

---

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΕ  
ΑΓΩΓΟΥΣ ΥΔΑΤΟΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΥ**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2016

© 2016 Κωνσταντίνος Αντωνίου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων 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     Δρ. Σπύρος Καραμάνος  
(Επιβλέπων)           Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
   Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής   Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος  
   Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
   Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής     Δρ. Αλέξης Κερμανίδης  
   Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
   Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Την εταιρεία Northwest Pipe Company που παρείχε μερική χρηματοδότηση για την παρούσα μελέτη. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Χαϊδεμενόπουλο και Κερμανίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες Γιαννούλα Χατζοπούλου και Γρηγόρη Σαρβάνη για την πολύτιμη βοήθειά τους στην κατανόηση βασικών εντολών στο ABAQUS. Ευχαριστώ τους φίλους μου Νίκο Βασιλειάδη και Γρηγόρη Φλούδα για την ηθική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Αχιλλέα Αντωνίου και Περσεφόνη Παπαδοπούλου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Κωνσταντίνος Αντωνίου

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΥΔΑΤΟΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΥ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σπύρος Καραμάνος, Καθηγητής Υπολογιστικών  
Μεθόδων-Πεπερασμένων Στοιχείων των Κατασκευών

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία λαμβάνουν υπόψη μη-γραμμικότητες στη γεωμετρία της κατασκευής και στις ιδιότητες του υλικού, μελετάται η αντοχή σε κάμψη των καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου. Αρχικά, συνάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για δύο καμπύλα τμήματα με λόγο διαμέτρου προς πάχους ( $D/t$ ) ίσο με 192 και 240. Ο σκοπός είναι ο υπολογισμός των συντελεστών ευκαμψίας (flexibility factor) και έντασης τάσεων (stress intensification factor). Στην παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιείται ελαστικό υλικό, με τα ελαστικά χαρακτηριστικά του χάλυβα X40. Επιπλέον, εξετάζεται η ελαστική-πλαστική συμπεριφορά των εν λόγω καμπύλων τμημάτων σε ισχυρά δομικά φορτία, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η μηχανική τους αντοχή σε κάμψη σε συνδυασμό με την επίδραση της εσωτερικής πίεσης. Επομένως, η γνώση των παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό αγωγών ύδατος σε περιοχές με πιθανούς γεωκινδύνους, όπως σεισμικές φορτίσεις, ώστε να διασφαλιστεί η δομική τους ακεραιότητα.

## Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
2. ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΥ .....	3
3. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΜΠΥΛΑ ΤΜΗΜΑΤΑ .....	5
3.1) ASME B31 .....	11
3.2) ΑΩΩΑ Μ11 .....	12
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	13
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	14
6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	16
6.1) ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	16
6.2) ΕΛΑΣΤΙΚΗ-ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ .....	39
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	62

## Κατάλογος εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΚΑΜΠΥΛΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (Α) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΤΑΙΡΕΙΑ NORTHWEST PIPE CO., ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΤΗΣ FORT-WORTH ΣΤΟ ΤΕΞΑΣ (Β) ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΕ ΕΝΑΝ ΑΓΩΓΟ ΥΔΑΤΟΣ ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	2
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΚΑΜΠΥΛΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΔΑΤΟΣ ΜΕ ΔΙΑΜΕΤΡΟ 48 ΙΝΤΣΕΣ ΣΤΗ ΡΟΔΟ, ΜΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ (Α) ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΡΙΝ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ (Β) ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΓΩΓΟ.....	2
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ CLOSING MOMENTS (ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ, 2016). .....	5
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΝΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΩΝΙΑΣ (Α) $\Delta=90^\circ$ , (Β) ΓΩΝΙΑΣ $\Delta=60^\circ$ ΚΑΙ (Γ) ΓΩΝΙΑΣ $\Delta=30^\circ$ , ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΩΩΑ C208, ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. ....	7
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΩΩΑ C208 ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	9
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ASTM 1018 ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΙΣΟ ΜΕ 303 ΜΡΑ (43,900 PSI).....	14
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΓΩΝΙΑΣ (Α) $\Delta=90^\circ$ , (Β) $\Delta=60^\circ$ ΚΑΙ (Γ) $\Delta=30^\circ$ , ΣΤΟ ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΤΜΗΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΛΕΓΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. ....	16
ΕΙΚΟΝΑ 8. (Α) ΜΟΝΤΕΛΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΩΝΙΑΣ $\Delta=90^\circ$ ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ ΚΑΙ ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ (Β) «ΕΙΚΟΝΙΚΟ» ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΛΟΓΟΥΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ.....	18
ΕΙΚΟΝΑ 9. (Α) ΚΑΜΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ-ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ) (Β) ΚΑΜΨΗ ΕΝΟΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΜΕ ΜΗΚΟΣ ΙΣΟ ΜΕ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (Γ) ΚΑΜΨΗ ΕΝΟΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΜΕ ΜΗΚΟΣ ΙΣΟ ΜΕ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ. ....	19
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΣΗΜΕΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ MISES ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ II ΓΙΑ ΓΩΝΙΕΣ (Α) $\Delta=90^\circ$ , (Β) ΓΩΝΙΑΣ $\Delta=60^\circ$ ΚΑΙ (Γ) ΓΩΝΙΑΣ $\Delta=30^\circ$ – ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ – ΜΕ ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ ΚΑΙ ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ( $P/P_Y = 0$ ). ....	24
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΑΚΜΗΣ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (MITERED ELBOW), ΣΤΟ «ΕΙΚΟΝΙΚΟ» ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ (SMOOTH ELBOW) ΣΤΗ ΜΕΣΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΙ ΣΕ ΕΝΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΣΩΛΗΝΑ (STRAIGHT PIPE) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΩΛΗΝΑ I, $D/T = 192$ , ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΚΑΙ ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ, $P/P_Y = 0$ ΚΑΙ $P/P_Y = 0.5$ , ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ $\Delta=90^\circ$ (Α), $\Delta=60^\circ$ (Β), $\Delta=30^\circ$ (Γ).....	30
ΕΙΚΟΝΑ 12. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΑΚΜΗΣ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (MITERED ELBOW), ΣΤΟ «ΕΙΚΟΝΙΚΟ» ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ (SMOOTH ELBOW) ΣΤΗ ΜΕΣΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΙ ΣΕ ΕΝΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΣΩΛΗΝΑ (STRAIGHT PIPE) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΩΛΗΝΑ I, $D/T = 192$ , ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΚΑΙ ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ, $P/P_Y = 0$ ΚΑΙ $P/P_Y = 0.5$ , ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ $\Delta=90^\circ$ (Α), $\Delta=60^\circ$ (Β), $\Delta=30^\circ$ (Γ).....	36
ΕΙΚΟΝΑ 13. ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ, ΓΩΝΙΑΣ $\Delta=90^\circ$ – ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ (CLOSING) ΚΑΙ ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ (OPENING) ΡΟΠΕΣ. (Α) ΠΡΩΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ – ΕΥΡΕΣΗ	

ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ ΙΣΗ ΜΕ $F^*H$ , (B) ΔΕΥΤΕΡΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ – ΙΔΙΑ ΡΟΠΗ ΚΑΜΨΗΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΔΙΑΤΟΜΗ. ....	41
ΕΙΚΟΝΑ 14. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. (A) ΣΩΛΗΝΑΣ Ι ΤΑ ΒΕΛΗ ( ↓ ) ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ Η ΤΟΠΙΚΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΧΕΙ ΦΤΑΣΕΙ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ 2% ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ ΚΑΙ ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ, (B) ΣΩΛΗΝΑΣ ΙΙ ΤΑ ΒΕΛΗ ( ↓ ) ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ Η ΤΟΠΙΚΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΧΕΙ ΦΤΑΣΕΙ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ 2% ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ ΚΑΙ ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 15. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΕΥΤΕΡΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. (A) ΣΩΛΗΝΑΣ Ι ΤΑ ΒΕΛΗ ( ↓ ) ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ Η ΤΟΠΙΚΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΧΕΙ ΦΤΑΣΕΙ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ 2% ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ ΚΑΙ ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ, (B) ΣΩΛΗΝΑΣ ΙΙ ΤΑ ΒΕΛΗ ( ↓ ) ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ Η ΤΟΠΙΚΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΧΕΙ ΦΤΑΣΕΙ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ 2% ΑΝΟΙΓΟΥΣΕΣ ΚΑΙ ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ.....	53
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΩΛΗΝΑ ΙΙ (D/T = 240) ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΡΟΣ (LE11/LE22) ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΟΡΙΟ 2%, ΕΝΩ ΣΤΟ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ (ΡΕΕQ) ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑ Δ=90°, Δ=60°, Δ=30° (A) ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ (B) ΠΙΕΣΗ ΙΣΗ ΜΕ ΤΟ 50% ΤΗΣ ΡΥ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 17. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΩΛΗΝΑ ΙΙ (D/T = 240) ΣΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΡΟΣ (LE11/LE22) ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΟΡΙΟ 2%, ΕΝΩ ΣΤΟ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ (ΡΕΕQ) ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑ ΚΛΕΙΝΟΥΣΕΣ ΡΟΠΕΣ, Δ=90°, Δ=60°, Δ=30° (A) ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ (B) ΠΙΕΣΗ ΙΣΗ ΜΕ ΤΟ 50% ΤΗΣ ΡΥ.....	61



## Κατάλογος πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΩWA C208. .....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΜΠΥΛΑ ΤΜΗΜΑΤΑ Ι ΚΑΙ ΙΙ.....	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΜΠΥΛΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι ΚΑΙ ΙΙ.....	39

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κίνητρο της παρούσας εργασίας είναι η ανάγκη να καθοριστεί η ικανότητα παραμόρφωσης στους αγωγούς ύδατος που κατασκευάζονται σε περιοχές με πιθανούς γεωκινδύνους και ιδιαίτερα σε περιοχές με ισχυρή σεισμική δραστηριότητα. Κάτω από τέτοιες συνθήκες ισχυρής φόρτισης, ο αγωγός παραμορφώνεται πάνω από τα όρια αντοχής του, που αφορούν συνθήκες κανονικής λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί βασικό ζήτημα η αντοχή των συγκολλημένων τμημάτων για τη δομική του επάρκεια (Lund, 1996; O' Rourke and Bonneau, 2007). Σε περιοχές με γεωκινδύνους, η κύρια φόρτιση στον αγωγό είναι η κάμψη του σωλήνα και των καμπύλων τμημάτων.

Προηγούμενες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη δομική συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων σταθερής καμπυλότητας (Εικόνα 3), τα οποία κατασκευάζονται κυρίως με induction bending και χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως διωλιστήρια, χημικές βιομηχανίες ή πυρηνικές εγκαταστάσεις. Η μηχανική συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων σταθερής καμπυλότητας, όπως αναφέρει ο Karamanos (2016), χαρακτηρίζεται από σημαντική ευκαμψία και συγκέντρωση τάσεων και αποτελούν ευαίσθητα σημεία του συστήματος σωληνώσεων κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Ωστόσο, η συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου έχει λάβει μικρότερη προσοχή. Αξίζει να σημειωθεί η πειραματική-αναλυτική εργασία που παρουσιάστηκε από τον Gresnigt (2002), όπως επίσης και η σχετικώς πρόσφατη εργασία του Wood (2008), που προσφέρουν μια επισκόπηση της μηχανικής συμπεριφοράς των καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου υπό διάφορες φορτίσεις. Σύμφωνα με τον Wood (2008), στην ανάλυση των καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου υπάρχει μία ασυνέχεια των τάσεων, όπως επίσης η οβαλότητα της διατομής δεν είναι πλέον ομαλή κοντά στο μήκος του σωλήνα. Επιπλέον, οι μέγιστες τάσεις λόγω κάμψης δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στο ίδιο σημείο ή στις ίδιες κατευθύνσεις για διαφορετικές τιμές της εσωτερικής πίεσης. Τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου χρησιμοποιούνται ευρέως στην Αμερική σε χαλύβδινους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου για τη μεταφορά νερού. Η κατασκευή τους γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο AWWA C208, ενώ ο σχεδιασμός τους ακολουθεί τις διατάξεις του προτύπου AWWA M11. Η εφαρμογή τους εντοπίζεται, επίσης, σε βιομηχανικές σωληνώσεις χαμηλής πίεσης, ως εναλλακτική λύση των καμπύλων τμημάτων σταθερής καμπυλότητας, όταν η χρήση του τελευταίου δεν είναι εφικτή ή

οικονομικά αποδεκτή. Η Εικόνα 1 δείχνει τη διαμόρφωση τυπικών καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου που χρησιμοποιούνται σε αγωγούς ύδατος στις ΗΠΑ. Επιπλέον, η Εικόνα 2 δείχνει τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου σε αγωγό ύδατος στο πεδίο κατασκευής σε μία περιοχή της Ελλάδας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εφαρμογή τους στη Ελλάδα οι σπόνδυλοι του καμπύλου τμήματος συνδέονται στο πεδίο και όχι στο εργοτάξιο, όπως στις ΗΠΑ.



(α)



(β)

Εικόνα 1. Καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου (α) κατασκευή του καμπύλου τμήματος στην εταιρεία Northwest Pipe Co., εργοστάσιο της Fort-Worth στο Τέξας (β) καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου σε έναν αγωγό ύδατος υπό κατασκευή.



(α)



(β)

Εικόνα 2. Καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου που χρησιμοποιούνται σε αγωγό μεταφοράς ύδατος με διάμετρο 48 ίντσες στη Ρόδο, μια περιοχή με υψηλή σεισμικότητα (α) τμήματα του καμπύλου τμήματος πριν τη συγκόλληση (β) κατά τη διάρκεια σύνδεσης του καμπύλου τμήματος με τον αγωγό.

Στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς μεγάλης διαμέτρου καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου γίνεται χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και επιβάλλεται κάμψη, υπό την παρουσία εσωτερικής πίεσης προσομοιώνοντας τις δράσεις λόγω εδαφικών μετατοπίσεων από σεισμική δραστηριότητα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη γεωμετρία των καμπύλων τμημάτων, καθώς και στη συγκολλητή σύνδεση των σπονδύλων του καμπύλου τμήματος που συνεπάγονται συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων. Αυτή η ασυνέχεια μεταξύ των τμημάτων προκαλεί διαφορετική απόκριση σε σχέση με το αντίστοιχο καμπύλο τμήμα σταθερής καμπυλότητας, όσον αφορά την ικανότητα σε κάμψη και πίεση.

Στην αριθμητική ανάλυση, το καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου συνδέεται με δύο ευθύγραμμα τμήματα σωλήνα, στις δύο πλευρές του, ώστε να αποτυπώνεται με ρεαλιστικό τρόπο η θέση του καμπύλου τμήματος στον αγωγό. Το καμπύλο τμήμα και τα δύο ευθύγραμμα τμήματα διαμορφώνονται με μη γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία, ικανά να περιγράψουν αξιόπιστα της παραμορφώσεις.

Παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για δύο καμπύλα τμήματα αγωγού από χάλυβα X40 με λόγο διαμέτρου προς πάχος 192 και 240. Επίσης, τα καμπύλα τμήματα που εξετάζονται έχουν γωνία 30, 60 και 90 μοίρες και υποβάλλονται σε διαμήκη κάμψη εντός του επιπέδου, τόσο σε «θετικές ροπές» (opening moments), όσο και σε «αρνητικές ροπές» (closing moments) υπό την παρουσία εσωτερικής πίεσης ίσης μέχρι και το 50% της πίεσης διαρροής ( $P_Y = 2\sigma_Y t/D$ ). Στο πρώτο τμήμα της εργασίας θεωρείται ελαστική απόκριση, δίνοντας έμφαση στον υπολογισμό του συντελεστή ευκαμψίας και του συντελεστή έντασης τάσεων. Στη συνέχεια θεωρείται ελαστική-πλαστική ανάλυση των καμπύλων τμημάτων που σχετίζεται με την αστοχία των καμπύλων τμημάτων υπό κάμψη και πίεση.

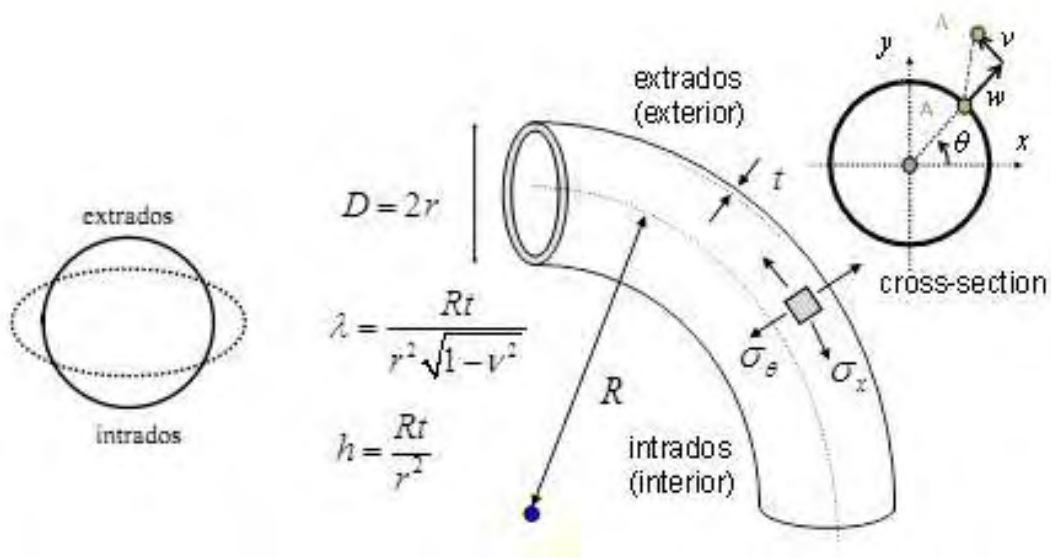
## **2. ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΥ**

Τα καμπύλα τμήματα σε σύγκριση με τα ευθύγραμμα τμήματα είναι σημαντικά πιο εύκαμπτα, η δομική τους συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από σημαντικά υψηλότερες καταπονήσεις και τάσεις και με πολύ έντονη παραμόρφωση της διατομής (cross sectional ovalization). Λόγω της ευκαμψίας τους, χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές, επειδή μπορούν να λάβουν θερμικές διαστολές και να

απορροφούν εξωτερικά φορτία. Στην περίπτωση ακραίων συνθηκών φόρτισης, η δομική τους απόκριση χαρακτηρίζεται από μια διαξονική κατάσταση τάσης-παραμόρφωσης στο τοίχωμα του σωλήνα (Εικόνα 3), η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του καμπύλου τμήματος με τρόπο διαφορετικό από εκείνον που αναμένεται σε αντίστοιχους ευθύγραμμους σωλήνες.

Η αναλυτική εργασία του Von Karman (1911) υπήρξε πρωτοποριακή για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των καμπύλων τμημάτων σταθερής καμπυλότητας. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε μια δισδιάστατη ενεργειακή προσέγγιση που συμπεριλαμβάνει τα έργα από την αξονική παραμόρφωση (longitudinal/axial deformation) λόγω κάμψης και την αντίστοιχη περιμετρική (hoop deformation) εξαιτίας της οβαλότητας. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε μια απλή, διπλά συμμετρική τριγωνομετρική συνάρτηση για την ακτινική μετατόπιση  $w$  ενός σημείου της διατομής του καμπύλου τμήματος (Εικόνα 3). Μια πιο βελτιωμένη σύνθεση της παραπάνω ανάλυσης έχει προταθεί από τους Rodabough and George (1957) που περιγράφει λεπτομερέστερα τη μηχανική ελαστική συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της εσωτερικής πίεσης, ως γενίκευση της λύσης του Von Karman (1911). Η εργασία των Rodabough and George (1957) αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των συντελεστών ευκαμψίας και έντασης των τάσεων που χρησιμοποιούν αμερικανικά και άλλα διεθνή και εθνικά πρότυπα και παρουσιάζονται και συζητούνται στην επόμενη ενότητα.

Παρά την εκτεταμένη και συνεχή έρευνα για τη μηχανική συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων σταθερής καμπυλότητας – εξαιτίας των εφαρμογών τους σε τομείς του πετρελαίου και της πυρηνικής ενέργειας – η συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου έχει λάβει μικρότερη προσοχή. Προηγούμενα έρευνες (Gresnigt, 2002; Wood, 2008) έχουν δείξει ότι σε σύγκριση με τα καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας, η οβαλότητα της διατομής (cross sectional ovalization) είναι μειωμένη λόγω των ακμών από τις συνδέσεις των σπονδύλων στο αντίστοιχο καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου και αυτό οδηγεί σε μια ιδιαιτερότητα στη μηχανική συμπεριφορά των σπονδυλωτών καμπύλων τμημάτων. Τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου εμφανίζουν cross sectional ovalization και αυξημένες τάσεις, κυρίως στις ενώσεις των παρακείμενων σπονδύλων. Η παρουσία των ακμών επιτείνει τα εν λόγω φαινόμενα αύξησης τάσεων, προκαλώντας την αστοχία του εν λόγω σπονδυλωτού καμπύλου τμήματος.



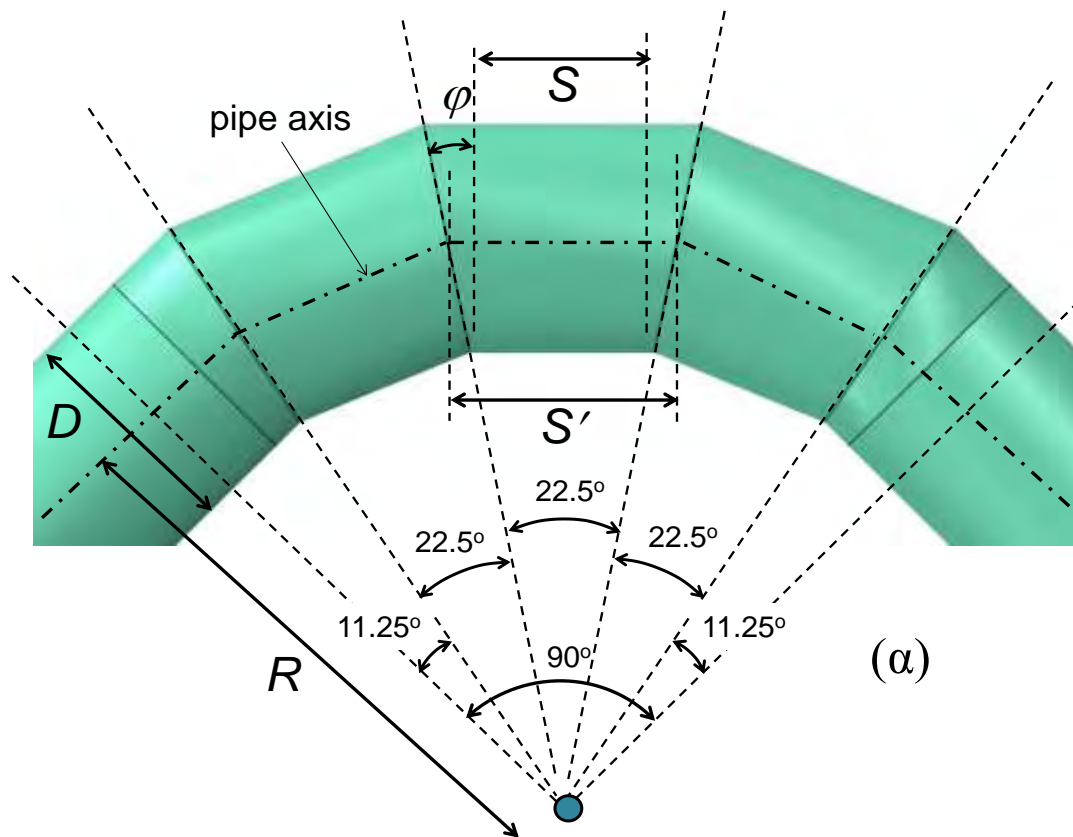
Εικόνα 3. Απόκριση ενός καμπύλου τμήματος σταθερής καμπυλότητας σε εντός του επιπέδου closing moments (Karamanos, 2016).

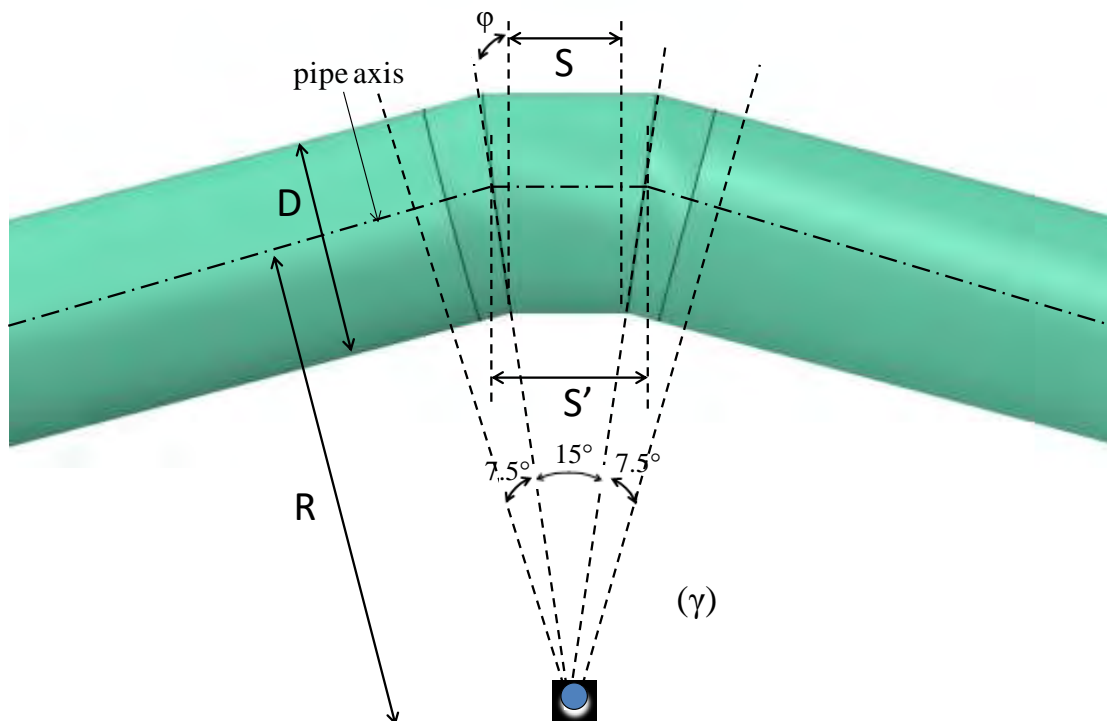
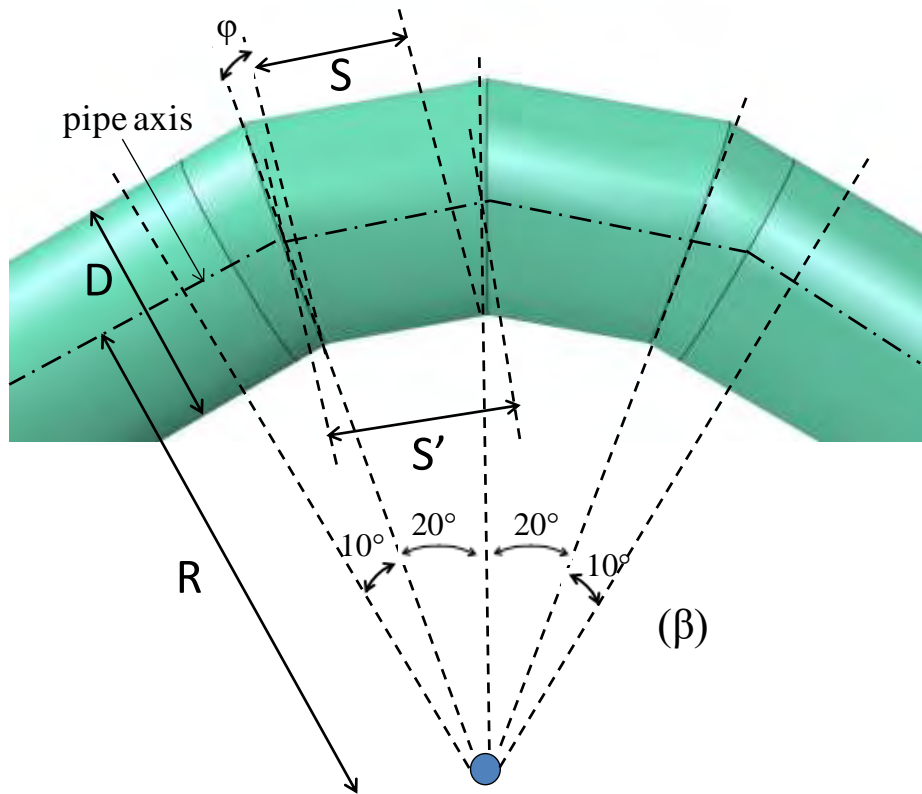
### 3. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΜΠΥΛΑ ΤΜΗΜΑΤΑ

Αναγνωρισμένες προδιαγραφές σχεδιασμού τόσο για τα καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας, όσο και για τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου παρουσιάζονται συνοπτικά σε αυτήν την παράγραφο. Οι προδιαγραφές βασίζονται σε ελαστική ανάλυση των καμπύλων τμημάτων, διότι αφορούν συνθήκες λειτουργίας. Οι διατάξεις ASME αναφέρονται σε συνθήκες κάμψης με πίεση, διότι είναι εμπνευσμένες από τα προβλήματα των βιομηχανικών σωληνώσεων, στο πλαίσιο της ανάλυσης ευκαμψίας-έντασης τάσεων, ενώ οι διατάξεις AWWA επικεντρώνονται μόνο σε συνθήκες φόρτισης υπό πίεση που αποτελεί την πλέον απλή περίπτωση λειτουργικής φόρτισης. Ειδικότερα, στην προδιαγραφή AWWA C208 επισημαίνεται ότι για τον προσδιορισμό των διαστάσεων του καμπύλου τμήματος (Εικόνα 4) θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, οι απαιτήσεις του χώρου, οι περιορισμοί κατά την παραγωγή του, οι εκτιμήσεις των τάσεων και η σχέση κόστους-οφέλους κατά τη διάρκεια ζωής του αγωγού. Η βέλτιστη ακτίνα καμπυλότητας για την κατασκευή των καμπύλων τμημάτων ισούται με 2.5 φορές την εξωτερική διάμετρο του αγωγού. Αυτή η τιμή συνίσταται ως πρότυπο για τους αγωγούς μεταφοράς ύδατος, εφόσον το

επιτρέπουν οι απαιτήσεις του χώρου. Αν η ακτίνα καμπυλότητας είναι μικρότερη από 2.5 φορές την εξωτερική διάμετρο του αγωγού, το πάχος του καμπύλου τμήματος πρέπει να υπολογιστεί σύμφωνα με το πρότυπο AWWA M11 (Εξίσωση 8). Οι κατευθυντήριες γραμμές για την κατασκευή και τη διαστασιολόγηση των καμπύλων τμημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι διατάξεις των προτύπων ASME και AWWA που αφορούν τα καμπύλα τμήματα.





Εικόνα 4. Γεωμετρία ενός καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου γωνίας (α)  $\Delta=90^\circ$ , (β) γωνίας  $\Delta=60^\circ$  και (γ) γωνίας  $\Delta=30^\circ$ , σύμφωνα με την προδιαγραφή AWWA C208, που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων.



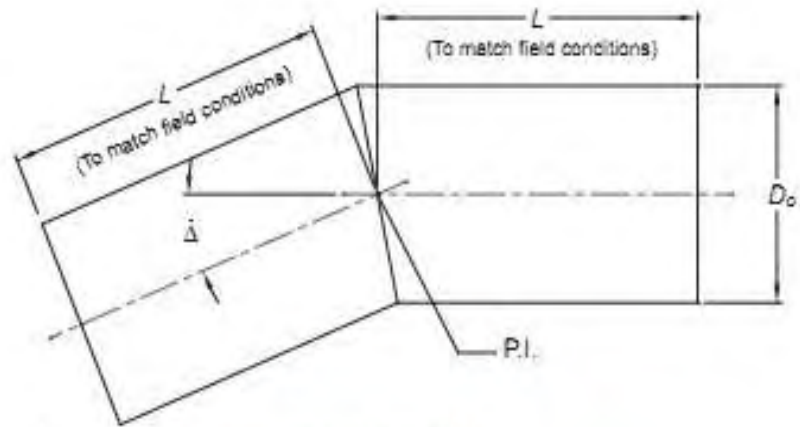


Figure 2C Two-piece elbow ( $0^\circ$  to  $22.5^\circ$ )

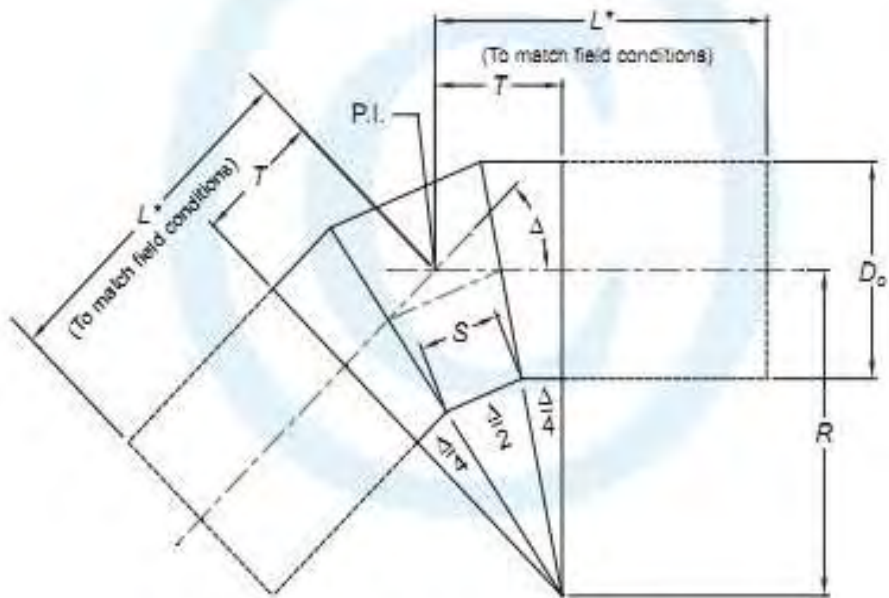


Figure 2D Three-piece elbow (more than  $22.5^\circ$  to  $45^\circ$ )

\*Note:  $L$  may be less than  $T$

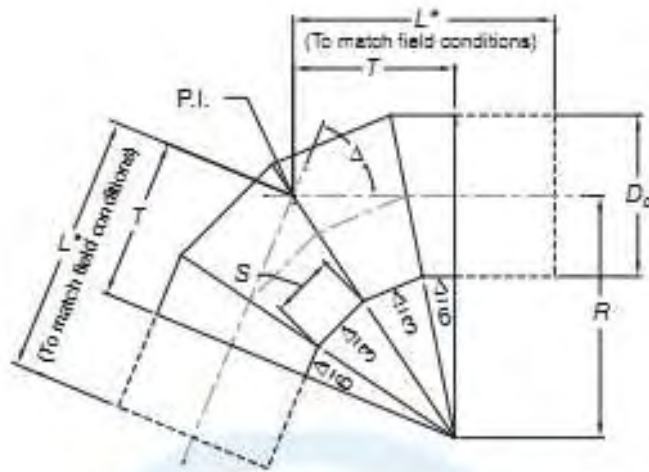


Figure 2E Four-piece elbow (more than 45° to 67.5°)

\*Note:  $L$  may be less than  $T$

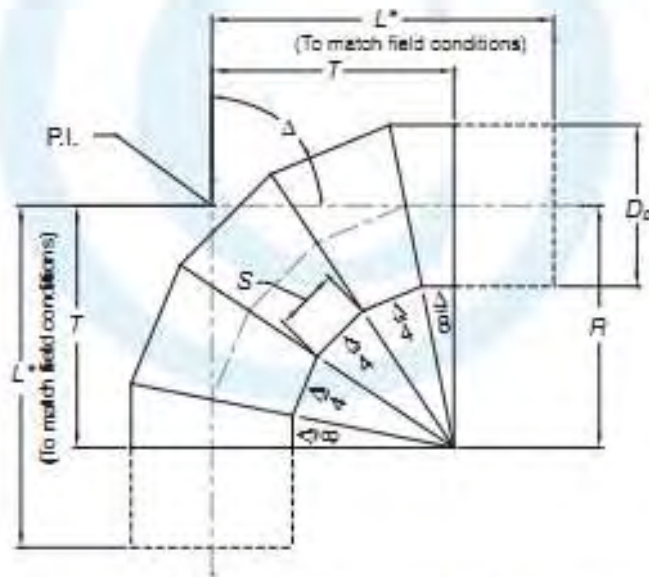


Figure 2F Five-piece elbow (more than 67.5° to 90°)

\*Note:  $L$  may be less than  $T$

Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων που ορίζονται από το πρότυπο AWWA C208 για τις περιπτώσεις καμπύλων τμημάτων σπονδυλωτού τύπου.

R	Προτεινόμενη ακτίνα καμπυλότητας του καμπύλου τμήματος	$n_e D_o$
T	Εφαπτόμενο μήκος του καμπύλου τμήματος	$n_e D_o \tan[\Delta/2]$
S	Το μήκος στο εσωτερικό του τμήματος του καμπύλου τμήματος. Ελάχιστη τιμή ίση με 38mm ή 6t	$D_o(2n_e - 1)\tan[\Delta/2k]$
L	Το ελάχιστο προτεινόμενο μήκος του «πόδα» του καμπύλου τμήματος	$n_e D_o \tan[\Delta/2] - D_o(n_e - 0.5) \tan\left[\frac{\Delta}{2k}\right] + 0.143D_o + 5$
k	(αριθμός των τμημάτων του καμπύλου τμήματος) - 1	
$\Delta \leq 22.5^\circ$	k =1	
$22.5^\circ < \Delta \leq 45^\circ$	k =2	
$45^\circ < \Delta \leq 67.5^\circ$	k =3	
$67.5^\circ < \Delta \leq 90^\circ$	k =4	
$n_e$	ο συντελεστής πολλαπλασιάζει τη διάμετρο για τον υπολογισμό της ακτίνας καμπυλότητας. Για αγωγούς ύδατος $n_e = 2.5$	

Πίνακας 1. Σύνοψη των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των καμπύλων τμημάτων σύμφωνα με το πρότυπο AWWA C208.

### 3.1) ASME B31

Ο κανονισμός ASME B31 αποτελείται από μια σειρά προτύπων για το σχεδιασμό και την κατασκευή των συστημάτων σωληνώσεων και αγωγών. Σε αρκετά από αυτά τα πρότυπα (B31.1 για τις σωληνώσεις παραγωγής ενέργειας, B31.3 για τις σωληνώσεις σε χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες, B31.4 για τους αγωγούς που μεταφέρουν υγρό, B31.8 για αγωγούς φυσικού αερίου), οι συντελεστές ευκαμψίας και έντασης τάσεων προτείνονται για το σχεδιασμό των καμπύλων τμημάτων ανάλογα με τη γεωμετρία και το επίπεδο της πίεσης. Βασίζονται στη μελέτη των Rodabough και George (1957) για τα καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας και στη μελέτη του Rodabough (1975) για τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου. Συγκεκριμένα, προτείνονται τα παρακάτω:

*Συντελεστές ευκαμψίας*

$$\text{Καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας:} \quad k = 1.65/h \quad (1)$$

$$\text{Καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου:} \quad k = 1.52/h^{5/6} \quad (2)$$

*Συντελεστές έντασης τάσεων (κάμψη εντός του επιπέδου – in-plane bending):*

$$\text{Καμπύλα τμήματα (σταθερής καμπυλότητας και σπονδυλωτού τύπου:} \\ i = 0.90/h^{2/3} \quad (3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις:

*Για τα καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας:*

$$h = Rt / r^2 \quad (4)$$

*Για τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου:*

$$h = 0.5(tS'/r^2) \cot \varphi \quad (5)$$

Οι συντελεστές αυτοί υπάρχουν στο πρότυπο ASME B31.4, Πίνακας 402. 1-1 και αναφέρονται σε μηδενική εσωτερική πίεση. Με την παρουσία εσωτερικής πίεσης, προτείνεται από τις διατάξεις του προτύπου μια μείωση των συντελεστών που αντιπροσωπεύουν τη θετική επιρροή στους συντελεστές ευκαμψίας και έντασης τάσεων:

*Flexibility*

$$1 + 6 \frac{p}{E} \left( \frac{r}{t} \right)^{7/3} \left( \frac{R}{r} \right)^{1/3} \quad (6)$$

*Stress intensification*

$$1 + 3.25 \frac{p}{E} \left( \frac{r}{t} \right)^{5/2} \left( \frac{R}{r} \right)^{2/3} \quad (7)$$

Οι συντελεστές αυτοί θα πρέπει να διαιρούν τους αντίστοιχους συντελεστές ευκαμψίας και έντασης των τάσεων. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι όλοι οι παραπάνω τύποι έχουν βασιστεί σε ελαστική ανάλυση και χρησιμοποιούνται εκτενώς στο σχεδιασμό των καμπύλων τμημάτων σε λειτουργικά φορτία. Ωστόσο, στην περίπτωση ακραίας φόρτισης, που σχετίζεται με σοβαρή πλαστική παραμόρφωση, οι προβλέψεις αυτών των διατάξεων αποτυγχάνουν.

### 3.2) AWWA M11

Στην προδιαγραφή σχεδιασμού AWWA M11, εξετάζεται η φόρτιση με εσωτερική πίεση στα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου. Ειδικότερα, η παρακάτω εξίσωση προτείνεται για τον προσδιορισμό του πάχους του καμπύλου τμήματος  $t_e$  σε σχέση με την πίεση, την επιτρεπόμενη τάση του υλικού του σωλήνα και τη γεωμετρία του καμπύλου τμήματος:

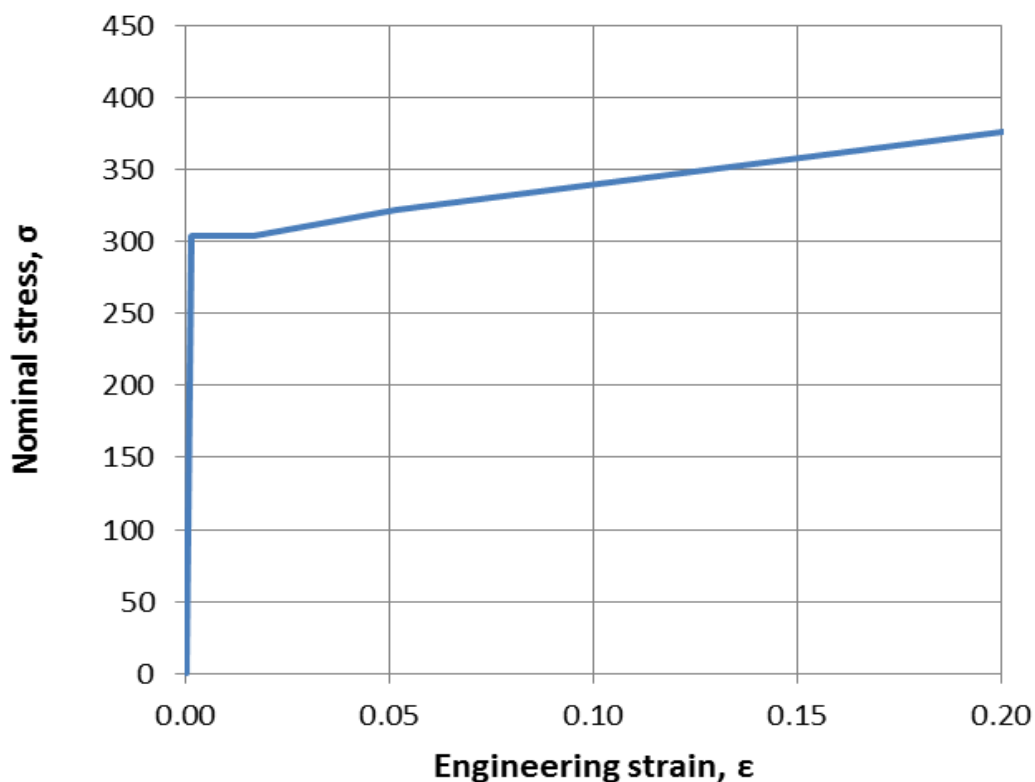
$$t_e = \frac{pD}{2\sigma_w} \left( 1 + \frac{D}{3R - 1.5D} \right) \quad (8)$$

Συγκρίνοντας αυτή την εξίσωση με την εξίσωση Barlow  $t = \frac{pD}{2\sigma_w}$  για τον υπολογισμό του πάχους σε σωλήνα (M11, Κεφάλαιο 9, εξίσωση 9-3), ο όρος στην παρένθεση

αντιπροσωπεύει την αύξηση της τάσης λόγω της γεωμετρίας του καμπύλου τμήματος. Υποθέτοντας μία καμπυλότητα  $R = 2.5D$ , (η τιμή 2.5 προτείνεται για καμπύλα τμήματα σε αγωγούς ύδατος) προκύπτει μια αύξηση 17% του πάχους του καμπύλου τμήματος, σε σχέση με το ευθύγραμμο σωλήνα, πράγμα που σημαίνει, αντίστοιχα, μια τοπική αύξηση 17% της τάσης για μια δεδομένη τιμή του πάχους του καμπύλου τμήματος. Εντούτοις, δεν υπάρχουν καθόλου διατάξεις για την περίπτωση των φορτίσεων του καμπύλου τμήματος λόγω δομικών φορτίων.

#### 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τριών ειδών γωνίας καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου ( $\Delta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ) με δύο διαφορετικούς λόγους διαμέτρου προς πάχος ( $D/t$ ). Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται ως «σωλήνας Ι», έχει διάμετρο 48in και πάχος 0.25in το οποίο αντιστοιχεί σε λόγο διαμέτρου προς πάχος  $D/t=192$ , ενώ η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται ως «σωλήνας ΙΙ», έχει διάμετρο 77.625in και πάχος 0.323in που αντιστοιχεί σε λόγο διαμέτρου προς πάχος  $D/t=240$ . Η ακτίνα καμπυλότητας και των δύο είναι ίση με  $R=2.5D$  και αποτελούνται από τρία τμήματα για γωνία  $\Delta=30^\circ$ , από τέσσερα τμήματα για γωνία  $\Delta=60^\circ$  και από πέντε τμήματα για γωνία  $\Delta=90^\circ$ , σύμφωνα με το πρότυπο AWWA C208. Σε κάθε περίπτωση, το καμπύλο τμήμα είναι συνδεδεμένο με δύο ευθύγραμμα τμήματα εκατέρωθεν, το μήκος των οποίων ισούται με πέντε φορές τη διάμετρο του σωλήνα. Στα άκρα των ευθύγραμμων τμημάτων έχουν συγκολληθεί «καπάκια», έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί εσωτερική πίεση. Το υλικό των δύο καμπύλων τμημάτων είναι χάλυβας ASTM 1018, ποιότητας X40 και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για μονοαξονικό εφελκυσμό φαίνεται στην Εικόνα 6. Το όριο διαρροής είναι 303 MPa (43,900 psi), ενώ υπάρχει πλαστικό «πλατώ» έως το 1.5% της παραμόρφωσης και στη συνέχεια η καμπύλη αυξάνει με ένα πλαστικό μέτρο κράτυνσης ίσο με 1/500 του μέτρου ελαστικότητας. Αυτή η καμπύλη έχει θεωρηθεί, επίσης, για την ανάλυση των συγκολλητών κόμβων μορφής lap joints για παρόμοιους αγωγούς ύδατος (Karamanos et al., 2015).



Εικόνα 6. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του χάλυβα ASTM 1018 που χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση ὄριο διαρροής ίσο με 303 MPa (43,900 psi).

## 5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των καμπύλων τμημάτων χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα, τα οποία αναπτύχθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η διάταξη με τα ευθύγραμμα τμήματα και το σπονδυλωτό καμπύλο τμήμα μοντελοποιείται με τρισδιάστατα μη γραμμικά στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης, για τα οποία έχουν αποδειχθεί πως παρουσιάζουν αρκετά καλή συμπεριφορά στην προσομοίωση λυγισμού και μεταλυστικής απόκρισης σε λεπτά κυλινδρικά τοιχώματα (Vasilikis et al., 2014· Karamanos et al., 2015). Τα στοιχεία αυτά μπορούν να περιγράψουν μη-γραμμικότητες στη γεωμετρία της κατασκευής, όπως μεγάλες παραμορφώσεις και τοπικό λυγισμό, καθώς και μη γραμμική (ανελαστική) συμπεριφορά του χαλύβδινου σωλήνα πέραν της ελαστικής περιοχής του υλικού.

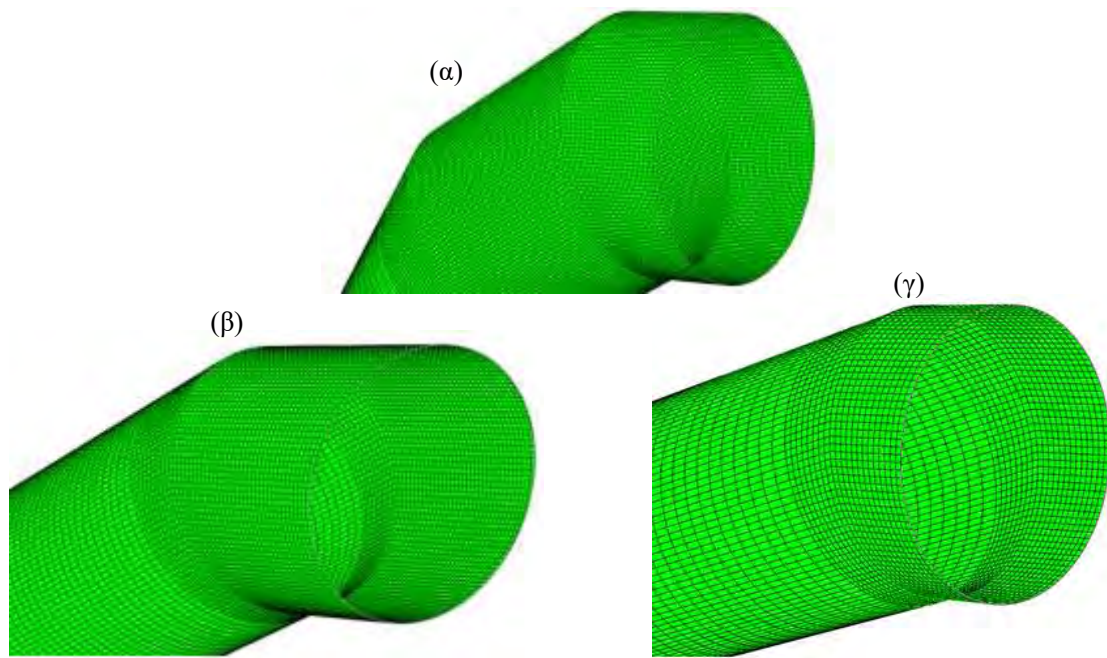
Τα αριθμητικά μοντέλα δε λαμβάνουν υπόψη τυχόν συμμετρίες, παρά το γεγονός ότι η γεωμετρία του καμπύλου τμήματος και η παραμόρφωση είναι αρχικά συμμετρική σε

σχέση με το επίπεδο κάμψης και τη μεσαία διατομή. Ωστόσο, κατά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού, το σχήμα του σωλήνα στη μεταλυγισμική του μορφή μπορεί να μην είναι κατ' ανάγκη συμμετρικό και ως εκ τούτου θεωρούνται τρισδιάστατα μοντέλα, χωρίς συμμετρίες.

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, για την περίπτωση γωνίας  $\Delta=90^\circ$  περιέχει πυκνό πλέγμα στην περιοχή του καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου (ίσο με 1/57 της διαμέτρου του σωλήνα) τόσο στην αξονική, όσο και στην περιμετρική διεύθυνση όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Αξίζει να σημειωθεί ότι, από τη θεωρία του λυγισμού για τα κελύφη, μια καλή εκτίμηση για το μήκος του ημι-κύματος (half-wave length) στην αξονική διεύθυνση μπορεί να ληφθεί από τη σχέση  $1.3\sqrt{Dt}$ . Αυτό σημαίνει ότι για ένα σωλήνα με  $D/t=240$ , θα πρέπει τουλάχιστον πέντε στοιχεία να περιέχονται στο αναμενόμενο μήκος ημι-κύματος, δηλαδή αριθμός που ικανοποιείται από το πλέγμα της παρούσας ανάλυσης. Αραιότερο πλέγμα θεωρείται στα ευθύγραμμα τμήματα εκατέρωθεν του καμπύλου τμήματος όπου δεν υπάρχουν σημαντικά υψηλές τάσεις και παραμορφώσεις. Αντίστοιχα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων γωνίας  $\Delta=60^\circ$  και γωνίας  $\Delta=30^\circ$  φαίνονται, επίσης, στην Εικόνα 7.

Στις δύο άκρες των ευθύγραμμων τμημάτων εισάγονται δύο «εικονικοί» κόμβοι, στον άξονα του σωλήνα. Ο κάθε κόμβος συνδέεται με όλους τους κόμβους της ακραίας διατομής του ευθύγραμμου τμήματος στην περιμετρική διεύθυνσή του με κατάλληλες κινηματικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας την εντολή «kinematic coupling» στο ABAQUS. Στο μοντέλο επιβάλλονται κατάλληλες συνοριακές συνθήκες απλής στήριξης στα άκρα του (άρθρωση-κύλιση) και εφαρμόζονται είτε δύο αντίθετες ροπές κάμψης, είτε δύο αντίθετες δυνάμεις στους ακραίους κόμβους. Ο τύπος της ανάλυσης είναι μη γραμμική ανάλυση τύπου «βήμα-προς-βήμα».





Εικόνα 7. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για καμπύλο τμήμα γωνίας (α)  $\Delta=90^\circ$ , (β)  $\Delta=60^\circ$  και (γ)  $\Delta=30^\circ$ , στο καμπύλο τμήμα και στο ευθύγραμμο τμήμα για το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.

## 6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αριθμητικά μοντέλα εστιάζουν σε δύο βασικά θέματα. Αρχικά, διεξάγεται η αναφερόμενη ως «ελαστική ανάλυση», η οποία σχετίζεται με τον προσδιορισμό των συντελεστών ευκαμψίας και έντασης των τάσεων. Το δεύτερο θέμα ανάλυσης, το οποίο αναφέρεται ως «ελαστική-πλαστική ανάλυση», αποσκοπεί στον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου, της μέγιστης ροπής κάμψης και του τρόπου αστοχίας του καμπύλου τμήματος, το οποίο υποβάλλεται σε ισχυρή κάμψη υπό την παρουσία εσωτερικής πίεσης.

### 6.1) Ελαστική ανάλυση

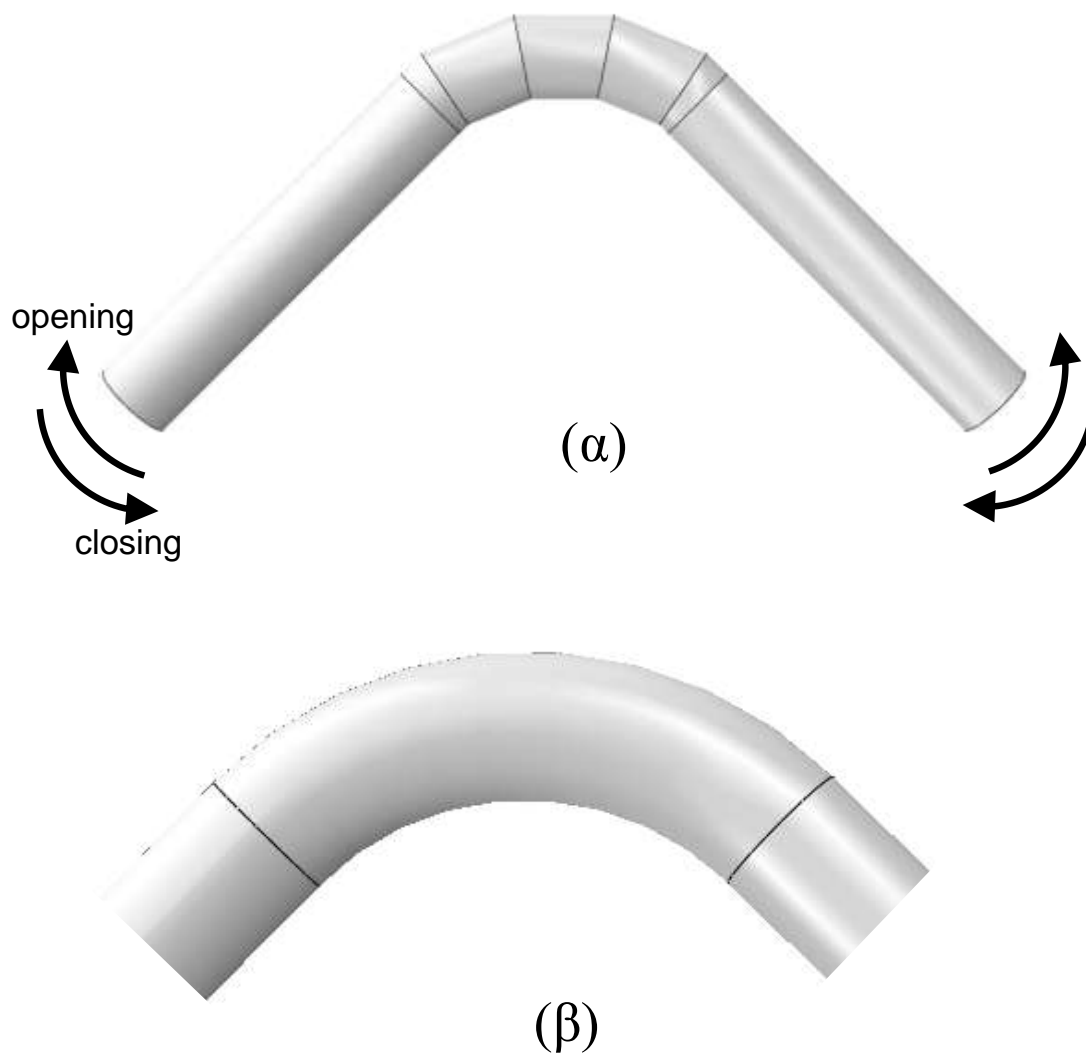
Βασικός στόχος της ανάλυσης αυτής είναι ο υπολογισμός του συντελεστή ευκαμψίας και του συντελεστή έντασης τάσεων. Ο συντελεστής ευκαμψίας υπολογίζεται σύμφωνα με τον αντίστοιχο ορισμό που εισάγει το πρότυπο ASME B31. Κατά τη διάρκεια της παρούσας μελέτης, υποθέτοντας ελαστική συμπεριφορά υλικού και λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά, εφαρμόζονται στα δύο άκρα δύο αντίθετες ροπές κάμψης (Εικόνα 8α), ώστε να υπολογιστεί η αντίστοιχη σχετική περιστροφή  $\theta$  των δύο άκρων Α και Β του Σχήματος 9α. Οι ίδιες ροπές κάμψης

εφαρμόζονται στα άκρα ενός ευθύγραμμου σωλήνα με μήκος ίσο με το μήκος ολόκληρης της διάταξης καμπύλο τμήμα-ευθύγραμμων τμημάτων, ώστε να υπολογιστεί η αντίστοιχη σχετική περιστροφή  $\theta'$  των άκρων Α' και Β' του Σχήματος 9b. Τέλος, αυτές οι ίδιες ροπές κάμψης εφαρμόζονται σε ένα ευθύγραμμο σωλήνα μήκους ίσο με το μήκος των δύο ευθύγραμμων τμημάτων, που ενώνονται με το καμπύλο τμήμα, ώστε να υπολογιστεί η αντίστοιχη σχετική περιστροφή  $\theta_s$  των δύο άκρων  $A_s$  και  $B_s$  του Σχήματος 9c. Ο συντελεστής ευκαμψίας (flexibility factor) υπολογίζεται από το λόγο:

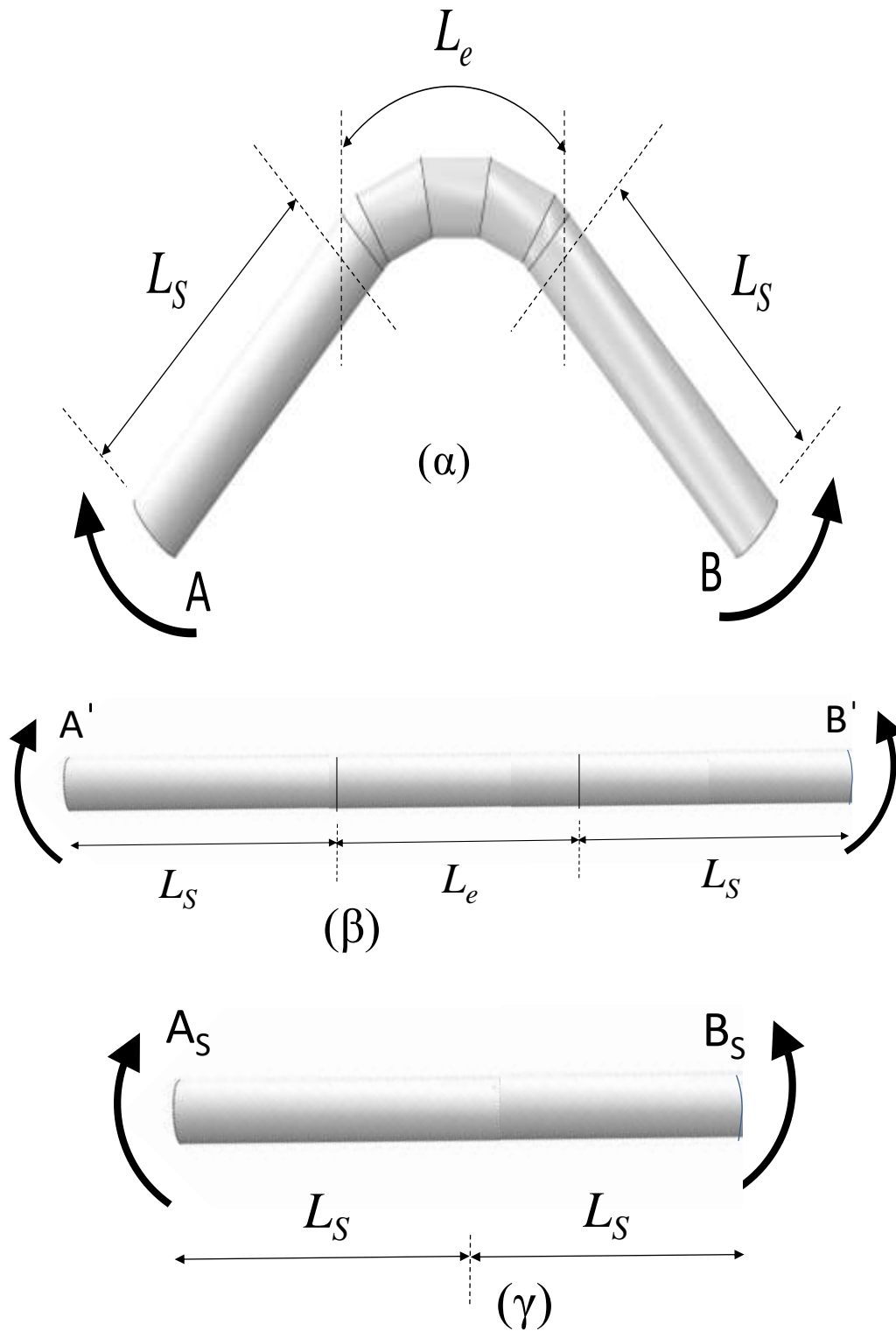
$$k = \frac{\theta - \theta_s}{\theta' - \theta_s} \quad (9)$$

Η εξίσωση (9) είναι σύμφωνη με τον ορισμό του συντελεστή ευκαμψίας του προτύπου ASME B31 με την αφαίρεση της στροφής των ευθύγραμμων τμημάτων της διάταξης ( $\theta_s$ ), προσδιορίζεται η ευκαμψία αμιγώς του καμπύλου τμήματος του σωλήνα. Οι τιμές του συντελεστή ευκαμψίας των καμπύλων τμημάτων που εξετάζονται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές της προδιαγραφής ASME B31. Σημειώνεται πως οι συντελεστές αυτοί στον κώδικα ASME B31 αφορούν μόνο στην περίπτωση που η γωνία  $\Delta=90^\circ$ , καθώς διαφορετικές τιμές γωνιών δεν εξετάζονται στο υπόψη πρότυπο. Και για τα δύο καμπύλα τμήματα, θεωρείται μια μικρή ροπή κάμψης ίση με 3.5% της ονομαστικής πλαστικής ροπής ( $M_p = \sigma_Y D^2 t$ ) στην παρούσα ανάλυση. Επιπλέον, οι αντίστοιχοι συντελεστές υπολογίζονται για ένα αντίστοιχο «εικονικό» καμπύλο τμήμα σταθερής καμπυλότητας (Εικόνα 8b) στον Πίνακα 2. Για την ανάλυση του καμπύλου τμήματος σταθερής καμπυλότητας αναπτύχθηκε ένα κατάλληλο αριθμητικό μοντέλο. Τα χαρακτηριστικά της διατομής του τελευταίου είναι τα ίδια με το καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου, με ακτίνα καμπυλότητας  $R=2.5D$ . Η έννοια «εικονικό» αναφέρεται στο γεγονός ότι μπορεί να μην είναι εφικτό τεχνικά να κατασκευαστεί ένα smooth καμπύλο τμήμα με τις υπό εξέταση διαστάσεις σε μια πρακτική εφαρμογή, απλώς η ανάλυση γίνεται για λόγους σύγκρισης, δεδομένου ότι για τα καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας υπάρχει αρκετή εμπειρία και ικανός αριθμός από πειραματικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συντελεστές ευκαμψίας στην περίπτωση καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου είναι σημαντικά υψηλότεροι σε σχέση με τις προβλέψεις των διατάξεων του ASME B31. Επιπρόσθετα, οι τιμές των συντελεστών ευκαμψίας των καμπύλων τμημάτων

σπονδυλωτού τύπου είναι αρκετά κοντά με αυτές των καμπύλων τμημάτων σταθερής καμπυλότητας.



Εικόνα 8. (α) Μοντέλο φόρτισης για ελαστική ανάλυση καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου γωνίας  $\Delta=90^\circ$  ανοίγουσες και κλείνουσες ροπές (β) «εικονικό» καμπύλο τμήμα σταθερής καμπυλότητας το οποίο χρησιμοποιείται για λόγους σύγκρισης.



Εικόνα 9. (α) Κάμψη της διάταξης (καμπύλο τμήμα-ευθύγραμμων τμημάτων)· (β) κάμψη ενός ευθύγραμμου σωλήνα με μήκος ίσο με το μήκος της διάταξης· (γ) κάμψη ενός ευθύγραμμου σωλήνα με μήκος ίσο με το μήκος των δύο ευθύγραμμων τμημάτων της διάταξης.

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι –  $\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	26.45	31.87	18.04
0.3	7.99	8.67	5.97
0.5	5.94	6.11	4.12

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ Ι –  $\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	29.19	32.85	32.13
0.3	8.13	8.46	10.63
0.5	6.01	6.16	7.35

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ –  $\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	37.55	37.82	21.77
0.3	8.42	8.54	5.84
0.5	6.16	6.21	3.92

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΙΙ –  $\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	37.96	39.10	40.26
0.3	8.52	8.62	9.10
0.5	6.18	6.23	6.01

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι –  $\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	29.63	35.14
0.3	9.15	9.48
0.5	6.85	7.01

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ Ι –  $\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	33.93	36.10
0.3	9.39	9.75
0.5	6.98	7.15

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ –  $\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	40.39	45.71
0.3	9.46	9.84
0.5	7.01	7.19

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΙΙ –  $\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	40.40	46.84
0.3	9.68	10.07
0.5	7.12	7.30

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι –  $\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	27.20	31.01
0.3	7.34	7.56
0.5	5.49	5.60

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ Ι –  $\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	35.81	31.42
0.3	7.30	7.51
0.5	5.42	5.52

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ –  $\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	42.30	39.43
0.3	7.59	7.83
0.5	5.64	5.75

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΙΙ –  $\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	41.78	39.92
0.3	7.52	7.75
0.5	5.53	5.64

Πίνακας 2. Συντελεστές ευκαμψίας για τα καμπύλα τμήματα Ι και ΙΙ.

Εκτός από τους συντελεστές ευκαμψίας, οι τάσεις που αναπτύσσονται στο καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και είναι πολύ σημαντικές στο δομικό σχεδιασμό τους. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι τα κρίσιμα σημεία στο καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου βρίσκονται στις ακμές των σπονδύλων, δηλαδή στα σημεία της συγκόλλησης, ενώ για το καμπύλο τμήμα σταθερής καμπυλότητας το κρίσιμο σημείο είναι στη μεσαία διατομή του (Εικόνα 10).

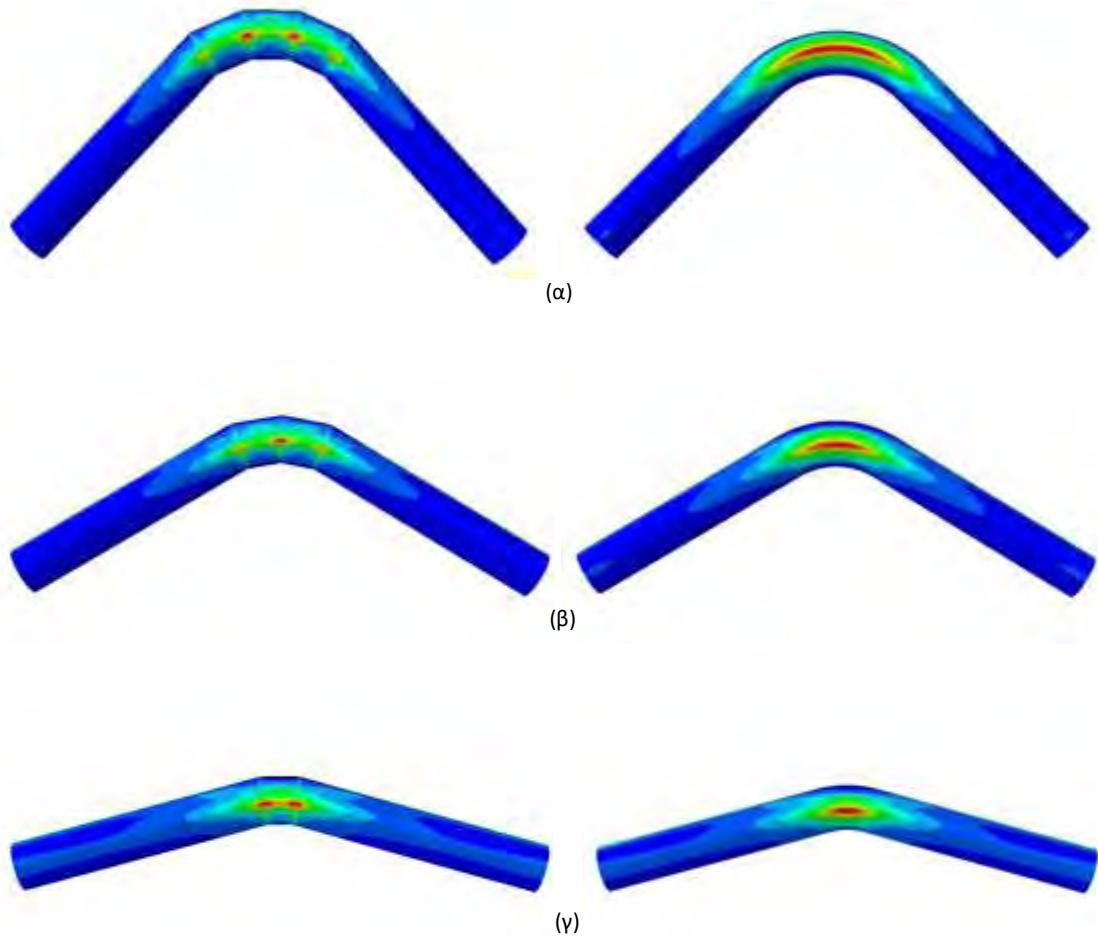
Η κατανομή των τάσεων στην αξονική και στην περιμετρική διεύθυνση στις κρίσιμες διατομές παρουσιάζονται στην Εικόνα 11 και στην Εικόνα 12 για «ανοίγουσες» και «κλείνουσες» ροπές κάμψης υπό μηδενική πίεση και υπό εσωτερική πίεση ίση με το 50% της ονομαστικής πίεσης διαρροής του σωλήνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανομή των τάσεων στις δύο περιπτώσεις, για σωλήνα I και σωλήνα II, για τα καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας και για τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου είναι ουσιαστικά διαφορετική από τη γραμμική κατανομή που υπολογίζεται από τους κλασικούς τύπους της Μηχανικής των Υλικών, που αντιστοιχεί σε εκείνη ενός ευθύγραμμου σωλήνα της ίδιας γεωμετρίας της διατομής. Επίσης, οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στα καμπύλα τμήματα σταθερής καμπυλότητας (smooth elbows) και στα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου (mitered elbows) είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τάσεις στον ευθύγραμμο σωλήνα (straight pipe).

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι συγκεντρώσεις των τάσεων σε διάφορα σημεία, εισάγεται ο συντελεστής έντασης τάσεων (stress intensification factor) ο οποίος υιοθετείται και από τον κώδικα ASME B31. Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τάσης  $\sigma_{\max}$  στο καμπύλο τμήμα που οφείλεται στην κάμψη, αφαιρώντας την τάση  $\sigma_{pressure}$  που τυχόν δημιουργείται λόγω πίεσης, προς την ονομαστική τάση που αντιστοιχεί σε ένα ευθύγραμμο σωλήνα ίδιας διατομής και μήκους:

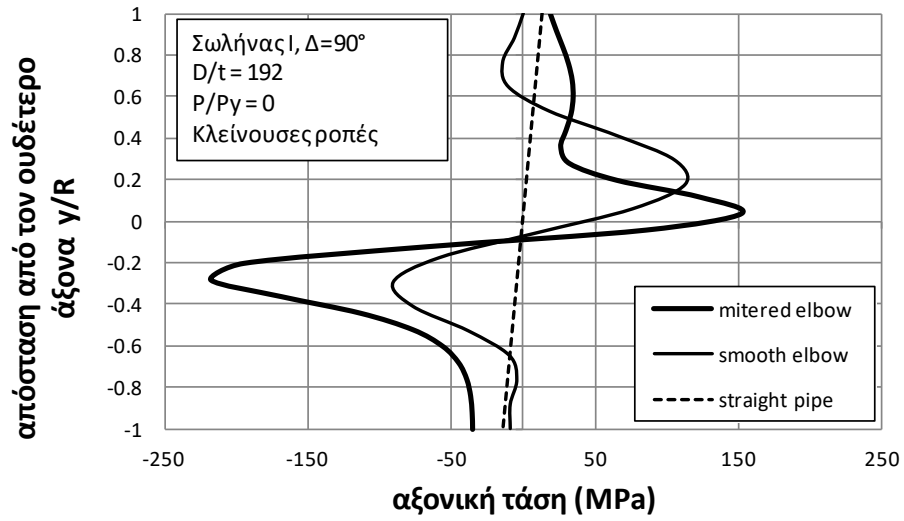
$$i = \left( \sigma_{\max} - \sigma_{pressure} / \sigma_{nom} \right) \quad (10)$$

Στην εξίσωση (10), η ονομαστική τάση  $\sigma_{nom}$  μπορεί να υπολογισθεί από τη Μηχανική των Υλικών σύμφωνα με τη σχέση  $\sigma_{nom} = M / (\pi r^2 t)$ , όπου το  $r$  είναι η ακτίνα του σωλήνα ( $r = D/2$ ). Οι τιμές των συντελεστών έντασης τάσεων απεικονίζονται στον Πίνακα 3 για τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου I και II. Σημειώνεται πως οι συντελεστές αυτοί στον κώδικα ASME B31 αφορούν μόνο στην περίπτωση που η γωνία  $\Delta = 90^\circ$ , καθώς διαφορετικές τιμές γωνιών δεν εξετάζονται στο υπόψη πρότυπο. Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι η τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων μειώνεται σημαντικά με την παρουσία εσωτερικής πίεσης, η οποία αποτελεί σταθεροποιητικό παράγοντα, καθώς μειώνει σημαντικά την οβαλότητα της διατομής σε καμπτικά φορτία.

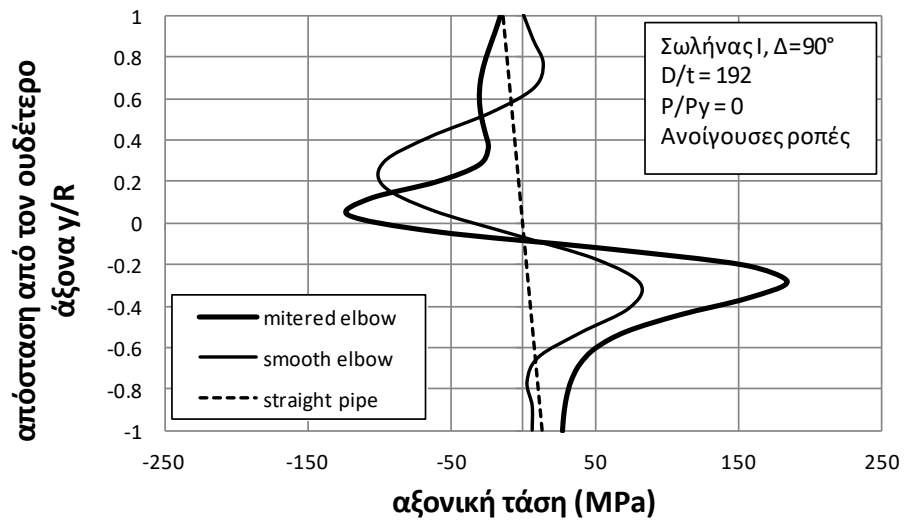


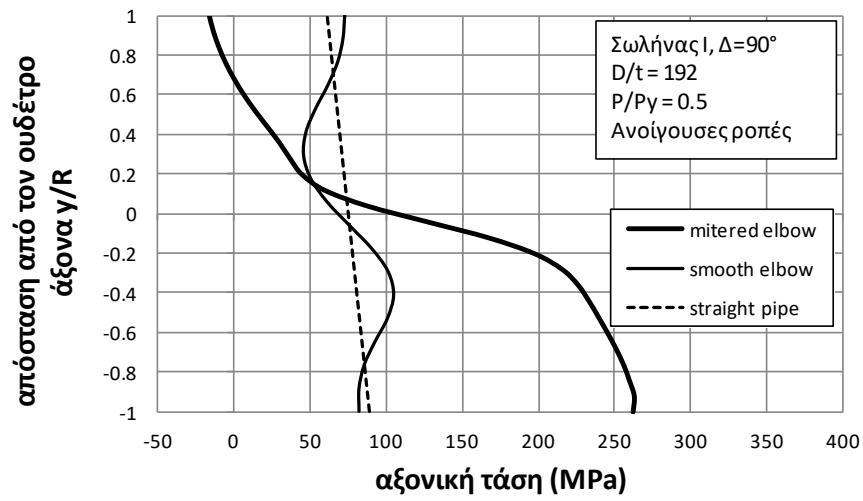
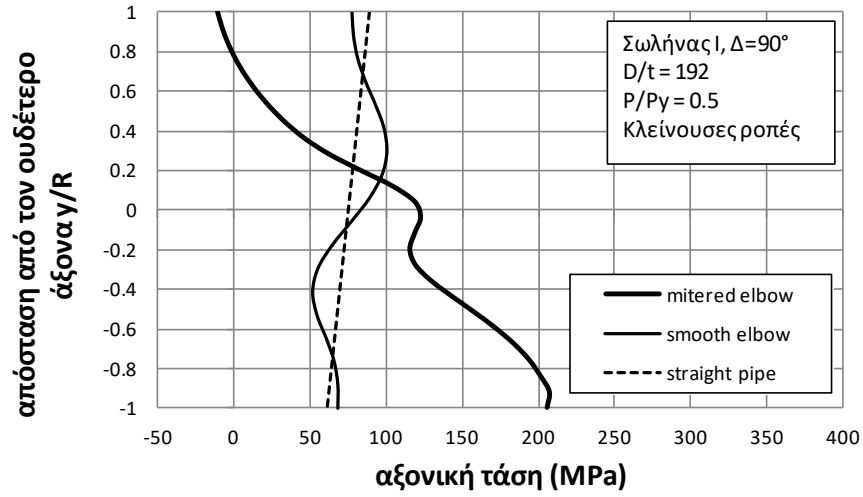


Εικόνα 10. Σημεία μέγιστης τάσης Mises του σωλήνα  $\Pi$  για γωνίες (α)  $\Delta=90^\circ$ , (β) γωνίας  $\Delta=60^\circ$  και (γ) γωνίας  $\Delta=30^\circ$  – καμπύλο τμήμα σταθερής καμπυλότητας και καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου – με κλείνουσες ροπές και μηδενική πίεση ( $P/P_y = 0$ ).

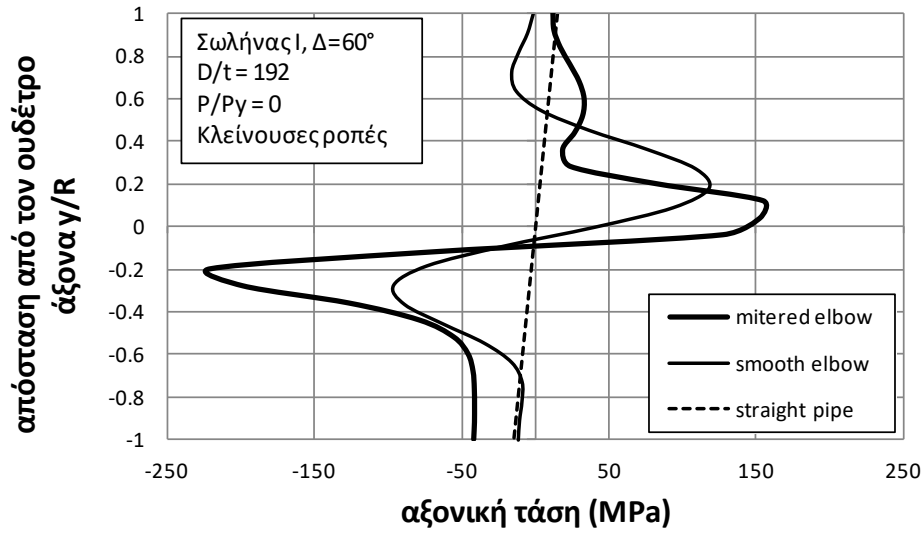


(α)

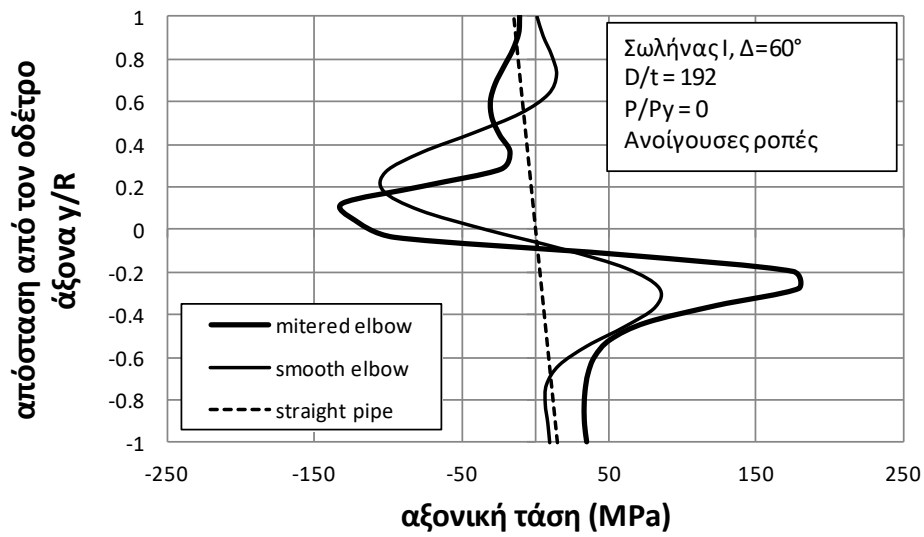


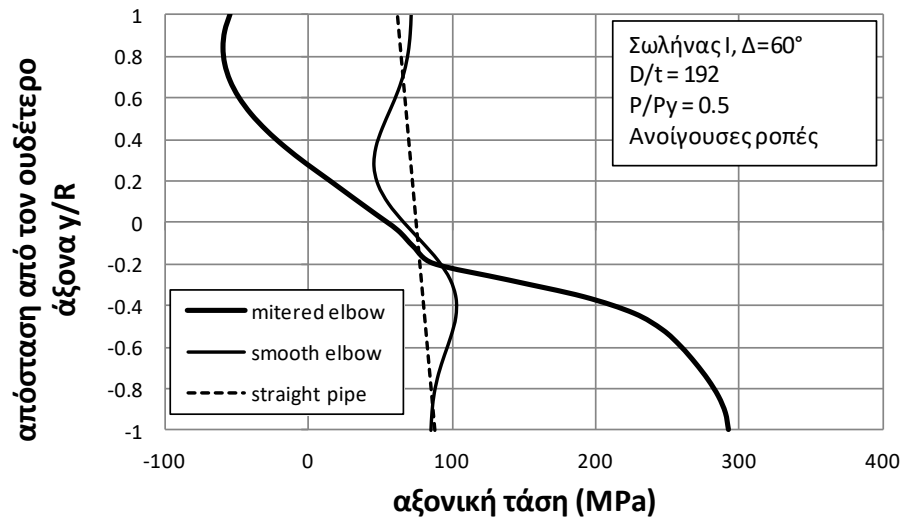
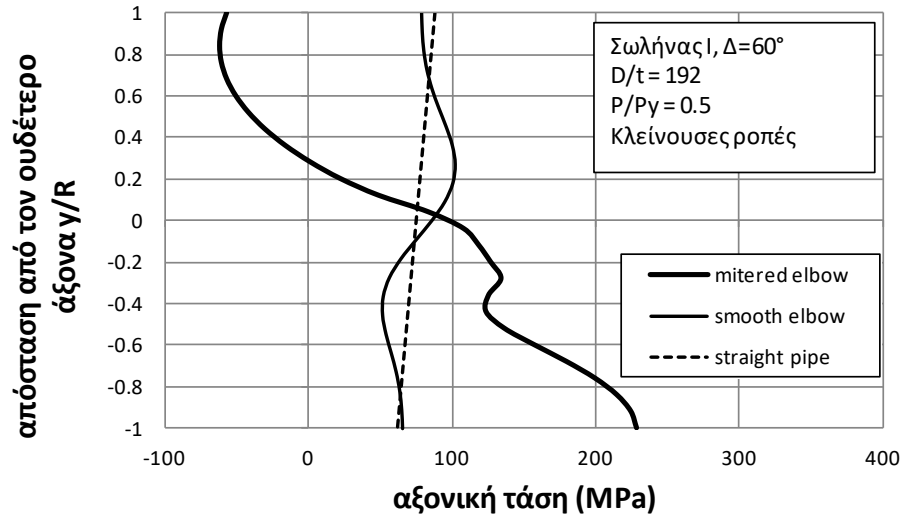


(α)

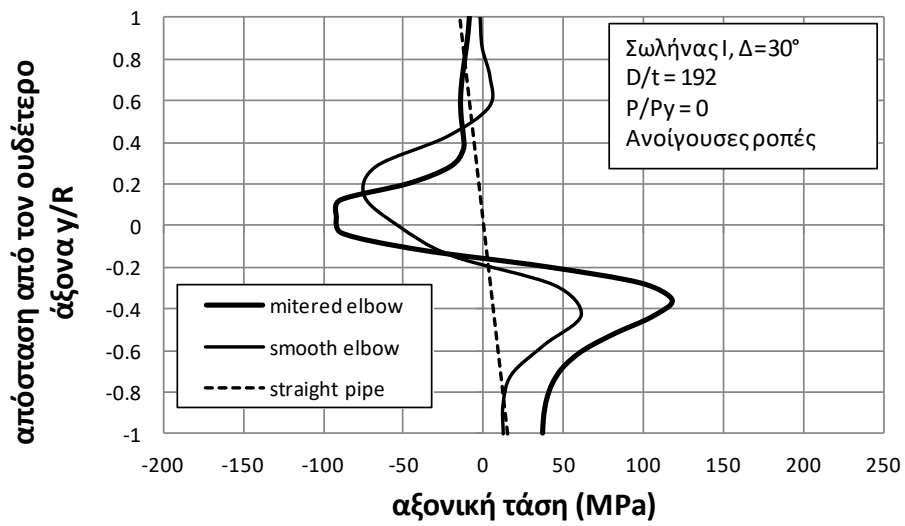
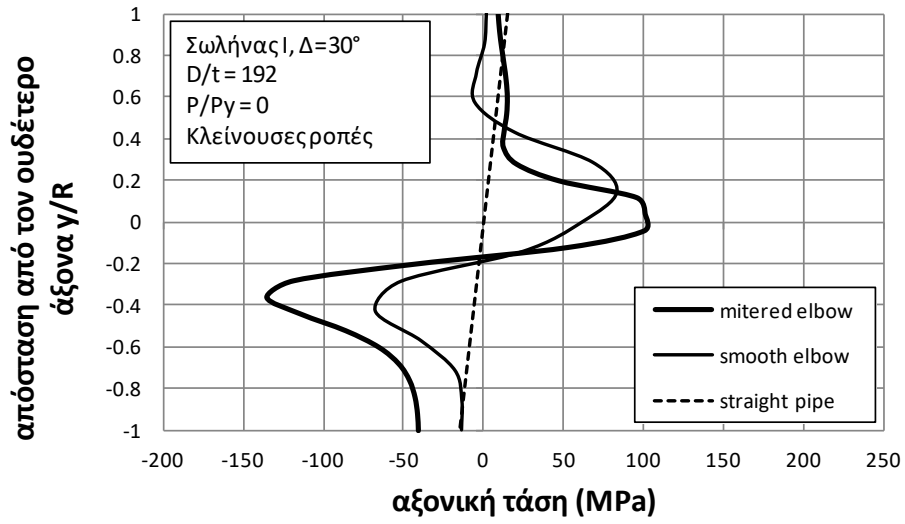


(β)

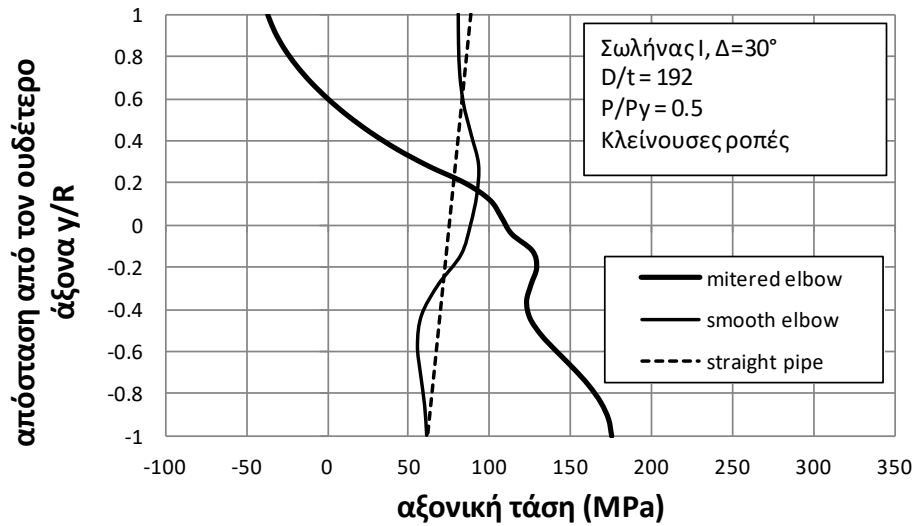




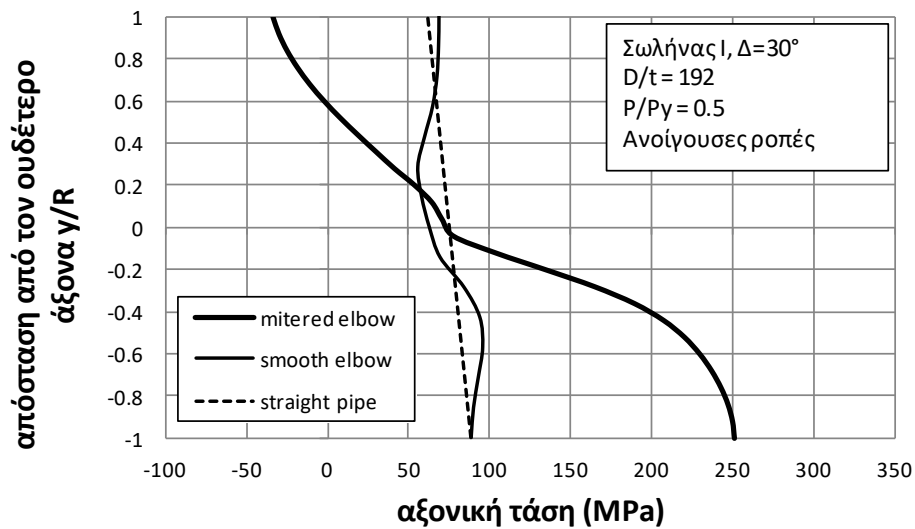
(β)



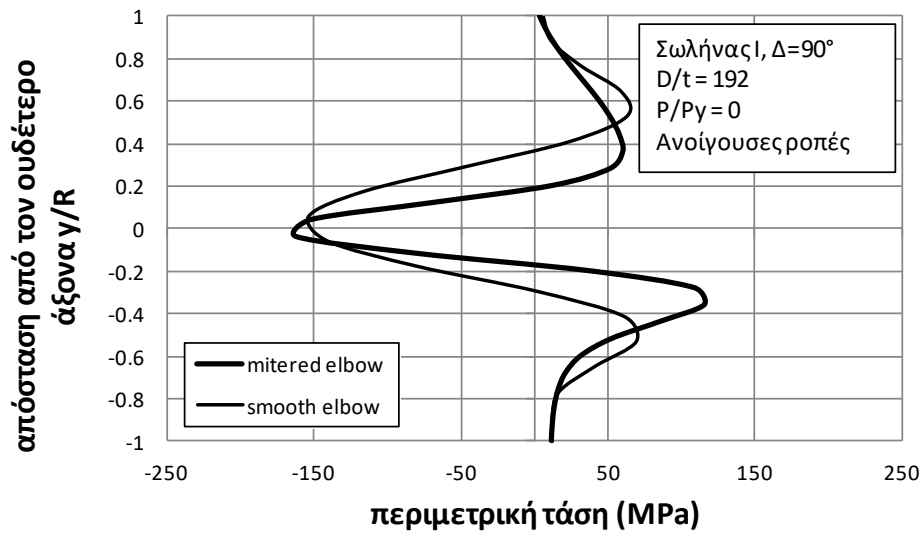
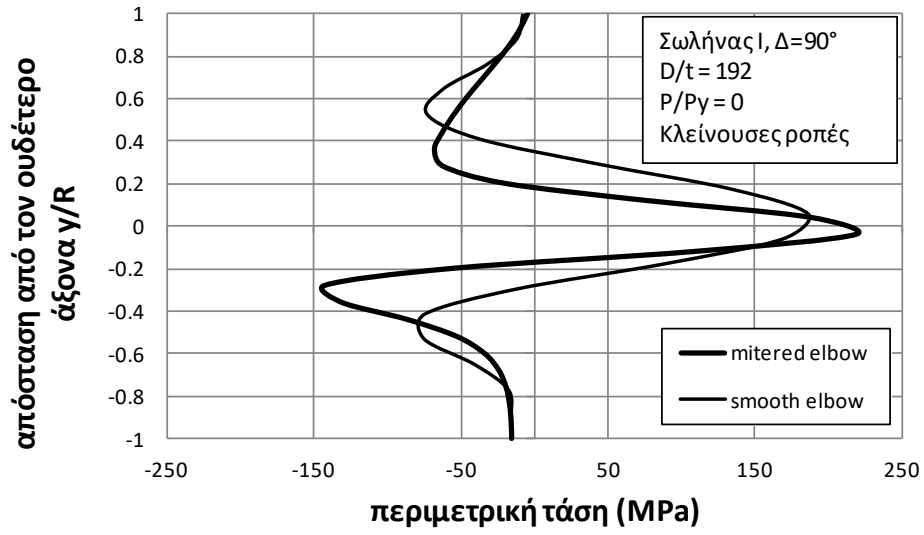
(γ)



(γ)

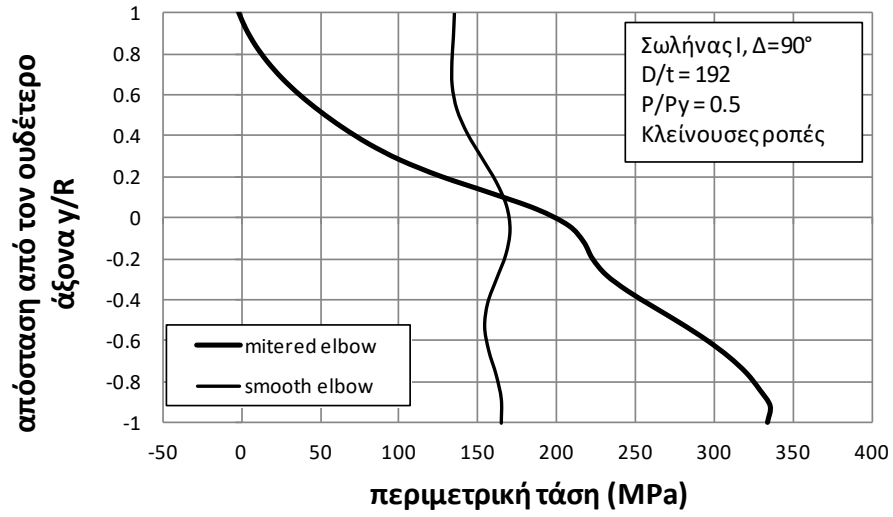


Εικόνα 11. Κατανομή των αξονικών τάσεων κατά μήκος της ακμής του καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου (mitered elbow), στο «εικονικό» καμπύλο τμήμα σταθερής καμπυλότητας (smooth elbow) στη μεσαία διατομή και σε ένα ευθύγραμμο σωλήνα (straight pipe) περίπτωση σωλήνα I,  $D/t = 192$ , κλείνουσες και ανοίγουσες ροπές,  $P/P_y = 0$  και  $P/P_y = 0.5$ , για γωνία  $\Delta=90^\circ$ (α),  $\Delta=60^\circ$ (β),  $\Delta=30^\circ$ (γ).

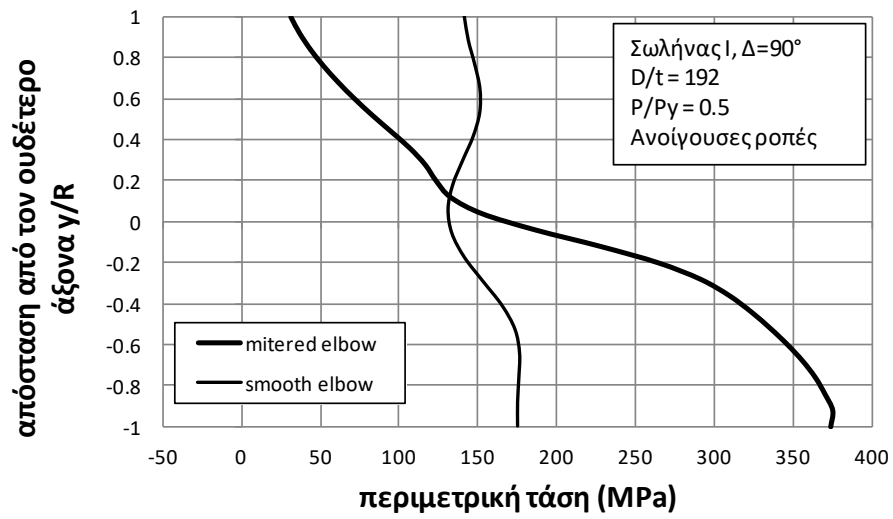


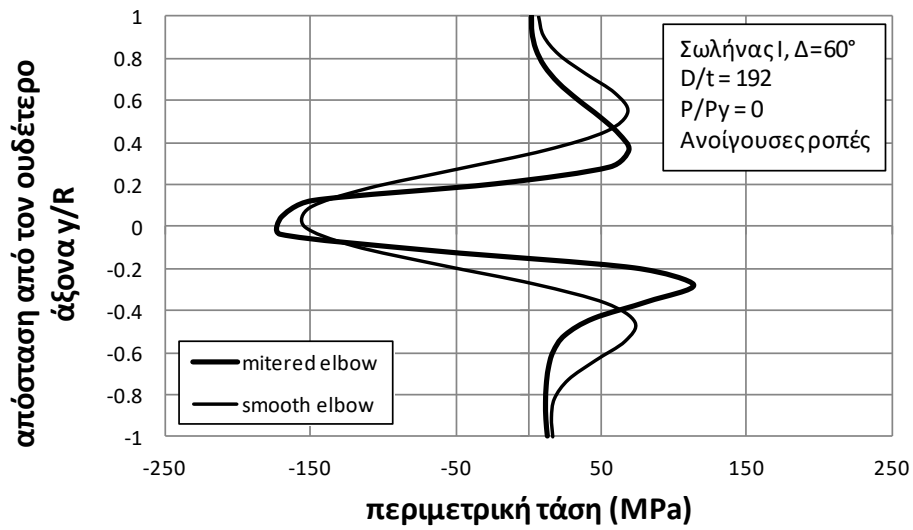
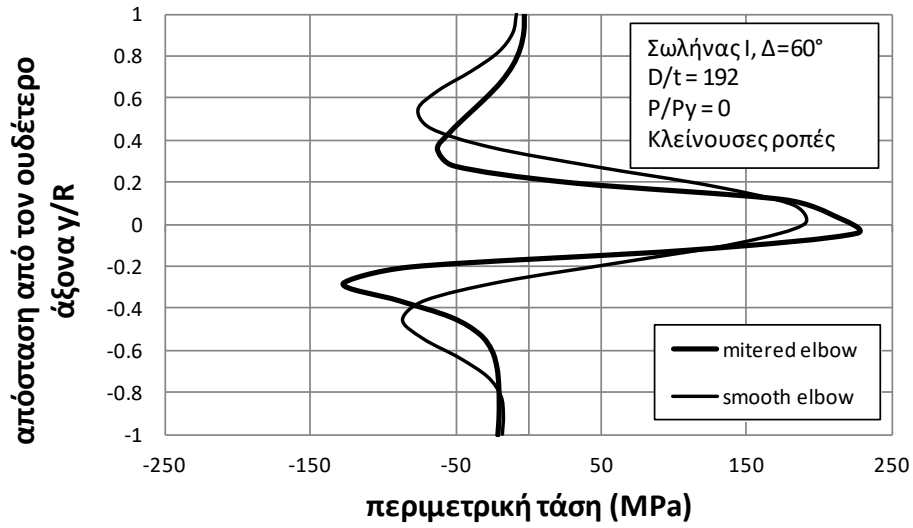
(α)



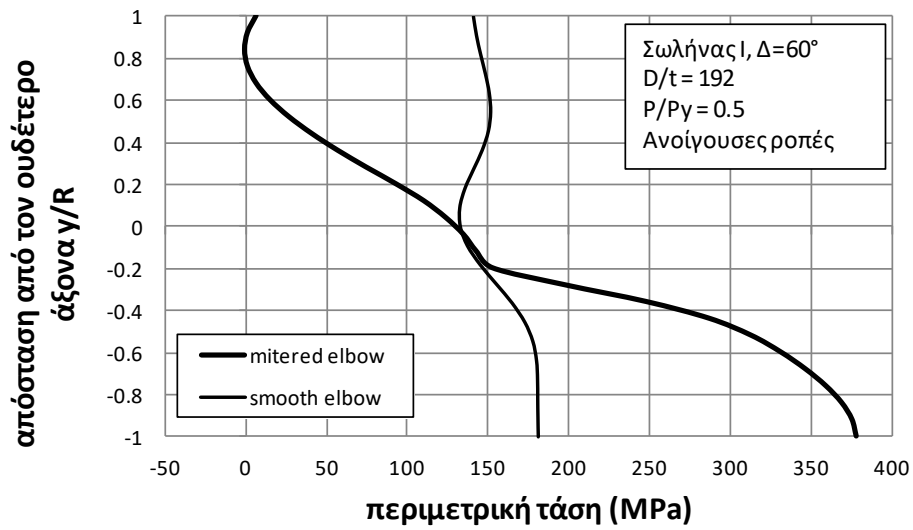
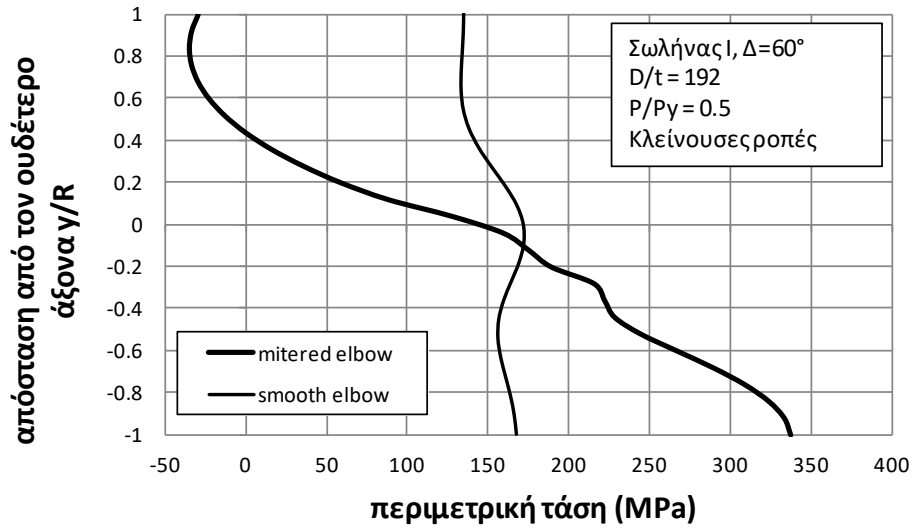


(α)

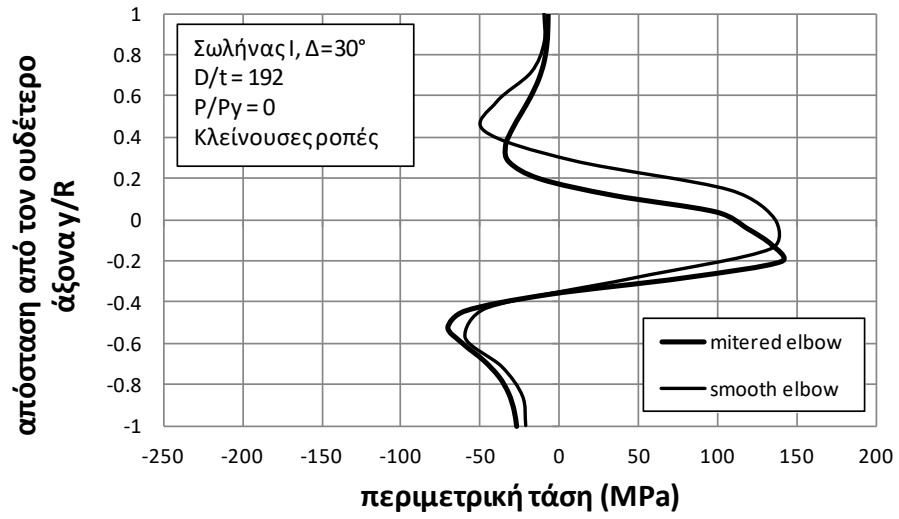




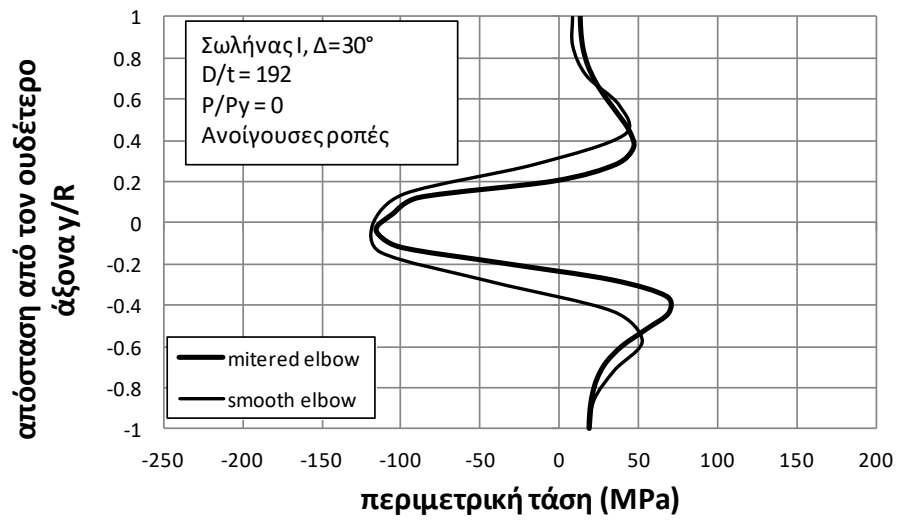
(β)

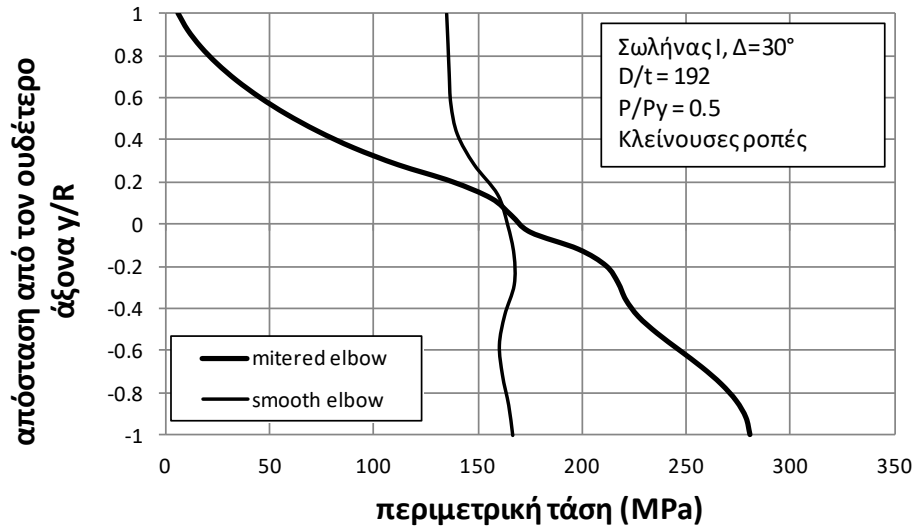


(β)

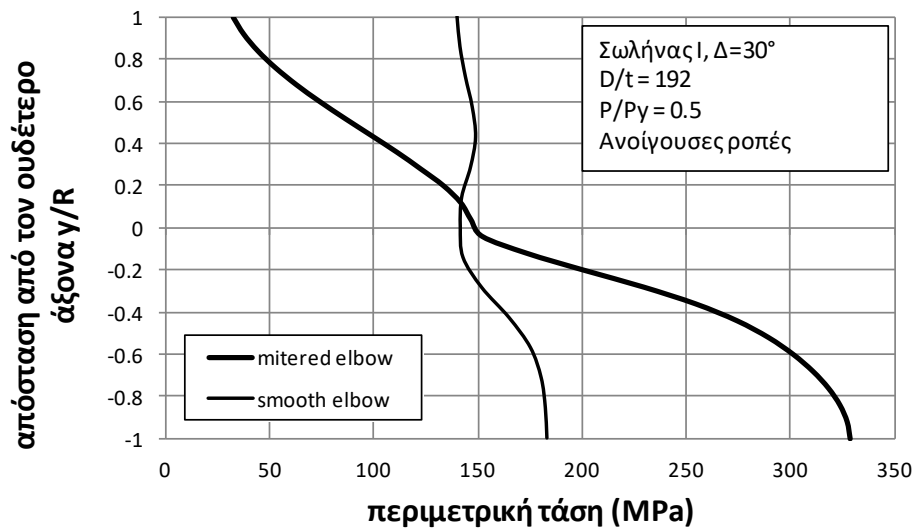


( $\gamma$ )





(γ)



Εικόνα 12. Κατανομή των περιμετρικών τάσεων κατά μήκος της ακμής του καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου (mitered elbow), στο «εικονικό» καμπύλο τμήμα σταθερής καμπυλότητας (smooth elbow) στη μεσαία διατομή και σε ένα ευθύγραμμο σωλήνα (straight pipe) περίπτωση σωλήνα I,  $D/t = 192$ , κλείνουσες και ανοίγουσες ροπές,  $P/P_y = 0$  και  $P/P_y = 0.5$ , για γωνία  $\Delta=90^\circ(\alpha)$ ,  $\Delta=60^\circ(\beta)$ ,  $\Delta=30^\circ(\gamma)$ .

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	13.54	16	6.51
0.3	1.97	2	1.31
0.5	2.04	2.05	0.85

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι – ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	11.92	16.09	6.51
0.3	1.34	1.36	1.31
0.5	1.44	1.47	0.85

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	14.44	18.84	7.57
0.3	0.95	1.97	1.15
0.5	2.02	2.03	0.74

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ – ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=90^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>	<b>ASME B31.8</b>
0	9.10	20.7	7.57
0.3	1.30	1.31	1.15
0.5	1.40	1.43	0.74

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	12.19	15.04
0.3	2.09	2.13
0.5	2.18	2.19

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι – ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	11.61	15.39
0.3	1.28	1.31
0.5	1.40	1.42

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	13.48	18.71
0.3	2.08	2.11
0.5	2.16	2.19

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ – ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=60^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	12.97	19.24
0.3	1.34	1.36
0.5	1.46	1.47

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	7.98	9.15
0.3	2.51	2.53
0.5	2.55	2.57

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ Ι – ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	7.82	9.48
0.3	1.55	1.57
0.5	1.59	1.61

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ – ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	8.49	10.18
0.3	2.46	2.51
0.5	2.51	2.54

ΚΑΜΠΥΛΟ ΤΜΗΜΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΙΙ – ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ –

$\Delta=30^\circ$

<b>P/Py</b>	<b>Opening</b>	<b>Closing</b>
0	8.85	11.14
0.3	1.58	1.61
0.5	1.63	1.65

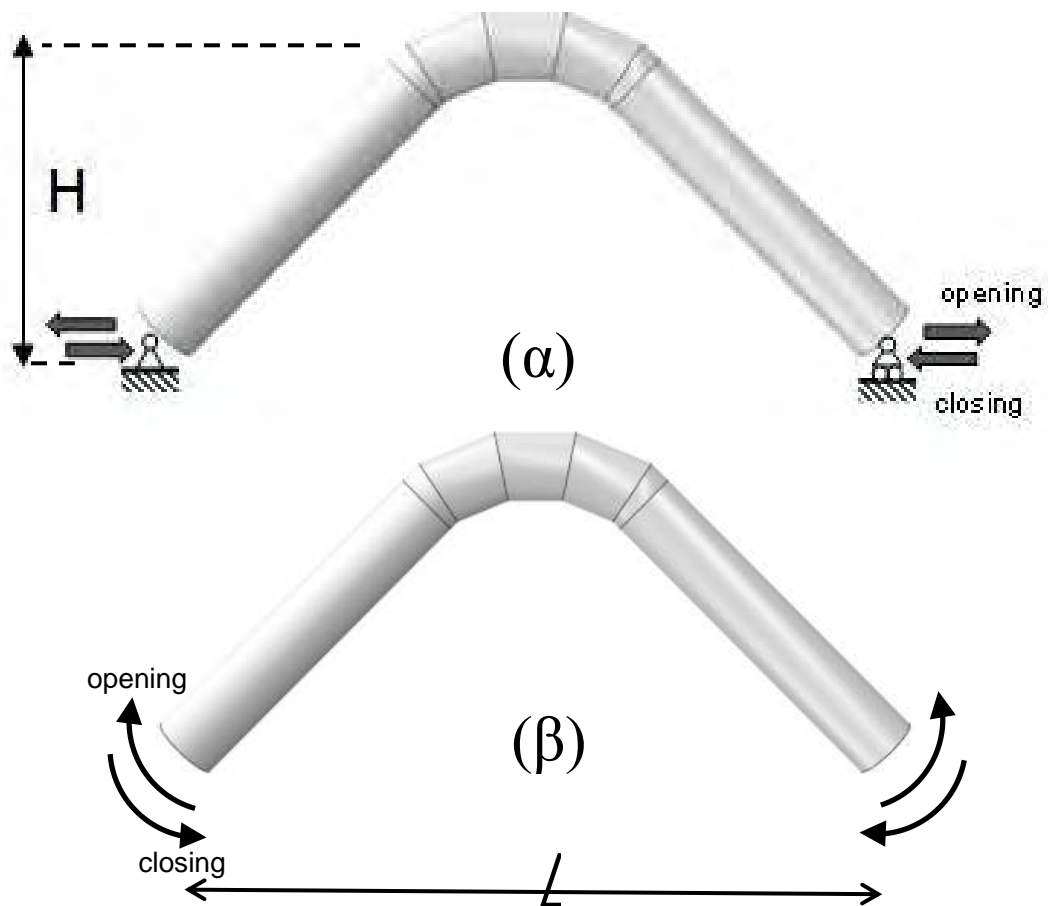
Πίνακας 3. Συντελεστές έντασης τάσεων για τα καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου Ι και ΙΙ.

## 6.2) Ελαστική-πλαστική συμπεριφορά και μέγιστη αντοχή

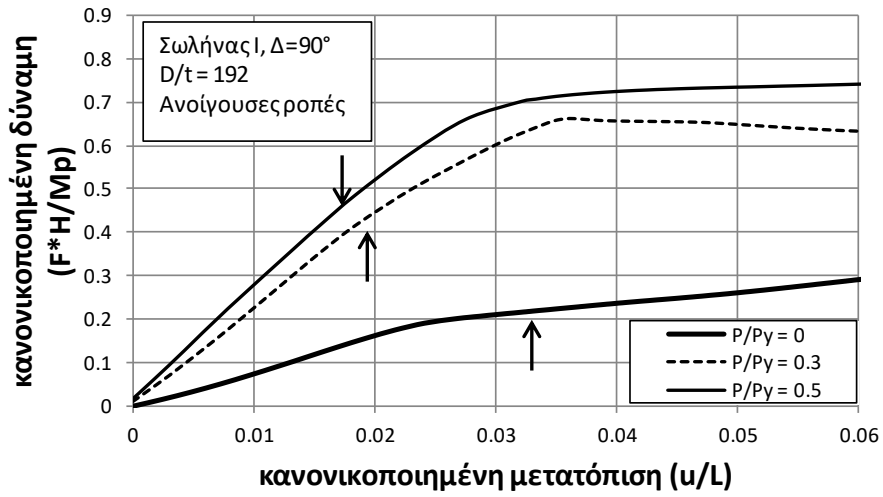
Η σχέση φορτίου-παραμόρφωσης προσδιορίζεται με δύο διατάξεις φόρτισης, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 13a και Εικόνα 13b. Στην πρώτη διάταξη επιβάλλεται οριζόντια



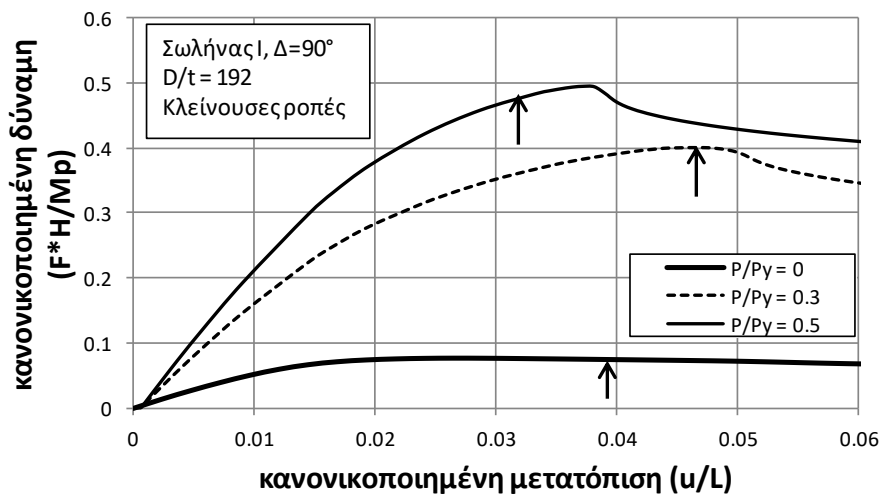
μετατόπιση στο ένα άκρο, ενώ το άλλο άκρο είναι αρθρωμένο. Αυτός ο τύπος φόρτισης θα μπορούσε να εφαρμοστεί εύκολα σε μία αντίστοιχη πειραματική διάταξη. Στη δεύτερη διάταξη εφαρμόζεται η ίδια ροπή κάμψης στα δύο άκρα με αντίθετο πρόσημο. Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης του σωλήνα I (Εικόνα 14a) και του σωλήνα II (Εικόνα 14b) αναφέρονται στην πρώτη διάταξη φόρτισης, ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες φορτίου-μετατόπισης του σωλήνα I (Εικόνα 15a) και του σωλήνα II (Εικόνα 15b) αναφέρονται στη δεύτερη διάταξη φόρτισης. Σε όλες τις περιπτώσεις, η ανάλυση δείχνει ότι ο τρόπος αστοχίας είναι ο τοπικός λυγισμός (local buckling) με επακόλουθη αναδίπλωση λόγω της υπερβολικής συμπίεσης του τοιχώματος του καμπύλου τμήματος. Εντούτοις, τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης που απεικονίζονται στις Εικόνες 14 και 15 ισχύουν μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο, καθώς οι τοπικές παραμορφώσεις δε μπορεί να υπερβαίνουν ένα ορισμένο όριο, είτε στην περιμετρική διεύθυνση (Ie11), είτε στην αξονική (Ie22). Ο καθορισμός αυτού του ορίου είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα. Συντηρητικά, με βάση έρευνες που βασίζονται στην εφελκυστική αντοχή αγωγών υδρογονανθράκων, αυτή η τιμή μπορεί να ληφθεί ίση με 2% για περιοχές με συγκόλληση. Παρακολουθώντας την εξέλιξη των τοπικών παραμορφώσεων στα κρίσιμα σημεία, το κριτήριο της υπέρβασης του ορίου υποδεικνύεται στις καμπύλες φορτίου μετατόπισης με ένα βέλος ( $\downarrow$ ). Στις Εικόνες 16 και 17 φαίνονται τα παραμορφωμένου σχήματος καμπύλα τμήματα σπονδυλωτού τύπου της δεύτερης διάταξης φόρτισης, υπό ανοίγουσες και κλείνουσες ροπές και πίεσης από μηδενική έως και ίση με το 50% της πίεσης διαρροής.

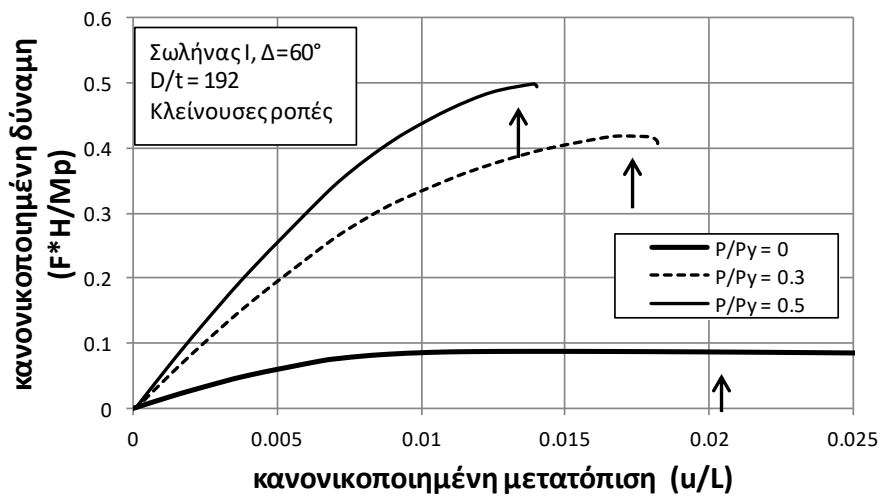
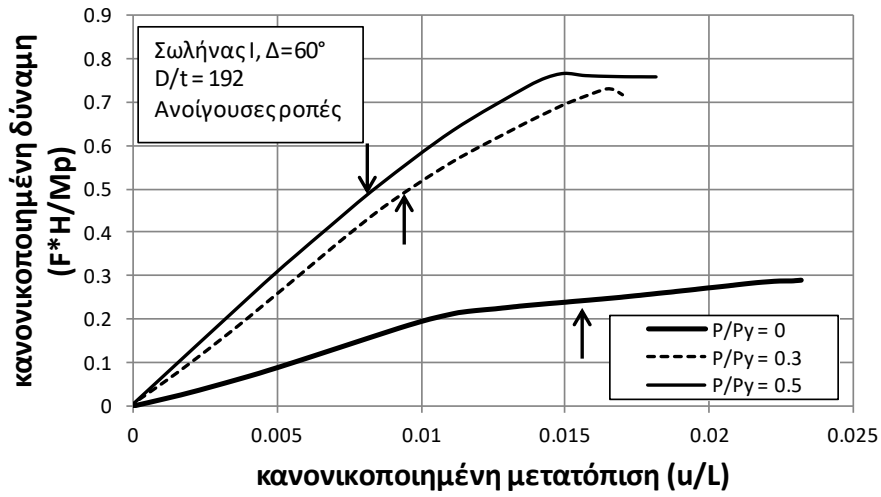


Εικόνα 13. Φορτίσεις κάμψης για καμπύλο τμήμα σπονδυλωτού τύπου, γωνίας  $\Delta=90^\circ$  – κλείνουσες (closing) και ανοίγουσες (opening) ροπές. (α) πρώτη διάταξη φόρτισης – εύρεση της ροπής στη μεσαία διατομή ίση με  $F \cdot H$ , (β) δεύτερη διάταξη φόρτισης – ίδια ροπή κάμψης σε κάθε διατομή.

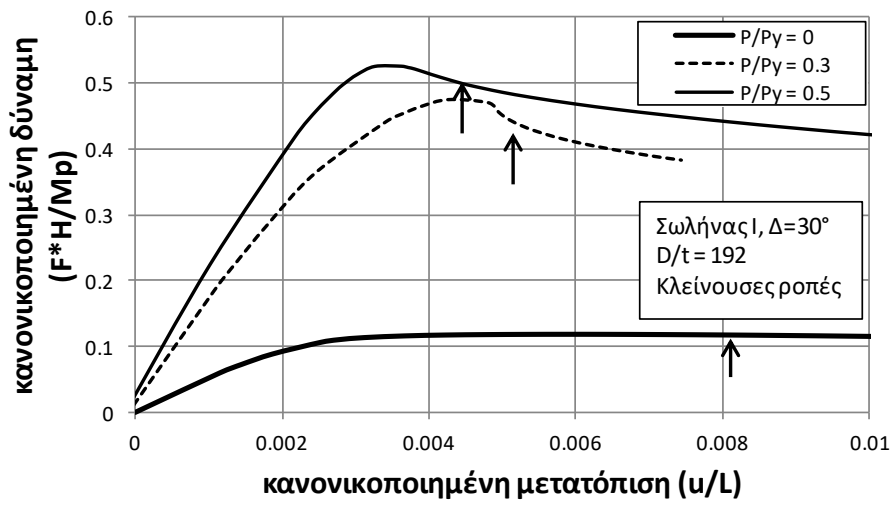
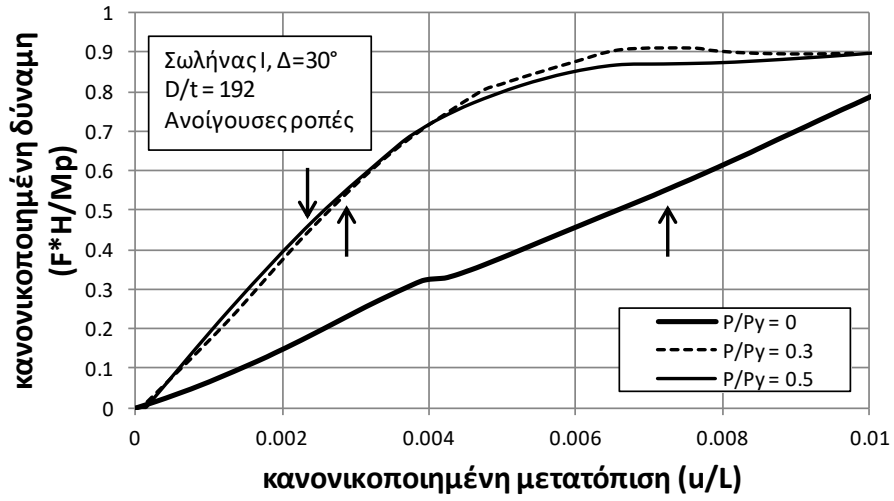


(α)

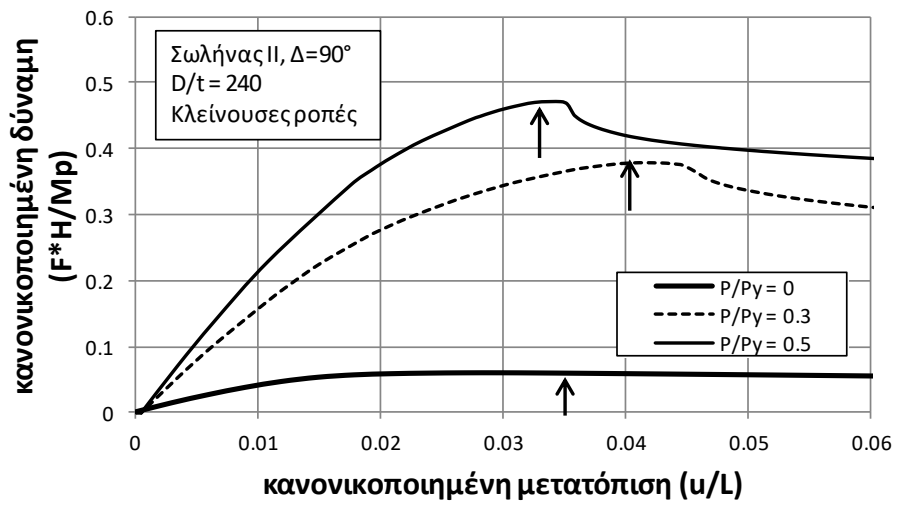
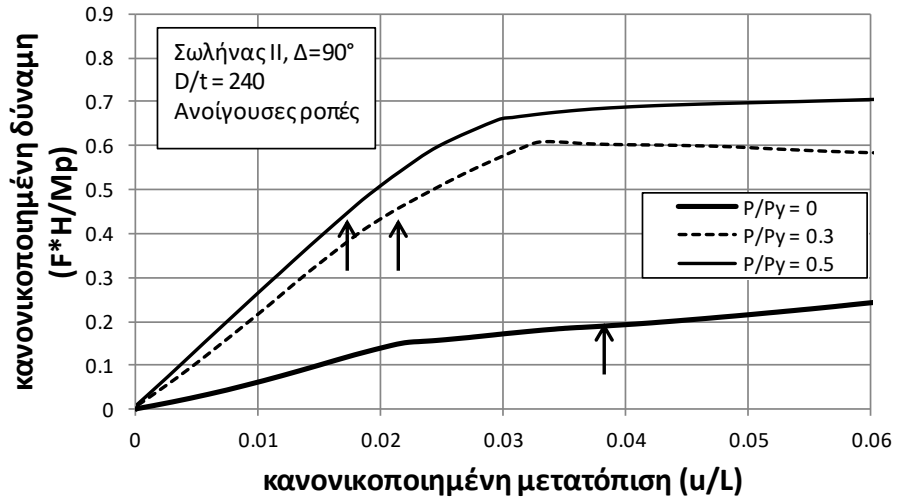




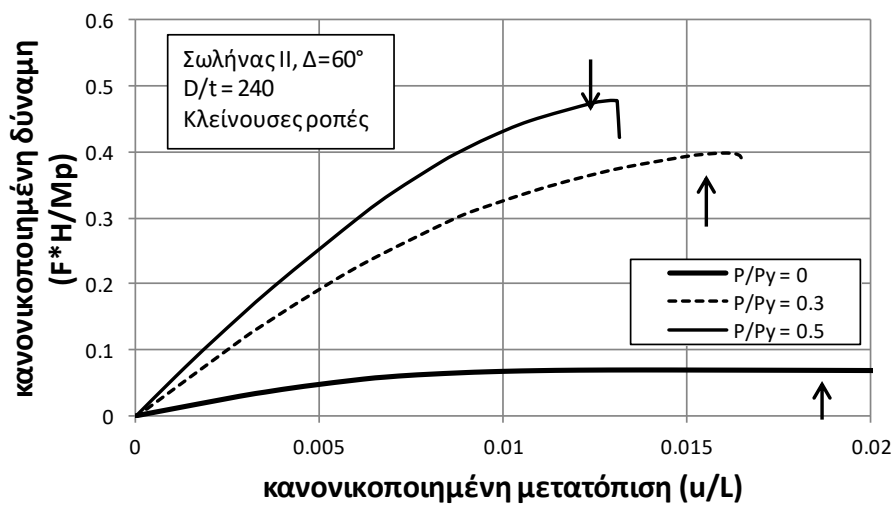
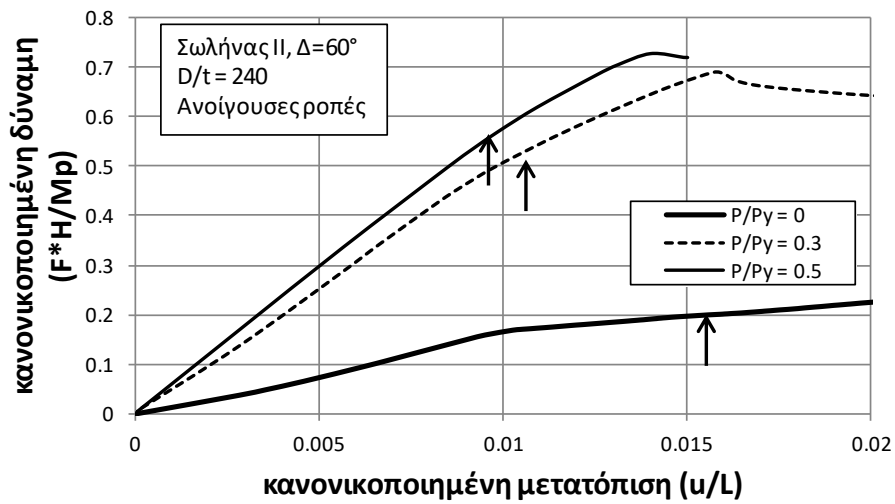
(α)



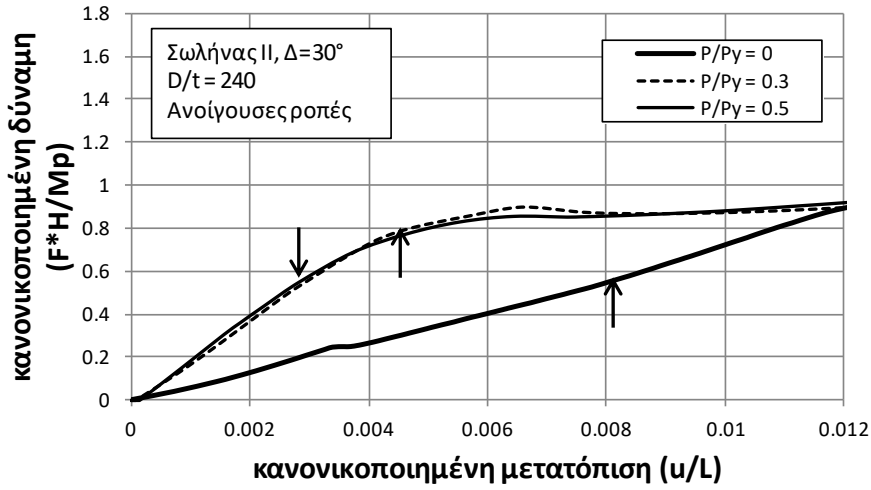
(α)



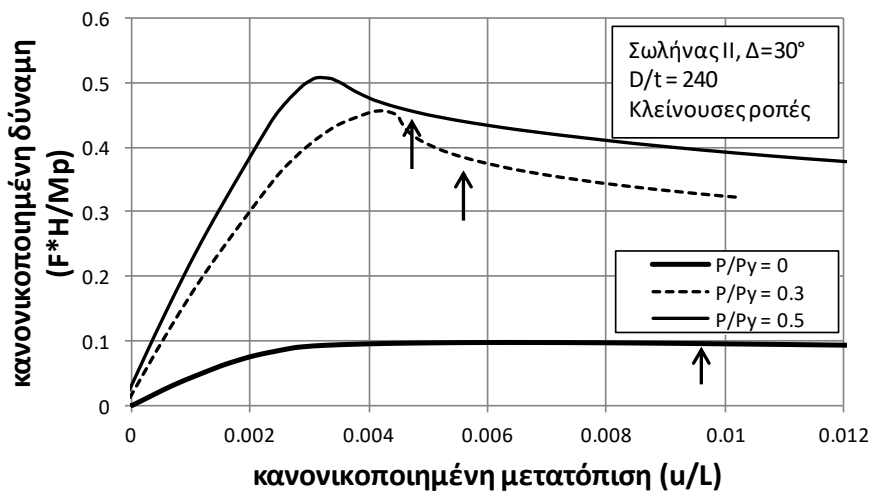
(β)



(β)

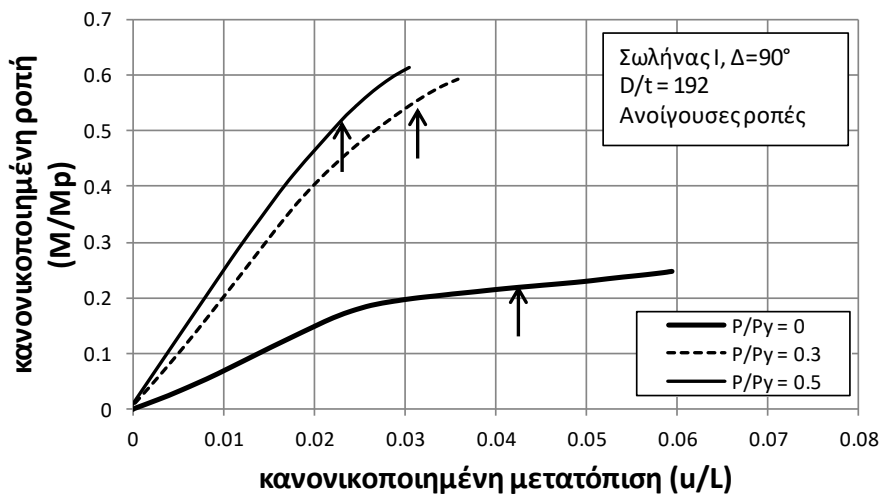


(β)

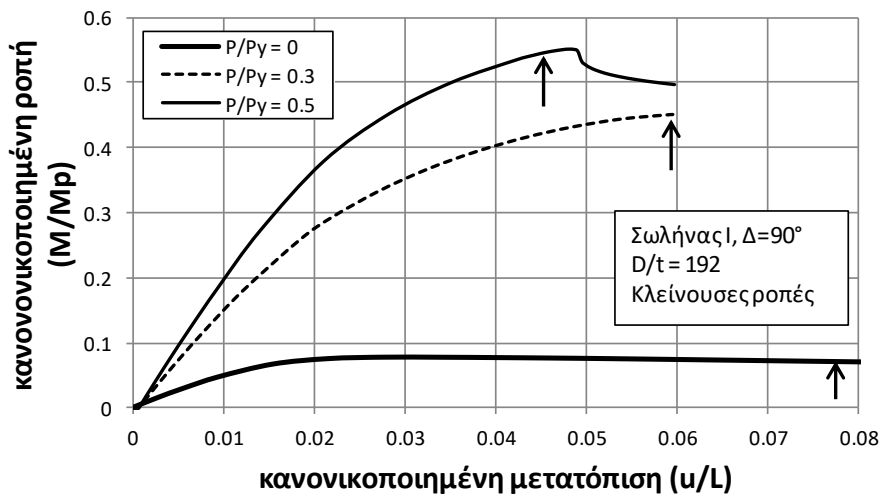


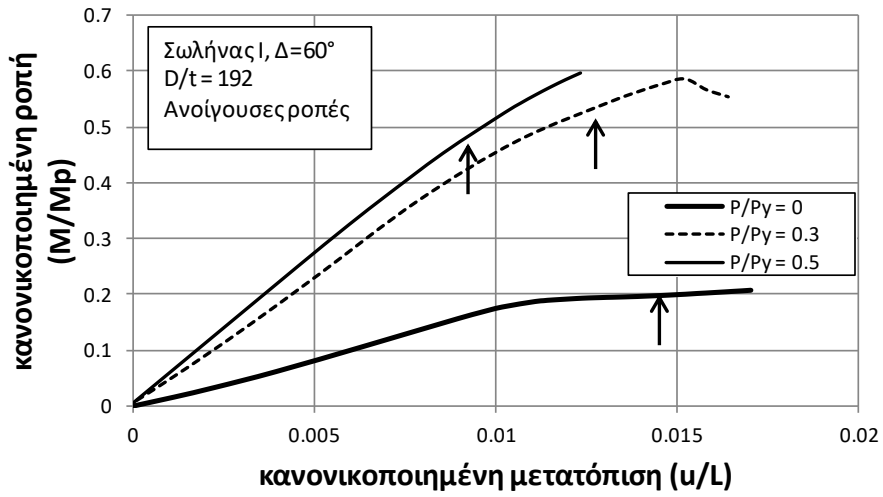
Εικόνα 14. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για την πρώτη διάταξη φόρτισης. (α) σωλήνας I τα βέλη ( ↓ ) δείχνουν το στάδιο στο οποίο η τοπική εφελκυστική παραμόρφωση έχει φτάσει την τιμή του 2% ανοίγουσες και κλείνουσες ροπές, (β) σωλήνας II τα βέλη ( ↓ ) δείχνουν το στάδιο στο οποίο η τοπική εφελκυστική παραμόρφωση έχει φτάσει την τιμή του 2% ανοίγουσες και κλείνουσες ροπές.



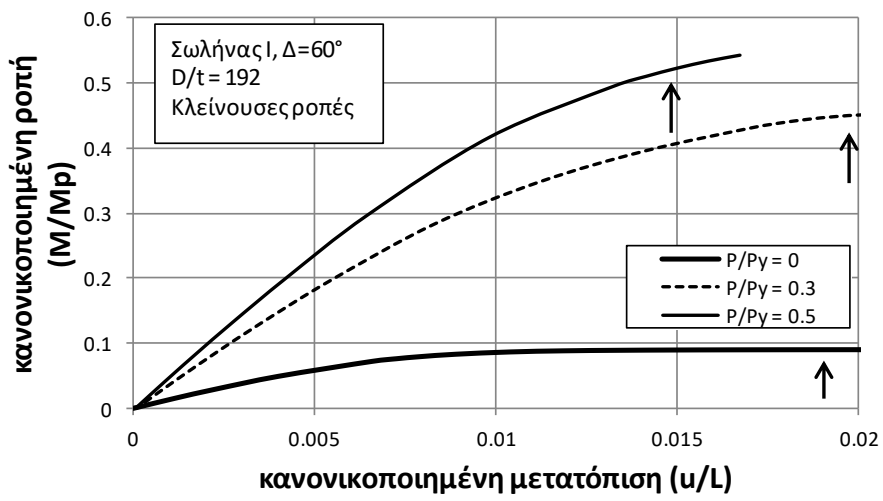


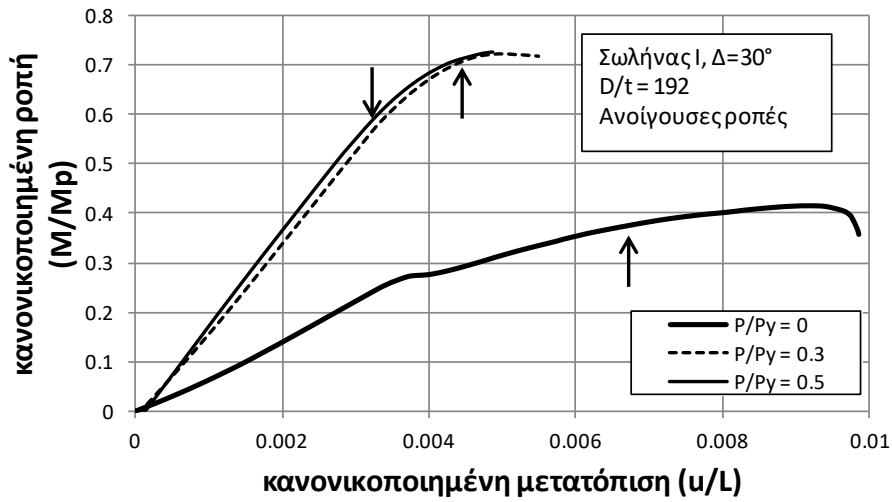
(α)



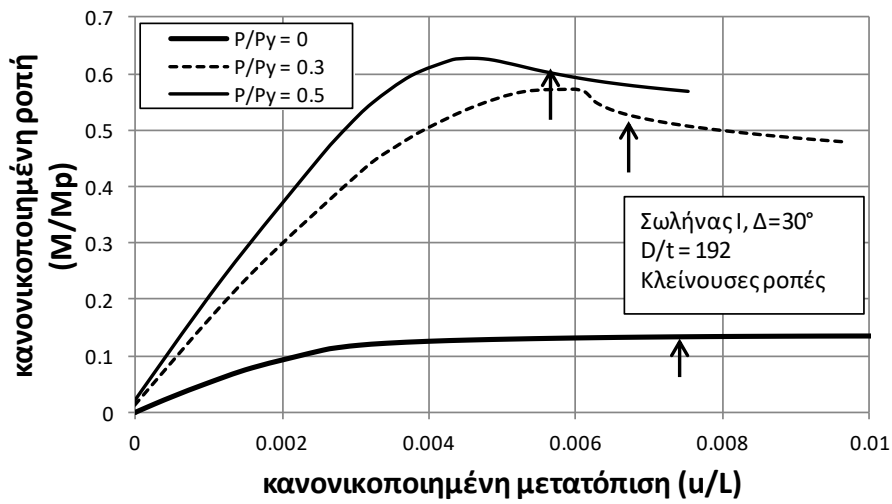


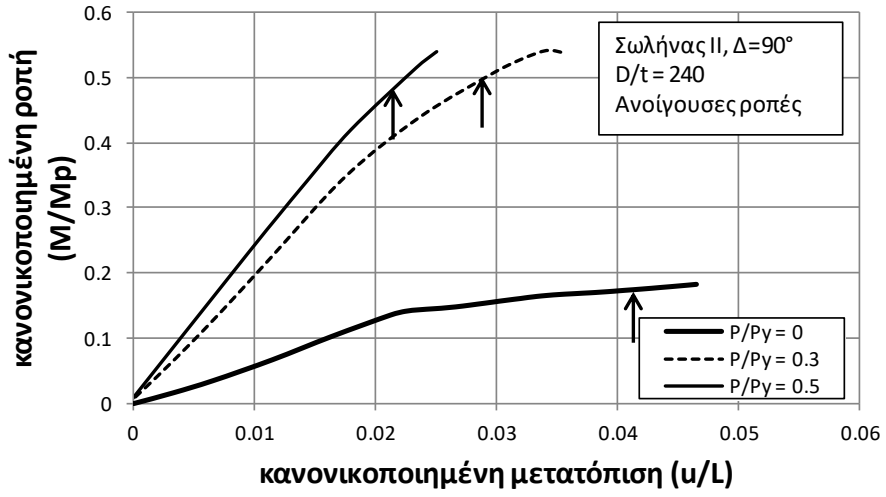
(α)



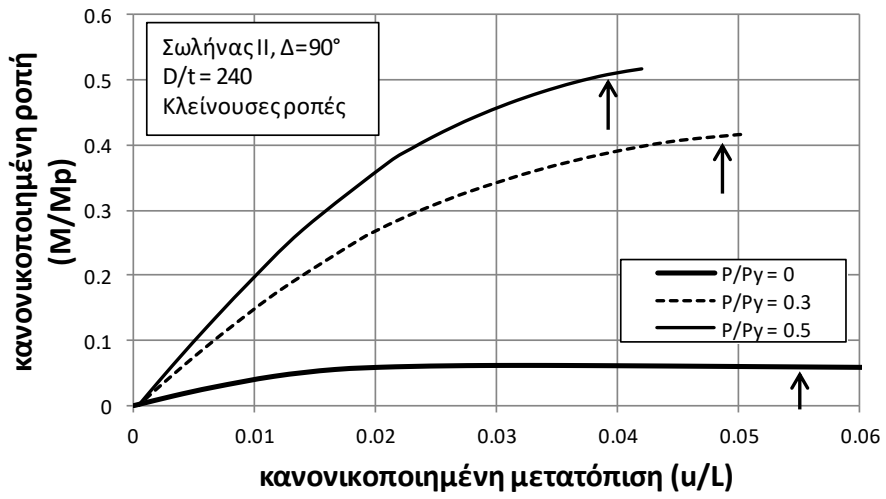


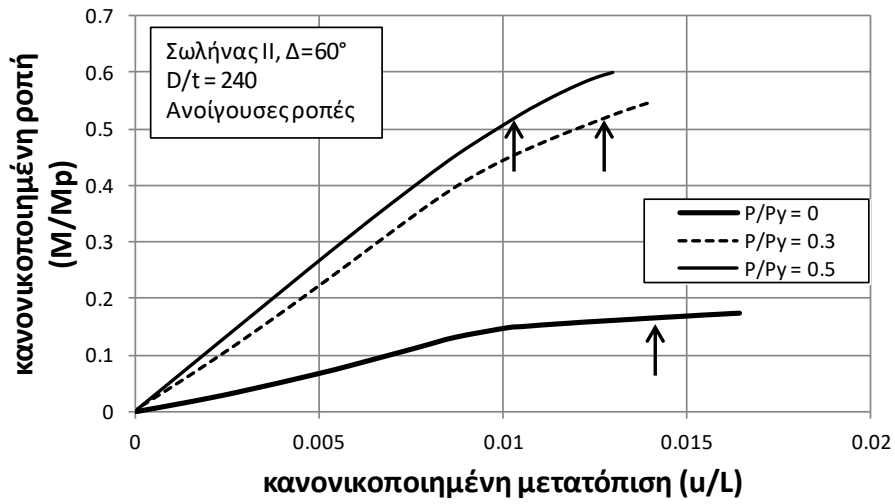
(α)



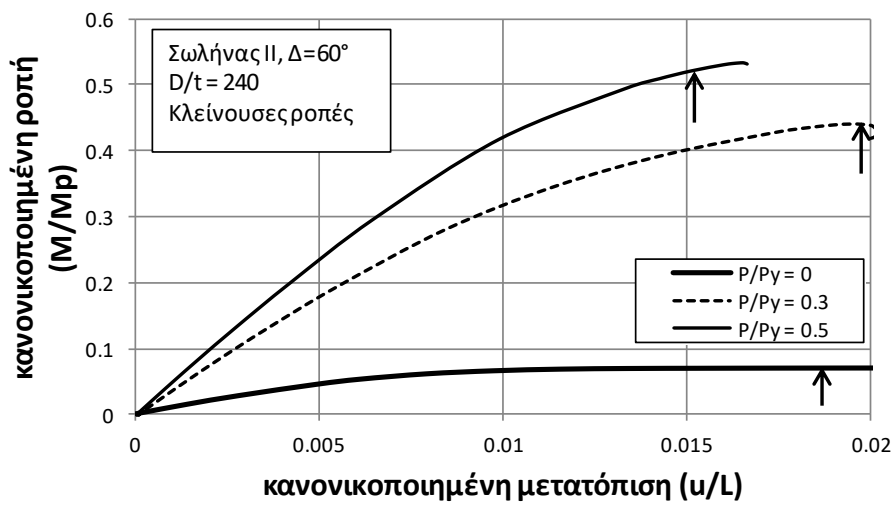


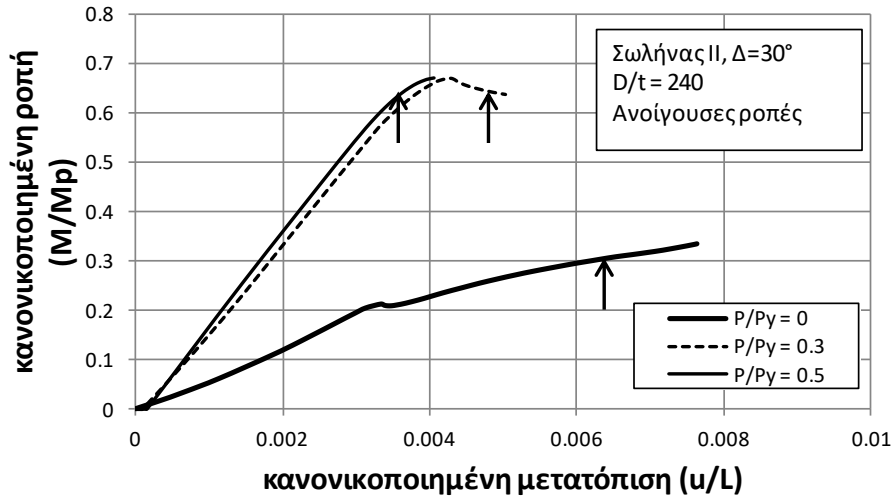
(β)



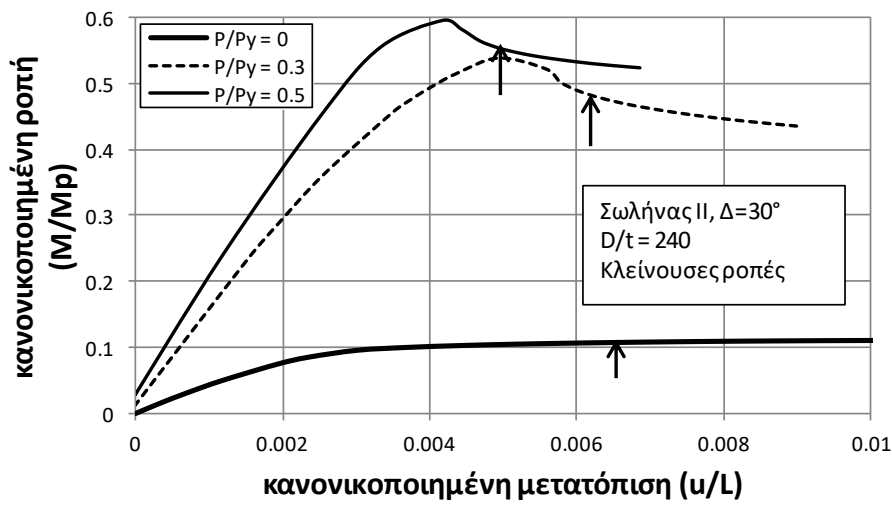


(β)

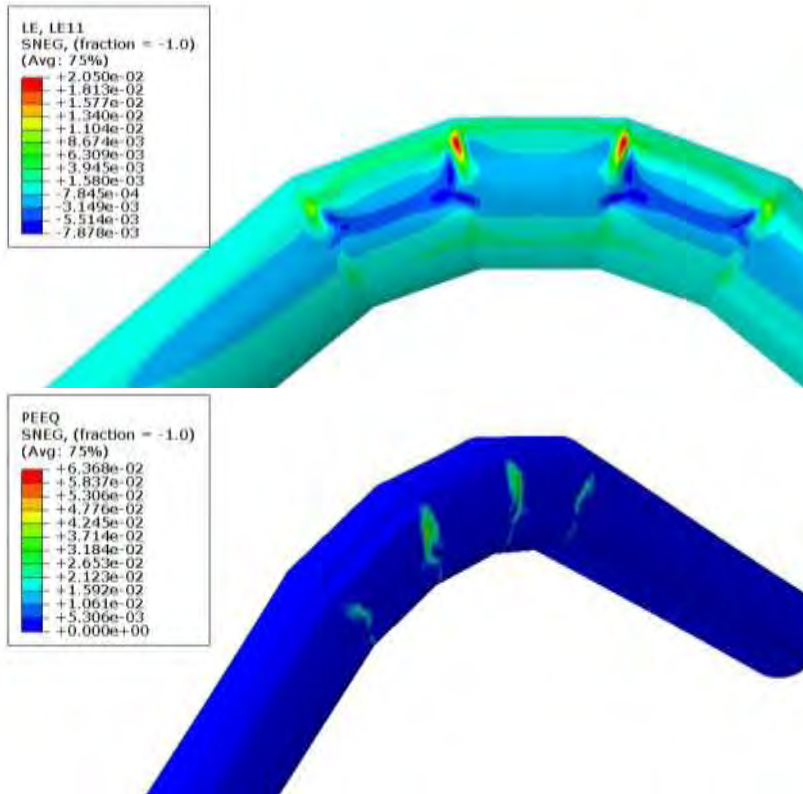




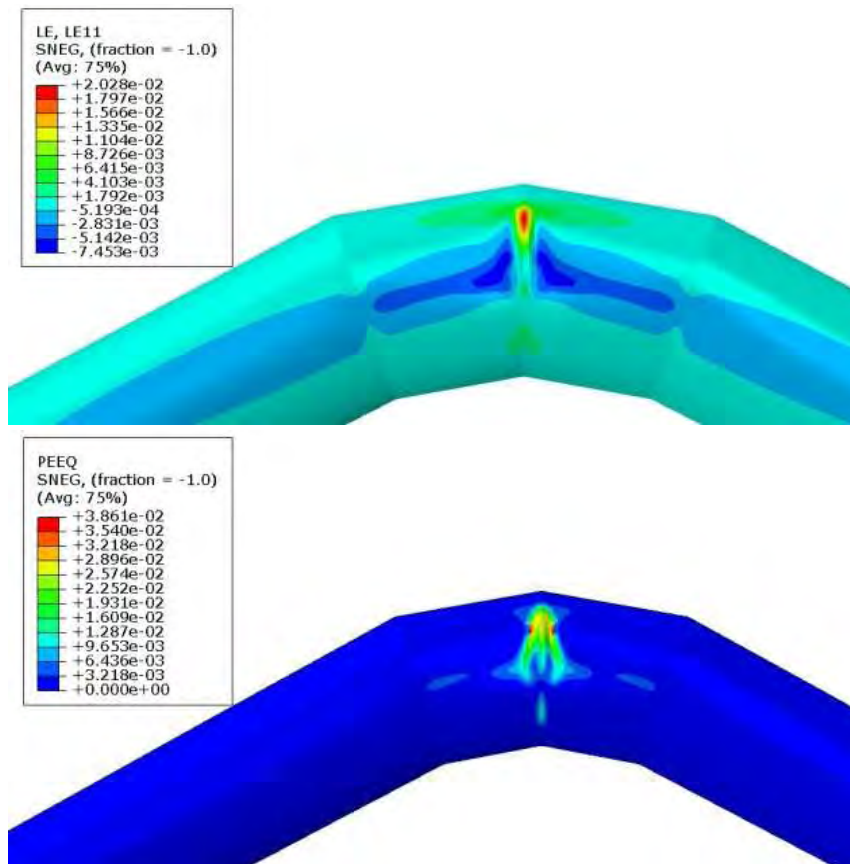
(β)

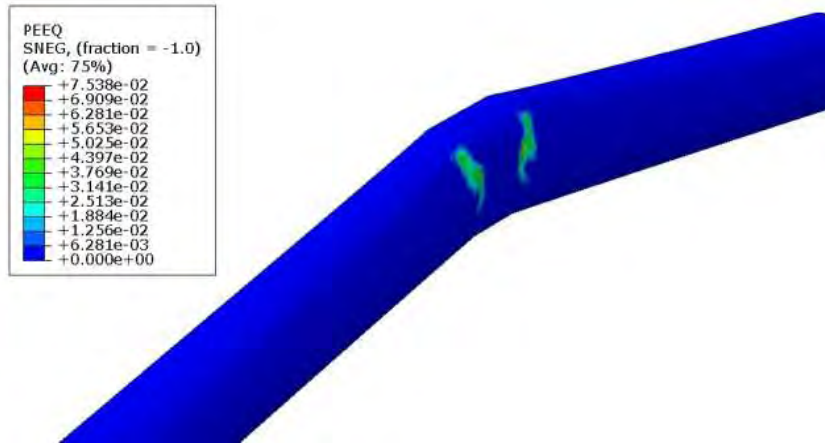
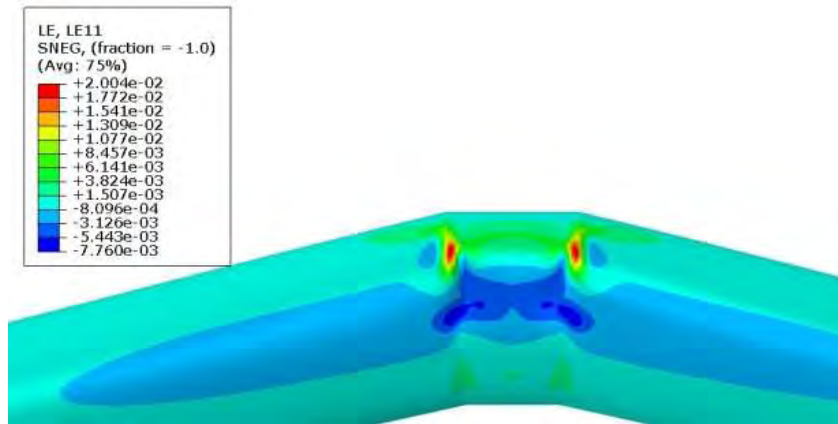


Εικόνα 15. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τη δεύτερη διάταξη φόρτισης. (α) σωλήνας I τα βέλη ( $\downarrow$ ) δείχνουν το στάδιο στο οποίο η τοπική εφελκυστική παραμόρφωση έχει φτάσει την τιμή του 2%· ανοίγουσες και κλείνουσες ροπές, (β) σωλήνας II τα βέλη ( $\downarrow$ ) δείχνουν το στάδιο στο οποίο η τοπική εφελκυστική παραμόρφωση έχει φτάσει την τιμή του 2%· ανοίγουσες και κλείνουσες ροπές.

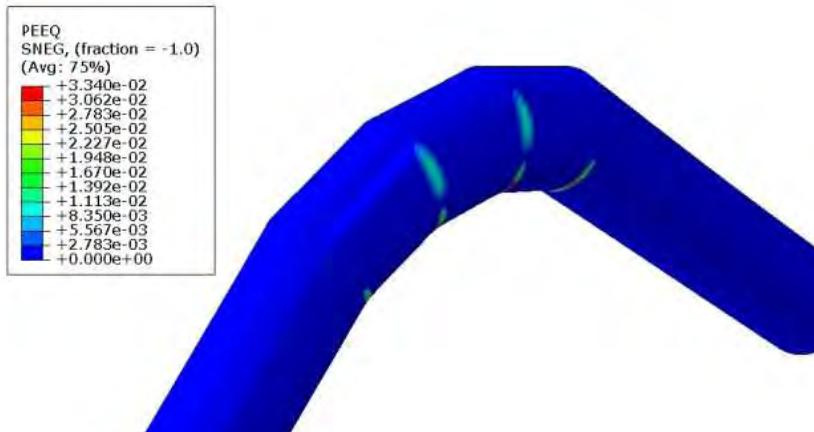
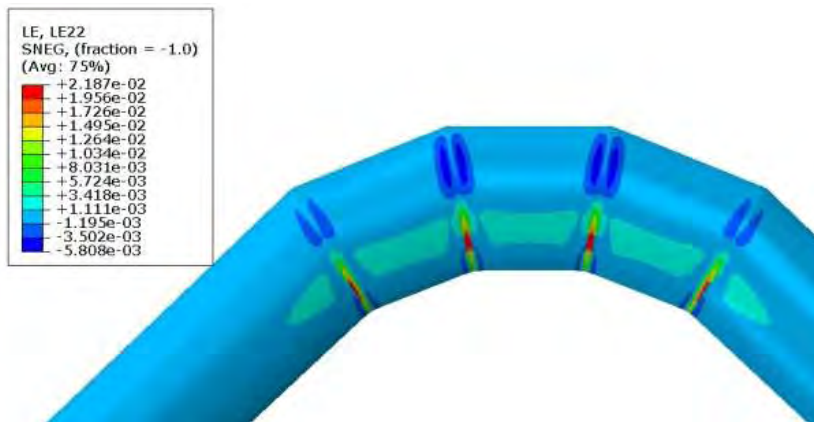


( $\alpha$ )



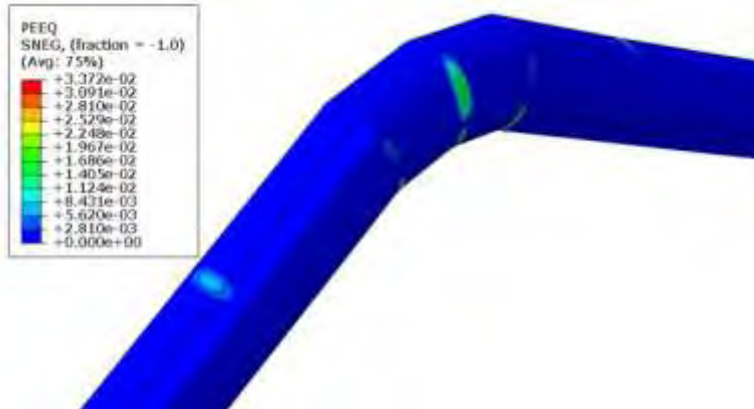
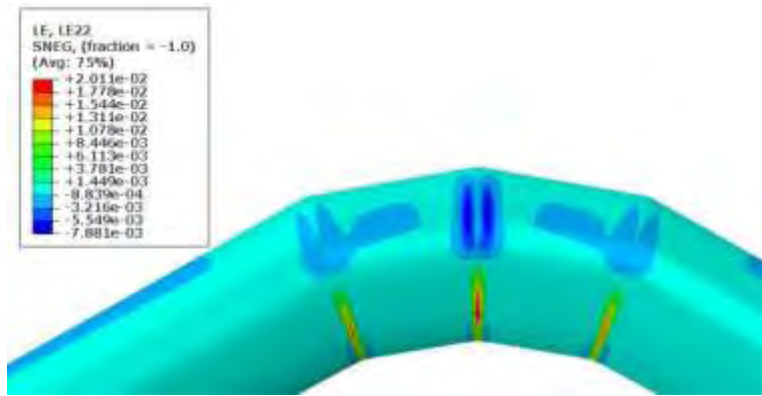


( $\alpha$ )

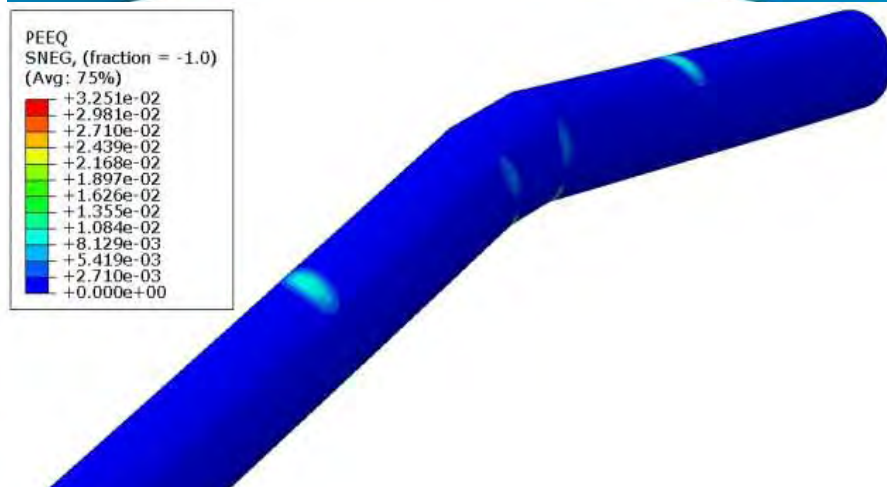
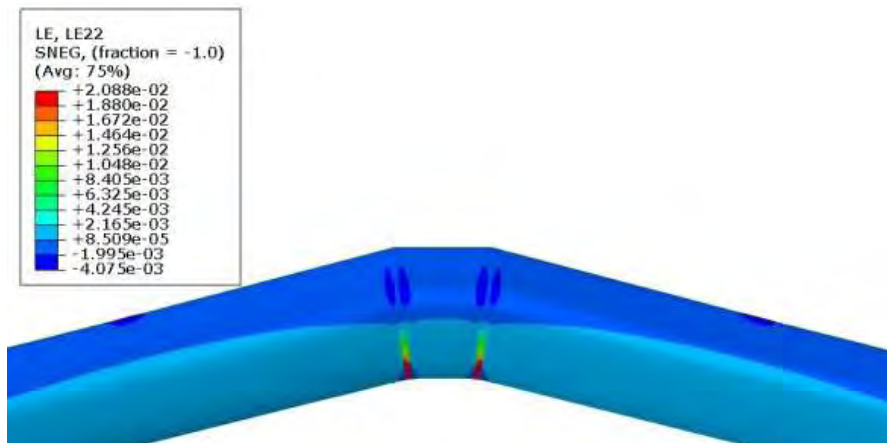


( $\beta$ )

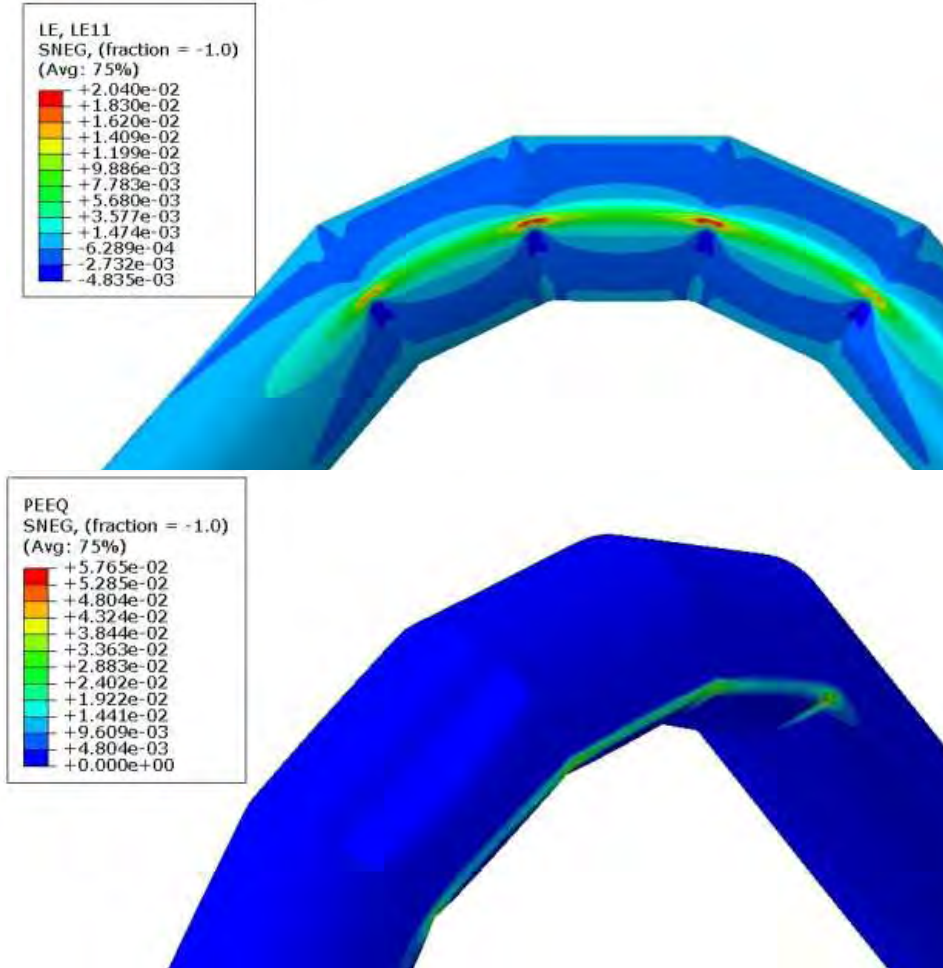




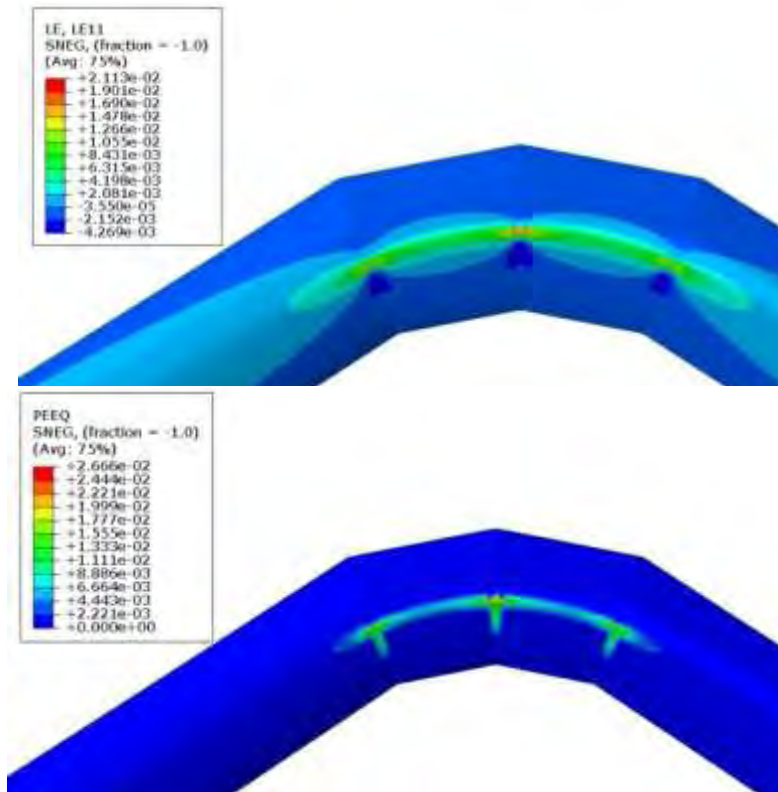
(β)



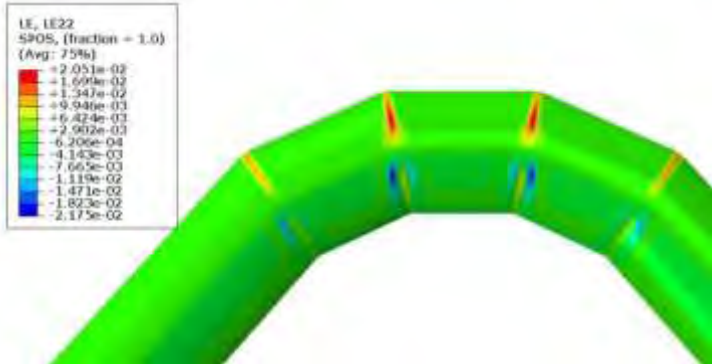
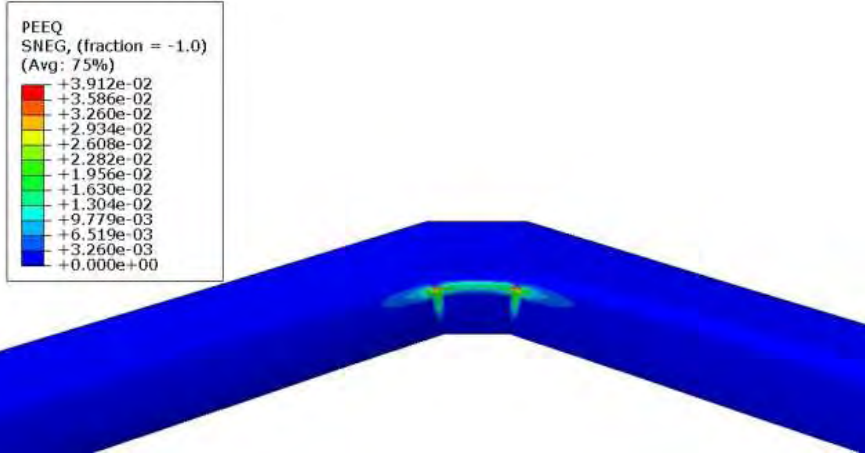
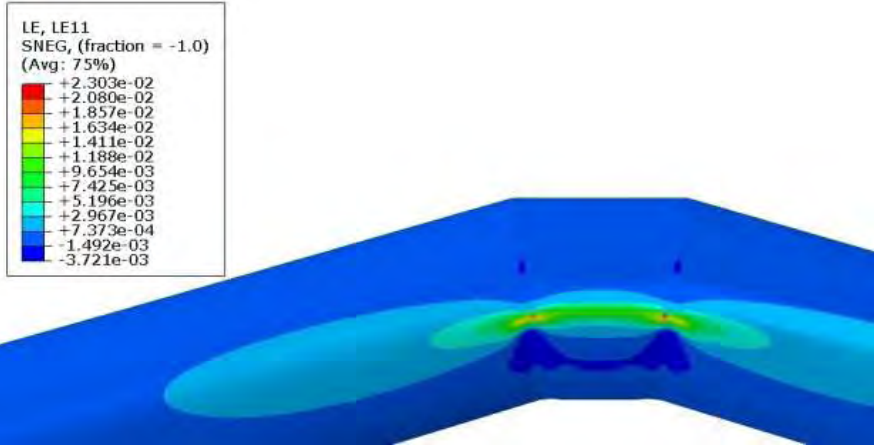
Εικόνα 16. Παραμορφωμένη κατάσταση δεύτερης διάταξης φόρτισης για το σωλήνα Π ( $D/t = 240$ ) στο πάνω μέρος ( $1e11/1e22$ ) με βάση το όριο παραμόρφωσης 2%, ενώ στο κάτω μέρος (PEEQ) με βάση την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στο τέλος της καμπύλης ανοίγουσες ροπές,  $\Delta=90^\circ$ ,  $\Delta=60^\circ$ ,  $\Delta=30^\circ$  (α) μηδενική πίεση και (β) πίεση ίση με το 50% της  $P_y$ .



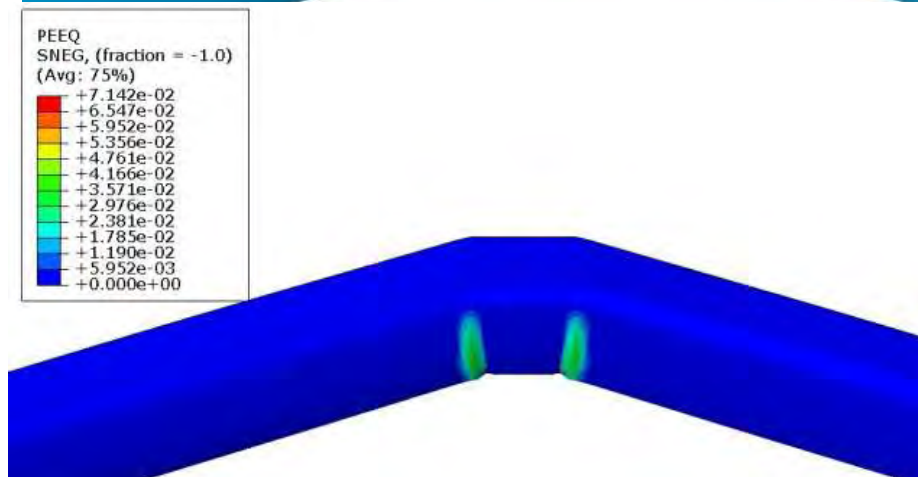
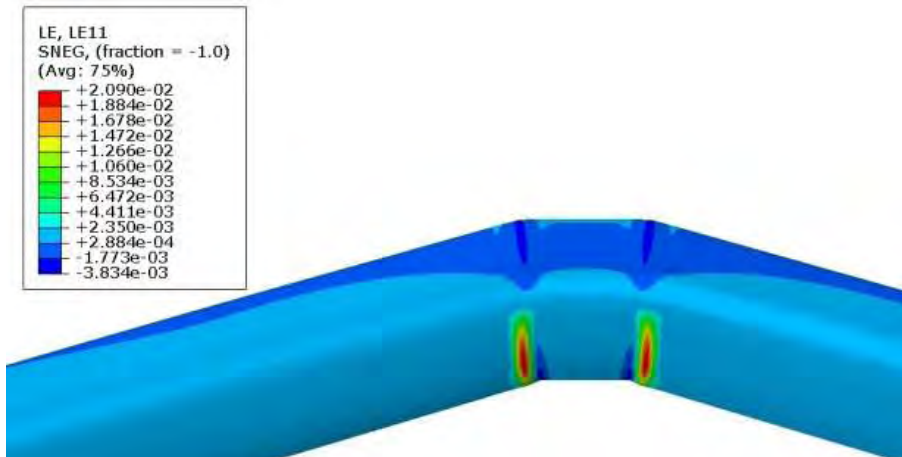
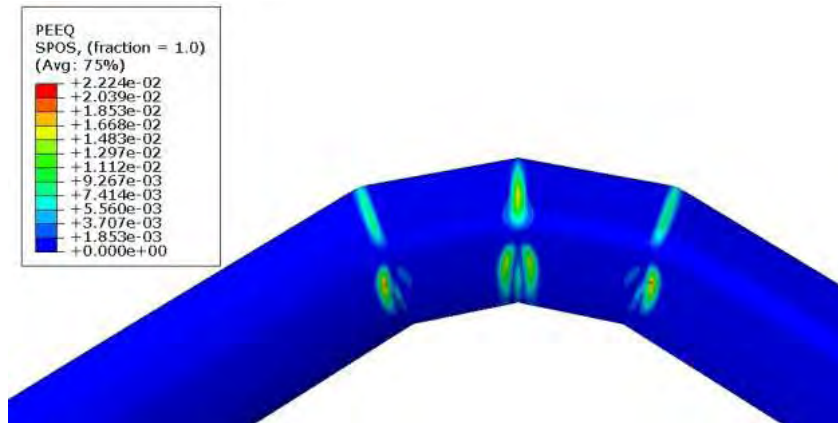
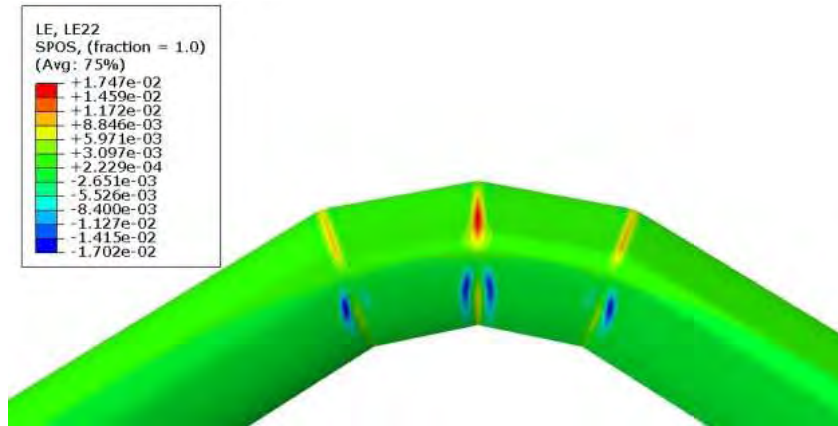
(α)



( $\alpha$ )



(β)



(β)

Εικόνα 17. Παραμορφωμένη κατάσταση δεύτερης διάταξης φόρτισης για το σωλήνα Π ( $D/t = 240$ ) στο πάνω μέρος ( $1e11/1e22$ ) με βάση το όριο παραμόρφωσης 2%, ενώ στο κάτω μέρος (PEEQ) με βάση την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στο τέλος της καμπύλης κλεινούς ροπές,  $\Delta=90^\circ$ ,  $\Delta=60^\circ$ ,  $\Delta=30^\circ$  (α) μηδενική πίεση και (β) πίεση ίση με το 50% της  $P_y$ .

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου από χάλυβα, χρησιμοποιώντας προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων. Δύο διαφορετικοί σωλήνες, με λόγο διαμέτρου προς πάχος ίσο με 192 και 240 αντίστοιχα και γωνίας  $\Delta$  ίσης με  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $30^\circ$  έχουν εξεταστεί, θεωρώντας δύο τύπους αναλύσεων: (α) ελαστική ανάλυση για τον προσδιορισμό της ευκαμψίας και της συγκέντρωσης των τάσεων και (β) ελαστική-πλαστική ανάλυση για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής του καμπύλου τμήματος και της προσομοίωσης της μορφής της αστοχίας. Συγκρίνεται, επίσης, στην ελαστική ανάλυση η αντίστοιχη απόκριση στην κάμψη του «εικονικού» καμπύλου τμήματος σταθερής καμπυλότητας.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν πως οι ακμές μεταξύ γειτονικών σπονδύλων του καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου είναι καθοριστικής σημασίας στην ανάπτυξη τοπικών τάσεων στο καμπύλο τμήμα, επηρεάζοντας την απόκριση και τη μέγιστη αντοχή του. Επιπλέον, οι τιμές των συντελεστών ευκαμψίας και έντασης τάσεων, που υπολογίζονται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές του κώδικα ASME, είναι μάλλον μη-συντηρητικές προβλέψεις σε σχέση με αυτές που υπολογίζονται αριθμητικά. Η παρουσία της εσωτερικής πίεσης παίζει σημαντικό ρόλο στην ευκαμψία και την αντοχή του καμπύλου τμήματος και επηρεάζει τον αντίστοιχο τρόπο αστοχίας.

Η ευκαμψία και η αύξηση των τάσεων των καμπύλων τμημάτων, σε σχέση με τους ευθύγραμμους σωλήνες, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση του αγωγού στο πλαίσιο γεωκινδύνων. Ειδικότερα, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των τάσεων του αγωγού χρειάζεται να αντιπροσωπεύουν τις δύο αυτές πτυχές. Επιπλέον, λόγω της ανάπτυξης σημαντικών τάσεων στις ακμές του καμπύλου τμήματος σπονδυλωτού τύπου, δε συνιστάται η χρήση του σε εδάφη με υψηλή εδαφική κίνηση. Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι η παρούσα μελέτη αναφέρεται σε σπονδυλωτά καμπύλα τμήματα που θα χρησιμοποιηθούν σε υπόγειους αγωγούς, στα οποία δε λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους-σωλήνα. Αναμένεται ότι η απόκριση

υπό δομική φόρτιση θα επηρεάζεται σε ένα βαθμό από το περιβάλλον έδαφος. Αυτό το πιθανότερο, θα οδηγεί σε μείωση της οβαλότητας της διατομής, των τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων. Τελικώς, περαιτέρω έρευνα πιστεύεται πως είναι απαραίτητη για την καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς, κυρίως με τη διεξαγωγή πειραμάτων, για τον προσδιορισμό της ικανότητας παραμόρφωσης των συγκολλημένων τμημάτων ενός σπονδυλωτού καμπύλου τμήματος σωλήνωσης.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- American Society of Mechanical Engineers, (2014), *Power Piping*, B31.1, ASME Code for Pressure Piping, New York, NY.
- American Society of Mechanical Engineers, (2014), *Process Piping*, B31.3, ASME Code for Pressure Piping, New York, NY.
- American Society of Mechanical Engineers, (2012), *Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*, B31.4, ASME Code for Pressure Piping, New York, NY.
- American Society of Mechanical Engineers, (2014), *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*, B31.8, ASME Code for Pressure Piping, New York, NY.
- American Water Works Association (2004), *Steel Pipe – A Guide for Design and Installation*, AWWA Manual M11, Denver, CO, USA.
- American Water Works Association (2012), *Dimensions for Fabricated Steel Water Pipe Fittings*, AWWA C208, Denver, CO, USA.
- Comité Européen de Normalisation, (2002), *Metallic industrial piping - Part 3: Design and calculation*, Standard EN 13480-3, Brussels.
- Gresnigt, A. M., (2002), “Elastic and plastic design of mitred bends”, *12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan.
- Karamanos, S. A., Koritsa, E., Keil, B. and Card, R. J. (2015), “Analysis and behavior of steel pipe welded lap joints in geohazard areas.”, *ASCE Pipelines Conference*, Paper No. 413, Baltimore, Maryland, USA.
- Karamanos, S. A., (2016), “Mechanical Behavior of Steel Pipe Bends; An Overview.”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, ASME, Invited paper: special issue for the 50<sup>th</sup> Anniversary of PVPD, in press.
- Lund, L. V. (1996), “Lifeline Utilities Performance in the 17 January 1994 Northridge, California, Earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No.1B, pp.S350-S361.

- O' Rourke, T. D. and A. Bonneau, (2007), "Lifeline Performance Under Extreme Loading During Earthquakes," *Earthquake Geotechnical Engineering*, K.D. Pitilakis, Ed., Springer, Dordrecht, Netherlands, June, pp. 407-432,
- Rodabaugh, E. C., and George, H. H., (1957), "Effect of internal pressure on the flexibility and stress intensification factors of curved pipe or welding elbows.", *Transactions of the ASME*, Vol. 79, pp. 939-948
- Rodabaugh E. C., (1975), *Review of data on mitre joints in piping to establish maximum angularity for fabrication of girth butt welds*, WRC Bulletin No. 208.
- Vasilikis, D., Karamanos, S. A., Van Es, S. H. J., Gresnigt, A. M. (2014), "Bending Deformation Capacity of Large-Diameter Spiral-Welded Tubes.", *International Pipeline Conference*, IPC2014-33231, Calgary, Alberta, Canada.
- Von Karman, T., (1911), "Über die Formuänderung dünnwandiger Rohre." [in German], *Zeit. Des Vereines deutscher Ingenieure*, Vol. 55, pp. 1889-1895.
- Wood, J., (2008), "A review of literature for the structural assessment of mitred bends", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 275–294





