



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΑΚΑΜΠΤΟΥ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ ΠΑΛΜΩΝ ΠΙΕΣΗΣ
ΣΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Διπλωματική Εργασία

ΡΟΥΒΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων : Επ. Καθηγητής Β. Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2017

Περίληψη

Τα υδραυλικά πλήγματα αποτελούν αντικείμενο εντατικής μελέτης αρκετών χρόνων. Ενώ η περιγραφή των μηχανισμών σε μονοδιάστατα και δισδιάστατα θεωρητικά συστήματα είναι αρκετά δομημένη, η εφαρμογή τους στην επίλυση πραγματικών προβλημάτων δεν είναι πρωταρχικός στόχος των μελετών. Βασισόμενη στα θεωρητικά μοντέλα, η παρούσα ερευνητική μελέτη προσπαθεί να προσεγγίσει το πρόβλημα από διαφορετική σκοπιά, σχετικά με τις τρέχουσες λύσεις των υδραυλικών συσσωρευτών και των αποσβεστήρων. Αντίθετα με αυτές τις λύσεις, επικεντρώνεται στην ανάπτυξη λύσεων παθητικού χαρακτήρα στα υδραυλικά κυκλώματα και ειδικότερα με την καταστροφική συμβολή ενός υδραυλικού πλήγματος με τον εαυτό του με χρήση αποκλειστικά της γεωμετρίας του σωλήνα. Αρχικά, γίνεται ανάπτυξη θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης του χρόνου μετάδοσης ενός πλήγματος μέσω ενός ελικοειδή σωλήνα σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα πορίσματα, παρουσιάζονται δύο βασικά σχέδια απόσβεσης ενός τυπικού πραγματικού υδραυλικού πλήγματος. Η μελέτη έχει σκοπό τη βασική εισαγωγή της θεωρίας μετάδοσης πληγμάτων στην παθητική αντιμετώπισή τους, γι' αυτό εξετάζεται αποκλειστικά η κυματική συνιστώσα του φαινομένου, αγνοώντας τους μηχανισμούς απόσβεσης λόγω καταστροφής ενέργειας, όπως η τριβή.

Λέξεις κλειδιά: υδραυλικό πλήγμα, απόσβεση υδραυλικού πλήγματος, καταστροφική συμβολή πληγμάτων, παθητικό σύστημα απόσβεσης υδραυλικών πληγμάτων, ελικοειδής σωλήνας

Abstract

Water hammer has been under study since the beginning of the last century. By now, the mathematical and physical description of its governing laws for one – dimensional and two – dimensional models is extensive and in depth. On the contrary, three – dimensional analysis and application on actual occurrences and problems is not a first priority for the researchers of the subject. Hydraulic systems and circuits are two engineering domains that are highly influenced by water hammer. Implementation of hydraulic accumulators or hydraulic mufflers are some of the solutions employed for problems derived from this phenomenon. However, both of those introduce added flexibility on the system they are applied on. The goal of the present study is to address the problem using a different approach. The study seeks the destructive interference of sinusoidal water hammer waves with themselves through design of a passive hydraulic circuit part focusing mainly on its geometry. At the beginning of the study, a formula is developed, correlating the time required for the water hammer to traverse through a helical pipe, with its geometrical characteristics. Furthermore, two basic constructive interference models are designed, based on the formula's results. Finally, it is important to mention that only the wave component of the water hammer was studied, without applying any dampening effects and factors, due to the introductory nature of the study.

Keywords: water hammer, water hammer attenuation, water hammer destructive interference, passive attenuation of water hammer, helical pipe

Περιεχόμενα

Κατάλογος διαγραμμάτων	7
Κατάλογος πινάκων	7
Κατάλογος εικόνων.....	8
Εισαγωγή	9
1. Βασικές αρχές	10
1.1. Το υδραυλικό πλήγμα	10
1.1. Θεωρία μετάδοσης πληγμάτων	10
1.1.1. Μέθοδος εξαγωγής εξισώσεων.....	11
1.2. Ταχύτητα μετάδοσης ήχου σε ρευστό μέσα σε σωλήνα	16
1.3. Θεωρία μετάδοσης κυμάτων	18
2. Παρουσίαση του προβλήματος.....	20
3. Μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος.	21
3.1. Λογισμικό ανάλυσης.....	21
3.1.1. Γνωριμία με το πρόγραμμα και το φαινόμενο	22
3.2. Γεωμετρία μελέτης και μοντέλο συσχέτισης	26
3.2.1. Γεωμετρία μοντέλων.....	26
3.2.2. Διαστατική ανάλυση.....	27
3.2.3. Πλεγματοποίηση.....	31
3.2.4. Οριακές συνθήκες.....	34
3.2.5. Χαρακτηριστικά διέγερσης.....	35
3.2.6. Χρονική κλίμακα αναλύσεων	36
3.2.7. Χαρακτηριστικά ρευστού	37
3.2.8. Επεξεργασία και αποτελέσματα	37
3.2.9. Ακρίβεια μοντέλου	41
4. Σχεδιαστική πρόταση λύσεων.....	43
4.1. Ορισμός τεχνικών προδιαγραφών και περιβαλλοντικών συνθηκών.....	43
4.2. Μελέτη τοιχωμάτων σωλήνωσης/καναλιού.....	43
4.3. Σχεδιασμός και παρουσίαση αποτελεσμάτων	46
4.3.1. Κύριο σώμα διάταξης	46
4.3.2. Διαχωριστής.....	47
4.3.3. Ζεύκτης.....	50
4.3.3.A. Ζεύκτης όμοιος με διαχωριστή.....	50
4.3.3.B. Ζεύκτης με ομόκεντρη συμβολή	55
4.4. Τελική γεωμετρία διάταξης.....	61
5. Συμπεράσματα	63
6. Προτάσεις ως αντικείμενο περαιτέρω μελέτης.....	63

7.	Βιβλιογραφία	64
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ.....	65

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Μορφή εισαγωγής διέγερσης στο πρόγραμμα, και σύγκρισή της με την πραγματική καμπύλη διέγερσης (συχνότητα φαινομένου 300Hz)	36
Διάγραμμα 2 Μεταβολή μεγίστων και ελαχίστων τιμών πλάτους ταλάντωσης πίεσης στις δύο επιφάνειες λήψης δεδομένων (εισόδου, εξόδου)	38
Διάγραμμα 3 Μεταβολή της αδιάστατης μεταβλητής Π_4 συναρτήσει μεταβολής της μεταβλητής Π_1	38
Διάγραμμα 4 Μεταβολή της αδιάστατης μεταβλητής Π_4 συναρτήσει μεταβολής της μεταβλητής Π_2	39
Διάγραμμα 5 Μεταβολή της αδιάστατης μεταβλητής Π_4 συναρτήσει μεταβολής της μεταβλητής Π_3	39
Διάγραμμα 6 Συσχέτιση μεταβολών Π_4 με μεταβολή των ανεξάρτητων αδιάστατων μεταβλητών Π_1, Π_2, Π_3	40
Διάγραμμα 7 Παρατηρούμενη και εκτιμώμενη τιμή μεταβλητής Π_4 και ποσοστιαία μεταβολή της	42
Διάγραμμα 8 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή της πίεσης στις επιφάνειες εισόδου καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης	51
Διάγραμμα 9 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή του πεδίου πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο	53
Διάγραμμα 10 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή της πίεσης στις επιφάνειες εισόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο	56
Διάγραμμα 11 Τιμή μέγιστης και ελάχιστης πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο	58

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Σχεδιαστικά μεγέθη για ποσοστιαία μεταβολή της Π_1 κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$	29
Πίνακας 2 Σχεδιαστικά μεγέθη για ποσοστιαία μεταβολή της Π_2 κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$	30
Πίνακας 3 Σχεδιαστικά μεγέθη για ποσοστιαία μεταβολή της Π_3 κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$	30
Πίνακας 4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων επαλήθευσης πειραματικού μοντέλου	41
Πίνακας 5 Σύγκριση παρατηρούμενης και εκτιμώμενης αδιάστατης μεταβλητής στόχου	41

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Όγκος ελέγχου ρευστού για εφαρμογή της διατήρησης της μάζας. [7]	12
Εικόνα 2 Όγκος ελέγχου ρευστού για εφαρμογή διατήρησης της ορμής [7]	13
Εικόνα 3 Συσσωρευτής για παραλαβή φορτίου υπερπίεσης υδραυλικών πληγμάτων	20
Εικόνα 4 Υδραυλικός Σιγαστήρας (Πηγή: http://www.meielevatorsolutions.com/components-parts/silencer)	20
Εικόνα 5 Δείγμα από τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν για εγκλιματισμό. Αποτελεί μέρος από σύνολο με ίδιες διαστάσεις αλλά διαφορετικά μεγέθη γωνίας (30°, 45°, 60°, 90°)	22
Εικόνα 6 (ζεύγη 1-8) Πεδίο πίεσης για την γεωμετρία γωνίας σε διάφορες χρονικές στιγμές (αναγράφονται στις εικόνες) στις τομές AA και BB αριστερά και δεξιά αντίστοιχα (προσδιορίζονται στην εικόνα (5))	25
Εικόνα 7 Μοντέλο αριθμητικών αναλύσεων. Σημειώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος	26
Εικόνα 8 Διαμέριση κάθετης διατομής σωλήνωσης σε πεπερασμένα στοιχεία	32
Εικόνα 9 Πλήρες πλέγμα ακουστικού σώματος (παραλλαγή γεωμετρίας που μελετήθηκε)	33
Εικόνα 10 Επιφάνειες από τις οποίες έγινε λήψη δεδομένων	37
Εικόνα 11 Πεδίο παραμορφώσεων για φόρτιση κυλίνδρου δακτυλιοειδούς διατομής από εσωτερική πίεση 350Bar	45
Εικόνα 12 Όγκος ρευστού διαχωριστή. Πρόοψη, άνοψη και ισομετρικό μοντέλο	47
Εικόνα 13 Πεδίο πιέσεων στην επιφάνεια του διαχωριστή που ορίζεται από την γραμμή τομής BB (τελευταία χρονική στιγμή προσομοίωσης)	48
Εικόνα 14 Πεδίο πιέσεων στις δύο επιφάνειες εξόδου του διαχωριστή (τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης)	48
Εικόνα 15 Πεδίο πιέσεων στις επιφάνειες εισόδου ζεύκτη όμοιου με τον διαχωριστή (τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης)	50
Εικόνα 16 Πεδίο πίεσης στο ζεύκτη την τελευταία χρονική τιμή της προσομοίωσης	52
Εικόνα 17 Πεδίο πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη την τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης	52
Εικόνα 18 (1-6 από αριστερά προς τα δεξιά) Πεδίο πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη για επιλεγμένες χρονικές στιγμές από το χρονικό διάστημα [1.3e-5s – 2e-5s]	54
Εικόνα 19 Όγκος ρευστού διαχωριστή. Πολλαπλές όψεις και ισομετρικό μοντέλο	55
Εικόνα 20 Πεδίο πιέσεων στις επιφάνειες εισόδου ζεύκτη όμοιου με τον διαχωριστή (τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης)	56
Εικόνα 21 (1-4 από αριστερά προς τα δεξιά) Πεδίο πίεσης του ζεύκτη για την τελευταία χρονική στιγμή (Πάνω: πρόοψη και πλάγια όψη. Κάτω: επιφάνεια που ορίζεται από την γραμμή τομής AA και λεπτομέρεια της επιφάνειας στην περιοχή της επιφάνειας εξόδου του ζεύκτη)	57
Εικόνα 22 Πεδίο πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη την τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης	58
Εικόνα 23 (1-6 από αριστερά προς τα δεξιά) Πεδίο πίεσης επιφάνειας εξόδου του ζεύκτη για επιλεγμένες χρονικές στιγμές από το διάστημα [4.3e-5s – 5e-5s]	59
Εικόνα 24 Διάταξη απόσβεσης υδραυλικών πληγμάτων. Παραλλαγή όμοιου τρόπου διαχωρισμού - ζεύξης ροής	61
Εικόνα 25 Διάταξη απόσβεσης υδραυλικών πληγμάτων. Παραλλαγή ομόκεντρης ζεύξης ροής	62

Εισαγωγή

Τα υδραυλικά συστήματα αποτελούν αντικείμενο μελέτης και πρακτικής εφαρμογής εδώ και χιλιάδες χρόνια. Στην αρχαιότητα παρατηρούνται μέσα μετατροπής της ενέργειας του νερού σε άλλες μορφές, όπως μύλοι δημητριακών ή διατάξεις μεταφοράς και αποθήκευσης του για ύδρευση και άρδευση. Αξιοσημείωτα επιτεύγματα της υδραυλικής μπορούμε να δούμε στην αρχαία Ελλάδα, όπως το Ευπαλίνειο όρυγμα στη Σάμο ως υδραγωγείο [1], στην αρχαία Κίνα, όπου μύλοι χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση φυσερών σιδηρουργείων. Τα ρωμαϊκά υδραγωγεία είναι πασίγνωστα για το μέγεθος τους και τη μηχανική τους. Παράλληλα, βλέπουμε και χρήση της ισχύος του νερού για εξόρυξη διαφόρων μετάλλων, όπως τα ορυχεία χρυσού στην Λας Μέδουλας της Ισπανίας [2].

Αυτή η πρώιμη επαφή με τα υδραυλικά συστήματα όμως έμελλε να αλλάξει σε μια πιο δομημένη προσέγγιση με την άφιξη των μαθηματικών εργαλείων στην περίοδο του διαφωτισμού. Πλέον η κατανόηση και η ανάλυση της δυναμικής των ρευστών γίνεται σε πολύ βαθύτερο επίπεδο και το γεγονός αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη υδραυλικών συστημάτων για περιπλοκότερες εργασίες. Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα έχουμε την υλοποίηση των υδραυλικών κυκλωμάτων μετάδοσης ισχύος και τον πρώτο βασικό καταναλωτή της, την υδραυλική πρέσα [3].

Σήμερα, τα υδραυλικά συστήματα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των εφαρμογών που απαιτούν μεταφορά ή εφαρμογή υψηλής ή υπερυψηλής πυκνότητας ισχύος. Αυτά τα συστήματα δεν είναι χωρίς μειονεκτήματα και ένα από αυτά, το υδραυλικό πλήγμα, θα μελετηθεί και θα επιλυθεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

1. Βασικές αρχές

1.1. Το υδραυλικό πλήγμα

Το υδραυλικό πλήγμα ως φαινόμενο έγινε αντιληπτό μέσω των αποτελεσμάτων του κατά τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, όταν υδραυλικά συστήματα αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της βιομηχανίας. Παρατηρήθηκε λοιπόν, ότι πολλά συστήματα είχαν υποστεί βλάβη λόγω υπερπιέσεων. Μετά από μελέτη του φαινομένου διαπιστώθηκε ότι δημιουργούνταν κύματα πίεσης -το υδραυλικό πλήγμα- λόγω του απότομου κλεισίματος βαλβίδων ελέγχου ροής. Το πρόβλημα ήταν ότι αυτό τα κύματα συνέβαλαν στην υπέρβαση του ορίου πίεσης σύμφωνα με το οποίο είχε κατασκευαστεί η σωλήνωση. Η προσπάθεια ελέγχου αυτής της μεταβολής οδήγησε στην μελέτη των μεταβατικών φαινομένων που συνέβαιναν στα υδραυλικά συστήματα.

Με την περαιτέρω μελέτη του φαινομένου έγινε αντιληπτό ότι υδραυλικά πλήγματα δεν δημιουργούνται μόνο από απότομα κλεισίματα βαλβίδων, αλλά και από την λειτουργία και άλλων υδραυλικών στοιχείων, όπως αντλίες και πιο γενικευμένα από την απότομη αλλαγή της ορμής του ρευστού.

1.1. Θεωρία μετάδοσης πληγμάτων

Οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με το φαινόμενο προσπάθησαν να συσχετίσουν την αλλαγή στην πίεση του ρευστού με την αλλαγή της ταχύτητάς του. Η σχέση που ξεχώρισε είναι η λεγόμενη βασική εξίσωση υδραυλικών πληγμάτων του Joukowski [4] η οποία είναι:

$$\Delta P = \pm \rho a \Delta V \quad \text{ή} \quad \Delta H = \pm \frac{a \Delta V}{g} \quad (1)$$

Όπου:

ΔP : μεταβολή πίεσης του ρευστού στον σωλήνα

ρ : πυκνότητα του ρευστού

a : ταχύτητα του ήχου στο ρευστό

ΔV : μεταβολή μέσης ταχύτητας κάθετης διατομής σωλήνα

ΔH : μεταβολή πιεζομετρικού ύψους

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

Το θετικό πρόσημο στην εξίσωση (1) υποδηλώνει κύμα πίεσης που μεταφέρεται κατά την φορά της ροής του ρευστού στην σωλήνωση ενώ το αρνητικό πρόσημο είναι για κύματα που μεταφέρονται αντίθετα με την ροή του ρευστού. Αυτή η εξίσωση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά όχι αρκετής ακρίβειας.

Μια πιο ακριβής θεωρία μετάδοσης των πληγμάτων σε σωληνώσεις εκκινήθηκε από τον Allievi ([5], [6]) το 1902 επηρεασμένος από την βλάβη στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας του Τέρνι στην Ιταλία. Αναπτύχθηκε από τις βασικές εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής αποδεικνύοντας ότι οι συναγωγικοί όροι στην εξίσωση διατήρησης της ορμής ήταν αμελητέοι. Με συμβολή και άλλων επιστημόνων, η συνδυασμένη και βελτιωμένη θεωρία περιλαμβάνεται στις παρακάτω εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής για μονοδιάστατη ανάλυση υδραυλικού πλήγματος:

$$\frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4}{\rho D} \tau_w = 0 \quad (3)$$

Όπου:

α : ταχύτητα του ήχου στο μέσο

H : πιεζομετρικό ύψος

V : ταχύτητα ροής του ρευστού

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

D : διάμετρος διατομής σωλήνα

ρ : πυκνότητα ρευστού

τ_w : διατμητική τάση στο τοίχωμα του σωλήνα

1.1.1. Μέθοδος εξαγωγής εξισώσεων

Η εξαγωγή αυτών των σχέσεων γίνεται με εφαρμογή του θεωρήματος διατήρησης μάζας και ορμής για ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου του ρευστού. Η ροή θεωρείται ότι είναι μονοδιάστατη. Αυτό σημαίνει ότι κάθε επιφάνεια κάθετης διατομής του σωλήνα περιγράφεται από μία πίεση και μία μέση ταχύτητα μόνο. Αν λοιπόν εφαρμοστεί διατήρηση της μάζας

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (4)$$

Όπου

ρ : πυκνότητα του ρευστού

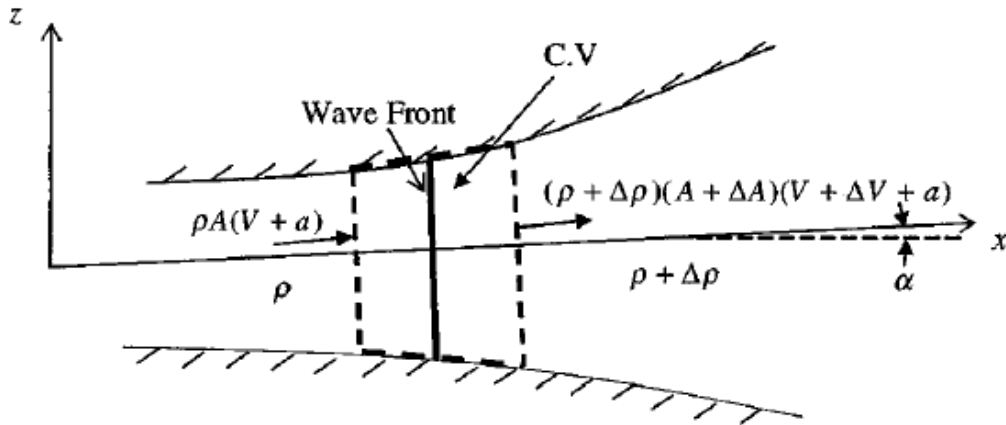
v : διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού

n : κάθετο διάνυσμα επιφανείας με φορά προς τα έξω του όγκου ελέγχου

cv : όγκος ελέγχου

cs : επιφάνεια όγκου ελέγχου

στον παρακάτω στοιχειώδη όγκο του ρευστού προκύπτει:



Εικόνα 1 Όγκος ελέγχου ρευστού για εφαρμογή της διατήρησης της μάζας. [7]

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+\delta x} \rho A dx + \int_{cs} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (5)$$

Αν ολοκληρωθεί η σχέση (5) για $\delta x \rightarrow 0$ τότε προκύπτει η σχέση μεταφοράς μάζας για μονοδιάστατη ασταθή ροή συμπιεστών ρευστών σε παραμορφώσιμο σωλήνα:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A v)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Ειδικότερα, ο πρώτος όρος της εξίσωσης περιγράφει την μεταβολή της μάζας λόγω της συμπιεστότητας του ρευστού και της ελαστικότητας του σωλήνα, και ο δεύτερος όρος περιγράφει την μεταβολή μάζας λόγω της μεταφοράς της εντός ή εκτός του όγκου ελέγχου.

Η εξίσωση (6) μπορεί να μεταγραφεί χρησιμοποιώντας τον ορισμό της υλικής παραγώγου $D/Dt = \partial/\partial t + v \partial/\partial x$. Η σχέση μετατρέπεται λοιπόν σε:

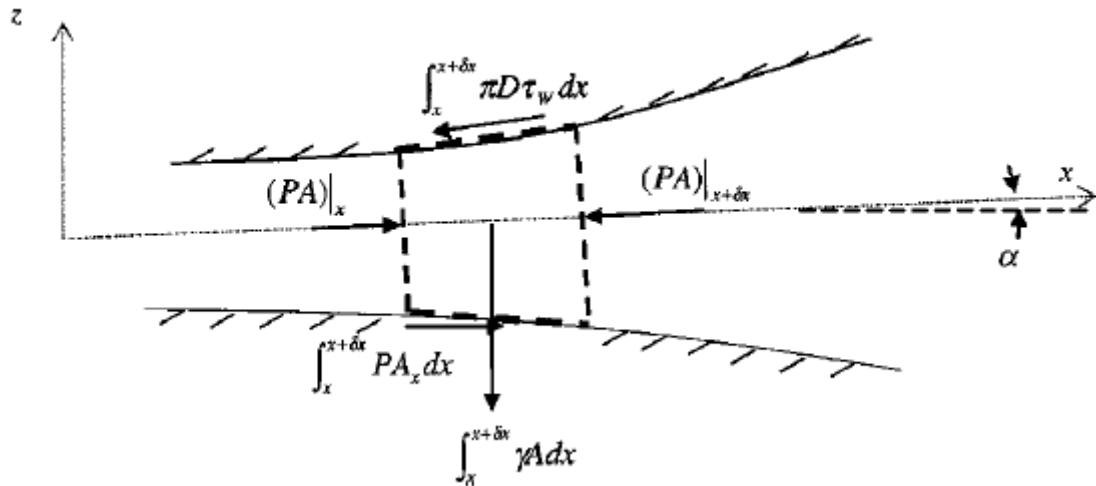
$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{1}{A} \frac{DA}{Dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{1}{\rho A} \frac{D\rho A}{Dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Η πυκνότητα και η επιφάνεια διατομής, όμως, εξαρτώνται από την πίεση (τα τοιχώματα του σωλήνα είναι ελαστικά). Τότε είναι δυνατόν να αναλυθεί περαιτέρω η εξίσωση (7) με βάση τον κανόνα της αλυσίδας. Προκύπτει λοιπόν:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dP} \frac{DP}{Dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dP} \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{1}{\rho a^2} \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Όπου εισάγεται το μέγεθος της ταχύτητας του ήχου, a , στο μέσο. Αυτή ισούται με $a^{-2} = d\rho/dP + \rho dA/A dP$ και θα παρουσιαστεί στην συνέχεια πως προκύπτει αυτή η σχέση.

Η ίδια συλλογιστική πορεία ακολουθείται και για την εξίσωση ορμής. Θεωρείται παρόμοιος όγκος ελέγχου:



Εικόνα 2 Όγκος ελέγχου ρευστού για εφαρμογή διατήρησης της ορμής [7]

και εφαρμόζεται αρχή διατήρησης της ορμής σε αυτόν τον όγκο ελέγχου:

$$\sum F_{ext} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho v dV + \int_{cs} \rho u (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \quad (9)$$

Όπου

ρ : πυκνότητα του ρευστού

v : διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού

n : κάθετο διάνυσμα επιφάνειας με φορά προς τα έξω του όγκου ελέγχου

cv : όγκος ελέγχου

cs : επιφάνεια όγκου ελέγχου

Αν για εξωτερικές δυνάμεις θεωρηθούν οι βαρυτικές, οι διατμητικές λόγω τριβής με τα τοιχώματα του σωλήνα και οι δυνάμεις λόγω πίεσης εκτός όγκου ελέγχου, η εξίσωση (9) μετατρέπεται σε:

$$\frac{\partial \rho A v}{\partial t} + \frac{\partial \beta \rho A v^2}{\partial x} = -A \frac{\partial P}{\partial x} - \pi D \tau_w - \gamma \sin(\alpha) \quad (10)$$

Όπου:

$\beta = \int_A u^2 dA / v^2$: συντελεστής διόρθωσης της ορμής

γ : μοναδιαία βαρυτική δύναμη

α : γωνία μεταξύ άξονα σωλήνα και x' x

Χρησιμοποιώντας, πλέον, την εξίσωση (10), την παραγωγή γινομένου και διαιρώντας με (ρA) και τα δύο μέλη της εξίσωσης προκύπτει η μη συντηρητική γραφή της εξίσωσης της ορμής:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho A} \frac{\partial(\beta-1)\rho A v^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin a + \frac{\tau_w \pi D}{\rho A} = 0 \quad (11)$$

Όπου

ρ : πυκνότητα του ρευστού

v : διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού

$\beta = \int_A u^2 dA / v^2$: συντελεστής διόρθωσης της ορμής

A : εμβαδό διατομής σωλήνα

τ_w : διατμητική τάση στο τοίχωμα του σωλήνα

P : πίεση

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

Οι εξισώσεις (8) και (11) αποτελούν τις θεμελιώδεις εξισώσεις περιγραφής μονοδιάστατης, ασταθούς, συμπιεστής ροής σε ελαστικό σωλήνα. Για να μπορέσουν να περιγράψουν το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος θα πρέπει να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία.

Η ταχύτητα μετάδοσης του πλήγματος είναι ίση με την ταχύτητα του ήχου στο μέσο μετάδοσης, το οποίο σημαίνει ότι για τυπικές περιπτώσεις ρευστών αυτή αντιστοιχεί σε 100m/s με 1500 m/s. Παράλληλα, μια τυπική ροή ρευστού σε υδραυλικά κυκλώματα δύσκολα ξεπερνά ταχύτητες των 10 m/s. Φαίνεται λοιπόν ότι ο αριθμός Mach των φαινομένων των υδραυλικών πληγμάτων, $M = U_1 / a$, είναι της τάξης $10^{-2} - 10^{-3}$ m/s (το U_1 είναι η παράμετρος αδιαστατοποίησης της ταχύτητας). Για να συνεχιστεί η ανάλυση, έχοντας ως παραδοχή τον μικρό αριθμό Mach, θα πρέπει να γίνει αδιαστατοποίηση των εξισώσεων (8) και (11). Με αυτό ως γνώμονα, αδιαστατοποιούνται τα μεγέθη των εξισώσεων με τα παρακάτω μεγέθη:

- Η πίεση αδιαστατοποιείται με το μέγεθος $\rho_0 a U_1$
- Ο χρόνος αδιαστατοποιείται με το μέγεθος $T = \zeta L / a$
- Το μήκος με $X = a T = \zeta L$
- Και η διατμητική τάση με το μέγεθος $\rho f U^2 / 8$

Όπου:

ρ_0 : η πυκνότητα του ρευστού στην φυσική του κατάσταση

a : η ταχύτητα του ήχου στο μέσο

U_1 : παράμετρος αδιαστατοποίησης της ταχύτητας

L : μήκος σωλήνωσης

ζ : μία θετική παράμετρος

f : συντελεστής τριβής Darcy-WeisBach

Η σημασία της παραμέτρου (ζ) έγκειται στο ότι με τη μεταβολή της μπορούμε να μελετήσουμε το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος σε διαφορετικές κλίμακες χρόνου και μήκους. Κάνοντας, λοιπόν, την αδιαστατοποίηση στις εξισώσεις προκύπτει:

$$\frac{\rho_0}{\rho} \frac{DP^*}{Dt^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\rho_0}{\rho} \left(\frac{\partial P^*}{\partial t^*} + Mv^* \frac{\partial P^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial t^*} + Mv^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + M \frac{1}{\rho A} \frac{\partial(\beta-1)\rho A v^{*2}}{\partial x^*} + \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{g\zeta L}{Ua} \sin \alpha + \frac{\zeta L}{D} M \frac{f}{2} \tau_w^* = 0 \quad (13)$$

Όπου τα μεγέθη με τον αστερίσκο είναι αδιαστατοποιημένα.

Σύμφωνα με την παραδοχή ότι ο αριθμός Mach είναι αρκετά μικρότερος της μονάδας στα φαινόμενα υδραυλικών πλήγματος, μπορούν να αγνοηθούν οι όροι που τον έχουν πολλαπλασιαστική. Αντιστρέφοντας την αδιαστατοποίηση προκύπτει:

$$\frac{1}{\rho a^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \alpha + \frac{\tau_w \pi D}{\rho A} = 0 \quad (15)$$

Το επόμενο βήμα προς τις βασικές εξισώσεις του υδραυλικού πλήγματος είναι να χρησιμοποιηθεί ο ορισμός του πιεζομετρικού ύψους: $P / g\rho_0 = H - Z$, όπου H το πιεζομετρικό ύψος και Z η στάθμη «βάσης», η οποία θα θεωρηθεί μηδέν, για λόγους απλότητας υπολογισμών. Οι εξισώσεις (14) και (15) μετατρέπονται λοιπόν σε:

$$\frac{g\rho_0}{\rho a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\tau_w \pi D}{\rho A} = 0 \quad (17)$$

Από την βιβλιογραφία, είναι γνωστό ότι για μικρούς αριθμούς Mach σε μεταβατικές ροές συμπιεστού ρευστού, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση των υδραυλικών πλήγματος, η πυκνότητά του είναι ανάλογη με το τετράγωνο του αριθμού Mach. Συνεπώς μπορεί να προκύψει η παραδοχή $\rho \approx \rho_0 \Rightarrow \rho_0 / \rho \approx 1$. Έτσι παρουσιάζεται η τελική μορφή των βασικών εξισώσεων που περιγράφουν το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος σε μονοδιάστατη ροή συμπιεστού ρευστού με αριθμό Mach αρκετά μικρό:

$$\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\tau_w \pi D}{\rho A} = 0 \quad (19)$$

1.2. Ταχύτητα μετάδοσης ήχου σε ρευστό μέσα σε σωλήνα

Το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος αποτελείται από δύο στελέχη, το ακουστικό και το μαζικό. Το δεύτερο αποτελεί ένα κύμα πίεσης το οποίο χαρακτηρίζεται από την μεταφορά μάζας. Κινείται με την ταχύτητα του ρευστού στην σωλήνωση. Εμφανίζεται και στην δίχως πλήγματα λειτουργία των υδραυλικών συστημάτων καθώς είναι ο τρόπος μεταφοράς της πληροφορίας της πίεσεως. Αντίθετα, το πρώτο στέλεχος του πλήγματος είναι ένα κύμα που χαρακτηρίζεται από την ταλάντωση των μορίων του ρευστού, χωρίς όμως μεταφορά της θέσης ισορροπίας της. Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο μεταδίδονται και οι ήχοι στον αέρα. Συνεπώς, όλοι οι νόμοι και οι εξισώσεις που διέπουν την μεταφορά του ήχου σε κάποιο μέσο θα περιγράψουν και το στέλεχος αυτό του κύματος.

Αρχικά η ταχύτητα μετάδοσης του πλήγματος είναι ίση με την ταχύτητα του ήχου στο μέσο στο οποίο συμβαίνει. Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα του ήχου σε ρευστό μέσα σε σωλήνα δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{d\rho}{dP} + \frac{\rho}{A} \frac{dA}{dP} \quad (20)$$

Όπου:

a: ταχύτητα του ήχου στο μέσο

ρ : πυκνότητα μέσου

P: πίεση

A: επιφάνεια διατομής σωλήνωσης

Από το δεύτερο μέλος της εξίσωσης γίνεται φανερό ότι η ταχύτητα του ήχου στο μέσο εξαρτάται από την ελαστικότητα του ίδιου του μέσου και από την ελαστικότητα τη σωλήνωσης στην οποία βρίσκεται. Ανάλογα με τις υποθέσεις που υιοθετούνται σε κάθε πρόβλημα, η ταχύτητα του ήχου μπορεί να ληφθεί ανεξάρτητη από κάποιον από τους δύο παράγοντες. Αν λοιπόν είναι επιθυμητό να βρεθεί η ταχύτητα του ήχου σε συμπιεστό ρευστό μέσα σε ασυμπιεστο σωλήνα, τότε μηδενίζεται ο παράγοντας $d\rho/dP$. Ανάλογα, αν είναι επιθυμητό να βρεθεί η ταχύτητα ενός ασυμπιεστού ρευστού μέσα σε συμπιεστό σωλήνα, τότε μηδενίζεται ο παράγοντας dA/dP .

Το δεξί μέλος της εξίσωσης (20) μελετήθηκε από τον Korteweg [8], και οι δύο όροι της συσχετίστηκαν με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του ρευστού καθώς και με τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής του σωλήνα και των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών. Το τμήμα της εξίσωσης που περιγράφει το ρευστό μετατράπηκε σύμφωνα με την εξίσωση $dP/d\rho = K_f / \rho$, σχέση που ήταν ήδη γνωστή από την βιβλιογραφία. Όσα αφορά

στο τμήμα που περιγράφει την σωλήνωση, ο λόγος dA/dP αντικαταστάθηκε σύμφωνα με την θεωρία ελαστικών παραμορφώσεων του συνεχούς μέσου, με σκοπό τη συσχέτισή του με την ακτίνα του σωλήνα, με το πάχος τοιχώματός του και με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του. Στην προσπάθεια αυτή, πρώτον, αγνοήθηκαν οι αξονικές τάσεις στον σωλήνα (με άλλα λόγια λόγο Poisson ίσο με 0) και δεύτερον αγνοήθηκε η αδράνεια του σωλήνα. Αυτές οι θεωρήσεις είναι έγκυρες όταν περιγράφουν σωλήνωση στηριγμένη καθ' όλο το μήκος της αλλά με την δυνατότητα να επιμηκυνθεί λόγω παραμορφώσεων. Αν, λοιπόν, ληφθεί ισορροπία δυνάμεων σε στοιχειώδη τόξο της διατομής του τοιχώματος του σωλήνα, θα προκύψει ότι :

$$A dP / \rho dA = eE / D\rho \quad (21)$$

Συνδυάζοντας πλέον τα δύο επιμέρους τμήματα η εξίσωση (20) γίνεται:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\rho}{K_f} + \frac{\rho}{E \frac{e}{D}} \Leftrightarrow a^2 = \frac{\frac{K_f}{\rho}}{1 + \frac{K_f D}{eE}} \quad (22)$$

Όπου

a : ταχύτητα του ήχου στο ρευστό μέσο

K_f : μέτρο ελαστικότητας του όγκου (bulk modulus of elasticity)

ρ : πυκνότητα του ρευστού μέσου

D : διάμετρος σωλήνα

E : μέτρο ελαστικότητας του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένος ο σωλήνας

e : πάχος τοιχώματος σωλήνα

Η φόρμουλα αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε περιπτώσεις που δεν περιλαμβάνονται στις παραδοχές που μελετήθηκαν από τον Korteweg [8]. Αν οι αξονικές τάσεις του σωλήνα δεν μπορούν να αγνοηθούν, τότε στην αντικατάσταση του μέλους της εξίσωσης θα ληφθεί υπόψιν και ο λόγος Poisson. Η εξίσωση (21) μεταβάλλεται, λοιπόν, στην

$$a^2 = \frac{\frac{K_f}{\rho}}{1 + c \frac{K_f D}{eE}} \quad (23)$$

Όπου c σταθερά που ισούται με:

- $c = 1 - \nu_p / 2$ για σωλήνωση με μόνο ανάντη πάκτωση
- $c = 1 - \nu_p^2$ για σωλήνωση με πάκτωση καθ' όλο το μήκος της
- $c = 1$ για σωλήνωση με ελεύθερη παραμόρφωση κατά την αξονική κατεύθυνση (περίπτωση Korteweg)

Επιπροσθέτως, η μελέτη του Korteweg [8] περιλάμβανε περιπτώσεις σωληνώσεων που είτε δεν μπορούσαν να μετακινηθούν κατά την ακτινική κατεύθυνση λόγω της εφαρμογής τους, για παράδειγμα σωληνώσεις αποχέτευσης και ύδρευσης), ή το υλικό κατασκευής τους ήταν στιβαρό και δύσκολα παραμορφώσιμο. Σε περίπτωση που η σωλήνωση είναι κατασκευασμένη από ελαστομερές υλικό τότε στην μελέτη της ταχύτητας του ήχου στο μέσο πρέπει να ληφθεί υπόψιν η μεταβολή της ορμής του ρευστού κατά την μετακίνηση ή παραμόρφωση (που πλέον είναι σημαντική) του σωλήνα καθώς και η αδράνεια και η ίδια η κίνησή του. Πρακτική εφαρμογή τέτοιων σωληνώσεων παρατηρείται σε διάφορους τομείς όπως για παράδειγμα σωληνάκια καυσίμων/ψυκτικών αεροσκαφών, απλή μεταφορά ρευστών, ακόμα και τα αιμοφόρα αγγεία μπορούν να μελετηθούν ως τέτοιες.

Όλη αυτή η θεώρηση πραγματοποιήθηκε για μονοφασικό ρευστό μέσα στην σωλήνωση. Στις γενικευμένες και βιομηχανικές εφαρμογές, τα διάφορα ρευστά που χρησιμοποιούνται περιέχουν διαλυμένα αέρια. Κατά το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος η πίεση του ρευστού ταλαντώνεται σε τιμές χαμηλότερες από την τάση ατμών του διαλυμένου αερίου, με αποτέλεσμα την μετατροπή της μονοφασικής ροής σε πολυφασική. Προφανώς, μπορεί να παρατηρηθεί και ύπαρξη μιας εκ των προτέρων πολυφασικής ροής. Η θεωρία που αναπτύχθηκε παραπάνω για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου μπορεί να ισχύσει και σε πολυφασικές ροές αρκεί να αντικατασταθεί στην εξίσωση (22) το μέτρο ελαστικότητας και η πυκνότητα με το σταθμισμένο μέτρο ελαστικότητας και την σταθμισμένη πυκνότητα του πολυφασικού μέσου αντίστοιχα. Τα βάρη για τους σταθμισμένους μέσους είναι ίσα με τους μερικούς όγκους της κάθε φάσης.

1.3. Θεωρία μετάδοσης κυμάτων

Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφουν την σχέση της μεταβολής της πίεσης με την μεταβολή της μέσης ταχύτητας της διατομής του ρευστού. Αν ήταν επιθυμητό να περιγραφεί η μεταβολή της πίεσης μίας στήλης ρευστού χωρίς να γίνει εντρύφηση στην ρευστομηχανική του φαινομένου, μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση της θεωρίας μετάδοσης διαμηκών κυμάτων. Αν θεωρηθεί για άλλη μια φορά μονοδιάστατη προοπτική ενός σωλήνα (η πίεση κάθε αξονικού σημείου περιγράφει την πίεση κάθε σημείου της κάθετης διατομής που διέρχεται από το αξονικό σημείο), με μη συνεκτικό ρευστό, τότε η συνάρτηση πίεσης κάθε σημείου θα είναι όμοια με την συνάρτηση πίεσης του σημείου διέγερσης λαμβάνοντας όμως υπόψιν μια διαφορά φάσης. Αν λοιπόν η εξίσωση περιγραφής τη πίεσης στο σημείο διέγερσης είναι $f(t,0)$, τότε για κάποιο διαφορετικό σημείο με τυχαία θέση x , θα ισχύει $f(t,x) = f(t-t_x)$, όπου t_x είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε η μεταβολή να μεταβεί από το σημείο διέγερσης μέχρι το τυχαίο σημείο κινούμενη με την ταχύτητα του ήχου στο μέσο.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αρμονικές διεγέρσεις, οι οποίες σε πραγματικές εφαρμογές μπορούν να δημιουργηθούν από αρμονικώς κινούμενα υδραυλικά στοιχεία όπως γρναζωτές και εμβολοφόρες αντλίες. Η διεγερση λοιπόν θα είναι της μορφής:

$$P(0,t) = P_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (24)$$

Όπου

P_0 : η μέγιστη τιμή της πίεσης στη διέγερση (πλάτος)

ω : κυκλική συχνότητα φαινομένου

φ : διαφορά φάσης (για μεταβολή της αρχικής τιμής της πίεσης)

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, για τυχαίο σημείο με θέση x , αρκεί να τεθεί στη σχέση διέγερσης όπου t , το $t-t_x$. Γνωρίζοντας ότι, το κύμα μεταφέρεται με την ταχύτητα του ήχου, ο χρόνος t_x που απαιτείται για την μεταφορά του στο σημείο x είναι ίσος με x/c , όπου c η ταχύτητα μετάδοσης του ήχου στο μέσο. Συνεπώς, η εξίσωση (24) γίνεται για το σημείο x :

$$P_x(x,t) = P_0 \cos(\omega(t-t_0) + \varphi) \quad (25)$$

Κάνοντας πράξεις και αντικαθιστώντας το ισοδύναμο του t_x προκύπτει:

$$P_x(x,t) = P_0 \cos\left(\omega t - \omega \frac{x}{c} + \varphi\right) \quad (26)$$

Θέτοντας το μέγεθος $\omega/c = k$ η σχέση (26)

$$P_x(x,t) = P_0 \cos(\omega t - kx + \varphi) \quad (27)$$

Αυτή η εξίσωση περιγράφει μεταφορά κύματος προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα του σωλήνα. Αν η διαταραχή δημιουργείται σε ενδιάμεσο σημείο, που πάντα λαμβάνει τη μηδενική τιμή του άξονα, τότε υπάρχει μεταφορά κύματος και προς τις αρνητικές τιμές του άξονα. Για να περιγραφεί, αρκεί να αλλάξει το πρόσημο το t_x από αρνητικό σε θετικό.

Συνεπώς η ολοκληρωμένη εξίσωσης περιγραφής της μετάδοσης του κύματος είναι η:

$$P_x(x,t) = P_0 \cos(\omega t \mp kx + \varphi) \quad (28)$$

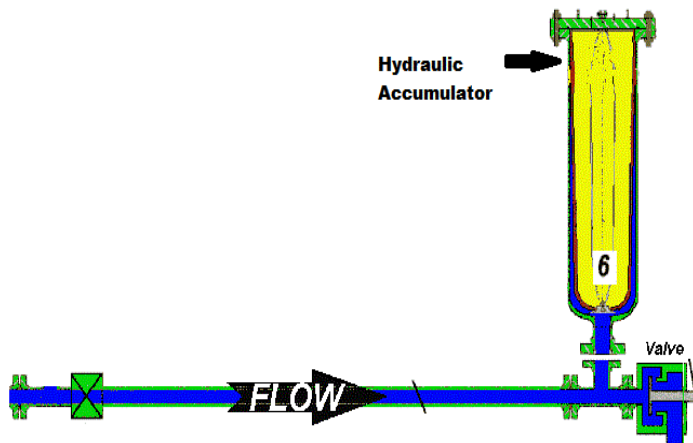
Η εξίσωση αυτή μπορεί να περιγράψει την τιμή της πίεση σε ανάντη σημεία του σωλήνα του σημείου διαταραχής (θετικό πρόσημο) και κατόντη του σημείου διαταραχής (αρνητικό πρόσημο) για διάφορες χρονικές στιγμές. Είναι άξιο αναφοράς ότι αν το μέγεθος $t \mp t_x$ είναι αρνητικό τότε το κύμα δεν έχει φτάσει ακόμα στο σημείο ενδιαφέροντος, συνεπώς σε αυτό επικρατεί ακόμα η αρχική συνθήκη πίεσης.

Αφού έχει πραγματοποιηθεί μια περιγραφή του φαινομένου των υδραυλικών πληγμάτων με την κυματική θεωρία, μπορούν να εφαρμοστούν κάποιες από τις βασικές φυσικές αρχές που ισχύουν. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρξει υπέρθεση δύο κυμάτων από διαφορετικές πηγές, π.χ. από μία αντλία και από μία βαλβίδα ρύθμισης ροής, για να περιγραφεί το μέγεθος της πίεσης ενός σημείου. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να γίνει και υπέρθεση ενός κύματος με τον ίδιο του τον εαυτό σε περίπτωση ανάκλασής του σε κάποιο στοιχείο του υδραυλικού κυκλώματος. Αυτό μπορεί να είναι είτε κάποιο hard stop, ή κλειστή βαλβίδα ρύθμισης ροής, ή τοιχώματα σωλήνα λόγω καμπυλότητας ή γωνίας του.

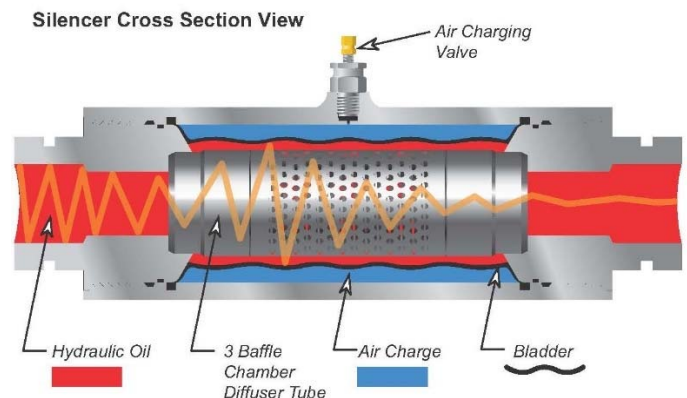
Η θεώρηση αυτή γίνεται όλο και πιο ακριβής, όσο πιο απλή είναι η μορφή της σωλήνωσης και η μορφή της διέγερσης. Για παράδειγμα, για ευθύγραμμο σωλήνα με διέγερση σε όλη την επιφάνεια της κάθετης διατομής του η θεώρηση αυτή είναι 100% ακριβής. Αντίθετα, αν μελετηθούν αλλαγές κατεύθυνσης ή διεγέρσεις στο εσωτερικό της επιφάνειας της κάθετης διατομής τότε στο φαινόμενο λαμβάνεται υπόψιν και η μετάδοση του κύματος κατά την ακτινική κατεύθυνση, γεγονός που καθιστά τη μονοδιάστατη θεώρηση ελλιπή. Επειδή το γενικό πλαίσιο που θα κινηθεί η εύρεση επίλυσης του προβλήματος περιφέρεται γύρω από την γεωμετρία της λύσης και την παραλλαγή των διάφορων καμπυλοτήτων, η πολυδιάστατη ανάλυση είναι απαραίτητη για πλήρη περιγραφή του φαινομένου.

2. Παρουσίαση του προβλήματος

Η δημιουργία πηλημάτων στα υδραυλικά και πνευματικά συστήματα είναι αναπόφευκτη και γι' αυτό πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψιν για τη μηχανική και λειτουργική ακεραιότητα του εκάστοτε συστήματος. Η πρόβλεψη προβλημάτων έγκειται είτε σε προσαρμογή των λειτουργιών του συστήματος, όπως μικρότερες πιέσεις, μικρότερες ταχύτητες ρευστού, μεγάλος χρόνος κλεισίματος βαλβίδων ροής κ.α., είτε σε προσθήκη επιπλέον στοιχείων σχεδιασμένα για απορρόφηση του πλεονάζοντος φορτίου. Ανάλογα με την εφαρμογή ενδέχεται να υπάρχουν φρεάτια με ελεύθερη επιφάνεια στην ατμόσφαιρα (συναντώνται κυρίως σε συστήματα μεταφοράς νερού ατμοσφαιρικής πίεσης π.χ. σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια) ή συσσωρευτές, όμοια λειτουργία με τα φρεάτια αλλά μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές πιέσεις (εικόνα 3), ή διατάξεις με ελαστικά στοιχεία ώστε να απορροφάται η ενέργεια του πλήγματος, όπως ο υδραυλικός σιγαστήρας (εικόνα 4).



Εικόνα 3 Συσσωρευτής για παραλαβή φορτίου υπερπίεσης υδραυλικών πηλημάτων



Εικόνα 4 Υδραυλικός Σιγαστήρας
(Πηγή: <http://www.meielevatorsolutions.com/components-parts/silencer>)

Ενώ όλες αυτές οι μέθοδοι είναι απόλυτα δόκιμες, όταν εφαρμοστούν σε ένα βιομηχανικό κύκλωμα υδραυλικής ισχύος μπορεί να έχουν διάφορους περιορισμούς. Αρχικά η λύση των φρεατίων είναι αδύνατη καθώς λειτουργεί σε στοιχεία που επικοινωνούν με την ατμόσφαιρα, άρα συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Επίσης, η εφαρμογή που τροφοδοτεί το σύστημα έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις ισχύος και το κύκλωμα προσαρμόζεται σε αυτές. Συνεπώς, η ρύθμιση των πηλημάτων με μεταβολές της λειτουργίας, ειδικά όταν αυτή μπορεί να μεταβάλλεται, καθίσταται αδύνατη. Συνεπώς, η μόνη λύση που μπορεί να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε περίπτωση φόρτισης είναι αυτή της προσθήκης των επιπλέον στοιχείων. Το θέμα που δημιουργείται είναι ότι προστίθενται στο σύστημα στοιχεία ελαστικότητας, χαρακτηριστικό που επηρεάζει τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος και το κάνει ασταθέστερο και ευάλωτο σε μεγαλύτερο φάσμα φαινομένων.

Η πρόταση που πραγματεύεται η παρούσα εργασία επιδιώκει την απόσβεση περιοδικών υδραυλικών πηλημάτων στην μόνιμη κατάσταση του κυκλώματος, μέσω παραλλαγής της γεωμετρίας της σωλήνωσης χωρίς την προσθήκη επιπλέον στοιχείων ελαστικότητας στο κύκλωμα. Ο σκοπός είναι να επιτευχθεί η αξιοποίηση του φαινομένου της ανάκλασης του πλήγματος στα τοιχώματα της σωλήνωσης και τελικά η καταστρεπτική συμβολή του με τον ίδιο τον εαυτό του. Αυτή η προσέγγιση γίνεται για να εξαλειφθούν τα μειονεκτήματα των στοιχείων ελαστικότητας και η επίδρασή τους στην δυναμική του συστήματος. Επειδή τα χαρακτηριστικά του κάθε πλήγματος εξαρτώνται άμεσα από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, είναι επιθυμητό η διάταξη να είναι προσαρμοστική και να αποφέρει απόσβεση των πηλημάτων σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών και συνθηκών.

3. Μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος.

Το βασικό στοιχείο της μελέτης πραγματοποιήθηκε, είναι η αποφυγή προσθήκης στοιχείων ελαστικότητας στο σύστημα. Με γνώμονα αυτή την αρχή, επιδιώχθηκε να μελετηθεί η επίδραση της γεωμετρίας της σωλήνωσης πάνω στον τρόπο μετάδοσης του υδραυλικού πλήγματος. Ο τελικός σκοπός είναι να επιτευχθεί απόσβεση του πλήγματος, ή μεγάλο μέρος του πλάτους ταλάντωσής του. Το πλήγμα είναι ένα κύμα πίεσης, συνεπώς για να αποσβεστεί αρκεί να συμβάλλει με ένα κύμα ίδιας ταχύτητας, ίδιας συχνότητας αλλά αντίθετου πλάτους, δηλαδή διαφοράς φάσης $\pi/2$. Αφού δεν επιθυμείται να προστεθούν περισσότερα στοιχεία στο σύστημα (θα ήταν δόκιμο να εισαχθεί μία αντλία η οποία να λειτουργεί με διαφορά φάσης $\pi/2$ από την κύρια αντλία του συστήματος) θα καταβληθεί προσπάθεια να γίνει συμβολή του υδραυλικού πλήγματος με τον εαυτό του.

Η διαφορά φάσης σε δύο μεταδιδόμενα κύματα έχει δύο συνιστώσες: την χρονική και την χωρική. Η χρονική δημιουργείται όταν το ένα κύμα αρχίσει να μεταδίδεται σε διαφορετικό χρόνο από το άλλο. Η χωρική συνιστώσα διαφοράς φάσης δημιουργείται όταν δύο κύματα που ξεκινούν μετάδοση μαζί διανύσουν διαφορετική απόσταση στο χώρο. Η εφαρμογή αυτής της συμπεριφοράς στο παρόν πρόβλημα είναι η εξής: αν καταστεί δυνατό η πληροφορία πίεσης του υδραυλικού πλήγματος να μεταδοθεί από δύο οδούς σχεδιασμένες έτσι, ώστε η μία να δημιουργεί διαφορά φάσης $\pi/2$ από την άλλη και στην συνέχεια συμβάλλουν, τότε θα υπάρξει απόσβεση του κύματος. Με βάση αυτό το πλαίσιο έγινε η μελέτη και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν.

Αρχικά, έγινε προσπάθεια να βρεθεί συσχέτιση μεταξύ διάφορων γεωμετριών των σωλήνων. Αυτές περιλάμβαναν γωνίες διαφόρων μοιρών, καμπυλότητες και έλικες. Μετά από εξέταση των αποτελεσμάτων της προκαταρκτικής μελέτης κρίθηκε ότι η έλικα αποτελεί τη γεωμετρία ενδιαφέροντος. Ο βασικός λόγος ήταν ότι η επιρροή της γεωμετρίας της πάνω στη μετάδοση του κύματος ήταν συνεχής, καθώς υπάρχει αλλαγή κατεύθυνσης της ροής καθ' όλο το μήκος της έλικας αντίθετα με τις συγκεντρωμένες ανωμαλίες της σωλήνες (π.χ. γωνίες, αδιέξοδα). Ειδικότερα για τις ελικοειδείς σωληνώσεις, ως κύρια γεωμετρία ενδιαφέροντος, έγινε διαστατική ανάλυση και σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας (αναλύσεις μοντέλων στο ANSYSTM) με σκοπό την εύρεση μαθηματικής σχέσης μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων.

3.1. Λογισμικό ανάλυσης

Η αριθμητική επίλυση των προβλημάτων υλοποιήθηκε με το ANSYSTM, και ειδικότερα με την επέκταση του Structural Module, το ANSYSTM Acoustics ACT. Η συγκεκριμένη επέκταση επιτρέπει τη μελέτη ακουστικών φαινομένων μέσα από το περιβάλλον του ANSYSTM APDL ή του ANSYSTM WORKBENCH.

Με την επέκταση αυτή λύνεται το σύστημα των βασικών εξισώσεων μετάδοσης υδραυλικών πληγμάτων (εξισώσεις (18) και (19)) κάνοντας τις παρακάτω παραδοχές:

- Το ρευστό είναι συμπιεστό
- Το ρευστό είναι μη συνεκτικό
- Δεν υπάρχει ροή ρευστού
- Η μέση πυκνότητα και πίεση είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο του ρευστού

Έτσι λοιπόν, οι εξισώσεις μεταφράζονται σε:

$$\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (29)$$

Όπου:

a : ταχύτητα του ήχου (όπως έχει οριστεί παραπάνω)

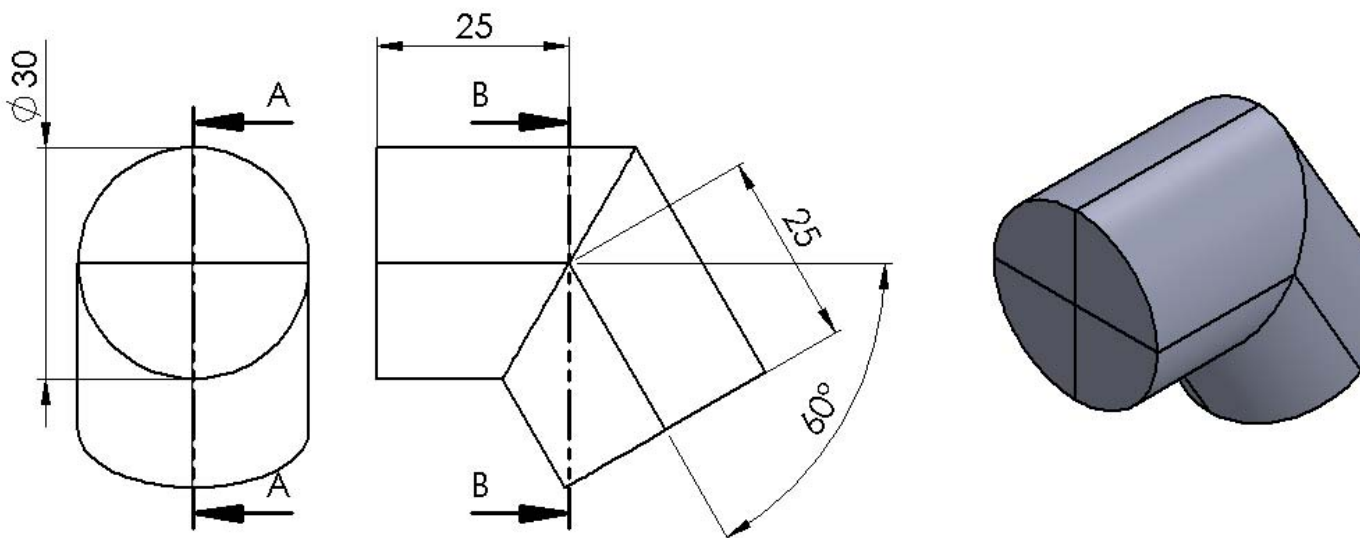
P : ακουστική πίεση

t : χρόνος

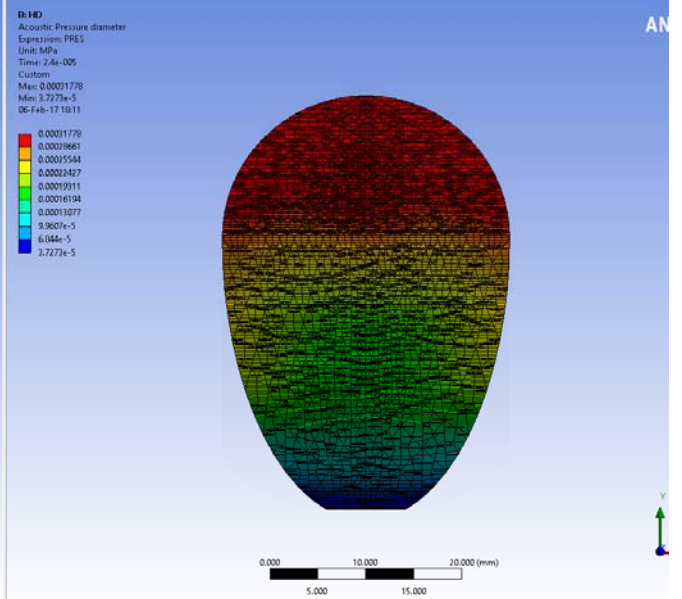
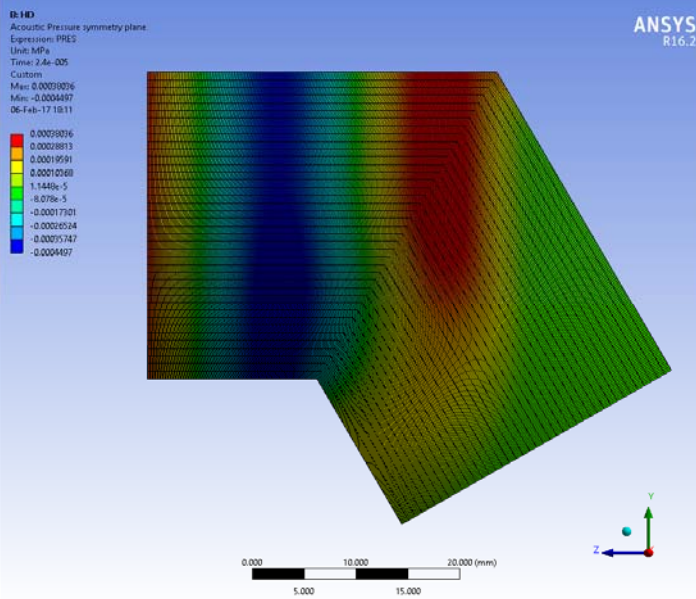
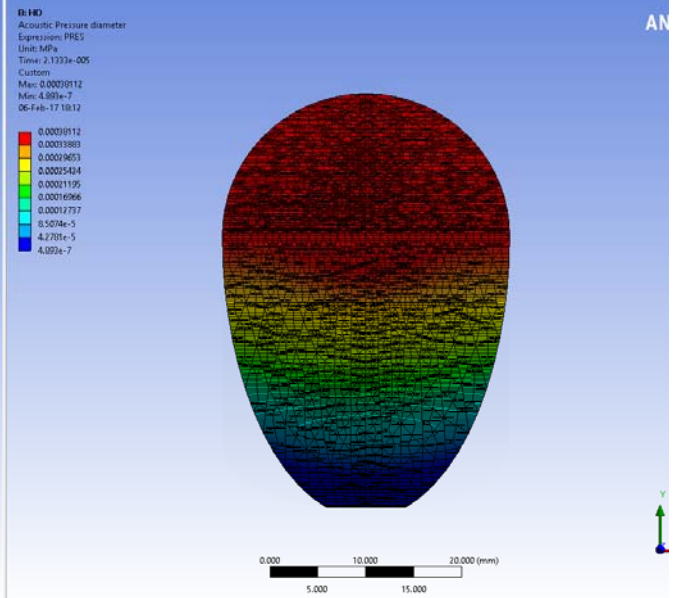
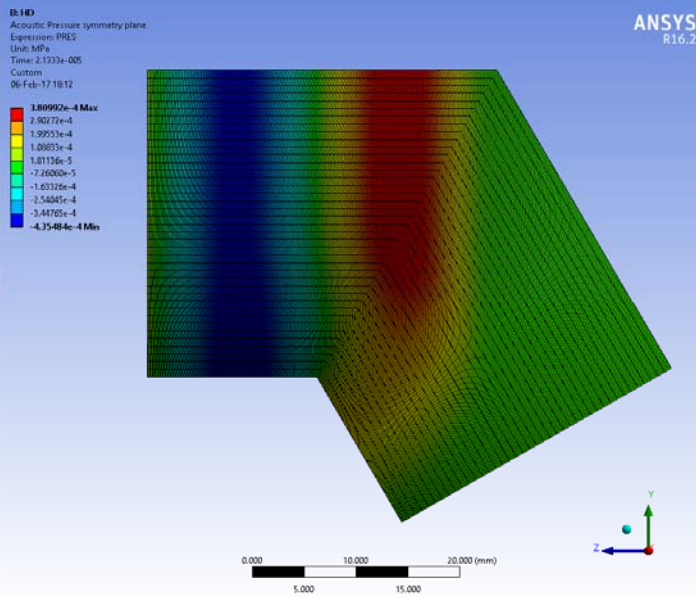
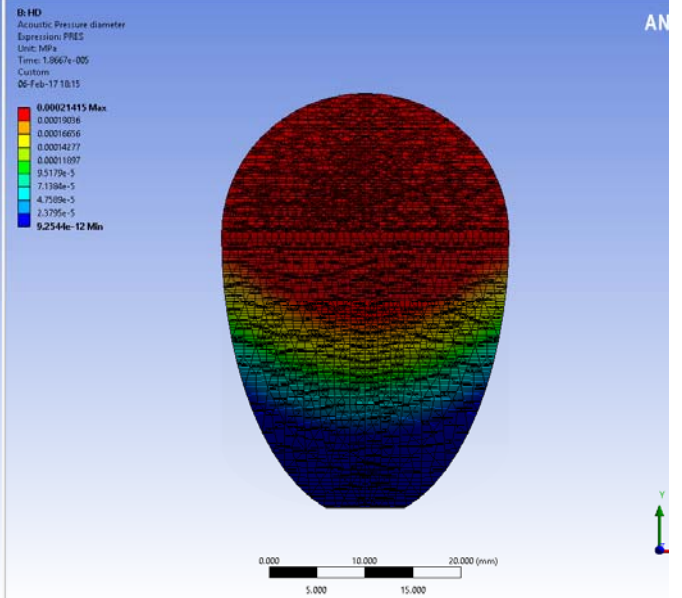
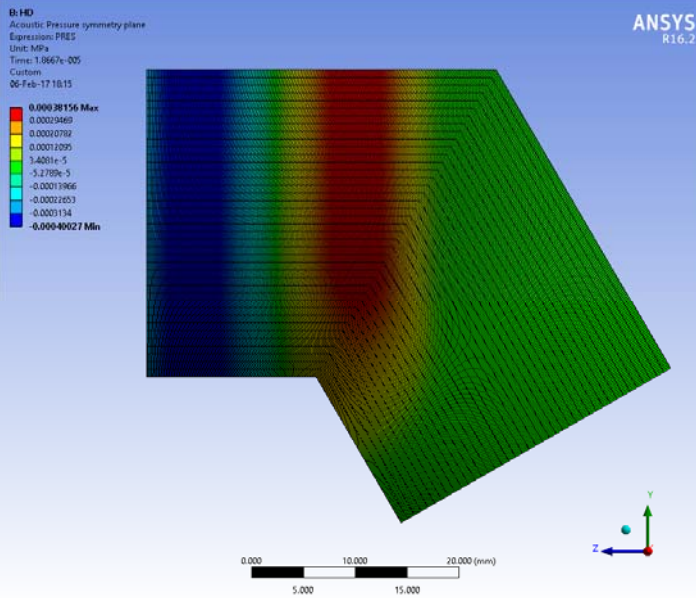
Η επίλυση της εξίσωσης (29) γίνεται μετά την διακριτοποίησή της, περισσότερες λεπτομέρειες της οποίας μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο χρήσης του ANSYSTM [9, pp. 388-389] .

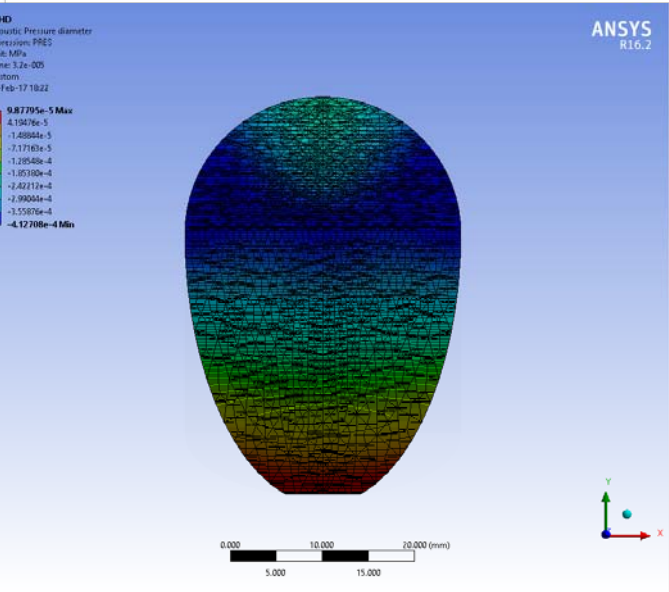
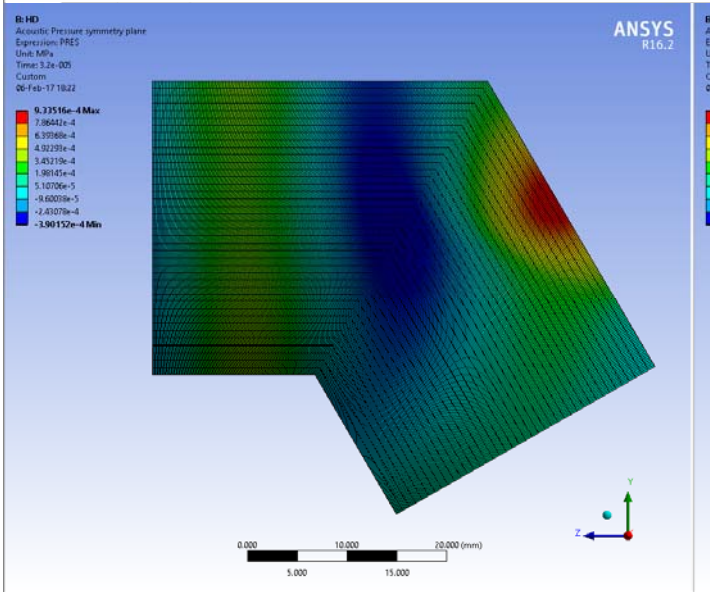
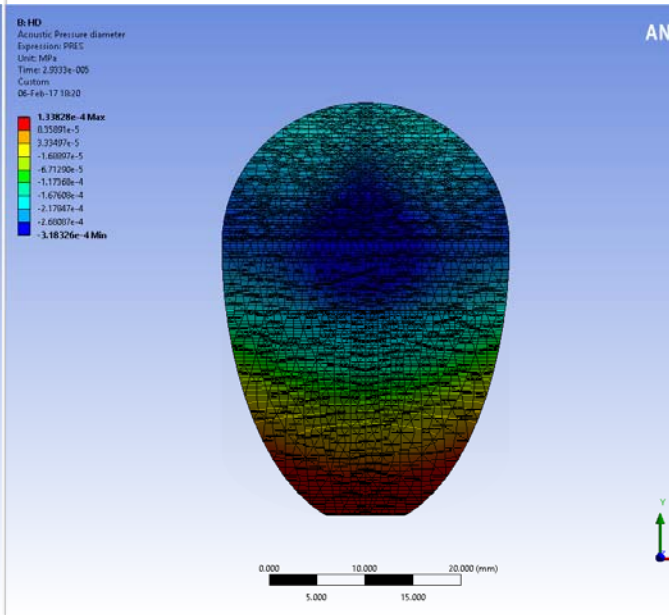
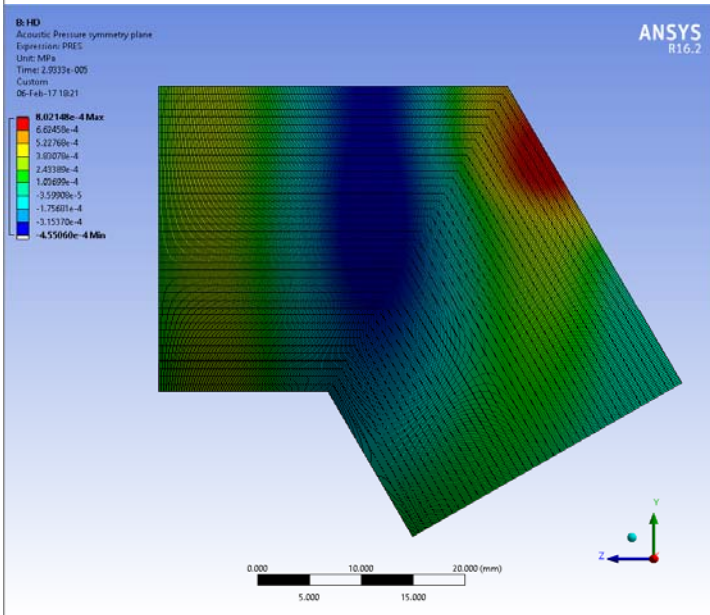
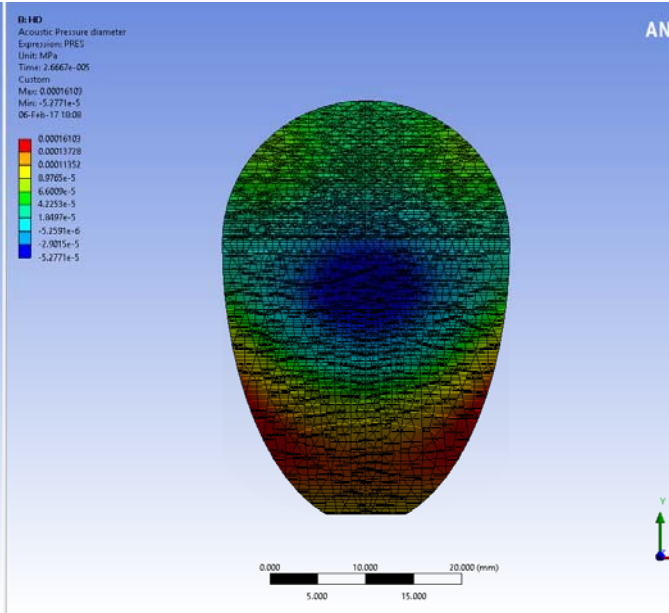
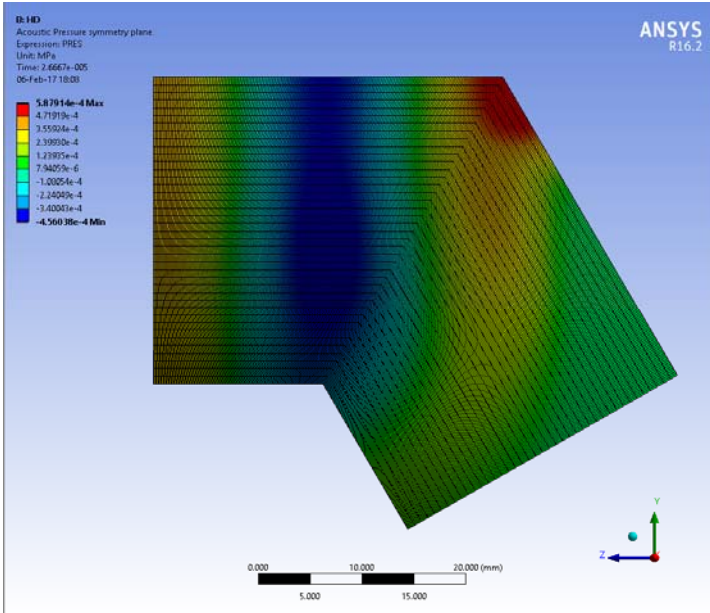
3.1.1. Γνωριμία με το πρόγραμμα και το φαινόμενο

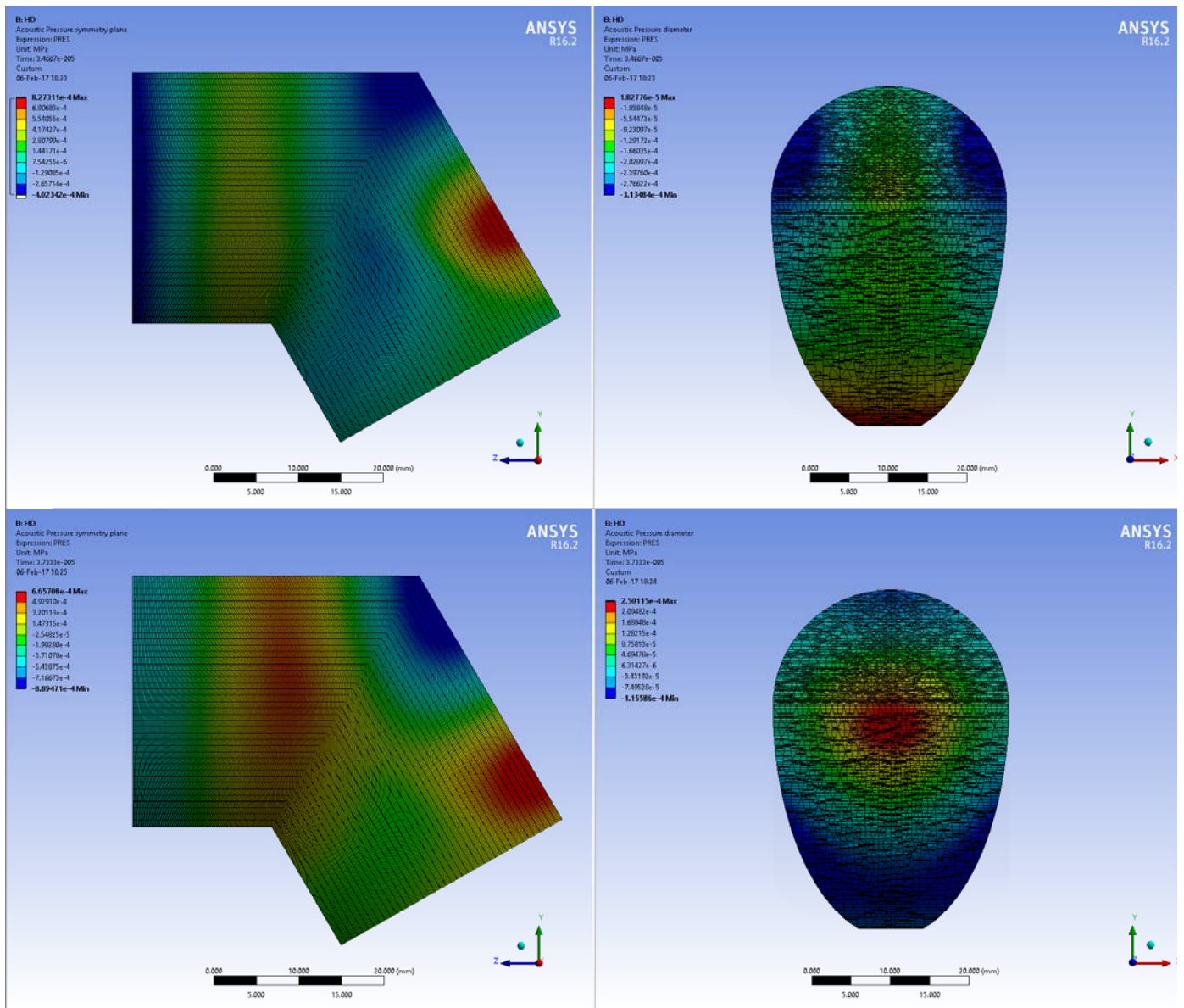
Στα πλαίσια εγκλιματισμού με το πρόγραμμα ανάλυσης και με τις δυνατότητές του, καθώς και στα πλαίσια γνωριμίας με το φαινόμενο της μετάδοσης υδραυλικών πηλημάτων, μελετήθηκαν απλές συνήθεις γεωμετρίες σωληνώσεων. Αυτές ήταν σωλήνες με μία γωνία διαφόρων μεγεθών. Παρόλο που οι τιμές των μεγεθών δεν αντικατοπτρίζουν κάποια εφαρμογή, οι αναλύσεις αυτές ήταν παραπάνω από ικανοποιητικές για να οπτικοποιηθεί το φαινόμενο της μετάδοσης υδραυλικών πηλημάτων. Αυτές οι απλές αλλά ευρέως χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες δύναται να δημιουργήσουν ένα εναρκτήριο σημείο μελέτης του προβλήματος. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν εικόνες από τομές των σωληνώσεων οι οποίες παριστούν το πεδίο πίεσης σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την μετάδοση πηλημάτων πίεσης μέσω της γεωμετρίας.



Εικόνα 5 Δείγμα από τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν για εγκλιματισμό. Αποτελεί μέρος από σύνολο με ίδιες διαστάσεις αλλά διαφορετικά μεγέθη γωνίας (30°, 45°, 60°, 90°)







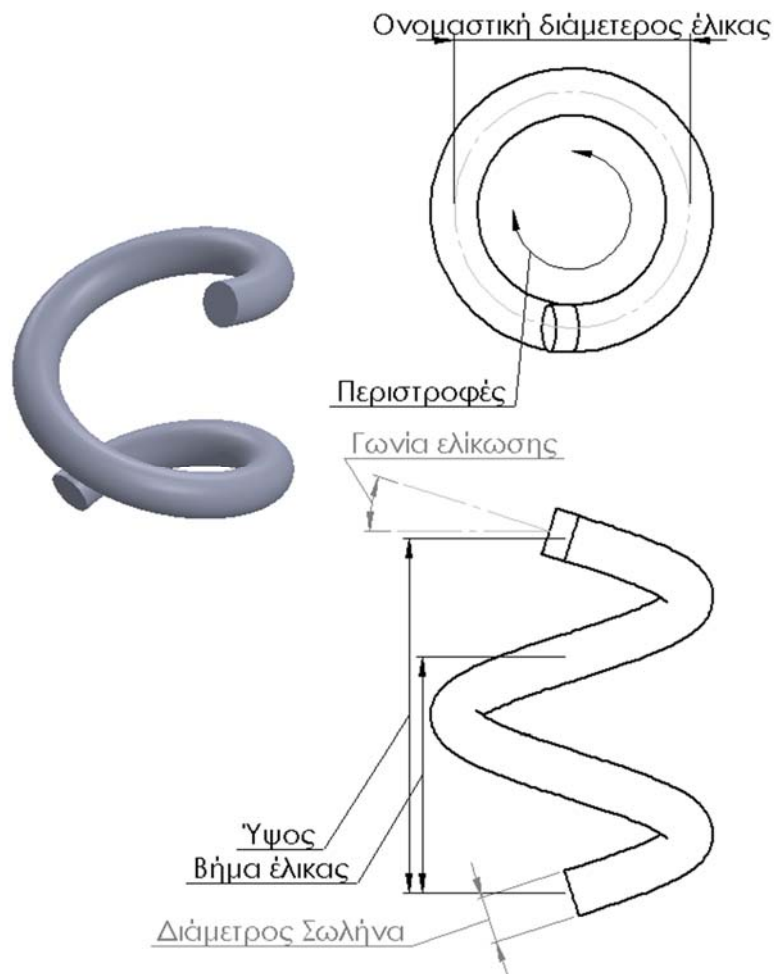
Εικόνα 6 (ζεύγη 1-8) Πεδίο πίεσης για την γεωμετρία γωνίας σε διάφορες χρονικές στιγμές (αναγράφονται στις εικόνες) στις τομές AA και BB αριστερά και δεξιά αντίστοιχα (προσδιορίζονται στην εικόνα (5))

Όπως φαίνεται και από τις εικόνες, αυτή η γωνία δημιουργεί μεγάλη παραμόρφωση του μετώπου του κύματος στην κατάντη πλευρά. Η ανάντη κυματική μορφή μένει ανεπηρέαστη. Ταυτόχρονα με την επικεντρωμένη ανάλυση στην γωνία, έγινε και μία πιο μακροσκοπική ανάλυση γύρω από αυτή με σκοπό την ερεύνηση της ακτίνας επίδρασής της στην μετάδοση του κύματος. Αυτό που βρέθηκε ήταν ότι η παραμόρφωση του κύματος από την γωνία σε αποστάσεις της τάξης του 20% του μήκους κύματος μετά γίνονταν αμελητέες. Επίσης, η χρονική καθυστέρηση από αυτή την διαταραχή της γεωμετρίας ήταν αμελητέα. Κρίθηκε αναγκαία λοιπόν η μελέτη πιο περίπλοκων γεωμετριών.

3.2. Γεωμετρία μελέτης και μοντέλο συσχέτισης

3.2.1. Γεωμετρία μοντέλων

Η γεωμετρία στην οποία έγινε η ανάλυση, ήταν μία σωλήνωση κυκλικής διατομής με ελικοειδή άξονα. Η διατομή αυτή είναι πάντα κάθετη στην διεύθυνση του διανύσματος του άξονα σε κάθε σημείο του, δηλαδή είναι μία κυκλική έλικα. Μετά το πέρας τις έλικας προστέθηκε ένα ευθύγραμμο τμήμα μήκους 5mm σε κάθε μοντέλο, για να δύναται να μελετηθεί και η επίδραση της έλικας στη μετάδοση του κύματος μετά την έξοδό του από τη γεωμετρία. Οι ακριβείς διαστάσεις για κάθε μέγεθος της γεωμετρίας δίνονται από τους πίνακες 1,2 και 3.



Εικόνα 7 Μοντέλο αριθμητικών αναλύσεων. Σημειώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος

3.2.2. Διαστατική ανάλυση

Η διαστατική ανάλυση είναι ένα εργαλείο που μπορεί να παρουσιάσει τον τύπο της συσχέτισης των διαφόρων μεγεθών που επηρεάζουν ένα φαινόμενο. Αν συνδυαστεί με σειρές αντίστοιχων πειραμάτων, τότε είναι δυνατόν να εξαχθεί μία εμπειρική μαθηματική σχέση που να συνδέει αυτά τα μεγέθη. Αν υπάρχει λοιπόν μία τέτοια σχέση, δύναται να ξεκινήσει ο σχεδιασμός διατάξεων και εργαλείων έχοντας μια εκτίμηση των πιθανών αποτελεσμάτων τους στην επίλυση ενός προβλήματος ή πάνω σε ένα φαινόμενο.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στην παρούσα εργασία. Με βάση το θεώρημα του Π των Vaschy – Buckingham, από ένα σύνολο μεγεθών N που επηρεάζουν ένα φαινόμενο, είναι δυνατό να υπάρξει μετάβαση σε ένα σύνολο $N-M$ αδιάστατων μεγεθών που επηρεάζουν το φαινόμενο με τον ίδιο τρόπο. M είναι ο αριθμός των θεμελιωδών διαστάσεων που εμφανίζονται στα N μεγέθη. Σύμφωνα με το διεθνές σύστημα μονάδων οι θεμελιώδεις διαστάσεις είναι:

- Μήκος [L]
- Χρόνος [T]
- Μάζα [M]
- Απόλυτη θερμοκρασία [Θ]
- Ένταση ρεύματος [I]
- Ποσότητα ύλης [N]
- Φωτεινότητα [J]

Αφού προσδιοριστούν τα $N-M$ αδιάστατα μεγέθη, τότε το ίδιο θεώρημα λέει ότι οποιοδήποτε από αυτά είναι συναρτήσε των υπολοίπων. Δεν υπολογίζει, όμως, με ποια συνάρτηση συνδέονται, παρά μόνο καθορίζει ποια μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους. Ο υπολογισμός αυτής θα παρουσιαστεί σε επόμενο εδάφιο.

Αρχικά λοιπόν πρέπει να οριστούν τα μεγέθη που επηρεάζουν το πρόβλημα υπό μελέτη. Η μετάδοση του πλήγματος περιλαμβάνει δύο κύρια στοιχεία, το ρευστό και την σωλήνωση, η οποία χωρίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά της και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Για κάθε περίπτωση έχουμε:

Γεωμετρικά μεγέθη σωλήνωσης: Τα ελάχιστα μεγέθη που απαιτούνται για να σχεδιαστεί μία έλικα: η ακτίνα της (R), και δύο από τα: ύψος έλικας, βήμα ελίκωσης, γωνία ελίκωσης, περιστροφές. Με αυτά τα τρία, μπορούν να βρεθούν όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία της έλικας. Στα πλαίσια της εργασίας επιλέχθηκαν ως παράμετροι σχεδιασμού έλικας το ύψος της (H), και το βήμα ελίκωσης (P). Παράλληλα, θα μελετηθεί και η επίδραση της μεταβολής της διαμέτρου του σωλήνα (D_T).

Δυναμικά μεγέθη σωλήνωσης: πρόκειται για μεγέθη που επηρεάζουν την ελαστικότητα του σωλήνα, όπως το μέτρο ελαστικότητας του σωλήνα και το πάχος του. Στην παρούσα μελέτη ο σωλήνας θεωρήθηκε ανελαστικός, οπότε δεν εξετάστηκε η επιρροή αυτών των μεγεθών

Χαρακτηριστικά ρευστού: Τα χαρακτηριστικά του ρευστού που επηρεάζουν την μετάδοση των υδραυλικών πλήγμάτων περιλαμβάνουν την ελαστικότητα του ρευστού (B : bulk modulus), την πυκνότητά του (ρ) και την ταχύτητα μετάδοσης του ήχου (c). Αυτά τα τρία μεγέθη είναι ανεξάρτητα ανά δύο. Λόγω του τρόπου ορισμού του ρευστού στο λογισμικό ανάλυσης μέσω της πυκνότητά του και της ταχύτητας του ήχου σε αυτό, θα επιλεγθούν αυτά τα μεγέθη για να περιγράψουν το ρευστό.

Μέγεθος – στόχος: Ο χρόνος που απαιτείται για να μεταβεί το μέτωπο του κύματος από τη επιφάνεια διαταραχής μέχρι το τέλος της σωλήνωσης (D).

Οι μονάδες των μεγεθών εξάρτησης είναι: $[R]=L$, $[P]=L$, $[H]=L$, $[D_T]=L$, $[\rho]=ML^{-3}$, $[c]=LT^{-1}$ και $[D]=T$.

Σε αυτές εμφανίζονται οι βασικές μονάδες του μήκους της μάζας και του χρόνου. Πρέπει να επιλεγθούν τρία μεγέθη που να περιλαμβάνουν ως σύνολο όλες αυτές τις βασικές μονάδες και ταυτόχρονα να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτά που έχουν επιλεγθεί για την παρούσα ανάλυση είναι το βήμα ελίκωσης, η πυκνότητα του ρευστού ρ και η ταχύτητα του ήχου c σε αυτό. Υπολογίζονται τότε τα πολυώνυμα Π και οι διαστάσεις τους:

$$\Pi_1 = \rho^a c^b P^c R, [\Pi_1] = M^a L^{-3a} L^b T^{-b} L^c L = M^a L^{-3a+b+c+1} T^{-b} \quad (30-1)$$

$$\Pi_2 = \rho^a c^b P^c H, [\Pi_2] = M^a L^{-3a} L^b T^{-b} L^c L = M^a L^{-3a+b+c+1} T^{-b} \quad (30-2)$$

$$\Pi_3 = \rho^a c^b P^c D_T, [\Pi_3] = M^a L^{-3a} L^b T^{-b} L^c L = M^a L^{-3a+b+c+1} T^{-b} \quad (30-3)$$

$$\Pi_4 = \rho^a c^b P^c D, [\Pi_4] = M^a L^{-3a} L^b T^{-b} L^c T = M^a L^{-3a+b+c} T^{-b+1} \quad (30-4)$$

Τα παραπάνω πολυώνυμα είναι αδιάστατα, συνεπώς οι εκθέτες των τριών διαστάσεων πρέπει να ισούται με το μηδέν. Λύνοντας για κάθε πολυώνυμο το σύστημα τριών αγνώστων – τριών εξισώσεων προκύπτουν οι αδιάστατοι αριθμοί:

$$\Pi_1 = \frac{R}{P} \quad (31-1)$$

$$\Pi_2 = \frac{H}{P} \quad (31-2)$$

$$\Pi_3 = \frac{D_T}{P} \quad (31-3)$$

$$\Pi_4 = \frac{uD}{P} \quad (31-4)$$

Με βάση το θεώρημα Vaschy – Buckingham, οποιοδήποτε από αυτά τα πολυώνυμα είναι συνάρτηση όλων των υπολοίπων. Το πολυώνυμο με τον στόχο ενδιαφέροντος είναι το Π_4 , συνεπώς:

$$\Pi_4 = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3)$$

Ο υπολογισμός της συνάρτησης f μπορεί να γίνει εμπειρικά μέσα από μία σειρά πειραμάτων. Πρέπει να μετρηθεί η μεταβολή του πολυωνύμου Π_4 για εκ περιτροπής μεταβολή ενός εκ των τριών, κρατώντας κάθε φορά τα άλλα δύο σταθερά.

Επειδή ο ακριβής υπολογισμός της συνάρτησης f θα απαιτούσε μεγάλο αριθμό αριθμητικών μοντέλων τα οποία είναι ασύμφορα χρονικά και δεν είναι ο κύριος σκοπός της εργασίας, επιλέχθηκαν να γίνουν πέντε μοντέλα ανά αδιάστατη μεταβλητή. Μάλιστα, αν ένα από αυτά καταστεί ως βάση των μεταβολών, τότε μπορούν οι δοκιμές να μειωθούν κατά τρεις. Με αυτές τις πέντε τιμές μπορεί υλοποιηθεί ο προγραμματισμός των αναλύσεων των μοντέλων έγινε με βάση ένα αρχικό σχέδιο και μετά προσαρμόστηκε το σχέδιο με μεταβολή της κάθε αδιάστατης παραμέτρου κατά -20%, -10%, +10%, +20%. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές με βάση τις οποίες έγινε η αδιαστατοποίηση έπρεπε να επιλεγθούν για να γίνει ο υπολογισμός των υπόλοιπων. Επιλέχθηκε λοιπόν να κρατηθούν σταθερές σε κάθε μοντέλο οι εξής τιμές:

- Ταχύτητα του ήχου $c = 1500 \text{ mm/s}$
- Βήμα ελίκωσης $P = 50 \text{ mm/rev}$
- Πυκνότητα ρευστού $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$

Με βάση αυτά τα δεδομένα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες:

	Μονάδες	Βάση	+10%	+20%	-10%	-20%
Γεωμετρία έλικας						
Υψος (H)	mm	75	75	75	75	75
Βήμα (P)	mm	50	50	50	50	50
Ακτίνα (R)	mm	25	27.5	30	22.5	20
Περιστροφές	N/A	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Μήκος ανά περιστροφή	mm	164.8	179.8	195.0	149.9	135.2
Συνολικό μήκος	mm	247.3	269.8	292.5	224.9	202.9
Γωνία ελίκωσης	degrees	17.66	16.14	14.86	19.48	21.70
	rad	0.308	0.281	0.259	0.339	0.378
Σωλήνας						
Διάμετρος (D_T)	mm	10	10	10	10	10
Ανεξάρτητες μεταβλητές						
Π_1	R/P	0.5	0.55	0.6	0.45	0.4
Π_2	H/P	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Π_3	D_T/P	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Π_4	D_c/P	5.022	5.4981	5.940	4.597	4.147

Πίνακας 1 Σχεδιαστικά μεγέθη για ποσοστιαία μεταβολή της Π_1 κατά $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$

	Μονάδες	Βάση	+10%	+20%	-10%	-20%
Γεωμετρία έλικας						
Υψος (H)	mm	75	82.5	90	67.5	60
Βήμα (P)	mm	50	50	50	50	50
Ακτίνα (R)	mm	25	25	25	25	25
Περιστροφές	N/A	1.5	1.65	1.8	1.35	1.2
Μήκος ανά περιστροφή	mm	164.8	164.8	164.8	164.8	164.8
Συνολικό μήκος	mm	247.2	272.0	296.7	222.5	197.8
Γωνία ελίκωσης	degrees	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66
	rad	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308
Σωλήνας						
Διάμετρος (D _T)	mm	10	10	10	10	10
Ανεξάρτητες μεταβλητές						
Π ₁	R/P	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Π ₂	H/P	1.5	1.65	1.8	1.35	1.2
Π ₃	D _T /P	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Π ₄	D _c /P	5.022	5.508	6.026	4.521	4.023

Πίνακας 2 Σχεδιαστικά μεγέθη για ποσοστιαία μεταβολή της Π₂ κατά ±10% και ±20%

	Μονάδες	Βάση	+10%	+20%	-10%	-20%
Γεωμετρία έλικας						
Υψος (H)	mm	75	75	75	75	75
Βήμα (P)	mm	50	50	50	50	50
Ακτίνα (R)	mm	25	25	25	25	25
Περιστροφές	N/A	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Μήκος ανά περιστροφή	mm	164.8	164.8	164.8	164.8	164.8
Συνολικό μήκος	mm	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3
Γωνία ελίκωσης	degrees	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66
	rad	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308
Σωλήνας						
Διάμετρος (D _T)	mm	10	11	12	9	8
Ανεξάρτητες μεταβλητές						
Π ₁	R/P	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Π ₂	H/P	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Π ₃	D _T /P	0.2	0.22	0.24	0.18	0.16
Π ₄	D _c /P	5.022	5.004	5.004	5.022	5.040

Πίνακας 3 Σχεδιαστικά μεγέθη για ποσοστιαία μεταβολή της Π₃ κατά ±10% και ±20%

3.2.3. Πλεγματοποίηση

Σε κάθε αριθμητική επίλυση προβλημάτων βασικός παράγοντας εξαγωγής έγκυρων αποτελεσμάτων είναι η σωστή διαμέριση του εκάστοτε μοντέλου ή μέρος αυτού. Αυτή εξαρτάται από το φαινόμενο που επιθυμείται να καταγραφεί. Στην περίπτωση των υδραυλικών πηληγμάτων πρόκειται για κύματα πίεσης που μεταφέρονται με την ταχύτητα του ήχου.

Η επέκταση του προγράμματος αντικαθιστά σε επιλεγμένους όγκους τα στοιχεία στερεών με στοιχεία ρευστών και τις αντίστοιχες ιδιότητες. Ορίζεται, δηλαδή, σε κάθε περίπτωση το λεγόμενο Ακουστικό Σώμα, το οποίο αποτελεί το μέσο διάδοσης των ηχητικών κυμάτων/πληγμάτων. Η σωστή πλεγματοποίηση αυτού του σώματος θα απεικονίσει την ακουστική πληροφορία. Για να ληφθεί λοιπόν η πληροφορία της πίεσης από κάθε πεπερασμένο στοιχείο, πρέπει το μέγεθος κάθε στοιχείου να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να «χωράει» την απόσταση που διανύει το κύμα σε μία μονάδα της χρονικής διαμέρισης. Η ANSYSTM στο αντίστοιχο εγχειρίδιο για τις αναλύσεις ακουστικών φαινομένων συστήνει τουλάχιστον 10 στοιχεία μικρής τάξης (πχ γραμμικά), ή πέντε στοιχεία ανώτερης τάξης ανά μήκος κύματος του φαινομένου [10].

Όλες οι αναλύσεις που έγιναν στην μελέτη των διαφόρων γεωμετριών έγιναν με περιοδική διέγερση συνημιτονοειδούς μορφής, με συχνότητα 300Hz και ταχύτητα ρευστού 1,5m/s. Παράλληλα, οι αναλύσεις έγιναν με χρονικό βήμα 3.6E-3. Σύμφωνα με την πρόταση της ANSYSTM και την ανωτέρα θεώρηση προκύπτει για το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1500}{300} = 5mm, \text{ όπου } c \text{ η ταχύτητα του ήχου στο μέσο, } f \text{ η συχνότητα περιοδικού κύματος. Με πέντε}$$

στοιχεία ανωτέρας τάξης ανά μήκος κύματος προκύπτει ότι το μέγιστο μέγεθος ανά στοιχείο είναι ένα χιλιοστό του μέτρου. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η διάσταση των στοιχείων κατά οποιαδήποτε κατεύθυνση (αξονική, ακτινική και περιφερειακή) της εκάστοτε σωλήνωσης να είναι περίπου 0.41mm, μέγεθος που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του προγράμματος.

Υπάρχει εξήγηση για την φαινομενική σπατάλη υπολογιστικών πόρων (σε προκαταρκτική μελέτη έχουμε 60% μικρότερο μέγεθος από το οριακά ανεκτό). Η κύρια γεωμετρία που μελετήθηκε ήταν η ελικοειδούς άξονα σωλήνωση. Αφού η μελέτη δεν είναι μονοδιάστατη, υπάρχουν σημεία που περιστρέφονται γύρω από τον άξονα ελίκωσης σε μεγαλύτερη και σε μικρότερη διάμετρο. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων με την μεγαλύτερη ακτίνα περιστροφής είναι έλικα με άξονα ελίκωσης ίδιο με τον κύριο και ακτίνα ελίκωσης την κοινή ακτίνα των σημείων. Αν, λοιπόν, το μέγεθος του στοιχείου θεωρηθεί σταθερό, τότε σ' αυτή την έλικα θα υπάρχουν παραπάνω στοιχεία από αυτά στον άξονα του σωλήνα. Το γεγονός αυτό δεν επιτρέπει στο πρόγραμμα να δημιουργήσει το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Άρα είναι απαραίτητο να έχουμε τον ίδιο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων στις διάφορες ελικοειδείς τροχιές. Αυτό σημαίνει ότι οι τροχιές με μεγαλύτερη και μικρότερη διάμετρο θα έχουν διαμερίσεις μεγαλύτερου και μικρότερου μεγέθους αντίστοιχα. Το σημαντικό είναι η μεγαλύτερη διαμέριση να είναι μικρότερη από την οριακά αποδεκτή που βρέθηκε παραπάνω. Η συσχέτιση του μήκους της μεγαλύτερης διαμέρισης με το μήκος της κύριας αξονικής ακολουθεί την συνάρτηση:

$$\frac{l_{out}}{l} = \frac{L_{out} / n}{L / n} = \frac{2\pi(R+r)PN}{2\pi RPN} = 1 + \frac{r}{R} \quad (32)$$

Πρέπει όμως να ισχύει $l_{out} < \lambda$ άρα:

$$l_{out} < \lambda \Rightarrow l \left(1 + \frac{r}{R} \right) < \lambda \Rightarrow l < \frac{\lambda R}{R + r} \quad (33)$$

Όπου:

l_{out} : μήκος διαμέρισης της εξωτερικής έλικας

l : μήκος διαμέρισης κύριας έλικας (αξονικής του σωλήνα

R : βήμα ελίκωσης

n : αριθμός διαμερίσεων ελικώσεων

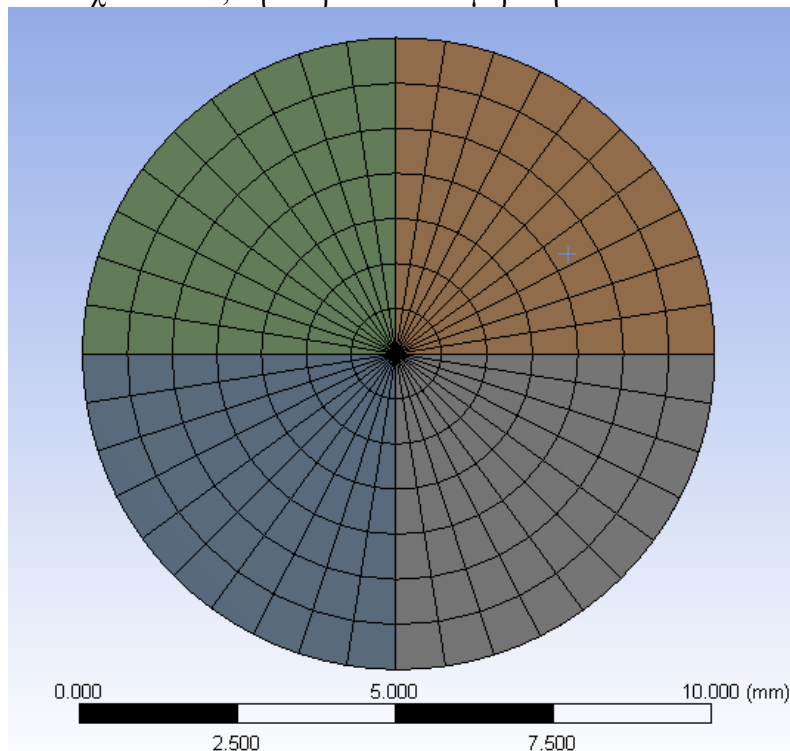
R : διάμετρος κύριας έλικας

r : διάμετρος σωλήνα

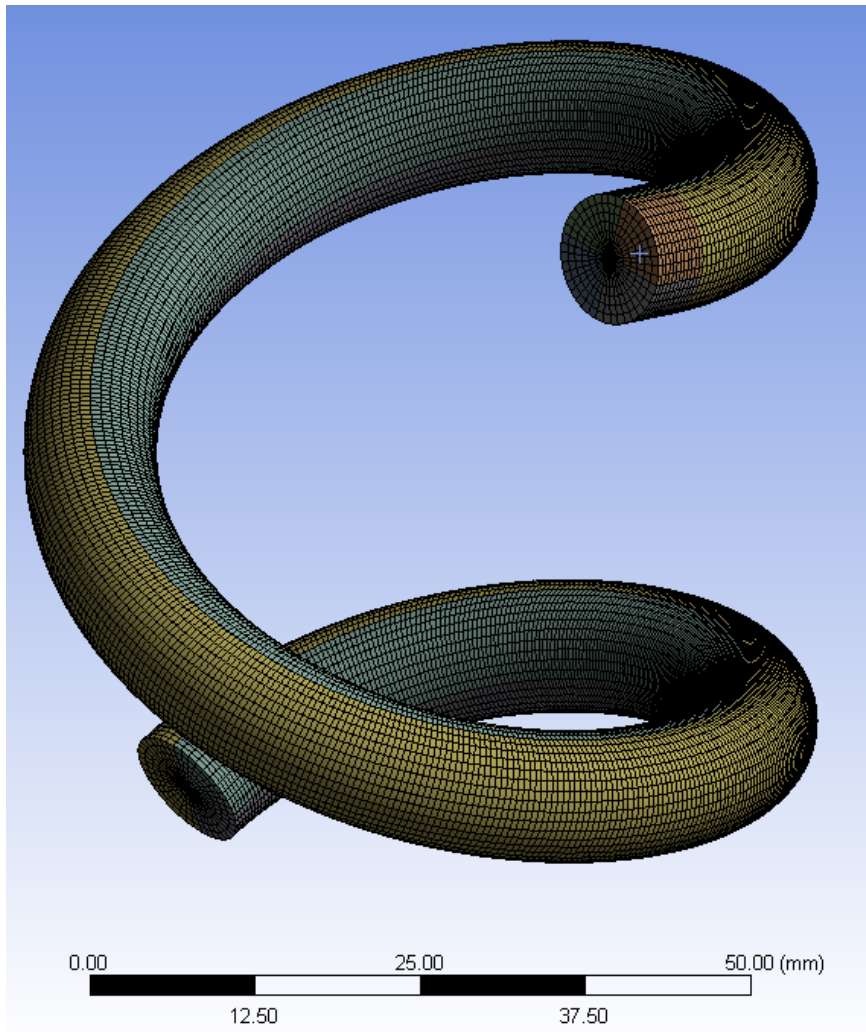
λ : μέγιστο μήκος πεπερασμένου στοιχείου κατά την αξονική διεύθυνση του σωλήνα

Τέλος, επειδή τα φαινόμενα μεταφοράς των υδραυλικών πληγμάτων στον ελικοειδή σωλήνα δεν είναι δυνατό να είναι αυστηρά αξονικά, απαιτείται καλή διακριτότητα και στις άλλες δυο διευθύνσεις, την ακτινική και την περιφερειακή. Αυτό γιατί, καθώς ακολουθείται η κεντρική έλικα (ο άξονας του σωλήνα), κάθε προηγούμενη τοπικά αξονική κατεύθυνση παύει να είναι αξονική και πλέον έχει ακτινικές και περιφερειακές συνιστώσες, οι οποίες είναι τελικά αυτές που δημιουργούν το φαινόμενο της καθυστέρησης του κύματος το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος.

Πέρα από το μέγεθος των στοιχείων πρέπει να εξεταστεί και ο τρόπος διάταξής τους στο εκάστοτε μοντέλο. Έχει εφαρμοστεί φόρτιση όλης της διατομής του σωλήνα (λεπτομέρειες στο κεφάλαιο των οριακών συνθηκών), η οποία είναι αξονοσυμμετρική. Δεν επιθυμείται να εξεταστεί κάποιο συγκεκριμένο σημείο του σωλήνα, γι' αυτό επιλέγεται και η αξονοσυμμετρική κατανομή πεπερασμένων στοιχείων. Κάθε κάθετη διατομή στην αξονική έλικα έχει λοιπόν, την παρακάτω διαμέριση:



Εικόνα 8 Διαμέριση κάθετης διατομής σωλήνωσης σε πεπερασμένα στοιχεία



Εικόνα 9 Πλήρες πλέγμα ακουστικού σώματος (παράλλαγή γεωμετρίας που μελετήθηκε)

3.2.4. Οριακές συνθήκες

Η αριθμητική επίλυση του συστήματος των εξισώσεων απαιτεί ορισμό των συνθηκών που επικρατούν στα όρια του μοντέλου. Ο σχεδιασμός της διάταξης μελετήθηκε με γνώμονα την ένταξή της στο υδραυλικό κύκλωμα εν σειρά με κύρια στοιχεία που δημιουργούν υδραυλικά πλήγματα, όπως αντλίες, βαλβίδες ελέγχου ροής. Σε κάθε περίπτωση το στοιχείο δεν αποτελεί στοιχείο συσσώρευσης, παρά μόνο διέλευσης. Με βάση αυτά τα πλαίσια, έχουμε τα εξής γεωμετρικά όρια:

- Ανάντη βάση: η κάθετη διατομή του σωλήνα που βρίσκεται πριν την εξεταστέα διάταξη, με βάση την αρχική φορά του δημιουργημένου πλήγματος
- Παράπλευρη επιφάνεια του σωλήνα
- Κατάντη βάση: η κάθετη διατομή του σωλήνα μετά την διάταξη/γεωμετρία

Η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου είναι το όριο που ορίζεται από τα όρια της σωλήνωσης. Δεν μελετάται η αλληλεπίδραση ρευστού – τοιχώματος, συνεπώς το τοίχωμα δεν συνεισφέρει στην μεταβολή της ενέργειας του συστήματος. Αντικείμενο ενδιαφέροντος όμως είναι η ανακλαστική ικανότητά του, συνεπώς για την επίλυση του μοντέλου ορίζεται ως μία πλήρως ανακλαστική επιφάνεια.

Θεωρείται ότι η διάταξή της παρούσας μελέτης ακολουθείται από διάφορα στοιχεία του κυκλώματος ανάλογα με την θέση που έχει τοποθετηθεί. Το αντικείμενο μελέτης όμως, είναι η επίδρασή της διάταξης καθαυτή στην μετάδοση του υδραυλικού πλήγματος. Ορίζεται τότε, η κατάντη βάση ως πλήρως ακουστικά απορροφητική επιφάνεια θεωρώντας ότι το κύμα (ή ότι έχει απομείνει από αυτό) θα συνεχίσει την πορεία του σε άλλο στοιχείο του κυκλώματος. Ταυτόχρονα, με αυτή την επιλογή δεν εξετάζονται υδραυλικά πλήγματα που ταξιδεύουν αντίθετα της ροής, χωρίς όμως να διαταράσσεται η γενικότητα του σχεδιασμού. Η επιλογή αυτή γίνεται χρίζοντας την κατάντη βάση ως Absorbing elements.

Τέλος, η ανάντη βάση αποτελεί την επιφάνεια διέγερσης του μοντέλου. Οι διεγέρσεις που παρουσίασαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη παρούσα εργασία ήταν οι περιοδικές διεγέρσεις/πλήγματα πίεσης, όπως αυτά που δημιουργούνται από μία αντλία παροχής. Τα μεταβατικά φαινόμενα εξετάζονται σε συγκεκριμένο κομμάτι του ANSYS WORKBENCH (WB) (Transient Structural ANSYS WB module). Η επέκταση ακουστικών προβλημάτων στο συγκεκριμένο τμήμα του WB επιτρέπει μόνο δύο ειδών διεγέρσεις επιφανείας. Παροχή μάζας και επιτάχυνση επιφανείας (ορισμένη είτε από το κάθετο διάνυσμα επιφανείας, το οποίο έχει φορά εξωτερική του ακουστικού όγκου, είτε από συνιστώσες x, y, z). Επιλέχθηκε η διέγερση μέσω επιτάχυνσης επιφανείας

3.2.5. Χαρακτηριστικά διέγερσης

Θεωρήθηκε συνημιτονοειδής διέγερση στην ανάντη βάση της έλικας με πλάτος τέτοιο ώστε να δημιουργείται πλήγμα με πλάτος πίεσης 20bar. Η διέγερση εισάγεται στο σύστημα με επιτάχυνση επιφανείας. Για να βρεθεί το πλάτος της επιτάχυνσης θα γίνει χρήση των νόμων της κλασικής μηχανικής.

Απαιτήθηκε ανάπτυξη πλάτους πίεσης ίση με $P = 20\text{bar}$. Όμως η πίεση είναι αναπτυσσόμενη δύναμη προς την επιφάνεια που εφαρμόζεται, δηλαδή $P = F / A$, όπου P πίεση, F αναπτυσσόμενη δύναμη, A επιφάνεια εφαρμογής της, δηλαδή η επιφάνεια της ανάντης βάσης. Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ισχύει $F = ma$. Συνεπώς αν βρεθεί η μάζα του ρευστού στον σωλήνα θα βρεθεί και η ζητούμενη επιτάχυνση. Η μάζα υπολογίζεται από τον τύπο της πυκνότητας ως $m = \rho(P)V$, όπου ρ η πυκνότητα και V ο συνολικός όγκος του

ρευστού. Αυτός υπολογίζεται από την σχέση $V = \int_{x=0}^{x_{end}} A(x)dx$, όπου A η επιφάνεια της κάθετης διατομής σε

κάθε σημείο x πάνω στον κεντρικό άξονα. Παρατηρείται ότι η πυκνότητα είναι συνάρτηση της πίεσης και η επιφάνεια κάθε διατομής είναι συνάρτηση του σημείου του άξονα. Στα μοντέλα που μελετήθηκαν θεωρήθηκε ότι και η πίεση και η επιφάνεια A είναι σταθερές, δηλαδή $\rho = \rho_0$ και $V = A \cdot L$, όπου ρ_0 η αρχική πυκνότητα του ρευστού και L το μήκος του κεντρικού άξονα (έλικα). Αν συνδυαστούν οι ανωτέρω σχέσεις προέκυψε η σχέση (34), που υπολογίζει το πλάτος της ταλάντωσης για ελικοειδή σωλήνωση με σταθερό εμβαδό διατομής καθ' όλο το μήκος του άξονά της.

$$\alpha = \frac{P}{\rho L} \quad (34)$$

Πλέον, γνωρίζοντας το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης της επιτάχυνσης του εμβόλου, μπορούσε να εισαχθεί στο πρόγραμμα και να υπολογιστούν πιο άμεσες εισοδοι, όπως για παράδειγμα το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης του εμβόλου, που υπολογίζεται ολοκληρώνοντας δύο φορές την συνάρτηση της επιτάχυνσης, $a(t) = a \cos(2\pi ft + \varphi)$ όπου f συχνότητα παραγωγής πληγμάτων και φ αρχική διαφορά φάσης. Δηλαδή το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης της θέσης του εμβόλου δίνεται από την σχέση (35) και τελικά το πλάτος της από την συνάρτηση της σχέσης (36)

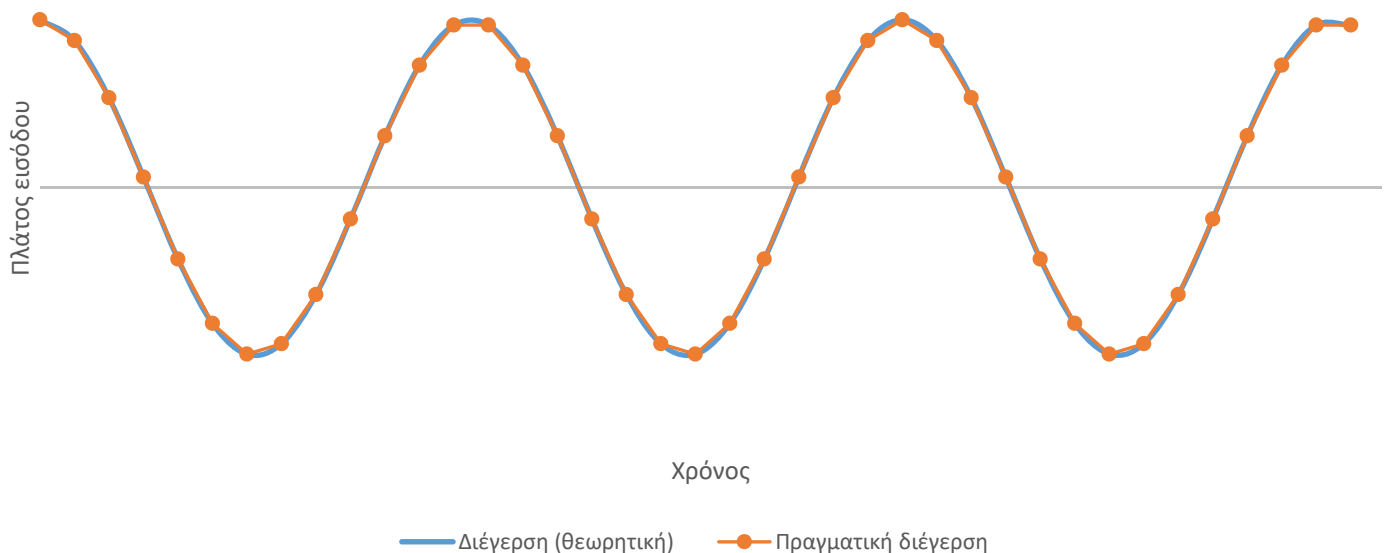
$$U_0 = -\frac{a}{4\pi^2 f^2} \quad (35)$$

$$U = -\frac{a}{4\pi^2 f^2} \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (36)$$

3.2.6. Χρονική κλίμακα αναλύσεων

Η χρονική κλίμακα των αναλύσεων καθορίστηκε από την επιθυμητή διακριτότητα και τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ, η οποία μεταφράζεται σε χρόνος υπολογισμού. Αυτά τα δύο μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα. Στην περίπτωση της παρούσας ερευνητικής εργασίας η υπολογιστική ισχύς ήταν καθοριστικός παράγοντας για την χρονική κλίμακα. Η συνολική διάρκεια του φαινομένου ήταν συγκεκριμένη σε κάθε ανάλυση: ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το πλήγμα στο τέλος της γεωμετρίας, προστιθέμενος ο χρόνος που απαιτείται για μερικές περιόδους του φαινομένου, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη πληθώρα δεδομένων για επεξεργασία. Συνεπώς, ο αριθμός των χρονικών βημάτων εξαρτιόταν από το μέγεθός τους. Η διέγερση είναι ημιτονοειδούς μορφής, και ο τρόπος εισαγωγής της στο πρόγραμμα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον αριθμό των χρονικών βημάτων. Προσπαθεί δηλαδή, να προσεγγίσει μία ημιτονοειδή καμπύλη με έναν αριθμό σημείων. Λαμβάνοντας πάρα πολλά υπάρχει καλή προσέγγισή της αλλά με μεγάλο υπολογιστικό κόστος και το αντίστροφο.

Στην σειρά πειραμάτων της διαστατικής ανάλυσης επιλέχθηκε μέγιστο χρονικό βήμα ίσο με $3.6e-3$. Με αυτή την τιμή η διέγερση παρουσιάζει την μορφή του διαγράμματος (1). Τα σημεία αποτελούν την είσοδο στο πρόγραμμα, ενώ η τεθλασμένη γραμμή (πορτοκαλί) αποτελεί την προσέγγιση της πραγματικής διέγερσης (μπλε)



Διάγραμμα 1 Μορφή εισαγωγής διέγερσης στο πρόγραμμα, και σύγκρισή της με την πραγματική καμπύλη διέγερσης (συχνότητα φαινομένου 300Hz)

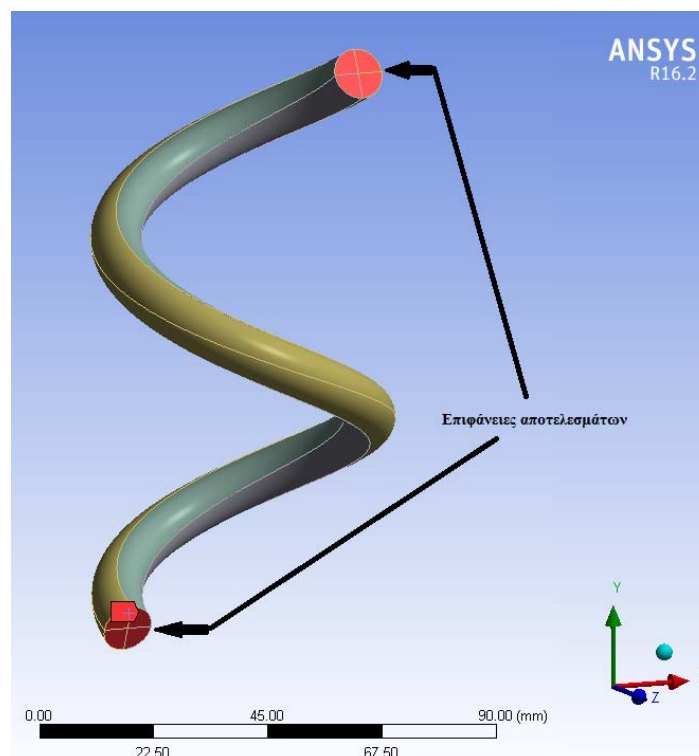
Σε περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, αρκεί να μικρύνει το χρονικό βήμα. Αυτή η αλλαγή επηρεάζει και το πλέγμα με τον τρόπο που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

3.2.7. Χαρακτηριστικά ρευστού

Οι λειτουργίες διεγέρσεως που μελετήθηκαν είναι σχετικά χαμηλόσυχνα φαινόμενα (200 – 800Hz). Αν θεωρηθεί ρευστό με τις ιδιότητες του νερού, πυκνότητα 10^3kg/m^3 και ταχύτητα ήχου 1500m/s, τότε ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταβεί το κύμα όλη την εξεταζόμενη γεωμετρία είναι αρκετά μικρότερος από τον χρόνο μιας περιόδου διέγερσης. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκε να μειωθεί η ταχύτητα του ήχου στο 1.5m/s κρατώντας την ίδια πυκνότητα με αυτή του νερού. Με αυτή την αλλαγή μειώθηκε το μέτρο ελαστικότητας του όγκου του ρευστού σύμφωνα με την εξίσωση (23) που συσχετίζει την ταχύτητα του ήχου σε ένα ρευστό με το μέτρο ελαστικότητάς του και την πυκνότητά του. Η συσχέτιση δύο ρευστών ίδιου όγκου με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας σε στατικά προβλήματα είναι τελείως γραμμική, όπως φαίνεται και από την εξίσωση υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας $B = -VdP / dV$.

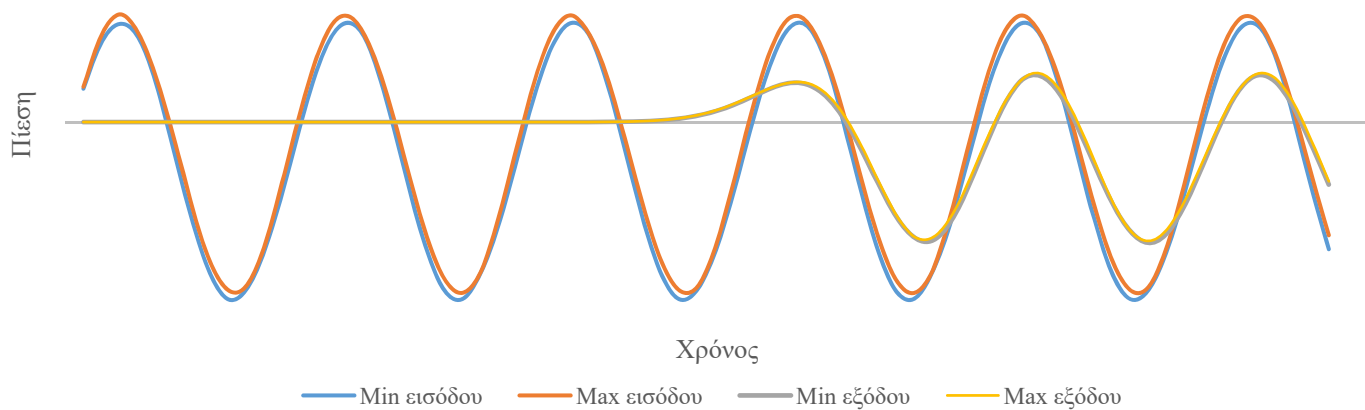
3.2.8. Επεξεργασία και αποτελέσματα

Ο υπολογισμός του χρόνου μεταφοράς του κύματος από την βάση διέγερσης στο τέλος της γεωμετρίας απαιτούσε λήψη δεδομένων από τις δύο βάσεις.



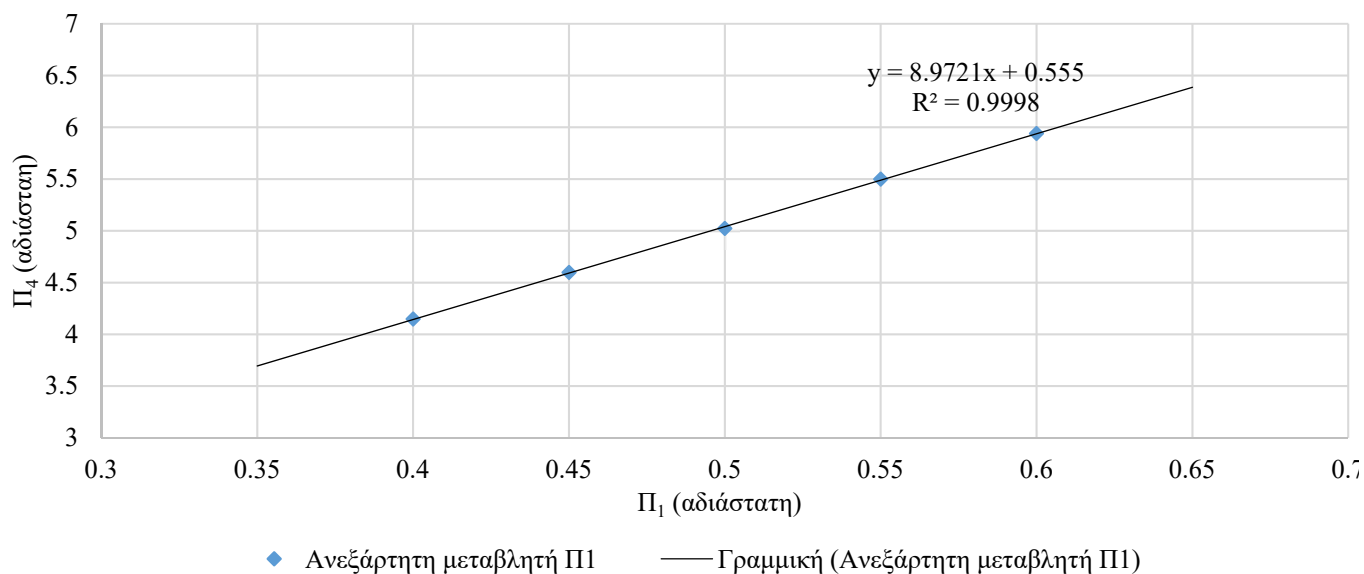
Εικόνα 10 Επιφάνειες από τις οποίες έγινε λήψη δεδομένων

Το πρόγραμμα προσέφερε το διάγραμμα της μέγιστης τιμής της πίεσης κάθε διατομής. Αυτό που υπολογίστηκε ήταν ο χρόνος που πέρασε για την εμφάνιση του πρώτου μεγίστου πλάτους πίεσης στην κατάντη βάση, από το πρώτο μέγιστο πλάτος πίεσης στην ανάντη βάση/είσοδο. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία εξετάζεται κάθε ο χρόνος μετάβασης κάθε ακροτάτου της ταλάντωσης και υπολογίζεται η μέση τιμή του. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα διάγραμμα (2) που συγκρίνει την πίεση στις δύο επιφάνειες για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

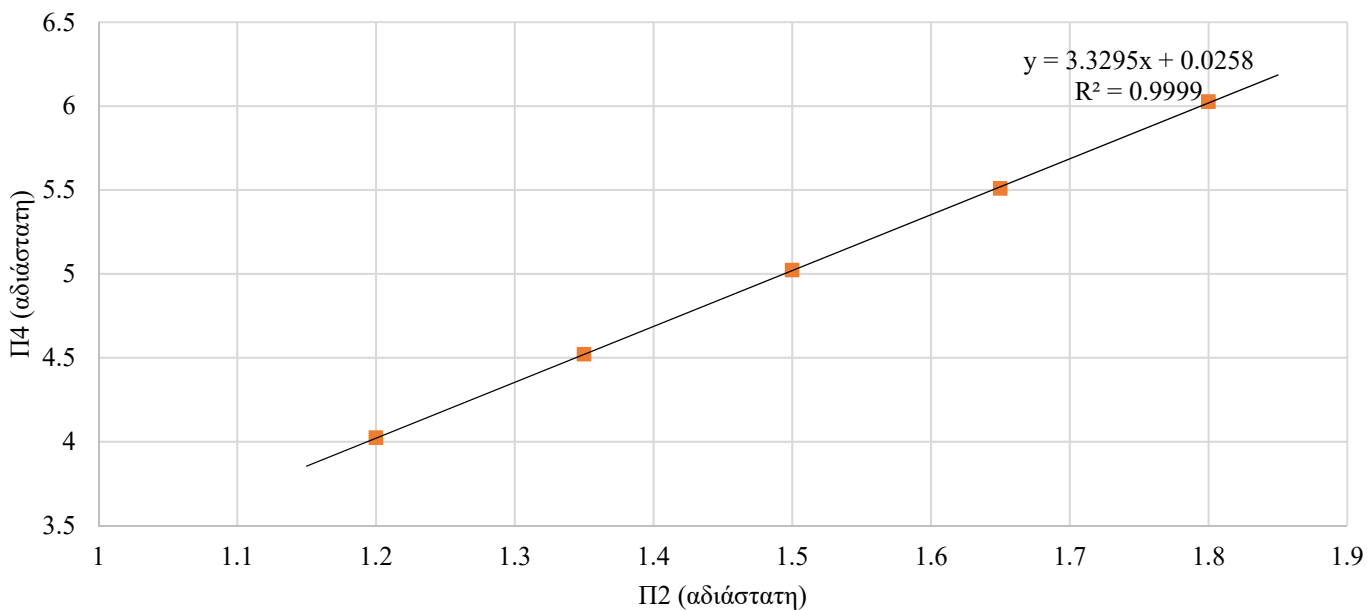


Διάγραμμα 2 Μεταβολή μεγίστων και ελαχίστων τιμών πλάτους ταλάντωσης πίεσης στις δύο επιφάνειες λήψης δεδομένων (εισόδου, εξόδου)

Μετά τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης δύναται πλέον να υπολογιστούν οι τιμές των αδιάστατων μεταβλητών και να χαραχθεί ο χάρτης εξάρτησης της μεταβλητής Π_4 από τις υπόλοιπες τρεις.

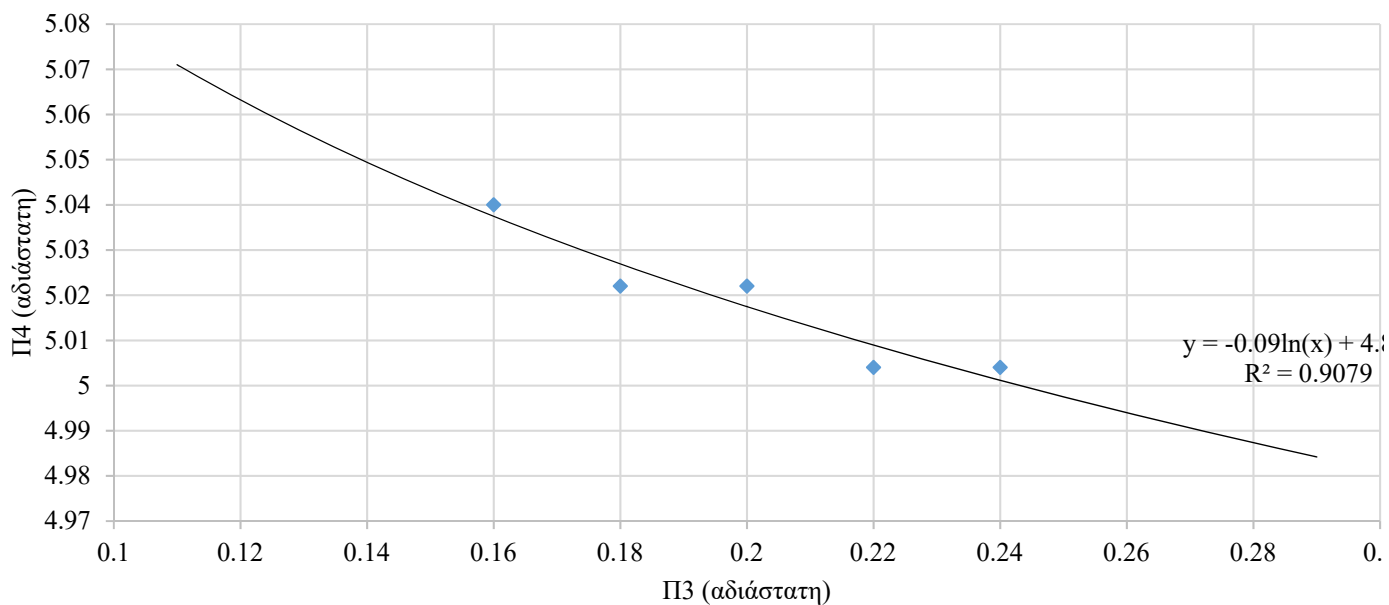


Διάγραμμα 3 Μεταβολή της αδιάστατης μεταβλητής Π_4 συναρτήσει μεταβολής της μεταβλητής Π_1



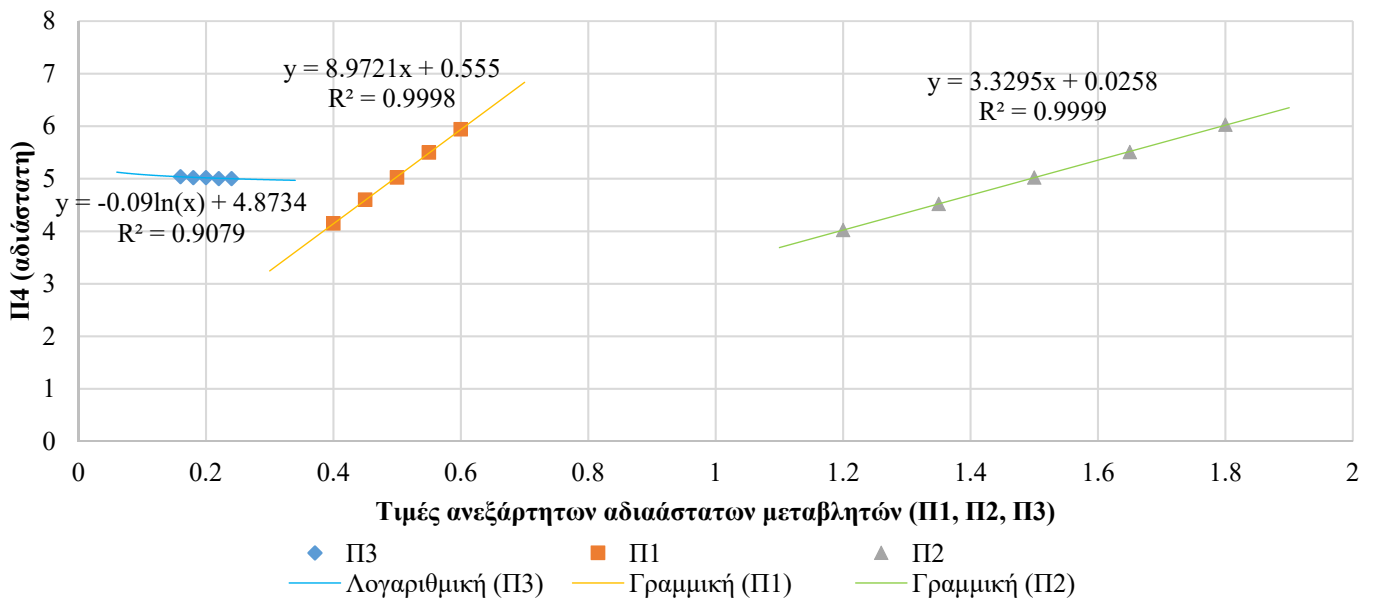
■ Ανεξάρτητη μεταβλητή Π2 — Γραμμική (Ανεξάρτητη μεταβλητή Π2)

Διάγραμμα 4 Μεταβολή της αδιάστατης μεταβλητής Π4 συναρτήσει μεταβολής της μεταβλητής Π2



◆ Αδιάστατη μεταβλητή 3 — Λογαριθμική (Αδιάστατη μεταβλητή 3)

Διάγραμμα 5 Μεταβολή της αδιάστατης μεταβλητής Π4 συναρτήσει μεταβολής της μεταβλητής Π3



Διάγραμμα 6 Συσχέτιση μεταβολών Π4 με μεταβολή των ανεξάρτητων αδιαστάτων μεταβλητών Π1, Π2, Π3

Στα δεδομένα που προέκυψαν πραγματοποιήθηκαν τρεις προσεγγίσεις των συναρτήσεων εξάρτησης της Π4 από τις Π1, Π2, Π3. Αυτές είναι:

$$\Pi_4(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 8.9721\Pi_1 + C_1(\Pi_2, \Pi_3) \quad (37)$$

$$\Pi_4(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 3.3295\Pi_2 + C_2(\Pi_1, \Pi_3) \quad (38)$$

$$\Pi_4(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = -0.09\ln(\Pi_3) + C_3(\Pi_1, \Pi_2) \quad (39)$$

Όπου C σταθερές εξαρτημένες από τις εκάστοτε δύο μη βασικές μεταβλητές Π

Μέσω του ορισμού του ολικού διαφορικού της συνάρτησης και της ανεξαρτησίας των εξισώσεων αυτών μπορούν να συνδυαστούν και να προκύψει η συνάρτηση που συνδέει την Π4 με τις άλλες τρεις ταυτόχρονα:

$$\Pi_4(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 8.9721\Pi_1 + 3.3295\Pi_2 - 0.09\ln(\Pi_3) + C \quad (40)$$

Όπου C σταθερά.

Για να υπολογιστεί η σταθερά C αρκεί να ληφθεί από μία προσομοίωση ο αντίστοιχος συνδυασμός Πi i=1:4, και τεθούν οι τιμές στην εξίσωση (39). Επιλέγεται το κοινό σε όλες τις ομάδες πειραμάτων πείραμα βάσης, για τον υπολογισμό της σταθεράς, η οποία προκύπτει ίση με $C = -4.4403$. Η συνάρτηση (40) γίνεται :

$$\Pi_4(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 8.9721\Pi_1 + 3.3295\Pi_2 - 0.09\ln(\Pi_3) - 4.4403 \quad (47)$$

η οποία επιτρέπει την πρόβλεψη του αποτελέσματος ενός σχεδίου στον χρόνο μετάδοσης του κύματος πίεσης

3.2.9. Ακρίβεια μοντέλου

Η επιβεβαίωση της ακρίβειας του μοντέλου απαιτεί την εκτέλεση περαιτέρω προσομοιώσεων και σύγκριση των μετρήσεων τους με τις προβλεπόμενες τιμές των μεγεθών. Με τον ίδιο τρόπο ανάλυσης και για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα (4)

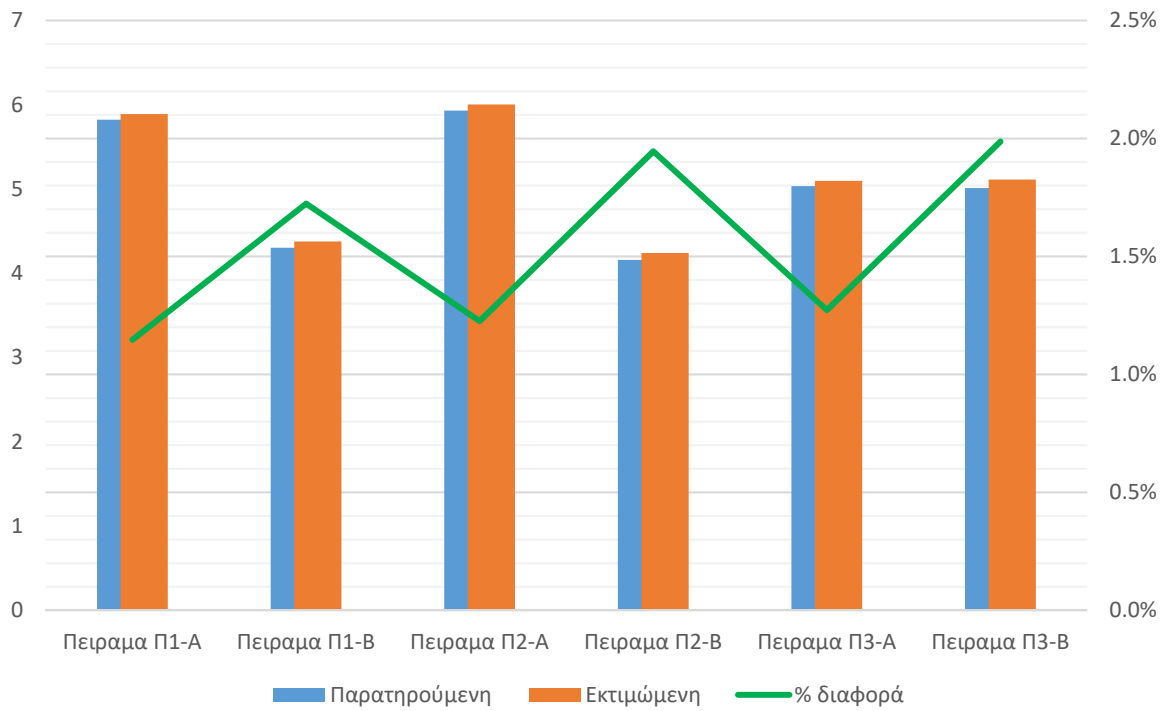
	Μονάδες	Π ₁ (A)	Π ₁ (B)	Π ₂ (A)	Π ₂ (B)	Π ₃ (A)	Π ₃ (B)
Γεωμετρία έλικας							
Υψος (H)	mm	75	75	88.5	62.025	75	75
Βήμα (P)	mm	50	50	50	50	50	50
Ακτίνα (R)	mm	29.375	20.95	25	25	25	25
Περιστροφές	N/A	1.5	1.5	1.77	1.2405	1.5	1.5
Μήκος ανά περιστροφή	mm	191.221	140.809	164.845	164.845	164.845	164.845
Συνολικό μήκος	mm	286.832	211.214	291.776	204.491	247.268	247.268
Γωνία ελίκωσης	degrees	15.16	20.80	17.66	17.66	17.66	17.66
	rad	0.26	0.36	0.31	0.31	0.31	0.31
Σωλήνας							
Διάμετρος (D _T)	mm	10.00	10.00	10.00	10.00	11.68	8.18
Ανεξάρτητες μεταβλητές							
Π ₁	R/P	0.5875	0.419	0.5	0.5	0.5	0.5
Π ₂	H/P	1.5	1.5	1.77	1.2405	1.5	1.5
Π ₃	D _T /P	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2336	0.1636
Π ₄	D _c /P	5.821	4.302	5.929	4.158	5.0328	5.0112

Πίνακας 4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων επαλήθευσης πειραματικού μοντέλου

Μετά την εκτέλεση των πειραμάτων συγκρίθηκαν οι παρατηρούμενες τιμές με τις αντίστοιχες εκτιμώμενες. Αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα (5) και οπτικοποιούνται στο διάγραμμα (7)

Σειρά προσομοίωσης	Π ₁ (A)	Π ₁ (B)	Π ₂ (A)	Π ₂ (B)	Π ₃ (A)	Π ₃ (B)
Π ₄ (παρατηρούμενο)	5.821	4.302	5.929	4.158	5.0328	5.0112
Π ₄ (εκτιμώμενο)	5.888	4.376	6.002	4.239	5.097	5.111
Ποσοστιαία διαφορά εκτίμησης από παρατήρηση	1.147 %	1.724 %	1.226 %	1.946 %	1.272 %	1.987 %

Πίνακας 5 Σύγκριση παρατηρούμενης και εκτιμώμενης αδιάστατης μεταβλητής στόχου



Διάγραμμα 7 Παρατηρούμενη και εκτιμώμενη τιμή μεταβλητής P_4 και ποσοστιαία μεταβολή της

Παρατηρείται απόκλιση προβλεπόμενων της τάξης του 2%, ακρίβεια που είναι ικανοποιητική αν ληφθεί υπόψιν και η ακρίβεια της αριθμητικής επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία που είναι της ίδιας τάξης. Η σχέση πρόβλεψης λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη και θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια, στα πλαίσια σχεδιασμού πιθανής λύσης του προβλήματος.

4. Σχεδιαστική πρόταση λύσεων

Έχοντας μελετήσει την επίδραση των γεωμετριών στην εξέλιξη του φαινομένου και χρησιμοποιώντας τα πορίσματα της παραπάνω μελέτης, δύναται να προταθεί σχεδιαστική λύση για την κατασκευή μίας διάταξης απόσβεσης υδραυλικών πηγμάτων σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος και διεγέρσεων.

4.1. Ορισμός τεχνικών προδιαγραφών και περιβαλλοντικών συνθηκών

Η σχεδιαστικές λύσεις που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια απαιτούν τον ακριβή προσδιορισμό των φαινομένων που καλούνται να επιλύσει καθώς και των γεωμετρικών περιορισμών που υπάρχουν για την εφαρμογή τους ως μέλος ενός υδραυλικού κυκλώματος. Θεωρήθηκαν τυπικές περιβαλλοντικές συνθήκες πίεσης – θερμοκρασίας. Για τα υπόλοιπα μεγέθη αναφέρονται:

Σημεία λειτουργίας – λειτουργικά χαρακτηριστικά/μεγέθη

- Ονομαστική πίεση λειτουργίας συστήματος 300 bar
- Διέγερση (υδραυλικό πλήγμα) συχνότητας $f = 500\text{Hz}$ και πλάτους 50bar
- Ρευστό πυκνότητας 1kg/m^3 και ταχύτητας ήχου σε αυτό ίση με 1500m/s

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά – περιορισμοί

- Διάμετρος σωλήνα διάταξης $D_T = \text{Ø}1 / 4''$
- Συνολικό μήκος διάταξης μικρότερο των 1000mm
- Πάχος τοιχωμάτων τέτοιο ώστε να θεωρούνται αρκούντως άκαμπτα
- Υλικό τοιχωμάτων τυπικός χάλυβας μέτρου ελαστικότητας 200GPa και πυκνότητας 7850kg/m^3

4.2. Μελέτη τοιχωμάτων σωλήνωσης/καναλιού

Η θεωρητική μελέτη της γεωμετρίας και του φαινομένου έγινε με την παραδοχή ότι τα τοιχώματα της σωλήνωσης είναι πλήρως άκαμπτα. Επειδή στην πραγματικότητα δεν υπάρχει πλήρως άκαμπτο υλικό, αρκεί να επιλεγθεί τύπος σωλήνωσης τέτοιος ώστε να θεωρείται αρκούντως άκαμπτος. Η συνθήκη που δίνει αυτή την ιδιότητα είναι ότι η μεταβολή όγκου που συμβαίνει στο ρευστό λόγω της πίεσης είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από την μεταβολή εσωτερικού όγκου που συμβαίνει λόγω της παραμόρφωσης των τοιχωμάτων του σωλήνα, δηλαδή

$$\Delta V_f \geq 10\Delta V_s \quad (42)$$

Ισχύει για το ΔV_s :

$$\Delta V_s = L\Delta A \quad (43)$$

όπου ΔA η μεταβολή εμβαδού κάθετης διατομής και L το μήκος στο οποίο υπολογίζεται ο όγκος (ισχύει για σωλήνα με σταθερό εμβαδό διατομής στο αντίστοιχο μήκος). Όμως για τη μεταβολή της επιφάνειας ισχύει:

$$\Delta A = 2\pi\Delta R \quad (44)$$

Όπου ΔR η μεταβολή της ακτίνας. Από την μηχανική ισχύει ότι:

$$\Delta R = R\varepsilon_R \quad (45)$$

όπου ε_R η ακτινική παραμόρφωση του σωλήνα. Συνδυάζοντας λοιπόν τις σχέσεις (43),(44) και (45) προκύπτει ότι:

$$\Delta V_s = 2\pi R^2\varepsilon_R \quad (46)$$

Ισχύει για το ΔV_f :

Από τον ορισμό του μέτρου ελαστικότητας του όγκου για το ρευστό προκύπτει ότι η κατ' απόλυτη τιμή μεταβολή όγκου του υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Delta V_f = \frac{PV}{B} = \frac{PAL}{B} = \frac{2P\pi R^2L}{B} \quad (47)$$

Όπου:

P: η ασκούμενη πίεση

V: όγκος ρευστού

B: μέτρο ελαστικότητας όγκου

A: εμβαδό κάθετης διατομής

L: μήκος υπολογισμού όγκου

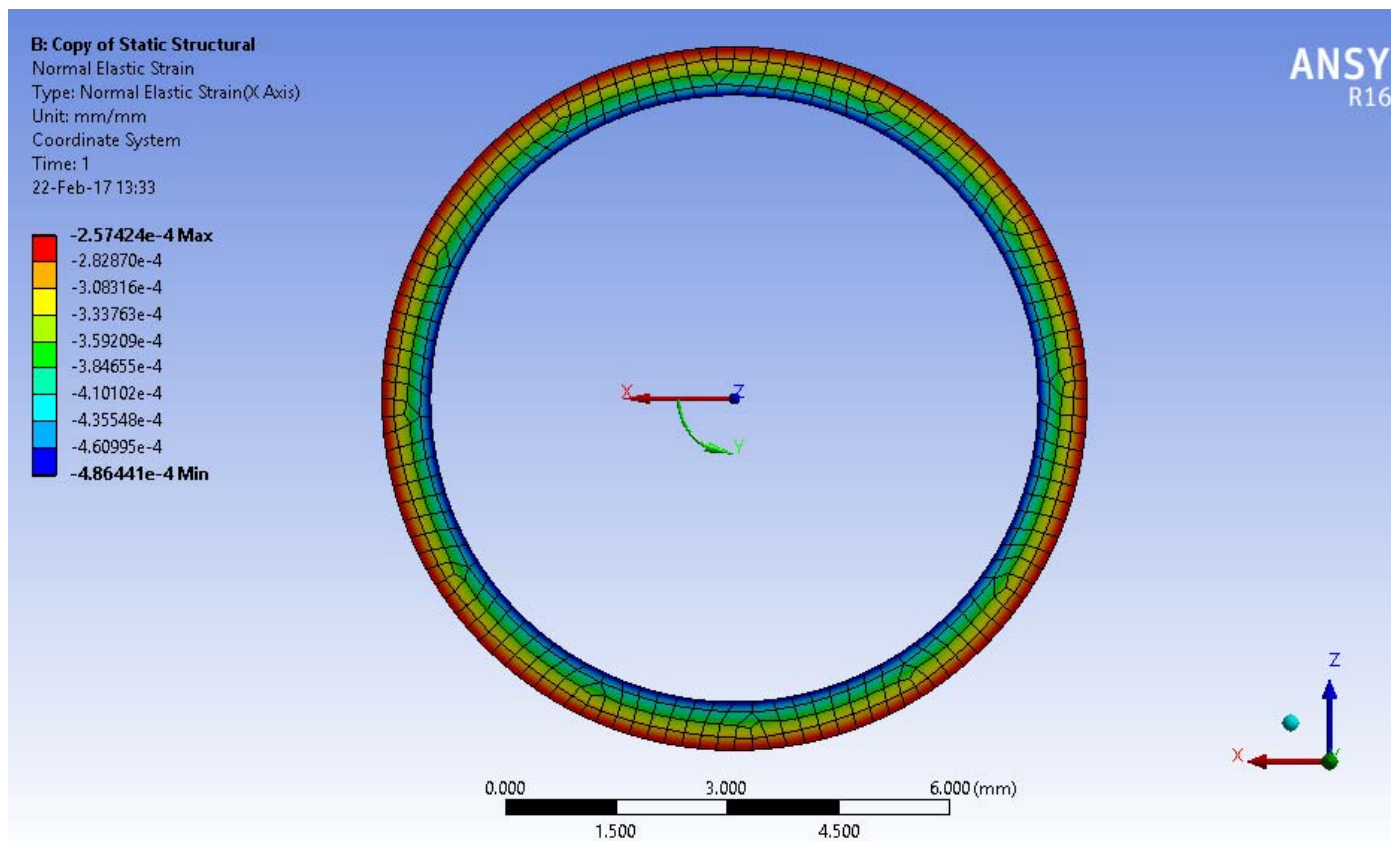
R: εσωτερική ακτίνα σωλήνα

Συνδυάζοντας τις (46) και (47) σύμφωνα με την σχέση (42) προκύπτει ότι για να θεωρηθούν αρκούντως άκαμπτα τα τοιχώματα του σωλήνα πρέπει να ισχύει:

$$\varepsilon_R \leq \frac{P}{20B} \quad (48)$$

Στην περίπτωση που μελετάται, η μέγιστη εσωτερική πίεση είναι ίση με 350 bar και το μέτρο ελαστικότητας όγκου του ρευστού ίσο με 2.2 GPa. Υπολογίζεται λοιπόν ότι η μέγιστη παραμόρφωση του τοιχώματος του σωλήνα πρέπει να είναι μικρότερη από $\varepsilon_R \leq 7.95e-4$ (49). Η παραμόρφωση εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και από την γεωμετρία του. Έχοντας επιλέξει το υλικό, η μόνη μεταβλητή είναι η γεωμετρία. Θα μελετηθούν λοιπόν διάφορα πάχη που να ικανοποιούν την συνθήκη αρκούντως ακαμψίας και φυσικά των κριτηρίων αντοχής του τοιχώματος.

Μετά από κάποιες δοκιμές για πάχος τοιχώματος ίσο με 0.75mm και εσωτερική ακτίνα σωλήνα ίση με 1/4", προκύπτει η κατανομή παραμορφώσεων όπως εμφανίζεται στην εικόνα (11)



Εικόνα 11 Πεδίο παραμορφώσεων για φόρτιση κυλίνδρου δακτυλιοειδούς διατομής από εσωτερική πίεση 350Bar

Παρατηρείται ότι η μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή ακτινική παραμόρφωση συμβαίνει στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα και ισούται με 4.86441×10^{-4} , μέγεθος που ικανοποιεί την συνθήκη (49). Η μηχανική αντοχή του επιβεβαιώνεται από σύγκριση των ισοδύναμων τάσεων με το όριο διαρροής του υλικού. Συνεπώς, τοίχωμα πάχους 0.75 mm είναι αρκετό για να θεωρηθεί άκαμπτο για το φαινόμενο. Δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να υπολογιστεί το όριο του πάχους του τοιχώματος, καθώς δεν είναι κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Οποιοδήποτε πάχος τοιχώματος άνω των 0.75 mm μπορεί να επιλεγεί στην σχεδιαστική πορεία.

Σημείωση: Τα διαγράμματα πίεσης που ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια έχουν προκύψει από την σχετική πίεση με βάση τα 30MPa. Γι' αυτό το λόγο εξηγούνται οι αρνητικές πιέσεις

4.3. Σχεδιασμός και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η επίτευξη της καταστροφικής συμβολής ενός υδραυλικού πλήγματος απαιτεί τη διάσπασή του σε δύο πορείες και στην συνέχεια τη σύζευξή τους. Αυτές οι δύο πορείες έχουν την ίδια εσωτερική διάμετρο και η σχέση των μηκών τους είναι τέτοια ώστε να δημιουργείται διαφορά φάσης $\pi/2$ μεταξύ των δύο πλήγμάτων στο σημείο συμβολής τους. Ο υπολογισμός των μηκών αυτών λαμβάνει υπόψιν τους περιορισμούς που τίθενται από το πρόβλημα και συμβαδίζει με την θεωρία που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα εδάφια της ερευνητικής εργασίας. Πέρα από τις δύο πορείες, βασικά στοιχεία της διάταξης αποτελούν ο διαχωριστής (splitter) και ο ζεύκτης (merger) ροής, οι οποίοι ευθύνονται για την διάσπαση της ροής (και του πλήγματος) και την επανένωσή της αντίστοιχα. Αποτελούν, λοιπόν, αντικείμενο εμβάθυνσης σχεδιασμού, καθώς μπορούν να προσθέσουν ανεξέλεγκτες μεταβολές στο πλήγμα, κάτι που είναι ανεπιθύμητο.

Η πορεία σχεδιασμού οδήγησε σε δύο μορφές σωλήνωσης που διαφέρουν μόνο στον ζεύκτη. Εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα και των δύο και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης.

4.3.1. Κύριο σώμα διάταξης

Λήφθηκε απόφαση το ύψος του ελικοειδή σωλήνα να είναι ίσο με 650mm και η δεύτερη πορεία ροής να είναι ευθεία με ίδιο μήκος. Από τη σχέση (40), θεωρώντας ότι ο χρόνος προσπέλασης της ελικοειδούς πορείας πρέπει να είναι μιάμιση φορά του χρόνου προσπέλασης της ευθείας πορείας και επιλέγοντας το βήμα με τρόπο που να βολεύει τον περαιτέρω σχεδιασμό, προκύπτει η διάμετρος της έλικας.

Στη συνέχεια έπρεπε να σχεδιαστούν οι εισοδοί και εξοδοί των καναλιών αυτών. Επιλέχθηκε ως βάση σχεδιασμού εισόδου – εξόδου η γεωμετρία της έλικας, και με βάση την προκύπτουσα γεωμετρία προσαρμόστηκε η «ευθεία» πορεία. Ως γεωμετρία εισόδου επιλέχθηκε κυκλικό τόξο με χαρακτηριστικά:

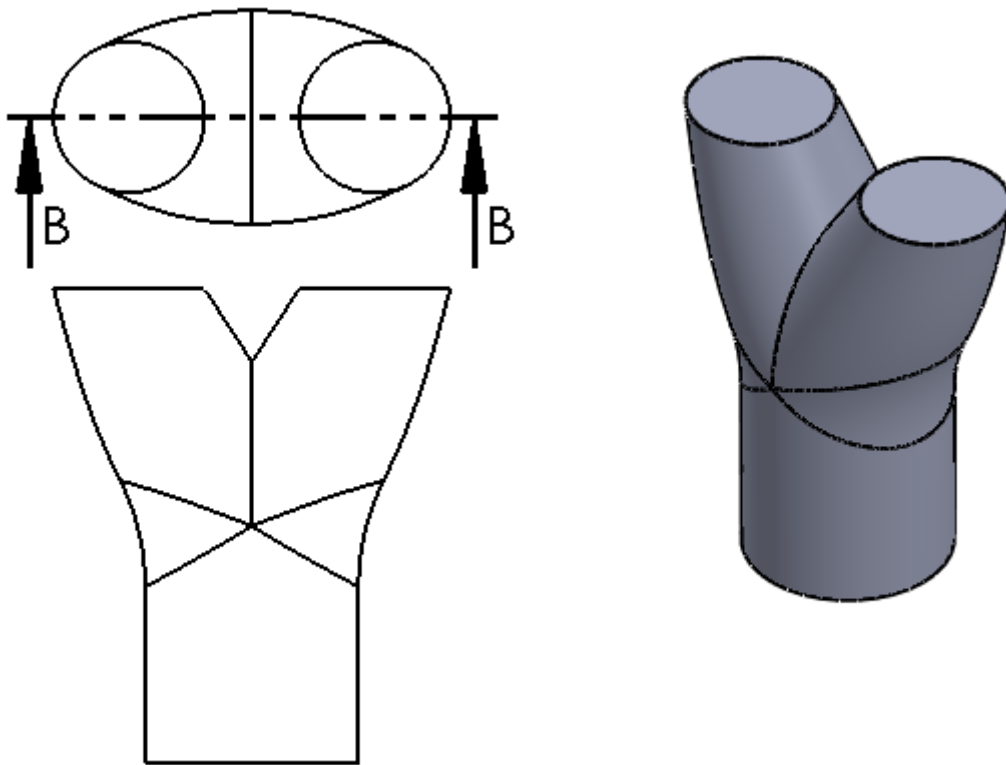
- Κλίση στην έναρξη της γεωμετρίας εισόδου ίση με την κλίση του άξονα της έλικας που ορίζει την ελικοειδή σωλήνωση
- Κλίση στο πέρας της γεωμετρίας εισόδου ίση με την κλίση της ίδιας της έλικας.
- Διάμετρο τέτοια ώστε η γεωμετρία εισόδου να αποτελεί άμεση συνέχεια του διαχωριστή

Για λόγους συμμετρίας του προβλήματος, η γεωμετρία εξόδου είναι πανομοιότυπη με αυτή της εισόδου αλλά με αντεστραμμένες οριακές συνθήκες. Οι διαστάσεις της ευθείας πορείας προσαρμόζονται κατάλληλα. Λεπτομέρειες γι' αυτή θα αναφερθούν στο παράρτημα των σχεδίων.

Οι αρνητικές τιμές της πίεσης στις εικόνες που ακολουθούν αποτελούν παράγωγο της βάσης πίεσης που έχει τεθεί κατά την διάρκεια της εκτέλεσης των προσομοιώσεων. Η βάση αυτή ισούται με 30MPa. Αυτό σημαίνει ότι μία τιμή πίεσης ίση με -2MPa στην πραγματικότητα αντιστοιχεί σε πίεση ίση με 28MPa

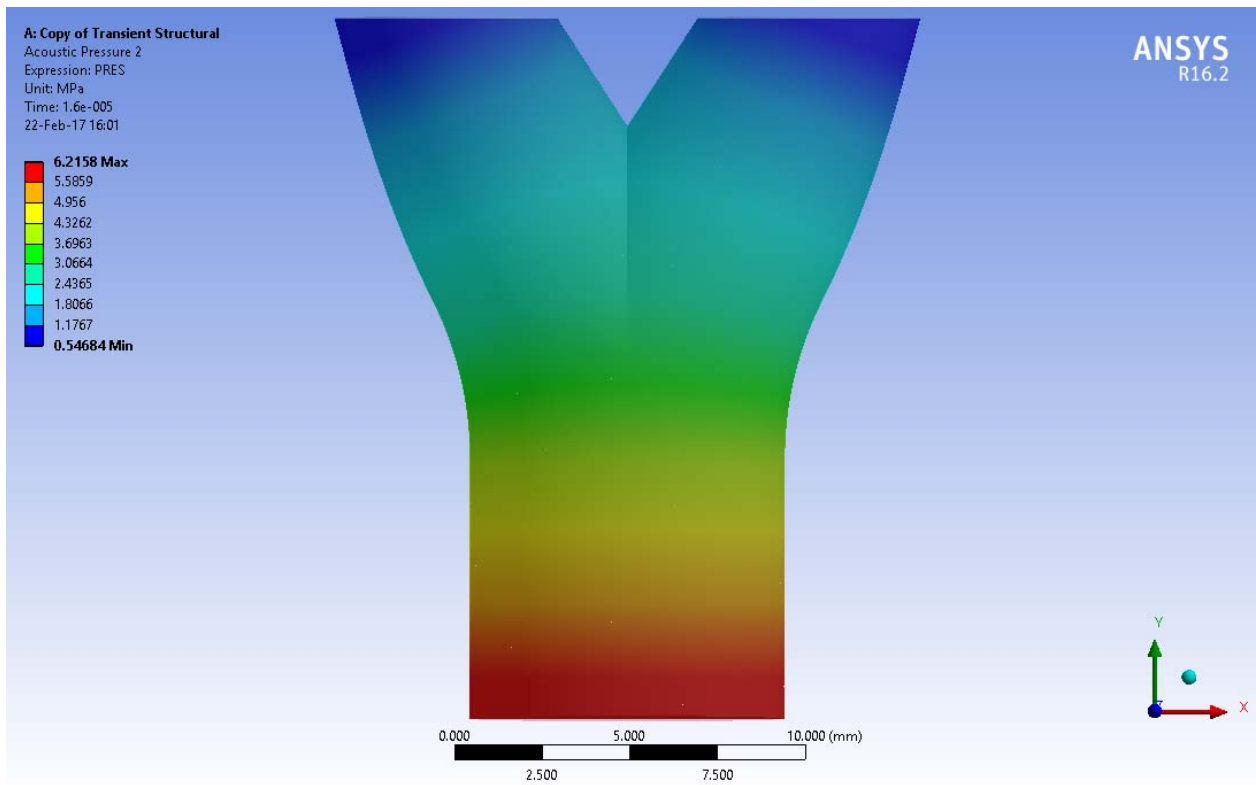
4.3.2. Διαχωριστής

Βασικό χαρακτηριστικό του διαχωριστή ροής είναι η ομαλότητα της μετάβασης από μία διατομή σε δύο. Ο τρόπος που θα υλοποιηθεί αυτή επιβάλλεται να μη δημιουργεί επιφάνειες που ανακλούν και προκαλούν την συμβολή του κύματος μέσα στο όγκο του διαχωριστή παραμορφώνοντας το μέτωπο και την μορφή του κύματος. Λαμβάνοντας αυτά υπόψιν σχεδιάστηκε και μελετήθηκε η μορφή του διαχωριστή όπως εμφανίζεται στην εικόνα (12). Το σχέδιο που εικονίζεται παριστά τον όγκο ρευστού που διαρρέει μέσω της σωλήνωσης. Το τοίχωμα το μέγεθος του οποίου μελετήθηκε σε παραπάνω εδάφιο, θα παρασχεθεί από κάποιο τάκο.

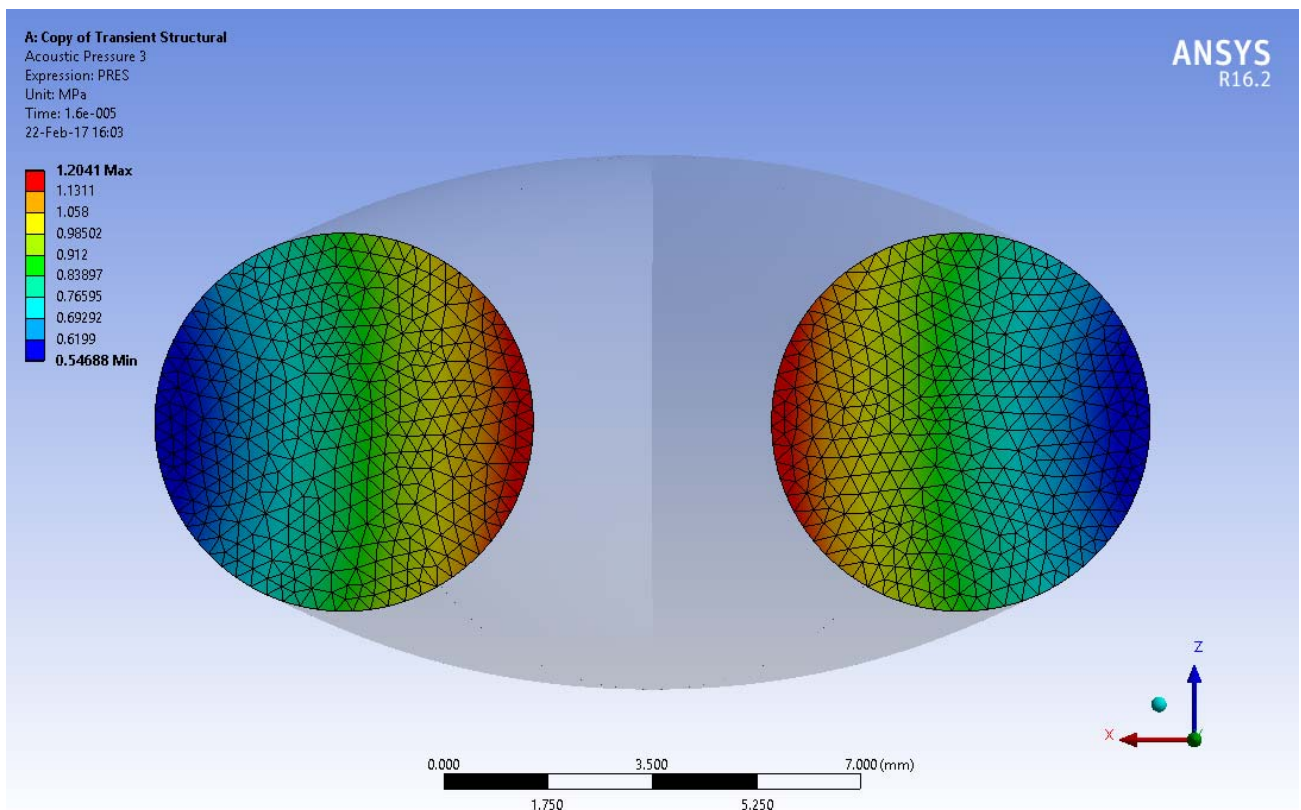


Εικόνα 12 Όγκος ρευστού διαχωριστή. Πρόοψη, άνοψη και ισομετρικό μοντέλο

Η αριθμητική επίλυση του φαινομένου της μετάδοσης υδραυλικού πλήγματος έδωσε τα ακόλουθα πεδία πιέσεων στην μεσοεπιφάνεια που καθορίζεται από την τομή BB και στις επιφάνειες εξόδου του διαχωριστή.



Εικόνα 13 Πεδίο πιέσεων στην επιφάνεια του διαχωριστή που ορίζεται από την γραμμή τομής BB (τελευταία χρονική στιγμή προσομοίωσης)



Εικόνα 14 Πεδίο πιέσεων στις δύο επιφάνειες εξόδου του διαχωριστή (τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης)

Τα στιγμιότυπα λήφθηκαν στο πέρας το χρόνου της χρονικής ανάλυσης για τα χαρακτηριστικά διέγερσης που έχουν αναφερθεί. Από την εικόνα (13) μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι μέσω του σχεδιασμού δεν δημιουργείται σημαντική ανάκλαση του κύματος στα τοιχώματα του σωλήνα οδηγώντας σε συμμετρία το πεδίο πίεσης. Η μεταφορά του κύματος, λοιπόν, γίνεται ομαλά. Ταυτόχρονα επιθυμείται η χρονική και η

τροπική έξοδος του κύματος από τον διαχωριστή προς τους δύο σωλήνες να είναι η ίδια, ώστε η μόνη ελεγχόμενη καθυστέρηση να δημιουργείται από την επερχόμενη διάταξη των σωληνώσεων. Ο συγκριμένος διαχωριστής επιτυγχάνει αυτό το στόχο, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την συμμετρία των προφίλ πιέσεων μεταξύ των δύο διατομών εξόδου όπως φαίνονται στην εικόνα (14). Ταυτόχρονα, το διάγραμμα μέγιστης – ελάχιστης πίεσης σε σχέση με το χρόνο για τις δύο επιφάνειες εξόδου δείχνει την ταυτότητα του μεγέθους της πίεσης.

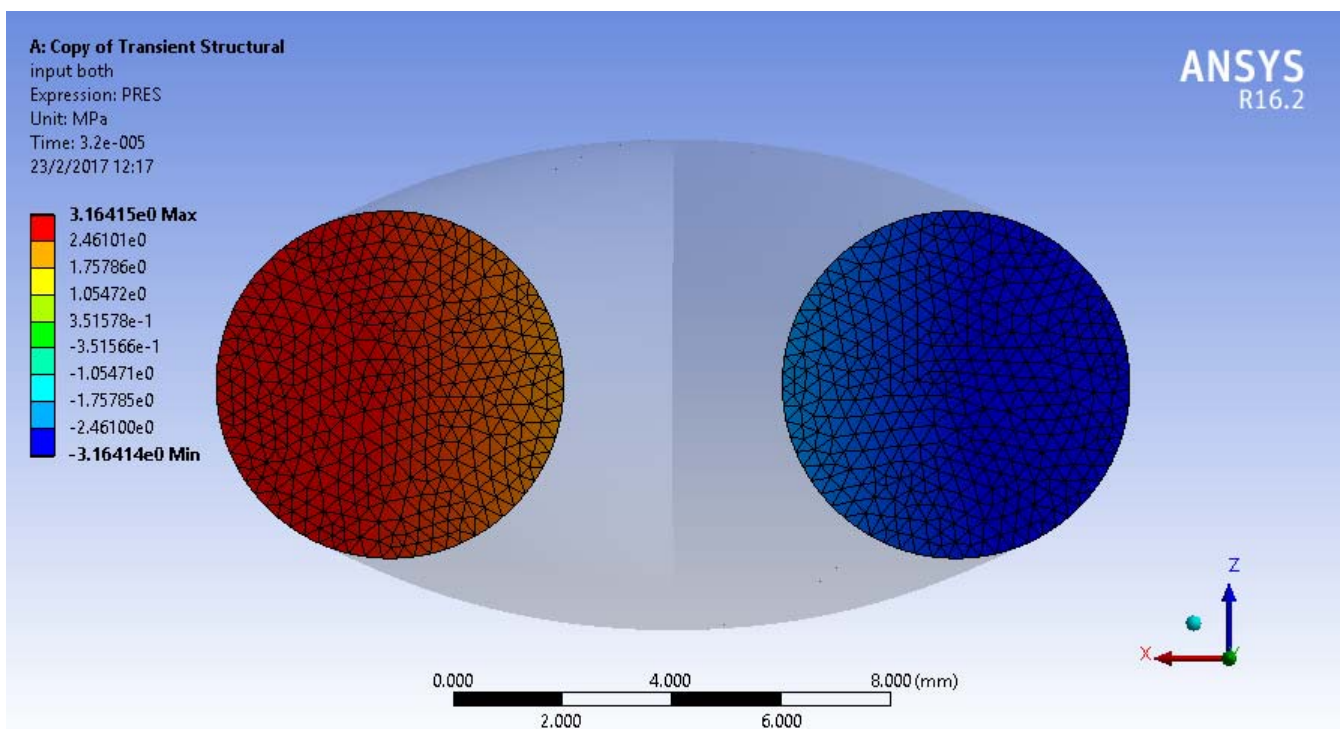
Άξια αναφοράς είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης τιμής της πίεσης στις δύο εικόνες. Αυτή προκύπτει από τον ανεπαρκή χρόνο εκτέλεσης της προσομοίωσης, δηλαδή στο πέρας της αριθμητικής ανάλυσης, τότε αρχίζει να «φτάνει» το κύμα στην επιφάνεια εξόδου. Επίσης, στην εικόνα (14) στις δύο επιφάνειες δεν επικρατούν ομοιόμορφες συνθήκες πίεσης. Αντίθετα φαίνεται ότι το μέτωπο του κύματος είναι υπό γωνία σχετικά με τον άξονα y (πράσινο χρώμα) ο οποίος ταυτίζεται με την αξονική κατεύθυνση του σωλήνα. Το γεγονός αυτό σχετίζεται μερικώς από την ανεπάρκεια χρόνου της προσομοίωσης, αλλά σύμφωνα με τις αρχικές μας θεωρητικές μελέτες που έγιναν για την μετάδοση του υδραυλικού πλήγματος σε γωνίες του σωλήνα, ακόμα και με επαρκή χρόνο εκτέλεσης, αυτό το φαινόμενο έχει την εξής μοίρα: τοπικά δεν πρόκειται να εξαλειφθεί, παρά μόνο να ελαττωθεί η κλίση του (σε σχέση με τον άξονα y) και σχετικά μακριά από τη διαμόρφωση δεν θα είναι αντιληπτό από το κύμα και το μέτωπο θα είναι κάθετο στην αξονική κατεύθυνση.

4.3.3. Ζεύκτης

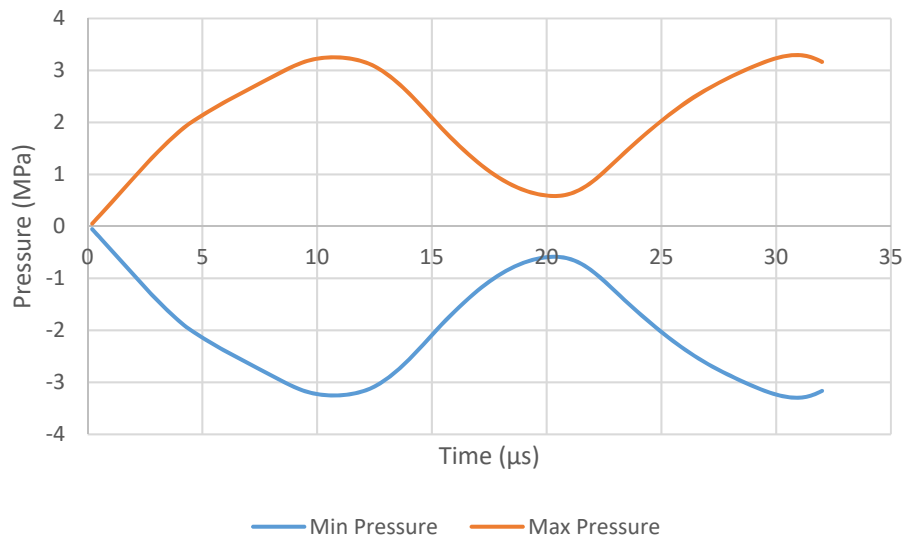
Εξετάστηκαν δύο σχεδιασμοί του ζεύκτη ροής. Ο πρώτος ήταν επανάληψη και αντιστροφή του διαχωριστή ροής μετά την διάταξη και ο δεύτερος ζεύκτης είχε σκοπό την συμβολή των δύο κυμάτων με ομοαξονικό τρόπο. Κάθε πρόταση ζεύκτη εξετάστηκε προς τα αποτελέσματά του πάνω στην καταστροφική συμβολή των δύο πληγμάτων. Για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων θεωρήθηκε ότι η προηγούμενη διάταξη καταφέρνει την διαφορά φάσης – στόχο $\pi/2$ και ως είσοδο στα αριθμητικά μοντέλα ορίζονται δύο τέλεια αντίθετα υδραυλικά πλήγματα.

4.3.3.A. Ζεύκτης όμοιος με διαχωριστή

Το πεδίο πιέσεων στις εισόδους του ζεύκτη για την τελευταίο χρονικό βήμα εμφανίζεται στην εικόνα (15). Στο διάγραμμα (8) φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη πίεση καθ' όλη την διάρκεια της ανάλυσης.

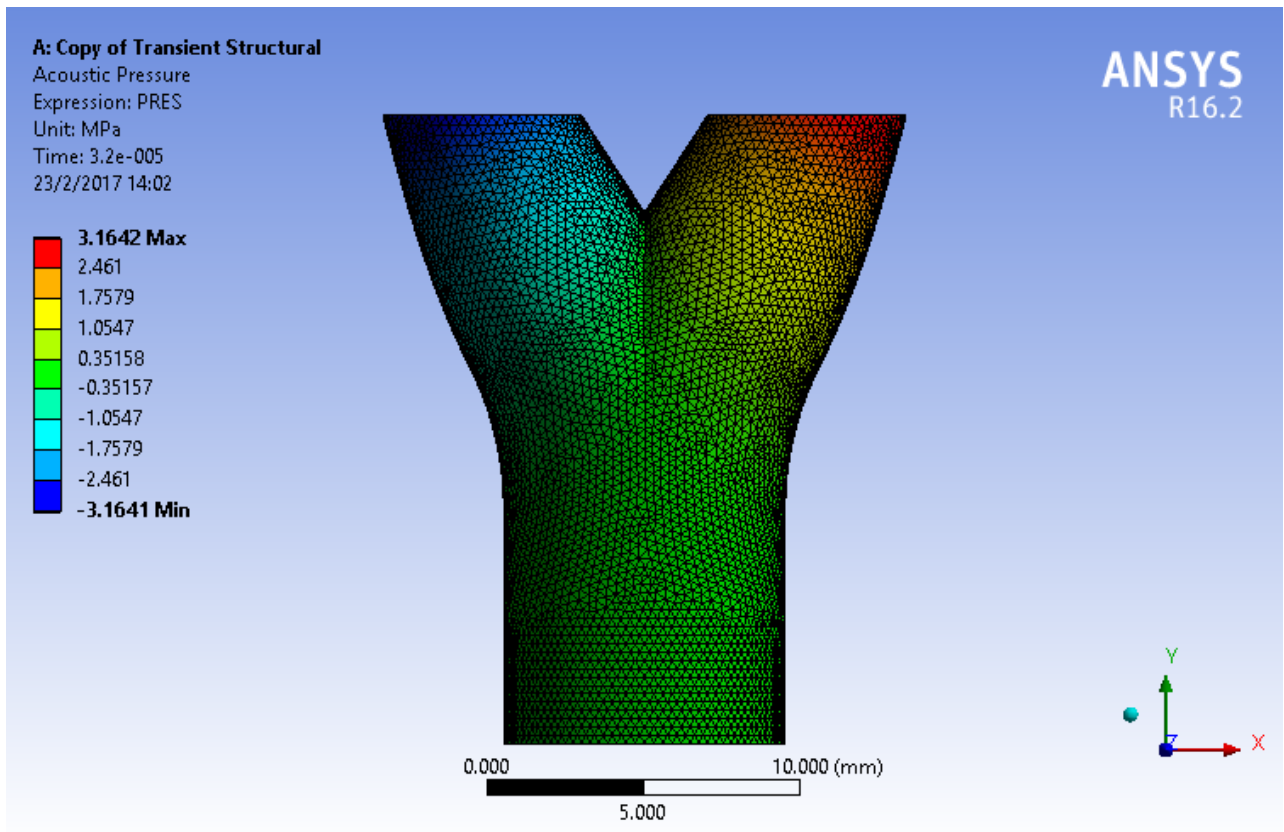


Εικόνα 15 Πεδίο πιέσεων στις επιφάνειες εισόδου ζεύκτη όμοιου με τον διαχωριστή (τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης)

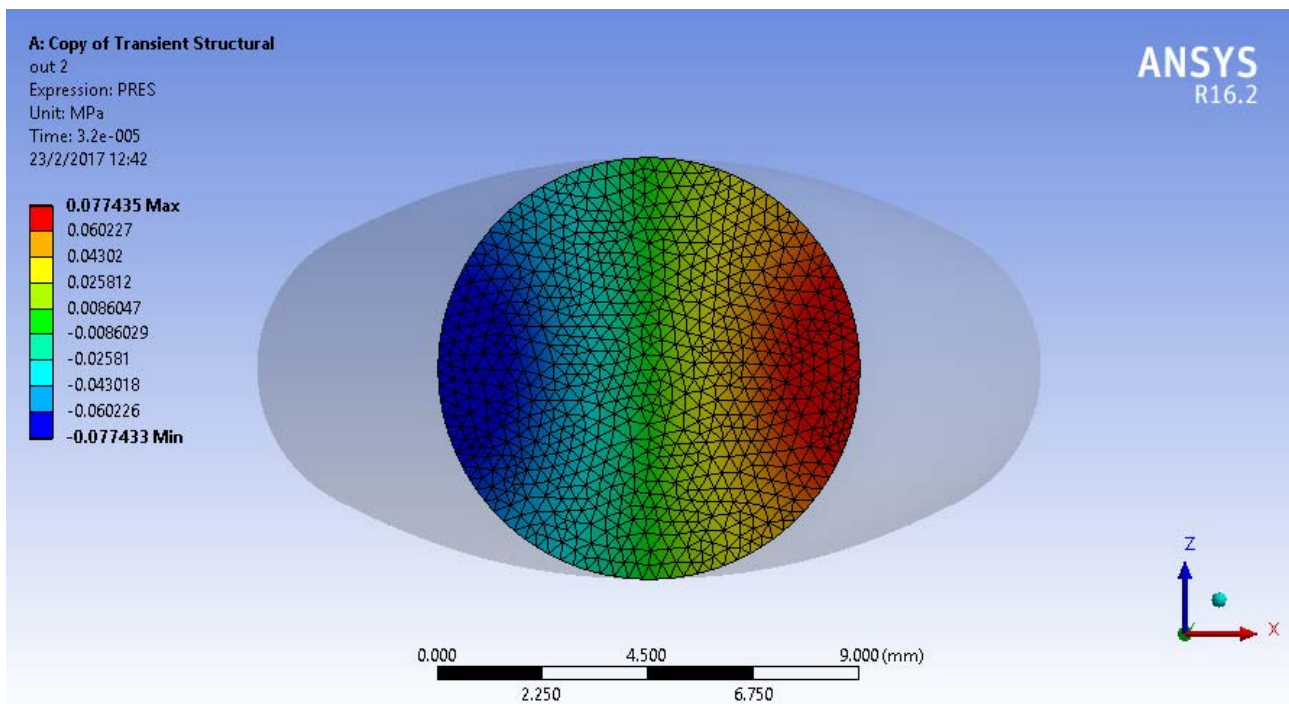


Διάγραμμα 8 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή της πίεσης στις επιφάνειες εισόδου καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης

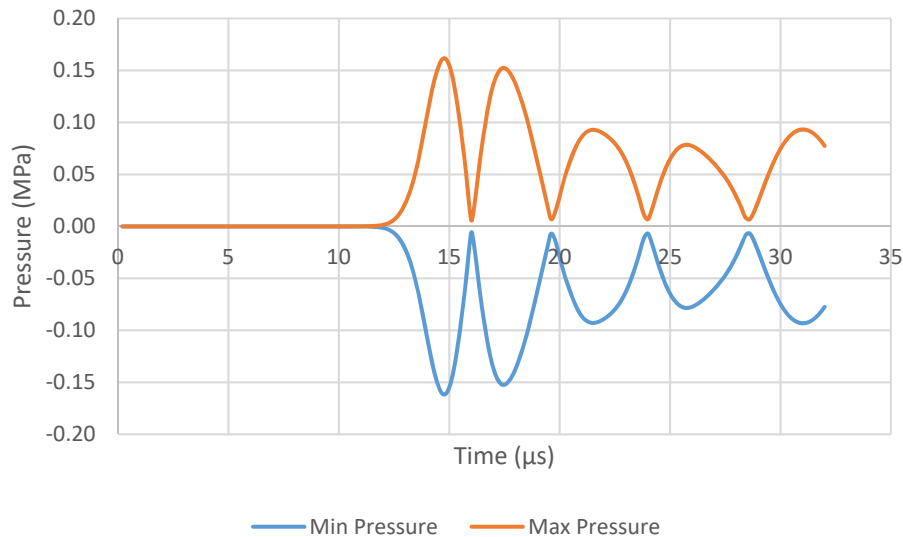
Η φύση του διαγράμματος και ο χρόνος εκτέλεσης είναι αρκετά μικρός (συνολικός χρόνος 3.2×10^{-5} s από περίοδο 2×10^{-3} s) ώστε η θετική πίεση (πορτοκαλί γραμμή) να αντικατοπτρίζει μόνο τη μία είσοδο και η αρνητική πίεση (μπλε γραμμή) να αντικατοπτρίζει την άλλη είσοδο. Για τον χρόνο εκτέλεσης του πειράματος, αναμένεται η μέγιστη πίεση σε κάθε είσοδο να είναι μία γνησίως μονότονη συνάρτηση (συνημιτονοειδής είσοδος). Αυτό που παρατηρείται τόσο από το διάγραμμα (8) όσο και από την εικόνα (15) είναι ότι τα δύο πλήγματα περνούν το ένα μέσα από το άλλο και ανακλώνται στα τοιχώματα του ενοποιημένου πλέον σωλήνα (το σχέδιο του ζεύκτη είναι ίδιο με το σχήμα της εικόνας (12)). Η επιλεγμένη έξοδος του ζεύκτη παρουσιάζει το πεδίο πίεσης για το τελικό χρόνο προσομοίωσης και το διάγραμμα μέγιστης – ελάχιστης πίεσης για όλη την διάρκειά της.



Εικόνα 16 Πεδίο πίεσης στο ζεύκτη την τελευταία χρονική τιμή της προσομοίωσης



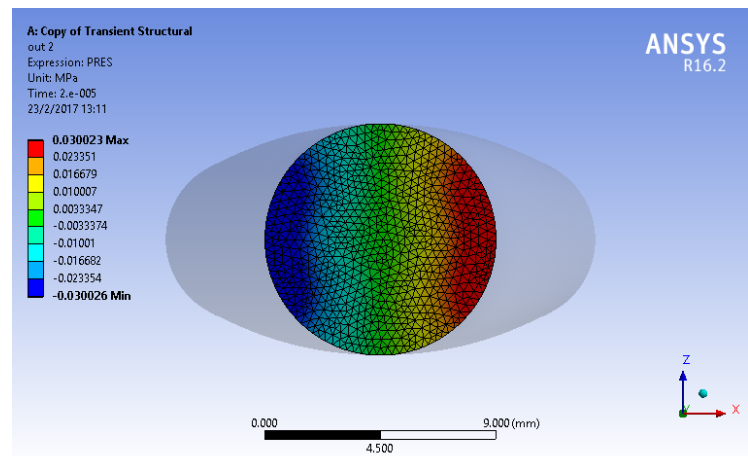
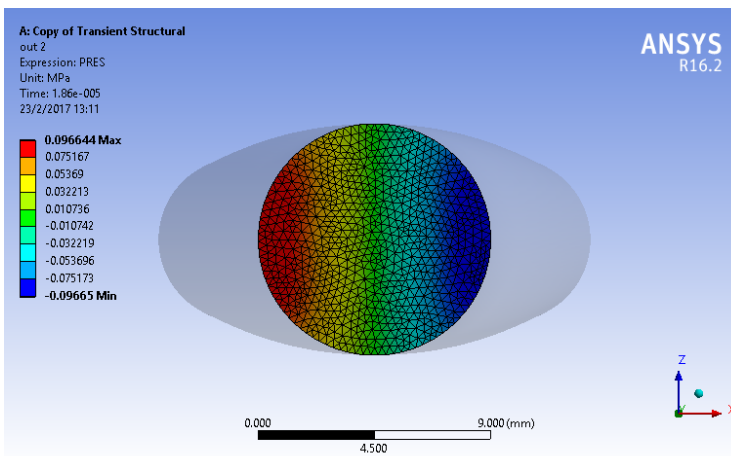
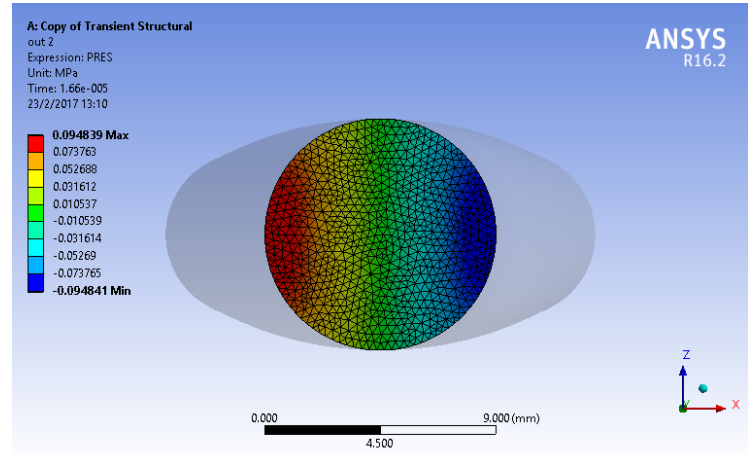
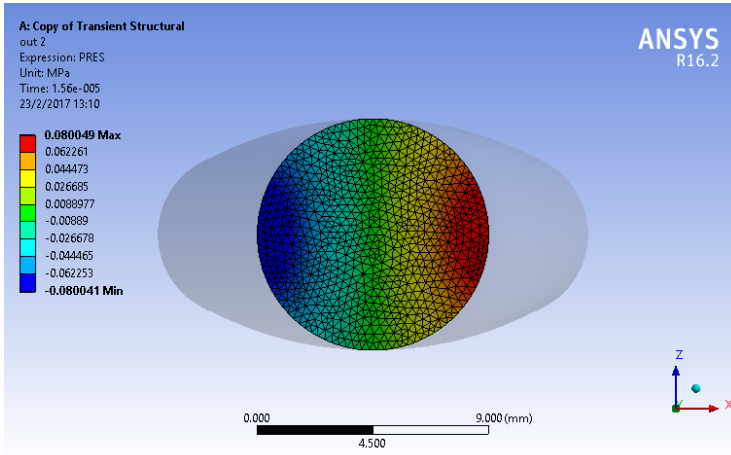
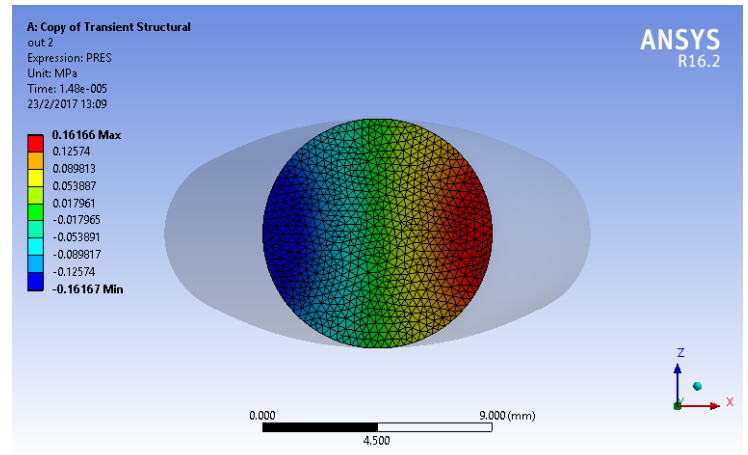
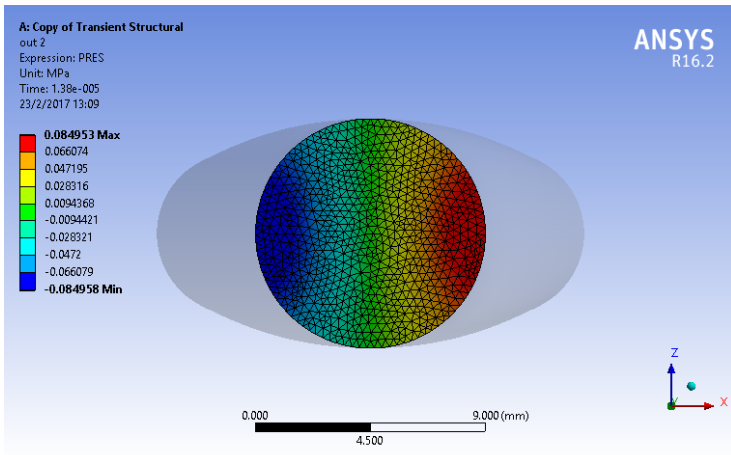
Εικόνα 17 Πεδίο πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη την τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης



Διάγραμμα 9 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή του πεδίου πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο

Αρχικά παρατηρείται ότι το πλάτος της πίεσης στην έξοδο κατά την άφιξη του συμβαλλόμενου κύματος είναι ± 0.161 MPa. Λόγω της παραμόρφωσης του μετώπου των κυμάτων από τις διάφορες ανακλάσεις στα τοιχώματα παρατηρείται δημιουργία διακροτημάτων και τελικά οι συμβολές των υπο – κυμάτων προκύπτουν με πλάτη μεγέθους ± 0.091 MPa. Συγκρινόμενα με την πίεση εισόδου επιτυγχάνεται απόσβεση του υδραυλικού πλήγματος στο $\pm 4.88\%$ του πλάτους εισόδου σε πρώτη φάση και στη συνέχεια αυτή η απόσβεση γίνεται $\pm 2.764\%$ του πλάτους εισόδου, αποτέλεσμα πολύ ικανοποιητικό για το μη βελτιστοποιημένο σχέδιο που μελετήθηκε.

Το διάγραμμα (9) παριστά μόνο τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση, χωρίς να δίνει καμία πληροφορία για την κατανομή της πίεσης την επιφάνεια εξόδου. Στις εικόνες (19.1 – 19.6) φαίνεται η κατανομή της πίεσης για επιλεγμένες χρονικές στιγμές από το διάστημα $[1.3e-5s - 2e-5s]$ της προσομοίωσης.

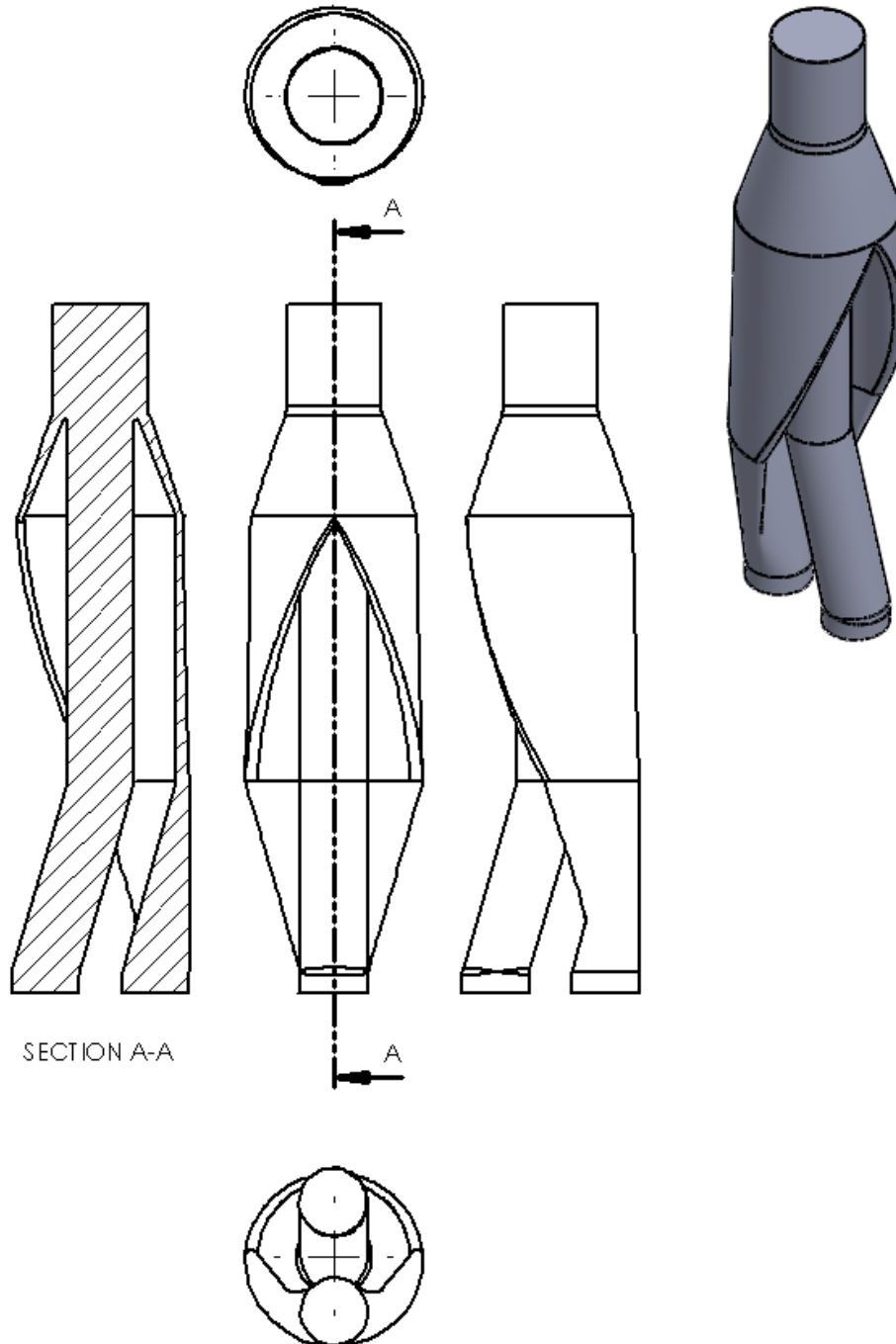


Εικόνα 18 (1-6 από αριστερά προς τα δεξιά) Πεδίο πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη για επιλεγμένες χρονικές στιγμές από το χρονικό διάστημα [1.3e-5s – 2e-5s]

Παρατηρείται ότι οι περιοχές μέγιστης ελάχιστης πίεσης εναλλάσσονται σε αυτό το μικρό χρονικό διάστημα, γεγονός που επιβεβαιώνει την πολλαπλή ανάκλαση των δύο κυρίων πληγμάτων στα τοιχώματα και την παραμόρφωση του μετώπου τους. Αξιοσημείωτη είναι η συμμετρία του πεδίου ως προς τον άξονα z, η οποία διατηρείται καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

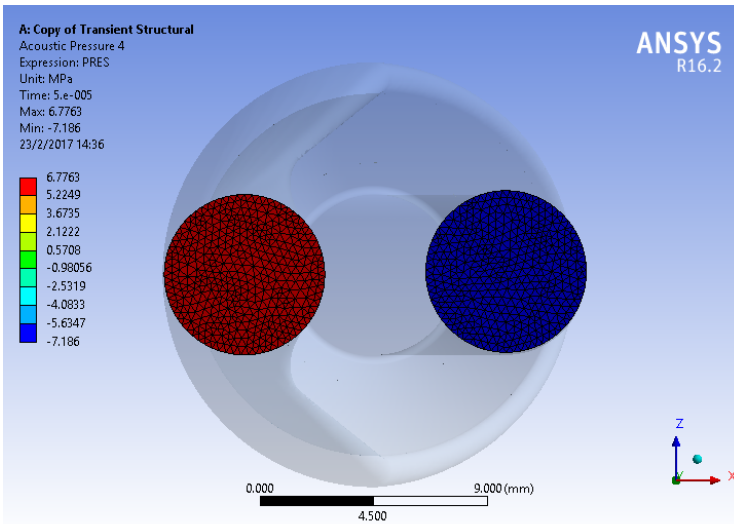
4.3.3.B. Ζεύκτης με ομόκεντρη συμβολή

Αυτός ο σχεδιασμός υλοποιήθηκε με σκοπό τα δύο πλήγματα να συμβάλουν έχοντας παράλληλες διευθύνσεις μετάδοσης. Για να επιτευχθεί αυτό, τα δύο κανάλια θα πρέπει να είναι ομοαξονικά και η ένωσή τους να γίνεται με όσο πιο μικρή γωνία είναι δυνατόν. Στην εικόνα (20) παρουσιάζεται το σχέδιο του εσωτερικού των καναλιών, δηλαδή ο όγκος ρευστού μέσα στον ζεύκτη. Οι εισοδοί του ζεύκτη βρίσκονται στο κάτω μέρος του ισομετρικού μοντέλου και η έξοδος στο πάνω.

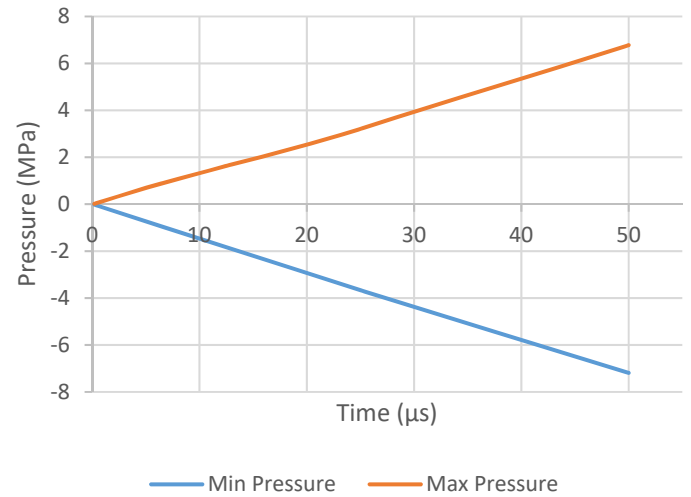


Εικόνα 19 Όγκος ρευστού διαχωριστή. Πολλαπλές όψεις και ισομετρικό μοντέλο

Παρόμοια με τον προηγούμενο ζεύκτη, έγινε προσομοίωση συμβολής αντίθετων κυμάτων εισόδου από τις κυκλικές διατομές της κάτωψης, με αντικείμενο ενδιαφέροντος το πεδίο πίεσης στην κυκλική διατομή της άνοψης.



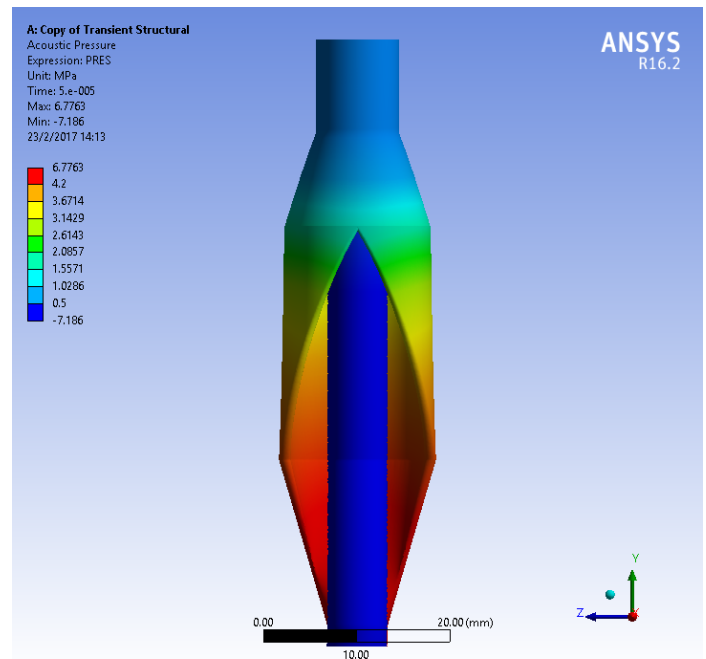
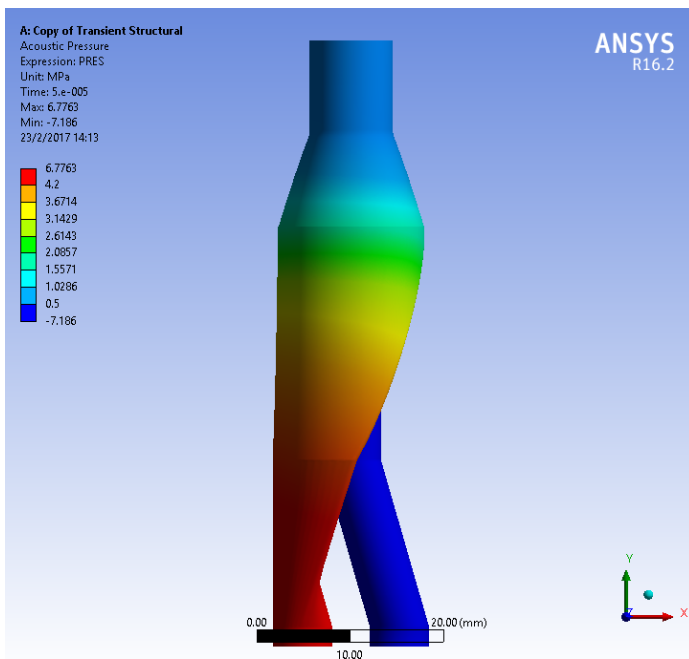
Εικόνα 20 Πεδίο πιέσεων στις επιφάνειες εισόδου ζεύκτη όμοιου με τον διαχωριστή (τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης)

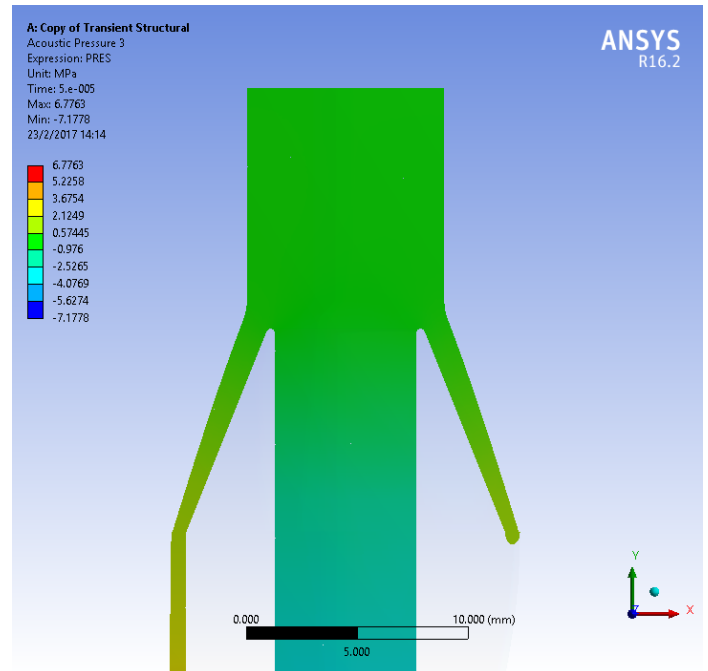
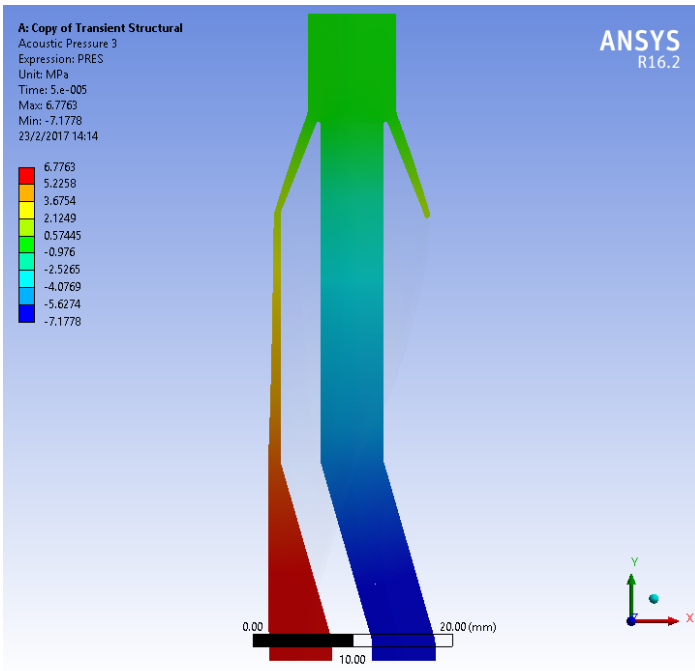


Διάγραμμα 10 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή της πίεσης στις επιφάνειες εισόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο

Στην εικόνα (20) παρατηρείται ακόμα μια φορά το πεδίο πίεσης στις δύο εισόδους του ζεύκτη για το τελευταίο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Αντίστοιχα, στο διάγραμμα (9) φαίνεται η μέγιστη και ελάχιστη πίεση και των δύο επιφανειών καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Ο τελικός χρόνος είναι δύο τάξεις μικρότερος της περιόδου της ταλάντωσης του πλήγματος, άρα οι πορτοκαλί και μπλε γραμμές μπορούν να περιγράψουν αποκλειστικά το ελλειψοειδές και το ευθύγραμμο κανάλι αντίστοιχα. Σε αυτό το σχέδιο η είσοδος στον ζεύκτη είναι αρκετά μακριά από το σημείο συμβολής, οπότε τα δύο κύματα δεν επηρεάζουν το ένα το άλλο στο επίπεδο της εισόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το διάγραμμα της πίεσης εισόδου για το χρόνο εκτέλεσης να είναι γνησίως μονότονη συνάρτηση. Αναμενόταν συνημιτονοειδής είσοδος αλλά ο μικρός χρόνος εκτέλεσης εκφυλίζει την καμπύλη σε ευθεία.

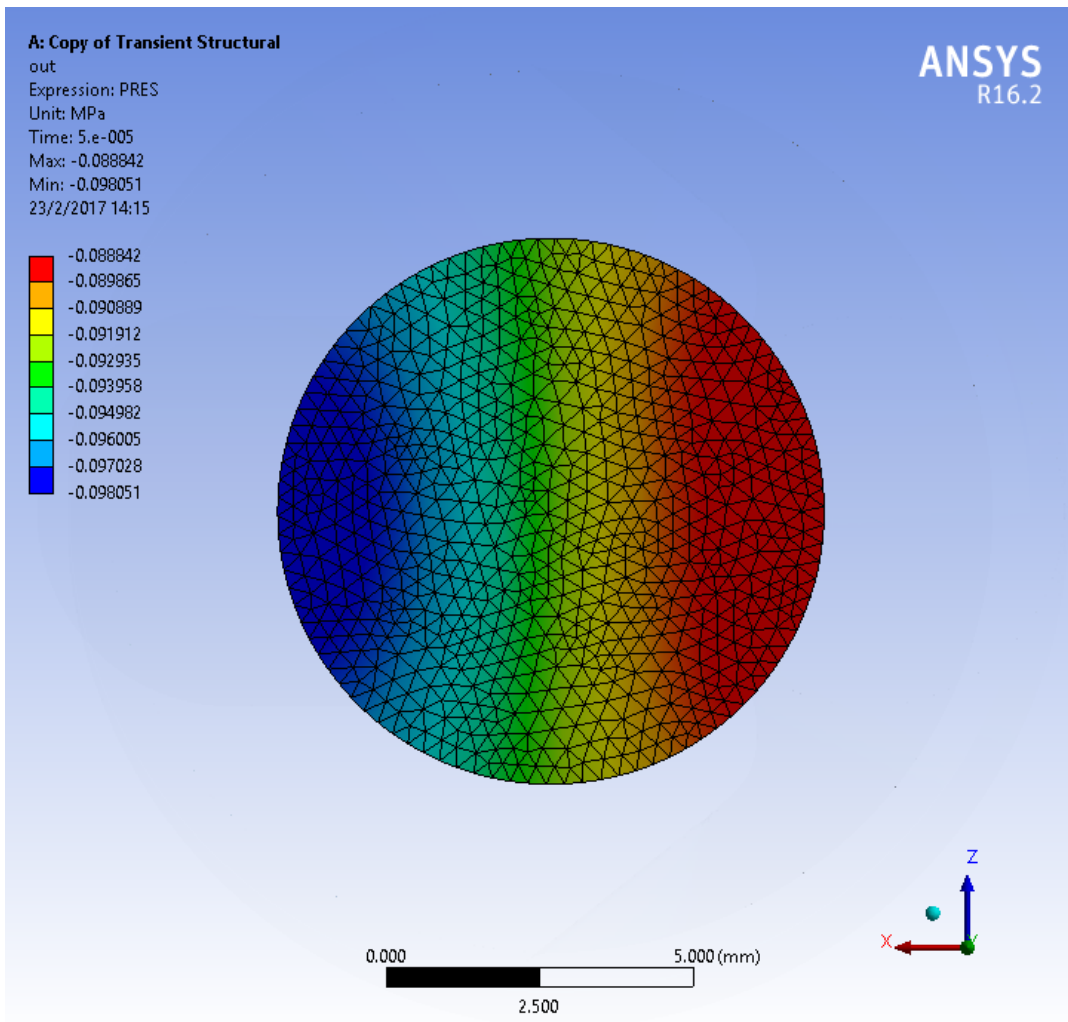
Στην συνέχεια, για το ίδιο χρονικό σημείο, παρουσιάζεται το πεδίο πίεσης σε όλο το ζεύκτη, καθώς και στο επίπεδο που δημιουργείται από την τομή A – A της εικόνας (19). Επίσης παρουσιάζεται με περισσότερη λεπτομέρεια σε τομή το τελευταίο κομμάτι του ζεύκτη κατά την φορά της μετάδοσης κύματος.



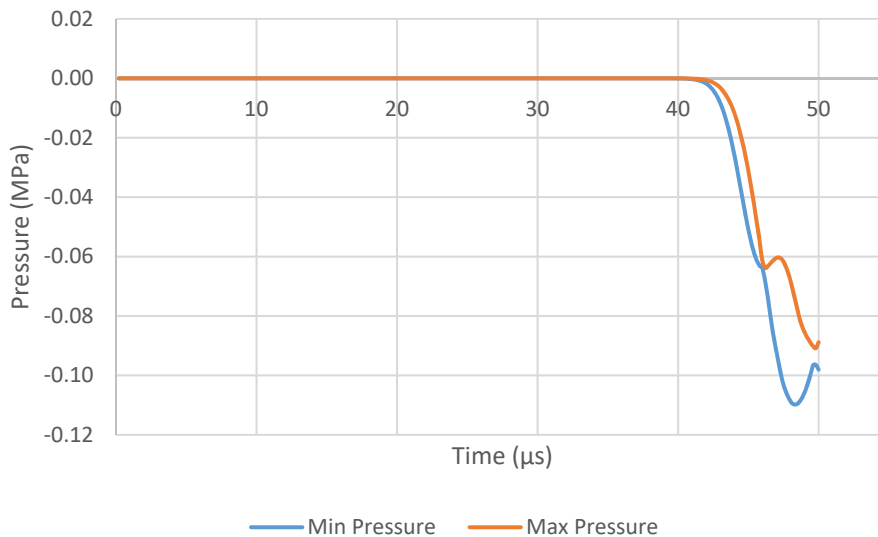


Εικόνα 21 (1-4 από αριστερά προς τα δεξιά) Πεδίο πίεσης του ζεύκτη για την τελευταία χρονική στιγμή (Πάνω: πρόοψη και πλάγια όψη. Κάτω: επιφάνεια που ορίζεται από την γραμμή τομής AA και λεπτομέρεια της επιφάνειας στην περιοχή της επιφάνειας εξόδου του ζεύκτη)

Από τις εικόνες (21-1) και (21-2) μπορεί να παρατηρηθεί η επίδραση της αύξησης της κεντρικής γωνίας της δακτυλιοειδούς διατομής. Κοντά στο σημείο στο οποίο σχηματίζεται πλήρης δακτυλιοειδής ροή φαίνεται η γωνία που σχηματίζει το μέτωπο του έξω πλήγματος σε σχέση με την αξονική διεύθυνση του εξαρτήματος. Αν και το ιδανικό θα ήταν το μέτωπο του πλήγματος να ήταν κάθετο στον άξονα, η προηγηθείσα γεωμετρία επιφέρει αυτή την γωνιακή απόκλιση. Από αυτό το φαινόμενο αναμένεται να σχηματιστούν διακροτήματα στη συνάρτηση οριακών (μέγιστη – ελάχιστη πίεση) μεγεθών στην επιφάνεια εξόδου. Από λήψη των δεδομένων στην επιφάνεια εξόδου προκύπτει η εικόνα (23) και το διάγραμμα (11).

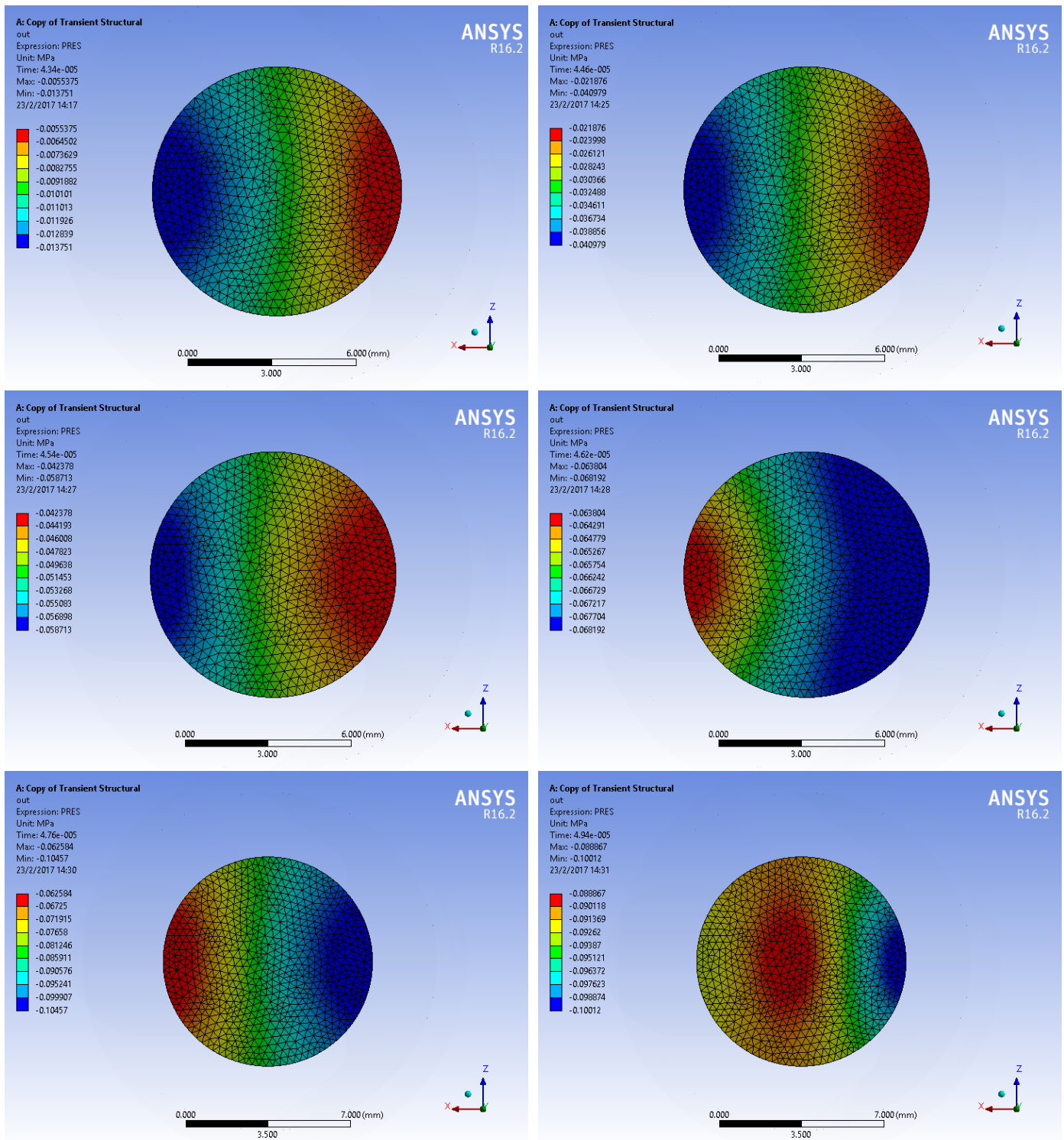


Εικόνα 22 Πεδίο πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη την τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης



Διάγραμμα 11 Τιμή μέγιστης και ελάχιστης πίεσης στην επιφάνεια εξόδου του ζεύκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο

Όπως και στο προηγούμενο σχέδιο ζεύκτη, έτσι και εδώ θα παρουσιαστεί το επίπεδο εξόδου του σε επιλεγμένες χρονικές στιγμές από το διάστημα $[4.3e-5s - 5e-5s]$ σε προσπάθεια να γίνει επεξήγηση των δεδομένων του διαγράμματος (10)



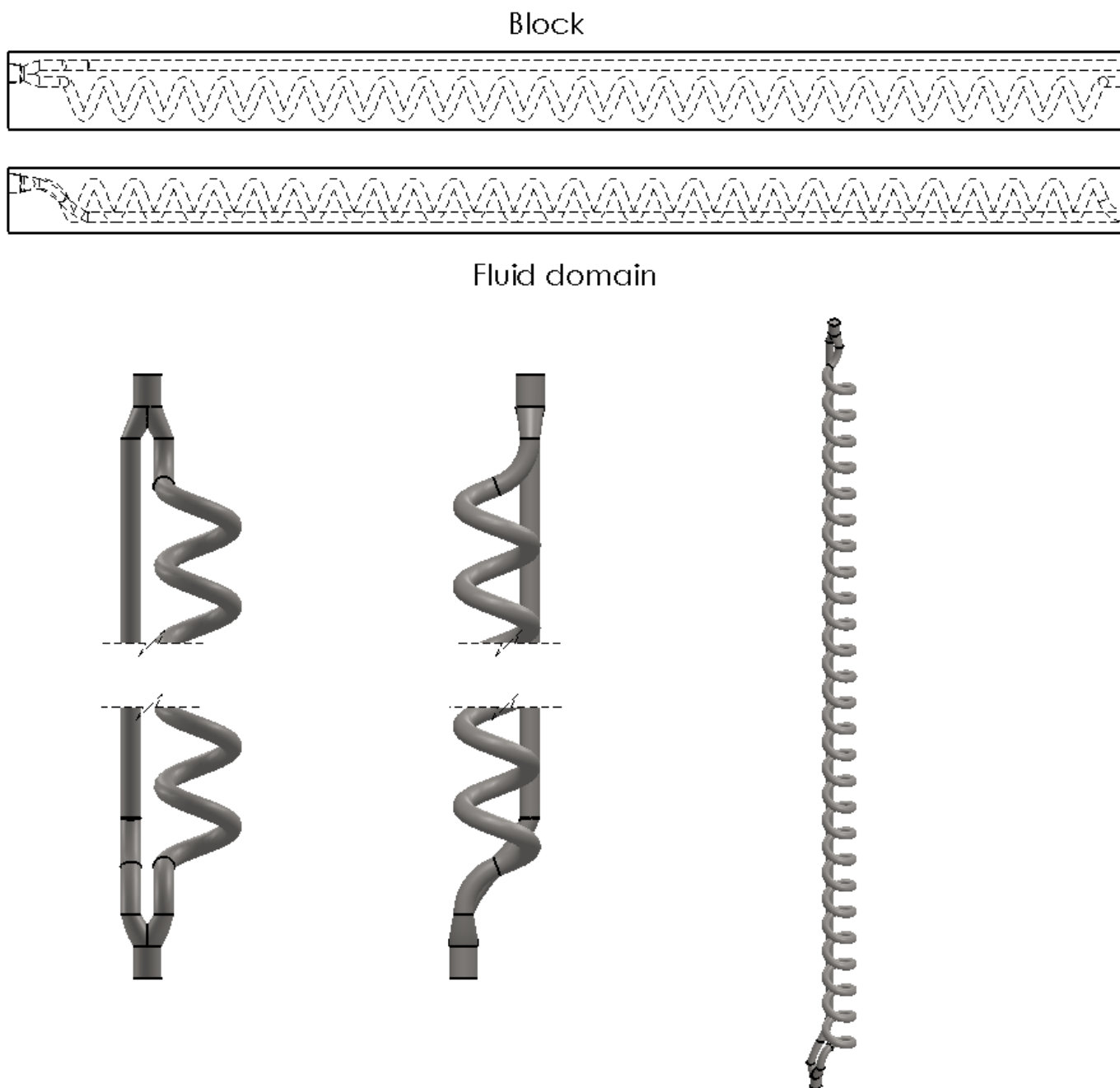
Εικόνα 23 (1-6 από αριστερά προς τα δεξιά) Πεδίο πίεσης επιφάνειας εξόδου του ζεύκτη για επιλεγμένες χρονικές στιγμές από το διάστημα $[4.3e-5s - 5e-5s]$

Κατ' αρχάς, από το γράφημα (9) φαίνεται ότι η ελάχιστη μείωση πλάτους του υδραυλικού πλήγματος είναι στο 1.53% του πλάτους εισόδου ενώ η μέγιστη μείωση του πλάτους του είναι στο 0.85%. Το επίπεδο απόσβεσης του υδραυλικού πλήγματος που επιτυγχάνεται είναι πολύ ικανοποιητικό. Η δημιουργία ταλαντώσεων μετά την συμβολή των πληγμάτων υποδεικνύει ότι τα μέτωπά τους είναι παραμορφωμένα και όχι συμμετρικά ως προς τον άξονα του σωλήνα εξόδου. Το γεγονός ότι οι ταλαντώσεις γίνονται με κέντρο ταλάντωσης υπό του μηδενός σημαίνει ότι το πλάτος του κύματος που προήλθε από την ελικοειδή πορεία έχει επιπλέον απόσβεση από την γεωμετρία του ζεύκτη. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί δημιουργία διακροτημάτων στην τιμή των ακροτάτων της πίεσης. Όμως, ο χρόνος προσομοίωσης δεν είναι αρκετός για να γίνει έγκυρη εξακρίβωση των περιβαλλουσών συναρτήσεων. Όπως και στον προηγούμενο ζεύκτη, η διαδοχή των εικόνων (23-1 – 23-6) δείχνει εναλλαγή των περιοχών υψηλής και χαμηλής πίεσης στο επίπεδο εξόδου. Από αυτό επιβεβαιώνεται η προηγούμενη υπόθεση, ότι το μέτωπο του κύματος δεν είναι ενιαίο και κάθετο στον άξονα του σωλήνα.

Η δυναμική συμπεριφορά του μετώπου του πλήγματος δεν είναι ανησυχητική. Όπως βρέθηκε στην προκαταρκτική μελέτη του φαινομένου, η διεύθυνση και η ενότητα του μετώπου του πλήγματος ανακτάται μετά από ένα σχετικά μικρό μήκος ευθύ σωλήνα μετά την διάταξη απόσβεσης(της τάξης των 20mm). Αυτό μπορεί να θεωρηθεί και ως δεδομένο ότι θα υπάρχει, αν ληφθεί υπόψιν ότι η διάταξη απόσβεσης αποτελεί μέρος ενός ολοκληρωμένου υδραυλικού κυκλώματος.

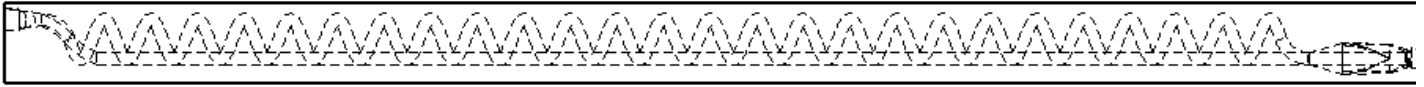
4.4. Τελική γεωμετρία διάταξης

Έχοντας μελετήσει και επιβεβαιώσει την αποτελεσματικότητα των επιμέρους τμημάτων της διάταξης, δύναται πλέον να συνδυαστούν για να προκύψουν οι δύο παραλλαγές της διάταξης απόσβεσης υδραυλικών πηγμάτων με παθητικό τρόπο ομικού τύπου (αντιστοιχία με την αντίσταση σε κύκλωμα R-L-C). Στις εικόνες (24) και (25) φαίνονται οι τάκοι που περιέχουν τα κανάλια με τις σχεδιασμένες γεωμετρίες καθώς και το αρνητικό αυτών των καναλιών, οι όγκοι ρευστού. Λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια βρίσκονται στο παράρτημα.

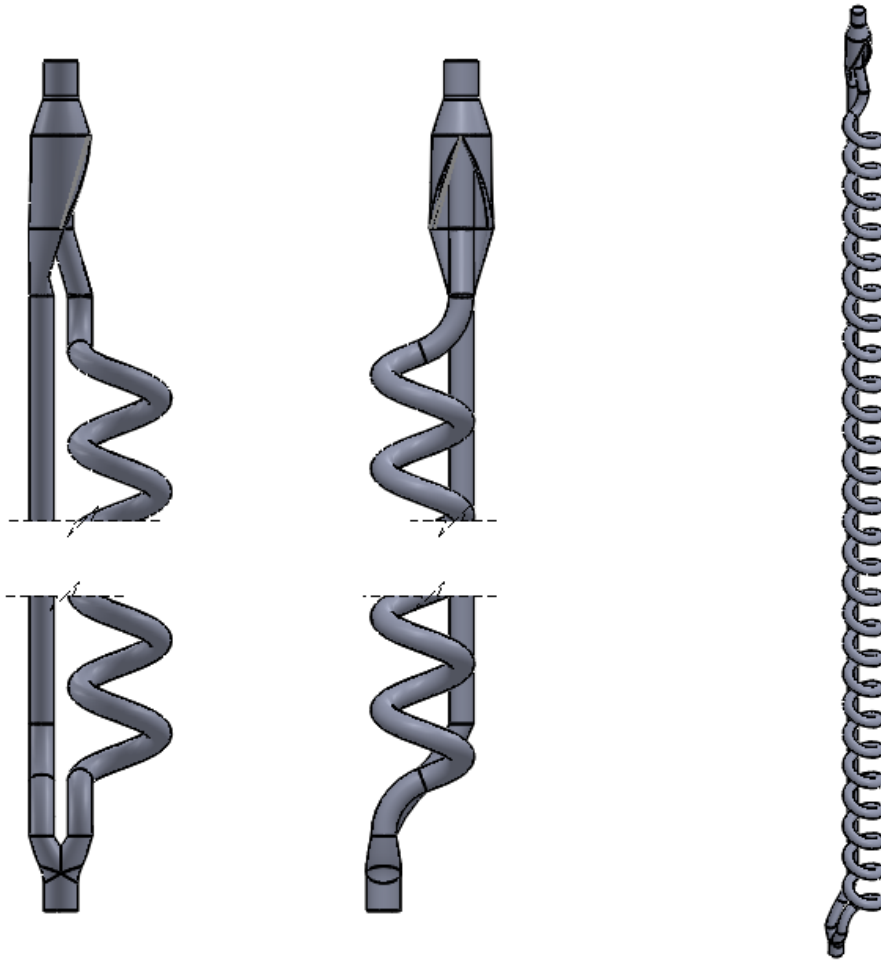


Εικόνα 24 Διάταξη απόσβεσης υδραυλικών πηγμάτων. Παραλλαγή όμοιου τρόπου διαχωρισμού - ζεύξης ροής

Block



Fluid domains



Εικόνα 25 Διάταξη απόσβεσης υδραυλικών πηγμάτων. Παραλλαγή ομόκεντρης ζεύξης ροής

5. Συμπεράσματα

Η θεωρητική μελέτη της απόσβεσης ενός υδραυλικού πλήγματος με τον εαυτό του χρησιμοποιώντας μία πλήρως παθητική διάταξη, έδειξε ότι είναι δυνατή. Με βάση τα θεωρητικά πορίσματα σχεδιάστηκαν και εξετάστηκαν δύο διατάξεις καταστροφικής συμβολής υδραυλικού πλήγματος. Τα αποτελέσματα της μελέτης επιβεβαίωσαν τα αντίστοιχα θεωρητικά με τα επίπεδα μείωσης του πλάτους του υδραυλικού πλήγματος να φτάνουν το 95% με 98%. Λαμβάνοντας υπόψιν την σχετική ακρίβεια των πεπερασμένων στοιχείων (1%-5%) και το πρωταρχικό στάδιο των σχεδίων, το αποτέλεσμα κρίνεται ακριβές και ικανοποιητικό έχοντας περιθώρια βελτίωσης.

6. Προτάσεις ως αντικείμενο περαιτέρω μελέτης

Η μελέτη που παρουσιάστηκε στα πλαίσια αυτής της ερευνητικής εργασίας αποτελεί εισαγωγική μελέτη στην απόσβεση υδραυλικών πληγμάτων με παθητικές διατάξεις χωρικού χαρακτήρα (αντίστοιχο στοιχείο αποτελεί η αντίσταση R σε δυναμικό κύκλωμα RLC). Όντας εισαγωγική, επικεντρώθηκε στον καθορισμό των βασικών αρχών που ενδεχομένως θα χρησιμοποιηθούν μελλοντικά και στη θέσπιση μοντέλων περιγραφής του φαινομένου και αδιάστατων λόγων ομοιότητας. Γι' αυτό το λόγο λοιπόν, δημιουργείται πληθώρα αντικειμένων για περαιτέρω μελέτη. Κάποιες προτάσεις αποτελούν:

1. Μελέτη της επίδρασης της ροής μάζας στην μετάδοση του υδραυλικού πλήγματος και στην συμβολή του
2. Αναθεώρηση των παρόντων σχεδίων ή/και δημιουργία νέων με σκοπό την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας εισόδου – εξόδου από την διάταξη παραγωγής διαφοράς φάσης
3. Εμπλουτισμός του μοντέλου υπολογισμού διαφοράς φάσης για ελικοειδείς σωλήνες με δυναμικά μεγέθη και συμπερίληψη τριβικών και ιξωδικών χαρακτηριστικών του ρευστού
4. Κατασκευή γεωμετρίας και επαλήθευση θεωρητικών μοντέλων και αριθμητικών αποτελεσμάτων μέσω πειραματικών διατάξεων
5. Εξεύρεση λύσεων για απόσβεση υδραυλικών πληγμάτων με πηγή μεταβλητής συχνότητας

7. Βιβλιογραφία

- [1] «Tunnel of Eupalinos,» 21 January 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_of_Eupalinos.
- [2] «Las Médulas,» 21 January 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Las_M%C3%A9dulas.
- [3] «Hydraulic power network,» 21 January 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_power_network.
- [4] N. Y. Joukowsky, *Memoirs of the imperial academy society of St. Petersburg*, 1898, pp. 341 - 424.
- [5] L. Allievi, *Teoria del colpo d'ariete*, *Atti collegio Ing. Arch*, 1913.
- [6] L. Allievi, *Teoria generale del moto perturbato del' acquani tubi in pressione*, Rome: Ann. Soc. Ing. Italiana, 1903.
- [7] M. Z. D. A. M. D. H. A. Mohamed S. Ghidaoui, «A Review of Water Hammer Theory and Practice,» *Applied Mechanics Reviews*, pp. 50-76, January 2005.
- [8] D. J. Korteweg, «Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Röhren,» *Annalen der Physic*, τόμ. 241, αρ. 12, pp. 525-542, 1878.
- [9] ANSYS, Inc, *ANSYS Mechanical User's Guide*, Canonsburg: ANSYS, Inc, 2013.
- [10] ANSYS, Inc, *Mechanical APDL Acoustic Analysis Guide*, Canonsburg: ANSYS, Inc, 2013.
- [11] Ahmad, S., Irons, B. M. a. Zienkiewicz και O. C., *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*, Canonsburg: ANSYS, Inc, 2009.
- [12] B. S. C. Carl Q. Howard, *Acoustic Analyses Using Matlab® and Ansys®*, New York: CRC Press, 2005.
- [13] ANSYS, Inc, *Mechanical APDL Command Reference*, Canonsburg: ANSYS, Inc, 2013.
- [14] S. M. J. Mihály Dobróka, «An introduction to continuum mechanics and elastic wave propagation,» Somogyiné Molnár Judit, Miskolc, 2014.
- [15] A. A. Arris S Tijsseling, «The Joukowsky equation for fluids and solids,» 2006.
- [16] Ν. Φλυτζάνης, «Διαστατική Ανάλυση και Ομοιότητα,» σε *Βασικές έννοιες συνεχούς και πεδίου ροής*, Πάτρα, Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015, pp. 366-392.
- [17] H. a. S. E. (HSE), «Noise from pneumatic systems,» Health and Safety Executive (HSE), 1999.
- [18] H. Kudel, *Dimensional Analysis*, 2009.

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ