



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Π.Μ.Σ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ
ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ
ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΡΑΝΕΣ**

**ΑΡΓΥΡΙΟΣ ΜΠΕΗΣ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Π.Θ.**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Τίτλου Σπουδών

ΒΟΛΟΣ 2021

© 2021 Αργύριος Μπέης

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Παναγιώτης Ντακούλας
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Σπύρος Καραμάνος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πολυνίκης Βαζούρας
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, Καθηγητή κ. Πάνο Ντακούλα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της εργασίας μου. Επιπλέον, οφείλω θερμές ευχαριστίες στα υπόλοιπα δύο μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Σπύρο Καραμάνο και τον Διδάκτορα του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κ. Πολυνίκη Βαζούρα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να απευθύνω στους φίλους και την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Αργύριος Μπέης

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ
ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ
ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΡΑΝΕΣ**

Αργύριος Μπέης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Παναγιώτης Ντακούλας, Καθηγητής

Περίληψη

Οι αγωγοί που μεταφέρουν φυσικό αέριο είναι δυνατόν να υποστούν ολικό λυγισμό λόγω των σημαντικών θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης του μεταφερόμενου υγρού. Ένας τέτοιος λυγισμός μπορεί να αποτελέσει σημαντική απειλή για αγωγούς, οι οποίοι θα πρέπει να εγκατασταθούν σε λόφους ή κορυφογραμμές, ακολουθώντας την κλίση του πρανούς. Η παρούσα εργασία αφορά τη διερεύνηση του θερμικού ολικού λυγισμού υπόγειου μεταλλικού αγωγού φυσικού αερίου, ο οποίος διέρχεται από πρανές. Το σύστημα εδάφους – αγωγού προσομοιώνεται μέσω πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη μεγάλες παραμορφώσεις και ανελαστική συμπεριφορά υλικού. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις γεωτεχνικές παραμέτρους του προβλήματος, εξετάζοντας τη συμπεριφορά του χαλύβδινου αγωγού σε αργιλικά και αμμώδη εδάφη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφές διαγραμμάτων της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης και κατακόρυφης μετατόπισης στην κρίσιμη διατομή και της κατακόρυφης μετατόπισης με τη θερμοκρασία του αγωγού.

Λέξεις Κλειδιά: *Υπόγειοι αγωγοί, Ολικός λυγισμός, Θερμικός λυγισμός, Πρανές, Κρίσιμη θερμοκρασία, Αριθμητική προσομοίωση*

AN INVESTIGATION INTO THERMAL UPHEAVAL BUCKLING OF BURIED STEEL NATURAL GAS PIPELINE PASSING THROUGH SLOPE

Argyrios Beis

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2021

Supervisor: Panagiotis Dakoulas, Professor

Abstract

Pipelines transporting natural gas may experience upheaval buckling due to substantial compressive forces induced by high temperature and pressure of the fluid content. Such upheaval buckling may pose a major threat to pipelines which often have to be installed crossing hills or mountain ridges, following the slope. The present paper investigates thermal upheaval of buried natural gas pipeline passing through slope. The system soil – pipeline is modeled through finite elements, which account for large strains and nonlinear material behavior. The study focuses on the geotechnical parameters of the system, investigating the behavior of steel pipeline buried in clay and sand. The results are presented in the form of diagrams of maximum plastic strains and vertical displacement around the critical pipeline cross section, and vertical displacement versus pipeline temperature.

Keywords: *Buried pipelines, Upheaval buckling, Thermal Buckling, Slope, Critical temperature, Numerical modeling*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο μελέτης	1
1.2	Οργάνωση μεταπτυχιακής διατριβής	2
Κεφάλαιο 2	Αγωγοί – Ολικός λυγισμός	3
2.1	Γενικά	3
2.2	Ολικός λυγισμός	7
2.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	7
2.4	Κανονιστικές προβλέψεις έναντι τοπικού λυγισμού	9
Κεφάλαιο 3	Ορισμός του προβλήματος και προσομοίωση	12
3.1	Λογισμικό Abaqus	12
3.2	Βασικά στοιχεία και παράμετροι προσομοίωσης	13
3.3	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	16
3.4	Ιδιότητες υλικών	18
Κεφάλαιο 4	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων	22
4.1	Άργιλος συνοχής $c = 20$ kPa	22
4.2	Άργιλος συνοχής $c = 30$ kPa	35
4.3	Άργιλος συνοχής $c = 50$ kPa	42
4.4	Άργιλος συνοχής $c = 80$ kPa	49
4.5	Άργιλος συνοχής $c = 200$ kPa	56
4.6	Άμμος με γωνία τριβής $\phi = 33^\circ$	60
4.7	Άμμος με γωνία τριβής $\phi = 38^\circ$	66
4.8	Άμμος με γωνία τριβής $\phi = 43^\circ$	71

Κεφάλαιο 5	Σύγκριση αποτελεσμάτων	76
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	80
6.1	Συμπεράσματα	80
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	81
	Βιβλιογραφία	82

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά χάλυβα API5L-X65	18
Πίνακας 3-2: Εδαφικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις.....	20
Πίνακας 5-1. Εξέλιξη της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, για αργιλικά εδάφη.....	76
Πίνακας 5-2. Εξέλιξη της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, για αμμώδη εδάφη	77
Πίνακας 5-3. Κρίσιμες θερμοκρασίες και έναρξη τοπικού λυγισμού αγωγού σε αργιλικά εδάφη .	77
Πίνακας 5-4. Κρίσιμες θερμοκρασίες και έναρξη τοπικού λυγισμού αγωγού σε αμμώδη εδάφη ..	78

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Τοποθέτηση αγωγού φυσικού αερίου σε όρυγμα, Καναδάς (Canadian Energy pipeline Association).....	4
Σχήμα 2-2. Τοποθέτηση αγωγού φυσικού αερίου σε πρανές (William Taufic / Getty Images).....	5
Σχήμα 2-3. Αστοχία αγωγού λόγω τοπικού λυγισμού (Yun and Kyriakides, 1990)	6
Σχήμα 2-4. Ολικός λυγισμός υπόγειων μεταλλικών αγωγών (http://www.passuite.com)	6
Σχήμα 2-5. Ακτίνα r_0 σε ωοειδώς παραμορφωμένη διατομή (EC3)	11
Σχήμα 3-1. Το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία και περιλαμβάνει το κεντρικό μοντέλο 70 m, στο οποίο αναμένεται να εμφανιστεί ο λυγισμός, και δύο άλλα μοντέλα δοκού μήκους 500 m σε κάθε πλευρά.	14
Σχήμα 3-2. Το έδαφος σε τομή και κάτοψη με τις διαστάσεις του και τα δεδομένα της διακριτοποίησης.	15
Σχήμα 3-3. Ο αγωγός για το τρισδιάστατο μοντέλο, διαιρεμένος σε τρία μέρη για την βελτιστοποίηση της διακριτοποίησης.	16
Σχήμα 3-4. Προσομοίωση αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους με στοιχεία δοκού και μετακινησιακά ελατήρια	18
Σχήμα 3-5. Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα API5L-X65	19
Σχήμα 3-6. Κύκλος του Mohr.....	20
Σχήμα 4-1. Σύστημα εδάφους – αγωγού κατά την τελική παραμόρφωση (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	22
Σχήμα 4-2. (α) Μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στη διατομή του αγωγού και (β) λεπτομέρεια της περιοχής που εμφανίστηκαν τοπικοί λυγισμοί (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	23
Σχήμα 4-3. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 20 kPa).....	24
Σχήμα 4-4. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση του αγωγού και λεπτομέρειες των σημείων που εμφανίστηκε τοπικός λυγισμός (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	25
Σχήμα 4-5. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης που σημειώθηκε στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	26

Σχήμα 4-6. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση του αγωγού στο σημείο A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	27
Σχήμα 4-7. Εικόνες του παραμορφωμένου αγωγού στο σημείο A (α) πριν την ανάπτυξη του λυγισμού, (β) στο κρίσιμο σημείο, (γ) μετά την ανάπτυξη του λυγισμού (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	27
Σχήμα 4-8. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	29
Σχήμα 4-9. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	30
Σχήμα 4-10. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού για τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της συνολικής κατακόρυφης μετακίνησης (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	31
Σχήμα 4-11. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 20 kPa). .	32
Σχήμα 4-12. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άργιλος συνοχής 20 kPa).	34
Σχήμα 4-13. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 30 kPa).	35
Σχήμα 4-14. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 30 kPa).	36
Σχήμα 4-15. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 30 kPa).	37
Σχήμα 4-16. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 30 kPa).	38
Σχήμα 4-17. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 30 kPa).	39

Σχήμα 4-18. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 30 kPa). .	40
Σχήμα 4-19. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άργιλος συνοχής 30 kPa).	41
Σχήμα 4-20. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 50 kPa).....	42
Σχήμα 4-21. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 50 kPa).....	43
Σχήμα 4-22. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 50 kPa).....	44
Σχήμα 4-23. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 50 kPa).	45
Σχήμα 4-24. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 50 kPa).	46
Σχήμα 4-25. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 50 kPa). .	47
Σχήμα 4-26. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άργιλος συνοχής 50 kPa).	48
Σχήμα 4-27. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 80 kPa).....	49
Σχήμα 4-28. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 80 kPa).....	50
Σχήμα 4-29. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 80 kPa).	51

Σχήμα 4-30. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 80 kPa).	52
Σχήμα 4-31. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 80 kPa).	53
Σχήμα 4-32. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 80 kPa). .	54
Σχήμα 4-33. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άργιλος συνοχής 80 kPa).	55
Σχήμα 4-34. Μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 200 kPa).	56
Σχήμα 4-35. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 200 kPa).	56
Σχήμα 4-36. Κατανομή της μέγιστης παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 20%, (β) 40%, (γ) 60%, (δ) 80%, (ε) 100%, της συνολικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 200 kPa).	57
Σχήμα 4-37. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 200 kPa).	58
Σχήμα 4-38. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου A με τη θερμοκρασία (Άργιλος συνοχής 200 kPa).	59
Σχήμα 4-39. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση του αγωγού, στην κρίσιμη διατομή, κατά την τελική παραμόρφωση (Άμμος με γωνία τριβής 33°).	60
Σχήμα 4-40. Θλιπτική παραμόρφωση στο κρίσιμο σημείο C, για την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού.	60
Σχήμα 4-41. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 33°).	61
Σχήμα 4-42. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 33°).	62
Σχήμα 4-43. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 33°).	63
Σχήμα 4-44. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άμμος με γωνία τριβής 33°).	64

Σχήμα 4-45. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άμμος με γωνία τριβής 33°).	65
Σχήμα 4-46. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 38°).	66
Σχήμα 4-47. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 38°).	67
Σχήμα 4-48. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 38°).	68
Σχήμα 4-49. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άμμος με γωνία τριβής 38°).	69
Σχήμα 4-50. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άμμος με γωνία τριβής 38°).	70
Σχήμα 4-51. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 43°).	71
Σχήμα 4-52. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 43°).	72
Σχήμα 4-53. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 43°).	73
Σχήμα 4-54. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άμμος με γωνία τριβής 43°).	74
Σχήμα 4-55. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άμμος με γωνία τριβής 43°).	75
Σχήμα 5-1. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης με τη θερμοκρασία του αγωγού σε αργιλικά εδάφη, όπου φαίνεται η έναρξη του τοπικού λυγισμού.....	78
Σχήμα 5-2. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης με τη θερμοκρασία του αγωγού σε αμμώδη εδάφη, όπου φαίνεται η έναρξη του τοπικού λυγισμού.....	79

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο μελέτης

Στη σύγχρονη εποχή δίκτυα αγωγών χρησιμοποιούνται ευρέως ανά τον κόσμο για τη μεταφορά διαφόρων μορφών ενέργειας. Το 2014 το συνολικό μήκος των αγωγών παγκοσμίως ανερχόταν σε περίπου 3.5 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Διάφορα υγρά και αέρια όπως νερό, πετρέλαιο και φυσικό αέριο μπορούν να μεταφερθούν στον προορισμό τους μέσω δικτύων αγωγών.

Συγκεκριμένα, το φυσικό αέριο σήμερα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παροχή ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Αναμένεται στα επόμενα 25 χρόνια να αυξηθεί από το ένα πέμπτο στο ένα τρίτο της συνολικής παροχής ενέργειας στην Ευρώπη, γι' αυτό και δαπανούνται αρκετά εκατομμύρια ευρώ για τη μεταφορά φυσικού αερίου μέσω δικτύων υπογείων αγωγών. Παράδειγμα των τελευταίων χρόνων είναι το Trans Adriatic Pipeline (TAP), που συνδέεται με το Trans Anatolian Pipeline (TANAP), που μεταφέρει φυσικό αέριο από το Αζερμπαϊτζάν στην Κεντρική Ευρώπη, και για το οποίο δαπανήθηκαν 1.5 δισεκατομμύρια ευρώ.

Έργα υψίστης σημασίας όπως το TAP πρέπει να περάσουν από περιοχές με έντονες κλίσεις όπως λόφους ή κορυφογραμμές, ακολουθώντας την κλίση τους. Ακόμη λαμβάνοντας υπόψη τις σημαντικές θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης του μεταφερόμενου υγρού, οι αγωγοί που μεταφέρουν φυσικό αέριο είναι δυνατόν να υποστούν ολικό λυγισμό. Μια τέτοιου είδους αστοχία σε αγωγό φυσικού αερίου, αναμένεται να έχει τεράστιες επιπτώσεις τόσο οικονομικές όσο και περιβαλλοντικές, αφού πρόκειται για έργα με μεγάλες διαστάσεις που επηρεάζουν πολλά εκατομμύρια πληθυσμό. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του θερμικού ολικού λυγισμού υπόγειου μεταλλικού αγωγού φυσικού αερίου,

ο οποίος διέρχεται από πρανές, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις γεωτεχνικές παραμέτρους του προβλήματος, εξετάζοντας τη συμπεριφορά του χαλύβδινου αγωγού σε αργιλικά και αμμώδη εδάφη. Μέσω των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τις αριθμητικές αναλύσεις, θα δοθεί μια εικόνα αναφορικά με την επίδραση της συνοχής και της γωνίας τριβής στην ανάπτυξη ολικού λυγισμού λόγω θερμότητας.

1.2 Οργάνωση μεταπτυχιακής διατριβής

Το υπόλοιπο της μεταπτυχιακής διατριβής χωρίζεται σε πέντε ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 6, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στη χρήση των αγωγών και στο φαινόμενο του ολικού λυγισμού.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για τις αριθμητικές αναλύσεις και παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία και οι παράμετροι προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις.

Στο Κεφάλαιο 5 συγκρίνονται τα παραπάνω αποτελέσματα.

Τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Κεφάλαιο 2 Αγωγοί – Ολικός λυγισμός

2.1 Γενικά

Οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις του σύγχρονου κόσμου καθιστούν απαραίτητη την αναζήτηση νέων κοιτασμάτων φυσικού αερίου και πετρελαίου σε τοποθεσίες που βρίσκονται αρκετά μακριά από τους τελικούς αποδέκτες των καυσίμων. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η κατασκευή χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών, για τη μεταφορά καυσίμων στον τελικό τους αποδέκτη, που εκτείνονται σε μήκη εκατοντάδων χιλιομέτρων. Η ικανότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων φυσικού αερίου και πετρελαίου σε μεγάλες αποστάσεις, και μέσω εδαφών διαφορετικής μορφολογίας και ανάγλυφου, καθιστά τους αγωγούς κατασκευές με μεγάλη περιβαλλοντική και οικονομική σημασία για το κοινωνικό σύνολο. Παράλληλα, όμως, είναι και κατασκευές με μεγάλη επικινδυνότητα, καθώς μια αστοχία όπως θραύση, διαρροή ή ακόμη και έκρηξη, μπορεί να προκαλέσει δυσμενέστερες επιπτώσεις τόσο σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο όσο και σε κοινωνικό, προκαλώντας ανθρώπινες απώλειες.

“Οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου ή πετρελαίου κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα με ποικίλα χαρακτηριστικά και αντοχές ή από πλαστικό (HDPE), με εσωτερική διάμετρο από 4 έως 48 ίντσες. Οι περισσότεροι αγωγοί θάβονται τυπικά σε βάθη από 0,90 έως 2,50 m” (Χρήστου, 2015). Ένας τυπικός αγωγός φυσικού αερίου που τοποθετείται σε όρυγμα λίγων μέτρων φαίνεται στο Σχήμα 2-1.

Η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός αγωγού πραγματοποιείται κάτω από ένα αυστηρό πλαίσιο περιορισμών και κανόνων. Τέτοιοι περιορισμοί είναι, για παράδειγμα, κατά τη διαδικασία επιλογής της χάραξης, να αποφευχθούν οικιστικές περιοχές και περιοχές με ιδιαίτερη περιβαλλοντική ευαισθησία, οι οποίες καθίστανται ακατάλληλες σε



Σχήμα 2-1. Τοποθέτηση αγωγού φυσικού αερίου σε όρυγμα, Καναδάς (Canadian Energy pipeline Association)

περίπτωση μιας πιθανής αστοχίας. Λόγω αυτών των περιορισμών, καθώς και λόγω του μεγάλου μήκους των αγωγών, είναι πολλές φορές αδύνατο να αποφευχθούν, κατά την όδευση, περιοχές με έντονες κλίσεις, οι οποίες ενδέχεται να επιβάλλουν μεγάλες μετατοπίσεις στον αγωγό, τις οποίες, όντας θαμμένος, πρέπει να ακολουθήσει. Επομένως, η ακεραιότητα του αγωγού εξαρτάται άμεσα από τη μορφολογία και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του αγωγού. Προκύπτει, έτσι, η ανάγκη προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης περιβάλλοντος εδάφους – αγωγού.

Οι δράσεις που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό μεταλλικών αγωγών σύμφωνα με τον EC3, είναι η εξωτερική πίεση που δέχεται ένας αγωγός, η εσωτερική πίεση στις συνθήκες λειτουργίας του, το ίδιο βάρος του αλλά και των περιεχόμενων του, τα φορτία του εδάφους, τα φορτία κυκλοφορίας στην επιφάνεια του εδάφους, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, τα φορτία λόγω σεισμικής διέγερσης αλλά και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις εξαιτίας διαφορικών καθιζήσεων και καθιζήσεων λόγω εξορύξεων και κατολισθήσεων.



Σχήμα 2-2. Τοποθέτηση αγωγού φυσικού αερίου σε πρανές (William Taufic / Getty Images)

Η υψηλή θερμοκρασία και η εσωτερική πίεση που ασκεί το καύσιμο στα τοιχώματα τους αγωγού μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες θλιπτικές τάσεις. “Παρόλο που ο χάλυβας αποτελεί ένα υλικό με μεγάλη ολκιμότητα, οι τάσεις αυτές που αναπτύσσονται και οι ακόλουθες παραμορφώσεις μπορούν να ξεπεράσουν την ικανότητα του υλικού να τις παραλάβει και κατ’ επέκταση αποτελούν απειλή για τους μελετητές τέτοιου τύπου τεχνικών έργων. Μέσω των μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων, οι αγωγοί, όντας λεπτότοιχες κατασκευές μεγάλου μήκους, είναι ευπαθείς σε πιθανή απώλεια της ευστάθειας μέσω ανάπτυξης φαινομένων δευτέρας τάξεως. Τα φαινόμενα αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη περιλαμβάνεται ο τοπικός λυγισμός του μεταλλικού κελύφους του φορέα (Shell-type buckling), με απώλεια του κυκλικού του σχήματος” (Καλφαντής, 2014). Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις, όπου αυξάνεται ο λόγος της ακτίνας προς το πάχος του, δηλαδή όσο πιο λεπτότοιχος είναι ο αγωγός ή αυξάνεται το βάθος ταφής του, ο αγωγός συμπεριφέρεται ως κέλυφος και αναδεικνύεται ως κρίσιμη μορφή αστοχίας ο τοπικός λυγισμός. Τέτοιου είδους αστοχία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3.

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνεται ο λυγισμός συνολικά του φορέα σε ένα συγκεκριμένο μήκος (Beam-type buckling), με απώλεια της αρχικής ευθύγραμμης χάραξης του και μετατροπής σε ένα σχήμα που μοιάζει με το σχήμα Ω , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4. Αυτός ο τύπος λυγισμού που στο εξής θα καλείται ολικός λυγισμός είναι το

αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Η περίπτωση αστοχίας λόγω ολικού λυγισμού, είναι κρίσιμη στις περιπτώσεις αγωγών οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε μικρό βάθος και χαρακτηρίζονται από μικρό λόγο διαμέτρου προς το πάχος του τοιχώματος.



Σχήμα 2-3. Αστοχία αγωγού λόγω τοπικού λυγισμού (Yun and Kyriakides, 1990)



Σχήμα 2-4. Ολικός λυγισμός υπόγειων μεταλλικών αγωγών (<http://www.passuite.com>)

2.2 Ολικός λυγισμός

Όπως προαναφέρθηκε οι αγωγοί χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μεταφορά φυσικού αερίου και πετρελαίου, σε μεγάλες αποστάσεις, ήδη από τις αρχές του 1970. Για να διευκολυνθεί η ροή του ρευστού και να αποφευχθεί τυχόν στερεοποίηση του περιεχομένου του αγωγού, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, σε υπεράκτιους αγωγούς, πρέπει να μεταφέρεται σε υψηλές πιέσεις (π.χ. $p_{\max}= 70$ MPa) και υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. $\Delta T_{\max}= 160$ °C) (Cheuk et al. 2008). Για χερσαίους αγωγούς, οι αντίστοιχες τιμές της μέγιστης πίεσης και θερμοκρασίας είναι γενικά μικρότερες (π.χ. $p_{\max}= 40$ MPa και $\Delta T_{\max}= 80$ °C) (Saadawi 2001). Για τους υπόγειους αγωγούς, οι υψηλές θλιπτικές δυνάμεις μπορεί να οδηγήσουν σε καθολικό λυγισμό, ο οποίος αποτελεί σοβαρή απειλή για τη δομική ακεραιότητα, ασφάλεια και λειτουργικότητα του αγωγού. Για τους υποθαλάσσιους αγωγούς η απειλή αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη εξαιτίας των σοβαρότερων περιβαλλοντικών και οικονομικών συνεπειών που μπορεί να προκληθούν. Αναφορές σχετικά με αστοχίες καθολικού λυγισμού κάνουν λόγο για μήκη κύματος από 24 έως 70 m και κατακόρυφες παραμορφώσεις από 0.5 έως 2 m (Liu and Yan 2013, Saadawi 2001).

Γενικά, ο ολικός λυγισμός είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα λυγισμού το οποίο, εκτός από την εσωτερική πίεση του ρευστού και τη θερμοκρασία, εξαρτάται επίσης από τις ιδιότητες του εδάφους και του υλικού κατασκευής του αγωγού, καθώς επίσης και το βάθος εγκιβωτισμού, τη γεωμετρία του ορύγματος, τις αρχικές τάσεις και άλλους συντελεστές. Κατά καιρούς, ερευνήθηκε το πρόβλημα του ολικού λυγισμού, από αρκετούς ερευνητές, μέσω πειραμάτων μικρής κλίμακας, καθώς επίσης και μαθηματικών και αριθμητικών μοντέλων.

2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σύμφωνα με τους Yun και Kyriakides (1988) τα φαινόμενα ολικού λυγισμού είναι αρκετά επικίνδυνα σε αγωγούς με σχετικά μικρή διάμετρο, στους οποίους ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος του τοιχώματος είναι αρκετά μικρός και επομένως η λυγηρότητα αρκετά μεγάλη. Σύμφωνα με τη μελέτη τους, ο καθολικός λυγισμός συμβαίνει σε μήκος δοκού ίσο

με περίπου 50-100 διαμέτρους του αγωγού. Επιπλέον το γεγονός ότι οι περισσότεροι αγωγοί είναι θαμμένοι σε σχετικά μικρό βάθος, και ειδικά στους υποθαλάσσιους αγωγούς όπου η εκσκαφή ορύγματος ικανού βάθους είναι τις περισσότερες φορές αδύνατη, καθιστά τον ολικό λυγισμό κρίσιμη μορφή αστοχίας.

Ο ολικός λυγισμός μπορεί να αποτελέσει κρίσιμη μορφή αστοχίας σε αγωγό μεγάλης πίεσης και μεγάλης εσωτερικής θερμοκρασίας λόγω επιβολής σε αυτόν δυνάμεων που οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Στους υποθαλάσσιους αγωγούς ο κίνδυνος τέτοιας αστοχίας είναι ακόμη μεγαλύτερος επειδή σε μεγάλα βάθη η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας του ρευστού είναι αρκετά μεγάλη και σε συνδυασμό με την εσωτερική πίεση επιβάλλουν θλιπτικές δυνάμεις στον αγωγό, οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη του ολικού λυγισμού.

Η εκτεταμένη διερεύνηση του φαινομένου του ολικού λυγισμού αγωγών ξεκίνησε στις αρχές του 1970. Αρχικά διερευνήθηκε ο λυγισμός λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής σε υποθαλάσσιους αγωγούς, προσομοιώνοντας δοκό εδραζόμενη σε άκαμπτη θεμελίωση και προτάθηκαν αναλυτικές εξισώσεις για των υπολογισμό των αξονικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών. Τέτοιες μελέτες δημοσιεύτηκαν από τους Hobs (1984), Taylor και Gan (1986) και Yun και Kyriakides (1990).

Οι Maltby και Calladine (1995) παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας εκτεταμένης πειραματικής διερεύνησης του ολικού λυγισμού αγωγού επί ελαστικού εδάφους, τα οποία προέκυψαν από αναλύσεις αγωγών υπό αξονική, εγκάρσια και ανακυκλιζόμενη αξονική ένταση. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν τον ολικό λυγισμό μέσω πειραμάτων μικρής κλίμακας, χρησιμοποιώντας ένα λεπτότοιχο αγωγό διαμέτρου 6 mm και μήκους 5 m, θαμμένο στο έδαφος. Τα αποτελέσματα έδειξαν συσχέτιση μεταξύ της έναρξης του τοπικού λυγισμού και του μέγιστου λυγισμικού φορτίου. Έδειξαν ότι το μικρότερο θερμικό φορτίο, που οδηγεί στον τοπικό λυγισμό, εξαρτάται από την καμπτική δυσκαμψία του αγωγού, το πλάτος της αρχικής ατέλειας και τη μέγιστη αντοχή του εδάφους.

Η μελέτη της δοκού επί ελαστικού εδάφους ή επί άκαμπτης θεμελίωσης με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων, μπορεί να θεωρηθεί μία πρώτη προσέγγιση προσομοίωσης του φαινομένου του ολικού λυγισμού.

Οι Andreuzzi και Perrone (2001) εξήγαγαν αναλυτικές λύσεις για την περιγραφή του φαινομένου του ολικού λυγισμού κάνοντας χρήση του προσομοιώματος της αμφιέριστης ελαστικής δοκού μεγάλου μήκους υπό σταθερή θερμοκρασιακή μεταβολή και συνυπολογίζοντας την τριβή μεταξύ εδάφους και αγωγού. Παρόλα αυτά επειδή οι πραγματικές χερσαίες και υποθαλάσσιες εδαφικές συνθήκες απέχουν από τις υποθέσεις του ελαστικού εδάφους ή της άκαμπτης θεμελίωσης, κρίθηκε ορθότερο να υιοθετηθεί ερευνητικά το προσομοίωμα επί ελαστοπλαστικής θεμελίωσης για τη διερεύνηση του ολικού λυγισμού υποθαλάσσιων αγωγών λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών.

Οι Karanprour et al. (2013) ανέδειξαν την ευαισθησία του ολικού λυγισμού λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής στις αρχικές ατέλειες χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα της δοκού μεγάλου βάρους επί άκαμπτης θεμελίωσης. Τα πρώτα τους συμπεράσματα αφορούν κυρίως στην ευαισθησία του φαινομένου στις αρχικές ατέλειες και όχι τόσο στην δυσκαμψία τους εδάφους.

Παρόλα αυτά περιορισμένη παραμένει η διαθέσιμη βιβλιογραφία περί ολικού λυγισμού σε χερσαίες αγωγούς. Ενδεικτικά, έμφαση δόθηκε από τους Matheson et al. (2008), μελετώντας την περίπτωση αγωγών κατασκευασμένων με τμήματα ψυχρής έλασης και διερχόμενων πάνω από χαμηλό ύψωμα, όπου προτάθηκε μία συνάρτηση οριακής κατάστασης. Στην μελέτη τους περιλαμβάνουν παραμετρικές αναλύσεις για τη διάμετρο του αγωγού, το λόγο της διαμέτρου προς το πάχος του τοιχώματος και το υλικό του αγωγού.

2.4 Κανονιστικές προβλέψεις έναντι τοπικού λυγισμού

Ο τοπικός λυγισμός και η οβαλοποίηση της διατομής αποτελούν κρίσιμες μορφές αστοχίας υπόγειων μεταλλικών αγωγών. Για την αποφυγή των αστοχιών αυτών, προτείνονται στους κανονισμούς περιορισμοί για τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στους αγωγούς και κατά κύριο λόγο των θλιπτικών παραμορφώσεων, αφού αυτές προκαλούν τον τοπικό λυγισμό.

Στο μέρος 4-3 του Ευρωκώδικα 3 προβλέπονται διατάξεις για τον περιορισμό των παραμορφώσεων και κατά κύριο λόγο θλιπτικών παραμορφώσεων. Επίσης, μέσω της παραμέτρου α ελέγχεται η ωσειδής παραμόρφωση του αγωγού που έχει ως στόχο τον

περιορισμό της σταδιακής οβαλοποίησης της διατομής του αγωγού, η οποία οδηγεί σε μείωση της φέρουσας ικανότητας του αγωγού, και ισούται με:

$$\alpha = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{4} \quad (2.1)$$

όπου D_{\max} , D_{\min} η μεγαλύτερη και η μικρότερη διάμετρος του αγωγού κατά την ωσειδή παραμόρφωση του αγωγού.

Η παραμόρφωση θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη τιμή της ωσειδούς παραμόρφωσης, η οποία ισούται με:

$$\alpha_{\max} = x D_e \quad (2.2)$$

όπου D_e η εξωτερική διάμετρος και x η προτεινόμενη τιμή του Ευρωκώδικα, η οποία ισούται με 0.05.

Ο έλεγχος των θλιπτικών παραμορφώσεων ϵ_{cr} πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων (2.3) και (2.4).

$$\epsilon_{cr} = 0.25 \frac{t}{r_o} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{p r_o}{E t} \right)^2 \frac{|p|}{p}, \quad \text{για } \frac{r_o}{t} \leq 60 \quad (2.3)$$

ή

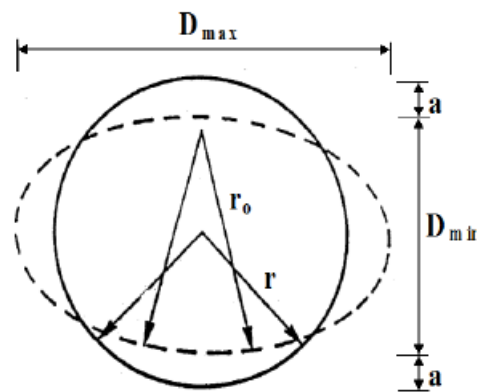
$$\epsilon_{cr} = 0.10 \frac{t}{r_o} + 3000 \left(\frac{p r_o}{E t} \right)^2, \quad \text{για } \frac{r_o}{t} \geq 60 \quad (2.4)$$

όπου t το πάχος του τοιχώματος του αγωγού, p η εσωτερική πίεση του ρευστού και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού.

Στις σχέσεις (2.3) και (2.4) η παράμετρος r_o υπολογίζεται ως εξής:

$$r_o = \frac{r}{1 - \frac{3\alpha}{r}} \quad (2.5)$$

Οι παράμετροι της σχέσης (2.5) παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-4:



Σχήμα 2-5. Ακτίνα r_0 σε ωειδώς παραμορφωμένη διατομή (EC3)

Σε όλες τις περιπτώσεις ελέγχου αστοχίας των αγωγών, θα πρέπει να ικανοποιείται η ανισότητα ασφαλείας:

$$\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_{cr} \quad (2.6)$$

Κεφάλαιο 3 Ορισμός του προβλήματος και προσομοίωση

Όπως προαναφέρθηκε το πρόβλημα που ζητείται να διερευνηθεί είναι το φαινόμενο του ολικού λυγισμού λόγω θερμότητας (Thermal Upheaval Buckling) ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού, ο οποίος διέρχεται από κεκλιμένο επίπεδο. Για το σκοπό αυτό, επιλέγεται το πρόβλημα να αναλυθεί μέσω μιας σειράς τρισδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v. 6.13 (2013). Το λογισμικό ABAQUS χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) -η οποία πρώτα εισήχθη στη γεωτεχνική μηχανική από τους Clough και Woodward (1967)- για να προσομοιώσει τη μηχανική συμπεριφορά χαλύβδινου αγωγού, του περιβάλλοντος εδάφους και την αλληλεπίδραση τους λαμβάνοντας υπόψη μη-γραμμικότητες του υλικού (πλαστικότητα), μεγάλες παραμορφώσεις και μετατοπίσεις που αλλάζουν σημαντικά τη γεωμετρία του αρχικού συστήματος.

3.1 Λογισμικό Abaqus

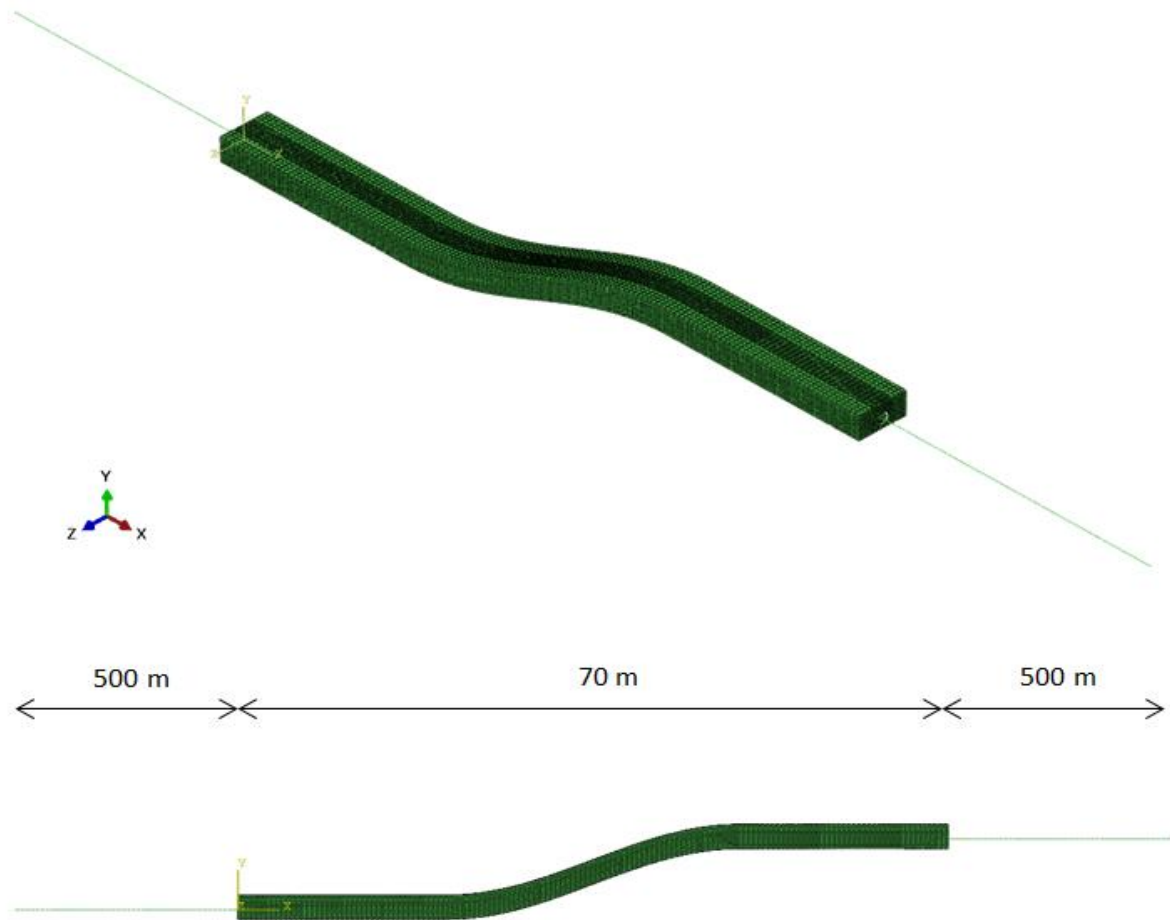
Το Abaqus είναι ένα εμπορικό λογισμικό για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα Abaqus αποτελείται από τρία βασικά προϊόντα: Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit και Abaqus/CAE. Το Abaqus/Standard είναι για επίλυση γενικού σκοπού χρησιμοποιώντας ένα παραδοσιακό σχήμα ολοκλήρωσης για την επίλυση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Το Abaqus/Explicit χρησιμοποιεί ένα ρητό σχήμα ολοκλήρωσης για την επίλυση εξαιρετικά μη γραμμικών μεταβατικών δυναμικών και σχεδόν στατικών αναλύσεων. Τέλος το Abaqus/CAE παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προσομοίωσης (προεπεξεργασίας) και οπτικοποίησης (μετά την επεξεργασία) για τα προϊόντα ανάλυσης. Το Abaqus χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες αυτοκινήτων, αεροδιαστημικής και βιομηχανικών προϊόντων.

Το προϊόν είναι δημοφιλές σε ακαδημαϊκά και ερευνητικά ιδρύματα λόγω της ευρείας ικανότητας προσομοίωσης υλικών και της δυνατότητας προσαρμογής του προγράμματος. Το Abaqus παρέχει επίσης μια καλή συλλογή δυνατοτήτων, όπως 62 συζευγμένες δυνατότητες ακουστικής-δομικής, πιεζοηλεκτρικής και δομικού πόρου, καθιστώντας το ελκυστικό για προσομοιώσεις σε επίπεδο παραγωγής, όπου πρέπει να συζητηθούν πολλαπλά πεδία. Σχεδιάστηκε αρχικά για να αντιμετωπίσει τη μη γραμμική φυσική συμπεριφορά, οπότε διαθέτει ένα εύρος υλικών προσομοιωμάτων με ελαστοπλαστικές ιδιότητες ιδιαίτερα αξιοσημείωτες.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το ABAQUS/CAE. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον στο οποίο ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει γεωμετρικά το προσομοίωμα που θα υποβληθεί σε ανάλυση με χρήση nodes (σημεία) και γραμμές. Επίσης ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει το υλικό του προσομοιώματος, τις συνοριακές του συνθήκες και τέλος να του επιβάλει στατικές και ψευδοστατικές δυνάμεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με ευκρίνεια στην οθόνη και ο χρήστης μπορεί να λάβει την πληροφορία που χρειάζεται είτε διαγραμματικά με το χρόνο από έτοιμα, αυτόματα διαγράμματα που παρουσιάζει το πρόγραμμα μετά το τέλος της ανάλυσης είτε με ανάγνωση των τιμών από υπολογιστικά φύλλα.

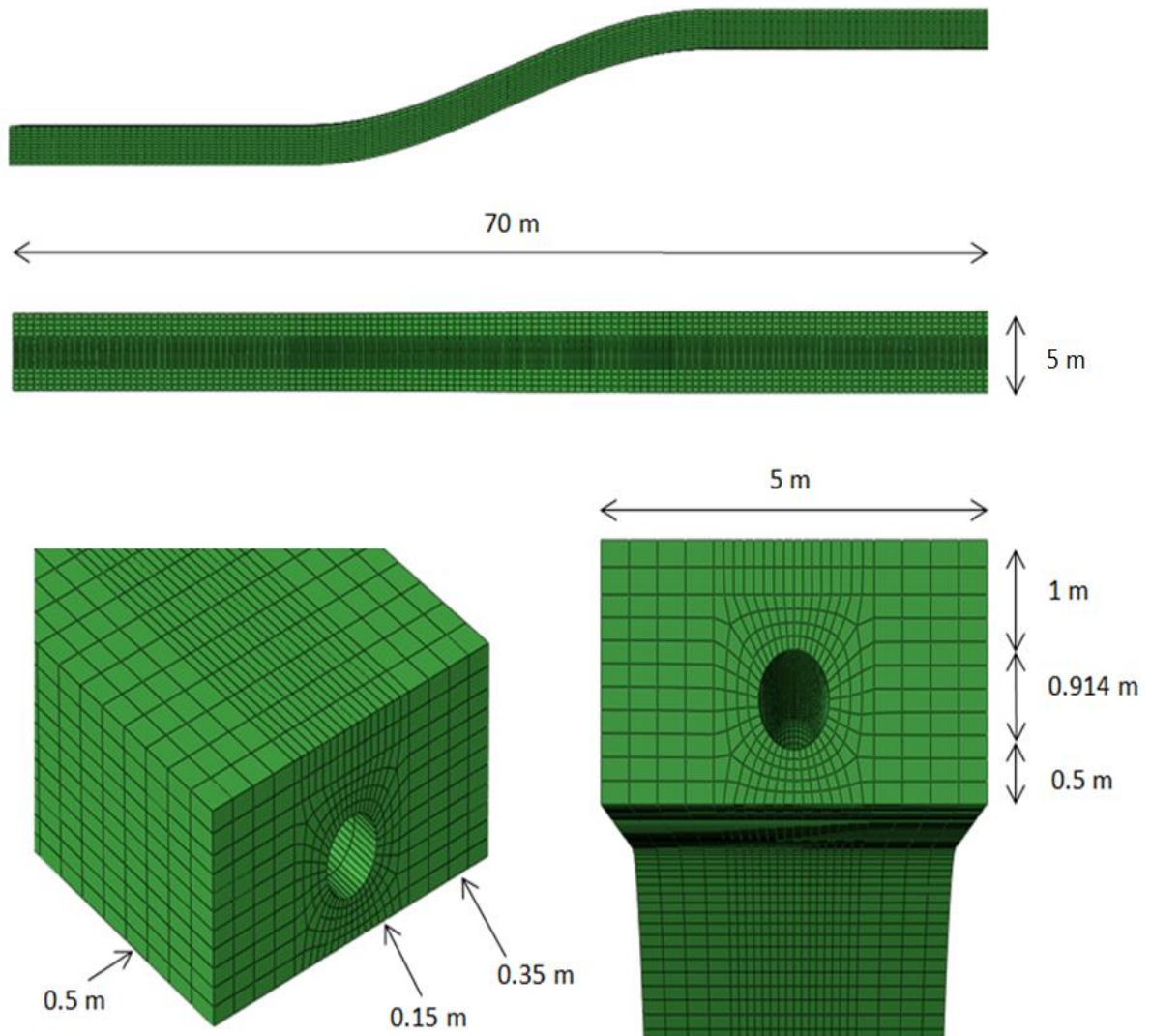
3.2 Βασικά στοιχεία και παράμετροι προσομοίωσης

Η γεωμετρία του προβλήματος περιγράφεται στο παρακάτω Στο Σχήμα 3-1 φαίνεται το αριθμητικό μοντέλο , το οποίο περιλαμβάνει 3 μέρη: ένα μοντέλο για την κρίσιμη περιοχή στο μέσο, όπου αναμένεται να εμφανιστεί ο λυγισμός, και άλλα δύο απλοποιημένα μοντέλα δοκού – εδαφικών ελατηρίων, τα οποία είναι συνδεδεμένα στις άκρες του κεντρικού μοντέλου.

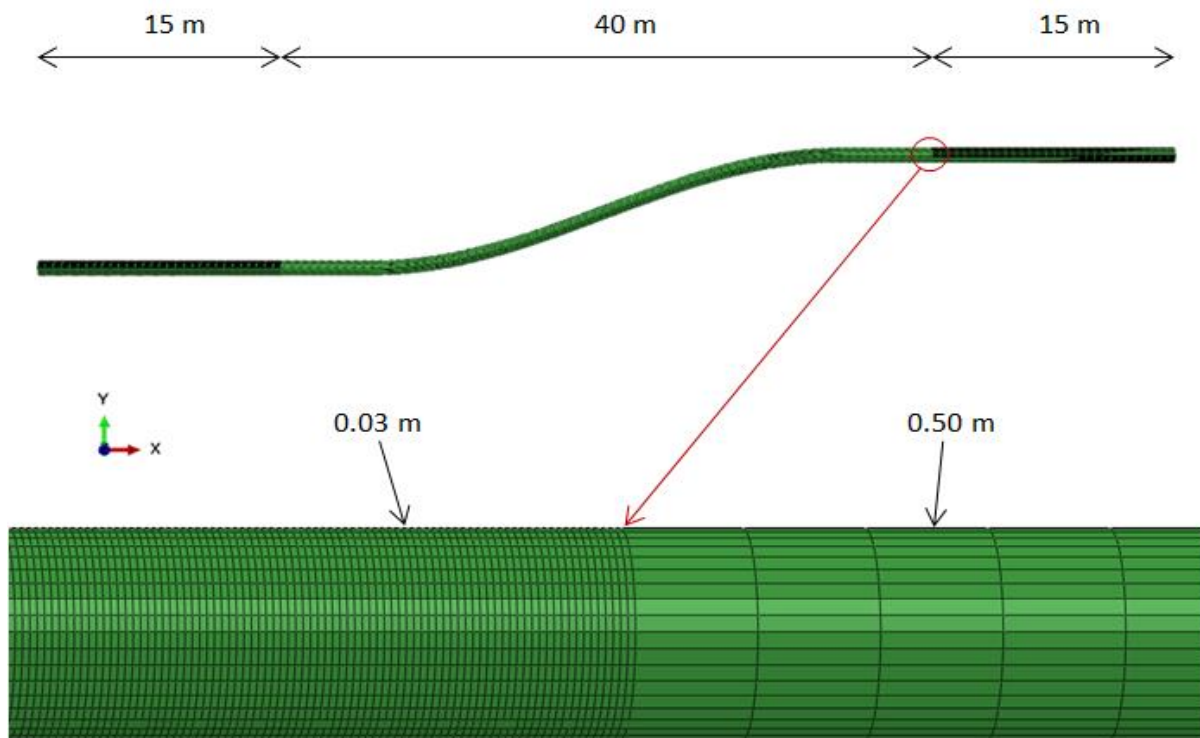


Σχήμα 3-1. Το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία και περιλαμβάνει το κεντρικό μοντέλο 70 m, στο οποίο αναμένεται να εμφανιστεί ο λυγισμός, και δύο άλλα μοντέλα δοκού μήκους 500 m σε κάθε πλευρά.

Θεωρείται αγωγός συνολικού μήκους 1070 m, διαμέτρου $D = 0,914$ m (36 in) και πάχους $t = 12,7$ mm (0,5 in), εγκιβωτισμένος σε βάθος 1,0 m – από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την άνω ίνα του αγωγού. Η μάζα του εδάφους που διακριτοποιείται έχει μήκος 70 m, πλάτος 5 m, βάθος 2,414 m και κλίση 33% (18°), ενώ καθένα από τα άλλα δύο απλοποιημένα μοντέλα έχει συνολικό μήκος 500 m. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία δεν προσομοιώνεται η ζώνη μη συνεκτικού υλικού που τοποθετείται στο όρυγμα γύρω από τον αγωγό.



Σχήμα 3-2. Το έδαφος σε τομή και κάτοψη με τις διαστάσεις του και τα δεδομένα της διακριτοποίησης.



Σχήμα 3-3. Ο αγωγός για το τρισδιάστατο μοντέλο, διαιρεμένος σε τρία μέρη για την βελτιστοποίηση της διακριτοποίησης.

3.3 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων

Όπως προαναφέρθηκε, η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης του υπόγειου αγωγού έγινε με βάση τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων κάνοντας χρήση του λογισμικού ABAQUS. Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος και οι ιδιότητες των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

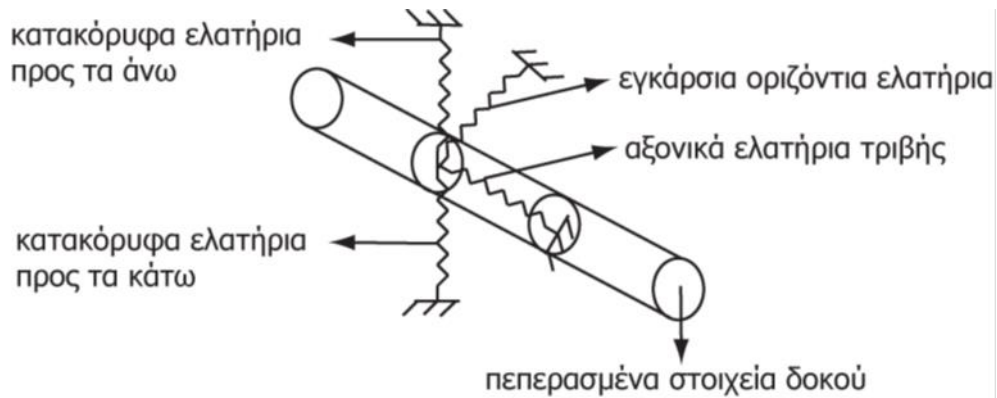
“Ο χαλύβδινος αγωγός προσομοιώνεται με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (S4R), τα οποία λαμβάνουν υπόψη μεγάλες παραμορφώσεις και ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Τα στοιχεία είναι τετρακομβικά, με γραμμικές συναρτήσεις σχήματος στην επιφάνεια του κελύφους, και μειωμένης ολοκλήρωσης, λόγω της πολύ καλής συμπεριφοράς τους σε καμπτικές καταπονήσεις” (Ντακούλας et al, 2008). Ένα τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του κελύφους φαίνεται στο Σχήμα 3-3.

Το περιβάλλον έδαφος προσομοιώνεται με συμπαγή χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (C3D8R), με κατάλληλο ελαστοπλαστικό νόμο συμπεριφοράς, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Για το τρισδιάστατο προσομοίωμα πέρα από τα 70 m, εκατέρωθεν ο αγωγός προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (pipe31) και το έδαφος με μη γραμμικά μετακινησιακά ελατήρια (spring2), για όλες τις κατευθύνσεις μετακίνησης (αξονικά, εγκάρσια, προς τα πάνω και προς τα κάτω).

“Τα στοιχεία δοκού (beam elements) του Abaqus έχουν την ικανότητα, μέσω κάποιων παραδοχών να μετατρέπουν ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων σε μονοδιάστατο πρόβλημα. Στα στοιχεία αυτά θεωρείται ότι όλες οι παραμορφώσεις κατά μήκος τους μπορούν να υπολογιστούν από μεταβλητές που είναι συναρτήσεις της θέσης ως προς τον άξονα της δοκού Η μεγάλη διάσταση του προσομοιώματος αποτελεί και τον άξονα των στοιχείων της δοκού”. (Μουλοπούλου, 2017)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αριθμητική προσομοίωση του εδάφους πραγματοποιείται με μη γραμμικά μετακινησιακά ελατήρια στις τρεις διευθύνσεις, τα οποία συνδέουν τους κόμβους του αγωγού με τους αντίστοιχους «εδαφικούς» κόμβους. Ειδικότερα, τα ελατήρια στη διαμήκη διεύθυνση του αγωγού (axial frictional soil springs) προσομοιώνουν την τριβή στην διεπιφάνεια εδάφους – αγωγού και τα εγκάρσια οριζόντια ελατήρια (lateral transverse soil springs) την εγκάρσια εδαφική αντίσταση στη μετακίνηση του αγωγού στο όρυγμα. Τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα άνω (vertical upward soil springs) και προς τα κάτω (vertical downward soil springs) προσομοιώνουν την εδαφική αντίσταση στις μετακινήσεις του αγωγού στο κατακόρυφο επίπεδο.



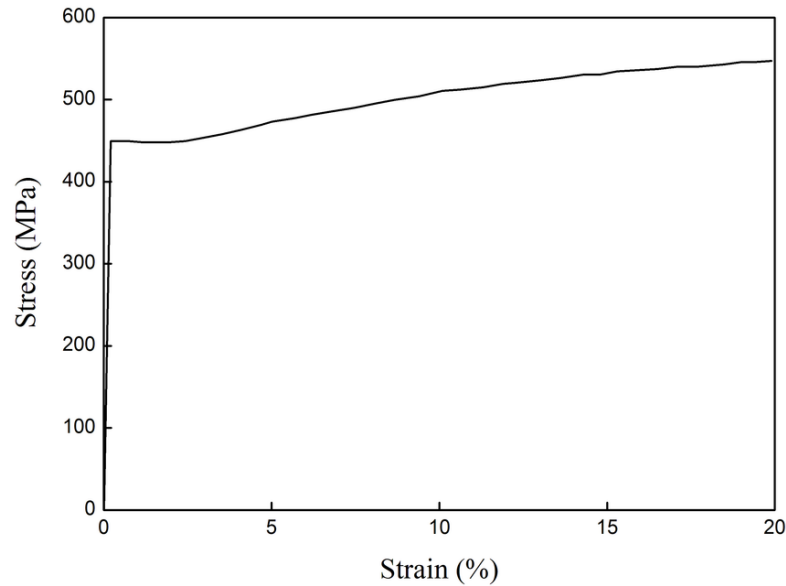
Σχήμα 3-4. Προσομοίωση αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους με στοιχεία δοκού και μετακινησιακά ελατήρια

3.4 Ιδιότητες υλικών

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται ως υλικό του μεταλλικού αγωγού είναι ποιότητας API5L-X65 και τα χαρακτηριστικά του παρατίθενται στον Πίνακα 3-1. Για την περιγραφή της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο J2 πλαστικότητας με ισότροπη κράτυνση. Στο Σχήμα 3-5 δίνεται η σχέση τάσης παραμόρφωσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό, και η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου πλαστικότητας. Το υλικό, όπως φαίνεται, παρουσιάζει ένα πλαστικό «πλατώ» μέχρι μία παραμόρφωση 2% και στη συνέχεια έχει κράτυνση με οριακή τάση 531 MPa. Στη διεπιφάνεια αγωγού - εδάφους, ο συντελεστής τριβής μ λαμβάνεται ίσος με 0,3.

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά χάλυβα API5L-X65

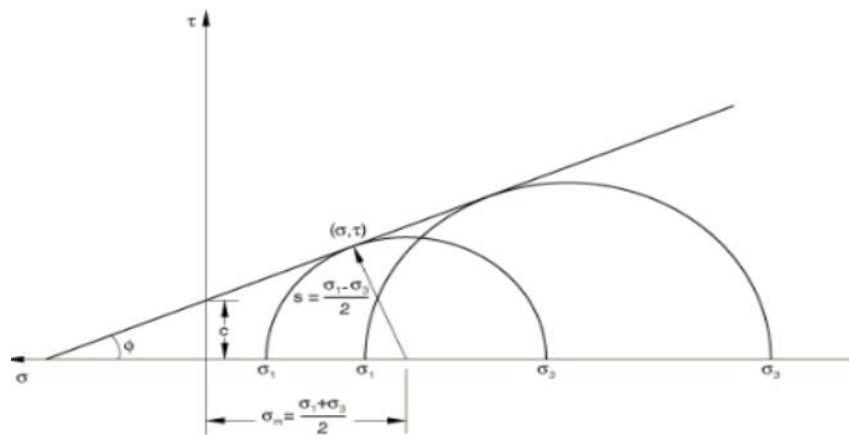
Μέτρο Ελαστικότητας, $E1$	210,0 GPa
Πυκνότητα, ρ	7500 kg/m ³
Λόγος Poisson, ν	0,3
Όριο Διαρροής, $\sigma1$	448,5 MPa
Όριο Θραύσης, $\sigma2$	531,0 MPa
Παραμόρφωση Διαρροής, $\epsilon1$	0,213%
Παραμόρφωση Θραύσης, $\epsilon2$	18,0%
Συντελεστής Θερμικής διαστολής, α	$1,1 \times 10^{-5}$ m/m°C



Σχήμα 3-5. Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα API5L-X65

Ο σχεδιασμός ενός αγωγού έναντι μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων πραγματοποιείται σε όρους παραμορφώσεων (Strain Based Design – SDB), παρά σε όρους τάσεων. Ο σχεδιασμός που βασίζεται στις παραμορφώσεις είναι κατάλληλος σε περιπτώσεις στις οποίες οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις αναμένεται να υπερβούν τα κανονιστικά όρια, δεδομένου ότι τα φορτία του αγωγού ελαττώνονται μετά την παραμόρφωσή του. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού έγκειται στο γεγονός πως οι μέθοδοι που βασίζονται στις αναπτυσσόμενες τάσεις είναι πολλές φορές ιδιαίτερα ευαίσθητες ως προς τη συμπεριφορά του υλικού.

Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους περιγράφεται από το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση υλικών σύμφωνα με το κλασικό κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Επιτρέπει στο υλικό να σκληρύνει και/ή να χαλαρώσει ισότροπα.



Σχήμα 3-6. Κύκλος του Mohr

Στην παρούσα διατριβή, δόθηκε έμφαση στην επίδραση των γεωτεχνικών παραμέτρων στη συμπεριφορά του συστήματος εδάφους – αγωγού. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να διερευνηθεί η επίδραση της συνοχής σε πέντε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη με τιμές συνοχής να κυμαίνονται μεταξύ 20 kPa και 200 kPa, γωνία τριβής $\varphi = 0^\circ$, γωνία διασταλτικότητας $\psi = 0^\circ$, πυκνότητα ρ , μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson $\nu = 0,3$. Η παραπάνω αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική μελέτη του συστήματος και για μη συνεκτικά εδάφη, και συγκεκριμένα για τρία είδη άμμου με γωνίες τριβής μεταξύ 33° και 43° . Στον Πίνακα 3-2 φαίνονται όλες οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για να διερευνηθεί ο θερμικός λυγισμός του κεκλιμένου αγωγού σε οκτώ διαφορετικά σενάρια.

Πίνακας 3-2: Εδαφικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις

Ιδιότητες εδαφών	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Μέτρο Ελαστικότητας E (Mpa)	Λόγος Poisson ν	Συνοχή c (kPa)	Γωνία τριβής φ (degrees)	Γωνία διασταλτικότητας ψ (degrees)
Άργιλος 1	1600	25	0,3	20	0	0
Άργιλος 2	1600	25	0,3	30	0	0
Άργιλος 3	1600	25	0,3	50	0	0
Άργιλος 4	1600	25	0,3	80	0	0
Άργιλος 5	1600	25	0,3	200	0	0
Άμμος 1	1700	5	0,3	0	33	0
Άμμος 2	1800	8	0,3	0	38	10
Άμμος 3	1900	8	0,3	0	43	17

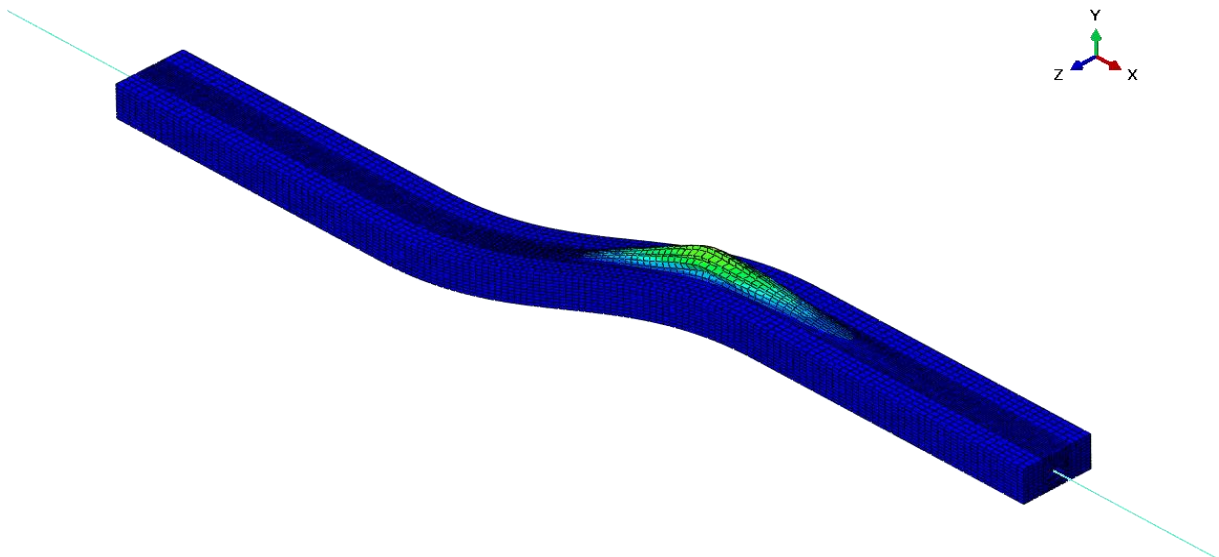
Σε κάθε ανάλυση, αρχικά εφαρμόστηκε το φορτίο της βαρύτητας και η εσωτερική πίεση, και ακολούθως η θερμοκρασία του αγωγού αυξήθηκε στους 120 °C, με αργό ρυθμό. Με βάση την ποιότητα του χάλυβα που επιλέχθηκε, εφαρμόστηκε εσωτερική πίεση ίση 5 MPa. Πρόκειται για έναν αγωγό φυσικού αερίου μέσης πίεσης. Όσον αφορά τις αρχικές (γεωστατικές) τάσεις, επιβλήθηκαν στο αρχικό βήμα της ανάλυσης, ώστε να έρθουν σε ισορροπία με το βάρος του εδάφους που επιβλήθηκε αργότερα.

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της πολυπαραμετρικής διερεύνησης του ολικού θερμικού λυγισμού χαλύβδινου αγωγού που διέρχεται από πρηνές. Στόχος των αναλύσεων αυτών είναι να διερευνηθεί η επίδραση των γεωτεχνικών παραγόντων στη ανάπτυξη μιας τέτοιας αστοχίας, μέσα από τον προσδιορισμό των θλιπτικών παραμορφώσεων και των κρίσιμων θερμοκρασιών. Η αστοχία αυτή θα συμβεί σε συγκεκριμένα σημεία, στα οποία υπάρχει σημαντική καμπυλότητα του αγωγού κατά τη διαμήκη κατάσταση.

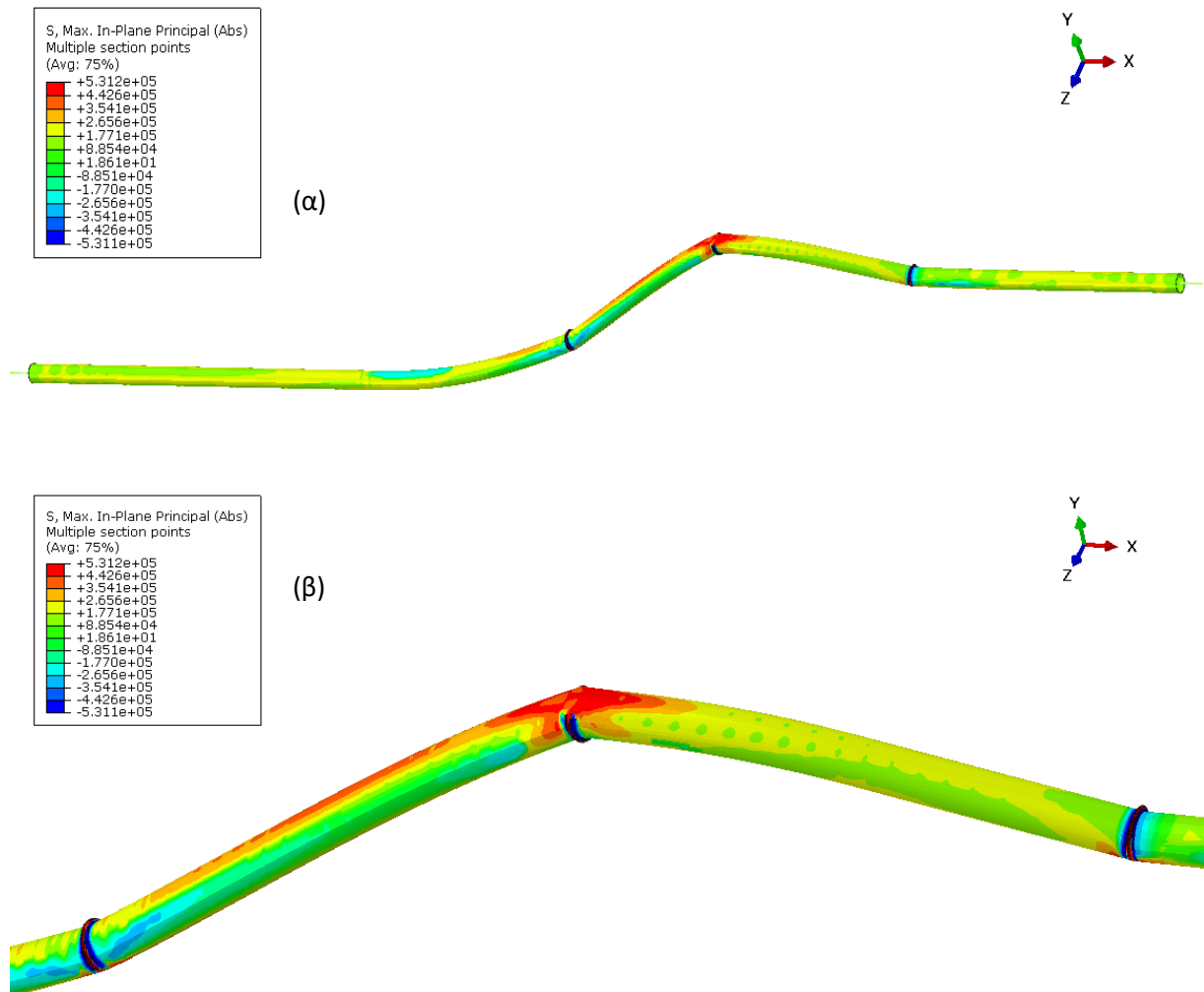
4.1 Άργιλος συνοχής $c=20$ kPa

Στο Σχήμα 4-1 δίνεται η εικόνα του παραμορφωμένου συστήματος εδάφους – αγωγού, όπως προέκυψε από την αριθμητική προσομοίωση για χαλαρή άργιλο συνοχής 20 kPa.



Σχήμα 4-1. Σύστημα εδάφους – αγωγού κατά την τελική παραμόρφωση (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

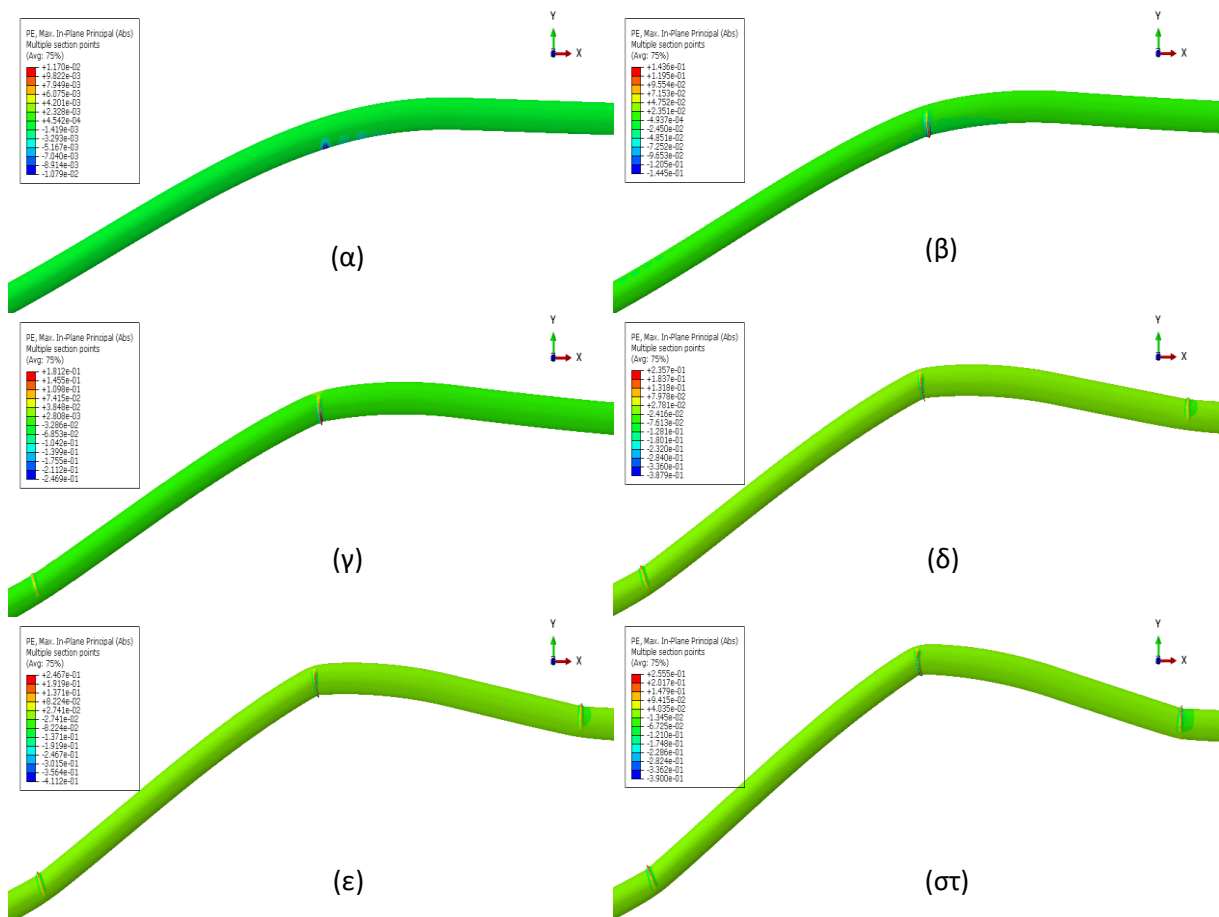
Στο Σχήμα 4-2 φαίνεται η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στη διατομή του αγωγού και αναλυτικότερα στην κρίσιμη περιοχή για την ύπαρξη τοπικών λυγισμών. Παρατηρείται ότι οι τιμές εκεί έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής και έχουν αγγίξει το όριο θραύσης για χάλυβα Χ65.



Σχήμα 4-2. (α) Μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στη διατομή του αγωγού και (β) λεπτομέρεια της περιοχής που εμφανίστηκαν τοπικοί λυγισμοί (Άργυλος συνοχής 20 kPa).

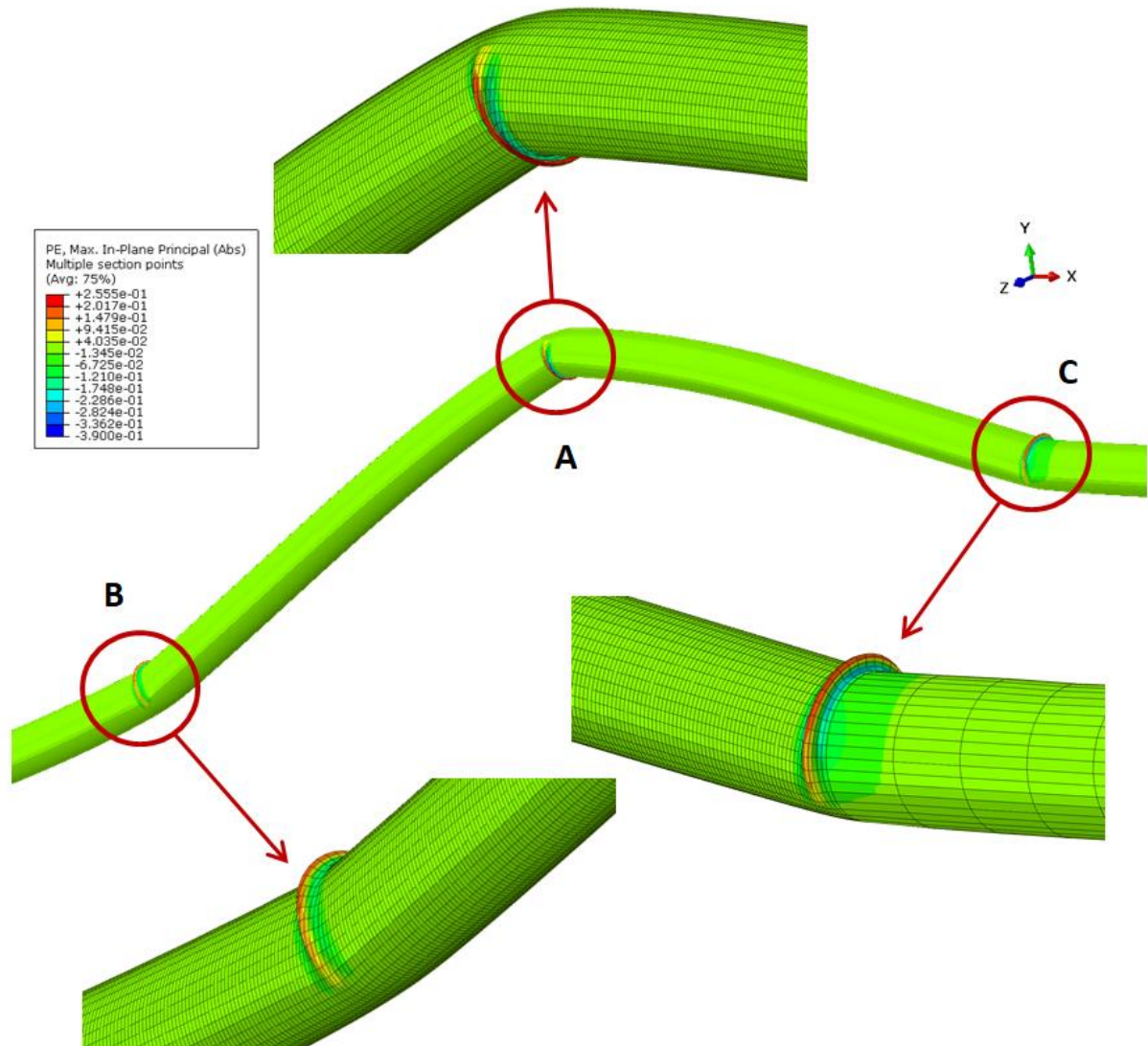
Στη συνέχεια της εργασίας τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων θα δοθούν σε όρους παραμορφώσεων, επειδή όπως αναφέρθηκε ο σχεδιασμός ενός αγωγού έναντι μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων πραγματοποιείται σε όρους παραμορφώσεων (Strain Based Design – SDB), παρά σε όρους τάσεων.

Στο Σχήμα 4-3 δίνεται το σχήμα του παραμορφωμένου αγωγού στην κρίσιμη διατομή για τις χρονικές στιγμές 0%, 20%, 40%, 60%, 80% και 100% της πλαστικής παραμόρφωσης. Αξίζει να τονιστεί πως ως 0% ορίζεται η στιγμή που ο χάλυβας διαρρέει, δηλαδή η στιγμή που η αναπτυσσόμενη τάση έχει ξεπεράσει τη μέγιστη τάση που μπορεί να παραλάβει ο αγωγός με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν πλαστικές παραμορφώσεις στη διατομή. Από εκεί και πέρα παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης, ανά ίσα χρονικά διαστήματα, μέχρι την τελική παραμόρφωση του αγωγού (100% της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης).



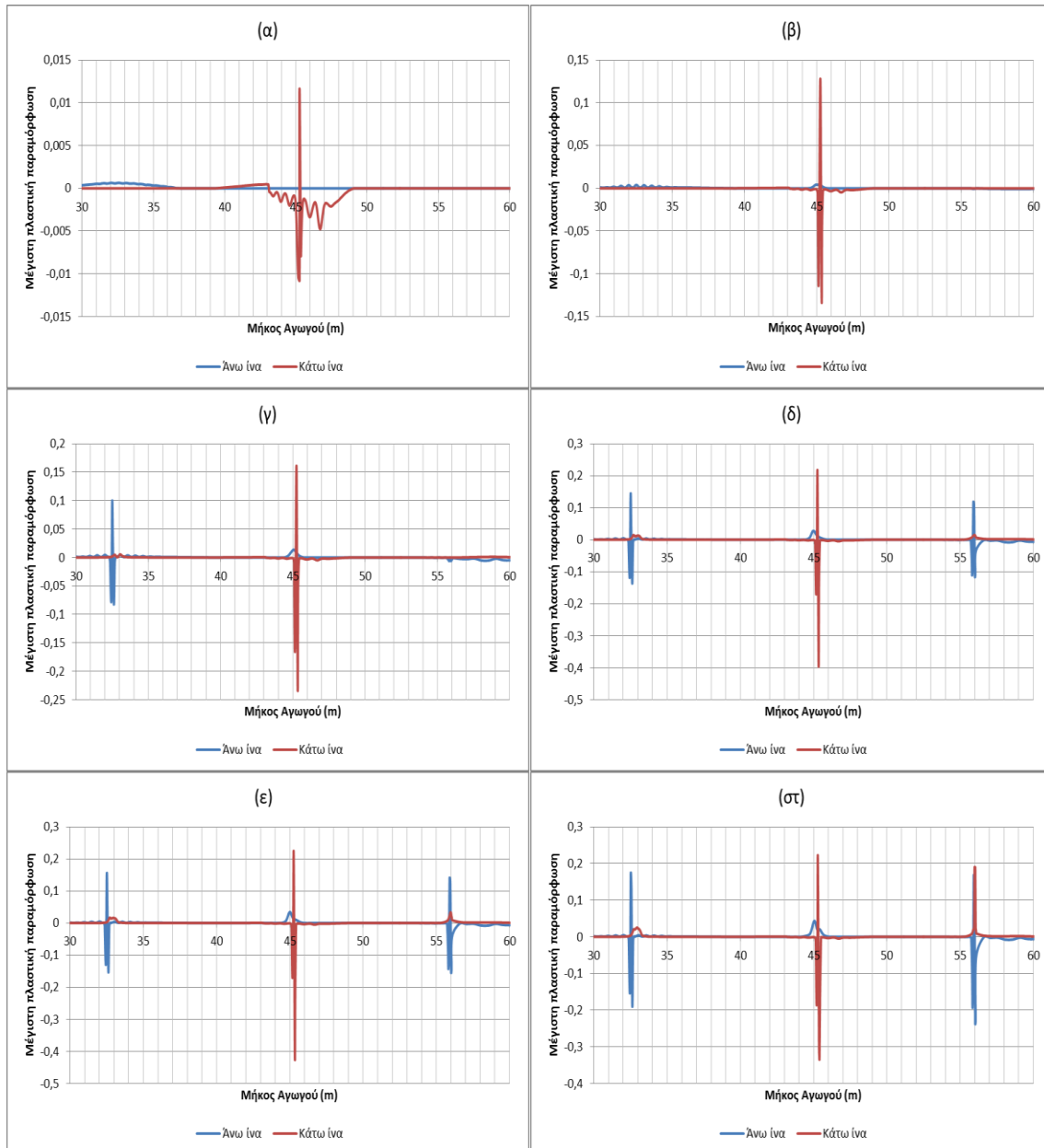
Σχήμα 4-3. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

Παρακάτω δίνεται το σχήμα του παραμορφωμένου αγωγού στην κρίσιμη διατομή κατά την τελική παραμόρφωσή του, στο οποίο διακρίνονται οι τοπικοί λυγισμοί.



Σχήμα 4-4. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση του αγωγού και λεπτομέρειες των σημείων που εμφανίστηκε τοπικός λυγισμός (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

Στο Σχήμα 4-5 φαίνεται η κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης.

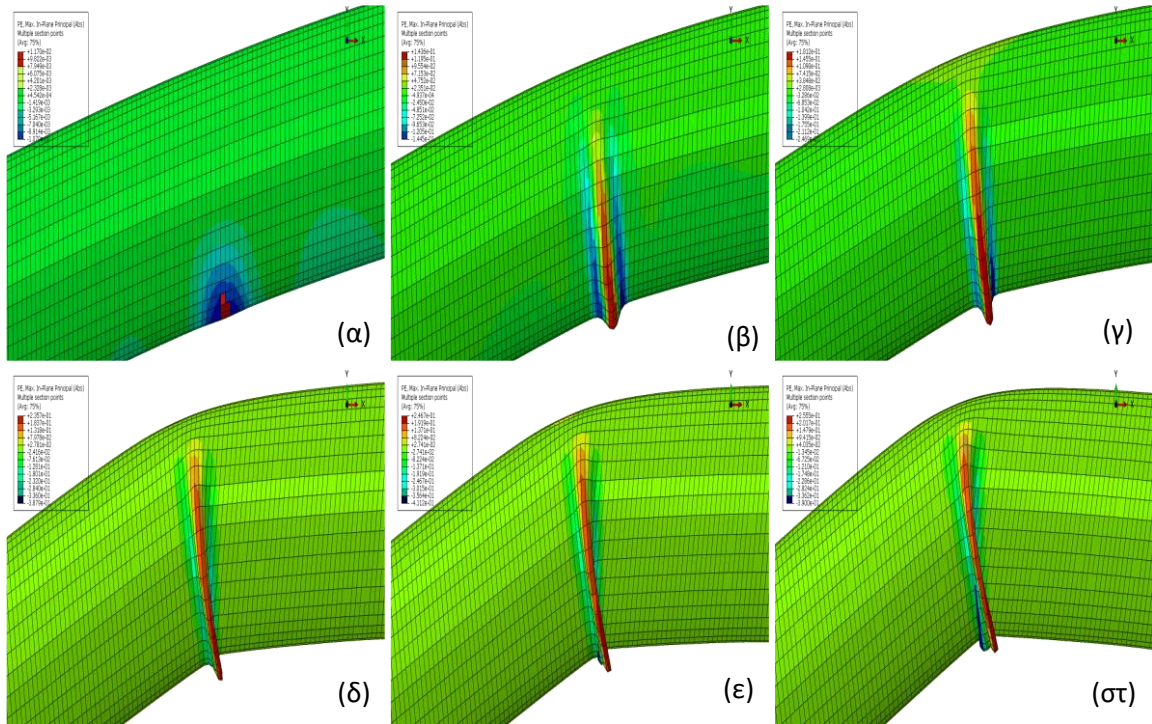


Σχήμα 4-5. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης που σημειώθηκε στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Αργίλος συνοχής 20 kPa).

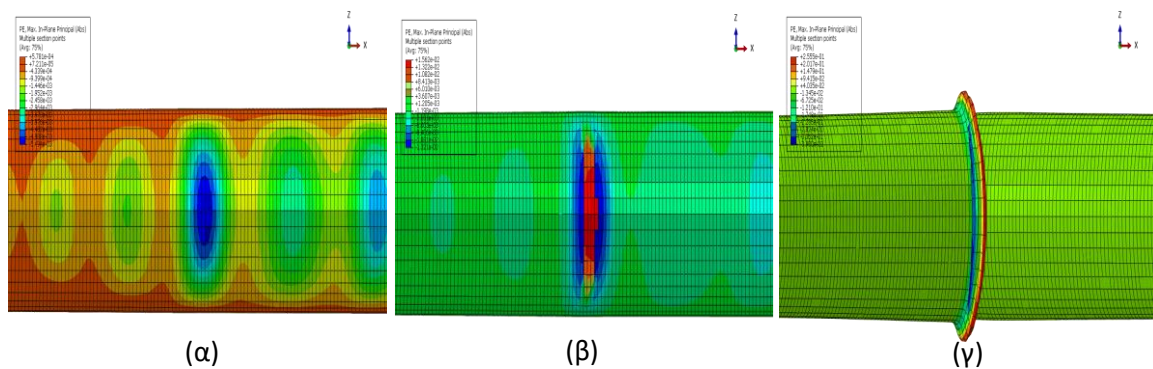
Η πλαστική παραμόρφωση ξεκινάει πρώτα στο σημείο Α. Ήδη στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού έχουν σημειωθεί σημαντικές παραμορφώσεις στην κάτω ίνα. Στο 40% οι παραμορφώσεις αυτές αυξάνονται ελαφρώς, ενώ αρχίζει να αναπτύσσεται παραμόρφωση και στην άνω ίνα του αγωγού στο σημείο Β. Στις επόμενες χρονικές στιγμές οι παραμορφώσεις στα σημεία Β και C κινούνται στις ίδιες τιμές, με τις παραμορφώσεις στο σημείο Α να είναι μεγαλύτερες. Στο τέλος της πλαστικής

παραμόρφωσης παρατηρούνται έντονες εφελκυστικές παραμορφώσεις και στην κάτω ίνα στο σημείο C.

Στη συνέχεια φαίνονται οι εικόνες του παραμορφωμένου αγωγού στο σημείο A, στο οποίο σημειώθηκε τοπικός λυγισμός.



Σχήμα 4-6. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση του αγωγού στο σημείο A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

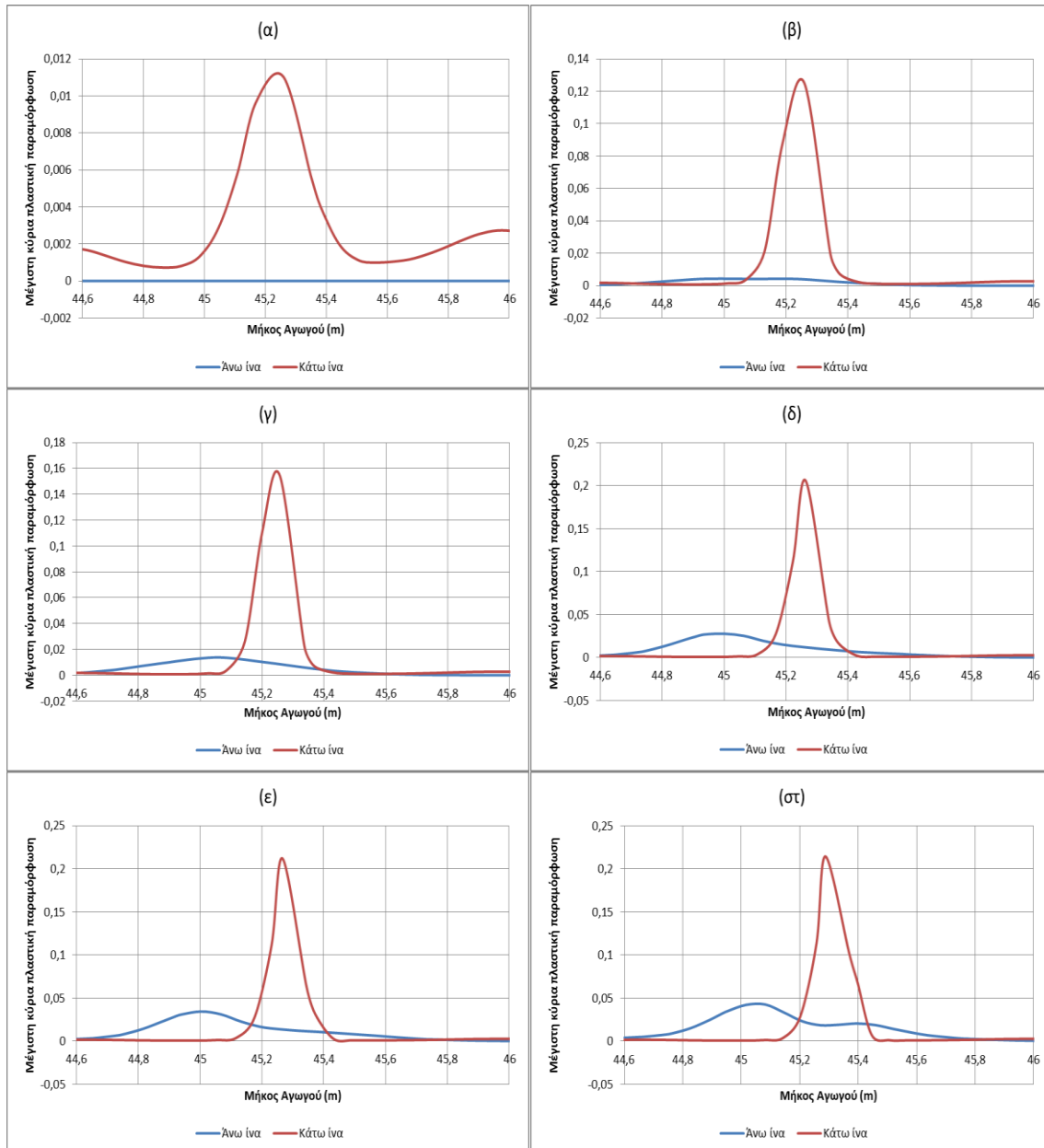


Σχήμα 4-7. Εικόνες του παραμορφωμένου αγωγού στο σημείο A (α) πριν την ανάπτυξη του λυγισμού, (β) στο κρίσιμο σημείο, (γ) μετά την ανάπτυξη του λυγισμού (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

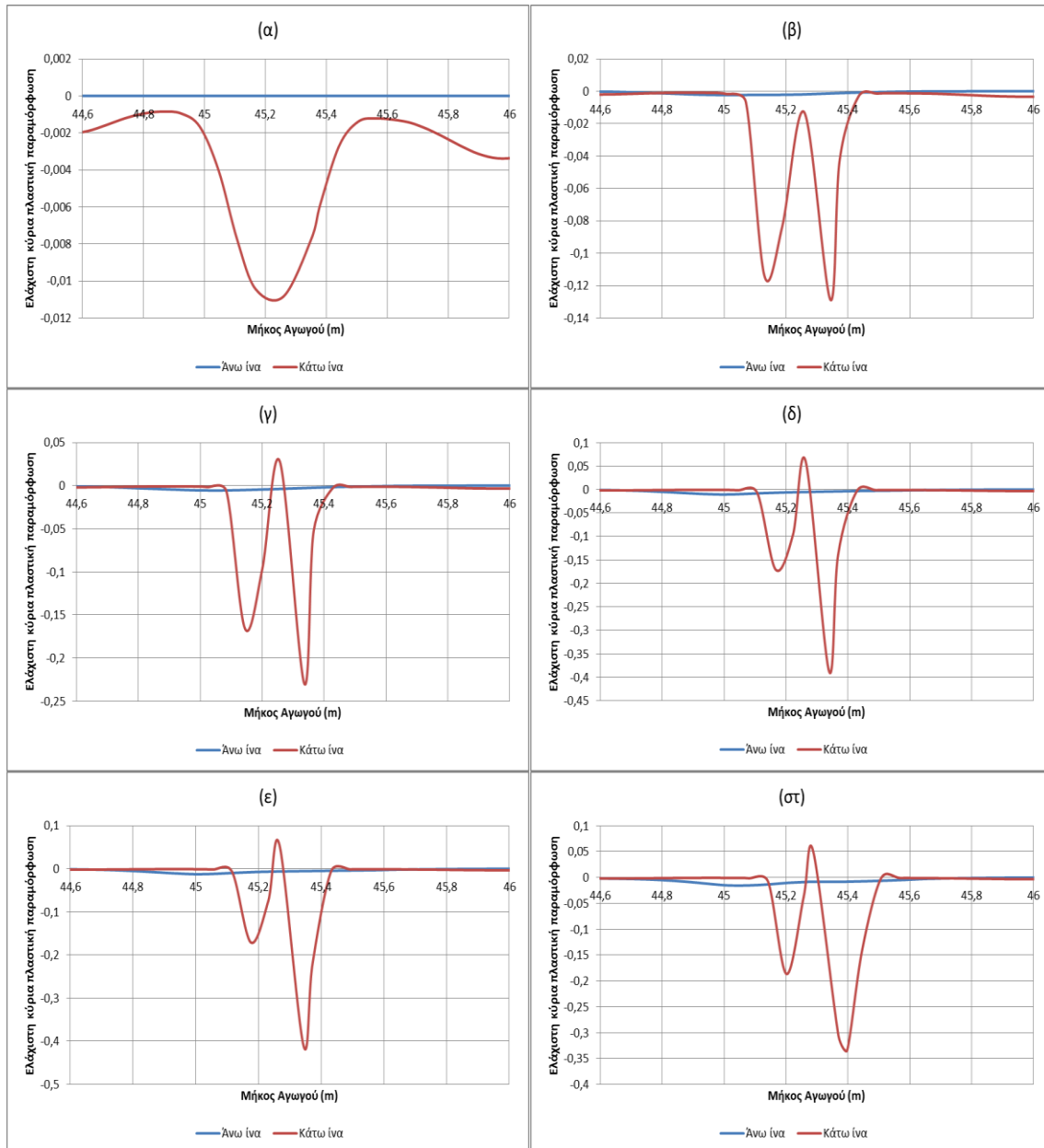
Στα Σχήματα 4-8, 4-9 φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη, αντίστοιχα, κύρια πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης. Τονίζεται ότι η χρονική στιγμή 0% αφορά τη στιγμή που ξεκινά η πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή τη στιγμή που ο χάλυβας έχει διαρρεύσει.

Η μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση επιτρέπει τον προσδιορισμό της μέγιστης πλαστικής εφελκυστικής παραμόρφωσης και η ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση τον προσδιορισμό της μέγιστης πλαστικής θλιπτικής παραμόρφωσης.

Παρατηρείται ότι, τη στιγμή που διαρρέει ο χάλυβας, έχει αναπτυχθεί εφελκυστική και θλιπτική πλαστική παραμόρφωση ίση με 0,011, ενώ στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης, η τιμή αυτή έχει αυξηθεί σημαντικά φτάνοντας στο 0,13. Στη συνέχεια, η εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται στο 0,21, ενώ η θλιπτική πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό φτάνοντας τη μέγιστη τιμή της (0,41) στο 80% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού.

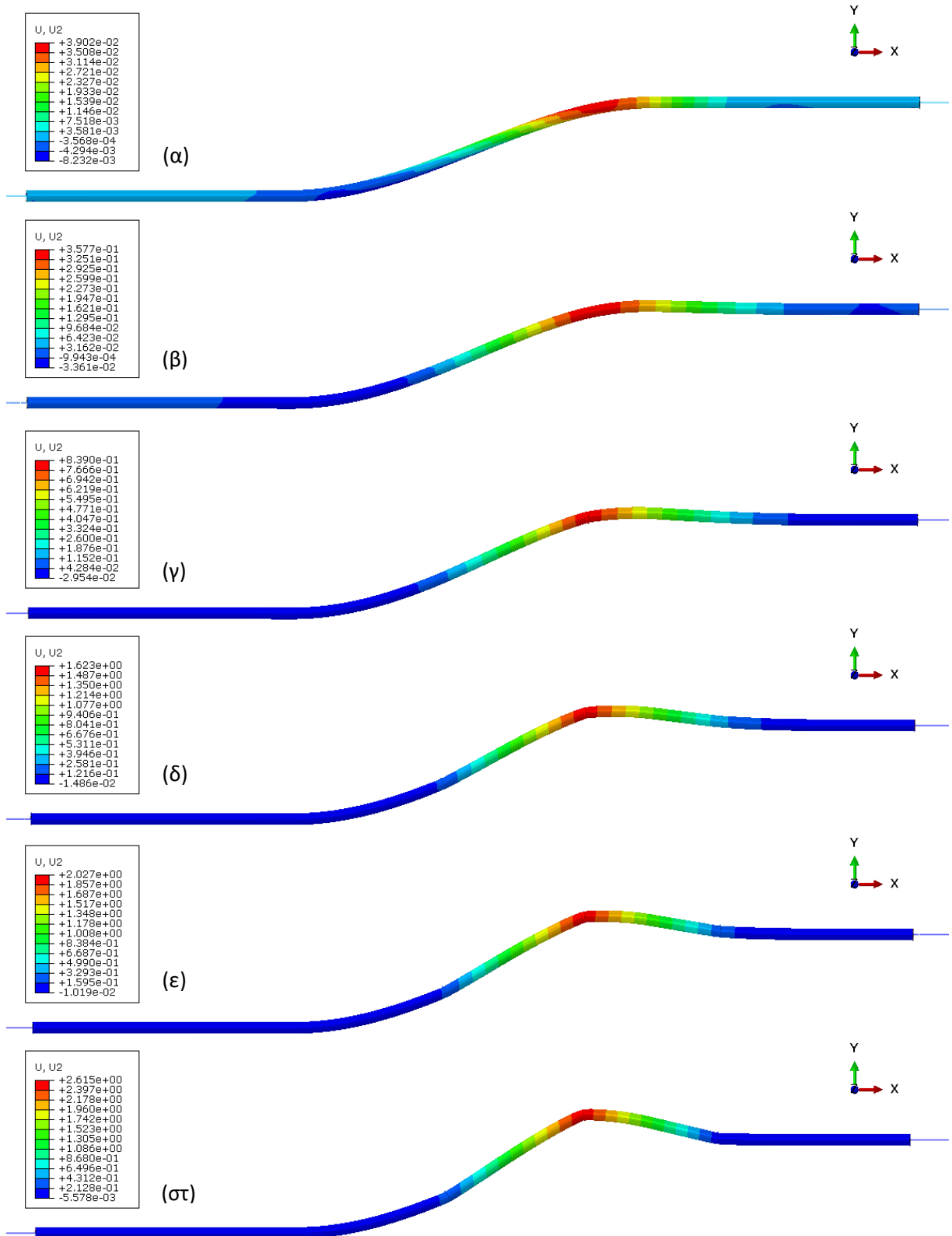


Σχήμα 4-8. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

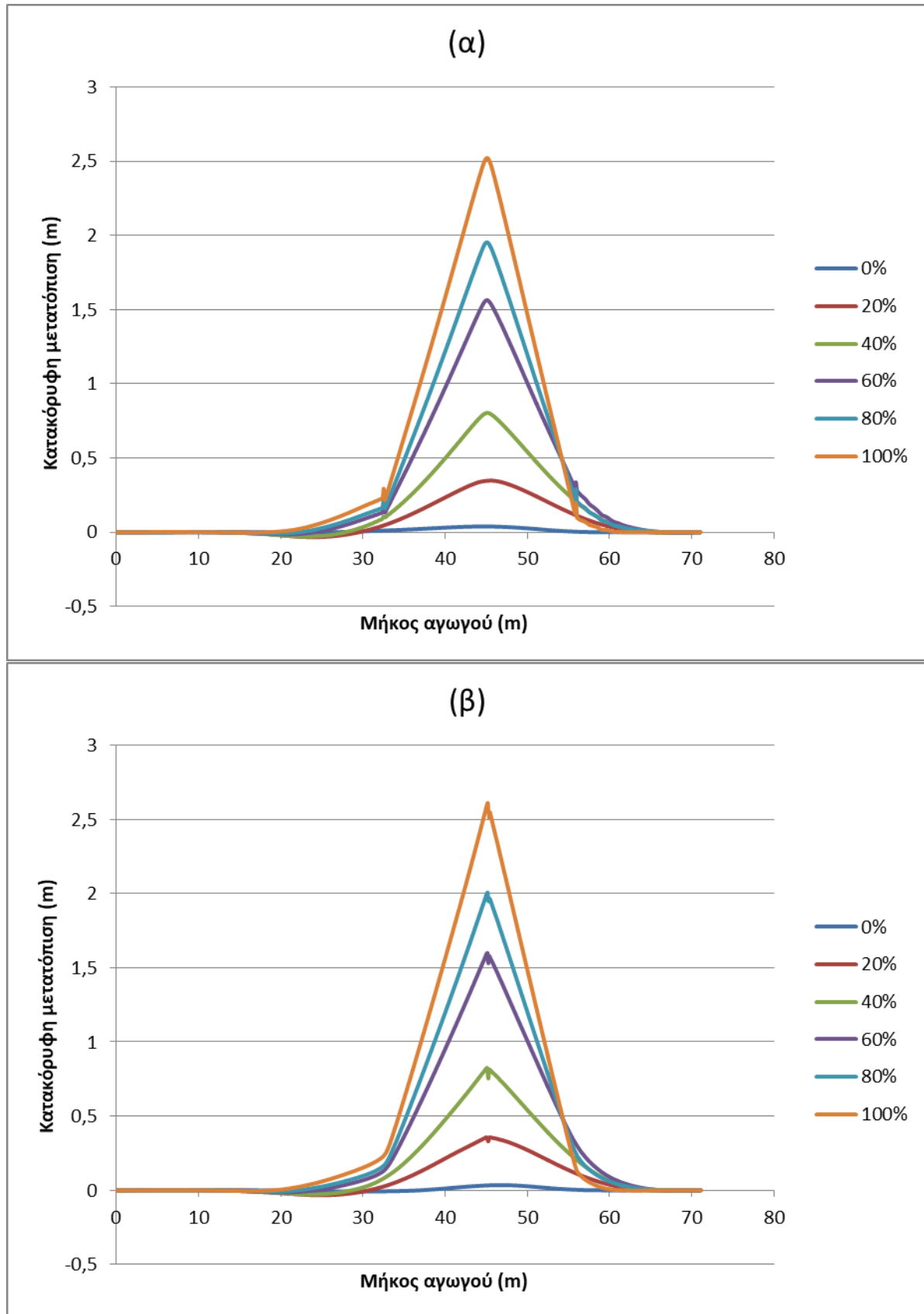


Σχήμα 4-9. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η κατακόρυφη μετατόπιση που παρουσίασε ο αγωγός λόγω της θερμότητας και των εσωτερικών πιέσεων και παρουσιάζεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του, σε διάφορες χρονικές στιγμές.



Σχήμα 4-10. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού για τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της συνολικής κατακόρυφης μετακίνησης (Άργλιος συνοχής 20 kPa).

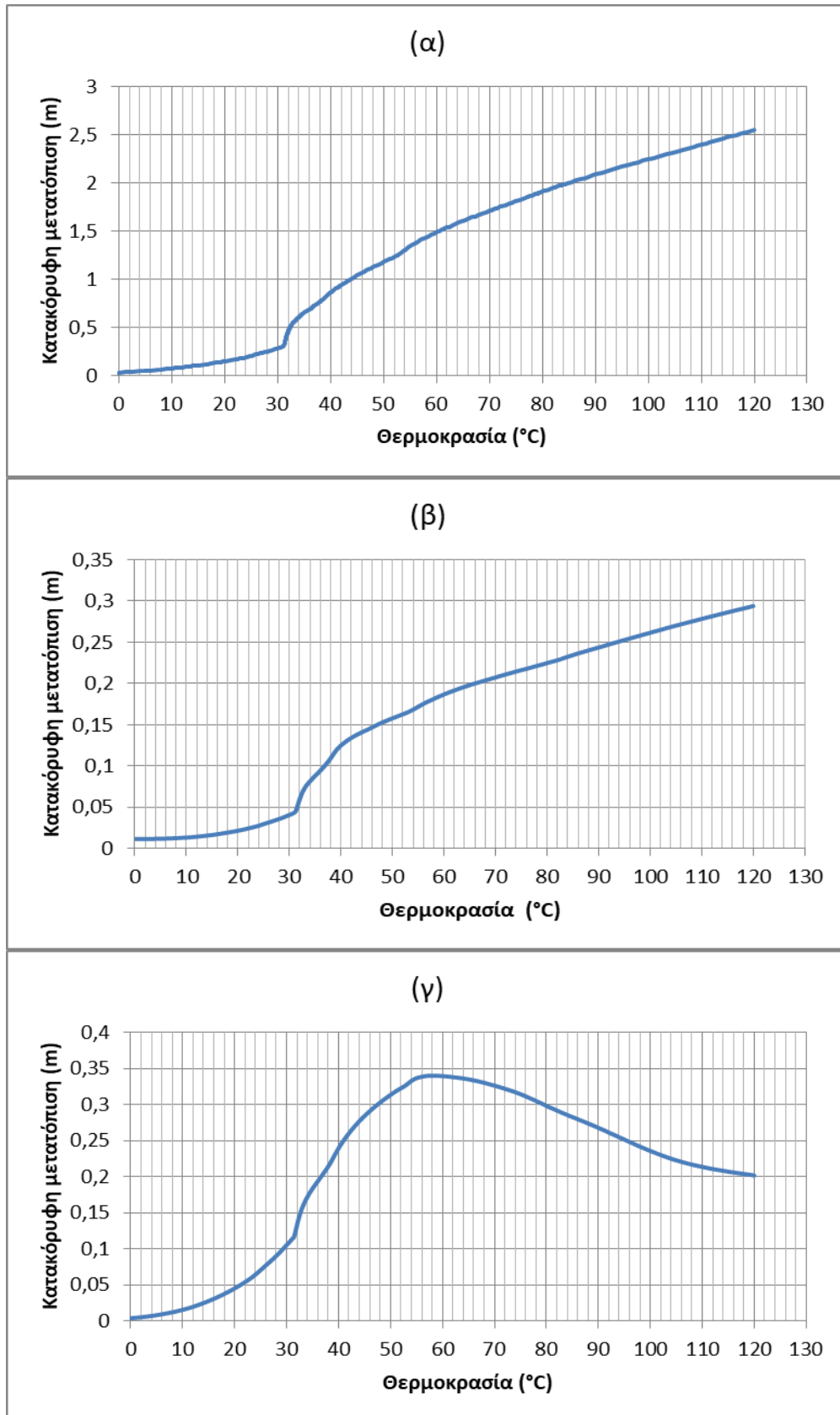


Σχήμα 4-11. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 20 kPa).

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ανύψωση που σημειώθηκε είναι ίση με 2,61 m και αφορά το σημείο A που βρίσκεται στην κάτω ίνα του αγωγού. Για τον προσδιορισμό της θέσης του σημείου A, ορίζεται ως σημείο αναφοράς το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 του αγωγού στην άνω γωνία στην αρχική γεωμετρία, το οποίο απέχει 45,0 m από την αριστερή άκρη του αγωγού που προσομοιώθηκε με στοιχεία κελύφους. Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το σημείο A βρίσκεται 0,3 m από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 του αγωγού.

Αξίζει να τονιστεί ότι η μέτρηση της κατακόρυφης μετακίνησης άρχισε από τη στιγμή που επιβλήθηκε το θερμικό φορτίο, αφότου δηλαδή επιβλήθηκαν τα φορτία βαρύτητας και η πίεση. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B είναι ίση με 0,29 m, ενώ στο σημείο C, ίση με 0,19 m. Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι αυτή η ανύψωση δεν είναι η μέγιστη που σημειώθηκε για το C. Μέχρι το 60% της συνολικής κατακόρυφης μετακίνησης, το σημείο C ανυψώνεται και φτάνει τη μέγιστη μετακίνηση του, η οποία είναι ίση με 0,33 m. Από εκεί και πέρα αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός στο σημείο και αναγκάζει τη διατομή του αγωγού σε εκείνη την περιοχή να μετατοπιστεί προς τα κάτω. Τα σημεία B και C βρίσκονται στην άνω ίνα, και απέχουν από το A απόσταση 12,8 m και 10,2 m, αντίστοιχα.

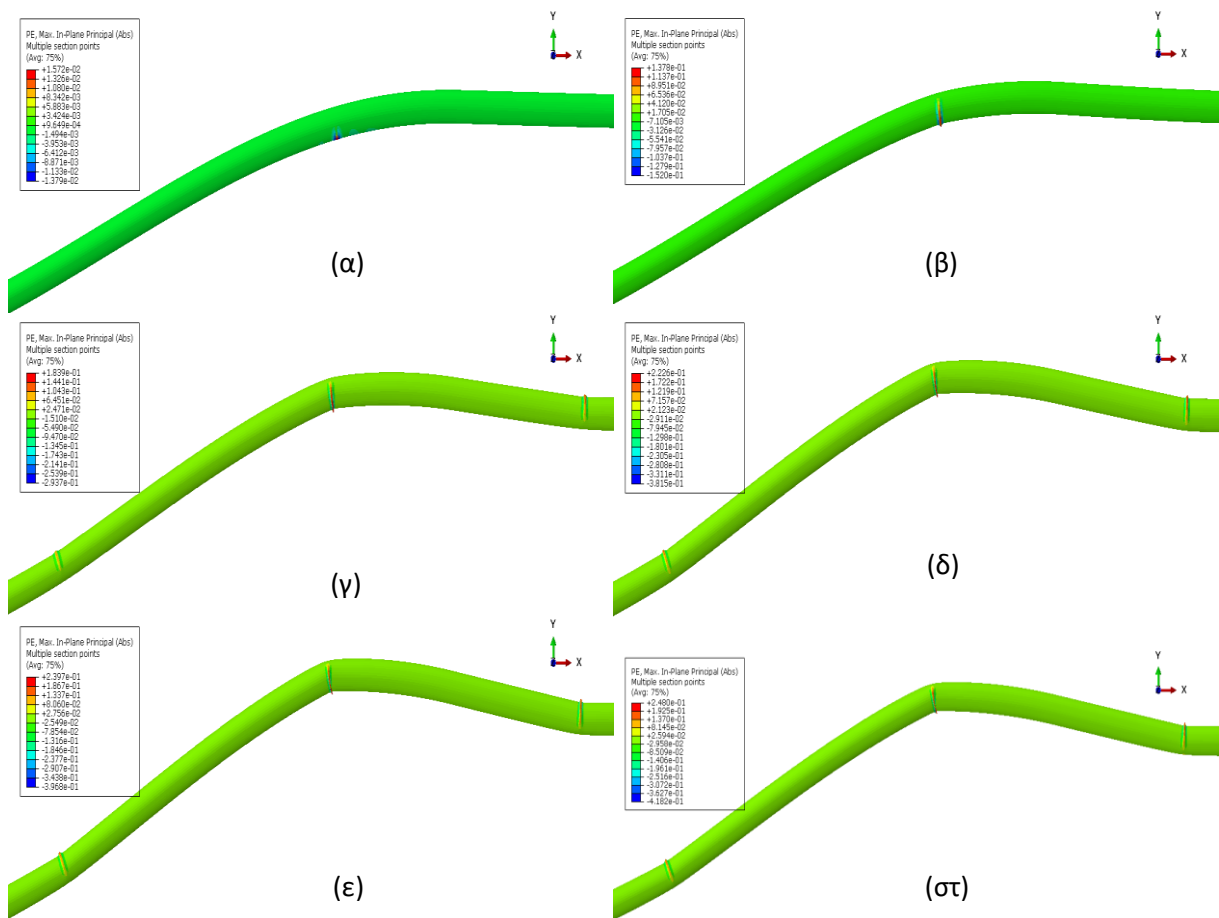
Το Σχήμα 4-12 παρουσιάζει την εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης των κρίσιμων σημείων A, B και C, με τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μία κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία αρχίζουν να αναπτύσσονται οι τοπικοί λυγισμοί στα σημεία. Όπως φαίνεται παρακάτω, η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας είναι ίση με $T_{cr} = 31,3$ °C. Ο τοπικός λυγισμός στο A ξεκίνησε όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου ήταν $u_{z,cr} = 0,33$ m. Στα σημεία B και C ξεκίνησε για κατακόρυφη μετακίνηση $u_{z,cr}$ ίση με 0,05 m και 0,12 m, αντίστοιχα.



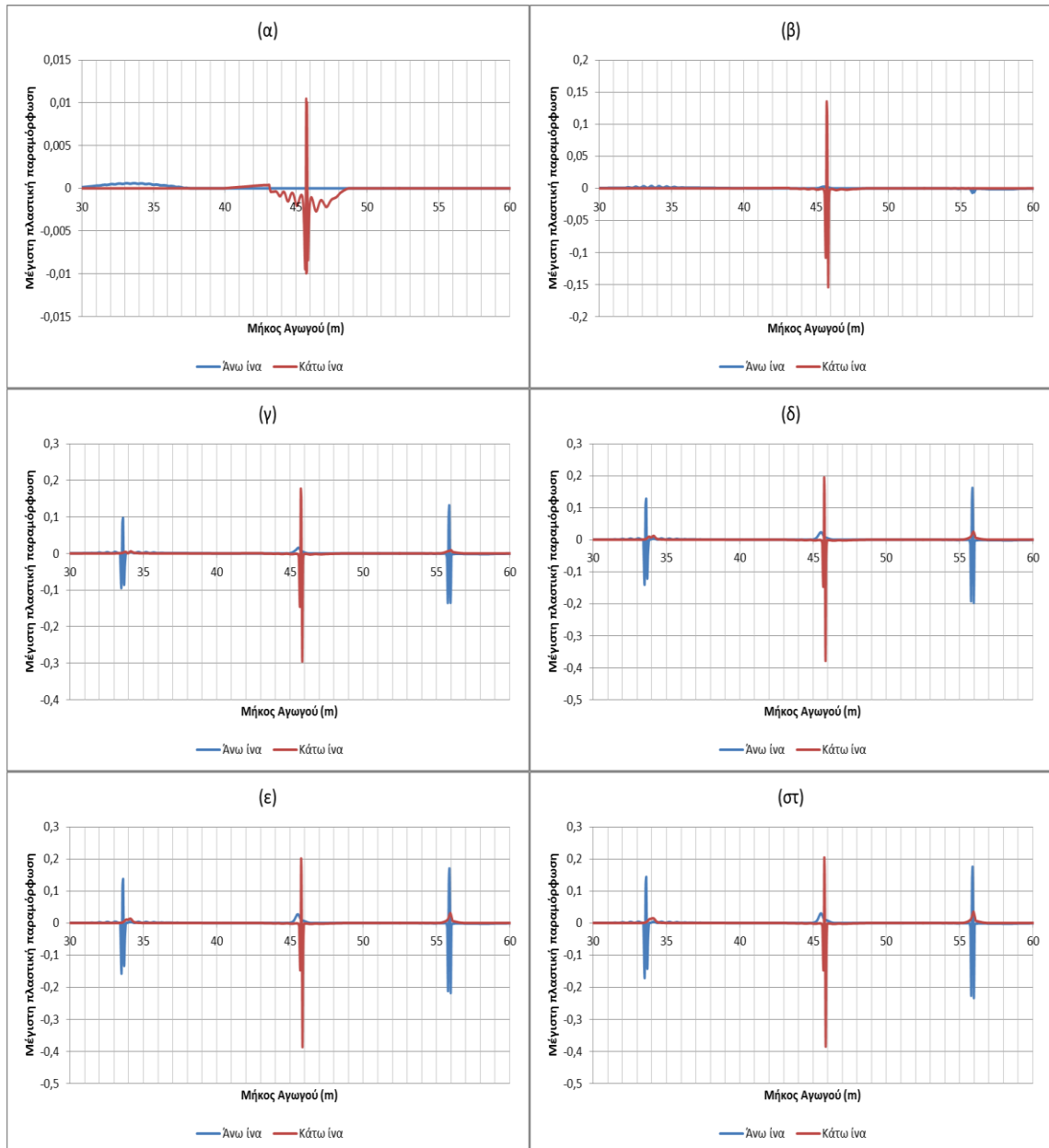
Σχήμα 4-12. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Αργίλος συνοχής 20 kPa).

4.2 Άργιλος συνοχής $c = 30$ kPa

Στα παρακάτω σχήματα δίνεται το σχήμα του παραμορφωμένου αγωγού στην κρίσιμη διατομή σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης και παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης που παρουσιάστηκε στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 4-13. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 30 kPa).

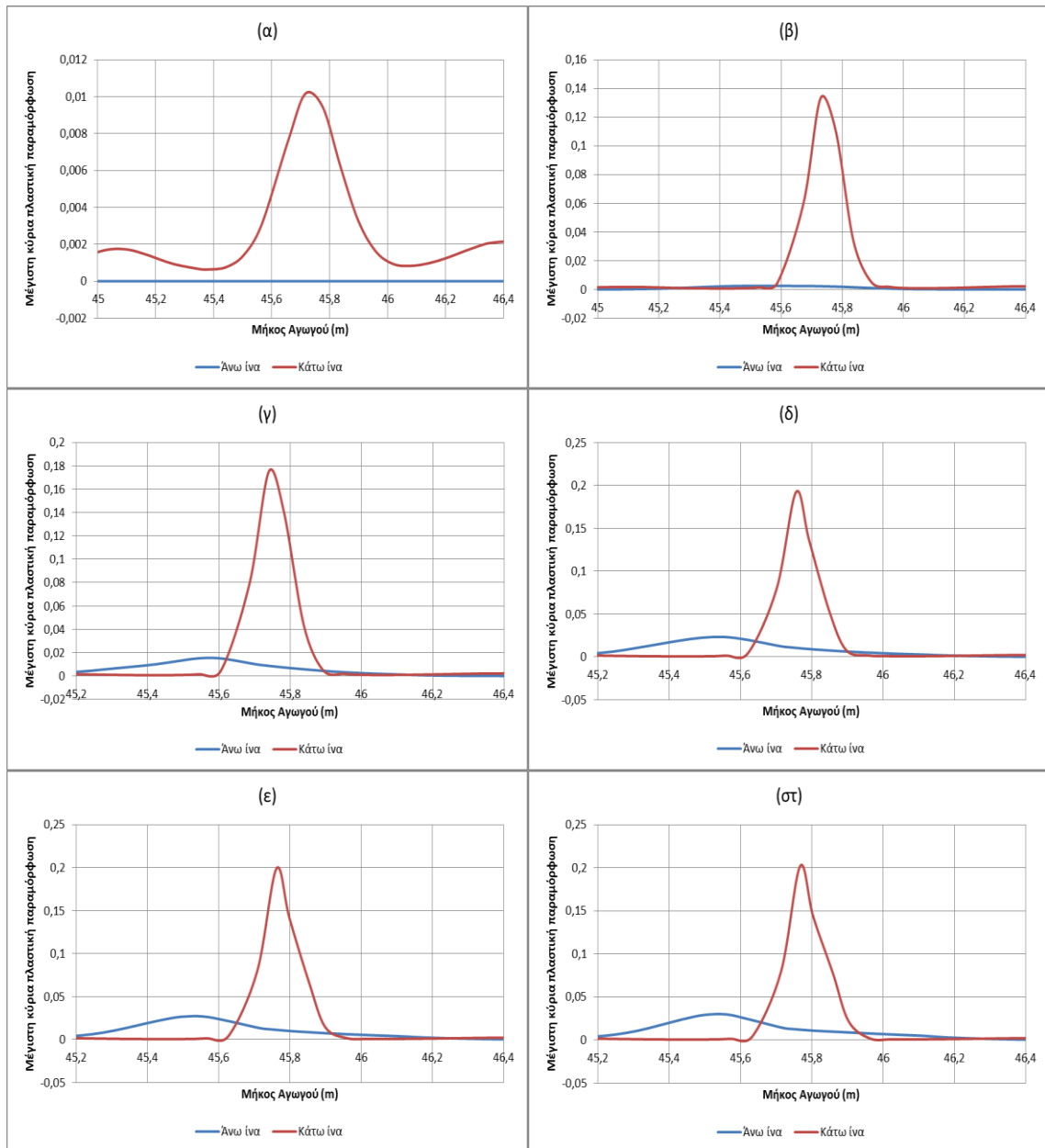


Σχήμα 4-14. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 30 kPa).

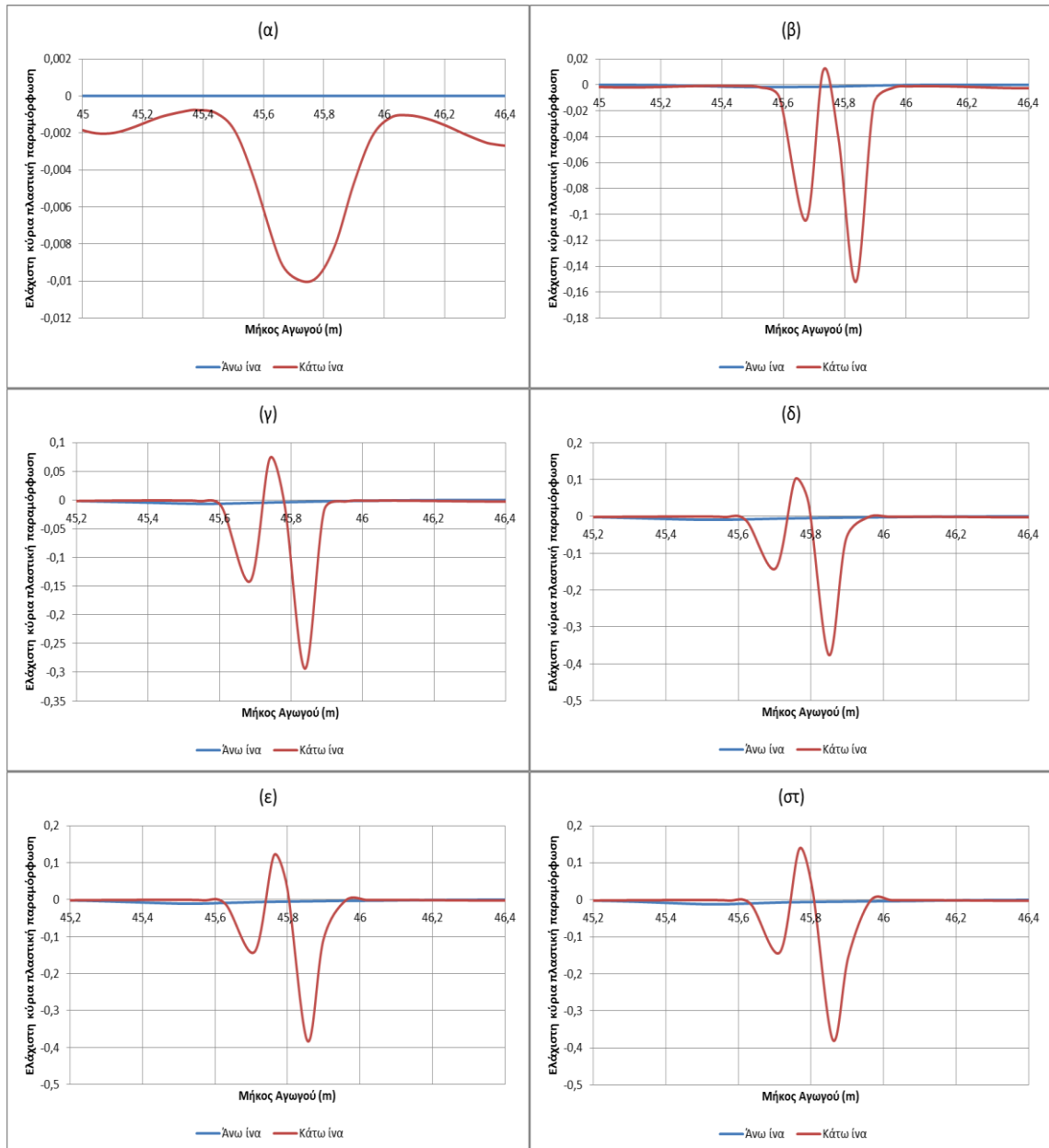
Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα είναι ευδιάκριτο πως η πλαστική παραμόρφωση ξεκινάει πρώτα στο σημείο A. Ήδη στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού έχουν σημειωθεί σημαντικές παραμορφώσεις στην κάτω ίνα. Στο 40% οι παραμορφώσεις αυτές έχουν διπλασιαστεί, ενώ αρχίζει να αναπτύσσεται παραμόρφωση και στην άνω ίνα του αγωγού στα σημεία B και C. Στις επόμενες χρονικές στιγμές οι παραμορφώσεις στα σημεία B και C κινούνται στις ίδιες τιμές, με ελαφρώς

μεγαλύτερες αυτές στο C, και την παραμόρφωση στο σημείο A να συνεχίζει να αυξάνεται, παρουσιάζοντας τη μέγιστη τιμή της στο τέλος της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού.

Στα Σχήματα 4-15, 4-16 φαίνεται η μέγιστη (άρα εφελκυστική) και η ελάχιστη (άρα θλιπτική) κύρια πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4-15. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 30 kPa).



Σχήμα 4-16. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 30 kPa).

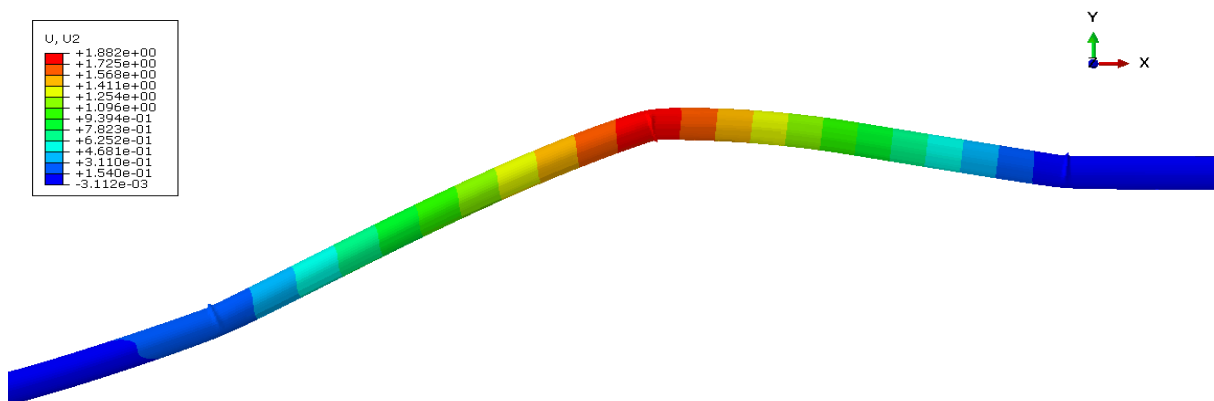
Παρατηρείται ότι, τη στιγμή που διαρρέει ο χάλυβας έχει αναπτυχθεί εφελκυστική και θλιπτική πλαστική παραμόρφωση ίση με 0,01, ενώ στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης, η τιμή αυτή έχει αυξηθεί σημαντικά φτάνοντας στο 0,13 και 0,15, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, η εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται στο 0,18, ενώ η θλιπτική πλαστική παραμόρφωση διπλασιάζεται. Στο 60% της συνολικής πλαστικής

παραμόρφωσης η θλιπτική παραμόρφωση έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή της 0,39, η οποία παραμένει σταθερή μέχρι να ολοκληρωθεί η πλαστική παραμόρφωση του αγωγού.

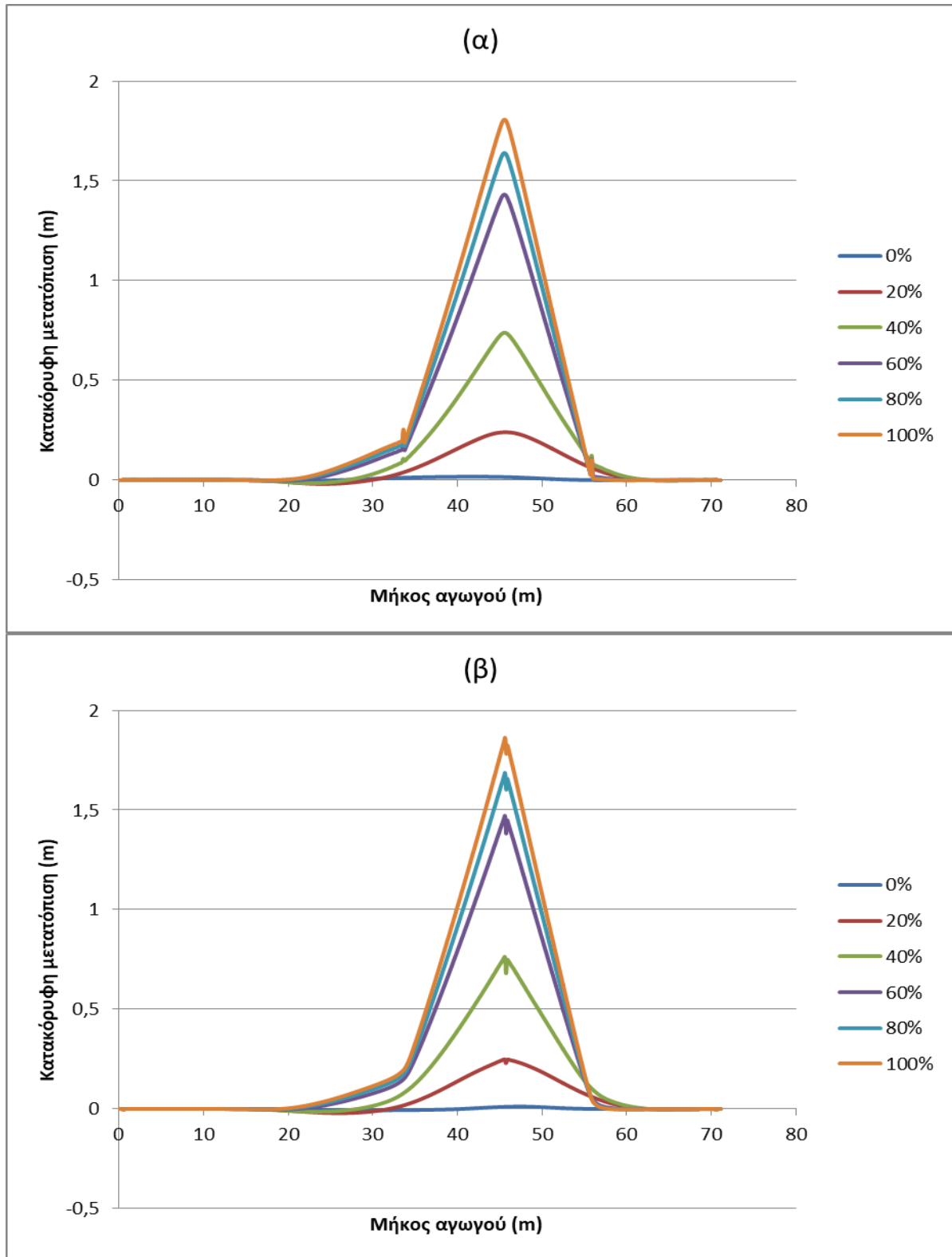
Στο Σχήμα 4-18 φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του αγωγού, κατά μήκος του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ανύψωση που σημειώθηκε είναι ίση με 1,86 m και αφορά το σημείο A που βρίσκεται στην κάτω ίνα του αγωγού σε απόσταση 0,6 m από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 στην άνω γωνία του αγωγού. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B είναι ίση με 0,25 m, ενώ στο σημείο C, ίση με 0,10 m. Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι αυτή η ανύψωση δεν είναι η μέγιστη που σημειώθηκε για το C. Μέχρι το 40% της συνολικής κατακόρυφης μετακίνησης, το σημείο C ανυψώνεται και φτάνει τη μέγιστη μετακίνηση του, η οποία είναι ίση με 0,12 m. Από εκεί και πέρα αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός στο σημείο και αναγκάζει τη διατομή του αγωγού σε εκείνη την περιοχή να μετατοπιστεί προς τα κάτω. Τα σημεία B και C βρίσκονται στην άνω ίνα, και απέχουν από το A απόσταση 11,9 m και 10,3 m, αντίστοιχα.

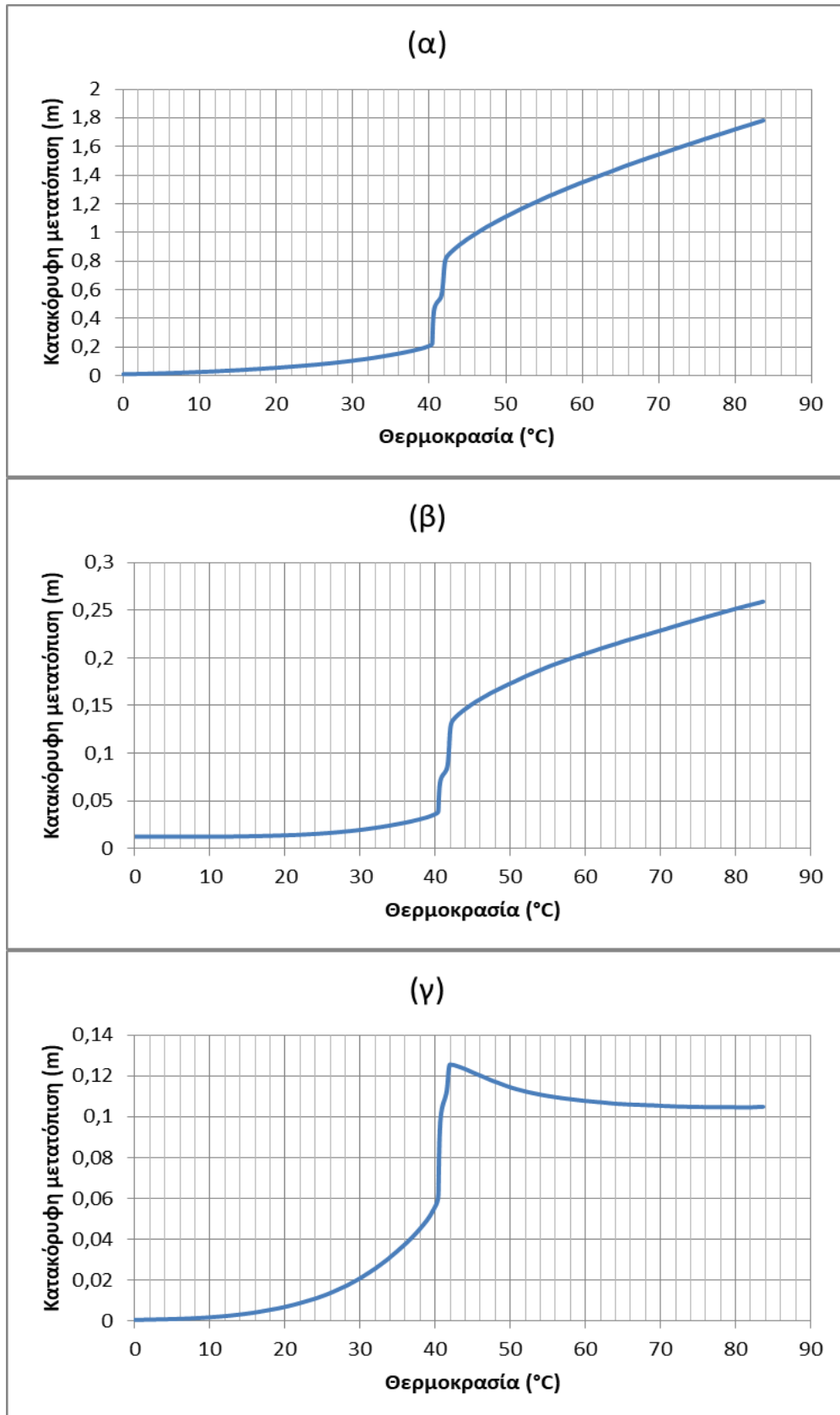
Το Σχήμα 4-19 δείχνει την εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης των κρίσιμων σημείων A, B και C, με τη θερμοκρασία, όπου φαίνεται ξεκάθαρα η στιγμή της εκτόξευσης του αγωγού. Παρατηρείται ότι η κρίσιμη θερμοκρασία για την ανάπτυξη λυγισμού είναι 40,4 °C. Ο τοπικός λυγισμός στο A ξεκίνησε όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου ήταν $u_{z,cr} = 0,23$ m. Στα σημεία B και C ξεκίνησε για κατακόρυφη μετακίνηση $u_{z,cr}$ ίση με 0,04 m και 0,06 m, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-17. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 30 kPa).



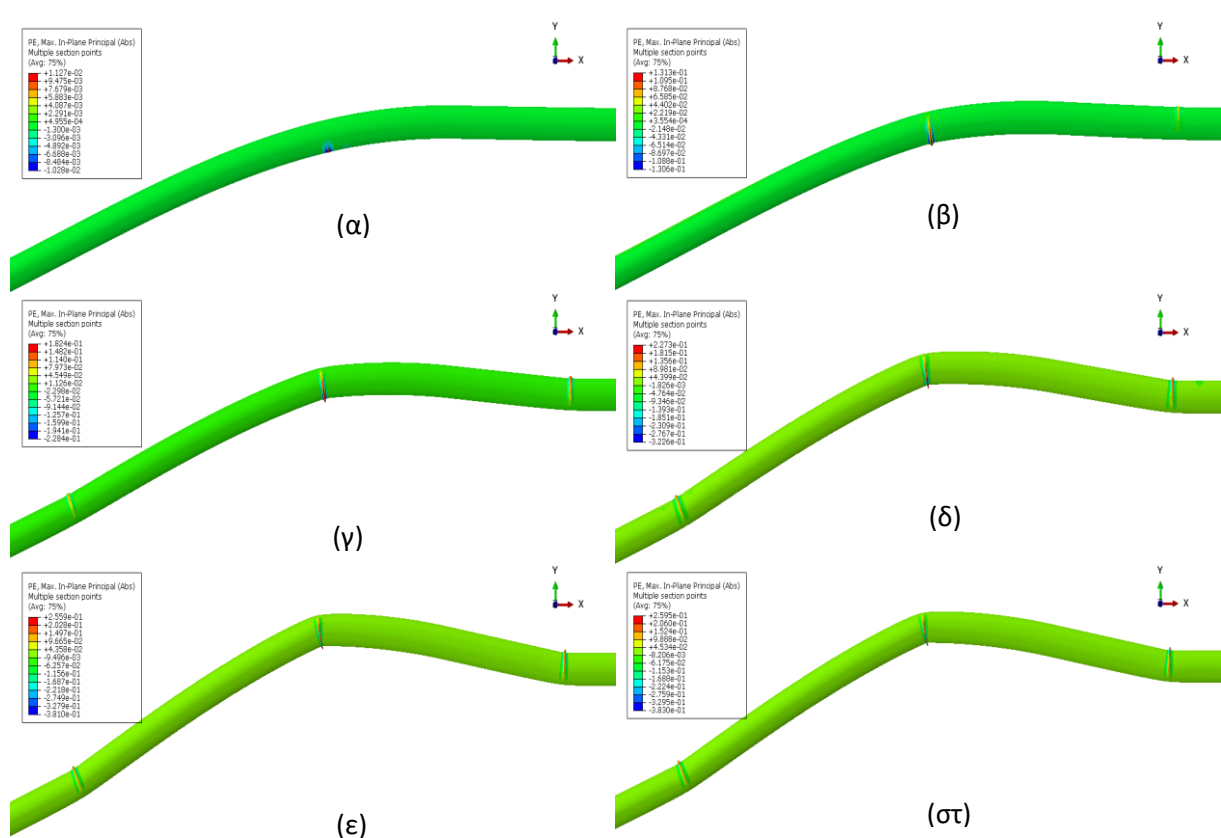
Σχήμα 4-18. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 30 kPa).



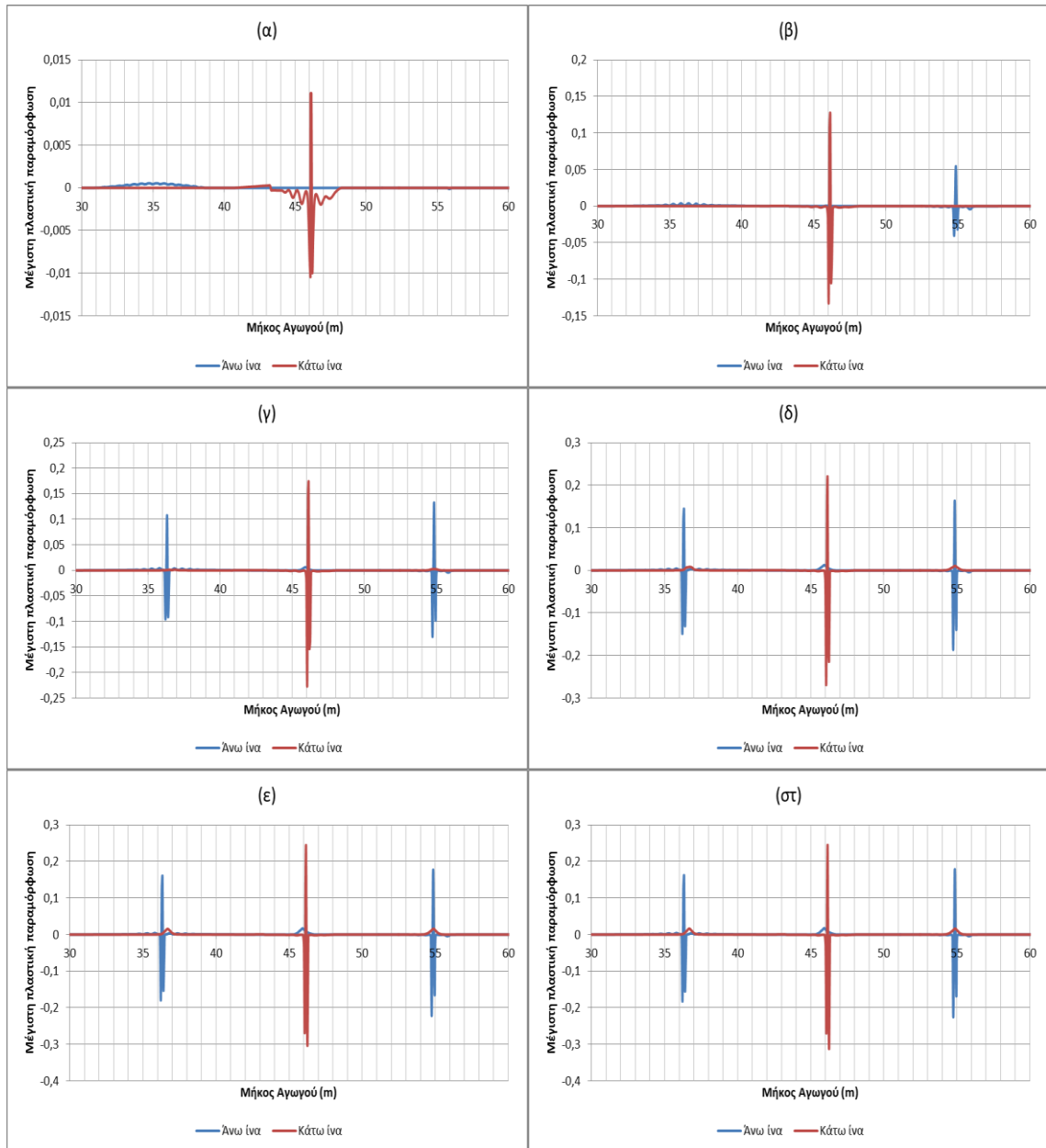
Σχήμα 4-19. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Αργίλος συνοχής 30 kPa).

4.3 Άργιλος συνοχής $c=50$ kPa

Στα παρακάτω σχήματα δίνεται το σχήμα του παραμορφωμένου αγωγού στην κρίσιμη διατομή σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης και παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης που παρουσιάστηκε στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 4-20. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 50 kPa).

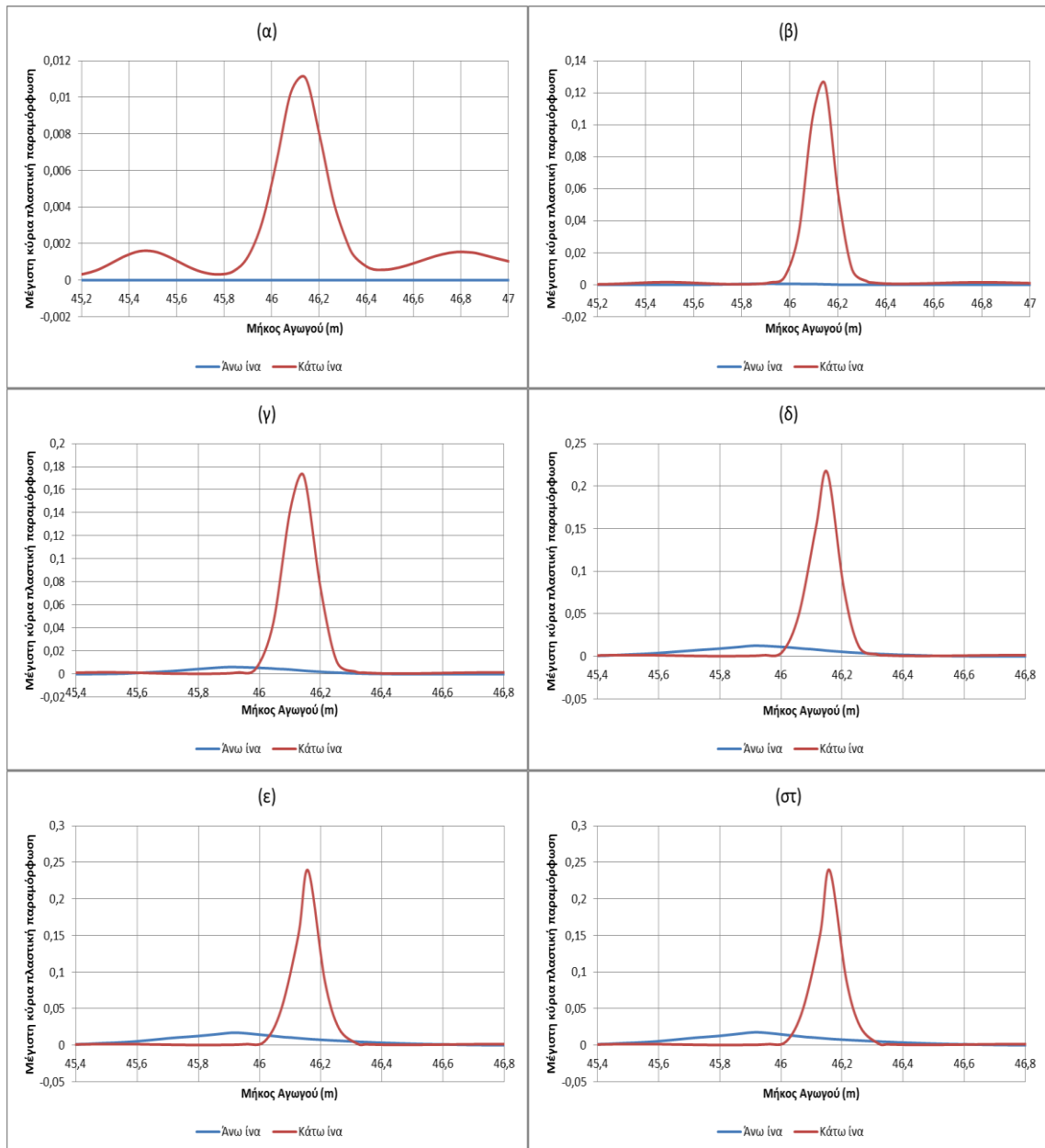


Σχήμα 4-21. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 50 kPa).

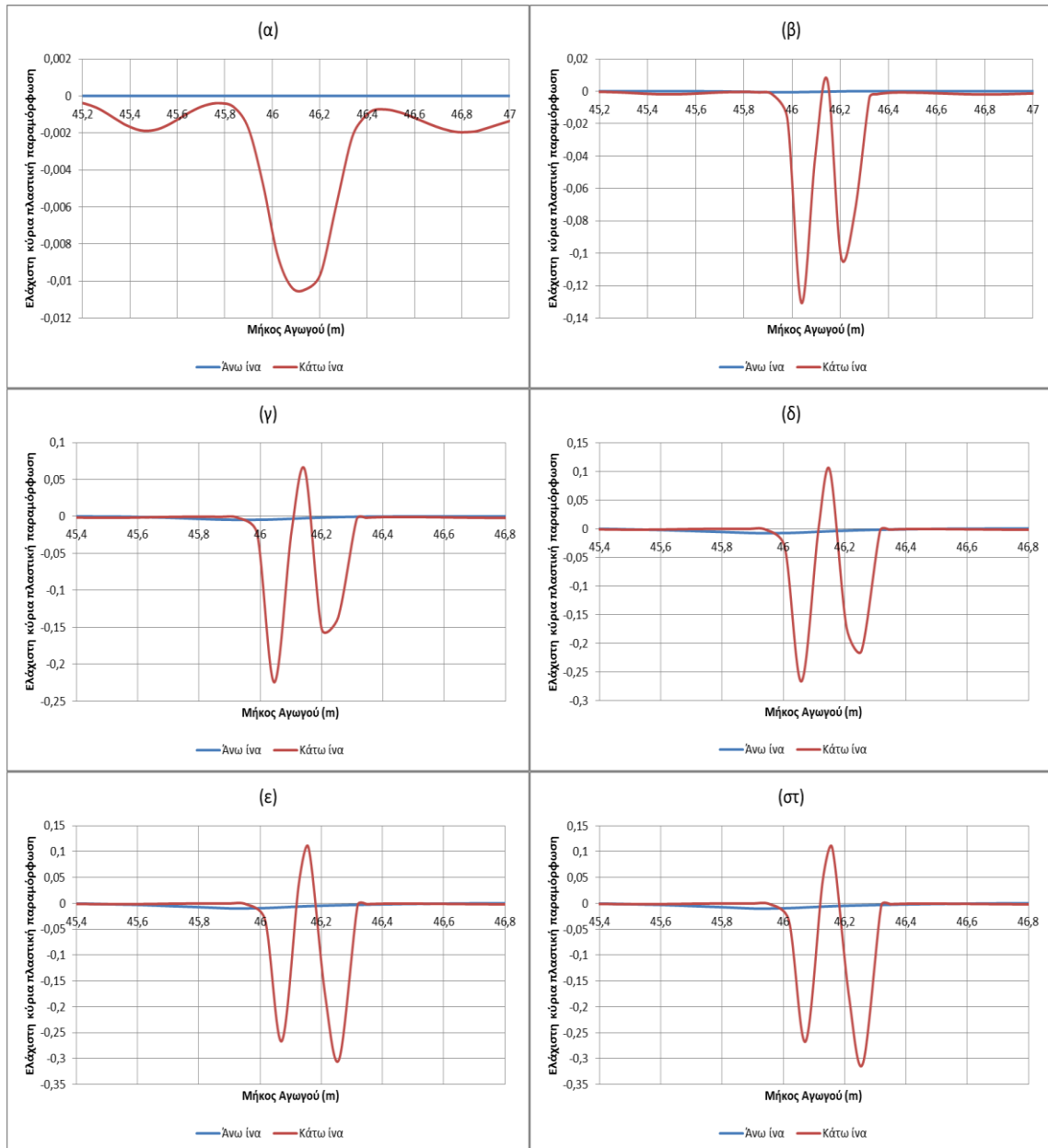
Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα είναι ευδιάκριτο πως η πλαστική παραμόρφωση ξεκινάει πρώτα στο σημείο A. Στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού η παραμόρφωση αυτή έχει αυξηθεί σημαντικά ενώ παραμορφώσεις εμφανίζονται και στο σημείο C. Στο 40% πλαστική παραμόρφωση έχει αναπτυχθεί και στο σημείο B. Στις επόμενες χρονικές στιγμές οι μέγιστες παραμορφώσεις

στα τρία σημεία συνεχίζουν να αυξάνονται, παρουσιάζοντας σχεδόν τις ίδιες τιμές στο 80% και 100% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης.

Στα Σχήματα 4-22, 4-23 φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4-22. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 50 kPa).



Σχήμα 4-23. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 50 kPa).

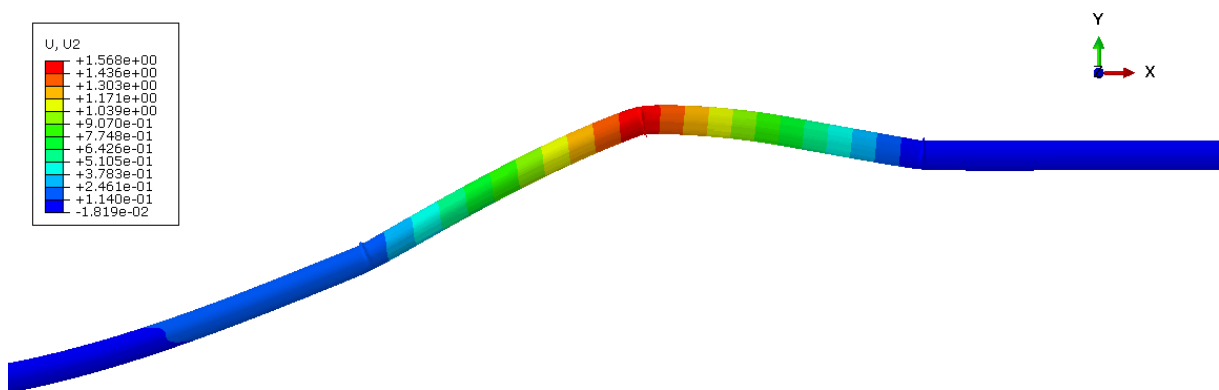
Παρατηρείται ότι, τη στιγμή που διαρρέει ο χάλυβας έχει αναπτυχθεί εφελκυστική και θλιπτική πλαστική παραμόρφωση ίση με 0,011, ενώ στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης, η τιμή αυτή έχει αυξηθεί σημαντικά φτάνοντας στο 0,13. Ο λυγισμός στο σημείο A έχει ήδη αναπτυχθεί. Στις επόμενες χρονικές στιγμές, η εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται στο 0,22, ενώ η θλιπτική πλαστική παραμόρφωση στο 0,26. Στο 80% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης η μέγιστη θλιπτική και εφελκυστική

παραμόρφωση έχουν αυξηθεί ελαφρώς και παραμένουν σταθερές μέχρι να ολοκληρωθεί η πλαστική παραμόρφωση του αγωγού.

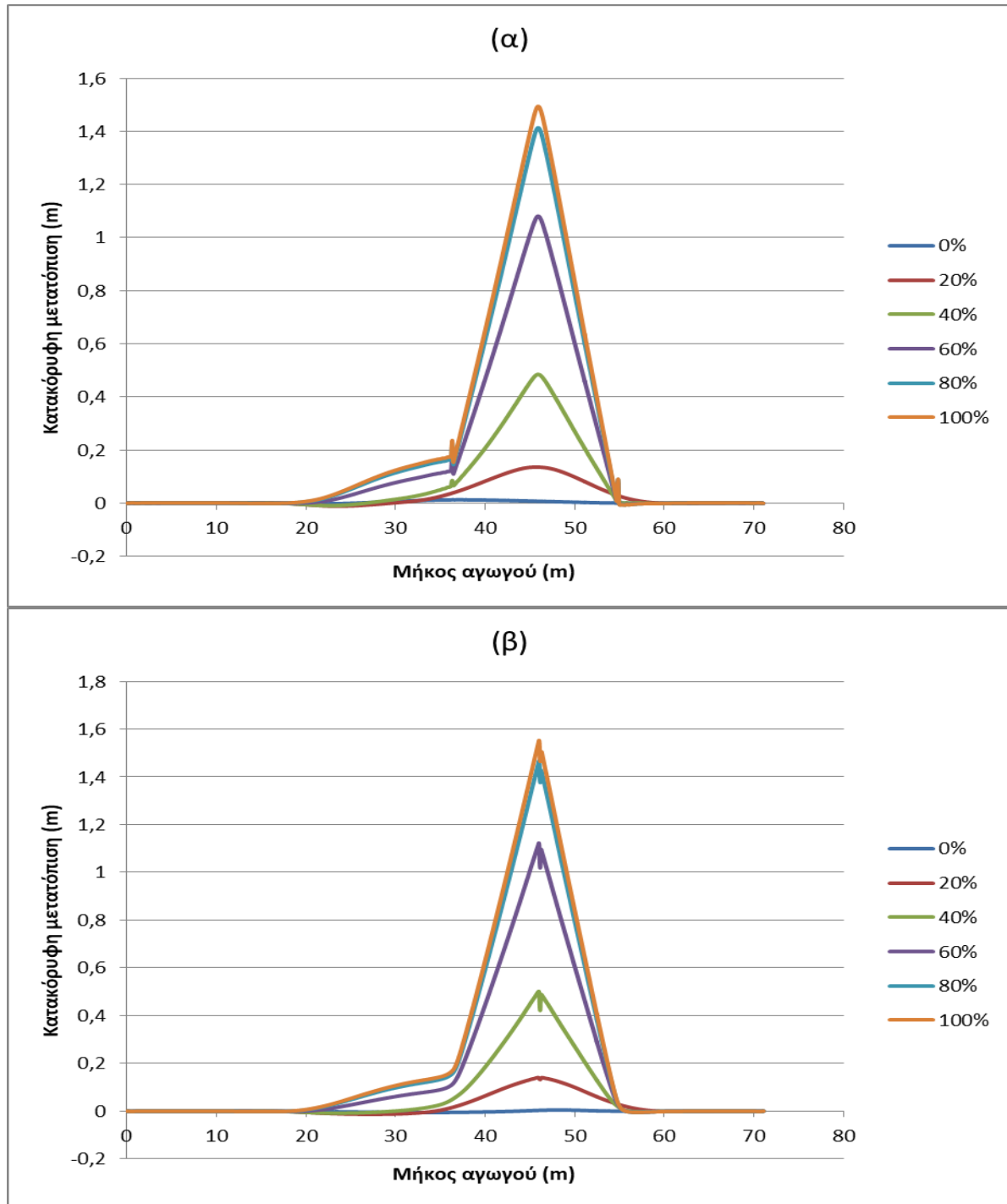
Στο Σχήμα 4-25 παρουσιάζεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του αγωγού, κατά μήκος του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ανύψωση που σημειώθηκε είναι ίση με 1,55 m και αφορά το σημείο A που βρίσκεται στην κάτω ίνα του αγωγού σε απόσταση 1,0 m από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 στην άνω γωνία του αγωγού. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B είναι ίση με 0,23 m, ενώ στο σημείο C, ίση με 0,09 m. Τα σημεία B και C βρίσκονται στην άνω ίνα, και απέχουν από το A απόσταση 9,6 m και 8,9 m, αντίστοιχα.

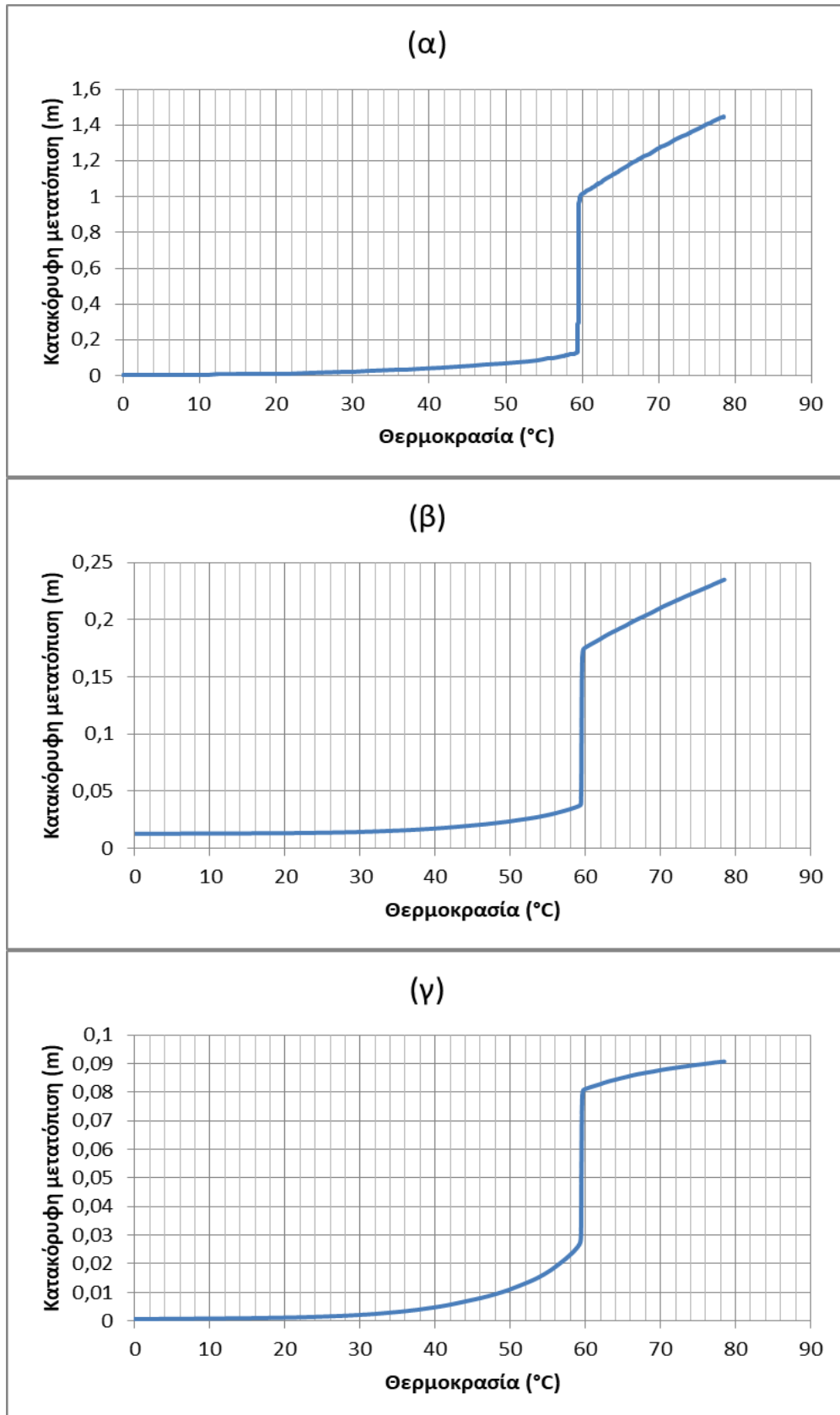
Το Σχήμα 4-26 δείχνει την εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης των κρίσιμων σημείων A, B και C, με τη θερμοκρασία, όπου φαίνεται ξεκάθαρα η στιγμή της εκτόξευσης του αγωγού. Παρατηρείται ότι θερμοκρασία ίση με 59,4 °C, έχουν ξεκινήσει οι τοπικοί λυγισμοί. Ο τοπικός λυγισμός στο A ξεκίνησε όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου ήταν $u_{z,cr} = 0,14$ m. Στα σημεία B και C ξεκίνησε για κατακόρυφη μετακίνηση $u_{z,cr}$ ίση με 0,04 m και 0,03 m, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-24. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 50 kPa).



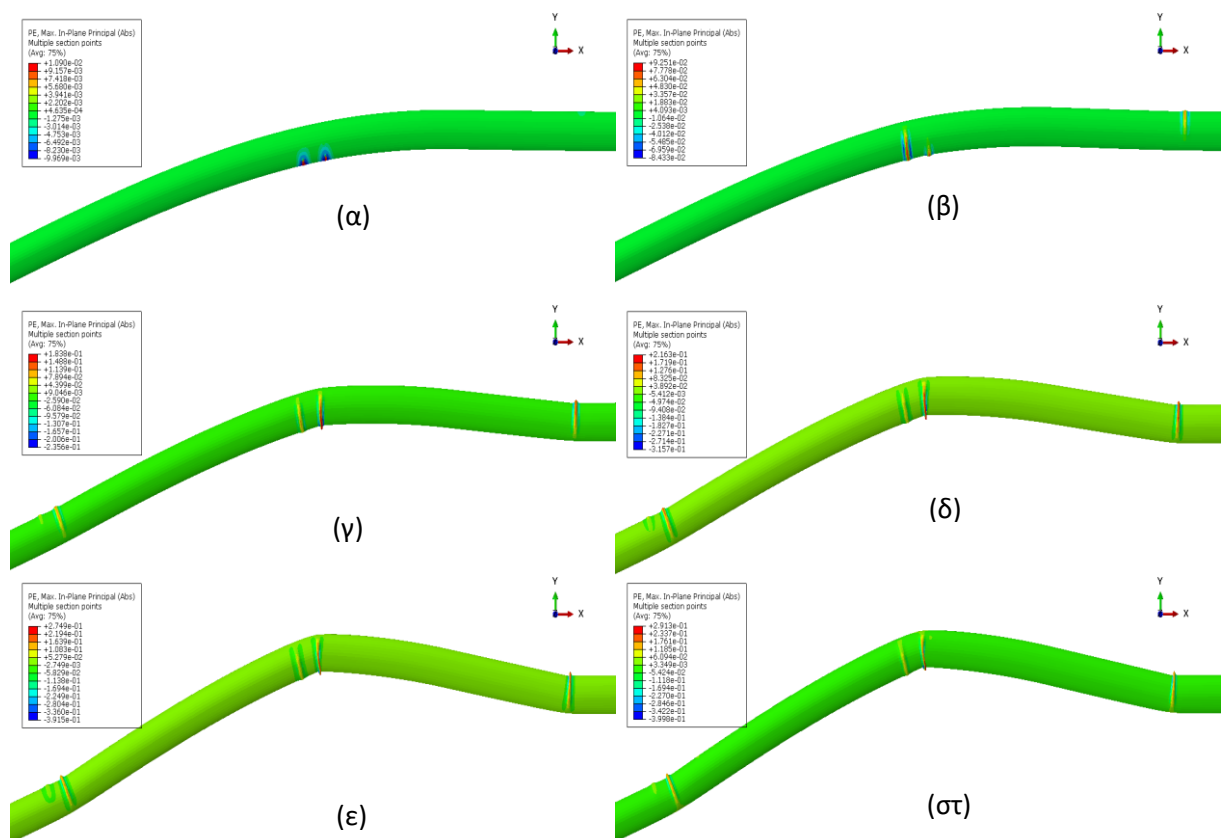
Σχήμα 4-25. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 50 kPa).



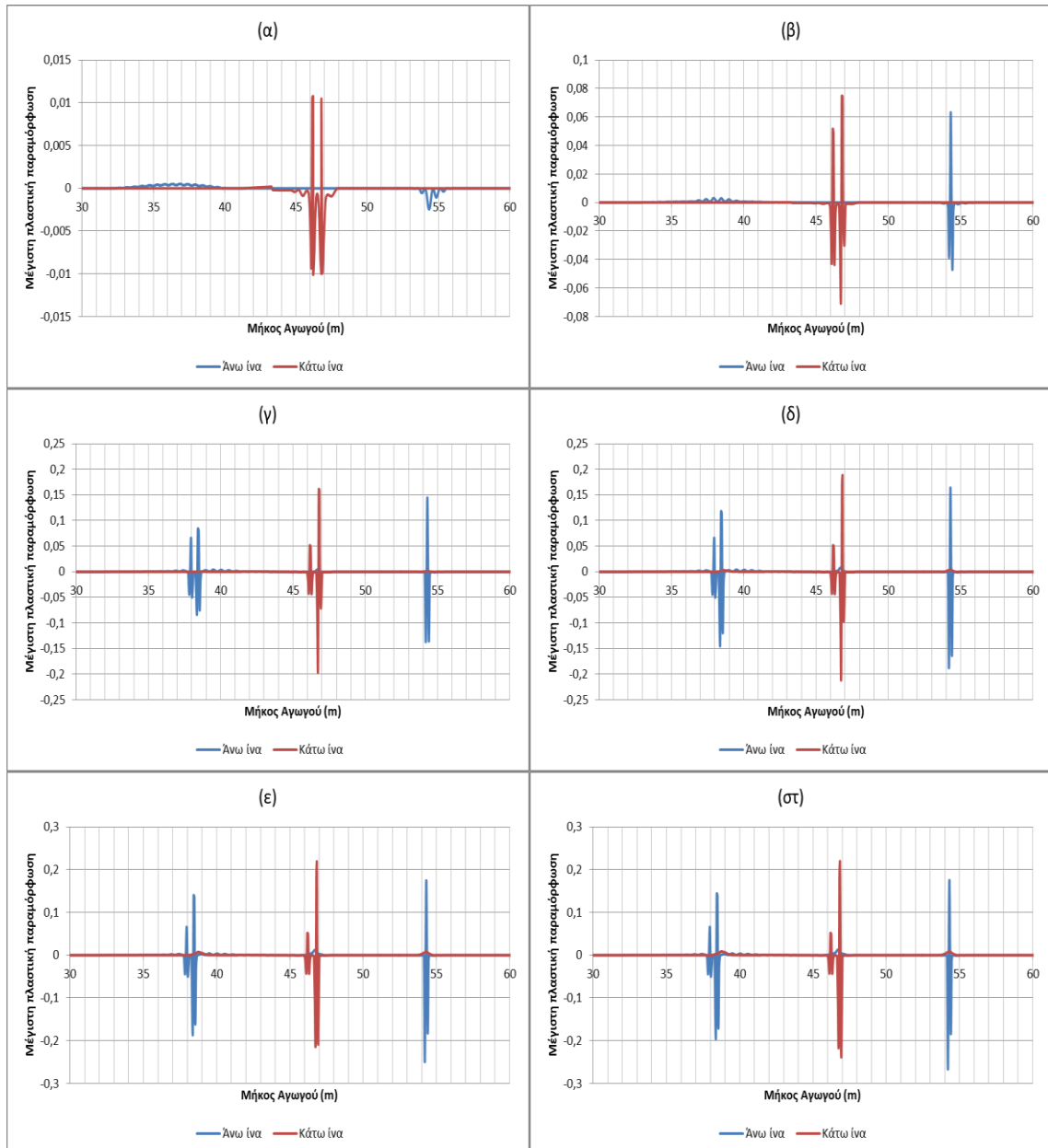
Σχήμα 4-26. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Αργίλος συνοχής 50 kPa).

4.4 Άργιλος συνοχής $c = 80$ kPa

Στα παρακάτω σχήματα δίνεται το σχήμα του παραμορφωμένου αγωγού στην κρίσιμη διατομή σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης και παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης που παρουσιάστηκε στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 4-27. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, τις χρονικές στιγμές (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 80 kPa).

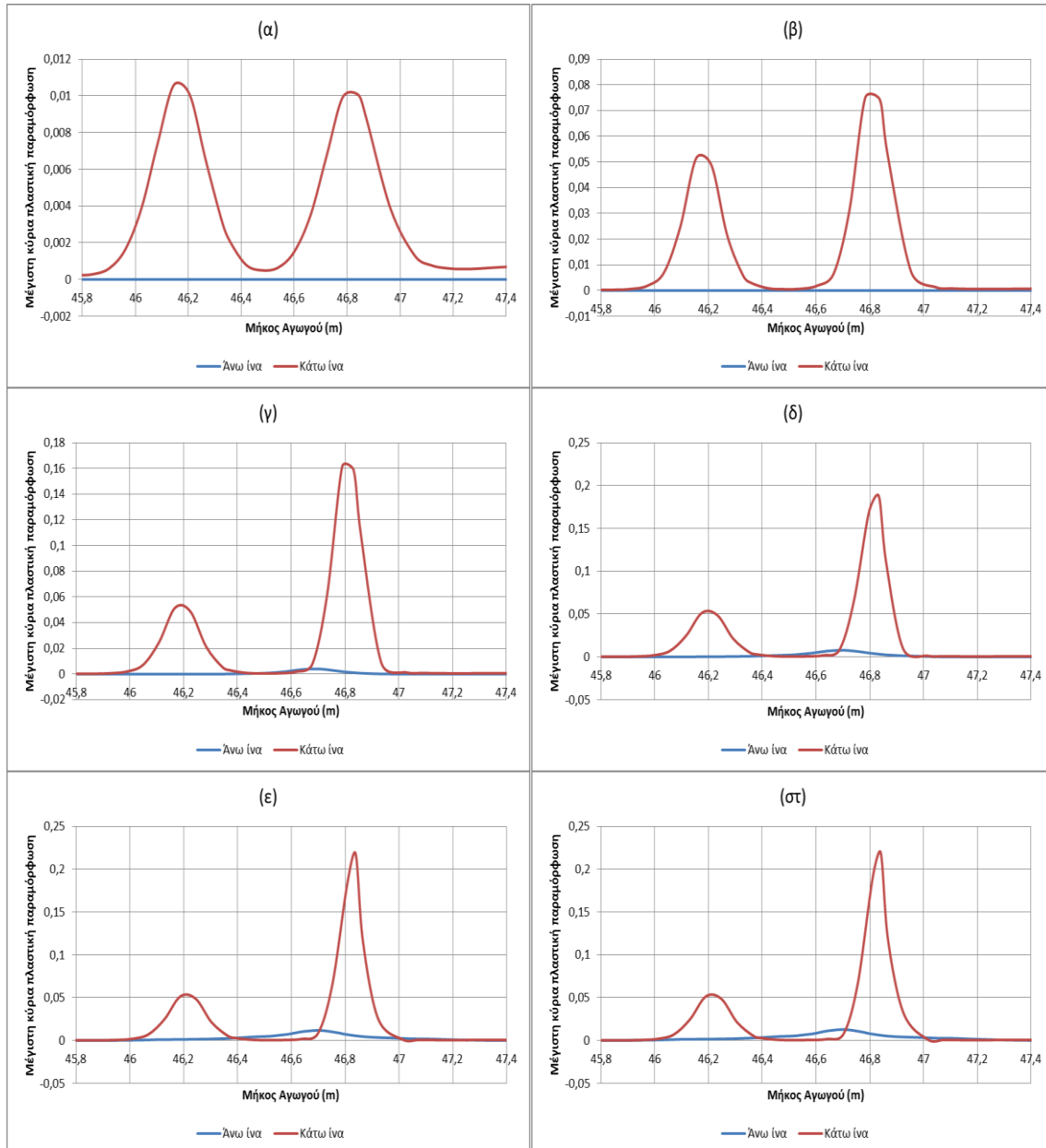


Σχήμα 4-28. Κατανομή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής πλαστικής παραμόρφωσης (Αργίλος συνοχής 80 kPa).

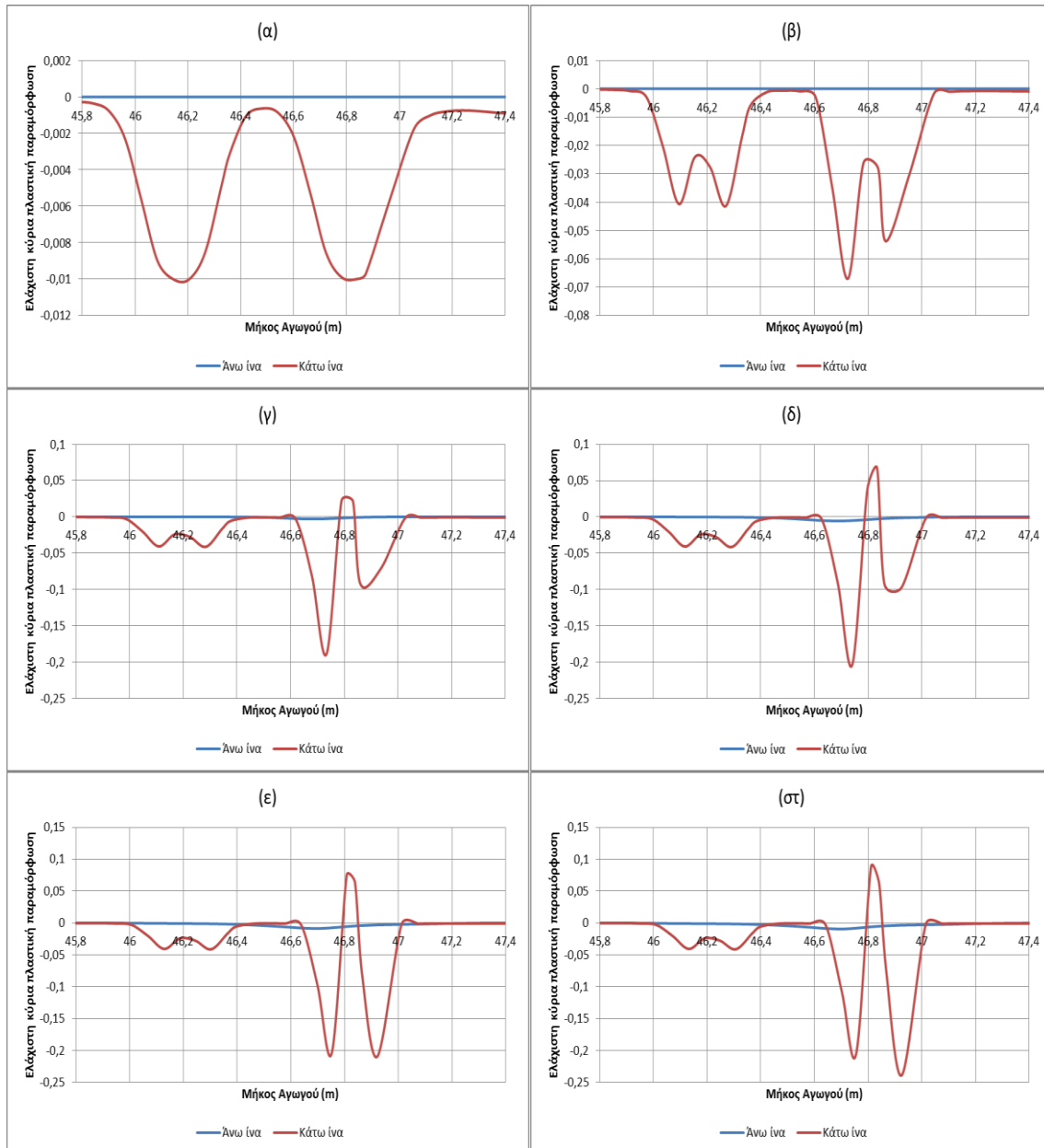
Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα, διακρίνεται ότι αμέσως μετά τη διαρροή του χάλυβα έχουν ήδη αναπτυχθεί παραμορφώσεις της τάξεως του 0,01 σε δύο σημεία στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A. Στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού, η παραμόρφωση αυτή έχει αυξηθεί σημαντικά ενώ θλιπτική παραμόρφωση της τάξης του 0,005 έχει εκδηλωθεί στο σημείο C. Στο 40% παρατηρούνται έντονες πλαστικές παραμορφώσεις σε δύο σημεία στην περιοχή του B. Από το 60% έως το

100% διακρίνονται μικρές αυξήσεις στις μέγιστες παραμορφώσεις και στα τρία σημεία, ενώ η μεγαλύτερη θλιπτική πλαστική παραμόρφωση σημειώνεται στο σημείο C κατά την τελική παραμόρφωση του αγωγού.

Στα Σχήματα 4-29, 4-30 φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4-29. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 80 kPa).



Σχήμα 4-30. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άργιλος συνοχής 80 kPa).

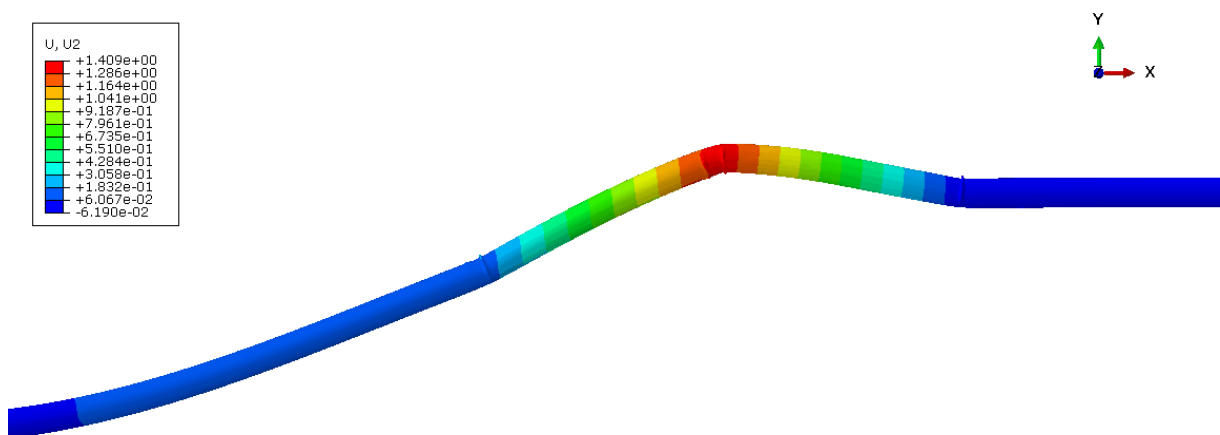
Όπως προαναφέρθηκε, μετά τη διαρροή του χάλυβα, παρατηρείται μέγιστη εφελκυστική και θλιπτική παραμόρφωση ίση με 0,01 σε δύο σημεία στην κρίσιμη περιοχή. Στο 20% της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης, η εφελκυστική και η θλιπτική παραμόρφωση του πρώτου σημείου σημειώνουν τιμές ίσες με 0,05 και 0,04, αντίστοιχα, οι οποίες παραμένουν σταθερές μέχρι την ολοκλήρωση της πλαστικής παραμόρφωσης. Όσον αφορά το δεύτερο σημείο, η εφελκυστική και η θλιπτική παραμόρφωση που αναπτύσσεται

εκεί, συνεχίζουν να αυξάνονται με τη μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση να είναι ίση με 0,24 κατά την τελική παραμόρφωση του αγωγού.

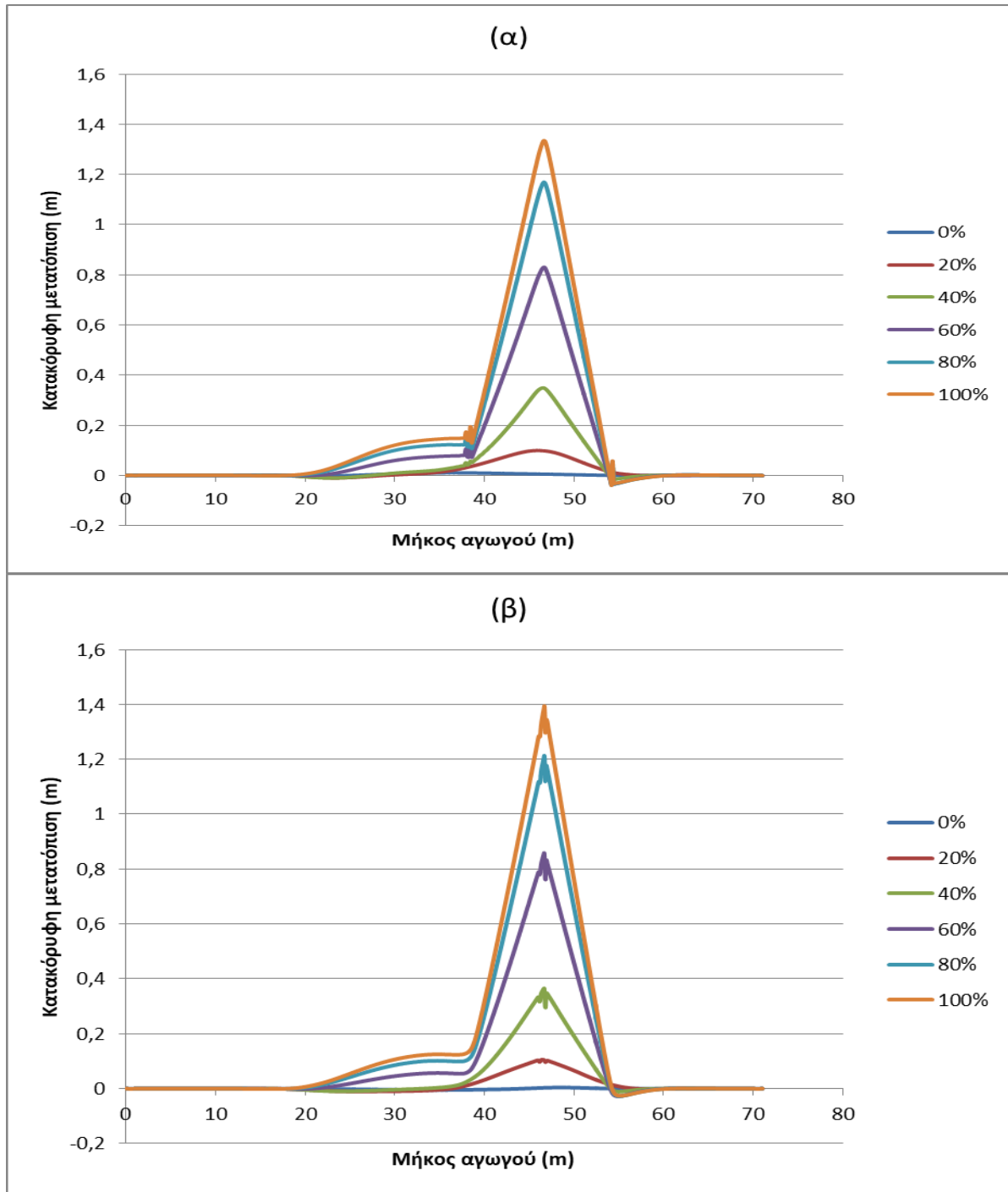
Στο Σχήμα 4-32 φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του αγωγού, κατά μήκος του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ανύψωση που σημειώθηκε είναι ίση με 1,39 m και αφορά το σημείο A που βρίσκεται στην κάτω ίνα του αγωγού σε απόσταση 1,7 m από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 στην άνω γωνία του αγωγού. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B είναι ίση με 0,17 m, ενώ στο σημείο C ίση με - 0,04 m, καθώς το C μετατοπίστηκε προς τα κάτω. Τα σημεία B και C βρίσκονται στην άνω ίνα, και απέχουν από το A απόσταση 8,7 m και 7,5 m, αντίστοιχα.

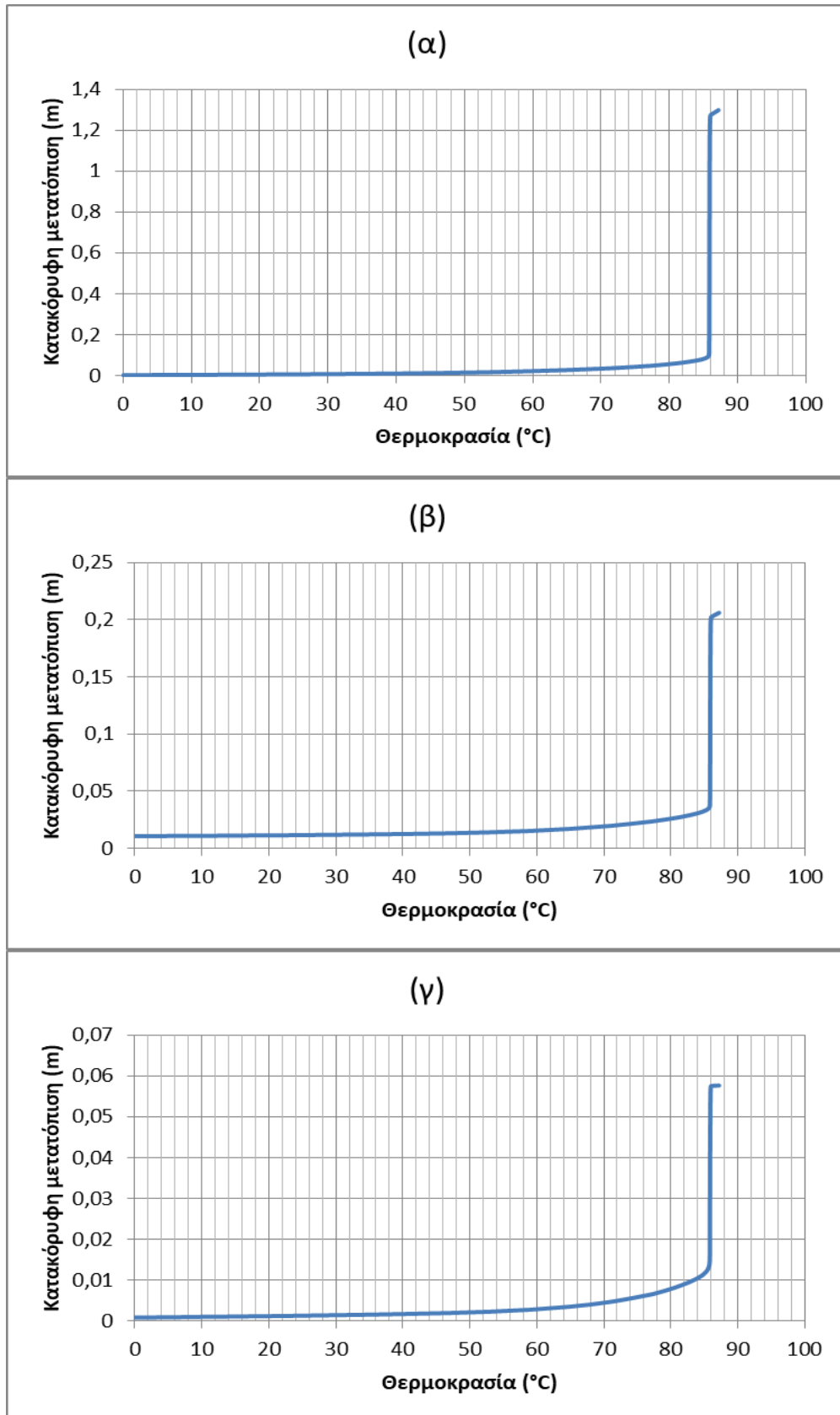
Το Σχήμα 4-33 παρουσιάζει την εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης των κρίσιμων σημείων A, B και C, με τη θερμοκρασία, όπου φαίνεται ξεκάθαρα η στιγμή της εκτόξευσης του αγωγού. Παρατηρείται ότι η κρίσιμη θερμοκρασία για την ανάπτυξη λυγισμού είναι 85,6 °C. Ο τοπικός λυγισμός στο σημείο A ξεκίνησε όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου ήταν ίση με $u_{z,cr} = 0,09$ m. Στα σημεία B και C ξεκίνησε για κατακόρυφη μετακίνηση $u_{z,cr}$ 0,03 m και 0,01 m, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-31. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 80 kPa).



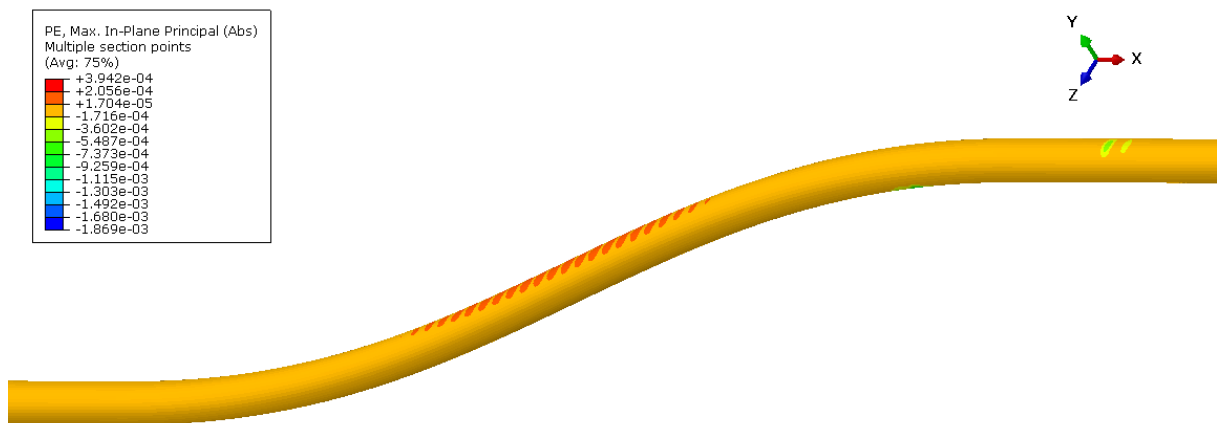
Σχήμα 4-32. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 80 kPa).



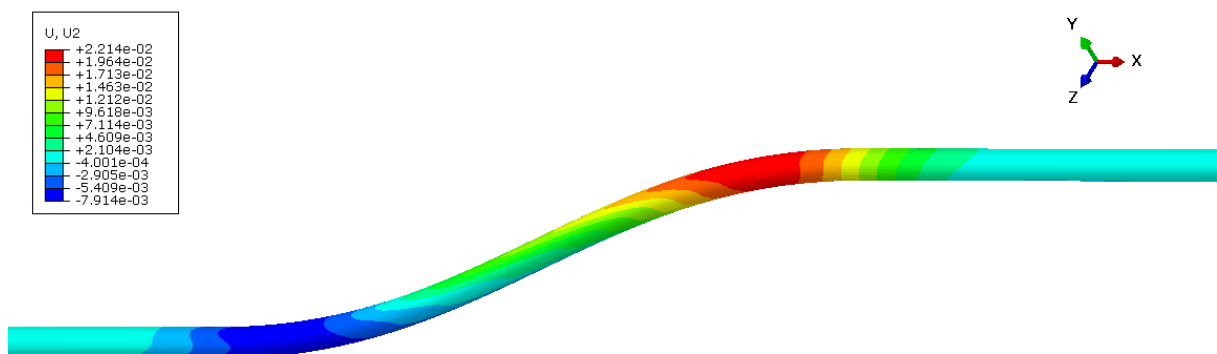
Σχήμα 4-33. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) A, (β) B και (γ) C με τη θερμοκρασία (Αργίλος συνοχής 80 kPa).

4.5 Άργιλος συνοχής $c=200$ kPa

Για την «σκληρή» άργιλο ($c=200$ KPa), παρατηρώντας το σχήμα του παραμορφωμένου αγωγού, διακρίνεται ότι δε σημειώθηκε λυγισμός της διατομής του αγωγού σε κανένα σημείο. Η τάση που αναπτύχθηκε, λόγω της θερμότητας και της εσωτερικής πίεσης, δε ξεπέρασε ποτέ το όριο διαρροής του χάλυβα και οι παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν ήταν πολύ μικρές. Παρακάτω φαίνεται το σχήμα του αγωγού, στην κρίσιμη διατομή του, κατά την τελική παραμόρφωση.

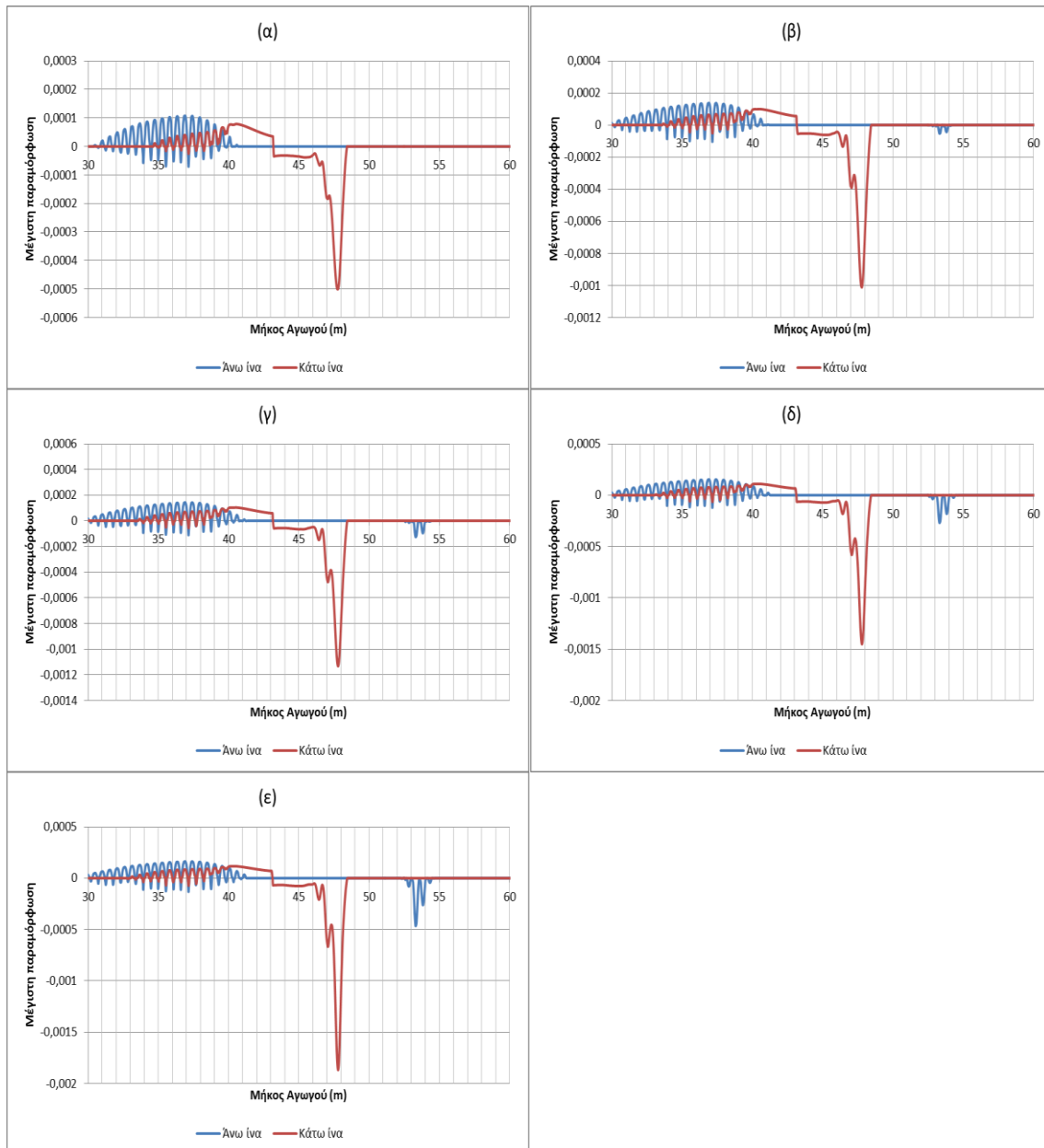


Σχήμα 4-34. Μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 200 kPa).



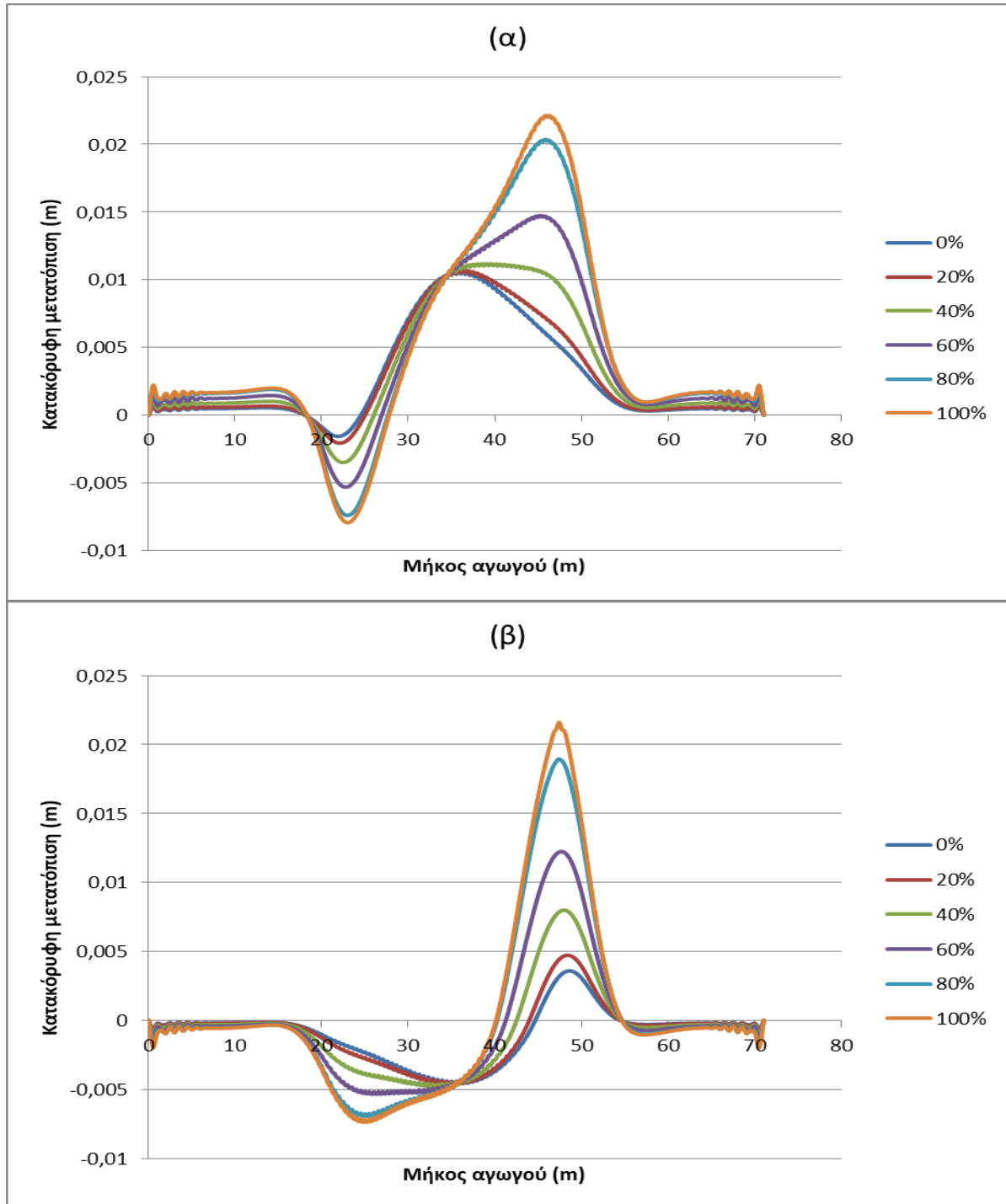
Σχήμα 4-35. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άργιλος συνοχής 200 kPa).

Στο Σχήμα 4-36 φαίνεται η μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές.



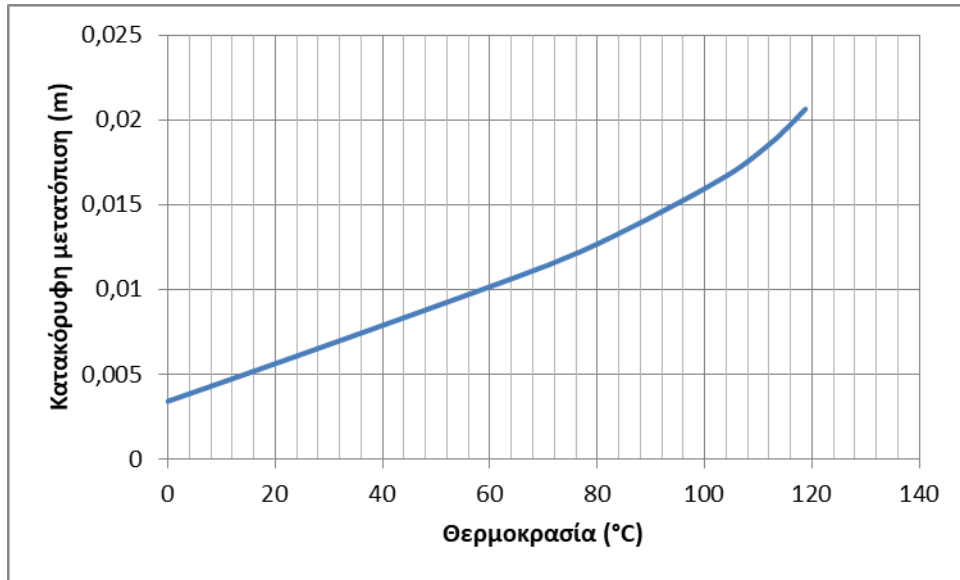
Σχήμα 4-36. Κατανομή της μέγιστης παραμόρφωσης στην άνω και κάτω ίνα κατά μήκος του αγωγού για τις χρονικές στιγμές, (α) 20%, (β) 40%, (γ) 60%, (δ) 80%, (ε) 100%, της συνολικής παραμόρφωσης (Άργιλος συνοχής 200 kPa).

Στο Σχήμα 4-37 φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του αγωγού, κατά μήκος του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές.



Σχήμα 4-37. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άργιλος συνοχής 200 kPa).

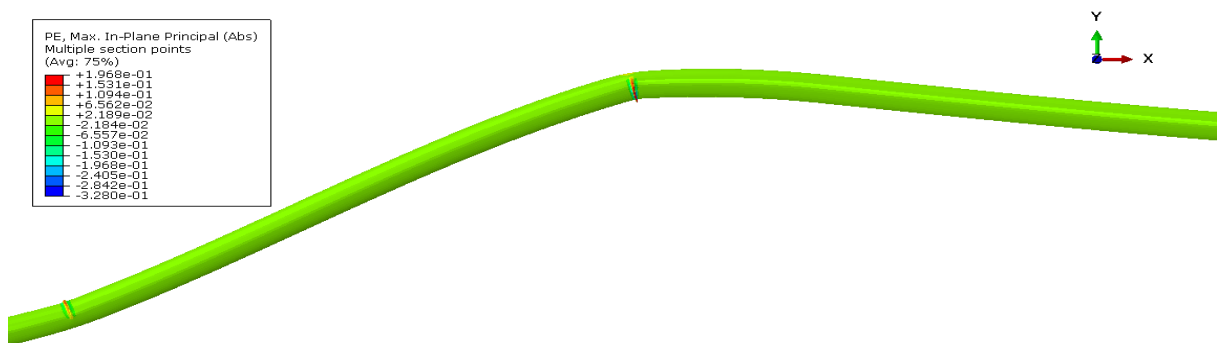
Η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση που σημειώθηκε είναι 0,02 m και αφορά την κρίσιμη περιοχή του σημείου A. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα για θερμοκρασιακή μεταβολή $\Delta T \leq 120^\circ\text{C}$, δε συνέβη λυγισμός της διατομής του αγωγού



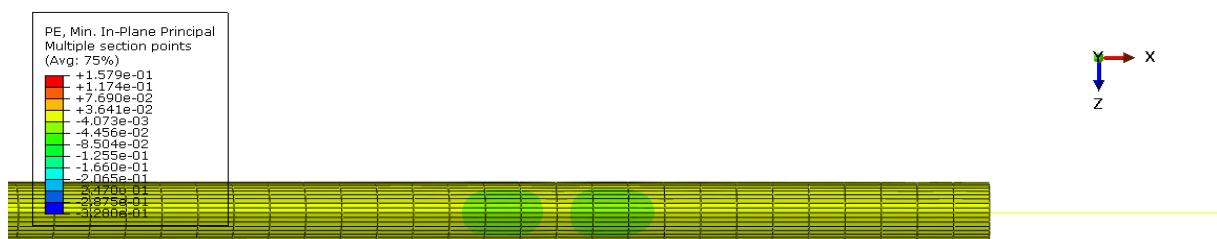
Σχήμα 4-38. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου A με τη θερμοκρασία (Άργιλος συνοχής 200 kPa).

4.6 Άμμος με γωνία τριβής $\phi = 33^\circ$

Στο Σχήμα 4-39 δίνεται η εικόνα του αγωγού στην κρίσιμη διατομή του κατά την τελική παραμόρφωση. Παρατηρείται ότι ο αναμενόμενος λυγισμός στο κρίσιμο σημείο C της διατομής δεν έχει εμφανιστεί και αυτό οφείλεται στην διακριτοποίηση που επιλέχθηκε για τον αγωγό σε εκείνη την περιοχή. Αξίζει να τονιστεί, ότι η διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε στον αγωγό σε αργιλικό έδαφος παρέμεινε ίδια και στις παραμετρικές αναλύσεις για τη διερεύνηση ολικού λυγισμού σε αγωγό που βρίσκεται θαμμένος σε αμμώδες έδαφος. Παρόλο που η διακριτοποίηση του φορέα κρίθηκε ικανοποιητική για να μελετηθεί η συμπεριφορά του σε αργιλικό έδαφος, δε συνέβη το ίδιο και για την άμμο, καθώς οι τοπικοί λυγισμοί αναπτύχθηκαν πιο μακριά από την κρίσιμη περιοχή που είχε προβλεφθεί αρχικά. Ο λυγισμός στο σημείο B εμφανίστηκε εντός της διατομής που έχει διακριτοποιηθεί πυκνά, ενώ ο τοπικός λυγισμός στο σημείο C φαίνεται να εκδηλώνεται κοντά στο άκρο του αγωγού, στην περιοχή δηλαδή που η διακριτοποίηση είναι πιο αδρή. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και δείχνουν αυξημένες θλιπτικές παραμορφώσεις σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην άνω ίνα, δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστεί προσεγγιστικά η θέση του τοπικού λυγισμού στο σημείο C.

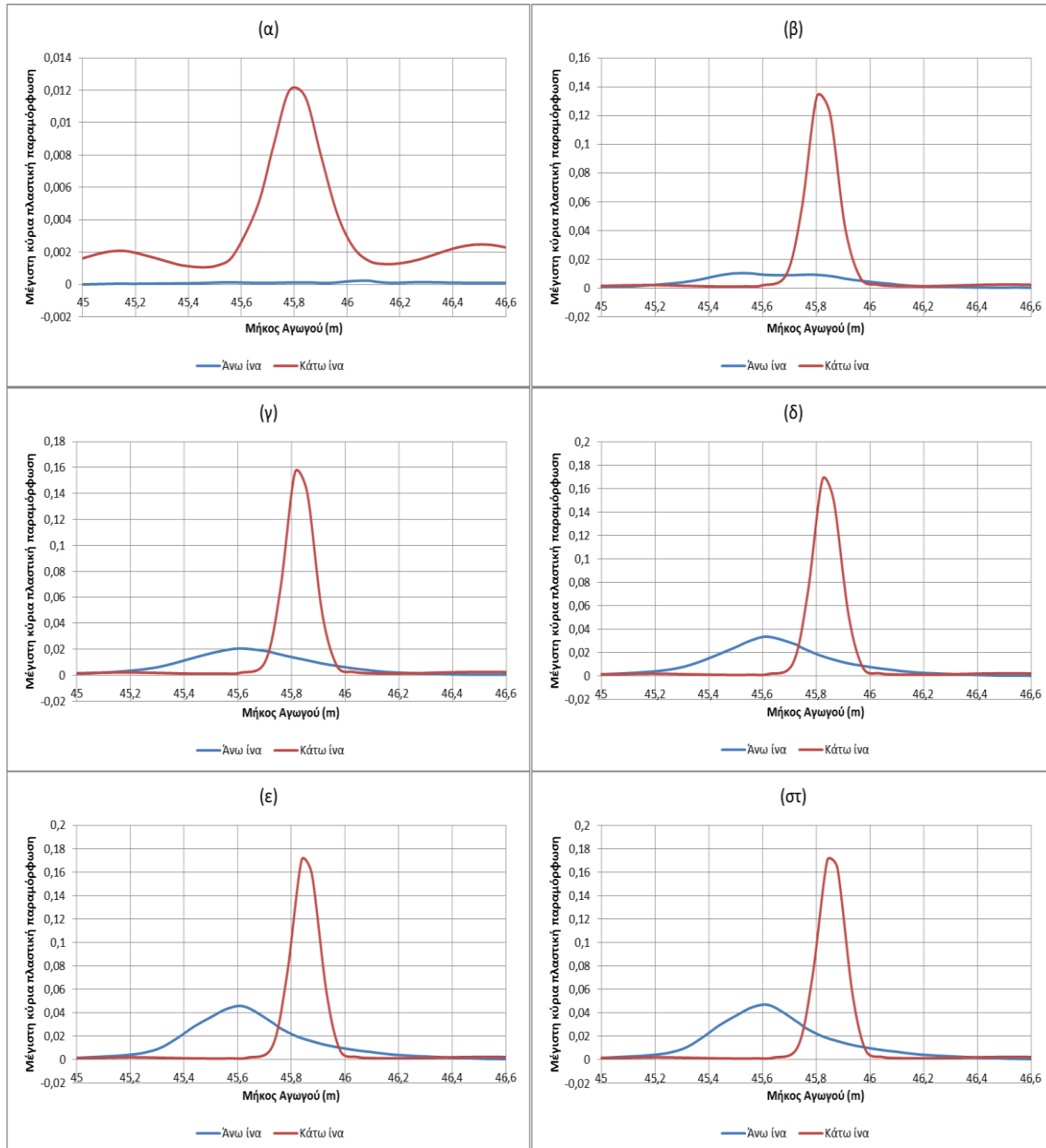


Σχήμα 4-39. Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση του αγωγού, στην κρίσιμη διατομή, κατά την τελική παραμόρφωση (Άμμος με γωνία τριβής 33°).

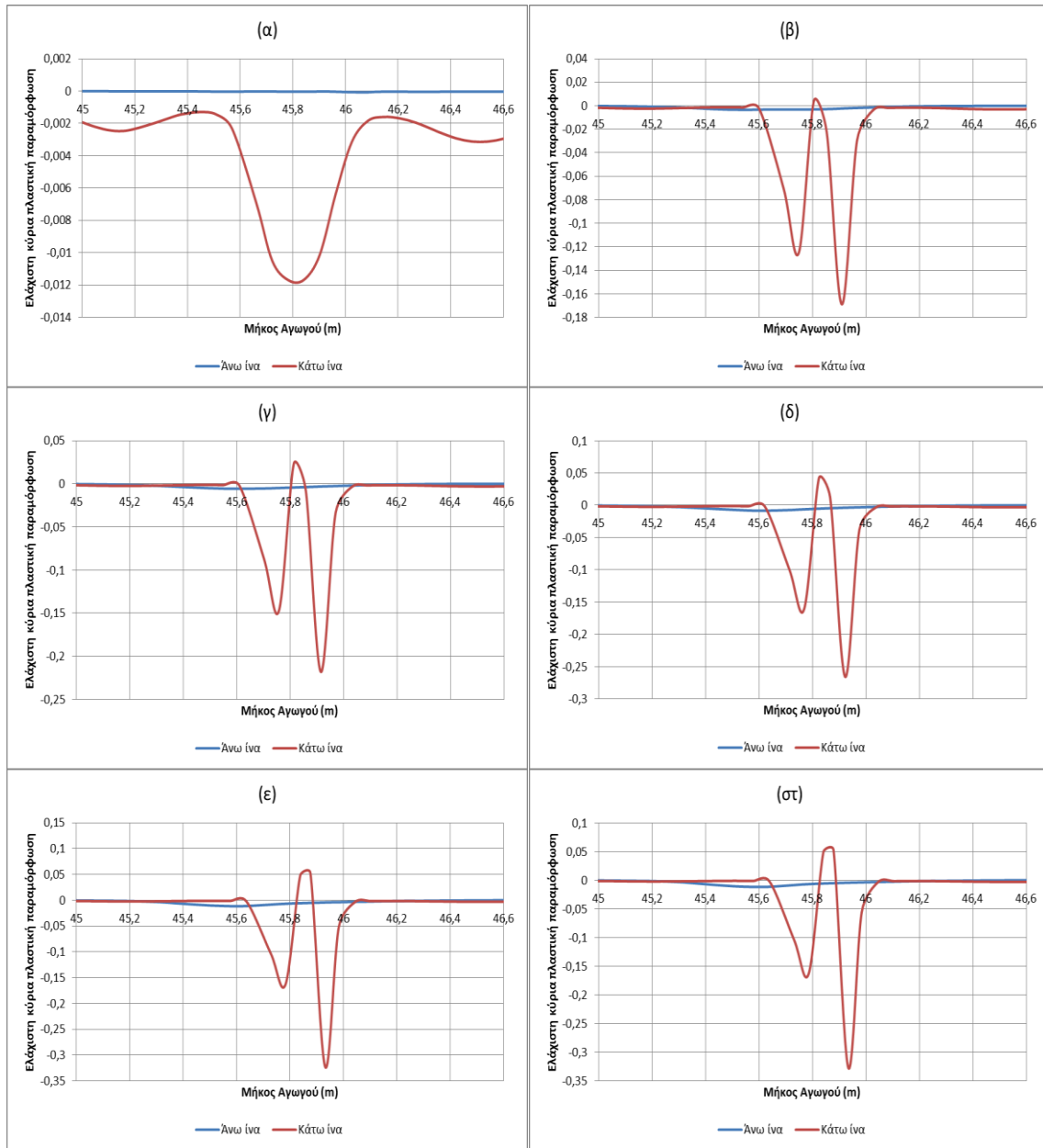


Σχήμα 4-40. Θλιπτική παραμόρφωση στο κρίσιμο σημείο C, για την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού.

Στη συνέχεια της εργασίας και για τις επόμενες αναλύσεις που αφορούν αμμώδη εδάφη θα δοθούν τα αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη (άρα εφελκυστική) και την ελάχιστη (άρα θλιπτική) κύρια πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4-41. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 33°).



Σχήμα 4-42. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 33°).

Όσον αφορά τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση, παρατηρείται ότι στην αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης είναι ίση με 0,012 και αυξάνεται σημαντικά στο 0,13 ήδη στο 20% της τελικής παραμόρφωσης. Στις επόμενες χρονικές στιγμές παρατηρείται μικρή αύξηση μέχρι την τιμή 0,17 που σημειώνεται κατά την ολοκλήρωση της. Παρόμοια συμπεριφορά μέχρι το 20%, παρατηρείται και για τη θλιπτική πλαστική παραμόρφωση, η

οποία φτάνει την τιμή 0,17 εκείνη τη στιγμή. Από το 40% και στη συνέχεια, αυξάνεται σημαντικά εμφανίζοντας διπλάσια τιμή 0,33 κατά την τελική παραμόρφωση.

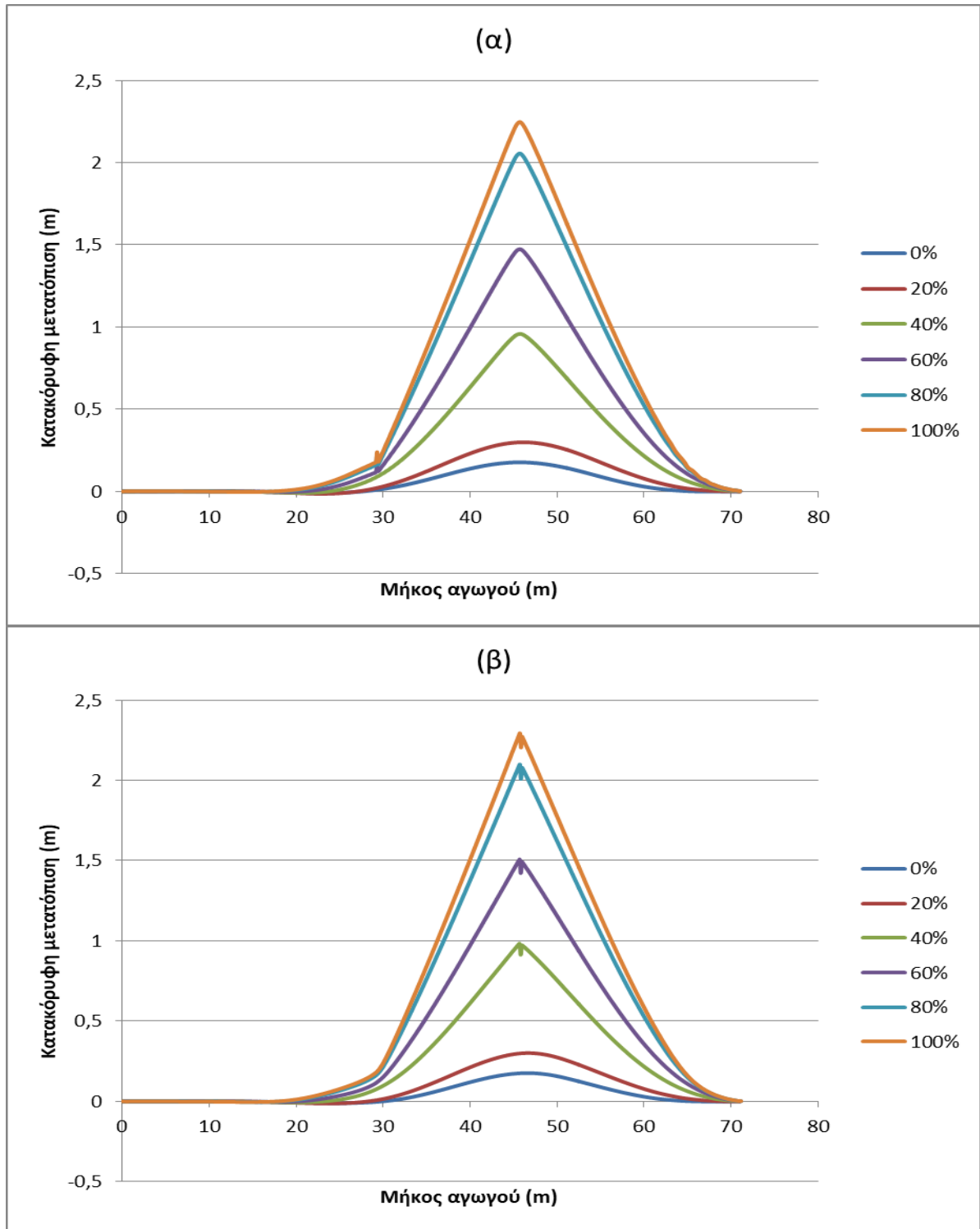
Στο Σχήμα 4-44 παρουσιάζεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του αγωγού, κατά μήκος του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ανύψωση που σημειώθηκε είναι ίση με 2,29 m και αφορά το σημείο A που βρίσκεται στην κάτω ίνα του αγωγού σε απόσταση 0,7 m από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 στην άνω γωνία του αγωγού. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B είναι ίση με 0,24 m, ενώ στο σημείο C ίση με 0,14 m. Τα σημεία B και C βρίσκονται στην άνω ίνα, και απέχουν από το A απόσταση 16,4 m και 18,8 m, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η θέση του σημείου C προσδιορίστηκε κατά προσέγγιση.

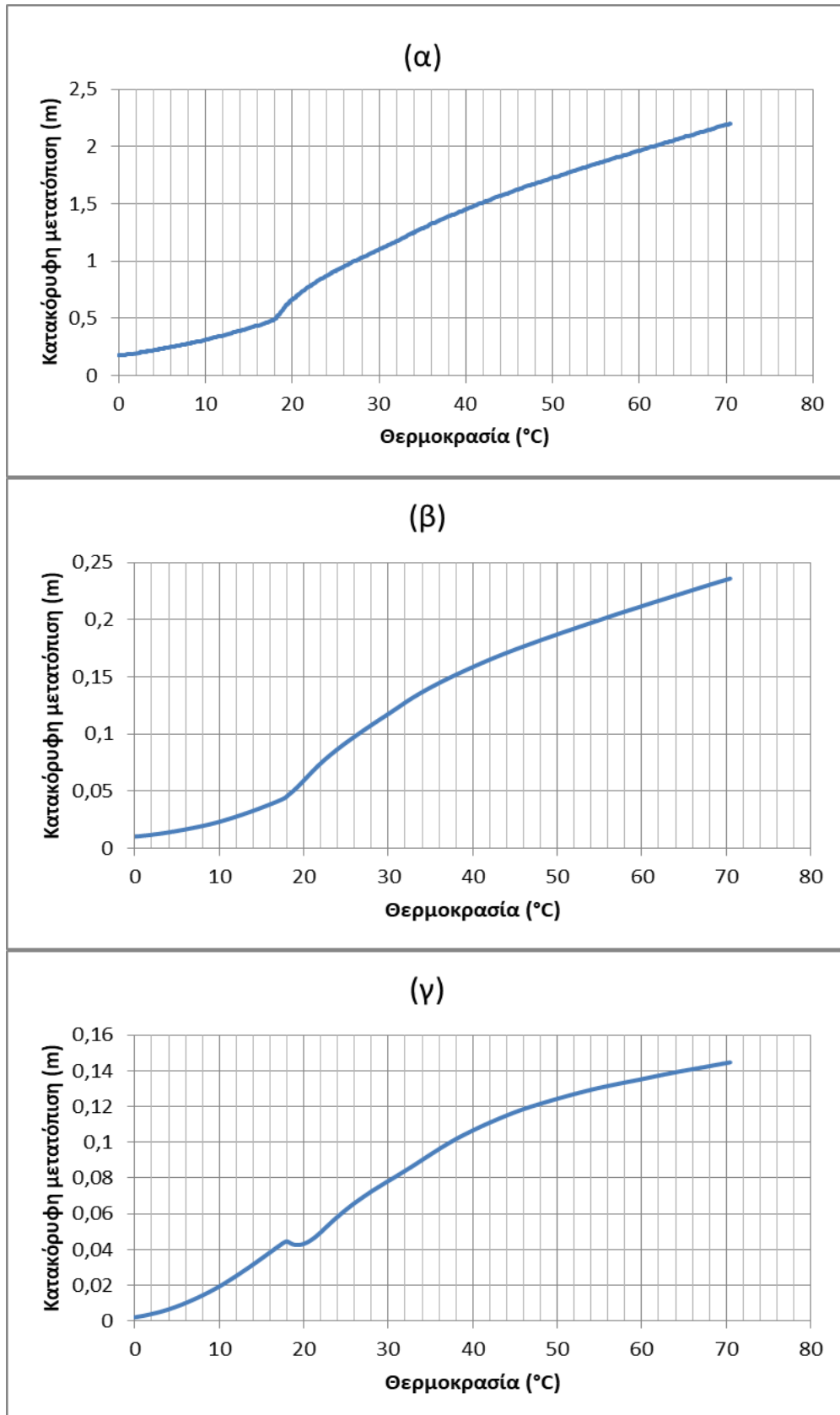
Το Σχήμα 4-45 παρουσιάζει την εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης των κρίσιμων σημείων A, B και C με τη θερμοκρασία. Παρατηρείται ότι η κρίσιμη θερμοκρασία είναι ίση με 17,8 °C. Ο τοπικός λυγισμός στο σημείο A ξεκίνησε όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου ήταν ίση με $u_{z,cr} = 0,49$ m. Στα σημεία B και C ξεκίνησε για κατακόρυφη μετακίνηση $u_{z,cr}$ 0,05 m και 0,04 m, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-43. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 33°).



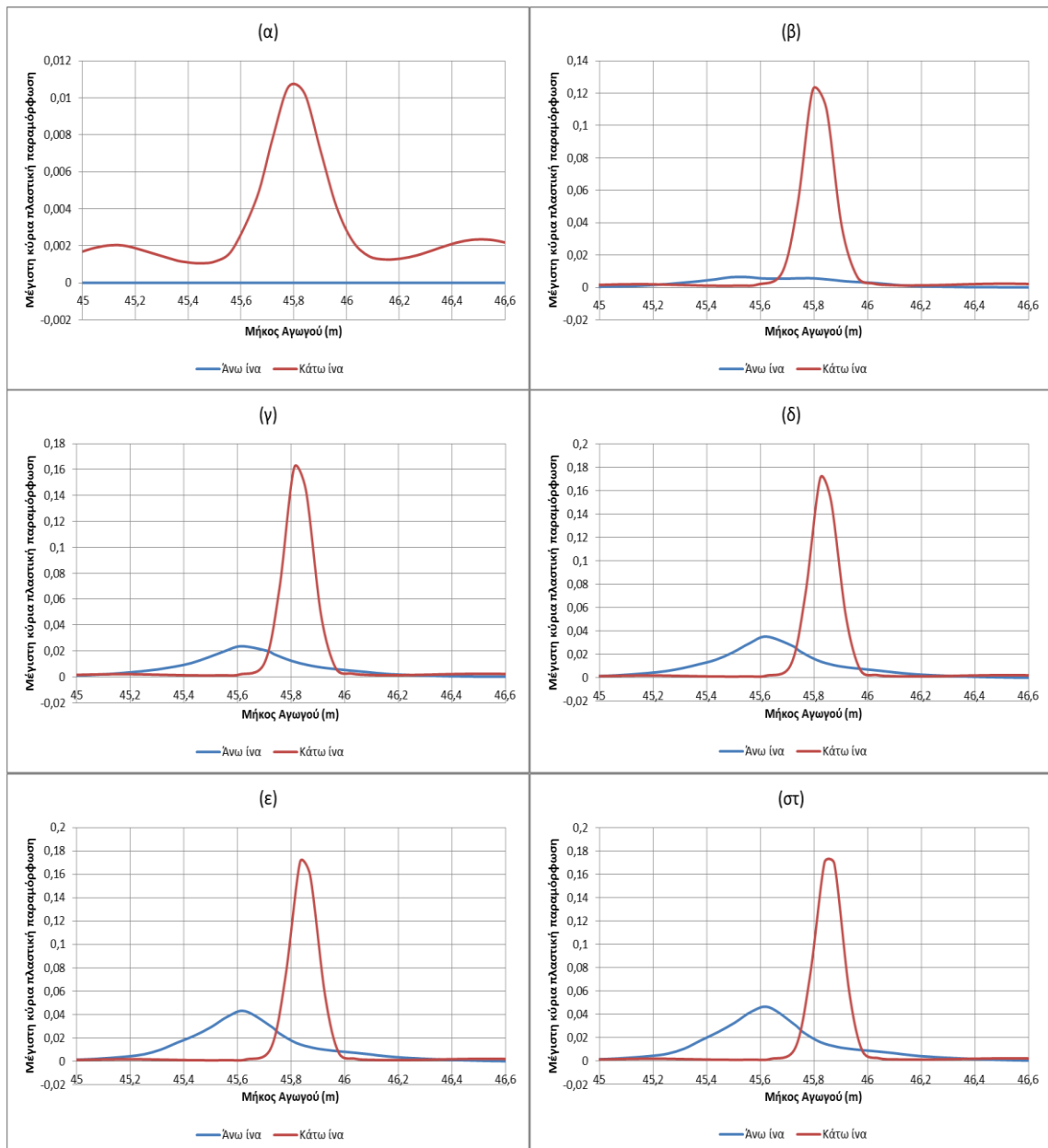
Σχήμα 4-44. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άμμος με γωνία τριβής 33°).



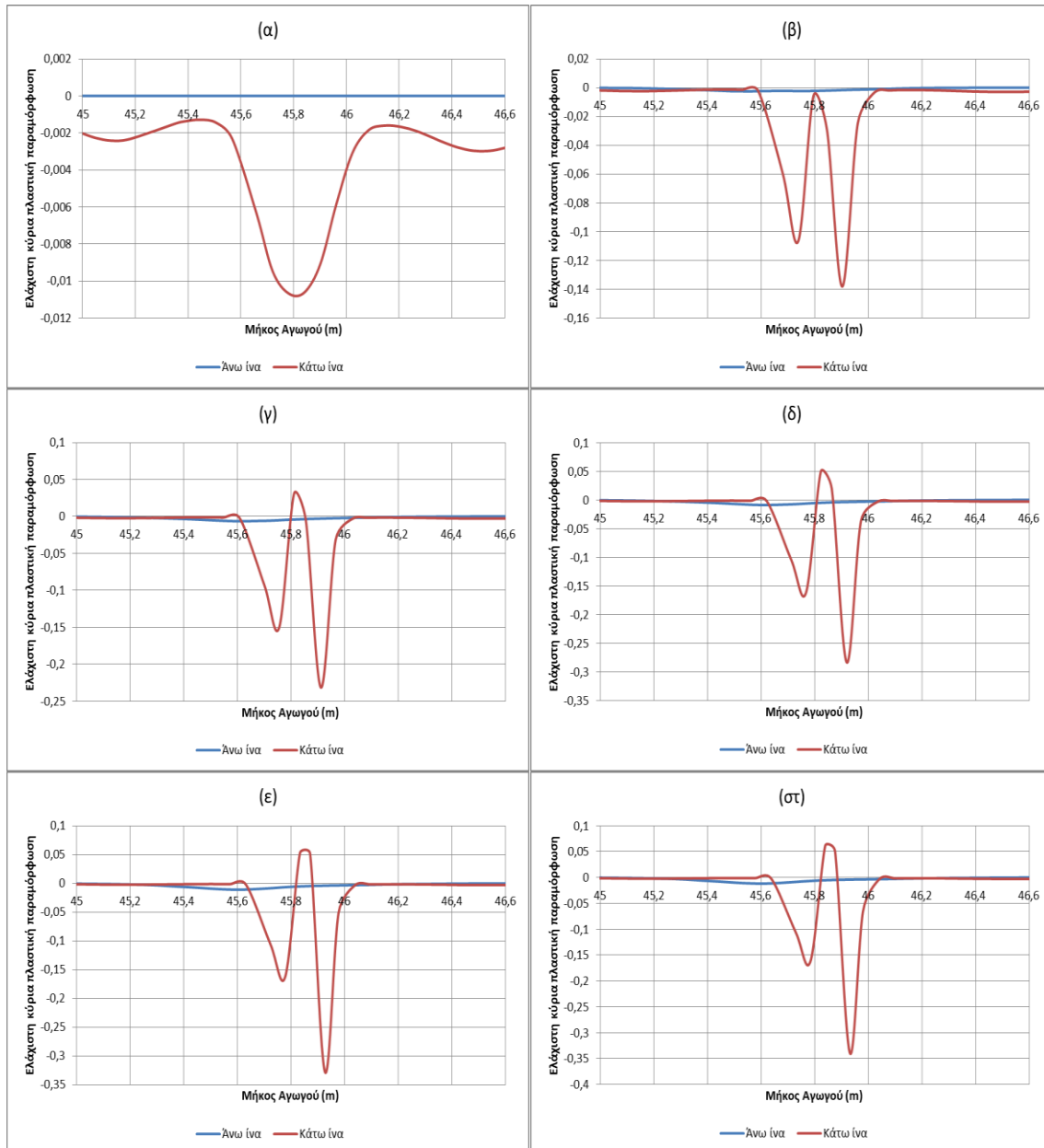
Σχήμα 4-45. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) Α, (β) Β και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άμμος με γωνία τριβής 33°).

4.7 Άμμος με γωνία τριβής $\phi = 38^\circ$

Στα Σχήματα 4-46, 4-47 φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4-46. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 38°).



Σχήμα 4-47. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 38°).

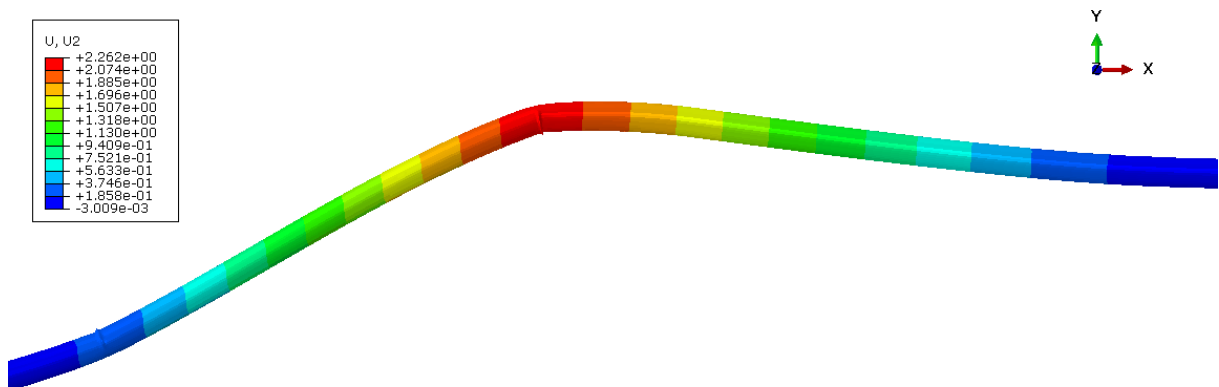
Όσον αφορά τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση, παρατηρείται ότι στην αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης είναι ίση με 0,011 και αυξάνεται σημαντικά στο 0,12 ήδη στο 20% της τελικής παραμόρφωσης. Στις επόμενες χρονικές στιγμές παρατηρείται μικρή αύξηση μέχρι την τιμή 0,17 που σημειώνεται κατά την ολοκλήρωση της. Παρόμοια συμπεριφορά μέχρι το 20%, παρατηρείται και για τη θλιπτική πλαστική παραμόρφωση, η οποία φτάνει την τιμή 0,14 εκείνη τη στιγμή. Από το 40% και στη συνέχεια, αυξάνεται

σημαντικά εμφανίζοντας τη μεγαλύτερη τιμή 0,34 τη στιγμή που ολοκληρώνεται η πλαστική παραμόρφωση.

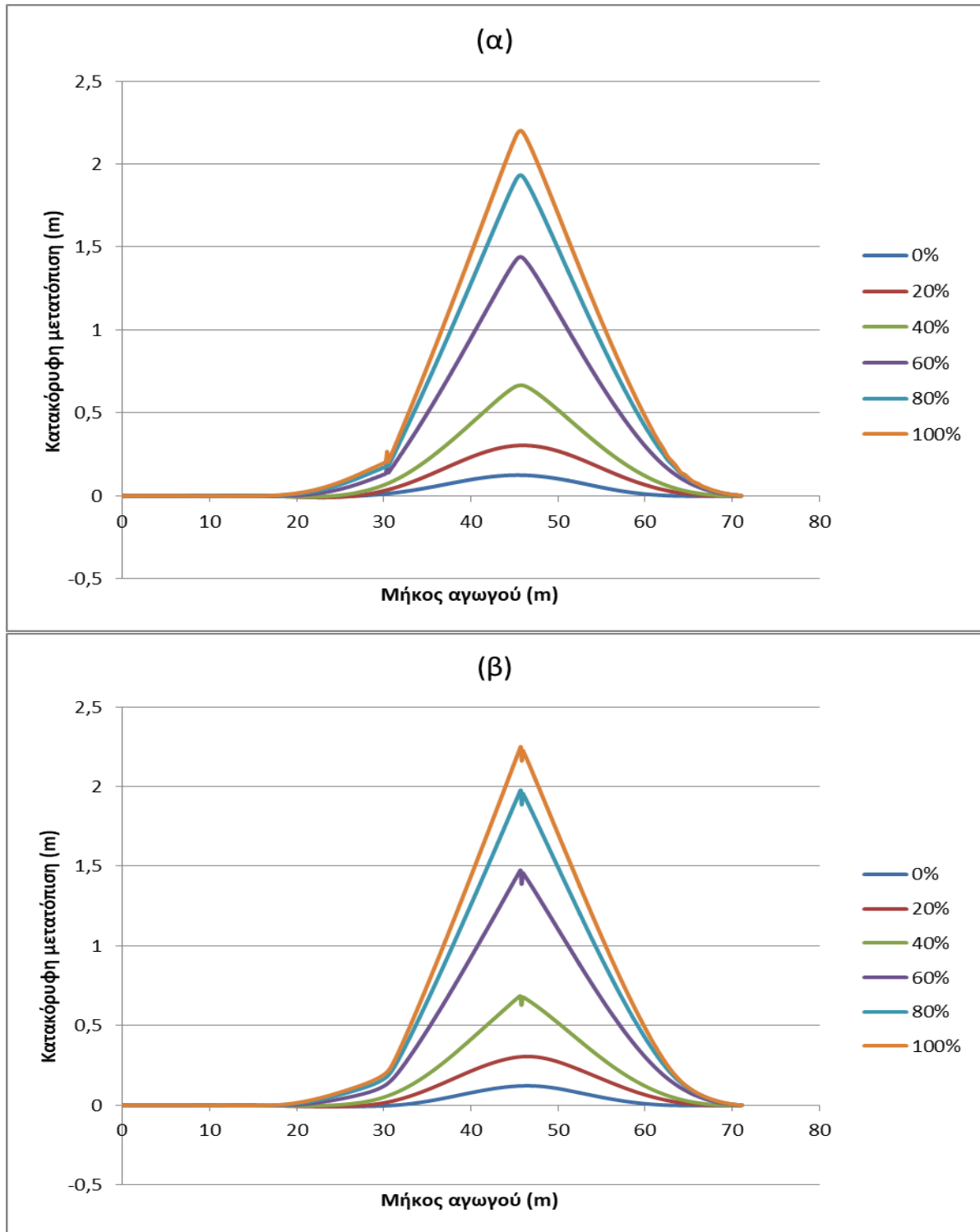
Στο Σχήμα 4-49 φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του αγωγού, κατά μήκος του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ανύψωση που σημειώθηκε είναι ίση με 2,25 m και αφορά το σημείο A που βρίσκεται στην κάτω ίνα του αγωγού σε απόσταση 0,7 m από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 στην άνω γωνία του αγωγού. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B είναι ίση με 0,27 m, ενώ στο σημείο C ίση με 0,21 m. Τα σημεία B και C βρίσκονται στην άνω ίνα, και απέχουν από το A απόσταση 15,3 m και 17,3 m, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η θέση του σημείου C προσδιορίστηκε κατά προσέγγιση.

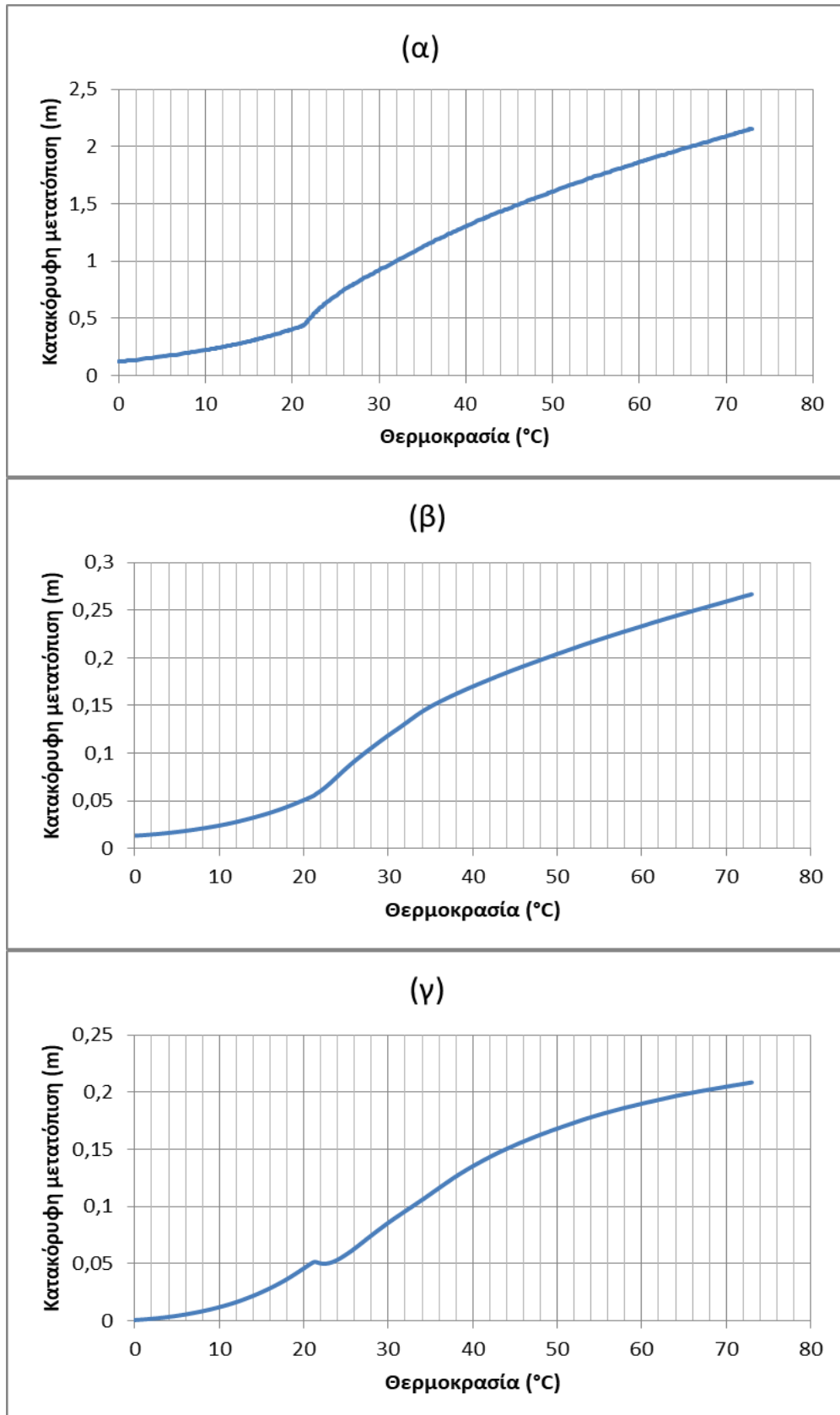
Το Σχήμα 4-50 παρουσιάζει την εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης των κρίσιμων σημείων A, B και C με τη θερμοκρασία. Παρατηρείται ότι για θερμοκρασία ίση με 21,5 °C, έχει ξεκινήσει ο τοπικός λυγισμός. Ο τοπικός λυγισμός στο σημείο A ξεκίνησε όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου ήταν ίση με $u_{z,cr} = 0,45$ m. Στα σημεία B και C ξεκίνησε για κατακόρυφη μετακίνηση $u_{z,cr}$ 0,06 m και 0,05 m, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-48. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 38°).



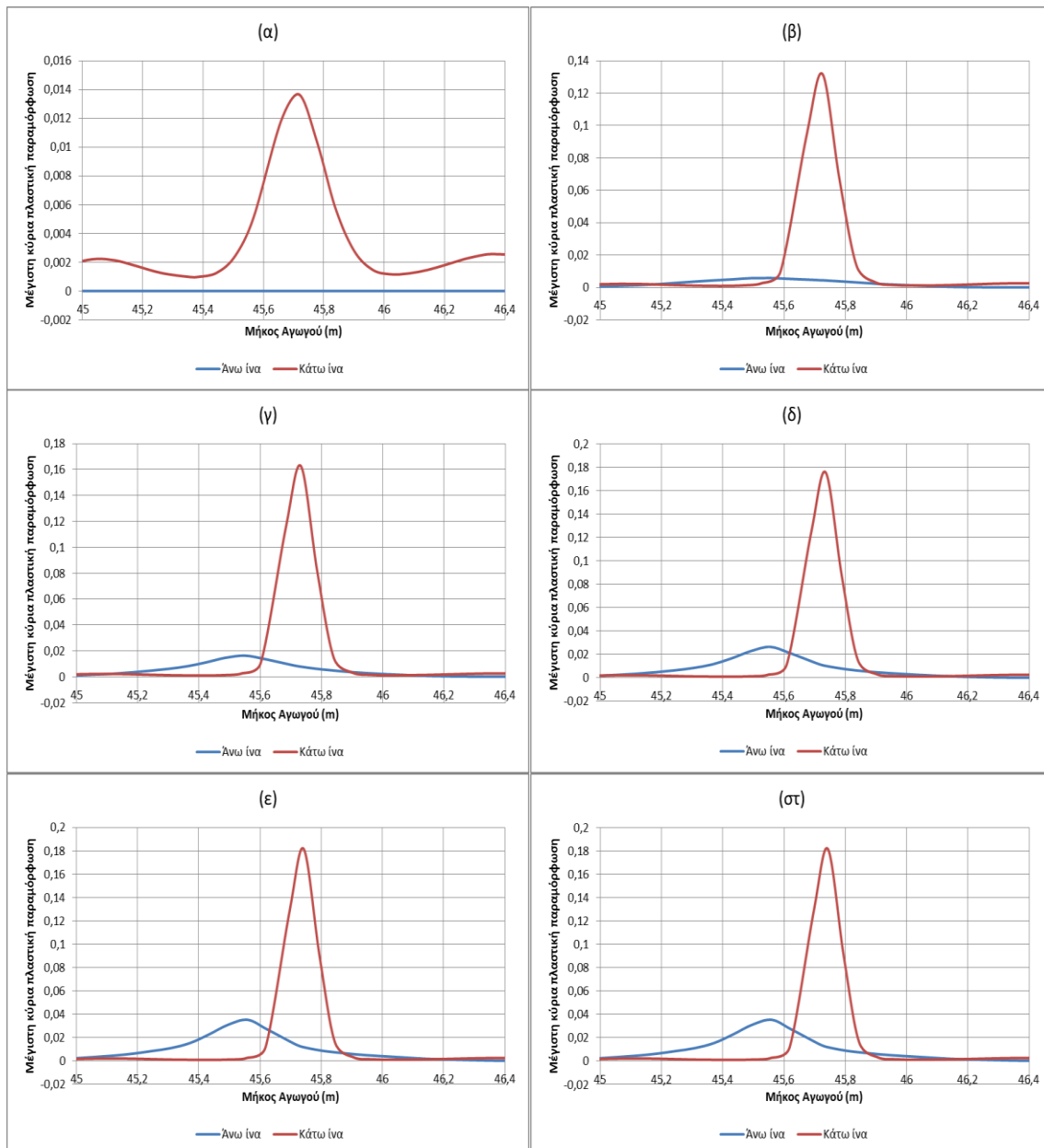
Σχήμα 4-49. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άμμος με γωνία τριβής 38°).



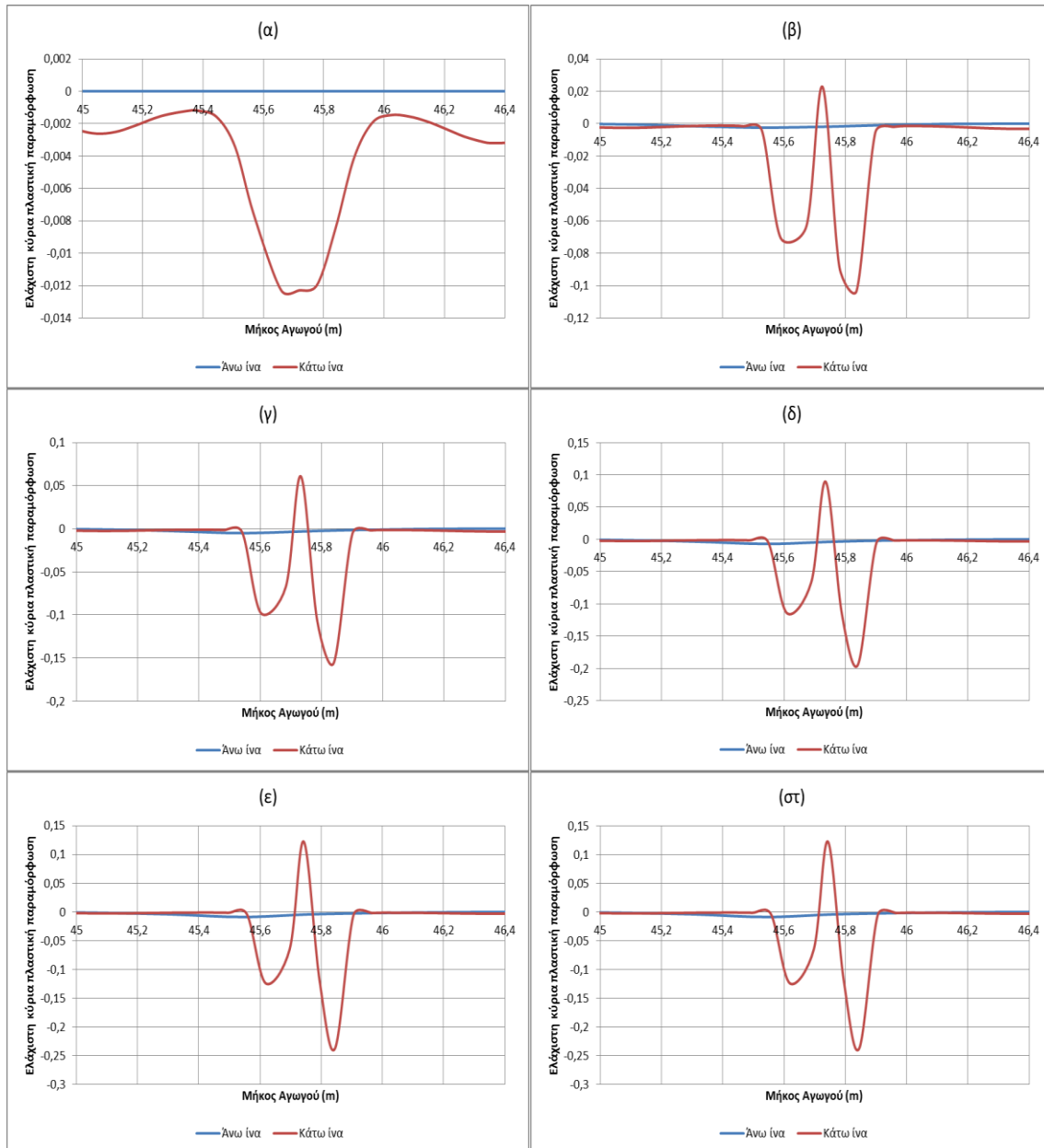
Σχήμα 4-50. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) Α, (β) Β και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άμμος με γωνία τριβής 38°).

4.8 Άμμος με γωνία τριβής $\phi = 43^\circ$

Στα Σχήματα 4-51, 4-52 φαίνεται η μεγαλύτερη και η μικρότερη κύρια πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α σε διάφορες χρονικές στιγμές της πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4-51. Κατανομή της μέγιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου Α για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 43°).



Σχήμα 4-52. Κατανομή της ελάχιστης κύριας πλαστικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή του σημείου A για τις χρονικές στιγμές, (α) 0%, (β) 20%, (γ) 40%, (δ) 60%, (ε) 80%, (στ) 100%, της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 43°).

Όσον αφορά τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση, παρατηρείται ότι στην αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης είναι ίση με 0,014 και αυξάνεται σημαντικά στο 0,13 ήδη στο 20% της τελικής παραμόρφωσης. Στις επόμενες χρονικές στιγμές παρατηρείται μικρή αύξηση μέχρι την τιμή 0,18 που σημειώνεται κατά την ολοκλήρωση της. Παρόμοια συμπεριφορά μέχρι το 20%, παρατηρείται και για τη θλιπτική πλαστική παραμόρφωση, η οποία φτάνει την τιμή 0,10 εκείνη τη στιγμή. Από το 40% και στη συνέχεια, αυξάνεται

σημαντικά εμφανίζοντας τη μεγαλύτερη τιμή 0,24 τη στιγμή που ολοκληρώνεται η πλαστική παραμόρφωση.

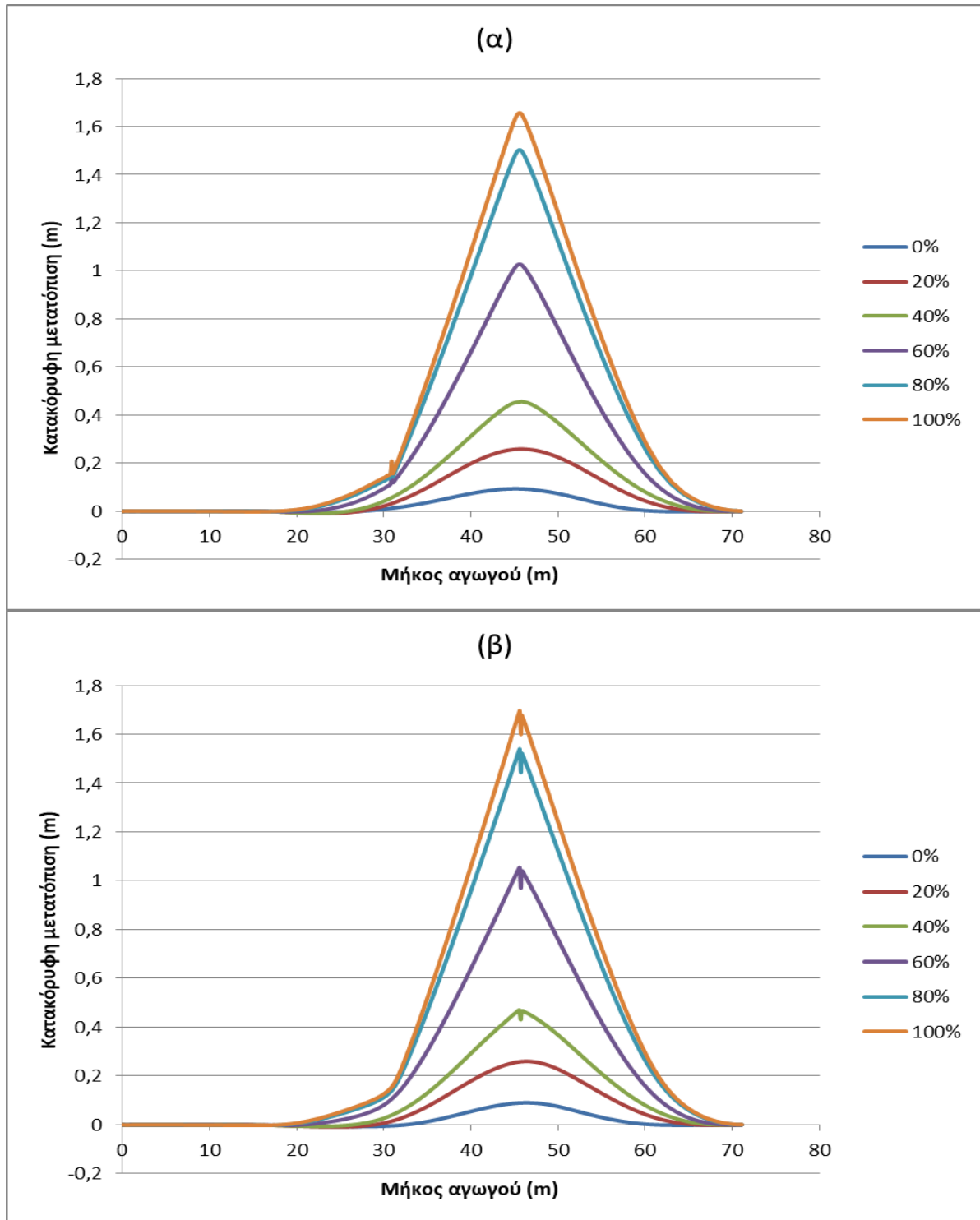
Στο Σχήμα 4-54 φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της άνω και κάτω ίνας του αγωγού, κατά μήκος του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ανύψωση που σημειώθηκε είναι ίση με 1,70 m και αφορά το σημείο A που βρίσκεται στην κάτω ίνα του αγωγού σε απόσταση 0,6 από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 στην άνω γωνία του αγωγού. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B είναι ίση με 0,21 m, ενώ στο σημείο C ίση με 0,19 m. Τα σημεία B και C βρίσκονται στην άνω ίνα, και απέχουν από το A απόσταση 14,6 m και 16,4 m, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η θέση του σημείου C προσδιορίστηκε κατά προσέγγιση.

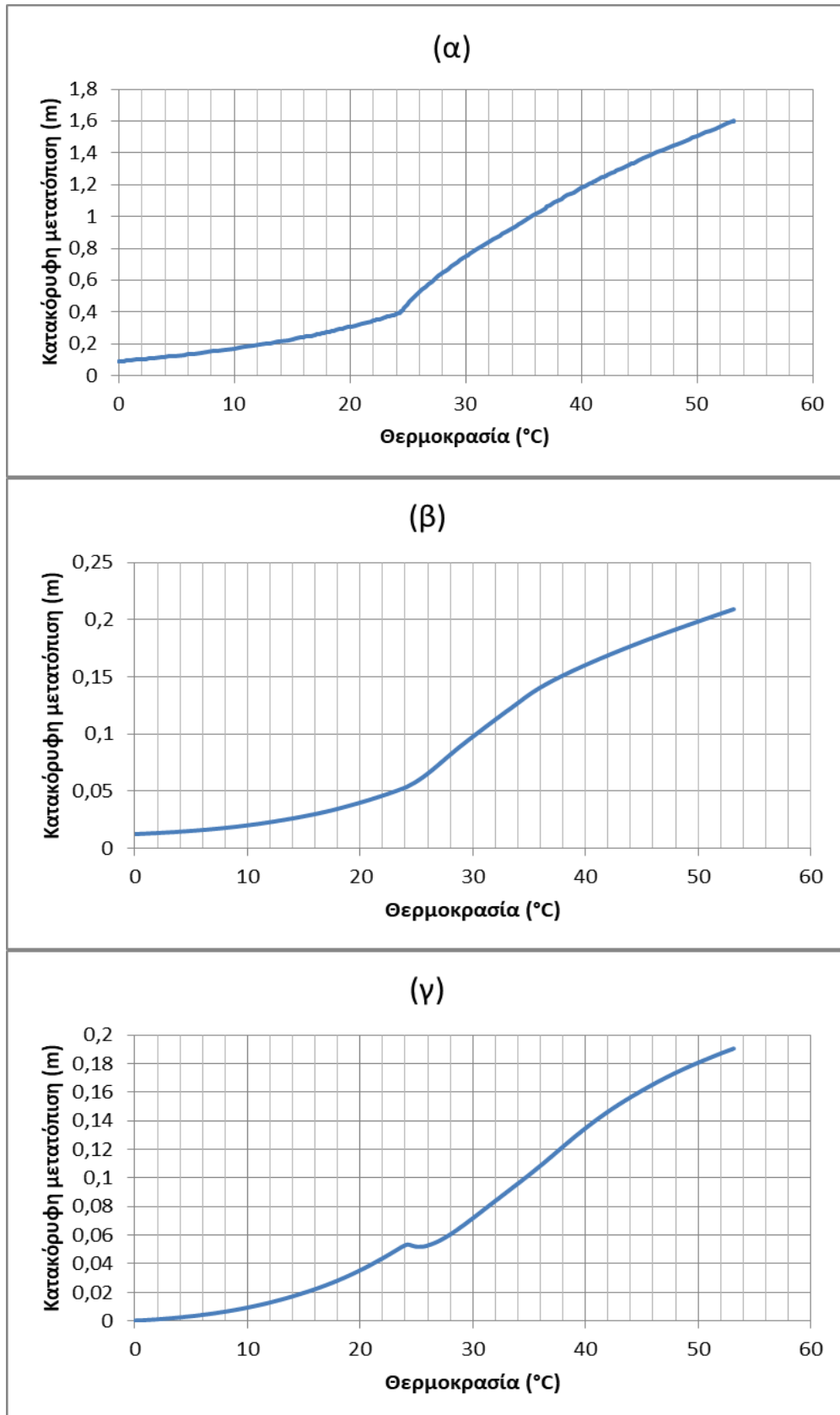
Το Σχήμα 4-55 παρουσιάζει την εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης των κρίσιμων σημείων A, B και C με τη θερμοκρασία. Παρατηρείται ότι η κρίσιμη θερμοκρασία για την ανάπτυξη λυγισμού είναι 24,1 °C. Ο τοπικός λυγισμός στο σημείο A ξεκίνησε όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του σημείου ήταν ίση με $u_{z,cr} = 0,39$ m. Στα σημεία B και C ξεκίνησε για κατακόρυφη μετακίνηση $u_{z,cr}$ 0,05 m και 0,05 m, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-53. Κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού (Άμμος με γωνία τριβής 43°).



Σχήμα 4-54. Κατανομή της κατακόρυφης μετατόπισης της (α) άνω και (β) κάτω ίνας του αγωγού σε διάφορες χρονικές στιγμές (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) (Άμμος με γωνία τριβής 43°).



Σχήμα 4-55. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης του σημείου (α) Α, (β) Β και (γ) C με τη θερμοκρασία (Άμμος με γωνία τριβής 43°).

Κεφάλαιο 5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας από τοπικό λυγισμό γίνεται υπολογίζοντας τις μέγιστες αναπτυσσόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής του αγωγού. Κάνοντας χρήση των ορίων που ορίζονται από τον Ευρωκώδικα 3, για τον αγωγό του προβλήματος, η κρίσιμη τιμή της θλιπτικής παραμόρφωσης είναι $\varepsilon_{cr} = 0,007$. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η ελάχιστη (θλιπτική) κύρια πλαστική παραμόρφωση έχει ξεπεράσει σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις την τιμή αυτή. Εξάιρεση αποτελεί η «σκληρή» άργιλος συνοχής 200 kPa, για την οποία η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση έφτασε στο 0,002.

Στους Πίνακες 5-1 και 5-2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εξέλιξης της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, σε διάφορες χρονικές στιγμές, για αργιλικά και αμμώδη εδάφη.

Πίνακας 5-1. Εξέλιξη της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, για αργιλικά εδάφη

c (kPa)	Μέγιστη θλιπτική πλαστική παραμόρφωση					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
20	0,011	0,129	0,230	0,388	0,411	0,335
30	0,010	0,152	0,294	0,376	0,382	0,378
50	0,010	0,131	0,225	0,267	0,301	0,310
80	0,010	0,067	0,189	0,203	0,209	0,238
200	0	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002

Πίνακας 5-2. Εξέλιξη της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης στην κρίσιμη διατομή του αγωγού, για αμμώδη εδάφη

φ (degrees)	Μέγιστη θλιπτική πλαστική παραμόρφωση					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
33	0,012	0,169	0,218	0,266	0,324	0,328
38	0,011	0,138	0,232	0,283	0,328	0,340
43	0,012	0,103	0,156	0,194	0,238	0,238

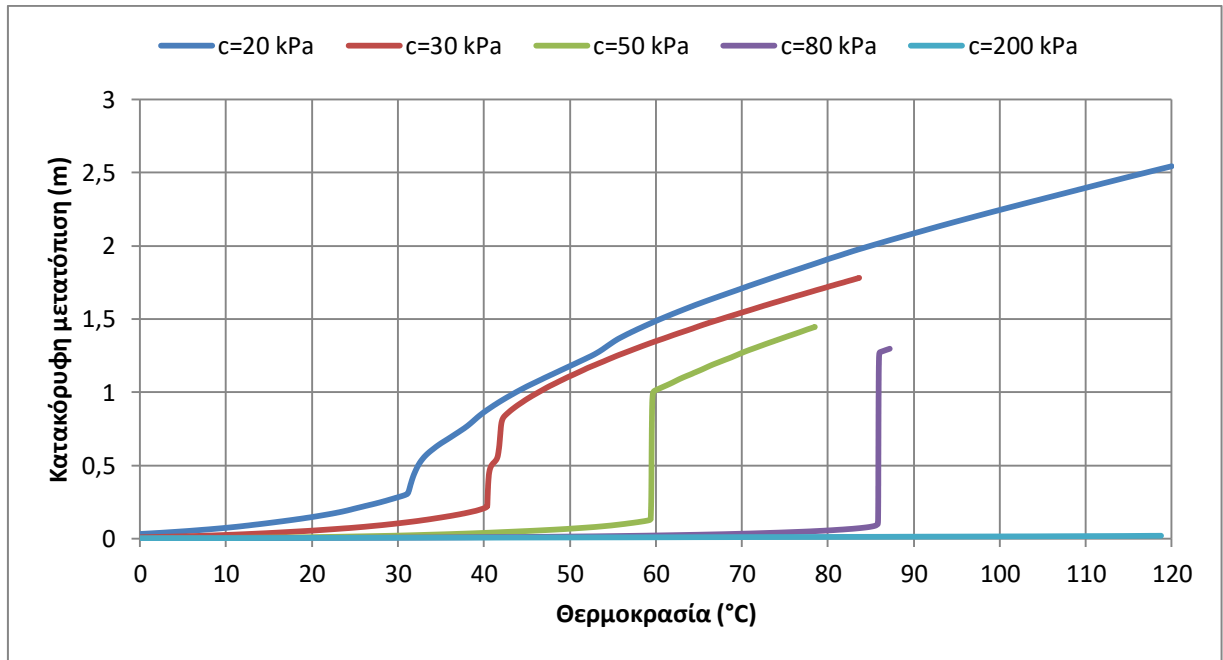
Παρατηρείται ότι μεγαλύτερες θλιπτικές παραμορφώσεις έχουν εκδηλωθεί για τις σχετικά μαλακές αργίλους συνοχής 20 kPa και 30 kPa, ενώ για μεγαλύτερες τιμές συνοχής οι πλαστικές παραμορφώσεις ήταν μικρότερες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό της σκληρής αργίλου, συνοχής 200 kPa, για την οποία εμφανίστηκαν αρκετά μικρές παραμορφώσεις. Συνεπώς, από τα αποτελέσματα φαίνεται καθαρά η επίδραση της συνοχής του εδάφους στην ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων στον αγωγό, και κατ' επέκταση αστοχίας λόγω λυγισμού.

Όσον αφορά τα αμμώδη εδάφη, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά για τη χαλαρή ($\varphi=33^\circ$) και μέση άμμο ($\varphi=38^\circ$), ως προς τις μέγιστες θλιπτικές παραμορφώσεις, ενώ μικρότερες τιμές για την πυκνή άμμο ($\varphi=43^\circ$).

Στους Πίνακες 5-3 και 5-4 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων θερμοκρασιών καθώς και της θέσης των κρίσιμων σημείων για την έναρξη του τοπικού λυγισμού, όπως αυτά προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις σε αργιλικά και αμμώδη εδάφη.

Πίνακας 5-3. Κρίσιμες θερμοκρασίες και έναρξη τοπικού λυγισμού αγωγού σε αργιλικά εδάφη

c (kPa)	T_{cr} (°C)	Max $u_{z,cr}$ για τοπικό λυγισμό στα κρίσιμα σημεία (m)			Απόσταση BC (m)
		A	B	C	
20	31,3	0,33	0,05	0,12	23,0
30	40,4	0,23	0,04	0,06	22,2
50	59,4	0,14	0,04	0,03	18,5
80	85,6	0,09	0,03	0,01	16,2
200	-	-	-	-	-

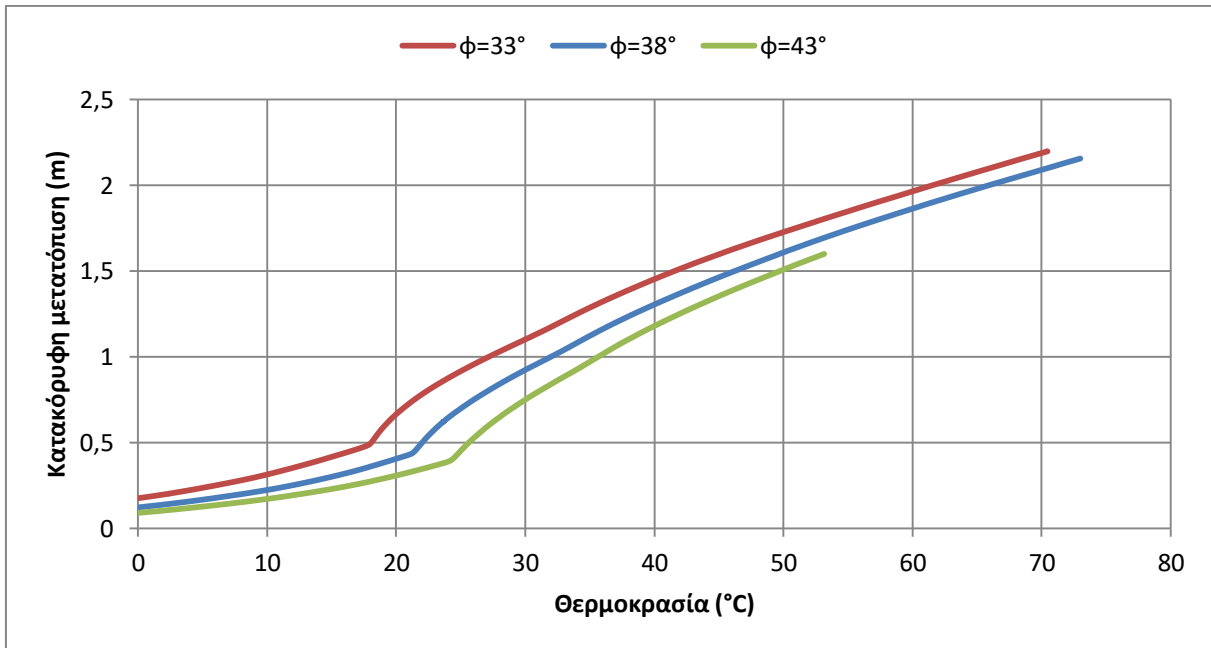


Σχήμα 5-1. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης με τη θερμοκρασία του αγωγού σε αργιλικά εδάφη, όπου φαίνεται η έναρξη του τοπικού λυγισμού.

Για τα αργιλικά εδάφη, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για μικρότερη συνοχή σημειώνεται μεγαλύτερη ανύψωση του αγωγού κατά την τελική του παραμόρφωση. Πράγματι, για συνοχή $c=20, 30, 50$ και 80 kPa, ο αγωγός ανυψώνεται στα 2.61, 1.86, 1.55 και 1.39 m, αντίστοιχα. Επίσης, μειώνοντας τη συνοχή, μειώνεται και η απόσταση του σημείου A από το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας A_0 στην άνω γωνία του αγωγού. Επιπλέον τα αποτελέσματα δείχνουν, ότι αυξάνοντας τη συνοχή του εδάφους αυξάνεται και η κρίσιμη θερμοκρασία για την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού. Τη στιγμή που ξεκινάει ο τοπικός λυγισμός, τα κρίσιμα σημεία έχουν σημειώσει μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση για μικρότερη συνοχή. Ακόμη μειώνοντας τη συνοχή, αυξάνεται η απόσταση των τοπικών λυγισμών στα σημεία B και C.

Πίνακας 5-4. Κρίσιμες θερμοκρασίες και έναρξη τοπικού λυγισμού αγωγού σε αμμώδη εδάφη

φ (degrees)	T_{cr} (°C)	Μαx $u_{z,cr}$ για τοπικό λυγισμό στα κρίσιμα σημεία (m)			Απόσταση BC (m)
		A	B	C	
33	17,8	0,49	0,05	0,04	35,2
38	21,5	0,45	0,06	0,05	32,6
43	24,1	0,39	0,05	0,05	31,0



Σχήμα 5-2. Εξέλιξη της κατακόρυφης μετατόπισης με τη θερμοκρασία του αγωγού σε αμμώδη εδάφη, όπου φαίνεται η έναρξη του τοπικού λυγισμού.

Για τα αμμώδη εδάφη δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την κάθε ανάλυση. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι αυξάνοντας τη γωνία τριβής αυξάνεται (όχι πολύ) η κρίσιμη θερμοκρασία για την έναρξη του τοπικού λυγισμού. Ακόμη τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο κατακόρυφος λυγισμός συμβαίνει στην ίδια ακριβώς θέση (αρκετά κοντά στο σημείο της μέγιστης καμπυλότητας στην άνω γωνία του αγωγού) και για τα τρία υλικά.

Επιπλέον, σε αντίθεση με τα συνεκτικά εδάφη στα οποία παρατηρείται απότομη εκτίναξη του αγωγού κατά την έναρξη του λυγισμού (Σχήμα 5-1), στα μη συνεκτικά εδάφη η ανύψωση αυτή συμβαίνει πιο ομαλά, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία (Σχήμα 5-2). Αξίζει να αναφερθεί ότι η άμμος όντας μη συνεκτικό εδαφικό υλικό δε μπορεί να παραλάβει εφελκυσμό. Αποτέλεσμα είναι να χάνει την φέρουσα ικανότητα της και να παρουσιάζει μια απομειωμένη αντοχή για την παραλαβή κατακόρυφων φορτίων. Επιπλέον, οι υπάρχουσες τάσεις, που δημιουργούν την αντοχή, δεν είναι σημαντικές (μικρό βάθος εγκιβωτισμού) και επομένως η αντίσταση της άμμου ώστε να ανέβει ο αγωγός είναι μικρότερη. Έτσι η άμμος φαίνεται να υποχωρεί σταδιακά λόγω της μικρής της αντοχής.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή διερευνήθηκε, μέσω παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων, το φαινόμενο του ολικού λυγισμού, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης, υπόγειου μεταλλικού αγωγού φυσικού αερίου, διερχόμενου από πρανές.

Με την κατασκευή κατάλληλου προσομοιώματος και λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους – αγωγού δόθηκε έμφαση στη μελέτη της επίδρασης των γεωτεχνικών παραγόντων στην ανάπτυξη του ολικού λυγισμού, μέσα από τον προσδιορισμό των θλιπτικών παραμορφώσεων και των κρίσιμων θερμοκρασιών. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η επίδραση της συνοχής σε πέντε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη με τιμές συνοχής να κυμαίνονται μεταξύ 20 kPa και 200 kPa, ενώ η ίδια αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική μελέτη του συστήματος και για μη συνεκτικά εδάφη, και συγκεκριμένα για τρία είδη άμμου με γωνίες τριβής μεταξύ 33° και 43°. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε μορφές διαγραμμάτων της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης και κατακόρυφης μετατόπισης στην κρίσιμη διατομή και της κατακόρυφης μετατόπισης με τη θερμοκρασία του αγωγού.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση είναι τα ακόλουθα:

1. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του ολικού λυγισμού, αρχικά ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει πρώτα στο σημείο που παρατηρείται η μεγαλύτερη ανύψωση του αγωγού, κοντά στη θέση μέγιστης καμπυλότητας στην άνω γωνία του αγωγού, και ακολουθούν στη συνέχεια δύο άλλοι τοπικοί λυγισμοί εκατέρωθεν του αρχικού.
2. Στα αργιλικά εδάφη αυξάνεται σημαντικά η κρίσιμη θερμοκρασία για την έναρξη του τοπικού λυγισμού, με την αύξηση της συνοχής της αργίλου.

3. Μεγαλύτερη ανύψωση του αγωγού παρατηρείται, μειώνοντας τη συνοχή της αργίλου.
4. Η αύξηση της γωνίας τριβής στα αμμώδη εδάφη, οδηγεί σε (σχετικά μικρή) αύξηση της αντίστασης του εδάφους σε ολικό λυγισμό.
5. Στα αργιλικά εδάφη παρατηρείται εκτίναξη του αγωγού στην κρίσιμη θερμοκρασία, ενώ η άμμος υποχωρεί σταδιακά λόγω της μικρής αντοχής του υπερκείμενου εδάφους, σε σχέση με την άργιλο.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για τη διερεύνηση του ολικού θερμικού λυγισμού δίνεται η δυνατότητα επέκτασης της παρούσας διατριβής και εξαγωγής νέων συμπερασμάτων με χρήση παραμέτρων και παραδοχών, είτε ίδιων με αυτών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, είτε νέων και διαφορετικών. Μερικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση είναι:

- Η μελέτη του φαινομένου σε διαφορετικές κλίσεις
- Η επίδραση της εσωτερικής πίεσης
- Τα χαρακτηριστικά του αγωγού
- Το βάθος εγκιβωτισμού
- Το περιβάλλον έδαφος. Η προσομοίωση έγινε με το εδαφικό υλικό που περιβάλλει τον αγωγό να έχει τις ίδιες ιδιότητες με το υπόλοιπο έδαφος. Στην πραγματικότητα όμως, η εδαφική ζώνη γύρω από τον αγωγό είναι δυνατό να είναι χαλαρότερου (μη συνεκτικού) υλικού, και για το λόγο αυτό αξίζει να διερευνηθεί η επίδραση του εδάφους εγκιβωτισμού.

Βιβλιογραφία

1. ABAQUS (Version 6.13) (Software) (2013) Providence, RI, USA: Dassault Systemes Simulia Corporation.
2. Cheuk, C. Y., White, D. J., and Bolton, M. D. 2008. "Uplift mechanisms of pipes buried in sand."
3. Clough, R.W., and Woodward, R.J. 1967. "Analysis of Embankment Stresses and Deformations" Soil Mechanics & Foundation Division, ASCE, 93, 529-549.
4. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 4-3: Pipelines
5. Hetenyi, Z. 1946. "Beams on elastic foundation", Ann Arbor: The University of Michigan Press.
6. Hobs, R.E. 1984. "In-service buckling of heated pipelines", Journal of Transportation Engineering.
7. Li S-R, and Batra, R.C. 2007. "Thermal buckling and postbuckling of Euler-Bernoulli Beams supported on nonlinear elastic foundations", AIAA Journal.
8. Liu, R., and Yan, S. 2013. "Brief history of upheaval buckling studies for subsea buried pipeline."
9. Massalas, Ch., Tzivanidis, G., and Katsikadelis, J. 1978. "Buckling of a continuous beam resting on a tensionless elastic foundation", The Franklin Institute.
10. Newson, T., and Deljoui, P. 2006. "Finite-element modeling of upheaval buckling of buried offshore pipelines in clayey soils." In Soil and rock behavior and modeling, 351–358.
11. O' Rourke, M.J., and Liu, X. 1999. "Response of buried pipelines subjected to earthquake effects. Monograph No. 3", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.

12. Saadawi, H. 2001. "Upheaval buckling of gas injection pipelines onshore Abu Dhabi—A case study." In Middle East oil show. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
13. Song, Xi., and Li, S-R. 2007. "Thermal buckling and post-buckling of pinned-fixed Euler Bernoulli beams on an elastic foundation", Elsevier.
14. Taylor, N., and Gan, A.B. 1986. "Submarine pipeline buckling – imperfection studies", Thin-Walled Structures.
15. Tsatsis, A., Gelagoti, F., and Gazetas, G. 2018. "Performance of a buried pipeline along the dip of a slope experiencing accidental sliding" *Geotechnique*, 68 (11), 968 – 988.
16. Vazouras, P., Tsatsis, A., and Dakoulas, P. 2020. "Thermal Upheaval Buckling of Buried Pipelines: Experimental Behavior and Numerical Modeling".
17. Wang, J., Eltahir, A., Jukes, P., Sun, J., and Wang, F. S. 2009. "Latest developments in upheaval buckling analysis for buried pipelines." In Proc., Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 594–602.
18. Wang, J., Haigh, S. K., and Thusyanthan, N. I. 2015. "Pipe-Soil interaction mechanism during pipeline upheaval buckling in loose saturated sand." In Proc., 3rd Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics Frontiers in Offshore Geotechnics III, 459–464.
19. Yun, H.D., and Kyriakides, S. 1990. "On the beam and shell modes of buckling of buried steel pipelines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
20. Yun, H.D. and Kyriakides, S. 1990. "A model of beam-mode buckling of buried pipelines" *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol 111.
21. Θεοδωρικάκη, Μ. 2018. "Προσομοίωση της ευστάθειας πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες και της συνεπακόλουθης καταπόνησης διερχόμενων αγωγών", Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
22. Καλφαντής, Π. 2014. "Διερεύνηση καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών", Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

23. Καρβέλης, Α. 2015. “Διερεύνηση τοπικού λυγισμού κυλινδρικών κελυφών και μεταλλικών αγωγών”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
24. Μουλοπούλου, Δ-Α. 2017. “Υπολογιστική προσομοίωση της απόκρισης υποθαλάσσιων αγωγών υδρογονανθράκων υπό πλευρική εδαφική μετατόπιση λόγω κατολισθήσεως”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
25. Ντακούλας, Π., Βαζούρας, Π., Καραμάνος, Σ. 2008. “Έντατική κατάσταση και οριακή αντοχή υπόγειων χαλύβδινων αγωγών σε ενεργά ρήγματα”, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Άρθρο 2029, Αθήνα.
26. Τρύφωνος, Κ. 2017. “Διερεύνηση καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
27. Χρήστου, Λ. 2015. “Απλοποιημένη μεθοδολογία απόκρισης υπόγειου αγωγού υποβαλλόμενου σε ανάστροφο ή κανονικό ρήγμα”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.