

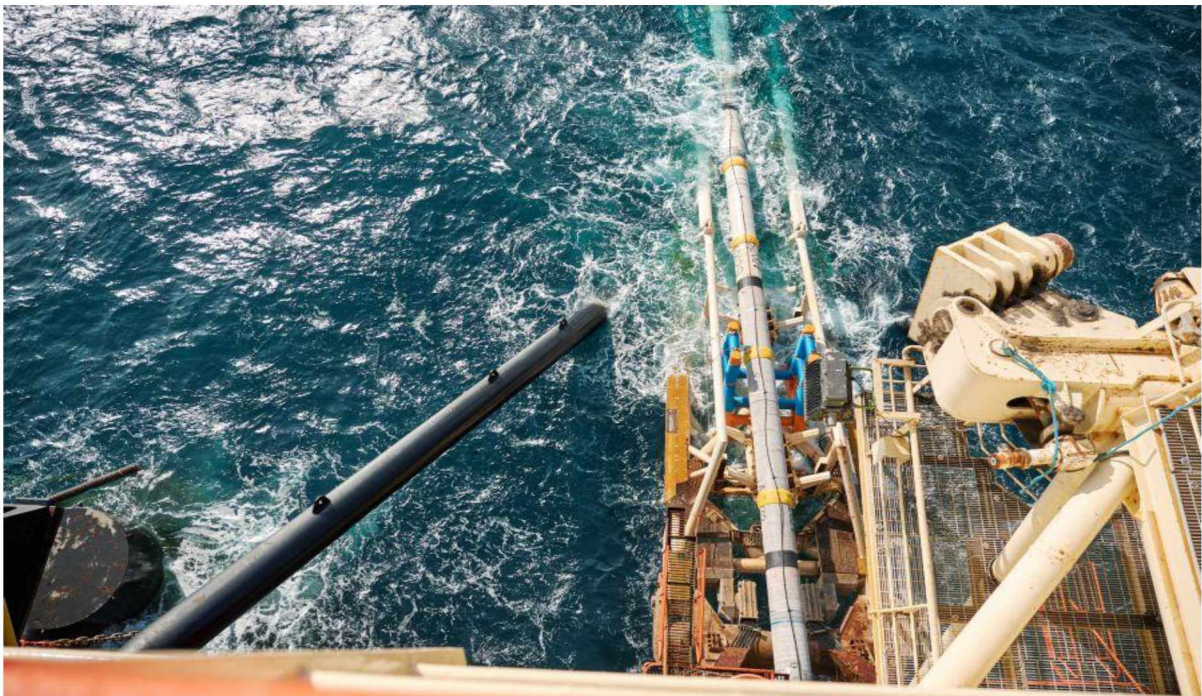


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ
ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ
ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

Επιμέλεια: Ιωάννης Τσάλας



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού
ΒΟΛΟΣ 2021

© 2021 Ιωάννης Τσάλας

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
(Επιβλέπων)

Δρ. Σ.Α. Καραμάνος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Σ. Α. Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων και στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου και Νικόλαο Πελεκάση για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Οι ευχαριστίες μου επεκτείνονται και στους μεταπτυχιακούς φοιτητές για την πολύτιμη βοήθεια τους στην εκμάθηση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω εγκάρδια τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξή τους καθώς και για τις όμορφες και μοναδικές εμπειρίες που ζήσαμε όλα αυτά τα χρόνια ως φοιτητές.

Πάνω από όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Κρυσταλλία για την ολόψυχη αγάπη και στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και στον αδελφό μου Γιώργο για την αγάπη και την συμπαράσταση που μου προσφέρει καθημερινά . Νιώθω λοιπόν την ανάγκη να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία στην οικογένεια μου.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΣΑΛΑΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σπυρίδων Α. Καραμάνος
Καθηγητής Υπολογιστικές Μέθοδοι-Πεπερασμένα Στοιχεία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης το οποίο εμφανίζεται σε αγωγούς μεγάλου μήκους, όταν εκείνοι κατά την λειτουργία τους υποβάλλονται σε εξωτερική πίεση. Για τον σκοπό αυτό γίνεται προσομοίωση, με την χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, τέτοιων αγωγών και μελετάται η συμπεριφορά τους υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Με την βοήθεια του ABAQUS γίνεται προσπάθεια κατανόησης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης ενώ παράλληλα προσομοιώνονται τρόποι αντιμετώπισης και αναστολής του.

Αναλυτικότερα, στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή όπου τονίζεται η χρησιμότητα των υποθαλάσσιων αγωγών για την εκμετάλλευση και μεταφορά ενεργειακών πόρων όταν εκείνοι βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Επιπλέον γίνεται μία πρώτη προσέγγιση του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης και της αναστολής της. Αυτό επιτυγχάνεται παραθέτοντας κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία συμβάλλουν στην κατανόηση του.

Στη συνέχεια, στο 2^ο Κεφάλαιο προσομοιώνονται αρχικά διδιάστατα μοντέλα δακτυλίων στα οποία ασκείται ομοιόμορφη εξωτερική πίεση. Από τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν κατασκευάζονται κάποια χρήσιμα διαγράμματα. Ακόμη, εργαζόμενοι πάλι σε διδιάστατα μοντέλα δακτυλίων μελετάται η επίδραση που έχει η εφαρμογή αξονικής δύναμης στο μοντέλο. Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο εξάγεται μία πρώτη εκτίμηση της τιμής της πίεσης διάδοσης η οποία αποτελεί ένα από τα βασικότερα μεγέθη του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης.

Στο 3^ο Κεφάλαιο εξετάζεται η συμπεριφορά τρισδιάστατων αγωγών υπό την επίδραση εξωτερικής πίεσης. Συγκεκριμένα προσομοιώνονται αγωγοί μεγάλου μήκους και κατασκευάζονται κάποια χρήσιμα διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου ενώ στόχος είναι ο αναλυτικός υπολογισμός της πίεσης διάδοσης με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Συνεχίζοντας, το 4^ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην αναστολή της διαδιδόμενης ύβωσης. Αυτό είναι εφικτό με την χρήση κατάλληλων συσκευών πάνω στους αγωγούς οι οποίοι ονομάζονται arrestors. Προσομοιώνονται λοιπόν μοντέλα αγωγών-αναστολέων και μελετάται η επίδραση της γεωμετρίας των αναστολέων στην ανάσχεση του φαινομένου.

Τέλος στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά Συμπεράσματα της εργασίας.

ABSTRACT

The present dissertation examines the problem of buckling propagation in submarine pipelines, when subjected to external pressure in the phase of installation. For this purpose a simulation of the mechanical response of these pipes is conducted and their performance under external loads is studied, with the use of ABAQUS, a finite element program. Using ABAQUS an effort is made to comprehend this phenomenon and ways to arrest this phenomenon are simulated.

More specifically, the 1st Chapter comprises an introduction on the use of underwater pipelines in order to exploit, gather and transport energy resources which are located in deep water. Furthermore a first approach to model the phenomenon of buckle propagation and its arrest is presented in this Chapter. This is accomplished by presenting some important characteristics that contribute to better understanding of this phenomenon.

Subsequently, in the 2nd Chapter two-dimensional models of rings, in which uniform external pressure is applied, are simulated. Following the results of these analyses some very useful charts are created. Moreover, working again with two-dimensional ring models the effect of the application of an axial force to the model is studied. At the end of this Chapter a first estimate of the propagation pressure, which is one of the main parameters of this phenomenon, is offered.

In the 3rd Chapter the behavior of pipes under external pressure using three-dimensional models is examined. In particular long pipes are simulated and some charts are created, in order to better understand the phenomenon of buckle propagation. The purpose of this Chapter is to calculate numerically the propagation pressure with the use of finite element analysis.

The 4th Chapter is primarily focused on the arrest of the propagating buckle. This is feasible with the use of proper devices on the pipelines which are called arrestors. Pipe-arrestor models are simulated and the effect of the geometry of these devices on the arrest of this phenomenon is also covered.

Finally, in the 5th Chapter the results of the present dissertation are presented together with some useful conclusions.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΚΕΦ ΑΛΑΙΟ 1^ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ.....	7
1.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ.....	9
1.3 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	14
1.3.1 ΠΙΕΣΗ ΕΝΑΡΞΗΣ.....	14
1.3.2 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	17
1.4 ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ.....	19
1.4.1 ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ.....	21
ΚΕΦ ΑΛΑΙΟ 2^ο ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	23
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	24
2.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑ.....	24
2.2.2 ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	26
2.2.3 ΑΡΧΙΚΗ ΑΤΕΛΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	28
2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	29
2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ.....	38
2.5 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ-ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ.....	45
2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	50
ΚΕΦ ΑΛΑΙΟ 3^ο ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΩΝ	54
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	54
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	55
3.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑ.....	55
3.2.2 ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	56
3.2.3 ΑΡΧΙΚΗ ΑΤΕΛΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	59
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	60
3.3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	60
3.3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ	61
3.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	63
3.3.4 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	71
3.4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	73
ΚΕΦ ΑΛΑΙΟ 4^ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	77
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	77
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	78
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	79
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ.....	86
ΚΕΦ ΑΛΑΙΟ 5^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Στη σημερινή εποχή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε παγκόσμιο επίπεδο γίνεται συνεχώς όλο και πιο απαιτητική και δύσκολη. Είναι γεγονός πως μεγάλο ποσοστό αυτών των αναγκών καλύπτεται ακόμα από τα φυσικά αποθέματα υδρογονανθράκων όπως είναι για παράδειγμα το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Τέτοιου είδους υδρογονάνθρακες συναντιούνται σε μορφή κοιτασμάτων τόσο σε χερσαία πεδία όσο και σε υπεράκτια. Το γεγονός όμως πως οι απαιτήσεις για τους συγκεκριμένους ενεργειακούς πόρους, είτε σε τομείς όπως είναι η βιομηχανία είτε σε βασικές καθημερινές ανάγκες όπως η θέρμανση, συνεχώς αυξάνονται, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα χερσαία αποθέματα σταδιακά εξαντλούνται καθίσταται απαραίτητη η αξιοποίηση και του υποθαλάσσιου ορυκτού πλούτου.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου από υπεράκτια πεδία γνώρισε σημαντική ανάπτυξη κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα και συγκεκριμένα στις αρχές τις δεκαετίας του 1970 κυρίως στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας. Σήμερα μάλιστα η άντληση πετρελαίου έχει φτάσει σε βάθη 2900 meters περίπου, ενώ η εξερεύνηση προχωράει σε βάθη που φτάνουν τα 3050 meters και περισσότερο . Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα αγωγών που χρησιμοποιούνται σε μεγάλα βάθη είναι ο Turk stream pipeline, ένας αγωγός φυσικού αερίου μεταξύ της Τουρκίας και της Ρωσίας ο οποίος φτάνει έως και βάθος 2200 meters, ο blue stream pipeline και αυτός ένας αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου από την Ρωσίας στην Τουρκία μέσω της Μαύρης Θάλασσας, ο οποίος φτάνει σε μέγιστο βάθος 2200 meters επίσης. Τέλος ο υποθαλάσσιος αγωγός Medgaz για την μεταφορά φυσικού αερίου μεταξύ Αλγερίας και Ισπανίας ο οποίος φτάνει σε μέγιστο βάθος 2500 meters. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται κάποιοι από τους αγωγούς που προαναφέρθηκαν.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα1. 1 Ο αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου Turk Stream



Σχήμα1. 2 Ο αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου Medgaz

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Όπως γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητό, οι αγωγοί και γενικά οι μεγάλες σωληνοειδείς κατασκευές είναι αναγκαία εργαλεία που χρησιμοποιούνται κατά κόρον από τις βιομηχανίες για την εξερεύνηση, την άντληση και την μεταφορά ορυκτού πλούτου όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Ήδη υπάρχει ένα αρκετά εκτεταμένο δίκτυο υποθαλάσσιων αγωγών με εκατοντάδες χιλιόμετρα να είναι ήδη υπό κατασκευή ή να πρόκειται να κατασκευαστούν. Ένα σύγχρονο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο υπό κατασκευή Διαδριατικός Αγωγός Φυσικού Αερίου ο οποίος έχει σαν στόχο την μεταφορά φυσικού αερίου από την Κασπία στην Ευρώπη. Το υποθαλάσσιο τμήμα μάλιστα του αγωγού είναι ένα ιδιαίτερα απαιτητικό κομμάτι της συνολικής κατασκευής και θα φτάνει σε βάθος έως 810 meters.

Πρόκειται λοιπόν για κατασκευές με τεράστια οικονομική σημασία καθώς η εγκατάσταση και η λειτουργία τους κοστίζουν αρκετά εκατομμύρια. Ακόμη, κάτι εξίσου σημαντικό με το οικονομικό κόστος που θα υπάρχει σε περίπτωση αστοχίας τέτοιων κατασκευών είναι και το ενδεχόμενο περιβαλλοντολογικό κόστος καθώς τυχών διασπορά κοιτασμάτων πετρελαίου στη θάλασσα θα είχε ολέθριες συνέπειες για το οικοσύστημα της περιοχής. Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν η αξιοπιστία, η δομική ακεραιότητα καθώς και η εύρυθμη λειτουργία τέτοιων αγωγών καθίσταται απολύτως αναγκαία. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι αυτό της διαδιδόμενης ύβωσης.

1.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ

Το πρόβλημα της διαδοχικής κατάρρευσης των διατομών ενός αγωγού άρχισε να απασχολεί τους ερευνητές στην υπεράκτια βιομηχανία αγωγών περίπου το 1975 και από τότε η αντιμετώπιση του έχει γίνει αντικείμενο διεξοδικής μελέτης. Αρχικά λοιπόν, πρέπει να τονιστεί πως η τοποθέτηση αλλά και η λειτουργία σωληνοειδών δομών σε μεγάλα βάθη είναι πολύ επιβαρυντικές και απαιτητικές διαδικασίες. Οι υψηλές δυνάμεις και κάμψεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της πόντισης ενός αγωγού, οι αρκετά ανεπτυγμένες θερμοκρασίες που παρατηρούνται στις πετρελαιοπηγές αλλά και γενικά το απαιτητικό περιβάλλον είναι μερικοί από τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό του αγωγού και κατά την επιλογή του υλικού του.

Ένας πολύ βασικός παράγοντας που δύναται να οδηγήσει σε κατάρρευση του αγωγού είναι η εξωτερική πίεση. Η εξωτερική πίεση δημιουργείται λόγω της υδροστατικής πίεσης του νερού και για αυτό τον λόγο αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος όπου είναι τοποθετημένος ο εκάστοτε αγωγός. Σε περίπτωση

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

λοιπόν που η εξωτερική πίεση αυξηθεί και ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένη τιμή, τότε δημιουργείται ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο ξεκινώντας από κάποια τοπική παραμόρφωση ή ατέλεια του κυλινδρικού αγωγού εν συνεχεία μετατρέπεται σε ύβωση η οποία διαδίδεται στην διαμήκη διεύθυνση του αγωγού, ισοπεδώνοντας τελικώς όλες τις διατομές του στο πέρασμά της. Αυτό είναι και το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης.

Μία πολύ σημαντική ιδιαιτερότητα αυτού του προβλήματος που πρέπει να τονιστεί είναι, όπως κατέστη σαφές και προηγουμένως, πως η αστοχία δεν είναι τοπική αλλά διαδίδεται με μεγάλη ταχύτητα κατά το μήκος του αγωγού με αποτέλεσμα να καταστρέφονται μεγάλα τμήματα του αγωγού. Το γεγονός αυτό μπορεί να συνεπάγεται με τεράστιο οικονομικό κόστος επιδιόρθωσης του αγωγού.

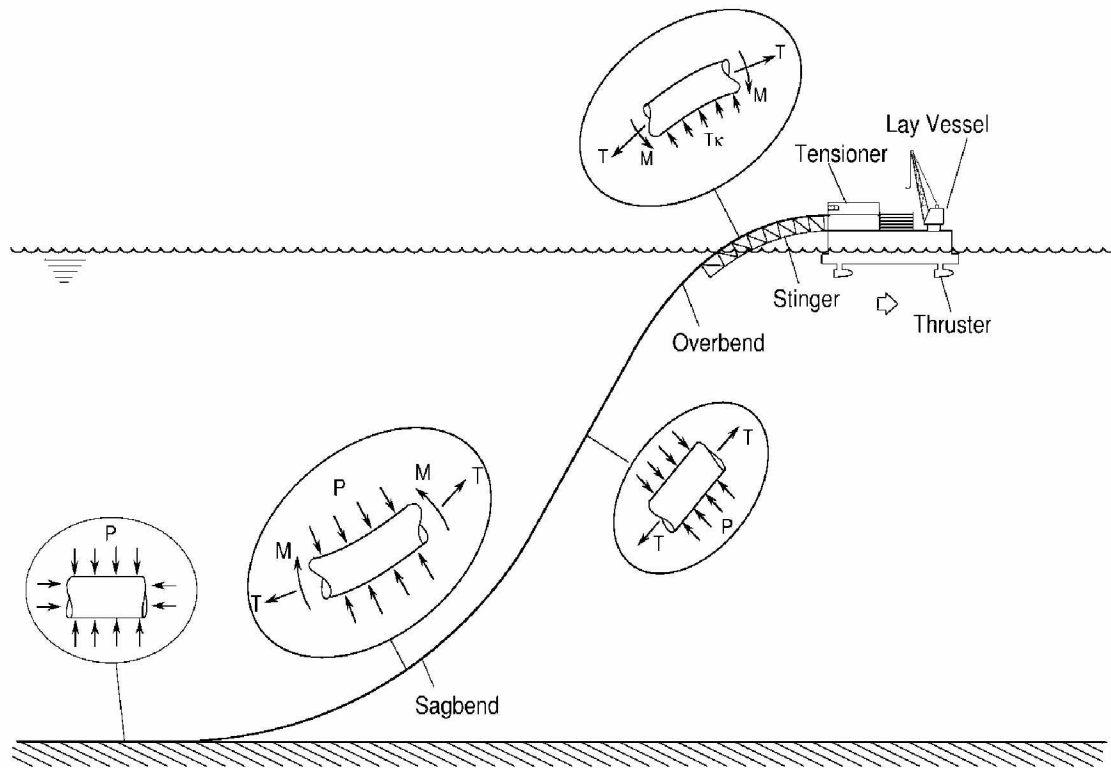
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μία αναφορά στις μικρές ατέλειες (αρχικές παραμορφώσεις) που υπάρχουν στον αγωγό και αποτελούν ουσιαστικά τα σημεία εκκίνησης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης. Ατέλειες σε πρώτη φάση μπορεί να είναι κατασκευαστικές για παράδειγμα μία μικρή απόκλιση από το τέλειο κυκλικό σχήμα που θα θέλαμε να έχει μία διατομή του αγωγού. Επίσης μία άλλη μορφή ατέλειας είναι η ανισορροπία που μπορεί να παρουσιάζει το υλικό. Επιπλέον, σημαντικές ατέλειες που συντελούν συχνά στην δημιουργία τοπικής αστοχίας μπορεί να προκύψουν κατά την μεταφορά του αγωγού από το εργοστάσιο παραγωγής του στην φορηγίδα ή και κατά την παραμονή του αγωγού σε αυτή λόγω μη προσεκτικής μεταχείρισης του. Τέλος, όπως ήδη έχει αναφερθεί, αναπόφευκτη είναι και η δημιουργία τοπικών δομικών ατελειών κατά την πόντιση και εγκατάσταση του αγωγού καθώς πρόκειται για αρκετά δύσκολες και απαιτητικές διαδικασίες.

Κάποιες από τις πιο γνωστές και ευρέως διαδεδομένες τεχνικές εγκατάστασης αγωγών και γραμμών ροής είναι οι εξής:

- S-Lay (**Σχήμα1. 3**) και (**Σχήμα1. 4**)
- J-Lay (**Σχήμα1. 5**) και (**Σχήμα1. 6**)
- Reel Vessel Method (**Σχήμα1. 7**) και (**Σχήμα1. 8**)

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια σχήματα που απεικονίζουν αυτές τις τεχνικές καθώς και τα αντίστοιχα σκάφη που χρησιμοποιούνται.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

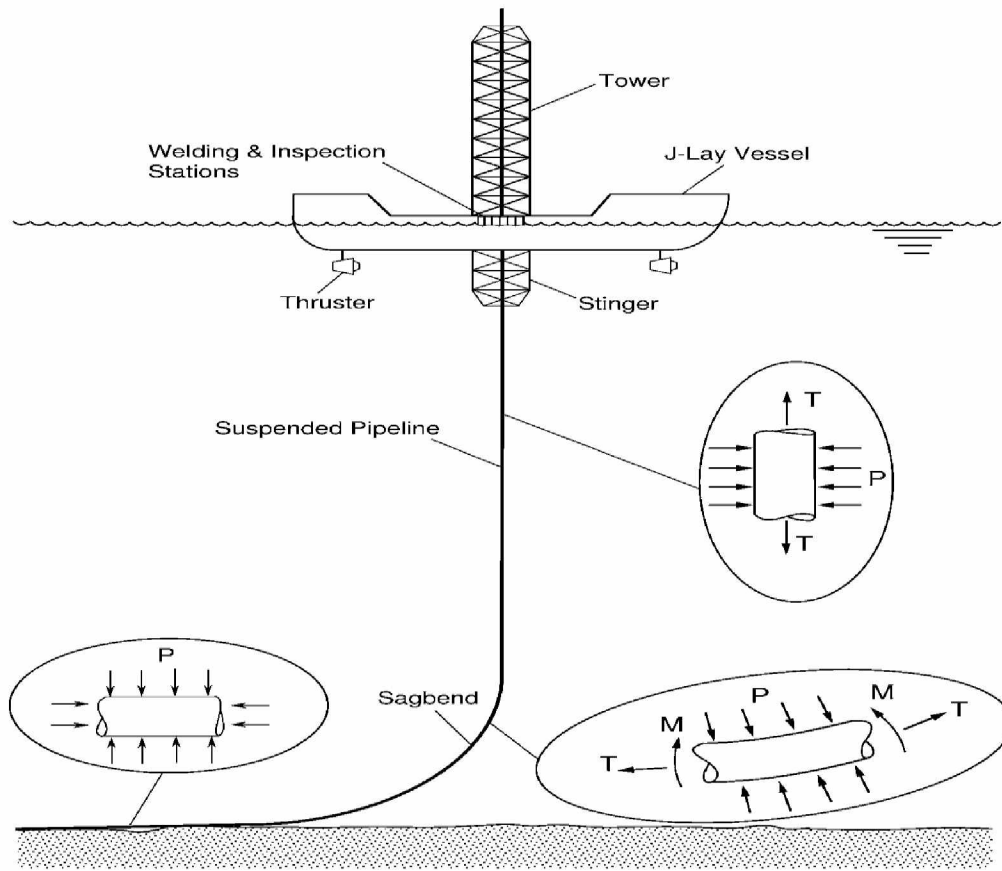


Σχήμα1. 3 Σχηματική αναπαράσταση της εγκατάστασης αγωγού με S-Lay και των σχετικών φορτίων (Κυριακίδες_Corona 2007)



Σχήμα1. 4 Η φορηγίδα Castoro Sei εγκατάστασης αγωγού με S-Lay (Κυριακίδες_Corona 2007)

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΟΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

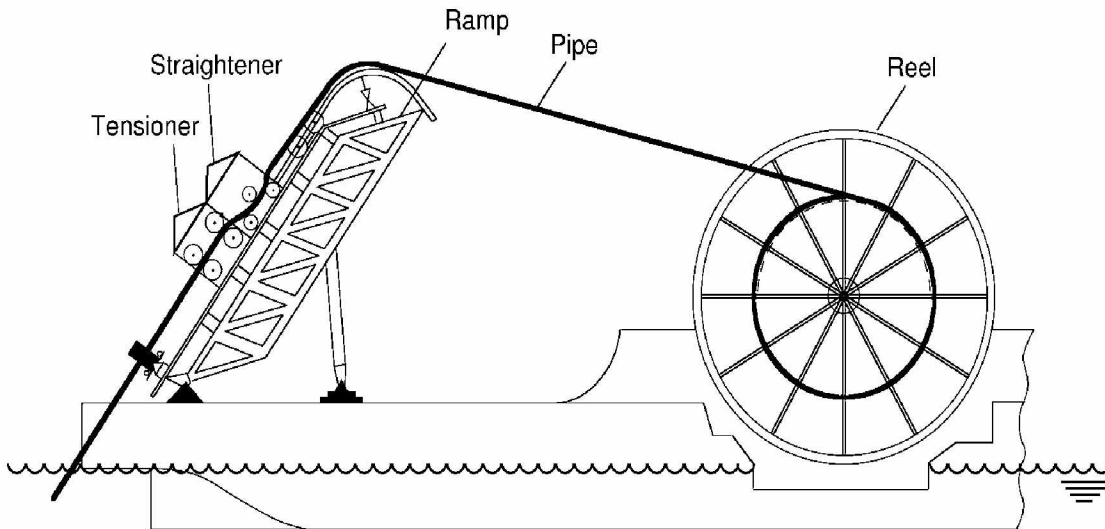


Σχήμα1. 5 Σχηματική αναπαράσταση της εγκατάστασης αγωγού με J-Lay και των σχετικών φορτίων (Kyriakides_Corona 2007)



Σχήμα1. 6 Η φορτηγίδα Saipem 7000 με πύργο για εγκατάσταση αγωγού με J-Lay (Kyriakides_Corona 2007)

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



Σχήμα1. 7 Σχηματική αναπαράσταση της φορτηγίδας Apache (Κυριακίδες_Corona 2007)



Σχήμα1. 8 Φωτογραφία της φορτηγίδας Apache (Κυριακίδες_Corona 2007)

1.3 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η διαδιδόμενη ύβωση ξεκινάει από ένα σημείο αρχικής ατέλειας που υπάρχει στον αγωγό. Υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης η αρχική ατέλεια μετατρέπεται σε ύβωση και εν συνέχεια προχωράει κατά μήκος του αγωγού. Υπάρχουν λοιπόν κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη πίεσης τα οποία σχετίζονται τόσο με την έναρξη όσο και με τη διάδοση του φαινομένου. Το παρών κεφάλαιο παρουσιάζει και αναλύει τα βασικότερα εξ' αυτών.

1.3.1 ΠΙΕΣΗ ΕΝΑΡΞΗΣ

Η τιμή της ομοιόμορφα κατανεμημένης εξωτερικής πίεσης, υπό την επίδραση της οποίας ένας θεωρητικά άπειρα μακρύς αγωγός λυγίζει ονομάζεται **κρίσιμη πίεση κατάρρευσης P_c** . Είναι ουσιαστικά η θεωρητική τιμή της πίεσης στην οποία το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης ξεκινά και μία αρχική ατέλεια του αγωγού μετατρέπεται στην πρώτη αστοχία του. Υπάρχουν αρκετοί τύποι υπολογισμού της P_c κάποιοι εκ' των οποίων παραθέτονται παρακάτω.

- Το κριτήριο σχεδιασμού σύμφωνα με το πρότυπο **API RP 1111**:

$$(P_o - P_i) \leq f_o \cdot P_c \quad (1. 1)$$

με P_c να είναι η ζητούμενη κρίσιμη πίεση κατάρρευσης, P_o να είναι η εξωτερική υδροστατική πίεση που ασκείται στο σωλήνα, P_i η εσωτερική πίεση που ασκείται στο σωλήνα την οποία στην παρούσα διπλωματική θα θεωρήσουμε μηδενική και f_o ένας συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του αγωγού. Ο συντελεστής f_o παίρνει τις εξής τιμές:

$$f_o = \begin{cases} 0.7 & \text{για αγωγούς χωρίς ραφή} \\ 0.6 & \text{για συγκολλητούς αγωγούς} \end{cases} \quad (1.2)$$

Η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_C = \frac{P_y \cdot P_e}{\sqrt{P_y^2 + P_e^2}} \quad (1.3)$$

όπου P_e είναι το κρίσιμο φορτίο για ελαστική κατάρρευση του αγωγού και δίνεται από τον τύπο:

$$P_e = \frac{2 \cdot E}{1 - \nu^2} \cdot \left[\frac{t}{D} \right]^3 \quad (1.4)$$

με E το μέτρο Ελαστικότητας του αγωγού, t το ονομαστικό πάχος του αγωγού, D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού και ν ο λόγος Poisson. Να σημειωθεί πως ο τύπος για το P_e προκύπτει από την θεωρία ευστάθειας δακτυλίων και αφορά σωλήνες οι οποίοι δεν παρουσιάζουν αρχικές ατέλειες και έχουν καθαρά ελαστική συμπεριφορά. Επίσης από την ίδια θεωρία προκύπτει ότι για αγωγούς με λόγο διαμέτρου προς το πάχος μεγαλύτερου του 30 $\left(\frac{D}{t} \geq 30 \right)$ ισχύει ότι

$P_C = P_e$. Το P_y αντίστοιχα είναι η τιμή της εξωτερικής πίεσης η οποία απαιτείται για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής ενός αγωγού και σύμφωνα με την θεωρία των λεπτότοιχων κυλίνδρων. (Καραμάνος, Σπύρος Α.2003. Σημειώσεις Μαθήματος Μη-Γραμμική Ανάλυση Κατασκευών Ευστάθεια) ισχύει ότι:

$$P_y = 2 \cdot \sigma_y \cdot \frac{t}{D} \quad (1.5)$$

όπου σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού από το οποίο αποτελείται ο αγωγός.

- Η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης σύμφωνα με το πρότυπο **DNVGL-ST-F101**:

$$[P_c - P_e] \cdot [P_c^2 - P_p^2] = P_c \cdot P_e \cdot P_p \cdot O_0 \cdot \frac{D}{t} \quad (1.6)$$

όπου P_e το κρίσιμο φορτίο για ελαστική κατάρρευση του αγωγού το οποίο υπολογίστηκε πιο πάνω με την σχέση (1. 4), P_p μία χαρακτηριστική πίεση η οποία ονομάζεται **πίεση διάδοσης** και θα αναλυθεί περισσότερο στο επόμενο κεφάλαιο και O_0 η αρχική οnality(οβαλότητα) η οποία ουσιαστικά αποτελεί μία αρχική απόκλιση από το τέλειο κυλινδρικό σχήμα που θα έπρεπε να είχε ο αγωγός. Μέσω αυτού του μεγέθους το συγκεκριμένο πρότυπο συμπεριλαμβάνει στον υπολογισμό της P_c τις πιθανές ατέλειες του αγωγού.

Η πίεση διάδοσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_p = \sigma_y \cdot a_{fab} \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \quad (1.7)$$

με a_{fab} να παίρνει τιμές ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του σωλήνα σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα.

Pipe	Seamless	UO,TRB,ERW,HFW	UOE
a_{fab}	1	0.93	0.85

Πίνακας 1

Τέλος η αρχική ovality υπολογίζεται από τον τύπο:

$$O_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (1.8)$$

με D όπως ήδη έχει αναφερθεί να είναι η ονομαστική εξωτερική διάμετρος, D_{max} η μεγαλύτερη διάμετρος (είτε εσωτερική είτε εξωτερική) και D_{min} η μικρότερη διάμετρος (είτε εσωτερική είτε εξωτερική).

1.3.2 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Μετά την πρώτη αστοχία του αγωγού, δηλαδή την κατάρρευση μίας διατομής του αγωγού όπου υπήρχε μία αρχική ατέλεια, το φαινόμενο της ύβωσης αρχίζει και διαδίδεται στην διαμήκη διεύθυνση του αγωγού ισοπεδώνοντας και τις υπόλοιπες διατομές του. Η ελάχιστη τιμή της ομοιόμορφα κατανεμημένης εξωτερικής πίεσης κάτω από την οποία η ύβωση μπορεί να διαδοθεί ονομάζεται **πίεση διάδοσης P_p** . Εδώ πρέπει να υπογραμμιστεί πως η τιμή της πίεσης διάδοσης P_p είναι αρκετές φορές μικρότερη από την τιμή της κρίσιμης πίεσης κατάρρευσης P_C . Σε συνήθεις εφαρμογές ισχύει ότι $\frac{1}{10} \cdot P_C \leq P_p \leq \frac{1}{5} \cdot P_C$. Ομοίως και για την πίεση διάδοσης υπάρχουν αρκετοί τύποι για τον υπολογισμό της και μερικοί δίνονται παρακάτω.

- Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με το πρότυπο **API RP 1111**:

$$P_p = 24 \cdot \sigma_y \cdot \left[\frac{t}{D} \right]^{2.4} \quad (1.9)$$

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

- Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με το πρότυπο **DNVGL-ST-F101:**
Η πίεση διάδοσης δίνεται σύμφωνα με την εξίσωση **(1. 7)** η οποία αναπτύχθηκε προηγουμένως.
- Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με τους **Kyriakides & Babcock (1982)** ύστερα από πειράματα που πραγματοποιήσαν σε χαλύβδινους αγωγούς και σε αγωγούς κραμάτων αλουμινίου:

$$P_p = A \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^\beta \quad (1. 10)$$

όπου A και β είναι συντελεστές οι οποίοι εξαρτούνται από το υλικό του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα για χαλύβδινους αγωγούς $A = 14.5$
 $\beta = 2.254$ ενώ για αγωγούς κατασκευασμένοι από κράματα αλουμινίου $A = 11.3$ και $\beta = 2.281$.

- Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με τους **Palmer & Martin (1975):**

$$P_p = \pi \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^2 \quad (1. 11)$$

Οι τύποι οι οποίοι παρουσιάστηκαν πιο πάνω, τόσο για την πίεση διάδοσης όσο και για την κρίσιμη πίεση κατάρρευσης, θα χρησιμοποιηθούν στη παρούσα διπλωματική για να υπολογιστούν θεωρητικά τα συγκεκριμένα μεγέθη. Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πρακτικά τα οποία προκύπτουν από την ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Στο επόμενο σχήμα (**Σχήμα1. 9**) φαίνεται μία τοπική κατάρρευση αγωγού υπό την επίδραση εξωτερικής πίεσης.



Σχήμα 1. 9 Φωτογραφία ενός αγωγού διαμέτρου 20 inches υλικού X80 ο οποίος έχει καταρρεύσει λόγω εξωτερικής πίεσης (Kyriakides_Corona 2007)

1.4 ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ

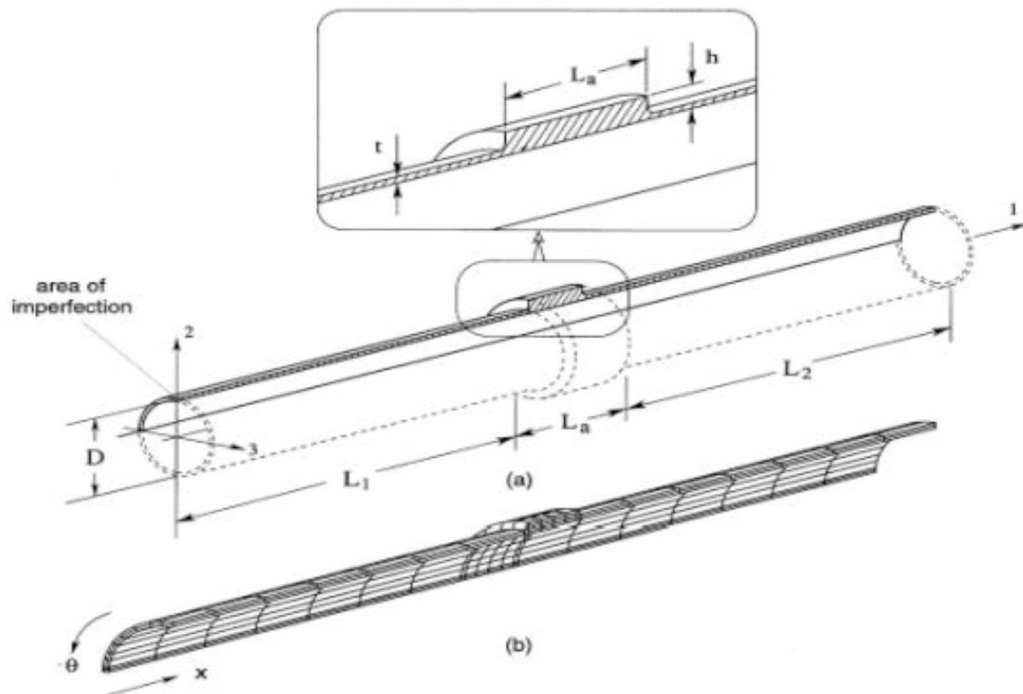
Το τελευταίο κεφάλαιο που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία είναι η αναστολή της διαδιδόμενης ύβωσης. Το φαινόμενο αυτό είναι καταστροφικό για τον αγωγό καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως, δεν είναι τοπικό αλλά επεκτείνεται και ισοπεδώνει διατομές του αγωγού σε μεγάλο μήκος του. Για να σταματήσει η διάδοση της ύβωσης θα πρέπει η εξωτερική πίεση να λάβει τιμή μικρότερη της πίεσης διάδοσης P_p όμως αυτό είναι πρακτικά δύσκολο για αγωγούς που είναι ποντισμένοι σε μεγάλα βάθη, διότι μέχρι να μειωθεί αρκετά το βάθος που είναι εγκατεστημένος ο αγωγός μπορεί να έχουν ήδη καταστραφεί πολλά χιλιόμετρα από το συνολικό του μήκος. Ακόμη ο σχεδιασμός ενός σωλήνα με βάση την πίεση διάδοσης δεν συνίσταται καθώς με αυτόν τον τρόπο το κόστος αυξάνεται κατακόρυφα, αφού θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν υλικά με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες είτε να αυξηθεί πολύ το πάχος του αγωγού.

Έτσι λοιπόν για την αντιμετώπιση του προβλήματος της διαδιδόμενης ύβωσης χρησιμοποιούνται μηχανισμοί αναστολής που ονομάζονται **buckle arrestors(αναστολείς)** και οι οποίοι τοποθετούνται περιοδικά κατά μήκος του αγωγού. Οι arrestors μπορεί να συγκολληθούν στον αγωγό επάνω στην φορηγίδα ή πριν φτάσει ο αγωγός σε αυτήν κάτι που είναι προτιμότερο. Έχουν γίνει μελέτες για arrestors που μπορεί να τοποθετηθούν τόσο εξωτερικά του σωλήνα όσο και εσωτερικά. Το 1973 κατοχυρώθηκε μία ιδέα τοποθέτησης ενός κυλινδρικού, κινούμενου arrestor στο εσωτερικό αγωγού κάτω από περιοχές που είναι πιθανόν να ξεκινήσει η ύβωση. Παρόλα αυτά οι εξωτερικοί arrestors είναι πολύ πιο ευρέως διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται συχνότερα.

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι arrestors ανάλογα με το σχήμα, την διαδικασία τοποθέτησης επάνω στον αγωγό και την συμπεριφορά που έχουν

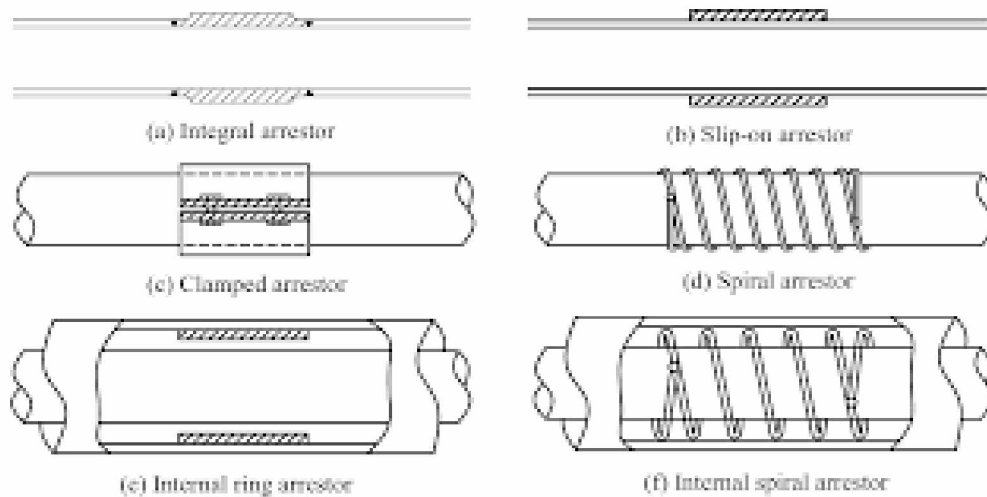
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

έναντι στο φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα εξής : integral arrestors(τμήματα αγωγού με μεγαλύτερο πάχος και ίδια εσωτερική διάμετρο με τον αγωγό συγκολλημένα κατά το μήκος του), slip-on arrestors(μεταλλικοί δακτύλιοι συγκολλημένοι εσωτερικά του αγωγού), spiral arrestors(δακτύλιοι τυλιγμένοι σε σπείρα και συγκολλημένοι στον αγωγό) και welded-ring arrestors(άκαμπτοι δακτύλιοι οι οποίοι έχουν γλιστρήσει πάνω στον σωλήνα και έχουν συγκολληθεί). Σε αυτήν την εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με integral arrestors. Παρακάτω απεικονίζονται κάποιοι αναστολείς διαδιδόμενης ύβωσης.



Σχήμα1. 10 Αναστολέας διαδιδόμενης ύβωσης (Netto & Kyriakides,1999)

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα1. 11 Διάφορα είδη Αναστολέων

1.4.1 ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

Το χαρακτηριστικό μέγεθος στην αναστολή της ύβωσης ονομάζεται **πίεση ανάσχεσης** P_{CO} και είναι η τιμή την οποία αν η εξωτερική πίεση υπερβεί τότε η διερχόμενη ύβωση προσπερνά την συσκευή αναστολής (arrester) και συνεχίζει την διάδοσή της και στο τμήμα του αγωγού μετά τον αναστολέα. Σε περίπτωση όμως που η τιμή της εξωτερικής πίεσης είναι μικρότερη από την τιμή της πίεσης ανάσχεσης τότε η διαδιδόμενη ύβωση αναστέλλεται. Γενικά ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$P_p \leq P_{CO} \leq P_c \quad (1. 12)$$

Το πρώτο μέρος $P_p \leq P_{CO}$ είναι και το ζητούμενο από έναν αναστολέα ενώ το δεύτερο μέρος $P_{CO} \leq P_c$ ισχύει διότι σε διαφορετική περίπτωση η πίεση κατάρρευσης θα ισοπεδώσει τα τμήματα του αγωγού εκατέρωθεν του αναστολέα.

Στην παρούσα διπλωματική ο υπολογισμός της πίεσης ανάσχεσης θα γίνει με το πρότυπο **DNVGL-ST-F101** σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$P_{CO} = P_p + (P_{p,BA} - P_p) \cdot \left[1 - EXP \left(-20 \cdot \frac{t \cdot L_{BA}}{D^2} \right) \right] \quad (1.13)$$

Όπου L_{BA} είναι το μήκος του buckle arrestor και $P_{p,BA}$ είναι η τιμή που θα είχε η πίεση διάδοσης σε έναν buckle arrestor άπειρου μήκους. Ο υπολογισμός της $P_{p,BA}$ γίνεται σύμφωνα με την σχέση:

$$P_p = 35 \cdot \sigma_y \cdot a_{fab} \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^{2.5} \quad (1.14)$$

με a_{fab} να δίνεται από τον **Πίνακας 1** και t , D τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του arrestor και όχι του αγωγού.

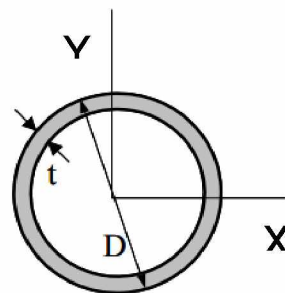
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πάρων κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας προσομοιώνονται διδιάστατα μοντέλα δακτυλίων και μελετάται η συμπεριφορά τους κάτω από την επίδραση εξωτερικής πίεσης. Αυτό αποτελεί μία καλή προσέγγιση του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης, διότι ο τρόπος με τον οποίο αστοχούν τα μοντέλα των δακτυλίων είναι παρόμοιος με την αστοχία των διαδοχικών διατομών ενός αγωγού. Πρακτικά λοιπόν, οι δακτύλιοι της παρακάτω διδιάστατης ανάλυσης ανιπροσωπεύουν μία διατομή ενός αγωγού με αντίστοιχες ιδιότητες.

Στόχος της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι μία πρώτη εκτίμηση της τιμής της πίεσης διάδοσης η οποία αποτελεί την βασικότερη παράμετρο του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης. Το βασικό πλεονέκτημα των διδιάστατων μοντέλων είναι το χαμηλό υπολογιστικό κόστος καθώς η ανάλυση ολοκληρώνεται πολύ γρήγορα και τα ζητούμενα αποτελέσματα εξάγονται σχετικά εύκολα. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική για την προσομοίωση των εκάστοτε μοντέλων είναι το ABAQUS.

Σε πρώτη φάση λοιπόν, να επισημάνουμε πως η ανάλυση πραγματοποιείται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) στο εγκάρσιο επίπεδο $X - Y$, ενώ τα εντακτικά και παραμορφωσιακά μεγέθη δεν εξαρτώνται από την διαμήκη διεύθυνση Z . Τα επίπεδα αυτά απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα2. 1**).



Σχήμα2. 1 Δακτύλιος

Επίσης, κάτι ακόμα που πρέπει να σημειωθεί είναι πως κατά την πλαστική κατάρρευση ο δακτύλιος υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις με αποτέλεσμα να

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

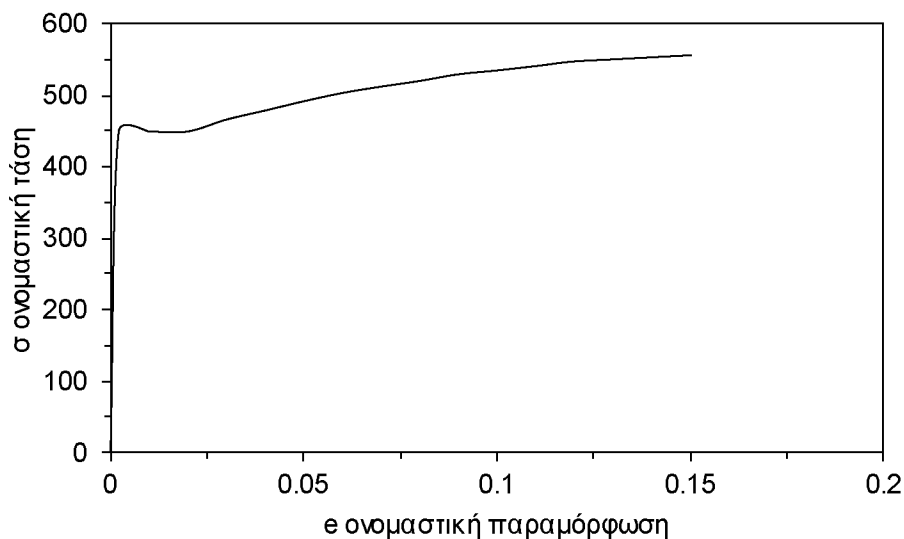
δημιουργούνται γεωμετρικές μη γραμμικότητες. Αυτό λαμβάνεται υπ' όψιν στο ABAQUS ενεργοποιώντας την υποεντολή 'nlgeom' που βρίσκεται μέσα στην εντολή 'step' η οποία καθορίζει τα βήματα της μη γραμμικής ανάλυσης.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

2.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑ

Αρχικά είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως λόγω της διπλής συμμετρίας του δακτυλίου προσομοιώνουμε μόνο το ένα τέταρτο του δακτυλίου κάνοντας έτσι την ανάλυση πιο εύκολη. Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο δακτύλιος που θα μας απασχολήσει έχει εξωτερική διάμετρο $D = 914.4mm$ και πάχος $t = 30 mm$.

Το υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του δακτυλίου είναι χάλυβας grade X_{65} με μέτρο ελαστικότητας $E = 210GP_a$, όριο διαρροής $\sigma_y = 450MP_a$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Η καμπύλη του υλικού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα2. 2**).



Σχήμα2. 2 Διάγραμμα ονομαστικής τάσης-ονομαστικής παραμόρφωσης για το υλικό X65

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Για να προσομοιώσουμε όμως στο ABAQUS την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του δακτυλίου θα πρέπει να δώσουμε τις τιμές της **πραγματικής τάσης σ_{true}** και της **λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης ε_{ln}^p** και όχι της **ονομαστικής τάσης σ** και της **ονομαστικής παραμόρφωσης e**

Οι σχέσεις που συνδέουν την ονομαστική τάση με την πραγματική και την ονομαστική παραμόρφωση με την λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση είναι οι εξής:

$$\sigma_{true} = \sigma \cdot (1 + e) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + e) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2.2)$$

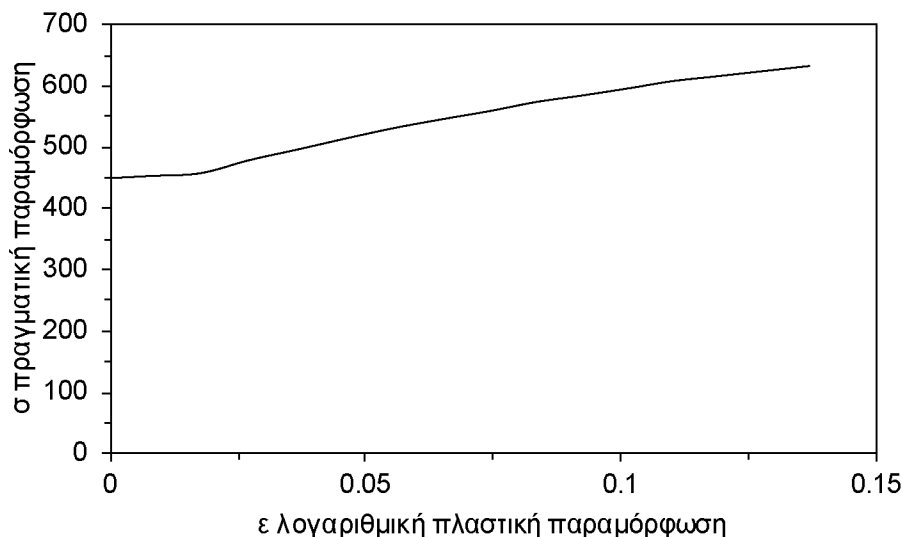
Στον επόμενο πίνακα (**Πίνακας 2**) παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις.

Πραγματική τάση σ_{true}	Λογαριθμική Πλαστική παραμόρφωση ε_{ln}^p (%)	Ονομαστική τάση σ	Ονομαστική παραμόρφωση e (%)
		0	0
449.397	0	0.002142	449.397
452.985	0.00779	0.009997	449.4835
457.47	0.0176	0.019975	449.5578
478.95	0.0273	0.030023	466.2221
496.6	0.0369	0.040046	478.9276
514.5	0.0463	0.049958	491.7328
531.378	0.0557	0.059959	503.3419
545.7	0.0651	0.070043	512.3463
558.9	0.0743	0.08	520.2457
573.667	0.0834	0.08995	529.5062
584.43	0.0925	0.09997	534.9474
596.625	0.102	0.110534	541.402
607.6	0.11	0.119513	547.3874
615.85	0.119	0.129678	550.3575
624.15	0.128	0.139936	553.3245
632.5	0.137	0.150287	556.2885

Πίνακας 2

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Επίσης παρακάτω βλέπουμε και το διάγραμμα πραγματικής τάσης-λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα2. 3 Διάγραμμα πραγματικής τάσης- λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης για το υλικό X65

Σχετικά με το πλέγμα του δακτυλίου, ο δακτύλιος αποτελείται από 360 στοιχεία 6 κατά το πάχος του και 60 κατά την περιφέρεια του τεταρτοκυκλίου. Τα στοιχεία αυτά είναι επίπεδης παραμόρφωσης CPE4R δηλαδή τετρα-κομβικά μειωμένης ολοκλήρωσης.

2.2.2 ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν 3 βήματα (steps) πέραν του αρχικού (initial step).

Στο 1^ο step δίνουμε μία αρχική κατακόρυφη μετατόπιση στον πάνω αριστερά κόμβο του δακτυλίου.

Στο 2^ο step άρουμε αυτήν την μετατόπιση. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να δημιουργηθεί στο δακτύλιο μία αρχική ατέλεια κάτι το οποίο θα εξηγηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, στο 3^ο step εφαρμόζουμε ομοιόμορφη εξωτερική πίεση στο δακτύλιο.

Για τις συνοριακές συνθήκες τώρα, αυτές δημιουργούνται στο initial step της ανάλυσης και παραμένουν ενεργές μέχρι και το τέλος της ανάλυσης (σε αντίθεση με την μετατόπιση η οποία δημιουργείται στο 1^ο step και γίνεται ανενεργή στο 2^ο). Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος είναι οι εξής:

- **ΣΥΝΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ X-SYMM**

Η αριστερή παρειά του τεταρτοκυκλίου παρουσιάζει συμμετρία ως προς τον άξονα X . Αυτό δηλώνεται στο ABAQUS με την εντολή x-symm η οποία ουσιαστικά δεσμεύει την μετατόπιση κατά τον άξονα X και τις στροφές ως προς τους άξονες Y και Z . Ισχύει δηλαδή ότι:

$$U_1 = UR_2 = UR_3 = 0$$

- **ΣΥΝΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ Y-SYMM**

Η κάτω δεξιά παρειά του τεταρτοκυκλίου παρουσιάζει συμμετρία ως προς τον άξονα Y . Αυτό δηλώνεται στο ABAQUS με την εντολή y-symm η οποία ουσιαστικά δεσμεύει την μετατόπιση κατά τον άξονα Y και τις στροφές ως προς τους άξονες X και Z . Ισχύει δηλαδή ότι:

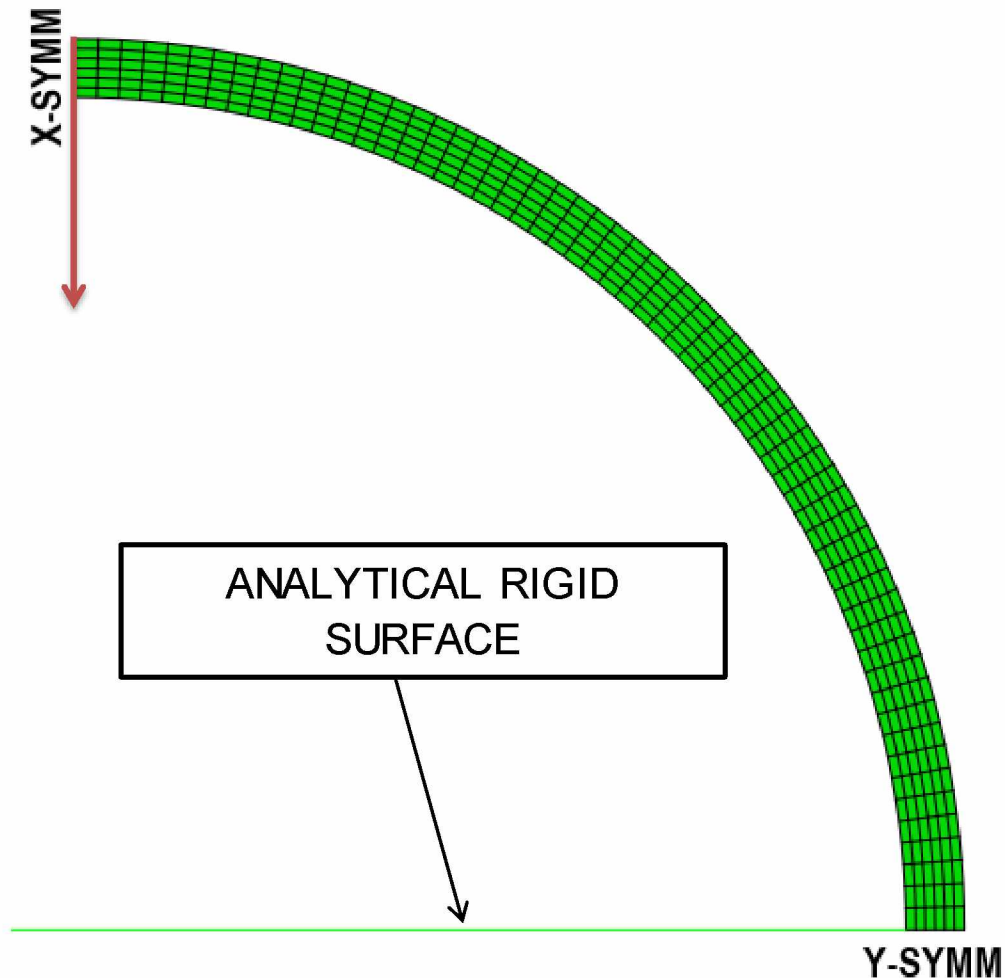
$$U_2 = UR_1 = UR_3 = 0$$

- **ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΑΦΗΣ**

Επειδή κατά την κατάρρευση ενός δακτυλίου οι εσωτερικές επιφάνειες του έρχονται σε επαφή, πρέπει να προσομοιώσουμε αυτή την επαφή χωρίς να χρειαστεί να κατασκευάσουμε όλο τον δακτύλιο. Για να το επιτύχουμε αυτό προσθέσαμε μία **αναλυτική επιφάνεια** (στην συγκεκριμένη περίπτωση του διδιάστατου μοντέλου πρόκειται για μία γραμμή πάνω στον άξονα X) η οποία έχει τα χαρακτηριστικά **άκαμπτου σώματος (analytical rigid surface)**. Για να είμαστε σίγουροι πως η γραμμή αυτή δεν θα μετακινηθεί δημιουργήσαμε ένα **σημείο αναφοράς (Reference Point)** πάνω σε αυτή την επιφάνεια στο οποίο δεσμεύσαμε όλες τις μετατοπίσεις και στροφές. Έτσι όλα τα σημεία της επιφάνειας έχουν τις ίδιες ιδιότητες με το σημείο αναφοράς. Ισχύει δηλαδή ότι:

$$U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$$

Οι συνοριακές συνθήκες οι οποίες αναλύθηκαν πιο πάνω καθώς και η αρχική μετατόπιση που εφαρμόζεται στον άνω δεξιά κόμβο του τεταρτοκυκλίου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. (**Σχήμα2. 4**)



Σχήμα2. 4 Συνοριακές συνθήκες του προβλήματος

2.2.3 ΑΡΧΙΚΗ ΑΤΕΛΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί και στο 1^ο Κεφάλαιο της διπλωματικής στην πραγματικότητα κανείς αγωγός που χρησιμοποιείται δεν είναι τέλειος αλλά όλοι έχουν κάποιες αρχικές ατέλειες. Η αρχική ατέλεια στην ανάλυση μας έχει την μορφή μίας **μικρής πλαστικής παραμόρφωσης**. Αυτό επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο. Στο 1^ο βήμα η μικρή κατακόρυφη μετατόπιση που εφαρμόζουμε δημιουργεί μία αλλαγή στη γεωμετρία του αρχικώς τέλειου δακτυλίου. Στο 2^ο βήμα με την άρση της μετατόπισης αφήνουμε τον δακτύλιο να επανέλθει ελαστικά. Ωστόσο παρά την επαναφορά του δακτυλίου, παραμένει μία μικρή πλαστική παραμόρφωση η οποία αποτελεί και την αρχική ατέλεια του μοντέλου μας.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Η τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης που δίνουμε στον δακτύλιο είναι $U_2 = -15 \text{ mm}$ και επιβάλλεται στον άνω αριστερά κόμβο του τεταρτοκυκλίου. Το αρνητικό πρόσημο αυτής υποδηλώνει πως η μετατόπιση έχει φορά προς στο κέντρο του δακτυλίου (**Σχήμα2. 4**).

Τέλος στο 3^ο βήμα της ανάλυσης μας επιβάλουμε στον δακτύλιο ομοιόμορφη εξωτερική πίεση με την **μέθοδο μήκους τόξου (Riks)**. Το διάνυσμα της πίεσης σε κάθε σημείο παραμένει κάθετο στον παραμορφωμένο δακτύλιο καθ' όλη την διάρκεια της ανάλυσης. Παρατηρούμε ακόμη πως στο ABAQUS υπάρχει ο παράγοντας LPF (Load Proportionality Factor) ο οποίος ρυθμίζει το πόσο μεγαλώνει η τιμή της πίεσης σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Στον παράγοντα αυτό δόθηκε η τιμή 1. Οι διαστάσεις που σχεδιάσαμε το μοντέλο είναι σε χιλιοστά (mm). Επομένως το φορτίο της πίεσης που θα μετρήσουμε στο τέλος θα είναι

$$P = LPF \cdot 1 \text{ και οι διαστάσεις του θα είναι σε } MP_a \left(\frac{N}{mm} \right)$$

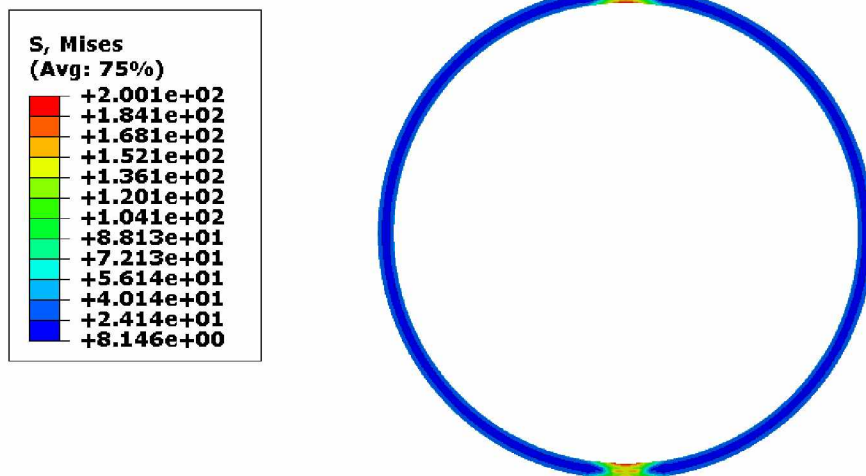
2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση του δακτυλίου μας. Αρχικά αυτό που παρατηρούμε είναι πως πράγματι η αστοχία και η πλαστικοποίηση του δακτυλίου ξεκινά από το σημείο της αρχικής ατέλειας που είχαμε δημιουργήσει με την κατακόρυφη μετατόπιση. Στην συνέχεια βλέπουμε πως η τιμή της πίεσης αυξάνει απότομα με την μέγιστη τιμή να αντιστοιχεί σε μικρές σχετικά παραμορφώσεις. Αφού έχει λάβει την μέγιστη τιμή της η πίεση αρχίζει και μειώνεται εξαιτίας της δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων στον δακτύλιο (**Σχήμα2. 9**) προκαλώντας έτσι την σταδιακή κατάρρευση του δακτυλίου. Κατά την κατάρρευση λοιπόν του δακτυλίου βλέπουμε τους κόμβους της άνω αριστερής παρειάς του τεταρτοκυκλίου να μετατοπίζονται ομοιόμορφα παράλληλα στον άξονα Y με κατεύθυνση το κέντρο του δακτυλίου. Παρόμοια, οι κόμβοι της κάτω δεξιάς παρειάς του τεταρτοκυκλίου μετατοπίζονται ομοιόμορφα παράλληλα στον άξονα X με κατεύθυνση ώστε να απομακρύνονται από το κέντρο του δακτυλίου. Καθ' όλη αυτή τη διάρκεια η πίεση συνεχίζει να μειώνεται με την ελάχιστη τιμή της να αντιστοιχεί στην στιγμή της επαφής της άνω αριστερής παρειάς με την αναλυτική επιφάνεια.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

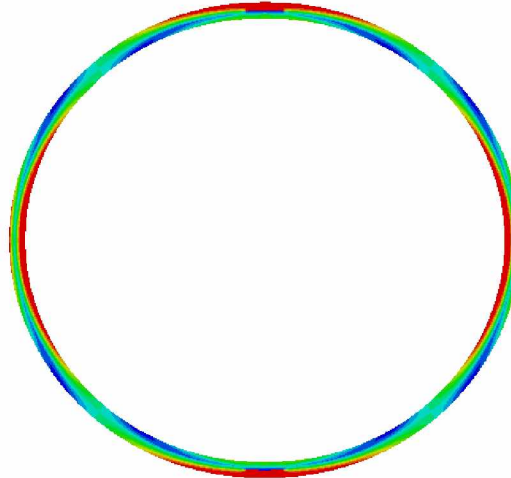
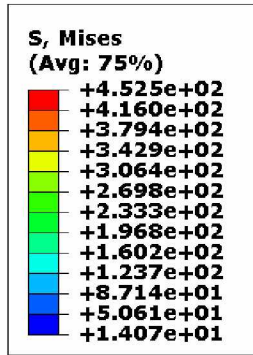
Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπενθυμίσουμε πως η επαφή των δύο επιφανειών αντιπροσωπεύει την επαφή των δύο αντιδιαμετρικών σημείων που βρίσκονται στις εσωτερικές επιφάνειες του δακτυλίου. Για αυτό το λόγο δεν επιτρέπουμε στους κόμβους του δακτυλίου να εισχωρήσουν στην αναλυτική επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την υποεντολή 'contact pair' η οποία βρίσκεται μέσα στην εντολή 'interaction' στο ABAQUS. Σαν επιφάνειες που αλληλεπιδρούν δηλώνονται η επιφάνεια συμμετρίας και επαφής με τους κόμβους της πάνω αριστερής παρειάς. Τέλος μετά την επαφή των δύο επιφανειών η πίεση αυξάνεται και πάλι με αποτέλεσμα να αρχίσει να καταρρέει και ο υπόλοιπος δακτύλιος. Μετά από λίγο η ανάλυση τερματίζεται.

Στα σχήματα τα οποία ακολουθούν φαίνεται η αστοχία του δακτυλίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

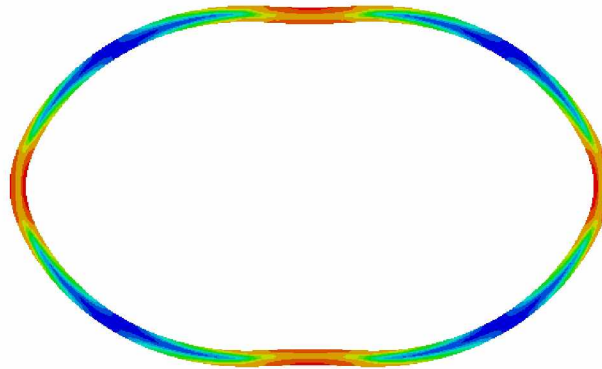
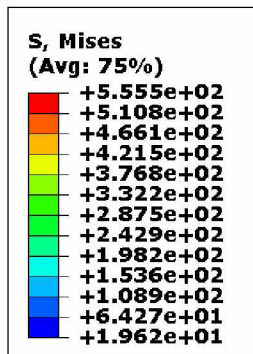


Σχήμα2. 5 Ο δακτύλιος πριν την επιβολή εξωτερικού φορτίου. Οι τάσεις που υπάρχουν οφείλονται στην παραμένουσα πλαστική παραμόρφωση λόγω αρχικής ατέλειας.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

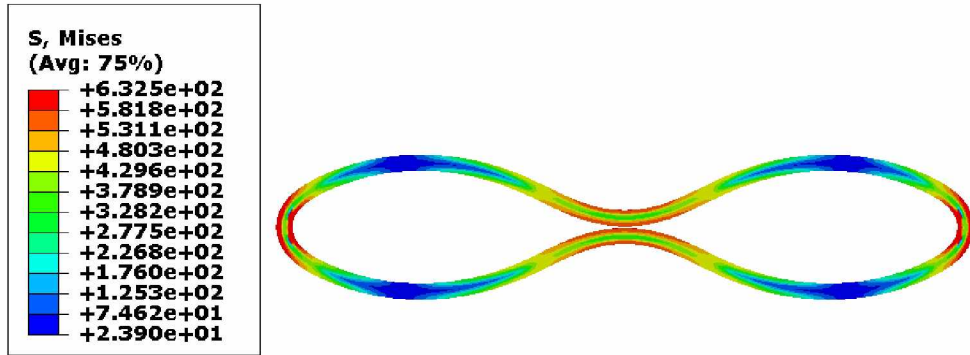


Σχήμα2. 6 Ο δακτύλιος την στιγμή του λυγισμού (μέγιστη πίεση)

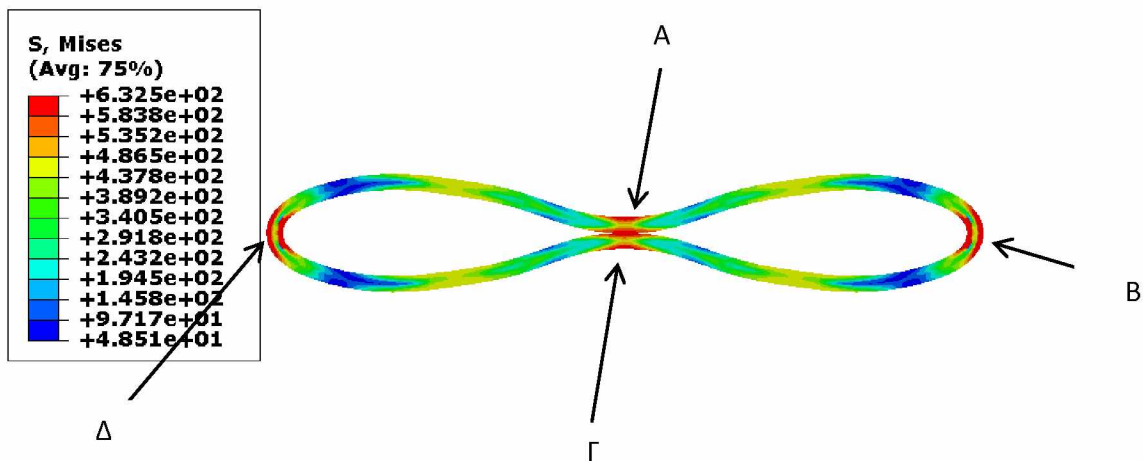


Σχήμα2. 7 Ο δακτύλιος κατά την κατάρρευσή του

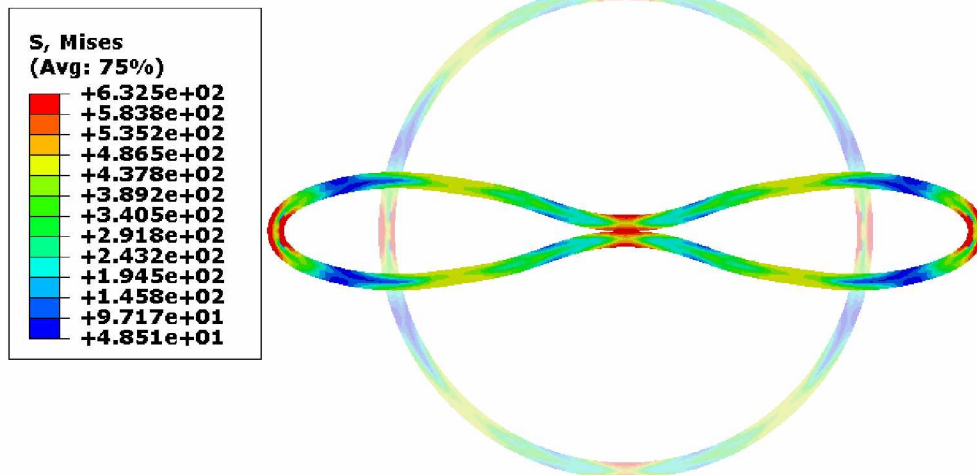
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα2. 8 Ο δακτύλιος την στιγμή της επαφής των δύο αντιδιαμετρικών εσωτερικών επιφανειών.



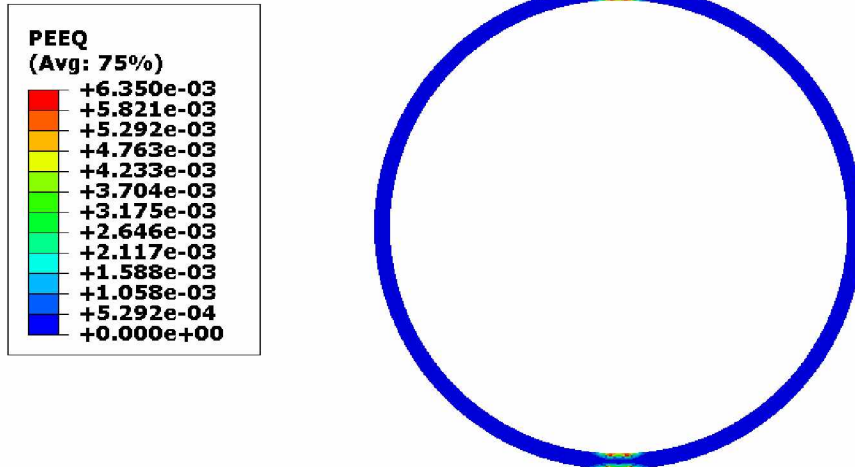
Σχήμα2. 9 Ο δακτύλιος μετά την κατάρρευση και των υπόλοιπων διατομών του. Στο σχήμα απεικονίζονται επίσης και οι πλαστικές αρθρώσεις που δημιουργούνται κατά την κατάρρευση του δακτυλίου.



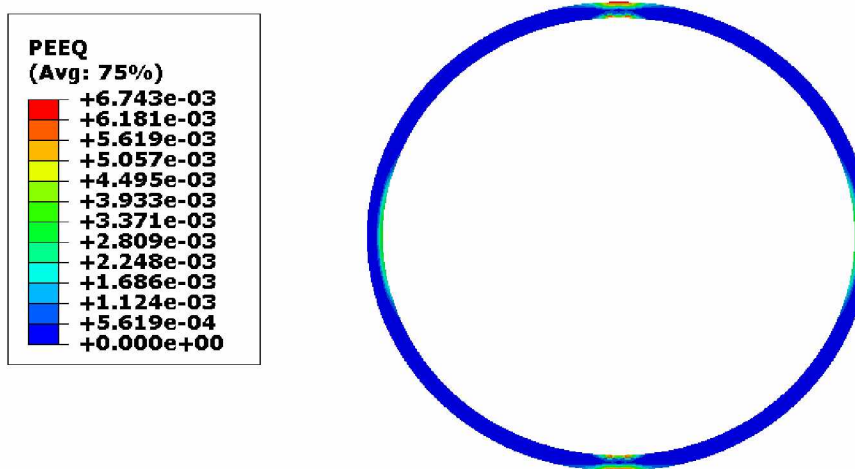
Σχήμα2. 10 Η αρχική και η τελική κατάσταση του δακτυλίου.

Μία παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι πως η μέγιστη τάση κατά την διάρκεια του φαινομένου εμφανίζεται στα τέσσερα ισαπέχοντα σημεία $A - B - \Gamma - \Delta$ τα οποία απεικονίζονται στο **Σχήμα2. 9**. Είναι σε αυτά τα τέσσερα σημεία στα οποία δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις κάτι αναμενόμενο σύμφωνα και με την θεωρία (Καραμάνος, ΣπύροςΑ.2003.Σημειώσεις Μαθήματος Μη-Γραμμική Ανάλυση Κατασκευών Ευστάθεια). Αυτό φαίνεται και στα επόμενα σχήματα τα οποία απεικονίζουν την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση του δακτυλίου στις ίδιες χρονικές στιγμές με τα σχήματα 2.5-2.9.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

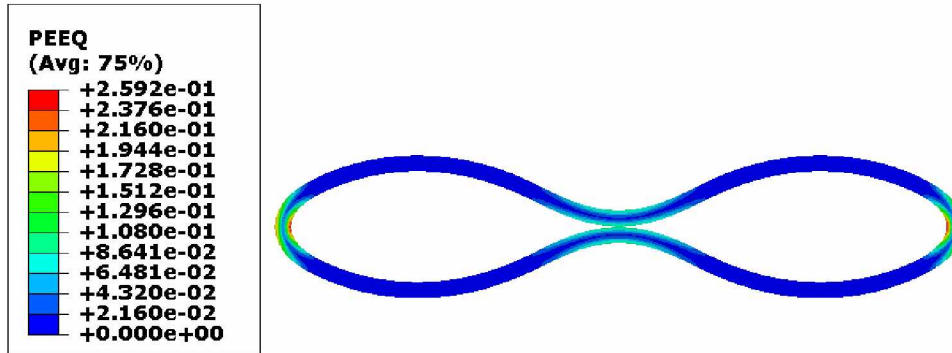


Σχήμα2. 11 Οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις στον δακτύλιο πριν την επιβολή των εξωτερικών φορτίων.

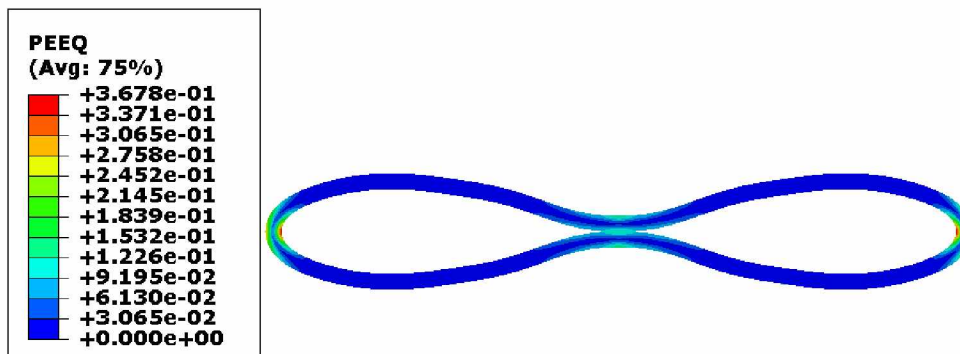


Σχήμα2. 12 Οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις την στιγμή του λυγισμού.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα2. 13 Οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις την στιγμή της επαφής των δύο αντιδιαμετρικών εσωτερικών επιφανειών.



Σχήμα2. 14 Οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις του δακτυλίου μετά την κατάρρευση και των υπόλοιπων διατομών του.

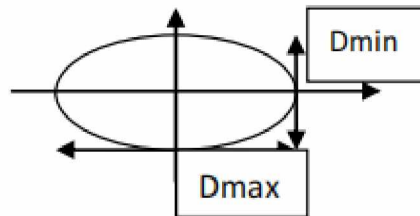
Στη συνέχεια θα επιχειρήσουμε να κατασκευάσουμε τον δρόμο ισορροπίας για το μοντέλο μας. Για να το καταφέρουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ένα μέγεθος στο οποίο είχαμε αναφερθεί στο 1^ο Κεφάλαιο, την **ovality(οβαλότητα)**. Όπως φάνηκε και από το **Σχήμα2. 5ο** δακτύλιος ακόμα και πριν την επιβολή της εξωτερικής πίεσης δεν έχει ένα τέλεια κυκλικό σχήμα αλλά παρουσιάζει μία αρχική οβαλότητα, εξαιτίας της αρχικής παραμόρφωσης

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

που του επιβάλλαμε. Εύκολα διαπιστώνουμε πως όσο ο αγωγός καταρρέει η ovality αυξάνεται. Στην παρούσα διπλωματική ο υπολογισμός της ovality έχει γίνει με τον εξής τύπο:

$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (2.3)$$

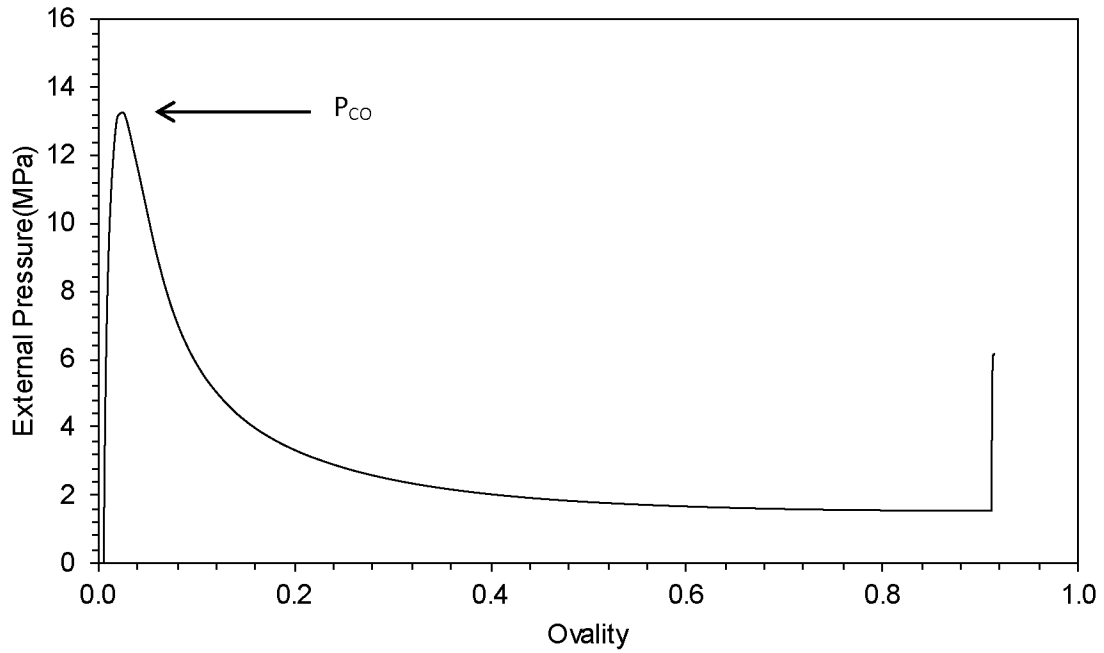
Όπου D_{max} και D_{min} φαίνονται από κάτω.



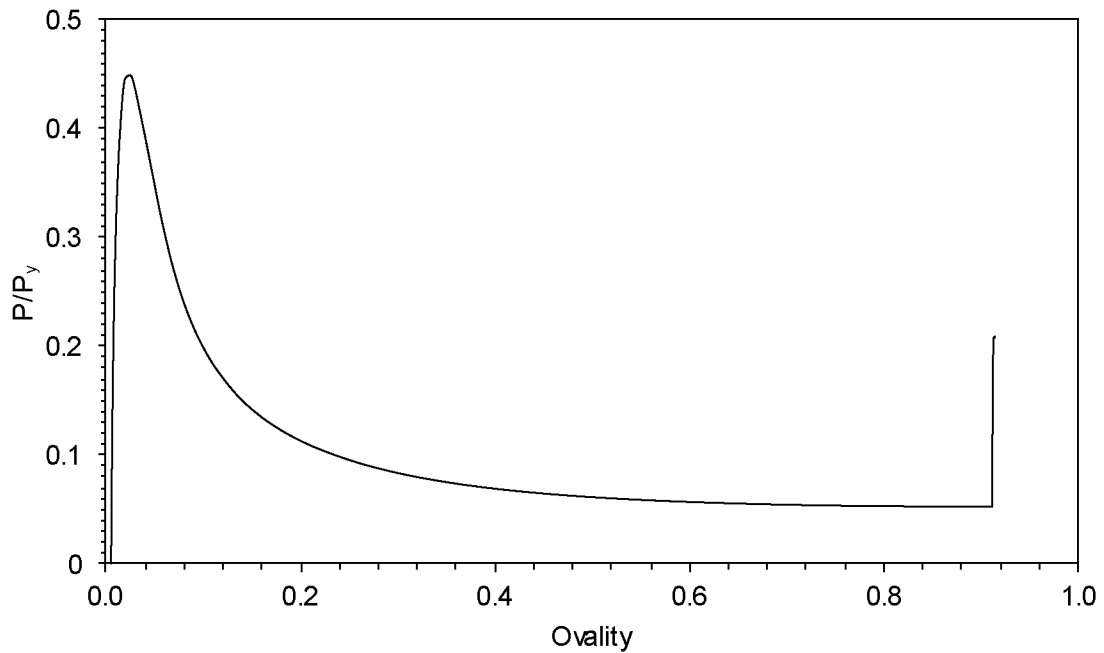
Ο τύπος **(1. 8)** της αρχικής ovality θα χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό της P_c σύμφωνα με το πρότυπο DNVGL-ST-F101:

Έτσι λοιπόν κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα2. 15 Διάγραμμα Πίεσης - Ovality

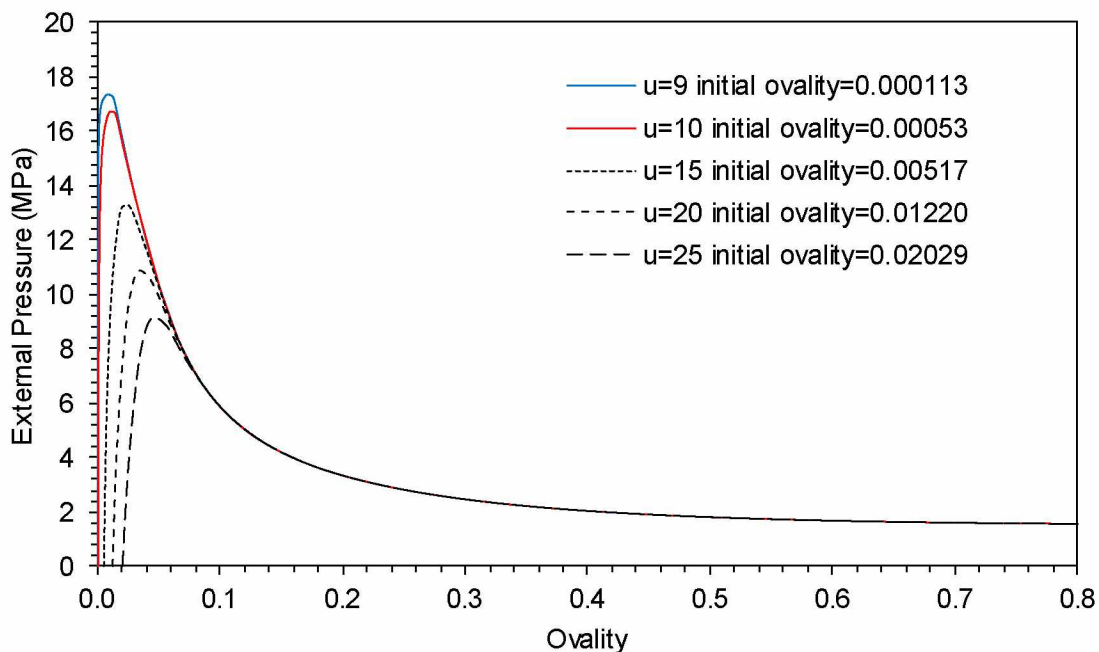


Σχήμα2. 16 Κανονικοποιημένο διάγραμμα Πίεσης-Ovality

2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

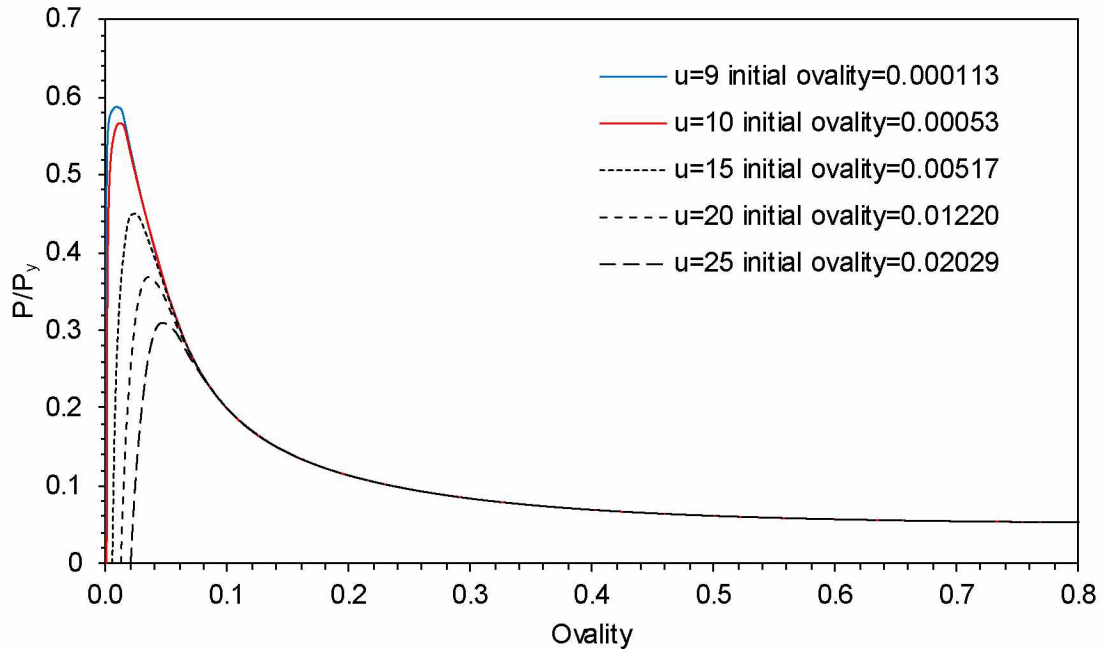
Στο κεφάλαιο αυτό ασχολούμαστε με κάποιους από τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την τιμή της πίεσης κατάρρευσης P_c του δακτυλίου.

Σε πρώτη φάση επιχειρήσαμε να μεταβάλλουμε την αρχική μετατόπιση που δίνουμε στο ABAQUS. Επαναλάβαμε λοιπόν την προηγούμενη διαδικασία για διαφορετικές τιμές της αρχικής κατακόρυφης μετατόπισης και κατασκευάσαμε τους αντίστοιχους δρόμους ισορροπίας όπως φαίνεται και στο **Σχήμα2. 17**. Παρατηρούμε πως η μέγιστη εξωτερική πίεση που αντέχει ο δακτύλιος μειώνεται όσο αυξάνεται η αρχική μετατόπιση. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της αρχικής μετατόπισης συνεπάγεται με δημιουργία μεγαλύτερης αρχικής ατέλειας στο μοντέλο επομένως οι παραμένουσες πλαστικές παραμορφώσεις είναι και αυτές σημαντικότερες. Η αρχική όμως μετατόπιση είναι ένα μέγεθος που δίνουμε στο ABAQUS και πρακτικά δεν έχει κάποιο φυσικό νόημα. Παρόλα αυτά, από το **Σχήμα2. 17** ανπιαμβανόμαστε πως υπάρχει μία σχέση ανάμεσα στην κρίσιμη πίεση κατάρρευσης και στην αρχική ovality.



Σχήμα2. 17 Διάγραμμα Πίεσης-Ovality για διαφορετικές αρχικές κατακόρυφες μετατοπίσεις

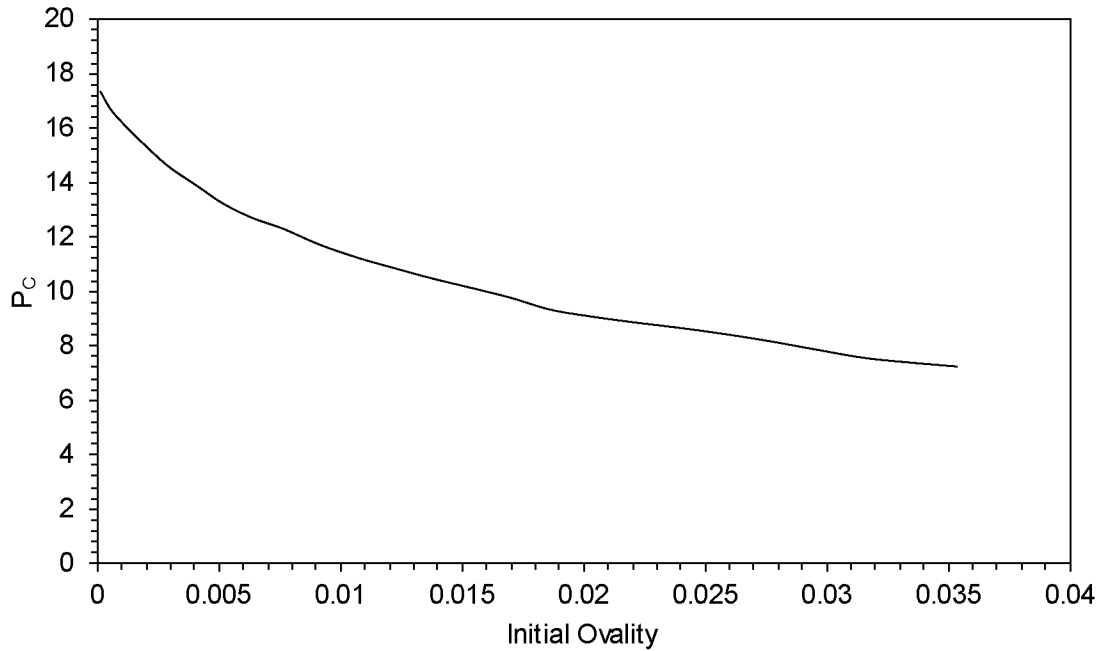
**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



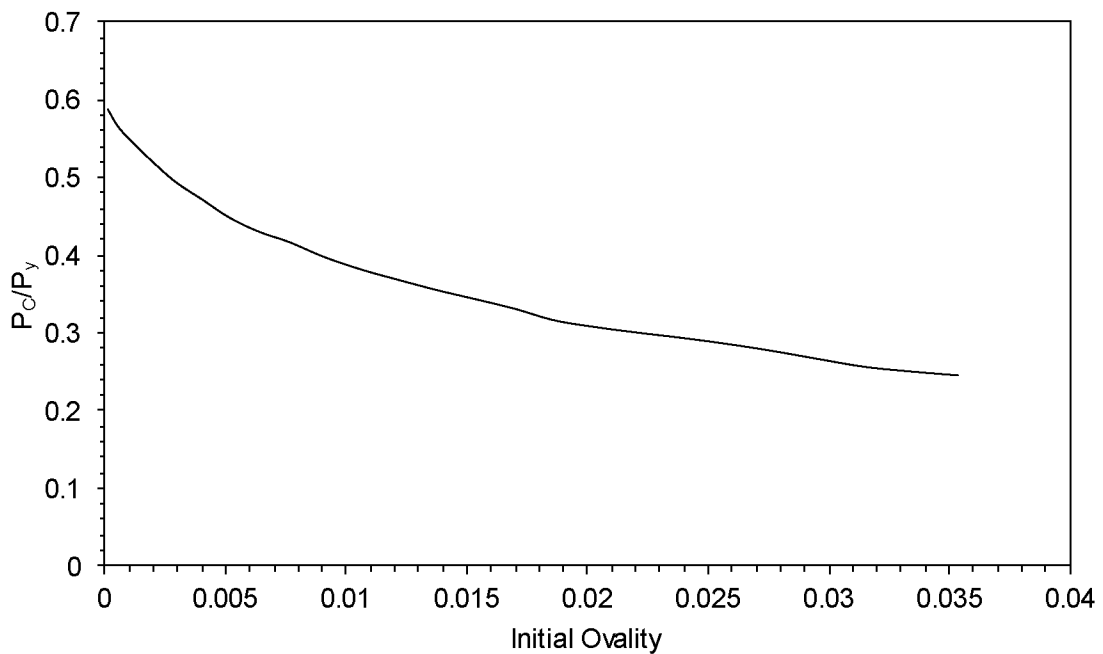
Σχήμα2. 18 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πίεσης – Ovality για διαφορετικές αρχικές κατακόρυφες μετατοπίσεις

Έτσι ολοκληρώνοντας τις κατάλληλες αναλύσεις στο ABAQUS για διαφορετικές τιμές της initial ovality κατασκευάσαμε το διάγραμμα που φαίνεται παρακάτω(**Σχήμα2. 19**). Όπως ήταν αναμενόμενο η Κρίσιμη Πίεση Κατάρρευσης P_c , επομένως και η αντοχή του δακτυλίου, μειώνεται αισθητά με την αύξηση της αρχικής οβαλότητας.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



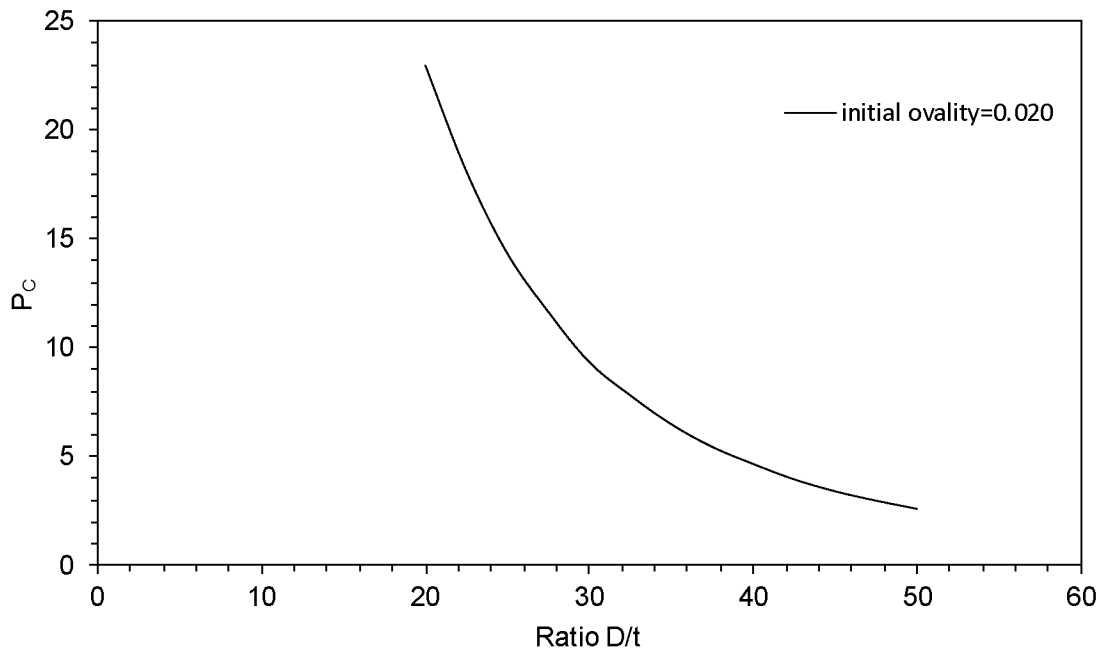
Σχήμα2. 19 Διάγραμμα Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης – Initial Ovality



Σχήμα2. 20 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης – Initial Ovality

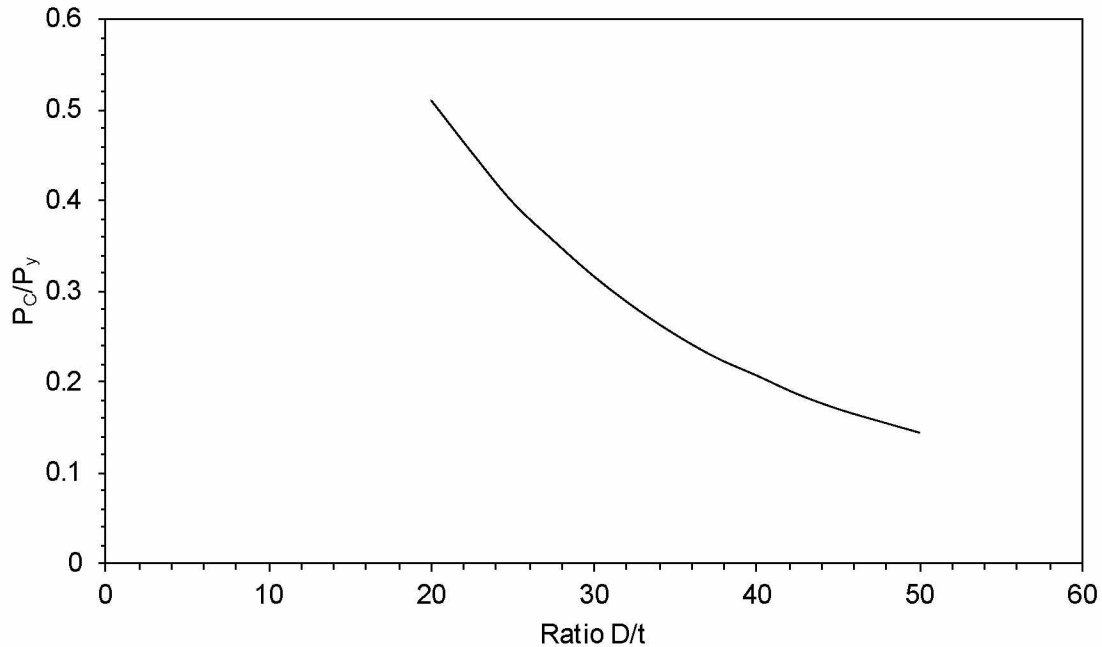
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Στη συνέχεια βασιζόμενοι στη θεωρία και συγκεκριμένα στους τύπους **(1. 4)** (διότι για αγωγούς όπου $\left(\frac{D}{t} \geq 30\right)$ ισχύει ότι $P_C = P_e$) και **(1. 6)**, όπου φαίνεται η Κρίσιμη Πίεση Κατάρρευσης να έχει κάποια εξάρτηση από τον λόγο $\frac{D}{t}$ κατασκευάσαμε το αντίστοιχο διάγραμμα. Αυτό έγινε κρατώντας σταθερή την εξωτερική διάμετρο του αγωγού στην τιμή $D = 914.4mm$ και μεταβάλλοντας το πάχος του. Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε πως για να μελετήσουμε αποκλειστικά μόνο την εξάρτηση της P_C από τον λόγο $\frac{D}{t}$ κρατήσαμε σταθερή την initial ovality στην τιμή 0.020. Από το **Σχήμα2. 21** παρατηρούμε πως η τιμή της Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης μειώνεται όσο ο λόγος $\frac{D}{t}$ αυξάνεται δηλαδή ο αγωγός γίνεται και πιο παχύς.



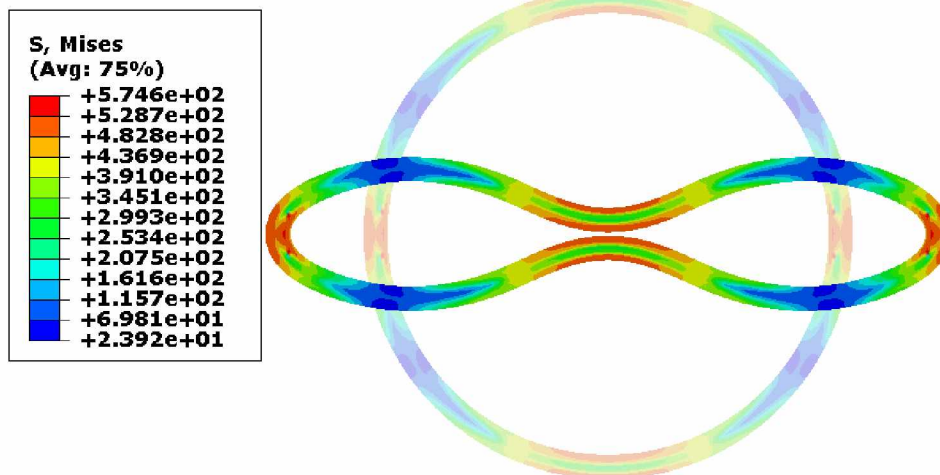
Σχήμα2. 21 Διάγραμμα Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης – Λόγος D/t

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



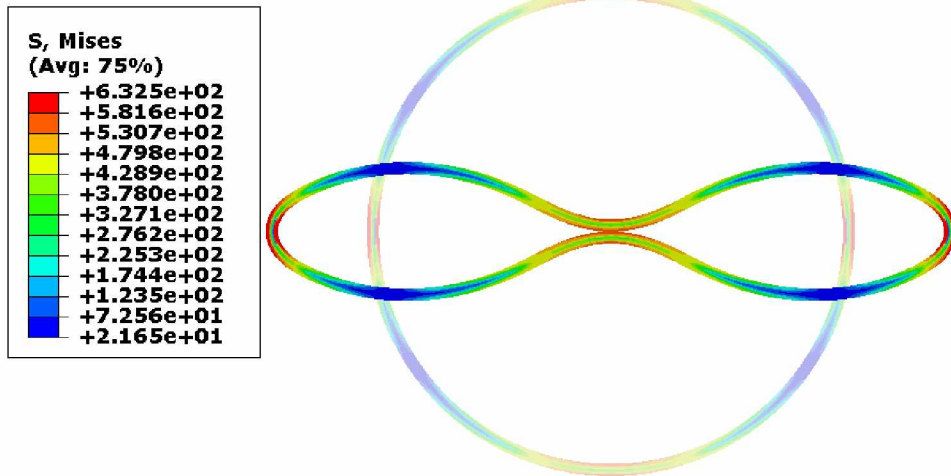
Σχήμα2. 22 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης – Λόγος D/t

Παρακάτω παρατίθενται μερικές εικόνες από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που δείχνουν την αρχική και την παραμορφωμένη κατάσταση του δακτυλίου στο τέλος της ανάλυσης για τους λόγους $\frac{D}{t} = 20$, $\frac{D}{t} = 40$ και $\frac{D}{t} = 50$.

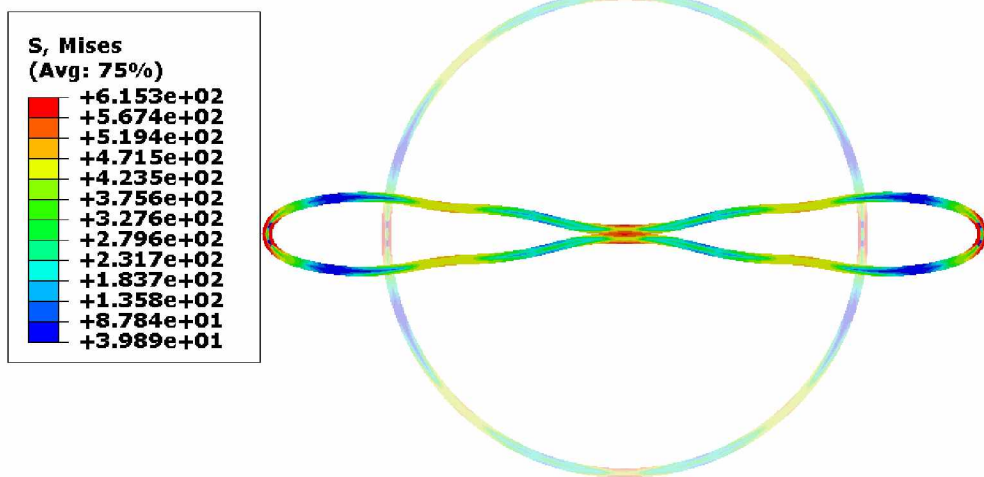


Σχήμα2. 23 Η αρχική και η τελική κατάσταση του δακτυλίου με λόγο D/t=20

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



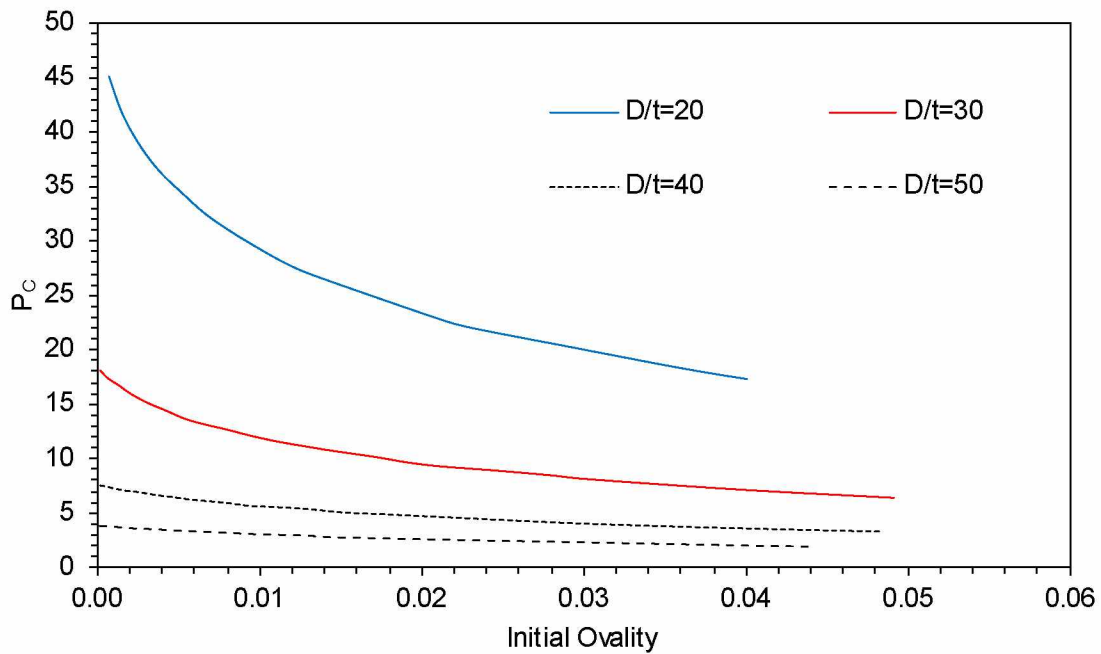
Σχήμα2. 24 Η αρχική και η τελική κατάσταση του δακτυλίου με λόγο $D/t=30$



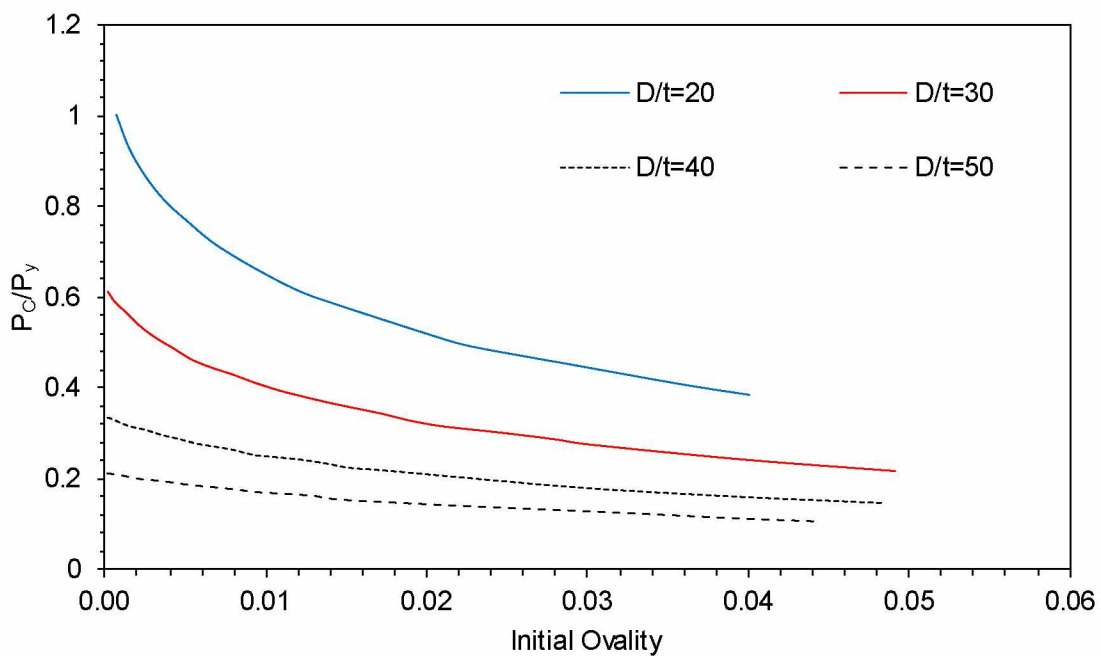
Σχήμα2. 25 Η αρχική και η τελική κατάσταση του δακτυλίου με λόγο $D/t=40$

Τέλος κατασκευάσαμε το διάγραμμα Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης- Initial
Ovality για διαφορετικές τιμές του λόγου $\frac{D}{t}$.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα2. 26 Διάγραμμα Κρίσιμη Πίεση Κατάρρευσης – Initial Ovality για διάφορες τιμές του λόγου D/t



Σχήμα2. 27 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Κρίσιμη Πίεση Κατάρρευσης – Initial Ovality για διάφορες τιμές του λόγου D/t

Αυτό που διαπιστώνουμε από το **Σχήμα2. 26** είναι πως η επίδραση της initial ovality γίνεται όλο και μικρότερη όσο ο λόγος $\frac{D}{t}$ μειώνεται δηλαδή όσο ο δακτύλιος γίνεται πιο λεπτός.

2.5 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ-ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

Μέχρι τώρα στις αναλύσεις μας ασχοληθήκαμε αποκλειστικά με καταστάσεις επίπεδης παραμόρφωσης. Για αυτό και η μοναδική φόρτιση που επιβάλλαμε στο σύστημά μας ήταν η ομοιόμορφη εξωτερική πίεση. Στο παρών κεφάλαιο όμως θα προσθέσουμε μία αξονική δύναμη στο δακτύλιό μας και θα μελετήσουμε την επίδραση της στην τιμή της Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης. Για να γίνει αυτό οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται η ανάλυση αλλάζουν από επίπεδη παραμόρφωση σε γενικευμένη επίπεδη παραμόρφωση(generalized plain strain).

Αρχικά αυτό το οποίο κάναμε ήταν να υπολογίσουμε σε θεωρητικό επίπεδο την μέγιστη αξονική δύναμη που μπορούμε να ασκήσουμε στον δακτύλιο χωρίς να φτάσουμε στην πλαστικοποίηση του σε ένα πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού. Ο υπολογισμός της μέγιστης δύναμης έγινε με την χρήση του τύπου:

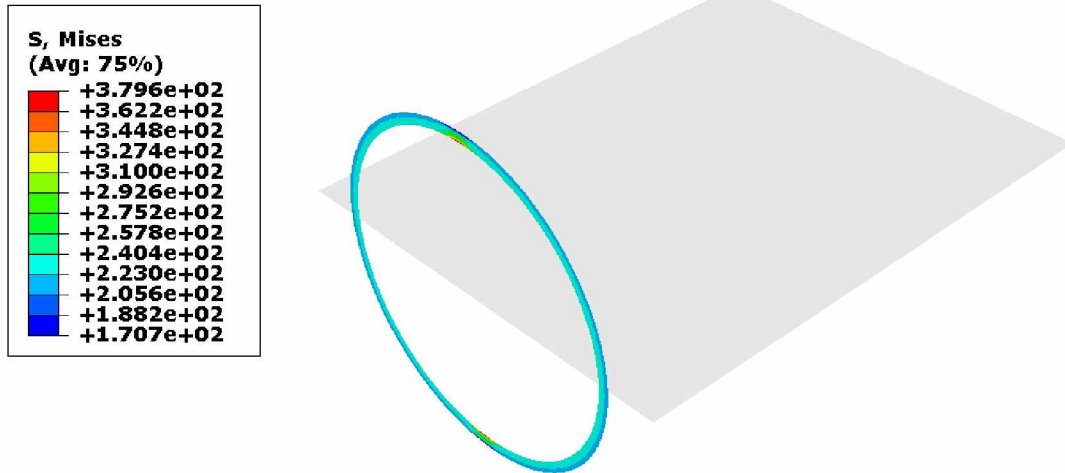
$$T_y = \sigma_y \cdot A \quad (2. 4)$$

Όπου σ_y είναι το όριο διαρροής του αγωγού και A είναι το εμβαδόν διατομής του δακτυλίου($A = \pi \cdot (R_{out} - R_{in})$). Εδώ απλά να υπενθυμίσουμε πως εφόσον τα μοντέλα που κατασκευάζουμε αποτελούν το ένα τέταρτο του δακτυλίου έτσι και η δύναμη που θα θεωρήσουμε θα αποτελεί το ένα τέταρτο αυτής που θα υπολογιστεί από την εξίσωση **(2. 4)**.

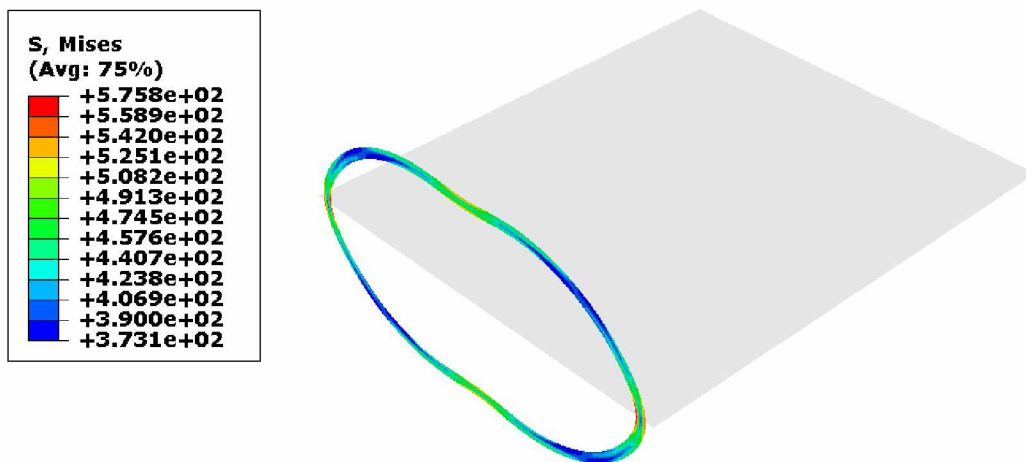
Επίσης κάτι άλλο που πρέπει να αναφέρουμε είναι πως η ανάλυση για τα μοντέλα της generalized plain strain ολοκληρώνεται σε 4 βήματα. Στο 3^ο βήμα εφαρμόζουμε στο μοντέλο του δακτυλίου μας διάφορα ποσοστά της μέγιστης αξονικής δύναμης T_y ενώ στο 4^ο εφαρμόζουμε την εξωτερική ομοιόμορφη πίεση

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

σύμφωνα με την μέθοδο Riks. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες φωτογραφίες από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ενός δακτυλίου με λόγο $\frac{D}{t} = 30$ στον οποίο εφαρμόζουμε αξονική δύναμη $T = 0.5 \cdot T_y$.

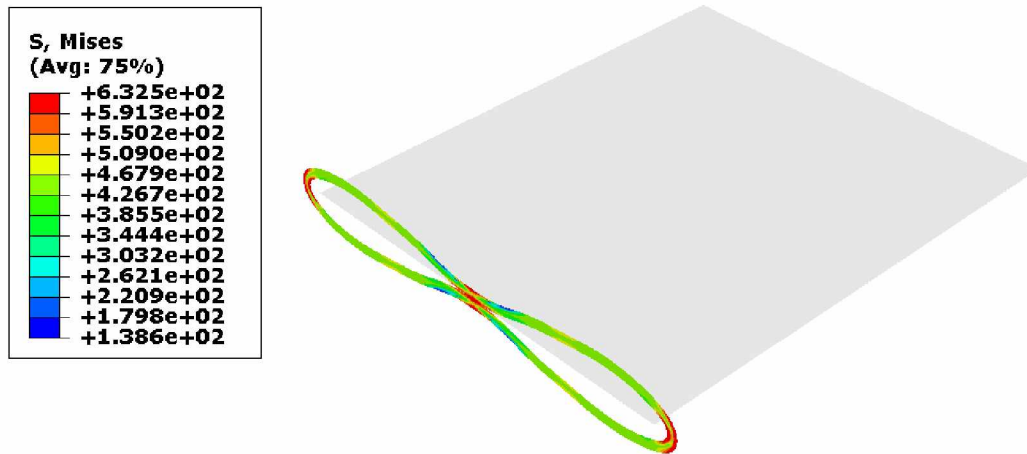


Σχήμα2. 28 Ο δακτύλιος πριν την επιβολή της εξωτερικής πίεσης για $T=0.5T_y$ και λόγο $D/t=30$



Σχήμα2. 29 Ο δακτύλιος κατά την κατάρρευσή του για $T=0.5T_y$ και λόγο $D/t=30$

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

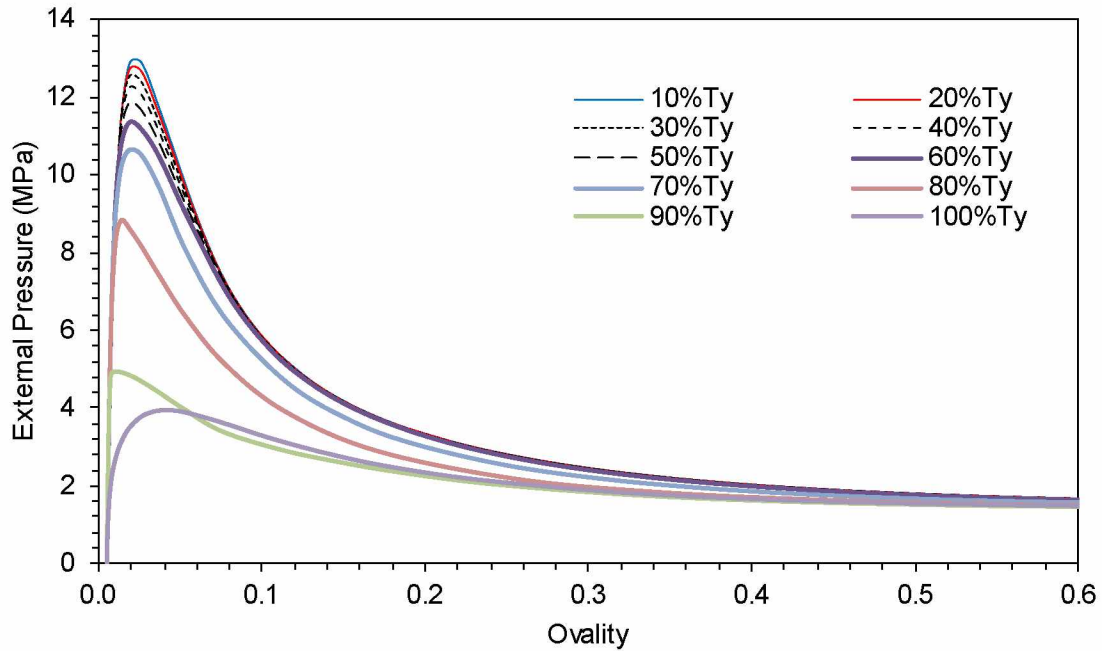


Σχήμα2. 30 Ο δακτύλιος κατά την ολική κατάρρευσή του για $T=0.5T_y$ και λόγο $D/t=30$

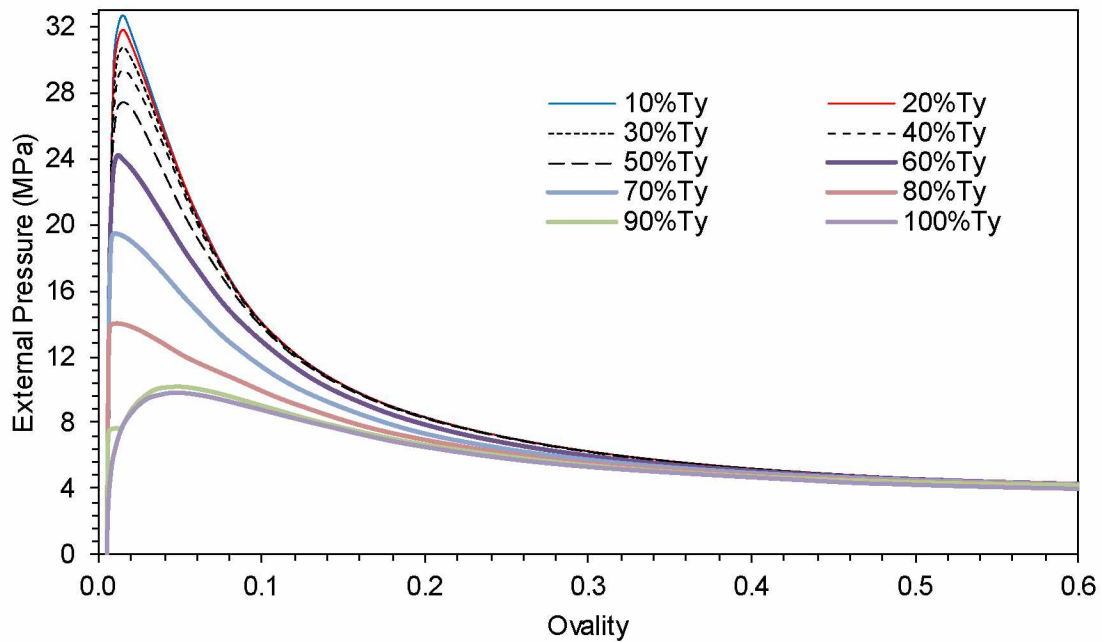
Στην συνέχεια επαναλάβαμε παρόμοια διαδικασία για δακτυλίους με διαφορετικό λόγο $\frac{D}{t}$. Να σημειώσουμε πως αλλάζοντας κάθε φορά τον λόγο $\frac{D}{t}$ θα πρέπει να υπολογίσουμε ξανά και την αντίστοιχη μέγιστη αξονική δύναμη που εφαρμόζεται στον δακτύλιο. Έτσι κατασκευάσαμε τα επόμενα διαγράμματα Πίεσης – Ovality για δακτυλίους με λόγο $\frac{D}{t} = 20, \frac{D}{t} = 30, \frac{D}{t} = 40$ στους οποίους εφαρμόσαμε ποσοστά της αντίστοιχης μέγιστης αξονικής πίεσης κάθε φορά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ακόμα πως και στις τρεις περιπτώσεις φροντίσαμε ώστε η initial ovality να είναι ίδια και ίση με την τιμή 0.0051 ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Αυτό το οποίο παρατηρούμε από τα παρακάτω διαγράμματα (**Σχήμα2. 31, Σχήμα2. 32, Σχήμα2. 33**) είναι πως όσο αυξάνεται η τιμή της αξονικής δύναμης που εφαρμόζουμε στον δακτύλιο τόσο μειώνεται η τιμή της Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης του δακτυλίου επομένως και η αντοχή του. Τέλος στο **Σχήμα2. 34** φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης πίεσης που αντέχει ο δακτύλιος σε σχέσης με την αξονική δύναμη που του ασκούμε.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

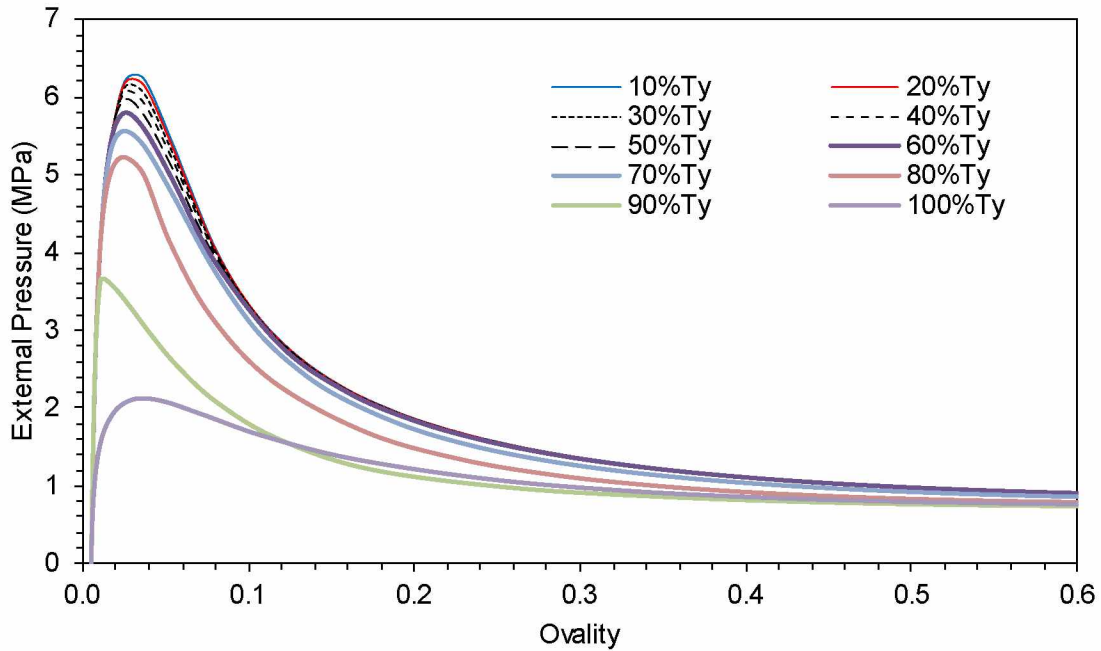


Σχήμα2. 31 Διάγραμμα Πίεσης – Ovality για λόγο D/t=30

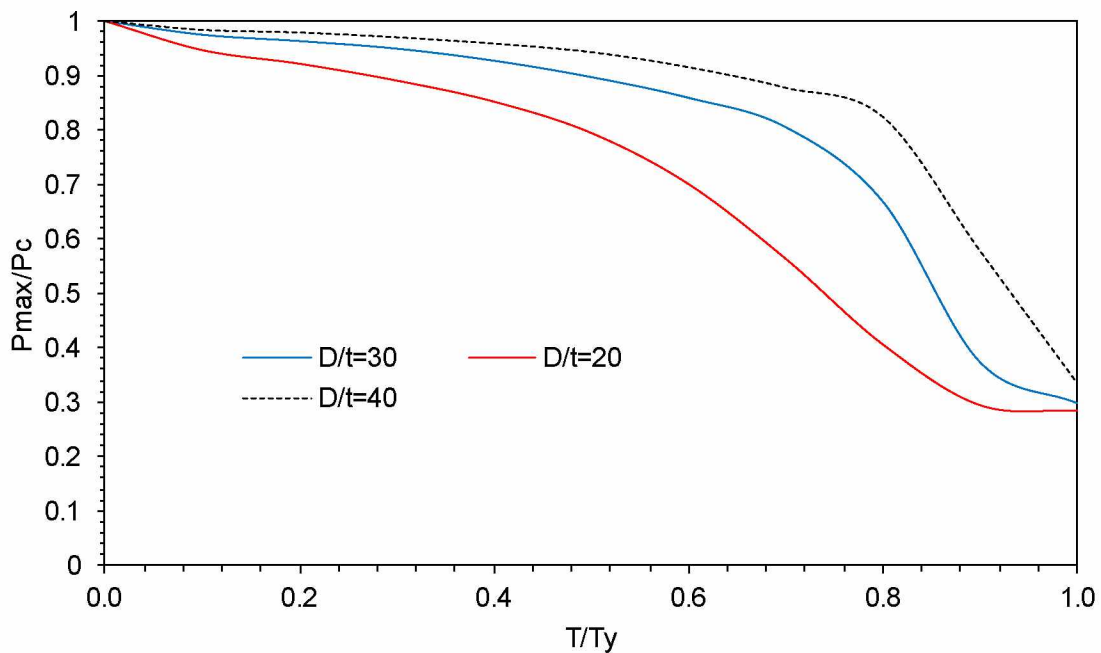


Σχήμα2. 32 Διάγραμμα Πίεσης – Ovality για λόγο D/t=20

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



Σχήμα2. 33 Διάγραμμα Πίεσης – Ovality για λόγο D/t=20



Σχήμα2. 34 Κανονικοποιημένο διάγραμμα Μέγιστης Πίεσης- Αξονικής Δύναμης

2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ **ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

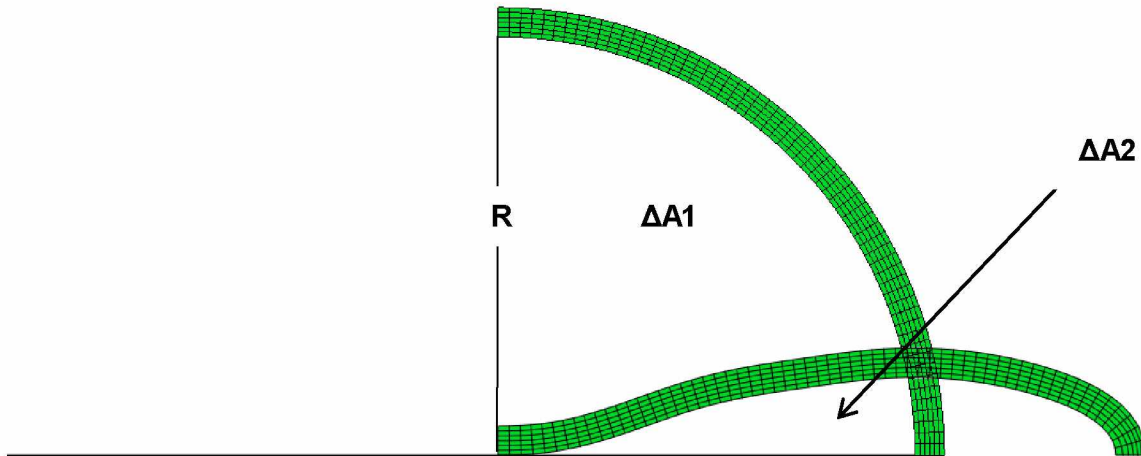
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία πρώτη προσέγγιση του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης μέσα από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την κατάρρευση των δακτυλίων υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Στόχος μας είναι να βρεθεί μία εκτίμηση της τιμής της πίεσης διάδοσης που αποτελεί το βασικότερο μέγεθος του φαινομένου.

Η συσχέτιση μεταξύ της κατάρρευσης ενός δακτυλίου και της διαδιδόμενης ύβωσης εξετάστηκε λεπτομερώς από τους Chater και Hutchinson οι οποίοι πρότειναν μία απλή θεωρία για τον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης χρησιμοποιώντας τον δρόμο ισορροπίας $P - \Delta A$ όπου ΔA είναι η μεταβολή του εμβαδού που περικλείεται από την εσωτερική επιφάνεια του δακτυλίου και τον άξονα X . Οι Chater και Hutchinson βασίστηκαν στην παραδοχή που ήδη έχουμε αναφέρει, πως η συμπεριφορά του δακτυλίου κατά την κατάρρευσή του σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης είναι παρόμοια με τον τρόπο που καταρρέουν οι διαδοχικές διατομές ενός αγωγού όταν τις διαπερνάει η ύβωση.

Επιπλέον η μεταβολή της τάσης σε κάθε σημείο της διατομής ενός αγωγού θεωρείται σχεδόν μονοτονική. Αυτό συνεπάγεται πως το έργο της εξωτερικής πίεσης το οποίο παράγεται κατά την παραμόρφωση της διατομής εξαρτάται μόνο από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση και από την τελική παραμορφωμένη και όχι από την διαδρομή που ακολουθήθηκε. Γνωρίζοντας ακόμα πως η πίεση διάδοσης έχει μία σχετικά σταθερή τιμή κατά την κατάρρευση των διαδοχικών διατομών του αγωγού το έργο της εξωτερικής πίεσης δίνεται από τον τύπο:

$$W = P_p \cdot (\Delta A_2 - \Delta A_1) \quad (2.5)$$

Με ΔA_1 να είναι η αρχική μεταβολή του εμβαδού του δακτυλίου και ΔA_2 η μεταβολή του εμβαδού στη τελική παραμορφωμένη κατάσταση όπως φαίνονται παρακάτω.



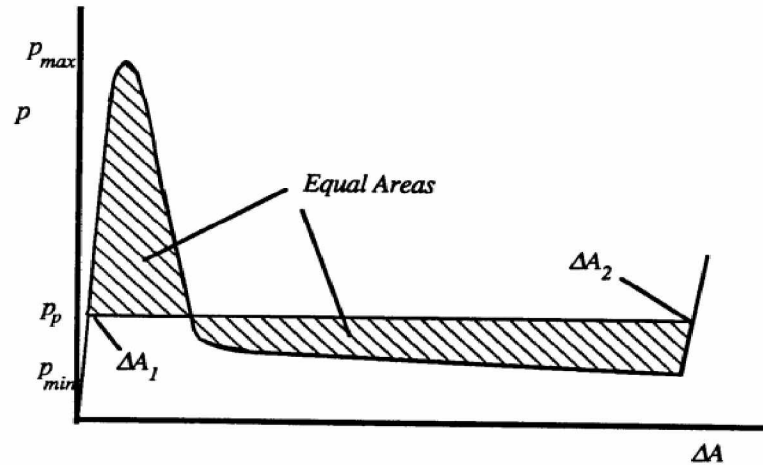
Σχήμα2. 35 Αρχικό και τελικό εμβαδόν του δακτυλίου

Σύμφωνα με την θεωρία της πλαστικής παραμόρφωσης το έργο αυτό είναι ίσο με το εμβαδόν που περικλείεται στην γραφική παράσταση $P - \Delta A$ μεταξύ των σημείων που αντιστοιχούν στην αρχική και στην τελική κατάσταση δηλαδή:

$$W = \int_{\Delta A_1}^{\Delta A_2} P \cdot d(\Delta A) \quad (2.6)$$

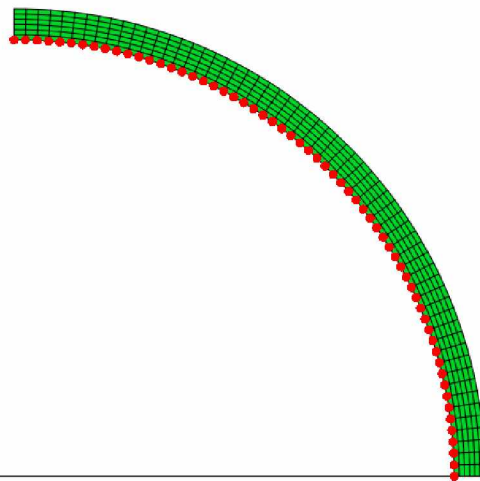
Εξισώνοντας λοιπόν τις σχέσεις **(2. 5)** και **(2. 6)** συμπεραίνουμε πως η πίεση διάδοσης μπορεί να υπολογιστεί χαράσσοντας μία γραμμή παράλληλη στον άξονα ΔA (Maxwell-line) ώστε το εμβαδόν κάτω από την γραμμή μεταξύ ΔA_1 και ΔA_2 να είναι ίσο με το εμβαδόν που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη $P - \Delta A$ μεταξύ των ίδιων τιμών του ΔA . (**Σχήμα2. 36**)

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα2. 36 Τυπικό διάγραμμα P-ΔA για έναν ελαστοπλαστικό δακτύλιο με αρχική ατέλεια (Katsounas_Tassoulas-OTRC-report)

Εμείς θα εργαστούμε πάλι με τον αρχικό μας δακτύλιο, με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $D = 914.4mm$ και $t = 30 mm$. Αρχικά εξαγάγαμε από το ABAQUS δεδομένα για τις συντεταγμένες των κόμβων της εσωτερικής επιφάνειας του δακτυλίου για κάθε χρονική στιγμή της ανάλυσης (**Σχήμα2. 37**).

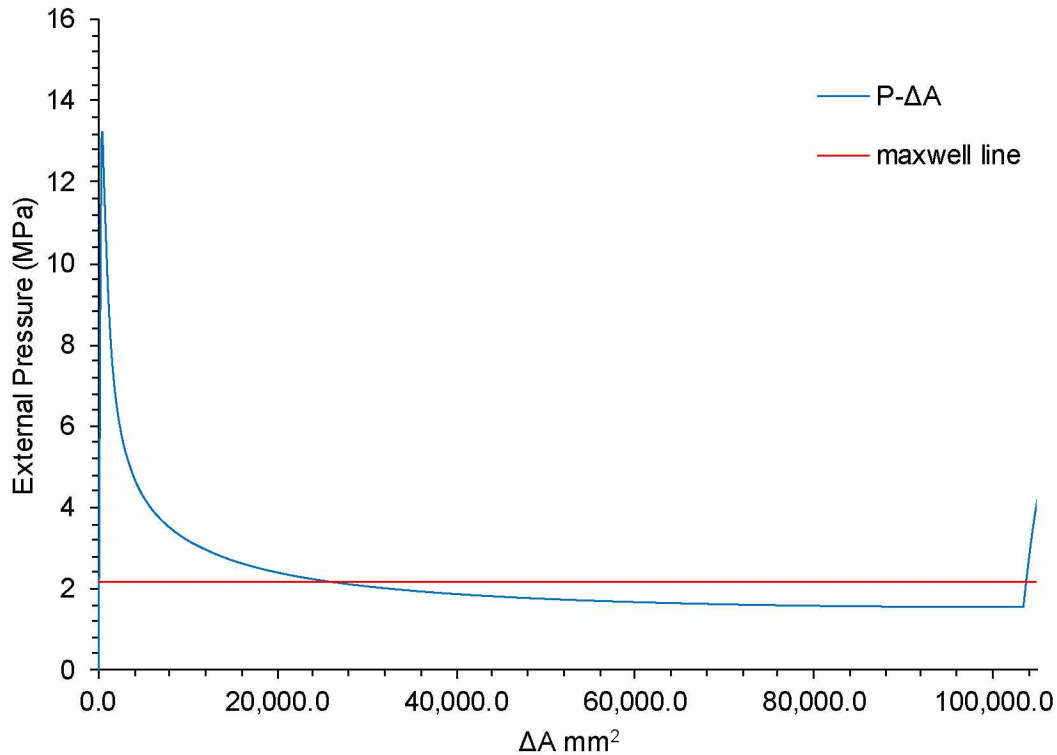


Σχήμα2. 37 Οι κόμβοι των οποίων οι συντεταγμένες χρησιμοποιήθηκαν στο excel

Στην συνέχεια τοποθετήσαμε τα δεδομένα μας σε ένα υπολογιστικό φύλλο στο excel όπου με μία απλή ολοκλήρωση η οποία βασίζεται στον κανόνα του τραπεζίου υπολογίσαμε το εμβαδόν του δακτυλίου κάθε χρονική στιγμή της

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

ανάλυσης. Επιπλέον υπολογίσαμε την μεταβολή του εμβαδού σε σχέση με το αρχικό εμβαδόν του δακτυλίου στην απαραμόρφωτη κατάσταση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

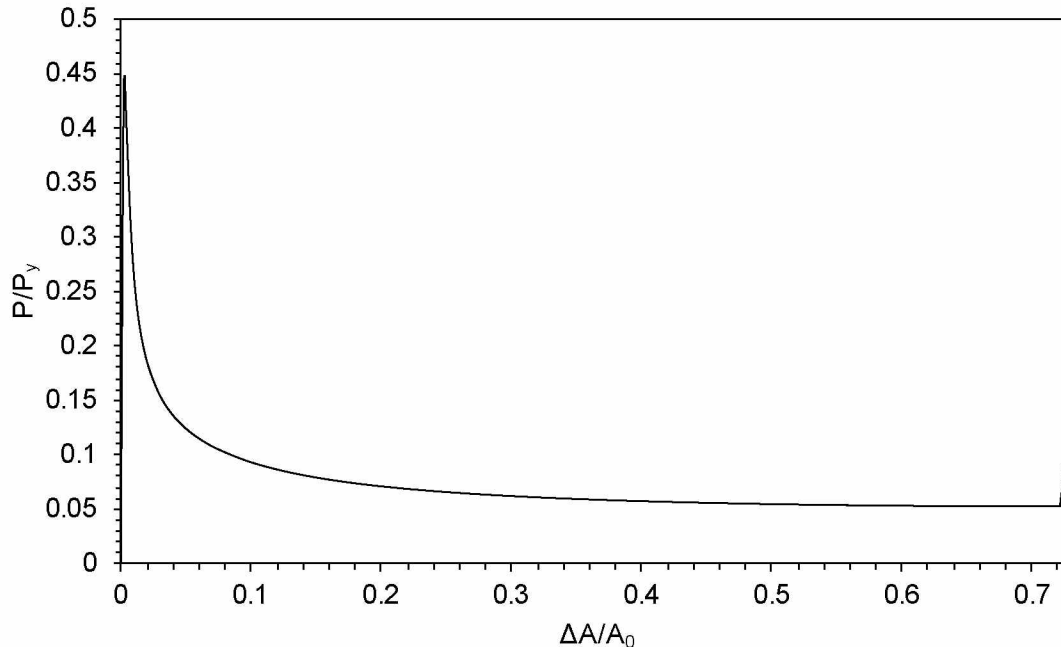


Σχήμα2. 38 Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής Εμβαδού στο οποίο φαίνεται και η Maxwell-line

Από το διάγραμμα αυτό βλέπουμε πως η τιμή της πίεσης διάδοσης η οποία προκύπτει από την διδιάστατη ανάλυση των δακτυλίων είναι:

$P_p = 2.17MP_a$. Στο επόμενο κεφάλαιο θα υπολογίσουμε την τιμή αυτή προσομοιώνοντας τρισδιάστατα μοντέλα αγωγών αλλά και με κάποιους θεωρητικούς τύπους που αναφέραμε στο 1^ο Κεφάλαιο και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

Ολοκληρώνοντας το παρών Κεφάλαιο παραθέτουμε και το Κανονικοποιημένο διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής Εμβαδού.



Σχήμα2. 39 Κανονικοποιημένο διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής Εμβαδού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσομοίωση τρισδιάστατων αγωγών μεγάλου μήκους κατά την διαμήκη διεύθυνση Z με σκοπό να υπολογιστεί η τιμή της πίεσης διάδοσης η οποία αποτελεί το βασικότερο μέγεθος του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης. Αφού βρεθεί η τιμή της πίεσης διάδοσης με την χρήση του ABAQUS θα συγκρίνουμε την τιμή αυτή με εκείνη που πήραμε από το διδιάστατο μοντέλο και με κάποιες τιμές οι οποίες προκύπτουν από θεωρητικούς τύπους. Ομοίως και σε αυτό το κεφάλαιο δεν προσομοιώνονται ολόκληροι οι αγωγοί αλλά εκμεταλλευόμενοι την διπλή συμμετρία του προβλήματος μόνο το ένα τέταρτο αυτών. Αυτό κάνει την ανάλυση πολύ πιο εύκολη και λιγότερο χρονοβόρα ιδιαίτερα όταν έχουμε αγωγούς μεγάλου μήκους και με πολύ πυκνό πλέγμα.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

Οι αναλύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο έγιναν με τρεις διαφορετικούς τύπους στοιχείων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά, μη γραμμικά, ελαστοπλαστικά, πεπερασμένα στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης, τύπου S4R (Shell Elements) οι κόμβοι των οποίων τοποθετούνται στην μεσαία επιφάνεια (Middle Surface). Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οκτακομβικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης τύπου C3D8R (Solid Elements) ενώ στο τέλος έγινε χρήση εικοσακομβικών στοιχείων μειωμένης ολοκλήρωσης τύπου C3D20R. Να αναφέρουμε πως και σε αυτό το κεφάλαιο ενεργοποιούμε την υποεντολή 'nlgeom' η οποία βρίσκεται στην εντολή 'step' στο ABAQUS για να ληφθούν υπ' όψιν οι γεωμετρικές μη γραμμικότητες που δημιουργούνται στον αγωγό λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που υφίσταται.

3.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑ

Ο αγωγός ο οποίος χρησιμοποιείται έχει διάμετρο $D = 914.4mm$ πάχος $t = 30mm$ και μήκος κατά τον διαμήκη άξονα Z $L = 20 \cdot D = 18288mm$ και για τα τρία διαφορετικά στοιχεία τα οποία μελετήθηκαν. Το υλικό του αγωγού είναι χάλυβας grade X_{65} παρόμοια με το προηγούμενο κεφάλαιο.

Όσον αφορά το πλέγμα αυτό διαφέρει μεταξύ των τριών διαφορετικών στοιχείων. Αυτό συμβαίνει διότι η ανάλυση με solid elements ,σε πρώτη φάση με C3D8R και ακόμη περισσότερο με C3D20R, είναι πολύ πιο χρονοβόρα από ότι με shell elements. Επίσης υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις δυνατότητες του εκάστοτε ηλεκτρονικού υπολογιστή. Πρέπει όμως να υπογραμμίσουμε την σημαντικότητα του πλέγματος στην καλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έτσι λοιπόν έχουμε:

- **Shell Elements S4R**

Το πλέγμα μας εδώ αποτελείται από 6000 στοιχεία εκ των οποίων 20 είναι στην περιφερειακή διεύθυνση και 300 κατά την διαμήκη.

- **Solid Elements C3D8R**

Το πλέγμα εδώ αποτελείται από 24000 στοιχεία εκ των οποίων 20 είναι στην περιφερειακή διεύθυνση 300 κατά την διαμήκη και 4 κατά το πάχος.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

- **Solid Elements C3D20R**

Το πλέγμα εδώ αποτελείται από 5600 στοιχεία εκ των οποίων 20 είναι στην περιφερειακή διεύθυνση 70 κατά την διαμήκη και 4 κατά το πάχος.

Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν τόσα πολλά C3D8R στοιχεία είναι για να πετύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στην τιμή της πίεσης διάδοσης. Ενώ ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν τόσα C3D20R στοιχεία είναι επειδή είναι τα πιο υπολογιστικά επίτινα.

3.2.2 ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Τα βήματα της ανάλυσης είναι τα ίδια τα οποία ακολουθήθηκαν και στην περίπτωση του διδιάστατου μοντέλου. Αναλυτικότερα:

Στο 1ο step δίνουμε μία αρχική κατακόρυφη μετατόπιση στον ανώτερο κόμβο του αριστερού άκρου του αγωγού.

Στο 2ο step γίνεται άρση αυτής της μετατόπισης.

Τέλος, στο 3ο step εφαρμόζουμε ομοιόμορφη εξωτερική πίεση στον αγωγό.

Για τις συνοριακές συνθήκες τώρα αυτές δημιουργούνται στο initial step της ανάλυσης και παραμένουν ενεργές μέχρι και το τέλος της ανάλυσης (σε αντίθεση με την μετατόπιση η οποία δημιουργείται στο 1^ο step και γίνεται ανενεργή στο 2^ο). Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος είναι οι εξής:

- **ΣΥΝΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ X-SYMM**

Η άνω γενέτειρα του αγωγού παρουσιάζει συμμετρία ως προς τον άξονα X . Αυτό δηλώνεται στο ABAQUS με την εντολή x-symm η οποία ουσιαστικά δεσμεύει την μετατόπιση κατά τον άξονα X και τις στροφές ως προς τους άξονες Y και Z . Ισχύει δηλαδή ότι:

$$U_1 = UR_2 = UR_3 = 0$$

- **ΣΥΝΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ Y-SYMM**

Η κάτω γενέτειρα του αγωγού παρουσιάζει συμμετρία ως προς τον άξονα Y . Αυτό δηλώνεται στο ABAQUS με την εντολή y-symm η οποία

ουσιαστικά δεσμεύει την μετατόπιση κατά τον άξονα Y και τις στροφές ως προς τους άξονες X και Z . Ισχύει δηλαδή ότι:

$$U_2 = UR_1 = UR_3 = 0$$

- **ΣΥΝΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ Z-SYMM**

Το δεξί και το αριστερό άκρο του αγωγού παρουσιάζουν συμμετρία ως προς τον άξονα Z . Αυτό δηλώνεται στο ABAQUS με την εντολή z-symm η οποία ουσιαστικά δεσμεύει την μετατόπιση κατά τον άξονα Z και τις στροφές ως προς τους άξονες X και Y . Ισχύει δηλαδή ότι:

$$U_3 = UR_1 = UR_2 = 0$$

- **ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΑΦΗΣ**

Επειδή κατά την κατάρρευση ενός αγωγού οι εσωτερικές επιφάνειες του έρχονται σε επαφή, πρέπει να προσομοιώσουμε αυτή την επαφή χωρίς να χρειαστεί να κατασκευάσουμε όλο τον αγωγό. Για να το επιτύχουμε αυτό προσθέσαμε μία αναλυτική επιφάνεια η οποία έχει τα χαρακτηριστικά άκαμπτου σώματος (analytical rigid surface). Για να είμαστε σίγουροι πως η επιφάνεια αυτή δεν θα μετακινηθεί δημιουργήσαμε ένα σημείο αναφοράς (Reference Point) πάνω σε αυτή στο οποίο δεσμεύσαμε όλες τις μετατοπίσεις και στροφές. Έτσι όλα τα σημεία της επιφάνειας έχουν τις ίδιες ιδιότητες με το σημείο αναφοράς. Ισχύει δηλαδή ότι:

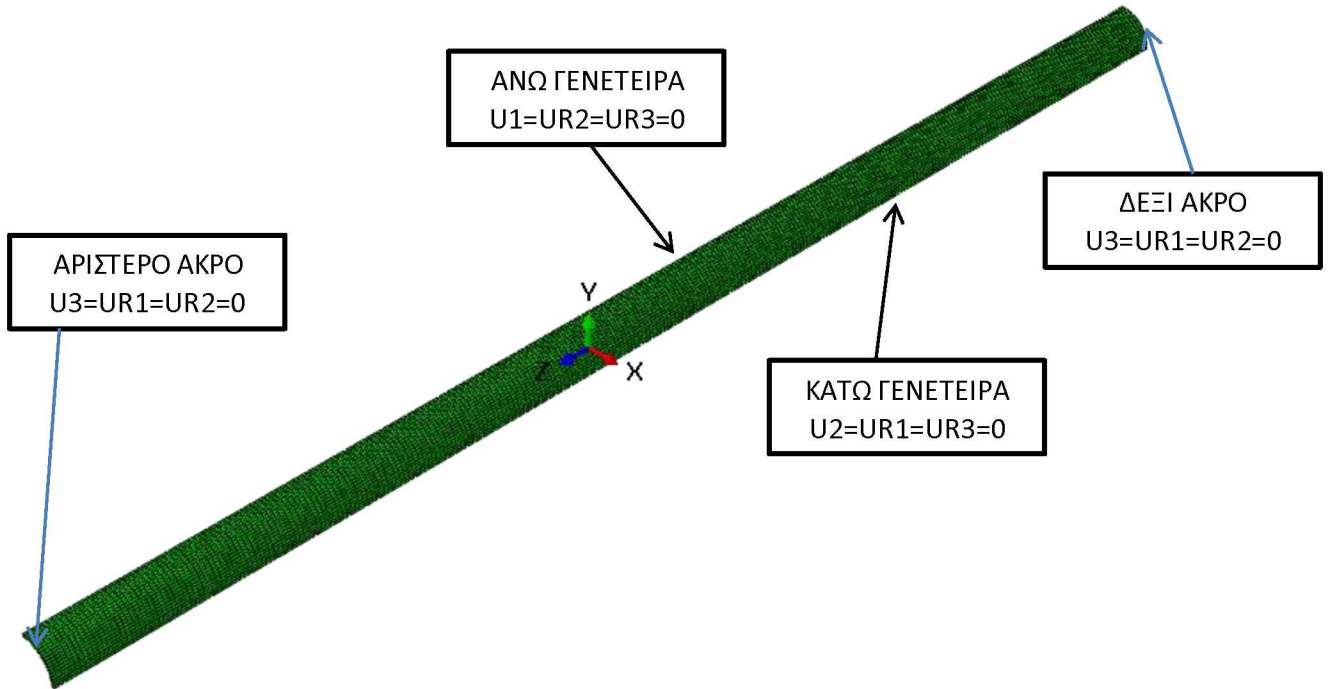
$$U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$$

Εδώ όμως υπάρχει μία διαφορά ανάμεσα στην προσομοίωση με shell elements και με solid. Στο σημείο αυτό να υπενθυμίσουμε πως τα shell elements τοποθετούνται στην μεσαία επιφάνεια. Επομένως όταν θα γίνει η επαφή μεταξύ της analytical rigid surface και του αγωγού, η κάτω επιφάνεια του αγωγού θα έχει μετατοπιστεί περισσότερο από το επιθυμητό κατά το μισό του πάχους. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται ανασηκώνοντας την αναλυτική επιφάνεια μόνο για την περίπτωση των shell elements κατά το μισό του πάχους.

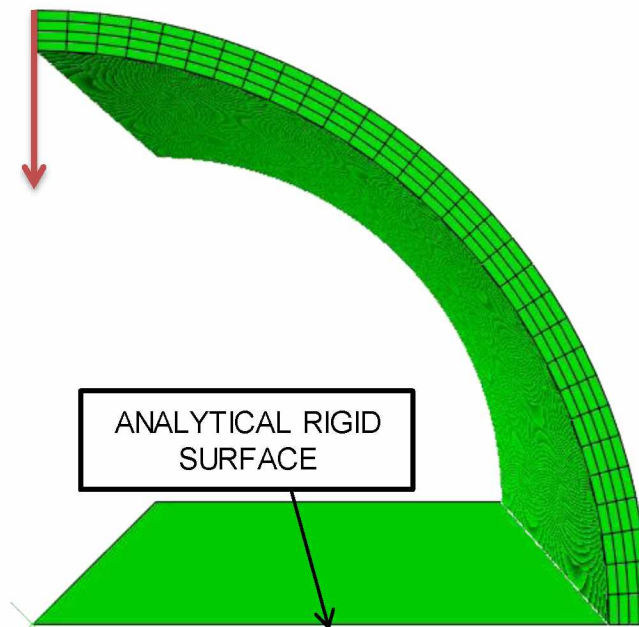
Με την χρήση της υποεντολής 'contact pair' που βρίσκεται στην εντολή 'interaction' εμποδίζονται οι κόμβοι της άνω γενέτειρας να εισέλθουν μέσα στην αναλυτική επιφάνεια.

Οι συνοριακές συνθήκες που μόλις αναφέρθηκαν καθώς και η αρχική μετατόπιση φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

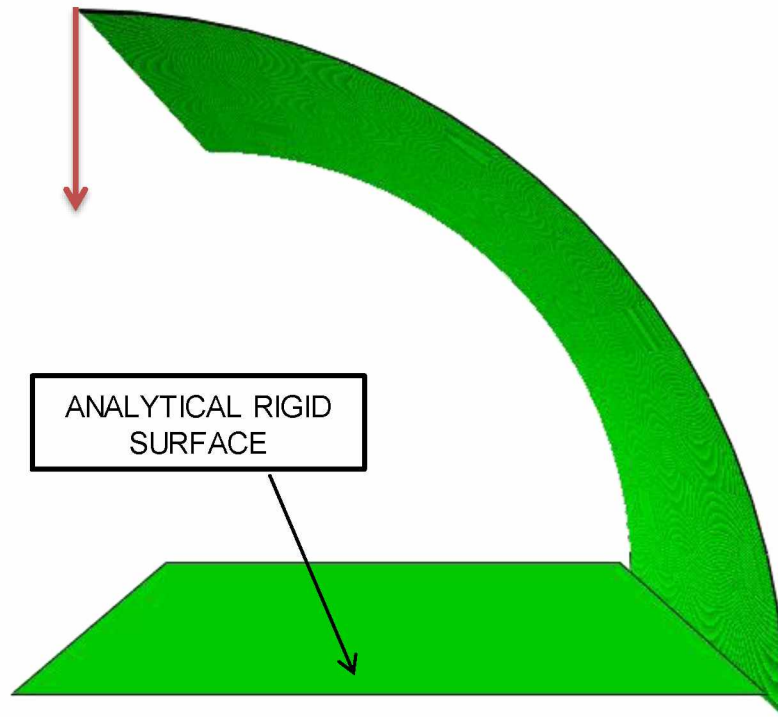


Σχήμα3. 1 Συνοριακές Συνθήκες του αγωγού



Σχήμα3. 2 Στο σχήμα απεικονίζεται ο αγωγός κατασκευασμένος με solid elements η αρχική μετατόπιση που δίνεται στον άνω κόμβο και η αναλυτική επιφάνεια

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα3. 3 Στο σχήμα απεικονίζεται ο αγωγός κατασκευασμένος με shell elements η αρχική μετατόπιση που δίνεται στον άνω κόμβο και η υπερυψωμένη αναλυτική επιφάνεια

3.2.3 ΑΡΧΙΚΗ ΑΤΕΛΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο η αρχική ατέλεια στον αγωγό μας έχει την μορφή μίας μικρής παραμένουσας πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτή δημιουργείται με την άρση της αρνητικής κατακόρυφης μετατόπισης που επιβάλλεται στον πάνω αριστερά κόμβο της άνω γενέτειρας όπως φαίνεται στο **Σχήμα3. 2**. Η τιμή της μετατόπισης αυτής είναι $U_2 = -15 \text{ mm}$.

Τέλος στο τρίτο βήμα της ανάλυσης εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση σύμφωνα με την μέθοδο τόξου (Riks method).

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ **ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

3.3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Πριν γίνει αυτό θα πρέπει όμως να υπολογίσουμε την τιμή της πίεσης διάδοσης σε θεωρητικό επίπεδο με βάση τους τύπους που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 1.

- **API RP 1111**

Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με το πρότυπο API RP 1111 δίνεται από τον τύπο **(1. 9)**. Έτσι υπολογίζουμε την τιμή $P_p = 2.9634MP_a$

- **DNVGL-ST-F101**

Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με το πρότυπο DNVGL-ST-F101 δίνεται από τον τύπο **(1. 7)** όπου $\alpha_{fab} = 0.93$. Έτσι υπολογίζουμε την τιμή $P_p = 2.8558MP_a$

- **Kyriakides & Babcock (1982)**

Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με τους Kyriakides & Babcock δίνεται από τον τύπο **(1. 10)** όπου για τον χαλύβδινο αγωγό μας ισχύει ότι $A = 14.5$ και $\beta = 2.254$. Έτσι υπολογίζουμε την τιμή $P_p = 2.9485MP_a$

- **Palmer & Martin (1975)**

Η πίεση διάδοσης σύμφωνα με τους Palmer & Martin δίνεται από τον τύπο **(1. 11)**. Έτσι υπολογίζουμε την τιμή $P_p = 1.5209MP_a$

Αυτό το οποίο παρατηρούμε είναι πως υπάρχει μία μικρή απόκλιση ανάμεσα στους θεωρητικούς τύπους, ενώ υπάρχει μεγάλη απόκλιση στην τιμή που προκύπτει από τον τύπο των Palmer & Martin. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί στην σχέση των Palmer & Martin δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι αξονικές

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

παραμορφώσεις που δέχεται ο αγωγός κατά την κατάρρευσή του ούτε και η κράτυνση του υλικού. Για τον λόγο αυτό η τιμή που δίνεται από την συγκεκριμένη εξίσωση είναι σημαντικά μικρότερη από τις υπόλοιπες. Η σχέση του Palmer & Martin δεν θα αποτελέσει μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα που θα πάρω από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Στην συνέχεια θα συγκρίνουμε αυτές τις τιμές με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το ABAQUS. Για να μπορέσουμε όμως να υπολογίσουμε την πίεση διάδοσης θα πρέπει να κατασκευάσουμε τον δρόμο ισορροπίας για τα μοντέλα μας. Για τον σκοπό αυτό χρειαζόμαστε μία συνεχώς αυξανόμενη ποσότητα η οποία να χαρακτηρίζει την μεταβολή της γεωμετρίας του αγωγού. Στην περίπτωση των τρισδιάστατων μοντέλων η ποσότητα αυτή είναι η μεταβολή του όγκου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται λεπτομερώς η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του όγκου του αγωγού για κάθε χρονική στιγμή.

3.3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε τον όγκο ο οποίος περικλείεται μεταξύ του σωλήνα μας και του επιπέδου $X - Z$. Ο όγκος ενός αγωγού μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας την εξίσωση της επιφάνειας κατά τον μήκος του αγωγού. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$V = \int_{A_0}^{A_1} A(x) dx \quad (3. 1)$$

Όπου $A(x)$ είναι η συνάρτηση του εμβαδού της επιφάνειας κατά την διαμήκη διεύθυνσή του. Αν καταφέρναμε να υπολογίσουμε επομένως τις τιμές όλων των διαδοχικών διατομών του αγωγού, όπως αυτές δημιουργούνται με βάση το πλέγμα, τότε εφαρμόζοντας τον κανόνα του τραπεζίου κατά το μήκος του σωλήνα θα παίρναμε τον όγκο του σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$V = \sum_1^n (A_n + A_{n+1}) \cdot \frac{h}{2} \quad (3. 2)$$

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Με το βήμα h να είναι η απόσταση μεταξύ των γειτονικών διατομών του αγωγού, ίσο δηλαδή με το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος στην διαμήκη διεύθυνση. Προφανώς όσο πυκνότερο το πλέγμα τόσο πιο ακριβή τα αποτελέσματα. Επίσης να υπενθυμίσουμε πως το βήμα h δεν είναι ίδιο και τις 3 αναλύσεις μας καθώς το πλέγμα είναι διαφορετικό όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

Επομένως αυτό που απομένει είναι υπολογιστεί το εμβαδόν όλων των διατομών του δακτυλίου. Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε πως υπολογίζεται το εμβαδόν ενός δακτυλίου παίρνοντας από το ABAQUS τις συντεταγμένες όλων των κόμβων της εσωτερικής πλευράς του δακτυλίου και βάζοντας αυτές σε ένα υπολογιστικό φύλλο στο excel, όπου εκεί χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου πήραμε το εμβαδόν του δακτυλίου για όλες τις χρονικές στιγμές. Δεδομένου πως η συμπεριφορά ενός δακτυλίου κατά την κατάρρευση του είναι παρόμοια με αυτή των διαδοχικών διατομών του αγωγού όταν τις διαπερνάει η ύβωση, ακολουθήσαμε την ίδια στρατηγική για τον υπολογισμό του εμβαδού της πρώτης διατομής του σωλήνα μας. Το να υπολογίσουμε όμως με αυτόν τον τρόπο κάθε διατομή του αγωγού θα ήταν πολύ χρονοβόρο.

Συνδυάσαμε λοιπόν την μεταβολή του εμβαδού μίας διατομής του αγωγού με την κατακόρυφη μετατόπιση του κόμβου που βρίσκεται στην άνω γενέτειρά του για κάθε χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα3. 4 Διάγραμμα Εμβαδού Διατομής – Μετατόπιση του κόμβου της Άνω Γενέτειρας

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Στη συνέχεια αυτό που κάναμε ήταν να βασιστούμε στο γεγονός πως κάθε διατομή του σωλήνα κατά το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης καταρρέει όπως και η προηγούμενη της. Έτσι λοιπόν με βάση το διάγραμμα του σχήματος **Σχήμα3. 4** μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα το εμβαδόν κάθε διατομής του αγωγού καθώς το μόνο που χρειάζεται να γνωρίζουμε είναι η μετατόπιση του κόμβου της διατομής ο οποίος βρίσκεται στην άνω γενέτειρα του αγωγού.

Τέλος αφού τοποθετήσαμε τα αποτελέσματα που πήραμε για το εμβαδόν όλων των διατομών του αγωγού για κάθε χρονική στιγμή σε ένα πρόγραμμα excel, χρησιμοποιώντας τον τύπο **(3. 2)** υπολογίσαμε τον όγκο του αγωγού για κάθε χρονική στιγμή.

3.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

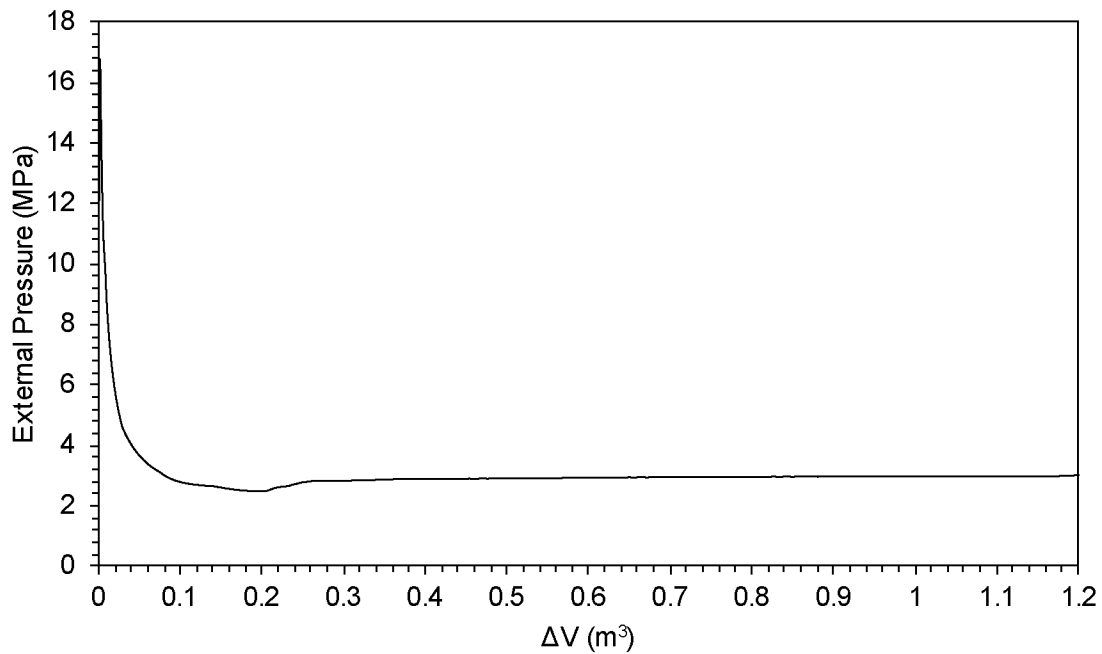
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ο υπολογισμός της πίεσης διάδοσης με βάση τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ABAQUS. Για να γίνει αυτό θα κατασκευάσουμε τον δρόμο ισορροπίας $P - \Delta V$ και για τους τρεις αγωγούς που προσομοιώσαμε.

- SHELL ELEMENTS S4R

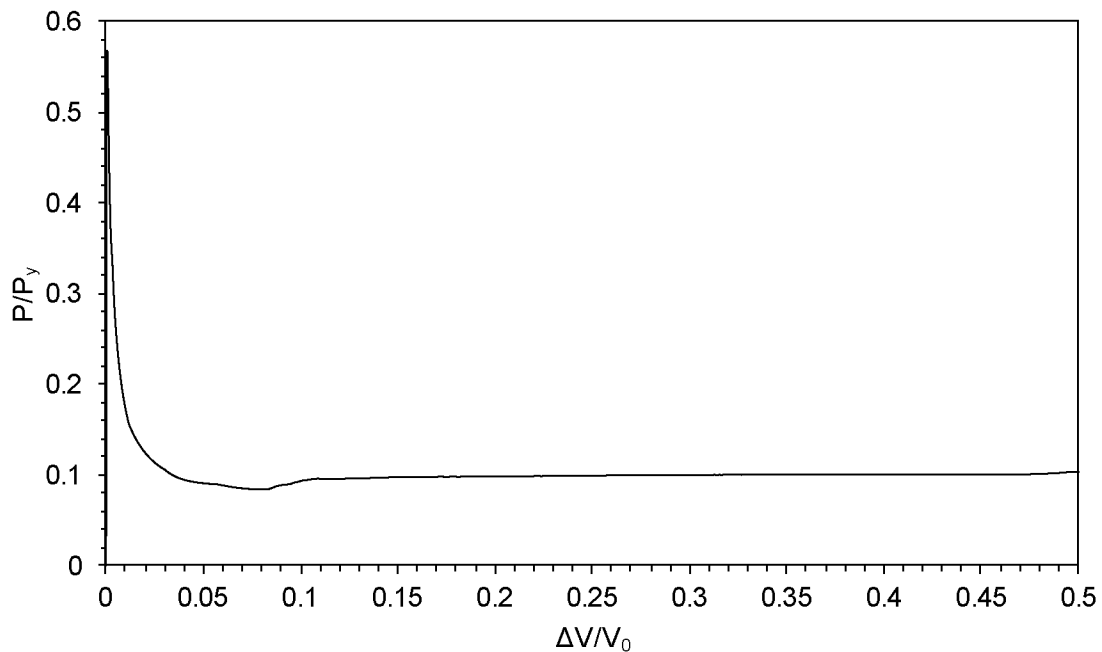
Το διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του όγκου φαίνεται στα παρακάτω σχήματα(**Σχήμα3. 5**, **Σχήμα3. 6**). Επίσης παραθέτουμε και το Κανονικοποιημένο αντίστοιχο διάγραμμα.

Η μελέτη και η κατανόηση των διαγραμμάτων αυτών μας βοηθάει να βγάλουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρούμε πως η πίεση αφού φτάσει στην μέγιστη τιμή της πέφτει απότομα μέχρι ένα ορισμένο σημείο που παίρνει την ελάχιστη τιμή της και στην συνέχεια αφού αυξηθεί ελάχιστα σταθεροποιείται σε μία τιμή με κάποιες μικρές αυξομειώσεις. Το σημείο όπου η τιμή της πίεσης αυξάνει λίγο μετά την ελάχιστη τιμή της είναι το σημείο όπου γίνεται η πρώτη επαφή μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών του αγωγού. Η σταθερή τιμή την οποία αποκτά μετά η πίεση είναι και η τιμή της πίεσης διάδοσης. Η τιμή της πίεσης διάδοσης για τον αγωγό με shell elements S4R είναι $P_p = 2.912MP_a$. Αυτή η τιμή θεωρούμε πως είναι αρκετά κοντά σε εκείνες που υπολογίστηκαν από τους θεωρητικούς τύπους. Επίσης βλέπουμε πως η πίεση διάδοσης αποτελεί περίπου το 17.3% της Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης του αγωγού. Αυτό δείχνει και πρακτικά πως αρκεί μία πολύ μικρή τιμή της εξωτερικής πίεσης για να καταστραφούν μεγάλα τμήματα του αγωγού όπως ήδη έχουμε αναφέρει.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



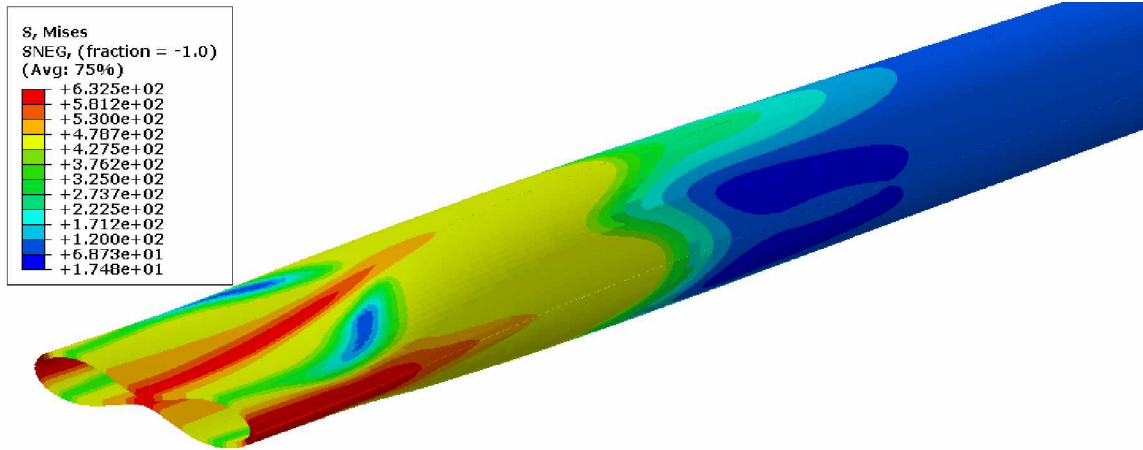
Σχήμα3. 5 Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με shell elements S4R



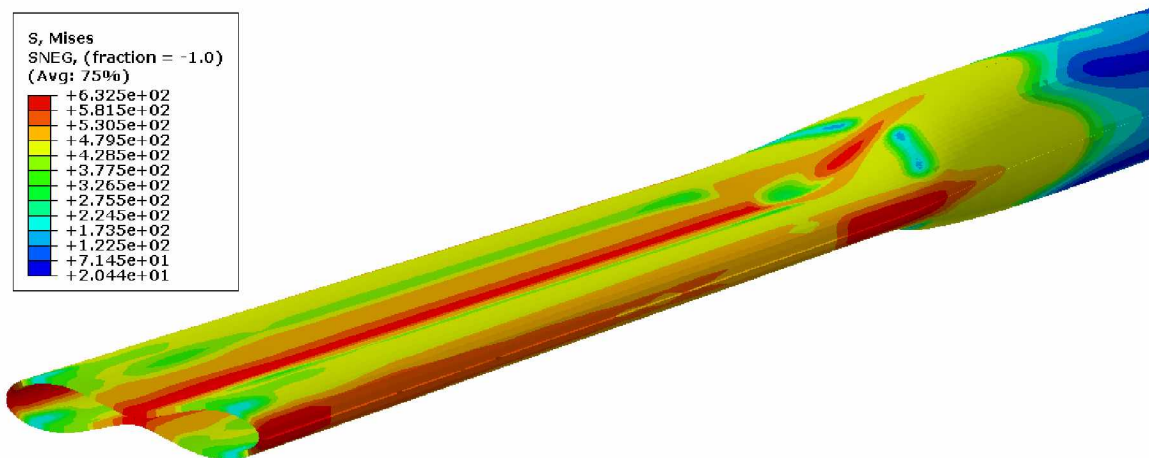
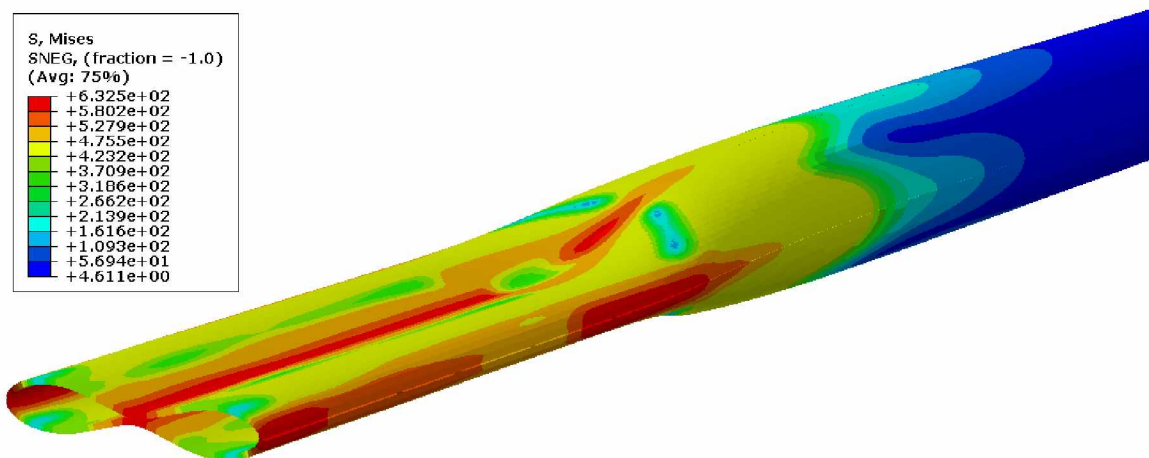
Σχήμα3. 6 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με shell elements S4R

Παρακάτω απεικονίζεται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης στο αγωγό που μελετάμε.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα3. 7 Η στιγμή της πρώτης επαφής των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού

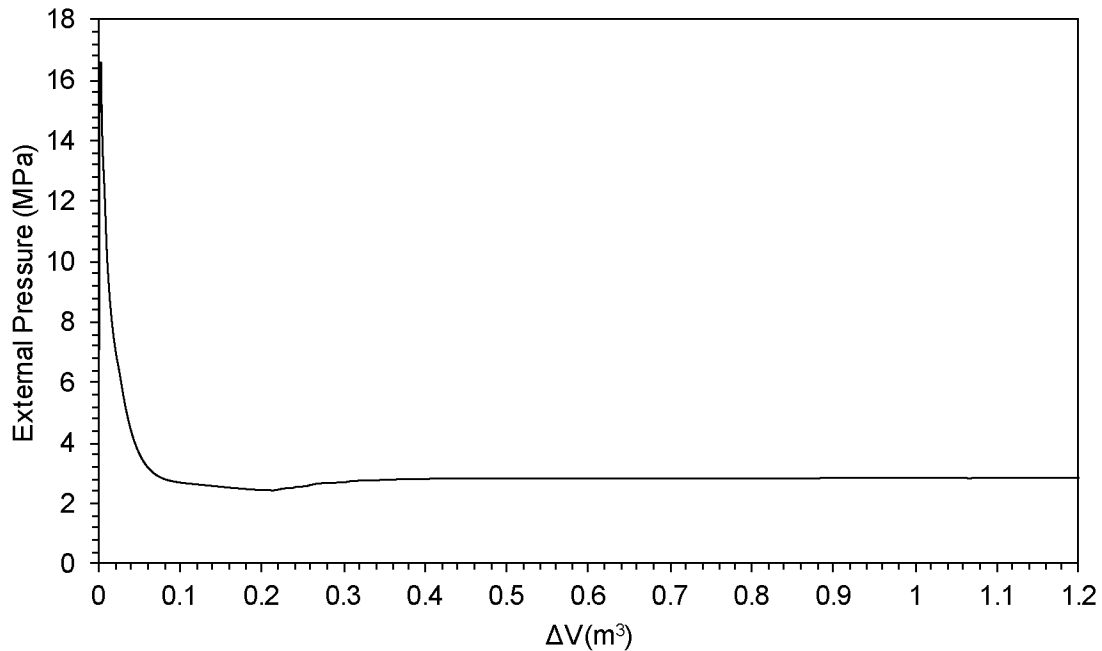


Σχήμα3. 8 Διάδοση της ύβωσης στον αγωγό

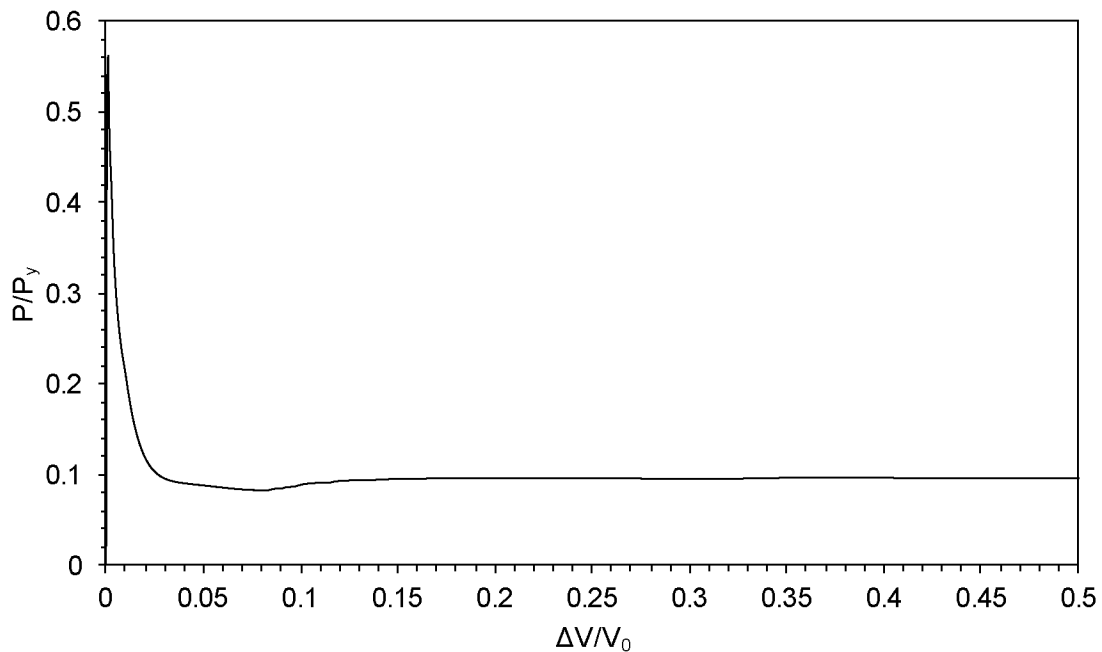
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

- **SOLID ELEMENTS C3D8R**

Στην συνέχεια προσομοιώσαμε τον αγωγό με solid elements C3D8R και κατασκευάσαμε τον δρόμο ισορροπίας του.



Σχήμα3. 9 Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με solid elements C3D8R

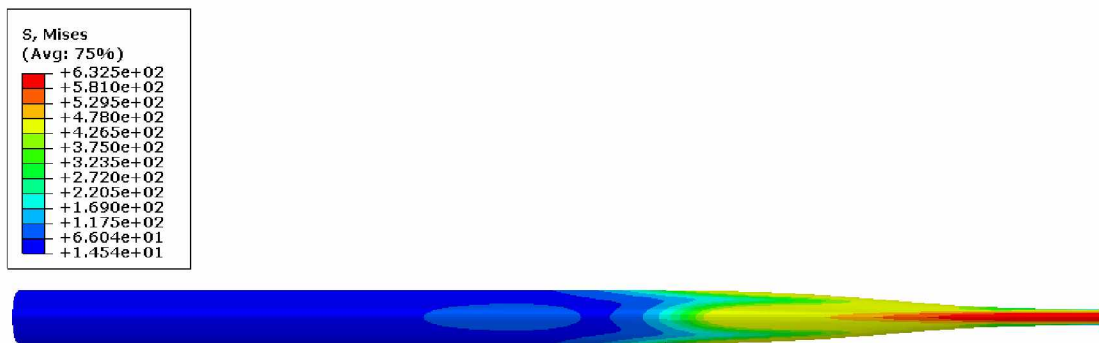


Σχήμα3. 10 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με solid elements C3D8R

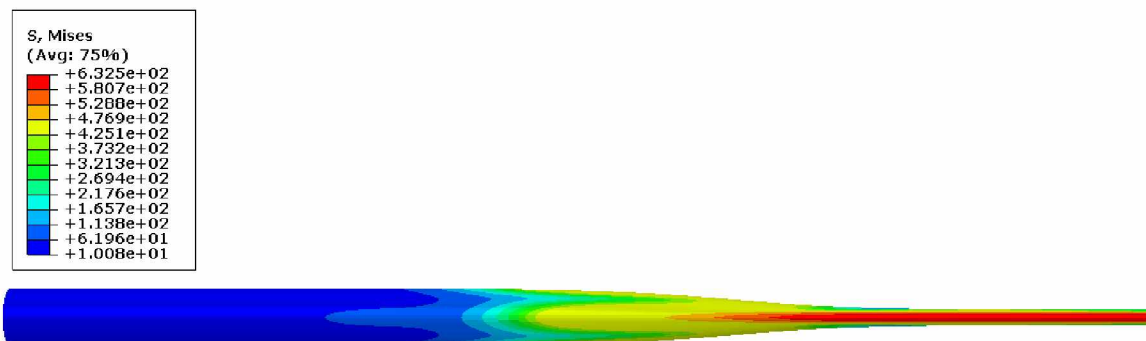
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Παρατηρούμε πως τα διαγράμματα που κατασκευάσαμε για τα solid elements C3D8R μοιάζουν αρκετά με αυτά των shell elements. Πιο συγκεκριμένα η τιμή της πίεσης διάδοσης είναι $P_p = 2.82MP_a$. Ομοίως και αυτή η τιμή είναι σχετικά κοντά με εκείνες που πήραμε από τα θεωρητικά αποτελέσματα ιδιαίτερα με εκείνη που προκύπτει από το πρότυπο DNVGL-ST-F101. Η διαφορά η οποία υπάρχει με την τιμή της πίεσης διάδοσης που προκύπτει από τα shell elements οφείλεται στο πλέγμα. Όσο πυκνότερο το πλέγμα τόσο πιο ακριβή τα αποτελέσματα παράλληλα όμως τόσο μεγαλύτερο το υπολογιστικό κόστος.

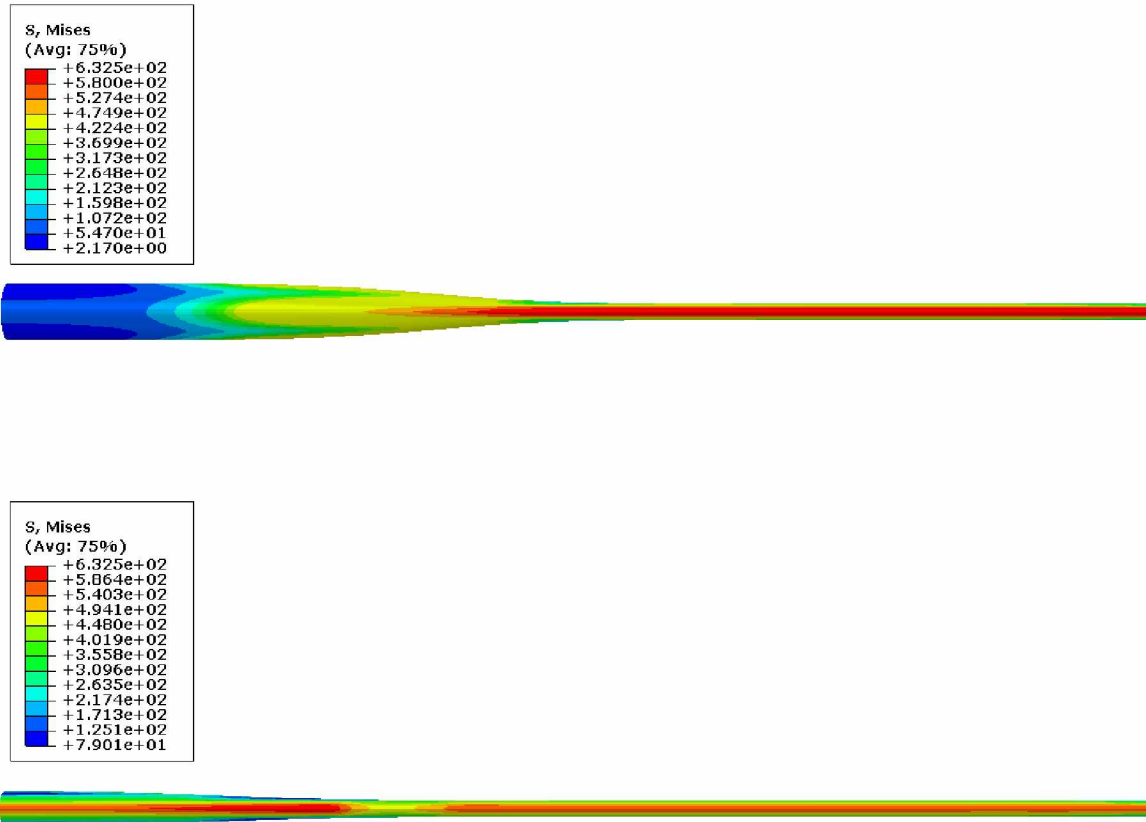
Θα δώσουμε και εδώ κάποιες εικόνες του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης στον αγωγό με τα solid elements 3D8R.



Σχήμα3. 11 Η στιγμή της πρώτης επαφής των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού



**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

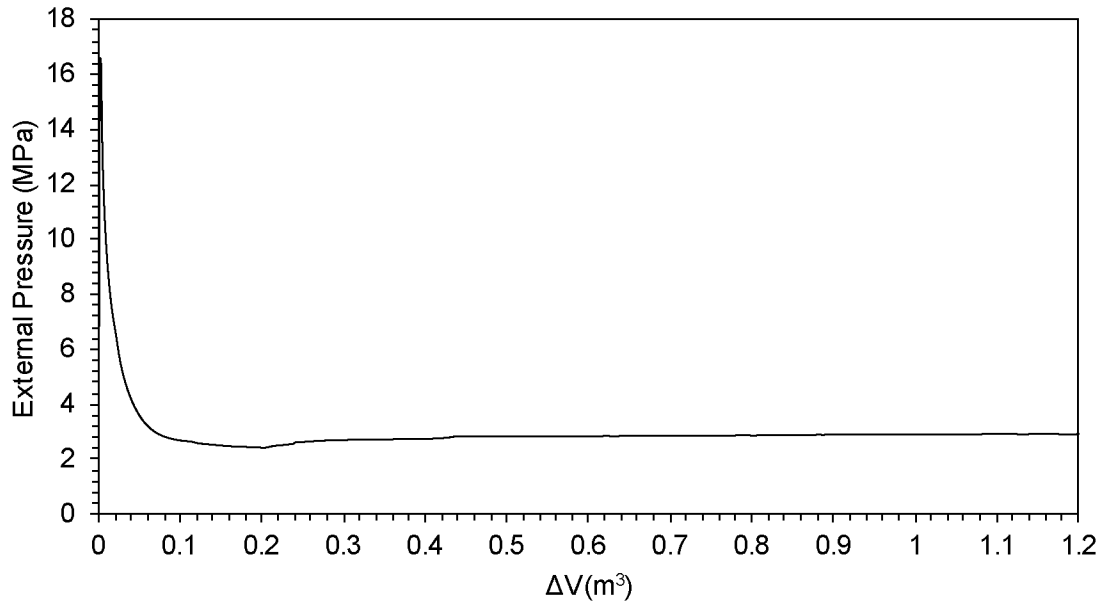


Σχήμα3. 12 Η διάδοση της ύβωσης στον αγωγό μέχρι την ισοπέδωση ολόκληρου του αγωγού.

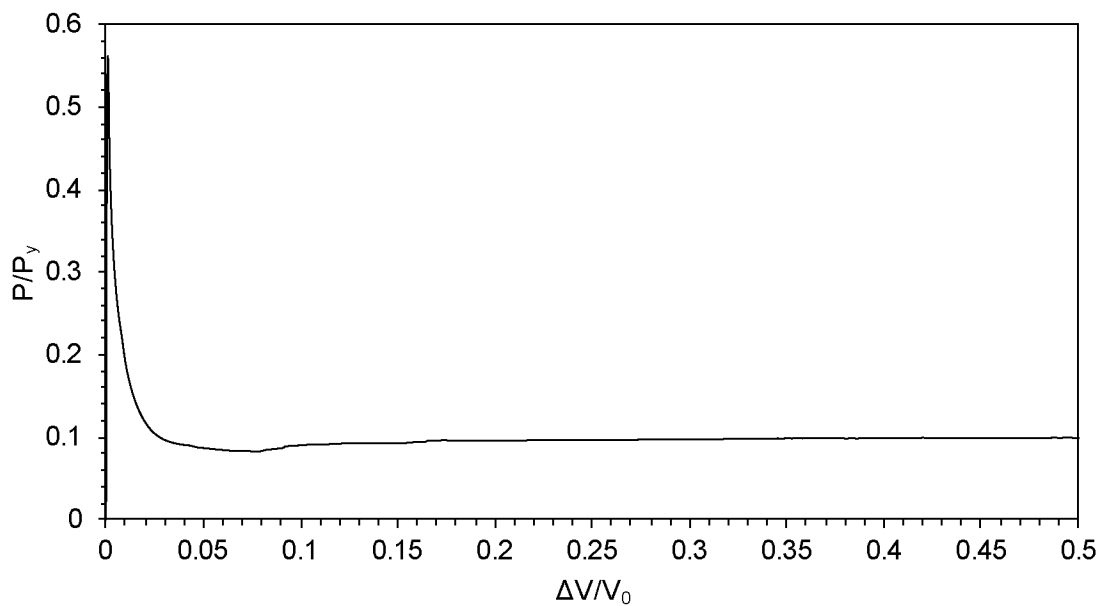
- **SOLID ELEMENTS C3D20R**

Τέλος παρουσιάζουμε και τα διαγράμματα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου και για τα solid C3D20R elements.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



Σχήμα3. 13 Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με solid elements C3D20R



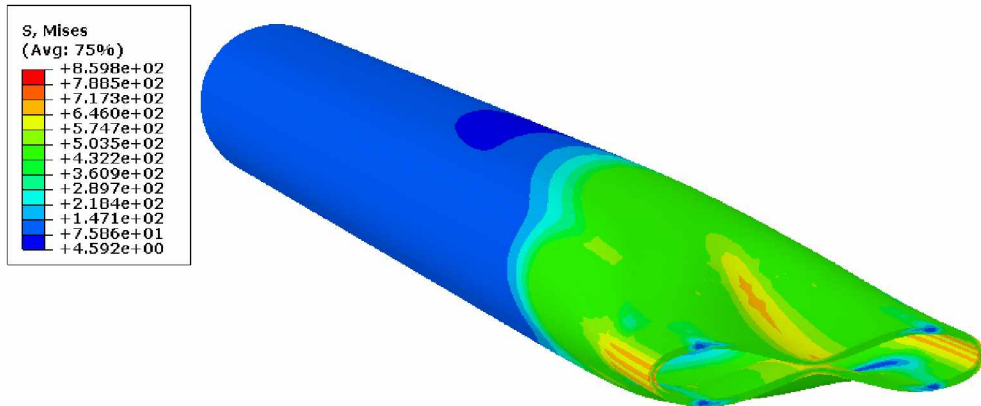
Σχήμα3. 14 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με solid elements C3D8R

Στην περίπτωση των Solid Elements C3D20R η τιμή της πίεσης διάδοσης είναι $P_p = 2.837MP_a$. Η τιμή αυτή είναι αρκετά κοντά με τις προηγούμενες

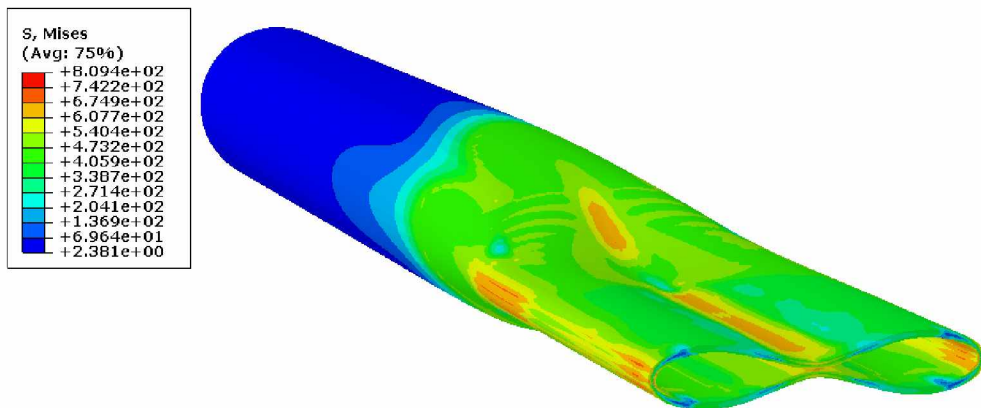
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

που πήραμε τόσο για τα shell elements όσο και για τα C3D8R. Επίσης είναι ικανοποιητικά κοντά στις θεωρητικές τιμές.

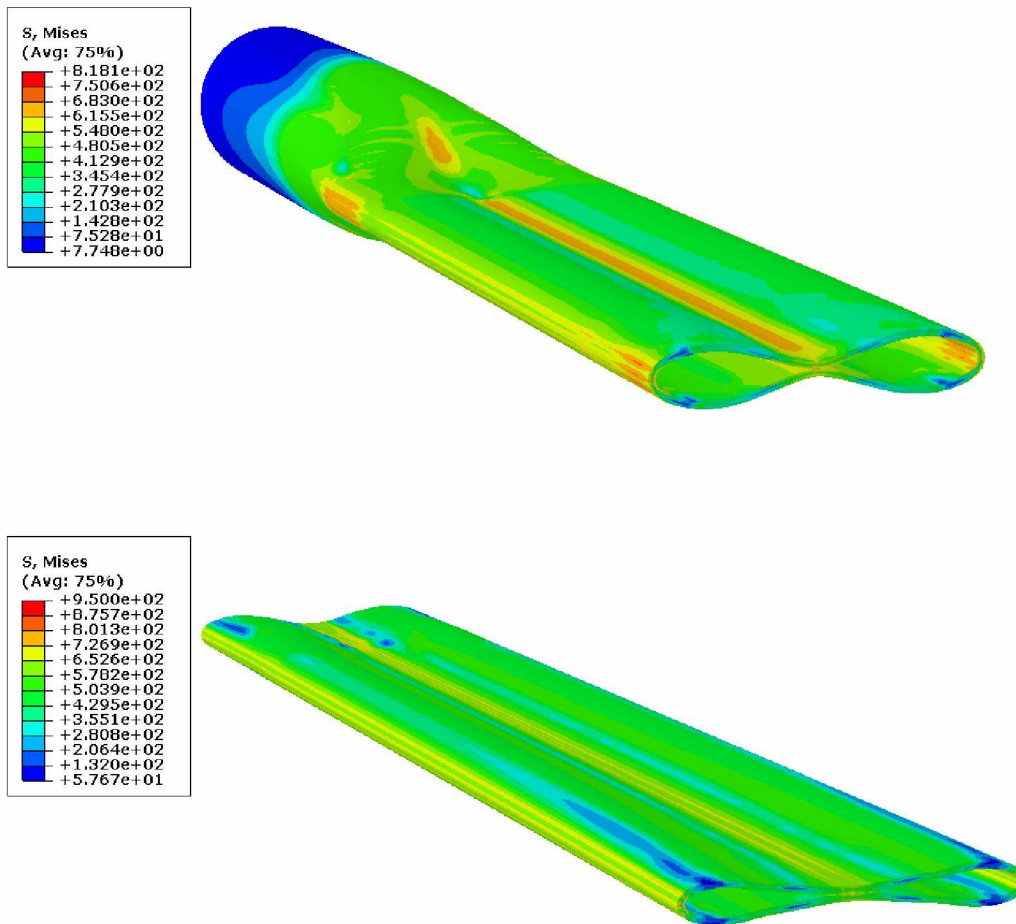
Θα παρουσιάσουμε και για αυτή την περίπτωση κάποιες φωτογραφίες από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία στις οποίες απεικονίζεται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης.



Σχήμα3. 15 Η στιγμή της πρώτης επαφής των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού



ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα3. 16 Η διάδοση της ύβωσης στον αγωγό μέχρι την ισοπέδωση ολόκληρου του αγωγού.

3.3.4 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο παρών κεφάλαιο συλλέξαμε όλα τα αποτελέσματα που έχουμε για την πίεση διάδοσης για τον αγωγό που μελετάμε τόσο από την θεωρία όσο και από τις τρεις αναλύσεις που τρέξαμε στο ABAQUS. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

Διδιάστατη Ανάλυση	$P_p = 2.17MP_a$
API RP 1111	$P_p = 2.9634MP_a$
DNVGL-ST-F101	$P_p = 2.8558MP_a$
Kyriakides & Babcock	$P_p = 2.9485MP_a$
Shell Elements S4R	$P_p = 2.912MP_a$
Solid Elements C3D8R	$P_p = 2.82MP_a$
Solid Elements C3D20R	$P_p = 2.837MP_a$

Πίνακας 3

Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι πως τα αποτελέσματα τα οποία πήραμε από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους αλλά και ικανοποιητικά κοντά με τις τιμές που προκύπτουν από την θεωρία. Η τιμή η οποία εμφανίζει μεγάλη διαφορά από τις υπόλοιπες είναι η τιμή που πήραμε από την διδιάστατη ανάλυση.

Αυτή η διαφορά μεταξύ των τιμών της πίεσης διάδοσης που παίρνουμε από την ανάλυση ενός τρισδιάστατου αγωγού με πεπερασμένα στοιχεία σε σχέση με την τιμή που προκύπτει από την εκτίμηση που κάναμε με την Maxwell-line οφείλετε στην διαφορά που υπάρχει μεταξύ της παραμόρφωσης της διατομής του αγωγού στο τέλος της διαδιδόμενης ύβωσης και της παραμόρφωσης του δακτυλίου καθώς επίσης και στην εκφόρτωση που γίνεται στον σωλήνα παραβιάζοντας έτσι την συνθήκη μονοτονικής μεταβολής τάσεων που είχαμε στο διδιάστατο μοντέλο.

Επίσης η διαφορά μεταξύ του σωλήνα και του δακτυλίου μπορεί να κατανοηθεί περισσότερο συγκρίνοντας το έργο της πίεσης ανά μονάδα μήκους κατά την διάδοση της ύβωσης στον σωλήνα, με το έργο της πίεσης κατά την κατάρρευση του δακτυλίου.

Το τελευταίο υπολογίζεται από τον τύπο **(2. 6)** και ισούται με το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη $P - \Delta A$ και τον άξονα ΔA μεταξύ των σημείων ΔA_1 και ΔA_2 . Υπολογίζοντας λοιπόν αυτό το εμβαδόν μέσω ενός υπολογιστικού φύλλου στο excel έχουμε $W_{ring} = 224351.36MP_a \cdot mm^2$ όπου ΔA_1 και ΔA_2 είναι η μεταβολή του εμβαδού στα σημεία που η Maxwell-line τέμνει την καμπύλη $P - \Delta A$ όπως φαίνεται και στο **Σχήμα2. 36**.

Για τον υπολογισμό του έργου της πίεσης ανά μονάδα μήκους στον σωλήνα θα πρέπει να μελετήσουμε τον αγωγό όταν η διαδιδόμενη ύβωση βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση (steady state). Παίρνουμε λοιπόν δύο σημεία

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

του αγωγού όχι πολύ κοντά στο άκρο του όπου ξεκινάει το φαινόμενο. Τα σημεία αυτά είναι σε απόσταση $Z_1 = 0.5 \cdot L$ και $Z_2 = 0.6 \cdot L$ όπου L το συνολικό μήκος του αγωγού. Από το διάγραμμα του **Σχήμα 3. 5** υπολογίζουμε τον όγκο του αγωγού την χρονική στιγμή της πρώτης επαφής των σημείων αυτών με την αναλυτική επιφάνεια. Έτσι το έργο ανά μονάδα μήκους για τον αγωγό δίνεται από τον τύπο:

$$W_{pipe} = \frac{P_p \cdot |(\Delta V_2 - \Delta V_1)|}{\Delta L} \quad (3.3)$$

$$\text{με } \Delta L = 0.1 \cdot L$$

$$\text{Έτσι υπολογίζεται ότι } W_{pipe} = 321613.353 MP_a \cdot mm^2$$

Υπάρχει μία διαφορά λοιπόν μεταξύ του W_{ring} και του W_{pipe} κοντά στο 31% που σημαίνει πως η παραμόρφωση του δακτυλίου κάτω από συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης δεν μπορεί να καλύψει ένα 31% του έργου κατά την διάδοση της ύβωσης στον αγωγό.

3.4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Ολοκληρώνοντας το τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής θα προσπαθήσουμε να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε κάποια ενδεικτικά σημεία του αγωγού κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του αγωγού με τα shell elements S4R.

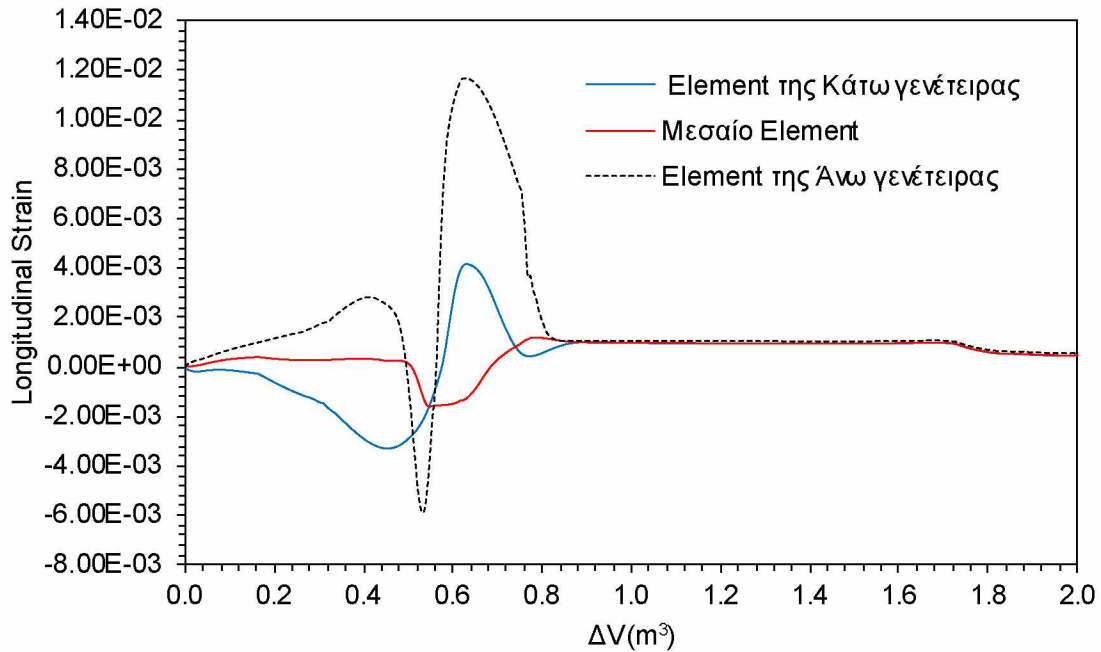
Αυτό που κάναμε ήταν να επιλέξουμε κάποια συγκεκριμένα σημεία πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Τα σημεία αυτά βρίσκονται στην άνω γενέτειρα του αγωγού, στην κάτω και στο ενδιάμεσο. Τα σημεία της άνω γενέτειρας έχουν όλα μεταξύ ίδιες συντεταγμένες ως προς τον άξονα X και Y και διαφορετικές ως προς τον Z . Το ίδιο ισχύει και για τα σημεία της κάτω γενέτειρας και τα ενδιάμεσα. Οι τριάδες των σημείων επιλέχθηκαν σε αποστάσεις

$$Z = 0.3 \cdot L, Z = 0.4 \cdot L, Z = 0.5 \cdot L, Z = 0.6 \cdot L, Z = 0.7 \cdot L$$

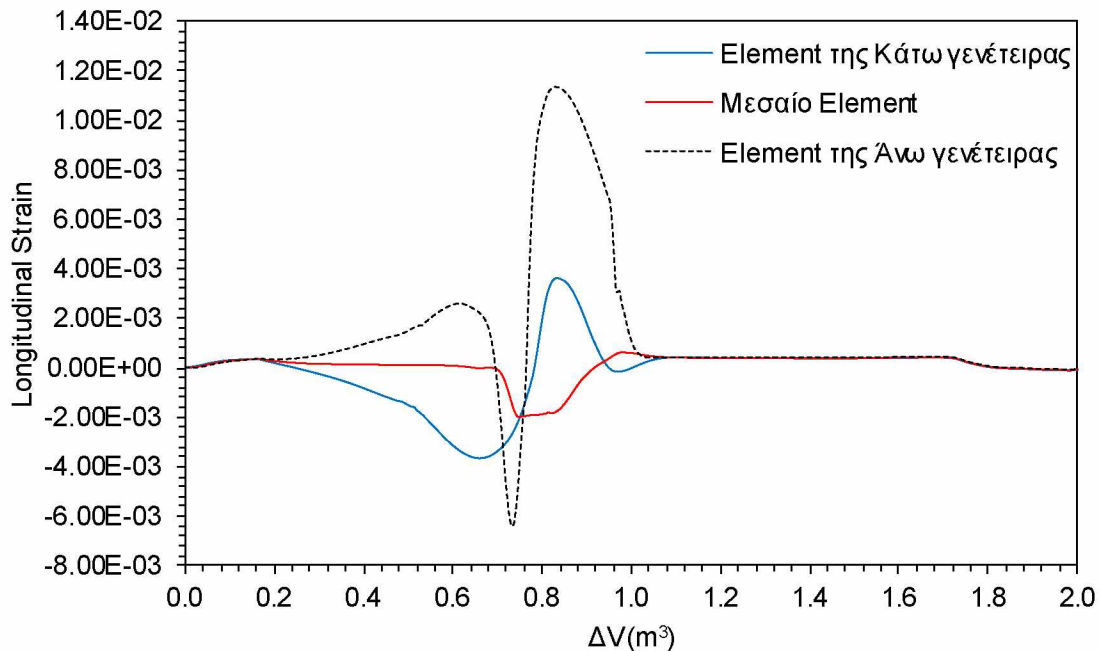
μετρημένες από το σημείο έναρξης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης. Στην συνέχεια πήραμε από το ABAQUS τις τιμές της διαμήκους παραμόρφωσης

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

για αυτά τα σημεία και κατασκευάσαμε τα αντίστοιχα διαγράμματα Παραμόρφωσης- Μεταβολής του Όγκου που φαίνονται παρακάτω.

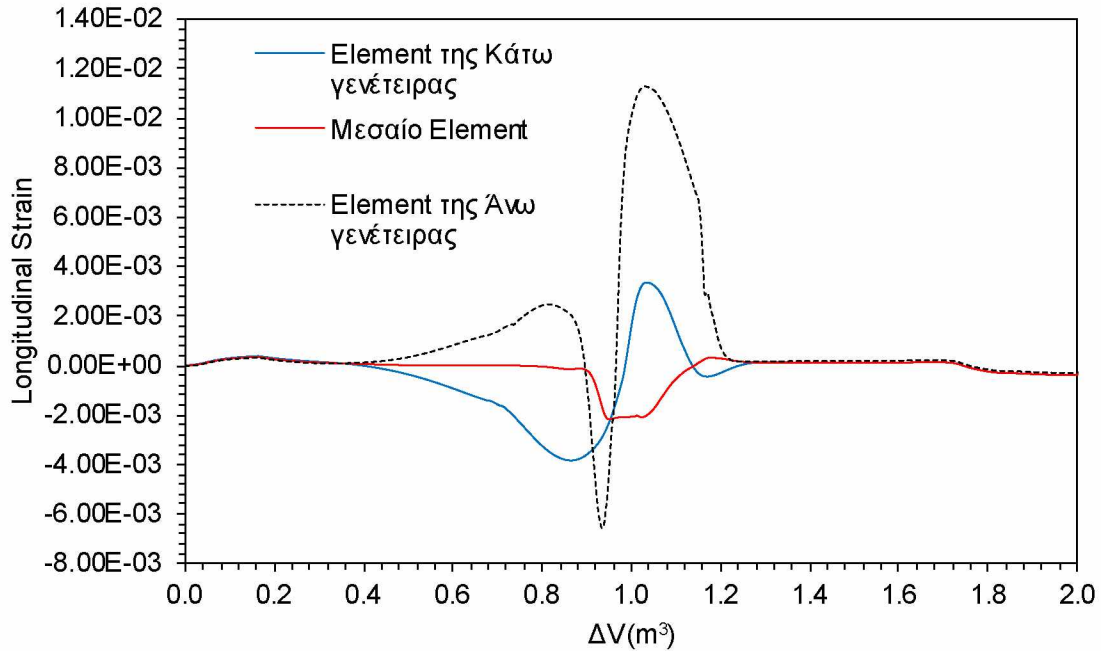


Σχήμα3. 17 Διάγραμμα Διαμήκους Παραμόρφωσης – Μεταβολής του Όγκου για Z=0.3L

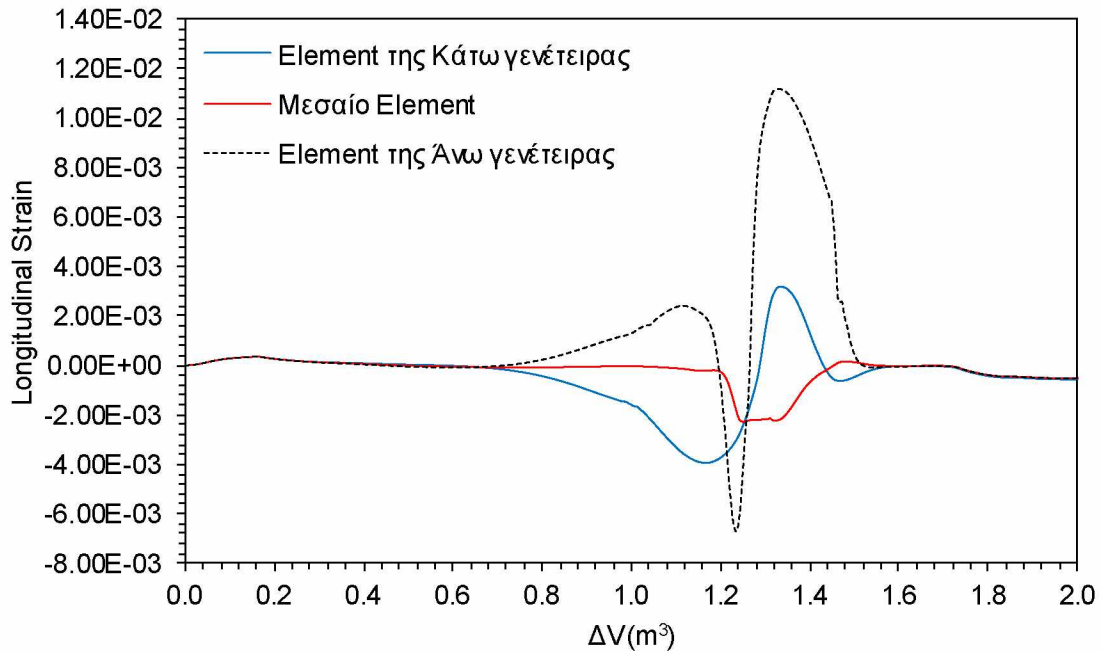


Σχήμα3. 18 Διάγραμμα Διαμήκους Παραμόρφωσης – Μεταβολής του Όγκου για Z=0.4L

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

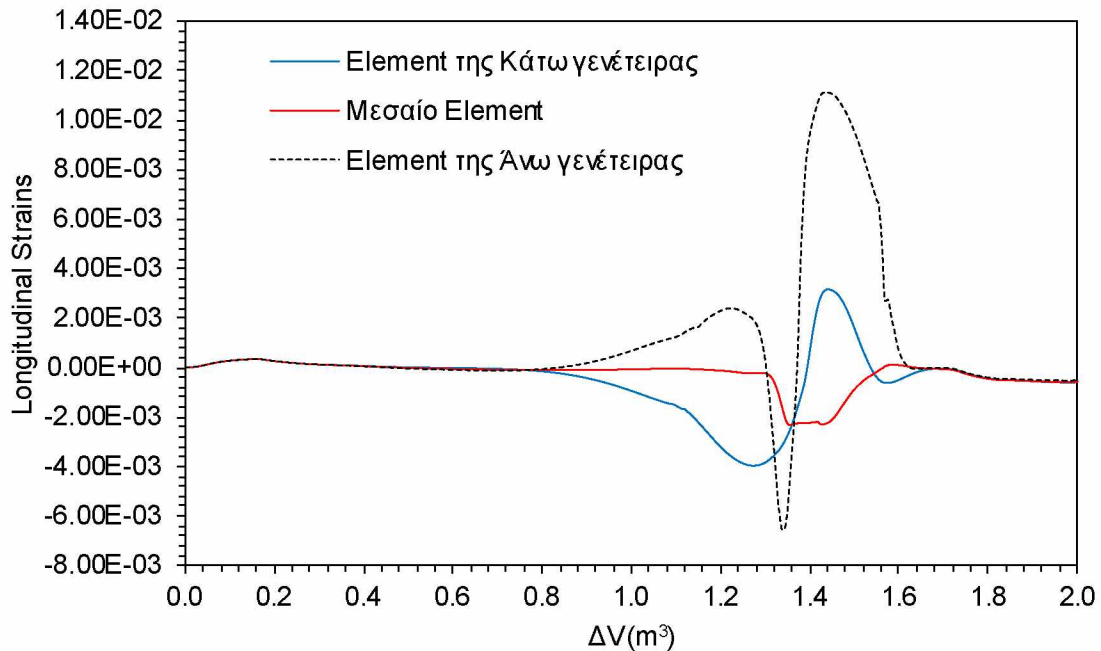


Σχήμα3. 19 Διάγραμμα Διαμήκουσ Παραμόρφωσς – Μεταβολήσ του Όγκου για $Z=0.5L$



Σχήμα3. 20 Διάγραμμα Διαμήκουσ Παραμόρφωσς – Μεταβολήσ του Όγκου για $Z=0.6L$

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



Σχήμα3. 21 Διάγραμμα Διαμήκους Παραμόρφωσης – Μεταβολής του Όγκου για Z=0.7L

Αυτό που παρατηρούμε στα διαγράμματα που κατασκευάσαμε είναι πως η διαμήκης παραμόρφωση για όλα τα στοιχεία της άνω γενέτειρας είναι ίδια με κάποια διαφορά φάσης. Το ίδιο συμβαίνει και για τα στοιχεία της κάτω γενέτειρας και για τα μεσαία. Κάτι τέτοιο είναι λογικό καθώς όσο πιο απομακρυσμένα είναι τα στοιχεία από το σημείο έναρξης της ύβωσης τόσο περισσότερο αργεί η ύβωση να φτάσει σε αυτά. Επίσης είναι λογικό η καμπύλη της διαμήκης παραμόρφωσης να είναι διαφορετική για κάθε στοιχείο για σταθερό Z διότι ο αγωγός δεν δέχεται τις ίδιες παραμορφώσεις σε κάθε σημείο του. Αφού όμως η διαδιδόμενη ύβωση προσπεράσει τα σημεία αυτά στο τέλος και τα τρία έχουν τις ίδιες περίπου παραμορφώσεις.

Παρατηρούμε ότι οι διαμήκεις παραμορφώσεις είναι κατά κύριο λόγο εφελκυστικές ενώ γίνονται και για λίγο θλιπτικές. Επίσης παρατηρούμε ότι αυξάνονται κατά απόλυτο τιμή όσο το φαινόμενο προχωράει μέχρι ένα σημείο που παίρνουν τις μέγιστες τιμές και στη συνέχεια φτάνουν σε μία σταθερή τιμή κοντά στο 0.

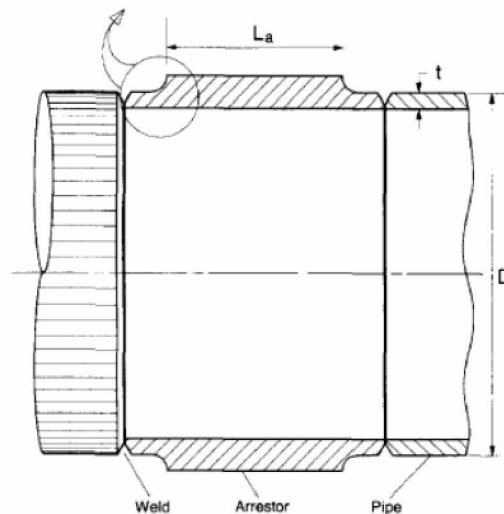
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

ΑΓΩΓΟΥ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσομοίωση αναστολέων (buckle arrestors) σε αγωγούς οι οποίοι υφίστανται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει και στο πρώτο κεφάλαιο οι αναστολές είναι ουσιαστικά δακτύλιοι που έχουν την ίδια εσωτερική διάμετρο με τον σωλήνα αλλά σημαντικά μεγαλύτερο πάχος. Επίσης οι αναστολές είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό που κατασκευάζεται και ο αγωγός και τοποθετούνται ανά τακτά διαστήματα στον αγωγό με 60-180m να είναι μία τυπική τιμή, (Kyriakides,S και Park T.D. 1997) με σκοπό να περιορίσουν όσο το δυνατόν περισσότερο την διάδοση της ύβωσης. Έχουμε αναφερθεί σε κάποιους τύπους αναστολέων όμως στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιήσουμε buckle arrestors τύπου integral.



Σχήμα4. 1 Γεωμετρία του Integral Buckle Arrestor

Στόχος μας σε αυτό το κεφάλαιο είναι ο υπολογισμός της πίεσης ανάσχεσης (Cross-Over Pressure) της τιμής της πίεσης δηλαδή την οποία η εξωτερική πίεση θα πρέπει να υπερβεί ώστε η διαδιδόμενη ύβωση να ξεπεράσει και να ισοπεδώσει τον αναστολέα. Τέλος εξετάζουμε την εξάρτηση της τιμής της πίεσης ανάσχεσης με το μήκος L του αναστολέα.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Αρχικά να αναφέρουμε πως τόσο ο αγωγός όσο και ο δακτύλιος κατασκευάστηκαν με solid elements τύπου C3D8R. Ο αγωγός έχει τις διαστάσεις $D = 914.4mm$, $t = 30mm$ και $L = 20 \cdot D = 18288mm$ όπου D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού, t το πάχος του και L το μήκος του. Για να επιλέξουμε την γεωμετρία του arrestor που θα τοποθετήσουμε στον αγωγό χρησιμοποιήσαμε το πρότυπο DNVGL-ST-F101.

Συγκεκριμένα βασιζόμενοι στην εξίσωση **(1. 6)** βρήκαμε την κρίσιμη πίεση κατάρρευσης. Η τιμή από το συγκεκριμένο πρότυπο είναι $P_c = 13.566MP_a$. Θα σχεδιάσουμε λοιπόν έναν αναστολέα στον οποίο θα θέλαμε ιδανικά η τιμή της πίεσης ανάσχεσης να είναι ίση με την κρίσιμη πίεση κατάρρευσης του αγωγού. Δηλαδή να ισχύει ότι $P_c = P_{CO} = 13.566MP_a$. Στη συνέχεια βάλαμε την τιμή αυτή στην εξίσωση **(1. 13)** και αντικαταστήσαμε την $P_{p,BA}$ με:

$$P_{p,BA} = 35 \cdot \sigma_y \cdot a_{fab} \cdot \left(\frac{h}{D_{arr}} \right)^{2.5} \quad (4. 1)$$

όπου h το πάχος του arrestor και D_{arr} η εξωτερική διάμετρος του arrestor για την οποία ισχύει $D_{arr} = D + (h - t)$.

Επιλύοντας λοιπόν την εξίσωση **(1. 13)** παίρνουμε διάφορα ζεύγη τιμών για το h και το L_{BA} . Εμείς λοιπόν επιλέξαμε να σχεδιάσουμε arrestor με γεωμετρικά χαρακτηριστικά

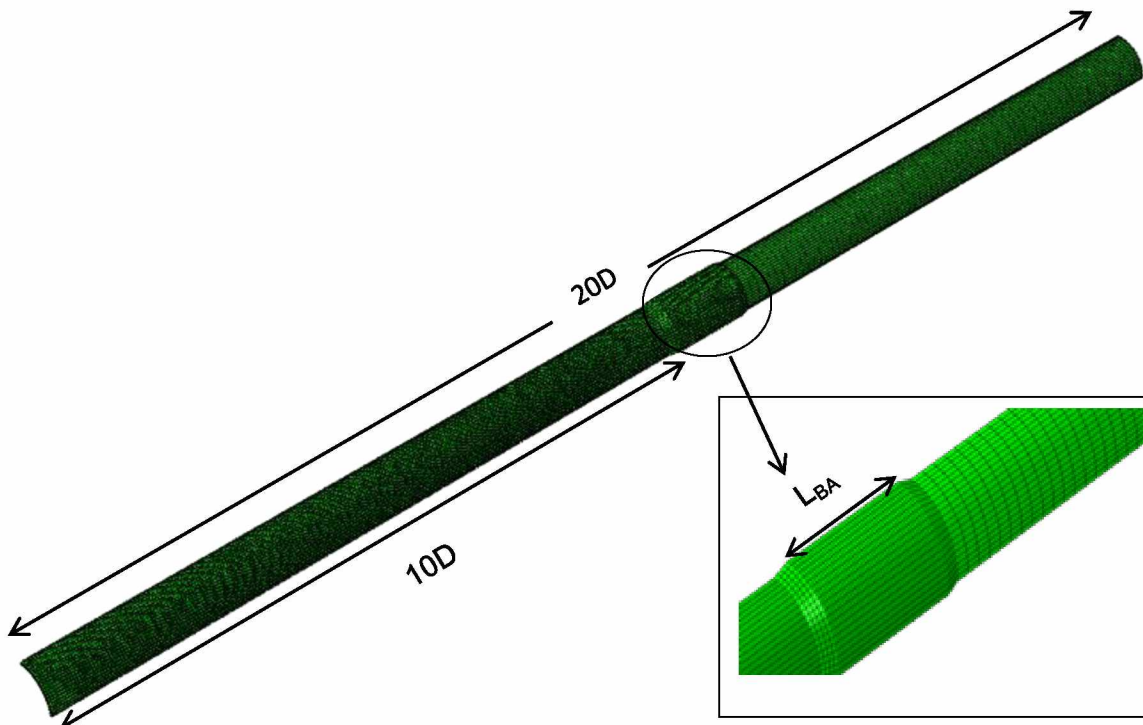
$$h = 2.5 \cdot t = 75mm \text{ και } L_{BA} = 1.198 \cdot D = 1095mm$$

Το υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε τόσο για τον αγωγό όσο και για τον arrestor είναι χάλυβας grade X_{65} όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια. Ο arrestor τοποθετήθηκε σε απόσταση $Z = 0.5 \cdot L = 9144mm$ από το σημείο που ξεκινάει να διαδίδεται η ύβωση.

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, η αρχική μετατόπιση που δόθηκε, η αναλυτική επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε και τα βήματα της ανάλυσης είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που αναπτύξαμε στο τρίτο κεφάλαιο.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Αυτό το οποίο διαφοροποιείται στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι το πλέγμα του μοντέλου μας. Σκοπός μας ήταν το πλέγμα του *arrestor* και πριν από αυτόν να είναι αρκετά πιο πυκνό από ότι μετά τον *arrestor* ώστε να πάρουμε μία καλή εκτίμηση της πίεσης διάδοσης και της πίεσης ανάσχεσης. Έτσι λοιπόν το πλέγμα μας αποτελείται από 48640 στοιχεία τύπου C3D8R εκ των οποίων υπάρχουν 4 στοιχεία κατά το πάχος και 20 κατά την περιφερειακή διεύθυνση σε όλο το μοντέλο. Στην διαμήκη διεύθυνση έχουμε 490 στοιχεία πριν τον αναστολέα, 70 στοιχεία μετά τον αναστολέα και ο αναστολέας αποτελείται από 48 στοιχεία. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το μοντέλο του αγωγού αναστολέα.

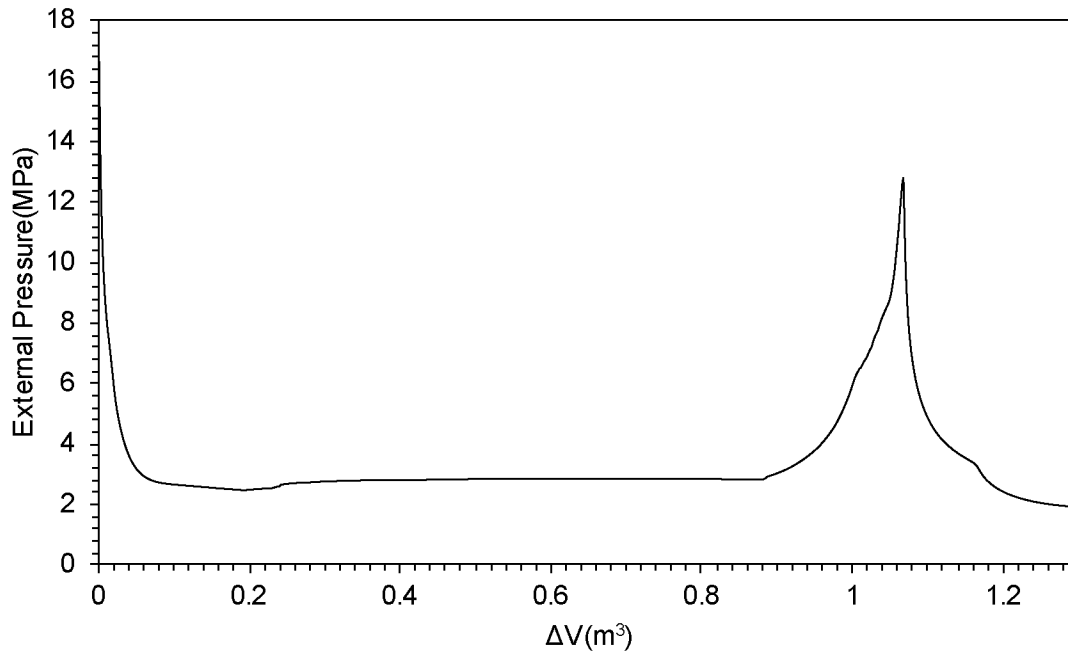


4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

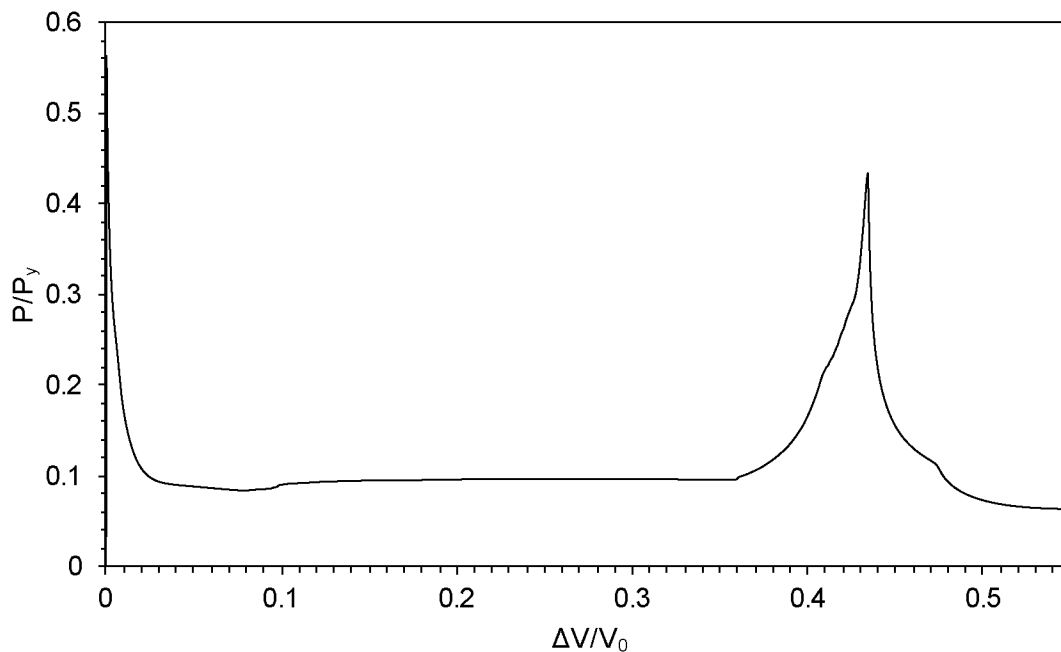
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του μοντέλου αγωγού-αναστολέα με πεπερασμένα στοιχεία. Αρχικά υπολογίσαμε τον όγκο του αγωγού-αναστολέα με την ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Αυτό ήταν εφικτό διότι αγωγός και

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

αναστολέας έχουν την ίδια εσωτερική διάμετρο. Στην συνέχεια κατασκευάσαμε τον δρόμο ισορροπίας $P - \Delta V$ ο οποίος φαίνεται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα4. 2 Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με arrestor $h=2.5t$, $L=1.198D$



Σχήμα4. 3 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με arrestor $h=2.5t$, $L=1.198D$

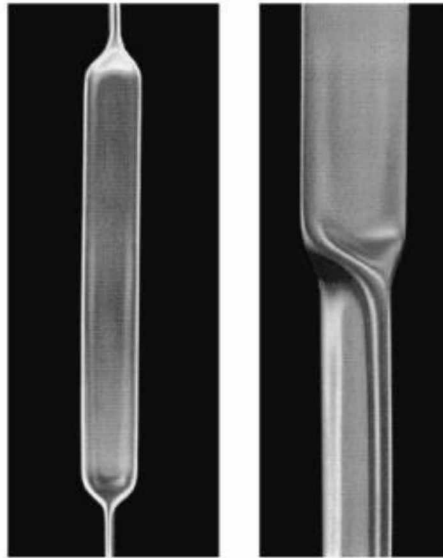
Από τα παραπάνω διαγράμματα βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης έχει τιμή $P_c = 16.6145MP_a$ πολύ κοντά στις τιμές τις πίεσης κατάρρευσης για τα μοντέλα αγωγών του προηγούμενου κεφαλαίου. (**Σχήμα3. 5, Σχήμα3. 9, Σχήμα3. 13**)
- Η πίεση διάδοσης έχει τιμή $P_p = 2.83919MP_a$ πολύ κοντά τόσο στις θεωρητικές τιμές όσο και στις τιμές της πίεσης διάδοσης που προκύπτουν από το ABAQUS. (**Πίνακας 3**)
- Η πίεση ανάσχεσης έχει τιμή $P_{CO} = 12.7945MP_a$ αρκετά κοντά στην τιμή $P_{CO} = 13.566MP_a$ με βάση την οποία είχαμε σχεδιάσει θεωρητικά τον αναστολέα μας.

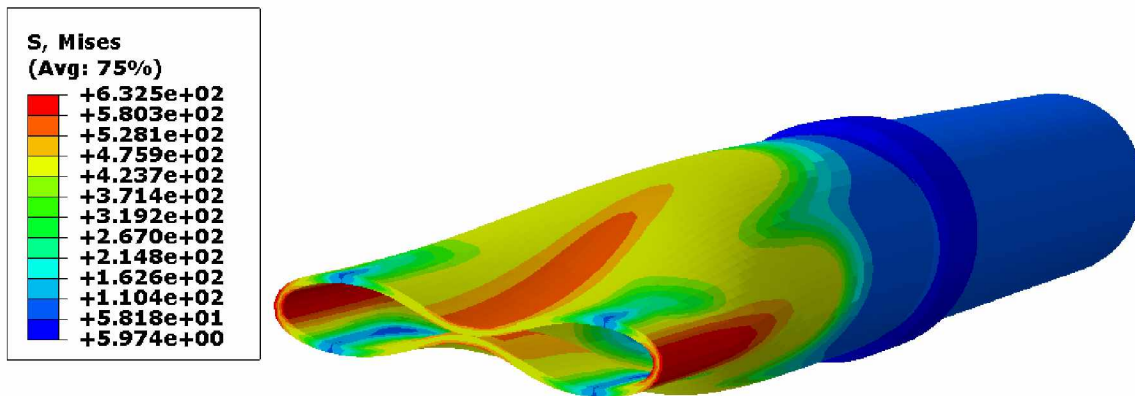
Παρακάτω θα παραθέσουμε μερικές φωτογραφίες από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που απεικονίζουν το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης στον αγωγό με τον αναστολέα. Κάτι το οποίο είναι πολύ ενδιαφέρον να σχολιάσουμε είναι αυτό που συμβαίνει στο τμήμα του αγωγού μετά τον αναστολέα όταν η ύβωση φτάσει σε αυτό αφού ξεπεράσει το εμπόδιο του αναστολέα. Εδώ για να κατανοήσουμε καλύτερα τι συμβαίνει θα πρέπει να αναφερθούμε σε μία σειρά πειραμάτων που διεξήγαγαν οι Kyriakides και Netto για να προσδιορίσουν την πίεση και την ταχύτητα διάδοσης του φαινομένου της ύβωσης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τους παρατήρησαν πως αν η τιμή της εξωτερικής πίεσης είναι ιδιαίτερα υψηλή, κοντά στο 90% της πίεσης κατάρρευσης του αγωγού, τότε το επίπεδο κατάρρευσης του αγωγού μπορεί να αλλάξει προσανατολισμό κατά 90° και η διάδοση της ύβωσης να συνεχιστεί με αυτόν τον τρόπο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται flip-flop και φαίνεται στο σχήμα Σχήμα4. 4 Αλλαγή του επιπέδου κατάρρευσης της διατομής του αγωγού κατά την διαδιδόμενη ύβωση (flip-flop) **Σχήμα4. 4**

Έτσι και στην περίπτωση του αγωγού που προσομοιώσαμε, επειδή η τιμή της πίεσης αυξάνει σε μεγάλο βαθμό με σκοπό η ύβωση να ξεπεράσει το εμπόδιο του αναστολέα δημιουργείται το συγκεκριμένο φαινόμενο στο τμήμα του αγωγού που βρίσκεται πέραν του αναστολέα μας.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

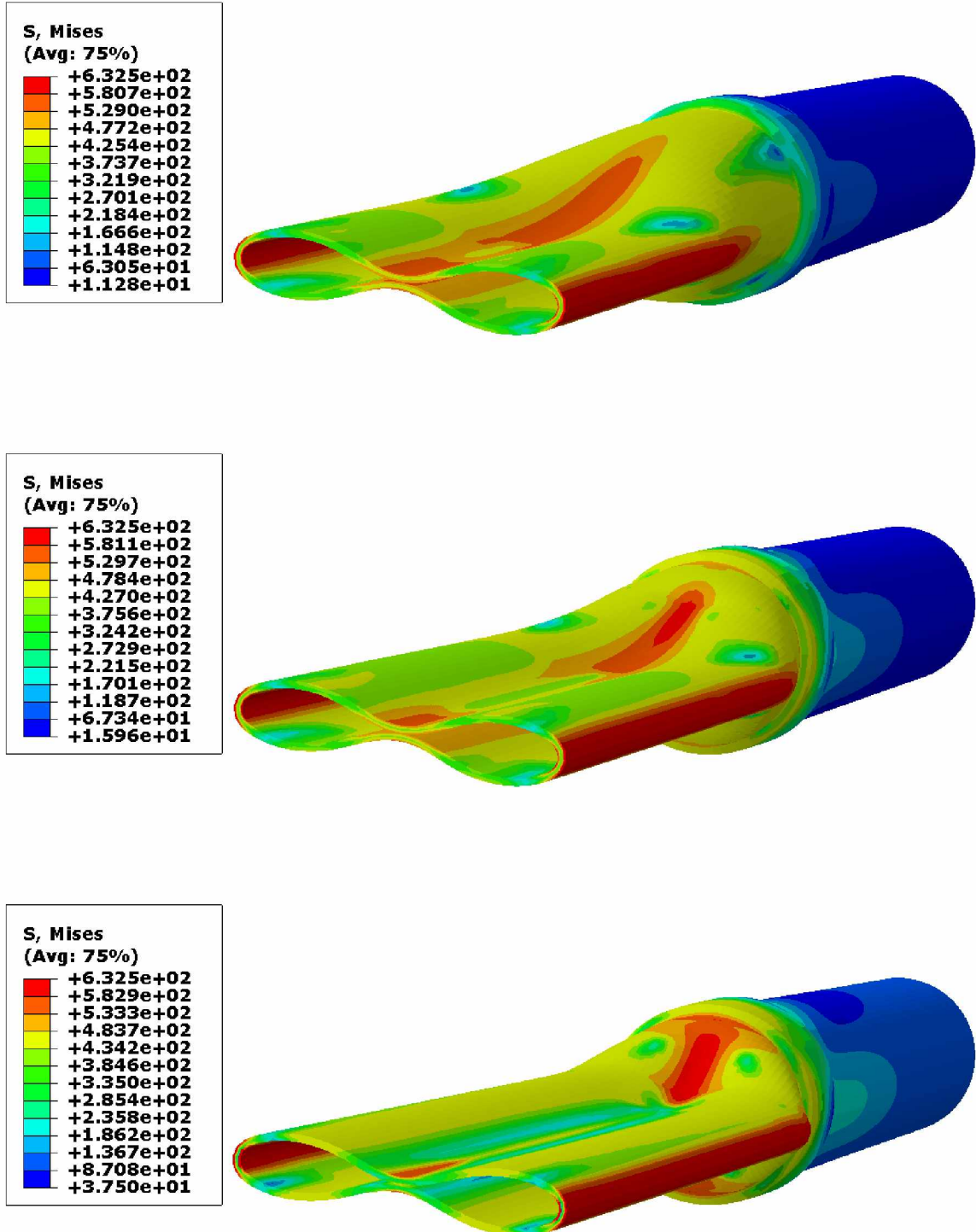


Σχήμα4. 4 Αλλαγή του επιπέδου κατάρρευσης της διατομής του αγωγού κατά την διαδιδόμενη ύβωση (flip-flop)



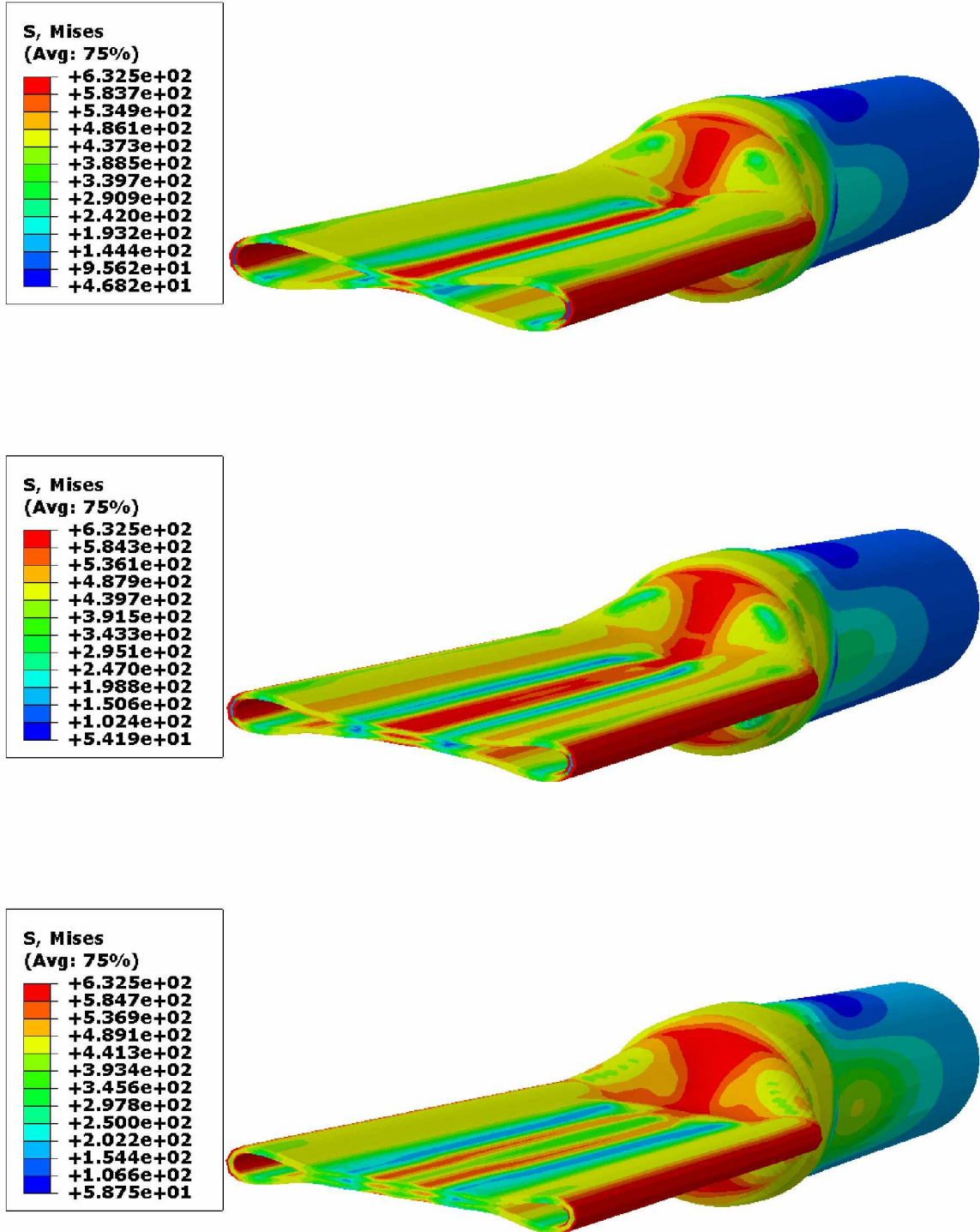
Σχήμα4. 5 Η στιγμή της πρώτης επαφής των εσωτερικών επιφανειών του αγωγού

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



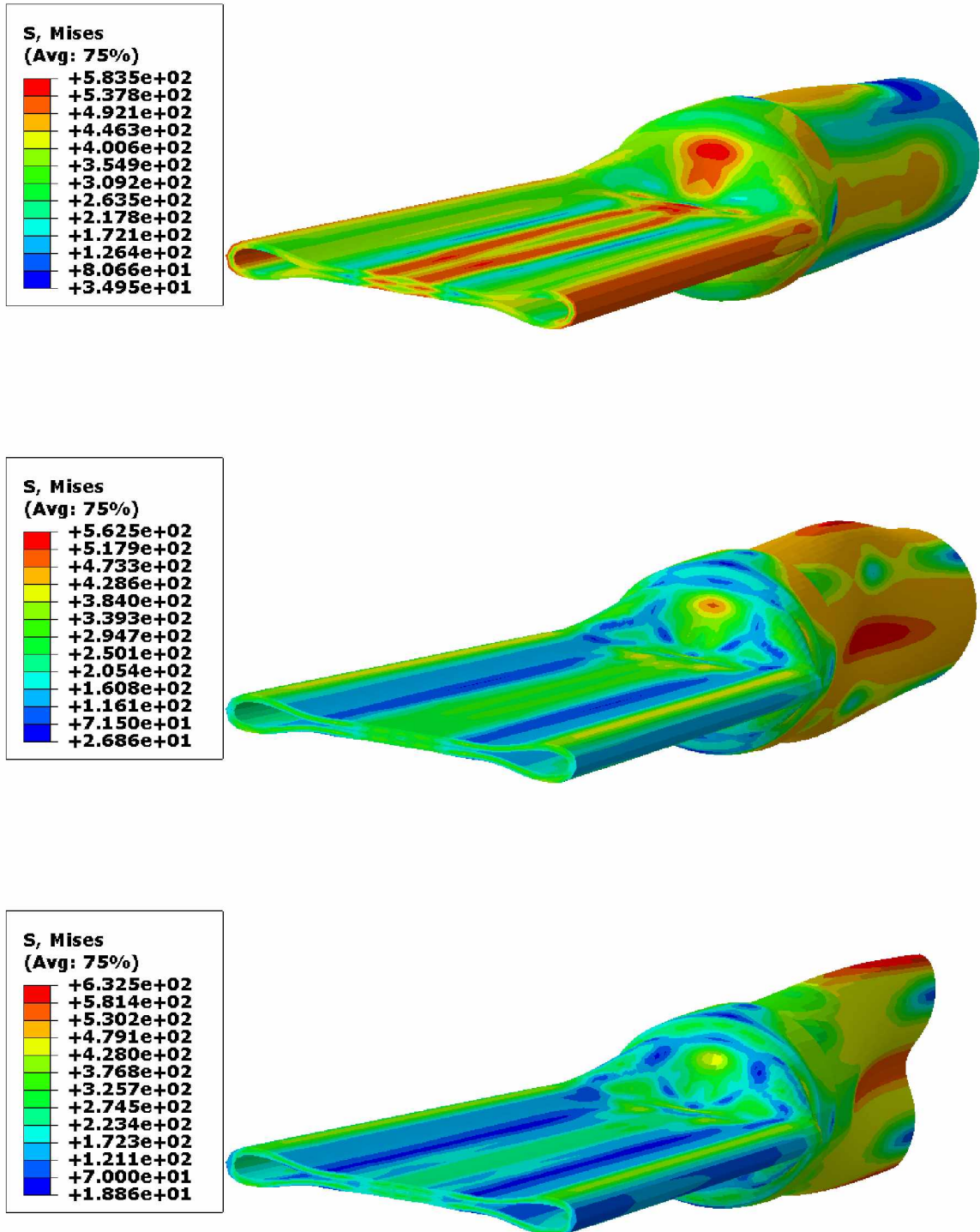
Σχήμα4. 6 Διάδοση της ύβωσης και ανάσχεση της από τον αναστολέα

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

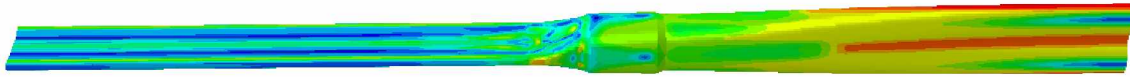


Σχήμα4. 7 Σταδιακή αύξηση της πίεσης που οδηγεί σε ισοπέδωση του αγωγού και κατάρρευση του αναστολέα

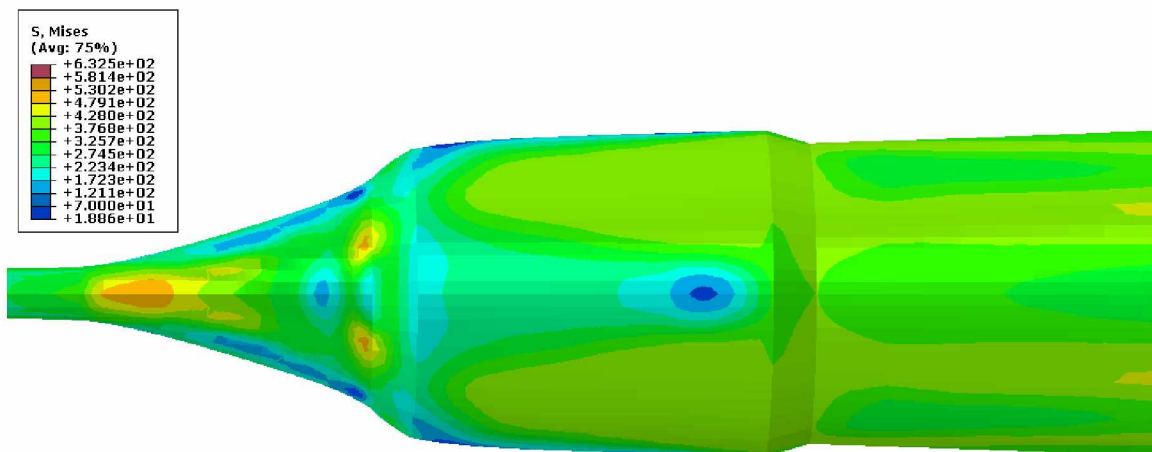
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα4. 8 Κατάρρευση του τμήματος του αγωγού μετά τον αναστολέα σύμφωνα με το φαινόμενο flip-flop



Σχήμα4. 9 Τελική κατάσταση του μοντέλου



Σχήμα4. 10 Προφίλ του αναστολέα μετά την αστοχία του

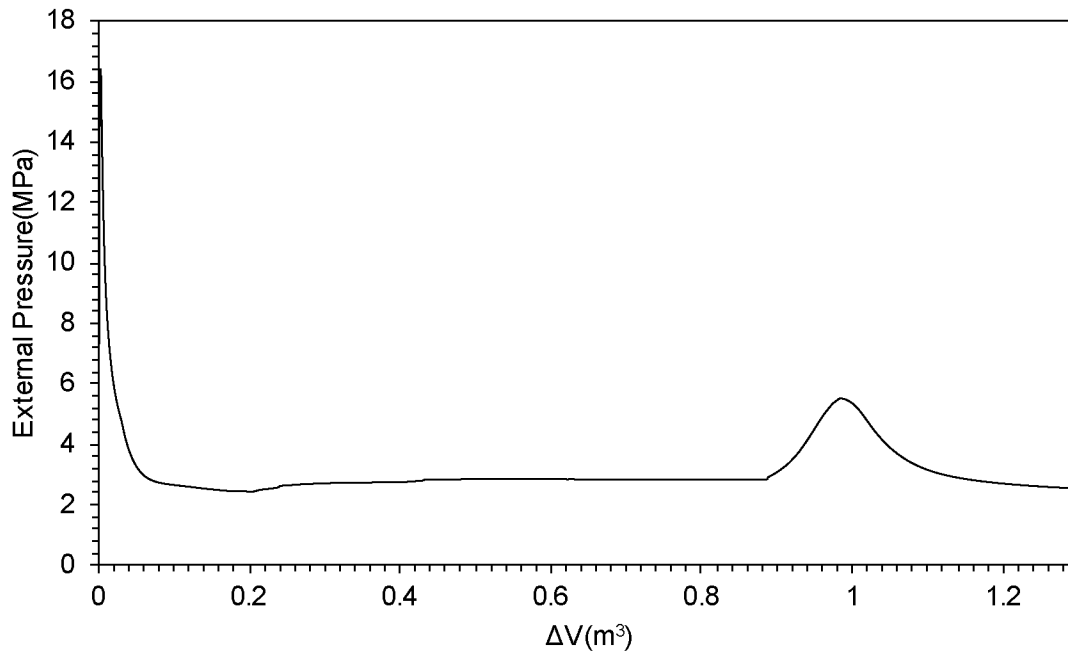
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε την επίδραση της γεωμετρίας του αναστολέα στο φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης και στην τιμή της πίεσης ανάσχεσης. Συγκεκριμένα αυτό που θα κάνουμε είναι να κατασκευάσουμε άλλα δύο μοντέλα αγωγού-αναστολέα κρατώντας σταθερό το μήκος του αναστολέα στην τιμή $L_{BA} = 1.198 \cdot D = 1095mm$ και μεταβάλλοντας κάθε φορά το πάχος του. Ουσιαστικά δηλαδή θα μελετήσουμε την επίδραση του πάχους του αναστολέα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

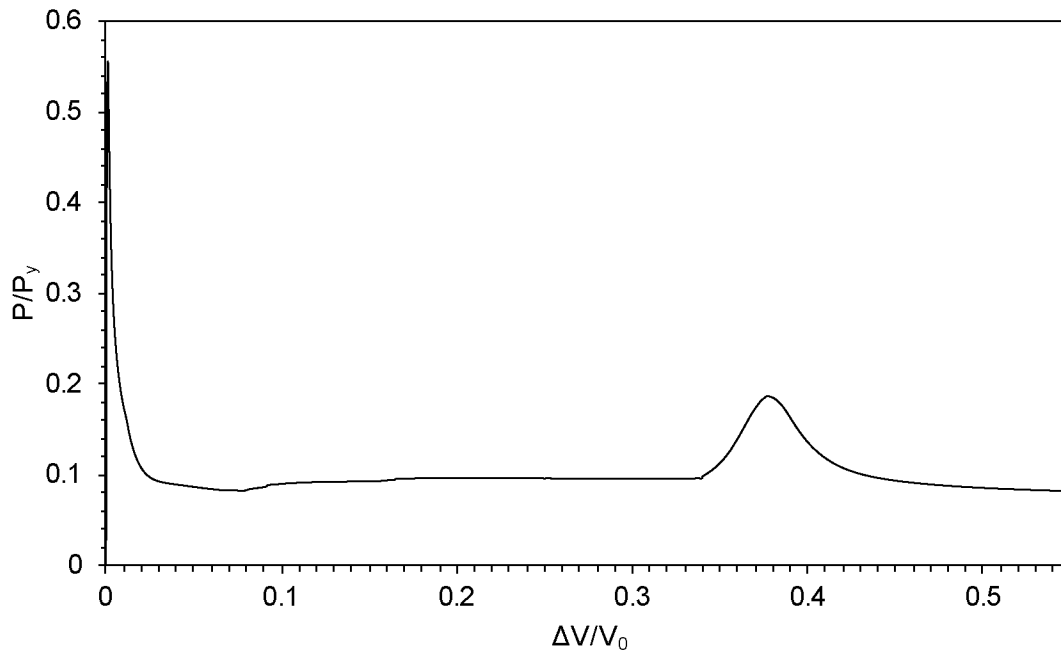
- ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΜΕ
 $h = 1.5 \cdot t = 45mm$

Ο δρόμος ισορροπίας $P - \Delta V$ για το συγκεκριμένο μοντέλο φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 4. 11 Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με arrestor $h=1.5t, L=1.198D$

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



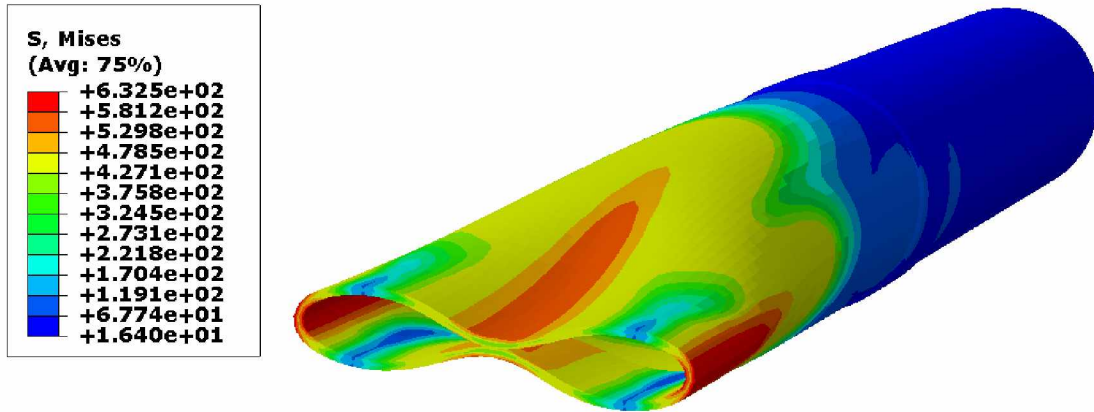
Σχήμα4. 12 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με arrestor $h=2.5t$, $L=1.198D$

Από τα παραπάνω διαγράμματα βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

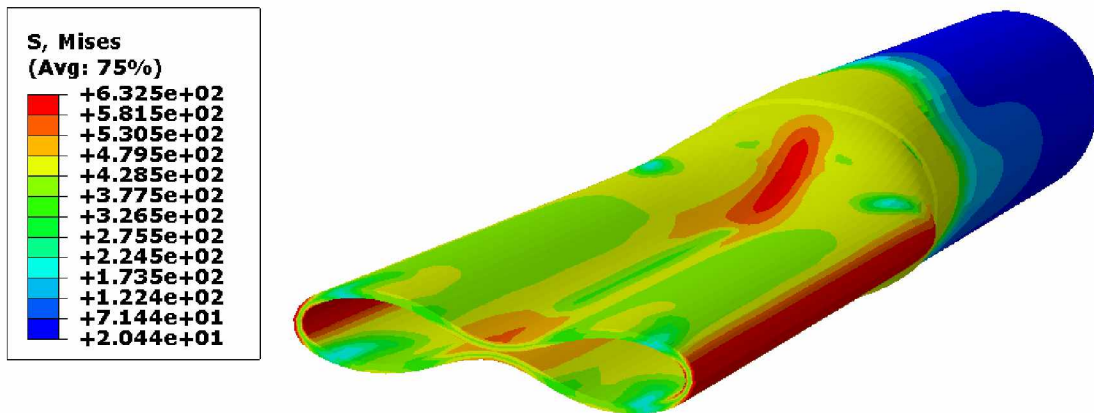
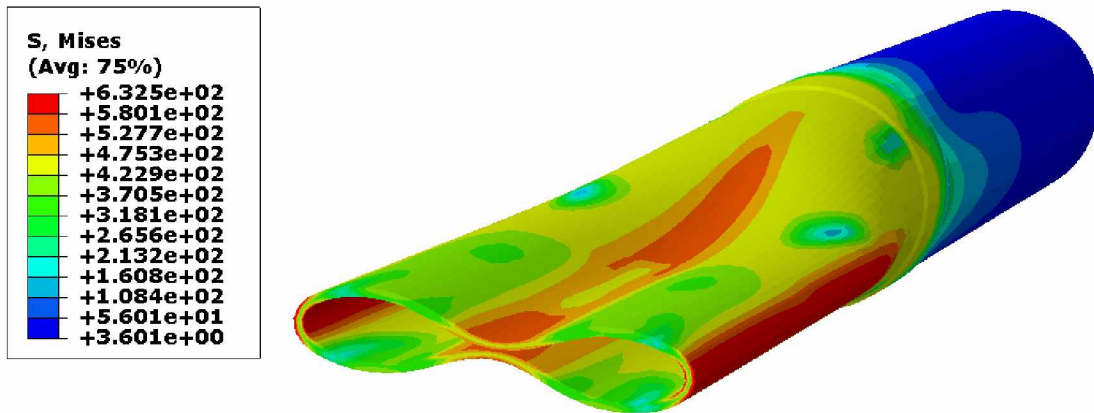
- Η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης έχει τιμή $P_c = 16.3723MP_a$ πολύ κοντά στις τιμές τις πίεσης κατάρρευσης για τα μοντέλα αγωγών του προηγούμενου κεφαλαίου. (**Σχήμα3. 5, Σχήμα3. 9, Σχήμα3. 13**)
- Η πίεση διάδοσης έχει τιμή $P_p = 2.83586MP_a$ πολύ κοντά τόσο στις θεωρητικές τιμές όσο και στις τιμές της πίεσης διάδοσης που προκύπτουν από το ABAQUS. (**Πίνακας 3**)
- Η πίεση ανάσχεσης έχει τιμή $P_{CO} = 5.5071MP_a$

Θα παραθέσουμε και εδώ κάποιες εικόνες από το ABAQUS.

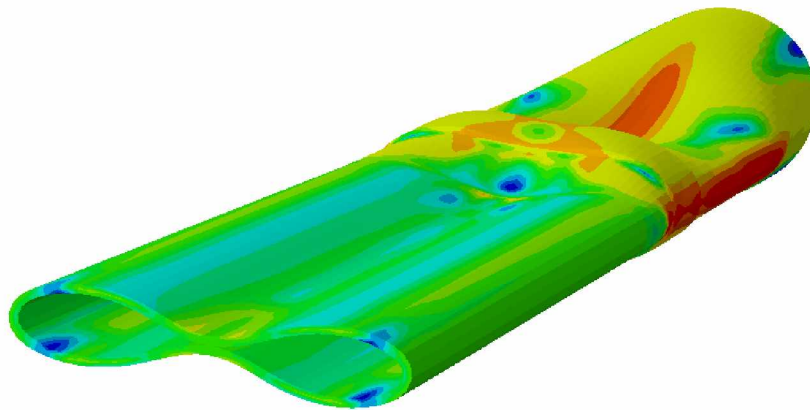
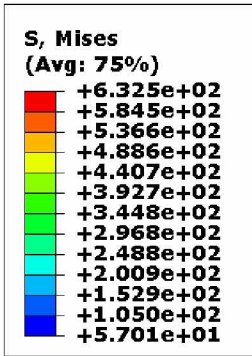
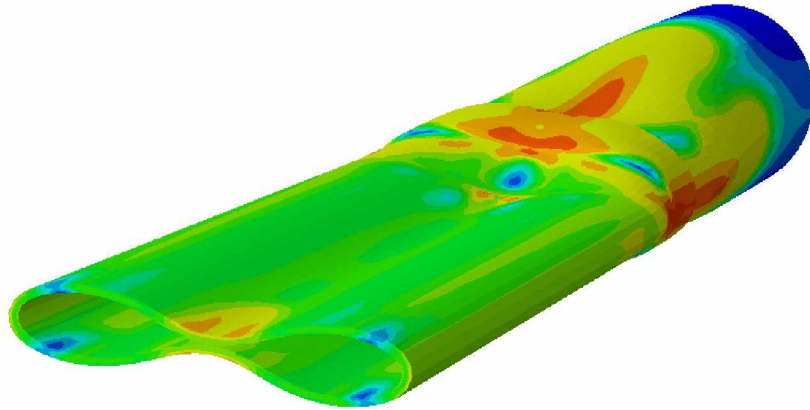
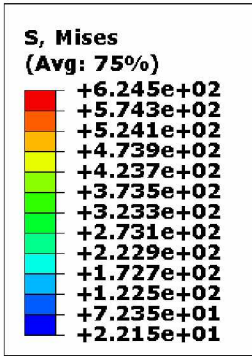
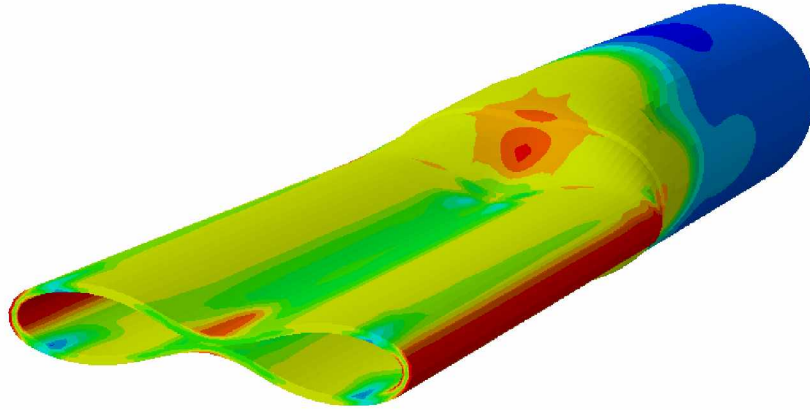
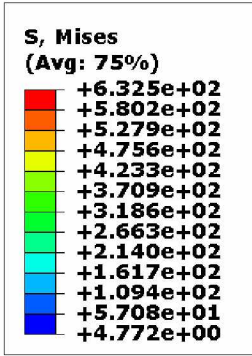
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



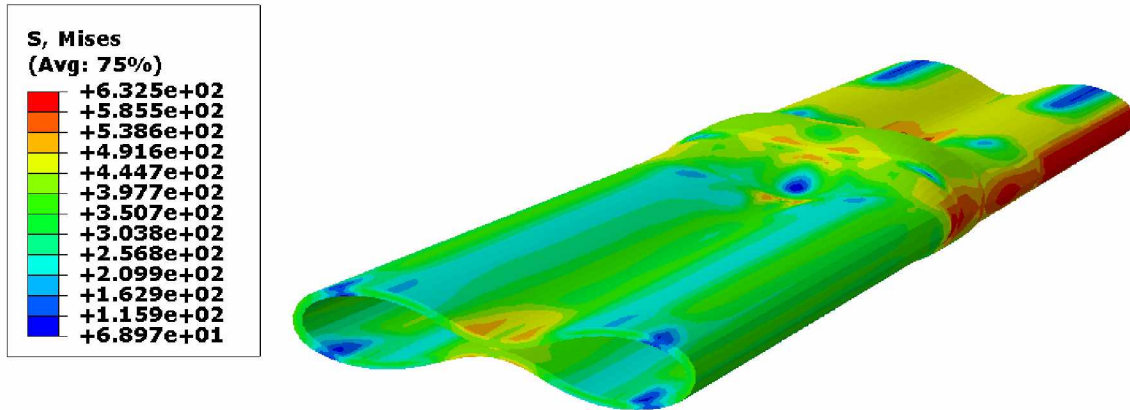
Σχήμα4. 13 Η στιγμή της πρώτης επαφής των εσωτερικών επιφανειών του αγωγού



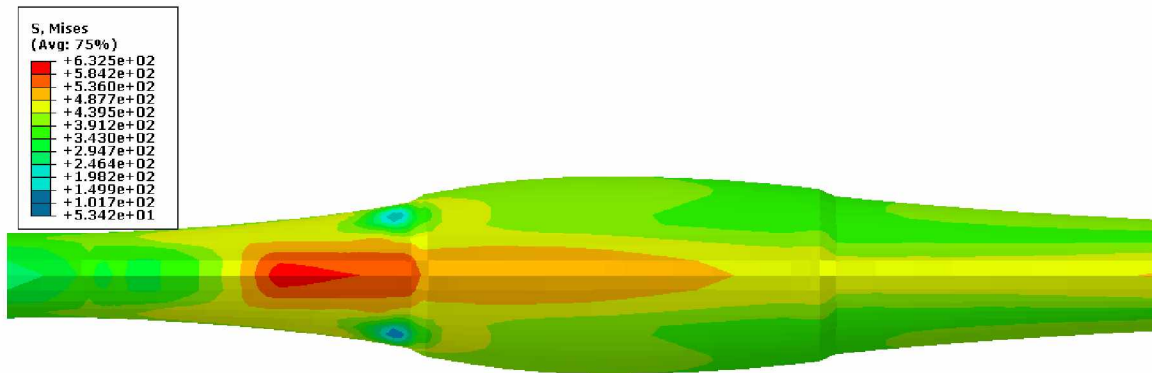
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα4. 14 Η εξέλιξη του φαινομένου μέχρι την πλήρη κατάρρευση του αγωγού και του αναστολέα.



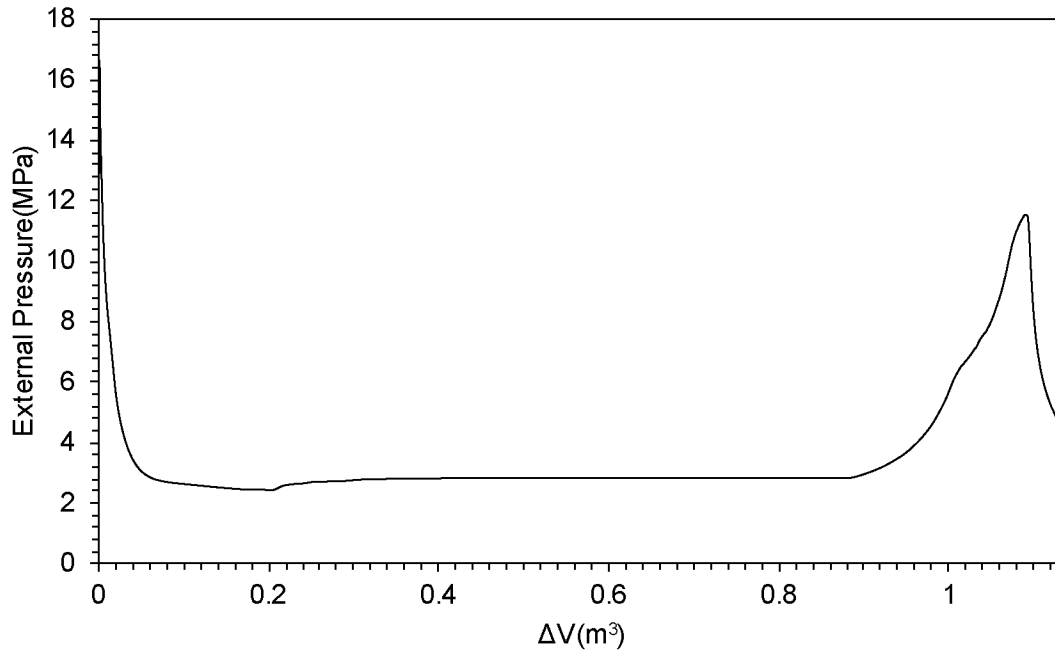
Σχήμα4. 15 Προφίλ του αναστολέα μετά την αστοχία του

Παρατηρούμε πως σε αυτή την περίπτωση η τιμή της πίεσης ανάσχεσης έχει μειωθεί αρκετά και σαν αποτέλεσμα η τιμή της πίεσης δεν παίρνει πολύ υψηλές τιμές. Για τον λόγο αυτό δεν έχουμε το φαινόμενο flip-flor.

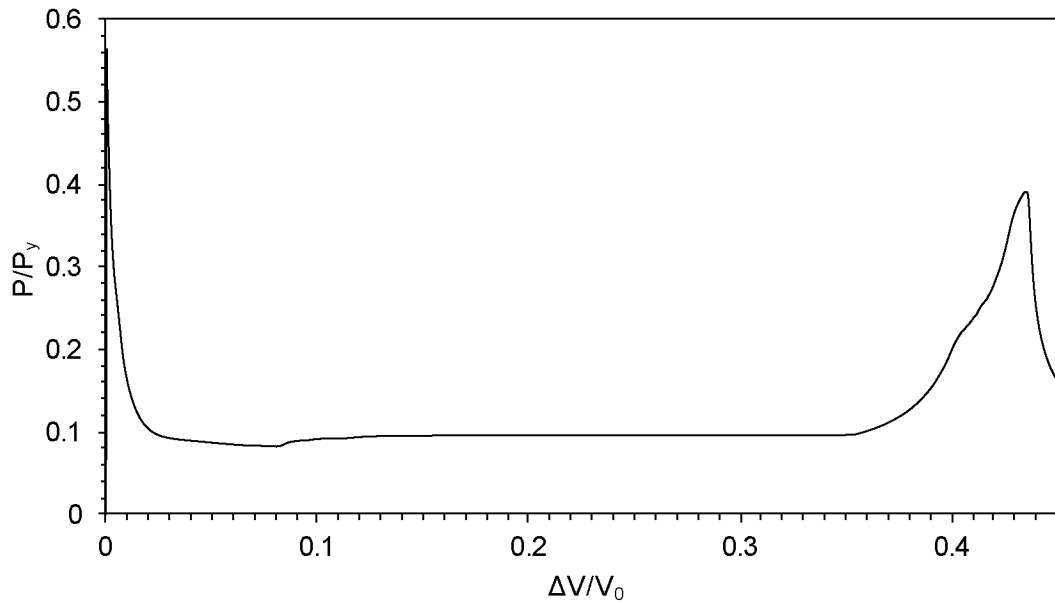
- **ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΜΕ**
 $h = 2 \cdot t = 60mm$

Ο δρόμος ισορροπίας $P - \Delta V$ για το συγκεκριμένο μοντέλο δίνεται στα ακόλουθα σχήματα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα4. 16 Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με arrester $h=2t, L=1.198D$



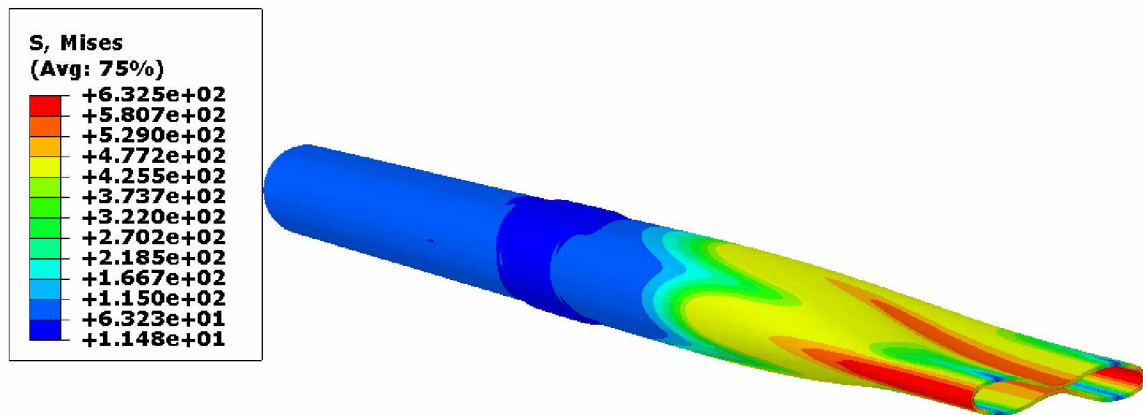
Σχήμα4. 17 Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πίεσης – Μεταβολής του Όγκου για αγωγό με arrester $h=2t, L=1.198D$

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Από τα παραπάνω διαγράμματα βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

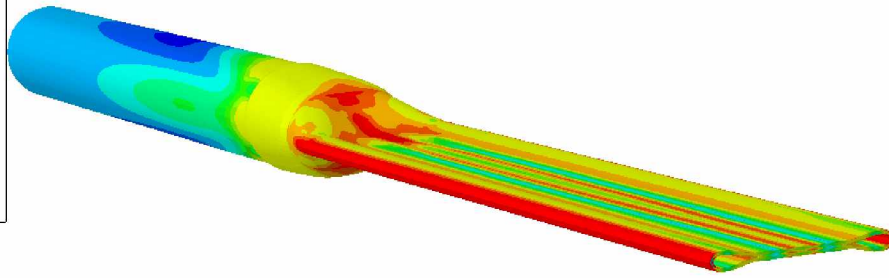
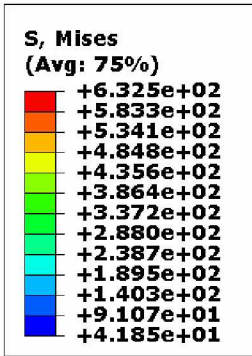
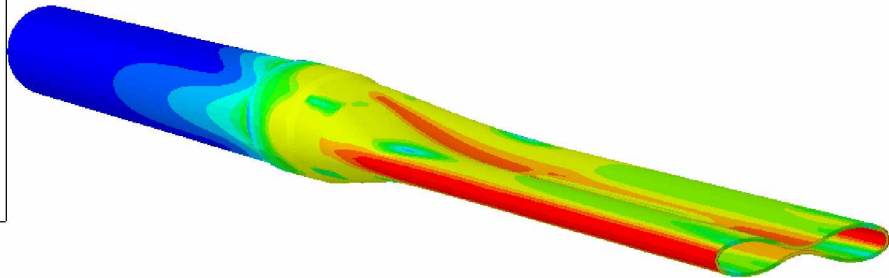
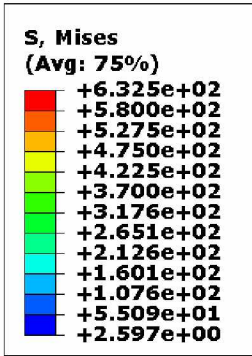
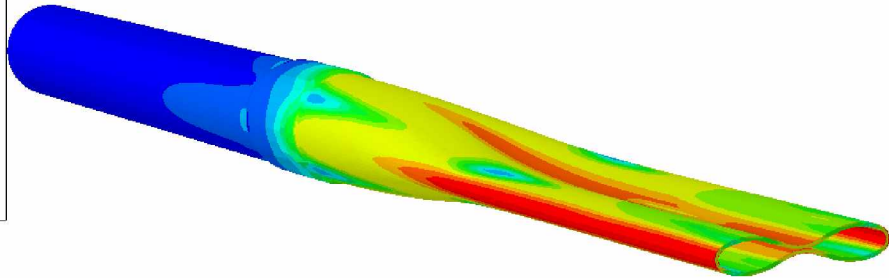
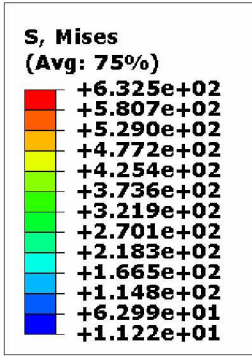
- Η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης έχει τιμή $P_c = 16.594MP_a$ πολύ κοντά στις τιμές της πίεσης κατάρρευσης για τα μοντέλα αγωγών του προηγούμενου κεφαλαίου. (Σχήμα3. 5, Σχήμα3. 9, Σχήμα3. 13)
- Η πίεση διάδοσης έχει τιμή $P_p = 2.82365MP_a$ πολύ κοντά τόσο στις θεωρητικές τιμές όσο και στις τιμές της πίεσης διάδοσης που προκύπτουν από το ABAQUS. (Πίνακας 3)
- Η πίεση ανάσχεσης έχει τιμή $P_{CO} = 11.521MP_a$

Θα παραθέσουμε και εδώ κάποιες εικόνες από το ABAQUS.

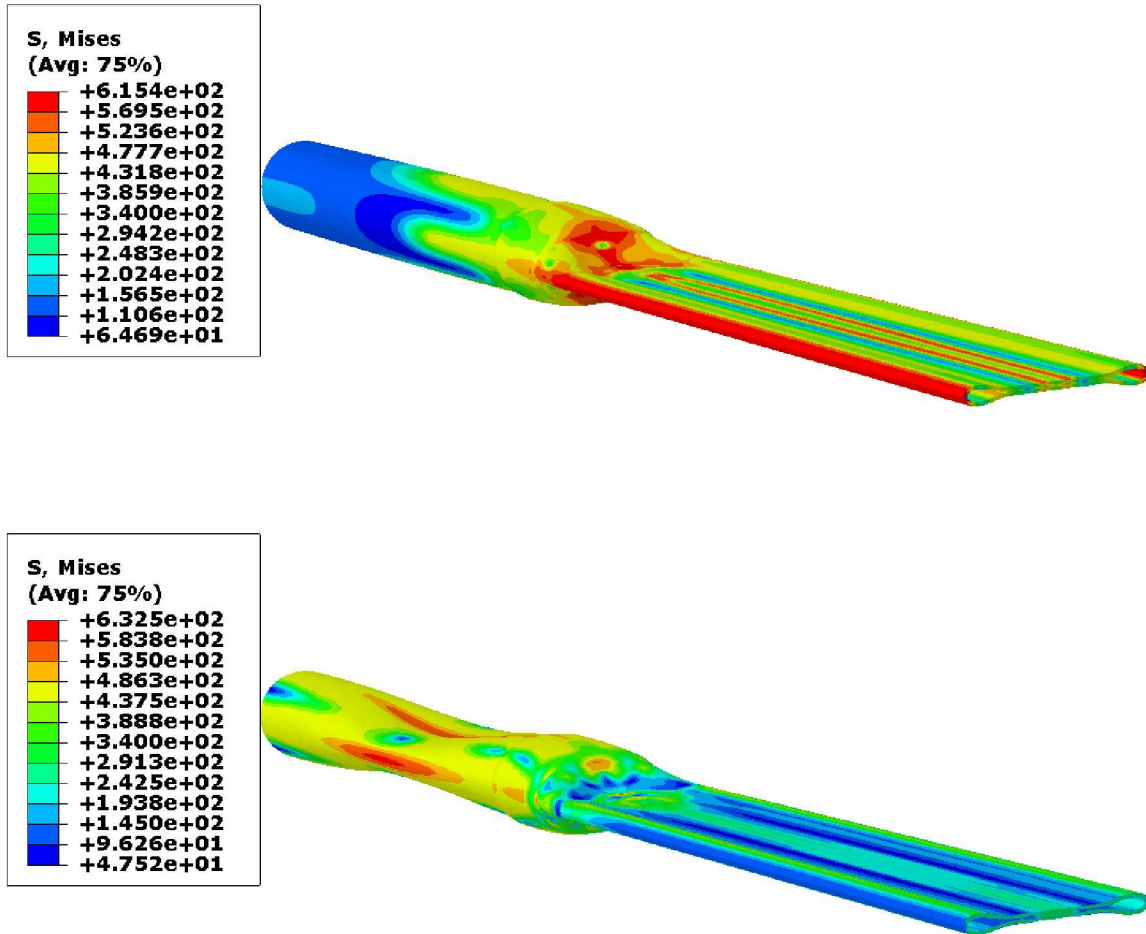


Σχήμα4. 18 Η στιγμή της πρώτης επαφής των εσωτερικών επιφανειών του αγωγού

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Σχήμα4. 19 Σταδιακή κατάρρευση του αγωγού και του αναστολέα

Ούτε σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε το φαινόμενο flip-flor καθώς η πίεση δεν πήρε πολύ υψηλές τιμές.

- ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΜΕ
 $h = 2.5 \cdot t = 75mm$

Ο δρόμος ισορροπίας $P - \Delta V$ για το συγκεκριμένο μοντέλο δίνεται από το **Σχήμα4. 2** και **Σχήμα4. 3** που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΩΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά τα διαγράμματα είναι τα εξής:

- Η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης έχει τιμή $P_c = 16.6145MP_a$ πολύ κοντά στις τιμές τις πίεσης κατάρρευσης για τα μοντέλα αγωγών του προηγούμενου κεφαλαίου. (**Σχήμα3. 5, Σχήμα3. 9, Σχήμα3. 13**)
- Η πίεση διάδοσης έχει τιμή $P_p = 2.83919MP_a$ πολύ κοντά τόσο στις θεωρητικές τιμές όσο και στις τιμές της πίεσης διάδοσης που προκύπτουν από το ABAQUS. (**Πίνακας 3**)
- Η πίεση ανάσχεσης έχει τιμή $P_{CO} = 12.7945MP_a$

Συγκρίνοντας λοιπόν και τα τρία μοντέλα αγωγών-αναστολέων που προσομοιώσαμε παρατηρούμε πως οι τιμές της κρίσιμης πίεσης κατάρρευσης και της πίεσης διάδοσης είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους και κοντά στις θεωρητικές τιμές που υπολογίσαμε.

Η μεταβολή όμως στο πάχος του αναστολέα έχει ως αποτέλεσμα μεταβολή της τιμής της πίεσης ανάσχεσης του αναστολέα. Συγκεκριμένα όσο παχύτερος ο αναστολέας τόσο μεγαλύτερη η τιμή της πίεσης ανάσχεσης που απαιτείται για να τον προσπεράσει η διαδιδόμενη ύβωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά υποθαλασσίων αγωγών υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Πιο συγκεκριμένα έγινε χρήση του υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS με σκοπό να προσομοιωθεί το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης καθώς και της αναστολής της σε υποθαλάσσιους αγωγούς.

Αρχικά έγινε μία εισαγωγή στην οποία τονίζουμε την σημασία των υποθαλάσσιων αγωγών για την αξιοποίηση των υπεράκτιων υδάτινων πόρων ενώ παρουσιάστηκαν και συγκεκριμένες μέθοδοι πόντισης υποθαλάσσιων αγωγών. Στην συνέχεια καθίσταται σαφές πόσο καταστροφικό είναι το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης στην ομαλή λειτουργία των σωλήνων και πόσο σημαντική είναι η αναστολή της. Γίνεται λοιπόν αναφορά σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου όπως είναι η Κρίσιμη Πίεση Κατάρρευσης P_c , και η πίεση διάδοσης P_p . Επίσης επισημάνθηκε η σημαντικότητα των αναστολέων, συσκευών που αναχαιτίζουν την διάδοση της ύβωσης.

Σε όλα τα μοντέλα τα οποία προσομοιώθηκαν σε αυτήν την διπλωματική έγινε θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας και ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Ακόμη εξαιτίας της συμμετρίας των μοντέλων στα επίπεδα $X - Y$ και $X - Z$ προσομοιώθηκε μόνο το ένα τέταρτο αυτών.

Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε ανάλυση ενός διδιάστατου μοντέλου δακτυλίου υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Μελετήθηκε η επίδραση που έχουν στην Κρίσιμη Πίεση Κατάρρευσης παράγοντες όπως η initial ovality και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δακτυλίου. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπεράναμε πως η αύξηση της αρχικής ατέλειας του δακτυλίου, η οποία έχει την μορφή μίας initial ovality, οδηγεί σε μείωση της αντοχής του δακτυλίου σε εξωτερική πίεση και επομένως σε μείωση της τιμής της Κρίσιμης Πίεσης Κατάρρευσης. Ενώ παράλληλα παρατηρήσαμε πως όσο μεγαλύτερος ο

λόγος $\frac{D}{t}$ δηλαδή όσο λεπτότερος ο σωλήνας τόσο η τιμή της Κρίσιμης Πίεσης

Κατάρρευσης μειώνεται. Συνεχίζοντας την ανάλυση των διδιάστατων δακτυλίων ασχοληθήκαμε με την κατάσταση γενικευμένης επίπεδης παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα μας έδειξαν πως όσο μεγαλύτερη είναι η αξονική προένταση που επιβάλλουμε στο σύστημα τόσο μειώνεται εν συνεχεία η αντοχή του δακτυλίου στην εξωτερική πίεση.

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**

Κλείνοντας το κεφάλαιο της διδιάστατης ανάλυσης πήραμε μία πρώτη εκτίμηση της πίεσης διάδοσης, της σταθερής δηλαδή πίεσης για την οποία η ύβωση διαδίδεται κατά μήκος του αγωγού. Η εκτίμηση αυτή εξάγεται από το διάγραμμα της ομοιόμορφα κατανεμημένης εξωτερικής πίεσης και της μεταβολής του εμβαδού που περικλείεται από τον δακτύλιο σύμφωνα με την μέθοδο της χάραξης της γραμμής Maxwell που πρότειναν οι Chater & Hutchinson (1984). Δυστυχώς όμως τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δεν είναι αρκετά αξιόπιστα καθώς διαφέρουν σημαντικά με τις θεωρητικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα API RP 1111 και DNVGL-ST-F101 αλλά και με τις σχέσεις που ανέπτυξαν οι Kyriakides & Babcock (1982).

Εν συνεχεία έγινε προσομοίωση τρισδιάστατων σωληνωτών αγωγών μεγάλου μήκους με σκοπό να υπολογιστεί η πίεση διάδοσης. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τρεις διαφορετικούς τύπους στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκαν shell elements τύπου S4R, solid elements τύπου C3D8R και solid elements τύπου C3D20R. Για να εκτιμηθεί η πίεση διάδοσης κάθε μοντέλου αγωγού κατασκευάστηκε ο δρόμος ισορροπίας $P - \Delta V$ για κάθε μοντέλο. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν ήταν αρκετά ικανοποιητικά και οι τιμές της πίεσης διάδοσης προσέγγιζαν σε μεγάλο βαθμό τις θεωρητικές τιμές.

Τέλος τοποθετήσαμε στο μοντέλο του αγωγού αναστολές της μορφής integral ring με στόχο να αναχαιτίσουμε την διάδοση της ύβωσης. Οι αναστολές αυτοί σχεδιάζονται με κύριες παραμέτρους το μήκος και το πάχος τους. Για την επιλογή αυτών των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο DNVGL-ST-F10. Σκοπός της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός της πίεσης ανάσχεσης. Επιπλέον επειδή στην περιοχή κοντά στον αναστολέα παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση εξαιτίας της απότομης αύξησης της πίεσης, για να γίνει μία καλύτερη εκτίμηση της πίεσης ανάσχεσης αλλά και της πίεσης διάδοσης, χρησιμοποιήθηκε πυκνότερο πλέγμα για τον αναστολέα και το τμήμα του αγωγού πριν από αυτόν.

Ολοκληρώνοντας μελετήθηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αναστολέα στην τιμή της πίεσης ανάσχεσης. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκαν άλλα δύο μοντέλα με ίδιο μήκος αναστολέα αλλά με διαφορετικό πάχος. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως όσο μεγαλύτερο το πάχος του αναστολέα τόσο υψηλότερη και η τιμή της πίεσης ανάσχεσης.

Εν κατακλείδι, το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για τους υποθαλάσσιους αγωγούς για αυτό και επιβάλλεται να πραγματοποιηθεί προσεκτικός σχεδιασμός για την αποφυγή του. Ο σχεδιασμός των αγωγών γίνεται φυσικά με βάση την Κρίσιμη Πίεση Κατάρρευσης καθώς σχεδιασμός με βάση την πίεση διάδοσης κρίνεται άκρως ανπιοικονομικός. Έτσι για την αντιμετώπιση του φαινομένου γίνεται περιοδική χρήση των αναστολέων ώστε η ύβωση να εγκλωβιστεί σε ένα μικρό τμήμα του αγωγού το οποίο δύναται να αντικατασταθεί σχετικά εύκολα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Kyriakides, S και Corona, E. 2007.** *Mechanics of offshore pipelines vol. 1.* Oxford : Elsevier, 2007.
- **Καραμάνος, Σπύρος Α. 2003.** *Σημειώσεις Μαθήματος Μη-Γραμμική Ανάλυση Κατασκευών Ευστάθεια .* Βόλος : Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- **DNVGL-ST-F101 2017,** *Submarine pipeline systems.*
- **API RP 1111 Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)(1999).**
- **Chater, E, and Hutchinson, J. W. (1984),** *On the Propagation of Bulges and Buckles, Journal of Applied Mechanics, Vol. 51, pp. 269-277.*
- **Johns_Mesloh_Sorenson_1978,** *Propagating Buckle Arrestors for Offshore Pipelines.*
- **Kamalarasa_Calladine_IJMS-1989,** *Geometry and Strain in the Transition Region of a Collapsing Submarine Pipe.*
- **Tassoulas, J. L., Katsounas, A.T. and Song, H-W. (1990),** *Finite Element Analysis of Propagating Buckles in Deepwater Pipelines, Offshore Technology Conference, Houston, Texas.*
- **Kyriakides, S. and Babcock, C. D. (1982),** *Buckle propagation phenomena in pipelines, IVTAM Symposium on Collapse, Cambridge, UK.*
- **Kyriakides, S. and Babcock, C. D. (1982),** *Experimental Determination of the Propagation Pressure of Circular Pipes, Journal of Pressure Vessel Technology.*
- **Kyriakides, S, Park T.D και Netto, T.A. 1998.** *On the design of the integral Buckle arrestors. Austin : elsevier, 1998.*
- **Palmer, A. C. and Martin, J. H., (1975),** *Buckle Propagation in Sybmarine Pipelines, Nature.*