



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ. "ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ"
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

2D & 3D ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΦΡΕΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ANALYSIS OF A SHAFT USING 2D & 3D FINITE ELEMENT PROGRAMS

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Ανδρέα Γ. Σεραφή
Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:
Β. ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2016

στον θείο μου Γιώργο,

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων” το οποίο πραγματοποιείται με τη συνεργασία των Σχολών Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών και Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Η παρότρυνση αλλά και η ανάθεση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού θέματος οφείλεται στην κα. Β. Γεωργιάννου, Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. την οποία οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη που έδειξε πρὸς το πρόσωπό μου. Οι επισημάνσεις της, τόσο για την ορθή δομή των αναλύσεων όσο και για την καταγραφή ουσιαστικών συμπερασμάτων, ήταν καταλυτικές καθ’ όλη τη διάρκεια σύνταξης της παρούσας εργασίας.

Επίσης θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Ν. Γερόλυμο, Επ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε με σκοπό την τεκμηριωμένη ανάλυση του συγκεκριμένου υπογείου έργου. Χωρίς την προσφορά του, θα ήταν αδύνατη η καταγραφή των τριδιάστατων αναλύσεων οι οποίες αποτελούν ένα καθοριστικό κεφάλαιο της μεταπτυχιακής εργασίας.

Επιπλέον, μετά το τέλος όλης αυτής της επίπονης προσπάθειας, επιθυμώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους εκείνους που συνέβαλαν ποικιλότροπα στην εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας και ιδιαίτερα:

Τον κ. Δ. Παπαδόπουλο, Τεχνικό Γεωλόγο, M.Sc., για την παράθεση πολύ χρήσιμων δεδομένων με σκοπό την εμπειριστατωμένη ανάλυση του υπογείου έργου. Η μεταπτυχιακή του εργασία στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων” αποτέλεσε το “έναυσμα” για την περαιτέρω ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στη δική μου εργασία.

Τον κ. Μ. Αντωνίνη, Πολιτικό Μηχανικό, M.Sc., για την αμέριστη συμπαράσταση του και την επιστημονική βοήθεια που μου προσέφερε στον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και στην αξιολόγηση των εντατικών μεγεθών του φρέατος, όπως προέκυψαν από τις διδιάστατες και τριδιάστατες αναλύσεις.

Την κα. Γ. Παπαυγέρη, Πολιτικό Μηχανικό, M.Sc., αλλά και τον κ. Ε. Λυμπέρη, Τεχνικό Γεωλόγο, M.Sc., για την παροχή στοιχείων σχετικά με την εκσκαφή και υποστήριξη κυλινδρικών ανοιγμάτων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την βαθύτερη κατανόηση της υπόψη μεθόδου κατασκευής φρεάτων.

Τον κ. Ε. Τσαντάκη, Μεταλλειολόγο Μηχανικό, M.Sc., για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις που είχαμε σε θέματα προσομοίωσης υπογείων ανοιγμάτων με τη χρήση γεωτεχνικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου για την ψυχολογική συμπαράσταση αλλά και την οικονομική τους αρωγή καθ’ όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Περίληψη

Η υποστήριξη κυλινδρικών υπογείων ανοιγμάτων με την χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων (PCC segments) αποτελεί το αντικείμενο της Μεταπτυχιακής Εργασίας. Πιο συγκεκριμένα προσομοιώνεται η εκσκαφή και υποστήριξη κατακόρυφου κυλινδρικού φρέατος με την μέθοδο “Underpin” σε ξηρούς οριζόντιους εδαφικούς σχηματισμούς (με μικρή τιμή της συνοχής). Το συγκεκριμένο προσομοίωμα θεωρείται αξονοσυμμετρικό και επιλύεται με τη χρήση των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων “Plaxis 2D” και “Plaxis 3D”.

Πρόκειται για φρέαρ εξυπηρέτησης αστικού υπογείου έργου, η κατασκευή του οποίου πραγματοποιείται σε 17 φάσεις με το βάθος πυθμένα να είναι στα 24m. Κρίσιμες παράμετροι των αναλύσεων αποτέλεσαν η επιλογή του καταστατικού νόμου που περιγράφει τη συμπεριφορά των εδαφικών στρώσεων (“Mohr-Coulomb” Model ή “Hardening Soil” Model) και η διάμετρος του φρέατος. Η αλλαγή των παραμέτρων διατμητικής αντοχής (c' , ϕ') των διεπιφανειών, με τις οποίες προσομοιώνεται το εδαφικό υλικό των κατακόρυφων παρειών που βρίσκεται σε επαφή με την υποστήριξη, αποδεικνύεται δευτερεύουσας σημασίας.

Τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις αφορούν την ανύψωση πυθμένα λόγω αποφόρτισης, τον σχηματισμό ζωνών έντονων πλαστικών παραμορφώσεων περιμετρικά του πυθμένα, την καθίζηση επιφανείας πλησίον της εκσκαφής και την ανάπτυξη σημαντικών εφαπτομενικών τάσεων επί των προκατασκευασμένων στοιχείων.

Η Μεταπτυχιακή Εργασία αναδεικνύει με χαρακτηριστικό τρόπο ποικίλα ζητήματα όπως είναι η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, η χρησιμότητα των τριδιάστατων αναλύσεων σε αξονοσυμμετρικά προβλήματα, η αντιμετώπιση της γενικότερης μη ρεαλιστικής ανύψωσης του προσομοιώματος με χρήση του κριτηρίου “Mohr-Coulomb” και τέλος η συνεπής περιγραφή του μηχανισμού ανάπτυξης των εφαπτομενικών δυνάμεων “hoop forces” επί των προκατασκευασμένων δακτυλίων.

Abstract

The objective of this MSc Thesis is to investigate the method of supporting underground cylindrical openings using prefabricated elements (PCC segments). The “Underpin” Method was used to simulate the excavation and support of a vertical cylindrical shaft constructed in dry low cohesion horizontal soil layers. The excavation is simulated as an axisymmetric problem and the “Plaxis 2D” finite element program is applied; the analysis results are subsequently compared with the “Plaxis 3D” finite element analysis.

The excavation and support simulate the construction of an underground shaft, 24m deep, excavated and supported in seventeen phases. The shaft provides tunnel support services such as ventilation, personnel transportation etc.

It has been found that the constitutive model adopted to simulate the soil behaviour (“Mohr-Coulomb” or “Hardening-Soil” model) is the crucial parameter for the analyses as well as the shaft diameter. However, the variation of the shear strength parameters (c' , ϕ') at the soil-structure interface, has only a minor influence on the results of the analyses.

Floor uplift due to unloading, the development of an excessive plastic zone around the bottom of the vertical shaft, significant surface settlement around the shaft and most importantly the high values of tangential hoop stresses observed in the circular segmental rings, are the main issues which addressed during the calculations.

This MSc Thesis highlights a number of both numerical and geotechnical issues as associated with soil-structure interaction, and the usefulness of three-dimensional simulations for axisymmetric problems. Moreover, the Thesis highlights simulation problems such as the wider uplift observed when the “Mohr-Coulomb” failure criterion is used, and the importance of the distribution of hoop forces around the segmental plates.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΦΡΕΑΤΩΝ	1
1.1.1 Σκοπός της κατασκευής / λειτουργικές απαιτήσεις	2
1.1.2 Απαιτούμενο βάθος φρέατος	2
1.1.3 Σχήμα και γεωμετρία φρέατος	2
1.1.4 Γεωτεχνικές / Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	3
1.1.5 Απαιτήσεις του Κυρίου του Έργου και των ενδιαφερομένων μερών	3
1.2 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΦΡΕΑΤΩΝ.....	3
1.2.1 Υδραυλική Αστοχία	3
1.2.2 Καθιζήσεις γειτονικά της εκσκαφής	4
1.2.3 Αστοχία της υποστήριξης.....	4
1.2.4 Αστοχία λόγω θραύσεως - ανύψωσης του πυθμένα	4
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΕΑΤΩΝ	5
1.3.1 Προσωρινή υποστήριξη με χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων (segments)	5
1.3.2 Caisson Method	6
1.3.3 Underpin Method	7
1.3.4 Συνδυασμός των μεθόδων “Caisson” και “Underpin”	9
1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΟΙ ΣΤΟΧΟΙ	10
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	11
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	11
2.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΙ Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	12
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS 2D [®]	14
2.3.1 Plate elements	15
2.3.2 Soil elements.....	17
2.3.3 Interface elements.....	19
2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS 3D [®]	19
2.4.1 Plate elements	20
2.4.2 Interface elements.....	22
2.4.3 Volume elements	22

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ	23
3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ.....	23
3.2 ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	24
3.3. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ LINEAR ELASTIC.....	24
3.4 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΟΗΡ – COULOMB	25
3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ HARDENING SOIL.....	27
3.6 STAGED CONSTRUCTION	28
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ Plaxis 2D (Version 8.2).....	31
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
4.2 INPUT PRE-PROCESSING	33
4.2.1 Finite Element Model Creation	33
4.2.2 Material Sets	35
4.2.3 Generate Mesh	36
4.2.4 Generate Initial Stresses	37
4.3 CALCULATIONS.....	38
4.3.1 General Calculation Settings.....	38
4.3.2 Calculation control parameters	38
4.3.3 Selecting points for curves.....	40
4.4 OUTPUT DATA POST PROCESSING	43
4.4.1 Deformations	43
4.4.2 Stresses	50
4.4.3 Forces.....	52
4.5 LOAD – DISPLACEMENT CURVES AND STRESS PATHS	53
4.6 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 1– ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	57
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΟ Plaxis 2D (Version 8.2)	59
5.1 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 1.....	59
5.2 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 2.....	60
5.2.1 Plaxis 2D_ Analysis N ^o 2– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	68
5.3 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 3.....	69
5.3.1 Plaxis 2D_ Analysis N ^o 3– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	75
5.4 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 4.....	76
5.4.1 Plaxis 2D_ Analysis N ^o 4– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	81

5.5 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 5	82
5.5.1 Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	90
5.6 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 6	91
5.6.1 Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	99
5.7 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 7	99
5.7.1 Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	105
5.8 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N ^o 8	106
5.8.1 Plaxis 2D_ Analysis N ^o 8– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	111
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ Plaxis 3D (Version 2013)	113
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	113
6.2 GROUND MODELLING – SOIL MODE.....	114
6.2.1 Create Borehole	115
6.2.2 Show Materials	116
6.3 MODELLING STRUCTURES – STRUCTURE MODE	116
6.3.1 Import Structures.....	117
6.3.2 Array.....	118
6.3.3 Show Materials	118
6.4 MESH GENERATION – MESH MODE.....	119
6.5 CALCULATIONS.....	121
6.6 OUTPUT DATA.....	122
6.7 CURVES.....	136
6.8 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 1–ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	139
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΟ Plaxis 3D (Version 2013).....	143
7.1 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 1	143
7.2 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 2	143
7.2.1 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 2–Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.	154
7.3 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 3	155
7.3.1 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 3–Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.	164
7.4 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 4	165
7.4.1 PLAXIS 3D_ ANALYSIS N ^o 4–Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.	171
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	173
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	177

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ Plaxis 2D – ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ Plaxis 3D – ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1 : Διάνοιξη και υποστήριξη φρέατος με την μέθοδο “Caisson”	6
Εικόνα 2 : Διάνοιξη και υποστήριξη φρέατος με την μέθοδο “Underpin”	7
Εικόνα 3 : Ειδικός αναρτήρας για την τοποθέτηση των “segments”	7
Εικόνα 4 : Τα δύο σφηνοειδή τεμάχια κατά την κατασκευή του “segmental ring”	8
Εικόνα 5 : Τοποθέτηση κοχλιών στον οριζόντιο άξονα.....	8
Εικόνα 6 : Τοποθέτηση κοχλιών στον κατακόρυφο άξονα.	8
Εικόνα 7 : Τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων προσωρινής υποστήριξης με την μέθοδο “Underpin”	9
Εικόνα 8 : Λεπτομέρεια των προκατασκευασμένων στοιχείων της συνδυαστικής μεθόδου.	9
Εικόνα 9 : Η διαδικασία μοντελοποίησης του φυσικού προβλήματος και η επίλυση αυτού με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.	13
Εικόνα 10 : Το σύστημα συντεταγμένων και η θετική φορά των τάσεων σε μια αξονοσυμμετρική ανάλυση.....	14
Εικόνα 11 : Χαρακτηριστικό αξονοσυμμετρικό μοντέλο και η εισαγωγή του στο Plaxis2D.....	15
Εικόνα 12 : Συναρτήσεις σχήματος για 5-κομβικό γραμμικό στοιχείο.	16
Εικόνα 13 : Η απεικόνιση των κόμβων (nodes) και των stress points για το 15-κομβικό τριγωνικό soil element.....	17
Εικόνα 14 : Τοπικό σύστημα συντεταγμένων σε 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία.	18
Εικόνα 15 : Η διάταξη των “interface elements” και η απεικόνιση των κόμβων.	19
Εικόνα 16 : Το σύστημα συντεταγμένων και τα θετικά διανύσματα των τάσεων με χρήση του Plaxis 3D.	20
Εικόνα 17 : Η τυπική εικόνα ενός 6-κομβικού τριγωνικού plate element στο Plaxis 3D και η διαφοροποίησή του σε σχέση με τα τριγωνικά soil elements του Plaxis 2D.	20
Εικόνα 18 : Η θετική διεύθυνση των αξονικών δυνάμεων σε πλάκες.....	21
Εικόνα 19 : Η θετική διεύθυνση των τεμνουσών δυνάμεων σε πλάκες.....	21

Εικόνα 20 : Η θετική διεύθυνση των ροπών σε πλάκες.....	21
Εικόνα 21 : Η μορφή των interface elements στο Plaxis 3D.	22
Εικόνα 22 : Η μορφή των 10-κομβικών τετραεδρικών στοιχείων στο Plaxis 3D.	22
Εικόνα 23 : Ποιοτικό διάγραμμα κατάταξης των εδαφικών σχηματισμών.	24
Εικόνα 24 : Τυπική τομή των εδαφικών σχηματισμών στον κατακόρυφο άξονα.	24
Εικόνα 25 : Ο κώνος αστοχίας σε όρους κυρίων τάσεων κατά Mohr – Coulomb για μηδενική συνοχή. .	25
Εικόνα 26 : Η βασική ιδέα ενός ελαστικού – απολύτως πλαστικού μοντέλου.....	25
Εικόνα 27 : Απεικόνιση της εφελκυστικής αντοχής του εδάφους και της περιβάλλουσας αστοχίας κατά Mohr–Coulomb.....	26
Εικόνα 28 : Ο καθορισμός του E_{oed}^{ref} μετά από αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου και η ελαστική συμπεριφορά του εδάφους κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση σύμφωνα με το κριτήριο “Hardening Soil”.....	27
Εικόνα 29 : Χαρακτηριστική εδαφική συμπεριφορά σε όρους δυσκαμψίας-παραμόρφωσης για ορισμένα τυπικά εύρη παραμορφώσεων που αφορούν συγκεκριμένες κατασκευές.	28
Εικόνα 30 : Plaxis 2D-Εισαγωγή των γενικών στοιχείων του project.....	33
Εικόνα 31 : Plaxis 2D-Εισαγωγή των μονάδων και των διαστάσεων του καννάβου του αριθμητικού προσομοιώματος.	33
Εικόνα 32 : Plaxis 2D_Analysis N ⁰ 1- Τα χαρακτηριστικά “materials” κατά την “1 st Analysis”.	35
Εικόνα 33 : Η επιλογή της τιμής του R_{inter} για τα “interface materials” της 1 st Analysis.	35
Εικόνα 34 : Το “mesh generation setup” το οποίο ισχύει για όλες τις δι-διάστατες αναλύσεις.....	36
Εικόνα 35 : Το γεωμετρικό μοντέλο σε όρους πεπερασμένων στοιχείων συνοδευόμενο με λεπτομερέστερη απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος.....	36
Εικόνα 36 : Το αρχικό πεδίο των ενεργών κυρίων τάσεων και λεπτομερέστερη απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος.....	37
Εικόνα 37 : Η καρτέλα “general” κατά το στάδιο των υπολογισμών.	38
Εικόνα 38 : Η καρτέλα “manual setting” της υποενότητας “Iterative procedure”.....	39
Εικόνα 39 : Η καρτέλα “parameters” κατά το στάδιο των υπολογισμών.....	39

Εικόνα 40 : Τα επτά χαρακτηριστικά σημεία (nodes) που επιλέγονται για την χάραξη καμπυλών φόρτισης – μετακίνησης (load-displacement curves).	40
Εικόνα 41 : Τα τρία χαρακτηριστικά σημεία (stress points) που επιλέγονται για την χάραξη καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων (stress-strain curves).	42
Εικόνα 42 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Σύγκριση των “deformed meshes” κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).	44
Εικόνα 43 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Σύγκριση των ολικών εδαφικών μετακινήσεων κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).	45
Εικόνα 44 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	46
Εικόνα 45 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Οριζόντιες και κατακόρυφες προσαυξημένες μετακινήσεις μετά την προτελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 16).	47
Εικόνα 46 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Οριζόντιες και κατακόρυφες προσαυξημένες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	48
Εικόνα 47 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Οι προσαυξημένες τροπές τις κύριες διευθύνσεις κατά την Φάση 16 και κατά την Φάση 17 (τοποθέτηση τελευταίου “segmental lining” και “lean concrete”).	49
Εικόνα 48 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Η διεύθυνση των ενεργών κύριων τάσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης.	50
Εικόνα 49 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).	51
Εικόνα 50 : Διάγραμμα hoop forces του φορέα της 1 st Analysis κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	52
Εικόνα 51 : Επιλογή των κατάλληλων μεγεθών για την χάραξη καμπυλών φορτίου- μετατόπισης (Point C_1 st Analysis).	53
Εικόνα 52 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Η καμπύλη ανύψωσης του κόμβου C (0.00m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης σε όρους “Sum-Mstage – U _y “	54
Εικόνα 53 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου D (+5.340m ,+75.80m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	55
Εικόνα 54 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Η καμπύλη οριζόντιων μετακινήσεων του κόμβου E (+5.00m,+78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	55

Εικόνα 55 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- Η καμπύλη οριζόντιων μετακινήσεων του κόμβου F(+5.410m,+78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	56
Εικόνα 56 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 1- – Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου G (+5.980m , +83.50m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	56
Εικόνα 57 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Σύγκριση των “deformed meshes” κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).	61
Εικόνα 58 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Οι οριζόντιες μετακινήσεις και η προσαύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων κατά την Φάση 16.....	62
Εικόνα 59 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Οι οριζόντιες μετακινήσεις και η προσαύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων κατά την τελευταία φάση [προσομοίωσης (Φάση 17)].....	63
Εικόνα 60 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).	64
Εικόνα 61 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 - Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	65
Εικόνα 62 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Η καμπύλη κατακορύφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	66
Εικόνα 63 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου B (+5.410m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	66
Εικόνα 64 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου C (+5.340m , +75.80m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	67
Εικόνα 65 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 2 – Η καμπύλη οριζοντίων τάσεων-τροπών του κόμβου D (+5.60m , +78.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	67
Εικόνα 66 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 3 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	70
Εικόνα 67 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 3 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	71
Εικόνα 68 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 3- Διάγραμμα hoop forces του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	72
Εικόνα 69 : Plaxis 2D_ Analysis N ⁰ 3 – Η καμπύλη κατακορύφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	73

Εικόνα 70 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 3 – Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου B(+5.340m , +75.80m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	73
Εικόνα 71 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 3 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+5.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	74
Εικόνα 72 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 3 - Οι ορθές τροπές στον κατακόρυφο άξονα για το Stress point E (0.00m, +75.80m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	74
Εικόνα 73 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 3 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων – τροπών στον οριζόντιο άξονα του Stress point F (+5.100m , +78.30m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	75
Εικόνα 74 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 4 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	77
Εικόνα 75 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 4 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	78
Εικόνα 76 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 4- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	79
Εικόνα 77 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 4 – Η καμπύλη κατακορύφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	80
Εικόνα 78 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 4 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+5.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	80
Εικόνα 79 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 4 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων–τροπών (στον οριζόντιο άξονα) του Stress point F (+5.100m , +78.30m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	81
Εικόνα 80 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 5 – Απεικόνιση του “deformed mesh” κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	83
Εικόνα 81 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 5 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	84
Εικόνα 82 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 5 – Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).	85
Εικόνα 83 : Plaxis 2D_ Analysis N ^ο 5- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	86

Εικόνα 84 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 – Η καμπύλη κατακόρυφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	87
Εικόνα 85 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 – Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου B (+8.170m , +75.60m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	88
Εικόνα 86 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+8.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	88
Εικόνα 87 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 - Οι ορθές τροπές (στον κατακόρυφο άξονα) για το Stress point E (0.00m, +75.70m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	89
Εικόνα 88 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” D (+8.170m , +75.60m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	89
Εικόνα 89 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων–τροπών (στον οριζόντιο άξονα) του Stress point F (+8.090m , +78.30m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	90
Εικόνα 90 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	92
Εικόνα 91 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 – Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).	93
Εικόνα 92 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17)	94
Εικόνα 93 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου B (+8.870m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	95
Εικόνα 94 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων–τροπών (στον οριζόντιο άξονα) του Stress point D (+8.670m , +78.00m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	95
Εικόνα 95 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” E (+8.250m , +76.50m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	96
Εικόνα 96 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις τις διεπιφάνειας μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	97
Εικόνα 97 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 – Ενεργές ορθές τάσεις και διατμητικές τάσεις επί τις διεπιφάνειας μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	98

Εικόνα 98 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 – Απεικόνιση του “deformed mesh” μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	100
Εικόνα 99 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	101
Εικόνα 100 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	102
Εικόνα 101 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	103
Εικόνα 102 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 – Η καμπύλη κατακορύφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	104
Εικόνα 103 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+8.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	104
Εικόνα 104 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” D (+8.150m , +75.60m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	105
Εικόνα 105 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 8 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	107
Εικόνα 106 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 8 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	108
Εικόνα 107 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 8- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).	109
Εικόνα 108 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 8 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” D (+8.150m , +75.60m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	111
Εικόνα 109 : Plaxis 3D_ Εισαγωγή των μονάδων και των διαστάσεων του καννάβου του αριθμητικού προσομοιώματος.	114
Εικόνα 110 : Plaxis 3D_ Ο καθορισμός των εδαφικών στρώσεων με το βάθος.	115
Εικόνα 111 : Plaxis 3D_ Ο προσδιορισμός των “ξηρών” συνθηκών κατά την προσομοίωση.	116
Εικόνα 112 : Plaxis 3D_ Ο προσδιορισμός των “initial conditions” κατά την προσομοίωση.	116
Εικόνα 113 : Plaxis 3D_ Η εισαγωγή του στοιχειώδους κυλινδρικού στοιχείου για την σχεδίαση του προσομοιώματος.	117

Εικόνα 114 : Plaxis 3D_ Η εντολή “array” με την οποία είναι δυνατή η σχεδίαση των στοιχείων μέχρι το βάθος των 24m.	118
Εικόνα 115 : Plaxis 3D_ Ο καθορισμός των “ξηρών συνθηκών” για το προσομοίωμα κατά το στάδιο “water levels”	120
Εικόνα 116 : Plaxis 3D_ Ο “κάνναβος” πεπερασμένων στοιχείων όπως προκύπτει από το “mesh mode”.	121
Εικόνα 117 : Plaxis 3D_ Οι απαραίτητες επιλογές στο στάδιο “Staged Construction” πριν την έναρξη των “Calculations”	121
Εικόνα 118 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Ο “παραμορφωμένος κάνναβος” πεπερασμένων στοιχείων μετά την 17 ^η φάση προσομοίωσης (τελευταία φάση).	122
Εικόνα 119 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 : Η ανύψωση πυθμένα και η καθίζηση της επιφανείας μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).....	123
Εικόνα 120 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Η προσαύξηση των κατακόρυφων μετακινήσεων μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).....	124
Εικόνα 121 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).....	125
Εικόνα 122 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Η προσαύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).....	126
Εικόνα 123 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Η προσαύξηση των ολικών μετακινήσεων μετά την 17 ^η φάση προσομοίωσης (τελευταία φάση).	127
Εικόνα 124 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Οι ορθές τροπές περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).....	128
Εικόνα 125 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Οι διατμητικές παραμορφώσεις περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).	129
Εικόνα 126 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Οι διατμητικές τάσεις περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).....	130
Εικόνα 127 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Τα σημεία αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).....	131
Εικόνα 128 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Απεικόνιση-σε τομή των σημείων αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16 ^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).	132

Εικόνα 129 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Οι τοπικοί άξονες σύμφωνα με τους οποίους χαρακτηρίζονται τα εντατικά μεγέθη (M, Q, N, Hoop forces).	133
Εικόνα 130 :Plaxis 3D_Analysis N ^o 1- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).....	134
Εικόνα 131 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Η καμπύλη των καθιζήσεων του “Node A” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	136
Εικόνα 132 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node B” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	137
Εικόνα 133 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node C” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	137
Εικόνα 134 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Η καμπύλη των οριζοντίων μετακινήσεων του “Node E” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	138
Εικόνα 135 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point K” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	138
Εικόνα 136 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point M” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	139
Εικόνα 137 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 - Η τριδιάστατη απεικόνιση των “nodes” και των “stress points” με τη βοήθεια του “Plaxis 3D_Output”.	144
Εικόνα 138 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις των εδαφικών στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	145
Εικόνα 139 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 - Οι καθιζήσεις των επιφανειακών εδαφικών “στοιχείων” αλλά και η ανύψωση των κατώτερων στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	146
Εικόνα 140 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Οι ολικές οριζόντιες ορθές τροπές κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	147
Εικόνα 141 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Οι ολικές κατακόρυφες ορθές τροπές κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	148
Εικόνα 142 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Οι ολικές διατμητικές τροπές κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	149
Εικόνα 143 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Τα “ plastic points” περιμετρικά του φρέατος κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).	150

Εικόνα 144 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Η διακύμανση των τιμών του Μέτρου αποφόρτισης-επαναφόρτισης “ E_{ur} ” σε σχέση με το βάθος (φάση 17).....	151
Εικόνα 145 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).....	152
Εικόνα 146 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Η καμπύλη καθίζησης του κόμβου A για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	153
Εικόνα 147 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Η καμπύλη καθίζησης του κόμβου B για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	153
Εικόνα 148 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Η ανύψωση του κόμβου C (πυθμένας) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	154
Εικόνα 149 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 - Η τριδιάστατη απεικόνιση των “nodes” και των “stress points” με τη βοήθεια του “Plaxis 3D_Output.....	156
Εικόνα 150 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 - Οι καθιζήσεις των επιφανειακών εδαφικών “στοιχείων” αλλά και η ανύψωση των κατώτερων στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	157
Εικόνα 151 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις των εδαφικών στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	158
Εικόνα 152 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 – Οι ολικές διατμητικές παραμορφώσεις κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	159
Εικόνα 153 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 - Οι διατμητικές τάσεις περιμετρικά της εκσκαφής κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης.....	160
Εικόνα 154 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 - Τα σημεία αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης.....	161
Εικόνα 155 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 – Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).....	162
Εικόνα 156 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node C” (πυθμένας) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.	163
Εικόνα 157 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point M” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.....	163
Εικόνα 158 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 - Οι καθιζήσεις των επιφανειακών εδαφικών “στοιχείων” αλλά και η ανύψωση των κατώτερων στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	166

Εικόνα 159 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις των εδαφικών στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).....	166
Εικόνα 160 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Οι πρόσθετες οριζόντιες μετακινήσεις του προσομοιώματος κατά την προτελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 16).....	167
Εικόνα 161 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Οι ολικές οριζόντιες ορθές παραμορφώσεις των στρώσεων μετά το πέρας των αναλύσεων.....	167
Εικόνα 162 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Οι πρόσθετες οριζόντιες ορθές τροπές κατά την προτελευταία φάση προσομοίωσης (ανυποστήρικτη κατακόρυφη παρειά ύψους 1.5m).....	168
Εικόνα 163 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Οι ολικές διατμητικές παραμορφώσεις των στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης.....	168
Εικόνα 164 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Οι πρόσθετες διατμητικές παραμορφώσεις κατά την προτελευταία φάση προσομοίωσης.....	169
Εικόνα 165 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Οι οριζόντιες ορθές τάσεις μετά το πέρας της ανάλυσης.....	169
Εικόνα 166 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα μετά το πέρας της ανάλυσης.....	170
Εικόνα 167 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node C” (πυθμένας) μετά το πέρας της ανάλυσης.....	170
Εικόνα 168 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point K” μετά το πέρας της ανάλυσης.....	171

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 : Οι συναρτήσεις σχήματος των 15-κομβικών “soil elements” στο Plaxis2D.	18
Πίνακας 2 : Οι συναρτήσεις σχήματος των 10-κομβικών “volume elements” στο Plaxis 3D.	22
Πίνακας 3 : Τα χαρακτηριστικά των υλικών με συμπεριφορά “linear elastic”, τα οποία εισάγονται στο Plaxis.	24
Πίνακας 4 : Οι 6 συναρτήσεις έκφρασης του πλήρους κριτηρίου “Mohr – Coulomb”.	25
Πίνακας 5 : Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των δύο στρώσεων στις περιπτώσεις που αυτές συμπεριφέρονται σύμφωνα με το κριτήριο “Mohr – Coulomb”.	26
Πίνακας 6 : Οι φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης του κατακορύφου φρέατος , όπως αυτές προσομοιώνονται με τη μέθοδο “Underpin”.	28
Πίνακας 7 : Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των δύο στρώσεων στις περιπτώσεις που αυτές συμπεριφέρονται σύμφωνα με το κριτήριο “Hardening Soil”, για $E_{ur}=4 \cdot E_{50}$	29
Πίνακας 8 : Σύνομη περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων με χρήση του Plaxis 2D.	32
Πίνακας 9 : Βασικές εντολές για την κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου σε περιβάλλον Plaxis 2D. .	34
Πίνακας 10 :Plaxis 2D_Analysis N ^o 1 -Οι επτά κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	41
Πίνακας 11 : Plaxis 2D_Analysis N ^o 1 - Τα τρία stress points που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.	41
Πίνακας 12 : Ο διαχωρισμός των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, με χρήση του Plaxis 2D, σε τρεις βασικές κατηγορίες.	43
Πίνακας 13 : Χαρακτηριστικές καμπύλες μετατόπισης εξαρτώμενες από τις ιδιότητες του κάθε κόμβου.	53
Πίνακας 14 : Plaxis 2D_Analysis N ^o 1 – Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των διεπιφανειών κατά την πρώτη παραμετρική ανάλυση.....	59
Πίνακας 15 : Plaxis 2D_Analysis N ^o 2 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.....	60
Πίνακας 16 : Plaxis 2D_Analysis N ^o 2 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.	60

Πίνακας 17 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 3 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	69
Πίνακας 18 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 3 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	69
Πίνακας 19 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 4 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	76
Πίνακας 20 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 4 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	76
Πίνακας 21 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 – Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	82
Πίνακας 22 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 5 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	82
Πίνακας 23 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	91
Πίνακας 24 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 6 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	91
Πίνακας 25 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	100
Πίνακας 26 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 7 - Τα δύο “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	100
Πίνακας 27 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 8 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	106
Πίνακας 28 : Plaxis 2D_ Analysis N ^o 8 - Τα δύο “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	106
Πίνακας 29 :Plaxis 3D_ Σύντομη περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων με χρήση του Plaxis 3D. .	114
Πίνακας 30 : Plaxis 3D_Οι βασικές εντολές της ενότητας “soil mode”.....	115
Πίνακας 31 : Plaxis 3D_Οι βασικές εντολές τις ενότητας “structure mode”	116
Πίνακας 32 : Plaxis 3D_Οι βασικές εντολές τις ενότητας “mesh mode”	119

Πίνακας 33 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 – Οι πέντε κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	119
Πίνακας 34 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 1 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	120
Πίνακας 35 : Plaxis 3D_Η κατανομή των “hoop forces” στον οριζόντιο άξονα με την πάροδο των φάσεων προσομοίωσης.....	135
Πίνακας 36 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 – Οι πέντε κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	143
Πίνακας 37 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 2 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	144
Πίνακας 38 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 – Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	155
Πίνακας 39 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	156
Πίνακας 40 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 – Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”	165
Πίνακας 41 : Plaxis 3D_Analysis N ^o 4 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”	165

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΦΡΕΑΤΩΝ

Καθώς η κατασκευή σηράγγων γίνεται περισσότερο δημοφιλής με το πέρασμα των χρόνων, εντείνεται ταυτόχρονα και η ανάγκη για ασφαλέστερα, φθηνότερα και ταχύτερα συστήματα προσωρινής υποστήριξης. Για σήραγγες συγκοινωνιακού ενδιαφέροντος εντός αστικής ζώνης, τα φρέατα είναι η “πόρτα” προς το υπόγειο περιβάλλον από την οποία δύναται να αερίζεται ο υπόγειος χώρος και να μεταφέρονται υλικά και προσωπικό από και προς αυτόν. Φρέατα επίσης κατασκευάζονται για την αποπεράτωση υδροϋλεκτρικών έργων αλλά και αποχετευτικών δικτύων.

Η μέθοδος κατασκευής ενός φρέατος και η επιλογή της υποστήριξης των πλευρικών εδαφικών σχηματισμών εξαρτάται άμεσα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε υπογείου έργου. Τα μοναδικά για κάθε έργο λοιπόν χαρακτηριστικά είναι εκείνα που καθορίζουν την επιλογή μεθόδου κατασκευής και ορισμένα από αυτά παρατίθενται παρακάτω:

- ❖ Σκοπός της κατασκευής / λειτουργικές απαιτήσεις
- ❖ Απαιτούμενο βάθος φρέατος
- ❖ Σχήμα και γεωμετρία φρέατος
- ❖ Γεωτεχνικές / Υδρογεωλογικές και Περιβαλλοντικές συνθήκες
- ❖ Διαθέσιμη έκταση για την περίμετρο του φρέατος και την τοποθέτηση του εργοταξίου
- ❖ Γειτονική περιουσία τρίτων (όμορες κατασκευές, υπόγειες χρήσεις, υπέργειες χρήσεις)
- ❖ Προσαυξημένες φορτίσεις λόγω συγκοινωνιακού φόρτου
- ❖ Διατιθέμενο κεφάλαιο
- ❖ Απαιτήσεις χρονοδιαγράμματος του έργου

- ❖ Εμπειρία και ικανότητα των κατά τόπους Εργολάβων / Μελετητών
- ❖ Νόμοι / Κανονισμοί / Διατάξεις
- ❖ Απαιτήσεις του Κυρίου του Έργου και των ενδιαφερομένων μερών

Όλοι οι ανωτέρω παράγοντες λοιπόν είναι καθοριστικοί για την επιλογή της μεθόδου προσωρινής υποστήριξης του φρέατος. Για τον λόγο αυτό περιγράφονται εκτενέστερα ορισμένα από τα κυριότερα ανωτέρω χαρακτηριστικά.

1.1.1 Σκοπός της κατασκευής / λειτουργικές απαιτήσεις

Προσωρινά κατακόρυφα φρέατα απαιτούνται για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως αναφέρθηκε συνοπτικά παραπάνω. Ειδικά για αβαθή υπόγεια έργα, φρέατα απαιτούνται για την εξυπηρέτηση και λειτουργία των Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής (TBM). Η διάμετρος του φρέατος απαιτείται να είναι τέτοια ώστε να μπορεί κυρίως να τοποθετηθεί το σύστημα αερισμού, να τοποθετηθεί ο ανελκυστήρας, να είναι δυνατή η υποδοχή της κεφαλής του TBM και να τοποθετηθεί το σύστημα ώσης αυτού. Επιπλέον η προσωρινή υποστήριξη του φρέατος πρέπει να αναλαμβάνει επαρκώς τα πλευρικά φορτία καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής του.

1.1.2 Απαιτούμενο βάθος φρέατος

Το βάθος του φρέατος είναι κρίσιμο για τον τρόπο λειτουργίας της υποστήριξης. Συνοπτικά, όσο βαθύτερο είναι το φρέαρ – τόσο μεγαλύτερες οι απαιτήσεις για λεπτομερή έλεγχο των εξωτερικών φορτίων. Για φρέατα σημαντικού βάθους σε εδαφικούς σχηματισμούς, συστήματα υποστήριξης όπως αυτά από “έγχυτο” σκυρόδεμα είναι απίθανό να έχουν τις απαιτούμενες αντοχές.

1.1.3 Σχήμα και γεωμετρία φρέατος

Η γεωμετρία των φρεάτων κατά κύριο λόγο είναι κυλινδρική, ελλειπτική και ορισμένες φορές ορθογωνική. Στα φρέατα κυκλικής διατομής οι οριζόντιες ωθήσεις γαιών ασκούν θλιπτικές τάσεις στην επένδυση. Για τον λόγο αυτό τα κυκλικά φρέατα είναι κατασκευές με μικρότερη πλευρική ενίσχυση σε σχέση με τα φρέατα διαφορετικού σχήματος. Ελλειπτικό σχήμα επιλέγεται για φρέατα μεγάλου βάθους και ορθογωνικά φρέατα επιλέγονται όταν ο λόγος μήκους προς βάθος είναι τέτοιος ώστε η επιλογή του κυκλικού και του ελλειπτικού να είναι αντιοικονομική ή ακατόρθωτη κατασκευαστικά (π.χ. λόγω χωροταξικών περιορισμών). Επιπλέον, η εμπειρία έχει δείξει ότι οι καθιζήσεις λόγω των κυκλικών φρεάτων είναι μικρότερες σε σχέση με εκείνες των ορθογωνικών (Muramatsu and Abe, 1996).

1.1.4 Γεωτεχνικές / Υδρογεωλογικές συνθήκες

Ο κυριότερος παράγοντας στην επιλογή μεθόδου υποστήριξης είναι οι γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής του έργου. Ερωτήματα όπως η κατασκευή του φρέατος γίνεται σε έδαφος ή βράχο, οι συνθήκες είναι ξηρές ή το αντίθετο, ο σχηματισμός είναι “στιφρός” ή “χαλαρός”, το πέτρωμα είναι “αδιατάρακτο” ή “αποδομημένο”, είναι δεδομένα που επιρραάζουν την απαιτούμενη αντοχή της υποστήριξης, το βαθμό προσβασιμότητας των μηχανημάτων και του προσωπικού και το απαιτούμενο εύρος του εργοταξίου.

Καθοριστικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά είναι η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα και ο συντελεστής διαπερατότητας (**k**) των εδαφικών σχηματισμών. Για φρέατα υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, ύψιστης σημασίας είναι η παρεμπόδιση μη διαχειρίσιμων υδατικών ροών ή η αστάθεια του φρέατος λόγω άντλησης. Για κατασκευή υπό αστράγγιστες συνθήκες, ύψιστης σημασίας είναι η παρεμπόδιση φαινομένων άνωσης και η επάρκεια (από πλευράς αντοχής) του υπογείου έργου.

1.1.5 Απαιτήσεις του Κυρίου του Έργου και των ενδιαφερομένων μερών

Οποιαδήποτε θέση κατασκευής ενός υπογείου έργου συνοδεύεται από συγκεκριμένες συνθήκες και περιορισμούς συμπεριλαμβανομένων και υπέργειων ζητημάτων. Για παράδειγμα, φρέατα τα οποία πρόκειται να κατασκευαστούν σε αστικό περιβάλλον, ειδικός εξοπλισμός απαιτείται ώστε να περιοριστούν φαινόμενα δονήσεων και ώχλησης. Παρομοίως, στην περίπτωση κατασκευής φρέατος σε περιοχή με σταθερό υπόγειο υδροφορέα δεν επιτρέπεται η άντληση υδάτων και επιλέγεται η τοποθέτηση υδατοστεγούς υποστήριξης.

1.2 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΦΡΕΑΤΩΝ

1.2.1 Υδραυλική Αστοχία

Συνοπτικά περιγράφονται τα τρία είδη αστοχίας που προκαλούνται λόγω υδατικών πιέσεων ή υδραυλικής ροής:

1. ***Failure by Uplift***. Αστοχία που πραγματοποιείται όταν η πίεση πόρων σε μια εδαφική στρώση χαμηλής περατότητας γίνει μεγαλύτερη από την πίεση των υπερκειμένων γαιών.
2. ***Failure by Heave***. Αστοχία που πραγματοποιείται όταν δυνάμεις ροής δρουν αντίθετα από το βάρος του εδάφους, μειώνοντας την κατακόρυφο ενεργό τάση στο μηδέν.
3. ***Failure by piping***. Γνωστό και ως πρόβλημα “διασωλήνωσης”. Αποτελεί ένα ιδιαίτερο είδος αστοχίας σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιείται εσωτερική διάβρωση και το ρέον υλικό που σχηματίζεται κινείται (ρέει) γύρω από την κατακόρυφη υποστήριξη. Απαραίτητη προϋπόθεση η παρουσία μη συνεκτικών εδαφών.

1.2.2 Καθιζήσεις γειτονικά της εκσκαφής

Οι μετακινήσεις των συστημάτων υποστήριξης που αντιστηρίζουν τα κατακόρυφα πρανή εκσκαφών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως από: **(α)** την ανακατανομή των τάσεων λόγω της εκσκαφής, **(β)** τις διαστάσεις της εκσκαφής (βάθος και πλάτος), **(γ)** τις ιδιότητες του εδάφους (τύπος εδάφους, προϊστορία των φορτίσεων), **(δ)** την ύπαρξη και μεταβολή της στάθμης των υπογείων υδάτων και **(ε)** από την τεχνολογία αντιστηρίξεως και ειδικότερα από την ταχύτητα κατασκευής των μέτρων αντιστηρίξεως και την δυσκαμψία αυτών. Μια ικανοποιητική εκτίμηση των μετακινήσεων του εδάφους στην περιοχή της εκσκαφής απαιτεί να ληφθούν υπόψη, έστω και ποιοτικά, όλοι οι ανωτέρω παράγοντες η επίδραση των οποίων περιγράφεται παρακάτω:

- Η μεταβολή του εντατικού πεδίου μπορεί να οδηγήσει ένα εδαφικό στοιχείο στην παρεία της εκσκαφής σε “αστοχία” λόγω μείωσης της οριζόντιας κύριας τάσης σ_3 (ενεργητική κατάσταση), ενώ ένα στοιχείο στον πυθμένα της εκσκαφής μπορεί να οδηγηθεί σε “αστοχία” λόγω μείωσης της κατακόρυφης κύριας τάσεως σ_1 (παθητική κατάσταση) ή ακόμα να ακολουθήσει δημιουργία πλαστικών ζωνών και μεγάλων παραμορφώσεων περί τον πυθμένα της εκσκαφής. Σε εκσκαφές εδαφών με μεγάλες τιμές του συντελεστή ουδετέρας ωθήσεως K_0 , παρατηρούνται μεγάλες μετακινήσεις ακόμη και αν πρόκειται για αβαθείς εκσκαφές. Αντίθετα σε εδάφη με μικρές τιμές K_0 οι μετακινήσεις που δημιουργούνται δεν είναι σημαντικές. Επίσης όσο πιο βαθιά είναι η εκσκαφή τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των ολικών τάσεων και κατά συνέπεια προκαλούνται μεγαλύτερες μετακινήσεις στο έδαφος περί την εκσκαφή. Τέλος και με την αύξηση του πλάτους της εκσκαφής (για το αυτό βάθος) αναμένεται αύξηση των μετακινήσεων.
- Η εισροή των υδάτων στο χώρο του πυθμένα από τον γύρω χώρο της εκσκαφής δημιουργεί αφ’ ενός μεν μείωση των υδροστατικών πιέσεων αλλά ταυτόχρονα αύξηση των ενεργών πιέσεων και κατά συνέπεια καθιζήσεις του εδάφους γύρω από την εκσκαφή.

1.2.3 Αστοχία της υποστήριξης

Στην περίπτωση κυκλικών φρεάτων, σημαντική αναμένεται να είναι η τιμή των “hoop forces” οι οποίες θλίβουν τη διατομή. Ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής, αστοχία αναμένεται σε μεγάλο βάθος εκσκαφής ή μετά την επιβολή πρόσθετων οριζοντίων πιέσεων (απότομη άνοδος της στάθμης του υπογείου υδροφορέα).

1.2.4 Αστοχία λόγω θραύσεως - ανύψωσης του πυθμένα

Το φαινόμενο πραγματοποιείται λόγω της εκσκαφής του πυθμένα του φρέατος. Με τον τρόπο αυτό τα εδαφικά στοιχεία σε ορισμένο βάθος δέχονται μικρότερη κατακόρυφη ορθή τάση και παραμορφώνονται σύμφωνα με το $E_{UNLOADING}$ (Μέτρο Young λόγω αποφόρτισης – διαφορετικό για κάθε σχηματισμό).

1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΕΑΤΩΝ

Κάθε μέθοδος κατασκευής φρέατος έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία αξιολογούνται σύμφωνα με τα κριτήρια της προηγούμενης ενότητας. Στη συνέχεια παρατίθενται οι συνηθέστεροι μέθοδοι εκσκαφής και υποστήριξης, από την απλούστερη στην πιο πολύπλοκη και περιγράφονται ορισμένες από αυτές:

- ❖ Trench boxes and speed slide rails
- ❖ Soldier piles and wood lagging (or steel plates)
- ❖ Liner plates
- ❖ **Precast segments**
- ❖ Conventional excavation with rock dowels and shotcrete
- ❖ Sheet piles
- ❖ Secant piles
- ❖ Drilled shafts
- ❖ Cutter soil mixing
- ❖ Slurry walls
- ❖ Ground freezing
- ❖ Caissons

Ορισμένες από τις παραπάνω μεθόδους ενδείκνυται για υποστήριξη εδαφών, ορισμένες για κατασκευή πάνω από το επίπεδο του υπογείου υδροφορέα και κάποιες έχουν ως περιοριστικό παράγοντα το βάθος εκσκαφής. Επιπλέον ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο στην κατασκευή φρέατων. Ακολουθεί μια συνοπτική παράθεση των πλεονεκτημάτων των “segmental shafts” και στη συνέχεια η αναλυτική περιγραφή της προσωρινής υποστήριξης με “precast segments” (Underpin Method), μια σύντομη περιγραφή της “Μεθόδου Βαρύτητας” (Caisson Method) και τέλος του συνδυασμού των παραπάνω (Combination of the Caisson and Underpin Methods).

1.3.1 Προσωρινή υποστήριξη με χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων (segments)

Τα προκατασκευασμένα φρέατα παρέχουν ορισμένα σημαντικά οφέλη σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους υποστήριξης καθώς η τοποθέτησή τους είναι ευκολότερη, το κόστος μειωμένο και το εργασιακό περιβάλλον περισσότερο ασφαλές.

Μείωση του κόστους:

- ✓ Ο χρόνος τοποθέτησης μειώνεται σημαντικά καθώς η εκσκαφή και τοποθέτηση των “segmental rings” μπορούν να προσαρμοστούν σε κύκλο εργασίας.
- ✓ Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα αποτελούν και την τελική επένδυση, επομένως δεν χρειάζεται επιπλέον σκυροδέτηση για την ολοκλήρωση της κατασκευής.
- ✓ Δεν υπάρχει απαίτηση για εξειδικευμένο προσωπικό, έτσι μια μικρή ομάδα ανθρώπων είναι ικανή να διαχειριστεί όλη τη διαδικασία της εγκατάστασης.

Ασφαλέστερο εργασιακό περιβάλλον:

- ✓ Το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών μπορεί να πραγματοποιηθεί στην επιφάνεια του εδάφους (Caisson method).
- ✓ Οι κίνδυνοι, λόγω ανύψωσης αντικειμένων, περιορίζονται καθώς δεν απαιτείται χρήση μεγάλων γερανών.
- ✓ Το σύστημα έχει έναν ενσωματωμένο “φραγμό ασφαλείας” λόγω της κατασκευής ενός “δαχτυλιδιού” από έγχυτο σκυρόδεμα στην επιφάνεια (Εικόνα 1 και Εικόνα 2).

Περιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων:

- ✓ Περιορισμός της όχλησης και των εδαφικών δονήσεων καθώς δεν απαιτείται η χρήση υδραυλικής σφύρας.
- ✓ Το μέγεθος του εργοταξίου και ο χώρος εναπόθεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων περιορίζεται καθώς τα “segments” έχουν μήκος έως 2,5m.
- ✓ Η κατασκευή του φρέατος δεν απαιτεί την χρήση νερού ή “έγχυτου-νωπού” σκυροδέματος (εκτός από την τελική στάθμη πυθμένα και τον δακτύλιο επιφανείας).

1.3.2 Caisson Method

Η μέθοδος βαρύτητας χρησιμοποιείται γενικά σε “μαλακά” εδάφη με ή χωρίς την παρουσία του υπογείου υδροφορέα. Σύμφωνα με τη μέθοδο , η κατασκευή του φρέατος πραγματοποιείται στην επιφάνεια και στη συνέχεια βυθίζεται ανάλογα με την πρόοδο των εκσκαφών. Ορισμένα χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι τα εξής :

1. Επί τόπου κατασκευή δακτυλίου “έγχυτου” σκυροδέματος
2. Υδραυλικά έμβολα τα οποία , σε συνδυασμό με ιδιον βάρος της κατασκευής , “βυθίζουν” το φρέαρ.
3. Η διάμετρος εκσκαφής είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο του φρέατος και το κενό γεμίζεται με μπετονίτη για καλύτερη ευστάθεια των παρειών και ευκολότερη βύθιση του φρέατος.
4. Μια μεταλλική σφήνα κοπής τοποθετείται στον πόδα του φρέατος.



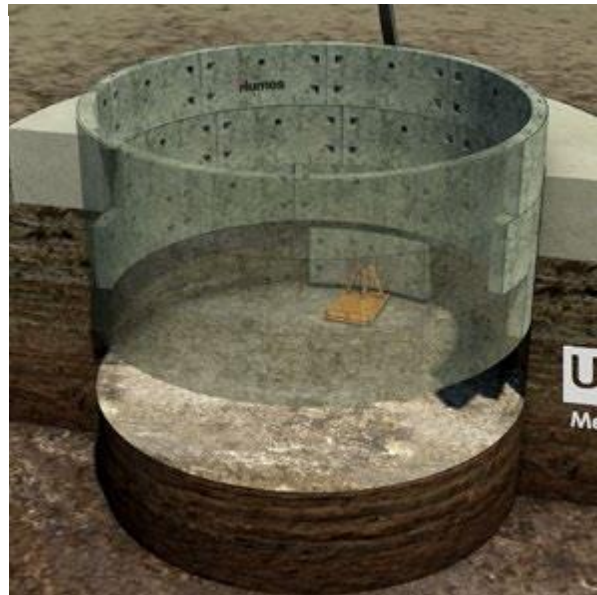
Εικόνα 1 : Διάνοξη και υποστήριξη φρέατος με την μέθοδο “Caisson”.

1.3.3 Underpin Method

Πρόκειται για μέθοδο που χρησιμοποιείται σε εδάφη με δυνατότητα “αυτο-υποστήριξης” και την μέθοδο “Caisson” αδύνατον να εφαρμοστεί. Στη συγκεκριμένη μέθοδο τα προκατασκευασμένα στοιχεία τοποθετούνται προοδευτικά στη βάση της εκσκαφής. Δακτύλιοι δημιουργούνται και το κενό μεταξύ της κατασκευής και των κατακόρυφων παρειών ενεματώνεται αμέσως.

Η διαδικασία εκσκαφής και εγκατάστασης ενδείκνυται να πραγματοποιείται ως εξής:

1. Γύρω από τον πρώτο “segmental ring” προβλέπεται η κατασκευή ενός περιμετρικού δακτυλίου από “έγχυτο” σκυρόδεμα με ταυτόχρονη απαίτηση συνάφειας μεταξύ των δύο.
2. Μετά από κάθε βήμα εκσκαφής τοποθετείται το “segmental ring” και ενεματώνεται το κενό. Το γεγονός αυτό μειώνει τον κίνδυνο υπερφόρτισης των ανωτέρω δακτυλίων και αποφεύγεται η κατάρρευση του έργου λόγω απώλειας συνάφειας της κατασκευής με το περιβάλλον έδαφος.
3. Η εκσκαφή του πυθμένα συνεχίζεται μόνο όταν εξασφαλιστεί ικανοποιητική αντοχή του ενέματος.
4. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία τοποθετούνται με τη βοήθεια ειδικού αναρτήρα (Εικόνα 3).



Εικόνα 2 : Διάνοξη και υποστήριξη φρέατος με την μέθοδο “Underpin”.



Εικόνα 3 : Ειδικός αναρτήρας για την τοποθέτηση των “segments”.

Ο δακτύλιος αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία κοινής χρήσης και δύο σφηνοειδή “segments” τα οποία επιτρέπουν στον δακτύλιο να πάρει την τελική του μορφή. Ο αριθμός των “segments” σε κάθε δακτύλιο κυμαίνεται και εξαρτάται από την διάμετρο του φρέατος.



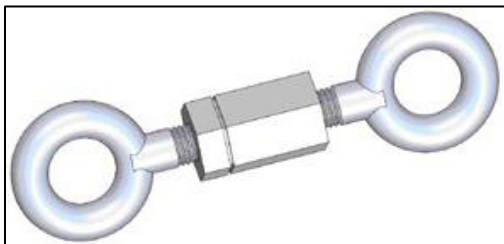
Εικόνα 4 : Τα δύο σφηνοειδή τεμάχια κατά την κατασκευή του “segmental ring”.

Στον οριζόντιο άξονα , τα “segments” συνδέονται με την βοήθεια κοχλιών σημαντικής καμπυλότητας οι οποίοι τοποθετούνται στην εσωτερική παρειά του φρέατος.



Εικόνα 5 : Τοποθέτηση κοχλιών στον οριζόντιο άξονα.

Στον κατακόρυφο άξονα οι δακτύλιοι συνδέονται με τη βοήθεια κοχλιών με σπύρωμα εκατέρωθεν των δύο κορυφών. Η περίσφυξη των κοχλιών γίνεται και πάλι εκ των έσω. Οι κοχλίες παύουν να παραλαμβάνουν φορτία από τη στιγμή που το ένεμα αναπτύξει ικανή αντοχή



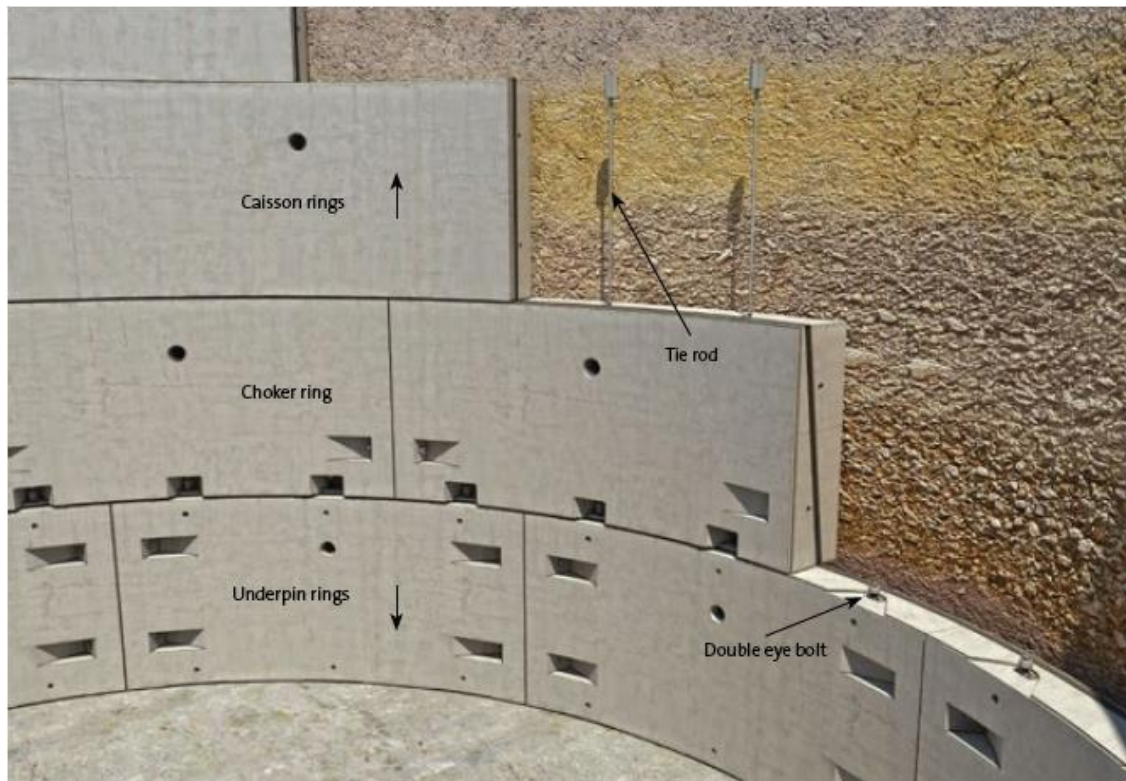
Εικόνα 6 : Τοποθέτηση κοχλιών στον κατακόρυφο άξονα.



Εικόνα 7 : Τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων προσωρινής υποστήριξης με την μέθοδο “Underpin”.

1.3.4 Συνδυασμός των μεθόδων “Caisson” και “Underpin”

Σε περίπτωση ποικίλων διαφορετικών εδαφικών σχηματισμών προτείνεται η εφαρμογή του συνδυασμού των δύο μεθόδων. Η εγκατάσταση αρχίζει με την εφαρμογή της μεθόδου “Caisson” και ακολουθεί η μέθοδος “Underpin” όταν ο εδαφικός σχηματισμός γίνει πιο “σκληρός”. Επιβάλλεται η εγκατάσταση ενδιάμεσου δακτυλίου (choker ring) ο οποίος κατασκευάζεται με το πέρασ της μεθόδου “Caisson” και αφού έχει ολοκληρωθει η ενεμάτωση και η απομάκρυνση της μεταλλικής σφήνας του πυθμένα.



Εικόνα 8 : Λεπτομέρεια των προκατασκευασμένων στοιχείων της συνδυαστικής μεθόδου.

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση (με χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων) της εκσκαφής και υποστήριξης κατακορύφου φρέατος το οποίο διανοίγεται σε εδαφικούς σχηματισμούς (προσχώσεις) και υποστηρίζεται με προκατασκευασμένα στοιχεία, σύμφωνα με την μέθοδο “Underpin” - όπως αυτή περιγράφεται παραπάνω. Η επίλυση γίνεται με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα με τη χρήση διδιάστατης και τριδιάστατης προσομοίωσης. Τέλος, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται χωρίς την παρουσία υπόγειου υδροφορέα.

Στόχος της εργασίας είναι :

- 1) Η παραμετρική ανάλυση του συστήματος ώστε να καθοριστούν ορισμένα κρίσιμα μεγέθη κατά την κατασκευή του φρέατος.
- 2) Η εξαγωγή διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών της υποστήριξης (τα οποία προκύπτουν λόγω των εξ ανακατανομής οριζοντίων – ακτινικών τάσεων “ σ_r ”).
- 3) Η διερεύνηση των καθιζήσεων γειτονικά του φρέατος και των ενδεχόμενων πλαστικών παραμορφώσεων περί τον πυθμένα της εκσκαφής.
- 4) Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της διδιάστατης και τριδιάστατης ανάλυσης και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

2

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η ανάπτυξή της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design).

Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

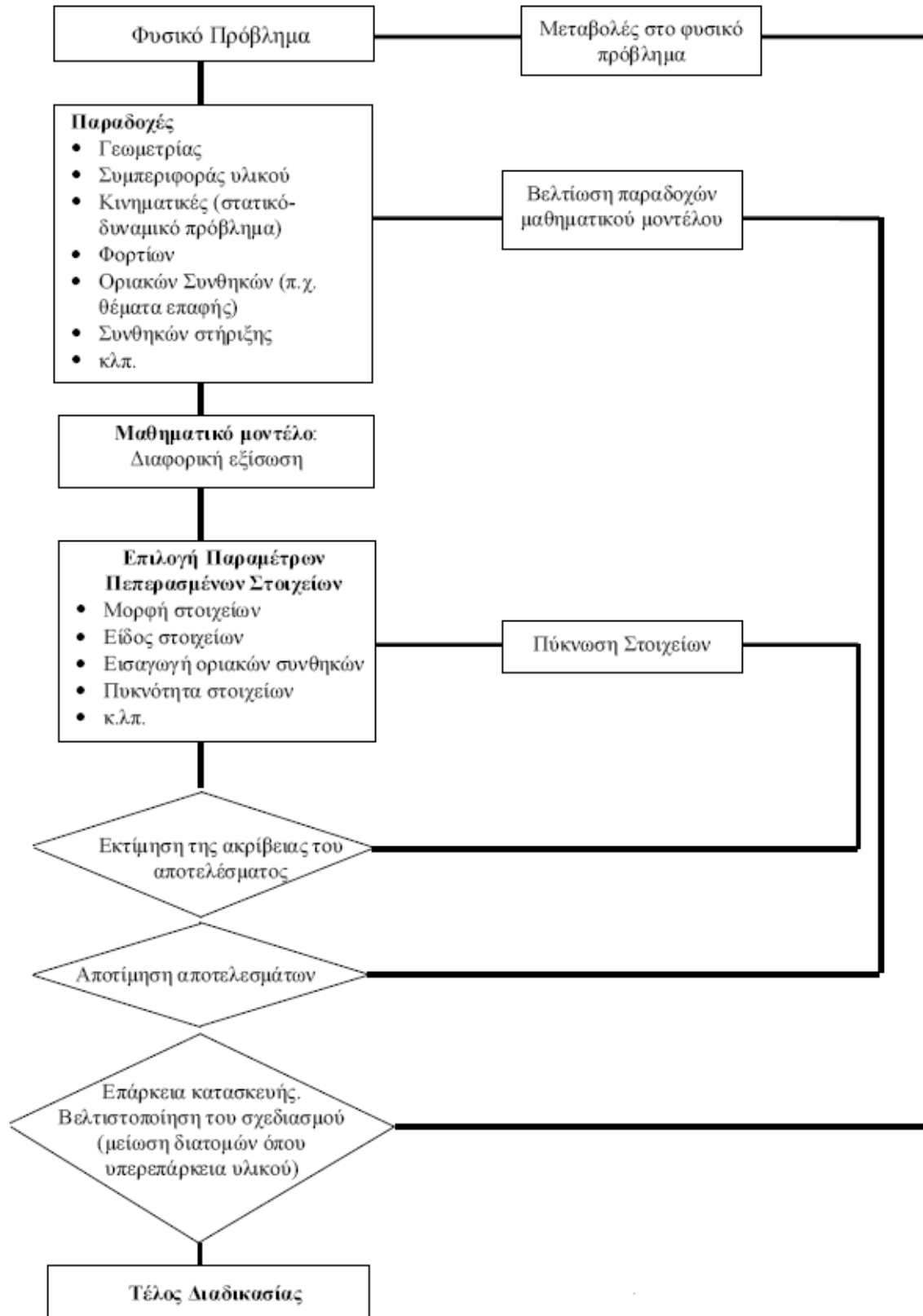
Αρχικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτέλεσε μια ενεργειακή μέθοδο για την επίλυση διδιάστατων φορέων όπως οι μέθοδοι *Rayleigh-Ritz* και *Galerkin*, τις οποίες μετέφερε ουσιαστικά από το χώρο των συνεχών συστημάτων στα διακριτά συστήματα. Στη συνέχεια επεκράτησαν οι αρχές των ισοπαραμετρικών στοιχείων που εξασφαλίζουν ακρίβεια στους υπολογισμούς και βελτιώνουν σημαντικά τον ενιαίο προγραμματισμό της μεθόδου.

Έτσι σήμερα, χρησιμοποιώντας προγράμματα που στηρίζονται στις αρχές του CAD ο χρήστης είναι σε θέση να μορφώσει, να τροποποιήσει το προσομοίωμα του και να καθορίσει τις επιβαλλόμενες φορτίσεις κατά τρόπο απλό και εύκολα ελέγξιμο. Μετά την επίλυση του προβλήματος, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται άμεσα και εποπτικά ενώ σε πολλά συστήματα παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης των αποτελεσμάτων με τη μορφή βάσεων δεδομένων (databases).

2.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΙ Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Μια κατασκευή ή ένα στοιχείο κατασκευής που υποβάλλεται σε φόρτιση αποτελεί το “φυσικό πρόβλημα” που καλείται να υπολογίσει ένας μηχανικός. Για να μπορέσει κανείς να υπολογίσει τη κατασκευή πρέπει να κατασκευαστεί το μαθηματικό μοντέλο. Πρέπει να παρασταθεί η γεωμετρία του σώματος. Η διαδικασία αυτή εμπεριέχει προσέγγιση αφού η επιφάνεια προσεγγίζεται από ένα πολυώνυμο. Πρέπει ακόμα να παρασταθεί η συμπεριφορά του υλικού με τα υπάρχοντα μοντέλα. Το ίδιο πρέπει να γίνει με την παράσταση των φορτίων και των συνοριακών συνθηκών.

Είναι προφανές ότι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται στο μαθηματικό πρόβλημα που επιλέχθηκε και δεν μπορεί να δώσει λύση στο αρχικό, φυσικό πρόβλημα. Η διαδικασία συνολικά παριστάνεται στην “Εικόνα 9” σελ.13.



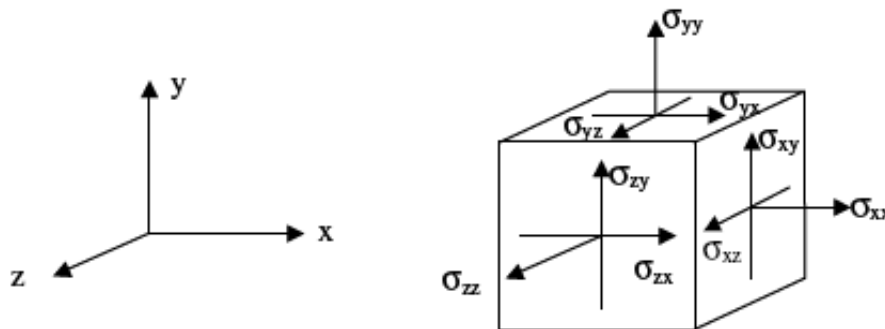
Εικόνα 9 : Η διαδικασία μοντελοποίησης του φυσικού προβλήματος και η επίλυση αυτού με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS 2D®

Το Plaxis 2D είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ειδικού σκοπού το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση των παραμορφώσεων και της ευστάθειας διαφόρων ειδών γεωτεχνικών εφαρμογών. Τα φυσικά προβλήματα μοντελοποιούνται είτε ως συστήματα “επίπεδης παραμόρφωσης” είτε ως “αξονοσυμμετρικά”.

Σε μια ανάλυση “επίπεδης παραμόρφωσης”, οι δυνάμεις που προκύπτουν λόγω επιβαλλόμενων μετακινήσεων αναπαριστούν δυνάμεις ανά μέτρο μήκους (στην τρίτη διεύθυνση z). Σε μια “αξονοσυμμετρική” ανάλυση, οι δυνάμεις που υπολογίζονται είναι αυτές που ασκούνται στην περιφέρεια ενός κύκλου και συγκεκριμένα που ασκούνται σε τόξο ενός ακτινίου (1 radian). Οι δυνάμεις λοιπόν που ασκούνται στην περιφέρεια ολόκληρου του κύκλου πρέπει να πολλαπλασιαστούν με 2π . Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που υπολογίζονται σε αξονοσυμμετρικές αναλύσεις προκύπτουν ανά μέτρο μήκους (per width) και όχι ανά ακτίδιο (per radian).

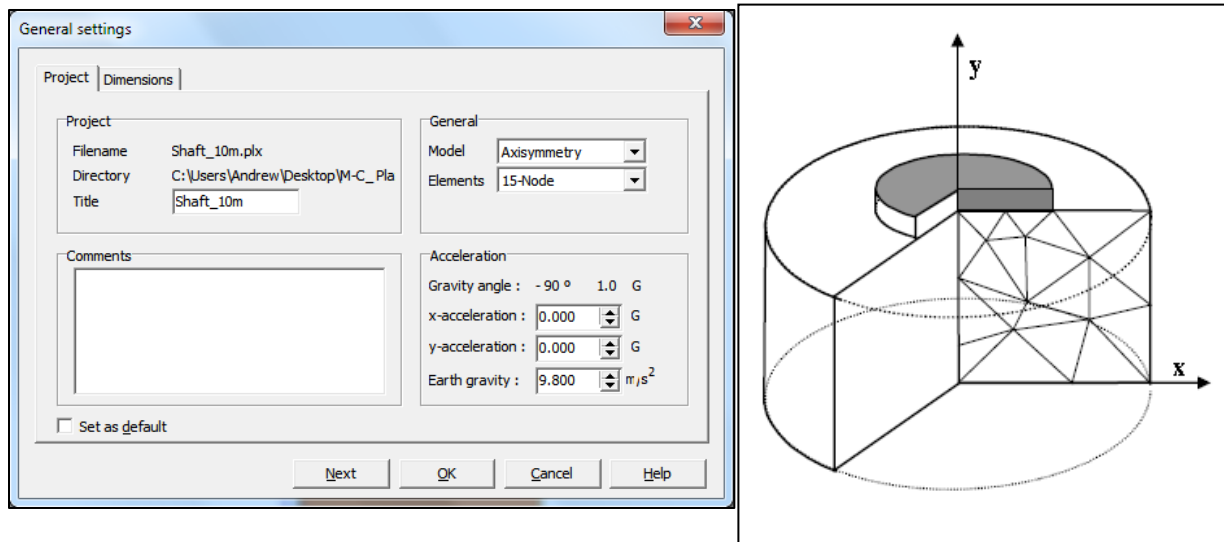
Σε μια “αξονοσυμμετρική” ανάλυση, ο άξονας των (x) αναπαριστά τις ακτινικές συντεταγμένες, ο άξονας των (y) αναπαριστά τις αξονικές συντεταγμένες και ο άξονας των (z) αναπαριστά τη διεύθυνση της εφαπτομένης. Σε αυτή τη περίπτωση, η τάση σ_{xx} είναι η ακτινική τάση (γνωστή και ως σ_r) ενώ η τάση σ_{zz} είναι η εφαπτομενική τάση (hoop stress – γνωστή και ως σ_θ). Οι λεπτομέρειες παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 10 : Το σύστημα συντεταγμένων και η θετική φορά των τάσεων σε μια αξονοσυμμετρική ανάλυση.

Σε όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν, οι θλιπτικές τάσεις και δυνάμεις – συμπεριλαμβανομένων των υδατικών πιέσεων πόρων- θεωρούνται αρνητικές ενώ οι εφελκυστικές τάσεις και δυνάμεις θεωρούνται θετικές. Οι θετικές διευθύνσεις των τάσεων διακρίνονται στην “Εικόνα 10”.

Η χρήση του αξονοσυμμετρικού μοντέλου γίνεται για “κυκλικές” κατασκευές με ομοιόμορφη διατομή κατά μήκος της ακτίνας τους και ομοιόμορφο φορτίο γύρω από τον άξονα συμμετρίας, με τις πιέσεις και τις παραμορφώσεις να είναι ακριβώς οι ίδιες σε οποιαδήποτε διεύθυνση (που ορίζεται από την ακτίνα της κυκλικής κατασκευής). Στα αξονοσυμμετρικά προβλήματα, ο άξονας (x) ορίζει την ακτίνα και ο άξονας (y) ορίζει τον άξονα συμμετρίας της κατασκευής. Αρνητικές συντεταγμένες – (x) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η αξονοσυμμετρική ανάλυση οδηγεί σε ένα πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων (x,y) με δύο μόνο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο.



Εικόνα 11 : Χαρακτηριστικό αξονοσυμμετρικό μοντέλο και η εισαγωγή του στο Plaxis2D.

2.3.1 Plate elements

Ως “Plates” ορίζονται οι κατασκευές οι οποίες προσομοιώνονται ως πολύ μικρού πάχους κατασκευαστικά στοιχεία με μια σημαντική τιμή της δυστένειας ($E \cdot A$) ή της δυσκαμψίας ($E \cdot I$) τους. Από τις δύο αυτές παραμέτρους υπολογίζεται το ισοδύναμο πάχος πλάκας το οποίο ισούται με :

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{12 \cdot EI}{EA}}$$

Οι κατασκευές αυτές λοιπόν μοντελοποιούνται ως “plate elements”, η βάση των οποίων είναι τα γραμμικά στοιχεία (line elements).

Εφαρμόζοντας λοιπόν μια σημειακή μετακίνηση, με συγκεκριμένη-γνωστή τιμή, σε ένα και μοναδικό κόμβο κάθε φορά προκύπτουν οι συναρτήσεις σχήματος (πολυώνυμα) οι οποίες καθορίζουν τις τιμές των μετακινήσεων σε κάθε σημείο του προαναφερθέντος γραμμικού στοιχείου.

Ορίζοντας ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων για το γραμμικό στοιχείο, και θεωρώντας γνωστή τη θέση (ξ) ενός σημείου, η μετακίνηση ισούται με :

$$u(\xi) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) v_i$$

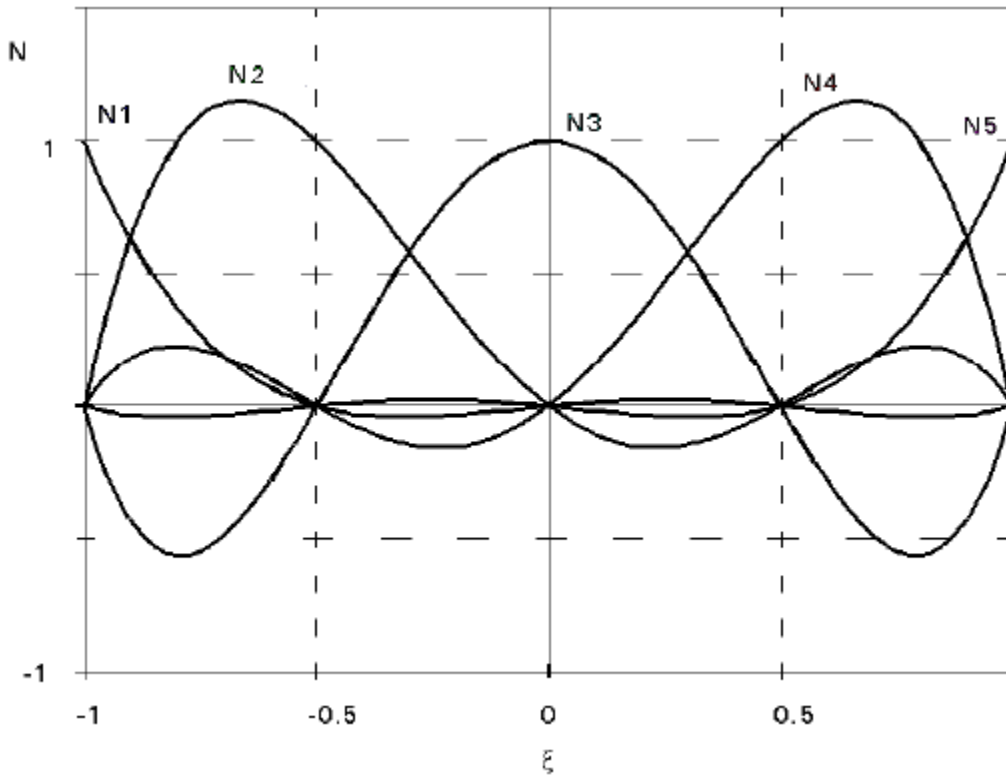
Οπου: v_i οι τιμές των μετακινήσεων στους κόμβους

$N_i(\xi)$ η τιμή της συνάρτησης σχήματος του κόμβου i στη θέση ξ

$U(\xi)$ η μετακίνηση που προκύπτει στη θέση ξ

n ο αριθμός των κόμβων ανά γραμμικό στοιχείο

Στη συνέχεια , ακολουθεί η περίπτωση 5-κομβικού γραμμικού στοιχείου (5-node line element), το οποίο είναι συμβατό με 15-κομβικά τριγωνικά εδαφικά στοιχεία στο Plaxis – τα οποία και αυτά με τη σειρά τους έχουν πέντε κόμβους σε κάθε πλευρά.



Εικόνα 12 : Συναρτήσεις σχήματος για 5-κομβικό γραμμικό στοιχείο.

Παρατηρείται ότι η εκάστοτε συνάρτηση σχήματος N_i ισούται με 1 στον κόμβο i και με μηδέν σε όλους τους υπόλοιπους κόμβους. Οι κόμβοι , από το 1ως το 5 , κατέχουν τις θέσεις $\xi = -1, -0.5, 0, +0.5, +1$ αντίστοιχα και προκύπτουν:

$$N_1 = \frac{-(1 - \xi) * (1 - 2\xi) * \xi * (-1 - 2\xi)}{6}$$

$$N_2 = 4 * \frac{(1 - \xi) * (1 - 2\xi) * \xi * (-1 - \xi)}{3}$$

$$N_3 = (1 - \xi) * (1 - 2\xi) * (-1 - 2\xi) * (-1 - \xi)$$

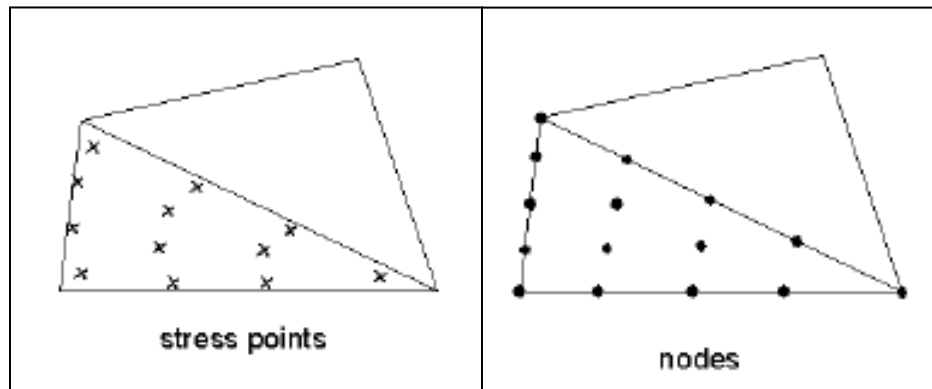
$$N_4 = 4 * \frac{(1 - \xi) * (-1 - 2\xi) * \xi * (-1 - \xi)}{3}$$

$$N_5 = \frac{(1 - \xi) * (-1 - 2\xi) * \xi * (-1 - 2\xi)}{6}$$

2.3.2 Soil elements

Στο Plaxis 2D υπάρχει η δυνατότητα επιλογής 6-κομβικών ή 15-κομβικών τριγωνικών στοιχείων ώστε να προσομοιωθούν εδαφικές στρώσεις ή γενικώς εδαφικοί όγκοι. Στην ανάλυση του φρέατος χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία που δίδονται ως προεπιλογή δηλαδή τα 15-κομβικά τριγωνικά διότι στα αξονοσυμμετρικά προβλήματα όπως αυτό, τα εξακομβικά τριγωνικά στοιχεία δίνουν πολύ συντηρητικά μη-ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αντιθέτως, με τα 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία, η ανάλυση των πιέσεων σε κρίσιμα σημεία των κατακορύφων παρειών του φρέατος είναι ακριβέστερη.

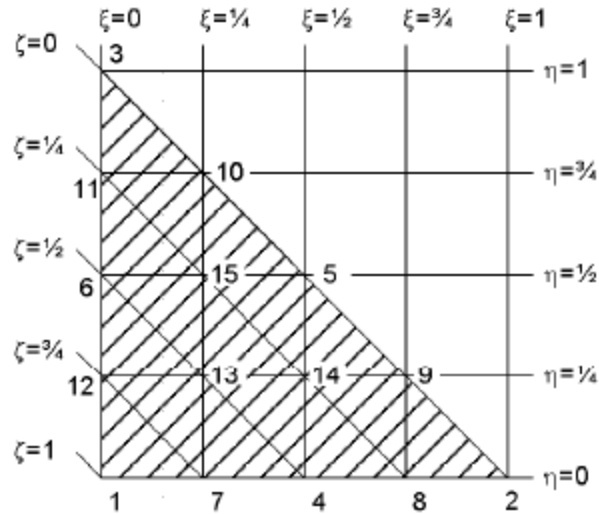
Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ένα 15-κομβικό στοιχείο μπορεί να αντικατασταθεί από τέσσερα 6-κομβικά τριγωνικά καθώς ο αριθμός των κόμβων και των stress points που προκύπτουν είναι ίδιοι. Ωστόσο, ένα 15-κομβικό τριγωνικό στοιχείο είναι υπολογιστικά πιο ισχυρό σε σχέση με τα τέσσερα 6-κομβικά.



Εικόνα 13 : Η απεικόνιση των κόμβων (nodes) και των stress points για το 15-κομβικό τριγωνικό soil element.

Σύμφωνα με την "Εικόνα 13", κάθε πλευρά του τριγωνικού στοιχείου αποτελείται από πέντε κόμβους. Σημαντικό βήμα στην πορεία της ανάπτυξης των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η έκφραση του πεδίου των μετακινήσεων ως προς τις ακραίες μετακινήσεις των τμημάτων του προβλήματος. Με τον τρόπο αυτό προσδίδεται ενιαία εποπτεία στο πεδίο μετακινήσεων, η δε απαίτηση της συνέχειας του πεδίου και της ικανοποίησης των συνοριακών συνθηκών παραπέμπεται σε καθολικό επίπεδο συνδέοντας τις ακραίες μετακινήσεις των στοιχείων με τις καθολικές μετακινήσεις του φορέα.

Για τα τριγωνικά στοιχεία υφίστανται δύο άξονες (ξ , η). Στα συγκεκριμένα στοιχεία γίνεται χρήση της βοηθητικής συντεταγμένης $\zeta=1-\xi-\eta$ όπως παρουσιάζεται παρακάτω και προκύπτουν δεκαπέντε συναρτήσεις σχήματος.



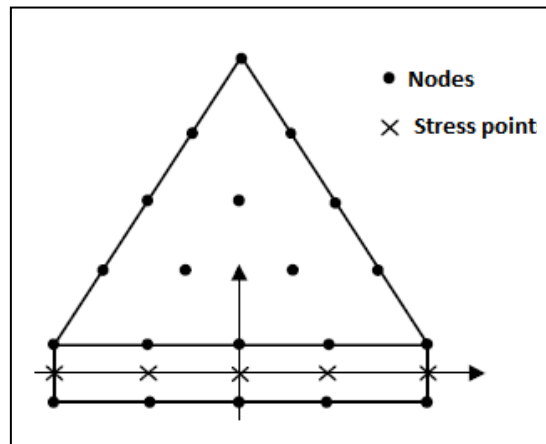
Εικόνα 14 : Τοπικό σύστημα συντεταγμένων σε 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία.

Πίνακας 1 : Οι συναρτήσεις σχήματος των 15-κομβικών "soil elements" στο Plaxis2D.

$N_1 = \frac{\zeta * (4\zeta - 1) * (4\zeta - 2) * (4\zeta - 3)}{6}$	$N_9 = 8 * \frac{\xi * n * (4\xi - 1) * (4\xi - 2)}{3}$
$N_2 = \frac{\xi * (4\xi - 1) * (4\xi - 2) * (4\xi - 3)}{6}$	$N_{10} = 8 * \frac{\xi * n * (4n - 1) * (4n - 2)}{3}$
$N_3 = \frac{n * (4n - 1) * (4n - 2) * (4n - 3)}{6}$	$N_{11} = 8 * \frac{n * \zeta * (4n - 1) * (4n - 2)}{3}$
$N_4 = 4 * \zeta * \xi * (4\zeta - 1) * (4\xi - 1)$	$N_{12} = 8 * \frac{n * \zeta * (4\zeta - 1) * (4\zeta - 2)}{3}$
$N_5 = 4 * n * \xi * (4n - 1) * (4\xi - 1)$	$N_{13} = 32 * n * \xi * \zeta * (4\zeta - 1)$
$N_6 = 4 * \zeta * n * (4\zeta - 1) * (4n - 1)$	$N_{14} = 32 * n * \xi * \zeta * (4\xi - 1)$
$N_7 = 8 * \frac{\xi * \zeta * (4\zeta - 1) * (4\zeta - 2)}{3}$	$N_{15} = 32 * n * \xi * \zeta * (4n - 1)$
$N_8 = 8 * \frac{\xi * \zeta * (4\xi - 1) * (4\xi - 2)}{3}$	

2.3.3 Interface elements

Τα “interface elements” είναι διαθέσιμα στο Plaxis 2D για την μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης εδάφους –κατασκευής. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της λεπτής ζώνης “διαταραγμένου” εδάφους των κατακορύφων παρειών του φρέατος (λόγω της εκσκαφής) και την αλληλεπίδραση αυτής με την υποστήριξη. Η χρήση των διεπιφανειών είναι απαραίτητη στην περίπτωση του φρέατος λόγω της επαφής ενός υλικού πολύ μεγάλης δυσκαμψίας (προκατασκευασμένα στοιχεία) με το έδαφος, του οποίου η δυσκαμψία είναι πολύ μικρότερη. Τα στοιχεία διεπιφανείας αποτελούνται από πέντε ζεύγη κόμβων (για την περίπτωση των 15-κομβικών “soil elements”) και το πάχος τους, όπως αυτό απεικονίζεται στο Plaxis 2D, είναι εικονικό (“virtual thickness”). Όσο το εικονικό πάχος μεγαλώνει, τόσο η ζώνη συμπεριφέρεται ελαστικά και προκύπτουν ελαστικές παραμορφώσεις. Κατά κύριο λόγο όμως οι διεπιφάνειες παραμορφώνονται πλαστικά, επομένως το εικονικό πάχος πρέπει να είναι μικρό και καθορίζεται από την επιλογή “virtual thickness factor” .

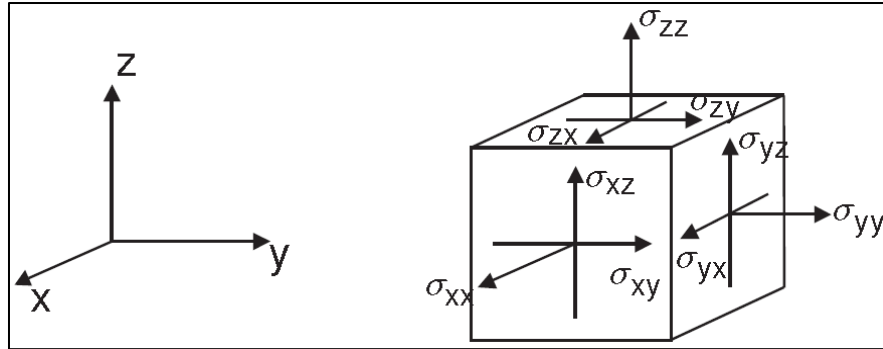


Εικόνα 15 : Η διάταξη των “interface elements” και η απεικόνιση των κόμβων.

2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS 3D®

Το Plaxis 3D είναι ένα γεωτεχνικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο επιτρέπει την εισαγωγή αντικειμένων CAD (Computer Aided Design) και την ανάλυση τους από μια γεωτεχνική σκοπιά.

Οι τάσεις στο Plaxis 3D υπολογίζονται σύμφωνα με το Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπως αυτό καταγράφεται στην “Εικόνα 16”. Οι θλιπτικές τάσεις και δυνάμεις, συμπεριλαμβανομένων των πιέσεων πόρων, θεωρούνται αρνητικές, ενώ οι εφελκυστικές τάσεις και δυνάμεις θεωρούνται θετικές. Παρακάτω απεικονίζονται οι θετικές διευθύνσεις των τάσεων.



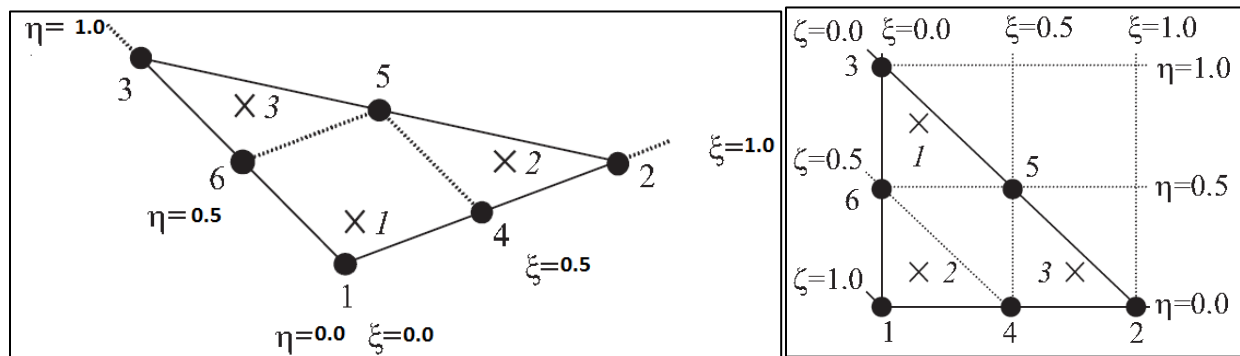
Εικόνα 16 : Το σύστημα συντεταγμένων και τα θετικά διανύσματα των τάσεων με χρήση του Plaxis 3D.

2.4.1 Plate elements

Ως “plates” ορίζονται τα αντικείμενα εκείνα τα οποία συνηθίζεται να προσομοιώνονται ως δι-διάστατες κατασκευές λεπτού πάχους, μέσα στο έδαφος και με μια σημαντική τιμή της δυσκαμψίας (E^*I).

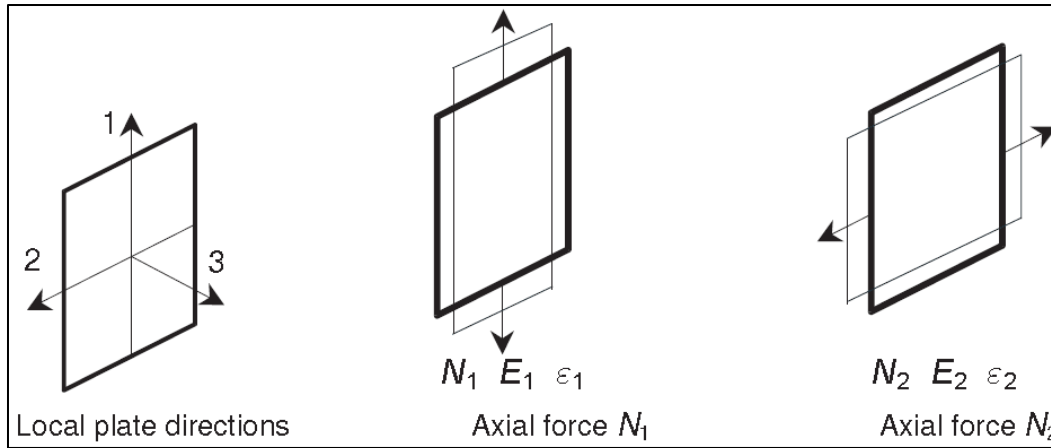
Στο Plaxis 3D, τα “plates” μεταφράζονται σε 6-κομβικά τριγωνικά στοιχεία με έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο:

1. U_x, U_y, U_z
2. Φ_x, Φ_y, Φ_z

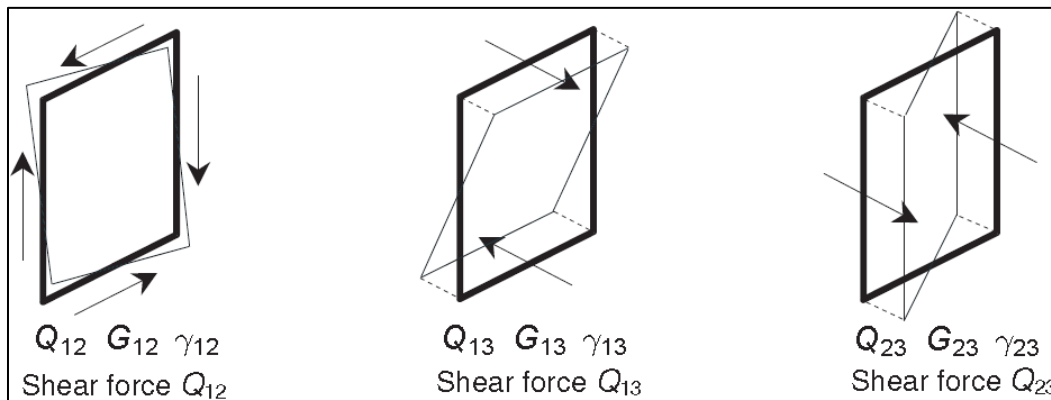


Εικόνα 17 : Η τυπική εικόνα ενός 6-κομβικού τριγωνικού plate element στο Plaxis 3D και η διαφοροποίησή του σε σχέση με τα τριγωνικά soil elements του Plaxis 2D.

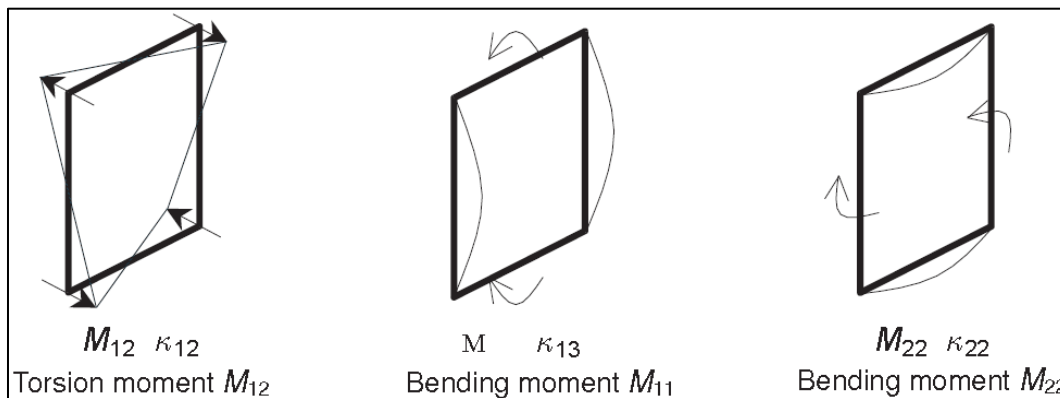
Στην ουσία, τα “plate elements” στο Plaxis 3D δεν αποτελούν τίποτε άλλο παρά μια διαφοροποίηση των 6-κομβικών τριγωνικών soil elements του Plaxis 2D, όπως αυτά απεικονίζονται παραπάνω. Τα “plate elements” βασίζονται στη θεωρία πλακών Mindlin (Bathe, 1982) σύμφωνα με την οποία επιτρέπονται αποκλίσεις των “plates” λόγω διάτμησης και κάμψης. Επιπλέον το στοιχείο μπορεί να αλλάξει μήκος όταν εφαρμόζεται αξονική δύναμη σε αυτό. Η θετική φορά των αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων, καθώς επίσης των καμπτικών ροπών, περιγράφεται στα σχήματα που ακολουθούν.



Εικόνα 18 : Η θετική διεύθυνση των αξονικών δυνάμεων σε πλάκες.



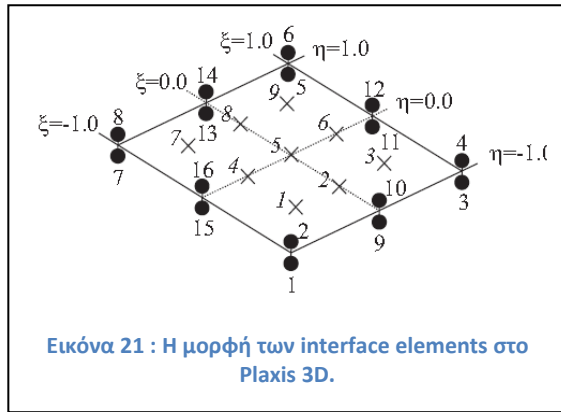
Εικόνα 19 : Η θετική διεύθυνση των τεμνουσών δυνάμεων σε πλάκες.



Εικόνα 20 : Η θετική διεύθυνση των ροπών σε πλάκες.

2.4.2 Interface elements

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του Plaxis 2D, οι διεπιφάνειες είναι στοιχεία τα οποία προστίθενται σε πλάκες ώστε να γίνει δυνατή η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής. Με την

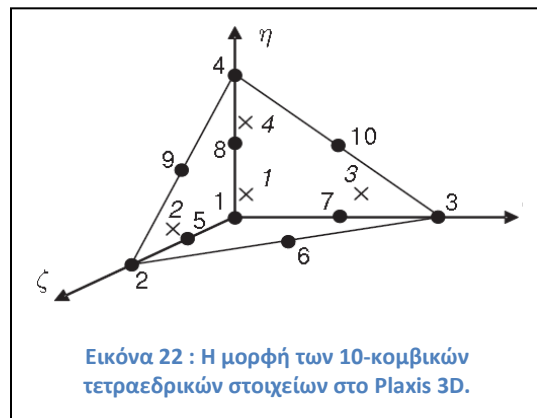


Εικόνα 21 : Η μορφή των interface elements στο Plaxis 3D.

δημιουργία του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων, οι διεπιφάνειες αποτελούνται από 12-κομβικά “interface elements”. Τα “interface elements” αποτελούνται από ζεύγη κόμβων και είναι συμβατά με 6-κομβικά τριγωνικά “plate elements” ή “soil elements”. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων κάθε ζεύγους θεωρείται μηδέν. Κάθε κόμβος έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας (u_x, u_y, u_z) με αποτέλεσμα να επιτρέπονται οι διαφορικές μετακινήσεις μεταξύ των κόμβων κάθε ζεύγους. Στη θέση των κόμβων, ο ένας κόμβος βρίσκεται στη πλευρά του εδάφους και ο άλλος κόμβος βρίσκεται στη πλευρά της κατασκευής.

2.4.3 Volume elements

Ο εδαφικός όγκος στο Plaxis προσομοιώνεται με 10-κομβικά τετραεδρικά στοιχεία. Για τα στοιχεία αυτά υφίστανται τρεις τοπικές συντεταγμένες (ξ, η, ζ). Οι συναρτήσεις σχήματος και η μορφή των τετραεδρικών στοιχείων ακολουθούν παρακάτω.



Εικόνα 22 : Η μορφή των 10-κομβικών τετραεδρικών στοιχείων στο Plaxis 3D.

Πίνακας 2 : Οι συναρτήσεις σχήματος των 10-κομβικών “volume elements” στο Plaxis 3D.

N_1	$= (1 - \xi - \eta - \zeta)(1 - 2\xi - 2\eta - 2\zeta)$
N_2	$= \zeta(2\zeta - 1)$
N_3	$= \xi(2\xi - 1)$
N_4	$= \eta(2\eta - 1)$
N_5	$= 4\zeta(1 - \xi - \eta - \zeta)$
N_6	$= 4\xi\zeta$
N_7	$= 4\xi(1 - \xi - \eta - \zeta)$
N_8	$= 4\eta(1 - \xi - \eta - \zeta)$
N_9	$= 4\eta\zeta$
N_{10}	$= 4\xi\eta$

3

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

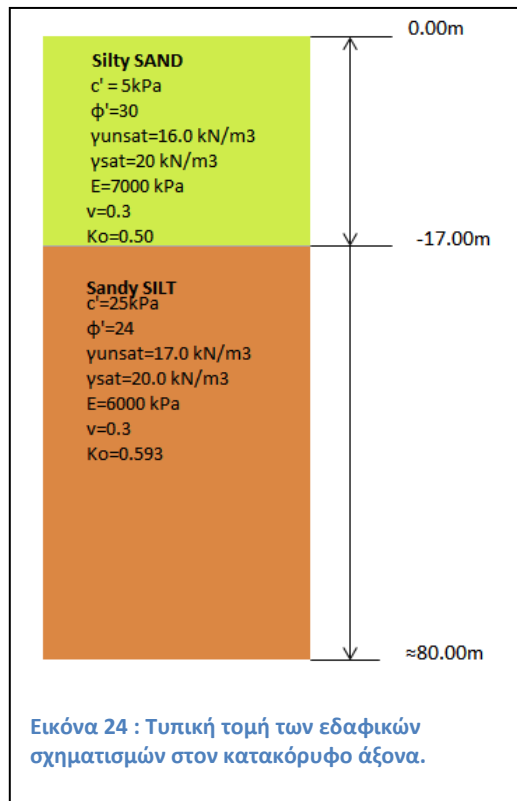
Στην παρούσα εργασία προσομοιώνεται η εκσκαφή και υποστήριξη κατακορύφου φρέατος με την μέθοδο “Underpin”. Όπως έχει περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 1, η εκσκαφή του πυθμένα γίνεται με μηχανικά μέσα – σε φάσεις κατασκευής – και η υποστήριξη, αποτελούμενη από προκατασκευασμένα στοιχεία, τοποθετείται στον πυθμένα του φρέατος. Οι βασικές παραδοχές του έργου είναι οι εξής:

- ❖ Οι εδαφικοί σχηματισμοί είναι οριζόντιοι έτσι ώστε το αριθμητικό προσομοίωμα να είναι αξονοσυμμετρικό.
- ❖ Η εκσκαφή και υποστήριξη γίνεται υπό “ξηρές” συνθήκες, χωρίς παρουσία νερού.
- ❖ Η διάμετρος του φρέατος προσομοιώνεται σε 10m και 16m.
- ❖ Το τελικό βάθος του πυθμένα είναι στα 24m για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις.
- ❖ Οι εδαφικοί σχηματισμοί συμπεριφέρονται σύμφωνα με τα κριτήρια “Mohr–Coulomb” και “Hardening Soil”.
- ❖ Το “υλικό” των διεπιφανειών, μεταξύ της υποστήριξης και του κατακόρυφου πρανού, προκύπτουν σύμφωνα με τις επιλογές “from adjacent soil” (Plaxis 3D) ή “cluster material” (Plaxis 2D), και “custom material”.
- ❖ Τα προκατασκευασμένα στοιχεία (segments) έχουν πάχος 30cm και ύψος 1.5m.
- ❖ Στον πυθμένα τοποθετείται στρώση “έγχυτου” σκυροδέματος πάχους 15cm.
- ❖ Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με την επιλογή “Staged Construction” σε 17 φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης.

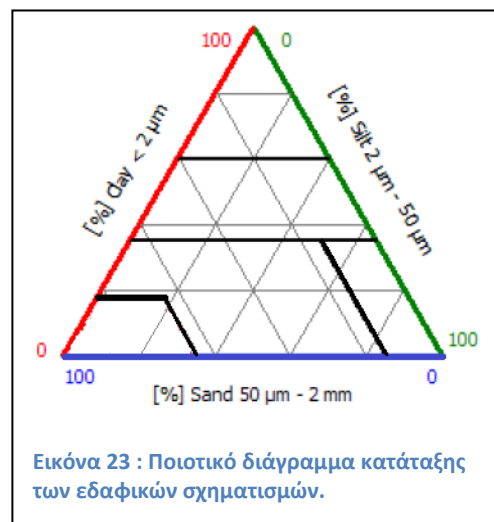
Στη συνέχεια περιγράφονται εκτενέστερα οι ανωτέρω βασικές παραδοχές.

3.2 ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Στο παρακάτω σκαρίφημα απεικονίζονται οι δύο οριζόντιες εδαφικές στρώσεις στις οποίες κατασκευάζεται το κατακόρυφο φρέαρ. Παρατηρείται λοιπόν ότι στα πρώτα 17m το φρέαρ διανοίγεται σε “ιλυδείς” άμμους και στα εναπομείναντα 7m, μέχρι το βάθος των 24m, το φρέαρ διανοίγεται σε “αμμώδεις” ιλύες. Πρόκειται για υποθετικό εδαφικό προφίλ μεν, χαρακτηριστικό δε για διάνοιξη



φρεάτων και σηράγγων σε αστικό περιβάλλον. Στην πρώτη στρώση το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού (silt) είναι μικρότερο σε σχέση με εκείνο το χονδρόκοκκου (sand) ενώ στη δεύτερη στρώση υπερισχύει το ποσοστό του λεπτόκοκκου. Το παρακάτω αποτελεί ένα χαρακτηριστικό σκαρίφημα κατάταξης εδαφών, το οποίο είναι διαθέσιμο στο Plaxis.



3.3. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ LINEAR ELASTIC

Το συγκεκριμένο κριτήριο βασίζεται στον Νόμο του Hooke για ισότροπη ελαστικότητα και αφορά τις κατασκευές (structures) του προσομοιώματος, δηλαδή την πλευρική επένδυση (lining) και τη λεπτή στρώση σκυροδέματος πυθμένα (lean concrete). Οι βασικές παράμετροι που απαιτούνται για την επιλογή του κριτηρίου είναι το Μέτρο Ελαστικότητας κατά Young (E) και ο λόγος Poisson (ν).

Πίνακας 3 : Τα χαρακτηριστικά των υλικών με συμπεριφορά “linear elastic”, τα οποία εισάγονται στο Plaxis.

Parameter	Name	Lining (C 40/50)	Lean concrete (C 16/20)	Unit
Material Model	Model	Linear Elastic	Linear Elastic	-----
Drainage Type	Type	Non porous	Non porous	-----
Unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	25.0	25.0	kN/m ³
Normal stiffness	E*A	10.5*10 ⁶	4.125*10 ⁶	kN/m
Flexural Rigidity	E*I	78750	7734	kNm ² / m
Effective Poisson's ratio	ν	0.2	0.2	-----
K ₀ determination	----	Automatic	Automatic	----
Concrete thickness	d	0.3	0.15	m

3.4 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΟHR – COULOMB

Πρόκειται για το ελαστικό – απολύτως πλαστικό κριτήριο αστοχίας “Mohr – Coulomb”, συμφωνα με το οποίο συμπεριφέρονται οι εδαφικοί σχηματισμοί, και το λογισμικό απαιτεί να εισαχθούν πέντε παραμέτροι. Το κριτήριο είναι χρήσιμο για μια πρώτη εκτίμηση των παραμορφώσεων και περιγράφει πολύ αποτελεσματικά το καθεστώς των τάσεων στα εδαφικά στοιχεία κατά την αστοχία.

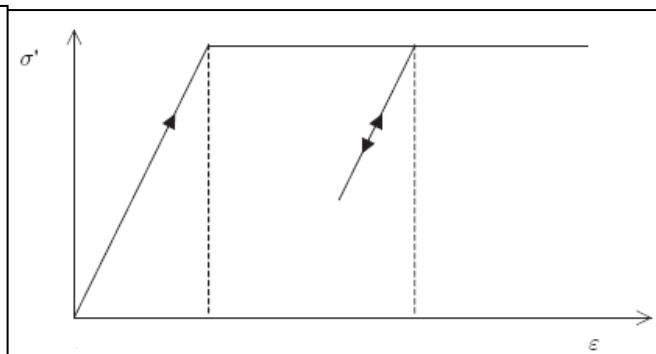
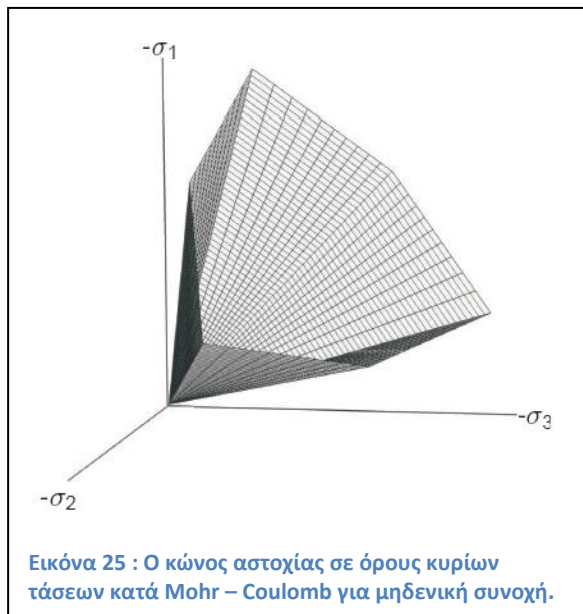
Το πλήρες κριτήριο “Mohr – Coulomb” χαρακτηρίζεται από έξι συναρτήσεις (f), η έκφραση των οποίων είναι σε όρους κυρίων τάσεων. Στην περίπτωση που $f_i = 0$ και για τις έξι συναρτήσεις ταυτόχρονα, τότε αυτές σχηματίζουν έναν εξαγωνικό κώνο όπως φαίνεται στο παρακάτω τρι-διάστατο διάγραμμα.

Πίνακας 4 : Οι 6 συναρτήσεις έκφρασης του πλήρους κριτηρίου “Mohr – Coulomb”.

$f_{1a} = \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin\varphi - c * \cos\varphi \leq 0$	$f_{2b} = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin\varphi - c * \cos\varphi \leq 0$
$f_{1b} = \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin\varphi - c * \cos\varphi \leq 0$	$f_{3a} = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin\varphi - c * \cos\varphi \leq 0$
$f_{2a} = \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin\varphi - c * \cos\varphi \leq 0$	$f_{3b} = \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin\varphi - c * \cos\varphi \leq 0$

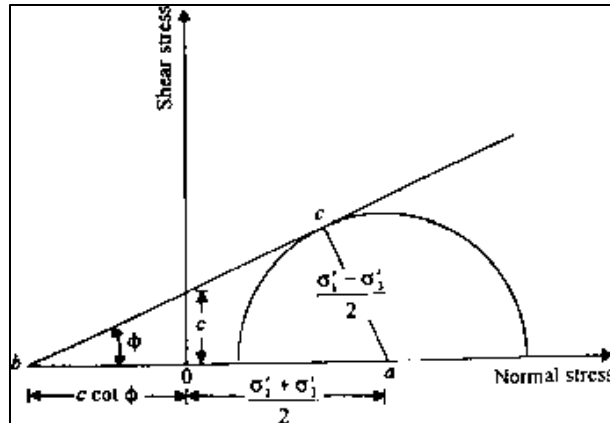
Για $f_i < 0$ τότε το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά.

Για $f_i = 0$ τότε το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά.



Εικόνα 26 : Η βασική ιδέα ενός ελαστικού – απολύτως πλαστικού μοντέλου.

Σύμφωνα με το εδαφικό προφίλ όμως, οι δύο στρώσεις έχουν συνοχή. Σε αυτή τη περίπτωση το τυπικό κριτήριο “Mohr – Coulomb” επιτρέπει στο έδαφος την ανάπτυξη εφελκυστικής αντοχής. Παρόλο που η εφελκυστική αντοχή αυτή είναι ιδιαίτερα μικρή, έχει ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς των Plaxis 2D και Plaxis 3D για την στρώση της ιλυώδους άμμου (silty sand) και μόνο.



Εικόνα 27 : Απεικόνιση της εφελκυστικής αντοχής του εδάφους και της περιβάλλουσας αστοχίας κατά Mohr-Coulomb.

Πίνακας 5 : Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των δύο στρώσεων στις περιπτώσεις που αυτές συμπεριφέρονται σύμφωνα με το κριτήριο "Mohr - Coulomb".

Parameter	Name	Silty Sand	Sandy Silt	Unit
General				
Material Model	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	----
Drainage Type	Type	Drained	Drained	----
Unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	16.0	17.0	kN/m ³
Unit weight below phreatic level	γ_{sat}	20.0	20.0	kN/m ³
Parameters				
Effective Young's modulus	E'	7000	6000	kN/m ²
Effective Poisson's ratio	ν	0.3	0.3	----
Cohesion	c'	5	25	kN/m ²
Friction angle	ϕ'	30	24	°
Dilatancy angle	ψ	0.0	0.0	°
Flow parameters				
Data set	----	Standard	Standard	----
Soil Type	----	Coarse	Medium	----
<2 μ m	----	10	19	%
2 μ m – 50 μ m	----	13	41	%
50 μ m – 2mm	----	77	40	%
Set parameters to defaults	----	YES	YES	----
Permeability in horizontal direction	k_x, k_y	$6.944 \cdot 10^{-6}$	$1.396 \cdot 10^{-6}$	m/s
Permeability in vertical direction	K_z	$6.944 \cdot 10^{-6}$	$1.396 \cdot 10^{-6}$	m/s
Interfaces				
Interface strength	----	Manual	Manual	----
Interface reduction factor	R_{inter}	0.7	0.5	----
Initial				
K_0 determination	----	Automatic	Automatic	----
Lateral earth pressure coefficient	K_0	0.500	0.593	----

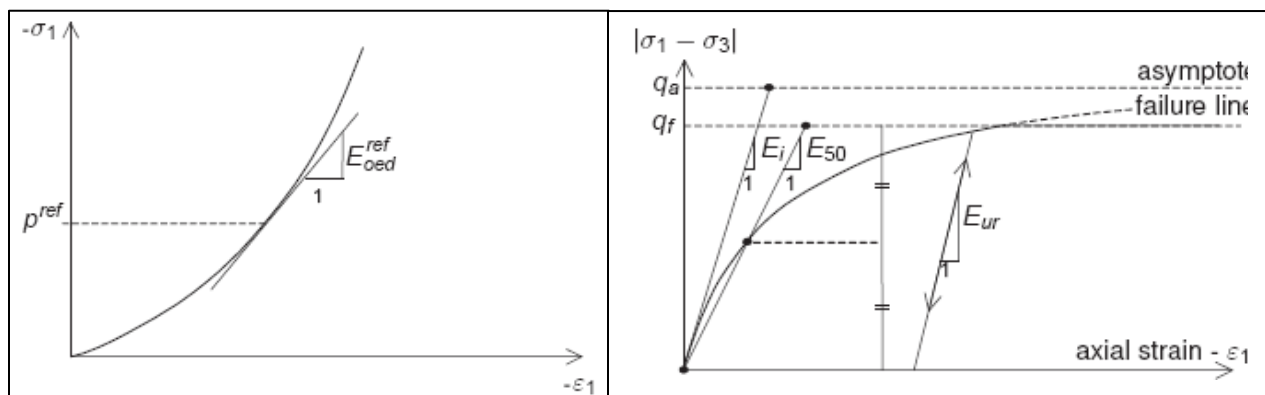
3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ HARDENING SOIL

Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο κριτήριο εδαφικής συμπεριφοράς. Όσον αφορά το κριτήριο “Mohr – Coulomb”, οι οριακοί συνδυασμοί ($\sigma' - \tau'$) των τάσεων εξαρτώνται από τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), τη συνοχή (c) και τη γωνία διαστολικότητας (ψ). Ωστόσο η δυσκαμψία του εδάφους περιγράφεται ακριβέστερα με την εισαγωγή τριών διαφορετικών παραμέτρων:

1. Η δυσκαμψία κατά την φόρτιση σε τριαξονική δοκιμή (E_{50}^{ref})
2. Η δυσκαμψία κατά την αποφόρτιση σε τριαξονική δοκιμή (E_{ur}^{ref}), και
3. Η δυσκαμψία κατά την φόρτιση σε δοκιμή συμπίεσομέτρου (E_{oed}^{ref})

Για την παραμετρική ανάλυση του φρέατος έχουν εισαχθεί οι τιμές $E_{ur}^{ref} \approx 3 * E_{50}^{ref}$ και $E_{oed}^{ref} \approx 4 * E_{50}^{ref}$. Η τιμή του E_{oed}^{ref} παραμένει σε όλες τις αναλύσεις σταθερή και ίση με $E_{oed}^{ref} \approx 2 * E_{50}^{ref}$.

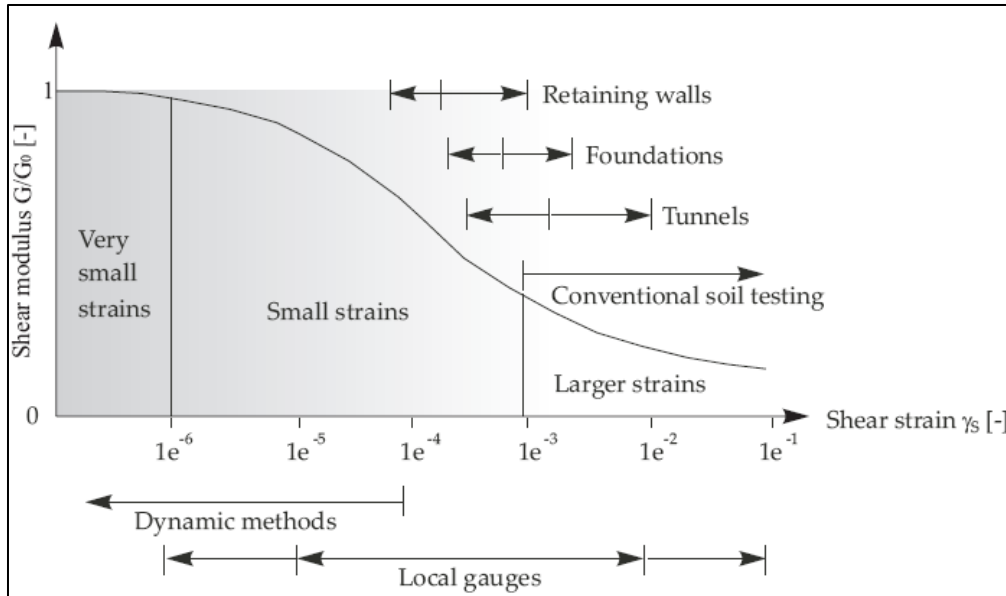
Στο κριτήριο συμπεριφοράς “Hardening Soil”, η τιμή της εδαφικής δυσκαμψίας είναι εξαρτώμενη της ασκούμενης τάσης σε αυτό, δηλαδή τα προαναφερθέντα μεγέθη (E_{ur}^{ref} , E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref}) αυξάνονται με την αύξηση της τάσης. Οι παραπάνω χαρακτηριστικές τιμές αντιστοιχούν σε μια πίεση αναφοράς $p^{ref} = 100$ kPa και είναι οι μοναδικές τιμές δοκιμών που απαιτούνται στο Plaxis.



Εικόνα 28 : Ο καθορισμός του E_{oed}^{ref} μετά από αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου και η ελαστική συμπεριφορά του εδάφους κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση σύμφωνα με το κριτήριο “Hardening Soil”.

Κατά την διάρκεια της φόρτισης και της αποφόρτισης, το κριτήριο “Hardening Soil” θεωρεί ότι το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά. Ωστόσο το εύρος των παραμορφώσεων στο οποίο το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά είναι πολύ μικρό και η συμπεριφορά του χαρακτηρίζεται ως υστερητική.

Ένας βασικός περιορισμός του κριτηρίου είναι ο μη διαχωρισμός μεταξύ των τιμών της δυσκαμψίας για καθεστώς μικρών τροπών και των απομειωμένων τιμών της δυσκαμψίας για συνήθεις τροπές σε έργα μηχανικού. Στο παρακάτω σκαρίφημα απεικονίζεται η απομείωση της δυσκαμψίας για ορισμένα τυπικά εύρη παραμορφώσεων τεχνικών έργων και εργαστηριακών δοκιμών. Παρατηρείται όμως ότι στην περίπτωση του φρέατος, δηλαδή κατηγορία “retaining wall”, η απομείωση του μέτρου διάτμησης είναι τέτοια ώστε $G/G_0 \approx 50\%$.



Εικόνα 29 : Χαρακτηριστική εδαφική συμπεριφορά σε όρους δυσκαμψίας-παραμόρφωσης για ορισμένα τυπικά εύρη παραμορφώσεων που αφορούν συγκεκριμένες κατασκευές.

3.6 STAGED CONSTRUCTION

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την επιλογή “staged construction” σε 17 φάσεις προσομοίωσης.

Πίνακας 6 : Οι φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης του κατακορύφου φρέατος , όπως αυτές προσομοιώνονται με τη μέθοδο “Underpin”.

Φάσεις	Εκσκαφή	Υποστήριξη
1	Εκσκαφή μέχρι βάθος 1.5m	---
2	Εκσκαφή μέχρι βάθος 3.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 1.5m
3	Εκσκαφή μέχρι βάθος 4.5m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 3.0m
4	Εκσκαφή μέχρι βάθος 6.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 4.5m
5	Εκσκαφή μέχρι βάθος 7.5m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 6.0m
6	Εκσκαφή μέχρι βάθος 9.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 7.5m
7	Εκσκαφή μέχρι βάθος 10.5m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 9.0m
8	Εκσκαφή μέχρι βάθος 12.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 10.5m
9	Εκσκαφή μέχρι βάθος 13.5m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 12.0m
10	Εκσκαφή μέχρι βάθος 15.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 13.5m
11	Εκσκαφή μέχρι βάθος 16.5m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 15.0m
12	Εκσκαφή μέχρι βάθος 18.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 16.5m
13	Εκσκαφή μέχρι βάθος 19.5m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 18.0m
14	Εκσκαφή μέχρι βάθος 21.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 19.5m
15	Εκσκαφή μέχρι βάθος 22.5m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 21.0m
16	Εκσκαφή μέχρι βάθος 24.0m	Τοποθέτηση “lining” μέχρι βάθος 22.5m
17	---	Τοποθέτηση “lining” και “lean concrete” σε βάθος 24m

Πίνακας 7 : Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των δύο στρώσεων στις περιπτώσεις που αυτές συμπεριφέρονται σύμφωνα με το κριτήριο "Hardening Soil", για $E_{ur}=4 \cdot E_{50}$.

Parameter	Name	Silty Sand ($E_{ur}=4 \cdot E_{50}$)	Sandy Silt ($E_{ur}=4 \cdot E_{50}$)	Unit
General				
Material Model	Model	Hardening Soil	Hardening Soil	----
Drainage Type	Type	Drained	Drained	----
Unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	16.0	17.0	kN/m ³
Unit weight below phreatic level	Γ_{sat}	20.0	20.0	kN/m ³
Parameters				
Secant stiffness for CD triaxial test	E_{50}^{ref}	14000	12000	kN/m ²
Tangent oedometer stiffness	E_{oed}^{ref}	7000	6000	kN/m ²
Unloading /Reloading stiffness	E_{ur}^{ref}	56000	48000	kN/m ²
Power for stress level dependency of stiffness	m	0.5	0.5	----
Cohesion	c'	5	25	kN/m ²
Friction angle	ϕ'	30	24	°
Dilatancy angle	ψ	0.0	0.0	°
Poisson's ratio	ν'_{ur}	0.2	0.2	----
Reference stress for stiffness	P_{ref}	100	100	kN/m ²
Stress ratio in normally consolidated state	K_0^{nc}	0.45	0.45	----
Flow Parameters				
Data set	----	Standard	Standard	----
Soil Type	----	Coarse	Medium	----
<2 μ m	----	10	19	%
2 μ m – 50 μ m	----	13	41	%
50 μ m – 2mm	----	77	40	%
Set parameters to defaults	----	YES	YES	----
Permeability in horizontal direction	k_x, k_y	$6.944 \cdot 10^{-6}$	$1.396 \cdot 10^{-6}$	m/s
Permeability in vertical direction	K_z	$6.944 \cdot 10^{-6}$	$1.396 \cdot 10^{-6}$	m/s
Interfaces				
Interface strength	----	Manual	Manual	----
Interface reduction factor	R_{inter}	0.7	0.5	----
Consider gap closure	----	YES	YES	----
Initial				
K_0 determination	----	Automatic	Automatic	----
Lateral earth pressure coefficient	K_0	0.500	0.593	----
Over – consolidation ratio	OCR	1.0	1.0	----
Pre – overburden pressure	POP	0.0	0.0	kN/m ²

4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ Plaxis 2D (Version 8.2)

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρών Κεφάλαιο περιγράφεται η ανάλυση του κατακορύφου φρέατος με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D η οποία αποτελείται από τέσσερις ενότητες:

1. **Input pre-processing.**

Πρόκειται για τη διαδικασία δημιουργίας του προσομοιώματος (finite element model creation), την εισαγωγή των χαρακτηριστικών των εδαφικών χαρακτηριστικών (material properties) και την εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (boundary conditions).

2. **Calculations.**

Έπειτα από τη δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου ακολουθεί το στάδιο των υπολογισμών στο οποίο καθορίζονται οι φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης του φρέατος σύμφωνα με τη μέθοδο “Underpin” και επιλέγεται ο τύπος υπολογισμών (στην συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγεται ως calculation type->plastic calculation).

3. **Output Data Post Processing.**

Έπειτα από την φάση των υπολογισμών ακολουθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων, δηλαδή οι μετακινήσεις των κόμβων (nodes), οι εδαφικές πιέσεις στα “stress points” και τα εντατικά μεγέθη (M, Q, N) επί της υποστήριξης (“segmental lining” και “lean concrete”).

4. **Load – Displacement Curves and Stress Paths.**

Σχεδιάζονται οι καμπύλες των μετακινήσεων χαρακτηριστικών – προεπιλεγμένων σημείων του προσομοιώματος – σε σχέση με την πρόοδο των φάσεων προσομοίωσης (Sum Mstage – Displacement Curves) και οι καμπύλες τάσεων - “τροπών” προεπιλεγμένων “stress points”.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι τέσσερις παραπάνω ενότητες, ενδεικτικά για τα χαρακτηριστικά του πρώτου αριθμητικού προσομοιώματος (1st Analysis). Στο τέλος του Κεφαλαίου 4 αξιολογούνται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων οι οποίες έχουν την εξής δομή:

Πίνακας 8 : Σύντομη περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων με χρήση του Plaxis 2D.

Plaxis 2D Analysis	
Παραμετρική Ανάλυση	Σύντομη Περιγραφή
1 st Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 10m , μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb , ξηρές συνθήκες, custom interface.
2 nd Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 10m , μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb , ξηρές συνθήκες, cluster material interface.
3 rd Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 10m , μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil με $E_{ur}^{ref} = 4 * E_{50}^{ref}$, ξηρές συνθήκες, cluster material interface.
4 th Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 10m , μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil με $E_{ur}^{ref} = 3 * E_{50}^{ref}$, ξηρές συνθήκες, cluster material interface.
5 th Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 16m , μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb , ξηρές συνθήκες, custom interface.
6 th Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 16m , μοντέλο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb , ξηρές συνθήκες, cluster material interface.
7 th Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 16m , μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil με $E_{ur}^{ref} = 4 * E_{50}^{ref}$, ξηρές συνθήκες, cluster material interface.
8 th Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 16m , μοντέλο συμπεριφοράς Hardening Soil με $E_{ur}^{ref} = 3 * E_{50}^{ref}$, ξηρές συνθήκες, cluster material interface.

4.2 INPUT PRE-PROCESSING

4.2.1 Finite Element Model Creation

Αρχικά, από τον πίνακα “general settings”, επιλέγονται τα γενικά στοιχεία του project, οι μονάδες μέτρησης και οι διαστάσεις του προσομοιώματος όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

The screenshot shows the 'Project' dialog box with the following settings:

- Project:**
 - Filename: Shaft_10m.plx
 - Directory: C:\Users\Andrew\Desktop\M-C_Pla
 - Title: Shaft_10m
- General:**
 - Model: Axisymmetry
 - Elements: 15-Node
- Comments:**
 - Vertical Shaft - Underpin Method
 - Diameter 10m
 - Dry Conditions
 - Mohr - Coulomb Model
- Acceleration:**
 - Gravity angle: -90 ° 1.0 G
 - x-acceleration: 0.000 G
 - y-acceleration: 0.000 G
 - Earth gravity: 9.800 m/s^2
- Set as default

Εικόνα 30 : Plaxis 2D-Εισαγωγή των γενικών στοιχείων του project.









The screenshot shows the 'Dimensions' dialog box with the following settings:

- Units:**
 - Length: m
 - Force: kN
 - Time: s
 - Stress: kN/m^2
 - Weights: kN/m^3
- Geometry dimensions:**
 - Left: 0.000 m
 - Right: 50.000 m
 - Bottom: 0.000 m
 - Top: 100.000 m
- Grid:**
 - Spacing: 0.500 m
 - Number of intervals: 1
- Set as default

Εικόνα 31 : Plaxis 2D-Εισαγωγή των μονάδων και των διαστάσεων του καννάβου του αριθμητικού προσομοιώματος.

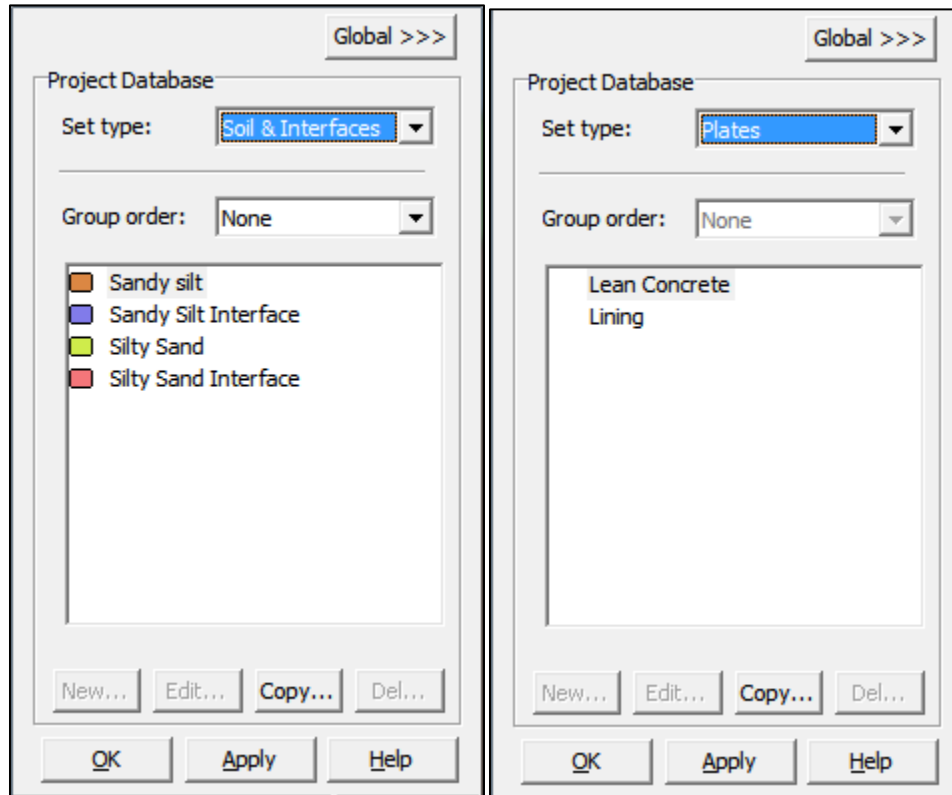
Ορισμένες σημαντικές εντολές για την δημιουργία του προσομοιώματος είναι οι εξής:

Πίνακας 9 : Βασικές εντολές για την κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου σε περιβάλλον Plaxis 2D.

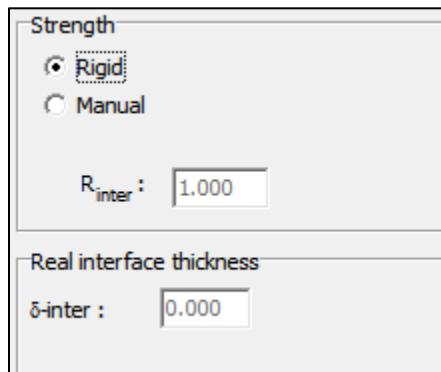
INPUT COMMANDS	
<p>Geometry line</p> 	<p>Είναι δυνατός ο ορισμός “clusters” και στη συνέχεια ο καθορισμός των ιδιοτήτων τους με την επιλογή “material properties”. Με την εντολή “geometry line”, το έδαφος εσωτερικά του φρέατος, χωρίζεται σε 16 “clusters” πάχους 1.5m και ορίζονται οι δύο σχηματισμοί (silty sand και sandy silt) με οριζόντια χάραξη σε βάθος 17m.</p>
<p>Plate</p> 	<p>Είναι δυνατή η σχεδίαση της υποστήριξης ως 16 διαφορετικά “linings” ύψους 1.5m και η τελική οριζόντια λεπτή στρώση (lean concrete) σε βάθος 24m.</p>
<p>Interface</p> 	<p>Είναι δυνατή η προσομοίωση του “διατμημένου” υλικού στις κατακόρυφες παρειές του φρέατος. Για κάθε “plate” σχεδιάζονται 2 διεπιφάνειες (negative και positive interface)</p>
<p>Standard Fixities</p> 	<p>Συμφωνα με την εντολή ,για τις κατακόρυφες “geometry lines” του προσομοιώματος ισχύει ότι $u_x=0$, για τις οριζόντιες “geometry lines” του προσομοιώματος ισχύει ότι $u_x=u_y=0$ και για το “lean concrete” (το οποίο εκτείνεται μέχρι το σύνορο του μοντέλου) ισχύει ότι $\phi_z=0$</p>
<p>Material Sets</p> 	<p>Καθορίζονται οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών και οι ιδιότητες των “plates” και “interfaces”.</p>
<p>Generate Mesh</p> 	<p>Μετά τα ανωτέρω ακολουθεί η δημιουργία του “πλέγματος” πεπερασμένων στοιχείων. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του “mesh” περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.</p>
<p>Initial Conditions</p>  Initial conditions	<p>Καθορίζεται το αρχικό καθεστώς των τάσεων μέσω του συντελεστή ωθήσεων K_0.</p>
<p>Generate Initial Stresses</p> 	<p>Επιλέγεται η τιμή του συντελεστή K_0 για κάθε “cluster” ξεχωριστά. Οι τιμές είναι γνωστές από το Κεφάλαιο 3.</p>

4.2.2 Material Sets

Οι ιδιότητες των παραπάνω υλικών παρατίθενται στο Κεφάλαιο 3.



Εικόνα 32 : Plaxis 2D_Analysis N^o1- Τα χαρακτηριστικά “materials” κατά την “1st Analysis”.

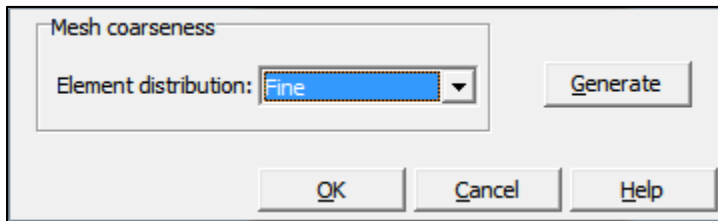


Εικόνα 33 : Η επιλογή της τιμής του R_{inter} για τα “interface materials” της 1st Analysis.

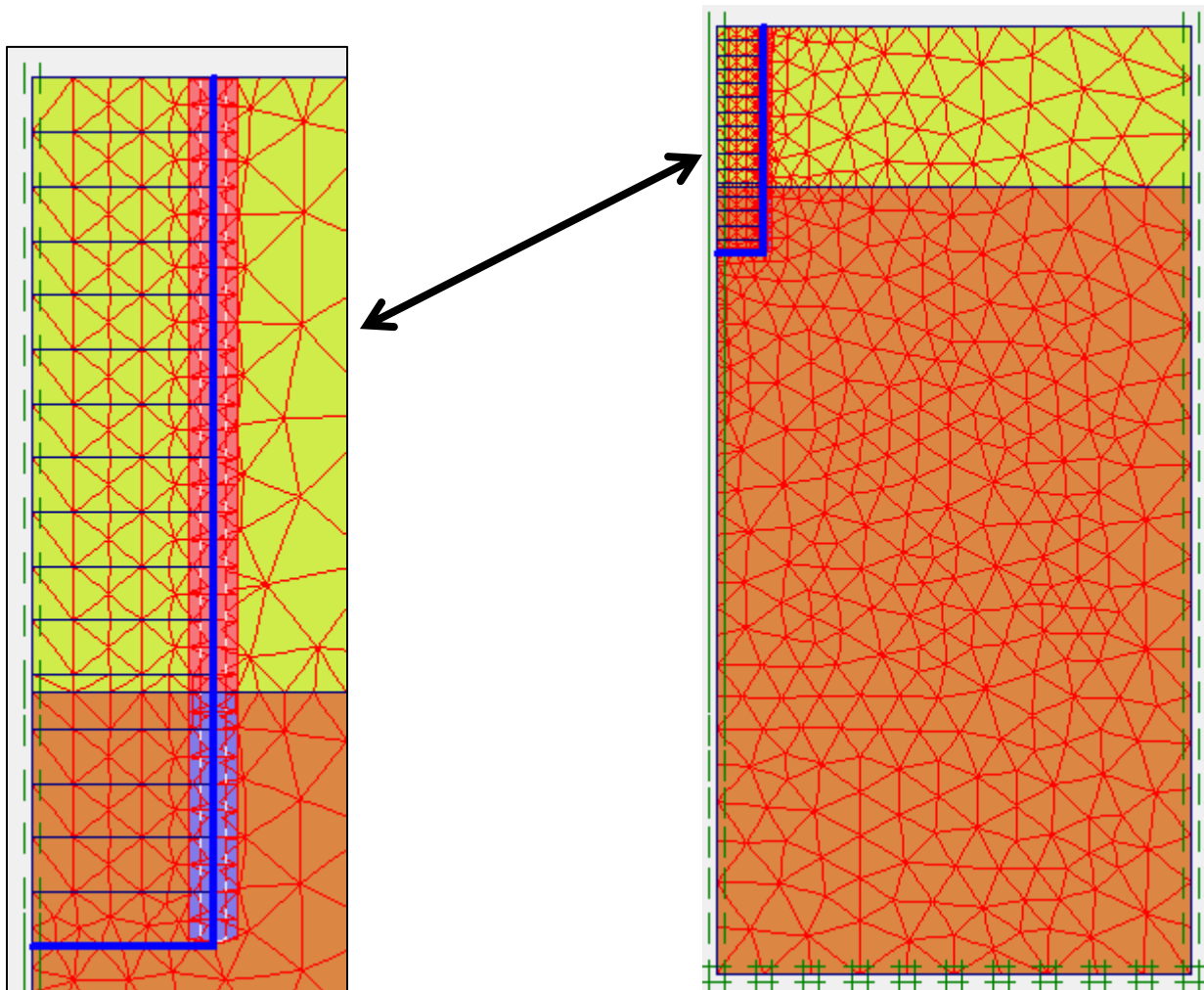
Στη συγκεκριμένη ανάλυση πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον συντελεστή R_{inter} που αφορά τις διεπιφάνειες. Ο συντελεστής R_{inter} ο οποίος εισάγεται για τα υλικά των διεπιφανειών (δηλαδή Silty sand interface και Sandy silt interface) πρέπει να ισούται με $R_{inter}=1$ διότι σε διαφορετική περίπτωση τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής ($c_{interface}$, $\phi_{interface}$) απομειώνονται υπερβολικά και το αριθμητικό προσομοίωμα “καταρρέει” (ένδειξη - “soil body collapses”).

4.2.3 Generate Mesh

Από την επιλογή- “Mesh generation setup”- επιλέγεται “Element distribution-fine” και στη συνέχεια επιλέγοντας όλα τα plates εκτελείται η εντολή “refine line”. Ο χρόνος εκτέλεσης των υπολογισμών με το Plaxis 2D είναι μικρός οπότε δύναται να επιλεγούν τα “clusters” και να εκτελεστεί και η εντολή “refine cluster”.



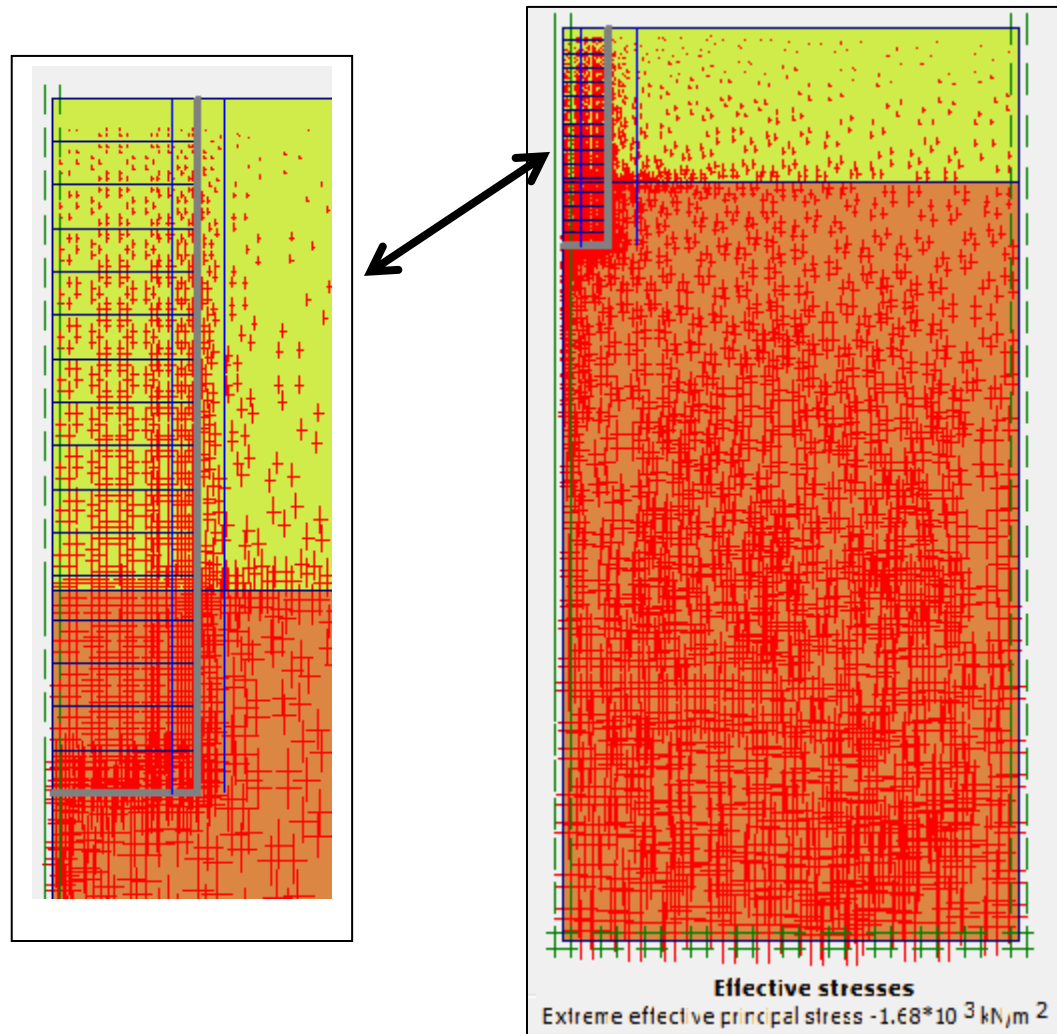
Εικόνα 34 : Το “mesh generation setup” το οποίο ισχύει για όλες τις δι-διάστατες αναλύσεις.



Εικόνα 35 : Το γεωμετρικό μοντέλο σε όρους πεπερασμένων στοιχείων συνοδευόμενο με λεπτομερέστερη απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος.

4.2.4 Generate Initial Stresses

Με την επιλογή αυτή δημιουργείται το αρχικό πεδίο ενεργών κυρίων τάσεων το οποίο προκύπτει από την επιλογή τιμής του συντελεστή K_0 . Η τιμή του συντελεστή προκύπτει είτε αυτόματα από τον τύπο του *Jaky* ($K_0 = 1 - \sin\phi$) είτε με “custom επιλογή”. Σε όλες τις αναλύσεις ο συντελεστής K_0 έχει προκύψει μετά από αυτόματη επιλογή.



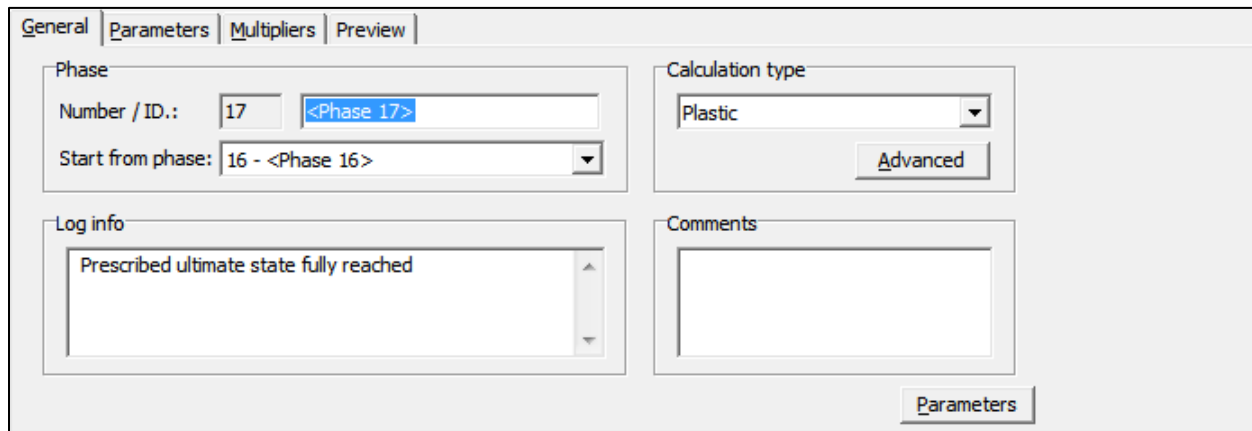
Εικόνα 36 : Το αρχικό πεδίο των ενεργών κυρίων τάσεων και λεπτομερέστερη απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος.

4.3 CALCULATIONS

Μετά την παραγωγή του αρχικού πεδίου τάσεων (Generate Initial Stresses) ακολουθεί το στάδιο των υπολογισμών επιλέγοντας την εντολή “Calculate”. Ακολουθεί το πλαίσιο εργασίας και τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε στήλης της ενότητας “Calculations” στο Plaxis 2D για το πρώτο αριθμητικό προσομοίωμα (1st Analysis).

4.3.1 General Calculation Settings

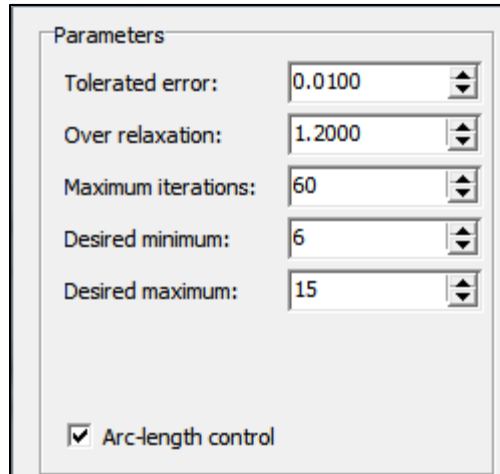
Στη συγκεκριμένη καρτέλα καταγράφεται η φάση προσομοίωσης η οποία υπολογίζεται λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη την επιλογή “staged construction”. Επιπλέον, ο συνήθης τύπος υπολογισμών για γεωτεχνικά προβλήματα είναι ο “plastic calculation type” και αυτός ο τύπος επιλέγεται για όλες τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν.



Εικόνα 37 : Η καρτέλα “general” κατά το στάδιο των υπολογισμών.

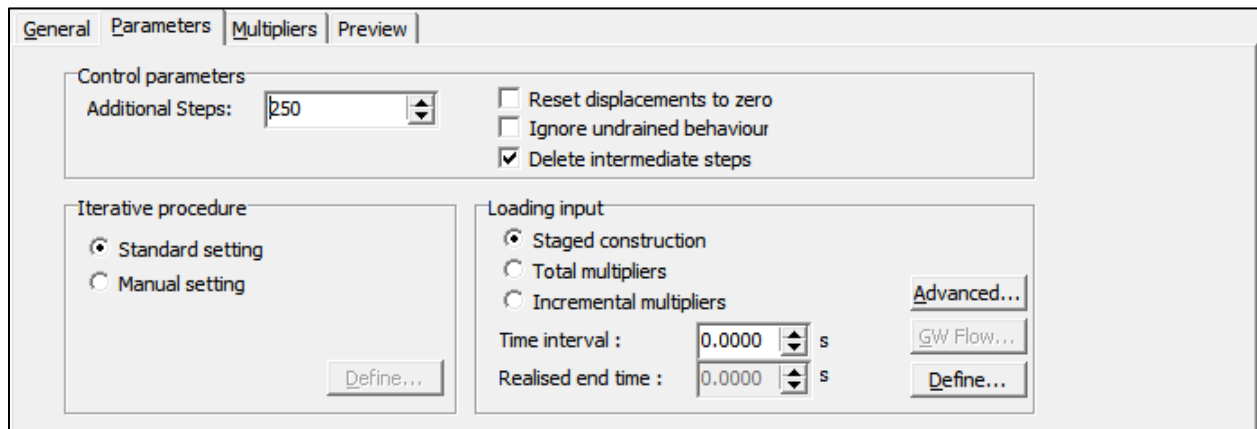
4.3.2 Calculation control parameters

Από τις παρακάτω επιλογές, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή “reset displacements to zero”. Η επιλογή πρέπει να παραμείνει ενεργοποιημένη κατά την φάση προσομοίωσης “Phase 2”. Οι μετακινήσεις λόγω του αρχικού πεδίου τάσεων (βαρυτική φόρτιση) της “Phase 1” δεν έχουν φυσικό νόημα. Επομένως αυτές οι μετακινήσεις δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη διότι σε αντίθετη περίπτωση θα εμφανιστούν ως προσαυξημένες μετακινήσεις (incremental displacements) στην “Phase 2”. Μετά την επιλογή “staged construction” είναι δυνατός ο καθορισμός των φάσεων προσομοίωσης επιλέγοντας την εντολή “define”, όπως αυτές έχουν οριστεί στο Κεφάλαιο 3.



Τέλος, κατά το στάδιο των υπολογισμών υπήρξαν προβλήματα αριθμητικής επίλυσης του προσομοιώματος τα οποία λύθηκαν με αλλαγή της τιμής του συντελεστή “tolerated error” από 0.01 σε 0.03, όπως αυτή προβλέπεται από το “Plaxis 2D Reference Manual”. Η τιμή μεταβάλλεται επιλέγοντας “Manual setting” στην υποενότητα “Iterative procedure” της καρτέλας “Parameters”. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κυριότερο πρόβλημα κατά την επίλυση του αριθμητικού μοντέλου είναι το λεγόμενο “failure of the soil body”.

Εικόνα 38 : Η καρτέλα “manual setting” της υποενότητας “Iterative procedure”.



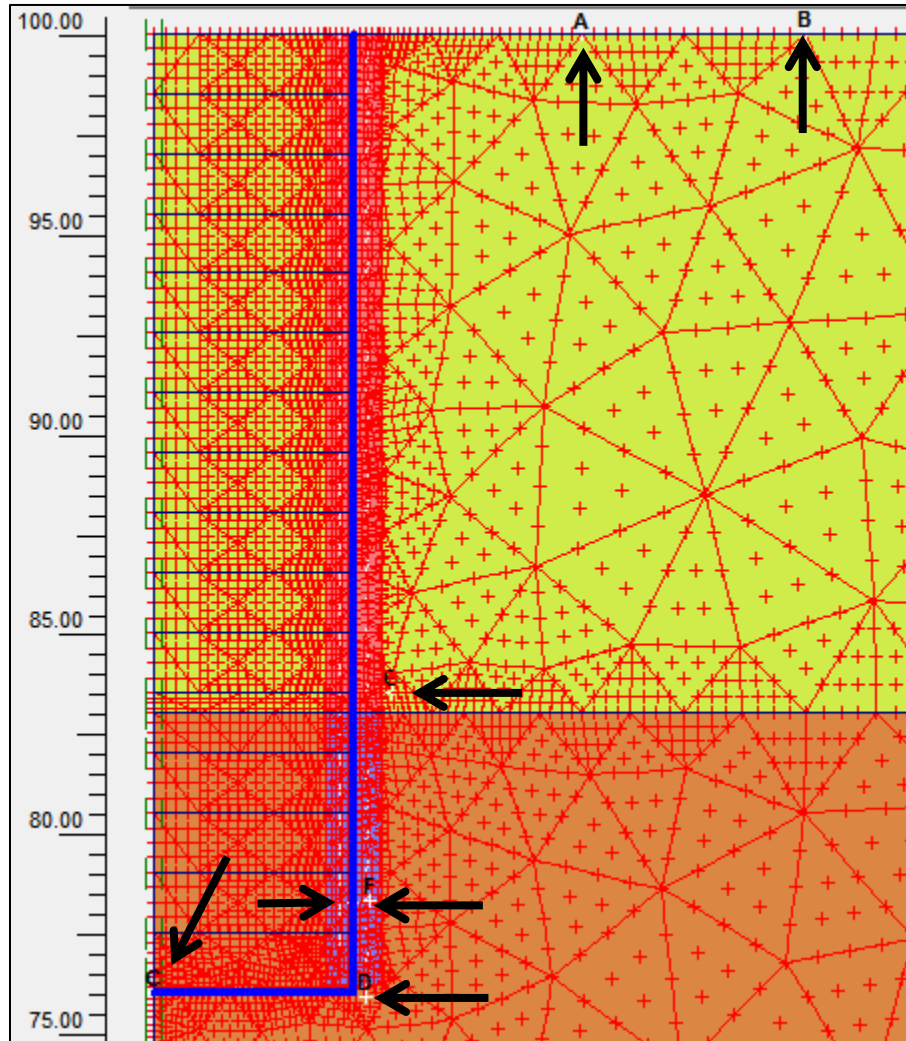
Εικόνα 39 : Η καρτέλα “parameters” κατά το στάδιο των υπολογισμών.

Οι τιμές της καρτέλας “Multipliers” διατηρούνται αυτές που δίνονται αυτόματα ως επιλογές από το πρόγραμμα.

4.3.3 Selecting points for curves

Στην ενότητα “Calculations” πραγματοποιείται η επιλογή σημείων για την χάραξη καμπυλών. Οι καμπύλες αυτές χαράσσονται σε επόμενο στάδιο και περιγράφονται στην τέταρτη ενότητα, όπως αυτή ορίζεται στην αρχή του Κεφαλαίου 4.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά “nodes” που επιλέγονται για την χάραξη “load – displacement” καμπυλών και τα χαρακτηριστικά “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “stress – strain” καμπυλών.



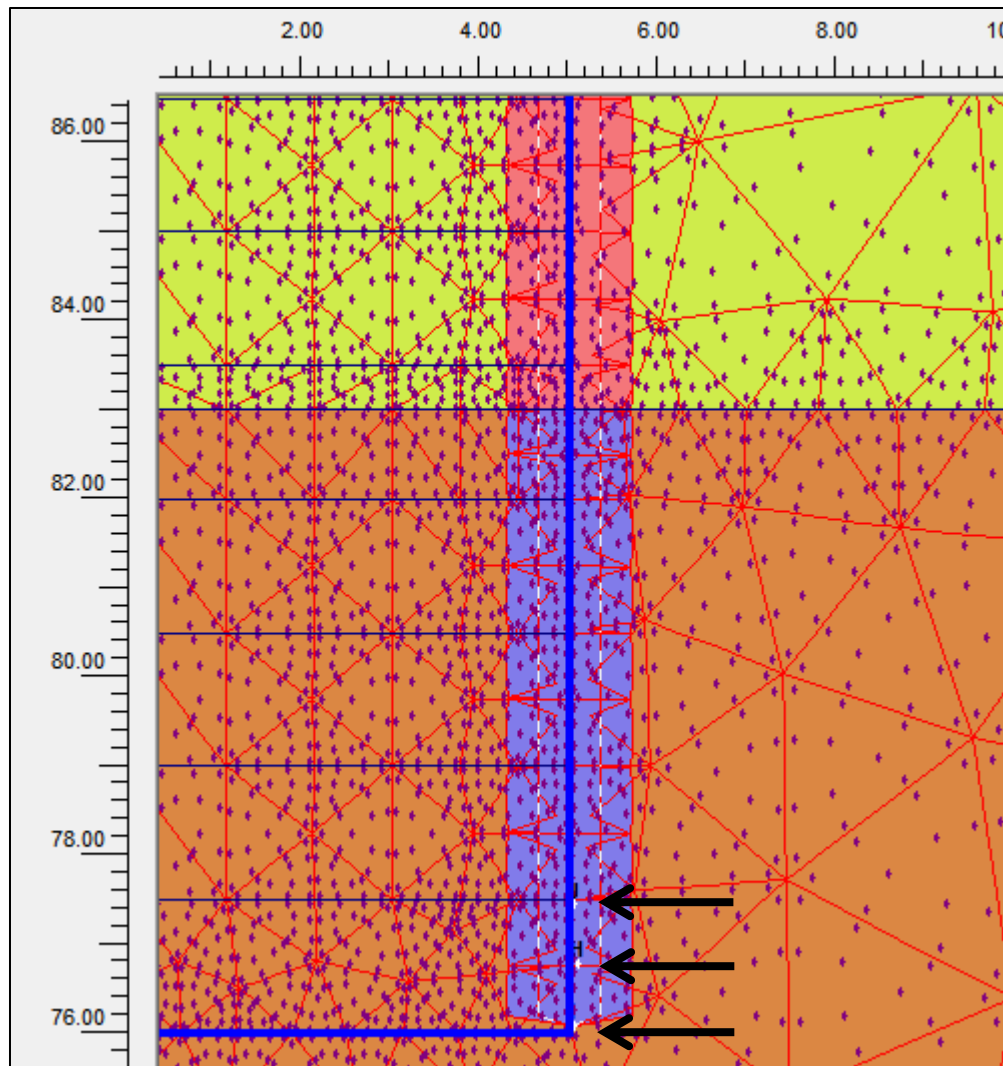
Εικόνα 40 : Τα επτά χαρακτηριστικά σημεία (nodes) που επιλέγονται για την χάραξη καμπυλών φόρτισης – μετακίνησης (load-displacement curves).

Πίνακας 10 :Plaxis 2D_Analysis N^o1 -Οι επτά κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.

Plaxis 2D_Analysis N ^o 1 – Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (+10.700m , +100.00m)	Σημείο στην επιφάνει , ≈5.5m μακριά από την παρειά της εκσκαφής όπου ενδεχομένως να υφίστανται κτίρια.
Node B (+16.300m , +100.00m)	Σημείο στην επιφάνεια, ≈10m μακριά από την παρειά τις εκσκαφής όπου ενδεχομένως να υφίστανται κτίρια.
Node C (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα τις εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node D (+5.340m , +75.80m)	Σημείο στον πυθμένα τις εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή τις κατακόρυφης υποστήριξης όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων (plastic points).
Node E (+5.00m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”. Ιδιαίτερα δυσμενής φάση προσομοίωσης και σημείο με αυξημένες μετακινήσεις.
Node F (+5.410m , +78.30m)	Σημείο πλησίον του Node E. Πρόκειται για σημείο τις διεπιφάνειας με έντονο ενδιαφέρον όσον αφορά τις μετακινήσεις.
Node G (+5.980m , +83.50m)	Σημείο το οποίο ανήκει στη στρώση της “ιλυδους άμμου”. Πρόκειται για το πεδίο του μοντέλου με τη δυσμενέστερη συμπεριφορά λόγω των μειωμένων χαρακτηριστικών διατμητικής αντοχής (c, φ) της στρώσης “silty sand”.

Πίνακας 11 : Plaxis 2D_Analysis N^o1 - Τα τρία stress points που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

Analysis N ^o 1 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point H (+5.100m , +76.800m)	Σημείο στο μέσο του τελευταίου “segmental lining” στο οποίο εξετάζεται η συμπεριφορά του εδάφους στο δυσμενέστερο βάθος και πώς αυτό φορτίζει την κατασκευή.
Stress point I (+5.070m , +76.100m)	Σημείο στην άκρη με το μεγαλύτερο βάθος του τελευταίου “segmental lining” στο οποίο εξετάζεται η συμπεριφορά του εδάφους στο δυσμενέστερο βάθος και πώς αυτό φορτίζει την κατασκευή.
Stress point J (+5.040m , +77.500m)	Σημείο στην άκρη με το μικρότερο βάθος του τελευταίου “segmental lining” στο οποίο εξετάζεται η συμπεριφορά του εδάφους και πώς αυτό φορτίζει την κατασκευή.



Εικόνα 41 : Τα τρία χαρακτηριστικά σημεία (stress points) που επιλέγονται για την χάραξη καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων (stress-strain curves).

4.4 OUTPUT DATA POST PROCESSING

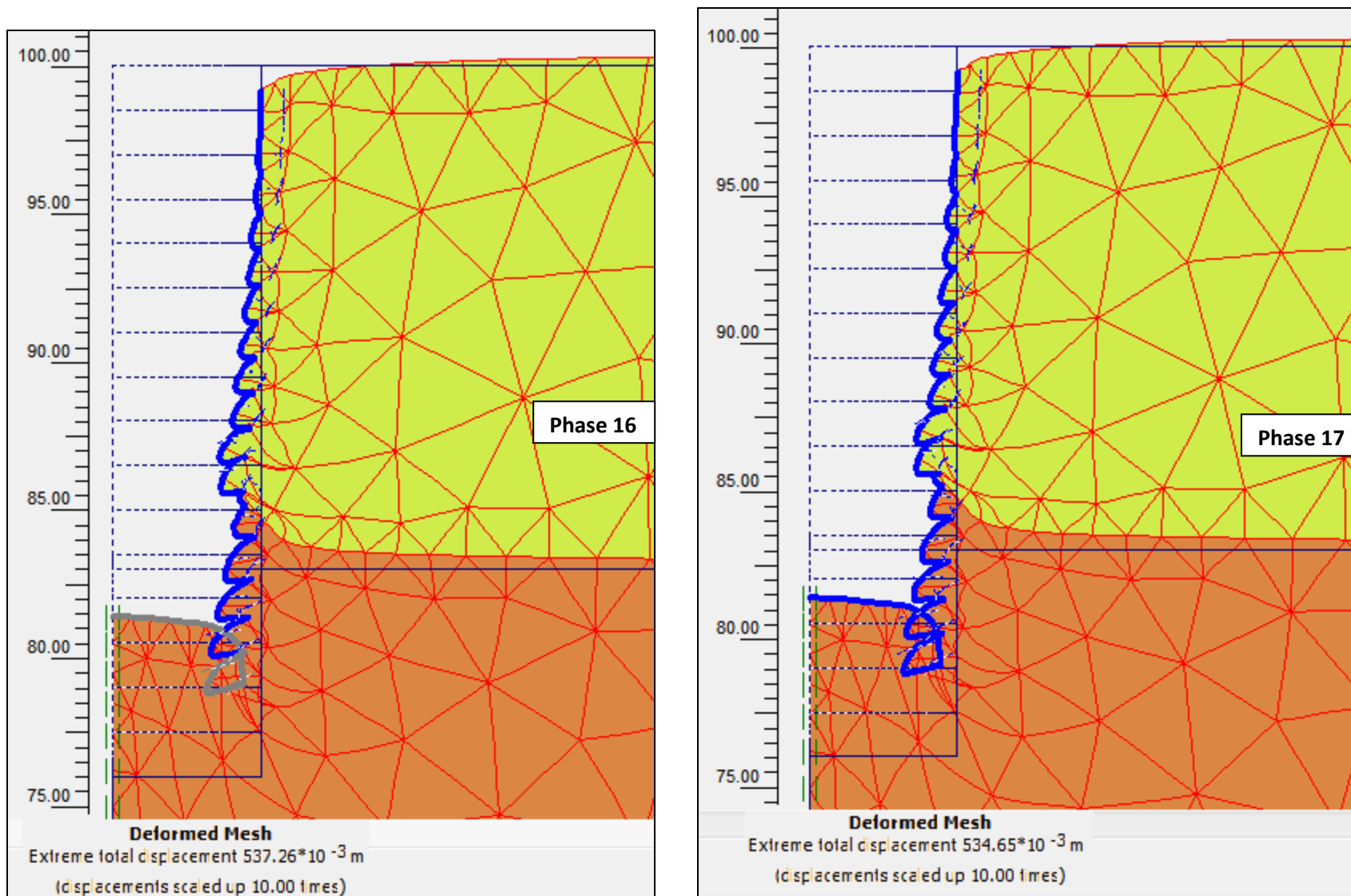
Σε αυτή την ενότητα προκύπτουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών τα οποία έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα. Στην ενότητα “output” είναι δυνατή η απεικόνιση των αποτελεσμάτων για κάθε φάση προσομοίωσης. Για την “1st Analysis”, που αποτελεί το χαρακτηριστικό παράδειγμα επίλυσης, όπως και για τις επόμενες αναλύσεις, ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκύπτει για την “Phase 16” (προτελευταία φάση) και όσον αφορά τα εντατικά μεγέθη της υποστήριξης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η “Phase 17”. Η συγκεκριμένη ενότητα χωρίζεται σε τρεις υποενότητες: **α)** η υποενότητα “deformations”, **β)** η υποενότητα “stresses” και **γ)** η υποενότητα “forces”. Οι δύο πρώτες υποενότητες αφορούν τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και τάσεις των εδαφικών στρώσεων και η τρίτη υποενότητα αφορά τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη (M, Q, N) επί τις υποστήριξης, τα οποία και καταγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 12 : Ο διαχωρισμός των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, με χρήση του Plaxis 2D, σε τρεις βασικές κατηγορίες.

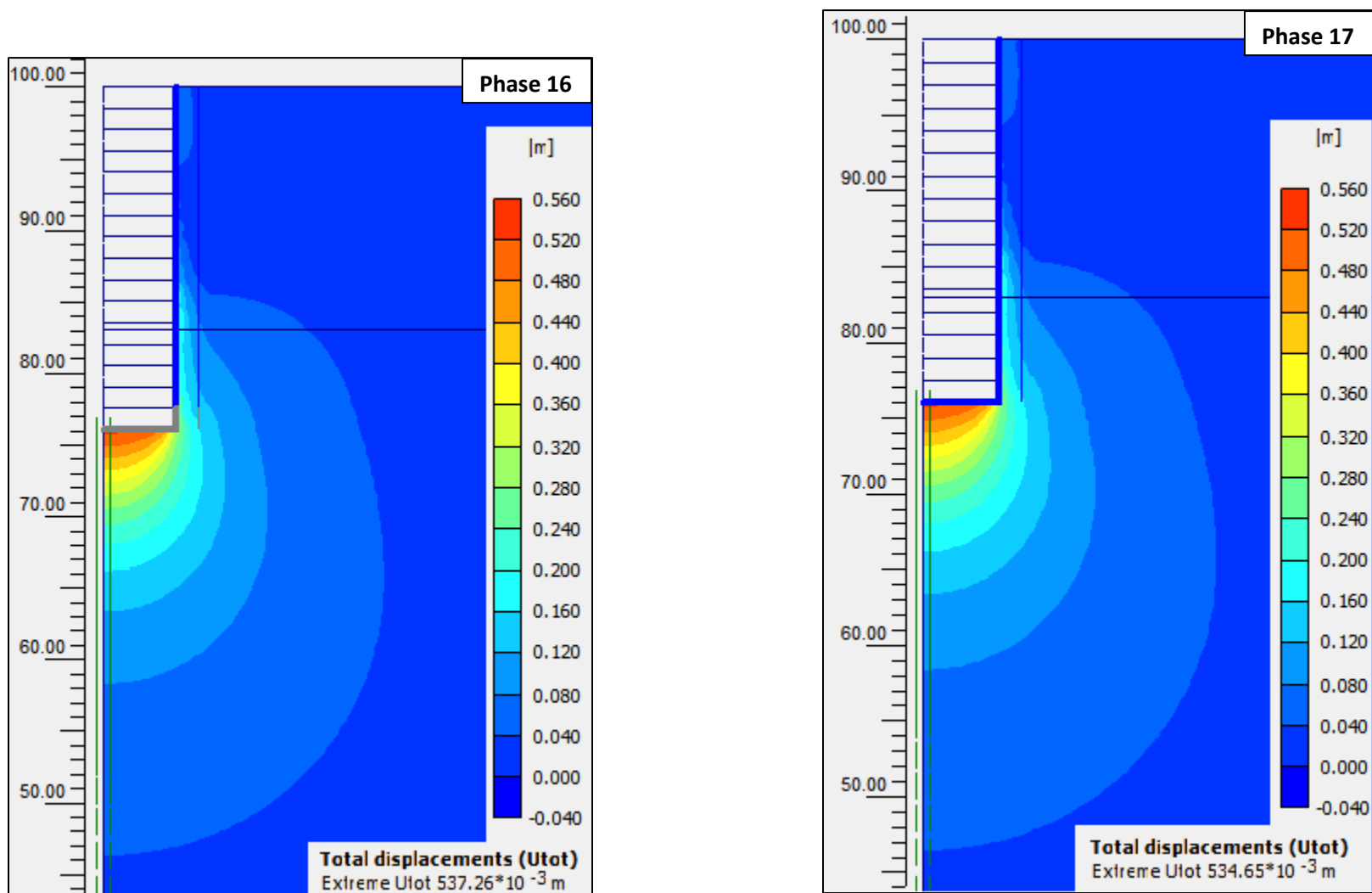
OUTPUT DATA POST PROCESSING	
Υποενότητες	Σύντομη Περιγραφή
Deformations	Απεικονίζονται το “παραμορφωμένο αριθμητικό μοντέλο” (deformed mesh), οι ολικές, κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις (U_{tot} , U_x , U_y) των κόμβων, οι προσαυξημένες μετακινήσεις (dU_{tot}) των κόμβων, οι ολικές “τροπές” (total strains) των stress points και οι προσαυξημένες “τροπές” (incremental strains) των stress points.
Stresses	Απεικονίζονται οι κύριες ενεργές τάσεις (effective stresses – principal directions) στο τέλος κάθε φάσης με τη μορφή “σταυρών” στα stress points κάθε τριγωνικού στοιχείου. Ακόμη απεικονίζονται τα plastic points γύρω από το κατακόρυφο φρέαρ.
Forces	Απεικονίζονται τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη επί τις υποστήριξης. Χωρίζονται σε “ axial forces ”, “ shear forces ”, “ hoop forces ” και “ bending moments ”.

4.4.1 Deformations

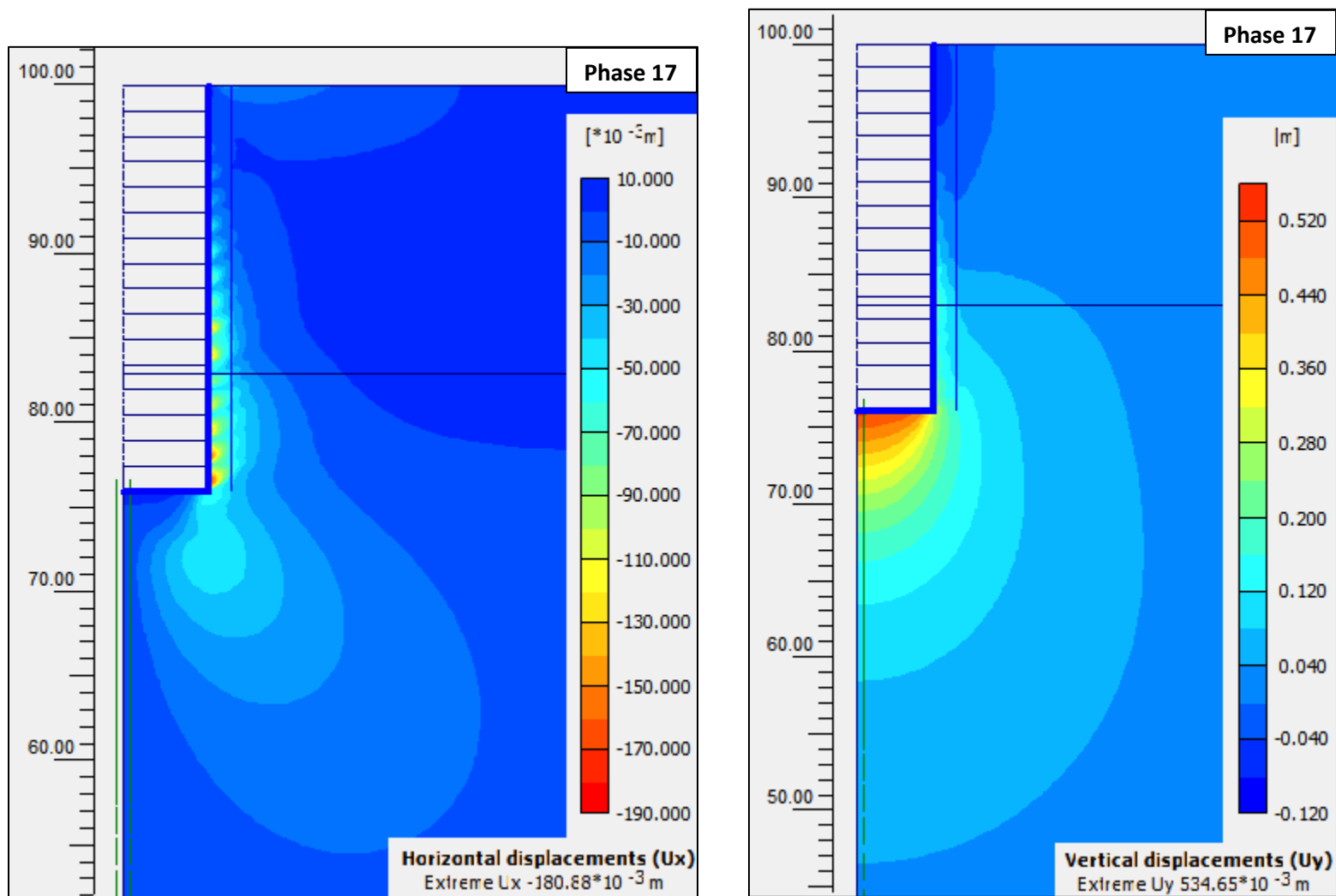
Ακολουθεί η απεικόνιση των μεγεθών που περιγράφονται στον παραπάνω πίνακα, με την σειρά που καταγράφονται, χωρίς την απαραίτητη αιτιολόγηση η οποία παρατίθεται συγκεντρωτικά στο τέλος του Κεφαλαίου. Το “παραμορφωμένο πλέγμα” απεικονίζεται σε μεγαλύτερη κλίμακα ώστε να είναι ευκρινείς ποιοτικά οι παραμορφώσεις, οι μετακινήσεις εμφανίζονται με σκιάσεις και οι τροπές με βέλη ως προς τις κύριες διευθύνσεις.



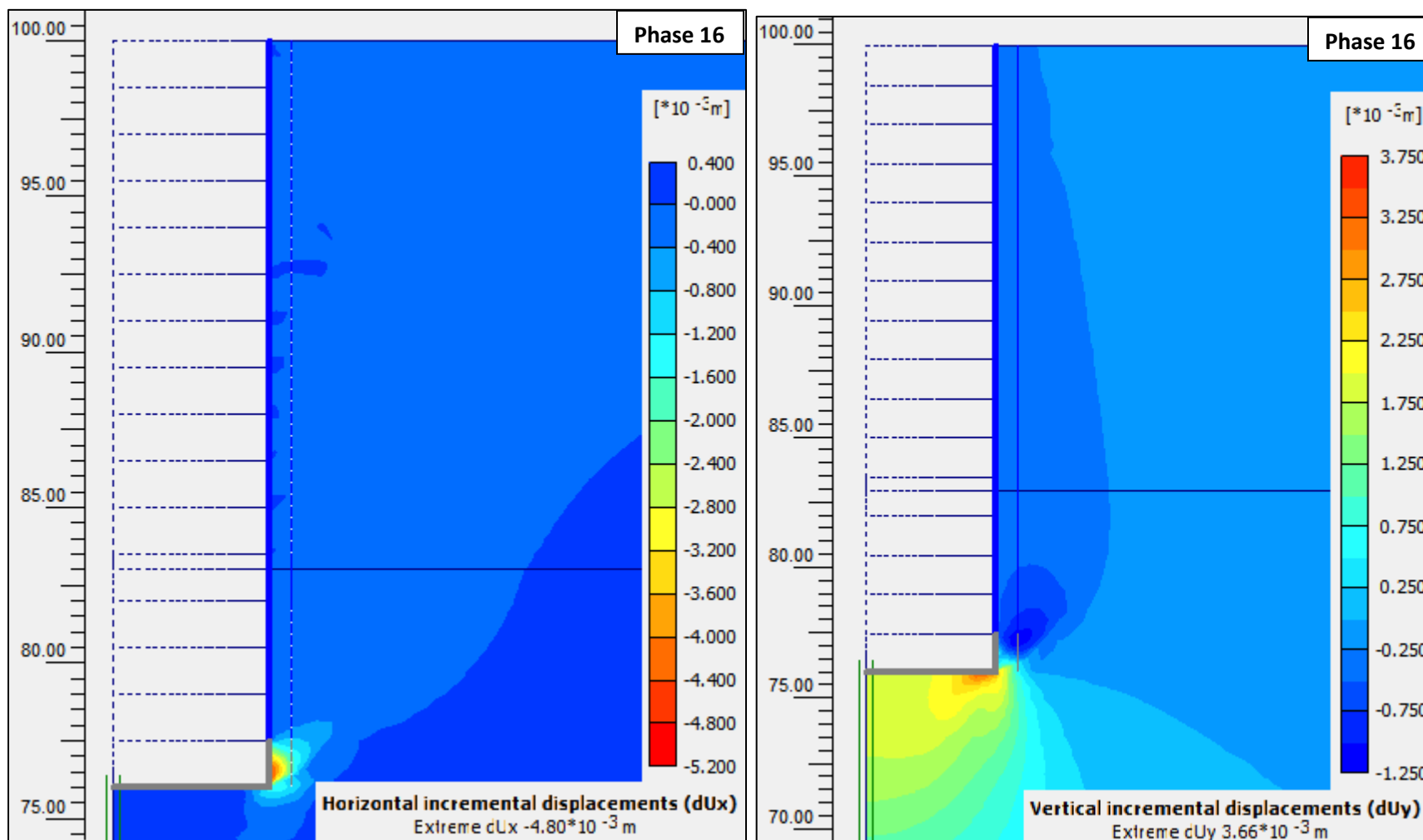
Εικόνα 42 : Plaxis 2D_ Analysis N^o1- Σύγκριση των “deformed meshes” κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).



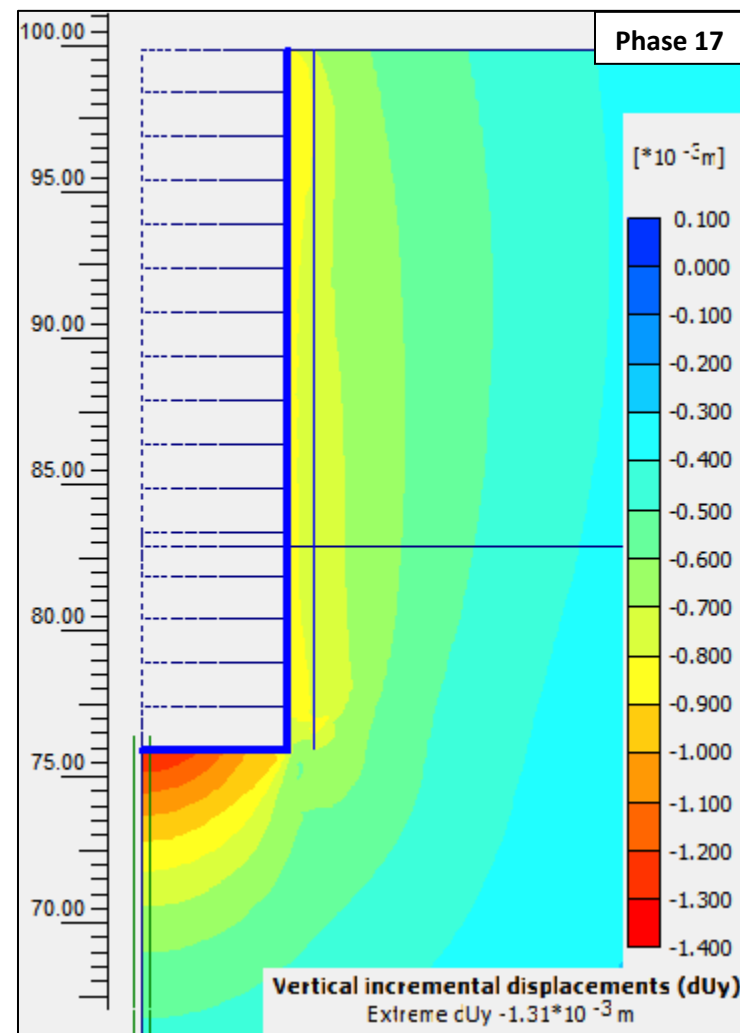
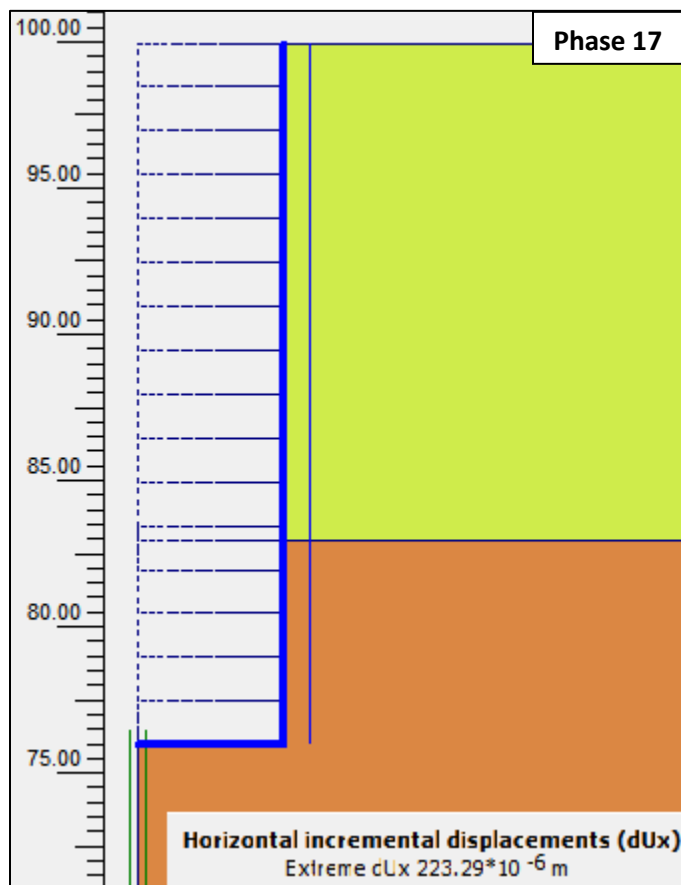
Εικόνα 43 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Σύγκριση των ολικών εδαφικών μετακινήσεων κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).



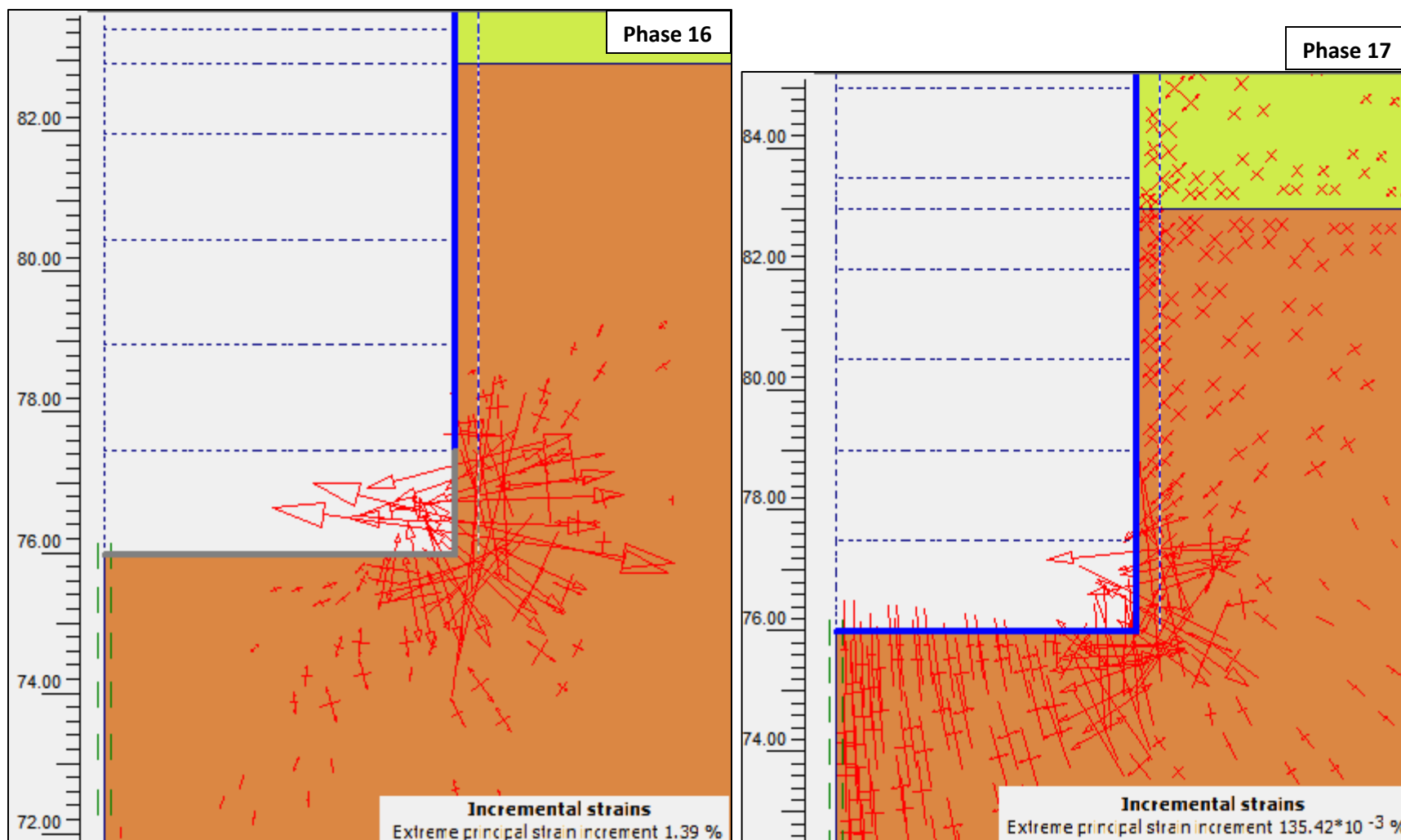
Εικόνα 44 : Plaxis 2D_Analysis N°1- Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 45 : Plaxis 2D_ Analysis N^o1- Οριζόντιες και κατακόρυφες προσαυξημένες μετακινήσεις μετά την προτελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 16).



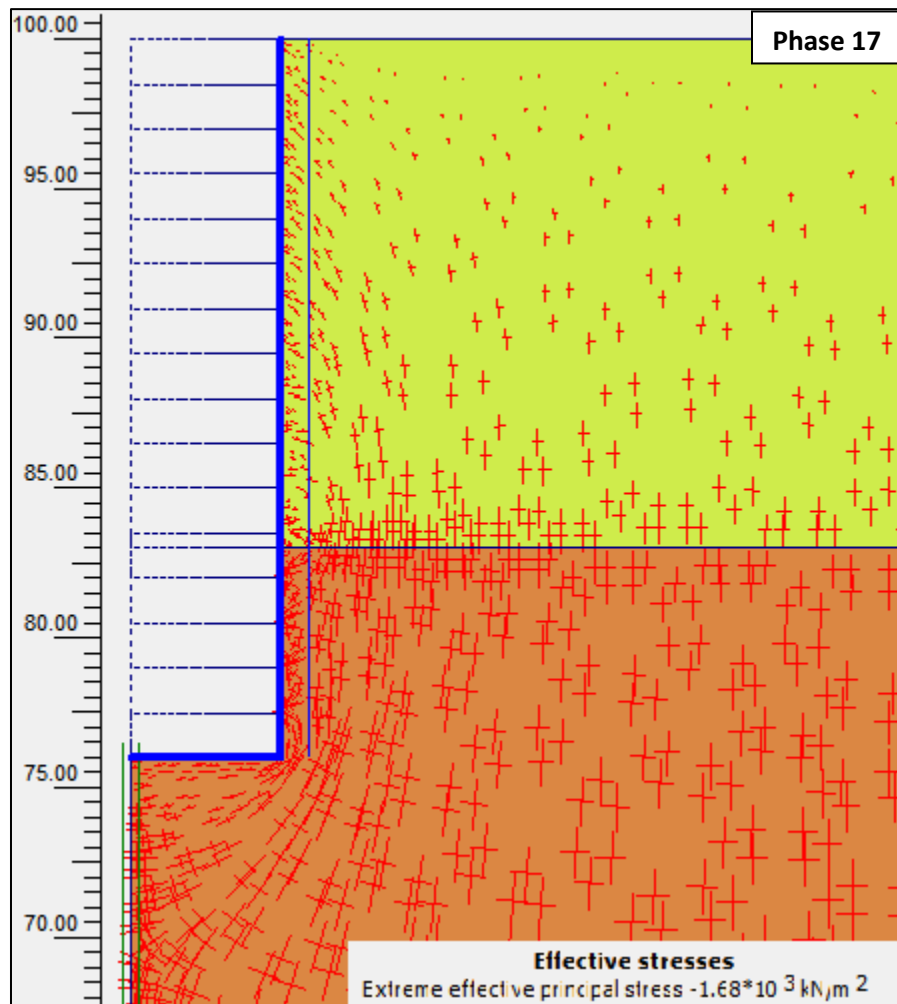
Εικόνα 46 : Plaxis 2D_ Analysis N^o1- Οριζόντιες και κατακόρυφες προσαυξημένες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



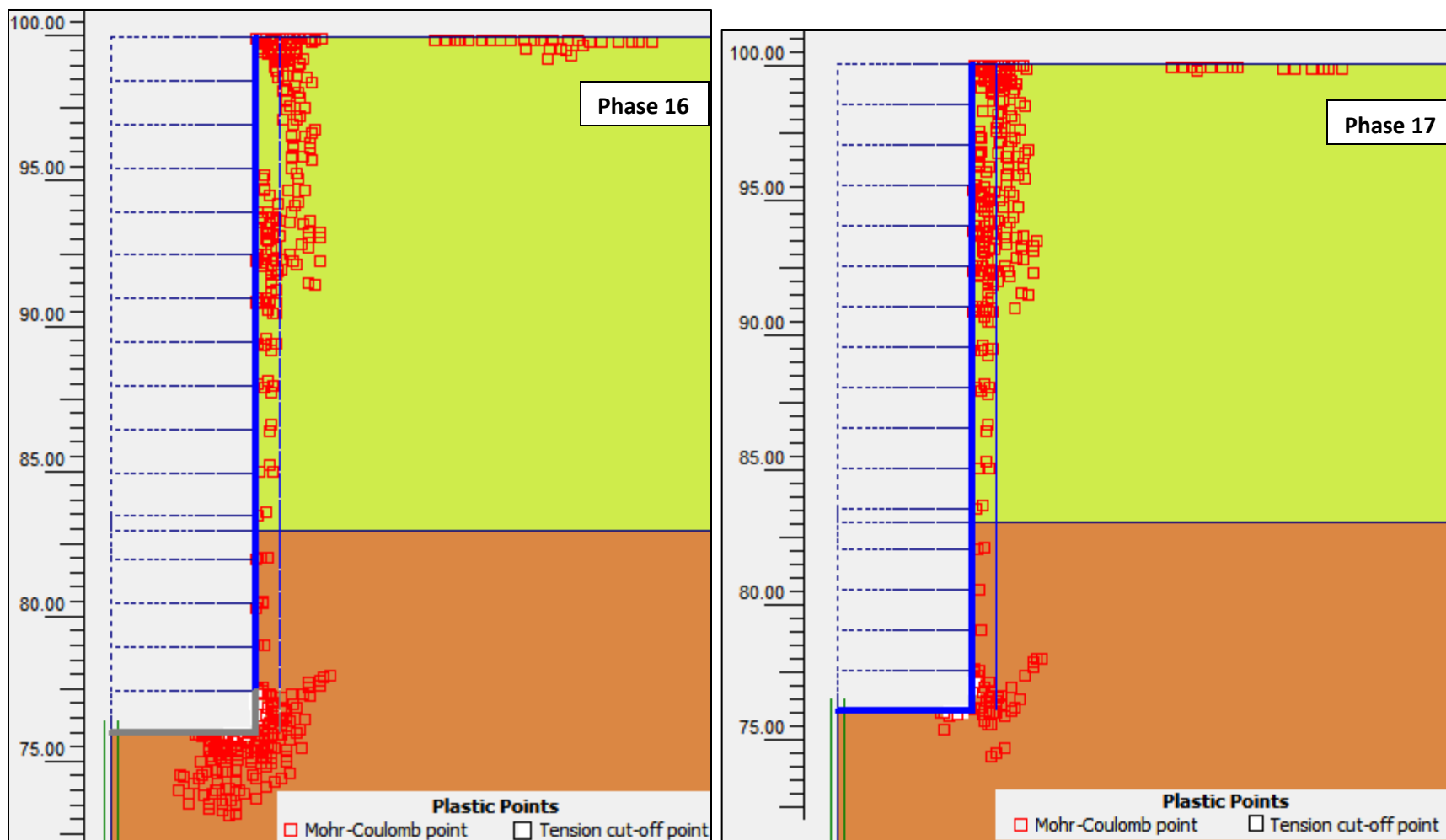
Εικόνα 47 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Οι προσαυξημένες τροπές τις κύριες διευθύνσεις κατά την Φάση 16 και κατά την Φάση 17 (τοποθέτηση τελευταίου “segmental lining” και “lean concrete”).

4.4.2 Stresses

Ακολουθεί η απεικόνιση των ενεργων τάσεων καθώς και των σημείων αστοχίας των εδαφικών στοιχείων γύρω από το φρέαρ. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι ολικές τάσεις είναι ίσες με τις ενεργές τάσεις καθώς δεν υπάρχει παρουσία νερού σε καμία από τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν. Επίσης είναι χαρακτηριστική η μεταβολή της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων, λόγω της εκσκαφής, περιμετρικά του φρέατος, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 48. Κάθε 15-κομβικό τριγωνικό στοιχείο αποτελείται από τρία “stress points” και οι “σταυροί” απεικονίζουν τις ενεργές κύριες τάσεις των σημείων αυτών.



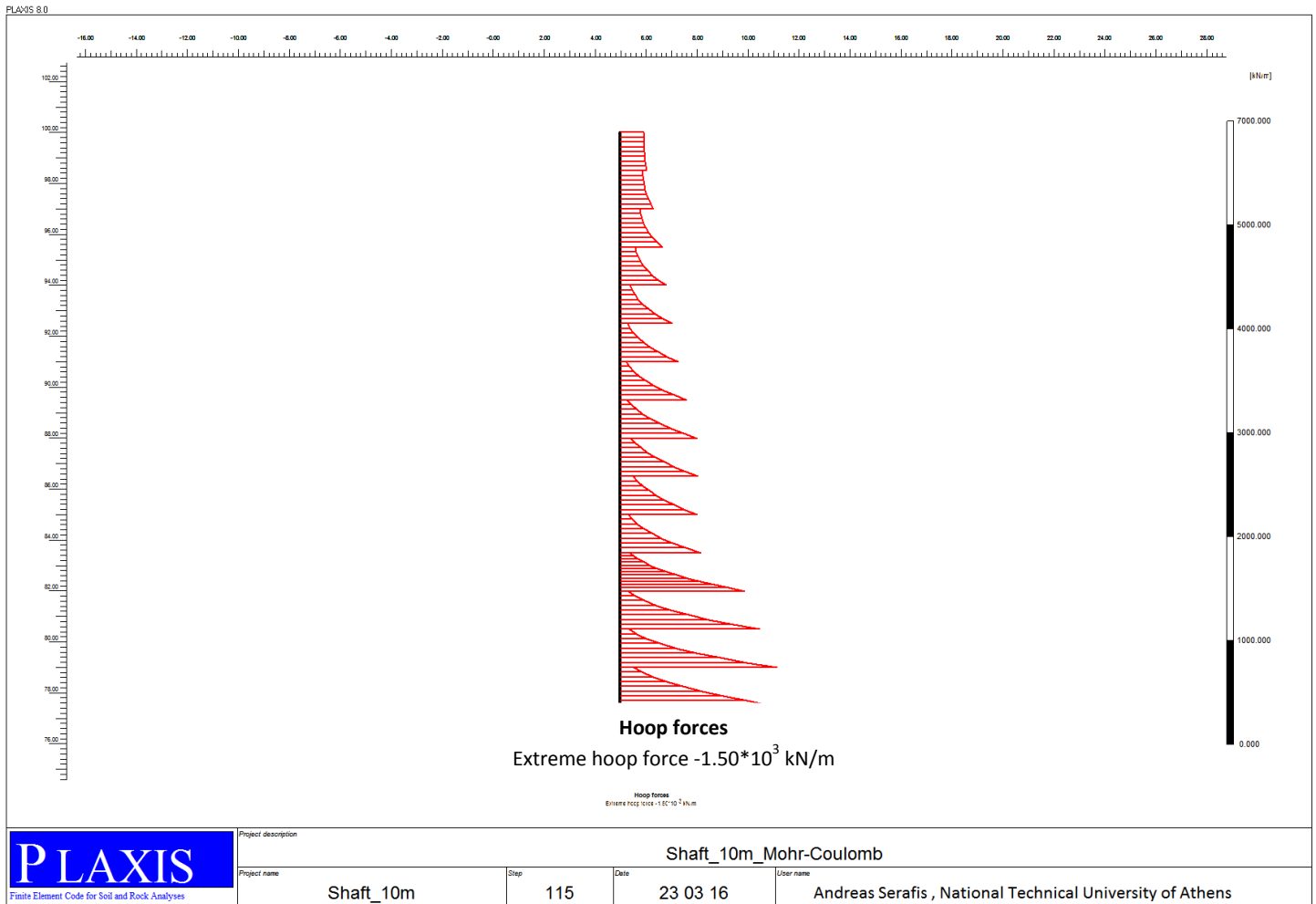
Εικόνα 48 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Η διεύθυνση των ενεργών κύριων τάσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης.



Εικόνα 49 : Plaxis 2D_ Analysis N^o1- Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).

4.4.3 Forces

Ακολουθεί η απεικόνιση των “hoop forces”, όπως προκύπτουν για το φρέαρ τις “1st Analysis”. Οι δυνάμεις αφορούν την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17). Τα υπόλοιπα μεγέθη (“axial forces”, “shear forces” και “bending moments”) παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α καθώς δεν είναι ιδιαίτερα δυσμενή για την κατασκευή. Παρόλο που δεν αποτελεί αντικείμενο τις συγκεκριμένης εργασίας, με τον υπολογισμό των διατμητικών δυνάμεων (shear forces) είναι δυνατός ο έλεγχος αστοχίας σε διάτμηση των κατακόρυφων-συνδετήριων κοχλιών, όπως αυτοί απεικονίζονται στην “Εικόνα 6” σελ.8.



Εικόνα 50 : Διάγραμμα hoop forces του φορέα της 1st Analysis κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

Αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη: $\sigma_c^{\text{αντοχη}} = 6000$ kPa και $A_{\text{segment}} = 1.5\text{m} \cdot 0.3\text{m} = 0.45$ m²

Αρα $F_{\text{resist}} = \sigma_c^{\text{αντοχη}} \cdot A_{\text{segment}} = 2700$ kN > $F_{\text{hoop}}^{\text{max}} = 1.5$ MN

Σύμφωνα με τον έλεγχο επάρκειας, η υποστήριξη μπορεί να παραλάβει τις “hoop forces” επαρκώς.

4.5 LOAD – DISPLACEMENT CURVES AND STRESS PATHS

Σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες μετατοπίσεων για ορισμένους από τους επτά προεπιλεγμένους κόμβους και οι χαρακτηριστικές καμπύλες “τάσεων – τροπών” για τα “stress points” της ενότητας 2 (calculations).

Αρχικά επιλέγεται το εικονίδιο “Curves” και στη συνέχεια ορίζονται οι επιθυμητές παράμετροι του Πίνακα “curve generation”, όπως φαίνεται παρακάτω.

X-Axis	Y-Axis
<input checked="" type="radio"/> Displacement	<input type="radio"/> Displacement
<input type="radio"/> Velocity	<input type="radio"/> Velocity
<input type="radio"/> Acceleration	<input type="radio"/> Acceleration
<input checked="" type="radio"/> Multiplier	<input checked="" type="radio"/> Multiplier
<input type="radio"/> Pore pressure	<input type="radio"/> Pore pressure
<input type="radio"/> Force	<input type="radio"/> Force
<input type="radio"/> Time	<input type="radio"/> Time
<input type="radio"/> Stress	<input type="radio"/> Stress
<input type="radio"/> Strain	<input type="radio"/> Strain
<input type="radio"/> Step	<input type="radio"/> Step
Point: C (0.00 / 76.00)	Point:
Type: Uy	Type: Sum-Mstage
<input type="checkbox"/> Invert sign	<input type="checkbox"/> Invert sign

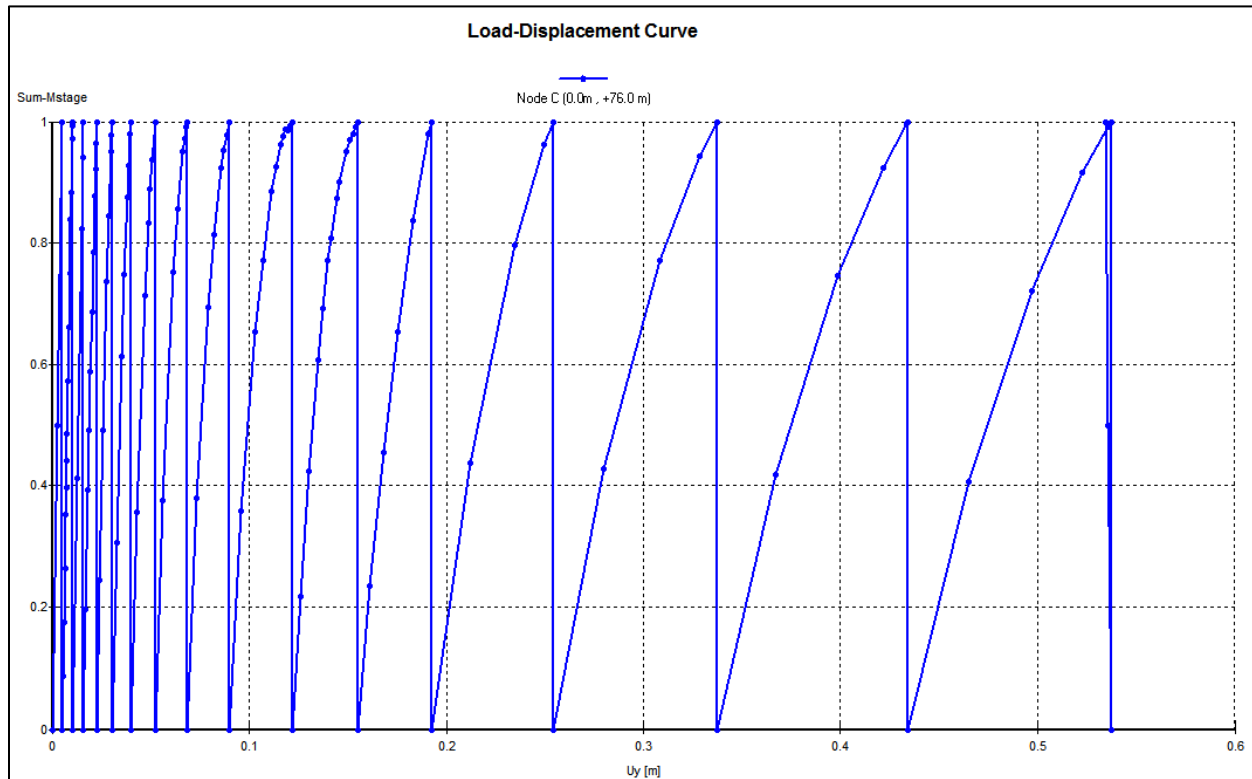
Εικόνα 51 : Επιλογή των κατάλληλων μεγεθών για την χάραξη καμπυλών φορτίου- μετατόπισης (Point C_1st Analysis).

Οι καμπύλες “load-displacement” που χαράσσονται στην πρώτη ανάλυση είναι οι εξής:

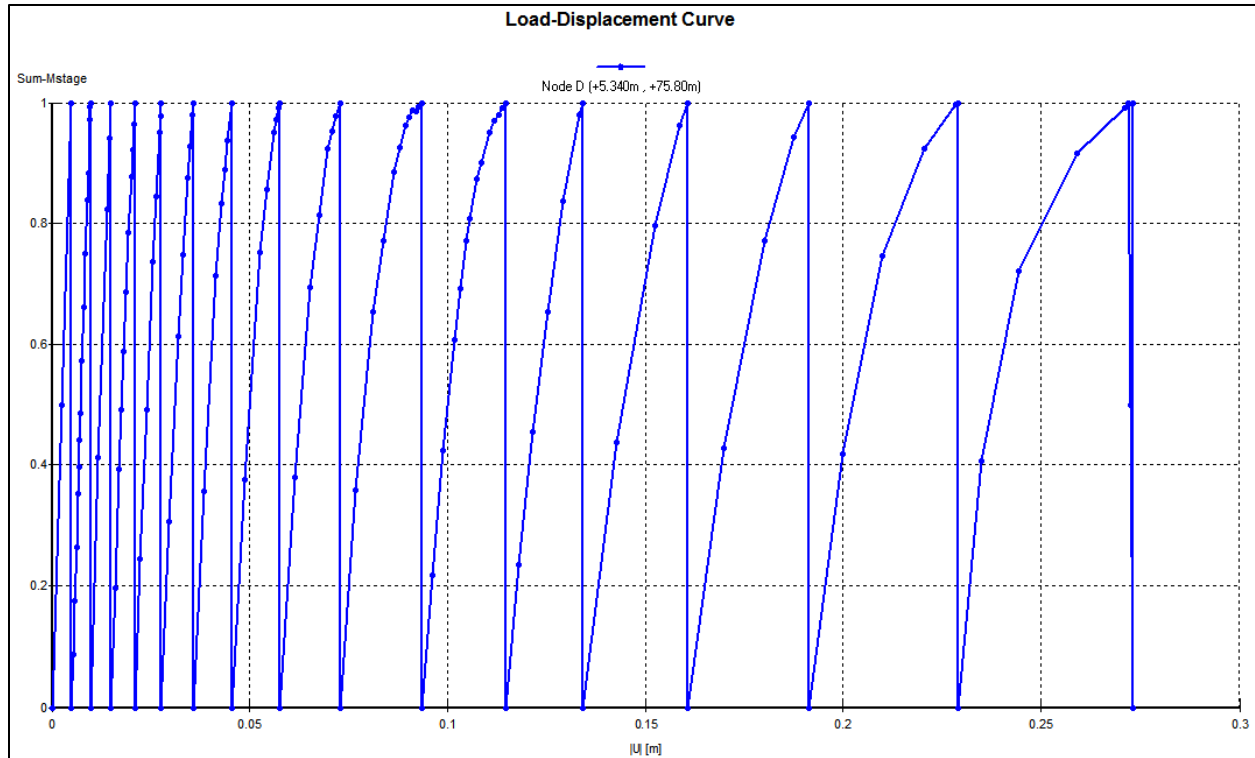
Πίνακας 13 : Χαρακτηριστικές καμπύλες μετατόπισης εξαρτώμενες από τις ιδιότητες του κάθε κόμβου.

Load – Displacement Curves	
Nodes	Displacement type (X-Axis)
Node A	U_x
Node A*	U_y
Node B	U_x
Node B*	U_y
Node C	U_y
Node D	U_{tot}
Node E	U_x
Node F	U_x
Node G	U_{tot}

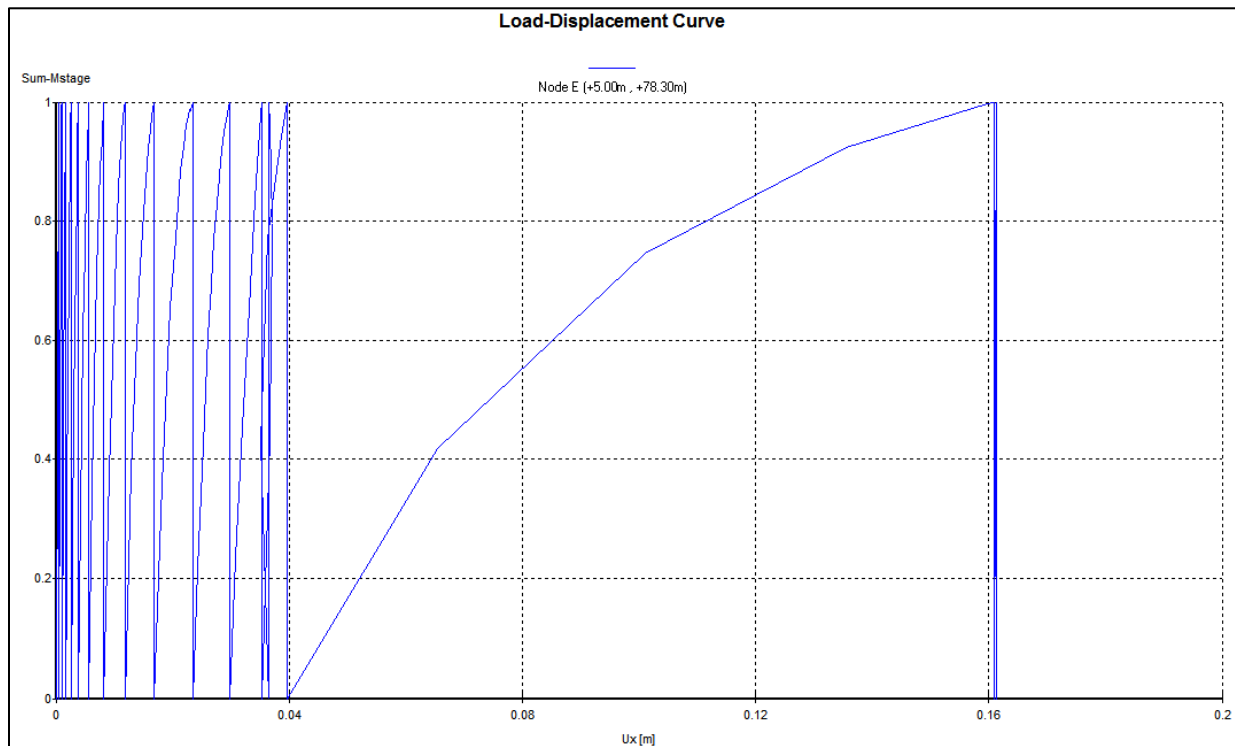
Για τους κόμβους A και B χαράσσονται καμπύλες ξεχωριστά για τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις. Παρόλο που δεν αποτελεί αντικείμενο τις παρούσας εργασίας, με τη χάραξη καμπυλών μετατοπίσεων σε αυτά τα σημεία είναι δυνατόν να διερευνηθούν πιθανές βλάβες σε όμορα κτίρια λόγω διαφορικών καθιζήσεων οι οποίες ενδέχεται να προκύψουν εξαιτίας της εκσκαφής του φρέατος. Οι συγκεκριμένες καμπύλες παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.



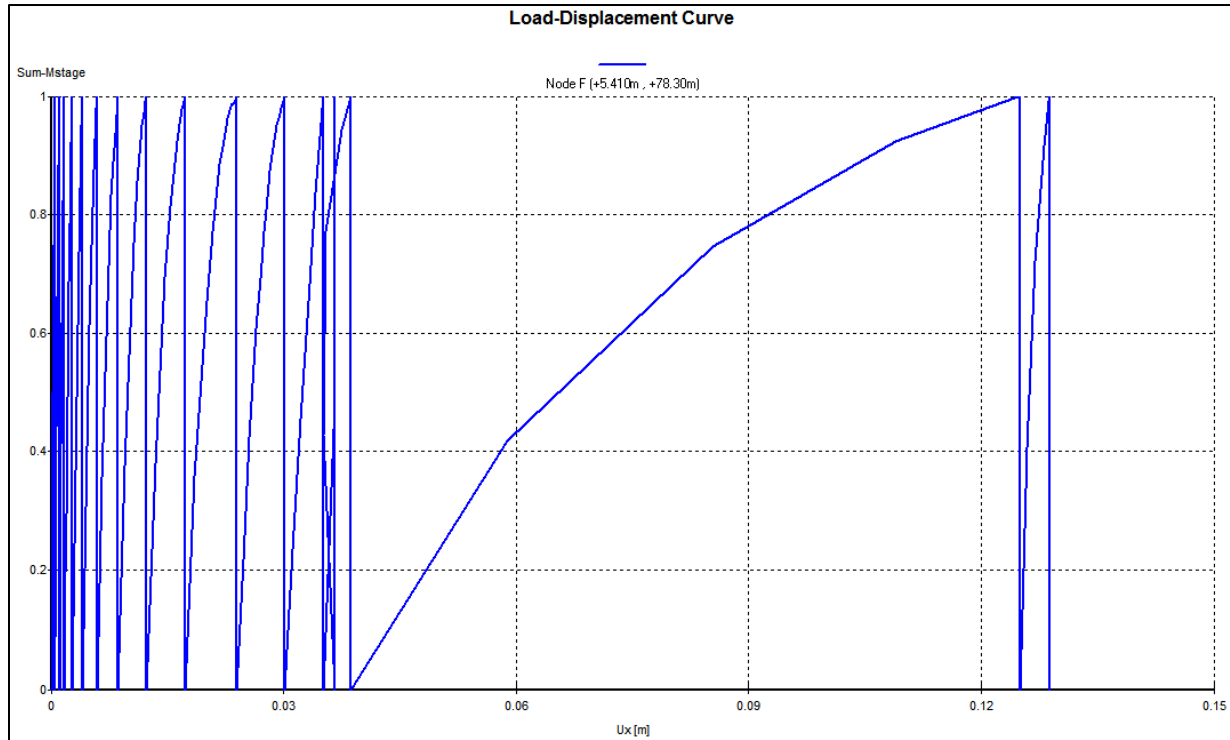
Εικόνα 52 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Η καμπύλη ανύψωσης του κόμβου C (0.00m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης σε όρους “Sum-Mstage – U_y”.



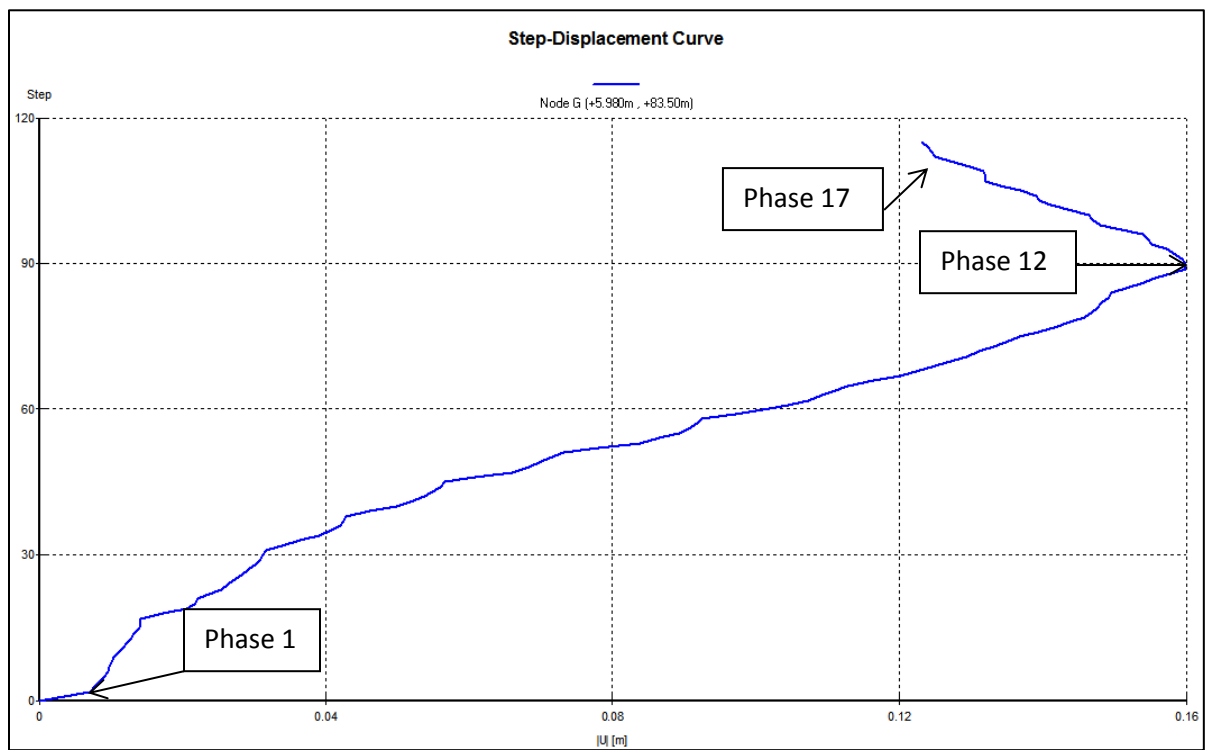
Εικόνα 53 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου D (+5.340m ,+75.80m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 54 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Η καμπύλη οριζόντιων μετακινήσεων του κόμβου E (+5.00m,+78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 55 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Η καμπύλη οριζόντιων μετακινήσεων του κόμβου F(+5.410m,+78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 56 : Plaxis 2D_ Analysis N⁰1- Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου G (+5.980m, +83.50m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.

4.6 PLAXIS 2D_ANALYSIS N°1- ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με αφορμή την εκτενή περιγραφή της ανάλυσης του κατακορύφου φρέατος με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D και βασιζόμενοι στο πρώτο παράδειγμα παραμετρικής ανάλυσης (1st Analysis), ακολουθεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτής. Η λεπτομερή παράθεση όλων των διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 5.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα και τις εικόνες που προηγήθηκαν συμπεραίνονται τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 42” σελ.44 παρατηρείται ότι η ανύψωση του πυθμένα έχει ολοκληρωθεί ήδη από την Φάση 16. Η τοποθέτηση του “lean concrete” μειώνει ελάχιστα την ανύψωση λόγω εφαρμογής (στον πυθμένα) του ίδιου βάρους σκυροδέματος.
2. Από την “Εικόνα 44” σελ.46 παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις εμφανίζονται στο μέσο του ανυποστήρικτου κατακόρυφου πρανού, ύψους 1,5m, κάθε φορά.
3. Από τις “Εικόνα 45” σελ.47 και “Εικόνα 46” σελ.48 παρατηρείται ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους (στο τελικό βάθος εκσκαφής) έχουν ολοκληρωθεί ήδη από την Φάση 16.
4. Από την “Εικόνα 47” σελ.49 επιβεβαιώνεται πως δεν προκύπτουν επιπλέον ορθές τροπές στον πυθμένα παρά μόνο ορισμένες ελάχιστες θλιπτικές ορθές τροπές λόγω της τοποθέτησης του “lean concrete”.
5. Από την “Εικόνα 48” σελ.50 είναι εμφανής η μεταβολή της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων, λόγω τις εκσκαφής, περιμετρικά των κατακορύφων παρειών αλλά και στον πυθμένα.
6. Ο συνδυασμός των “Εικόνα 47” σελ.49 και “Εικόνα 49” σελ.51 επιβαιώνει την κρισιμότητα τις Φάσης 16 (προτελευταία φάση). Όπως παρατηρείται, ιδιαίτερα προβλήματα πλαστικών παραμορφώσεων εμφανίζονται στην γωνία του πυθμένα τις εκσκαφής με αποτέλεσμα την περαιτέρω ανύψωση αυτού. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο διότι ως κριτήριο αστοχίας έχει επιλεγεί το κριτήριο “Mohr-Coulomb”. Αντιθέτως, πλαστικές παραμορφώσεις δεν εμφανίζονται στον πυθμένα, γεγονός που αποδεικνύει ότι κατά την αποφόρτιση το έδαφος του πυθμένα μετακινείται ως “απολύτο στερεό”. Επιπλέον, στην “Εικόνα 49” σελ.51, και συγκεκριμένα στην γωνία του πυθμένα, παρατηρούνται ορισμένα σημεία αστοχίας λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής της στρώσης “sandy silt”. Τέτοιου είδους αστοχία πραγματοποιείται διότι κατά την εκσκαφή εμφανίζονται φαινόμενα ανύψωσης (uplift) στην συγκεκριμένη θέση και επίσης κατά την επιλογή παραμέτρων για την υπόψη στρώση, η εφελκυστική της αντοχή (“tensile strength”) επιλέγεται να είναι μηδέν.
7. Στην “Εικόνα 50” σελ.52 παρατηρείται η μεγάλη τιμή της εφαπτομενικής δύναμης (hoop force) που ασκείται στα “segmental rings”. Η εφαπτομενική δύναμη αποτελεί το δυσμενές εντατικό μέγεθος κατά την προσομοίωση και ασκείται επί των “concrete segments”. Πρέπει να τονισθεί ότι στην αξονοσυμμετρική ανάλυση που πραγματοποιείται με το Plaxis 2D λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή των “hoop forces” μόνο στον κατακόρυφο άξονα και με βάσει αυτές τις τιμές έχει γίνει έλεγχος επάρκειας της διατομής. Στην πραγματικότητα πρέπει να εξεταστεί επιπλέον η μεταβολή των “hoop forces” και στον οριζόντιο άξονα, όπως πραγματοποιείται και σχολιάζεται στον “Πίνακας 35” σελ.137.

8. Η “Εικόνα 54” σελ.55 αποτελεί την καμπύλη των οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου E το οποίο αποτελεί σημείο της κατακόρυφης παρειάς. Παρατηρείται λοιπόν ότι κατά την Φάση15 (μια φάση πριν την τοποθέτηση του “segmental ring” με ταυτόχρονη απομάκρυνση του “volume cluster”) οι U_x γίνονται μέγιστες και κατά την Φάση16 και Φάση17 (τοποθέτηση του “segmental ring”) η προσαύξηση των U_x είναι ελάχιστη.

Τελικά τα κυριότερα προβλήματα στην “1st Analysis” είναι:

- ❖ Η αυξημένη ανύψωση του πυθμένα (που προκαλεί προβλήματα λειτουργικότητας του φρέατος) και αστοχίας των σχηματισμών στην ακμή του πυθμένα λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής τους.
- ❖ Οι αυξημένες πλαστικές παραμορφώσεις κατά την Φάση 16.
- ❖ Οι περιμετρικές καθιζήσεις πλησίον της εκσκαφής, όπως αυτές περιγράφονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου, βασιζόμενοι στην “1st Analysis”, είναι η υπερ-επάρκεια των “segmental rings” έναντι των εντατικών μεγεθών που δρούν σε αυτά.

5

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΟ Plaxis 2D (Version 8.2)

5.1 PLAXIS 2D_ANALYSIS N° 1

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται και αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 4. Παρακάτω, δίνεται μόνο ο Πίνακας με τις γεωτεχνικές παραμέτρους των “interfaces” ώστε να γίνει ευκολότερη η σύγκριση αυτών με τις παραμέτρους των “interfaces” της Ανάλυσης N° 2. Ακολουθούν οι υπόλοιπες παραμετρικές αναλύσεις, όπως δίνονται στον “Πίνακας 8” σελ.32.

Πίνακας 14 : Plaxis 2D_Analysis N°1 – Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των διεπιφανειών κατά την πρώτη παραμετρική ανάλυση.

Analysis N° 1		
Parameters	Silty Sand “Custom interface”	Sandy Silt “Custom interface”
Material Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Drainage Type	Drained	Drained
Unit weight above phreatic level	16.0 kN/m ³	17.0 kN/m ³
Unit weight below phreatic level	20.0 kN/m ³	20.0 kN/m ³
Effective Young’s modulus	7000 kN/m ²	6000 kN/m ²
Effective Poisson’s ratio	0.3	0.3
Cohesion	1 kN/m ²	1 kN/m ²
Friction angle	30°	24°
Dilatancy angle	0°	0°

5.2 PLAXIS 2D_ANALYSIS N° 2

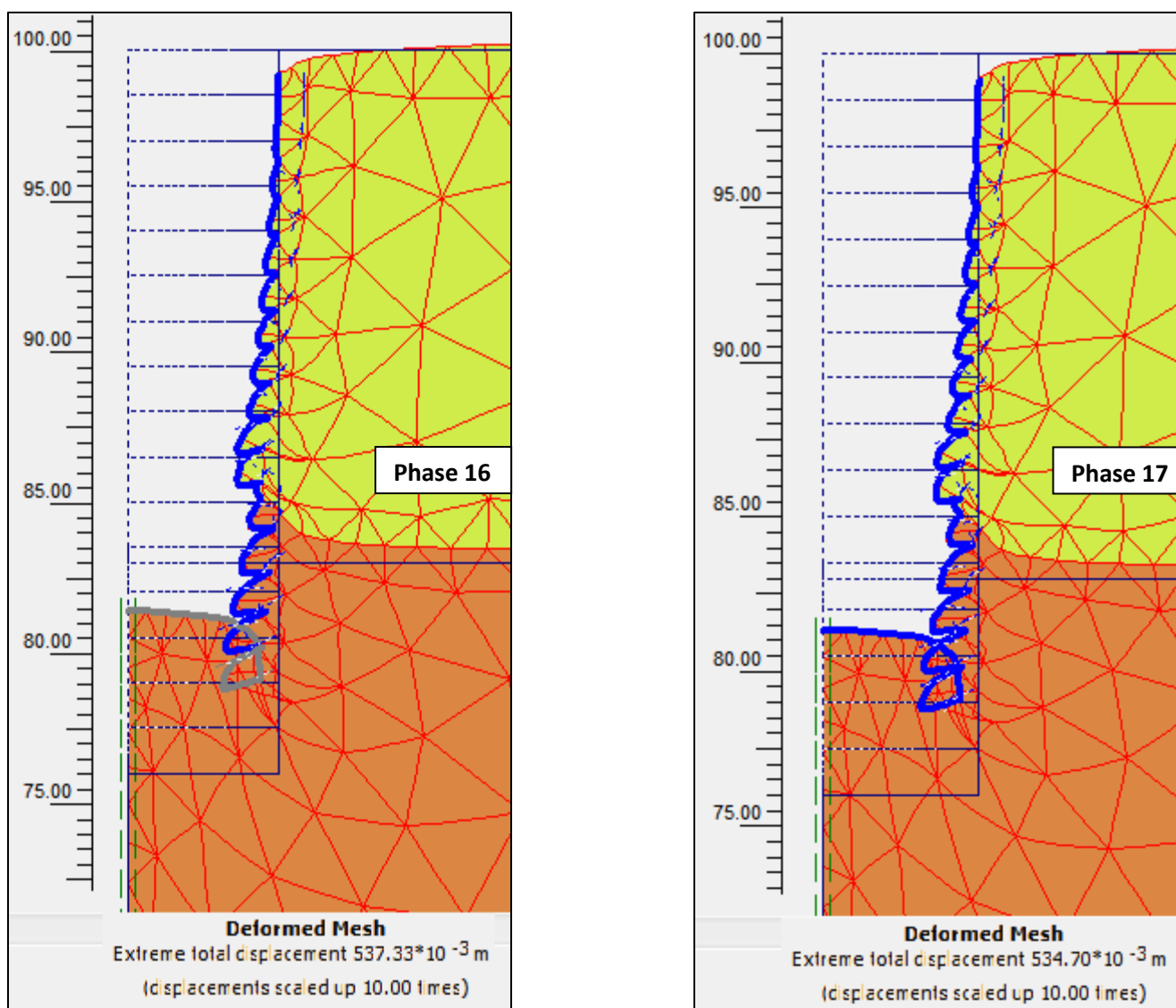
Η ανάλυση πραγματοποιείται για την εξακρίβωση της επιρροής των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας (“interface parameters”) στα τελικά αποτελέσματα. Οι γεωτεχνικές παράμετροι κατά την Ανάλυση N° 2 εξαρτώνται από τον συντελεστή “ R_{inter} ” των εδαφικών στρώσεων, όπως περιγράφονται στον “Πίνακας 5” σελ.26.

Πίνακας 15 : Plaxis 2D_Analysis N°2 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.

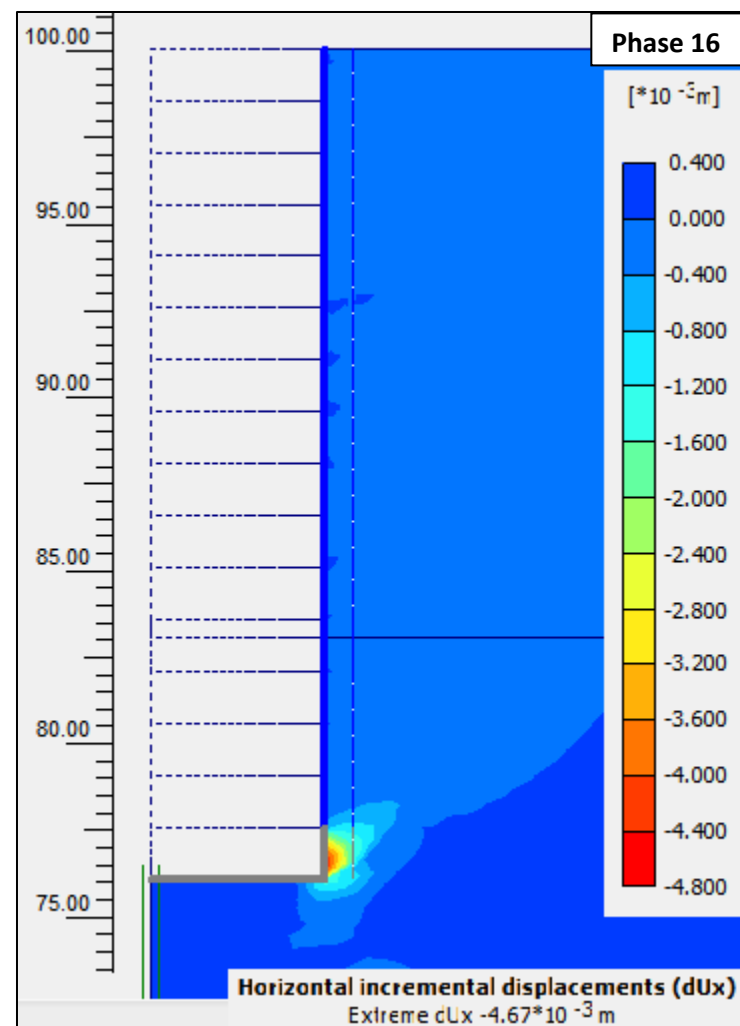
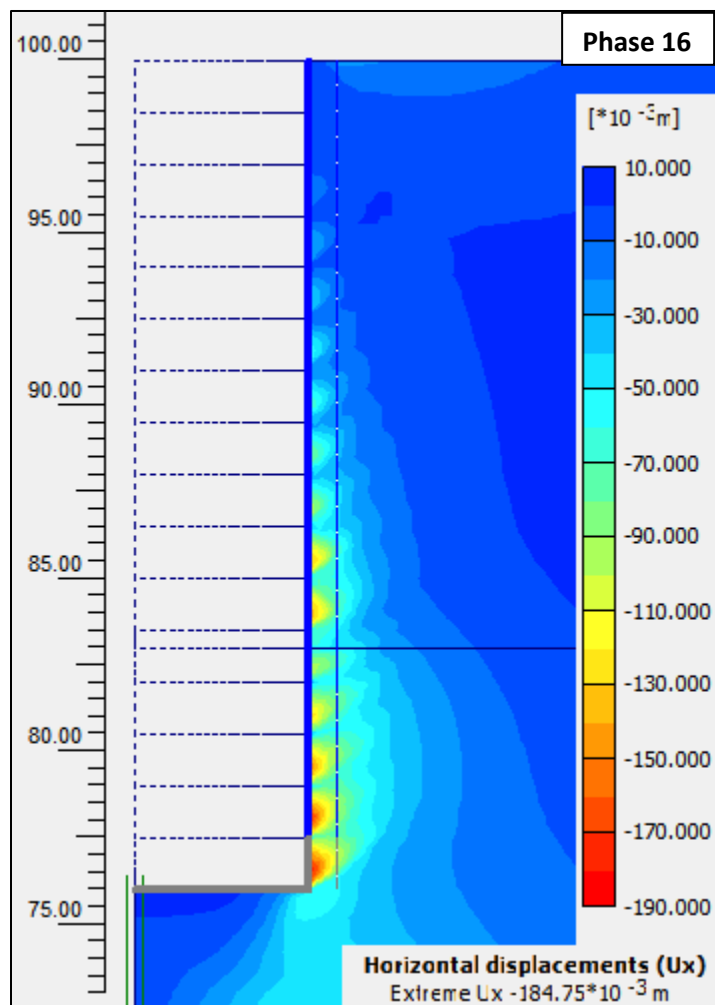
Analysis N°2- Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+5.410m , +78.30m)	Πρόκειται για σημείο της διεπιφάνειας με έντονο ενδιαφέρον όσον αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις.
Node C (+5.340m , +75.80m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων (plastic points).

Πίνακας 16 : Plaxis 2D_Analysis N°2 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

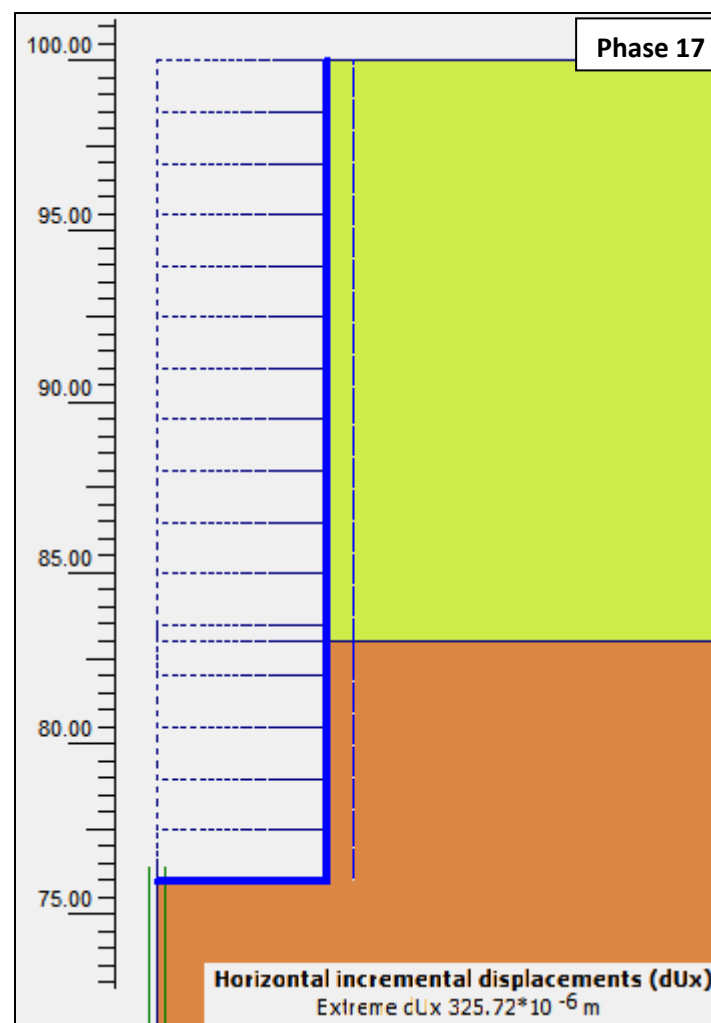
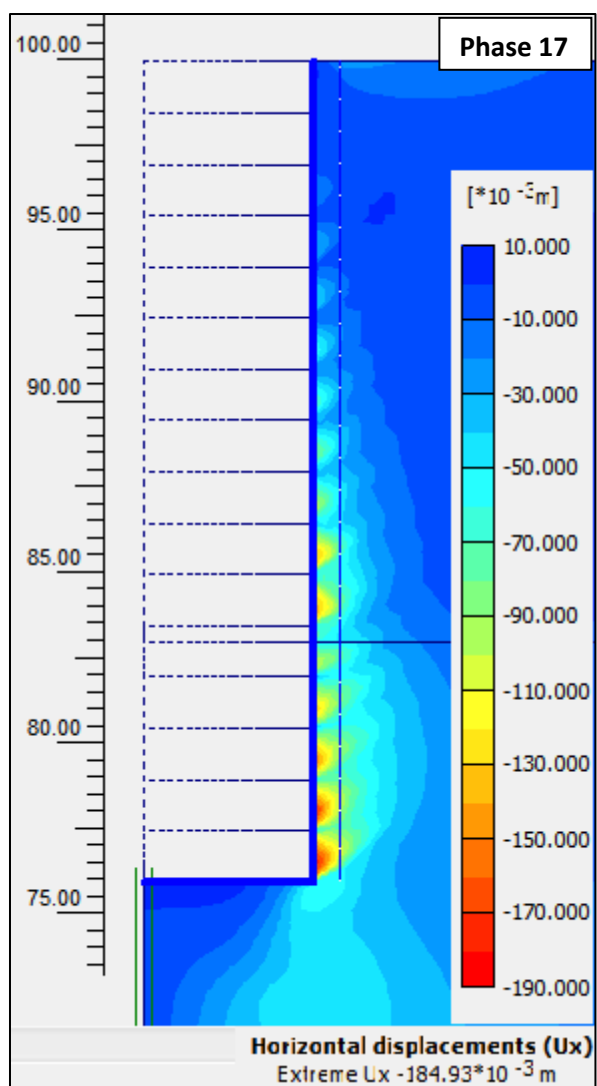
Analysis N°2 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point D (+5.60m , +78.00m)	Σημείο της διεπιφάνειας στο βάθος που τοποθετείται το “segmental ring” με τις μέγιστες “hoop forces”.
Stress point E (+5.240m , +76.50m)	Σημείο της διεπιφάνειας στο μέγιστο βάθος του φρέατος.
Stress point F (+5.200m , +83.30m)	Σημείο της διεπιφάνειας της στρώσης “silty sand”, στο όριο με την στρώση “sandy silt”.



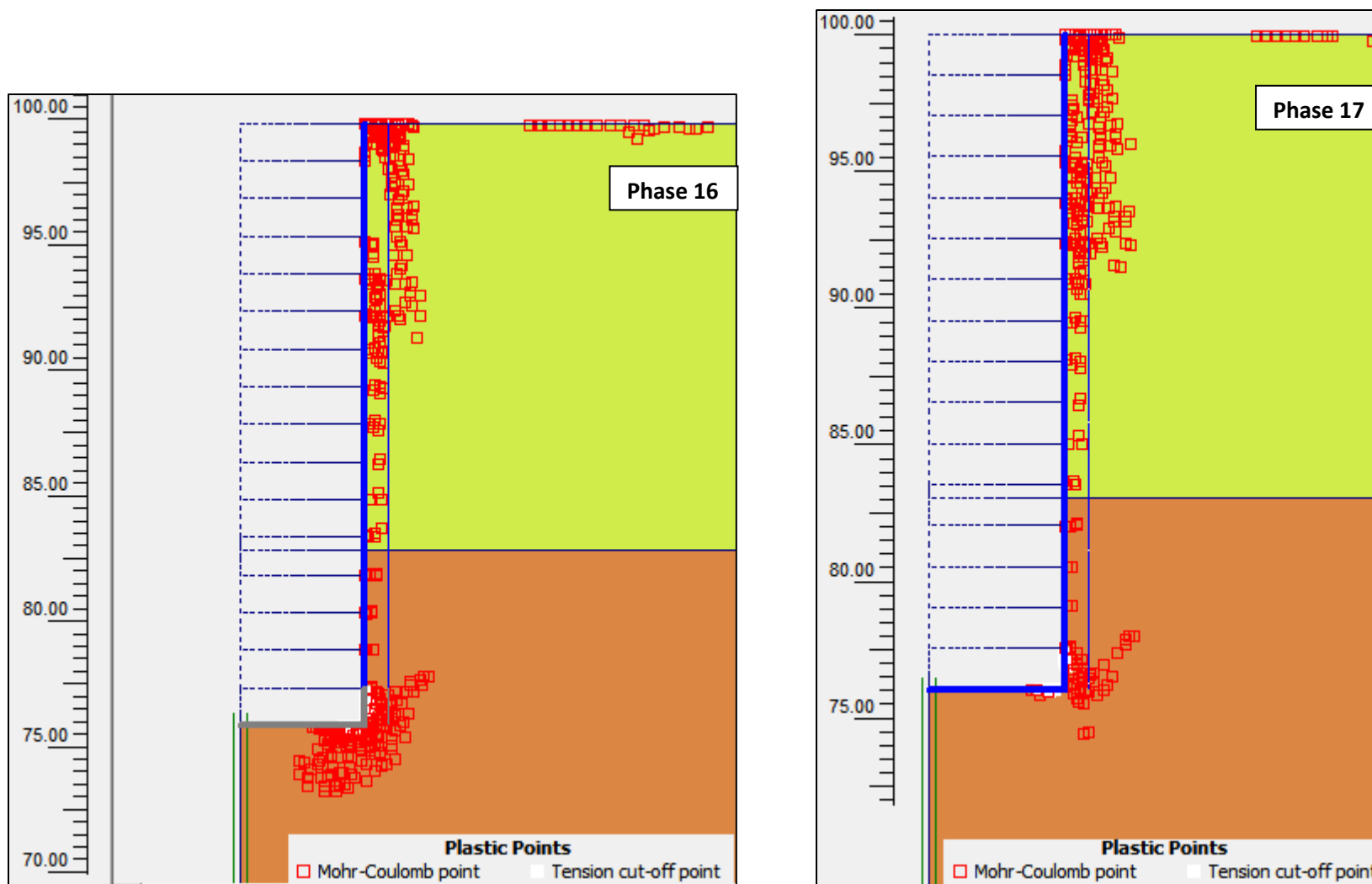
Εικόνα 57 : Plaxis 2D_ Analysis N^o2 – Σύγκριση των “deformed meshes” κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).



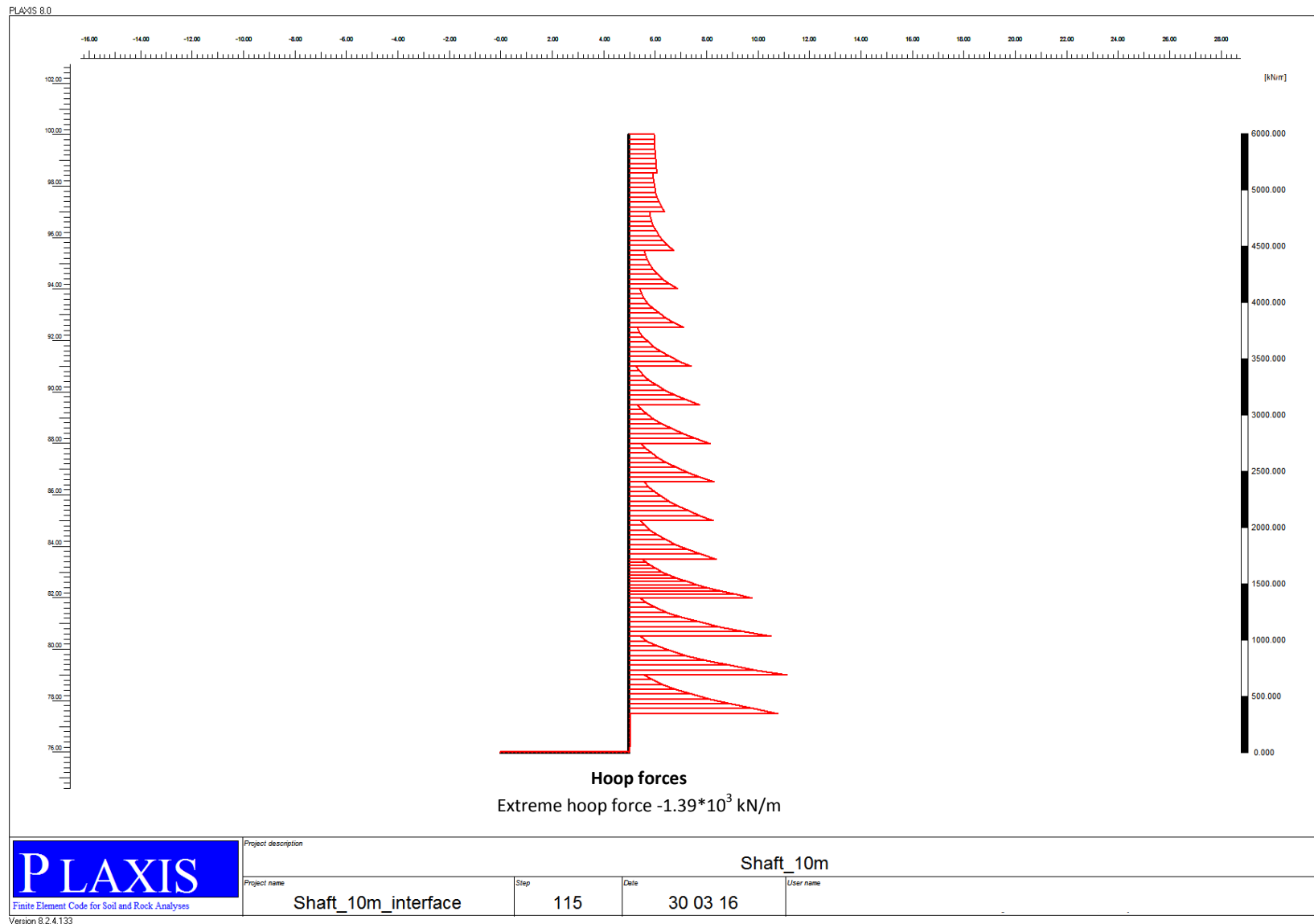
Εικόνα 58 : Plaxis 2D_ Analysis N^o2 – Οι οριζόντιες μετακινήσεις και η προσαύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων κατά την Φάση 16.



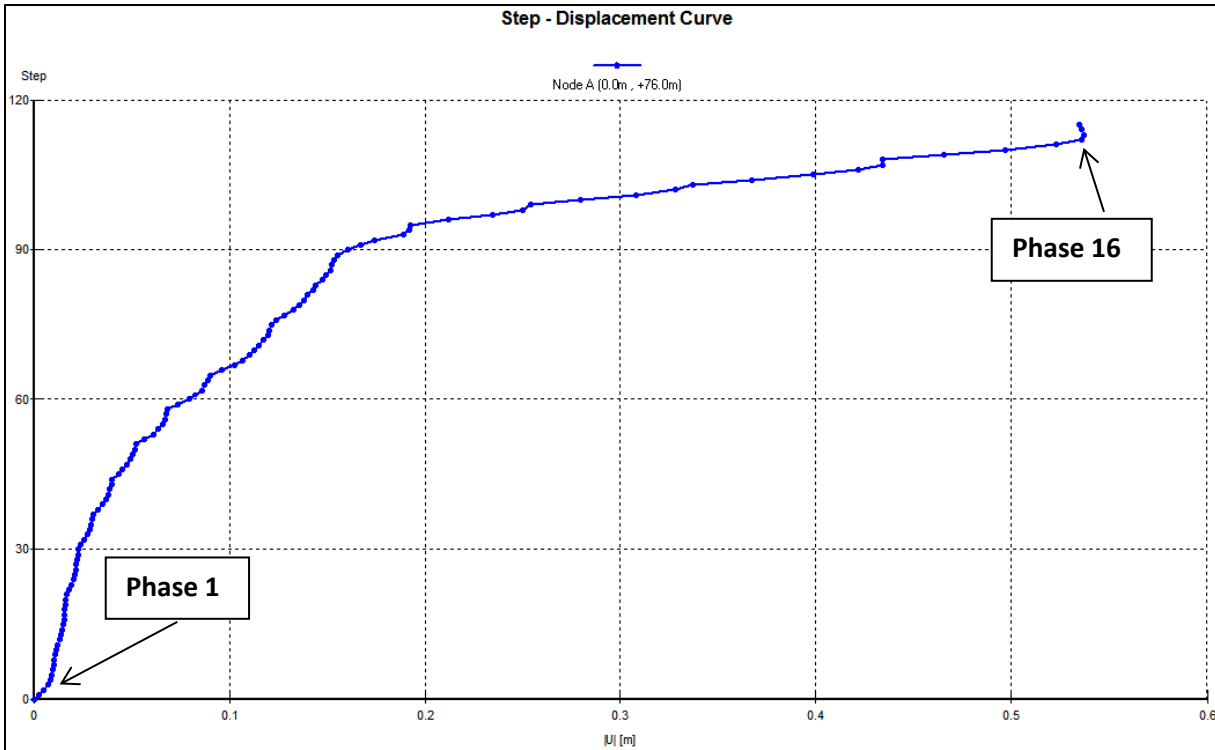
Εικόνα 59 : Plaxis 2D_ Analysis N°2 – Οι οριζόντιες μετακινήσεις και η προσαύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων κατά την τελευταία φάση [ροσομείωσης (Φάση 17)].



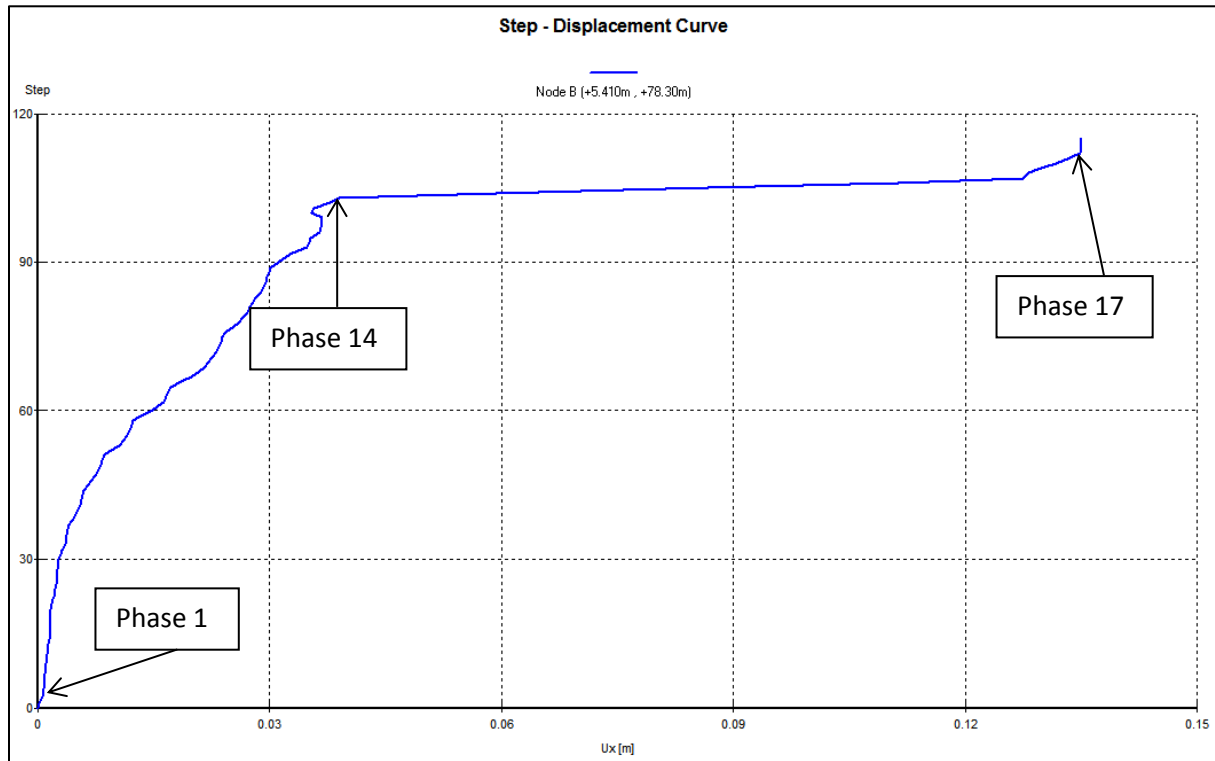
Εικόνα 60 : Plaxis 2D_ Analysis N^ο2 – Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).



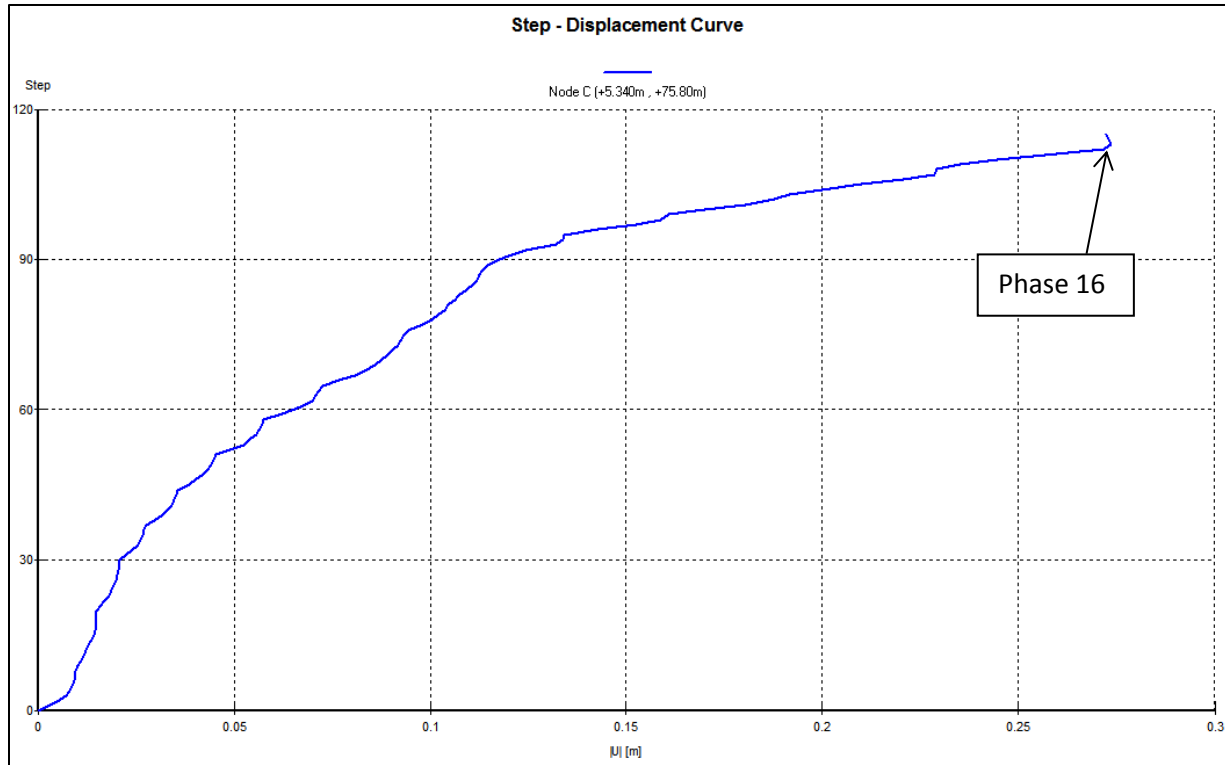
Εικόνα 61 : Plaxis 2D_ Analysis N°2 - Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



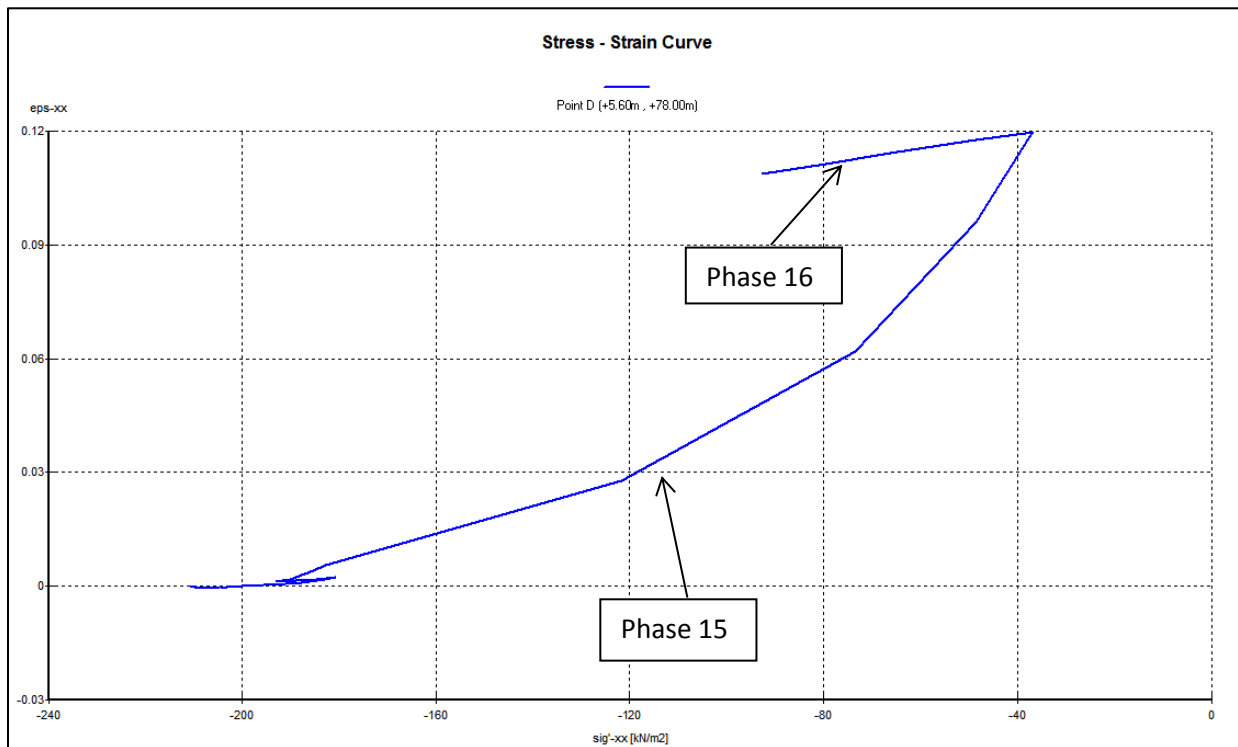
Εικόνα 62 : Plaxis 2D_ Analysis N°2 – Η καμπύλη κατακόρυφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 63 : Plaxis 2D_ Analysis N°2 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου B (+5.410m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 64 : Plaxis 2D_ Analysis N^ο2 – Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου C (+5.340m , +75.80m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 65 : Plaxis 2D_ Analysis N^ο2 – Η καμπύλη οριζοντίων τάσεων-τροπών του κόμβου D (+5.60m , +78.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.

5.2.1 Plaxis 2D_ Analysis N°2- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την 2^η Ανάλυση, και έχοντας υπόψη τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 57” σελ.61, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 42” σελ.44, συμπερένεται ότι δεν προκύπτει κάποια αξιοσημείωτη διαφορά στις μέγιστες μετακινήσεις με την αλλαγή των γεωτεχνικών παραμέτρων της διεπιφάνειας. Σημειώνεται ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις αφορούν την ανύψωση του πυθμένα, ο οποίος δεν επιρεάζεται άμεσα από τις διεπιφάνειες. Ο παραπάνω ισχυρισμός επιβεβαιώνεται και με τη σύγκριση των “Εικόνα 52” σελ.54 και “Εικόνα 62” σελ.66 σύμφωνα με τις οποίες η ανύψωση παραμένει σχεδόν η ίδια ($\approx 54\text{cm}$) και παράλληλα αποτελεί την δυσμενέστερη τιμή και των δύο αναλύσεων.
2. Από τις “Εικόνα 58” σελ.62 και “Εικόνα 59” σελ.63, και σε σύγκριση με τις “Εικόνα 44” σελ.46 και “Εικόνα 45” σελ.47, συμπερένεται ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις εμφανίζονται ελαφρώς προσαυξημένες κατά την 2^η Ανάλυση ($\approx 0.5\text{cm}$). Προφανώς λοιπόν η μεταβολή των “interface parameters” δεν επιρεάζει ουσιαστικά τις οριζόντιες μετακινήσεις.
3. Από την “Εικόνα 60” σελ.64, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 49” σελ.51, συμπερένεται ότι οι κατακόρυφες διεπιφάνειες εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά και “αστοχούν” με τον ίδιο τρόπο.
4. Από την “Εικόνα 61” σελ.65, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 50” σελ.52, παρατηρείται μια μικρή μείωση των “hoop forces” στην 2^η Ανάλυση. Πιθανώς η μικρή αυτή μείωση των “hoop forces” να οφείλεται στην αντίστοιχη μείωση των οριζοντίων ορθών (ακτινικών) ενεργών τάσεων ($\text{sig}'\text{-xx}$), όπως παρατηρείται στην “Εικόνα 65” σελ.67. Σημειώνεται ότι οι “hoop forces” ισούνται με $F_{\text{hoop}} = \sigma_{\theta} \cdot A$, όπου “ σ_{θ} ” η εφαπτομενική τάση επί της υποστήριξης και $A = 1.5\text{m} \cdot 0.3\text{m} = 0.45\text{m}^2$ το εμβαδόν διατομής του “segment”. Η τιμή της “ σ_{θ} ” εξαρτάται από την τιμή της $\text{sig}'\text{-xx}$ (ή σ_r) στην κατακόρυφη παρειά.
5. Στην “Εικόνα 65” σελ.67 παρατηρείται ότι το εδαφικό στοιχείο στο συγκεκριμένο σημείο παραμορφώνεται με την παραμόρφωσή να παίρνει την μέγιστη τιμή της μετά το τέλος της φάσης 15. Μετά την Φάση 15 η οριζόντια ορθή τροπή του στοιχείου μειώνεται λόγω τοποθέτησης τις υποστήριξης.

5.3 PLAXIS 2D_ANALYSIS N° 3

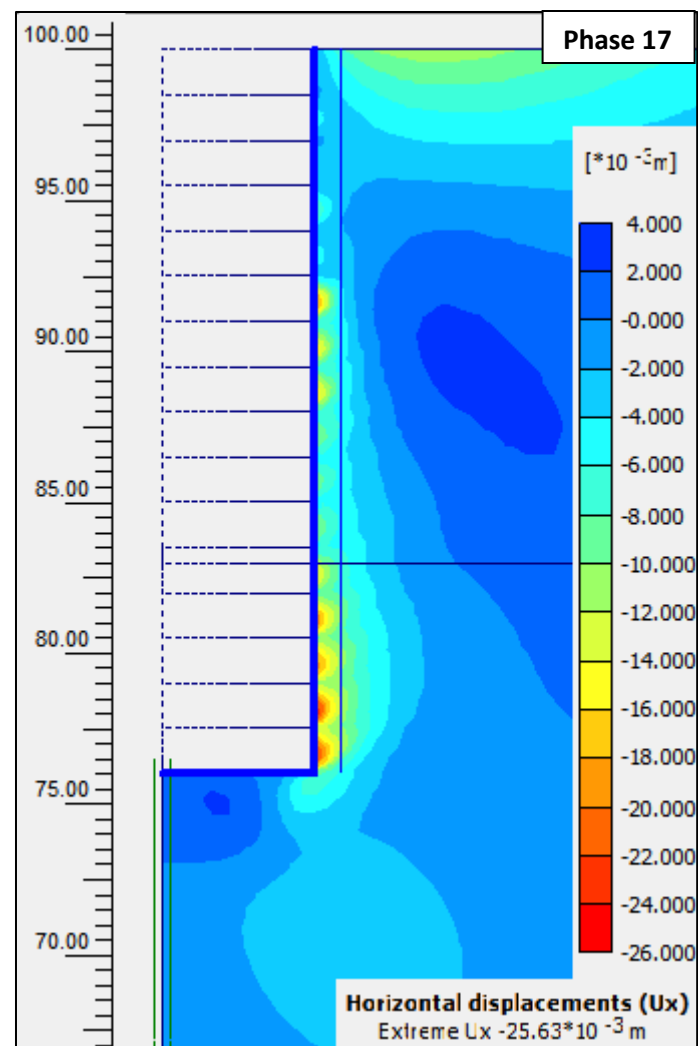
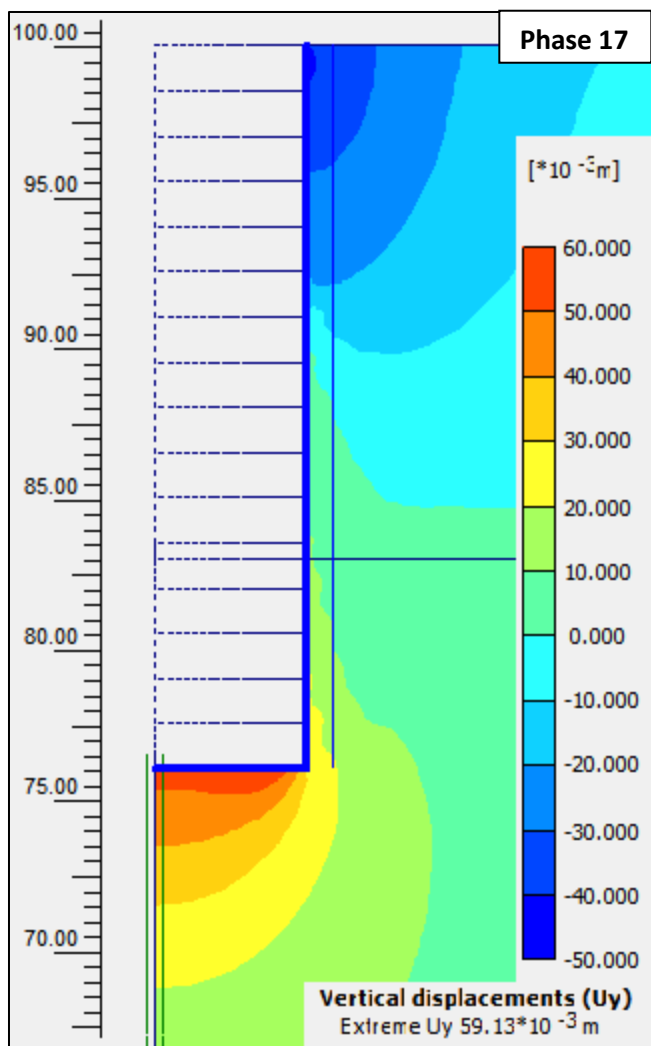
Πρόκειται για ανάλυση σύμφωνα με την οποία το κριτήριο συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων είναι το “Hardening Soil”, όπως περιγράφεται στην Ενότητα “3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ HARDENING SOIL” σελ.27. Λόγω των μικρών αποκλίσεων των αποτελεσμάτων με αλλαγή των γεωτεχνικών παραμέτρων τις διεπιφάνειας, οι υπόλοιπες αναλύσεις πραγματοποιούνται με την επιλογή “cluster material” interface. Οι Εικόνες που ακολουθούν αφορούν μόνο την φάση 17 (τελευταία φάση προσομοίωσης) καθώς αναμένονται πολύ μικρότερα προβλήματα σε σχέση με τις προηγούμενες δύο αναλύσεις και δεν είναι απαραίτητη η λεπτομερής σύγκριση των μεγεθών μεταξύ των Φάσεων 16 και 17.

Πίνακας 17 : Plaxis 2D_Analysis N°3 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.

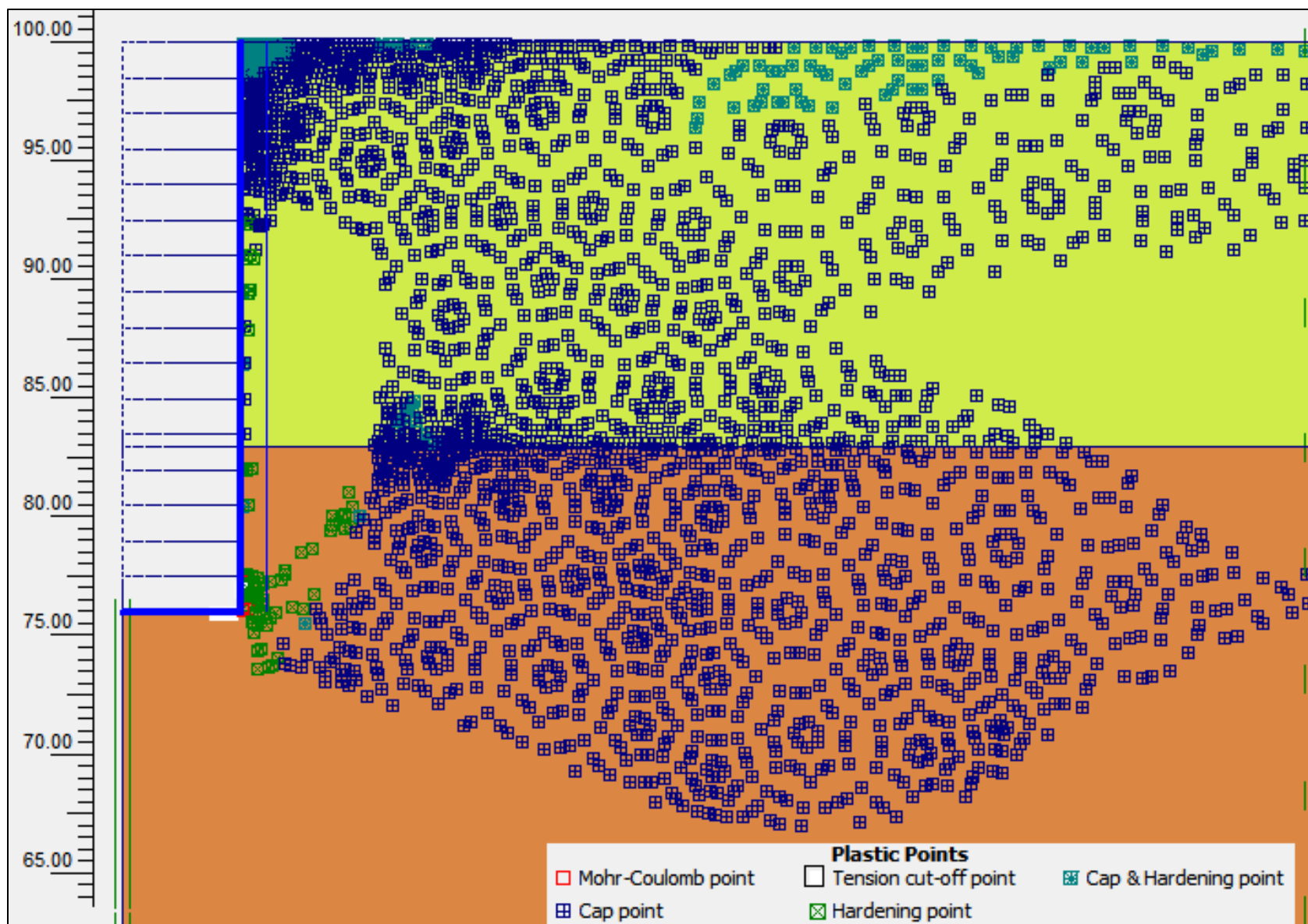
Analysis N°3- Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+5.340m , +75.80m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης.
Node C (+5.00m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.

Πίνακας 18 : Plaxis 2D_Analysis N°3 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

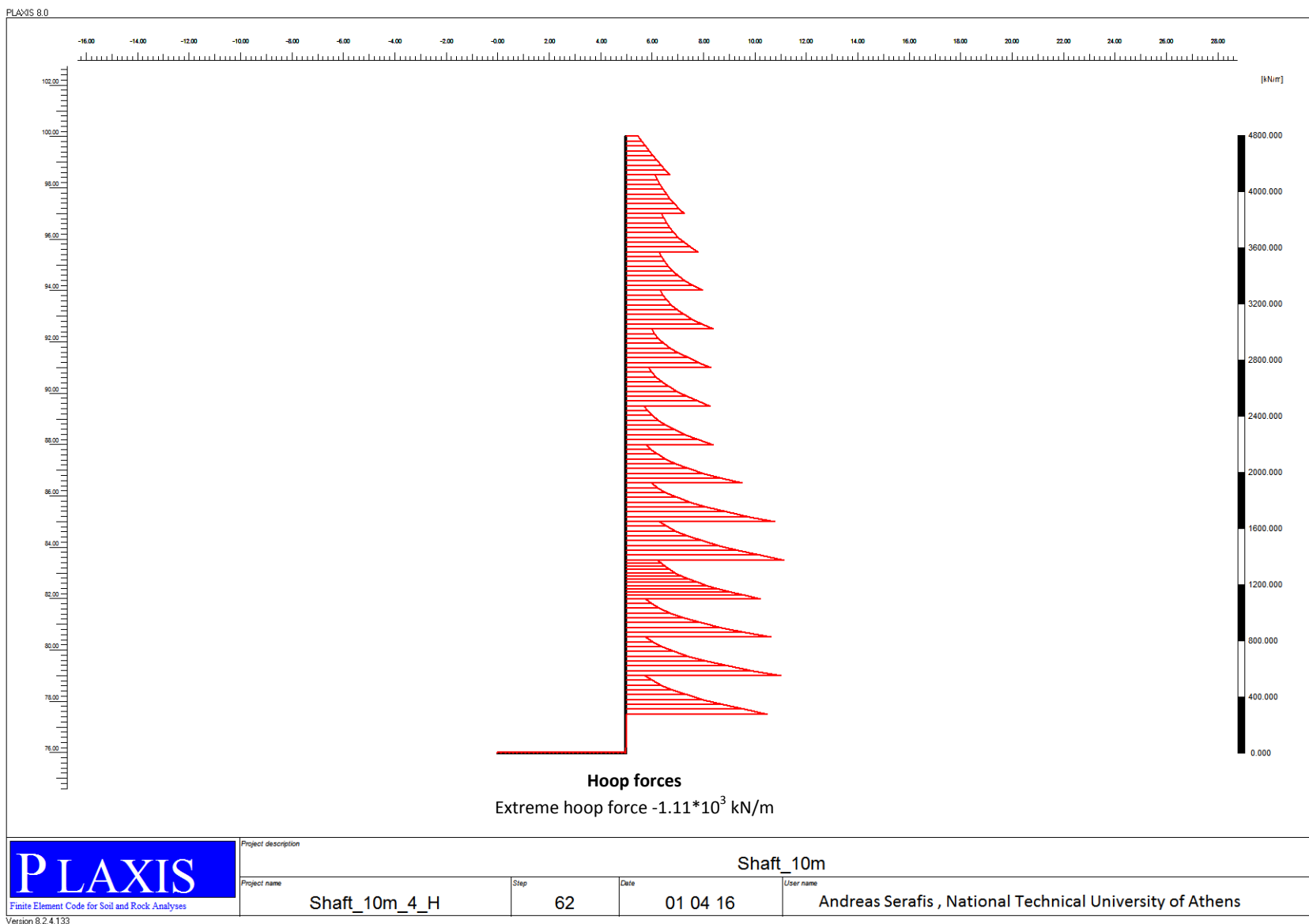
Analysis N°3 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point D (+5.420m , +75.60m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point E (0.00m , +75.80m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.
Stress point F (+5.100m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.



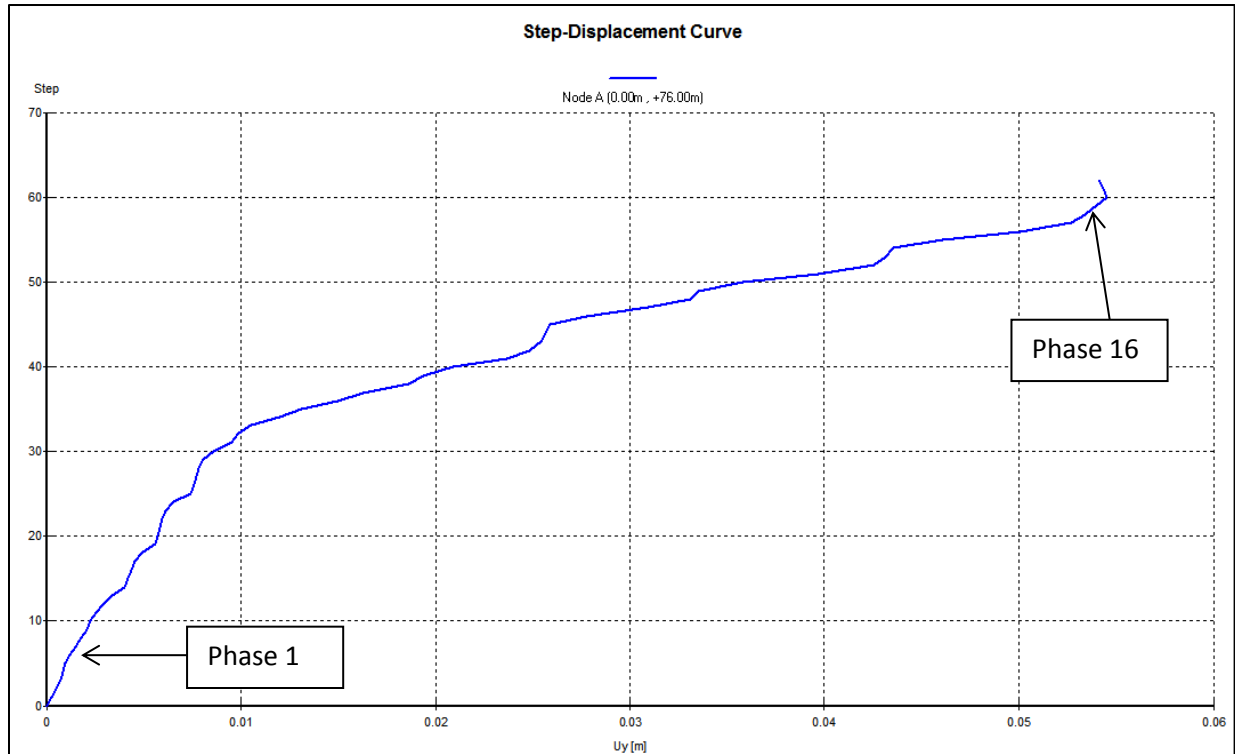
Εικόνα 66 : Plaxis 2D_ Analysis N°3 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



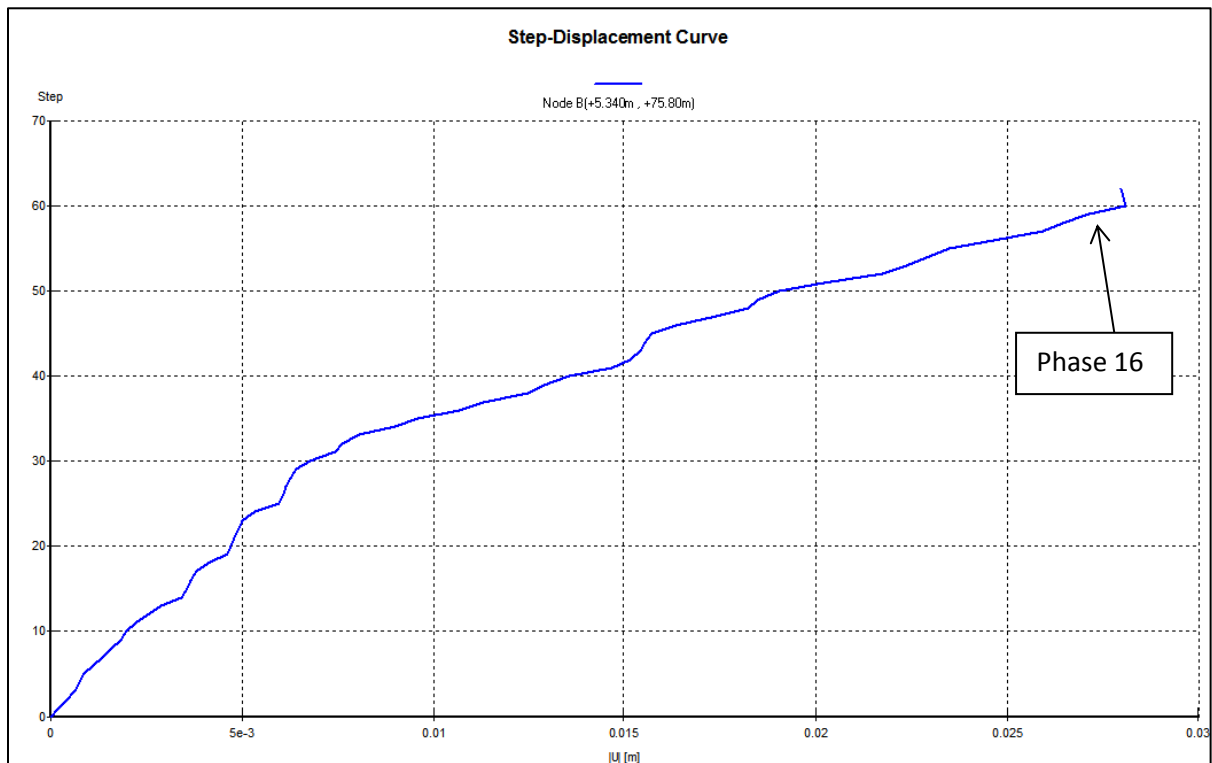
Εικόνα 67 : Plaxis 2D_ Analysis N°3 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



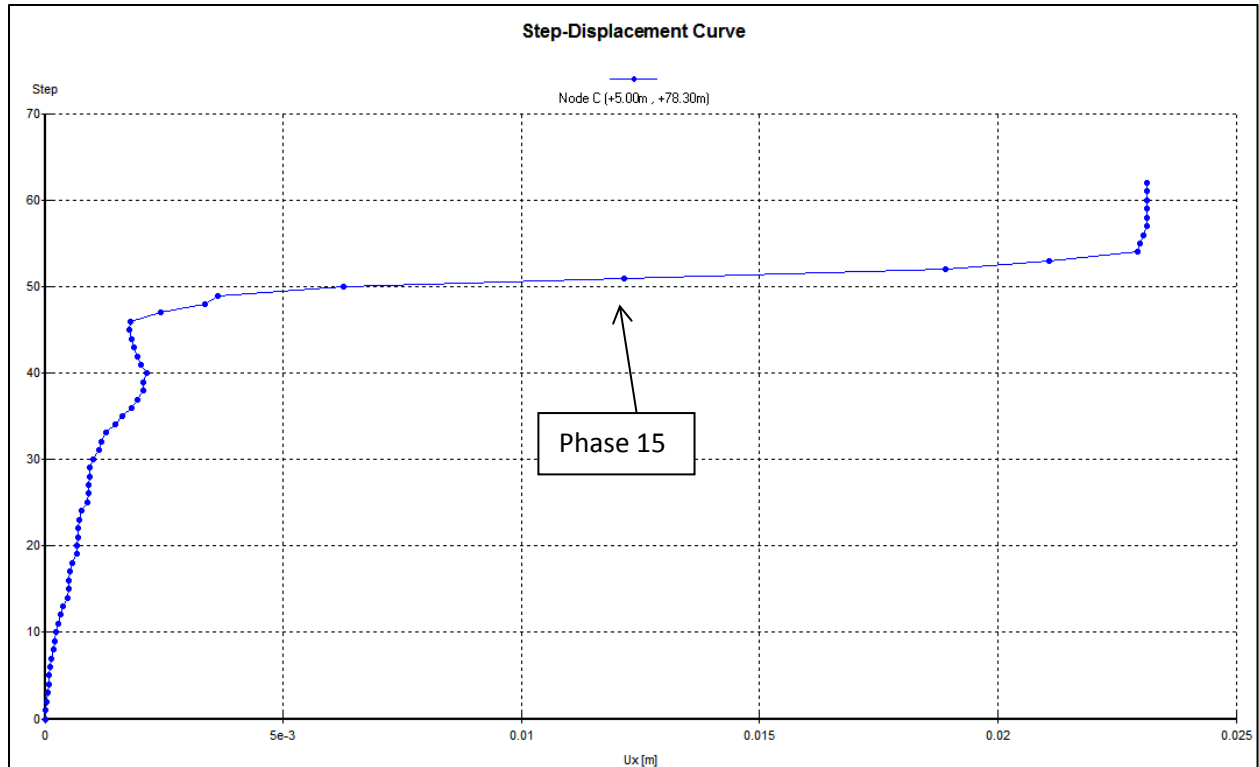
Εικόνα 68 : Plaxis 2D_Analysis N^o3- Διάγραμμα hoop forces του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



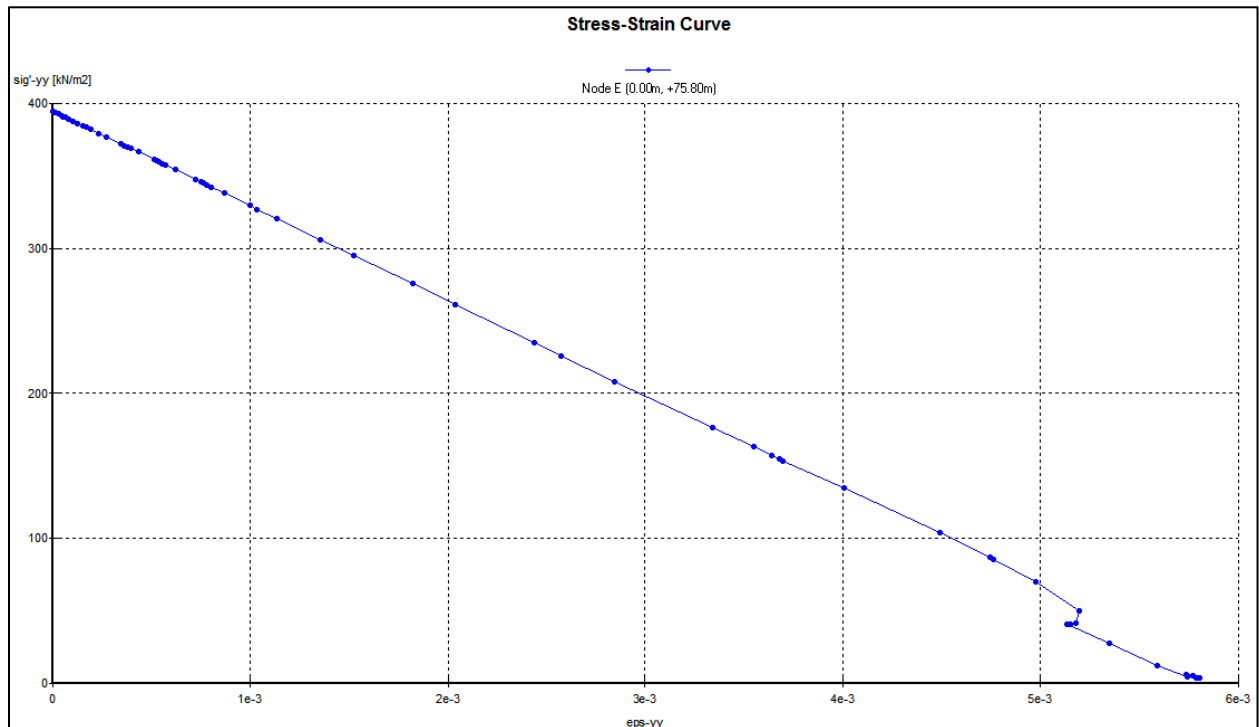
Εικόνα 69 : Plaxis 2D_ Analysis N^o3 – Η καμπύλη κατακορύφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



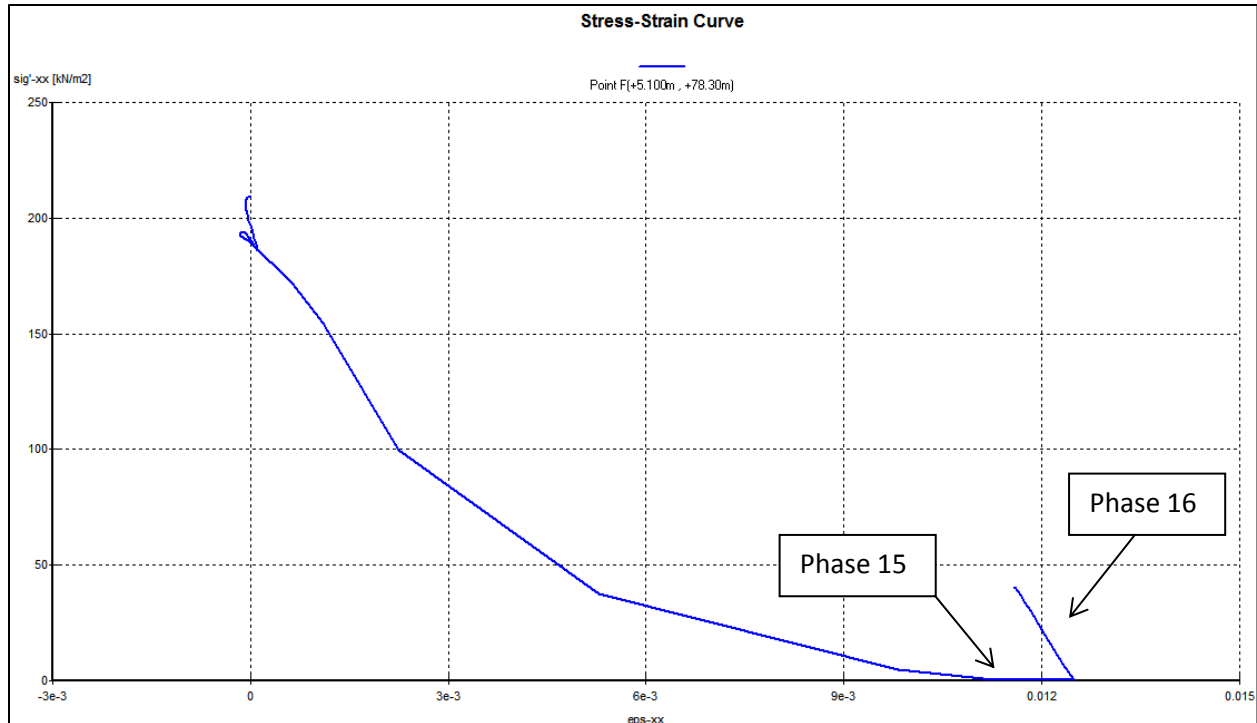
Εικόνα 70 : Plaxis 2D_ Analysis N^o3 – Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου B(+5.340m , +75.80m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 71 : Plaxis 2D_ Analysis N^o3 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+5.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 72 : Plaxis 2D_ Analysis N^o3 - Οι ορθές τροπές στον κατακόρυφο άξονα για το Stress point E (0.00m, +75.80m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).



Εικόνα 73 : Plaxis 2D_ Analysis N°3 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων – τροπών στον οριζόντιο άξονα του Stress point F (+5.100m , +78.30m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

5.3.1 Plaxis 2D_ Analysis N°3– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την 3^η Ανάλυση, και έχοντας υπόψη τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 66” σελ.70 προκύπτει ότι η ανύψωση του πυθμένα είναι πολύ μικρότερη (≈ 6 cm) σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις. Οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι πολύ μικρότερες (≈ 2.5 cm). Προφανώς αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται στο κριτήριο “Hardening Soil” σύμφωνα με το οποίο η αποφόρτιση καθορίζεται από το Μέτρο Ελαστικότητας $E_{ur}^{ref} \approx 4 * E_{50}^{ref}$. Η παραπάνω τιμή της ανύψωσης είναι ευδιάκριτη και στην “Εικόνα 69” σελ.73 στην οποία παρατηρείται η προοδευτική μετακίνηση του πυθμένα μέχρι την τελική του τιμή κατά την φάση 16, όπως ακριβώς συμβαίνει και στις προηγούμενες δύο αναλύσεις.
2. Από την “Εικόνα 68” σελ.72 παρατηρείται ότι οι μέγιστες επαπτομενικές δυνάμεις (“hoop forces”) είναι της τάξης του 1MN/m, μικρότερες δηλαδή σε σχέση με τις προηγούμενες δύο αναλύσεις.
3. Στην “Εικόνα 71” σελ.74 είναι προφανής η αύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων κατά την φάση 15 (αφαίρεση του εδαφικού όγκου στο αντίστοιχο βάθος), όπως αναμενόταν, και στη συνέχεια ο περιορισμός αυτών λόγω τοποθέτησης τις υποστήριξης.
4. Σε συνέχεια της προηγούμενης παρατήρησης, παρατίθεται η “Εικόνα 73” σελ.75 η οποία αναφέρεται σε “stress point” πλησίον του Node C. Παρατηρείται λοιπόν ότι η αφαίρεση εδαφικού όγκου προκαλεί μια προοδευτική αύξηση των οριζοντίων ορθών τροπών (**eps-xx**) με ταυτόχρονη μείωση των ορθών ενεργών οριζοντίων τάσεων (**sig'-xx**). Οι τάσεις μηδενίζονται

κατά την φάση 15 (απομάκρυνση εδαφικού όγκου στο υπόψη βάθος) όπως αναμενόταν. Τέλος, κατά την φάση 16, η τοποθέτηση του “segmental ring” στο υπόψη βάθος προκαλεί μια οριζόντια πίεση στο “stress point” της τάξης των 40kPa.

5. Στην “Εικόνα 72” σελ.74 παρατηρείται η σταδιακή αποφόρτιση του πυθμένα σύμφωνα με την οποία, κατά την τελική φάση εκσκαφής και υποστήριξης, οι ορθές ενεργές τάσεις (**sig'-yy**) σχεδόν μηδενίζονται και συνοδεύονται από ταυτόχρονη **μικρή αύξηση** των ορθών τροπών.

5.4 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N° 4

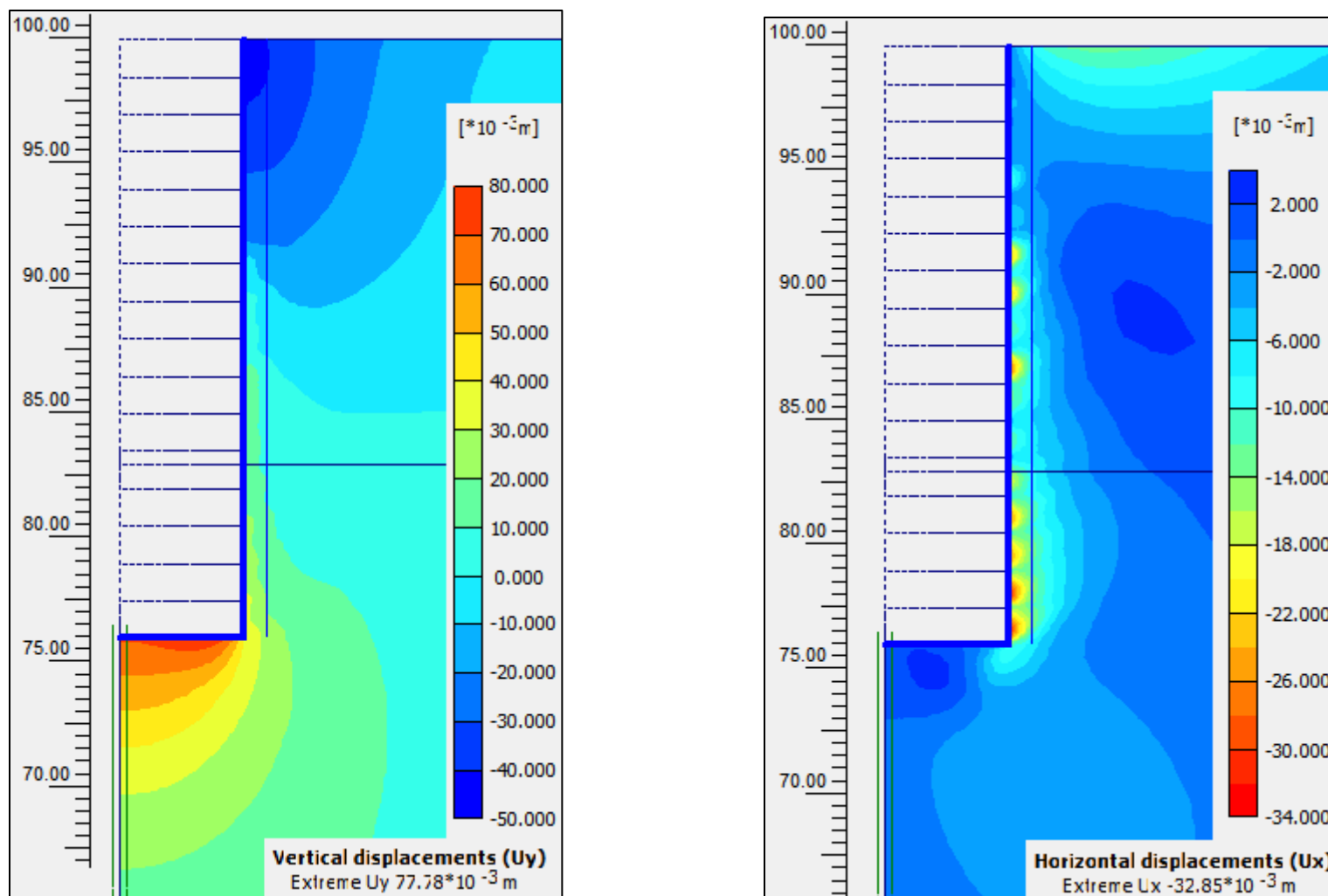
Η συγκεκριμένη ανάλυση πραγματοποιείται με σκοπό την εξακρίβωση τις επιρροής του E_{ur}^{ref} στα τελικά αποτελέσματα. Παρόλο που στην Analysis N°3 επιλέγεται $E_{ur}^{ref} \approx 4 * E_{50}^{ref}$, η συνηθέστερη επιλογή στις προσομοιώσεις με κριτήριο αστοχίας το “Hardening Soil Model” είναι $E_{ur}^{ref} \approx 3 * E_{50}^{ref}$. Στη συνέχεια ακολουθούν τα κυριότερα διαγράμματα, με την ίδια επιλογή κόμβων και “stress points”, καθώς και η παράθεση συγκριτικών συμπερασμάτων.

Πίνακας 19 : Plaxis 2D_ Analysis N°4 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.

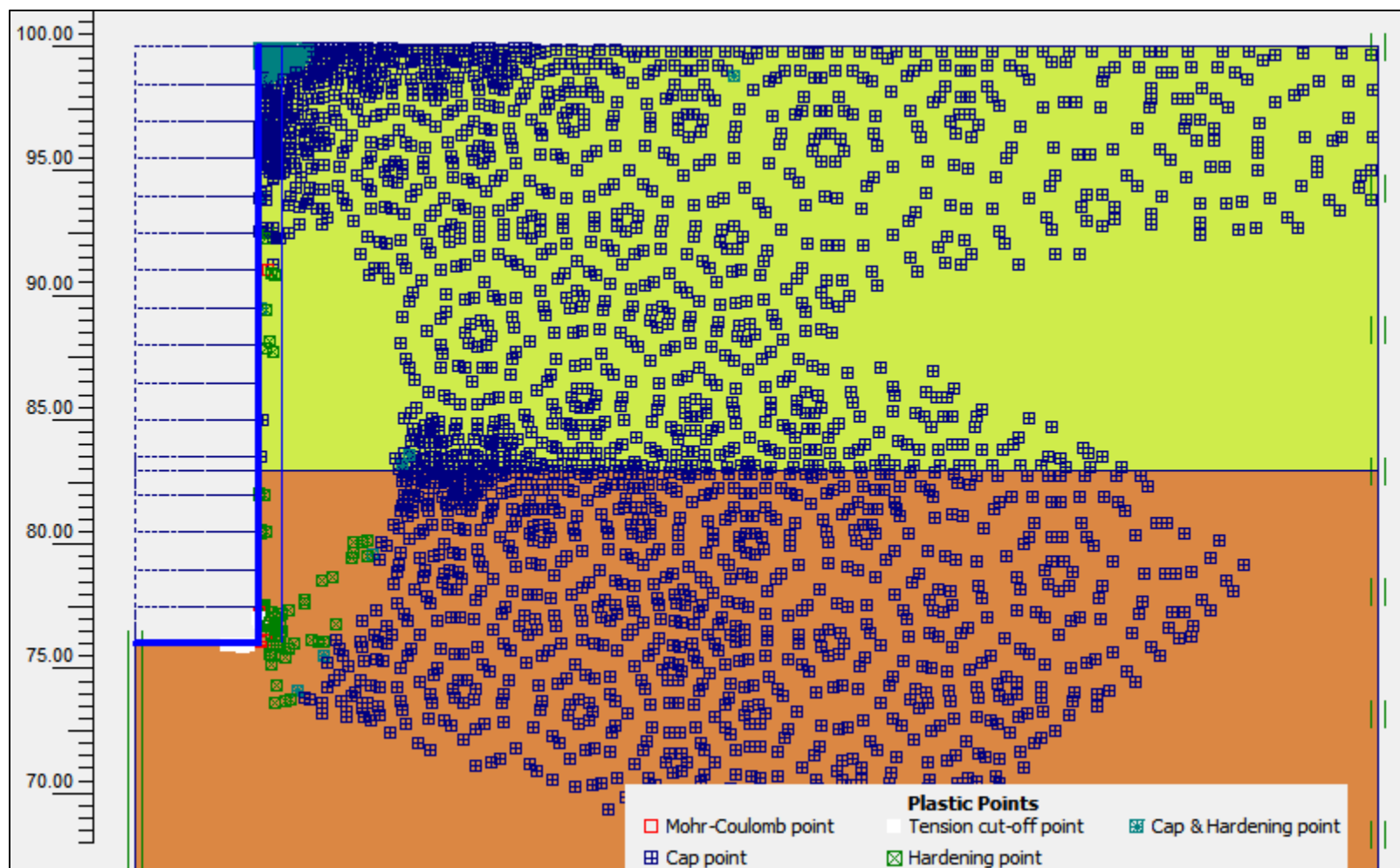
Analysis N°4- Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+5.340m , +75.80m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης.
Node C (+5.00m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.

Πίνακας 20 : Plaxis 2D_ Analysis N°4 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

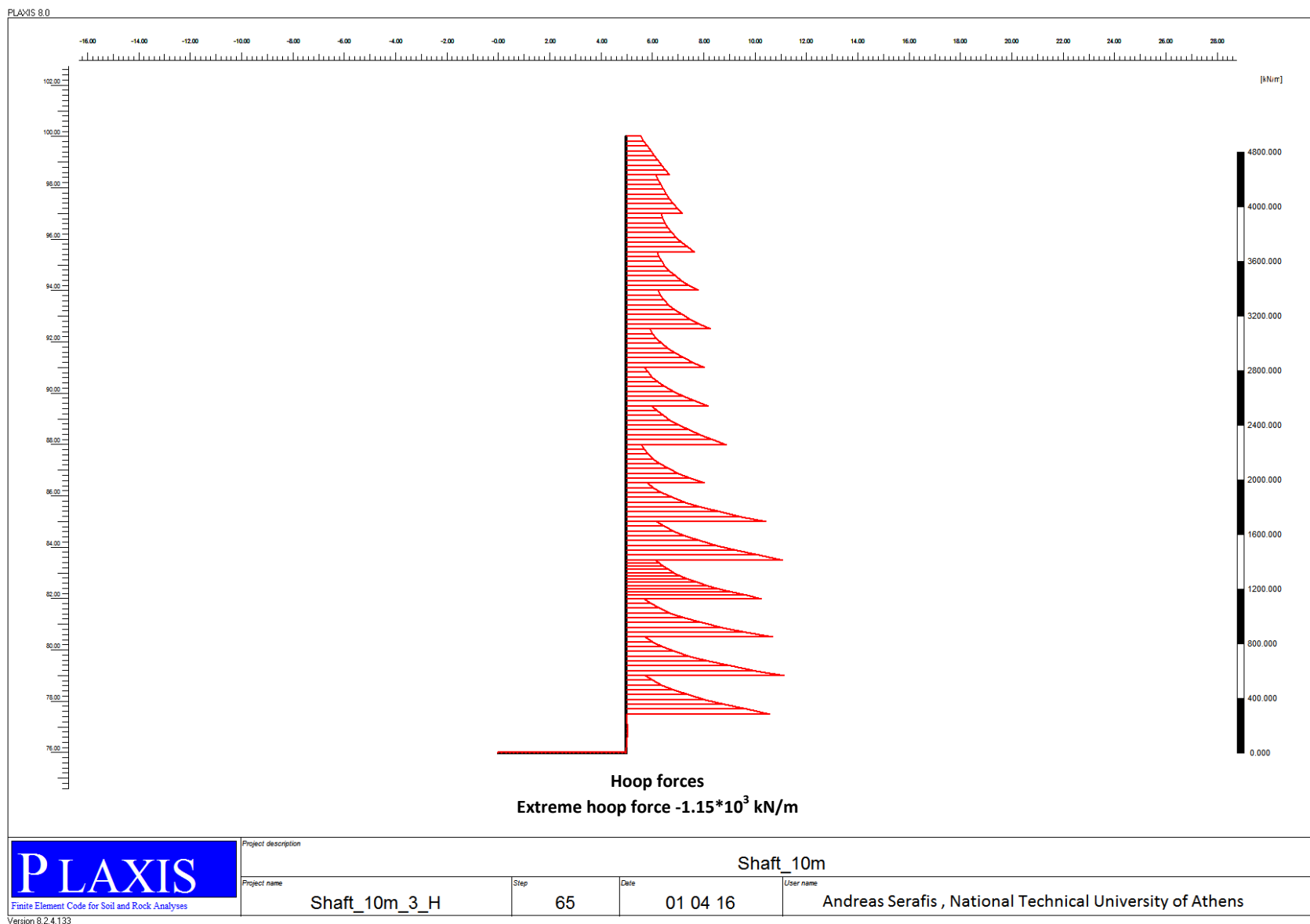
Analysis N°4 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point D (+5.420m , +75.60m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point E (0.00m , +75.80m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.
Stress point F (+5.100m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.



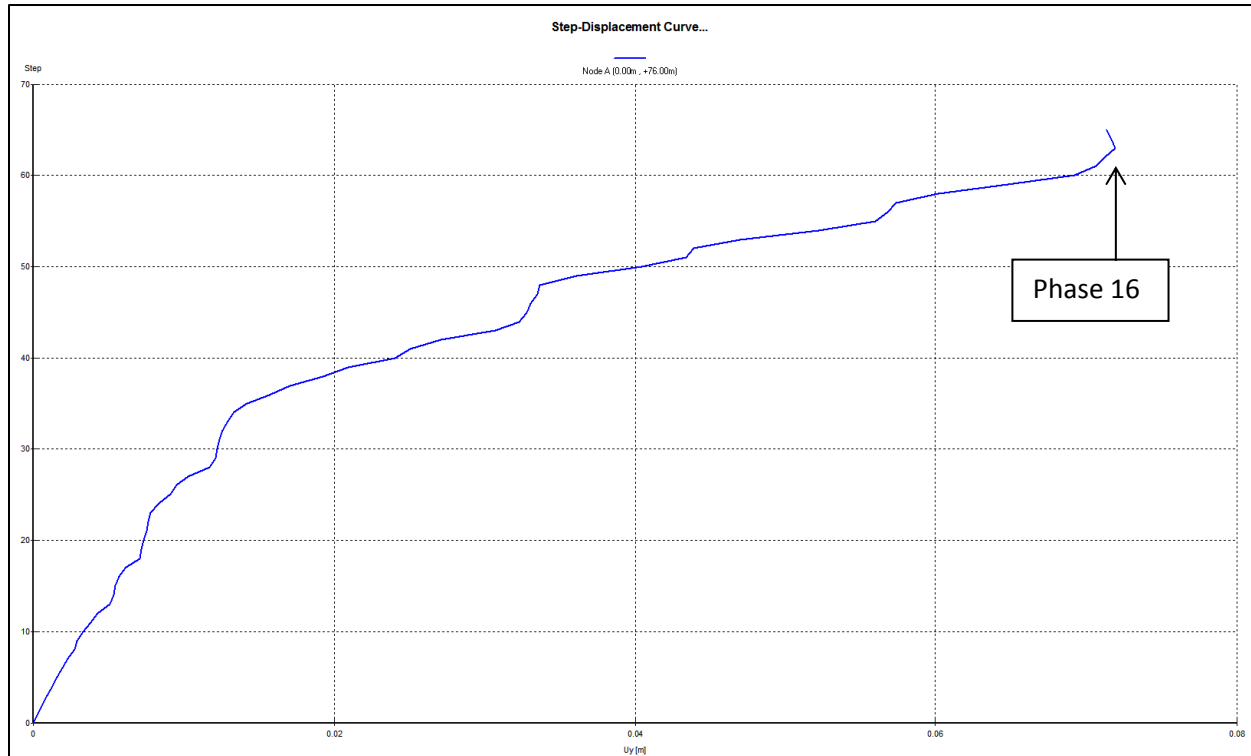
Εικόνα 74 : Plaxis 2D_ Analysis N^o4 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



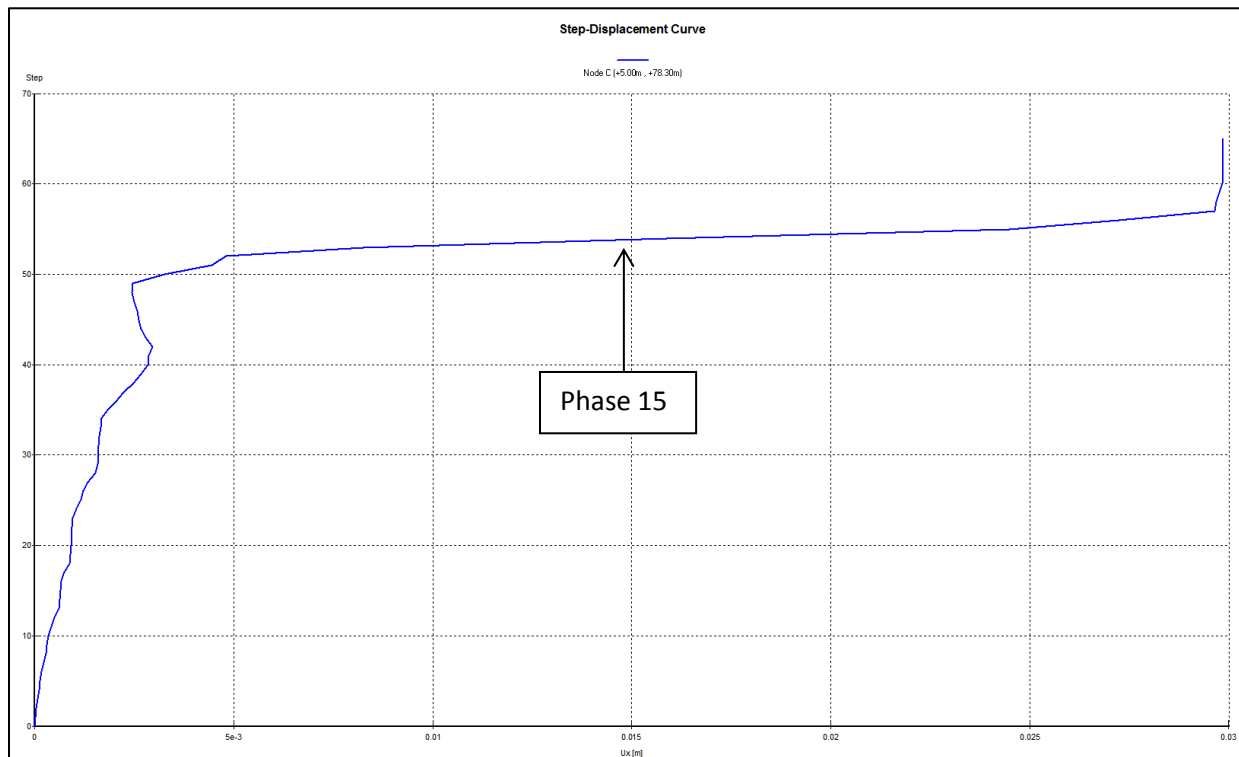
Εικόνα 75 : Plaxis 2D_Analysis N°4 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



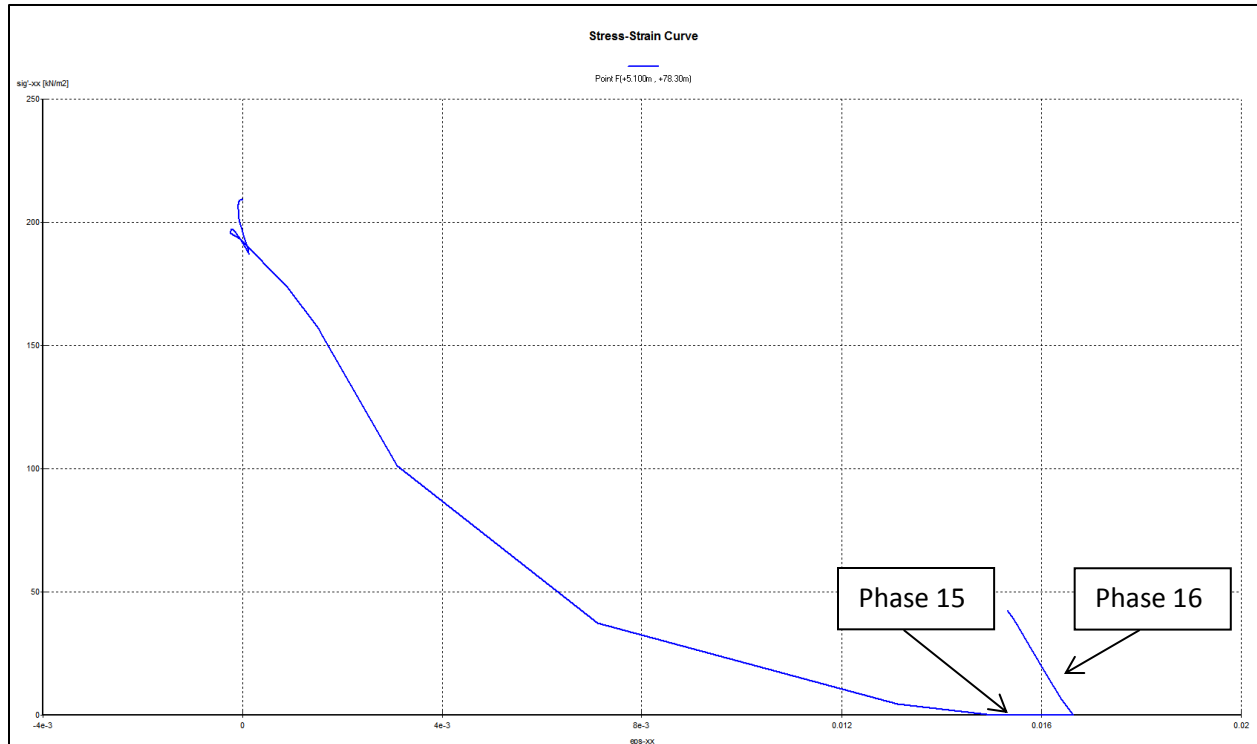
Εικόνα 76 : Plaxis 2D_ Analysis N^o4- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 77 : Plaxis 2D_ Analysis N^o4 – Η καμπύλη κατακόρυφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 78 : Plaxis 2D_ Analysis N^o4 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+5.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 79 : Plaxis 2D_ Analysis N°4 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων–τροπών (στον οριζόντιο άξονα) του Stress point F (+5.100m , +78.30m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

5.4.1 Plaxis 2D_ Analysis N°4– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την 4^η Ανάλυση, και έχοντας υπόψη τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 74” σελ.77 συμπερένεται ότι η ανύψωση πυθμένα καθώς και οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με την Ανάλυση 3. Οι αυξημένες αυτές τιμές αποδεικνύουν το προφανές, δηλαδή την άμεση επιρροή του Μέτρου Αποφόρτισης-Επαναφόρτισης E_{ur}^{ref} στις τελικές τιμές των μετακινήσεων.
2. Στην “Εικόνα 76” σελ.79 παρατηρείται η ελαφρά αύξηση των “hoop forces” σε σχέση με την “Εικόνα 68” σελ.72 της Ανάλυσης 3.
3. Από την “Εικόνα 77” σελ.80, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 69” σελ.73 της Ανάλυσης 3, παρατηρείται ότι η πρόοδος των μετακινήσεων με την πάροδο των φάσεων προσομοίωσης είναι η ίδια αλλά κατά την Ανάλυση 4 οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες.
4. Από την “Εικόνα 78” σελ.80 και σε σύγκριση με την “Εικόνα 71” σελ.74 της Ανάλυσης 3 παρατηρείται ότι η πρόοδος των οριζοντίων μετακινήσεων με την πάροδο των φάσεων προσομοίωσης είναι η ίδια αλλά και πάλι κατά την Ανάλυση 4 οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες.
5. Από την “Εικόνα 79” σελ.81, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 73” σελ.75 της Ανάλυσης 3 παρατηρείται ότι η πρόοδος των οριζοντίων παραμορφώσεων (ϵ_{ps-xx}), με την πάροδο των φάσεων προσομοίωσης, είναι η ίδια (παρόμοια μορφή διαγράμματος) αλλά κατά την Ανάλυση 4 οι τελικές οριζόντιες παραμορφώσεις, πριν την τοποθέτηση τις υποστήριξης, είναι μεγαλύτερες.

5.5 PLAXIS 2D_ANALYSIS N° 5

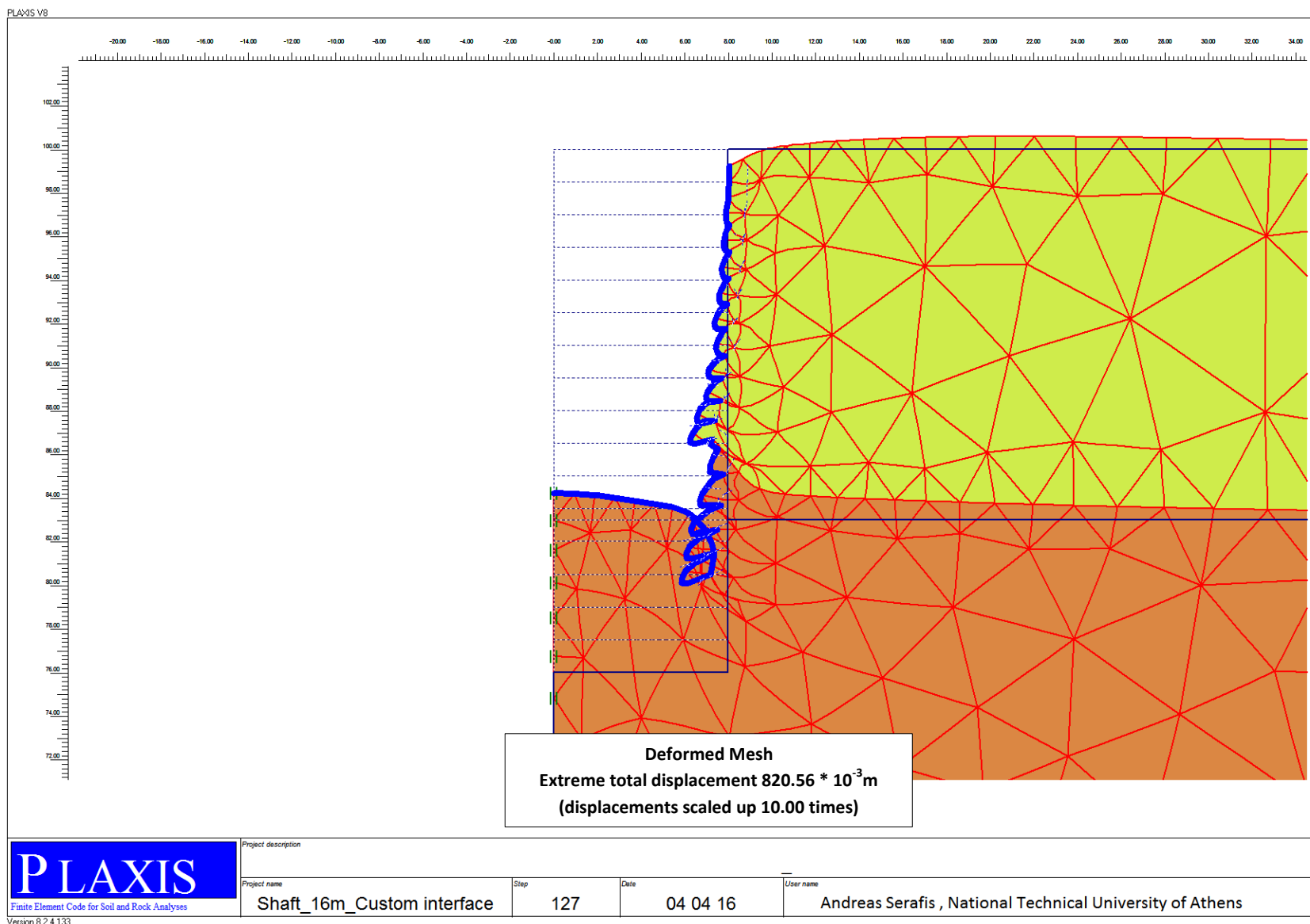
Η Ανάλυση πραγματοποιείται με σκοπό τον έλεγχο τις επιρροής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του φρέατος στις εδαφικές μετακινήσεις και στα εντατικά μεγέθη της υποστήριξης. Σκοπός της Ανάλυσης 5 είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα της Ανάλυσης 1, διότι τα δύο αυτά προσομοιώματα διαφέρουν μόνο στη διάμετρο. Σημειώνεται ότι τα χαρακτηριστικά των “segments”, δηλαδή δυσκαμψία (E^*I) και δυστένεια (E^*A), παραμένουν ίδια με εκείνα των προηγούμενων αναλύσεων. Τέλος παρατίθεται ο έλεγχος επάρκειας των “segments” έναντι των εφαπτομενικών δυνάμεων - “hoop forces”.

Πίνακας 21 : Plaxis 2D_Analysis N°5 – Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “Load-Displacement Curves”.

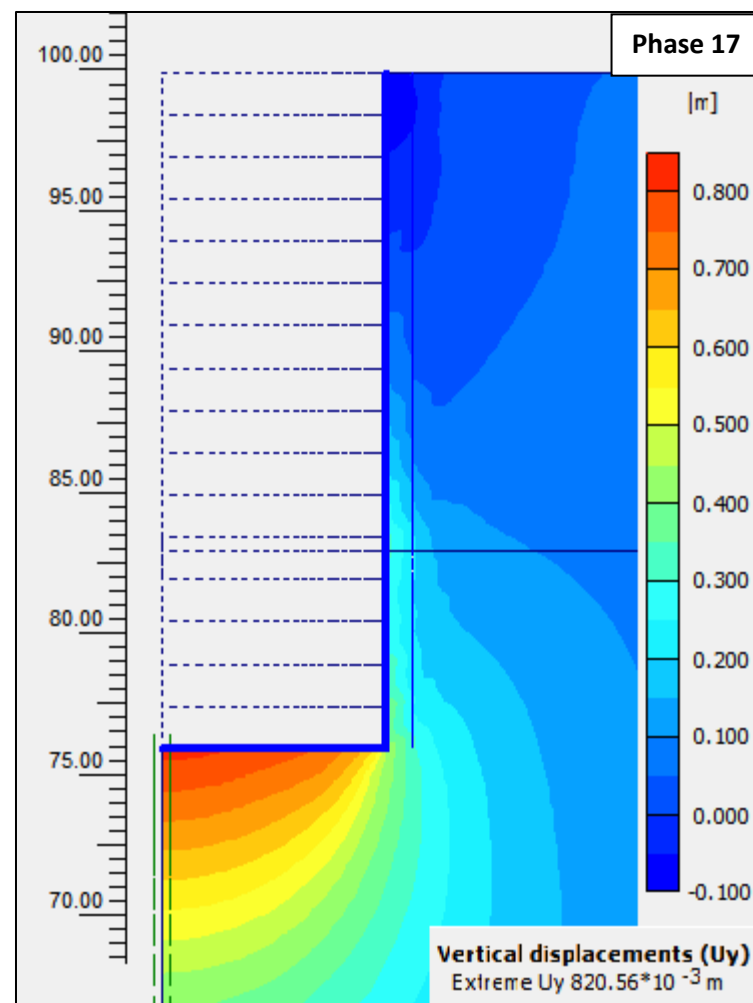
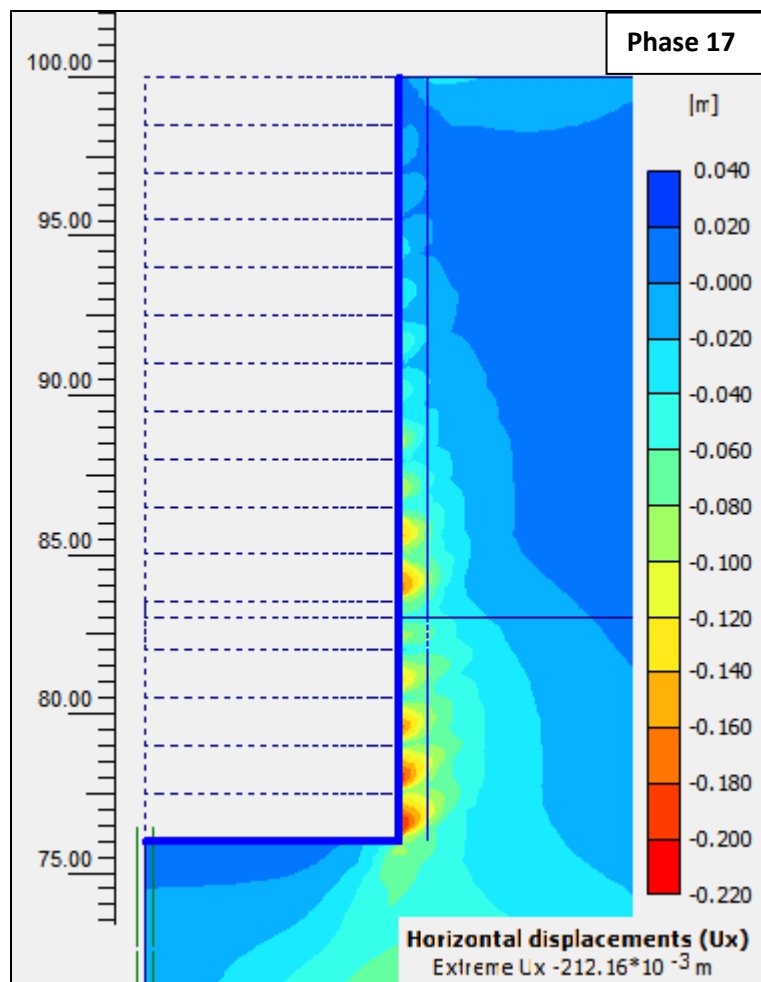
Analysis N°5- Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+8.170m , +75.60m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης.
Node C (+8.00m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.

Πίνακας 22 : Plaxis 2D_Analysis N°5 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

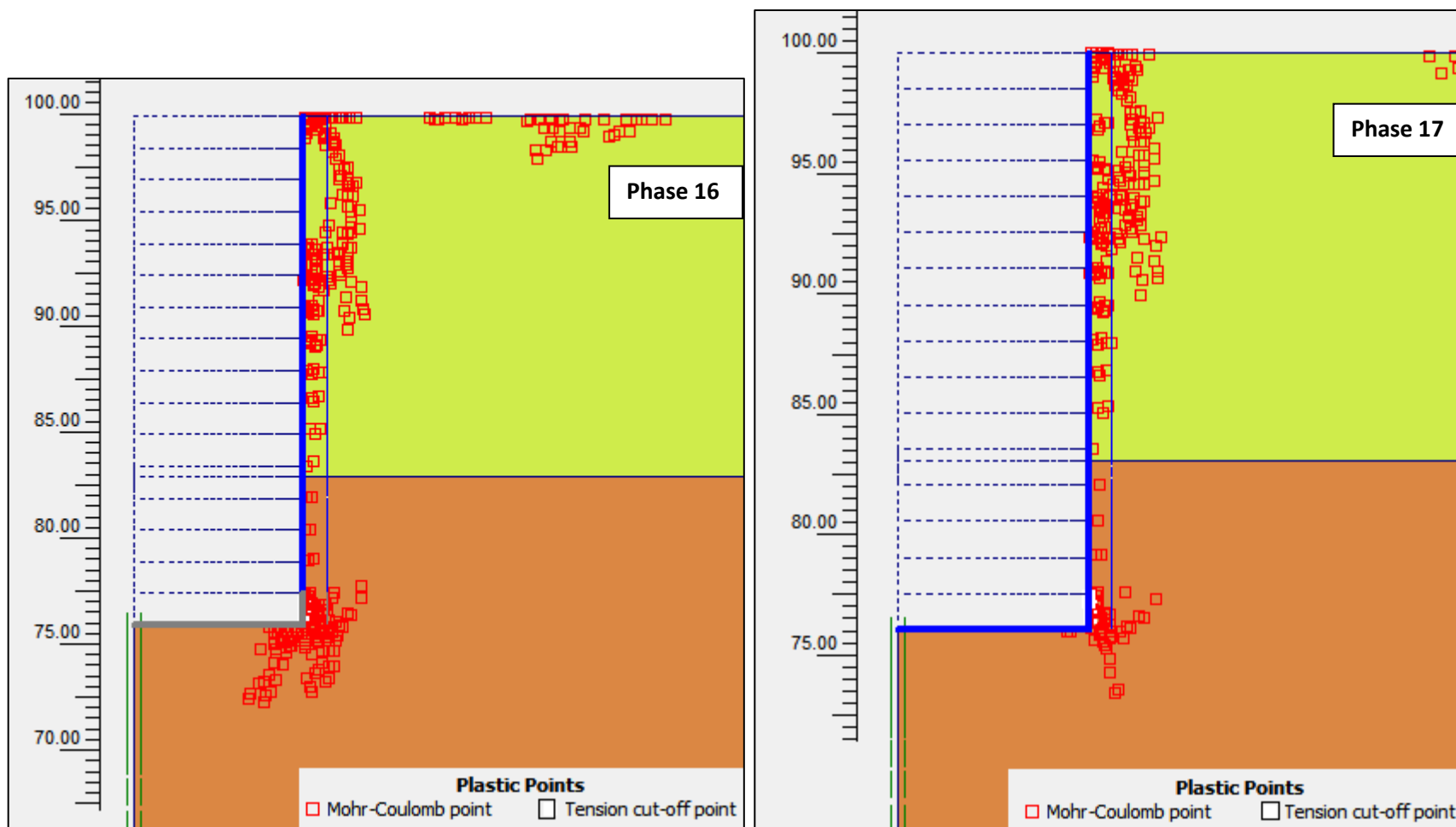
Analysis N°5 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point D (+8.170m , +75.60m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point E (0.00m, +75.70m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.
Stress point F (+8.090m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.



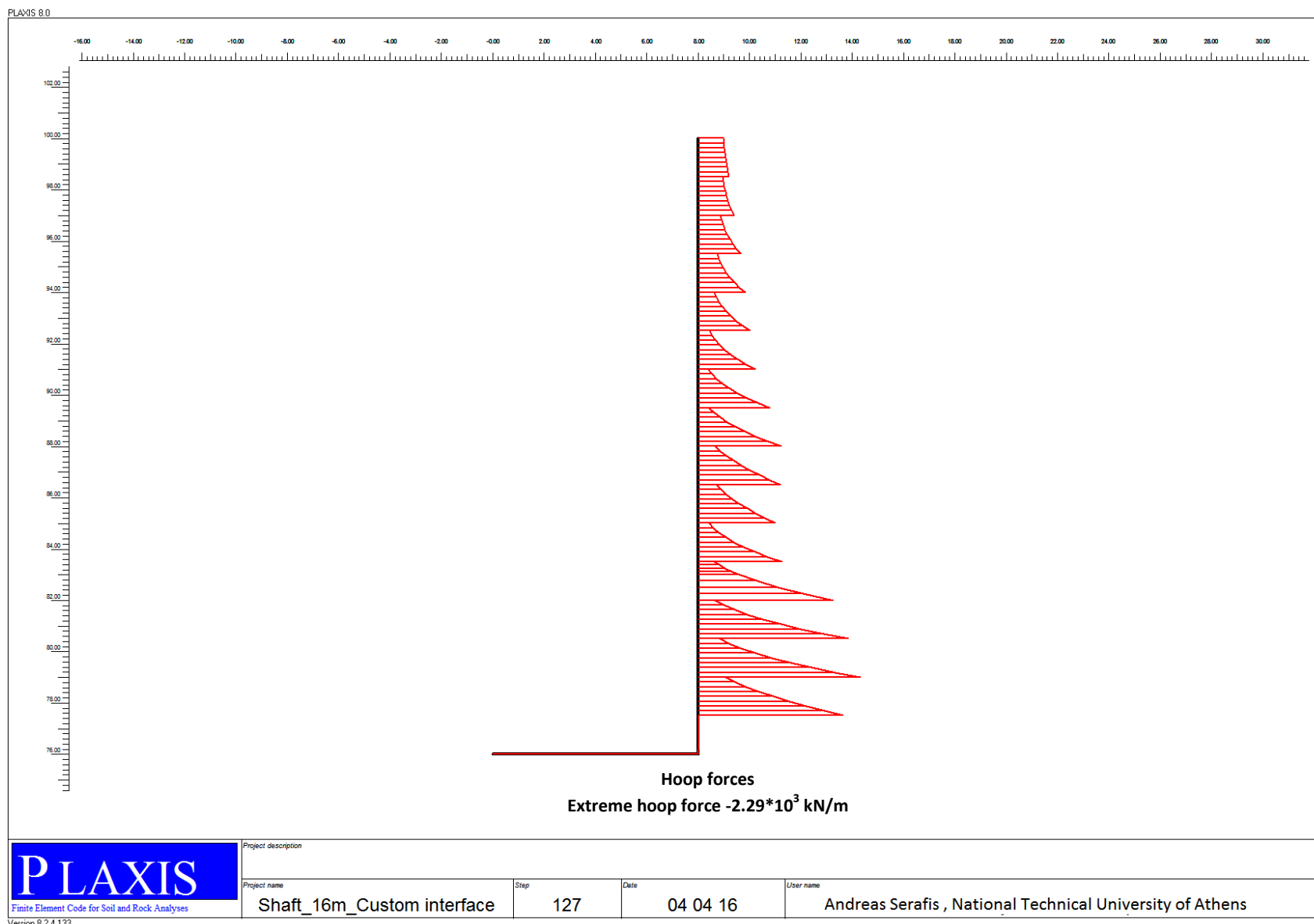
Εικόνα 80 : Plaxis 2D_ Analysis N^o5 – Απεικόνιση του “deformed mesh” κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 81 : Plaxis 2D_ Analysis N°5 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 82 : Plaxis 2D_ Analysis N°5 – Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).



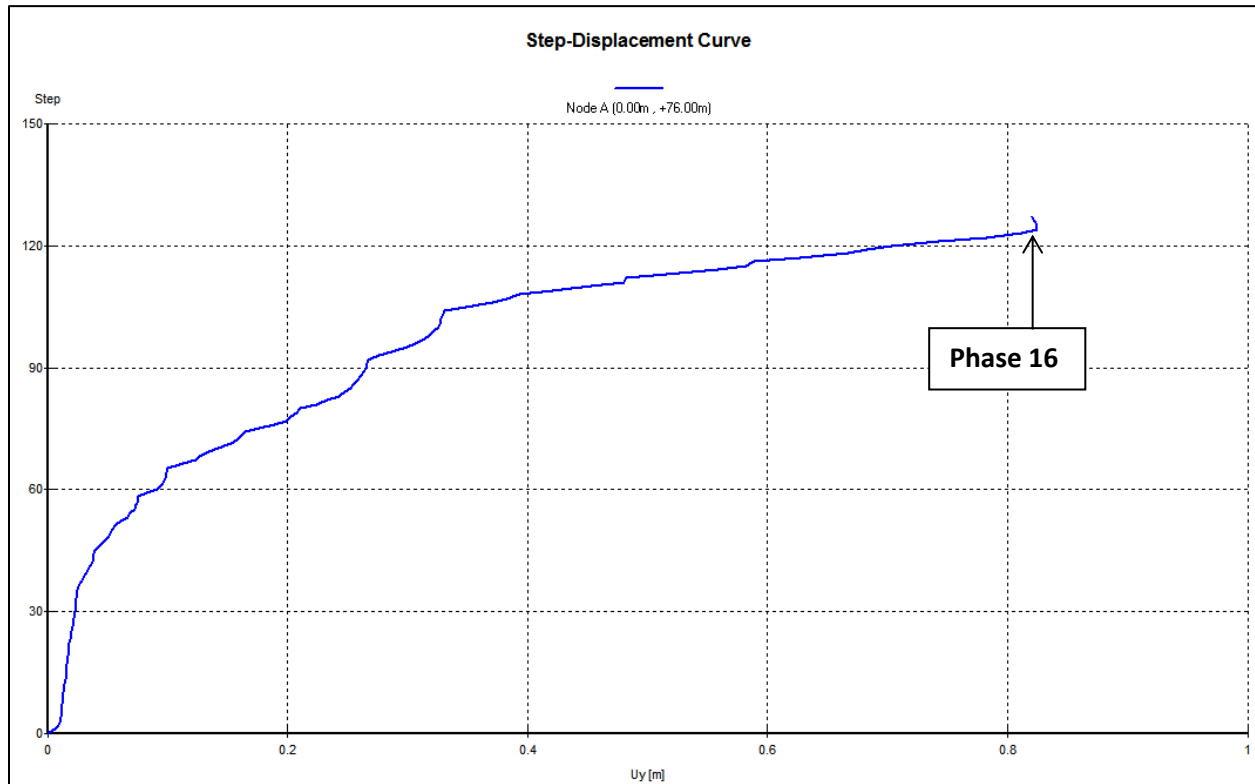
Εικόνα 83 : Plaxis 2D_ Analysis N°5- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

Έλεγχος επάρκειας διατομής έναντι των “hoop forces”.

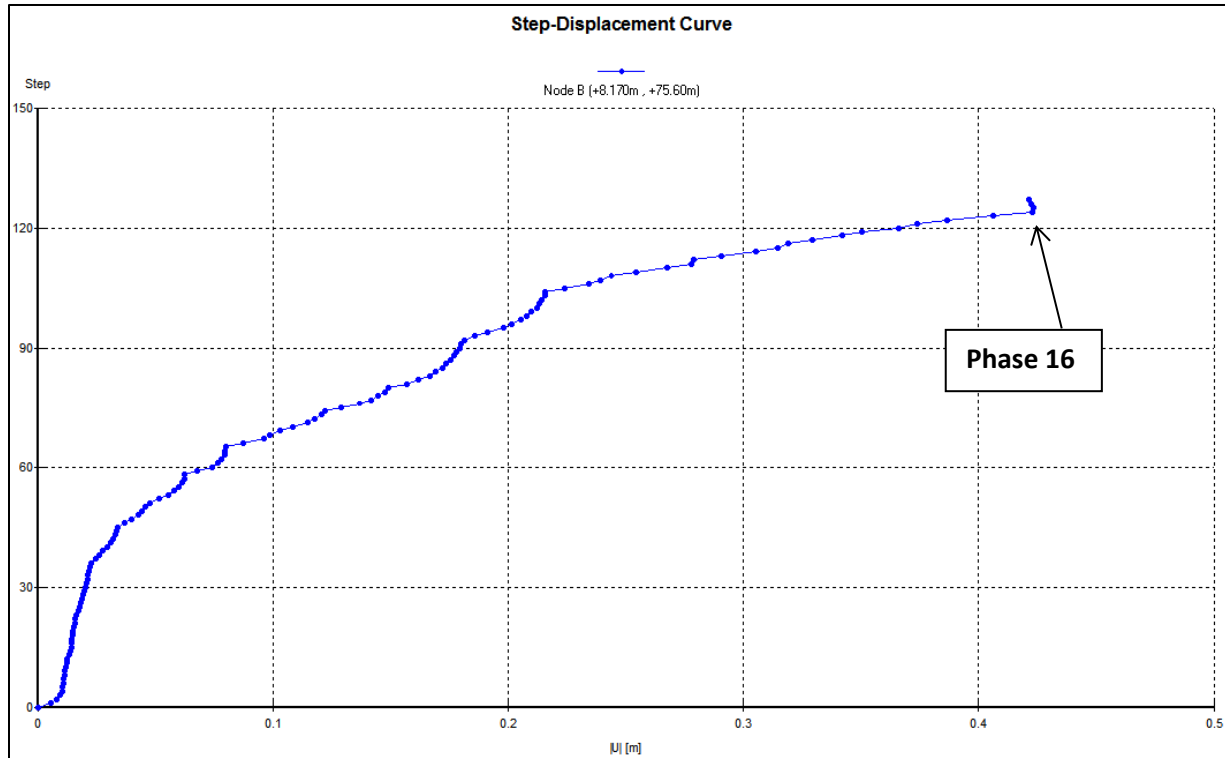
Αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη: $\sigma_c^{\text{αντοχή}} = 6000 \text{ kPa}$ και $A_{\text{segment}} = 1.5\text{m} * 0.3\text{m} = 0.45 \text{ m}^2$

Αρα $F_{\text{resist}} = \sigma_c^{\text{αντοχή}} * A_{\text{segment}} = 2700 \text{ kN} > F_{\text{hoop}}^{\text{max}} = 2.29 \text{ MN}$

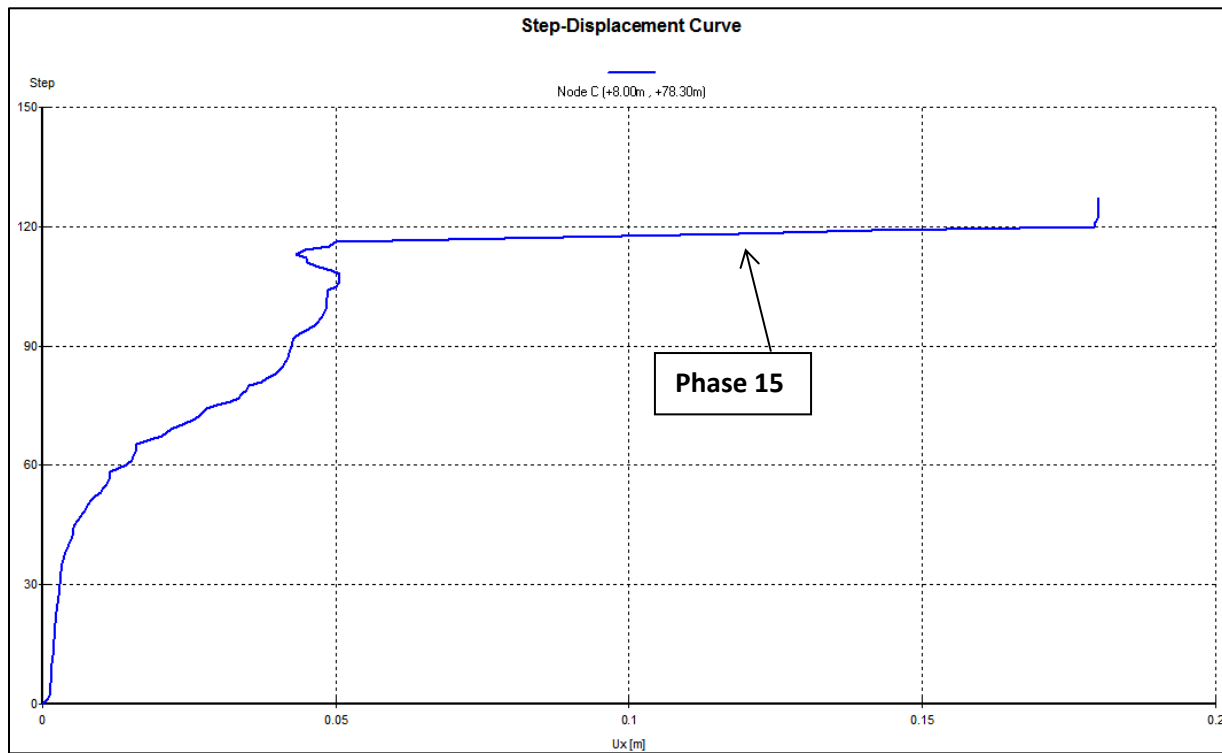
Σύμφωνα με τον έλεγχο επάρκειας, η υποστήριξη μπορεί να παραλάβει τις “hoop forces” επαρκώς.



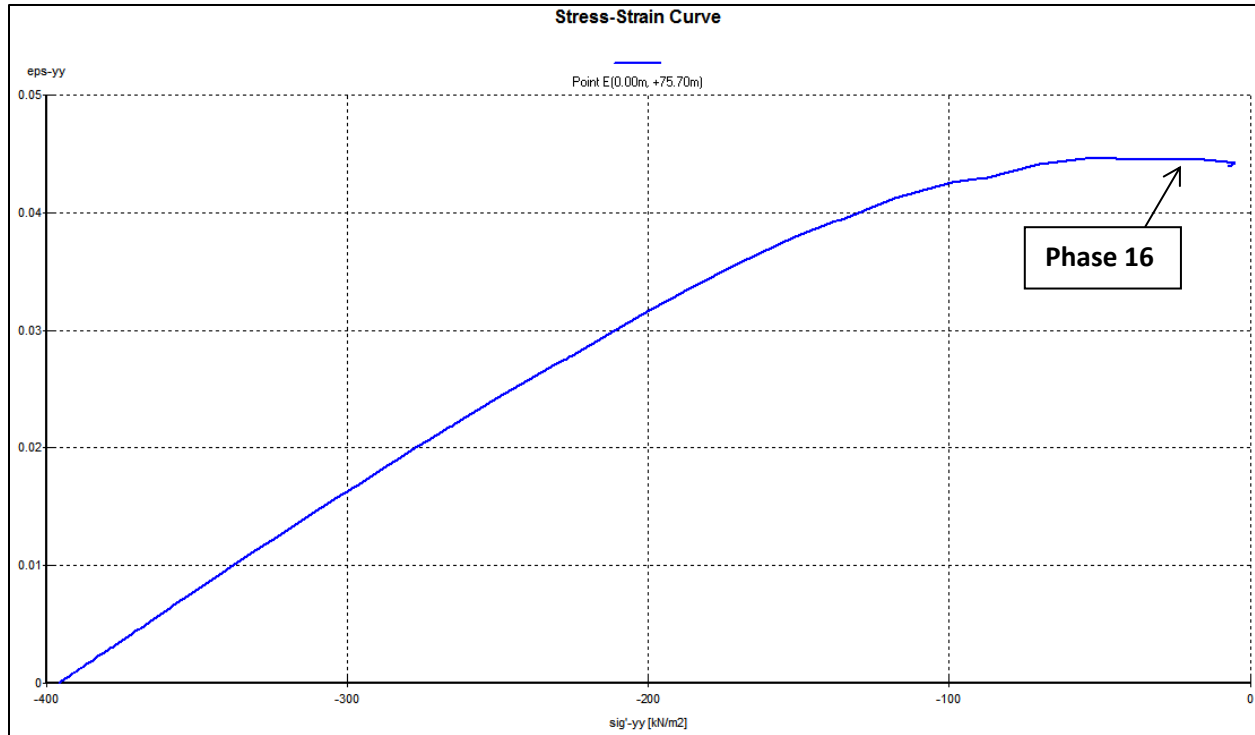
Εικόνα 84 : Plaxis 2D_ Analysis N°5 – Η καμπύλη κατακόρυφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m, +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



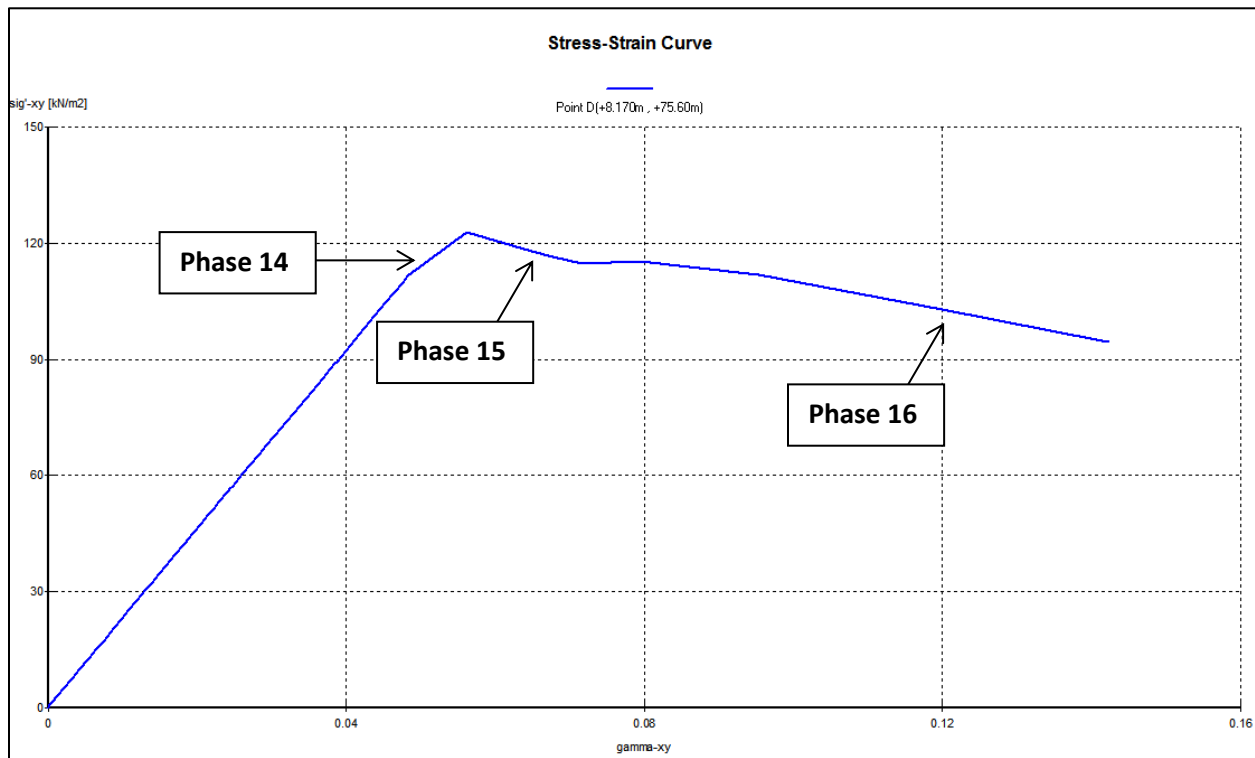
Εικόνα 85 : Plaxis 2D_ Analysis N^o5 – Η καμπύλη ολικών μετακινήσεων του κόμβου B (+8.170m , +75.60m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



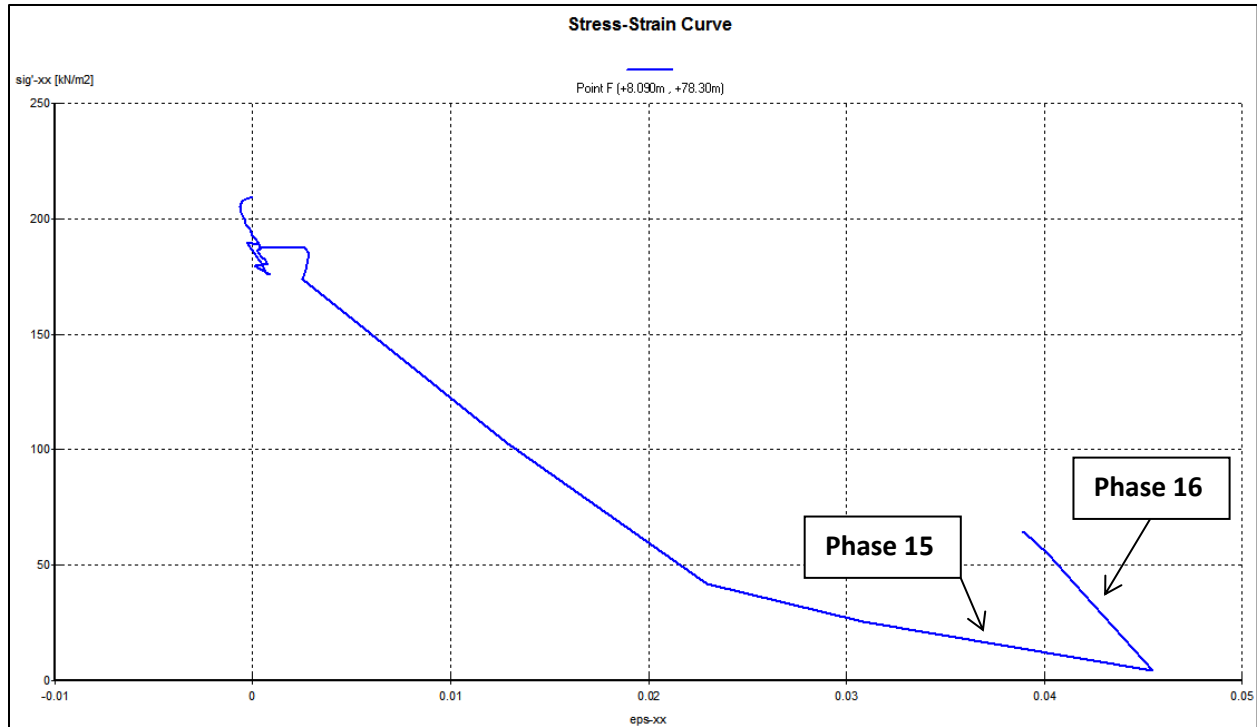
Εικόνα 86 : Plaxis 2D_ Analysis N^o5 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+8.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 87 : Plaxis 2D_ Analysis N^o5 - Οι ορθές τροπές (στον κατακόρυφο άξονα) για το Stress point E (0.00m, +75.70m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).



Εικόνα 88 : Plaxis 2D_ Analysis N^o5 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” D (+8.170m, +75.60m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).



Εικόνα 89 : Plaxis 2D_ Analysis N°5 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων–τροπών (στον οριζόντιο άξονα) του Stress point F (+8.090m , +78.30m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

5.5.1 Plaxis 2D_ Analysis N°5– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από την ανωτέρω ανάλυση, για διάνοιξη και υποστήριξη φρέατος διαμέτρου 16m, προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 81” σελ.84, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 44” σελ.46, παρατηρείται ότι η αύξηση της διαμέτρου (διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους ως έχουν) οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση των οριζοντίων και κατακόρυφων μετακινήσεων. Όπως παρατηρείται στην “Εικόνα 84” σελ.87, η ανύψωση του πυθμένα είναι ιδιαίτερα δυσμενής αφού αυξάνεται περίπου **35cm** παραπάνω σε σχέση με την Ανάλυση 1.
2. Από την “Εικόνα 82” σελ.85, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 49” σελ.51, παρατηρείται ότι η δυσμενέστερη φάση και στις δύο αναλύσεις είναι η φάση 16. Επιπλέον στην Ανάλυση 5 παρατίθεται ένα διάγραμμα διατμητικών τάσεων–παραμορφώσεων με σκοπό την ακριβέστερη απεικόνιση των αυξημένων “πλαστικών” παραμορφώσεων στην ακμή της κατακόρυφης παρειάς με τον πυθμένα.
3. Από την “Εικόνα 83” σελ.86, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 50” σελ.52, παρατηρείται ότι οι “hoop forces” είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Παρ’όλα αυτά η υποστήριξη δύναται να αναλάβει τις μέγιστες εφαπτομενικές δυνάμεις.
4. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Εικόνα 88 σελ.89 στην οποία απεικονίζεται η καμπύλη διατμητικών τάσεων (σ'_{xy}) – διατμητικών τροπών (γ_{xy}) για το σημείο D (+8.170m, +75.60m). Υπενθυμίζεται ότι το σημείο βρίσκεται στο δυσμενέστερο σημείο από άποψη “πλαστικών” παραμορφώσεων, όπως παρατηρείται στην “Εικόνα 82” σελ.85. Σύμφωνα με το

διάγραμμα η σταδιακή αποφόρτιση στις πρώτες φάσεις προσομοίωσης οδηγεί σε αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων και ταυτόχρονη σταδιακή αύξηση των διατμητικών τάσεων. Ακριβέστερα οι κατακόρυφες ορθές τάσεις στο σημείο παραμένουν σταθερές ($\sigma_v = \text{σταθερό}$) αλλά οι οριζόντιες ορθές τάσεις μειώνονται (λόγω αφαίρεσης εδαφικού υλικού) με αποτέλεσμα την αύξηση των διατμητικών τάσεων. Κατά την Φάση 15 επέρχεται υπέρβαση της διατμητικής αντοχής με αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων (“αστοχία”).

5.6 PLAXIS 2D_ANALYSIS N° 6

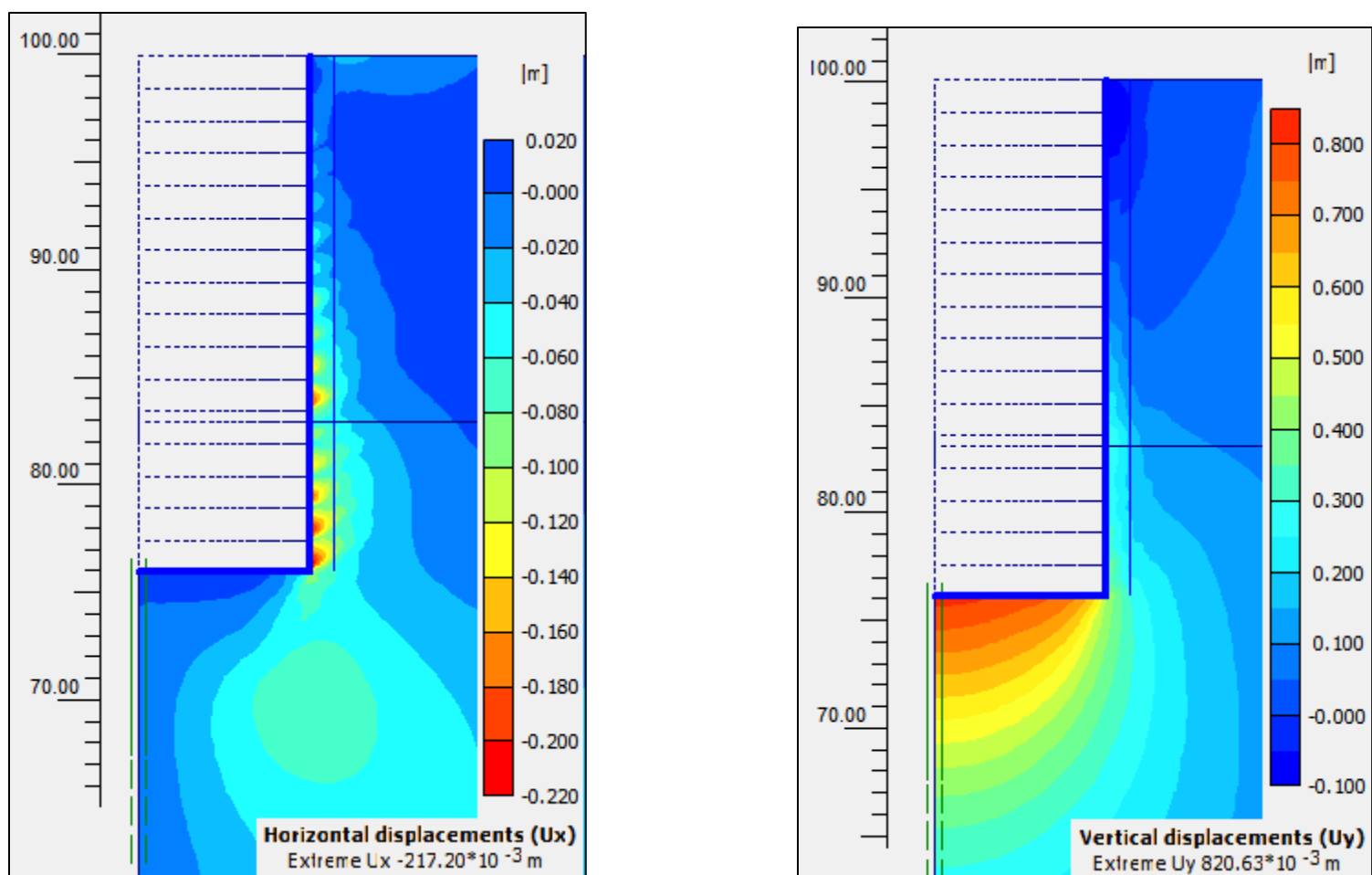
Η ανάλυση πραγματοποιείται για την εξακρίβωση τις επιρροής των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας (“interface parameters”) στα τελικά αποτελέσματα, για διάμετρο 16m. Επειδή δεν αναμένονται ουσιαστικές διαφορές σε σχέση με την αντίστοιχη σύγκριση των “Ανάλυση 1” και “Ανάλυση 2”, ακολουθούν τα κυριότερα διαγράμματα στα οποία παρατηρείται μια ενδεχόμενη μεταβολή των υπό εξέταση μεγεθών λόγω της αλλαγής των παραμέτρων τις διεπιφάνειας.

Πίνακας 23 : Plaxis 2D_Analysis N°6 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.

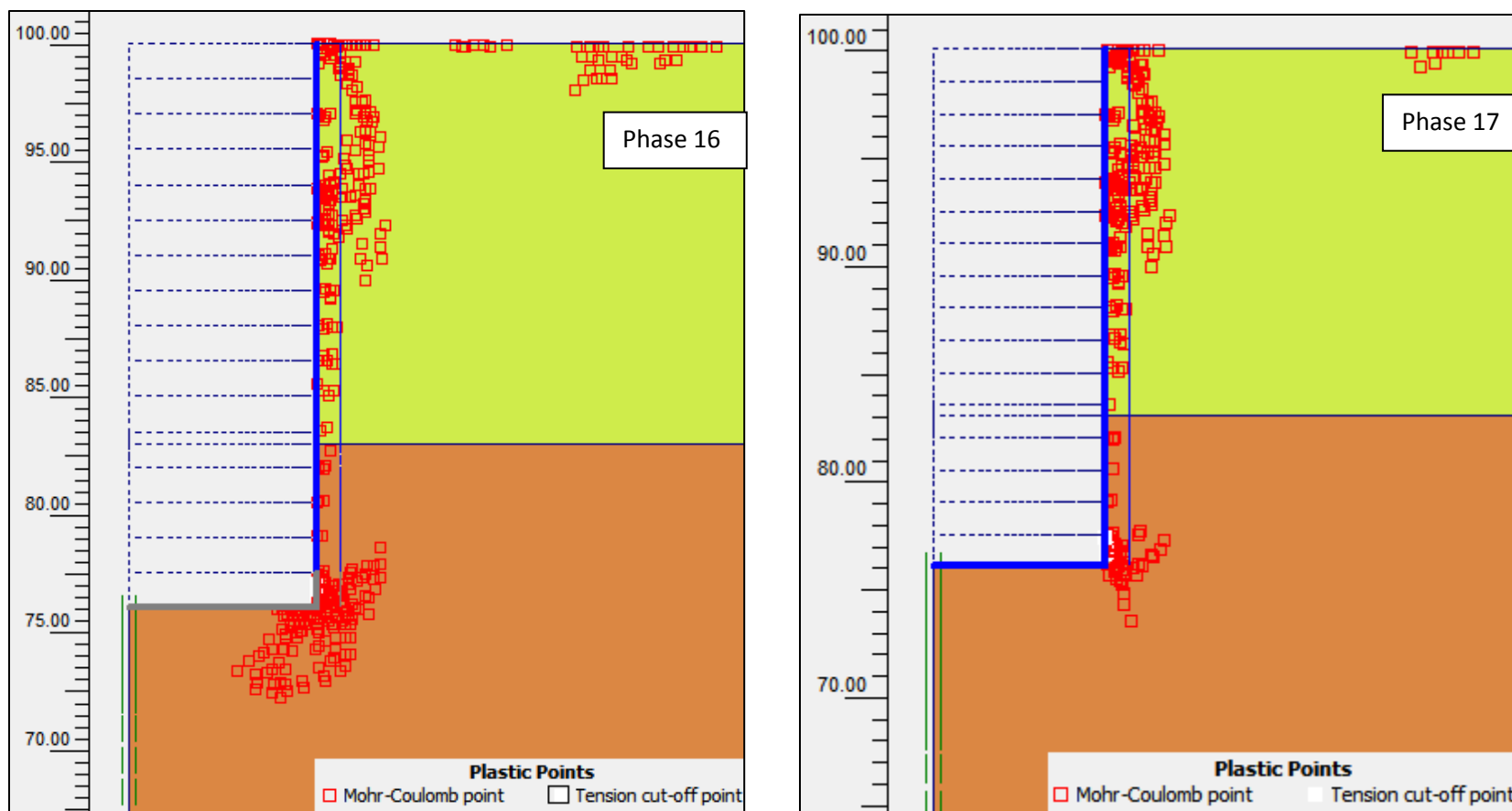
Analysis N°6- Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+8.870m , +78.30m)	Πρόκειται για σημείο της διεπιφάνειας με έντονο ενδιαφέρον όσον αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις.
Node C (+8.320m , +75.90m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή τις κατακόρυφης υποστήριξης όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων (plastic points).

Πίνακας 24 : Plaxis 2D_Analysis N°6 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

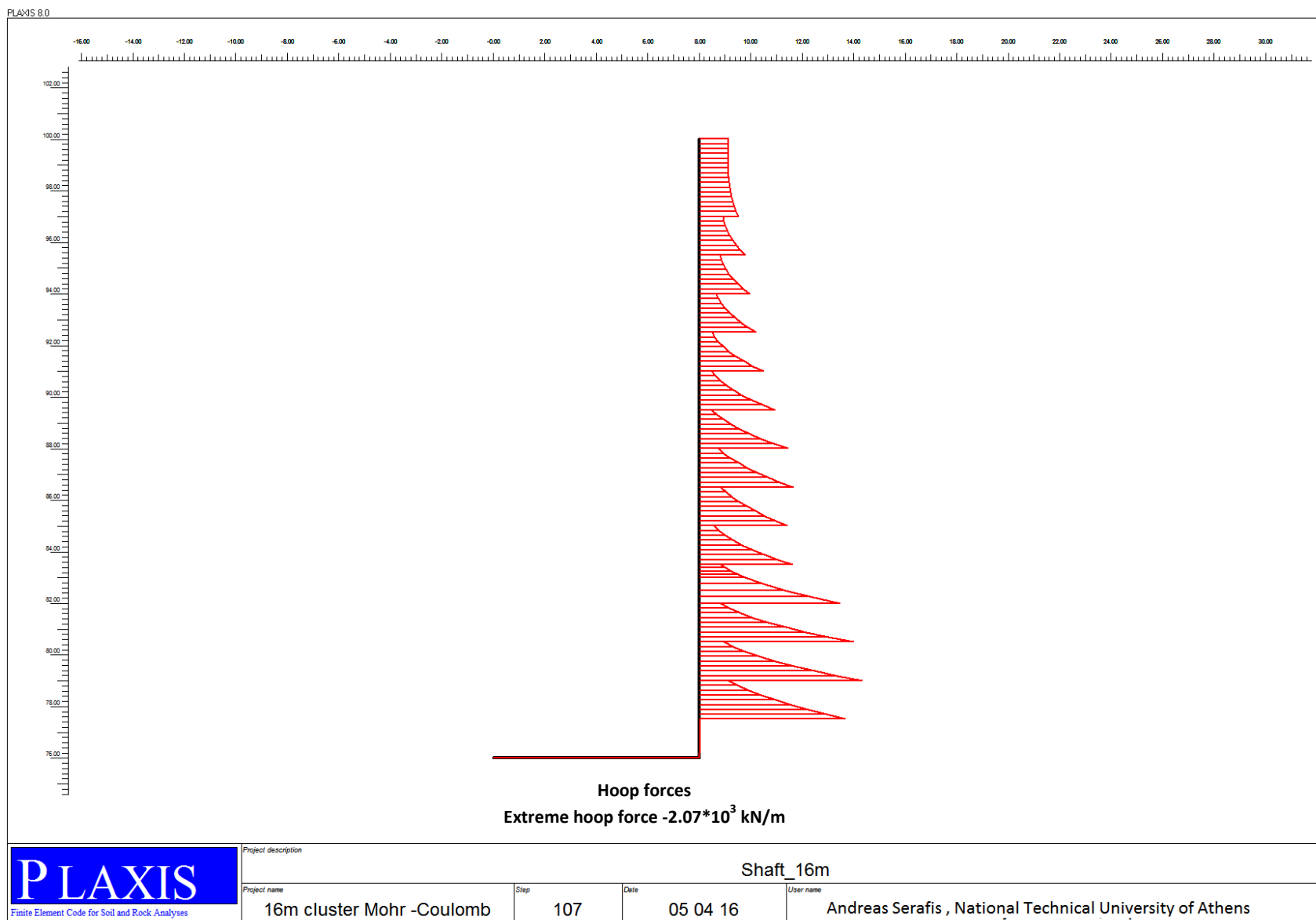
Analysis N°6 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point D (+8.670m , +78.00m)	Σημείο της διεπιφάνειας στο βάθος που τοποθετείται το “segmental ring” με τις μέγιστες “hoop forces”.
Stress point E (+8.250m , +76.50m)	Σημείο τις διεπιφάνειας στο μέγιστο βάθος του φρέατος.
Stress point F (+8.220m , +83.10m)	Σημείο της διεπιφάνειας της στρώσης “silty sand”, στο όριο με την στρώση “sandy silt”.



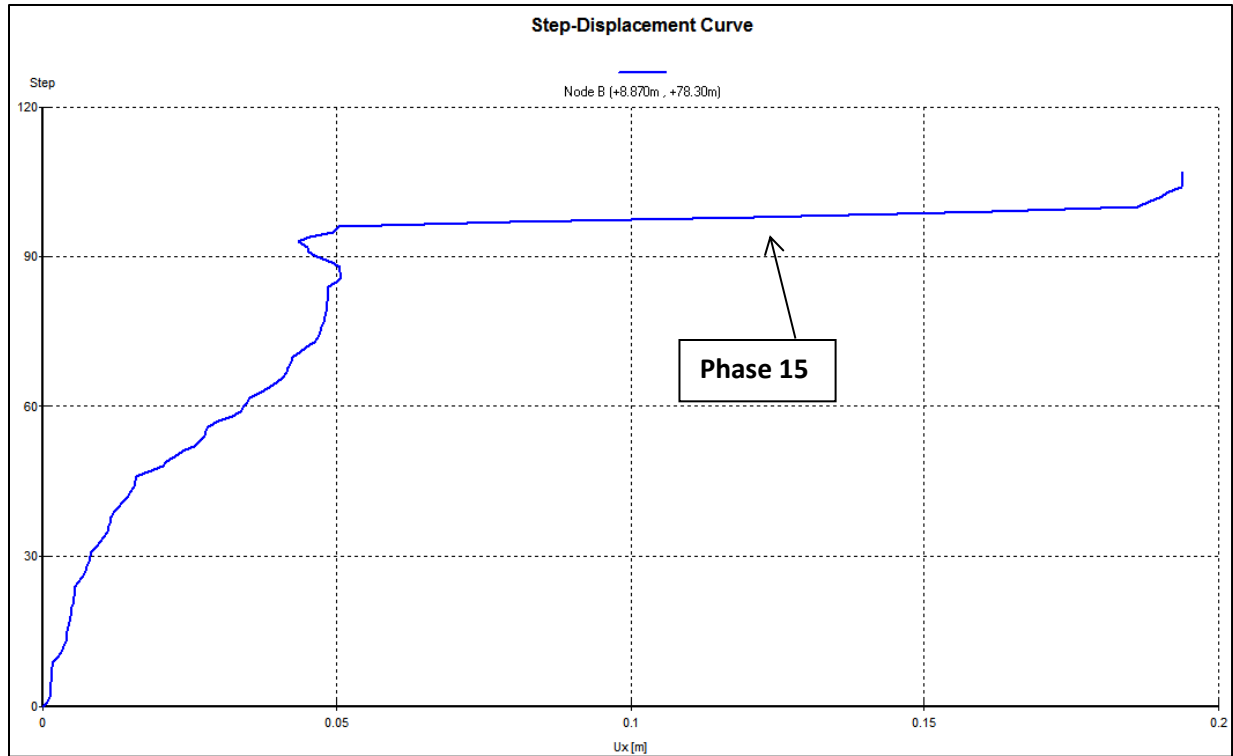
Εικόνα 90 : Plaxis 2D_ Analysis N°6 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



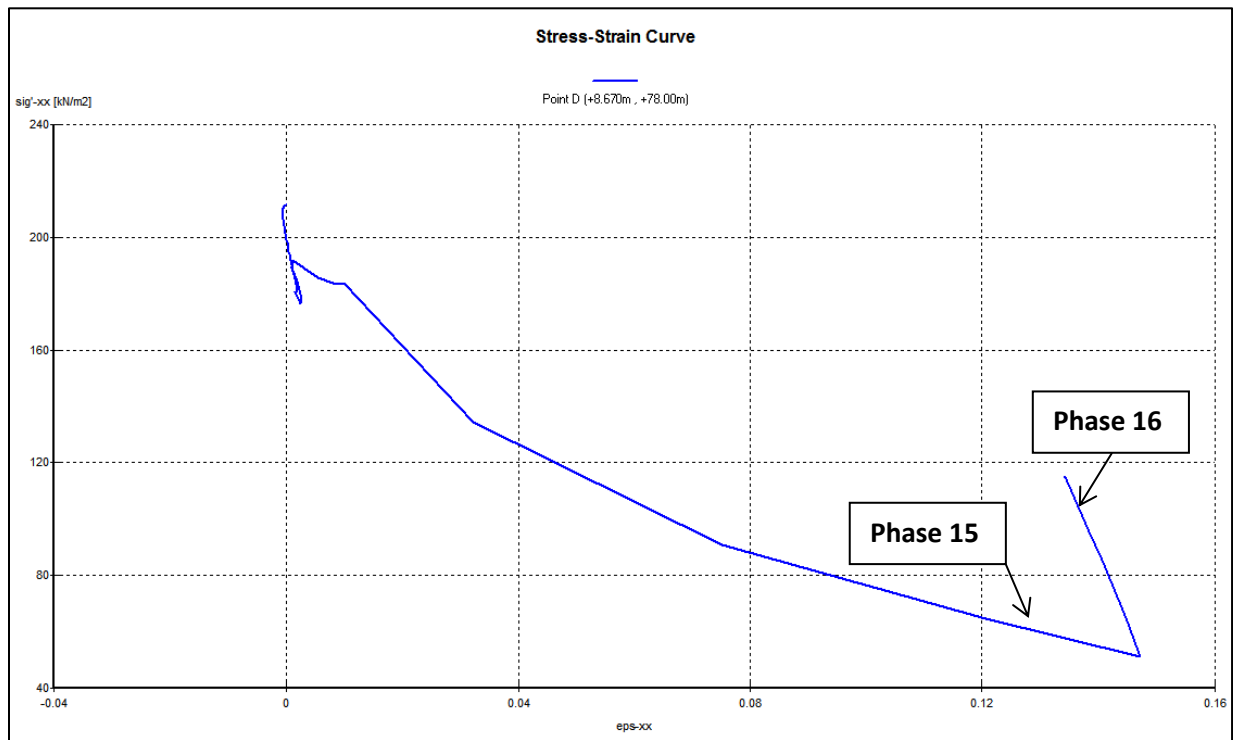
Εικόνα 91 : Plaxis 2D_ Analysis N^o6 – Σύγκριση των σημείων αστοχίας κατά τις δύο τελευταίες φάσεις προσομοίωσης (Phase 16 και Phase 17).



Εικόνα 92 : Plaxis 2D_ Analysis N^o6- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17)

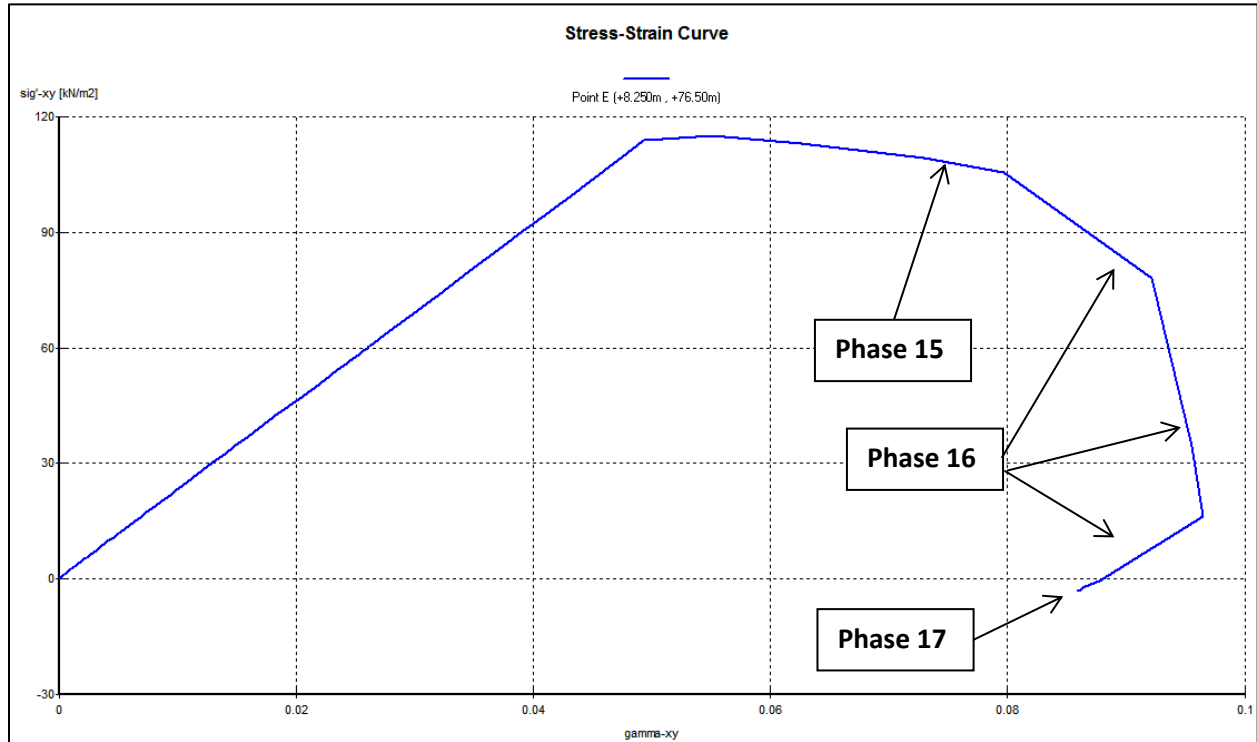


Εικόνα 93 : Plaxis 2D_ Analysis N^o6 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου B (+8.870m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.

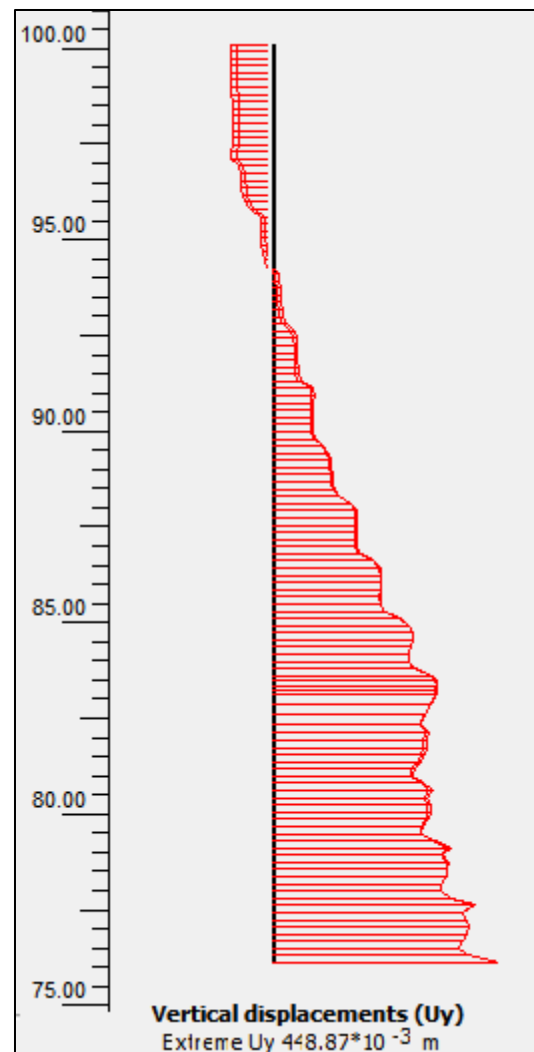
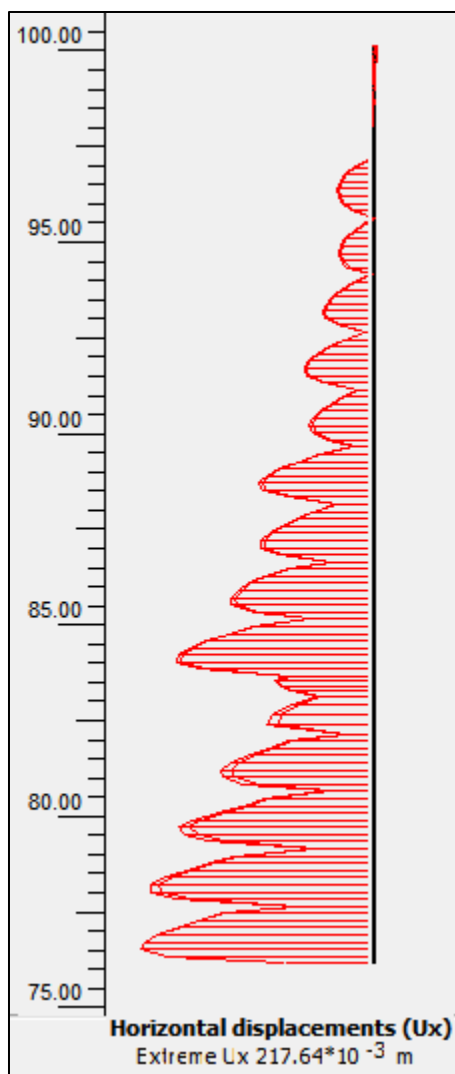


Εικόνα 94 : Plaxis 2D_ Analysis N^o6 – Η καμπύλη ορθών ενεργών κυρίων τάσεων-τροπών (στον οριζόντιο άξονα) του Stress point D (+8.670m , +78.00m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

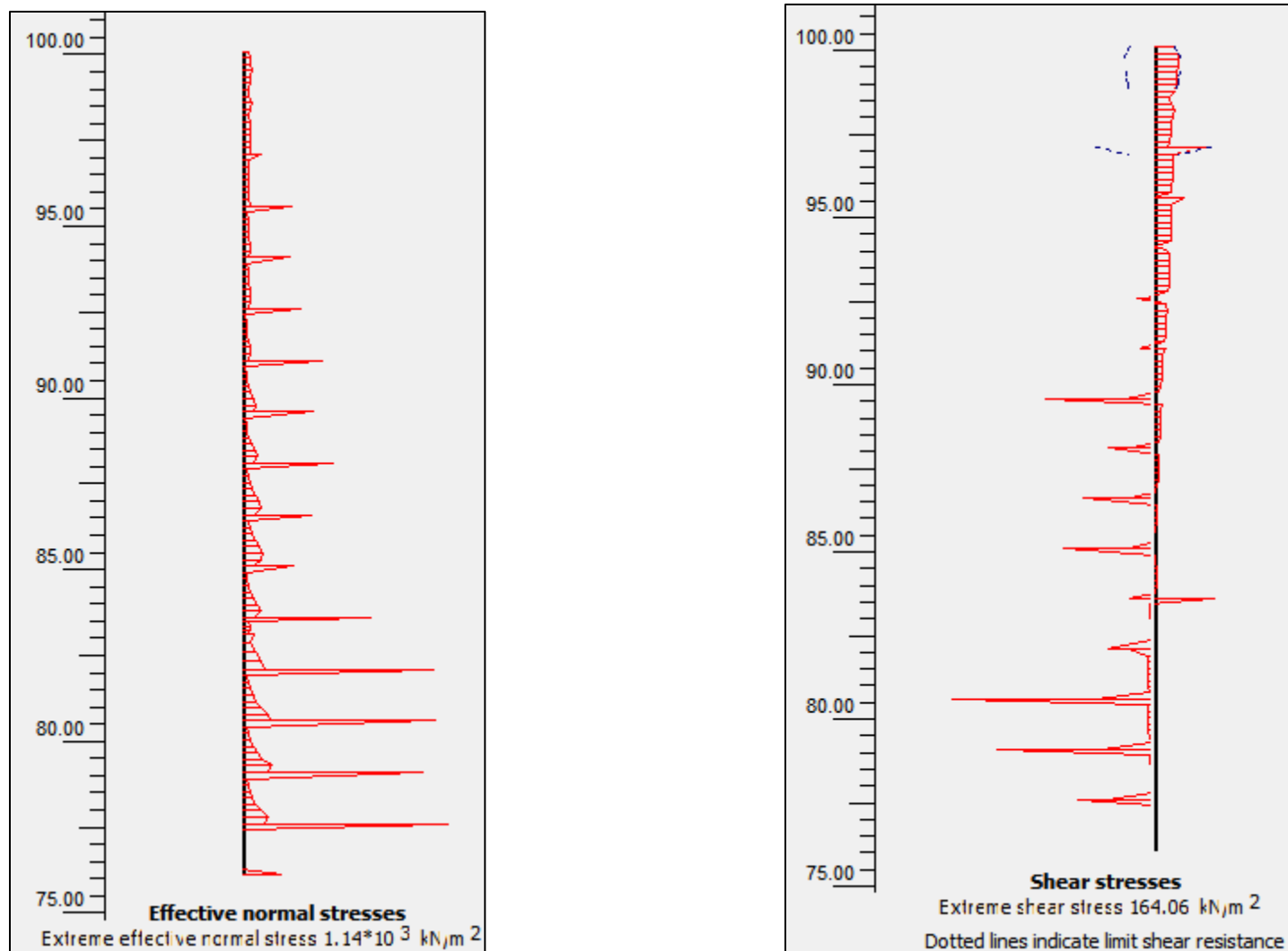
Στην συνέχεια παρατίθενται ορισμένα διαγράμματα μετακινήσεων και τάσεων επί της διεπιφάνειας με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της παρακάτω καμπύλης. Η καμπύλη σχεδιάζεται για το “stress point” E το οποίο ανήκει στην “νοητή” κατακόρυφη γραμμή της διεπιφάνειας και υψομετρικά βρίσκεται στον πυθμένα τις εκσκαφής.



Εικόνα 95 : Plaxis 2D_ Analysis N°6 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” E (+8.250m , +76.50m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).



Εικόνα 96 : Plaxis 2D_ Analysis N°6 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις τις διεπιφάνειας μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 97 : Plaxis 2D_Analysis N^o6 – Ενεργές ορθές τάσεις και διατμητικές τάσεις επί τις διεπιφάνειας μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

5.6.1 Plaxis 2D_ Analysis N°6- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την 6^η Ανάλυση, και έχοντας υπόψη τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 90” σελ.92, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 81” σελ.84, συμπερένεται ότι η αλλαγή των γεωτεχνικών παραμέτρων τις “interface” δεν επιρρεάζει τις μετατοπίσεις. Υπενθυμίζεται ότι στην Ανάλυση 6 οι παράμετροι διατμητικής αντοχής (c , ϕ) της διεπιφάνειας καθορίζονται από τον συντελεστή R_{inter} , όπως περιγράφεται στον “Πίνακας 5” σελ.26.
2. Από την “Εικόνα 91” σελ.93, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 82” σελ.85, συμπερένεται ότι τα σημεία αστοχίας είναι παρόμοια με μια ελαφρώς εκτεταμένη περιοχή αστοχίας στον πυθμένα για την Ανάλυση 6.
3. Από την “Εικόνα 92” σελ.94, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 83” σελ.86, προκύπτει μια μικρή απόκλιση των “hoop forces” λόγω αλλαγής της διεπιφάνειας. Ωστόσο η μείωση αυτή είναι μικρή και επιπλέον τα δύο διαγράμματα έχουν παρόμοια κατανομή εφαπτομενικής δύναμης με το βάθος.
4. Στην “Εικόνα 96” σελ.97 απεικονίζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις της διεπιφάνειας. Παρατηρείται λοιπόν ότι η μετακίνηση στον οριζόντιο άξονα είναι αντίστοιχη με εκείνη της υποστήριξης ενώ στον κατακόρυφο άξονα ένα μέρος της διεπιφάνειας ανυψώνεται και το μεγαλύτερο μέρος της βυθίζεται.
5. Στην “Εικόνα 97” σελ.98 απεικονίζονται οι ορθές ενεργές και διατμητικές τάσεις επί της διεπιφάνειας. Σε ορισμένα σημεία λοιπόν παρατηρείται συγκέντρωση διατμητικών και ορθών τάσεων με τις ορθές τάσεις να είναι τις τάξης του 1.2Μρα. Η φορά των θετικών τάσεων για το Plaxis 2D απεικονίζεται χαρακτηριστικά στην “Εικόνα 10” σελ.14.
6. Στην “Εικόνα 95” σελ.96 παρατηρείται ότι η αποφόρτιση προκαλεί σταδιακή αύξηση των διατμητικών τάσεων στο “stress point”Ε, όπως περιγράφεται στην ενότητα “5.5.1 Plaxis 2D_ Analysis N°5- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων” σελ.90. Στη συνέχεια λόγω των πρόσθετων παραμορφώσεων υπερβένεται η διατμητική αντοχή του σημείου και ακολουθούν προσαυξημένες διατμητικές τροπές. Η αξιοσημείωτη διαφορά της “Εικόνα 95” σελ.96 από την “Εικόνα 88” σελ.89 είναι η παύση των παραμορφώσεων κατά την Φάση 16 η οποία οφείλεται στην μικρή υψομετρική διαφορά των δύο σημείων. Το “stress point” Ε της Ανάλυσης 6 επιρρεάζεται από την τοποθέτηση του “segmental lining” στο βάθος αυτό και οι διατμητικές παραμορφώσεις παύουν να αυξάνονται.

5.7 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N° 7

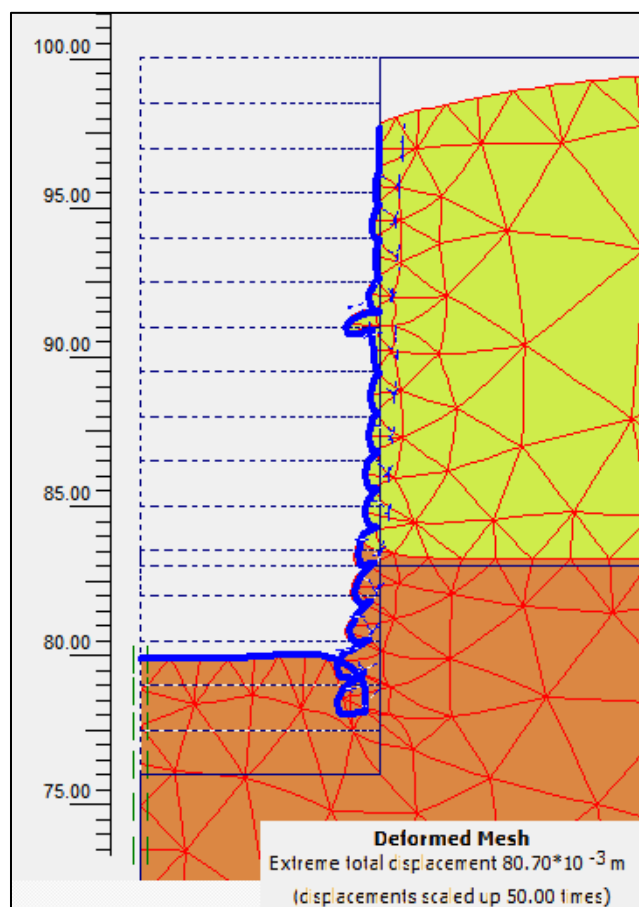
Πρόκειται για ανάλυση σύμφωνα με την οποία το κριτήριο συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων είναι το “Hardening Soil”, όπως περιγράφεται στην Ενότητα “3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ HARDENING SOIL” σελ.27. Ακολουθεί η επιλογή κόμβων και “stress points” και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της Αναλυσης 6.

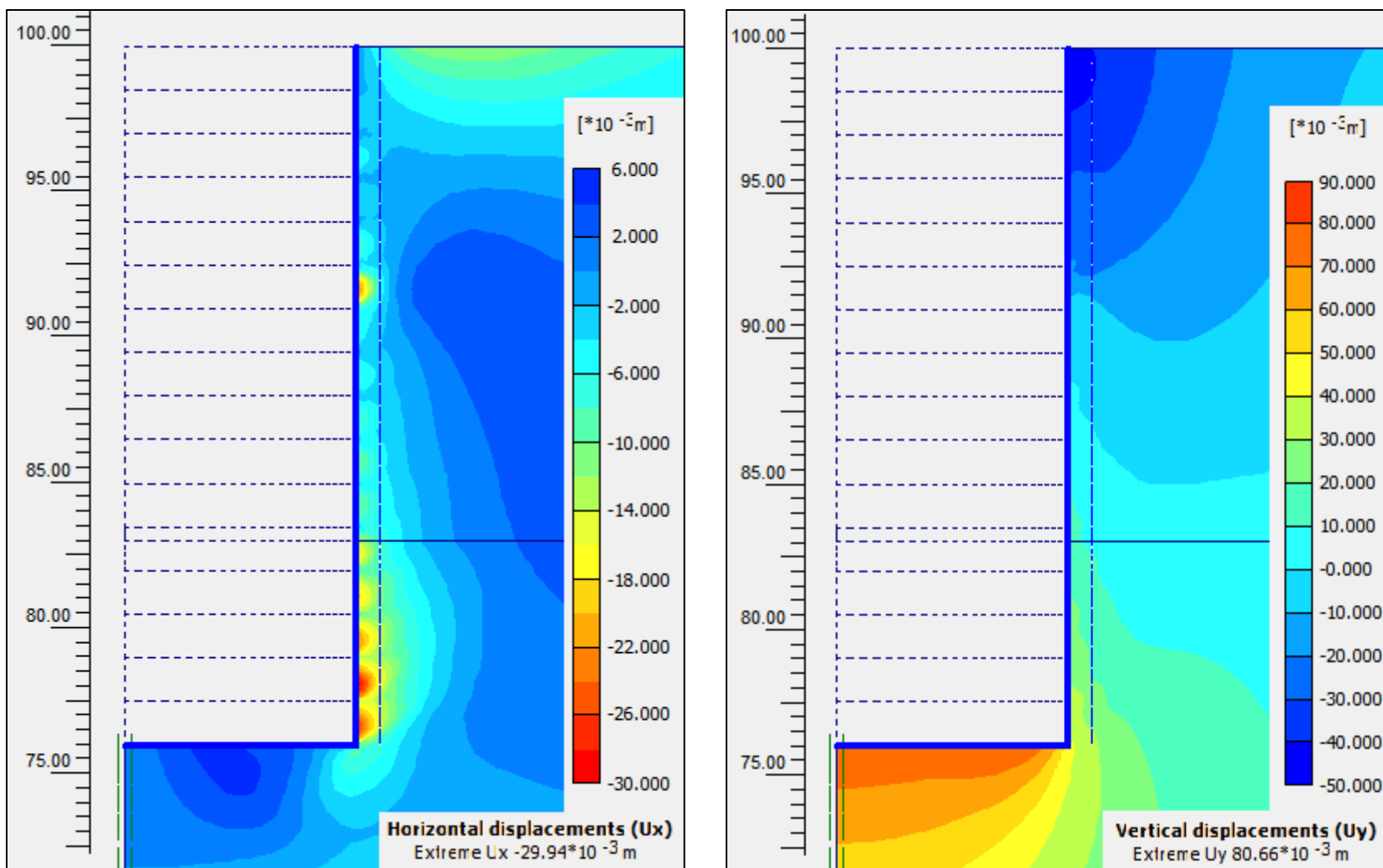
Πίνακας 25 : Plaxis 2D_ Analysis N^o7 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.

Analysis N ^o 7- Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+8.190m , +75.60m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή με την κατακόρυφη υποστήριξη.
Node C (+8.00m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.

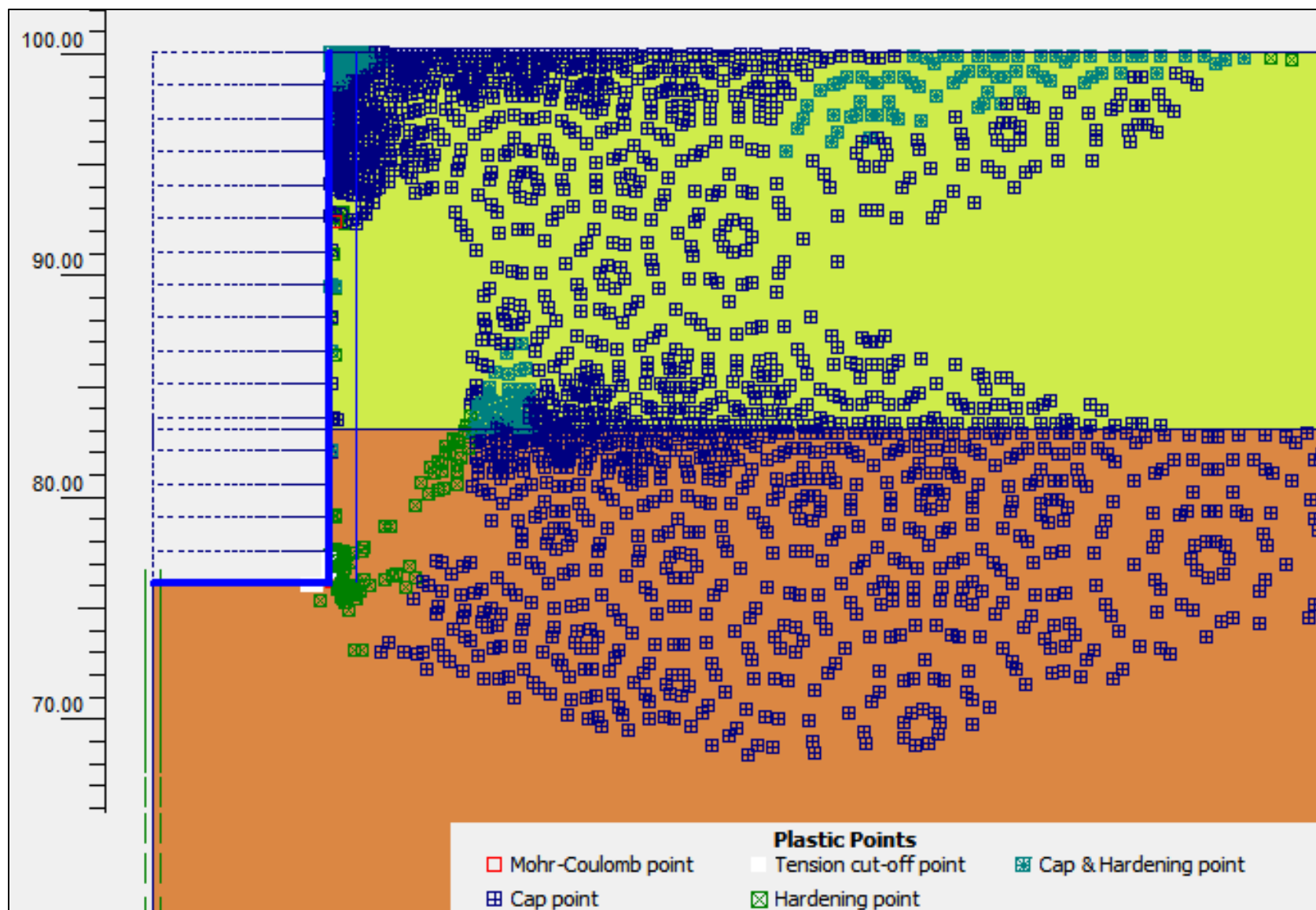
Πίνακας 26 : Plaxis 2D_ Analysis N^o7 - Τα δύο “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

Analysis N ^o 7 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point D (+8.150m , +75.60m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point E (0.00m , +75.80m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.

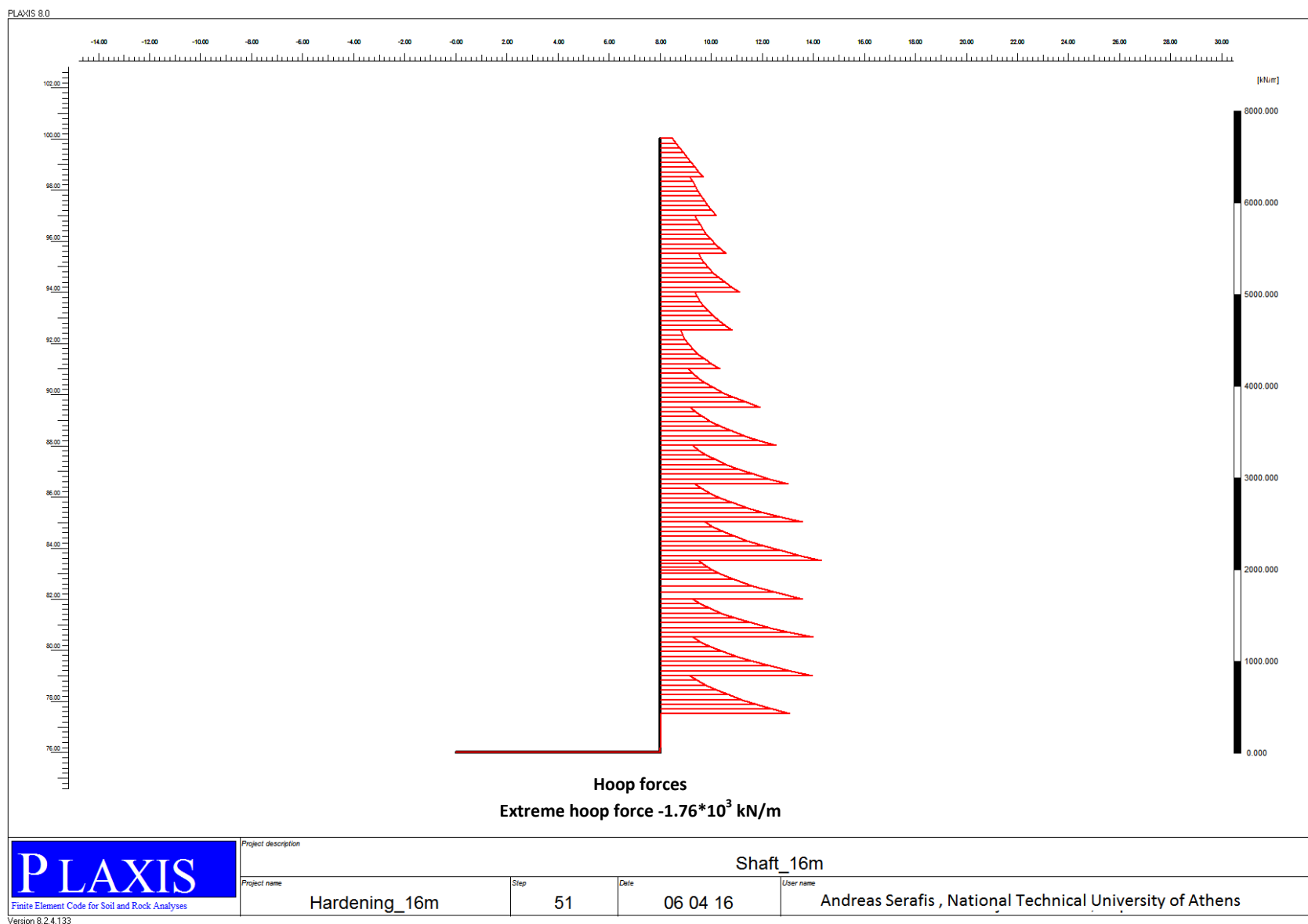
Εικόνα 98 : Plaxis 2D_ Analysis N^o7 – Απεικόνιση του “deformed mesh” μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



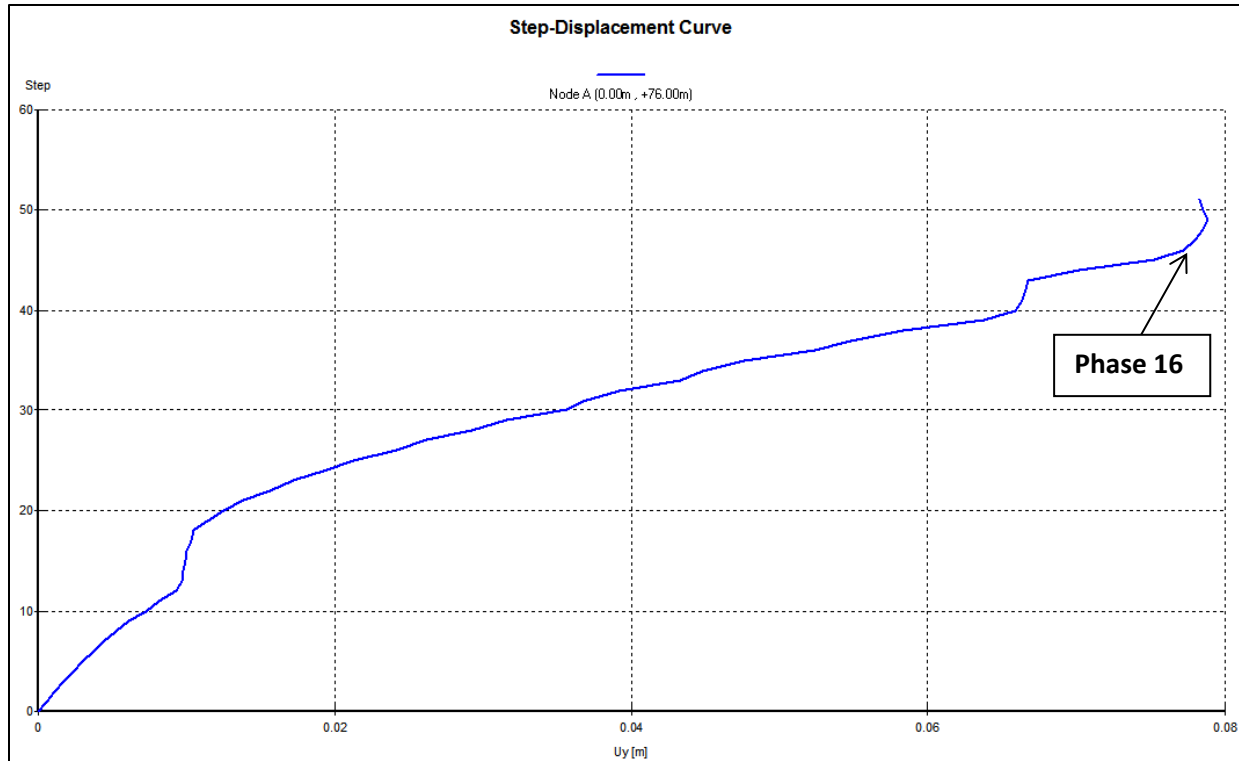
Εικόνα 99 : Plaxis 2D_ Analysis N°7 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



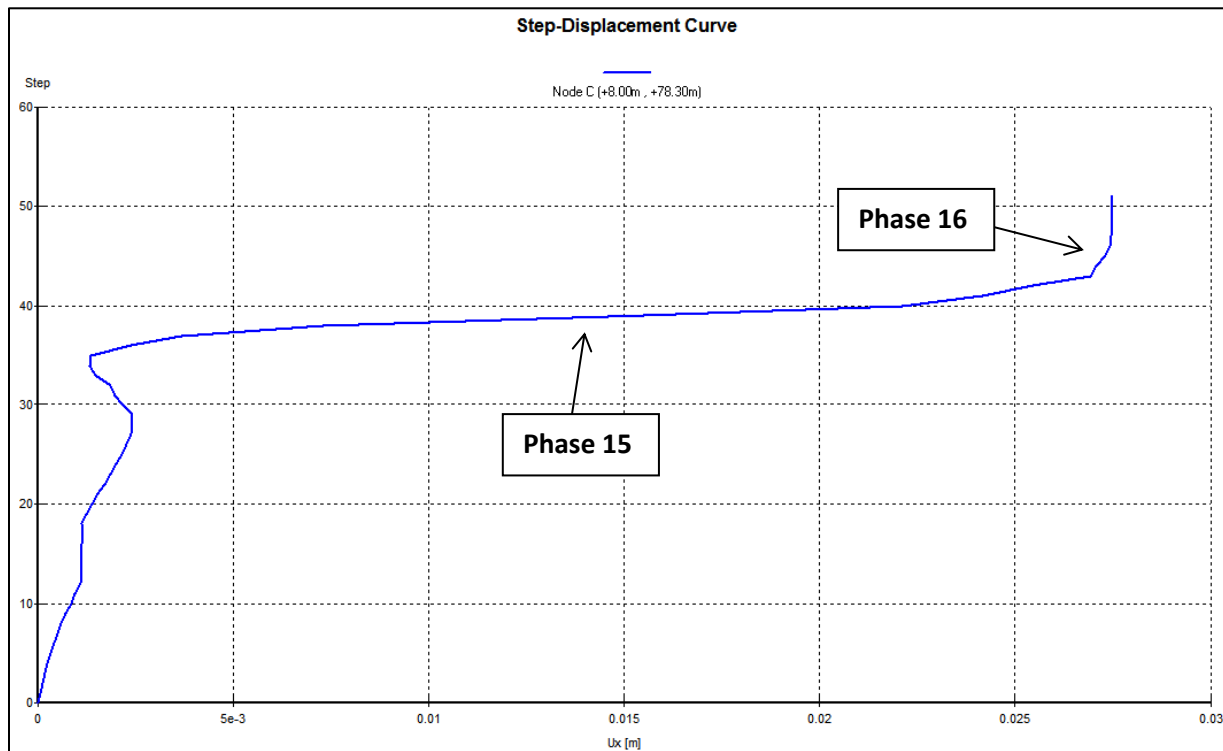
Εικόνα 100 : Plaxis 2D_ Analysis N^o7 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



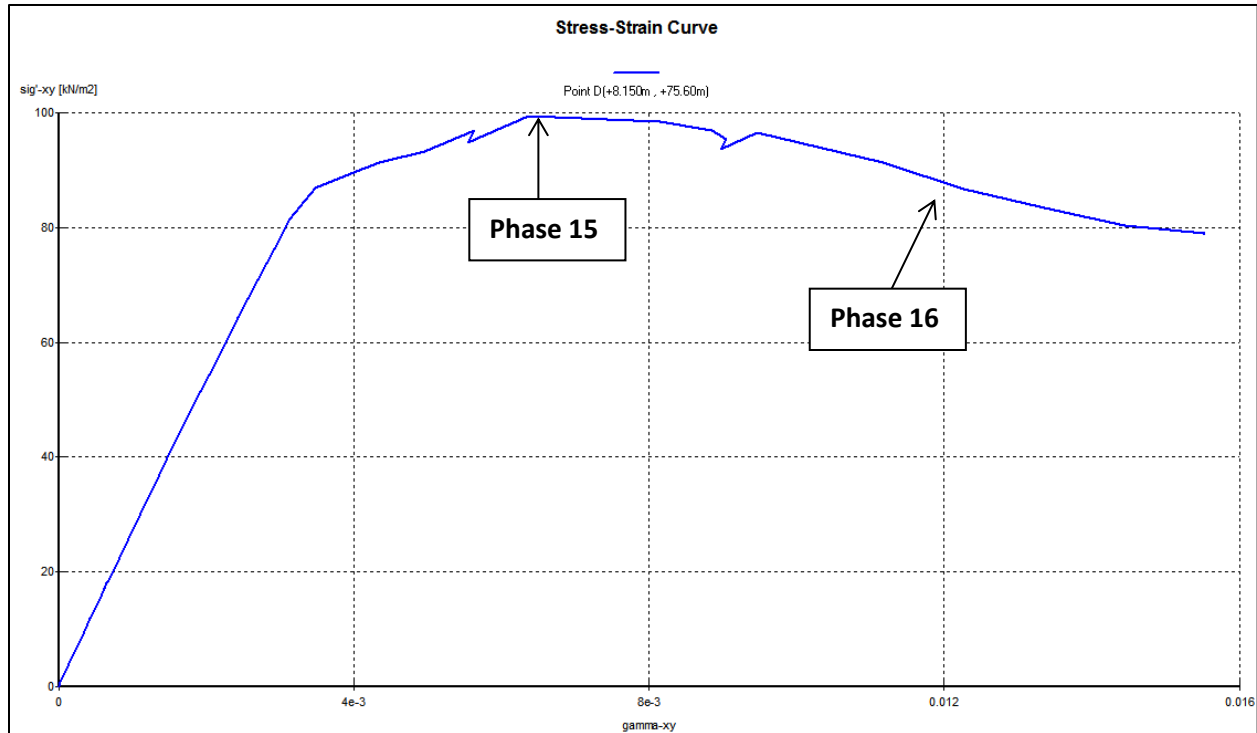
Εικόνα 101 : Plaxis 2D_ Analysis N^o7- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 102 : Plaxis 2D_ Analysis N^o7 – Η καμπύλη κατακόρυφων μετακινήσεων του κόμβου A (+0.0m , +76.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 103 : Plaxis 2D_ Analysis N^o7 – Η καμπύλη οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου C (+8.00m , +78.30m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 104 : Plaxis 2D_ Analysis N^ο7 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” D (+8.150m , +75.60m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

5.7.1 Plaxis 2D_ Analysis N^ο7– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την Ανάλυση 7 για φρέαρ διαμέτρου 16m και κριτήριο αστοχίας “Hardening Soil” προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 99” σελ.101, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 90” σελ.92, συμπερένεται ότι οι εδαφικές μετακινήσεις είναι αρκετά μικρότερες. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα της Ενότητας “ 5.3.1 Plaxis 2D_ Analysis No3– ” σελ.85.
2. Από την Εικόνα 101 σελ.113, και σε σύγκριση με την Εικόνα 92 σελ.104, συμπερένεται ότι οι εφαπτομενικές τάσεις εμφανίζονται μειωμένες. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα της Ενότητας “5.3.1 Plaxis 2D_ Analysis No3– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων” σελ.75.
3. Από τον “Node A” της “Εικόνα 102” σελ.104 παρατηρείται η μικρότερη ανύψωση πυθμένα (“uplift”). Μετά την εξαγωγή διαγραμμάτων τάσεων – τροπών, για το “stress point” E (0.00m, +75.80m), πλησίον τις περιοχής μέγιστης ανύψωσης παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες ορθές και διατμητικές τροπές που προέκυψαν είναι πολύ μικρές. Ειδικά για την περίπτωση των διατμητικών τάσεων, αυτές δεν ξεπέρασαν την διατμητική αντοχή των εδαφικών σχηματισμών (επομένως δεν επήλθε αστοχία). Συμπερένεται λοιπόν ότι ο εδαφικός όγκος του πυθμένα μετατοπίζεται ως “απόλυτο στερεό”.
4. Στην “Εικόνα 104” σελ.105, η οποία αναφέρεται στο “Stress point D (+8.150m , +75.60m), παρατηρείται η “αστοχία” με βάση το κριτήριο “Mohr-Coulomb” κατά την Φάση 15 (το συγκεκριμένο “failure point” διακρίνεται στην “Εικόνα 100” σελ.102). Ωστόσο η Ανάλυση 7

πραγματοποιήθηκε με βάση το κριτήριο “Hardening Soil”, επομένως οι μέγιστες διατμητικές παραμορφώσεις είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με εκείνες του ίδιου “stress point” αλλά για ανάλυση με το κριτήριο “Mohr-Coulomb” όπως διακρίνεται στην “Εικόνα 88” σελ.89.

5.8 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N° 8

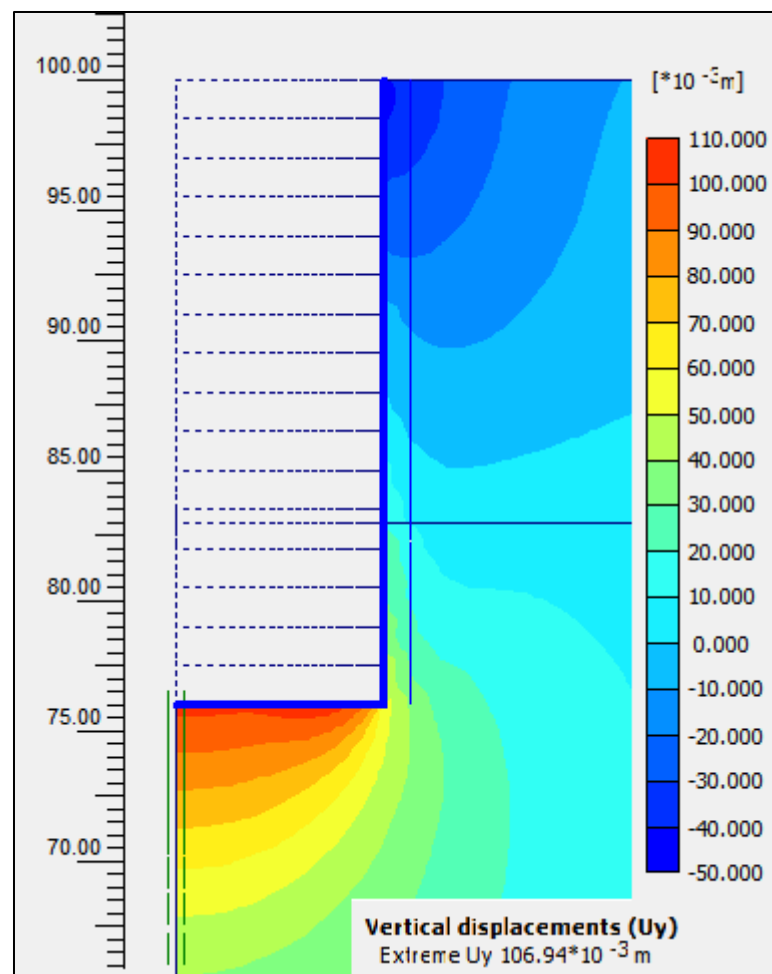
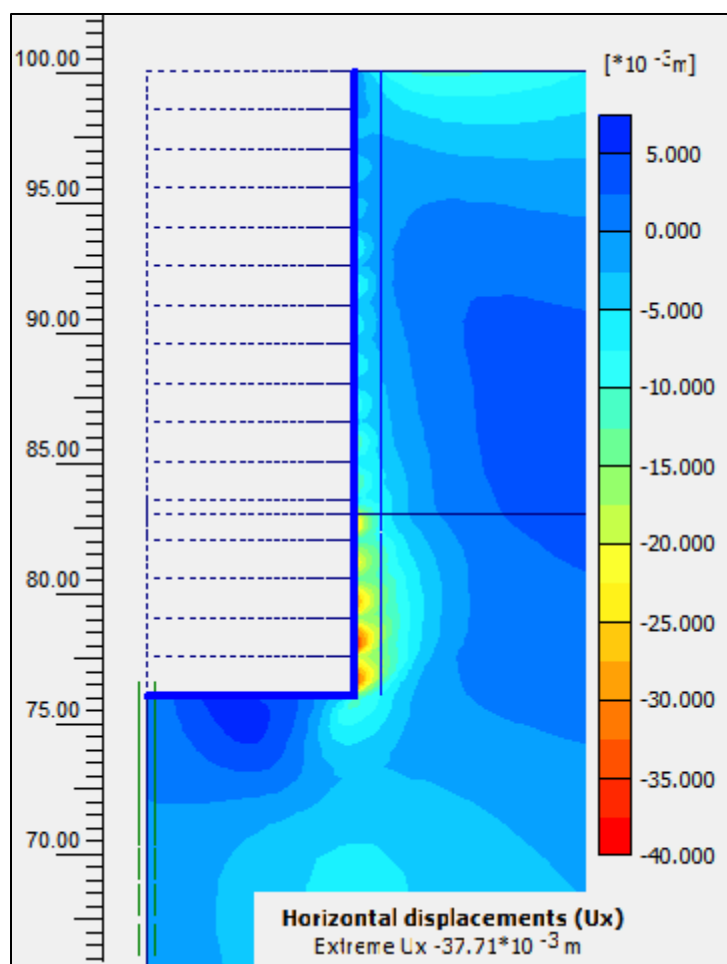
Η συγκεκριμένη ανάλυση ακολουθεί τη λογική της Ανάλυσης 4 (δηλαδή την αλλαγή του E_{ur}^{ref}) με ταυτόχρονη αλλαγή της διαμέτρου του φρέατος σε 16m, όπως περιγράφεται στον “Πίνακας 8” σελ.32.

Πίνακας 27 : Plaxis 2D_ Analysis N°8 –Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “Load-Displacement Curves”.

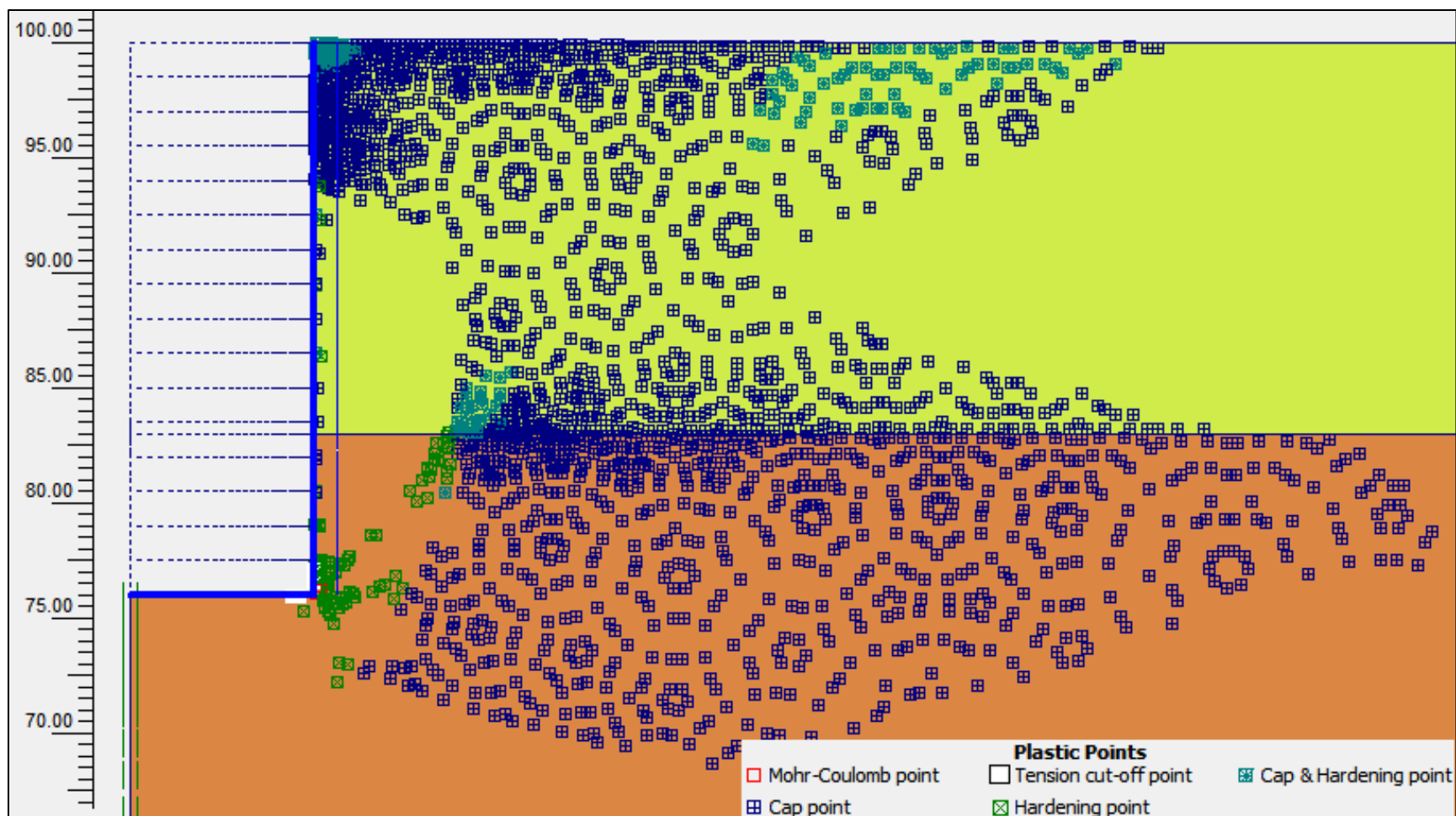
Analysis N°8- Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (0.00m , +76.00m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+8.190m , +75.60m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή με την κατακόρυφη υποστήριξη.
Node C (+8.00m , +78.30m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.

Πίνακας 28 : Plaxis 2D_ Analysis N°8 - Τα δύο “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

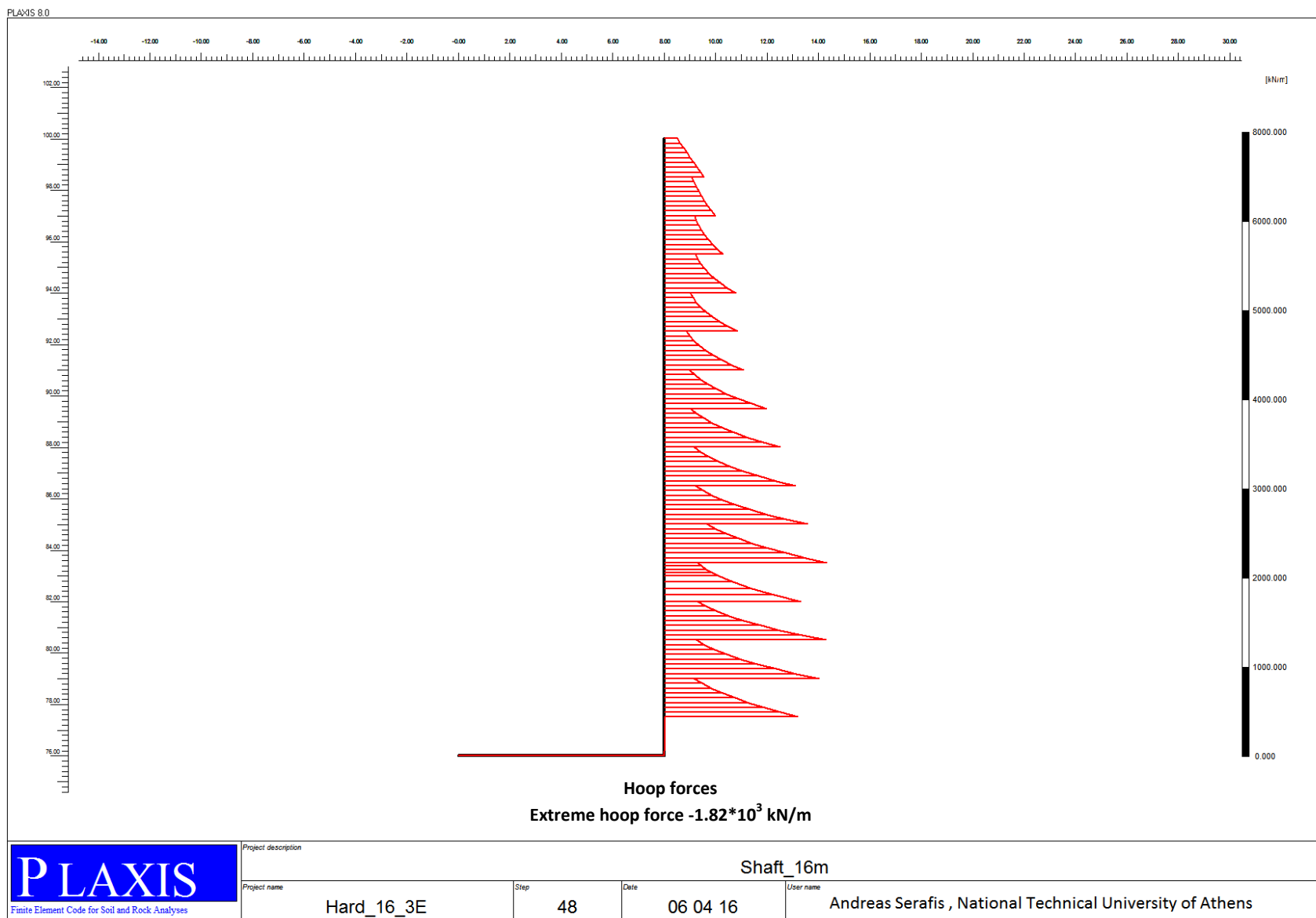
Analysis N°8 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point D (+8.150m , +75.60m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point E (0.00m , +75.80m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.



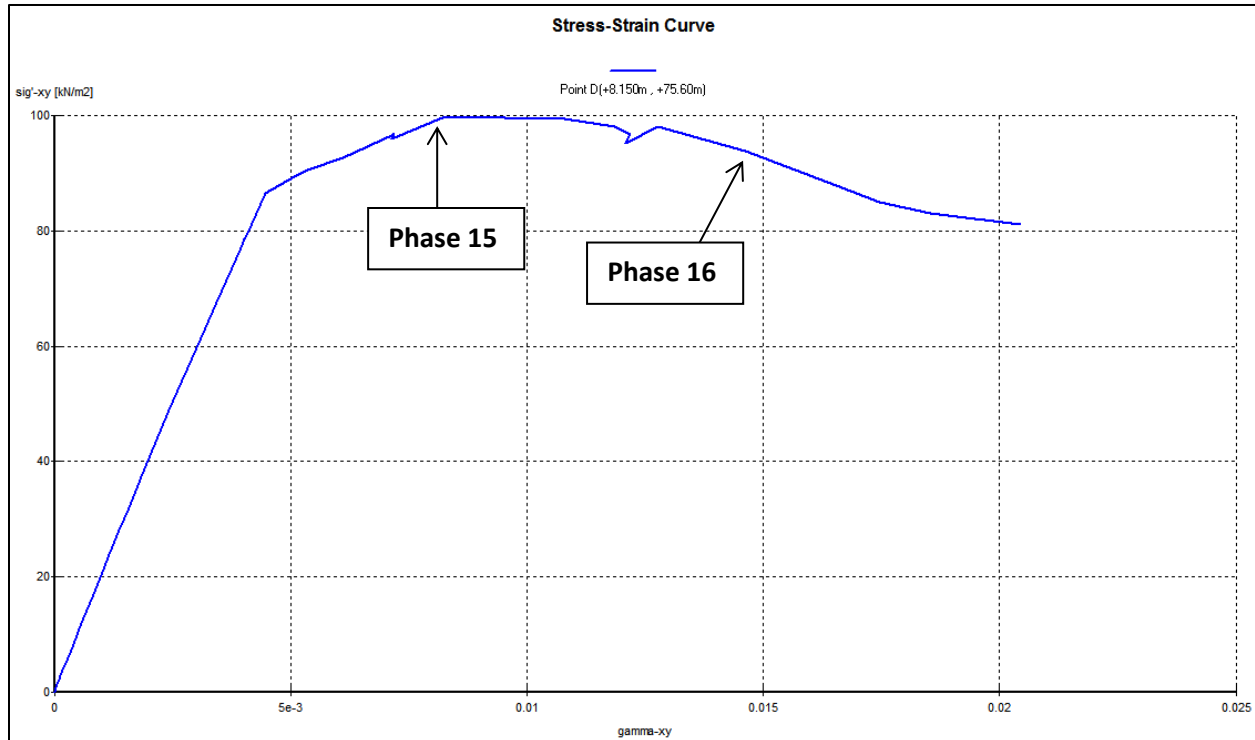
Εικόνα 105 : Plaxis 2D_ Analysis N°8 – Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 106 : Plaxis 2D_ Analysis N^o8 – Σημεία εδαφικής αστοχίας κατά την τελευταία φάση προσομίωσης (Phase 17).



Εικόνα 107 : Plaxis 2D_ Analysis N°8- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 108 : Plaxis 2D_Analysis N°8 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων του “stress point” D (+8.150m , +75.60m) μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

5.8.1 Plaxis 2D_Analysis N°8– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από τις ανωτέρω Εικόνες της Ανάλυσης 8 προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 105” σελ.107, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 99” σελ.101, παρατηρείται μια μερική αύξηση των μετακινήσεων. Ορισμένα χρήσιμα σχόλια παρατίθενται στην Ενότητα “**5.4.1 Plaxis 2D_Analysis N°4– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων**” σελ.81.
2. Στην “Εικόνα 107” σελ.109, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 101” σελ.103, παρατηρείται μια πολύ μικρή αύξηση των “hoop forces”.
3. Από την “Εικόνα 108” σελ.111, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 104” σελ.105, παρατηρείται ότι η μορφή των δύο καμπυλών είναι παρόμοια (οι καμπύλες χαράσσονται για το ίδιο σημείο και στις δύο αναλύσεις). Ωστόσο οι μέγιστες διατμητικές παραμορφώσεις εμφανίζονται μεγαλύτερες στην Ανάλυση 8, όπως αναμενόταν λόγω μικρότερου Μέτρου αποφόρτισης-επαναφόρτισης.

6

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ Plaxis 3D (Version 2013)

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρών Κεφάλαιο περιγράφεται η ανάλυση του κατακορύφου φρέατος με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 3D, η οποία αποτελείται από τις εξής ενότητες:

1. **Ground modelling – Soil mode.** Πρόκειται για τη διαδικασία καθορισμού των ορίων του προσομοιώματος, την διαδικασία καθορισμού των εδαφικών στρώσεων με το βάθος (με τη χρήση τις εντολής “boreholes”), την επιλογή κριτηρίων αστοχίας και τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών για τις στρώσεις αυτές.
2. **Modelling structures – Structure mode.** Περιγράφεται η διαδικασία της σχεδίασης του φρέατος, μέσω τις εισαγωγής ειδικού γεωμετρικού σχήματος στο προσομοίωμα, και η διαδικασία διαχωρισμού των εδαφικών όγκων εσωτερικά του φρέατος.
3. **Mesh generation – Mesh mode.** Η ενότητα αφορά την “γέννεση” του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα την επιλογή κόμβων (“nodes”) και “stress points” για την χάραξη χαρακτηριστικών καμπυλών.
4. **Calculations.** Ορίζονται οι 17 φάσεις προσομοίωσης (όπως ακριβώς και στο πρόγραμμα Plaxis 2D) και τέλος επιλέγεται ο τύπος της ανάλυσης και ο τύπος της φόρτισης.
5. **Output data.** Έπειτα από την φάση των υπολογισμών ακολουθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων, δηλαδή οι μετακινήσεις των κόμβων (nodes), οι εδαφικές πιέσεις στα “stress points” και τα εντατικά μεγέθη (M , Q , N) επί της υποστήριξης (“segmental lining” και “lean concrete”).
6. **Curves.** Χαράσσονται οι “step – displacement” καμπύλες καθώς και τα “stress – strain” διαγράμματα για τα χαρακτηριστικά σημεία που επιλέγονται στην ενότητα 3.

Σημειώνεται ότι μετά τα αποτελέσματα των δι-διάστατων αναλύσεων και επιπλέον λόγω των χρονοβόρων υπολογισμών του Plaxis 3D κρίνεται πως οι κυριότερες αναλύσεις οι οποίες πρέπει να πραγματοποιηθούν είναι οι εξής:

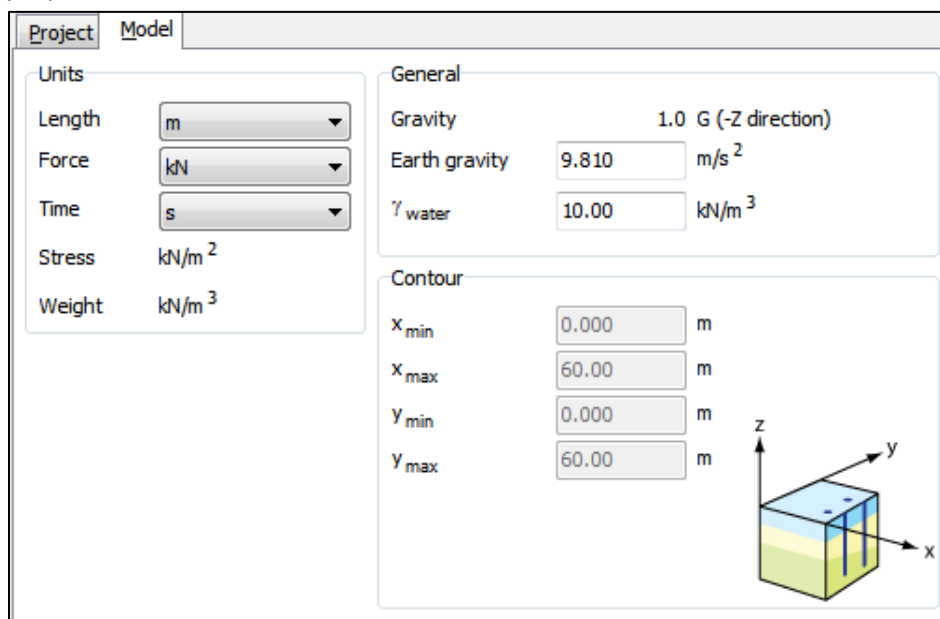
Πίνακας 29 :Plaxis 3D_ Σύνομη περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων με χρήση του Plaxis 3D.

Plaxis 3D Analysis	
Παραμετρική Ανάλυση	Σύνομη Περιγραφή
1 st Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 10m , μοντέλο συμπεριφοράς “Mohr-Coulomb” , ξηρές συνθήκες, “from adjacent soil” interface.
2 nd Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 10m , μοντέλο συμπεριφοράς “Hardening Soil” με $E_{ur}^{ref} = 4 * E_{50}^{ref}$, ξηρές συνθήκες, “from adjacent soil” interface.
3 rd Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 16m , μοντέλο συμπεριφοράς “Mohr-Coulomb” , ξηρές συνθήκες, “from adjacent soil” interface.
4 th Analysis	Κατακόρυφο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου 16m , μοντέλο συμπεριφοράς “Hardening Soil” με $E_{ur}^{ref} = 4 * E_{50}^{ref}$, ξηρές συνθήκες, “from adjacent soil” interface.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται εκτενώς η χρήση του Plaxis 3D για την “1st Analysis” όπως ακριβώς έγινε και στο Κεφάλαιο 4 “ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ Plaxis 2D” σελ.31.

6.2 GROUND MODELLING – SOIL MODE



Αρχικά ορίζεται το εύρος του προσομοιώματος σε δύο διαστάσεις με το άνοιγμα του Πίνακά “project properties”.



Εικόνα 109 : Plaxis 3D_ Εισαγωγή των μονάδων και των διαστάσεων του καννάβου του αριθμητικού προσομοιώματος.

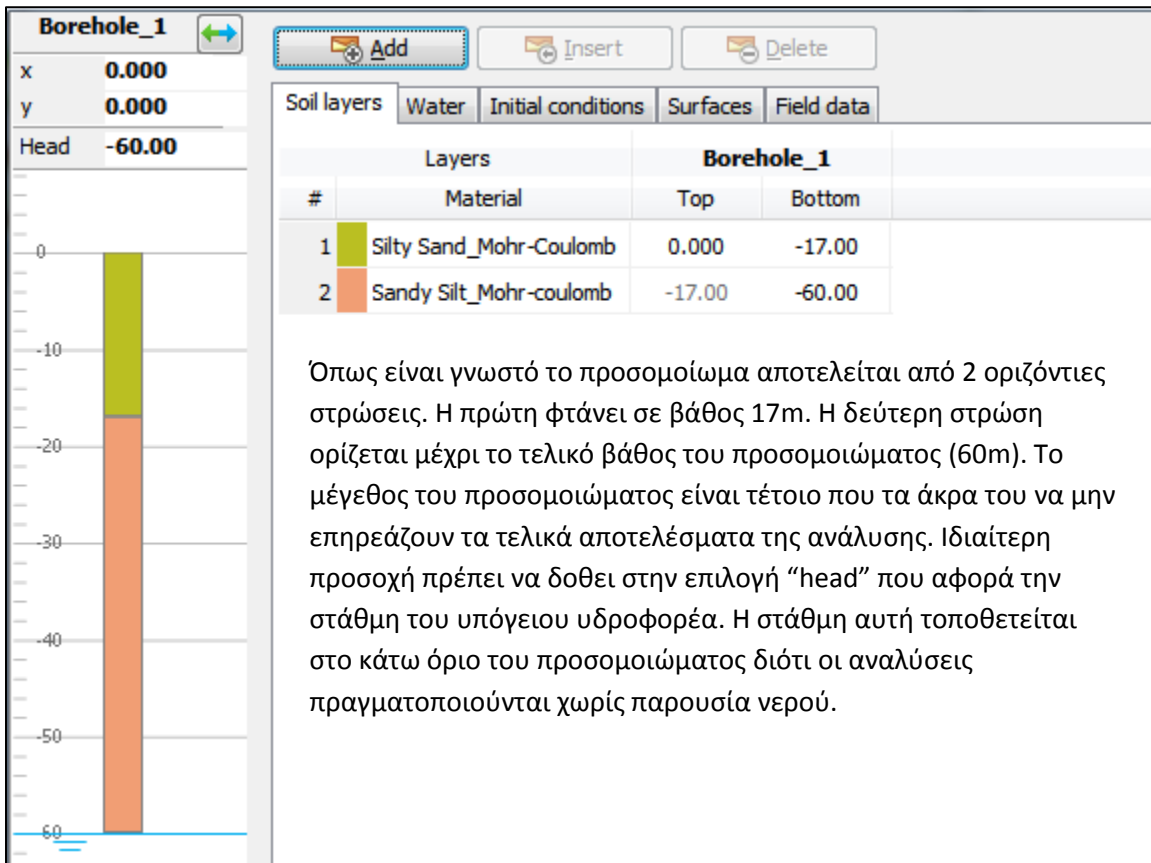
Ορισμένες σημαντικές εντολές για την δημιουργία του προσομοιώματος είναι οι εξής:

Πίνακας 30 : Plaxis 3D_Οι βασικές εντολές της ενότητας “soil mode”.

INPUT COMMANDS FOR SOIL MODE	
<p>Create Borehole</p> 	Είναι δυνατός ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των στρώσεων με το βάθος και κατά συνέπεια είναι δυνατή η σχεδίαση του 3D προσομοιώματος.
<p>Show Materials</p> 	Καθορίζονται οι ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων και οι ιδιότητες των “interfaces”.

6.2.1 Create Borehole

Αρχικά πρέπει να οριστεί, με την βοήθεια του “κέρσορα”, το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί “borehole”. Στη συνέχεια ορίζονται τα χαρακτηριστικά, όπως περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα.



Όπως είναι γνωστό το προσομοίωμα αποτελείται από 2 οριζόντιες στρώσεις. Η πρώτη φτάνει σε βάθος 17m. Η δεύτερη στρώση ορίζεται μέχρι το τελικό βάθος του προσομοιώματος (60m). Το μέγεθος του προσομοιώματος είναι τέτοιο που τα άκρα του να μην επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή “head” που αφορά την στάθμη του υπόγειου υδροφορέα. Η στάθμη αυτή τοποθετείται στο κάτω όριο του προσομοιώματος διότι οι αναλύσεις πραγματοποιούνται χωρίς παρουσία νερού.

Εικόνα 110 : Plaxis 3D_ Ο καθορισμός των εδαφικών στρώσεων με το βάθος.

Soil layers		Water	Initial conditions	Surfaces	Field data
Layers			Borehole_1		
#	Water conditions	P_{top}	P_{bottom}		
1	Dry	0.000	0.000		
2	Dry	0.000	0.000		

Εικόνα 111 : Plaxis 3D_O προσδιορισμός των “ξηρών” συνθηκών κατά την προσομοίωση.

Soil layers		Water	Initial conditions	Surfaces	Field data		
Layers							
#	Material	Model	OCR	POP	$K0_x$	$K0_y$	
1	Silty Sand_Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb			0.5000	0.5000	
2	Sandy Silt_Mohr-coulomb	Mohr-Coulomb			0.5933	0.5933	

Εικόνα 112 : Plaxis 3D_O προσδιορισμός των “initial conditions” κατά την προσομοίωση.




6.2.2 Show Materials

Με την επιλογή της εντολής είναι δυνατός προσδιορισμός των παραμέτρων των εδαφικών στρώσεων, όπως αυτές ορίζονται στο Κεφάλαιο 3 “ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ” σελ.23.

6.3 MODELLING STRUCTURES – STRUCTURE MODE

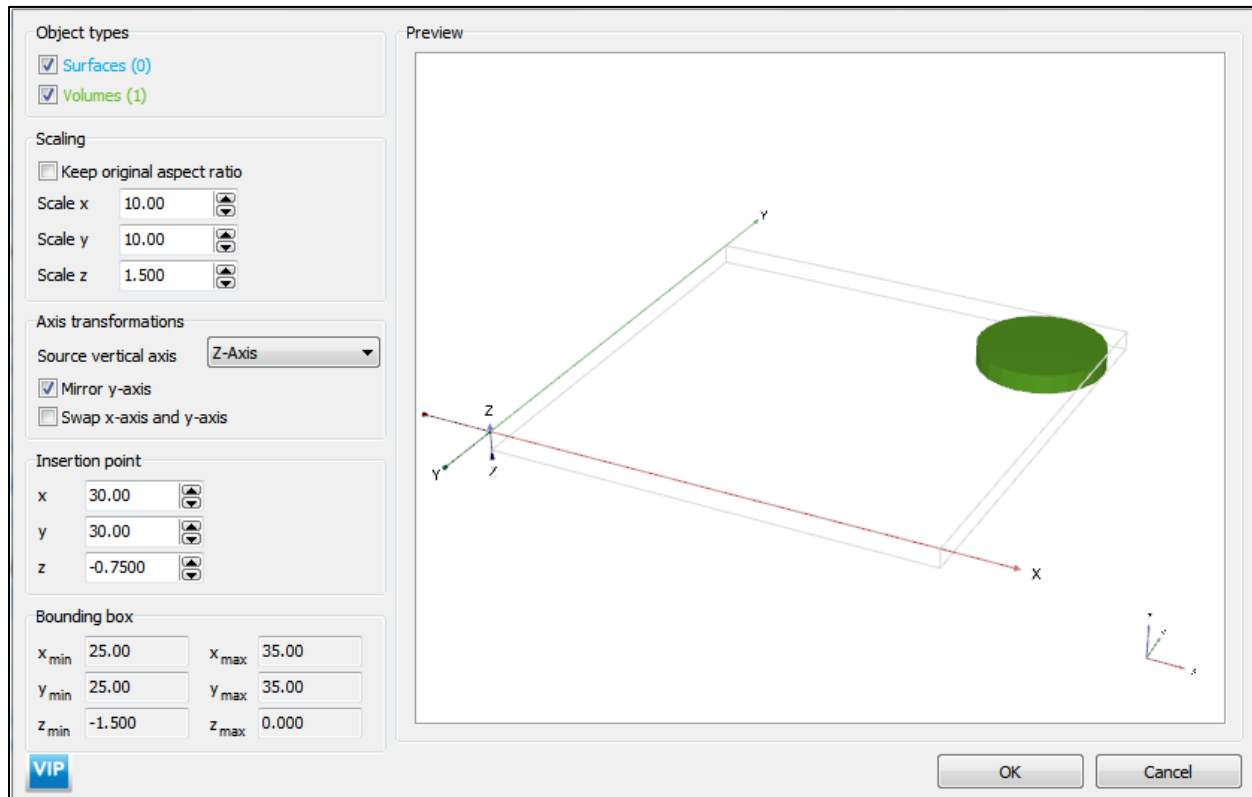
Λόγω της γεωμετρικής απλότητας του κατακορύφου κυλινδρικού φρέατος, η εισαγωγή του στο πρόγραμμα γίνεται μέσω τις βάσης δεδομένων του Plaxis 3D εκτελώντας συγκεκριμένες εντολές, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Πίνακας 31 : Plaxis 3D_Οι βασικές εντολές τις ενότητας “structure mode”.

INPUT COMMANDS FOR STRUCTURE MODE	
Import Structures 	Με την επιλογή εισάγεται στο πρόγραμμα το κατάλληλο γεωμετρικό σχήμα για την σχεδίαση του κυλινδρικού φρέατος.
Array 	Πρόκειται για ένα “drawing tool” με το οποίο είναι δυνατή η σχεδίαση των “clusters”, όπως περιγράφεται παρακάτω.
Show Materials 	Καθορίζονται οι ιδιότητες των “plates”.

6.3.1 Import Structures

Αρχικά πραγματοποιείται η εισαγωγή του κυλίνδρου με “file name: example_cylinder_vertical_D1h1_centered”. Πρόκειται για αρχείο το οποίο είναι αποθηκευμένο στον “folder:Program files_Plaxis_Plaxis 3D_Importables”. Τα χαρακτηριστικά του γεωμετρικού στοιχείου καταγράφονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 113: Plaxis 3D_H εισαγωγή του στοιχειώδους κυλινδρικού στοιχείου για την σχεδίαση του προσομοιώματος.

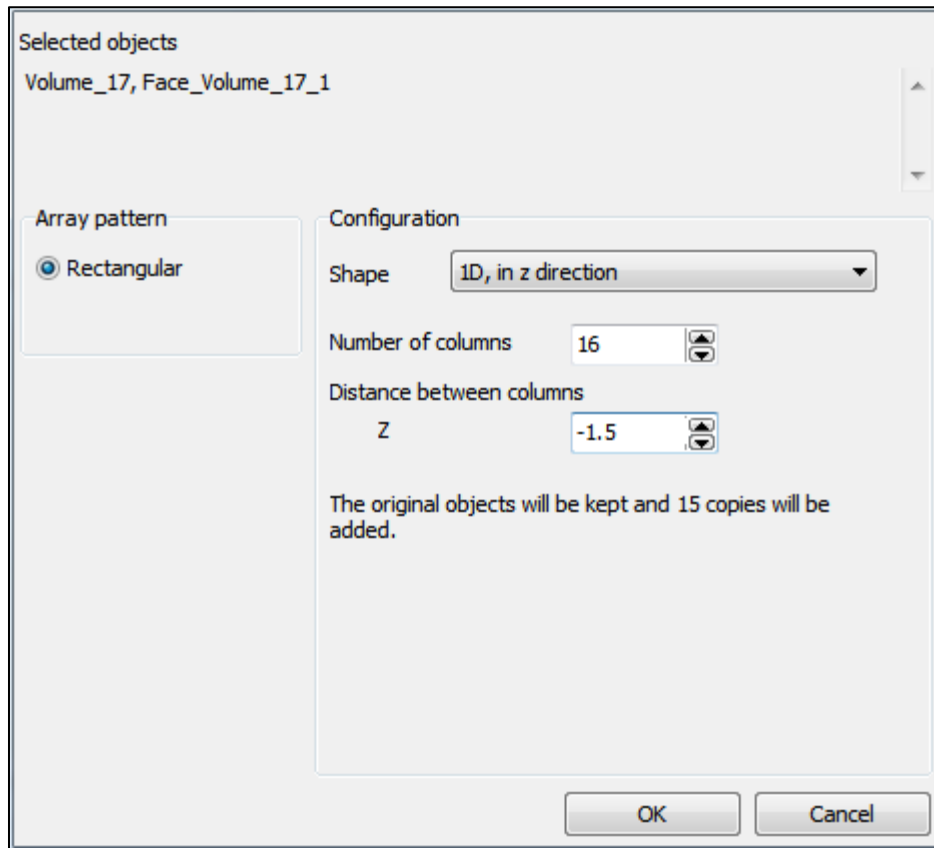
Πατώντας “δεξί κλικ” εμφανίζεται η εντολή “Decompose into surfaces”. Μετά την εκτέλεση τις εντολής το κυλινδρικό αυτό στοιχείο αποτελείται από την άνω επιφάνεια (η οποία είναι ασήμαντη και παραλείπεται), την κάτω επιφάνεια (η οποία θα αποτελέσει τον πυθμένα του φρέατος), την πλευρική κυλινδρική επιφάνεια (η οποία αποτελεί την “segmental lining”) και τον εσωτερικό όγκο (ο οποίος αποτελεί τον εδαφικό όγκο ο οποίος αφαιρείται σε κάθε φάση προσομοίωσης). Στην συνέχεια δίνονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στα στοιχεία που αναφέρονται παραπάνω, δηλαδή:

- ❖ Πατώντας “δεξί κλικ” στην πλευρική επιφάνεια εκτελείται η εντολή “create plate” επομένως είναι δυνατή η προσομοίωση του “segmental lining” επιλέγοντας “set material_lining”. Στη συνέχεια πατώντας και πάλι “δεξί κλικ” στις εντολές “create positive interface” και “create negative interface” είναι δυνατή η προσομοίωση των διεπιφανειών τις κατακόρυφες παρειές της εκσκαφής του φρέατος.
- ❖ Επιλέγοντας την κατώτερη επιφάνεια, και χρησιμοποιώντας το “Selection explorer” της περιοχής σχεδίασης του Plaxis 3D είναι δυνατός ο πλήρης ορισμός των συντεταγμένων της δηλαδή ($x=30m$, $y=30m$, $z=-24.0m$)

- ❖ Επιλέγοντας τον εσωτερικό όγκο είναι δυνατός ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του, όπως δίνονται στο Κεφάλαιο 3 “ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ” σελ.23.

6.3.2 Array

Η τελική μορφή του φρέατος διαμορφώνεται με την εκτέλεση της εντολής “array” .



Εικόνα 114 : Plaxis 3D_H εντολή “array” με την οποία είναι δυνατή η σχεδίαση των στοιχείων μέχρι το βάθος των 24m.





6.3.3 Show Materials

Με την εντολή είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμέτρων των “volume clusters” εσωτερικά του φρέατος αλλά και των “plates”, όπως ορίζονται στο Κεφάλαιο 3 “ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ” σελ.23.

6.4 MESH GENERATION – MESH MODE

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται η “γέννηση” του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων, με τις κυριότερες εντολές της ενότητας να είναι αυτές που ακολουθούν.

Πίνακας 32 : Plaxis 3D_Οι βασικές εντολές της ενότητας “mesh mode”.

INPUT COMMANDS FOR MESH MODE	
<p>Refine mesh</p> 	<p>Πραγματοποιείται “πύκνωση” των πεπερασμένων στα σημεία ενδιαφέροντος. Η “πύκνωση” αυτή πραγματοποιείται με την επιλογή του επιθυμητού όγκου με “αριστερό κλικ” και μόνο. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει χρήση τις περιοχής σχεδίασης “selection explorer” του Plaxis 3D και καθορισμό τις επιθυμητής τιμής του “fineness factor”. Οι διαφορετικοί χρωματισμοί του προσομοιώματος υποδεικνύουν τις διαφορετικές τιμές του “fineness factor” για κάθε “cluster”.</p>
<p>Generate mesh</p> 	<p>Πραγματοποιείται η τελική επιλογή των παραμέτρων πριν την “γέννηση” του προσομοιώματος. Στις αναλύσεις επιλέγεται “element distribution_fine”.</p>
<p>View mesh</p> 	<p>Απεικονίζεται το προσομοίωμα πριν την επίλυση του. Ορισμένες χαρακτηριστικές λεπτομέρειες απεικονίζονται παρακάτω.</p>
<p>Select points for curves</p> 	<p>Επιλέγονται τα “nodes” και “stress points” για την χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών. Η επιλογή τους γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα με εκείνα των 2D αναλύσεων.</p>

Πίνακας 33 : Plaxis 3D_Analysis N°1 – Οι πέντε κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “ Load-Displacement Curves”.

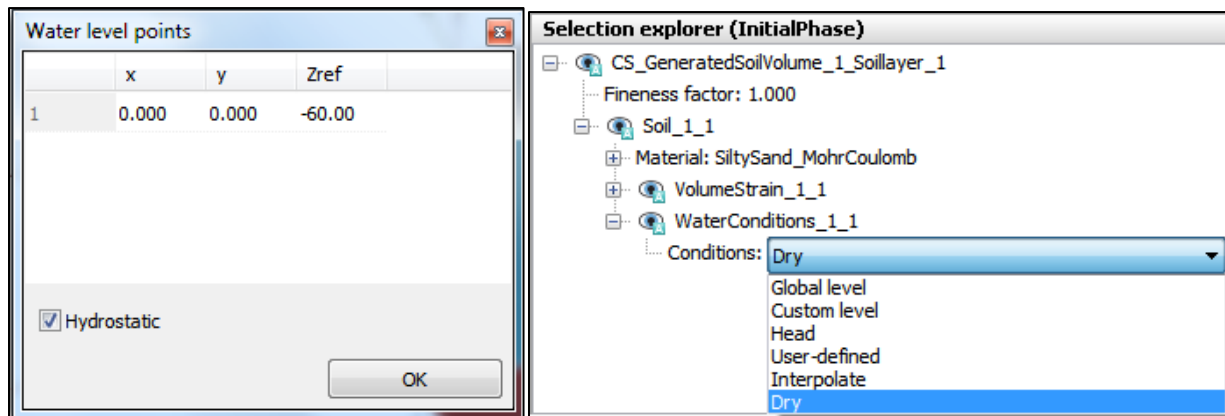
Plaxis 3D_Analysis N°1 - Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (+30.37m , +40.30m , 0.0m)	Σημείο στην επιφάνεια ≈5.5m μακριά από την παρειά της εκσκαφής όπου ενδεχομένως να υφίστανται κτίρια.
Node B (+30.83m , +45.60m , 0.0m)	Σημείο στην επιφάνεια ≈10m μακριά από την παρειά της εκσκαφής όπου ενδεχομένως να υφίστανται κτίρια.
Node C (30.00m , +30.00m , -24.0m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node D (+30.01m , +35.41m , -24.35m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων (plastic points).

Node E (+30.0m , +35.0m , -21.75m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”. Ιδιαίτερα δυσμενής φάση προσομοίωσης και σημείο με αυξημένες μετακινήσεις.
---	--

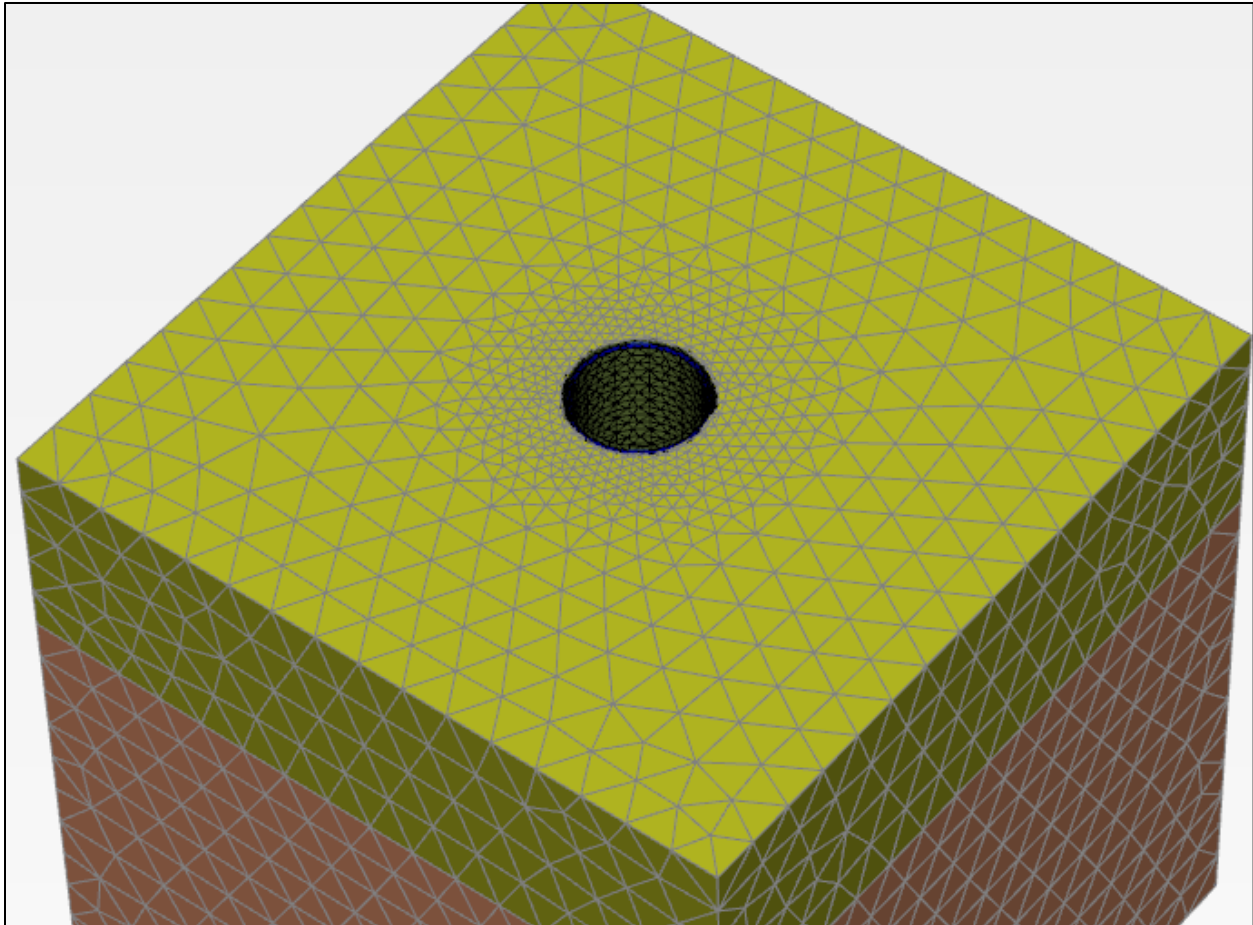
Πίνακας 34 : Plaxis 3D_Analysis N°1 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

Plaxis 3D_Analysis N°1 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point K (+30.08m , +37.89m , 24.26m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point L (+30.28m , +30.03m , -24.6m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.
Stress point M (+30.10m , +35.52m , -21.72m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”.

Σημειώνεται ότι πρίν την έναρξη των υπολογισμών (“calculations”) ορίζεται το επίπεδο του υπόγειου υδροφορέα. Η ανάλυση γίνεται υπό “ξηρές” συνθήκες επομένως εκτελώντας την εντολή “create water level” τίθενται οι συντεταγμένες του επιπέδου σε βάθος 60m. Εναλλακτικά επιλέγονται οι εδαφικοί όγκοι και μέσω του “selection explorer” επιλέγεται “water conditions_conditions_dry”.



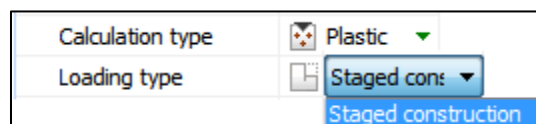
Εικόνα 115 : Plaxis 3D_ Ο καθορισμός των “ξηρών συνθηκών” για το προσομοίωμα κατά το στάδιο “water levels”.



Εικόνα 116 : Plaxis 3D_Ο “κάνναβος” πεπερασμένων στοιχείων όπως προκύπτει από το “mesh mode”.

6.5 CALCULATIONS

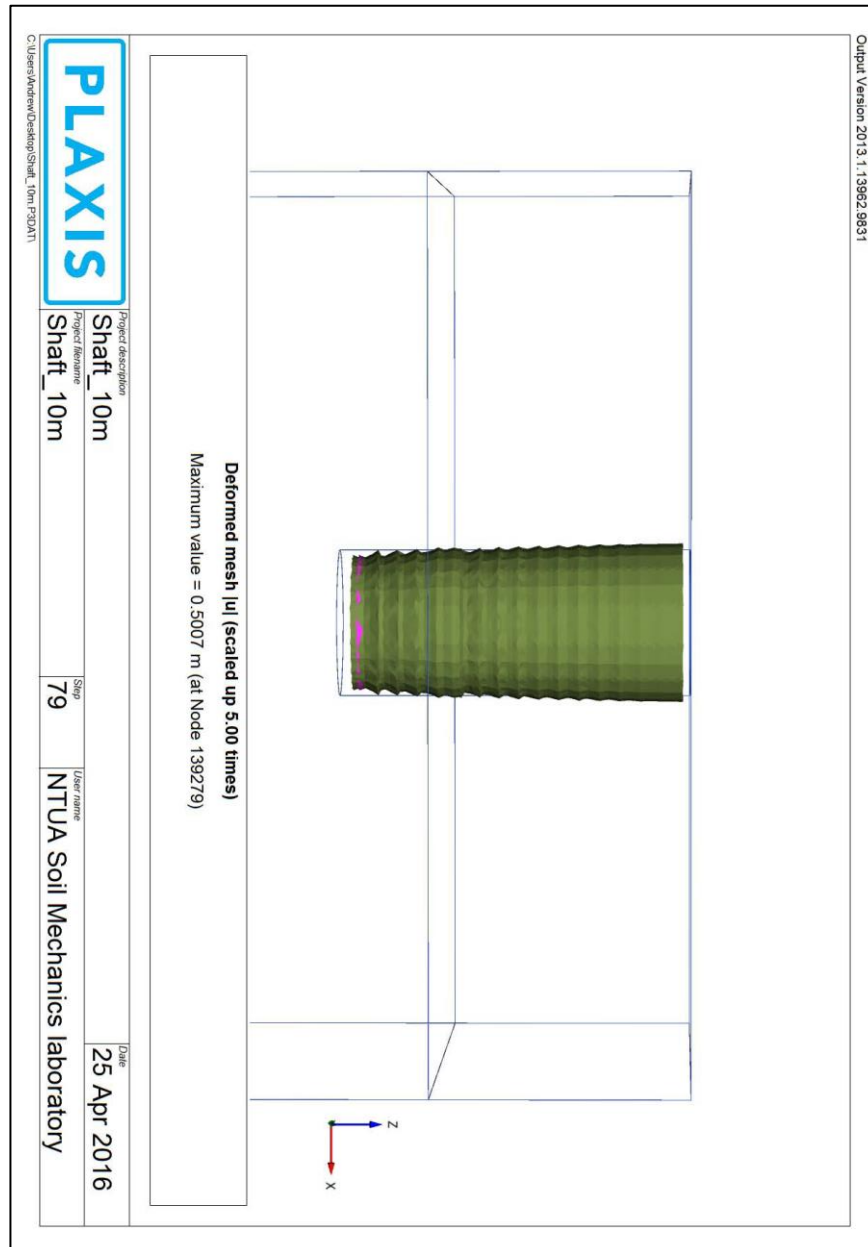
Μετά τον καθορισμό των φάσεων προσομοίωσης , όπως περιγράφονται στην ενότητα “3.6 STAGED CONSTRUCTION” σελ. 28, ακολουθεί το στάδιο των υπολογισμών. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία διατηρώντας τις αυτόματες επιλογές του Plaxis 3D και επιπλέον τις επιλογές που περιγράφονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 117 :Plaxis 3D_ Οι απαραίτητες επιλογές στο στάδιο “Staged Construction” πριν την έναρξη των “Calculations”.

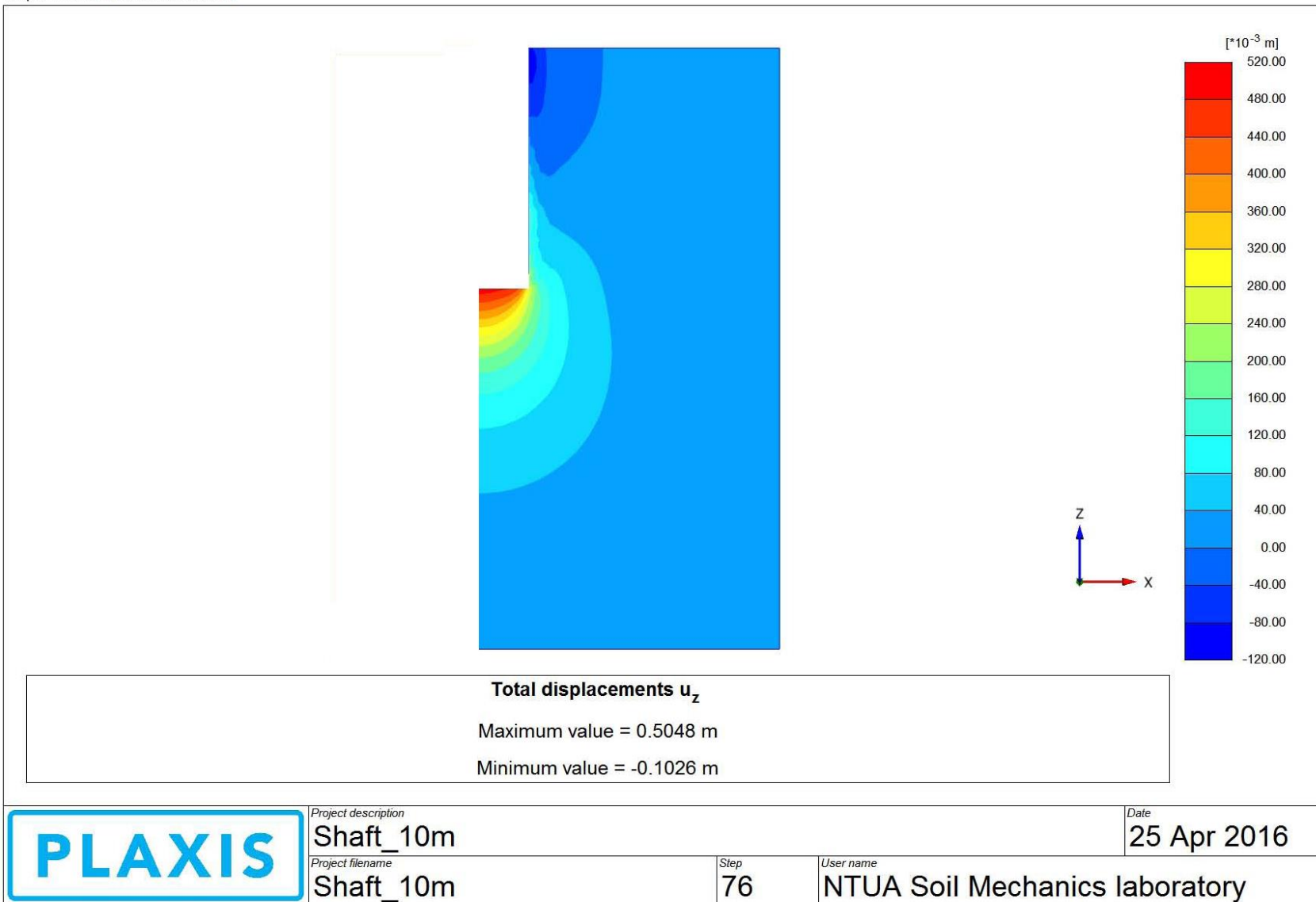
6.6 OUTPUT DATA

Παρατίθενται τα αποτελέσματα της τριδιάστατης ανάλυσης σε μορφή 3D απεικονίσεων ώστε να είναι δυνατή η καλύτερη κατανόηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του φρέατος. Επιπλέον, για να καταστή δυνατή η καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μια κατακόρυφη τομή που περνά από το κέντρο του φρέατος (με την βοήθεια της εντολής “vertical cross section” του “Output Plaxis 3D”).



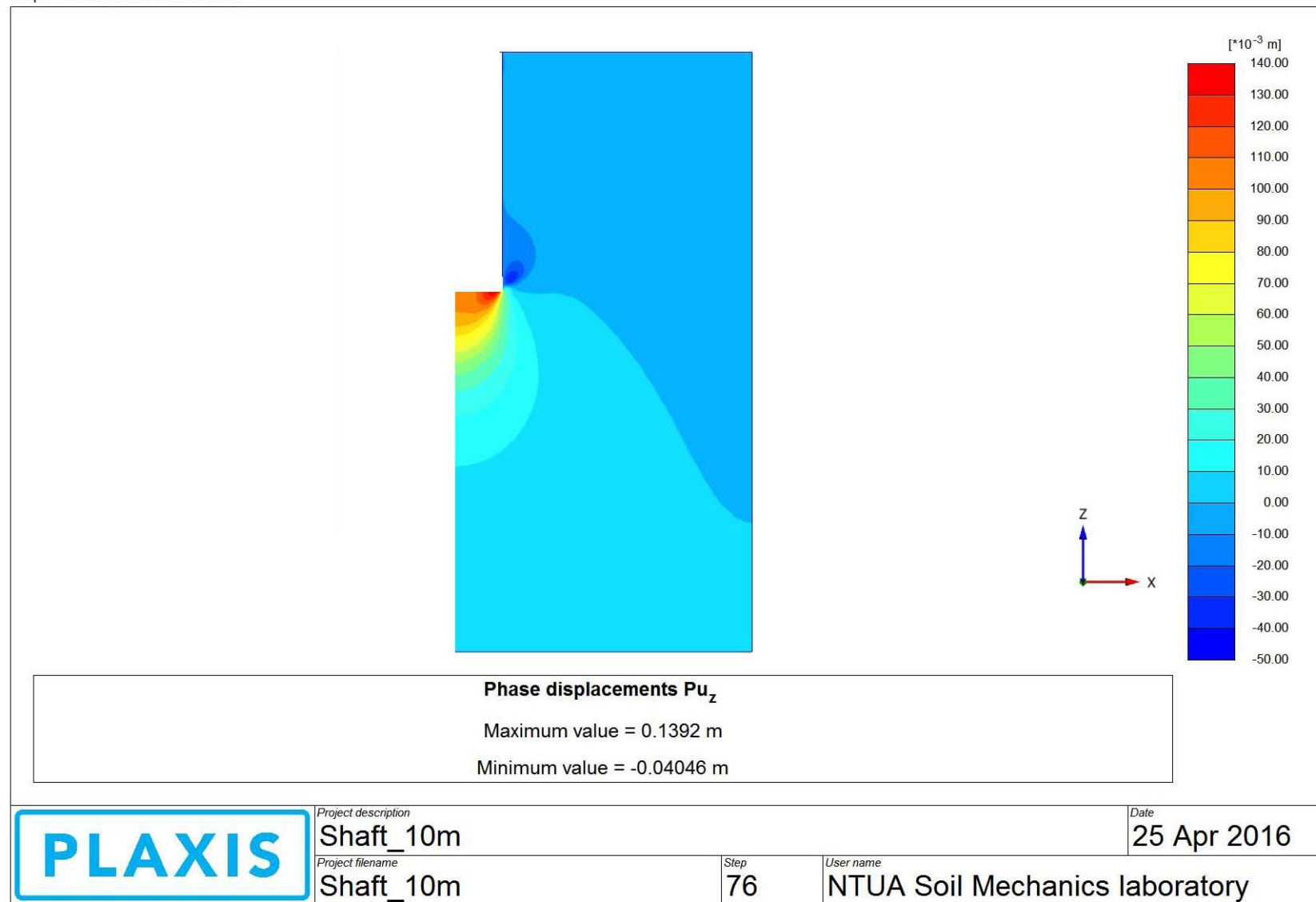
Εικόνα 118 : Plaxis 3D_ Analysis N^o1 - Ο “παραμορφωμένος κάρναβος” πεπερασμένων στοιχείων μετά την 17^η φάση προσομοίωσης (τελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831



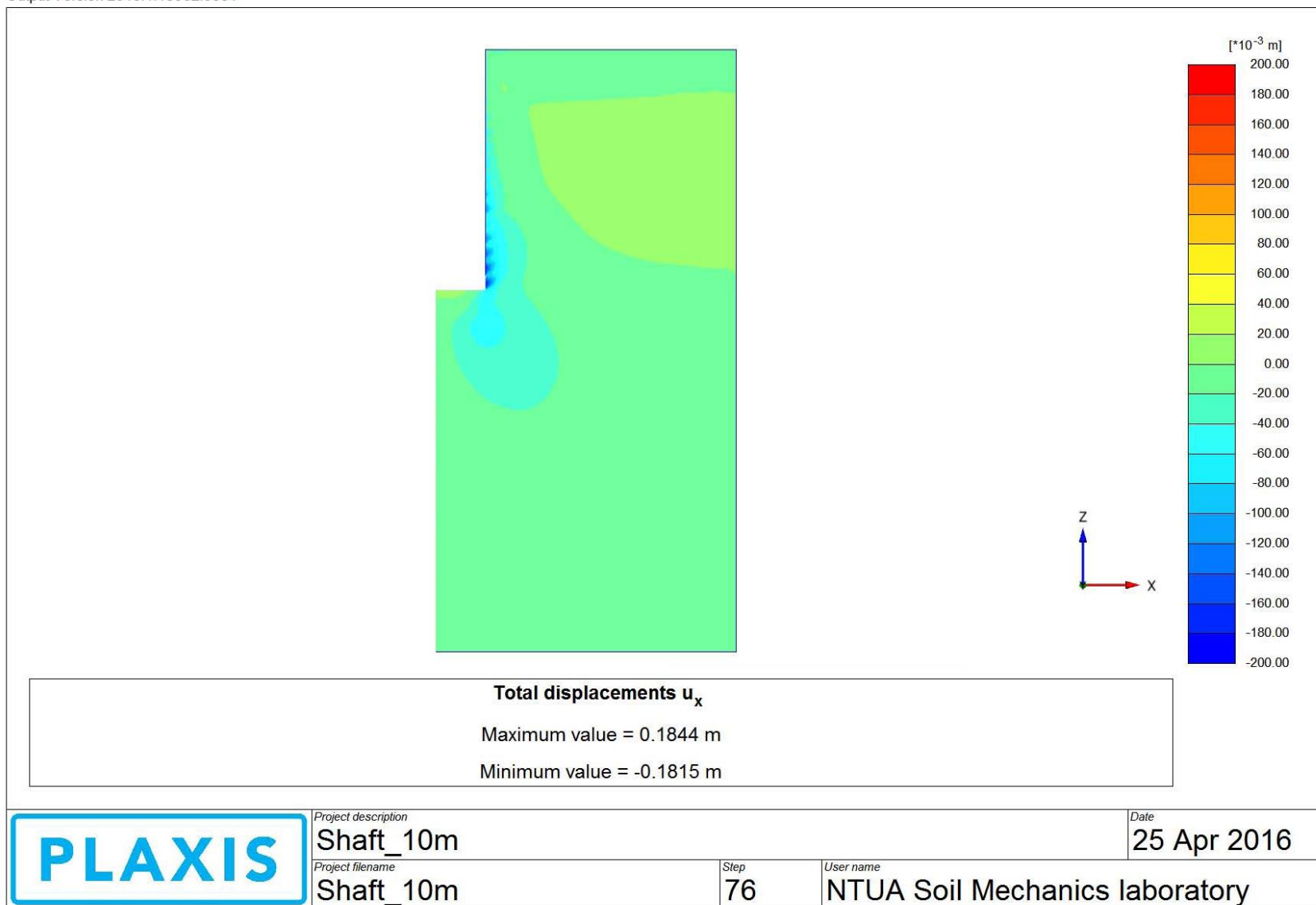
Εικόνα 119 : Plaxis 3D_ Analysis N^o1 : Η ανύψωση πυθμένα και η καθίζηση της επιφανείας μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831



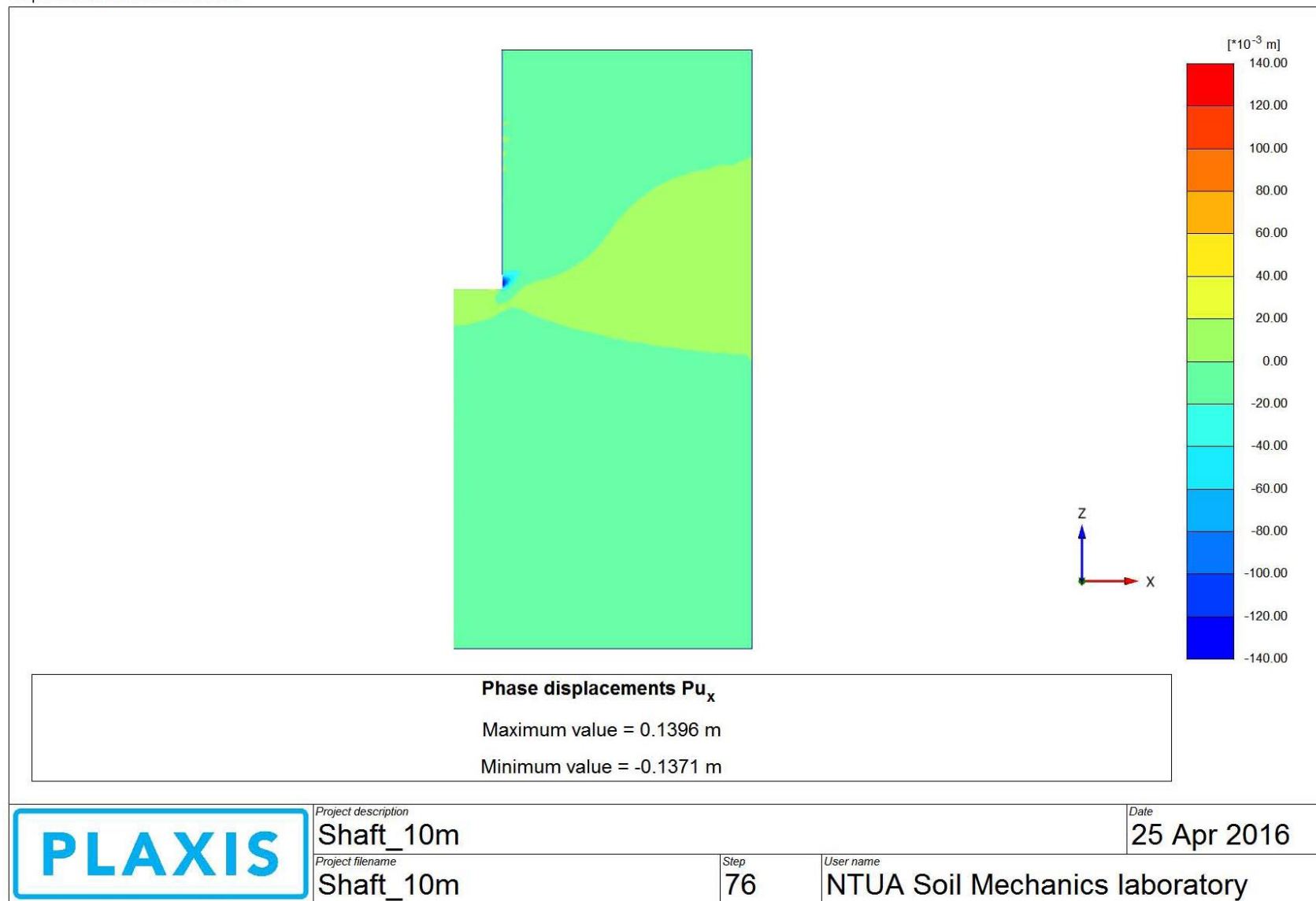
Εικόνα 120 : Plaxis 3D_Analysis N°1 - Η προσαύξηση των κατακόρυφων μετακινήσεων μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831

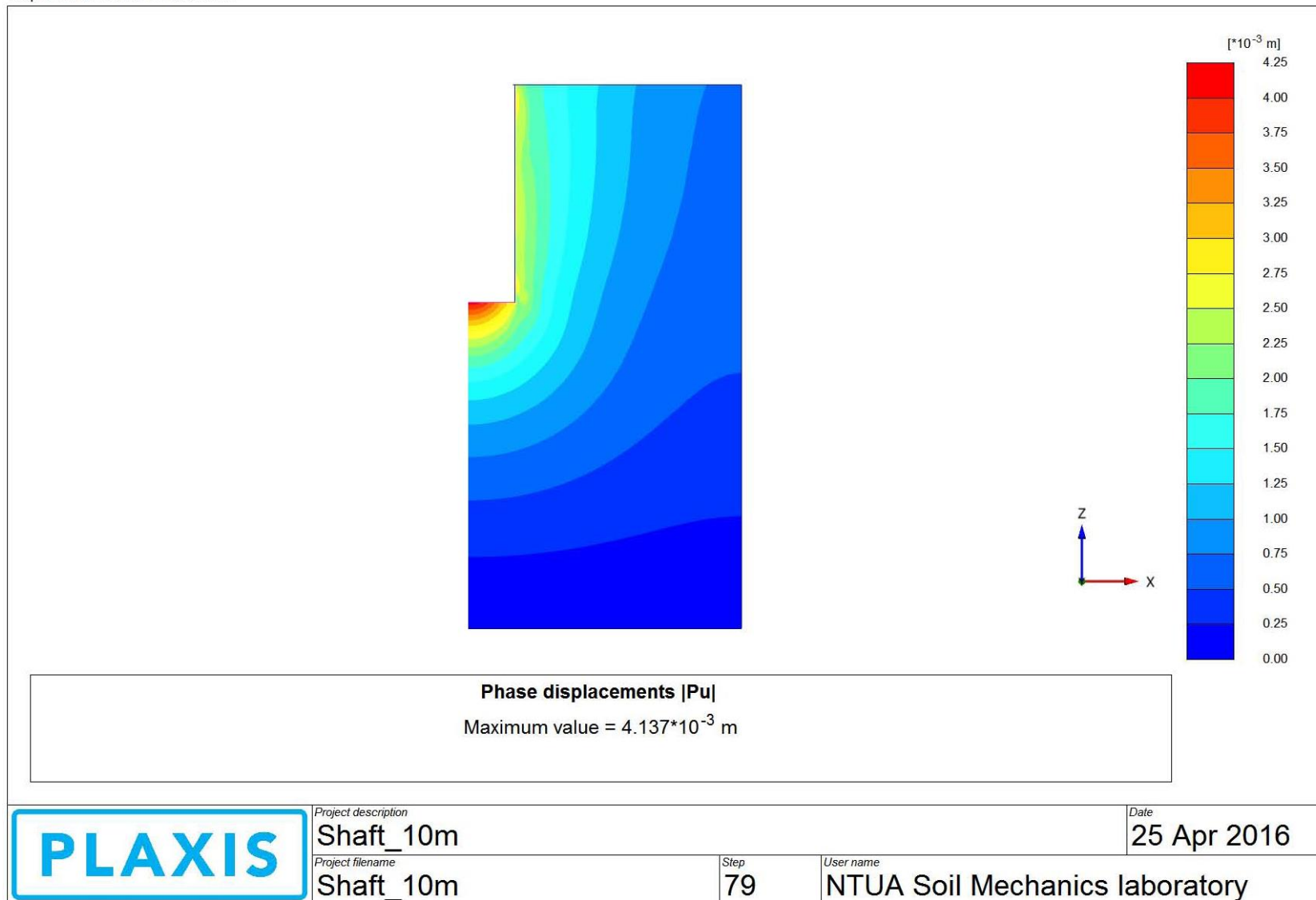


Εικόνα 121: Plaxis 3D_ Analysis N^o1 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831

Εικόνα 122 : Plaxis 3D_ Analysis N^o1 - Η προσαύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

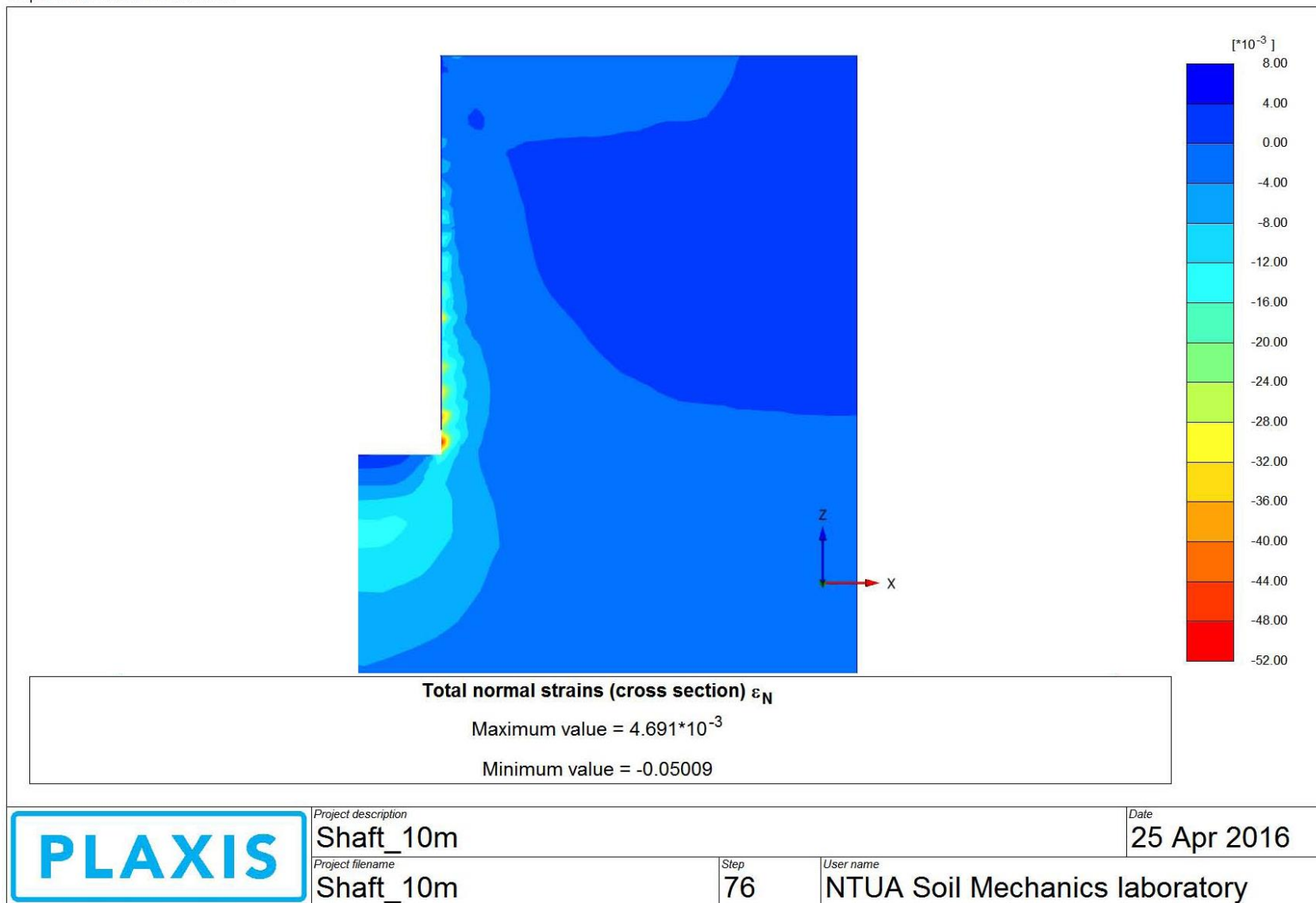
Output Version 2013.1.13962.9831



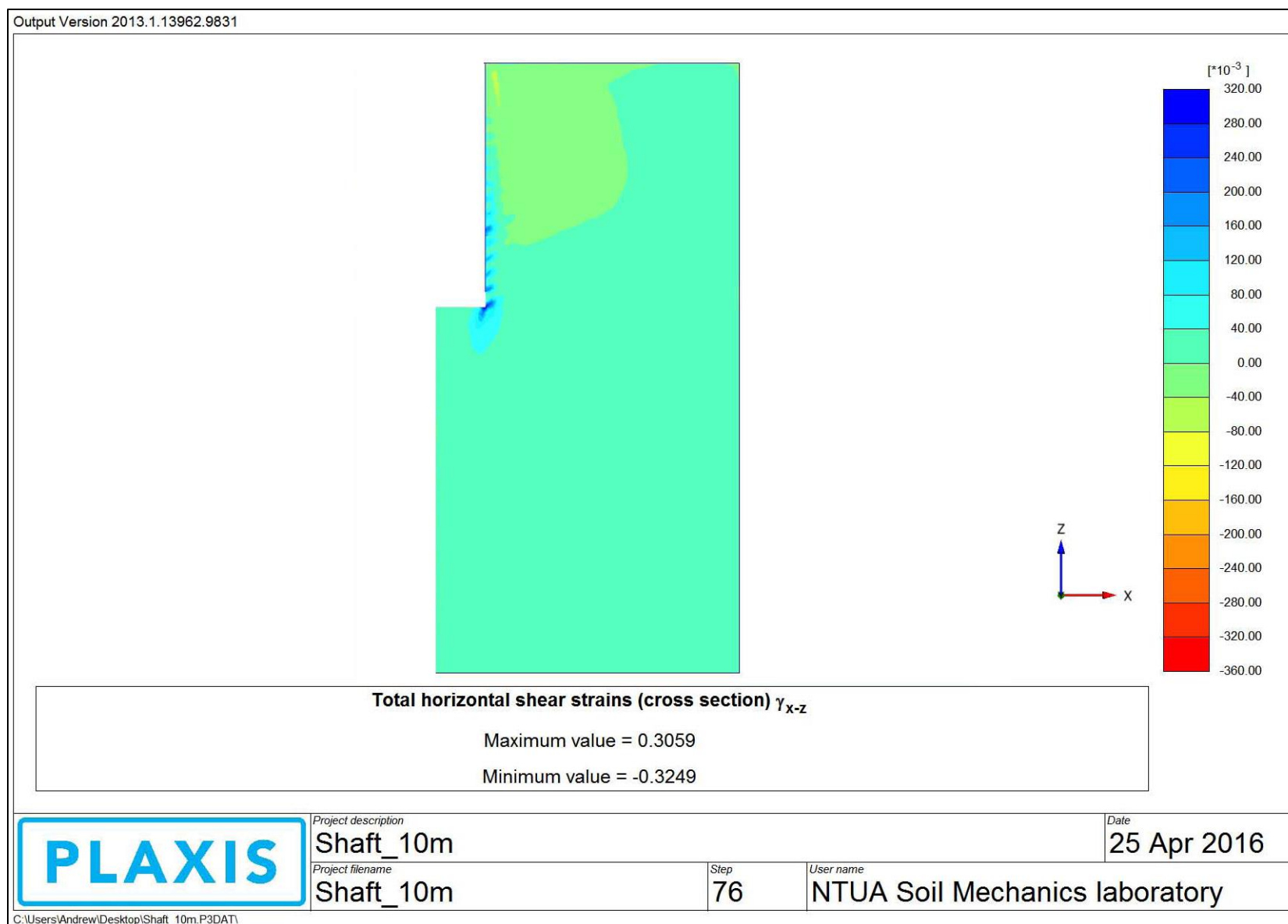
C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_10m.P3DAT\

Εικόνα 123 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Η προσαύξηση των ολικών μετακινήσεων μετά την 17^η φάση προσομοίωσης (τελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831

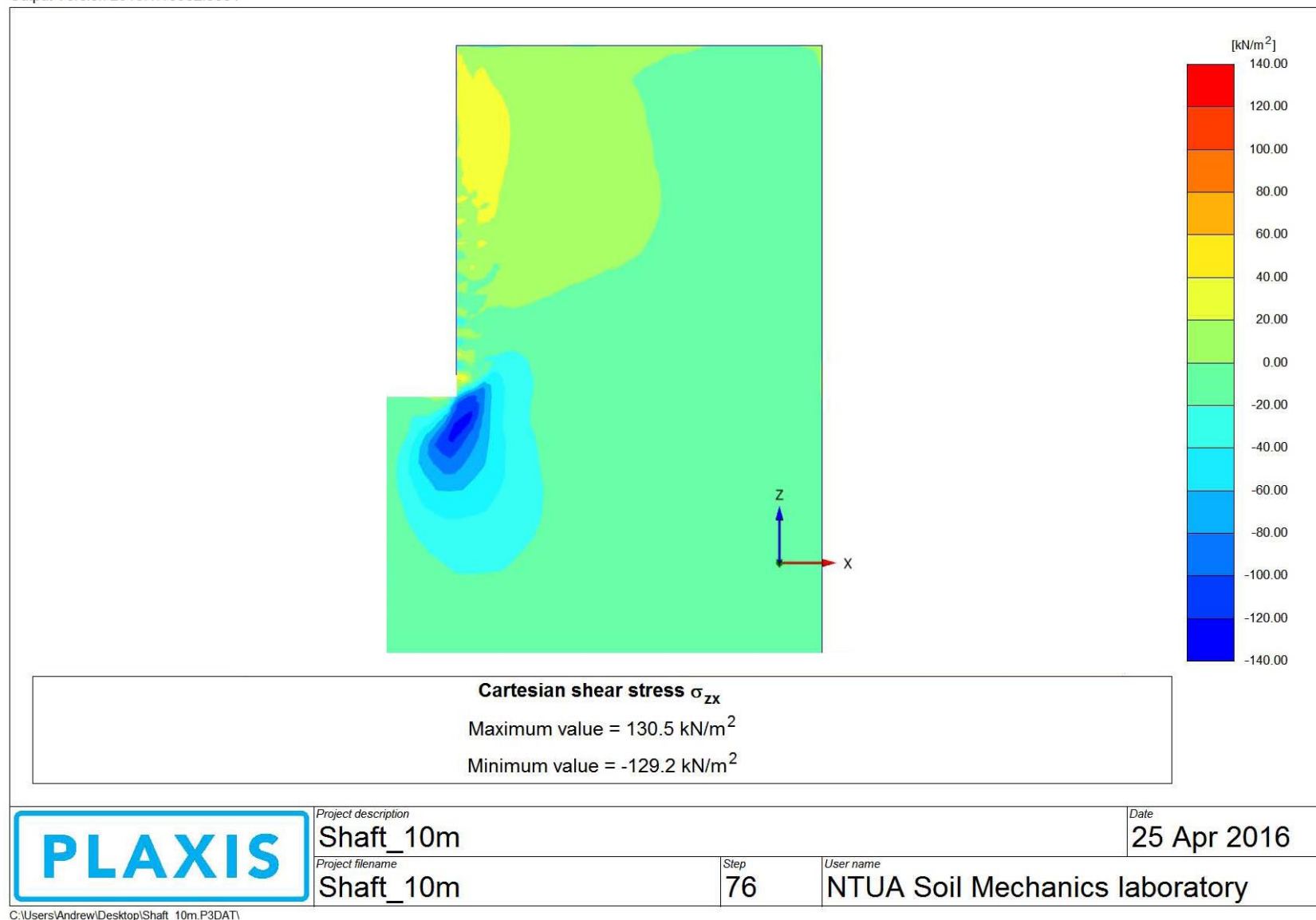


Εικόνα 124 : Plaxis 3D_Analysis N°1 - Οι ορθές τροπές περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

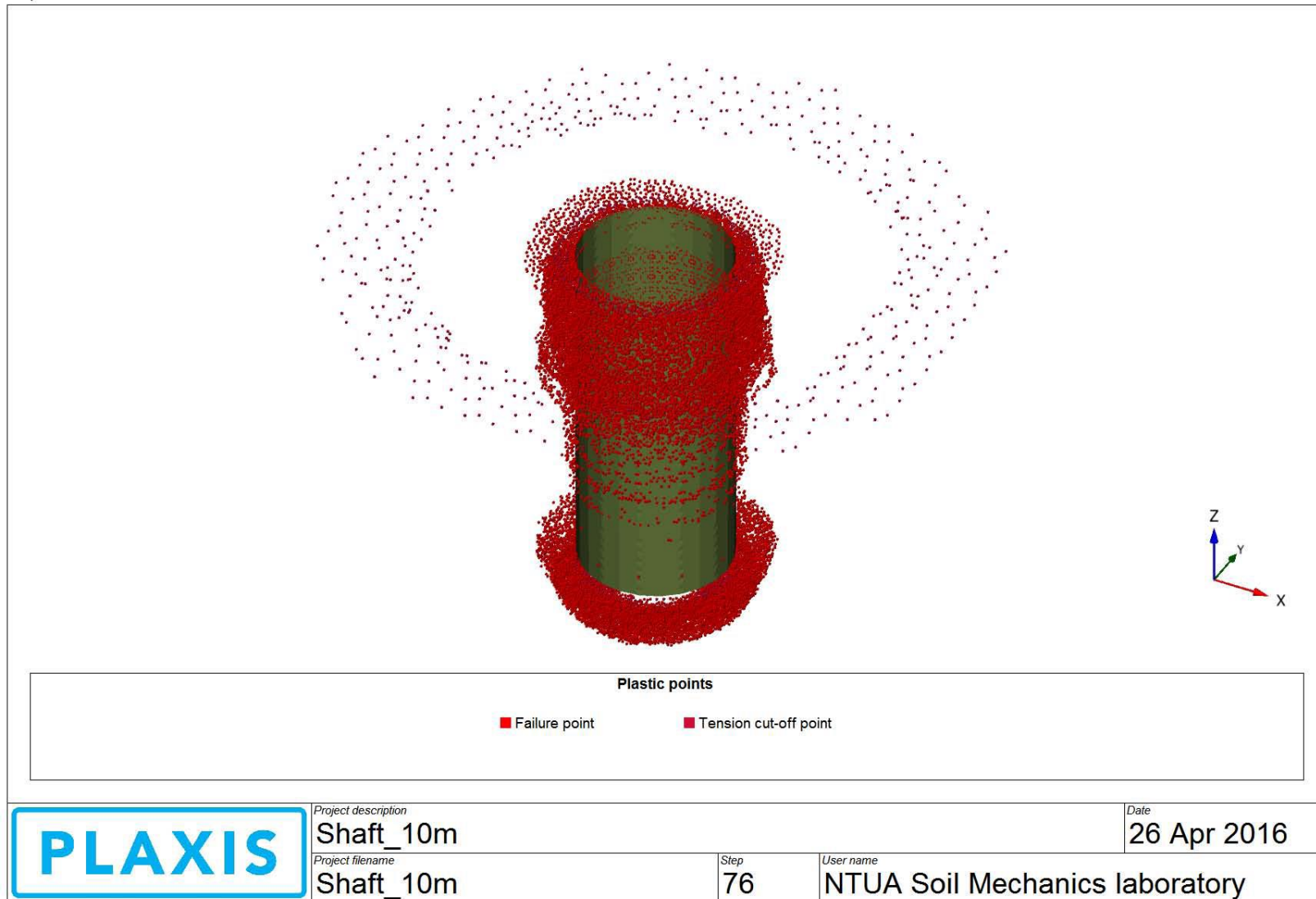


Εικόνα 125 : Plaxis 3D_Analysis N^o1 - Οι διατμητικές παραμορφώσεις περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831

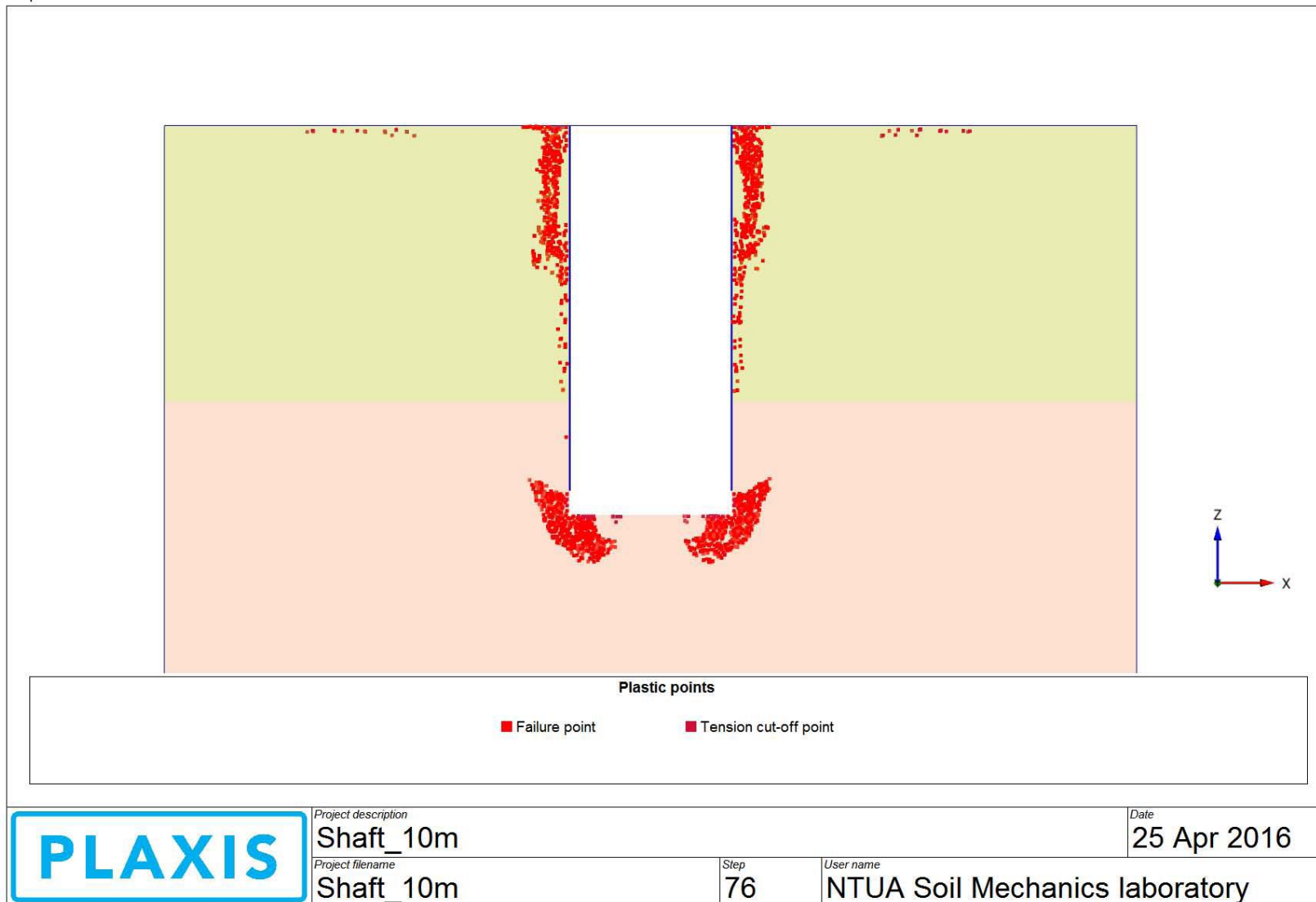
Εικόνα 126 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 - Οι διατμητικές τάσεις περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831



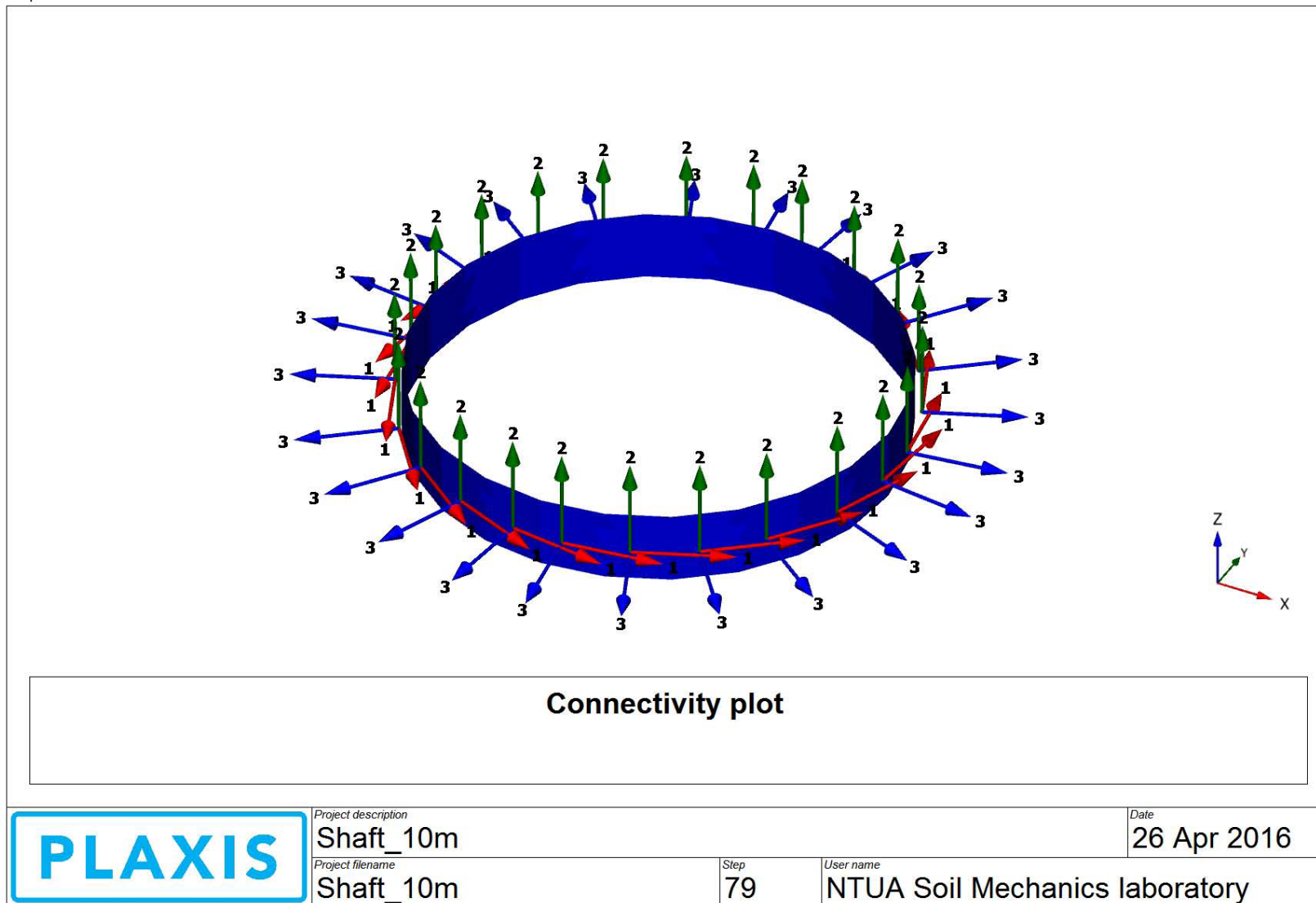
Εικόνα 127 : Plaxis 3D_ Analysis N^o1 - Τα σημεία αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831



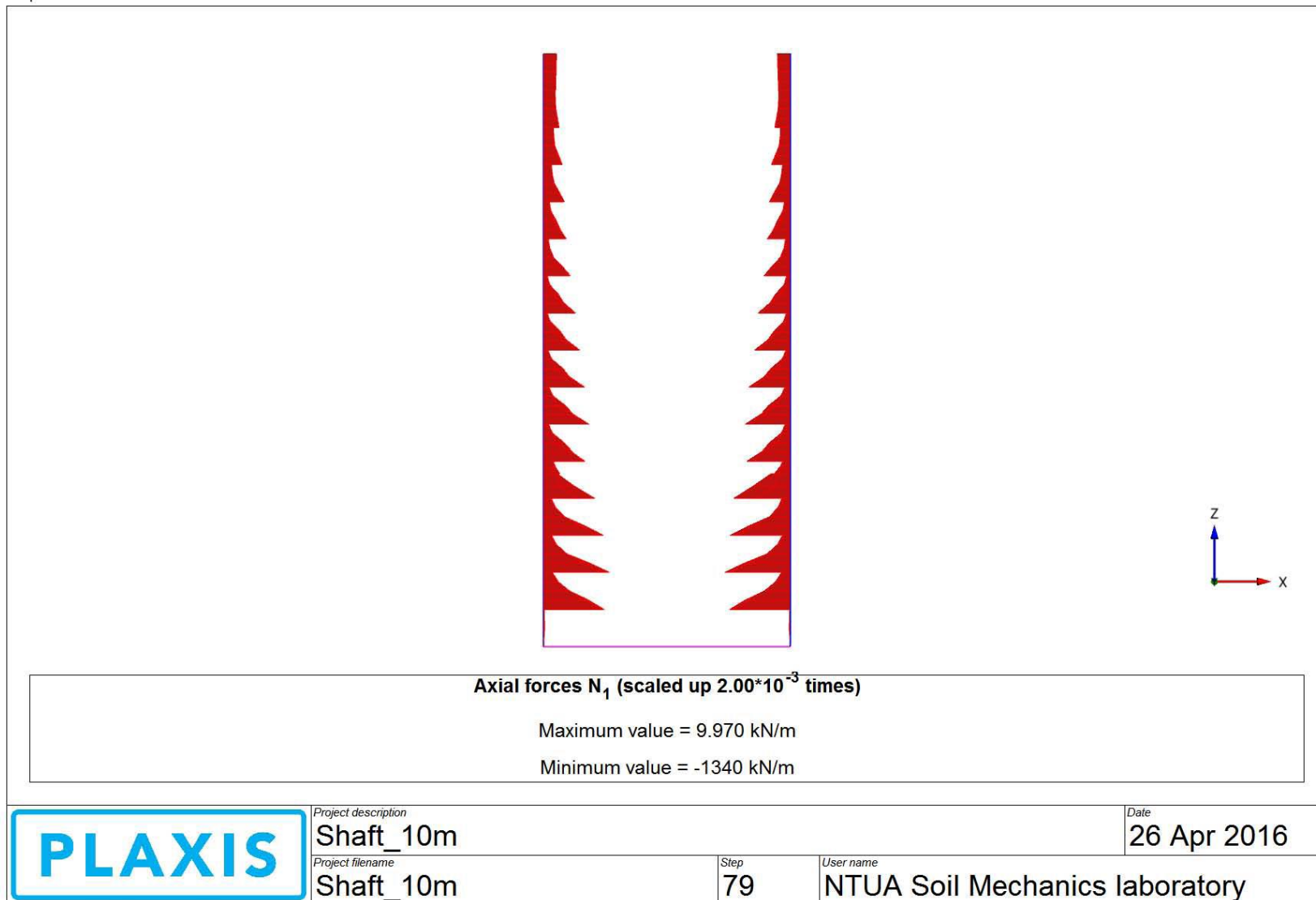
Εικόνα 128 : Plaxis 3D_Analysis N°1 - Απεικόνιση-σε τομή των σημείων αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 16^η φάση προσομοίωσης (προτελευταία φάση).

Output Version 2013.1.13962.9831



Εικόνα 129 : Plaxis 3D_ Analysis N°1 – Οι τοπικοί άξονες σύμφωνα με τους οποίους χαρακτηρίζονται τα εντατικά μεγέθη (M, Q, N, Hoop forces).

Output Version 2013.1.13962.9831

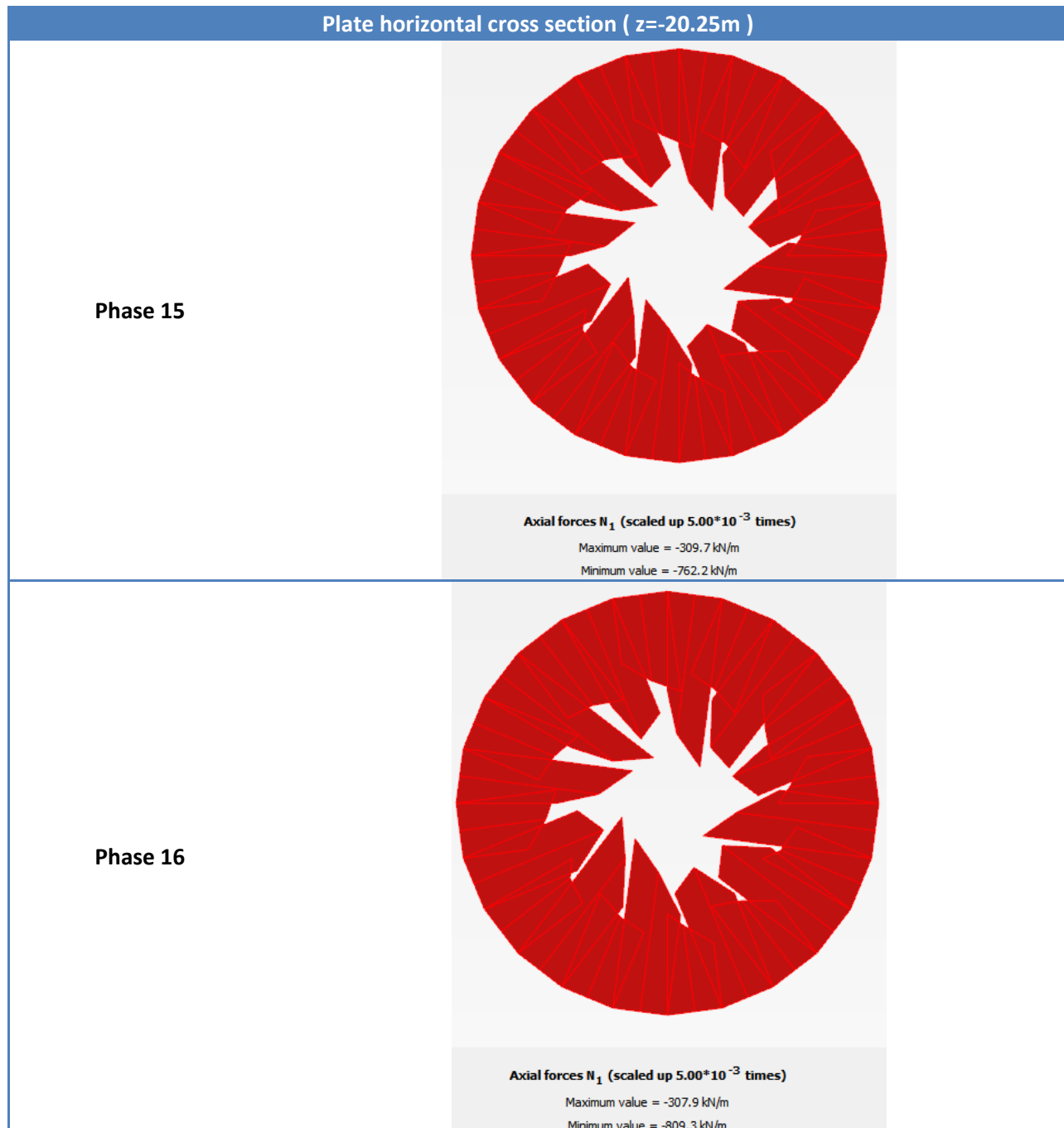


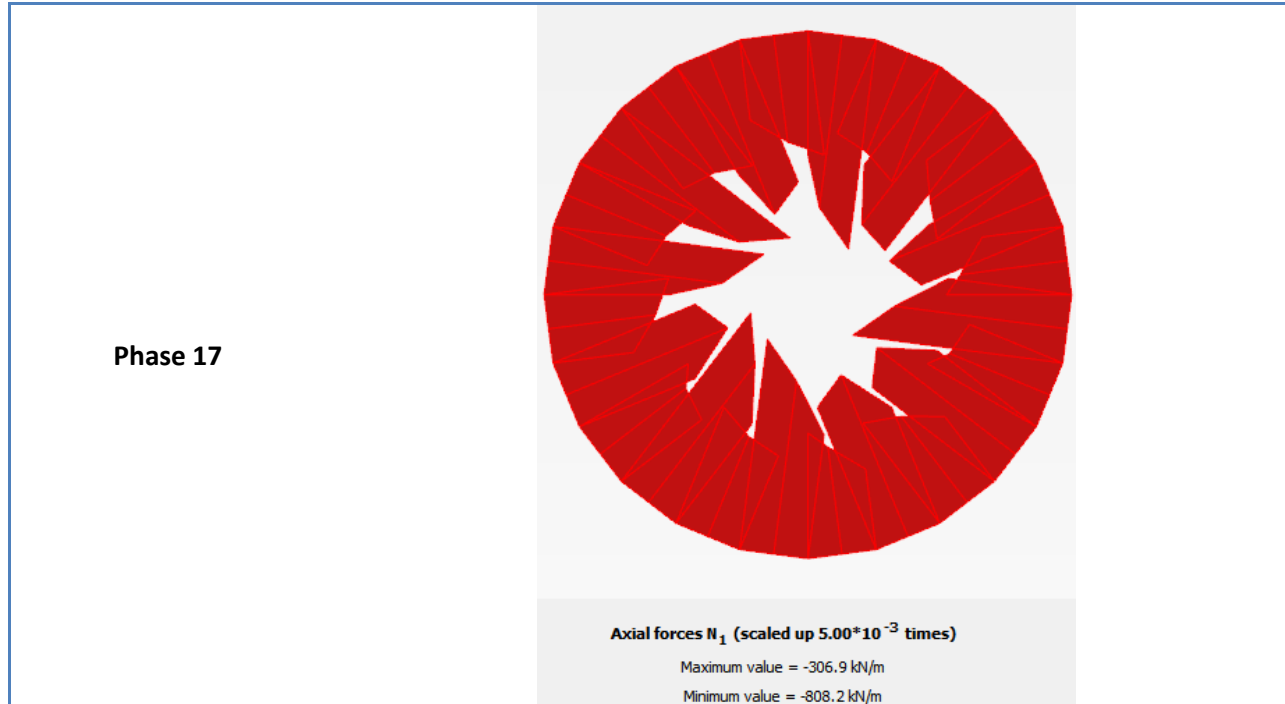
C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_10m.P3DAT1

Εικόνα 130 :Plaxis 3D_ Analysis N°1- Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17)

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του Plaxis 3D Output, παρατίθενται οι “hoop forces” για το “segment” που τοποθετείται κατά την φάση 15 σε υψόμετρο $-19.5\text{m} \div -21.0\text{m}$. Για την ακρίβεια καταγράφονται εκτενώς οι επαπτομενικές δυνάμεις για την οριζόντια τομή που περνά από το μέσο του “segment” δηλαδή σε βάθος -20.25m . Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ακριβής απεικόνιση των εντάσεων που δέχεται η υποστήριξη στον οριζόντιο άξονα. Υπενθυμίζεται ότι τα ανωτέρω μεγέθη υπολογίζονται με βάση το τοπικό σύστημα αξόνων της “Εικόνα 129” σελ.133.

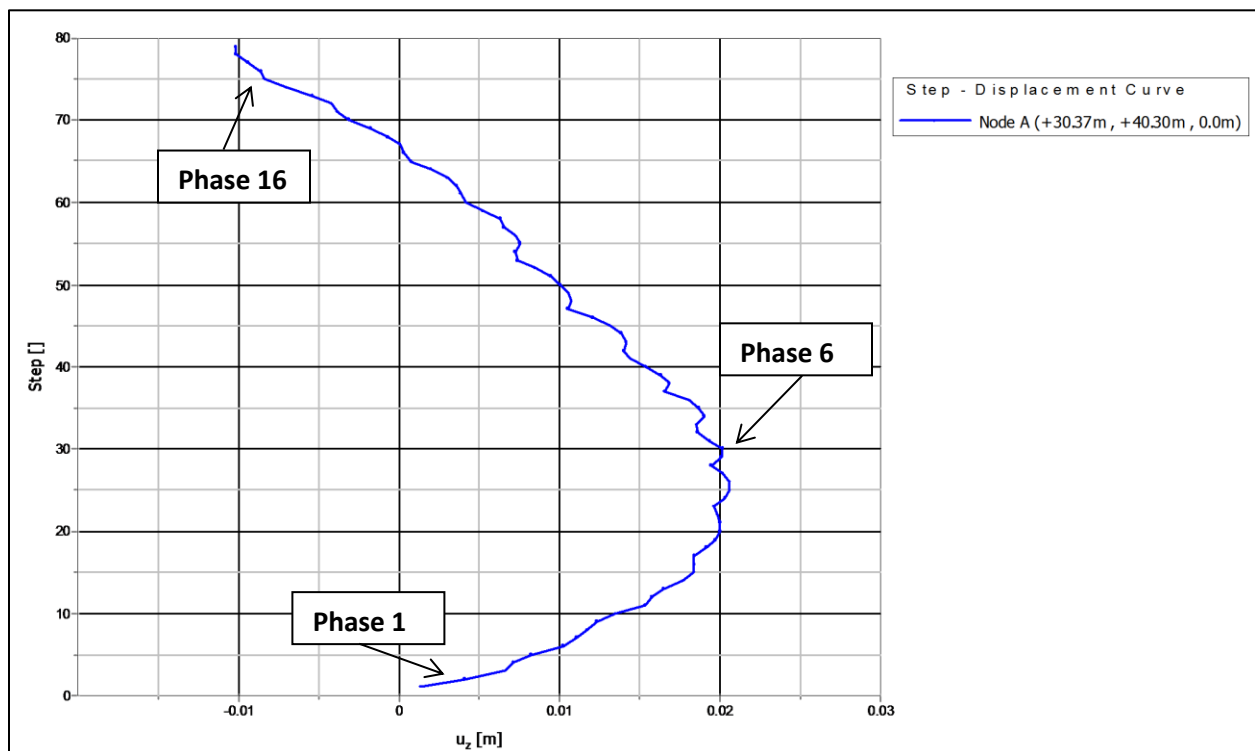
Πίνακας 35 : Plaxis 3D_H κατανομή των “hoop forces” στον οριζόντιο άξονα με την πάροδο των φάσεων προσομοίωσης.



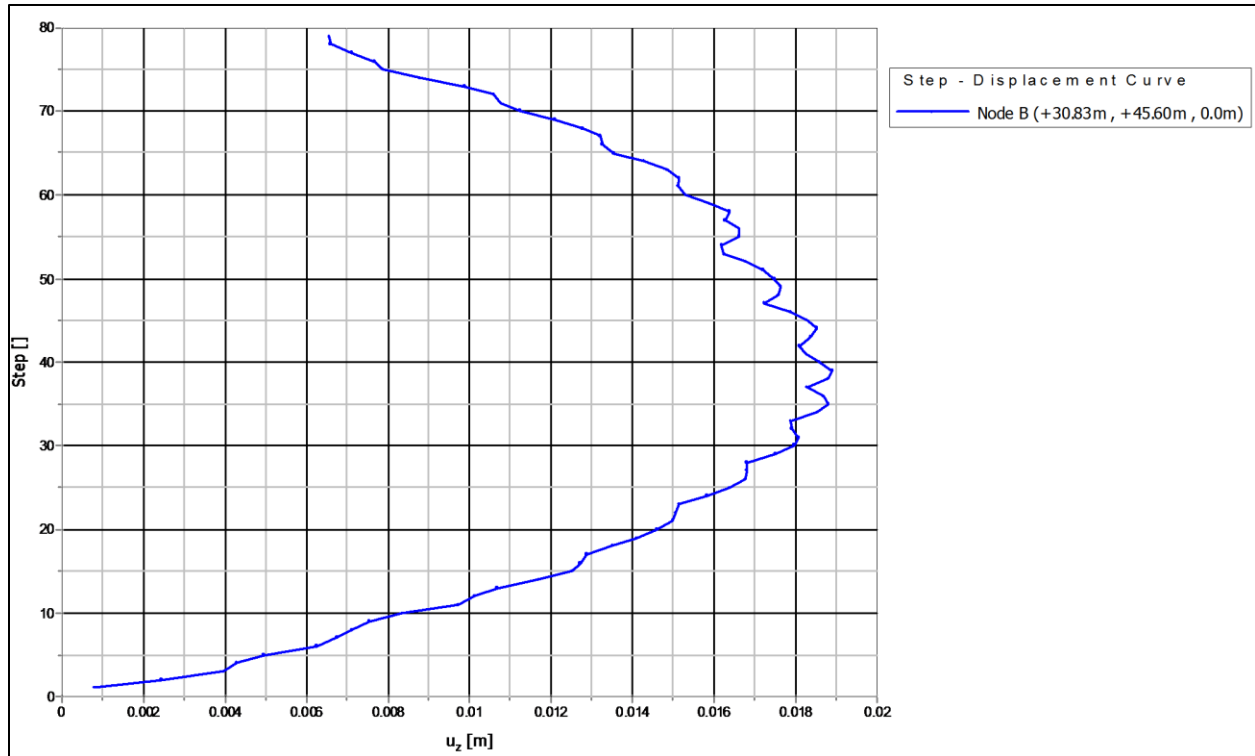


6.7 CURVES

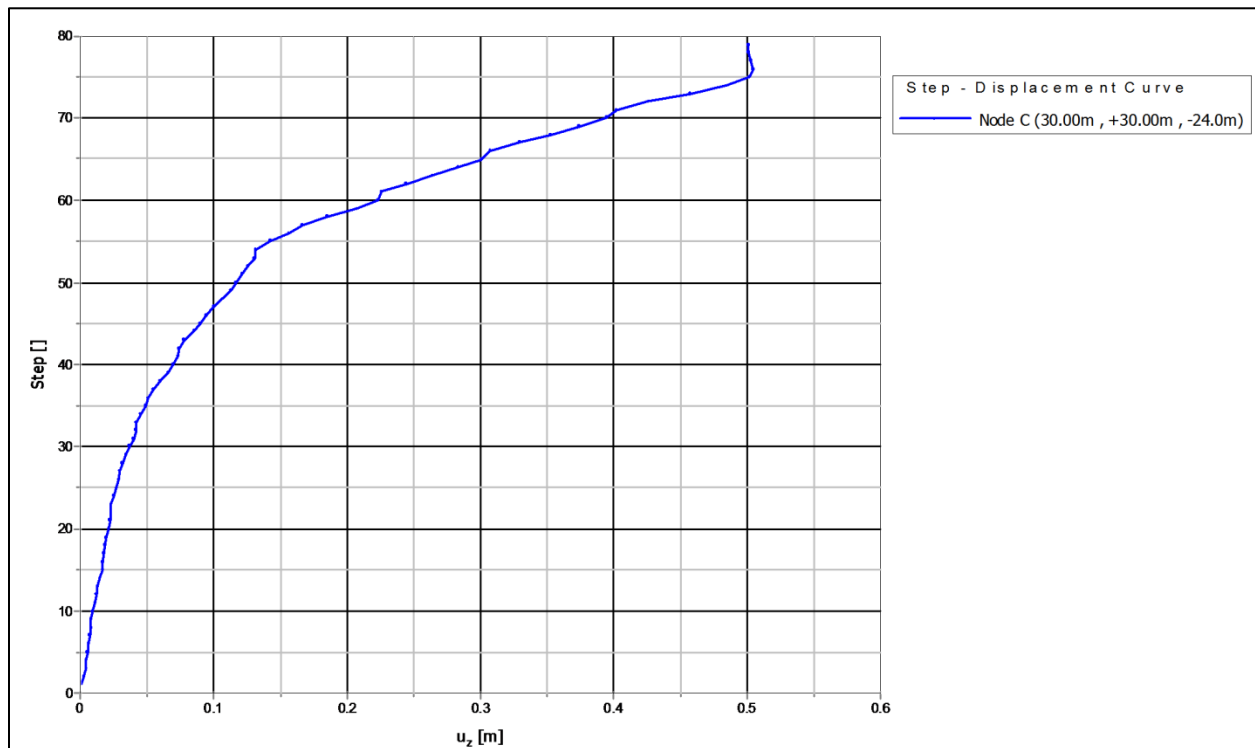
Ακολουθεί η χάραξη διαγραμμάτων καθιζήσεων για τα “nodes” του “Πίνακας 33” σελ.119 και η χάραξη διαγραμμάτων τάσεων-τροπών για τα “stress points” του “Πίνακας 34” σελ.120.



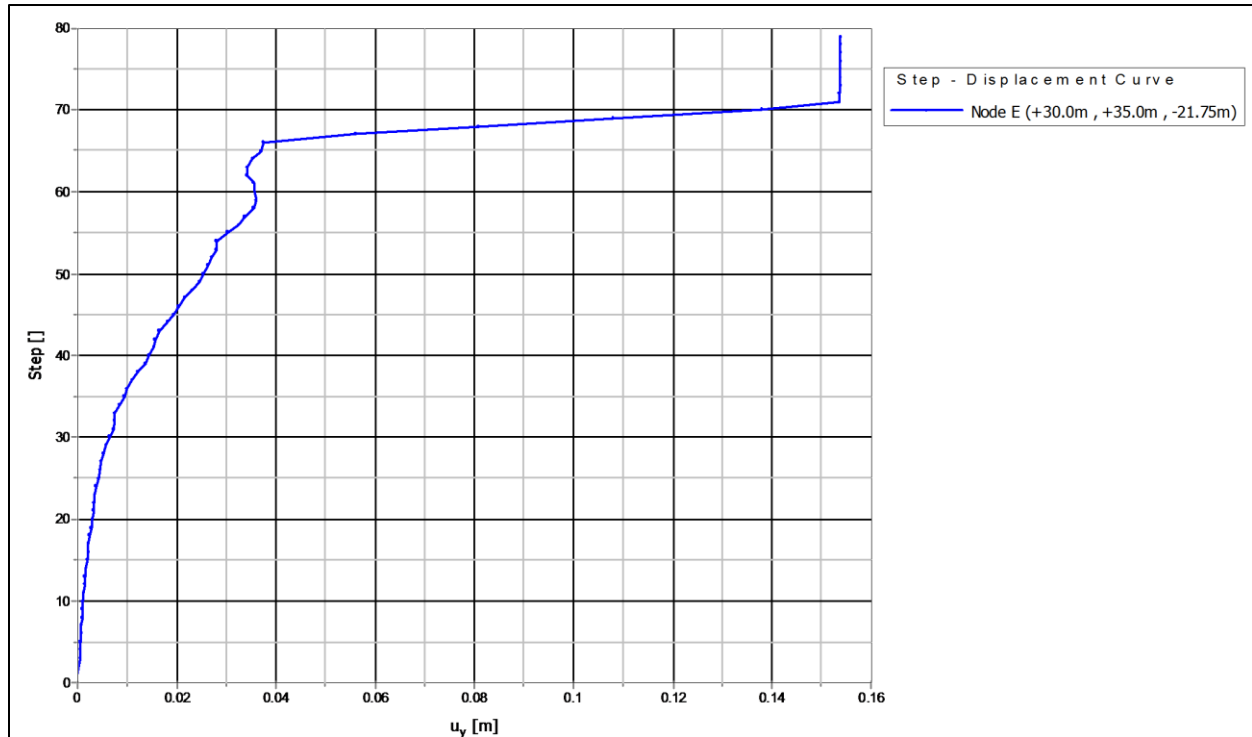
Εικόνα 131 : Plaxis 3D_Analysis N^o1 – Η καμπύλη των καθιζήσεων του “Node A” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



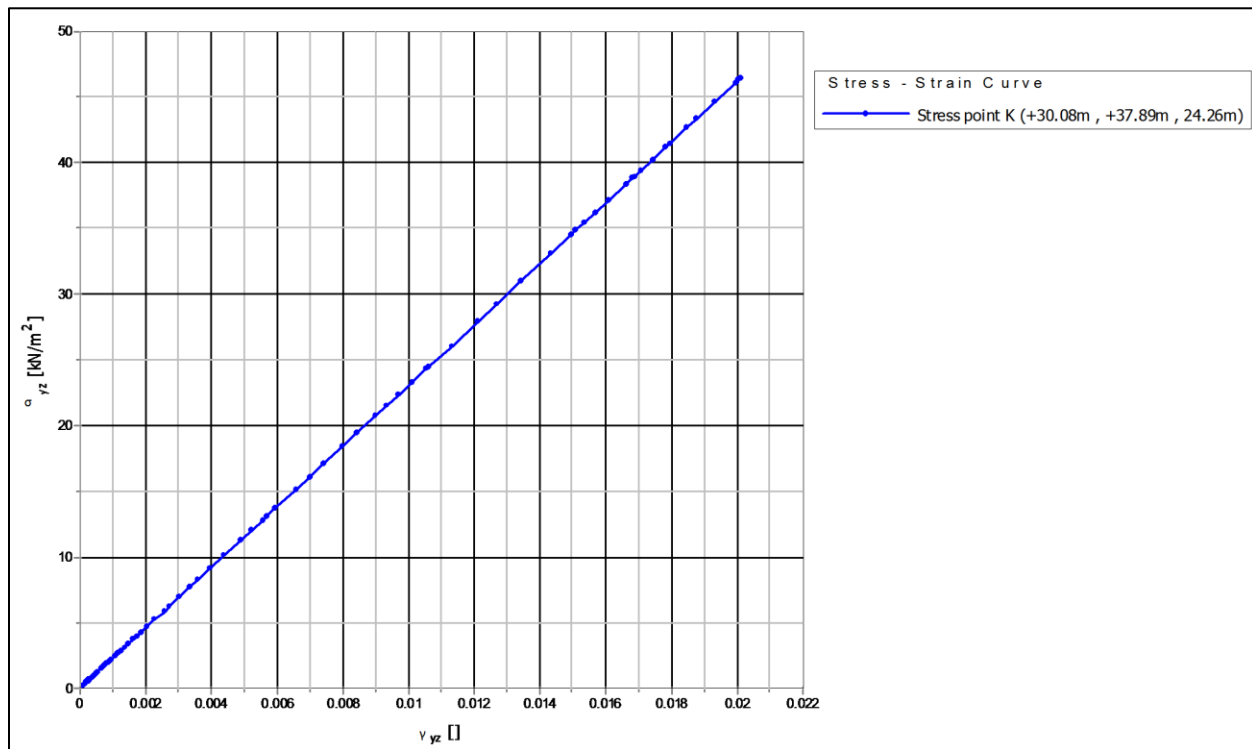
Εικόνα 132 : Plaxis 3D_Analysis N^ο1 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node B” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



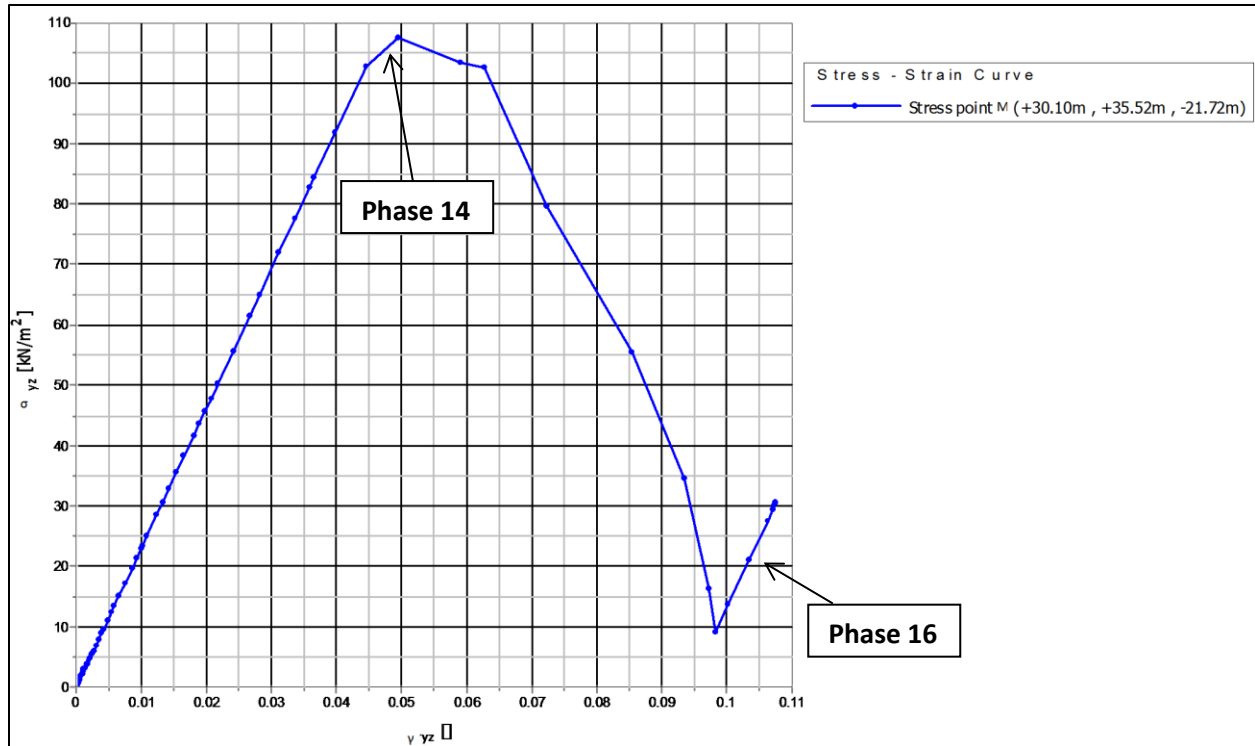
Εικόνα 133 : Plaxis 3D_Analysis N^ο1 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node C” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 134 : Plaxis 3D_Analysis N°1 – Η καμπύλη των οριζοντίων μετακινήσεων του “Node E” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 135 : Plaxis 3D_Analysis N°1 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point K” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 136 : Plaxis 3D_Analysis N°1 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point M” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.

6.8 PLAXIS 3D_ANALYSIS N°1-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από την τριδιάστατη ανάλυση του φρέατος της 1^{ης} περίπτωσης, όπως αυτή περιγράφεται στον “Πίνακας 29” σελ.114, και σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της διδιάστατης ανάλυσης προκύπτουν τα εξής:

1. Από την “Εικόνα 119” σελ.123, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 43 ” σελ.45, συμπερνεται ότι η μέγιστη ανύψωση πυθμένα αντιστοιχεί στην φάση 16 (προτελευταία φάση) και η τιμή της είναι παρόμοια και στα δύο μοντέλα (διδιάστατο και τριδιάστατο μοντέλο).
2. Στην “Εικόνα 119” σελ.123 εκτός από την ανύψωση πυθμένα παρατηρείται καθίζηση της επιφάνειας η οποία κατά την φάση 16 έχει μέγιστη τιμή $z \approx 10\text{cm}$. Επιπλέον οι καθιζήσεις ολοκληρώνονται σε μιά απόσταση $x \approx 5\text{m}$ από την κατακόρυφη παρειά.
3. Η “Εικόνα 120” σελ.124 απεικονίζει τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις που προκύπτουν σε μια φάση. Για την ακρίβεια πρόκειται για την ανύψωση πυθμένα η οποία κατά την προτελευταία φάση (φάση 16) λαμβάνει την τιμή $PU_z \approx 14\text{cm}$. Όπως αναμενόταν οι πρόσθετες μετακινήσεις κατά την τελευταία φάση (κατά την τοποθετείται το τελικό “segmental ring” και το “lean concrete” στον πυθμένα και επιπλέον σταματούν οι περαιτέρω εκσκαφές) είναι ελάχιστες, όπως αυτές καταγράφονται στην “Εικόνα 123” σελ.127. Τέλος σημειώνεται ότι παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν για τις οριζόντιες ολικές και οριζόντιες “phase

- displacements”, όπως αυτές καταγράφονται στις “Εικόνα 121” σελ.125 και “Εικόνα 122” σελ.126 αντίστοιχα.
4. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι “incremental vertical displacements” κατά την φάση 16 ισούνται με $\Delta U_z \approx 6\text{mm}$ και οι “incremental horizontal displacements” ισούνται με $\Delta U_x \approx 8\text{mm}$. Οι τιμές αυτές είναι αυξημένες σε σχέση με εκείνες της διαδιάστατης ανάλυσης, όπως αυτές παρουσιάζονται στην “Εικόνα 45” σελ.47.
 5. Στην “Εικόνα 124” σελ.128 παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή των ορθών τροπών αφορά τις παρειές της εκσκαφής. Σημειώνεται όμως ότι οι “incremental normal strains” στην 3D ανάλυση ισούνται με $\Delta \epsilon_N \approx 0.16\%$ πολύ μικρότερες δηλαδή σε σχέση με τις αντίστοιχες της 2D ανάλυσης, όπως αυτές παρουσιάζονται στην “Εικόνα 47” σελ.49 (“**extreme principal strain increment**” $\approx 1.40\%$).
 6. Στην “Εικόνα 125” σελ.129 παρατηρείται ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις “ γ_{xz} ” εμφανίζονται μέγιστες κατά την φάση 16 και συγκεκριμένα περιμετρικά του πυθμένα του φρέατος. Επιπλέον, όπως αναμενόταν, στην περιοχή αυτή οι διατμητικές τάσεις λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους ($\sigma_{zx} \approx 130 \text{ kPa}$), όπως καταγράφεται στην “Εικόνα 126” σελ.130. Τέλος τα εδαφικά στοιχεία τα οποία παραμορφώνονται πέραν κάποιου ορίου αστοχούν σε διάτμηση, όπως παρατηρείται στην “Εικόνα 127” σελ.131.
 7. Από την “Εικόνα 128” σελ.132, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 49” σελ.51, συμπερένεται ότι η αστοχία των εδαφικών στρώσεων συμβαίνει με παρόμοιο τρόπο και στις δύο αναλύσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα δύο είδη αναλύσεων (2D και 3D ανάλυση) εμφανίζονται κάποια “stress points” τα οποία αστοχούν σε εφελκυσμό. Αυτά βρίσκονται στην επιφάνεια, περιμετρικά του φρέατος, και ορισμένα στον ανυποστήρικτο πυθμένα και στην ανυποστήρικτη παρειά (ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται η φάση 16 – προτελευταία φάση- για την εξαγωγή των παραπάνω εικόνων είναι γιατί πρόκειται για τη δυσμενέστερη φάση της κατασκευής).
 8. Από την “Εικόνα 130” σελ.134, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 50” σελ.52, συμπερένεται ότι εφαπτομενικές δυνάμεις (οι οποίες αποτελούν και το δυσμενέστερο εντατικό μέγεθος για το έργο) λαμβάνουν παρόμοιες τιμές ($F_{\text{hoop-3D}}=1.30 \text{ MN}$ ενώ $F_{\text{hoop-2D}}=1.50 \text{ MN}$).
 9. Στον “Πίνακας 35” σελ.135 παρατηρείται ότι η κατανομή των “hoop forces” σε οριζόντια τομή είναι γενικώς ανομοιόμορφη. Η τιμή τους και η κατανομή τους είναι γενικώς σταθερή με την πρόοδο των φάσεων προσομοίωσης.
 10. Στην “Εικόνα 131” σελ.136 παρατηρείται μια γενικότερη ανύψωση των εδαφικών στρώσεων. Η ανύψωση αυτή (η οποία αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο παρατηρείται σε 2D και 3D ανάλυση και οφείλεται στο κριτήριο αστοχίας “Mohr-Coulomb”) αυξάνεται μέχρι την φάση 6, στη συνέχεια μειώνεται και τελικά μετά την φάση 15 προκύπτει καθίζηση στον κόμβο A (περίπου 5 μέτρα μακριά από την παρειά της εκσκαφής) της τάξης του 1cm.
 11. Παρόμοιο είναι το φαινόμενο της ανύψωσης και στον κόμβο B (περίπου 10 μέτρα μακριά από την κατακόρυφη παρειά της εκσκαφής), όπως παρατηρείται στην “Εικόνα 132” σελ.137. Κατά την τελευταία φάση το αριθμητικό μοντέλο καταλήγει να ανυψώνεται αντί να καθιζάνει.
 12. Από την “Εικόνα 133” σελ.137, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 52” σελ.54, παρατηρείται ότι η ανύψωση του πυθμένα του κόμβου C είναι παρόμοια και στις δύο αναλύσεις. Παρόμοια είναι και η καταγραφή των οριζοντίων μετακινήσεων του κόμβου E με τη χρήση 2D και 3D αριθμητικού μοντέλου.

13. Η επιλογή των “stress points” έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα για τα διάφορα είδη αναλύσεων (2D και 3D). Η “Εικόνα 135” σελ.138 όμως περιγράφει τη συμπεριφορά ενός “stress point” σε “αποφόρτιση” το οποίο όμως δεν αστοχεί. Αυτό παρατηρείται από τον συνεχόμενα ανοδικό κλάδο της καμπύλης διατμητικής τάσης – διατμητικής παραμόρφωσης.
14. Στην “Εικόνα 136” σελ.139 είναι προφανής η αστοχία, λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής, του “stress point M”. Πράγματι μέχρι την φάση 14 το σημείο “M” αναπτύσσει διατμητική αντοχή λόγω αποφόρτισης αλλά δεν αστοχεί. Κατά την φάση 15 όμως γίνεται εκσκαφή σε αυτό το υψόμετρο και απομακρύνεται το αντίστοιχο “volume cluster” επομένως επέρχεται αστοχία. Τέλος ο ανοδικός κλάδος του διαγράμματος κατά την φάση 16 οφείλεται στην τοποθέτηση του “segmental ring”.

7

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΟ Plaxis 3D (Version 2013)

7.1 PLAXIS 3D_ANALYSIS N°1

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται και αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 6. Ακολουθούν οι υπόλοιπες παραμετρικές αναλύσεις, όπως δίνονται στον “Πίνακας 29” σελ.114.

7.2 PLAXIS 3D_ANALYSIS N°2

Πρόκειται για ανάλυση σύμφωνα με την οποία το κριτήριο συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων είναι το “Hardening Soil”, όπως περιγράφεται στην Ενότητα “3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ HARDENING SOIL” σελ.27.

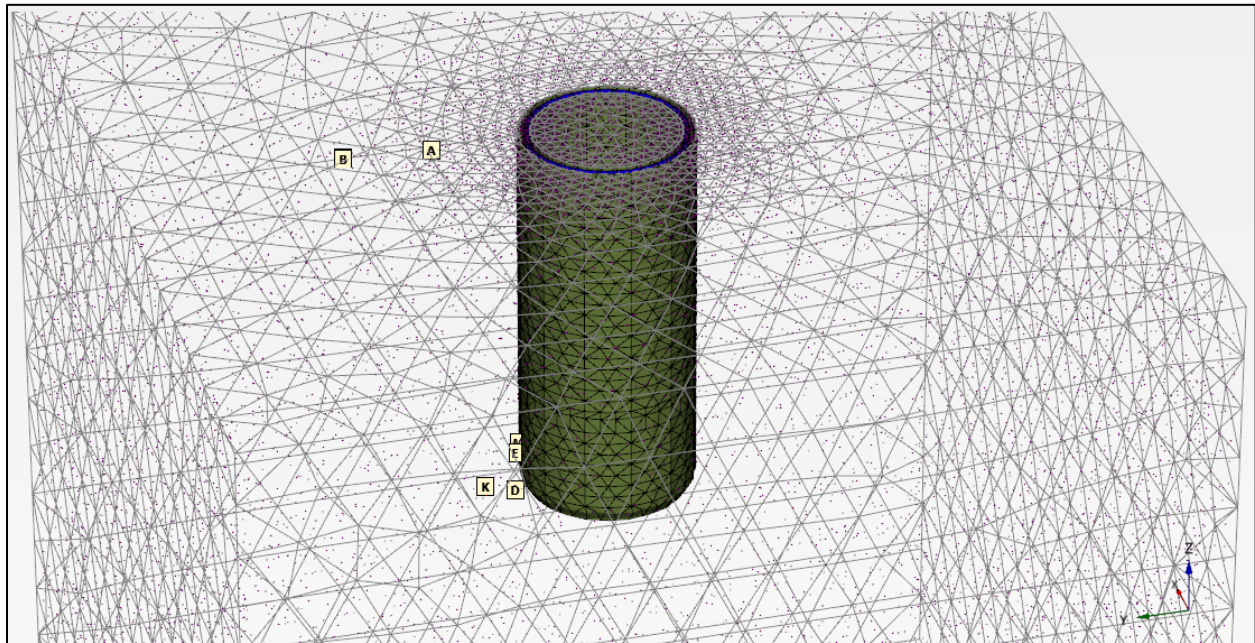
Πίνακας 36 : Plaxis 3D_Analysis N°2 – Οι πέντε κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “Load-Displacement Curves”.

Plaxis 3D_Analysis N°2 - Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (+30.37m , +40.30m , 0.0m)	Σημείο στην επιφάνεια ≈5.5m μακριά από την παρειά της εκσκαφής όπου ενδεχομένως να υφίστανται κτίρια.
Node B (+30.83m , +45.60m , 0.0m)	Σημείο στην επιφάνεια ≈10m μακριά από την παρειά της εκσκαφής όπου ενδεχομένως να υφίστανται κτίρια.
Node C (30.00m , +30.00m , -24.0m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node D (+30.01m , +35.41m , -24.35m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης όπου εμφανίζονται έντονα

	φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων (plastic points).
Node E (+30.0m , +35.0m , -21.75m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την "Phase 16". Ιδιαίτερα δυσμενής φάση προσομοίωσης και σημείο με αυξημένες μετακινήσεις.

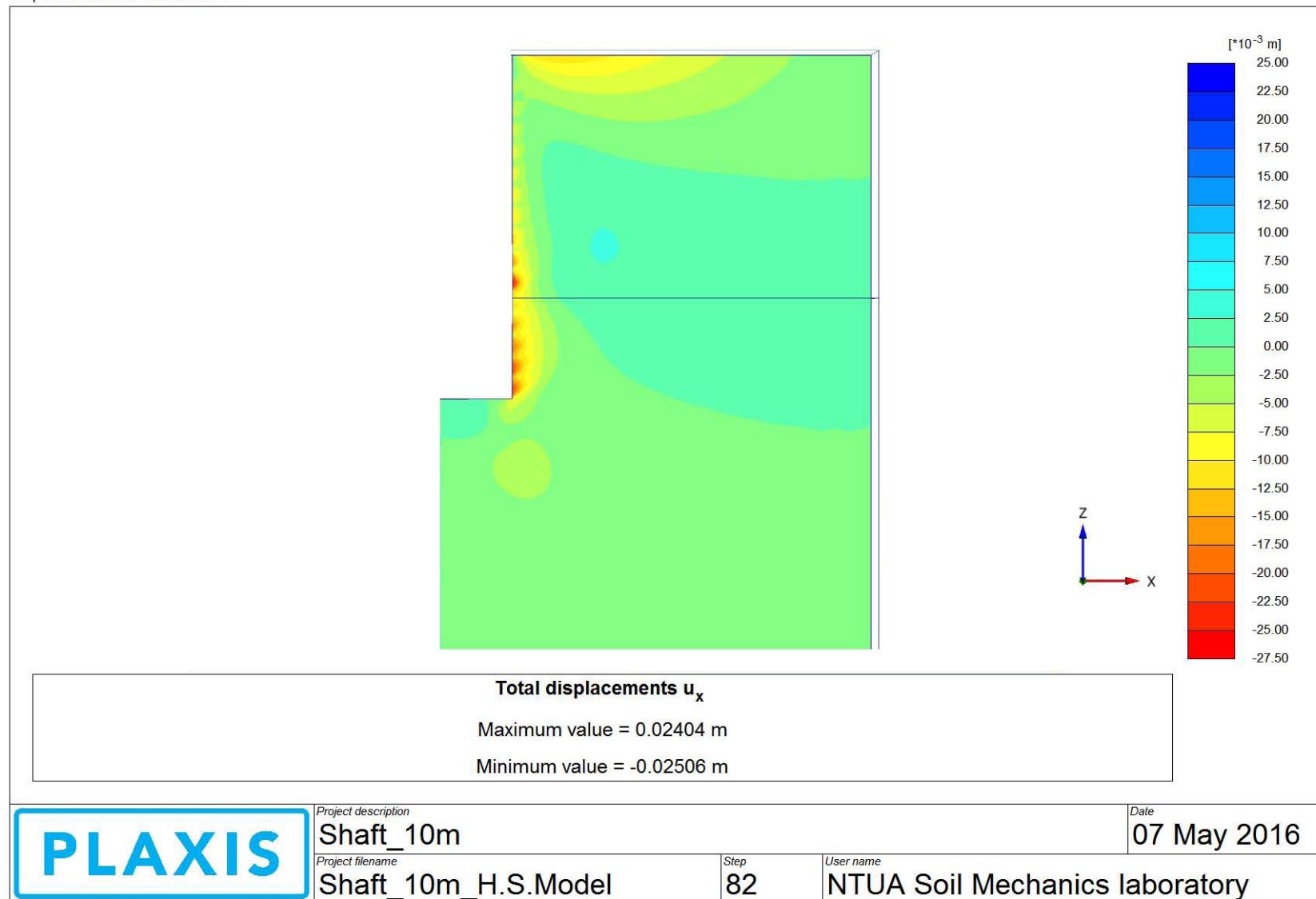
Πίνακας 37 : Plaxis 3D_Analysis N°2 - Τα τρία "stress points" που επιλέγονται για την χάραξη "Stress-Strain Curves".

Plaxis 3D_Analysis N°2 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point K (+30.28m , +37.59m , 24.60m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point L (+30.28m , +30.03m , -24.6m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά "αποφόρτισης".
Stress point M (+30.09m , +35.48m , -21.74m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την "Phase 16".



Εικόνα 137 : Plaxis 3D_Analysis N°2 - Η τριδιάστατη απεικόνιση των "nodes" και των "stress points" με τη βοήθεια του "Plaxis 3D_Output".

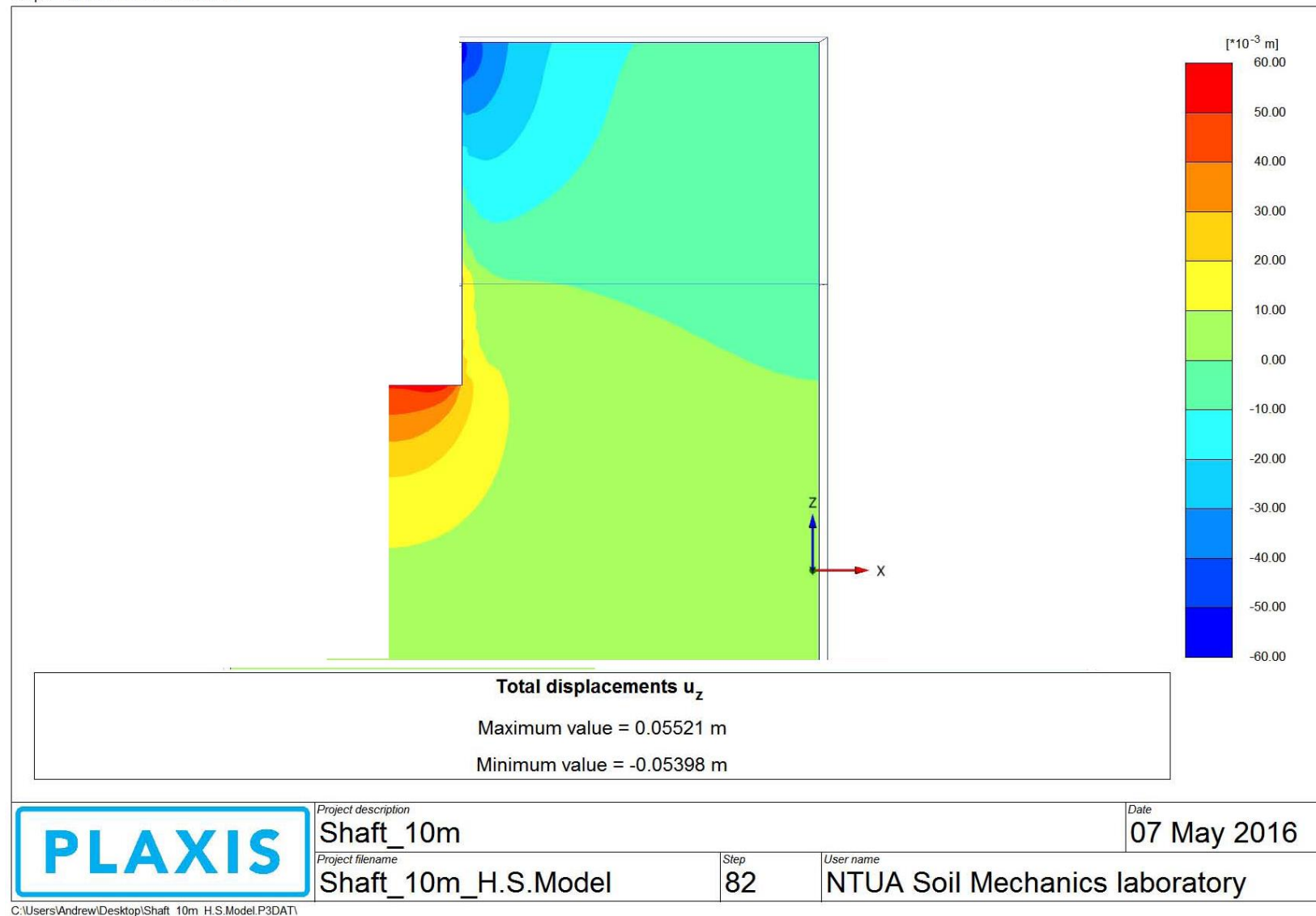
Output Version 2013.1.13962.9831



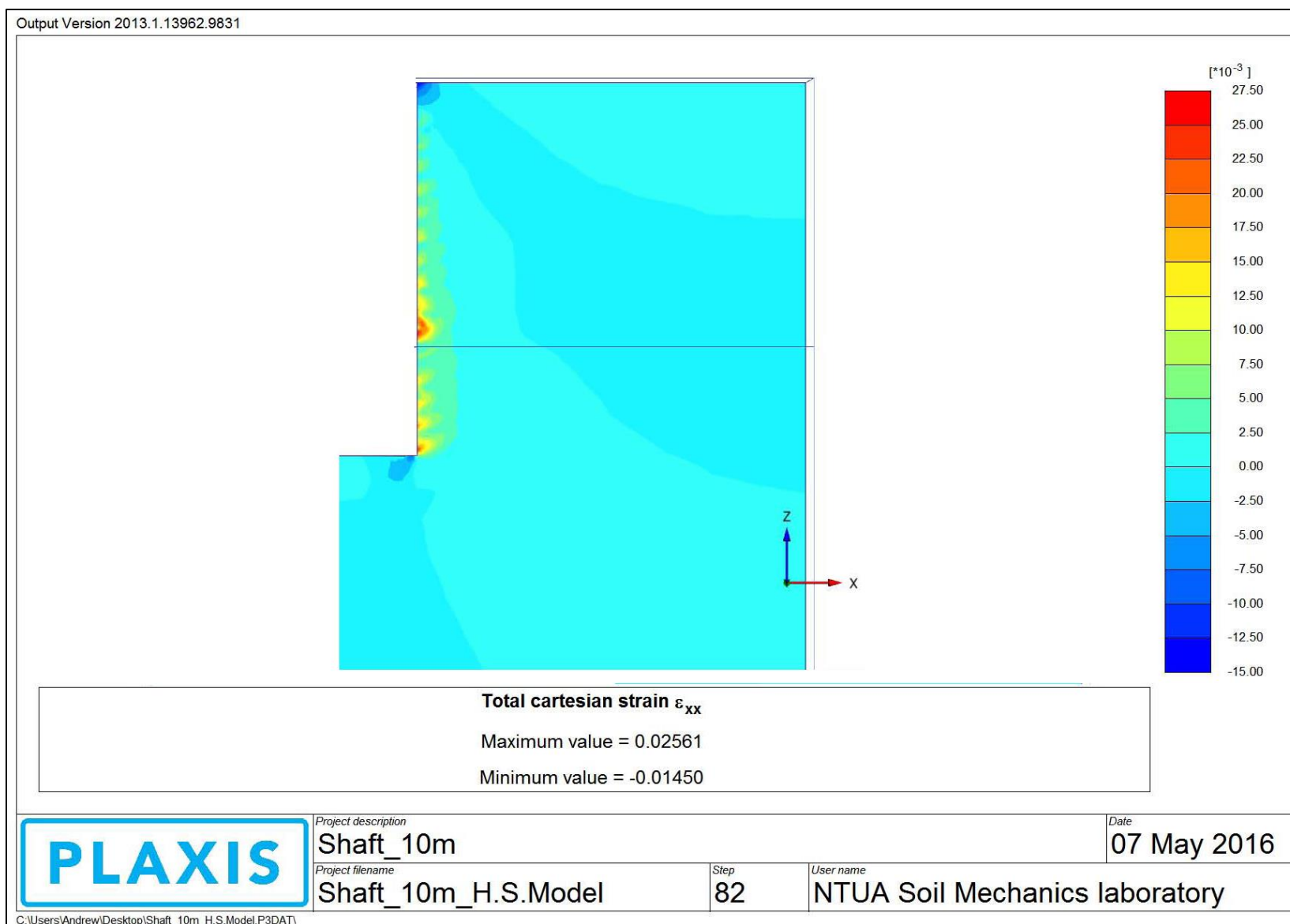
C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_10m_H.S.Model.P3DAT\

Εικόνα 138 : Plaxis 3D_Analysis N^o2 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις των εδαφικών στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

Output Version 2013.1.13962.9831

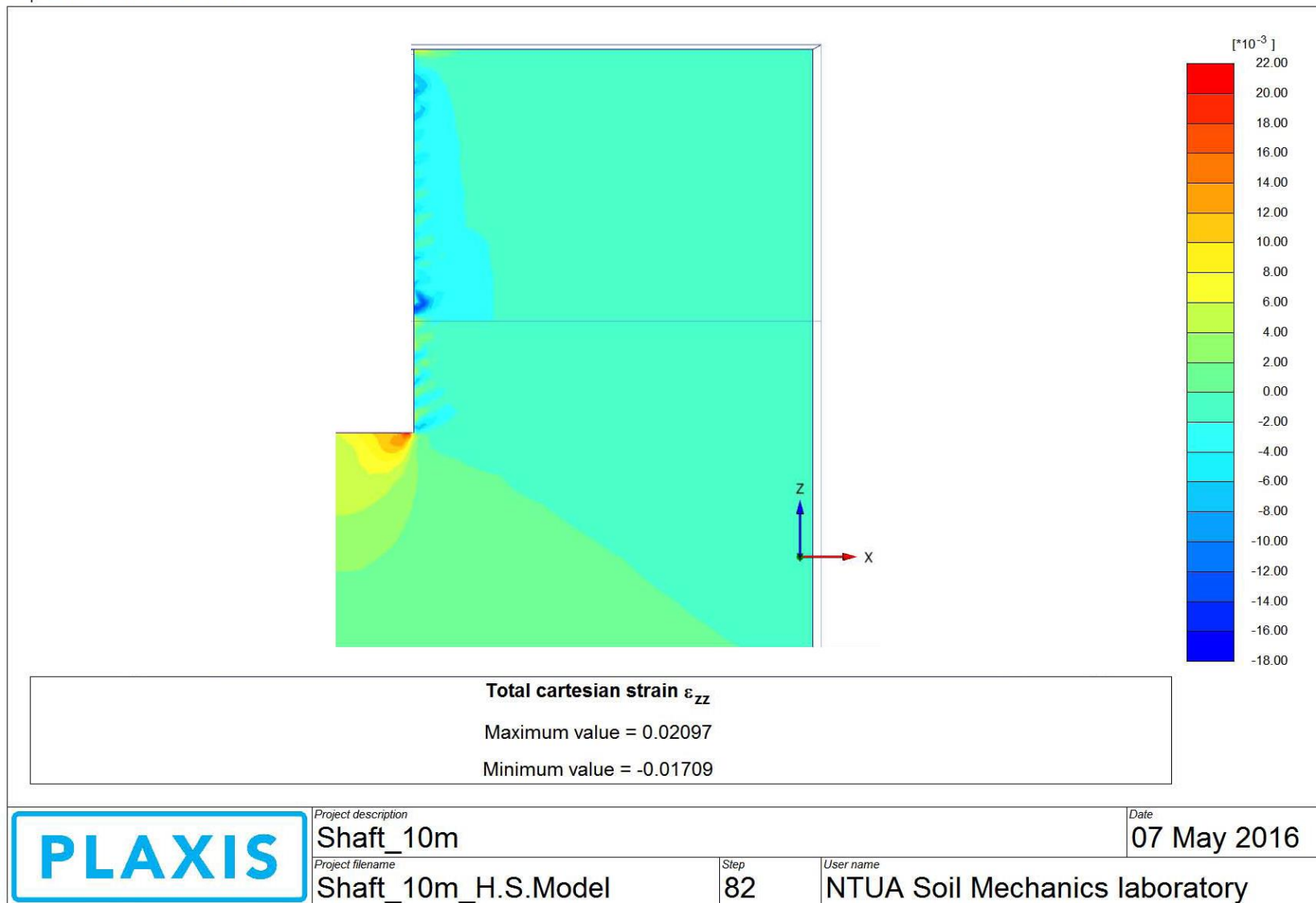


Εικόνα 139 : Plaxis 3D_Analysis N°2 - Οι καθιζήσεις των επιφανειακών εδαφικών “στοιχείων” αλλά και η ανύψωση των κατώτερων στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).



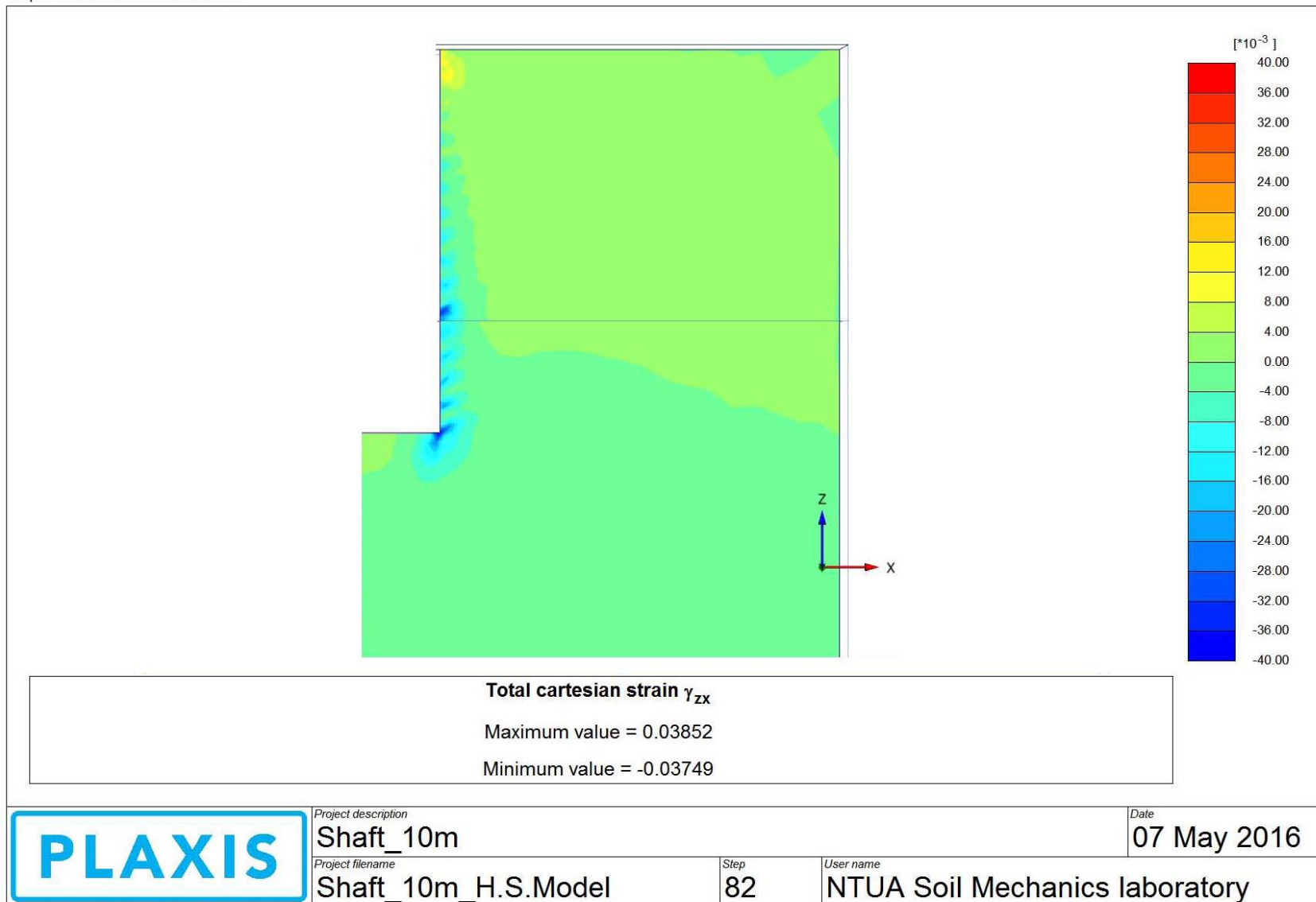
Εικόνα 140 : Plaxis 3D_Analysis N°2 – Οι ολικές οριζόντιες ορθές τροπές κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

Output Version 2013.1.13962.9831



Εικόνα 141 : Plaxis 3D_Analysis N^ο2 – Οι ολικές κατακόρυφες ορθές τροπές κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

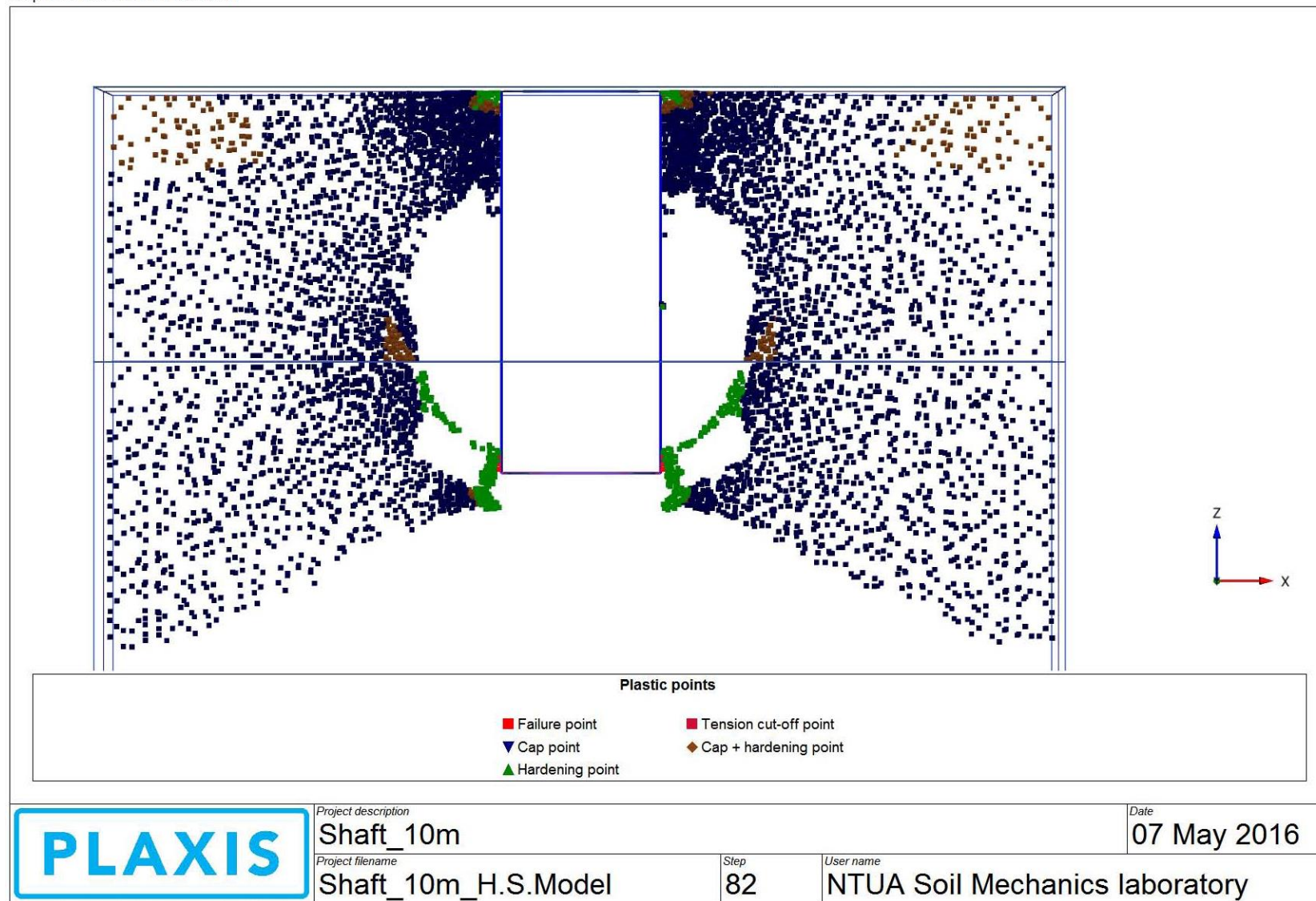
Output Version 2013.1.13962.9831



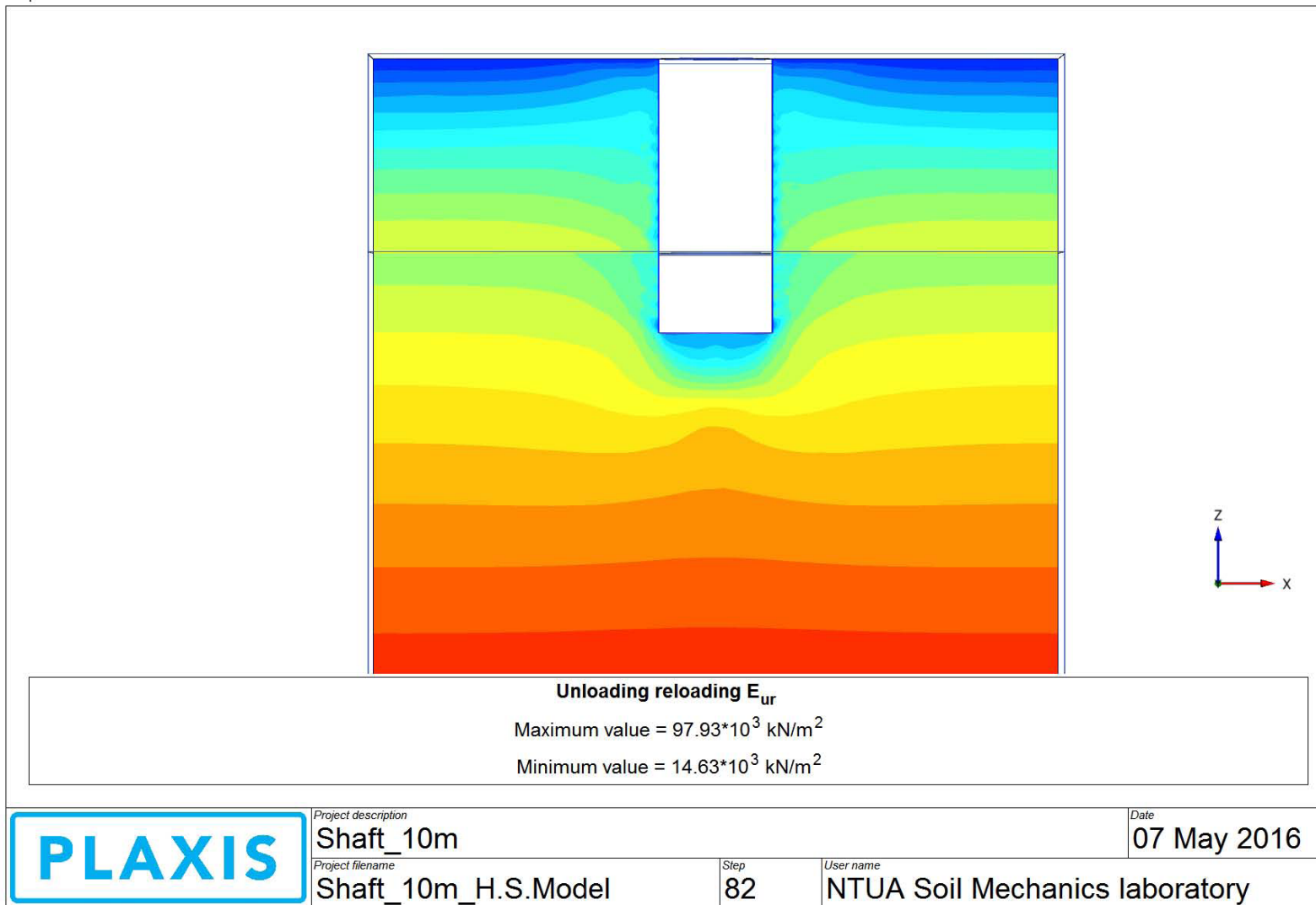
C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_10m_H.S.Model.P3DAT\

Εικόνα 142 : Plaxis 3D_Analysis N^o2 – Οι ολικές διατμητικές τροπές κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

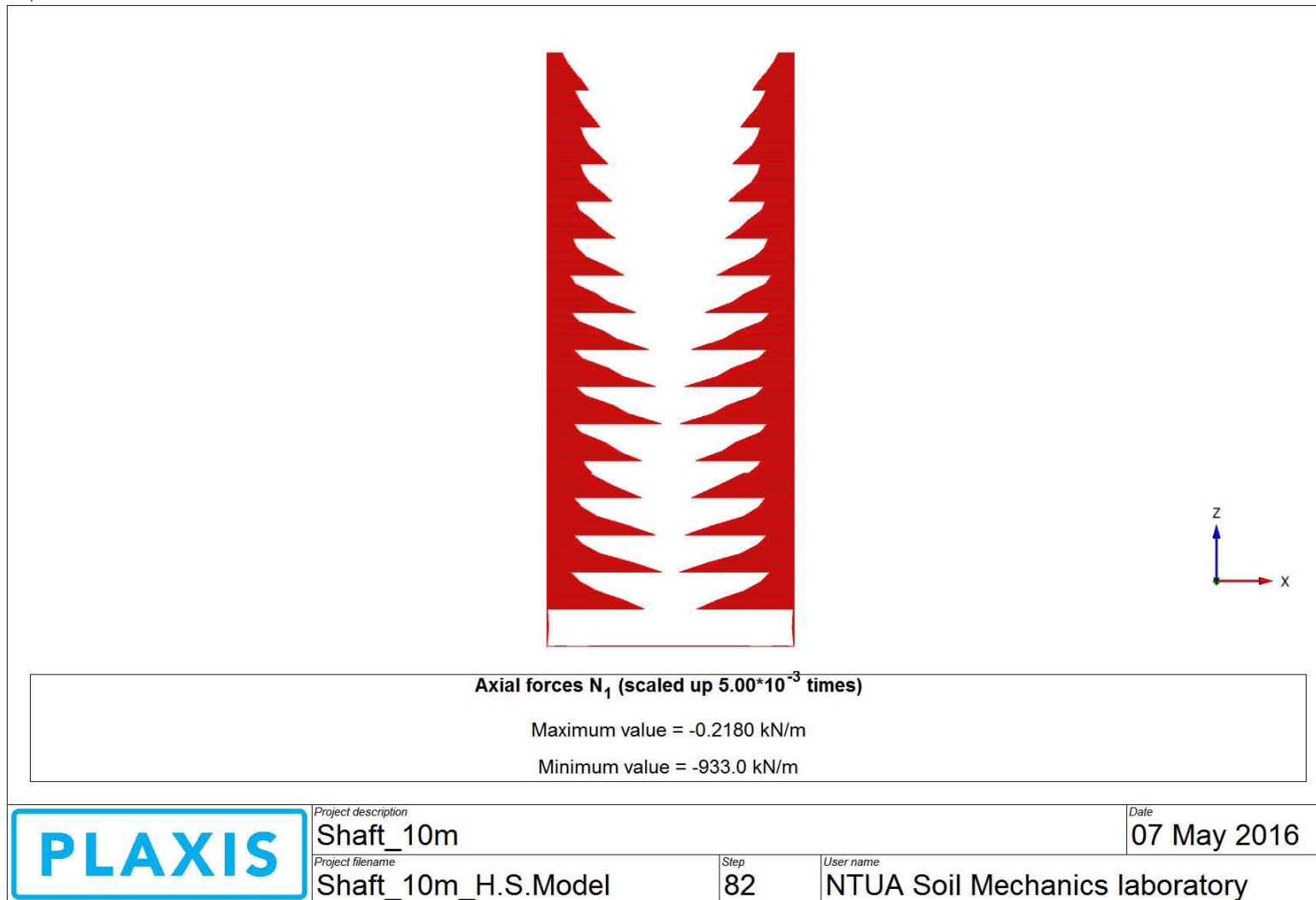
Output Version 2013.1.13962.9831

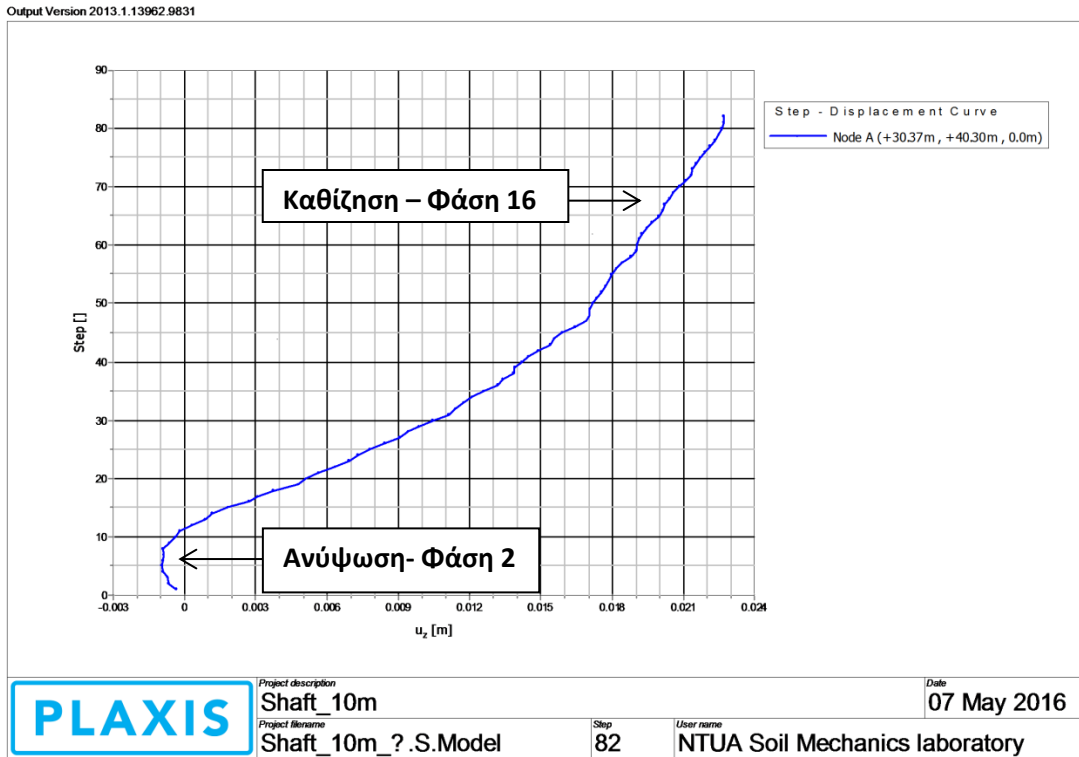
Εικόνα 143 : Plaxis 3D_Analysis N^o2 – Τα “ plastic points” περιμετρικά του φρέατος κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

Output Version 2013.1.13962.9831

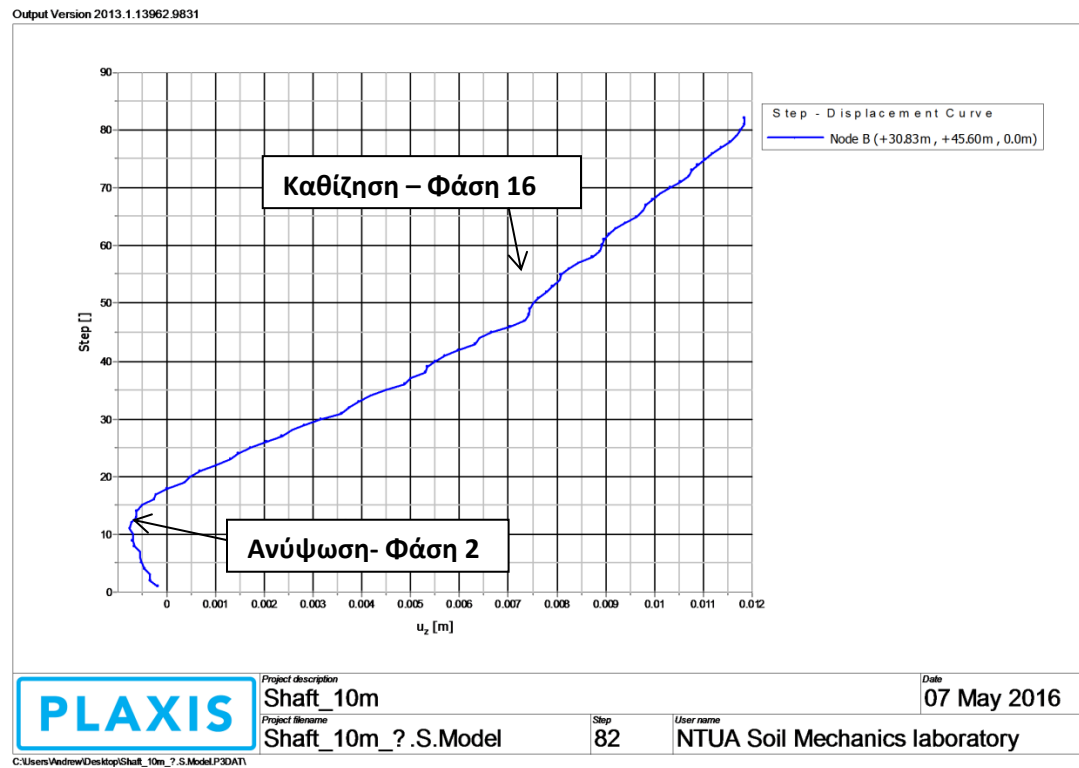
Εικόνα 144 : Plaxis 3D_Analysis N^o2 – Η διακύμανση των τιμών του Μέτρου αποφόρτισης-επαναφόρτισης “ E_{ur} ” σε σχέση με το βάθος (φάση 17).

Output Version 2013.1.13962.9831

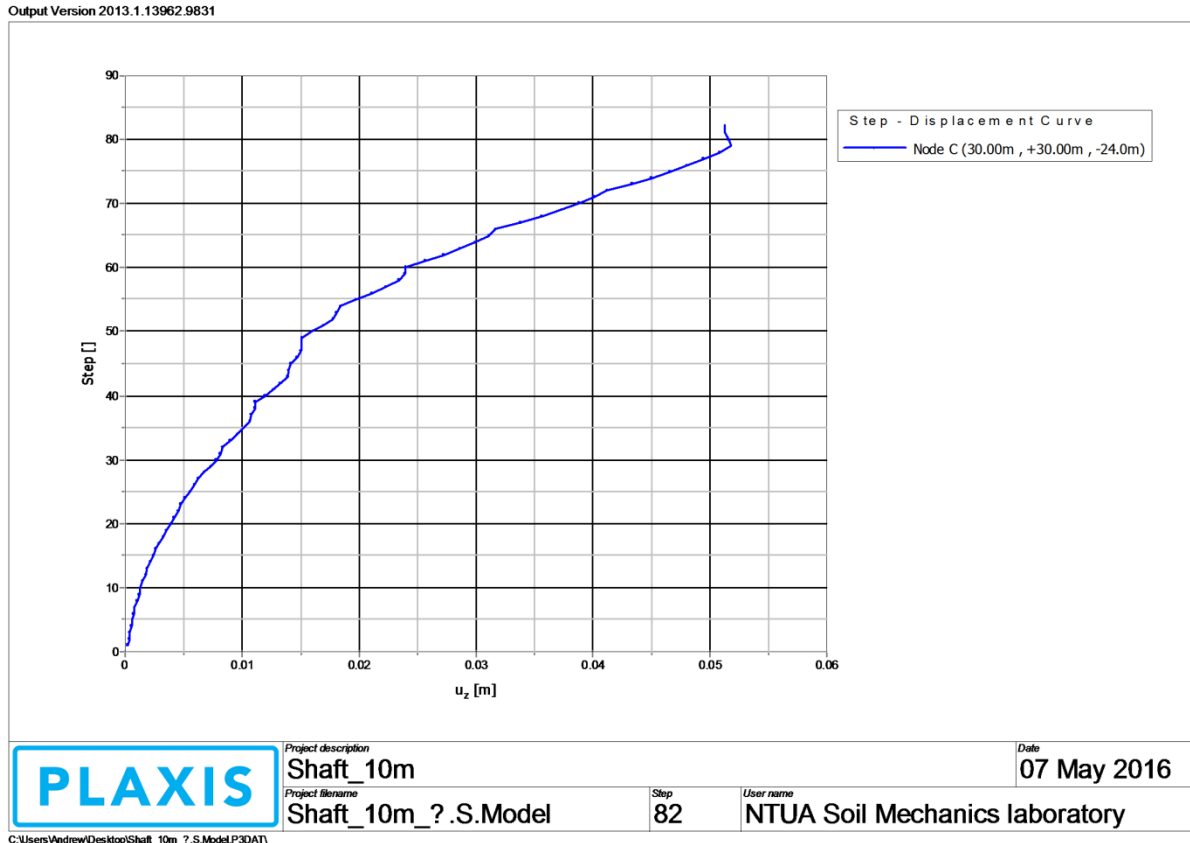
Εικόνα 145 : Plaxis 3D_Analysis N^o2 – Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 146: Plaxis 3D_Analysis N^o2 – Η καμπύλη καθίζησης του κόμβου A για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 147 : Plaxis 3D_Analysis N^o2 – Η καμπύλη καθίζησης του κόμβου B για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 148 : Plaxis 3D_Analysis N^o2 – Η ανύψωση του κόμβου C (πυθμένας) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.

7.2.1 PLAXIS 3D_ANALYSIS N^o2–Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Από τις παραπάνω εικόνες, και έχοντας υπόψη την αντίστοιχη 2D ανάλυση, προκύπτουν τα εξής:

1. Από τις “Εικόνα 138” σελ.145 και “Εικόνα 139” σελ.146, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 66” σελ.70, συμπεράνεται ότι τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι παρόμοιες για την διδιάστατη και τριδιάστατη ανάλυση. Σημειώνεται ότι οι μέγιστες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις εμφανίζονται σε βάθος $\approx 23\text{m}$ και λαμβάνουν τιμή $\approx 2.5\text{cm}$. Επιπλέον παρατηρείται μια έντονη μετακίνηση στο στρώμα “silty sand” και συγκεκριμένα στο μέγιστο βάθος του των 17m. Οι καθιζήσεις περιορίζονται σε απόσταση $\approx 10\text{m}$ μακριά από την κατακόρυφη παρειά με την μέγιστη τιμή τους να είναι $\approx 5.4\text{cm}$. Τέλος και στα δύο είδη αναλύσεων (2D και 3D) η μέγιστη ανύψωση πυθμένα είναι $\approx 5.5\text{cm}$.
2. Από την “Εικόνα 140” σελ.147 παρατηρείται ότι οι ολικές οριζόντιες ορθές τροπές “ ϵ_{xx} ” εμφανίζονται ιδιαίτερα αυξημένες σε βάθος $\approx 23\text{m}$. Επίσης από την “Εικόνα 142” σελ.149 παρατηρείται ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις “ ν_{zx} ” εμφανίζονται αυξημένες και πάλι σε βάθος $\approx 23\text{m}$. Πιθανώς λοιπόν αυτές οι αυξημένες παραμορφώσεις να οφείλονται στις μειωμένες παραμέτρους διατμητικής αντοχής (c, ϕ) της στρώσης “ιλυδούς άμμου” σε σχέση με εκείνες της κατώτερης στρώσης “αμμώδους ιλύως”.

3. Στην “Εικόνα 142” σελ.149 παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή των διατμητικών παραμορφώσεων είναι $\gamma_{zx} \approx 3.8\%$. Η αντίστοιχη μέγιστη διατμητική παραμόρφωση με χρήση του κριτηρίου “Mohr–Coulomb” είναι $\gamma_{zx} \approx 30\%$. Η παραμόρφωση στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα την εμφάνιση “plastic points” (λόγω υπέρβασης της διαμητικής αντοχής). Με την χρήση του κριτηρίου “Hardening Soil” όμως η παραμόρφωση των αντίστοιχων “stress points” είναι πολύ μικρότερη με αποτέλεσμα αυτά να μην “αστοχούν”.
4. Από την “Εικόνα 145” σελ.152, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 68” σελ.72, συμπερένεται ότι εφαπτομενικές δυνάμεις (οι οποίες αποτελούν και το δυσμενέστερο εντατικό μέγεθος για το έργο) λαμβάνουν διαφορετικές τιμές ($F_{\text{hoop-3D}}=0.95 \text{ MN}$ ενώ $F_{\text{hoop-2D}}=1.10 \text{ MN}$) με δυσμενέστερες εκείνες της διδιάστατης ανάλυσης.
5. Στις “Εικόνα 146” και “Εικόνα 147” σελ.153 αποδεικνύεται η συνολική καθίζηση της επιφάνειας του προσομοιώματος κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης. Όσο προφανής και αν φαίνεται η παραπάνω παρατήρηση, δεν ισχύει για τις αναλύσεις με το κριτήριο “Mohr – Coulomb” όπως παρατηρείται στην “Εικόνα 42” σελ.44.

7.3 PLAXIS 3D_ANALYSIS N°3

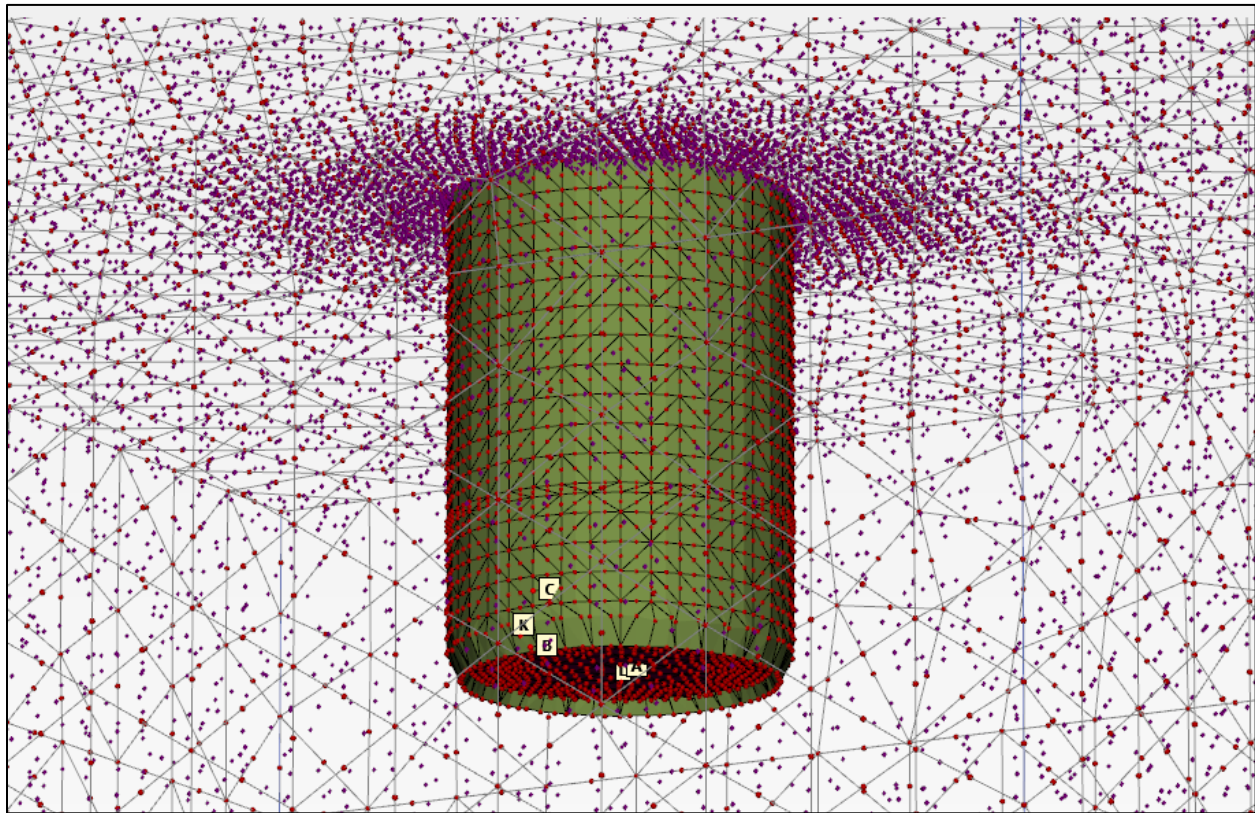
Η Ανάλυση πραγματοποιείται με σκοπό τον έλεγχο τις επιρροής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του φρέατος στις εδαφικές μετακινήσεις, στα εντατικά μεγέθη της υποστήριξης και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα μεγέθη της διδιάστατης ανάλυσης. Τα χαρακτηριστικά της ανάλυσης περιγράφονται στον “Πίνακας 29” σελ.114.

Πίνακας 38 : Plaxis 3D_Analysis N°3 – Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “Load-Displacement Curves”.

Plaxis 3D_Analysis N°3 - Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (+50.0m , +50.0m , -24.0m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+58.63m , +49.84m , -24.56m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων (plastic points).
Node C (+58.0m , +50.0m , -21.75m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”. Ιδιαίτερα δυσμενής φάση προσομοίωσης και σημείο με αυξημένες μετακινήσεις.

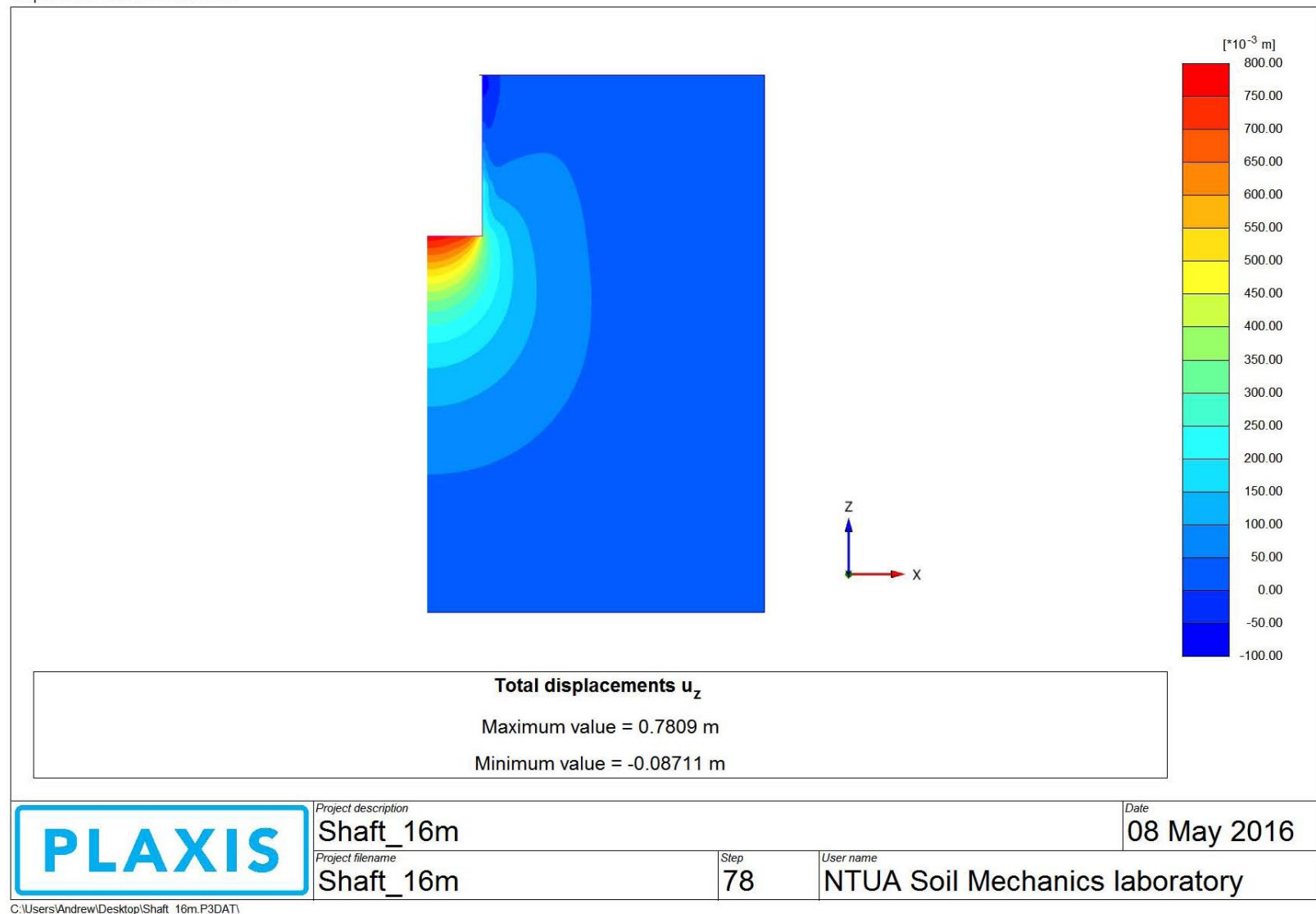
Πίνακας 39 : Plaxis 3D_Analysis N^o3 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

Plaxis 3D_Analysis N ^o 3 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point K (+60.09m , +50.11m , 24.34m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point L (+50.08m , +50.09m , -24.68m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.
Stress point M (+58.09m , +50.35m , -15.98m)	Σημείο το οποίο ανήκει στην κατακόρυφη παρειά εκσκαφής και συγκεκριμένα στην στρώση “silty sand”.



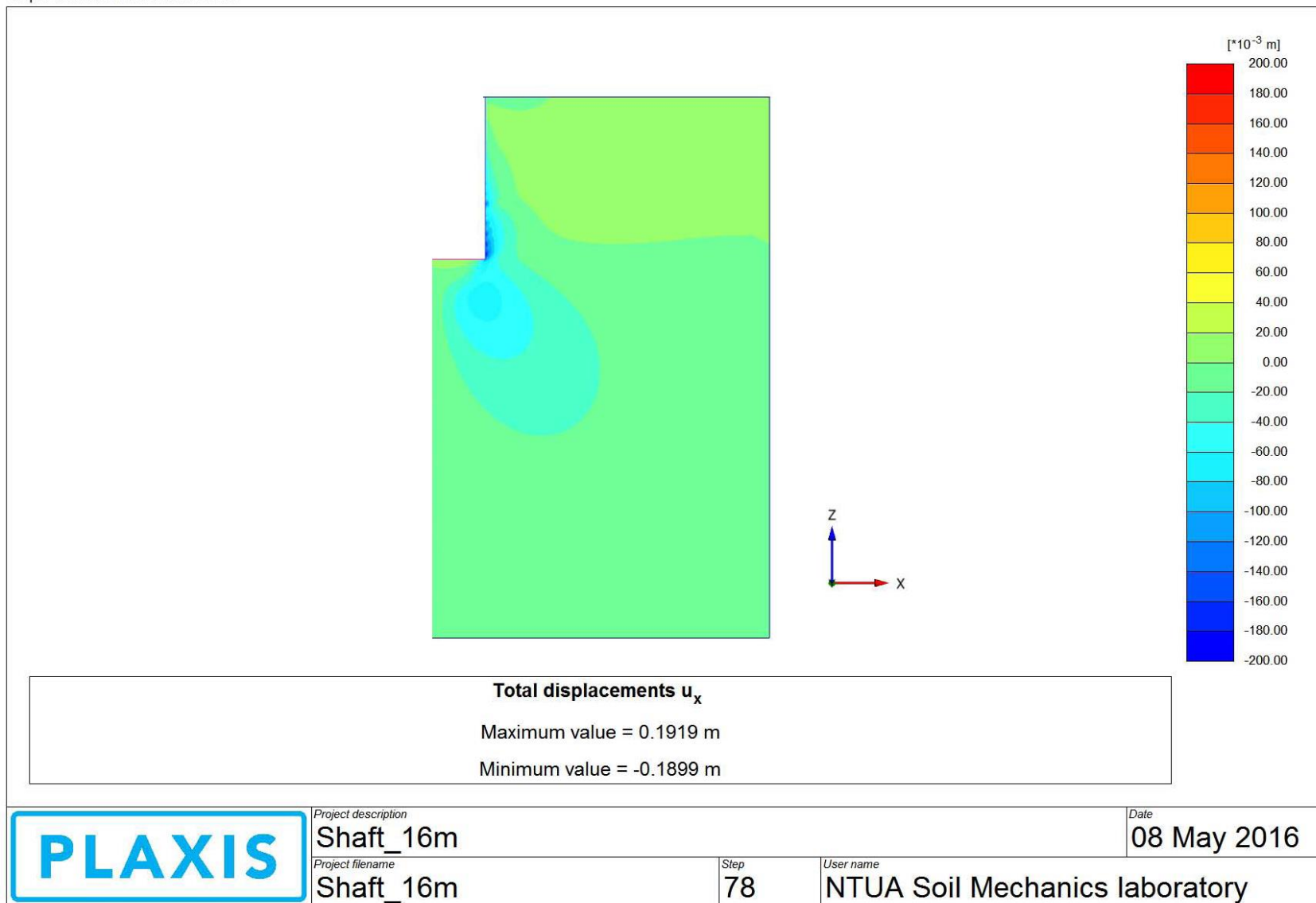
Εικόνα 149 : Plaxis 3D_Analysis N^o3 - Η τριδιάστατη απεικόνιση των “nodes” και των “stress points” με τη βοήθεια του “Plaxis 3D_Output”

Output Version 2013.1.13962.9831



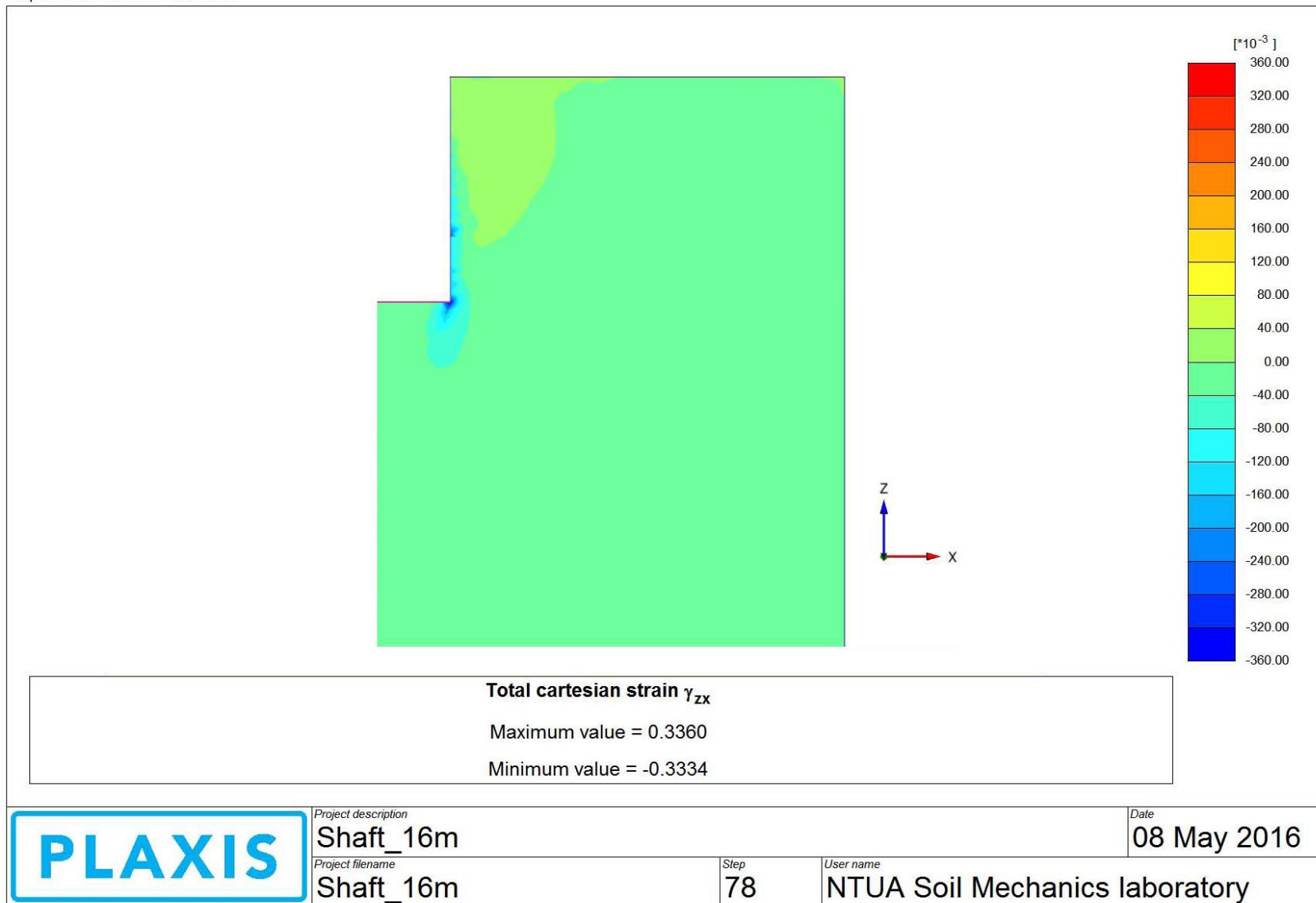
Εικόνα 150 : Plaxis 3D_Analysis N^o3 - Οι καθιζήσεις των επιφανειακών εδαφικών “στοιχείων” αλλά και η ανύψωση των κατώτερων στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

Output Version 2013.1.13962.9831



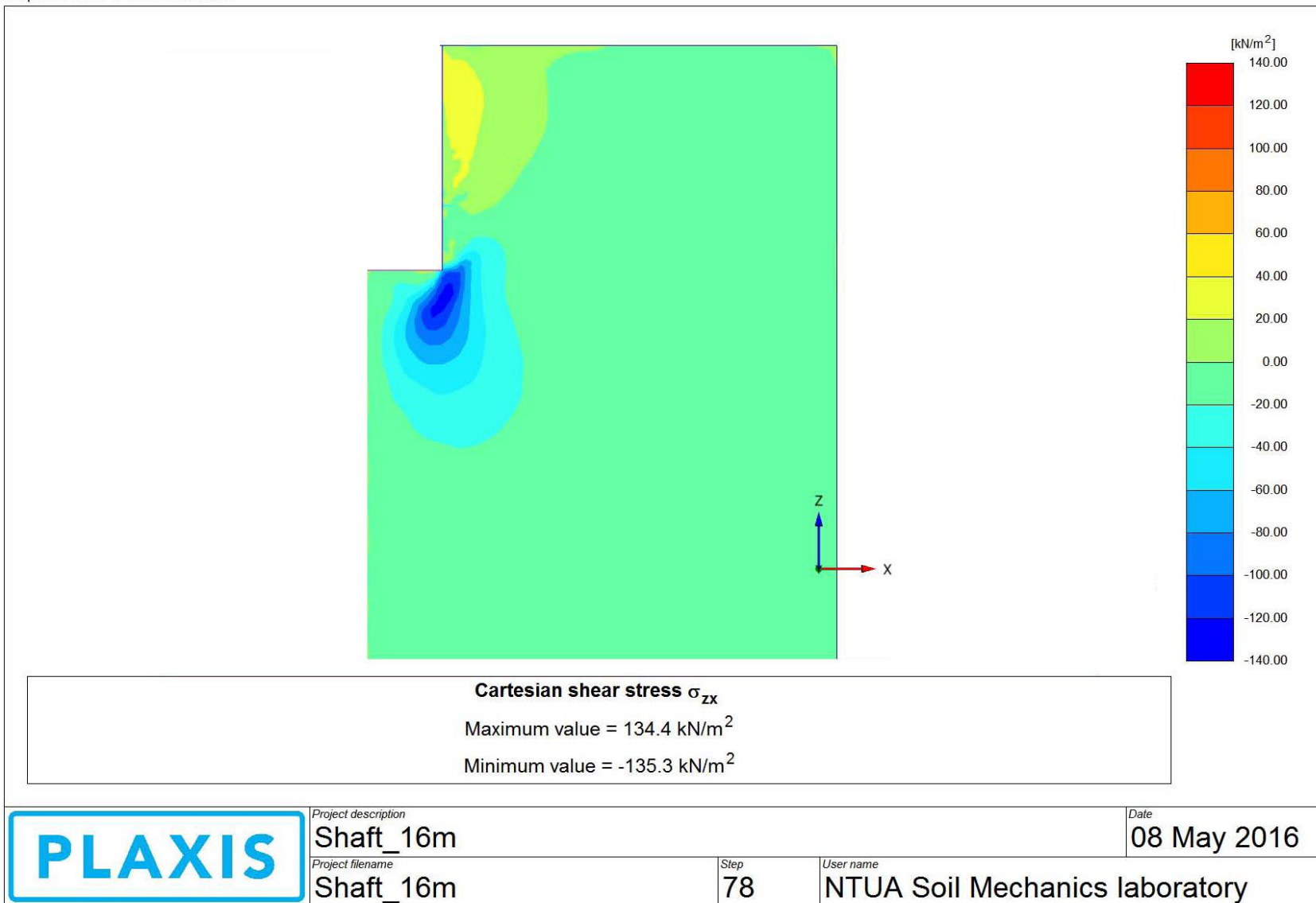
Εικόνα 151 : Plaxis 3D_Analysis N°3 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις των εδαφικών στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

Output Version 2013.1.13962.9831



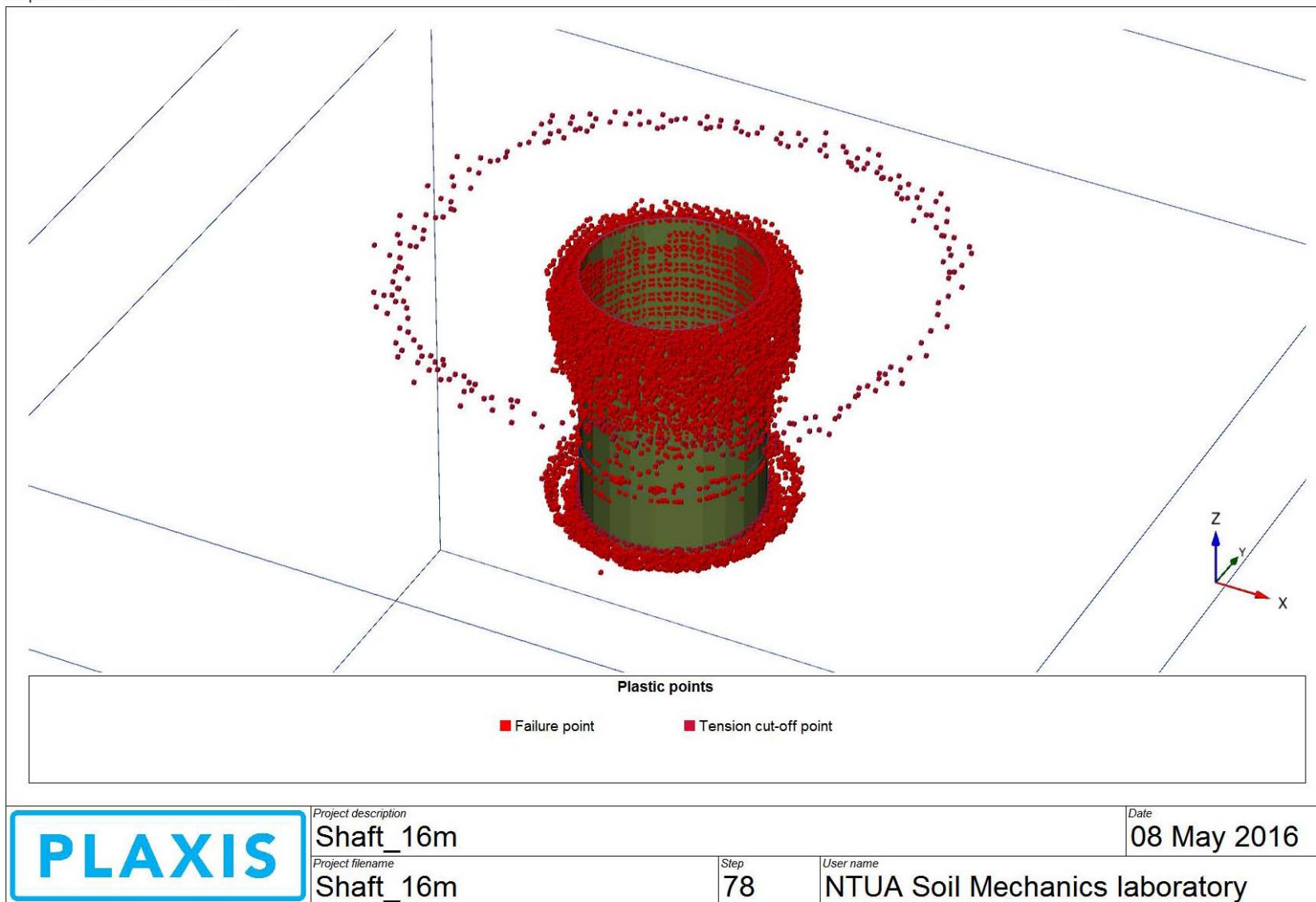
Εικόνα 152 : Plaxis 3D_Analysis N°3 – Οι ολικές διατμητικές παραμορφώσεις κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).

Output Version 2013.1.13962.9831



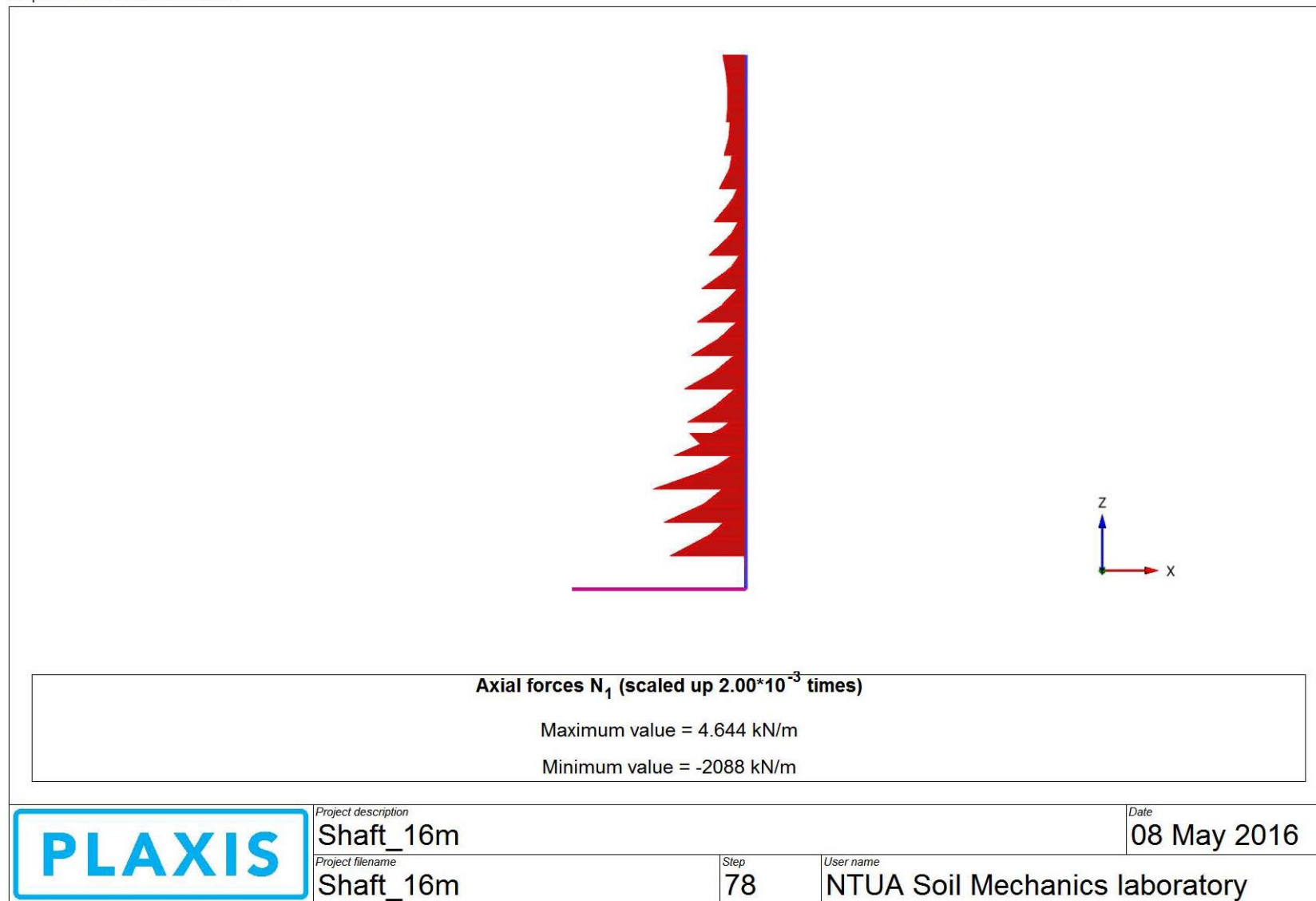
Εικόνα 153 : Plaxis 3D_ Analysis N°3 - Οι διατμητικές τάσεις περιμετρικά της εκσκαφής κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης.

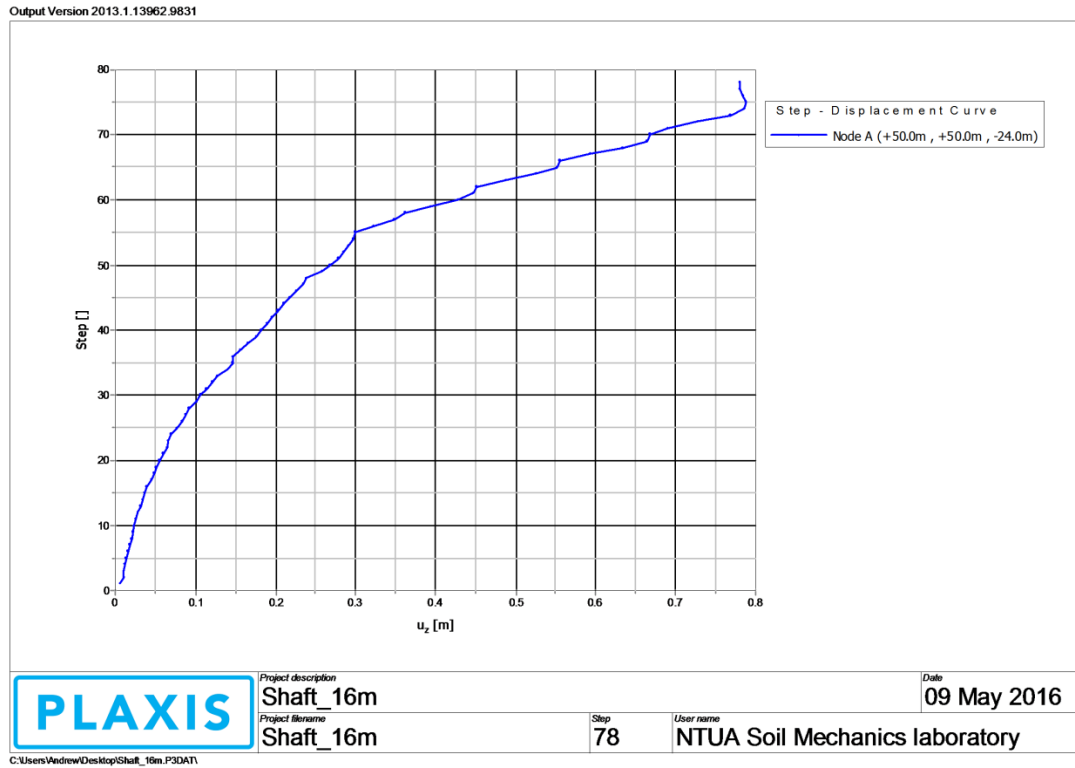
Output Version 2013.1.13962.9831



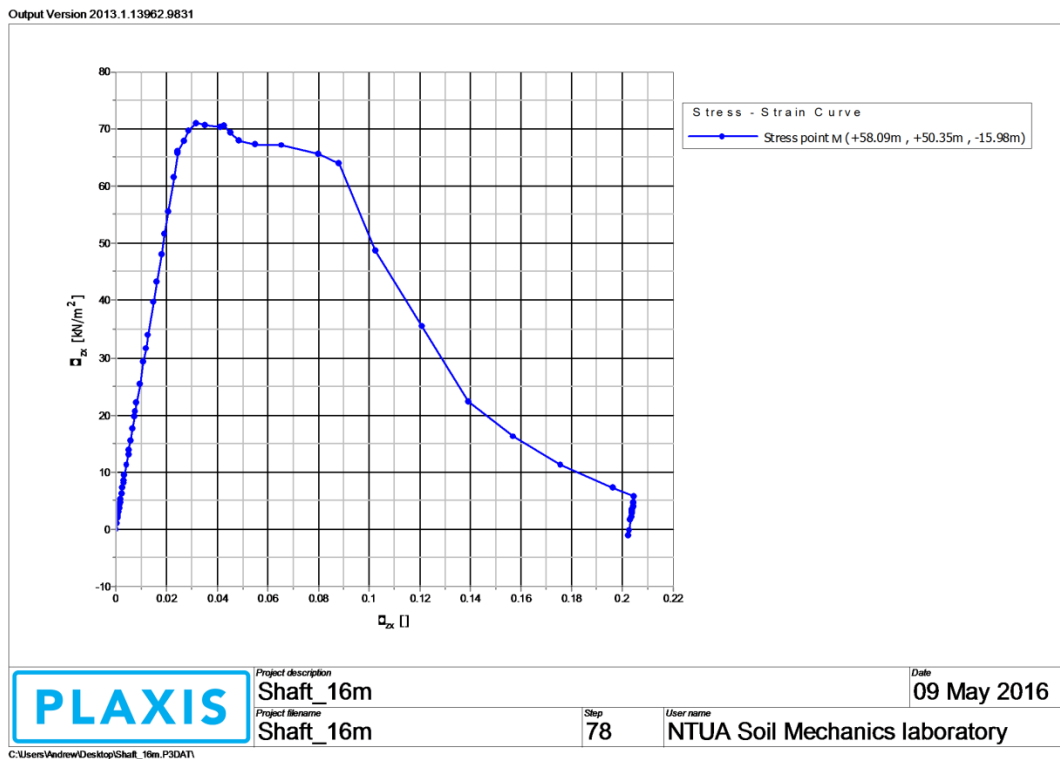
Εικόνα 154 : Plaxis 3D_ Analysis N^o3 - Τα σημεία αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής μετά την τελευταία φάση προσομοίωσης.

Output Version 2013.1.13962.9831

Εικόνα 155 : Plaxis 3D_Analysis N^o3 – Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 156 : Plaxis 3D_Analysis N^o3 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node C” (πυθμένας) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 157 : Plaxis 3D_Analysis N^o3 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point M” για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.

7.3.1 PLAXIS 3D_ANALYSIS N^o3-Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Από τις παραπάνω εικόνες, και έχοντας υπόψη την αντίστοιχη 2D ανάλυση, προκύπτουν τα εξής:

1. Από τις “Εικόνα 150” σελ.157 και “Εικόνα 151” σελ.158, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 81” σελ.84, συμπερνείται ότι τόσο οι κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις όσο και οι οριζόντιες λαμβάνουν παρόμοιες τιμές στην διδιάστατη και τριδιάστατη προσομοίωση. Επιπλέον, από την 3D ανάλυση, η μέγιστη καθίζηση εμφανίζεται ακριβώς στην παρειά της εκσκαφής και ισούται με **9cm**. Τέλος η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση εμφανίζεται σε βάθος 23m και ισούται με **20cm**.
2. Στην “Εικόνα 152” σελ.159 παρατηρείται ότι οι μέγιστες διατμητικές παραμορφώσεις λαμβάνουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές και εμφανίζονται στην περιοχή περιμετρικά του πυθμένα - στην περιοχή δηλαδή των έντονων πλαστικών παραμορφώσεων. Οι τιμές τους είναι παρόμοιες στις διδιάστατες και τριδιάστατες αναλύσεις.
3. Από την “Εικόνα 155” σελ.162, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 83” σελ.86, συμπερνείται ότι η διδιάστατη ανάλυση είναι ελαφρώς δυσμενέστερη όσον αφορά τις εφαπτομενικές δυνάμεις επί της υποστήριξης. Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη τιμή των “hoop forces” αγγίζει τα **2.1 MN/m**. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια, με το ενδιαφέρον φαινόμενο τα τρία τελευταία “segmental rings” να δέχονται παρόμοιες “hoop forces” και το τελευταίο “segmental ring” να δέχεται ελάχιστες “hoop forces”.
4. Στην “Εικόνα 157” σελ.163 παρατηρείται η σταδιακή αποφόρτιση του σημείου M το οποίο ανήκει στην κατακόρυφη παρειά και πιο συγκεκριμένα στην πρώτη στρώση “silty sand”. Η αποφόρτιση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων οι οποίες φτάνουν στο όριο τους κατά την Φάση 11. Στη συνέχεια ακολουθούν αυξημένες παραμορφώσεις (“αστοχία”).

7.4 PLAXIS 3D_ANALYSIS N⁰4

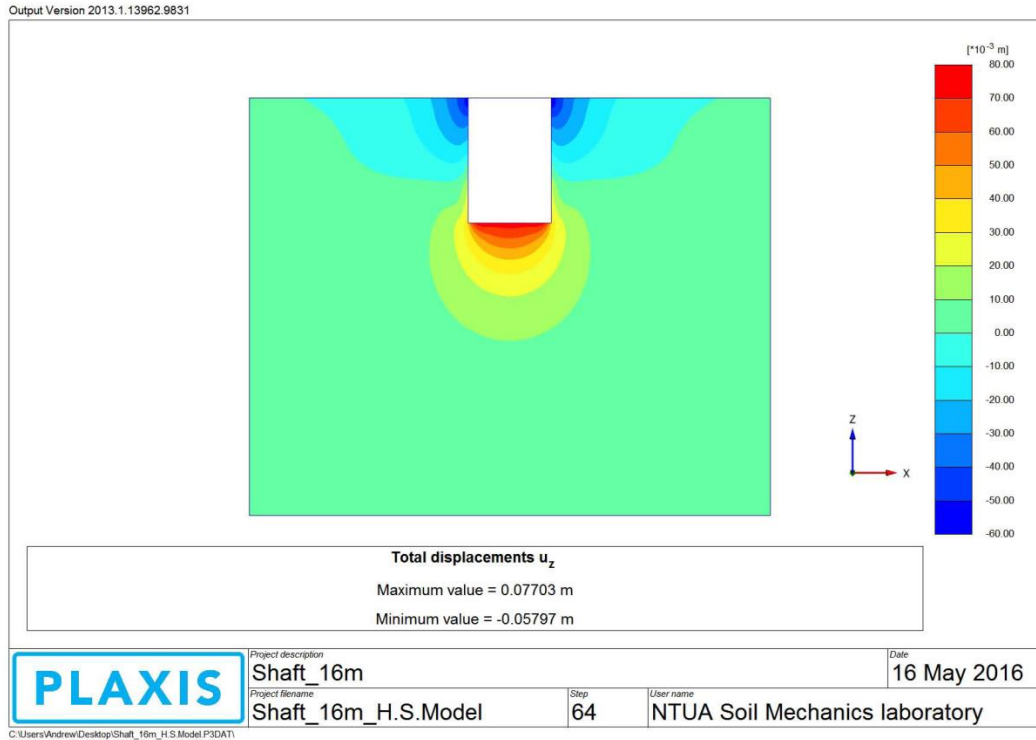
Πρόκειται για τριδιάστατη ανάλυση σύμφωνα με την οποία το κριτήριο συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων είναι το “Hardening Soil”, όπως περιγράφεται στην Ενότητα “3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ HARDENING SOIL” σελ.27. Οι παράμετροι της ανάλυσης περιγράφονται στον “Πίνακας 29” σελ.116. Ακολουθεί η περιγραφή των χαρακτηριστικών “nodes” και “stress points” που επιλέγονται για την ανάλυση. Σημειώνεται ότι τα σημεία των “Πίνακας 40” και “Πίνακας 41” είναι ακριβώς ίδια με τα αντίστοιχα της ανάλυσης 3.

Πίνακας 40 : Plaxis 3D_Analysis N⁰4 – Οι τρεις κόμβοι που επιλέγονται για την χάραξη των “Load-Displacement Curves”.

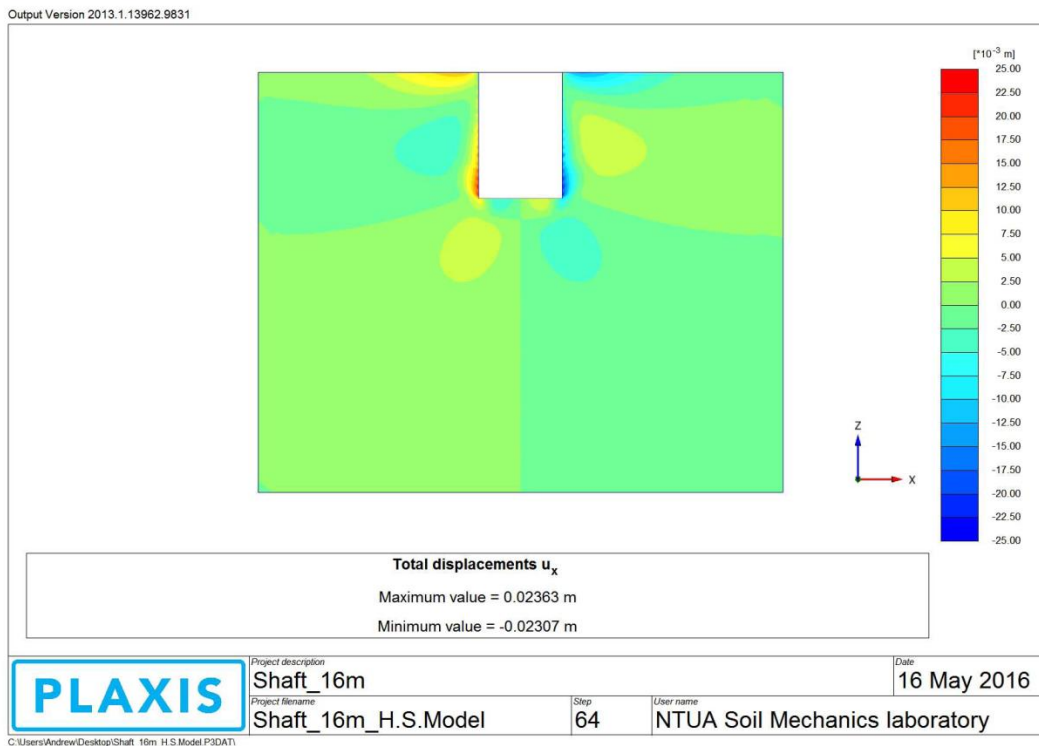
Plaxis 3D_Analysis N ⁰ 3 - Nodes for Load-Displacement Curves	
Κόμβοι	Σύντομη Περιγραφή
Node A (+50.0m , +50.0m , -24.0m)	Σημείο στο κέντρο του πυθμένα της εκσκαφής όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανύψωση (uplift).
Node B (+58.63m , +49.84m , -24.56m)	Σημείο στον πυθμένα της εκσκαφής και συγκεκριμένα στην ακμή της κατακόρυφης υποστήριξης όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων (plastic points).
Node C (+58.0m , +50.0m , -21.75m)	Σημείο στο οποίο τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη κατά την “Phase 16”. Ιδιαίτερα δυσμενής φάση προσομοίωσης και σημείο με αυξημένες μετακινήσεις.

Πίνακας 41 : Plaxis 3D_Analysis N⁰4 - Τα τρία “stress points” που επιλέγονται για την χάραξη “Stress-Strain Curves”.

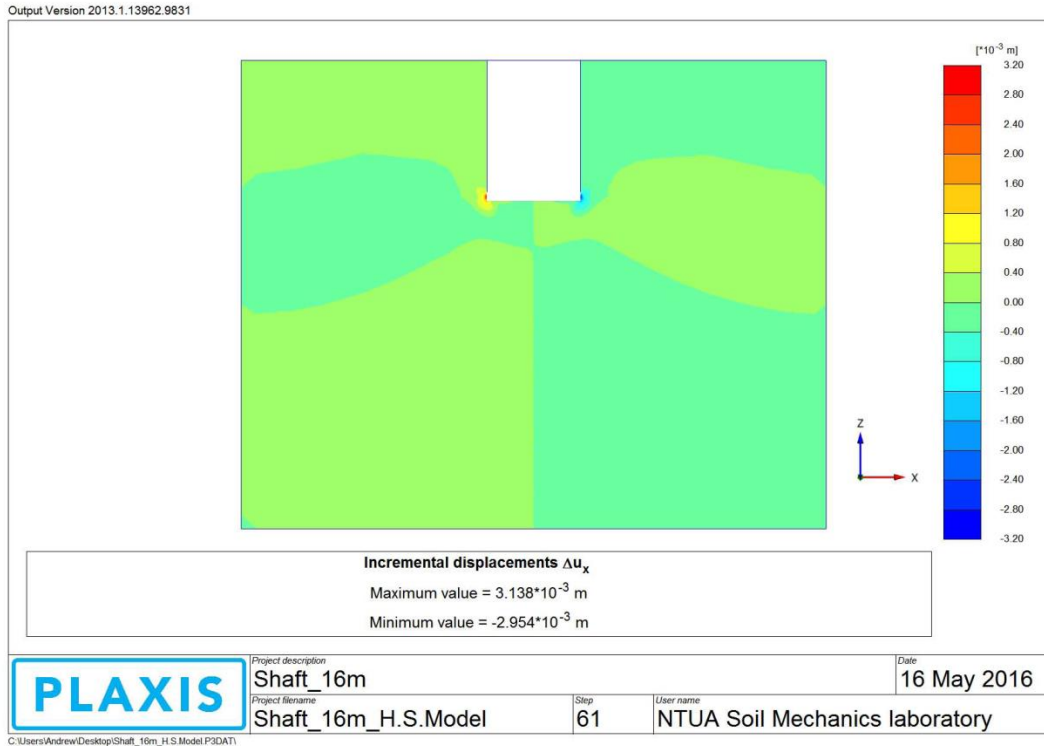
Plaxis 3D_Analysis N ⁰ 3 – Stress Points for Stress-Strain Curves	
Σημεία	Σύντομη Περιγραφή
Stress point K (+60.09m , +50.11m , 24.34m)	Σημείο στην ακμή του πυθμένα στο οποίο εμφανίζονται αυξημένες παραμορφώσεις.
Stress point L (+50.08m , +50.09m , -24.68m)	Σημείο κάτω από την τελική στάθμη του πυθμένα. Σημείο με έντονη συμπεριφορά “αποφόρτισης”.
Stress point M (+58.09m , +50.35m , -15.98m)	Σημείο το οποίο ανήκει στην κατακόρυφη παρειά εκσκαφής και συγκεκριμένα στην στρώση “silty sand”.



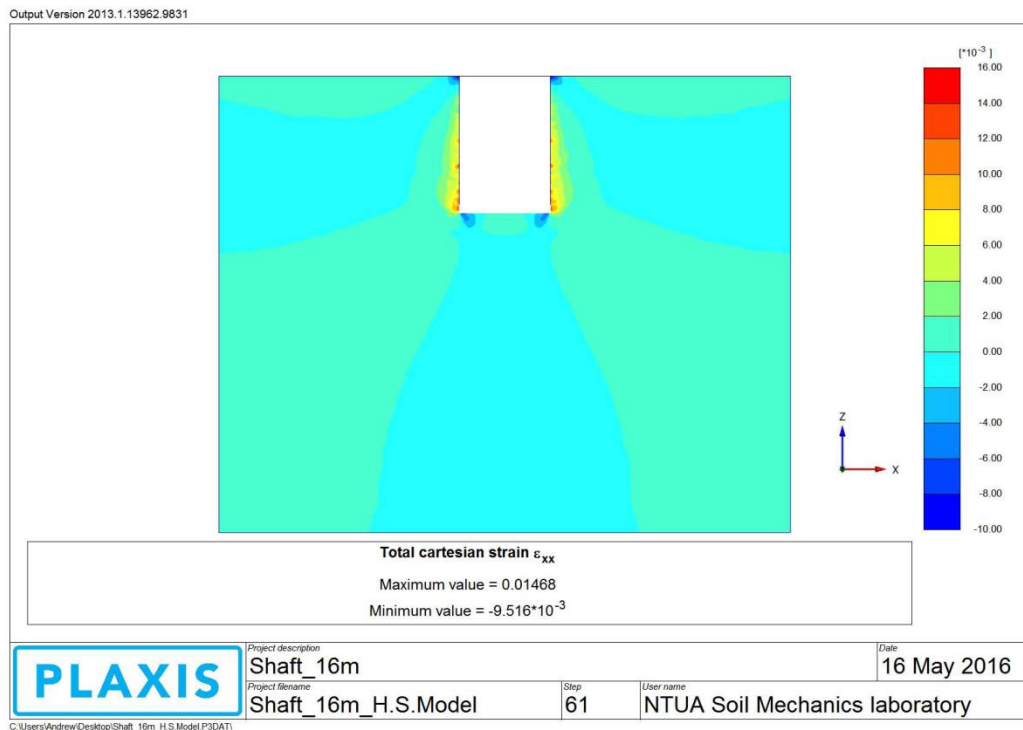
Εικόνα 158 : Plaxis 3D_Analysis N^ο4 - Οι καθιζήσεις των επιφανειακών εδαφικών “στοιχείων” αλλά και η ανύψωση των κατώτερων στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).



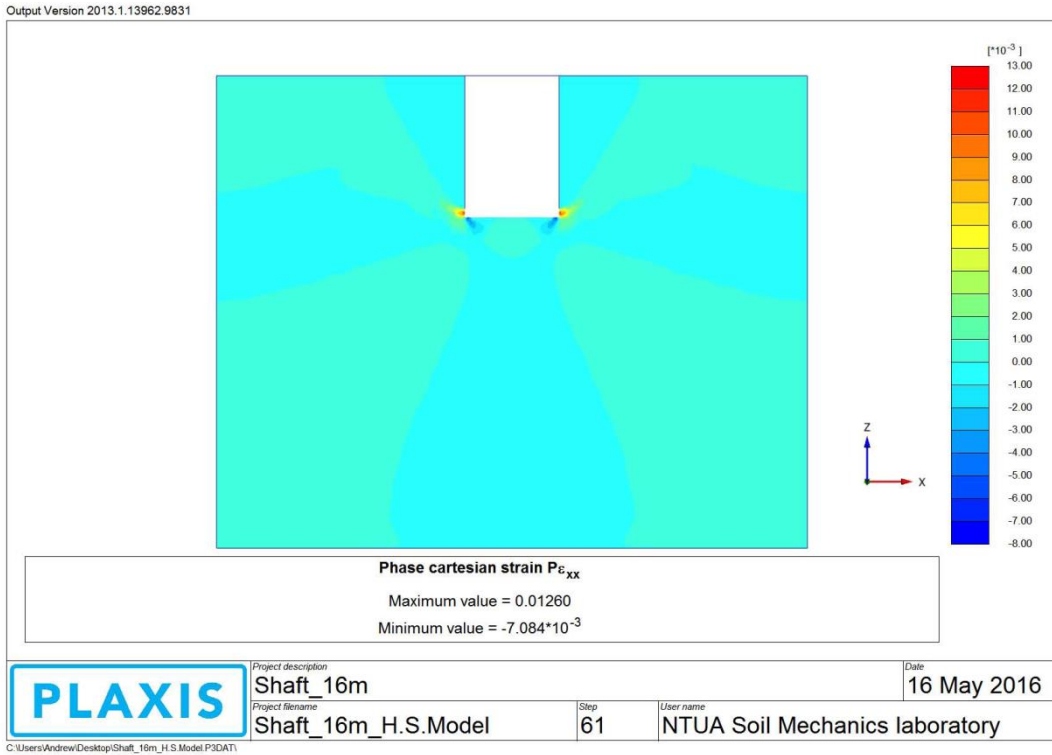
Εικόνα 159 : Plaxis 3D_Analysis N^ο4 - Οι οριζόντιες μετακινήσεις των εδαφικών στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 17).



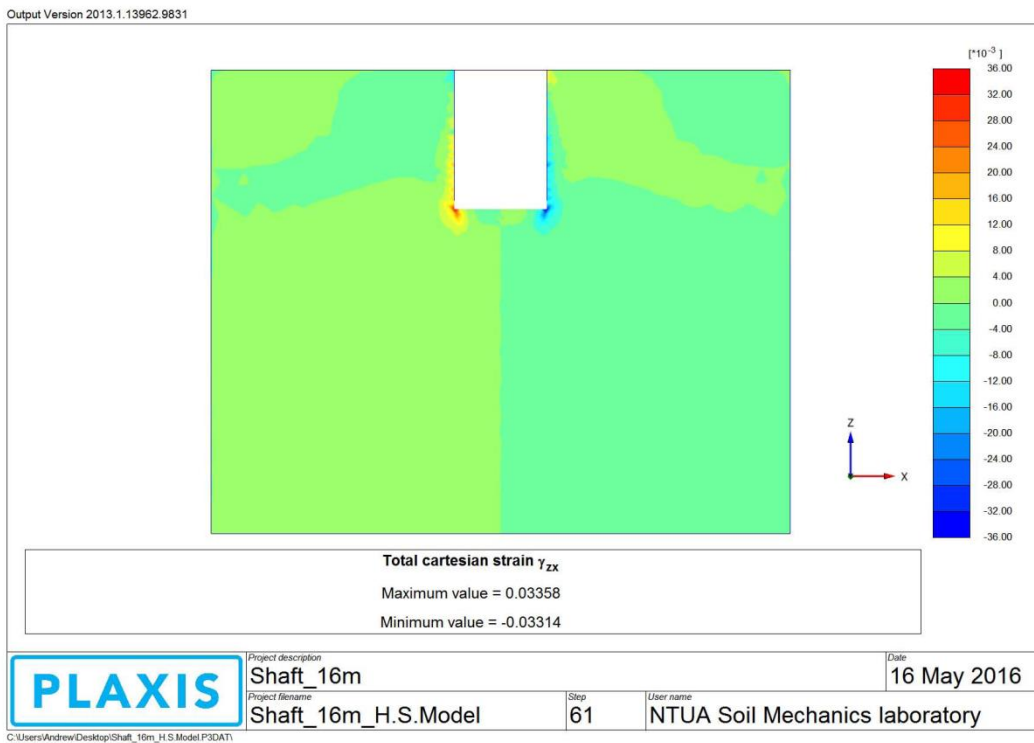
Εικόνα 160 : Plaxis 3D_Analysis N^o4 – Οι πρόσθετες οριζόντιες μετακινήσεις του προσομοιώματος κατά την προτελευταία φάση προσομοίωσης (Φάση 16).



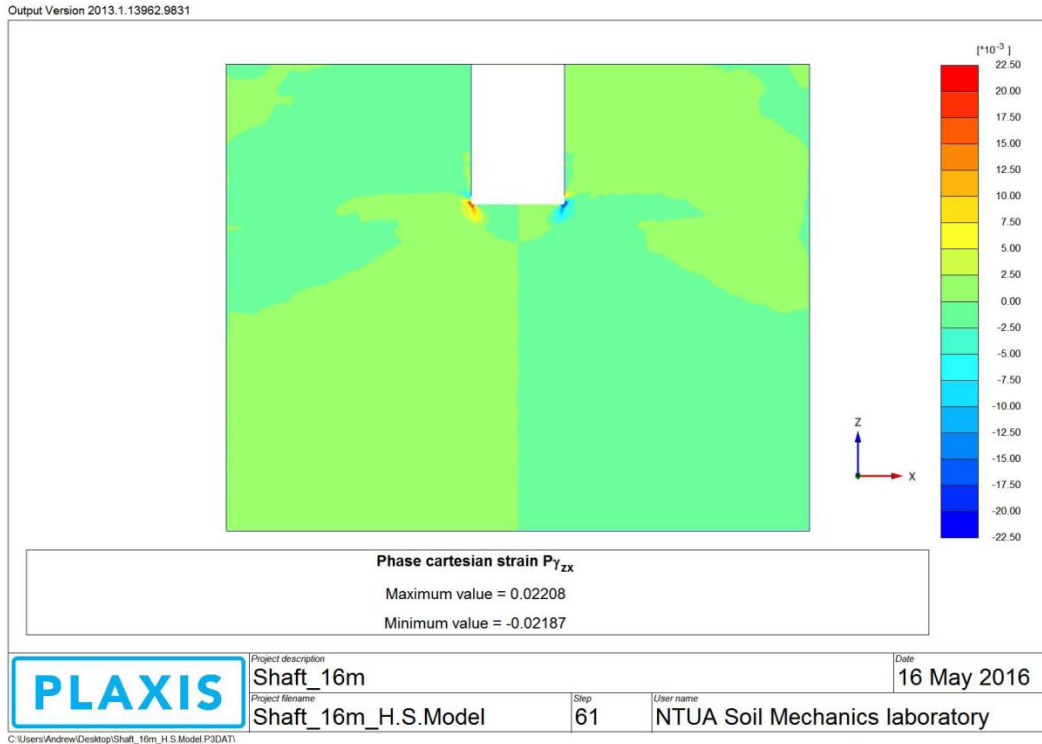
Εικόνα 161 : Plaxis 3D_Analysis N^o4 – Οι ολικές οριζόντιες ορθές παραμορφώσεις των στρώσεων μετά το πέρας των αναλύσεων.



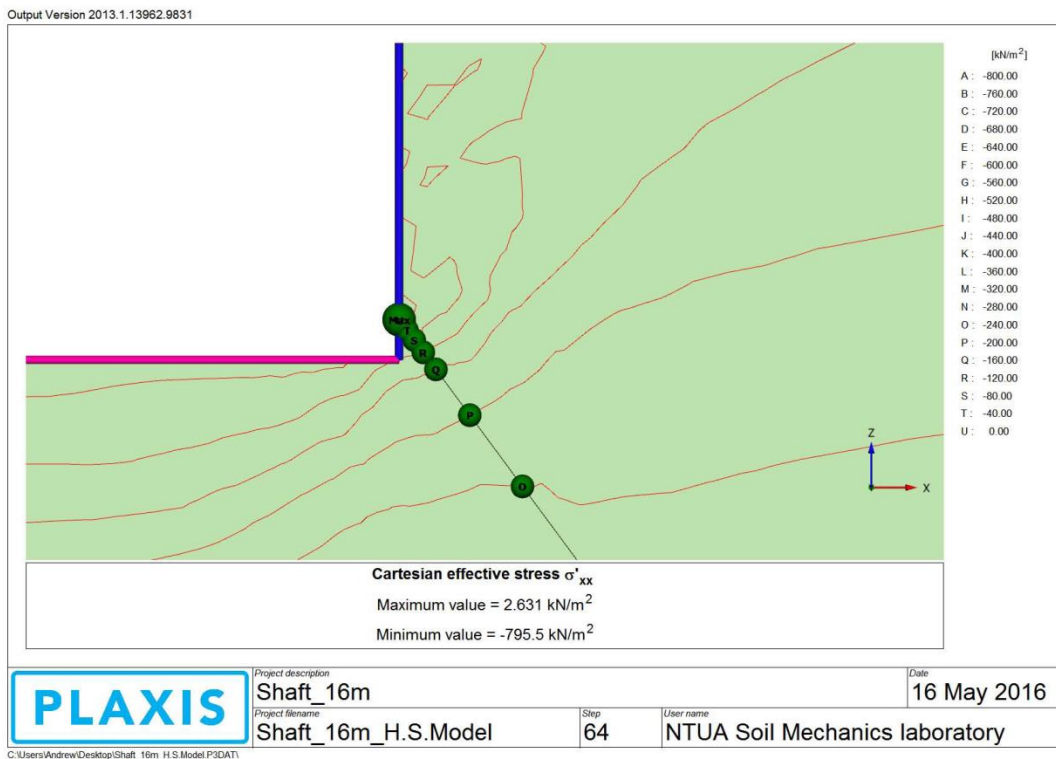
Εικόνα 162 : Plaxis 3D_Analysis N°4 – Οι πρόσθετες οριζόντιες ορθές τροχές κατά την προτελευταία φάση προσομοίωσης (ανυποστήρικτη κατακόρυφη παρειά ύψους 1.5m)



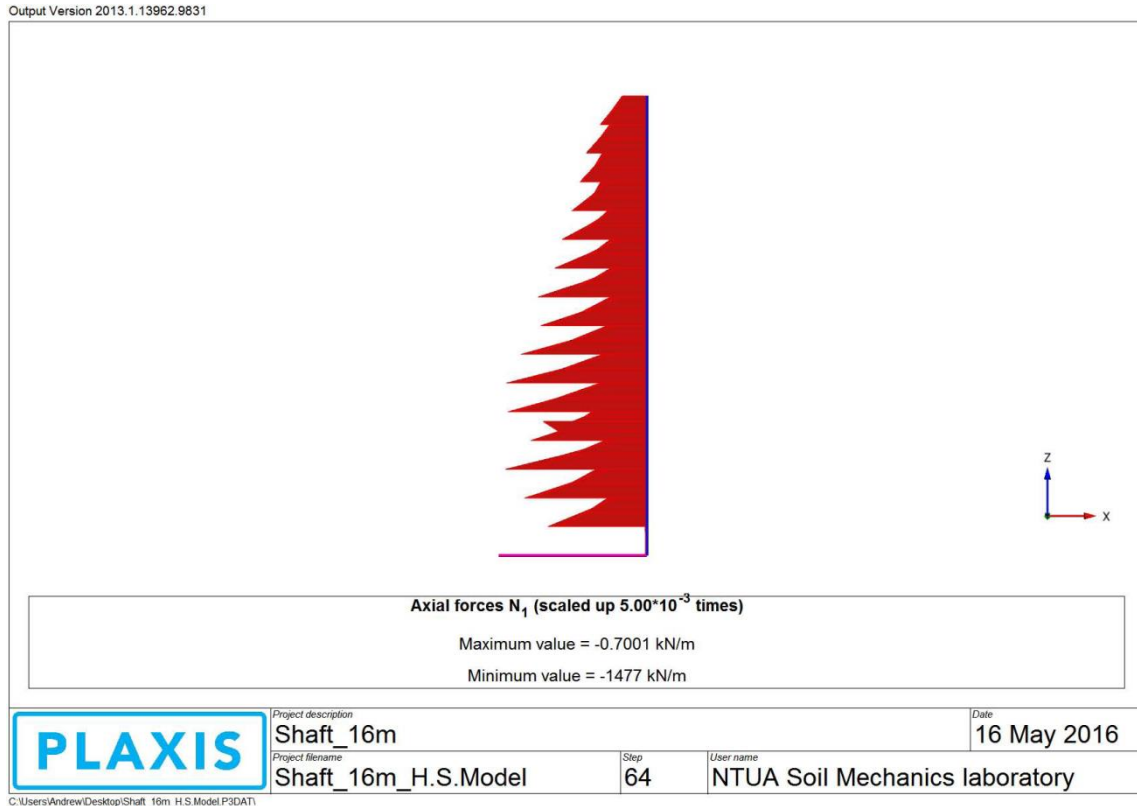
Εικόνα 163 : Plaxis 3D_Analysis N°4 – Οι ολικές διαμητικές παραμορφώσεις των στρώσεων κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης.



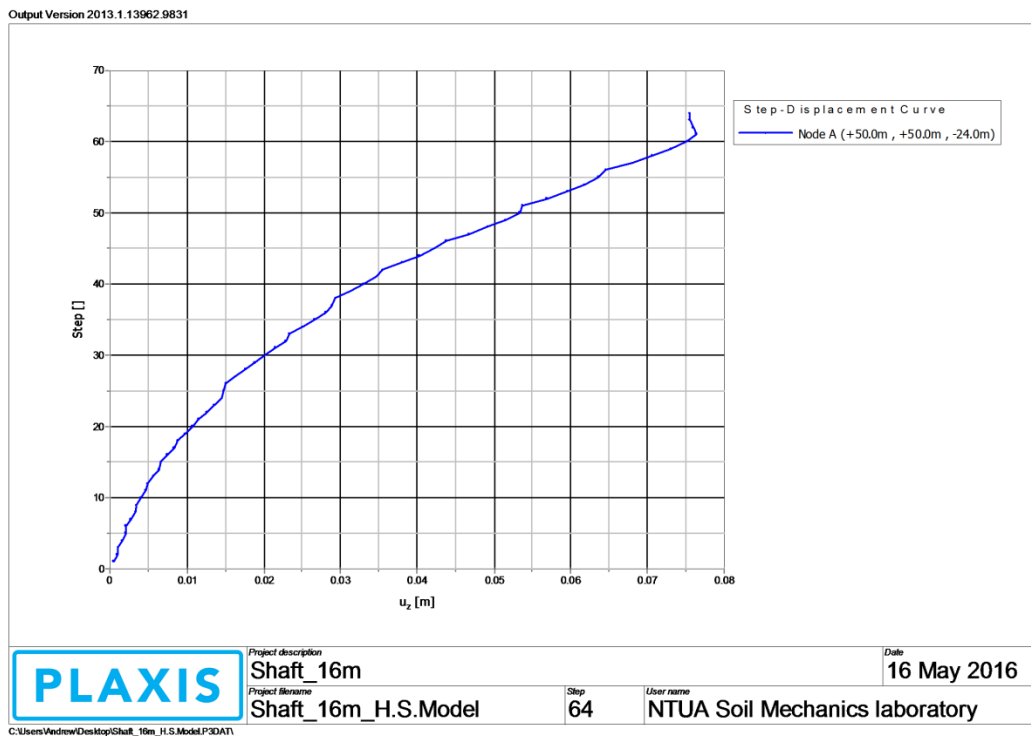
Εικόνα 164 : Plaxis 3D_Analysis N°4 – Οι πρόσθετες διατμητικές παραμορφώσεις κατά την προτελευταία φάση προσομοίωσης.



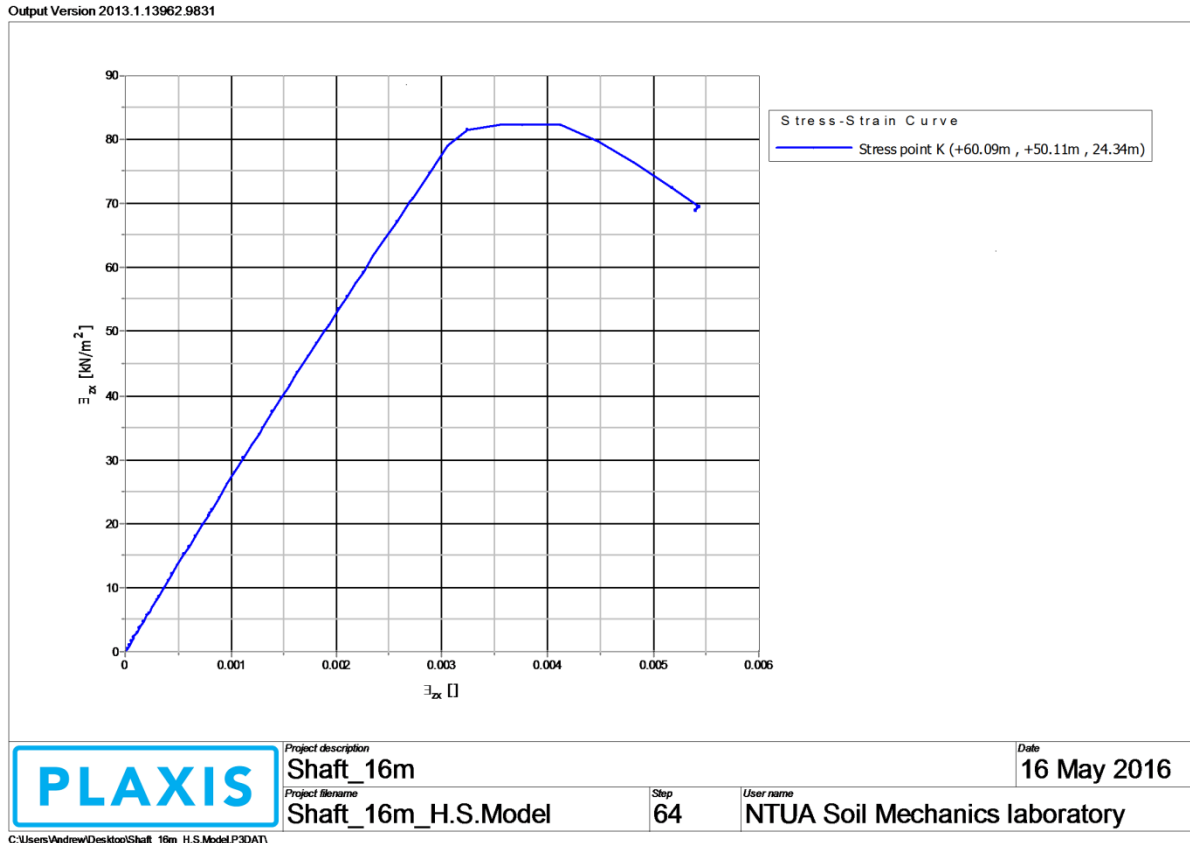
Εικόνα 165 : Plaxis 3D_Analysis N°4 – Οι οριζόντιες ορθές τάσεις μετά το πέρας της ανάλυσης.



Εικόνα 166 : Plaxis 3D_Analysis N^o4 – Διάγραμμα “hoop forces” του φορέα μετά το πέρας της ανάλυσης.



Εικόνα 167 : Plaxis 3D_Analysis N^o4 – Η καμπύλη της ανύψωσης του “Node C” (πυθμένας) μετά το πέρας της ανάλυσης.



Εικόνα 168 : Plaxis 3D_Analysis N^o4 – Η καμπύλη διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων του “stress point K” μετά το πέρας της ανάλυσης.

7.4.1 PLAXIS 3D_ANALYSIS N^o4–Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Από την ανωτέρω τελευταία ανάλυση N^o4 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Από την “Εικόνα 158” σελ.166, και σε σύγκριση με την “Εικόνα 99” σελ.101, συμπερένεται ότι οι τελικές τιμές της “βύθισης” του φρέατος, της επιφανειακής καθίζησης αλλά και της ανύψωσης πυθμένα είναι παρόμοιες με εκείνες της διδιάστατης ανάλυσης ελαφρώς δυσμενέστερες. Επιπλέον παρόμοιες εμφανίζονται και οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες αφορούν το μέγιστο βάθος των 24m.
2. Στην “Εικόνα 160” σελ.167 παρατηρούνται οι τελευταίες πρόσθετες οριζόντιες μετακινήσεις του προσομοιώματος κατά την πρότελευταία φάση. Επιπλέον παρατηρείται πως οι πρόσθετες αυτές μετακινήσεις συνοδεύονται από “έντονες” οριζόντιες ορθές παραμορφώσεις, ιδιαίτερα στο μέσο της ανυποστήρικτης παρειάς ύψους 1.5m (“Εικόνα 162” σελ.168). Η τοποθέτηση των “segmental rings” έχει ως αποτέλεσμα την παρεμπόδιση περαιτέρω παραμορφώσεων των κατακορύφων παρειών. Αυτή η παρεμπόδιση όμως οδηγεί σε συγκέντρωση οριζοντίων ορθών τάσεων οι οποίες αποκτούν μέγιστες τιμές στην γωνία της υποστήριξης, όπως παρατηρείται στην “Εικόνα 165” σελ.169. Το φαινόμενο αυτό της συγκέντρωσης τάσεων “ σ_{xx} ” στην γωνία της

υποστήριξης είναι πολύ “έντονο” με την χρήση του κριτηρίου “Mohr-Coulomb” ως κριτήριο αστοχίας των εδαφικών στρώσεων. Τέλος αυτή η συγκέντρωση των οριζοντίων ορθών τάσεων είναι “υπεύθυνη” για την μορφή των διαγραμμάτων “Hoop Forces” τα οποία με τη σειρά τους απεικονίζουν αυτή την ανομοιόμορφη καταπόνηση των προκατασκευασμένων στοιχείων. Τέλος, είναι προφανές ότι η καταπόνηση της υποστήριξης με την χρήση του κριτηρίου “Mohr-Coulomb” εμφανίζεται “έντονα” ανομοιόμορφη.

8

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ανάλυση της κατασκευής φρεάτων με την μέθοδο “Underpin” και οι προσομοιώσεις που προηγήθηκαν πραγματοποιήθηκαν για τους λόγους που αναφέρονται στην ενότητα “1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΟΙ ΣΤΟΧΟΙ” σελ.10. Από τις γενικότερες συνθήκες που αφορούν το συγκεκριμένο έργο λοιπόν, όπως αυτές περιγράφονται στο Κεφάλαιο 1, ορίστηκε το προσομοίωμα με τις απαραίτητες παραδοχές, όπως αυτές καταγράφονται στο Κεφάλαιο 3 “ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ” σελ.23. Μετά το πέρας των παραμετρικών αναλύσεων είναι απαραίτητες ορισμένες διευκρινήσεις σχετικά με τα αποτελέσματά που προέκυψαν και σχολιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια:

❖ **Η χρησιμότητα του Plaxis 3D σε αξονοσυμμετρικά προβλήματα.**

Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι στα αξονοσυμμετρικά προβλήματα, όπως αυτό του κατακόρυφου κυλινδρικού φρέατος, η ανάλυση με το Plaxis 2D είναι αρκετή για τον υπολογισμό των πρὸς εξέταση μεγεθών. Πράγματι η απόκλιση μεταξύ των τριδιάστατων και διδιάστατων αναλύσεων είναι πολύ μικρή επομένως αυτός ο ισχυρισμός θα μπορούσε να είναι αληθής, αν προστεθεί σε αυτόν και η χρονοβόρος διαδικασία των υπολογισμών με το Plaxis 3D. Τέλος οφείλεται να διευκρινιστεί ότι η απόκλιση μεταξύ των δύο αναλύσεων θα ήταν πολύ μικρότερη στην περίπτωση κυλινδρικής κατασκευής μεγαλύτερου βάθους. Ο πυθμένας του φρέατος αποτελεί ένα κάτω σύνορο το οποίο επηρεάζει ως ένα βαθμό τα αποτελέσματα.

❖ **Η γενικότερη ανύψωση του προσομοιώματος.**

Είναι πολύ χαρακτηριστικό το φαινόμενο της γενικότερης ανύψωσης των πρὸς εξέταση προσομοιωμάτων στα οποία ως κριτήριο συμπεριφοράς των γεωυλικών επιλέγεται το κριτήριο “Mohr-Coulomb”. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε με την χρήση και των δύο τύπων

αναλύσεων (2D και 3D ανάλυση). Το γεγονός αυτό είναι προφανώς παράλογο και απαιτεί ιδιαίτερη ερμηνεία. Σύμφωνα λοιπόν με το **“Plaxis Bulletin _ Spring 1997 _ Column Vermeer”** η γενικότερη ανύψωση που παρατηρείται, λόγω αποφόρτισης των εδαφικών στρώσεων, αντιμετωπίζεται με τους εξής τρόπους: **α)** αύξηση του λόγου Poisson (ν) των στρώσεων, **β)** διαχωρισμός των στρώσεων σε “υποστρώσεις” με διαφορετικό Μέτρο Young (E) η κάθε μια έτσι ώστε να προσεγγίζεται με κάποιο τρόπο η εξάρτηση αυτού από το καθεστώς των κατακορύφων τάσεων και **γ)** αλλαγή του κριτηρίου αστοχίας σε “Hardening Soil”. Πράγματι οι “step-displacement curves” για τα σημεία της επιφάνειας κατέδειξαν ότι η αλλαγή του κριτηρίου αστοχίας οδήγησε σε αναμενόμενες καθιζήσεις (βλέπε “Εικόνα 132” σελ.137 και “Εικόνα 147” σελ.153).

❖ **Αλληλεπίδραση εδάφους–κατασκευής και επιλογή κατάλληλης τιμής R_{inter} .**

Οι προσχώσεις “ιλύδης άμμος” και “αμμώδης ιλύς”, με βάσει την τιμή του E_{oed}^{ref} , θεωρούνται “μαλακά εδάφη” (**“Plaxis Bulletin _ Spring 2001 _ Column Vermeer”**). Η επαφή των υλικών αυτών με μια κατασκευή πολύ μεγαλύτερου Μέτρου Ελαστικότητας απαιτεί την χρήση “interface elements”. Τα στοιχεία διεπιφάνειας λοιπόν χρησιμοποιούνται: **α)** για την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής επιτρέποντας την σχετική ολίσθηση μεταξύ των “segments” και του εδάφους και **β)** για την προσομοίωση της διατάραξης του εδάφους πέριξ της εκσκαφής. Τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά προσομοιώνονται με τον συντελεστή διεπιφάνειας R_{inter} με τον οποίο απομειώνονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής (c, ϕ) της διεπιφάνειας. Το “bonding” μεταξύ εδάφους-υποστήριξης επηρεάζει άμεσα τις παραμέτρους (c, ϕ). Για παράδειγμα η περίπτωση ενός “full roughness wall” οδηγεί στην επιλογή $R_{inter}=1$. Με την λογική λοιπόν μεγαλύτερου “Effective Young’s modulus” για την στρώση “silty sand” επιλέγεται $R_{inter}=0.7$, μεγαλύτερο δηλαδή από εκείνο της “sandy silt” ($R_{inter}=0.5$). Οι τιμές παρατίθενται στον “Πίνακας 5” σελ.26.

❖ **Η ανάπτυξη των “hoop forces” επί της υποστήριξης.**

Στην **παρατήρηση 4** της ενότητας “5.2.1 Plaxis 2D_ Analysis N°2– Αξιολόγηση αποτελεσμάτων” σελ.68, αλλά και στην **παρατήρηση 2** της ενότητας “7.4.1 PLAXIS 3D_ANALYSIS N°4–Σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.” σελ.171 γίνεται μια προσπάθεια κατανόησης του τρόπου ανάπτυξης των εφαπτομενικών δυνάμεων στα “segmental rings”. Έπειτα από την ολοκλήρωση των αναλύσεων συμπερένεται το εξής:

Ο τελευταίος δακτύλιος προκατασκευασμένων στοιχείων δεν δέχεται εφαπτομενικές τάσεις διότι οι αντίστοιχες ακτινικές τάσεις (ή αλλιώς οριζόντιες ορθές τάσεις σ_{xx}) που ασκούνται σε αυτό είναι μηδέν. Αυτό συμβαίνει διότι ήδη κατά την φάση 16 (προτελευταία φάση) έχουν ολοκληρωθεί οι εκσκαφές και έχει απομακρυνθεί ο εδαφικός όγκος στο υπόψη υψόμετρο (πλήρης αποφόρτιση των εδαφικών στοιχείων στην κατακόρυφη παρειά της εκσκαφής). Μια ικανοποιητική ερμηνεία του τρόπου φόρτισης των ανωτέρω προκατασκευασμένων στοιχείων, τα οποία φορτίζονται με τις μέγιστες εφαπτομενικές τάσεις, μπορεί να δοθεί μέσω του διαγράμματος “Εικόνα 89” σελ.90. Παρατηρείται λοιπόν ότι κατά την φάση 16 (τοποθέτηση της επένδυσης και ταυτόχρονα εκσκαφή στο αμέσως επόμενο βάθος) και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης αναπτύσσονται οριζόντιες ορθές τάσεις “sig’xx” οι οποίες ευθύνονται για την ανάπτυξη εφαπτομενικών τάσεων επί της υποστήριξης. Τέλος αξίζει να τονιστεί πως στην μεταπτυχιακή εργασία η επένδυση των προκατασκευασμένων στοιχείων έχει προσομοιωθεί με

“plates” δηλαδή με την χρήση “plate elements”. Με τον τρόπο αυτό όμως είναι αδύνατον να υπολογιστεί η μεταβολή των “hoop forces” κατά μήκος της διατομής του “segmental ring” (δηλαδή κατά μήκος του τοπικού άξονα 3, όπως δίνεται στην “Εικόνα 129” σελ.133). Επιπλέον δεν έχει προσομοιωθεί η διακριτοποίηση των “segments” στον οριζόντιο άξονα και η ανάλογη σύνδεση μεταξύ τους παρά μόνο έχει προβλεφθεί η τοποθέτηση ενός ενιαίου “segmental ring” σε κάθε φάση προσομοίωσης. Επομένως συνίσταται η χρήση επιπλέον προγραμμάτων για την επιβεβαίωση των εντατικών μεγεθών επί του φρέατος.

Ο συνδυασμός των διδιάστατων και τριδιάστατων αναλύσεων οδήγησε στα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Τα κυριότερα προβλήματα κατά την κατασκευή του φρέατος είναι: **α)** η ανύψωση πυθμένα λόγω “αποφόρτισης”, **β)** οι οριζόντιες μετατοπίσεις των κατακόρυφων παρειών της εκσκαφής λόγω “αποφόρτισης” και η εφαρμογή οριζοντίων ορθών ακτινικών τάσεων επί των προκατασκευασμένων στοιχείων και **γ)** η ανάπτυξη “πλαστικών” παραμορφώσεων στην ακμή του πυθμένα τις κατασκευής. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της χρήσης του Κριτηρίου “Mohr-Coulomb”, περιμετρικά της κατασκευής δεν προκύπτουν προβλήματα καθιζήσεων αλλά μια γενικότερη ανύψωση (αξιοσημείωτες καθιζήσεις δεν εμφανίζονται παρά μόνο σε πολύ μικρή απόσταση περιμετρικά του φρέατος). Το ζήτημα αυτό σχολιάζεται εκτενώς παραπάνω. Ωστόσο τα παραπάνω προβλήματα περιγράφονται επακριβώς (και ταυτόχρονα επαληθεύουν την ορθότητα των αναλύσεων) στην Ενότητα “1.2 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΦΡΕΑΤΩΝ” σελ.3.
- ❖ Η Φάση 16 (προτελευταία φάση προσομοίωσης) αποτελεί την δυσμενέστερη φάση των αναλύσεων. Κατά την Φάση 16 λοιπόν : **α)** αναπτύσσεται εκτεταμένη ζώνη από “failure points” στην γωνία του πυθμένα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εκτεταμένων μετακινήσεων, **β)** τοποθετείται εκείνο το “segmental ring” το οποίο δέχεται τις μεγαλύτερες “hoop forces”. Κατά την Φάση 17 (βλέπε “Πίνακας 6” σελ.28) τα “plastic points” είναι λιγότερα, οι πρόσθετες μετακινήσεις είναι μηδενικές και η επένδυση (“final segmental ring” και “lean concrete”) η οποία τοποθετείται δέχεται μηδενικά σχεδόν εντατικά μεγέθη (M, Q, N, Hoop Forces).
- ❖ Οι εφαπτομενικές δυνάμεις (“hoop forces”) είναι η δυσμενέστερη φόρτιση επί τις κατασκευής. Σύμφωνα με τις αναλύσεις η μέγιστη τιμή άγγιξε τα **2.3 MN/m** (βλέπε “Εικόνα 83” σελ.86).
- ❖ Η επιλογή κριτηρίου αστοχίας και η διάμετρος του φρέατος αποτελούν τις δυσμενέστερες παραμέτρους σύμφωνα με τις αναλύσεις. Οι γεωτεχνικές παράμετροι της διεπιφάνειας και η αλλαγή του E_{ur}^{ref} (Hardening Soil Model) αποτελούν παραμέτρους δευτερεύουσας σημασίας.
- ❖ Το Κριτήριο “Mohr-Coulomb” αποτελεί το δυσμενέστερο κριτήριο συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων. Ειδικά κατά την Ανάλυση 5 (βλέπε την Ενότητα “5.5 PLAXIS 2D_ ANALYSIS N^o 5” σελ.82) τα κυριότερα προβλήματα που αναφέρονται παραπάνω λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Τα προβλήματα αυτά περιορίζονται με την επιλογή του “Hardening Soil Model” ως κριτηρίου συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων. Επιπλέον με το “Hardening Soil Model” παύουν τα προβλήματα γενικότερης ανύψωσης του προσομοιώματος, όπως προκύπτει από τις αναλύσεις 3, 4, 7 και 8.

- ❖ Ο εδαφικός όγκος του πυθμένα ανυψώνεται ως “στερεό”. Πρόσθετες καμπύλες διατμητικών τάσεων – διατμητικών τροπών σε “stress points” του πυθμένα κατέδειξαν ότι τα σημεία αυτά παραμορφώνονται ελάχιστα και σε καμία περίπτωση δεν φτάνουν την διατμητική τους αντοχή.
- ❖ Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου “Underpin” είναι: **α)** η επάρκεια της υποστήριξης έναντι των “hoop forces”, **β)** οι μειωμένες πιέσεις επί της υποστήριξης (οι οποίες συνδεόνται άμεσα με την ίδια την αλληλουχία των φάσεων προσομοίωσης, δηλαδή αυτή καθ’αυτή τη μέθοδο “Underpin”) και **γ)** η εντατική καταπόνηση (λόγω των “hoop forces”) κάθε “segmental ring” η οποία είναι μεταβλητή καθ’ύψος αυτού αλλά και με το βάθος εκσκαφής. Η ιδιαίτερη μορφή των διαγραμμάτων των “hoop forces” έγκειται στο γεγονός ότι οι κατακόρυφες συνδέσεις (κοχλιώσεις) μεταξύ των προκατασκευασμένων στοιχείων στην μέθοδο “underpin” δεν μεταβιβάζουν επαπτομενικές δυνάμεις. Αυτό είναι ευδιάκριτο στην “Εικόνα 29” του Παραρτήματος Α σύμφωνα με την οποία κάθε “segmental ring” εντείνεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Σημειώνεται ότι πρόκειται για μια εξυδανικευμένη ανάλυση σύμφωνα με την οποία οι κατακόρυφες συνδέσεις αντικαθίστανται με αρθρώσεις.
- ❖ Μετά από αλλαγή του “Calculation type” σε “Phi/c reduction”, κατά την διαδικασία των υπολογισμών με το Plaxis 2D, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας για το έργο – όπως περιγράφεται στο “Plaxis 2D_ Reference Manual_Υποενότητα 4.9”. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς ο δυσμενέστερος συντελεστής ασφάλειας, “Σ-Msf”, ισούται με **1.97** και αντιστοιχεί στην Ανάλυση N^ο5, Φάση 16 (προτελευταία φάση προσομοίωσης). Για την ίδια ανάλυση, ο συντελεστής ασφάλειας για την Φάση 17 (τελευταία φάση) ισούται με **4.5**. Πρόκειται δηλαδή για μια κατασκευή χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα ευστάθειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τον συνδυασμό τις επιλογής “Phi/c reduction” με εξειδικευμένα κριτήρια εδαφικής συμπεριφοράς, τα κριτήρια αυτά συμπεριφέρονται όπως το κριτήριο “Mohr-Coulomb” χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση τις δυσκαμψίας των εδαφικών στοιχείων από τις ασκούμενες τάσεις σε αυτά (δηλαδή αύξηση της δυσκαμψίας με το βάθος).
- ❖ Τα προσομοιώματα της μεταπτυχιακής εργασίας εμπεριέχουν απλουστεύσεις οι οποίες ευνοούν την χρήση διδιάστατης ανάλυσης. Ωστόσο η χρήση ενός πιο περίπλοκου αξονοσυμμετρικού προβλήματος απαιτεί την χρήση τριδιάστατων γεωτεχνικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον η ορθή απεικόνιση των “hoop forces” σε οριζόντια τομή (βλέπε “Πίνακας 35” σελ.133) είναι δυνατή μόνο με τη χρήση του Plaxis 3D.

9

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Swolfs, W.M.2014. *Plaxis 2014 (Tutorial, Reference, Material Models and Scientific Manual)*, Delft

Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Swolfs, W.M.2013. *Plaxis 3D (Tutorial, Reference, Material Models and Scientific Manual)*, Delft

Κουμούσης, Β., 1998, *Ανάλυση Φορέων με Πεπερασμένα Στοιχεία – Σημειώσεις Μέρος Α'*, Ε.Μ.Π.

Αναγνωστόπουλος, Α., Μιχάλης, Η., 2004, *Σημειώσεις Αντιστηρίξεων και Καθιζήσεων λόγω εκσκαφών*, Ε.Μ.Π., pp 29-31

Papadopoulos, D., 2014. *Analysis of circular ventilation shaft with 2D and 3D finite element models (FEM)*. NTUA

Shaft construction methods comparison, NASTT, 2015. Denver, Colorado

Tunnel and shaft solutions, 2015, (Eds.), Humes, Holcim (Australia)

Tunnel Lining Design Guide, 2004, (Eds.), Telford, T., London, pp.83-86

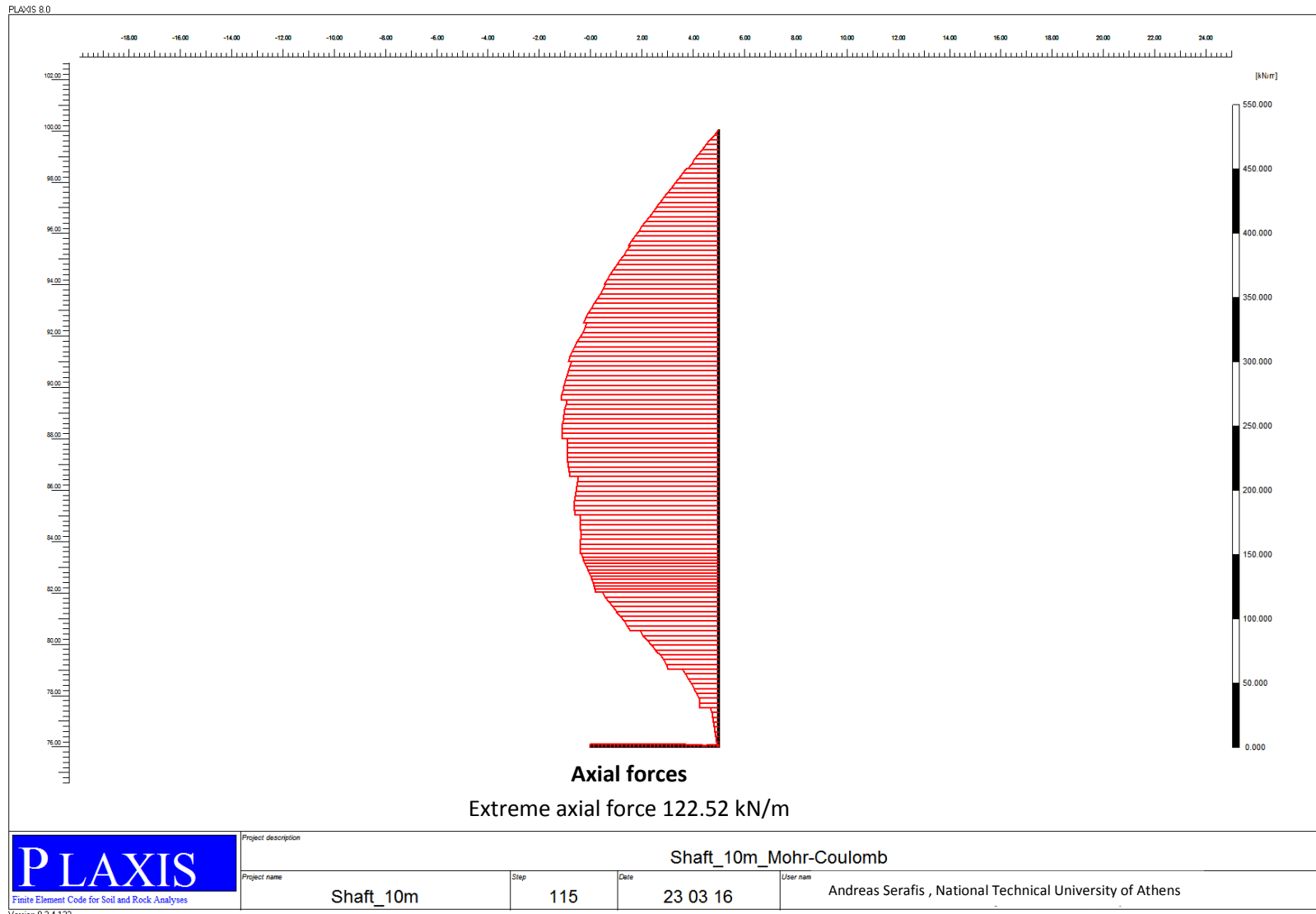
Bond, A.J., Schuppener, B., Scarpelli, G., Orr, T.L., 2013, *Eurocode 7: Geotechnical Design, Worked Examples*. Dublin

- Muramatsu, M., Abe, Y., 1996. *Considerations in shaft excavation and peripheral ground deformation*. In: Mair, R.J., Taylor, R.N., (Eds.), International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in soft ground, London, pp 173-178
- Tobar, T., Meguid, A.M. 2009. *Comparative evaluation of methods to determine the earth pressure distribution on cylindrical shafts: A review.*, Tunneling and Underground Space Technology 25, pp 188-197
- Dias, T.G.S., Farias, M.M., Assis, A.P., 2015. *Large diameter shafts for underground infrastructure*. Tunneling and Underground Space Technology 45, pp 181-189
- Bloodworth, A.G., 2002. *Three-dimensional Analysis of Tunnelling effects on structures to develop design methods*. Michaelmas Term, pp 5.1- 5.36
- Liao, L., De La Fuente, A., Cavalaro, S., Aguado, A., 2016. *Design procedure and experimental study on fibre reinforced concrete segmental rings for vertical shafts*. Materials and Design 92, pp 590-601
- Roy, D., Robinson, K.E., 2009. *Surface settlements at a soft soil site due to bed rock dewatering*. Engineering Geology 107, pp 109-117

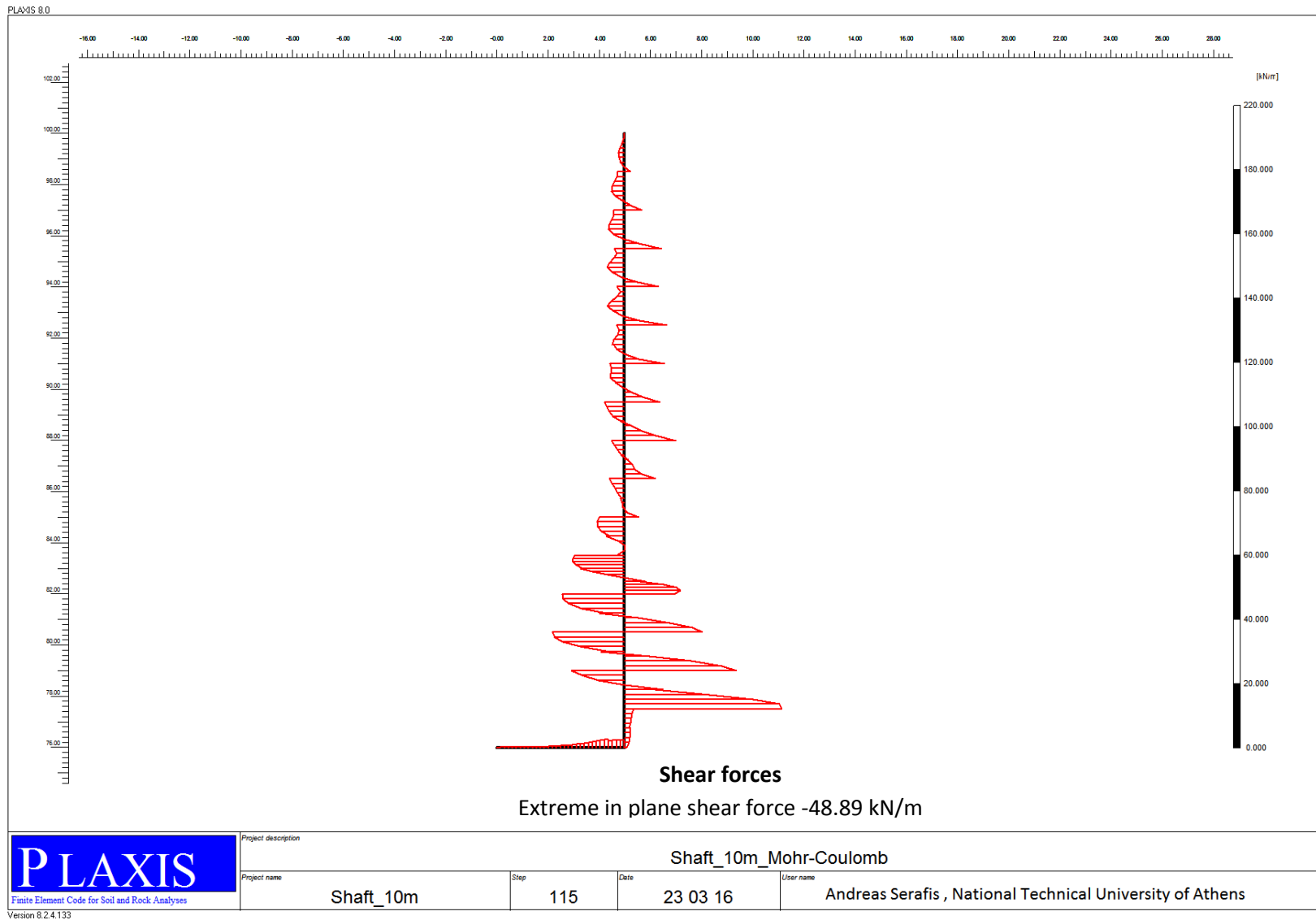
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS 2D-ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

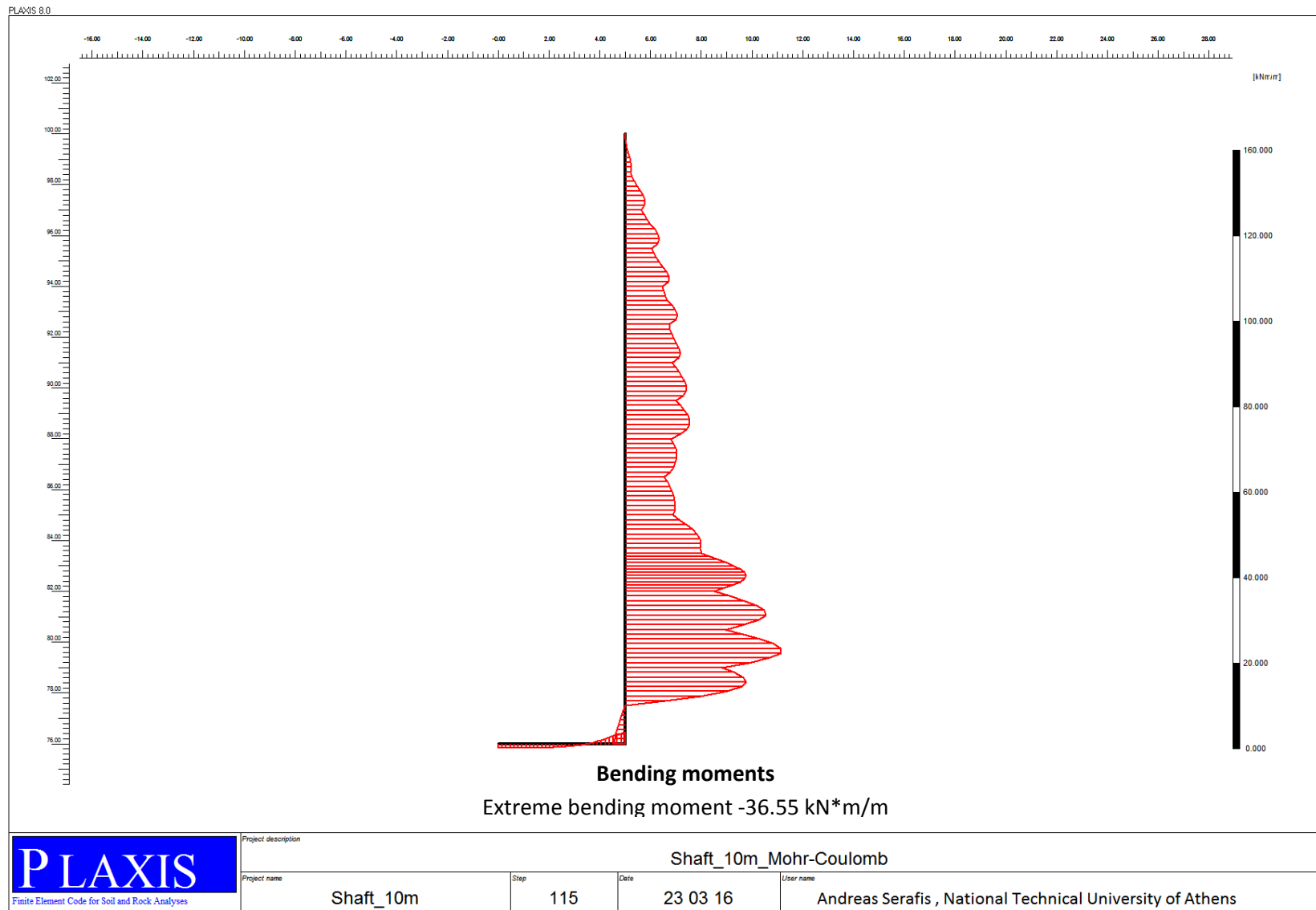
Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄ εμπεριέχονται τα εντατικά μεγέθη (M,Q,N), αποτέλεσμα των διδιάστατων αναλύσεων, τα οποία δεν θεωρούνται ιδιαίτερα δυσμενή για την κατασκευή.



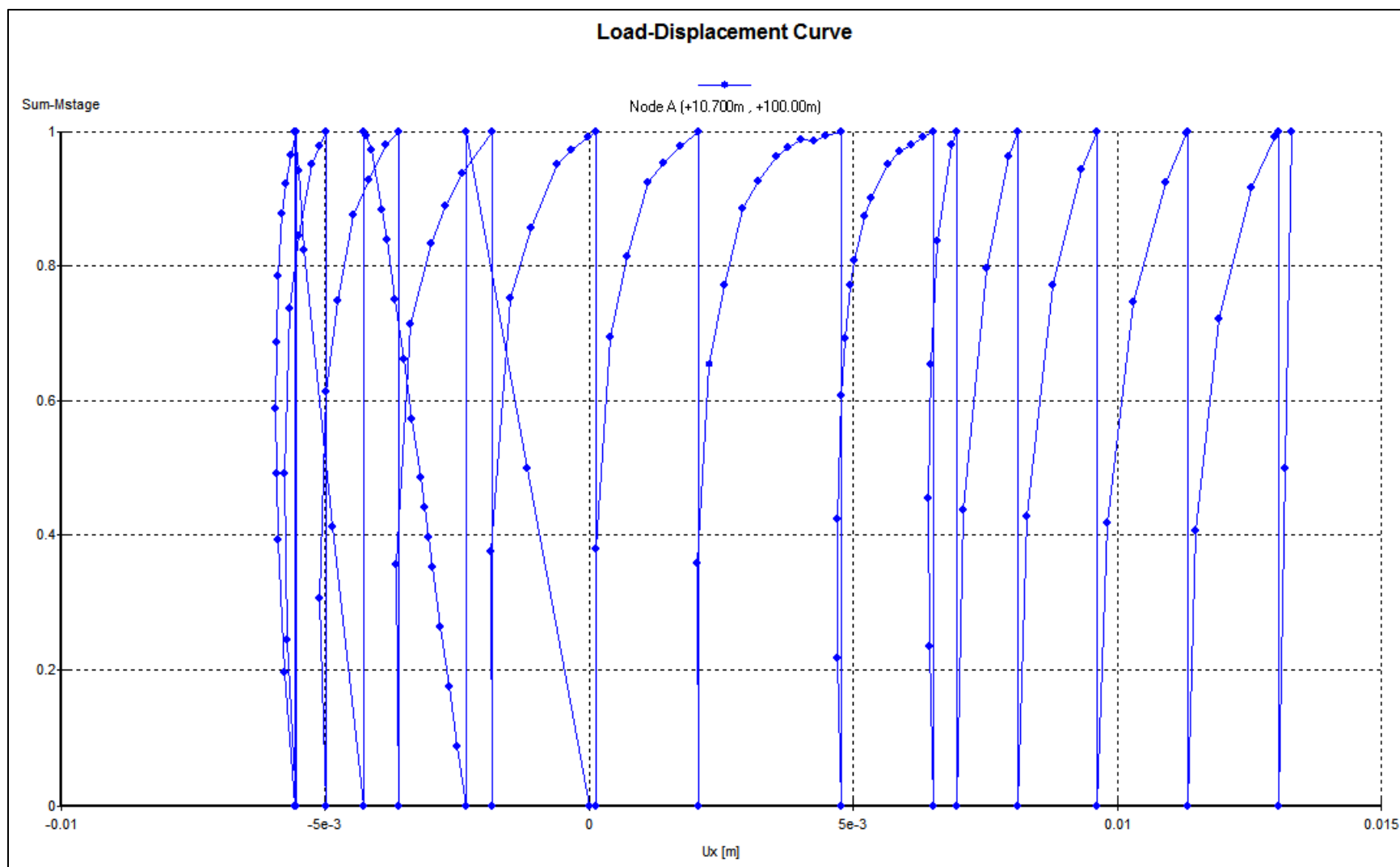
Εικόνα 169 : Analysis N°1 -Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



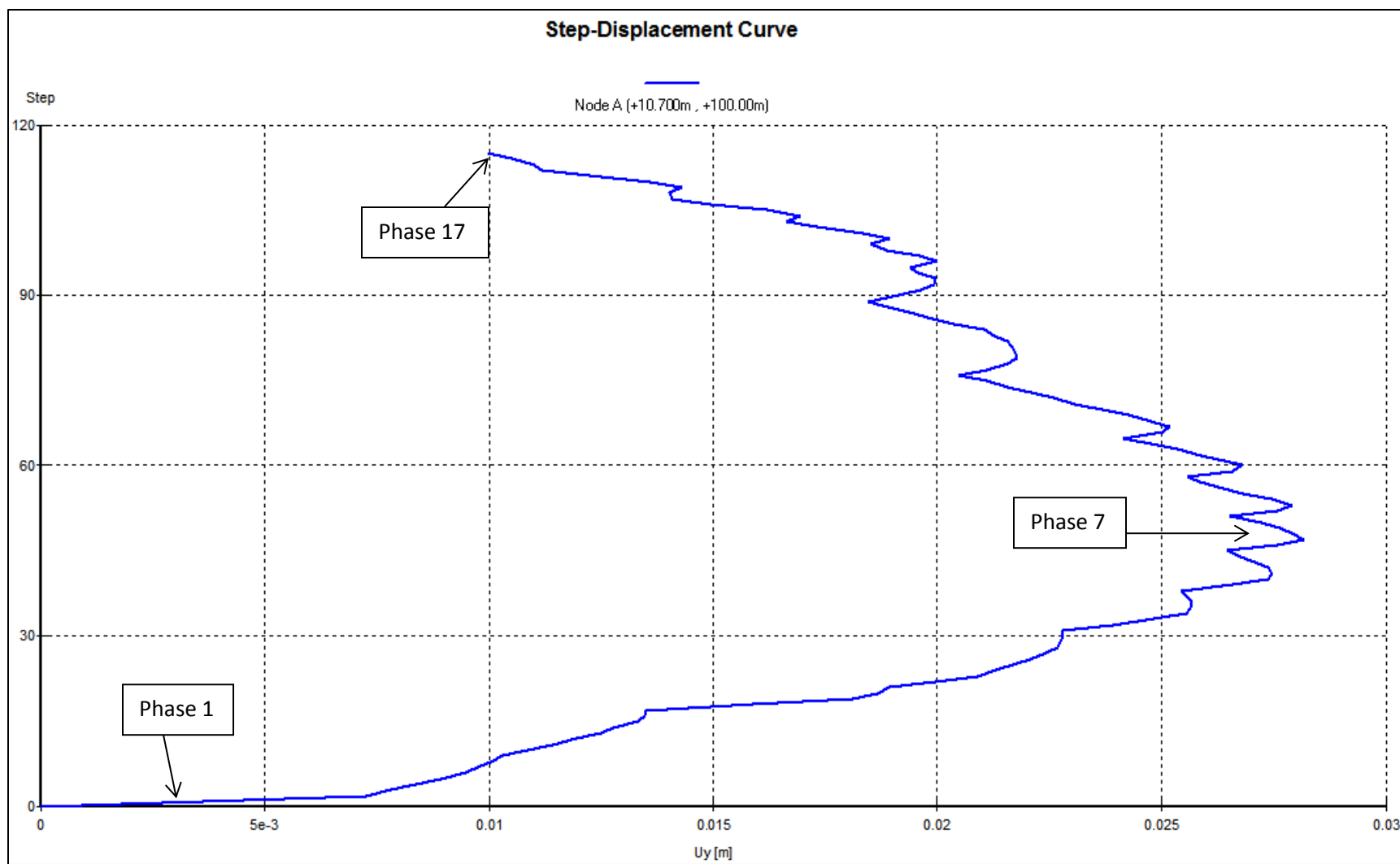
Εικόνα 170 : Analysis N^o1 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



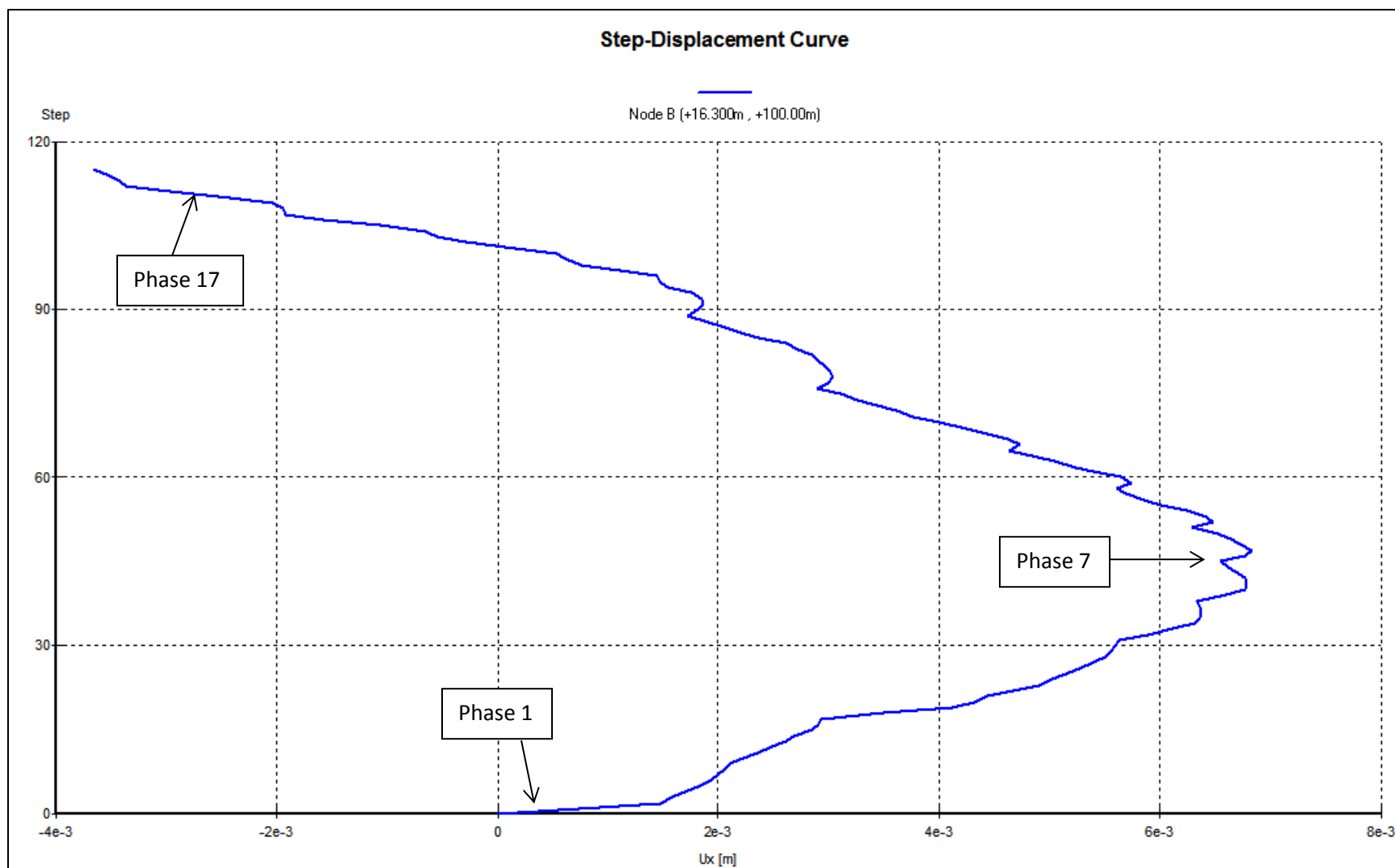
Εικόνα 171 : Analysis N^o1 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



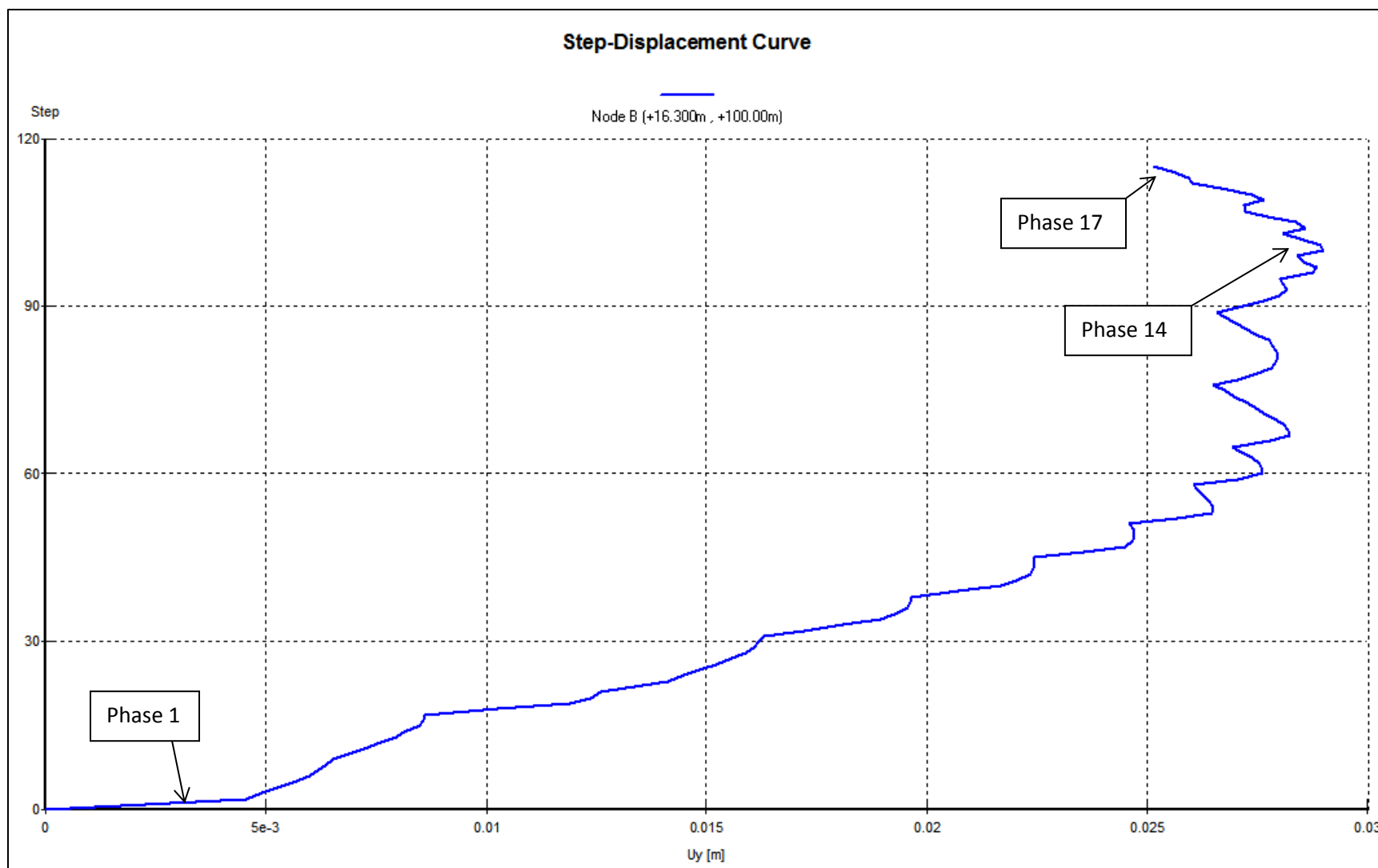
Εικόνα 172 : Analysis N^o1 - Η καμπύλη οριζόντιων μετακινήσεων του κόμβου A (+10.700m , +100.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



Εικόνα 173 : Analysis N^ο1 - Η καμπύλη κατακορύφων μετακινήσεων του κόμβου A (+10.700m , +100.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.

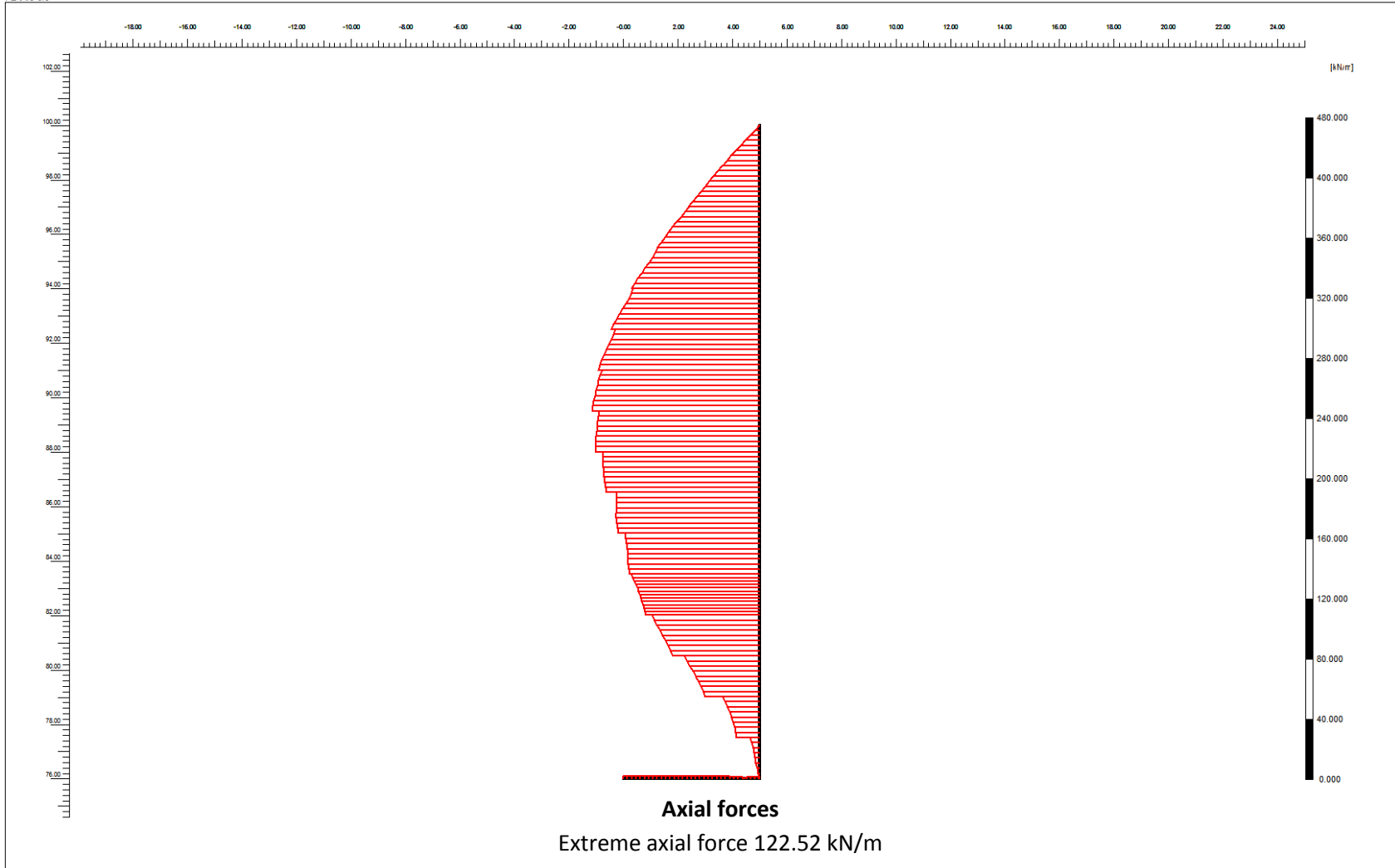


Εικόνα 174 : Analysis N^o1 - Η καμπύλη οριζόντιων μετακινήσεων του κόμβου B (+16.300m , +100.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.



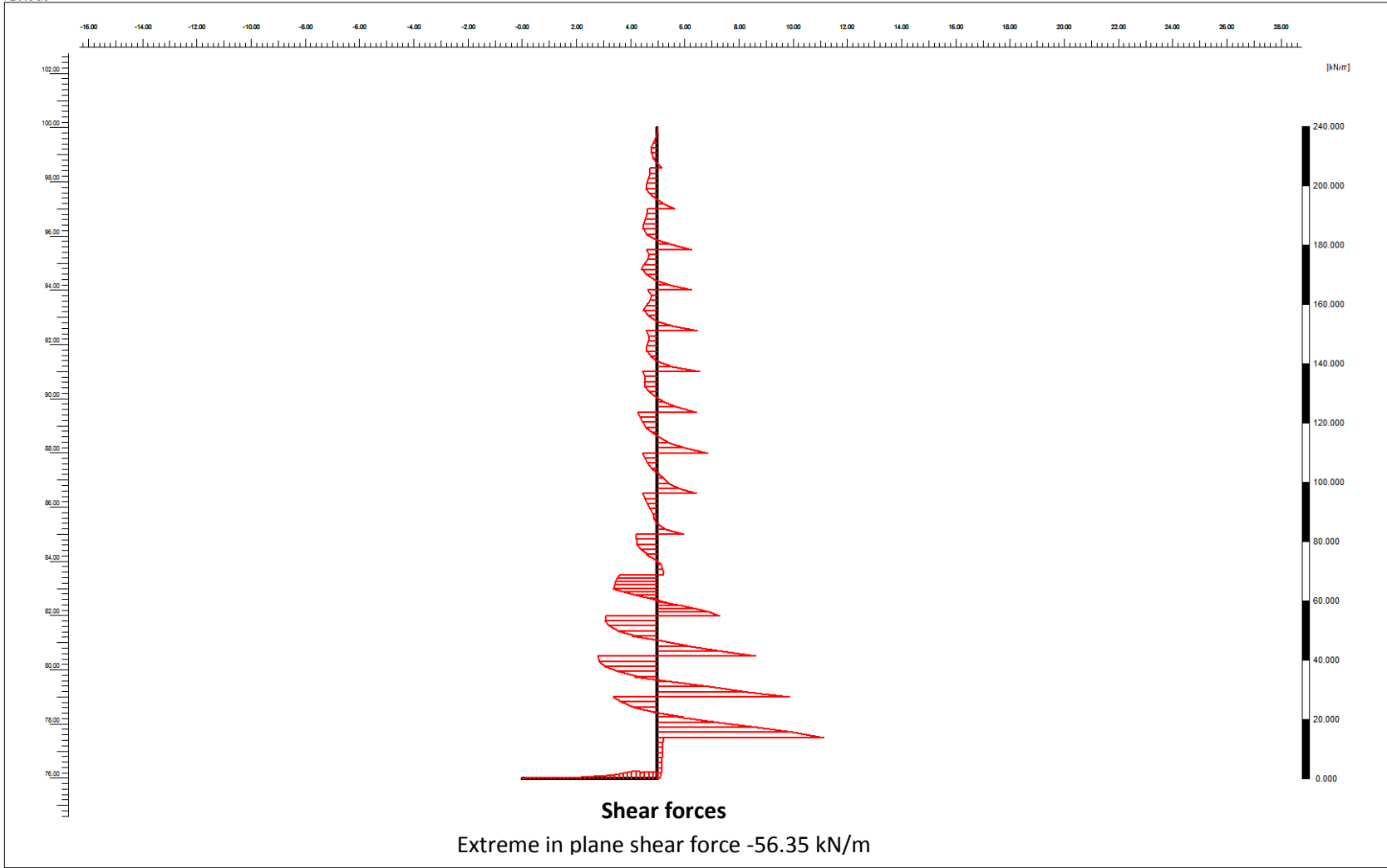
Εικόνα 175 : Analysis N^ο1 - Η καμπύλη κατακορύφων μετακινήσεων του κόμβου B (+16.300m , +100.00m) για όλες τις φάσεις προσομοίωσης.


PLAXIS 8.0



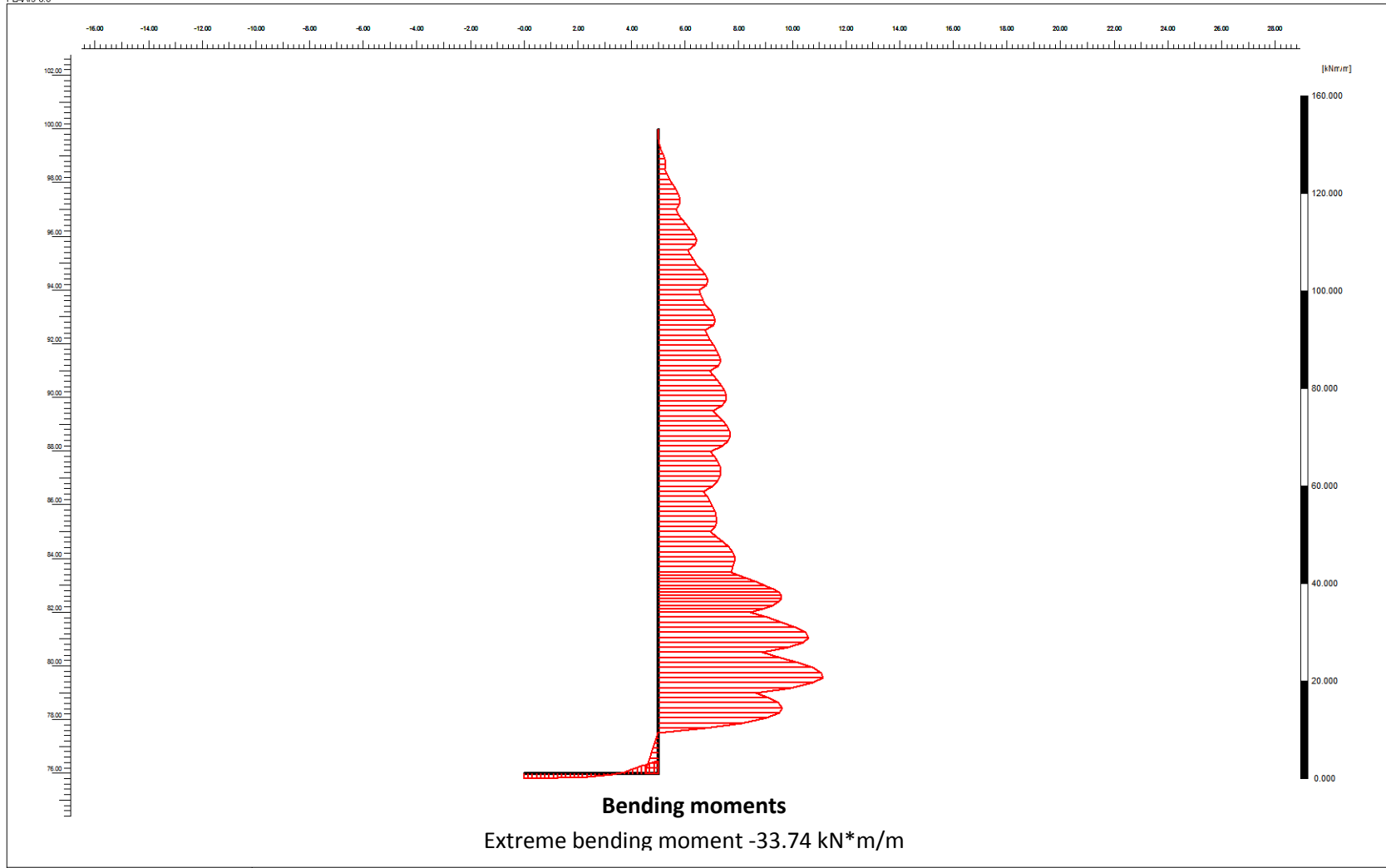
PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Version 8.2.4.133	Project description			
	Shaft_10m			
Project name	Step	Date	User name	
Shaft_10m_interface	115	30 03 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 176 : Analysis N^o2 - Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description				Shaft_10m
	Project name	Step	Date	User name	
	Shaft_10m_interface	115	30 03 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 177 : Analysis N^o2 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

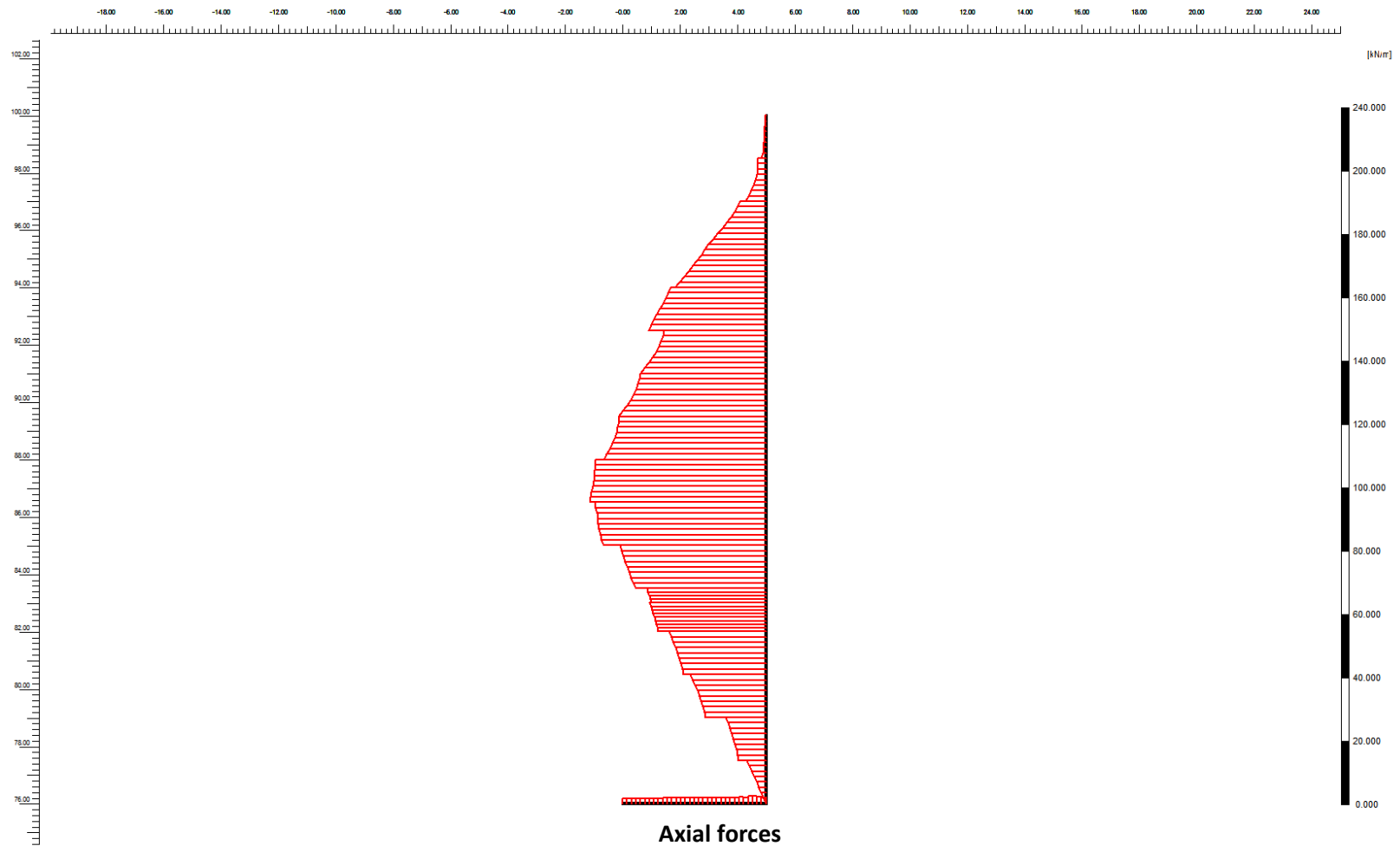


Version 8.2.4.133

Project description				Shaft_10m	
Project name	Step	Date	User name		
Shaft_10m_interface	115	30 03 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens		

Εικόνα 178 : Analysis N^o2 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

PLAXIS 8.0

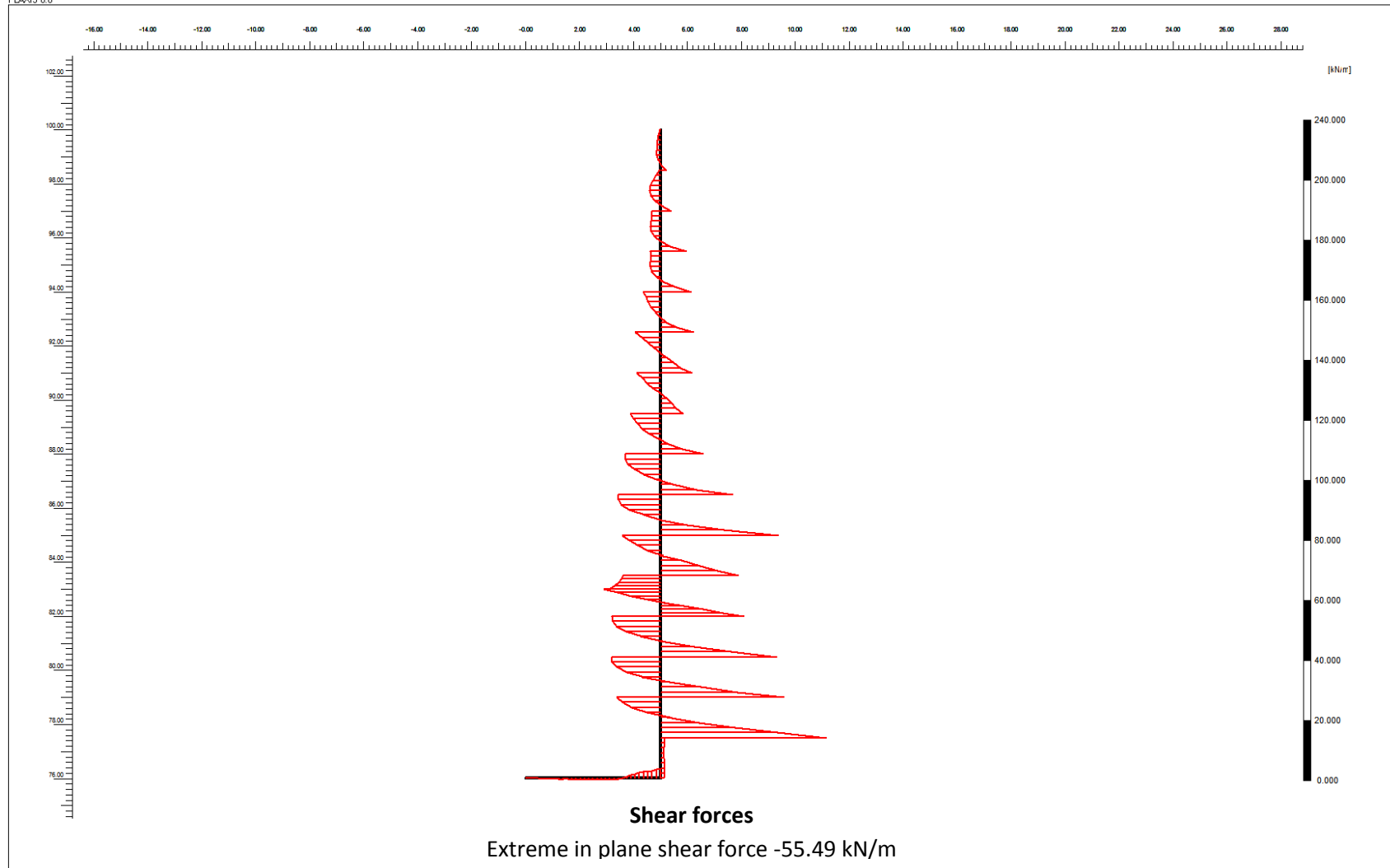



Axial forces
Extreme axial force 55.79 kN/m



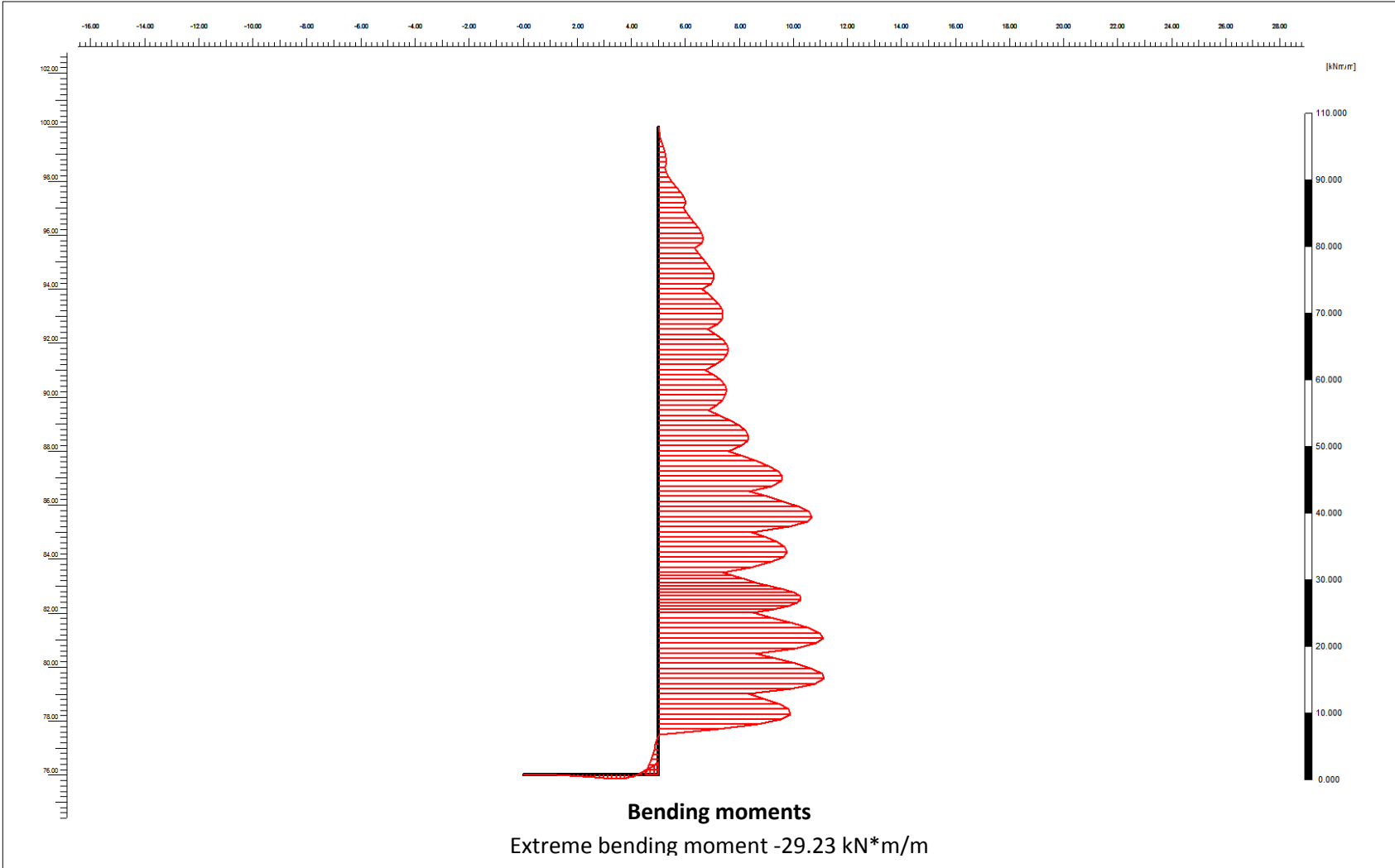
Project description				
Shaft_10m				
Project name	Step	Date	User name	
Shaft_10m_4_H	62	01 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	


Εικόνα 179 : Analysis N°3 - Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description				Shaft_10m	
	Project name	Step	Date	User name		
	Shaft_10m_4_H	62	01 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens		

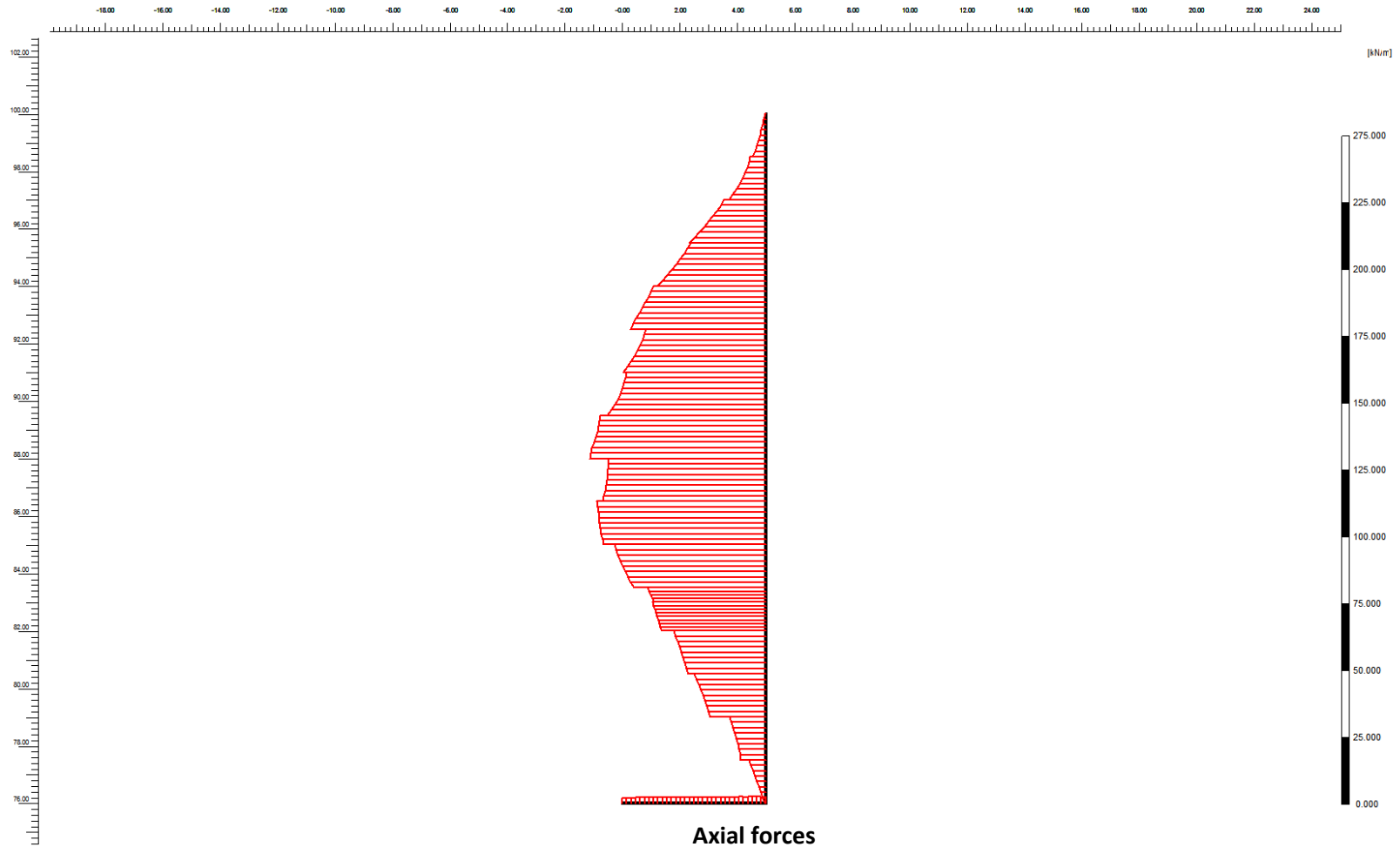
Εικόνα 180 : Analysis N^o3 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Shaft_10m			
Project name	Step	Date	User name	
Shaft_10m_4_H	62	01 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 181 : Analysis N^o3 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

PLAXIS 8.0



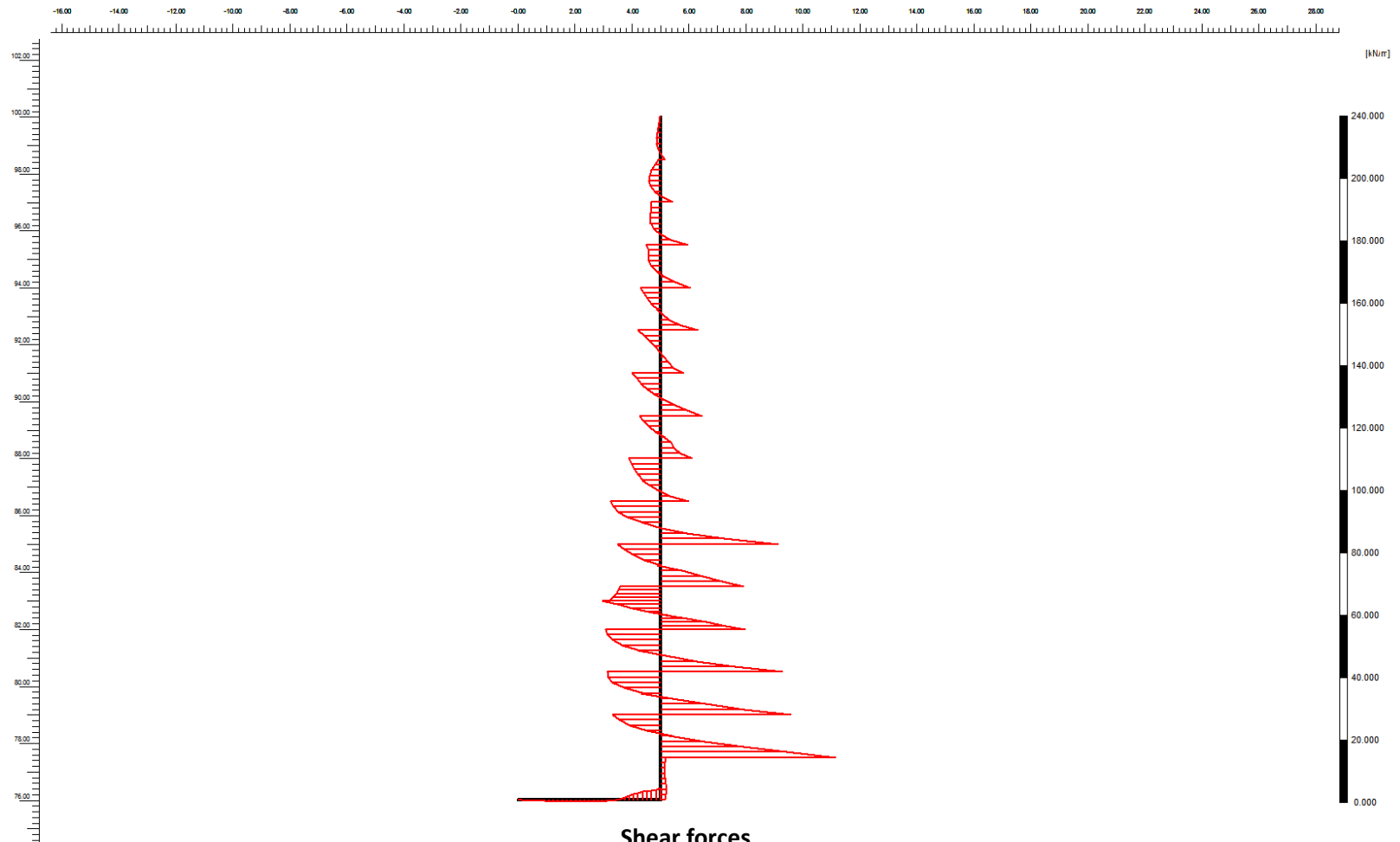
Axial forces
Extreme axial force 65.87 kN/m



Project description				
Shaft_10m				
Project name	Step	Date	User name	
Shaft_10m_3_H	65	01 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 182 : Analysis N^o4 - Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

PLAXIS 8.0

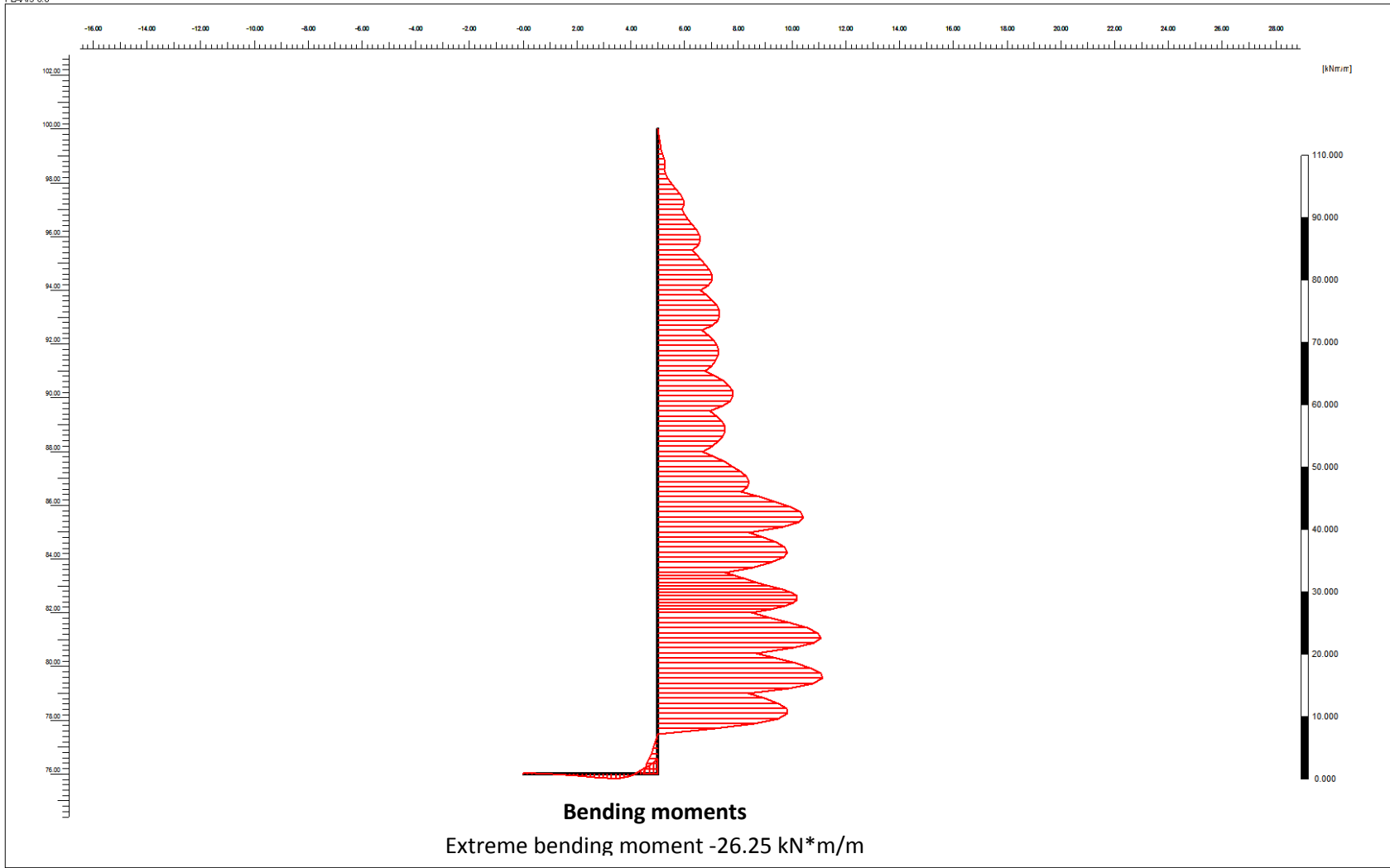



Shear forces
Extreme in plane shear force -55.84 kN/m



Project description					Shaft_10m	
Project name	Step	Date	User name			
Shaft_10m_3_H	65	01 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens			

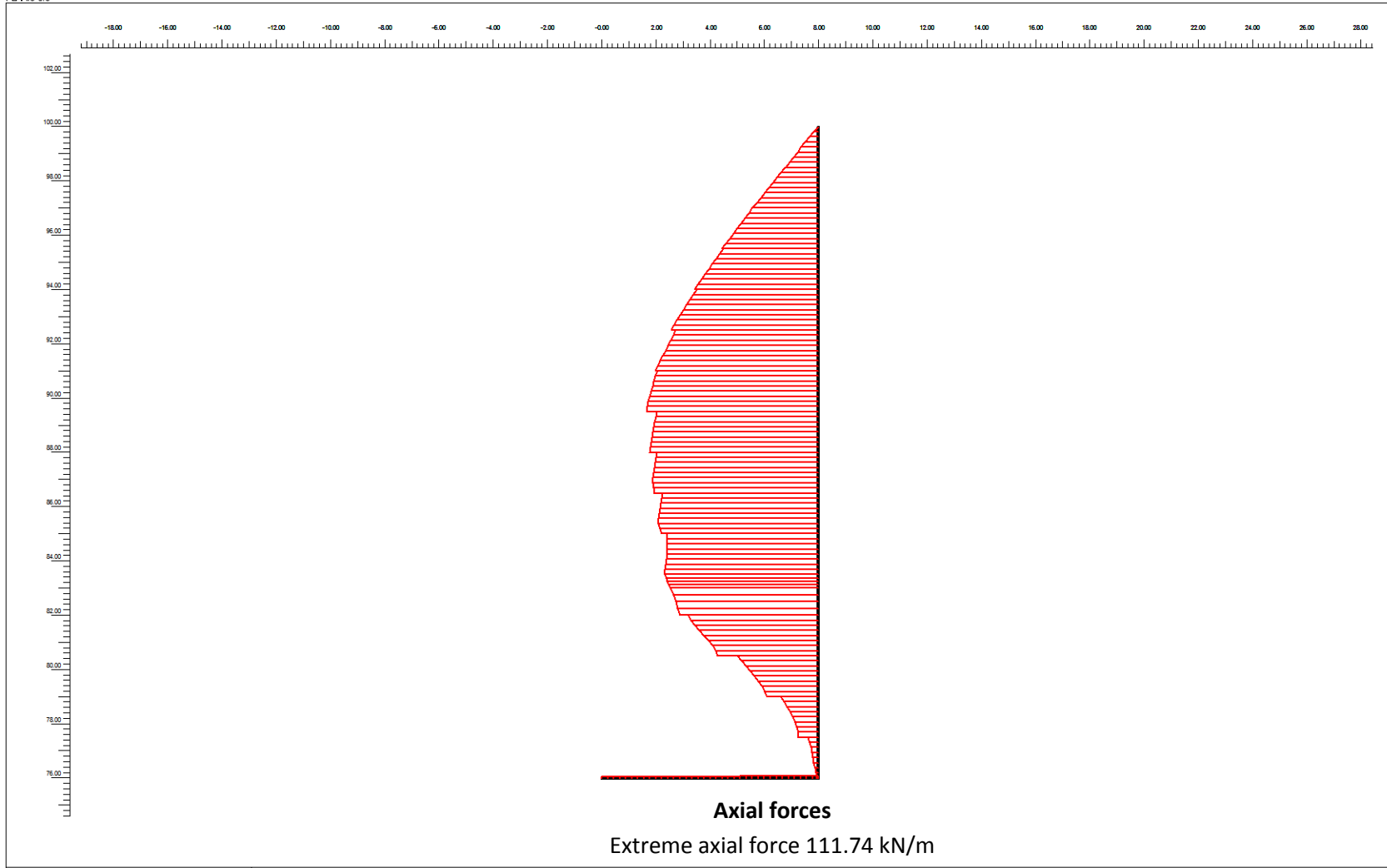
Εικόνα 183 : Analysis N^o4 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description				Shaft_10m	
	Project name	Step	Date	User name		
	Shaft_10m_3_H	65	01 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens		

Εικόνα 184 : Analysis N^o4 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

PLAXIS 8.0



Axial forces
Extreme axial force 111.74 kN/m

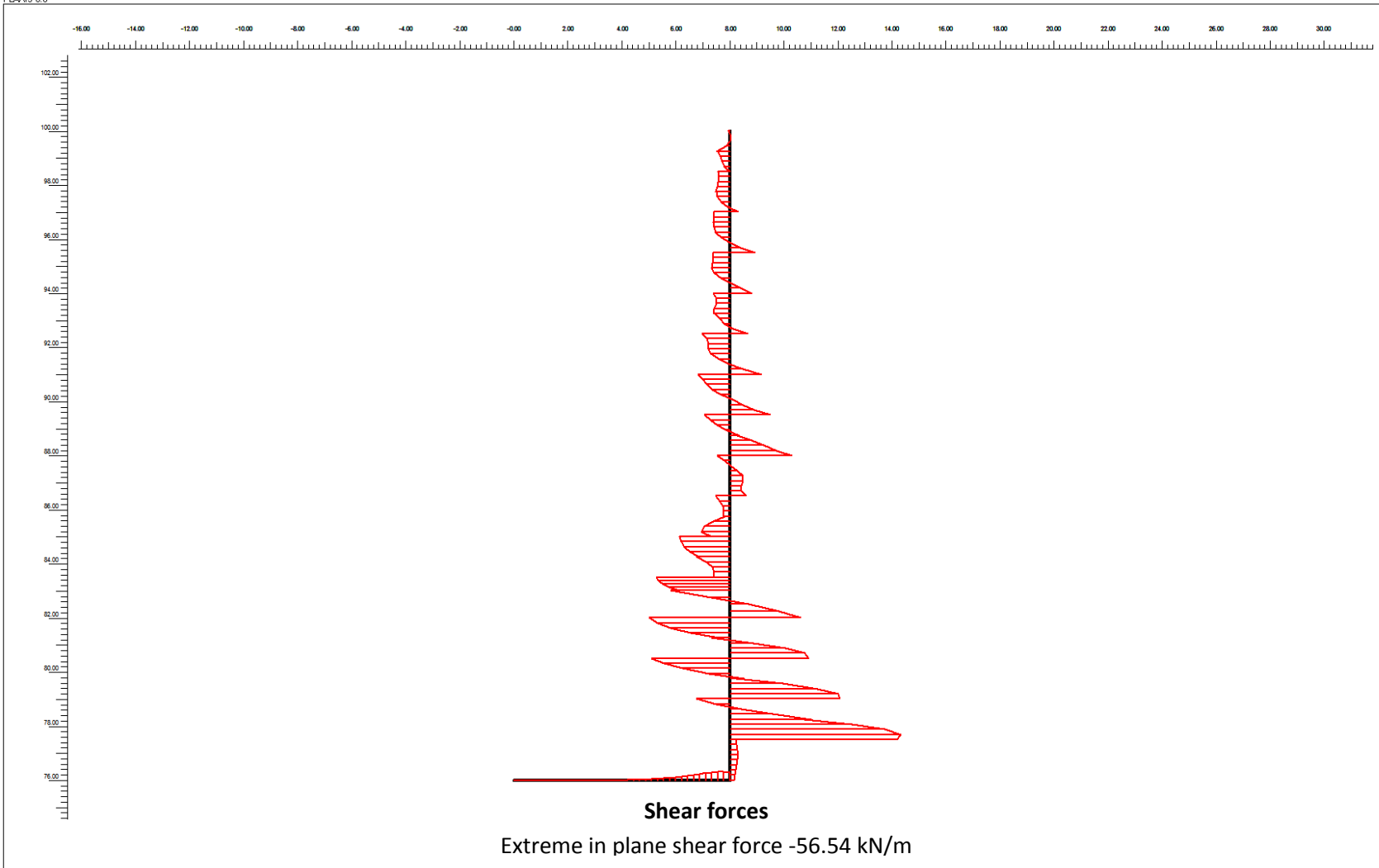
PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses


Version 8.2.4.133

Project description		Shaft_16m		
Project name	Step	Date	User name	
Shaft_16m_Custom interface	127	04 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 185 : Analysis N°5 - Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

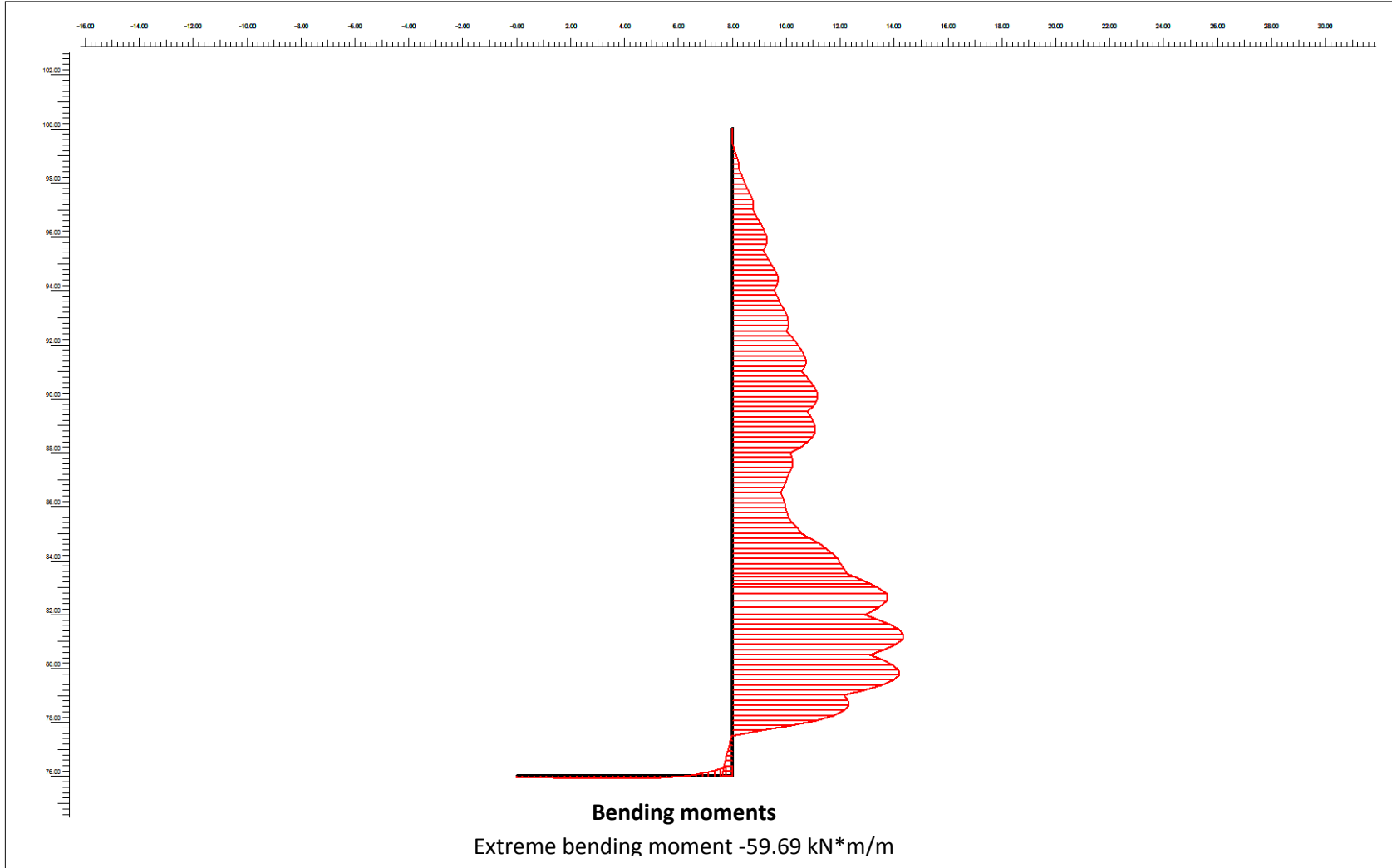
PLAXIS 8.0



 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
Shaft_16m_Custom interface	127	04 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

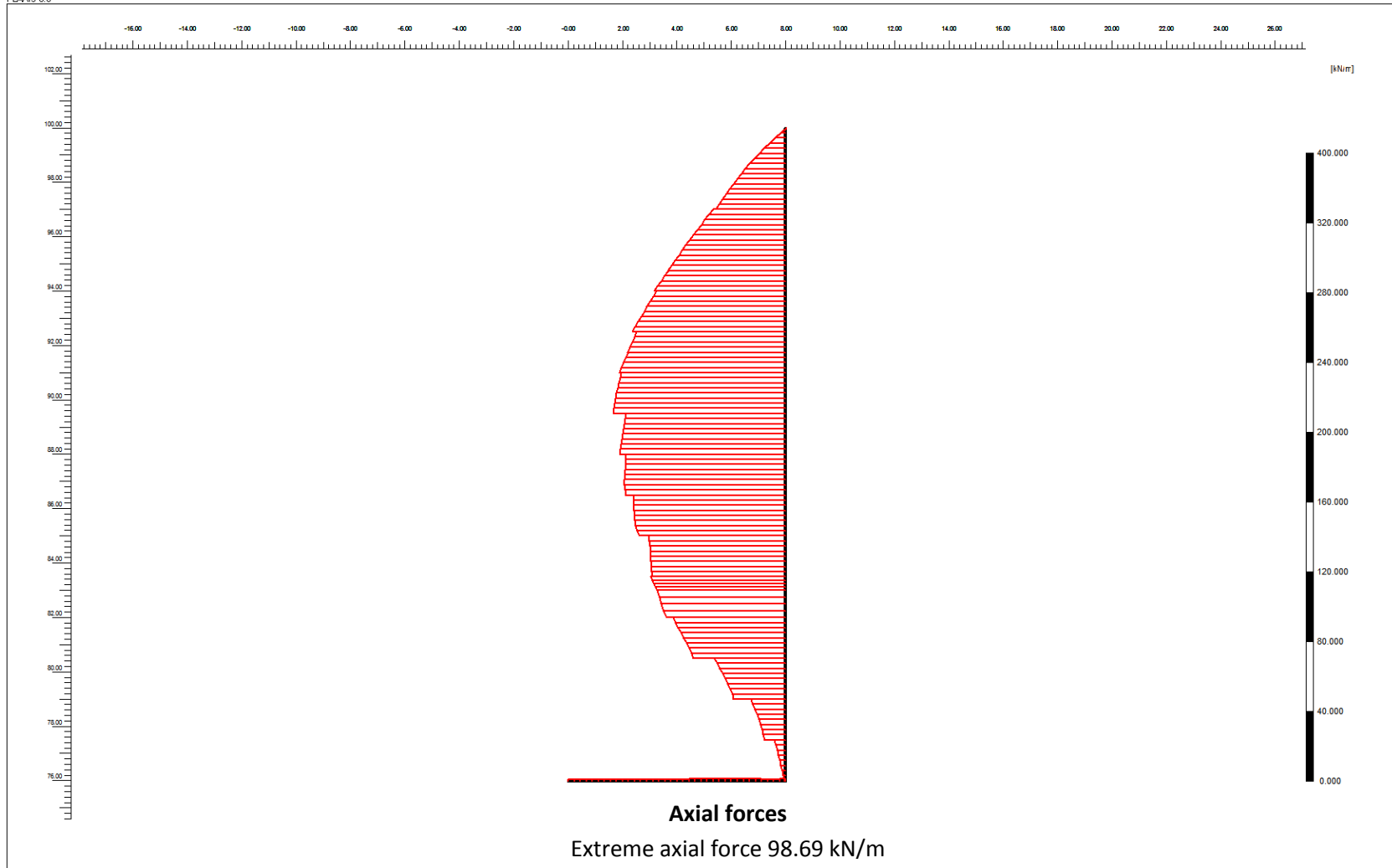
Εικόνα 186 : Analysis N°5 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).


PLAXIS 8.0



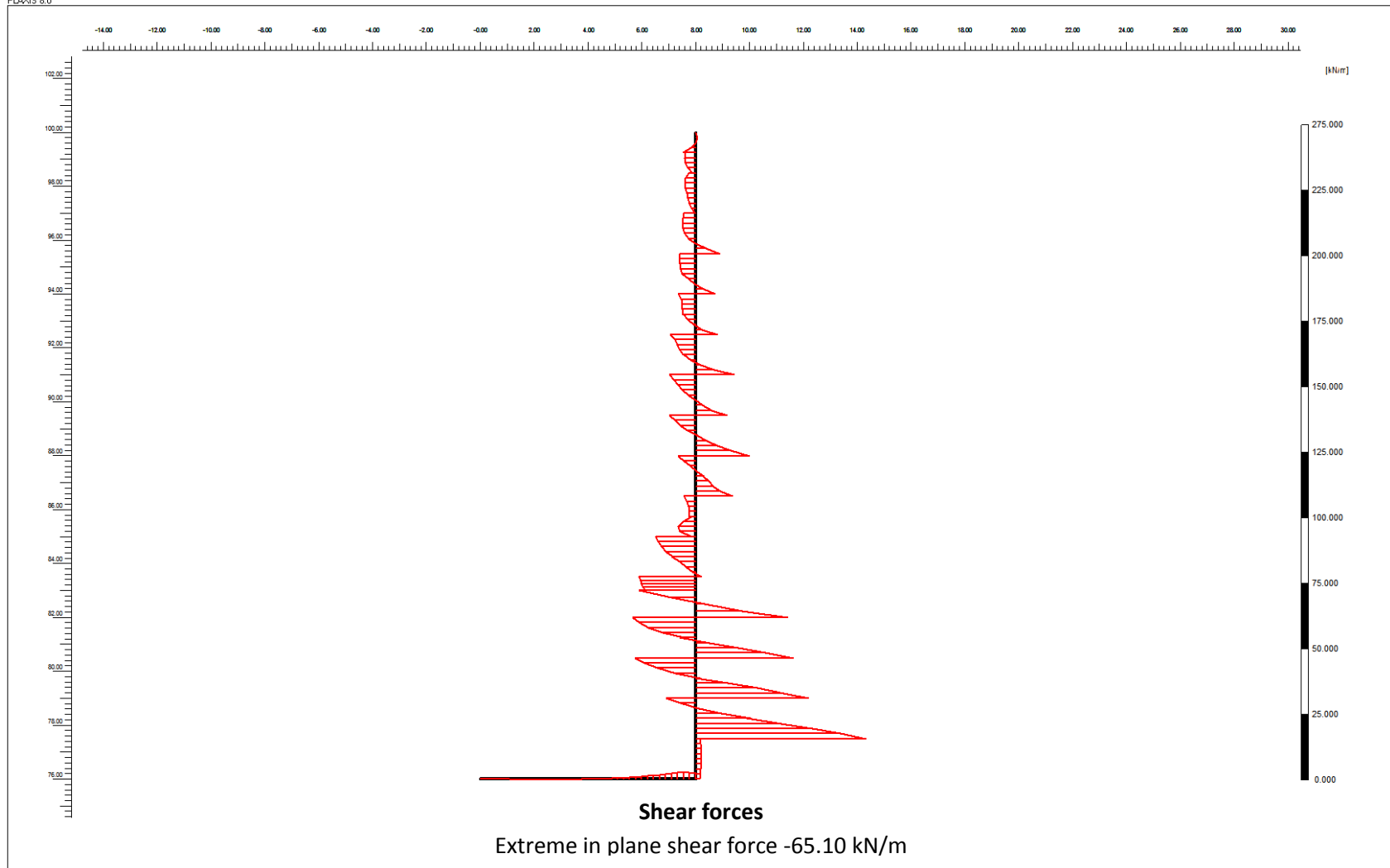
PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Version 8.2.4.133	Project description			
	Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
Shaft_16m_Custom interface	127	04 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	


Εικόνα 187 : Analysis N^o5 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



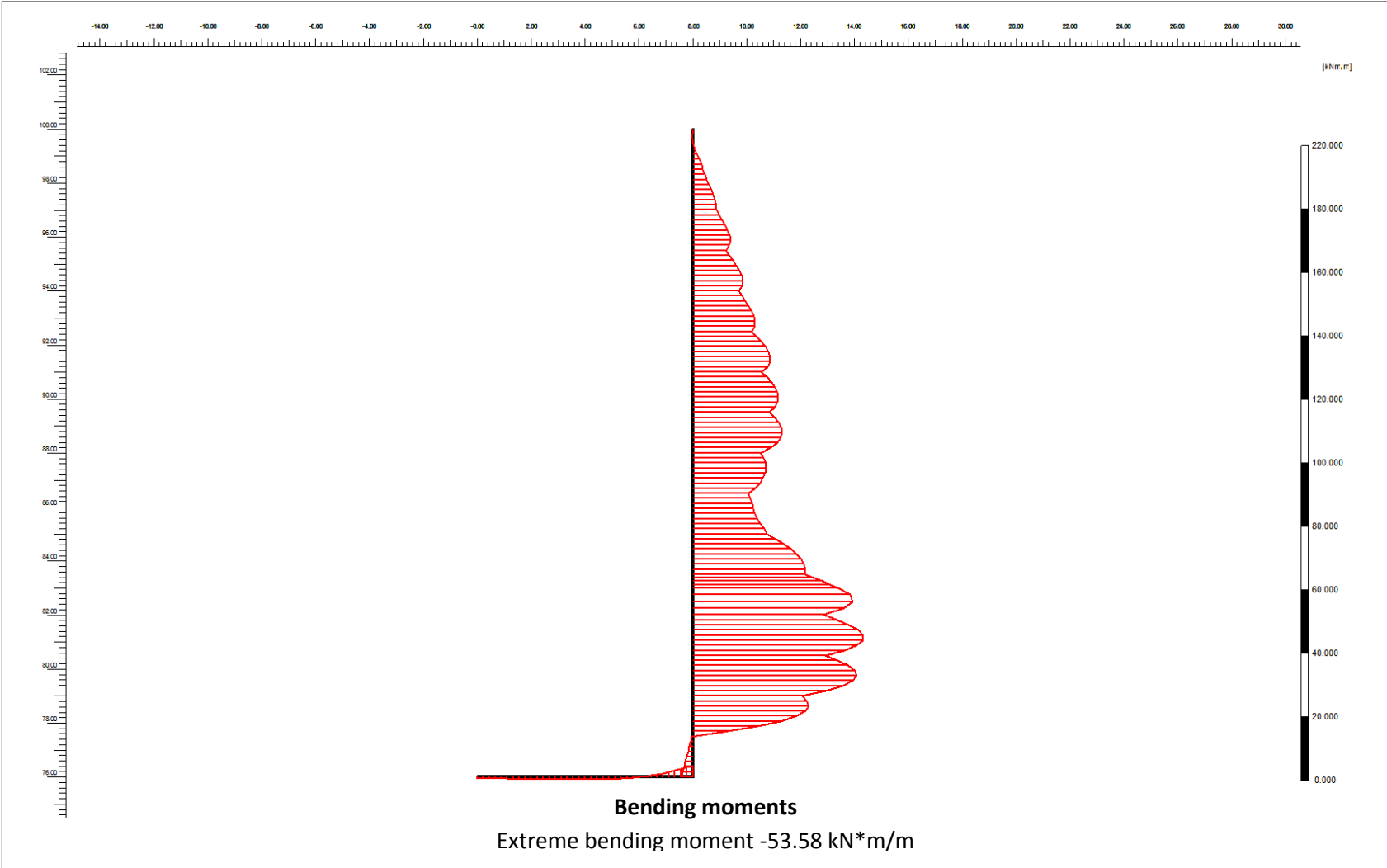
 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
16m cluster Mohr -Coulomb	107	05 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	


Εικόνα 188 : Analysis N^o6 - Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



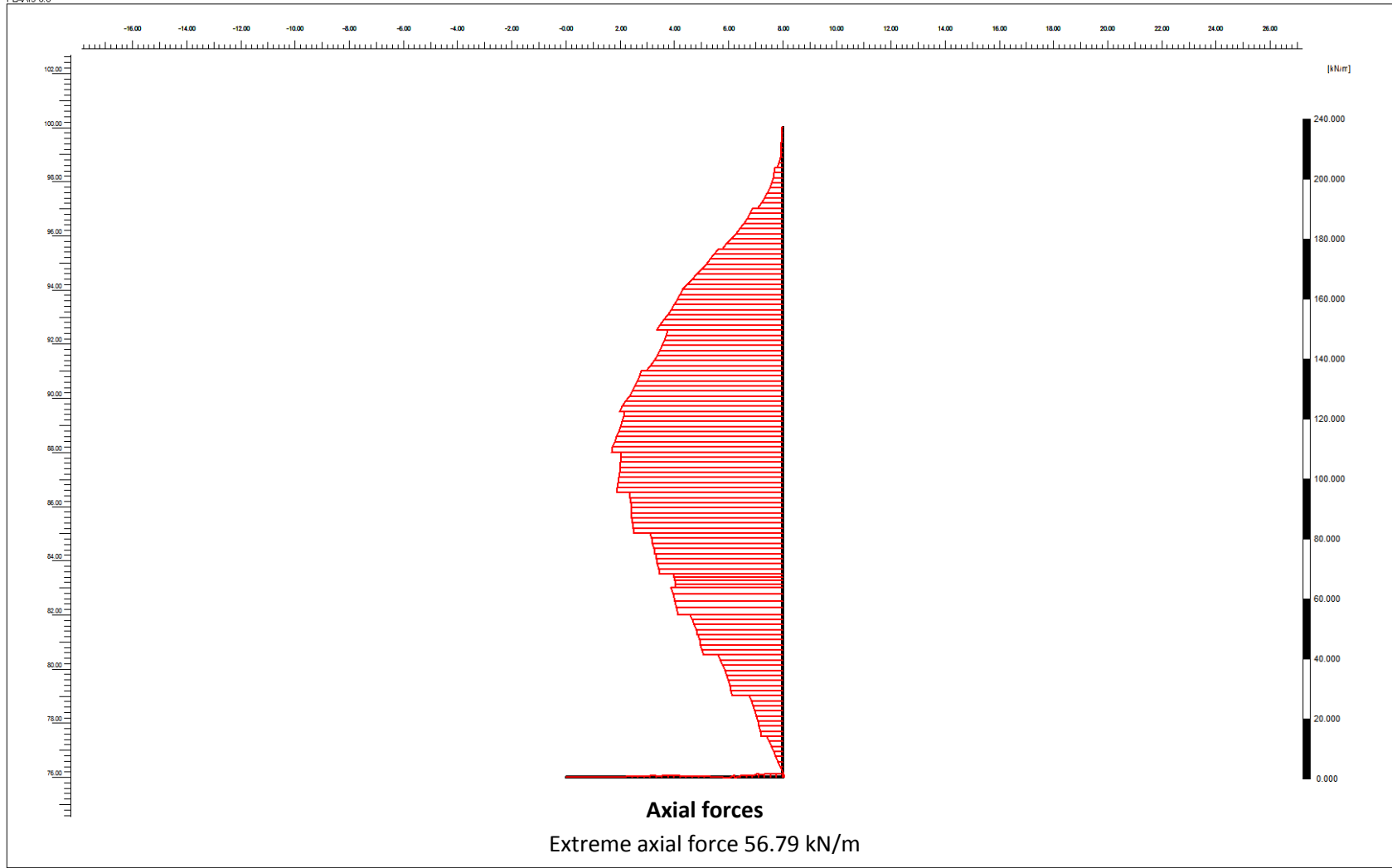
 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
16m cluster Mohr -Coulomb	107	05 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	


Εικόνα 189 : Analysis N°6 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



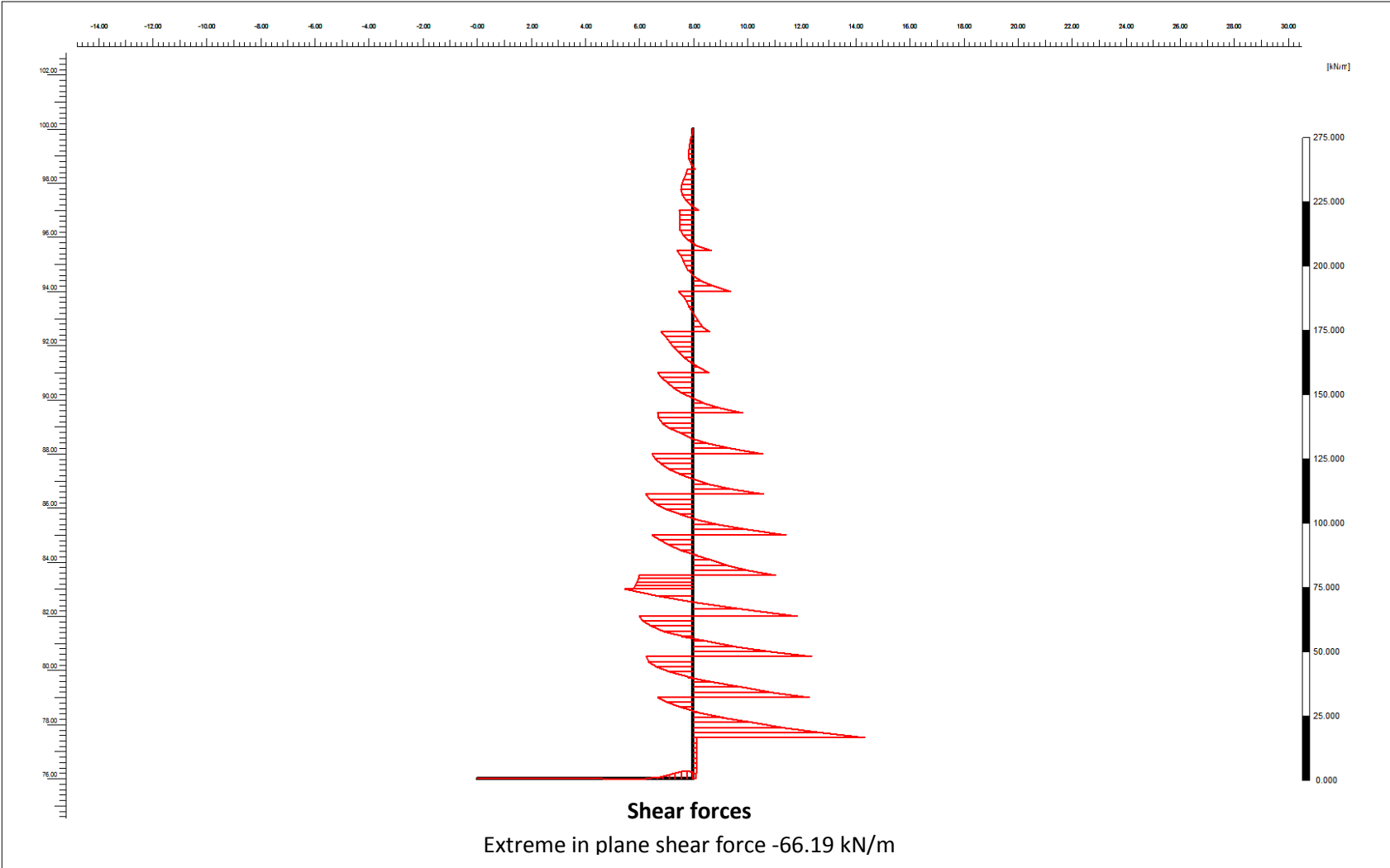
 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
16m cluster Mohr -Coulomb	107	05 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	


Εικόνα 190 : Analysis N^o6 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



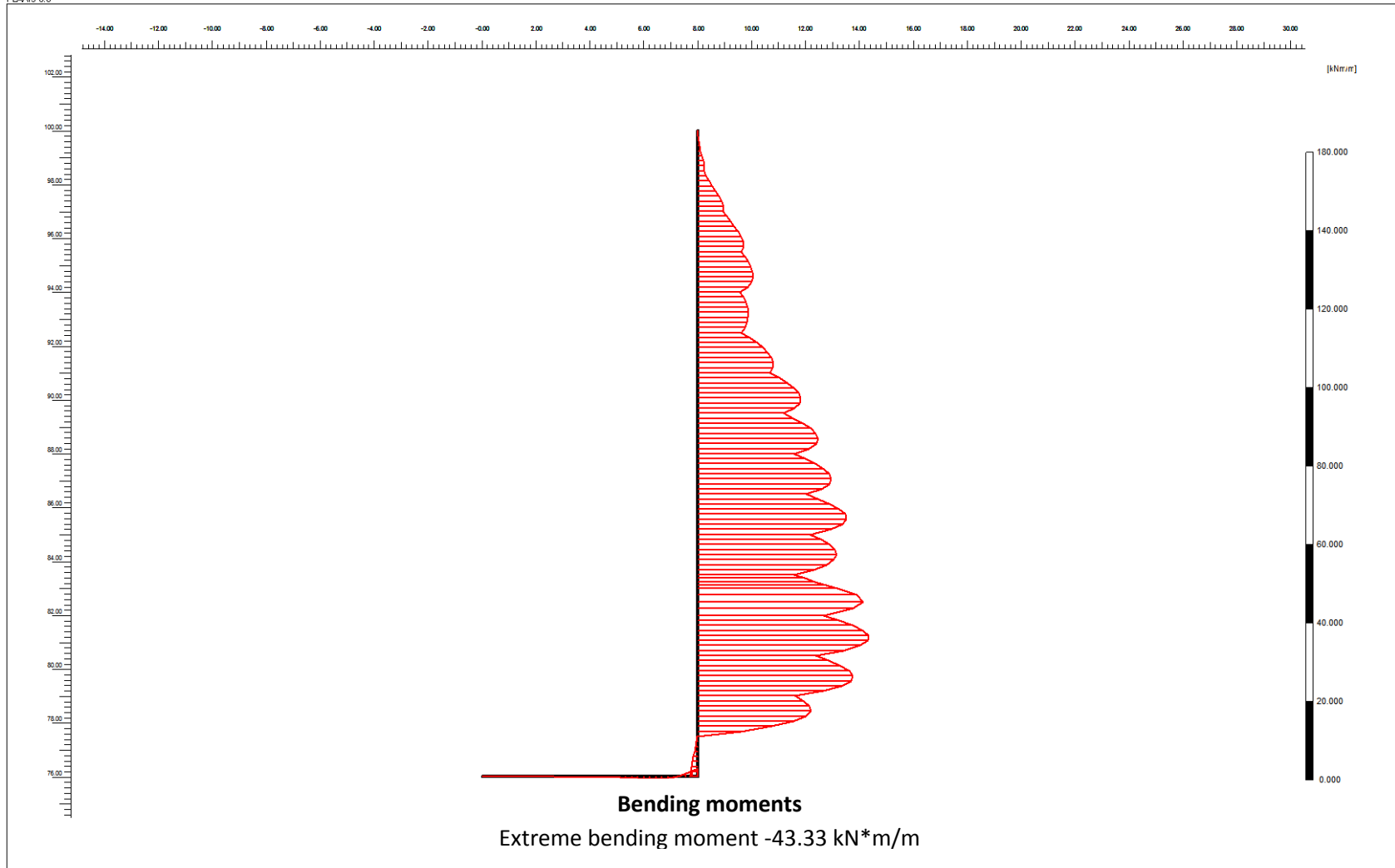
 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description				Shaft_16m	
	Project name	Step	Date	User name		
	Hardening_16m	51	05 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens		


Εικόνα 191 : Analysis N^o7 - Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



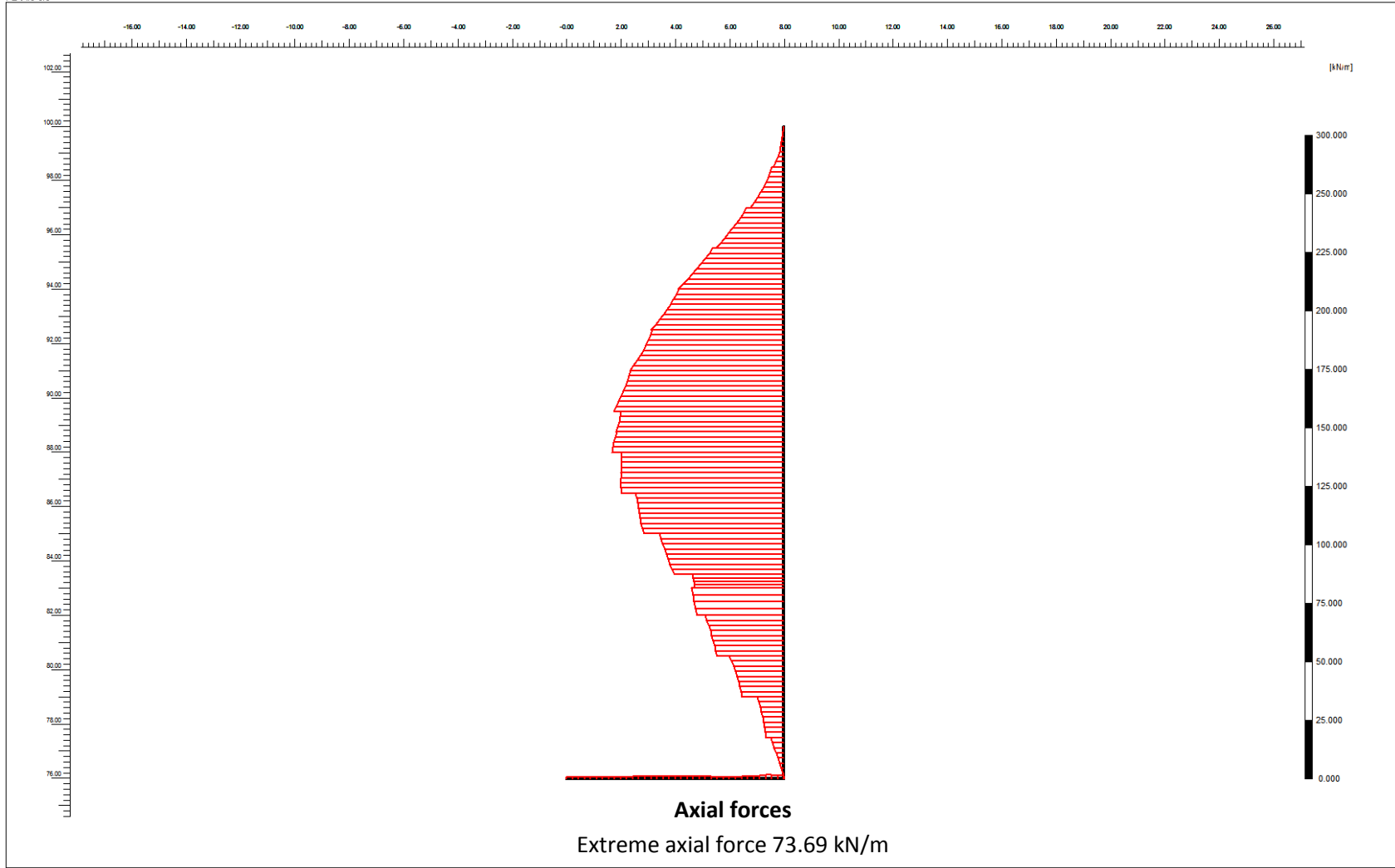
 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
Hardening_16m	51	05 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	


Εικόνα 192 : Analysis N^o7 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



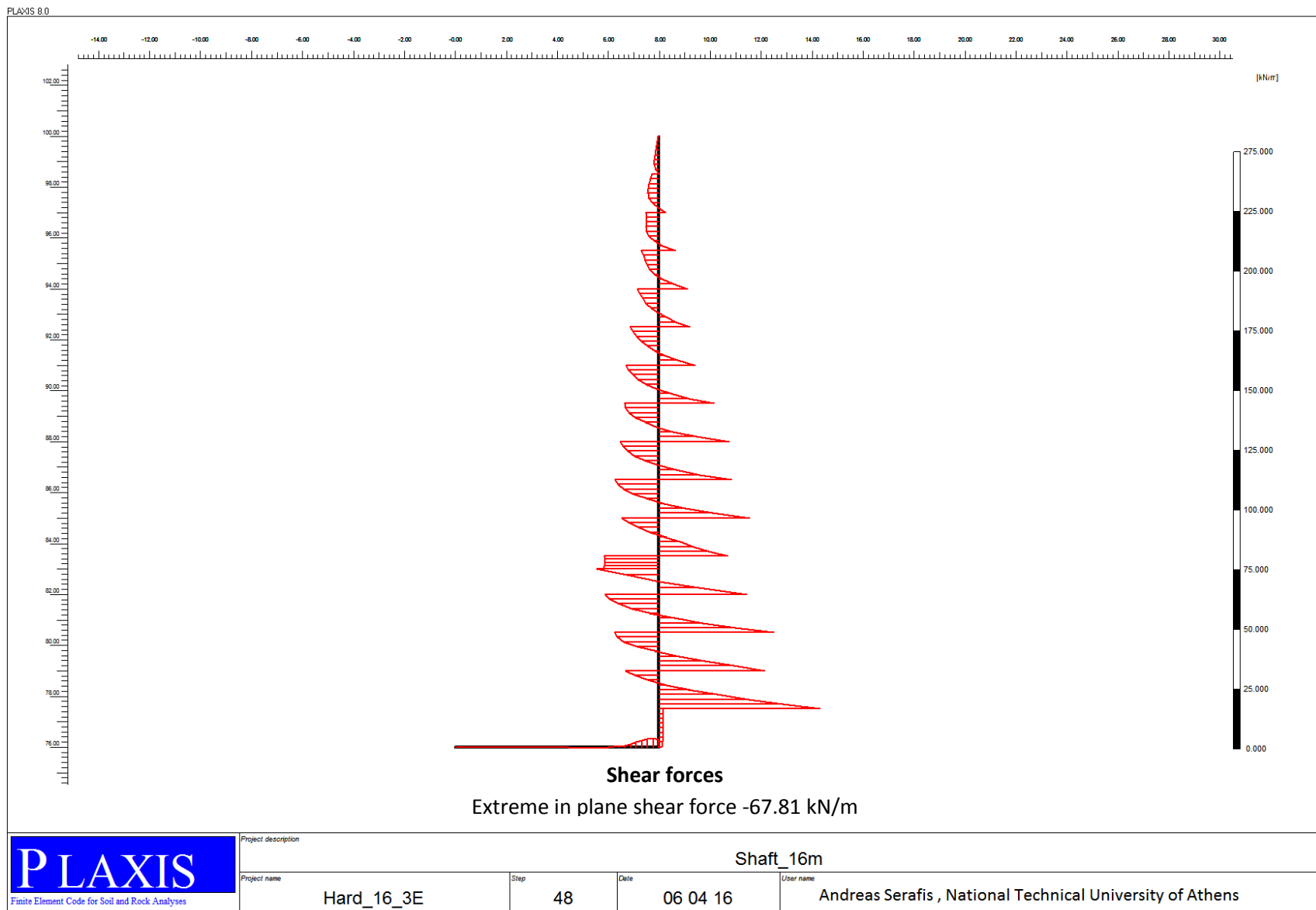
 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description				Shaft_16m	
	Project name	Step	Date	User name		
	Hardening_16m	51	05 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens		

Εικόνα 193 : Analysis N^o7 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

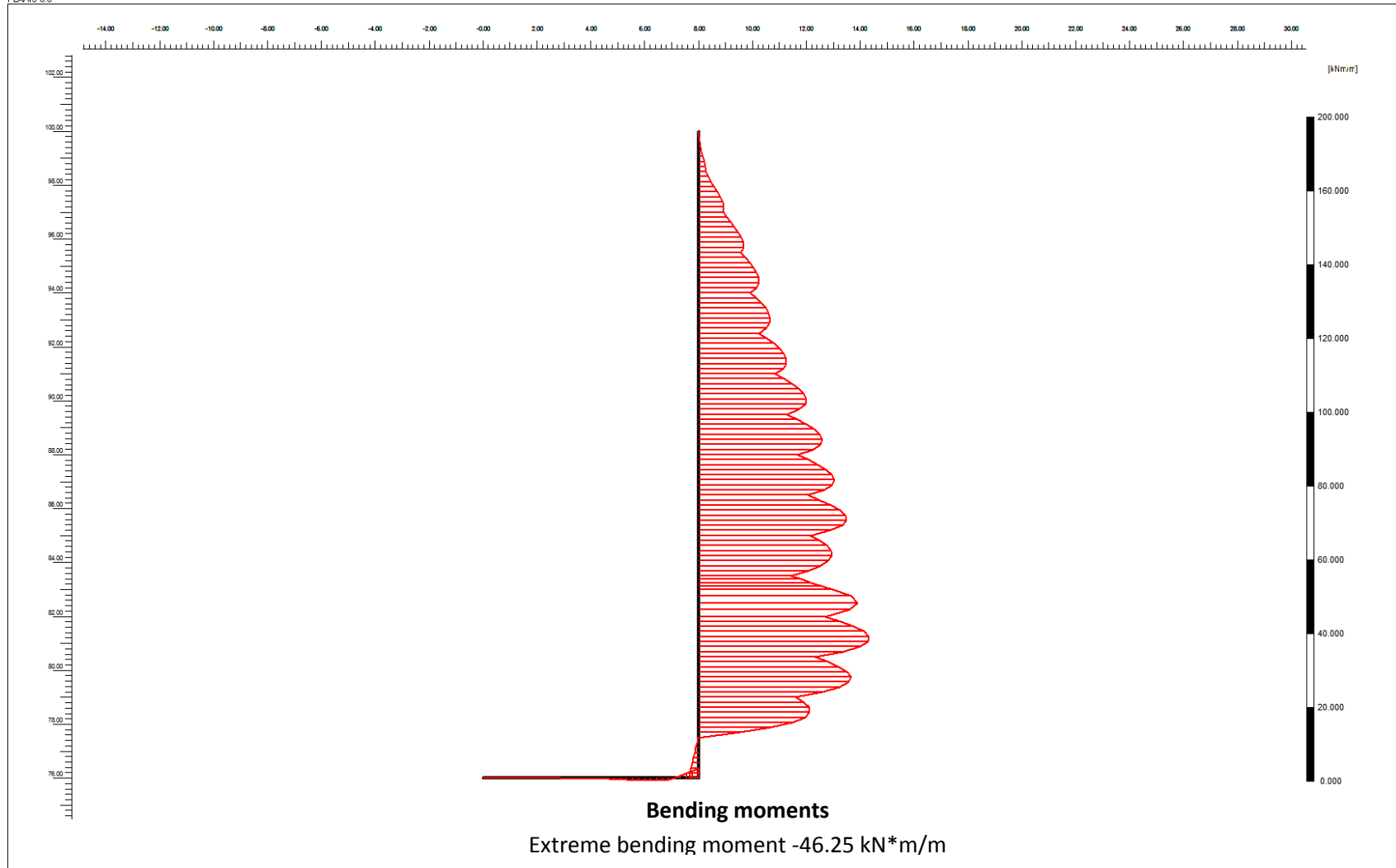



 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description				Shaft_16m	
	Project name	Step	Date	User name		
	Hard_16_3E	48	06 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens		

Εικόνα 194 : Analysis N^o8 - Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



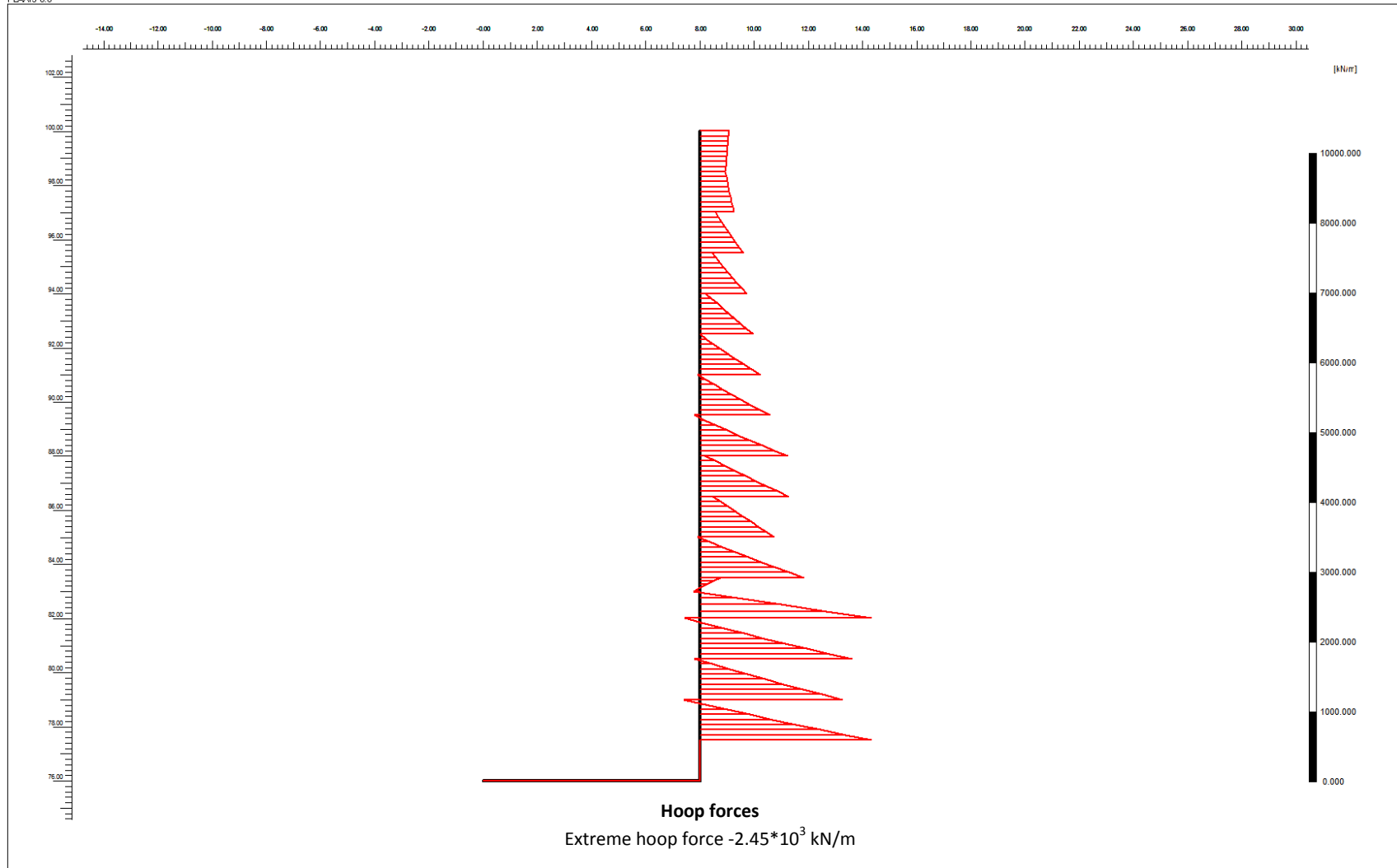
Εικόνα 195 : Analysis N°8 - Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).




 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
Hard_16_3E	48	06 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 196 : Analysis N^o8 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

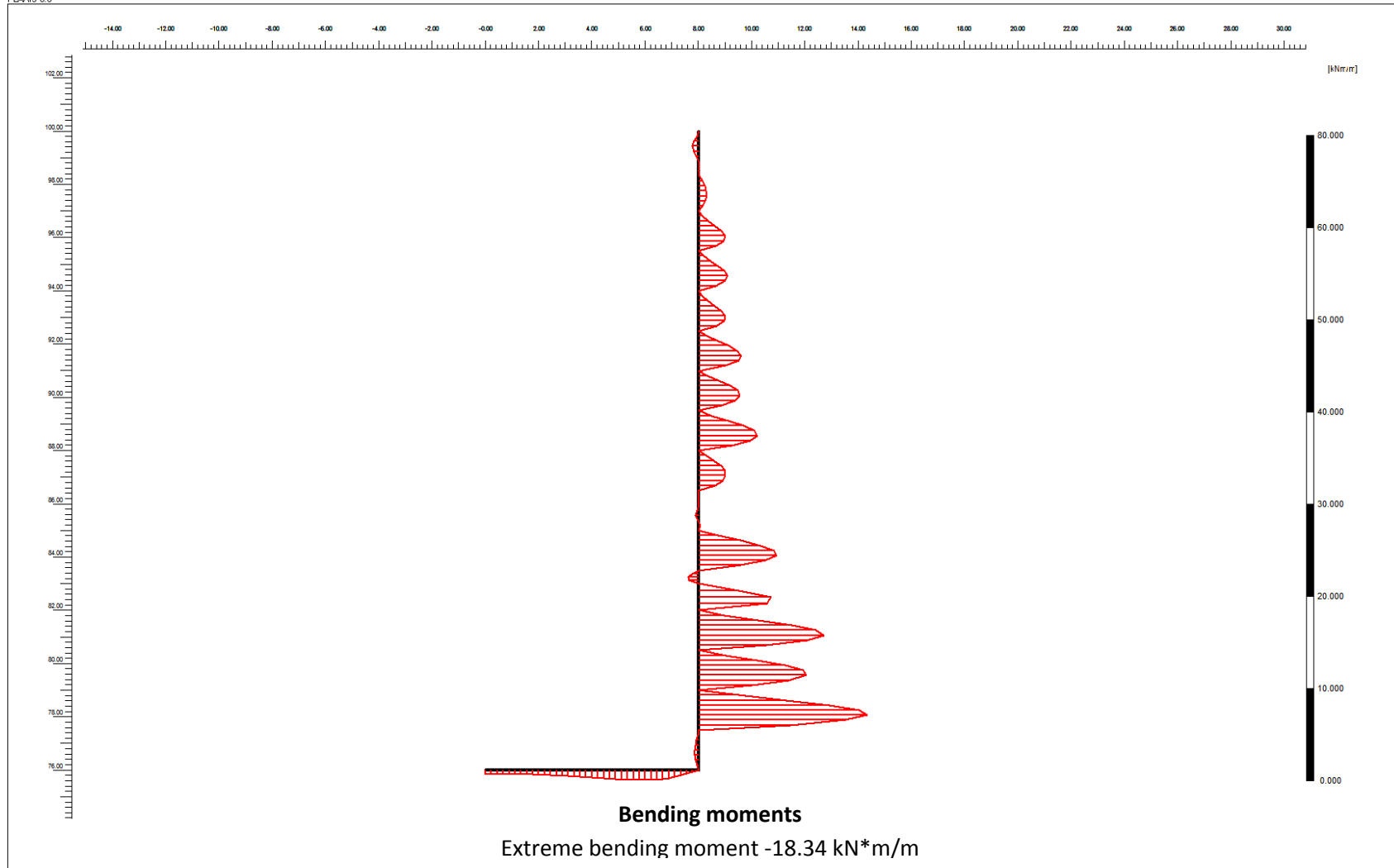
PLAXIS 8.0




 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	Project description			
	Hinge and Rotation Spring_Shaft_16m			
Project name	Step	Date	User name	
HINGE	105	07 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 197 : Hinge and Rotation Spring Analysis- Διάγραμμα hoop forces του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

PLAXIS 8.0



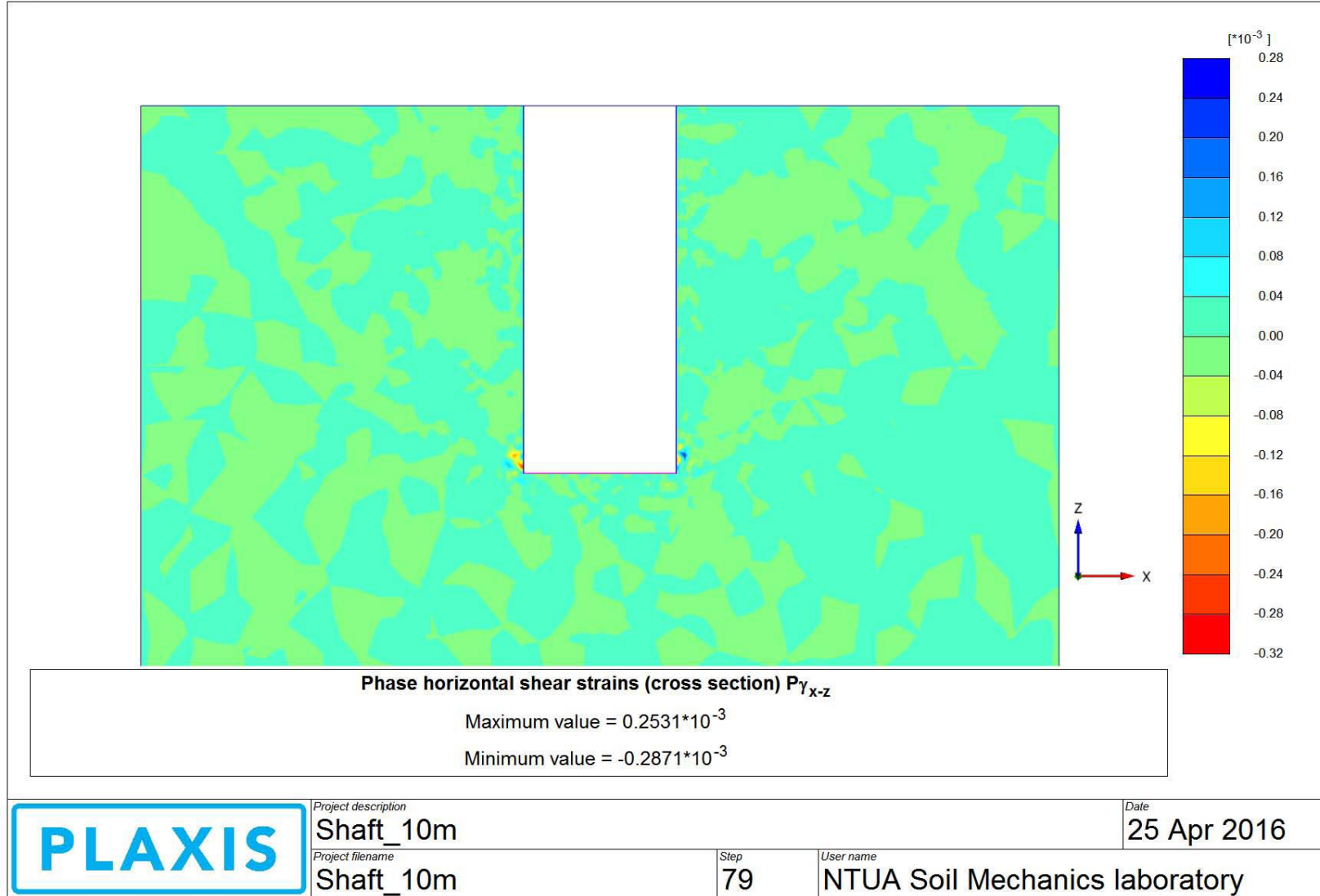
 <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analyses</small> <small>Version 8.2.4.133</small>	<small>Project description</small>			
	Hinge and Rotation Spring_Shaft_10m			
<small>Project name</small>	<small>Step</small>	<small>Date</small>	<small>User name</small>	
HINGE	105	07 04 16	Andreas Serafis , National Technical University of Athens	

Εικόνα 198 : Hinge and Rotation Spring Analysis- Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).

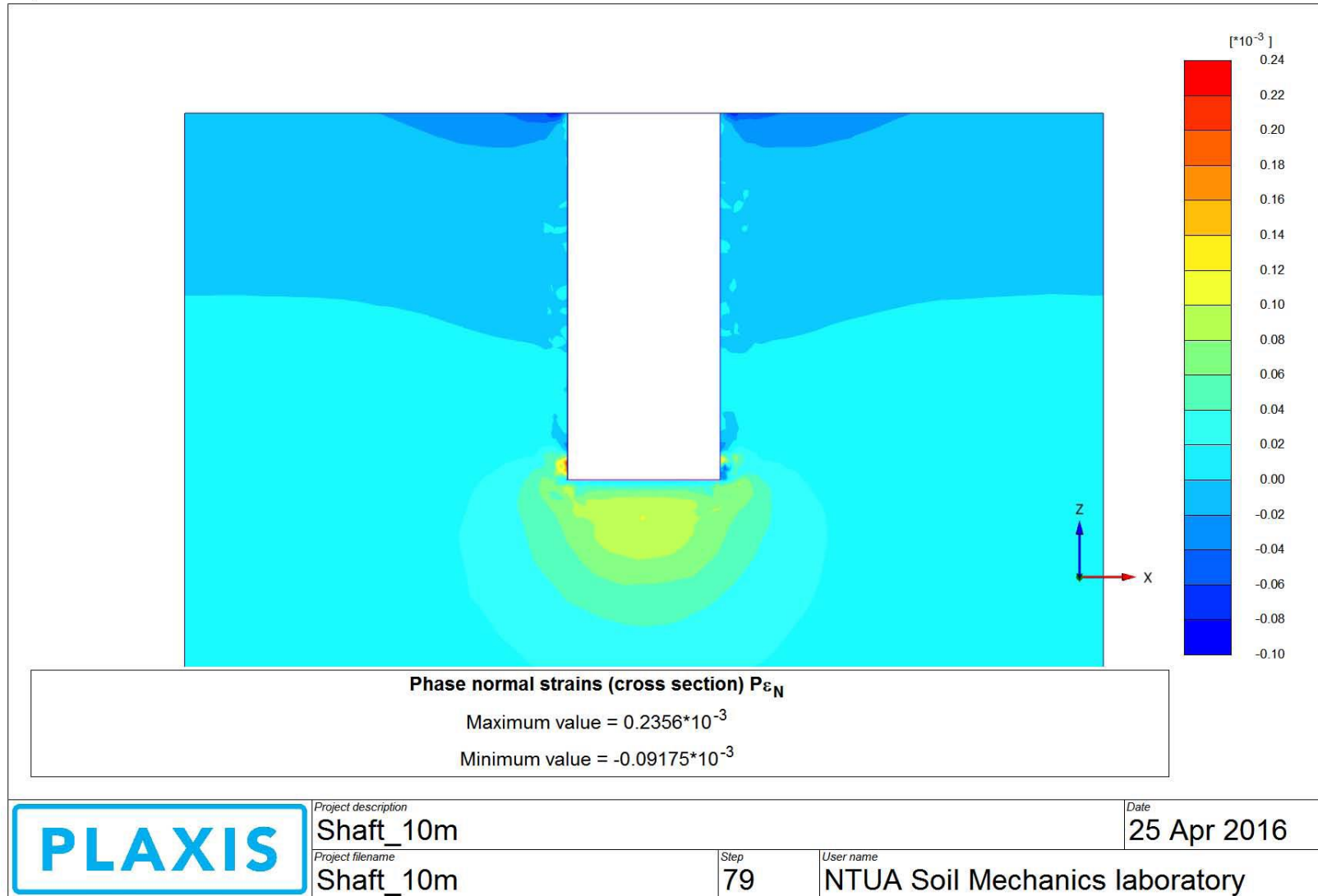
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PLAXIS 3D-ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

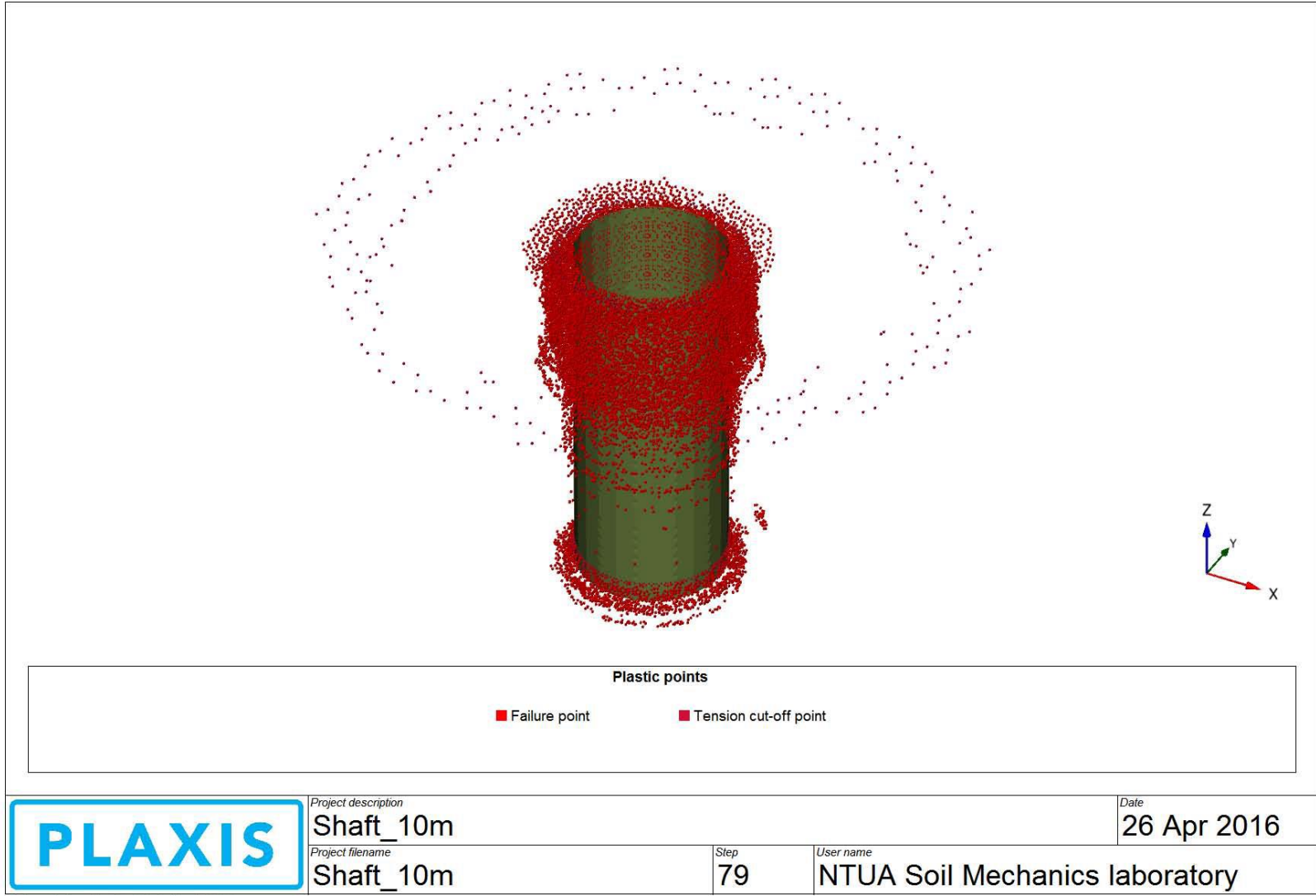
Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄ εμπεριέχονται τα εντατικά μεγέθη (M,Q,N), αποτέλεσμα των τριδιάστατων αναλύσεων, τα οποία δεν θεωρούνται ιδιαίτερα δυσμενή για την κατασκευή.



Εικόνα 199 : Plaxis 3D_Analysis N^ο1 : Η προσαύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων μετά την 17^η φάση προσομοίωσης (τελευταία φάση).

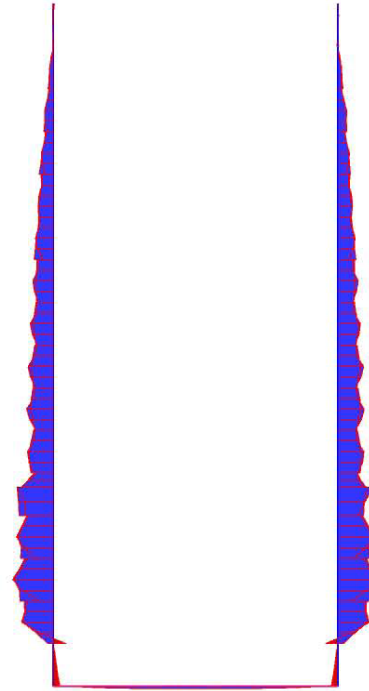


Εικόνα 200 : Plaxis 3D_ Analysis N^o1 : Η προσαύξηση των ορθών τροπών μετά την 17^η φάση προσομοίωσης (τελευταία φάση).



C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_10m.P3DAT\

Εικόνα 201 : Plaxis 3D_Analysis N^ο1 : Τα σημεία αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής μετά την 17^η φάση προσομοίωσης (τελευταία φάση).



Bending moments M_{22} (scaled up 0.0500 times)

Maximum value = 28.56 kNm/m

Minimum value = -8.939 kNm/m



Project description

Shaft_10m

Date

26 Apr 2016

Project filename

Shaft_10m

Step

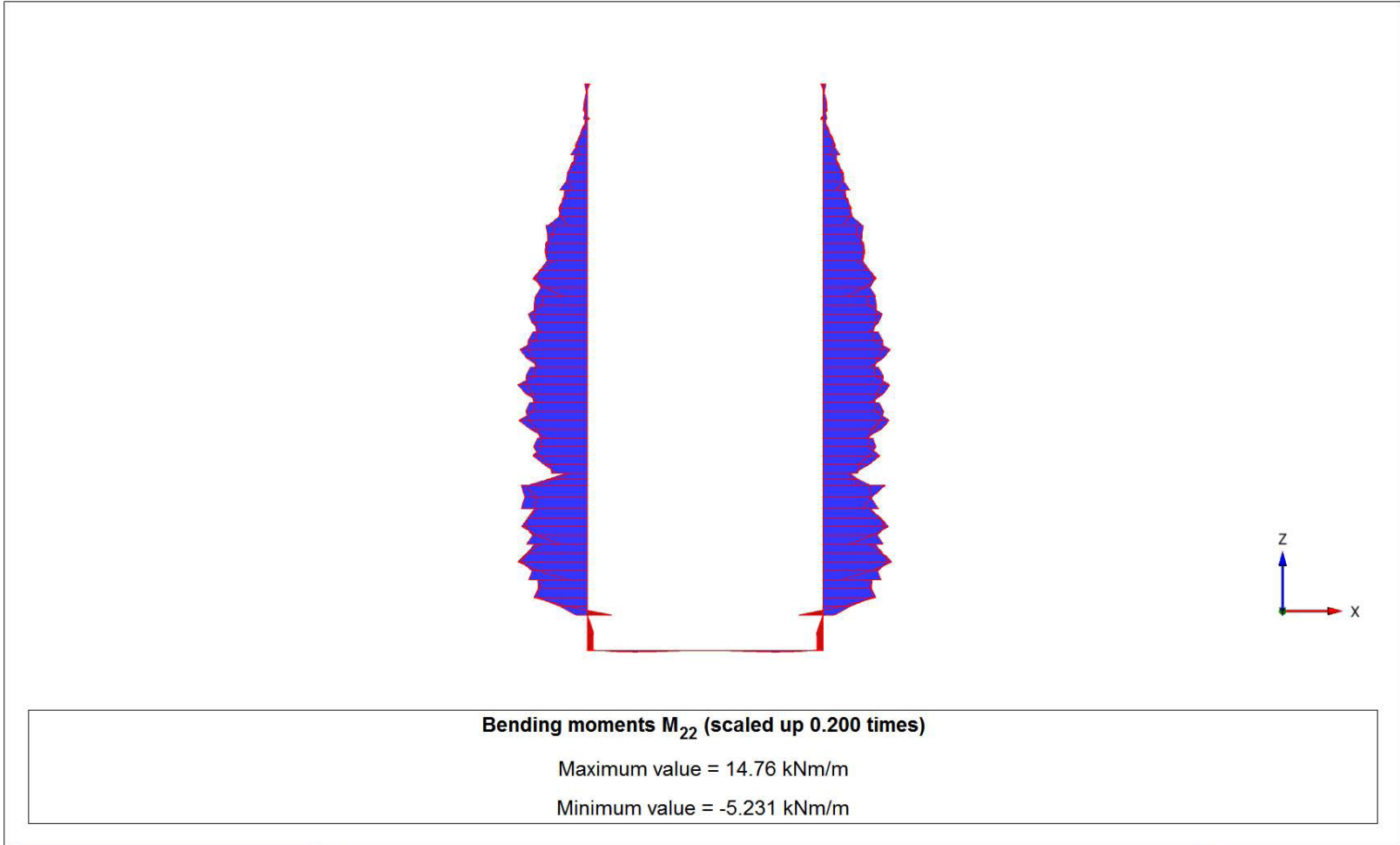
79

User name

NTUA Soil Mechanics laboratory

C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_10m.P3DAT\

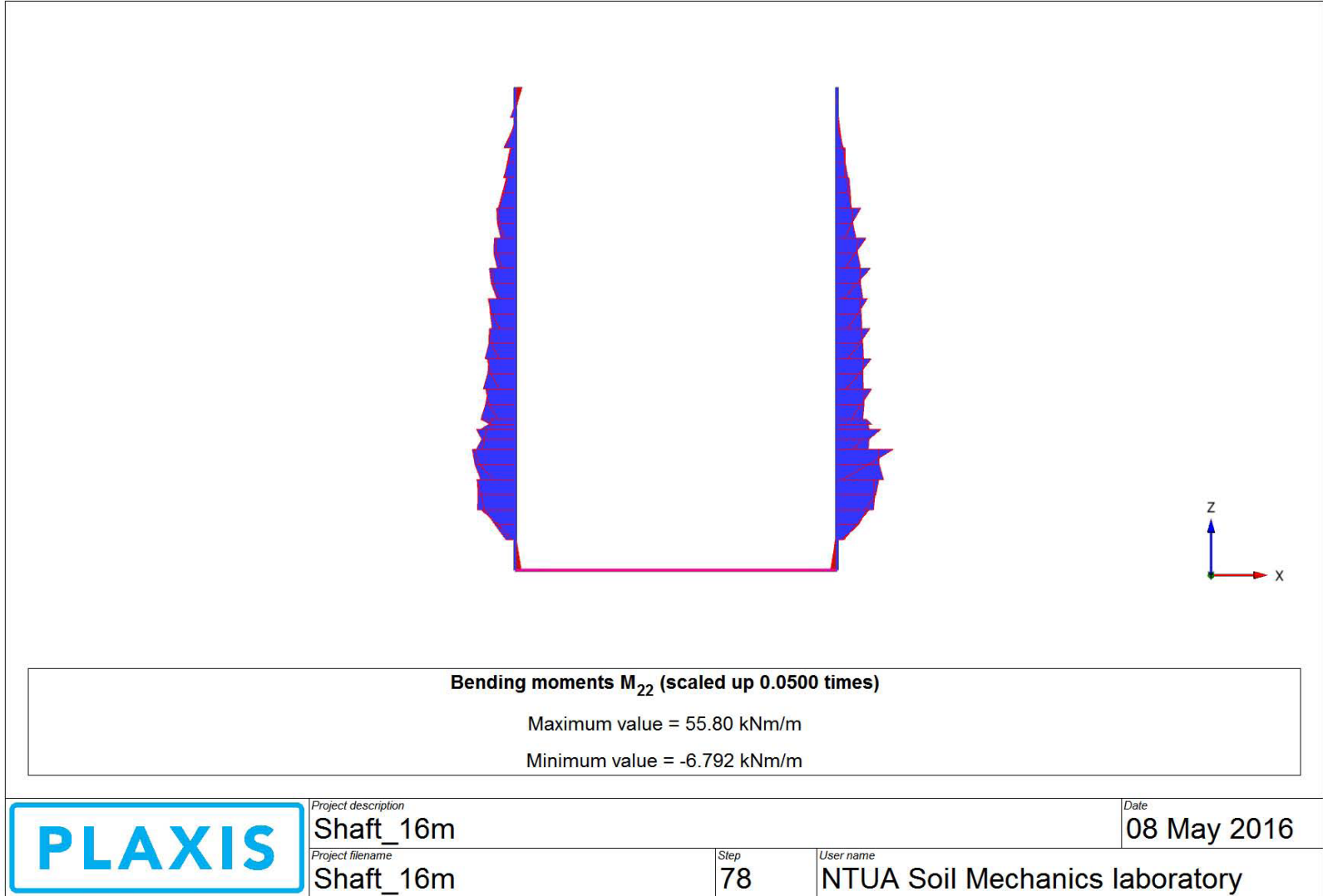
Εικόνα 202 : Plaxis 3D_ Analysis N^o1 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



	<i>Project description</i> Shaft_10m	<i>Date</i> 07 May 2016	
	<i>Project filename</i> Shaft_10m_H.S.Model	<i>Step</i> 82	<i>User name</i> NTUA Soil Mechanics laboratory

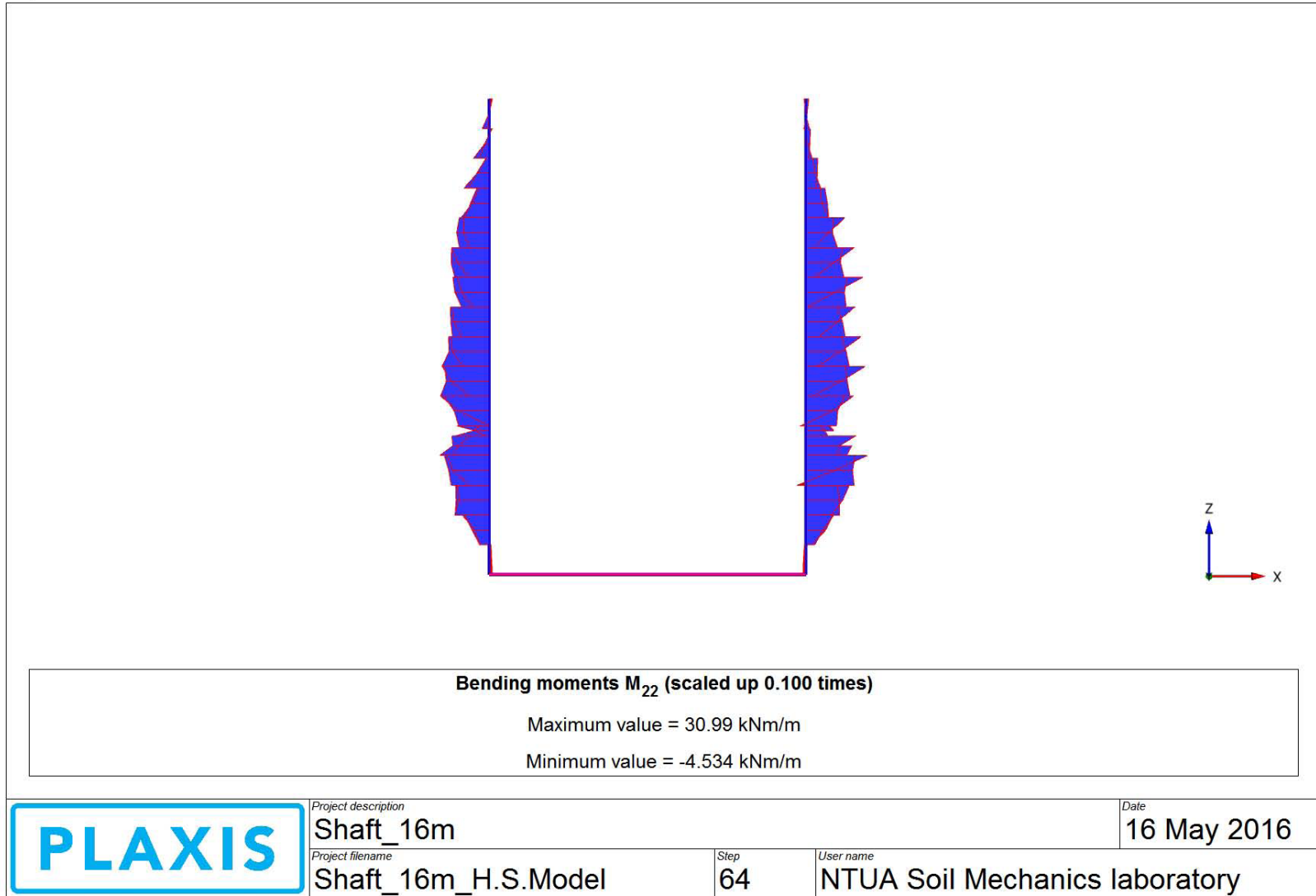
C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_10m_H.S.Model.P3DAT\

Εικόνα 203 : Plaxis 3D_ Analysis N°2 - Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



C:\Users\Andrew\Desktop\Shaft_16m.P3DAT\

Εικόνα 204 : Plaxis 3D_ Analysis N°3- Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17).



Εικόνα 205 : Plaxis 3D_ Analysis N^o4- Διάγραμμα καμπτικών ροπών του φορέα κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης (Phase 17)

