



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ
ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗΣ ΣΤΟ ΑΙΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΑΠΟΦΡΑΓΜΕΝΗΣ
ΑΡΤΗΡΙΑΣ**

ΔΡΟΥΜΠΑΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΡΩΜΑΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (Δρ. Μηχ.)

ΠΑΤΡΑ 2018

Δρούμπαλης Ιωάννης

Πάτρα __ Δεκεμβρίου 2017

© 2017 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Υπογραφή_____

Η συγγραφή της διπλωματικής εργασίας ακολούθησε την ακαδημαϊκή δεοντολογία ως προς την αναγνώριση της συμβολής των άλλων ερευνητών και την απόδοση παραπομπών στις πηγές στις οποίες έχει βασιστεί.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να αποδώσω ευχαριστίες σε όλους όσους συνέφεραν για την πραγματοποίησή της.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ρωμαίο Αλέξανδρο για την υπομονή και τις συμβουλές του σε κάθε στάδιο της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Λέκτορα του Εργαστηρίου Τεχνικής Θερμοδυναμικής, κ. Περράκη Κωνσταντίνο για την παρουσία και τον χρόνο που αφιέρωσε για την διεκπεραίωση της πτυχιακής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μεταπτυχιακό σπουδαστή και καθηγητή κ. Ναζάκη Ανδρέα για τις συμβουλές του στην διάρκεια της εκπόνησης πτυχιακής εργασίας.

Επιπροσθέτως ευχαριστώ τον κ. Ζαφείρη Σωτήρη, για την προσφορά βοήθειάς του στο κατασκευαστικό τμήμα της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος θέλω ακόμη να ευχαριστήσω τον προπτυχιακό συνάδελφο μου, Μπαλωμενάκη Δημήτρη του τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών για την στενή συνεργασία που είχαμε και για την φιλία που αναπτύχθηκε μέσω αυτής.

Περίληψη

Μία από τις σημαντικότερες αιτίες θανάτων παγκοσμίως προέρχονται από παθήσεις του καρδιαγγειακού συστήματος. Λόγοι όπως το κάπνισμα, τα γεράματα και η καθιστική ζωή συναινούν στην δημιουργία θρομβώσεων και αθηρωματικών πλακών με αποτέλεσμα αυτών την τοπική φραγή του αγγείου. Είναι κατανοητό ότι, πλέον η αιματική ροή είναι μειωμένη και τα ρευστοδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής διαφέρουν από τα φυσιολογικά. Μία από τις κυριότερες μεθόδους αποκατάστασης της ροής, είναι η χειρουργική επέμβαση, με την διαδικασία παράκαμψης (by pass) της πάσχουσας αποφραγμένης περιοχής του αγγείου με τεχνητό ή αγγειακό μόσχευμα.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση του αιμοδυναμικού πεδίου στην κρίσιμη περιοχή αναστόμωσης αποφραγμένης αρτηρίας. Συγκεκριμένα η μελέτη αφορά στην επίδραση της γωνίας αναστόμωσης με μέθοδο end to side, της σχετικής θέσης της αναστόμωσης ως προς την στένωση καθώς και της αναλογίας παροχών των δύο αγγείων, σε συνθήκες μόνιμης και παλμικής ροής.

Στόχος της πτυχιακής είναι η μελέτη και η κατανόηση των αιμοδυναμικών χαρακτηριστικών της ροής στην περιοχή της στένωσης, η ανάπτυξη της ροής έως την αναστόμωση, καθώς και η διάγνωση εξέλιξης της ροής στην αναστόμωση. Η αποτύπωση των ροών πραγματοποιήθηκε μέσω της διαδικασίας της οπτικοποίησης, και έγινε μέσω καταγραφής στιγμιότυπων της τροχιάς τροχοδεικτικών σωματιδίων με την βοήθεια μίας κάμερας και ενός λείζερ λεπτού επιπέδου φύλλου φωτός εντός διάφανου αγωγού Plexiglass σταθερής διαμέτρου.

Αναλυτικότερα στην εργασία αυτή αρχικά θα προσεγγισθεί το φυσικό φαινόμενο της αθηρωμάτωσης, έπειτα θα περιγραφεί το πειραματικό μοντέλο και η πειραματική διαδικασία, καθώς και η μέθοδος της οπτικοποίησης και τα αποτελέσματα των

μετρήσεων. Τέλος μετά από την σύγκριση των αποτελεσμάτων θα γίνουν προτάσεις για μελλοντικές έρευνες ως διεύρυνση της εργασίας αυτής.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ.....	21
2.1 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	21
2.1.1 Το καρδιαγγειακό σύστημα.....	21
2.1.2 Η λειτουργία της καρδιάς και ο κύκλος.....	23
2.1.2. Η αορτή.....	24
2.1.3 Αρτηριακό τοίχωμα.....	25
2.1.4 Το αίμα, η λειτουργία του και τα συστατικά του.....	26
2.1.5 Γενικά για την Αθηροσκλήρωση.....	28
2.1.6 Η βιολογία του ενδοθηλίου και η δυσλειτουργία του.....	28
2.1.7 Η Διατμητική τάση τοιχώματος WSS (Wall Shear Stress) και η βιολογική απάντηση του ενδοθηλίου.....	32
2.1.8 Η έναρξη και η ανάπτυξη της Αθηροσκλήρωσης.....	35
2.1.9 Γενικοί τρόποι αντιμετώπισης – ειδικά για το bypass.....	39
2.2 ΑΙΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	41
2.2.1 Δυναμική ρευστού και ιξώδες.....	41
2.2.2 Διατήρηση μάζας.....	42
2.2.3 Διατήρηση της Ενέργειας.....	42

2.2.4 Διατήρηση της ορμής (Εξίσωση Navier-Stokes).....	44
2.2.5 Αριθμός Reynolds.....	45
2.2.6 Νόμος του Poiseuille.....	45
2.2.7 Οριακό στρώμα.....	47
2.2.8 Ο Αριθμός Womersley	48
2.2.9 Αποκόλληση της ροής	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	54
3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	54
3.1.1 Κατασκευή της περιοχής ενδιαφέροντος.....	54
3.1.2 Σχεδιασμός και Κατασκευή Συνολικής Διάταξης	59
3.1.3 Λειτουργία της Διάταξης	60
3.1.4 Παλμική Αντλία	64
3.1.5 Έλεγχος μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.....	66
3.1.6 Το Laser.....	67
3.1.7 Η Κάμερα και φακός	68
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ	69
3.2.1 Τα τροχοδεικτικά σωματίδια	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	72
4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ	72
4.2 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ.....	75
4.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΑΞΗ	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ	78

5.1	ΣΤΕΝΩΣΗ ΜΕΧΡΙ ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ.....	78
5.1.1	Εναλλαγή της έκτασης των χαρακτηριστικών περιοχών.....	84
5.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ	86
5.2.1	Γενική περιγραφή του ροϊκού φαινομένου	86
5.2.2	Ζώνη μίξης.....	88
5.2.3	Περιοχή αποκόλλησης ροής.....	90
5.2.4	Μετά την περιοχή αποκόλλησης της ροής	93
5.2.5	Ομαλοποίηση του ροϊκού πεδίου.....	95
5.3	ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΟΧΩΝ.....	96
5.3.1	Μεταβατικά φαινόμενα στην μόνιμη ροή.....	98
5.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ		112
6.1	ΣΤΕΝΩΣΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ.....	114
6.2	ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ ΓΙΑ ΡΕΥΣΤΟ ΙΞΩΔΟΥΣ 3,4 CP	118
6.2.1	Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 50%	118
6.2.2	Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 70%.....	119
6.2.3	Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 85%	121
6.2.4	Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 100%.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ		124
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		124
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ		126
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα καρδιαγγειακά νοσήματα αποτελούν μία από τις κυριότερες αιτίες θανάτου παγκοσμίως καταλαμβάνοντας την πρώτη θέση στην εν λόγω στατιστική σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.). Ο σύγχρονος καθιστικός τρόπος ζωής, οι διατροφικές συνήθειες, το άγχος αλλά και η γήρανση είναι από τις κύριες αιτίες των καρδιαγγειακών παθήσεων. Το κυριότερο τμήμα των καρδιαγγειακών νοσημάτων αφορά την ασθένεια της αθηροσκλήρωσης, η ανάπτυξη της εντός των αιμοφόρων αγγείων αθηροματικών πλακών που μειώνουν την διατομή των αγγείων και συνεπώς επηρεάζουν τα φυσιολογικά ρευστοδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής του αίματος. Μεταξύ των αποτελεσμάτων της στένωσης είναι η δημιουργία τυρβωδών περιοχών, αποκόλληση της ροής, μη φυσιολογικά επίπεδα διατμητικών τάσεων, πτώση της πίεση και της παροχής με κίνδυνο την αιμόλυση και θρομβώσεις. Η ανάπτυξη της αθηρωματικής πλάκας αν δεν καταπολεμηθεί επαρκώς προκαλείται ισχαιμία της καρδιάς, είτε του εγκεφάλου είτε των άκρων και τελικώς του μυοκαρδίου και στον θάνατο. Στην ασθένεια αυτή οφείλεται μεγάλο ποσοστό θανάτων στην εποχή μας.

Από τις κύριες “παραδοσιακές” μεθόδους χειρουργικής αντιμετώπισης των αγγειακών στενώσεων είναι η παράκαμψη τους και η αναστόμωση των αγγείων με μοσχεύματα αγγειακά ή τεχνητά (bypass). Με την μέθοδο αυτή παρακάμπτεται η επικίνδυνη περιοχή και επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της κυκλοφοριακής ροής του αίματος. Η μέθοδος με την οποία εκτελείται η επέμβαση, το είδος του μοσχεύματος, η γεωμετρία και η θέση του και μια σειρά άλλων ζητημάτων είναι ακόμα προς διερεύνηση. Εκεί εμφανίζεται ένα πεδίο μελέτης που εμπλέκει άμεσα και τους μηχανικούς, καθώς ένα μεγάλο τμήμα της διαδικασία αφορά την μελέτη της ροής του αίματος πριν και μετά την χειρουργική επέμβαση. Στατιστικά έχει παρατηρηθεί πως η επιτυχία της μετεγχειρητικής πορείας της

μεθόδου του bypass εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα νέα χαρακτηριστικά του δημιουργημένου αιμοδυναμικού πεδίου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η οπτικοποίηση του αιμοδυναμικού πεδίου αποφραγμένης αρτηρίας με 90° μοιρών αναστόμωση. Η μελέτη αφορά την αποτύπωση του ροϊκού πεδίου σε συνθήκες μόνιμης και παλμικής λειτουργίας. Αποτυπώνεται η ανάπτυξη της ροής και τα χαρακτηριστικά της που οφείλονται στην ύπαρξη της στένωσης και εκτείνονται μέχρι την περιοχή της αναστόμωσης. Επίσης αποτυπώνεται η μίξη των των δυο ροών της μητρικής και της παρακαμπτήριας και των χαρακτηριστικών περιοχών για τέσσερις διαφορετικές αναλογίες παροχών. Για την περιοχή της αναστόμωσης δοκιμάζονται τρία διαφορετικά ρευστά λειτουργίας για να παρατηρηθεί η αλλαγή στο ιξώδες του ρευστού πως επηρεάζει το ροϊκό πεδίο.

Κατασκευάστηκε πειραματικό μοντέλο για την προσομοίωση ενός πραγματικού φαινομένου σε ανθρώπινη κλίμακα. Από την αορτή και την στένωση μέχρι την παλμική λειτουργία της καρδιάς. Ως βάση του σχεδιασμού της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα που είχαν επιλεχθεί και από σε άλλες εργασίες και πειράματα, κυρίως για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Το ρευστό λειτουργίας επιλέχθηκε ώστε να διατηρείται η δυναμική ομοιότητα της ροής με παρόμοιους αριθμούς Reynolds και Womersley

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το καρδιαγγειακό σύστημα αποτελεί ένα διακλαδιζόμενο δίκτυο αγωγών που μεταφέρει τις θρεπτικές και αναγκαίες ουσίες στο σώμα μέσω της παλμικής λειτουργίας της καρδιάς. Το αίμα ρέει διαμέσου του δικτύου μεταφέροντας τις ουσίες, μάλιστα είναι διαφασικό (στερεό/υγρό). Η παλμική λειτουργία της καρδιάς δημιουργεί ένα δυναμικό περιβάλλον όπου τα χαρακτηριστικά της ροής του αίματος μεταβάλλονται συνεχώς.

Όπως επισημαίνει ο D.N. Ku (1991) κάθε μηχανικό χαρακτηριστικό της ροής παίζει έναν ρόλο είτε στην δημιουργία, είτε στον προσδιορισμό, είτε στην θεραπεία της αρτηριακής ασθένειας. Οι περισσότερες ασθένειες χαρακτηρίζονται από τοπικότητα, καθορίζονται λοιπόν από τα τοπικά χαρακτηριστικά της ροής που αναπτύσσονται στην συγκεκριμένη περιοχή. Για αυτό ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών του αίματος πρέπει να γίνεται με ακρίβεια. Παρόλα αυτά η πλήρης κατανόηση της σχέσης μεταξύ της πίεσης, της ροής, των διατμητικών τάσεων με τα συμπτώματα των αγγειακών στενώσεων παραμένει ένα ανοιχτό ζήτημα. Πλήθος ερευνητών έχουν προσπαθήσει και συνεχίζουν μέχρι σήμερα να μελετούν τις σχέσεις αυτές.

Οι έρευνες αυτές γίνονται από ένα εύρος in vitro και in vivo πειραματικών τεχνικών, συμπεριλαμβανομένου LDA, MRI, PIV, υπέρηχους doppler, όπως και με υπολογιστικά προγράμματα (CFD).

Από τους γιατρούς επιλέγεται η μέθοδος της παράκαμψης της στένωσης (bypass) όταν εκείνη έχει ξεπεράσει το 70% της διατομής της αρτηρίας. Ένα μεγάλο ποσοστό των εγχειρήσεων bypass τείνουν να μην είναι αποτελεσματικές το επόμενο χρονικό διάστημα, με στατιστικά στοιχεία να φανερώνουν ότι το 25% των επεμβάσεων αποτυγχάνουν μέσα στον πρώτο χρόνο και 50% των επεμβάσεων μέσα σε 10 χρόνια (T.Grus et al. 2009). Τα κύρια αίτια για την παρουσίαση ασθενειών στην περιοχή του

bypass είναι οι χειρουργικοί τραυματισμοί (Loth et al., 2002) η ασυμβατότητα του υλικού του μοσχεύματος (Bassiouny et al. , 1992,)και η ανάπτυξη υπενδοθηλιακής υπερπλασίας και θρομβώσεων στην περιοχή της αναστόμωσης (Echave et al.1979, Imparato et al.1972). Παθήσεων που επιφέρουν τη μακροχρόνια στένωση των αγγείων και τελικώς την μείωση του χρόνου “ζωής”.

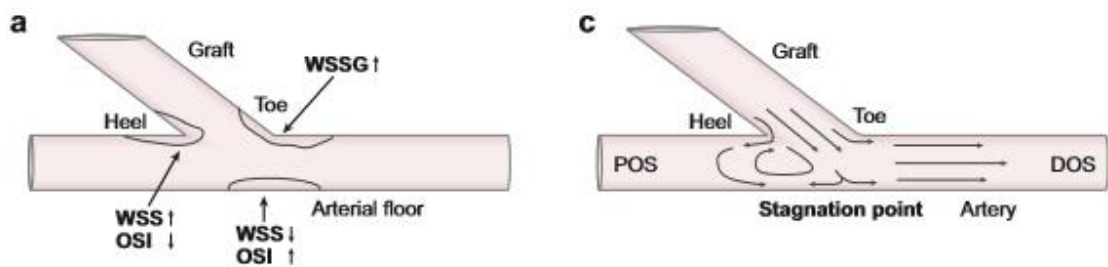
Η ανάπτυξη της αθηροσκλήρωσης είναι ένα σύνθετο φαινόμενο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, από το υλικό του μοσχεύματος και τον τρόπο συρραφής μέχρι και χημικούς και κυτταρικούς παράγοντες. Όμως οι αιμοδυναμικοί παράγοντες φαίνεται να έχουν σημαντική συμβολή: η ροή του αίματος (στασιμότητα, στροβιλισμοί) και το προφίλ της ταχύτητας. Η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στα τοιχώματα θεωρείται ο κύριος λόγος καθώς η αθηρωματική πλάκα παρουσιάζεται σε περιοχές με χαμηλή διατμητική τάση και σε περιοχές με υψηλή χωρική ή χρονική ταλάντευση των διατμητικών (Binns R.L. et al. 1989, Ku D. 1991). Χαμηλές διατμητικές συνήθως παρουσιάζονται σε περιοχές με χαμηλή ή στάσιμη ροή, σε περιοχές με ανακυκλοφορία και διαχωρισμού της ροής (M.Hoedt et al. 2015)

Ξεκινώντας από την προσομοίωση του αίματος, το αίμα χαρακτηρίζεται από μη-νευτώνια συμπεριφορά σε μικρούς αγωγούς και τριχοειδή αγγεία ενώ συμπεριφέρεται σαν νευτώνιο ρευστό στις μεγάλες αρτηρίες του οργανισμού (David N. Ku 1991). Έχουν γίνει συγκρίσεις για αυτές τις δυο περιπτώσεις μοντελοποίησης μελετώντας την κατανομή των διατμητικών (B.M. Johnston et al. 2005) όπου καταλήγουν ότι στην περίπτωση που επιδιώκεται να υπολογιστεί η κατανομή των διατμητικών τάσεων η νευτώνια συμπεριφορά του ρευστού είναι ικανοποιητική, άποψη που συμφωνεί με τον (Perktold et al. 1991)

Τα ανθρώπινα αγγεία έχουν την ικανότητα να προσαρμόζουν την γεωμετρία τους (διαστέλλονται /συστέλλονται) ανάλογα με τις μεταβλητές συνθήκες ροής/πίεσης ώστε να προσαρμόζονται στις αιμοδυναμικές απαιτήσεις. Χρησιμοποιώντας υπολογιστικό πρόγραμμα ο (Leuprecht et al. 2002) δεν διαπίστωσε μεγάλη διαφορά στις διατμητικές

τάσεις για τις δυο περιπτώσεις αγγείων. Για την οπτικοποίηση του ροϊκού πεδίου με την τροχιοδεικτική μέθοδο απαιτούνται διάφανα τοιχώματα στο μοντέλο ώστε να μπορούν να αποτυπωθούν οι τροχιές (όπως και στην PIV μέθοδο). Συνήθως χρησιμοποιείται plexiglass ή pyrex glass (Jum-Mei Zhang et al 2007) μερικοί χρησιμοποιούν και κερί (Schmirler et al 2007). Με την ανάπτυξη των CAD τεχνολογιών προσομοιώνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η γεωμετρία των ανθρώπινων αγγείων με μοντέλα σιλικόνης κατασκευασμένα με ταχεία προτυποποίηση (Hoedt M. et al 2015, Buchman et al 2011).

Ακολουθεί σχήμα αναστόμωσης για την γενική περιγραφή των κρίσιμων σημείων που παρουσιάζεται η υπενδοθηλιακή υπερπλασία και την σύγκριση των παραμέτρων που την επηρεάζουν.



Εικόνα 1 Φαίνεται μια τυπική κατανομή της υπενδοθηλιακής υπερπλασίας στην αναστόμωση (α) και η ροή του αίματος όταν η στένωση είναι 100% (c). DOS/POS δηλώνουν την κατεύθυνση κοντά/μακριά από την εκροή. WSS είναι η διατμητική τάση, WSSG είναι η βαθμίδα της διατμητικής, OSI ο δείκτης ταλάντωσης της διατμητικής τάσης. Το σχήμα υιοθετήθηκε από τους Haruguchi & Teraoka 2003

Στην μελέτη (M. Schmirler et al.2007) γίνεται μια προσπάθεια να προσδιοριστούν αριθμητικά αυτές οι περιοχές κρίσιμης τιμής της διατμητικής τάσης. Χρησιμοποιώντας υπολογιστικές προσομοιώσεις και μέθοδο PIV καταλήγει στο συμπέρασμα ότι χαμηλές μη επιθυμητές διατμητικές τάσεις παρουσιάζονται $x/D = 1,3$ πίσω από το “toe” και απέναντι στο “floor” στην θέση $x=0$, όπου η αρχή των αξόνων τοποθετείται στο “toe” και το D είναι η διάμετρος του αγγείου.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της ροής διαμορφώνονται από τον τύπο της αναστόμωσης (end-to-side, end-to-end, side-to-end), την διάμετρο και την γωνιά του μοσχεύματος, τον

βαθμό της στένωσης και την απόστασή της από την αναστόμωση. Σε αυτές τις παραμέτρους συγκεντρώνεται η μελέτη για τον προσδιορισμό των αιμοδυναμικών χαρακτηριστικών. Στην παρούσα εργασία μελετάται η end-to-side αναστόμωση. Η μοντελοποίηση του προβλήματος φέρει κάποιες διαφορές από ερευνητές σε ερευνητές.

Βασικό σημείο έρευνας είναι η γωνία της αναστόμωσης που καθορίζει πως θα συγχωνευτούν η κύρια με την παρακαμπτήρια ροή. Οπότε τους στροβιλισμούς, τις ζώνες ανακυκλοφορίας και τον διαχωρισμό της ροής. Η παρουσία του στροβίλου αυξάνει την παραμονή του αίματος κοντά στα τοιχώματα και έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των αιμοπεταλίων και στο σχηματισμό ενός ινώδους θρόμβου το οποίο οδηγεί σε ανάπτυξη υπενδοθηλιακής υπερπλασίας. Ενώ σε περιοχές με χαμηλή/στάσιμη ροή και διαχωρισμού ροής παρουσιάζονται χαμηλές διατμητικές τάσεις (Hoedt M et al. 2015). Οπότε είναι και λογικό το ενδιαφέρον των ερευνητών για την γωνία της αναστόμωσης. Σε μια έρευνα (Keynton et al. 1991) που υπολόγιζε την ταχύτητα υπό σταθερή ροή για διάφορες γωνίες αναστόμωσης 30-45-60 παρατηρήθηκε ότι για γωνία μεγαλύτερη των 45 μοιρών η διατμητική τάση στο “floor” ήταν μεγαλύτερη.

Μια στατιστική παρακολούθηση ασθενών που έχουν κάνει bypass (T.Grus et al. 2009) και παρουσίασαν ξανά στένωση μέσα στον πρώτο χρόνο της εγχείρησης παρατηρεί ότι το 11% εκείνων που η γωνία ήταν κάτω από 30 μοίρες παρουσίασαν αθηροματική πλάκα στην περιοχή των “δαχτύλων” σε αντίθεση με εκείνους τους ασθενείς που είχαν πάνω από 30 μοίρες όπου το ποσοστό ήταν 97% για την ίδια περιοχή. Ωστόσο και στις δυο περιπτώσεις το μόσχευμα αστόχησε πολύ σύντομα. Στην ίδια έκθεση συναντάμε μοντέλα 25-45-60 γωνίας αναστόμωσης και καταλήγει ότι είναι εμφανές πως για μικρότερες γωνίες οι διατμητικές τάσεις ήταν μειωμένες, ειδικά για μεγάλες τιμές του αριθμού Reynolds.

Στις προσπάθειες των ερευνητών δεν είναι μόνο η περιοχή της εξόδου του μοσχεύματος αλλά εξίσου μελετάται και η είσοδος του. Στην μελέτη (Jun-Mei Zhang et al. 2007) προσεγγίζονται δυο μοντέλα 135-90 μοιρών για την είσοδο του μοσχεύματος με την

μέθοδο της PIV, καταλήγουν ότι στην περίπτωση των 135 μοιρών η μεταβολή του εύρους των διατμητικών τάσεων είναι μικρότερη και για αυτό προτιμάτε έναντι των 90μοιρών.

Ενδιαφέρον έχει η περίπτωση, η αναστόμωση να μην βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την αρτηρία (Paparhilaou et al. 2002). Στην μελέτη (Loth F et al. 2008) όπου η γωνία αναστόμωσης ήταν 45μοίρες και η είσοδος της σχημάτιζε 90^0 με το επίπεδο του αγγείου παρατηρήθηκε ότι η ροή σε διαφορετικά επίπεδα εισήγαγε δίνη στην μητρική αρτηρία. Η υπολογιστική προσομοίωση εμφάνισε βελτιωμένα αιμοδυναμικά χαρακτηριστικά, δηλαδή στην περίπτωση παλμικής ροής υπήρχε μείωση κατά 22% της ταλάντωσης της διατμητικής και αύξηση της ροής μάζας από την περιοχή ανάντι της αναστόμωσης κατά 80% .

Την διάμετρο του μοσχεύματος χαρακτήρισε ο Moore (et al. 1999) ως την κύρια παράμετρο που επηρεάζει την κατανομή και το μέγεθος των διατμητικών τάσεων. Δεν είναι πολύ εύκολος ο προσδιορισμός της βέλτιστης διαμέτρου καθώς πέρα από της ανατομικές δυσκολίες, η μεγάλη διάμετρος του μοσχεύματος οδηγεί σε χαμηλές διατμητικές τάσεις και την αύξηση της υπερπλασίας, ενώ η μικρή διάμετρος αυξάνει κατά πολύ τις διατμητικές και παρουσιάζεται το φαινόμενο της θρόμβωσης (Owida 2011). Σε μια in vivo μελέτη που περιείχε 12 μοσχεύματα ο Keynton (et al. 2001) σύγκρινε τις διατμητικές με βάση την αναλογία των διαμέτρων του μοσχεύματος προς το αγγείο για δυο διαφορετικούς λόγους (1,5-1,0). Κατέληξε πως η διαφορά των διαμέτρων επηρέασε την υπενδοθηλιακή υπερπλασία μόνο στην περιοχή των δαχτύλων “toe” και όχι στην πρόσκρουσή της πάνω στο τοίχωμα απέναντι από την αναστόμωση “floor”. Συνηθίζεται η διάμετρος του μοσχεύματος να είναι ίδια ή λίγο μεγαλύτερη από του αγγείου που πρόκειται να παρακάμψουμε (Qiao et al. 2006, F.Loht et al. 2008). Η ύπαρξη της στένωσης προσδίδει στην ροή του αίματος χαρακτηριστικά τύπου δέσμης εκροής (jet flow) προσθέτοντας πολυπλοκότητα στο φαινόμενο. Αφού η απόσταση της αναστόμωσης από την στένωση επηρεάζει το ροϊκό πεδίο ο C. Bertolotti (et

a1.1999,2001) μεταβάλει αυτή την απόσταση για τον προσδιορισμό των προφίλ των ταχυτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΔΕΥΤΕΡΟ

ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ

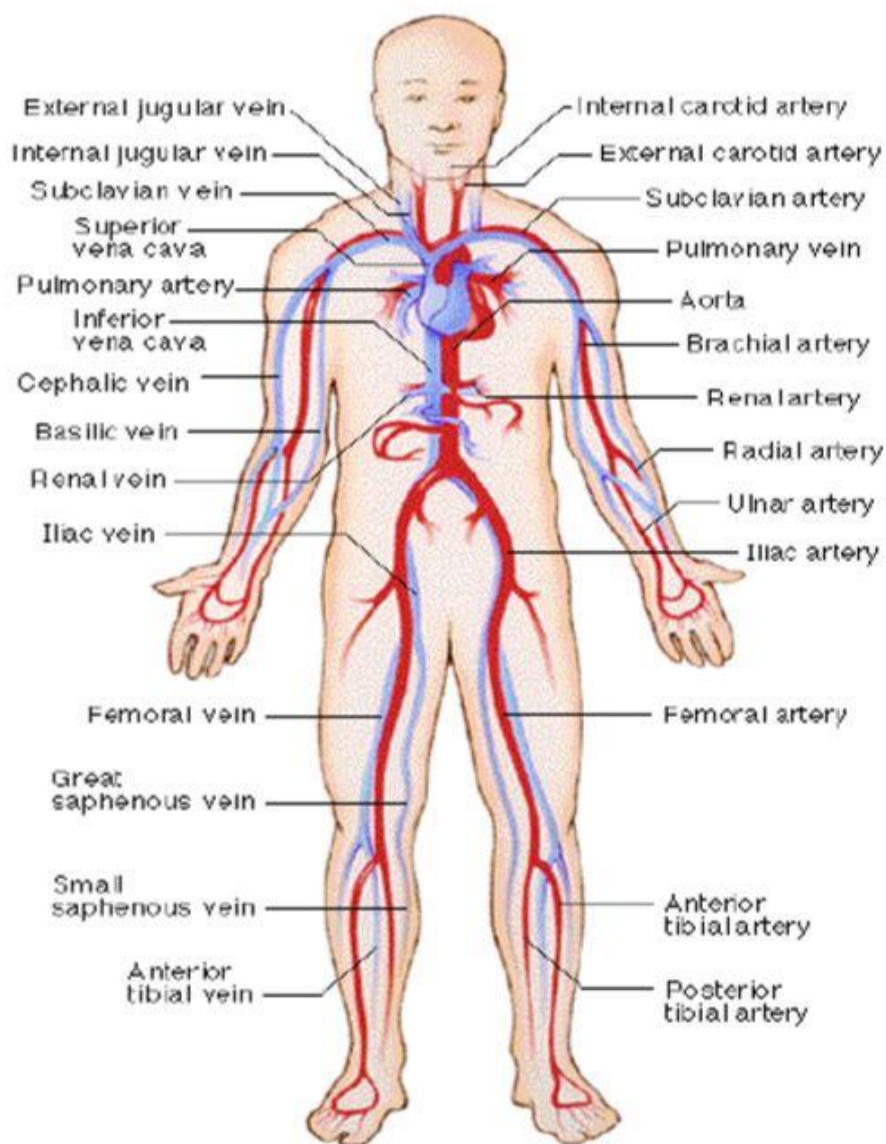
2.1 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

2.1.1 Το καρδιαγγειακό σύστημα

Η λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος εξυπηρετεί την μεταφορά των θρεπτικών και απαραίτητων στοιχείων καθώς και των αποβλήτων στον οργανισμό. Η καρδιά είναι το αναπόσπαστο όργανο που θέτει σε κίνηση το αίμα λειτουργώντας ως παλμική αντλία. Το αίμα κινείται διαμέσου των αγγείων σε όλο τον οργανισμό.

Τα αγγεία χωρίζονται σε αρτηρίες, φλέβες και τα τριχοειδή ανάλογα με την διάμετρο και την λειτουργία τους. Το αίμα ξεκινάει την διαδρομή του από την αριστερή κοιλία μεταφέροντας οξυγόνο και τα αναγκαία στοιχεία για τον μεταβολισμό. Αφού διέλθει από την μεγαλύτερη αρτηρία, την αορτή, ξεκινάει η διακλάδωσή του στον οργανισμό. Οι αρτηρίες διακλαδώνονται συνεχώς σε μικρότερα αγγεία μέχρι να εκπέσουν στο μέγεθος των τριχοειδών αγγείων που πια χρησιμεύουν σε κυτταρικό επίπεδο για την μεταφορά των ουσιών. Τα αρτηριακά τριχοειδή αγγεία μετά την ανταλλαγή των στοιχείων στα κύτταρα εξελίσσονται σε φλεβικά που μεταφέρουν τα κατάλοιπα της κυτταρικής λειτουργίας και με την σειρά τους ενώνονται σε διαρκώς αυξανόμενες φλέβες. Το αίμα επιστρέφει μέσω των φλεβών στον δεξιό κόλπο της καρδιάς. Οι φλέβες διαθέτουν βαλβίδες για εμποδίζουν την αντίθετη κίνηση του αίματος. Στο τέλος του ταξιδιού από τον δεξιό κόλπο το αίμα διέρχεται στην δεξιά κοιλία και πηγαίνει στους πνεύμονες για οξυγονωθεί επαναλαμβάνοντας μετά την ίδια διαδρομή.

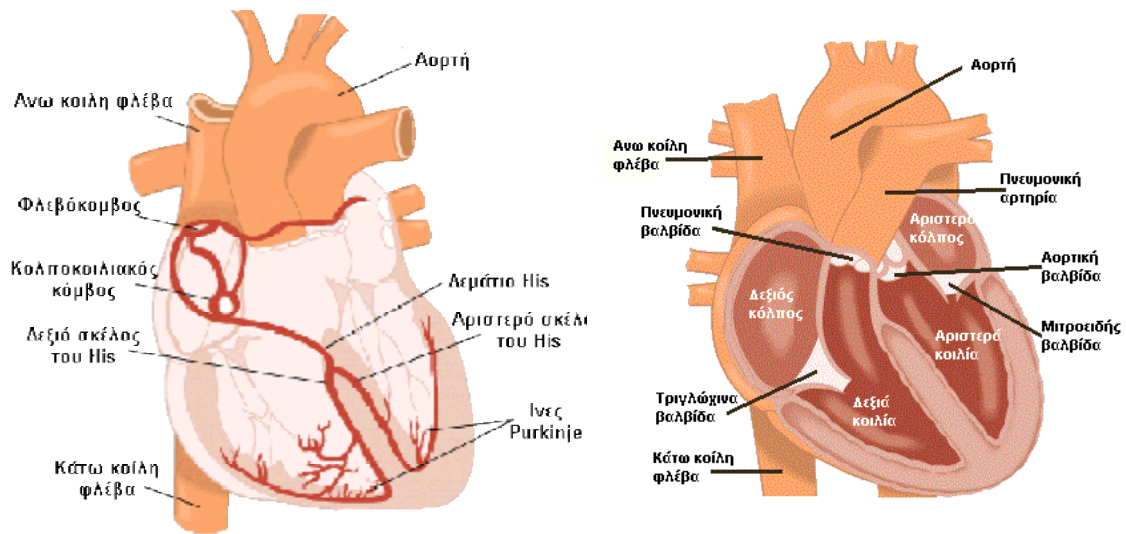
Τα αγγεία αυτά προσομοιώνονται στην ρευστομηχανική σαν σωληνώσεις όπου το είδος του τοιχώματος διαφέρει αναλόγως την μελέτη που επιχειρείται.



Εικόνα 2 : Κυκλοφορικό Σύστημα

2.1.2 Η λειτουργία της καρδιάς και ο κύκλος

Η καρδιά είναι μυϊκή αντλία που αποτελείται από τέσσερις κοιλότητες και τέσσερις βαλβίδες, η λειτουργία της περιλαμβάνει κυκλικές εναλλαγές πίεσης και όγκου.

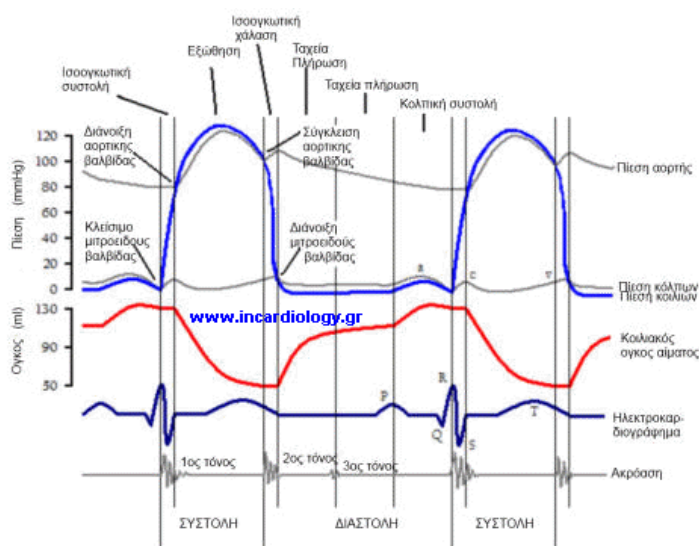


Εικόνα 3: Απεικόνιση των περιοχών της καρδιάς

Κατά την συστολή των κοιλιών : αυξάνεται η πίεση στις κοιλίες και εξωθείται το αίμα προς την αορτή και την πνευμονική αρτηρία. Κλειστές παραμένουν οι μιτροειδής και η τριγλώχινα βαλβίδα ενώ ανοιχτές οι βαλβίδες που διοχετεύουν το αίμα στις αρτηρίες.

Κατά την διαστολή της καρδιάς: ελαττώνεται η πίεση στις κοιλίες και το αίμα εισρέει από τους κόλπους στις κοιλίες. Οι βαλβίδες εναλλάσσονται, με κλειστές πια την αορτική και την πνευμονική. Το κλείσιμο των βαλβίδων δημιουργεί τους καρδιακούς τόνους που ακούγονται.

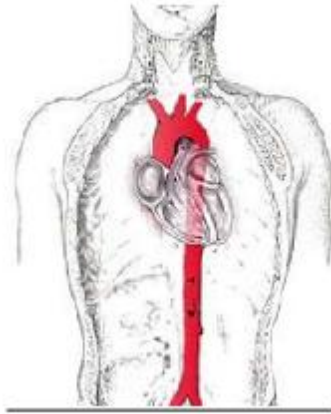
Παρακάτω ακολουθεί ένα διάγραμμα τις κατανομής της πίεσης και του όγκου αναλόγως την φάση του καρδιακού κύκλου και τις διεργασίες που συμβαίνουν .



Εικόνα 4: Διάγραμμα κατανομής πίεσης και όγκου κατά την καρδιακή λειτουργία

2.1.2. Η αορτή

Παρουσιάζονται μερικά βασικά χαρακτηριστικά της μεγαλύτερης αρτηρίας καθώς αυτή έχει μοντελοποιηθεί στο πείραμα. Είναι ένας σωληνωτός αγωγός που χωρίζεται στα εξής μέρη : στη ρίζα της αορτής, στην ανιούσα αορτή, στο αορτικό τόξο που διοχετεύει με αίμα τον εγκέφαλο και τα άνω άκρα, την κατιούσα θωρακική, την κοιλιακή που παροχετεύει τα κάτω άκρα.



Εικόνα 5: Αορτή

Μέσο αυτού του αγγείου διέρχεται όλη η ποσότητα του αίματος που επίκειται να διοχετευτεί σε όλο τον οργανισμό. Έχει περίπου 25 mm διάμετρο και σε αυτή αναπτύσσονται μεγάλες πιέσεις (της τάξης των 100 mmHg) ώστε να μπορεί το αίμα να φτάσει σε κάθε άκρη του αγγειακού συστήματος.

2.1.3 Αρτηριακό τοίχωμα

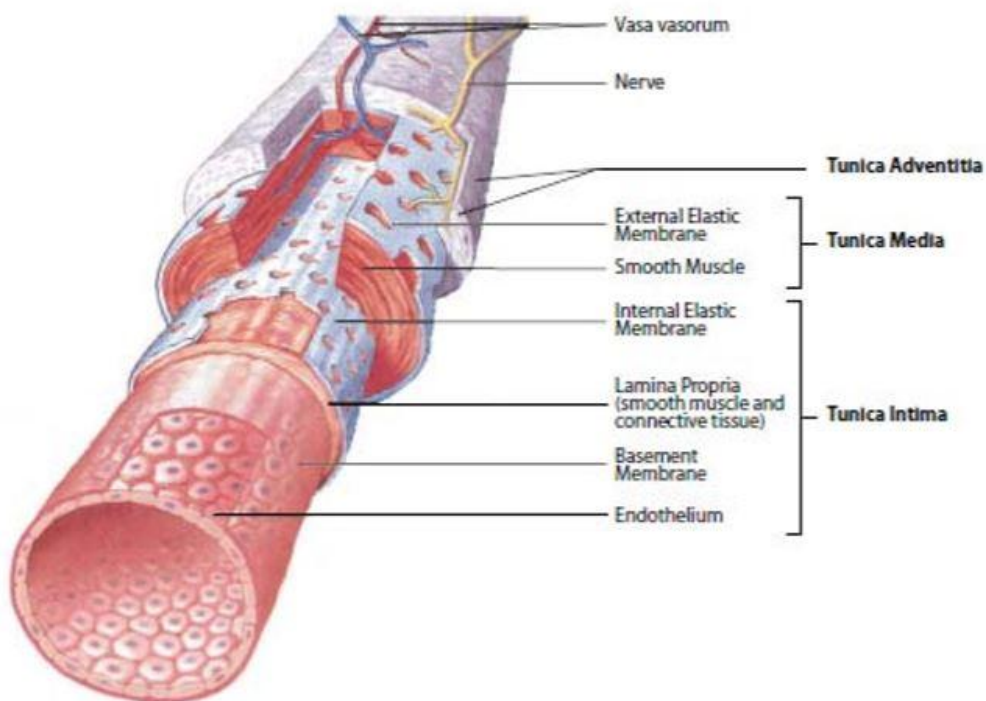
Η σύσταση της αρτηρίας αναλύεται σε τρία διακριτά στρώματα όπως αναλυτικά φαίνονται στην εικόνα 5: τον έσω, μέσο, έξω χιτώνα.

Στον έσω χιτώνα βρίσκεται ένα λεπτό στρώμα που περιλαμβάνει την εσωτερική περιοχή του τοιχώματος που με την σειρά του χωρίζεται σε τέσσερα κομμάτια. Στην εσωτερική περιοχή σε άμεση επαφή με το κινούμενο αίμα βρίσκεται ένα λεπτό στρώμα ενδοθηλιακών κυττάρων. Η στρώση αυτή λειτουργεί ως φράγμα στη μεταφορά υλικών μεταξύ του αίματος και του αρτηριακού τοιχώματος. Το ενδοθηλιακό στρώμα περιβάλλεται με έναν συνδετικό ιστό και ένα ελαστικό έλασμα.

Ο μεσαίος χιτώνας είναι ο μεγαλύτερος στο αρτηριακό τοίχωμα, αποτελείται κυρίως από ομόκεντρα διατεταγμένα λεία μυϊκά κύτταρα και μια ελαστική και κολλαγόνα ινώδη μεμβράνη. Το στρώμα αυτό προσδίδει την αντοχή και την δομική ακεραιότητα στην

αρτηρία. Έχει παρατηρηθεί πως η ατομική σύνθεση του εξαρτάται κυρίως από την αρτηριακή διάμετρο και την ηλικία του οργανισμού (Seeley et al., 2003).

Ο έξω χιτώνας, περιέχει συνδετικό ιστό και κάποιες κολλαγόνες και ελαστικές ίνες. Επίσης στο στρώμα αυτό βρίσκονται μικρότερα αιμοφόρα αγγεία που τροφοδοτούν το αρτηριακό τοίχωμα με μεταβολίτες και τα θρεπτικά συστατικά που είναι αναγκαία για την λειτουργία του τοιχώματος.



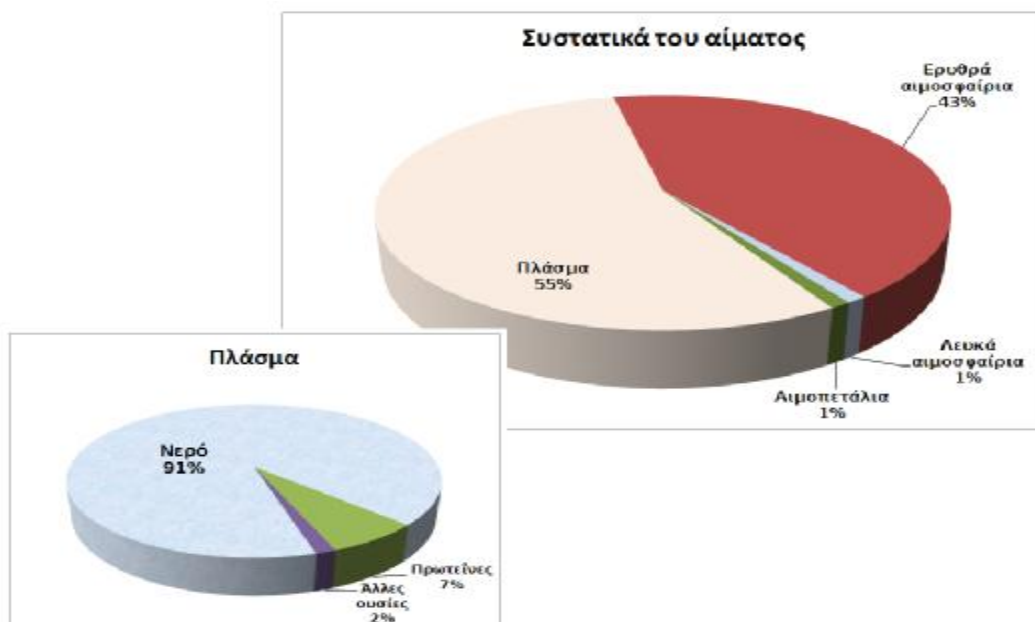
Εικόνα 6: Σύνθεση του αρτηριακού τοιχώματος

2.1.4 Το αίμα, η λειτουργία του και τα συστατικά του

Ο βασικός ρόλος του αίματος είναι η μεταφορά του οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών σε όλα τα κύτταρα των ιστών και η ταυτόχρονη απομάκρυνση από αυτά των αποβλήτων του μεταβολισμού των κυττάρων και του διοξειδίου του άνθρακα.

Επίσης το αίμα μεταφέρει ορμόνες και κύτταρα του ανοσολογικού συστήματος. Η σύσταση του αίματος είναι ένα σύνθετο μίγμα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί. Δυο βασικοί διαχωρισμοί είναι το πλάσμα και τα έμμορφα στοιχεία (ερυθρά λευκά αιμοσφαίρια, αιμοπετάλια). Τα ερυθρά αιμοσφαίρια αναλογούν στο 43% του συνολικού αίματος ενώ είναι εκείνα που οφείλεται το αυξημένο ιξώδες του αίματος σχεδόν 3,5-4 φορές μεγαλύτερο από του νερού. Το πλάσμα αποτελείται κυρίως από νερό (90%) στο οποίο βρίσκονται διαλυμένα ανόργανα άλατα, ορμόνες και θρεπτικές ουσίες. Το αίμα είναι διαφασικό ρευστό με 78% να είναι υγρό και 22% στερεό.

Η αλλαγή του ιξώδους του αίματος με τον ρυθμό της ροής και η συσσωματική συμπεριφορά που εμφανίζουν τα ερυθρά αιμοσφαίρια προκαλεί την μη-Νευτώνεια συμπεριφορά σε συνθήκες χαμηλών διατμητικών τάσεων. Τέτοιες περιοχές είναι τα τριχοειδή αγγεία, ενώ στις μεγάλες αρτηρίες το αίμα θεωρείται πως συμπεριφέρεται σαν Νευτώνειο.



Εικόνα 7 Σύνθεση του αίματος

2.1.5 Γενικά για την Αθηροσκλήρωση

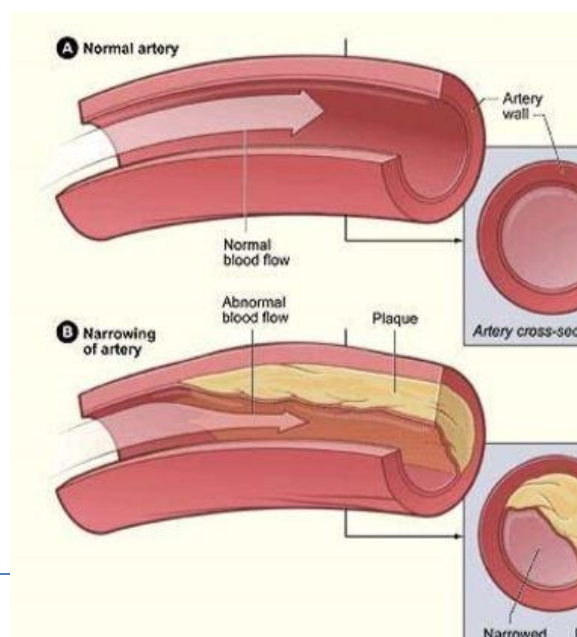
Η αθηροσκλήρωση προκαλεί την σταδιακή στένωση και σκλήρυνση των μεσαίων και μεγάλων διαμέτρου αρτηριών. Αν δεν καταπολεμηθεί επαρκώς οδηγεί σε ισχαιμία της καρδιάς, του εγκεφάλου ή των άκρων και τελικώς του μυοκαρδίου και στον θάνατο (Ross, 1999).

Η καρδιαγγειακή νόσος είναι η κορυφαία αιτία θανάτου στην Ευρώπη και στην Αμερική και οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι: η γενετική προδιάθεση, η ανθυγιεινή διατροφή κατά προέκταση ο σακχαρώδης διαβήτης και η υπερχοληστερολαιμία, η υπέρταση, το κάπνισμα, η καθιστική ζωή. Εμφανίζεται κυρίως σε ηλικιωμένη ηλικία και οι άντρες εμφανίζουν μεγαλύτερες πιθανότητες από τις γυναίκες.

Κατά την ανάπτυξη της αθηροσκλήρωσης λιπίδια και ασβεστοποιημένος ιστός προσκολλούνται στο αρτηριακό τοίχωμα μειώνοντας την διατομή της αρτηρίας. Όσο η αρτηριακή πλάκα αναπτύσσεται χωρίς να αντιμετωπίζεται οδηγεί στο σχηματισμό θρόμβου ή πλήρους απόφραξης της αρτηρίας.

2.1.6 Η βιολογία του ενδοθηλίου και η δυσλειτουργία του

Τα ενδοθηλιακά κύτταρα ευθυγραμμίζουν τα εσωτερικά τοιχώματα του αγγείου και παρέχουν επικοινωνία μεταξύ του κινούμενου ρευστού και του αρτηριακού τοιχώματος. Η κύρια δομή των κυττάρων



Εικόνα 8 Απεικόνιση της αθηροματικής πλάκας

αποτελείται από μεμβράνες, οργανίδια και το κυτοσόλιο. Η εξωτερική προστατευτική μεμβράνη είναι ημι διαπερατή όπου ελέγχει την διέλευση των υλικών μεταξύ του εξωκυτταρικού και ενδοκυτταρικού περιβάλλοντος. Η επιφάνεια της μεμβράνης έχει την δυνατότητα να “αισθάνεται” το αιμοδυναμικό περιβάλλον της.

Η περιοχή εντός των ενδοθηλιακών κυττάρων αποτελείται από το κυτοσόλιο και οργανίδια που περιστοιχίζονται από εσωτερική σειρά ινών που προσδίδουν μηχανική αντοχή. Αυτές οι ίνες συμμετέχουν στη μετάδοση ισχύος (πχ διατμητική τάση) ώστε να δύνανται μορφολογικές αλλαγές στην δομή και τον προσανατολισμό των κυττάρων έπειτα από αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Το ενδοθήλιο πέρα από την επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον είναι υπεύθυνο και για μερικές ρυθμιστικές διεργασίες όπως : η πήξη του αίματος, η ανάπτυξη λείων μυϊκών κυττάρων και λευκοκυττάρων, την πρόσληψη χαμηλής πυκνότητας λιποπρωτεΐνης και την ρύθμιση του αγγειακού τόνου (Traub και Berk,1998, Chatzizisis et al., 2007). Συμβάλει ουσιαστικά στην ομοιόσταση του οργανισμού δηλαδή στην δυνατότητα του οργανισμού να διατηρεί σταθερές φυσιολογικές συνθήκες. Εξαιρετικό ενδιαφέρον, για την παρούσα εργασία, είναι η δυνατότητα του ενδοθηλίου για την ενεργοποίηση ενός ισχυρού αγγειοδιασταλτικού οξειδίου του αζώτου, το οποίο παρουσιάζει αθηρο-προστατευτικά χαρακτηριστικά ως παράγοντες που δυσκολεύουν την πήξη και στον έλεγχο της πρόσφυσης άλλων μορίων στο αγγειακό τοίχωμα (Libby, 2001).

Αυτή η δυνατότητα του υγιούς ενδοθηλίου να ανταποκρίνεται στις επικρατούσες αιμοδυναμικές και βιοχημικές καταστάσεις του περιβάλλοντός του ώστε να έχει μια ρυθμιστική λειτουργία, το καθιστά κρίσιμο παράγοντα στην παθολογία της αθηροσκλήρωσης και ουσιαστικά στην υγιή λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος (Traub και Berk, 1998, Malek et al., 1999 , Resnick et al., 2003) .

Είναι προφανές λοιπόν ότι η ενδοθηλιακή δυσλειτουργία, δηλαδή η μειωμένη λειτουργικότητα της ομοιόστασης του ενδοθηλίου, οδηγεί σε μια σειρά από κινδύνους. Στις αρχικές προσπάθειες προσδιορισμού της αιτίας αθηροσκλήρωσης πιστευόταν πως

οφειλόταν σε ενδοθηλιακό τραυματισμό (Ross και Glomset, 1976) . Αργότερα απορρίφθηκε αυτή η υπόθεση καθώς in vivo ευρήματα αγγείων με αθηροσκλήρωση εμφάνιζαν ανέπαφη την μορφολογία των ενδοθηλίων (Davies et al., 1976). Από αυτά in vivo ευρήματα έχει εισαχθεί η στην ιατρική προσέγγιση η έννοια της ενδοθηλιακής δυσλειτουργίας (Gimbrone et al., 2000).

Έχει ταυτοποιηθεί η σύνδεση μεταξύ της δυσλειτουργίας του ενδοθηλίου και της ενεργότητας του οξειδίου του αζώτου (Davignon και Ganz, 2004) που είναι ο κρίσιμος κρίκος για τα αθηροπροστατευτικά χαρακτηριστικά της ενδοθηλιακής λειτουργίας (Barbato and Tzeng, 2004). Ουσιαστικά η επιφάνεια του δυσλειτουργικού ενδοθηλίου υφίσταται μια βιοχημική μεταβολή, μεταβάλλοντας την σε ένα προ-θρομβωτικό, προ-αθηρογενετικό περιβάλλον.

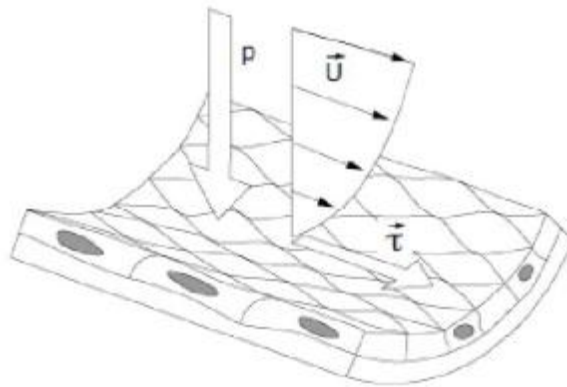
Μέχρι και σήμερα ο πλήρης προσδιορισμός της αιτίας της ενδοθηλιακής δυσλειτουργίας δεν είναι τεκμηριωμένος. Όμως οι επιστήμονες συνδέουν την αιτία εμφάνισης με παράγοντες καρδιαγγειακού κινδύνου, όπως η υπέρταση, η υπερχοληστερολαιμία δηλαδή τα αυξημένα επίπεδα χοληστερόλης, ο διαβήτης, το κάπνισμα και οι χρόνιες λοιμώξεις καθώς και η γενετική προδιάθεση. Πέρα από αυτούς τους παράγοντες, η ενδοθηλιακή δυσλειτουργία συνδέεται στενά με το επικρατών αιμοδυναμικό περιβάλλον το οποίο καθορίζει την διατμητική τάση στο τοίχωμα του ενδοθηλίου που ενεργοποιεί την απελευθέρωση των οξειδίων του αζώτου τα οποία όπως προαναφέρθηκε λειτουργούν αθηροπροστατευτικά (Gimbrone et al., 2000).

Ως εκ τούτου, η λεπτομερής κατανόηση του αιμοδυναμικού περιβάλλοντος είναι ικανή να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την προδιάθεση της ενδοθηλιακής δυσλειτουργίας. Γεγονός που χρησιμοποιείται κλινικά για τον προσδιορισμό τέτοιων περιοχών επιρρεπείς στην αθηροσκλήρωση (Davignon and Ganz, 2004 Chatzizisis et al., 2007).

Τέτοιες περιοχές εμφανίζουν τα εξής χαρακτηριστικά: έχουν χαμηλές ή μεγάλες διακυμάνσεις στις διατμητικές τάσεις στο τοίχωμα της αρτηρίας, παρατηρείται διαχωρισμός ροής, είτε υπάρχει παρατεταμένος χρόνος παραμονής σωματιδίων σε επαφή με το τοίχωμα, κάτι το οποίο συμβαίνει σε περιπτώσεις στροβίλων ή ανακυκλοφοριών.

2.1.7 Η Διατμητική τάση τοιχώματος WSS (Wall Shear Stress) και η βιολογική απάντηση του ενδοθηλίου

Η διατμητική τάση τοιχώματος είναι η δύναμη που ασκείται στο ενδοθήλιο εξαιτίας της κίνησης του αίματος στο αγγείο. Η σύνδεση της με την ανάπτυξη της αθηροσκλήρωσης ερευνάται εντατικά τα τελευταία 35 χρόνια (Asakura and Karino (1990). Friedman et al (1981) Zarins et al. (1983)?Ku et al. (1985a)).



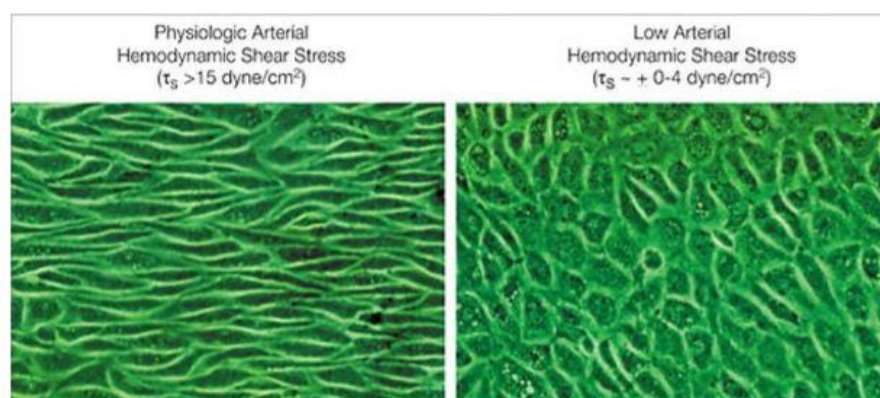
Εικόνα 9: Ενδοθηλιακή Διατμητική τάση τοιχώματος (Buchmann , 2010)

Οι έρευνες αυτές επιβεβαιώνουν μια σταθερή σύνδεση μεταξύ των περιοχών με διαταραχή στην ροή με τα σημεία πύκνωσης του έσω χιτώνα, όπου συσχετίζονται με την παρουσία χαμηλών και ταλαντευόμενων διατμητικών τάσεων. Επίσης είναι επιβεβαιωμένο πως η αθηροσκλήρωση εμφανίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές του καρδιαγγειακού συστήματος και δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε αυτό (DeBakey et al., 1985).

Το αιμοδυναμικό περιβάλλον καθορίζεται από την γεωμετρία των αγγείων για αυτό κατά προτίμηση η αθηροσκλήρωση εμφανίζεται επί των πλευρικών τοιχωμάτων στις διακλαδώσεις των αγγείων και στα τοιχώματα των αρτηριακών καμπών (Asakura and Karino, 1990, Zarins et al., 1983? Gimbrone et al., 2000).

Σε αντίθεση στις γραμμικές περιοχές του αγγειακού συστήματος με αξονικά ευθυγραμμισμένη ροή, η διάμετρος του αγγείου μέσω της διαστολής και συστολής των αγγείων καταφέρνει και διατηρεί μια φυσιολογική διατμητική τάση στο τοίχωμα του αγωγού (της τάξης περίπου των 1-2 Pa)(Traub και Berk, 1998). Στις περιοχές αυτές τα ενδοθηλιακά κύτταρα εμφανίζουν ατρακτοειδές σχήμα και προσανατολισμένα στην κατεύθυνση της ροής όπως εξηγείται παρακάτω. Κατά συνέπεια η ανάπτυξη της αθηροσκλήρωσης είναι σπάνια σε εκείνες τις περιοχές.

Τόσο η χαμηλή όσο και η ταλαντευόμενη διατμητική τάση στο αγγειακό τοίχωμα πυροδοτούν τις υγιής βιολογικές κυτταρικές διαδικασίες, όπως η αγγειοδιαστολή και η ενεργοποίηση του οξειδίου του αζώτου. Η ίδια η δομή του ενδοθηλίου προσαρμόζεται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη διατμητική τάση. Η φυσιολογική εφαρμοζόμενη διατμητική τάση μεταβάλλει τα πολυγωνικά και τυχαίου προσανατολισμού ενδοθηλιακά κύτταρα σε ατρακτοειδή κύτταρα προσανατολισμένα στην φορά της ροής. Φυσιολογική διατμητική τάση θεωρείται $\tau_s > 15 \text{ dyne/cm}^2$ ενώ εμφανίζονται ανωμαλίες στον προσανατολισμό των ενδοθηλιακών κυττάρων για διατμητικές κυμαίνονται μεταξύ 0-και 4 dyne/cm^2 .

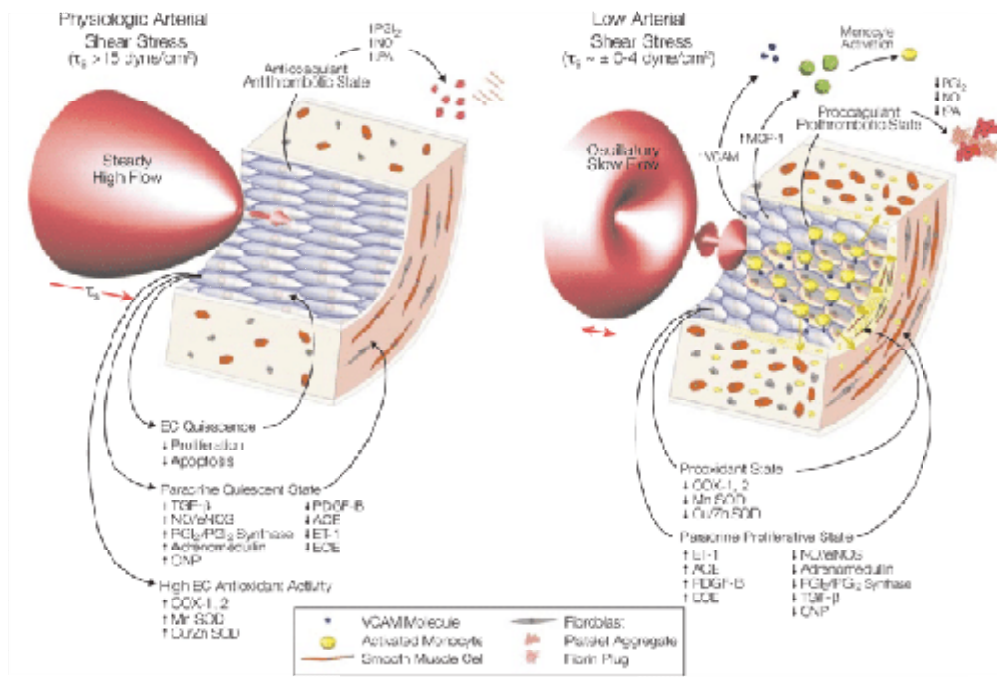


Εικόνα 10: Μορφοποίηση των ενδοθηλιακών κυττάρων από την διατμητική τάση(Malek et al ,1999)

Η υπόθεση ότι η διατμητική τάση ρυθμίζει την βιολογική λειτουργία των ενδοθηλιακών κυττάρων εξηγεί την τοπική εμφάνιση της αθηροσκλήρωσης με τον τραυματισμό του έσω χιτώνα. Η διατμητική ελεγχόμενη έκφραση των γονιδίων των ενδοθηλιακών κυττάρων συμβάλει στην ομοιόσταση του οργανισμού για να διατηρηθεί η φυσιολογική δομή των αγγείων.

Η φυσιολογική διατμητική τάση φαίνεται να παράγει ένα αθηροσκληρωτικό ενδοθηλιακό φαινότυπο που καθιστά το ενδοθήλιο λιγότερο ευαίσθητο σε παθογόνα ερεθίσματα, σε κυτταρική προσκόλληση, στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων και στην πρόσληψη λιπιδίων.

Σε αντίθεση οι περιοχές με χαμηλή διατμητική τάση, όπου τα ενδοθηλιακά κύτταρα είναι κακώς προσανατολισμένα εμφανίζουν προαθερογενετικά χαρακτηριστικά. Δηλαδή την εξασθενημένη σύνθεση του οξειδίου του νατρίου, τον πολλαπλασιασμό αγγειακά λείων μυϊκών κυττάρων και την αυξημένη διαπερατότητα του ενδοθηλίου. Επίσης η τοπική μεταφορά μάζας προς και από το αρτηριακό τοίχωμα αναστέλλεται σε αυτές τις περιοχές και προκαλείται αυξημένη συσσωμάτωση των λευκοκυττάρων και των μορίων LDL στο ενδοθήλιο. Συνεπώς οι περιοχές αυτές είναι πιο επιρρεπείς στην δυσλειτουργία του ενδοθηλίου και την ανάπτυξη της αθηρωματικής πλάκας. Ακολουθεί μια σχηματική απεικόνιση των βιολογικών διεργασιών που προκαλεί η διατμητική τάση.



Εικόνα 11: Μοντέλο της Αθηρογένεσης (Malek et al ,1999)

2.1.8 Η έναρξη και η ανάπτυξη της Αθηροσκλήρωσης

Μέχρι σήμερα οι ακριβείς μηχανισμοί που αναπτύσσονται κατά την εμφάνιση της αθηροσκλήρωσης παραμένουν μη προσδιορισμένοι. Παρόλα αυτά είναι αποσαφηνισμένο πως η αθηροσκλήρωση εκδηλώνεται ως μια φλεγμονώδης νόσος που αναπτύσσεται με την πάροδο του καιρού (Ross, 1999; Libby et al., 2002). Ο σχηματισμός της πλάκας αποτελείται από μια πολύπλευρη αλληλεπίδραση και διαρθρωτικές μεταβολές μεταξύ των εμπλεκόμενων παραγόντων: του αρτηριακού τοιχώματος, της ροής του αίματος και των αγωνιστών του αίματος. Η φλεγμονή που προκαλείται είναι απόκριση του ανοσοποιητικού συστήματος του οργανισμού, με συνέπεια την αναδιαμόρφωση του αγγειακού τοιχώματος μέσω της εισχώρησης λιπιδίων στον έσω χιτώνα. Εκείνα οφείλονται για την στένωση της αρτηρίας και προκαλούν την αρτηριακή απόφραξη ή ρήξη.

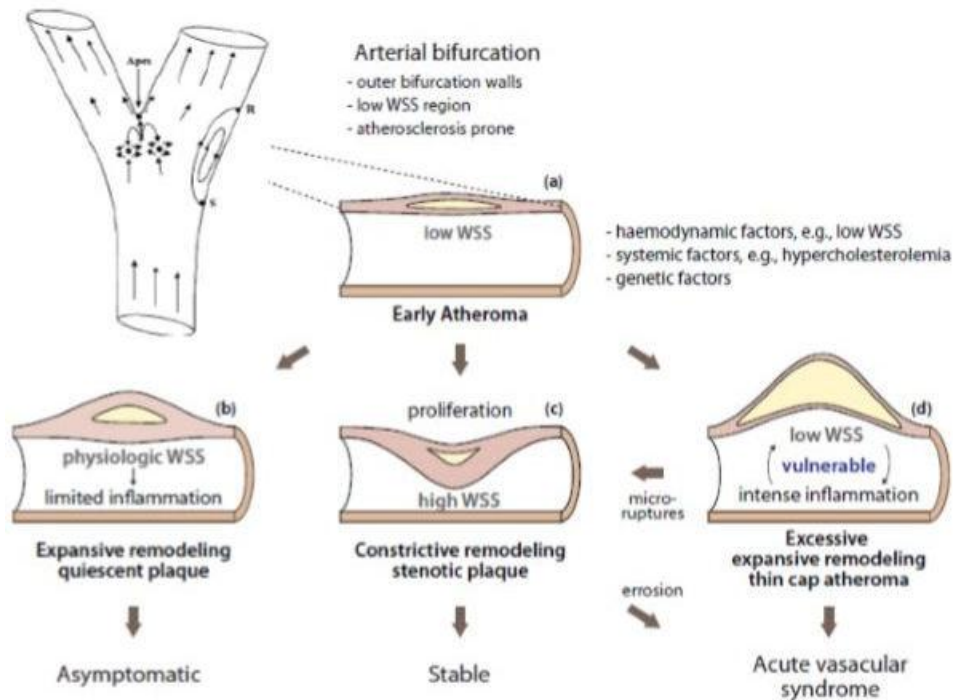
Στην αρχική φάση της αθηροσκλήρωσης, η ενδοθηλιακή αντίδραση ενώ παρουσιάζει μειωμένη παραγωγή οξειδίου του αζώτου (Libby et al., 2002), παρουσιάζει αυξημένη αγγειακή επούλωση των μορίων και την δέσμευση των ακόλουθων λευκοκυττάρων. Ακολουθεί η διείσδυση εντός του χιτώνα των λευκοκυττάρων και των μορίων LDL και η πρόκληση φλεγμονώδους απόκρισης.

Στο αρχικό στάδιο της αθηροσκλήρωσης, η ενδοθηλιακή επιφάνεια παρουσιάζει μειωμένη παραγωγή οξειδίου του αζώτου (Libby et al., 2002), και υπέρ-έκφραση της αγγειακής επούλωσης των μορίων και δέσμευση των ακόλουθων λευκοκυττάρων. Αυτό ακολουθείται από την προσάρτηση των λευκοκυττάρων και μορίων LDL, τα οποία στη συνέχεια διεισδύουν εντός του χιτώνα για να προκαλέσουν μια φλεγμονώδη απόκριση.

Μέσα στον έσω χιτώνα, τα λευκοκύτταρα χωρίζονται σε μακροφάγα και LDL όπου υφίστανται οξείδωση, με συνέπεια ένα πολύ αθηρογόνες ενδοθήλιο και την περαιτέρω έκφραση των επουλωτικών μορίων. Το οξειδωμένο πια LDL σαρώνεται από τα μακροφάγα σχηματίζοντας “αφρώδη κύτταρα” (foam cells) και “λιπαρές ραβδώσεις”. Επίσης, η ελαττωμένη οξείδωση του αζώτου επιφέρει υπέρ-έκφραση των αυξανόμενων υποκινητών και υπο-έκφραση των αναστολέων της ανάπτυξης, η οποία προκαλεί ομαλή μετανάστευση και πολλαπλασιασμό των μυϊκών κυττάρων. Τα αυξημένα πια λεία μυϊκά κύτταρα εκκρίνουν εξωκυτταρικές πρωτεΐνες για να σχηματιστεί ένα ινώδες κάλυμμα. Το κάλυμμα αυτό διαθέτει μια σχετικά υψηλή μηχανική αντοχή, θεωρείται ως ένας μηχανισμός άμυνας ώστε να εμποδιστεί η πάχυνση και προεξοχή της πλάκας προς το εσωτερικό του αγγείου.

Από αυτό το σημείο και στο εξής, η περαιτέρω ανάπτυξη της αθηρωματικής πλάκας μπορεί να διαφέρει αρκετά (Chatzizisis et al., 2007; Libby et al., 2002). Αρχικά σε περιβάλλον του τοιχώματος με χαμηλές διατμητικές τάσεις αναπτύσσεται ένα πρώιμο ινώδες αθήρωμα, αναπτύσσεται εξαιτίας της διαστολής του αγγείου για να φιλοξενήσει την επέκταση του έσω χιτώνα χωρίς να περιορίζουν την παροχή του αίματος στο αγγείο.

Ανάλογα με την απόκριση του αγγείου, το ινώδες αθήρωμα αναπτύσσεται με τους τρεις παρακάτω διαφορετικούς τρόπους: α) σε μια πλάκα σε ηρεμία β) σε μια πλάκα με στένωση γ) σε μια υψηλού ρίσκου πλάκα. Οι τρεις τρόποι αυτοί φαίνονται καθαρά στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 12: Η ανάπτυξη της αθηροματικής πλάκας

Όπως φαίνεται στην πρώτη περίπτωση της εικόνας, οι σταθερές πλάκες παρουσιάζουν ελάχιστες στενώσεις με ένα παχύ ινώδες κάλυμμα. Έχουν μια μικρή συσσώρευση λιπιδίων και μια περιορισμένη φλεγμονή. Με την αναδιαμόρφωση του τοπικού αγγειακού ιστού ομαλοποιείται η διατμητική τάση στο τοίχωμα με αποτέλεσμα εξάλειψη των αιμοδυναμικών ερεθισμάτων που θα μεγάλωνε την πλάκα. Η ήρεμη πλάκα δεν προκαλεί συμπτώματα και παρουσιάζει μικρό ενδεχόμενο ρήξης.

Δεύτερο ενδεχόμενο, το αρχικό αθήρωμα να μετεξελιχθεί σε μια στένωση πλάκας. Αυτό συμβαίνει είτε με τον πολλαπλασιασμό των ινών είτε με ουλές από προηγούμενες μικρό ρωγμές των πλακών υψηλού κινδύνου που θα δούμε παρακάτω. Οι στενωτικές πλάκες παρουσιάζουν ένα παχύ ινώδες κάλυμμα συνδυσασμένο με έναν μικρό πυρήνα λιπιδίων. Η

αναδιαμόρφωση του αγγείου είναι περιορισμένη αλλά με την πάροδο του καιρού αυξάνεται ώστε να αποφράζει το αγγείο. Συνήθως οι στενωτικές πλάκες είναι σταθερές αλλά εμπεριέχουν ένα κίνδυνο ρήξης εξαιτίας της παρατεταμένης έκθεσης σε αυξημένες μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται από την κίνηση του αίματος.

Στην τρίτη περίπτωση βρίσκονται οι υψηλού κινδύνου πλάκες. Το αγγειακό τοίχωμα έχει υποστεί υπερβολική επεκτατική αναδιαμόρφωση. Οι πλάκες αυτές χαρακτηρίζονται από ένα λεπτό ινώδες κάλυμμα που εμπεριέχει σημαντική ποσότητα LDL και φλεγμονώδη κύτταρα ενώ η χαμηλή διατμητική τάση του τοιχώματος παραμένει, συμβάλλοντας έτσι στην περαιτέρω ανάπτυξη της πλάκας. Με αυτή την διαδικασία εμφανίζεται ένας ατέρμονος κύκλος μεταξύ των χαμηλών διατμητικών τάσεων και της αναδιαμόρφωσης των αγγείων και της φλεγμονής της πλάκας.

Ωστόσο, στην παρουσία ορισμένων αιμοδυναμικών, συστημικών και γενετικών παραγόντων, το τοπικό αγγειακό τοίχωμα μπορεί να υποστεί υπερβολική επεκτατική αναδιαμόρφωση, προκαλώντας το σχηματισμό πλακών υψηλού κινδύνου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ένα λεπτό ινώδες κάλυμμα, που περιέχει σημαντική ποσότητα της LDL και φλεγμονώδη κύτταρα (δηλαδή, «αφρό κυττάρων»). Στην περίπτωση αυτή, η τοπική χαμηλή διατμητική τάση τοιχώματος στο περιβάλλον εξακολουθεί να υφίστανται, προωθώντας την περαιτέρω ανάπτυξη της πλάκας, για τη θέσπιση ενός αυτό-διδιωριζόμενου κύκλου μεταξύ της χαμηλής διατμητικής τάσης τοιχώματος, της αναδιαμόρφωσης των αγγείων και της φλεγμονής της πλάκας. Στις προκύπτουσες πλάκες ενέχει σημαντικός κίνδυνος ρήξης και στον σχηματισμό θρόμβου εγκυμονώντας οξεία αγγειακά σύνδρομα.

Η ανάπτυξη κάθε περίπτωση πλάκας που μόλις περιγράφηκε εξαρτάται κυρίως από την θέση της εντός του αγγειακού συστήματος και των γενετικών παραγόντων. Για παράδειγμα υπάρχει ενδεχόμενο ένας ασθενής να έχει και τις τρεις περιπτώσεις πλακών, ακόμα είναι πιθανό να βρίσκονται και οι τρεις τους στην ίδια αρτηρία (Chatzizisis et al., 2007)

2.1.9 Γενικοί τρόποι αντιμετώπισης – ειδικά για το bypass

Μετά από δεκαετίες μελετών για την αντιμετώπιση της αθηροσκλήρωσης έχουν αναπτυχθεί μηχανισμοί που αφορούν ολόκληρο το φάσμα της δημιουργίας της στένωσης, από την αρχική φάση του ινώδους αθηρώματος μέχρι την πλήρη απόφραξη και την πρόκληση καρδιακού επεισοδίου .

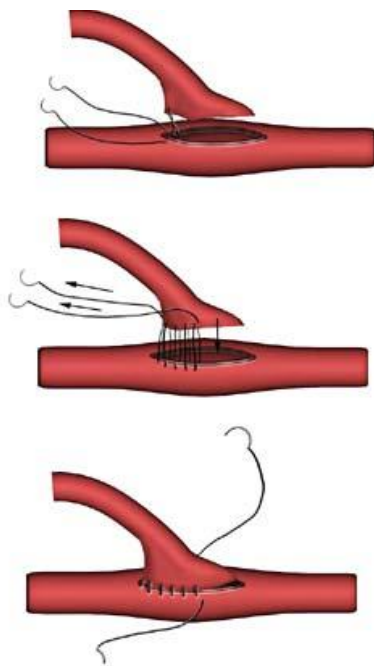
Μερικοί τρόποι αντιμετώπισης είναι : η φαρμακευτική αγωγή, η αθηρεκτομή όπου με διάφορες τεχνικές απομακρύνεται η αθηρωματική πλάκα, είτε με σωληνάκι που έχει προσαρμοστεί μπαλονάκι στην απόληξή του ώστε το φούσκωμα του να συνθλίβει το αθήρωμα της αρτηρίας, είτε με σβουράκια που ρινίζουν τα ασβεστωμένα αθηρώματα στα αγγεία. Μια μέθοδος αγγειοπλαστικής είναι η τοποθέτηση ενός αγγειακού νάρθηκα (stent), η μέθοδος αυτή ανοίγει την διατομή του αγγείου συμπιέζοντας την αθηρωματική πλάκα προς το τοίχωμα. Αυτές οι μέθοδοι εμφανίζουν μεγάλο ποσοστό επαναστένωσης καθώς δεν αντιμετωπίζουν τις αιτίες της πρόκλησης και ανάπτυξης της αθηρωματικής πλάκας. Για τις περιπτώσεις όπου η στένωση εμφανίζει ποσοστά απόφραξης μεγαλύτερα από 75% προτιμάται η πιο “παραδοσιακή” μέθοδος, το bypass όπου ουσιαστικά παρακάμπτεται η στένωση με την χρήση μοσχεύματος φυσικού ή τεχνητού.

Το σημείο της στένωσης προσδιορίζεται μέσω της στεφανιογραφίας. Τα φυσικά μοσχεύματα που χρησιμοποιούνται είναι είτε αρτηριακά είτε φλεβικά από κάποιο άλλο σημείο του καρδιαγγειακού συστήματος. Η επέμβαση συνηθίζεται να γίνεται με την καρδιά σταματημένη αφού πρώτα υποκατασταθεί με μηχανικό τρόπο, σπάνια αφήνεται η καρδιά σε λειτουργία. Τα αρτηριακά μοσχεύματα στατιστικώς παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα.

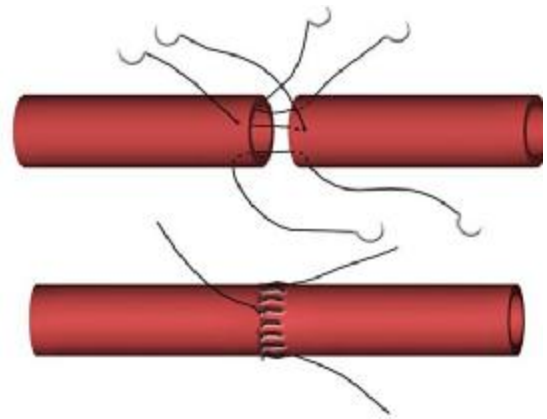
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σύνδεσης του μοσχεύματος στην μητρική αρτηρία. Η παρούσα μελέτη γίνεται για την πιο συνηθισμένη περίπτωση της end-to-side αναστόμωσης. Η τομή πρέπει να είναι λοξή συνήθως 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερη από την

διάμετρο του μοσχεύματος. Για να αποφευχθεί η επαναστένωση του μοσχεύματος είναι κρίσιμο στο τέλος του μοσχεύματος να έχει διαμορφωθεί σε σχήμα “σπάτουλας” και να έχει ομαλή κυρτή εμφάνιση.

Στην end-to-end τεχνική ο κεντρικός άξονας του μοσχεύματος ευθυγραμμίζεται με τον άξονα του μητρικού αγγείου.



Εικόνα 13 End to side bypass



Εικόνα 14 End-to-end bypass

Δυστυχώς, μετεγχειρητικά έχει καταγραφεί ένα σημαντικό ποσοστό αστοχίας των επεμβάσεων. Σχετίζεται με την μακροβιότητα των μοσχευμάτων της αναστόμωσης. Το κυρίαρχο αίτιο για την εμφάνιση ασθενειών στην περιοχή της συρραφής είναι οι χειρουργικοί τραυματισμοί (Loth et al., 2002) η ασυμβατότητα υλικών (Bassiouny et al., 1992, Wieslander et al., 1984) και η μη φυσιολογική διαμόρφωση των αιμοδυναμικών χαρακτηριστικών στην περιοχή.

2.2 ΑΙΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.2.1 Δυναμική ρευστού και ιξώδες

Στην παρούσα μελέτη θεωρείται το αίμα ασυμπύεστο Νευτώνιο ρευστό με σταθερή πυκνότητα $\rho=1,05 \text{ kg/l}$, διότι μελετάται η περιοχή της αορτής και όχι αγγείο με μικρότερη διάμετρο. Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα ρευστό έχουν καθορισμένη διεύθυνση και διαχωρίζονται σε δυνάμεις μάζας και σε δυνάμεις επιφάνειας. Οι δυνάμεις επιφάνειας ή αλλιώς τάσεις χωρίζονται σε εκείνες με διεύθυνση κάθετη στην εξεταζόμενη επιφάνεια που ονομάζονται πιέσεις και σε εκείνες εφαπτόμενες στην επιφάνεια μελέτες που ονομάζονται διατμητικές τάσεις. Η διατμητική τάση που ασκείται στο υγρό δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{du}{dy}$$

όπου: μ ο συντελεστής ιξώδους του ρευστού

du/dy η κλίση της ταχύτητας που εφάπτεται στο τοίχωμα

το μείον δηλώνει ότι η φορά της τάσης είναι αντίθετη στην φορά της ταχύτητας του ρευστού.

Εντός ενός κυλινδρικού αγωγού η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dv}{dr}$$

όπου: r συμβολίζεται η απόσταση από τον άξονα του αγωγού

v : η ταχύτητα της ροής

Το ιξώδες (μ) εκφράζει την δυσρευστότητα ενός ρευστού και η μονάδα μέτρησης είναι $\text{Pa}\cdot\text{sec}$ συχνά χρησιμοποιείται η μονάδα poise που είναι $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{sec}$.

2.2.2 Διατήρηση μάζας

Στη μόνιμη κατάσταση η ποσότητα της μάζας που εισέρχεται στο σύστημα στη μονάδα του χρόνου είναι ίση με αυτή η οποία εξέρχεται:

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt}$$

Επειδή το αίμα θεωρήθηκε ασυμπίεστο ρευστό η πυκνότητα του είναι σταθερή οπότε η παραπάνω έκφραση παίρνει την μορφή:

$$Q_1 = \frac{dV_1}{dt} = \frac{dV_2}{dt} = Q_2$$

Όπου: V_1 και V_2 οι όγκοι του ρευστού,

Q_1 και Q_2 οι παροχές στις αντίστοιχες θέσεις.

Η γενική μορφή της εξίσωσης της συνέχειας

$$Q = v_1 A = v_2 A$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

2.2.3 Διατήρηση της Ενέργειας

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας για ένα ρευστοδυναμικό σύστημα εκφράζεται από τη σχέση:

$$E_{ολ} = \hat{E} + PV + \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

όπου: η εσωτερική ενέργεια του υγρού συναρτήσει της θερμοκρασίας του

PV : η ενέργεια πίεσης

$\frac{1}{2}mv^2$: η κινητική ενέργεια

mgh : η δυναμική ενέργεια εξαιτίας της βαρύτητας

h : το ύψος του υπό μελέτη σημείου από το σημείο αναφοράς

Σε περίπτωση μόνιμης ροής, η ενέργεια ανά μονάδα όγκου διατηρείται σταθερή και βασισμένο σε αυτό υπάρχει η αρχή του Bernoulli που αναφέρει ότι σε μια μη ιξώδη ροή μη εξαρτώμενη από το χρόνο, αν το ρευστό είναι ασυμπίεστο κατά μήκος μια γραμμής ροής η ολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου παραμένει αμετάβλητη.

Η μαθηματική έκφραση αυτής της αρχής είναι η γνωστή εξίσωση του Bernoulli

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{σταθερό}$$

όπου P : η στατική πίεση

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2$: η δυναμική πίεση

ρgh η υδροστατική πίεση

Ακόμη, οι ενεργειακές απώλειες σε περίπτωση οριζόντιου αγωγού σταθερής διατομής υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\Delta h = f \rho \frac{L u_1^2}{d \cdot 2}$$

όπου: L το μήκος του αγωγού

d η διάμετρος του αγωγού

f ο συντελεστής τριβής Moody

u_1 η ταχύτητα και ρ είναι η πυκνότητα

2.2.4 Διατήρηση της ορμής (Εξίσωση Navier-Stokes)

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα

$$\Sigma F = ma = m \frac{du}{dt} = \frac{d(mu)}{dt}$$

όπου: ΣF το άθροισμα των δυνάμεων

m: η μάζα

a: η επιτάχυνση

Αν θεωρήσουμε ένα ασυμπίεστο ρευστό που ρέει με ταχύτητα v και εφαρμόσουμε το 2^ο νόμο του Νεύτωνα για τη συνιστώσα x , τότε θα καταλήξουμε στην εξίσωση Navier-Stokes, που συνδέει τις μεταβολές της πίεσης με τις ιξώδεις και αδρανειακές δυνάμεις, καθώς και με τις εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα, και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\rho \frac{\partial u_x}{\partial t} + \rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + F_x$$

Όπου: $\frac{\partial u_x}{\partial t}$: η χρονική επιτάχυνση

$\rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)$: οι αδρανειακές δυνάμεις

$-\frac{\partial P}{\partial x}$: οι δυνάμεις πίεσης

$\mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right)$: οι δυνάμεις ιξώδους

F_x : οι βαρυτικές δυνάμεις

Η λύση της εξίσωσης με βάση της τις κατάλληλες αρχικές και οριακές συνθήκες περιγράφει το πεδίο ταχυτήτων από το οποίο προκύπτουν οι εφαπτομενικές τάσεις στις οριακές επιφάνειες.

2.2.5 Αριθμός Reynolds

Ο χαρακτήρας της ροής εξαρτάται από τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων ως προς τις ιξώδεις δυνάμεις και ο λόγος αυτός εκφράζεται με τον αριθμό Reynolds και για κυκλικούς αγωγούς δίνεται από τη σχέση

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu}$$

όπου: ρ η πυκνότητα της ροής

μ ο συντελεστής ιξώδους

u η ταχύτητα της ροής

d : η διάμετρος του αγωγού

Στην περίπτωση που οι αδρανειακές δυνάμεις είναι ασθενείς και οι ιξώδεις δυνάμεις δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, τότε το ρευστό κινείται ομοιόμορφα και η ροή είναι στρωτή, ενώ όταν οι αδρανειακές δυνάμεις έχουν μεγάλο ρόλο στο φαινόμενο, εμφανίζονται διαταραχές με τη μορφή τοπικών περιδινήσεων και η ροή γίνεται τυρβώδης.

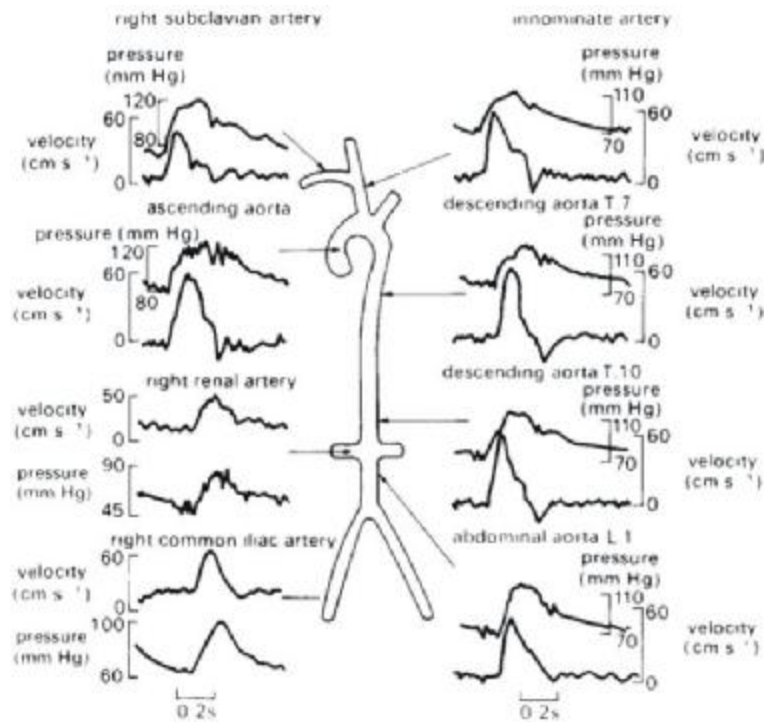
Η κρίσιμη τιμή μεταξύ των δύο περιπτώσεων έχει βρεθεί πειραματικά και είναι 2100 σε ευθύγραμμους αγωγούς με κυκλική διατομή. Στο κυκλοφορικό σύστημα του ανθρώπου ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται από 1-4000.

2.2.6 Νόμος του Poiseuille

Το κυκλοφορικό σύστημα θέτεται σε κίνηση εξαιτίας της καρδίας, που δημιουργεί διαφορά πίεσης με την διαστολή και την συστολή της. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα φαίνονται η κατανομή των πιέσεων και των ταχυτήτων σε σχέση με τον καρδιακό παλμό σε διάφορα σημεία του κυκλοφοριακού συστήματος.

Η διαφορά της πίεσης εξωθεί το αίμα στις αρτηρίες προκαλώντας τα προφίλ των ταχυτήτων σε μια εγκάρσια τομή να είναι παραβολικής μορφής. Αυτό οφείλεται στην

“συνθήκη μηδενικής ολίσθησης” και στην εσωτερική τριβή (δηλαδή στο ιξώδες) που αντιστέκεται στην ροή.



Εικόνα 15 Διακύμανση της πίεσης σε διάφορα σημεία της αορτής.

Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από το νόμο του Poiseuille

$$\Delta P = P_1 - P_2 = Q \frac{8\mu l}{\pi a^4}$$

Όπου: ΔP : η διαφορά πίεσης μεταξύ 2 σημείων του καρδιακού συστήματος

Q : η παροχή

μ : ο συντελεστής ιξώδους

l : η αξονική απόσταση μεταξύ των δύο σημείων

a : η ακτίνα του αγγείου

Ο νόμος του Poiseuille ισχύει μόνο κάτω υπό τις συνθήκες Νευτώνειου ρευστού, στρωτής και ανεξάρτητης του χρόνου ροής καθώς και ευθυτενούς κυλινδρικού αγωγού

με άκαμπτα τοιχώματα. Όταν η ροή αναπτυχθεί πλήρως η ταχύτητα σε ακτινική απόσταση r από τον άξονα δίνεται από τη σχέση

$$u_r = u_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)$$

όπου: u_0 η μέγιστη ταχύτητα της ροής

u_r η ταχύτητα στην ακτινική απόσταση r

a η ακτίνα του αγγείου

Η αντίσταση της ροής R ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς πίεσης ΔP ως προς τη ροή Q και άρα δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{P_1 - P_2}{Q} = \frac{8\eta l}{\pi a^4}$$

οπότε φαίνεται πως η αντίσταση της ροής εξαρτάται από τις διαστάσεις του αγγείου (μήκος και ακτίνα) και το ιξώδες του ρευστού

2.2.7 Οριακό στρώμα

Η περιοχή του ρευστού που επηρεάζεται από το τοίχωμα, δηλαδή η περιοχή στην οποία η ταχύτητα ροής του ρευστού μεταβάλλεται απότομα από τα ιξώδη φαινόμενα, ονομάζεται οριακό στρώμα. Τελικά, το οριακό στρώμα καταλαμβάνει ολόκληρο τον αυλό του σωλήνα και η ταχύτητα αποκτά παραβολική κατανομή.

Από αυτό το σημείο και μετά η παραβολική μορφή της ταχύτητας παραμένει αμετάβλητη και η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη και η περιοχή από την είσοδο του αγωγού μέχρι το σημείο έναρξης της πλήρους ανεπτυγμένης ροής ονομάζεται περιοχή εισόδου. Η περιοχή εισόδου εκτείνεται σε απόσταση L_e , η οποία για στρωτή ροή δίνεται από τη σχέση :

$$L_{e_{στρ}} = 0,03dRe$$

όπου: d η διάμετρος του αγωγού

Re ο αριθμός Reynolds

η οποία είναι ικανοποιητική για αριθμούς $10 < Re < 2500$. Για $Re < 1$ το μήκος εισόδου προσεγγίζει τη διάμετρο του αγωγού $Le \approx d$ στρ. Για $Re > 2500$ έχουμε τυρβώδη ροή και το μήκος εισόδου είναι μικρότερο από το αντίστοιχο της στρωτής και δίνεται από τη σχέση

$$Le_{\text{τυρβ}} = 0,693dRe^{1/4}$$

Το μήκος της περιοχής εισόδου είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος, γιατί στην περιοχή που ορίζει οι μεταβολές της ταχύτητας dv/dr είναι μεγάλες και συνεπώς η διατμητική τάση κοντά στα τοιχώματα είναι ιδιαίτερα υψηλή, κυρίως στην περίπτωση της τυρβώδους ροής και άρα είναι αυξημένη η πιθανότητα εμφάνισης φθορών στις περιοχές των εκφύσεων των αγγείων ή των αναστομών τους με τα διάφορα μοσχεύματα.

Το εύρος της οριακής στοιβάδας δ υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\frac{\delta}{\chi} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}}$$

όπου χ : η απόσταση από την είσοδο του αγωγού

Re_x : ο αντίστοιχος αριθμός Re

2.2.8 Ο Αριθμός Womersley

Το αίμα τίθεται σε κίνηση από την παλμική λειτουργία της καρδιάς, για αυτό η ροή του δεν εμφανίζει σταθερά χαρακτηριστικά ανεξάρτητα του χρόνου. Το ροϊκό πεδίο συνεχώς μεταβάλλεται συνεπώς στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν ισχύει ο νόμος του Poiseuille. Ο Womersley έχει παρουσιάσει μια σημαντική ανάλυση των χαρακτηριστικών της

παλμικής ροής. Παρόλο που ισχύει μόνο για ευθύγραμμους κυκλικής διατομής αγωγούς με στρωτή ροή, δίνει μια γεύση της πολυπλοκότητας που εμφανίζει η παλμική κίνηση. Το κύριο μέγεθος που περιγράφει την αστάθεια της ροής και υπεισέρχεται στην όλη μελέτη είναι ο αδιάστατος αριθμός Womersley. Προκύπτει από την διαστατική ανάλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για μη μόνιμη ροή και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha = r \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = r \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\nu}}$$

Όπου: r η ακτίνα του αγωγού

f: η συχνότητα του παλμού

ν : το κινηματικό ιξώδες

Ουσιαστικά ο αριθμός Womersley είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους, δηλαδή είναι το ανάλογο του αριθμού Reynolds στην παλμική ροή.

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με τους αριθμούς Reynolds και Womersley για διάφορα σημεία του κυκλοφοριακού συστήματος. Οι μέγιστοι συστολικοί αριθμοί Reynolds υπερβαίνουν το 2300 στην αορτή και στην πνευμονική αρτηρία, και έχουν παρατηρηθεί κάποια στοιχεία μετάβασης σε τύρβη. Οι τιμές στον πίνακα είναι τυπικές

Man (70 kg, 1.8 m2)

Systemic Vesse	α	Velocity (cm/s)	Re
Ascending aorta	21	18 (112/0)*	1500 (9400)*
Abdominal aorta	12	14 (75/0)	640 (3600)
Renal artery	4	40 (73/26)	700 (1300)
Femoral artery	4	12 (52/2)	200 (860)
Femoral vein	7	4	104
Superior vena cava	15	9 (23/0)	550 (1400)
Inferior vena cava	17	21 (46/0)	1400 (3000)
Pulmonary vessels			
Main artery	20	19 (96/0)	1600 (7800)

Πίνακας 1 Οι μέσοι και οι μέγιστοι αριθμοί Reynolds στον άνθρωπο όπως επίσης και οι μέσες/μέγιστες και ελάχιστες ταχύτητες όπως και τον αριθμό Womersley. (Womersley. Milnor WR. 1989. Hemodynamics, 2d ed, p 148, Baltimore, Williams and Wilkins)

για ανθρώπους σε ανάπαυση. Υπογραμμισμένα, τονίζονται οι τιμές του αριθμού Womersley ($\alpha=12$ και 21) Reynolds ($Re=640$ και 1500) για την αορτή, περιοχή όπου μελετάται.

Για τις χαμηλές τιμές του αριθμού Womersley κυριαρχούν οι δυνάμεις ιξώδους και οι κατανομές της ταχύτητας είναι παραβολικές, με την ταχύτητα στο κέντρο του αγγείου να μεταβάλλεται περιοδικά κατά την διάρκεια του κύκλου. Ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 10 κυριαρχούν οι μη μόνιμες δυνάμεις αδράνειας και τα προφίλ των ταχυτήτων είναι ουσιαστικά επίπεδα (McDonald 1974).

Για μικρές τιμές της παραμέτρου κυριαρχούν οι δυνάμεις ιξώδους και οι κατανομές της ταχύτητας είναι παραβολικές με την κεντρική ταχύτητα να μεταβάλλεται περιοδικά κατά την διάρκεια του κύκλου, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 10 κυριαρχούν οι μη μόνιμες δυνάμεις αδράνειας και οι κατανομές ταχύτητας είναι ουσιαστικά επίπεδες (McDonald 1974).

2.2.9 Αποκόλληση της ροής

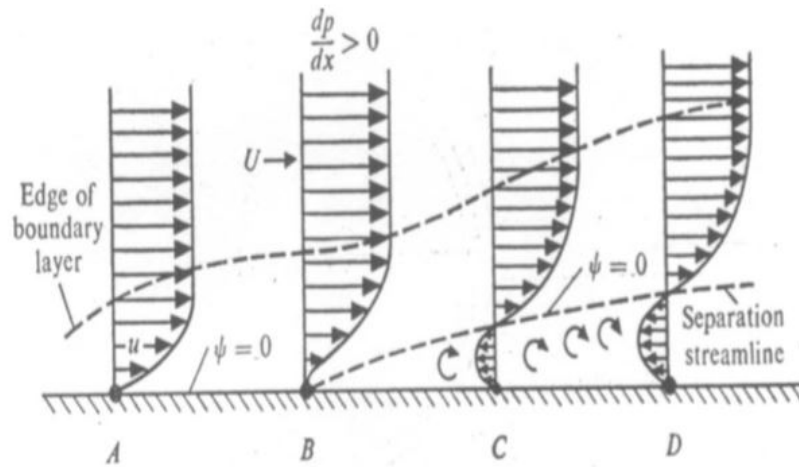
Η αποκόλληση της ροής είναι ένα σημαντικό ροϊκό φαινόμενο που φαίνεται να επιδράει στην ανάπτυξη της αθηρωματικής πλάκας. Παρατηρείται σε περιοχές όπως στις εκφύσεις των αρτηριών και στην περιοχή της αναστόμωσης σε διάφορα μοσχεύματα. Η αποκόλληση της ροής οφείλεται σε δυο παράγοντες.

Ο πρώτος παράγοντας είναι η απότομη εκτροπή της διεύθυνση της ροής (στην περίπτωση του πειράματος η 90° αναστόμωση) όπου αν η αδράνεια της ροής είναι αρκετά υψηλή τότε το ρευστό αδυνατεί να ανταποκριθεί γρήγορα στην αλλαγή της διεύθυνσης ώστε να ακολουθήσει την μεταβολή της γεωμετρίας.

Ο δεύτερος παράγοντας είναι η ανάπτυξη ανάδρομης διαφοράς πίεσης, όπου η πίεση αυξάνεται κατά την διεύθυνση της κίνησης του ρευστού. Στην περίπτωση αυτή η πίεση

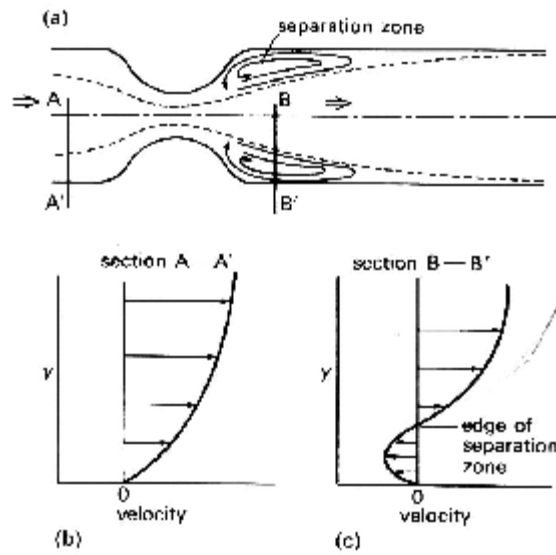
και η διατμητική τάση του τοιχώματος δρουν αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής, με αποτέλεσμα την απότομη ελάττωση της ορμής του ρευστού και την απότομη αύξηση του εύρους της οριακής στοιβάδας.

Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο κοντά στα τοιχώματα του αγωγού όπου η ταχύτητα λόγω οριακού στρώματος είναι μηδενική. Η περιοχή αυτή ονομάζεται διαχωρισμού της ροής. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η διαδικασία αυτή.



Εικόνα 16 Σχηματική απεικόνιση αποκόλλησης της ροής

Μέσα στην περιοχή αυτή το ρευστό παγιδεύεται και εκτελεί ανάδρομη με αποτέλεσμα την δημιουργία δευτερεύουσας ροής. Στις περιοχές αυτές, η μοριακή ανταλλαγή με την κύρια ροή είναι πολύ βραδεία και περιορισμένη. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο παρακάτω σχεδιάγραμμα για το ροϊκό πεδίο μετά από μια στένωση.



Εικόνα 17 Στένωση, αποκόλληση ροής

Στην παρακάτω οπτικοποίηση φαίνεται ξεκάθαρα η αποκόλληση της ροής αμέσως μετά την στένωση που η διατομή του αγωγού αυξάνεται απότομα.



Εικόνα 18 Οπτικοποίηση της αποκόλλησης ροής σε στένωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η προσπάθεια μοντελοποίησης του ανθρώπινου οργανισμού παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα. Βασικά στοιχεία που προσθέτουν δυσκολίες είναι η καρδιακή λειτουργία και η γεωμετρία των αρτηριών της στένωσης και της αναστόμωσης. Εξίσου η προσομοίωση των ροϊκών συμπεριφορών του αίματος εγκυμονεί κινδύνους καθώς σε μικροσκοπικό επίπεδο δεν είναι ομογενές ρευστό. Για την μελέτη της ροής του αίματος στις αρτηρίες αναγκαστικά θα ακολουθηθούν οι παρακάτω παραδοχές που έχουν γίνει αποδεκτές και από προηγούμενους ερευνητές.

- Το αίμα θεωρείται ασυμπίεστο μονοφασικό νευτώνειο ρευστό. Η προσομοίωση του αίματος επιτυγχάνεται με τη χρήση ομογενοποιημένου διαλύματος νερού-γλυκερίνης σε συγκεκριμένη ογκομετρική συγκέντρωση και θερμοκρασία ώστε να παρουσιάζει το δυναμικό ιξώδες του αίματος.
- Η στένωση είναι κατασκευασμένη αξονοσυμμετρικά.
- Η αρτηρία είναι ευθύς αγωγός με σταθερά τοιχώματα.

3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ

ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1.1 Κατασκευή της περιοχής ενδιαφέροντος

Η διάμετρος του μοντέλου αρτηρίας επιλέχτηκε να προσομοιάζει μια πραγματική ανθρώπινη αορτή. Η ανθρώπινη αορτή είναι περίπου της τάξης της μιας ίντσας, οπότε η

διάμετρος των αρτηριών κατασκευάστηκε στα 24mm. Επίσης, η χειρουργική αντιμετώπιση του φαινομένου επιλέγεται από τους γιατρούς στην περίπτωση που η στένωση έχει τέτοια έκταση ώστε να αποφράσσει το 70 με 75% της αρτηρίας. Ακριβώς για αυτό το λόγο η στένωση κατασκευάστηκε να αποτελεί το 75% της αρχικής διατομής της αρτηρίας. Η διατομή ορίζεται ως:

$$A = \pi r^2$$

Έτσι,

$$A_{\sigma\tau} = \frac{1}{4} A_0$$

$$\frac{A_0}{A_{\sigma\tau}} = \frac{\pi r_0^2}{\pi r_{\sigma\tau}^2} = 4 \leftrightarrow r_{\sigma\tau} = \frac{r_0}{2}$$

Όπου $A_{\sigma\tau}$ η διατομή της στένωσης και A_0 η αρχική διατομή του αγωγού.

r_0 και $r_{\sigma\tau}$ είναι οι ακτίνες πριν την στένωση και στην στένωση, αντίστοιχα.

Όπως υπολογίζεται από τις παραπάνω εξισώσεις η διάμετρος στο στενότερο σημείο της στένωσης θα είναι η μισή της αρχικής δηλαδή 12mm. Το μήκος της στένωσης αποφασίστηκε να είναι ίσο με την αρχική διατομή του αγωγού και ίσο με 24mm. Το μήκος της στένωσης που αποφασίστηκε δεν είναι τόσο μεγάλο σε σχέση με αντίστοιχες έρευνες, αλλά δόθηκε έμφαση η συμπεριφορά του ρευστού σε ένα σχετικά μικρό μήκος το οποίο είναι πιο επικίνδυνο για την πραγματική αορτή ενός οργανισμού.

Για την αποφυγή προβλημάτων κατά την μοντελοποίηση, δηλαδή την εμφάνιση χαρακτηριστικών που δεν παρουσιάζονται στον ανθρώπινο οργανισμό όπως για παράδειγμα μια τυρβώδης ροή ή την παρουσία φυσαλίδων αέρα που θα επηρεάζουν το ροϊκό πεδίο και θα δυσκόλευαν την διαδικασία της οπτικοποίησης προσπαθήθηκε η ομαλοποίηση της ροής πριν είσοδο της στένωσης και της αναστόμωσης με την προσθήκη ενός ευθύγραμμου τμήματος 60cm.

Η διαδικασία της μεθόδου της οπτικοποίησης θέτουν στην διάταξη μερικές βασικές αρχές λειτουργίας. Απαραίτητο ήταν οι ανοιχτοί οπτικοί δρόμοι για την οπτική επαφή της κάμερας και του laser, οπότε απαιτούνταν διάφανες επιφάνειες στις περιοχές που θα καταγραφεί το ροϊκό πεδίο. Κρίσιμο ήταν η αποφυγή των διαθλάσεων λόγω των καμπύλων επιφανειών των αγωγών, στην περιοχή της ένωσης του μητρικού αγωγού με τον παρακαμπτήριο δεν καταφέρθηκε να εξαλειφθούν πλήρως οι διαθλάσεις. Σε αρκετές φωτογραφίες οι ροϊκές γραμμές εμφανίζουν ένα “σκαλοπάτι” σε αυτό το σημείο. Ως υλικό των αγωγών επιλέχθηκε το πλεξιγκλάς.

Για τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά: επιλέχθηκε ο λόγος των διαμέτρων των δυο αρτηριών να είναι μονάδα, δηλαδή ο παρακαμπτήριος κλάδος να έχει και αυτός διάμετρο 24 mm, και η γωνία μεταξύ των δυο κλάδων να σχηματίζει ορθή γωνία. Για την καμπύλη της στένωσης η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε από την βιβλιογραφία. Ακολουθεί η μορφή της εξίσωσης έπειτα από τις απαραίτητες απλοποιήσεις και αντικαταστάσεις των παραμέτρων με τα δεδομένα που έχουν επιλεγεί.

$$F(x) = x_0 \pm 3(\cos(\frac{\pi\chi}{12}))$$

Όπου x_0 το σημείο για την τοποθέτηση της εκάστοτε γεωμετρικής εξίσωσης όπου εξαρτάται από την θέση και την γεωμετρία της στένωσης.

Για τον τελικό σχεδιασμό της στένωσης προέκυψαν οι παρακάτω εξισώσεις σύμφωνα με τις οποίες κατασκευάστηκε η στένωση

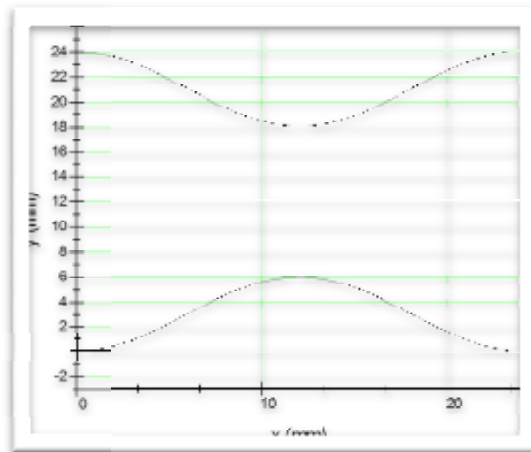
$$F_1(x) = 21 + 3(\cos(\frac{\pi\chi}{24}))$$

και

$$F_2(x) = 3 - 3(\cos(\frac{\pi\chi}{24}))$$

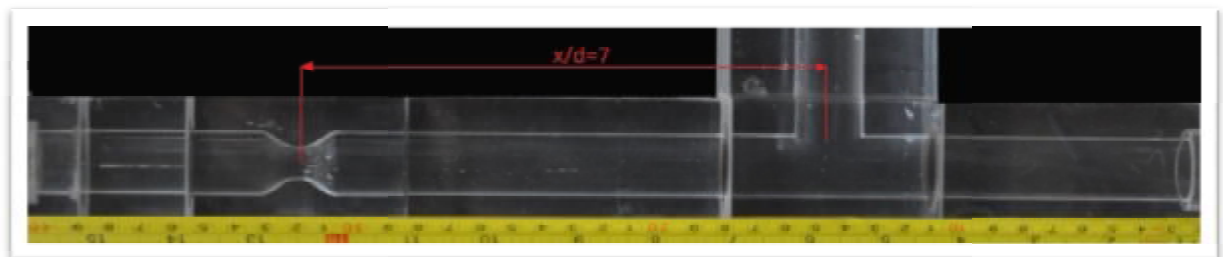
Όπου το χ_0 αντικαταστάθηκε με 21 στην πρώτη και 3 στην δεύτερη, έτσι ώστε για $F_1(\mathbf{0})$ και $F_2(\mathbf{0})$ να προκύπτουν οι τιμές $F_1(\mathbf{0}) = 24$ και $F_2(\mathbf{0}) = 0$. Οι τιμές αυτές είναι η αρχή της στένωσης, όπου έχουμε διάμετρο 24 mm.

Όπως γίνεται αντιληπτό η αρχή των αξόνων είναι στην είσοδο της στένωσης, αφού το x αντιπροσωπεύει το οριζόντιο μήκος και η συνάρτηση $F(x)$ την κάθετη συνιστώσα. Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η μορφή της στένωσης.



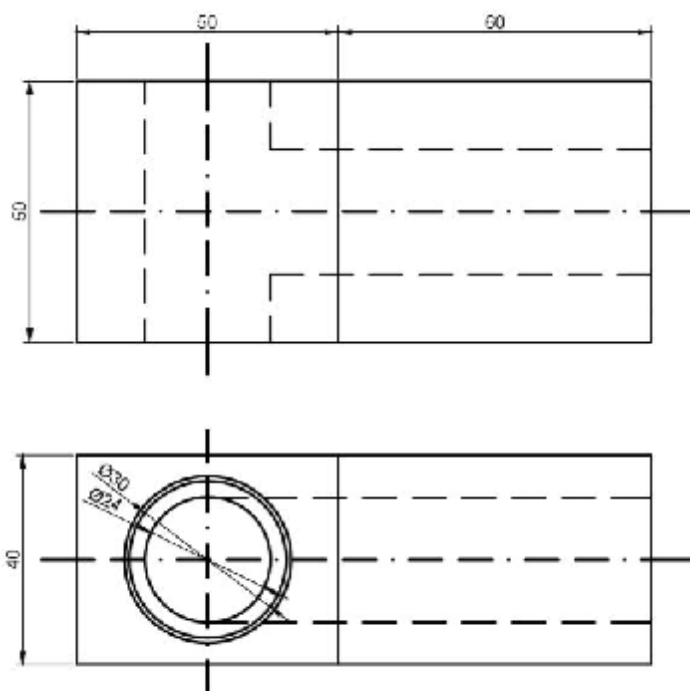
Εικόνα 19: Μορφή στένωσης

Η κατασκευή των αγωγών στις περιοχές ενδιαφέροντος έγινε από αρθρωτά κομμάτια ευθύγραμμων τμημάτων και την περιοχή της στένωσης από πλεξιγκλάς σε μηχανή CNC. Η επιλογή των αρθρωτών κομματιών ενάντια στο ενιαίο κομμάτι έγινε για να υπάρχει ευχέρεια στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ στένωσης και αναστόμωσης για την διεξαγωγή συγκριτικών πειραμάτων. Αυτή η επιλογή είχε μια επίπτωση, στα σημεία της ένωσης των μπλοκ, οι οριζόντιες εξωτερικές επιφάνειες δυσκολεύουν το φύλλο φωτός να διέλθει δημιουργώντας μια μικρή δυσδιάκριτη περιοχή στις φωτογραφίες. Η απόσταση αυτή για την παρούσα εργασία καθορίστηκε σταθερή και ίση με 7 διαμέτρους (168mm). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται βαθμονομημένο το κατασκευασμένο μοντέλο και σχέδια με τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη.

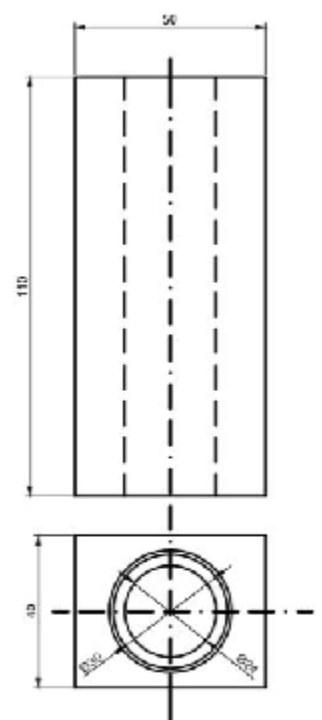


Εικόνα 20: περιοχή ενδιαφέροντος

Παρακάτω φαίνονται τα σχέδια για το τμήμα της αναστόμωσης και του ευθύγραμου τμήματος μεταξύ στένωσης -αναστόμωσης. Τα αρθρωτά μέλη κομμάτια διαθέτουν ένα λάστιχο για στεγανοποίηση όπως φαίνεται παραπάνω. Η ελαφριά συμπίεση διαστέλλει το λάστιχο και επιτυγχάνεται στεγανοποίηση.

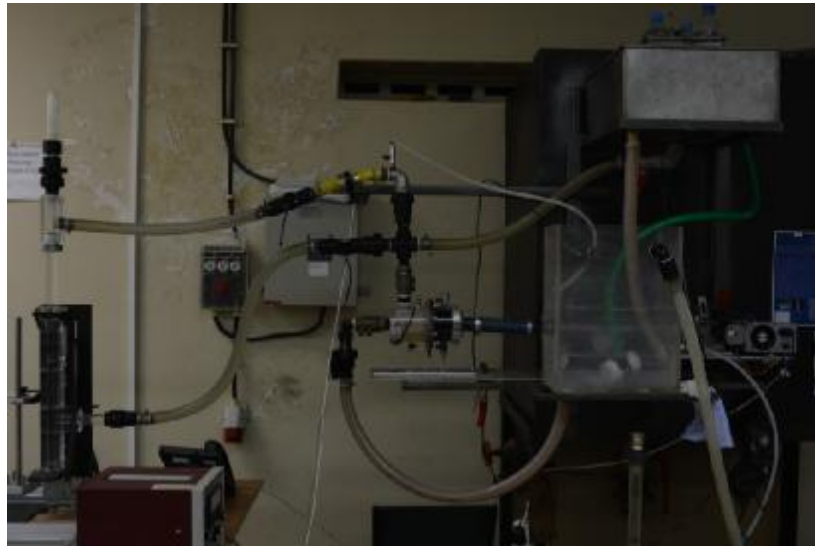


Εικόνα 21: Μπλοκ αναστόμωσης

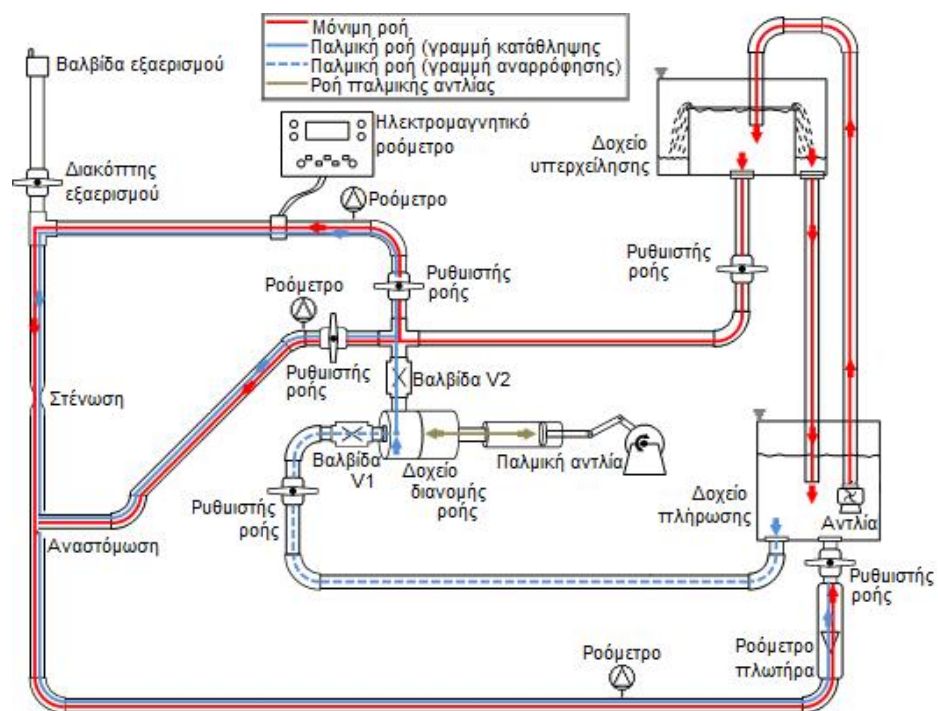


Εικόνα 22: Ευθύγραμμο τμήμα

3.1.2 Σχεδιασμός και Κατασκευή Συνολικής Διάταξης



Εικόνα 23 Συνολική πειραματική διάταξη



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

Στο προηγούμενο σχεδιάγραμμα φαίνεται η απεικόνιση της πειραματικής διάταξης καθώς και τον επιμέρους τμημάτων της. Διαγράφεται η διαδρομή του ρευστού και για τις δυο λειτουργίες.

Τα τμήματα της διάταξης είναι:

- Μία υποβρύχια αντλία πλήρωσης
- Τρία δοχεία, ένα δοχείο πλήρωσης και 2 δοχεία υπερχειλίσης. Τα δοχεία υπερχειλίσης χρησιμοποιούνται για να μένει σταθερή η διαφορά πίεσης στην διάταξη.
- Δύο ανεπίστροφες βαλβίδες, με σκοπό να μην επιτρέπουν στο ρευστό να επιστρέφει μέσα στο δίκτυο.
- Τέσσερις ρυθμιστές της ροής για ευελιξία στην ρύθμιση των παροχών.
- Ένα Ηλεκτρομαγνητικό Ροόμετρο.
- Τρία ροόμετρα
- Ένα ροόμετρο πλωτήρα , για την πιο γρήγορη μέτρηση της συνολικής παροχής
- Μια παλμική αντλία, για την προσομοίωση της παλμικής ροής
- Ένα δοχείο διανομής της ροής
- Οι υπόλοιποι αγωγοί πέρα από την περιοχή της καταγραφής είναι πλαστικοί σωλήνες κυκλικής διατομής μιας ίντσας ενισχυμένοι περιμετρικά με σύρμα ώστε να μην μεταβάλλεται η εσωτερική τους διατομή για τις μεγάλες πιέσεις.

3.1.3 Λειτουργία της Διάταξης

Η πειραματική κατασκευή είναι ένα κλειστό σύστημα με την δυνατότητα συνεχής και παλμικής λειτουργίας. Στην συνεχή ροή το ρευστό ακολουθεί την ακόλουθη διαδρομή,

αρχικά τοποθετείται στη δεξαμενή πλήρωσης από εκεί με την συμβολή της υποβρύχιας αντλίας το ρευστό ανεβαίνει στο εσωτερικό τμήμα της πάνω δεξαμενής.

Η δεξαμενή αυτή απαρτίζεται από δυο δοχεία. Το εσωτερικό που πρέπει να είναι συνεχώς γεμάτο για να εξασφαλίζεται η σταθερή ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού. Αφού το δοχείο υπερχειλίσσης πρέπει να είναι πάντοτε γεμάτο θα πρέπει να ξεχειλίζει συνεχώς και το ρευστό που υπερχειλίζει από το εσωτερικό παραλαμβάνεται από το εξωτερικό δοχείο για να επιστρέψει στην δεξαμενή πλήρωσης.. Το μανομετρικό της αντλίας όπως είναι λογικό είναι μεγαλύτερο από το απαιτούμενο.

Από το εσωτερικό δοχείο με φυσική ροή, που δημιουργείται εξαιτίας της διαφοράς των ελεύθερων επιφανειών στο δοχείο υπερχειλίσσης και στην δεξαμενή πλήρωσης, το ρευστό διερχόμενο από τους ρυθμιστές της ροής διακλαδίζεται στους δυο κλάδους, τον μητρικό κλάδο που έχει την στένωση και τον παρακαμπτήριο κλάδο. Επιλέχθηκε η προαναφερθείσα διάταξη με τις δυο δεξαμενές για την ομαλότερη ροή ως την είσοδο των περιοχών ενδιαφέροντος. Με αυτόν τον τρόπο οι τιμές των ταχυτήτων που εμφανίζονται στις περιοχές αυτές είναι αρκετά κοντά στις επιθυμητές. Οπότε δεν είναι απαραίτητες μεγάλες παρεμβάσεις στο κύκλωμα μέσω των ρυθμιστών ροής.

Το ρευστό πριν εισέλθει στην περιοχή της στένωσης και της αναστόμωσης έχει διέλθει από ένα ευθύγραμμο τμήμα 60 cm για να προλάβει να αποκατασταθεί η ομαλοποιημένη ροή. Μετά την περιοχή του ενδιαφέροντος το ρευστό επιστρέφει διαμέσου ενός ροόμετρου τύπου πλωτήρα στην δεξαμενή πλήρωσης.

Για την παλμική λειτουργία, το ρευστό ακολουθεί διαφορετική διαδρομή. Η υποβρύχια αντλία δεν στέλνει ρευστό στο δοχείο υπερχειλίσσης αλλά το έμβολο στην διαδρομή της διαστολής τραβάει ρευστό στο δοχείο διανομής. Το δοχείο διανομής χωρίζεται σε δυο τμήματα από μια ελαστική μεμβράνη. Στο ένα βρίσκεται το ρευστό και στο δεύτερο βρίσκεται λάδι για την καλύτερη λίπανση του εμβόλου. Η εναλλαγή της πίεσης που δημιουργεί η κίνηση του εμβόλου μεταφέρεται μέσω του λιπαντικού και της μεμβράνης

στο ρευστό. Στην διαδρομή της συστολής το ρευστό εκτοπίζεται προς το κύκλωμα και στην διαδρομή της διαστολής το ρευστό μεταφέρεται από την δεξαμενή πλήρωσης στο δοχείο διανομής. Ο όγκος του ρευστού που εκτοπίζεται είναι ίσος με τον όγκο του του εμβόλου. Δυο ανεπίστροφες βαλβίδες ρυθμίζουν την κατεύθυνση της ροής, έχοντας μια πριν και μια μετά από το δοχείο διανομής εμποδίζεται την αντίθετη κίνηση του ρευστού κατά την κίνηση του εμβόλου. Βέβαια οι βαλβίδες αυτές (όπως συμβαίνει και στις ανθρώπινες) δεν εμποδίζουν πλήρως την αντίθετη κίνηση ώστε στο παλμογράφημα παρατηρείται μια μικρή περιοχή αντίθετης κίνησης όταν βρισκόμαστε στην διαστολική φάση. Μετά την δεύτερη ανεπίστροφη βαλβίδα το ρευστό διακλαδίζεται και ακολουθεί την διαδρομή που περιγράφηκε στην μόνιμη κατάσταση επιστρέφοντας στο δοχείο πλήρωσης.

Παρακάτω παραθέτονται μερικές φωτογραφίες και επεξηγήσεις για τα επιμέρους τμήματα της πειραματικής διάταξης.



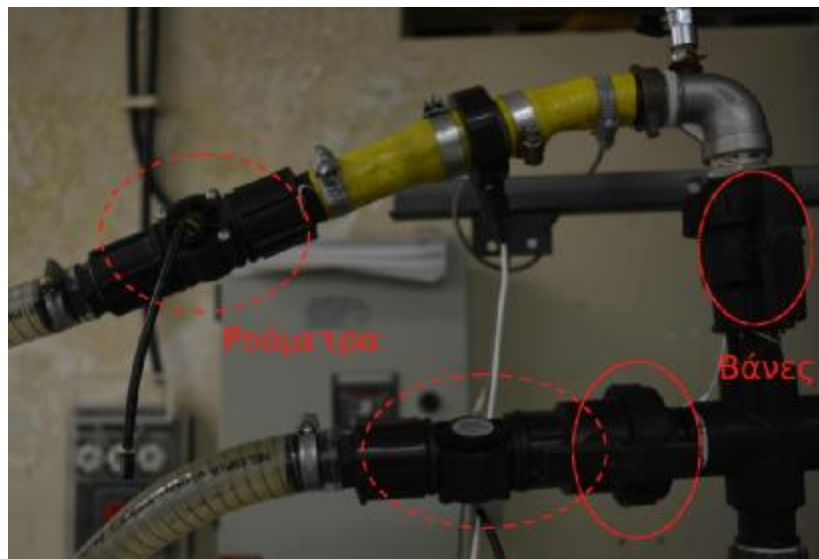
Εικόνα 25 Δεξαμενή πλήρωσης



Εικόνα 26 Δοχείο υπερχειλίσσης

Τα τέσσερα μπουκάλια στο εσωτερικό δοχείο υπερχειλίσσης έχουν τοποθετηθεί για την μείωση του όγκου του ρευστού, ώστε να απαιτείται λιγότερο ρευστό για την λειτουργία.

Ρυθμιστές ροής (βάνες) στους δυο κλάδους αμέσως μετά είναι τοποθετημένα **δυο ροόμετρα**. Επειδή δεν μπορούσαν να μετρήσουν κάτω από 2l/min παροχή χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο για τον καθορισμό της αναλογίας παροχών στο παλμικό.



Εικόνα 28 Ροόμετρα και ρυθμιστές ροής



Εικόνα 27 Ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο..

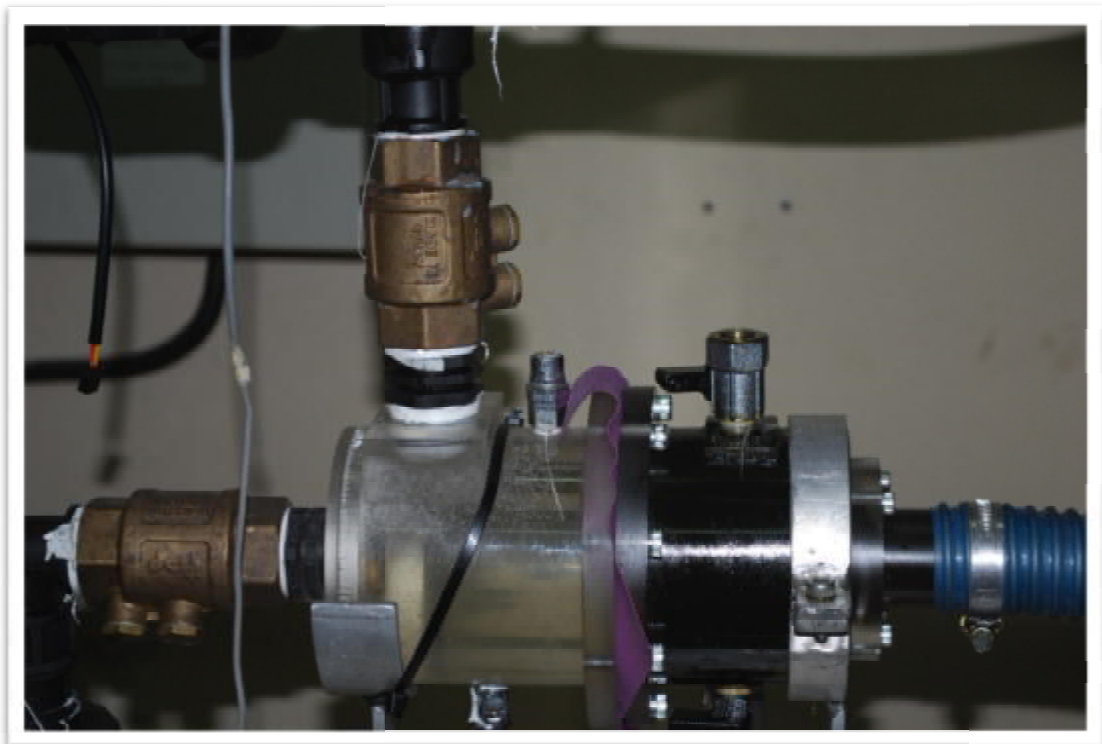
Φαίνονται συνδεδεμένα το καλώδιο του αισθητηρίου και οι δυο καλώδια για γειώσεις.

3.1.4 Παλμική Αντλία

Η προσομοίωση της καρδιακής λειτουργίας επιτεύχθηκε μέσω της παλμικής αντλίας που κατασκευάστηκε αποκλειστικά για αυτήν την λειτουργία. Αποτελείται από ένα κύλινδρο ο οποίος περιέχει το έμβολο. Το έμβολο συνδέεται με έναν βηματικό κινητήρα ο οποίος καθοδηγείται μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η συχνότητα του παλμού ρυθμίστηκε σε 60 παλμούς το λεπτό, δηλαδή περίπου τη συχνότητα της καρδιάς σε χαλαρή ένταση. Η διάμετρος του κυλίνδρου είναι 40 mm και το έμβολο είναι ρυθμισμένο να κινείται 48 mm εντός του κυλίνδρου ώστε να εκτοπίζονται 60 cc σε κάθε παλμό όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$V = \frac{\pi h d^2}{4} = \frac{\pi 48 \times 40^2}{4} = 60 \text{ cc/cycle}$$

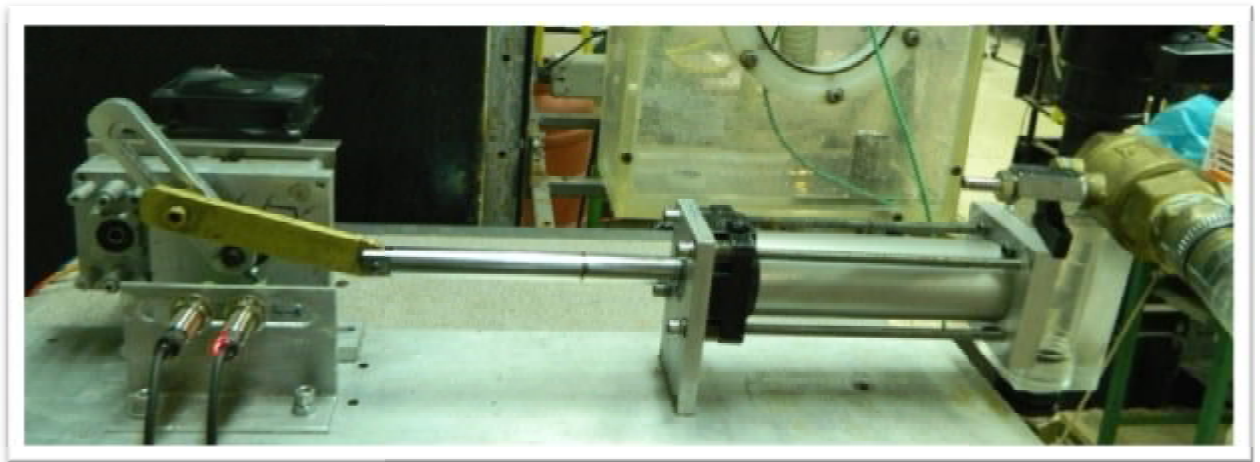
Ακολουθούν φωτογραφίες για την καλύτερη απεικόνιση και η περιγραφή του τρόπου όπου καθοδηγείται η κίνηση του εμβόλου από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 29 Δοχείο διανομής ροής

Στο Δοχείο διανομής ροής για τη λειτουργία της παλμικής αντλίας. Φαίνονται οι δυο περιοχές, το λάδι και το ρευστό λειτουργίας.

Εμβολοφόρος παλμική αντλία, φαίνεται ο κύλινδρος, οι φωτοδίοδοι, ο κινητήρας και ο ανεμιστήρας που λειτουργεί για την ψύξη του.



Εικόνα 31 Εμβολοφόρος αντλία πίσω όψη



Εικόνα 30 Εμβολοφόρος αντλία μπροστά όψη

3.1.5 Έλεγχος μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή

Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθοδηγείται ο βηματικός κινητήρας, δίνονται οι εντολές της παύσης και της έναρξης. Μέσω δυο καρτών, μια για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κινητήρα και την άλλη για τον έλεγχο δυο φωτοδίοδων που είναι τοποθετημένες στα άκρα της διαδρομής του εμβόλου για την οριοθέτηση της κίνησης του, ώστε ο όγκος του ρευστού που εκτοπίζεται να είναι προκαθορισμένος (60cc /pulse). Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το Labview. Στον υπολογιστή καταγράφεται επίσης ο παλμός από το ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο για την καλύτερη αποτύπωση.



Εικόνα 32 Το Hardware



Εικόνα 33 Η επιφάνεια ελέγχου



Εικόνα 34 Ηλεκτρικός βηματικός κινητήρας



Εικόνα 35 Σύνδεση κινητήρα με το έμβολο

3.1.6 Το Laser

Το laser που χρησιμοποιήθηκε στην διάταξη είναι της εταιρίας OdiForce με τα εξής χαρακτηριστικά:

Μήκος κύματος	Τάση Λειτουργίας	Συχνότητα	Οπτική ισχύς	Διάμετρο ακτίνας
532μ (πράσινο)	12 V	0-20kHz	80-100 mW	4 mm

Για την δημιουργία του επίπεδου φύλλου φωτός μεσολάβησε ένας τριχοειδής σωλήνας υλικού quartz διαμέτρου 4mm. Το λέιζερ ήταν στερεωμένο σε έναν βραχίονα που

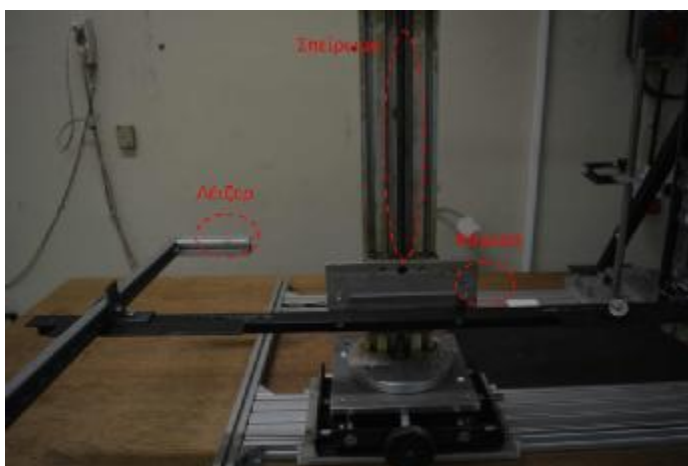


Εικόνα 38 Laser



Εικόνα 37 Κυλινδρικός φακός

στηριζόταν πάνω σε έναν μηχανισμό που με σπείρωμα ρυθμιζόταν το ύψος. Η κάμερα ήταν προσαρτημένη και αυτή πάνω σε αυτόν τον μηχανισμό. Οπότε υπήρχε η δυνατότητα ταυτόχρονης ρύθμισης τους ύψους του λέιζερ και της κάμερας



Εικόνα 36 Στήριξη κάμερας και laser

3.1.7 Η Κάμερα και φακός

Χρησιμοποιήθηκε η κάμερα της Nikon D5200,



Είναι τύπου DSLR και μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά της φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ανάλυση φωτογραφίας	Ανάλυση Βίντεο	Ευαισθησία ISO	Εύρος ταχύτητας κλείστρου	Video frame rate
6000 x 4000 pixels	1080p	100 - 6400	1/4000 - 30 sec	25 fps

Η κάμερα παρείχε την δυνατότητα χειροκίνητης εστίασης, γεγονός κρίσιμο για την δυνατότητα εστίασης στο κεντρικό επίπεδο του αγωγού. Η αυτόματη εστίαση πιθανότατα θα εστίαζε σε μη επιθυμητό επίπεδο. Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Nikon AF-S DX NIKKOR 18-105mm



3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ

Όπως έχει προαναφερθεί έγινε η παραδοχή πως το αίμα θεωρείται ασυμπίεστο μονοφασικό νευτώνειο ρευστό. Το αίμα δεν είναι ομοιογενές μίγμα και μάλιστα διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο με αποτέλεσμα να αλλάζει και το ιξώδες του. Για τις αντίστοιχες έρευνες που έχουν προηγηθεί πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τις παρακάτω κοινές τιμές για το ιξώδες (3,35 cP) και την πυκνότητα (1,06 kgf/l). Αυτά τα χαρακτηριστικά προσεγγίστηκαν με ένα ομογενοποιημένο μίγμα νερού γλυκερίνης, αυτή την προσομοίωση έχουν χρησιμοποιήσει αρκετοί άλλοι ερευνητές. Η γλυκερίνη ήταν καθαρή κατά 99,7%. Από τις φυσικές ιδιότητες της γλυκερίνης και των διαλυμάτων της βρίσκουμε τον παρακάτω πίνακα για το ιξώδες του μίγματος γλυκερίνης ανάλογα με την θερμοκρασία.

Glyc. % Wt.	Temperature (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0*	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	—	—	—
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	—	—	—
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	—	—
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.29
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.88	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.88	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	118	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.84	5.13	4.03	3.18
85	640	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	468	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	73.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	25.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	168	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

Σχέση Θερμοκρασίας και ποσοστού Γλυκερίνης για τον υπολογισμό του δυναμικού ιξώδους (Physical Properties of Glycerine and its solutions)

Με γραμμική παρεμβολή βρίσκουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρουν.

Τα πειράματα διεξάχθηκαν για τρία διαφορετικά ρευστά, για να καταγραφούν οι διαφορές στα ροϊκά πεδία. Το πρώτο ήταν καθαρό νερό με ιξώδες 1cP , το δεύτερο ήταν μίγμα γλυκερίνης (99,7% καθαρή) με νερό για αναλογία 35% κατά βάρος (ιξώδες 2,7 cP) και το τρίτο ήταν και αυτό μίγμα γλυκερίνης αλλά σε αναλογία 41% κατά βάρος (ιξώδες 3,4 cP). Η πυκνότητα των δυο μιγμάτων γλυκερίνης ήταν 1,06 kg/l και 1,08 kg/l αντίστοιχα.

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε είτε ως ρευστό είτε ως συστατικό μίγματος ήταν καθαρό απιονισμένο για την προστασία της διάταξης. Όμως υπήρχε πρόβλημα με το ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο καθώς δεν μπορούσε να καταγράψει την ροή. Το πρόβλημα ξεπεράστηκε με την προσθήκη δυο κουταλιών αλατιού.

3.2.1 Τα τροχοδεικτικά σωματίδια

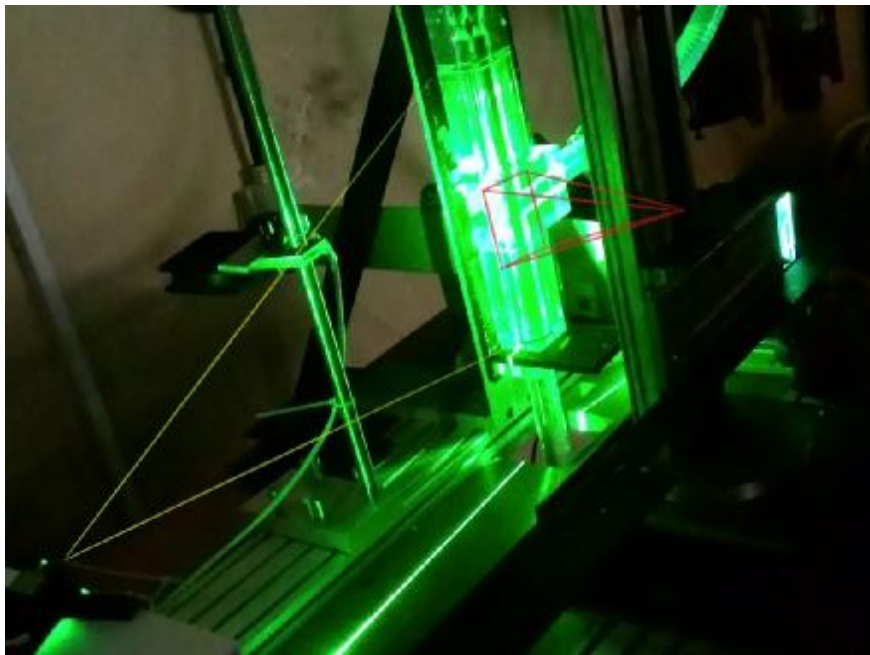
Για την οπτικοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκαν γυάλινα σφαιρίδια (hollow glass M/spheres) πυκνότητας $0,17 \text{ gr/cm}^3$. Κοσκινίστηκαν με ειδικά μικρής διαπερατότητας κόσκινα και η διάμετρος τους ήταν μεταξύ 200μ και 100μ. Στην δεξαμενή πλήρωσης για την καλύτερη διασπορά των τροχοδεικτικών σωματιδίων έχει τοποθετηθεί ένας αναδευτήρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

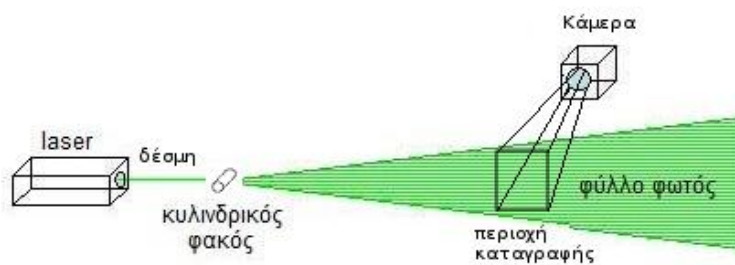
4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ



Η οπτικοποίηση του ροϊκού πεδίου προσφέρει την οπτική καταγραφή και κατανόηση της ροής και των χαρακτηριστικών της, την αποκόλληση ροής, τις ζώνες ανακυκλοφορίας, τις στροβιλώδης δομές κτλ.

Η μέθοδος της οπτικοποίησης που ακολουθήθηκε ήταν η φωτογράφιση τροχιοδεικτικών σωματιδίων σε φωτισμένο επίπεδο του αγωγού. Με την χρήση ενός λέιζερ κουκίδας και

την διαμεσολάβηση ενός κυλινδρικού φακού δημιουργήθηκε ένα λεπτό επίπεδο (φωτογραφία 39) φύλλο φωτός. Σε απόλυτο σκοτάδι το φύλλο αυτό διερχόταν από τον άξονα συμμετρίας του μοντέλου και φώτιζε τα τροchioδεικτικά σωματίδια που κινιόντουσαν σε αυτό το επίπεδο και καταγραφόντουσαν τελικά στην κάμερα.



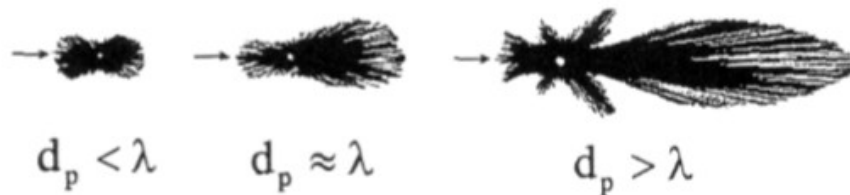
Εικόνα 39: Δημιουργία δέσμης φωτός

Στην φωτογραφία δεν αποτυπώνεται επακριβώς η ροή του ρευστού αυτή αλλά καταγράφονται οι τροχιές των τροchioδεικτικών σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά πρέπει να είναι αρκετά μικρά ώστε να ακολουθούν τις ροϊκές γραμμές με ακρίβεια. Υπάρχει ο κίνδυνος για τα μεγάλα σωματίδια επειδή η αεροδυναμική αντίσταση (drag) που τους ασκεί το ρευστό αυξάνεται, υπάρχει μείωση της ταχύτητας με κίνδυνο την απόκλιση από την πραγματική ροϊκή γραμμή. Τότε το αποτυπωμένο ροϊκό πεδίο θα διαφέρει από το πραγματικό. Ταυτόχρονα όμως πρέπει να διαθέτουν ικανοποιητικό μέγεθος ώστε να αντανακλούν ικανοποιητική ποσότητα φωτός στο μέσο καταγραφής. Ακόμα πρέπει να έχουν την ίδια πυκνότητα με αυτή του ρευστού λειτουργίας για να μην εμφανίζονται ανωστικά φαινόμενα.

Κατά τους Melling και Whitelaw (1973) τα τροchioδεικτικά σωματίδια, οφείλουν να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες : να ακολουθούν με ακρίβεια την ροή, να αντανακλούν ικανοποιητική ποσότητα φωτός στο μέσο καταγραφής, να παράγονται με ικανοποιητικό ρυθμό, να μην είναι τοξικά ή διαβρωτικά, να μην αργούν να εξατμιστούν (στην

περίπτωση αερίων) και να είναι χημικά αδρανή και καθαρά. Προφανώς δεν πρέπει να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και να επηρεάζουν το ροϊκό πεδίο.

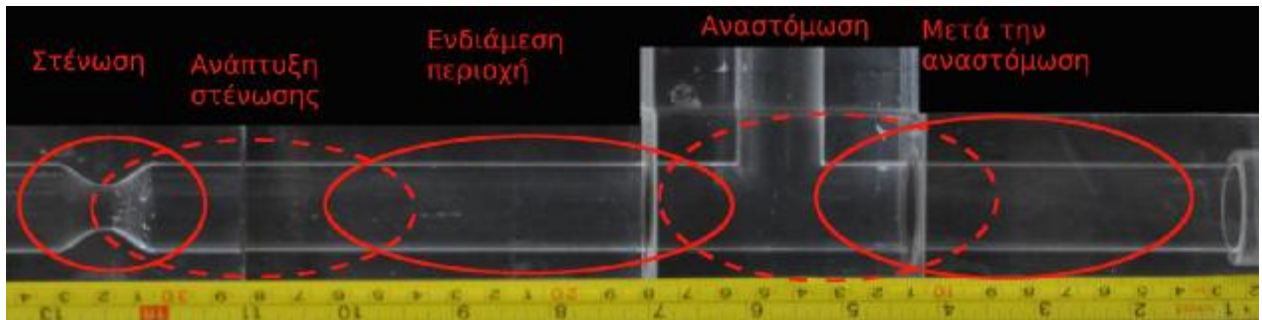
Κατά την θεωρία των Lorenz & Mie, η ανάκλαση του φωτός από τα σωματίδια καθορίζεται κυρίως από το μέγεθός τους. Δεν πρέπει να αγνοηθούν και παράγοντες όπως το σχήμα και ο προσανατολισμός των σωματιδίων. Γενικός κανόνας είναι πως τα μεγαλύτερα ανακλούν περισσότερο φως από τα μικρότερα σωματίδια. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο τρόπος όπου ανακλούν το φως τα σωματίδια ανάλογα με το μέγεθός τους, όπου d_p =η διάμετρος του σωματιδίου και λ = το μήκος κύματος του λείζερ.



Συνηθίζεται στις κλειστές διατάξεις με νερό τα τροχοδεικτικά σωματίδια που χρησιμοποιούνται να είναι κόκκοι latex, γύρη πεύκου ή σφαιρίδια γυαλιού(hollow-glass spheres) όπως στο παρόν πείραμα. Η διασπορά των σωματιδίων πρέπει να γίνεται ομοιόμορφα σε όλη στην κρίσιμη περιοχή που μελετάται, με την πυκνότητα της διασποράς τους πρέπει να είναι υψηλή. Για την καλύτερη διασπορά και την αποφυγή συσσωματωμάτων τοποθετήθηκε στην δεξαμενή πλήρωσης αναδευτήρας.

4.2 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

Φωτογραφίστηκαν οι χαρακτηριστικές περιοχές στο μοντέλο της αρτηρίας όπως φαίνονται παρακάτω.

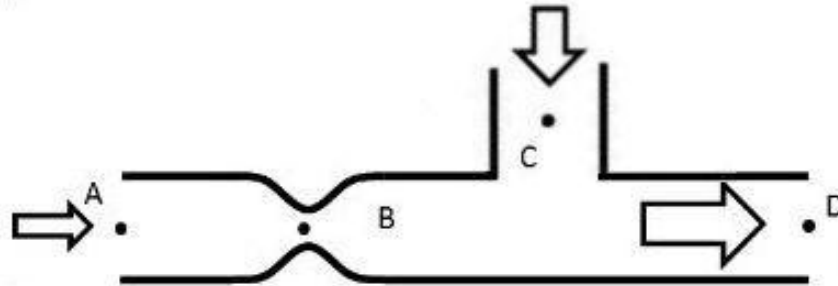


Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται όλα τα πειραματικά δεδομένα από περιοχές για τα διαφορετικά ρευστά.

	Ρευστό	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Ιξώδες μ (Pa·s)	Παροχή Q (lt/h)	Αναλογία Παροχών του μητρικού κλάδου			
					100%	85%	70%	50%
Μόνιμο Πεδίο Ροής	Διάλυμα Γλυκερίνης-Νερού 41% w/w	1080	3.4	240	X	X	X	X
	Διάλυμα Γλυκερίνης-Νερού 35% w/w	1060	2.7	240	X	X	X	X
	Νερό	1000	1	240	X	X	X	X

	Ρευστό	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Ιξώδες μ (Pa·s)	Αριθμός Womersley	Αναλογία Παροχών του μητρικού κλάδου			
					100%	85%	70%	50%
Παλμικό Πεδίο Ροής	Διάλυμα Γλυκερίνης-Νερού 41% w/w	1080	3.4	17	X	X	X	X
	Διάλυμα Γλυκερίνης-Νερού 35% w/w	1060	2.7	18,8	X	X	X	X

Οι χαρακτηριστικοί αριθμοί Reynolds για τα διάφορα σημεία στους αγωγούς.



Εικόνα 40: Σκαρίφημα της περιοχής ενδιαφέροντος

Σημείο A : πριν την στένωση

Σημείο B : πάνω στην στένωσης

Σημείο C : στον παρακαμπτήριο κλάδο πριν εισέλθει στον μητρικό

Σημείο D : μετά την αναστόμωση στον μητρικό κλάδο

Q = 240l/h D = 24 mm	ReA				ReB				ReC				ReD
	50%	30%	15%	0%	50%	30%	15%	0%	50%	70%	85%	100%	
Κινηματικό ιξώδες	50%	30%	15%	0%	50%	30%	15%	0%	50%	70%	85%	100%	4 l/m
1cP	1716	1029	514	-	6864	4116	2056	-	1716	2402	2917	3432	3432
2.7cP	707	424	212	-	2828	1696	848	-	707	990	1203	1415	1415
3.35cP	570	342	171	-	2280	1368	684	-	570	798	955	1140	1140

Επειδή η φωτογραφία καταγράφει το στιγμιαίο ροϊκό πεδίο και όχι την εξέλιξη της ροής στον χώρο και στον χρόνο αναγκαστικά γίνεται στατιστική επεξεργασία της αλληλουχίας των στιγμιότυπων του πεδίου ώστε να αποτυπωθούν οι συνεκτικές δομές που εμφανίζονται στην ροή. Η στατιστική επεξεργασία έγινε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ImageJ. Σε κάθε θέση τραβήχτηκαν δεκάδες διαδοχικές φωτογραφίες (1 δευτερόλεπτο

απόσταση). Η τυπική απόκλιση του στιγμιαίου πεδίου ήταν μεταξύ 5 και 10 στιγμιότυπων.

4.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το βασικό πρόβλημα που παρουσιαζόταν στην διαδικασία ήταν η συσσώρευση σωματιδίων στην είσοδο της αναστόμωσης (“φτέρνα”). Η βρώμικη αυτή περιοχή εμπόδιζε την οπτική επαφή και δεν καταγραφόντουσαν στις φωτογραφίες οι δυο στροβιλώδεις δομές που δημιουργόντουσαν κατά την σύγκρουση των ροών. Στην περιοχή αυτή παρουσιάζονταν χαμηλότερες διατμητικές τάσεις, πιθανότατα η ροή δεν είχε προλάβει να ομαλοποιηθεί πλήρως ερχόμενη από το προηγούμενο καμπύλο τμήμα της διάταξης. Συχνά στην περιοχή αυτή συσσωρευόντουσαν φυσαλίδες αέρα που εγκλωβιζόταν στην διάταξη.

Στις φωτογραφίες εμφανίζεται στο μπλοκ της αναστόμωσης μια μικρή διάθλαση στις ροϊκές γραμμές. Η περιοχή αυτή σχηματίζει μια ορθή γωνία και πιθανότατα οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκαν οι οπές. Δεν επηρεάζει το οπτικό αποτέλεσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

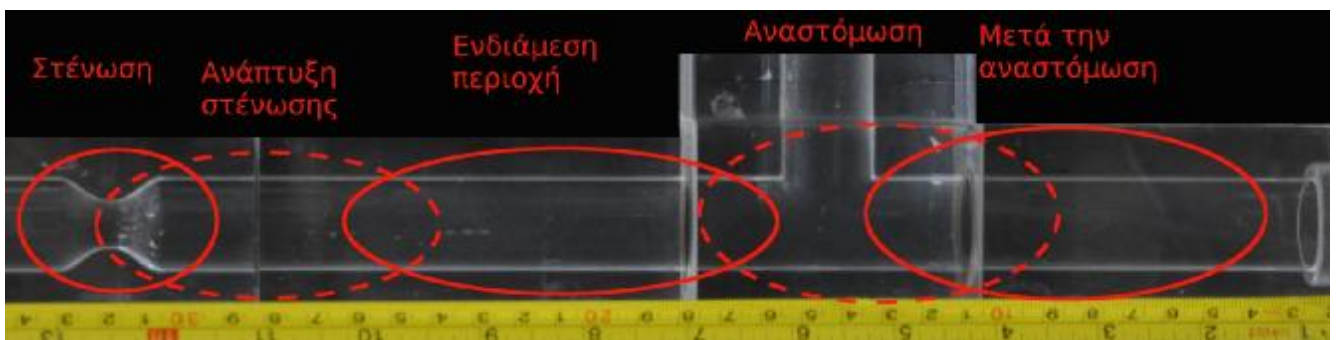
ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΙΜΗΣ

ΡΟΗΣ

5.1 ΣΤΕΝΩΣΗ ΜΕΧΡΙ ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ.

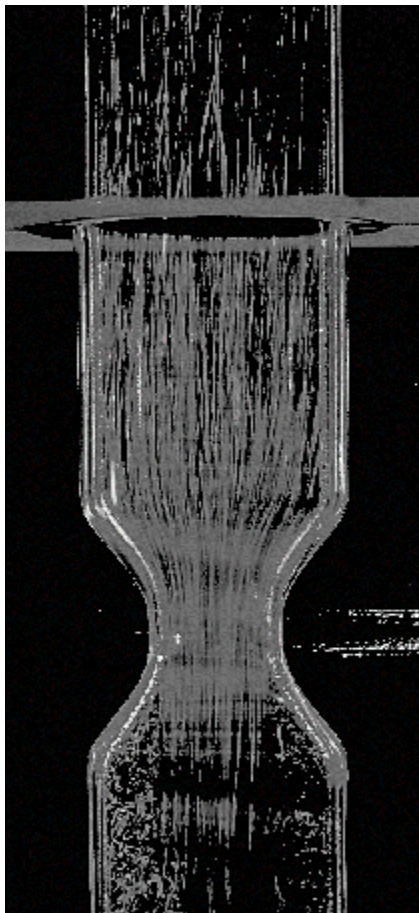
Το μοντέλο της στένωσης έχει συμμετρία ως προς τον άξονα του αγωγού, αποφράζει κατά 75% την ροή της αρτηρίας, έχει το 25% της αρχικής διατομής και ημιτονοειδές σχήμα. Απέχει 7 διαμέτρους από την περιοχή της αναστόμωσης

Ακολουθεί η απεικόνιση και περιγραφή των χαρακτηριστικών της ροής και των δομών της, που αναπτύσσονται μέχρι την αναστόμωση (περιοχές: στένωση-ανάπτυξη στένωσης στένωσης-ενδιάμεση περιοχή). Η περιοχή αυτή εκτείνεται για 7 διαμέτρους από την στένωση, επίσης το ροϊκό πεδίο παρουσιάζει ενδιαφέρον για το πως και αν επηρεάζει την μίξη των δυο ροών στην περιοχή της αναστόμωσης.

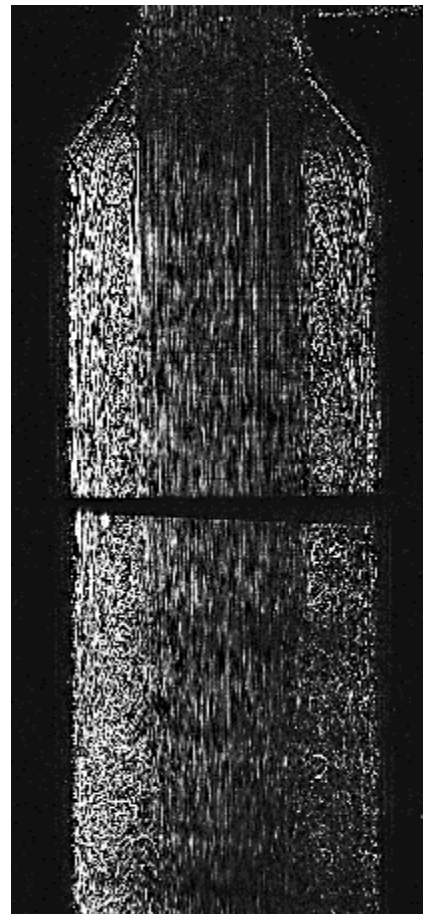


Εικόνα 41: Περιοχή ενδιαφέροντος και περιοχές αποτύπωσης

Το ροϊκό πεδίο φαίνεται να παρουσιάζει στρωτά χαρακτηριστικά πριν και κατά την διάρκεια της περιοχής της στένωσης. Όπως φαίνεται στην πρώτη εικόνα που διαλέχτηκε επίτηδες ο μεγαλύτερος αριθμός Re (Re 1716 πριν την μείωση της διατομής), αφού παρατηρείται για τον μεγαλύτερο αριθμό σίγουρα θα ισχύει και για τους μικρότερους Re .



Απεικόνιση 1 $Re_A=1716$



Απεικόνιση 2 $Re_A= 707$

Το ρευστό προσπερνώντας την στένωση σχηματίζει μια δέσμη εκροής και ζώνες ανακυκλοφορίας κατά μήκος των τοιχωμάτων αξονοσυμμετρικά του αγωγού όπως φαίνεται στην δεύτερη απεικόνιση (Re 707). Η παρατήρηση των ζωνών ανακυκλοφορίας, που καταλαμβάνουν 25% της διατομής, εμφανίζεται αμέσως μετά τον “λαιμό” κατά την αύξηση της διατομής του αγωγού.

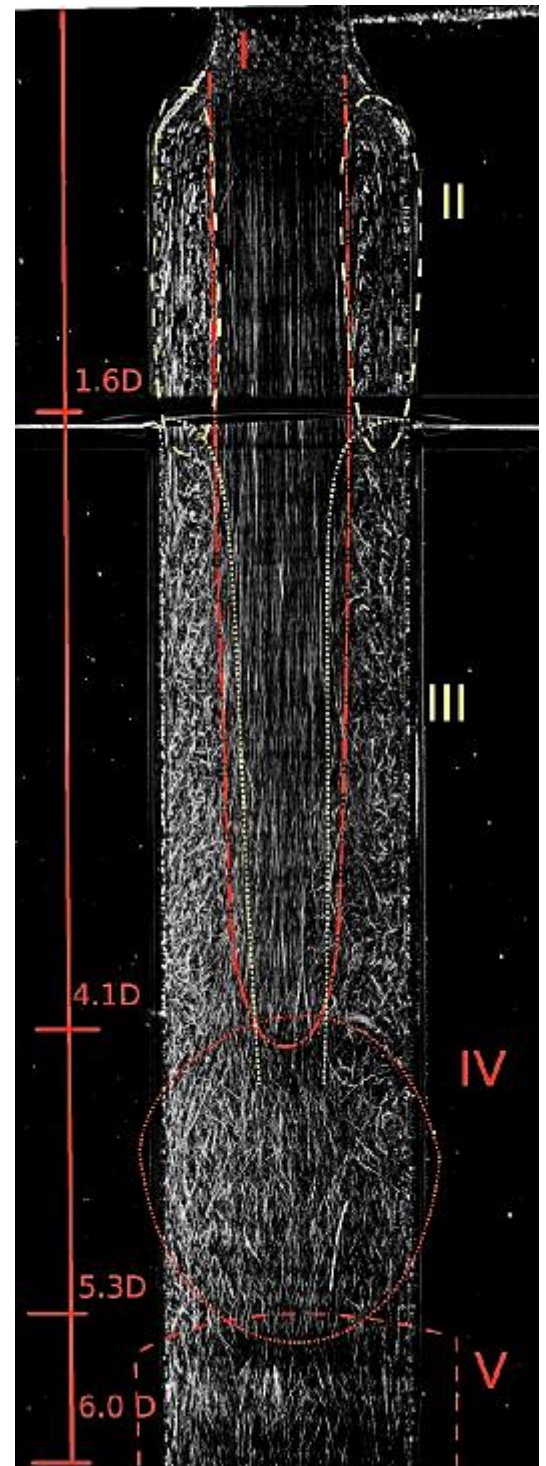
Στο πειραματικό μοντέλο, η στένωση με την αρχή της αναστόμωσης απέχουν 7 διαμέτρους. Μέσα σε αυτήν την απόσταση διακρίνονται πέντε βασικές περιοχές. Η διπλανή εικόνα χαρακτηρίζεται από αριθμό $Re\ 707$, οι αποστάσεις που αναγράφονται είναι ενδεικτικές.

I) Στην πρώτη περιοχή παρατηρείται η δέσμη εκροής, καταλαμβάνει αρχικά το 50% της διαμέτρου ενώ το ρευστό έχει σχεδόν τετραπλασιάσει την ταχύτητά του. Καθώς απομακρυνόμαστε από την στένωση η δέσμη μειώνει την διατομή της εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τις υπόλοιπες περιοχές.

II) Στις περιοχές αμέσως μετά την έξοδο από την στένωση περιμετρικά της δέσμης εκροής παρουσιάζεται αποκόλληση της ροής και η δημιουργία μιας αργής περιστροφικής δομής. Οι ζώνες ανακυκλοφορίας καταλαμβάνουν καθεμιά το 25% της διατομής και για 1,6 της διαμέτρου αλληλοεπιδρούν με την δέσμη εκροής.

III) Στην περιοχή (1.6-4.1D) δημιουργείται ένα στρώμα μίξης μεταξύ της δέσμης εκροής και του οριακού στρώματος όπως αυτό διαμορφώνεται στο τοίχωμα του μοντέλου αρτηρίας. Η αλληλεπίδραση αυτή μειώνει σταδιακά την διατομή της δέσμης εκροής.

IV) Στην περιοχή (4,1-5,3D) αποδομείται ο δυναμικός πυρήνας της δέσμης εκροής και η ροή αποκτά πλήρως τυρβώδη χαρακτηριστικά λόγω της μίξης των αλληλοεπιδρώντων δομών.



Απεικόνιση 3 $ReA=707$

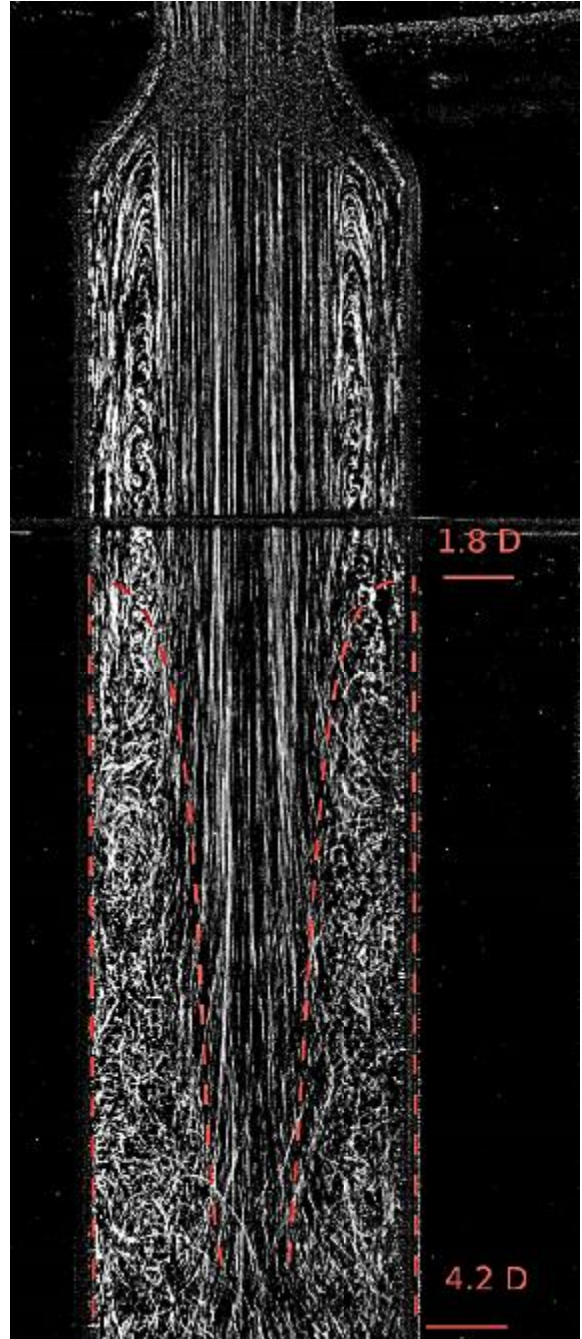
V) Μετά από 5,3 διαμέτρους η περιοχή χαρακτηρίζεται από την αναδιάταξη του ροϊκού πεδίου με έντονα στοιχεία τρισδιαστατότητας, περιέλιξης της ροής και απουσία διακριτών συνεκτικών δομών. Η ροή αποκτά κανονική κατανομή μέχρι να φτάσει στην είσοδο της αναστόμωσης μετά από 7 διαμέτρους από την στένωση.

Ακολουθούν οι αποτυπώσεις των ροϊκών χαρακτηριστικών που δεν φαίνονται ευδιάκριτα στις μέχρι τώρα εικόνες. Το κάνουμε αυτό για να απεικονίσουμε καλύτερα την ανάπτυξη της ροής από την στένωση μέχρι την αναστόμωση.

Η περιοχή III

Στην δεξιά εικόνα αναδεικνύεται η τρίτη χαρακτηριστική περιοχή. Είναι η τυπική απόκλιση του στιγμιαίου πεδίου για αριθμό Re 690

Παρατηρούμε πως όσο απομακρυνόμαστε από την στένωση η δέσμη εκροής μειώνει την διατομή της και εξασθενεί αλληλεπιδρώντας με τα διατμητικά στρώματα. Χαρακτηριστικοί είναι οι στροβιλισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή αυτή.



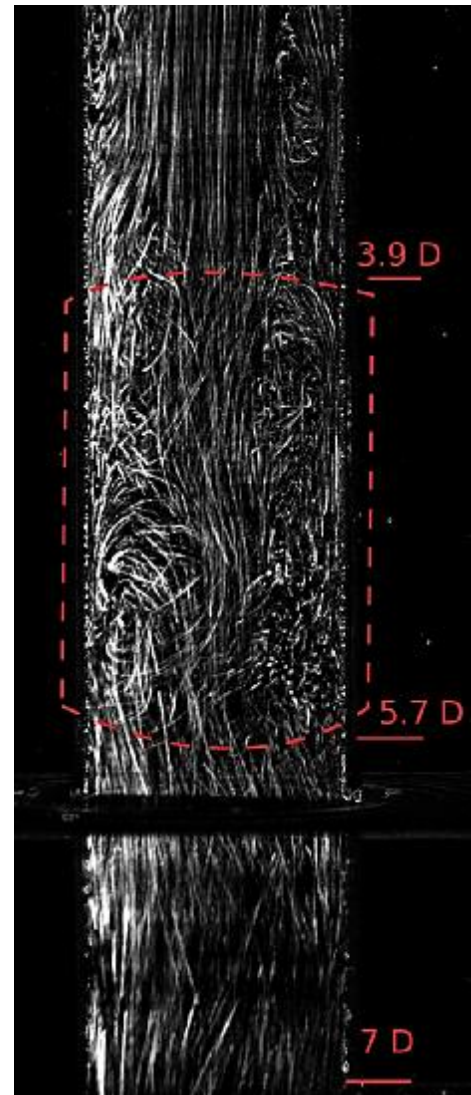
Απεικόνιση 4 $Re_A=690$

Η περιοχή IV

Εμφανίζει τυρβώδη χαρακτηριστικά οπότε για την πιο ευδιάκριτη παρουσίασή της, απεικονίζεται σε στιγμιαίο πεδίο. Γιατί αλλιώς οι ροϊκές γραμμές θα μπλεχτούν πολύ και δεν θα είναι εύκολα διακριτές οι κινήσεις των σωματιδίων.

Επειδή είναι στιγμιαίο πεδίο οι αναγραφόμενες αποστάσεις είναι οι στιγμιαίες. Παρόλα αυτά οι μέσες τιμές κυμαίνονταν κοντά στις αναγραφόμενες. Στην αριστερή φωτογραφία το στιγμιότυπο χαρακτηρίζεται από αριθμό Re 522

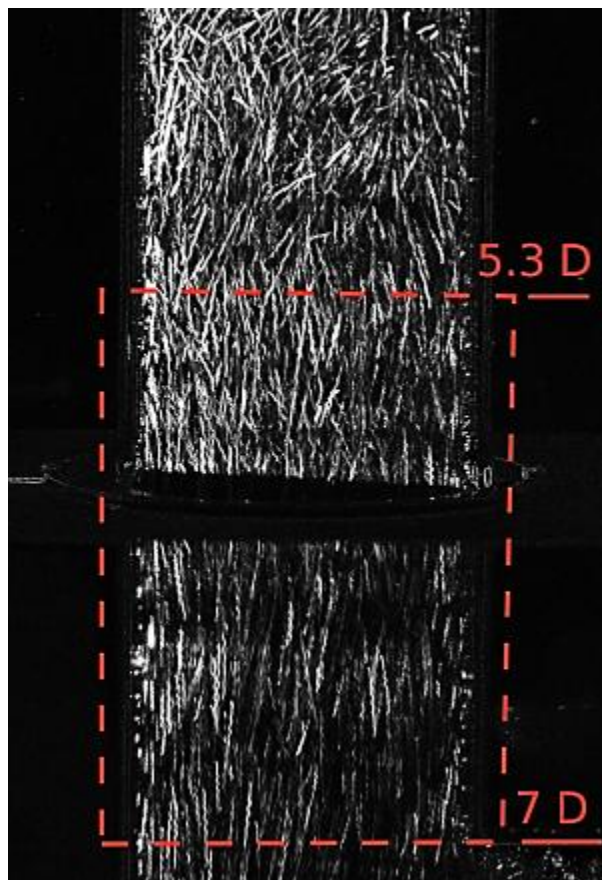
Παρατηρείται πως στην τέταρτη περιοχή η δέσμη εκροής έχει αποδομηθεί, κυριαρχούν έντονες στροβιλώδης δομές με το ρευστό να διαγράφει ελικοειδής τροχιές.



Απεικόνιση 5 $ReA=522$

Η περιοχή V

Στην τελευταία περιοχή παρατηρείται η αναδιάταξη του ροϊκού πεδίου διαμορφώνοντας σχεδόν μια ομοιόμορφη κατανομή πριν την είσοδο της αναστόμωσης (7 διαμέτρους). Η διπλανή φωτογραφία είναι η τυπική απόκλιση πέντε στιγμιότυπων για αριθμό Re 424

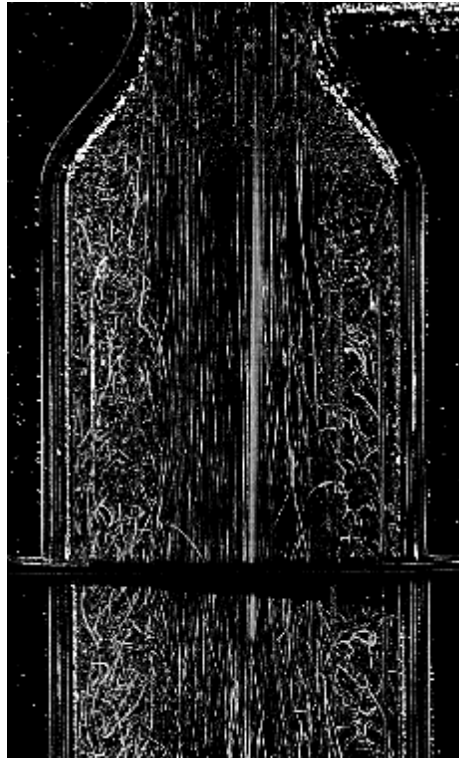


Απεικόνιση 6 ReA= 424

5.1.1 Εναλλαγή της έκτασης των χαρακτηριστικών περιοχών

Η έκταση των περιοχών που περιγράφηκαν παραπάνω παρατηρήθηκε ότι μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό Reynolds της ροής. Για παράδειγμα η μείωση του αριθμού Reynolds αυξάνει το μήκος των ζωνών ανακυκλοφορίας (περιοχή II) τόσο ώστε για χαμηλούς Re δεν παρατηρούμε την τυρβώδη περιοχή (περιοχή IV).

Για υψηλούς αριθμούς Re όπως στην παρακάτω απεικόνιση του ροϊκού πεδίου (Re 1716) οι ζώνες ανακυκλοφορίας δεν διαγράφονται δεξιά και αριστερά της δέσμης, αντ' αυτού τα σωματίδια διαγράφουν μικρές νευρικές και γρήγορες τροχιές, που περισσότερο μοιάζουν για την περιοχή III



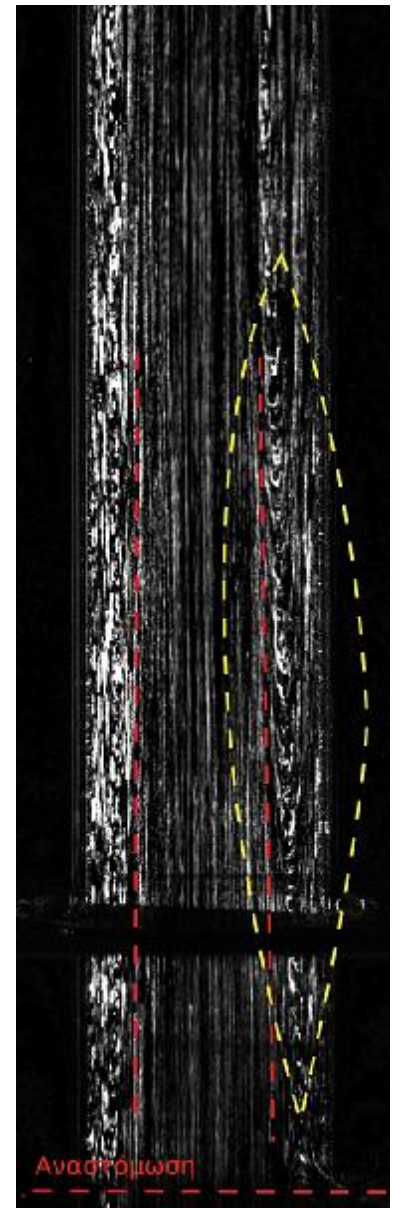
Απεικόνιση 7 $Re_A = 1716$

Η ομοιόμορφη κατανομή του ροϊκού πεδίου δεν επιτυγχάνεται πάντα μέχρι την αναστόμωση

Για παράδειγμα παρατηρήθηκε σε χαμηλούς αριθμούς Re η ζώνη ανακυκλοφορίας να εκτείνεται μέχρι και την αναστόμωση (7D απόσταση) Στο διπλανό στιγμιότυπο με αριθμό Re 350 διακρίνεται η ζώνη ανακυκλοφορίας να εκτείνεται σχεδόν μέχρι την αναστόμωση. Η δέσμη εκροής κυριαρχεί στον αγωγό και είναι ανεπηρέαστη σε όλο το μήκος από την στένωση μέχρι την αναστόμωση.

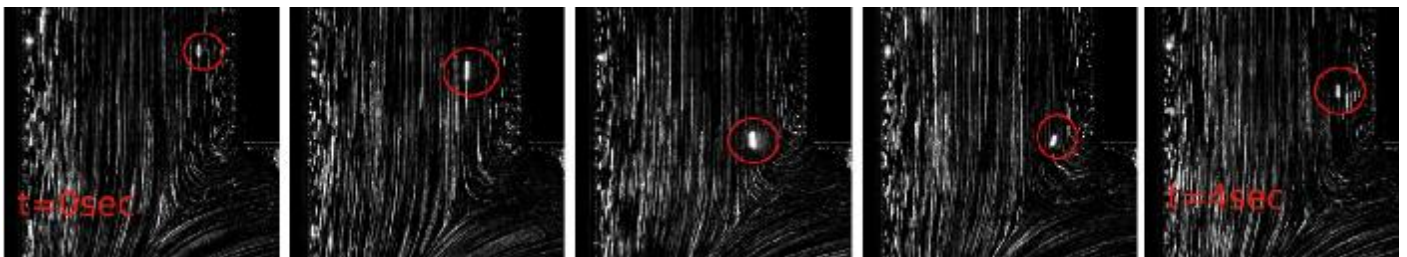
Όταν η αναλογία των παροχών βρίσκεται στο 15% για τον μητρικό κλάδο τα ροϊκά πεδία χαρακτηρίζονται από αριθμούς Re 515-212-170 για τα τρία ρευστά λειτουργίας. Οπότε εκτιμάτε πως για τις δυο τελευταίες περιπτώσεις που ο αριθμός Re είναι χαμηλότερος η ζώνη ανακυκλοφορίας που προκύπτει από την στένωση εκτείνεται μέχρι την αναστόμωση. Γεγονός που επιδράει στο ροϊκό πεδίο που διαμορφώνεται στην αναστόμωση.

Σε αποτυπώσεις στην περιοχή της αναστόμωσης εντοπίστηκε σωματίδιο που διαγράφει την τροχιά της ανακυκλοφορίας. Φαίνεται στα παρακάτω διαδοχικά στιγμιότυπα (απεικόνιση 9). Οι φωτογραφίες είναι για αναλογία παροχής 15% για τον μητρικό κλάδο με αριθμό Re 170. Από τα στιγμιότυπα έχει αφαιρεθεί το μέσο πεδίο των 5 αυτών στιγμιότυπων.



Απεικόνιση 8 ReA= 350

Φαίνεται ένα μεγαλύτερο φωτισμένο σωματίδιο πως κατευθύνεται προς τα κάτω και μετά περιστρέφεται και αλλάζει πορεία 180 μοιρών ανηφορίζοντας προς την στένωση. Τα στιγμιότυπα είναι διαδοχικά και απέχουν 1 δευτερόλεπτο μεταξύ τους.



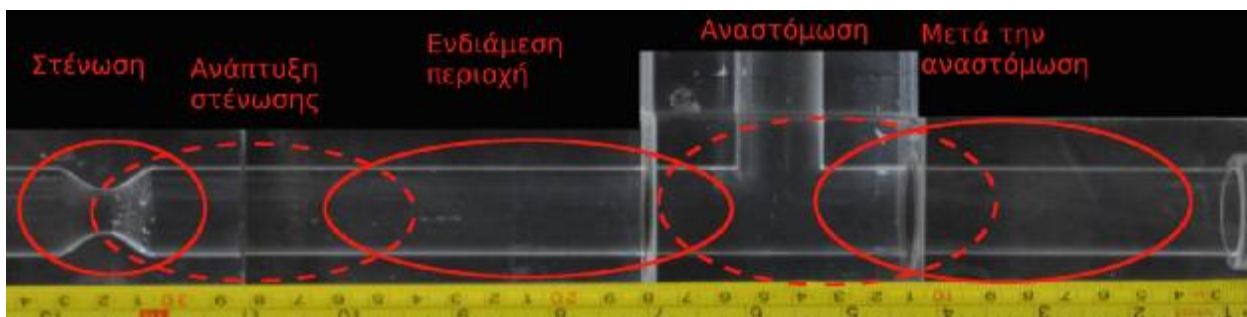
Εικόνα 42: Διαδοχικά στιγμιότυπα, σωματίδιο διαγράφει την ζώνη ανακυκλοφορίας

Από την ποιοτική σύγκριση των διαγραμμένων τροχιών στις περιοχές της δέσμης εκροής και στις ζώνες ανακυκλοφορίας (περιοχές I και II) προκύπτει πως το ρευστό που βρίσκεται στις ζώνες ανακυκλοφορίας είναι σχεδόν στάσιμο. Γεγονός που επιβεβαιώνεται στην βιβλιογραφία.

5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ

5.2.1 Γενική περιγραφή του ροϊκού φαινομένου

Ο παρακαμπτήριος κλάδος της αναστόμωσης έχει την ίδια διατομή με τον μητρικό. Η 90° μοιρών ένωση προκαλεί την κάθετη σύγκρουση των δυο ροών. Οι φωτογραφίες που παρουσιάζονται εδώ είναι από την περιοχή της αναστόμωσης και μετά.



Παρακάτω περιγράφεται το γενικό φαινόμενο της μίξης, ουσιαστικά οι βασικές συμπεριφορές των δυο συγκρουόμενων ροών. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρατηρούνται σε όλες τις συνθήκες που εκτελέστηκε το πείραμα. Από εκεί και πέρα η αναλογία της παροχής των δυο κλάδων αλλάζει μερικά χαρακτηριστικά μέχρι που εμφανίζονται και καινούργια στοιχεία που δεν υπήρχαν στις άλλες συνθήκες.

Αρχικά για χάρη, απλότητας υποθέτουμε πως η μητρική ροή δεν υπάρχει και ο κατακόρυφος (οριζόντιος στην προηγούμενη εικόνα) αγωγός είναι άδειος με την ροή να έρχεται μόνο από την παρακαμπτήρια 90° ένωση. Το ρευστό εισερχόμενο στον κατακόρυφο αγωγό δεν μπορεί κατευθείαν να καλύψει όλη την διατομή, συμβαίνει αποκόλληση της ροής προς το τοίχωμα και έτσι δημιουργείται μια ζώνη ανακυκλοφορίας που ξεκινάει κατάντι της ένωσης. Σε αυτήν την ζώνη υπάρχει χαμηλότερη πίεση.

Όταν πια εισρέει ρευστό και στις δυο εισόδους της T-ένωσης έχουμε τις δυο ροές να συγκρούονται. Εκείνη με την μεγαλύτερη ορμή (διαφέρει με βάση την αναλογία των παροχών) θα κυριαρχήσει στην διατομή του αγωγού. Παρατηρούμε πως η κατακόρυφη ροή τείνει να απομακρύνεται από το κέντρο του αγωγού και να καλύπτει την περίμετρο και ένα κομμάτι της περιστρέφεται εκρέοντας στην περιοχή ανακυκλοφορίας όπου έχει χαμηλή πίεση όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οπότε όσο ρευστό από την κατακόρυφη ροή δεν έχει καταφέρει να κρατήσει την κατεύθυνσή του διερχόμενο από την περιοχή της αναστόμωσης αρχίζει μια ελικοειδή κίνηση προς την περιοχή της ανακυκλοφορίας που

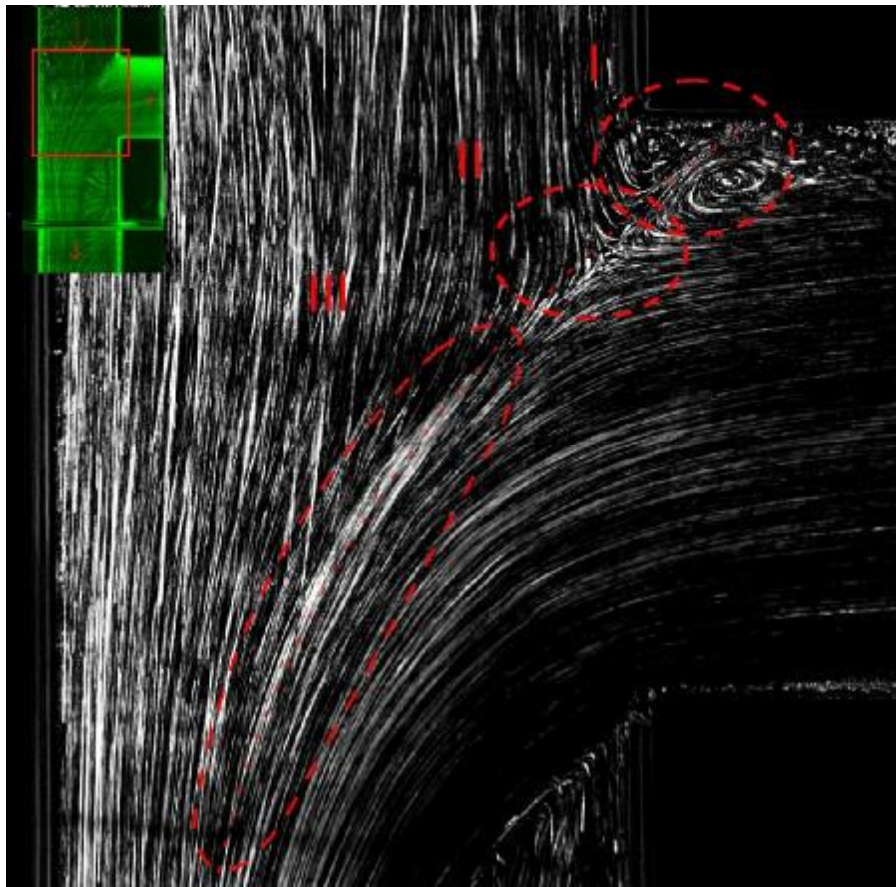
την διατηρεί και μετά την σύγκρουση με το τοίχωμα του αγωγού μέχρι να εξομαλυνθεί πάλι η ροή. Η μείωση της ενεργούς διατομής όπου διέρχονται οι ροές προκαλεί την επιτάχυνσή τους.

Το φαινόμενο είναι τρισδιάστατο, το επίπεδο που φωτογραφίζεται είναι το κεντρικό κατακόρυφο οπότε υπάρχει αδυναμία να αποτυπωθούν οπτικά πλήρως όλες τις πτυχές της ροής.

5.2.2 Ζώνη μίξης

Στην επόμενη φωτογραφία φαίνεται το σύνολο της ζώνης μίξης, ακόμα και συνήθως “βρώμικη” περιοχή ανάντι της αναστόμωσης.

Διακρίνονται τρεις χαρακτηριστικές περιοχές στην ζώνη μίξης μεταξύ των δυο ροών. Η πρώτη είναι οι δυο αντίθετες φοράς στρόβιλοι στην είσοδο της αναστόμωσης (φτέρνα), η δεύτερη η περιοχή διαχωρισμού όπου συγκρούονται οι δυο ροές και φεύγουν προς τις δυο κατευθύνσεις, και η τρίτη όπου οι δυο ροές κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση αλλά χωρίς να αναμιγνύονται ακόμα, στην περιοχή αυτή εμφανίζονται υψηλές τιμές διάτμησης λόγω της αλληλεπίδρασης των δυο ροών. Και οι τρεις αυτές περιοχές βρίσκονται πάνω στην ίδια ευδιάκριτη ζώνη μίξης.



Γραμμή μίξης $Re_A = Re_C = 707$ αναλογία παροχών 50%

Εδώ αξιωματικά υσαν εσωτερικά στον παρακαμπτήριο κλάδο καθώς οι ταχύτητες των ρευστών θα έπρεπε να είναι ίδιες σε αυτό το σημείο. (50% παροχή σε κάθε κλάδο και ίδια διατομή). Έτσι όπως διαφαίνονται τώρα η ταχύτητα του μητρικού κλάδου είναι μεγαλύτερη και προλαβαίνει να εισέρθει στον παρακαμπτήριο. Ίσως να υπάρχει κάποιο κατασκευαστικό λάθο, ίσως η ροή από τον παρακαμπτήριο να μην προλαβαίνει να ομαλοποιηθεί μετά από την φυγόκεντρο που αποκτά στο καμπύλο τμήμα που υπάρχει πριν την ένωση. Ωστε στην περιοχή των κατάντι της αναστόμωσης να είναι η ταχύτητα μεγαλύτερη από εκείνη ανάντι.

Παρατηρείτε πως υπάρχει μια διαρκής ταλάντευση της ζώνη μίξης των δυο ροών, ξεκινάει από ανάντι της εισδοχής της αναστόμωσης και κυματώνεται μέχρι να χαθεί όταν

ενοποιηθούν οι ροές και να μην διαφέρουν . Δεν διακρίνουμε να κάνει σταθερή ταλάντωση ούτε να έχει σταθερή συχνότητα, ίσως να οφείλεται από την ανακυκλοφορία της στένωσης ή σε ταλάντωση και κυματισμό στον μητρικό αγωγό, ίσως από στροβιλισμούς στην περιοχή της ανακυκλοφορίας.

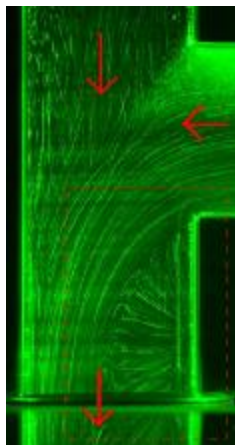
Η θέση των στροβίλων, η κλίση της ευθεία αυτής και η μικρή της ταλάντωση εξαρτώνται από το ρευστό -τον αριθμό Re όπως και την αναλογία των παροχών στους δυο αγωγών. Παρουσιάζονται οι διαφορές πιο συγκεκριμένα παρακάτω.

5.2.3 Περιοχή αποκόλλησης ροής

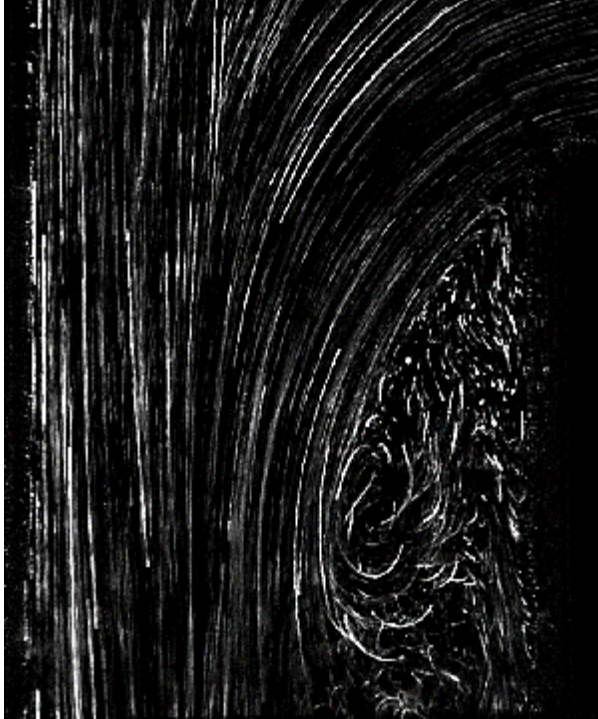
Η περιοχή αποκόλλησης της ροής παρατηρείται να καλύπτει ένα εύρος από 40% μέχρι 65% της διαμέτρου του αγωγού κατά πλάτος, αναλόγως τις αναλογίες των παροχών. Είναι δύσκολο να παρατηρηθεί που ακριβώς τελειώνει η ανακυκλοφορία και το ύψος της περιοχής της αυτής εκτιμάται περίπου σε 1.5-1.7 της διαμέτρου.

Η περιοχή αυτή αποτελείται από δυο στοιχεία που συνυπάρχουν.

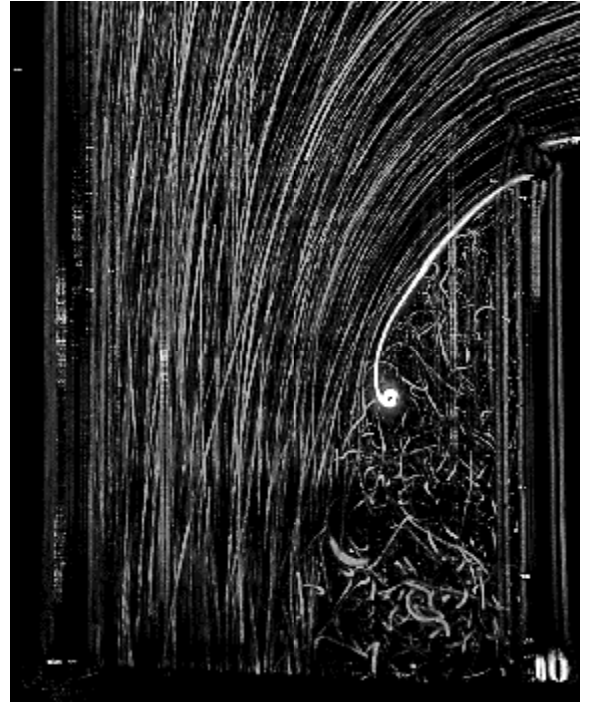
Το πρώτο στοιχείο ό,τι ακριανά τμήματα της παρακαμπτήριας ροής αποκολλούνται από την κύρια ροή και περιστρεφόμενα εισέρχονται προς την ανακυκλοφορία, παραμένουν ένα χρονικό διάστημα εγκλωβισμένα μέχρι να καταφέρουν να προσκολληθούν στην κύρια ροή και να εξέρθουν από την ανακυκλοφορία. Ακολουθούν δυο στιγμιότυπα που εμφανίζουν διακριτά την αποκόλληση ροής.



Περιοχή εστίασης



Απεικόνιση 10 Αποκόλληση ροής $ReA=ReC = 570$



Απεικόνιση 9: Αποκόλληση ροής $ReA=ReC = 1716$

Το δεύτερο χαρακτηριστικό στοιχείο της περιοχής είναι μια “πηγή” ρευστού που εμφανίζεται κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα σε σταθερή θέση ανεξάρτητη από τις συνθήκες (αναλογία παροχών) Η “πηγή” εκρέει ρευστό πότε προς όλες τις κατευθύνσεις του επιπέδου και πότε σε λιγότερες αναλόγως τις αρχικές συνθήκες. Ουσιαστικά ρευστό από άλλο επίπεδο του αγωγού που δεν φωτίζεται εκρέει σε αυτό το σημείο. Είναι η δευτερεύουσα ροή που κατά την σύγκρουση των δυο ροών αποκτά ελικοειδή κίνηση προς την περιοχή με την χαμηλότερη πίεση.

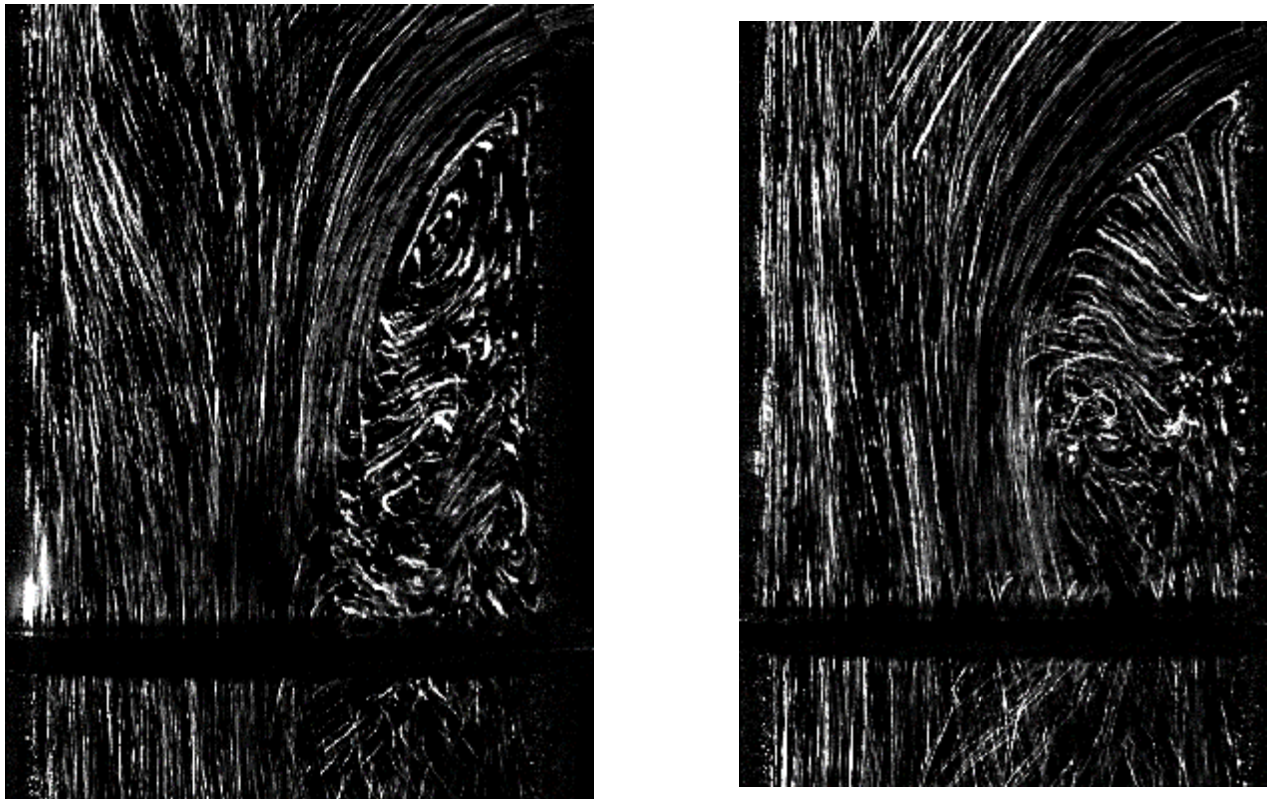


Απεικόνιση 11: Εκροή δευτερεύουσας ροής

$$\mathbf{Re}_A = 424, \mathbf{Re}_C = 990$$

Αυτά τα δυο χαρακτηριστικά συνυπάρχουν με κατά κανόνα να κυριαρχεί το δεύτερο. Οι φωτογραφίες των μέσων πεδίων που χρησιμοποιούμε για να αποτυπώσουμε σε βάθος χρόνου το φαινόμενο δεν αποτυπώνουν με ευκρίνεια τι γίνεται ακριβώς σε αυτή την περιοχή διότι μπλέκονται οι ροϊκές γραμμές.

Παρακάτω φαίνονται δυο διαδοχικά στιγμιότυπα που απέχουν 2 δευτερόλεπτα με εμφανής την διαφορά τους στην περιοχή της αποκόλλησης. Η χρήση βίντεο βοηθούσε στην καλύτερη κατανόηση για την ανάπτυξη της ροής σε βάθος χρόνου.



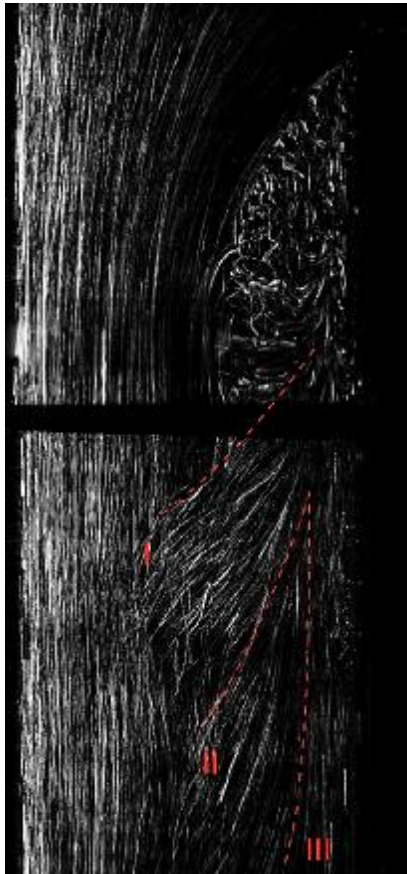
Απεικόνιση 12 και 14 Εναλλαγή απέχουν 2 δευτερόλεπτα $Re_A = 342$ $Re_C = 798$

Όλες οι φωτογραφίες καταγράφουν το κεντρικό επίπεδο. Οπότε ότι ρευστό περιστρέφεται και εκρέει στην “πηγή” υπάρχει και ένα συμμετρικό του, που έχει την ίδια συμπεριφορά και συγκλίνει προς την ίδια κατεύθυνση στο κεντρικό επίπεδο του αγωγού.

5.2.4 Μετά την περιοχή αποκόλλησης της ροής

Στο παρακάτω στιγμιότυπο παρατηρούμε τις κατευθύνσεις όπου αποχωρεί το ρευστό από την περιοχή της ανακυκλοφορίας. Καταγράφεται μια ελικοειδής κίνηση προς την

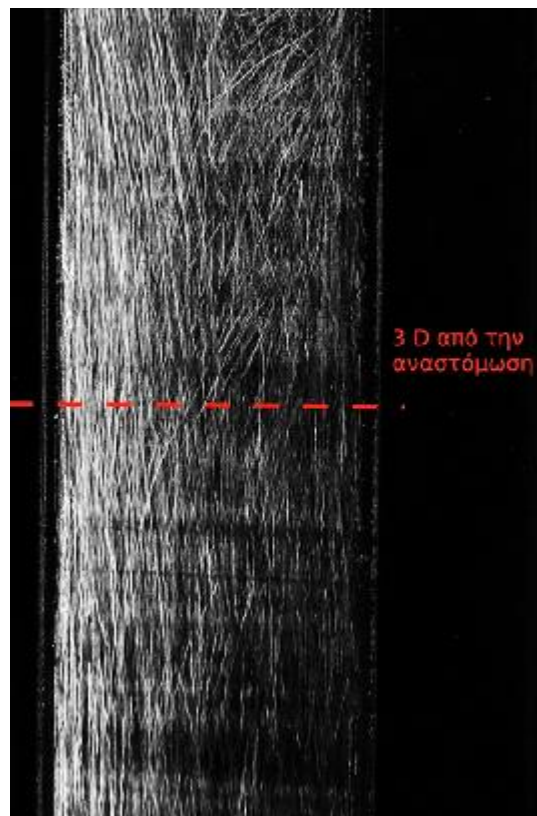
ομαλοποίηση της ροής. Η αποχώρηση γίνεται κατά ομάδες όπως φαίνεται στην φωτογραφία, διαγράφοντας “φύλλα” προς την ίδια κατεύθυνση. Διακρίνονται 3 κατευθύνσεις σε αυτή την φωτογραφία με τα τρία “φύλλα” να φαίνεται να έχουν κοινή αφετηρία την πηγή στην περιοχή της ανακυκλοφορίας. Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η δευτερεύουσα ροή που δημιουργείται μετά την σύγκρουση των δυο κύριων ροών στην αναστόμωση εκτοπίζεται από το κεντρικό επίπεδο που φωτογραφίζεται και διαγράφοντας ελικοειδή τροχιά εκρέει στην πηγή. Τα φύλλα που διαφαίνονται στην διπλανή φωτογραφία είναι η συνέχεια αυτής της ελικοειδής τροχιάς μετά την σύγκρουση της με το τοίχωμα.



Φύλλα εκροής $Re_A=Re_C = 707$

5.2.5 Ομαλοποίηση του ροϊκού πεδίου

Η ομαλοποίηση της ροής όπου έχουν αποκατασταθεί οι ταχύτητες, δεν είναι ευδιάκριτο να αποτυπωθεί με ακρίβεια. Διότι η οπτικοποίηση καταγράφει ποιοτικά τις ροϊκές γραμμές, η χρήση της μεθόδου PIV θα βοηθούσε στον υπολογισμό των ταχυτήτων και τότε με μεγαλύτερη ακρίβεια θα υπολογιζόταν το σημείο αποκατάστασης της ομαλότητας της ροής.



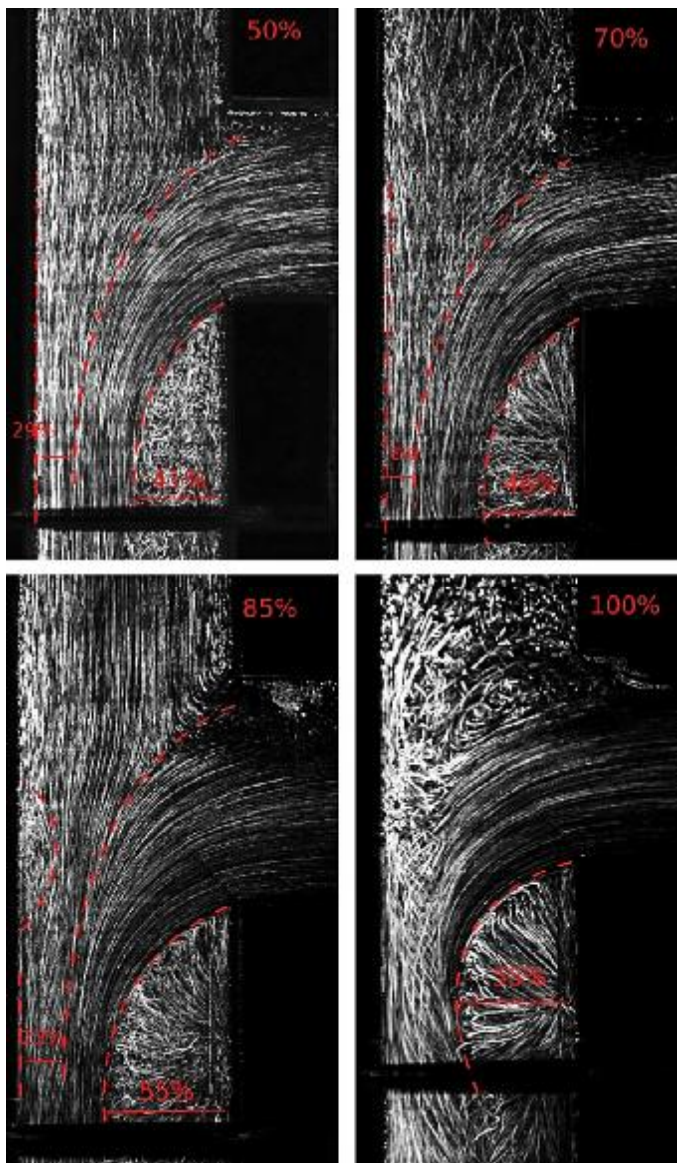
Ομαλοποίηση ροής $Re_D = 1415$

Ποιοτικά η ομαλοποίηση της ροής εκτιμάται περίπου 3 με 3.5 διαμέτρους μετά από την αναστόμωση.

5.3 ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΟΧΩΝ

Η κεντρική παροχή είναι σταθερά ρυθμισμένη μέσω ενός πλωτήρα στα 4 l/min. Η παροχή των δυο κλάδων ρυθμιζόταν με βάνες και με την βοήθεια ενός ηλεκτρομαγνητικού ροόμετρου υπολογιζόταν η αναλογία των παροχών. Για διευκόλυνση θα αναφερόμαστε στο ποσοστό του παρακαμπτήριου κλάδου επί της συνολικής παροχής

. Τέσσερις ήταν οι διαφορετικές αναλογίες: 50% - 70% - 85% - 100% (για τον παρακαμπτήριο κλάδο).



Τυπική απόκλιση στιγμιαίου πεδίου για τέσσερις αναλογίες παροχών Ιξώδες ρευστού 3,4cP

Πέρα από την αποτύπωση του εκάστοτε ροϊκού πεδίου σκοπός ήταν η καταγραφή της μεταβολή στην περιοχή της αποκόλλησης ροής καθώς είναι πιθανή περιοχή για την ανάπτυξη της αθηροσκλήρωσης.

Οι παραπάνω εικόνες είναι για ρευστό με ιξώδες 3.4 cP σε συνθήκες μόνιμης ροής, με διακεκομμένη γραμμή τονίζονται τα όρια των χαρακτηριστικών του ροϊκού πεδίου. Οι εικόνες είναι η τυπική απόκλιση του στιγμιαίου πεδίου για την αποτύπωση σε βάθος χρόνου, για αυτό οι δομές που μεταβάλλονται με τον χρόνο δεν φαίνονται καθαρά (85% - 100%). Διακρίνεται η σταδιακή αύξηση του πλάτους της ανακυκλοφορίας, τα ποσοστά που διαγράφονται είναι επί της συνολικής διαμέτρου του αγωγού.

Παρατηρείται επίσης η μείωση της ενεργούς διατομής της μητρικής ροής καθώς μειώνεται η παροχή του μητρικού κλάδου. Στην περίπτωση 85% καταγράφεται αύξηση της ενεργούς διατομής σε σχέση με την 70% περίπτωση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δημιουργία μιας στροβιλώδους δομής που δημιουργείται κατά την 85% περίπτωση, το φαινόμενο αναπτύσσεται αναλυτικότερα παρακάτω. Παρατηρείται με δυσκολία πως στην περιοχή της φτέρνας οι δυο αντίθετοι στρόβιλοι μετατοπίστηκαν εντός του μητρικού κλάδου για την περίπτωση 85%.

5.3.1 Μεταβατικά φαινόμενα στην μόνιμη ροή

Στις συνθήκες 85% και 100% παρόλο που έχουμε μόνιμη ροή παρατηρούνται μεταβατικά φαινόμενα.

Στην περίπτωση 85% εμφανίζεται μια μικρή δομή στροβίλου στο τοίχωμα του μητρικού αγωγού απέναντι από την αναστόμωση όπως φαίνεται στα διπλανά στιγμιότυπα. Η μητρική ροή που είναι και πολύ χαμηλότερης παροχής προσκρούει στην παρακαπτήρια και φαίνεται να ελαττώνει δραστικά την ενεργό διατομή όπου διέρχεται.

Από την αποτύπωση του ροϊκού πεδίου στην ενδιάμεση περιοχή πριν την αναστόμωση παρατηρήθηκε πως η ανακυκλοφορία που δημιουργείται από την στένωση προεκτείνεται μέχρι και την αναστόμωση για την περίπτωση της 85% αναλογίας παροχής. Επειδή οι ταχύτητες κοντά στο τοιχώματα είναι χαμηλές λόγω της ανακυκλοφορίας διευκολύνει τον στροβιλισμό ενός κομματιού της ροής κατά την πρόσκρουση των δυο κύριων ροών.

Η δομή αυτή μεταβάλλεται: δημιουργείται και καταστρέφεται, μετατοπίζεται ελαφρώς πάνω και κάτω. Όπως ακριβώς φαίνεται στην αλληλουχία στιγμιοτύπων ($Re_A=212$, $Re_c=990$). Στην πρώτη και στην τελευταία εικόνα ο στρόβιλος βρίσκεται στην πιο συχνή του θέση. Στη δεύτερη φωτογραφία καταστρέφεται, στην τρίτη δεν εμφανίζεται καθόλου για να παρατηρηθεί ξανά στην τέταρτη που μεγαλώνει. Οι φωτογραφίες είναι τραβηγμένες μέσα σε 5 δευτερόλεπτα, δεν παρατηρούμε όμως αυτή την δημιουργία και καταστροφή κάθε 5 δευτερόλεπτα.



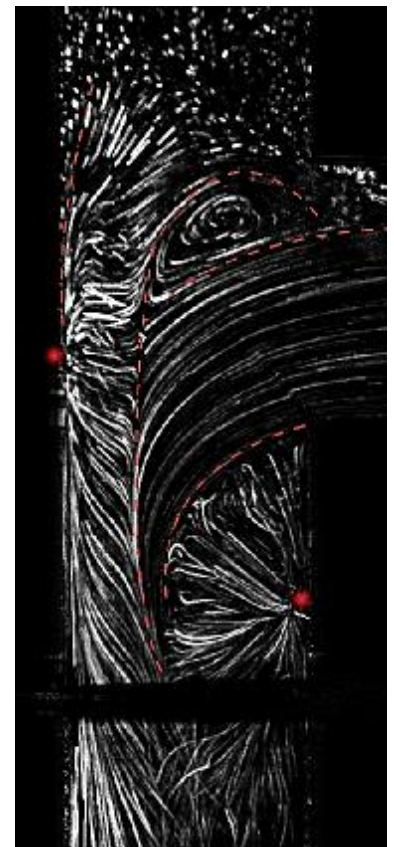
Λιαδοχικά στιγμιότυπα, δημιουργία καταστροφή στροβίλου

Ένα χαρακτηριστικό ακόμα που μεταβάλλεται με τον χρόνο είναι η θέση της ζώνης μίξης. Διαπιστώνεται από την αλληλουχία στιγμιότυπων πως όταν η δομή εμφανίζεται η ζώνη μίξης δεν φτάνει μέχρι το τοίχωμα του αγωγού. Ενώ όταν η δομή έχει καταστραφεί (στιγμιότυπο 3) η παρακαμπτήρια ροή καταφέρνει να κυριαρχήσει στην διατομή προσκρούοντας στο απέναντι τοίχωμα. Συμπεραίνεται πως η ύπαρξη της στροβιλώδους δομής εμποδίζει την διέλευση της μητρικής ροής που με την σειρά της “σπρώχνει” την παρακαμπτήρια ροή και διέρχεται από την περιοχή της αναστόμωσης. Σε αυτό το χαρακτηριστικό βασίζεται η αύξηση της ενεργούς διατομής της μητρικής για την περίπτωση της 85% παροχής σε σχέση με την περίπτωση της 70% παροχής.

Στην περίπτωση 100%

Σε αυτή την περίπτωση που ο μητρικός κλάδος είναι πλήρως φραγμένος το σύνολο της ροής έρχεται από την παράκαμψη και συγκρούεται απέναντι στο τοίχωμα του μητρικού αγωγού. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ένα μεταβατικό φαινόμενο που δεν εμφανιζόταν στις υπόλοιπες συνθήκες λειτουργίας. Είναι ένα περιοδικό φαινόμενο όπου μια ποσότητα της παρακαμπτήριας ροής ανακλάται πλήρως στο τοίχωμα απέναντι από την αναστόμωση, επιστρέφει και συγκρούεται με την κύρια ροή. Όπως φαίνεται στο διπλανό στιγμιότυπο (ιξώδες ρευστού 3,4cP, κεντρική παροχή 240 l/h).

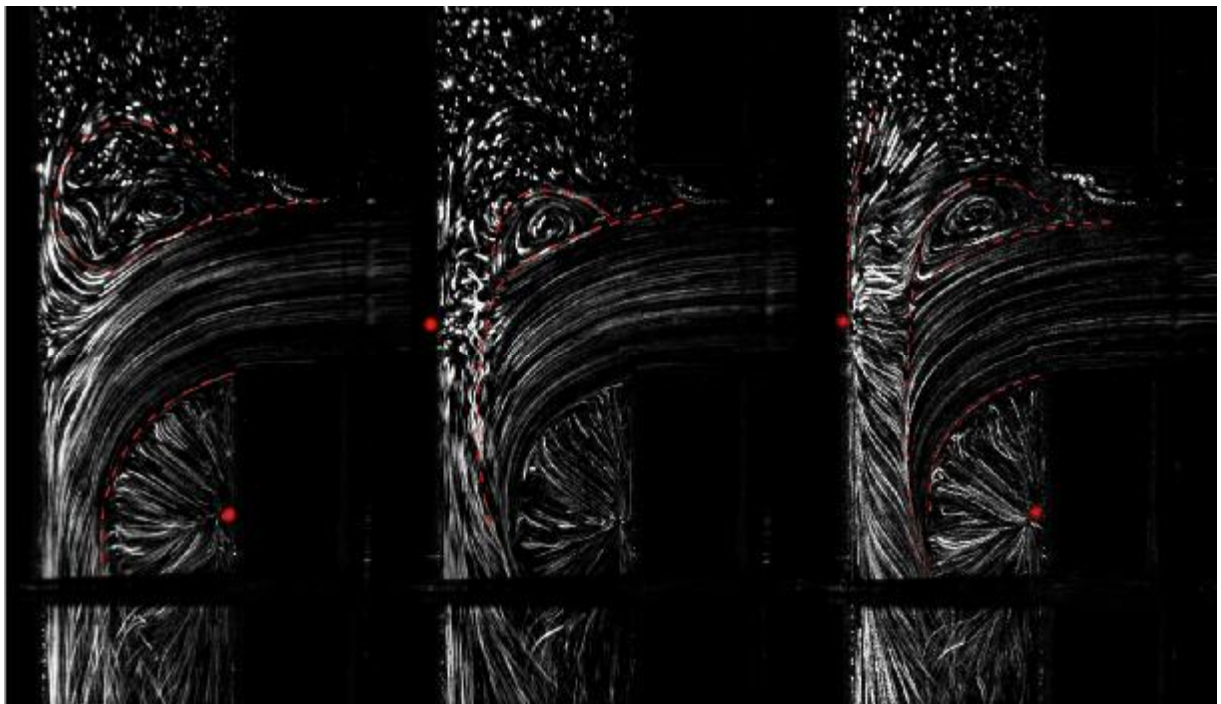
Το φαινόμενο φαίνεται να έχει σχεδόν μια σταθερή συχνότητα όπου εναλλάσσονται τρεις διακριτές καταστάσεις. Την πρώτη με την πρόσκρουση της κύριας ροής στο τοίχωμα και διαχωρισμός της προς τις δυο κατακόρυφες κατευθύνσεις.



Ανάκλαση ροής $Re_c = 1140$

Η δεύτερη φάση όπου διακρίνεται η ανακλώμενη ροή όμως ακόμα δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως και συγκρούεται με την κύρια ροή, εκεί εμφανίζεται μια ελικοειδής κίνηση κατά μήκος της γραμμής σύγκρουσης.

Στην τρίτη φάση η ανακλώμενη ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως και συγκρούεται με την κύρια ροή. Αυτό το στιγμιότυπο φαίνεται δίπλα στην φωτογραφία. Με κόκκινη κουκίδα είναι σημειωμένες «πηγές» ρευστού που εμφανίζονται στο κεντρικό επίπεδο. Οι τρεις αυτές φάσεις εμφανίζονται στην επόμενη εικόνα



Οι τρεις διακριτές φάσεις της περιόδου. Α) Η κύρια ροή προσκρούει στο τοίχωμα Β) η δημιουργία ανακλώμενης ροής Γ) Η πλήρης ανάπτυξη της ανακλώμενης ροής και η σύγκρουσή της με την κύρια. $Re_c = 1140$

Με τις διακεκομμένες γραμμές διαγράφονται τα όρια των ροϊκών χαρακτηριστικών. Φαίνονται οι περιοχές των δομών στροβιλισμού. Στην πρώτη φάση είναι εμφανώς μεγαλύτερη η δομή. Με κόκκινη τελεία είναι σημειωμένες οι «πηγές» ρευστού που εμφανίζονται στο κεντρικό επίπεδο που βρισκόμαστε.

Στο δεύτερο στιγμιότυπο φαίνονται σωματίδια με ελικοειδή τροχία κατά μήκος της γραμμής σύγκρουσης. Το ότι έχουν ελικοειδή τροχία σημαίνει πως τα επίπεδα των ροών που συγκρούστηκαν είναι υπό γωνία. Στην δεύτερη και τρίτη φάση εμφανίζεται μια δεύτερη πηγή που εκρέει προς όλες της κατευθύνσεις ακόμα και προς τα πάνω που δεν έχουμε ροή θέτοντας έτσι το στάσιμο ρευστό σε κίνηση.

Μετρήθηκε η περίοδος του μεταβατικού φαινομένου. Με την χρήση της φωτογραφικής μηχανής ήταν πιο δύσκολο καθώς η ελάχιστη δυνατή χρονική απόσταση μεταξύ διαδοχικών φωτογραφιών ήταν 1 δευτερόλεπτο. Η χρήση βίντεο που είχε συχνότητα λήψης 25frames το δευτερόλεπτο βελτίωσε την συχνότητα αποτύπωσης των στιγμιότυπων. Εξήχθησαν τα frames του βίντεο για ευκολία επεξεργασίας και μελετώντας πια τις διαδοχικές φωτογραφίες υπολογίστηκε η περίοδος για 10 διαδοχικούς κύκλους. Δυστυχώς τα στατιστικά δεδομένα δεν επαρκούν για την βεβαιότητα ότι η περίοδος είναι σταθερή (μέση τιμή 4,6sec και 2,7sec για τα δυο ρευστά λειτουργίας), όμως είναι εμφανές ότι το ρευστό με ιξώδες 3,4 cP είχε μεγαλύτερη περίοδο από εκείνο με ιξώδες 2,7 cP

Για την πληρέστερη κατανόηση του μεταβατικού φαινομένου μεταβλήθηκε η συνολική παροχή για να διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζει. Ξεκινώντας από την αρχική παροχή των 240l/h μειωνόταν συνεχώς η κεντρική παροχή μέχρι να παρατηρηθεί η εξάλειψη του μεταβατικού φαινομένου για κεντρική παροχή 140 l/h. Όσο μειωνόταν η παροχή, η απόσταση που διανύει η ανακλώμενη ροή πριν την σύγκρουση της με την παρακαμπτήρια μειωνόταν συνεχώς. Η αύξηση της κεντρικής παροχής (μέχρι 300 l/h) οδηγούσε σε αύξηση της συχνότητας του φαινομένου

Για την κατανόηση του φαινομένου στο σύνολο του αγωγού, φωτογραφήθηκαν διαδοχικά κατά 1 mm όλα τα παράλληλα στο κεντρικό επίπεδο μέχρι την άκρη του αγωγού. Παρατηρήθηκε πως 3mm μακριά από το κέντρο η ανακλώμενη ροή ήταν σταθερή και η ζώνη σύγκρουσης ήταν και αυτή σχεδόν σταθερή. Από αυτό το επίπεδο

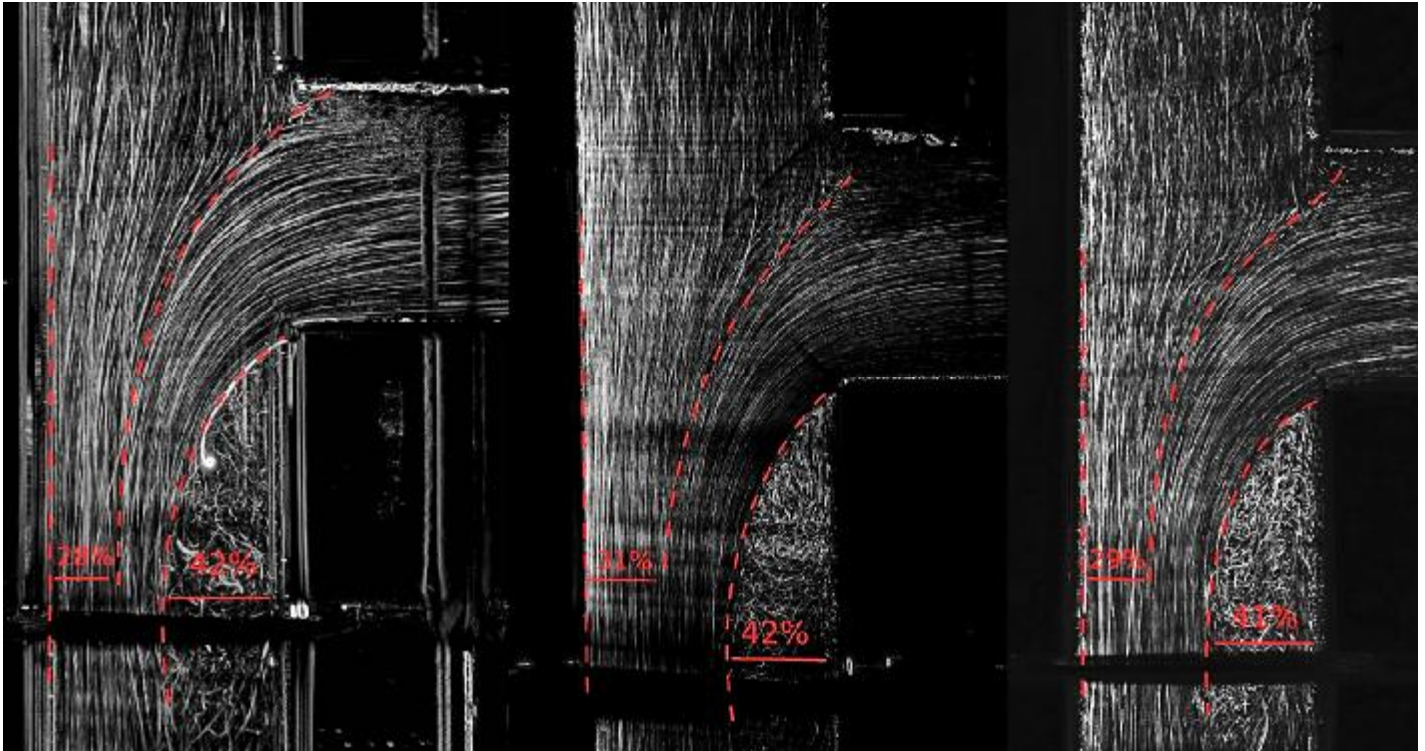
και προς την άκρη του αγωγού, η κύρια ροή χτυπούσε κατευθείαν στο απέναντι τοίχωμα όπως θα περιμέναμε εξ' αρχής. Στην άκρη σχεδόν του αγωγού φαίνεται κομμάτι της ροής που κινείται περιμετρικά του αγωγού (σχεδόν διαγώνια) και εκρέει στην περιοχή της ανακυκλοφορίας.

Συνοψίζοντας για την αποτύπωση του μεταβατικού φαινομένου, συμπεραίνεται πως κατά την σύγκρουση της κύριας ροής στο κυκλικό τοίχωμα του αγωγού ένα κομμάτι της ακολουθεί την καμπυλότητα του και επιστρέφει προς τα πίσω. Όχι σε όλη την διατομή όπως παρατηρήθηκε προηγουμένως για τα διαφορετικά επίπεδα. Η ανακλώμενη ροή σχηματίζει ένα τεταρτημόριο της σφαίρας γιατί αυτό το φαινόμενο εξελίσσεται στον χώρο. Στο κεντρικό επίπεδο η ανακλώμενη ροή τότε καταφέρνει να επικρατήσει ενάντια στην κύρια και τότε η κύρια κερδίζει καταφέροντας να χτυπήσει στο τοίχωμα. Γίνεται ένα διαρκές μπρα ντε φερ όπου παρουσιάζει περιοδικότητα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στα τρία πειραματικά μας ρευστά με διαφορετική έκταση. Η μείωση της παροχής κάτω από 140l/h, δηλαδή της ταχύτητας-ορμής της κύριας ροής εξαφανίζει το φαινόμενο. Οπότε διαπιστώνεται πως πέρα από την καμπυλότητα του αγωγού και η παροχή είναι καθοριστικός παράγοντας.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Τα πειράματα διεξήχθησαν για τρία διαφορετικά ρευστά, για να καταγραφεί η διαφορά του ροϊκού πεδίου ανάλογα με το ιξώδες. Το πρώτο ήταν απλό νερό (ιξώδες 1 cP), το δεύτερο ήταν μίγμα γλυκερίνης (99,7% καθαρή) με νερό για αναλογία 35% κατά βάρος (ιξώδες 2,7 cP) και το τρίτο ήταν και αυτό μίγμα γλυκερίνης αλλά σε αναλογία 41% κατά βάρος (ιξώδες 3,4 cP). Οι φωτογραφίες που ακολουθούν είναι η τυπική απόκλιση του στιγμιαίου πεδίου και έχει σημειωθεί η ενεργός διατομή των ροών και η έκταση της περιοχής αποκόλλησης ροής.

I 50% της παροχής διέρχεται από τον παρακαμπτήριο κλάδο



A) νερό $Re_A=Re_C=1716$

B) Γλυκερίνη 35% $Re_A=Re_C=707$

Γ) Γλυκερίνη 41% $Re_A=Re_C=57$

(Re_A -για μητρικό κλάδο, Re_C . για τον παρακαμπτήριο)

Η μίξη των δυο ροών

Δεν φαίνεται εμφανής η διαφορά στις τρεις διαφορετικές συνθήκες. Η ζώνη μίξης στην περίπτωση του νερού φαίνεται απλώς να ξεκινάει από πιο ψηλά στην περιοχή της αναστόμωσης. Μετρώντας την ενεργό διατομή της μητρικής ροής βρέθηκε 28%-31%-29% της διαμέτρου αντίστοιχα για τις τρεις περιπτώσεις ρευστού. Ουσιαστικά δεν φαίνεται να μεταβάλλεται αυτή η περιοχή.

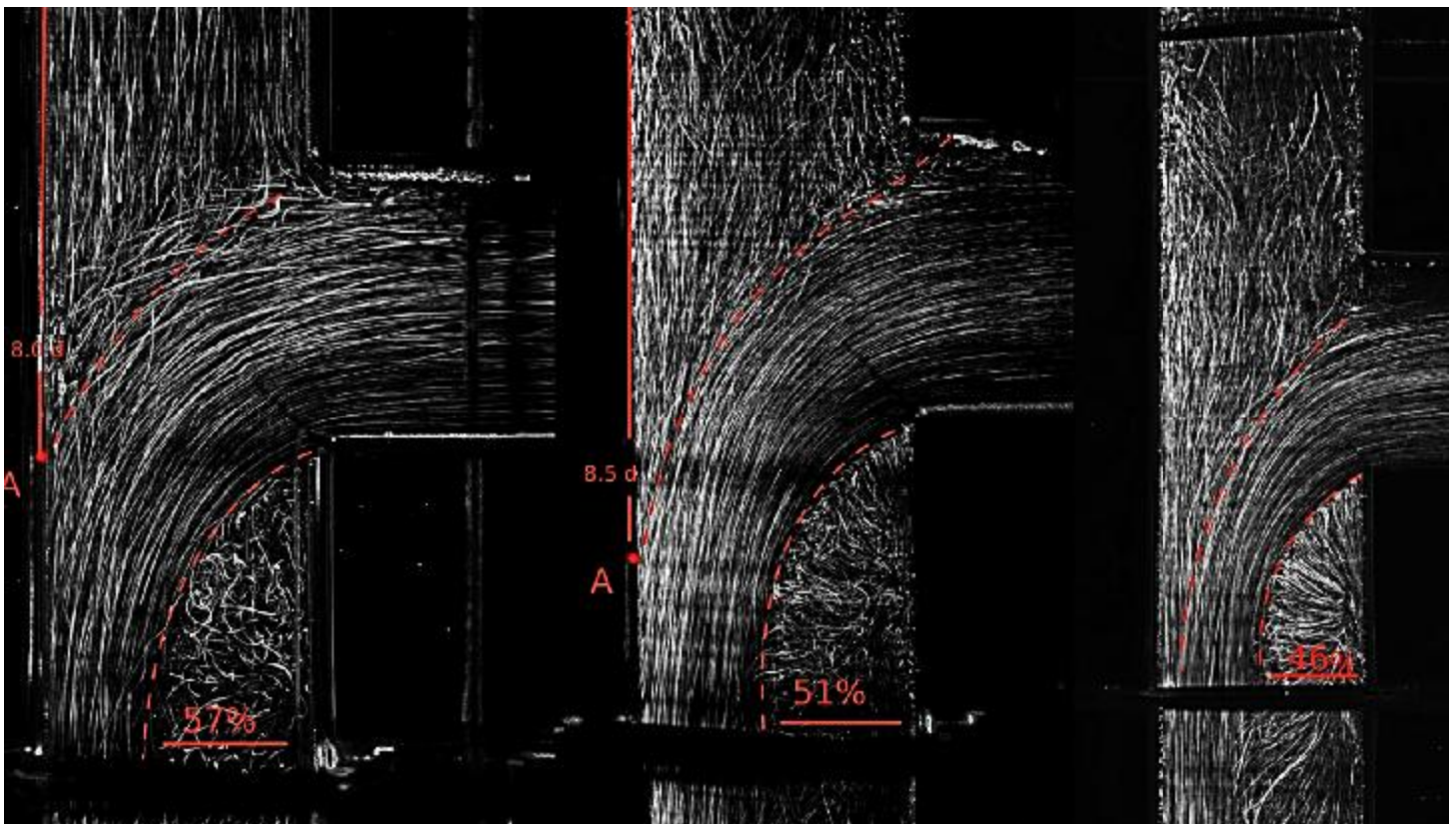
Η περιοχή αποκόλλησης της ροής

Το πλάτος της περιοχής είναι ίδιο και για τις τρεις περιπτώσεις, 42% για το νερό και την γλυκερίνη περιεκτικότητας 35% w/w και 41% για το μίγμα περιεκτικότητας 41% σε γλυκερίνη.

Οι στρόβιλοι στην περιοχή ανάντι της αναστόμωσης

Παρόλο που δεν φαίνονται ξεκάθαρα λόγω της συσσώρευση σωματιδίων είναι εμφανές ότι στην περίπτωση του νερού που ο αριθμός Re είναι (σχεδόν τριπλάσιος) η έκταση των δομών που στροβιλίζονται στην “φτέρνα” είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα μίγματα γλυκερίνης.

I 70% της παροχής διέρχεται από τον παρακαμπτήριο κλάδο



A) νερό $Re_A=1030$ $Re_C=2400$

B) Γλυκερίνη 35% $Re_A = 224$ $Re_C=990$

Γ) Γλυκερίνη 41% $Re_A=342$ $Re_C =79$

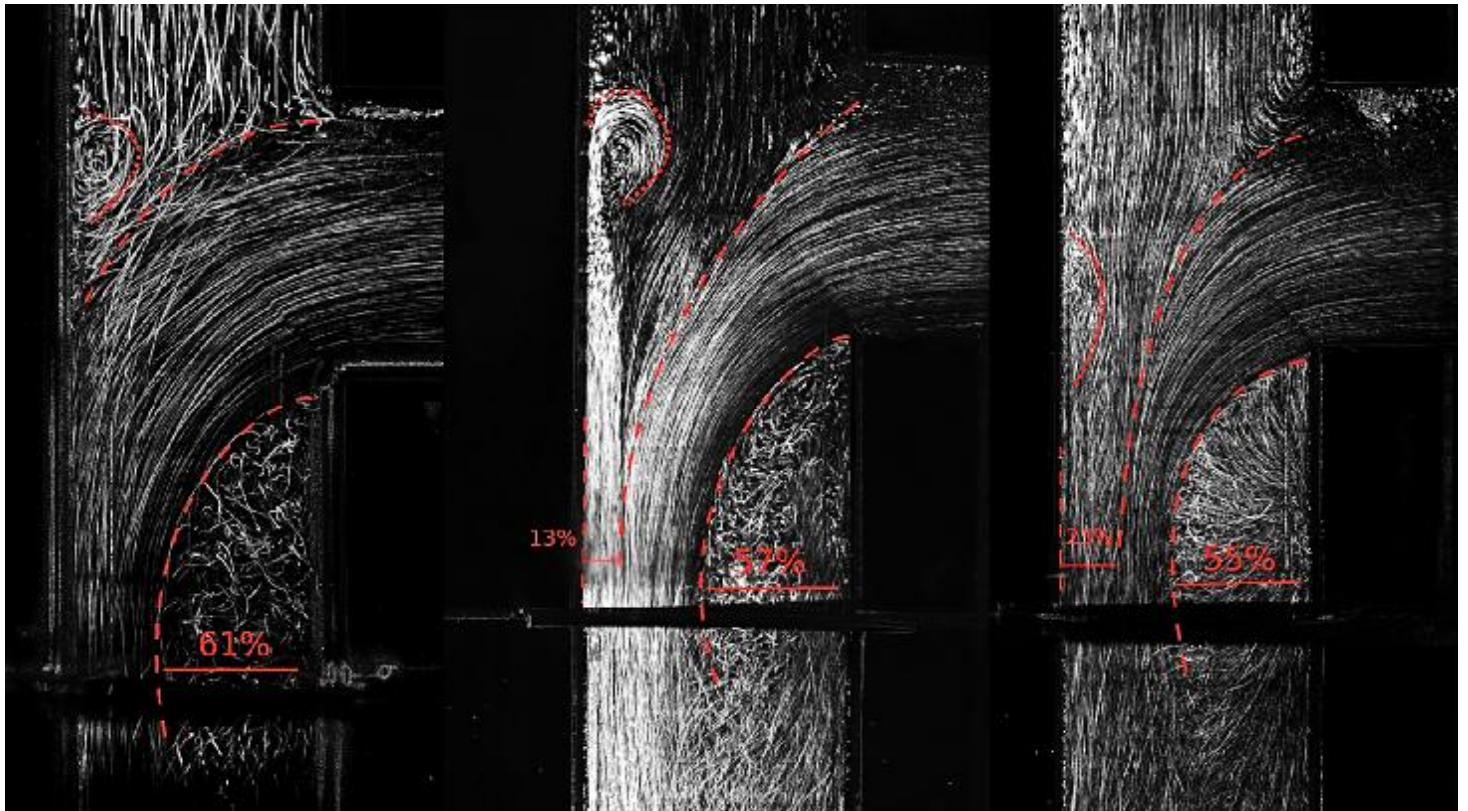
Παρατηρούνται οι αντίστοιχες διαφορές με εκείνες για 50% αλλά πιο έντονα.

Η καμπύλη μίξης είναι εμφανώς διαφορετική και στις τρεις περιπτώσεις. Στην περίπτωση του νερού που ο αριθμός Re είναι σχεδόν τριπλάσιος η παρακαμπτήρια ροή κυριαρχεί στο κεντρικό επίπεδο εκτοπίζοντας την μητρική ροή προς τις άκρες του αγωγού. Από σημείο “Α” και μετά φαίνεται να κυριαρχεί παρακαμπτήρια. Στην περίπτωση του νερού το σημείο αυτό απέχει 8 διαμέτρους από την στένωση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το σημείο “Α” παρατηρείται μισή διάμετρο πιο χαμηλά. Στην τρίτη περίπτωση που το ρευστό λειτουργίας διαθέτει το υψηλότερο ιξώδες η μητρική ροή διατηρεί έστω και μια μικρή περιοχή διέλευσης.

Η περιοχή αποκόλληση της ροής φαίνεται να αλλάζει στις τρεις περιπτώσεις σε αντίθεση με την 50% αναλογία. Μικραίνει όσο αυξάνεται το ιξώδες και πέφτει ο αριθμός Re , από 57% της διαμέτρου στην περίπτωση του νερού πέφτει σε 51% για το δεύτερο ρευστό και καταλήγει σε 46% για την περίπτωση μίγματος γλυκερίνης-νερού 41%

Οι στροβιλισμοί στην περιοχή της “φτέρνας” φαίνεται να έχουν εξαφανιστεί στην περίπτωση του νερού κάτι που δεν συμβαίνει για τις άλλες δυο περιπτώσεις.

I 85% της παροχής διέρχεται από τον παρακαμπτήριο κλάδο



A) νερό $Re_A=514$ $Re_C=2917$ B) Γλυκερίνη 35% $Re_A = 212$ $Re_C=1203$ Γ) Γλυκερίνη 41% $Re_A=171$ $Re_C =$

Η ζώνη μίξης παρουσιάζει έντονες αλλαγές, στην πρώτη περίπτωση η παρακαμπτήρια εκτοπίζει την μητρική από το κεντρικό επίπεδο. Στην δεύτερη εικόνα η ενεργός διατομή μετριέται 13% της διαμέτρου . Σε αντίθεση με το τρίτο ρευστό που έχει και το χαμηλότερο αριθμό Re η μητρική διατηρεί 23% της διαμέτρου.

Δομή στροβίλου

Στην πρώτη περίπτωση με το νερό η στροβιλώδης δομή στο τοίχωμα δεν διακρίνεται τόσο καθαρά, είτε γιατί γενικά οι φωτογραφίες του νερού δεν είναι τόσο ευδιάκριτες σε σχέση με της γλυκερίνης είτε γιατί οι ταχύτητες είναι τόσο μεγαλύτερες για να δημιουργούν μια σταθερή δομή. Στην τρίτη περίπτωση ο στρόβιλος έχει μικρότερο

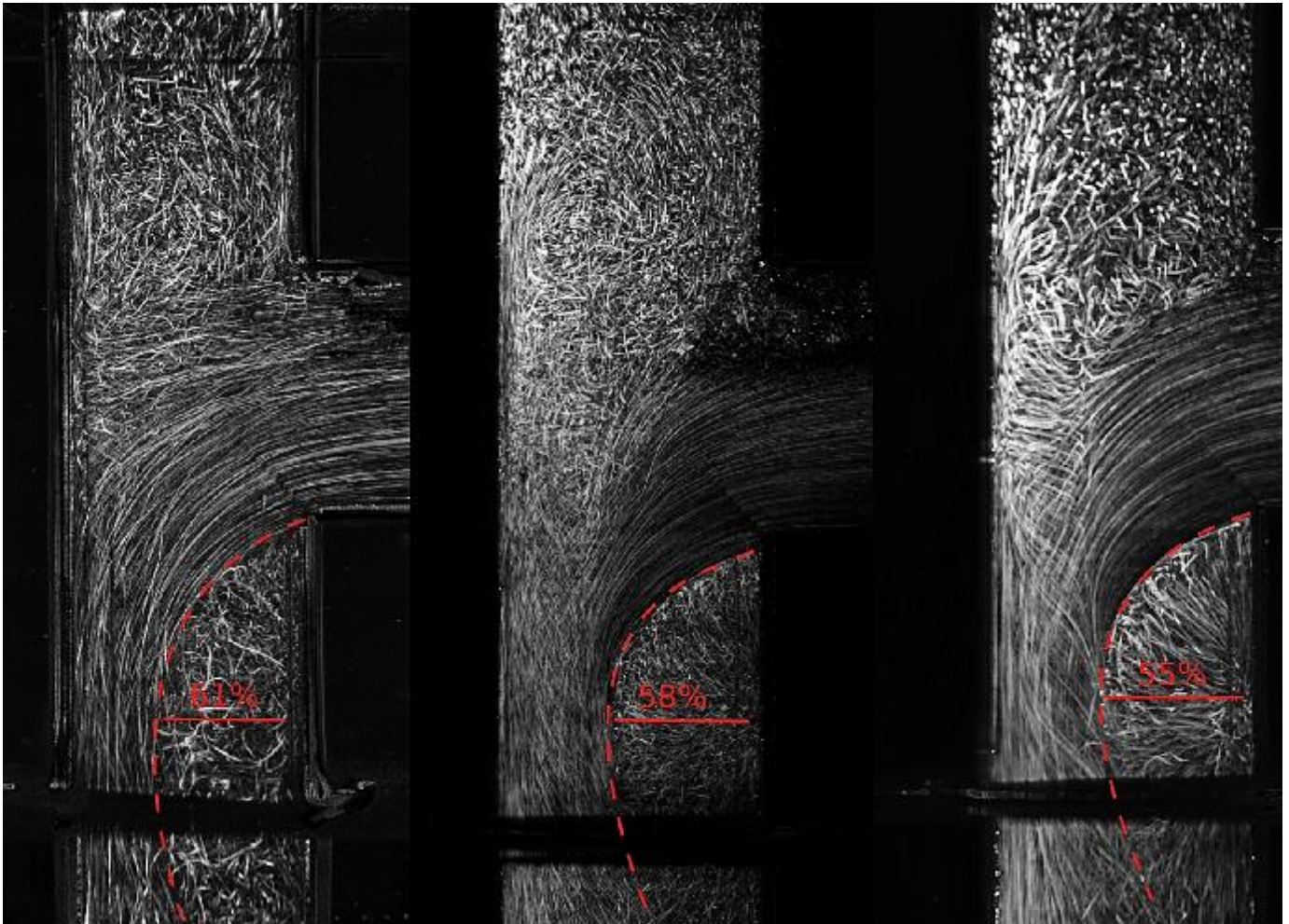
μέγεθος και τείνει προς το να εξαφανιστεί. Παρατηρείται πως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός Re τόσο πιο μετατοπισμένη προς τα πάνω είναι η δομή του στροβίλου

Η ζώνη ανακυκλοφορίας

Για το πλάτος στην περιοχή των “δαχτύλων” μετρήθηκε διαδοχικά για τα 3 ρευστά λειτουργίας να καλύπτει το 61%, 57%, 55% της διαμέτρου του αγωγού.

Παρατήρηση: Τα όργανα μέτρησής μας και οι βάνες που ρυθμίζανε τις παροχές βρισκόντουσαν αρκετά κοντά στο όριο λειτουργίας για παροχές 15-10% (~2,4 l/h) οπότε η αβεβαιότητα μας εκτιμάμε πως είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ροϊκού πεδίου για αναλογίες 50%

I 100% της παροχής διέρχεται από τον παρακαμπτήριο κλάδο



A) νερό $Re_c=3432$

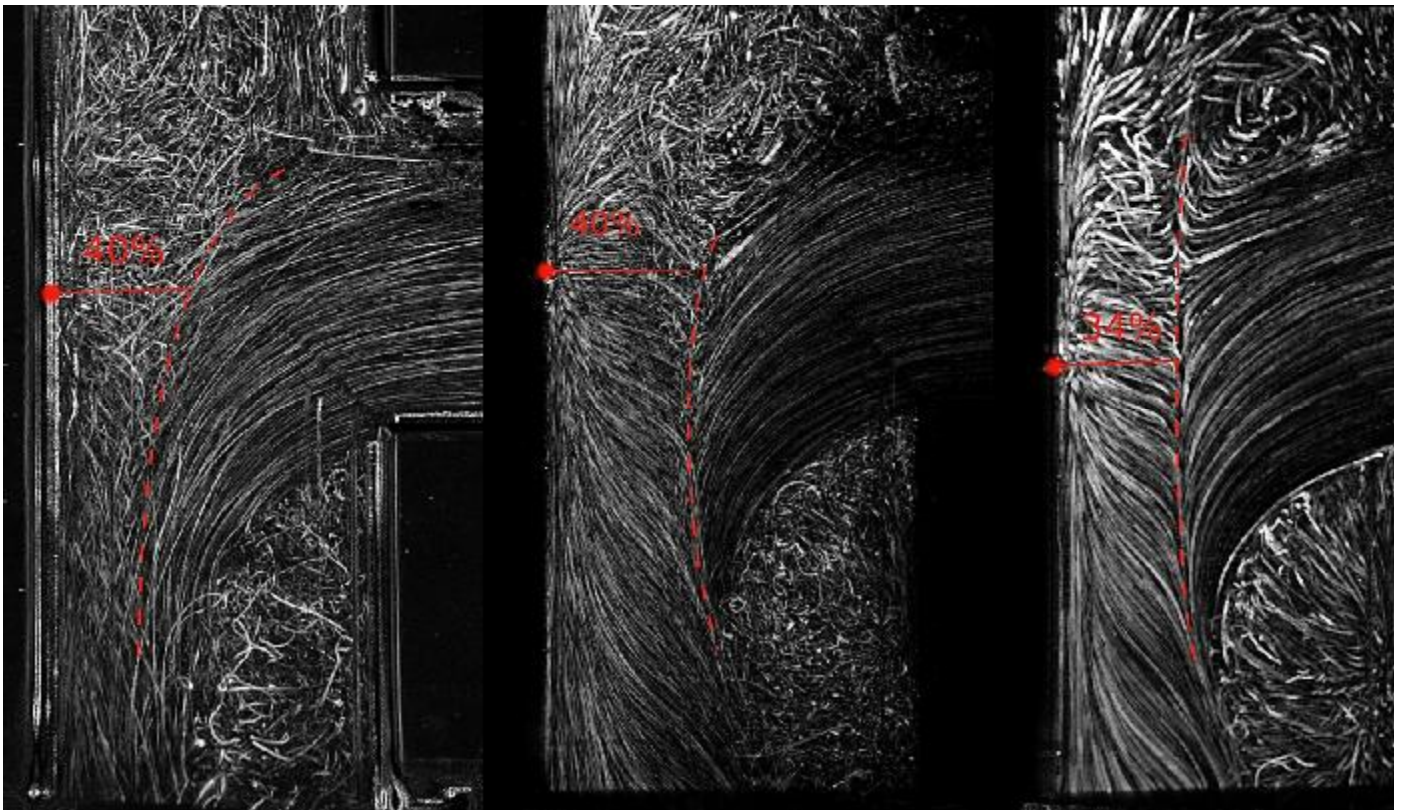
B) Γλυκερίνη 35% $Re_c=1415$

Γ) Γλυκερίνη 41% $Re_c=1140$

Λόγω της περιοδικότητας του φαινομένου η τυπική απόκλιση του στιγμιαίου πεδίου δεν παρέχει ευδιάκριτες φωτογραφίες.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η έκταση της κάθε περιοχής ανακυκλοφορίας. Η διαφορά τους ελάχιστη αλλά υπαρκτή. Και σε αυτή την περίπτωση είναι φθίνουσα όσο μειώνεται ο αριθμός Re

Παρακάτω συγκρίνεται μια επιπλέον διαφοροποίηση, η απόσταση της γραμμής σύγκρουσης των δυο ροών από την πηγή που εμφανίζεται στο απέναντι τοίχωμα. Προστέθηκαν 5 στιγμιότυπα αντίστοιχης περιοδικής στιγμής για να υπολογίσουμε μια μέση κατάσταση και όχι μόνο ένα στιγμιότυπο



Φαίνεται πως η απόσταση μειώνεται στην 3η κατάσταση όπου το ρευστό μας έχει το μεγαλύτερο ιξώδες.

Η γραμμή σύγκρουσης από μια πιο καμπύλη μορφή που έχει στην περίπτωση του νερού τείνει να γίνει μια ευθεία όπως βλέπουμε στην τρίτη κατάσταση.

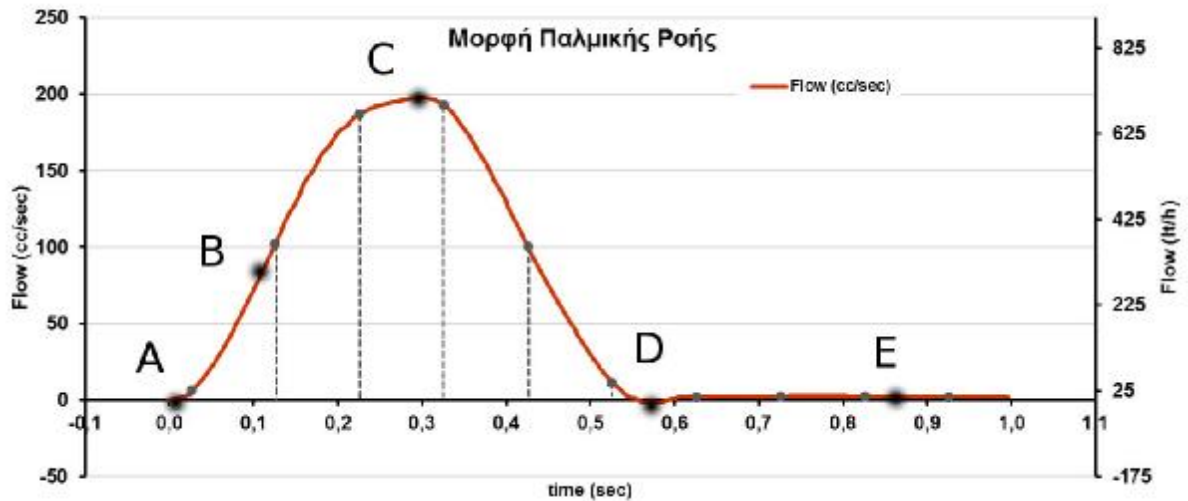
Και στις τρεις καταστάσεις η πηγή (κόκκινη κουκίδα) φαίνεται να βρίσκεται λίγο πιο κάτω από το μέσο του παρακαμπτήριου αγωγού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Η αποτύπωση του παλμικού πεδίου που ακολουθεί γίνεται για τις ίδιες ακριβώς συνθήκες εισόδου με εκείνες του μόνιμου πεδίου. Δηλαδή τις αναλογίες στις παροχές των δυο κλάδων (50%, 70%, 85%, 100% για τον παρακαμπτήριο). Ακόμα η συνεχής παροχή 4l/min που υπήρχε για την μόνιμη κατάσταση είναι περίπου όσος όγκος ρευστού εκτοπίζει το έμβολο στην διάρκεια ενός λεπτού (60cc/ παλμό). Η συνολική διάρκεια του παλμού είναι σχεδόν 1 δευτερόλεπτο, ο αριθμός Womersley της ροής είναι 17 . Η προσομοίωση της καρδιακής λειτουργίας γίνεται με την χρήση βηματικής εμβολοφόρου αντλίας που καθοδηγείται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή (μέσω του λογισμικού Labview). Η καταγραφή της παροχής κατά την διάρκεια της περιόδου γινόταν με την βοήθεια παλμογραφικού ηλεκτρομαγνητικού ροομέτρου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ένας κύκλος της αντλίας όπως έχει καταγραφεί από το παλμογραφικό ροόμετρο. Τα πέντε σημεία που είναι σημειωμένα είναι οι στιγμές του κύκλου που θα απεικονηθούν τα ροϊκά πεδία. Η εκκίνηση του κύκλου στο σημείο A , η ανάπτυξη της ροής στο σημείο B, το ανώτατο σημείο της παροχής στο C, το σημείο D είναι στην περιοχή που παρατηρείται μια ελαφριά ανάστροφη πορεία, ενώ το πέμπτο σημείο E είναι στην στάσιμη περιοχή. Τα τρία πρώτα σημεία αφορούν στη συστολική φάση (έμπροσθεν κίνηση του εμβόλου) ενώ τα υπόλοιπα δυο στη διαστολική (όπισθεν κίνηση του εμβόλου).



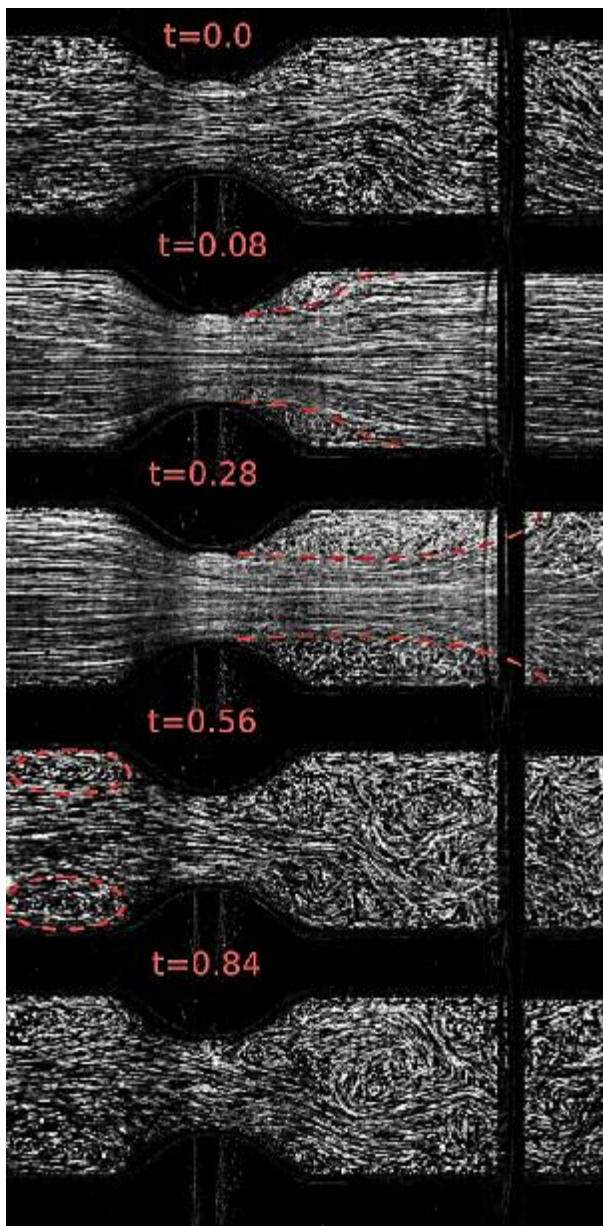
Συνολικό χαρακτηριστικό του παλμικού πεδίου, για όλες τις πειραματικές συνθήκες, είναι η σταδιακή αύξηση της έντασης των μεγεθών του ροϊκού πεδίου στις χρονικές όπου κυριαρχούν οι αδρανειακές δυνάμεις (A-B-C). Για την διάρκεια όπου κυριαρχούν οι δυνάμεις τριβής (D-E) παρατηρείται η αποδιοργάνωση του ροϊκού πεδίου τριβής με την εμφάνιση στάσιμων και ανοργάνωτων δομών.

Η αποτύπωση του ροϊκού πεδίου γίνεται με την χρήση βίντεο. Μετά την εξαγωγή των frames σε στιγμιότυπα και την αφαίρεση από αυτά του μέσου πεδίου αποτυπώνονται ευδιάκριτα οι ροϊκές γραμμές. Η αποτύπωση του ροϊκού πεδίου δεν γίνεται σε βάθος χρόνου με την τυπική απόκλιση του στιγμιαίου πεδίου διότι ο παλμοί απέχουν μεταξύ τους ελαφρώς λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα να μην συμπίπτουν ακριβώς οι χρονικές στιγμές (διότι η κάμερα έχει σταθερό ρυθμό 25fps). Κρίθηκε πως η ουσιαστική διαφορά του στιγμιαίου πεδίου με την τυπική απόκλισή του ήταν αμεληταία.

6.1 ΣΤΕΝΩΣΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ

Οι περιοχές καταγραφής είναι εκτείνονται από την στένωση μέχρι την αναστόμωση για την απεικόνιση της επίδρασης της στένωσης στο ροϊκό πεδίο. Το ρευστό λειτουργίας είναι μίγμα γλυκερίνης νερού 41% κατά βάρος, έχει ιξώδες 3.4 cP

Το μήκος του αγωγού που φαίνεται είναι μια διάμετρο πριν την στένωση και 2,2 διαμέτρους μετά. Η ροή πηγαίνει από τα αριστερά προς τα δεξιά



Η εκκίνηση του κύκλου όπου όλα τα σωματίδια ταυτόχρονα θέτονται σε κίνηση

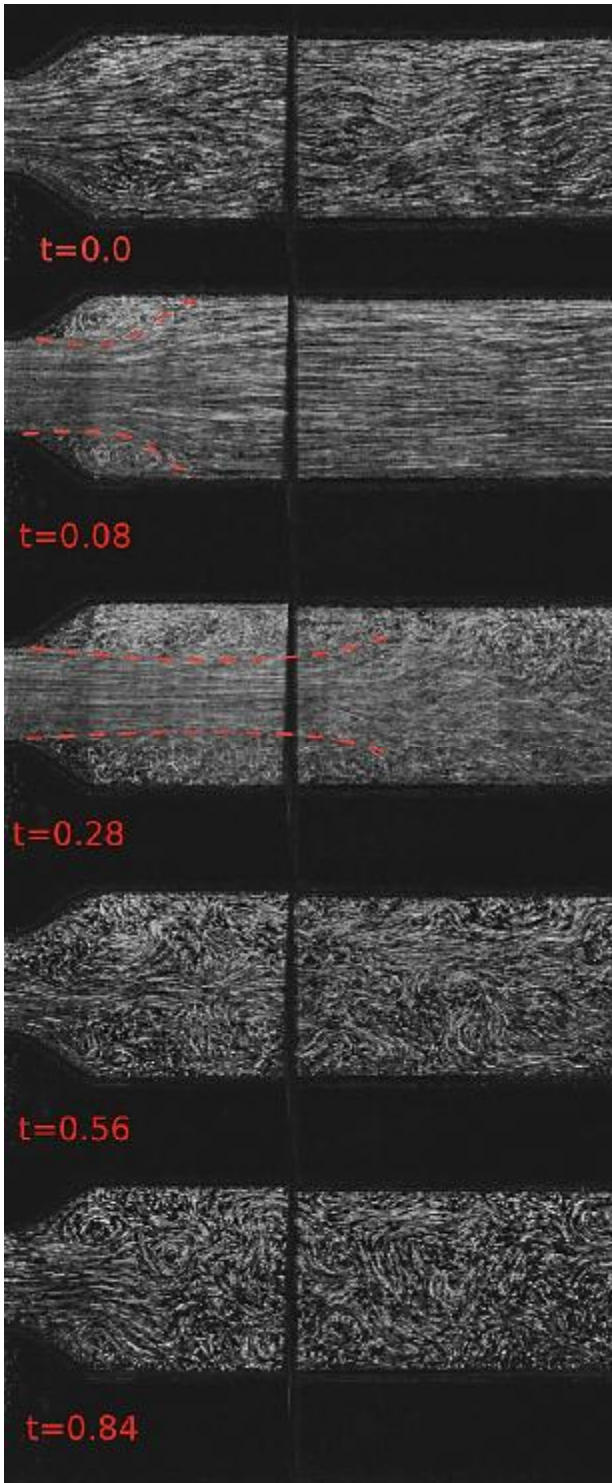
Αρχίζουν και διαμορφώνονται οι ζώνες ανακυκλοφορίας

Στο μέγιστο σημείο του κύκλου η παροχή είναι μεγαλύτερη και το ροϊκό πεδίο μοιάζει με εκείνο του μόνιμου πεδίου

Στο σημείο D του παλμικού κύκλου παρατηρούμε ζώνες ανακυκλοφορίας πίσω από την περιοχή της στένωσης

Στο τέλος του κύκλου το ρευστό έχει ακανόνιστη συμπεριφορά

Ανάπτυξη της ροής από την στένωση μέχρι 3.5 διαμέτρους



Αρχή του κύκλου

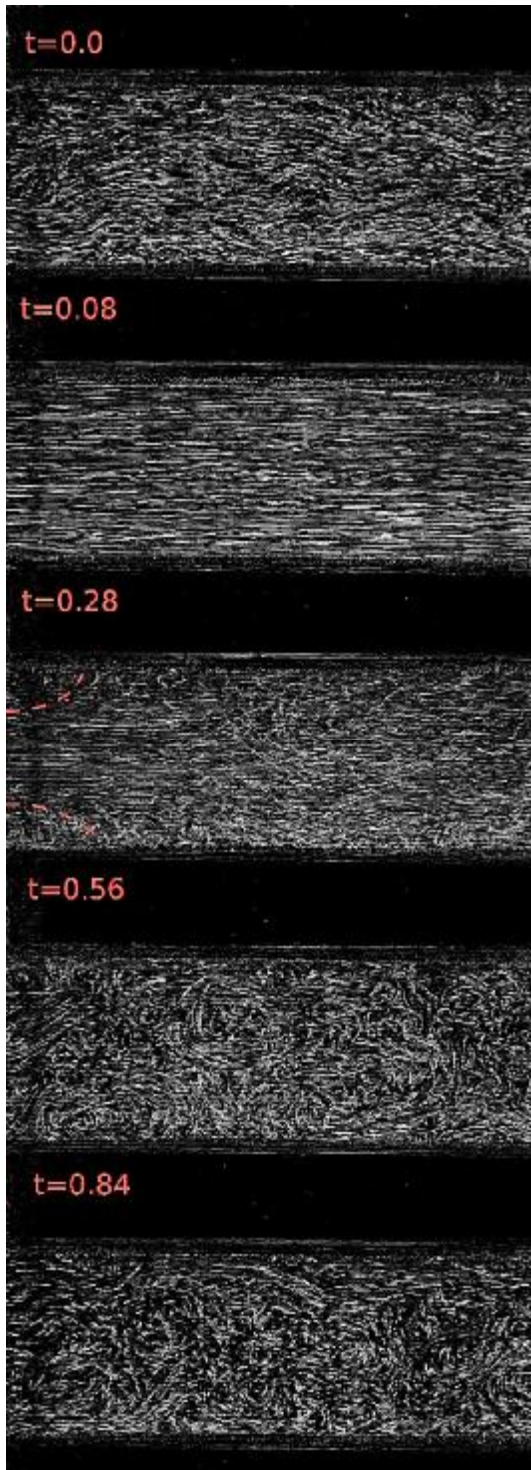
Μόλις που αρχίζουν να δημιουργούνται οι ζώνες ανακυκλοφορίας. Η δέσμη εκροής αμέσως καλύπτει όλη την διατομή

Ανάπτυξη της ροής όπως φαίνεται και στο μόνιμο πεδίο, δημιουργία των ζωνών ανακυκλοφορίας

Ακανόνιστη ελαφριά κίνηση

Τέλος του κύκλου και ακανόνιστη κίνηση

Ενδιάμεση περιοχή μεταξύ 1.6D και 4,6D μετά την στένωση



Αρχή του κύκλου, τα σωματίδια μόλις ξεκινούν την κίνησή τους

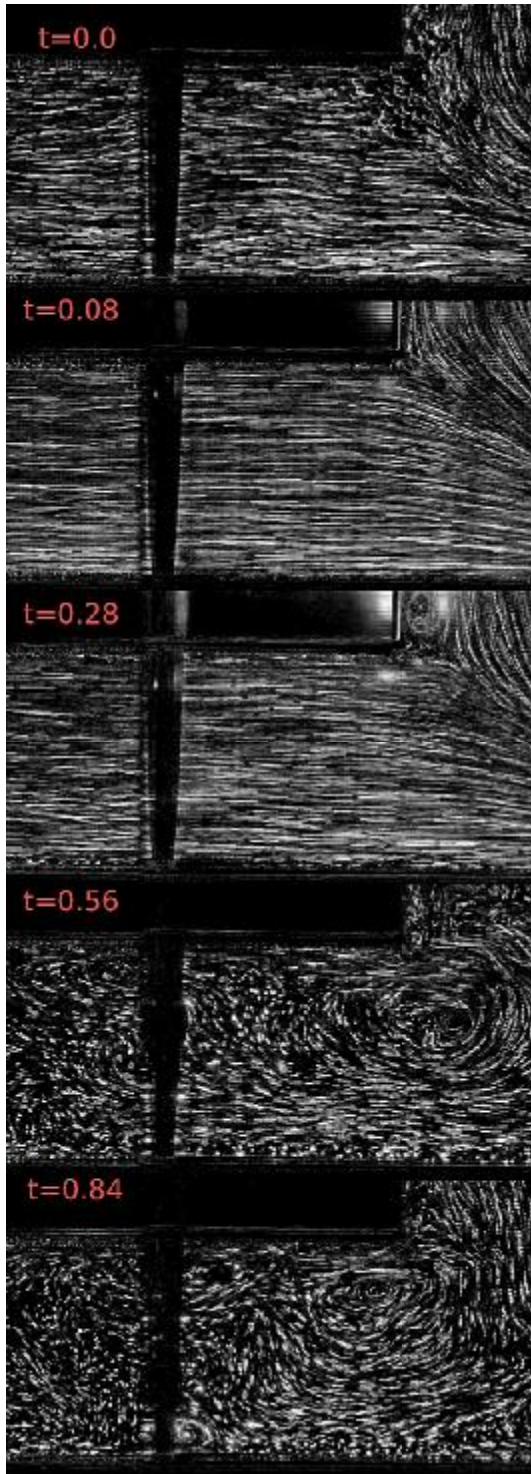
Σημείο Β του καρδιακού κύκλου η εμφανίζονται ίδιες ταχύτητες σε όλη την διατομή του αγωγού.

Στο σημείο C του καρδιακού κύκλου φαίνεται η τυρβώδης περιοχή του μόνιμου πεδίου, αποδομείται ο δυναμικός πυρήνας της δέσμης εκροής.

Ακανόνιστες κινήσεις

Ακανόνιστες κινήσεις

Περιοχή λίγο πριν την αναστόμωση μεταξύ 5D και 7D μακριά από την στένωση



Φαίνεται μόλις ξεκίνησε η κίνηση

Φαίνεται καθαρά η γραμμική ζώνη μίξης των δυο κλάδων.

Παρατηρείται σε σύγκριση με το προηγούμενο στιγμιότυπο ένα μικρό οριακό στρώμα και η δημιουργία μιας δίνης εντός του παρακαμπτήριο κλάδου στην περιοχή ανάντι της αναστομωσης

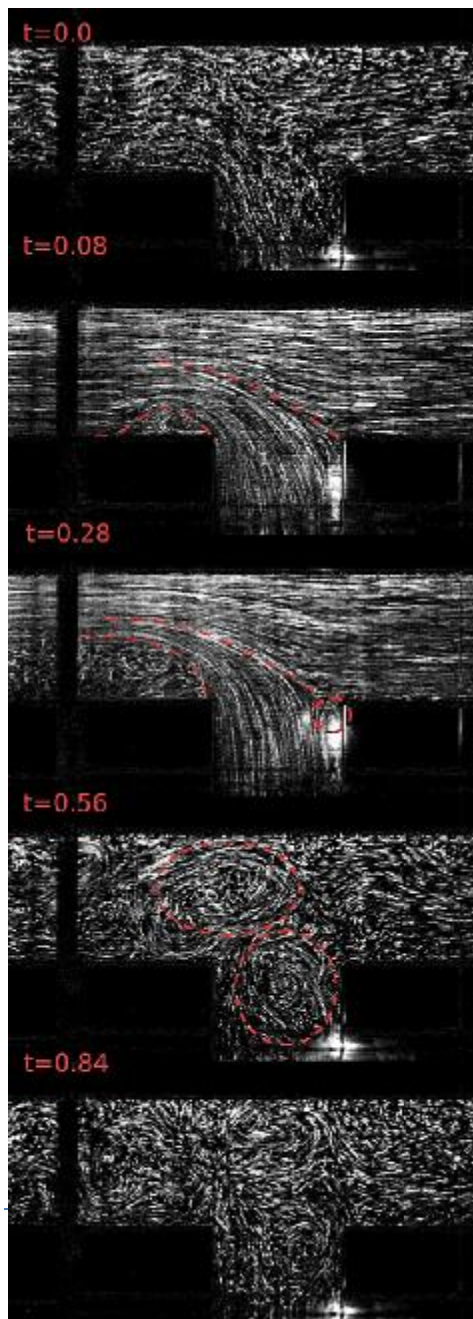
Δημιουργία μιας στιγμιαίας δίνης

Ακανόνιστη κίνηση παρατηρούνται σωματίδια πλήρως ακίνητα

6.2 ΑΝΑΣΤΟΜΩΣΗ ΓΙΑ ΡΕΥΣΤΟ ΙΞΩΔΟΥΣ 3,4 CP

6.2.1 Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 50%

Τα στρογγυλά φωτεινά σώματα στην περιοχή της φτέρνας είναι φυσαλίδα αέρα που κάνει ταλάντωση αντίστοιχη του εμβόλου. Στην δεύτερη και στην τρίτη φωτογραφία βρισκόμαστε στην συστολική φάση Η ροή πάει από τα δεξιά προς τα αριστερά



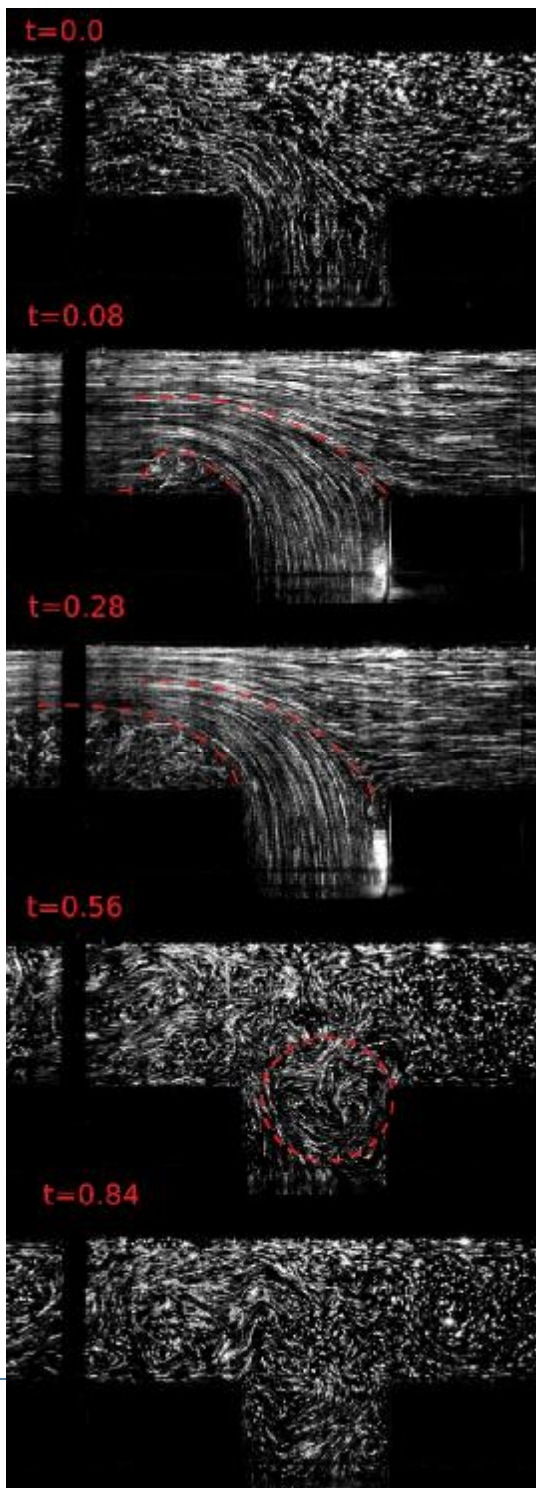
Αρχή του κύκλου όλα τα σωματίδια διαγράφουν μια μικρή εκκίνηση

Σημείο Β του καρδιακού κύκλου η ανακυκλοφορία βρίσκεται σε περιορισμένο στάδιο

Σημείο C του καρδιακού κύκλου το ροϊκό πεδίο μοιάζει με εκείνο για την μόνιμη κατάσταση. Στην περιοχή της φτέρνας δημιουργείται δίνη.

Δημιουργία τοπικών δινών

Προς το τέλος του κύκλου



6.2.2 Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 70%

Εκκίνηση του κύκλου

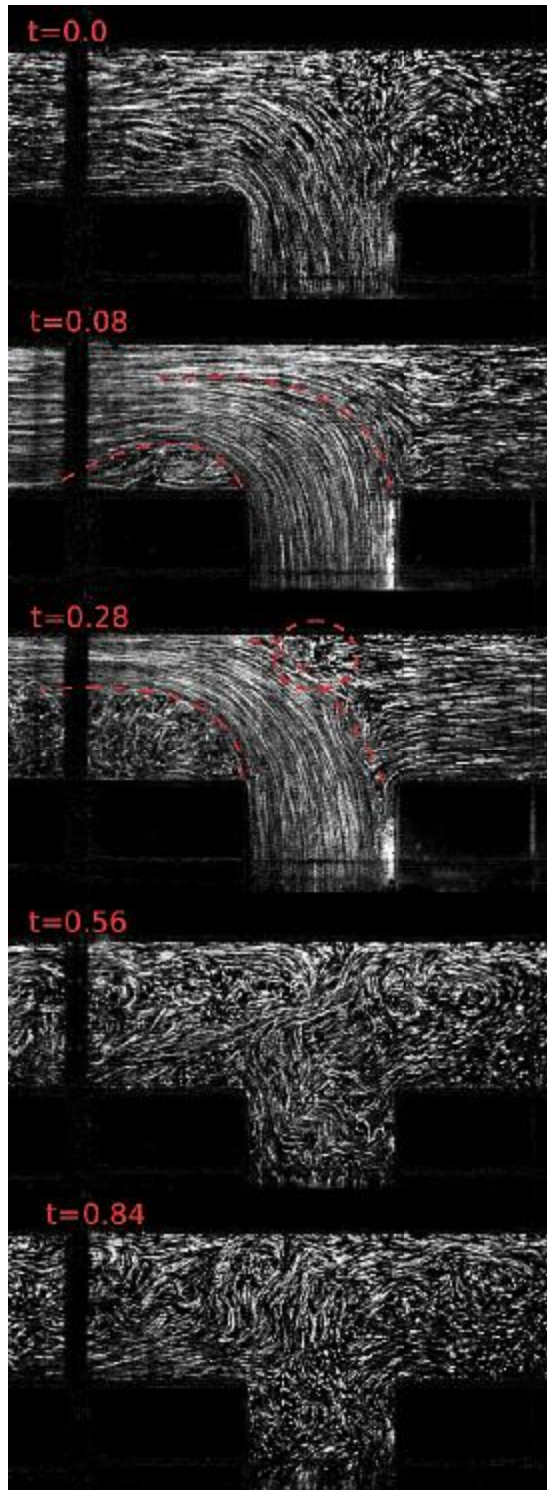
Η ζώνη ανακυκλοφορίας βρίσκεται σε περιορισμένο έκταση
Εμφανίζεται η εγκλωβισμένη φυσαλίδα στην συστολική φάση του εμβόλου.

Το στιγμιότυπο μοιάζει με εκείνο του μόνιμου πεδίου.

Εμφάνιση τοπικών δινών

Στο τέλος του κύκλου φαίνονται
αρκετά στάσιμα σωματίδια

6.2.3 Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 85%



Εκκίνηση κύκλου

Μικρή έκταση ανακυκλοφορίας, η παρακαμπτήρια δεν προφτάνει να χτυπήσει στο απέναντι τοίχωμα

Εμφάνιση στροβιλώδους δομής όπως στο μόνιμο πεδίο

Ακανόνιστη κίνηση

Ακανόνιστη κίνηση

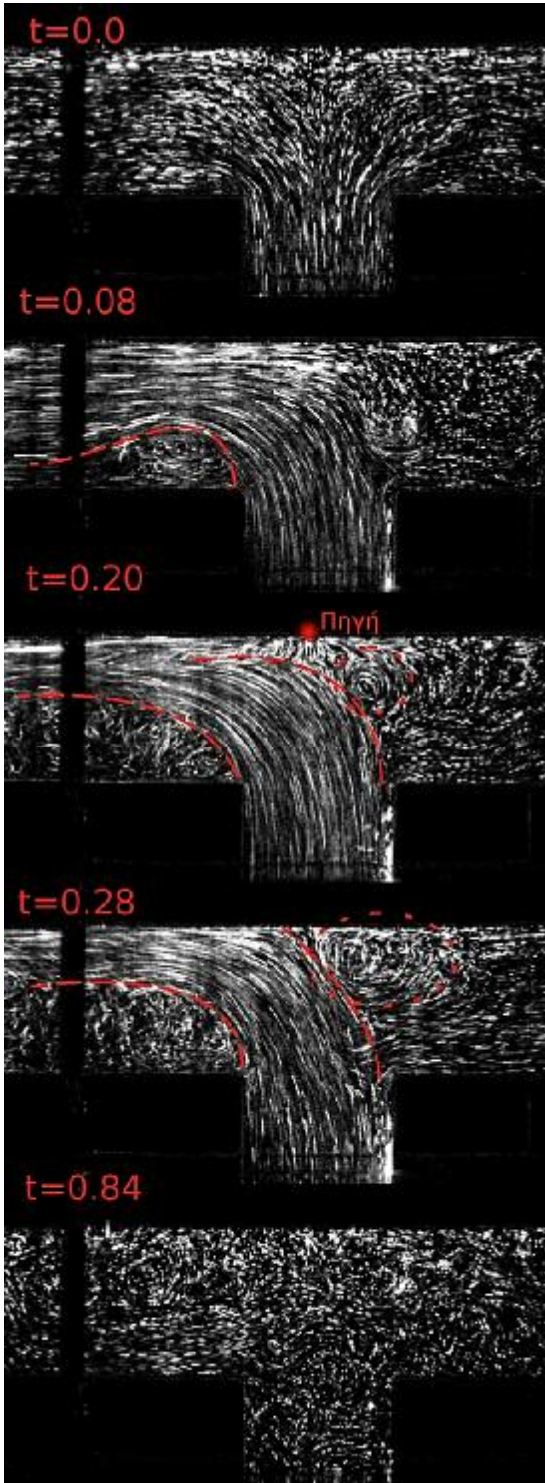
6.2.4 Παροχή παρακαμπτήριου κλάδου 100%

Στην περίπτωση αυτή αντικαταστήθηκε το σημείο D του καρδιακού κύκλου από ένα τρίτο στιγμιότυπο στην περιοχή της ανάπτυξης της ροής για χρόνο 0.2 δευτερόλεπτα. Ωστε να φανεί το μεταβατικό φαινόμενο που παρατηρήθηκε στην μόνιμη ροή. Εκκίνηση του κύκλου.

Φαίνεται η γέννηση της ανακυκλοφορίας

Εμφανίζεται η πηγή της αντανακλώμενης ροής και η πρόσπτωση της στην κύρια.

Η δομή του στροβίλου είναι μεγαλύτερη όταν η κύρια ροή προσκρούει στο απέναντι τοίχωμα του αγωγού.



Προς το τέλος του κύκλου,
στασιμότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οπτικοποιήθηκε το ροϊκό πεδίο αποφραγμένης αρτηρίας με 90° αναστόμωση. Το πειραματικό μοντέλο κατασκευάστηκε για να προσομοιώσει τον ανθρώπινο οργανισμό, μοντελοποιήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά: η διάμετρος, η παλμική λειτουργία της καρδιάς, το ιξώδες του αίματος. Η κατασκευή της διάταξης βασίστηκε στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και σχεδιάστηκε ώστε να υπάρχουν δυο συνθήκες ροής, παλμικής και μόνιμης. Η καταγραφή επιτεύχθηκε με την διασπορά τροχιοδεικτικών σωματιδίων στο ρευστό λειτουργίας και με τον φωτισμό (λείζερ) του κεντρικού επιπέδου. Η καταγραφή των σωματιδίων γινόταν σε δυο διαστάσεις οπότε οι ροϊκές γραμμές που αποτυπώνονταν στην φωτογραφική μηχανή κινιόντουσαν στο κεντρικό επίπεδο.

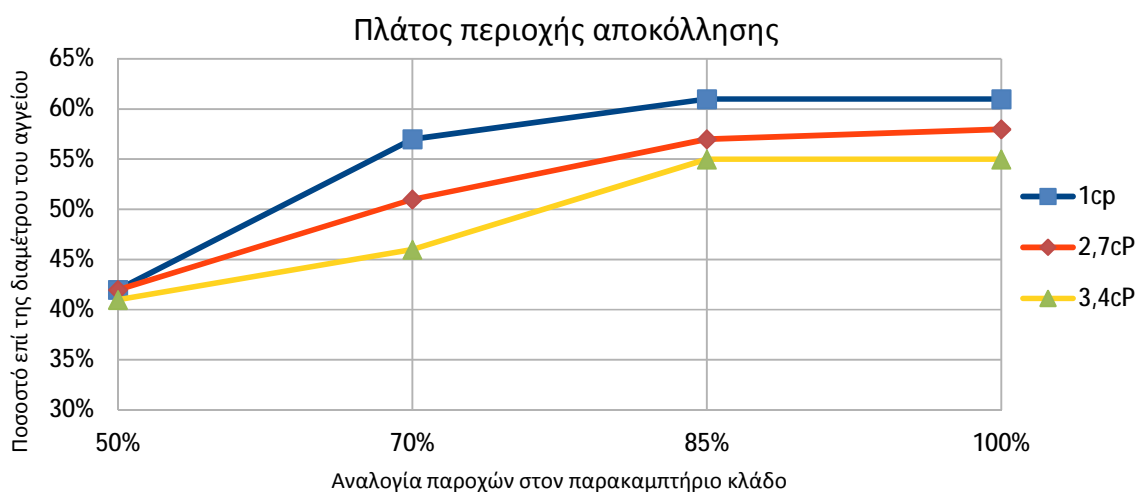
Στόχος της εργασίας ήταν η αποτύπωση του ροϊκού πεδίου στην περιοχή της στένωσης και πως αναπτύσσεται η ροή μέχρι την περιοχή της αναστόμωσης. Το βασικό ερώτημα ήταν αν και πότε προλαβαίνει να ομαλοποιηθεί η ροή έτσι ώστε να μην επηρεάζει το ροϊκό πεδίο της αναστόμωσης. Δεύτερος στόχος ήταν η αποτύπωση του ροϊκού πεδίου στην περιοχή της αναστόμωσης για τρία διαφορετικά ρευστά λειτουργίας και τέσσερις διαφορετικές παροχές. Συγκεκριμένα πως διαμορφώνεται το ροϊκό πεδίο για κάθε συνθήκη παροχής, την έκταση της περιοχής αποκόλλησης και μετά από πόση απόσταση από την αναστόμωση ομαλοποιείται η ροή. Τα παραπάνω έγιναν σε μόνιμη ροή λειτουργίας.

Για την παλμική ροή αποτυπώθηκε το ροϊκό πεδίο της περιοχής ενδιαφέροντος για πέντε

διαφορετικά σημεία του καρδιακού κύκλου. Τρία σημεία στην συστολική φάση και δυο στην διαστολική. Παρατηρήθηκε ότι στην συστολική φάση της αντλίας το ροϊκό πεδίο έμοιαζε αρκετά με εκείνο της μόνιμης ροής.

Για την ανάπτυξη της ροής από την στένωση μέχρι την αναστόμωση παρατηρήθηκαν και αποτυπώθηκαν οι εξής χαρακτηριστικές περιοχές: η δέσμη εκροής, η αποκόλληση της ροής και η δημιουργία ζώνης ανακυκλοφορίας, ένα στρώμα μίξης μεταξύ της δέσμης εκροής και του οριακού στρώματος με σταδιακή μείωση της διατομής της δέσμης εκροής και την εμφάνιση έντονων δομών στροβιλισμού. Παρατηρήθηκε η τυρβώδης περιοχή μετά την αποδόμηση της δέσμης εκροής και η ομαλοποίηση πια της ροής πριν την στένωση. Οι χαρακτηριστικές περιοχές εμφανίζουν εξάρτηση από τον αριθμό Re για την έκταση και την θέση τους. Παρατηρήθηκε πως για αριθμό Re κάτω από 350 η δέσμη εκροής φτάνει ανεπηρέαστη μέχρι την περιοχή της αναστόμωσης.

Από μετρήσεις που έγιναν στην τυπική απόκλιση του στιγμιαίου πεδίου για κάθε περίπτωση κατασκευάστηκε το παρακάτω σχεδιάγραμμα. Καταγράφεται το ποσοστό επί της διατομής του αγωγού που καταλαμβάνει η περιοχή της αποκόλλησης ροής για κάθε αναλογία παροχής. Στο υπόμνημα φαίνεται το ιξώδες του ρευστού λειτουργίας (νερό , 35% γλυκερίνη, 41% γλυκερίνη)



Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα όσο αυξάνεται η παροχή από τον παρακαμπτήριο

κλάδο τόσο αυξάνεται το ποσοστό που καταλαμβάνει η περιοχή της αποκόλλησης. Ουσιαστικά μειώνεται η ενεργός διατομή όπου διέρχεται η ροή στην περιοχή της αναστόμωσης. Επίσης είναι εμφανές πως όσο μεγαλύτερο το ιξώδες του ρευστού λειτουργίας τόσο μικρότερο το ποσοστό της διατομής που καταλαμβάνεται.

Η ομαλοποίηση της ροής μετά την περιοχή της αναστόμωσης δεν ήταν εύκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Ποιοτικά φαινόταν ίδια η απόσταση για όλες τις περιπτώσεις παροχών περίπου 3 με 3,5 διαμέτρους μακριά από την εκβολή της αναστόμωσης.

Συγκρίνοντας τα ροϊκά πεδία που καταγράφηκαν με αντίστοιχες μελέτες τις βιβλιογραφίας είναι προφανές πως το 90 μοιρών bypass είναι ακατάλληλο. Η μίξη των δυο ροών γίνεται πιο “βίαια” και η κρίσιμη περιοχή της αποκόλλησης της ροής (στο “δάχτυλο της αναστόμωσης”) είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με μικρότερης γωνίας αναστόμωσης.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η συσσώρευση σωματιδίων στην περιοχή της “φτέρνας” στην αναστόμωσης εμπόδιζε την αποτύπωση των δομών στροβίλων που δημιουργόντουσαν στην περιοχή. Η εύρεση ενός τρόπου για την απομάκρυνση των σωματιδίων θα πρόσφερε πληρέστερη αποτύπωση του φαινομένου της μίξης. Ίσως η δημιουργία ενός στρώματος νανοσωματιδίων στην περιοχή εκείνη να εμποδίσει την προσκόλληση των σωματιδίων γυαλιού που έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 100μ.

Η διάταξη είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της απόστασης της αναστόμωσης από την στένωση. Ενδιαφέρον θα είχε η παρατήρηση της μεταβολής αυτής στο ροϊκό πεδίο της αναστόμωσης, δηλαδή πόσο επηρεάζει η ύπαρξη της

στένωσης και του πεδίου που προκαλείται από αυτήν.

Η παρούσα εργασία κατέγραψε το κύριο επίπεδο των αγωγών, το φαινόμενο όμως είναι τρισδιάστατο θα προσέδιδε καλύτερη οπτική κατανόηση του φαινομένου αν γινόταν οπτικοποίηση σε άλλο επίπεδο του αγωγού. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να αλλάξει ο τρόπος στησίματος της διάταξης.

Με την μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry) θα μπορούσε να μετρηθεί η ταχύτητα και η στροβιλότητα του ροϊκού πεδίου, να προσδιοριστούν οι διατμητικές τάσεις και η ταλάντευση τους ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια πια οι κρίσιμες περιοχές για την μελλοντική ανάπτυξη της αθηρωματικής πλάκας.

Θα μπορούσε να αντικατασταθούν τα υπάρχοντα σταθερά τοιχώματα με ελαστικά ώστε να επιτευχθεί καλύτερη μοντελοποίηση του ανθρώπινου αγγείου. Η προσθήκη πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων θα μετρούσε τις ορθές τάσεις στα τοιχώματα και θα προσέδιδε μια δυνατότητα μηχανικής ανάλυσης του τοιχώματος στην πάροδο του χρόνου.

Τέλος μπορεί ακόμα να γίνει μελέτη κάποιων άλλων τεχνικών αναστόμωσης και σύγκριση των μελλοντικών αποτελεσμάτων με τα ήδη υπάρχοντα για την επιλογή της βέλτιστης τεχνικής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Asakura, T. and Karino, T. (1990). Flow patterns and spatial distribution of atherosclerotic lesions in human coronary arteries. *Circulation Research*, 66(4):1045-1066

Barbato, J. E. and Tzeng, E. (2004). Nitric oxide and arterial disease. *Vascular surgery*, 40:187-193.

Bassiouny, H.S., White, S., Glagov, S., Choi, E., Giddens, D.P., Zarins, C.K. Anastomotic intimal hyperplasia: Mechanical injury or flow induced (1992) *Journal of Vascular Surgery*, 15

Bertolotti C. Delpano V. Fuseria J. Dupouy P. Numerical and experimental models of post operative realistic flows in stenosed coronary bypasses. 2011 *J. Biomechanics* 34: 1049-1064

Bertolotti C. Delpano V. Three dimensional numerical simulations of flow through a stenosed coronary bypass 1999. *J. Biomechanics* 33: 1011-1022

Binns R.L., MD, David N. Ku, MD, PhD, Mark T. Stewart, MD, Joseph P. Ansley, MD Optimal graft diameter: Effect of wall shear stress on vascular healing 1989

Buchman N. A, Atkinson C. Jeremy M. Tomographin particle image velocimetry investigation of the flow in a modelled human carotid artery bifurcation (2010) *Exp Fluids* 50:1131-1151

Buchmann Nicolas Alexander (2010). Development of Particle Image Velocimetry for In Vitro Studies of Arterial Haemodynamics

Chatzizisis, Y.S., Coskun, A.U. , Jonas, M.,E.R., Feldman, C.L. and Stone, P. H. (2007). Role of endothelial shear stress in the natural history of coronary atherosclerosis and vascular remodeling: Molecular, cellular, and vascular behavior. *Journal of the American College of Cardiology*, 49(25):2379-2393

Davies, P., Reidy, M. A., Goode, T. B., and Bowyer, D. E. (1976). Scanning electron microscopy in the evaluation of endothelial integrity of the fatty streak lesion of atherosclerosis. *Atherosclerosis*, 25:125-130.

Davignon, J. and Ganz, P. (2004). Role of endothelial dysfunction in atherosclerosis. *Circulation*, 109:27-32.

DeBakey, M., Lawrie, G., and Glaeser, D. (1985). Patterns of atherosclerosis and their surgical significance. *Annals of Surgery*, 201(2):115-131.

Echave V., Koornick A.R., Haimov M., Jacobson J.H., 1979, Intimal hyperplasia as a complication of the use of the polytetrafluoroethylene graft for femoral-popliteal bypass, *Surgery* 86:791-98

Friedman, M., Hutchins, G., Barger, C., Deters, O., and Mark, F. (1981). Correlation between intimal thickness and fluid shear in human arteries. *Atherosclerosis*, 39:425-436.

Gimbrone, M. A., Topper, J., Nagel, T., Anderson, K., and Garcia-Cardena, G. (2000). Endothelial dysfunction, hemodynamic forces, and atherogenesis. *Ann NY Acad. Sci.*, 902:230-239.

Grus T. Linder J. Vidim T. Tosovsky J. Mateecha J. Rohn V. Lambert L. Grusova G. The anastomosis angle is a key to improved long-term patency of proximal femoropopliteal bypass 2009. *Ann Vasc. Surg.* 23:598-605

Hoedt M, Thien H. Poyck P, Wittens C. 2015 Why patencies of femoropopliteal bypass grafts with distal end to end anastomosis are comparable with end to side anastomosis. *Thorac Cardiovasc. Surg.* 21:157-164

Imparato AM, Bracco A, Kim GE, Zeff R. 1972. Intimal and neointimal fibrous proliferation causing failure of arterial reconstructions. *Surgery* 72:1007-17

Johnston B. Johnston P. Corney S. Kilpatrick D. Non-Newtonian blood flow in human right coronary arteries: transient simulations 2005. *J. Biomechanics* 39: 1116-1128

Jun-Mei Zhang, Leok Poh Chua, Dhanjoo N.Gista, Tong-Ming Zhou, Yong Seng Tan 2007 Validation of numerical simulation with PIV measurements for two anastomosis models. *Medical Engineering and Physics* 30: 226-247

Keynton RS, Evancho MM, Sims RL, Rodway NV, Gobin A, Rittgers SE. 2001. Intimal hyperplasia and wall shear in arterial bypass graft distal anastomoses: an in vivo model study. *J. Biomech. Eng.* 123:464-73

Keynton RS, Rittgers SE, Shu MC. 1991 The effect of angle and flow rate upon hemodynamics in distal vascular graft anastomoses: an in vitro model study. *J. Biomech. Eng.* 123: 464-73

Ku D.N. Blood flow in arteries 1991

Ku, D. N., Giddens, D. P., Phillips, D. J., and Strandness, D. E. (1985a). Hemodynamics of the normal human carotid bifurcation: In vitro and in vivo studies. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 11(1):13 – 26

Leuprecht A, Perktold K, Prosi M, Berk T, Trubel W, Schima H. 2002. Numerical study of hemodynamics and wall mechanics in distal end-to-side anastomoses of bypass grafts. *Jbiomech.Eng* 35:225-36

Libby, P. (2001). *Heart Disease: A Textbook of Cardiovascular Medicine*. W.B. Saunders Company.

Libby, P., Ridker, P. M., and Maseri, A. (2002). Inflammation and atherosclerosis. *Circulation*, 105:1135-1143.

Loth F, Jones S.A. Zarins C.K. Giddens D.P., Nassar R.F. Glagov S. and Bassiouny H.S. 2002 Relative Contribution of Wall Shear Stress and Injury in Experimental Intimal Thickening at PTFE End-to-Side Arterial Anastomoses, *J. Biomech. Eng.* (124): 44–51

Loth F., Fischer Paul F, Bassiouny Hisham S. 2008 Blood Flow in End-to-Side Anastomoses. *Fluid Mechanics* 40:367-93

Malek, A. M., Alper, S. L., and Izumo, S. (1999). Hemodynamic shear stress and its role in atherosclerosis. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, 282(21):2035-2042

Melling A. and Whitelaw J.H., 1973, Seeding of gas flows for laser anemometry, *DISA Information*, Vol.15, pp. 5–14

Moore JA, Steinman DA, Prakash S, Johnston KW, Ethier CR. 1999 A numerical study of blood flow patterns in anatomically realistic and simplified end-to-side anastomoses. *J. Biomech.Eng.* 121: 265-72

Owida Amal Ahmed, Hund Do, Yos S. Morsi, 2011 Numerical analysis of coronary artery bypass graft: an overview. *J. Computer methods and programs in biomedicine* 108:689-705

Papaharilaou Y, Doorly DJ, Sherwin SJ. 2002 The influence of out-of-plane geometry on pulsatile flow within a distal end-to-side anastomosis. *Biomed. Eng* 13:507-15

Perktold K, Peter RO, Resch M, Langs G. 1991. Pulsatile non-Newtonian blood flow in three-dimensional carotid bifurcation models: a numerical study of flow phenomena under different bifurcation angles. *J Biomed.Eng.* 13:507-15

Qiao, A.-K., Liu, Y.-J. Simulation and comparison of hemodynamics in coronary artery bypass graft with different graft-host diameter ratio (2006) *Chinese Journal of Biomedical Engineering*,

Resnick, N., Yahav, H., Shay-Salit, A., Shushy, M., Schubert, S., Zilberman, L.C. M., and Wofovitz, E. (2003). Fluid shear stress and the vascular endothelium: for better and for worse. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 81(3):177-199

Ross, R. (1999). Atherosclerosis - An Inflammatory Disease. *The New England Journal of Medicine*, 340(2):115-126.

Ross, R. and Glomset, J. A. (1976). The pathogenesis of atherosclerosis. *The New England Journal of Medicine*, 295:369-377

Schmirler M, Netrebska H, Matecha J, Adamec J, Jezek J, Grus T 2007. Experimental study of bypass of critical locations in relation to vessel wall shear stress. 753-757

Seeley, R. R., Stephens, T. D., and Tate, P. (2003). *Anatomy and physiology*. McGraw- Hill, Boston, 6th edition

Traub, O. and Berk, B. C. (1998). Laminar shear stress: Mechanisms by which endothelial cells transduce an atheroprotective force. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 18(5):677-685

Zahab Z. Kassab D. Minimisation of the wall shear stress gradients in bypass grafts anastomoses using meshless SFD and genetic algorithm optimization 2010

Zarins, C., Giddens, D., Bharadvaj, B., Sottiurai, V., Mabon, R., and Glagov, S. (1983). Carotid bifurcation atherosclerosis. quantitative correlation of plaque localization with flow velocity profiles and wall shear stress. *Circulation Research*, 53(4):502-514