

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική μελέτη ροής σε πραγματική γεωμετρία
κοιλιακής αορτής υγιούς και ασθενούς (με ανεύρισμα).**



ΚΑΤΡΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

A.M. 6856

ΚΟΚΟΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

A.M. 6983

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΖΙΡΤΖΙΑΚΗΣ Ε.

ΠΑΤΡΑ - ΜΑΡΤΙΟΣ 2022



Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
1. Βασικά Στοιχεία Ρευστοδυναμικής.....	10
1.1 Ιδιότητες των Ρευστών.....	11
1.1.1. Μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία.....	14
1.2 Ταξινόμηση των Ροών.....	14
1.2.1 Αριθμός Reynolds και ιξώδες ρευστού.....	15
1.3 Κατηγορίες ρευστών.....	16
2. Δυναμική του Αίματος – Βιομαγνητικά Ρευστά.....	18
2.1 Αίμα.....	18
2.1.1 Ροϊκές ιδιότητες αίματος.....	19
2.1.2 Μαγνητικές ιδιότητες αίματος.....	20
2.3 Η λειτουργία του αίματος.....	21
2.4 Ρεολογία του αίματος.....	22
2.4.1 Ιξώδες του αίματος.....	22
2.5 Τοιχωματική διατμητική τάση (Wall Shear Stress, WSS).....	23
2.6 Ο ρόλος της ρεολογίας του αιματος στην αιμοδυναμική	24
2.6.1 Συμπεριφορά της ροής του αίματος σε κυλινδρικούς αγωγούς.....	24
2.6.2 Συμπεριφορά της ροής του αίματος σε In Vivo.....	25
2.6.3 Ρόλος της παραμόρφωσης των RBCs- Ο ρόλος διαχωρισμού φάσης.....	25
2.7 Το καρδιαγγειακό σύστημα.....	26
2.7.1 Καρδιά & καρδιακός κύκλος.....	26
2.7.2 Αορτή.....	27
2.7.3 Στεφανιαία νόσος και Αθηροσκλήρυνση.....	28
3. Το καρδιαγγειακό σύστημα.....	30
3.1 Ανάλυση κυκλοφορίας του αίματος.....	30
3.2 Κυκλοφορικό σύστημα.....	32
3.3 Λειτουργία καρδιάς και καρδιακός κύκλος.....	33
3.4 Αιμοφόρα αγγεία.....	35
3.5 Χαρακτηριστικά αορτής.....	37



3.6	Συνεισφορά του αίματος στο καρδιαγγειακό σύστημα.....	38
3.7	Καρδιαγγειακή νόσος.....	39
3.8	Στεφανιαία νόσος – Αθηροσκλήρυνση.....	40
3.9	Διατμητική τάση τοιχώματος WSS (Wall Shear Stress.....	43
3.10	Τρόποι αντιμετώπισης της στεφανιαίας νόσου.....	45
3.11	Η αορτοστεφανιαία παράκαμψη (BY PASS).	47
3.12	Ανεύρισμα.....	48
3.12.1	Ανεύρισμα λαγόνιας αρτηρίας.....	49
4.	Πειραματική Εγκατάσταση – Αποτελέσματα.....	50
4.1	Πειραματική Διάταξη.....	50
4.2	Διαδικασία Μετρήσεων.....	53
	<i>Διάγραμμα A1.1: Εξέλιξη παροχών κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών υγειούς δοκιμίου nylon.....</i>	<i>55</i>
	<i>Διάγραμμα A1.2: Εξέλιξη παροχών κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών υγειούς δοκιμίου (carbon).....</i>	<i>55</i>
	<i>Διάγραμμα A1.3: Σύγκριση παροχών κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών των υγείων δοκιμίων διαφορετικών υλικών (nylon - carbon).....</i>	<i>56</i>
	<i>Διάγραμμα A2.1: Χρονοσειρές κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών ως προς την παροχή για υγιές δοκίμιο τύπου nylon.....</i>	<i>57</i>
	<i>Διάγραμμα A2.2: Χρονοσειρές κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών ως προς την παροχή για υγιές δοκίμιο τύπου carbon.....</i>	<i>57</i>
	<i>Διάγραμμα A3.1: Συγκριτική παρουσίαση χρονοσειρών κοιλιακής αορτής υγειούς nylon.....</i>	<i>58</i>
	<i>Διάγραμμα A3.2: Συγκριτική παρουσίαση χρονοσειρών κοιλιακής αορτής υγειούς carbon.....</i>	<i>58</i>
	<i>Διάγραμμα A4: Χαρακτηριστικά του ρευστού κατά τη διέλευση από τα σημεία ενδιαφέροντος (Ταχύτητες – Αριθμοί Reynolds) υγειούς δοκιμίου.....</i>	<i>59</i>
	<i>Διάγραμμα B1: Χαρακτηριστικά του ρευστού κατά τη διέλευση από τα σημεία ενδιαφέροντος (Σύγκριση Ταχυτήτων – Αριθμών Reynolds μεταξύ δοκιμίων 1,2).....</i>	<i>60</i>
	<i>Διάγραμμα C1.1: Συγκριτική Εξέλιξη παροχών υγειούς και παθολογικού δοκιμίου nylon.....</i>	<i>61</i>
	<i>Διάγραμμα C1.2: Συγκριτική Εξέλιξη παροχών υγειούς και παθολογικού δοκιμίου carbon.....</i>	<i>62</i>
	<i>Διάγραμμα C1.3: Συγκριτική Εξέλιξη παροχών των παθολογικών δοκιμίων.....</i>	<i>62</i>
	<i>Διάγραμμα C2.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κοιλιακής Αορτής για δοκίμιο nylon παθολογικό.....</i>	<i>63</i>
	<i>Διάγραμμα C2.2: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κοιλιακής Αορτής για δοκίμιο carbon παθολογικό.....</i>	<i>63</i>
	<i>Διάγραμμα C3.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κεντρικής Αρτηρίας για υγιή δοκίμια nylon και carbon.....</i>	<i>64</i>
	<i>Διάγραμμα C3.2: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας αρτηρίας-1 για υγιή δοκίμια nylon και carbon.....</i>	<i>65</i>



<i>Διάγραμμα C3.3: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας αρτηρίας-2 για υγιή δοκίμια nylon και carbon.</i>	65
<i>Διάγραμμα D 3.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κεντρικής Αρτηρίας για παθολογικά δοκίμια nylon - carbon.</i>	66
<i>Διάγραμμα D 3.2: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας Αρτηρίας-1 για παθολογικά nylon - carbon.....</i>	66
<i>Διάγραμμα D 3.3: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας Αρτηρίας-2 για παθολογικά nylon - carbon.....</i>	67
<i>Διάγραμμα E.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κοιλιακής Αορτής παθολογικού δοκιμίου nylon.</i>	68
5. Συμπεράσματα – Ανασκόπηση.....	69
BIBLIOΓΡΑΦΙΑ.....	71



Εικόνα 1: Αναπαράσταση εμφάνισης διάτμησης.....	10
Εικόνα 2 Αναπαράσταση στρωτής και τυρβώδους ροής.....	16
Εικόνα 3 Από αριστερά προς τα δεξιά: ερυθροκύτταρο, θρομβοκύτταρο και λευκοκύτταρο.....	19
Εικόνα 4: Διάγραμμα Ιξώδους(Viscosity) και διατμητικής τάσης(Shear rate).	22
Εικόνα 5: Επίδραση της WSS στη λειτουργία του ενδοθηλίου.....	23
Εικόνα 6: Δομή μυϊκής αρτηρίας(αρ) και μεγάλης φλέβας(δεξ).....	26
Εικόνα 7: Μεταβολή σχήματος των RBCS για να είναι ικανά να περάσουν μέσα από τη μικροκυκλοφορία (Baskurt & Meiselman 2003).....	29
Εικόνα 8: Καρδιαγγειακό σύστημα (EB-15).....	34
Εικόνα 9: Λειτουργικά τμήματα της καρδιάς. (EB-15).....	34
Εικόνα 10: Μορφολογικά χαρακτηριστικά αρτηρίας (I-1).	35
Εικόνα 11: Μορφολογικά χαρακτηριστικά φλέβας (I-2).....	36
Εικόνα 12:Τριχοειδή αγγεία [I-2].....	36
Εικόνα 13:Θέση κοιλιακής αορτής [I-3].....	37
Εικόνα 14:Συστατικά στοιχεία σύνθεσης του αίματος [I-4].....	38
Εικόνα 15: Αναλυτική ποσοστιαία σύσταση αίματος [I-6].	39
Εικόνα 16: Μορφολογία στεφανιαίων αρτηριών [I-10].	40
Εικόνα 17: Σχηματισμός αθηρωματικής πλάκας [I-17].....	41
Εικόνα 18: Ανεύρισμα θωρακικής αορτής [I-18].	42
Εικόνα 19: Ενδοθηλιακή διατμητική τάση τοιχώματος (Buchmann 2010).....	43
Εικόνα 20: Απεικόνιση περιοχών που αναμένονται να εμφανίσουν υψηλά ή χαμηλά επίπεδα διατμητικών τάσεων (Haguguchi και Teraoka et al. 2003).....	44
Εικόνα 21: Αθηροτόμος και Περιστροφικός καθετήρας αθηρεκτομής [I-10].....	45
Εικόνα 22 Καθετήρας με λάζερ [I-10).....	46
Εικόνα 23: Προώθηση του μπαλονιού μέσα στην αρτηρία [I-11] Τοποθέτηση του stent μέσα στην αρτηρία [I-19].....	46
Εικόνα 24: End to side by pass & End to end by pass [I-16].....	48
Εικόνα 25: Ταξινόμηση των αιμοφόρων αγγείων [EB-2].....	49
Εικόνα 26: Κλειστό κύκλωμα με αισθητήρες παροχής.....	51
Εικόνα 27: Γεωμετρία υγειούς δοκιμίου προερχόμενο από αξονική τομογραφία (CT scan).	52
Εικόνα 28: Ζευγάρια δοκιμίων (υγειούς - παθολογικού) κατασκευασμένα από διαφορετικό υλικό.	52

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Η μελέτη που ακολουθεί αναφέρεται στην πειραματική μελέτη ροής εντός δοκιμίων κοιλιακής αορτής υγιούς και ασθενούς με ανεύρισμα. Τα δοκίμια έχουν παραχθεί με εκτυπωτή 3D βάση δεδομένων αξονικής τομογραφίας που έχουν παρθεί από το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Ασθενές δοκίμιο είναι αυτό που φέρει το ανεύρισμα και η μορφή του έχει καταγραφεί με την μέθοδο της αξονικής τομογραφίας.

Το ανεύρισμα κοιλιακής αορτής είναι μια ανωμαλία στην ανατομία της κοιλιακής αορτής του ανθρώπου. Αυτή η ανωμαλία είναι εξαιρετικά απειλητική για την ζωή του ανθρώπου καθώς η ρήξη του ανευρύσματος ακόμα και εκτός του νοσοκομείου έχει θνησιμότητα πάνω από 80%. Για αυτόν το λόγο, όταν διαγνωσκειται το ανεύρισμα χρήζει άμεση αντιμετώπιση.

Το ανεύρισμα είναι η διεύρυνση στην διάμετρο της αορτής πάνω από το διπλάσιο του φυσιολογικού. Το ανεύρισμα ως γνωστών είτε χειρουργείται με ανοιχτή επέμβαση, είτε με κλειστή μέθοδο, δηλαδή με ενδαγγειακή τοποθέτηση stent. Κάθε μία μέθοδος έχει ενδείξεις, αντενδείξεις, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι ασθενείς με ανεύρισμα δεν πρέπει φοβούνται κατά το ιατρικό προσωπικό διότι πλέον η αντιμετώπιση αποτελεί ρουτίνα τις περισσότερες φορές.

Στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας μελετήθηκε το πεδίο ροής της κοιλιακής αορτής υπό το πρίσμα ταυτόχρονης καταγραφής μετρήσεων παροχής (χρονοσειρών) στην περιοχή της κεντρικής αρτηρίας όπου βρίσκεται η είσοδος του ρευστού καθώς και στην περιοχή των δύο λαγόνιων αρτηριών – απολήξεων. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο Τμήμα Μηχανολόγων έχουν γίνει παρόμοιες μελέτες στο παρελθόν από τις οποίες πάρθηκε υλικό και προσαρτήθηκε στην παρούσα. Οι πηγές σε κάθε περίπτωση αναφέρονται ρητά.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τζιρτζιλιάκη Ε., υπεύθυνο για την εκπόνηση της εργασίας, για τις πολύτιμες συμβουλές του, καθώς και τον κ. Βούρο Α. για τη συμπαράσταση κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Τους ευχαριστούμε για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που προσέφεραν για την υλοποίηση της πτυχιακής εργασίας.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την υπομονή και στήριξη που μας παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μας, αλλά και κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης

Οι σπουδαστές

ΚΑΤΡΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΚΟΚΟΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αορτή είναι η μεγαλύτερη αρτηρία στο σώμα μας, και μεταφέρει το οξυγονωμένο αίμα από τη καρδιά μας στο υπόλοιπο σώμα. Το τμήμα αορτής που περνάει από το στήθος και το θώρακα ονομάζεται θωρακική αορτή, ενώ το τμήμα που βρίσκεται στην κοιλιά, ονομάζεται κοιλιακή αορτή. Στην κοιλιά, ακριβώς κάτω από το ύψος του ομφαλού, η αορτή χωρίζεται σε δύο κλάδους, τις ονομαζόμενες λαγόνιες αρτηρίες οι οποίες μεταφέρουν το αίμα στα κάτω άκρα. Όταν μια αδύναμη περιοχή της κοιλιακής αορτή διαστέλλεται και αυξάνεται σε μέγεθος, αυτό ονομάζεται ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής. Η πίεση του αίματος που ρέει μέσα από την κοιλιακή αορτή μπορεί να κάνει ένα αποδυναμωμένο τμήμα της αορτής να μεγαλώσει και να προεξέχει. Η κανονική διάμετρος της κοιλιακής αορτής είναι περίπου 2 εκατοστά. Όταν η αορτή πάσχει από ανευρυσματική νόσο τότε αυτή διατείνεται σε σημείο που να φτάνει και να ξεπερνά τα 4 εκατοστά.

Το ανεύρυσμα της κοιλιακής αορτής αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την υγεία, καθώς μπορεί να διαρραγεί. Η ρήξη του ανευρύσματος δημιουργεί μεγάλη εσωτερική αιμορραγία η οποία συνήθως προκαλεί θάνατο. Λιγότερο συχνά, το ανεύρυσμα της κοιλιακής αορτής δημιουργεί εξίσου σοβαρά προβλήματα υγείας, αυτά είναι η περιφερική εμβολή και ισχαιμία των κάτω άκρων. Αν το ανεύρισμα αποσπαστεί τότε μπορεί να μεταφερθεί αθηρωματικό υλικό η θρόμβος μέσω του αίματος σε μικρότερα αγγεία των κάτω άκρων δημιουργώντας έτσι απόφραξη, εμποδίζοντας το αίμα να μεταφερθεί περαιτέρω. Αυτό προκαλεί ισχαιμία στα κάτω άκρα, η οποία μπορεί να προκαλέσει ακόμα και στην απώλεια των κάτω άκρων.

Με αναφορά τα παραπάνω στην παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται μια προσπάθεια μελέτης του ρευστοδυναμικού πεδίου ροής εντός κοιλιακής αορτής με την καταγραφή χρονοσειρών παροχής στην κεντρική αρτηρία και στις δύο λαγόνιες.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ρευστών και στις ιδιότητές τους. Αναφέρονται βασικές αρχές και γίνεται η κατηγοριοποίηση των ρευστών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, η μελέτη εστιάζεται στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του αίματος που είναι και το πραγματικό ρευστό αναφοράς ενώ αναλύεται η δομή και τα συστατικά του, δίνοντας στοιχεία για τη φυσιολογία των ερυθρών αιμοσφαιρίων και των υπόλοιπων συστατικών στοιχείων του αίματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνεται μια σύντομη περιγραφή του καρδιαγγειακού συστήματος, με όλα τα τμήματα που το απαρτίζουν, τα χαρακτηριστικά της αορτής. Περιγράφονται οι κυριότερες νόσοι που εμφανίζει το σύστημα και οι τρόποι αντιμετώπισης αυτών ενώ ειδική αναφορά γίνεται για το ρόλο του ανευρύσματος στα προβλήματα υγείας που ανακύπτουν στον άνθρωπο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνεται η πειραματική εγκατάσταση και η διαδικασία μετρήσεων καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα συνίστανται σε καταγραφές παροχής από κεντρική και λαγόνιες αρτηρίες σε μορφή χρονοσειρών και στη συνέχεια εξάγονται και χαρακτηριστικά της ροής (μέσες ταχύτητες ροής και αριθμοί Reynolds). Επίσης τα αποτελέσματα αναφέρονται τόσο σε υγειή όσο και σε παθολογικό δοκίμιο στο οποίο έχει μορφοποιηθεί ανεύρισμα σημαντικού μεγέθους.

Διπλωματική Εργασία Πειραματική Παραμετρική Μελέτη Ρευστοδυναμικού Πεδίου εντός
Λαγώνιας Αρτηρίας Υγιούς και Παθολογικής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΚΑΤΡΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α.Μ 6856 ΚΟΚΟΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α.Μ 6983



Στο πέμπτο κεφάλαιο τέλος γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα του θέματος κάτι που είναι ήδη σε εξέλιξη και θα προκύψει σε επόμενη εργασία.



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ετυμολογικά ο όρος ανεύρισμα προκύπτει από τον ελληνικό όρο ανευρύνην που σειμάνει διευρύνει. Το ανεύρισμα της κοιλιακής αορτής είναι λοιπόν η διεύρυνση που δημιουργείται στην κοιλιακή αορτή, δηλαδή η αύξηση της διαμέτρου της αορτής σε ποσοστό τουλάχιστον μεγαλύτερο από 50% της αρχικής διαμέτρου. Σύμφωνα με μια μελέτη που διεξάχθηκε στην ΗΠΑ σε μια μεγάλη μερίδα πλυσισμού ανάμεσα σε άτομα ηλικίας 50 έως 79 ετών, διαπιστώθηκε παρουσία ανευρισμάτος στην κοιλιακή αορτή στο 5.9% του πληθυσμού και μάλιστα πιο συχνά σε λευκούς άνδρες καπνιστές. Συνήθως το ανεύρισμα δεν εμφανίζει κάποιο σύμπτωμα και η παρουσία του γίνεται αντιληπτή μέσω κάποιας εξέτασης ρουτίνας, αυτό όμως δε σημαίνει ότι δεν πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα.

Προκειμένου να επιλχθεί η κατάλληλη μέθοδος αντιμετώπισης και να αποκαταστασης του ανευρύσματος είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθεί η μορφολογία του ανευρίσματος. Με την βοήθεια της αξονικής αγγειογραφίας (CTA) ο θεράπωντας ιατρός συλλέγει προεγχειρητικά σημαντικές πληροφορίες για τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του ανευρίσματος και του πιτρέπει να μετρήσει διάφορες παραμέτρους (sizing) έτσι ώστε να αντιμετωπίσει το ανεύρισμα όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά. Με βοήθεια της μαγνητικής αγγειογραφίας (MRA) συλλέγονται επίσης προεγχειρητικά αξιόπιστες εικόνες για την μελέτη της μορφολογίας του ανευρίσματος, χωρίς την ύπαρξη της ιονίζουσας ακτινοβολίας που υπάρχει στην αξονική και χωρίς την ανάγκη να ληφθεί το ιωδιούχο σκιαγραφικό φάρμακο από τον ασθενή. Στην παρούσα πτυχιακή ερευνητική εργασία αναλύονται οι διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν από έναν ασθενή για την αντιμετώπιση του ανευρύσματος, ενώ αναλύεται και η πειραματική μελέτη ροής μέσα σε δοκίμια τα οποία αναπαριστούν την κοιλιακή αορτή μαζί με τις δυο λαγονίες αρτηρίες. Το ρευστο που χρησιμοποιείται αντί για το αίμα είναι το απιονισμένο νερό καθώς οι φυσικές του ιδιότητες είναι παραπλήσιες με αυτές του αίματος.

Το αίμα είναι σύνθετο υγρό και αποτελείται από διάφορα κύτταρα, πρωτεΐνες και άλλα μακρομόρια. Από μηχανική άποψη ανήκει στην κατηγορία των διφασικών ρευστών, με το κύριο γνώρισμα τους ότι αποτελούνται από ένα συνεχές ρευστό στο οποίο αιωρούνται εντός σωματίδια, φυσαλίδες, σταγονίδια υγρού, κύτταρα κ.α. Το κύριο συστατικό του αίματος είναι το ερυθρό αιμοσφαίριο το οποίο αποτελεί το 45% του ρευστού σε κανονικές συνθήκες και αιωρείται μέσα στο πλάσμα [Sherwood Lauralee, 2010, Tortora Gerard J., Grabawski Sandra Reynolds 2007]. Η ροή του αίματος εντός του κυκλοφορικού συστήματος είναι αντικείμενο εξέτασης επί πολλων χρόνων καθώς τα αλλοιωμένα χαρακτηριστικά στην ροή του προκύπτουν από διάφορες παθολογικές καταστάσεις όπως για παράδειγμα ο διαβήτης, το αγγειακό εγκεφαλικό κ.α. [Lima et al. 2008]. Οι εν λόγω παθήσεις είναι υπεύθυνες για αρκετούς θανάτους την σύγχρονη εποχή και για τον λόγο αυτό είναι αναγκαία η πλήρης εκτίμηση των θεμελιωδών πτυχών της ροής του αίματος προκειμένου να αναπτυχθούν αποτελεσματικοί μέθοδοι θεραπείας.



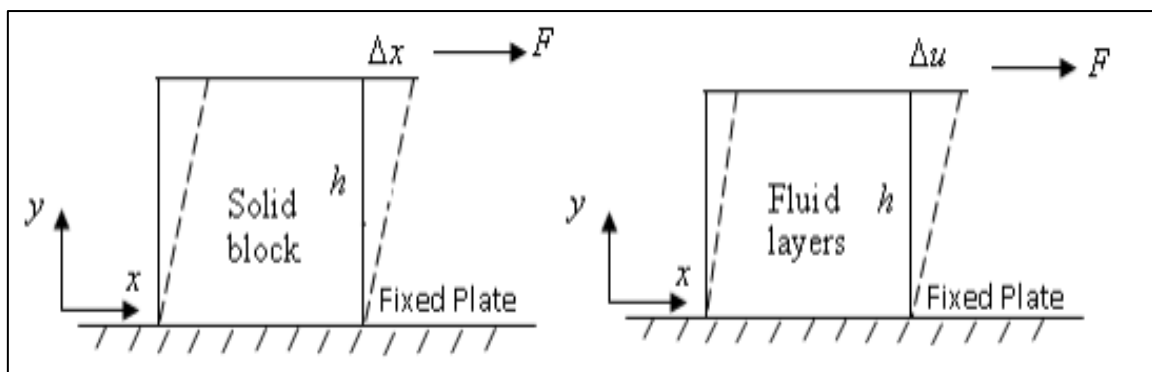
1. Βασικά Στοιχεία Ρευστοδυναμικής.

Η μηχανική των ρευστών είναι ένας ανεξάρτητος κλάδος της Κλασσικής Μηχανικής και είναι η επιστήμη που μελετά τα ρευστά, δηλαδή τα υγρά και τα αέρια. Η Ρευστομηχανική ασχολείται με την συμπεριφορά των ρευστών όταν αυτά βρίσκονται σε ισορροπία (στατική των ρευστών), όταν ρέουν (δυναμική των ρευστών) αλλά και όταν αλληλεπιδρούν με άλλα ρευστά ή στερεά. Η στατική των ρευστών ασχολείται με ιδιότητες και φαινόμενα που εμφανίζονται στα ρευστά (πίεση υδροστατική και ατμοσφαιρική, άνωση κλπ) ενώ η ρευστοδυναμική επικεντρώνεται σε ζητήματα σχετικά με την μεταφορά μάζας. Η κατανόηση της συμπεριφοράς των ρευστών είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση προβλημάτων σχετικά με την ροή τους στους αγωγούς, την χρήση αεροσυμπιεστών, αντλιών και παρόμοιου εξοπλισμού.

Ρευστα θεωρούνται τα σώματα που έχουν ακανόνιστο σχήμα και έχουν την δυνατότητα να ρέουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το νερό, ο αέρας και το αίμα. Ως γνωστών αν τοποθετηθεί μικρή ποσότητα νερού πάνω σε μια επιφάνεια, αυτό θα ισορροπήσει, εάν η επιφάνεια αυτή αποκτήσει μια κλίση τότε το νερό θα κινηθεί σταδιακά. Τα εξωτερικά στρώματα μορίων θα αρχίσουν να ρέουν ενώ μικρές ποσότητες ρευστού θα παραμείνουν στην επιφάνεια. Υπάρχει λοιπόν, μια δύναμη κατά την διεύθυνση της κινήσεως που ευθύνεται για την έναρξη της ροής. Η δύναμη αυτή ονομάζεται διατμητική τάση και ορίζεται ως το πηλίκο της παράλληλης ή εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται σε μια επιφάνεια ρευστού, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής:

$$\tau = \frac{F}{A}.$$

Στην περίπτωση στερεού σώματος ωστόσο, δεν θα παρατηρηθεί το ίδιο φαινόμενο αφού στο κεκλιμένο επίπεδο το σώμα θα κινηθεί ενιαία προβάλλοντας αντίσταση στην διάτμηση που του εφαρμόζεται. Κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται η διάκριση μεταξύ στερεών και ρευστών σωμάτων.



Εικόνα 1: Αναπαράσταση εμφάνισης διάτμησης.

Σύμφωνα με την εικόνα 1 και τον τύπο διάτμησης που προαναφέρθηκε μπορεί να οριστεί ο συντελεστής διάτμησης στερεού σώματος (S) και ο συντελεστής που αποδίδει τις εσωτερικές ιδιότητες του ρευστού δηλαδή το ιξώδες (μ):



$$S = \frac{\text{Διατμητική ή πίεση}}{\text{Διατμητική ή παραμόρφωση}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta x}{h}} \quad (1.1)$$

$$\mu = \frac{\text{Διατμητική ή πίεση}}{\text{Διατμητική ή παραμόρφωση}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta u}{h}} \quad (1.2)$$

Εδώ η δύναμη διατμήσεως (F) επενεργεί επί της ορισμένης περιοχής διατομής (A), h είναι το ύψος του στερεού μπλόκ / ύψος μεταξύ δύο γειτονικών στρωμάτων του ρευστού, Δx είναι η επιμήκυνση του συμπαγούς μπλόκ και Δu είναι η κλίση της ταχύτητας μεταξύ δύο γειτονικών στρωμάτων του ρευστού.

1.1 Ιδιότητες των Ρευστών.

Ως ιδιότητα ορίζουμε τα διάφορα χαρακτηριστικά ενός συστήματος. Οι ιδιότητες καταναίμονται σε δυο κατηγορίες τις εκτατικές και τις εντατικές ιδιότητες. Στις εκτατικές ιδιότητες η τιμή τους εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος ενώ στις εντατικές ιδιότητες η τιμή τους είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του συστήματος. Στην μηχανική των ρευστών υπάρχουν τρεις βασικές θερμοδυναμικές ιδιότητες, αυτές είναι η πίεση, η θερμοκρασία και η πυκνότητα. Υπάρχουν όμως και άλλες ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως το ιξώδες, παρακάτω αναφέρονται επεξηγηματικά οι ιδιότητες :

- **Πίεση:** Ως πίεση ενός αερίου υγρού συστήματος ορίζεται το πηλίκο της κάθετης δύναμης που εξασκεί σε μία επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής. Στο διεθνές σύστημα μετριέται σε Newton ανά τετραγωνικό μέτρο.
- **Θερμοκρασία:** Είναι το μετρό της εσωτερικής ενέργειας ενός συστήματος και είναι ένα καταστατικό και εντατικό μέγεθος. Επιπλέον εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του συστήματος. Στο σύστημα SI εκφράζεται σε βαθμούς Κέλβιν ενώ συχνά χρησιμοποιούνται βαθμοί Κελσίου. Η θερμοκρασία σε συνδυασμό με την πίεση καθορίζει την φυσική κατάσταση ενός σώματος.
- **Πυκνότητα:** Ως πυκνότητα μιας ουσίας ορίζουμε την ποσότητα της ύλης που περιέχεται στην μονάδα του όγκου της ουσίας γενικά η πυκνότητα ισούται με το πηλίκο της μάζας του ρευστού ως προς τον όγκο που καταλαμβάνει. Στο διεθνές σύστημα μονάδων μετριέται σε γραμμάρια ανά κυβικό μέτρο.
- **Ιξώδες:** Όταν δύο ρευστά κινούνται παράλληλα το ένα με το άλλο μεταξύ των στρώσεων των ρευστών αυτόν εμφανίζονται δυνάμεις εσωτερικής τριβής και σε κάθε σημείο της ροής υπάρχει διατμητική τάση. Αυτές οφείλονται στις εσωτερικές ιδιότητες του ρευστού και ο συντελεστής που αποδίδει αυτές τις ιδιότητες ονομάζεται δυναμικό ιξώδες ή απλά ιξώδες. Με άλλα λόγια το ιξώδες είναι η ιδιότητα που αντιπροσωπεύει την εσωτερική αντίσταση ενός υγρού σε κίνηση. μετράτε σε kg/ m.sec.



Κάποιες τυπικές τιμές του κινηματικού ιξώδους του αέρα και του νερού σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία είναι οι $1,4 * 10^{-5} m^2/s$ και $1,14 * 10^{-6} m^2/s$ αντίστοιχα. Η τάση διάτμησης (τ) εκφράζεται στη συνέχεια ως:

$$\tau = \mu \frac{Du}{Dy} \quad (1.3)$$

Όπου du/dy είναι ο ρυθμός της διατμητικής παραμορφώσεως και τομή είναι το δυναμικό (ή απόλυτο) ιξώδες του υγρού.

Γενικά το ιξώδες ενός υγρού εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία. Για τα υγρά, το ιξώδες μειώνεται με την θερμοκρασία και για τα αέρια, αυξάνεται με την θερμοκρασία. Ο συσχετισμός του Sutherland χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ιξώδους των αερίων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T_0+S}{T+S}\right) \quad (1.4)$$

Για τον αέρα η τιμή αναφοράς του ιξώδους $\mu_0 = 1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{sec}$ στα $T_0 = 288\text{K}$ και $S = 110\text{K}$. Στην περίπτωση υγρών το ιξώδες προσεγγίζεται όπως:

$$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = a + b\left(\frac{T}{T_0}\right) + c\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \quad (1.5)$$

Για το νερό στα $T_0 = 273\text{K}$ και $\mu_0 = 0,001792 \text{ Kg/ms}$, $a = -1,94$, $b = -4,8$, $c = 6,74$

Το ιξώδες ενός ρευστού είναι 1 m της αντίστασης όπου παρουσιάζει μία σταδιακή παραμόρφωση του μετά από διατμητική ή εντατική τάση. Εκφράζεται επίσης και με την αντίσταση που προβάλλει κατά την ροή του. Για υγρά ειδικότερα αντιστοιχεί στην ιδιότητα της πηκτικότητας. Το ιξώδες είναι μία ιδιότητα ενός ρευστού που προκύπτει από τις συγκρούσεις μεταξύ γειτονικών σωματιδίων (δηλαδή μορίων με την ευρεία έννοια), καθώς τμήματα του ρευστού αυτού κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Επιπλέον προκύπτει και από την εφαρμογή των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των μορίων αυτόν. Όταν ένα ρευστό υποχρεώνεται να ρεύσει μέσα από ένα σωλήνα τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται το ρευστό κινούνται ταχύτερα κατά μήκος του άξονα του σωλήνα στο εσωτερικό του και βραδύτερα κοντά στα τοιχώματα του σωλήνα. Γι' αυτό χρειάζεται να ασκηθεί κάποια τάση όπως μια διαφορά πίεσης ανάμεσα στα δύο άκρα του σωλήνα για να υπερπηδηθεί η τριβή ανάμεσα στα στρώματα του ρευστού που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες και να συνεχιστεί η ροή του ρευστού. Η τάση που απαιτείται για ένα δεδομένο μοτίβο κίνησης αντιστοιχεί στο ιξώδες του ρευστού αυτού.

Ένα ρευστό που δεν αντιστέκεται καθόλου στην τάση διατμησης του ονομάζεται ιδανικό ή η ιδέα το υγρό. Το μηδενικό ιξώδες, όμως, παρατηρείται μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στα είπε ρευστά. Διαφορετικά, σε τεχνική βάση, όλα τα ρευστά έχουν θετικό ιξώδες ένα ρευστό με σχετικά υψηλό ιξώδες. Όπως η πίσσα, μπορεί να παρουσιάζεται σαν στερεό και τότε συχνά χαρακτηρίζεται ως ημίρρευστο.

Η ιδιότητα του ιξώδους για τα υγρά εξετάζεται ιδιαίτερα από την ρευστοδυναμική. Το μετρό του ιξώδους είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας ή συντελεστής εσωτερικής τριβής ή συντελεστής ιξώδους του υγρού. Όσο πιο παχύρρευστο είναι ένα υγρό τόσο μεγαλύτερο ιξώδες λέμε ότι έχει (π.χ το μέλι έχει

Διπλωματική Εργασία Πειραματική Παραμετρική Μελέτη Ρευστοδυναμικού Πεδίου εντός
Λαγώνιας Αρτηρίας Υγιούς και Παθολογικής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



ΚΑΤΡΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α.Μ 6856 ΚΟΚΟΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α.Μ 6983

μεγαλύτερο ιξώδες από το λάδι). Το ιξώδες μετρείται με ειδικό όργανο που λέγεται ιξωδόμετρο. Η μέτρηση γίνεται σε βαθμούς Engler, βαθμούς Redwood, βαθμούς Saybolt κλπ., που παρέχονται από το εγχειρίδιο του κατά την περίπτωση Χρήσης του ομώνυμου οργάνου.



1.1.1. Μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία.

Το ιξώδες των υγρών εξαρτάται σε μικρό βαθμό από την πίεση και παρουσιάζει έντονες μεταβολές ανάλογα με τη θερμοκρασία. Γενικότερα ισχύει ότι το ιξώδες ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένα παράδειγμα είναι τα λάδια των μηχανών εσωτερικής καύσης που παρουσιάζουν αυξημένη ιξώδη αντίσταση όταν ο καιρός είναι κρύος και χρειάζεται μεγαλύτερη ισχύς ώστε να τεθεί σε η μηχανή σε λειτουργία. Στα υγρά η θεωρητική ανάλυση είναι πιο δύσκολη σε σχέση με τα αέρια και αυτό συμβαίνει επειδή το φαινόμενο της μετάδοσης της ορμής με σκεδάσεις αλληλοκαλύπτεται από τις συνεχείς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πυκνοδομημένων μορίων του υγρού. Επομένως, η σκέδαση ανά ζεύγη μορίων δεν έχει νόημα. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τις διακυμάνσεις των μορίων σε κάθε συσσωμάτωμα έτσι ώστε η ολίσθηση μεταξύ τους να είναι πιο εύκολη. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζεται μια ελάττωση της μεταδιδόμενης ορμής μεταξύ των γειτονικών σημείων του υγρού και άρα την ελάττωση του ιξώδους.

1.2 Ταξινόμηση των Ροών.

Η ροή των ρευστών μέσα σε αγωγούς διακρίνεται σε δύο μορφές ροής, την στρωτή και την τυρβώδη. Στρωτή ροή ονομάζεται η ροή που μπορεί να περιγραφεί με την παραδοχή ότι το ρευστό αποτελείται από πολλά λεπτά στρώματα που ολισθαίνουν το ένα πάνω στο άλλο. Κάτα την ομαλή ροή ή στρωτή ροή ή παράλληλη ροή ή μονιμή ροή το ρευστό ρέει σε παράλληλες προς τον άξονα του αγωγού γραμμές δίνοντας έτσι την εικόνα της ομαλής ή στρωτής ροής. Συνήθης εικόνα παράλληλης ροής είναι εκείνη του νερού από τις βρύσες. Κατά την τυρβώδη ροή οι γραμμές της ροής του ρευστού λαμβάνουν μορφή ακανόνιστων καμπυλών οι οποίες τέμνουν συνεχώς αλλήλους, δίνοντας έτσι την εικόνα ροής με στροβιλισμούς. Τυρβώδη ροή είναι δυνατόν να προκαλέσουν τα πλοία που κινούνται ενάντια στο ρεύμα του ποταμού.

- **Ροή ιξώδους:** Η ροή ρευστού στην οποία τα αποτελέσματα της τριβής έχουν σημασία, αντιμετωπίζονται ως ιξώδους ροής. Όταν δύο στρώματα υγρού κινούνται σχετικά το ένα με το άλλο, αναπτύσσεται μεταξύ τους η δύναμη τριβής η οποία ποσοτικοποιείται μέσω του ιξώδους. Οι ροές των στρωμάτων είναι παράδειγμα παχύρρευστης ροής. Παραμερίζοντας τους όρους του ιξώδους από την εξίσωση η ροή μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ογκώδης ροή.
- **Εσωτερική και Εξωτερική ροή:** Η ροή ενός απεριόριστο υγρού πάνω από μια επιφάνεια αντιμετωπίζεται ως <<εξωτερική ροή>> και αν το υγρό είναι πλήρως οριοθετημένο από την επιφάνεια, τότε καλείται <<εσωτερική ροή>> για παράδειγμα η ροή πάνω από μια επίπεδη πλάκα θεωρείται ως εξωτερική ροή και η ροή μέσω ενός σωλήνα η αγωγή ως εσωτερική ροή. Ωστόσο σε ειδικές περιπτώσεις εάν ο λόγος είναι μερικώς γεμάτος και υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια τότε η ροή ονομάζεται ροή σε ανοιχτό κανάλι. Οι εσωτερικές ροές κυριαρχούνται από το ιξώδες ενώ τα έξοδα αποτελέσματα περιορίζονται σε οριακά στρώματα στην επιφάνεια στερεών για εξωτερικές ροές.



- Συμπιεζόμενη και η συμπιεσμένη ροή: Η ροή λέγεται ότι είναι ασυμπιέστη εάν η πυκνότητα παραμένει σχεδόν σταθερή καθόλη τη διάρκεια. Όταν η μεταβολή της πυκνότητας κατά τη διάρκεια μιας ροής είναι περισσότερο από 5%, τότε αντιμετωπίζεται ως συμπιεσμένη.
- Τυρβώδης και στρωτή ροή: Η εξαιρετικά διαταγμένοι κίνηση ενός ρευστού όπου χαρακτηρίζεται από απώλεια στρωμάτων υγρού ονομάζεται στρωτή ροή, (π.χ ροή υψηλού ιξώδους υγρών σε χαμηλές ταχύτητες. Η κίνηση ενός ρευστού που συνήθως κινείται σε υψηλές ταχύτητες είναι αυτή που χαρακτηρίζεται από αρκετές διακυμάνσεις της ταχύτητας και ονομάζεται τυρβοειδής. Οι εναλλαγές ανάμεσα σε στρωτή και στην τυρβώδη ροή την χαρακτηρίζουν ως μεταβατική. Ο αριθμός Reynolds είναι η βασική παράμετρος που καθορίζει αν η ροή είναι τυρβώδης ή στρωτή.
- Ροή σταθερής και ασταθούς ροής: Όταν δεν υπάρχει αλλαγή στην ιδιότητα του υγρού σε σχέση με το χρόνο τότε συνεπάγεται σταθερή ροή. Ωστόσο, η ιδιότητα ενός υγρού σε ένα σημείο μπορεί επίσης να ποικίλει ανάλογα με το χρόνο, πράγμα που σημαίνει ότι η ροή είναι ασταθής ή παροδική. Ο όρος <<περιοδική ροή>> αναφέρεται στο είδος των ασταθών ροών στις οποίες η ροή ταλαντώνεται γύρω από ένα σταθερό μέσο.
- Φυσική και εξαναγκασμένη ροή: Σε μια αναγκαστική ροή, το υγρό αναγκάζεται να ρεύσει πάνω από μια επιφάνεια με εξωτερικά μέσα όπως αντλία ή ανεμιστήρα. Σε κάθε περίπτωση (φυσική ροή), η διαφορά της πυκνότητας είναι ο συντελεστής κινήσεως της ροής του ρευστού. Εδώ, η πλευστότητα παίζει ένα σημαντικό ρόλο για παράδειγμα σε ένα θερμότερο υγρό αυξάνεται η στάθμη του σε ένα δοχείο λόγω της διαφοράς της πυκνότητας.

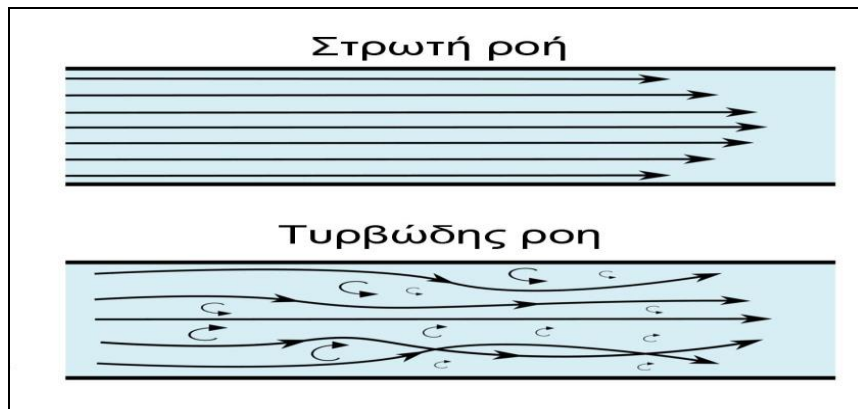
1.2.1 Αριθμός Reynolds και ιξώδες ρευστού.

Στην μηχανική ρευστών, ο αριθμός Reynolds (Re) είναι μια σταθερά (καθαρός αριθμός) που χαρακτηρίζει κάθε κινούμενο ρευστό. Χρησιμοποιείται για να προσδιορίσουμε όμοια πρότυπα ροής σε διαφορετικές καταστάσεις ροής ρευστών. Η έννοια του αριθμού Reynolds εισήχθη από τον Stokes G. το 1851, αλλά πήρε το όνομά του από τον Reynolds O. (1842-1912), ο οποίος καθιέρωσε την χρήση του το 1883. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις εξόδους και συνεπώς ποσοτικοποιεί τη μεταξύ τους. Η σημαντικότητα για μια συγκεκριμένη κατάσταση ροής. Συχνά χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια πειραμάτων μοντελοποίησης, προκειμένου να προσδιορίσουμε την σχέση μεταξύ δύο διαφορετικών περιπτώσεων ροής ρευστού. Επίσης χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό του είδους μιας ροής, όπως είναι η στρωτή και η τυρβώδης ροή.

Η στρωτή ροή προκύπτει για χαμηλούς αριθμούς Reynolds, όπου κυρίαρχες είναι οι δυνάμεις εξόδους και χαρακτηρίζεται από ομαλή, σταθερή κίνηση του ρευστού.



Η τυρβώδης ροή προκύπτει για υψηλούς αριθμούς Reynolds, όπου κυρίαρχες είναι οι δυνάμεις αδράνειας οι οποίες παράγουν χαοτικές δίνες και άλλες αστάθειες στην ροή.



Εικόνα 2 Αναπαράσταση στρωτής και τυρβώδους ροής.

Η σχέση που προσδιορίζει τον αριθμό Reynolds, είναι:

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (1.6)$$

Όπου u η ταχύτητα ροής ρευστού, ν το κινηματικό ιξώδες ρευστού, d η διάμετρος σωλήνα. Γενικά για τον αριθμό Reynolds σε σωληνογραμμή ισχύει ότι οι τιμές της στρωτής ροής κυμαίνονται έως 2000 ($Re < 2000$), ενώ για τιμές άνω των 5000 εμφανίζεται ασταθής μετάπτωση της ροής σε τυρβώδη ($Re > 5000$).

1.3 Κατηγορίες ρευστών.

Τα ρευστά διακρίνονται στις τρεις ακόλουθες κατηγορίες:

• Ιδανικά ρευστά ή τέλεια ρευστά ή και ιδεώδη ή ιδεατά: Χαρακτηρίζονται υποθετικά ρευστά (συνήθως υγρά) τα οποία είναι τελείως ασυμπίεστα και καμιά εσωτερική τριβή των μορίων τους δεν αναπτύσσεται κατά την ροή τους. Όπως επίσης και καμιά δύναμη συνάφειας μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που περιέχονται. Είναι προφανές ότι αυτά αποτελούν υπό θετική θεωρητική κατάσταση και μόνο που λαμβάνεται υπόψη στις έρευνες και μελέτες των νόμων των ρευστών διευκολύνοντας έτσι κατά πολύ την εξαγωγή συμπερασμάτων με αντίστοιχους υπολογισμούς. Παρά ταύτα ορισμένα φυσικά ρευστά με πολύ χαμηλό ιξώδες και μικρή θερμική αγωγιμότητα είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν, βέβαια κατά προσέγγιση, ως ιδανικά ρευστά.

➤ Φυσικά ρευστά καλούμενα και Νευτώνεια ρευστά: Ρευστά τα οποία ικανοποιούν τον πειραματικό νόμο του Newton καλούνται Νευτώνεια ρευστά. Στην



περίπτωση αυτή η διατμητική τάση τ είναι ανάλογη της ταχύτητας μεταβολής της γωνιακής παραμορφώσεως.

- Μη Νευτώνεια ρευστά: : Ρευστά τα οποία δεν ικανοποιούν τον πειραματικό νόμο του Newton καλούνται μη Νευτώνεια ρευστά. Στην περίπτωση αυτή ο συσχετισμός της διατμητικής τάσεως (τ) και της ταχύτητας μεταβολής της γωνιακής παραμορφώσεως είναι διαφορετικός. Είναι συνήθως υγρά που παρουσιάζουν χαμηλό ιξώδες ιδιαίτερα όταν υποβάλλονται σε ανάδευση και γίνονται περισσότερο λεπτόρευστα. Σε αυτήν την κατηγορία συμπεριλαμβάνεται και το αίμα.

Κύρια στοιχεία της διαφορετικότητας των παραπάνω διακρίσεων των ρευστών είναι οι τρεις χαρακτηριστικές ιδιότητες τους: το συμπιεστό, της συνοχής μεταξύ των μορίων τους που ανθίσταται στην διάσπαση τους κατά την ροή και που εκδηλώνεται ως εσωτερική τριβή καλούμενη συντελεστής τριβής ή συντελεστής ιξώδους ή πιο απλά ιξώδες και τέλος από την συνάφεια των υγρών που παρατηρείται μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που μεταφέρονται. Η παραπάνω διάκριση των ρευστών προτάθηκε στα τέλη του 18ου αιώνα και ακολουθείται μέχρι και σήμερα.



2. Δυναμική του Αίματος – Βιομαγνητικά Ρευστά.

Τα ρευστά των οργανισμών έμβιων όντων τα οποία η ροή επηρεάζεται από την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου ονομάζονται Βιομαγνητικά Ρευστά. Τα βιομαγνητικά ρευστά εμφανίζουν αναλογίες στη δομή τους σε σχέση με τα μαγνητικά ρευστά. Είναι προφανές πως τα βιομαγνητικά ρευστά είναι φυσικά ρευστά ενώ τα μαγνητικά ρευστά είναι τεχνητά ρευστά, με τα μαγνητικά σωματίδια να είναι λίγο μικρότερα σε μέγεθος και να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη μαγνήτιση σε σχέση με αυτά των βιομαγνητικών ρευστών. Το πιο γνωστό και ταυτόχρονα σημαντικό βιομαγνητικό ρευστό είναι το Αίμα.

2.1 Αίμα.

Το ανθρώπινο αίμα αποτελείται από το πλάσμα(φορέας ρευστού), μέσα στο οποίο αιωρούνται τα ερυθρά αιμοσφαίρια, τα λευκά αιμοσφαίρια και τα αιμοπετάλια. Το πλάσμα είναι το κύριο συστατικό του αίματος και αποτελεί το 55% κατ' όγκο του αίματος. Το πλάσμα αποτελείται κατά 91,5% από νερό κατά 7% από πρωτεΐνες. Σε κλίμακα ροής σε αρτηρία για φυσιολογικές τιμές της ταχύτητας παραμόρφωσης (shear rate), συνεπώς και των διατμητικών τάσεων (shear stresses), μπορεί να θεωρηθεί ομογενές και Νευτώνειο ρευστό. Τα αιωρούμενα κύτταρα, δηλαδή τα ερυθρά αιμοσφαίρια, τα λευκά αιμοσφαίρια και τα αιμοπετάλια, υπό φυσιολογικές συνθήκες καταλαμβάνουν περίπου το 45% κατ' όγκο του αίματος.

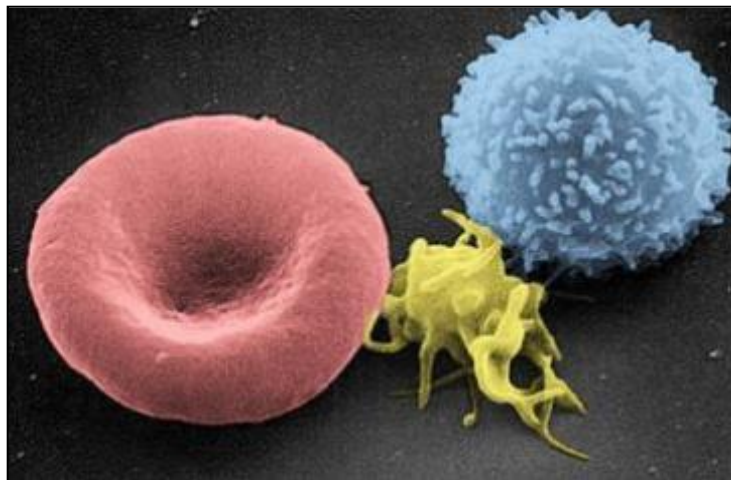
Τα **ερυθρά αιμοσφαίρια ή ερυθροκύτταρα (RBC)** αποτελούν το 38% με 48% του πλήρους αίματος. Είναι τα πιο πολυάριθμα κύτταρα σε κυκλοφορία[1] και δίνουν στο αίμα το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα του μέσω της αιμοσφαιρίνης που περιέχουν. Η λειτουργία τους αφορά τη διατήρηση των ιστών στη ζωή καθώς μεταφέρουν σε αυτούς οξυγόνο από τους πνεύμονες και απομακρύνουν το διοξείδιο του άνθρακα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έχουν το σχήμα αμφίκοιλων δίσκων διαμέτρου 7 μικρόμετρα και πάχους 2. Παράγονται από τον μυελό των οστών και δεν έχουν πυρήνα, ενώ ο μέσος όρος ζωής τους είναι 120 ημέρες, κατά τη διάρκεια του οποίου διανύει 1.500 χιλιόμετρα καθώς διασχίζει ολόκληρο το κυκλοφορικό σύστημα. Είναι πολύ ελαστικά κύτταρα και αυτή τους η ιδιότητα τους επιτρέπει να περνούν από τα τριχοειδή αγγεία. Η εκατοστιαία αναλογία ερυθρών αιμοσφαιρίων ανά μονάδα όγκου αίματος ονομάζεται αιματοκρίτης.

Τα **λευκά αιμοσφαίρια**, λευκοκύτταρα ή κοκκιοκύτταρα (WBC) είναι άχρωμα ή λευκού χρώματος κύτταρα με πυρήνα. Αποτελούν λιγότερο από το 1 τοις εκατό του πλήρους αίματος. Έχουν σχήμα σφαιρικό όταν είναι ακίνητα ενώ μπορούν να κινούνται με αμοιβαδικές κινήσεις. Μία σημαντική τους ικανότητα είναι το ότι μπορούν να διαπερνούν τα τοιχώματα των αιμοφόρων αγγείων και να φτάνουν στο συνδετικό ιστό και στη λέμφο. Η πρωταρχική λειτουργία τους είναι η άμυνα και η καταπολέμηση των λοιμώξεων μέσω της επίθεσης και της καταστροφής επιβλαβών ξένων ουσιών. Μπορούν να κατευθύνονται προς τις περιοχές του οργανισμού όπου αυτός έχει προσβληθεί, όπως φλεγμονές, εγκαύματα, πληγές, και να κατατρώνε και να αποβάλλουν με φαγοκύτωση μικρότερα τους οργανικά μόρια. Επιπλέον, με ένζυμα



που φέρουν μπορούν να καταλύουν τον ιστό, φαινόμενο που συναντάται στα αποστήματα με σκοπό την επαναδημιουργία υγιούς ιστού μετά την πλήρη καταπολέμηση της πάθησης που προκάλεσε την κατάλυση. Σχηματίζονται στους μυελοβλάστες του μυελού των οστών, στο σπλήνα και τους λεμφαδένες. Κατά κανόνα είναι, επίσης, υπεύθυνα για την Ιστοσυμβατότητα κατά τις μεταμοσχεύσεις οργάνων, καθώς, αν δεν υφίσταται ιστοσυμβατότητα, τα λευκά αιμοσφαίρια "επιτίθενται" στο μόσχευμα, θεωρώντας το "ξένο σώμα" και, σταδιακά, προκαλούν την καταστροφή του

Τα **αιμοπετάλια** είναι κυτταρικά θραύσματα, μήκους 2 - 4 μm, τα οποία αποτελούν λιγότερο από το 1 τοις εκατό του πλήρους αίματος. Αριθμούν 250.000 - 400.000 ανά κυβικό χιλιοστό αίματος. Παίζουν καθοριστικό ρόλο στην πήξη του αίματος και την αιμόσταση, δηλαδή στην αναστολή της αιμορραγίας ή της κυκλοφορίας μέσω έκκρισης του ενζύμου της θρομβοκινάσης. Δημιουργούν το φαινόμενο της πήξης του αίματος, με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η διαρροή αίματος από τις πληγές. Τα αιμοπετάλια παράγονται από το μυελό των οστών. Πολλές φορές αναφέρονται ως θρομβοκύτταρα, χωρίς αυτή η ονομασία να είναι ορθή. Τα θρομβοκύτταρα είναι κύτταρα με πυρήνα που συναντώνται σε όλα τα σπονδυλωτά, πλην των θηλαστικών.



Εικόνα 3 Από αριστερά προς τα δεξιά: ερυθροκύτταρο, θρομβοκύτταρο και λευκοκύτταρο.

2.1.1 Ροϊκές ιδιότητες αίματος.

Τα ρευστά έχουν σταθερό ιξώδες (το μέτρο της αντίστασης του ρευστού στη μεταβολή του σχήματος του για μια ορισμένη ταχύτητα), δηλαδή δεν επηρεάζονται από την τιμή της τριβής, ονομάζονται **Νευτώνεια ρευστά**. Όπως για παράδειγμα το νερό. Στην αντίθετη περίπτωση ονομάζονται **Μη Νευτώνεια ρευστά**. Στην περίπτωση του αίματος το πλάσμα είναι Νευτώνειο ρευστό λόγω της σύστασής του. Το ερώτημα είναι τότε το αίμα μπορεί να θεωρηθεί, με ικανοποιητική προσέγγιση, ομογενές και Νευτώνειο ρευστό για συγκεκριμένα προβλήματα ροής.



Το καθοριστικό κριτήριο για το αν μπορεί με ικανοποιητική ακρίβεια να υποτεθεί Νευτώνεια συμπεριφορά φαίνεται ότι είναι η γεωμετρία καθώς και οι βαθμίδες ταχύτητας που εμφανίζονται σε κάθε πρόβλημα ροής. Πιο συγκεκριμένα το αίμα δε μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενές ρευστό στις μικρές αρτηρίες γιατί τότε η διάμετρος και η απόσταση των ερυθρών αιμοσφαιρίων είναι συγκρίσιμες με τη διάμετρο των αρτηριών. Για παράδειγμα στα τριχοειδή αγγεία με διάμετρο 50 φορές μικρότερη από τη διάμετρο του ερυθρού αιμοσφαιρίου, τα ερυθρά αιμοσφαίρια έχουν την ιδιότητα να παραμορφώνονται και η μοντελοποίηση τα θεωρεί ως ανεξάρτητα στερεά σωματίδια μέσα στο πλάσμα με συγκεκριμένες ιδιότητες. Γενικότερα, σε αρτηρίες οι οποίες ξεπερνούν τα $100\mu m$, το αίμα μπορεί να θεωρηθεί ως ομοιογενές επειδή η κλίμακα της δομής του ρευστού είναι πολύ μικρότερη από αυτή της ροής. Συνεπώς το αίμα έχει μοντελοποιηθεί ως Μη Νευτώνειο μικροπολικό η διφασικής ροής ρευστό ανάλογα με το πρόβλημα που έχουμε.

Επιπρόσθετα, έχει μελετηθεί και η επίδραση που έχει η διάμετρος του σωλήνα (αρτηρία) και του αιματοκρίτη στο ιξώδες. Ειδικότερα, αν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από $1mm$, το ιξώδες του αίματος είναι ανεξάρτητο από τη διάμετρο. Αντίθετα αν η διάμετρος είναι μικρότερη από $1mm$, υπάρχει ισχυρή εξάρτηση από τη διάμετρο και το ιξώδες μεταβάλλεται μη γραμμικά με τον αιματοκρίτη. Εκτός από τις διαστάσεις των τριχοειδών αγγείων, στις περισσότερες περιπτώσεις ροής αίματος οι γεωμετρικές διαστάσεις (διάμετρος) της ροής είναι μεγαλύτερες του $1mm$, οπότε το ιξώδες του αίματος θεωρείται ανεξάρτητο της διαμέτρου [49]. Στο Πίνακα 1 δίνονται η διάμετρος και η μέση ταχύτητα ροής του αίματος για διάφορες τιμές διαμέτρων αγγείων του ανθρώπινου σώματος [41].

2.1.2 Μαγνητικές ιδιότητες αίματος.

Το αίμα περιέχει τα ερυθρά αιμοσφαίρια, τα οποία με τη σειρά τους περιέχουν πρωτεΐνες. Η κύρια πρωτεΐνη είναι η αιμογλοβίνη η οποία συμμετέχει στην αποθήκευση και τη μεταφορά του οξυγόνου από τους πνεύμονες στους μύες. Εξαιτίας της παρουσίας της αιμογλοβίνης, το αίμα παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες ρευστού, διότι περιέχει οξείδιο του σιδήρου που συνιστά μαγνητικό δίπολο. Όταν λοιπόν το αίμα εκτεθεί σε μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται η αιμογλοβίνη και κατά συνέπεια τα ερυθρά αιμοσφαίρια τα οποία τείνουν να προσανατολιστούν με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Τα ερυθρά αιμοσφαίρια όπως αναφέραμε λόγω του μεγάλου τους αριθμού και της συγκέντρωσης τους, κυριαρχούν στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του αίματος. Οπότε τελικά με την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου επηρεάζεται η ροή του αίματος.

Έχει παρατηρηθεί επίσης πως η οξυγονωμένη αιμογλοβίνη (αρτηριακό αίμα) έχει διαμαγνητική συμπεριφορά, ενώ η μη οξυγονωμένη αιμογλοβίνη (φλοιβικό αίμα) παρουσιάζει παραμαγνητική συμπεριφορά.

Παράλληλα με τη μαγνήτιση που παρουσιάζει το αίμα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αίματος που οφείλεται στα ιόντα του πλάσματος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος που δημιουργείται από την κίνηση ηλεκτρικά αγώγιμου ρευστού και τη δημιουργία της δύναμης Lorentz εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με το μαγνητικό πεδίο.



Οι μαγνητικές ιδιότητες του αίματος έχουν επιβεβαιωθεί και μετρηθεί σε αρκετά πειράματα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα παρακάτω:

- Σε πείραμα που έγινε σε αίμα υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου έντασης από 1 – 8 Tesla, διαπιστώθηκε ο προσανατολισμός των ερυθρών αιμοσφαιρίων με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, καθώς επίσης και ο προσανατολισμός των υπόλοιπων κυττάρων του αίματος, όπως για παράδειγμα των αιμοπεταλίων, τα οποία προσανατολίζονται με τις δυναμικές γραμμές με τον ίδιο τρόπο.
- Στο ίδιο πείραμα έγινε και μελέτη της μαγνητικής επιδεκτικότητας του αίματος και βρέθηκε να είναι ίση με 3.5×10^{-6} για φλεβικό αίμα και -6.6×10^{-7} για το αρτηριακό αίμα.
- Σε ένα άλλο πείραμα που έγινε σε ζωντανό ποντικό που εκτέθηκε σε μαγνητικό πεδίο έντασης 8 Tesla, η ροή του αίματος μειώθηκε. Μάλιστα σε μαγνητικό πεδίο έντασης 8 Tesla βρέθηκε ότι η ροή αίματος σε σωλήνα επιβραδύνεται κατά 30%.
- Σε διάφορα πειράματα επίσης διαπιστώθηκε ότι η υπόθεση μαγνήτισης ισορροπίας για το αίμα είναι σωστή και μπορεί να ληφθεί υπόψη για την κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την ροή του αίματος υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου.
- Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι το αίμα λόγω των ιόντων στο πλάσμα παρουσιάζει ηλεκτρική αγωγιμότητα η οποία έχει πειραματικά προσδιοριστεί σε $0.7 \Omega^{-1}$ [70] για το στάσιμο αίμα. Με τη ροή, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να αυξάνεται περίπου 10%.

2.3 Η λειτουργία του αίματος.

Όπως προαναφέρθηκε, το αίμα επιτελεί ποικίλες λειτουργίες στον οργανισμό, ρυθμίζοντας και προστατεύοντας τον. Αυτές φαίνονται αναλυτικά παρακάτω:

- Μεταφέρει το οξυγόνο από τους πνεύμονες στα κύτταρα και την και το διοξείδιο του άνθρακα από τα κύτταρα στους πνεύμονες. Επίσης μεταφέρει θρεπτικές ουσίες όπως ορμόνες και βιταμίνες από το πεπτικό σύστημα προς τα κύτταρα του σώματος και απομακρύνει και μεταφέρει άχρηστες και τοξικές ουσίες από τα κύτταρα σε τμήματα του οργανισμού τα οποία τα αποβάλλουν ή τα καταστρέφουν όπως τα νεφρά ή το ήπαρ.
- Ρυθμίζει το pH και βοηθά στην ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος έτσι ώστε να υπάρχει ισοκατανομή τις. Επιπλέον με τη μεταφορά των ορμονών, των πεπτιδίων, των ιόντων και των φυσιολογικών δραστικών ουσιών από τη θέση



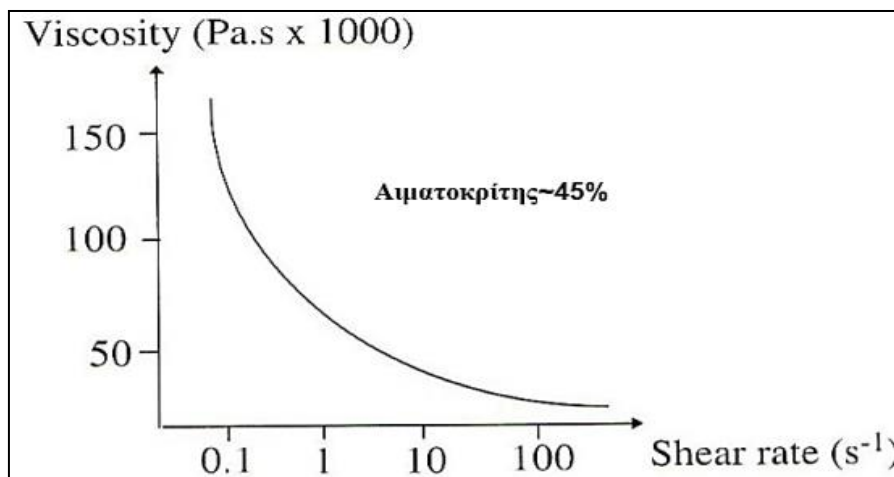
- συνθέσεις προς τα κύτταρα καθίσταται δυνατή η ρύθμιση της φυσιολογικής λειτουργίας των διαφόρων ιστών και οργάνων του οργανισμού.
- Το αίμα συμβάλλει στην προστασία του οργανισμού από ξένα μικρόβια και τοξίνες με τη μεταφορά των λευκών αιμοσφαιρίων και πρωτεϊνών του πλάσματος. Επίσης με το μηχανισμό της πήξης προστατεύει από την απώλεια αίματος [Sherwood Lauralee, 2010, Tortora Gerard J., Grabowski Sandra Reynolds, 2007].

2.4 Ρεολογία του αίματος.

Το αίμα στην κυκλοφορία μεταφέρει το οξυγόνο στους ιστούς και απομακρύνει διοξείδιο του άνθρακα. Η ανταλλαγή αυτή εξαρτάται από α) την συγκέντρωση των ερυθρών αιμοσφαιρίων (αιματοκρίτης) και από β) τον λόγο της ροής (flow rate), δηλ. προσδιορίζεται από την απόδοση της καρδιάς. Η αντίσταση στη ροή (flow resistance) παίζει ρόλο, όχι μόνο λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων των αγγείων (γεωμετρία, ιξωδοελαστικότητα, κ.λ.π), αλλά και λόγω αυτών καθεαυτών των ρεολογικών ιδιοτήτων του αίματος και του πλάσματος. [Δρ. Γεώργιος Βλαστός].

2.4.1 Ιξώδες του αίματος.

Όπως έχει αναφερθεί το αίμα αποτελείται από ένα νευτώνειο ρευστό (το πλάσμα) και τρία κύρια συστατικά (λευκοκύτταρα, ερυθροκύτταρα, αιμοπετάλια). Υπό την επίδραση χαμηλών διατμητικών τάσεων τα ερυθρά αιμοσφαίρια σχηματίζουν συσσωματώματα τα οποία διαταράσσουν τις λογικές γραμμές και αυξάνουν σημαντικά το φαινόμενο ιξώδες (μ) του αίματος. Με αύξηση του ρυθμού διάτμησης (γ) τα συσσωματώματα αυτά σταδιακά διαλύονται και το ιξώδες του αίματος μειώνεται τείνοντας ασυμπτωτικά προς μια οριακή τιμή. Επομένως το αίμα συμπεριφέρεται ως μη νευτώνειο ρευστό που για αυξανόμενο ρυθμό διάτμησης το ιξώδες του μειώνεται με φθίνοντα ρυθμό μεταβολής το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ψευδόπλαστική συμπεριφορά (shear thinning behavior).



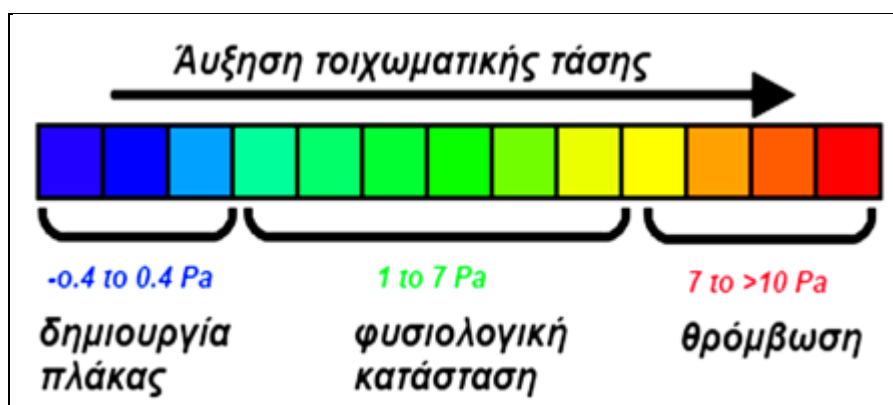
Εικόνα 4: Διάγραμμα Ιξώδους (Viscosity) και διατμητικής τάσης (Shear rate).



Το $\mu\infty$ αίματος με αιματοκρίτη (Ht) Περίπου 45% και σε θερμοκρασία 37 βαθμούς Κελσίου κυμαίνεται γύρω στα 3,5 mPa.s. Πολλοί ερευνητές θεωρούν το αίμα νευτώνειο ρευστό, στηριζόμενοι στους υψηλούς ρυθμούς διάτμησης που επικρατούν στις μεγάλες αρτηρίες. Ωστόσο οι Gijsen et al θεωρούν μια τέτοια παραδοχή επισφαλής σημειώνοντας ότι οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες του αίματος επηρεάζουν την ρευστόδυναμική του συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα πρόσφατων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο τεχνολογίας χημικών εγκαταστάσεων έδειξαν ότι η συνήθης παραδοχή πως το αίμα συμπεριφέρεται ως νευτώνειο ρευστό δεν ισχύει για ροή σε μικρές αρτηρίες.

2.5 Τοιχωματική διατμητική τάση (Wall Shear Stress, WSS).

Το ιξώδες του αίματος δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το ρυθμό διάτμησης λόγω των σωμάτων που σχηματίζουν τα ερυθρά αιμοσφαίρια σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης. Υπό κανονικές συνθήκες και σε κατάσταση ηρεμίας η ροή μέσα σε μια αρτηρία είναι στρωτή με δευτερεύουσες ροές να δημιουργούνται στις περιοχές μετά από στένωσης σε διχασμούς και σε καμπυλότητες. Η τριβή ανάμεσα στο ρευστό και στο ενδοθηλιακό κύτταρο δημιουργεί μια επαπτομενική δύναμη που ασκείται από το ρευστό στην εσωτερική επιφάνεια της αρτηρίας και είναι γνωστή ως τοιχωματική διατμητική τάση (Wall Shear Stress, WSS). Το μέγεθος της εξαρτάται από το πόσο γρήγορα αυξάνεται η ταχύτητα του ρευστού από το τοίχωμα της αρτηρίας προς το κέντρο της. Αυτή η μεταβολή της ταχύτητας ονομάζεται ρυθμός διάτμησης (Shear rate). Πλέον είναι εδραιωμένη η άποψη ότι η αιμοδυναμικές συνθήκες στο εσωτερικό της αρτηρίας συνδέονται άμεσα με την αθηροσκλήρωση και συγκεκριμένα οι χαμηλές τιμές της τοιχωματικής διατμητικής τάσης (WSS), Όπως και οι έντονες διακυμάνσεις της. Ειδικότερα οι πολύ χαμηλές οι και αρνητικές τιμές της WSS Ευθύνονται για την δημιουργία πλάκας ενδιάμεσες τιμές υποδηλώνουν συνθήκες που επικρατούν σε φυσιολογική αρτηρία ενώ υψηλές τιμές ευνοούν την έναρξη μιας άλλης παθήσεως της θρόμβωσης η οποία ενδέχεται να προκαλέσει μηχανικές βλάβες του ενδοθηλίου.



Εικόνα 5: Επίδραση της WSS στη λειτουργία του ενδοθηλίου.



2.6 Ο ρόλος της ρεολογίας του αίματος στην αιμοδυναμική .

Οι περισσότερες αναφορές σχετικά με τις μεταβολές της ρεολογίας του αίματος σε φυσιολογικές και παθοφυσιολογικές καταστάσεις συμπεριλαμβάνουν εργαστηριακές μελέτες των ρεολογικών παραμέτρων όπως είναι το ιξώδες η συσσωμάτωση και η παραμόρφωσιμότητα. Λόγω αυτού είναι αβέβαιες οι επιπτώσεις σε μεταβολές της ρεολογίας σε καταστάσεις ροής *in vivo* και σε αιμάτωση των ιστών. Έτσι υποστηρίζεται πως υπάρχουν διαφορές μεταξύ στο *in vivo* και τις μετρήσεις που παίρνονται σε δείγματα αίματος έξω από το κυκλοφοριακό σύστημα. Αυτό βασίζεται σε διαφορές που έχουν βρεθεί σε μετρήσεις του φαινομενικού ιξώδους με τη χρήση για παράδειγμα ενός γυάλινου σωλήνα η ιξωδόμετρου τύπου Couette. Τα ιξωδόμετρα τύπου Couette είναι περιστροφικά ιξωδόμετρα όπου το ιξώδες ρευστό βρίσκεται στο χώρο μεταξύ δύο παράλληλων πλακών ,ένας από τους οποίους κινείται σε σχέση με το άλλο. Για την καλύτερη κατανόηση των σχέσεων μεταξύ της ρεολογίας του αίματος και αιμοδυναμικής, πρέπει να γίνονται έρευνες στις σχέσεις πιέσεις ροής σε συστήματα ροής που προσεγγίζουν καλύτερα το κυκλοφοριακό σύστημα[Baskurt & Meiselman 2003].

2.6.1 Συμπεριφορά της ροής του αίματος σε κυλινδρικούς αγωγούς.

Για την καλύτερη κατανόηση της ρεολογίας του αίματος συνήθως χρησιμοποιούνται κυλινδρικού γυάλινου σωλήνες οι οποίοι είναι απλοποιημένα μοντέλα για το αγγειακό σύστημα. Αυτοί οι σωλήνες επιτρέπουν μετρήσεις των σχέσεων πιέσεις ροής και οπτικοποίηση του αίματος κατά την ροή[Baskurt & Meiselman 2003].

Μελέτες στις αρχές του 20ού αιώνα αναφέρουν πως το φαινομενικό ιξώδες του αίματος όταν ρέει μέσα σε τριχοειδή σωλήνα αλλάζει ανάλογα με την διάμετρο του σωλήνα. Συγκεκριμένα μειώνεται όταν μειώνεται η διάμετρος και φτάνει σε μια ελάχιστη τιμή σε διαμέτρους 6-8μm και μετά αυξάνεται απότομα καθώς η διάμετρος γίνεται ακόμη μικρότερη. Αυτή η ανώμαλη συμπεριφορά του αίματος επηρεάζεται από την παραμόρφωσιμότητα των RBCs και είναι λιγότερο έντονη η σχεδόν αμελητέα για άκαμπτα αιωρήματα ερυθροκυττάρων. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Fahraeus-Lindqvist. Το φαινόμενο Fahraeus-Lindqvist επηρεάζεται από το φαινόμενο Fahraeus το οποίο είναι το αποτέλεσμα της μέσης συγκέντρωσης RBCs στο ανθρώπινο αίμα καθώς η διάμετρος του γυάλινου σωλήνα στο οποίο ρέει μειώνεται. Με άλλα λόγια όταν τα αιμοφόρα αγγεία έχουν διάμετρο μικρότερη από 500 μm ο αιματοκρίτης μειώνεται όσο μειώνεται και η διάμετρος των τριχοειδή[Baskurt & Meiselman 2003].

Τα RBC δεν κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη την κλινική διατομή του κεντρικού σωλήνα κατά την ροή αλλά τείνουν να συσσωματώνονται στην κεντρική περιοχή δημιουργώντας έτσι ένα στρώμα χωρίς κύτταρα (*cell free layer* ή CFL) κοντά στα τοιχώματα του σωλήνα με την μέγιστη τιμή αιματοκρίτη στο κέντρο και την ελάχιστη στα τοιχώματα. Ωστόσο στο κέντρο όπου υπάρχει το μέγιστο ποσοστό αιματοκρίτη υπάρχουν αντίστοιχα οι ελάχιστες τιμές διατμητικών τάσεων και έτσι υψηλότερη ταχύτητα. Αντίθετα στα τοιχώματα υπάρχουν οι μέγιστες για την δικές στάσεις και η χαμηλότερη ταχύτητα. Η αντίσταση της τριβής στο τοίχωμα του σωλήνα



είναι ευθέως ανάλογη στο ιξώδες του ρευστού και είναι ένα αρκετά σημαντικό στοιχείο της υδροδυναμικής αντίστασης. Επίσης η συσσωμάτωση και η καθίζηση επηρεάζουν την κατανομή των RBCs Κατά μήκος της διαμέτρου του σωλήνα με τις επιδράσεις της αντίστασης της ροής να εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της ροής του συστήματος σε σχέση με την βαρύτητα. Συγκεκριμένα η καθίζηση των RBCs Τείνει να αυξάνει την αντίσταση της ροής σε οριζόντιες σωλήνες λόγω της συγκέντρωσης των RBCs Στην κάτω πλευρά του τοίχου του σωλήνα.

Επιπλέον σε κάθετους σωλήνες η ακτινική μετανάστευση των RBCs κυριαρχεί και η αντίσταση της ροής είναι μειωμένη λόγω του σχηματισμού ενός CFL, Έτσι κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα το ιξώδες είναι μειωμένο.Εντούτοις σε κάθετους σωλήνες η αυξημένη συσσωμάτωση των RBCs ευνοεί τον σχηματισμό ενός CFL κοντά στο τοίχωμα και έτσι μια μείωση της αντίστασης της ροής. Η ροή του αίματος σε κυλινδρικό σωλήνα είναι επομένως τουλάχιστον συνάρτηση της συσσωμάτωσης της παραμόρφωσιμότητας της διάμετρου του σωλήνα και τον προσανατολισμό έναντι βαρύτητας (Baskurt & Meiselman 2003). Παράλληλα είναι αναμενόμενο ότι η συμπεριφορά του αίματος στους ιστούς ενδέχεται να είναι σημαντικά διαφορετική από αυτή που προβλέπεται με βάση τις μετρήσεις από το ιξωδομέτρα.

2.6.2 Συμπεριφορά της ροής του αίματος σε In Vivo.

Αρκετοί παράγοντες υποδηλώνουν ότι τα πειραματικά αποτελέσματα σε γυάλινους σωλήνες μπορεί να μην είναι άμεσα εφαρμόσιμα σε in vivo συνθήκες ροής. Αρχικά η γεωμετρία του μικρού αγγειακού είναι εξαιρετικά πολύπλοκη με αρκετές διακλάδωσεις και έτσι ο χρόνος παραμονής του αίματος μέσα σε ένα ενιαίο αγγείο μπορεί να είναι πολύ λίγος για να επιτραπεί ανάπτυξη ενός CFL. Επιπλέον τα αιμοφόρα αγγεία έχουν ελαστικά τοιχώματα και η διάμετρος τους μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με την αύξηση της πίεσης του αίματος,τροποποιώντας την αγγειακή γεωμετρία και την αντίσταση της ροής(Baskurt & Meiselman 2003).

2.6.3 Ρόλος της παραμόρφωσης των RBCs- Ο ρόλος διαχωρισμού φάσης.

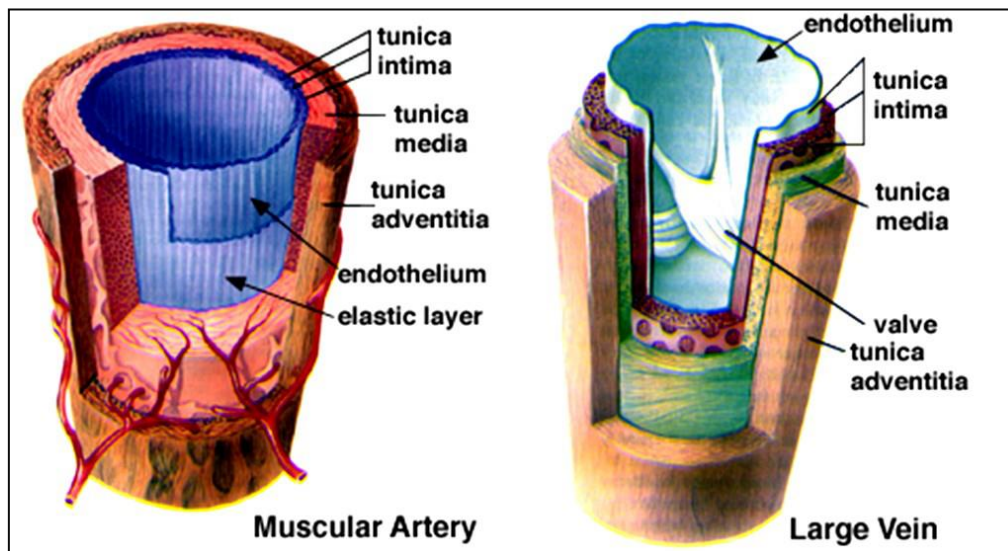
Η παραμόρφωσιμότητα των RBCs έχει σημαντικές επιδράσεις στην αντίσταση της ροής σε όλο το αγγειακό σύστημα. Στα μεγάλα αιμοφόρα αγγεία τα παραμορφώσιμα RBCs προσανατολίζονται εύκολα μέσα στις ροογραμμές και έτσι μειώνεται το ιξώδες του αίματος. Αντίθετα στα μικρά αιμοφόρα αγγεία η εξάρτηση του Fahraeus-Lindqvist στην παραμόρφωσιμότητα επηρεάζει την παραμόρφωσιμότητα και αυτό σχετίζεται με την μείωση της αντίστασης της ροής. Επιπλέον καθώς το μέγεθος των αιμοφόρων αγγείων μειώνεται η ακτινική μετανάστευση και ο διαχωρισμός φάσης γίνονται σημαντικοί μηχανισμοί οι οποίοι επηρεάζουν την αντίσταση της ροής. Στα πραγματικά τριχοειδή όπου θα πρέπει να παραμορφωθούν για να εισέλθουν και να διελεύσουν σε διάμετρο αγγείων μικρότερη από την διάμετρο των RBCs όταν βρίσκονται σε ηρεμία η παραμόρφωσιμότητα των RBCs είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ροή του αίματος(Baskurt & Meiselman 2003).



2.7 Το καρδιαγγειακό σύστημα.

Το καρδιαγγειακό σύστημα είναι σύστημα οργάνων που είναι υπεύθυνο για την παροχή οξυγόνου καθώς και για την μεταφορά και ανταλλαγή ουσιών στα κύτταρα του οργανισμού. Το καρδιαγγειακό σύστημα αποτελείται από την καρδιά, τις φλέβες, τις αρτηρίες και τα τριχοειδή αγγεία. Τα όργανα αυτά ανακυκλώνουν συνεχώς το αίμα στον οργανισμό. Το αίμα είναι ένα είδος συνδετικού ιστού το οποίο αποτελείται από πλάσμα και κύτταρα που αιωρούνται στο πλάσμα. Είναι αυτό που πραγματοποιεί την μεταφορά οξυγόνου, την μεταφορά άλλων θρεπτικών ουσιών, όπως σάκχαρα και αμινοξέα από το πεπτικό σύστημα προς τους ιστούς, την μεταφορά των άχρηστων υλικών προς το απεκκριτικό σύστημα, την μεταφορά ορμονών ενώ συμμετέχει και σε άλλους μηχανισμούς που σχετίζονται με την προστασία του οργανισμού. Κύριος ρόλος του καρδιαγγειακού συστήματος είναι:

- Η διανομή οξυγόνου στους ιστούς (μέσω του αίματος).
- Η μεταφορά των μεταβολικών αποβλήτων (δηλ του διοξειδίου του άνθρακα).
- Η μεταφορά και διανομή ύδατος και άλλων θρεπτικών συστατικών στους ιστούς.
- Η διατήρηση της ομοιόστασης στον οργανισμό.
- Η θερμορρύθμιση (μεταφορά θερμότητας).



Εικόνα 6: Δομή μυϊκής αρτηρίας(αρ) και μεγάλης φλέβας(δεξ).

2.7.1 Καρδιά & καρδιακός κύκλος.

Η καρδιά είναι το κεντρικό όργανο της κυκλοφορίας. Είναι ένα κοίλο μυώδες Όργανο που λειτουργεί σαν μια φυσική αντλία η οποία δέχεται το αίμα που προέρχεται από τις φλέβες στις οποίες βρίσκεται σε χαμηλή πίεση και το ωθεί προς τις αρτηρίες με υψηλή πίεση. Η καρδιά βρίσκεται μέσα στην θωρακική κοιλότητα ανάμεσα στους δύο πνεύμονες. Το σχήμα της καρδιάς παρομοιάζεται με το σχήμα



κώνου. Η καρδιά περιβάλλεται από ένα υμένα από δύο φύλλα το περικάρδιο ενώ οι εσωτερικές της κοιλότητες καλύπτονται από μια λεπτή μεμβράνη το ενδοκάρδιο. Ανάμεσα στο περικάρδιο και το ενδοκάρδιο βρίσκεται το παχύτερο τοιχώματα της καρδιάς που ονομάζεται μυοκάρδιο και αποτελείται από δυνατές μυϊκές ίνες. Αποτελείται από τέσσερις μυώδεις κοιλότητες δύο πάνω με λεπτά τοιχώματα τα οποία ονομάζονται κόλποι και δύο κάτω με παχύτερα τοιχώματα που ονομάζονται κοιλιές. Ο δεξιός κόλπος της καρδιάς δέχεται το αίμα από όλα τα μέρη του σώματος μέσω των μεγάλων φλεβών το προωθεί στη δεξιά κοιλία και από εκεί στην πνευμονική κυκλοφορία με στόχο την οξυγόνωσή του.

Στη συνέχεια το πλούσιο σε οξυγόνο αίμα προωθείται από τους πνεύμονες στον αριστερό κόλπο και από εκεί στην αριστερή κοιλία. Η τελευταία αποτελεί το πιο δυνατό και σημαντικό τμήμα του μυοκαρδίου γιατί με την συστολή της προωθεί το οξυγονωμένο πλέον αίμα σε όλο το σώμα μέσω της αορτής και των μεγάλων αρτηριών. Η καρδιά διαθέτει τέσσερις βαλβίδες που χρησιμεύουν στο να επιτρέπουν την διόδο του αίματος προς μία μόνο κατεύθυνση και να εμποδίζουν την παλινδρόμηση του κατά τη διάρκεια της καρδιακής συστολής.

2.7.2 Αορτή.

Η αορτή είναι η κυριότερη και μεγαλύτερη αρτηρία του σώματος. Αρχίζει από την αριστερή κοιλία της καρδιάς και είναι η πρώτη αρτηρία που συναντά το αίμα καθώς εξέρχεται από την καρδιά. Μέσω της αορτής και των διαφόρων κλάδων της το αίμα διοχετεύεται σε όλο τον οργανισμό καθώς ακολουθεί την πορεία του σύμφωνα με την συστηματική ή περιφερική κυκλοφορία που προαναφέραμε.

Η αορτή είναι ένας μεγάλος ελαστικός αγωγός με διάμετρο περίπου 25 mm και μήκος 6 cm μέσω της οποίας διοχετεύεται στον οργανισμό όλος ο όγκος του αίματος και μάλιστα με μεγάλη αρχική πίεση ώστε να μπορέσει να φτάσει σε κάθε σημείο του καρδιαγγειακού συστήματος. Από την έκφυση της η αορτή δημιουργεί τόξο περίπου 180° και κατευθύνεται στο κάτω μέρος του σώματος με μέση αρχική πίεση περίπου 100 mmHg και με μεγαλύτερη παροχή όγκου στην εξόδο από την αριστερή κοιλία περίπου 5 lt/min. Η αορτή χωρίζεται στα εξής τμήματα:

- Την ανιούσα αορτή
- Το αορτικό τόξο
- Την κατιούσα θωρακική αορτή
- Την κοιλιακή αορτή

Μετά την έκφυση της η αορτή στρέφεται προς τα πάνω. Το τμήμα αυτό λέγεται ανιούσα αορτή. Όταν φτάσει πίσω από το δεύτερο δεξιό πλευρικό χονδρό τότε κάμπτεται σε σχήμα τόξου. Το τμήμα αυτό λέγεται αορτικό τόξο. Μετά η αορτή κατέρχεται και σχηματίζει την κατιούσα αορτή. Κατευθύνεται προς την μπροστινή επιφάνεια των σπονδύλων οπότε το τμήμα αυτό λέγεται θωρακική αορτή. Τέλος, φτάνει στην κοιλία (κοιλιακή αορτή).



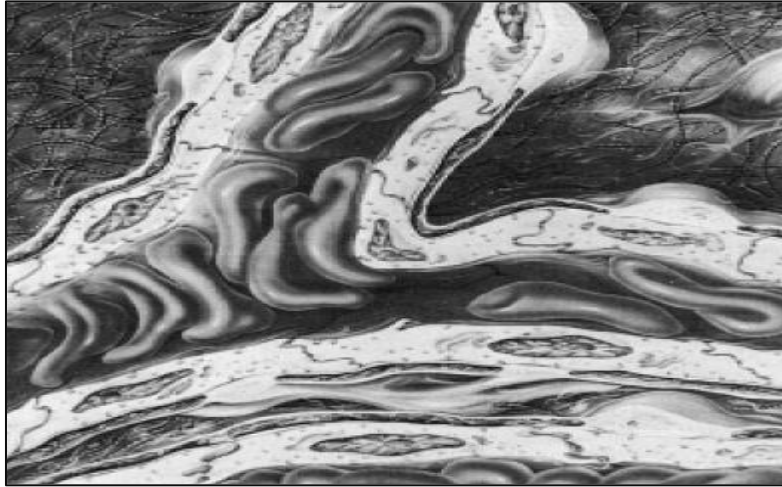
2.7.3 Στεφανιαία νόσος και Αθηροσκλήρυνση.

Τα καρδιαγγειακά νοσήματα αποτελούν ένα ευρύ φάσμα διαταραχών που προσβάλλουν την καρδιά και τα αιμοφόρα αγγεία. Η στεφανιαία νόσος αποτελεί την συχνότερη και ίσως σπουδαιότερη καρδιαγγειακή νόσο. Η στεφανιαίες αρτηρίες εκφύονται από την αορτή και διακλαδίζονται στην δεξιά και αριστερή στεφανιαία, στη συνέχεια διακλαδίζονται ακόμη περισσότερο και καταλήγουν σε ένα πυκνό δίκτυο τριχοειδών αγγείων. Οι στεφανιαίες αρτηρίες τροφοδοτούν με αίμα και θρεπτικά συστατικά τον καρδιακό μυ δίνοντας του την απαραίτητη ενέργεια για την σύσπασση του. Σε περίπτωση ανάπτυξης αθηρωματικής πλάκας ωστόσο η παροχή του αίματος στον καρδιακό μυ μειώνεται με αποτέλεσμα να προκαλείται στηθάγχη, δηλαδή έντονος θωρακικός πόνος.

Αναλυτικότερα η ανάπτυξη αθηρωματικής πλάκας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγγείου το οποίο είναι προϊόν της αθηροσκλήρυνσης που συμβαίνει κατά την φυσιολογική γήρανση του οργανισμού. Η αθηρωματικές πλάκες είναι ένα υλικό από λιπαρές ουσίες, χοληστερίνη κι άλλα προϊόντα του μεταβολισμού και των κυττάρων που κυκλοφορούν στις αρτηρίες, κολλάνε στα τοιχώματα και με την πάροδο του χρόνου προκαλούν στένωση του αυλού των αγγείων. Συνέπεια της αθηροσκλήρυνσης και κατεπέκταση των αθηρωματικών πλακών είναι η εξασθένηση του τοιχώματος της αρτηρίας και η πιθανή δημιουργία ανευρύσματος.

Η έννοια του ανευρύσματος θα παρουσιαστεί λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστά με βεβαιότητα τα πραγματικά αίτια της δημιουργίας αθηρωματικών πλακών αναμφίβολα όμως υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που προδιαθέτουν στην εμφάνισή τους. Κύριο ρόλο παίζουν τα επίπεδα των λιπιδίων στο αίμα δηλαδή η χοληστερόλη και τα τριγλυκερίδια η αρτηριακή υπέρταση ζαχαρώδης διαβήτης το κάπνισμα το βεβαρυμένο οικογενειακό ιστορικό όπως π.χ γονείς με στεφανιαία νόσο σε ηλικία μικρότερη των 60 ετών. Λόγω της σπουδαιότητάς της,

Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες επεμβατικές τεχνικές για την αντιμετώπιση της στεφανιαίας νόσου. Οι τρεις κυριότερες είναι η αθηρεκτομή, η αγγειοπλαστική, η αορτοστεφανιαία παράκαμψη (by pass). Βέβαια υπάρχουν και διάφορες φαρμακευτικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για την πρόληψη εμφράγματος του μυοκαρδίου και του καρδιακού θανάτου. Οι κυριότερες ουσίες είναι τα αντιαιμοπεταλιακά που αποτρέπουν την πήξη του αίματος και την δημιουργία θρόμβων, διάφοροι υπολιπιδαιμικοί παράγοντες που οδηγούν σε μείωση των λιπιδικών κλασμάτων και κυριότερα της χοληστερόλης και οι αναστολείς του μετατρεπτικού ενζύμου της αγγειοτασίνης που έχουν αντίαθηρωματική δράση. Σε κρίσιμες περιπτώσεις όμως η καρδιολογία παρεμβαίνει και αντιμετωπίζει ριζικότερα την στεφανιαία νόσο αποκαθιστώντας δηλαδή τις βλάβες που υπάρχουν μέσα στα στεφανιαία αγγεία.



Εικόνα 7: Μεταβολή σχήματος των RBCS για να είναι ικανά να περάσουν μέσα από τη μικροκυκλοφορία (Baskurt & Meiselman 2003)



3. Το καρδιαγγειακό σύστημα.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται θέματα που άπτονται της κυκλοφορίας του αίματος, ειδικότερα το κυκλοφορικό σύστημα η λειτουργία της καρδιάς και το καρδιαγγειακό σύστημα.

3.1 Ανάλυση κυκλοφορίας του αίματος.

Την τελευταία δεκαετία έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στον τομέα της ιατρικής ανάλυσης μέσω προσομοιώσεων και αισθητήρων κατάλληλων να ανιχνεύουν και να μετρούν τις περισσότερες διεργασίες στο ανθρώπινο σώμα. Η μελέτη των Friman O. et al. (2011) αναφέρεται στη χρήση ενός τρόπου μαγνητικής τομογραφίας (Phase-Contrast -PC) μέσω του οποίου χρησιμοποιούνται μετατοπίσεις φάσης σήματος που προκύπτουν από μετακινήσεις περιστροφών για τη μέτρηση της κίνησης της ροής του αίματος στους ιστούς. Χρονικά επιλυμένα πεδία διανυσμάτων 4D που αντιπροσωπεύουν την κίνηση ή τη ροή μπορούν να εξαχθούν από τις εικόνες μαγνητοσκοπημένης μαγνητικής τομογραφίας.

Στις εφαρμογές μαγνητικής τομογραφίας του καρδιαγγειακού συστήματος με υπολογιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέτοιες τεχνικές απεικόνισης και τα ίχνη των σωματιδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνήθως για την απεικόνιση της ροής του αίματος. Επιπλέον στην έρευνά τους εξάγουν στατιστικά αποτελέσματα για την πιθανότητα λάθους της συγκεκριμένης μεθόδου και τα ποσοστά επιτυχίας. Τέτοιου είδους τεχνικές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά σε συνδυασμό με πειράματα που αφορούν το αντικείμενο της τρέχουσας πτυχιακής εργασίας για την επίτευξη άμεσης μελέτης, ελέγχου και ορθότερων αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε μέσω της χρήσης πειραματόζων να γίνει άμεση ανίχνευση της ροής του αίματος κατά τη χρήση μαγνήτη για τη μαγνήτιση του σιδήρου του αίματος.

Σχεδόν όλα τα αγγεία του σώματος όπως οι αρτηρίες και οι φλέβες είναι «ευέλικτα» το οποίο σημαίνει ότι όταν υπάρχει διαφορά μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής πίεσης, η περιοχή της διατομής τους μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά και να αλλάξει. Αυτό το περίπλοκο και μη γραμμικό φαινόμενο προέρχεται από μια προσαρμογή με ταλαντευόμενη πίεση της καρδιάς, πράγμα που σημαίνει ότι η αύξηση της πίεσης του αίματος κάνει αυτές τις φλέβες και αρτηρίες να επεκτείνονται και η απελευθέρωση της πίεσης τις κάνει να συστέλλονται και να συμπιέζονται στο αρχικό τους μέγεθος.

Υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις που ερευνάται η ελαστική συμπεριφορά των σωλήνων ως μοντέλο των αιμοφόρων αγγείων. Οι Lou X.Y. και Pedeley T.J. (1993) ερεύνησαν τη σταθερή ροή σε ένα κανάλι με ένα άκαμπτο τοίχωμα και με ένα τμήμα του άλλου τοιχώματος να αντικαθίσταται από ένα ελαστικό μεμβράνης. Χρησιμοποίησαν ως παραμέτρους, T_m , τη διαμήκη τάση του ελαστικού τμήματος για την εξέταση της ευελιξίας. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι για μια δεδομένη παράμετρο του συστήματος υπάρχει μια τιμή T_m , η οποία προς το πάνω τμήμα της μεμβράνης διογκώνεται και προς τα έξω παραμένει σταθερή.

Επίσης, έδειξαν λεπτομέρειες για την ταλάντωση στην περίπτωση που το σύστημα είναι ασταθές. Στόχος των αναλύσεων αυτών ήταν η μελέτη της ασταθής



ροής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Lou X.Y. και Pedeley T.J., 1996). Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ξανά ότι για τις τιμές κάτω από ένα ορισμένο σταθερό διάλυμα οι συνθήκες γίνονται ασταθείς και η σταθερή ροή δείχνει συμπεριφορές αυτοσυγκρατημένων ταλαντώσεων.

Επίσης, σε πολλά δημοσιεύματα μελετάται αυτό το φαινόμενο των ελαστικών σωλήνων όπως στις μελέτες των Lou X. Y. (2001) ή Armitstead J.P. και Bertram C.D. (1996). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μία από τις διάφορες δυνατότητες στόχευσης φαρμάκων είναι η μαγνητικώς ελεγχόμενη στόχευση φαρμάκων. Σε αυτή τη μέθοδο κατάλληλα αντικαρκινικά φάρμακα δεσμεύονται με σιδηρούχα ρευστά που συγκεντρώνουν το φάρμακο σε μια συγκεκριμένη περιοχή (περιοχή όγκου) με την εφαρμογή μαγνητικών πεδίων. Την ίδια στιγμή τα φάρμακα αποσυνδέονται από το φερρορευστό και απορροφώνται για παράδειγμα από τον όγκο των κυτάρων. Το φερρορευστό είναι ένα μαγνητικό κολλοειδές εναιώρημα αποτελούμενο από βασικά υγρά και μαγνητικά νανοσωματίδια (συνήθως αποτελούνται από σίδηρο στην περίπτωση της στόχευσης φαρμάκων (Alexίου C. Et al., 2006) με εύρος διαμέτρου 5-15 nm. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αποφυγή τυχόν παρενεργειών σε σχέση με τη συμβατική χημειοθεραπεία (Lubbe A. S. et al., 2001). Πολλές μελέτες έχουν βασιστεί σε αυτή τη μέθοδο και τα μέσα της όπου τελικά μπορεί να είναι και αποτελεσματικότερη (Ruenraroengsak P. Et al., 2009). Επίσης, το ίδιο το αίμα μπορεί να θεωρείται ως μαγνητικό σιδηρορευστό λόγω της ύπαρξης μορίων αιμοσφαιρίνης που περιέχουν οξειδίο του σιδήρου. Η διάμετρος των μορίων της αιμοσφαιρίνης είναι περίπου 55 Å (5,5 nm). Επίσης, σε πολλές άλλες δημοσιεύσεις έχει μελετηθεί η επίδραση των μαγνητικών πεδίων με τα χαρακτηριστικά του αίματος στα αγγεία (Habibi M.R. και Ghasemi M., 2011), αλλά η ελαστικότητα του αιμοφόρου αγγείου δεν έχει ληφθεί υπόψη.

Οι Aminfar H. et al. (2013) μελέτησαν τη συμπεριφορά ενός δισδιάστατου σωλήνα με ένα ελαστικό τμήμα που περιέχει φερρορευστό όπως το αίμα στην παρουσία και μη ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου. Έλαβαν υπόψιν τους δύο περιπτώσεις μαγνητικών πεδίων, συμπεριλαμβανόμενης σταθερής κλίσης (τόσο θετικής όσο και αρνητικής) αλλά και ενός πεδίου μέσω της χρήσης ενός καλωδίου που μετέφερε ηλεκτρικό ρεύμα. Η επιφανειακή τάση της μεμβράνης θεωρείται σταθερή κατά μήκος του τοιχώματος. Η αριθμητική λύση των κατευθυντικών εξισώσεων του πεδίου ροής λήφθηκε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο με δύο φάσεις ελέγχου.

Αν και το μαγνητικό πεδίο επηρεάζει το ιξώδες και τη θερμική αγωγιμότητα του φερρορευστού, αυτά τα αποτελέσματα τα θεώρησαν ως αμελητέα. Στη μελέτη τους, θεώρησαν το μαγνητισμό ισορροπίας και αγνόησαν το διασκεδασμό της ενέργειας, την πίεση και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ρευστού. Επιπλέον, θεώρησαν το φερρορευστό τους ως Νευτώνιο υγρό. Χρησιμοποιήθηκε μίγμα δύο φάσεων για τη μοντελοποίηση της ροής που περιέχει νανοσωματίδια. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι τα αρνητικά και τα θετικά μαγνητικά πεδία με κλίση κάνουν το σωλήνα να είναι ευρύτερος και στενότερος, αντίστοιχα. Σε κάποια περίπτωση αρνητικής κλίσης, το πάνω μέρος της μεμβράνης διογκώνεται προς τα έξω. Αν το μέγεθος της κλίσης αυξηθεί περισσότερο, τα αποτελέσματα του μαγνητικού πεδίου στο σχήμα του τοίχου θα αυξηθεί. Το μαγνητικό πεδίο ενός καλωδίου με ηλεκτρικό ρεύμα τοποθετημένο κατακόρυφα στο επίπεδο του καναλιού, μπορεί να ανοίξει το κανάλι λόγω της αύξησης της πίεσης που παράγεται.



Οι Abdallah D. Abi. et al. (2009) στη μελέτη τους εξέτασαν τα σταθερά μαγνητοϋδροδυναμικά διαλύματα σε ένα άκαμπτο δοχείο. Ανέλυσαν μια ακριβή λύση για την οποία παρουσίασαν νέες εικονογραφήσεις, ερμηνείες και στη συνέχεια ανέπτυξαν περαιτέρω τα αποτελέσματά τους για να μπορέσουν να δείξουν το διαχωρισμό των φορτίων στα τοιχώματα των αγγείων. Στη συνέχεια, εξέτασαν την κατά προσέγγιση λύση του Vardanyan μέσω επαγωγικών υπολογισμών. Στη συνέχεια ολοκλήρωσαν μια σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά των Kiyouchi et al προκειμένου να δείξουν την επιρροή της απλοποίησης των υποθέσεων σχετικά με τους υπολογισμούς. Κατέληξαν ότι η εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου Β0 στη ροή του αίματος παράγει ηλεκτρομαγνητικές επαγωγές στο υγρό το οποίο μειώνει το ρυθμό ροής. Αυτά τα αποτελέσματα αυξάνουν όταν το Β0 αυξάνεται. τα επαγόμενα μαγνητικά πεδία παραμένουν πάντως πολύ αδύναμα. Κατά προσέγγιση των αποτελεσμάτων, παρέμειναν στην παραδοχή της συμμετρίας του προφίλ της ταχύτητας, υπερεκτιμώντας τις μειώσεις της ροής. Ακόμα κι αν τα προκαλούμενα μαγνητικά πεδία είναι ασήμαντα, επιλύοντας το πρόβλημα η παραμέλησή τους είναι ανακριβής. Παρά την ανακρίβεια της προσέγγισης του Vardanyan, για χαμηλά μαγνητικά πεδία όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μαγνητική τομογραφία, παρέχεται μια καλή προσέγγιση για τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας σχετικά απλούς υπολογισμούς. Από την άλλη πλευρά, κάνοντας την παραδοχή των μη-αγώγιμων τοιχωμάτων, παράγεται μια τρέχουσα ανακυκλοφορία εντός του δοχείου, η οποία παρουσιάζει αντίστροφη επίδραση στη μείωση της ροής. Ο ρυθμός που υπολογίζεται είναι μεγαλύτερος από αυτών που λαμβάνεται από τους Kiyouchi et al. χρησιμοποιώντας αγώγιμα τοιχώματα. Συνοπτικά, αυτή η μελέτη έδειξε ότι, για μικρούς Hartmann αριθμούς, το αποτέλεσμα της αγωγιμότητας δεν είναι σημαντική και ότι η παραμέληση των επαγόμενων πεδίων δημιουργεί μια πολύ στενή προσέγγιση της ακριβούς λύσης. Ως εκ τούτου, συμπέραναν ότι σε περιπτώσεις όπως η έκθεση σε μαγνητική τομογραφία, παραμένουν οι παραπάνω απλουστευτικές υποθέσεις αρκετά λογικές.

3.2 Κυκλοφορικό σύστημα.

Το κυκλοφορικό σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο συνδεδεμένων κοιλοτήτων και αγωγών μέσω των οποίων διακινείται κυρίως το αίμα και η λέμφος. Έτσι το κυκλοφορικό σύστημα διακρίνεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι το καρδιαγγειακό σύστημα και δεύτερο το λεμφικό σύστημα. Το καρδιαγγειακό σύστημα αποτελείται από την καρδιά, η οποία είναι η κινητήρια αντλία, και από ένα κλειστό σύστημα αγωγών, των λεγόμενων αγγείων μέσω των οποίων το αίμα κυκλοφορεί κυκλικά, δηλαδή επανέρχεται περιοδικά στο αρχικό του σημείο από όπου ξεκίνησε.

Το καρδιαγγειακό σύστημα διακρίνεται σε δυο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η πνευμονική ή κεντρική κυκλοφορία, κατά την οποία το αίμα μεταφέρεται από την δεξιά κοιλία της καρδιάς μέσω της πνευμονικής αρτηρίας στους πνεύμονες, όπου εκεί τελείται η διαδικασία ανταλλαγής αερίων του αναπνευστικού συστήματος και στη συνέχεια επιστρέφει με τις πνευμονικές φλέβες στον αριστερό κόλπο της καρδιάς. Το δεύτερο μέρος είναι η συστηματική ή περιφερική κυκλοφορία, κατά την οποία το αίμα παρέχεται σε όλους τους ιστούς του σώματος μέσω της αορτής και των κλάδων της. Τέλος το αίμα επιστρέφει στην καρδιά με την άνω και κάτω κοίλη φλέβα, όπως επίσης και με τις



καρδιακές φλέβες.

Τα δυο αυτά μέρη του καρδιαγγειακού συστήματος αποτελούνται από το αρτηριακό σύστημα, από τα τριχοειδή αγγεία και από το φλεβικό σύστημα. Οι αρτηρίες και τα αρτηρίδια λειτουργούν ως ένα σύστημα διανομής αίματος στους ιστούς, τα τριχοειδή αγγεία εξυπηρετούν στην ανταλλαγή ουσιών και οι φλέβες και τα φλεβίδια λειτουργούν ως ένα σύστημα συλλογής και αποθήκευσης το οποίο επιστρέφει το αίμα στην καρδιά.

3.3 Λειτουργία καρδιάς και καρδιακός κύκλος.

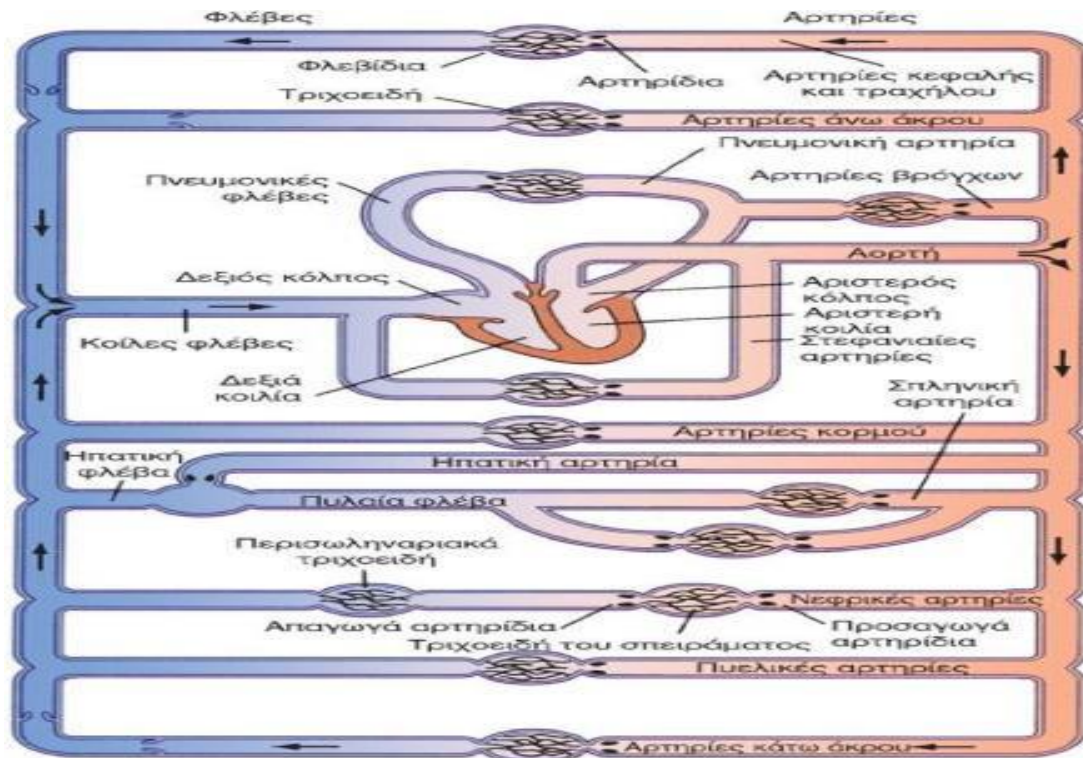
Η καρδιά, είναι το κεντρικό όργανο της κυκλοφορίας. Είναι ένα κοίλο μυώδες όργανο, που λειτουργεί σαν μια φυσική αντλία η οποία δέχεται το αίμα που προέρχεται από τις φλέβες στις οποίες βρίσκεται σε χαμηλή πίεση και το ωθεί προς τις αρτηρίες με υψηλή πίεση.

Η καρδιά βρίσκεται μέσα στη θωρακική κοιλότητα ανάμεσα στους δύο πνεύμονες. Το σχήμα της καρδιάς παρομοιάζεται με το σχήμα κώνου. Η καρδιά περιβάλλεται από ένα υμένα από δύο φύλλα, το περικάρδιο, ενώ οι εσωτερικές της κοιλότητες καλύπτονται από μια λεπτή μεμβράνη, το ενδοκάρδιο. Ανάμεσα στο περικάρδιο και ενδοκάρδιο βρίσκεται το παχύτερο τοίχωμα της καρδιάς που ονομάζεται μυοκάρδιο και αποτελείται από δυνατές μυϊκές ίνες.

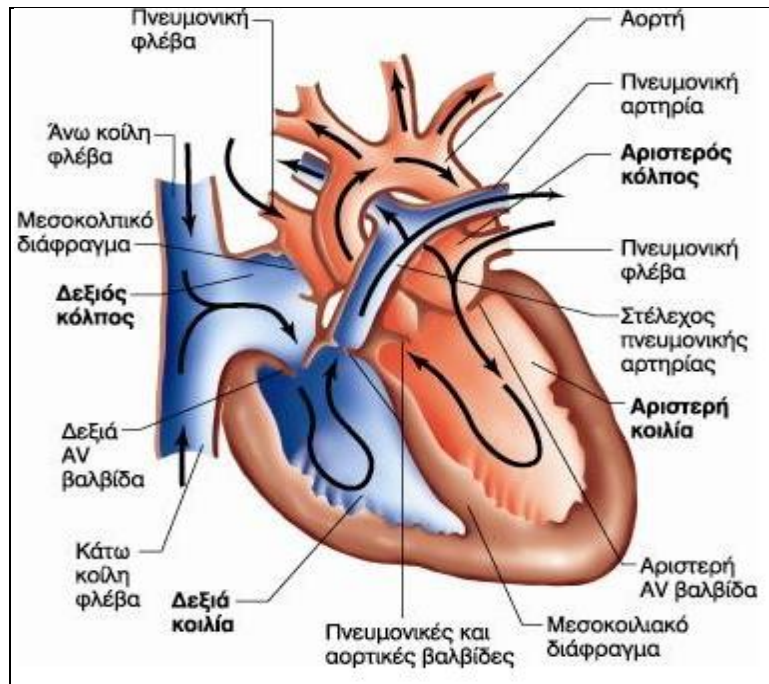
Η καρδιά αποτελείται από τέσσερις μυώδεις κοιλότητες, δύο πάνω με λεπτά τοιχώματα τα οποία ονομάζονται κόλποι και δύο κάτω με παχύτερα τοιχώματα που ονομάζονται κοιλίες. Ο δεξιός κόλπος της καρδιάς δέχεται το αίμα από όλα τα μέρη του σώματος μέσω των μεγάλων φλεβών, το προωθεί στη δεξιά κοιλία και από εκεί στην πνευμονική κυκλοφορία με στόχο την οξυγόνωσή του. Στη συνέχεια, το πλούσιο σε οξυγόνο αίμα προωθείται από τους πνεύμονες στον αριστερό κόλπο και από εκεί στην αριστερή κοιλία. Η τελευταία αποτελεί το πιο «δυνατό» και σημαντικό τμήμα του μυοκαρδίου γιατί με τη συστολή της προωθεί το οξυγονωμένο πλέον αίμα σε όλο το σώμα, μέσω της αορτής και των μεγάλων αρτηριών.

Η καρδιά διαθέτει τέσσερις βαλβίδες που χρησιμεύουν στο να επιτρέπουν την δίοδο του αίματος προς μία μόνο κατεύθυνση και να εμποδίζουν την παλινδρόμησή του κατά τη διάρκεια της καρδιακής συστολής. Αυτές οι βαλβίδες είναι:

- Η τριγλώχινα μεταξύ δεξιού κόλπου και δεξιάς κοιλίας
- Η πνευμονική μεταξύ δεξιάς κοιλίας και πνευμονικής αρτηρίας
- Η μιτροειδής ή διγλώχινα μεταξύ αριστερού κόλπου και αριστερής κοιλίας
- Η αορτική μεταξύ αριστερής κοιλίας και αορτής.



Εικόνα 8: Καρδιαγγειακό σύστημα (EB-15)



Εικόνα 9: Λειτουργικά τμήματα της καρδιάς. (EB-15)

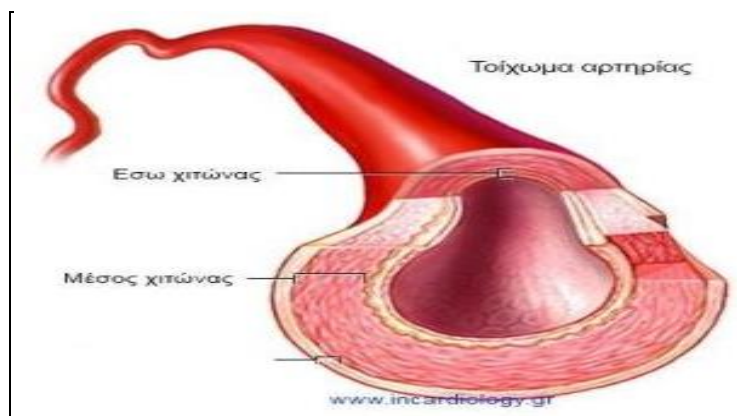


3.4 Αιμοφόρα αγγεία.

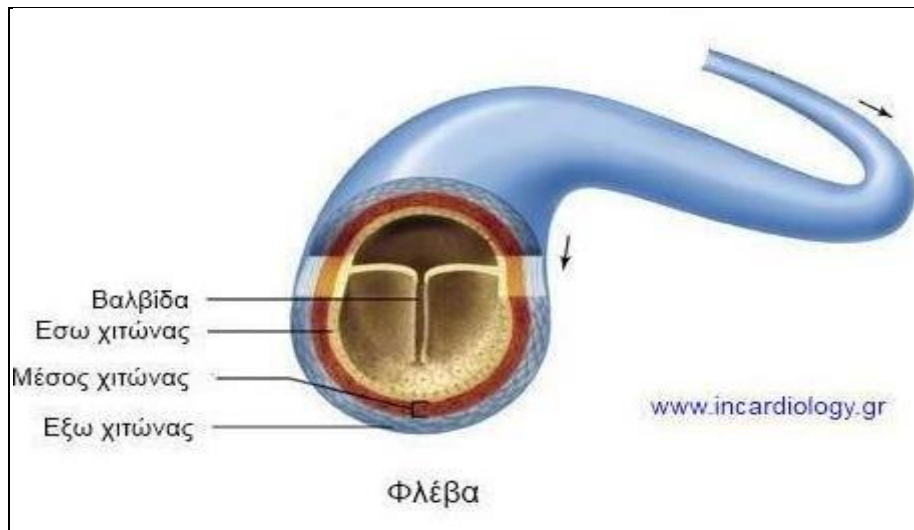
Το αίμα για να φθάσει σε κάθε τμήμα του οργανισμού μας, ρέει μέσα σε ειδικούς σωλήνες που ονομάζονται αγγεία. Τα αγγεία τα οποία ξεκινούν από την καρδιά και κατευθύνονται στην περιφέρεια ονομάζονται αρτηρίες. Εκείνα τα οποία ακολουθούν αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή από την περιφέρεια προς την καρδιά, ονομάζονται φλέβες. Όπως προαναφέραμε στο κυκλοφορικό σύστημα περιλαμβάνονται τρία είδη αγγείων. Οι αρτηρίες (και τα αρτηρίδια), που μεταφέρουν το αίμα από την καρδιά προς την περιφέρεια, τα τριχοειδή αγγεία, που επιτρέπουν την ανταλλαγή ουσιών με τους ιστούς, και οι φλέβες (και τα φλεβίδια), που επαναφέρουν το αίμα στην καρδιά. Τα τριχοειδή αγγεία παρεμβάλλονται μεταξύ αρτηριών και φλεβών.

Οι αρτηρίες έχουν παχύτερα τοιχώματα και μικρότερη εσωτερική διάμετρο από τις φλέβες και περισσότερο μυϊκό ιστό. Το αίμα διοχετεύεται στις αρτηρίες με κάθε συστολή των κοιλιών της καρδιάς. Κάθε φορά που διοχετεύεται μία ποσότητα αίματος στις αρτηρίες, τα τοιχώματά τους διευρύνονται με την πίεση του εισερχόμενου αίματος και η διεύρυνση αυτή ονομάζεται σφυγμός. Κάθε παλμός της καρδιάς προκαλεί ένα σφυγμό στις αρτηρίες, με αποτέλεσμα να έχουν τον ίδιο ρυθμό οι σφυγμοί των αρτηριών και οι παλμοί της καρδιάς. Ο σφυγμός αυτός ανιχνεύεται στον καρπό του χεριού, καθώς και σε άλλα σημεία του σώματος.

Οι φλέβες είναι περισσότερες των αρτηριών και δεν εμφανίζουν σφυγμό. Στο εσωτερικό τους έχουν βαλβίδες, που επιτρέπουν μονόδρομη πορεία στο αίμα, ώστε να οδεύει αναγκαστικά προς την καρδιά. Τα φλεβίδια είναι μικρές φλέβες, οι οποίες συνενωμένες σε μεγαλύτερα στελέχη, τις φλέβες, επαναφέρουν το αίμα στην καρδιά. Ανά πάσα στιγμή, περισσότερο από τα 2/3 της συνολικής ποσότητας αίματος βρίσκεται στις φλέβες και στα φλεβίδια. Με τον τρόπο αυτό οι φλέβες λειτουργούν σαν δεξαμενές αίματος. Στις φλέβες επικρατεί πολύ χαμηλότερη πίεση απ' ό τι στις αρτηρίες. Για τον λόγο αυτό τα τοιχώματα των φλεβών είναι λεπτότερα. Μια ιδιαιτερότητα όμως έχουν, κυρίως οι φλέβες του τοιχώματος του κορμού και των κάτω άκρων, καθώς διαθέτουν μηννοειδείς βαλβίδες. Στο ενδοθήλιο - το εσωτερικό στρώμα των αγγείων - βρίσκονται σε δύο αντίθετες πλευρές σχηματισμοί που μοιάζουν σαν εκκολπώματα. Τα εκκολπώματα αυτά λειτουργούν σαν βαλβίδες. Όταν ρέει το αίμα προς την καρδιά, εφάπτονται στο τοίχωμα του αγγείου και αφήνουν το αίμα να περνά ελεύθερο. Όταν όμως το αίμα ρέει αντίστροφα (ανάποδα), τα εκκολπώματα ανοίγουν και φράζουν το δρόμο.

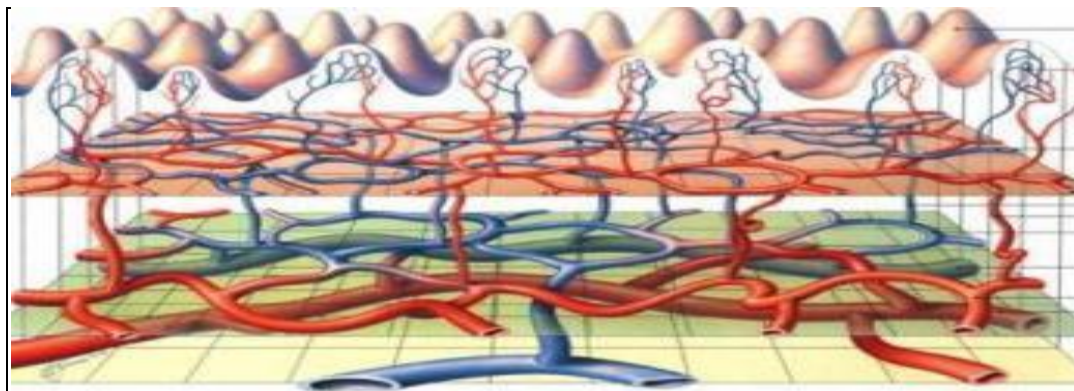


Εικόνα 10: Μορφολογικά χαρακτηριστικά αρτηρίας (I-1).



Εικόνα 11: Μορφολογικά χαρακτηριστικά φλέβας (1-2).

Οι αρτηρίες, όταν φθάνουν στην περιφέρεια του ανθρώπινου σώματος, δηλαδή στους μύες, το δέρμα και σε όλα τα όργανα, διακλαδίζονται σε ολοένα μικρότερες αρτηρίες, ωστόσο η διάμετρός τους γίνεται μικροσκοπική. Σε αυτό το σημείο ακριβώς συντελείται η ανταλλαγή μεταξύ του αίματος και των κυττάρων. Τα μικροσκοπικά αυτά αγγεία ονομάζονται τριχοειδή και σχηματίζουν μέσα στα διάφορα όργανα και ιστούς ένα εκτεταμένο δίκτυο. Τα τριχοειδή αγγεία συμβάλλουν σε μικρές φλέβες οι οποίες λίγο-λίγο ενώνονται ή μία με την άλλη σε όλο μεγαλύτερες φλέβες και επαναφέρουν το αίμα στην καρδιά. Είναι τα πολυπληθέστερα και λεπτότερα αιμοφόρα αγγεία με εσωτερική διάμετρο όση περίπου κι ένα ερυθρό αιμοσφαίριο (7 μm), που σημαίνει ότι μόνο ένα ερυθρό αιμοσφαίριο χωράει να περάσει μέσα απ' αυτά. Τα τριχοειδή παρεμβάλλονται μεταξύ αρτηριών και φλεβών, έχουν δε έναν πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του κυκλοφορικού συστήματος και του οργανισμού γενικότερα. Μέσω των τοιχωμάτων τους, τα οποία συνίστανται από ένα μονόστιβο στρώμα επιθηλιακών κυττάρων, το ενδοθήλιο, γίνεται η ανταλλαγή των ουσιών ανάμεσα στο αίμα και στους ιστούς, καθώς και η ανταλλαγή, με παθητική διάχυση, του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 12: Τριχοειδή αγγεία [1-2].



3.5 Χαρακτηριστικά αορτής.

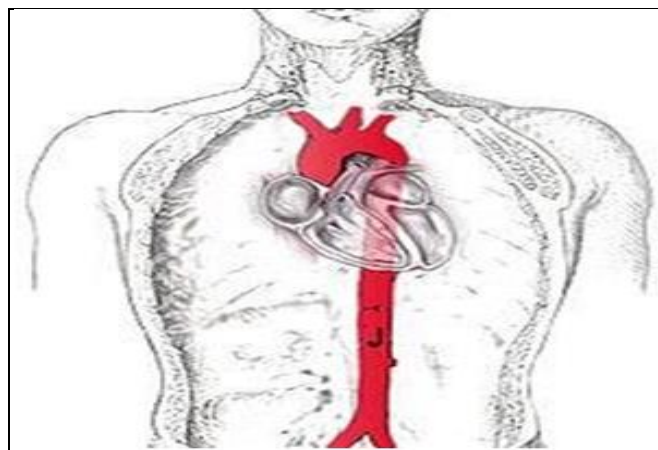
Η αορτή είναι η κυριότερη και μεγαλύτερη αρτηρία του σώματος. Αρχίζει από την αριστερή κοιλιά της καρδιάς και είναι η πρώτη αρτηρία που συναντά το αίμα καθώς εξέρχεται από την καρδιά. Μέσω της αορτής και των διάφορων κλάδων της το αίμα διοχετεύεται σε όλο τον οργανισμό καθώς ακολουθεί την πορεία του σύμφωνα με την συστηματική ή περιφερική κυκλοφορία που προαναφέρθηκε.

Η αορτή είναι ένας μεγάλος ελαστικός αγωγός με διάμετρο περίπου 25 mm και μήκος 6 cm μέσω της οποίας διοχετεύεται στον οργανισμό όλος ο όγκος του αίματος και μάλιστα με μεγάλη αρχική πίεση ώστε να μπορέσει να φθάσει σε κάθε σημείο του καρδιαγγειακού συστήματος. Από την έκφυσή της η αορτή δημιουργεί τόξο περίπου 180° και κατευθύνεται στο κάτω μέρος του σώματος, με μέση αρχική πίεση περίπου 100 mmHg και με μεγαλύτερη παροχή όγκου στην εξόδο από την αριστερή κοιλία περίπου 5 lt/min.

Η αορτή χωρίζεται στα έξι τμήματα:

- Την ανιούσα αορτή
- Το αορτικό τόξο
- Την κατιούσα θωρακική αορτή
- Την κοιλιακή αορτή

Μετά την έκφυσή της, η αορτή στρέφεται προς τα άνω. Το τμήμα αυτό λέγεται ανιούσα αορτή. Όταν φτάσει πίσω από το δεύτερο δεξιό πλευρικό χόνδρο, τότε κάμπτεται σε σχήμα τόξου. Το τμήμα αυτό λέγεται αορτικό τόξο. Μετά η αορτή κατέρχεται και σχηματίζει την κατιούσα αορτή. Κατευθύνεται προς τη μπροστινή επιφάνεια των σπονδύλων, οπότε το τμήμα αυτό λέγεται θωρακική αορτή. Τέλος, φτάνει στην κοιλία (κοιλιακή αορτή).



Εικόνα 13:Θέση κοιλιακής αορτής [1-3]

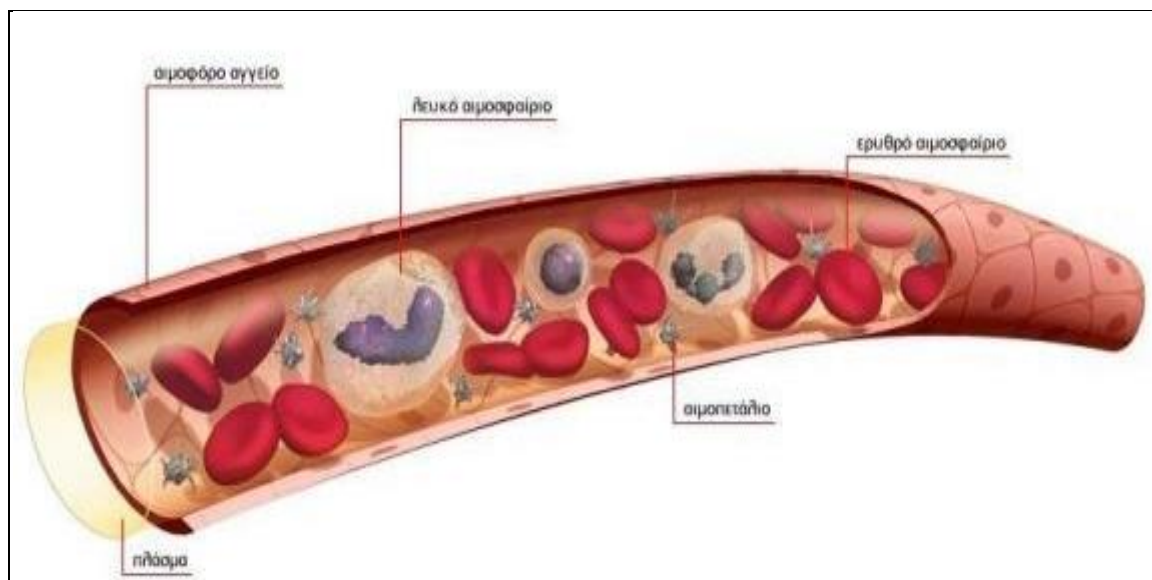


3.6 Συνεισφορά του αίματος στο καρδιαγγειακό σύστημα.

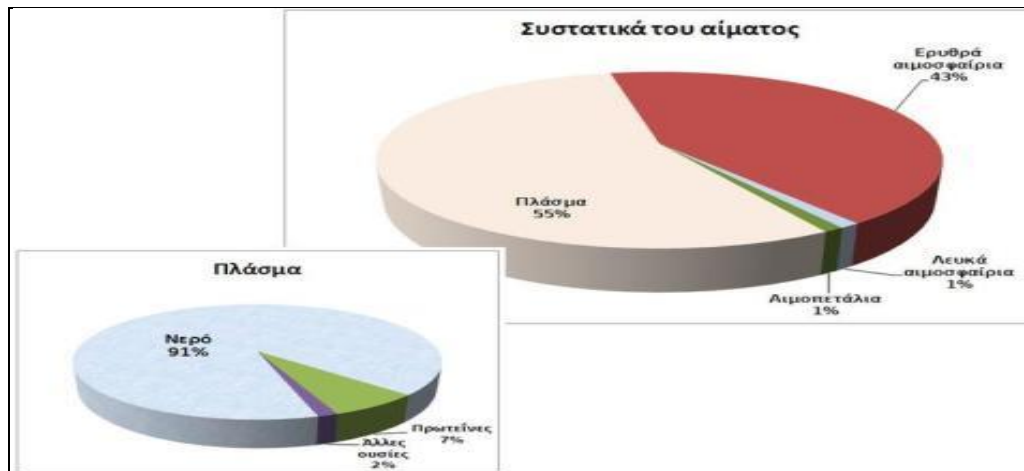
Το αίμα είναι το υγρό που κυκλοφορεί στο αγγειακό σύστημα του ανθρώπου. Όπως αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα το αίμα με την βοήθεια της καρδιάς κυκλοφορεί σε όλο τον οργανισμό μέσω των αρτηριών, των φλεβών και των τριχοειδών αγγείων. Κατά την διάρκεια της κυκλοφορίας του επιτελεί διάφορες λειτουργίες όπως η μεταφορά θρεπτικών ουσιών, ορμονών, βιταμινών, οξυγόνου και θερμότητας στους ιστούς. Επίσης απομακρύνει τις άχρηστες ουσίες που παράγονται κατά τον μεταβολισμό, όπως επίσης και το διοξείδιο του άνθρακα. Το αίμα διασχίζει το ανθρώπινο σώμα με μέση ταχύτητα 2 km/h, καλύπτοντας όλο το δίκτυο των αιμοφόρων αγγείων, των οποίων η επιφάνεια υπολογίζεται σε 8000 m². Με κάθε παλμό της η καρδιά διοχετεύει περίπου 70 ml αίματος στις αρτηρίες, που ισοδυναμούν με περίπου 7000 lt ημερησίως ή περίπου 2,5 10⁶ lt το χρόνο.

Το αίμα αποτελεί το 7% του βάρους του ανθρώπινου σώματος. Έτσι ένας μέσος ενήλικος άνθρωπος έχει συνολικό όγκο αίματος περίπου 5 lt. Το αίμα αποτελείται κυρίως από το πλάσμα μέσα στο οποίο αιωρούνται τα ερυθρά αιμοσφαίρια, τα λευκά αιμοσφαίρια και τα αιμοπετάλια. Επίσης μέσα στο αίμα εμπεριέχονται αέρια όπως οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο και μικρές ποσότητες μια μεγάλη ποικιλία διαλυμένων χημικών ουσιών, στις οποίες περιλαμβάνονται υδατάνθρακες (γλυκόζη), πρωτεΐνες (λευκώματα), ορμόνες, λίπη και αζωτούχες ενώσεις. Το πλάσμα είναι το μεγαλύτερο συστατικό του αίματος (άμορφο συστατικό), αφού αποτελεί το 55% του όγκου του, ενώ τα πραγματικά κύτταρα και τα διάφορα τμήματά τους (έμμορφο συστατικό) αποτελούν το 45%.

Το πλάσμα είναι ένα υποκίτρινο υγρό το οποίο αποτελείται κατά 91,5% από νερό, κατά 7% από πρωτεΐνες, όπως η λευκωματίνη (αλβουμίνη), οι σφαιρίνες και το ινωδογόνο, και κατά 1,5% από άλλες ουσίες, όπως θρεπτικά συστατικά, ορμόνες, αναπνευστικά αέρια, ηλεκτρολύτες, βιταμίνες και άχρηστες αζωτούχες ουσίες.



Εικόνα 14:Συστατικά στοιχεία σύνθεσης του αίματος [1-4]



Εικόνα 15: Αναλυτική ποσοστιαία σύσταση αίματος [1-6].

3.7 Καρδιαγγειακή νόσος.

Γενικά τα καρδιαγγειακά νοσήματα απευθύνονται σε διαταραχές, οι οποίες προσβάλλουν την καρδιά και τα αιμοφόρα αγγεία. Μερικά από αυτά είναι:

- Η στεφανιαία νόσος: Προκαλείται από στένωση των αιμοφόρων αγγείων (στεφανιαίων) που αιματώνουν τον καρδιακό μυ, κυρίως εξαιτίας εναπόθεσης λίπους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αθηρωματικών πλακών.
- Το αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο: Πρόκειται για τη διαταραχή της εγκεφαλικής αιματικής κυκλοφορίας. Μπορεί να προκληθεί είτε από διακοπή της αιματικής ροής του εγκεφάλου (ισχαιμικό επεισόδιο), είτε από ρήξη των εγκεφαλικών αγγείων (αιμορραγικό επεισόδιο). Παράγοντες κινδύνου είναι η υψηλή αρτηριακή πίεση, κολπική μαρμαρυγή, υπερλιπιδαιμία, κάπνισμα, διαβήτης, διατροφή, φυσική δραστηριότητα, προχωρημένη ηλικία (National Diabetes Information Clearinghouse, 2005).
- Η ρευματική καρδιοπάθεια: Πρόκειται για την καταστροφή του καρδιακού μυ και των βαλβίδων της καρδιάς, η οποία προκαλείται από άνοση αντίδραση προς τη λοίμωξη από β-αιμολυτικό στρεπτόκοκκο της ομάδας A, η οποία δεν αντιμετωπίστηκε θεραπευτικά (Atlas of Heart Disease and Stroke 2004).
- Η συγγενής καρδιοπάθεια: Πρόκειται για ανωμαλίες των καρδιαγγειακών δομών π.χ. μεσοκοιλιακά ή μεσοκολπικά ελλείμματα, ανωμαλίες των βαλβίδων, ανωμαλίες των καρδιακών κοιλοτήτων, οι οποίες υπάρχουν από τη γέννηση. Οφείλονται είτε σε γενετικούς παράγοντες για παράδειγμα, σύνδρομο Down, είτε σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα χρήση αλκοόλ, φαρμάκων (θαλιδομίδη, βαρφαρίνη) από τη μητέρα κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης, ενδομήτριες λοιμώξεις (ερυθρά), κακή θρέψη της εγκύου (χαμηλή πρόσληψη φολικού οξέως), συγγενική σχέση εξ' αίματος μεταξύ των γονέων (Chun 2006).

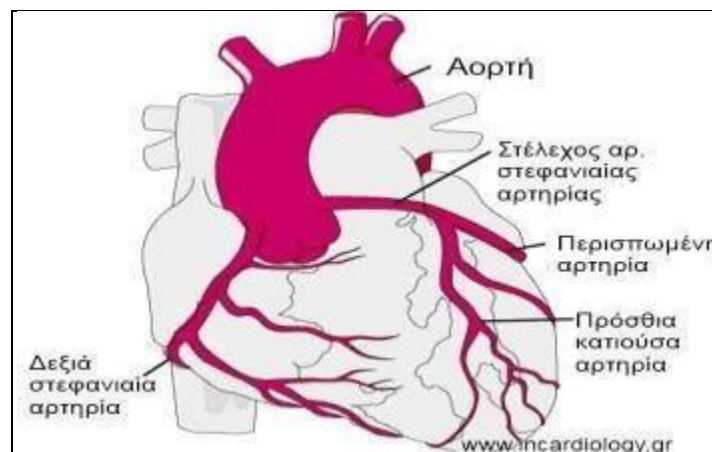


- Το ανευρύσματα και ο διαχωρισμός αορτής: Πρόκειται για διάταση και ρήξη της αορτής. Παράγοντες κινδύνου είναι: η προχωρημένη ηλικία, μακροχρόνια υψηλή αρτηριακή πίεση, σύνδρομο Marfan, συγγενείς ανωμαλίες της καρδιάς, σύφιλη και άλλοι λοιμώδεις και φλεγμονώδεις παράγοντες (Atlas of Heart Disease and Stroke 2004).
- Η εν τω βάθει φλεβοθρόμβωση και η πνευμονική εμβολή: Πρόκειται για απόφραξη του φλεβικού δικτύου των κάτω άκρων με θρόμβους, οι οποίοι μπορεί να αποσπαστούν και μέσω της κυκλοφορίας να καταλήξουν στον πνεύμονα. Παράγοντες κινδύνου είναι οι χειρουργικές επεμβάσεις, παχυσαρκία, κακοήθειες, κύηση, λήψη αντισυλληπτικών και θεραπεία ορμονικής αποκατάστασης, μακροχρόνια περίοδος ακινησίας π.χ. ταξίδια, ομοκυστειναιμία (Atlas of Heart Disease and Stroke 2004).
- Η περιφερική αρτηριοπάθεια: Πρόκειται για νόσο των περιφερικών αγγείων που αρδεύουν τα άνω και κάτω άκρα.
- Άλλα καρδιαγγειακά νοσήματα: Αρτηριακή υπέρταση, όγκοι καρδιάς, εγκεφαλικά ανευρύσματα, δυσλειτουργία του καρδιακού μυ όπως για παράδειγμα η καρδιομυοπάθεια και οι βαλβιδοπάθειες.

Από τα παραπάνω οι συχνότερες μορφές καρδιαγγειακής νόσου είναι η στεφανιαία νόσος και το αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο.

3.8 Στεφανιαία νόσος – Αθηροσκλήρυνση.

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα η συχνότερη καρδιαγγειακή νόσος και ίσως η σπουδαιότερη είναι η στεφανιαία νόσος. Η ανατομία των στεφανιαίων αρτηριών απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 1.9). Όπως μπορούμε να δούμε οι στεφανιαίες αρτηρίες εκφύονται από την αορτή και διακλαδίζονται στην δεξιά και αριστερή στεφανιαία, στη συνέχεια διακλαδίζονται ακόμη περισσότερο και καταλήγουν σεένα πυκνό δίκτυο τριχοειδών αγγείων.



Εικόνα 16: Μορφολογία στεφανιαίων αρτηριών [1-10].

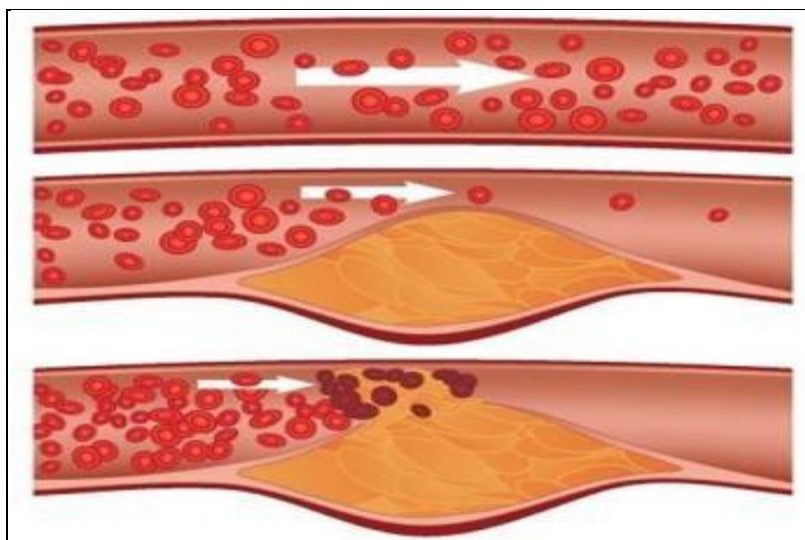


Η παροχή αίματος του καρδιακού μυ από τις στεφανιαίες αρτηρίες υπολογίζεται στα $250 \text{ cm}^3/\text{min}$ σε κατάσταση ηρεμίας. Οι στεφανιαίες αρτηρίες τροφοδοτούν με αίμα και θρεπτικά συστατικά τον καρδιακό μυ δίνοντας του την απαραίτητη ενέργεια για την σύσπασή του. Σε περίπτωση ανάπτυξης αθηρωματικής πλάκας μειώνεται η παροχή αίματος στον καρδιακό μυ προκαλώντας στηθάγχη και σε περίπτωση πλήρους απόφραξης από κάποιον θρόμβο, ανάλογα με την σπουδαιότητα του αποφρασθέντος κλάδου στην αιμάτωση του καρδιακού μυ υπάρχουν ποικίλες συνέπειες. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες αιτιολογίες της στεφανιαίας νόσου εκτός της ανάπτυξης αθηρωματικών πλακών αλλά δεν θα της αναπτύξουμε στην παρούσα εργασία.

Όταν αναπτύσσεται αθηρωματική πλάκα, σαν αποτέλεσμα έχουμε την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγγείου, το οποίο είναι προϊόν της αθηροσκλήρυνσης που συμβαίνει κατά την φυσιολογική γήρανση του οργανισμού.

Με τον όρο αθηροσκλήρυνση εννοούμε την ανάπτυξη βλαβών στο τοίχωμα των αρτηριών που ονομάζονται αθηρώματα ή αθηρωματικές πλάκες. Για να καταλάβουμε καλύτερα τι εννοούμε με τον όρο αθηροσκλήρυνση, αρκεί να σκεφτούμε τι συμβαίνει στο εσωτερικό ενός παλαιού αγωγού με την πάροδο των ετών. Καθώς τα χρόνια περνάνε το εσωτερικό του αγωγού γεμίζει με άλατα από το νερό που ρέει μέσα του. Έτσι κάποια στιγμή τα άλατα μπορεί να φράξουν πλήρως σε ένα σημείο τον αγωγό, με αποτέλεσμα να διακοπεί η παροχή του νερού. Το παράδειγμα αυτό ταιριάζει απόλυτα στην περίπτωση της αθηροσκλήρυνσης.

Οι αθηρωματικές πλάκες είναι ένα υλικό από λιπαρές ουσίες, χοληστερίνη και άλλα προϊόντα του μεταβολισμού και των κυττάρων που κυκλοφορούν στις αρτηρίες, κολλάνε στα τοιχώματα και με την πάροδο του χρόνου προκαλούν στένωση του αυλού των αγγείων. Έτσι σαν αποτέλεσμα έχουμε την μείωση της παροχής αίματος στο όργανο που τροφοδοτείται από την αρτηρία.



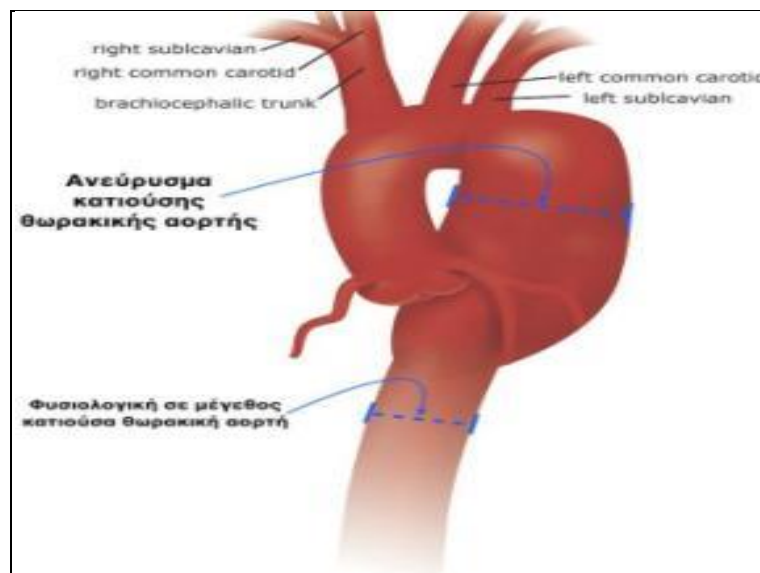
Εικόνα 17: Σχηματισμός αθηρωματικής πλάκας [1-17]

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί η διαφορά μεταξύ της αρτηριοσκλήρυνσης και της αθηροσκλήρυνσης, διότι πολλοί συγχέουν αυτούς τους δυο όρους. Με τον όρος αρτηριοσκλήρυνση εννοείται η απώλεια της ελαστικότητας των αρτηριών, με αποτέλεσμα την αύξηση της αρτηριακής πίεσης. Ως συνέπεια της



αθηροσκλήρυνσης και κατ' επέκταση των αθηρωματικών πλακών είναι η εξασθένηση του τοιχώματος της αρτηρίας και η πιθανή δημιουργία ανευρύσματος.

Με τον όρο ανεύρυσμα εννοούμε την σακοειδή διεύρυνση, διόγκωση ή διάταση τμήματος του αυλού ενός αιμοφόρου αγγείου (συνήθως αρτηρίας) ενός αγγείου. Πιο συγκεκριμένα, η εστιακή διεύρυνση της διαμέτρου ενός αγγείου πάνω από το 50% της φυσιολογικής. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του ανευρύσματος τόσο αυξάνεται και ο κίνδυνος ρήξης αυτού. Η ρήξη ενός ανευρύσματος μπορεί να οδηγήσει σε αιμορραγία και κατ' επέκταση στο θάνατο. Τα ανευρύσματα συνήθως σχηματίζονται λόγω εξασθένησης των τοιχωμάτων των αιμοφόρων αγγείων (αθηροσκλήρυνση), και μπορεί να είναι αποτέλεσμα μιας κληρονομικής πάθησης ή επίκτητης ασθένειας. Τα ανευρύσματα μπορεί επίσης να αποτελέσουν σημείο σχηματισμού θρόμβων ή και εμβολής. Τα ανευρύσματα συνήθως συμβαίνουν στα μεγάλα αγγεία όπως η αορτή και οι κλάδοι της.



Εικόνα 18: Ανεύρισμα θωρακικής αορτής [1-18].

Συνήθως η αθηροσκλήρυνση εντοπίζεται στις στεφανιαίες αρτηρίες, με αποτέλεσμα ένα καρδιακό επεισόδιο. Σε περίπτωση που η αθηρωματική πλάκα αναπτυχθεί στις καρωτίδες, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι ένα εγκεφαλικό επεισόδιο ή αν προσβληθούν οι αρτηρίες που μεταφέρουν αίμα στα κάτω άκρα, έχουμε την εμφάνιση «διαλείπουσας χωλότητας», δηλαδή μια κράμπα στις γάμπες που έρχεται με το βάδισμα και παύει με τη διακοπή του βαδίσματος.

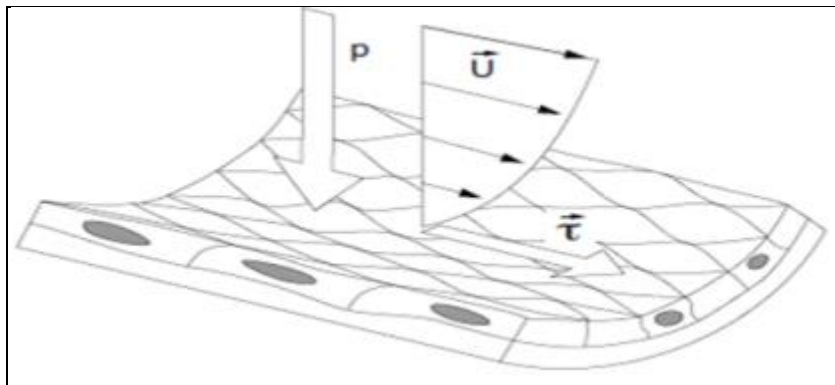
Μέχρι σήμερα δεν γνωρίζουμε με βεβαιότητα τα πραγματικά αίτια της δημιουργίας αθηρωματικών πλακών, ξέρουμε όμως ότι υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που προδιαθέτουν στην εμφάνισή τους. Κύριο ρόλο παίζουν τα επίπεδα των λιπιδίων στο αίμα, δηλαδή η χοληστερόλη και τα τριγλυκερίδια, η αρτηριακή υπέρταση, ο σακχαρώδης διαβήτης, το κάπνισμα, το βεβαρημένο οικογενειακό ιστορικό όπως π.χ. γονείς με στεφανιαία νόσο σε ηλικία μικρότερη των 60 ετών. Τα πρώτα στίγματα της αθηροσκλήρυνσης, δηλαδή η δημιουργία της αθηρωματικής πλάκας, προκαλούνται από τη συσσώρευση λιπιδίων κάτω από το ενδοθήλιο και μοιάζουν με κίτρινες γραμμώσεις. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω δεν γνωρίζουμε τον



ακριβή μηχανισμό με τον οποίο τα λίπη, δηλαδή η χοληστερόλη εισέρχονται κάτω από το ενδοθήλιο και συσσωρεύονται. Κατά πάσα πιθανότητα εδώ παίζουν ρόλο οι παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι προκαλείται κάποιος τραυματισμός στο ενδοθήλιο και δίνεται η ευχέρεια στη χοληστερόλη να μπει κάτω από το ενδοθήλιο. Έπειτα κατά την πάροδο των ετών αυξάνεται η συγκέντρωση των λιποειδών στα σημεία αυτά, μαζεύονται και άλλα κύτταρα σε συνδυασμό με την εναπόθεση ασβεστίου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της αθηρωματικής πλάκας.

3.9 Διατμητική τάση τοιχώματος WSS (Wall Shear Stress).

Η διατμητική τάση τοιχώματος (WSS), όπως είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα είναι το αποτέλεσμα της δύναμης που ασκείται στο ενδοθήλιο λόγω της ροής του αίματος και η σχέση του με την αθηρογένεση έχει ερευνηθεί εντατικά τα τελευταία 30 χρόνια (Asakura και Karino et al. 1990, Friedman et al. 1981, Zarins et al. 1983, Ku et al. 1985). Οι παραπάνω μελέτες έχουν δημιουργήσει μια σταθερή σχέση μεταξύ των περιφερειών της διαταραγμένης ροής και τις θέσεις πύκνωσης του έσω χιτώνα, η οποία συσχετίζεται ιδιαίτερα με περιοχές με χαμηλές και ταλαντωτικές διατμητικές τάσεις. Επιπλέον είναι καλά τεκμηριωμένο ότι η αθηροσκλήρωση είναι μια ασθένεια σε συγκεκριμένη περιοχή, που δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε όλο το ανθρώπινο αγγειακό σύστημα (DeBakey et al. 1985) και κατά προτίμηση συμβαίνει επί των πλευρικών τοιχωμάτων στις διακλαδώσεις των αγγείων και στα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα των αρτηριακών καμπών (Asakura και Karino et al. 1990, Zarins et al. 1983, Gimbrone et al. 2000).



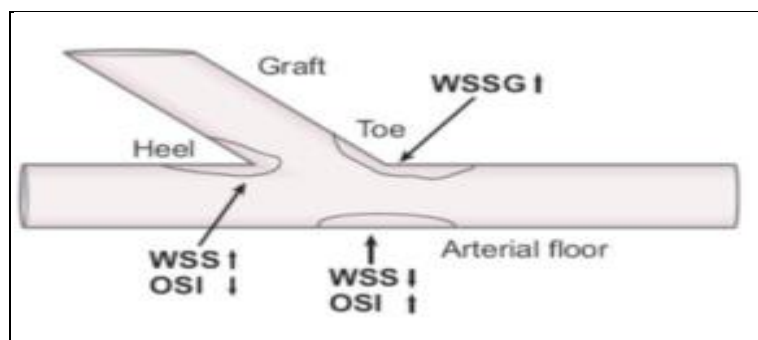
Εικόνα 19: Ενδοθηλιακή διατμητική τάση τοιχώματος (Buchmann 2010)

Από βιολογικής απόψεως, τόσο χαμηλή και ταλαντωτική διατμητική τάση τοιχώματος είναι ένας σημαντικός ρυθμιστής πολλών γρήγορων κυτταρικών αποκρίσεων, όπως η αγγειοδιαστολή και η ενεργοποίηση του οξειδίου του αζώτου που ως εκ τούτου εμπλέκεται στην πρώιμη ανάπτυξη της νόσου. Ειδικότερα, η διατμητική τάση τοιχώματος αποτελεί ένα σημαντικό κίνητρο της δομής του ενδοθηλίου και της βιολογικής του λειτουργίας, όπως αποδεικνύεται από μια σειρά μελετών (Chatzizisis et al. 2007, Malek et al. 1999, Resnick et al. 2003, Traub και Berk et al. 1998). Σε γραμμικά τμήματα του αγγειακού συστήματος με αξονικά ευθυγραμμισμένη ροή, η διάμετρος του αγγείου προσαρμόζεται στην ροή του τοπικού περιβάλλοντος (μέσω αγγειοδιαστολής και αγγειοσυστολής) για να διατηρήσει μια φυσιολογική διατμητική



τάση τοιχώματος επιπέδου περίπου $WSS \approx 1$ με 2 [Pa] (Traub και Berk et al. 1998). Στις περιοχές αυτές, τα ενδοθηλιακά κύτταρα έχουν ελλειψοειδές σχήμα και είναι ευθυγραμμισμένες με μεθοδευμένο τρόπο σύμφωνα την κατεύθυνση της ροής (Malek et al. 1999) και εμφανίζουν πολλά αθηροπροστατευτικά χαρακτηριστικά. Κατά συνέπεια, η αθηροσκλήρωση είναι σπάνια σε αυτές τις θέσεις. Στις περιοχές της διαταραγμένης ροής, με χαμηλή διατμητική τάση τοιχώματος, τα ενδοθηλιακά κύτταρα είναι κακώς ευθυγραμμισμένα και είναι πιο επιρρεπή σε δυσλειτουργία του ενδοθηλίου και δυνητικά σε ανάπτυξη αθηρωματικής πλάκας. Σε αυτές τις περιοχές ($WSS < 0,4$ [Pa]), τα ενδοθηλιακά κύτταρα εμφανίζουν προ-αθερογενετικά χαρακτηριστικά όπως εξασθενημένη σύνθεση οξειδίου του νατρίου, πολλαπλασιασμό αγγειακά λείων μυϊκών κυττάρων και αυξημένη διαπερατότητα του ενδοθηλίου. Επιπλέον, η τοπική μεταφορά μάζας προς και από το αρτηριακό τοίχωμα αναστέλλεται σε αυτές τις περιφέρειες και οδηγεί σε αυξημένη συσσώματωση των λευκοκυττάρων και των μορίων των LDL (λιποπρωτεΐνες χαμηλής πυκνότητας, Low Density Lipoproteins) στο ενδοθήλιο.

Μια συνηθισμένη end to side αναστόμωση χαρακτηρίζεται από ανωμαλίες στα ροϊκά χαρακτηριστικά της, όπως είναι η ταλάντωση της ροής στην αρχή της αναστόμωσης (heel), την αντίδραση στο κάτω μέρος της αρτηρίας και το διαχωρισμό της ροής στο τέλος της αναστόμωσης (toe). Υπάρχει ένα σημείο στασιμότητας στο κάτω μέρος της αρτηρίας, όπου η ροή από το μόσχευμα προσκρούει στο κάτω μέρος του αρτηριακού τοιχώματος, η θέση του οποίου ταλαντεύεται κατά τη διάρκεια του καρδιακού κύκλου. Αυτή η μετακίνηση του σημείου παρέχει μια χαμηλού μεγέθους αλλά υψηλής ταλάντωσης διατμητική τάση τοιχώματος στο κάτω μέρος της αρτηρίας το οποίο έχει προταθεί για την ενίσχυση της αθηρογένεσης (Ku et al. 1995) και το σχηματισμό υποενδοθηλιακής υπερπλασίας (Li et al. 2001). Επιπλέον, είναι γνωστό ότι η επίδραση της ροής στο κάτω μέρος της αρτηρίας είναι επιβλαβής για το ενδοθήλιο και πιστεύεται ότι είναι άλλος ένας λόγος που συμβάλλει στην αστοχία του μοσχεύματος (Bates et al. 2001). Επίσης, σε μια συμβατική διαμόρφωση end to side αναστόμωσης υπάρχει μια υψηλή χωρική διαβάθμιση της διατμητικής τάσης τοιχώματος στο τέλος της αναστόμωσης (toe), η οποία έχει προταθεί για μια πιθανή αιτία πρόκλησης μορφολογικών λειτουργικών αλλαγών στο ενδοθήλιο που μπορεί να συμβάλλει σε αυξημένη τοιχωματική διαπερατότητα και ως εκ τούτου σε αθηροσκληρωτικές βλάβες (DePaola et al. 1992, Lei et al. 1995, Lei et al. 1996) και ανάπτυξη υπενδοθηλιακής υπερπλασίας (Ohja et al. 1993).



Εικόνα 20: Απεικόνιση περιοχών που αναμένονται να εμφανίσουν υψηλά ή χαμηλά επίπεδα διατμητικών τάσεων (Haruguchi και Teraoka et al. 2003)



3.10 Τρόποι αντιμετώπισης της στεφανιαίας νόσου.

Λόγω της σπουδαιότητας της στεφανιαίας νόσου έχουν αναπτυχθεί ποικίλες επεμβατικές τεχνικές για την αντιμετώπιση της. Οι τρεις κυριότερες είναι η αθηρεκτομή, η αγγειοπλαστική και η αορτοστεφανιαία παράκαμψη (by pass). Βέβαια υπάρχουν και διάφορες φαρμακευτικές ουσίες όπου χρησιμοποιούνται για την πρόληψη του εμφράγματος του μυοκαρδίου και του καρδιακού θανάτου. Οι κυριότερες ουσίες είναι τα αντιαιμοπεταλιακά που αποτρέπουν την πήξη του αίματος και την δημιουργία θρόμβων, διάφοροι υπολιπιδαιμικοί παράγοντες που οδηγούν σε μείωση των λιπιδικών κλασμάτων και κυρίτερα της χοληστερόλης και οι αναστολείς του μετατρεπτικού ενζύμου της αγγειοτασίνης που έχουν αντιαθηρωματική δράση. Σε κρίσιμες περιπτώσεις όμως η καρδιολογία παρεμβαίνει και αντιμετωπίζει ριζικότερα την στεφανιαία νόσο αποκαθιστώντας δηλαδή τις βλάβες που υπάρχουν μέσα στα στεφανιαία αγγεία κάνοντας χρήση των επεμβατικών τεχνικών που αναφέραμε πιο πάνω και θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

Η πρώτη επεμβατική μέθοδος που θα αναλύσουμε είναι η αθηρεκτομή, δηλαδή η αφαίρεση της αθηρωματικής πλάκας η οποία γίνεται με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι με χρήση αθηροτόμων, οι οποίοι είναι ειδικά διασκευασμένοι καθετήρες που έχουν τη δυνατότητα να αφαιρούν την αθηρωματική πλάκα που προκαλεί τη στένωση της αρτηρίας και λειτουργούν όπως μια ξυριστική μηχανή, έτσι κόβουν την μαλακή αθηρωματική πλάκα από τη στενωμένη περιοχή και την εναποθέτουν σε μια ειδική θήκη που μετά αποσύρεται.



Εικόνα 21: Αθηροτόμος και Περιστροφικός καθετήρας αθηρεκτομής [1-10]

Σε περίπτωση που η αθηρωματική πλάκα είναι σκληρή από εναπόθεση ασβεστίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συσκευή, που ονομάζεται περιστροφικός καθετήρας αθηρεκτομής, όπου περιστρέφεται με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα και κορνιτοποιεί τη πλάκα σε αβλαβή μικροσκοπικά μόρια που ξεπλένονται με τη ροή του αίματος. Τέλος υπάρχουν και μερικοί καθετήρες που λειτουργούν με ειδικά λέιζερ που μπορούν να διαλύσουν την αθηρωματική πλάκα που στενεύει την αρτηρία.

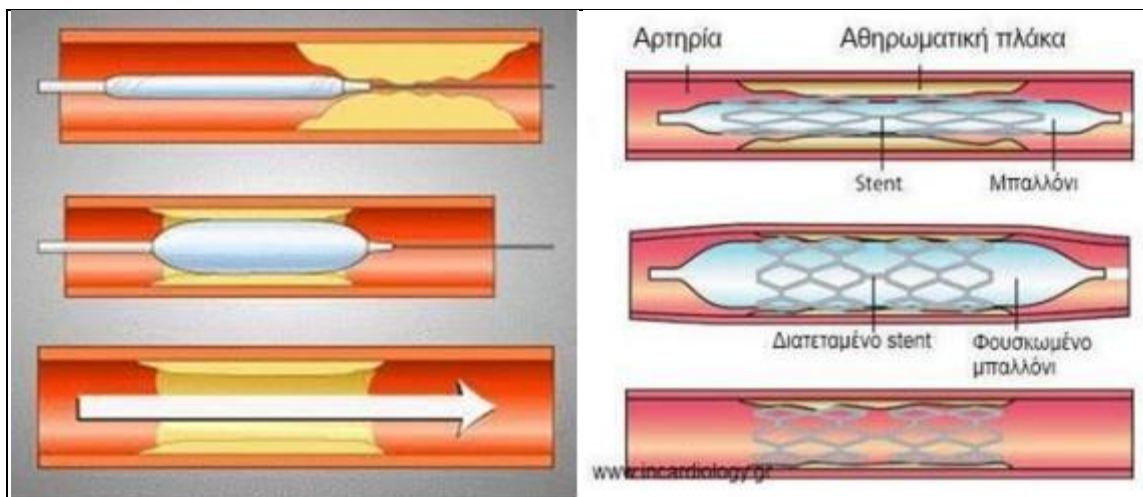
Μια άλλη γνωστή επεμβατική τεχνική είναι η αγγειοπλαστική με τοποθέτηση ενδοαγγειακού νάρθηκα (stent). Επίσης είναι γνωστή και με άλλα ονόματα όπως μπαλονάκι ή PTCA ή PCI. Κατά τη διεξαγωγή της επέμβασης αρχικά, αφού πρώτα γίνει τοπική αναισθησία στην περιοχή της εισόδου του καθετήρα (περιοχή του καρπού-κερκιδική προσπέλαση ή του μηρού-μηριαία προσπέλαση), προωθείται ένας καθετήρας έως τη στεφανιαία αρτηρία που έχει τη στένωση, έπειτα γίνεται προώθηση ενός οδηγού σύρματος μέσα στη στένωση και στη συνέχεια ο καθετήρας με ειδικό μπαλόνι στο άκρο του (διαστάσεων αντίστοιχων με τη διάμετρο του αγγείου και το



μήκος της βλάβης) όταν φτάσει στο κατάλληλο σημείο της στένωσης φουσκώνει με υγρό στις 12-16 Atm. Έτσι συμπιέζεται η αθηρωματική πλάκα με αποτέλεσμα τη διάνοιξη της στενωμένης αρτηρίας. Αφού αποσυρθεί ο καθετήρας με το μπαλόνι, προωθείται ένας άλλος καθετήρας-μπαλόνι που έχει συμπιεσμένο μεταλλικό πλέγμα τυλιγμένο στην επιφάνεια του (stent). Καθώς, λοιπόν το μπαλόνι φουσκώνει εκπνύσσεται και το stent, που παραμένει στο σημείο της βλάβης μετά την απομάκρυνση του μπαλονιού και διατηρεί τον αυλό του αγγείου ανοιχτό. Από την παραπάνω διαδικασία η επακόλουθη πλαστική παραμόρφωση επαναφέρει την ροή διαμέσω του αγγείου στο φυσιολογικό.



Εικόνα 22 Καθετήρας με λέιζερ [I-10]



Εικόνα 23: Προώθηση του μπαλονιού μέσα στην αρτηρία [I-11] Τοποθέτηση του stent μέσα στην αρτηρία [I-19]

Βέβαια τόσο η ελαστικότητα του αγγείου όσο και βιολογικοί παράγοντες συντείνουν στην συχνή επαναστένωση. Το αγγείο λειτουργώντας σαν ελαστικό σώμα επανέρχεται σταδιακά στην αρχική του μορφή συμπαρασύροντας και την αθηρωματική πλάκα προκαλώντας έτσι την επαναστένωση. Ακόμα και τα λεία μυϊκά κύτταρα της επιφάνειας του αγγείου αντιδρούν στην σύνθλιψη που υφίστανται από το μπαλονάκι και έτσι αναπαράγονται σε μεγαλύτερους αριθμούς πέραν του φυσιολογικού. Ως επακόλουθο έχουμε λοιπόν την δημιουργία μίας τοπική υπερπλασίας προκαλώντας έτσι την επαναστένωση του αγγείου. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω παραγόντων,



μηχανικών και βιολογικών, είναι που δίνει τελικά τα πολύ υψηλά ποσοστά επαναστένωσης (20% - 30% των ασθενών) μέσα στους 6 μήνες μετά την επέμβαση, κάτι το οποίο εμφανίζουν και οι επεμβάσεις αθηρεκτομής με έμφαση κυρίως όμως στους βιολογικούς παράγοντες.

Αυτά τα υψηλά ποσοστά οδήγησαν τους ιατρούς στο να βρουν ένα τρόπο να αποτρέψουν την επαναφορά της πλάκας σε τόσο υψηλά επίπεδα. Έτσι αρχικά δοκιμάστηκαν διάφορες μεθοδολογίες για να σταματήσει η υπερπλασία όπως η τοποθέτηση μίας λεπτής ταινίας με ραδιενεργό ιρίδιο-192 που προκαλεί αλλαγές στην αλληλουχία του DNA των κυττάρων αποτρέποντας την αναπαραγωγή τους. Η τεχνική αυτή πλέον έχει δώσει την θέση της στα λεγόμενα drug eluting stents, stents που εκλύουν φάρμακα, που είναι εμποτισμένα με ουσίες που σταματούν τις βιολογικές διαδικασίες που προκαλούν την επαναστένωση. Έτσι τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα σε σύγκριση με το απλό μπαλονάκι ή την τοποθέτηση stents.

3.11 Η αορτοστεφανιαία παράκαμψη (BY PASS).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι επεμβατικές τεχνικές που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό επαναστένωσης καθώς δεν αντιμετωπίζουν τις αιτίες της πρόκλησης και ανάπτυξης της αθηρωματικής πλάκας. Σε περιπτώσεις όπου η στένωση εμφανίζει μεγαλύτερα ποσοστά απόφραξης από 75% της αρχικής διατομής ή αλλιώς 50% της αρχικής διαμέτρου της αρτηρίας, τότε ίσως η καλύτερη και πιο αποτελεσματική χειρουργική τεχνική για αντιμετώπιση της στεφανιαίας νόσου είναι η αορτοστεφανιαία παράκαμψη (by pass).

Αρχικά γίνεται εντοπισμός του σημείου της στένωσης μέσω στεφανιογραφίας και στη συνέχεια επιχειρείται να παρακαμφθεί. Κατά την διεξαγωγή της επέμβασης συνήθως η καρδιά είναι σταματημένη καθώς υποκαθίσταται με μηχανικό τρόπο. Τα φυσικά μοσχεύματα που χρησιμοποιούνται είναι είτε αρτηριακά, είτε φλεβικά.

Σαν αρτηριακά μοσχεύματα χρησιμοποιούνται κοντινές αρτηρίες, όπως οι έσω μαστικές αρτηρίες (δεξιά και αριστερά) που βρίσκονται πλάγια του στέρνου και η δεξιά γαστροεπιπλοϊκή από το στομάχι, η οποία αφού διέλθει από το διάφραγμα, αναστομώνονται με τα στεφανιαία αγγεία.

Σαν φλεβικά μοσχεύματα χρησιμοποιούνται φλέβες που αποκόπτονται από τα κάτω άκρα και τα οποία συνήθως λαμβάνονται από την έσω επιφάνεια των κάτω άκρων, από το άνω μέρος του μηρού μέχρι του άκρου ποδός. (Συνήθως λαμβάνεται η μείζονα σαφηνή φλέβα). Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι τα αρτηριακά μοσχεύματα σε βάθος 10 ετών παραμένουν ανοιχτά σε ποσοστό 90% ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τα φλεβικά είναι 76%.

Βέβαια σε ασθενείς με προ υπάρχουσα αγγειακή νόσο ή σε ασθενείς στους οποίους έχει ήδη γίνει χρήση φυσικών μοσχευμάτων, δεν μπορούν να βρεθούν αγγειακά μοσχεύματα που να είναι αρκετά υγιή για να εξυπηρετήσουν επαρκώς την αναστόμωση (by pass). Έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται χρήση μοσχευμάτων από συνθετικά πουλερικά υλικά όπως το ePTFE (παρατεταμένο πολυτετραφθοροαιθυλένιο) ή το Dacron (τετραφθαλικό πολυαιθυλένιο) (Eleyas Shaik et al. 2008).

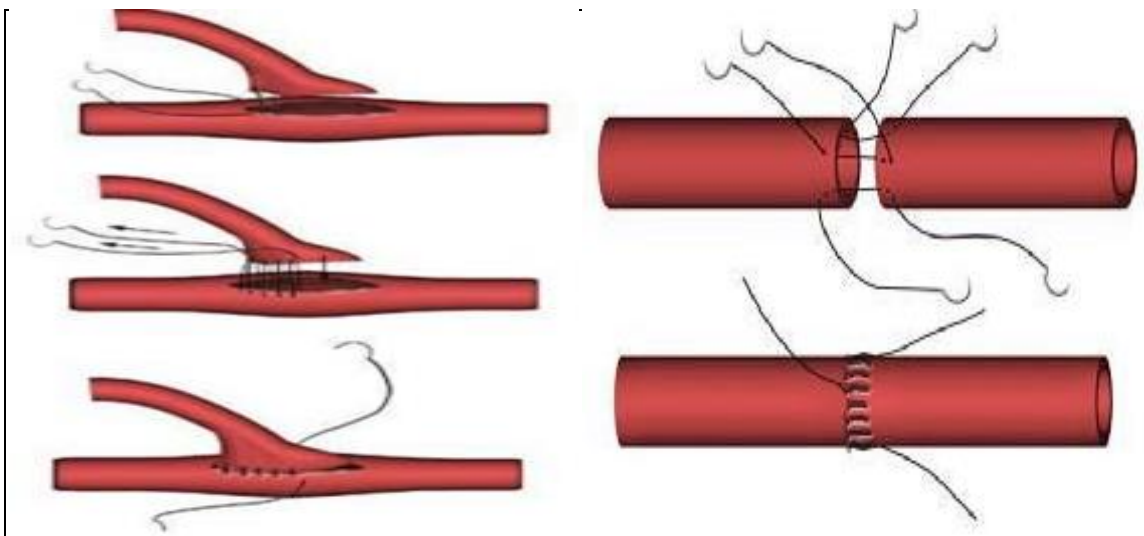
Για την διεκπεραίωση της επέμβασης υπάρχουν διάφοροι τρόποι σύνδεσης του μοσχεύματος στην μητρική αρτηρία. Μια τεχνική είναι η end-to-end όπου ο κεντρικός



άξονας του μοσχεύματος ευθυγραμμίζεται με τον άξονα του μητρικού αγγείου, ενώ η πιο συνηθισμένη και υπό μελέτη στην παρούσα εργασία τεχνική είναι η end-to-side αναστόμωση. Στην end-to-side τεχνική η τομή πρέπει να είναι λοξή συνήθως 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερη από την διάμετρο του μοσχεύματος και για να αποφευχθεί η επαναστένωση είναι κρίσιμο το τέλος του μοσχεύματος να έχει διαμορφωθεί σε σχήμα “σπάτουλας” και να έχει ομαλή κυρτή εμφάνιση.

Τα στατιστικά αποτελέσματα της αορτοστεφανιαίας παράκαμψης δείχνουν βατότητα των μοσχευμάτων πάνω από 80% μετά τους πρώτους 6 μήνες, ενώ το ετήσιο ποσοστό απόφραξης κυμαίνεται περίπου στο 2%. Επίσης έχουμε σαφώς μεγαλύτερο ποσοστό ανακούφισης των συμπτωμάτων του άλγους και της στηθάγχης σε ποσοστό (75 ως 90%) συγκριτικά με την απλή φαρμακευτική μέθοδο αντιμετώπισης.

Δυστυχώς όμως, μετεγχειρητικά έχει καταγραφεί ένα σημαντικό ποσοστό αστοχίας των επεμβάσεων. Σχετίζεται με την μακροβιότητα των μοσχευμάτων της αναστόμωσης και το κύριο 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, αφού έχει παρατηρηθεί πως η στροβιλώδης ροή μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της παραγωγής ορισμένων μορίων προσκόλλησης των λευκών αιμοσφαιρίων που ευθύνονται για την ανάπτυξη της αθηρωματικής πλάκας.



Εικόνα 24: End to side by pass & End to end by pass [I-16]

3.12 Ανεύρισμα.

Τα ανευρύσματα της κοιλιακής αρτηρίας (ΚΑΑ) είναι σπάνια και αποτελούν το 4% επί του συνόλου των σπλαγγχνικών ανευρυσμάτων και το τέταρτο είδος σπλαγγχνικού ανευρύσματος σε σειρά συχνότητας εμφάνισης, μετά τα ανευρύσματα της σπληνικής, της ηπατικής και της άνω μεσεντερίου αρτηρίας.

Η εκφύλιση του μέσου χιτώνα είναι ο συχνότερος αιτιολογικός παράγοντας, ενώ οι αθηροσκληρωτικές τοιχωματικές αλλοιώσεις ανευρίσκονται στο 30% των



ασθενών, αλλά πιθανότατα αποτελούν δευτερογενείς βλάβες. Είναι συνήθως ασυμπτωματικά και στο 80% των ασθενών η πρώτη εμφάνιση συμπτωμάτων οφείλεται στη ρήξη τους. Ο κίνδυνος ρήξης τους έχει υπολογισθεί στο 13% και η θνητότητα της επείγουσας αντιμετώπισής τους ξεπερνά το 40%, σε αντίθεση με την εκλεκτική επέμβαση που το αντίστοιχο ποσοστό δεν ξεπερνά το 5% (1-3).

Όμως το καθοριστικό κριτήριο για το αν μπορεί, με ικανοποιητική ακρίβεια, να υποθεθεί το αίμα ως Νευτώνειο ρευστό φαίνεται ότι είναι η γεωμετρία του αγγείου στο οποίο ρέει, όπως και οι βαθμίδες ταχύτητας που εμφανίζονται στο κάθε πρόβλημα ροής. Για παράδειγμα, το αίμα δεν μπορεί να θεωρηθεί ομογενές ρευστό στα μικρά αγγεία, διότι τότε η διάμετρος και η απόσταση των ερυθρών αιμοσφαιρίων είναι συγκρίσιμες με την διάμετρο των αγγείων. Ειδικά δε στα πάρα πολύ μικρά τριχοειδή αγγεία, με διάμετρο μικρότερη από 50 φορές την διάμετρο του ερυθρού αιμοσφαιρίου, τα ερυθρά αιμοσφαίρια έχουν την ιδιότητα να παραμορφώνονται και η μοντελοποίηση τα λαμβάνει ως ανεξάρτητα στερεά σώματα μέσα στο πλάσμα με συγκεκριμένες ιδιότητες. Γενικά σε αγγεία των οποίων η διάμετρος είναι $D > 100 \mu\text{m}$, το αίμα μπορεί να θεωρηθεί ως ομογενές και Νευτώνειο ρευστό, επειδή η κλίμακα της δομής του ρευστού είναι πολύ μικρότερη από αυτή της ροής. Άρα στις περιπτώσεις όπου θέλουμε να προσομοιώσουμε την ροή του αίματος σε αρτηρίες ή φλέβες η θεώρηση του αίματος ως Νευτώνειου ρευστού είναι μια ικανοποιητική και αποδεκτή θεώρηση. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε μια ταξινόμηση των αιμοφόρων αγγείων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διατομής τους.

3.12.1 Ανεύρυσμα λαγόνιας αρτηρίας.

Τα ανευρύσματα των λαγόνιων αρτηριών συνυπάρχουν συνήθως με τα αντίστοιχα της κοιλιακής αορτής. Αφορούν την κοινή λαγόνιο αρτηρία σε ποσοστό 90 % και 10 % την έσω λαγόνια.

Τα ανευρύσματα είναι συνήθως αθηροσκληρωτικής αιτιολογίας. Δεν αναγνωρίζονται εύκολα με την αντικειμενική εξέταση. Γι' αυτό το λόγο οι απεικονιστικές τεχνικές (υπερηχογράφημα, αξονική και μαγνητική αγγειογραφία) είναι απαραίτητες για τη διάγνωσή τους. Τα ανευρύσματα της έσω λαγονίου αρτηρίας μπορεί να παρουσιάζονται ως σφύζουσα μάζα κατά τη διάρκεια ορθοπρωκτικής εξέτασης. Όταν η διάμετρος της λαγονίου αρτηρίας ξεπερνά τα 3 cm, υπάρχει ρήξη του ανευρύσματος που επέρχεται σχετικά καθυστερημένα σε σύγκριση με τα ανευρύσματα της κοιλιακής αορτής (109, 135).

	Μέση διάμετρος	Μέσο πάχος τοιχώματος	Ελάττω	Ευνοητέ	Ασθενή	Καλώς	
Αρτηρία	4mm	1mm					
Αρτηρίδιο	30μm	6μm					
Τριχοειδές	8μm	0.5μm					
Φλεβίδιο	20μm	1μm					
Φλέβα	5mm	0.5mm					

Εικόνα 25: Ταξινόμηση των αιμοφόρων αγγείων [EB-2]



4. Πειραματική Εγκατάσταση – Αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η πειραματική διάταξη – εγκατάσταση καθώς και η μεθοδολογία των μετρήσεων που ελήφθησαν. Στη συνέχεια καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα και αναλύονται σε διαγράμματα.

4.1 Πειραματική Διάταξη.

Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη προσομοίωσης κοιλιακής αορτής. Με τον όρο αορτή στη συνέχεια θα χαρακτηρίζεται το δοκίμιο με είσοδο την κεντρική αρτηρία και εξόδους – απολήξεις τις δύο λαγόνιες αρτηρίες. Ειδικότερα η αορτή απαρτίζεται από μια είσοδο κυκλοφορίας του αίματος (κεντρική αρτηρία) διαμέτρου 8mm που απολήγει σε δύο αρτηρίες (λαγόνιες) διαμέτρου 3mm.

Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκαν 4 δοκίμια κατά ζεύγη ως προς το υλικό κατασκευής. Ένα ζευγάρι δοκιμίων (ένα υγιές και ένα παθολογικό) κατασκευάστηκαν από nylon άκαμπτο, ενώ ένα δεύτερο ζευγάρι δοκιμίων ((ένα υγιές και ένα παθολογικό) κατασκευάστηκαν από υλικό carbon εύκαμπτο. Επομένως μια παράμετρος στη μελέτη είναι και το υλικό κατασκευής με την πιθανή διαφοροποίηση στη συμπεριφορά τους ως προς τις διερχόμενες παροχές ρευστού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι γωνίες που σχηματίζουν οι λαγόνιες αρτηρίες με τη διεύθυνση της κεντρικής είναι διαφορετικές και κατά συνέπεια η ροή έχει προτιμητέα διεύθυνση φθάνοντας στην κορυφή αυτών με τις μεγαλύτερες παροχές να διευθετούνται προς τη λαγόνια αρτηρία μικρότερης εκτροπής, όπως είναι και αναμενόμενο.

Στην περίπτωση των υγιών δοκιμίων οι δύο λαγόνιες αρτηρίες έχουν ίδια μορφή και διάμετρο, ενώ στην περίπτωση των παθολογικών η κατασκευή διαφοροποιήθηκε με την παρουσία κοιλότητας σε μία εκ των δύο λαγόνιων αρτηριών που συνιστά το ανεύρυσμα. Στην πειραματική μελέτη που ακολουθεί τα χαρακτηριστικά μορφολογικά στοιχεία υγιών και παθολογικών δοκιμίων έχουν ληφθεί από αξονική τομογραφία (CTscan) έτσι ώστε η πειραματική προσομοίωση της κυκλοφορίας του ρευστού να πλησιάζει περισσότερο σε πραγματικές καταστάσεις – συνθήκες.

Η παραμετρική μελέτη που περιγράφεται στην παρούσα εργασία αποτελεί συγκριτική μελέτη υγιούς και παθολογικής αορτής κατασκευασμένων από δύο διαφορετικά υλικά (νάιλον και συνθετικό με ανθρακονήματα - carbon) σε εύρος παροχών. Το ρευστό που χρησιμοποιείται είναι απιονισμένο νερό το οποίο διαθέτει φυσικές ιδιότητες παραπλήσιες του αίματος (πυκνότητα, ιξώδες). Ειδικότερα στην παρούσα εργασία καταγράφονται παροχές με μικρομυλίσκους στα τρία σημεία ενδιαφέροντος, δηλ. στην κεντρική αρτηρία (είσοδος ρευστού) και στις δύο λαγόνιες αρτηρίες (έξοδοι του ρευστού).

Το σύστημα που κατασκευάστηκε είναι ένα κλειστό κύκλωμα ανακυκλοφορίας ρευστού (νερού) η οποία συντηρείται με μια αντλία τύπου Solar Water Pump JT - 800 IP 68 ROHS με χαρακτηριστικά λειτουργίας H_{max} (80 – 800)cm και Q_{max} (45 –

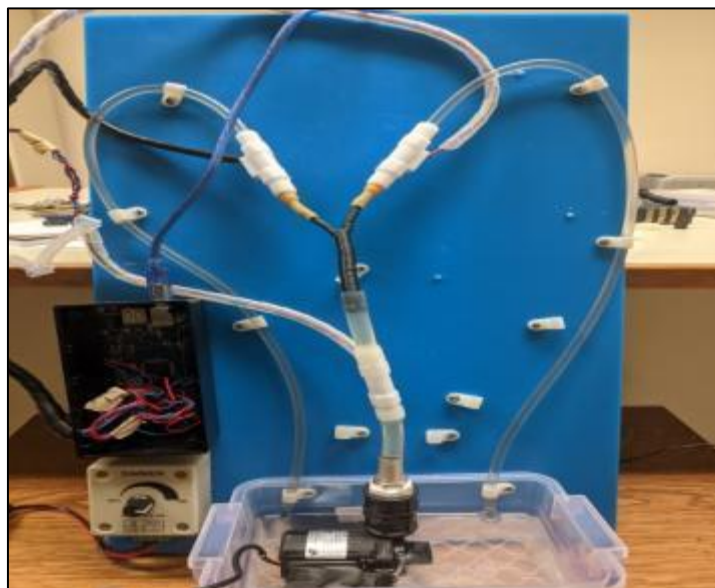


1100) lt/h. Η αντλία ελέγχεται ως προς την ταχύτητα (rpm) με τη βοήθεια ρυθμιστή (dimmer) που παρέχει τη δυνατότητα αυξομείωσης της παροχής που διαπερνά την αορτή – εκάστοτε δοκίμιο. Οι αγωγοί μεταφοράς που αναπαριστούν τα αγγεία μεταφοράς είναι από εύκαμπτο λάστιχο ενώ στο κύκλωμα παρεμβάλλονται και 3 μετρητικές διατάξεις παροχής τύπου μυλίσκου. Μια δεξαμενή νερού συμπεριλαμβάνεται στο κύκλωμα από την οποία αντλείται ποσότητα νερού από τον αγωγό εισόδου διαμέτρου 8mm (κεντρική αρτηρία) και στην οποία το νερό επιστρέφει εξερχόμενο των λαγόνιων αρτηριών διαμέτρων 3mm. Οι παροχές καταγράφονται με τη βοήθεια μικροελεγκτή σε επικοινωνία με λογισμικό σε περιβάλλον LabView σε μορφή χρονοσειρών σήματος για μετέπειτα επεξεργασία.

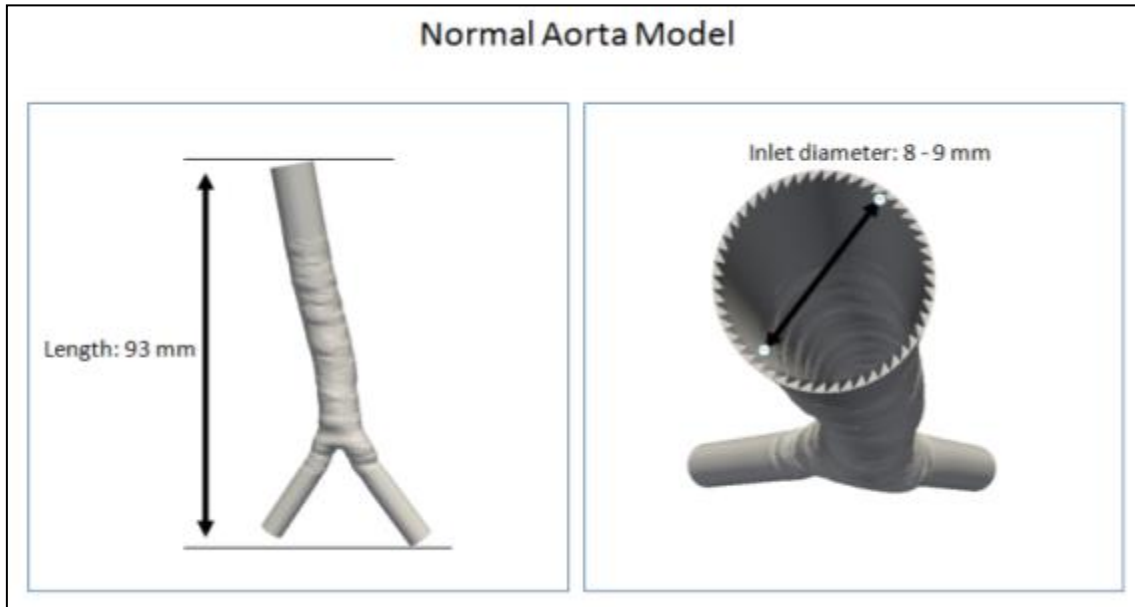
Στην Εικ.27 δίνεται το κλειστό κύκλωμα ανακυκλοφορίας του εργαζόμενου μέσου (απιονισμένο νερό) με δοκίμιο υγιές (συνθετικό με προσθήκη ανθρακωνημάτων).

Στην Εικ.28 δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων τα οποία μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία και αποτελέσματα της μελέτης δίνονται στην παρούσα εργασία ακολούθως

Στην Εικ.27 δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων nylon τα οποία μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία και αποτελέσματα της μελέτης δίνονται στην παρούσα εργασία ακολούθως.



Εικόνα 26: Κλειστό κύκλωμα με αισθητήρες παροχής.



Εικόνα 27: Γεωμετρία υγειούς δοκιμίου προερχόμενο από αξονική τομογραφία (CT scan).

Στην Εικ. 28 δίνονται και τα 4 δοκίμια που δοκιμάζονται στο πλαίσιο μιας συγκριτικής μελέτης μεταξύ δοκιμίων σταθερών τοιχωμάτων από υλικό nylon άκαμπτο (λευκού χρώματος) με δοκίμια κατασκευασμένα από ελαστικό υλικό carbon (μαύρου χρώματος).



Εικόνα 28: Ζευγάρια δοκιμίων (υγειούς - παθολογικού) κατασκευασμένα από διαφορετικό υλικό.



4.2 Διαδικασία Μετρήσεων.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων παροχής που ελήφθησαν σε μορφή χρονοσειρών σημάτων. Τα αποτελέσματα που δίνονται στα Διαγράμματα A1.1, A1.2, A1.3 αφορούν τη συμπεριφορά των υγείων δοκιμίων. Στα διαγράμματα αποδίδονται οι μέσες τιμές παροχής για την είσοδο της αορτής (κεντρική αρτηρία) και τις δύο λαγόνιες απολήξεις αυτής. Στην κεντρική αρτηρία με τη βοήθεια του ρυθμιστή ελέγχου στροφών της αντλίας (dimmer) έχουν τεθεί παροχές στο εύρος (0.8 – 2.8)ml/s με βήμα 0.2 ml/s. Στο διάγραμμα δίνεται η απόκριση του συστήματος τόσο για την ίδια την κεντρική αρτηρία όσο και για τις λαγόνιες αρτηρίες - αγγεία.

Στο Διάγραμμα A1.1 δίνεται η συμπεριφορά υγειούς δοκιμίου κατασκευής από nylon, στο Διάγραμμα A1.2 δίνεται η συμπεριφορά υγειούς δοκιμίου κατασκευής από carbon ενώ στο Διάγραμμα A1.3 δίνεται η παραπάνω πληροφορία των A1.1, A1.2 συγκριτικά.

Τόσο για το υλικό nylon όσο και για το υλικό carbon φαίνεται ότι αυξανόμενης της παροχής η τάση που ακολουθείται είναι περίπου γραμμική για όλες τις αρτηρίες αν και στις λαγόνιες είναι εμφανής μια κόπωση αυξανόμενης της παροχής. Επίσης η εικόνα μπορεί να αποτελεί ασθενή ένδειξη ανακυκλοφορίας του ρευστού στο χώρο μεταξύ κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών.

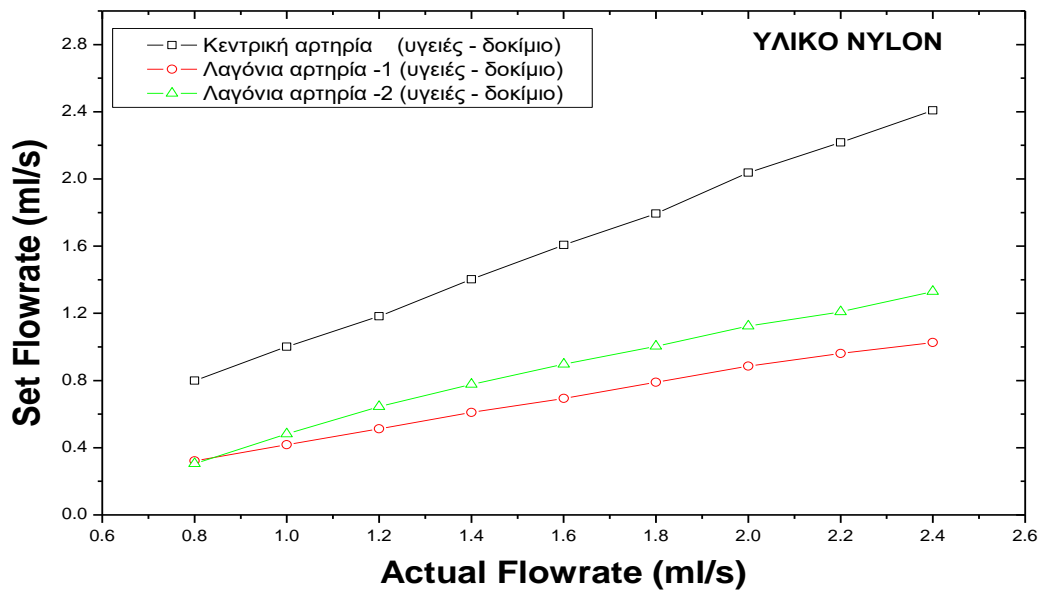
Προφανώς οι μέσες τιμές παροχής της κεντρικής αρτηρίας ακολουθούν με συνέπεια εκείνες που έχουν τεθεί αντίστοιχα στο εύρος (0.8 – 2.4)ml/s ενώ διαφοροποιήσεις αναγνωρίζονται για τη συμπεριφορά των λαγόνιων αρτηριών. Έτσι το λαγόνιο αγγείο-1 λαμβάνει τιμές στο εύρος (0.3 – 0.8) ml/s ενώ το λαγόνιο αγγείο-2 λαμβάνει τιμές στο εύρος (0.4 – 1.3) ml/s. Η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται με τη κατασκευαστική γεωμετρία των λαγόνιων αγγείων. Η σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ κεντρικής αρτηρίας και λαγόνιου αγγείου-2 είναι μικρότερη από τη αντίστοιχη που σχηματίζεται με το λαγόνιο αγγείο-1. Έτσι το οδηγούμενο ρευστό παρεκκλίνει λιγότερο της αρχικής του πορείας περνώντας από το λαγόνιο αγγείο-2 επομένως προτιμά αυτή τη διαδρομή σε μεγαλύτερο βαθμό από το λαγόνιο αγγείο-1. Το αποτέλεσμα της γεωμετρίας λοιπόν των δύο αγγείων απολήξεων απεικονίζεται με την εμφάνιση υψηλότερης στάθμης παροχών στο λαγόνιο αγγείο-2 για όλες τις παροχές που δοκιμάστηκαν (Διαγράμματα A1.1, A1.2).

Στο Διάγραμμα A1.3 δίνονται οι καταγραφόμενες παροχές και για τα δύο υλικά (nylon και carbon). Οι τάσεις αναφορικά με τη συμπεριφορά της κεντρικής αρτηρίας είναι παρόμοια και για τα δύο υλικά. Σε ότι αφορά τις λαγόνιες αρτηρίες φαίνεται πάλι ότι η λαγόνια αρτηρία μικρότερης εκτροπής (γωνίας) ως προς τον άξονα της κεντρικής (λαγόνια αρτηρία -2 στο διάγραμμα) διατηρεί υψηλότερη στάθμη αφού το ρευστό προτιμά αυτή τη διαδρομή.

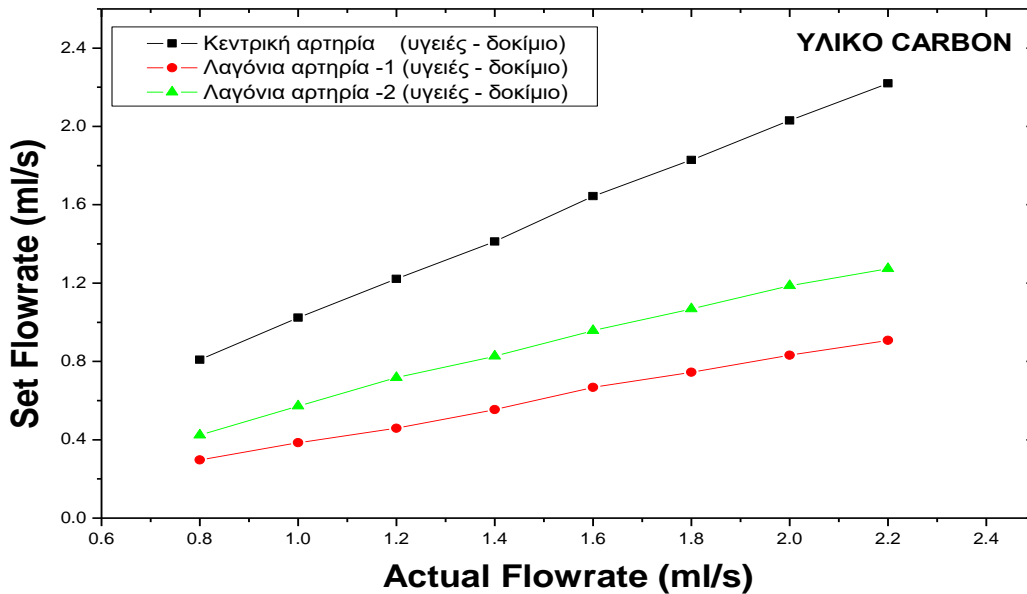
Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι ότι στην περίπτωση του υλικού carbon η διαφοροποίηση στην κατανομή της παροχής διευρύνεται σχεδόν κατά σταθερό τρόπο. Με άλλα λόγια αναγνωρίζεται ότι η λαγόνια αρτηρία -2 (μικρότερης εκτροπής



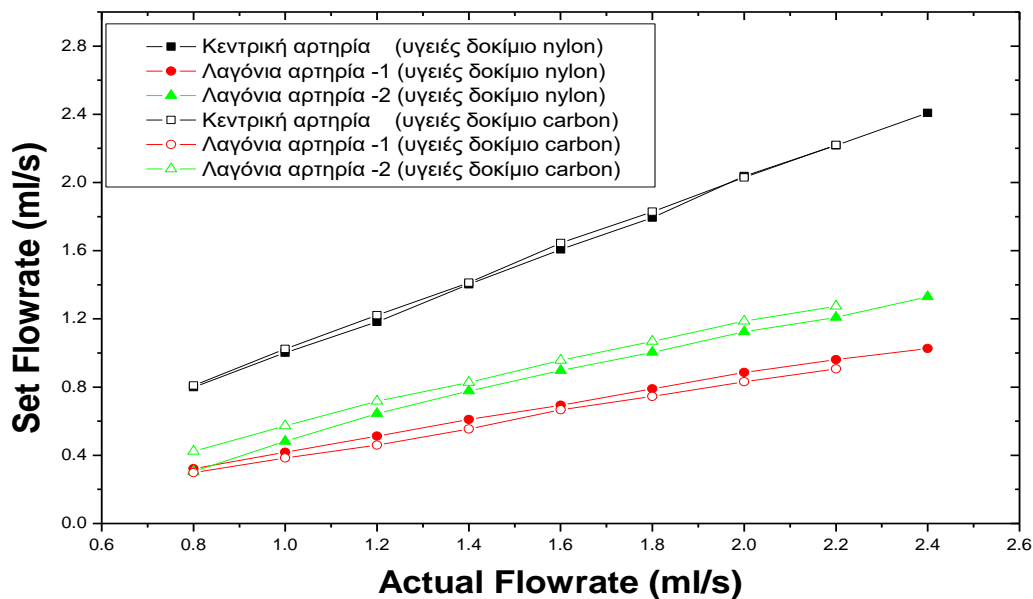
της ροής) συγκεντρώνει ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό παροχής σε σχέση με το υλικό nylon) ενώ η λαγόνια αρτηρία -1 (μεγαλύτερης εκτροπής της ροής) καταλαμβάνεται από μικρότερες παροχές. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να σχετίζεται με το ότι το υλικό carbon είναι εύκαμπτο με αποτέλεσμα να διαστέλλεται κατά τρόπο που να μπορεί να «αντέξει» λίγο μεγαλύτερες παροχές ρευστού ως προς το υλικό nylon. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι για το υλικό carbon δεν ήταν εφικτή η τελευταία μέτρηση στα 2.4ml/s όπως φαίνεται στο Διάγραμμα A1.3.



Διάγραμμα A1.1: Εξέλιξη παροχών κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών υγειούς δοκιμίου nylon.



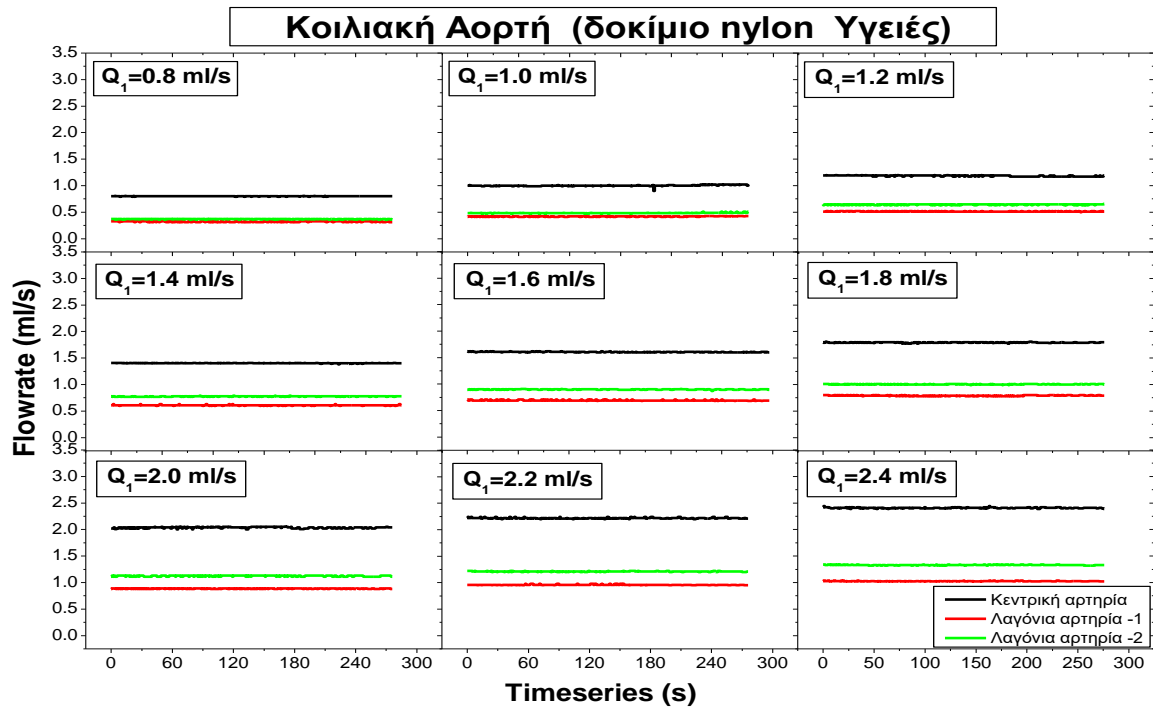
Διάγραμμα A1.2: Εξέλιξη παροχών κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών υγειούς δοκιμίου (carbon).



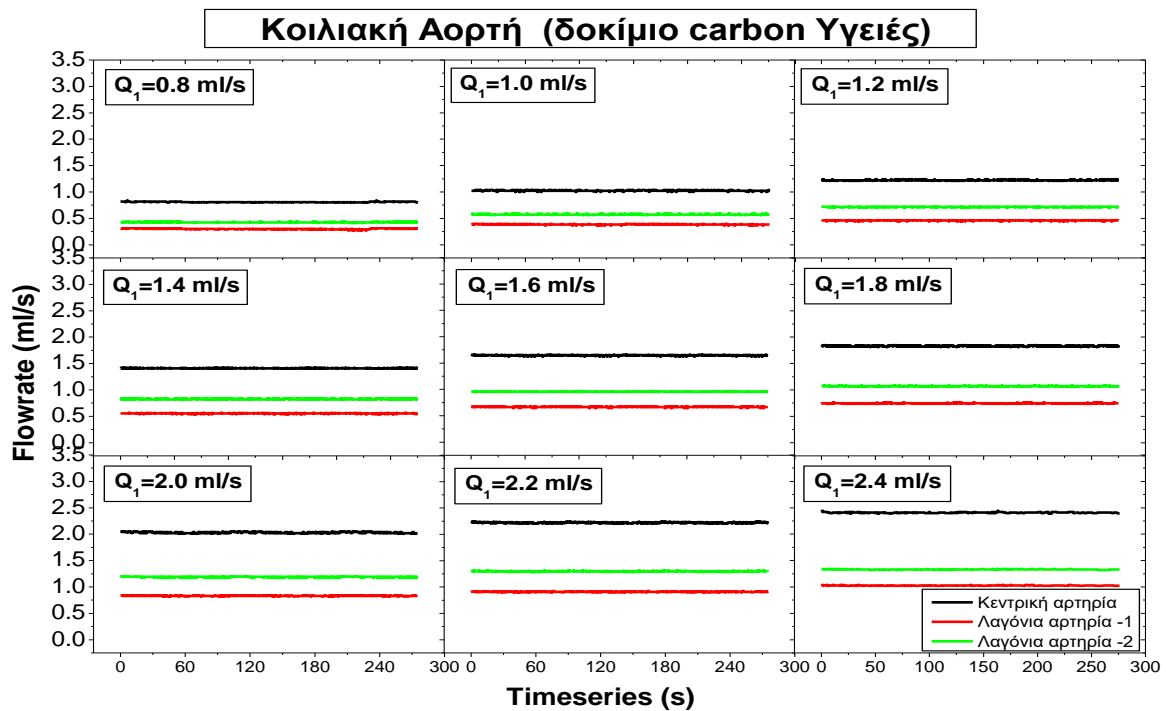
Διάγραμμα A1.3: Σύγκριση παροχών κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών των υγιών δοκιμίων διαφορετικών υλικών (nylon - carbon).

Στα Διαγράμματα A2.1, A2.2 δίνεται η εξέλιξη των χρονοσειρών κεντρικής αρτηρίας και λαγόνιων αρτηριών (αγγείων) για όλες τις παροχές που δοκιμάστηκαν στο εύρος (0.8 – 2.4)ml/s) της κεντρικής που χρησιμοποιείται πάντα ως αναφορά. Η διαφοροποίηση σχετίζεται με το υλικό κατασκευής της διάταξης της κοιλιακής αορτής (nylon και carbon αντίστοιχα). Κοινά χαρακτηριστικά αναγνωρίζονται και για τα δύο υλικά.

Οι παροχές της κεντρικής αρτηρίας (μαύρη γραμμή) διατηρούν την υψηλότερη στάθμη όπως και αναμένεται. Οι παροχές στο λαγόνιο αγγείο-2 (πράσινη γραμμή) διατηρούνται σταθερά σε υψηλότερες στάθμες ως προς τις αντίστοιχες του λαγόνιου αγγείου-1 κάτι που αναγνωρίστηκε και στα Διαγράμματα A1.1, A1.2, A1.3 και η συμπεριφορά αυτή πιστεύεται ότι σχετίζεται με τη γεωμετρία του δοκιμίου. Διακρίνεται επίσης μια ασθενής τάση διεύρυνσης της απόστασης των σταθμών μεταξύ των λαγόνιων αγγείων, αυξανόμενης της παροχής της κεντρικής αρτηρίας. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πιο εμφανές στην περίπτωση του υλικού nylon. Στην περίπτωση του υλικού carbon δεν είναι τόσο φανερό αυτή η διεύρυνση απόστασης των σταθμών μεταξύ των λαγόνιων αρτηριών.



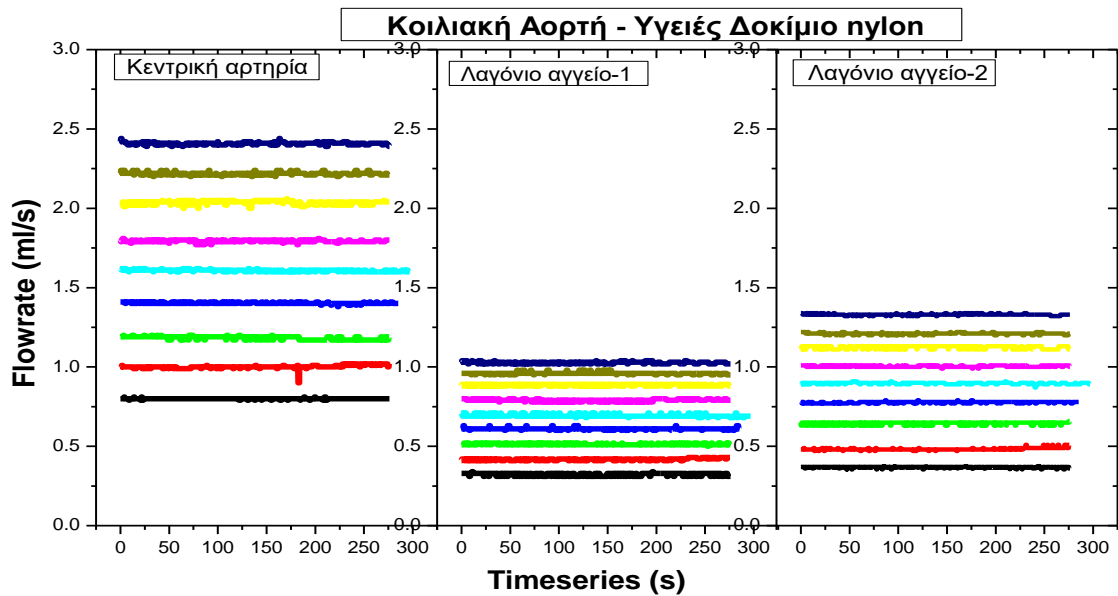
Διάγραμμα A2.1: Χρονοσειρές κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών ως προς την παροχή για υγιές δοκίμιο τύπου nylon.



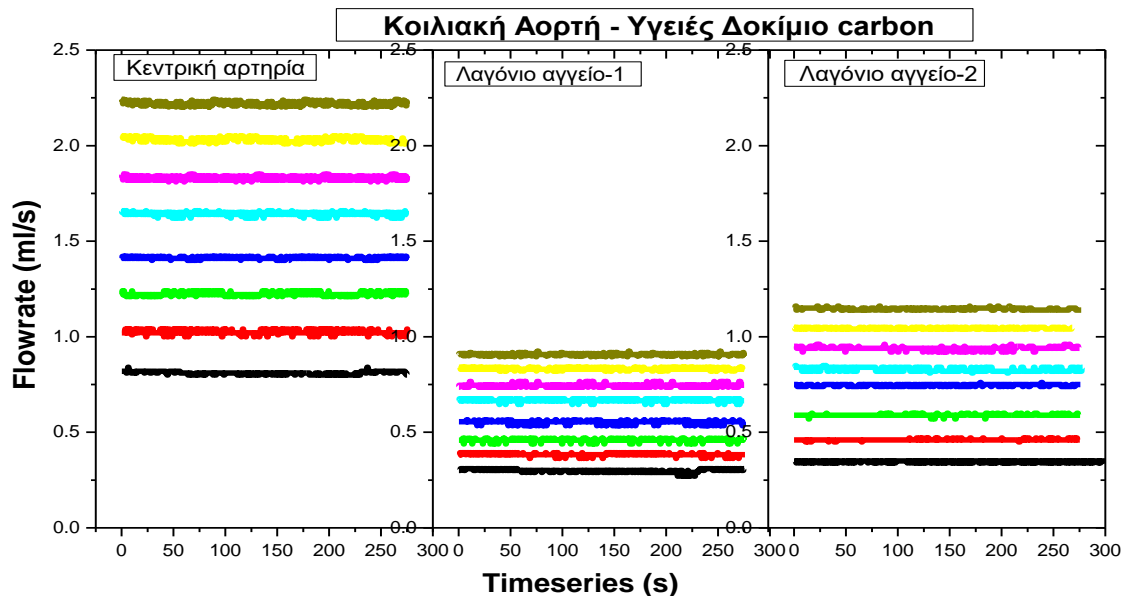
Διάγραμμα A2.2: Χρονοσειρές κεντρικής και λαγόνιων αρτηριών ως προς την παροχή για υγιές δοκίμιο τύπου carbon.



Στα Διαγράμματα A3.1, A3.2 δίνονται πάλι συγκριτικά οι χρονοσειρές παροχής στην κεντρική αρτηρία (κοιλιακής αορτής) και των λαγόνιων αρτηριών για τα υγιή δοκίμια των δύο υλικών (nylon και carbon αντίστοιχα). Δηλ. είναι πλέον προφανής η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των επιπέδων παροχής των λαγόνιων αγγείων με το λαγόνιο αγγείο-2 να διατηρείται σταθερά σε υψηλότερες στάθμες παροχής διευρύνοντας την απόσταση από τις αντίστοιχες του λαγόνιου αγγείου-1 με την αύξηση της παροχής της κεντρικής αρτηρίας.



Διάγραμμα A3.1: Συγκριτική παρουσίαση χρονοσειρών κοιλιακής αορτής υγιούς nylon.



Διάγραμμα A3.2: Συγκριτική παρουσίαση χρονοσειρών κοιλιακής αορτής υγιούς carbon.



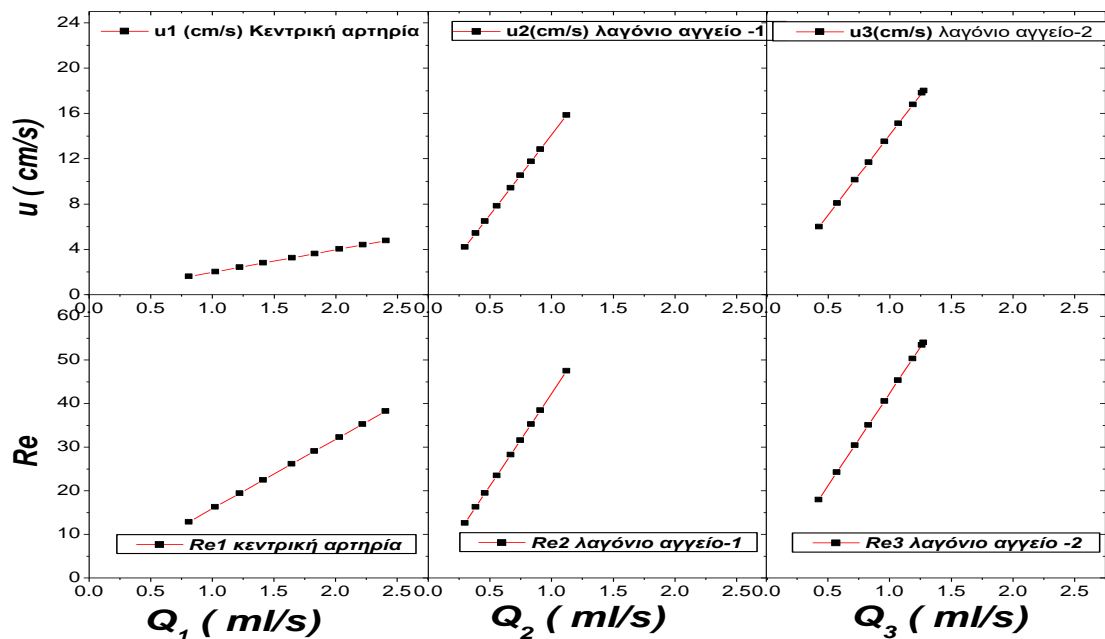
Στο Διάγραμμα A4 δίνονται χαρακτηριστικά του ροικού πεδίου, δηλ. οι ταχύτητες του μέσου (νερού) όπως αυτές προκύπτουν από τις καταγεγραμμένες μέσες τιμές παροχής. Τόσο οι ταχύτητες όσο και οι αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds ακολουθούν γραμμική συμπεριφορά όπως και αναμένεται λόγω της σχέσης αναλογίας της ταχύτητας με την παροχή.

Η ταχύτητα της κεντρικής αρτηρίας λόγω και της μεγαλύτερης διατομής (8mm) διατηρεί μικρότερο εύρος τιμών αυξανόμενης της παροχής. Προκύπτει ότι στη μεγαλύτερη παροχή των 2.4ml/s αντιστοιχεί ταχύτητα περίπου 5cm/s.

Αντίθετα λόγω του ότι η ταχύτητα έχει αντίστροφα ανάλογη σχέση με τη διάμετρο ή και τη διατομή του αγωγού προκύπτει ότι οι λαγόνιες αρτηρίες που έχουν μικρότερη διάμετρο (3mm) ακολουθούν την ίδια πιο οξεία γραμμική συμπεριφορά ως προς την κεντρική αρτηρία κάτι που φαίνεται από τη μεγαλύτερη κλίση των ευθειών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το εύρος παροχών που δοκιμάστηκαν για την κεντρική αρτηρία ήταν στην περιοχή (0.8 – 2.4) ml/s που αντιστοιχεί σε ταχύτητες στο εύρος (2 – 5)cm/s και αριθμούς Reynolds (12 – 40).

Ακόμα για το λαγόνιο αγγείο-1 οι παροχές διατηρούνται στο εύρος (0.25 – 1.00) ml/s με το εύρος ταχυτήτων να βρίσκεται στο εύρος (2 – 14) cm/s και αντίστοιχα οι αριθμοί Reynolds καλύπτουν μια περιοχή (11 – 45).



Διάγραμμα A4: Χαρακτηριστικά του ρευστού κατά τη διέλευση από τα σημεία ενδιαφέροντος (Ταχύτητες – Αριθμοί Reynolds) υγειούς δοκιμίου.

Επίσης για το λαγόνιο αγγείο-2 οι παροχές διατηρούνται στο εύρος (0.25 – 1.00) ml/s με το εύρος ταχυτήτων να βρίσκεται στο εύρος (4 – 16) cm/s και αντίστοιχα οι αριθμοί Reynolds καλύπτουν μια περιοχή (12 – 50).

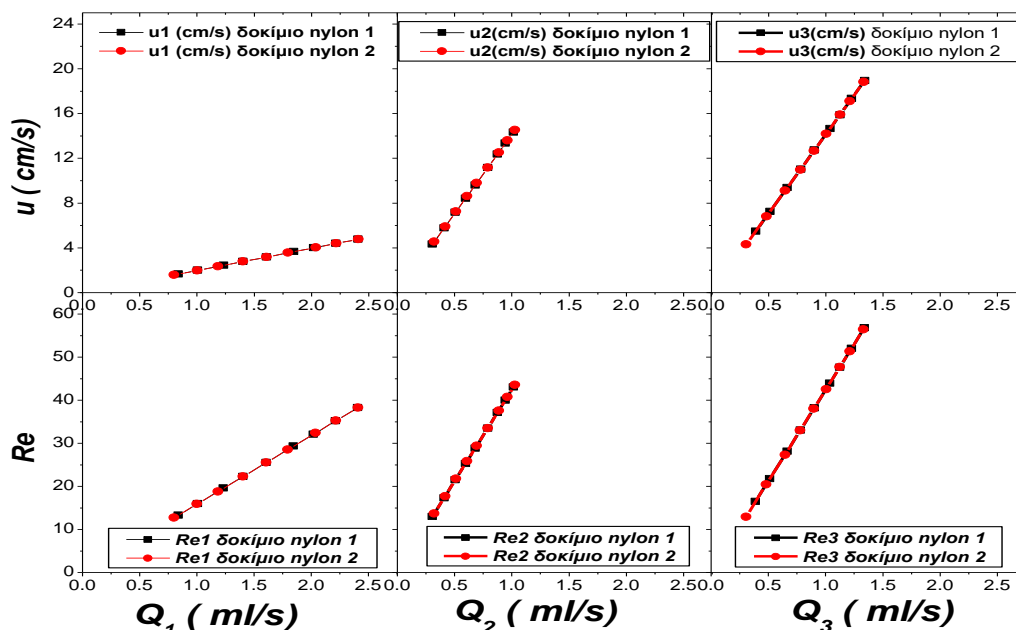
Αναφορικά με το Διάγραμμα B1 καταγράφονται συγκριτικά οι μέσες τιμές παροχής για την είσοδο της αορτής (κοιλιακή αρτηρία) και τις δύο λαγόνιες απολήξεις αυτής



για τα υγιή δοκίμια κατασκευασμένα από nylon. Στην κοιλιακή αρτηρία με τη βοήθεια του ρυθμιστή ελέγχου στροφών της αντλίας έχουν τεθεί παροχές στο εύρος (0.8 – 2.4)ml/s με βήμα 0.2 ml/s. Στο διάγραμμα δίνεται η απόκριση του συστήματος τόσο για την ίδια την κοιλιακή αρτηρία όσο και για τις λαγόνιες αρτηρίες (λαγόνια αγγεία).

Ειδικότερα αυξανομένης της παροχής φαίνεται ότι η τάση που ακολουθείται είναι περίπου γραμμική για όλες τις αρτηρίες και για τα δύο δοκίμια που ελέγχονται. Φαίνεται ότι το υλικό κατασκευής nylon των δοκιμίων δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά στις λαγόνιες αρτηρίες, κάτι που δείχνει ότι τουλάχιστον η εσωτερική κατασκευή των δοκιμίων είναι πολύ παρόμοια, μη επιφέροντας αξιοσημείωτες διαφορές στα αποτελέσματα.

Επιβεβαιώνονται οι παροχές του δοκιμίου-1 (υγειούς) στις λαγόνιες αρτηρίες με τη διαφοροποίηση στις παροχές να σχετίζονται με τη μορφολογία των λαγόνιων αγγείων και ειδικότερα τη σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ κεντρικής αρτηρίας και των δύο λαγόνιων. Επιβεβαιώνεται ότι το οδηγούμενο ρευστό παρεκκλίνει λιγότερο της αρχικής του πορείας περνώντας από το λαγόνιο αγγείο-3 προτιμώντας ά αυτή τη διαδρομή σε μεγαλύτερο βαθμό από το λαγόνιο αγγείο-2. Το αποτέλεσμα της γεωμετρίας λοιπόν των δύο αγγείων απολήξεων είναι η εμφάνιση υψηλότερης στάθμης παροχών στο λαγόνιο αγγείο-3 για όλες τις παροχές που δοκιμάστηκαν.



Διάγραμμα Β1: Χαρακτηριστικά του ρευστού κατά τη διέλευση από τα σημεία ενδιαφέροντος (Σύγκριση Ταχυτήτων – Αριθμών Reynolds μεταξύ δοκιμίων 1,2).

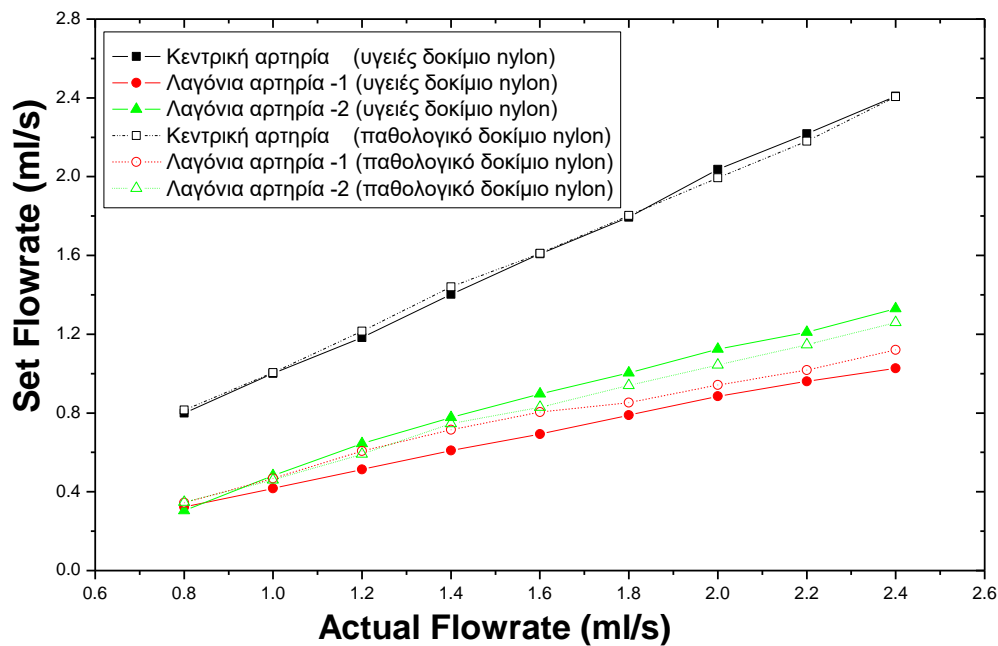
Στο Διάγραμμα Β1 δίνονται οι ταχύτητες του μέσου (νερού) και οι αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds για τα δύο υγιή δοκίμια. Τόσο οι ταχύτητες όσο και οι αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds ακολουθούν γραμμική συμπεριφορά όπως και αναμένεται λόγω της σχέσης αναλογίας της ταχύτητας με την παροχή.



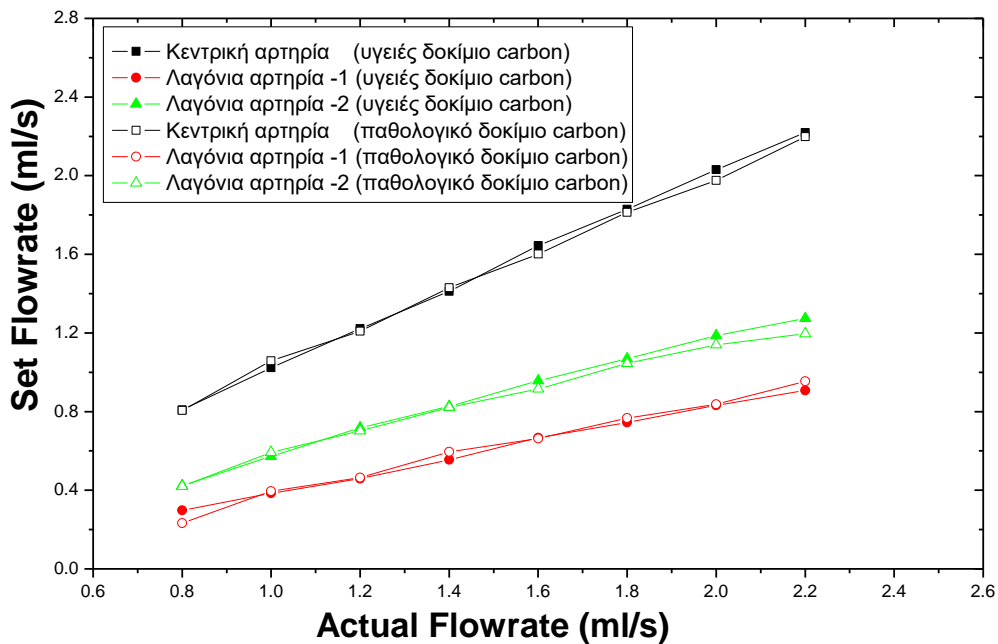
Στο Διάγραμμα C1.1 δίνονται συγκριτικά οι μετρούμενες παροχές υγειούς και παθολογικού δοκιμίου κατασκευασμένων από nylon. Προκύπτει διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του παθολογικού δοκιμίου που φέρει ανεύρυσμα. Ειδικότερα φαίνεται ότι η διαφοροποίηση των παροχών στις λαγόνιες αρτηρίες μειώνεται κάτι που στο διάγραμμα υποδεικνύεται με τη σύγκλιση των παροχών σε αυτές, ως προς τις αντίστοιχες του υγειούς δοκιμίου.

Είναι ενδιαφέρον ότι στην περίπτωση του παθολογικού δοκιμίου nylon η παροχή ισομοιράζεται στις 2 λαγόνιες αρτηρίες έως την τιμή κεντρικής αρτηρίας 1.4ml/s. Από την τιμή αυτή και άνω φαίνεται ότι η παροχή στη λαγόνια αρτηρία-2 αρχίζει να υπολείπεται λαμβάνοντας μικρότερη ποσότητα ρευστού.

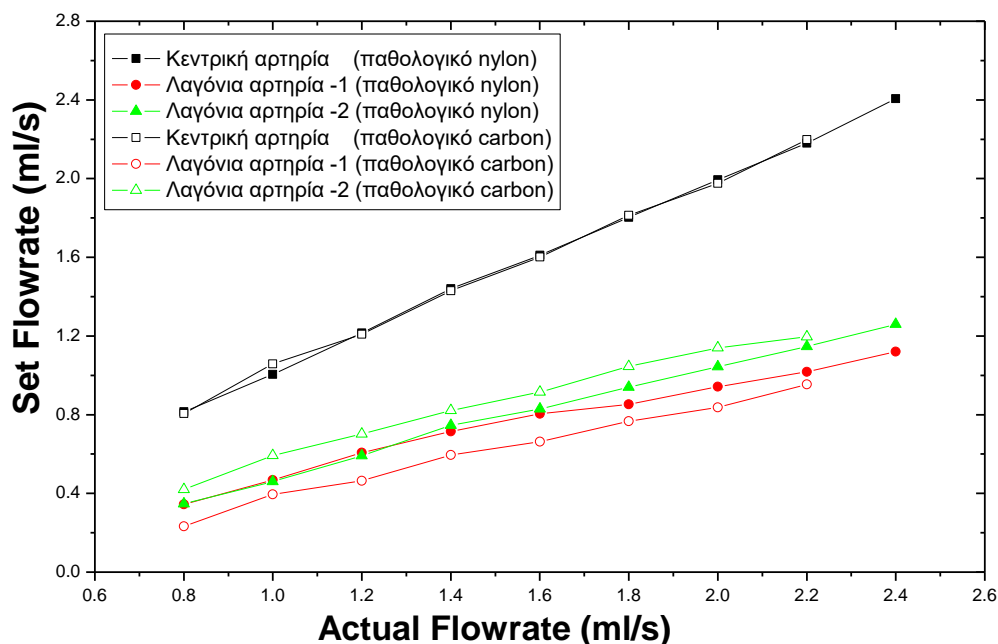
Αντίστοιχα στο Διάγραμμα C1.2 δίνεται η ίδια πληροφορία (σύγκριση υγειούς και παθολογικού) για τα δοκίμια υλικού carbon. Η παραπάνω διαπίστωση για το δοκίμιο nylon δεν επιβεβαιώνεται στην περίπτωση του δοκιμίου υλικού carbon το οποίο υπενθυμίζεται ότι διαθέτει ελαστικά τοιχώματα.



Διάγραμμα C1.1: Συγκριτική Εξέλιξη παροχών υγειούς και παθολογικού δοκιμίου nylon.



Διάγραμμα C1.2: Συγκριτική Εξέλιξη παροχών υγειούς και παθολογικού δοκιμίου carbon.

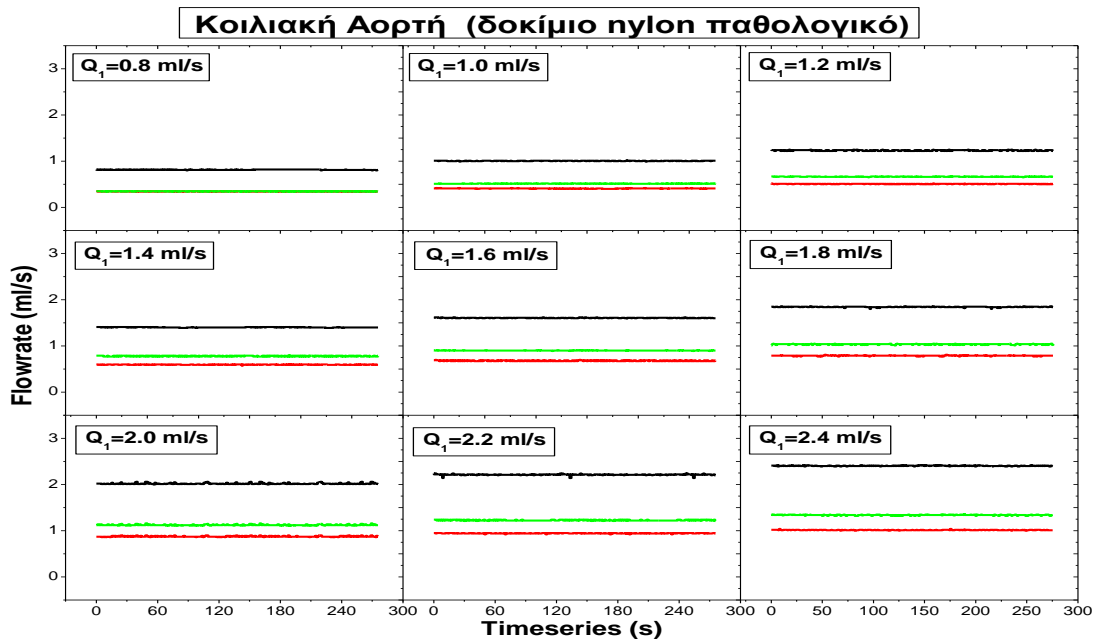


Διάγραμμα C1.3: Συγκριτική Εξέλιξη παροχών των παθολογικών δοκιμών.

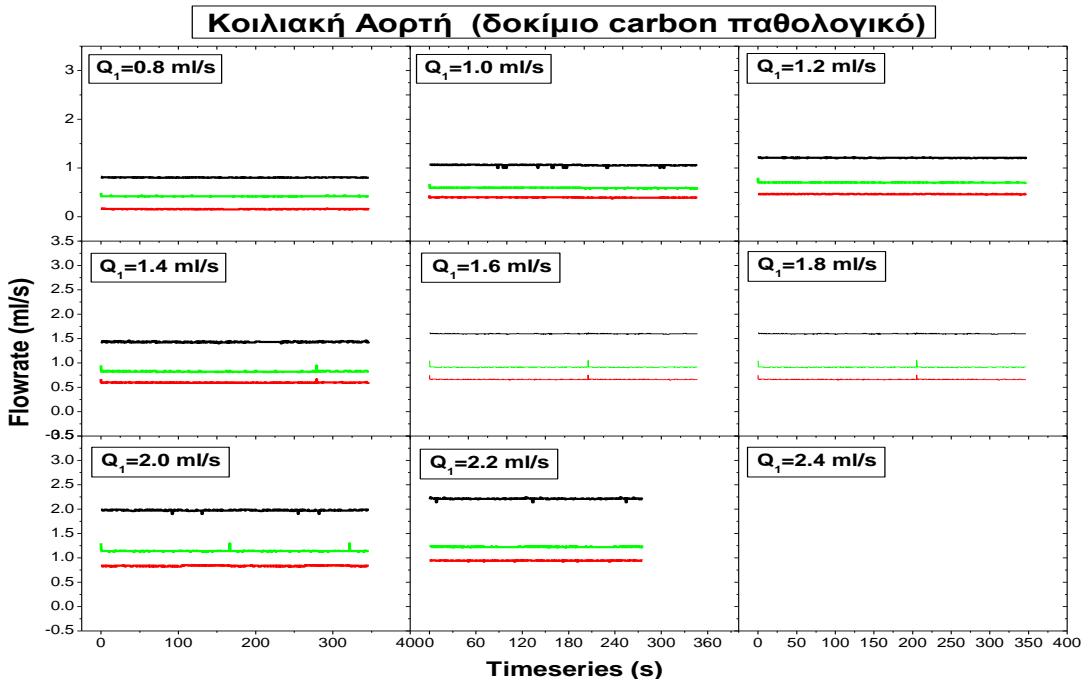
Στο Διάγραμμα C1.3 δίνεται η συμπεριφορά των παθολογικών δοκιμών των διαφορετικών υλικών (nylon και carbon). Αναφορικά με την κεντρική αρτηρία προκύπτει ότι δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες αποκλίσεις με τα δύο υλικά να συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο γενικά τρόπο. Οι διαφοροποιήσεις φαίνονται πιο χαρακτηριστικά στο διάγραμμα αυτό αναφορικά με τη συμπεριφορά των λαγόνιων αρτηριών. Έτσι για παράδειγμα φαίνεται ότι το δοκίμιο κοιλιακής αορτής υλικού



carbon (με ελαστικά τοιχώματα) συγκεντρώνει περισσότερο ρευστό στη λαγόνια αρτηρία-1 και μικρότερη παροχή στη λαγόνια αρτηρία-2 ως προς τις παροχές στις αντίστοιχες λαγόνιες αρτηρίες υλικού nylon. Αυτή η διαφοροποίηση μπορεί να σχετίζεται με το ότι λόγω της ελαστικότητας του τοιχώματος της λαγόνιας αρτηρίας -2 αυτή μπορεί να διαχειριστεί ακόμα μεγαλύτερες παροχές.



Διάγραμμα C2.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κοιλιακής Αορτής για δοκίμιο *nylon* παθολογικό.

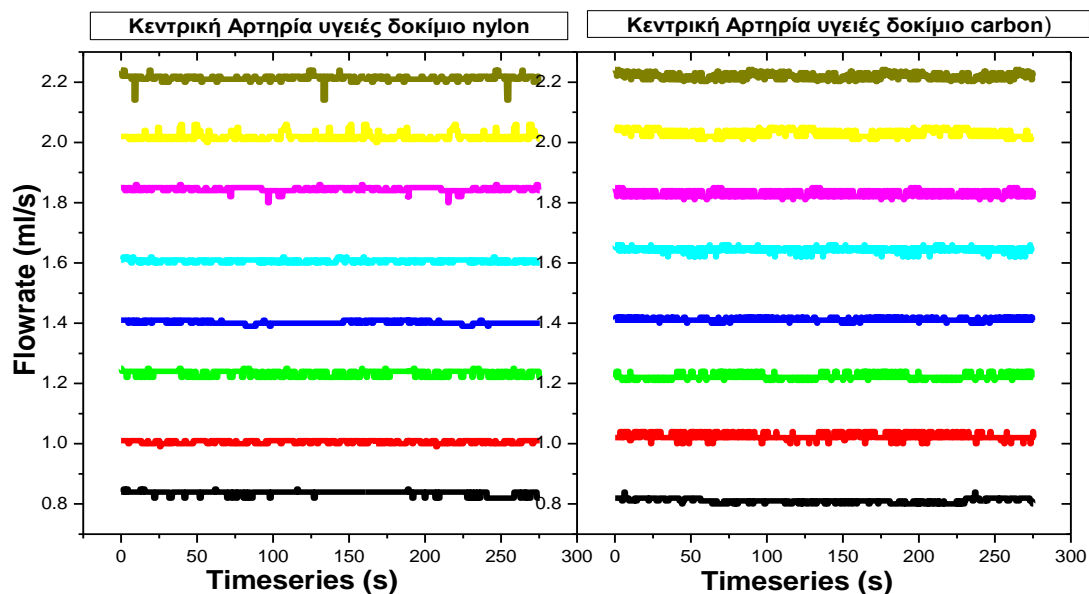


Διάγραμμα C2.2: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κοιλιακής Αορτής για δοκίμιο *carbon* παθολογικό.

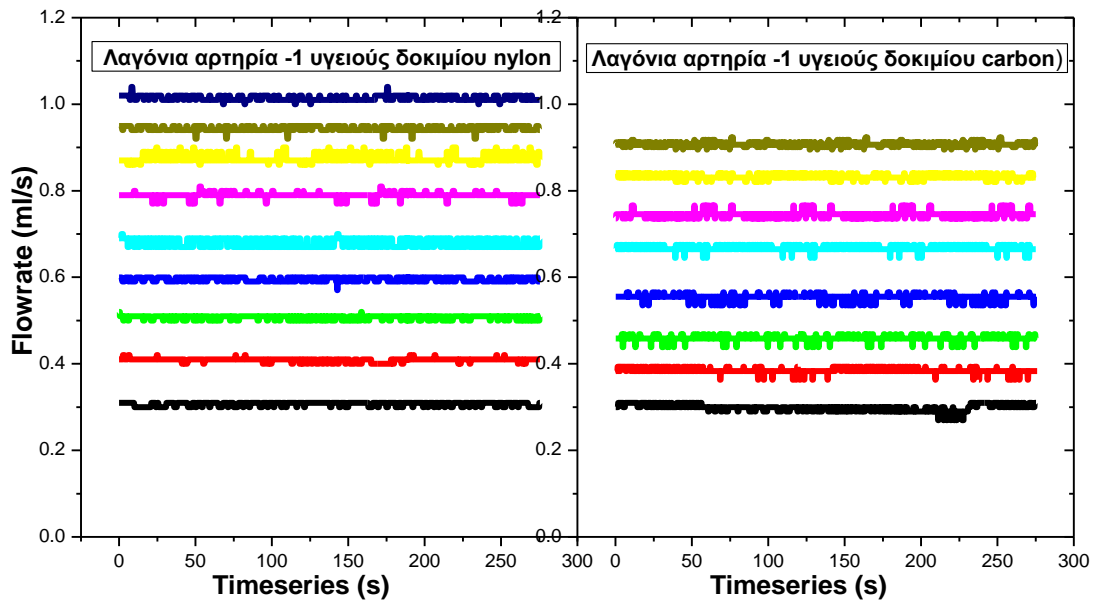


Στα Διαγράμματα C2.1, C2.2, δίνεται η εξέλιξη των χρονοσειρών κεντρικής αρτηρίας και λαγόνιων αρτηριών (αγγείων) για όλες τις παροχές που δοκιμάστηκαν στο εύρος (0.8 – 2.4)ml/s) της κεντρικής που χρησιμοποιείται πάντα ως αναφορά για τα παθολογικά δοκίμια που φέρουν το ανεύρισμα κατασκευασμένα από nylon και carbon αντίστοιχα. Οι παροχές της κεντρικής αρτηρίας (μαύρη γραμμή) διατηρούν την υψηλότερη στάθμη όπως και αναμένεται. Οι παροχές στο λαγόνιο αγγείο-3 (πράσινη γραμμή) διατηρούνται σταθερά σε υψηλότερες στάθμες ως προς τις αντίστοιχες του λαγόνιου αγγείου-2 και η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται με τη γεωμετρία του δοκιμίου. Διακρίνεται επίσης μια ελαφρά τάση διεύρυνσης της απόστασης των σταθμών μεταξύ των λαγόνιων αγγείων, αυξανομένης της παροχής της κεντρικής αρτηρίας για το δοκίμιο από nylon. Η συμπεριφορά αυτή αναγνωρίστηκε και στην περίπτωση των υγείων αγγείων. Αντίθετα στην περίπτωση του υλικού carbon αυτή η συμπεριφορά δεν φαίνεται να επιβεβαιώνεται.

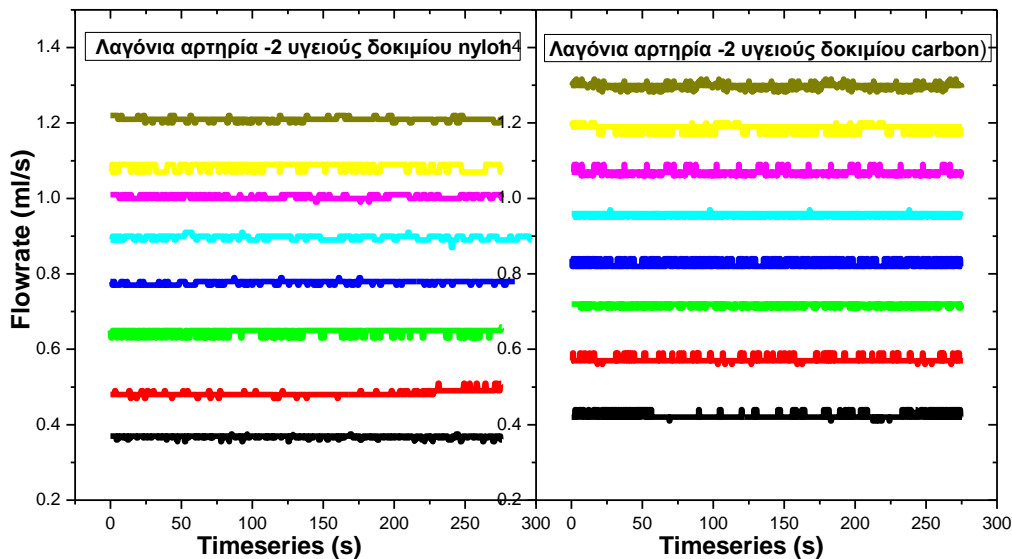
Στο διάγραμμα C3.1 δίνονται οι χρονοσειρές της κεντρικής αρτηρίας για τα υγεία δοκίμια nylon και carbon. Φαίνεται ότι γενικά επιβεβαιώνουν οι παροχές αναφοράς όπως αυτές έχουν τεθεί με το dimmer της διάταξης ελέγχου παροχής αν και σε κάποιες παροχές το δοκίμιο carbon φτάνει σε ελαφρά υψηλότερες τιμές (π.χ 1.6ml/s, 2.0ml/s).



Διάγραμμα C3.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κεντρικής Αρτηρίας για υγεία δοκίμια **nylon** και **carbon**.



Διάγραμμα C3.2: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας αρτηρίας-1 για υγειή δοκίμια nylon και carbon.



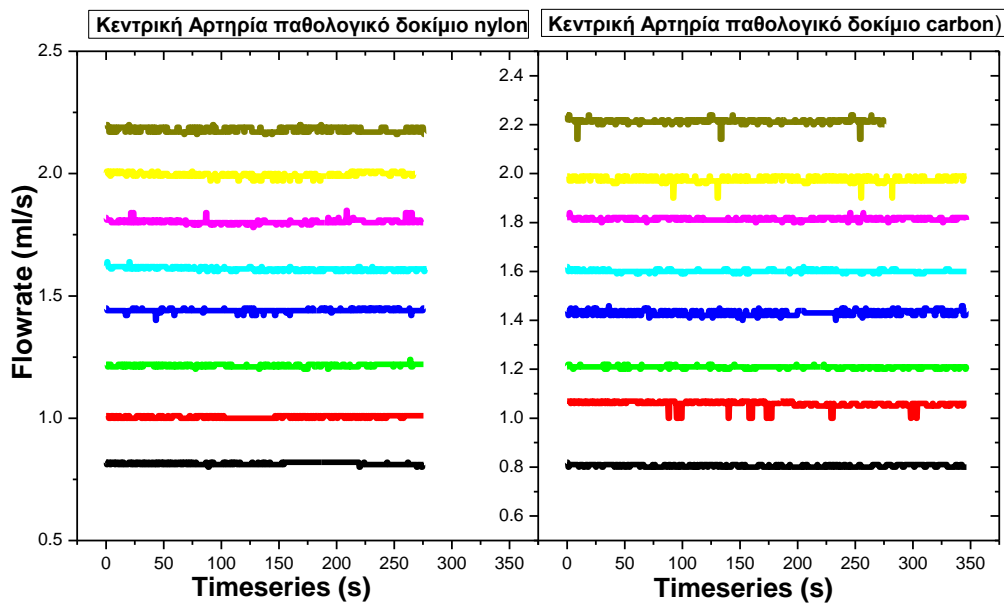
Διάγραμμα C3.3: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας αρτηρίας-2 για υγειή δοκίμια nylon και carbon.

Στο διάγραμμα C3.2 συγκρίνονται οι χρονοσειρές παροχών του λαγόνιου αγγείου-1 των δύο υγείων δοκιμίων κατασκευασμένων από nylon και carbon αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι το λαγόνιο αγγείο-1 του δοκιμίου nylon διατηρεί υψηλότερα επίπεδα παροχής σχεδόν σε όλες τις δοκιμαζόμενες παροχές της κεντρικής. Αυτή η διαπίστωση έχει γίνει ήδη από το Διάγραμμα A3.1 όπου και εκεί φάνηκε ότι το υλικό carbon βρίσκεται σε χαμηλότερες στάθμες παροχής ως προς το υλικό nylon.

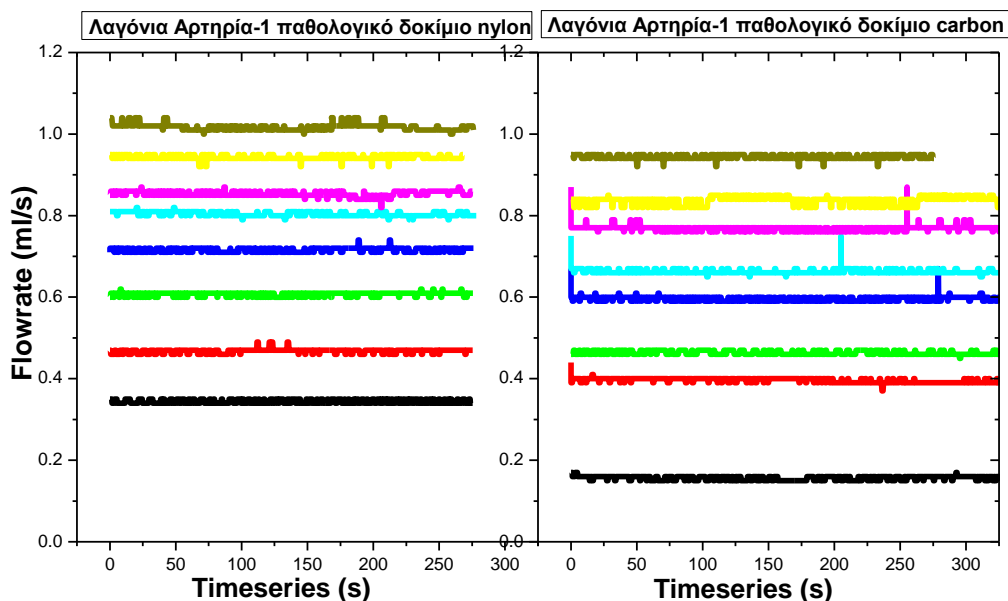
Στο διάγραμμα C3.3 συγκρίνονται οι χρονοσειρές παροχών του λαγόνιου αγγείου-2 των δύο υγείων δοκιμίων κατασκευασμένων από nylon και carbon αντίστοιχα. Είναι



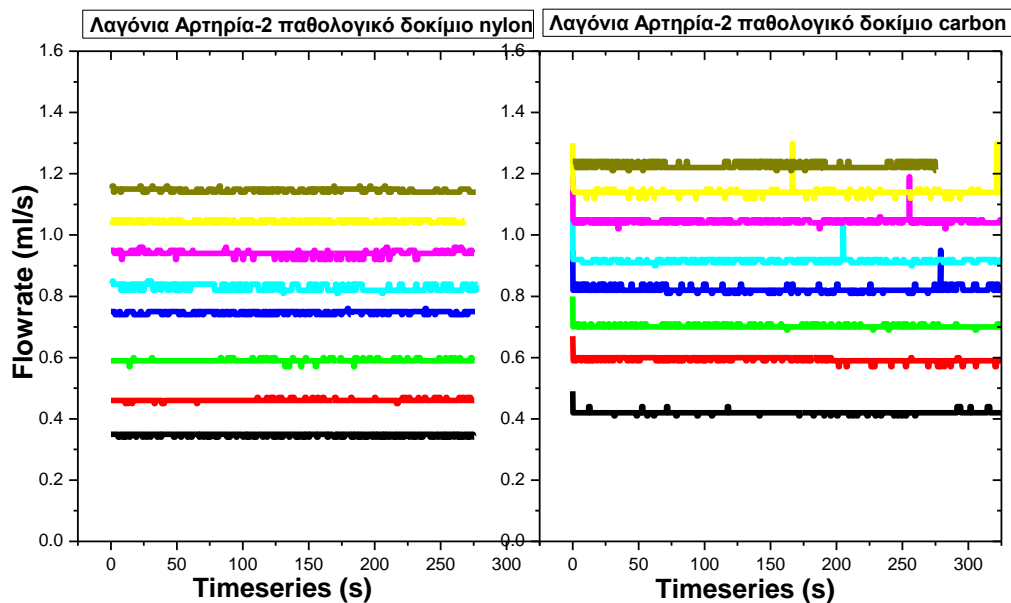
προφανές ότι το λαγόνιο αγγείο-2 του δοκιμίου nylon διατηρεί χαμηλότερα επίπεδα παροχής σχεδόν σε όλες τις δοκιμαζόμενες παροχές της κεντρικής. Μάλιστα φαίνεται ότι αυξανόμενη της παροχής στην κεντρική αρτηρία, η διαφορά παροχής στη λαγόνια αρτηρία -2 για τα δύο υλικά (nylon και carbon αντίστοιχα). Η διαφοροποίηση αυξάνεται αυξανόμενη της παροχής στην κεντρική με την παροχή της λαγόνιας αρτηρίας -2 του υλικού carbon να λαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερες τιμές παροχής ως προς το υλικό που είναι κατασκευασμένο από nylon.



Διάγραμμα D 3.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κεντρικής Αρτηρίας για παθολογικά δοκίμια *nylon* - *carbon*.



Διάγραμμα D 3.2: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας Αρτηρίας-1 για παθολογικά *nylon* - *carbon*.

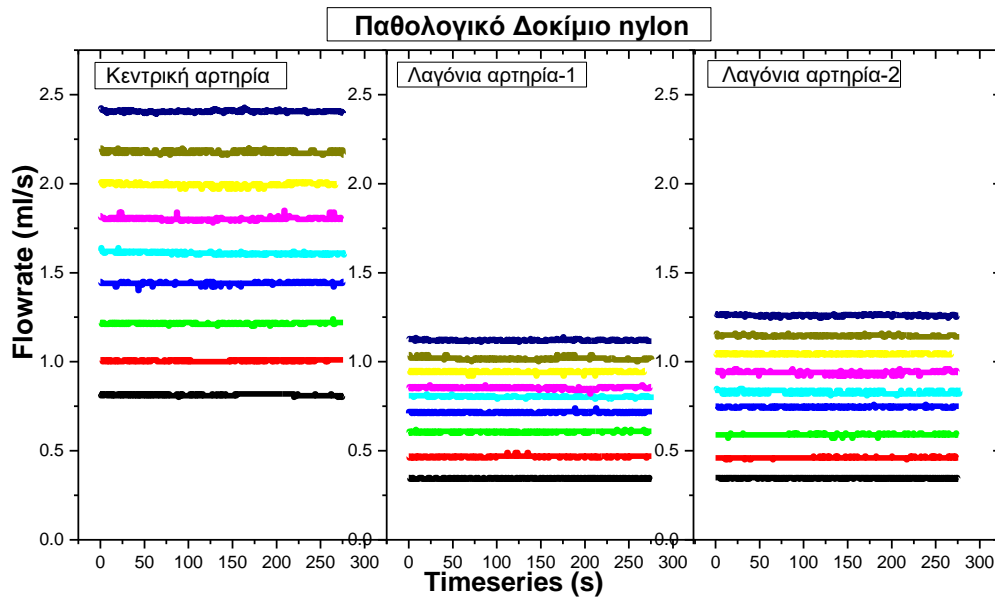


Διάγραμμα D 3.3: Εξέλιξη Χρονοσειρών Λαγόνιας Αρτηρίας-2 για παθολογικά *nylon - carbon*.

Στο Διάγραμμα D3.1 δίνονται οι χρονοσειρές παροχής της κεντρικής αρτηρίας των παθολογικών δοκιμίων από nylon και carbon αντίστοιχα. Κοινό χαρακτηριστικό στα διαφορετικά υλικά είναι η ύπαρξη μεγαλύτερων διακυμάνσεων που μπορεί να σχετίζεται με την τροποποίηση της ροής λόγω της παρουσίας του ανευρίσματος με το οποίο σχετίζεται.

Στο Διάγραμμα D3.2 δίνονται οι χρονοσειρές παροχής της Λαγόνιας αρτηρίας-1 των παθολογικών δοκιμίων από nylon και carbon αντίστοιχα. Και σε αυτές τις αρτηρίες φαίνονται πιο έντονες οι διακυμάνσεις των παροχών που καταγράφησαν. Επιπλέον στο συγκριτικό αυτό διάγραμμα φαίνεται ότι η συγκεκριμένη αρτηρία του παθολογικού carbon μπορεί να διαχειριστεί μικρότερες παροχές ρευστού σε σχέση με το αντίστοιχο nylon κάτι που υποδεικνύεται με τις χαμηλότερες στάθμες παροχής που καταγράφηκαν για το carbon.

Στο Διάγραμμα D3.3 δίνονται οι χρονοσειρές παροχής της Λαγόνιας αρτηρίας-2 των παθολογικών δοκιμίων από nylon και carbon αντίστοιχα. Και σε αυτές τις αρτηρίες φαίνονται πιο έντονες οι διακυμάνσεις των παροχών που καταγράφησαν. Σε συνέντευξη με τη συμπεριφορά των λαγόνιων αρτηριών-1 στο συγκεκριμένο διάγραμμα φαίνεται ότι η συγκεκριμένη αρτηρία-2 του παθολογικού carbon μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερες παροχές ρευστού σε σχέση με το αντίστοιχο nylon κάτι που υποδεικνύεται με τις υψηλότερες στάθμες παροχής που καταγράφηκαν για το carbon. Η συμπεριφορά αυτή δείχνει συνέπεια ως προς το νόμο της παροχής με τον τρόπο που κατανέμεται η παροχή της κεντρικής αρτηρίας στις λαγόνιες.



Διάγραμμα Ε.1: Εξέλιξη Χρονοσειρών Κοιλιακής Αορτής παθολογικού δοκιμίου nylon.

Στο Διάγραμμα Ε.1 δίνονται ενδεικτικά πάλι συγκριτικά οι χρονοσειρές παροχής στην κεντρική αρτηρία (κοιλιακής αορτής) για το παθολογικό δοκίμιο nylon. Επιβεβαιώνεται και σε αυτό το δοκίμιο η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των επιπέδων παροχής των λαγόνιων αγγείων με το λαγόνιο αγγείο-2 να διατηρείται προοδευτικά σε υψηλότερες στάθμες παροχής διευρύνοντας την απόσταση από τις αντίστοιχες του λαγόνιου αγγείου-1 με την αύξηση της παροχής της κεντρικής αρτηρίας. Συγκρίνοντας το διάγραμμα C3 με τα αντίστοιχα διαγράμματα A3, B3 των υγειών δοκιμίων φαίνεται ότι τα επίπεδα διαφορών παροχής μεταξύ των λαγόνιων αγγείων 1,2 έχουν συρρικνωθεί στην περίπτωση του παθολογικού.



5. Συμπεράσματα – Ανασκόπηση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη προσομοίωσης κοιλιακής αορτής υγειούς και παθολογικής. Ειδικότερα η αορτή απαρτίζεται από μια είσοδο κυκλοφορίας του αίματος (κεντρική αρτηρία της καρδιάς) διαμέτρου 8mm που απολήγει σε δύο αρτηρίες μικρότερης διαμέτρου 3mm. Στην περίπτωση του υγειούς δοκιμίου οι δύο αρτηρίες είχαν ίδια μορφή και διάμετρο, ενώ στην περίπτωση του παθολογικού θεωρήθηκε η δημιουργία και παρουσία κοιλότητας που συνιστά το ανεύρυσμα. Τα χαρακτηριστικά μορφολογικά στοιχεία του παθολογικού αλλά και του υγειούς δοκιμίου ελήφθησαν από αξονική τομογραφία (CT scan) και κατασκευάστηκαν από εύκαμπτο πλαστικό.

Η παραμετρική μελέτη που περιγράφηκε αποτελεί το δεύτερο στάδιο μιας συνολικότερης διερεύνησης του προβλήματος που συνίσταται στη συγκριτική μελέτη υγειούς και παθολογικής αορτής κατασκευασμένων από δύο διαφορετικά υλικά (νάιλον και συνθετικό με ανθρακονήματα) σε εύρος παροχών. Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν απιονισμένο νερό το οποίο διαθέτει φυσικές ιδιότητες παραπλήσιες του αίματος (πυκνότητα, ιξώδες). Στο προηγούμενο κεφάλαιο του εκπονήματος αυτού παρουσιάστηκαν αποτελέσματα που αφορούσαν τα δύο δοκίμια (υγείας και παθολογικό) κατασκευασμένα από συνθετικό υλικό με προσθήκη ανθρακονημάτων, ενώ καταγράφηκαν παροχές με μικρομυλίσκους στα τρία σημεία ενδιαφέροντος, ήτοι στην κεντρική αρτηρία (είσοδος ρευστού) και στις δύο λαγόνιες αρτηρίες (έξοδοι του ρευστού).

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων περιλάμβανε την ταυτόχρονη καταγραφή παροχών της κοιλιακής αορτής στις προαναφερθείσες θέσεις ενδιαφέροντος και έγινε σε μορφή χρονοσειρών σημάτων κατά τη διέλευση του ρευστού από μικρομυλίσκους, οι οποίοι παρεμβάλλονταν στη ροή των 3 κλάδων της αορτής. Κατόπιν καθορισμένης διαδικασίας και με τη χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού εξήχθησαν οι χρονοσειρές των σημάτων παροχής δίνοντας τη δυνατότητα στατιστικής ανάλυσης και επεξεργασίας (postprocessing). Υπενθυμίζεται ότι η μελέτη έγινε παραμετρικά, με την έννοια ότι δοκιμάστηκαν παροχές σε ένα εύρος (0.8 – 2.4) ml/s όπως καταγράφηκαν από την κεντρική αρτηρία, με τη βοήθεια ρυθμιστή, ενώ έγινε ταυτόχρονη καταγραφή σημάτων παροχής για ίση διάρκεια πειράματος.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα που προέκυψαν, αρχικά φαίνεται πως αυξανόμενη της παροχής η τάση που ακολουθείται είναι περίπου γραμμική για όλες τις αρτηρίες αν και στις λαγόνιες είναι εμφανής μια κόπωση αυξανόμενης της παροχής. Επιπλέον, οι μέσες τιμές παροχής της κεντρικής αρτηρίας ακολουθούν με συνέπεια εκείνες που έχουν τεθεί αντίστοιχα στο εύρος (0.8 – 2.4) ml/s ενώ διαφοροποιήσεις αναγνωρίζονται για τη συμπεριφορά των λαγόνιων αρτηριών, οι οποίες σχετίζονται με την κατασκευαστική γεωμετρία των αγγείων αυτών. Όπως αναμένεται, οι παροχές της κεντρικής αρτηρίας διατηρούν την υψηλότερη στάθμη και παράλληλα διακρίνεται μια ασθενής τάση διεύρυνσης της απόστασης των σταθμών μεταξύ των λαγόνιων αγγείων, αυξανόμενη της παροχής της κεντρικής αρτηρίας.



Τόσο οι ταχύτητες όσο και οι αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds ακολουθούν γραμμική συμπεριφορά όπως και αναμένεται λόγω της σχέσης αναλογίας ταχύτητας – παροχής. Η ταχύτητα της κεντρικής αρτηρίας λόγω και της μεγαλύτερης διατομής (8mm) διατηρεί μικρότερο εύρος τιμών αυξανόμενης της παροχής. Αντιθέτως, λόγω της αντίστροφης αναλογίας μεταξύ της ταχύτητας και της διαμέτρου ή της διατομής του αγωγού, προκύπτει ότι οι λαγόνιες αρτηρίες που έχουν μικρότερη διάμετρο (3mm) ακολουθούν την ίδια πιο οξεία γραμμική συμπεριφορά ως προς την κεντρική αρτηρία κάτι που φαίνεται από τη μεγαλύτερη κλίση των ευθειών.

Διακρίνεται μια ελαφρά τάση διεύρυνσης της απόστασης των σταθμών μεταξύ των λαγόνιων αγγείων, αυξανόμενης της παροχής της κεντρικής αρτηρίας, συμπεριφορά που αναγνωρίστηκε και στην περίπτωση των υγείων αγγείων. Φαίνεται ότι το υλικό κατασκευής των δοκιμίων δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά στις λαγόνιες αρτηρίες, κάτι που δείχνει ότι τουλάχιστον η εσωτερική κατασκευή των δοκιμίων είναι πολύ παρόμοια, μη επιφέροντας αξιοσημείωτες διαφορές στα αποτελέσματα.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abdallah D. Abi. (2009). Magneto hydrodynamics of blood flow. *MagnReson Med*.

Albrecht, T.; Bühner, C.; Fähnle, M.; Maier, K.; Platzek, D.; Reske, J. (1997). «First observation of ferromagnetism and ferromagnetic domains in a liquid metal». *Applied Physics A: Materials Science & Processing* **65**(2): 215. doi:10.1007/s003390050569. Bibcode: 1997ApPhA..65..215A.

Alexiou C., Schmid R.J., Jurgons R., Kremer M., Wanner G., Bergemann C., Huenges E., Nawroth T., Arnold W., Parak F.G., (2006). Targeting cancer cells: magnetic nanoparticles as drug carriers, *Eur Biophys J.*, **35**(5):446-50

Aminfar H., Mohammadpourfard M., Maroofiazar R. (2013). Eulerian simulation of subcooled boiling flow in straight and curved annuli, *Journal of Mechanical Science and Technology*

Armitstead J.P. και Bertram C.D. (1996). A study of the bifurcation behaviour of a model of flow through a collapsible tube, *Bulletin of Mathematical Biology*, Volume 58, Issue 4, pp 611–641

Assael Marc J.; Trusler J.P. Martin,; Tsolakis Thomas F. (1996), Thermophysical Properties of Fluids, Imperial College Press

Bashtovoy V. G., Berkovsky B. M. and Vislovich A. N., "Introduction to thermomechanics of magnetic fluids", Hemisphere, 1988.

Baskurt Oğkuz K., Meiselman Herbert J., Neu Björn, Red Blood Cell Aggregation. Taylor and Francis Group, 2011

Carlton J.M.R., Yowell C.A., Sturrock K.A., Dame J.B. (2011), Biomagnetic separation of contaminating host leukocytes from plasmodium-infected erythrocytes, *Experimental Parasitology* **97** 111–114

Chu, Steven. Critical Materials Strategy *United States Department of Energy*, December 2011. Accessed: 23 December 2011.

Cornell R. M. & Schwertmann U. 2003, The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses (second ed.), *Wiley-VCH, Weinheim*



Davidson, P. (2001). *An Introduction to Magnetohydrodynamics* (Cambridge Texts in Applied Mathematics). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511626333

Davis E. James, Gill William N, The effects of axial conduction in the wall on heat transfer with laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume Faber & S. Papell, S. (1968). On the influence of nonuniform magnetic fields on ferromagnetic colloidal sols.

Fertman V.E. (1990), *Magnetic Fluids Guidebook: Properties and Applications*, Hemisphere Publishing Co., New York]

Fraden, Jacob (2010). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 4th Ed.*. USA: Springer, σελ. 73. ISBN 1441964657.

Friman O., Cedefamn J., Lundberg P., Borga M., Knutsson H. 2001, Detection of Neural Activity in Functional MRI Using Canonical Correlation Analysis, *Magnetic Resonance in Medicine* 45:323–330

Ganguly R., Amit G. P., Swarnendu S., Puri Ishwar K., Analyzing ferrofluid transport for magnetic drug targeting, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 289, 2005, Pages 331-334, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.094>.

Grave E. De, Bowen L.H. and Weed S.B. 2005, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*

Habibi M.R. & Ghasemi M., (2011). NUMERICAL STUDY OF MAGNETIC PARTICLES CONCENTRATION IN BIOFLUID (BLOOD) UNDER THE INFLUENCE OF HIGH GRADIENT MAGNETIC FIELD IN MICROCHANNEL, *Conference: VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, DOI: 10.7712/100016.1871.9717

Haik Y., Chen J.C., Pai V.M., Development of bio-magnetic fluid dynamics, in: S.H. Winoto, Y.T. Chew, N.E. Wijesundera (Eds.), *Proceedings of the IX International Symposium on Transport Properties in Thermal Fluids Engineering*, Singapore, Pacific Center of Thermal Fluid Engineering, Hawaii, USA, June 25–28, 1996, pp. 121–126.

Ichioka, S., Iwasaka, M., Shibata, M. et al. *Med. Biol. Eng. Comput.* Kluwer Academic Publishers, (1998) 36: 91. <https://doi.org/10.1007/BF02522863>



Ichioka, S. , Minegishi, M. , Iwasaka, M. , Shibata, M. , Nakatsuka, T. , Harii, K. , Kamiya, A. and Ueno, S. (2000), High-intensity static magnetic fields modulate skin microcirculation and temperature in vivo. *Bioelectromagnetics*, 21: 183-188. doi:10.1002/(SICI)1521-186X(200004)21:3<183::AID-BEM5>3.0.CO;2-5

Issue 3, 1970, Pages 459-470, ISSN 0017-9310, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(70\)90143-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(70)90143-2).

JuhaPyrhönen, Tapani Jokinen, ValériaHrabovcová (2009). Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley and Sons, σελ. 232. ISBN 0-470-69516-1

Kinouchi Y, Yamaguchi H, Tenforde TS (1996) Theoretical analysis of magnetic field interactions with aortic blood flow. *Bioelectromagnetics* 17: 21–32

Krakov, M &Nikiforov, I.V. (2002). To the influence of uniform magnetic field on thermomagnetic convection in square cavity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 252. 209-211. 10.1016/S0304-8853(02)00653-4.

Lin, T., &Kandlikar, S.G. (2011). A Theoretical Model for Axial Heat Conduction Effects During Single-Phase Flow in Microchannels.

Lou X.Y. &PedeleyT.J., (1996).Steady and unsteady flows in collapsible channels, *Advances in Biomechanics*

Lou X.Y. &PedeleyT.J. (1993). The effects of wall inertia on flow in a 2-D collapsible channel, *Journal of Fluid Mechanics* 363:253-280, DOI: 10.1017/S0022112098001062

Lubbe A. Alexiou C, Bergemann C., (2001). Clinical applications of magnetic drug targeting, *J Surg Res.*;95(2):200-6.

Maranzana, Gaël& Perry, Isabelle &Maillet, Denis. (2004). Mini- and micro-channels: Influence of axial conduction in the walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer - INT J HEAT MASS TRANSFER*. 47. 3993-4004. 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.016.

Nakayama Y., Boucher R. F., Introduction to Fluid Mechanics, Butterworth-Heinemann, Pages xi-xii, 1998, ISBN 9780340676493, <https://doi.org/10.1016/B978-034067649-3/50002-6>.

Neuringer,Joseph L., Rosensweig,Ronald E., Ferrohydrodynamics, The Physics of Fluids, American Institute of Physics, doi: 10.1063/1.1711103, 1964



Pankhurst, Connolly, Jones, & Dobson 2003, Influence of magnetic iron oxide nanoparticles on red blood cells and Caco-2 cells, *Advances in Bioscience and Biotechnology*, Vol.1 No.5

Pauling L., Coryell C. D. (1936), The magnetic properties and structure of hemoglobin, oxyhemoglobin and carbonmonoxy hemoglobin, in: *Proceedings of the National Academy of Science*, 22, pp. 210–216

Ruenraroengsak P., Cook JM, Florence AT., (2009). Nanosystem drug targeting: Facing up to complex realities, *J Control Release*. 15;141(3):265-76. doi: 10.1016/j.jconrel.2009.10.032.

Reynolds, O. (1883), *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 174, 935-982, <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/174/935>

Rosensweig, Ronald. (1985). *Ferrohydrodynamics*. 10.1063/1.1711103.

Scherer, C. and Figueiredo Neto, A. M. (2005). «Ferrofluids: Properties and Applications». *Brazilian Journal of Physics* 35 (3A): 718–727. doi:10.1590/S0103-97332005000400018. Bibcode: 2005BrJPh..35..718S.

Sperber, D.; Oldenbourg, R.; Dransfeld, K. (1984), Magnetic field induced temperature change in mice, AA(Fakultät für Physik der Universität, Konstanz), AB(Fakultät für Physik der Universität, Konstanz), AC(Fakultät für Physik der Universität, Konstanz), *Naturwissenschaften*, Volume 71, Issue 2, pp.100-101, SPRINGER, DOI:10.1007/BF01156362

Stokes, G.G. (1851) On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Part II, 9, 8-106.

Takeuchi T., Mizuno T., Yamagishi A., Higashi T., Date M. (1995), Orientation of red blood cells in high magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 140–144 (2)

Tiselj, Iztok & Hetsroni, G & Mavko, B & Mosyak, A & Pogrebnyak, Elena & Segal, Z. (2004). Effect of axial conduction on the heat transfer in micro-channels. *International*



Journal of Heat and Mass Transfer. 47. 2551-2565.
10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.01.008.

Tzirtzilakis, E.E. (2005) A Mathematical Model for Blood Flow in Magnetic Field.
Physics of Fluids, 17, 1-15.

<https://doi.org/10.1063/1.1978807>

Tzirtzilakis, E. E. (2015). Biomagnetic fluid flow in an aneurysm using
ferrohydrodynamics principles. Physics of Fluids. 061902. 10.1063/1.4922757.

US Patent # 3215572 filed Oct 9, 1963 <https://www.google.com/patents/US3215572>

Voit, Kim and Zapka. «Magnetic behavior of coated superparamagnetic iron oxide
nanoparticles in ferrofluids». *NCBI. Pubmed*. Ανακτήθηκε στις 2 Ιουλίου 2014.

wiseGEEK website «What are neodymium magnets?». Conjecture Corp. 2011.

Walter T. Benecki «The Permanent Magnet Market - 2015» (PDF). *Magnetics 2013
Conference*. Magnetics 2013 Conference. February 7, 2013

Δρ. Γεώργιος Βλαστός , Εισαγωγή στην βιοϊατρική μηχανική Μάθημα ETY-494