



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**«Καθολικός θερμικός λυγισμός υπόγειων μεταλλικών
αγωγών λόγω υψηλής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης»**

Υπό
ΚΑΡΡΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

Βόλος, 2022

[ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ]

© 2022 Καρράς Αντώνιος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας 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. Πολυνίκης Βαζούρας Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
---------------------------------	---

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

Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
------------------	--

Καθολικός θερμικός λυγισμός υπόγειων μεταλλικών αγωγών λόγω υψηλής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης

Καρράς Αντώνιος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Βαζούρας Πολυνίκης

Περίληψη

Οι αγωγοί που μεταφέρουν φυσικό αέριο είναι δυνατόν να υποστούν λυγισμό λόγω των σημαντικών θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης του μεταφερόμενου υγρού. Επομένως, προκύπτει κίνδυνος όσον αφορά την λειτουργικότητα και την ασφάλεια του αγωγού σε συνδυασμό πάντοτε με τις εκάστοτε οικονομικές κυρώσεις. Η εργασία αυτή, πραγματεύεται τον θερμικό λυγισμό υπογείου μεταλλικού αγωγού λόγω της θερμοκρασίας και της εσωτερικής πίεσης μέσα από μία σειρά παραμετρικών αναλύσεων. Το σύστημα εδάφους-αγωγού προσομοιώνεται με την χρήση τρισδιάστατων και επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων και εξετάζεται η συμπεριφορά του αγωγού για διαφορετικές παραμέτρους συνοχής, μέτρου ελαστικότητας, εσωτερικής πίεσης και πάχους αγωγού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων παραμόρφωσης κατά μήκος του αγωγού καθώς και κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία.

Λέξεις-κλειδιά: Καθολικός λυγισμός, Υπόγειος Αγωγός, Θερμοκρασία, Εσωτερική Πίεση,

Thermal upheaval buckling of buried steel pipelines due to high temperature and internal pressure

KARRAS ANTONIOS

Department of Civil Engineering, University of Thessaly, 2022

Supervisor: Dr Polynikis Vazouras

Abstract

Pipelines transporting natural gas may experience upheaval buckling due to substantial compressive forces induced by high temperature and pressure of the fluid content. Therefore comes forward the hazard regarding the operability and safety of the pipeline combined with the financial consequences from this action. This dissertation is about the upheaval buckling of a buried steel pipe due to temperature and internal pressure through a series of numerical analyses. The pipeline-soil system is simulated by finite elements. The goal of this dissertation is to investigate the behavior of the pipeline for various parameters such as cohesion, Young's modulus, internal pressure and thickness of the pipeline. The results conducted from the analyses are represented in the form of diagrams of plastic strain versus pipeline length and vertical displacement versus pipeline temperature.

Keywords: Upheaval buckling , Buried pipeline , temperature, internal pressure

<u>Κεφάλαιο 1^ο</u>	1
<u>1.1 Εισαγωγή</u>	1
<u>1.2 Αγωγοί μεταφοράς</u>	3
<u>1.2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή</u>	3
<u>1.2.2 Τύποι αγωγών μεταφοράς</u>	5
<u>1.2.3 Σχεδιασμός, Κανονισμοί και υλικά κατασκευής αγωγών</u>	6
<u>1.3 Καταπονήσεις, Υδραυλικές δοκιμές και θέση εγκατάστασης</u>	8
<u>1.3.1 Καταπονήσεις</u>	8
<u>1.3.2 Υδραυλική δοκιμή αγωγών</u>	9
<u>1.3.3 Θέση εγκατάστασης αγωγών</u>	11
<u>1.4 Λειτουργία, προστασία, επιθεώρηση και συντήρηση αγωγών μεταφοράς</u>	19
<u>1.4.1 Λειτουργία και ανίχνευση διαρροών</u>	12
<u>1.4.2 Προστασία αγωγών</u>	14
<u>1.4.3 Επιθεώρηση και συντήρηση αγωγών</u>	15
<u>1.5 Υποθαλάσσιοι αγωγοί</u>	17
<u>Κεφάλαιο 2^ο</u>	20
<u>2.1 Θερμικός λυγισμός αγωγών</u>	20
<u>2.2 Αριθμητικά μοντέλα μελέτης θερμικού λυγισμού αγωγών</u>	23
<u>2.3 Αναλυτικά μοντέλα μελέτης θερμικού λυγισμού αγωγών</u>	24
<u>2.4 Πειραματικά μοντέλα μελέτης θερμικού λυγισμού αγωγών</u>	26
<u>Κεφάλαιο 3^ο</u>	28
<u>3.1 Μεθοδολογία μελέτης</u>	28
<u>3.2 Μοντέλο Abaqus</u>	28
<u>3.3 Βασικά στοιχεία της ανάλυσης</u>	29
<u>3.3 Βασικά στοιχεία της ανάλυσης</u>	29
<u>3.4 Χαρακτηριστικά αναλύσεων</u>	33
<u>Κεφάλαιο 4^ο</u>	34
<u>4.1 Έδαφος συνοχής C= 20 kPa</u>	34
<u>4.1.1 Μέτρο ελαστικότητας E= 5 MPa</u>	34
<u>4.1.2 Μέτρο ελαστικότητας E= 10 MPa</u>	41
<u>4.1.3 Μέτρο ελαστικότητας E= 25 MPa</u>	47

<u>4.2 Έδαφος συνοχής $C = 40 \text{ kPa}$</u>	54
<u>4.2.1 Μέτρο ελαστικότητας $E = 5 \text{ MPa}$</u>	54
<u>4.2.2 Μέτρο ελαστικότητας $E = 10 \text{ MPa}$</u>	60
<u>4.2.3 Μέτρο ελαστικότητας $E = 25 \text{ MPa}$</u>	67
<u>4.3 Εσωτερική πίεση $P = 10 \text{ MPa}$</u>	72
<u>4.4 Πάχος $t = 0.009525 \text{ m}$</u>	78
<u>4.5 Πάχος $t = 0.00635 \text{ m}$</u>	83
<u>Κεφάλαιο 5^ο</u>	89
<u>5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων</u>	89
<u>5.2 Συμπεράσματα</u>	94
<u>Βιβλιογραφία</u>	95

Κεφάλαιο1^ο

1.1 Εισαγωγή

Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο παρέχουν το 60% του πρωτογενούς καυσίμου στον κόσμο. Επομένως, δεν αποτελεί έκπληξη το ότι υπάρχουν πάνω από ένα εκατομμύριο τόνοι πετρελαίου και 250 εκατομμύρια m³ αερίου που καταναλώνονται κάθε ώρα σε όλο τον κόσμο. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του πετρελαίου και του φυσικού αερίου μεταφέρεται με αγωγούς. Οι μεγαλύτεροι από αυτούς τους αγωγούς ονομάζονται αγωγοί μεταφοράς (Εικ. 1.1). Το ευρύ κοινό δεν έχει οπτική επαφή με τους αγωγούς καθώς είτε βρίσκονται κάτω από τη θάλασσα είτε είναι στο υπέδαφος στην ξηρά, αλλά αποτελούν τις κύριες αρτηρίες των συστημάτων μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Συνήθως έχουν μεγάλη διάμετρο και λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις για να επιτρέπουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς. Σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και λειτουργούν σύμφωνα με καθιερωμένα πρότυπα επειδή τα προϊόντα που μεταφέρουν μπορεί να αποτελέσουν σημαντικό κίνδυνο για τον περιβάλλοντα πληθυσμό και το περιβάλλον, αλλά ο συνδυασμός καλού σχεδιασμού, υλικών και πρακτικών λειτουργίας εξασφαλίζει ότι οι αγωγοί μεταφοράς θα λειτουργούν με αποδεκτή ασφάλεια.



Εικ. 1.1 Αγωγοί μεταφοράς που κατασκευάζονται στην Ευρώπη

Όλοι οι αγωγοί πρέπει να διασφαλίζουν:

- i. **Ασφάλεια.** Πρέπει να έχει αποδεκτά χαμηλό συντελεστή κινδύνου για τον περιβάλλοντα πληθυσμό.
- ii. **Συμμόρφωση με κώδικες και νομοθεσία.** Πρέπει να τηρούνται εθνικά πρότυπα και κώδικες. Ελλείψει αυτών μπορούν να υιοθετούνται ευρωπαϊκά-διεθνή πρότυπα.
- iii. **Ασφάλεια εφοδιασμού.** Το προϊόν πρέπει να παραδίδεται με συνεχή τρόπο, για να την ικανοποίηση των αναγκών των κάτοχων του προϊόντος (αποστολείς) και των τελικών χρηστών (πελάτες). Επίσης πρέπει να υπάρχει χαμηλός κίνδυνος αποτυχίας μεταφοράς.
- iv. **Χαμηλό Κόστος- Υψηλή Αποτελεσματικότητα.** Το προϊόν πρέπει να παραδίδεται σε ελκυστική τιμή αγοράς και να ελαχιστοποιείτε ο κίνδυνος της επιχείρησης. Αυτά επιτυγχάνονται διασφαλίζοντας ότι ο αγωγός έχει σχεδιαστεί σωστά και δεν παρουσιάζει δομική αστοχία λόγω διάτρησης, υπερφόρτωσης, λυγισμού, κόπωσης ή θραύσης.

Η δομική ακεραιότητα των αγωγών ξεκινά με καλές πρακτικές σχεδιασμού και κατασκευής, οι οποίες θα εξαλείψουν τους περισσότερους πιθανούς τρόπους αστοχίας. Το γεγονός όμως ότι οι αγωγοί πολλές φορές λειτουργούν και τοποθετούνται σε περιβάλλοντα με ιδιαίτερες συνθήκες καταπόνησης, δημιουργεί συνεχείς βλάβες και αστοχίες κατά τη χρήση τους. Επομένως, για να γίνει κατανοητή και να ελεγχθεί η δομική ακεραιότητα των αγωγών κατά τη λειτουργία πρέπει να ελεγχθεί η αιτία των βλαβών. Η εμφάνιση και η συμπεριφορά των βλαβών - αστοχιών αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας και ανάπτυξης για περισσότερα από 35 χρόνια.

1.2 Αγωγοί μεταφοράς

1.2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Οι πρόγονοί μας χρησιμοποιούσαν ξύλινους και πήλινους σωλήνες πριν από πολλούς αιώνες: οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν σωλήνα μπαμπού για να μεταδώσουν φυσικό αέριο για να φωτίσουν την πρωτεύουσά τους, το Πεκίνο, ήδη από το 400 π.Χ. και πριν από 1.000 χρόνια, Ιρακινές γυναίκες ανάγκασαν τους άντρες τους να κατασκευάσουν αγωγούς για να τους σώσουν από τη μεταφορά νερού από τα πηγάδια. Οι Ρωμαίοι χρησιμοποίησαν μολύβδινους σωλήνες για τη διανομή νερού σε πολύ ανεπτυγμένες πόλεις το 500 π.Χ. και η χρήση αγωγών από χάλυβα ή σίδηρο ξεκίνησε στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1820 όταν χρησιμοποιήθηκαν βαρέλια από χυτοσίδηρο που είχαν απομείνει από τους πολέμους για τη μεταφορά αερίου από άνθρακα.

Την ίδια εποχή (1821), χρησιμοποιήθηκαν κούφιοι κορμοί στις ΗΠΑ για τη μεταφορά φυσικού αερίου που χρησιμοποιούνταν για φωτισμό, αλλά μόλις το 1843 χρησιμοποιήθηκε σιδερένιος σωλήνας για τη μείωση των προφανών κινδύνων. Η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου άρχισε να χρησιμοποιεί για πρώτη φορά αγωγούς χάλυβα στις ΗΠΑ στα μέσα του 1800. Εκείνες τις μέρες το λάδι μεταφέρονταν σε βαρέλια στα ποτάμια με φορτηγίδες κινούμενες από άλογα. Αυτό ήταν επικίνδυνο επειδή οι καιρικές και εργατικές διαμάχες συχνά διέκοπταν τη ροή. Ο σιδηρόδρομος έλυσε αυτό το πρόβλημα, αλλά το πετρέλαιο ελέγχονταν πλέον από τα αφεντικά των σιδηροδρόμων.

Το 1879 κατασκευάστηκε στην Πενσυλβανία μια γραμμή μήκους 173 χιλιομέτρων (108 μίλια), διαμέτρου 152 χιλιοστών (6 ιντσών) για τη μεταφορά αργού πετρελαίου

σε βυτιοφόρα για την αγορά της Νέας Υόρκης και 12 χρόνια αργότερα κατασκευάστηκε ο πρώτος αγωγός μεγάλων αποστάσεων υψηλής πίεσης. Ο αγωγός μείωσε το κόστος μεταφοράς του πετρελαίου από \$3 σε \$1 ανά μίλι.

Αρχικά, όλοι οι χαλύβδινοι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του αγωγού έπρεπε να συνδεθούν με σπείρωμα. Αυτό ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθεί για μεγάλους σωλήνες και ήταν πιθανό να παρουσιάσουν διαρροή υπό υψηλή πίεση. Η εφαρμογή της συγκόλλησης για την ένωση σωλήνων στη δεκαετία του 1920 κατέστησε δυνατή την κατασκευή στεγανών αγωγών υψηλής πίεσης και μεγάλης διαμέτρου. Οι αγωγοί μεγάλων αποστάσεων πρωτοστάτησαν στις ΗΠΑ τη δεκαετία του 1940 λόγω των ενεργειακών απαιτήσεων αυτών των χρόνων του πολέμου, και τώρα οι περισσότερες χώρες σε όλο τον κόσμο διαθέτουν ένα σύστημα αγωγών μεταφοράς. Αυτά τα συστήματα κυμαίνονται από σχετικά μικρά (το ΗΒ έχει 3104 km αγωγών μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου) έως πολύ μεγάλους (οι ΗΠΑ έχουν πάνω από 5105 km αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου). ΗΕικ.1.2 δείχνει έναν σύγχρονο αγωγό μεταφοράς στα τελικά στάδια κατασκευής.



Εικ.1.2 Υπό κατασκευή αγωγός στο Ηνωμένο Βασίλειο

1.2.2 Τύποι αγωγών μεταφοράς

Υπάρχουν πολλοί τύποι αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου:

- i. **Αγωγοί ροής και συγκέντρωσης.** Αυτοί οι αγωγοί μικρού μήκους συγκεντρώνουν ποικιλία προϊόντων σε μια περιοχή και τα μεταφέρουν σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Συνήθως έχουν μικρή διάμετρο (50–305 mm)
- ii. **Αγωγοί τροφοδοσίας.** Αυτοί οι αγωγοί μεταφέρουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο σε υγρή μορφή από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, αποθήκευσης κ.λπ., στις κύριες γραμμές μεταφοράς. Μπορούν να έχουν διάμετρο έως 508 mm (20 in).
- iii. **Αγωγοί μεταφοράς.** Αυτοί είναι οι κύριοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι γραμμές μεταφοράς φυσικού αερίου συνήθως παραδίδουν προϊόν στην στη βιομηχανία ή σε ένα σύστημα διανομής, ενώ οι γραμμές μεταφοράς αργού πετρελαίου μεταφέρουν διαφορετικούς τύπους προϊόντων σε διυλιστήρια ή εγκαταστάσεις αποθήκευσης.
- iv. **Αγωγοί προϊόντων.** Οι αγωγοί που μεταφέρουν προϊόντα διύλισης πετρελαίου από τα διυλιστήρια στα κέντρα διανομής ονομάζονται αγωγοί προϊόντων.
- v. **Αγωγοί διανομής.** Αυτοί οι αγωγοί επιτρέπουν τοπική διανομή χαμηλής πίεσης από ένα σύστημα μετάδοσης. Οι γραμμές διανομής μπορεί να έχουν μεγάλη διάμετρο, αλλά οι περισσότερες έχουν διάμετρο κάτω από 152 mm (6 ίντσες).

1.2.3 Σχεδιασμός, Κανονισμοί και υλικά κατασκευής αγωγών

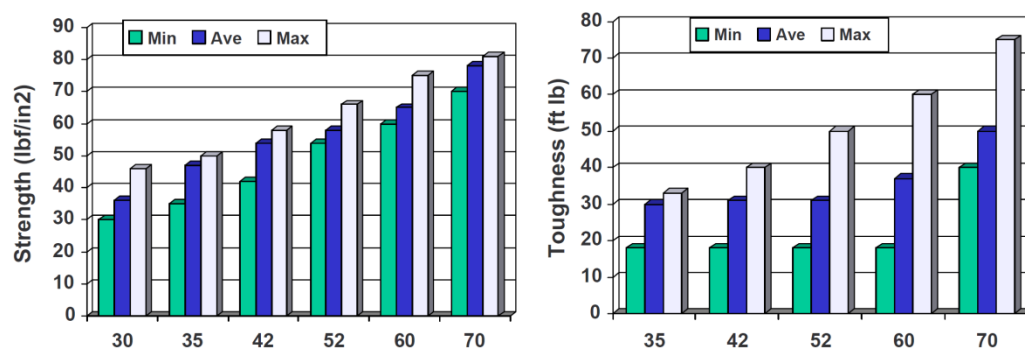
Ο πρωταρχικός ρόλος του σχεδιασμού του αγωγού είναι η ασφάλεια. Οι περισσότεροι αγωγοί μεταφοράς έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τα πρότυπα της Αμερικανικής Εταιρείας Μηχανολόγων Μηχανικών (American Society of Mechanical Engineers ASME). Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των αγωγών συνήθως ρυθμίζονται ή υπόκεινται σε τοπικούς νόμους. Στο ΗΒ, οι αγωγοί καλύπτονται από τους Κανονισμούς Ασφάλειας Αγωγών του 1996, οι οποίοι περιγράφουν λεπτομερώς τις απαιτήσεις σχεδιασμού, κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης για τους αγωγούς.

Οι αγωγοί μεταφοράς κατασκευάζονται με συγκόλληση χαλύβδινων σωλήνων. Ο αγωγός είναι γνωστός από τη διάμετρό του, το πάχος του τοιχώματος, τον τύπο συγκόλλησης (είτε διαμήκως συγκολλημένος, σπειροειδής συγκόλληση ή χωρίς ραφή) και κατηγορία χάλυβα. Για παράδειγμα, η κατηγορία X60 έχει μια ελάχιστη καθορισμένη αντοχή διαρροής 414 N/mm² (6104 lbf/in²).

Η Εικ.1.4 δίνει ορισμένες τυπικές αντοχές για αγωγούς λειτουργίας στις ΗΠΑ. Ο υψηλότερος βαθμός σε χρήση στις αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα είναι ο X80. Η σκληρότητα (η ικανότητα του χάλυβα να αντέχει την παρουσία ρωγμών) είναι επίσης σημαντική. Οι σύγχρονοι χάλυβες μπορούν να έχουν σκληρότητα Charpy 300 J (221 ftlb), αλλά οι παλαιότεροι χάλυβες συνήθως έχουν πολύ χαμηλότερη σκληρότητα.



Εικ. 1.3 Συνεργεία συγκόλλησης αγωγών σε αγωγό στην Αμερική



Εικ. 1.4 Παραλλαγές στην αντοχή διαρροής και την αντοχή σε κρούση παλαιότερων χαλύβδινων αγωγών μεταφοράς στις ΗΠΑ (Eiberetal., 2000).

1.3 Καταπονήσεις, Υδραυλικές δοκιμές και θέση εγκατάστασης

1.3.1 Καταπονήσεις

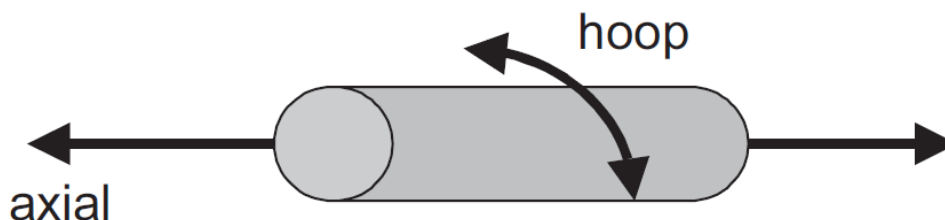
Οι αγωγοί πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν ποικίλα φορτία, που κυμαίνονται από τα υψηλά φορτία που παρουσιάζονται κατά την κατασκευή (π.χ. κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης στην ανοικτή θάλασσα) και κατά τη λειτουργία. (π.χ. λόγω παγετού).

Ωστόσο, η κύρια τάση στους περισσότερους αγωγούς είναι αυτή που προκαλείται από την εσωτερική πίεση και αυτή η περιφερειακή τάση είναι συνήθως το κύριο θέμα σχεδιασμού. Πίεση είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που ασκείται από το μέσο στον σωλήνα.

Οι περισσότεροι κώδικες σχεδίασης αγωγών χρησιμοποιούν εξωτερική διάμετρο στον τύπο υπολογισμού της περιφερειακής τάσης. Αυτός είναι ένας συντηρητικός τρόπος υπολογισμού. Μια ακριβέστερη εξίσωση περιφερειακής τάσης (χρησιμοποιώντας τόσο την εσωτερική όσο και την εξωτερική διάμετρο) δίνει ως αποτέλεσμα τιμές περιφερειακής τάσης έως και 5% μειωμένες σε σχέση με τον παραπάνω απλό τύπο. Σύμφωνα με τα πρότυπα του ASME χρησιμοποιείται ονομαστικό (καθορισμένο) πάχος τοιχώματος στην τάση σχεδιασμού του υπολογισμού.

Η πίεση προκαλεί και μια περιφερειακή και μια αξονική τάση, οι οποίες κατ'επέκταση προκαλούν ογκομετρική διαστολή στον αγωγό. Η μέγιστη επιτρεπόμενη περιφερειακή τάση σε αγωγούς σε όλο τον κόσμο είναι 72% SMYS (SMYS: Καθορισμένη ελάχιστη τάση διαρροής – Specified minimum yield strength) αν και υπάρχουν ορισμένοι αγωγοί που λειτουργούν με υψηλότερους συντελεστές (π.χ. ο μέγιστος συντελεστής σχεδιασμού στους καναδικούς αγωγούς είναι 0,8). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι κωδικοί αγωγών επιτρέπουν υπερπίεση συνήθως 10% πάνω από αυτήν τη μέγιστη τάση, επομένως, ένας αγωγός στο 72% SMYS μπορεί να αντιμετωπίσει υπερπίεση έως και 79% SMYS. Ο ανωτέρω συντελεστής σχεδιασμού

είναι ταυτόχρονα συντελεστής ασφάλειας επιτρέποντας τη μεταβλητότητα στα υλικά και τις κατασκευαστικές πρακτικές καθώς και αβεβαιότητες στις συνθήκες φόρτισης και συνθήκες λειτουργίας.



Εικ. 1.5 Η επίδραση της πίεσης σε έναν αγωγό που προκαλεί περιφερειακή και αξονική τάση.

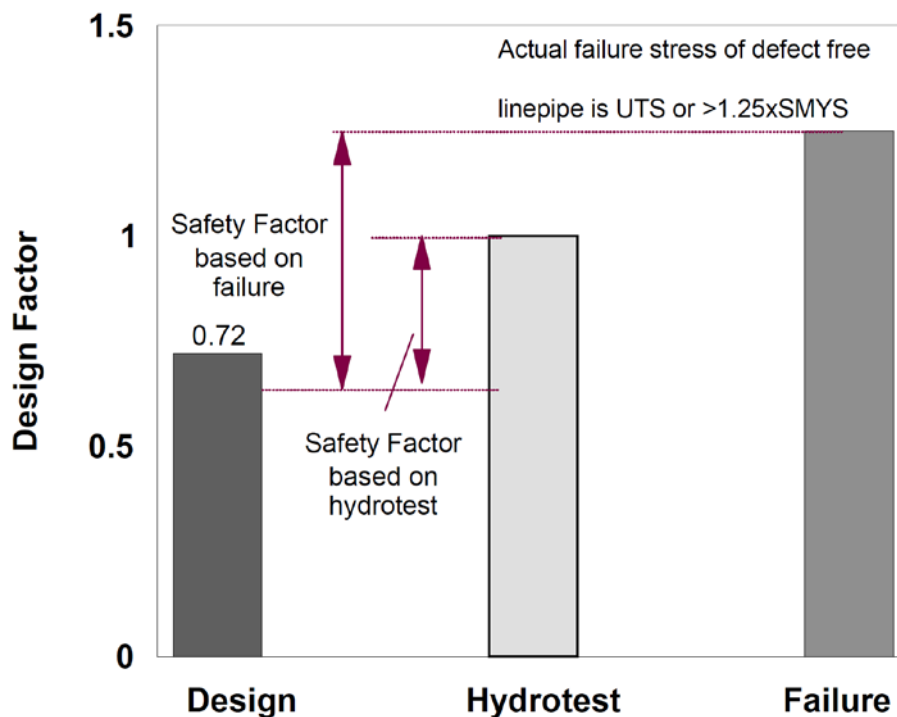
1.3.2 Υδραυλική δοκιμή αγωγών

Οι αγωγοί μπορούν να ελεγχθούν υδραυλικά πρεσάροντας τους με νερό σε υψηλότερη τάση από αυτή της πραγματικής λειτουργίας. Αυτή η δοκιμή έχει τη μορφή υδροστατικής δοκιμής, πριν από τη εκκίνηση της λειτουργίας, σε υψηλά επίπεδα καταπόνησης (π.χ. 100% SMYS για αγωγούς αερίου στις ΗΠΑ). Η δοκιμή διασφαλίζει ότι έχουμε ένα «εγγυημένο» περιθώριο ασφάλειας κατά την έναρξη λειτουργίας (εικ.1.6). Η ιδέα και η αξία της υδροστατικής δοκιμής των αγωγών μεταφοράς ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1950, όταν η Texas Eastern Transmission Company στις ΗΠΑ θέλησε αλλάξει την χρήση των αγωγών έκτακτης ανάγκης που είχαν κατασκευαστεί για τον πόλεμο σε αγωγούς φυσικού αερίου (Kiefner and Maxey, 2000). Πριν από οποιαδήποτε δοκιμή, αυτοί οι αγωγοί απέτυχαν συχνά κατά τη λειτουργία τους λόγω των αρχικών κατασκευαστικών ελαττωμάτων στον σωλήνα γραμμής. Τα εργαστήρια Battelle Columbus στις ΗΠΑ πρότειναν ότι αυτές οι γραμμές θα πρέπει να υποβάλλονται σε υδραυλική δοκιμή πριν από τη μετατροπή τους.

Συνήθως μια υδραυλική δοκιμή συντήρησης θα διεξάγεται σε πίεση 1,25 φορές τη μέγιστη πίεση σχεδιασμού. Η υδραυλική δοκιμή είναι πλέον ευρέως αποδεκτή για τους ακόλουθους ελέγχους :

- (i) Έλεγχος για διαρροές.
- (ii) Έλεγχος της αντοχής του αγωγού
- (iii) Υπόδειξη ελαττωμάτων του αγωγού για επισκευή τους (όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο πίεσης στη δοκιμή, τόσο περισσότερα ελαττώματα είναι πιθανό να εμφανιστούν). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται τη διάρκεια της επακόλουθης κόπωσης, μειώνοντας υπολειπόμενες τάσεις.
- (iv) Υπόδειξη ελαττωμάτων προερχόμενων από θερμές εργασίες που έχουν λάβει χώρα στον αγωγό.

Η υδραυλική δοκιμή χρησιμοποιήθηκε αρχικά (με αποτυχία) για την ανίχνευση ελαττωμάτων του αρχικού αγωγού κατασκευής, αλλά οι σύγχρονοι αγωγοί είναι συνήθως απαλλαγμένοι από αυτά τα ελαττώματα καθώς πλέον είναι εξασφαλισμένη η υψηλή ποιότητα πριν από την παράδοση. Επομένως, ο πρωταρχικός ρόλος της υδραυλικής δοκιμής σήμερα είναι μια δοκιμή διαρροής, όχι μια δοκιμή αντοχής.



Εικ. 1.6 Περιθώριο ασφαλείας κατά την έναρξη ζωής ενός αγωγού. Η τάση αστοχίας ενός σωλήνα χωρίς ελαττώματα ($r60$) είναι τουλάχιστον 1,25 SMYS αλλά δεν μπορεί να υπερβαίνει το UTS (Ultimate tensile strength) (Leis and Thomas, 2001).

1.3.3 Θέση εγκατάστασης αγωγών

Οι περισσότερες χώρες έχουν νόμους ή κανονισμούς που απαιτούν την κατασκευή αγωγών που μεταφέρουν επικίνδυνα προϊόντα σε περιοχές είτε μακριά από τον τοπικό πληθυσμό είτε σε περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας. Αυτό διασφαλίζει ότι ο αγωγός λειτουργεί σε έναν ασφαλή «διάδρομο» και οι συνέπειες οποιασδήποτε αστοχίας είναι περιορισμένες.

Οι κώδικες αγωγών αντιμετωπίζουν τους αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου διαφορετικά. Για αγωγούς πετρελαίου:

- i. Συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη η πυκνότητα πληθυσμού στη θέση των αγωγών.
- ii. Δεν υπάρχει καθορισμένη απόσταση από τα κατοικημένα κτίρια και
- iii. Είναι γενικά δυνατή η κατασκευή ενός αγωγού πετρελαίου με υψηλό συντελεστή σχεδιασμού στις περισσότερες τοποθεσίες.

Ωστόσο, για αγωγούς που μεταφέρουν ένα πιο επικίνδυνο προϊόν όπως το φυσικό αέριο:

- i. λαμβάνεται υπόψη η πυκνότητα του πληθυσμού·
- ii. καθορίζεται μια ελάχιστη απόσταση («εγγύτητα») από τα κατοικημένα κτίρια
- iii. ο συντελεστής σχεδιασμού μειώνεται σε κατοικημένες περιοχές

1.4 Λειτουργία, προστασία, επιθεώρηση και συντήρηση αγωγών μεταφοράς

1.4.1 Λειτουργία και ανίχνευση διαρροών

Οι σύγχρονοι αγωγοί μεγάλων αποστάσεων λειτουργούν κυρίως αυτόματα από υπολογιστές στα κεντρικά γραφεία των εταιρειών διαχείρισης αγωγών. Οι υπολογιστές παρακολουθούν την πίεση, τους ρυθμούς ροής και άλλες παραμέτρους σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του σωλήνα, εκτελούν πολλούς υπολογισμούς on-line και στέλνουν εντολές στο πεδίο για τον έλεγχο της λειτουργίας των βαλβίδων και των αντλιών.

Συχνά απαιτείται χειροκίνητη παρέμβαση για την τροποποίηση της αυτόματης λειτουργίας, όπως όταν διαφορετικές παρτίδες καυσίμων κατευθύνονται σε διαφορετικές δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης ή όταν το σύστημα πρέπει να απενεργοποιηθεί ή να επανεκκινηθεί. Ο αγωγός συνήθως είναι εφοδιασμένος με κάποιο είδος συστήματος ανίχνευσης διαρροών που θα επιτρέπει την ταχεία απόκριση σε περίπτωση βλάβης του αγωγού.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων:

- i. **Απλά συστήματα (ακρόαση, όσφρηση ή οπτικά).** Τα απλά συστήματα περιλαμβάνουν πτήσεις πάνω από τον αγωγό, επιθεώρηση με οχήματα ή με περιπολίες και την αναζήτηση ενδείξεων αποχρωματισμένης βλάστησης γύρω από τον αγωγό ή την ακρόαση ή την όσφρηση. Αυτού του είδους η ανίχνευση διαρροής πραγματοποιείται από μέλη του προσωπικού που εργάζονται κοντά σε αγωγό (π.χ. σε υπεράκτια πλατφόρμα) ή από μέλη του πληθυσμού που ζουν κοντά ή διέρχονται από αγωγούς.

- ii. **Ισορροπία ροής (ότι εισέρχεται, πρέπει να εξέρχεται).** Απλά ισοζύγια ροής στις γραμμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση διαρροών. Αυτό περιλαμβάνει τη μέτρηση των εισροών και των εξόδων ενός αγωγού. Η απώλεια προϊόντος προσδιορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του αποθέματος σταθερής κατάστασης του συστήματος και των στιγμιαίων ροών εισόδου και εξόδου.
- iii. **Ακουστικές μέθοδοι (οι διαρροές είναι θορυβώδεις).** Ο θόρυβος που σχετίζεται με μια διαρροή μπορεί να ανιχνευθεί. Αυτές οι συχνότητες, που προκαλούνται από κραδασμούς, μπορεί να έχουν συχνότητες άνω των 20 kHz. Τα συστήματα ανίχνευσης μπορούν να στερεωθούν σε έναν αγωγό και σημειώνοντας την ισχύ του σήματος, μπορεί να εντοπιστεί με ακρίβεια η πηγή της διαρροής.
- iv. **Μοντελοποίηση αγωγών (θεωρία έναντι πράξης).** Η μοντελοποίηση αγωγών σε πραγματικό χρόνο, η οποία προσομοιώνει τη λειτουργία του αγωγού και συγκρίνει συνεχώς το αναμενόμενο με το πραγματικό, μπορεί να προσφέρει τόσο την αντίληψη ύπαρξης όσο και τον εντοπισμό υφιστάμενων διαρροών. Υπάρχουν εμπορικά πακέτα στην αγορά που μπορεί να είναι κατάλληλα για ορισμένες λειτουργίες αγωγών. Το μοντέλο είναι μια μαθηματική αναπαράσταση του αγωγού και θα περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως δεδομένα ανύψωσης, θέσεις βαλβίδων και αντλιών κ.λπ. Το μοντέλο μπορεί στη συνέχεια να υπολογίσει τις αναμενόμενες πιέσεις, ροές κ.λπ. και να τις συγκρίνει με τις μετρούμενες τιμές. Οποιαδήποτε ασυμφωνία μπορεί να είναι διαρροή και μπορεί να ενεργοποιηθούν συναγερμοί διαρροής σε αυτήν την περίπτωση.

Οι διαρροές μπορεί να είναι δύσκολο να ανιχνευθούν και να εντοπιστούν λόγω μεταβατικών φαινομένων στα συστήματα ελέγχου και στη ροή του προϊόντος.

1.4.2 Προστασία αγωγών

Οι αγωγοί έχουν σχεδιαστεί για να προστατεύονται από της συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου ως εξής:

- i. **Εξωτερική διάβρωση.** Ο χάλυβας του σωλήνα πρέπει να διαχωριστεί από το έδαφος ή το υδάτινο περιβάλλον διαφορετικά θα διαβρωθεί. Συνήθως, δεν υπάρχει «επιτρεπόμενο όριο διάβρωσης» για εξωτερική διάβρωση στους αγωγούς (αυξημένο πάχος σωλήνων γραμμής ειδικά για να επιτρέπει προβλέψιμη απώλεια λόγω διάβρωσης). Ως εκ τούτου, η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα γραμμής προστατεύεται χρησιμοποιώντας μια επίστρωση σωλήνα (π.χ. λιθανθρακόπισσα) ως κύρια προστασία, και ένα σύστημα προστασίας από τη διάβρωση είναι η δευτερεύουσα προστασία.
- ii. **Εσωτερική διάβρωση.** Στο στάδιο του σχεδιασμού, μπορεί να εισαχθεί ένα όριο διάβρωσης για την προσαρμογή της προβλέψιμης διάβρωσης κατά τη χρήση. Ωστόσο, είναι προτιμότερο να αποτραπεί η εσωτερική διάβρωση με: επεξεργασία του προϊόντος πριν από την είσοδο στη γραμμή, έλεγχο ποιότητας, καθαρισμό της γραμμής και ανάμειξη χημικών για την αναστολή τυχόν διάβρωσης.
- iii. **Εξωτερική βλάβη.** Οι αγωγοί μπορούν να προστατεύονται από τρίτους με: παχύτερο τοίχωμα σωλήνα, βαθύτερο κάλυμμα (αλλά με προσοχή για τυχόν υπερφόρτωση), εντοπισμό σε απομακρυσμένες περιοχές, τακτικές περιπολίες ή έρευνες της γραμμής, σαφείς σημάνσεις, καλή επικοινωνία με τρίτους συμπεριλαμβανομένου του κοινού, προστατευτικά μέτρα όπως περιβλήματα από σκυρόδεμα και εξοπλισμός ανίχνευσης ζημιών.

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι συχνά εγκλωβισμένοι σε σκυρόδεμα. Αυτή η επίστρωση σκυροδέματος είναι κατά κύριο λόγο μια επίστρωση βάρους αποτρέπει την αιώρηση του αγωγού. Ωστόσο, προσφέρει επιπλέον προστασία από κρούσεις όπως π.χ., από άγκυρες πλοίων.

1.4.3 Επιθεώρηση και συντήρηση αγωγών

Οι κανονισμοί και οι κώδικες αγωγών απαιτούν από έναν φορέα εκμετάλλευσης να συντηρεί και να επιθεωρεί τον αγωγό του σύμφωνα με τα κατάλληλα πρότυπα. Η συντήρηση ενός αγωγού είναι ένα ουσιαστικό μέρος της διατήρησης της συνολικής ακεραιότητας ολόκληρου του συστήματος αγωγών. Ως εκ τούτου, οι αγωγοί επιθεωρούνται και παρακολουθούνται τακτικά χρησιμοποιώντας πολλές άμεσες και έμμεσες τεχνικές. Οι μέθοδοι αποσκοπούν στο να διασφαλίσουν ότι οι αγωγοί δεν θα καταστούν ελαττωματικοί ή κατεστραμμένοι και ότι ανιχνεύονται ζημιές ή ελαττώματα προτού προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα.

Ο χειριστής θα πρέπει να αξιολογήσει τον μεγαλύτερο κίνδυνο ζημιάς/ελαττώματος στον αγωγό και, στη συνέχεια, να επιλέξει μια μέθοδο παρακολούθησης/επιθεώρησης για να μειώσει αυτόν τον κίνδυνο. Ως εκ τούτου, οι χειριστές αγωγών χρησιμοποιούν μια ποικιλία μεθόδων για να διασφαλίσουν ότι οι αγωγοί τους δεν έχουν υποστεί ζημιά ή ότι η ζημιά ανιχνεύεται πριν δημιουργήσει πρόβλημα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι απλώς είτε για την πρόληψη είτε για τον εντοπισμό ζημιών στον αγωγό και τα παραδείγματα δίνονται παρακάτω:

- i. **Περιπολίες.** Οι περιπολίες με αεροσκάφη, οδικά και με πεζές περιπολίες κατά μήκος των διαδρομών του αγωγού μπορούν να ελέγξουν για ανεπιθύμητες ή μη προγραμματισμένες εκσκαφές γύρω από τον αγωγό και καταπάτηση πληθυσμού/κτηρίων. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί επιθεωρούνται τακτικά χρησιμοποιώντας ένα σκάφος έρευνας και σχετικό εξοπλισμό για τον έλεγχο της διαδρομής του αγωγού.
- ii. **Εσωτερική επιθεώρηση.** Οι αγωγοί μπορούν τώρα να επιθεωρηθούν από το εσωτερικό, χωρίς σοβαρή διακοπή της ροής του προϊόντος από «έξυπνα συστήματα» (Εικόνα 8) (intelligentpigs). Αυτά τα συστήματα είναι εξελιγμένα μηχανήματα που συνήθως ταξιδεύουν με το προϊόν και, μέσω συστοιχιών αισθητήρων, καταγράφουν δεδομένα που σχετίζονται με την κατάσταση του σωλήνα. Τα συστήματα αυτά μπορούν να μετρήσουν την

- iii. απώλεια μετάλλων (π.χ. διάβρωση) και τις γεωμετρικές ανωμαλίες (π.χ. βαθουλώματα). Πιο εξειδικευμένα συστήματα μπορούν να χαρτογραφήσουν τον αγωγό και άλλα μπορούν να ανιχνεύσουν ρωγμές.
- iv. **Υπέργειος έλεγχος.** Η κατάσταση του συστήματος αντιδιαβρωτικής προστασίας του αγωγού και η επίστρωσή του μπορούν να προσδιοριστούν εξ αποστάσεως χρησιμοποιώντας μετρήσεις πάνω από το έδαφος. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μπορούν να έχουν παρόμοιες έρευνες που διεξάγονται με χρήση τηλεχειριζόμενων οχημάτων (ROV).
- v. **Έρευνες διαρροών.** Οι διαρροές σε αγωγούς μπορούν να ανιχνευθούν από συστήματα on-line, καθώς και από περιπολίες που μπορεί να δουν αποχρωματισμένη βλάστηση (σε χερσαίες γραμμές) ή ίχνη προϊόντος (σε υποθαλάσσιες γραμμές).
- vi. **Εξειδικευμένες έρευνες.** Οι αγωγοί μπορούν να υποβληθούν σε λεπτομερείς γεωτεχνικές έρευνες για την ανίχνευση καθίζησης κ.λπ., και μπορούν να εξοπλιστούν με μετρητές καταπόνησης για την ανίχνευση υπερβολικής καταπόνησης.
- vii. **Ηλεκτρονική παρακολούθηση ποιότητας.** Ο έλεγχος ποιότητας του προϊόντος και η on-line μέτρηση των ιδιοτήτων του προϊόντος μπορούν να βοηθήσουν στον έλεγχο της εσωτερικής διάβρωσης και διάβρωσης.
- viii. **Υδραυλικές δοκιμές.** Ορισμένοι αγωγοί υποβάλλονται σε περιοδική υδραυλική δοκιμή εν λειτουργία για να αποδειχθεί η ακεραιότητα.
- vi. **Ευαισθητοποίηση του κοινού.** Οι φορείς εκμετάλλευσης αγωγών θα πρέπει να έρχονται σε επαφή με αγρότες, αλιευτικές οργανώσεις κ.λπ., για να διασφαλίσουν ότι οι οργανισμοί που ενδέχεται να εργάζονται γύρω από τους αγωγούς τους γνωρίζουν τη θέση των γραμμών και δεν τις βλάπτουν.

1.5 Υποθαλάσσιοι αγωγοί

Οι περισσότεροι αγωγοί μεταφοράς είναι στην ξηρά, θαμμένοι σε βάθος περίπου 1 m. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα υπεράκτιων (ή υποθαλάσσιων) αγωγών. Κυμαίνονται από αγωγούς σε πολύ ρηχά νερά (λίγα μέτρα), έως πολύ βαθιά: ορισμένοι νέοι αγωγοί σχεδιάζονται να λειτουργήσουν σε πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια.

Αυτοί οι αγωγοί χρησιμοποιούν τον ίδιο σωλήνα και μεταφέρουν παρόμοια προϊόντα, αλλά τα προβλήματα ακεραιότητάς τους και ο τρόπος με τον οποίο τα επιλύουμε μπορεί να διαφέρουν σημαντικά λόγω του περιβάλλοντος τους σε σχέση με τους αγωγούς στην ξηρά:

- i. Υπάρχει περιορισμένη προσβασιμότητα για επιθεώρηση και συντήρηση (π.χ. δεν είναι δυνατή η ανθρώπινη παρέμβαση σε βάθη μεγαλύτερα από 300 m). Το κόστος της επιθεώρησης μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 10 φορές το κόστος της ξηράς.
- ii. Η διαμόρφωση του αγωγού μπορεί να αποτρέψει την εξωτερική επιθεώρηση (π.χ. συστήματα σωλήνα μέσα σε σωλήνα, συγκροτήματα ανύψωσης κ.λπ.).
- iii. Απαιτούνται διαφορετικοί τύποι μεθόδων και εργαλείων επιθεώρησης.
- iv. Οι περισσότεροι υποθαλάσσιοι αγωγοί δεν έχουν εναλλακτική διαδρομή, δηλαδή έχουν δυνητικά αυξημένο κόστος απώλειας παραγωγής.
- v. Υπάρχει αυξημένο κόστος των επισκευαστικών εργασιών, και ως εκ τούτου πιο συχνά είναι οικονομικά αποδοτικό να διεξάγονται αναλυτικές αξιολογήσεις.

- vi. Μπορεί να υπάρχουν περιορισμοί στο χρονοδιάγραμμα λόγω του καιρού και διαθεσιμότητας εξοπλισμού (π.χ. εξειδικευμένα σκάφη).
- vii. Άλλοι χρήστες (ψαράδες, δεξαμενόπλοια κ.λπ.) βρίσκονται συνεχώς κοντά στους αγωγούς δημιουργώντας υψηλό κίνδυνο ζημιάς από τρίτους.

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μπορεί να περιέχουν όλες τις βλάβες που καλύπτονται από τις παραπάνω μεθόδους αξιολόγησης, αλλά επιπλέον μπορεί να περιέχουν:

Ανοίγματα αγωγών.

Ανοίγματα στους αγωγούς υπάρχουν όταν η επαφή μεταξύ του αγωγού και του βυθού χάνεται σε σημαντική απόσταση σε έναν ανώμαλο βυθό. Απαιτείται αξιολόγηση ενός επιτρεπόμενου μήκους ελεύθερου ανοίγματος στο σχεδιασμό του αγωγού.

Εκθέσεις αγωγών

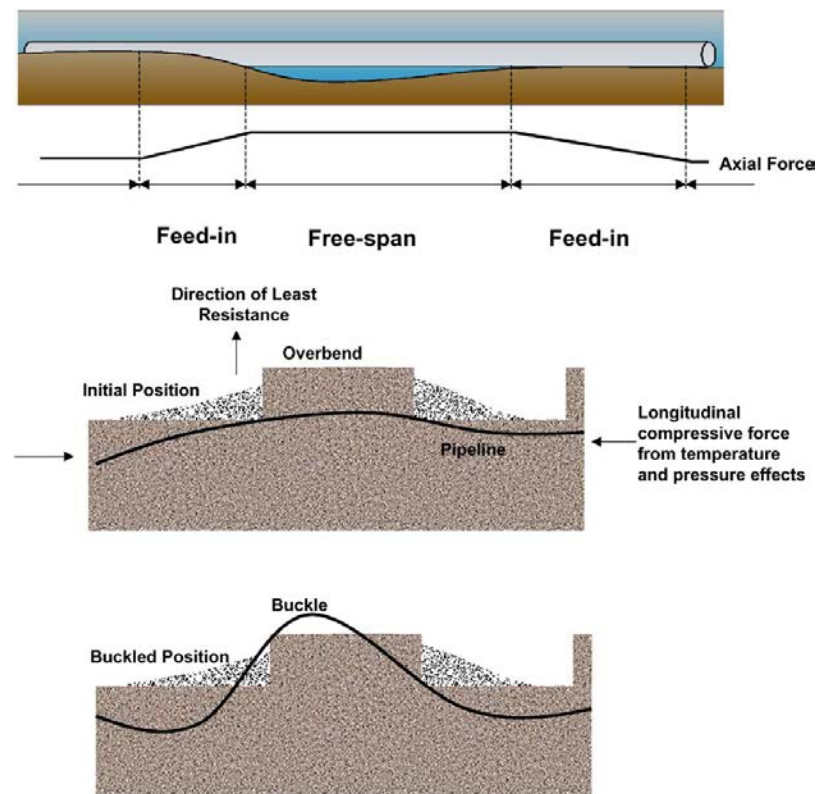
Αυτά είναι τμήματα εκτεθειμένου αγωγού που βρίσκονται σε αυλακωμένο ή προστατευμένο σύστημα αγωγών. Προκαλούνται από την κίνηση του βυθού ή την κίνηση του αγωγού, και μπορεί να είναι ο πρόδρομος ενός ανοίγματος αγωγού. Τα βασικά ζητήματα ακεραιότητας είναι η σταθερότητα, η εξωτερική ζημιά και πιθανώς η θερμική απόδοση.

Λυγισμός.

Σε υποθαλάσσιους αγωγούς είναι δυνατό να λάβει χώρα ο πλευρικός (οριζόντιος) και ο κάθετος λυγισμός. Ο πλευρικός λυγισμός συνήθως συνδέεται με μη θαμμένους αγωγούς σε περιοχές όπου η ευθυγράμμιση είναι καμπύλη, ενώ ο κάθετος λυγισμός θα είναι σε θαμμένους αγωγούς σε γωνίες μεγάλης καμπυλότητας, όπου το προφίλ είναι κυρτό προς τα πάνω.

Προκαλούνται από θερμοκρασία και πίεση, σε συνδυασμό με κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ή παρεμβολές τρίτων. Αναγνωρίζονται από την πλευρική ή κάθετη απόκλιση του αγωγού, συνήθως σε συνδυασμό με την κίνηση του εδάφους. Τα βασικά ζητήματα ακεραιότητας είναι η δομική αστοχία και η αστοχία κόπωσης, βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα.

Τα παραπάνω προβλήματα έκτασης και λυγισμού μπορούν να λυθούν με ανάλυση τάσεων και καθοδήγηση που δίνονται στους κώδικες σχεδιασμού υποθαλάσσιων αγωγών. Ωστόσο, θα απαιτήσουν ακριβή δεδομένα επιθεώρησης και πρόσθετες αναλύσεις, όπως υδραυλικοί υπολογισμοί και υπολογισμοί διεργασίας.



Εικ.1.7 Παράδειγμα ελεύθερου ανοίγματος (πάνω) και λυγισμού σε υποθαλάσσιο αγωγό.

Κεφάλαιο 2^ο

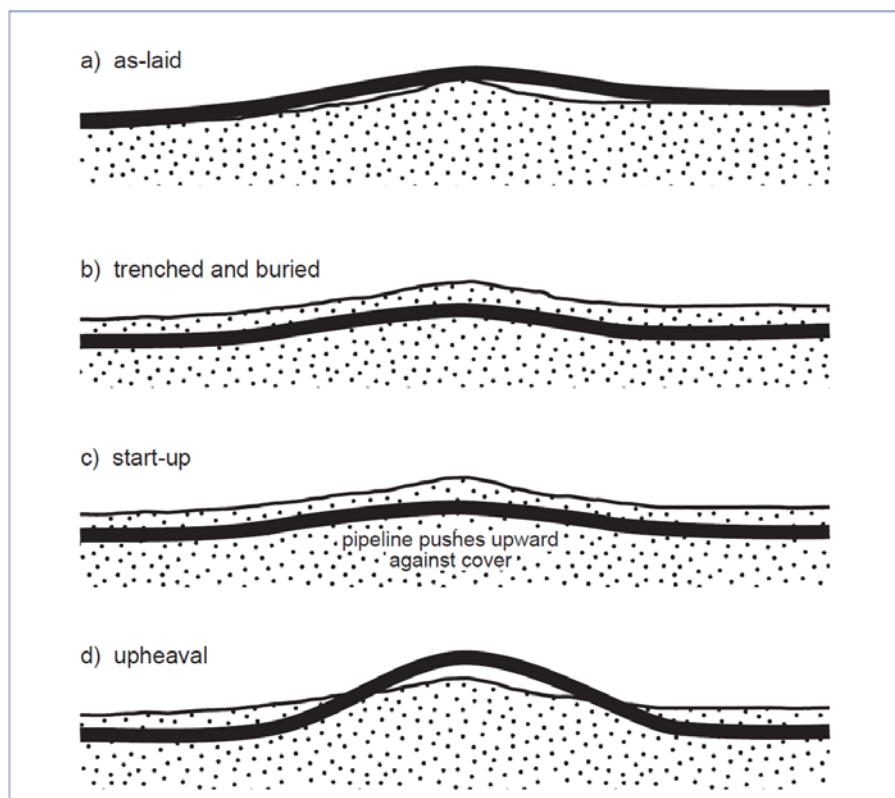
2.1 Θερμικός λυγισμός αγωγών

Οι αγωγοί έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου σε μεγάλες αποστάσεις από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Για να διευκολυνθεί η ροή του ρευστού και να αποφευχθεί οποιαδήποτε στερεοποίηση της περιεκτικότητας σε κερί, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο σε υπεράκτιους αγωγούς πρέπει να μεταφέρονται σε υψηλή πίεση (π.χ. $p_{max} = 70 \text{ MPa}$) και υψηλή θερμοκρασία (π.χ. $\Delta T_{max} = 160^\circ\text{C}$) (Cheuketal. . 2008). Για τους χερσαίους αγωγούς, οι αντίστοιχες τιμές της μέγιστης πίεσης και θερμοκρασίας είναι γενικά μικρότερες (π.χ. $p_{max} = 40 \text{ MPa}$ και $\Delta T_{max} = 80^\circ\text{C}$) (Saadawi 2001). Για τους υπόγειους αγωγούς, οι προκύπτουσες υψηλές πιέσεις μπορεί να οδηγήσουν σε λυγισμό που αποτελεί σημαντική απειλή για τη δομική ακεραιότητα, την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα του αγωγού. Για τους υποθαλάσσιους αγωγούς οι οποίοι ταυτόχρονα είναι τοποθετημένοι υπό του εδάφους, αυτή η απειλή είναι ακόμη μεγαλύτερη. Οι αναφορές για αστοχίες λυγισμού αναφέρουν οριζόντια παραμόρφωση λόγω λυγισμού με εύρος από 24 έως 70 m και πλάτη κάθετης παραμόρφωσης από 0,5 έως 2 m (Liu και Yan 2013· Saadawi 2001).

Ο λυγισμός σε αγωγούς υποδηλώνει τον λυγισμό του αγωγού αν τον θεωρούσαμε ως ράβδο στην οποία υπόκειται σε συμπίεση. Θα μπορούσε να εμφανιστεί προς τα κάτω σε ένα ελεύθερο άνοιγμα, οριζόντια όπως στον πλευρικό λυγισμό ενός αγωγού στον πυθμένα της θάλασσας, ή κατακόρυφα όπως στον λυγισμό των θαμμένων αγωγών . Ο λυγισμός των αγωγών συμβαίνει ως αποτέλεσμα θερμικής φόρτισης και εσωτερικής πίεσης που παράγει αξονικά θλιπτικά φορτία κατά μήκος του αγωγού. Ο πλευρικός λυγισμός συμβαίνει όταν ο αγωγός τοποθετείται στην επιφάνεια του βυθού της θάλασσας. Ο κατακόρυφος λυγισμός συμβαίνει όταν ο αγωγός τοποθετείται κάτω από το έδαφος του βυθού της θάλασσας και διαδίδεται σε κατακόρυφη διεύθυνση.

Όταν η θερμοκρασία και η πίεση ενός αγωγού λειτουργίας είναι υψηλότερη από την αυτή του περιβάλλοντος τριγύρω, ο αγωγός τείνει να διαστέλλεται. Λόγω του ανεπαρκούς χώρου για να επιτραπεί η διαστολή του υπόγειου αγωγού, ο αγωγός αναπτύσσει μια αξονική θλιπτική δύναμη. Εάν η δύναμη που δημιουργείται από τον αγωγό είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη δύναμη που παράγεται από το έδαφος πάνω από τον αγωγό (που εμποδίζει την κίνηση ανύψωσης που δημιουργείται από την θλιπτική δύναμη του αγωγού), τότε ο αγωγός τείνει να κινηθεί προς τα πάνω προκαλώντας κατακόρυφη μετατόπιση του σωλήνα. Η υπερβολική κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού μπορεί τελικά να οδηγήσει σε αστοχία του αγωγού .

Η Εικ.2.1 δείχνει ένα διάγραμμα της κατακόρυφης μετατόπισης (λυγισμού) σε θαμμένους αγωγούς. Το 1α απεικονίζει τον αγωγό που τοποθετείται στον βυθό της θάλασσας. Ο αγωγός στη συνέχεια τοποθετείται υπόγεια, όπως φαίνεται στο 1β. Αυτή η διαδικασία επομένως τροποποιεί το προφίλ θεμελίωσης όπου στηρίζεται ο αγωγός. Κατά τη λειτουργία, όπως απεικονίζεται στ 1γ, η αυξημένη θερμοκρασία και πίεση δημιουργεί μια συμπιεστική αξονική δύναμη που προκαλεί ανύψωση του αγωγού. Η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης κατά τη λειτουργία αναγκάζει τον αγωγό να πιέζει προς τα πάνω το έδαφος, δημιουργώντας λυγισμό του αγωγού όπως φαίνεται στο 1δ.



Εικ.2.1. Ακολουθία γεγονότων που απεικονίζουν λυγισμό σε θαμμένο αγωγό .

Προκειμένου να αποφευχθούν οι επιπτώσεις στον αγωγό από άλλες θαλάσσιες δραστηριότητες, όπως τα δίκτυα αλιείας ή οι άγκυρες πλοίων, και για την ασφάλεια του αγωγού και του περιβάλλοντος, οι αγωγοί συνήθως τοποθετούνται υπόγεια.

Ο θερμικός λυγισμός των αγωγών είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα λυγισμού που, εκτός από την εσωτερική πίεση και θερμοκρασία, εξαρτάται επίσης από τις ιδιότητες του σωλήνα και του εδάφους, το βάθος τοποθέτησης, την αρχική τάση τοποθέτησης, τη γεωμετρία της βάσης της τάφρου και άλλους παράγοντες. Μετά την υπέρβαση μιας ορισμένης τιμής κατακόρυφης εκτροπής, μπορεί να αναπτυχθεί τοπικός λυγισμός, με αποτέλεσμα την αστοχία του τοιχώματος του σωλήνα, μεγάλες πλαστικές καταπονήσεις ή αστοχία λόγω κόπωσης (BouwkampandStephen 1973Sherman 1976, Reddy 1979, GresnigtandvanFoeken 2001). Αρκετές μελέτες από πολλούς ερευνητές έχουν διερευνήσει το θερμικό λυγισμό μέσω πειραμάτων μικρής κλίμακας, καθώς και μαθηματικών και αριθμητικών μοντέλων.

2.2 Αριθμητικά μοντέλα μελέτης θερμικού λυγισμού αγωγών

Οι αριθμητικές μελέτες που έχουν δημοσιευτεί για την μελέτη του θερμικού λυγισμού κάνουν χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για να μοντελοποιήσουν με πιο ρεαλιστικό τρόπο τη γεωμετρία του αγωγού, τη μη γραμμικότητα του υλικού και τις ατέλειες της βάσης της τάφρου. Ο VandenBerghe (2005) χρησιμοποίησε δισδιάστατη (2D) ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά του εδάφους κατά τη μετατόπιση ανύψωσης ενός αγωγού θαμμένου σε άμμο. Διερευνήθηκαν οι μηχανισμοί αστοχίας κατά την λυγισμό. Διαπιστώθηκε ότι η ανύψωση του αγωγού μικρή πυκνότητα εδάφους κυριαρχείται από τοπική αστοχία στον αγωγό.

ΟJung (2013) παρουσίασε μια δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων της συμπεριφοράς ανύψωσης του αγωγού χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και ένα ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας συμβατό με την παραμόρφωση του εδάφους στη μέγιστη αντίσταση ανύψωσης. Το μοντέλο αντιπροσώπευε τη μειωμένη διαστολή και τη μέγιστη γωνία τριβής με το βάθος ενσωμάτωσης του αγωγού και τη ροή του εδάφους κάτω από τον σωλήνα κατά τη μετατόπιση προς τα πάνω. Τα αποτελέσματα δοκιμών μεγάλης κλίμακας και οι αριθμητικές προβλέψεις είχαν πολύ καλή συμφωνία για διάφορες πυκνότητες και βάθη.

ΟRoy (2018) παρουσίασε μια αριθμητική μελέτη της αντίστασης ανύψωσης ενός αγωγού θαμμένου σε πυκνό έδαφος. Βασίστηκε σε ένα τροποποιημένο μοντέλο Mohr-Coulomb που ενσωματώθηκε μέσω μιας υπορουτίνας χρήστη στην έκδοση 6.14/Explicit του Abaqus. Η ανάλυση χρησιμοποίησε προσαρμοστική επανασύνθεση για μεγάλες παραμορφώσεις (Roy 2018). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρείχαν χρήσιμη εικόνα για την εξέλιξη της γωνίας κλίσης των επιπέδων ολίσθησης κατά την μετατόπιση των αγωγών προς τα πάνω. Οι αριθμητικές προβλέψεις της δύναμης ανύψωσης έναντι της κατακόρυφης μετατόπισης στη συμπεριφορά κορυφής και μετά την κορυφή ήταν σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα (Bransbyetal. 2002· Cheuket al. 2008· Eiksundet al. 2013).

Όσον αφορά τη συμπεριφορά κατά τον λυγισμό, οι Newson και Deljouï (2006) χρησιμοποίησαν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να πραγματοποιήσουν μια παραμετρική μελέτη υπεράκτιων αγωγών που είναι ενσωματωμένοι σε έδαφος αργίλου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράγοντες ανύψωσης ήταν παρόμοιοι με αυτούς που έχουν υπολογιστεί στην βιβλιογραφία για τις αγκυρώσεις πλακών.

Ο Wang. (2009) παρουσίασε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του θερμικού λυγισμού των αγωγών που βασίζεται σε μια προσέγγιση διπλούμοντέλου(γενικού-τοπικού), στην οποία ο λυγισμός ερευνάται μόνο τοπικά στην περιοχή που είναι πιο πιθανό να συμβεί, η οποία προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας το γενικό μοντέλο. Εξέτασε διάφορες μεθόδους για τον μετριάσμό του δυνητικού λυγισμού για χερσαίους και υπεράκτιους αγωγούς.

2.3 Αναλυτικά μοντέλα μελέτης θερμικού λυγισμού αγωγών

Ο Hobbs (1984) παρουσίασε μια θεωρητική μελέτη του πλευρικού λυγισμού λόγω αλλαγής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης στην οποία ο αγωγός ήταν μια ελαστική δοκός Euler-Bernoulli. Ο σωλήνας υποβλήθηκε στο ίδιο βάρος του αγωγού και το βάρος του υπερκείμενου εδάφους και στηρίχθηκε σε άκαμπτη βάση με τριβή. Λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο λυγισμού, η αναλυτική λύση παρέχει εκφράσεις για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, το μήκος λυγισμού και τη μέγιστη τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης. Αυτά τα αναλυτικά αποτελέσματα προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες, αλλά αγνοούν την ανελαστική συμπεριφορά τόσο του χάλυβα σωλήνων όσο και του υπερκείμενου εδάφους.

Χρησιμοποιώντας μαθηματική μοντελοποίηση, οι Taylor και Gan (1986) μελέτησαν τον λυγισμό λαμβάνοντας υπόψη τις δομικές ατέλειες, όπως η μη ευθύτητα του βυθού της θάλασσας.

Χρησιμοποιώντας μαθηματική μοντελοποίηση, οι Taylor και Gan (1986) μελέτησαν τον λυγισμό λαμβάνοντας υπόψη τις δομικές ατέλειες, όπως η μη ευθύτητα του βυθού της θάλασσας.

Οι Ju και Kyriakides (1988) παρουσίασαν μια μελέτη για τον θερμικό λυγισμό λαμβάνοντας υπόψη μια άκαμπτη βάση με διαφορετικούς τύπους ατελειών, εξετάζοντας τη συμπεριφορά τόσο του ελαστικού όσο και του ανελαστικού υλικού σωλήνα. Διαπίστωσαν ότι για μεγάλες ατέλειες, μετά την αρχική ανύψωση ο σωλήνας είχε μειωμένη αντίσταση στην παραμόρφωση. Επιπλέον, έδειξαν ότι η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού μπορεί να οδηγήσει σε τοπικό λυγισμό του κελύφους που έχει πιο καταστροφικές συνέπειες. Επειδή τα σημεία έναρξης αστάθειας του υλικού ήταν αρκετά κοντά, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο σχεδιασμός με βάση το όριο ελαστικότητας είναι επαρκής.

Οι Taylor και Tran (1993, 1996) εξέτασαν τρεις τύπους ατελειών του αγωγού με (1) πλήρη επαφή με το έδαφος, (2) μεμονωμένο στήριγμα (ή ανωμαλία σημείου) και (3) μεμονωμένο στήριγμα αλλά με τα κενά γεμάτα με άμμο. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλυτικών μοντέλων συγκρίθηκαν με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.

2.4 Πειραματικά μοντέλα μελέτης θερμικού λυγισμού αγωγών

Οι πειραματικές έρευνες για το φαινόμενο του θερμικού λυγισμού των αγωγών έχουν επικεντρωθεί στην αντίσταση ανύψωσης του σωλήνα, την αξονική δύναμη τριβής και τον λυγισμό. Όσον αφορά την αντίσταση ανύψωσης αγωγού, ο Bransby (2001) διεξήγαγε κλιμακούμενες δοκιμές μοντέλων διερευνώντας τη συμπεριφορά ανύψωσης των θαμμένων υπεράκτιων αγωγών τόσο στο εργαστήριο όσο και σε μια μεγάλη φυγοκεντρική συσκευή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πυκνή και η μη πυκνή άμμος έχουν διαφορετικούς μηχανισμούς παραμόρφωσης λόγω της διαστολής, επηρεάζοντας το μέγεθος των δυνάμεων ανύψωσης. Η ροή του εδάφους μετά την ανύψωση γύρω από τον σωλήνα παρατηρήθηκε τόσο σε δοκιμές χαλαρής άμμου όσο και σε δοκιμές πυκνής άμμου. Η επίδραση της κλίμακας διερευνήθηκε επίσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα δοκιμών μοντέλων που πραγματοποιήθηκαν σε 1 g και σε φυγοκεντρίστη στα 5 g.

Ο Cheuk (2008) χρησιμοποίησε δοκιμές μοντέλων για να διερευνήσουν τους μηχανισμούς αλλαγής της αντίστασης ανύψωσης σωλήνων στην άμμο με βάση τις μετρήσεις παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας σαν εισαγωγή δεδομένων τις εικόνες. Έδειξαν ότι ο μηχανισμός παραμόρφωσης μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερα στάδια: αντίσταση κορυφής, πλήρωση, σχηματισμός ζώνης διάτμησης και ροής τριγύρω. Η μέγιστη αντίσταση ανύψωσης συμβαίνει μέσω του σχηματισμού ενός ανεστραμμένου τραπεζοειδούς μπλοκ, που οριοθετείται από δύο κατανεμημένες ζώνες διάτμησης. Σε μεγάλες μετατοπίσεις σωλήνων, ο παρατηρούμενος μηχανισμός παραμόρφωσης ήταν είτε ένα κατακόρυφο συρόμενο μπλοκ σε συνδυασμό με έναν μηχανισμό ροής γύρω από τον σωλήνα, είτε μια εντοπισμένη ροή τριγύρω χωρίς επιφανειακή ανύψωση, ανάλογα με τη διαστολή του εδάφους. Τα αποτελέσματά τους περιορίστηκαν σε αναλογίες βάθους προς διάμετρο ενσωμάτωσης $H/D=3$, που είναι τυπικό για υπεράκτιους αγωγούς.

Ο Wang (2012) παρουσίασε τα αποτελέσματα 15 εργαστηριακών δοκιμών πλήρους κλίμακας για την αντίσταση ανύψωσης σωλήνων οι οποίοι ήταν ενσωματωμένοι σε αμμώδη και βραχώδη εδάφη για αναλογίες H/D από 0,1 έως 6. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μετατόπιση ποικίλλει γραμμικά όταν $H=D$.

Ο Eiksund (2013) διεξήγαγε δοκιμές πλήρους κλίμακας για να διερευνήσουν το φαινόμενο σε σχέση με το υλικού επίχωσης της τάφρου, που αποτελείται από ένα στρώμα μαλακού, αναμορφωμένου θαλάσσιου πηλού που επικαλύπτεται από ένα στρώμα είτε άμμου είτε θρυμματισμένου βράχου μεταβλητού πάχους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αγωγοί σε ένα στρώμα επίχωσης από μαλακό πηλό είχαν αρχικά μια τοπική αστοχία λειτουργίας με χαμηλή αντίσταση ανύψωσης. Ωστόσο, όταν ο σωλήνας έφτασε στο στρώμα άμμου ή θρυμματισμένου βράχου κατά την ανοδική κίνηση, η αντίσταση ανύψωσης αυξήθηκε σημαντικά. Αυτά τα αποτελέσματα προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το ρόλο του υλικού επίχωσης στον τρόπο παραμόρφωσης. Ωστόσο, τα πειράματα δεν περιλάμβαναν άμεσες μετρήσεις της εξέλιξης των πεδίων μετατόπισης γύρω από τον σωλήνα κατά την ανύψωση.

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Μεθοδολογία μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε τον θερμικό λυγισμό αγωγών. Για την αντίσταση ανύψωσης και τον λυγισμό ενός αγωγού, η συμπεριφορά του εδάφους είναι μια βασική παράμετρος που επηρεάζει το φαινόμενο. Αν και παρόμοιοι τύποι εδαφών μπορεί να παρουσιάζουν κάπως παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης και στα διασταλτικά χαρακτηριστικά τους ανάλογα με την ορυκτολογία των κόκκων, την κατανομή μεγέθους κόκκου κ.λπ. (Bolton 1986).

3.2 Μοντέλο Abaqus

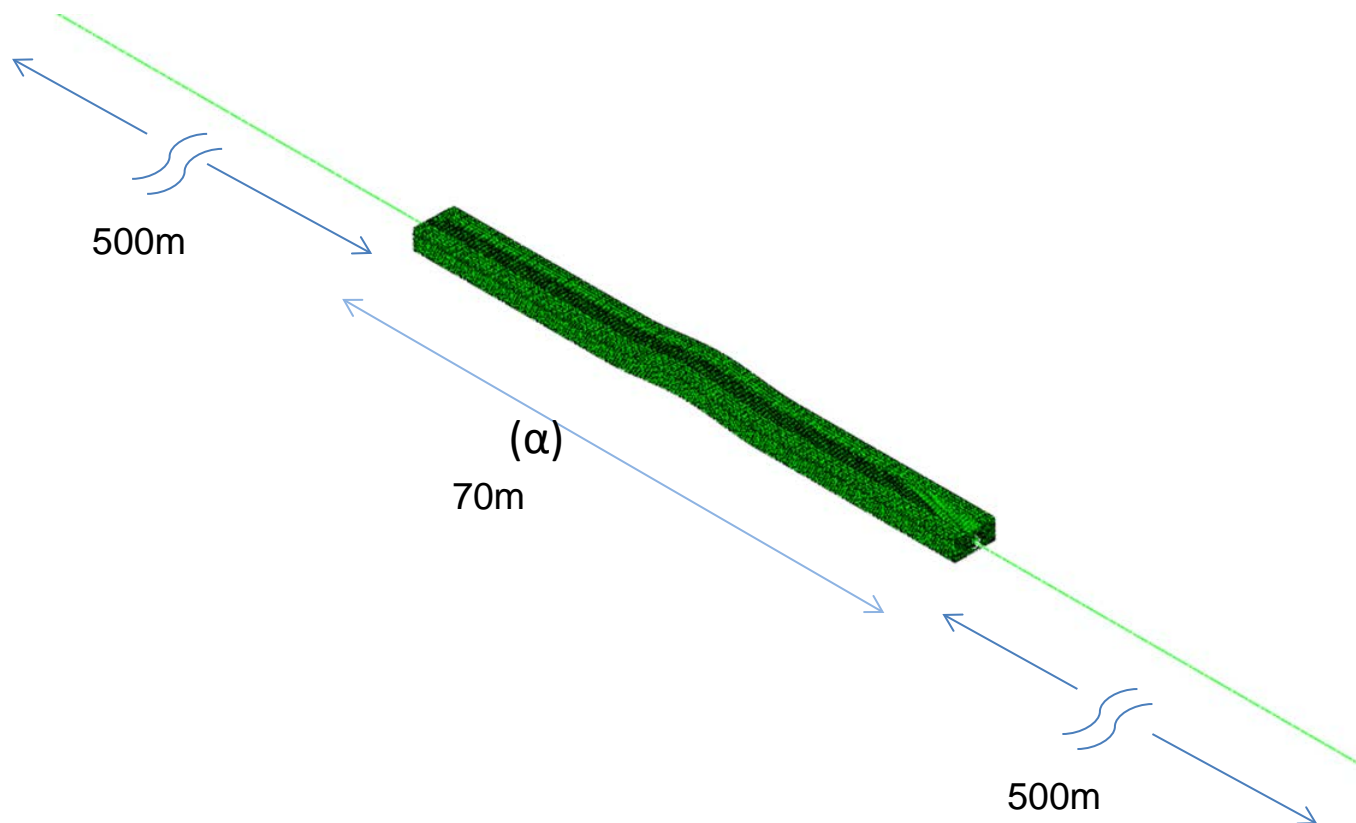
Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης Abaqus (έκδοση 6.14) χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του χαλύβδινου σωλήνα, του περιβάλλοντος εδάφους και την αλληλεπίδρασή τους, λαμβάνοντας υπόψη την ανελαστική συμπεριφορά υλικού χάλυβα και εδάφους και η γεωμετρική μη γραμμικότητα μέσω μιας σύνθεσης μεγάλης παραμόρφωσης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και του αγωγού θεωρήθηκε μέσω ενός αλγόριθμου που προσομοιώνει τη συμπεριφορά τριβής και την ικανότητα για διαχωρισμό της διεπαφής αγωγού-εδάφους.

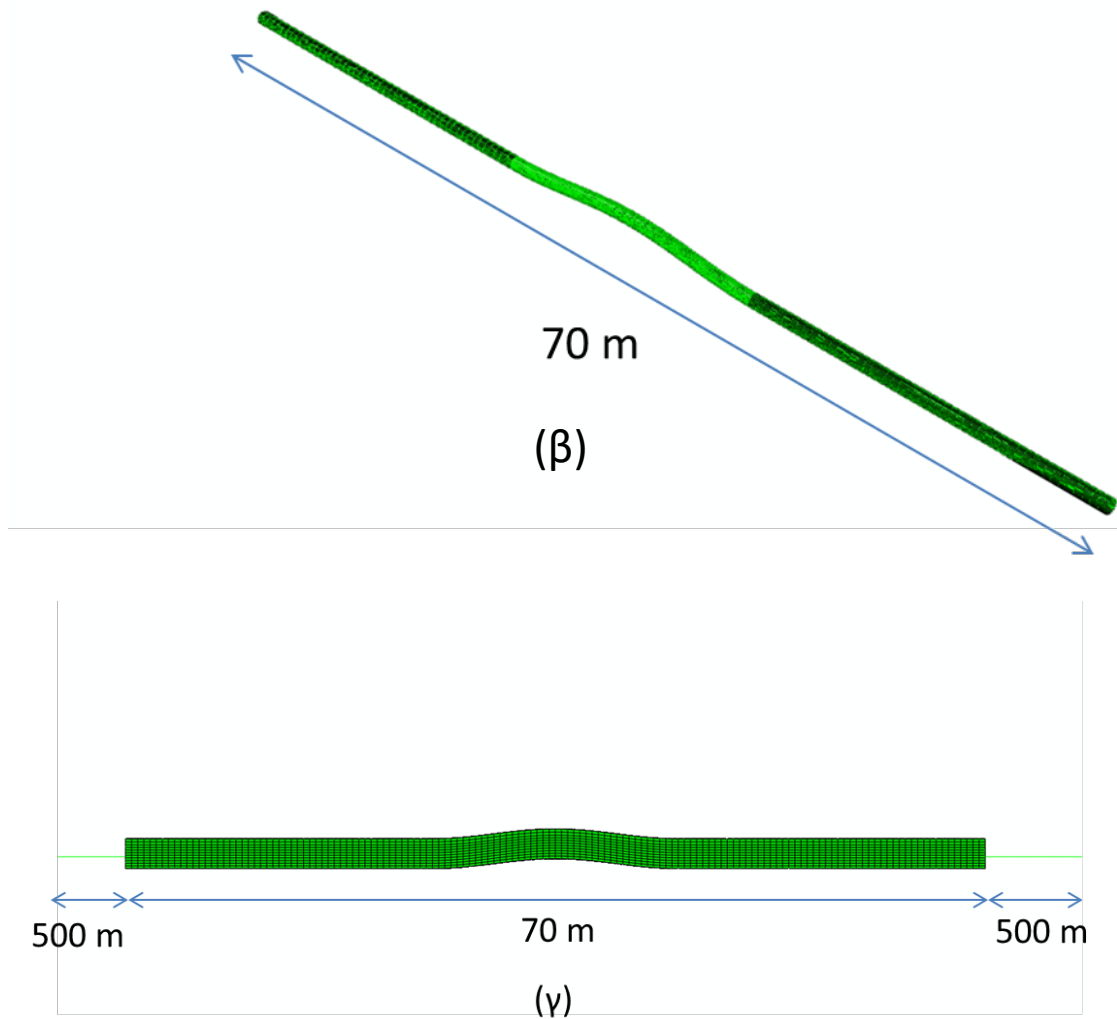
Το Abaqus δημιουργήθηκε αρχικά για την αντιμετώπιση του προβλήματος της μη γραμμικής συμπεριφοράς, και για αυτό τον λόγο διαθέτει μεγάλη γκάμα υλικών προσομοιωμάτων με ελαστοπλαστικές ιδιότητες. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται κατά κόρον σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα λόγω της χρήσης του όσον αφορά την τρισδιάστατη ανάλυση και προσομοίωση των υλικών.

Το Abaqus περιέχει διάφορα προϊόντα αλλά στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται το Abaqus/Standard.

3.3 Βασικά στοιχεία της ανάλυσης

Το μοντέλο του προβλήματος αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη τα οποία και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.1. Στην (α) απεικονίζεται μία διατομή εδάφους που περικλείει τον αγωγό αποτελούμενο από τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία μαζί με τα δύο μοντέλα δοκού-ελατηρίου. Στην (β) απεικονίζεται ο μεταλλικός αγωγός αποτελούμενος από επιφανειακά στοιχεία. Το συνολικό μήκος του αγωγού απεικονίζεται στην εικόνα (γ) και είναι 1070 m εκ των οποίων τα 500 m σε κάθε πλευρά αποτελούν στοιχεία δοκού και τα 70 m αποτελούν το κυρίως μοντέλο στο οποίο γίνεται και η προσομοίωση.



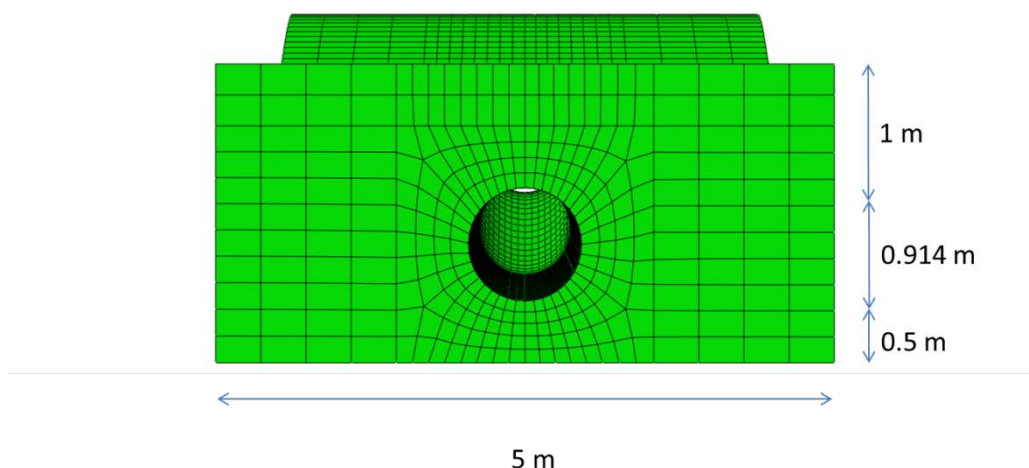


Εικ 3.1. Γεωμετρία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και αναπαριστά το μήκος του αγωγού.

Η διάμετρος είναι ίση με $D = 0.914 \text{ m}$ και πάχος $t = 12.7 \text{ mm}$ (0,5 in). Το πάχος του εδάφους από την επιφάνεια μέχρι το πάνω μέρος του αγωγού είναι 1 m. Το κομμάτι στο οποίο ουσιαστικά θα συμβεί ο τοπικός λυγισμός έχει μήκος 70 m , βάθος 2.414m και πλάτος 5 m (Εικ. 3.2). Στη μεσαία περιοχή, υπάρχει μια αρχική ατέλεια η οποία έχει μεταβλητό ύψος που δίνεται από τον τύπο :

$$V(x) = V_i (\cos (2\pi x/L_i) + 1)/2$$

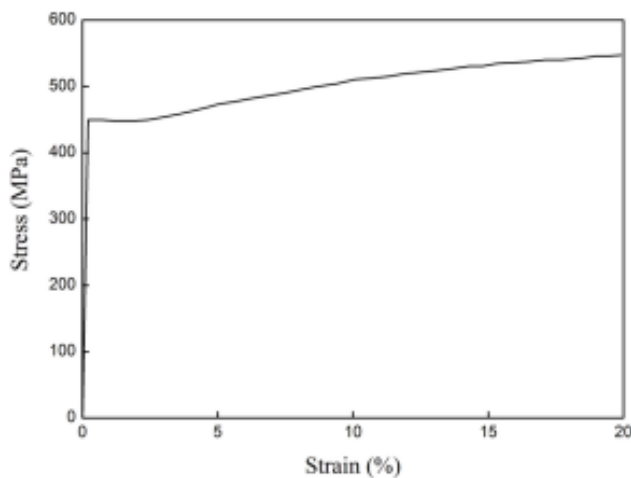
Όπου είναι V_i = μέγιστο ύψος ατέλειας, L_i = μήκος ατέλειας και x = απόσταση που μετρήθηκε από το μέσο του μοντέλου.



Εικ 3.2 Γεωμετρία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση.

Για τη μοντελοποίηση του σωλήνα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους (S4R) και για τη μοντελοποίηση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν στερεά στοιχεία (C3D8R). Η αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και του αγωγού θεωρήθηκε μέσω ενός αλγορίθμου μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του χαλύβδινου αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους. Για τον αγωγό χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο πλαστικότητας vonMises με πυκνότητα $\rho = 7,500 \text{ kg/m}^3$, σταθερά του Young $E = 210 \text{ GPa}$, λόγος Poisson $\nu = 0,3$ καθώς και όριο διαρροής $\sigma_y = 450 \text{ MPa}$. Για να προσομοιωθεί σωστά η σύνθετη αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού, καθώς και η σύλληψη οποιασδήποτε κρίσιμης τοπικής αστοχίας λυγισμού του τοιχώματος του σωλήνα, χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά στοιχεία με διαστάσεις ίσες με $0,03 \text{ m}$ στην αξονική διεύθυνση και $0,07 \text{ m}$ στην περιφερειακή διεύθυνση. Κάθε ένα από τα δύο απλουστευμένα μοντέλα είχε μήκος 500 m και αποτελούνταν από στοιχεία αγωγού, τα οποία είναι στοιχεία τύπου δοκού που λαμβάνουν υπόψη την εσωτερική πίεση. Για να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού, κάθε κόμβος των στοιχείων του αγωγού υποστηρίζονταν από τρία μη γραμμικά ελατήρια προς τις τρεις κατευθύνσεις, οι οποίες σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές που έδωσε η ALA (2001). Το μεσαίο μοντέλο συνδέθηκε με τα δύο απλουστευμένα μοντέλα εδάφους και αγωγού στις δύο άκρες.

Σε καθεμία από αυτές τις δύο συνδέσεις, ο τελικός κόμβος του στοιχείου αγωγού ενώθηκε στους ακραίους κόμβους του αντίστοιχου επιφανειακού στοιχείου, μέσω ενός διαθέσιμου αλγορίθμου κινηματικής σύζευξης στο Abaqus. Η Εικόνα 3.3 δείχνει την παραμόρφωση σε μονοαξονικό εφελκυσμό σε σχέση με την μηχανική τάση του χάλυβα API 5LX65. Η καμπύλη που προκύπτει χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση του μοντέλου πλαστικότητας. Στη διεπιφάνεια σωλήνα-εδάφους, ο συντελεστής τριβής $\mu = 0.3$.



Εικ 3.3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα APISL-X65

Η μηχανική συμπεριφορά του υλικού του εδάφους περιγράφεται από το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Mohr- Coulomb, που χαρακτηρίζεται από συνοχή c , γωνία τριβής ϕ , μέτρο ελαστικότητας E και τον δείκτη Poisson ν .

3.4 Χαρακτηριστικά αναλύσεων

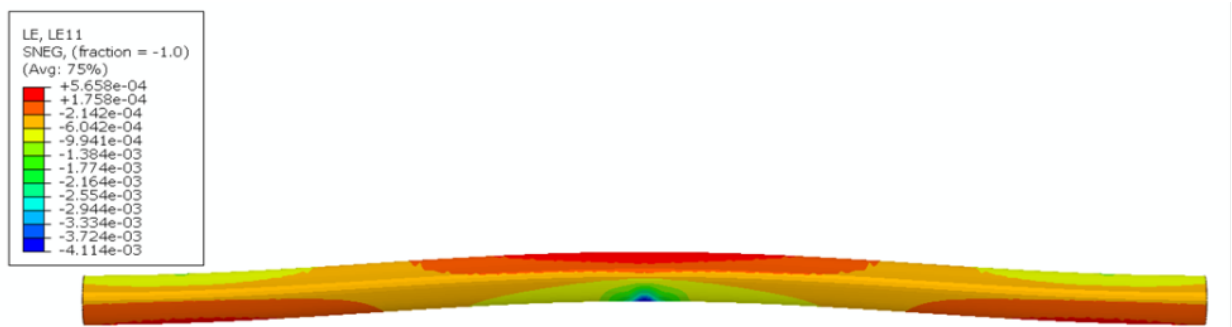
Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται αναλύσεις που σχετίζονται με συνεκτικά εδάφη, αυτός είναι και ο λόγος που γίνονται αναλύσεις για δύο διαφορετικές τιμές συνοχής $c = 20 \text{ kPa}$ και $c = 40 \text{ kPa}$ με γωνία τριβής $\varphi=0$, και για τρία διαφορετικά ύψη ατέλειας με τιμές $V_i = 0.4 \text{ m}$, $V_i = 0.8 \text{ m}$ και $V_i = 1.2 \text{ m}$ και διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας $E = 5$, $E = 10$ και $E = 25 \text{ MPa}$. Επιπλέον παρουσιάζονται και κάποια αποτελέσματα όταν γίνεται μεταβολή στην εσωτερική πίεση με αρχική τιμή $P = 5 \text{ MPa}$ και αύξηση σε $P = 10 \text{ MPa}$ με σταθερές τιμές $c = 20 \text{ kPa}$, $E = 10 \text{ MPa}$ με διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4 \text{ m}$, $V_i = 0.8 \text{ m}$ και $V_i = 1.2 \text{ m}$. Επίσης, παρουσιάζονται και αποτελέσματα με μεταβολή του πάχους με αρχική τιμή $t = 12.7 \text{ mm}$ σε $t = 9.525 \text{ mm}$ και $t = 6.35 \text{ mm}$ με σταθερές τιμές $c = 20 \text{ kPa}$, $E = 10 \text{ MPa}$ και διαφορετικά ύψη ατέλειας $V_i = 0.4 \text{ m}$, $V_i = 0.8 \text{ m}$, $V_i = 1.2 \text{ m}$. Η τιμή του μήκους ατέλειας είναι σταθερή $L_i = 20 \text{ m}$, όπως και η πυκνότητα και ο λόγος Poisson $\nu = 0.3$. Όσον αφορά την ανάλυση, είναι χωρισμένη σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα ασκείται η βαρύτητα και η εσωτερική πίεση στα τοιχώματα του αγωγού, ενώ στο δεύτερο ασκείται θερμοκρασία 120°C .

Κεφάλαιο 4^ο

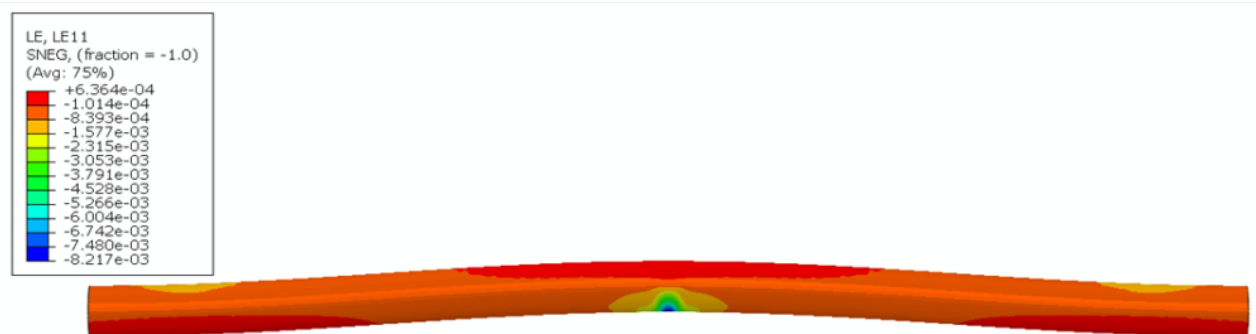
4.1 Έδαφος συνοχής $C = 20 \text{ kPa}$

4.1.1 Μέτρο Ελαστικότητας $E = 5 \text{ MPa}$

Στα Σχήματα 4.1-4.3 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού σε τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίες. Αρχικά, ακριβώς πριν από την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A, που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού, στα σημεία B και C όπου επίσης συμβαίνει τοπικός λυγισμός καθώς και πριν από την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Έπειτα, στα Σχήματα 4.4-4.6 παρουσιάζεται η μέγιστη πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού για τις ίδιες τιμές θερμοκρασίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, για τρεις διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4, 0.8$ και 1.2 m . Στην πρώτη περίπτωση για τιμή $V_i = 0.4 \text{ m}$ ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει ταυτόχρονα στα σημεία A,B,C και στην συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα όσον αφορά την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Για τις τιμές $V_i = 0.8$ και 1.2 ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει σε διαφορετικές στιγμές στα σημεία A,B,C και ακολουθεί η κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} .

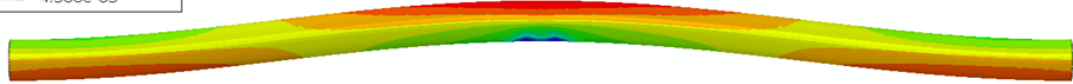
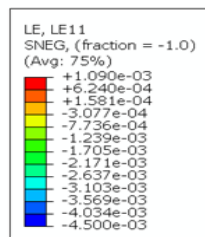


(α)

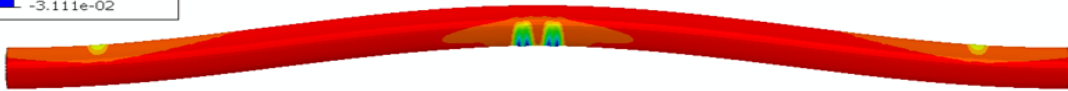
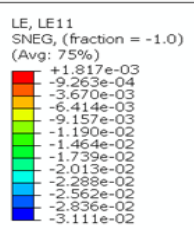


(β)

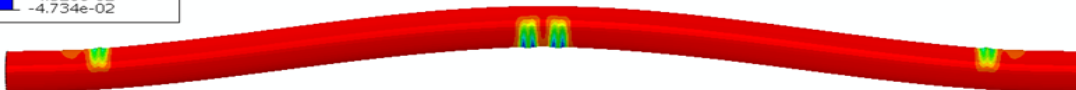
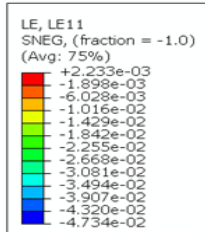
Σχήμα 4.1 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i=0,4m$.



(α)

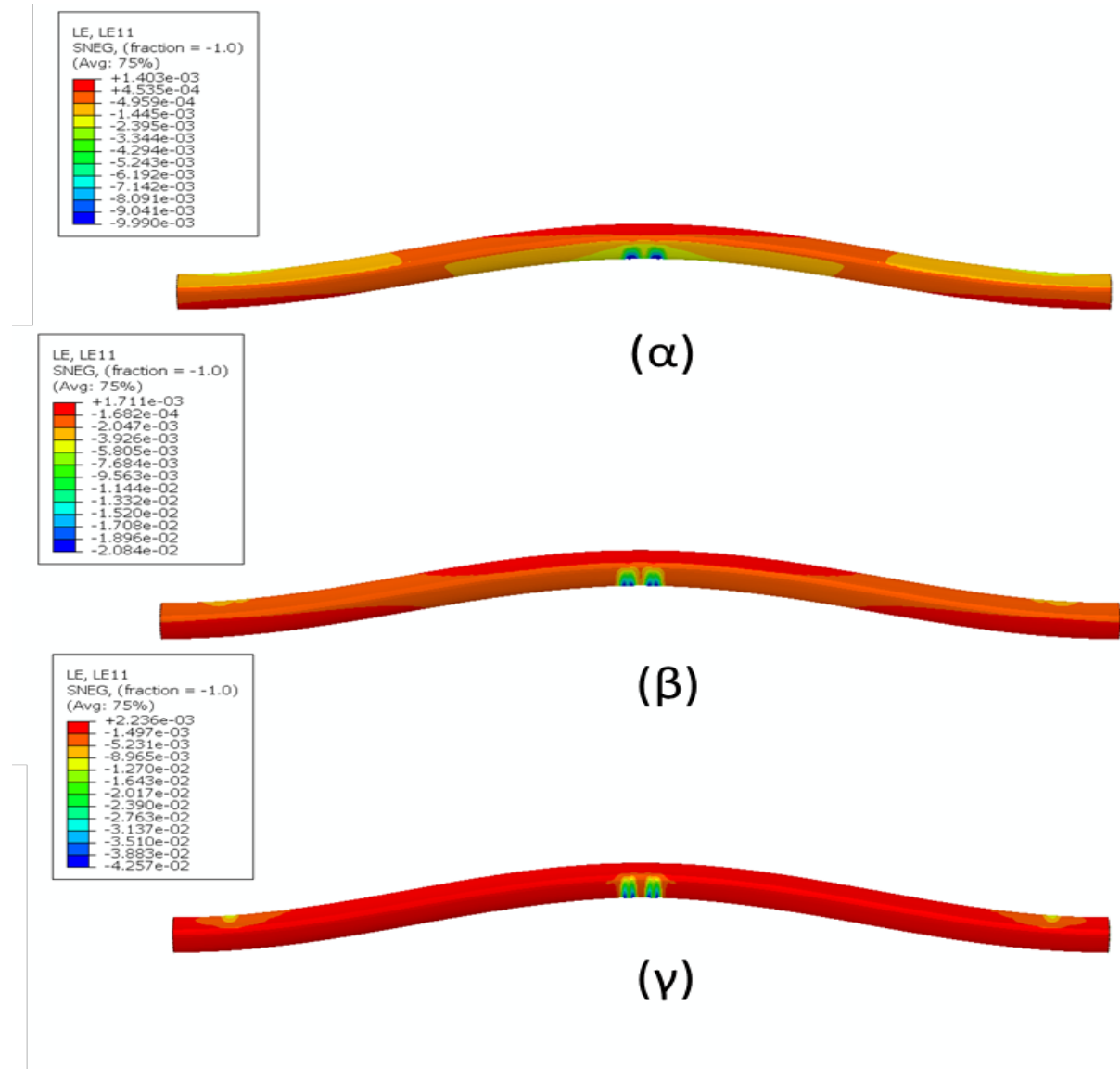


(β)

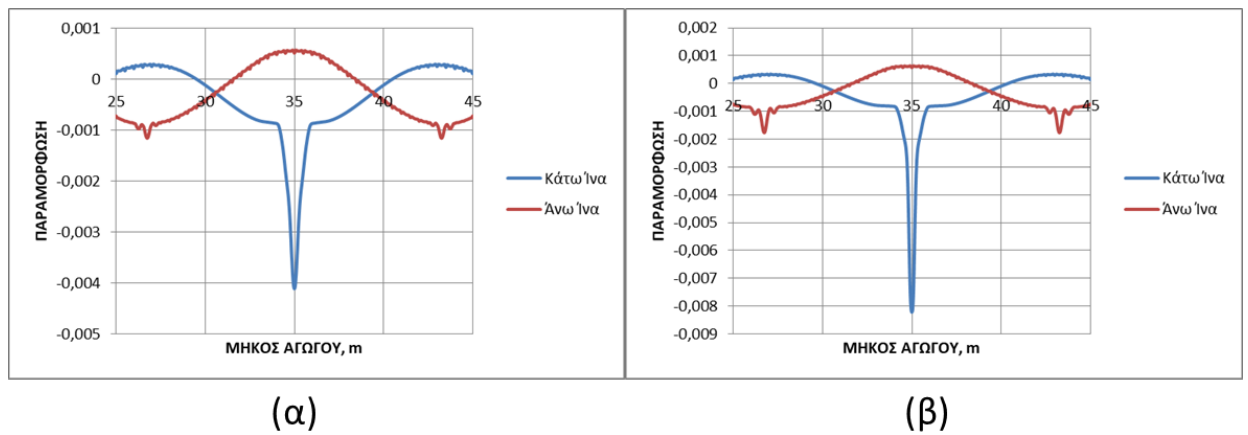


(γ)

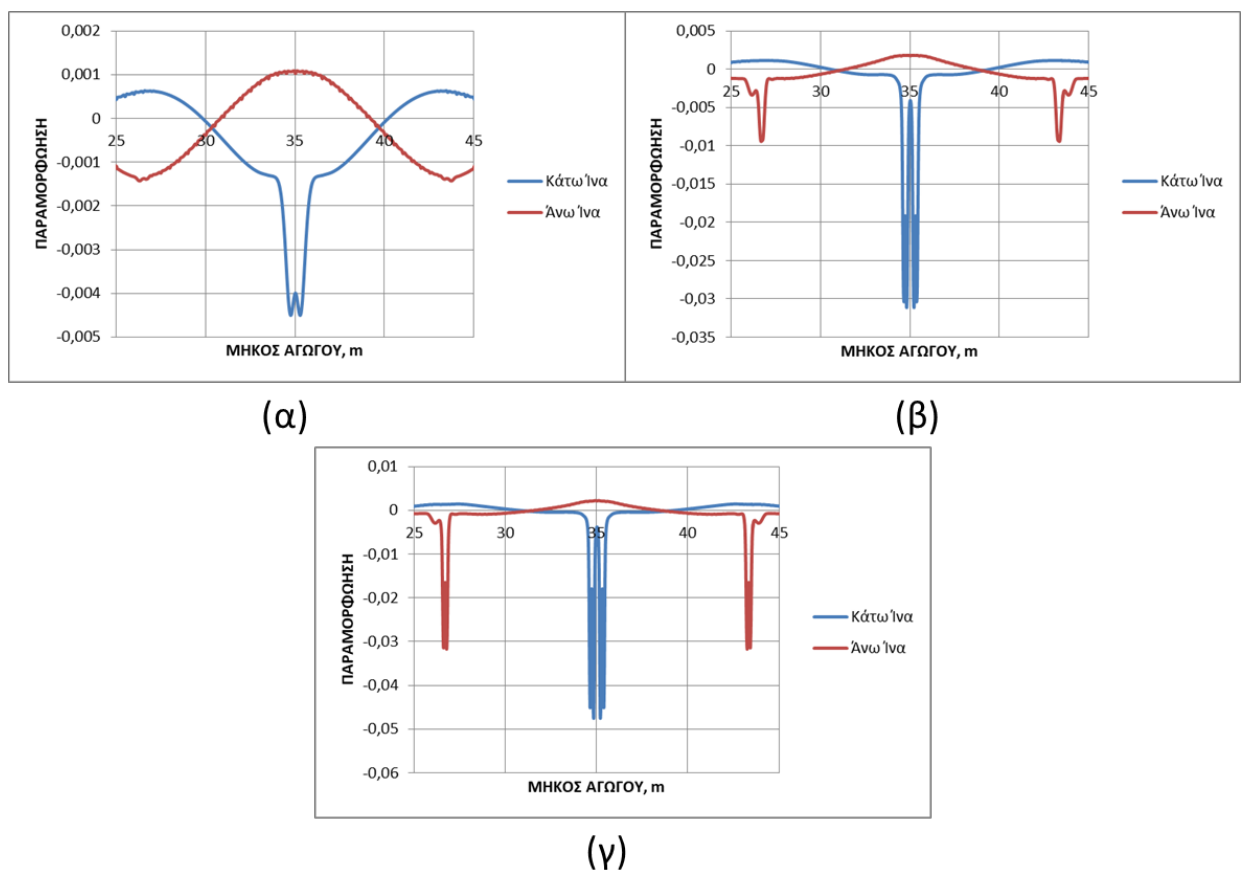
Σχήμα 4.2 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0,8$ m.



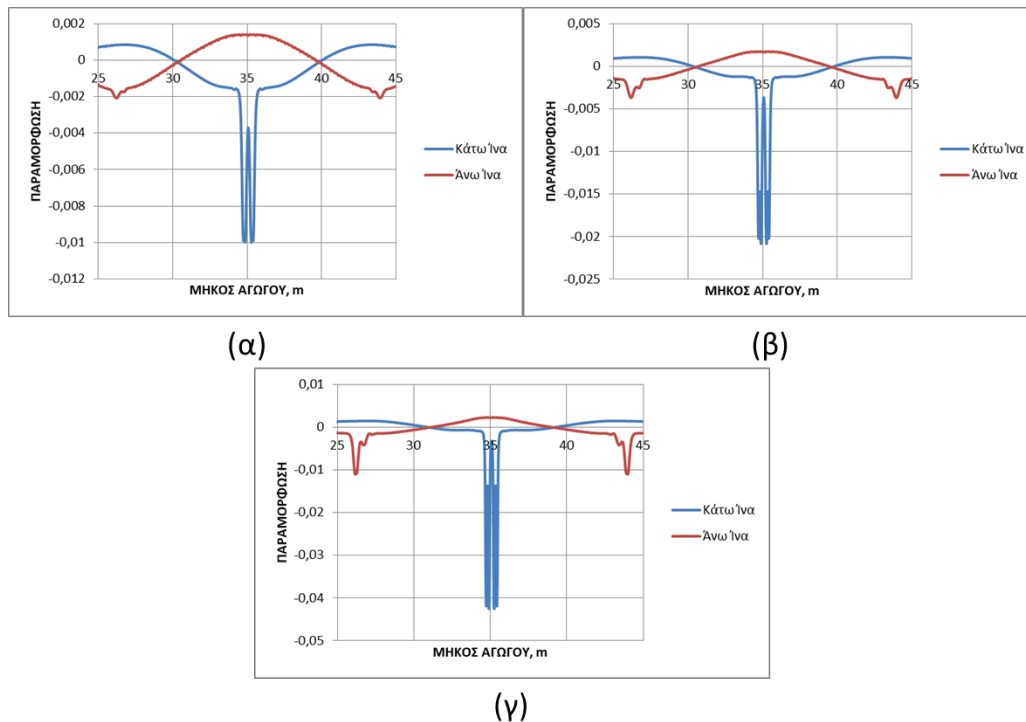
Σχήμα 4.3 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



Σχήμα 4.4 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία Α,Β,Σ και (β) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0.4 \text{ m}$.



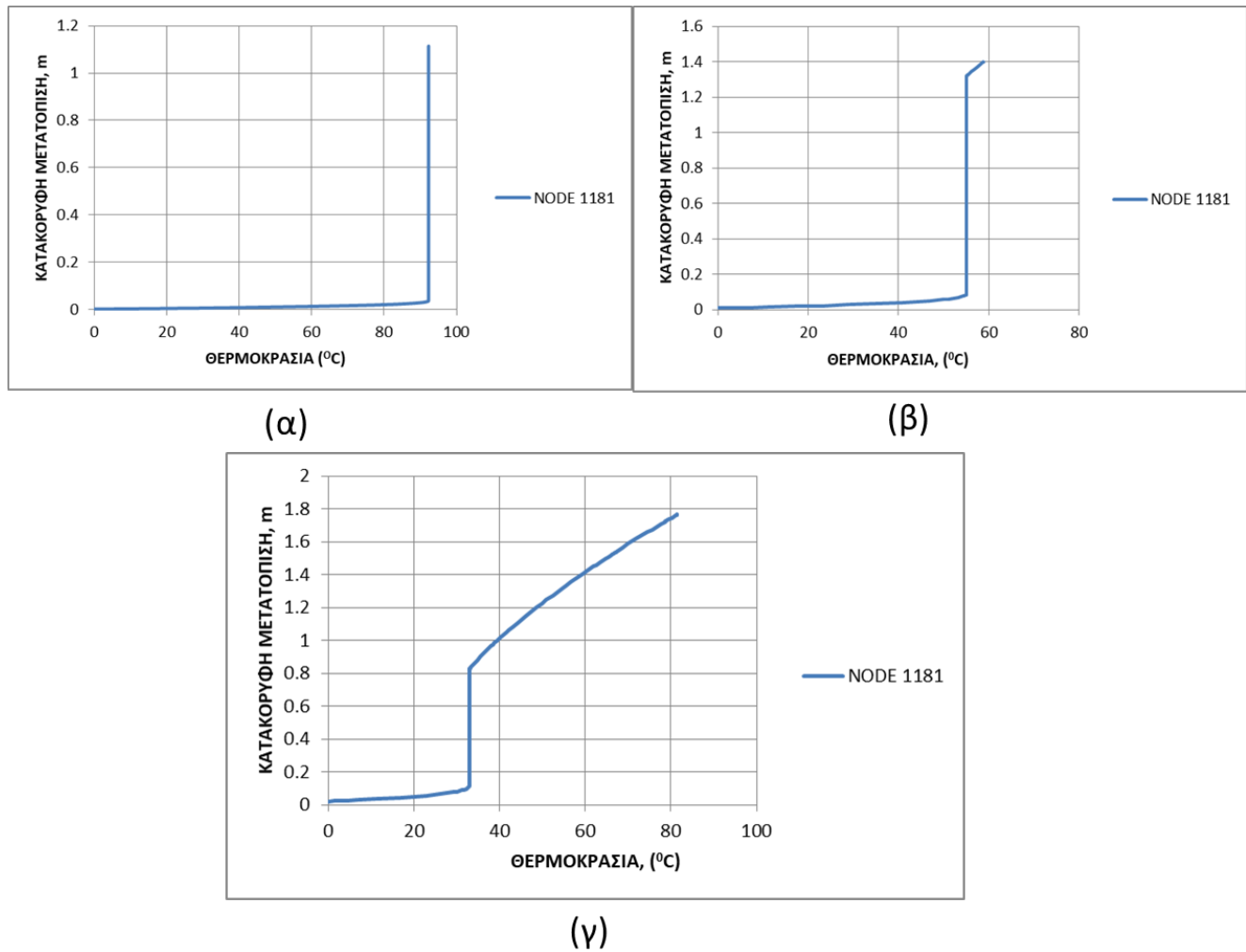
Σχήμα 4.5 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο Α, (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία Β,Σ και (γ) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0.8 \text{ m}$.



Σχήμα 4.6 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία A, (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2\text{ m}$.

Από το Σχήμα 4.7α προκύπτει ότι η κατακόρυφη μετατόπιση U , που παρατηρείται πριν την δημιουργία λυγισμού στο σημείο A και ταυτίζεται με την αντίστοιχη των σημείων B,C καθώς συμβαίνει για την ίδια τιμή θερμοκρασίας, είναι ίση με 0.032 m . Επιπλέον, η θερμοκρασία που αντιστοιχεί πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία B,C είναι $\Delta T = 88.56^\circ\text{C}$ ενώ την στιγμή της κρίσιμης θερμοκρασίας, $\Delta T_{cr} = 91.6^\circ\text{C}$. Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C είναι ίση με 16.51 m για $V_i = 0.4\text{ m}$. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.7β προκύπτει $U = 0.067\text{ m}$ στο σημείο A και $U = 0.1468\text{ m}$ στα σημεία B,C για την τιμή $V_i = 0.8\text{ m}$. Η θερμοκρασία ΔT όταν δημιουργείται τοπικός λυγισμός στα σημεία B,C ισούται με 51.1°C και αντίστοιχα για Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 55.14^\circ\text{C}$. Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C να είναι ίση με 16.52 m . Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.7γ για τιμή $V_i = 1.2\text{ m}$, η κατακόρυφη μετατόπιση ισούται με $U = 0.1\text{ m}$ και 0.13 m για τα σημεία A και B,C.

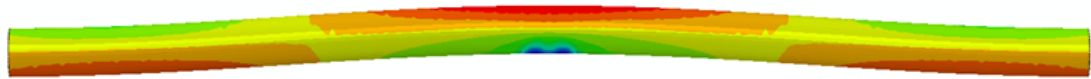
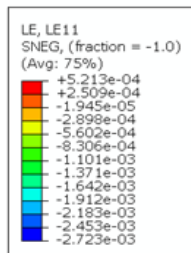
Η τιμή της θερμοκρασίας ισούται με $\Delta T_{cr} = 32.87^{\circ}\text{C}$ καθώς ο λυγισμός στα σημεία B,C παρατηρείται ταυτόχρονα με την Θ_{cr} . Η απόσταση μεταξύ των B,C ισούται με 17.5 m.



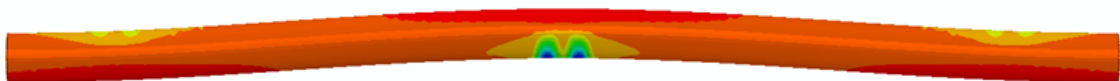
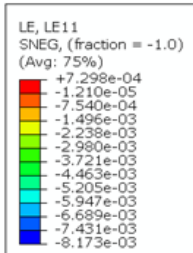
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.

4.1.2 Μέτρο Ελαστικότητας $E = 10 \text{ MPa}$

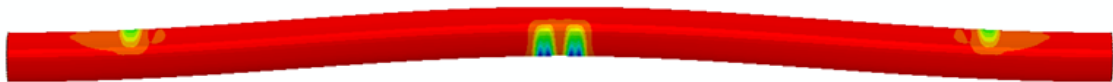
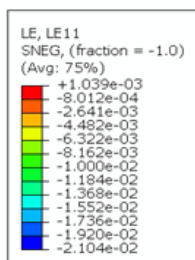
Στα Σχήματα 4.8-4.10 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού σε τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας. Αρχικά, ακριβώς πριν από την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A, που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού, στα σημεία B και C, όπου επίσης συμβαίνει τοπικός λυγισμός, καθώς και πριν από την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Έπειτα, στα Σχήματα 4.11-4.13 παρουσιάζεται η πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού για τις ίδιες τιμές θερμοκρασίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, για τρεις διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4, 0.8$ και 1.2 m . Για τιμή $V_i = 0.4$ και 0.8 m ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας στα σημεία A,B,C και ακολουθεί η κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Στην περίπτωση για τιμή $V_i = 1.2 \text{ m}$ ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει ταυτόχρονα στα σημεία A,B,C και στην συνέχεια ακολουθεί η Θ_{cr} .



(α)

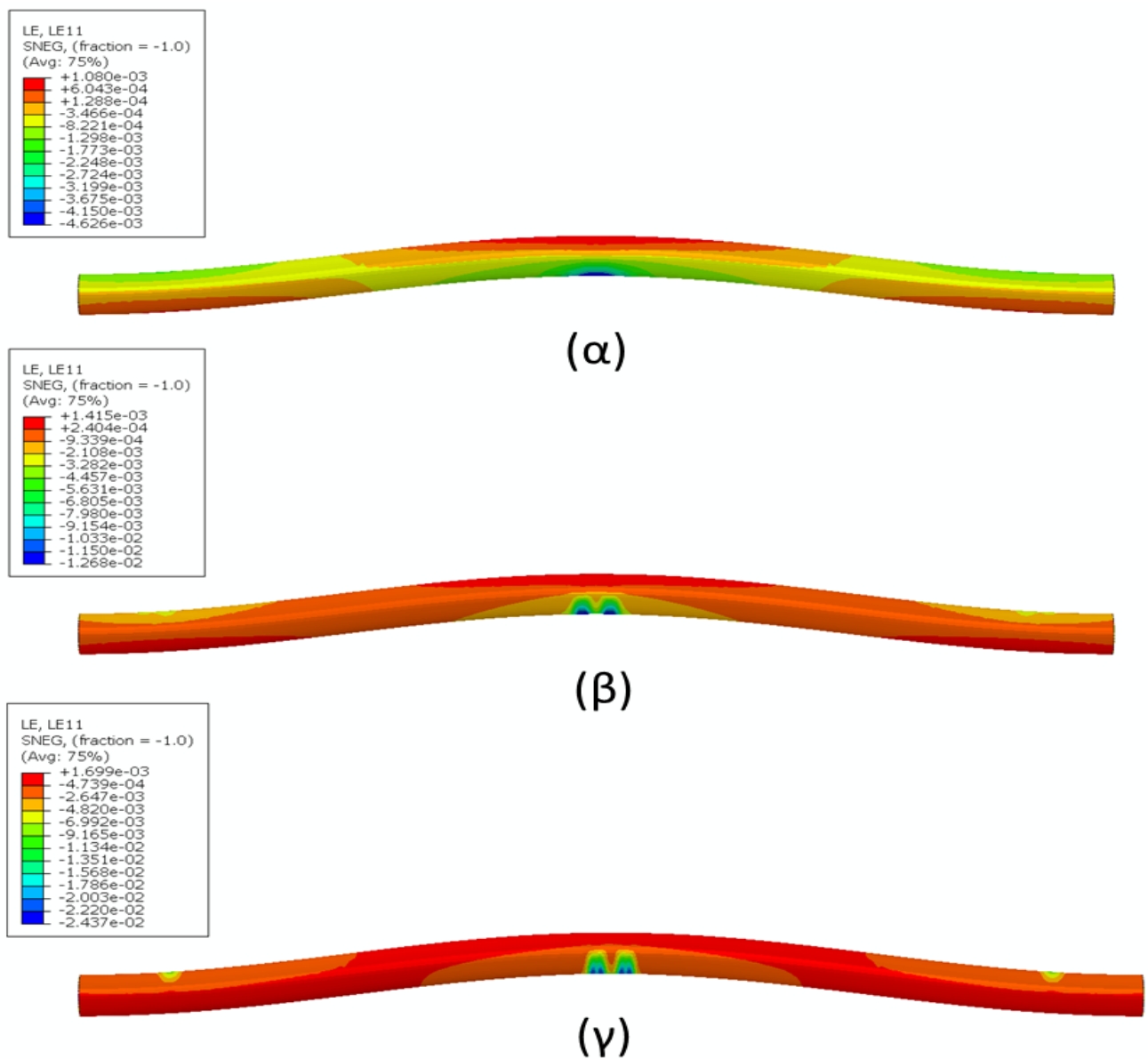


(β)

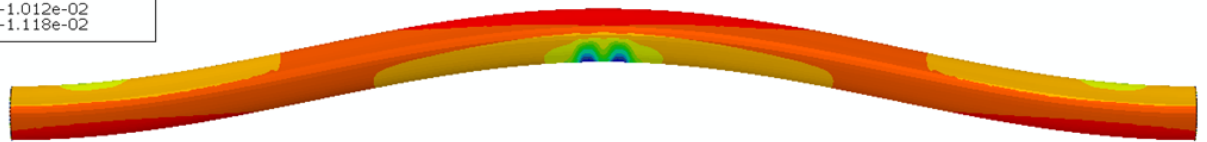
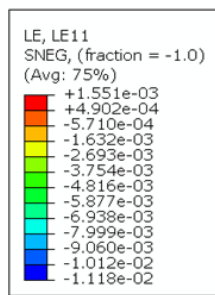


(γ)

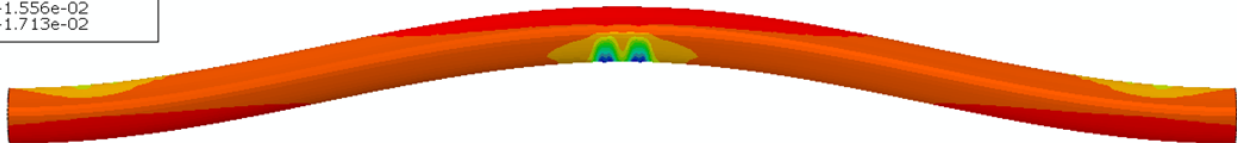
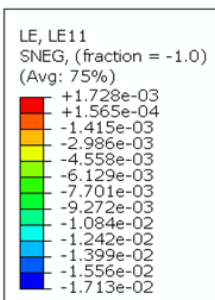
Σχήμα 4.8 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0,4$ m.



Σχήμα 4.9 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0,8$ m.

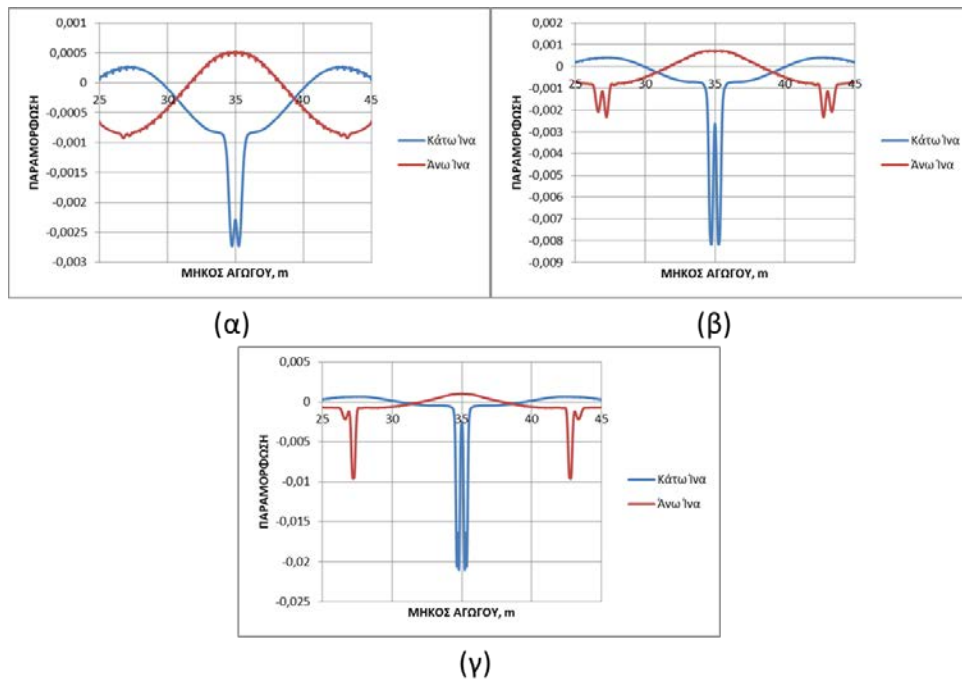


(α)

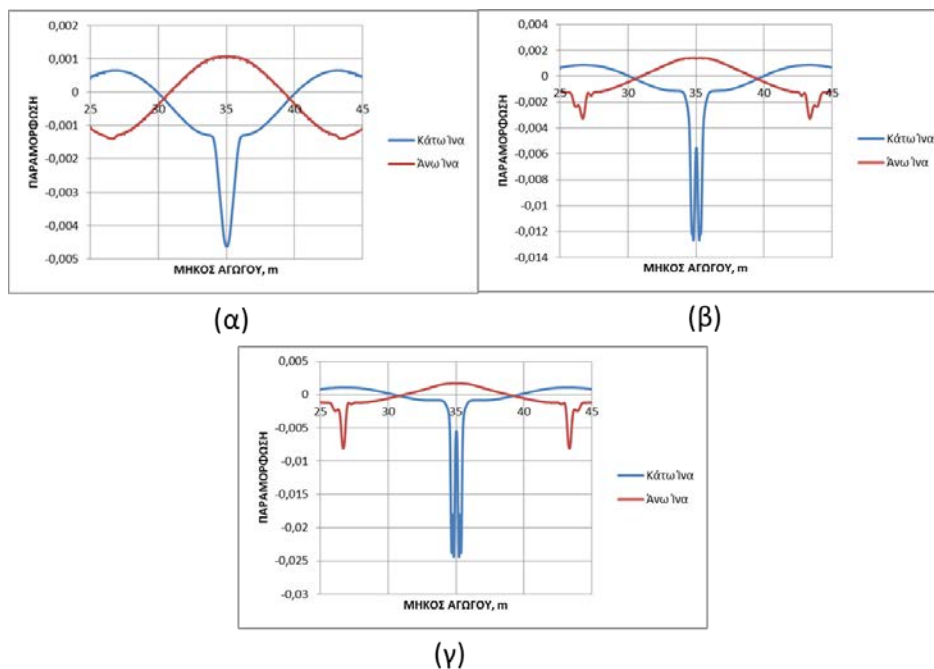


(β)

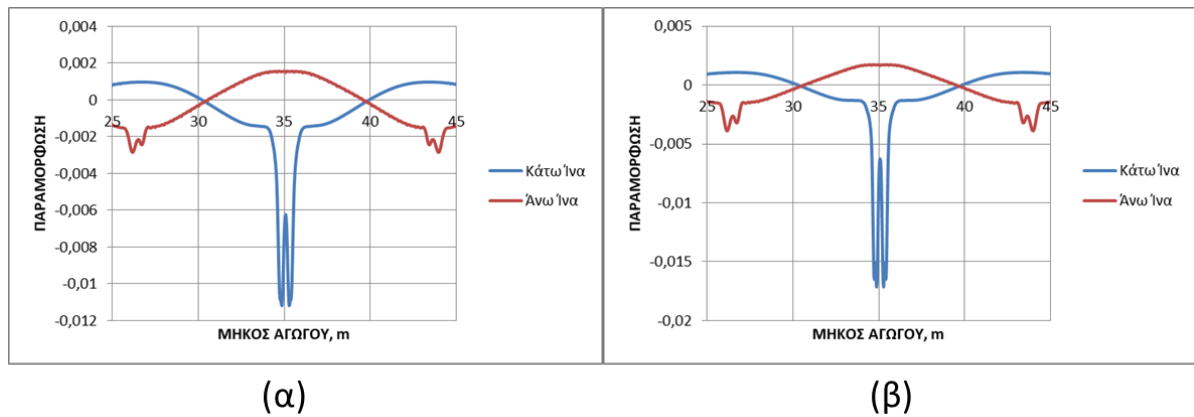
Σχήμα 4.10 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2 \text{ m}$.



Σχήμα 4.11 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A, (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0.4 \text{ m}$.

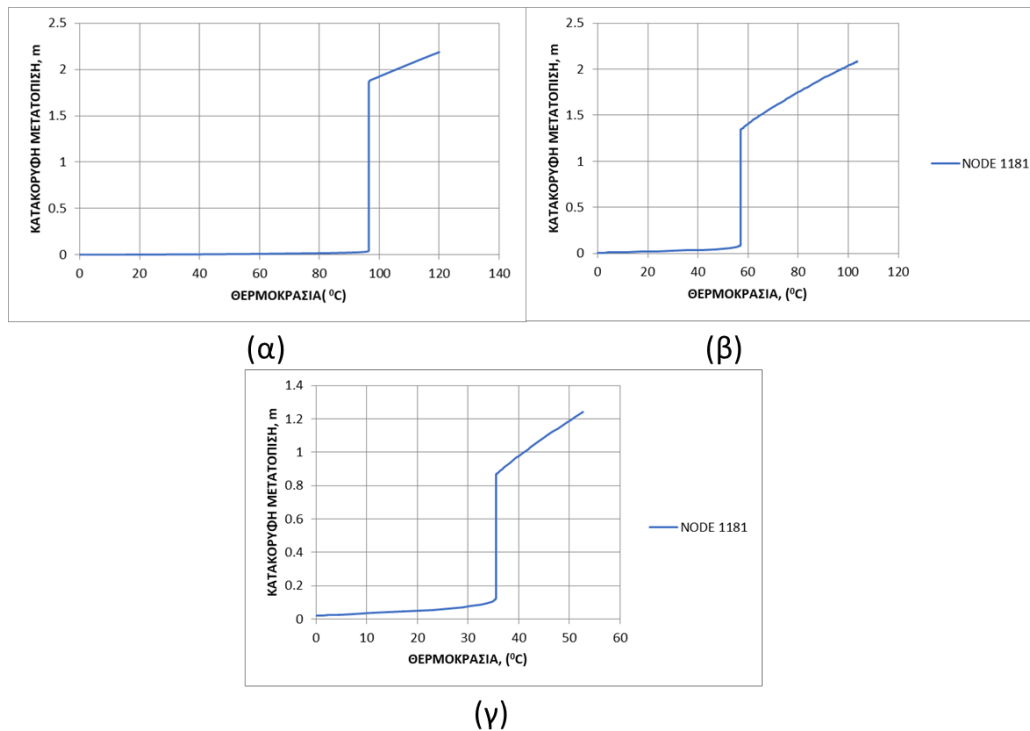


Σχήμα 4.12 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A, (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0.8 \text{ m}$



Σχήμα 4.13 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία Α,Β,С και (β) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.

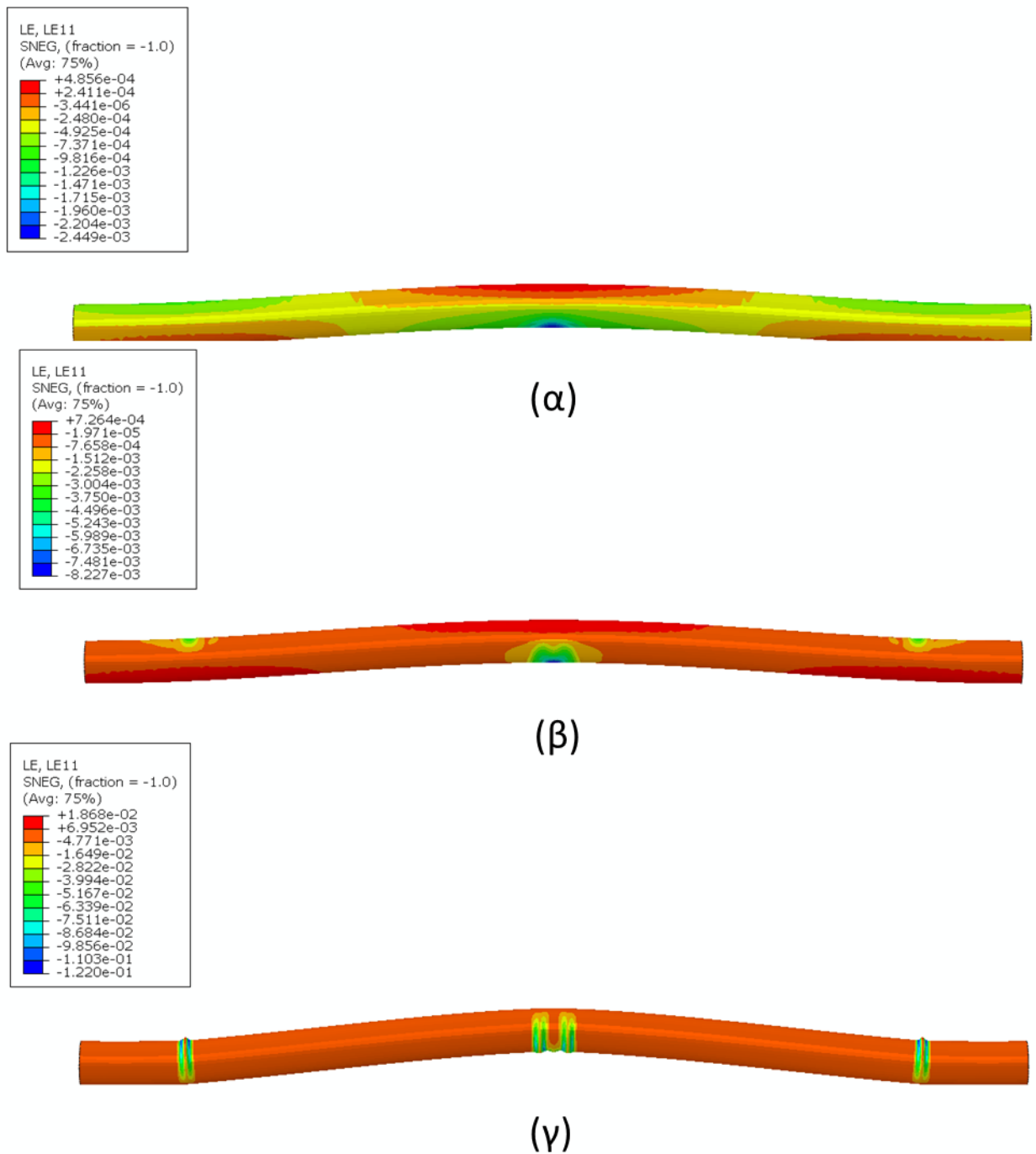
Η κατακόρυφη μετατόπιση U που παρατηρείται πριν την δημιουργία λυγισμού στο σημείο Α από το Σχήμα 4.14α, είναι ίση με 0.025 m ενώ για Β,С ισούται με 0.029 m. Επιπλέον, η θερμοκρασία που αντιστοιχεί ακριβώς πριν την δημιουργία λυγισμού στα σημεία Β,С είναι $\Delta T = 92.7$ °C, ενώ την στιγμή της Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 96$ °C. Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία Β και С είναι ίση με 15.52 m για $V_i = 0.4$ m. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.14β προκύπτει $U = 0.067$ m στο σημείο Α και $U = 0.1$ m στα σημεία Β,С για την τιμή $V_i = 0.8$ m. Η θερμοκρασία ΔT όταν δημιουργείται λυγισμός στα σημεία Β,С ισούται με 57.05 °C και αντίστοιχα για την Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 57.12$ °C με την απόσταση ανάμεσα στα σημεία Β και С να είναι ίση με 16.59 m. Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.14γ για τιμή $V_i = 1.2$ m, η μέγιστη μετατόπιση ισούται με $U = 0.11$ m για τα σημεία Α,Β,С, καθώς συμβαίνει λυγισμός για την ίδια τιμή θερμοκρασίας. Η τιμή της θερμοκρασίας για τα σημεία Β,С ισούται με $\Delta T = 34.67$ °C και 35.25 °C για την Θ_{cr} . Η απόσταση μεταξύ Β,С ισούται με 17.54 m.



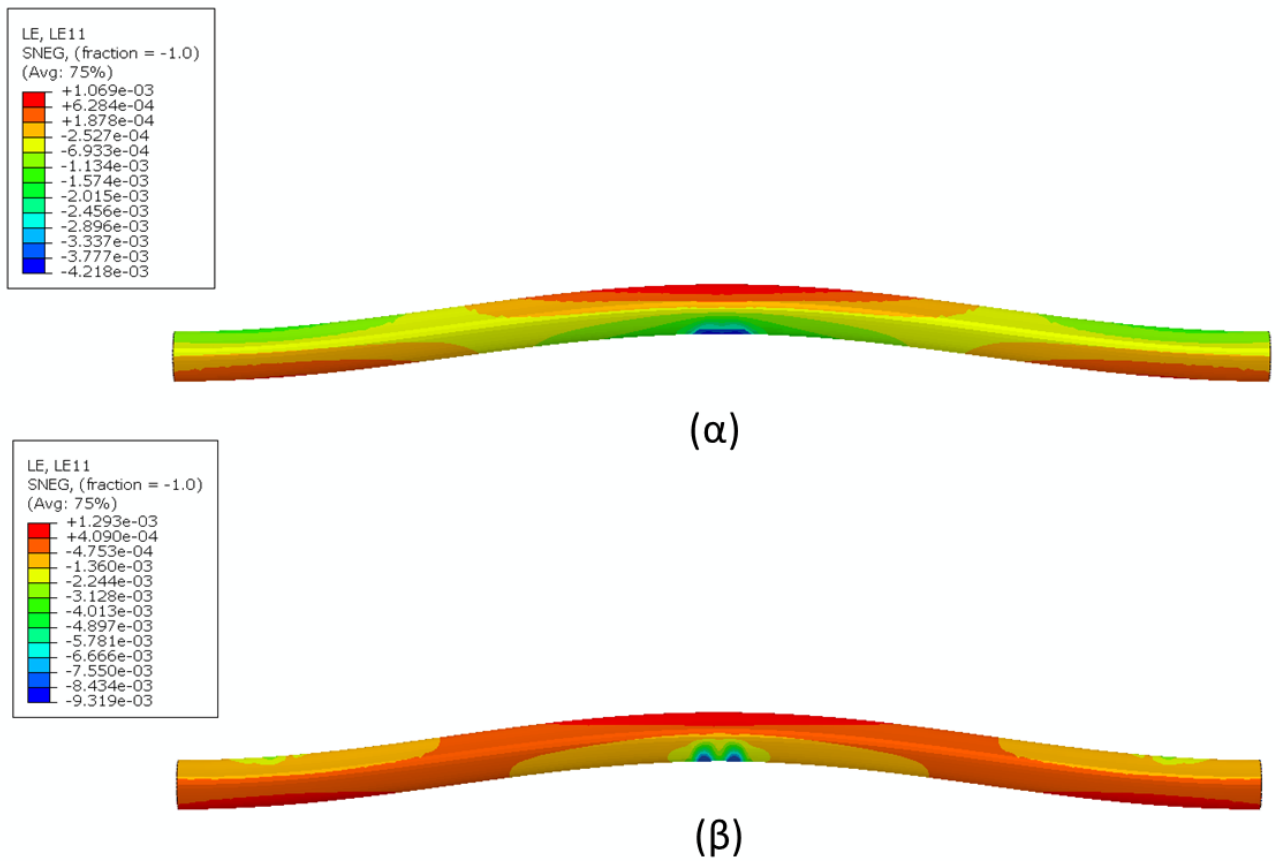
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.

4.1.3 Μέτρο Ελαστικότητας $E = 25$ MPa

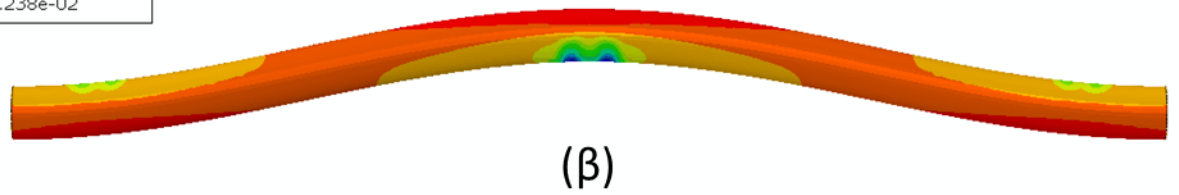
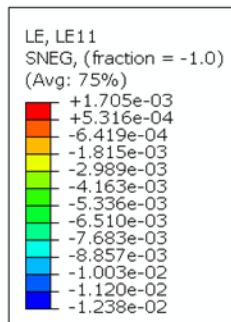
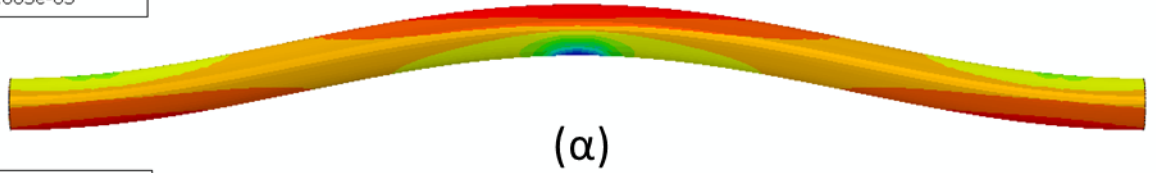
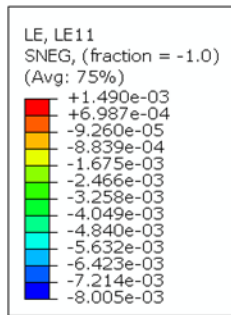
Στα Σχήματα 4.15- 4.17 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού σε τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας. Αρχικά, ακριβώς πριν από την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A, που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού, στα σημεία B και C, όπου επίσης συμβαίνει τοπικός λυγισμός, καθώς και πριν από την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Έπειτα στα Σχήματα 4.18-4.19 παρουσιάζεται η πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού για τις ίδιες τιμές θερμοκρασίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, για τρεις διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4, 0.8$ και 1.2 m. Στην περίπτωση $V_i = 0.4$ m δημιουργείται λυγισμός σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές στα σημεία A και B,C και έπειτα ακολουθεί η Θ_{cr} , για $V_i = 0.8$ m τοπικός λυγισμός αρχικά εμφανίζεται μόνο στο σημείο A, ενώ στη συνέχεια ο παρατηρείται στα σημεία B,C ταυτόχρονα με την τιμή της Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m τοπικός λυγισμός συμβαίνει ταυτόχρονα στα σημεία A,B,C και ακολουθεί η Θ_{cr} .



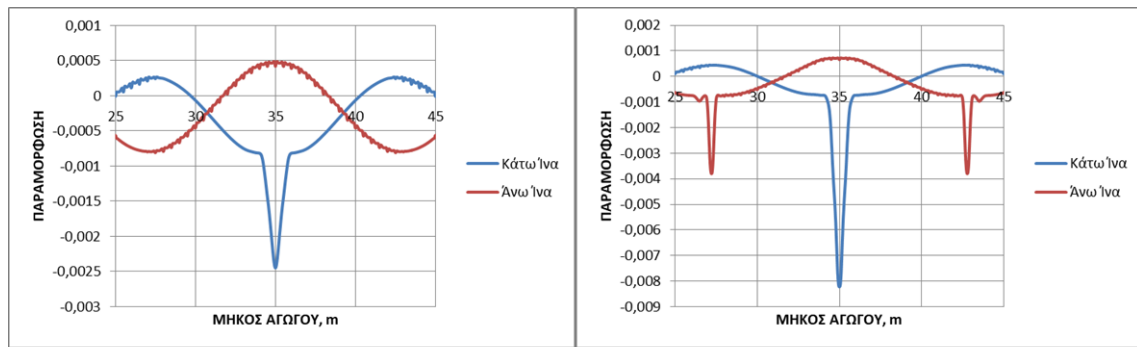
Σχήμα 4.15 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0,4$ m.



Σχήμα 4.16 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0.8$ m.

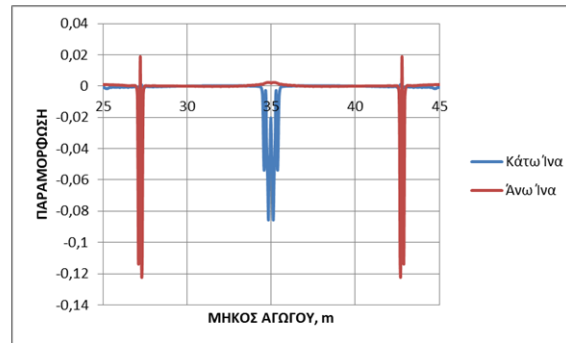


Σχήμα 4.17 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



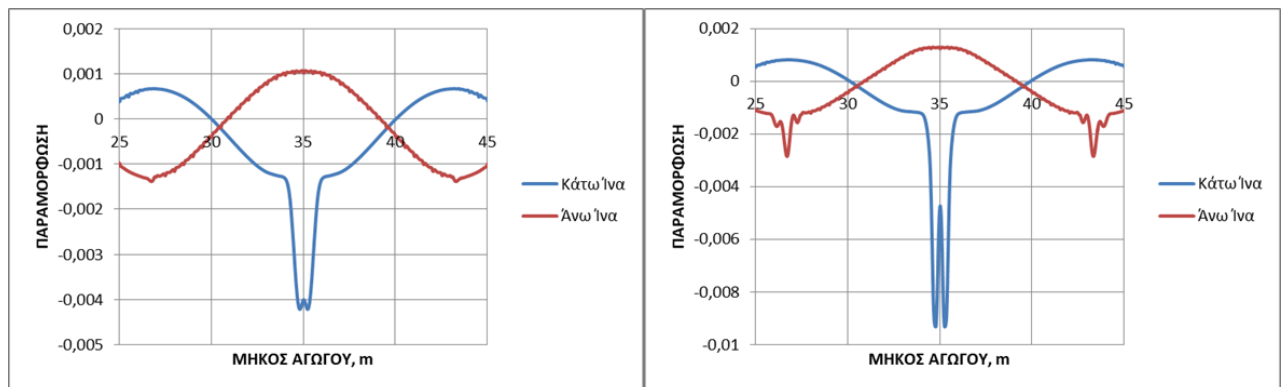
(α)

(β)



(γ)

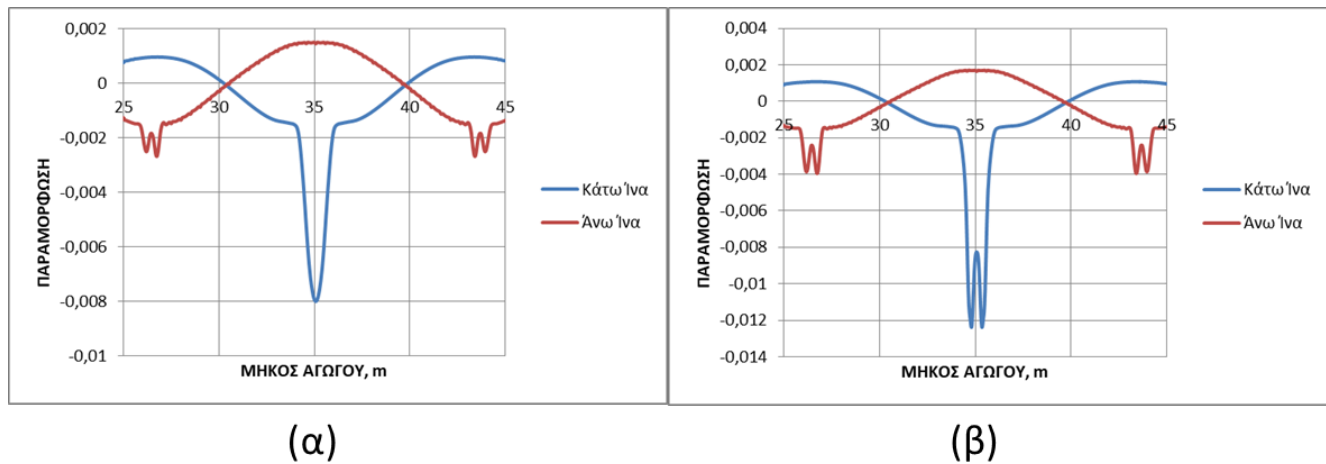
Σχήμα 4.18 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A, (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0.4$ m



(α)

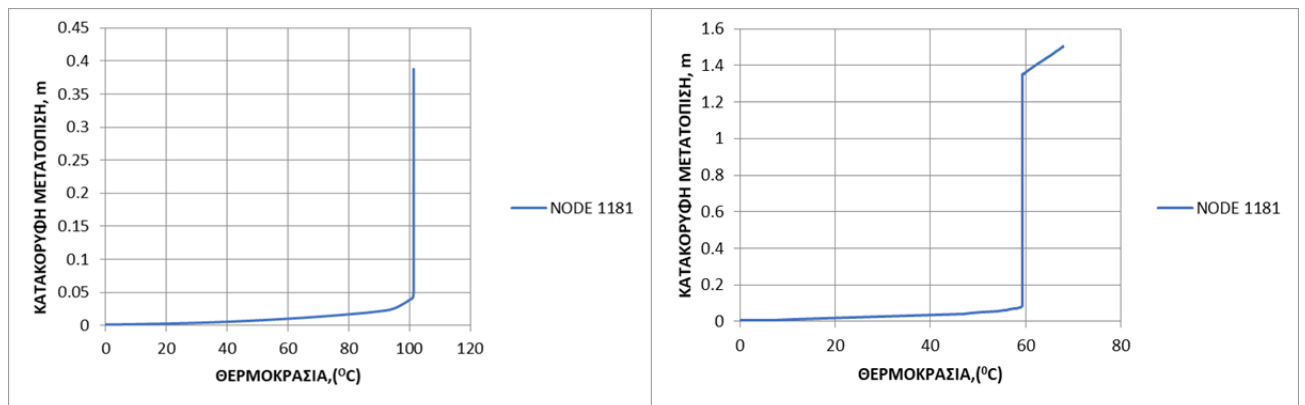
(β)

Σχήμα 4.19 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



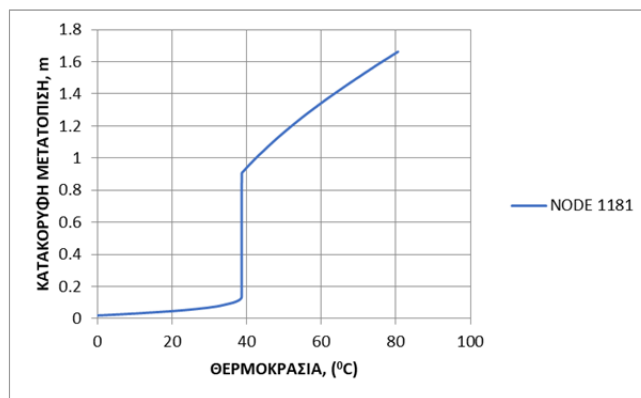
Σχήμα 4.20 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία Α,Β,С και (β) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.

Η κατακόρυφη μετατόπιση U πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο Α από το Σχήμα 4.21α, είναι ίση με 0.027 m, ενώ για Β,С ισούται με 0.041 m. Επιπλέον, η θερμοκρασία ακριβώς πριν την δημιουργία λυγισμού στα σημεία Β,С είναι $\Delta T = 100.95$ °C, ενώ την στιγμή Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 101.36$ °C. Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία Β και С είναι ίση με 15.48 m, για $V_i = 0.4$ m. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.21β προκύπτει $U = 0.09$ m στο σημείο Α αλλά και στα Β,С καθώς ο λυγισμός συμβαίνει ταυτόχρονα για την τιμή $V_i = 0.8$ m. Η θερμοκρασία ΔT όταν δημιουργείται λυγισμός στα σημεία Β,С ισούται με 59.16 °C και αντίστοιχα για την χρονική στιγμή Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 60.2$ °C με την απόσταση ανάμεσα στα σημεία Β και С να είναι ίση με 16.53 m. Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.21γ για τιμή $V_i = 1.2$ m, η κατακόρυφη μετατόπιση ισούται με $U = 0.11$ m για τα σημεία Α,Β,С καθώς συμβαίνει λυγισμός για την ίδια τιμή θερμοκρασίας, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας $\Delta T = 36.26$ °C και $\Delta T_{cr} = 38.18$ °C για τα σημεία Β,С και την Θ_{cr} αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ Β,С ισούται με 17.55 m.



(α)

(β)



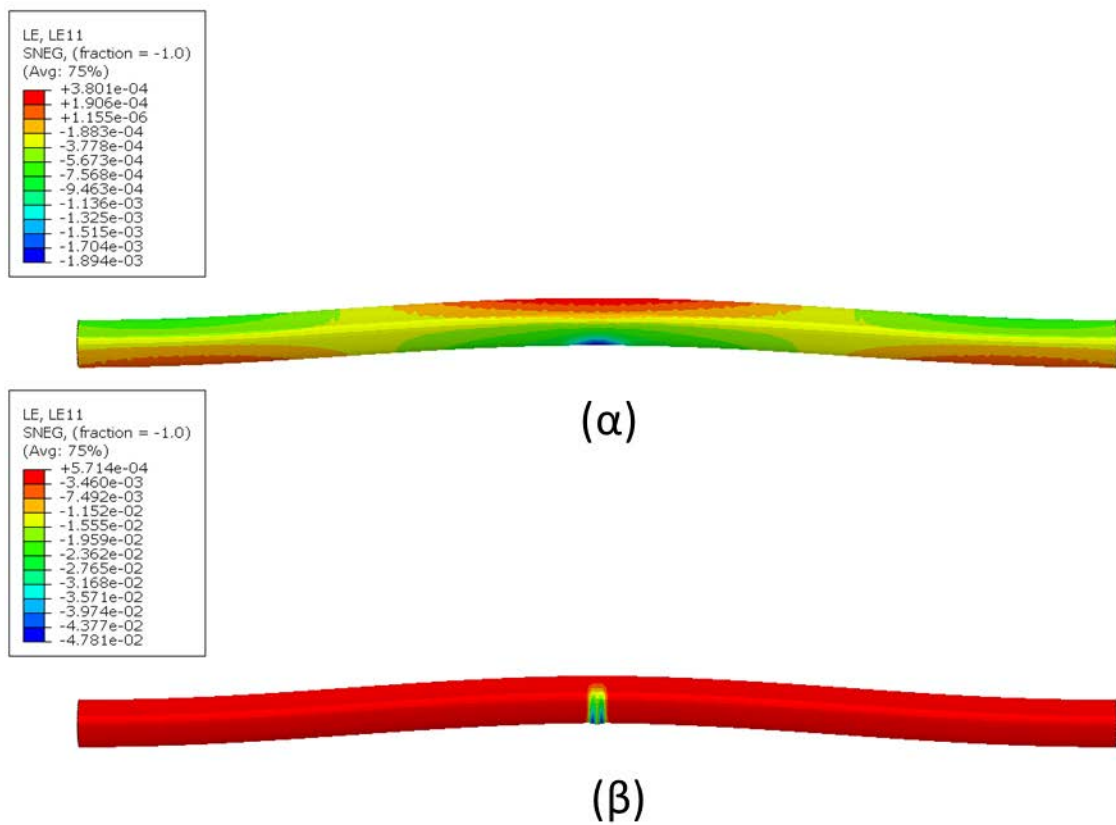
(γ)

Σχήμα 4.21 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.

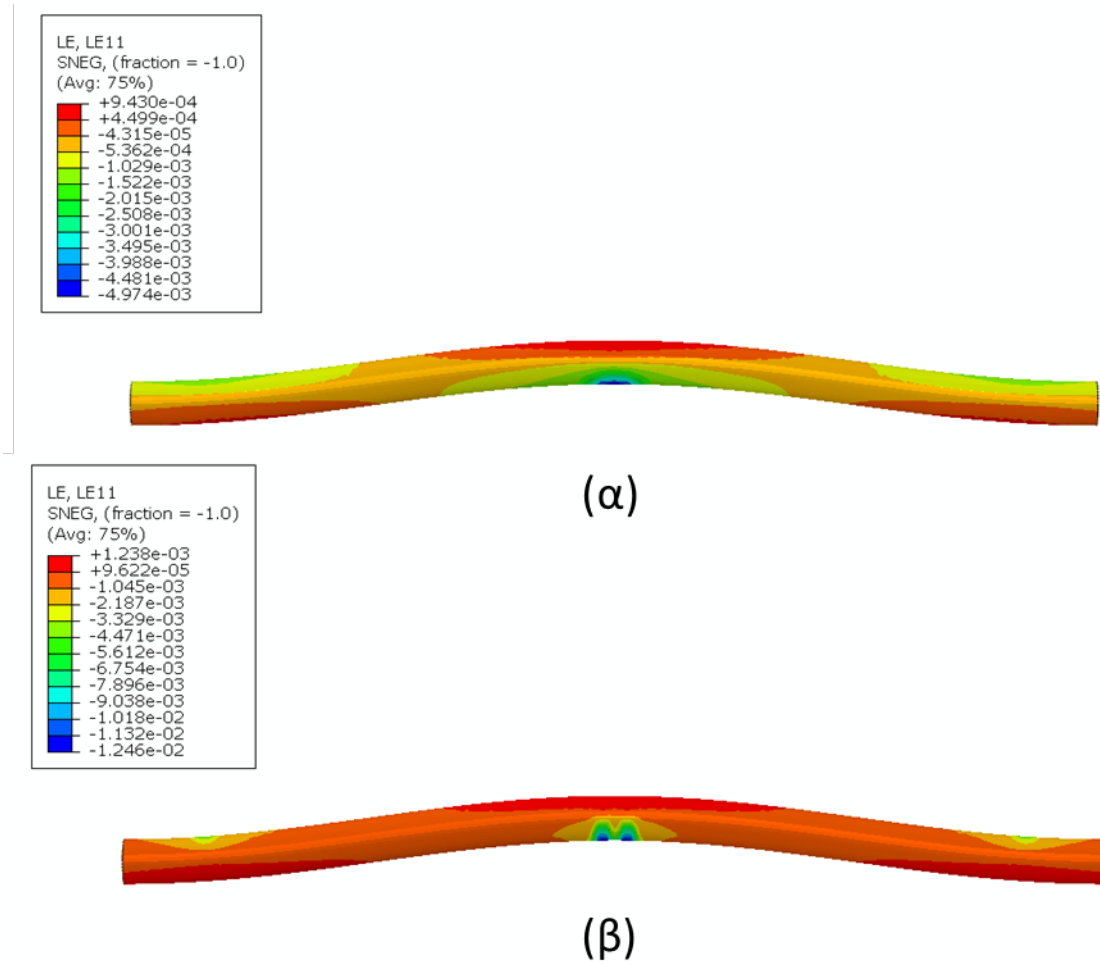
4.2 Έδαφος συνοχής $C = 40 \text{ kPa}$

4.2.1 Μέτρο Ελαστικότητας $E = 5 \text{ MPa}$

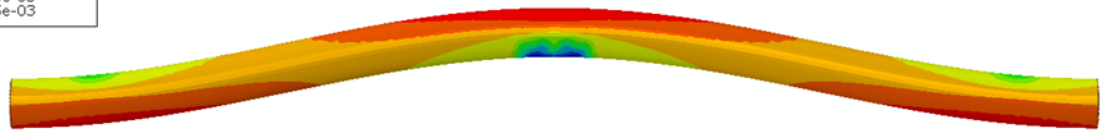
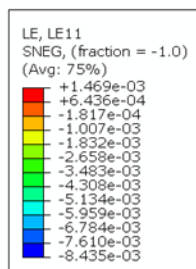
Στα Σχήματα 4.22-4.24 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας. Έπειτα, στα Σχήματα 4.25-4.270 παρουσιάζεται η τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού την στιγμή ακριβώς πριν από την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A, που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού, καθώς και στα σημεία B και C, όπου επίσης παρατηρείται τοπικός λυγισμός. Επιπλέον, απεικονίζει την στιγμή πριν από την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} κατά την οποία συμβαίνει απότομη αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία. Για την τιμή $V_i = 0.4 \text{ m}$ εμφανίζεται τοπικός λυγισμός μόνο στο σημείο A και ακολουθεί η Θ_{cr} , ενώ για την τιμή $V_i = 0.8 \text{ m}$ τοπικός λυγισμός παρατηρείται ταυτόχρονα στα σημεία A,B,C και στη συνέχεια ακολουθεί η Θ_{cr} . Τέλος για $V_i = 1.2 \text{ m}$ τοπικός λυγισμός παρατηρείται αρχικά στο σημείο A και στη συνέχεια στα σημεία B,C ταυτόχρονα με την Θ_{cr} .



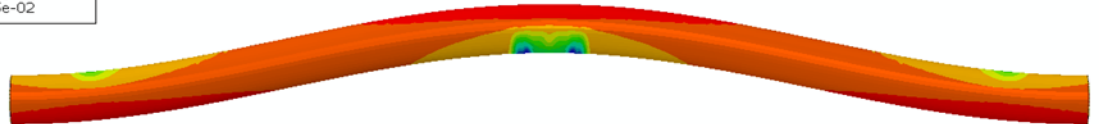
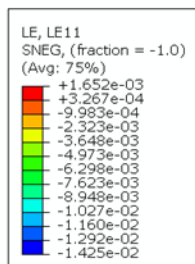
Σχήμα 4.22 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 0.4 \text{ m}$.



Σχήμα 4.23 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία A,B,C και (β) πριν το τέλος της ανάλυσης για $V_i = 0.8 \text{ m}$.

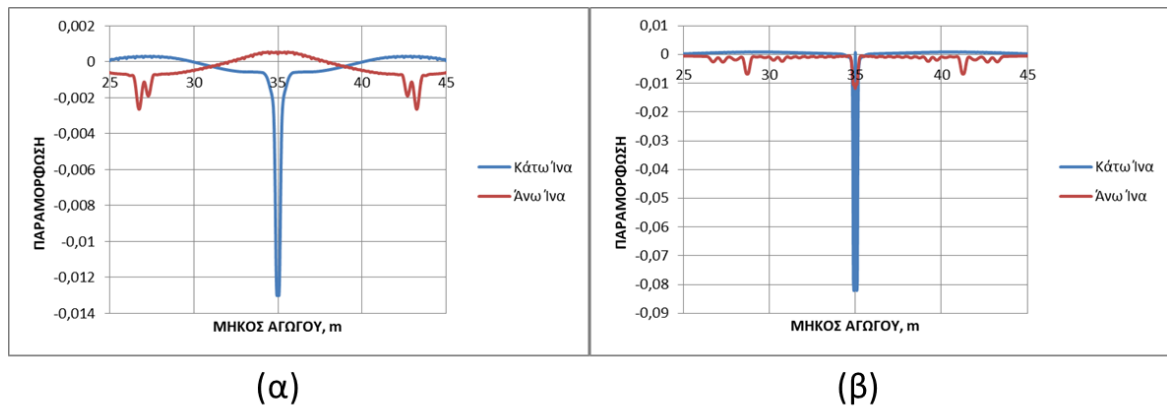


(α)

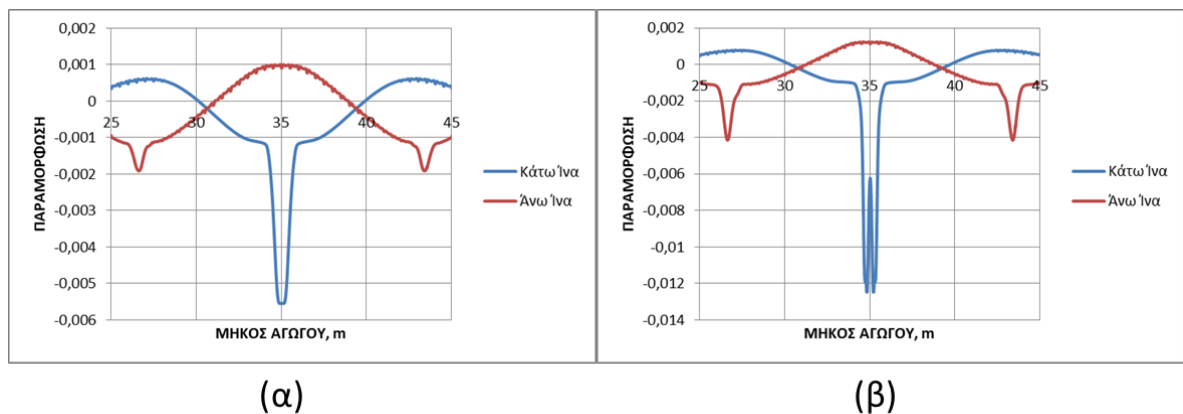


(β)

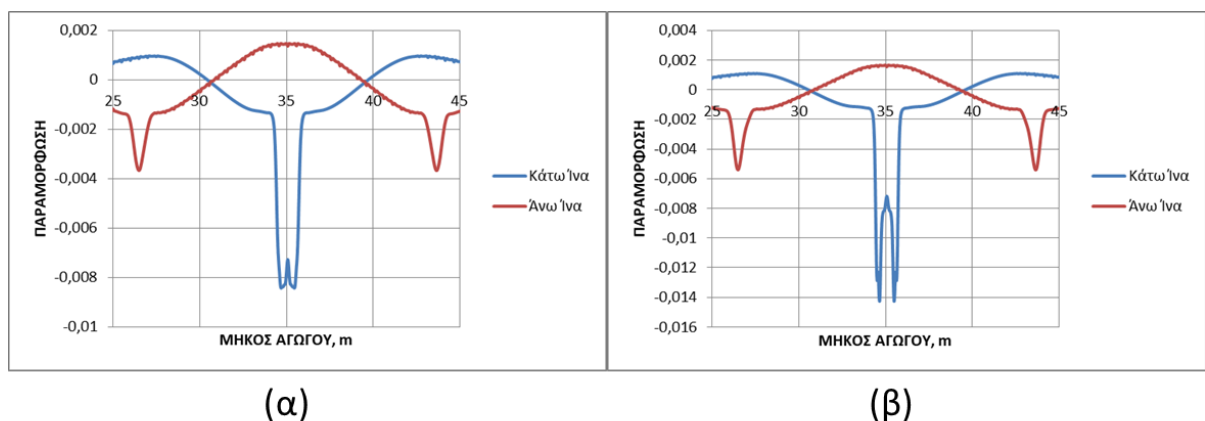
Σχήμα 4.24 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A, (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



Σχήμα 4.25 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.4$ m.

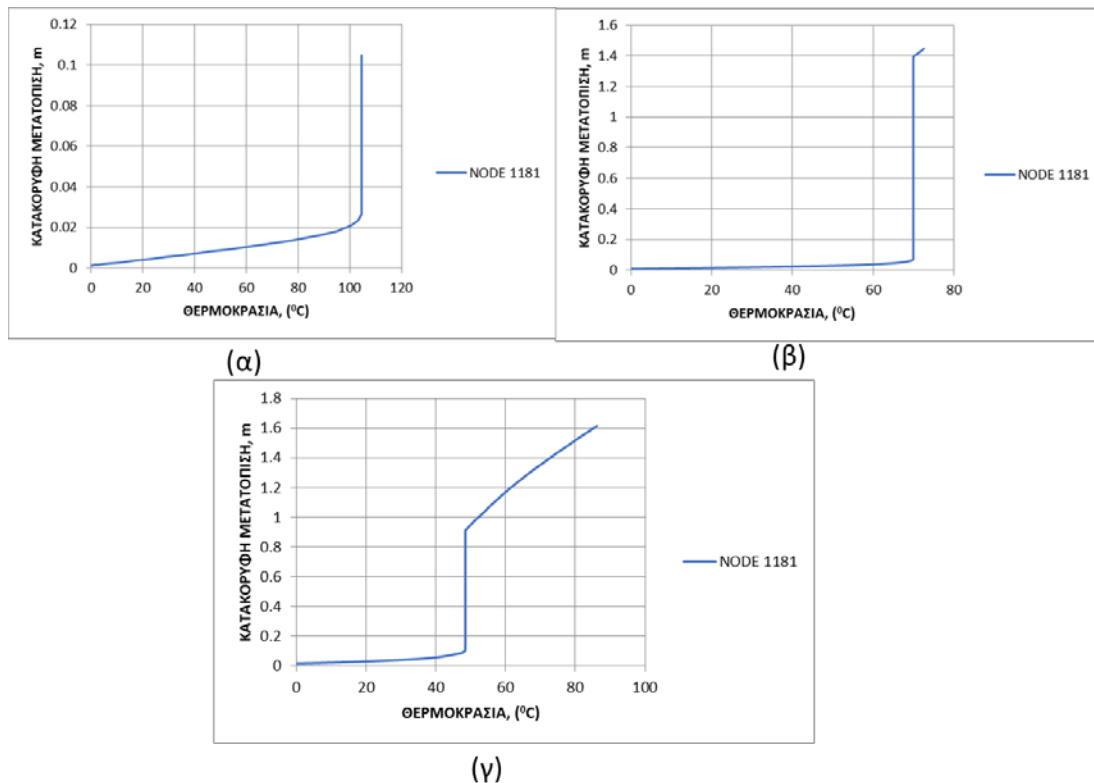


Σχήμα 4.26 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.8$ m.



Σχήμα 4.27 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα στο σημείο A και (β) πριν τον λυγισμό στα σημεία B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 1.2$ m.

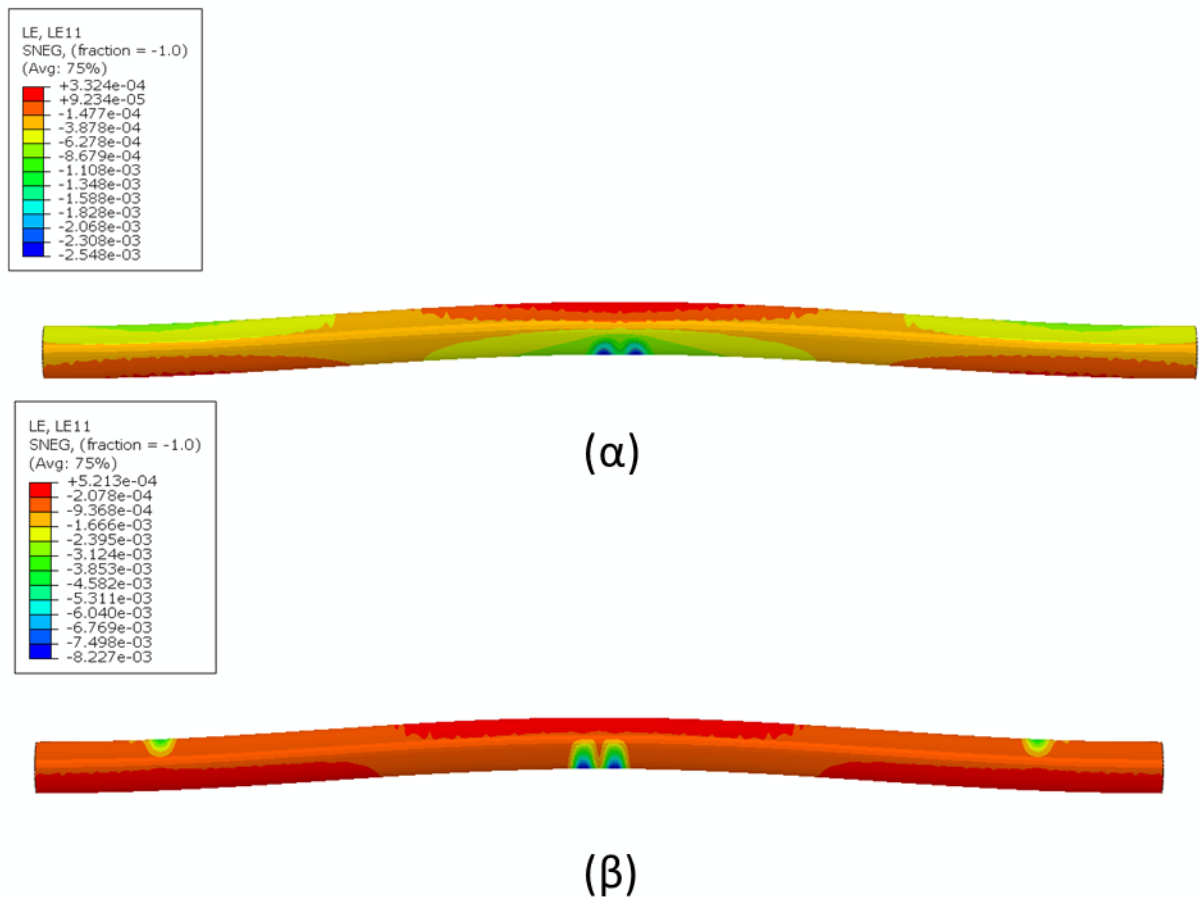
Από το Σχήμα 4.28α προκύπτει ότι η κατακόρυφη μετατόπιση U πριν την δημιουργία λυγισμού στο σημείο A είναι ίση με 0.0125m. Επιπλέον η $\Delta T_{cr} = 104.65^\circ\text{C}$, για την Θ_{cr} και $V_i = 0.4$ m. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.28β προκύπτει $U = 0.05$ m στο σημείο A και $U = 0.07$ m στα σημεία B,C για την τιμή $V_i = 0.8$ m. Η θερμοκρασία ΔT για την τιμή θερμοκρασίας που παρατηρείται τοπικός λυγισμός στα σημεία B,C ισούται με 64.94°C και αντίστοιχα για την Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 69.36^\circ\text{C}$ με την απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C να είναι ίση με 16.71 m. Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.28γ για τιμή $V_i = 1.2$ m, η μετατόπιση ισούται με $U = 0.07$ m για τα σημεία A,B,C, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας $\Delta T = 40.95^\circ\text{C}$ και 48.26°C για τα σημεία B,C και την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ των B,C ισούται με 16.99 m.



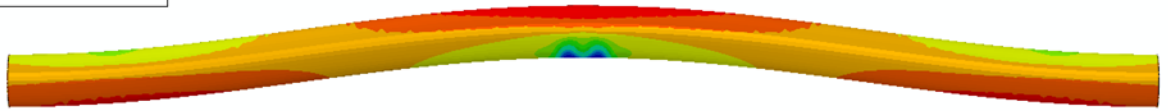
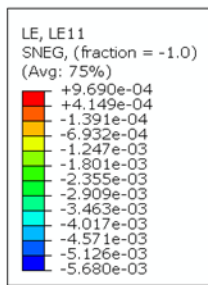
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.

4.2.2 Μέτρο Ελαστικότητας $E = 10 \text{ MPa}$

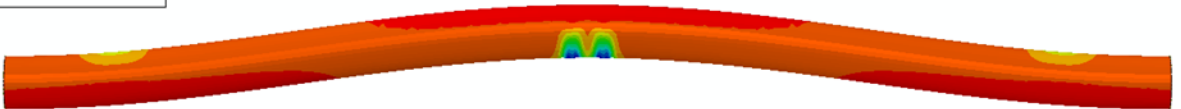
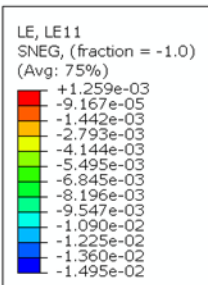
Στα Σχήματα 4.29-4.31 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας. Έπειτα, στα Σχήματα 4.32-4.34 παρουσιάζεται η τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης κατά μήκος του αγωγού ακριβώς πριν από την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A, που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού, καθώς και στα σημεία B και C, όπου επίσης παρατηρείται τοπικός λυγισμός. Επιπλέον, απεικονίζει την στιγμή πριν από την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} κατά την οποία συμβαίνει απότομη αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία. Για τιμές $V_i = 0.4 \text{ m}$ και 1.2 m παρατηρείται τοπικός λυγισμός στα σημεία A,B,C καθώς και πριν από την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} στην πάνω και κάτω ίνα του αγωγού, ενώ για $V_i = 0.8 \text{ m}$ προκύπτει τοπικός λυγισμός, αρχικά στο σημείο A και στην συνέχεια στα σημεία B,C ταυτόχρονα με την Θ_{cr} .



Σχήμα 4.29 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.4$ m.

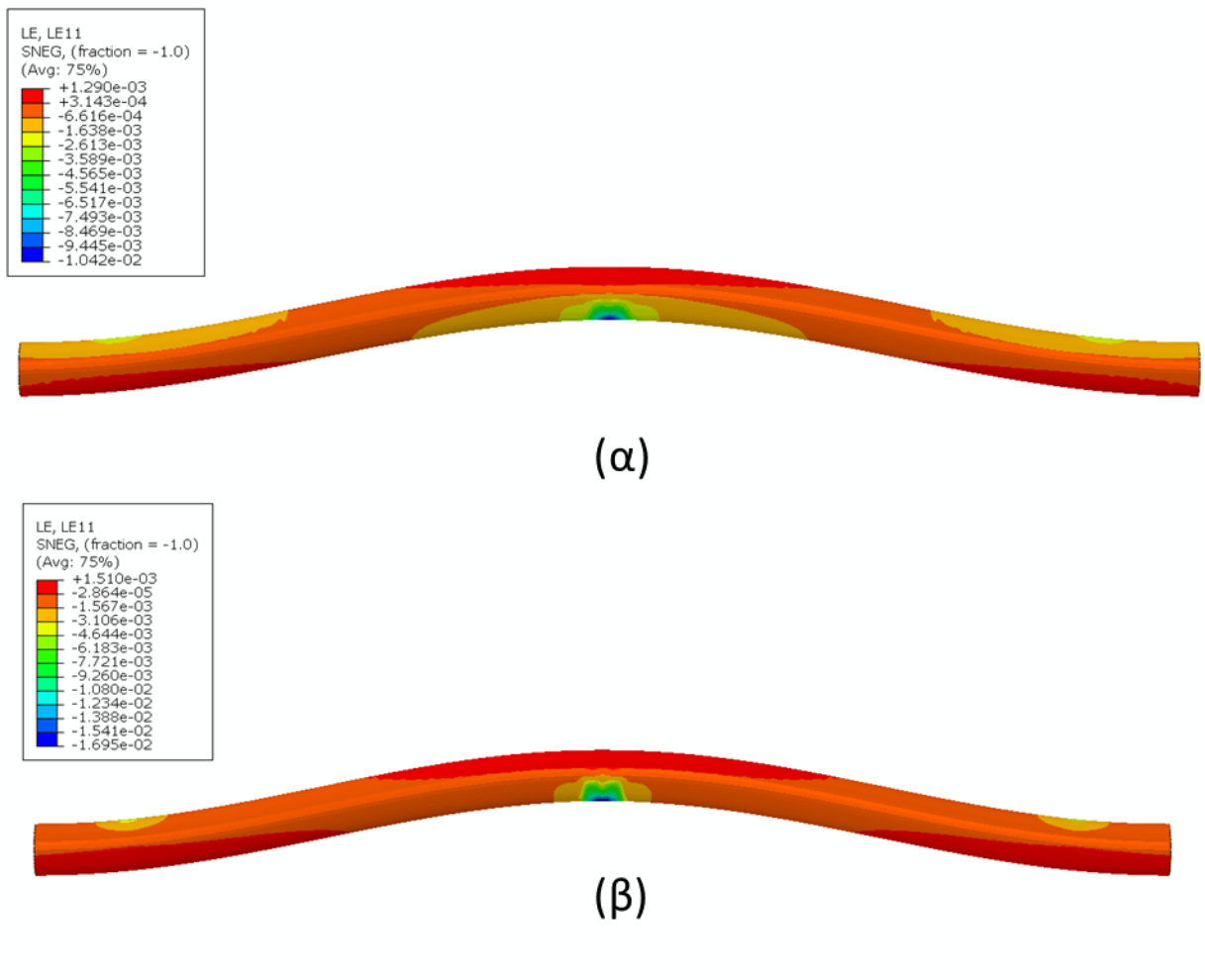


(α)



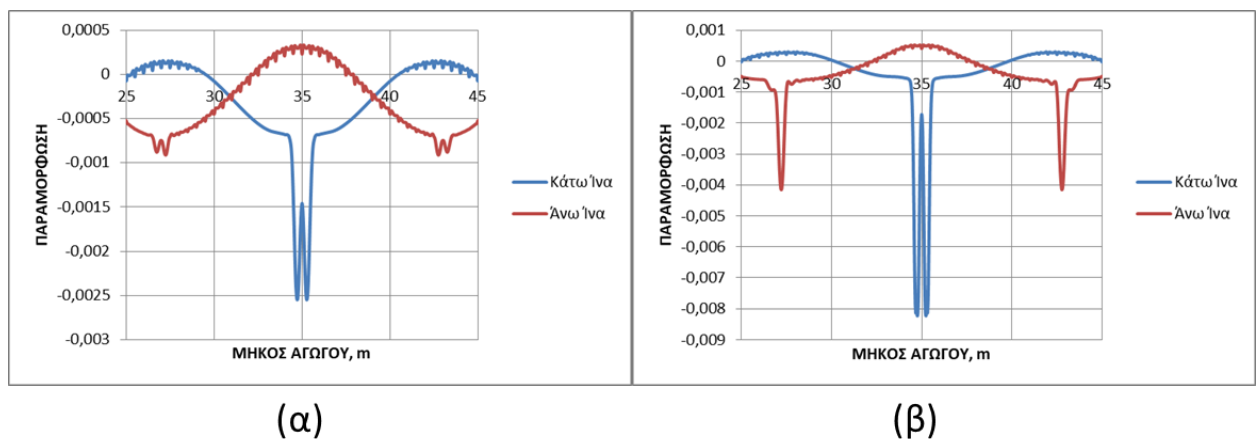
(β)

Σχήμα 4.30 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A και (β) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία B,C καθώς και στην κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.8$ m.



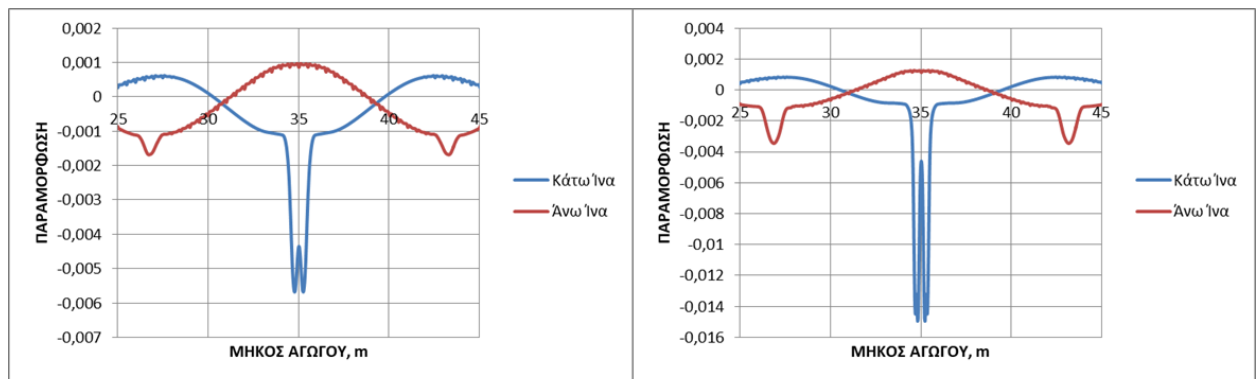
Σχήμα 4.31 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.

53



Σχήμα 4.32 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.4$ m.

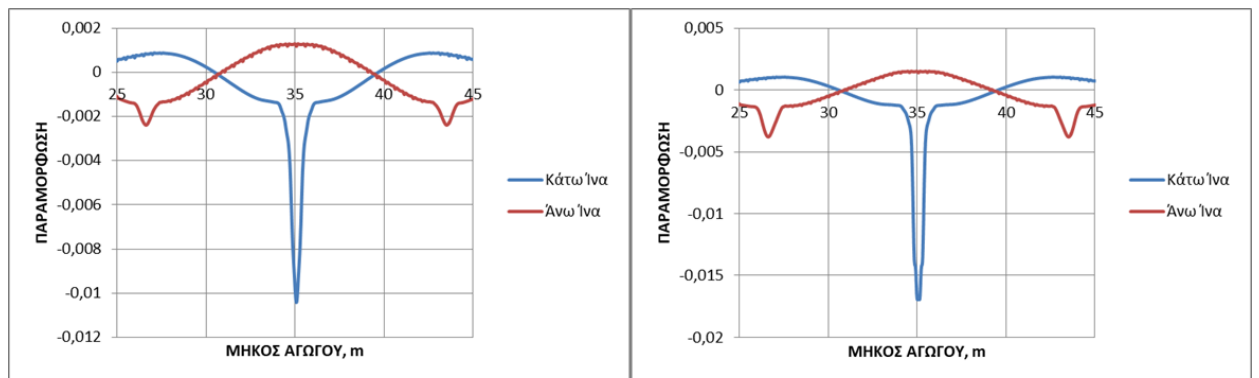
63



(α)

(β)

Σχήμα 4.33 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα στο σημείο A και (β) πριν τον λυγισμό στα σημεία B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 0.8 \text{ m}$.



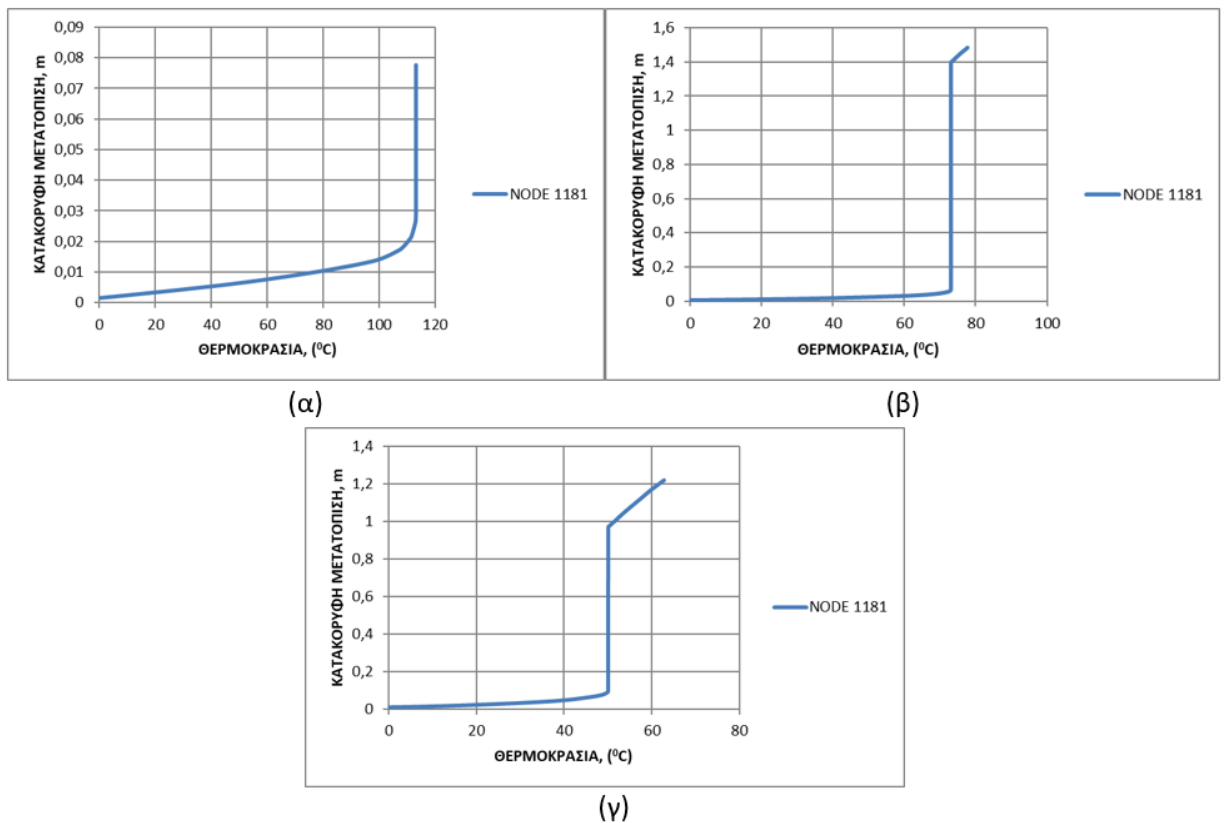
(α)

(β)

Σχήμα 4.34 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 1.2 \text{ m}$.

Από το Σχήμα 4.35α προκύπτει ότι κατακόρυφη μετατόπιση U πριν την δημιουργία λυγισμού στο σημείο A ταυτίζεται με την αντίστοιχη των σημείων B,C, καθώς συμβαίνει για την ίδια τιμή θερμοκρασίας, και είναι ίση με 0.018 m . Επιπλέον, η θερμοκρασία ακριβώς πριν την δημιουργία λυγισμού στα σημεία B,C είναι $\Delta T = 106.96^\circ\text{C}$ ενώ την στιγμή της Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 113^\circ\text{C}$.

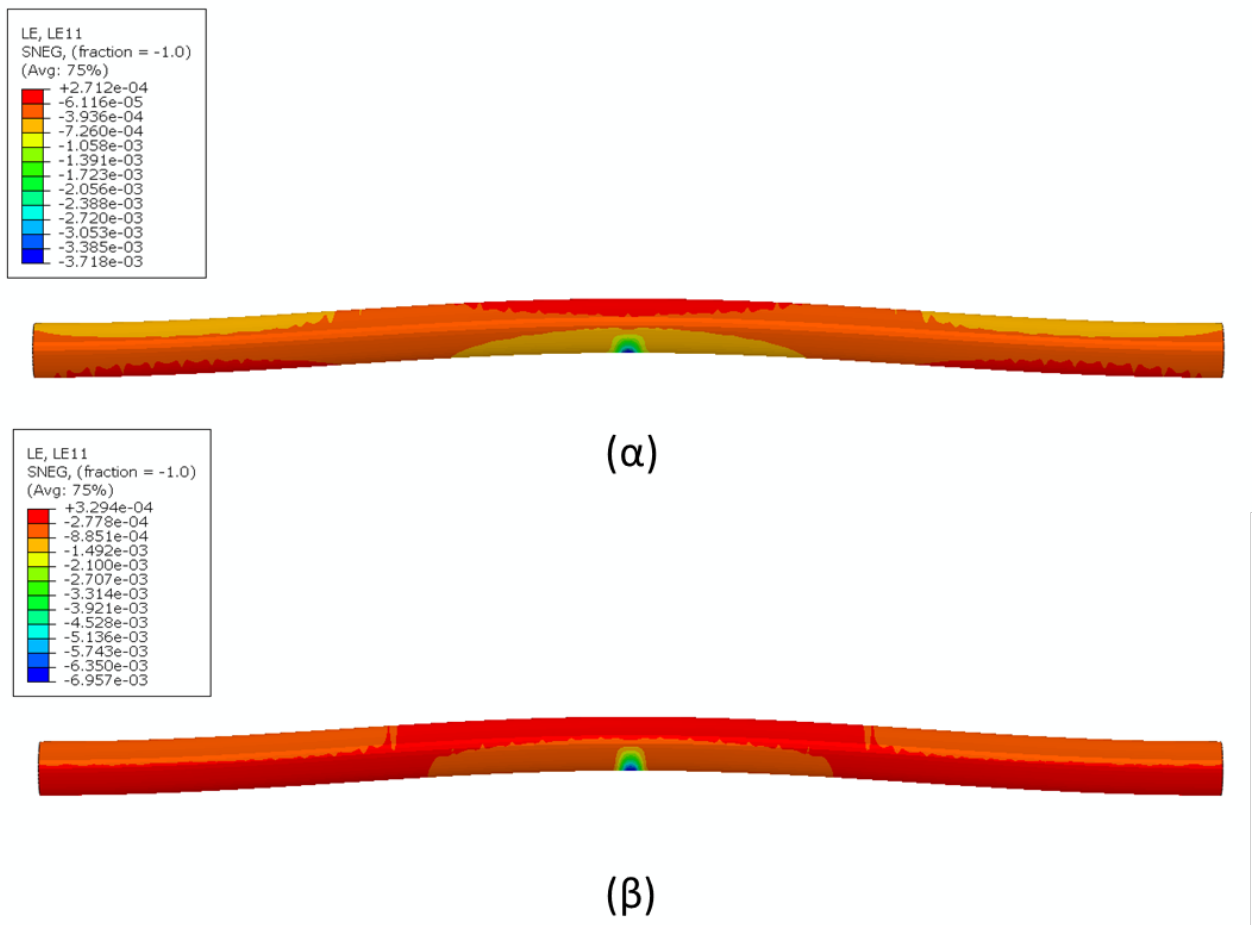
Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C είναι ίση με 15.58 m για $V_i = 0.4$ m. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.35β προκύπτει $U = 0.054$ m στο σημείο A και $U = 0.054$ m στα σημεία B,C για την τιμή $V_i = 0.8$ m. Η θερμοκρασία ΔT όταν δημιουργείται λυγισμός στα σημεία B,C ισούται με 70.39°C και αντίστοιχα για την Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 73.07^\circ\text{C}$ με την απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C να είναι ίση με 15.62 m. Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.35γ για τιμή $V_i = 1.2$ m, η μέγιστη μετατόπιση ισούται με $U = 0.08$ m για τα σημεία A,B,C, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας $\Delta T = 47.33^\circ\text{C}$ και $\Delta T_{cr} = 49.79^\circ\text{C}$ για τα σημεία B,C και την Θ_{cr} αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ των B,C ισούται με 16.72 m.



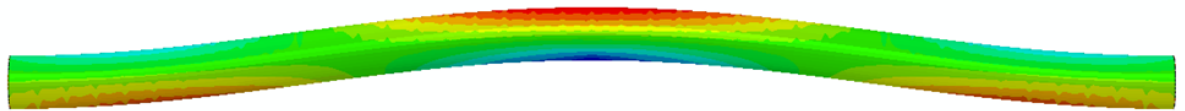
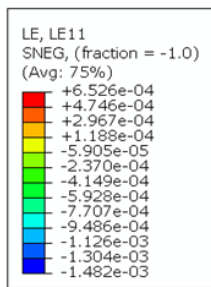
Σχήμα 4.35 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.

4.2.3 Μέτρο Ελαστικότητας $E = 25 \text{ MPa}$

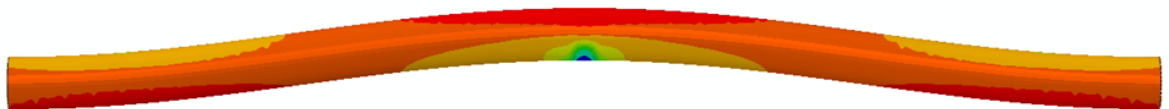
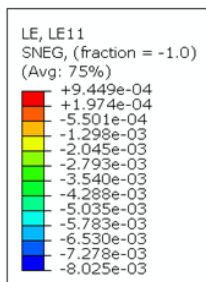
Στα Σχήματα 4.36-4.38 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας. Έπειτα, στα Σχήματα 4.39-4.41 παρουσιάζεται η τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης κατά μήκος του αγωγού για τις ίδιες τιμές θερμοκρασίας, δηλαδή, ακριβώς πριν από την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A, που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού, καθώς και στα σημεία B και C, όπου επίσης παρατηρείται τοπικός λυγισμός. Επιπλέον, απεικονίζει την στιγμή πριν από την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} κατά την οποία συμβαίνει απότομη αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία. Για $V_i = 0.4 \text{ m}$ παρατηρείται τοπικός λυγισμός στο σημείο A, ενώ ακολουθεί η τιμή κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} στην πάνω και κάτω ίνα του αγωγού. Για $V_i = 0.8 \text{ m}$ προκύπτει τοπικός λυγισμός, αρχικά στο σημείο A και στην συνέχεια στα σημεία B, C ταυτόχρονα με την Θ_{cr} . Τέλος για $V_i = 1.2 \text{ m}$ προκύπτει τοπικός λυγισμός σχεδόν ταυτόχρονα στα σημεία A, B, C και ακολουθεί η κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} .



Σχήμα 4.36 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο A και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία T_{cr} για $V_i = 0.4$ m.

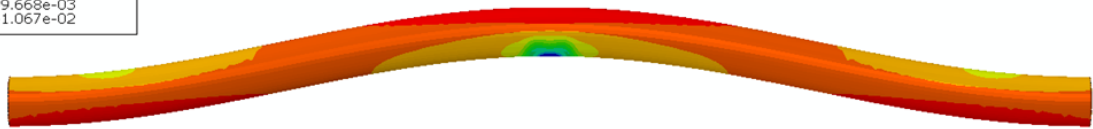
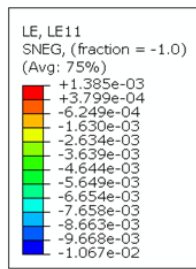


(α)

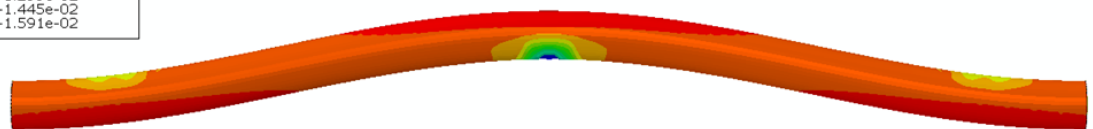
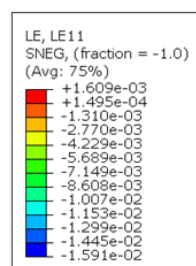


(β)

Σχήμα 4.37 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο Α και (β) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία Β, C καθώς και στην κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.8$ m.

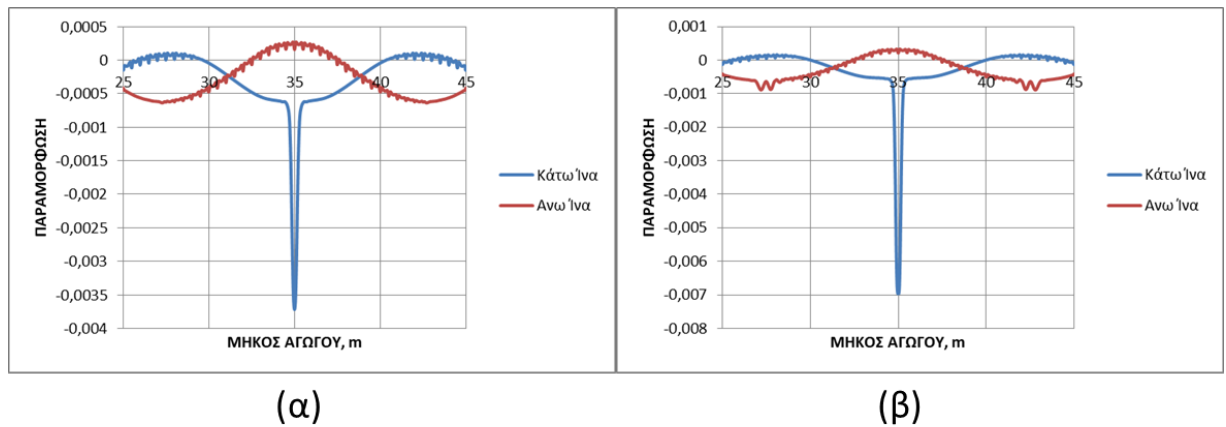


(α)

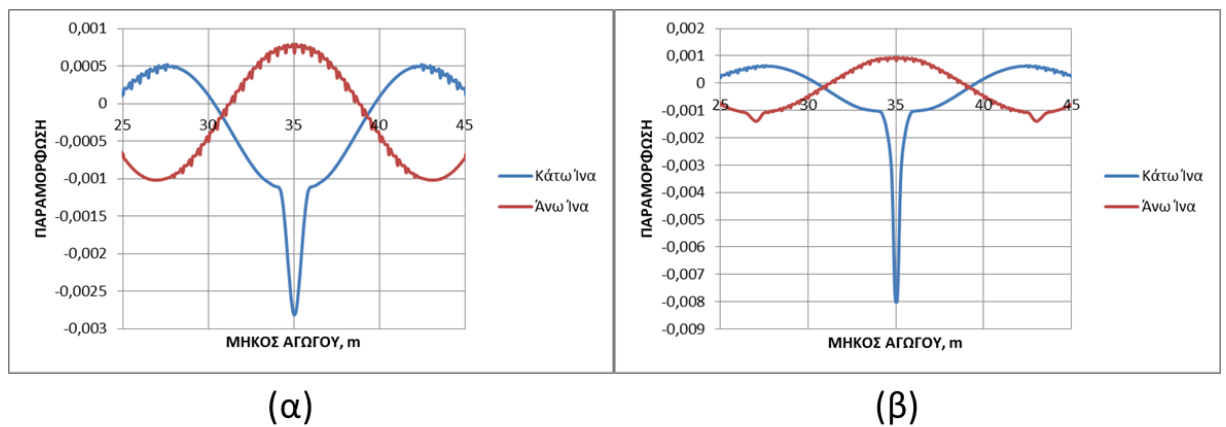


(β)

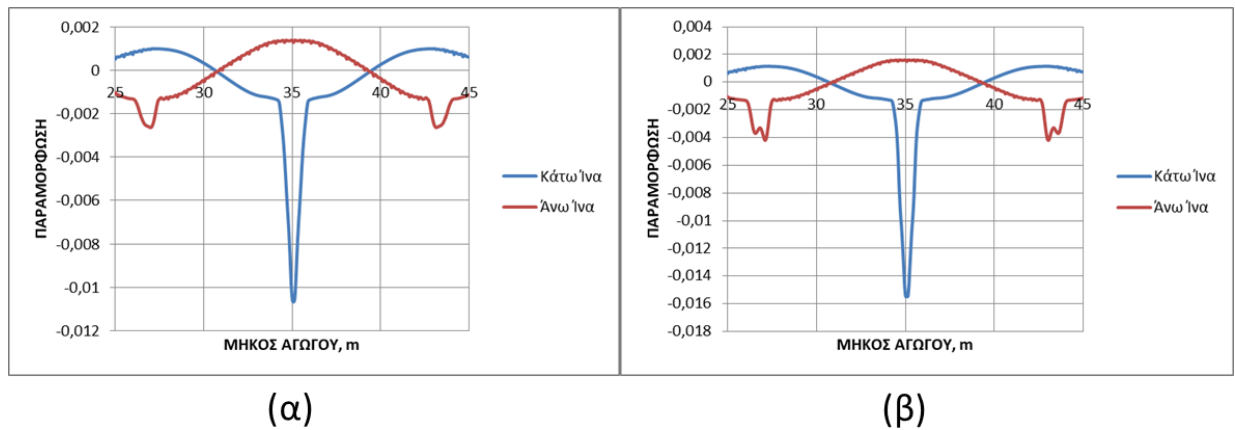
Σχήμα 4.38 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



Σχήμα 4.39 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.4$ m.

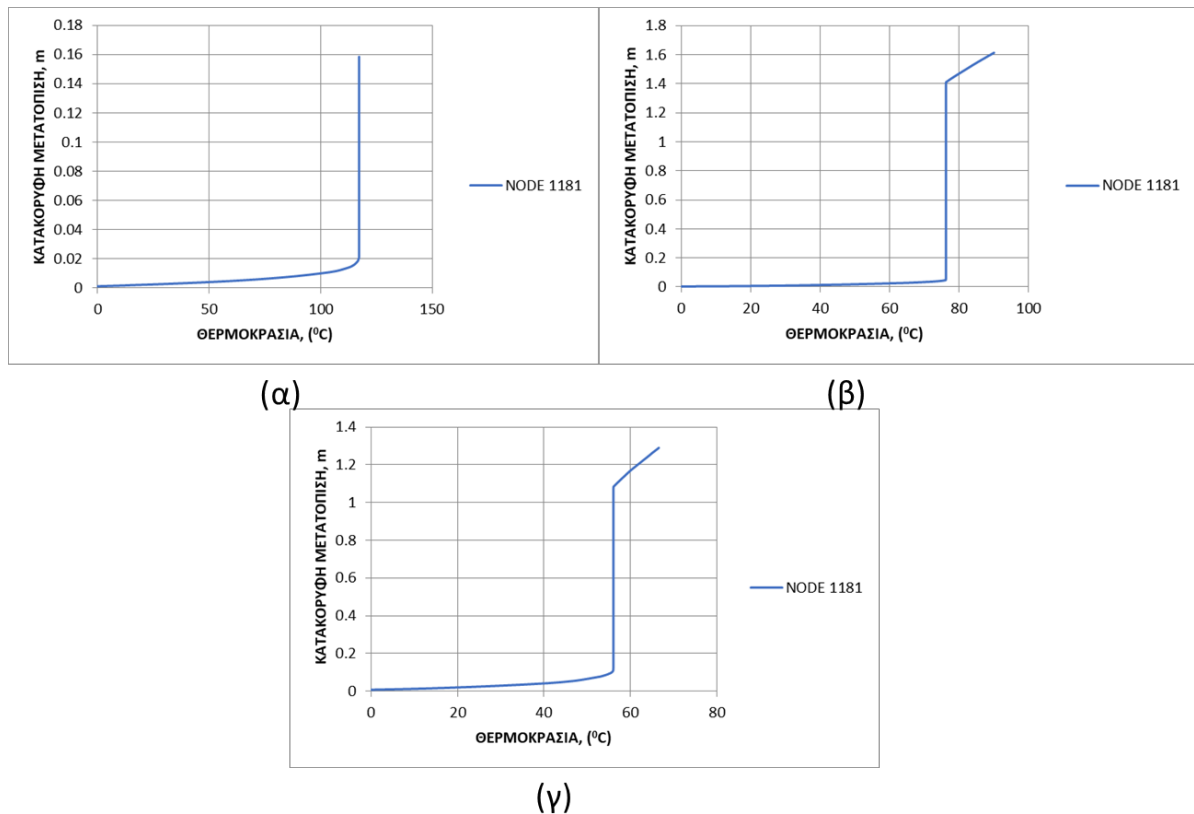


Σχήμα 4.40 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα στο σημείο A και (β) πριν τον λυγισμό στα σημεία B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 0.8$ m.



Σχήμα 4.41 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 1.2 \text{ m}$.

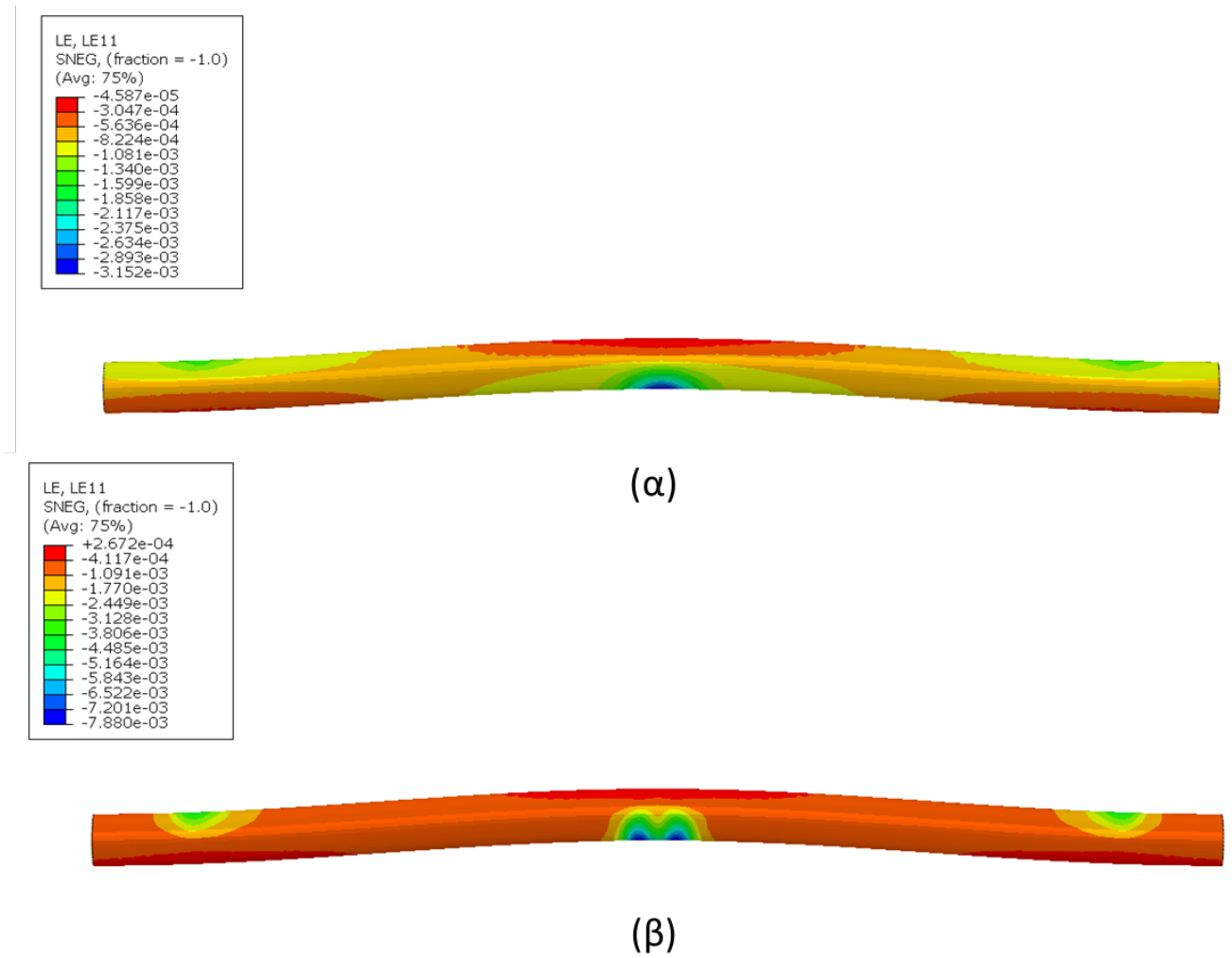
Από το Σχήμα 4.42α προκύπτει ότι η κατακόρυφη μετατόπιση U πριν την δημιουργία λυγισμού στο σημείο A είναι ίση με 0.015 m . Επιπλέον, η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή Θ_{cr} , $\Delta T_{cr} = 115.86^\circ\text{C}$, για $V_i = 0.4 \text{ m}$. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.42β προκύπτει $U = 0.04 \text{ m}$ στο σημείο A και $U = 0.05 \text{ m}$ στα σημεία B,C για την τιμή $V_i = 0.8 \text{ m}$. Παρατηρείται τοπικός λυγισμός στα σημεία B,C ταυτόχρονα με την Θ_{cr} , οπότε προκύπτει $\Delta T_{cr} = 75.44^\circ\text{C}$ με την απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C να είναι ίση με 15.2 m . Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.42γ για τιμή $V_i = 1.2 \text{ m}$, η μέγιστη μετατόπιση ισούται με $U = 0.1 \text{ m}$ για τα σημεία A,B,C, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας $\Delta T = 52.94^\circ\text{C}$ και $\Delta T_{cr} = 55.36^\circ\text{C}$ για τα σημεία B,C και Θ_{cr} αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ των B,C ισούται με 15.75 m .



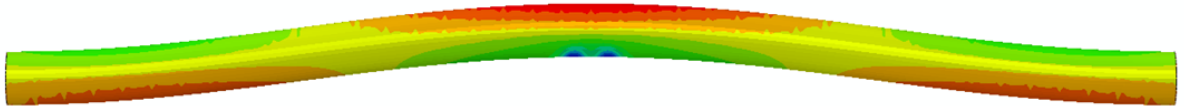
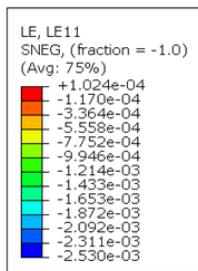
Σχήμα 4.42 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.

4.3 Εσωτερική Πίεση $P = 10$ MPa

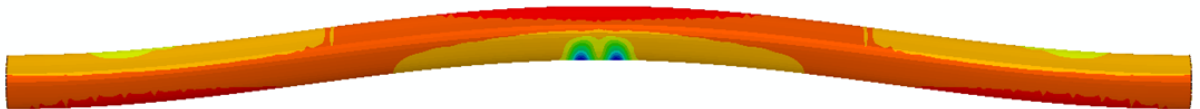
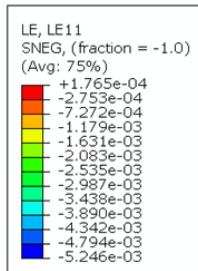
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την τιμή εσωτερικής πίεσης $P = 10$ MPa. Σταθερές παραμένουν οι τιμές της συνοχής $c = 20$ kPa, του μέτρου ελαστικότητας $E = 10$ MPa, του πάχους $t = 0.127$ m, και το μήκος ατέλειας $L = 20$ m. Ομοίως με τις προηγούμενες ενότητες, παρουσιάζονται αποτελέσματα για τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας. Πριν συμβεί λυγισμός στα σημεία A,B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Στα Σχήματα 4.43-4.45 παρουσιάζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού. Στα Σχήματα 4.46-4.47 παρουσιάζεται η πλαστική παραμόρφωση, σε σχέση με το μήκος του αγωγού στην άνω και κάτω ίνα του αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4$, 0.8 και 1.2 m. Για την τιμή $V_i = 0.4$ και 1.2 m παρατηρείται τοπικός λυγισμός στα σημεία A,B,C και ακολουθεί η κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Για την τιμή $V_i = 0.8$ m παρατηρείται αρχικά τοπικός λυγισμός στο σημείο A και ακολουθεί τοπικός λυγισμός στα σημεία B,C σχεδόν ταυτόχρονα με την Θ_{cr} .



Σχήμα 4.43 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $Vi = 0.4$ m.

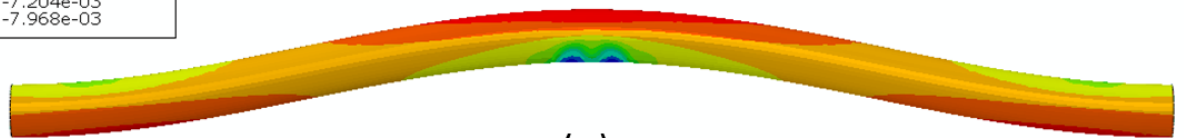
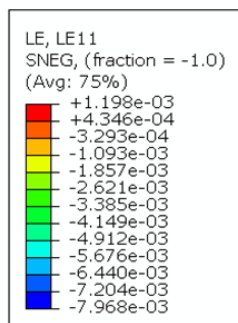


(α)

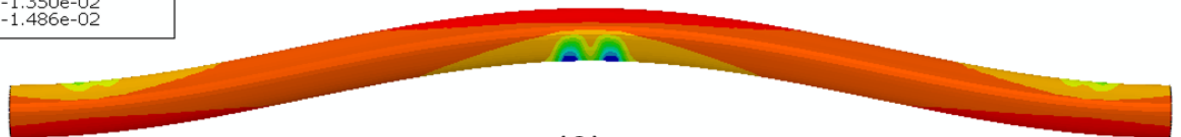
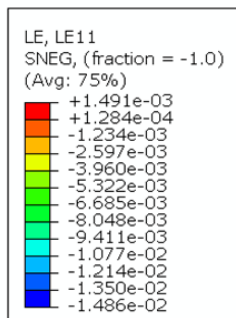


(β)

Σχήμα 4.44 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στο σημείο Α και (β) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία Β, C καθώς και στην κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.8$ m.

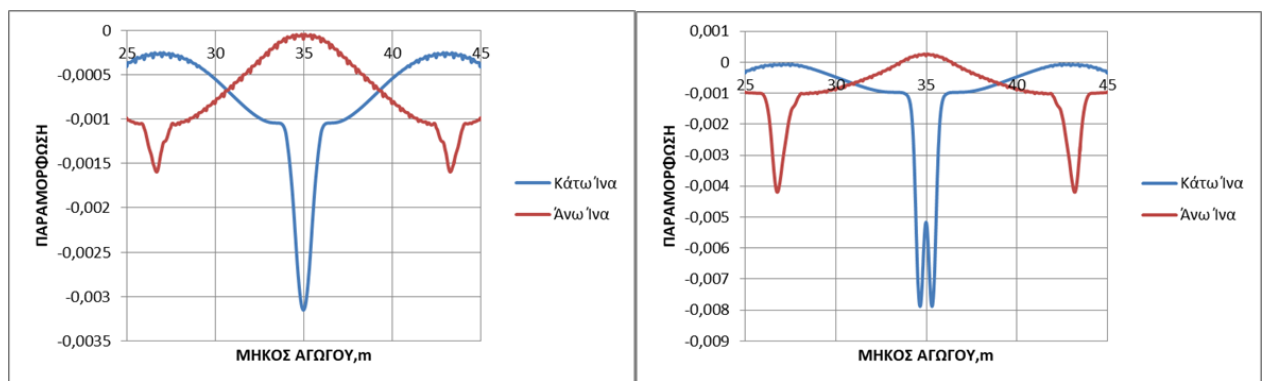


(α)



(β)

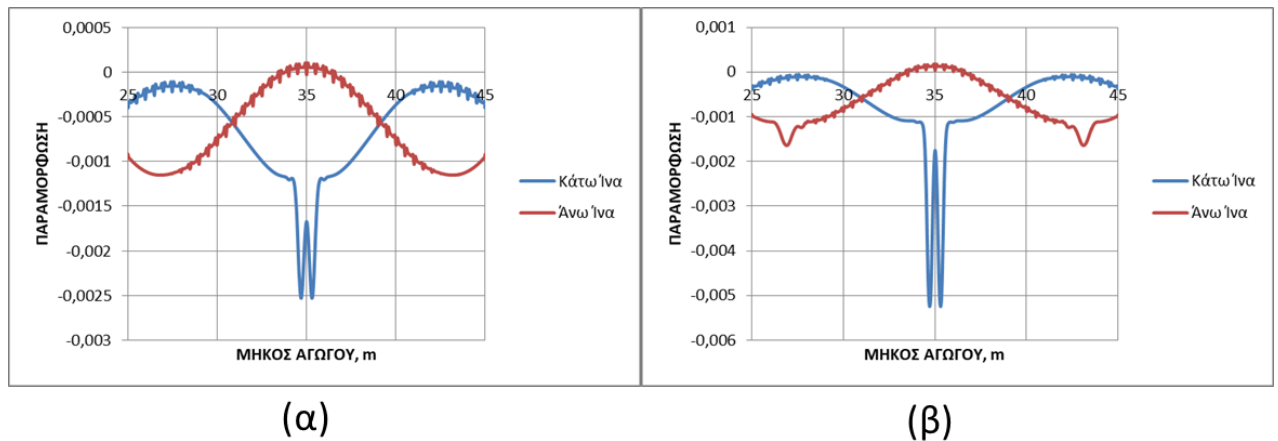
Σχήμα 4.45 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν την δημιουργία τοπικού λυγισμού στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



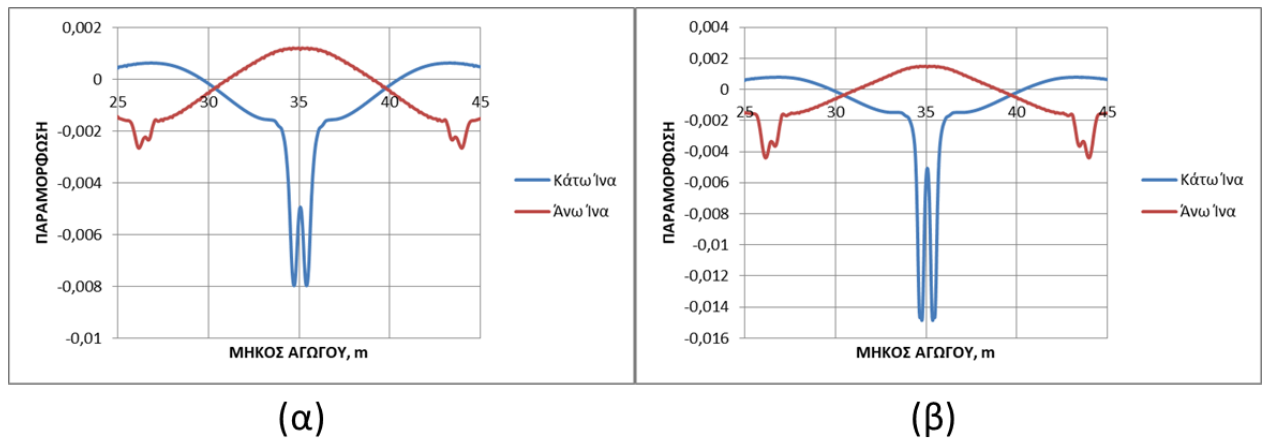
(α)

(β)

Σχήμα 4.46 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 0.4$ m.



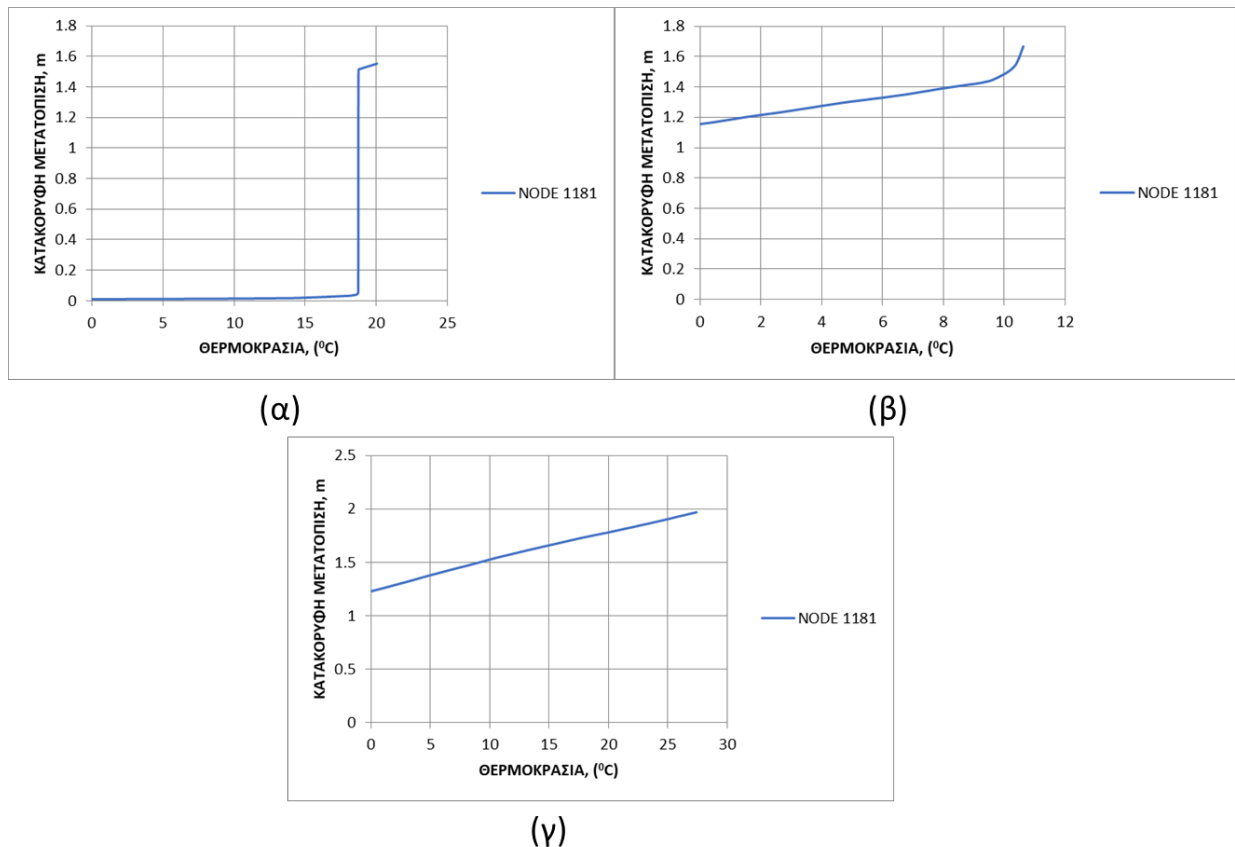
Σχήμα 4.47 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα στο σημείο A και (β) πριν τον λυγισμό στα σημεία B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 0.8$ m.



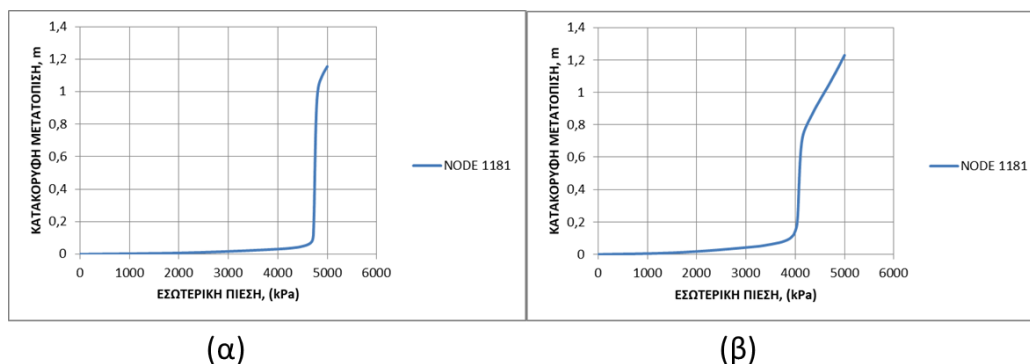
Σχήμα 4.48 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 1.2$ m.

Από το Σχήμα 4.49α προκύπτει ότι η μετατόπιση U πριν την δημιουργία λυγισμού στα σημεία A,B,C είναι ίση με 0.02 m. Επιπλέον, η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή ακριβώς πριν από την δημιουργία των B,C είναι $\Delta T = 14.7$ °C με την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} να ισούται με 18.55 °C . Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C είναι ίση με 16.44 m , για $V_i = 0.4$ m. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.50α προκύπτει $U = 0.022$ m στο σημείο A και $U = 0.027$ m στα σημεία B,C για την τιμή $V_i = 0.8$ m, με την απόσταση B,C ίση με 16.85 m. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ο τοπικός λυγισμός στα σημεία A και B,C συμβαίνει κατά την διάρκεια άσκησης της εσωτερικής πίεσης σύμφωνα με το Σχήμα 4.50α.

Το αποτέλεσμα αυτό, παρατηρείται εξαιτίας της αύξησης της εσωτερικής πίεσης σε συνδυασμό με ένα αυξημένο ύψος ατέλειας. Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.50β για τιμή $V_i = 1.2$ m, η μέγιστη μετατόπιση ισούται με $U = 0.098$ m, και η απόσταση μεταξύ B,C ίση με 17.52 m, ενώ ομοίως λυγισμός παρατηρείται κατά την διάρκεια της άσκησης εσωτερικής πίεσης με αποτέλεσμα την απουσία Θ_{cr} .



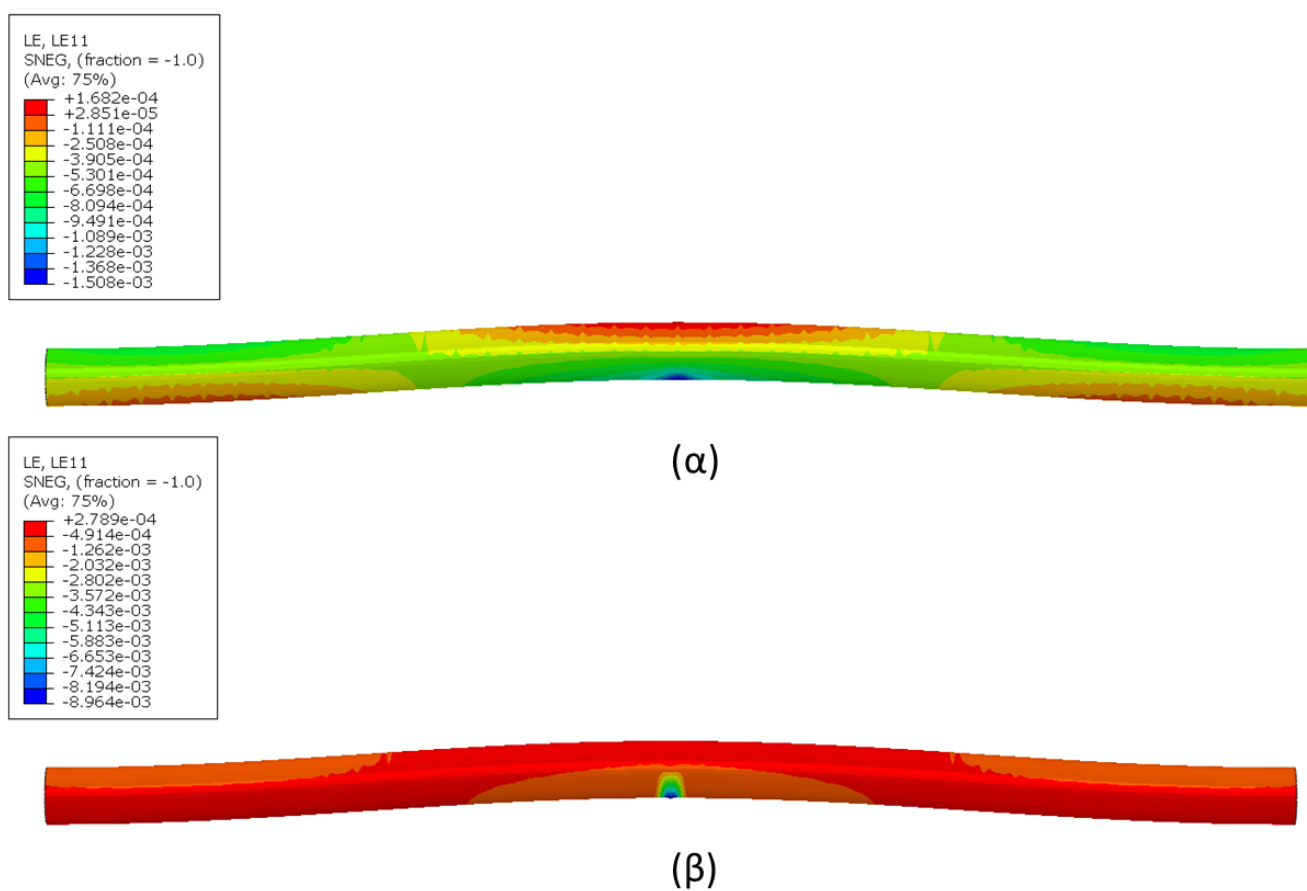
Σχήμα 4.49 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.



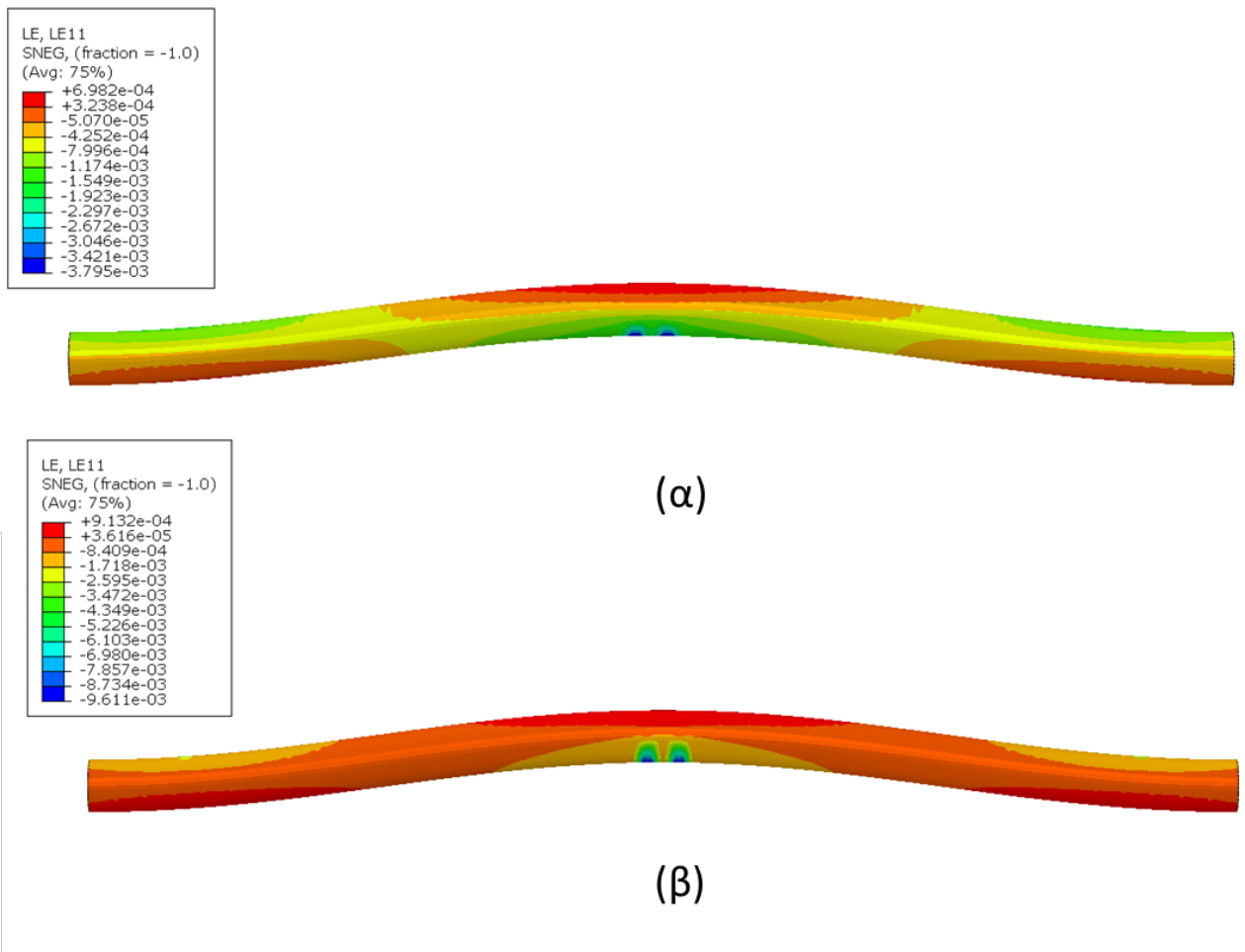
Σχήμα 4.50 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την εσωτερική πίεση για (α) $V_i = 0.8$ m, (β) $V_i = 1.2$ m.

4.4 Πάχος $t = 0.009525$ m

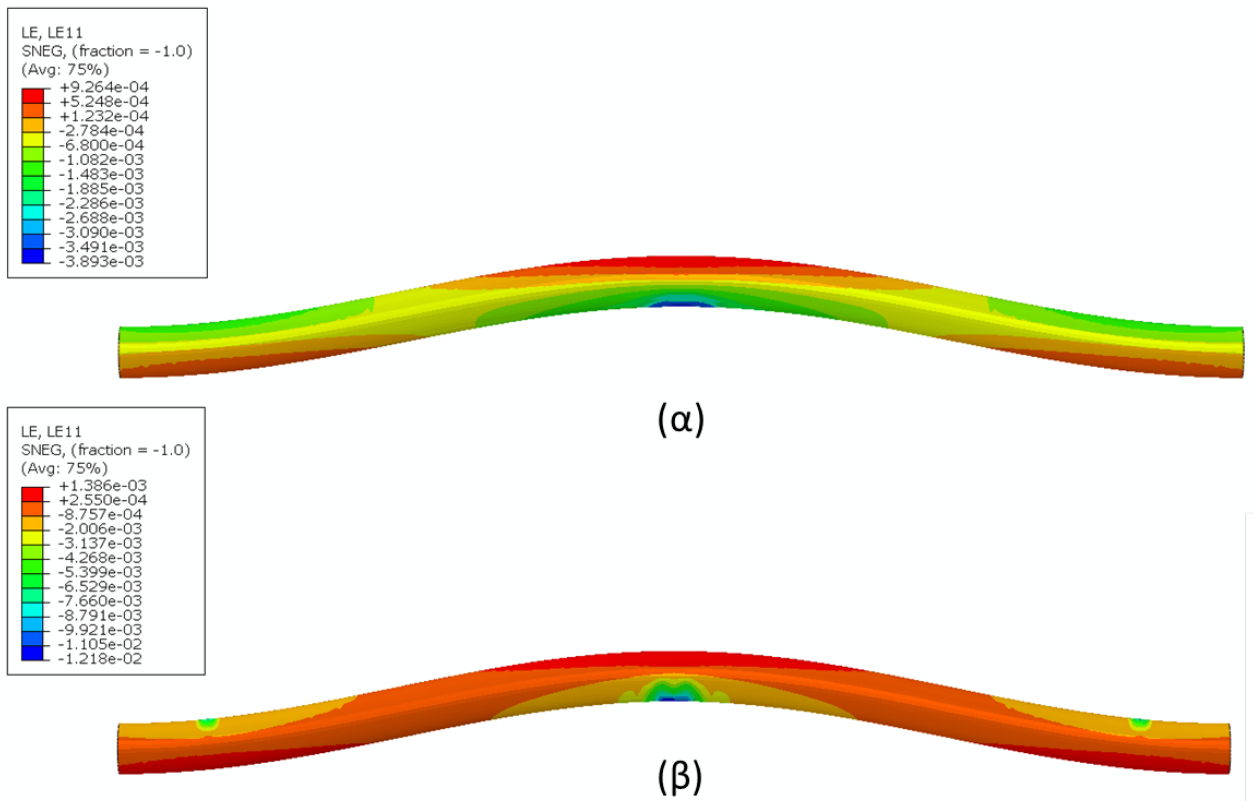
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την τιμή πάχους $t = 0.009525$ m. Σταθερές παραμένουν οι τιμές της συνοχής $c = 20$ kPa, του μέτρου ελαστικότητας $E = 10$ MPa, της εσωτερικής πίεσης $P = 5$ MPa και το μήκος ατέλειας $L = 20$ m. Ομοίως με τις προηγούμενες ενότητες, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται πριν συμβεί λυγισμός στα σημεία A,B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Στα Σχήματα 4.51-4.53 παρουσιάζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού. Στα Σχήματα 4.54-4.56 παρουσιάζεται η πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει του μήκους του αγωγού στην άνω και κάτω ίνα του αγωγού, για τρεις διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4, 0.8$ και 1.2 m.



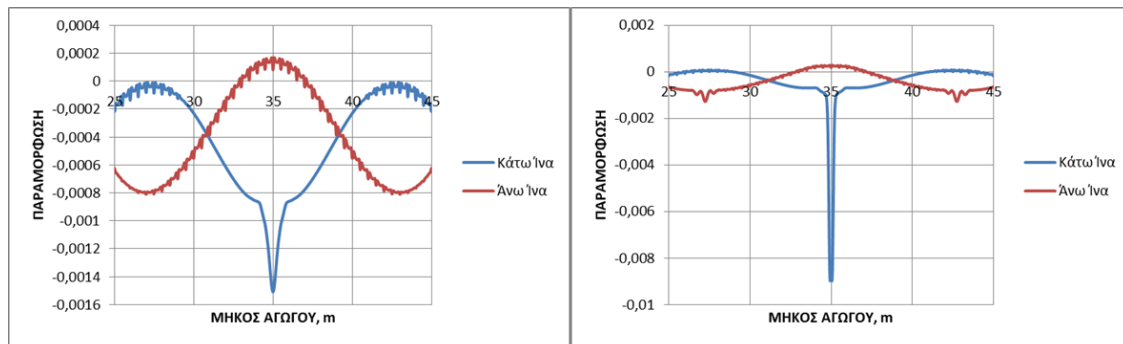
Σχήμα 4.51 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0,4$ m.



Σχήμα 4.52 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο Α (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία Β, C και από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0,8 \text{ m}$.



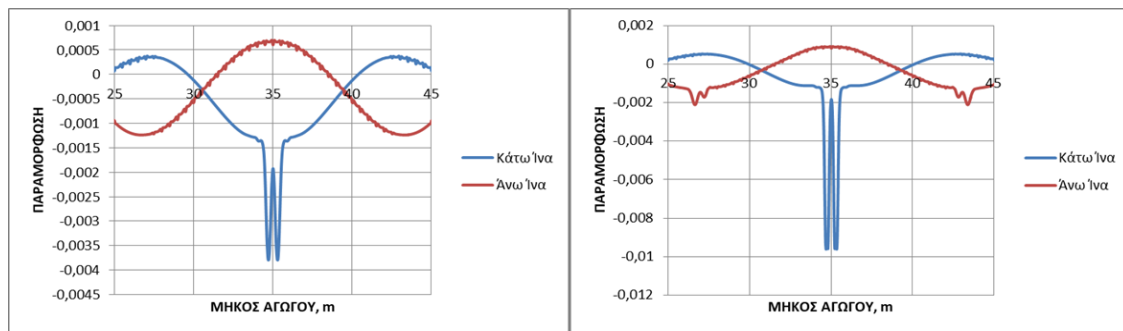
Σχήμα 4.53 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία A,B,C (β) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



(α)

(β)

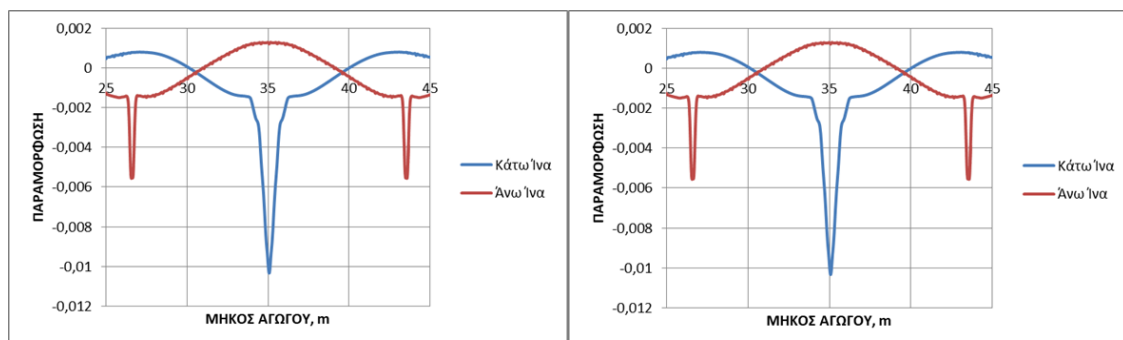
Σχήμα 4.54 Διάγραμμα που παρουσιάζει την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού (α) πριν τον λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.4$ m.



(α)

(β)

Σχήμα 4.55 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα στο σημείο A και (β) πριν τον λυγισμό στα σημεία B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 0.8$ m.

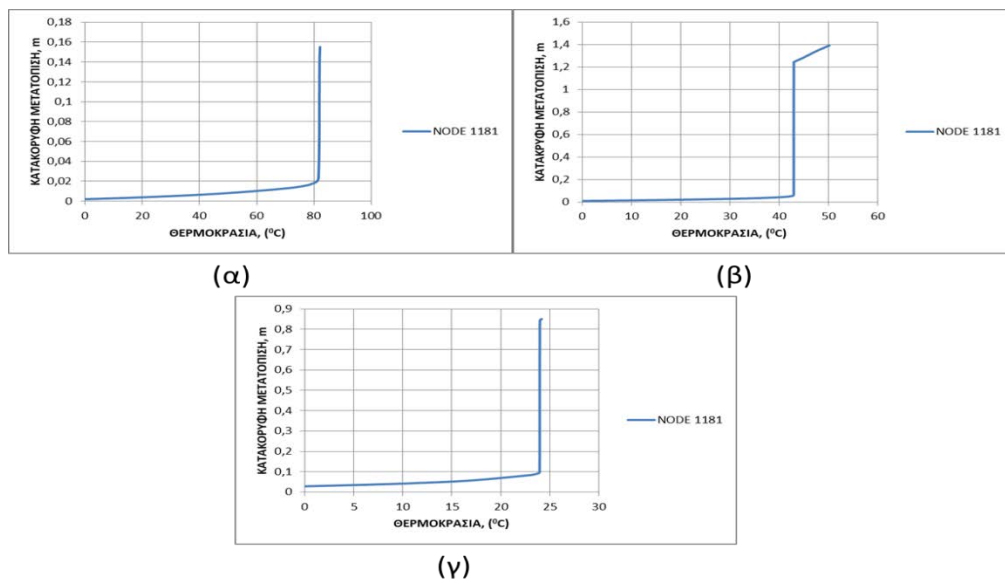


(α)

(β)

Σχήμα 4.56 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στα σημεία A,B,C και (β) πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} για $V_i = 1.2$ m.

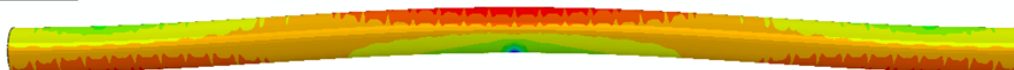
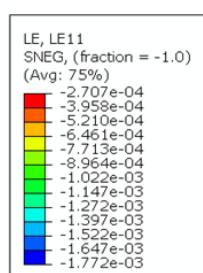
Η μετατόπιση U πριν την δημιουργία λυγισμού στο σημείο A από το Σχήμα 4.57α, είναι ίση με 0.017 m στο τέλος της ανάλυσης, ενώ η κρίσιμη θερμοκρασία ισούται με $\Delta T_{cr} = 81.31$ °C για $V_i = 0.4$ m. Αντίστοιχα, από το Σχήμα 4.57β προκύπτει $U = 0.044$ m στο σημείο A και $U = 0.062$ m για τα σημεία B,C για τιμή $V_i = 0.8$ m. Η θερμοκρασία ΔT_{cr} την χρονική στιγμή που δημιουργείται λυγισμός στα σημεία B,C ισούται με $\Delta T_{cr} = 42.67$ °C όπως και πριν από την Θ_{cr} καθώς ταυτίζονται. Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία B και C να είναι ίση με 16.68 m. Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.57γ για τιμή $V_i = 1.2$ m, η μετατόπιση ισούται με $U = 0.092$ m για τα σημεία A,B,C καθώς συμβαίνει λυγισμός την ίδια χρονική στιγμή. Η τιμή της θερμοκρασίας $\Delta T = 22.95$ °C και 38.18 °C για τα σημεία B,C και Θ_{cr} αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ B,C ισούται με 16.88 m.



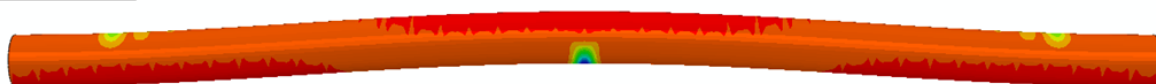
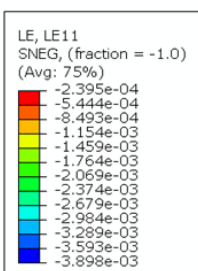
Σχήμα 4.57 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.4$ m, (β) $V_i = 0.8$ m και (γ) $V_i = 1.2$ m.

4.5 Πάχος $t = 0.00635$ m

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν το πάχος $t=0.00635$ m. Σταθερές παραμένουν οι τιμές της συνοχής $c = 20$ kPa, του μέτρου ελαστικότητας $E = 10$ MPa, τα εσωτερικής πίεσης $P = 5$ MPa και το μήκος ατέλειας $L = 20$ m. Ομοίως με τις προηγούμενες ενότητες, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται πριν από την εμφάνιση λυγισμού στα σημεία A,B,C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} . Στα Σχήματα 4.58-4.60 παρουσιάζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού. Στα Σχήματα 4.61-4.63 παρουσιάζεται η παραμόρφωση σε σχέση με το μήκος του αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4, 0.8$ και 1.2 m.

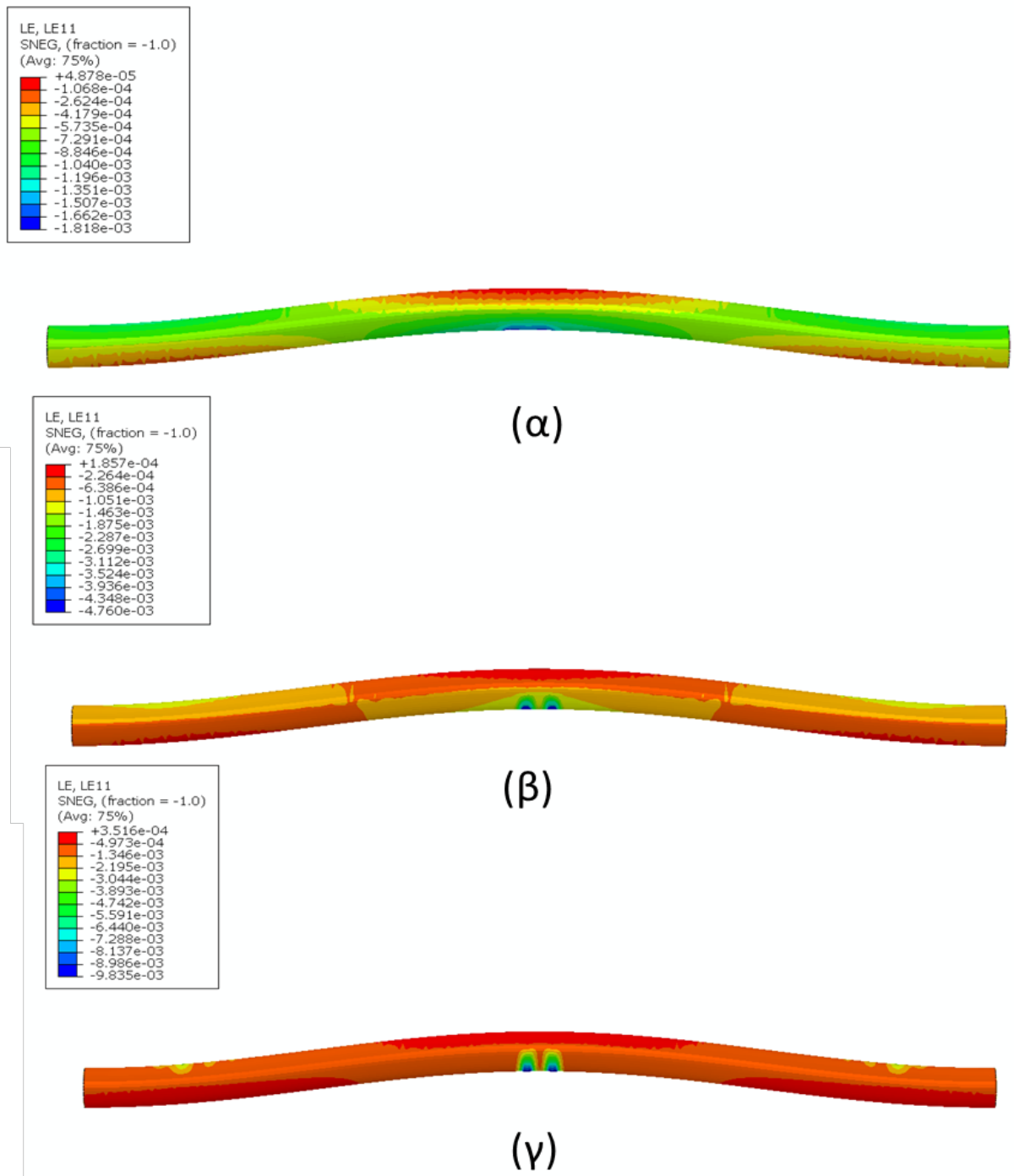


(α)

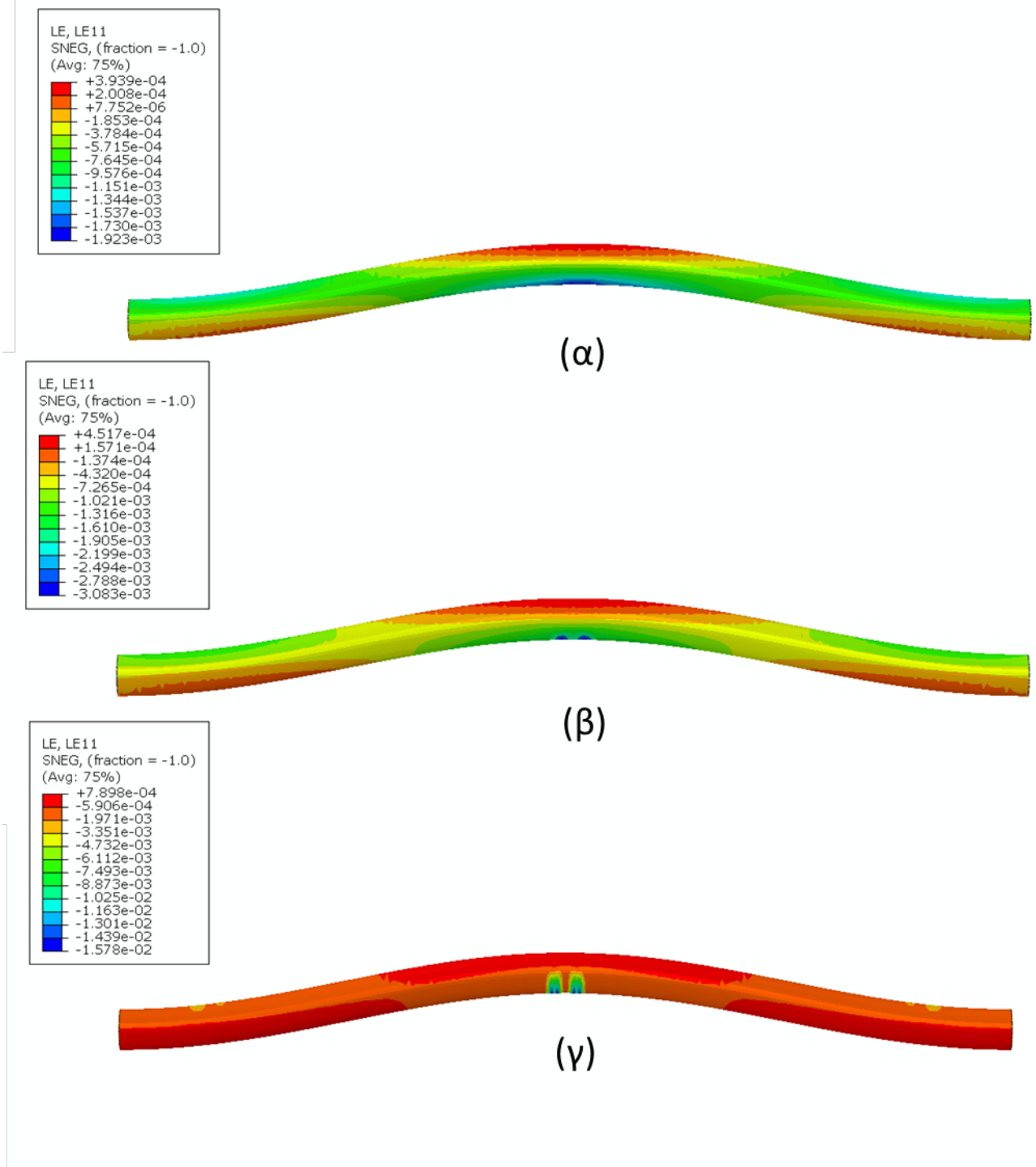


(β)

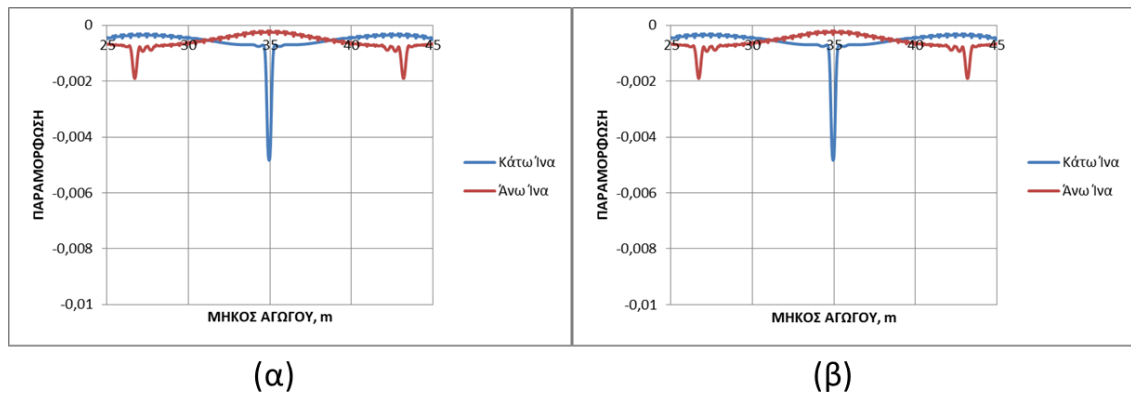
Σχήμα 4.58 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A και (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} για $V_i = 0.4$ m



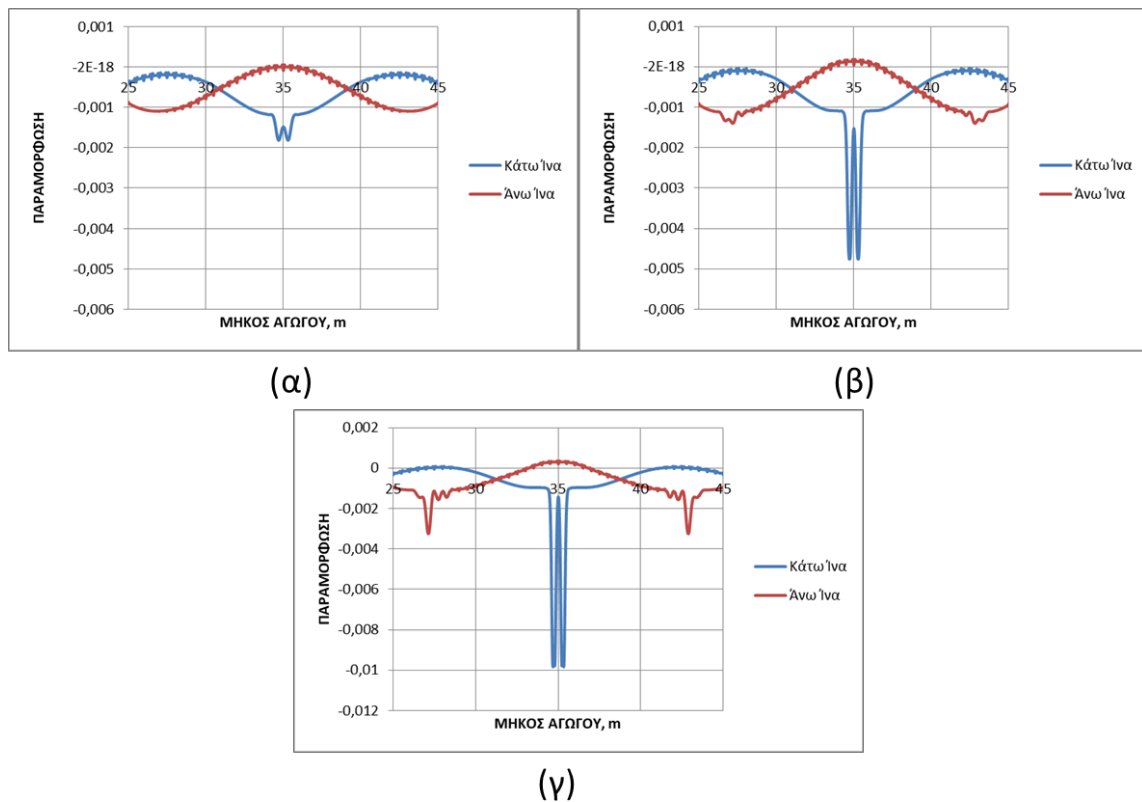
Σχήμα 4.59 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0,8$ m.



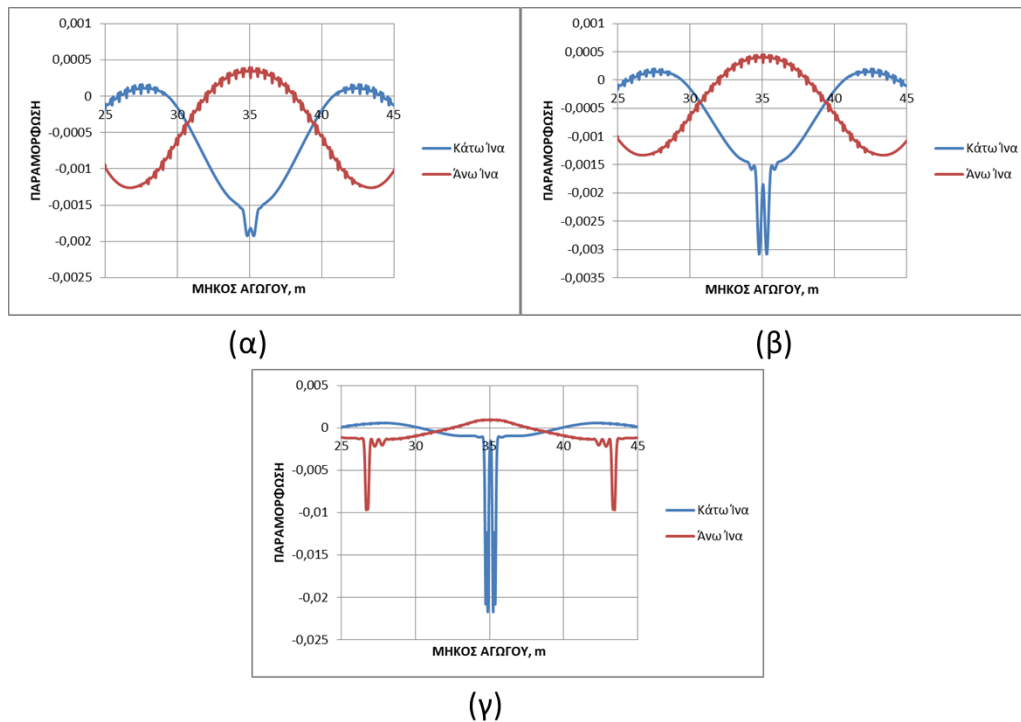
Σχήμα 4.60 Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού τις χρονικές στιγμές, (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο A (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία B,C και (γ) πριν από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 1.2$ m.



Σχήμα 4.61 Διάγραμμα που παρουσιάζει την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον λυγισμό στο σημείο Α και (β) πριν τον λυγισμό στα σημεία Β, C καθώς και πριν την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} , για $V_i = 0.4$ m.

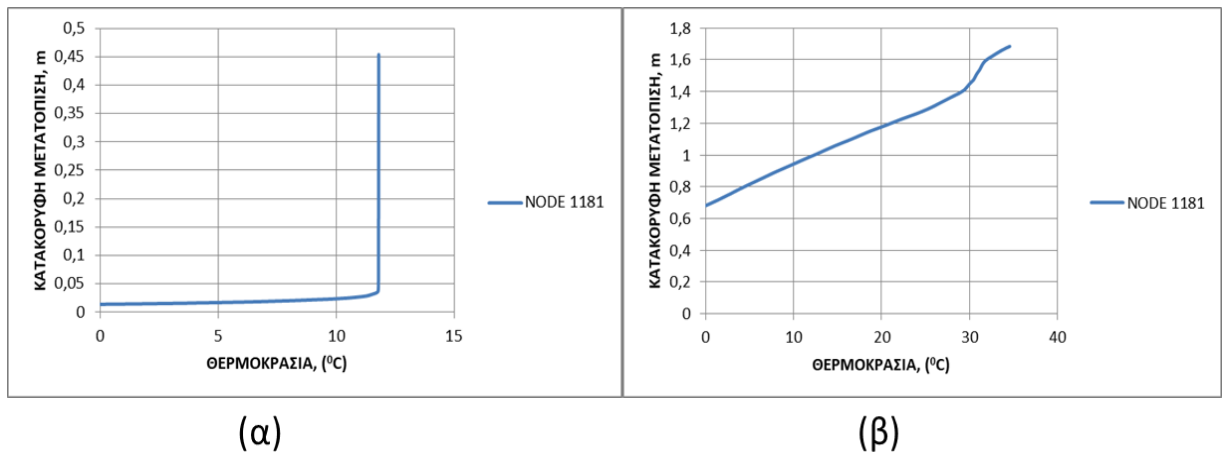


Σχήμα 4.62 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο Α, (β) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία Β, C και (γ) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} , για $V_i = 0.8$ m.

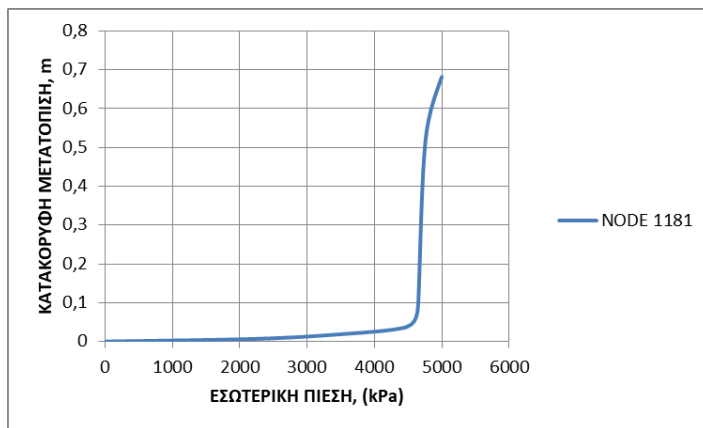


Σχήμα 4.63 Διαγράμματα που παρουσιάζουν την πλαστική παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού τις χρονικές στιγμές (α) πριν τον τοπικό λυγισμό στο σημείο Α, (β) πριν την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας Θ_{cr} και (γ) πριν τον τοπικό λυγισμό στα σημεία Β, C και, για $V_i = 0.8$ m.

Σύμφωνα με τα δεδομένα της ανάλυσης η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης για την τιμή $V_i = 0.4$ m είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα να μην υφίσταται ανύψωση του αγωγού. Από το Σχήμα 4.64β προκύπτει ότι η μετατόπιση U , που παρατηρείται πριν την δημιουργία λυγισμού στο σημείο Α είναι ίση με 0.026 m, ενώ στα σημεία Β, C $U = 0.028$ m. Επιπλέον, η θερμοκρασία ακριβώς πριν από την δημιουργία λυγισμού στα σημεία Β, C είναι $\Delta T = 9.6^{\circ}\text{C}$ με την κρίσιμη θερμοκρασία Θ_{cr} να ισούται με $\Delta T_{cr} = 11.67^{\circ}\text{C}$. Η απόσταση ανάμεσα στα σημεία Β και C είναι ίση με 15.69 m, για $V_i = 0.8$ m. Αντίστοιχα, για $V_i = 1.2$ m προκύπτει $U = 0.034$ m στο σημείο Α και $U = 0.082$ m στα σημεία Β, C και την απόσταση μεταξύ τους ίση με 16.48 m. Ωστόσο, ο λυγισμός στα σημεία Α, Β, C, όπως και η ανύψωση του αγωγού, συμβαίνει κατά την διάρκεια της άσκησης της εσωτερικής πίεσης σύμφωνα με το Σχήμα 4.65, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται θερμοκρασιακή μεταβολή κατά την δημιουργία του λυγισμού.



Σχήμα 4.64 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για (α) $V_i = 0.8$ m και (β) $V_i = 1.2$ m.

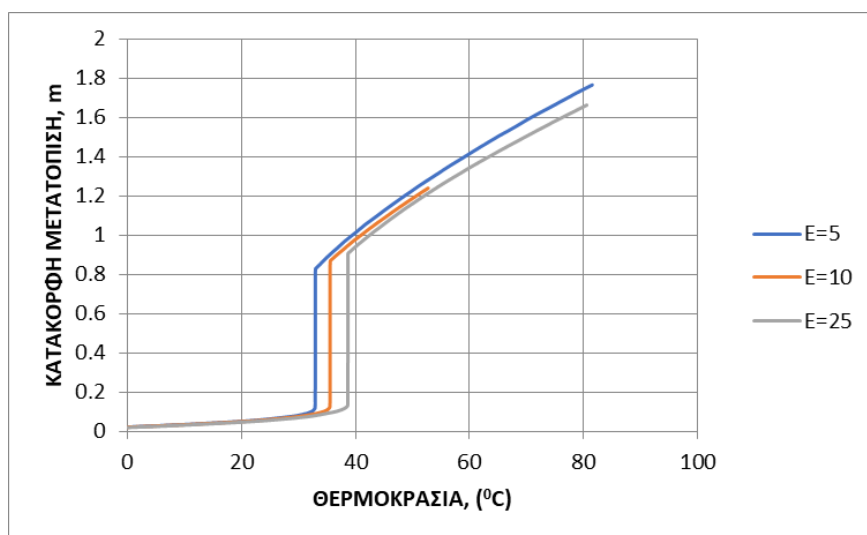


Σχήμα 4.65 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού σε συνάρτηση με την εσωτερική πίεση για $V_i = 1.2$ m.

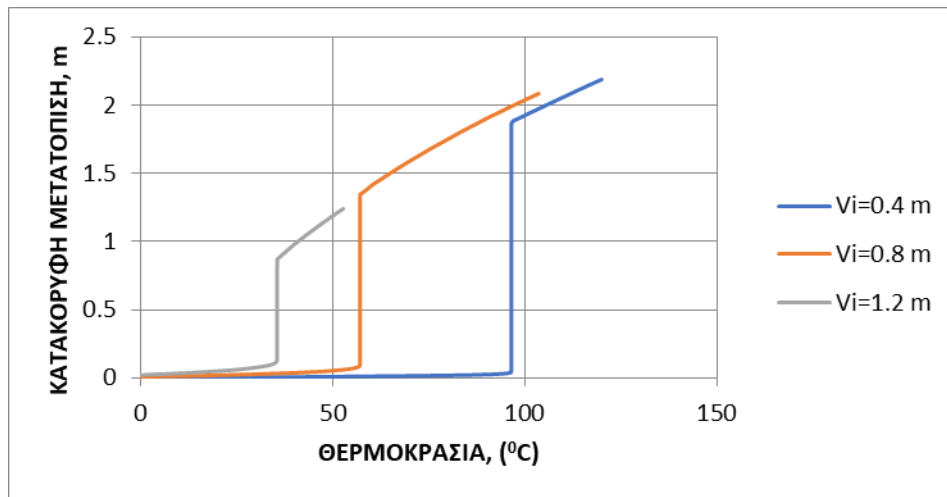
Κεφάλαιο 5^ο

5.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται, για σταθερές τιμές συνοχής $c = 20$ KPa, εσωτερικής πίεσης $P = 5$ MPa, πάχους $t = 0.0127$ m, μήκους ατέλειας $L_i = 20$ m και ύψους ατέλειας $V_i = 1.2$ m η κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους αυξάνεται η τιμή της θερμοκρασίας στην οποία ο αγωγός θα αρχίσει να μετατοπίζεται κατακόρυφα. Επιπλέον, παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην τιμή της μετακίνησης από την οποία αρχίζει η κατακόρυφη ανύψωση του αγωγού. Το ίδιο συμβαίνει και για την τιμή του άλματος της κατακόρυφης μετακίνησης, καθώς παρατηρούνται τιμές 0.78, 0.82 και 0.86 m για τα τρία μέτρα ελαστικότητας $E = 5, 10, 25$ MPa αντίστοιχα. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές του V_i θεωρώντας σταθερό το μέτρο ελαστικότητας ($E = 5$ MPa). Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μείωση της κρίσιμης θερμοκρασίας με την αύξηση της τιμής του V_i . Ακόμα, κατά την αύξηση του V_i αυξάνεται η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης στην οποία θα εμφανιστεί η κρίσιμη θερμοκρασία, ενώ μειώνεται το κατακόρυφο άλμα του αγωγού που αντιστοιχεί στην Θ_{cr} .

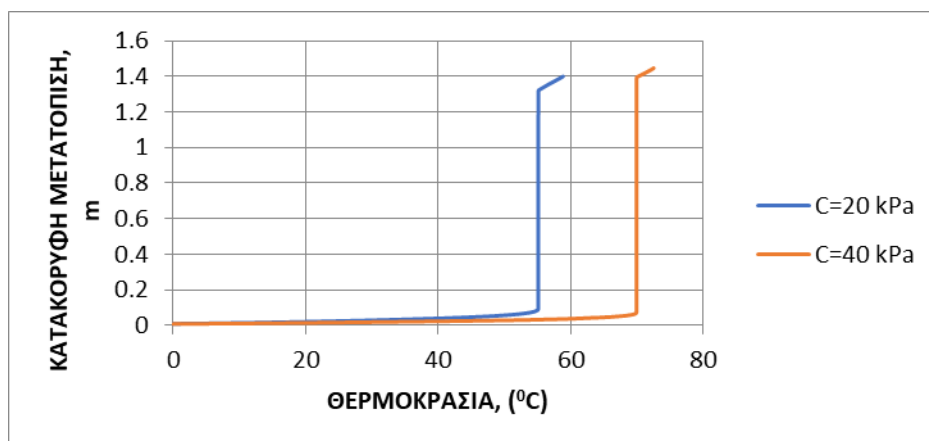


Σχήμα 5.1 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας εδάφους $E = 5, 10, 25$ MPa.



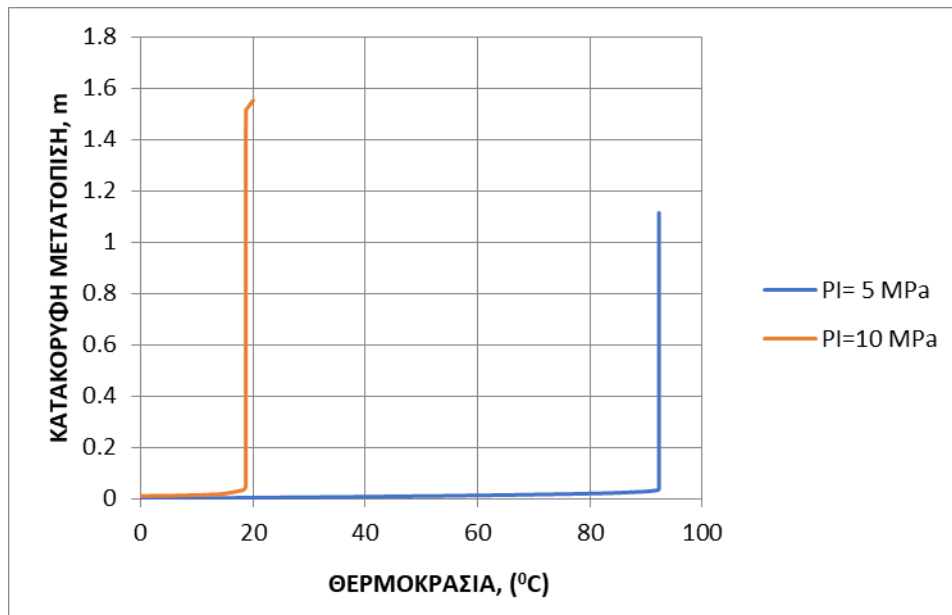
Σχήμα 5.2 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές $V_i = 0.4, 0.8, 1.2$ m.

Στη συνέχεια, μελετάται η περίπτωση μεταβολής της συνοχής c με τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές μέσα από το Σχήμα 5.3. Για τον διπλασιασμό της τιμής της συνοχής προκύπτει ότι η θερμοκρασία κατά την οποία πραγματοποιείται η απότομη ανύψωση του αγωγού αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της συνοχής. Η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης την στιγμή που ξεκινάει η ανύψωση του αγωγού μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της συνοχής. Οι τιμές του κατακόρυφου άλματος του αγωγού είναι ίσες με 1.28 και 1.38 m για συνοχή $c = 20$ και 40 kPa αντίστοιχα.



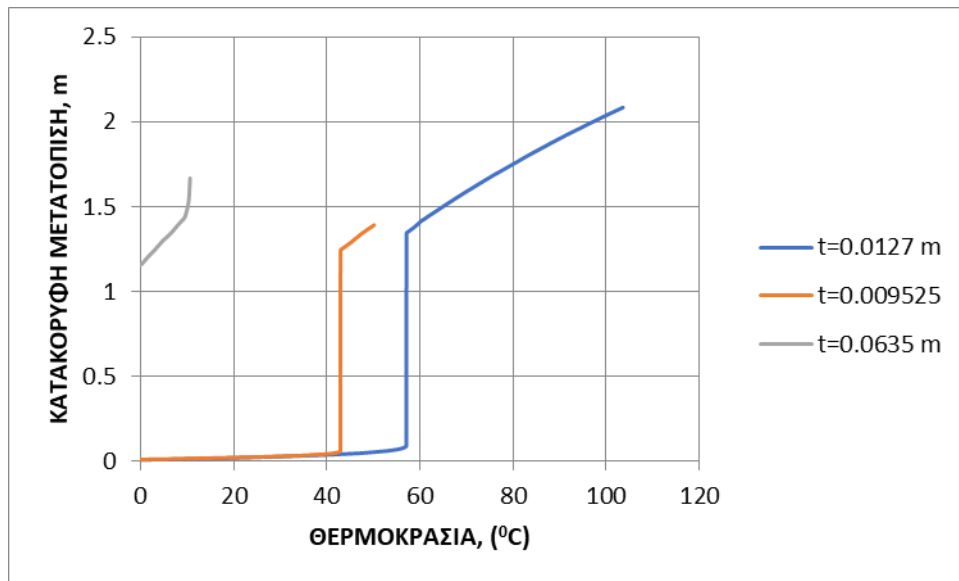
Σχήμα 5.3 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές $c = 20$ και 40 kPa ($E = 5$ MPa και $V_i = 0.8$ m).

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η περίπτωση κατά την οποία μεταβάλλεται η τιμή της εσωτερικής πίεσης P διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές $V_i = 0.4$ m. Διπλασιάζοντας την εσωτερική πίεση προκύπτει μεγάλη μείωση της κρίσιμης θερμοκρασίας, ενώ η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης στην οποία συμβαίνει η Θ_{cr} αυξάνεται ελαφρώς. Στις περιπτώσεις με $V_i = 0.8$ και 1.2 m η αύξηση της εσωτερικής πίεσης, οδηγεί σε τοπικό λογισμό και ανύψωση του αγωγού κατά το στάδιο της επιβολής της πίεσης όπως επισημάνθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές $P = 5$ και 10 MPa ($E = 10$ MPa και $V_i = 0.4$ m).

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του πάχους του αγωγού t με για σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους $E= 10 \text{ MPa}$ και $V_i= 0.8 \text{ m}$. Προκύπτει ότι όσο μειώνεται το πάχος μειώνεται και η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας. Επιπλέον, με την αύξηση της τιμής του πάχους του αγωγού αυξάνει ελαφρώς η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης κατά την οποία ξεκινάει η ανύψωση. Για πάχος $t= 0.00635 \text{ m}$ προκύπτει ότι ο τοπικός λυγισμός στα σημεία A,B,C και η κατακόρυφη ανύψωση έχει δημιουργηθεί κατά την διάρκεια της επιβολής της εσωτερικής πίεσης (βλέπε Κεφάλαιο 4).



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές $t = 0.0127, 0.009525$ και 0.00635 m ($E= 10 \text{ MPa}$ και $V_i= 0.8 \text{ m}$).

Τέλος, ακολουθεί ο Πίνακας 5.1 στον οποίο παρουσιάζονται συνολικά οι τιμές της κρίσιμης θερμοκρασίας του αγωγού για το πλήθος των αναλύσεων, καθώς και οι τιμές της κατακόρυφης μετατόπισης πριν από την δημιουργία λυγισμού στα σημεία A και B,C. Δίνεται επίσης η θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στα σημεία B, C. Η θερμοκρασία αυτή προηγείται της Θ_{cr} .

								Τιμή Κατακόρυφης Μετακίνησης U, (m)		
C, (kPa)	P, (Mpa)	Li, (m)	E, (Mpa)	Vi, (m)	t, (m)	ΔTcr, (°C)	ΔT _{B,C} , (°C)	At Point A	At Point B,C	DISTANCE B,C, (m)
20	5	20	5	0.4	0.0127	91.6	88.56	0.032	0.032	16.51
20	5	20	5	0.8	0.0127	55.14	51.1	0.067	0.1468	16.52
20	5	20	5	1.2	0.0127	32.87	32.87	0.1	0.13	17.5
20	5	20	10	0.4	0.0127	96	92.7	0.025	0.029	15.52
20	5	20	10	0.8	0.0127	57.12	57.05	0.067	0.1	16.59
20	5	20	10	1.2	0.0127	35.25	34.67	0.11	0.11	17.54
20	5	20	25	0.4	0.0127	101.36	100.95	0.027	0.041	15.54
20	5	20	25	0.8	0.0127	59.16	59.16	0.09	0.09	16.53
20	5	20	25	1.2	0.0127	38.18	36.26	0.11	0.11	17.55
40	5	20	5	0.4	0.0127	104.65		0.0125		
40	5	20	5	0.8	0.0127	69.36	64.94	0.07	0.05	16.71
40	5	20	5	1.2	0.0127	48.26	40.95	0.07	0.07	16.99
40	5	20	10	0.4	0.0127	113	106.96	0.018	0.018	15.58
40	5	20	10	0.8	0.0127	73.07	70.39	0.054	0.054	15.62
40	5	20	10	1.2	0.0127	49.79	47.33	0.08	0.08	16.72
40	5	20	25	0.4	0.0127	115.86		0.015		
40	5	20	25	0.8	0.0127	75.44	75.44	0.04	0.05	15.2
40	5	20	25	1.2	0.0127	55.36	52.94	0.1	0.1	15.75
20	10	20	10	0.4	0.0127	18.55	14.7	0.02	0.02	16.44
20	10	20	10	0.8	0.0127			0.024	0.029	16.85
20	10	20	10	1.2	0.0127			0.098	0.098	17.52
20	5	20	10	0.4	0.009525	81.31		0.023		
20	5	20	10	0.8	0.009525	42.67	42.67	0.044	0.062	16.68
20	5	20	10	1.2	0.009525	23.77	22.95	0.092	0.092	16.88
20	5	20	10	0.4	0.00635					
20	5	20	10	0.8	0.00635	11.67	9.6	0.026	0.028	15.69
20	5	20	10	1.2	0.00635			0.034	0.082	16.48

Πίνακας 5.1 Τιμές κατακόρυφης μετακίνησης, κρίσιμης θερμοκρασίας και απόστασης μεταξύ των σημείων B,C πριν από την δημιουργία τοπικού λυγισμού για το σύνολο των αναλύσεων.

5.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε, μέσω παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων, ο καθολικός λυγισμός, λόγω υψηλής θερμοκρασίας και εσωτερικής πίεσης, υπόγειου μεταλλικού αγωγού. Με την κατασκευή κατάλληλου αριθμητικού προσομοιώματος και λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους – αγωγού, μελετήθηκε η επίδραση ποικίλων παραμέτρων στην ανάπτυξη του θερμικού λυγισμού, μέσα από τον προσδιορισμό των θλιπτικών παραμορφώσεων και των κρίσιμων θερμοκρασιών στον αγωγό. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η επίδραση της συνοχής για δύο διαφορετικές τιμές 20 και 40 kPa, το μέτρο ελαστικότητας για τρεις διαφορετικές τιμές 5, 10 και 25 MPa, η εσωτερική πίεση για δύο τιμές 5 και 10 MPa, καθώς και 3 διαφορετικές τιμές πάχους 0.0127m, 0.009525m και 0.00635m. Η παραπάνω διερεύνηση έγινε για τρία διαφορετικά ύψη ατέλειας 0.4m, 0.8m και 1.2 m. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε μορφές διαγραμμάτων της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης κατά μήκος του αγωγού καθώς και κατακόρυφης μετατόπισης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Συνεπώς, μετά το πέρας των αναλύσεων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Τοπικός λυγισμός παρατηρείται αρχικά στο σημείο A (στο μέσο του αγωγού) και στην συνέχεια στα σημεία B,C.
- Με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας αυξάνεται η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας.
- Η αύξηση του ύψους ατέλειας μειώνει τη τιμή της κρίσιμης θερμοκρασία του αγωγού, καθώς και το άλμα της κατακόρυφης μετακίνησης.
- Με την αύξηση της συνοχής αυξάνεται η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας του αγωγού.
- Η αύξηση της εσωτερικής πίεσης μειώνεται δραστικά τη τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας.
- Με την αύξηση του πάχους του αγωγού αυξάνεται η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας.
- Με την αύξηση του ύψους ανύψωσης αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των σημείων B,C.
- Η μέγιστη τιμή μετατόπισης του αγωγού βρίσκεται στο κέντρο του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. R. J. Eiber, et al., 2000, Fracture control requirements for gas transmission pipelines. In: “Proceedings of the 3rd International Pipeline Technology Conference, Brugge, Belgium, 2000,” ed. R. Denys, Elsevier, L, pp. 437–454.
- [2]. J. F. Kiefner and W. A. Maxey, 2000, Model helps prevent failures. *Oil and Gas Journal*, 98(32), 54–58.
- [3]. B. Leis and T. Thomas, 2001, Line pipe property issues in pipeline design and reestablishing MAOP. In: “International Congress on Pipelines, PEMEX, Merida, Mexico, 2001,” PEMEX, Mexico, Paper ARC-17.
- [4]. Cheuk, C. Y., D. J. White, and M. D. Bolton. 2008. “Uplift mechanisms of pipes buried in sand.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 134 (2): 154–163. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:2\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:2(154)).
- [5]. 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.
- [6]. Liu, R., and S. Yan. 2013. “Brief history of upheaval buckling studies for subsea buried pipeline.” *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 4 (3): 170–183. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000127).
- [7]. Det Norske Veritas, 2007, Recommended Practice DNVRP- F110: Global buckling of submarine pipelines. Hovik, Norway.
- [8]. 19. A. Palmer, C. Ellinas, D. Richards, and G. Guijt, 1990. Design of submarine pipelines against upheaval buckling. *Offshore Technology Conference*.
- [9]. 18. Ocean and Me, You, They, Everyone (February 1, 2013). Upheaval buckling of offshore pipelines, available at: nonerieska.wordpress.com/2013/02/01/upheaval-buckling-of-offshore-pipelines/ (accessed July 3, 2013).
- [10]. 7. X. Gao, R. Liu, Z. Du, and Z. Tan, 2011. Overview of upheaval buckling theoretical studies for submarine buried pipelines. *J. of Ship Mechanics*, 15, 6, pp 678–687.
- [11]. Bouwkamp, J. G., and R. M. Stephen. 1973. “Large diameter pipe under combined loading.” *Transp. Eng. J.* 99 (3): 521–536.

- [12]. Sherman, D. R. 1976. "Tests of circular steel tubes in bending." J. Struct.Div. 102 (11): 2181–2195.
- [13]. Reddy, B. D. 1979. "An experimental study of the plastic buckling of circular cylinders in pure bending." Int. J. Solids Struct. 15 (9): 669–683.[https://doi.org/10.1016/0020-7683\(79\)90066-0](https://doi.org/10.1016/0020-7683(79)90066-0).
- [14]. Gresnigt, A. M., and R. J. van Foeken. 2001. "Local buckling of UOE and seamless steel pipes." In Vol. II of Proc., Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 131–142. Cupertino, CA: International Society of Offshore and Polar Engineering.
- [15]. VandenBerghe, J.-F., D. Cathie, and J.-C. Ballard. 2005. "Pipeline uplift mechanisms using finite element analysis." In Proc., 16th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1801–1804. Rotterdam, Netherlands: Millpress Science Publishers. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1801>.
- [16]. Hobbs, R. E. 1984. "In-service buckling of heated pipelines." J. Transp. Eng. 110 (2): 175–189. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1984\)110:2\(175\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1984)110:2(175)).
- [17]. Jung, J. K., T. D. O'Rourke, and N. A. Olson. 2013. "Uplift soil–pipe interaction in granular soil." Can. Geotech. J. 50 (7): 744–753. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0357>.
- [18]. Roy, K., B. Hawlander, S. Kenny, and I. Moore. 2018. "Uplift failure mechanisms of pipes buried in dense sand." J. Geotech. Geoenviron.Eng. 144 (11): 04018078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001957](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001957).
- [19]. Bransby, M. F., T. A. Newson, and P. Brunning. 2002. "The upheaval capacity of pipelines in jetted clay backfill." Int. J. Offshore PolarEng. 12 (4): 280–287.
- [20]. Cheuk, C. Y., D. J. White, and M. D. Bolton. 2008. "Uplift mechanisms of pipes buried in sand." J. Geotech. Geoenviron. Eng. 134 (2): 154–163.[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:2\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:2(154)).
- [21]. Eiksund, G., H. Langø, and E. Øiseth. 2013. "Full scale field tests of uplift resistance of trenched pipes." Int. J. Offshore Polar Eng. 23 (4):298–306.
- [22]. Newson, T., and P. Deljouei. 2006. "Finite-element modeling of upheaval buckling of buried offshore pipelines in clayey soils." In Soil and rock behavior and modeling, 351–358. Reston, VA: ASCE. [https://doi.org/10.1061/40862\(194\)47](https://doi.org/10.1061/40862(194)47).

- [23]. Wang, J., A. Eltaher, P. Jukes, J. Sun, and F. S. Wang. 2009. "Latest developments in upheaval buckling analysis for buried pipelines." In Proc., Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 594–602. Cupertino, CA: International Society of Offshore and Polar Engineering.
- [24]. Ju, G. T., and S. Kyriakides. 1988. "Thermal buckling of offshore pipelines." J. Offshore Mech. Arct. Eng. 110 (4): 355–364. <https://doi.org/10.1115/1.3257073>.
- [25]. Taylor, N., and V. Tran. 1993. "Prop-imperfection subsea pipeline buckling." Mar. Struct. 6 (4): 325–358. [https://doi.org/10.1016/0951-8339\(93\)90001-J](https://doi.org/10.1016/0951-8339(93)90001-J).
- [26]. Taylor, N., and V. Tran. 1996. "Experimental and theoretical studies in subsea pipeline buckling." Mar. Struct. 9 (2): 211–257. [https://doi.org/10.1016/0951-8339\(94\)00021-J](https://doi.org/10.1016/0951-8339(94)00021-J).
- [27]. Bodaghi, M., and A. R. Saidi. 2010. "Levy-type solution for buckling analysis of thick functionally graded rectangular plates based on the higher-order shear deformation plate theory." Appl. Math. Modell. 34 (11): 3659–3673. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.03.016>.
- [28]. Bodaghi, M., and A. R. Saidi. 2011a. "Buckling behavior of standing laminated Mindlin plates subjected to body force and vertical loading." Compos. Struct. 93 (2): 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.08.026>.
- [29]. Bodaghi, M., and A. R. Saidi. 2011b. "Thermoelastic buckling behavior of thick functionally graded rectangular plates." Arch. Appl. Mech. 81 (11): 1555–1572. <https://doi.org/10.1007/s00419-010-0501-0>.
- [30]. Bransby, M. F., T. A. Newson, P. Brunning, and M. C. R. Davies. 2001. "Numerical and centrifuge modeling of the upheaval resistance of buried pipelines." In Proc., 20th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: ASME.
- [31]. Wang, J., S. K. Haigh, G. Forrest, and N. I. Thusyanthan. 2012. "Mobilization distance for upheaval buckling of shallowly buried pipelines." J. Pipeline Syst. Eng. Pract. 3 (4): 106–114. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000099](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000099).

- [32]. P. Vazouras, Ph.D.; A. Tsatsis, Ph.D.; and P. Dakoulas, Ph.D. (2020) (Thermal Upheaval Buckling of Buried Pipelines: Experimental Behavior and Numerical Modeling
- [33]. P. HOPKINS (2003) Penspen Ltd., Newcastle uponTyne, UK The Structural IntegrityofOiland Gas Transmission Pipelines