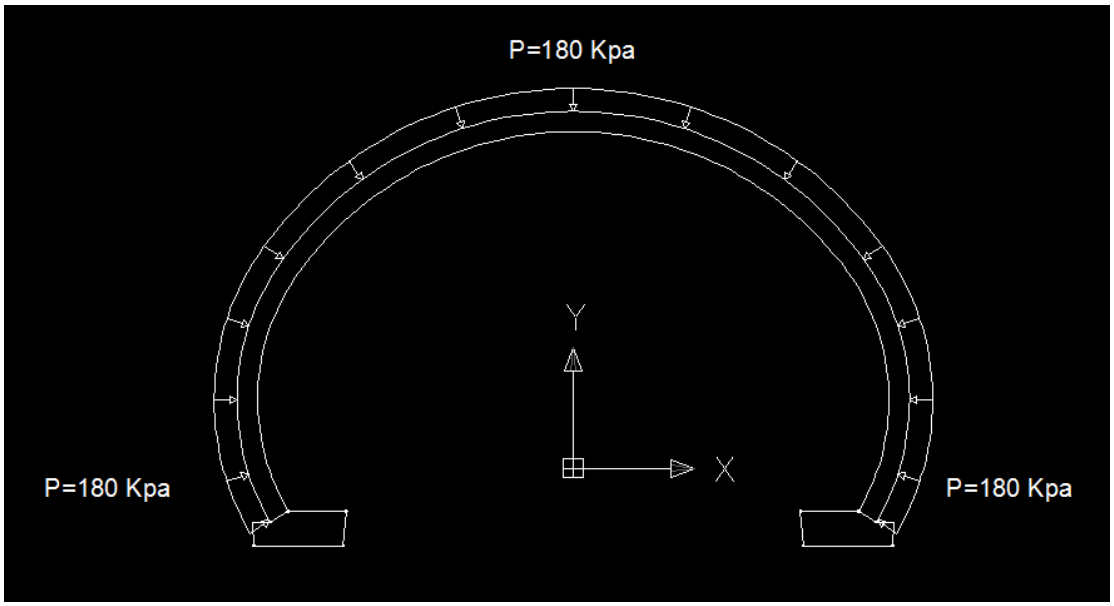
Όπου μπορούμε να επιβάλλουμε πίεση σε επιφάνεια, δύναμη, ροπή, θερμοκρασία και άλλα διάφορα φορτία κατασκευής.



Εικόνα 3.47: Πτυσσόμενο μενού (στο αριστερό τμήμα) επιβολής φορτίων κατασκευής.

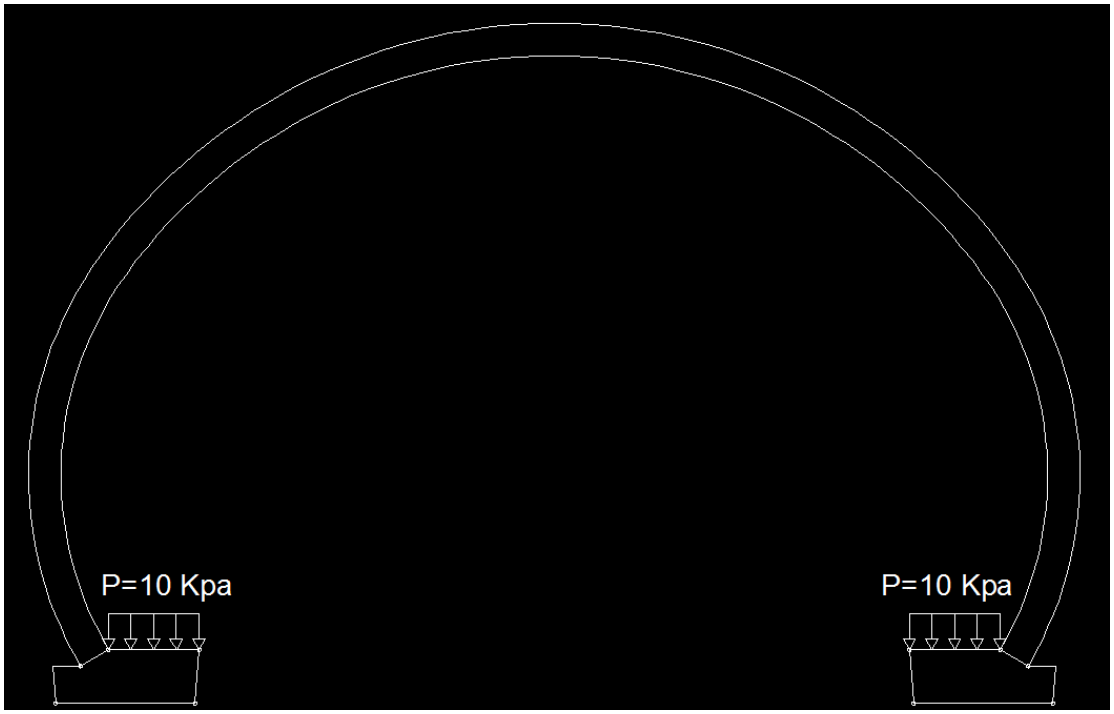
Τα φορτία που πρόκειται να εφαρμοστούν στην διατομή που προσομοιώσαμε με σκοπό αργότερα την ανάλυση και για κατηγορίες σκυροδέματος C30/37 και C25/30 είναι:

- Ίδιο βάρος κατασκευής μόνιμης επένδυσης (Inertia, Gravity).
- Φορτίο από περιβάλλουσα βραχόμαζα (Surface Load, Gradient, Pressure).
- Φορτίο στην επιφάνεια των θεμελίων (footings) λόγω επίστρωσης (Pressure).



Εικόνα 3.48: Φόρτιση επένδυσης από την περιβάλλουσα βραχόμαζα.

Όπου P= 180 KN/m^2 το φορτίο (πίεση) που εφαρμόζεται από το περιβάλλον γεωυλικό (E_{rm}=1000 MPa) στην επένδυση τύπου 1. Σύμφωνα με το άρθρο 8 (Κριτήρια Σχεδιασμού) ΟΜΟΕ Σηράγγων μπορούμε να λάβουμε υπόψη στον σχεδιασμό τις δυσμενέστερες τιμές των φορτίσεων λόγω ωθήσεων από το περιβάλλον γεωυλικό και να μην λάβουμε υπόψη μας τον συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων (K).



Εικόνα 3.49: Φόρτιση θεμελίων (footings) λόγω επίστρωσης (οδόστρωμα).

Τα θεμέλια (footings) της διατομής -τύπου 1- φορτίζονται με πίεση p=10 KPa λόγω ιδίου βάρους (I.B.) επίστρωσης τους.

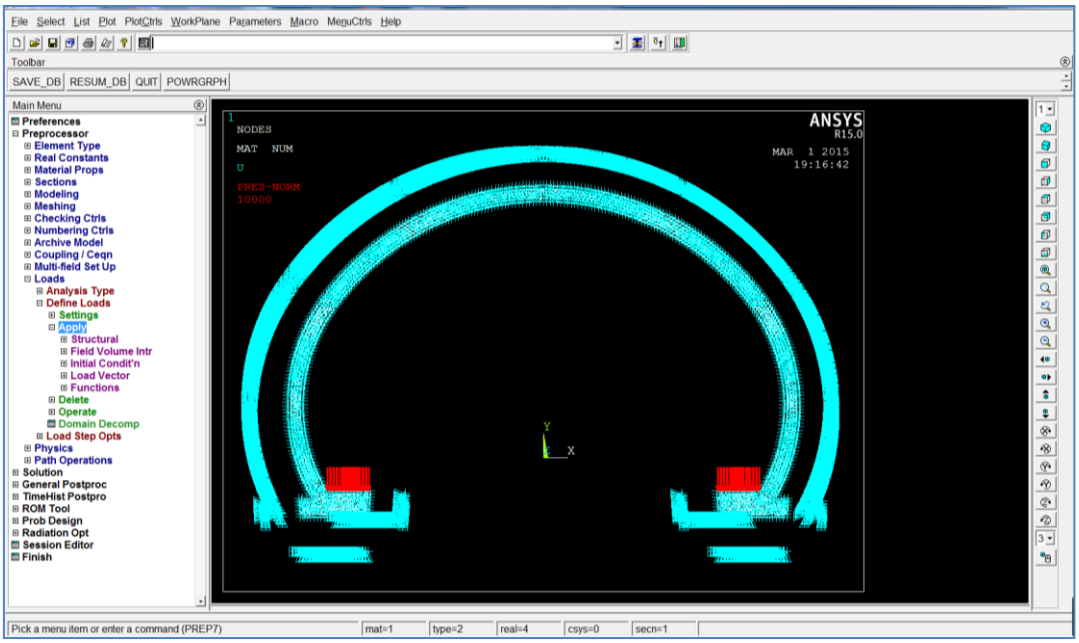
Τα φορτία της διατομής μας, θα τα εφαρμόσουμε χωρίς συντελεστές ασφαλείας (safety factors).

Πίνακας 3.2: Τιμή χωρίς συντελεστή σε σχέση με το είδος φόρτισης.

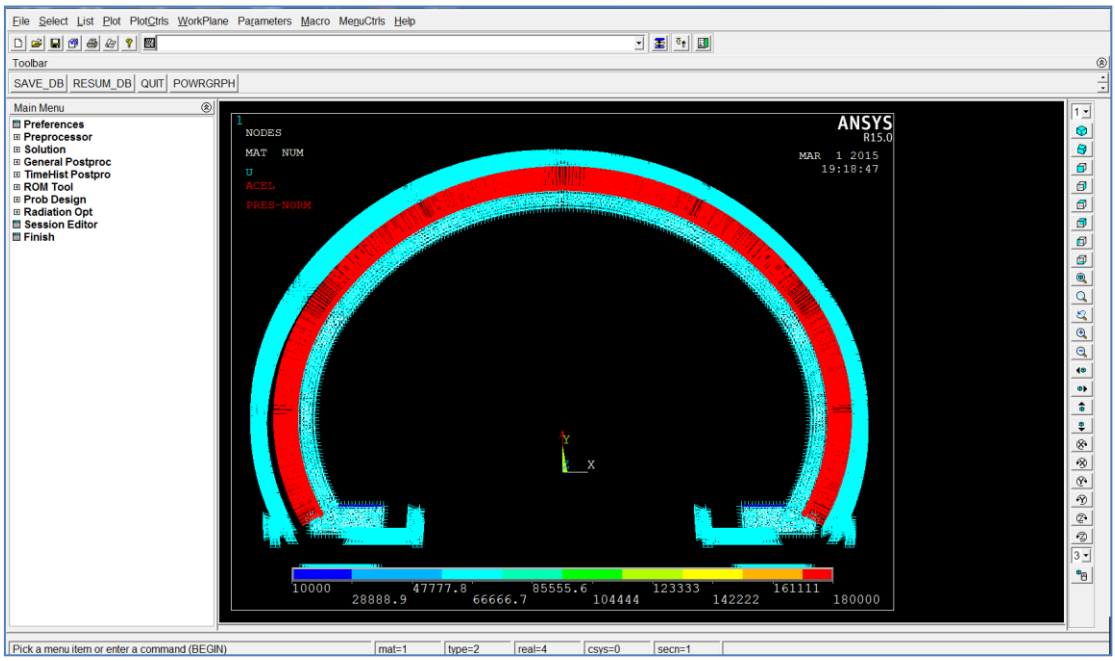
Είδος φόρτισης	**Τιμή χωρίς συντελεστή**
Ειδικό βάρος κατασκευής	2400 KN/m^3
Φόρτιση από βραχόμαζα	180 KPa
Φόρτιση θεμελίων	10 KPa

Εικόνα 3.50: Εφαρμογή βαρύτητας (m/s^2) στην κατασκευή (εισάγεται με θετικό πρόσημο κατά Y).

Εικόνα 3.51: Εφαρμογή φορτίου – πίεσης (σε Pa) από την περιβάλλουσα βραχόμαζα.



Εικόνα 3.52: Εφαρμογή φορτίου – πίεσης (σε Pa) στις επιφάνειες θεμελίων.

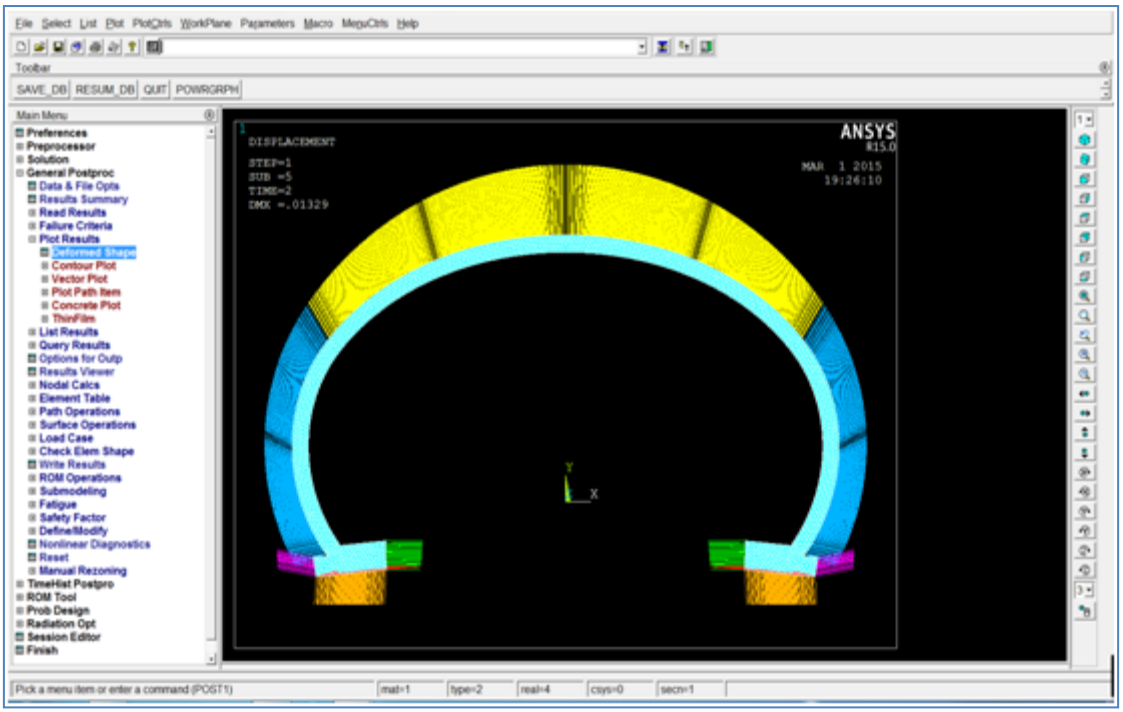


Εικόνα 3.53: Εφαρμογή φορτίων στην επένδυση -τύπου 1- κατηγορίας σκυροδέματος C30/37.

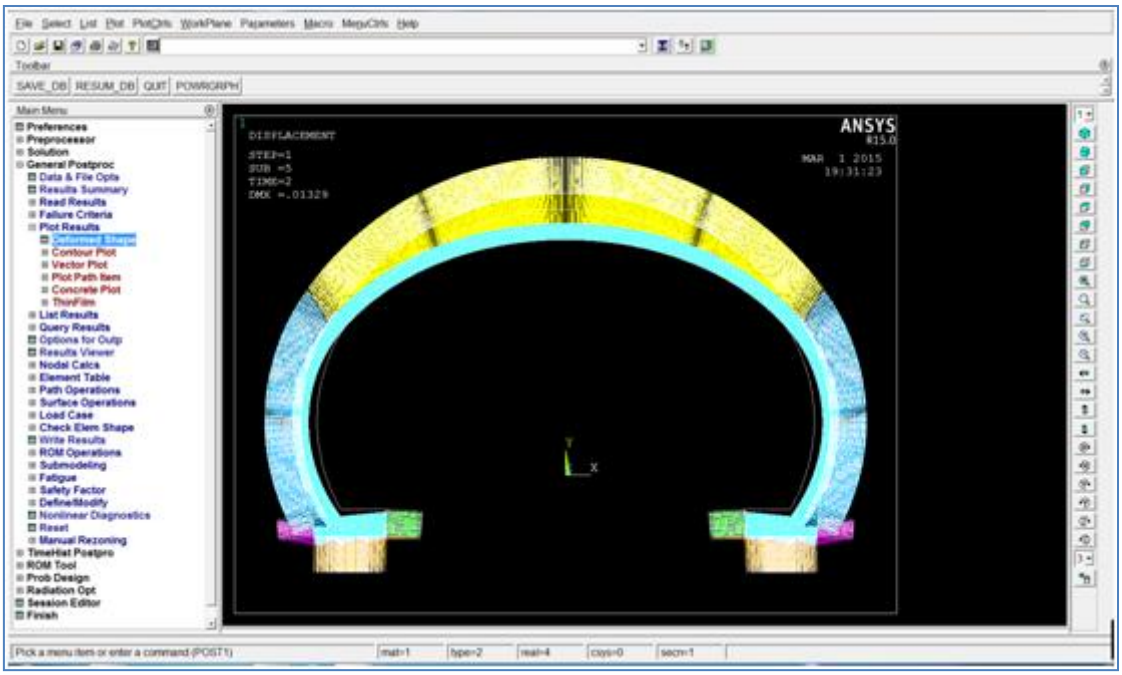
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{ο}: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΥΤΩΝ

4.1 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C30/37

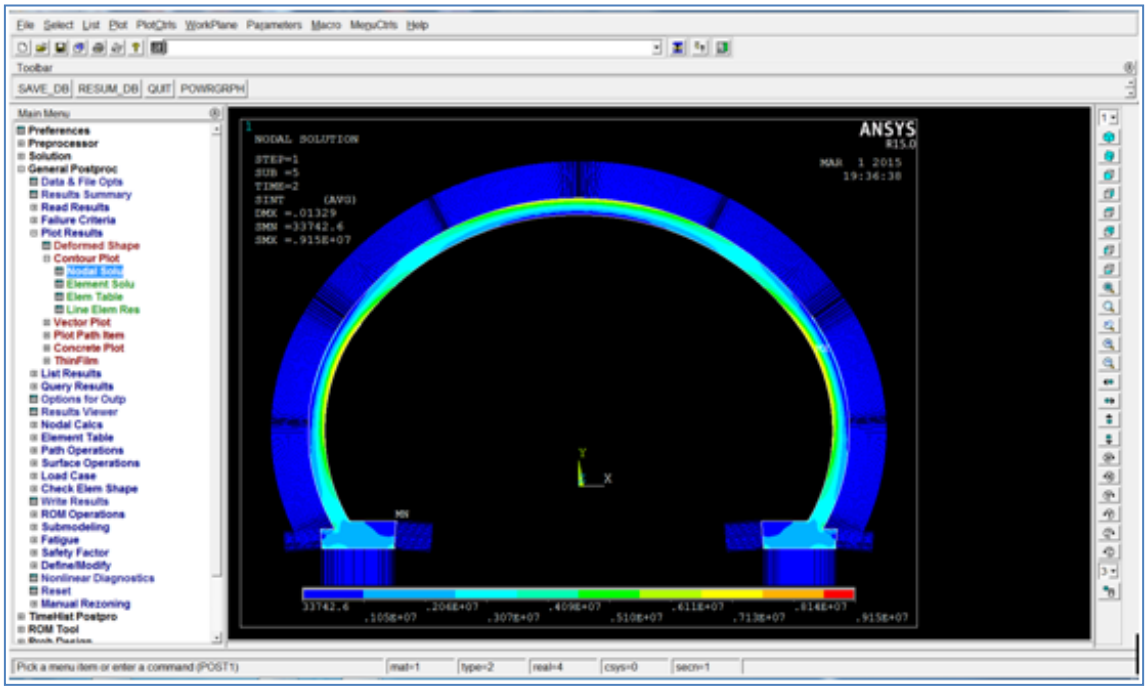
Παρακάτω θα απεικονιστεί η τελική επένδυση κατηγορίας σκυροδέματος C30/37.



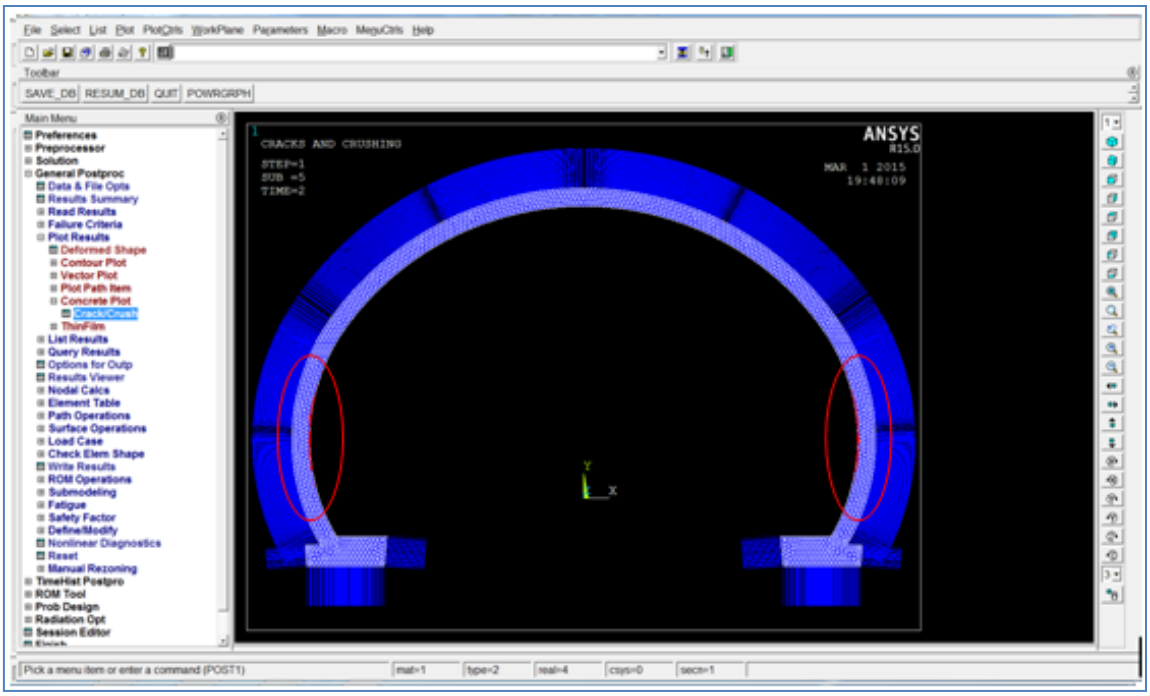
Εικόνα 4.1: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης λόγω εφαρμογής των φορτίων (αυτόματη κλίμακα απεικόνισης).



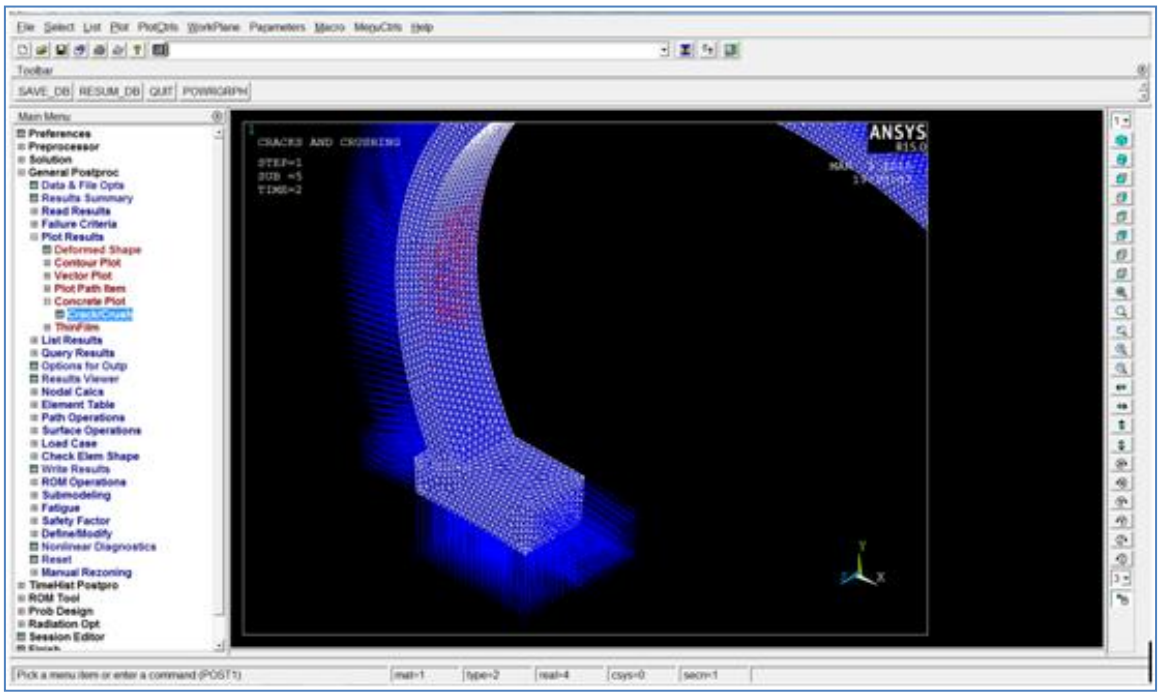
Εικόνα 4.2: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης σε σχέση με την αρχική μη παραμορφούμενη (διακεκομμένη γραμμή).



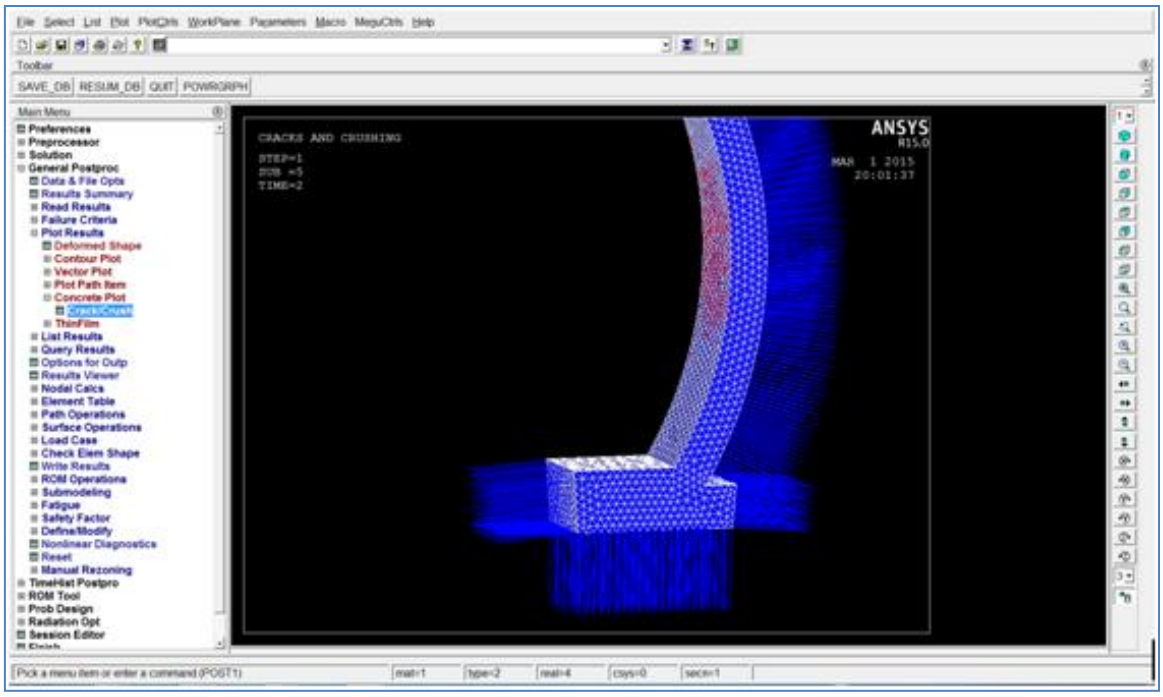
Εικόνα 4.3: Τάσεις που εφαρμόζονται στην διατομή (Stress Intensity).



Εικόνα 4.4: Ρωγμάτωση του σκυροδέματος στις εσωτερικές παρειές της διατομής.



Εικόνα 4.5: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην αριστερή εσωτερική παρειά.



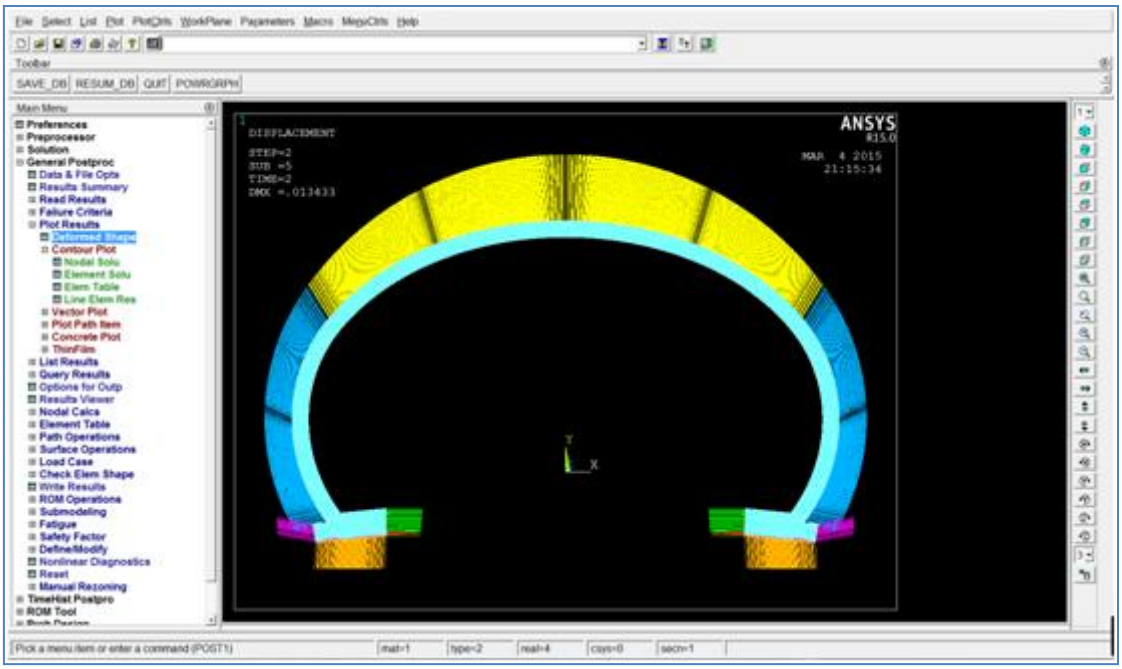
Εικόνα 4.6: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην δεξιά εσωτερική παρειά.

4.2 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C25/30

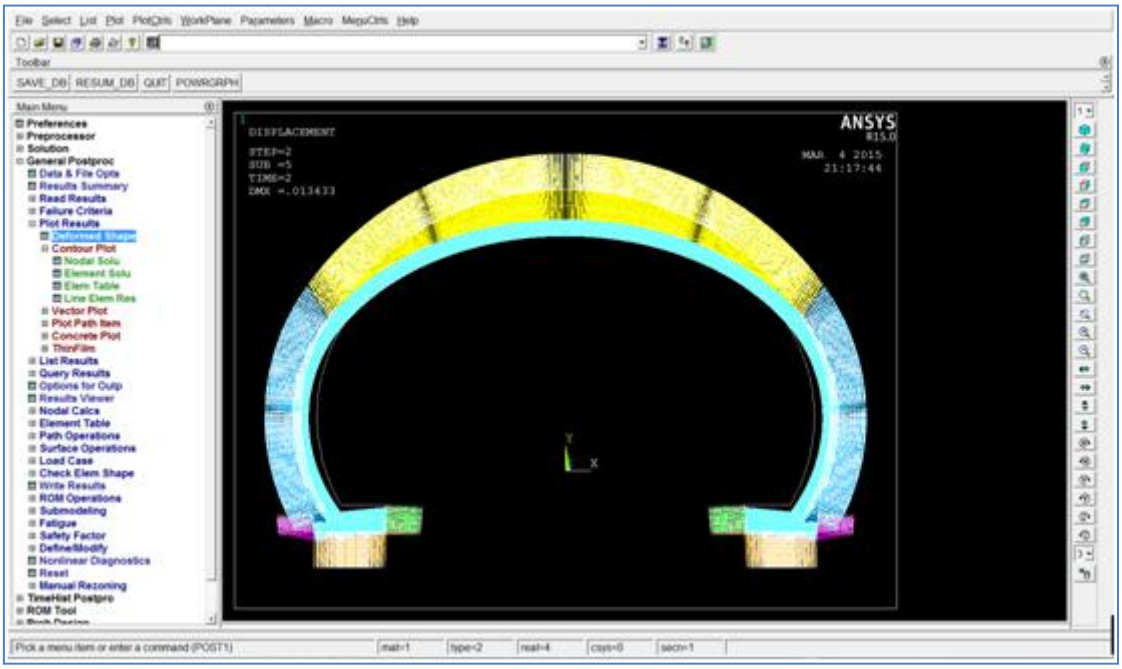
Για την κατηγορία σκυροδέματος C25/30, εκτελούμε την ίδια ανάλυση αλλά με δεδομένα σκυροδέματος σύμφωνα με τον ισχύοντα EC-2:

Πίνακας 4.1: Δεδομένα σκυροδέματος σύμφωνα με τον ισχύοντα EC-2.

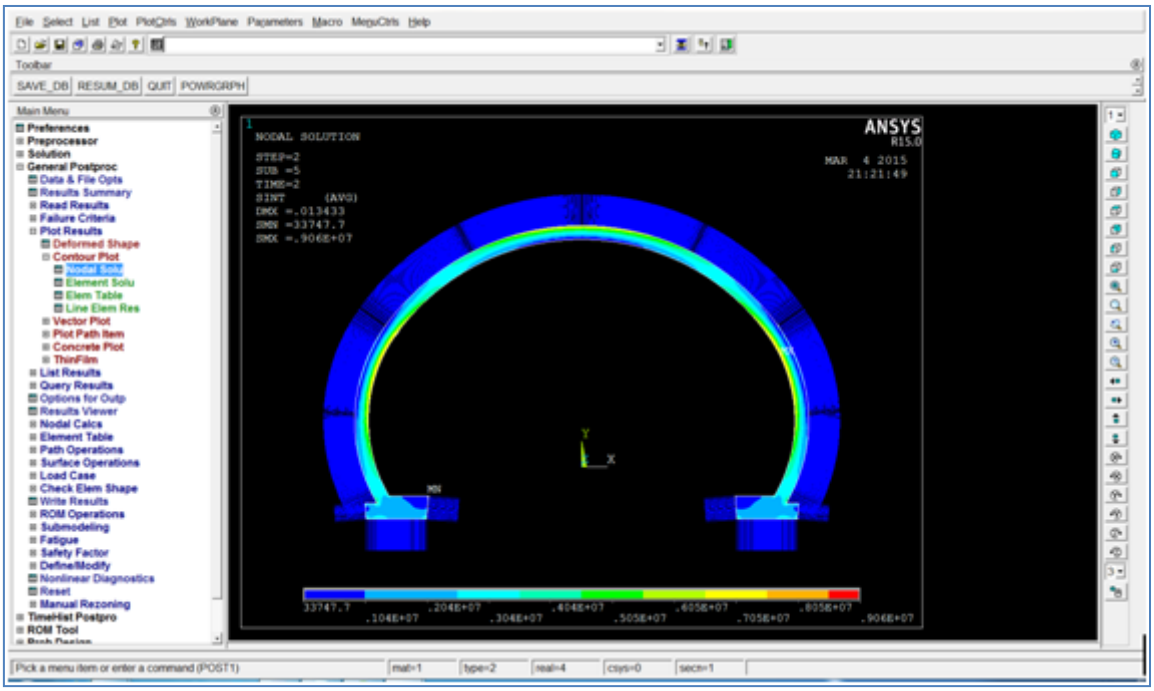
Δεδομένα σκυροδέματος	Τιμές
Μονοαξονική θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου f_c (MPa)	25,0
Μονοαξονική εφελκυστική αντοχή f_{ctm} (MPa)	2,6
Μέτρο ελαστικότητας E_{cm} (GPa)	31,0



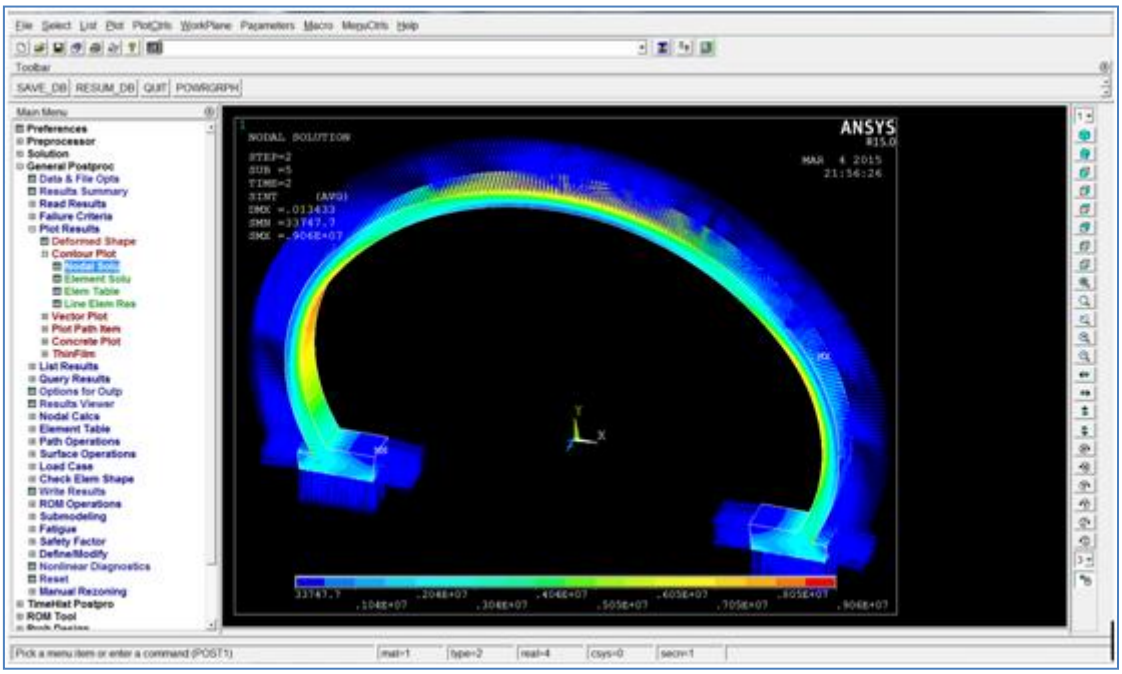
Εικόνα 4.7: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης λόγω εφαρμογής των φορτίων (αυτόματη κλίμακα απεικόνισης).



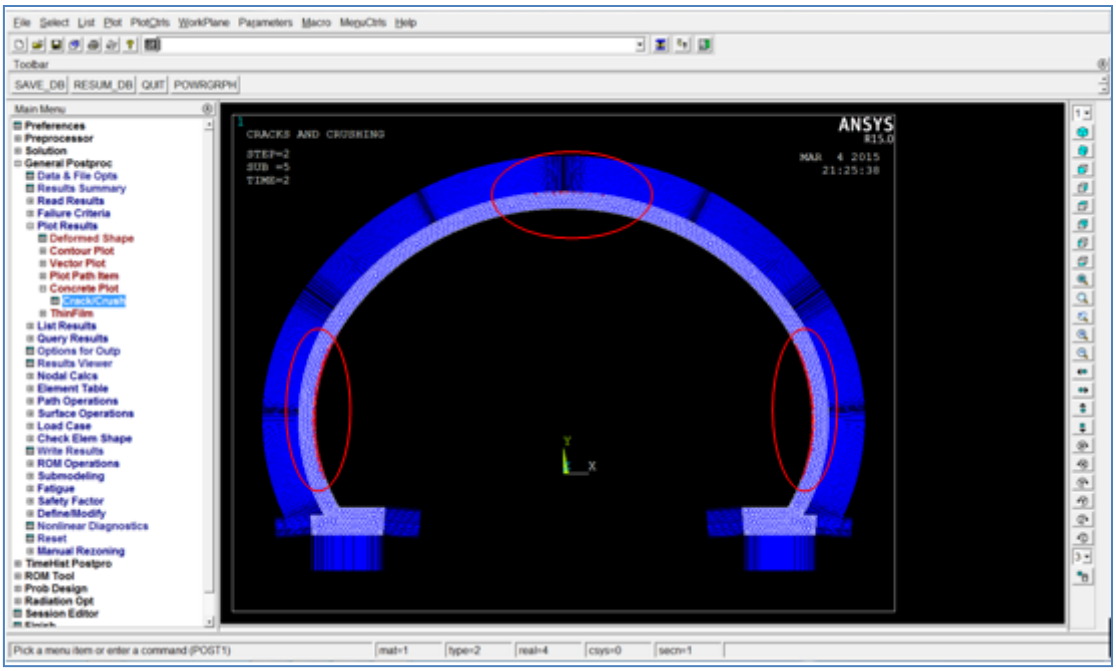
Εικόνα 4.8: Παραμόρφωση τελικής επένδυσης σε σχέση με την αρχική μη παραμορφούμενη (διακεκομμένη γραμμή).



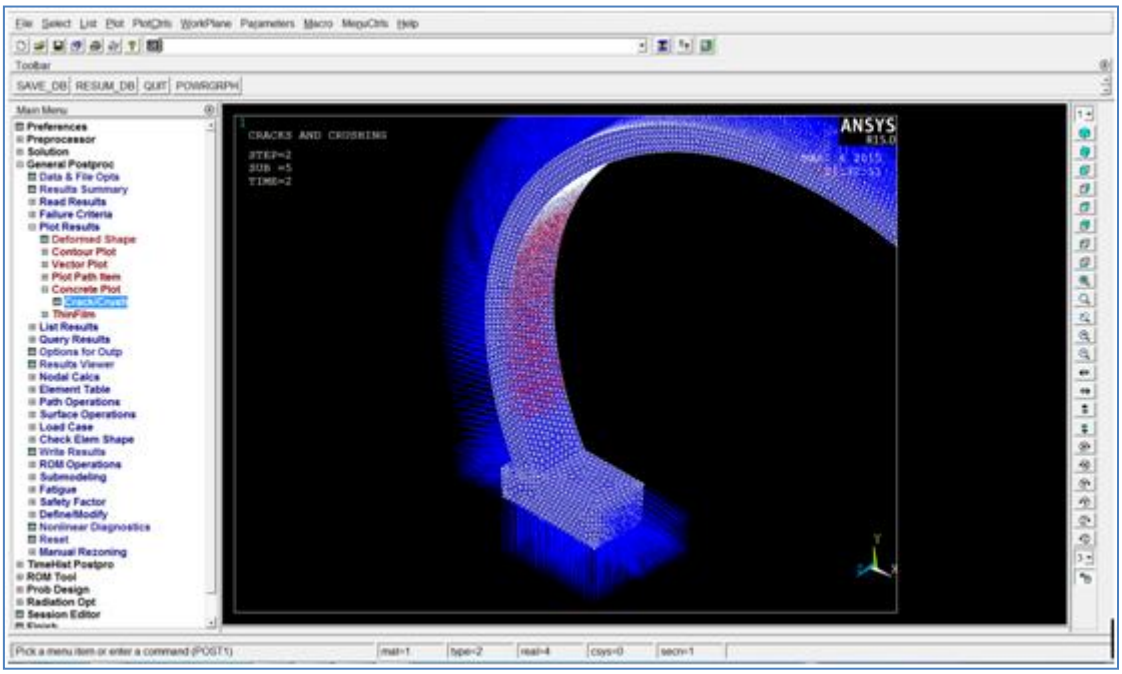
Εικόνα 4.9: Τάσεις που εφαρμόζονται στην διατομή (Stress Intensity).



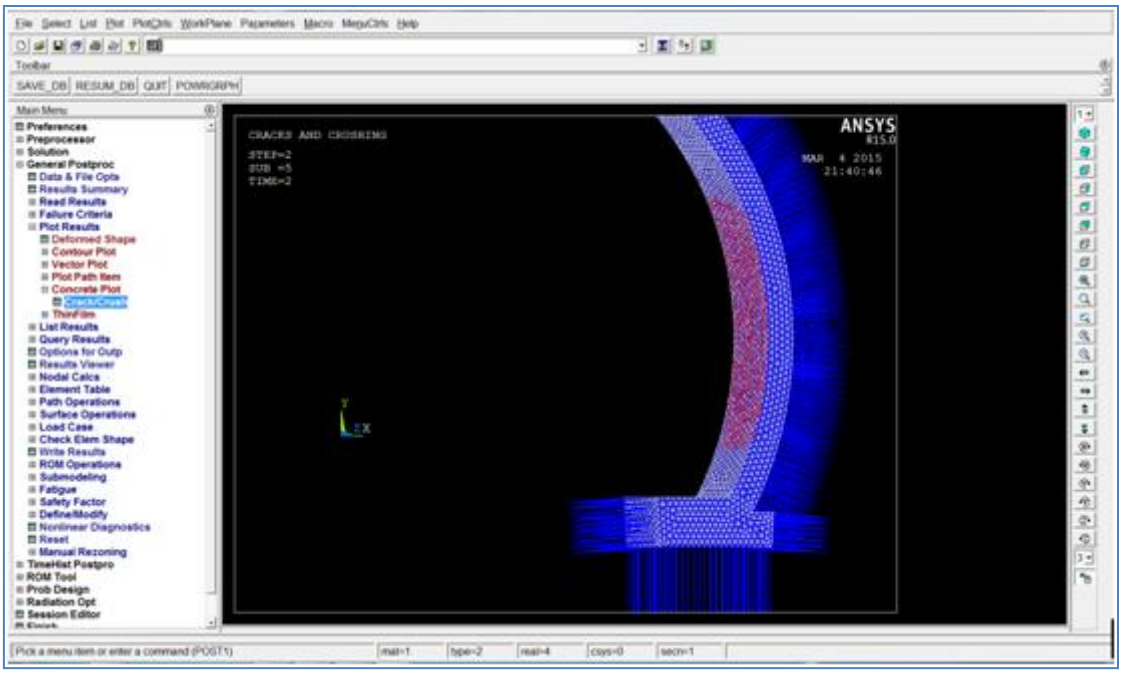
Εικόνα 4.10: Τάσεις που εφαρμόζονται στην διατομή-αξονομετρική απεικόνιση (Stress Intensity).



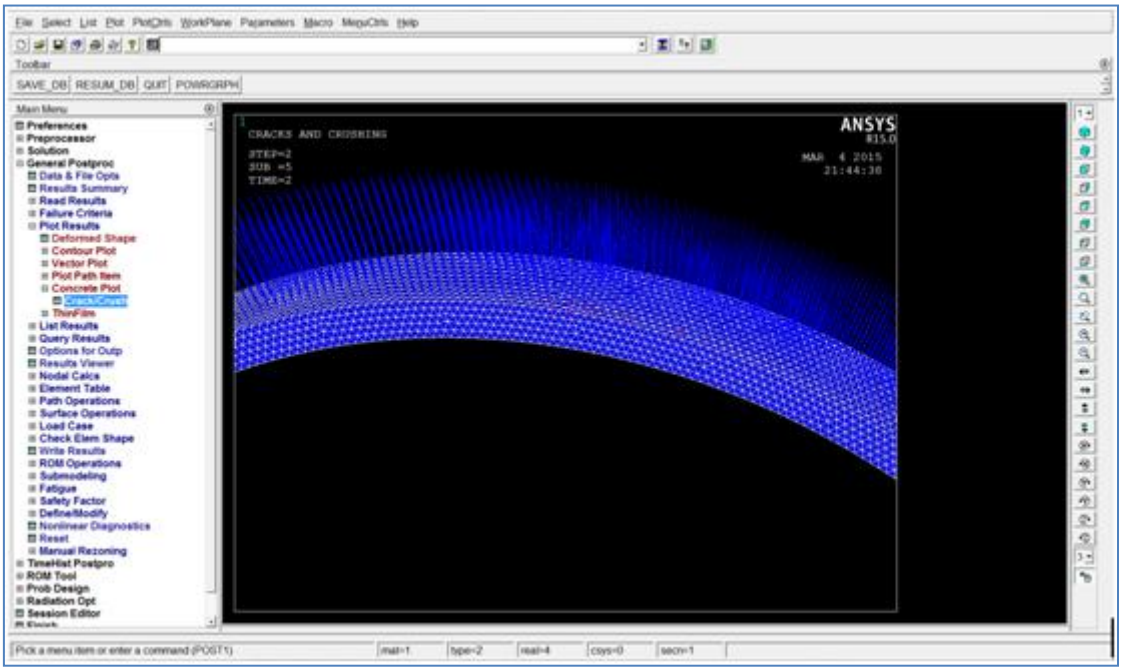
Εικόνα 4.11: Ρωγμάτωση του σκυροδέματος στις εσωτερικές παρειές και στο πάνω τμήμα της διατομής.



Εικόνα 4.12: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην αριστερή εσωτερική παρειά.



Εικόνα 4.13: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην δεξιά εσωτερική παρειά.



Εικόνα 4.14: Λεπτομέρεια ρωγμάτωσης του σκυροδέματος στην εξωτερική παρειά της οροφής.

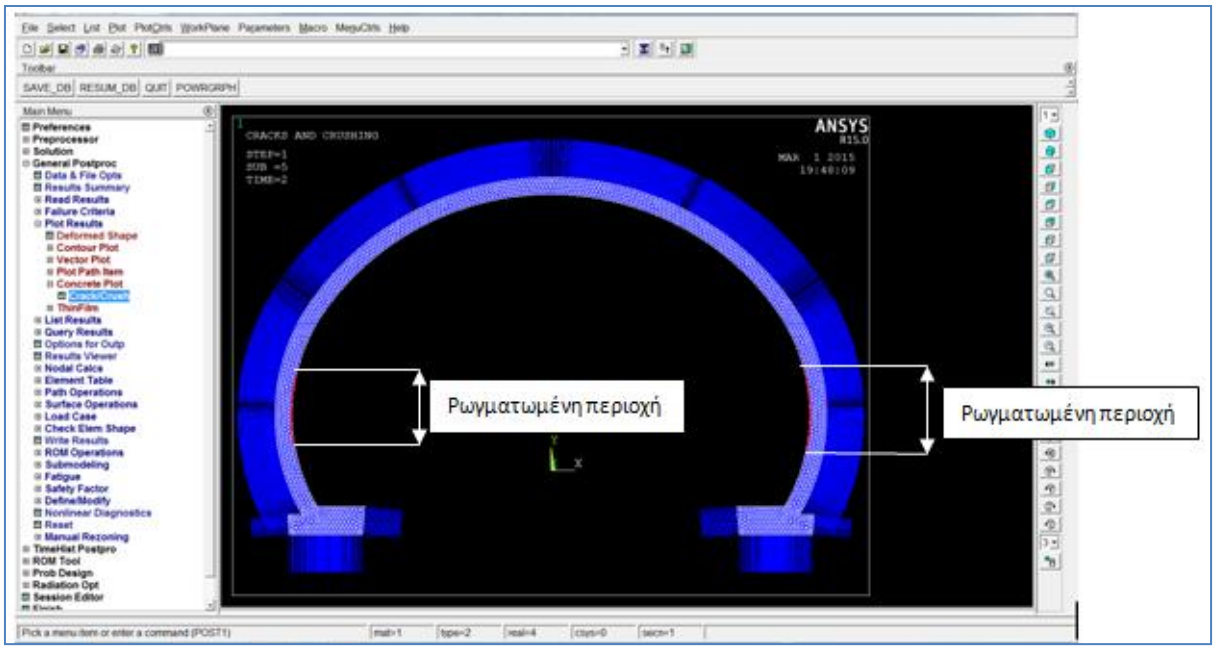
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατηρούμε ότι για την ίδια διατομή και για ίδια φορτία, μειώνοντας την ποιότητα (κατηγορία) του άοπλου σκυροδέματος το εύρος της ρωγματωμένης περιοχής στις παρειές αυξάνεται. Επίσης, με την μείωση της ποιότητας σκυροδέματος αρχίζει να

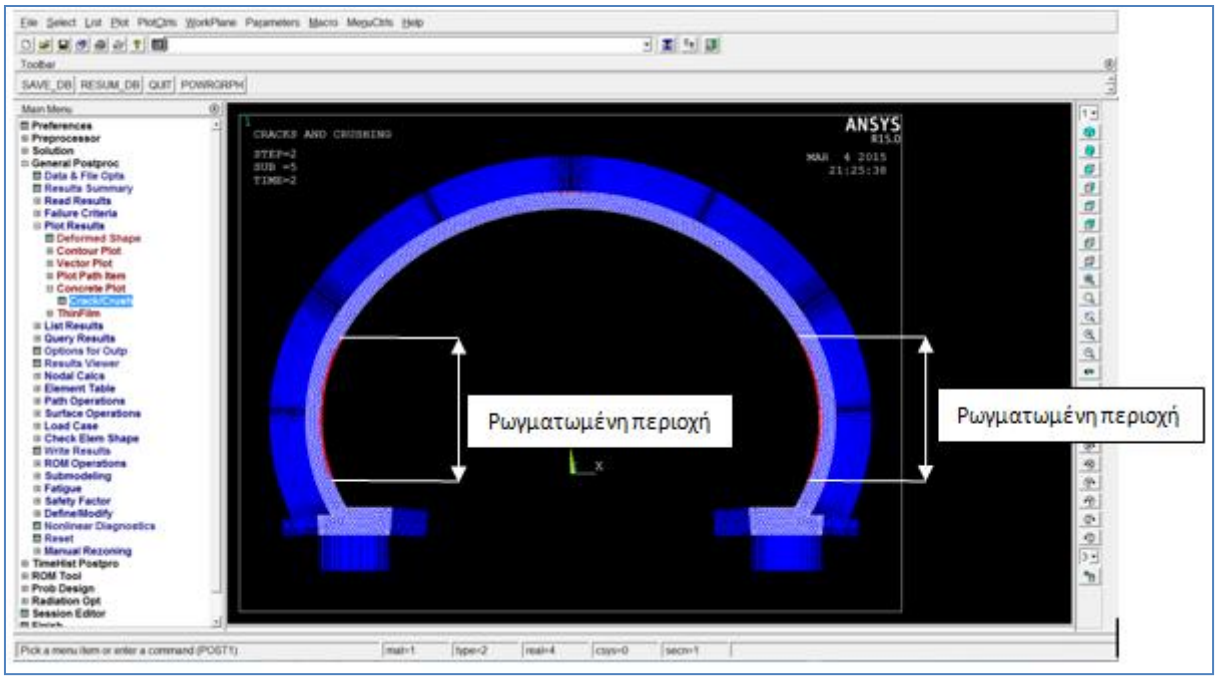
εμφανίζεται και ρωγμάτωση στην εξωτερική παρειά της οροφής της μόνιμης επένδυσης. Μπορούμε έτσι βάση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης να εκτιμήσουμε:

Πίνακας 4.2: Εύρος ρωγματωμένης περιοχής στις πλαϊνές παρειές και Εμφάνιση ρωγμών στην εξωτερική παρειά της οροφής σε σχέση με την Κατηγορία σκυροδέματος.

Κατηγορία σκυροδέματος	**Εύρος ρωγματωμένης περιοχής στις πλαϊνές παρειές.**	**Εμφάνιση ρωγμών στην εξωτερική παρειά της οροφής.**
C30/37	1,9 - 2,1 m	Όχι
C25/30	3,8 - 4,0 m	Ναι



Εικόνα 4.15: Εύρος ρωγματωμένης περιοχής πλευρικών παρειών χωρίς εμφάνιση ρωγμών στην οροφή για κατηγορία σκυροδέματος C30/37.



Εικόνα 4.16: Εύρος ρωγματωμένης περιοχής πλευρικών παρειών με εμφάνιση ρωγμών και στην οροφή για κατηγορία σκυροδέματος C25/30.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, βλέπουμε ότι η μόνιμη επένδυση ρωγματώνεται στις εσωτερικές τις παρειές (και στην οροφή) δίχως όμως αυτή η ρωγμάτωση να οδηγεί σε κάποια σημαντική αστοχία - κατάρρευση. Αυτό, δείχνει σε αρχικό στάδιο, ότι η ανοιχτή άοπλη επένδυση έχει εφαρμογή στο έργο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι βάση του κανονισμού ΟΜΟΕ σηράγγων (άρθρο 8), η ελάχιστη κατηγορία άοπλου σκυροδέματος για μόνιμη επένδυση είναι C20/25, και το ελάχιστο πάχος τελικής επένδυσης 0,30 m. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματά μας, αν τοποθετούσαμε στην κατασκευή μας σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 θα αναμέναμε μεγαλύτερα εύρη ρωγμάτωσης στις παρειές και στην οροφή της σήραγγας. Το συμπέρασμα αυτό θεωρείται λογικό και αποδεκτό για περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^{ο}: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ

5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΟΠΛΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η τάση κατασκευής τελικής επένδυσης από άοπλο σκυρόδεμα έναντι οπλισμένου, ήταν και η βασική πηγή «έμπνευσης» για την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Για την πληρότητα της, είναι αναγκαία μια σύγκριση κόστους άοπλου σκυροδέματος έναντι οπλισμένου για την διατομή επένδυσης (ανοιχτού τύπου) που προσομοιώσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τον σκοπό αυτό, θα πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές:

- ✓ Θεωρείται ίδια ποιότητα σκυροδέματος C 30/37 τόσο στην άοπλη όσο και στην οπλισμένη διατομή.
- ✓ Θεωρείται ποιότητα δομικού χάλυβα S500 στην περίπτωση της οπλισμένης διατομής.
- ✓ Λαμβάνεται κόστος σκυροδέματος 100 € / m^3
- ✓ Λαμβάνεται κόστος χάλυβα 0,90 € / Kg (εύρος τιμής: 900-1000 € / ton).
  (Οι παραπάνω τιμές ελήφθησαν από καταλόγους τιμολογίων για το έτος 2009).

Η διατομή (ανοιχτού τύπου) που προσομοιώσαμε έχει επιφάνεια A= 14,47 m^2 και καταλαμβάνει όγκο V= 14,47 $m^2 \cdot 1$ m = 14,47 m^3 ανά τρέχον μέτρο.

Οπότε, για την περίπτωση της άοπλης επένδυσης θα απαιτηθούν 14,47 $m^3 \cdot$ 100 € = 1.447 € για σκυρόδεμα κατηγορίας C 30/37.

Για την περίπτωση της οπλισμένης επένδυσης, λαμβάνουμε ότι θα τοποθετηθεί τουλάχιστον οπλισμός S500 100 Kg / m^3 σκυροδέματος (ελάχιστη αναλογία). Οπότε στην περίπτωση αυτή θα απαιτηθούν τουλάχιστον 1.447 Kg οπλισμού S500 που κοστίζουν 1.302,3 €.

Δηλαδή το εκτιμώμενο τελικό κόστος (βάση των παραδοχών μας) για την οπλισμένη διατομή είναι 1.447 € + 1.302 € = 2.749 € ανά τρέχον μέτρο, σχεδόν διπλάσιο απ' αυτό της άοπλης διατομής. (Χωρίς να ληφθεί υπ' όψη και τα επιμέρους κόστη εργασίας της τοποθέτησης οπλισμού).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προώθηση της άοπλης τελικής επένδυσης έναντι της οπλισμένης έγκειται λιγότερο στο γεγονός της οικονομικότερης κατασκευής από άποψη κόστους υλικών κατασκευής, αλλά ο κρίσιμος παράγοντας που κάνει την άοπλη τελική επένδυση πιο ελκυστική είναι μεγαλύτερη ταχύτητα στην κατασκευή αυτής που έχει ως αποτέλεσμα την μη καθυστέρηση όλου του έργου. Καθώς στην οπλισμένη τελική επένδυση υπάρχει μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία στο καλούπωμα και στο σιδέρωμα του μεταλλότυπου, όπου χρονοτριβεί όλη η κατασκευή του έργου.

5.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, η τοποθέτηση οπλισμού στον μεταλλότυπο είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα εργασία. Έστω και στην τοποθέτηση ελάχιστου οπλισμού, προκύπτουν προβλήματα που ορισμένες φορές είναι δύσκολο να αντιμετωπισθούν. Ο Kuesel [(1996), "Tunnel Stabilization and linin", ch. 5 in “Tunnel Engineering Handbook”, ed. Bickel JO, Kuesel TR, King EH.] θεωρεί ότι δεν υπάρχει λογική αιτιολόγηση για την τοποθέτηση οπλισμού χάλυβα στην εξωτερική ίνα της εσωτερικής επένδυσης. Στην εσωτερική ίνα, ένας διαμήκης οπλισμός προσφέρει αντίσταση στη ρωγμάτωση λόγω συρρίκνωσης, και ένας επαρκής περιφερειακός οπλισμός στηρίζει το διαμήκη στη θέση του έναντι της πίεσης που ασκεί το αντλούμενο σκυρόδεμα γλιστρώντας προς τα κάτω στο μεταλλότυπο. Η τοποθέτηση οπλισμού δεν αναστέλλει βέβαια τη ρωγμάτωση, μειώνει όμως το άνοιγμα κάθε ρωγμής με σύγχρονη μείωση της απόστασής τους. Ένας ελάχιστος οπλισμός, χωρίς να προσφέρει αντοχή, επιτυγχάνει επομένως αυτή τη μείωση, [Maidl, (2004) "Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus", Band I, 3 Auflage, Verlag Gluckauf.]. Όμως, από την τοποθέτηση του οπλισμού αυτού προκύπτουν τα παρακάτω σημαντικά μειονεκτήματα (Maidl, 2004):

- ✓ Όταν τοποθετείται μεμβράνη στεγανοποίησης μεταξύ των δύο επενδύσεων, ο οπλισμός της εσωτερικής επένδυσης είναι ανεπιθύμητος, δεδομένου ότι είτε θα απαιτηθεί το τρύπημα της μεμβράνης για την τοποθέτηση στηριγμάτων στερέωσης του οπλισμού στη θέση του έναντι της πίεσης του αντλούμενου σκυροδέματος είτε θα είναι δύσκολη η σταθεροποίηση ενός ανεξάρτητου δισδιάστατου πλέγματος οπλισμού. Είναι επίσης δύσκολο να αποκλειστεί το κατά λάθος τρύπημα ή ο τραυματισμός της μεμβράνης στεγάνωσης κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης του χάλυβα οπλισμού, χωρίς μάλιστα να μπορεί να ελεγχθεί. Τούτο δύναται να έχει σαν αποτέλεσμα την εισροή νερού στη σήραγγα.

- ✓ Η ύπαρξη του οπλισμού παρεμποδίζει την αποτελεσματικότητα της δόνησης στη συμπύκνωση του σκυροδέματος, και δύναται να συντελεί στην απόμιξη του σκυροδέματος σε αδρομερή και λεπτομερή.

- ✓ Σε περίπτωση πυρκαγιάς, δημιουργούνται αστοχίες λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς του χάλυβα και του σκυροδέματος.

Τα παραπάνω προβλήματα απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά την φάση κατασκευής διότι εκτός από το αρχικό (επιπλέον) κόστος του οπλισμού, τα τυχόν λάθη κατά την κατασκευή αυξάνουν επιπλέον το κόστος και την χρονική καθυστέρηση.

5.3 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Συνοψίζοντας όσα ειπώθηκαν παραπάνω, η επιλογή εφαρμογής άοπλης τελικής επένδυσης δείχνει να υπερτερεί έναντι της οπλισμένης και θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη τόσο από τους μελετητές όσο και από τους κατασκευαστές, αναδόχους, κλπ. Δεν θα πρέπει να παραλείπεται όμως ότι η προτίμηση της άοπλης επένδυσης αποτελεί συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών της περιοχής του έργου.

Για ότι αφορά το έργο της παρούσας εργασίας, μπορεί να γίνει με ασφάλεια η εφαρμογή άοπλης τελικής επένδυσης (ανοιχτής ή κλειστής) σε τμήματα όπου οι γεωλογικές συνθήκες το επιτρέπουν. Επίσης, θα πρέπει να επισημάνουμε και να συγκρατήσουμε ότι:

- ✓ Η έννοια της άοπλης τελικής επένδυσης δεν πρέπει να είναι απαγορευτική.

- ✓ Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, ένας σημαντικός αριθμός των οδικών και σιδηροδρομικών σηράγγων με τελική επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα έχουν κατασκευαστεί με επιτυχία.

- ✓ Η δομική ακεραιότητα μίας επένδυσης από άοπλο σκυρόδεμα δεν επηρεάζεται για την περίπτωση εφαρμογής σε βραχομάζες με E_{rm} > 800 MPa - 1000 MPa , ακόμη και σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας και ακανόνιστη τοπογραφία.

- ✓ Επενδύσεις σήραγγας από άοπλο σκυρόδεμα σε βραχομάζες χαμηλού μέτρου ελαστικότητας E_{rm} (300MPa < E_{rm} ≤ 800MPa) μπορούν να εμφανίζουν σημαντική ρωγμάτωση , σε συνδυασμό με θραύση.

- ✓ Σε στόμια σηράγγων , καθώς και σε περιοχές όπου διέρχονται ενεργά ρήγματα , πρέπει να αποφεύγεται η εφαρμογή επένδυσης από άοπλο σκυρόδεμα.

- ✓ Άοπλες τελικές επενδύσεις μικρού πάχους (30-40 cm) θα πρέπει να αποφεύγονται σε βραχομάζες "φτωχών" μηχανικών χαρακτηριστικών ($E_{rm} \leq 300$ MPa) διότι υπάρχει κίνδυνος σύνθλιψης.

- ✓ Ο Ευρωκώδικας 2 (EN 1992-1 Κεφάλαιο 12) όσο και οι συστάσεις AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain), παρέχουν το αναγκαίο πλαίσιο-κώδικα για το σχεδιασμό των τελικών επενδύσεων σηράγγων από άοπλο σκυρόδεμα.

5.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ

Σε μία μελλοντική και πιο ρεαλιστική αριθμητική ανάλυση, θα μπορούσαμε να λάβουμε υπόψη μας και άλλες φορτίσεις (με αντίστοιχους συντελεστές σχεδιασμού) που δέχεται η επένδυση όπως:

- ✓ Ομοιόμορφη πτώση θερμοκρασίας λόγω συστολής ξήρανσης.
- ✓ Ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας λόγω του υπόγειου χαρακτήρα του έργου.
- ✓ Τυχηματικές δράσεις όπως έκρηξη, υδροστατική πίεση.

Επίσης, θα μπορούσαμε να προσομοιώσουμε την περιβάλλουσα βραχόμαζα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπ' όψη και την διάτμηση στην διεπιφάνεια βράχου-επένδυσης.

Στην περίπτωση αυτή θα είχαμε μια πιο ακριβή εικόνα του τρόπου ρωγμάτωσης και συμπεριφοράς της μόνιμης επένδυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ:

SALFO & Associates LTD Professional Consulting Services. (2009) "PATHE Section Maliakos - Kleidi" Project.

Ilias K. Michalis. (2014). "Evaluating the application limits of unreinforced concrete tunnel final linings".

Willam, K. J. and Warnke, E. P. (1975). "*Constitutive models for the triaxial behavior of concrete"*. Proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering , vol 19, ISMES, Bergamo, Italy, pp. 174.

Vesic, A.B. (1961). "Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solids". Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 87, pp. 35-53.

Kachlakev D., Miller T., Yim S. and Chansawat K., (2001). "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates". Civil and Environmental Engineering, Department California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

ANSYS Inc. (2013). ANSYS Mechanical APDL Element Reference, Release 15.0.

ANSYS Inc. (2013). ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide, Release 15.0.

ANSYS Training Manual. (2001). Module 8, Introduction to Nonlinear Analysis.

ΕΛΛΗΝΟΦΩΝΗ:

Π. Γ. Μαρίνος. (2013-2014). Σήραγγες Τεμπών - Πλαταμώνα. Σημειώσεις "Υπό Κατασκευή Σήραγγες Στην Ελλάδα - Τόμος Ι" στα Πλαίσια Εκπαιδευτικής Εκδρομής.

Α. Ι. Σοφιανός. (2014). Κεφάλαιο 7, "Μόνιμη Επένδυση από Έγχυτο Σκυρόδεμα". Σημειώσεις Μαθήματος Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων Δ.Π.Μ.Σ. ΣΚΥΕ.

Πενέλης, Κάππος, Ιγνατάκης, Σέξτος. (2011) . Ευρωκώδικας 2 Σχεδιασμός Φορέων από Σκυρόδεμα. Μέρος 1-1, Κεφάλαιο 3. Διαφάνειες Παρουσίασης Εκπαιδευτικών Σεμιναρίων.

Σακκάς, Αγγέλης, Μπακογιάννης, Καζίλης, Ροζενμπεργκ, Σοφιανός, Ηλίας, Αντωνίου. (2002). Ο.Μ.Ο.Ε. Σηράγγων, Τεύχος Οδικών Σηράγγων.

Μ. Παπαδρακάκης. (2001). "Ανάλυση φορέων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων".