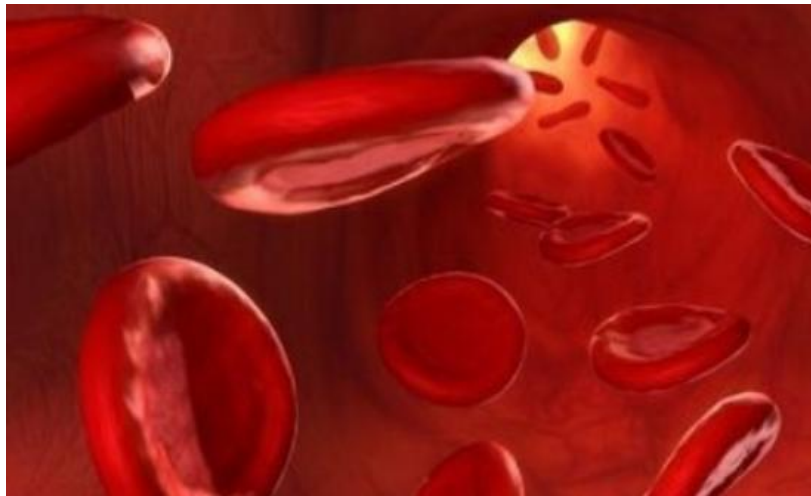




Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εξομοίωση της Ροής του Αίματος σε Ανεύρυσμα
Κατιούσας Αορτής»



Συντάξας: Γεώργιος Κουφόπουλος
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Μεταξά

Ηράκλειο 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια μου Ελένη Μεταζά για τη συνεργασία μας όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Επίσης, ευχαριστώ την οικογένεια μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαίτερα την αδερφή μου, Στέλλα, για την πολύτιμη βοήθεια της κατά την εκπόνηση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
Λέξεις – Κλειδιά.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1. ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ.....	6
1.1 Στοιχεία Ρευστομηχανικής	8
1.2 Εφαρμογές της Ρευστομηχανικής	10
1.3 Υπολογιστική Ρευστομηχανική.....	16
2. ΑΝΕΥΡΥΣΜΑ ΚΑΤΙΟΥΣΑΣ ΑΟΡΤΗΣ.....	18
2.1 Αίμα.....	19
2.2 Αιμοδυναμική.....	23
2.3 Κατιούσα Αορτή	26
2.4 Ανεύρυσμα	28
2.5 Ανεύρυσμα Κατιούσας Αορτής.....	31
2.6 Ενδοαυλικός Θρόμβος.....	38
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	42
3.1 Μεθοδολογία	42
3.1.1 Εξισώσεις Navier – Stokes	42
3.1.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	43
3.1.3 Λογισμικό LISA	44
3.2 Εφαρμογή – Αποτελέσματα	46
3.2.1 Παραδοχές.....	46
3.2.2 Διαδικασία επίλυσης	48
3.2.3 Εξεταζόμενα σενάρια και επίλυση τους.....	55
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας τομέας που έχει εξελιχθεί σημαντικά χάρη στην ραγδαία αύξηση των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι η μελέτη των ιδιοτήτων των ρευστών. Με την υπολογιστική ρευστομηχανική κατέστη δυνατή η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν μία μεγάλη γκάμα μηχανικών και κατασκευαστικών προβλημάτων. Με την υποδιαίρεση του προβλήματος σε διακριτά διαδοχικά στοιχεία εξομοιώνεται η ροή του αντίστοιχου ρευστού έχοντας κατάλληλα παραμετροποιήσει το αντίστοιχο λογιστικό πρόγραμμα. Ένα από τα σημαντικότερα ρευστά είναι το αίμα και ένα από τα πεδία εφαρμογής της υπολογιστικής ρευστομηχανικής η μελέτη της ροής του εντός του ανθρώπινου κυκλοφορικού συστήματος. Στόχος αυτού είναι η κατανόηση των λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος και οι μηχανισμοί εκδήλωσης των διαφόρων παθήσεων.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξομοιώθηκε με τη χρήση του λογισμικού LISA έκδοση 7.5.1 η ροή του αίματος στην είσοδο γεωμετρικού μοντέλου που προσομοιάζει την είσοδο ενός ανευρύσματος αορτής. Στόχος είναι να εντοπισθούν τα σημεία και οι προϋποθέσεις σχηματισμού στροβιλισμών στη ροή, οι οποίοι σχετίζονται με το σχηματισμό θρόμβων εντός του ανευρύσματος. Αυτό το φαινόμενο καθιστά το ανεύρυσμα διπλά επικίνδυνο, και λόγω της πιθανής ρήξης του και λόγω σχηματισμού θρόμβων που μπορεί να προκαλέσουν εμβολές στα αγγεία.

Λέξεις – Κλειδιά

Αίμα, Ανεύρυσμα, Κατιούσα Αορτή, Θρόμβος, Στροβιλισμός Αίματος, Υπολογιστική Ρευστομηχανική, LISA, Εξισώσεις Navier - Stokes

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

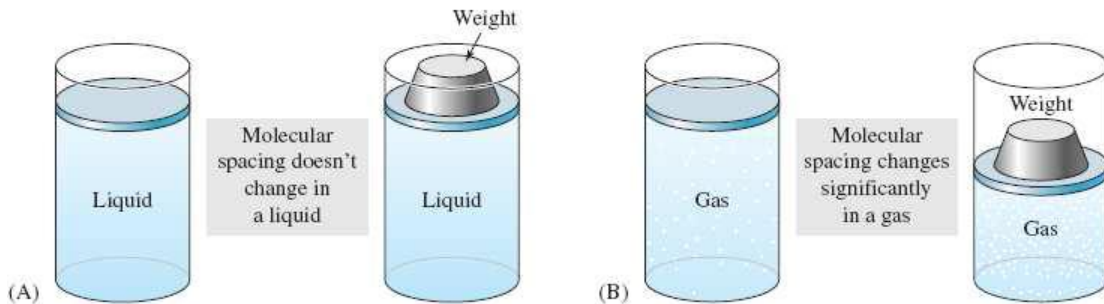
Η ανθρώπινη αναγκαιότητα για συνεχή αύξηση του προσδόκιμου ζωής και της πρόληψης και θεραπείας των ασθενειών καθιστά επιτακτική τη μελέτη και συστηματικοποίηση με ποσοτικούς όρους των βιολογικών φαινομένων. Έτσι η γνώση που έχει αποκτηθεί από επιστήμες, όπως η Μηχανική και η Πληροφορική, επιχειρείται να αξιοποιηθεί και να ενσωματωθεί στην Ιατρική για την κατανόηση των μηχανισμών του ανθρώπινου σώματος, ώστε οι ζωτικές διεργασίες και τα προβλήματα τους να μοντελοποιηθούν και να είναι προβλέψιμη η μελλοντική εξέλιξη τους.

Σημαντικό τμήμα του ανθρώπινου οργανισμού αποτελείται από υγρά. Η κίνηση τους και οι αλληλεπιδράσεις τους στο ανθρώπινο σώμα γίνεται προσπάθεια να γίνουν κατανοητές και να μοντελοποιηθούν μέσω της ενσωμάτωσης της Ρευστομηχανικής στην Ιατρική. Έννοιες όπως οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ενέργειας, της ορμής, η μελέτη των ιδιοτήτων των στερεών που περιβάλλουν τα ρευστά, οι ιδιότητες των ίδιων των ρευστών και σειρά άλλων φυσικών μεγεθών και εξισώσεων εξειδικεύονται ώστε να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη των ρευστών του σώματος (π.χ. αίμα).

Στην παρούσα εργασία, προσεγγίζοντας το αίμα ως ισοτροπικό και ασυμπίεστο ρευστό, μελετάται η επίδραση που έχει στα χαρακτηριστικά της ροής του ο σχηματισμός ανευρύσματος στην κατιούσα αορτή. Με τη χρήση του λογισμικού LISA μοντελοποιούνται διατομές του ανευρύσματος, ορίζονται οι απαραίτητες οριακές συνθήκες και εξομοιώνεται η ροή του αίματος σε αυτές. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στη διερεύνηση των συνθηκών σχηματισμού στροβιλισμών στο σημείο διεύρυνσης της αορτής λόγω του ανευρύσματος.

1. ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

Ως «ρευστά» χαρακτηρίζονται τα υλικά τα οποία δε διατηρούν τη μορφή τους, αλλά παίρνουν το σχήμα του μέσου που τα φέρει ή περιέχει. Δηλαδή, είναι τα υγρά και τα αέρια σώματα, τα οποία σε αντίθεση με τα στερεά, δεν διατηρούν, στη θερμοκρασία αναφοράς, το σχήμα τους σταθερό. Η διάκριση των ρευστών σε υγρά και αέρια βασίζεται στη διατήρηση της πυκνότητας τους κατά τη μεταβολή της πίεσης τους. Τα υγρά είναι πρακτικά «ασυμπίεστα», έχουν δηλαδή σταθερό όγκο ανά μονάδα μάζας, δηλαδή η πυκνότητα τους είναι ανεξάρτητη από την πίεση. Αντίθετα τα αέρια είναι «συμπιεστά», δηλαδή η πυκνότητα τους μεταβάλλεται κατά τη μεταβολή της πίεσης τους [1,2].



Διαφορά Υγρού με Αέριο

Πολύ μεγάλο ποσοστό των στοιχείων που μας περιβάλλουν και αλληλεπιδρούμε με αυτά χαρακτηρίζονται ως ρευστά. Ξεκινώντας από τον άνεμο και το νερό στη φύση και καταλήγοντας στα συστήματα κλιματισμού και εξαερισμού, τους αγωγούς ύδρευσης και αποχέτευσης και την κίνηση πλοίων και αεροπλάνων, κατανοούμε τη σημαντικότητα κατανόησης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ρευστών. Περνώντας από την παρατήρηση της φύσης στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων των ρευστών σε πληθώρα τεχνικών εφαρμογών, προκύπτει η ανάγκη για ακριβή μαθηματική έκφραση των ιδιοτήτων τους. Αυτό ακριβώς είναι το αντικείμενο της ρευστομηχανικής.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο τρίτο, μαζί με τον αέρα και το νερό, από τα κύρια ρευστά για τη ζωή, το αίμα. Το αίμα είναι ένα ιδιαίτερο ρευστό λόγω της μεγάλης σημασίας του για τα έμβια όντα και των πολλαπλών λειτουργιών που επιτελεί για τον οργανισμό. Ακριβώς για αυτό το λόγο είναι σημαντική η ακριβής κατανόηση και μαθηματική έκφραση της συμπεριφοράς του. Αυτό είναι και ένα από τα νεότερα πεδία ενασχόλησης των μηχανικών, η βιορευστομηχανική. Ως συνέχεια της κατανόησης και αριθμοποίησης των ζητημάτων, στόχος είναι η ανάπτυξη κατάλληλων διαγνωστικών εργαλείων και τεχνικών ή συσκευών αποκατάστασης υψηλής τεχνολογικής στάθμης.

1.1 Στοιχεία Ρευστομηχανικής

Οι ιδιότητες των ρευστών ακολουθούν τους ίδιους φυσικούς νόμους που διέπουν το σύνολο της ύλης. Η ροή ενός ρευστού χαρακτηρίζεται κύρια από την εξίσωση διατήρησης της μάζας (εξίσωση της συνέχειας), η οποία περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας, και την εξίσωση διατήρησης της ορμής.

Σε ένα διαφορικό υλικό όγκο ελέγχου $\Delta x \Delta y \Delta z$, το ρευστό δύναται να θεωρηθεί ως συνεχές μέσο [3]. Ο όγκος ελέγχου δεν παραμορφώνεται στο χρόνο. Τότε, οποιαδήποτε διαφορά παρατηρείται μεταξύ της εισερχόμενης και της εξερχόμενης μάζας στο όγκο αυτό προκύπτει λόγω μεταβολής της πυκνότητας εντός αυτού. Η Αρχή Διατήρησης της Μάζας καταγράφεται ως εξής:

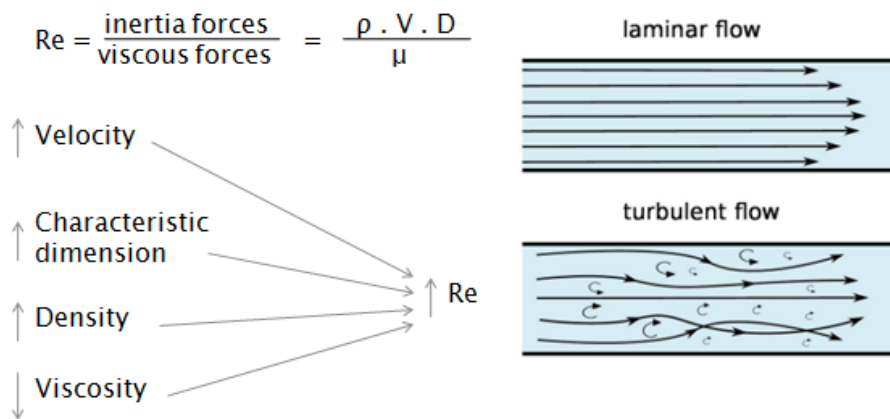
$$\{\text{Ογκομετρικός διαφορικός ρυθμός συσσώρευσης της μάζας}\} = \{\text{Ρυθμός εισερχόμενης μάζας}\} - \{\text{Ρυθμός εξερχόμενης μάζας}\} = \{\text{Καθαρός ογκομετρικός διαφορικός ρυθμός εκροής μάζας}\}$$

Ακολουθως, για τον ίδιο όγκο, η μεταβολή της ορμής διανυσματικά ισούται με τη συνισταμένη των ασκούμενων δυνάμεων στο σύνολο των μορίων του όγκου. Το ίδιο ισχύει και για το κάθε μόριο – σημείο ξεχωριστά. Η Αρχή Διατήρησης της Ορμής εκφράζεται ως εξής:

$$\{\text{Ρυθμός αύξησης της γραμμικής ορμής ανά μονάδα όγκου}\} = \{\text{Συνισταμένη των εκ πίεσεως δυνάμεων που ασκούνται ανά μονάδα όγκου}\} - \{\text{Συνισταμένη των ιξωδών επιφανειακών δυνάμεων («τριβή»: αντίσταση στη ροή) που ασκούνται ανά μονάδα όγκου}\} + \{\text{Συνισταμένη των σωματικών δυνάμεων που ασκούνται ανά μονάδα όγκου}\}$$

Τέλος ισχύει και η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας, δηλαδή οποιαδήποτε μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ισούται με το σχετιζόμενο έργο που απαιτήθηκε ή παράχθηκε. Ή αλλιώς, το άθροισμα της κινητικής ενέργειας και το ενεργειακό δυναμικό παραμένουν σταθερά.

Όταν το ρευστό κινείται ομοιόμορφα στο χώρο και το χρόνο σαν σε παράλληλες στοιβάδες, η ροή ονομάζεται στρωτή. Αυτό σημαίνει ότι οι τροχιές είναι παράλληλες και τα γειτονικά μόρια ή σωματίδια έχουν την ίδια ταχύτητα, ως προς το μέγεθος και τη διεύθυνση. Όταν αυξάνεται η ταχύτητα ή επέρχεται κάποια σημαντική μεταβολή, η ροή εμφανίζει διαταραχές με τη μορφή τοπικών περιδινήσεων (swirl). Αυτή είναι η τυρβώδης ροή.



Στρωτή και Τυρβώδης ροή [<http://www.nuclear-power.net/>]

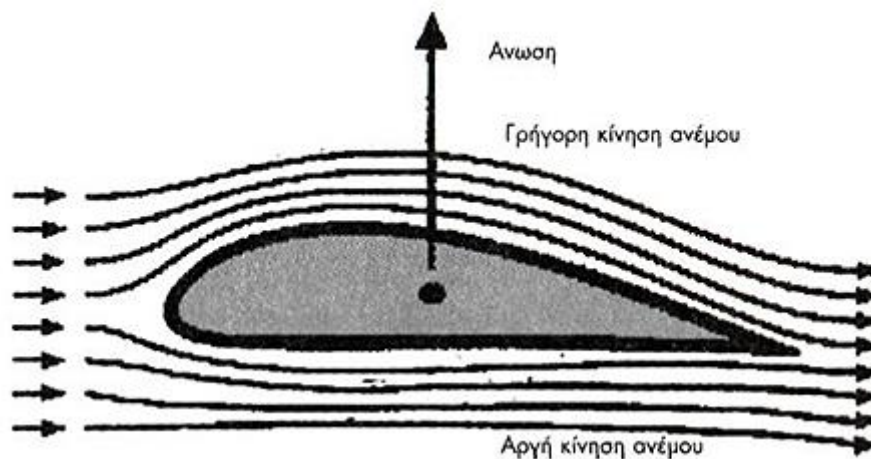
Ο χαρακτήρας της ροής εξαρτάται από το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις του ιξώδους και εκφράζεται με τον αριθμό Reynolds, $Re = F_{\text{αδράνειας}} / F_{\text{ιξώδους}} = \rho v d / \mu$, όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, v η μέση ταχύτητα ροής, d η διάμετρος για ροή σε σωλήνα και μ ο συντελεστής ιξώδους. Για ροή εντός κυλινδρικών σωλήνων, η κρίσιμη τιμή Re είναι το 2100, δηλαδή το άνω όριο τιμής του Re , για το οποίο διατηρείται η ροή στρωτή (laminar flow). Αντίστοιχα, όταν $2100 < Re < 4000$ έχουμε μεταβατική ροή και όταν $Re > 4000$ έχουμε τυρβώδη ροή (turbulent flow) [3]. Σε αγωγούς με άλλη γεωμετρία (τετράγωνη εγκάρσια τομή, αγωγούς με ημιτονοειδή μορφή τοιχώματος, πορώδη μέσα κλπ) η κρίσιμη τιμή του Re είναι πολύ διαφορετική.

Στα ρευστά εντός οποιουδήποτε κλειστού αγωγού ή δοχείου, ισχύει και η αρχή του Pascal σύμφωνα με την οποία η πίεση που ασκείται από κάποιο αίτιο σε ένα σημείο ενός ομογενούς ρευστού μεταδίδεται αναλλοίωτη σε κάθε σημείο του ίδιου ρευστού και στα τοιχώματα του δοχείου που το περιέχει.

1.2 Εφαρμογές της Ρευστομηχανικής

Πάρα πολλά, αν όχι όλα, ζητήματα της επιστήμης εμπεριέχουν άμεσα ή έμμεσα την αλληλεπίδραση κάποιου υλικού με ρευστό, για τη μεταφορά ενέργειας ή μάζας. Η ρευστομηχανική καλείται, ως κλάδος της Φυσικής, να ερμηνεύσει, εκφράσει αριθμητικά και προβλέψει τη συμπεριφορά των ρευστών υπό τις συνθήκες που αυτά ενεργούν. Στην ενότητα αυτή δίνονται συνοπτικά παραδείγματα εφαρμογών της ρευστομηχανικής σε διάφορους κλάδους της επιστήμης, με σκοπό να τονιστεί η μεγάλη σημασία της κατανόησης των ιδιοτήτων τους.

Στο πεδίο της ενέργειας, κάθε μορφή ενέργειας επηρεάζεται άμεσα από κάποιο ρευστό. Πιο εύκολα αντιληπτές είναι οι περιπτώσεις της υδροηλεκτρικής και της αιολικής ενέργειας. Η σχεδίαση των υδροστροβίλων απαιτεί την κατανόηση των ιδιοτήτων του προσπίπτοντος ύδατος. Πρέπει να γίνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση της ενέργειας και η ροή να μη προκαλεί έντονες καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη, ιδιαίτερα όταν εγκλωβίζεται αέρας. Στις ανεμογεννήτριες και στα αεροπλάνα μελετάται η γεωμετρία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια.

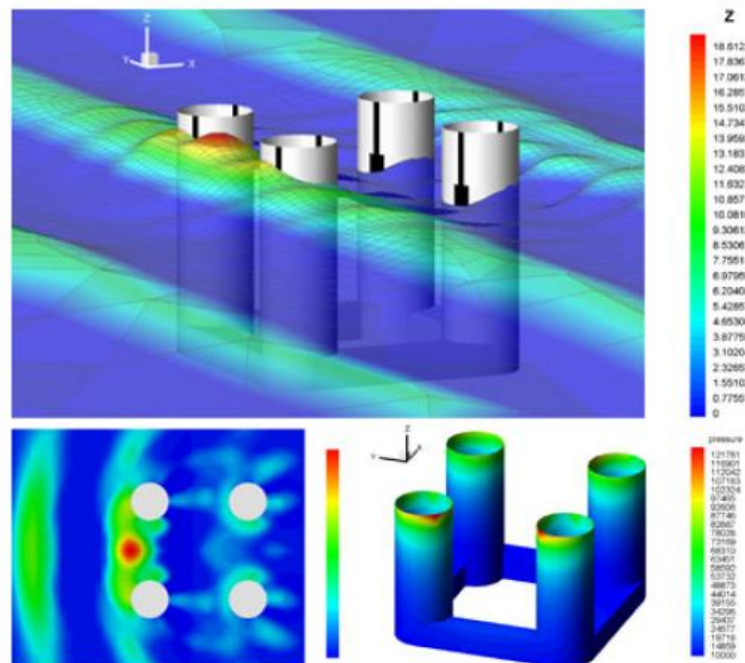


Ροή αέρα γύρω από πτερύγιο

Στις μηχανές εσωτερικής καύσης, ο τρόπος έγχυσης του μίγματος αέρα – καυσίμου επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και το προσδόκιμο ζωής. Στους αεριοστροβίλους και ατμοστροβίλους το υψηλής πίεσης ρευστό προσπίπτει στα

περυγία τους. Ταυτόχρονα, αέρα, λάδι ή νερό, ρέει σε ένα δίκτυο αγωγών εξωτερικά τους για τη ψύξη τους, επηρεάζοντας το κόστος, την ισχύ και την αντοχή της κατασκευής. Στα ηλιοθερμικά συστήματα, η μεταφορά της ροής γίνεται μέσω της ροής του ψυκτικού μέσου. Ακόμα και στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, όπου κανένα ρευστό δε συμμετέχει στη μετατροπή ενέργειας, η κίνηση του αέρα στο πίσω μέρος ψύχει τους ημιαγωγούς και αυξάνει την απόδοση, ενώ μη απορροή της βροχής σε ψυχρά κλίματα μπορεί σε συνδυασμό με παγετό να προκαλέσει φθορές.

Η κίνηση του νερού εμφανίζεται σε πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών. Η μελέτη της χρησιμοποιείται στη σχεδίαση σωληνώσεων για τα δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης, για το σύστημα πρόωσης πλοιαρίων, για τη μελέτη λιμναίων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων και την επίδραση της μεταφοράς ωφέλιμων και επιβλαβών ουσιών. Επίσης, μελετάται η καταπόνηση που προκαλεί το νερό σε πυλώνες γεφυρών, πλατφόρμες πετρελαίου, λιμενικά έργα και κοίτες ποταμών, ώστε να υπολογιστούν οι απαιτούμενες εδράσεις και ενισχύσεις.



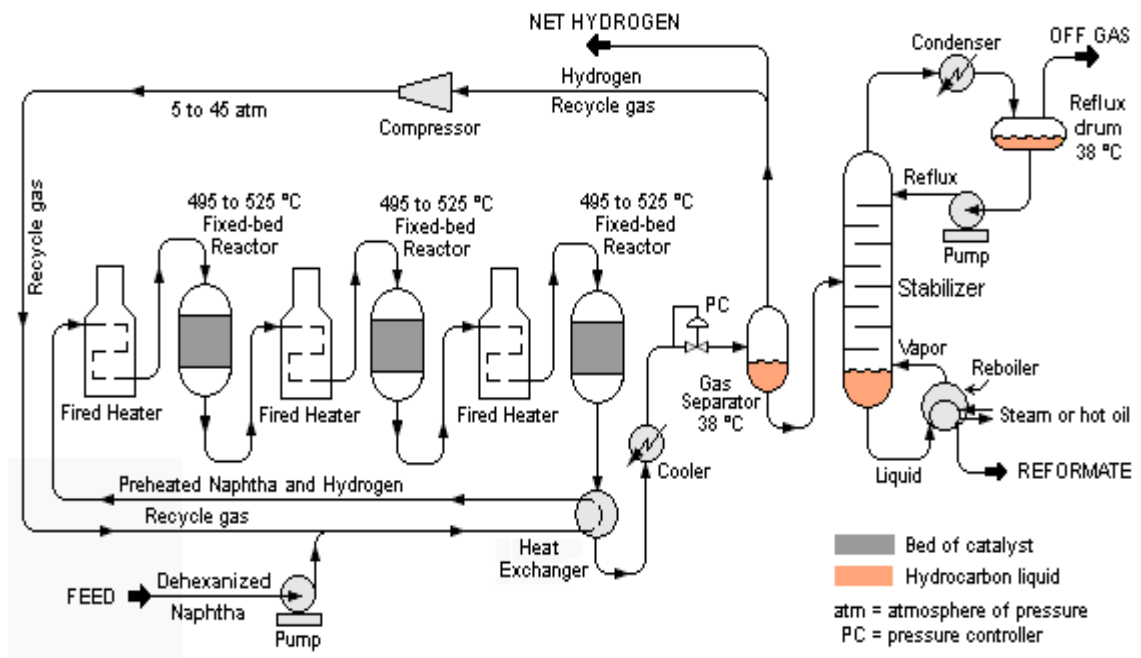
*Καταπόνηση πλατφόρμας άντλησης πετρελαίου
[Ιωάννης Σαρρής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας]*

Όλες οι βιομηχανικές διεργασίες εμπεριέχουν τη διαχείριση κάποιου ρευστού, από τη τροφοδοσία τους σε καύσιμα, τη χρήση νερού ως πρώτη ύλη ή απλά μέσο ψύξης, έως τα μέτρα περιβαλλοντικής προστασίας για τη διαχείριση των αέριων και υγρών ρύπων. Ειδικά στη βιομηχανία τροφίμων, μία η περισσότερες πρώτες ύλες είναι πάντα ρευστό. Για παράδειγμα θα συμμετέχει σίγουρα κάποιο από τα παρακάτω: νερό, χυμός, γάλα, σάλτσα ή διοξείδιο του άνθρακα. Επίσης, κατά το στάδιο της συσκευασίας, η απομάκρυνση του αέρα αυξάνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.



Εμφιαλωτήριο σάλτσας ντομάτας [<http://metrotech-hellas.gr/>]

Στη βιομηχανία πετρελαίου, η πρώτη ύλη και τα περισσότερα παράγωγα είναι ρευστά. Όλες οι διεργασίες σε κάθε διυλιστήριο βασίζονται στους νόμους των ρευστών. Φυσικό αέριο, υδρογόνο και άζωτο είναι τα πιο διαδεδομένα «βιομηχανικά» αέρια. Η μεταφορά τους γίνεται είτε με φιάλες υπό μεγάλη πίεση είτε με αγωγούς. Οι μονάδες παραγωγής και επεξεργασίας είναι μεγάλα συστήματα σωληνώσεων και θερμοχημικών διεργασιών. Οι απαιτούμενες πιέσεις και παροχές σε συνδυασμό με τα μέτρα ασφαλείας καθορίζουν τη σχεδίαση, κατασκευή και συντήρησή τους. Ακόμα και στη μεταλλουργία, όπου η πρώτη ύλη και το τελικό προϊόν είναι στερεά, το σύνολο των διεργασιών καθαρισμού, εμπλουτισμού και μορφοποίησης γίνονται με τα μέταλλα σε υγρή φάση.



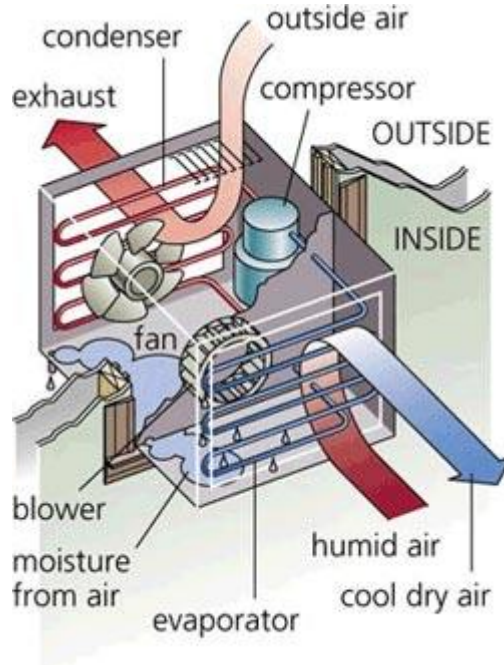
Process flow diagram of a semi-regenerative catalytic reforming unit in an oil refinery

Διάγραμμα μίας διεργασίας σε διυλιστήριο [chemengineering.wikispaces.com]

Ο αέρας είναι το πλέον ζωτικό αέριο. Περιέχει το οξυγόνο που είναι απαραίτητο για την αναπνοή όλων των έμβιων όντων. Είναι παντού γύρω μας. Το αναπνευστικό σύστημα διέπεται το ίδιο από τους κανόνες της ρευστομηχανικής. Η εκπονή διοξειδίου του άνθρακα από τα έμβια όντα και η διασπορά στην ατμόσφαιρα των ρύπων είναι σημαντικό πεδίο έρευνας, λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της ευαισθητοποίησης για την ποιότητα του αέρα. Αντίστοιχα οι επιστήμες της αεροναυπηγικής και της μετεωρολογίας εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες των ρευστών για την κατανόηση του αντίστοιχου αντικειμένου.

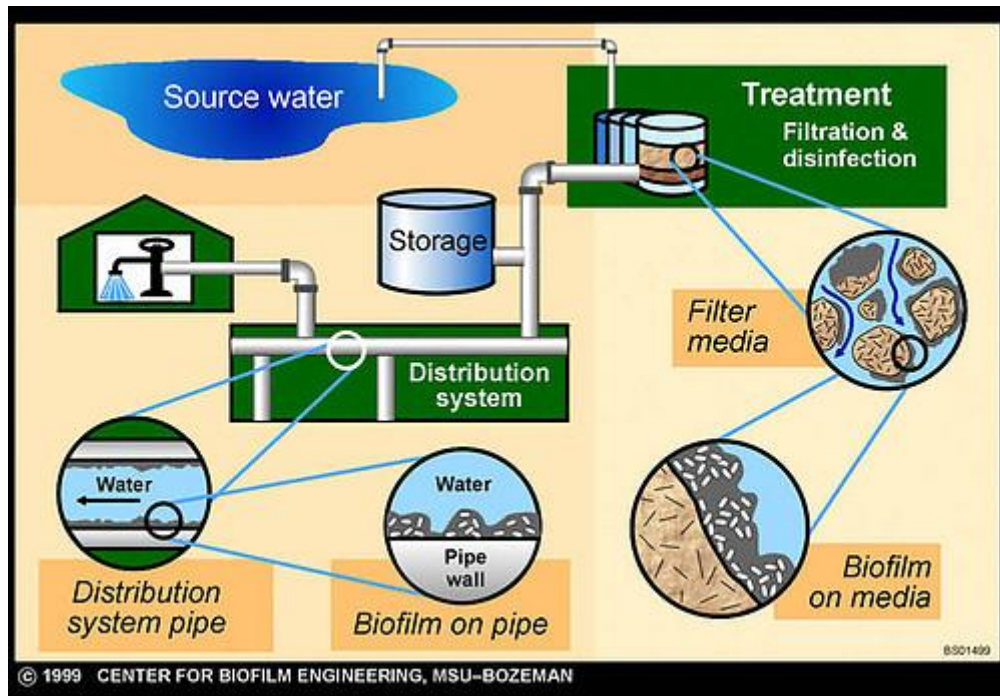
Η κίνηση του αέρα στο εσωτερικό των εγκαταστάσεων απασχολεί πολλούς μηχανικούς σε πλήθος εφαρμογών. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας και της υγρασίας, ο καθαρισμός μέσω φιλτραρίσματος, η ανάκτηση θερμότητας και η λειτουργία των αντίστοιχων δικτύων είναι κλασσικά μηχανολογικά προβλήματα. Στις κτιριακές εγκαταστάσεις εκτός από τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης, εξαερισμού και ψύξης – θέρμανσης, συναντάμε συστήματα πυρόσβεσης, ανάχνευσης καπνού και φυσικού αερίου, ροή διαφόρων ψυκτικών μέσων,

απορροφητήρες, καμινάδες από τζάκια, Ακόμα και κάθε συσκευή, ακόμα και η πιο απλή, διαθέτει θυρίδες απαγωγής θερμού αέρα για την ψύξη των κυκλωμάτων της, π.χ. τηλεόραση, router.



Ροή ψυκτικού μέσου [http://superklimatismos.blogspot.gr/]

Η ροή ενός ρευστού, εκτός από τη μεταφορά μάζας του ίδιου του ρευστού, συνοδεύεται και από άλλες παράλληλες διαδικασίες. Για παράδειγμα, κατά τη ροή του νερού στις σωληνώσεις μεταφέρονται παράλληλα σωματίδια και μικροοργανισμοί. Οι παράλληλες διαδικασίες μπορεί να έχουν σημαντικές συνέπειες είτε προς τη λειτουργικότητα είτε προς την ασφάλεια του συστήματος. Στο ίδιο παράδειγμα, αν η ταχύτητα του νερού είναι μικρή και οι συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη μικροοργανισμών, τότε σταδιακά αναπτύσσεται στα τοιχώματα των σωληνώσεων επιστρώσεις μικροοργανισμών (biofilms), η οποία σταδιακά επιβαρύνει την ποιότητα του νερού (εμφάνιση λεγιονέλλας), και διαταράσσει την ομαλή κυκλοφορία του με συνέπεια να απαιτείται υψηλότερο κόστος συντήρησης και σημαντική ποσότητα ύδατος να απορρίπτεται. Έρευνες έχουν δείξει ότι η απομάκρυνση αυτών των επικαθίσεων μπορεί να προκαλεί έως και το 30% των λειτουργικών εξόδων μίας βιομηχανίας.



Σχηματισμός επικαθίσεων (biofilms)

Η μελέτη της ροής στα σημεία δείχνει ότι αν σε τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται εξαναγκασμένη ανακυκλοφορία του νερού στα δίκτυα σε υψηλές ταχύτητες, τότε αυτές οι επιστρώσεις μικροοργανισμών δεν αναπτύσσονται και έτσι μειώνεται το κόστος συντήρησης, χρησιμοποιούνται λιγότερα χημικά καθαριστικά και απορρίπτονται μικρότερες ποσότητες ακατάλληλου ύδατος. Η δυνατότητα εξοικονόμησης νερού μόνο από αυτό φτάνει το 52% για τη βιομηχανία υφασμάτων και μεταξύ 20-50% για τη βιομηχανία τροφίμων [4].

1.3 Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Στη σύγχρονη πρακτική, κατά τη μελέτη μηχανικών ζητημάτων κάθε είδους εμφανίζονται συχνά προβλήματα ρευστομηχανικής, τα οποία απαιτείται να επιλυθούν. Η μελέτη και η επίλυση τους με αναλυτικές μεθόδους δεν είναι εύκολη, καθώς οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν αυτά τα προβλήματα είναι μη γραμμικές και ταυτόχρονα παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα, ενώ η μελέτη αυτών μέσω πειραμάτων, αν είναι εφικτή, αποδεικνύεται στις περισσότερες περιπτώσεις ιδιαίτερα χρονοβόρα και κοστοβόρα. Ως εκ τούτου για την επίλυση των εν λόγω προβλημάτων απαιτήθηκε η ανάπτυξη ενός νέου κλάδου της ρευστομηχανικής, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες των υπολογιστών, και είναι αυτός της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Η υπολογιστική ρευστομηχανική εξετάζει μεθόδους ανάπτυξης και επίλυσης διακριτών μοντέλων για τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τα ρευστομηχανικά προβλήματα, υιοθετώντας στοιχεία από τη μαθηματική φυσική και την αριθμητική ανάλυση. Για παράδειγμα, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συνεκτική κίνηση των ρευστών είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes. Οι εξισώσεις αυτές δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά, εκτός από λίγες ειδικές περιπτώσεις, οπότε καθίσταται αναγκαία η χρήση υπολογιστή. Οι βασικές αρχές που εφαρμόζονται για την αριθμητική επίλυση των προαναφερθέντων διαφορικών εξισώσεων είχαν επινοηθεί και εδραιωθεί κατά τον προηγούμενο αιώνα. Όμως, η υπολογιστική ρευστομηχανική παρουσίασε ιδιαίτερη ανάπτυξη μόλις τις τελευταίες δεκαετίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ραγδαία πρόοδο που σημειώνει η σύγχρονη τεχνολογία στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πλέον διαθέσιμα ισχυρά υπολογιστικά συστήματα, ικανά να επιλύσουν τις εν λόγω διαφορικές εξισώσεις με ικανοποιητική ακρίβεια και σε αποδεκτό χρονικό διάστημα. [5]

Με την υπολογιστική ρευστομηχανική υπολογίζεται τελικά μία προσεγγιστική αριθμητική λύση του ρευστομηχανικού προβλήματος. Για την εύρεση αυτής της

λύσης είναι απαραίτητη καταρχήν η χρήση μιας μεθόδου διακριτοποίησης, η οποία ουσιαστικά προσεγγίζει το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων με ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο τελικά δύναται να επιλυθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Οι προσεγγίσεις εφαρμόζονται σε μικρά διαστήματα του χώρου και μικρά χρονικά βήματα για μεταβατικά προβλήματα, οπότε η λύση αποδίδεται τελικά σε διακριτά σημεία του χώρου και του χρόνου. Η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται από την ποιότητα της προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε. Θεωρητικά, είναι δυνατός ο υπολογισμός μιας λύσης με οποιαδήποτε επιθυμητή ακρίβεια. Ωστόσο, σε πολλά πρακτικά προβλήματα ροής ρευστών, όπως η τυρβώδης ροή και οι πολυφασικές ροές, η ακριβής αριθμητική λύση δεν είναι εφικτή [3].

Το παραπάνω φαινόμενο καθιστά επιτακτική την επινόηση μοντέλων. Αν και η μοντελοποίηση περιορίζει την ακρίβεια της λύσης, μοντέλα χρησιμοποιούνται ακόμα και σε απλές περιπτώσεις ώστε να μειώνεται αισθητά το υπολογιστικό κόστος. Η προσεγγιστική αριθμητική λύση πρέπει να ελέγχεται, ως τελικό βήμα, ώστε να εξακριβώνεται κατά πόσο ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Η ανάλυση του αποτελέσματος καθώς και η σύγκριση του με πειραματικά δεδομένα αποτελούν τις συνηθέστερες τακτικές ελέγχου, επιτυγχάνοντας σε αξιοπιστία. Συμπερασματικά, η υπολογιστική ρευστομηχανική αποτελεί έναν ανερχόμενο κλάδο με ευρύ πεδίο εφαρμογής,

2. ΑΝΕΥΡΥΣΜΑ ΚΑΤΙΟΥΣΑΣ ΑΟΡΤΗΣ

Τα καρδιαγγειακά νοσήματα αποτελούν μία από τις κυριότερες αιτίες θανάτου παγκοσμίως καταλαμβάνοντας την πρώτη θέση στην εν λόγω στατιστική, ενώ η τάση σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.) είναι να καταλάβουν ακόμα μεγαλύτερα ποσοστά καθώς ο κίνδυνος από μολυσματικές ασθένειες μειώνεται σταδιακά. Ο σύγχρονος καθιστικός τρόπος ζωής, οι διατροφικές συνήθειες, το άγχος, αλλά και η γήρανση του πληθυσμού είναι από τις κύριες αιτίες των καρδιαγγειακών παθήσεων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του ανευρύσματος της κατιούσας αορτής. Λόγω της φύσης του προβλήματος και του θέματος της συγκεκριμένης εργασίας, η προσέγγιση στο πρόβλημα απαιτεί πέραν της γνώσεως των κανόνων της μηχανικής, την κατανόηση των ιατρικών παραγόντων που διέπουν τη φυσιολογία του ανευρύσματος. Έτσι δίνονται στοιχεία για το αίμα και το κυκλοφορικό σύστημα και τα κύρια χαρακτηριστικά του ανευρύσματος.

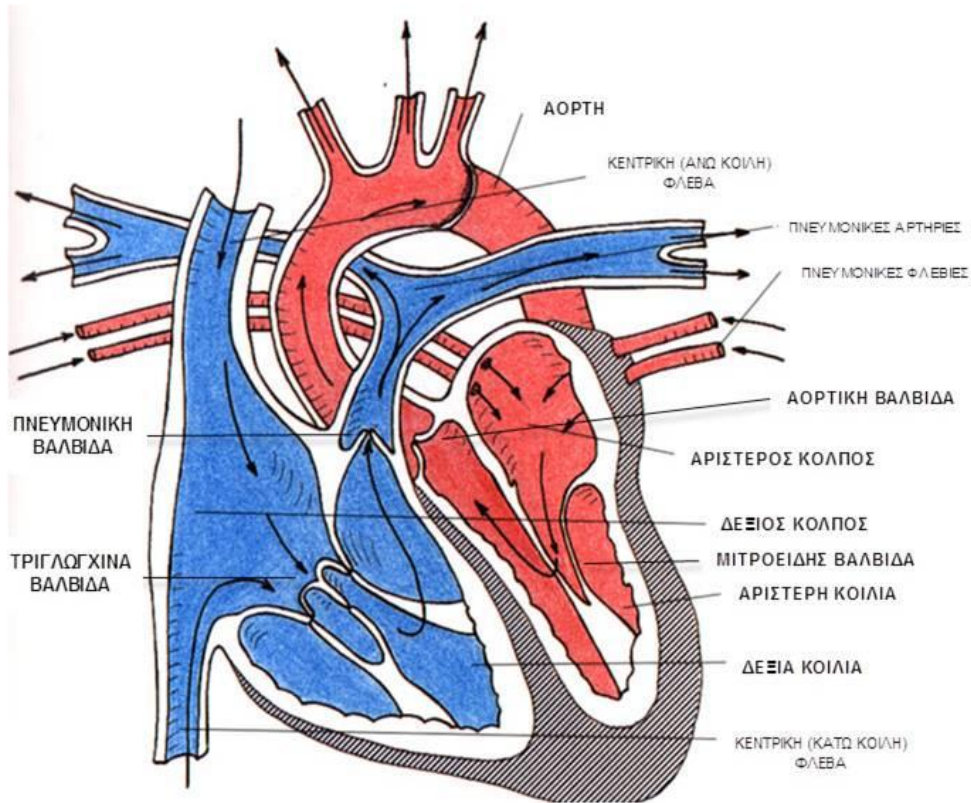
2.1 Αίμα

Το αίμα είναι το σημαντικότερο βιολογικό ρευστό. Η σημασία του για το ανθρώπινο σώμα αποδεικνύεται από τις πολλαπλές λειτουργίες του:

- Είναι ο φορέας του οξυγόνου: Παραλαμβάνει το οξυγόνο από τους πνεύμονες και μέσω των τριχοειδών αγγείων το μεταφέρει στους ιστούς και στα όργανα του σώματος, όπου χρησιμοποιείται για τις καύσεις. Επίσης, μεταφέρει από τους ιστούς και τα όργανα του σώματος προς τους πνεύμονες το διοξείδιο του άνθρακα που σχηματίζεται.
- Μεταφέρει προς τους ιστούς, και μέσω αυτών προς τα κύτταρα, διάφορες ουσίες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως δομικά και λειτουργικά στοιχεία των κυττάρων καθώς και ως φορείς ενέργειας.
- Παραλαμβάνει από τους διάφορους ιστούς και όργανα του σώματος τα άχρηστα και επιβλαβή προϊόντα του μεταβολισμού και τα μεταφέρει στα όργανα απεκκρίσεως (κυρίως τους νεφρούς), μέσω των οποίων ο οργανισμός τα αποβάλλει.
- Αποτελεί το κυριότερο μέσο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του οργανισμού.

Ο καρδιακός κύκλος υποδιαιρείται σε δύο κυρίως τμήματα, τη συστολή και τη διαστολή για να αντιδράσει ο οργανισμός στη μεταβολή της πίεσης. Κατά τη διάρκεια της συστολής της καρδιάς, η υψηλή πίεση της καρδιάς ωθεί το αίμα στις αρτηρίες οι οποίες διογκώνονται, ενώ κατά τη διάρκεια της διαστολής το συσσωρευθέν αίμα απελευθερώνεται, καθώς οι αρτηρίες συστέλλονται λόγω μείωσης της πίεσης. Οι αρτηρίες είναι το μέσο μεταφοράς του αίματος σε όλα τα σημεία του ανθρώπινου σώματος. Το οξυγονωμένο αίμα εγκαταλείπει την καρδιά εκτοπιζόμενο από τη σύσταση της αριστερής κοιλίας και φθάνει στην αορτή μέσω της αορτικής βαλβίδας και από εκεί διαμοιράζεται σε όλα τα όργανα και τους ιστούς. Στη συνέχεια μέσω των τριχοειδών αγγείων διέρχεται στο φλεβικό σύστημα. Δια μέσου του φλεβικού συστήματος και της κοίλης φλέβας πλούσιο σε διοξείδιο του άνθρακα φθάνει στο δεξιό κόλπο και μετά στη δεξιά κοιλία. Μέσω της πνευμονικής βαλβίδας και της πνευμονικής κυκλοφορίας μεταφέρεται στον

πνεύμονες. Εκεί το διοξείδιο του άνθρακα ανταλλάσσεται με οξυγόνο και επιστρέφει στον αριστερό κόλπο. Από εκεί μέσω της μιτροειδούς βαλβίδας εισέρχεται στην αριστερή κοιλία για να επαναληφθεί ο κύκλος [6].



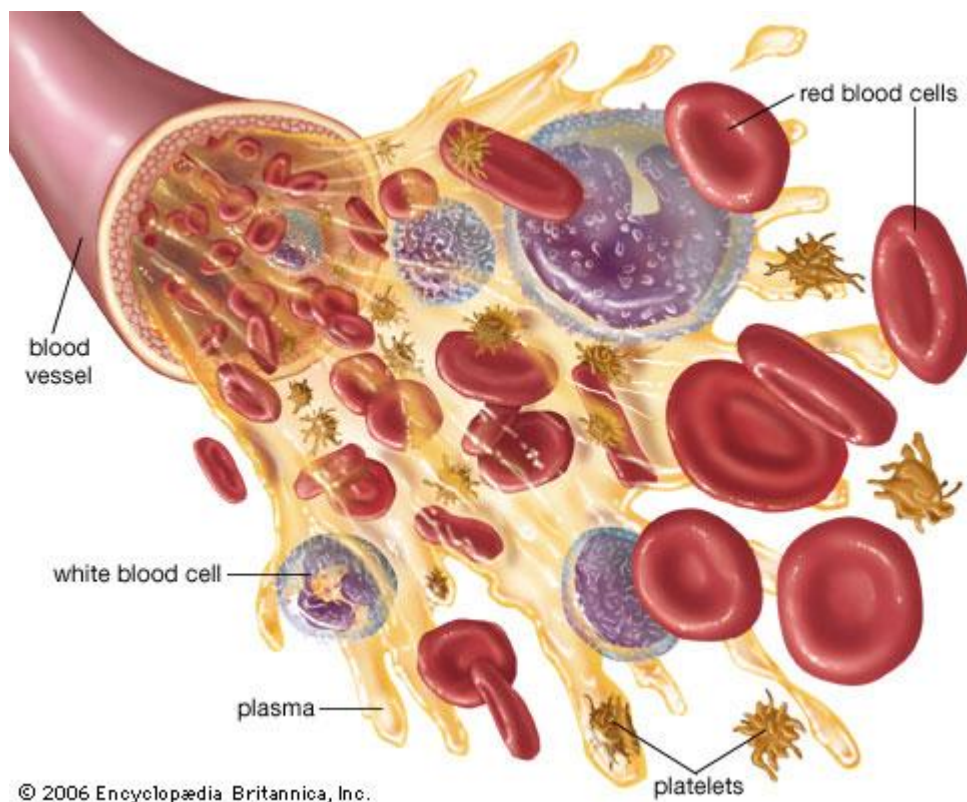
Τμήματα και λειτουργίες της καρδιάς[<http://mathetinkardiasou.gr/>]



Τα στάδια του καρδιακού κύκλου [<http://kykloforiko.weebly.com/>]

Από φυσικής απόψεως το αίμα είναι υγρό και είναι ένα εναιώρημα κυτταρικών στοιχείων. Η υγρή φάση του αίματος ονομάζεται πλάσμα. Αποτελείται από νερό (90%), άλατα και οργανικές ενώσεις. Στις οργανικές ενώσεις περιλαμβάνονται πρωτεΐνες, γλυκόζη, λιπίδια, βιταμίνες, ορμόνες και χρωστικές. Είναι συνολικά περίπου 3 λίτρα στους ενήλικες, αποτελώντας περίπου το 55% του όγκου του αίματος.

Μέσα στο πλάσμα αιωρούνται τα έμμορφα συστατικά του αίματος (ερυθρά αιμοσφαίρια, λευκά αιμοσφαίρια και αιμοπετάλια). Η επί της εκατό κατ' όγκο περιεκτικότητα του αίματος σε έμμορφα στοιχεία λέγεται αιματοκρίτης [3]. Αναιμία είναι η κατάσταση στην οποία το άτομο έχει χαμηλό αιματοκρίτη.



Σύσταση του αίματος [britannica.com]

Ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες, το αίμα είναι ασυμπίεστο ρευστό. Ασυμπίεστο σημαίνει ότι η πυκνότητα του είναι σταθερή ανεξαρτήτως πίεσης, δηλαδή μία σταθερή μάζα αναφοράς καταλαμβάνει πάντα τον ίδιο όγκο, και έχει

σταθερή πυκνότητα $\rho=1.05 \text{ gr/cm}^3 = 1050 \text{ kg/m}^3$ [Biaseti]. Το ιξώδες του κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2.5 και 5 cpoise ($1 \text{ poise}=\text{dyn}\cdot\text{s/cm}^2=10^{-1} \text{ Ns/m}^2$). Τα μεγαλύτερα σωματίδια που περιέχει το αίμα είναι τα ερυθρά αιμοσφαίρια.

2.2 Αιμοδυναμική

Αιμοδυναμική ονομάζεται η μελέτη της ροής του αίματος μέσα στα αγγεία.

Το κυκλοφορικό σύστημα μπορούμε να το εκλάβουμε ως ένα δίκτυο ελαστικών σωληνώσεων μέσα στο οποίο ρέει το αίμα, με την καρδιά να παίζει τον ρόλο δύο αντλιών εν σειρά, που πρέπει να είναι πλήρως συγχρονισμένες. Πάνω σε αυτή τη θεώρηση στηρίζεται η ρευστομηχανική μελέτη του κυκλοφορικού συστήματος.

Το κυκλοφορικό σύστημα είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου, και η ροή μέσω του κυκλοφορικού συστήματος είναι αποτέλεσμα των διαφορών πίεσης μεταξύ των δύο άκρων του συστήματος, η αριστερή κοιλία (μέση τιμή 90 mm Hg) και το δεξιό κόλλο (περίπου 0 mm Hg). Ο καρδιακός κύκλος υποδιαιρείται σε δύο κυρίως τμήματα, τη συστολή και τη διαστολή. Η καρδιά προσφέρει την απαραίτητη πίεση εξώθησης του αίματος για να ελέγχονται οι απώλειες πίεσης και να παρέχεται σταθερά αίμα στα υπόλοιπα όργανα. Οι αρτηρίες είναι οι ελαστικοί αγωγοί μέσα στους οποίους κινείται το ρευστό αίμα. Πρέπει να διατηρούν τη ροή ομαλή και την πίεση σταθερή [Λ,Μ].

Η ροή του αίματος σε κατάσταση ηρεμίας είναι ίση με την αλλαγή της πίεσης διαιρούμενη με την αντίσταση των αγγείων, δηλαδή: $BF = P / R$, όπου BF είναι η ροή του αίματος, P είναι η πίεση, και η R είναι η αντίσταση που απαντάται.

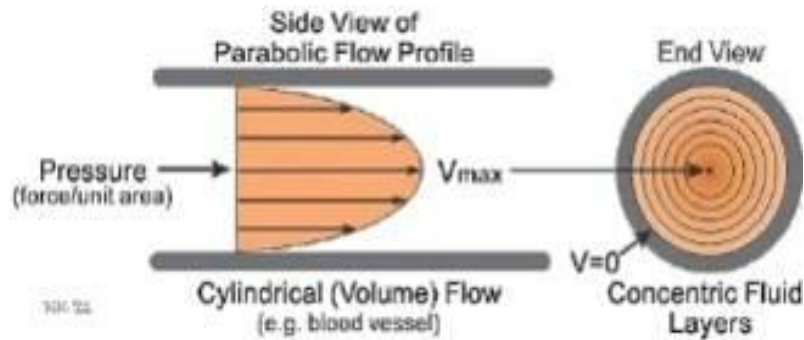
Όλες οι μετρήσεις πίεσης του αίματος γίνονται αναφορικά με την ατμοσφαιρική πίεση. Επίσης, είναι τυπικό να εκφράζεται η αρτηριακή πίεση σε mmHg, αντί της διεθνούς, τυποποιημένης μονάδας (σύστημα S.I.) μέτρησης για πίεση (Pa). Ένα (1) mmHg αντιπροσωπεύει τη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, που ασκείται από το βάρος μίας ράβδου υδραργύρου πάχους 1 mm και ισοδυναμεί περίπου $1 \text{ mmHg} \approx 133 \text{ Pa}$. Ο όρος πίεση του αίματος σημαίνει πρακτικά τη δύναμη, που εξασκείται από το αίμα σε κάθε μονάδα επιφάνειας του αγγειακού τοιχώματος. Όταν λέμε, ότι η πίεση σε ένα αγγείο είναι 50 mmHg, εννοούμε ότι η δύναμη, που εξασκείται πάνω σε αυτό είναι ικανή να ανυψώσει μία στήλη υδραργύρου ως τα 50 mm [3].

Η ροή του αίματος καθορίζεται από τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στα άκρα του αγγείου και όχι από την απόλυτη τιμή της πίεσης μέσα σε αυτό. Αν η πίεση ήταν η ίδια και στα δύο άκρα του αγγειακού τμήματος και άρα δεν υπήρχε διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο άκρων, δε θα υπήρχε ροή παρά την ύπαρξη πίεσης μέσα στο αγγείο. Πρέπει επομένως πάντα να υπάρχει μία διαφορά πίεσης έτσι, ώστε το αίμα να ρέει από περιοχές υψηλότερης πίεσης σε περιοχές χαμηλότερης πίεσης εξασφαλίζοντας την κυκλοφορία.

Η ροή του αίματος εκφράζεται σε ml ή l (λίτρα) ανά min. Η ολική ροή αίματος μέσα στην κυκλοφορία ενός ενήλικα σε ηρεμία είναι περίπου 5l/min [3]. Η ροή αυτή ονομάζεται και καρδιακή παροχή (ή κατά λεπτό όγκος), γιατί αποτελεί την ποσότητα αίματος, που εξωθείται από την καρδιά στη μονάδα του χρόνου.

Αντίσταση του αίματος είναι η παρεμπόδιση της ροής του αίματος σε ένα αγγείο. Συντελείται ως αποτέλεσμα της τριβής μεταξύ του αίματος που ρέει και του ενδοαγγειακού ενδοθηλίου κατά μήκος του αγγείου. Αυτή η αντίσταση είναι το ιξώδες του αίματος. Ως ορισμός, το ιξώδες είναι ο λόγος της διατμητικής τάσης προς το ρυθμό διάτμησης, έννοιες που δε θα συναντήσουμε στο υπόλοιπο της παρούσας εργασίας και γι' αυτό δεν αναλύονται περαιτέρω. Η άμεση μέτρησή της είναι αδύνατη, οπότε υπολογίζεται από μετρήσεις της ροής του αίματος και της διαφοράς πίεσης στο αγγείο. Είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης της διαμέτρου του αγγείου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Όταν η γεωμετρία των αρτηριών μεταβάλλεται, προκαλούνται προβλήματα στην αιμάτωση των οργάνων και των μυών του οργανισμού που είναι γνωστά ως στένωση και ανεύρυσμα, με το οποίο θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία. Υπο φυσιολογικές συνθήκες, οι αρτηρίες μπορούν να θεωρηθούν κυλινδρικοί αγωγοί με τη ροή να εμφανίζει αξονική – κυλινδρική συμμετρία ως προς το κέντρο του κυλίνδρου.



Κυλινδρική συμμετρία της ροής στη φυσιολογική αορτή

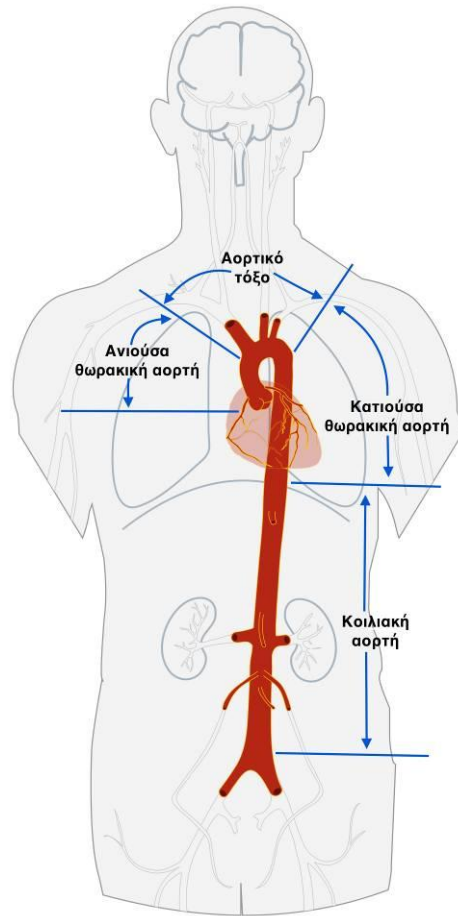
Η στένωση και το ανεύρυσμα αποτελούν τα πιο γνωστά και ευρέως μελετώμενα τυπικά ρευστομηχανικά προβλήματα στην αιμοδυναμική, προσομοιάζοντας αντίστοιχα σε συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο και σε απότομα διευρυνόμενο αγωγό. Οι περιοχές αυτές έχουν ιδιαίτερο ρευστομηχανικό ενδιαφέρον γιατί εκεί εντοπίζονται σημαντικές διαφορές της πίεσης και των διατμητικών τάσεων στο τοίχωμα (WSS), σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη στα ευθύγραμμα τμήματα.

Προφανώς, στο τοίχωμα η ταχύτητα του ρευστού κάθετα σ' αυτό είναι μηδέν. Η παραπάνω συνθήκη για την ταχύτητα ονομάζεται συνθήκη μη διείσδυσης. Αλλά και για την ταχύτητα του ρευστού παράλληλα με το τοίχωμα επί αυτού ισχύει το ίδιο. Αυτή είναι η συνθήκη μη ολίσθησης. Αυτή η συνθήκη δεν είναι προφανής, αλλά επιβεβαιώνεται πειραματικά. Αυτό γίνεται έμμεσα από τις συνέπειές της, που είναι η ύπαρξη τριβών και τάσεων που ασκούνται στα στερεά, αλλά και άμεσα με ειδικές τεχνικές. Επιβεβαιώνεται επίσης και από θεωρητικές προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής [8].

2.3 Κατιούσα Αορτή

Η αορτή, ξεκινώντας από την αριστερή κοιλία της καρδιάς, είναι η μεγαλύτερη αρτηρία του σώματος μας και σαν ελαστικός σωληνωτός αγωγός μεταφέρει, με τους διαφόρους κλάδους της, αίμα σε όλο το σώμα μας. Η προς τα εμπρός κίνηση του αίματος εξασφαλίζεται με τη συστολή της καρδιάς και την παρεμβολή βαλβίδας μιας κατευθύνσεως (αορτική βαλβίδα) μεταξύ αριστερής κοιλίας και αορτής.

Η αορτή διακρίνεται στη ρίζα αορτής (το πρώτο τμήμα της), την ανιούσα αορτή, το αορτικό τόξο, που δίνει αίμα στα αγγεία του εγκεφάλου και των άνω ακρών, και την κατιούσα θωρακική αορτή. Αυτά τα τμήματα βρίσκονται εντός του θώρακα και αποτελούν τη θωρακική αορτή. Συνεχίζει την πορεία της δια του διαφράγματος στην κοιλιά (κοιλιακή αορτή), όπου τελικά χωρίζεται σε δύο άλλους κλάδους (κοινές λαγόνιες αρτηρίες) που μεταφέρουν το αίμα στα κάτω άκρα. Η κατιούσα θωρακική και η κοιλιακή αορτή δίνουν επίσης αίμα και στο νωτιαίο μυελό.



Απεικόνιση της αορτής [http://www.dr-tsekouras.gr/- Δρ. Ν. Τσεκούρας]

Η φυσιολογική της διατομή σε ενήλικα άτομα είναι εντός του εύρους 16 έως 37 χιλιοστά [Μπίσμπα, ΓΝΘ «Παπανικολάου»]. Σε άλλες πηγές αναφέρεται ως κύρια τιμή τα 25 ή 28 χιλιοστά. Το πάχος του τοιχώματος είναι περίπου 2 χιλιοστά και από μέσα προς τα έξω διακρίνεται στα εξής στρώματα: 5% ενδοθήλιο, 40% ελαστικός ιστός, 25% μαλακός ιστός, 30% ινώδης ιστός [2].

2.4 Ανεύρυσμα

Με τον όρο ανεύρυσμα περιγράφεται η μη αναστρέψιμη διάταση μίας αρτηρίας κατά τουλάχιστον 50% πάνω από την φυσιολογική διάμετρό της, εξαιτίας της εξασθένησης του τοιχώματος της.

Τα ανευρύσματα μπορεί να εμφανιστούν σε αρτηρία του εγκεφάλου, στην αορτή ή/και σε κάποια περιφερειακή αρτηρία, συνήθως των κάτω άκρων. Τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφανίζουν τα ανευρύσματα της αορτής, ιδίως της κοιλιακής αορτής. Το 70% των περιφερειακών ανευρυσμάτων εντοπίζονται στις ιγνυακές αρτηρίες (είναι αυτές που διέρχονται πίσω από τα γόνατα).

Τα ανευρύσματα, ανάλογα με την μορφή τους, διακρίνονται σε:

- Ατρακτοειδή: Έχουν ομοιόμορφο σχήμα και εμφανίζονται σε ένα εκτεταμένο συνήθως τμήμα της αορτής.
- Σακκοειδή: Συνήθως είναι μικρότερα και εντοπίζονται στην μία πλευρά του αορτικού τοιχώματος, στο πλέον αδυνατισμένο τμήμα του.

Τα ανευρύσματα είναι ως επί το πλείστον επίκτητα, δηλαδή εμφανίζονται στην πορεία της ζωής. Προκαλούνται συχνότερα από αθηροσκλήρωση, δηλαδή από σκλήρυνση των αρτηριών, η οποία καταστρέφει το τοίχωμα των αρτηριών. Οι αρτηρίες είναι φυσιολογικά λείες στην εσωτερική πλευρά τους, όμως καθώς η ηλικία αυξάνει μπορεί να αναπτύξουν αθηροσκλήρωση. Η δημιουργία των αθηρωματικών πλακών αυξάνει με την πάροδο του χρόνου και οδηγεί τελικά σε ελάττωση της ελαστικής ικανότητας της αορτής και αδυνάτισμα του τοιχώματος. Με την πάροδο της ηλικίας οι περισσότεροι άνθρωποι αντιμετωπίζουν κάποιου βαθμού απώλεια των ελαστικών ιδιοτήτων του τοιχώματος της αορτής τους.

Υπάρχουν ορισμένες ασθένειες, όπως το σύνδρομο Marfan, που προκαλούν εκ γενετής ανευρύσματα, αλλά αυτές σπανίζουν στον ελληνικό πληθυσμό. Στους παράγοντες που ευνοούν την εμφάνισή τους συμπεριλαμβάνονται το οικογενειακό ιστορικό ανευρύσματος, το φύλο (τα ανευρύσματα εγκεφάλου είναι πιο συχνά στις

γυναίκες, τα ανευρύσματα αορτής στους άντρες) και πρωτίστως οι παράγοντες υψηλού καρδιαγγειακού κινδύνου (υπέρταση και κάπνισμα). Ανεύρυσμα μπορεί να προκληθεί και έπειτα από έναν τραυματισμό (π.χ. χτύπημα στο κεφάλι ή μεγάλη πίεση στον θώρακα ή στην κοιλιά). Ιστορικά, η σύφιλη και η φυματίωση συνδέονται με την εμφάνιση υψηλών ποσοστών ανευρυσμάτων.

Ο βαθμός επικινδυνότητας ενός ανευρύσματος εξαρτάται κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά, από το μέγεθος του. Ο γενικός κανόνας είναι πως όσο μεγαλύτερο είναι ένα ανεύρυσμα, τόσο αυξάνεται ο κίνδυνος να υποστεί ρήξη, χωρίς αυτό να είναι απόλυτα σωστό. Στα ανευρύσματα εγκεφάλου η ρήξη προκαλεί αιμορραγικό εγκεφαλικό επεισόδιο, ενώ η ρήξη ανευρύσματος αορτής προκαλεί μαζική εσωτερική αιμορραγία και οι πιθανότητες επιβίωσης είναι λιγιστές. Όσον αφορά στα περιφερειακά ανευρύσματα, αυτά μπορεί να οδηγήσουν σε απόφραξη της αρτηρίας και να «νεκρώσουν» το όργανο ή τμήμα του σώματος που αυτή αιματώνει.

Τα ανευρύσματα σπανίως εμφανίζουν προειδοποιητικά συμπτώματα, εκτός κι αν είναι πολύ μεγάλα. Συνήθως εντοπίζονται τυχαία στη διάρκεια εξέτασης (π.χ. υπερηχογράφημα, αξονική τομογραφία) για άλλα νοσήματα ή όταν δημιουργήσουν επιπλοκές. Η ρήξη, π.χ. του ανευρύσματος κοιλιακής αορτής προκαλεί έντονο πόνο στην κοιλιά, ενώ η απόφραξη από ανεύρυσμα ιγνυακής αρτηρίας προκαλεί πόνο και «παγώνει» το πόδι. Ένα ύποπτο σύμπτωμα από μεγάλο ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής μπορεί να είναι ο πόνος στη μέση, ο οποίος είναι βαθύς και ο ασθενής τον νιώθει εσωτερικά. Ύποπτο είναι επίσης και αν ο ασθενής ψηλαφίσει μια «παλλόμενη» (σφύζουσα) μάζα κοντά στον ομφαλό. Αντίστοιχα στον εγκέφαλο, ένα μεγάλο ανεύρυσμα μπορεί να προκαλέσει πόνο πάνω και πίσω από το μάτι ή μούδιασμα/παράλυση στο πρόσωπο, και αλλαγές στην όραση.

Η αντιμετώπιση τους εξαρτάται από τη θέση και το μέγεθός τους. Για τα ανευρύσματα αορτής και τα περιφερειακά που είναι μικρά, συνήθως συνιστάται επανέλεγχος ανά 6μηνο και, αν διαπιστωθεί ότι μεγαλώνουν επικίνδυνα, μπορεί να γίνει χειρουργική αποκατάσταση. Στους ασθενείς με ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής

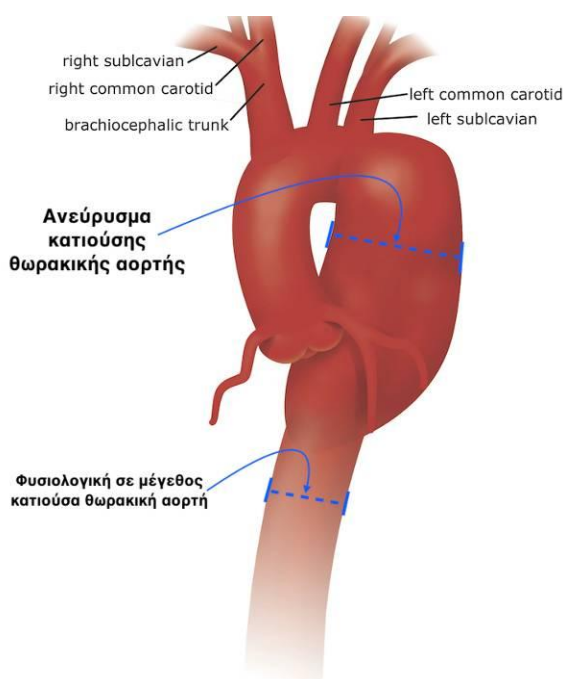
η εγχείρηση συνιστάται συνήθως όταν η διάμετρος του ανευρύσματος υπερβεί τα 5,5 εκατοστά, δηλαδή όταν εντοπιστεί διπλασιασμός της διαμέτρου. Τα ανευρύσματα εγκεφάλου, που τα αντιμετωπίζουν οι νευροχειρουργοί, έχουν ανάλογη θεραπεία.

Κάτω από ορισμένες συνθήκες και ανάλογα με το είδος του ανευρύσματος ο χειρουργός μπορεί να συστήσει μία νεώτερη μέθοδο που καλείται «Ενδαγγειακή Χειρουργική Επέμβαση». Αυτό σημαίνει πως η επέμβαση εκτελείται από το εσωτερικό τμήμα της αορτής με την χρήση λεπτών και μακριών σωλήνων, που καλούνται καθετήρες. Το μόσχευμα τοποθετείται στην θέση αυτή και αποκλείει το παθολογικό τμήμα σαν νάρθηκας, εξασφαλίζοντας έτσι την κανονική ροή του αίματος. Η μέθοδος αυτή (stent) χρησιμοποιείται σήμερα για την αντιμετώπιση κοιλιακών ανευρυσμάτων και ανευρυσμάτων της κατιούσης θωρακικής αορτής.

Από τη βιβλιογραφική έρευνα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, προέκυψε ότι ο Άλμπερτ Αϊνστάιν έπασχε από ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής, για το οποίο χειρουργήθηκε στα 69 του χρόνια. Ο χειρουργός διαπίστωσε ότι δεν μπορούσε να το αφαιρέσει και έτσι το τύλιξε σφικτά με σελοφάν για να μην μεγαλώσει άλλο. Ωστόσο το ανεύρυσμα υπέστη ρήξη επτά χρόνια αργότερα, αφαιρώντας τη ζωή του.

2.5 Ανεύρυσμα Κατιούσας Αορτής

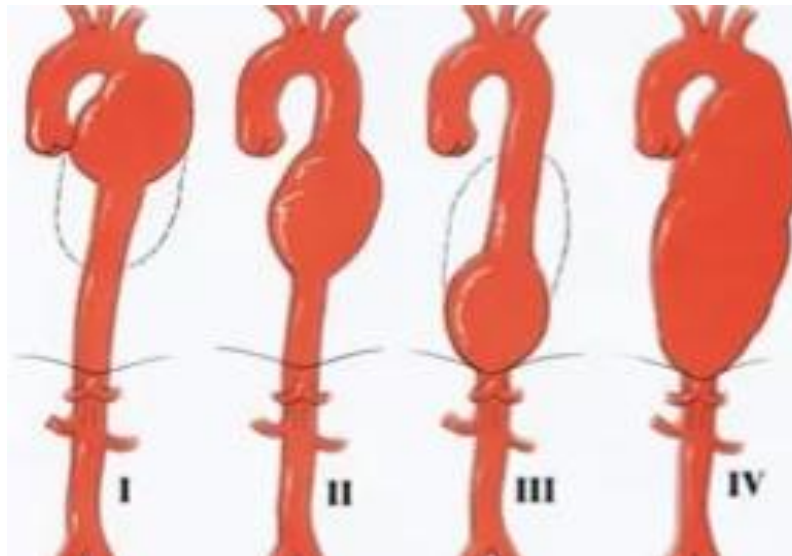
Με τον όρο «Ανεύρυσμα Κατιούσας Θωρακικής Αορτής» (Α.Κ.Θ.Α.) εννοούμε την μόνιμη εντοπισμένη διάταση ή διεύρυνση της κατιούσας θωρακικής αορτής σε μέγεθος μεγαλύτερο τουλάχιστον κατά 50% της υπόλοιπης φυσιολογικής θωρακικής αορτής του ίδιου ατόμου. Η κατιούσα θωρακική αορτή περιλαμβάνει το τμήμα από την αριστερή υποκλείδιο αρτηρία έως το αορτικό τμήμα του διαφράγματος. Βρίσκεται πολύ κοντά στο αντίστοιχο τμήμα της σπονδυλικής στήλης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η φυσιολογική διάμετρος της είναι περίπου 28 χιλιοστά.



*Ανεύρυσμα Κατιούσας Θωρακικής Αορτής
[<http://www.dr-tsekouras.gr/> - Δρ. Ν. Τσεκούρας]*

Τα ανευρύσματα της θωρακικής αορτής ταξινομούνται σε 4 διαφορετικούς τύπους:

- Τύπος I: αφορά τον ισθμό της αορτής και δεν επεκτείνεται πιο περιφερικά από το μέσο της θωρακικής αορτής.
- Τύπος II: αφορά το μεσαίο τμήμα της θωρακικής αορτής.
- Τύπος III: αφορά το μεσαίο τμήμα της θωρακικής αορτής και δεν επεκτείνεται πιο κεντρικά από το μέσο της θωρακικής αορτής.
- Τύπος IV: αφορά όλη τη θωρακική αορτή.



Τέσσερις τύποι ΑΚΘΑ

[<http://www.dr-paraskevas.com/> - Δρ. Νικόλαος Παρασκευάς]

Τα ανευρύσματα της θωρακικής αορτής συνολικά υπολογίζονται σε περίπου 5,9 ανά 100.000 πληθυσμού [9], με το 24,7% αυτών να εντοπίζονται στην κατιούσα αορτή. Η αναλογία ανευρυσμάτων θωρακικής προς κοιλιακής αορτής είναι περίπου 1:4. Δηλαδή συνολικά το 5% των συνολικών περιπτώσεων ανευρύσματος είναι Α.Κ.Θ.Α. Προσβάλλεται με ανεύρυσμα της κατιούσας θωρακικής αορτής 1 στους 1000 ηλικιωμένους. Η πιο συχνή αιτιολογία για την εμφάνιση Α.Κ.Θ.Α. είναι η αρτηριοσκλήρυνση (75% περιπτώσεων) που παρατηρείται μετά την 6η δεκαετία της ζωής κυρίως στους άνδρες.

Η ρήξη που συνδυάζεται με υψηλό ποσοστό θνητότητας (70-80%) είναι η πιο μεγάλη απειλή για την ζωή του ασθενούς που πάσχει από Α.Κ.Θ.Α. Το 70% των ασθενών που υφίστανται ρήξη ανευρύσματος αορτής είναι άντρες. Μπορεί επίσης να προκαλέσει θρομβοεμβολικά επεισόδια στα κάτω άκρα, σε περιφερικούς κλάδους, όπως τα σπλαχνικά αγγεία και τις νεφρικές αρτηρίες καθώς και να ασκήσει πίεση στα παρακείμενα όργανα.

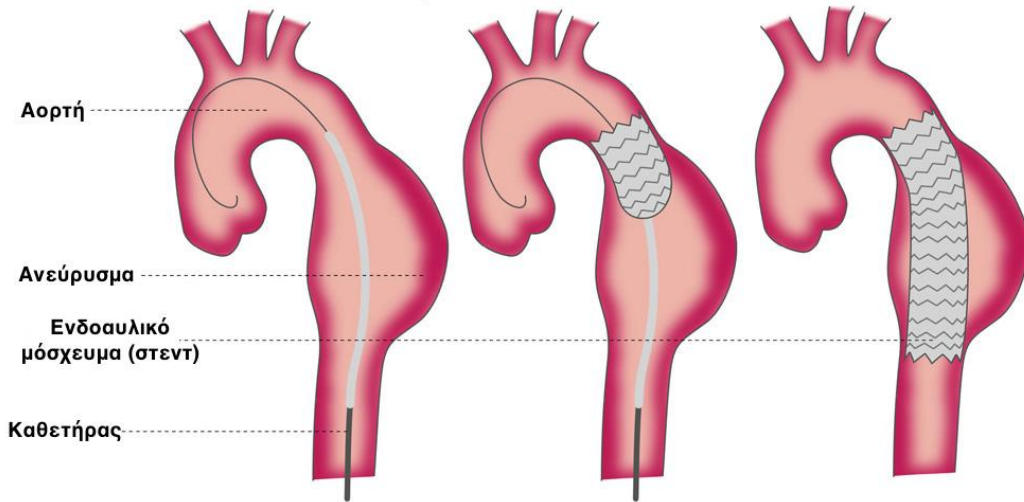
Οι ασθενείς με ανεύρυσμα κατιούσας θωρακικής αορτής δεν παρουσιάζουν συμπτώματα όταν αυτά είναι ακόμα μικρά και αυξάνονται αργά σε μέγεθος και

έκταση. Οι ασθενείς αναφέρουν πόνο στο αριστερό τμήμα του θώρακα ή πιο συχνά την πλάτη. Άλλα συμπτώματα είναι ο βήχας, η αιμόπτυση (παρουσία αίματος στα πτύελα) που αυξάνει σε συχνότητα και ποσότητα αίματος, η δυσκαταποσία (δυσκολία κατάποσης) ή δυσφαγία (δυσκολία σίτισης) κυρίως στερεών τροφών όταν πιέζεται ο οισοφάγος. Σπάνια, εμφανίζονται νευρολογικά συμπτώματα λόγω ισχαιμίας του νωτιαίου μυελού [10].

Η κατάσταση κρίνεται ιδιαίτερα σοβαρή, όταν η διάμετρος του ανευρύσματος φτάσει να είναι μεγαλύτερη από 6 εκατοστά έχει ένδειξη για αποκατάσταση, ή όταν προκαλεί συμπτώματα (πόνος, εμβολή κ.α) ή έχουμε γρήγορη αύξηση της διαμέτρου του ανευρύσματος σε δύο διαδοχικές μετρήσεις στο ίδιο έτος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ρήξη. Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να αποφασίζεται ενδοαυλική («στεντ») ή χειρουργική αποκατάσταση («ανοιχτή καρδιά») του ανευρύσματος της κατιούσας θωρακικής αορτής.

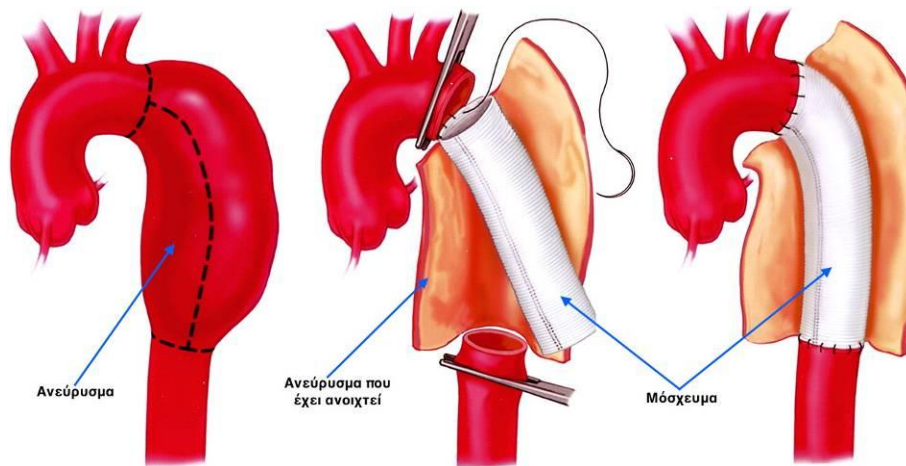
Κατά την ενδοαγγειακή μέθοδο η αποκατάσταση του ανευρύσματος γίνεται από το εσωτερικό του αγγείου με τη χρήση ειδικών καθετήρων. Η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο επεμβατική γιατί, ακόμη και με τοπική αναισθησία, γίνονται μία ή δύο μικρές τομές στη βουβωνική χώρα για την αποκάλυψη της μίας ή και των δύο μηριαίων αρτηριών. Στη συνέχεια από τις μηριαίες, και με τη χρήση ακτινοσκοπικού μηχανήματος, εισέρχονται οι ειδικοί καθετήρες που φέρουν το ενδομόσχευμα που αποτελείται από ένα μεταλλικό σκελετό επενδεδυμένο με ειδικό ύφασμα. Το μόσχευμα εκπτύσσεται και στηρίζεται στο εσωτερικό της αορτής με ειδικά διαμορφωμένους νάρθηκες (stents). Σε 1 με 2 μέρες ο άρρωστος παίρνει εξιτήριο και η ανάρρωσή του είναι ταχύτετη και ανώδυνη [<http://aggeiopathia.gr/> - Δρ. Ιωάννης Μπέλλος].

Thoracic endovascular aortic repair (TEVAR)



*Ενδαγγειακή αποκατάσταση ανευρύσματος κατιούσης θωρακικής αορτή (stent)
[<http://www.dr-tsekouras.gr/>- Δρ. Ν. Τσεκούρας]*

Στην ανοικτή χειρουργική επέμβαση μετά από γενική νάρκωση και τομή στο θώρακα και την κοιλιά ο αγγειοχειρουργός αντικαθιστά την αορτή με συνθετικό μόσχευμα. Μετά το χειρουργείο ο ασθενής οδηγείται στη μονάδα εντατικής θεραπείας 1-2 μέρες και συνολικά παραμένει στο νοσοκομείο για 7-10 μέρες περίπου. Για να αναρρώσει πλήρως απαιτούνται 3 μήνες [<http://aggeiopathia.gr/> - Δρ. Ιωάννης Μπέλλος]. Πολλοί ασθενείς με ΑΘΑ έχουν συγχρόνως και καρδιακές παθήσεις ή είναι προσβεβλημένο το κεντρικό τμήμα της θωρακικής αορτής που είναι σε άμεση επαφή με την καρδιά σας. Σε τέτοιες περιπτώσεις σύνθετων ή πολύ εκτεταμένων ΑΘΑ πολλές φορές πραγματοποιείται ταυτόχρονα ανοικτή χειρουργική αποκατάσταση του ΑΘΑ με επέμβαση ανοικτής καρδιάς.



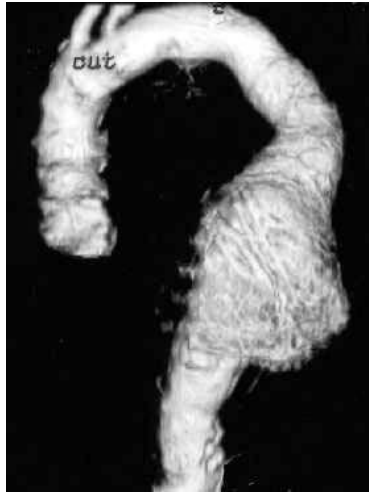
*Ανοικτή αποκατάσταση ανευρύσματος κατιούσης θωρακικής αορτής. Το ανεύρυσμα αντικαθίσταται από το συνθετικό μόσχευμα, που συρράπτεται κεντρικά και περιφερικά του ανευρύσματος σε υγιή αορτικό ιστό.
[<http://www.dr-tsekouras.gr/>- Δρ. Ν. Τσεκούρας]*

Τα προτερήματα της ενδοαγγειακής μεθόδου είναι προφανή: αποφυγή γενικής αναισθησίας, απουσία εκτεταμένης θωρακοκοιλιακής τομής, μικρότερη εγχειρητική θνητότητα και νοσηρότητα, απουσία μετεγχειρητικού πόνου, μικρότερη νοσηλεία και γρήγορη ανάρρωση. Αν και η ενδοαγγειακή μέθοδος είναι κατάλληλη για πολλά ΑΚΘΑ, ωστόσο υπάρχουν περιορισμοί λόγω μορφολογίας και εντόπισης του ανευρύσματος που κάνουν απαγορευτική τη χρήση της σε όλες τις περιπτώσεις. Με την ενδοαγγειακή μέθοδο είναι σημαντικό να γνωρίζετε ότι πρέπει να βρίσκεστε υπό συνεχή παρακολούθηση για μεγάλο χρονικό διάστημα με περιοδική πραγματοποίηση αξονικών τομογραφιών. Μερικές φορές απαιτούνται πρόσθετες επεμβάσεις για τη διόρθωση τυχόν διαφυγών από το ενδομόσχευμα ή της θέσης του σε τυχόν μετακίνηση του.

Και στις δύο μεθόδους υπάρχουν σαφείς ενδείξεις και αντενδείξεις. Τα αποτελέσματα της ενδοαγγειακής χειρουργικής είναι άριστα όταν εφαρμόζονται από έμπειρους αγγειοχειρουργούς σε ασθενείς που έχουν ένδειξη για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου.

Η απλή ακτινογραφία του θώρακος σε ευμεγέθη ανευρύσματα μπορεί να δώσει αρκετά στοιχεία ή ακόμα και βέβαιη διάγνωση. Η αξονική αγγειογραφία (CTA) αποτελεί την κύρια μέθοδο εντοπισμού προεγχειρητικά, δίνοντας πολύτιμες

πληροφορίες για την μορφολογία του ανευρύσματος και επιτρέποντας τη μέτρηση διαφόρων παραμέτρων, ικανών να οδηγήσουν σε καλή εκτίμηση για τη σοβαρότητα του ανευρύσματος. Πολύτιμες πληροφορίες προσφέρει και η μαγνητική αγγειογραφία.

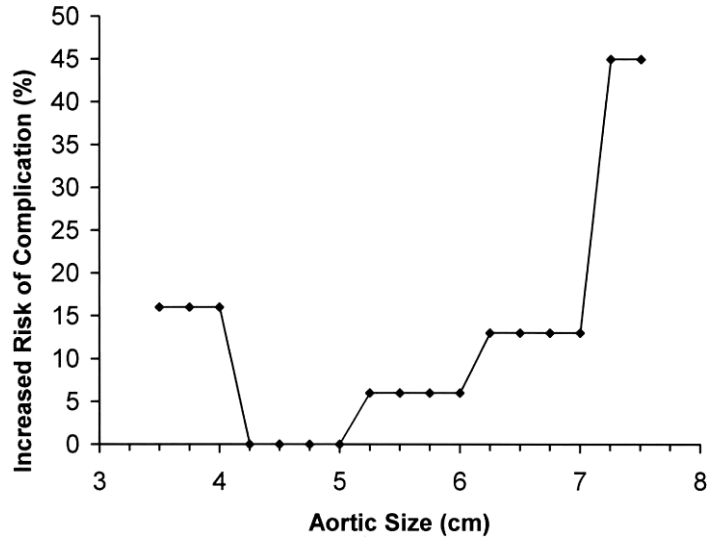


Σπειροειδής υπολογιστική τομογραφία (spiral computed tomography) ανευρύσματος της κατιούσας θωρακικής αορτής [10]

Η ύπαρξη συμπτωμάτων αποδιδόμενων στο ανεύρυσμα αποτελεί ένδειξη χειρουργικής θεραπείας. Στους ασυμπτωματικούς ασθενείς η απόφαση για χειρουργική επέμβαση είναι λιγότερο εύκολη. Στους ασθενείς αυτούς, η ένδειξη για επέμβαση τίθεται όταν οι αναμενόμενοι κίνδυνοι από τη φυσική εξέλιξη των ανευρυσμάτων είναι μεγαλύτεροι από τους κινδύνους θανάτου και σοβαρών επιπλοκών (π.χ. παραπληγίας) που συνεπάγεται η ίδια η επέμβαση. Ως εκ τούτου, η γνώση της φυσικής πορείας των ανευρυσμάτων είναι εξαιρετικής σημασίας.

Σύμφωνα με το νόμο του Laplace, υπό συγκεκριμένες τιμές ενδοαυλικής πίεσης, η αύξηση της αορτικής διαμέτρου οδηγεί σε αύξηση της τοιχωματικής τάσης. Αυτή με τη σειρά της οδηγεί σε λέπτυνση του αορτικού τοιχώματος, περαιτέρω αύξηση της αορτικής διαμέτρου και τελικώς σε ένα φαύλο κύκλο με επικίνδυνες συνέπειες. Κατ' αυτό τον τρόπο, η φυσική εξέλιξη των ανευρυσμάτων, ιδιαιτέρως αν δεν υπάρξει δραστική αντιμετώπιση της αρτηριακής υπέρτασης, είναι η προοδευτική αύξηση της διαμέτρου τους και τελικώς η εκδήλωση θανατηφόρων επιπλοκών, ήτοι ρήξης ή διαχωρισμού. Η πιθανότητα εκδήλωσης επιπλοκών αυξάνεται

σταδιακά με την αύξηση της διαμέτρου, γίνεται δε εξαιρετικά υψηλή όταν η διάμετρος των ανευρυσμάτων της κατιούσας θωρακικής αορτής ξεπεράσει τα 7 cm.



Διαγραμματική απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης επιπλοκών από ένα ανεύρυσμα της κατιούσας θωρακικής αορτής σε σχέση με τη διάμετρο του ανευρύσματος. Παρατηρείστε ότι το σημείο καμπής πέραν του οποίου η πιθανότητα αυτή αυξάνεται δραματικά είναι τα 7 cm.

[Coady MA et al. "What is the appropriate size criterion for resection of thoracic aortic aneurysms?", J Thorac Cardiovasc Surg 1997;113:476-491].

2.6 Ενδοαυλικός Θρόμβος

Ενδοαυλικός Θρόμβος ή Θρόμβωση είναι ο σχηματισμός μιας μάζας πηγμένου αίματος που αποτελείται από αιμοπετάλια, ερυθρά και λευκά κύτταρα του αίματος, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε ένα ινώδες δίκτυο μέσα στο αιμοφόρο αγγείο ή αυλό. Ανάλογα με τις διαστάσεις του, ένας θρόμβος μπορεί να εμποδίσει τη ροή του αίματος στο αιμοφόρο αγγείο. Όταν ένας θρόμβος καταλαμβάνει περισσότερο από το 75% της επιφάνειας του αυλού μιας αρτηρίας, η ροή του αίματος προς τον παρεχόμενο ιστό έχει μειωθεί αρκετά για να προκληθούν συμπτώματα λόγω της μειωμένης παροχής οξυγόνου (υποξία) και της συσσώρευσης των μεταβολικών προϊόντων, όπως το γαλακτικό οξύ [wikipedia.org]. Απόφραξη περισσότερο από το 90% μπορεί να οδηγήσει σε ανοξία, που είναι η πλήρης στέρηση του οξυγόνου, και του μυοκαρδίου, μια λειτουργία του κυτταρικού θανάτου.



Θρόμβος [<http://www.onmed.gr/>]



Μείωση της ροής σε στενώσεις της αορτής [2]

Το μέγεθος και η μορφή των θρόμβων ποικίλουν ανάλογα με τη θέση προέλευσής τους και των καταστάσεων που οδηγούν στην ανάπτυξή τους. Οι αρτηριακοί ή οι καρδιακοί θρόμβοι συνήθως αρχίζουν στη θέση της βλάβης του ενδοθηλίου (π.χ. αθηροσκληρωτική πλάκα) ή της στροβιλώδους ροής (π.χ. σε διακλάδωση αγγείου), ενώ οι θρόμβοι των φλεβών χαρακτηριστικά παρατηρούνται σε θέσεις στάσης του αίματος. Οι αρτηριακοί θρόμβοι συνήθως είναι αποφρακτικοί. Οι συνηθέστερες θέσεις είναι οι στεφανιαίες αρτηρίες, οι αρτηρίες του εγκεφάλου και οι μηριαίες αρτηρίες. Ο θρόμβος συνήθως βρίσκεται πάνω σε μια αθηροσκληρωτική πλάκα και μπορεί να εμπλέκονται και άλλες μορφές αγγειακής βλάβης, όπως αγγειίτιδα και τραύματα. Οι θρόμβοι βρίσκονται στερεά προσκολλημένοι στο αρτηριακό τοίχωμα που έχει υποστεί βλάβη και είναι εύθρυπτοι. Έτσι, συχνά αποκολλούνται και μεταφέρονται σε κρίσιμα σημεία με θανατηφόρες συνέπειες (εμβολή).

Η αρτηριακή θρόμβωση μπορεί να προσβάλλει κάθε όργανο του σώματος ανάλογα με την αρτηρία που έχει αποφράξει. Στην καρδιά η απόφραξη των στεφανιαίων αρτηριών προκαλεί έμφραγμα (νέκρωση του τμήματος που αρδεύουν). Στην εγκεφαλική κυκλοφορία προκαλούνται τα θρομβωτικά εγκεφαλικά επεισόδια. Η απόφραξη των αρτηριών των άκρων προκαλεί γάγγραινα. Λιγότερο συχνά θρόμβωση μπορεί να συμβεί σε αγγεία που αιματώνουν το έντερο. Τα έμβολα από

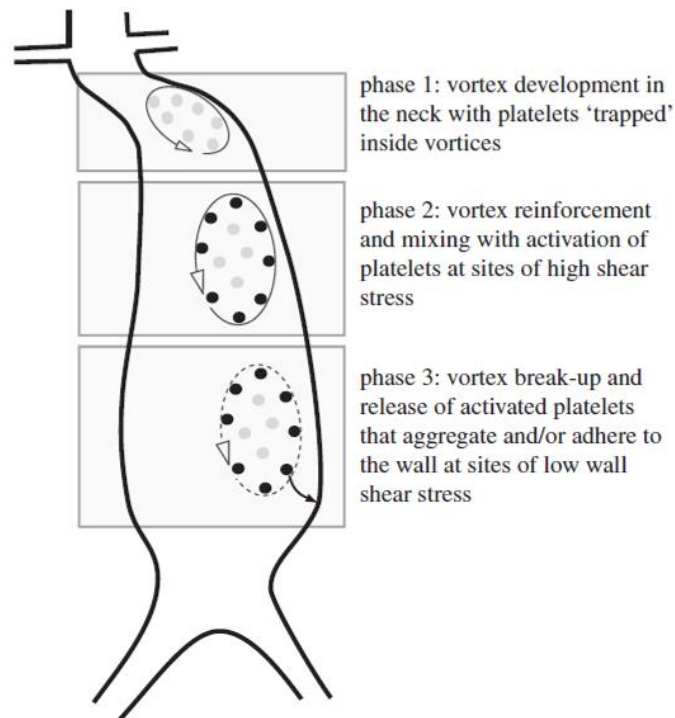
τους θρόμβους των αρτηριών συνήθως μεταφέρονται στα όργανα με τη μεγαλύτερη αιμάτωση όπως ο εγκέφαλος, οι νεφροί και ο σπλήνας.

Τρεις πρωτογενείς επιδράσεις προδιαθέτουν σε παραγωγή θρόμβων και είναι γνωστές ως «Τριάδα του Virchow» [<http://www.doctorshospital.gr/blog>].

1) **Βλάβη του ενδοθηλίου - τοιχώματος:** Αποτελεί την κυριότερη επίδραση και μπορεί από μόνη της να οδηγήσει σε θρόμβωση. Ενέχει ιδιαίτερη σημασία στη παραγωγή θρόμβων μέσα στις κοιλότητες της καρδιάς όταν υπάρχει βλάβη του ενδοκαρδίου (π.χ. έμφραγμα του μυοκαρδίου ή φλεγμονή των βαλβίδων), ελκωποιημένες πλάκες σε βαριά αρτηριοσκληρωτικές αρτηρίες ή σε θέσεις τραυματικής ή φλεγμονώδους βλάβης των αγγείων.

2) **Μεταβολές στη φυσιολογική ροή του αίματος:** Η στροβιλώδης ροή συμβάλλει στη θρόμβωση του αίματος στις αρτηρίες και στην καρδιά, με πρόκληση βλάβης ή δυσλειτουργίας του ενδοθηλίου, καθώς δημιουργείται στάση αίματος. Η στάση αίματος αποτελεί μείζονα παράγοντα για την ανάπτυξη θρόμβων. Αυτό είναι το βασικό στοιχείο που θα μελετηθεί κατά το πειραματικό μέρος της παρούσας. Δηλαδή, υπό ποιες συνθήκες και σε τι βαθμό ένα ανεύρυσμα στην αορτή δημιουργεί στροβιλισμούς στη ροή του αίματος, οι οποίοι με τη σειρά τους μπορεί να προκαλέσουν ή να επιταχύνουν το σχηματισμό θρόμβου.

Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται ένας μηχανισμός που προτείνεται για την επεξήγηση της συμβολής του ανευρύσματος στο σχηματισμό θρόμβου. Λόγω της διεύρυνσης, η ροή του αίματος διαταράσσεται και σχηματίζονται στροβιλισμοί. Τα αιμοπετάλια που εμπλέκονται στις δίνες και βρίσκονται κοντά στα τοιχώματα αποκτούν διατμηματικές τάσεις. Κάποια από αυτά επικάθονται ή απορροφώνται από το ενδοθήλιο, δημιουργώντας σταδιακά το θρόμβο, κυρίως κοντά στο τέλος του ανευρύσματος, λόγω χαμηλότερων διατμηματικών τάσεων στο τοίχωμα. Δεν έχει διευκρινιστεί αν ο σχηματισμός του θρόμβου προστατεύει ή επιταχύνει τη ρήξη του ανευρύσματος [H].



Στάδια σχηματισμού θρόμβου λόγω της ύπαρξης ανευρύσματος [H]

3) **Υπερηκτικότητα του αίματος:** Δεν είναι πολύ συνηθισμένη αιτία θρόμβωσης. Κυρίως προέρχεται από γενετικά ελαττώματα ή αυτοάνοσες διαταραχές

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να εξετάσει μέσω εξομοίωσης με χρήση λογισμικού την επίδραση του ανευρύσματος στην κατιούσα αορτή στη ροή του αίματος και την πιθανότητα συμβολής του στο σχηματισμό θρόμβωσης.

3.1 Μεθοδολογία

Για την επίλυση και μελέτη των διάφορων σεναρίων Ανευρύσματος Κατιούσας Αορτής στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υιοθετήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση του λογισμικού LISA. Η ροή του αίματος μοντελοποιήθηκε από το λογισμικό με τις εξισώσεις Navier – Stokes για ασυμπύεστο ισοτροπικό ρευστό.

Στα προηγούμενα κεφάλαια και πριν τη μοντελοποίηση και ανάλυση του προβλήματος με τη χρήση υπολογιστή παρουσιάστηκε συνοπτικά η φυσική που διέπει το συγκεκριμένο πρόβλημα, ώστε να γίνουν οι κατάλληλες παραμετροποιήσεις στο λογισμικό και στο πλέγμα.

3.1.1 Εξισώσεις Navier – Stokes

Το γεωμετρικό μοντέλο που δημιουργείται για την αρτηρία επιλύεται από το λογισμικό που υπολογίζει τα διάφορα ρευστομηχανικά μεγέθη. Το πεδίο ροής μοντελοποιείται με τις εξισώσεις που είναι γνωστές ως εξισώσεις «Navier-Stokes». Χωρίς να εμβαθύνουμε στο πώς αυτές οι εξισώσεις προκύπτουν από τις βασικές εξισώσεις για τα ρευστά της παραγράφου 1.2, τις παραθέτουμε για λόγους πληρότητας. Οι εξισώσεις αυτές γράφονται σε διανυσματική μορφή ως εξής :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\mu} \cdot (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)) + \nabla(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{g}$$

Εξισώσεις Navier – Stokes

Επειδή η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων αυτών για τις γεωμετρίες που μελετούμε είναι αδύνατη χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι αριθμητικού (με χρήση υπολογιστή) υπολογισμού τους. Έτσι οι γεωμετρίες χωρίζονται σε απειροστά στοιχεία (πεπερασμένα στοιχεία) του χώρου που το καθένα τροφοδοτείται από το προηγούμενο του, ενώ τα αρχικά στοιχεία τα ορίζει ο χρήστης του λογισμικού με τιμές που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (αρχικές συνθήκες) [12].

3.1.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος διακριτοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε αρχικά ως ένα εργαλείο επίλυσης προβλημάτων στον τομέα της αντοχής των υλικών. Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, ο υπό εξέταση χώρος διαιρείται σε έναν αριθμό στοιχείων. Ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή δύναται να εφαρμοστεί σε περίπλοκες γεωμετρίες. Αρχικά, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις σε κάθε στοιχείο πολλαπλασιάζονται με έναν συντελεστή (relaxation factor), προτού δηλαδή συμπεριληφθούν στο σύστημα των εξισώσεων. Στη συνέχεια η λύση προσεγγίζεται με μία νέα συνάρτηση για κάθε στοιχείο με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η συνοχή της λύσης στα όρια των στοιχείων. Η εν λόγω μέθοδος έχει επιδείξει έως σήμερα θετικά αποτελέσματα ακόμη και σε ιδιαίτερα πολύπλοκες γεωμετρίες. Αν και παραμένει το κύριο υπολογιστικό εργαλείο για την επίλυση δομικών προβλημάτων, εφαρμόζεται επιτυχώς και σε προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η πιο διαδεδομένη για την επίλυση των εξισώσεων που ελέγχουν τη ροή του αίματος. Η εφαρμογή της μεθόδου στο παρελθόν έχει δοκιμαστεί και πιστοποιηθεί σε πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές [3].

3.1.3 Λογισμικό LISA

Το LISA είναι ένα πακέτο λογισμικού εξομοίωσης μηχανικών προβλημάτων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Ως στοιχεία θεωρεί είτε τους κόμβους, είτε επιφάνειες (μέθοδος πεπερασμένων επιφανειών), είτε όγκους (μέθοδος πεπερασμένων όγκων). Περιλαμβάνει λογισμικό σχεδίασης για την εξεταζόμενη γεωμετρία και δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής έτοιμου σχεδίου από αρχείο της μορφής .cad. Επίσης επιτρέπει τη συγχώνευση σχεδίων για την επίτευξη πιο πολύπλοκων γεωμετριών.

Το πλέγμα των υπό εξέταση στοιχείων επιτρέπει τη σύνδεση για τη μεταφορά ιδιοτήτων μόνο μεταξύ ίδιων στοιχείων, π.χ. στην περίπτωση μας, κόμβος με κόμβους και όχι με κάποιο όγκο.

Εκτός από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος (solver) με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων προσφέρει και τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων (graphical post processor). Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του, κάθε πρόβλημα απαιτεί διαφορετική αντιμετώπιση και στη σχεδίαση των τμημάτων του πλέγματος και προφανώς στη μέθοδο επίλυσης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αρχικά χρησιμοποιήθηκε η δωρεάν έκδοση 8.0.0., η οποία σε σύγκριση με το πλήρες πρόγραμμα παρέχει το σύνολο των δυνατοτήτων με τον περιορισμό ότι το πλέγμα (mesh) προς επίλυση δεν μπορεί να αποτελείται από περισσότερους από 1.300 κόμβους (nodes) – πεπερασμένα στοιχεία. Παρά την κυλινδρική συμμετρία στην αρτηρία, ο περιορισμός αυτός κρίθηκε σημαντικός και τελικώς χρησιμοποιήθηκε η πλήρης έκδοση 7.5.1 με επίλυση πλεγμάτων έως και 50.000 κόμβων. Η δημιουργία πλεγμάτων έως 13.000

κόμβων με 4.224 στοιχεία τύπου quad8 τελικά κρίθηκε ικανοποιητική. Επίσης σημαντικό ρόλο φάνηκε ότι διαδραματίζει ο τρόπος σχηματισμού του πλέγματος. Πλέγματα που σχεδιάστηκαν από μηδενική βάση είχαν αδυναμία σύγκλισης και για το λόγο αυτό προτάθηκε η παρούσα εργασία να βασιστεί στο έτοιμο από το λογισμικό πλέγμα του υποδείγματος modf36.

Η αδυναμία του λογισμικού LISA είναι ότι σε περίπτωση τυρβώδους ροή είναι πιθανό να μην αποδώσει αποτελέσματα λόγω μη σύγκλισης. Αυτό είναι πιθανό να συμβεί σε περιοχές με έντονη διαφοροποίηση στις οριακές συνθήκες, ή σε περιοχές με απότομη μεταβολή στη γεωμετρία, όπως στα εξεταζόμενα στην παρούσα σενάρια.

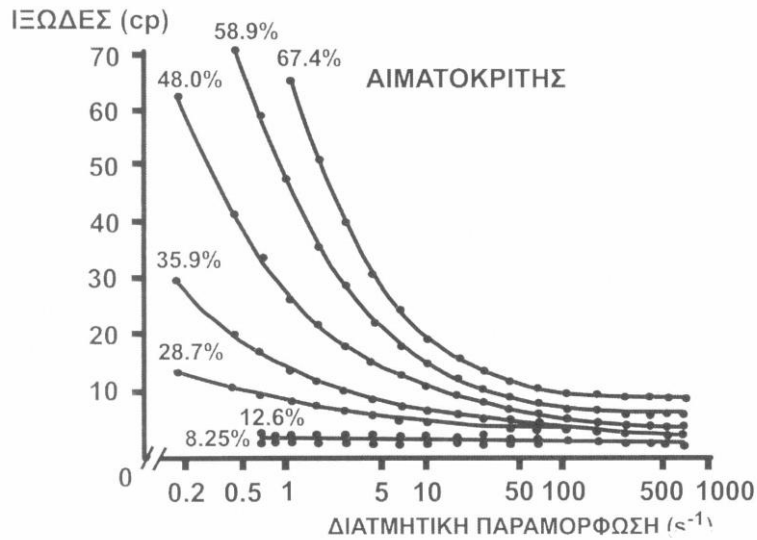
3.2 Εφαρμογή – Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη χρήση του λογισμικού, ώστε να σχεδιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος και να επιλύεται ικανοποιητικά. Επίσης, παρουσιάζονται τα σενάρια που διερευνήθηκαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

3.2.1 Παραδοχές

Για τη διευκόλυνση στη χρήση του λογισμικού LISA στη μοντελοποίηση της ροής στο σημείο διεύρυνσης της αορτής λόγω του ανευρύσματος έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

Το αίμα έχει κάποιες ιδιομορφίες όσον αφορά στην σύνθεσή του που το διαφοροποιούν από τα συνήθη ρευστά. Αποτελείται από το πλάσμα, δηλαδή από νερό, ανόργανα ιόντα και πρωτεΐνες, και από αιμοπετάλια, ερυθρά και λευκά αιμοσφαίρια. Η συμπεριφορά του αίματος σε αγγεία μικρότερα των 100μm παρουσιάζει λόγω της ύπαρξης σωματιδίων μεγαλύτερων από 1μm σημαντικά μη νευτώνεια συμπεριφορά. Η αορτή όμως έχει διάμετρο πολύ μεγαλύτερη (25-30mm) και συνεπώς η θεώρηση της νευτώνειας συμπεριφοράς μπορεί να θεωρηθεί ορθή. Έτσι θεωρούμε το αίμα ομογενές και με σταθερή τιμή για το ιξώδες, άρα νευτώνιο υγρό [2,11], ίση με $3.5 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ [3].



Στην πραγματικότητα το ιξώδες του αίματος εξαρτάται από τον αιματοκρίτη και τις διατμηματικές τάσεις [2]

Η πυκνότητα του αίματος θεωρείται σταθερή και συνεπώς θεωρούμε ασυμπίεστη ροή. Η αλλαγή της πυκνότητας μπορεί να προκληθεί και με αλλαγή της θερμοκρασίας [2], την οποία εδώ επίσης θεωρούμε σταθερή (δε λαμβάνουμε υπόψη τη μεταφορά θερμότητας προς και από το ρευστό), δηλαδή θεωρούμε ισητροπική ροή (“isotropic flow”).

Η γεωμετρία της αορτής συνολικά είναι σύνθετη. Για τη μοντελοποίηση της ροής αναπαριστάται ως κυλινδρικός αγωγός με μονόπλευρη διεύρυνση. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η αορτή λόγω κυλινδρικής συμμετρίας αναπαριστάται σε δύο διαστάσεις [7]. Το σακκοειδές ανεύρυσμα αποτυπώνεται ως μονόπλευρη αύξηση της διαμέτρου. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι απλοποιημένες γεωμετρίες δεν αναπαριστούν με ιδιαίτερη ακρίβεια την πραγματική ροή σε ανευρύσματα λόγω της ιδιαίτερης και τυχαίας γεωμετρίας τους [13].

Η αορτή θεωρείται ως ένας μακρύς σωλήνας, συγκρινόμενος με την μελετώμενη περιοχή. **Η φυσιολογική διάμετρος της λαμβάνεται ίση με 28mm.** Η διεύρυνση σχεδιάζεται ως ακαριαία (σηματισμός «δοντιού»), ώστε πιθανές ανωμαλίες στη

ροή να εντοπιστούν πιο εύκολα, ακόμα και ως μη σύγκλιση της επίλυσης σε αποτέλεσμα.

Δεν εξετάζεται η επίδραση της γεωμετρίας του τέλους του ανευρύσματος. Εξετάζεται μόνο το τμήμα της εισόδου στο ανεύρυσμα – διεύρυνση αορτής, και όχι το στένωμα στην έξοδο. Οποιαδήποτε ανωμαλία στη ροή εντοπιστεί λόγω της απότομης διεύρυνσης εικάζεται ότι στην πραγματικότητα εντείνεται λόγω της στένωσης στην έξοδο του ανευρύσματος.

Κατά τη διάρκεια του καρδιακού κύκλου, η διάμετρος της αορτής και κάθε αρτηρίας πάλλεται ώστε να διατηρείται η πίεση ανά σημείο σταθερή. Εδώ η αορτή μοντελοποιείται ως αγωγός σταθερής διαμέτρου και το αίμα έχει σταθερή πίεση [7].

Το ρευστό δεν ολισθαίνει στα τοιχώματα της αορτής.

Ο ρυθμός ροής είναι σταθερός και δεν υπόκειται σε μεταβολή (επιτάχυνση ή επιβράδυνση). Έτσι χρησιμοποιούμε τη δυνατότητα εξομοίωσης από το LISA «steady flow fluid». Στην είσοδο η παροχή, η ταχύτητα και η πίεση θεωρούνται σταθερά.

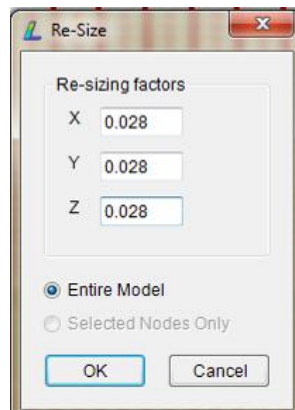
3.2.2 Διαδικασία επίλυσης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

- Σχεδίαση του περιγράμματος του πλέγματος. Για κάθε σενάριο για το μέγεθος του ανευρύσματος άλλαζε κατάλληλα η γεωμετρία του περιγράμματος. Για να είναι δυνατή η λύση του προβλήματος από το LISA, το μήκος της αρτηρίας μετά τη διεύρυνση έπρεπε να είναι σημαντικά μεγαλύτερο της διαμέτρου της, ώστε να αναπτύσσεται πλήρως η ροή. Από τη βιβλιογραφία [14], η ροή αναπτύσσεται πλήρως έπειτα από μήκος 40-120 φορές τη φυσιολογική διάμετρο, κάτι που δε συμβαίνει λόγω των πολλών διακλαδώσεων ούτε στο ανθρώπινο σώμα. Για την επίλυση του προβλήματος με χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes, το πλέγμα πρέπει να

υλοποιηθεί με τη χρήση στοιχείων οκτώ (8) κόμβων (quad8) ή έξι (6) κόμβων (tri6). Επιλέχθηκαν τα στοιχεία quad8.

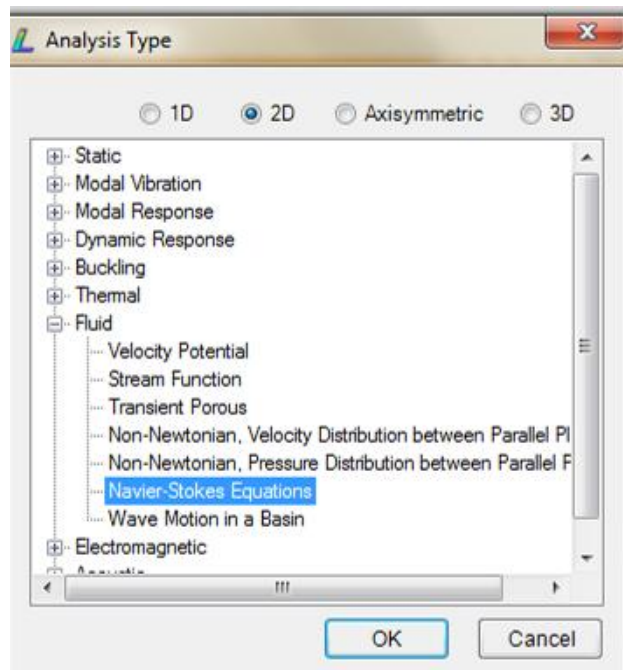
- Λόγω προβλημάτων στη σύγκλιση της επίλυσης σε πλέγματα που είχαν σχεδιαστεί εξ' αρχής, η παρούσα εργασία βασίστηκε στο πλέγμα του υποδείγματος modf36 που διαθέτει το πακέτο του λογισμικού. Το πλέγμα είναι βασισμένο σε στοιχεία οκτώ κόμβων (quad8). Αρχικά μέσω της εντολής «Nodes -> Re-Size» και με κλίμακα 0,028, η είσοδος του μίκρυνε από 1μέτρο σε 0.028χιλιοστά, όσο και η διάμετρος της αορτής, με ταυτόχρονη μεταβολή και των υπολοίπων διαστάσεων σε ολόκληρο το μοντέλο. Το μήκος από το σχηματισμό του ανευρύσματος έως την έξοδο είναι 5 φορές η διάμετρος της ($5 \times 0,028 = 0,14\text{m}$)



Παράθυρο της εντολής Re-Size

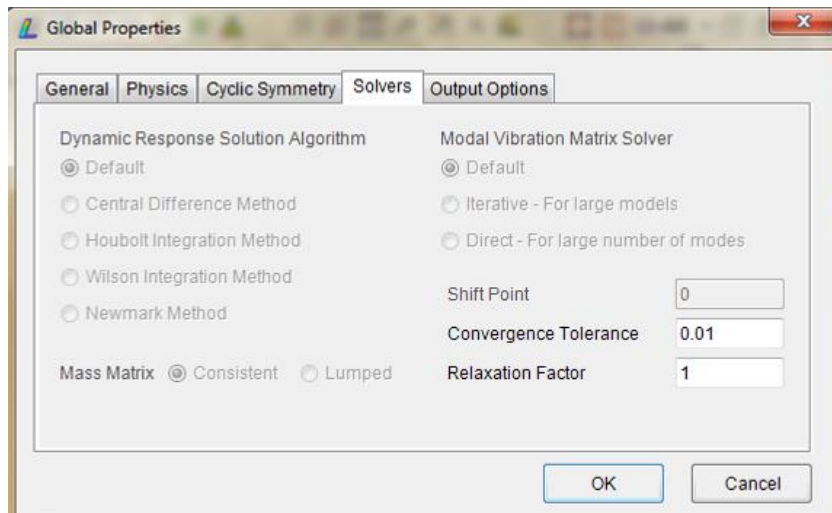
- Στη συνέχεια, ανάλογα με το μέγεθος του υπό εξέταση ανευρύσματος γινόταν «Re -Size» κατά τον άξονα y μόνο του επιλεγμένου τμήματος που αφορούσε το ανεύρυσμα.
- Διαίρεση του πλέγματος για την αύξηση των κόμβων επίλυσης με χρήση της εντολής «Elements -> Refine». Τα υφιστάμενα στοιχεία διαιρούνται στο μισό σε κάθε πλευρά, και έτσι τετραπλασιάζονται τα στοιχεία του πλέγματος, όχι όμως οι κόμβοι. Δεν μπορεί να γίνει «Refine» σε τμήμα του πλέγματος. Επιλύθηκαν πλέγματα έως 50.000 κόμβους. Κρίθηκαν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα από πλέγματα έως 13.000 κόμβους.
- Επιλογή του είδους του προβλήματος: Από την καρτέλα «Model -> Analysis Type» επιλέγεται «2D» -> «Fluid -> Navier-Stokes Equations».

Το ρευστό έχει θεωρηθεί «νευτώνιο» και έτσι απορρίπτεται οι επιλογές “Non-Newtonian”. Επειδή η επίδραση του ιξώδους επιθυμούμε να συνεκτιμηθεί (viscous fluid – μη ιδανικό), απορρίπτεται και η επιλογή “Fluid Potential Flow”



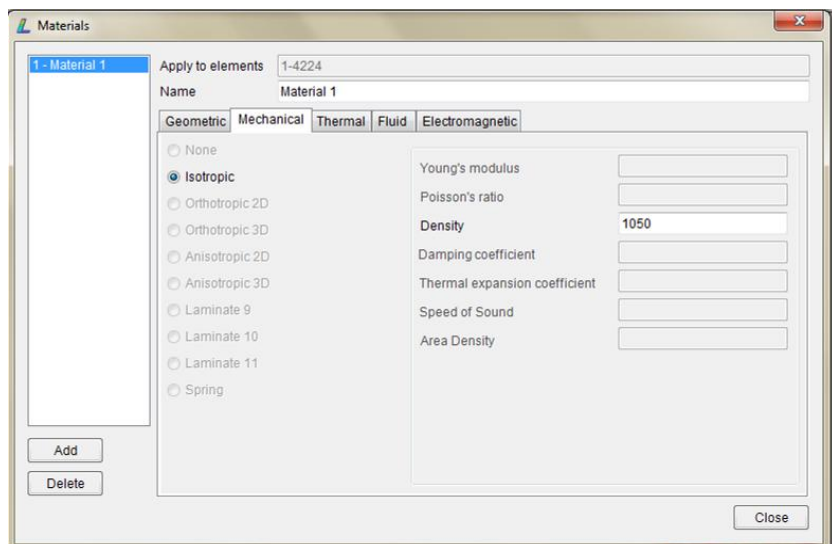
Παράθυρο Model -> Analysis Type -> 2D

- Εισαγωγή των παραμέτρων για τη σύγκλιση της αριθμητικής επίλυσης. Από την καρτέλα «Model -> Global Properties» επιλέγεται η καρτέλα «Solvers». Από το manual για το λογισμικό προτείνεται η ανοχή στη σύγκλιση του αποτελέσματος (convergence tolerance) να οριστεί στο 0,01. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η αριθμητική επίλυση του προβλήματος από το LISA θα επαναλαμβάνεται (iterate) μέχρι τα αποτελέσματα για όλα μεγέθη να διαφοροποιούνται μεταξύ των επαναλήψεων λιγότερο από 0,01. Ακόμα και σύγκλιση 0,05 θα μπορούσε να θεωρηθεί ικανοποιητική.

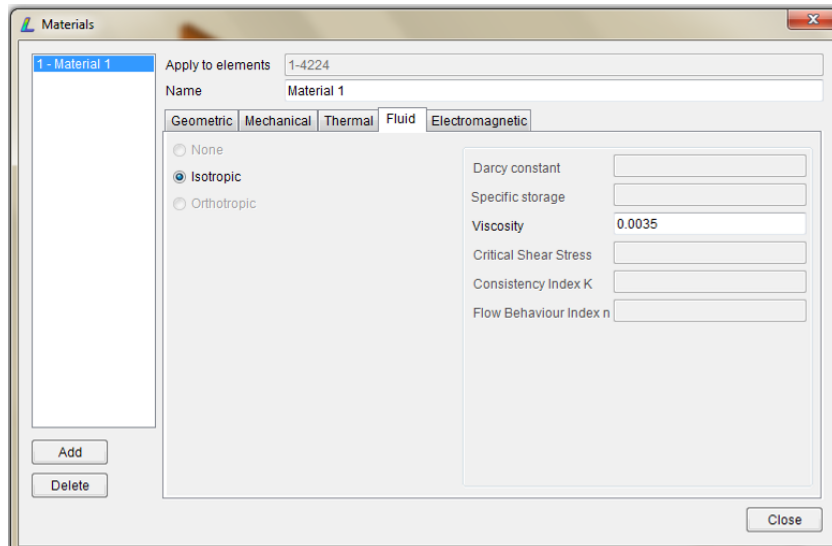


Παράθυρο Model -> Global Properties -> Solvers

- Εισαγωγή των παραμέτρων για το ρευστό. Στην καρτέλα «Model -> Material» θέτουμε στην καρτέλα «Mechanical» ιστροπικό με πυκνότητα $1050 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ και στην καρτέλα «Fluid» ιστροπικό με ιξώδες $0,0035 \text{ (Pa.s)}$. Από το λογισμικό λόγω της επιλογής της ανάλυσης είναι απενεργοποιημένες οι επιλογές για γεωμετρικά, θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά.



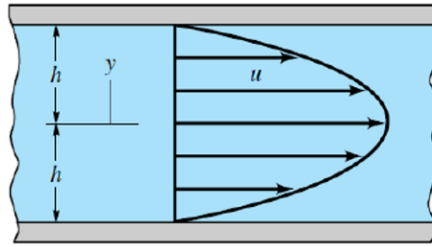
Παράθυρο Materials -> 1 - Material 1 -> Mechanical



Παράθυρο Materials -> 1 - Material 1 -> Fluid

- Εισαγωγή των δεδομένων ταχύτητας και πίεσης (οριακές συνθήκες) στους αντίστοιχους κόμβους. Οι τιμές που μπορούν να ορισθούν ή αλλιώς ζητείται να υπολογισθούν είναι οι εξής πέντε: αρχική ταχύτητα στον άξονα x (startvelx), αρχική ταχύτητα στον άξονα y (startvely), τελική ταχύτητα στον άξονα x (velx), τελική ταχύτητα στον άξονα y (vely), και πίεση (nodepressure).
 - Λόγω της συνθήκης μη διείσδυσης και μη ολίσθησης στα τοιχώματα, όλες οι ταχύτητες εκεί (velx, vely) ορίζονται ως μηδέν [8]. Στο manual του λογισμικού αναφέρεται ότι αυτό θα γινόταν και αυτομάτως κατά την επίλυση. Η προσθήκη τιμών σε κόμβο γίνεται ως εξής: Επιλέγονται οι κόμβοι στους οποίους επιθυμείται να οριστεί η ίδια τιμή, επιλέγεται η καρτέλα «Constraints» και στη συνέχεια «Add / Edit»
 - Η πίεση στην έξοδο ορίζεται μηδενική, γιατί η ροή δεν οφείλεται σε απόλυτη πίεση αλλά στη διαφορά πίεσης.
 - Ταχύτητα εισόδου 0,1m/s στην κορυφή από παραβολικό προφίλ μεταξύ παράλληλων πλακών.

$$u = \frac{3V}{2} \left[1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right]$$



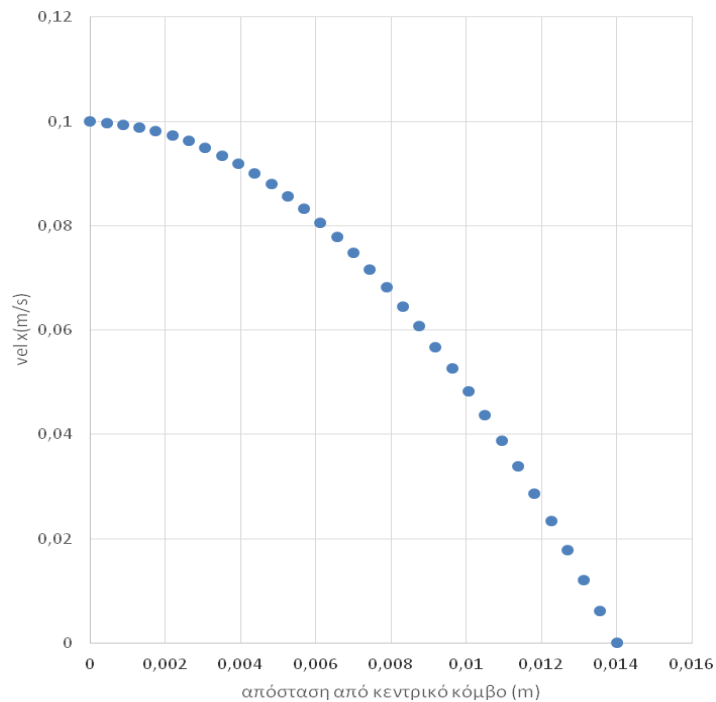
Παραβολικό προφίλ εισόδου

Για να έχουμε στην κορυφή ταχύτητα 0,1m/s, πρέπει - βάσει του ανωτέρω τύπου - η μέση ταχύτητα να είναι $V_{mean} = 2/3 V_{max} = 0,066m/s$. Στην πραγματικότητα η ταχύτητα του αίματος στην αορτή είναι μικρότερη, περίπου 0,02 – 0,03m/s. Το ύψος είναι $h = 0,028/2 = 0,014m$. Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων του πλέγματος είναι 0,0004375m και λόγω κατασκευής μέσω της χρήσης εντολής Re-Size είναι σταθερή σε όλη την είσοδο. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας για τις τιμές της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας u_{velx} στην είσοδο.

Απόσταση y από τον κεντρικό κόμβο	y/h	velx (y)
0	0	0,1
0,0004375	0,03125	0,099652588
0,000875	0,0625	0,099360352
0,0013125	0,09375	0,098873291
0,00175	0,125	0,098191406
0,0021875	0,15625	0,097314697
0,002625	0,1875	0,096243164
0,0030625	0,21875	0,094976807
0,0035	0,25	0,093515625
0,0039375	0,28125	0,091859619
0,004375	0,3125	0,090008789
0,0048125	0,34375	0,087963135
0,00525	0,375	0,085722656
0,0056875	0,40625	0,083287354
0,006125	0,4375	0,080657227
0,0065625	0,46875	0,077832275
0,007	0,5	0,0748125
0,0074375	0,53125	0,0715979
0,007875	0,5625	0,068188477
0,0083125	0,59375	0,064584229
0,00875	0,625	0,060785156
0,0091875	0,65625	0,05679126
0,009625	0,6875	0,052602539
0,0100625	0,71875	0,048218994
0,0105	0,75	0,043640625
0,0109375	0,78125	0,038867432
0,011375	0,8125	0,033899414
0,0118125	0,84375	0,028736572
0,01225	0,875	0,023378906
0,0126875	0,90625	0,017826416
0,013125	0,9375	0,012079102
0,0135625	0,96875	0,006136963
0,014	1	0

Τιμές ταχύτητας εισόδου velx

Γραφικά οι τιμές αυτές δίνουν το παρακάτω παραβολικό προφίλ:

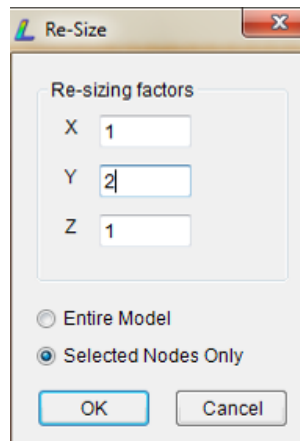


Παραβολικό προφίλ για την οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας εισόδου velx

- Επίλυση του προβλήματος με το ενσωματωμένο υπολογιστικό εργαλείο (solver)
- Γραφική παρουσίαση του αποτελέσματος

3.2.3 Εξεταζόμενα σενάρια και επίλυση τους

Για τη διερεύνηση της ροής στο σημείο του ανευρύσματος εξετάστηκαν δύο (2) πιθανοί σχηματισμοί σακκοειδούς ανευρύσματος: 50 και 100% πλέον της φυσιολογικής διαμέτρου, δηλαδή ανευρύσματα 42 και 56 χιλιοστών. Οι οριακές συνθήκες παραμένουν οι ίδιες. Η μόνη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο πλεγμάτων είναι η κατακόρυφη απόσταση των κόμβων μόνο εντός του ανευρύσματος. Αυτή διπλασιάζεται με εκτέλεση της εντολής «Re-Size» στους κόμβους αυτούς μόνο κατά τον άξονα y.



Re-Size στον άξονα y

Σημειώνεται ότι δεν είναι εφικτή η τοπική πύκνωση του πλέγματος λόγω της γεωμετρίας των στοιχείων οκτώ (8) κόμβων (quad8). Ο μόνος τρόπος τοπικής πύκνωσης είναι η εξ' αρχής σχεδίαση του πλέγματος με τέτοιο τρόπο ώστε στα σημεία ενδιαφέροντος να υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι. Κάτι τέτοιο δοκιμάστηκε με τη σχεδίαση εντελώς νέου πλέγματος στα πλαίσια της παρούσας, το οποίο παρουσίαζε προβλήματα κατά την επίλυση. Δεν ήταν δυνατή η επίτευξη σύγκλισης ακόμα και σε πλέγματα 3.000 περίπου κόμβων ακόμα και μετά από δύο (2) ώρες. Με τη χρήση του πλέγματος του παραδείγματος modf36 η λύση είναι εφικτή σε πλέγμα 13.000 κόμβων εντός ενός (1) λεπτού!

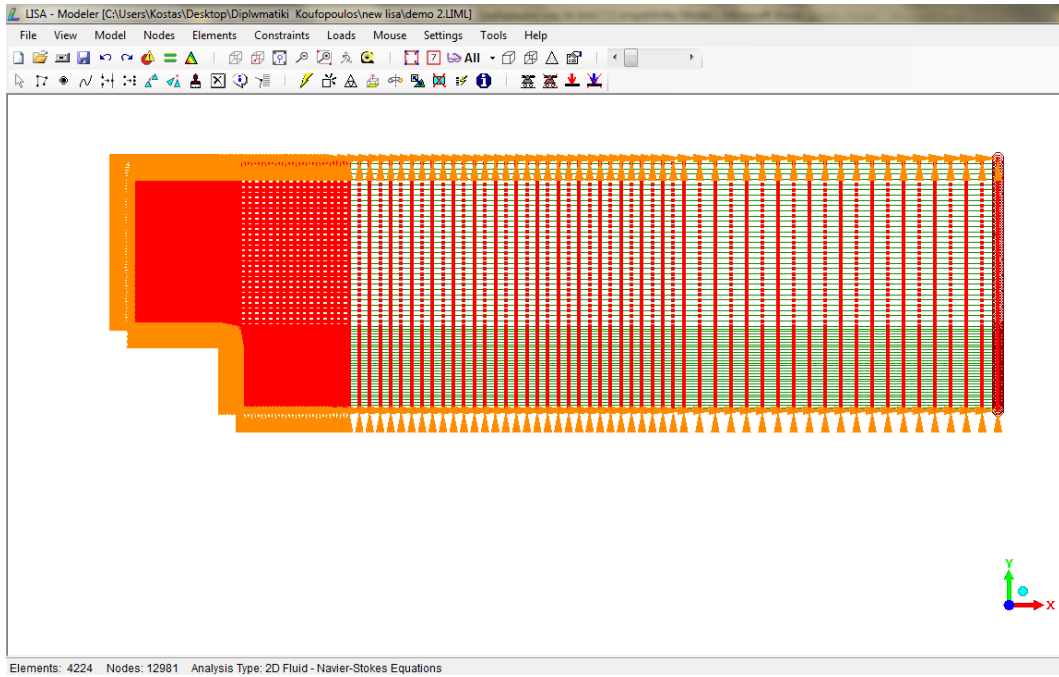
Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία στη διαμόρφωση των προβλημάτων στο πλέγμα παρέμειναν ίδια.

Από τις επιλογές που έγιναν προκύπτει ότι αριθμός Reynolds θα είναι:

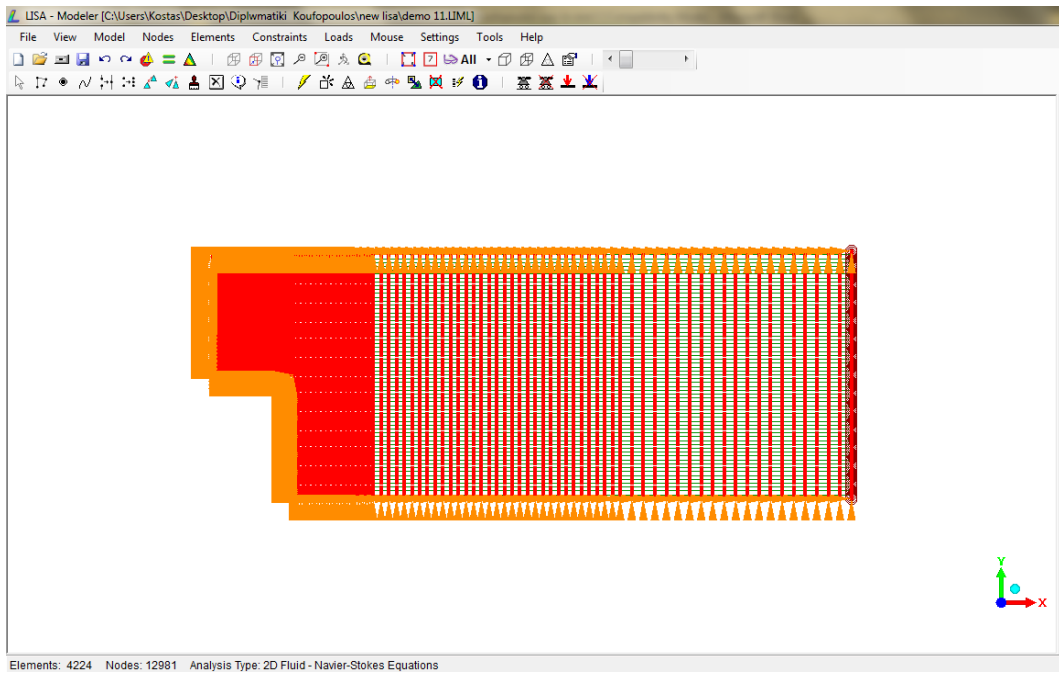
$$Re = \rho v d / \mu = 1050 \times 0.0665 \times 0.028 / 0.0035 = 558,6 < 2.100$$

οπότε είμαστε σε κατάσταση στρωτής ροής στην είσοδο.

Στις παρακάτω φωτογραφίες δίνονται οι μορφές των πλεγμάτων μετά την καταχώρηση των οριακών συνθηκών και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

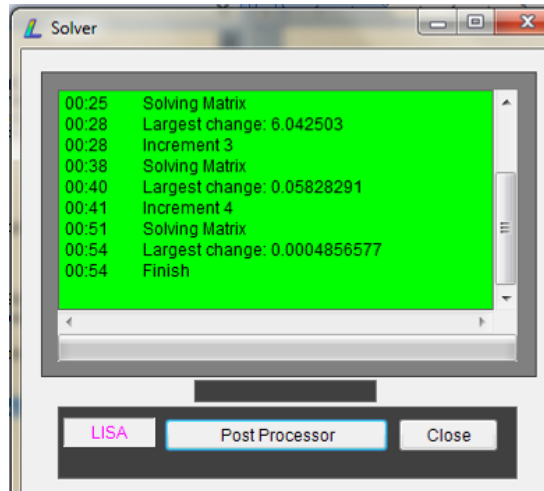


Πλέγμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 50%



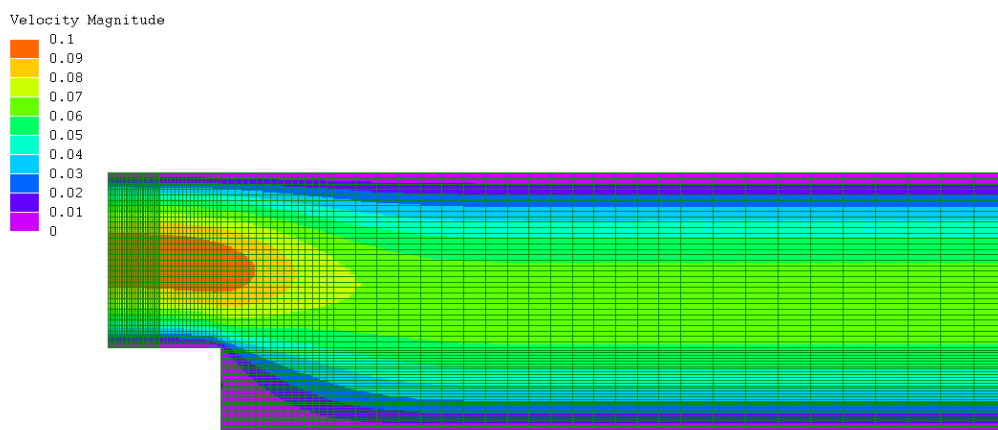
Πλέγμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 100%

Η επίλυση δεν ήταν χρονοβόρα και απαιτήθηκαν μόλις τέσσερις επαναλήψεις και χρόνος περίπου ένα λεπτό για να επιτευχθεί σύγκλιση 0,01 και στις δύο περιπτώσεις. Η παράμετρος που υπολογίζεται είναι το πλάτος της ταχύτητας.

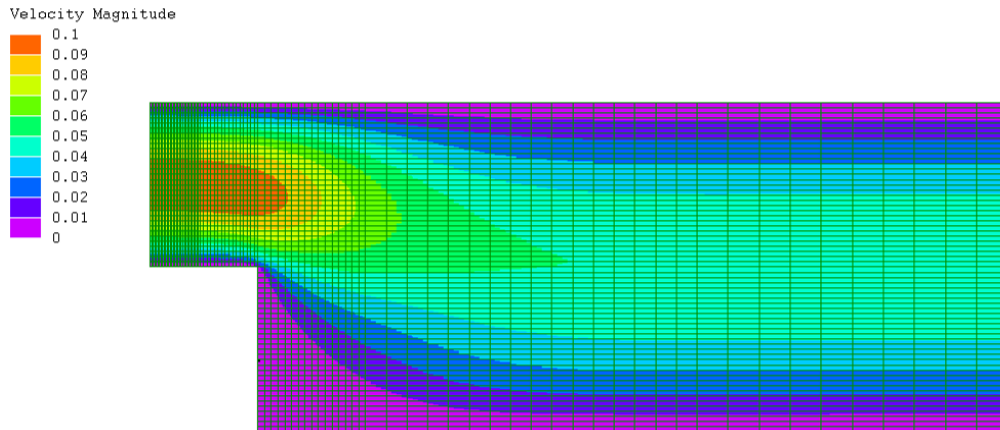


Παράθυρο προγράμματος επίλυσης (solver)

Η προεπιλογή του προγράμματος για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων είναι η εμφάνιση των αποτελεσμάτων του μεγέθους του πλάτους της ταχύτητας (Velocity Magnitude) από μηδέν έως τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας (0,1m/s). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Οι περιοχές (σημεία) με μαύρο χρώμα υποδηλώνουν δυσκολία ανεύρεσης λύσης.

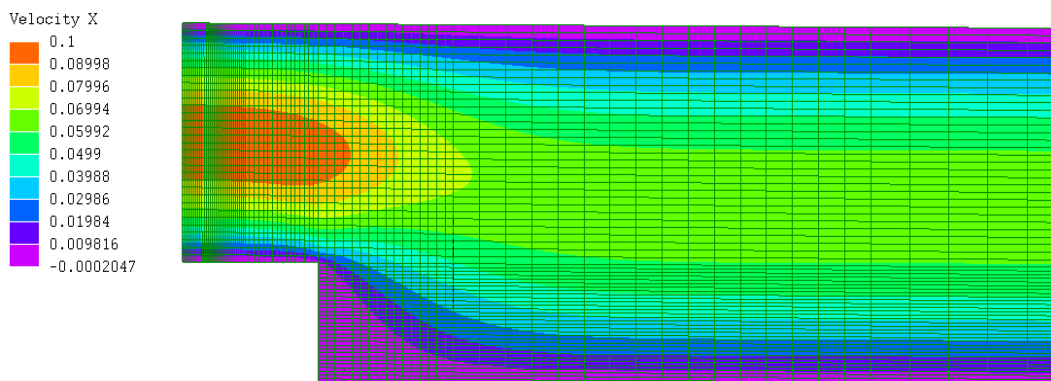


Γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 50% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity Magnitude”

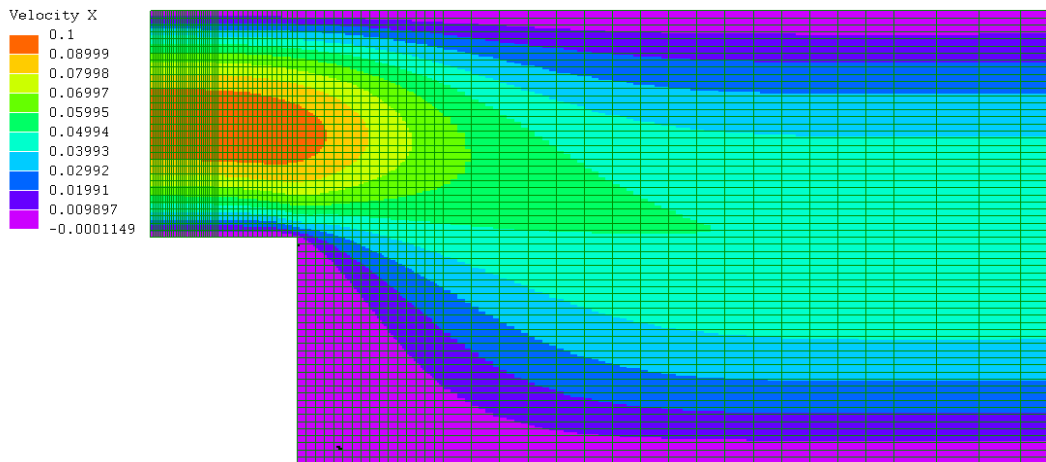


Γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 100% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity Magnitude”

Επειδή στόχος της εξομοίωσης είναι ο εντοπισμός σημείων πιθανού στροβιλισμού, προτιμήθηκε η αποτύπωση του μεγέθους ταχύτητας στον οριζόντιο άξονα (Velocity X), όπου αρνητικό πρόσημο θα δηλώνει ροή προς τα πίσω και πιθανό σημείο στροβιλισμού.



Γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 50% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity X”

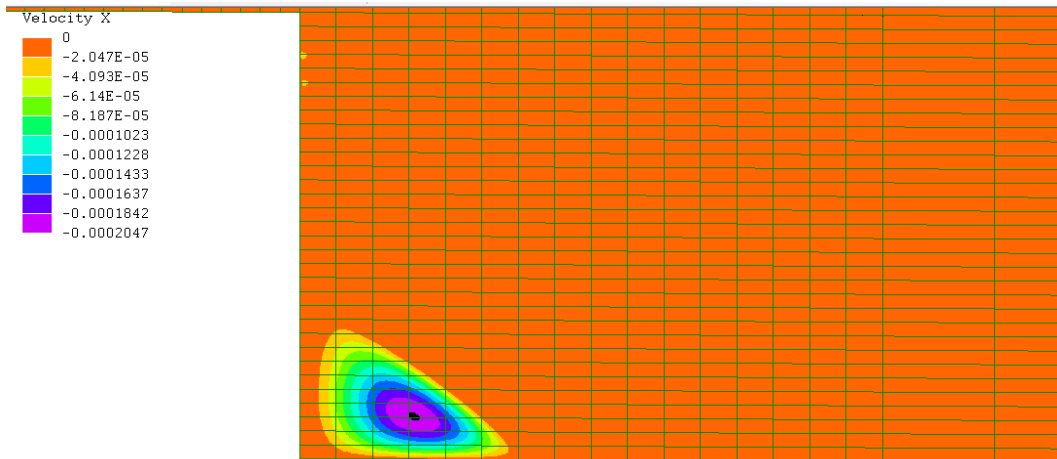


Γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 100% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity X”

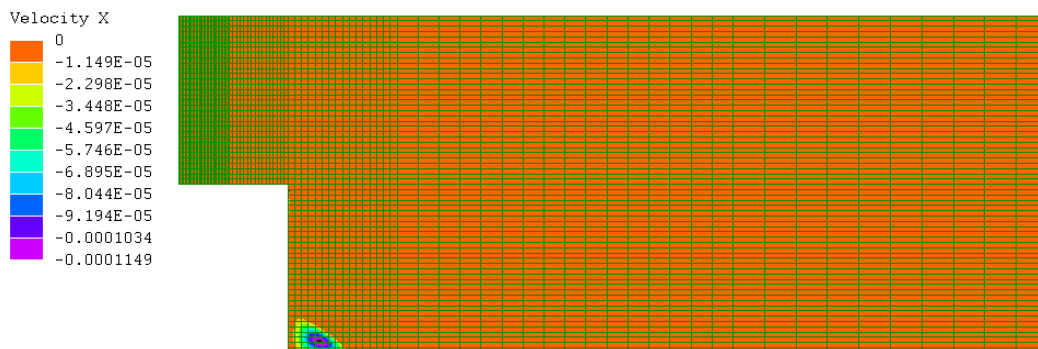
Στο υπόμνημα εμφανίζονται και αρνητικές τιμές εντός των μωβ περιοχών. Για να έχουμε καλύτερη άποψη σχετικά για τις περιοχές σχεδόν μηδενικής ταχύτητας αποφασίστηκε η απεικόνιση του αποτελέσματος και για διαφορετικό εύρος τιμών. Αφήνεται η ελάχιστη τιμή να καθοριστεί από το λογισμικό και η μέγιστη να είναι η μηδενική. Οι περιοχές με υψηλότερες ταχύτητες απεικονίζονται με το ίδιο χρώμα με τις μηδενικές (πορτοκαλί).



Γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 50% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity X” και περιορισμένο εύρος τιμών αποτύπωσης



Λεπτομέρεια από το γραφικό αποτέλεσμα στο ανεύρυσμα 50% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity X” και περιορισμένο εύρος τιμών αποτύπωσης

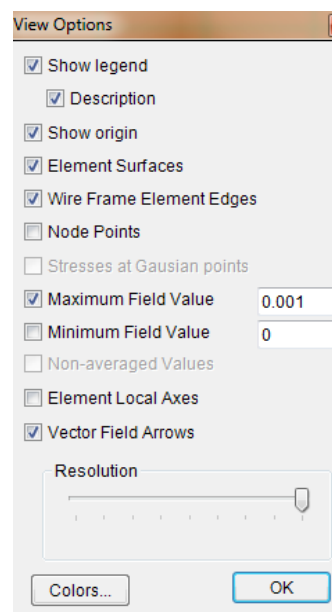


Γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανεύρυσμα 100% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity X” και περιορισμένο εύρος τιμών αποτύπωσης

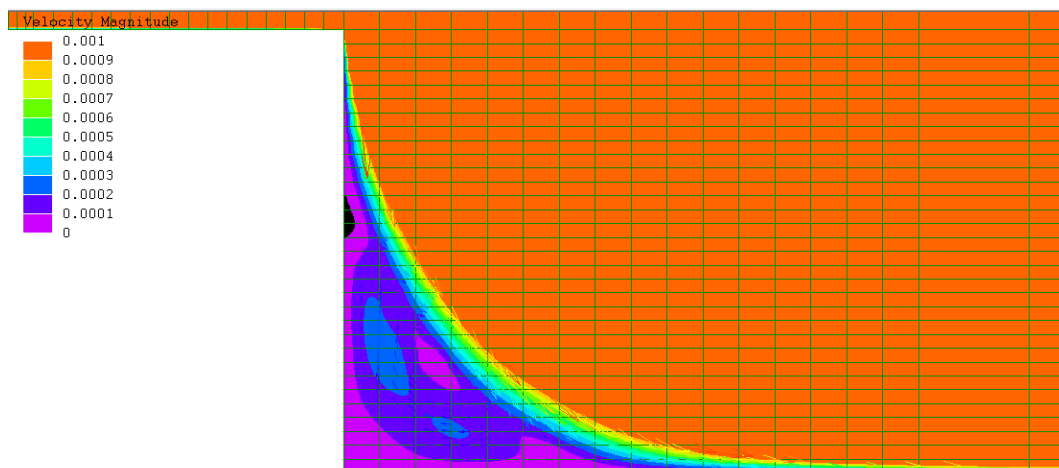


Λεπτομέρεια από το γραφικό αποτέλεσμα στο ανεύρυσμα 100% με αποτύπωση του μεγέθους “Velocity X” και περιορισμένο εύρος τιμών αποτύπωσης

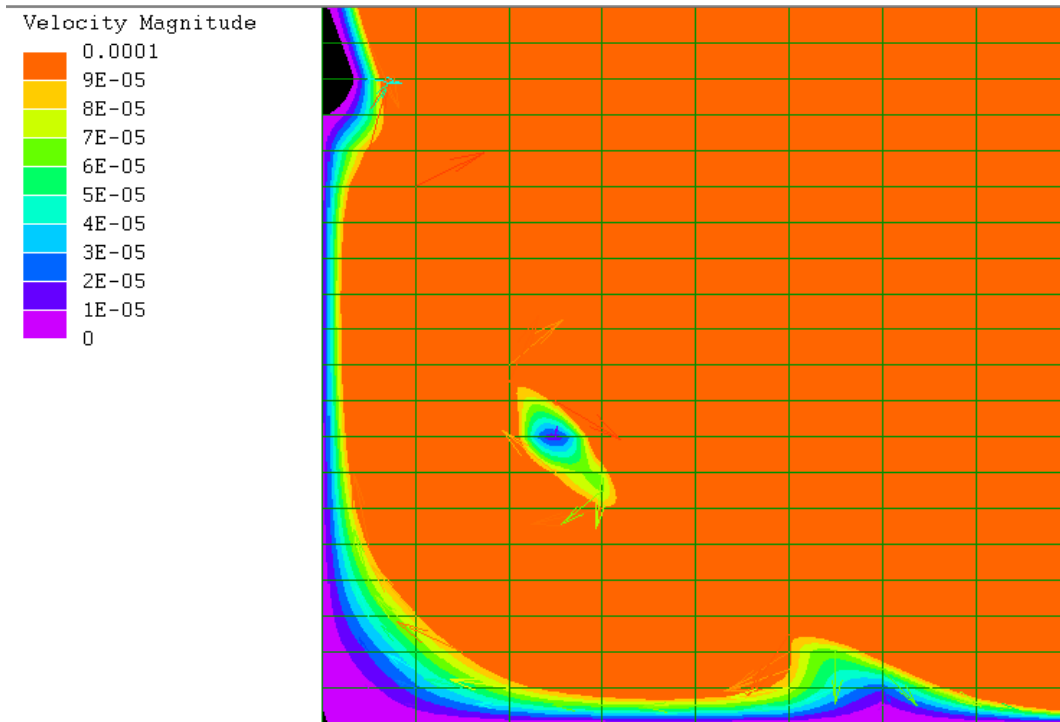
Μία άλλη επιλογή που μας βοηθάει στην απεικόνιση της ροής είναι η εμφάνιση στη λύση της φοράς του υπολογιζόμενου μεγέθους, δηλαδή του πλάτους της ταχύτητας ροής. Είναι η επιλογή «Vector Field Arrows» η οποία είναι λειτουργική όταν απεικονίζεται το μέγεθος “Velocity Magnitude”. Η εμφάνιση του συνόλου των αποτελεσμάτων δεν οδηγεί σε κάτι σημαντικό. Αν όμως περιορίσουμε το εύρος αποτύπωσης στην περιοχή των πολύ μικρών ταχυτήτων π.χ. στο εύρος 0-0.0001m/s τότε ξεχωρίζουν οι περιοχές στροβιλισμών. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



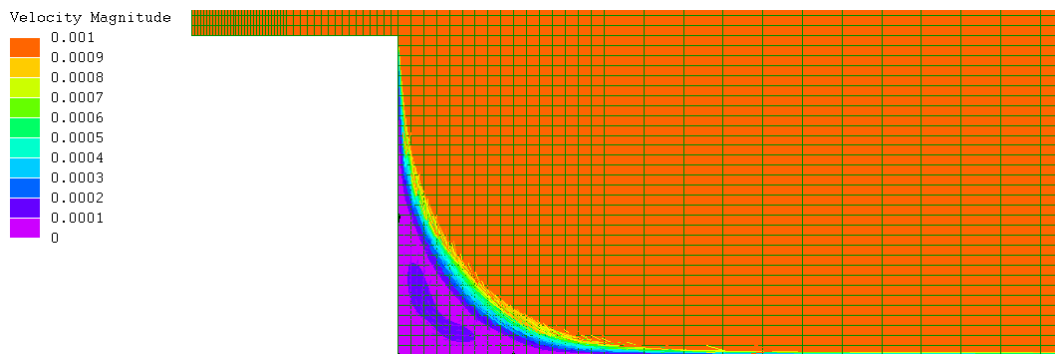
Παράθυρο View -> Options



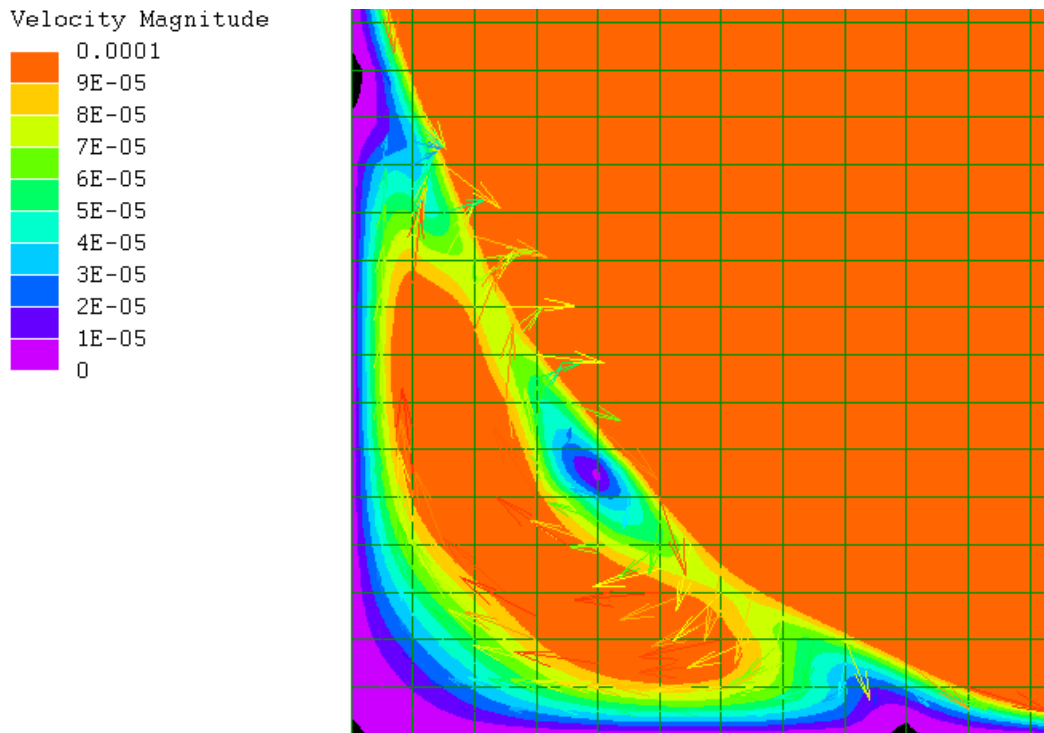
Λεπτομέρεια από το γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανέυρσμα 50% στο εύρος 0- 0,001m/s και ενεργοποίηση των Vector Field Arrows



Λεπτομέρεια από το γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανέυρσμα 50% στο εύρος 0- 0,0001m/s και ενεργοποίηση των Vector Field Arrows

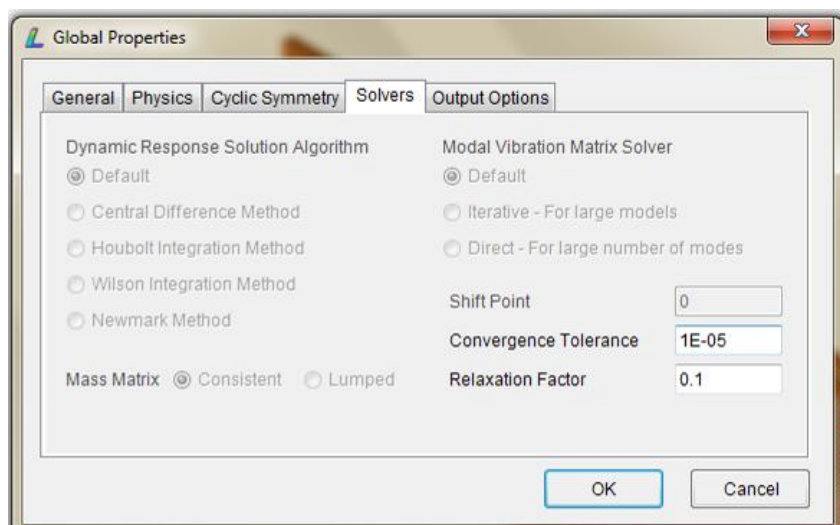


Λεπτομέρεια από το γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανέυρσμα 100% στο εύρος 0- 0,001m/s και ενεργοποίηση των Vector Field Arrows



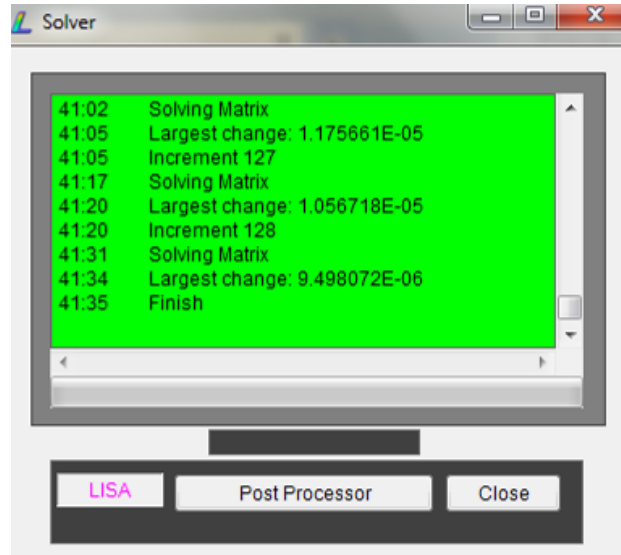
Λεπτομέρεια από το γραφικό αποτέλεσμα για εξομοίωση ροής σε αορτή με ανέυρσµα 100% στο εύρος 0-0,0001m/s και ενεργοποίηση των Vector Field Arrows

Ακριβώς το ίδιο γραφικό αποτέλεσμα προέκυψε αυξάνοντας το όριο σύγκλισης στο 0,0001m/s και το scale factor στο 0,1. Από το λογισµικό δίνεται ότι η µείωση του scale factor αυξάνει το χρόνο και τη σταθερότητα της λύσης.



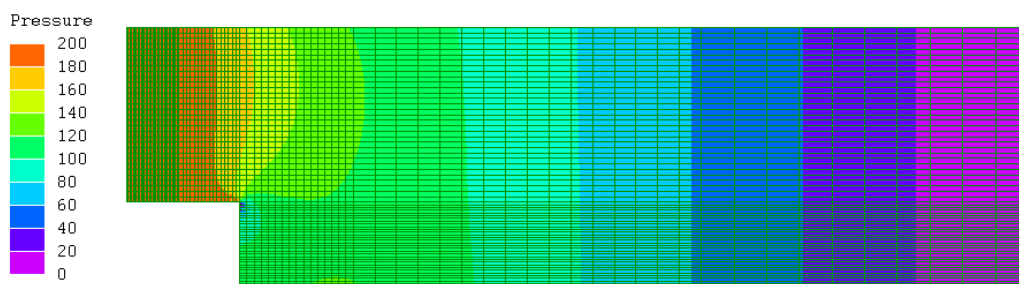
Χαμηλότερο όριο σύγκλισης και scale factor

Το αποτέλεσμα προέκυψε ύστερα από 42 λεπτά και 128 επαναλήψεις της επίλυσης.

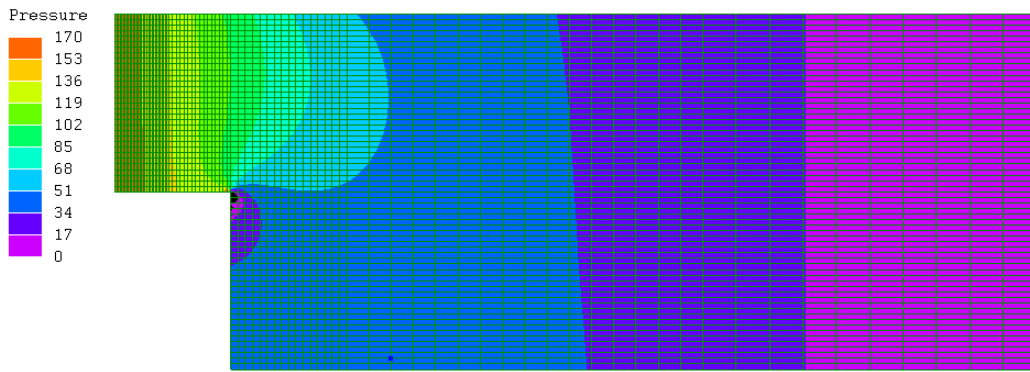


*Solver στο τέλος της εξομοίωσης
για σύγκλιση στο 0,0001m/s και scale factor στο 0.1*

Τέλος, δίνονται και τα γραφικά αποτελέσματα για την πτώση της πίεσης εντός της αορτής.



Διακύμανση της πίεσης σε αορτή με ανεύρυσμα 50%



Διακύμανση της πίεσης σε αορτή με ανεύρυσμα 100%

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετώντας τις παραπάνω αποτυπώσεις προκύπτουν κάποια συμπεράσματα τα οποία είναι γενικώς αναμενόμενα.

Κατ' αρχήν, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει το ανεύρυσμα, δηλαδή διευρύνεται ο αγωγός η ταχύτητα εξόδου μειώνεται. Έτσι, ενώ στην είσοδο που η ροή είναι φυσιολογική, η ταχύτητα στο μέσο της αορτής είναι 0,1m/s, στο ανεύρυσμα 50% έχει πέσει στα 0,066m/s και στο ανεύρυσμα 100% στα 0,49m/s. Άρα όσο διευρύνεται το ανεύρυσμα, η ταχύτητα ροής του αίματος μειώνεται εντός αυτού. Αναμενόμενο από την αρχή της συνέχειας για σταθερή παροχή.

Ο αριθμός Reynolds παραμένει στα ίδια επίπεδα, και μάλιστα μειώνεται ελαφρώς. Η πυκνότητα και το ιξώδες του αίματος παραμένουν σταθερά. Στην περίπτωση του ανευρύσματος 50%, ο Re μεταβάλλεται κατά $(0,066 / 0,1) \times 1,5 = 0,99$ και στην περίπτωση του ανευρύσματος κατά $0,49 \times 2 = 0,98$. Έτσι η ροή στην έξοδο παραμένει εξίσου στρωτή με την είσοδο.

Στο σημείο της διεύρυνσης εντοπίζεται μία τοπική υποπίεση, ως αποτέλεσμα της απότομης αύξησης της διαμέτρου. Η τοπική διαφοροποίηση της πίεσης είναι πιθανό να σχετίζεται με τη συνολική καταπόνηση των τοιχωμάτων της αορτής από το ανεύρυσμα, συμβάλλοντας στην περαιτέρω διεύρυνση του.

Στο ανεύρυσμα 50%, η ροή ομαλοποιείται περίπου μετά από μήκος περίπου ίσο με το διπλάσιο της διαμέτρου. Στο μεγαλύτερο ανεύρυσμα, η ροή ομαλοποιείται σε απόσταση περίπου τρεις φορές τη διάμετρο της αορτής. Μέχρι αυτό το μήκος αναμένουμε να βρούμε περιοχές στροβιλισμών ή αρχικά στάδια θρομβώσεων.

Όταν διευρύνεται η αορτή, παρατηρείται εκτός από μείωση της ταχύτητας ροής στην έξοδο και διεύρυνση της ζώνης πολύ μικρής ταχύτητας κοντά στα τοιχώματα. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του ανευρύσματος, αυξάνεται το πλάτος αυτής της ζώνης. Η πολύ χαμηλή ταχύτητα ροής (της τάξεως των 0,0001m/s), αν και στην

εξομοίωση δηλώνει ροή, σε πραγματικές συνθήκες και πιθανόν σε τοιχώματα με άλλες επικαθίσεις, να μηδενίζεται. Ειδικά στα σημεία εντός του δοντιού στην αρχή του ανευρύσματος, η αλλαγή στο εύρος αποτύπωσης δείχνει ότι οι ταχύτητες εκεί είναι σχεδόν μηδενικές, περίπου 100 ως 1000 φορές μικρότερες της ταχύτητας φυσιολογικής ροής.

Ειδικά στις περιοχές αυτές, εμφανίζονται και σημεία με αρνητικές τιμές ταχύτητας, δηλαδή όπισθεν φορά. Αυτά είναι τα σημεία των στροβιλισμών, που στοχεύαμε να εντοπίσουμε. Στην αποτύπωση με τα βέλη φοράς εμφανίζεται και στις δύο περιπτώσεις ένας στροβιλισμός με μικρές ταχύτητες, της τάξης των 0,0001m/s. Είναι κοινό ότι αυτές οι περιοχές είναι πολύ κοντά στο σημείο της απότομης διεύρυνσης. Είναι εντός απόστασης μισής περίπου διαμέτρου της αορτής από τη διεύρυνση. Και στις δύο περιπτώσεις, εμφανίζεται ο κύριος στροβιλισμός σχεδόν στην εσωτερική γωνία του ανευρύσματος, όπως αποτυπώνεται και στο σχήμα στο τέλος της ενότητας 2.6. Επιβεβαιώθηκε συνεπώς ότι οι περιοχές αυτές είναι «ζώνες στροβιλισμών».

Οι παρατηρήσεις αυτές είναι σε συμφωνία με όσα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.6 σχετικά με το μηχανισμό συμβολής του ανευρύσματος στο σχηματισμό θρόμβων. Η εμφάνιση των στροβιλισμών λειτουργεί ως μηχανισμός ενεργοποίησης των αιμοπεταλίων που συμβάλλουν στη δημιουργία θρόμβου. Το ερώτημα όμως που μένει να απαντηθεί είναι ποια τελικά είναι η συμβολή του θρόμβου στην πορεία του ανευρύσματος. Όπως έχει καταγραφεί [11], αν υποθέσουμε ότι οι πιθανές επικαθίσεις στο τοίχωμα της αορτής μειώνουν τις τάσεις που εντέλει δέχεται το τοίχωμα, αφού ο θρόμβος έχει θεωρηθεί ότι λειτουργεί ως ένα μαξιλαράκι (cushioning effect), είναι πιθανό να συμβάλλουν στην επιβράδυνση διεύρυνσης του ανευρύσματος. Από την άλλη, συμμετέχουν στη τοπική μείωση της αντοχής του τοιχώματος μιάς και ο θρόμβος σχετίζεται με έντονη ενζυματική δραστηριότητα η οποία αποδομεί το αρτηριακό τοίχωμα και συνεπώς συμβάλλει στην αύξηση του κινδύνου ρήξης του ανευρύσματος. Προφανώς τέτοια κλινικά συμπεράσματα απαιτούν περισσότερα δεδομένα, στοιχεία από κλινικές δοκιμές και πραγματικούς ασθενείς που ξεπερνούν το εύρος της παρούσας εργασίας. Εξάλλου η συγκεκριμένη αντίφαση καταγράφεται στη

βιβλιογραφία και οι παρατηρήσεις από την παρούσα εργασία ενισχύουν τη συγκεκριμένη αβεβαιότητα.

Στην παρούσα εργασία με τη χρήση ενός υπολογιστικού εργαλείου εξομοιώσαμε τη ροή του αίματος σε ανεύρυσμα της αορτής με ένα πλέγμα κόμβων, το οποίο επιλύσαμε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Εντοπίστηκαν και αποτυπώθηκαν γραφικά τα σημεία όπου η παραμόρφωση της ροής ήταν τόσο έντονη ώστε να σχηματίζονται στροβιλισμοί του αίματος, οι οποίοι είναι πιθανό να σχετίζονται με άλλες ανεπιθύμητες καταστάσεις στη ροή του αίματος, όπως η θρόμβωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γεώργιος Παπαευαγγέλου, Βασικές Αρχές Υδραυλικής, Τ.Ε.Ι. Σερρών, 2009
2. Δ. Κουτσουρής, Βιοϊατρική Τεχνολογίας, Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Βιοϊατρικής Τεχνολογίας
3. «Επεξεργασία Εικόνων Αξονικού Τομογράφου με τη χρήση του λογισμικού Vascular Modeling Toolkit (VMTK)», Διπλωματική Εργασία, Απόστολος Σιδεράκης, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Βιοϊατρική Τεχνολογία, Πανεπιστήμιο Πατρών – Ε.Μ.Π., 2007
4. The combined effects of shear stress and mass transfer on the balance between biofilm and suspended cell dynamics, Moreira et al, LEPAE – Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Porto, Portugal
5. «Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Αυτόματης Πύκνωσης μη Δομημένου Πλέγματος κατά την Αριθμητική Επίλυση των Εξισώσεων Euler στις Τρεις Διαστάσεις.», Διπλωματική Εργασία, Λυγιδάκης Γεώργιος, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009
6. «Υπολογισμός Μηχανικών Τάσεων σε Ανεύρυσμα Κοιλιακής Αορτής», Πτυχιακή Εργασία, Περδικάκη Χριστίνα, Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 2014
7. «Αριθμητική μελέτη μόνιμης ροής μη Νευτώνειων ρευστών σε αξονικά συμμετρική διεύρυνση αγωγού», Διπλωματική Εργασία, Φράγκου Δήμητρα, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2011
8. «Σημειώσεις από τις παραδόσεις στα φαινόμενα Μεταφοράς», Στέγιος Γιάντσιος, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
9. «Αντιμετώπιση ανευρυσμάτων κατιούσας θωρακικής αορτής», Δρ. Η. Δαλαΐνας, Αγγειοχειρουργική Κλινική, πανεπιστήμιο Μιλάνου, Αρχεία Ελληνικής Ιατρικής, 2009
10. «Κατιούσα Θωρακική Αορτή», Δημήτριος Αγγουράς, FETCS, Λέκτορας Καρδιοχειρουργικής, Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Αθηνών
11. Blood flow and coherent vortices in the normal and aneurysmatic aortas: a fluid dynamical approach to intra-luminal thrombus formation, Jacopo Biasetti et al, Journal of Royal Society, 2011

12. «Υπολογιστική προσομοίωση της ροής στα στεφανιαία αγγεία βασισμένη σε πραγματικά ανατομικά δεδομένα», Διπλωματική Εργασία, Αγγελίδης Εμμανουήλ, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Βιοϊατρική Τεχνολογία, Πανεπιστήμιο Πατρών – Ε.Μ.Π., 2012
13. «Ανεύρυσμα Κοιλιακής Αορτής – Επεξεργασία της τρισδιάστατης ιατρικής απεικόνισης της γεωμετρίας του ανευρύσματος για τη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος», Πτυχιακή Εργασία, Κωνσταντάκη Αγγελική, Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 2014
14. Αιμοδυναμική Ανάλυση πεδίων ροής σε ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής και ενδοαγγειακό μόσχευμα: Μελέτη σε μοντέλο πραγματικής γεωμετρίας», Διπλωματική Εργασία, Ξενάκης Αντώνιος, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2010