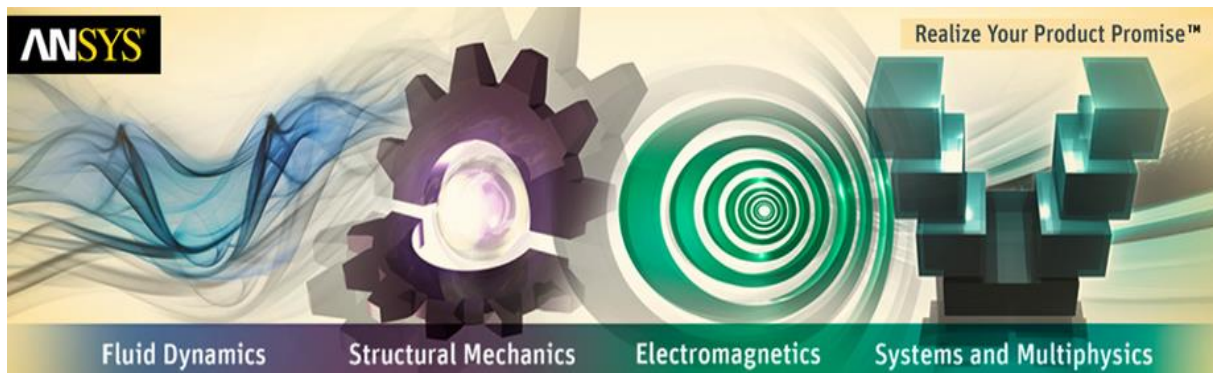


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΡΟΗΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΛΑΜΠΑΔΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Α.Μ. 5861)
ΔΗΜΗΤΡΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ (Α.Μ. 5638)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΥΓΕΝΙΟΣ ΣΚΟΥΡΑΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδος και στοχεύει στη κατάστρωση, την επίλυση καθώς και τον υπολογισμό του ροϊκού πεδίου ευθύγραμμων σωλήνων. Η διατομή των σωλήνων μπορεί να είναι τετραγωνική, ορθογώνια ή κυκλική με εμπόδιο καθώς γίνεται χρησιμοποίηση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά μελετάται η ροή σε σωλήνα δίνοντας προσοχή στους λόγους όπου την καθιστούν ένα βασικό ρευστοδυναμικό πρόβλημα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αριθμητικοί υπολογισμοί αφορώντας την συγκεκριμένη ροή καθώς γίνεται μελέτη ροών γύρω και πίσω από σώματα διάφορων γεωμετριών προσαρμόζοντάς τα σε συγκεκριμένη διάταξη. Έπειτα, αναφέρονται τα αποτελέσματα της μελέτης εν συγκρίσει όμως με κλασσικές θεωρήσεις και πειραματικές μετρήσεις.

Ευχαριστούμε θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Ευγένιο Σκούρα, επιστημονικό συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας, για την υψίστης σημασίας βοήθειά του και για την καθοδήγηση που μας προσέφερε.

Λαμπάδας Γεώργιος
Δημητρουλόπουλος Γιάννης
Ιούλιος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας από τους πιο ανεπτυγμένους τομείς της εφαρμοσμένης έρευνας του μηχανικού είναι η Υπολογιστική Ρευστομηχανική και Υπολογιστική Μηχανική των ρευστών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια θεωρητική και πειραματική μελέτη σχετικά με τις εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής καθώς πραγματοποιείται μία ανάλυση ροής εντός μιας αεροσήραγγας μέσω λογισμικού Fluent. Επιπλέον, πραγματοποιείται μια θεωρητική ανάλυση όσο αναφορά θεμελιώδεις σχέσεις εξισώσεων ροής.

Μελετώντας το **πρώτο κεφάλαιο (Εισαγωγή)**, γίνεται κατανοητή η έννοια του ρευστού καθώς και η ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν όταν αυτό βρίσκεται σε υγρή, στερεή αλλά και αέρια κατάσταση. Τέλος, πραγματοποιείται αναφορά σε ορισμένες διακρίσεις μεταξύ των φάσεων κατάστασης του ρευστού καθώς και στα είδη ροών όπου αυτά κατατάσσονται

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αναφέρεται στην ανάπτυξη της υπολογιστικής ρευστομηχανικής και πως αυτό συμβάλλει σε μια πιο αποδοτική μοντελοποίηση φυσικών φαινομένων. Η απεικόνιση της γεωμετρίας μιας κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή καθώς και η δυνατότητα προσομοίωσης της στατικής δυναμικής και της θερμικής ρευστομηχανικής συμπεριφοράς, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και επηρεάζουν σημαντικά την πορεία του μηχανικού τόσο σε εκπαιδευτικό όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται μελέτη ροϊκού πεδίου σε σωληνώσεις τοποθετώντας διάφορα είδη εμποδίων καθώς επιτυγχάνεται εφαρμογή μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, αναλύονται αποτελέσματα σχετικά με τους τρόπους όπου μπορεί να επηρεάσει ένα πρόβλημα ροής η γεωμετρία του αγωγού όπου χρησιμοποιείται.

Η θεωρητική ανάλυση ολοκληρώνεται στο **τέταρτο κεφάλαιο** με την εμβάθυνση στις μεθόδους επίλυσης προβλημάτων μέσω του λογισμικού Fluent. Αρχικά πραγματοποιείται μια εισαγωγή στις μεθόδους αυτές και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην σημασία των υπολογιστικών πλεγμάτων. Μελετάται επίσης η σημασία των συνοριακών συνθηκών ροής που πρέπει να εισαχθούν προκειμένου να υπάρξει ομαλή ανάλυση ροής καθώς παρουσιάζεται ο τρόπος όπου επιτυγχάνεται η επίλυση προβλημάτων ρευστοδυναμικού περιεχομένου. Τέλος, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία διακριτοποίησης στο χώρο, εφαρμόζοντας μεθόδους παρεμβολής και πεπερασμένων όγκων.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναλύεται εκτενώς ένα πρόβλημα ροής ρευστών εντός αγωγού με καμπύλη, εφαρμόζοντας τις θεωρητικές μελέτες που αναφέρθηκαν στο δεύτερο και τέταρτο κεφάλαιο. Η υποδειγματική αυτή ανάλυση πραγματοποιείται, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Fluent. Αρχικά παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται το πρόβλημα ροής και εισάγεται στο περιβάλλον εργασίας του Fluent και στη συνέχεια προβάλλεται η διαδικασία εισαγωγής ή κατασκευής της γεωμετρίας του αγωγού. Έπειτα, επιτυγχάνεται μια λεπτομερές ανάλυση της γεωμετρίας αυτής

μέσω της εφαρμογής *Mesh* και αφού ολοκληρωθεί, λαμβάνει χώρα η προσομοίωση της ροής στο *ANSYS Fluent*.

Στο **έκτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται προσομοίωση ροής εντός μιας αεροσήραγγας. Το κυρίως θέμα της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η κατανόηση του κεφαλαίου αυτού. Η γεωμετρία του υπολογιστικού πεδίου, το πλέγμα και η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής πραγματοποιήθηκαν με τα προγράμματα *Design Modeler*, *Meshing* και *Fluent* του *ANSYS*. Ειδικότερα για το *Fluent* επιλέχθηκε το μοντέλο τύρβης *k-ε* και πραγματοποιήθηκε έλεγχος για διάφορες τιμές ακρίβειας. Στη συνέχεια, φαίνεται με λεπτομερές τρόπο όλη η διαδικασία εισαγωγής των συνοριακών συνθηκών και παρουσιάζονται με απλό και κατανοητό τρόπο τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Μελετώντας την παρούσα εργασία, μπορούμε να κατανοήσουμε τις μεθόδους που χρησιμοποιεί η υπολογιστική ρευστομηχανική τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Συμπεραίνουμε ακόμη, ότι εφαρμόζοντας την επιστήμη αυτή μπορούμε να καλύψουμε ένα πολύ μεγάλο εύρος προβλημάτων ροής και επιπλέον, μας δίνεται η δυνατότητα να προσθέσουμε εναλλαγές στον τρόπο με τον οποίο επιλέγουμε να επιλύσουμε το εκάστοτε πρόβλημα. Το παρών πρόβλημα μας βοηθάει να κατανοήσουμε εις βάθος την λογική με την οποία λειτουργεί το λογισμικό *Fluent* και πιο συγκεκριμένα μας βοηθά στον χειρισμό προβλημάτων ροής σε πρότυπες πειραματικές συσκευές όπως είναι και η αεροσήραγγα που μελετάται στο έκτο κεφάλαιο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	III
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VII
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ	1
1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΟΥ	1
1.3 ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ ΡΕΥΣΤΩΝ	5
1.3.1 Διάκριση μεταξύ στέρεου και υγρού	5
1.3.2 Διάκριση μεταξύ αερίου και υγρού	5
1.4 ΕΙΔΗ ΡΟΩΝ	6
2 ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ.....	7
2.1 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ (ΕΠΙΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΡΟΗΣ)	8
2.1.1 Εξισώσεις συνέχειας και αρχή διατήρησης της μάζας.	8
2.1.2 Εξισώσεις ενέργειας.....	10
2.1.3 Εξισώσεις ορμής.....	12
2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ	14
2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ (ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΣ NAVIER & STOKES)	19
3 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ ΜΕ ΕΜΠΟΔΙΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.	22
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	22
3.1.1 Ροή εντός ανοικτών αγωγών.....	22
3.1.2 Εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.....	24
3.2 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	26
3.3 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	28
3.3.1 Αγωγοί ορθογωνικής και τριγωνικής διατομής.....	28
3.3.2 Η σημασία της υδραυλικής διαμέτρου	29
3.4 ΡΟΗ ΓΥΡΟ ΑΠΟ ΣΩΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.....	30
3.4.1 Ροή γύρω από αντικείμενα.....	30
3.4.2 Η έννοια της δύναμης της αντίστασης.....	31
3.5 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΓΥΡΟ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ	32
3.6 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΓΥΡΟ ΑΠΟ ΣΦΑΙΡΑ.....	34
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ (FLUENT)	38
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FLUENT	38
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ.	40
4.2.1 Δημιουργία υπολογιστικών πλεγμάτων σαν πρόβλημα οριακών τιμών.	40
4.2.2 Είδη πλεγμάτων και μορφές πλεγματοποίησης.....	41
4.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ.	44
4.3.1 Συνοριακές συνθήκες εισόδου και εξόδου ταχύτητας και πίεσης.....	45
4.3.2 Συνοριακές συνθήκες τοιχωμάτων (wall boundary conditions).....	46
4.3.3 Συμμετρικές συνοριακές συνθήκες.....	47
4.3.4 Κυκλικές συνοριακές συνθήκες	47
4.3.5 Περιοδικές συνοριακές συνθήκες.....	48
4.3.6 Αξονικές συνοριακές συνθήκες.....	48

4.4	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΛΥΤΗ	49
4.5	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	49
4.6	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ	50
4.7	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	52
5	ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΣ ΚΩΔΙΚΑ FLUENT (CFD).	53
5.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ FLUENT (ANSYS WORKBENCH).....	54
5.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ANSYS DESIGN-MODELER	56
5.2.1	<i>Σχεδιασμός γεωμετρίας στο ANSYS Design-Modeler</i>	<i>56</i>
5.2.2	<i>Εισαγωγή γεωμετρίας στο λογισμικό ANSYS Fluent Workbench.</i>	<i>65</i>
5.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ANSYS MESHING.	66
5.4	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ CFD ΣΤΟ ANSYS FLUENT	70
5.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	79
6	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΕΝΤΟΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.	80
6.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ FLUENT (ANSYS WORKBENCH)	81
6.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ANSYS DESIGN-MODELER	83
6.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ANSYS MESHING.	85
6.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ANSYS FLUENT	91
6.5	ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.	99
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Το στοιχείο που ξεχωρίζει το ρευστό από οποιαδήποτε άλλη φυσική μορφή ύλης είναι η συμπεριφορά που έχει κάτω από διατμητικές συνθήκες. Με βάση λοιπόν την συμπεριφορά αυτή "ρευστό ορίζεται κάθε σώμα το οποίο υπό διατμητική τάση όσο μικρή και αν είναι αυτή δεν μπορεί να μείνει σε στατική ισορροπία". Πολλά σώματα, κυρίως στερεά, παρουσιάζουν ιδιότητες ρευστών όταν υποστούν μεγάλες διατμητικές καταπονήσεις όπως και μερικά ρευστά έχουν τόσο μεγάλο ιξώδες που σε κανονικές συνθήκες συμπεριφέρονται σαν στερεά. Ο παραπάνω ορισμός που δόθηκε είναι επαρκής και ταιριάζει σε όλα τα συνήθη ρευστά, που είναι τα υγρά και τα αέρια.

Με τον όρο ρευστό χαρακτηρίζεται μια οποιαδήποτε ουσία που παρουσιάζει ροή. Τέτοιες ουσίες είναι τα υγρά και τα αέρια ή και στερεά που βρίσκονται σε φάση ροής. Συνεπώς ο όρος ρευστό χαρακτηρίζει συνοπτικά τα υγρά και τα αέρια σώματα των οποίων οι δυνάμεις συνοχής είναι χαλαρές με συνέπεια η μάζα τους να ολισθαίνει ελεύθερα (περίπτωση υγρών) ή να μετατοπίζεται ανεξάρτητα (περίπτωση αερίων) έτσι ώστε να λαμβάνει κάθε φορά το σχήμα του χώρου που καταλαμβάνουν ή του μέσου δια του οποίου κινούνται αυτά.

Σημειώνεται ότι το φαινόμενο της ροής που χαρακτηρίζει γενικά τα ρευστά είναι ακριβώς τούτο: ότι σε αυτά δεν παρατηρείται κατάτμηση της μάζας τους όταν ασκούνται σε αυτήν εξωγενείς δυνάμεις αλλά αντίθετα αυτή αντιδρά ολισθαίνοντας συνεχώς ή μετατοπίζεται εξ ολοκλήρου ανεξάρτητα και συνεχώς. Φαινόμενο που δεν συμβαίνει στη μάζα των στερεών, υποκείμενη σε κατάτμηση, κάμψη, στρέψη ή άλλη παραμόρφωση ή ακόμα και επαναφορά στην αρχική κατάσταση, εκτός και αν βρεθεί σε "φάση ροής" οπότε και έχει πάψει τότε να θεωρείται στερεό.

Τα ρευστά παρουσιάζουν μόνο μία δύναμη που ασκούν προς τα έξω την υδροστατική πίεση και η οποία εφαρμόζεται πάντα κάθετα προς οποιοδήποτε σημείο των τοιχωμάτων του χώρου που βρίσκονται.

1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ_ΡΕΥΣΤΟΥ

Για να γίνει η μελέτη ενός συστήματος ροής πρέπει να έχουν προηγουμένως ορισθεί όλες οι μηχανικές ιδιότητες του ρευστού μέσου. Για τον λόγο αυτό προέχει η ανάγκη ορισμού των εξής ιδιοτήτων των ρευστών, ήτοι:

1. πυκνότητα
2. πίεση ρευστού
3. ειδικό βάρος ρευστού

4. επιφανειακή τάση
5. τριχοειδή φαινόμενα
6. το ιξώδες ή δυναμική συνεκτικότητα ρευστού
7. συμπιεστότητα ρευστού
8. πίεση ατμών υγρού
9. μεταβολές καταστάσεων αερίων

Πυκνότητα ρ ενός υλικού είναι η μάζα ανά μονάδα όγκου του εν λόγου υλικού. Η πυκνότητα ρευστού είναι άμεσα συνδεδεμένη με την θερμοκρασία και την πίεση. Η πυκνότητα ενός αερίου υφίσταται μεγαλύτερες μεταβολές από αυτή του υγρού. Εν τούτοις σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι η πυκνότητα ενός ρευστού ελάχιστα μεταβάλλεται, οπότε η ροή λαμβάνεται σαν ασυμπίεστη. Η μαθηματική σχέση δια μέσου της οποίας υπολογίζεται η πυκνότητα, είναι η εξής:

$$\rho = \lim \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

όπου: m = μάζα
 V = όγκος

Πίεση P ορίζουμε το πηλίκο της δύναμης που το ρευστό εξασκεί πάνω σε μια επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής ενώ η πίεση σε κάποιο σημείο εντός του υγρού είναι ίση με το βάρος της κατακόρυφης στήλης του υγρού αυτού. Ο υπολογισμός της πίεσης πραγματοποιείται με χρήση της εξής μαθηματικής σχέσης, ήτοι:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.2)$$

Το πηλίκο του βάρους μιας ποσότητας μάζας σώματος δια του όγκου που καταλαμβάνει καλείται **ειδικό βάρος** και ισούται με:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.3)$$

Όπου ρ = πυκνότητα του σώματος
 g = επιτάχυνση της βαρύτητας

Επιφανειακή τάση καλείται η δύναμη ανά μονάδα μήκους, η οποία εφαρμόζεται καθέτως σε μια τυχαίας διεύθυνσεως νοητή γραμμή επί της επιφάνειας του ρευστού. Οπότε, επιφανειακή τάση είναι το έργο το απαιτούμενο όπου φέρει νέα μόρια από το εσωτερικό, ανά μονάδα δημιουργούμενης νέας επιφάνειας. Επιπλέον, όταν ένα εσωτερικό μόριο υγρού υφίσταται ελκτικές δυνάμεις από άλλα μόρια που το περιβάλλουν, η συνισταμένη τους δύναμη είναι μηδέν. Τα μόρια όμως που βρίσκονται στην επιφάνεια έλκονται μόνο από τα μόρια του υγρού που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια αυτή με αποτέλεσμα η συνισταμένη των ελκτικών δυνάμεων επί του μορίου να είναι διάφορη του μηδενός με φορά προς το εσωτερικό και κάθετα προς την επιφάνεια. Η επιφανειακή τάση εκφράζεται με το συντελεστή επιφανειακής τάσης γ , ο οποίος ισούται με τη δύναμη F που ασκείται πάνω στη μονάδα μήκους l

μιας υποτιθέμενης γραμμής πάνω στην επιφάνεια του υγρού, ή με το έργο dW που απαιτείται για να αυξηθεί η επιφάνεια του υγρού κατά dS , ήτοι:

$$\gamma = \frac{F}{l} \quad \text{ή} \quad \gamma = \frac{dW}{dS} \quad (1.4), (1.5)$$

Σαν **τριχοειδή φαινόμενα** ορίζουμε το αποτέλεσμα της ικανότητας του υγρού να διαβρέχει ένα συγκεκριμένο υλικό. Το υγρό για το οποίο παρατηρείται συνηθέστερα το φαινόμενο είναι το νερό εξαιτίας του ότι έχει τη δυνατότητα να συνάψει ισχυρές δυνάμεις συνάφειας με άλλες επιφάνειες και βρίσκεται άφθονο στη φύση. Η ύψωση ή η πτώση της στάθμης του υγρού εντός λεπτού σωλήνα όπως υπολογίζεται ως εξής:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (1.6)$$

Όπου: h = τριχοειδής ανύψωση ή ύψωση
 σ = επιφανειακή τάση
 θ = γωνία επαφής
 ρ = πυκνότητα υγρού
 g = επιτάχυνση βαρύτητας
 r = ακτίνα σωλήνα

Το **ιξώδες** είναι η ιδιότητα εκείνη του ρευστού η οποία καθορίζει το μέγεθος της αντιστάσεως του κάτω από συνθήκες διατμήσεως. Η ιδιότητα αυτή είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης, κατά την σχετική κίνηση των μορίων, δυο συνεχών και παράλληλων στρωμάτων του ρευστού. Από τον ορισμό ενός ρευστού προκύπτει ότι ένα στοιχείο ρευστού θα συνεχίσει να παραμορφώνεται όταν διατμητικές τάσεις ενεργούν επί της επιφανείας του. Το ιξώδες προσδιορίζεται από την σχέση μεταξύ της μεταβολής της παραμορφώσεως και της διατμητικής τάσης. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι για τα περισσότερα ρευστά η μεταβολή της παραμορφώσεως λόγω διατμητικής τάσης ($\tau = \frac{F}{A}$) εκφράζεται από την σχέση $\frac{U}{d}$. Δηλαδή, ο συντελεστής αναλογίας είναι το ιξώδες του ρευστού μ , ήτοι:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{d} \quad (1.7)$$

όπου ο μ είναι ανεξάρτητος της τιμής της ταχύτητας. Λύνοντας την εξ.(7) ως προς μ , έχουμε:

$$\mu = \frac{F \cdot d}{A \cdot U} \quad (1.8)$$

Από την κινητική θεωρία των αερίων το **ιξώδες ενός αερίου**, συναρτήσει της θερμοκρασίας του, έχει αποδειχθεί ότι δίνεται από την σχέση:

$$\mu = \frac{2}{3(\pi^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{(MRT)^{\frac{1}{2}}}{N_0 \sigma^2} = \frac{1}{3} \rho u \lambda \quad (1.9)$$

όπου M = μοριακό βάρος αερίου
R = παγκόσμια σταθερά των αερίων
T = απόλυτη θερμοκρασία του αερίου
N₀ = αριθμός Avogadro
σ = ενεργός διάμετρος του μορίου του αέρα
ρ = πυκνότητα του αερίου
λ = μέση ελεύθερη διακίνηση μεταξύ διαδοχικών συγκρούσεων μορίων

Με τον όρο **συμπιεστότητα** στη φυσική χαρακτηρίζεται η ιδιότητα των σωμάτων να μειώνουν τον όγκο τους όταν αυτά ασκούνται σε πιέσεις. Υπάρχουν δύο συντελεστές συμπιεστότητας, ο ισοθερμοκρασιακός ή ισόθερμος συντελεστής και ο αδιαβατικός συντελεστής. Ανάλογα με τη φυσική κατάσταση των σωμάτων (ουσιών) η συμπιεστότητα αυτών διαφέρει σημαντικά.

Τα στερεά όταν υποβληθούν σε υδροστατική συμπίεση (ομοιόμορφη κατανομή πίεσης σε όλη την επιφάνειά τους), παρουσιάζουν ιδιαίτερη αντίσταση δηλαδή πολύ μικρή συμπιεστότητα. Τα υγρά είναι περισσότερο συμπιεστά από τα στερεά αλλά πολύ λιγότερο από τα αέρια με αποτέλεσμα η συμπιεστότητα των υγρών να μεταβάλλεται όταν τους ασκείται πίεση. Τέλος τα αέρια παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συμπιεστότητα και κατά συνέπεια ο όγκος ενός αερίου που καταλαμβάνει κάποιο χώρο να είναι αντιστρόφως ανάλογος προς τη πίεσή του.

Καθώς τα μόρια εγκαταλείπουν την ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού, σχηματίζουν ένα νέφος ατμών το οποίο καλύπτει την επιφάνεια και αυξάνεται ή ελαττώνεται, ανάλογα με την φορά κίνησης των μορίων που διασχίζουν την διαχωριστική επιφάνεια. Η πίεση του νέφους αυτού καλείται **πίεση ατμών υγρού**. Στην εικόνα 1 παρατηρούμε την σχέση της πίεσης των υδρατμών P_v σε mb, συναρτήσει της θερμοκρασίας Θ, σε °C, όπου έχει το νερό σε μία τυχαία θέση. Εάν ο χώρος πάνω από την επιφάνεια του υγρού είναι περιορισμένος, τότε η τιμή της πίεσεως των ατμών αυξάνεται ή ελαττώνεται, ανάλογα με την θερμοκρασία. Όταν δε η πίεση υπεράνω της επιφάνειας ενός υγρού γίνει ίση με τη πίεση των ατμών του το υγρό αρχίζει να βράζει, ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου, προκειμένου περί νερού, εάν η πίεση ελαττωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να γίνει ίση με την πίεση των ατμών του νερού στην θερμοκρασία δωματίου.



Εικόνα 1.1: Πίεση υδρατμών σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του νερού.

1.3 ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

1.3.1 Διάκριση μεταξύ στέρεου και υγρού

Τα μόρια που αποτελούν ένα στερεό σώμα βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους σε σχέση με αυτά του υγρού. Οι ελκτικές όμως δυνάμεις μεταξύ των μορίων ενός στερεού σώματος είναι αρκετά μεγάλες ώστε το στερεό να μπορέσει διατηρήσει τη μορφή του. Αυτό δεν συμβαίνει και στα υγρά, καθώς οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων είναι μικρότερες. Αποτέλεσμα της φόρτισης των ελαστικών σωμάτων είναι η παραμόρφωσή τους. Το βασικότερο όμως χαρακτηριστικό τους είναι ότι επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση εάν αφαιρεθεί το φορτίο που ασκούνταν πάνω τους. Ορισμένα όμως στερεά είναι πλαστικά. Αυτό σημαίνει ότι οι παραμορφώσεις που δέχονται είναι μόνιμες και οφείλονται σε δράσεις υψηλών φορτίων (με την παραδοχή ότι το υλικό δεν θα σπάσει). Οι διαμοριακές δυνάμεις συνοχής σε ένα ρευστό αδυνατούν να συγκρατήσουν τα διάφορα σωματίδια του ρευστού μαζί καθώς είναι πολύ μικρές. Επομένως κάθε ρευστό θα ρέει εξαιτίας της δράσης και της πιο μικρής τάσης και η ροή θα συνεχίζεται όσο θα είναι παρούσα η τάση.

1.3.2 Διάκριση μεταξύ αερίου και υγρού

Τα ρευστά μπορούν να είναι είτε αέρια είτε υγρά. Τα μόρια ενός αερίου έχουν πολύ μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους από ότι έχουν τα μόρια ενός υγρού. Εξαιτίας αυτού τα αέρια είναι πολύ συμπιεστά και κάθε εξωτερική πίεση τείνει να τα εξαπλώσει απεριόριστα. Άρα ένα αέριο βρίσκεται σε ισορροπία μόνο όταν είναι

πλήρως εγκλωβισμένο σε ένα χώρο. Ένα υγρό είναι σχετικά ασυμπίεστο και αν όλη η πίεση, εκτός από την πίεση υγροποίησης εκλείψει, η συνοχή μεταξύ των μορίων τα συγκρατεί κοντά μεταξύ τους, έτσι ώστε το υγρό δεν εξαπλώνεται απεριόριστα. Επομένως, τα υγρά είναι δυνατό να έχουν ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή μια επιφάνεια στην οποία δεν ασκείται άλλη πίεση εκτός από την πίεση υγροποίησης.

1.4 ΕΙΔΗ ΡΟΩΝ

Η ροή σε ανοικτούς αγωγούς μπορεί να χωριστεί σε διάφορες κατηγορίες και να περιγραφεί με διάφορους τρόπους. Έτσι με βάση τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων της ροής σε σχέση με το χρόνο και το χώρο η ροή διακρίνεται σε:

1. Σταθερή και ασταθής ροή,
2. Στρωτή και τυρβώδες ροή,
3. Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή,
4. Υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη και κρίσιμη ροή,
5. Αστρόβιλη και στροβιλώδη ροή,
6. Μονοδιάστατη, δισδιάστατη και τρισδιάστατη

Η ροή σε έναν ανοικτό αγωγό ονομάζεται **σταθερή ή μόνιμη** όταν οι μεταβλητές της σε ένα σημείο (ταχύτητα, βάθος κ.λπ.) είναι ανεξάρτητες από το χρόνο, όπως προκύπτει και από τη συνθήκη $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$. Στην αντίθετη περίπτωση όμως, όπου ισχύει η συνθήκη $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \neq 0$, η ροή ονομάζεται ασταθής ή μη μόνιμη. Η ροή σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds διακρίνεται σε **στρωτή** ($Re < 500$) και σε **τυρβώδη** ($Re > 2000$). Η ενδιάμεση κατάσταση ροής ονομάζεται μεταβατική. Για ανοικτούς αγωγούς, ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{4 \cdot R \cdot V}{\nu} \quad (1.10)$$

όπου: R = υδραυλική ακτίνα της υγρής διατομής σε m
 V = μέση ταχύτητα ροής σε m/s
 ν = κινηματικό ιξώδες του ρέοντος νερού σε m²/s.

Το πιο σύνηθες είδος ροής είναι η τυρβώδης ροή καθώς αναφέρεται σε περισσότερα από 98 % των προβλημάτων της ροής που λαμβάνουν χώρα σε ανοικτούς αγωγούς.

Ομοιόμορφη, ονομάζεται η ροή κατά την οποία οι μεταβλητές της σε μία χρονική στιγμή είναι ανεξάρτητες από το χώρο, που σημαίνει ότι θα είναι οι ίδιες σε όλα τα σημεία κατά μήκος του αγωγού όπως φαίνεται και στην συνθήκη $\frac{\partial \bar{u}}{\partial L} = 0$. Στην

αντίθετη περίπτωση που ισχύει $\frac{\partial \bar{u}}{\partial L} \neq 0$, η ροή ονομάζεται **ανομοιόμορφη**.

Υποκρίσιμη καλείται η ροή όπου η ταχύτητά της είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, ενώ **υπερκρίσιμη** καλείται η ροή όπου η ταχύτητά της είναι

μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα. Σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα ροής είναι ίση με την κρίσιμη ταχύτητα, η ροή ονομάζεται **κρίσιμη** και οι δυνάμεις μάζας και αδρανείας είναι ίσες. Η κατάσταση της ροής ελέγχεται δια μέσω του αριθμού Froude ο οποίος είναι ένας αδιάστατος αριθμός και υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{Eg}{B}}} \quad (1.11)$$

όπου: V= μέση ταχύτητα ροής

E= υγρή διατομή

B = πλάτος διατομής στην επιφάνεια του νερού

g = επιτάχυνση βαρύτητας

Όταν $Fr < 1$ ροή είναι υποκρίσιμη, ενώ όταν $Fr > 1$ είναι η ροή είναι υπερκρίσιμη.

Αστρόβιλη λέγεται η ροή όπου τα σωματίδια της δεν έχουν γωνιακή ταχύτητα περί το κέντρο τους, ενώ στην αντίθετη περίπτωση όπου τα σωματίδια χαρακτηρίζονται από γωνιακή ταχύτητα, η ροή καλείται **στροβιλώδης**. Όσο αναφορά τα πραγματικά ρευστά, η ροή θα είναι πάντοτε στροβιλώδης. Επειδή όμως το νερό διαθέτει μικρό ιξώδες, η επίδραση του εξασθενεί γρήγορα πέρα από τα τοιχώματα και περιορίζεται σε ένα λεπτό στρώμα σε αυτά. Η διαμόρφωση της ροής επιτυγχάνεται δια μέσω των δυνάμεων της βαρύτητας και θεωρείται αστρόβιλη, και η επίδραση του ιξώδους, (και της τραχύτητας), λαμβάνεται υπόψη μέσω εμπειρικών τύπων απωλειών.

2 ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ

Στον κλάδο της ρευστομηχανικής υπάρχουν τρεις βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνει περιγραφή μιας ροής σε ανοικτούς αγωγούς και είναι οι εξής:

- Εξισώσεις συνέχειας
- Εξισώσεις ενέργειας
- Και εξισώσεις ορμής

Επιπλέον, στον κλάδο της ρευστομηχανικής γίνεται λόγος για το ρευστό του Stokes όπου σύμφωνα με τον ίδιο, είναι ισοτροπικό και παρουσιάζει ομογένεια. Παρακάτω, παρουσιάζονται όλες οι βασικές εξισώσεις του Navier και Stokes που αποτελούν βάση για την επίλυση προβλημάτων Νευτώνειας ροής.

2.1 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ (ΕΠΙΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΡΟΗΣ)

2.1.1 Εξισώσεις συνέχειας και αρχή διατήρησης της μάζας.

Έστω ότι σε κάποιο συγκεκριμένο χρόνο t ο όγκος ελέγχου ροής συμπίπτει με τα όρια ενός συστήματος που αποτελείται από μάζα m_t ενώ αυτό περιφέρεται σε ένα πεδίο. Ύστερα από το συγκεκριμένο αυτό χρονικό διάστημα δt , ο όγκος ελέγχου ροής δεν αλλάζει σχήμα σε αντίθεση με το σύστημα που αλλάζει μορφή επιφάνειας και δεν ταυτίζεται πλέον με τον όγκο ελέγχου.

Εφόσον με $m_{t+\delta t}$ ενδείκνυται η μάζα του ρευστού που βρίσκεται μέσα στον όγκο του ελέγχου σε χρονικό διάστημα $t + \delta t$, τότε σε χρόνο δt η ποσότητα της μάζας εσωτερικά του όγκου έχει μετατραπεί από m_t σε $m_{t + \delta t}$, άρα η ταχύτητα όπου μεταβάλλεται η μάζα θα είναι η εξής:

$$\frac{m_{t + \delta t} - m_t}{\delta t} = \frac{\delta m}{\delta t} \quad (2.1)$$

Όπου συνεπάγεται με την ταχύτητα μεταβολής της μάζας μέσα στον όγκο ελέγχου. Επειδή όμως ισχύει το εξής :

$$m = \int_V \rho dV \quad (2.2)$$

όπου: V =Όγκος ελέγχου
 ρ = Πυκνότητα ρευστού,

Τότε,

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{m_{t + \delta t} - m_t}{\delta t} \right) = \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (2.3)$$

Επιπλέον, εντός του χρόνου δt κάποιο ποσόν μάζας δm_o εξήλθε και κάποιο ποσόν δm_i εισήλθε στον όγκο ελέγχου, που σημαίνει ότι η διαφορά της εξελθούσας μάζας από την εισελθούσα πρέπει να είναι ίση με την μεταβολή της μάζας μέσα στον όγκο αυτό, ήτοι:

$$m_{t+\delta t} - m_t = \delta m_i - \delta m_o$$

$$\frac{m_{t+\delta t} - m_t}{\delta t} = \frac{\delta m_i}{\delta t} - \frac{\delta m_o}{\delta t} \quad (2.4)$$

Η παροχή όμως της μάζας δια μέσου μιας επιφάνειας που αντιπροσωπεύει το ποσόν της μάζας ρευστού με κάποια συγκεκριμένη πυκνότητα ρ η οποία όμως διαπερνά μια επιφάνεια δS , θα είναι:

$$\left(\frac{\delta m_i}{\delta t} \right)_{\delta S_i} = -\rho U_i \cos \theta \delta S_i \quad (2.5)$$

Οπότε προκύπτει, ότι για ολόκληρη την επιφάνεια S_i θα ισχύει το εξής:

$$\left(\frac{\delta m_i}{\delta t} \right)_{S_i} = -\int_{S_i} \rho U_i \cos \theta dS_i \quad (2.6)$$

Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις ροής μάζας προς τα έξω θα έχουμε:

$$\left(\frac{\delta m_o}{\delta t} \right)_{\delta S_o} = \rho U_o \cos \theta \delta S_o \quad (2.7)$$

Ενώ για ολόκληρη την επιφάνεια S_o είναι:

$$\left(\frac{\delta m_o}{\delta t} \right)_{S_o} = \int_{S_o} \rho U_o \cos \theta dS_o \quad (2.8)$$

Τέλος, γράφοντας

$$\int_S \rho U \cos \theta dS = \int_S \rho \bar{U} \cdot \hat{n} dS \quad (2.9)$$

και συσχετίζοντας τις εξ. (2.3),(2.4) και (2.9), προκύπτει ότι

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = -\int_S \rho \bar{U} \cdot \hat{n} dS \quad (2.10)$$

Έτσι, με την εξ.(2.10) εκφράζεται η ολοκληρωματική μορφή της εξίσωσης της μάζας όπου χρησιμοποιείται ακόμα και στις πιο απλές εφαρμογές της ρευστομηχανικής.

2.1.2 Εξισώσεις ενέργειας

Όταν γίνεται λόγος για ιδανικά ρευστά, δηλαδή για εξισώσεις Bernoulli, τότε η εξίσωση ενέργειας διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{U^2}{2g} = \text{σταθερό} \quad (2.11)$$

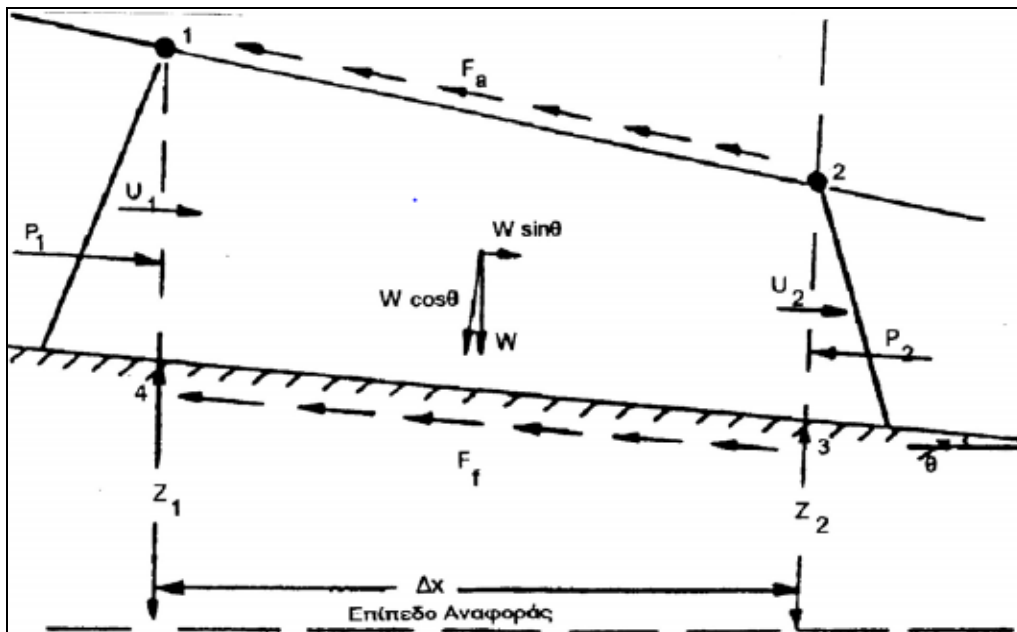
Όπου: p = στατική πίεση σε ένα σημείο

γ = ειδικό βάρος ρευστού = ρg

z = υψόμετρο από ένα επίπεδο αναφοράς

U = ταχύτητα ροής

Οι δείκτες 1 και 2 που φαίνονται στην Εικ.(2.1), αντιστοιχούν στα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα. Η απώλεια φορτίου h_L μεταξύ των δύο διατομών οφείλεται συνήθως στη τριβή του πυθμένα και των τοιχωμάτων, καθώς και στη ροή γύρω από βυθισμένα σώματα.



Εικόνα 2.1: Ανομοιόμορφη ροή εντός ανοικτού αγωγού.

Με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες ενέργειας που επιδρούν πάντοτε σε περιπτώσεις πραγματικών αερίων και εξετάζοντας μία ανομοιόμορφη ροή σε ανοικτό αγωγό όπως φαίνεται στην Εικ.(2.1), η εξ.(2.11) θα γίνει:

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = h_2 + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (2.12)$$

και μπορεί να γραφτεί επίσης ως εξής:

$$E_1 - E_2 = (z_1 - z_2) + h_L \quad (2.13)$$

Όμως, προκειμένου να γίνει κατανοητό το τι εκφράζει η εξίσωση της συνέχειας στα ρευστά, παρουσιάζεται παρακάτω μία πολύ βασική απόδειξη. Αρχικά, προβάλλεται η εξίσωση κίνησης σε μορφή διανυσματική, της οποίας η δύο πλευρές πολλαπλασιάζονται σε εσωτερικό γινόμενο με την διανυσματική ταχύτητα καθώς προβάλλονται εναλλαγές στην εξίσωση για περαιτέρω κατανόηση, ήτοι:

$$\vec{V} \frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{1D}{2Dt}(V^2) = \frac{D}{Dt} \left(\frac{V^2}{2} \right) \quad (2.14)$$

Και

$$\vec{V} \cdot \nabla P = \nabla \cdot (P\vec{V}) - P(\nabla \cdot \vec{V}) \quad (2.15)$$

Γράφοντας την εξίσωση της συνέχειας με εναλλακτικό τρόπο και παρατηρώντας τις εξ.(2.14) και (2.15) προκύπτει το εξής:

$$\vec{V} \cdot \nabla P = \nabla \cdot (P\vec{V}) - P(\nabla \cdot \vec{V}) = \nabla \cdot (P\vec{V}) + \frac{P}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} \quad (2.16)$$

Θέτοντας την βαρύτητα υπεύθυνη για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις πεδίου σε έναν κατακόρυφο άξονα y, θα ισχύει:

$$\vec{V} \cdot \vec{W} = (ui + vj + wk) \cdot (0i + gj + 0k) = -gv = -g \frac{Dy}{Dt} = -\frac{D}{Dt}(gy) \quad (2.17)$$

Αντικαθιστώντας τους όρους $\vec{V} \frac{D\vec{V}}{Dt}$, $\vec{V} \cdot \nabla P$, $\vec{V} \cdot \vec{W}$, στην εξίσωση του εσωτερικού γινομένου της ταχύτητας με ισοδύναμα μεγέθη από την εξίσωση κίνησης καθώς και λαμβάνοντας υπόψη βασικές ιδιότητες παραγώγων, προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{V^2}{2} \right) + \frac{D}{Dt} (gy) = P \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (P\vec{V}) \quad (2.18)$$

Όποτε, με βάση το 1^ο θερμοδυναμικό αξίωμα για κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα τελείου αερίου και λύνοντας ως προς τον όρο της ενέργειας \dot{Q}_{in} , προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{Q}_{in} = \frac{D}{Dt} \left(\frac{V^2}{2} + gy + c_v T \right) + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (P\vec{V}) \quad (2.19)$$

Όπου ο τελευταίος όρος της εξίσωσης ενέργειας δείχνει το ειδικό έργο ανά μονάδα χρόνου όπου παράγεται από το σύστημα.

2.1.3 Εξισώσεις ορμής

Η εξίσωση της ορμής, όπως μας υποδεικνύει ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα, αναφέρει ότι το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται εξωτερικά σε ένα όγκο ελέγχου ενός ρευστού εντός μίας συγκεκριμένης διεύθυνσης, είναι ίσο με την μεταβολή της παροχής της ορμής στην ίδια διεύθυνση. Αυτό συνεπάγεται με τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$\sum F_x = \rho Q \Delta U \quad (2.20)$$

Για συγκεκριμένα είδη ελέγχου όπου παρουσιάζονται στη συνέχεια, η εξ. (2.20) αναδιαμορφώνεται ως εξής:

$$W \sin \theta + P_1 - P_2 - F_f - F_a = \rho Q (U_2 - U_1) \quad (2.21)$$

όπου: W = βάρος όγκου ελέγχου,

θ = κλίση πυθμένα,

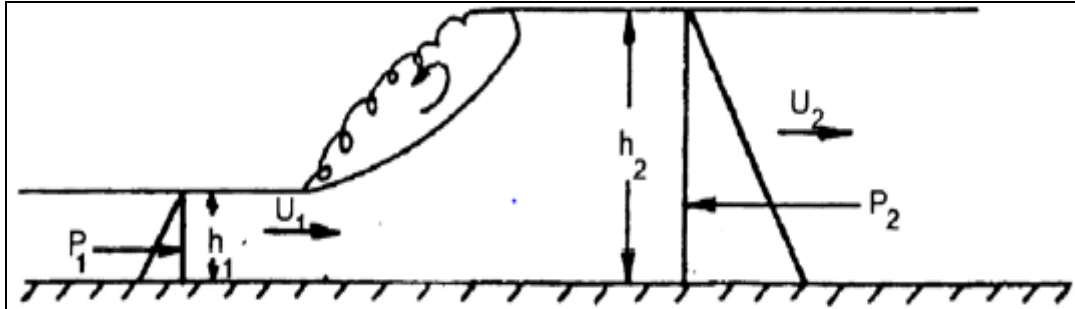
P_1, P_2 = υδροστατικές δυνάμεις,

F_f = δύναμη λόγω τριβής σε μήκος Δx ,

F_a = αντίσταση αέρα στην ελεύθερη επιφάνειας.

Πολλές φορές είναι αδύνατον να υπολογισθούν η ενεργειακές απώλειες ενός συστήματος με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει εφαρμογή της εξίσωσης της συνέχειας. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εφαρμοστεί η εξίσωση της ορμής γεγονός που αυξάνει το εύρος εφαρμογής της. Ένας από τους πολλούς χώρους εφαρμογής της εξίσωσης της ορμής είναι σε περιπτώσεις που παρουσιάζεται σε ένα σύστημα

μετάβαση ροής από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη. Τέτοια παραδείγματα συναντώνται σε ροή μετά από θυρίδες ή σε ροή από εκχειλιστές. Όμως, μέσω της μεταβολής από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη ροή, το φαινόμενο του υδραυλικού άλματος λαμβάνει χώρα με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργειακών απωλειών και των επιπέδων τύρβης.



Εικόνα 2.2: Εφαρμογή υδραυλικού άλματος σε ορθογώνιο οριζόντιο αγωγό.

Εξετάζοντας έναν οριζόντιο αγωγό ορθογώνιου σχήματος, όπως προβάλλεται στην Εικ.(2.2), με επίδραση του φαινομένου του υδραυλικού άλματος και θέτοντας $\theta = F_f = F_a = 0$ στην εξ.(2.21), τότε θα έχουμε:

$$P_1 - P_2 = \rho Q(U_1 - U_2) \quad (2.22)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας, ισχύει ότι,

$$q = U_1 h_1 = U_2 h_2 \quad (2.23\alpha)$$

με αποτέλεσμα η εξ.(2.22) να γίνεται

$$(h_1 - h_2)(h_1 + h_2) = \frac{2(U_1^2)h_1}{gh_2}(h_1 - h_2) \quad (2.23\beta)$$

που ισοδυναμεί με,

$$\frac{h_2}{h_1} \left(1 + \frac{h_2}{h_1} \right) = 2Fr_1^2 \quad (2.24)$$

όπου:

$$Fr_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}} \quad (2.25)$$

Οπότε οι εξ. (2.24) και (2.25) μας δίνουν :

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad (2.26)$$

όπου: $h_1 h_2 =$ συζυγή βάθη.

2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

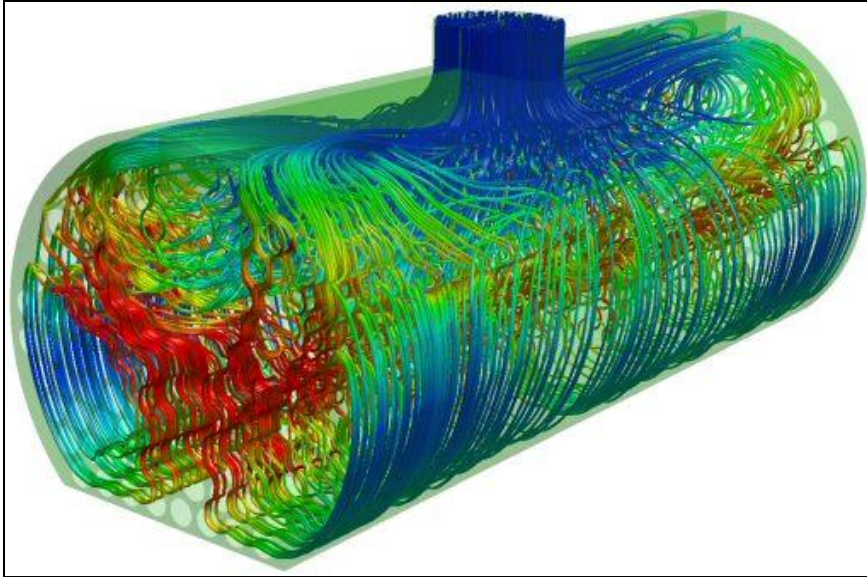
Η υπολογιστική ρευστομηχανική είναι ο κλάδος εκείνος της μηχανικής των ρευστών όπου χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους αλλά και αλγόριθμους, προκειμένου να επιλύσει και να αναλύσει προβλήματα που αφορούν ροές ρευστών. Σήμερα, με την βοήθεια των υπολογιστών, πραγματοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί προκειμένου να γίνει εξομοίωση διαφόρων ροών οι οποίες έρχονται σε αλληλεπίδραση με επιφάνειες όπου χαρακτηρίζονται από κάποιες συνοριακές συνθήκες. Είναι γεγονός, πως όταν χρησιμοποιούνται υψηλής ταχύτητας υπολογιστές (supercomputers) επιτυγχάνονται λύσεις και αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας και ευστοχίας. Μέχρι και σήμερα, πραγματοποιούνται έρευνες και πειραματικές διαδικασίες προκειμένου να βελτιωθεί η ευστοχία αυτή αλλά και η ταχύτητα διαφόρων περίπλοκων υπολογισμών όπως είναι ταραχώδης και διηχητικές ροές.

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική αναπτύχθηκε ραγδαία τις τελευταίες δυο δεκαετίες και αποτελεί μια ουσιαστική προσαρμογή της μαθηματικής ή θεωρητικής ρευστομηχανικής. Αποτελεί επίσης, ένα αναπόσπαστο στοιχείο μόρφωσης και επιμόρφωσης του φοιτητή, του ερευνητή αλλά και του μηχανικού, καθώς χρησιμοποιείται οπουδήποτε παρουσιάζονται προβλήματα σχεδιασμού ρευστοδυναμικών συστημάτων, μηχανών και ιδιαίτερος προβλήματα πρόβλεψης φαινομένων ροής. Είναι αυτονόητο, ότι συνδέεται στενά με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την τεχνολογία λογισμικού, αφού ο υπολογιστής είναι το βασικό μέσο, που χρησιμοποιεί η υπολογιστική ρευστοδυναμική. Ένα ακόμη πολύ σημαντικό στοιχείο της είναι η αριθμητική ανάλυση, δηλ. ο γνωστός κλάδος των μαθηματικών, που επίσης έχει εξελιχθεί ραγδαία στον αιώνα μας παράλληλα με την ανάπτυξη της πληροφορικής. Ο πυρήνας όμως της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής παραμένει η φυσικομαθηματική μοντελοποίηση, δηλαδή η προσομοίωση ενός πραγματικού ρευστοδυναμικού φαινομένου και η αντίστοιχη μαθηματική προσομοίωση με την βοήθεια των βασικών εξισώσεων της ρευστομηχανικής. Οι σημαντικότερες από αυτές, σε συνδυασμό με βασικά θερμοδυναμικά αξιώματα και υπολογισμούς των ιδιοτήτων μεταφοράς των ρευστών, είναι οι εξής:

- Η εξίσωση διατήρησης της μάζας
- Η εξίσωση διατήρησης της ορμής

- Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Στην Εικ.(2.3) είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μία προσομοίωση ροής προκειμένου να γίνει κατανοητή η σημαντικότητα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σήμερα, καθώς και να παρατηρηθεί η λεπτομερής απεικόνιση μιας ροής.



Εικόνα 2.3: Πεδίο ροής για τη συμπύκνωση ψυκτικών μειγμάτων[ANSYS].

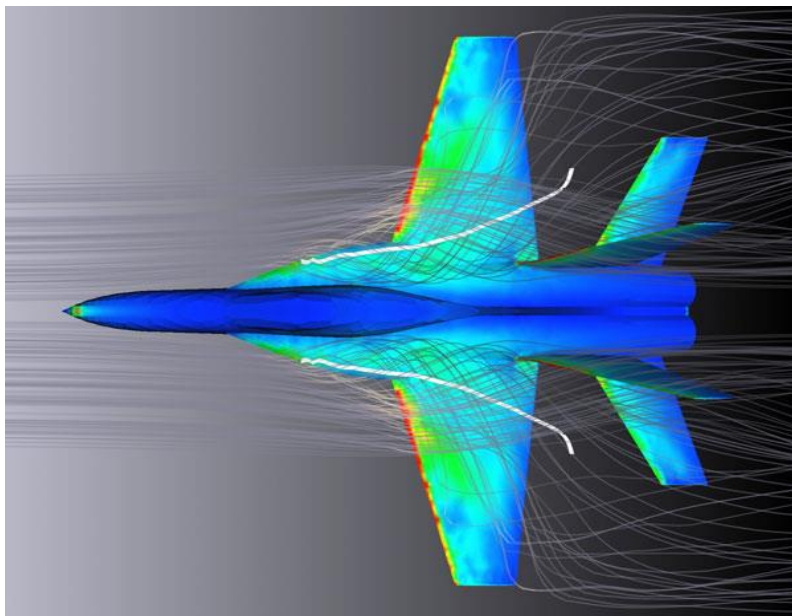
Αναλυτικότερα, ο κώδικας CFD είναι δυνατόν να χωρισθεί θεωρητικά σε δυο μεγάλες ενότητες. Η μια περιλαμβάνει τα σύγχρονα, άκρως εξελιγμένα, και ολοκληρωμένα συστήματα υπολογιστικής ανάλυσης της ροής τα οποία χρησιμοποιούνται είτε σε κέντρα ερευνών είτε διακινούνται από ειδικές εταιρίες λογισμικών εφαρμογών στην βιομηχανία. Το χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι το μέγεθος και η πολυπλοκότητα τους. Αυτό είναι αναπόφευκτο λόγω των πολύπλευρων εφαρμογών και υπολογισμών που υπόκεινται και εξαιτίας της χαμηλής δυνατότητας του χρήστη να εισέλθει στις εσωτερικές διαδικασίες υπολογισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τον περιορισμό του χρήστη στην αυτοματοποιημένη χρήση τους. Παρόλα αυτά, η απλή χρήση αυτών των συστημάτων είναι επίπονη και απαιτεί εφαρμογή προδιαγραμμένων κανόνων προσαρμογής τους στις ειδικές εφαρμογές του χρήστη. Οπότε είναι εύκολο να συμπεράνουμε ότι οι γνώσεις του χρήστη πάνω στον κλάδο της ρευστομηχανικής καθώς και οι ικανότητες του στον υπολογιστή, είναι χαρακτηριστικά υψίστης σημασίας προκειμένου να γίνει σωστά μια μελέτη η γενικότερα μια προσομοίωση ροής ρευστών.

Η άλλη ενότητα είναι τα μικρότερα υπολογιστικά συστήματα, τα οποία αναπτύσσονται μετά από τη φυσικομαθηματική μοντελοποίηση και την απλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται γρηγορότερη ανάπτυξη του υπολογιστικού αλγορίθμου και ελαττώνεται η έκταση του αντίστοιχου κώδικα, δηλαδή η κατάστρωση του υπολογιστικού προγράμματος στην κατάλληλη γλώσσα προγραμματισμού. Έτσι γίνεται προσιτή σε κάθε επιστημονικά και τεχνολογικά

ενδιαφερόμενο προκειμένου να υπάρξει αυτοδύναμη ανάπτυξη κωδίκων και προγραμμάτων για ειδικές εφαρμογές.

Στον κλάδο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής εμπεριέχεται ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών όπως είναι των μαθηματικών, της επιστήμης υπολογιστών, της μηχανικής και φυσικής, οι οποίες συνεργαζόμενες οδηγούν στην προσομοίωση της ροής των ρευστών. Μια τέτοια προσομοίωση χρησιμοποιείται συχνά σε πολλά επιστημονικά πεδία, αλλά γίνεται πραγματικά χρήσιμη, όταν τα αποτελέσματα που προκύπτουν δίνουν μια ρεαλιστική εξομοίωση του ροϊκού φαινομένου. Αυτό, εξαρτάται από το πρόβλημα που επιχειρείται να εξομοιωθεί, το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται, και από την ικανότητα του χρήστη.

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική έχει συνεισφέρει και συνεχίζει να συνεισφέρει πολύτιμες υπηρεσίες στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη νέων προϊόντων. Στο πεδίο της αεροναυπηγικής, όπως παρουσιάζεται και στην Εικ.(2.4), η εξέλιξη της επέτρεψε την ακριβή πρόβλεψη της ροής γύρω από σύνθετες γεωμετρίες στα αεροπλάνα και οδήγησε σε πιο αποδοτική και οικονομική χρήση των ακριβών πειραματικών εγκαταστάσεων, όπως είναι οι αεροσήραγγες.



Εικόνα 2.4: Εφαρμογή κώδικα CFD στον αεροναυπηγικό χώρο [ANSYS].

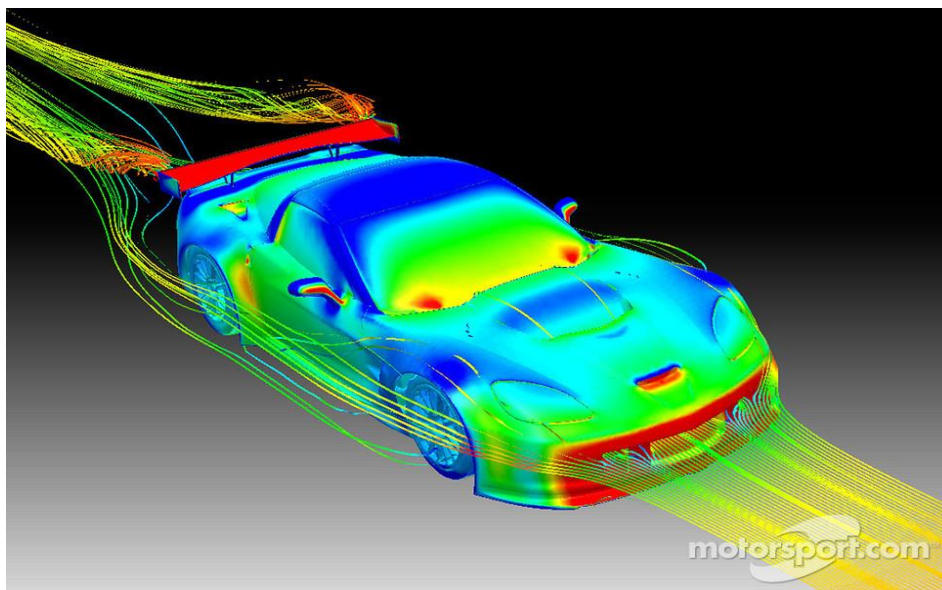
Αποτέλεσμα αυτού, είναι η δυνατότητα της πρόβλεψης, κατά μια έννοια, των φαινομένων στην "αριθμητική αεροσήραγγα" και γενικότερα στο χώρο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, καθώς με την χρησιμοποίηση των κατάλληλων κωδίκων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, τα θεωρητικά αποτελέσματα ελαχιστοποιούν σε πολύ μεγάλο βαθμό μελλοντικά πειραματικά σφάλματα. Είναι γεγονός ότι ο ακριβής και άμεσος υπολογισμός των ροϊκών μεγεθών και ιδιαίτερα της αεροδυναμικής αντίστασης, αποτελεί πρόβλημα για πολλές μεθόδους ακόμα αλλά ο ρυθμός ανάπτυξης των τελευταίων 25 χρόνων είναι εντυπωσιακός και οι τρέχουσες εξελίξεις ραγδαίες. Σήμερα, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί, ότι για όλα τα αποτελέσματα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής απαιτείται η πειραματική ή κάποιου άλλου είδους επαλήθευση, ώστε να είναι δυνατή η τελική "πιστοποίηση" των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Η πρόκληση για το μέλλον θα προέλθει από τη λεγόμενη πολυελεγχόμενη βελτιστοποίηση. Δηλαδή την μηχανική προσέγγιση, όπου όλες οι πλευρές του σχεδιασμού παραγωγής, συμπεριλαμβανομένου την αεροδυναμική, τη μηχανική κατασκευών και το σύστημα ολοκλήρωσης και κατασκευής, προσφέρουν ταυτόχρονη επεξεργασία. Αυτό επιτυγχάνεται κάτω από μια απλή διαδικασία βελτιστοποίησης, στο στάδιο του σχεδιαστικού κύκλου. Η μηχανική των ρευστών θα παίξει ένα σημαντικό ρόλο στην παραγωγή και οι βελτιώσεις στην υπολογιστική ρευστοδυναμική θα συνεχίσουν να είναι ένα σημαντικό στοιχείο στην ανταγωνιστικότητα στο μέλλον.

Οι κύριες περιοχές όπου εφαρμόζεται ο κλάδος της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σήμερα, είναι οι εξής:

- Στις τεχνολογίες πληροφοριών με την εξομοίωση και το σχεδιασμό, εφαρμόζοντας υπολογιστικές μεθόδους και ανάπτυξη λογισμικού (software).
- Στις τεχνολογίες βιομηχανίας και υλικών με την επέκταση της στρωτής ροής και τη μείωση αντίστασης.
- Στην αεροναυπηγική και την αεροελαστικότητα.
- Στις τεχνολογίες συστημάτων πρόωσης και στην τεχνολογία περιβάλλοντος.
- Στην ατμοσφαιρική φυσική και χημεία (τροπόσφαιρα-στρατόσφαιρα).
- Και τέλος στις τεχνολογίες ενέργειας με έμφαση στην αιολική ενέργεια, τις καθαρές τεχνολογίες για στερεά καύσιμα και την έρευνα και παραγωγή υδρογονανθράκων.

Η βασική έρευνα στην υπολογιστική ρευστοδυναμική έχει σκοπό να κάνει κατανοητά επιστημονικά προβλήματα όπως είναι εξέλιξη της τριβής στην ατμόσφαιρα και στους ωκεανούς. Αυτές είναι σήμερα οι πιο ακριβής υπολογιστικές εξομοιώσεις όπου ο κώδικας CFD, εφαρμόζει αριθμητικά εργαλεία για πιο ακριβές αποτελέσματα. Επίσης, τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιούνται για ειδικά προβλήματα, που εμφανίζονται σε φυσικά φαινόμενα και φυσικές διεργασίες, όπως είναι οι αεροδυναμικές ιδιότητες ενός οχήματος. Στο βιομηχανικό σχεδιασμό και τις κατασκευές εφαρμόζει αριθμητικά εργαλεία προκειμένου να επιλυθούν προβλήματα που σχετίζονται με την τεχνολογία που χαρακτηρίζει μια μηχανή εσωτερικής καύσης. Στην Εικ.(2.5) παρουσιάζεται μια προσομοίωση ροής σε ένα τυχαίο αυτοκίνητο.



Εικόνα 2.5: Προσημείωση ροής στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Το μέλλον της υπολογιστικής ρευστομηχανικής εξελίσσεται ραγδαία στα προβλήματα της επόμενης γενιάς τα οποία εμπεριέχουν σύνθετα και μέχρι, και σήμερα, δύσκολα προς κατανόηση φυσικά μοντέλα πολλών διαστάσεων και κλιμάκων. Μερικά από αυτά είναι η τυρβώδης καύση, ο ενεργός έλεγχος ροής καθώς και ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός πολλαπλού ελέγχου. Ένας μεγάλος βαθμός κατανόησης από μαθηματικής, αριθμητικής και φυσικής άποψης, πρέπει να ολοκληρωθεί για να επιτευχθούν αποδοτικές και ακριβείς τεχνικές λύσεις. Για παράδειγμα, στη βιομηχανία αεροσκαφών, η λύση των πλήρων εξισώσεων Navier-Stokes για μη μόνιμη ροή υψηλών αριθμών Reynolds γύρω από ένα ολοκληρωμένο αεροσκάφος δεν έχει ακόμα επιτευχθεί με τις υπαρκτές υπολογιστικές μεθόδους.

Αναλυτικότερα μερικά από τα θέματα με τα οποία ασχολείται η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι τα ακόλουθα:

- Υπολογισμοί σε παράλληλους επεξεργαστές,
- Η αλληλεπίδραση ρευστών όταν πραγματοποιείται μια καύση,
- Σε ελέγχους ροών στον χώρο της αεροδυναμικής και αεροακουστικής των αεροκινητήρων,
- Για μεταφορά μάζας και ενέργειας και για εξομοιώσεις τυρβώδους ροής
- Σε υπερηχητικές εφαρμογές καθώς και για δημιουργία πλεγμάτων,
- Στους σχεδιασμούς στροβιλομηχανών,
- Στη μη μόνιμη αεροδυναμική και αεροελαστικότητα και στα οριακά στρώματα,
- Σε υπερηχητικές ροές και κινητική αερίων και ροή ρευστών με ελεύθερη επιφάνεια,
- Και τέλος σε πολυφασικές ροές με μελέτη στη συμπεριφορά μη Νευτώνειων ρευστών.

2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ (ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΣ NAVIER & STOKES)

Η εξίσωση Navier & Stokes εκφράζει στην ουσία την μεταβολή της ορμής ενός ρευστού όταν ισούται με το σύνολο των δυνάμεων που ενεργούν πάνω στο ρευστό αυτό στοιχείο, ό,τι δηλαδή μας υποδεικνύει ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα. Όμως, προκειμένου να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία αυτή, θα πρέπει να γίνει λόγος και σε άλλες θεμελιώδεις εξισώσεις όπως είναι η εξίσωση κινήσεως του Cauchy. Αυτή, ισχύει για όλα τα ρευστά χωρίς να υπάρχουν περιορισμοί ρεολογικής φύσεως, ήτοι:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tilde{\tau} + \rho g \quad (2.27)$$

Όπου: $\tilde{\tau}$ = Επιφανειακό ιξώδες.

Αναλυτικότερα, η εξ.(2.27) εκφράζει τον ρυθμό αυξήσεως της γραμμικής ροής ενός υλικού σημείου ανά μονάδα όγκου. Αυτό συνεπάγεται με το σύνολο των δυνάμεων πίεσης, επιφανειακού ιξώδους αλλά και σωματικών δυνάμεων που ασκούνται πάνω σε ένα σημείο ανά μονάδα όγκου. Οπότε για ένα σύστημα με διαφορικό υλικό όγκο και βάσει ενός διαφορικού όγκου ελέγχου, η εξ.(2.27) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{D(\rho v)}{Dt} - v \frac{D\rho}{Dt} \quad (2.28)$$

Και χρησιμοποιώντας την εξίσωση της συνέχειας θα έχουμε:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{D(\rho v)}{Dt} + \rho v(\nabla \cdot v) = \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \rho v + \rho v(\nabla \cdot v) \quad (2.29)$$

Σε αυτό το σημείο εφαρμόζουμε την εξής ταυτότητα:

$$\nabla \cdot ab = (a \cdot \nabla)b + (\nabla \cdot a)b \quad (2.30)$$

όπου a και b είναι ανύσματα και το ζεύγος ab είναι τανυστής δευτέρας τάξεως. Θέτοντας $a=v$ και $b=\rho v$ θα έχουμε:

$$\nabla \cdot \rho v v = \nabla \cdot v(\rho v) = (v \cdot \nabla) \rho v + (\nabla \cdot v) \rho v \quad (2.31)$$

Στη συνέχεια, συνδυάζοντας τις εξ.(2.27) και (2.31) λαμβάνουμε:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -\nabla \rho v v - \nabla p + \nabla \cdot \tilde{\tau} + \rho g \quad (2.32)$$

Η εξ.(2.32) εκφράζει τον ρυθμό αύξησης της γραμμικής ορμής εντός ενός διαφορικού όγκου ελέγχου ανά μονάδα όγκου. Ισοδυναμεί δηλαδή με το άθροισμα του ρυθμού καθαρής εισροής γραμμικής ορμής και των δυνάμεων πίεσης, επιφανειακού ιξώδους και σωματικών δυνάμεων που επιδρούν στον διαφορικό όγκο ελέγχου ανά μονάδα όγκου.

Δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στα Νευτώνεια ρευστά και στο νόμο ιξώδους του Νεύτωνα, λαμβάνουμε την εξής ρεολογική εξίσωση, ήτοι:

$$\tilde{\tau} = \mu \overset{\circ}{\gamma} + \left[\left(\kappa - \frac{2}{3} \mu \right) \nabla \cdot v \right] \delta \quad (2.33)$$

όπου: μ = συντελεστής διατμητικού ιξώδους
 γ = τανυστής ρυθμών παραμορφώσεων
 κ = συντελεστής πυκνωτικού ιξώδους
 δ = μοναδιαίος τανυστής δευτέρας τάξεως.

Με συνδυασμό των εξ.(2.27) και (2.33), και γνωρίζοντας ότι $\overset{\circ}{\gamma} = \nabla v + (\nabla v)^T$ παίρνουμε:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \{ \nabla v + (\nabla v)^T \} \right] + \nabla \left[\left(\kappa - \frac{2}{3} \mu \right) \nabla \cdot v \right] + \rho g \quad (2.34)$$

Σύμφωνα με την σχέση $\kappa=0$ και το μ να είναι σταθερό, έχουμε,

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \mu \left[\nabla^2 v + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot v) \right] + \rho g \quad (2.35)$$

Η εξ. (2.35) είναι η εξίσωση των Navier & Stokes, γνωστή και ως εξίσωση κινήσεως για Νευτώνεια ρευστά και αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο για την επίλυση προβλημάτων Νευτώνειας ροής.

Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένες αναφορές που πρέπει να γίνουν όσο αναφορά το είδος της ροής, όταν πρόκειται να εφαρμοστεί η εξίσωση των Navier & Stokes και είναι οι εξής:

- Για ισόθερμη ροή, υπάρχουν πέντε άγνωστοι, δηλαδή $V_1, V_2, V_3, \rho, \rho$, και πέντε εξισώσεις, δηλαδή η εξίσωση της συνέχειας, η τρεις συνιστώσες της εξισώσεως κίνησης και η καταστατική εξίσωση $\rho=\rho(\rho)$

- Για συμπιεστές ροές το κινηματικό ιξώδες μ προστίθεται στους αγνώστους οπότε χρειάζεται να εισαχθεί και μία ακόμη εξίσωση που θα προκύπτει το ιξώδες συναρτήσει όμως της πυκνότητας, δηλ. $\mu=\mu(\rho)$.
- Για μη ισόθερμες ροές οι άγνωστοι αυξάνονται καθώς χρησιμοποιείται η θερμοκρασία T , με αποτέλεσμα να γίνεται χρήση της εξίσωσης της ενέργειας.

Από τις παραπάνω αναφορές συμπεραίνουμε ότι εμφανίζονται επτά εξισώσεις με επτά αγνώστους με αποτέλεσμα η πίεση και το ιξώδες να είναι πλέον συναρτήσεις όχι μόνο της πυκνότητας αλλά και της θερμοκρασίας, οπότε θα έχουμε, $\rho=\rho(\rho, T)$ και $\mu=\mu(\rho, T)$. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις ισόθερμες ροές.

Η Εξίσωση των Navier & Stokes συνήθως δεν χρησιμοποιείται στην πλήρη μορφή της διότι μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές απλοποιήσεις κάνοντας ορισμένες υποθέσεις. Υποθέτοντας λοιπόν, ότι το μ και το ρ είναι παράμετροι σταθερές, προκύπτει μια πιο απλή αλλά και πιο συνηθισμένη μορφή της, οπότε θα έχουμε,

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (\rho=\text{σταθ.}) \quad (2.36)$$

και

$$\nabla \left[\nabla v + (\nabla v^T) \right] = \nabla (\nabla \cdot v) + \nabla^2 v = \nabla^2 v \quad (2.37)$$

Έτσι, με ορισμένες παραδοχές η εξ.(2.35) γράφεται ως εξής:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (\text{N-S, } \rho=\text{σταθ.}, \mu=\text{σταθ.}) \quad (2.38)$$

και είναι η πλέον συνηθέστερη μορφή της εξίσωσης των Navier & Stokes.

Παρατηρώντας όμως ότι για $\rho=\text{σταθ.}$ και $\mu=\text{σταθ.}$, προκύπτει το εξής:
 Η συνισταμένη των επιφανειακών δυνάμεων λόγω ιξώδους που επιδρούν επάνω σε ένα υλικό σημείο ανά μονάδα όγκου ($\mu \nabla^2 v$), είναι ίση με την συνισταμένη των επιφανειακών δυνάμεων λόγω ιξώδους που επιδρούν όμως, επάνω σε ένα διαφορικό όγκο ελέγχου ανά μονάδα όγκου.

3 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ ΜΕ ΕΜΠΟΔΙΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1.1 Ροή εντός ανοικτών αγωγών

Ανοικτός αγωγός ή αγωγός ελεύθερης ροής καλείται ο αγωγός μέσα στον οποίο το νερό ρέει με ελεύθερη επιφάνεια. Η πίεση στην επιφάνεια του νερού είναι σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική. Οι δυνάμεις τις βαρύτητας είναι αυτές που προκαλούν την ροή στους ανοικτούς αγωγούς ενώ οι δυνάμεις που επιβραδύνουν τη ροή οφείλονται στην ιξώδη διάτμηση και στις τριβές κατά μήκος των τοιχωμάτων του αγωγού. Οι δυνάμεις επιφανειακής τάσεως βέβαια, καθώς και η αντίσταση του αέρα πάνω στη ελεύθερη επιφάνεια θεωρούνται αμελητέες και δεν λαμβάνονται υπόψη.

Γενικότερα, οι ανοικτοί αγωγοί διακρίνονται σε δύο είδη. Τους **τεχνητούς** αγωγούς και τους **φυσικούς**, ανάλογα με την αρχική τους διαμόρφωση. Οι φυσικοί ανοικτοί αγωγοί χαρακτηρίζονται από διάφορα είδη διατομών, με ακανόνιστα σχήματα και με μεγάλη ποικιλία τραχύτητας στα τοιχώματά τους. Οι τεχνητοί αγωγοί επίσης έχουν διάφορες διατομές αλλά η ποικιλία της τραχύτητας είναι μικρότερη εξαιτίας της γεωμετρίας και των υλικών κατασκευής τους. Ακόμα, οι τεχνητοί αγωγοί ονομάζονται και *πρισματικοί* όταν η διατομή και η κλίση του πυθμένα τους είναι σταθερές. Οι πρισματικοί αγωγοί, ανάλογα με το γεωμετρικό σχήμα της διατομής τους, ονομάζονται *ορθογωνικοί, τραπεζοειδείς, τριγωνικοί, ημικυκλικοί, παραβολικοί* κ.λπ. Στον Πιν.(3.1) φαίνονται τα συνηθέστερα είδη διατομών που μπορούν να έχουν οι αγωγοί σε συνδυασμό με ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε διατομές αγωγών.

Διατομή	Εμβαδόν, A	Βρεχόμενη Περίμετρος, P	Υδραυλική Ακτίνα, R	Πλάτος Ελεύθερης Επιφάνειας, T	Υδραυλικό Βάθος, $D = \frac{A}{T}$
Ορθογωνική	$B \cdot h$	$B + 2h$	$\frac{B \cdot h}{B + 2h}$	B	h
Τραπεζοειδής	$(B + zh)h$	$B + 2h\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(B + zh)h}{B + 2h\sqrt{1 + z^2}}$	$B + 2zh$	$\frac{(B + zh)h}{B + 2zh}$
Τριγωνική	zh^2	$2h\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zh}{2\sqrt{1 + z^2}}$	2zh	0.5h
Κυκλική	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)D^2$	$\frac{1}{2}\theta D$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)D$	$D \sin \frac{1}{2}\theta$	$\left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{1}{2}\theta}\right) \frac{D}{8}$

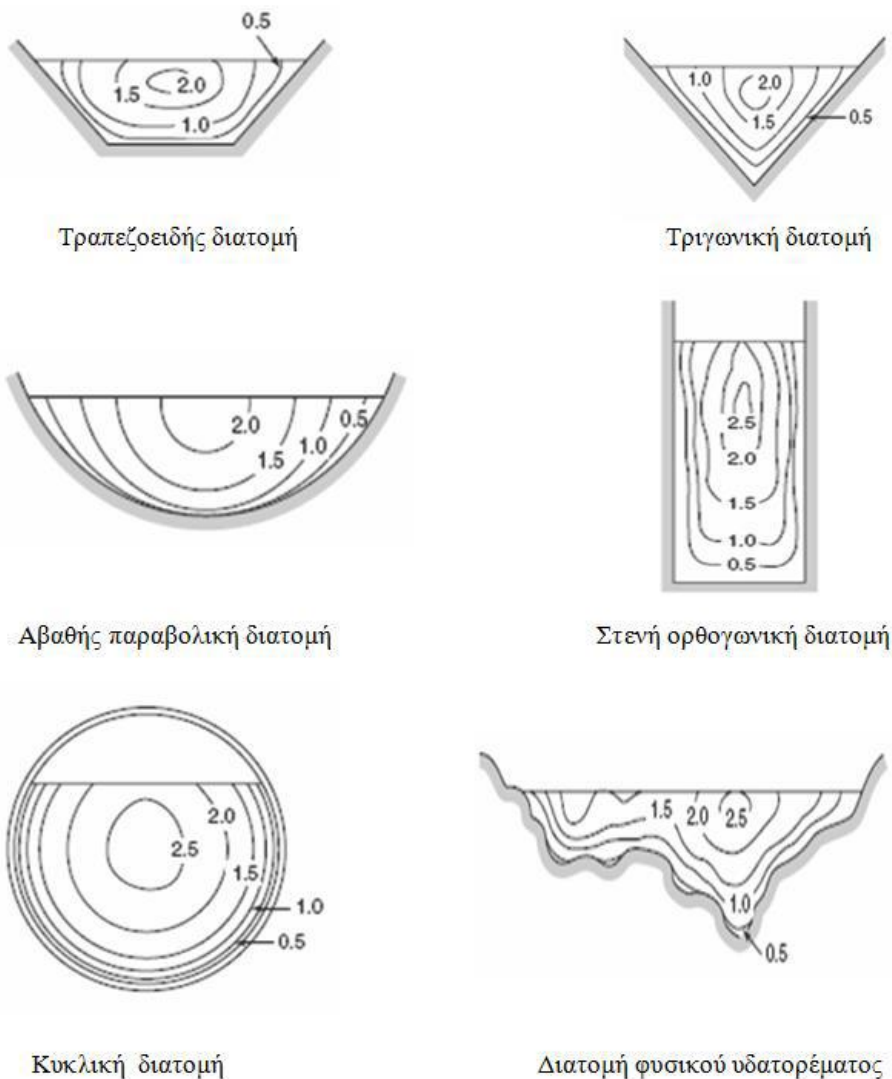
Για την ανάλυση όμως των προβλημάτων των ανοικτών αγωγών, απαιτείται η ακριβής γνώση των γεωμετρικών αυτών χαρακτηριστικών. Στον Πιν.(3.1) προβάλλονται μερικά από αυτά και με περαιτέρω ανάλυση, έχουμε:

- *Βρεχόμενη περίμετρος P:* Είναι το μήκος της περιμέτρου της βρεχόμενης επιφάνειας.
- *Υδραυλική ακτίνα R:* Είναι ο λόγος της βρεχόμενης επιφάνειας προς την βρεχόμενη περίμετρο.
- *Βρεχόμενη επιφάνεια E:* Είναι το εμβαδόν της βρεχόμενης διατομής όπου υπολογίζεται κατακόρυφα.
- *Πλάτος διατομής b:* Είναι το εύρος της διατομής στην ελεύθερη επιφάνεια.
- *Βάθος ροής y:* Είναι η κατακόρυφη απόσταση από το χαμηλότερο σημείο της διατομής του αγωγού μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια.
- *Βάθος z:* Είναι το βάθος του νερού σε μία τυχαία θέση της συγκεκριμένης διατομής.
- *Μέσο (ή υδραυλικό) βάθος Dm:* Είναι ο λόγος της βρεχόμενης επιφάνειας προς το πλάτος της διατομής στην ελεύθερη επιφάνεια.

Είναι γεγονός όμως, ότι η μελέτη τέτοιων προβλημάτων είναι πιο δύσκολη εν συγκρίσει με μελέτες προβλημάτων ροής υπό πίεση.

Σήμερα, η πλειονότητα των ροών στους ανοικτούς αγωγούς είναι τυρβώδεις. Οι ροές αυτές αντιμετωπίζονται ως μόνιμες ομοιόμορφες ροές στα ευθύγραμμα τμήματα μεγάλου μήκους και ως μόνιμες ανομοιόμορφες ροές στα σημεία μεμονωμένων κατασκευών.

Οι βασικότεροι παράγοντες που καθορίζουν την κατανομή ταχύτητας στους ανοικτούς αγωγούς, συμπεριλαμβανομένου την τυρβώδη ροή, είναι το ιξώδες, το σχήμα και η τραχύτητα των τοιχωμάτων καθώς και τα δευτερεύοντα ρεύματα που συνήθως εμφανίζονται σε όλους τους τύπους των ανοικτών αγωγών. Γενικότερα, η ταχύτητα λαμβάνει μηδενικές τιμές πάνω στα τοιχώματα του αγωγού και αυξάνεται κατά μη γραμμικό τρόπο με την απόσταση παίρνοντας τη μέγιστη τιμή λίγο κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια. Στην Εικ.(3.1) φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας σε περιπτώσεις αγωγών όπου η διατομή μπορεί να είναι τραπεζοειδής, παραβολική, κυκλική, τριγωνική, στενή ορθογωνική αλλά και αυτή του φυσικού υδατορέματος.



Εικόνα 3.1: Κατανομή της ταχύτητας σε διάφορες γεωμετρίες ανοικτών αγωγών.

3.1.2 Εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι πλέον η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης στην προσομοίωση προβλημάτων ροής. Προτιμάται σε προβλήματα

τρισδιάστατης ροής καθώς είναι σχετικά απλή να κατανοηθεί αλλά και να εφαρμοστεί. Ένα παράδειγμα κώδικα προσομοίωσης με την μέθοδο αυτή είναι το Fluent. Σε κάθε προσομοίωση ροής πεπερασμένων διαφορών, πραγματοποιείται υπολογισμός φορτίου σε καθορισμένα σημεία στο χώρο τα οποία ονομάζονται κόμβοι του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών. Ανάλογα με τον τρόπο καθορισμού των υδραυλικών παραμέτρων (σε σχέση με τους κόμβους του πλέγματος), τα ομοιώματα πεπερασμένων διαφορών περιγράφονται ως εξής:

- Κέντρο του κύβου (block-centered) δηλαδή, οι κόμβοι βρίσκονται στις τομές των γραμμών πλέγματος.
- Κέντρο του κόμβου (mesh-centered) δηλαδή οι περιοχές στις οποίες πραγματοποιείται καθορισμός μεταβιβαστικών ιδιοτήτων, διαφέρουν από τις ιδιότητες αποθηκευτικότητας, εισροής και αποχώρησης.

Αναλυτικότερα, οι μεταβιβαστικές ιδιότητες, όπως είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε μια δεδομένη κατεύθυνση, καθορίζονται πάνω σε ένα διάστημα ως προς την ίδια κατεύθυνση και η τιμή που παίρνουν είναι ίδια σε όλη την απόσταση ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους. Σε άλλες όμως περιπτώσεις, όπως είναι οι ιδιότητες του συντελεστή αποθηκευτικότητας ή του ρυθμού επανατροφοδότησης, ο καθορισμός τους πραγματοποιείται σε περιοχές με κέντρα τους κόμβους.

Το Fluent, όπως θα περιγραφεί αναλυτικότερα και στα επόμενα κεφάλαια, χρησιμοποιεί κώδικες πεπερασμένων διαφορών και μπορεί να προσομοιάσει όλους τους τύπους υδροφορέων. Ο κώδικας αυτός παρουσιάζει ένα τρισδιάστατο σύστημα ως ακολουθία στρωμάτων πορώδους μέσου με τους κόμβους να βρίσκονται στο κέντρο των κύβων (στοιχείων). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το πεδίο προσομοίωσης να θεωρείται σαν πλέγμα στοιχείων ή κελιών τα οποία περιβάλλουν κάθε κόμβο. Αυτά τα στοιχεία διαχωρίζονται μεταξύ τους με πλεγματικές γραμμές καθώς βρίσκονται ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους. Ο καθορισμός των υδραυλικών ιδιοτήτων πραγματοποιείται για κάθε στοιχείο καθώς αυτά θεωρούνται ομοιογενή.

Η δημιουργία του οριζοντίου πλέγματος (grid) επιτυγχάνεται καθορίζοντας τις διαστάσεις του πλέγματος κατά τις διευθύνσεις x και y . Το οριζόντιο πλέγμα πρέπει να είναι το ίδιο για κάθε στρώμα, όπως άλλωστε ισχύει και για όλα τα πλέγματα των πεπερασμένων διαφορών. Το μοντέλο δεν απαιτεί εισαγωγή κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (z) καθώς αυτή καθορίζεται έμμεσα. Ο χρήστης είναι δυνατόν να εισάγει τις μεταβιβαστικότητες (transmissivities) του στρώματος, οι οποίες θα είναι ίσες με την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) του στρώματος επί το πάχος του στρώματος (z). Σε κάθε άλλη περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε στρώμα και τιμές που δίνουν το υψόμετρο της οροφής και του δαπέδου του κάθε στρώματος. Έπειτα πραγματοποιείται ο υπολογισμός της μεταβιβαστικότητας του στρώματος, αφού προηγηθεί ο υπολογισμός του πάχους του στρώματος από τα υψόμετρα της οροφής και της βάσης του. Σημαντικό επίσης, είναι το γεγονός ότι η μεταβιβαστικότητα σε κάθε θέση i, j εντός του στρώματος είναι πολύ πιθανόν να ποικίλει, γεγονός που οφείλεται στις χωρικές μεταβολές του πάχους του υδροφορέα ή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το z να ποικίλει χωρικά εντός του στρώματος.

Η παραπάνω διαδικασία προσφέρει μεγαλύτερη ευκαμψία στην χρήση των υδροστρωματογραφικών ενοτήτων στο πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών. με βασικότερο μειονέκτημα την διαστρέβλωση των στρωμάτων λόγω λανθασμένης εισαγωγής της προσέγγισης των πεπερασμένων διαφορών.

3.2 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Οι Ευθύγραμμοι κυκλικοί αγωγοί αποτελούν την πλειοψηφία των αγωγών που χρησιμοποιούνται σήμερα προκειμένου να υπάρξει μεταφορά ρευστών όπως σε περιπτώσεις ύδρευσης, θέρμανσης κ.λπ.

Για την μελέτη όμως της ροής σε κάποιο ευθύγραμμο αγωγό κυκλικής διατομής, θεωρείται ότι αυτός είναι συνδεδεμένος σε μία δεξαμενή με ρευστό. Επίσης για την μελέτη αυτή, η πίεση P εντός της δεξαμενής και η παροχή του όγκου Q που ρέει εντός του σωλήνα, θεωρούνται μεγέθη σταθερά.

Ο αριθμός Reynolds είναι αυτός που καθορίζει το είδος της ροής που θα έχουμε, δηλαδή στρωτή, τυρβώδης κ.λπ. Όταν έχουμε ένα σωλήνα διαμέτρου D , ο αριθμός Reynolds θα ορίζεται από την εξής σχέση:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (3.1)$$

όπου: ρ = πυκνότητα

U = ταχύτητα

μ = συντελεστής ιξώδους

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της εργασίας, η ροή θα καλείται στρωτή όταν ο αριθμός Reynolds θα έχει τιμές χαμηλότερες από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds Re_k . Η ακριβής όμως τιμή του Re_k είναι εξαρτώμενη από την τραχύτητα των τοιχωμάτων του σωλήνα καθώς και από τις συνθήκες εισόδου και εξόδου του σωλήνα. Για συνηθισμένους αγωγούς κυκλικής διατομής η τιμή του κρίσιμου αριθμού Reynolds είναι $Re_k = 2000$ και υπό ιδανικές συνθήκες μπορεί να φτάσει έως και 10^5 .

Έχοντας λοιπόν σαν αφετηρία την αρχή του σωλήνα στο σημείο σύνδεσης με την δεξαμενή, μπορούν να διακριθούν τρεις περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικά οριακά στρώματα. Τα οριακά αυτά στρώματα αναπτύσσονται στα τοιχώματα του αγωγού, θεωρώντας πάντα ότι η ροή είναι αξισυμμετρική και έχοντας σαν άξονα συμμετρίας τον άξονα του αγωγού.

Στην αρχή του αγωγού βρίσκεται η πρώτη περιοχή χαρακτηριζόμενη από στρωτό οριακό στρώμα. Η διαμόρφωση της συνδεσμολογίας του αγωγού με την δεξαμενή καθώς και η αρχή του αγωγού, έχουν καθοριστικό ρόλο όσο αναφορά το μέγεθος της πρώτης περιοχής. Σε ορισμένα είδη στομίων εισροής, δημιουργούνται στην είσοδο δίνες που τείνουν να αποκολλήσουν τον αγωγό, με αποτέλεσμα το μήκος της πρώτης περιοχής να είναι ελάχιστο. Και αυτό συμβαίνει διότι το σημείο επανακόλλησης είναι σημαντικά ασταθές.

Στην περιοχή ανάπτυξης, δηλαδή την δεύτερη περιοχή, το οριακό στρώμα γίνεται τυρβώδες παρουσιάζοντας αύξηση του πάχους κατά την διεύθυνση που έχει η ροή. Ο κεντρικός πυρήνας (core) χαρακτηρίζει το είδος διανομής ταχύτητας που θα έχει η ροή κατά μήκος της ακτίνας του στρώματος. Για σταθερή απόσταση x , η

ταχύτητα και η πίεση κατά μήκος της ακτίνας είναι μεγέθη σταθερά, παρουσιάζοντας ένα τυρβώδες οριακό στρώμα. Στην περίπτωση όμως που η απόσταση x αυξάνεται, τότε το μέγεθος του κεντρικού πυρήνα θα ελαττώνεται ανάλογα, έως ότου λάβει μηδενική τιμή. Ύστερα από αυτό, το πάχος του οριακού στρώματος θα είναι ίσο με $D/2$. Όσο αναφορά το μήκος της δεύτερης περιοχής, όταν αναφερόμαστε σε στρωτή ροή με σταθερή διανομή ταχύτητας κατά μήκος μιας ακτίνας, θα υπολογίζεται με τον εξής τύπο, ήτοι:

$$L_2 = 0,028D Re \quad (3.2)$$

Βέβαια, το ακριβές μήκος εξαρτάται από τις συνθήκες ροής που επικρατούν αλλά και από τη φύση του ρευστού, δηλαδή τον αριθμό Reynolds και το είδος της επιφάνειας.

Τέλος, ακολουθεί η τρίτη περιοχή η οποία έχει σταθερή κατανομή ταχύτητας στην διεύθυνση της ακτίνας χωρίς να την επηρεάζει το μέγεθος της απόστασης x από την αρχή του σωλήνα. Προκειμένου όμως να πραγματοποιηθεί ο καθορισμός της διανομής της ταχύτητας κατά μήκος της ακτίνας, γίνεται χρήση της εξής εκθετικής σχέσης:

$$V(r) = V_{\max} \left(1 - \frac{2r}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.3)$$

όπου: V_{\max} = ταχύτητα ρευστού στον άξονα συμμετρίας

Ο όρος n αντιπροσωπεύει τον εκθέτη που έχει άμεση σχέση με τον αριθμό Reynolds της ροής και υπολογίζεται ως εξής:

$$n = 1,66 \log Re \quad (3.4)$$

Και

$$U = \frac{Q}{\left(\pi \frac{D^2}{4} \right)} \quad (3.5)$$

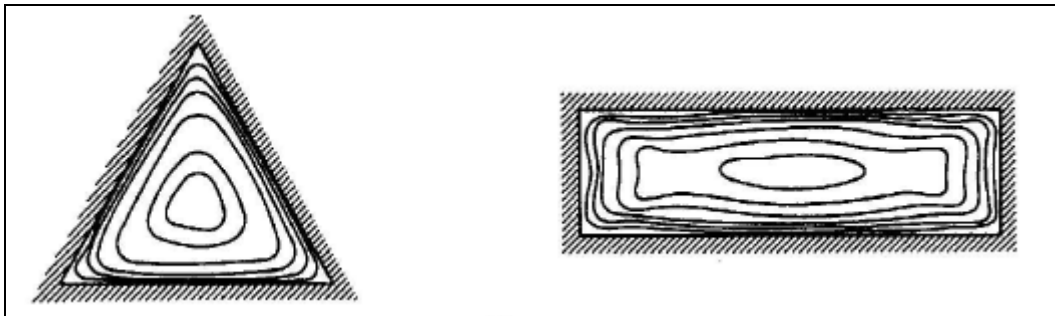
Η εξ.(3.3) υποδεικνύει την γενική διανομή ταχύτητας που υπάρχει παντού εκτός από την περιοχή πλησίον των τοιχωμάτων και την κεντρική γραμμή. Εφαρμόζοντας την εξ.(3.5) λαμβάνουμε την τιμή της ταχύτητας εντός δύο διαφορετικών ειδών αγωγών διαμέτρου D , δηλ. αυτούς που είναι κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο και είναι λείοι, και τους τραχείς. Στο πρώτο είδος, η ταχύτητα στη μέση γραμμή μειώνεται με την ανάλογη αύξηση του αριθμού Reynolds καθώς η διανομή της ταχύτητας γίνεται πιο ομοιόμορφη. Στο δεύτερο είδος αγωγών όμως, ο λόγος U/V_{\max} παραμένει σταθερός

από κάποιο συγκεκριμένο αριθμό Reynolds και μετά. Η σταθερότητα που παρουσιάζεται καθώς και η σχέση που υπάρχει μεταξύ των σχετικών μεγεθών τραχύτητας και οριακών υποστρωμάτων, χαρακτηρίζουν την ροή σαν πλήρως τυρβώδης.

3.3 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

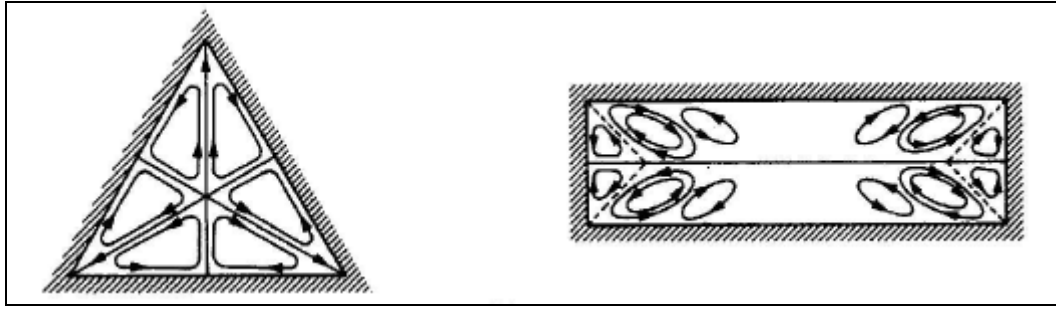
3.3.1 Αγωγοί ορθογωνικής και τριγωνικής διατομής

Όταν αντιμετωπίζουμε ροές εντός αγωγών με τριγωνική ή ορθογωνική διατομή, οι κατανομές της ταχύτητας παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις κατανομές που είχαμε στους αγωγούς κυκλικής διατομής. Αναφερόμενοι πάντα σε τυρβώδη ροή, οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας σε τριγωνικής και ορθογωνικής διατομής αγωγούς, προσδιορίστηκαν από τον J.Nikuradse. Στην Εικ.(3.2) φαίνονται αναλυτικά οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας για τυρβώδης ροή σε αγωγούς τριγωνικής και ορθογωνικής διατομής αντίστοιχα.



Εικόνα 3.2: Ισοταχείς καμπύλες ροής εντός αγωγών, τριγωνικής και ορθογωνικής διατομής [1].

Είναι γεγονός ότι σε όλους τους ευθύγραμμους αγωγούς μη κυκλικής διατομής, αναπτύσσονται ορισμένες δευτερεύουσες ροές με κατεύθυνση εγκάρσια προς την κύρια ροή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της ταχύτητας στις γωνίες των αγωγών. Αναλύοντας περισσότερο τις δευτερεύουσες ροές, παρατηρείται ότι το ρευστό κινείται προς την γωνία κατά μήκος της διχοτόμου της ίδιας γωνίας, ενώ στη συνέχεια κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση της γωνίας αλλά και από τις δύο πλευρές της διχοτόμου. Όπως φαίνεται και στην Εικ.(3.3), η ολοκληρωμένη πορεία που ακολουθεί το ρευστό, και ειδικότερα οι δευτερεύουσες ροές, συνεπάγονται στην μεταφορά γραμμικής ορμής από το κέντρο του αγωγού προς τις γωνίες του και στην δημιουργία υψηλών σχετικά ταχυτήτων.



Εικόνα 3.3: Δευτερεύουσες ροές εντός αγωγών τριγωνικής και ορθογωνικής διατομής [2].

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ότι δευτερεύουσες ροές, σαν και τις προαναφερθείσες, αναπτύσσονται και σε ανοικτούς αγωγούς ή κανάλια. Η διαφορά τους εντοπίζεται στη μέγιστη ταχύτητα καθώς αυτή δεν αναπτύσσεται στην ελεύθερη επιφάνεια, που είθισται να είναι το αναμενόμενο, αλλά σε βάθος ίσο με $\sim 1/5$ του ολικού βάθους και επιπλέον έχει μια μη μηδενική συνιστώσα η οποία είναι κάθετη προς την διεύθυνση της κύριας ροής.

3.3.2 Η σημασία της υδραυλικής διαμέτρου

Γενικότερα, όταν αναφερόμαστε σε τυρβώδη ροή, υπάρχουν ορισμένες σχέσεις που πρέπει να κατανοηθούν προκειμένου να αντιμετωπισθεί σωστά μια ροή εντός αγωγών μη κυκλικής διατομής. Σε περιπτώσεις λοιπόν, που ο λόγος όψεως της διατομής ενός τέτοιου αγωγού δεν έχει υπερβολικά μεγάλο μέγεθος αλλά ούτε και πολύ μικρό, τότε μπορεί να γίνει χρήση της υδραυλικής διαμέτρου, ήτοι:

$$D_v = \frac{4A}{C} \quad (3.5)$$

όπου: A = επιφάνεια διατομής
 C = βρεχόμενη περίμετρος

Είναι γνωστό, ότι για κυκλική διατομή ισχύει:

$$D_v = 4 \frac{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{(\pi D)} = D \quad (3.6)$$

Ενώ για ορθογωνική, ισχύει:

$$D_v = \frac{2bh}{(b+h)} \quad (3.7)$$

όπου: b = πλάτος
 h = ύψος

Ορίζοντας όμως ως λόγο όψεως,

$$\omega = \frac{h}{b} \quad (3.8)$$

Τότε η υδραυλική διάμετρος θα είναι:

$$D_v = \frac{2h}{(1+\omega)} \quad (3.9)$$

Σε περιπτώσεις που $\frac{1}{3} < \omega < 3$, η θεωρία της υδραυλικής διαμέτρου είναι δυνατών να εφαρμοσθεί και σε αγωγούς ορθογωνικής διατομής οι οποίοι κατασκευάζονται από μεταλλικά φύλλα και χρησιμοποιούνται συνήθως σε κλιματισμό χώρων.

3.4 ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΩΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

3.4.1 Ροή γύρω από αντικείμενα

Όταν πραγματοποιείται μία μελέτη ροής γύρω από αντικείμενα, οποιασδήποτε διαμέτρου, παρατηρείται η ανάπτυξη μιας δύναμης στο αντικείμενο όπου καλείται συνιστάμενη των δυνάμεων. Αυτή οφείλεται σε δυνάμεις τάσεως και πιέσεως που αναπτύσσονται πάνω στην επιφάνεια του αντικείμενου. Η ανάλυση της ολικής δύναμης πάνω στο αντικείμενο επιτυγχάνεται, χωρίζοντας την σε δύο ξεχωριστές συνιστώσες. Η μια είναι παράλληλη προς την ροή και λέγεται «αντίσταση» του αντικείμενου, ενώ η άλλη είναι καθετή προς την ροή και λέγεται «άνωση» του αντικείμενου ή δυναμική άνωση.

Το γεγονός ότι το αντικείμενο αντιστέκεται, οφείλεται σε δύο παράγοντες, ήτοι:

1. Στις τάσεις τριβής πάνω στην επιφάνειά του.
2. Στις διαφορετικές πιέσεις κατά μήκος του.

Όταν αντιμετωπίζουμε ροές της πρώτης κατηγορίας, τις καλούμε ροές με αντίσταση λόγω τριβής, ενώ για την δεύτερη κατηγορία τις καλούμε ροές με αντίσταση λόγω μορφής. Για πεπλατυσμένα αντικείμενα η κυρίαρχη συνιστώσα είναι η αντίσταση λόγω τριβής ενώ για ογκώδη αντικείμενα η κυρίαρχη συνιστώσα είναι η αντίσταση λόγω μορφής. Βέβαια υπάρχουν και οι ακραίες περιπτώσεις που μια πλάκα βρίσκεται παράλληλα προς την ροή με την αντίσταση να οφείλεται αποκλειστικά στην τριβή. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η πλάκα θα βρίσκονταν κάθετα προς την ροή, τότε η αντίσταση θα ήταν αποτέλεσμα διαφοράς πίεσης ανάμεσα στις δυο πλευρές της πλάκας.

Ο υπολογισμός της αντίστασης λόγω τριβής, επιτυγχάνεται εάν υποθέσουμε ότι αυτή είναι ίση με την αντίσταση της επίπεδης πλάκας. Αυτή έχει ακριβώς το ίδιο

μήκος με το αντικείμενο και επιφάνεια ίση με την συνολική βρεχόμενη επιφάνεια του αντικείμενου. Για τον καθορισμό όμως της αντίστασης λόγω μορφής, πρέπει να αντιμετωπίσουμε τη ροή πειραματικά. Για ιδιότυπη γεωμετρία αντικείμενου, με άγνωστα πειραματικά δεδομένα, η αντίσταση προσδιορίζεται από πειράματα με μοντέλο του αντικείμενου.

Τέλος, ενώ όλα τα αντικείμενα παρουσιάζουν κάποια τιμή αντίστασης, μονό τα μη συμμετρικά αντικείμενα έχουν μη μηδενική μέση άνωση όπως είναι οι υδρονομές (αεροτομές) που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλές εφαρμογές. Σε συμμετρικά αντικείμενα (π.χ. κύλινδρος, σφαίρα) η μέση τιμή της άνωσης είναι μηδέν.

3.4.2 Η έννοια της δύναμης της αντίστασης

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί μια ροή γύρω από σώματα διαφορετικών διατομών και γενικότερα για να κατανοηθούν τα αναπτυσσόμενα ροϊκά πεδία, πρέπει να εμπεδωθεί η έννοια της δύναμης της αντίστασης. Η αναπτυσσόμενη δύναμη της αντίστασης D είναι παράλληλη στην κατεύθυνση που έχει το διάνυσμα της ταχύτητας U_∞ και παίρνει την εξής μορφή:

$$D = c_D A \frac{\rho}{2} U_\infty^2 \quad (3.9)$$

όπου: C_D = ολικός συντελεστής αντίστασης

Ολικός συντελεστής αντίστασης C_D , καλείται επίσης το άθροισμα δύο επιμέρους συντελεστών του συντελεστή τριβής C_u . Έτσι, εκφράζεται η δύναμη της αντίστασης εξαιτίας των διαμηθικών τάσεων στο οριακό στρώμα και του συντελεστή αντίστασης μορφής (form drag coefficient).

Όταν πάνω σε ένα -τυχαίας διατομής- σώμα, η δύναμη της αντίστασης D που δημιουργείται είναι συνάρτηση της ταχύτητας U_∞ , ενός τυχαίου μήκους d , της πίεσης P και του ιξώδους μ , τότε θα γίνεται εφαρμογή του εξής τύπου:

$$D = f(U_\infty, d, P, \mu) \quad (3.10)$$

Θεωρώντας όμως δύο ανεξάρτητες αδιάστατες ομάδες και λαμβάνοντας υπ όψιν τις βασικές αρχές ομοιότητας, τότε θα έχουμε:

$$c_D = \frac{D}{\left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2\right)} = f\left(\frac{d U_\infty}{\mu}\right) \quad (3.11)$$

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι ο συντελεστής αντίστασης C_D για ροές με ασυμπίεστα ρευστά, είναι συνάρτηση μόνο του αριθμού Reynolds και συνεπάγεται ότι ροές που παρουσιάζουν δυναμικές ομοιότητες θα έχουν τον ίδιο συντελεστή C_D . Άρα θα ισχύει:

$$c_D = f(R_e) \quad (3.12)$$

3.5 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΓΥΡΟ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ

Η ροή γύρω από κύλινδρο είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα ροή καθώς ένα πολύ μεγάλο μέρος κατασκευών που λειτουργούν μέσα σε ρεύματα φέρουν κυκλική διατομή (π.χ. καλώδια). Ο κύλινδρος γενικότερα θεωρείται ένα απλό γεωμετρικό σχήμα καθώς χαρακτηρίζεται από μόνο μια διάσταση, την διάμετρο. Η ροή γύρω από τον κύλινδρο εξαρτάται μονό από τον αριθμό του Reynolds ο οποίος βασίζεται πάνω στην ταχύτητα της εξωτερικής ροής U , και την διάμετρο D του κυλίνδρου.

Όταν οι τιμές του αριθμού Reynolds κυμαίνονται κοντά στην μονάδα τότε η ροή γύρω από τον κύλινδρο καλείται συμμετρική. Το μέγεθος της πίεσης στην πίσω πλευρά είναι περίπου ίση με αυτήν που υπάρχει και μπροστά, με αποτέλεσμα η αντίσταση του κυλίνδρου να οφείλεται αποκλειστικά στην τριβή. Όταν η τιμή του αριθμού Reynolds αυξάνεται, τότε αρχίζει να παρατηρείται αποκόλληση της ροής. Στο πίσω μέρος του κυλίνδρου εμφανίζονται δυο είδη δινών οι οποίες είναι συμμετρικές και παραμένουν προσκολλημένες στον κύλινδρο. Πλέον, λόγω διαφοράς πίεσης, αναπτύσσεται και αντίσταση μορφής. Η ροή εξακολουθεί να είναι μόνιμη έως ότου ο αριθμός Reynolds να φτάσει περίπου $Re=48$, όπου γίνεται ασταθής και μετατρέπεται σε μη μόνιμη.

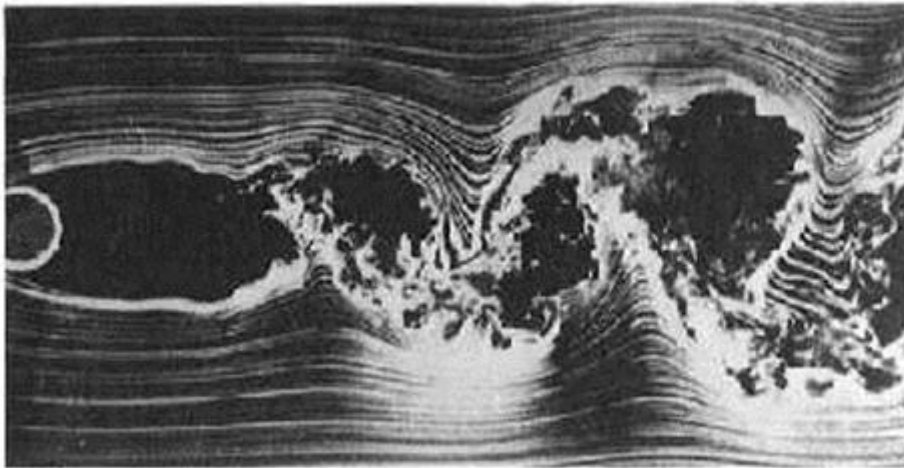


Εικόνα 3.4: Οι σειρές του Von Karman που σχηματίζονται πίσω από ένα κύλινδρο [3].

Σε αυτό το σημείο, αρχίζουν να σχηματίζονται εναλλάξ, ορισμένες δίνες. Η μία στην πάνω και η άλλη στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου, εγκαταλείποντας τον κύλινδρο με ταχύτητα λίγο μικρότερη από αυτή της εξωτερικής ροής. Οι δύο σειρές δινών που παρατηρούνται πίσω από τον κύλινδρο καλούνται «σειρές του Von Karman» και απεικονίζονται λεπτομερώς στην Εικ.(3.4). Ο σχηματισμός τους είναι ένα περιοδικό φαινόμενο με καλά καθορισμένη συχνότητα. Αν η συχνότητα σχηματισμού των δινών συμβολίζεται με f (σε Hertz), τότε η ποσότητα,

$$S = f \frac{D}{U} \text{ (αριθμός Strouhal)} \quad (3.13)$$

είναι συνάρτηση του αριθμού του Reynolds. Όταν έχουμε εύρος τιμών αριθμών Reynolds από 1000 έως 200000, τότε ο αριθμός Strouhal δεν αλλάζει, παραμένοντας σε τιμή περίπου $S=0.2$. Στην Εικ.(3.5) φαίνεται ένα παράδειγμα τυρβώδους ροής καθώς και οι αναπτυσσόμενες δίνες λόγω του -κυλινδρικής διατομής- εμποδίου. Επίσης ο συντελεστής αντίστασης, που αναπτύσσεται λόγω διαφοράς πίεσης, παραμένει σταθερός σε αυτή την περιοχή, με τιμή περίπου 1.15.



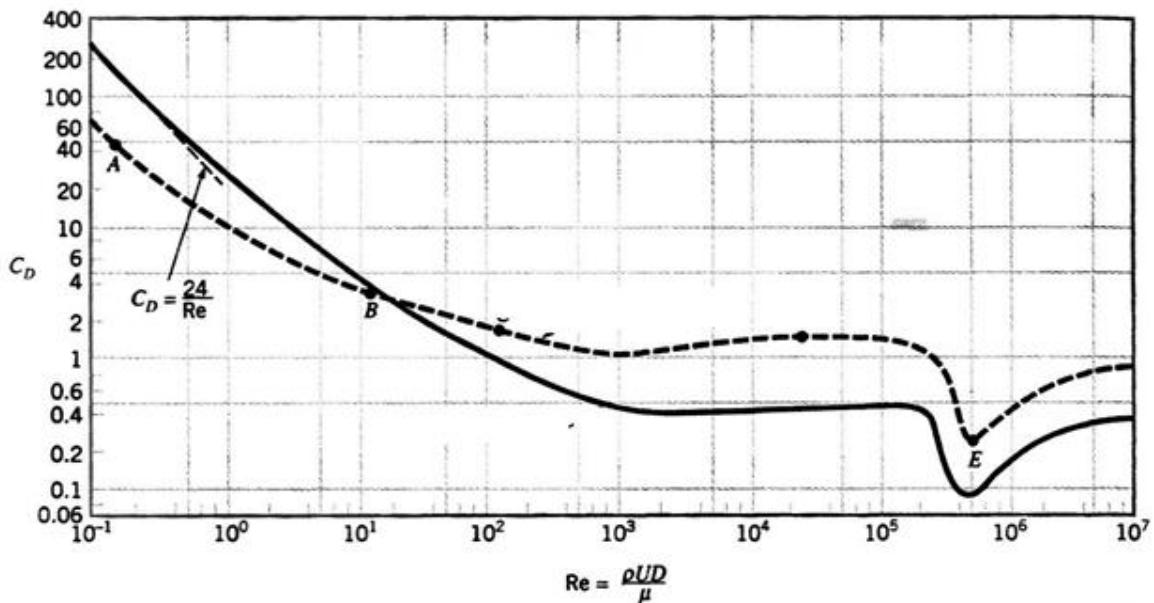
Εικόνα 3.5: Φωτογραφία τυρβώδους ροής γύρω από κυλίνδρου με αριθμό Reynolds 10000 (Corked και Nagy) [4].

Λόγω των δινών που δημιουργούνται στην πάνω και κάτω πλευρά του κυλίνδρου, αναπτύσσεται μια αρμονική δύναμη πάνω στον κύλινδρο με συχνότητα ίση προς την συχνότητα σχηματισμού δινών και σε κατεύθυνση καθετή προς την ροή. Οπότε, σε περίπτωση που ο κύλινδρος είναι μέρος εύκαμπτης κατασκευής (π.χ. καλώδιο), και η συχνότητα σχηματισμού δινών γίνει περίπου ίση με μια από τις ραδιοσυχνότητες της κατασκευής, τότε είναι δυνατών να υπάρξει συντονισμός. Ο συντονισμός είναι ένα υδροελαστικό φαινόμενο όπου έχει σαν αποτέλεσμα την ταλάντωση της κατασκευής με υψηλό κίνδυνο αστοχίας λόγω συσσωρευμένης κοπώσεως. Είναι ένα φαινόμενο υπεύθυνο για πολλές αστοχίες κατασκευών εντός θαλάσσιων ρευμάτων αλλά και κατασκευών στην ξηρά που λειτουργούν υπό την επήρεια δυνατών ανέμων.

Αναλυτικότερα, για $Re > 200000$, το οριακό στρώμα του κυλίνδρου γίνεται τυρβώδες με τα σημεία αποκόλλησης της ροής να μετατοπίζονται. Ο συντελεστής αντίστασης του κυλίνδρου ελαττώνεται, και αγγίζει την τιμή 0.3 όταν $Re = 300000$. Για υψηλότερους αριθμούς Reynolds υπάρχει άνοδος του συντελεστή αντίστασης παραμένοντας όμως σε χαμηλότερες τιμές από αυτές που έχει όταν το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Στην Εικ.(3.5) παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει διάφορων τιμών Reynolds.

Όταν το οριακό στρώμα γίνει τυρβώδες τότε ο συντελεστής αντίστασης μειώνεται. Το οριακό αυτό στρώμα, χαρακτηρίζει όλα τα σώματα με καμπυλωμένο περίβλημα όπως είναι η σφαίρα, της οποίας ο συντελεστής αντίστασης επίσης φαίνεται παρακάτω στην Εικ.(3.5). Για υδροδυναμικά σώματα, η μείωση είναι σχεδόν

ανεπαίσθητη καθώς τα σημεία αποκόλλησης είναι κοντά στο άκρο του σώματος, και δεν έχουν πολλά περιθώρια μετατόπισης. Όταν το οριακό στρώμα μετατραπεί σε τυρβώδες, η ορμή των σωματιδίων του ρευστού εντός του οριακού στρώματος, κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα καθώς έχουν αυξημένη ταχύτητα. Οπότε, οι δυνάμεις πίεσης πρέπει να είναι μεγαλύτερες προκειμένου να προκαλέσουν αποκόλληση. Τέτοιες δυνάμεις πίεσης αναπτύσσονται σε σημεία κάτω από το σημείο αποκόλλησης του στρωτού οριακού στρώματος.



Εικόνα 3.6: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης κυλίνδρου με λεία επιφάνεια (διακεκομμένη γραμμή), και σφαίρας (συνεχής γραμμή) συναρτήσει του αριθμού Reynolds [5].

3.6 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΓΥΡΟ ΑΠΟ ΣΦΑΙΡΑ

Κατά την μελέτη της ροής γύρο από μία σφαίρα παρατηρούνται πολλές ομοιότητες με την ροή γύρο από κύλινδρο, κυρίως όταν αναφερόμαστε στα στάδια που περνάει ο συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Για στρωτή ροή γύρο από σφαίρα, δεχόμαστε την λύση του Stokes, που ισχύει για μικρούς αριθμούς Reynolds ($Re < 1$). Παρακάτω, προβάλλονται πολλαπλά παραδείγματα ροών πίσω από σφαίρα για ένα μεγάλο εύρος τιμών που μπορεί να λάβει ο αριθμός Re .



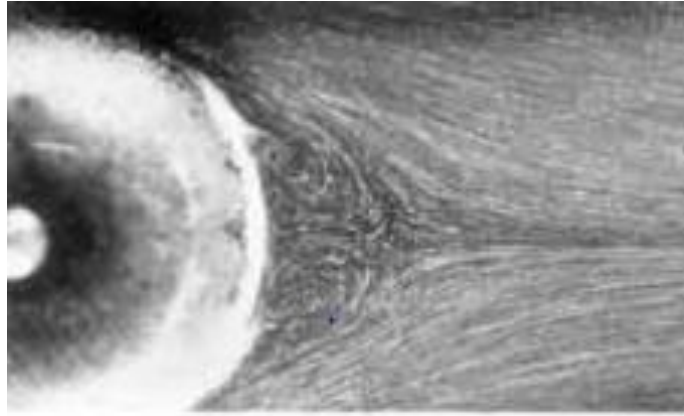
Εικόνα 3.7: Ροή πίσω από σφαίρα για $Re=17.9$ [6].

Όπως φαίνεται και στην Εικ.(3.7), όταν ο αριθμός Re παίρνει τιμές μικρότερες από είκοσι, τότε το στρωτό οριακό σώμα που δημιουργείται πάνω στην σφαίρα, παραμένει προσκολλημένο στην επιφάνεια μέχρι το σημείο ανακοπής που βρίσκεται στο πίσω μέρος. Στις παρακάτω εικόνες αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι ροές που επικρατούν στο πίσω μέρος μια σφαίρας, για διάφορους αριθμούς Reynolds, όταν αυτή τοποθετείται σαν εμπόδιο σε μια ροή.



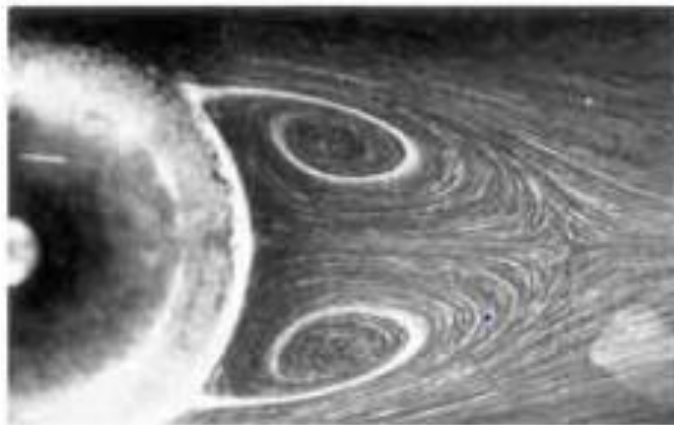
Εικόνα 3.8: Ροή πίσω από σφαίρα για $Re=25.5$ [7].

Αναλυτικότερα, όταν ο αριθμός Re ξεπερνά την τιμή είκοσι, η μικρή περιοχή αποκόλλησης πίσω από τη σφαίρα στο σημείο ανακοπής, αρχίζει να διαφοροποιείται. Όπως παρατηρείται και στην Εικ.(3.8), η γραμμές ροής γίνονται κυρτές, ενώ στην Εικ.(3.9) που η τιμή του αριθμού Reynolds ξεπερνά την τιμή τριανταπέντε, η γραμμές ροής μετατρέπονται σε κοίλες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία, εντός της περιοχής αποκόλλησης, μιας δίνης που έχει σαν κέντρο ένα δακτύλιο.



Εικόνα 3.9: Δημιουργία δακτυλίου πίσω από σφαίρα για τιμή $Re=37,7$ [8].

Η δίνη αυτή περιβάλλεται από την εξωτερική ροή σχηματίζοντας ένα τρίτο σημείο ανακοπής. Δημιουργείται πάνω στον άξονα συμμετρίας και καθορίζει το όριο ανακυκλοφορίας. Το σημείο αυτό καλείται κορυφή απόρρου (wake tip) και καθορίζει το ποσοστό ευστάθειας που θα έχει η ροή πίσω από τη σφαίρα.



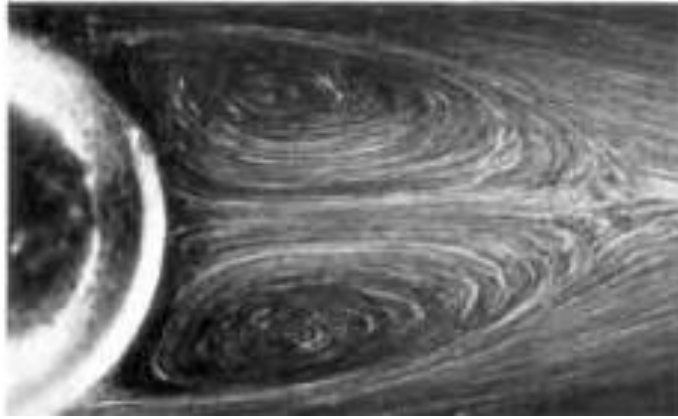
Εικόνα 3.10: Σχηματισμός δινών σε ροή πίσω από σφαίρα για τιμή $Re=73,6$ [9].

Εν συνέχεια, η ροή παρουσιάζει περαιτέρω αλλαγές καθώς οι τιμές του αριθμού Reynolds αυξάνουν. Παρατηρώντας τις Εικ.(3.10) και (3.11) είναι εύκολο να διακριθεί το μέγεθος των αλλαγών στη ροή πίσω από τη σφαίρα. Η περιοχή αποκόλλησης και οι δίνες, για τιμές Reynolds άνω των εβδομήντα και εκατό δείχνουν να αλλάζουν σημαντικά.

Οι συντεταγμένες του σημείου αποκόλλησης σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds θα δίνονται από την παρακάτω σχέση, ήτοι:

$$\theta = 180 - 42,5 \left[\ln \left(\frac{Re}{20} \right) \right]^{0,483} \quad (3.14)$$

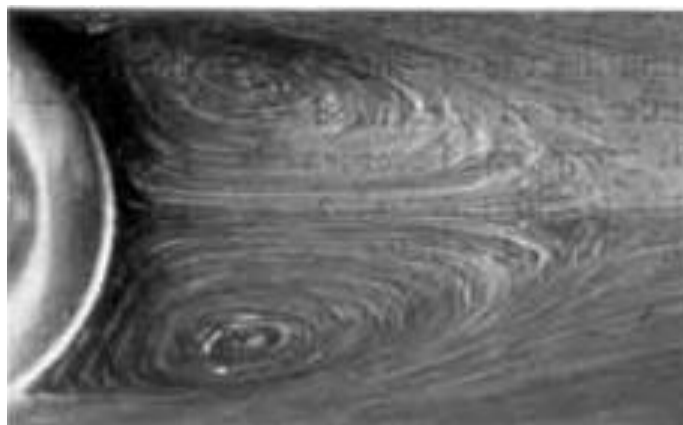
Παρατηρούμε ότι το μήκος της περιοχής αυξάνεται λογαριθμικά σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds .



Εικόνα 3.11: Ροή πίσω από σφαίρα για $Re= 118$ [10].

Η λεπτομερής ανάλυση της ροής γύρο και πίσω από αντικείμενα με γεωμετρία σφαίρας, μας δείχνει ότι η μορφή των δινών που αναπτύσσονται με την αύξηση του αριθμού Re αλλάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό. Το μέγεθος των αλλαγών αυτών μπορεί να γίνει κατανοητό εφόσον δοθεί προσοχή σε ροή γύρο από σφαίρα με υψηλό εύρος τιμών Re .

Για μια περιοχή τιμών της τάξης των $130 < Re < 400$ παρουσιάζεται μια αστάθεια στην γεωμετρία της δίνης (κυρίως στην περιοχή της κορυφής του απόρρου) με την μορφή εκροής (shedding). Η εκροή αυτή που δημιουργήθηκε λόγω υψηλής αστάθειας, κινείται στην διεύθυνση της ροής έως ότου φτάσει κοντά στο σημείο ανακοπής, δηλαδή στην κορυφή του απόρρου. Εκεί, προκαλείται εκροή της δίνης ενώ ταυτόχρονα το σημείο ανακοπής μετακινείται κάθετα στον άξονα ροής. Γνωρίζοντας ότι η εκροή δινών σχηματίζεται με κάποια συγκεκριμένη συχνότητα f , το σημείο ανακοπής στην κορυφή του απόρρου ταλαντεύεται επίσης με μια συχνότητα f και με εύρος τιμών εξαρτώμενο από τον αριθμό Re . Στην Εικ.(3.12) απεικονίζεται η μορφή της δίνης που σχηματίζεται λόγω πολύ υψηλού αριθμού Re .



Εικόνα 3.1: Ροή γύρο από σφαίρα για $Re=133$ [11]

Όταν έχουμε τιμές $400 < Re < 5 \times 10^5$, τότε αυτή η περιοχή τιμών θα καλείται **υποκριτική περιοχή** και όπως φαίνεται και στην Εικ.(3.6), ο συντελεστής αντίδρασης κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα. Στην περιοχή αυτή, εμφανίζονται δίνες οι οποίες

εκρέουν διαδοχικά από συμμετρικές πλευρές του απόρρου και εντοπίζονται στον άξονα συμμετρίας της ροής. Η διαδοχικές αυτές δίνες, αντιπροσωπεύονται από μία ορισμένη συχνότητα f και ένα αριθμό Strouhal. Τα μεγέθη αυτά είναι συναρτήσεις του αριθμού Re για οποιοδήποτε εύρος τιμών του, ήτοι:

- Για $400 < Re < 1300$, το σημείο εκροής των δινών βρίσκεται στα άκρα το απόρρου.
- Για $Re > 6000$, το σημείο εκροής των δινών βρίσκεται στην επιφάνεια της σφαίρας.

Εν κατακλείδι, το σημείο αποκόλλησης πάνω στην σφαίρα για την υποκριτική περιοχή υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$\theta_s = 78 + 275 (Re)^{-0,37} \quad (3.15)$$

Οι περιοχή με τιμές $2 \times 10^5 < Re < 4 \times 10^5$, καλείται **κρίσιμη περιοχή** του αριθμού Reynolds και είναι συνάρτηση της τύρβης στην ελεύθερη ροή.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ (FLUENT)

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FLUENT

Το Fluent είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα όπου προσομοιώνει ροές, χημικές αντιδράσεις καθώς και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Προσφέρει στο χρήστη ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων όπως είναι η μοντελοποίηση μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών των πρακτικών σχεδιαστικών προβλημάτων για περαιτέρω ανάλυση και τελικά, επίλυση. Μέσο του λογισμικού Fluent επιτυγχάνεται μια ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνικών μοντελοποίησης με ένα πλατύ πεδίο φυσικών μοντέλων προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση πολυάριθμων τύπων ροικών προβλημάτων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το λογισμικό Fluent είναι ικανό να μοντελοποιήσει φαινόμενα, ορισμένα από τα οποία αναφέρονται παρακάτω ως εξής:

- Μεταφορά θερμότητας με τους ανάλογους τρόπους που διέπεται (ακτινοβολία αγωγή και συναγωγή)
- Ανάμιξη καθώς και αντίδραση χημικών ουσιών

- Ροή Νευτώνειων ρευστών.
- Στρωτή και τυρβώδης ροής
- Δισδιάστατης αλλά και τρισδιάστατης γεωμετρίας σε καρτεσιανό, κυλινδρικό, ή σε κάποιο άλλο σύστημα
- Ροή εντός υλικών με πορώδη χαρακτηριστικά
- Ασυμπίεστη και συμπίεστη ροή
- Μεταβατική ή σταθερή κατάσταση

Είναι γεγονός ότι το λογισμικό Fluent αποτελεί ένα αναπόσπαστο εργαλείο για τους επιστήμονες που μελετούν τέτοιου είδους φαινόμενα. Παρόλα αυτά όμως η σωστή μοντελοποίηση προβλημάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και μεγάλη ακρίβεια έτσι ώστε να μην παραληφθούν βασικές παράμετροι του εκάστοτε προβλήματος. Οπότε, είναι απαραίτητη η σωστή κρίση του χρήστη προκειμένου να οργανωθεί σωστά το πρόβλημα σε ενότητες.

Η μοντελοποίηση μέσω του λογισμικού Fluent χωρίζεται στα εξής βήματα προβαλλόμενα με σειρά προτεραιότητας, ήτοι:

1. Συγκεκριμενοποίηση των στόχων της μοντελοποίησης. Εδώ παρουσιάζονται εναλλαγές στην προσέγγιση του προβλήματος, όπου καθορίζονται από την ακρίβεια και τα αποτελέσματα που απαιτούνται.
2. Επιλογή υπολογιστικού μοντέλου. Αποφασίζεται δηλαδή, αν το σύστημα θα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο προκειμένου να εισαχθούν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες.
3. Δημιουργία-σχεδιασμός του πλέγματος. Εισαγωγή δηλαδή, του συστήματος συντεταγμένων που χρειαζόμαστε, ανάλογα πάντα με την ακρίβεια που απαιτείται.
4. Καθορισμός φυσικού μοντέλου. Ο καθορισμός αυτός γίνεται ανάλογα με το είδος της ροής που αντιμετωπίζουμε (τυρβώδης, στρωτή, σταθερή, ασυμπίεστη).
5. Καθορισμός των διαδικασιών λύσης του προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την σύγκλιση καθώς προτιμάται ο μικρός υπολογιστικός χρόνος και μικρότερη δυνατή υπολογιστική ισχύς.

Προκειμένου να καθοριστεί όμως το μοντέλο, πρέπει να γίνει πρώτα προσδιορισμός της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) και επιλογή μοντέλου της τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον θα πρέπει να προσδιορίσουμε αν παρουσιάζονται πολλές φάσεις και ποιο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτή την περίπτωση, το μοντέλο που υπολογίζει με τον όγκο του ρευστού, ή το μοντέλο μίγματος. Επίσης, χρειάζεται να επιλέξουμε αν θα λυθεί η εξίσωση της ενέργειας και αν θα ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία. Σημαντικό επίσης στοιχείο αποτελεί ο καθορισμός της συμπεριφοράς των χημικών στοιχείων του προβλήματος. Ο τρόπος δηλαδή με τον οποίο μεταφέρονται, αν αντιδρούν μεταξύ τους και με τι είδους μίγμα επιτυγχάνεται η καύση. Βέβαια, τις ιδιότητες του μίγματος καθώς και τη σύστασή του μπορούμε να

την καθορίσουμε εμείς ή να εισάγουμε ένα έγγραφο που να περιέχει οτιδήποτε πληροφορίες χρειαζόμαστε, από τη σύστασή του μέχρι και τα βήματα των αντιδράσεων καύσης. Ακόμη, στην περίπτωση της καύσης υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των οξειδίων του αζώτου, καθώς επίσης και των πιθανών αλλαγών φάσεως του ρευστού (τήξη, πήξη κλπ.)

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ.

4.2.1 Δημιουργία υπολογιστικών πλεγμάτων σαν πρόβλημα οριακών τιμών.

Έστω ότι έχουμε ένα φυσικό ροικό πεδίο R στο σύστημα συντεταγμένων X, Y που περικλείεται από μία κλειστή γραμμή δR . Η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος για το πεδίο αυτό, αλλά και γενικότερα, βασίζεται σε μια διαδικασία αντιστοίχισης ανάμεσα στα σημεία του ροικού πεδίου (x, y) και στα σημεία (ξ, η) του υπολογιστικού πλέγματος, όπου ξ, η , είναι οι συντεταγμένες των σημείων στο πλέγμα

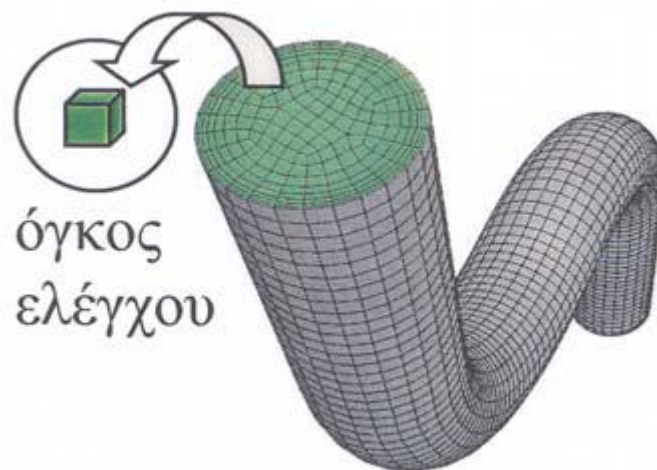
Μια γενική προσέγγιση του προβλήματος μπορεί να γίνει αρχικά με τον υπολογισμό των συντεταγμένων (ξ, η) των σημείων στα όρια του πεδίου. Συνεπώς τα σημεία στο εσωτερικό του πεδίου μπορούν να καθοριστούν από την τομή γραμμών αντίθετων οικογενειών που φέρνονται μεταξύ αντίστοιχων οριακών σημείων. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η δημιουργία υπολογιστικών πλεγμάτων μπορεί να παρασταθεί σαν ένα πρόβλημα οριακών τιμών Έχοντας δεδομένες τις τιμές $\xi = \xi b(x, y)$, και $\eta = \eta b(x, y)$ πάνω στο όριο δR , υπολογίζονται τα σημεία $\xi = \xi(x, y)$, και $\eta = \eta(x, y)$ στο πεδίο R που περικλείεται από τη δR . Οι φυσικές συντεταγμένες (x, y) είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές και οι παραγόμενες συντεταγμένες (ξ, η) είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές του προβλήματος.

Στην πράξη το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργείται με λιγότερη υπολογιστική δουλειά εάν και εφόσον, εργαζόμαστε στο υπολογιστικό πεδίο. Σκοπός είναι η διακριτοποίηση του υπολογιστικού πλέγματος σε πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου, όπως φαίνεται και στην Εικ.(4.1) Αναλυτικότερα, υπολογίζουμε αρχικά τη θέση $\xi = \xi(x, y)$ και $\eta = \eta(x, y)$ των σημείων επάνω στα όρια του πεδίου, με άμεσο αποτέλεσμα η δημιουργία του πλέγματος στο εσωτερικό να εκφράζεται σαν ένα ακόμη πρόβλημα οριακών τιμών. Οπότε, με δεδομένες τις τιμές ξ, η , πάνω στο όριο δR , είναι δυνατόν να βρεθούν τα σημεία $\xi = \xi(x, y)$, και $\eta = \eta(x, y)$ στο πεδίο R που περικλείεται από τη δR . Εφόσον τα σημεία του υπολογιστικού πεδίου καθορίζουν ένα κανονικό πλέγμα και τα όρια του πεδίου συμπίπτουν με γραμμές συντεταγμένων, η εύρεση των σημείων $x = x(\xi, \eta)$, και $y = y(\xi, \eta)$ είναι ευκολότερη από το να δουλεύουμε στο φυσικό ροικό πεδίο ειδικότερα όταν για την επίλυση χρησιμοποιούμε διαφορική εξίσωση.

Η ανάλυση του παραπάνω προβλήματος έχει στηριχθεί σε οριακές συνθήκες Dirichlet. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις είναι συνετό να εισάγουμε οριακές συνθήκες Neumann. Για παράδειγμα αυτές θα ήταν κατάλληλες για περιπτώσεις

όπου θέλουμε οι γραμμές του πλέγματος να τέμνουν τα όρια του πεδίου κανονικά. Αυτό σημαίνει ότι σε συγκεκριμένα τμήματα των ορίων του πεδίου η γωνία τομής των γραμμών του πλέγματος, η οποία είναι θεωρητικά 90 μοίρες, είναι καθορισμένη και η θέση των σημείων του πλέγματος λαμβάνεται σαν μέρος της λύσης του προβλήματος οριακών τιμών.

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω περιπτώσεις μπορούμε να ορίσουμε μια μικτή οριακή συνθήκη και να βρούμε και τη θέση των σημείων και την ορθογωνική κατανομή του πλέγματος στα όρια του πεδίου. Οι δύο γενικότερες μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος οριακών τιμών είναι η λύση μερικής διαφορικής εξίσωσης και η παρεμβολή εσωτερικού χώρου. Είναι προφανές ότι για τον καθορισμό της αντιστοιχίας μεταξύ του φυσικού και του υπολογιστικού πεδίου πρέπει να υπάρχει αναλογία ένα προς ένα. Δεν επιτρέπεται σε καμιά περίπτωση το ίδιο σημείο του φυσικού ροϊκού πεδίου να αντιστοιχεί σε δύο σημεία του υπολογιστικού και αντίστροφα. Αυτό είναι ισοδύναμο με την απαίτηση ότι οι γραμμές του πλέγματος της ίδιας οικογένειας δεν επιτρέπεται να διασταυρώνονται, ενώ οι γραμμές διαφορετικής οικογένειας μπορούν να διασταυρώνονται μόνο μια φορά.



Εικόνα 4.1: Υπολογιστικό πλέγμα διακριτοποιημένο σε πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου [12].

4.2.2 Είδη πλεγμάτων και μορφές πλεγματοποίησης.

Αρχικά θα γίνει αναφορά στην πιο απλή κατηγορία πλεγμάτων όπου κατατάσσονται τα ορθογωνικά πλέγματα και τα σχεδόν ορθογωνικά. Τα ορθογωνικά πλέγματα μπορούν να κατασκευαστούν μόνο για δισδιάστατα προβλήματα, ωστόσο, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν τρισδιάστατα ορθογωνικά πλέγματα από μια δέσμη δυσδιάστατων πλεγμάτων. Αυτό βέβαια έχει σαν αποτέλεσμα, μια λιγότερο ομαλή κατανομή του πλέγματος στην τρίτη διάσταση, γεγονός που δεν παρουσιάζεται τόσο έντονα στη χρήση των σχεδόν ορθογωνικών πλεγμάτων. Παρόλο που η χρήση των απόλυτα ορθογωνικών πλεγμάτων επιτρέπει την απλοποίηση ή ακόμη και την παράληψη ορών στις βασικές ροϊκές εξισώσεις, τα

σχεδόν ορθογωνικά πλέγματα είναι πιο εύκολο να κατασκευαστούν. Αυτό έχει σαν αντίκτυπο, την ελαχιστοποίηση ή ακόμη και την απαλοιφή τυχόν σφαλμάτων που οφείλονται στην παραμόρφωση του πλέγματος.

Στη συνέχεια ακολουθεί η επίλυση ελλειπτικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Προκειμένου όμως να γίνει κατανοητή, θα χρησιμοποιήσουμε το πρόβλημα της δημιουργίας ενός υπολογιστικού πλέγματος σαν πρόβλημα οριακών τιμών στο πεδίο (ξ, η) που αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο (4.2.1). Για την επίλυση του λοιπόν, με ελλειπτική μερική διαφορική εξίσωση, είναι απαραίτητο να ορίσουμε τις θέσεις των σημείων του πλέγματος και τις κλίσεις των γραμμών πάνω στα όρια του ροϊκού πεδίου σαν οριακές συνθήκες. Η πιο γνωστή ελλειπτική μερική διαφορική εξίσωση, που χρησιμοποιείται στη δημιουργία πλέγματος είναι η εξίσωση Poisson που έχει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P(\xi, \eta) \quad (4.1)$$

και,

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q(\xi, \eta) \quad (4.2)$$

Όπου: P, Q = γνωστές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την κατανομή του εσωτερικού πλέγματος.

Οι ελλειπτικές μερικές διαφορικές εξισώσεις για ορισμένες τιμές των P, Q ικανοποιούν την απαίτηση που λέει ότι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των ξ και η πρέπει να εμφανίζονται στο όριο. Αυτό εξασφαλίζει ένα προς ένα αναλογία αλλά οι πολύ μεγάλες τιμές των P, Q μπορεί να προκαλέσουν μια τοπική επικάλυψη του πλέγματος. Η λύση λοιπόν των ελλειπτικών μερικών διαφορικών εξισώσεων γίνεται στο πεδίο ξ, η όπου οι εξ.(4.1) και (4.2) γράφονται ως εξής:

$$a \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \delta \left(P \frac{\partial x}{\partial \xi} + Q \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (4.3)$$

$$a \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + \delta \left(P \frac{\partial y}{\partial \xi} + Q \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (4.4)$$

Όπου: $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = όροι του μετρικού τανυστή g .

Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι οι οριακές συνθήκες καθορίζονται ανάλογα με το είδος του ροϊκού προβλήματος.

Μια ακόμη πολύ σημαντική μορφή πλεγματοποίησης είναι αυτή που γίνεται με την τεχνική δύο ορίων (Two boundary technique). Έστω ότι έχουμε ένα καμπύλο δισδιάστατο αγωγό ABCD. Η κατανομή των σημείων του πλέγματος κατά μήκος των επιφανειών AB και CD βρίσκεται μέσω μονοδιάστατων συναρτήσεων παραμόρφωσης $r_{AB}(\xi)$ και $r_{DC}(\xi)$. Οι εξισώσεις, που ισχύουν, για την παρεμβολή στο εσωτερικό του πλέγματος είναι οι ακόλουθες:

$$x(\xi, n) = (1-s)x_{AB}(r_{AB}) + sx_{DC}(r_{DC}) \quad (4.5)$$

$$y(\xi, n) = (1-s)y_B(r_{AB}) + sy_C(r_{DC}) \quad (4.6)$$

Καθώς ισχύει:

$$s = s_{AD} + \xi(s_{BC} - s_{AD}) \quad (4.7)$$

και,

$$\xi = \frac{(\xi - \xi_1)}{(\xi_2 - \xi_A)} \quad (4.8)$$

Η κατανομή του υπολογιστικού πλέγματος στο εσωτερικό ενός πεδίου μπορεί επίσης να ελεγχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, με την προσθήκη πρόσθετων επιφανειών μεταξύ των ορίων του. Αναφερόμαστε δηλαδή στη μέθοδο πολλαπλών επιφανειών (Multisurface Method). Συνδέοντας οπότε αντίστοιχα σημεία (με ίδια τιμή η) σε γειτονικές επιφάνειες, σχηματίζεται μια δέσμη διευθύνσεων οι οποίες σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, παρεμβάλλονται. Αυτό έχει δυο άμεσα πλεονεκτήματα, και είναι τα εξής:

- 1) Κάνοντας την αντιστοιχία μεταξύ σημείων μιας επιφάνειας και της γειτονικής της, είναι δυνατό να κατασκευάσουμε πλέγμα τοπικά ορθογωνικό στο όριο του πεδίου.
- 2) Η κατανομή του πλέγματος γίνεται με ολοκλήρωση της δέσμης των διευθύνσεων ώστε να επιτευχθεί ομαλή κατανομή του πλέγματος.

Γενικά δεν υπάρχει όριο στο πλήθος των ενδιάμεσων επιφανειών. Στην πράξη όμως ένας καλός έλεγχος επιτυγχάνεται με την παρεμβολή δύο ενδιάμεσων επιφανειών.

Τέλος, υπάρχει και μια ακόμη μέθοδος πλεγματοποίησης όπου αντιτίθεται στις προηγούμενες, οι οποίες έκαναν παρεμβολή σε μια μόνο διάσταση. Η μέθοδος ονομάζεται «Υπερπερασμένη παρεμβολή (Transfinite Interpolation)» και το βασικότερο χαρακτηριστικό της είναι ότι μπορεί να κάνει συνεχείς αντιστοιχήσεις σε δύο διευθύνσεις.

4.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ.

Οι συνοριακές συνθήκες που ορίζουμε σε μία ροή, παρέχουν στο λογισμικό Fluent, όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν ροϊκές αλλά και θερμικές συνθήκες στα όρια του φυσικού μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή συγκεκριμένων δυνατοτήτων, όπως φαίνεται και παρακάτω, ήτοι:

- Εισαγωγή σημείων εισόδου και εξόδου της ροής. Ο προσδιορισμός των σημείων εισόδου και εξόδου μπορεί να επιτευχθεί μέσω του καθορισμού της πίεσης και/ή της ταχύτητας
- Οριοθέτηση τοιχωμάτων. Οι οριακές συνθήκες για τον τοίχο μπορεί να είναι σταθερές ή ακόμη και κινούμενες με σκοπό την ρύθμιση της εξίσωσης της αγωγής και γενικά της θερμική συμπεριφορά του
- Επιλογή συμμετρικών και κυκλικών ορίων. Οι συμμετρικές και οι κυκλικές συνοριακές συνθήκες προσφέρουν ένα μέσο ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό μοντέλο αξιοποιώντας έτσι, την επαναληπτική φύση της γεωμετρίας και της ροής
- Επιλογή περιοδικών ορίων. Οι περιοδικές συνοριακές συνθήκες επιτρέπουν την μοντελοποίηση πλήρως ανεπτυγμένων ροών.
- Αξονικές συνοριακές συνθήκες. Χρησιμοποιούνται όταν πολλαπλές γραμμές από το πλέγμα συναντώνται σε ένα συγκεκριμένο σημείο σ' ένα τρισδιάστατο κυλινδρικό πολικό πλέγμα.

Το λογισμικό όμως Fluent, παρέχει πολλούς τρόπους καθορισμού των συνοριακών συνθηκών μερικοί από τους οποίους αναφέρονται παρακάτω. Αρχικά μπορεί να γίνει μέσω ανάθεσης των οριακών συνθηκών σε έναν όγκο ελέγχου που καθορίζεται σαν ένα κελί. Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση, οι οριακές συνθήκες έχουν ομοιόμορφη τιμή για όλα τα κελιά ή οι τιμές μπορεί να ποικίλουν μέσω μιας πολυωνυμικής, αρμονικής ή κάποιου άλλου είδους συνάρτησης. Ο καθορισμός, μπορεί να γίνει επίσης, εάν αναθέσουμε τις τιμές των οριακών συνθηκών σε μεμονωμένο όγκο ελέγχου μέσω του "patching". Σε αυτή την περίπτωση, οι αριθμητικές τιμές των οριακών συνθηκών ανατίθενται σε μια βάση κελί με κελί, δίνοντας έτσι την δυνατότητα τέλει ελαστικότητας ώστε να εισαχθούν ομοιόμορφα οι οριακές συνθήκες. Τέλος, ο καθορισμός μπορεί να επιτευχθεί αναθέτοντας δεδομένες τιμές ξεχωριστά, σε διαφορετικούς όγκους ελέγχου. Με αυτό τον τρόπο, επιτρέπεται ο καθορισμός των τιμών της ταχύτητας, για παράδειγμα, μπορεί να προσομοιωθεί η επίδραση ενός ανεμιστήρα χωρίς όμως να απαιτείται η εισαγωγή επιπρόσθετων πληροφοριών στα κελιά.

Παρακάτω πραγματοποιείται μια αναλυτική επεξήγηση όλων των παραπάνω δυνατοτήτων που παρέχονται στο Fluent μέσω των συνοριακών συνθηκών, προκειμένου να γίνει κατανοητή η κάθε μέθοδος ξεχωριστά. Αυτό συμβαίνει διότι η

χρήση του λογισμικού Fluent και η κατανόηση των μεθόδων που χρησιμοποιεί, κυμαίνεται σε επίπεδα υψηλής δυσκολίας.

4.3.1 Συνοριακές συνθήκες εισόδου και εξόδου ταχύτητας και πίεσης.

Συνθήκες εισόδου ταχύτητας:

Ορίζονται ως τα μεγέθη των ταχυτήτων για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας ενώ οι απαραίτητες βαθμωτές ποσότητες απαιτούνται σαν δεδομένα, ανάλογα βέβαια με τον σκοπό του προβλήματος που έχει καθοριστεί. Αποτέλεσμα αυτού είναι εισαγωγή δεδομένων που το καθένα από αυτά αντιπροσωπεύει και κάτι διαφορετικό, όπως και αυτά που αναφέρονται παρακάτω:

- Η ροή της μάζας (mass flux)
- Η θερμοκρασία
- Η στατική πίεση
- Τα μαζικά κλάσματα των χημικών ειδών
- Οι καρτεσιανές συνιστώσες της ταχύτητας
- Η κλίμακα μήκους και έντασης της τύρβης

Συνθήκες εισόδου πίεσης:

Μέσω των συνοριακών συνθηκών εισόδου της πίεσης, πραγματοποιείται ο καθορισμός της πίεσης του ρευστού στα σημεία εισόδου και/ή εξόδου ενώ συνεργάζονται και με άλλες βαθμωτές ιδιότητες της ροής. Είναι εφικτό να εφαρμοστεί, σε περιπτώσεις που η αλλαγή της πίεσης από την είσοδο στην έξοδο είναι γνωστή με τη διαφορά όμως ότι ο ρυθμός ροής και/ή η ταχύτητα είναι όροι άγνωστοι. Αυτή η κατάσταση μπορεί να παρουσιαστεί σε πολλά πρακτικά προβλήματα, όπως είναι οι ανωστικές ροές. Οι συνθήκες εισόδου πίεσης χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνει καθορισμός ενός «ελεύθερου» ορίου σε εξωτερική ροή καθώς και σε ζητήματα με πολλαπλές εξόδους.

Η εισαγωγή της πίεσης του ρευστού εντός των κελιών εισόδου πίεσης, επιτρέπεται μέσω του λογισμικού Fluent σαν μια συνοριακή συνθήκη. Όταν πραγματοποιείται η είσοδος της πίεσης στον τομέα μέσω του ανάλογου κελιού εισόδου πίεσης, μεταχειρίζεται σαν ολική πίεση και όταν η ροή εξέρχεται του τομέα, η είσοδος αντιμετωπίζεται σαν στατική πίεση. Θα μπορούσαμε να πούμε δηλαδή, ότι στα κελιά εισόδου πίεσης συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- Πίεση. Ολική και στατική στην είσοδο και στην έξοδο αντίστοιχα.
- Θερμοκρασία
- Τυρβώδη κινητική ενέργεια και ο ρυθμός σκέδασης

- Γωνία ροής
- Ενθαλπία
- Κλάσματα μάζας των χημικών στοιχείων

Οι συνθήκες ορίου πίεσης χρησιμοποιούνται μόνες τους ή και σε συνδυασμό με τις συνθήκες ορίου ταχύτητας δια μέσου των συνθηκών εισόδου της. Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας πρέπει να γίνεται εφόσον έχει ενεργοποιηθεί η λύση της εξίσωσης της ενθαλπίας ενώ οι συγκεντρώσεις καθορίζονται όταν είναι ενεργοποιημένη η λύση της εξίσωσης μεταφοράς των ειδών. Γενικότερα όμως, οποιοσδήποτε συνδυασμός ορίων εισόδου πίεσης και ταχύτητας είναι θεωρητικά καλά-προσδιορισμένος, αλλά ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε να μην χρησιμοποιούνται συνθήκες εισόδου πίεσης σε υπερηχητική έξοδο. Ακόμη, οι συνθήκες εισόδου πίεσης δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιούνται στο ίδιο πρόβλημα σαν συνθήκες εξόδου εκτός και αν η ροή κατατάσσεται στις διηχητικές ροές.

Συνθήκες εξόδου ταχύτητας και πίεσης:

Προκειμένου να επιτευχθεί η σωστή μοντελοποίηση εξόδου ροής όπου οι λεπτομέρειες της ταχύτητας και της πίεσης της ροής δεν είναι γνωστές πριν τη λύση του προβλήματος, απαιτείται η εισαγωγή συνθηκών εξόδου. Ο καθορισμός τους δεν πραγματοποιείται στα κελιά εξόδου, καθώς το εξειδικευμένο λογισμικό Fluent παρέχει εσωτερικές οριακές συνθήκες. Αναλυτικότερα οι εσωτερικές οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στα κελιά εξόδου από το Fluent είναι:

1. Μηδενικός ρυθμός διάχυσης.
2. Συνολική διόρθωση ισορροπίας της μάζας.

Ο μηδενικός ρυθμός διάχυσης ισχύει για όλες τις μεταβλητές εκτός όμως της πίεσης. Εφαρμόζεται στα κελιά εξόδου που σημαίνει ότι οι συνθήκες του επιπέδου εξόδου παρατείνονται εντός του τομέα και δεν επηρεάζουν την ροή. Η διαδικασία αυτή ενημερώνει την ταχύτητα εξόδου και την πίεση υποθέτοντας πάντα, ότι η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη και ότι δεν υπάρχει αλλαγή επιφάνειας στην έξοδο. Πλήρως ανεπτυγμένες ροές ονομάζονται αυτές στις οποίες το προφίλ της ταχύτητας της ροής δεν αλλάζει στην κατεύθυνση αυτής. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξει μια μικρή κλίση της ταχύτητας που θα είναι κάθετη στη ροή.

Η συνολική διόρθωση ισορροπίας της μάζας βρίσκει εφαρμογή μόνο στις υποχηχητικές ροές και σκοπός της είναι η επιτάχυνση της διαδικασίας σύγκλισης χωρίς όμως να επηρεάζεται η λύση. Όταν λοιπόν η λύση συγκλίνει και η ισορροπία μάζας εξυπακούεται σε κάθε όγκο ελέγχου, τότε σημαίνει ότι η διόρθωση είναι μηδέν. Αυτό συμβαίνει γιατί η ταχύτητα στο εξωτερικό όριο ενημερώνεται σε κάθε επανάληψη ξεχωριστά έτσι ώστε να ισοσταθμίζεται η ροή εξόδου με τη ροή εισόδου.

4.3.2 Συνοριακές συνθήκες τοιχωμάτων (wall boundary conditions)

Με τις συνθήκες αυτές πραγματοποιείται ο υπολογισμός της διατμητικής τάσης καθώς και η μεταφορά θερμότητας που αναπτύσσεται ανάμεσα στο ρευστό και το τοίχωμα. Αυτό γίνεται, βασιζόμενοι πάντα στα στοιχεία της ροής και το τοπικό ροικό πεδίο. Επιπροσθέτως, τα τοιχώματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως θερμικές

οριακές συνθήκες για άλλες συμπαγείς περιοχές όπως είναι τα αγωγή κελιά τοιχωμάτων. Οπότε, προκειμένου το λογισμικό Fluent να προβλέψει τις διατμητικές τάσεις στο ρευστό όταν αλληλεπιδρά με τα τοιχώματα, επικαλείται τις ιδιότητες της ροής στα σημεία αυτά. Σε περιπτώσεις όμως που η ροή καλείται στρωτή, τότε αυτός ο υπολογισμός εξαρτάται απλά από την κλίση της ταχύτητας στο τοίχωμα, σε αντίθεση με την τυρβώδη ροή όπου γίνεται εφαρμογή λογαριθμικών νόμων στον τοίχο.

4.3.3 Συμμετρικές συνοριακές συνθήκες

Η εφαρμογή τους οφείλεται στην ανάγκη για φυσική γεωμετρία με την προσδοκώμενη μορφή της ροικής και θερμικής λύσης να έχει ομοιότητα κατοπτρικού ειδώλου. Δεν πραγματοποιείται καθορισμός οριακών συνθηκών στα συμμετρικά όρια καθώς αυτά προέρχονται μέσα από το πρόγραμμα. Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται προκειμένου να γίνει σωστός προσδιορισμός στις περιοχές συμμετρίας.

Έτσι, επιτυγχάνεται μια μηδενική διακύμανση όλων των ποσοτήτων στα συμμετρικά όρια από το Fluent που είναι αποτέλεσμα σωστής λειτουργίας της συμμετρίας. Παρακάτω γίνεται μια περιληπτική αναφορά σε ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των συμμετρικών συνοριακών συνθηκών, ήτοι:

- Λειτουργία μηδενικής κάθετης ταχύτητας σε συμμετρικό επίπεδο
- Λειτουργία με μηδενικές κάθετες κλίσεις όλων των μεταβλητών σε συμμετρικό επίπεδο.

Τέλος, οι συμμετρικές συνοριακές συνθήκες είναι ταυτόσημες με αυτές λείου τοιχώματος και προσοχή πρέπει να δίνεται σε περιπτώσεις που η γεωμετρία είναι συμμετρική αλλά η ροή δεν είναι. Κατά την λειτουργία μηδενικής κάθετης ταχύτητας, η άνωση δημιουργεί ασύμμετρη ροή ενώ στη περίπτωση μη μηδενικών κάθετων κλίσεων, ο στροβιλισμός στη ροή δημιουργεί ροή σε επίπεδο που θα έπρεπε να είναι συμμετρικό.

4.3.4 Κυκλικές συνοριακές συνθήκες

Όταν η φυσική γεωμετρία και η αναμενόμενη μορφή της ροικής-θερμικής λύσης έχουν μια κυκλικά επαναλαμβανόμενη φύση, τότε υφίσταται εισαγωγή κυκλικών συνοριακών συνθηκών. Αυτές, δεν προσδιορίζονται στα κυκλικά όρια αλλά εισάγονται από το ίδιο το πρόγραμμα. Ωστόσο, ο προσδιορισμός τοποθεσίας των κύκλων απαιτεί ακρίβεια και ορθότητα.

Η ροή στα κυκλικά όρια μεταχειρίζεται από το Fluent σαν να βρίσκεται στο αντίθετο κυκλικό επίπεδο ένα απόλυτα ενεργό γειτονικό κελί του πρώτου κυκλικού ορίου. Έτσι, κατά την διάρκεια της διαδικασίας υπολογισμού της ροής μέσω του κυκλικού ορίου στο προσαρμοσμένο ενεργό κελί, το Fluent καλεί τις συνθήκες ροής στο ενεργό κελί σε συνεργασία με το προσαρμοσμένο στο αντίθετο κυκλικό επίπεδο. Τα κυκλικά επίπεδα πρέπει να προσδιορίζονται σε ζευγάρια, ακολουθώντας ορισμένους περιορισμούς, ήτοι:

- Η τοποθέτηση των κυκλικών επιπέδων πρέπει να λαμβάνει χώρο στο πρώτο και στο τελευταίο επίπεδο του υπολογιστικού τομέα.
- Το κάθε πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπίζεται με μόνο ένα ζευγάρι κυκλικών επιπέδων.
- Ο καθορισμός της γεωμετρίας του προβλήματος σε ζητήματα που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενα κυκλικά όρια και η γεωμετρική κεντρική γραμμή, θα προσδιορίζονται σαν z-άξονας, αν σχεδιάζουμε να επιλύσουμε το πρόβλημα στο καρτεσιανό επίπεδο, ή σαν x-άξονας αν χρησιμοποιήσουμε κυκλικές πολικές συντεταγμένες ταχύτητας.

4.3.5 Περιοδικές συνοριακές συνθήκες

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα του υπολογισμού περιοδικών ή πλήρως ανεπτυγμένων ροών και μεταφοράς θερμότητας. Οι περιοδικές ροές παρουσιάζονται σε πολλά προβλήματα συμπεριλαμβανόμενων των ροών κατά μήκος των σωλήνων και σε κανάλια εναλλακτών θερμότητας. Η γεωμετρία σε αυτού του είδους ροές ,μεταβάλλεται περιοδικά στη διεύθυνση της ροής, οδηγώντας σε μια περιοδική πλήρως ανεπτυγμένη ροή στην οποία η μορφή της ροής επαναλαμβάνεται σε διαδοχικούς κύκλους. Επίσης, περιοδική ροή περιλαμβάνεται σε ζητήματα που η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη και βρίσκεται μέσα σε σωλήνες και αγωγούς. Οι συνθήκες αυτές επιτυγχάνονται μετά από ένα συγκεκριμένο μήκος εισόδου, που εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds της ροής και τη γεωμετρική διαμόρφωση.

Όταν το προφίλ της ταχύτητας επαναλαμβάνεται περιοδικά μέσα σε ένα περιοδικό μήκος L , συνοδευόμενο από μια περιοδικά σταθερή πτώση πίεσης κατά μήκος του περιοδικού μήκους, σημαίνει ότι γίνεται εφαρμογή περιοδικών συνοριακών συνθηκών.

Σε περιπτώσεις όμως που θέλουμε να υπολογίσουμε ένα χωρικά περιοδικό ροικό πεδίο με ένα καθορισμένο ρυθμό ροής μάζας, θα πρέπει πρώτα να έχουμε δημιουργήσει ένα πλέγμα με κυκλικό τύπο κελιών κατά μήκος των γραμμών πλέγματος ($I=1$ και $I=IMAX$). Τα κυκλικά αυτά επίπεδα απαιτείται να βρίσκονται σε παραλληλία και φυσικά να έχουν το ίδιο μέγεθος μεταξύ τους καθώς θα εμφανίζονται συνέχεια στην απόσταση του πλέγματος. Ύστερα από τον προσδιορισμό των κυκλικών κελιών, σειρά έχει η οριοθέτηση των κυκλικών ορίων προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκλογή της μοντελοποίησης της περιοδικής ροής.

4.3.6 Αξονικές συνοριακές συνθήκες

Το Fluent εφαρμόζει ορισμένες ειδικές συνθήκες, όσο αναφορά τα αξονικά κελιά, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία πολλαπλών φυσικών τιμών σε ένα σημείο. Αυτό συμβαίνει, επειδή ένα σημείο μοιράζεται από πολλά κελιά και προτιμάται σε περιπτώσεις που έχουμε πλέγματα O-τύπου με πολύ μικρή εσωτερική ακτίνα. Όλες οι πληροφορίες μπαίνουν αυτόματα όταν επιλέγεται το κελί καθώς δεν γίνεται να καθοριστούν οι συνθήκες για τα αξονικά όρια.

Για τον καθορισμό όμως της κατάλληλης φυσικής τιμής για μία τυχαία προκαθορισμένη μεταβλητή σε ένα σημείο του άξονα, το λογισμικό Fluent υπολογίζει τη μέση τιμή στο μέσο των κελιών που περικυκλώνουν το σημείο που εξετάζεται. Η

μέση τιμή ανατίθεται στη συνέχεια σε καθένα από τα συνοριακά κελιά ξεχωριστά που είναι υπεύθυνα για την πλαισίωση του περιφερειακού άξονα.

Ωστόσο υπάρχουν ορισμένοι κανόνες και περιορισμοί που πρέπει να τηρούνται προκειμένου να αποφευχθούν τυχών σφάλματα, ήτοι:

1. Η εφαρμογή της συνθήκης ορίου άξονα είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθεί σε δισδιάστατα πολικά πλέγματα. Σε αυτά τα πλέγματα καθορίζεται μια μικρή εσωτερική ακτίνα προκειμένου να ανατεθούν συνθήκες συμμετρίας στον εσωτερικό όριο.
2. Δέσμευση χρήσης ενός και μόνο ορίου άξονα κατά την αντιμετώπιση προβλημάτων. Σε περίπτωση που υφίσταται κυλινδρικός μετασχηματισμός της ταχύτητας τότε η αξονική κατεύθυνση πρέπει να είναι η κατεύθυνση X.

Όσο αναφορά τον δεύτερο περιορισμό, σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται η προεπιλογή για καρτεσιανή διατύπωση ταχύτητας, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της X, Y, ή Z κατεύθυνσης ως αξονική κατεύθυνση, ή η δυνατότητα διευκρίνησης ενός καμπύλου άξονα.

4.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΛΥΤΗ

Μετά των καθορισμό των οριακών συνθηκών, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα που εξετάζουμε, πραγματοποιείται η επιλογή του λύτη (solver). Μέσο του λογισμικού Fluent παρέχονται τρεις βασικές επιλογές λυτών, ήτοι:

- Συζευγμένο άρρητο (Coupled – Implicit),
- Συζευγμένο ρητό (Coupled – Explicit),
- Ασύζευκτο άρρητο Segregated (Implicit).

Οι Coupled λύτες προτείνονται σε περιπτώσεις που υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ πυκνότητας, ενέργειας, ορμής και/ή χημικών αντιδράσεων, όπως δηλαδή, στην περίπτωση συμπιεστής ροής υψηλής ταχύτητας. Ο Coupled - Implicit προτιμάται έναντι του Coupled - Explicit για το λόγο ότι είναι διπλάσια γρήγορος αλλά απαιτεί την διπλάσια μνήμη από τον Coupled - Explicit ή τον Segregated (Implicit) λύτη. Ο Coupled - Explicit λύτης βρίσκει εφαρμογή μόνο σε μη μόνιμες ροές, όπου οι χαρακτηριστικές κλίμακες χρόνου του προβλήματος, βρίσκονται στην ίδια τάξη με τα ακουστικά κύματα. Τέλος, ο Segregated (Implicit) λύτης εφαρμόζεται σε οποιοσδήποτε άλλες περιπτώσεις. Βασικό του χαρακτηριστικό είναι ότι έχει μικρότερη απαίτηση μνήμης σε σχέση με τους άλλους λύτες ενώ η προσεγγίσεις που δίνει, έχουν μεγάλη ευελιξία στη διαδικασία επίλυσης.

4.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το πεδίο μπορεί να διακριτοποιηθεί σε έναν πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου δηλαδή τα κελιά. Οι γενικές εξισώσεις μεταφοράς της μάζας, ορμής,

ενέργειας που αναφέραμε στα προηγούμενα κεφάλαια, εφαρμόζονται σε κάθε κελί ξεχωριστά και διακριτοποιούνται, ήτοι:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \int_A \rho \Phi V dA = \int_A \Gamma \cdot \nabla \Phi dA + \int_V S \Phi \cdot dV \quad (4.9)$$

όπου: Φ = συνάρτηση που καθορίζεται από το είδος της εξίσωσης που αναλύεται.

Στο λογισμικό Fluent συναντάμε τα λεγόμενα σχήματα παρεμβολής όπου έχουν καθοριστικό ρόλο προκειμένου να πραγματοποιηθεί σωστά μια μελέτη ροής, ήτοι:

- *First - Order Upwind Scheme*, η οποία δίνει μία εύκολη σύγκλιση αλλά ακρίβεια μόνο πρώτου βαθμού.
- *Power Law Scheme*, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά μόνο για ροές με χαμηλό αριθμού Reynolds.
- *Second Order Upwind Scheme*, που εφαρμόζεται όταν το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από τετραεδρικά ή τριγωνικά κελιά με αποτέλεσμα την καθυστερημένη σύγκλιση.
- *Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)* Το σχήμα αυτό εφαρμόζεται σε ροές με έντονη περιστροφή και σε περιπτώσεις που το πλέγμα αποτελείται από τετραπλευρικά ή εξαεδρικά κελιά, ενώ σε περίπτωση ομοιόμορφου πλέγματος προσφέρει ακρίβεια τρίτου βαθμού.

Επιπλέον, παρέχονται και μέθοδοι παρεμβολής για τον υπολογισμό της πίεσης στα πρόσωπα (faces) των κελιών (cells), μόνο όμως στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο Segregated λύτης. Για ροές με μεγάλες μεταβολές κάθετα στα όρια, εφαρμόζεται το δεδομένο (default) ενώ για μελέτη πίεσης εφαρμόζεται το σχήμα “Standard” που προσφέρει χαμηλή ακρίβεια. Το σχήμα “Linear” χρησιμοποιείται μόνο όταν τα άλλα σχήματα δημιουργούν πρόβλημα σύγκλισης ή προβάλλουν διαστρεβλωμένα αποτελέσματα. Στην περίπτωση συμπιεστής ροής εφαρμόζεται το σχήμα “Second Order Upwind Scheme” και όταν οι δυνάμεις πεδίου είναι σημαντικές, εφαρμόζεται το σχήμα “Body Force Weighted”. Τέλος, για ροές με πεδία ροής που εμφανίζουν μεγάλη καμπυλότητα αλλά και μεγάλη συστροφή, η πιο συνετή επιλογή είναι η “PRESTO!”.

Η σύνδεση πίεσης - ταχύτητας έχει να κάνει με τον τρόπο όπου μεταφράζεται η διατήρηση της μάζας στον Segregated λύτη με αποτέλεσμα να παρέχονται τρεις μέθοδοι προσέγγισης. Αρχικά έχουμε την μέθοδο “SIMPLE” όπου είναι η σταθερή μέθοδος με υψηλή ευστάθεια και έπειτα ακολουθεί η μέθοδος “SIMPLEC” που προτιμάται, όταν χρειαζόμαστε ταχύτερη σύγκλιση και όταν η ροή είναι απλή. Ωστόσο, η μέθοδός με το πιο μεγάλο εύρος εφαρμογής είναι η “PISO” που χρησιμεύει σε μη μόνιμες ροές.

4.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Η διαδικασία της επίλυσης αποτελείται από μικρούς ή μεγάλους αριθμούς επαναλήψεων, απαιτώντας όλες οι μεταβλητές που πρόκειται να επιλυθούν να

πάρουν μια αρχική τιμή πριν τον υπολογισμό τους. Οι αρχικές αυτές τιμές είναι καθαρά προσεγγιστικές, αντιπροσωπεύοντας -όσο δυνατών καλύτερα- την πραγματική τιμή των μεταβλητών και ορίζονται ως διαδικασία "initialize". Όσο πιο ρεαλιστικές είναι τόσο περισσότερο βελτιώνεται η ευστάθεια της λύσης και επιταχύνεται η σύγκλιση. Επίσης, σε όλο το πεδίο επίλυσης υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης σε καθορισμένες περιοχές αυτού, επιτρέποντας έτσι μια περισσότερο ρεαλιστική έναρξη της επίλυσης.

Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών είναι εξίσου σημαντικός με την επιλογή των αρχικών συνθηκών προκειμένου να υπάρξει σωστή λύση. Η διακριτοποιημένη εξίσωση μεταφοράς για την ποσότητα Φ απλοποιείται και παίρνει την παρακάτω μορφή, ήτοι:

$$\alpha_p \cdot \Phi_p + \sum_{nb} \alpha_{nb} \cdot \Phi_{nb} = b_p \quad (4.10)$$

όπου: p = τυχαίο κελί του υπολογιστικού πλέγματος

nb = γειτονικά κελιά του p .

Οι συντελεστές αυτοί ανανεώνονται διαρκώς σε κάθε επανάληψη, ωστόσο, στην αρχή κάθε επανάληψης η παραπάνω εξίσωση δεν ικανοποιείται, οπότε έχουμε:

$$R_p = \alpha_p \cdot \Phi_p + \sum_{nb} \alpha_{nb} \cdot \Phi_{nb} - b_p \quad (4.11)$$

Σκοπός είναι, το R_p (υπόλοιπο) να πάρει αμελητέα τιμή με την πάροδο των επαναλήψεων ενώ παρακάτω φαίνεται το άθροισμα σε όλα τα κελιά ήτοι:

$$R = \sum_{cells} |R_p| \quad (4.12)$$

Αποτέλεσμα των πολλαπλών επαναλήψεων είναι η μείωση των τιμών των μεταβλητών καθώς και η βαθμωτή σύγκλιση, που μέσω αυτής, ικανοποιούνται σε όλα τα κελιά οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής, ενέργειας, κ.λπ. Αυτό βέβαια συμβαίνει, σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο βαθμό ακρίβειας. Αυτό σημαίνει ότι ανεξαρτήτως των αριθμό επαναλήψεων, η λύση παραμένει σταθερή καθώς τα ολικά ισοζύγια μάζας, ορμής, ενέργειας και άλλων παραμέτρων ικανοποιούνται.

Ο χρόνος σύγκλισης και γενικότερα η παραπάνω διαδικασία, εξαρτώνται από ορισμένους συντελεστές. Οι συντελεστές αυτοί λειτουργούν με τον Segregated λύτη και ονομάζονται συντελεστές υπο-χαλάρωσης ενώ με την βοήθεια των ενσωματωμένων αρχικών τιμών τους που παρέχει το Fluent, πραγματοποιείται η εκκίνηση της λύσης. Συνήθως, οι καταλληλότερες τιμές των συντελεστών προκύπτουν εμπειρικά. Παρακάτω, φαίνεται μία λογική των συντελεστών υπο-χαλάρωσης για μια μεταβλητή Φ , ήτοι:

$$\Phi_p = \Phi_{p,old} + a \cdot \Delta\Phi_p \quad (4.13)$$

όπου: Φ_p = τιμή της μεταβλητής με την οποία ξεκινά η i επανάληψη

$\Phi_{p,old}$ = τιμή της μεταβλητής που προκύπτει από την $i-1$ επανάληψη

A = συντελεστής υπο-χαλάρωσης

Εν κατακλείδι, η ποιότητα της σύγκλισης που επιτυγχάνεται είναι αποτέλεσμα σωστής επίλυσης του φυσικού ζητήματος. Η σύγκλιση μπορεί να επιταχυνθεί και να βελτιωθεί με διάφορους τρόπους. Αρχικά, με την δημιουργία ενός σωστού υπολογιστικού πλέγματος και ύστερα με το επίπεδο ποιότητας καθορισμού των αρχικών τιμών. Μπορεί ακόμη να επιταχυνθεί, με την σχετική αύξηση των συντελεστών υπό-χαλάρωσης, σε επιθυμητές τιμές προκειμένου να αποφευχθεί τυχών αστάθεια και απόκλιση από την πραγματική λύση.

4.7 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Το λογισμικό Fluent παρέχει στο χρήστη μια μεγάλη συλλογή από εργαλεία επεξεργασίας προκειμένου να υπάρξει ορθός τρόπος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν ύστερα από κάθε επίλυση. Αυτή η διαδικασία, συνήθως, λαμβάνει χώρα πάνω σε επιφάνειες, οι οποίες δημιουργούνται αυτόματα από τις περιοχές (zones εισόδου-εξόδου, όρια κλπ.) ενώ παρέχεται η επιλογή δημιουργίας περισσότερων επιφανειών. Για παράδειγμα μπορούμε να ορίσουμε μια επιφάνεια στο υπολογιστικό πεδίο του προβλήματος και να δούμε εκεί τις τιμές των διαφόρων μεταβλητών που χαρακτηρίζουν το πεδίο ροής. Το λογισμικό Fluent έχει την δυνατότητα να υπολογίζει, στα κέντρα των κελιών, τις τιμές των μεταβλητών, με τις κομβικές τιμές του πλέγματος να υπολογίζονται ξεχωριστά. Δηλαδή να υπολογίζονται ως μέσες τιμές των γειτονικών τιμών των κελιών ή να είναι καθοριζόμενες από τις οριακές συνθήκες όταν πρόκειται για περιοχές οριακών κελιών.

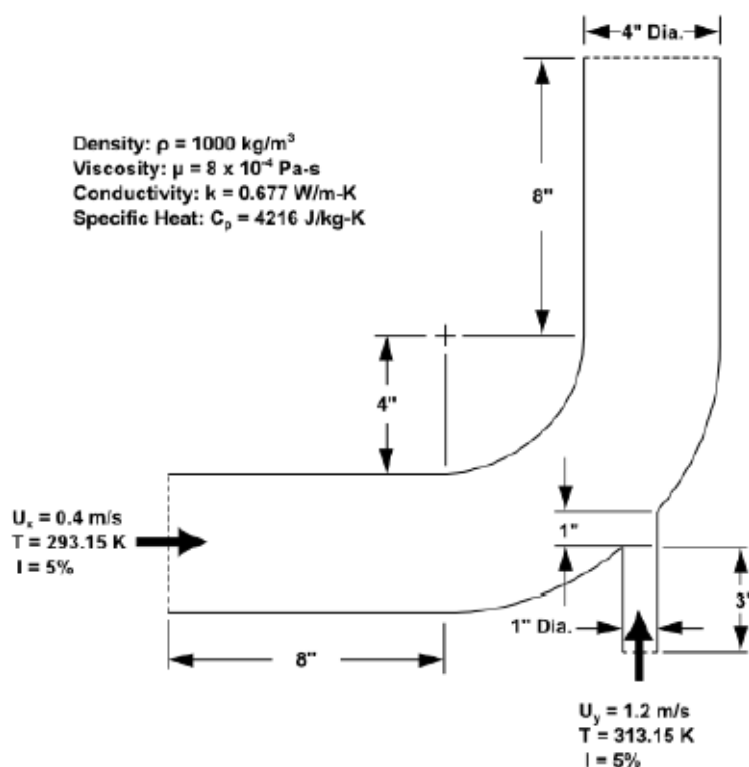
Είναι γεγονός ότι οι κομβικές τιμές σε επιφάνειες είναι αποτέλεσμα της γραμμικής παρεμβολής των κομβικών τιμών του πλέγματος. Τα κέντρα των κελιών του πλέγματος, λειτουργούν ως χώρος αποθήκευσης όλων των δεδομένων που εισάγονται στο πρόγραμμα. Η αποθήκευση δε, των κομβικών τιμών των μεταβλητών μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε οριακούς κόμβους ενώ δια μέσω του κώδικα, παρέχεται η δυνατότητα αναφοράς της ροής (report flux) για τη μάζα στους διαφόρους χώρους του πλέγματος εντός του υπολογιστικού πεδίου. Σημαντικό επίσης ρόλο έχει η προβολή του ρυθμού της παροχής μάζας του ρευστού (mass flow rate) στην είσοδο (inlet) και έξοδο (outflow) του υπολογιστικού πεδίου. Με την εξίσωση της συνέχειας να ικανοποιείται, ακόμα και με μικρές αποκλίσεις, είναι ένα δείγμα καλής ποιότητας σύγκλισης και κατ' επέκταση, δείγμα ορθής οργάνωσης του προβλήματος.

Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα ολικής εμποπτείας όλων των αποτελεσμάτων των μεταβλητών. Αυτό πραγματοποιείται σε οποιαδήποτε θέση ή επιφάνεια του υπολογιστικού πεδίου επιτρέποντας έτσι, ένα πιο οργανωμένο τρόπο ελέγχου των χαρακτηριστικών της ροής σε οποιοδήποτε σημείο του πεδίου ανάλυσης επιθυμεί ο χρήστης.

5 ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΣ ΚΩΔΙΚΑ FLUENT (CFD).

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ.(4), η εφαρμογή των μεθόδων της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την ανάλυση της ροής, πραγματοποιείται εφαρμογή του εμπορικού κώδικα Fluent και συγκεκριμένα η έκδοση 13.0 (Fluent, Inc. 2005).

Το πρόβλημα το οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω, έχει σχέση με την ροή ρευστών εντός ενός αγωγού με καμπύλη. Το ρευστό εισέρχεται μέσα στο σωλήνα από το σημείο που υποδεικνύει ο οριζόντιος δείκτης στην Εικ.(5.1) και αναμειγνύεται με ένα άλλο ρευστό το οποίο εισέρχεται από το σημείο που δείχνει ο κάθετος δείκτης, καθώς αυτό βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία.



Εικόνα 5.1: Διαστασιολόγηση αγωγού και προσδιορισμός σημαντικών μεγεθών.

Τέτοιου είδους «αγκώνες ανάμειξης» χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα σωληνώσεων σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και γενικότερα σε εργοστάσια.

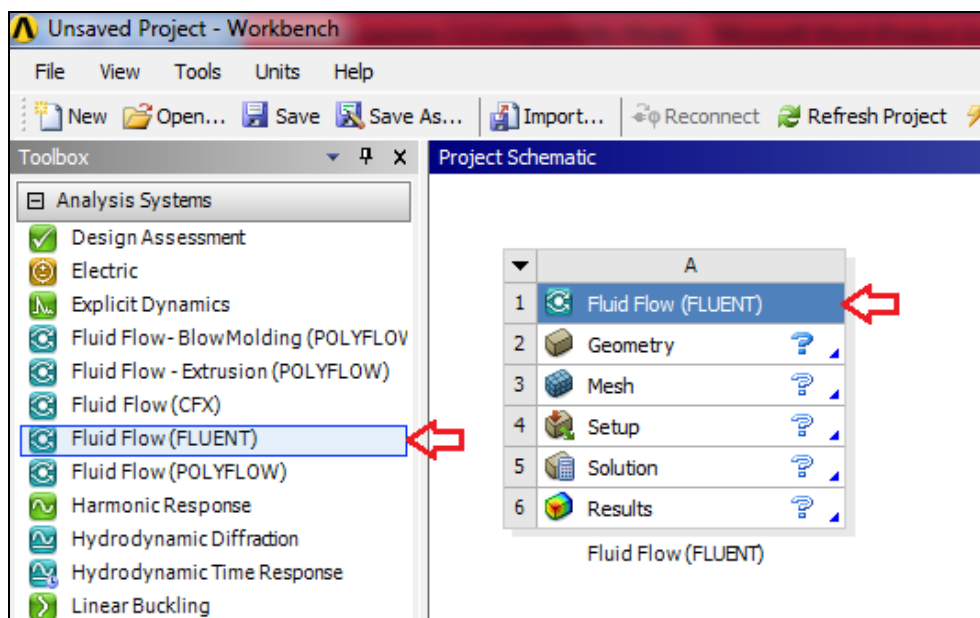
Παρακάτω, πραγματοποιείται μια αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι μέθοδοι όπου χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Fluent και γενικότερα να απλουστευθεί η διαδικασία κατανόησης του προβλήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία.

5.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ FLUENT (ANSYS WORKBENCH)

Λόγο της πολυπλοκότητας που μπορεί να παρουσιάσει το πρόγραμμα κατά την αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων, η προσέγγιση του προβλήματος αυτού θα πραγματοποιηθεί χωρίζοντάς το σε επιμέρους βήματα. Με την λεπτομερείς αυτή ανάλυση, επιτυγχάνεται μια ευκολότερη αλλά και γρηγορότερη αντιμετώπιση του προβλήματος.

1. Βήμα πρώτο:

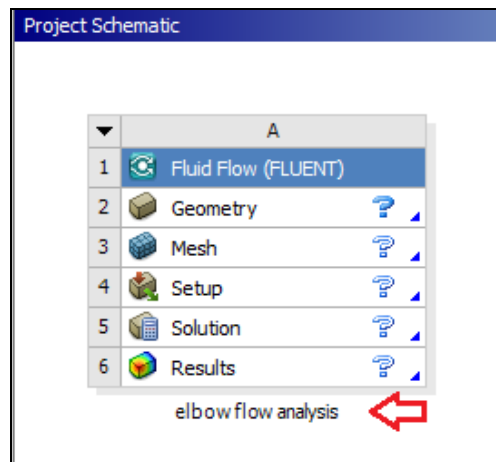
Μετά την επιτυχημένη εκκίνηση του **Ansys Fluent**, εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή μας το κυρίως περιβάλλον εργασίας του προγράμματος (**Workbench**). Όπως απεικονίζεται στην Εικ.(5.1), προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα νέο πρόβλημα ανάλυσης ροής, επιλέγουμε την εντολή **“Fluid Flow (FLUENT)”**.



Εικόνα 5.2: Περιβάλλον εργασίας και δημιουργία προβλήματος στο **Ansys Worckbench**.

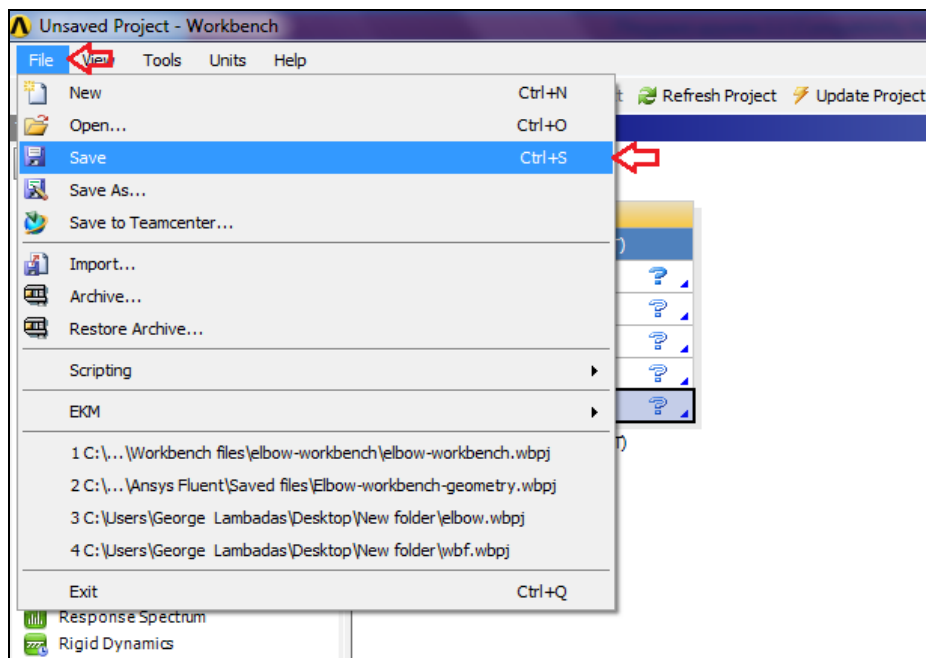
2. Βήμα δεύτερο:

Στη θέση που υποδεικνύεται στην Εικ.(5.3), δίνουμε ένα τίτλο στο πρόβλημα που αναλύουμε. Στην προκειμένη περίπτωση θα είναι **“elbow flow analysis”**.



Εικόνα 5.3: Εισαγωγή τίτλου προβλήματος.

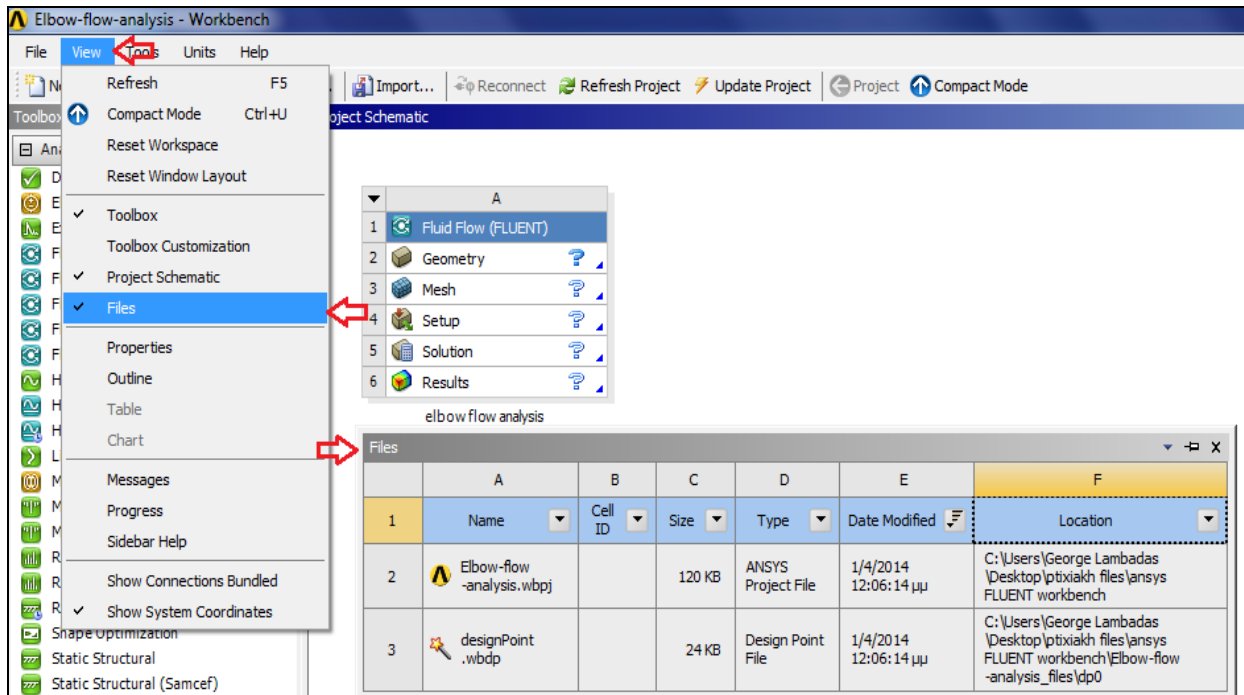
Στην συνέχεια, αποθηκεύουμε το πρόβλημα στον υπολογιστή μας επιλέγοντας **“File ~ Save”** όπως υποδεικνύεται στην Εικ.(5.4).



Εικόνα 5.4: Διαδικασία αποθήκευσης του προβλήματος

3. Βήμα τρίτο:

Το Fluent, μας παρέχει την δυνατότητα να δούμε όλα τα αρχεία τα οποία έχουμε χρησιμοποιήσει αλλά και δημιουργήσει, οποιαδήποτε στιγμή κατά την επίλυση του προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας **“View ~ Files”** καθώς στην Εικ.(5.5) παρατηρούμε λεπτομερώς, τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται αυτό.



Εικόνα 5.5: Προβολή δημιουργημένων και αποθηκευμένων αρχείων.

Στο παράθυρο που εμφανίζεται, παρατηρούμε το όνομα και τον τύπο του αρχείου, την ταυτότητα του κελιού όπου βρίσκεται το αρχείο μας, το μέγεθός του, και διάφορες άλλες πληροφορίες.

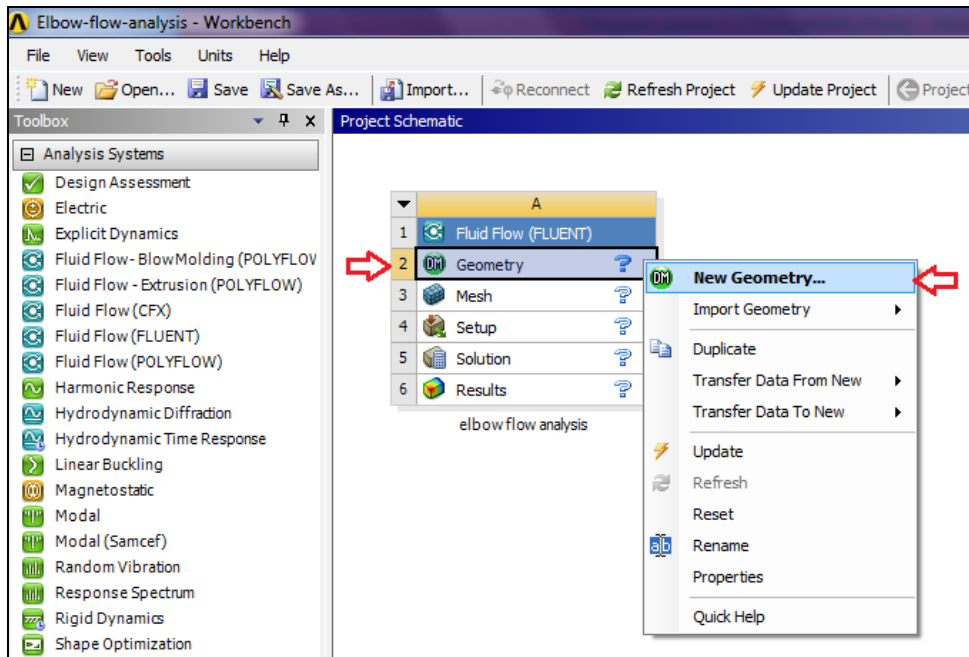
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ANSYS DESIGN-MODELER

Η γεωμετρία του προβλήματος που αναλύουμε, αλλά και γενικότερα σε κάθε είδους πρόβλημα που ενδέχεται να αντιμετωπίσουμε, μπορεί να δημιουργηθεί ή να εισαχθεί στο πρόγραμμα. Η δημιουργία της γεωμετρίας είναι μια διαδικασία όπου η διεκπεραίωση της θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω, για το πρόβλημα του παρόντος κεφαλαίου. Η εισαγωγή δε, της γεωμετρίας προϋποθέτει να έχουμε στην κατοχή μας το ανάλογο αρχείο γεωμετρίας το οποίο μπορεί να παρέχεται σε εμάς από κάποιον αρμόδιο φορέα. Παρακάτω, θα δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην πρώτη μέθοδο καθώς η δεύτερη δεν απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία ή πνευματική εργασία.

5.2.1 Σχεδιασμός γεωμετρίας στο ANSYS Design-Modeler

1. Βήμα πρώτο:

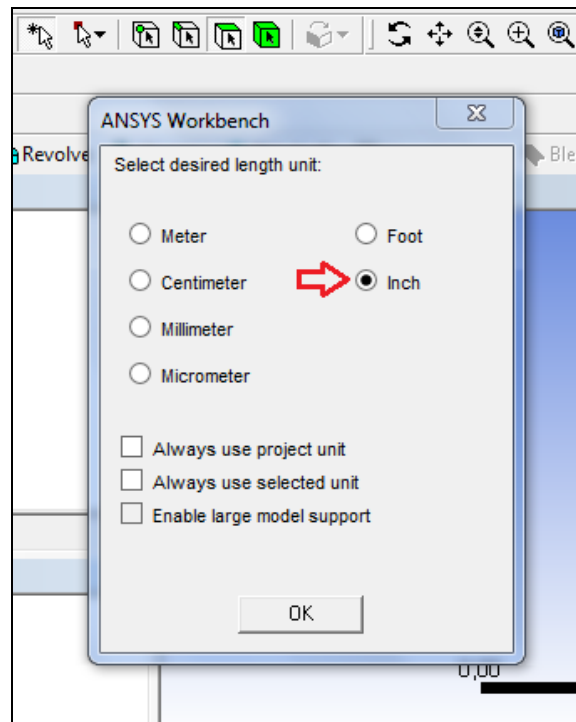
Για να ξεκινήσουμε την διαδικασία κατασκευής της γεωμετρίας, πατάμε δεξί κλικ στο το κελί που αναγράφει **“Geometry”** και επιλέγουμε **“New Geometry...”** όπως φαίνεται και στην Εικ.(5.6).



Εικόνα 5.6: Δημιουργία νέας γεωμετρίας

2. Βήμα δεύτερο:

Κατά την εκκίνηση του “**ANSYS Design-Modeler**”, καλούμαστε να επιλέξουμε τις μονάδες μέτρησης μήκους με τις οποίες επιθυμούμε να εργαστούμε. Όπως παρατηρούμε και στην Εικ.(5.7), οι μονάδες με τις οποίες θα εργαστούμε θα είναι οι «ίντσες (in)». Στο παρών πρόβλημα δεν υπάρχουν περιορισμοί οπότε επιλέγουμε οποιαδήποτε μονάδα μέτρησης επιθυμούμε εμείς.

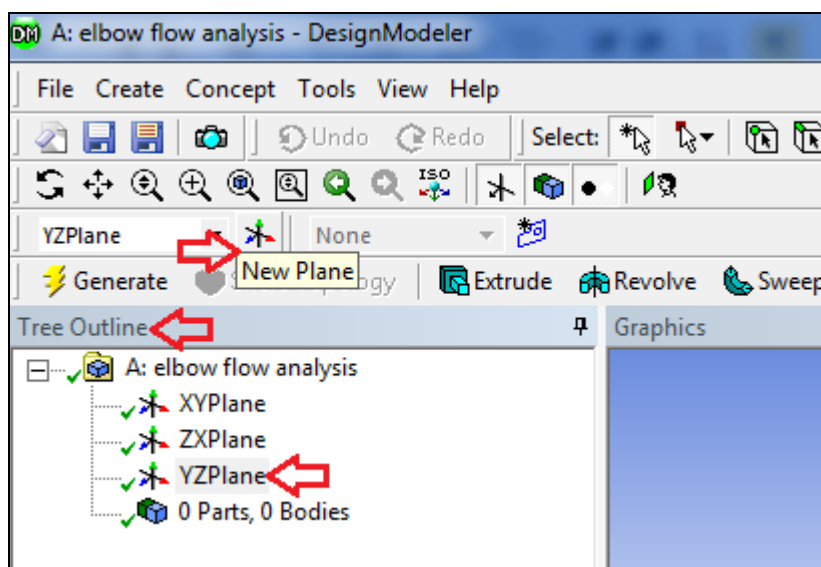


Εικόνα 5.7: Επιλογή μονάδων μέτρησης διαστάσεων μήκους.

3. Βήμα τρίτο:

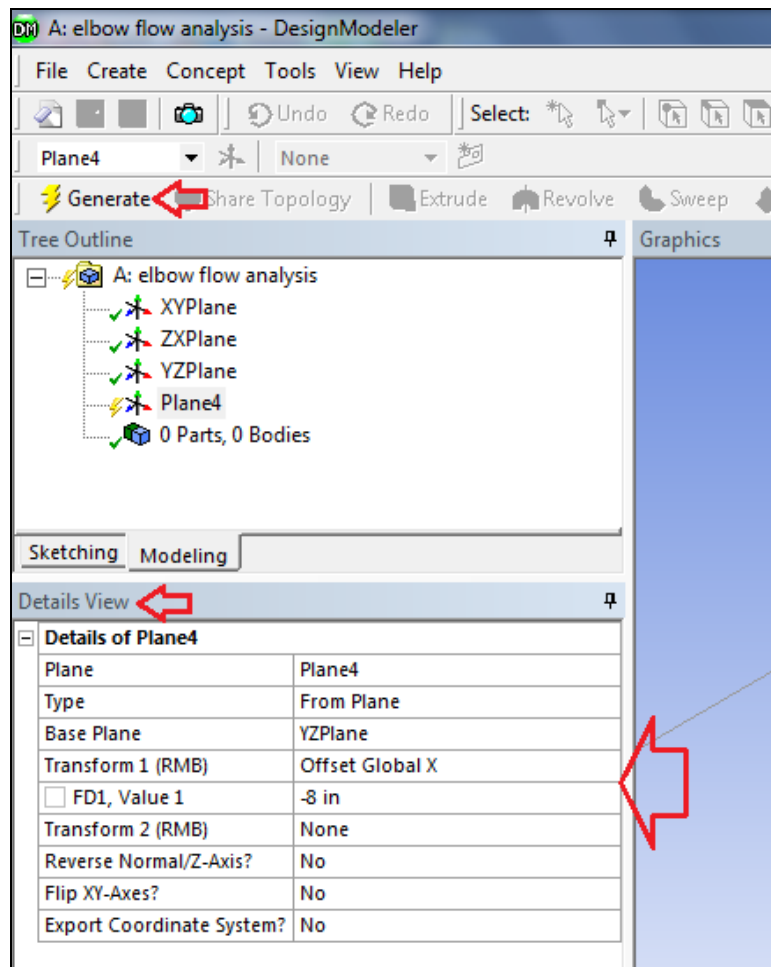
Η γεωμετρία αυτού του προβλήματος αποτελείται από ένα μεγάλο καμπύλο αγωγό συνοδευόμενος από ένα μικρότερο πλαϊνό αγωγό. Για να κατασκευάσουμε τον κυρίως αγωγό, θα χρησιμοποιήσουμε την εντολή **“Sweep”**. Η εντολή αυτή απαιτεί την ύπαρξη δύο σκίσεων τα οποία καλούνται **“Sketches”**.

Αρχικά θα δημιουργήσουμε ένα νέο επίπεδο έχοντας επιλεγμένη την εντολή **“YZPlane”** από την λίστα επιλογών που μας παρέχει το **“Tree outline”** και επιλέγοντας **“New Plane”** από τα εικονίδια συντόμευσης στο πάνω μέρος. Η διαδικασία αυτή φαίνεται αναλυτικά στην Εικ.(5.8)

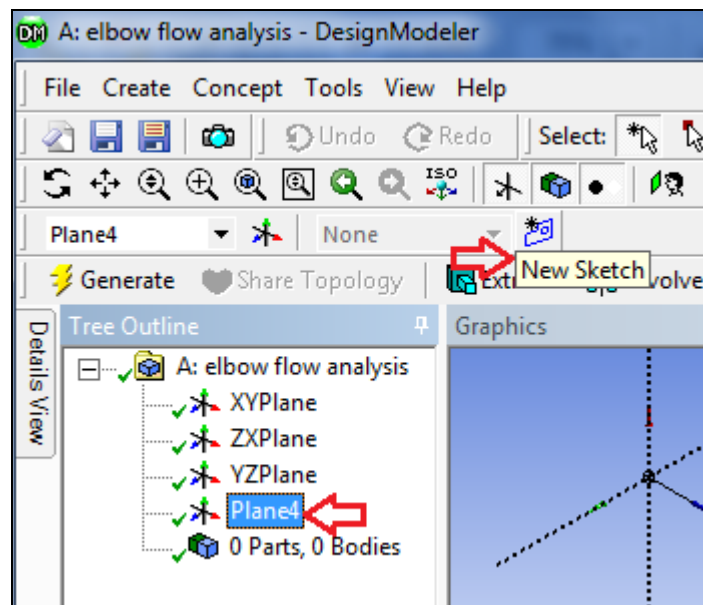


Εικόνα 5.8: Κατασκευή νέου επιπέδου στον άξονα Y,Z.

Έπειτα, επιλέγοντας το νέο επίπεδο **“Plane 4”** που κατασκευάσαμε, θέτουμε ορισμένες διαστάσεις σε αυτό μέσω της λίστας επιλογών **“Details View”**. Στο κελί **“Transform 1 (RMB)”** ορίζουμε την επιλογή **“Offset Global X”** θέτοντας **“None”** στα δεξιά της παραμέτρου **“Transform 2 (RMB)”**. Η τιμή που θα δώσουμε στην παράμετρο **“FD1, Value 1”** θα είναι **-8 in**, προκειμένου όμως να γίνουν αποδεκτές οι ρυθμίσεις αυτές, θα πρέπει να δώσουμε την εντολή **“Generate”** όπως υποδεικνύεται στην Εικ.(5.9). Στην Εικ.(5.10) φαίνεται η διαδικασία κατασκευής ενός νέου σκίτσου, **“New Sketch”** βασιζόμενο στο ήδη κατασκευασμένο επίπεδο **“Plane 4”**.



Εικόνα 5.9: Διαστασιολόγηση του νέου επιπέδου (*Plane 4*).

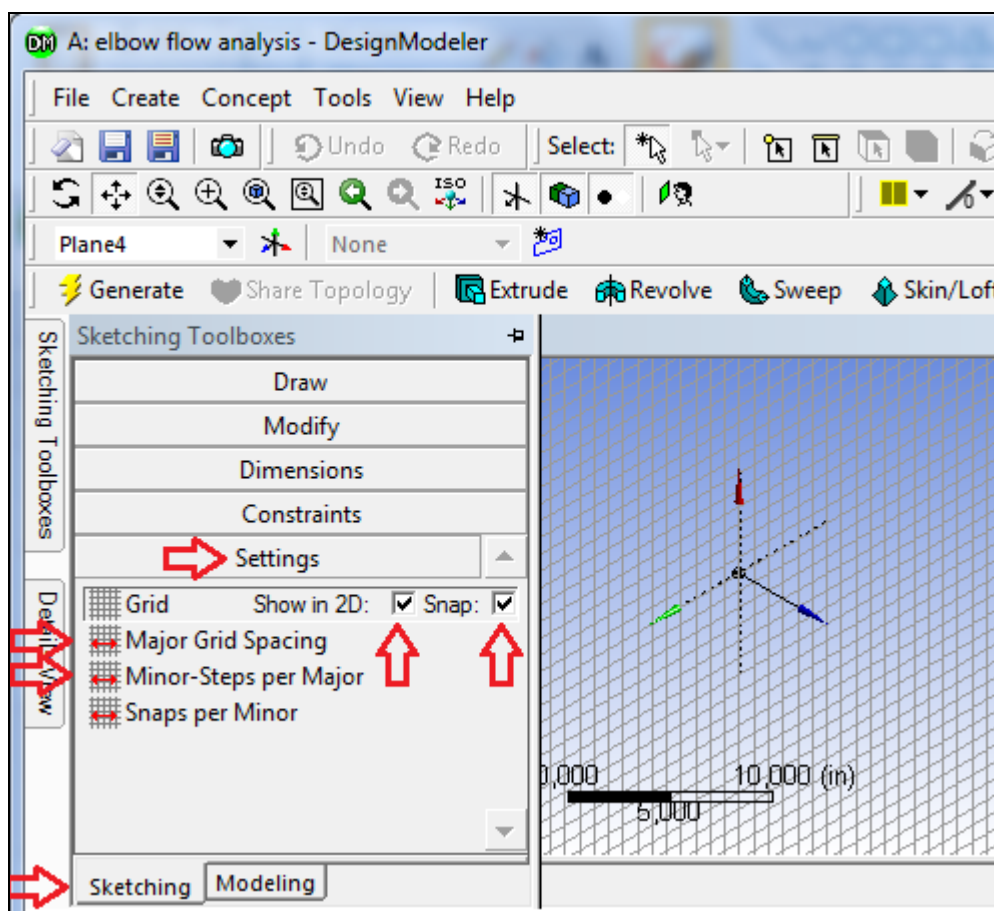


Εικόνα 5.10: Κατασκευή νέου σκίτσου.

4. Βήμα τέταρτο:

Είναι πολύ σημαντικό να ενεργοποιήσουμε ορισμένες ρυθμίσεις οι οποίες θα μας βοηθήσουν να κατασκευάσουμε την γεωμετρία πιο γρήγορα αλλά και πιο εύκολα. Ορισμένες από αυτές τις ρυθμίσεις φαίνονται στην Εικ.(5.11) και αναλύονται γραπτώς παρακάτω.

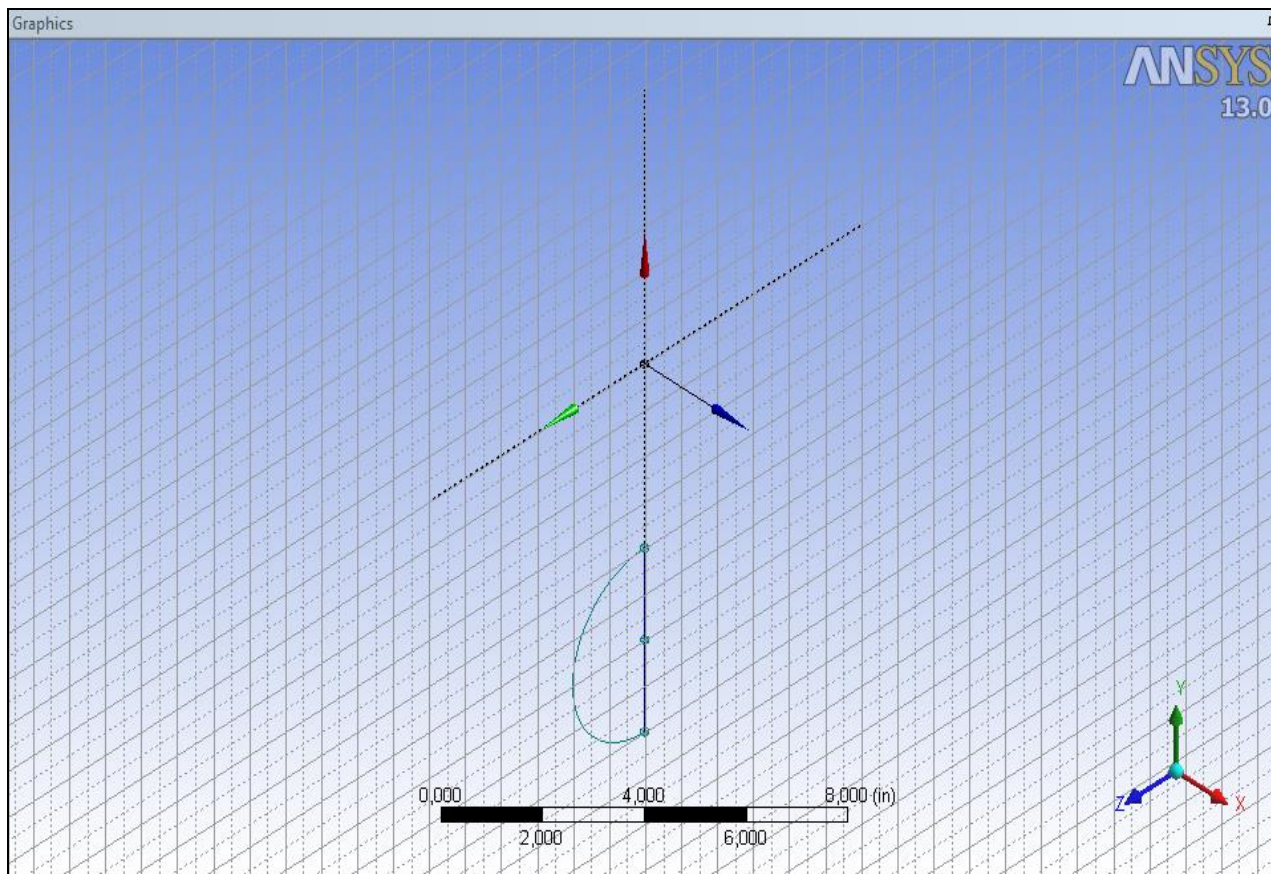
Αρχικά ανοίγουμε την λίστα με τίτλο **“Sketching”** κάτω από το **“Tree outline”** και επιλέγουμε το κελί **“Settings”**. Στο σημείο αυτό, ενεργοποιούμε τις επιλογές **“Show in 2D”** και **“Snap”** που εμφανίζονται ανοίγοντας το κελί **“Grid”**. Στη συνέχεια θέτουμε το **“Major Grid Spacing”** στη μία ίντσα και το **“Minor-Steps per Major”** στα δύο βήματα.



Εικόνα 5.11: Ενεργοποίηση βοηθητικών ρυθμίσεων.

5. Βήμα πέμπτο:

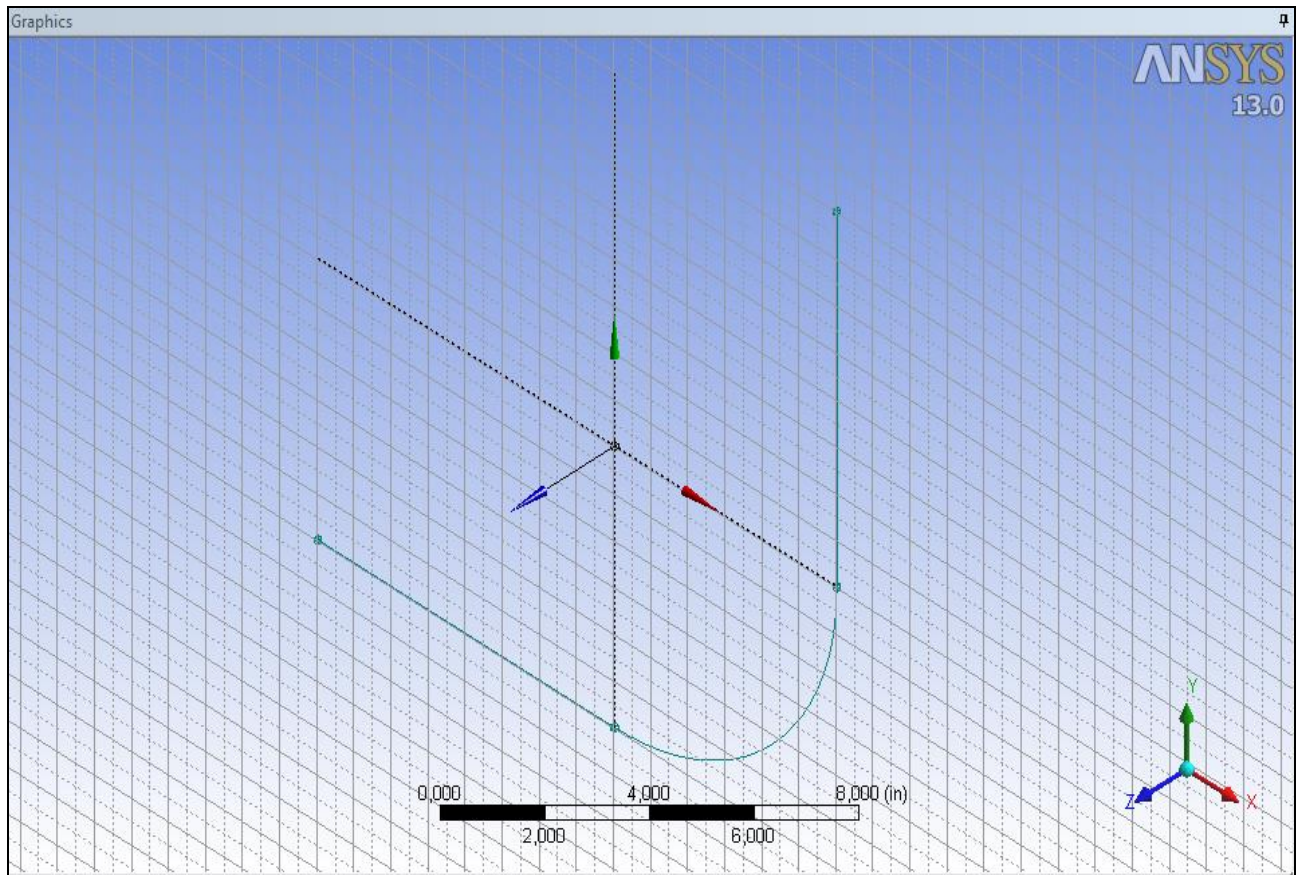
Στη καρτέλα **“Sketching”** επιλέγουμε **“Draw”** και μετά **“Arc by Center”**. Θα σχεδιάσουμε ένα τόξο με $r = 2$ in όπου οι ακριβείς συντεταγμένες του θα είναι $Y = -6$ in και $Z = 0$ in. Οι ρυθμίσεις που ενεργοποιήσαμε προηγουμένως θα μας βοηθήσουν να κατασκευάσουμε το τόξο σωστά. Αφού κατασκευάσουμε το τόξο, θα επιλέξουμε την εντολή **“Line”** από την λίστα **“Draw”** και θα σχεδιάσουμε δύο γραμμές. Η μία θα εκτείνεται από $Y = -4$ in έως $Z = 0$ in και η άλλη από $Y = -8$ in έως $Z = 0$ in. Στην Εικ.(5.12) παρατηρούμε την υλοποίηση των παραπάνω εντολών.



Εικόνα 5.12: Σχεδιασμός προφίλ τόξου.

6. Βήμα έκτο:

Αφού κατασκευάσαμε το προφίλ τόξου, σειρά έχει η δημιουργία του «μονοπατιού» που θα ακολουθήσει ο καμπύλος αυτός αγωγός. Για να επιτευχθεί αυτό όμως, θα πρέπει να κατασκευάσουμε ένα νέο σκίτσο, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με παραπάνω, το οποίο θα βασίζεται στο **“XYPlane”**. Έχοντας λοιπόν, ανοιχτό το σκίτσο, ξεκινάμε να σχεδιάζουμε χρησιμοποιώντας την εντολή **“Line”**. Θα σχεδιάσουμε δύο γραμμές οι συντεταγμένες των οποίων θα είναι $X = -8in$, $Y = -6$ για την κάθετη και $X = 8in$, $Y = 8in$ για την οριζόντια. Στη συνέχεια, ενώνουμε τις δύο αυτές γραμμές δημιουργώντας ένα νέο τόξο, χρησιμοποιώντας την εντολή **“Arc by Center”**. Παρατηρώντας τις Εικ.(5.12) και (5.13), καταλαβαίνουμε ξεκάθαρα την λογική όπου πρέπει να ακολουθούμε προκειμένου να κατασκευάσουμε ένα τέτοιου είδους σωλήνα.



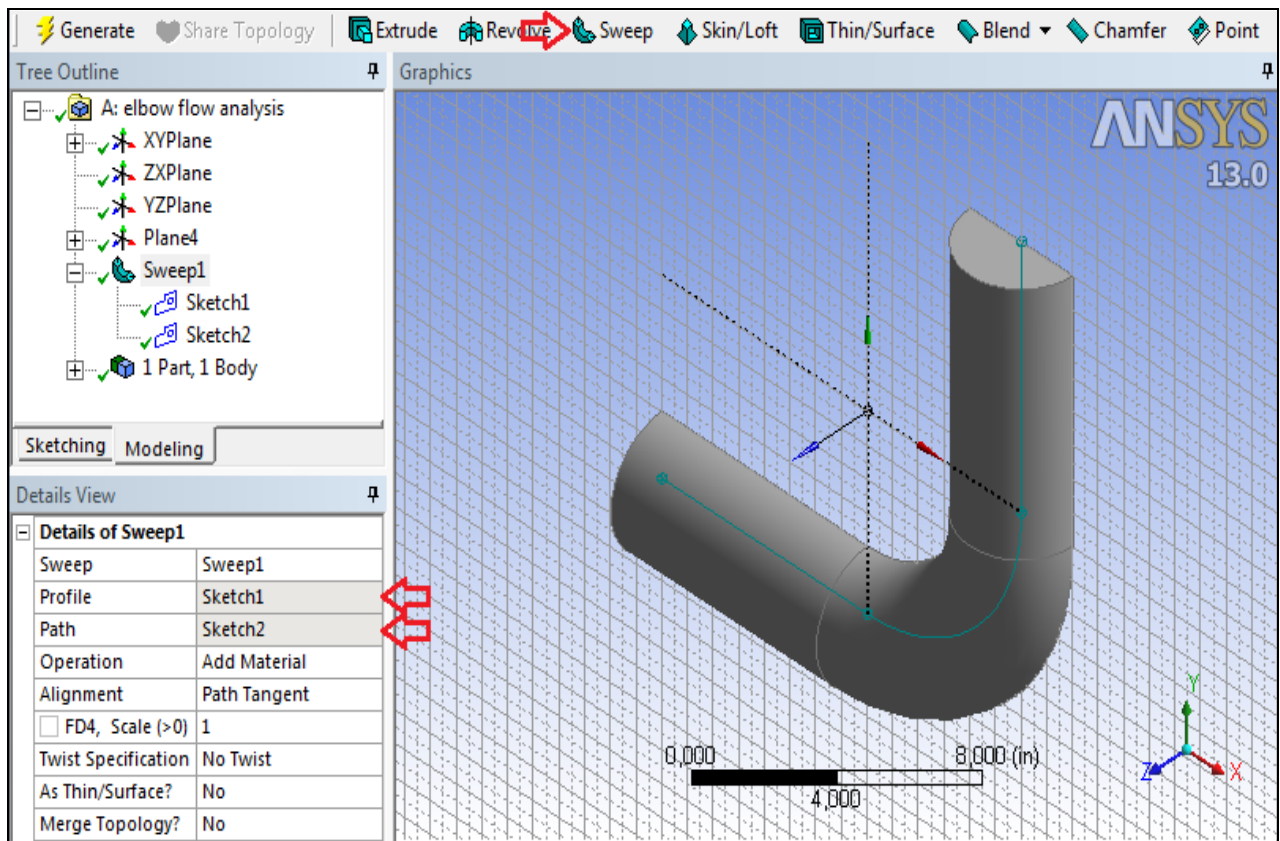
Εικόνα 5.13: Κατασκευή «μονοπατιού» του καμπύλου αγωγού.

7. Βήμα έβδομο:

Στο σημείο αυτό, είμαστε έτοιμοι να κατασκευάσουμε των αγωγό χρησιμοποιώντας την εντολή **“Sweep”** που αναφέραμε και στο τρίτο βήμα. Επιλέγοντας **“Sweep”** από τις συντομεύσεις στο πάνω μέρος, πραγματοποιούμε ορισμένες ρυθμίσεις στην καρτέλα επιλογών **“Details View”** και είναι οι εξής:

- a) Στην ρύθμιση **“Profile”** επιλέγουμε το **“Sketch 1”**
- b) Στην ρύθμιση **“Path”** επιλέγουμε **“Sketch 2”**

Έχοντας εφαρμόσει τις παραπάνω αλλαγές, επιλέγουμε **“Generate”** και κατασκευάζουμε τον αγωγό όπως υποδεικνύεται και στην Εικ.(5.14).



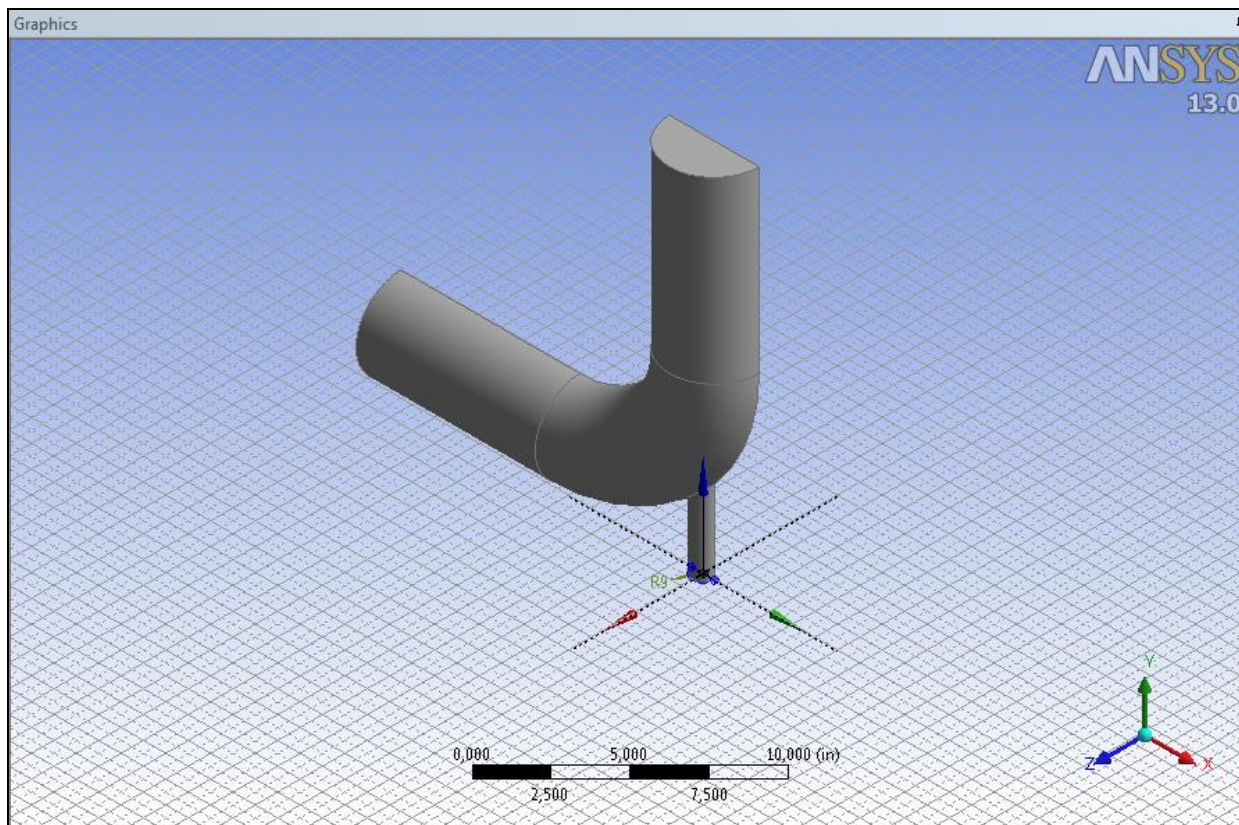
Εικόνα 5.14: Κατασκευή του αγωγού μέσω επιλογής “Sweep”.

8. Βήμα όγδοο:

Όπως αναφέραμε και στο τρίτο βήμα, ο αγωγός αυτός συνοδεύεται από έναν μικρότερο πλαϊνό αγωγό τον οποίο θα κατασκευάσουμε τώρα. Αρχικά δημιουργούμε ένα νέο επίπεδο που θα βασίζεται στο “ZXPlane”, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με το τρίτο βήμα. Στις ρυθμίσεις του “Plane 5” εισάγουμε:

- “Offset Global X” στο κελί “Transform 1 (RMB)” με 5.5in στην παράμετρο “FD1, Value 1”
- Και “Offset Global Y” στο κελί “Transform 1 (RMB)” με -9in στην παράμετρο “FD2, Value 2”

Στη συνέχεια κάνουμε “Generate” και καθώς έχουμε επιλεγμένο το “Plane 5”, κατασκευάζουμε ένα νέο σκίτσο. Στην καρτέλα “Sketching” επιλέγουμε “Draw” και “Arc by Center” ώστε να σχεδιάσουμε ένα τόξο 180° με κέντρο, το κέντρο των αξόνων και ακτίνα 0.5in. Τα δύο άκρα του τόξου αυτού τα ενώνουμε με μία γραμμή χρησιμοποιώντας την εντολή “Line” και στη συνέχεια επιλέγουμε “Extrude” ώστε να του δώσουμε τρισδιάστατο σχήμα. Στις λεπτομέρειες της εντολής αυτής θέτουμε στο “Base Object” το “Sketch 3” και ρυθμίζουμε το “Operation” στην επιλογή “Add Material”. Στο κελί “Direction” εισάγουμε “Normal” και στο κελί “Extend Type” εισάγουμε “Fixed”. Τέλος, δίνουμε τιμή 4in στην παράμετρο “FD1, Depth(>0)” και κάνουμε κλικ στο “Generate”. Το σχήμα που προκύπτει καθώς και η διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω, φαίνονται στην Εικ.(5.15) και (5.16) αντίστοιχα.



Εικόνα 5.15: Σχεδιασμός πλαινού αγωγού

Details View	
[-] Details of Extrude1	
Extrude	Extrude1
Base Object	Sketch3
Operation	Add Material
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	4 in
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes

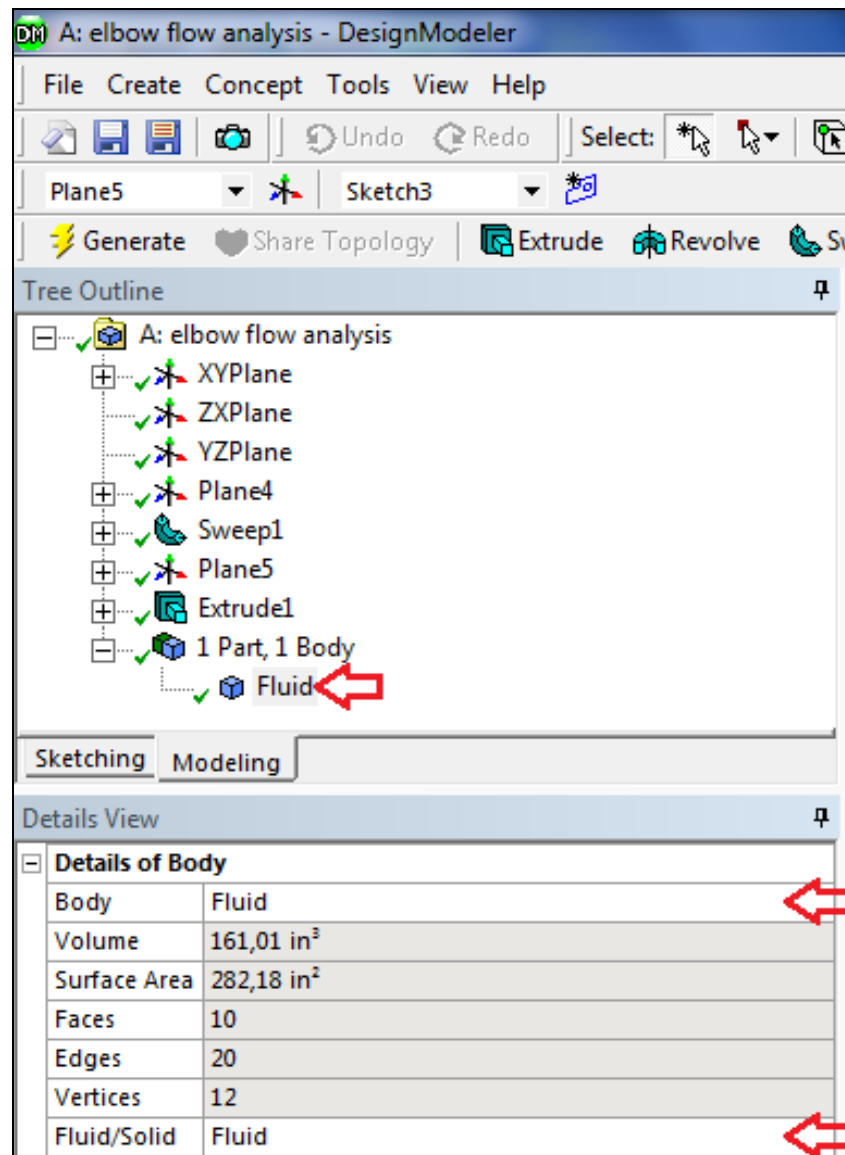
Εικόνα 5.16: Λεπτομέρειες εντολής “Extrude”

9. Βήμα ένατο:

Ύστερα από την επιτυχημένη ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, επιλέγουμε “Fluid” στην επιλογή “1 Part, 1 Body” που βρίσκεται στο “Tree Outline” και εισάγουμε:

- “Fluid” στην επιλογή “Body” που βρίσκεται στο “Details View”
- Και “Fluid” στην επιλογή “Fluid/Solid”, όπως φαίνεται στην Εικ.(5.18)

Τέλος, κάνουμε **“Generate”** και αποθηκεύουμε το αρχείο γεωμετρίας που έχουμε κατασκευάσει.



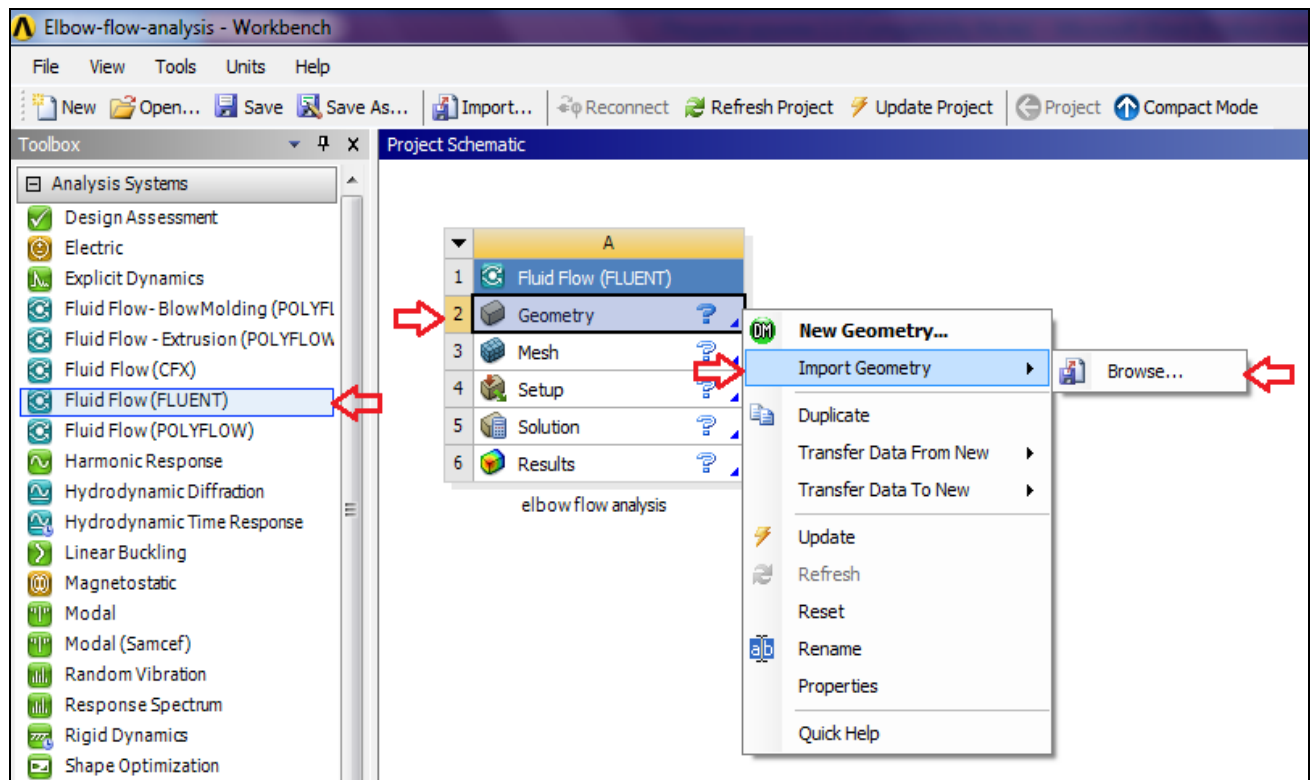
Εικόνα 5.17: Διαμόρφωση τελικών ρυθμίσεων στο αρχείο γεωμετρίας.

5.2.2 Εισαγωγή γεωμετρίας στο λογισμικό ANSYS Fluent Workbench.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του Κεφ.(5.2), η γεωμετρία ενός στοιχείου μπορεί να εισαχθεί στο πρόγραμμα χωρίς να χρειάζεται να την σχεδιάσουμε εμείς. Παρακάτω, παρουσιάζεται η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτό.

Αρχικά, εισερχόμαστε στο περιβάλλον εργασίας **“Workbench”** του λογισμικού Fluent και επιλέγουμε **“Fluid Flow (FLUENT)”** από το **“Tree outline”**, όπως φαίνεται και στο βήμα πρώτο του προηγούμενου υποκεφαλαίου(5.2.1). Στη συνέχεια, ανοίγουμε την λίστα επιλογών για το κελί **“Geometry”**, κάνοντας δεξί κλικ σε αυτό και επιλέγουμε **“Import Geometry”** και **“Browse”**. Με τον τρόπο αυτό μας παρέχεται η δυνατότητα να αναζητήσουμε στα αρχεία του υπολογιστή μας για το

αρχείο γεωμετρίας που επιθυμούμε να εισάγουμε. Στην Εικ.(5.18) παρατηρείται όλη η παραπάνω διαδικασία αναλυτικά.



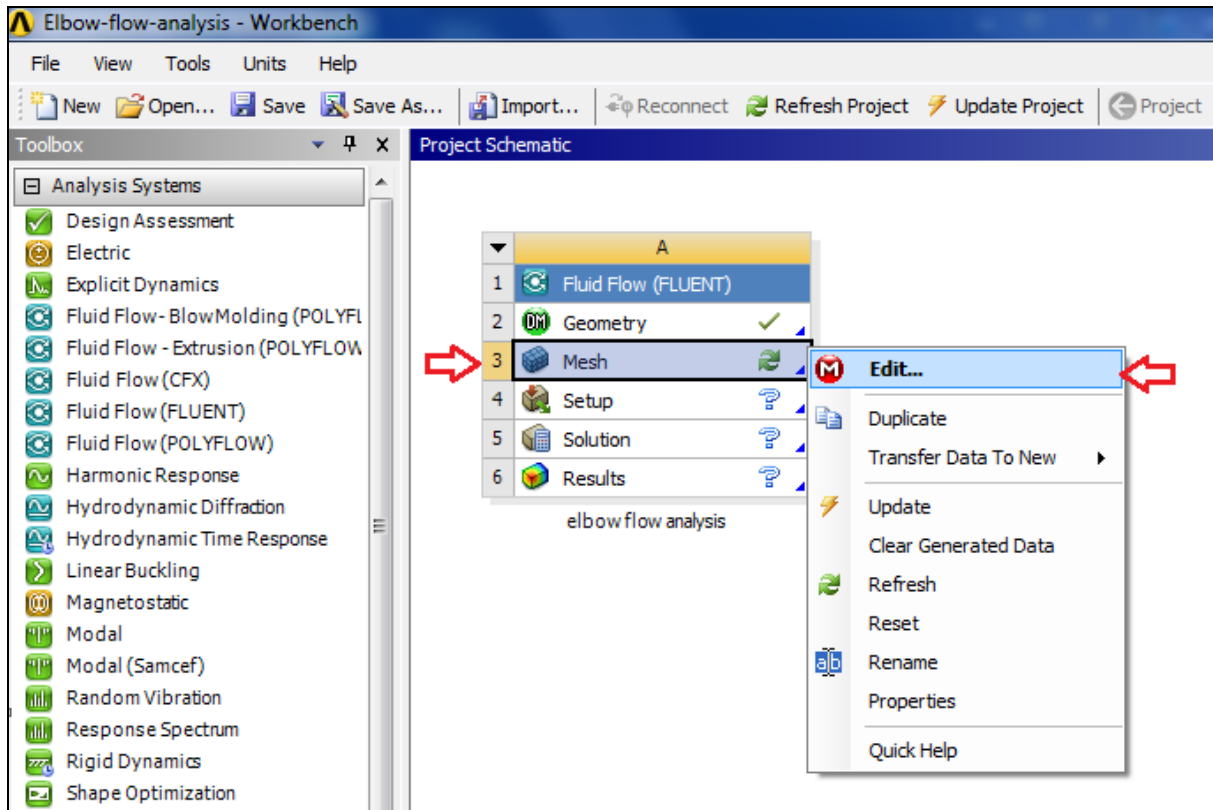
Εικόνα 5.18: Εισαγωγή γεωμετρίας στο Fluent.

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ANSYS MESHING.

Έχοντας δημιουργήσει την γεωμετρία του αρχείου μας με επιτυχία, σειρά έχει η ανάλυση αυτής χρησιμοποιώντας την εφαρμογή **“Mesh”**. Σκοπός της εφαρμογής αυτής είναι η πλεγματοποίηση της υπολογιστικής αυτής ανάλυσης που πραγματοποιούμε προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα.

1. Βήμα πρώτο:

Καθώς βρισκόμαστε στο περιβάλλον εργασίας **“Workbench”** ανοίγουμε την εφαρμογή **“Mesh”** κάνοντας δεξί κλικ και **“Edit...”** όπως φαίνεται και στην Εικ.(5.19). Την πρώτη φορά που θα ανοίξουμε την εφαρμογή αυτή, καλούμαστε να εισάγουμε ορισμένες ρυθμίσεις, οι οποίες -ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη- βοηθούν στη χρήση του προγράμματος. Στην προκειμένη περίπτωση, οι ρυθμίσεις είναι ικανοποιητικές και δεν χρειάζεται να κάνουμε κάποια αλλαγή.

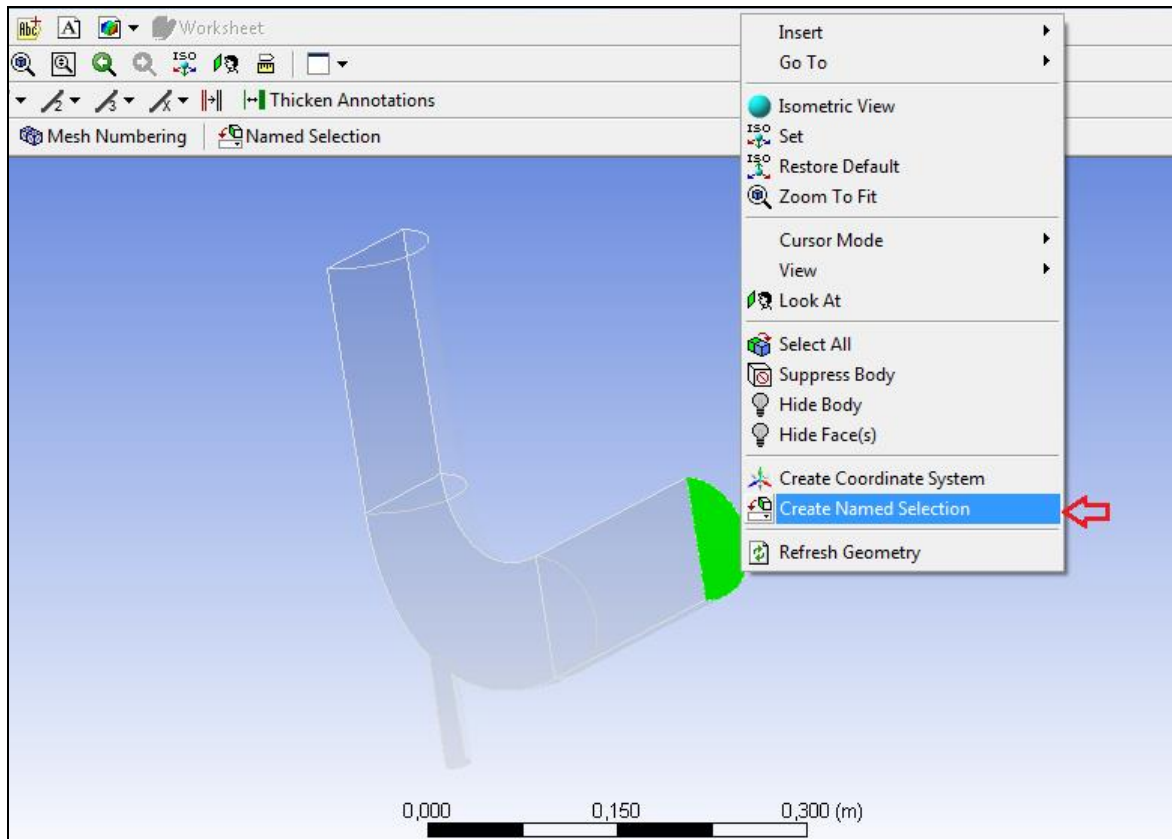


Εικόνα 5.19: Εκκίνηση εφαρμογής “Mesh”

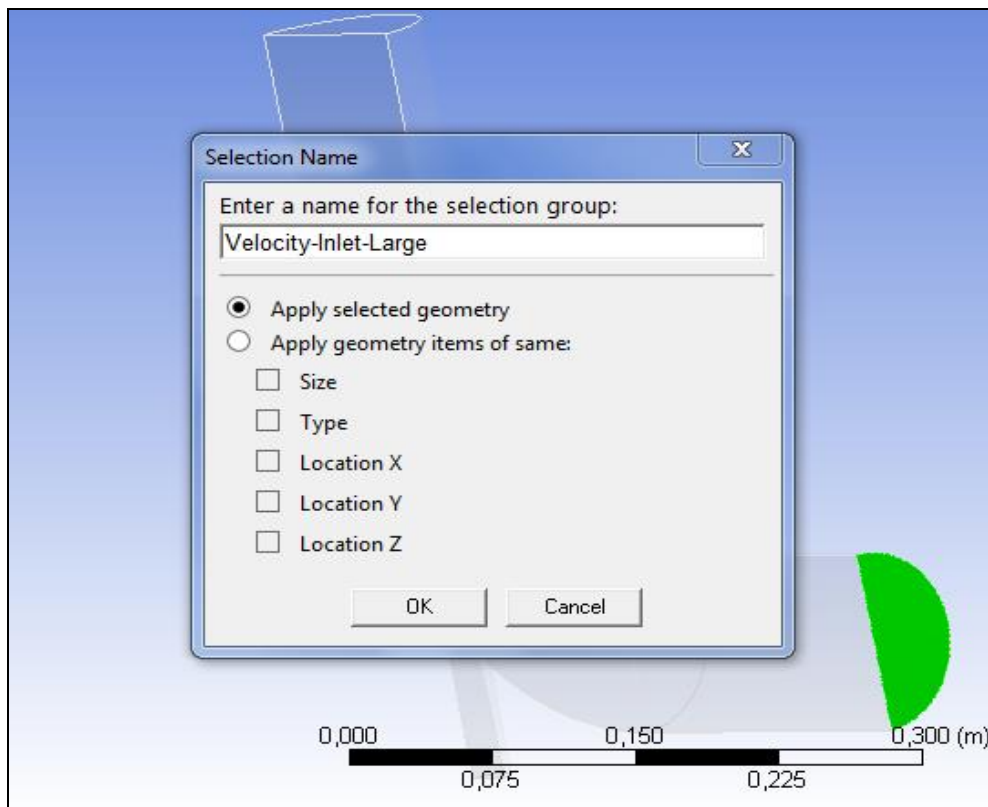
2. Βήμα δεύτερο:

Λόγο της πολυπλοκότητας που μπορεί να παρουσιάσει η εφαρμογή αυτή αργότερα, είναι σημαντικό να δώσουμε μια ονομασία σε κάθε είσοδο, έξοδο και συμμετρική επιφάνεια που χαρακτηρίζουν τον αγωγό αυτό που αναλύουμε. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να επιλέξουμε την επιφάνεια που επιθυμούμε να ονομάσουμε και να πατήσουμε δεξί κλικ. Στις επιλογές που εμφανίζονται, επιλέγουμε “**Create Named Selection**” και εισάγουμε το όνομα που επιθυμούμε, όπως φαίνεται στις Εικ.(5.20) και (5.21). Η επιφάνεια που επιλέγουμε πρώτη είναι η είσοδος του αγωγού θα την ονομάσουμε “**Velocity-Inlet-Large**” ενώ αφήνουμε τις υπόλοιπες ρυθμίσεις που φαίνονται στην Εικ.(5.21) ως έχουν. Ακολουθώντας την διαδικασία αυτή εισάγουμε ονομασίες σε κάθε επιφάνεια του αγωγού μας, ήτοι:

- a) Μικρή είσοδος: “**Velocity-Inlet-Small**”.
- b) Μεγάλη έξοδος: “**Pressure-Outlet**”.
- c) Συμμετρικά μέρη: “**Symmetry**”.



Εικόνα 5.20: Διαδικασία ονομασίας της επιφάνειας εισόδου του αγωγού.



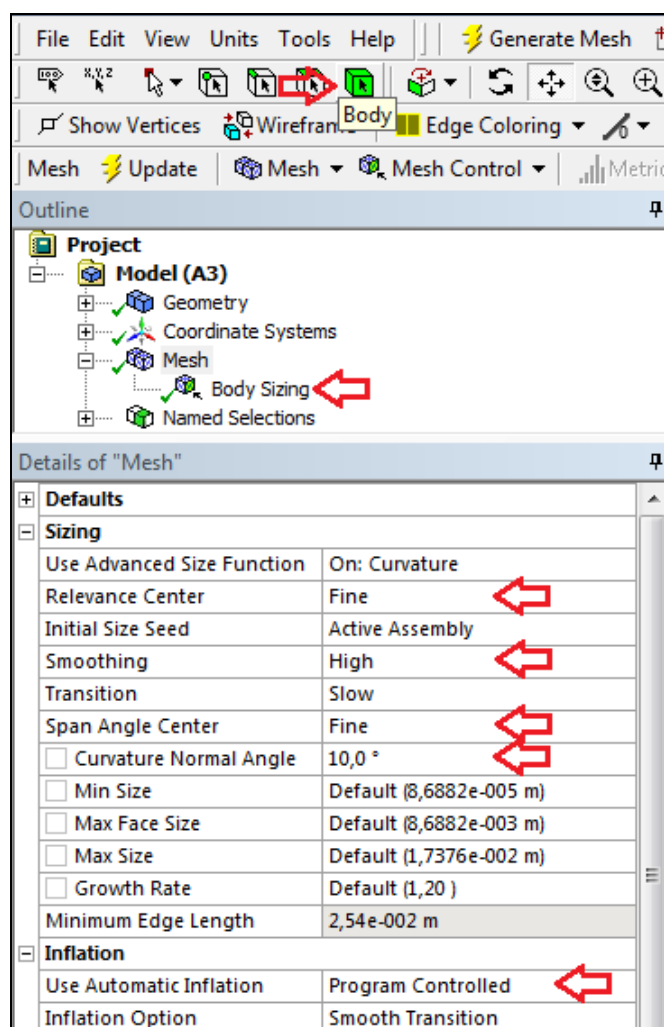
Εικόνα 5.21: Ρυθμίσεις κατά την ονομασία εισόδου του αγωγού.

3. Βήμα τρίτο:

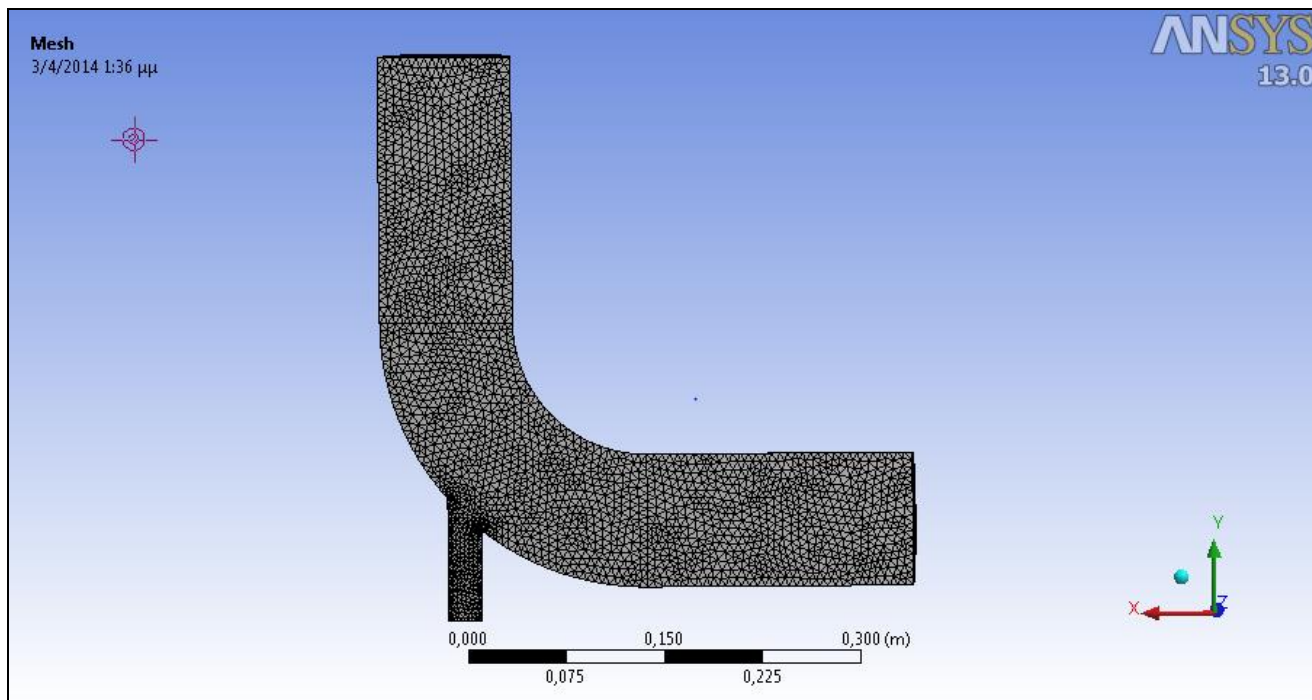
Προκειμένου να έχουμε μια πιο εύστοχη πλεγματοποίηση, θα κάνουμε ορισμένες αλλαγές στις ρυθμίσεις που βρίσκονται στο **“Details of Mesh”** Στην επιλογή **“Sizing”** αλλάζουμε τα εξής:

- a) **“Relevance Center”**: **“Fine”**
- b) **“Smoothing”**: **“High”**
- c) **“Curvature Normal Angle”**: 10

Στην συνέχεια εισάγουμε έναν ελεγκτή μεγέθους μέσω της εντολής **“Body”** που βρίσκεται στο πάνω μέρος της εφαρμογής, και κάνοντας δεξί κλικ στον ήδη επιλεγμένο αγωγό, πατάμε **“Insert”** και **“Sizing”**. Παρατηρώντας την καρτέλα **“Outline”** βλέπουμε μια νέα επιλογή όπου λέγεται **“Body Size”** και επιλέγοντάς την, εισάγουμε στο κελί **“Element Size”** την τιμή 6e-3. Στις ρυθμίσεις του **“Mesh”**, **“Inflation”** εισάγουμε **“Program Controlled”** στο κελί **“Use Automatic Inflation”**. Τέλος επιλέγουμε **“Update”** από τις συντομεύσεις στο πάνω μέρος. Οι αλλαγές αυτές καθώς και τα αποτελέσματα που προκαλούν, προβάλλονται στην Εικ.(5.22) και (5.23) αντίστοιχα.



Εικόνα 5.22: Αλλαγή ρυθμίσεων για πιο βέλτιστη πλεγματοποίηση.



Εικόνα 5.23: Υπολογιστική πλεγματοποίηση γεωμετρίας.

5.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ CFD ΣΤΟ ANSYS FLUENT

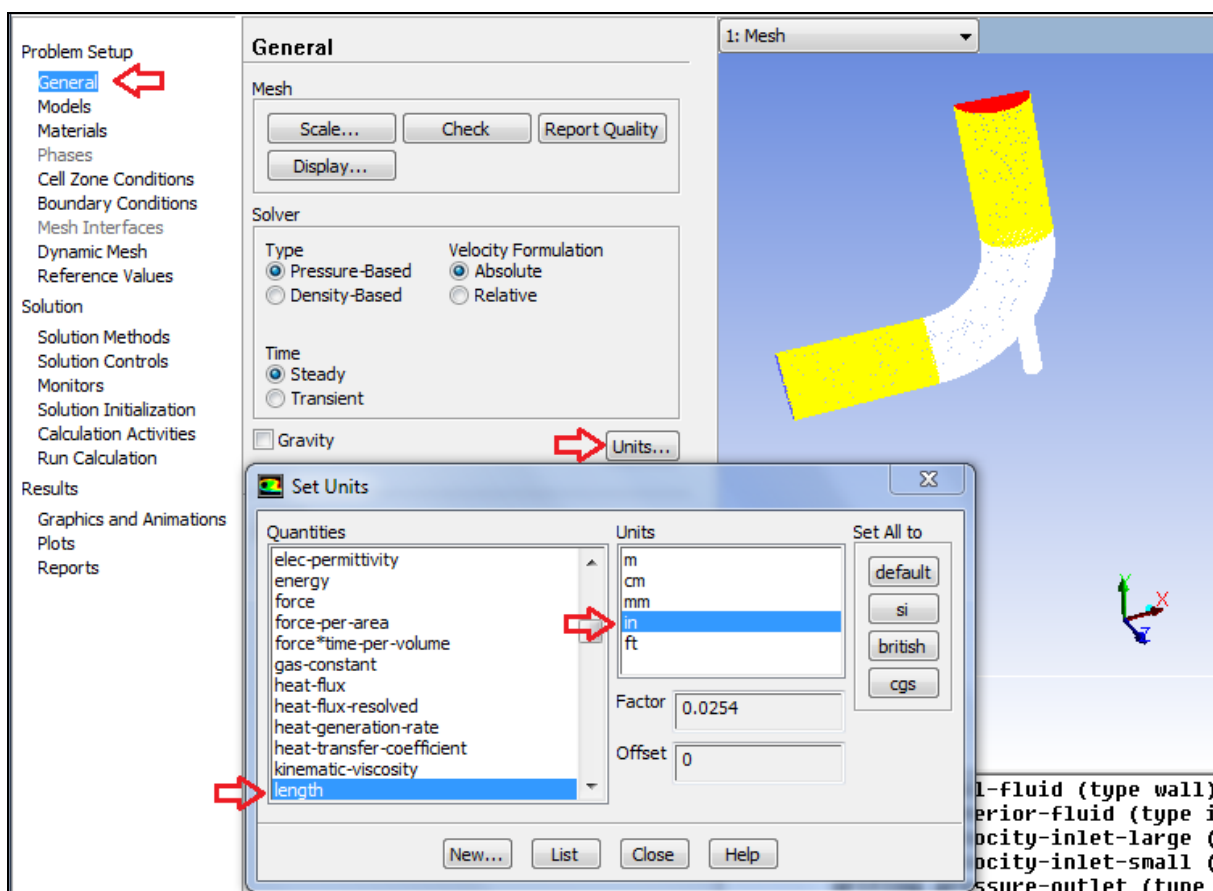
Έχοντας πλέον δημιουργήσει το υπολογιστικό πλέγμα του αγωγού, θα προετοιμάσουμε μια υπολογιστική ρευστοδυναμική ανάλυση χρησιμοποιώντας την εφαρμογή “**ANSYS Fluent**”.

1. Βήμα πρώτο:

Βρισκόμενοι στο περιβάλλον εργασίας του ANSYS Workbench, ανοίγουμε την εφαρμογή **ANSYS Fluent** μέσω της επιλογής “**Setup**” και “**Edit**”. Έχοντας κάνει αυτό, τίθεται σε λειτουργία το πρόγραμμα “**FLUENT Launcher**” έτσι ώστε να αλλάξουμε ορισμένες εισαγωγικές ρυθμίσεις που θα μας βοηθήσουν στην πορεία της ανάλυσης. Οι ρυθμίσεις αυτές προβάλλονται παρακάτω στην Εικ.(5.24). Αφού δώσουμε τις επιθυμητές ρυθμίσεις, κλείνουμε το “**Fluent Launcher**” και εισερχόμαστε στο περιβάλλον εργασίας του “**ANSYS Fluent**” όπου πραγματοποιείται αυτόματη φόρτωση του αγωγού. Στη συνέχεια, καλούμαστε να εισάγουμε ορισμένες γενικές ρυθμίσεις πλεγματοποίησης καθώς και να επιλέξουμε έναν επιλυτή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής “**General**” στα αριστερά του προγράμματος όπως υποδεικνύεται στην Εικ.(5.25) παρακάτω.



Εικόνα 5.24: Εισαγωγικές ρυθμίσεις στο *ANSYS Fluent Launcher*.



Εικόνα 5.25: Εισαγωγή γενικών ρυθμίσεων στο *ANSYS Fluent*.

Εισάγοντας λοιπόν, **“in”** στην επιλογή **“length”**, κλείνουμε το παράθυρο **“Units...”** και επιλέγουμε **“Check”**. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιούμε έναν έλεγχο πλεγματοποίησης, βασιζόμενος όμως στην παρούσα κονσόλα καθώς τα αποτελέσματα του ελέγχου αυτού (Εικ.(5.26)) διαφέρουν όταν εφαρμόζεται σε διαφορετικές πλατφόρμες.

```
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -2.032000e-01, max (m) = 2.032000e-01
  y-coordinate: min (m) = -2.286000e-01, max (m) = 2.032000e-01
  z-coordinate: min (m) = -2.332952e-18, max (m) = 5.080000e-02
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 7.813646e-11
  maximum volume (m3): 5.621398e-08
  total volume (m3): 2.633958e-03
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 1.992215e-07
  maximum face area (m2): 3.522854e-05
Checking mesh.....
Done.
```

Εικόνα 5.26: Αποτελέσματα ελέγχου πλεγματοποίησης στο **ANSYS Fluent**.

2. Βήμα δεύτερο:

Σε αυτό το σημείο, επιλέγουμε **“Models”** από την καρτέλα **“Problem Setup”** στα αριστερά ούτως ώστε να μοντελοποιήσουμε την προσομοίωσή μας, και κάνουμε τις εξής αλλαγές:

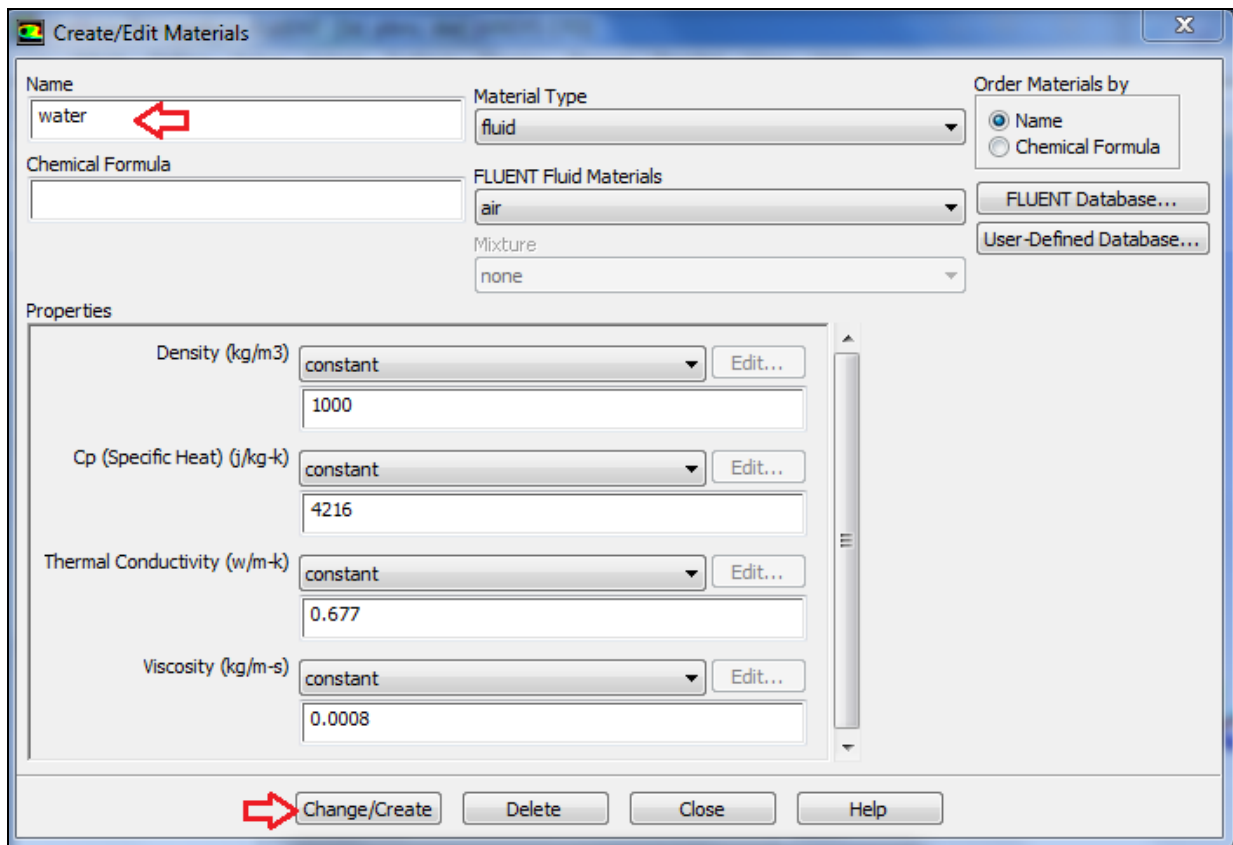
- “Models ~ Energy ~ Edit...”** ενεργοποιούμε το **“Energy Equation”**.
- “Models ~ Viscous ~ Edit...”** ενεργοποιούμε αρχικά το **“k-epsilon (2eqn)”** και στη συνέχεια τα **“Standard”** και **“Enhanced Wall Treatment”**.

3. Βήμα τρίτο:

Εδώ, προετοιμάζουμε τα υλικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση. Επιλέγουμε **“Materials ~ Fluid ~ Create/Edit...”** από την καρτέλα στα αριστερά και εισάγουμε τα εξής στοιχεία:

- Πληκτρολογούμε *water* στο κελί με τίτλο **“Name”**
- Επιλέγουμε **“Properties”** και εισάγουμε ορισμένες τιμές στις παραμέτρους που εμφανίζονται.
- Επιλέγουμε **“Change/Create ~ Yes”** ούτως ώστε να γίνουν αποδεκτές οι αλλαγές και στη συνέχεια κλείνουμε το παράθυρο **“Create/Edit Materials”**.

Προκειμένου να προχωρήσουμε στα επόμενα βήματα με επιτυχία, πρέπει να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω αλλαγές όπως ακριβώς υποδεικνύεται στην Εικ.(5.27).



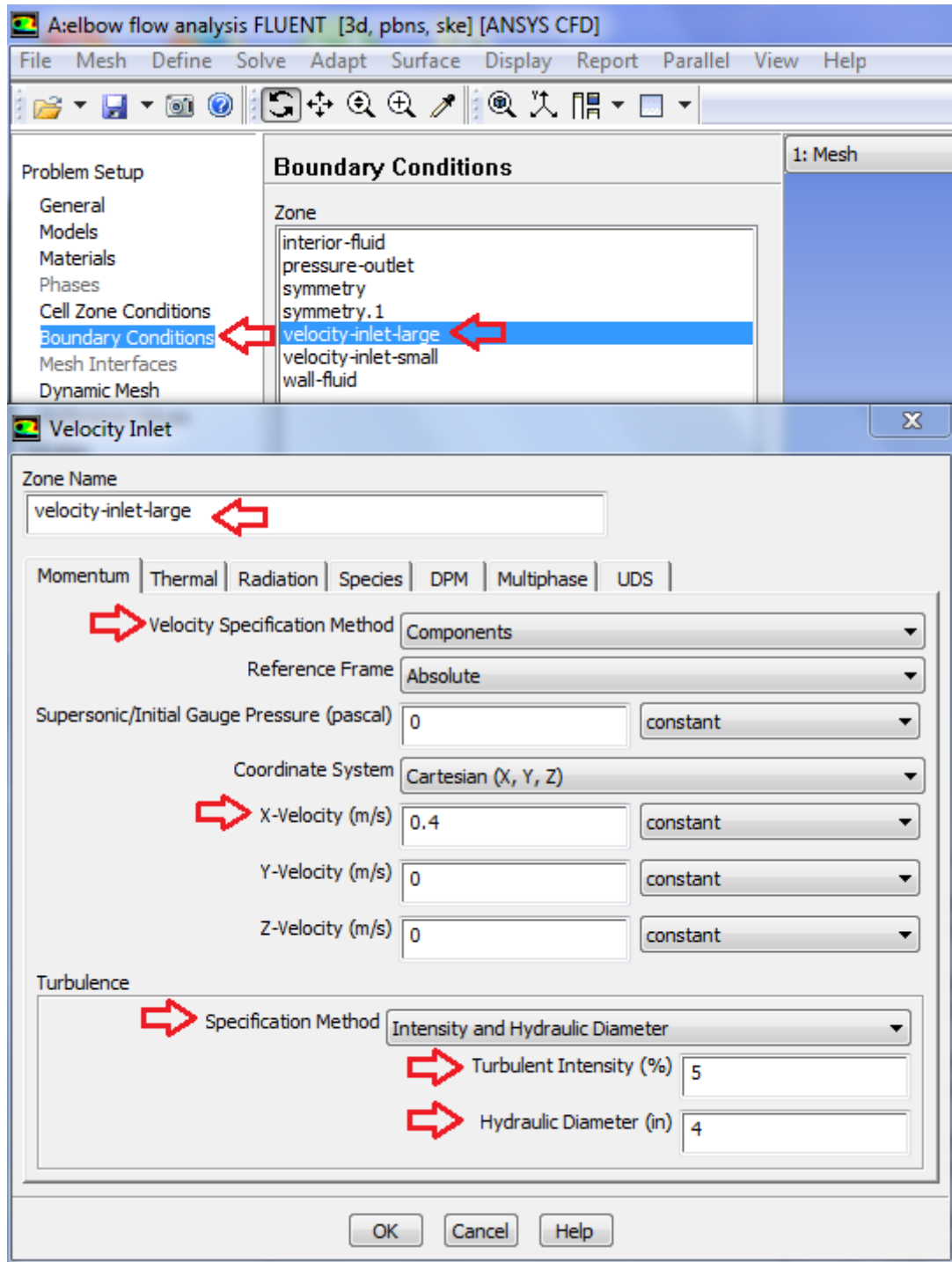
Εικόνα 5.27: Εισαγωγή νέου στοιχείου (water) και επεξεργασία των παραμέτρων του.

4. Βήμα τέταρτο:

Αφού έχουμε πραγματοποιήσει τα παραπάνω βήματα με επιτυχία, συνεχίζουμε, διαμορφώνοντας τις οριακές συνθήκες κελιών. Ανοίγοντας το **“Cell Zone Conditions”** από την λίστα στα αριστερά, επιλέγουμε **“fluid ~ Edit...”** και κάνουμε ορισμένες τροποποιήσεις. Στο κελί που αναγράφεται **“Material Name”** αλλάζουμε την υπάρχουσα ρύθμιση σε **“water”** και ύστερα κλείνουμε το παράθυρο κάνοντας κλικ στην επιλογή **“OK”**.

5. Βήμα πέμπτο:

Στο βήμα αυτό θα αναλύσουμε εκτενώς, τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών. Αρχικά κάνουμε **“Edit...”** στο **“velocity-inlet-large”** από το μενού που εμφανίζεται κάνοντας κλικ στην επιλογή **“Boundary Conditions”** που βρίσκεται στα αριστερά. Το παράθυρο που παρουσιάζεται στην οθόνη του υπολογιστή μας, φαίνεται παρακάτω στην Εικ.(5.28) καθώς γίνεται προβολή όλων των τιμών που πρέπει να εισαχθούν στις προκύπτουσες παραμέτρους. Ακολουθώντας ακριβώς τις υποδείξεις της Εικ.(5.28), είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην επόμενη καρτέλα που παρέχετε από το πρόγραμμα μέσω του ίδιου παραθύρου (**Velocity Inlet**), αυτή δηλαδή που έχει τίτλο **“Thermal”**.



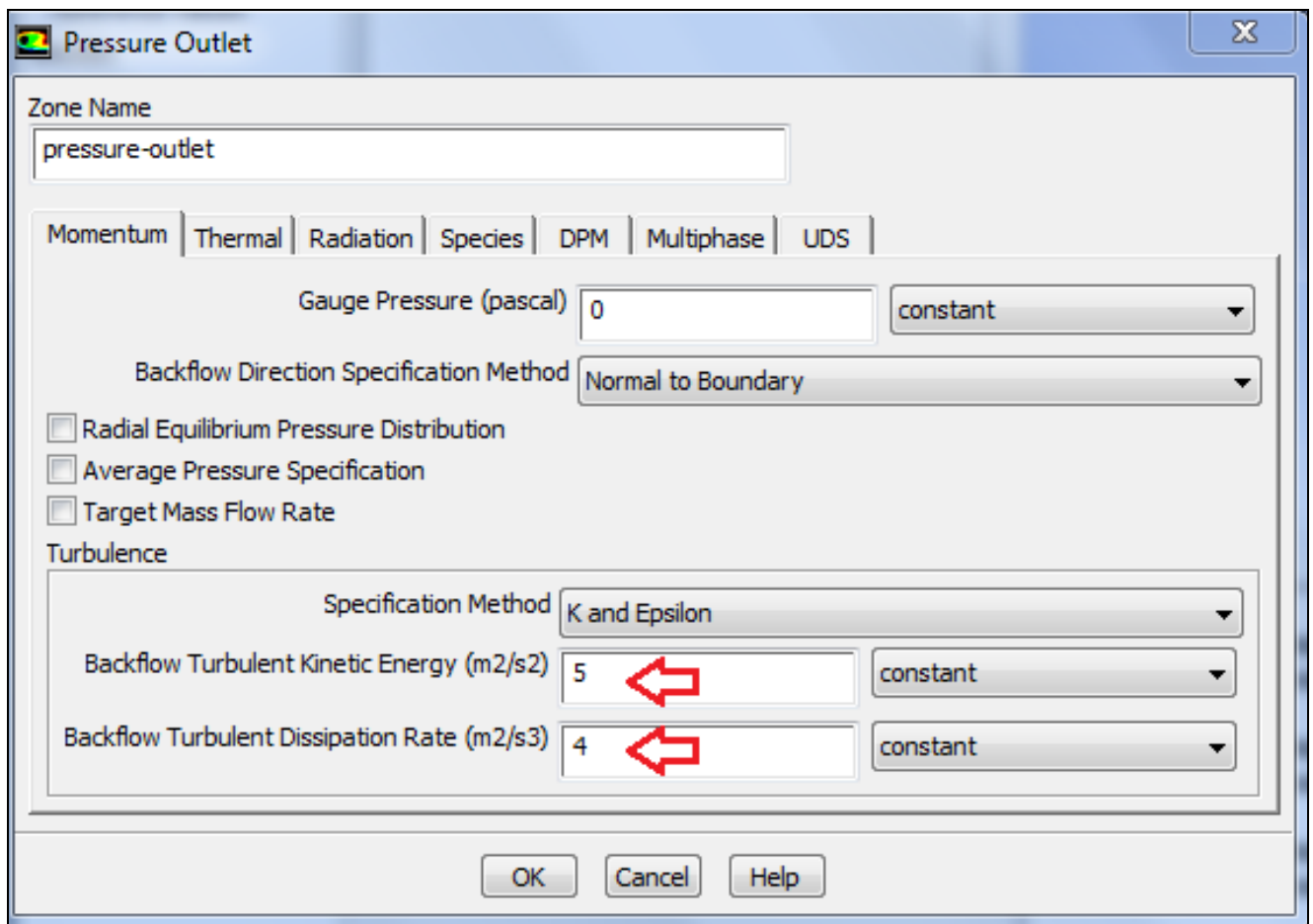
Εικόνα 5.28: Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (velocity-inlet-large)

Ανοίγοντας λοιπόν την καρτέλα αυτή, απλά πληκτρολογούμε μια τιμή θερμοκρασίας στο αντίστοιχο κελί **“Temperature (k)”**. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι όλες οι τιμές που εισάγονται δεν είναι αυθαίρετες αλλά προκαθορισμένες από την εκφώνηση του παραδείγματος όπως επιβεβαιώνεται και από την Εικ.(5.1)

Προκειμένου να εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες και για τα υπόλοιπα μέρη του αγωγού μας, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με παραπάνω, ήτοι:

- **“Boundary Conditions ~ pressure-outlet ~ Edit...”**

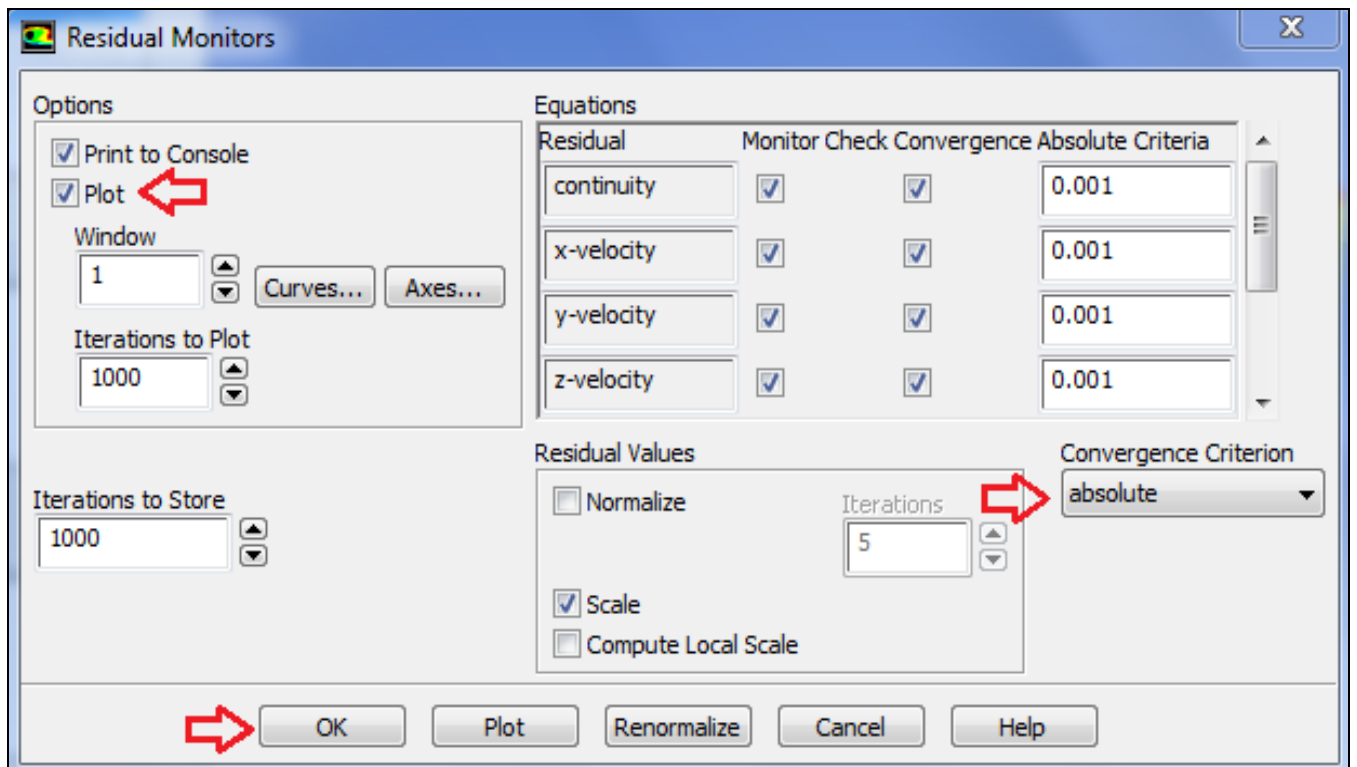
Στην Εικ.(5.29) φαίνονται αναλυτικά οι ρυθμίσεις όπου πραγματοποιούνται.



Εικόνα 5.29: Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (pressure-outlet)

6. Βήμα έκτο:

Έχοντας εισάγει με επιτυχία τιμές στις παραπάνω παραμέτρους, μπορούμε να συνεχίσουμε με την προετοιμασία του επιλυτή για την υπολογιστική ρευστοδυναμική προσομοίωση. Για να γίνει αυτό, θα ανοίξουμε την λίστα επιλογών **“Monitors ~ Residuals ~ Edit...”** από το μενού στα αριστερά. Όπως παρατηρείται και στην Εικ.(5.30), στο παράθυρο που εμφανίζεται μπορούμε να αλλάξουμε ορισμένες ρυθμίσεις αλλά και να δώσουμε κάποιες τιμές. Αρχικά, θα ενεργοποιήσουμε την επιλογή **“Plot”** και στη συνέχεια θα εισάγουμε **“Absolute”** στην ρύθμιση **“Convergence Criterion”**.

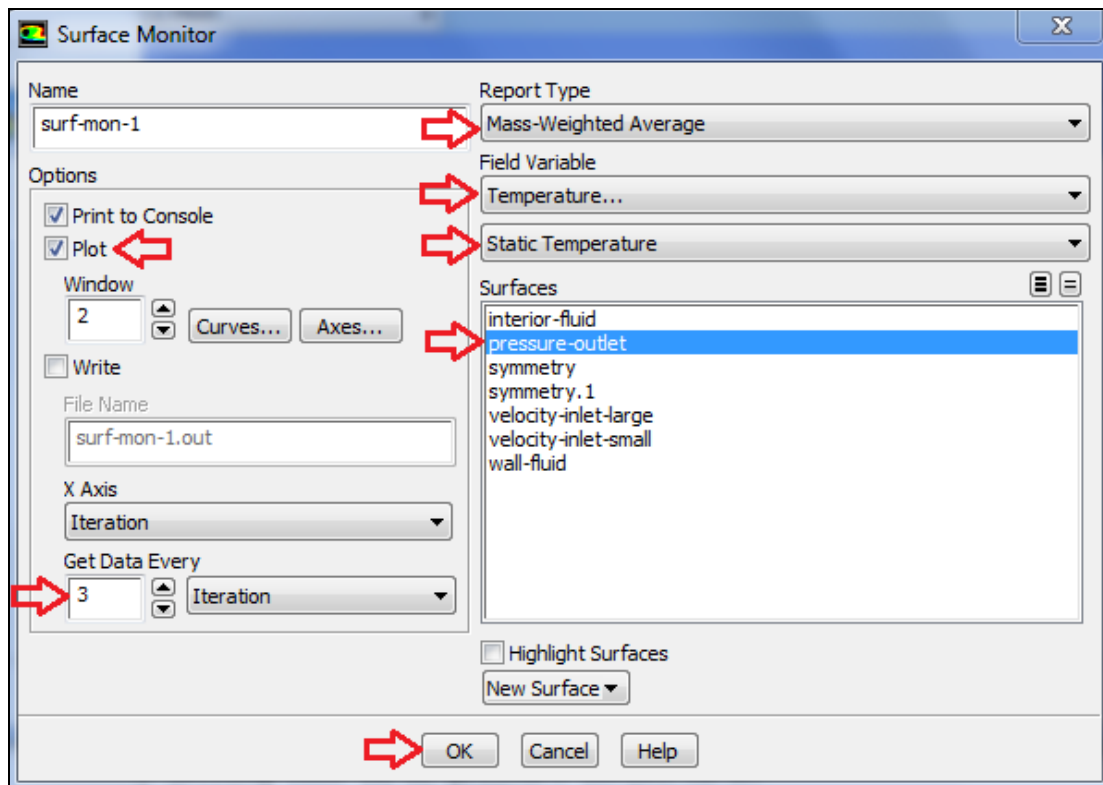


Εικόνα 5.30: Προετοιμασία επιλυτή.

Στο σημείο αυτό, θα δημιουργήσουμε μέσω της εντολής **“Monitors ~ Create”** έναν παρακολουθητή για την επιφάνεια **“Pressure-outlet”**. Οι αλλαγές που θα πραγματοποιήσουμε παρατηρούνται στην Εικ.(5.31) και αναλύονται παρακάτω, ήτοι:

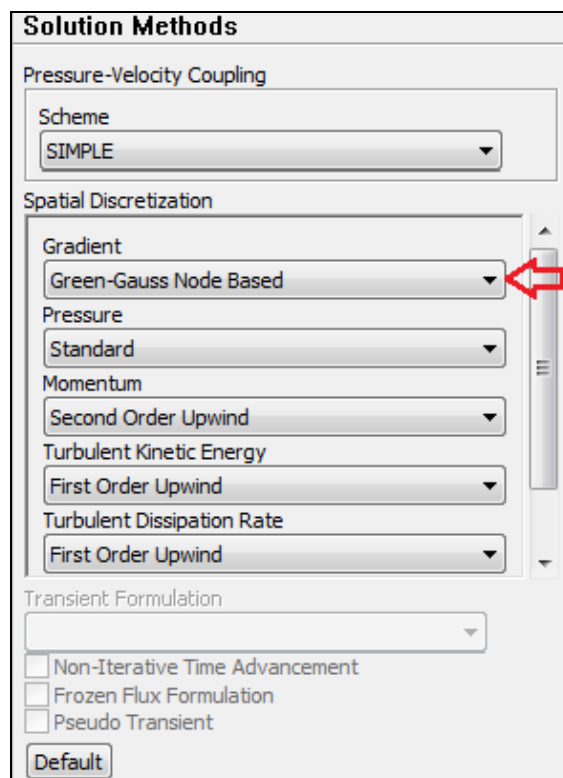
- Ενεργοποιούμε την επιλογή **“Plot”**.
- Θέτουμε στο κελί **“Get Data Every”** την τιμή 3. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται καταγραφή των δεδομένων μετά από κάθε τρεις επαναλήψεις.
- Επιλέγουμε **“Mass-Weighted Average”** από την λίστα **“Report Type”**.
- Επιλέγουμε **“Temperature”** και **“Static Temperature”** από την λίστα **“Field Variable”**.
- Ορίζουμε **“pressure-outlet”** στο κελί **“Surfaces”** και πατάμε **“OK”**

Αυτές οι ρυθμίσεις πραγματοποιούνται προκειμένου να γίνει μια αναλυτική καταγραφή και απεικόνιση των δεδομένων σχετικά με συγκεκριμένες παραμέτρους όπως είναι η θερμοκρασία.



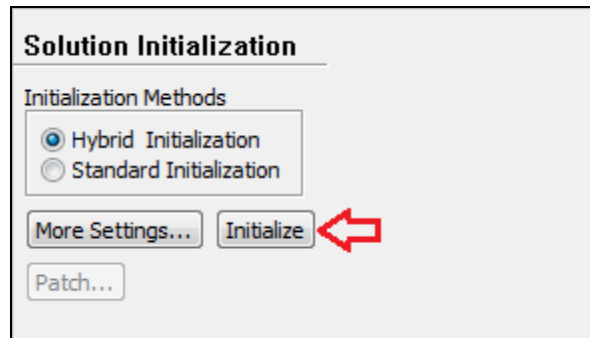
Εικόνα 5.31: Ρυθμίσεις παρακολούθησης επιφανειών.

Εν κατακλείδι, αλλάξουμε ορισμένες ρυθμίσεις σχετικά με την διαδικασία επίλυσης του προβλήματος όπως υποδεικνύεται στην Εικ.(5.32),



Εικόνα 5.32: Μέθοδοι επίλυσης προβλήματος.

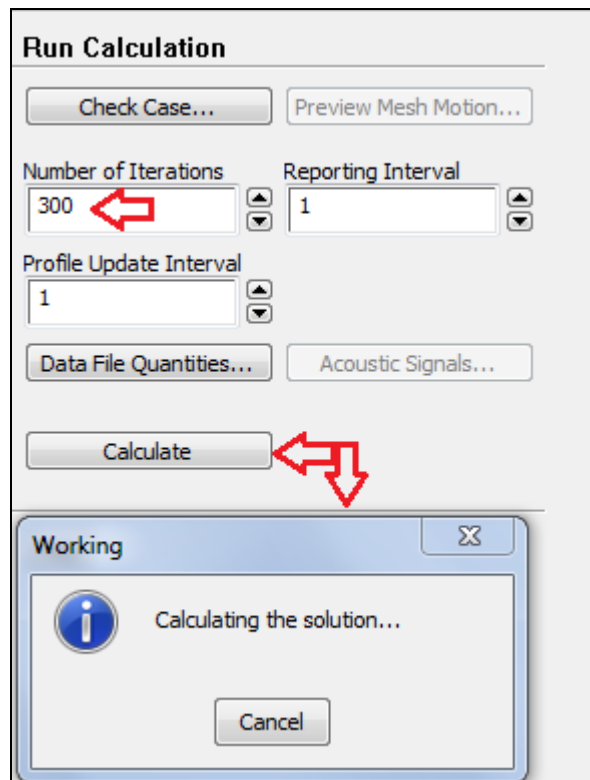
και δίνουμε εντολή εκκίνησης της διαδικασίας επίλυσης ακολουθώντας τις οδηγίες τις Εικ.(5.33).



Εικόνα 5.33: Αρχικοποίηση επίλυσης.

7. Βήμα έβδομο:

Ύστερα από όλες τις παραπάνω αλλαγές και ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν, είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την διαδικασία προσδιορισμού επίλυσης του προβλήματος. Στο μενού **“Run Calculation”** στα αριστερά, εισάγουμε έναν αριθμό στη θέση **“Number of Iterations”** όπου θα αντιπροσωπεύει τον αριθμό επαναλήψεων επίλυσης του προβλήματος. Το βήμα στο οποίο αναφερόμαστε, προβάλλεται στην Εικ.(5.34). Ύστερα, κλείνουμε την εφαρμογή **“ANSYS Fluent”** και μελετάμε τα αποτελέσματα.

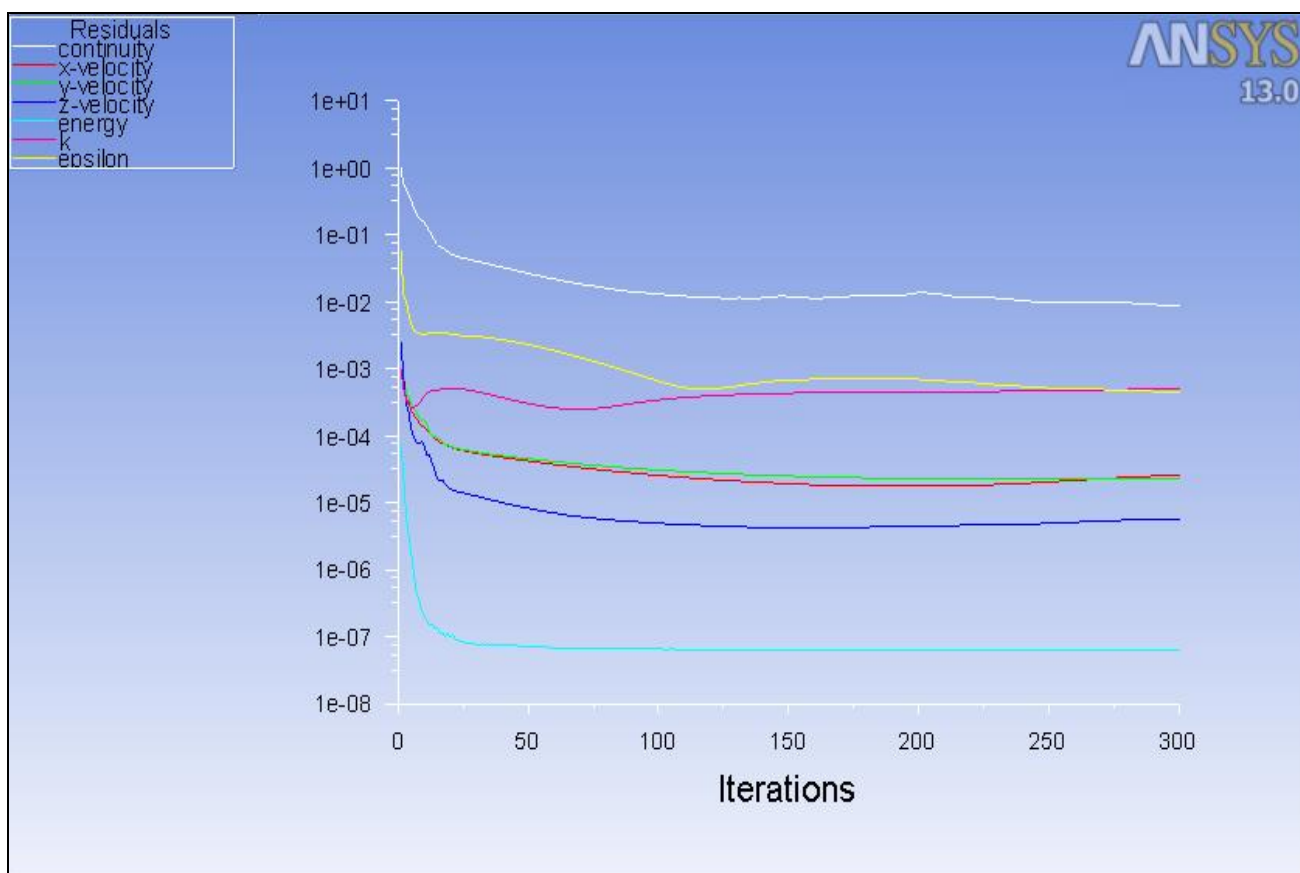


Εικόνα 5.34: Εκκίνηση επίλυσης του προβλήματος.

5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω προεργασίες, μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με την κονσόλα που χρησιμοποιούμε. Αυτό συμβαίνει, διότι, ανεξαρτήτως τον αριθμό επαναλήψεων που έχουμε ορίσει εμείς να γίνει επίλυση του προβλήματος, εάν τα αποτελέσματα παραμένουν ίδια τότε το πρόγραμμα σταματάει αυτόματα τον υπολογισμό.








Παρατηρώντας την Εικ.(5.35), βλέπουμε ότι υπάρχει ένας βαθμός σύγκλισης της λύσης. Αυτό συμβαίνει όταν το κριτήριο σύγκλισης για κάθε μεταβλητή έχει επιτευχθεί. Το κριτήριο αυτό ορίζει, ότι κάθε μεταβλητή θα πρέπει να καταλήξει σε μια τιμή όπου θα είναι μικρότερη από $1e-03$, εκτός από την μεταβλητή **“Energy”** καθώς ο δικός της περιορισμός είναι η τιμή $1e-06$.



Εικόνα 5.35: Αποτελέσματα επίλυσης του προβλήματος.

Στην συνέχεια, επιστρέφουμε στο αρχικό περιβάλλον εργασίας **“ANSYS Workbench”** έτσι ώστε να δούμε τις αλλαγές που έχουν επέλθει. Με την ίδια διαδικασία που περιγράψαμε στην αρχή το Κεφ.(5), ανοίγουμε την καρτέλα **“View”** στο πάνω μέρος και επιλέγουμε **“Files”**. Στην Εικ.(5.36) παρατηρούμε ότι έχουν δημιουργηθεί όλα εκείνα τα αρχεία που έχουμε χρησιμοποιήσει κατά την διεξαγωγή επίλυσης του προβλήματος αυτού. Αυτό μας βοηθάει, καθώς οποιαδήποτε

πληροφορία χρειαζόμαστε για κάποιο από αυτά τα αρχεία, παρέχεται εύκολα και γρήγορα.

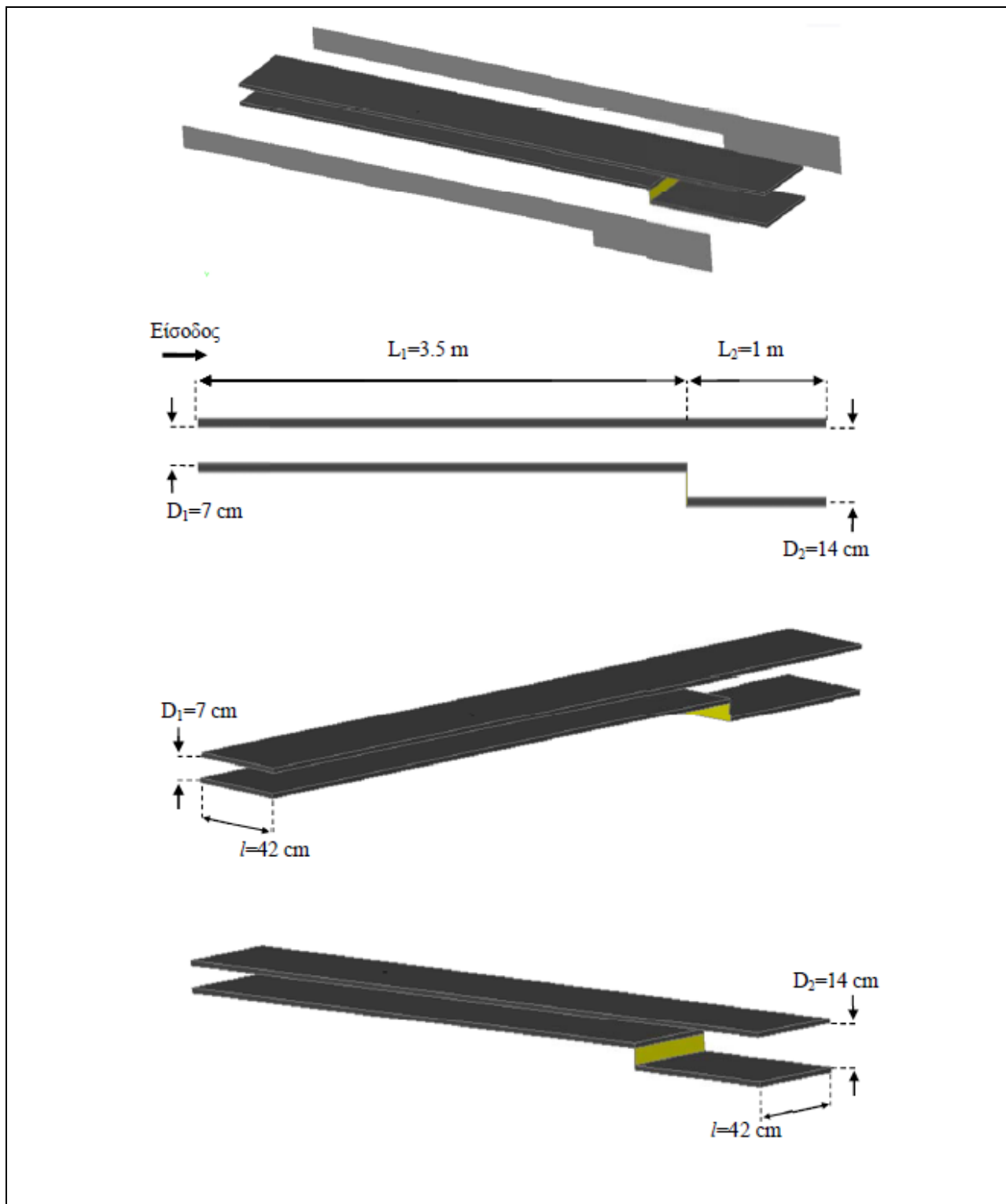
Files						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	Cell ID	Size	Type	Date Modified	Location
2	 Elbow-flow-analysis.wbpj		128 KB	ANSYS Project File	7/4/2014 2:15:19 μμ	C:\Users\George Lambadas\Desktop\Πτυχιακή Εργασία\ansys FLUENT workbench
3	 FFF.agdb	A2	16 KB	Geometry File	3/4/2014 11:28:56 ημ	C:\Users\George Lambadas\Desktop\Πτυχιακή Εργασία\ansys FLUENT workbench\Elbow-flow-analysis_files\dp0\FFF\DM
4	 FFF.1.msh	A3,A4	8 MB	Fluent Mesh File	3/4/2014 1:39:08 μμ	C:\Users\George Lambadas\Desktop\Πτυχιακή Εργασία\ansys FLUENT workbench\Elbow-flow-analysis_files\dp0\FFF\MECH
5	 FFF.mshdb	A3	1 MB	Mesh Database Files	3/4/2014 1:40:15 μμ	C:\Users\George Lambadas\Desktop\Πτυχιακή Εργασία\ansys FLUENT workbench\Elbow-flow-analysis_files\dp0\global\MECH
6	 FFF.1.set	A4	17 KB	FLUENT Model File	7/4/2014 1:32:23 μμ	C:\Users\George Lambadas\Desktop\Πτυχιακή Εργασία\ansys FLUENT workbench\Elbow-flow-analysis_files\dp0\FFF\Fluent
7	 FFF.1-1.cas.gz	A	3 MB	FLUENT Case File	7/4/2014 1:04:46 μμ	C:\Users\George Lambadas\Desktop\Πτυχιακή Εργασία\ansys FLUENT workbench\Elbow-flow-analysis_files\dp0\FFF\Fluent
8	 FFF.1-1-00300.dat.gz	A	7 MB	FLUENT Data File	7/4/2014 1:04:54 μμ	C:\Users\George Lambadas\Desktop\Πτυχιακή Εργασία\ansys FLUENT workbench\Elbow-flow-analysis_files\dp0\FFF\Fluent

Εικόνα 5.36: Προβολή αρχείων που δημιουργήθηκαν για την μελέτη και την επίλυση του προβλήματος.

6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΕΝΤΟΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάσθηκε αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται ένα πρόβλημα προσομοίωσης ροής εντός σωλήνα. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, θα μελετήσουμε και στη συνέχεια θα αντιμετωπίσουμε το παρών πρόβλημα ακολουθώντας την ίδια ιεραρχία διαδικασιών.

Αναλυτικότερα, στο παρών κεφάλαιο θα μελετήσουμε εκτενώς μια ροή η οποία λαμβάνει χώρα εντός μιας πρότυπης συσκευής και θα την προσομοιάσουμε. Η πειραματική αυτή συσκευή καλείται «Αεροσήραγγα» και η μελέτη της θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό **“ANSYS Fluent”**. Στην Εικ.(6.1) είναι δυνατών να παρατηρηθεί η γεωμετρικά μορφή που φέρει αυτή η συσκευή και γενικότερα οι διαστάσεις της.



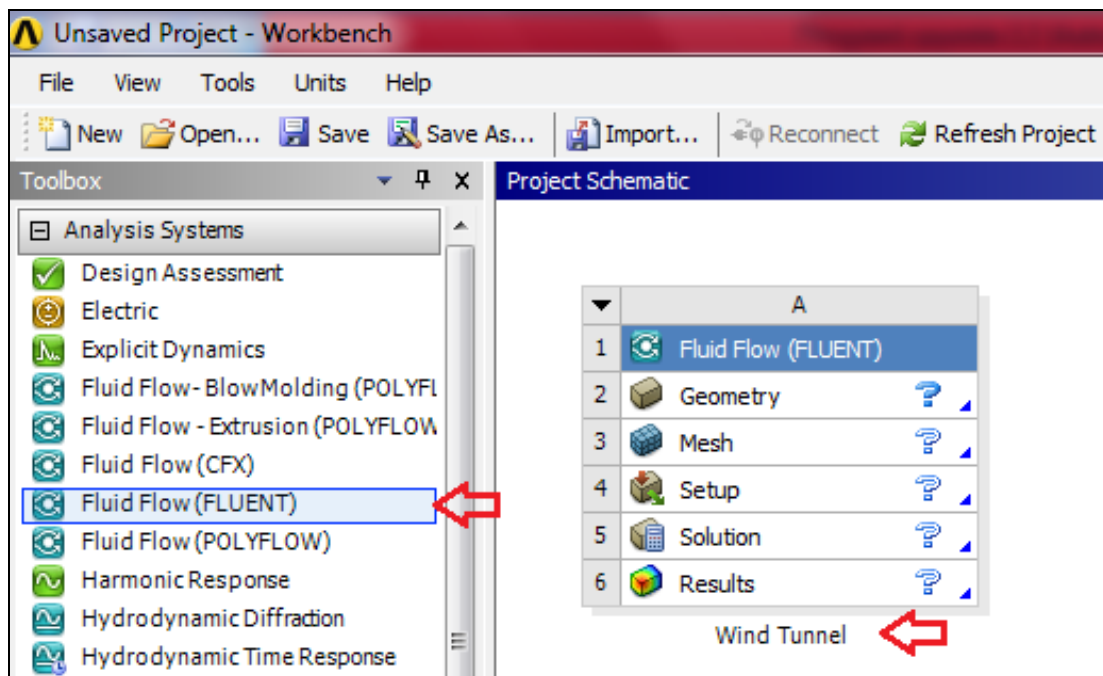
Εικόνα 6.1: Διαστάσεις πρότυπης πειραματικής συσκευής (Αεροσήραγγα).

6.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ FLUENT (ANSYS WORKBENCH)

Ανεξαρτήτως το πρόβλημα το οποίο μας έχει ανατεθεί να μελετήσουμε και να επιλύσουμε, οι εισαγωγικές διαδικασίες που πρέπει να ακολουθήσουμε και οι εισαγωγικές ρυθμίσεις που πρέπει να δώσουμε παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ τους. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, οι πορεία που θα ακολουθήσουμε προκειμένου να δημιουργήσουμε και να αναλύσουμε την ροή αυτή, θα είναι ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε και στο Κεφ.(5).

1. Βήμα πρώτο:

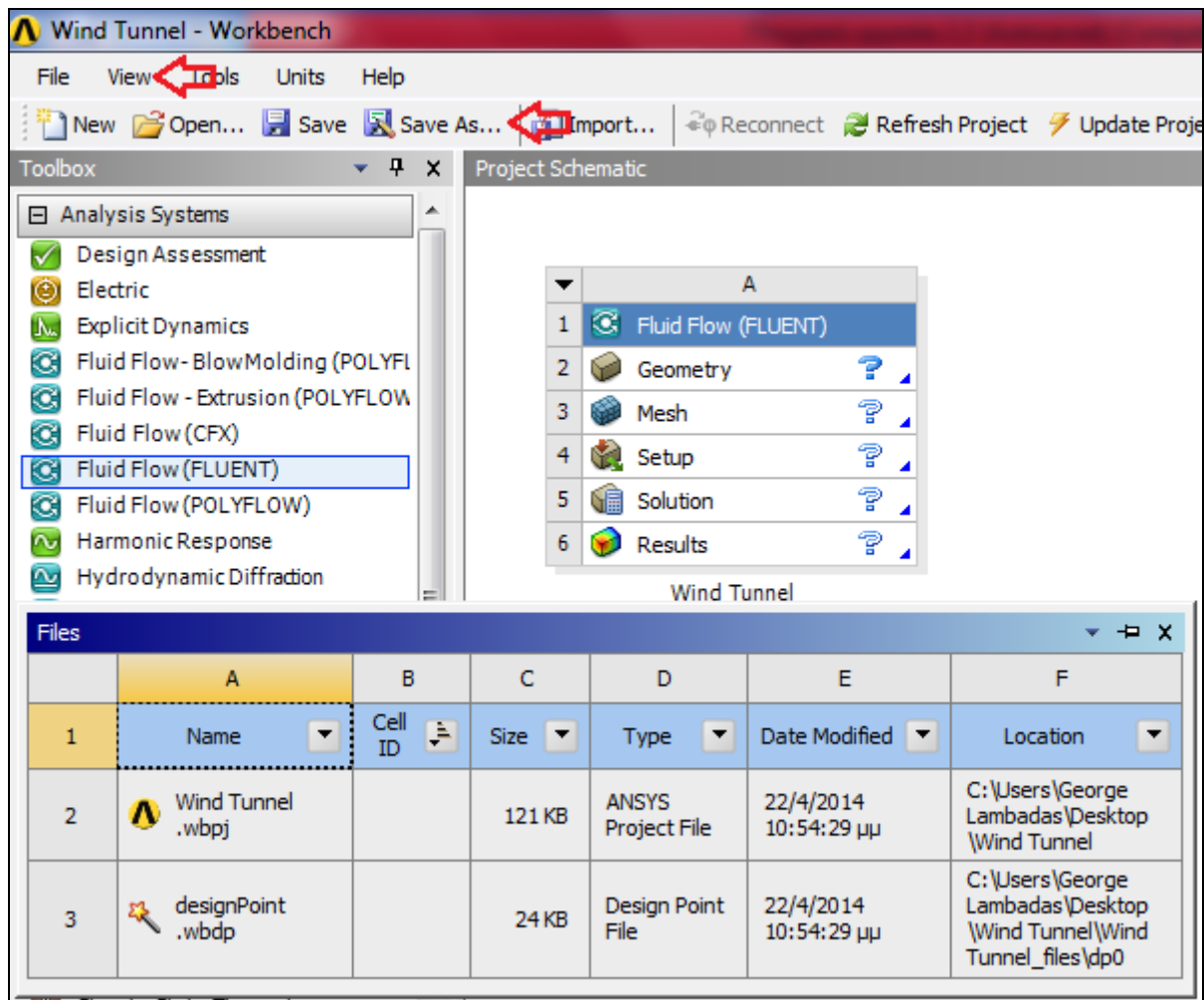
Αρχικά ανοίγουμε το πρόγραμμα **“AnsysWorkbench”** που βρίσκεται στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή μας μετά την εγκατάσταση όλου του λογισμικού και στη συνέχεια εισερχόμαστε στο περιβάλλον εργασίας του. Έχοντας πλέον εξοικειωθεί με το περιβάλλον αυτό, επιλέγουμε **“Fluid Flow (FLUENT)”** και δίνουμε τίτλο στο πρόβλημα μας όπως φαίνεται και στην Εικ.(6.2).



Εικόνα 6.2: Εισαγωγή ανάλυσης ροής και ονομασία προβλήματος.

2. Βήμα δεύτερο:

Στο βήμα αυτό θα ενεργοποιήσουμε την επιλογή **“Files”** από την καρτέλα **“View”** προκειμένου να έχουμε πλήρη εικόνα των αρχείων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση αυτή και ύστερα θα αποθηκεύσουμε τις αλλαγές αυτές όπως παρατηρείται και στην Εικ.(6.3). Η τοποθεσία όπου θα επιλέξουμε να αποθηκεύσουμε την ανάλυση αυτή επιλέγεται ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη.



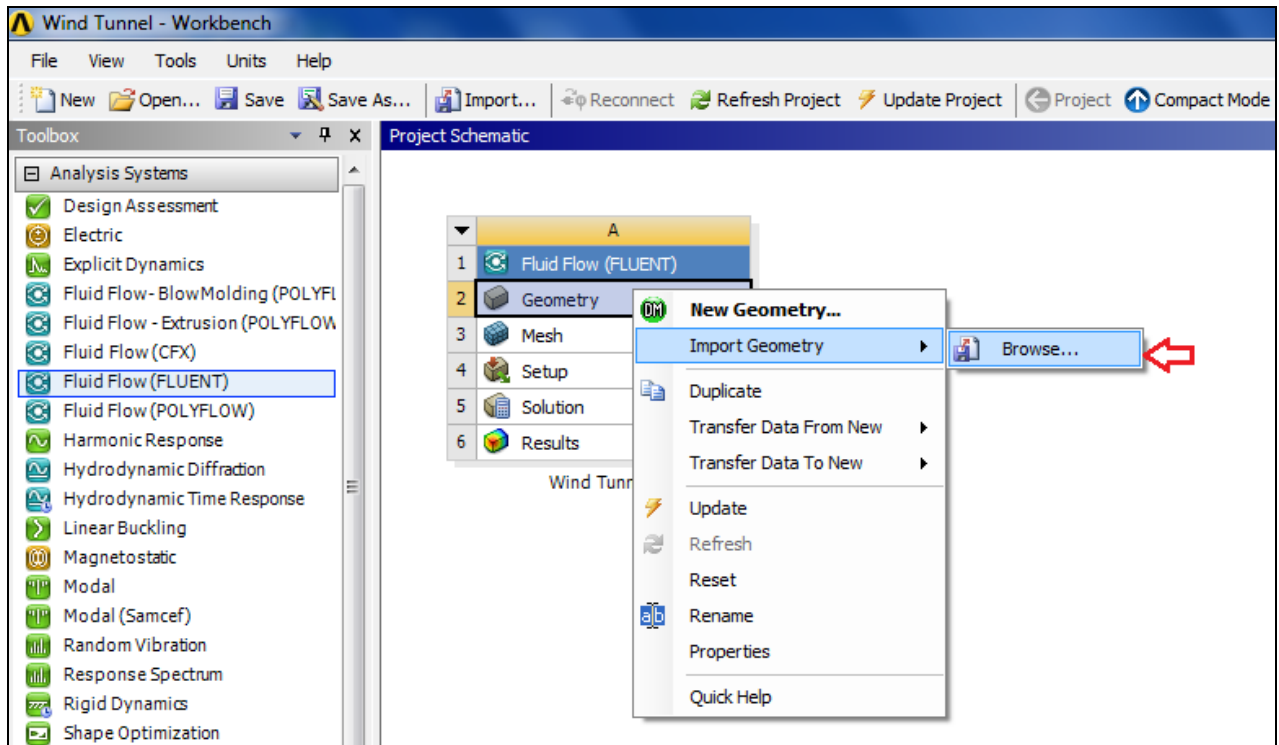
Εικόνα 6.3: Προβολή αρχείων και αποθήκευση ανάλυσης ροής.

6.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ANSYS DESIGN-MODELER

Έχοντας στην κατοχή μας το αρχείο γεωμετρίας της αεροσήραγγας που αναλύουμε, θα ακολουθήσουμε την γνωστή διαδικασία εισαγωγής γεωμετρίας στο λογισμικό **“ANSYS Fluent Workbench”**.

1. Βήμα πρώτο:

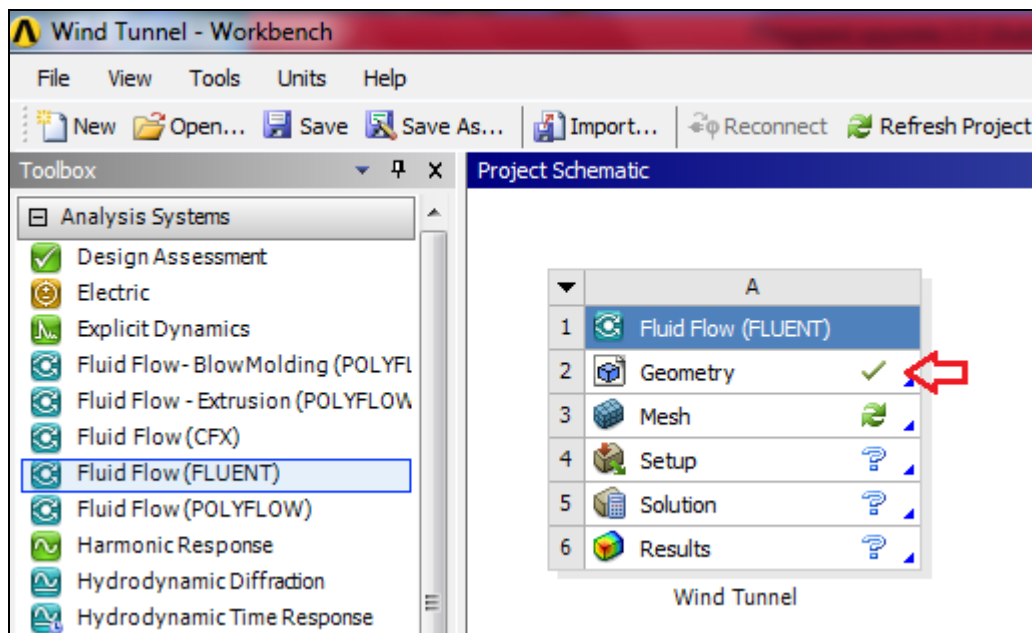
Κάνοντας δεξί κλικ στην επιλογή **“Geometry”**, από το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος, επιλέγουμε **“Import Geometry”** και στη συνέχεια εξερευνούμε τα αρχεία του υπολογιστή μας επιλέγοντας **“Browse”** έως ότου βρούμε το αρχείο γεωμετρίας που αναζητάμε. Στην Εικ.(6.4) υποδεικνύεται όλη η παραπάνω διαδικασία προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα.



Εικόνα 6.4: Εισαγωγή γεωμετρίας της αεροσήραγγας στο “ANSYS Fluent Workbench”.

2. Βήμα δεύτερο:

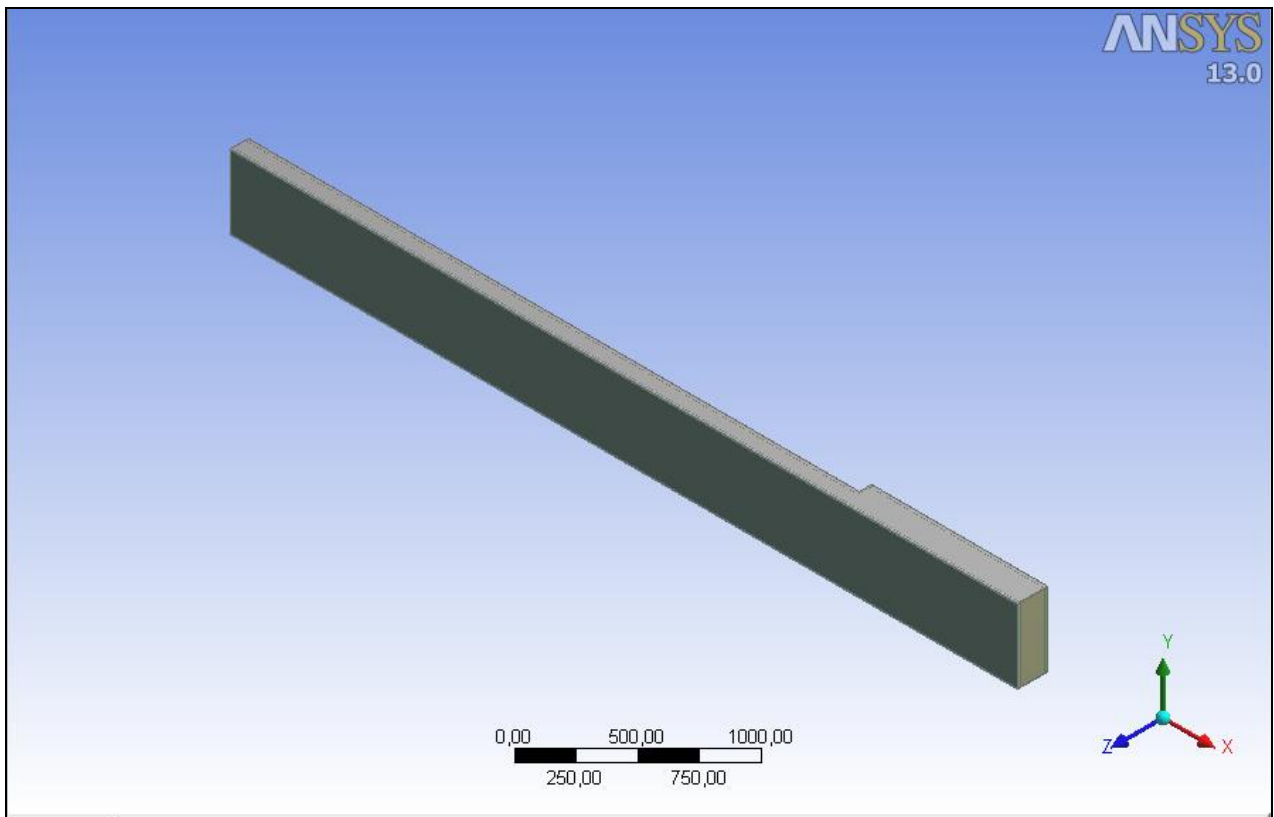
Φθάνοντας στο σημείο που φαίνεται στην Εικ.(6.5),σημαίνει ότι έχουμε ακολουθήσει σωστά την διαδικασία εισαγωγής γεωμετρίας καθώς το αρχείο που επιλέξαμε έχει γίνει αποδεκτό από το πρόγραμμα.



Εικόνα 6.5: Απεικόνιση επιτυχημένης εισαγωγής γεωμετρίας.

3. Βήμα τρίτο:

Στο σημείο αυτό ανοίγουμε το αρχείο γεωμετρίας που εισάγαμε από το **“ANSYS Fluent Workbench”** προκειμένου να λάβουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της αεροσήραγγας που μελετάμε. Στην Εικ.(6.6) προβάλλεται αναλυτικά η γεωμετρία της αεροσήραγγας αυτής μέσω του προγράμματος **“ANSYS Design-Modeler”**.



Εικόνα 6.6: Γεωμετρία αεροσήραγγας στο **“ANSYS Design-Modeler”**

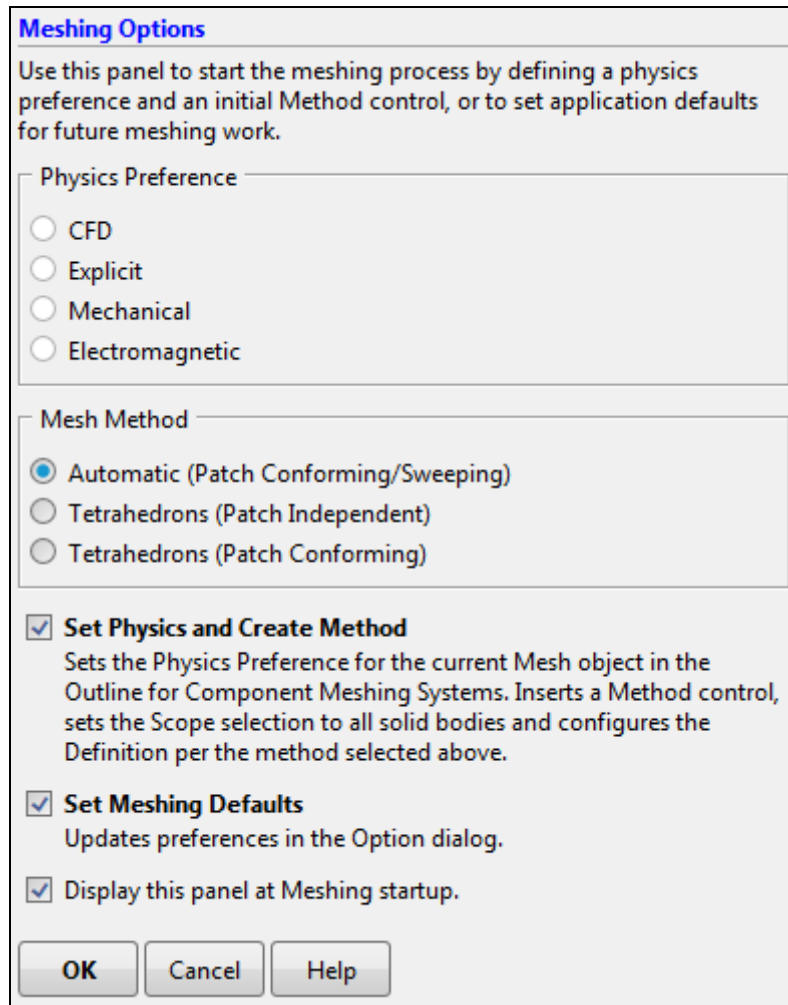
Τέλος, τερματίζουμε την εφαρμογή **“ANSYS Design-Modeler”** καθώς στο σημείο αυτό δεν απαιτείται να κάνουμε κάποια αλλαγή στην γεωμετρία της αεροσήραγγας και επιστρέφουμε στο αρχικό περιβάλλον εργασίας του **“ANSYS Fluent Workbench”**.

6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ANSYS MESHING.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εισαγωγής της γεωμετρίας της αεροσήραγγας, συνεχίζουμε την ανάλυση του προβλήματος ανοίγοντας την εφαρμογή **“Mesh”**.

1. Βήμα πρώτο:

Ανοίγοντας την εφαρμογή **“Mesh”** από το περιβάλλον εργασίας **“Workbench”**, εισάγουμε ορισμένες ρυθμίσεις προκειμένου να απλουστευθεί η μετέπειτα χρήση του προγράμματος. Οι ρυθμίσεις αυτές φαίνονται αναλυτικά στην Εικ.(6.7).



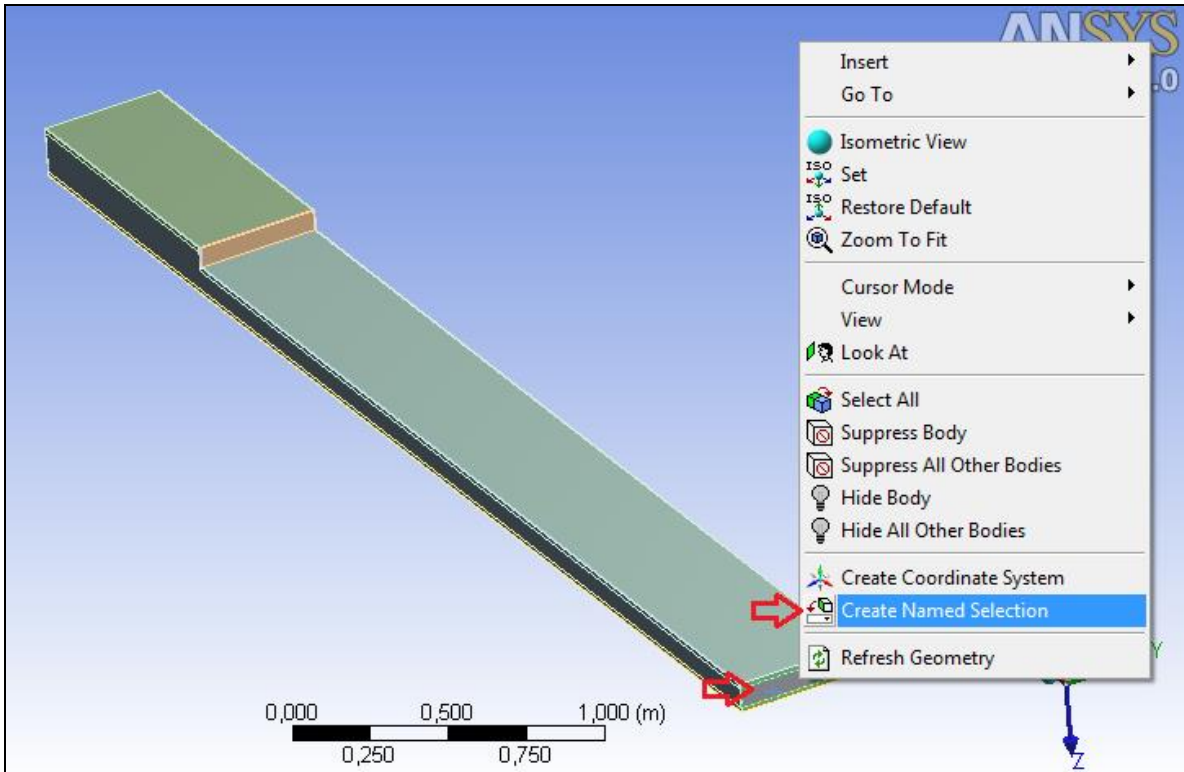
Εικόνα 6.7: Εισαγωγικές ρυθμίσεις εφαρμογής **“Mesh”**

2. Βήμα δεύτερο:

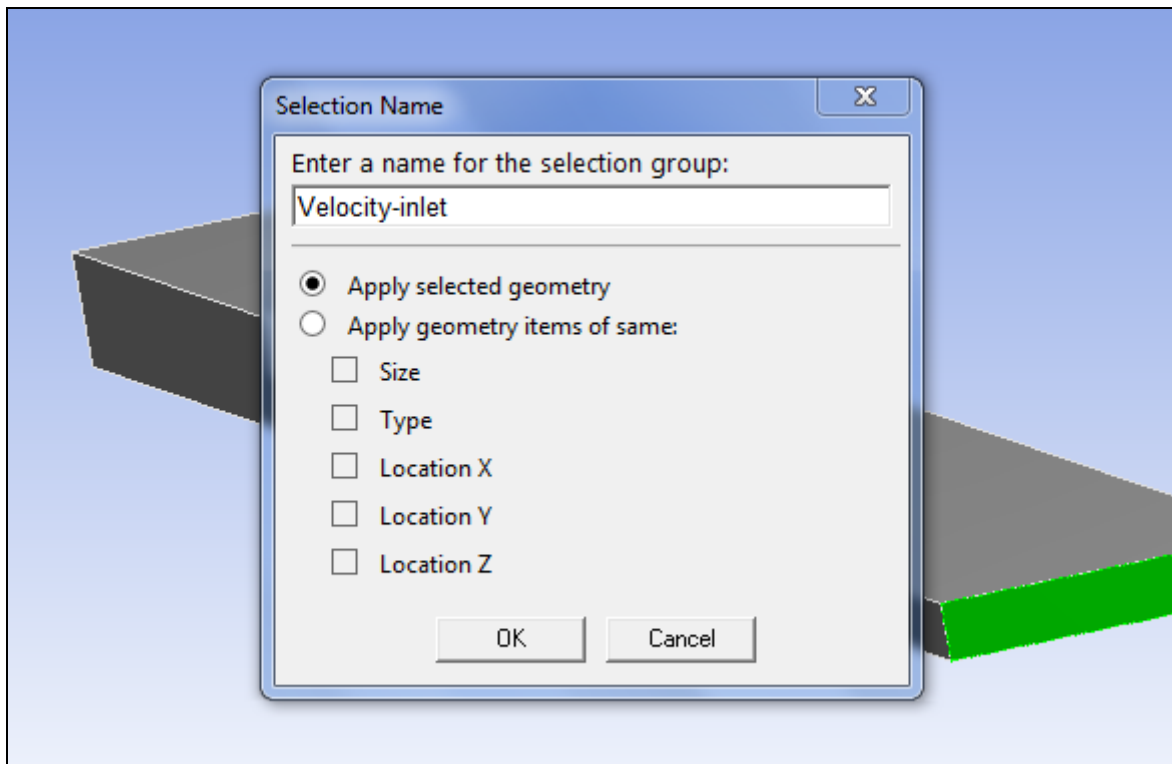
Καθώς η εφαρμογή αυτή είναι δυνατόν να παρουσιάσει επιπλοκές κατά τον χειρισμό της, είναι συνετό να εισάγουμε μία ονομασία σε κάθε είσοδο και έξοδο της αεροσήραγγας που μελετάμε. Οι ονομασίες που θα εισάγουμε είναι οι εξής:

- Μικρή είσοδος: **“Velocity-Inlet”**.
- Μεγάλη έξοδος: **“Pressure-Outlet”**.
- Τοιχώματα: **“Walls”**

Οι παραπάνω διαδικασία προβάλλεται στις Εικ.(6.8) και (6.9)



Εικόνα 6.8: Επιλογή επιφάνειας προς ονομασία.



Εικόνα 6.9: Ονομασία επιλεγμένης επιφάνειας.

3. Βήμα τρίτο:

Το βήμα αυτό θα χωριστεί σε δύο μέρη. Το πρώτο θα αφορά την υπολογιστική πλεγματοποίηση της αεροσήραγγας με απλές ρυθμίσεις χαμηλής ποιότητας και ακρίβειας, ενώ το δεύτερο θα αφορά την ίδια πλεγματοποίηση αλλά με ρυθμίσεις υψηλής ακρίβειας και ποιότητας.

Μέρος πρώτο:

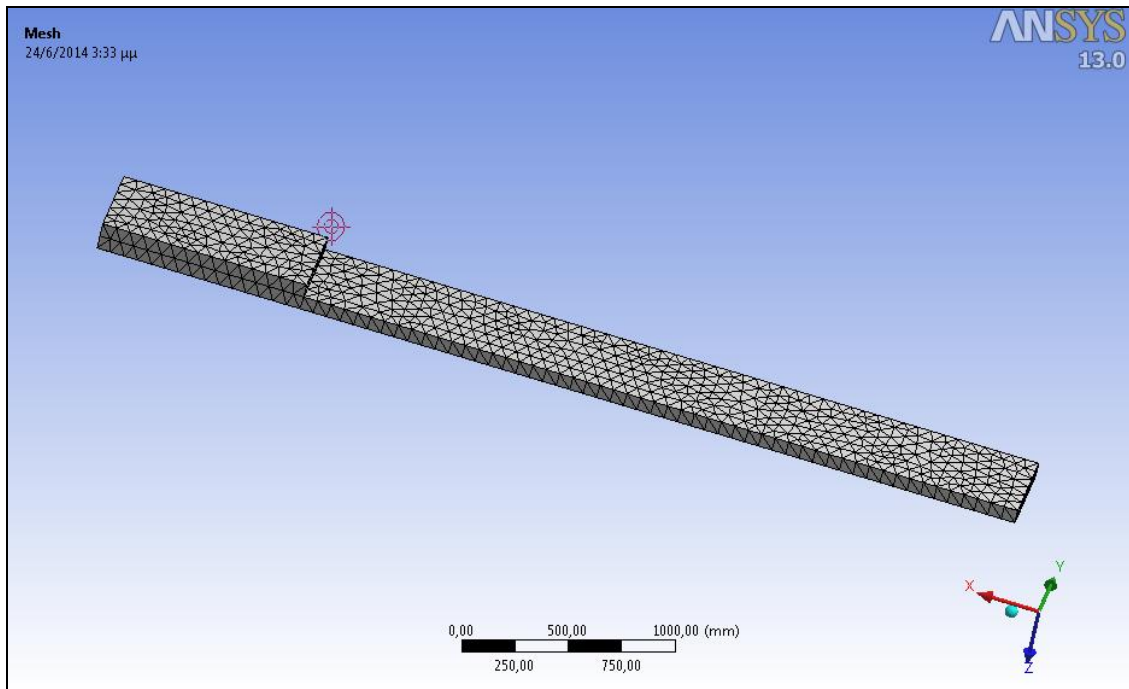
Προκειμένου να επιτύχουμε μια απλή και ομαλή πλεγματοποίηση, αλλάζουμε ορισμένες ρυθμίσεις από την καρτέλα επιλογών **“Details of Mesh”**. Αρχικά μετατρέπουμε την επιλογή **“Relevance Center”**, που βρίσκεται στο μενού **“Sizing”**, από **“Coarse”** σε **“Fine”**. Στη συνέχεια, εισάγουμε στην ρύθμιση **“Smoothing”** την επιλογή **“High”** και τέλος, πληκτρολογούμε την τιμή 20 στην παράμετρο **“Curvature Normal Angle”**.

Οι αλλαγές που πρέπει να πραγματοποιηθούν στην καρτέλα επιλογών που εμφανίζεται, υποδεικνύονται στην Εικ.(6.10)

Details of "Mesh"	
⊕	Defaults
⊖	Sizing
	Use Advanced Size Function On: Curvature
	Relevance Center Fine ←
	Initial Size Seed Active Assembly
	Smoothing High ←
	Transition Slow
	Span Angle Center Fine
	<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle 20,0 ° ←
	<input type="checkbox"/> Min Size Default (6,6034e-004 m)
	<input type="checkbox"/> Max Face Size Default (6,6034e-002 m)
	<input type="checkbox"/> Max Size Default (0,132070 m)
	<input type="checkbox"/> Growth Rate Default (1,20)
	Minimum Edge Length 5,e-003 m
⊖	Inflation
	Use Automatic Inflation Program Controlled ←
	Inflation Option Smooth Transition
	<input type="checkbox"/> Transition Ratio 0,272
	<input type="checkbox"/> Maximum Layers 5
	<input type="checkbox"/> Growth Rate 1,2
	Inflation Algorithm Pre

Εικόνα 6.10: Διαδικασία πλεγματοποίησης.

Στην Εικ.(6.11) είναι δυνατόν να παρατηρηθεί το αποτέλεσμα της πλεγματοποίησης μετά την εφαρμογή των αλλαγών που αναφέραμε παραπάνω.



Εικόνα 6.11: Υπολογιστική πλεγματοποίηση αεροσήραγγας χαμηλής ακρίβειας.

Μέρος δεύτερο:

Στο μέρος αυτό, θα ακολουθήσουμε ακριβώς την ίδια διαδικασία με το μέρος πρώτο αλλά θα προσθέσουμε ορισμένες ρυθμίσεις επιπλέον ούτως ώστε η πλεγματοποίηση μας να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Αρχικά, αφήνουμε τις επιλογές **“Relevance Center”**, που βρίσκεται στο μενού **“Sizing”**, ως έχει (**“Fine”**) και την ρύθμιση **“Smoothing”** επίσης (**“High”**) και τέλος, πληκτρολογούμε την τιμή 10 στην παράμετρο **“Curvature Normal Angle”**.

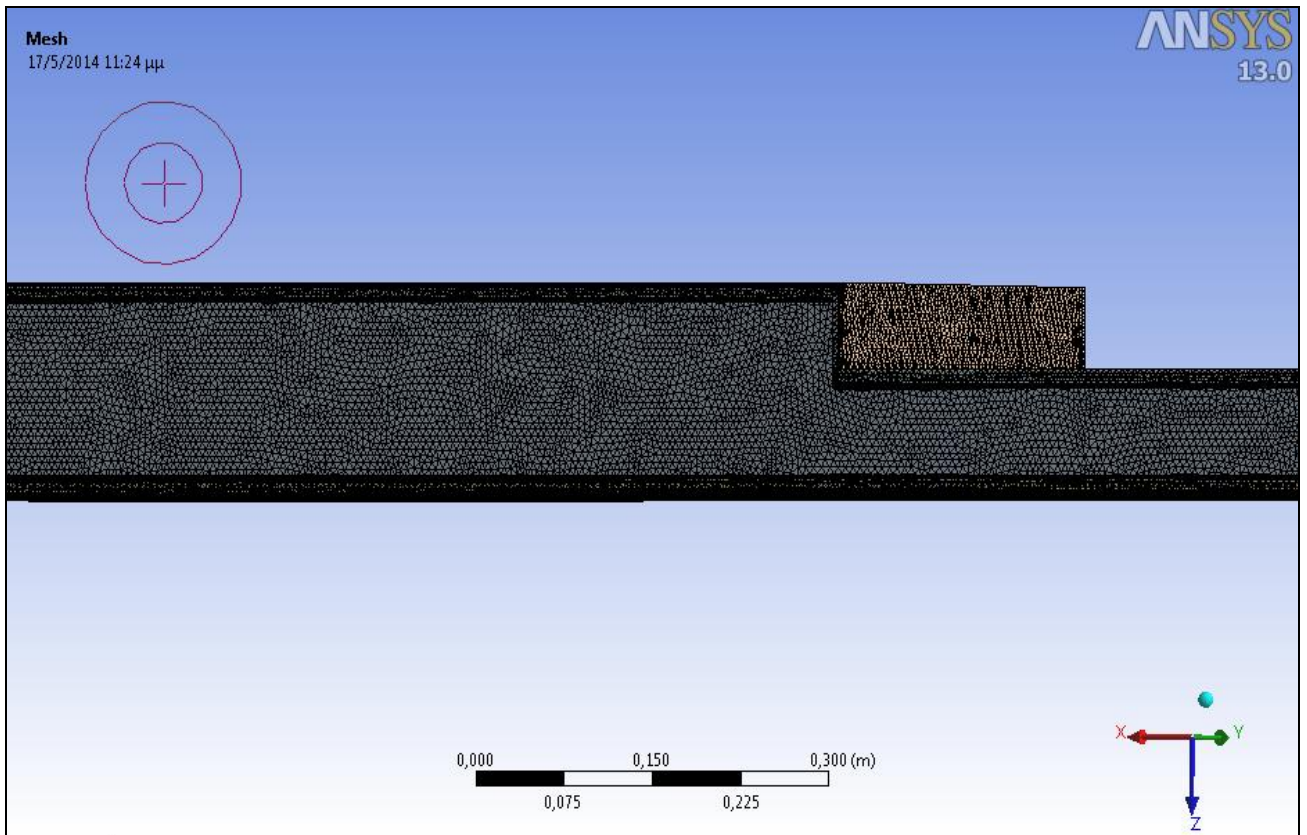
Παρατηρώντας την καρτέλα **“Outline”** βλέπουμε μια νέα επιλογή όπου λέγεται **“Body Size”** και επιλέγοντάς την, εισάγουμε στο κελί **“Element Size”** την τιμή $5e-3$. Στις ρυθμίσεις του **“Mesh”**, **“Inflation”** εισάγουμε **“Program Controlled”** στο κελί **“Use Automatic Inflation”**. Τέλος επιλέγουμε **“Update”** από τις συντομεύσεις στο πάνω μέρος προκειμένου να γίνουν αποδεκτές οι αλλαγές που πραγματοποιήσαμε.

Οι νέες αλλαγές που πρέπει να πραγματοποιηθούν στην καρτέλα επιλογών που εμφανίζεται, υποδεικνύονται στην Εικ.(6.12)

Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	5,e-003 mm
Behavior	Soft
Growth Rate	Default

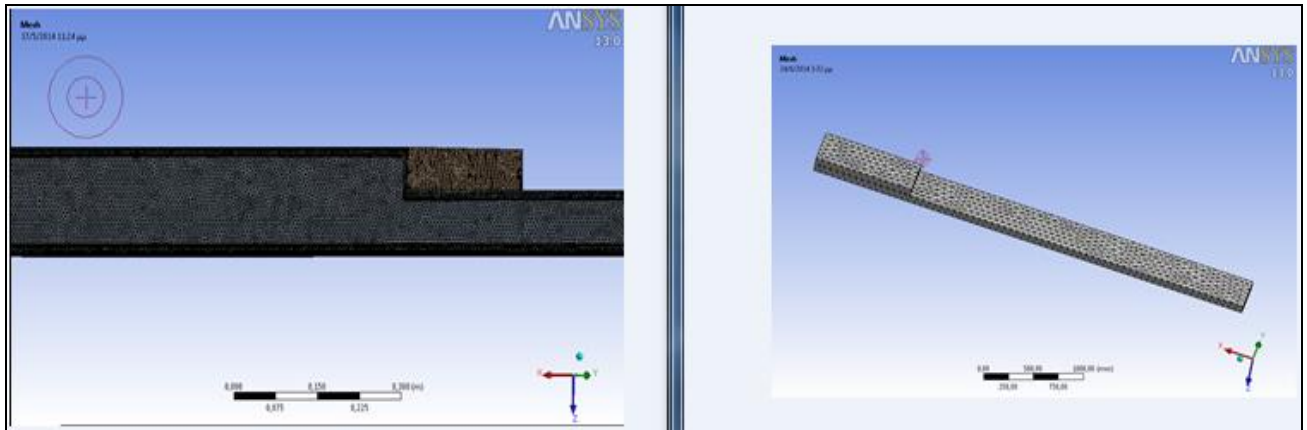
Εικόνα 6.12: Εισαγωγή ρυθμίσεων για αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας.

Στην Εικ.(6.13) είναι δυνατόν να παρατηρηθεί το αποτέλεσμα της πλεγματοποίησης μετά την εφαρμογή των νέων αλλαγών που προαναφέραμε.



Εικόνα 6.13: Υπολογιστική πλεγματοποίηση αεροσήραγγας υψηλής ακρίβειας.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο αυτών περιπτώσεων πλεγματοποίησης, παρατηρούμε ότι μέσω της διαδικασίας “**Meshing**”, ο χρήστης έχει μεγάλο εύρος επιλογών όσο αναφορά το επίπεδο ακρίβειας. Παρατηρώντας την Εικ.(6.14) καταλαβαίνουμε ότι όσο πιο απαιτητικές είναι οι ρυθμίσεις που εισάγουμε στο πρόγραμμα τόσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα θα χρειαστεί να περάσει προκειμένου να λάβουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Κλείνοντας, είναι συνετό να τονιστεί, ότι οι ρυθμίσεις υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας παρέχουν στο χρήστη μια πιο ομαλή απεικόνιση των μεγεθών πίεσης, ταχύτητας τύρβης κλπ. με αποτέλεσμα να απλουστεύεται η διαδικασία διεξαγωγής συμπερασμάτων.



Εικόνα 6.14: Συσχέτιση αποτελεσμάτων υψηλής και χαμηλής ακρίβειας.

6.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ANSYS FLUENT

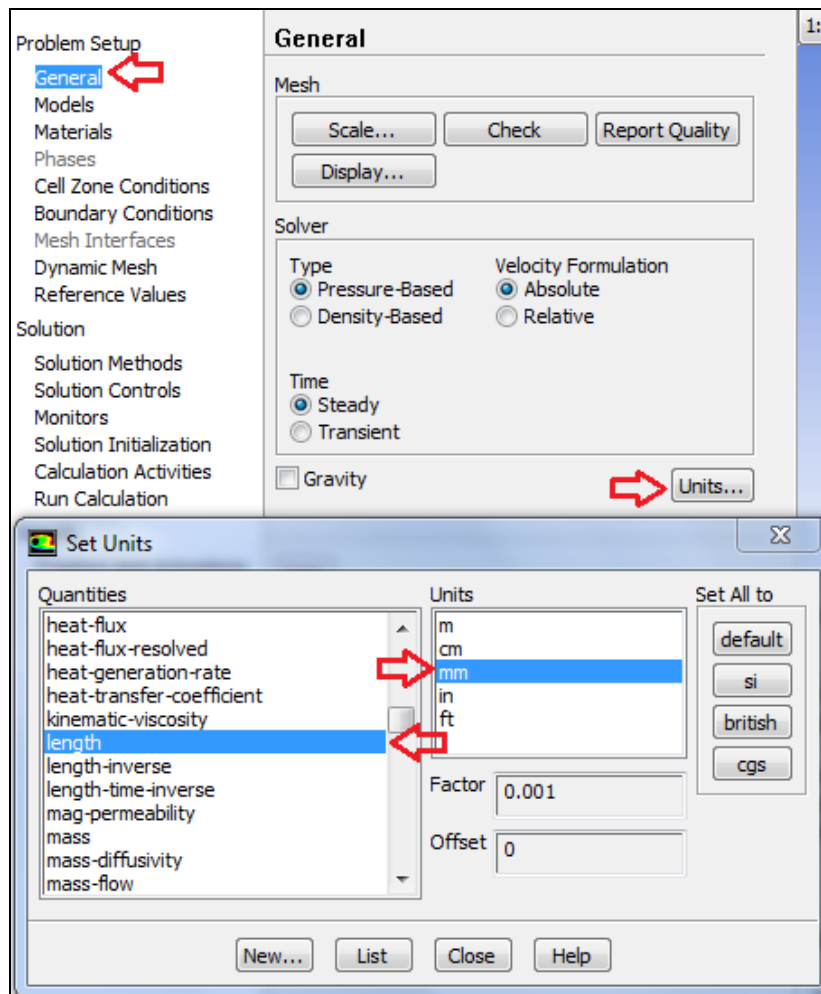
Ύστερα από την επιτυχημένη πλεγματοποίηση της αεροσήραγγας μέσω της εφαρμογής **“Mesh”**, θα πραγματοποιηθεί μια υπολογιστική ρευστοδυναμική ανάλυση (CFD). Η ανάλυση αυτή επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την εφαρμογή **“ANSYS Fluent”** που βρίσκεται στο περιβάλλον εργασίας **“Workbench”** και εξετάζεται στα παρακάτω βήματα.

1. Βήμα πρώτο:

Θέτοντας σε λειτουργία την εφαρμογή **“ANSYS Fluent”** από το περιβάλλον εργασίας **“ANSYS Workbench”**, εμφανίζεται στην οθόνη μας το πρόγραμμα **“ANSYS Launcher”** μέσω του οποίου μπορούμε να δώσουμε κάποιες εισαγωγικές ρυθμίσεις βασιζόμενες στις προτιμήσεις του χρήστη. Στην προκειμένη περίπτωση δεν χρειάζεται να αλλάξουμε καμία ρύθμιση οπότε συνεχίζουμε την φόρτωση της εφαρμογής κλείνοντας το πρόγραμμα **“ANSYS Launcher”**.

2. Βήμα δεύτερο:

Έχοντας πραγματοποιήσει επιτυχημένη εκκίνηση του **“ANSYS Fluent”**, προτεραιότητα έχει, ο καθορισμός των μονάδων με τις οποίες θα γίνεται η μελέτη της ροής εντός της αεροσήραγγας. Η μονάδες μήκους με τις οποίες θα εργαστούμε στο πρόγραμμα αυτό θα είναι *χιλιοστά (mm)* και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται ο καθορισμός αυτός, υποδεικνύεται αναλυτικά στην Εικ.(6.15).



Εικόνα 6.15: Εισαγωγή μονάδων μέτρησης μήκους.

Στο σημείο αυτό είναι συνετό να πραγματοποιήσουμε ένα έλεγχο πλεγματοποίησης, όπως φαίνεται στην Εικ.(6.16), προκειμένου να εξετάσουμε την υπολογιστική ικανότητα της πλατφόρμας μας.

```

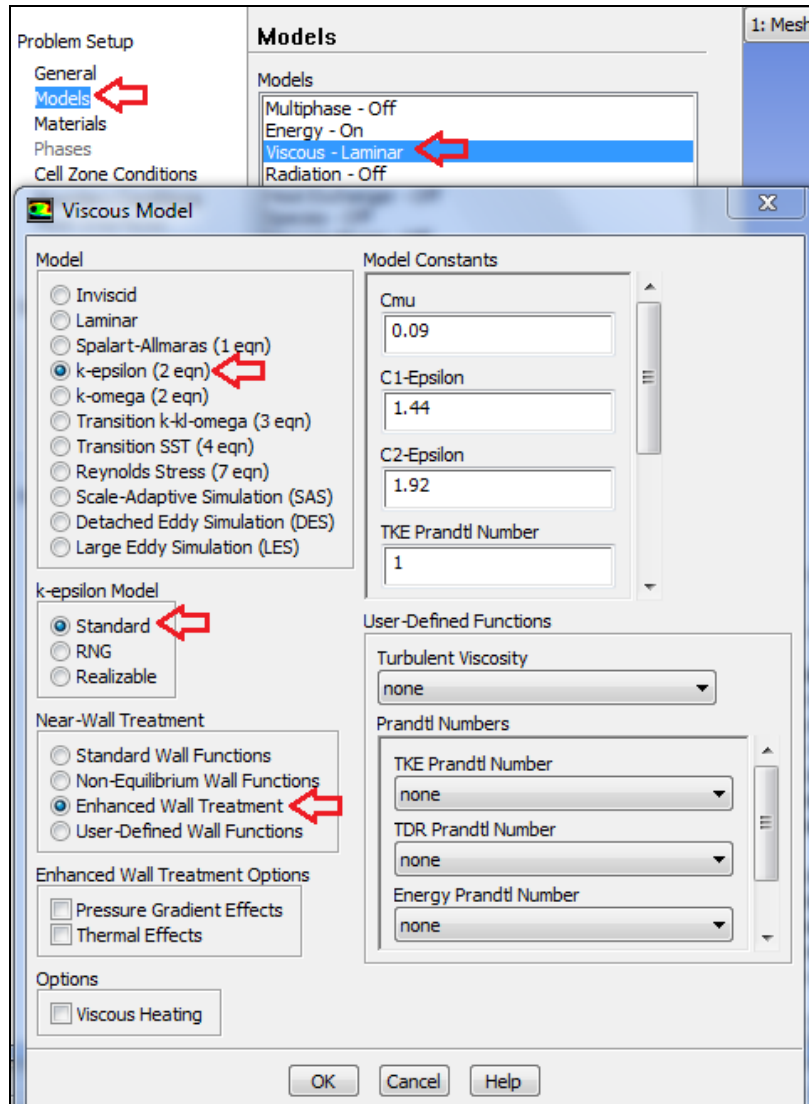
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = 8.029969e+00, max (m) = 1.252997e+01
  y-coordinate: min (m) = -4.200000e-01, max (m) = 1.793416e-10
  z-coordinate: min (m) = 1.409809e+00, max (m) = 1.549809e+00
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 2.433747e-05
  maximum volume (m3): 3.217125e-04
  total volume (m3): 1.617001e-01
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 3.308798e-04
  maximum face area (m2): 5.866298e-03
Checking mesh.....
Done.

```

Εικόνα 6.16: Έλεγχος πλεγματοποίησης στο “ANSYS Fluent”.

3. Βήμα τρίτο:

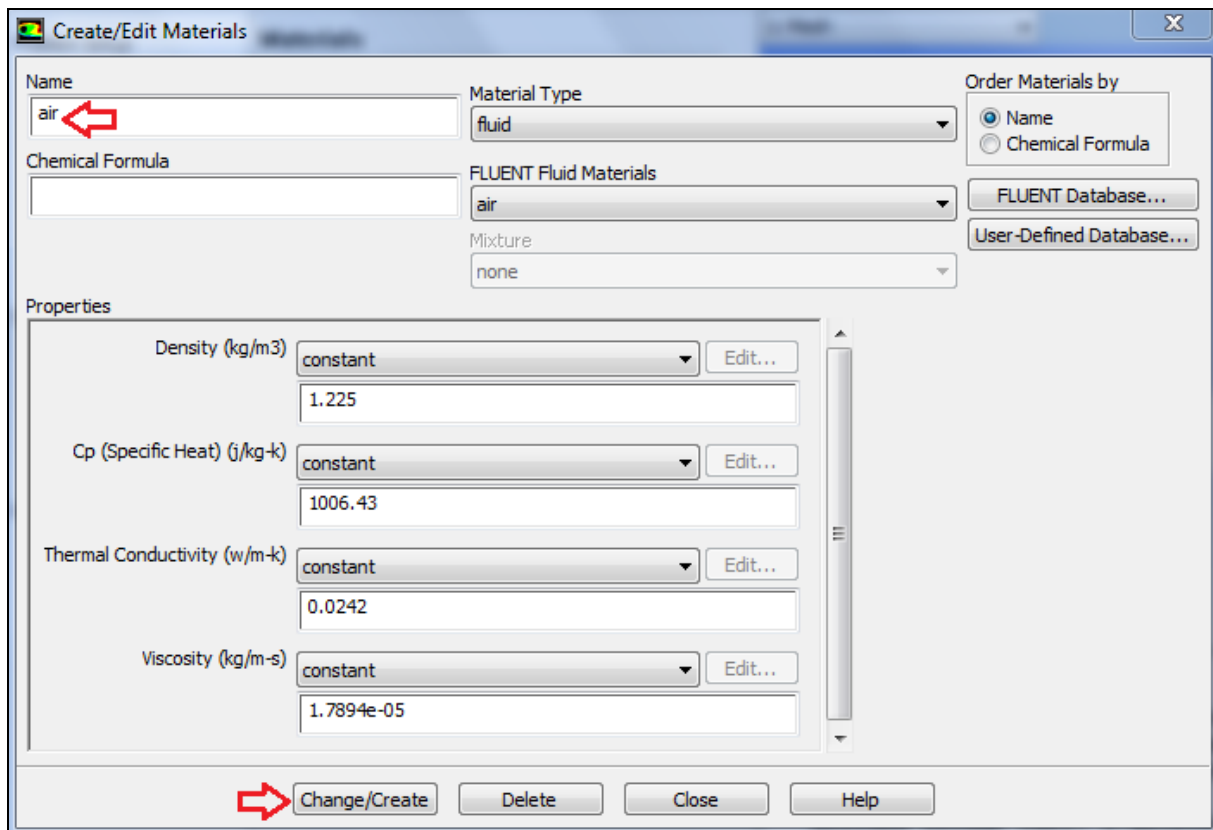
Στο βήμα αυτό θα μοντελοποιήσουμε την προσομοίωσή μας επιλέγοντας **“Models”** από την λίστα επιλογών στα αριστερά. Αρχικά ενεργοποιούμε τις επιλογές **“Energy Equation”** και **“k-epsilon (2eqn)”** και στη συνέχεια τις επιλογές **“Standard”** και **“Enhanced Wall Treatment”** όπως ακριβώς υποδεικνύεται στην Εικ.(6.17) . Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια πιο απλή επεξεργασία και μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αυτής.



Εικόνα 6.17: Ρυθμίσεις μοντελοποίησης και προσομοίωσης της ροής.

4. Βήμα τέταρτο:

Στο σημείο αυτό επιλέγουμε **“Materials ~ Fluid ~ Create/Edit...”** έτσι ώστε να καθορίσουμε τα υλικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση αυτής της ροής. Στο μενού με τις επιλογές που εμφανίζεται, πραγματοποιούμε ορισμένες αλλαγές. Στην Εικ.(6.18) παρατηρούνται αναλυτικά οι αλλαγές αυτές οι οποίες λαμβάνουν χώρα.

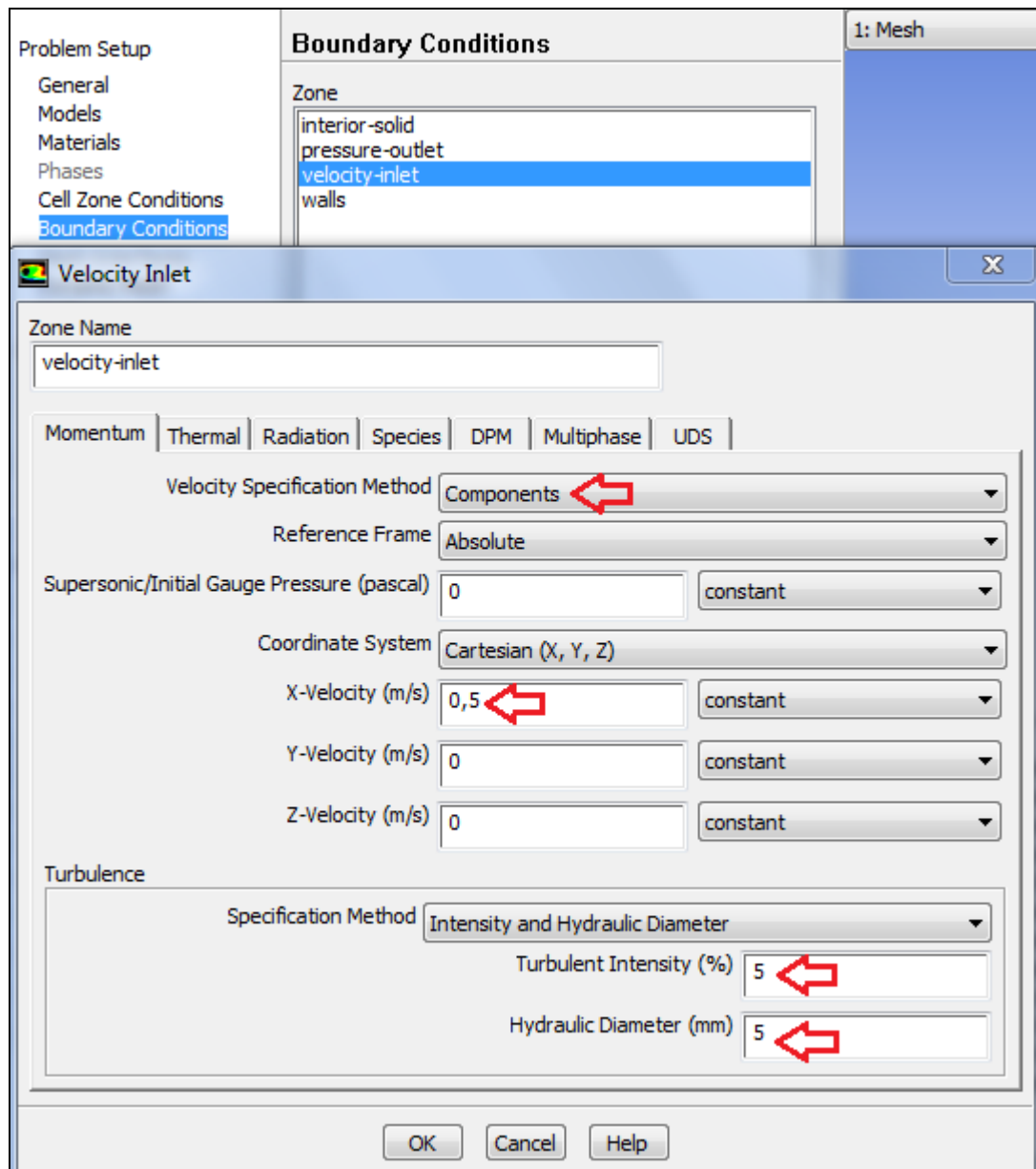


Εικόνα 6.18: Καθορισμός στοιχείου (αέρας) για τη μελέτη της ροής και εισαγωγή τιμών σε βασικές παραμέτρους.

Αρχικά παρατηρούμε ότι ορίζεται ο αέρας σαν το ρευστό που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθεί η μελέτη ροής εντός της συγκεκριμένης αεροσήραγγας. Στη συνέχεια απαιτείται ο καθορισμός ορισμένων παραμέτρων όπου θα χαρακτηρίζουν του ρευστό αυτό, όπως παρουσιάζεται στην Εικ.(6.18). Οι τιμές όμως όπου πρέπει να δοθούν, είναι ήδη γνωστές καθώς παρέχονται από το πρόγραμμα αυτόματα. Αυτό συμβαίνει, διότι η μελέτη πραγματοποιείται κάτω από ιδανικές συνθήκες οπότε ανεξαρτήτως του ρευστού, που θα χρησιμοποιούσαμε, οι τιμές των παραμέτρων θα ήταν προκαθορισμένες.

5. Βήμα πέμπτο:

Ύστερα από την επιτυχημένη ολοκλήρωση των παραπάνω επεξεργασιών, είναι σημαντικό να διαμορφώσουμε τις οριακές συνθήκες των κελιών. Εισερχόμεστε λοιπόν στο μενού επεξεργασίας των οριακών συνθηκών και πραγματοποιούμε ορισμένες τροποποιήσεις όπως προβάλλεται στην Εικ.(6.19).



Εικόνα 6.19: Επεξεργασία συνοριακών συνθηκών (**Velocity-inlet**)

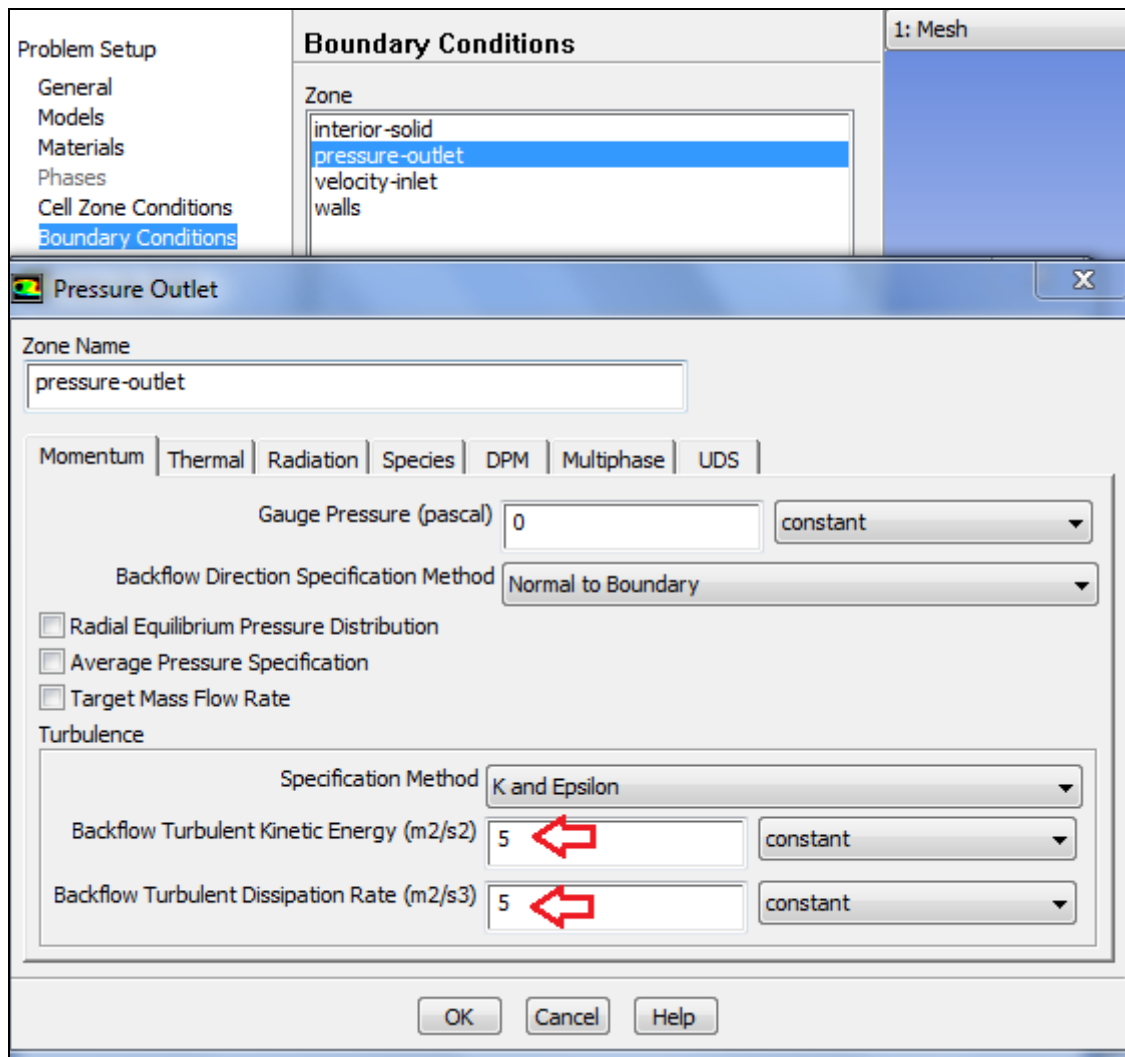
Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως οι τιμές εισάγονται ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη και τους πειραματισμούς που επιθυμεί να πραγματοποιήσει. Σε αυτήν την περίπτωση, οι τιμές που επιλέγουμε απεικονίζονται στις παραπάνω εικόνες.

6. Βήμα έκτο:

Σε αυτό το βήμα δίνουμε ιδιαίτερη προσοχή καθώς ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών είναι πολύ σημαντικός για την μετέπειτα πορεία της μελέτης μας.

Αρχικά επιλέγουμε **“Boundary Conditions”** από το μενού στα αριστερά και στην συνέχεια επιλέγουμε την επιφάνεια με όνομα **“Velocity-Inlet”** ούτως ώστε να εισάγουμε ορισμένες ρυθμίσεις. Στην Εικ.(6.20) παρατηρείται ολόκληρη η παραπάνω διαδικασία καθώς και όλες οι αλλαγές που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Ωστόσο,

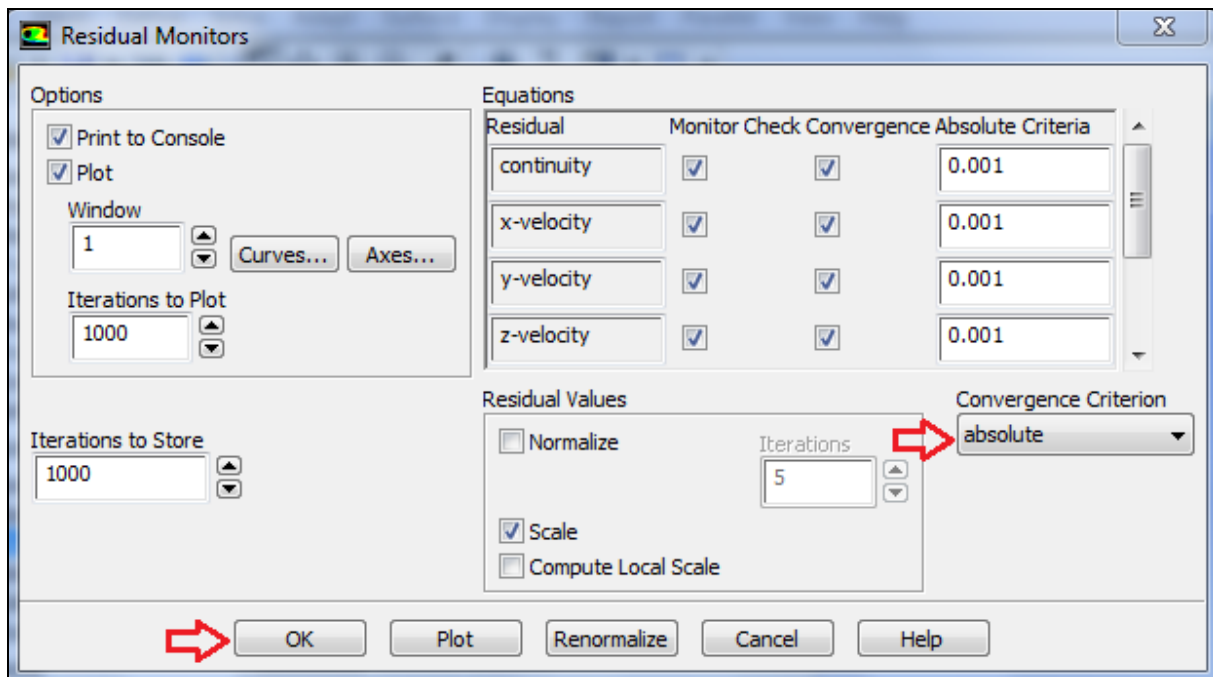
είναι σημαντικό να θυμόμαστε πώς όλες οι τιμές των παραμέτρων που εισάγονται, βασίζονται σε δεδομένα που αντιπροσωπεύουν ιδανικές συνθήκες.



Εικόνα 6.20: Επεξεργασία συνοριακών συνθηκών (**Pressure-outlet**)

7. Βήμα έβδομο:

Ολοκληρώνοντας με επιτυχία τα παραπάνω βήματα, είμαστε πλέον έτοιμοι να προετοιμάσουμε τον επιλυτή που θα χρησιμοποιήσουμε, προκειμένου να επιτευχθεί η υπολογιστική ρευστοδυναμική προσομοίωση της ροής μας. Αρχικά επιλέγουμε **“Monitors ~ Residuals ~ Edit...”** από το μενού στα αριστερά και στη συνέχεια πραγματοποιούμε ορισμένες τροποποιήσεις με τον τρόπο που υποδεικνύεται στην Εικ.(6.21).

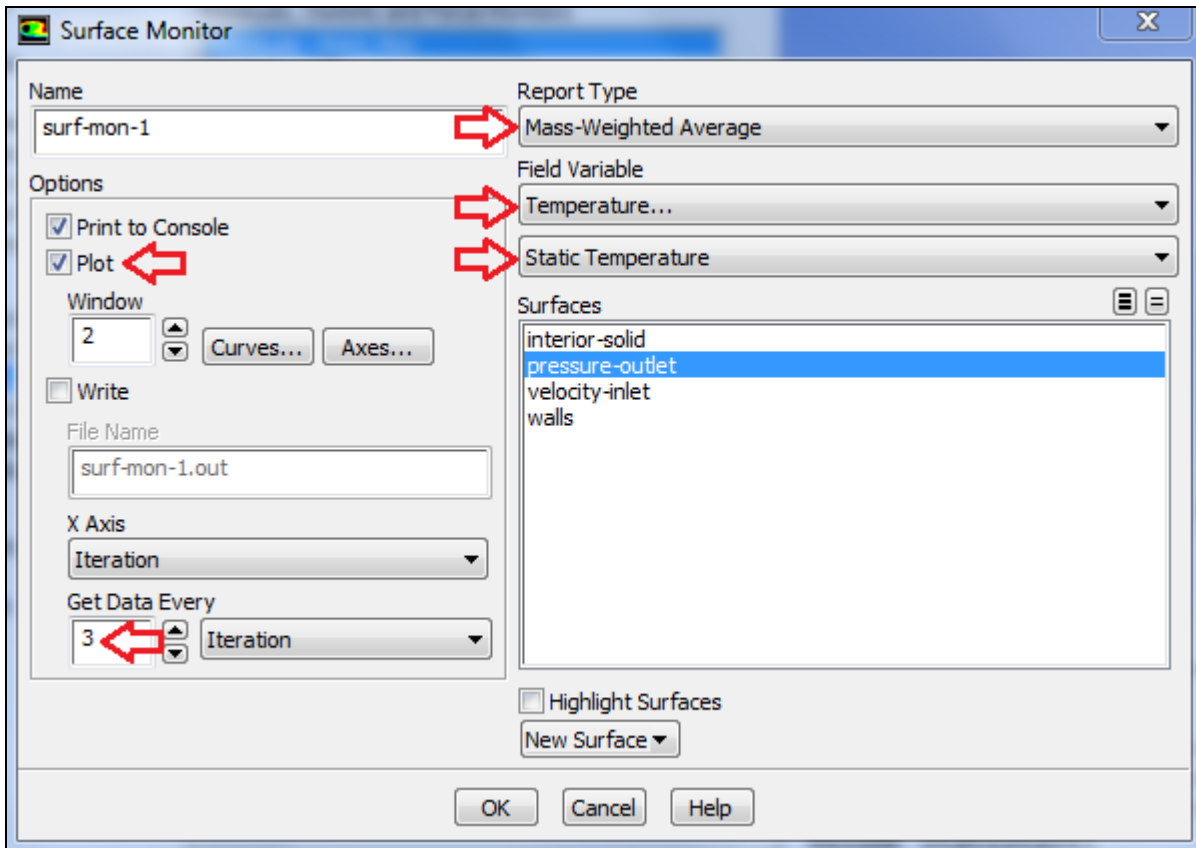


Εικόνα 6.21: Ρυθμίσεις επιλυτή.

Αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι τροποποιήσεις που φαίνονται στην Εικ.(6.21), σειρά έχει η δημιουργία ενός ανιχνευτή για την επιφάνεια εξόδου της αεροσήραγγας. Οι αλλαγές που λαμβάνουν χώρα είναι:

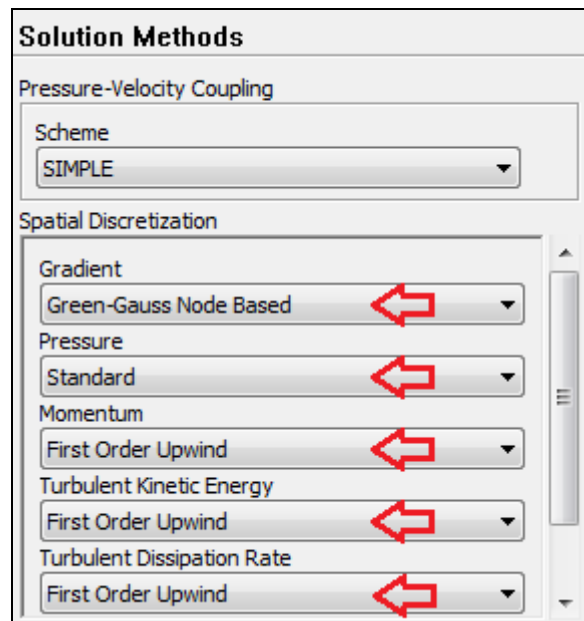
- Ενεργοποίηση επιλογής **“Plot”**.
- **“Get Data Every”** :3. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται καταγραφή των δεδομένων μετά από κάθε τρεις επαναλήψεις.
- Επιλέγουμε **“Mass-Weighted Average”**.
- Επιλέγουμε **“Temperature”** και **“Static Temperature”**
- Ορίζουμε **“Pressure-Outlet”** στο κελί **“Surfaces”** και πατάμε **“OK”**

Στην Εικ.(6.22) φαίνονται όλες οι παραπάνω τροποποιήσεις σχετικά με την επιλογή **“Surface monitors”**, αναλυτικά.



Εικόνα 6.22: Εισαγωγή ρυθμίσεων στον παρακολουθητή επιφανειών.

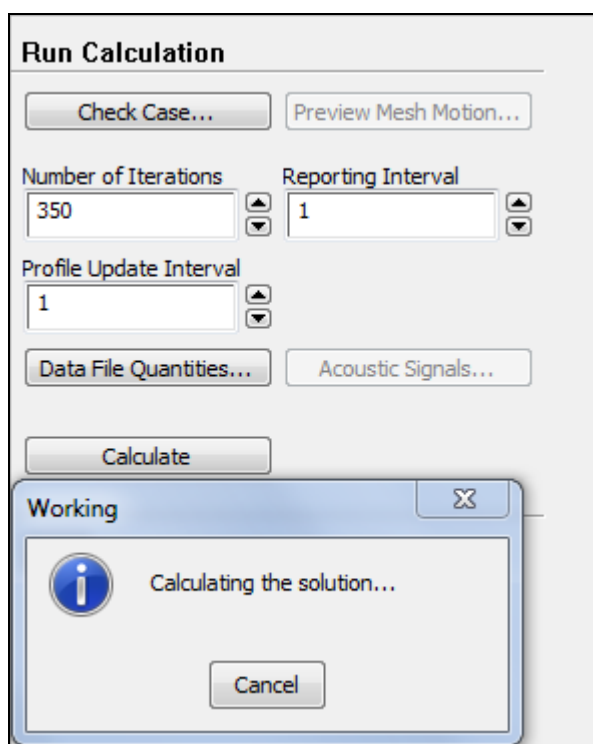
Πλησιάζοντας προς το τέλος του βήματος αυτού, αλλάζουμε ορισμένες μεθόδους επίλυσης του προβλήματος που επεξεργαζόμαστε. Στην Εικ.(6.23) απεικονίζονται όλες αυτές οι αλλαγές.



Εικόνα 6.23: Μέθοδοι επίλυσης της ρευστοδυναμικής ανάλυσης.

8. Βήμα όγδοο:

Ύστερα από την επιτευγμένη εφαρμογή των ρυθμίσεων που αναλύονται σε όλα τα παραπάνω βήματα, ξεκινάμε την διαδικασία προσδιορισμού επίλυσης του προβλήματος. Στο μενού “**Run Calculation**” στα αριστερά, εισάγουμε έναν αριθμό στη θέση “**Number of Iterations**” όπου θα αντιπροσωπεύει τον αριθμό επαναλήψεων επίλυσης του προβλήματος. Ο αριθμός που επιλέγουμε είναι σχετικά μικρός καθώς η ακρίβεια επίλυσης δεν διαφοροποιείται ύστερα από την πραγματοποίηση πολλαπλών επαναλήψεων. Η διαδικασία στη οποία αναφερόμαστε, προβάλλεται στην Εικ.(6.24). Τέλος, κλείνουμε την εφαρμογή “**ANSYS Fluent**” και μελετάμε τα αποτελέσματα.



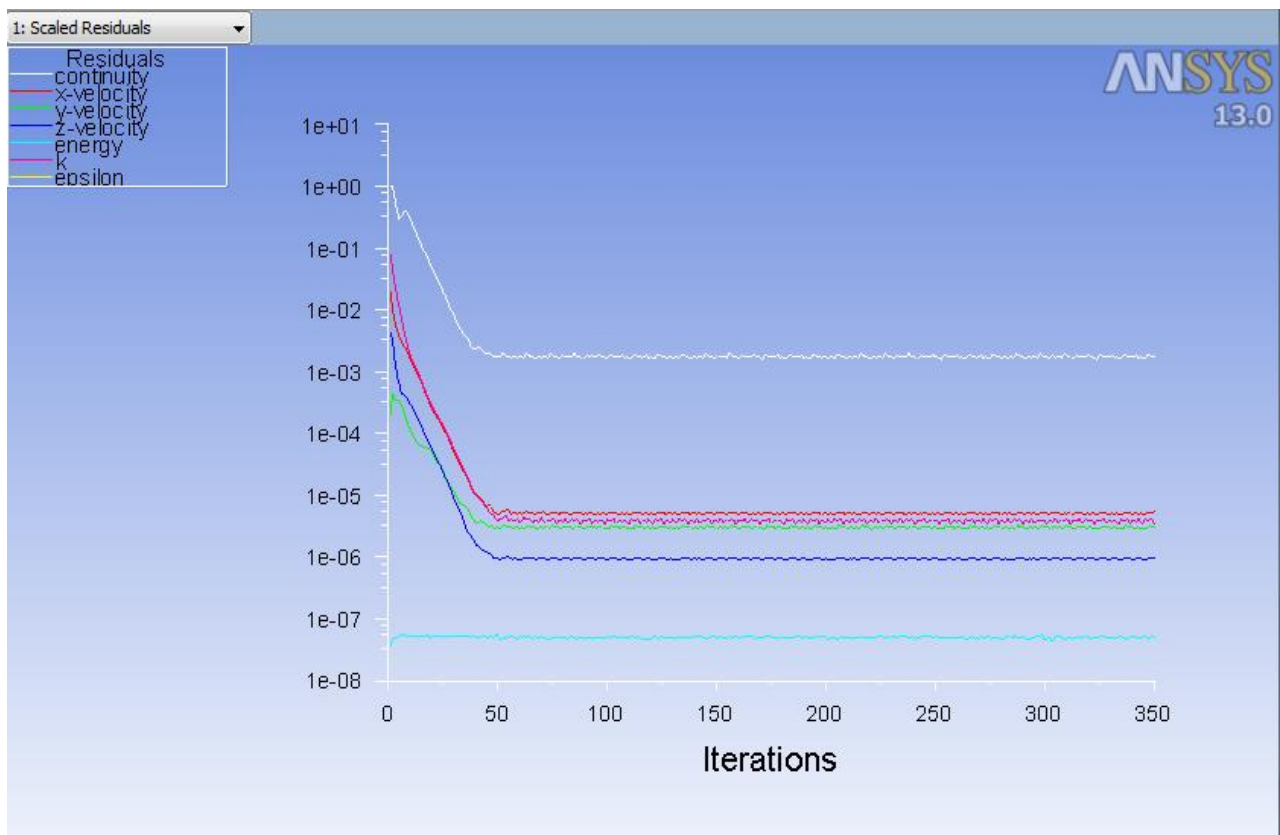
Εικόνα 6.24: Επίλυση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ανάλυσης.

6.5 ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.

Αρχικά θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα της υπολογιστικής και ρευστοδυναμικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο υποκεφάλαιο (4.5) και στη συνέχεια θα δοθεί σημασία στα μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται εντός της αεροσήραγγας, ξεχωριστά.

Στην Εικ.(6.25), είναι δυνατών να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της ταχύτητας ως προς τους άξονες x, y, z καθώς και η μεταβολή διαφόρων άλλων μεγεθών (ενέργεια) κατά την διαδικασία επανάληψης της μεθόδου επίλυσης. Ο βαθμός σύγκλισης της λύσης ο οποίος παρατηρείται, σημαίνει ότι το κριτήριο σύγκλισης για

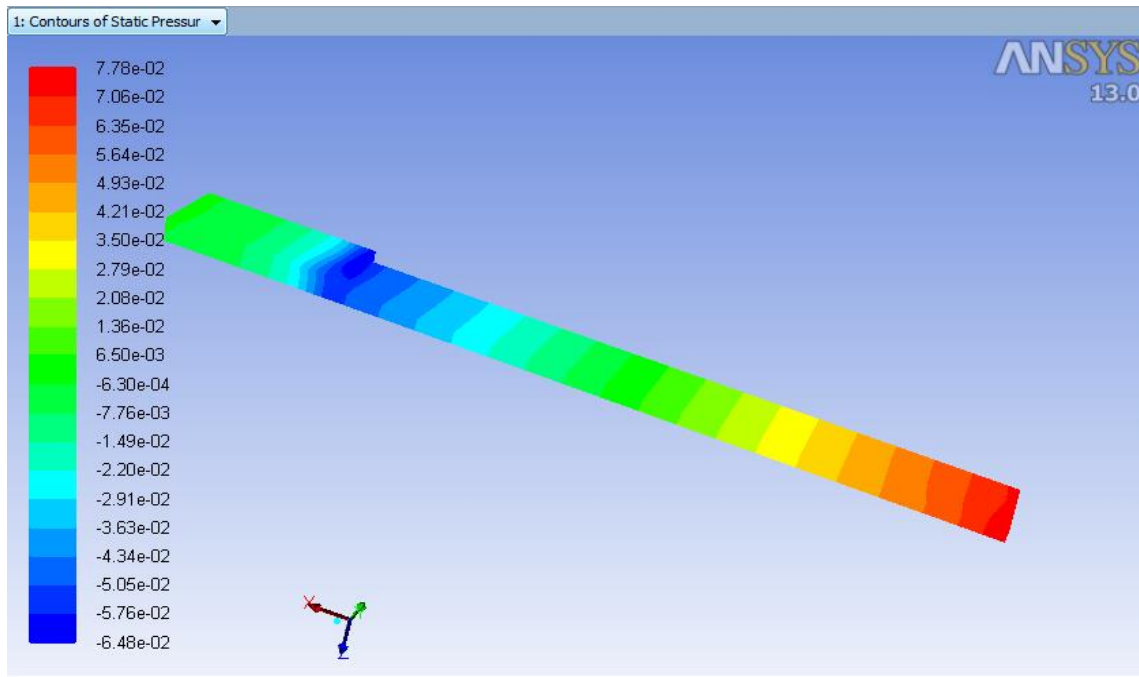
κάθε μεταβλητή ξεχωριστά έχει επιτευχθεί. Επίσης παρατηρείται, ότι μετά από τις 100 επαναλήψεις, η λύση παρουσιάζει γραμμικότητα. Αυτό συμβαίνει διότι η ακρίβεια της λύσης αυξάνεται σημαντικά και οι διαφορές των αποτελεσμάτων γίνονται πιο μικρές.



Εικόνα 6.25: Αποτελέσματα επίλυσης της ρευστοδυναμικής ανάλυσης.

Στην Εικ.(6.26) παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η στατική πίεση κατά μήκος της αεροσήραγγας που μελετάμε. Η διαφορά αυτή της πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο, οφείλεται στην αλλαγή της διατομής της αεροσήραγγας και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που παίρνει είναι οι εξής:

- Min: $-0,064 \text{ Pa}$
- Max: 0.077 Pa

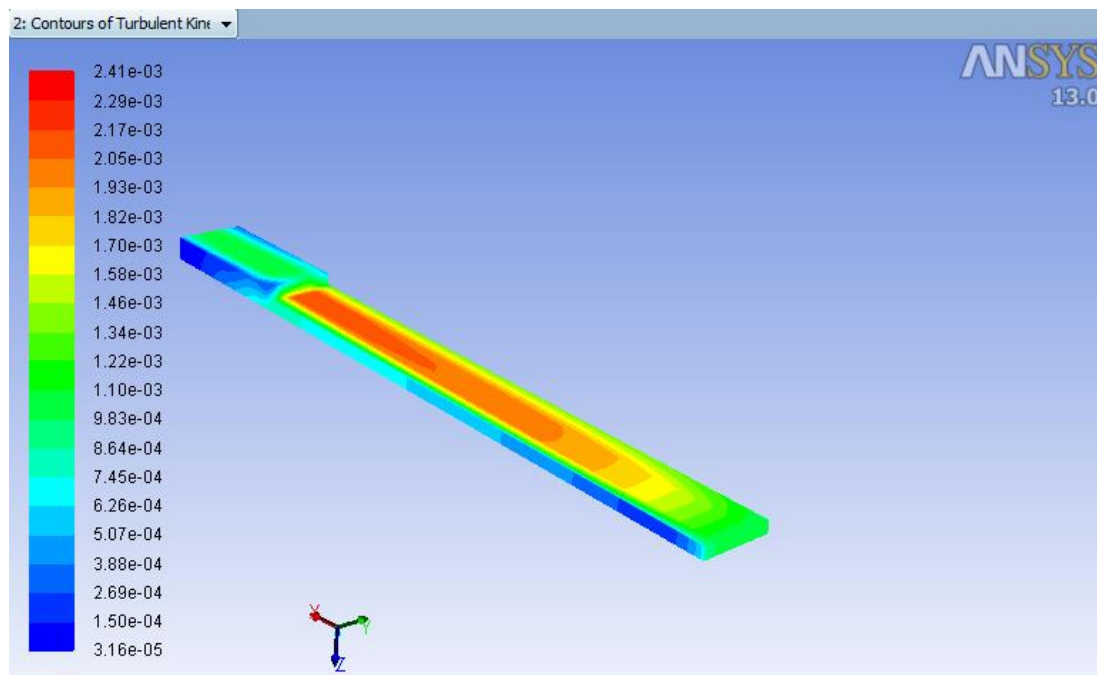


Εικόνα 6.26: Κατανομή στατικής πίεσης.

Η κατανομή της τύρβης κατά μήκος της αεροσήραγγας απεικονίζεται στην Εικ.(6.27). Παρατηρούμε πως στο κέντρο της αναπτύσσεται το μεγαλύτερο ποσοστό τύρβης ενώ πλησιάζοντας τα άκρα της αεροσήραγγας το ποσοστό γίνεται μικρότερο.

Οι τιμές στις οποίες αναφερόμαστε είναι οι εξής:

- *Min:* 3,156191e-05
- *Max:* 0,0014



Εικόνα 6.27: Κατανομή τύρβης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετώντας το θεωρητικό μέρος της παρούσας εργασίας, μπορούμε να κατανοήσουμε τις μεθόδους που χρησιμοποιεί η υπολογιστική ρευστομηχανική τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Συμπεραίνουμε ακόμη, ότι εφαρμόζοντας την επιστήμη αυτή μπορούμε να καλύψουμε ένα πολύ μεγάλο εύρος προβλημάτων ροής και επιπλέον, μας δίνεται η δυνατότητα να προσθέσουμε εναλλαγές στον τρόπο με τον οποίο επιλέγουμε να επιλύσουμε το εκάστοτε πρόβλημα. Το παρών πρόβλημα μας βοηθάει να κατανοήσουμε εις βάθος την λογική με την οποία λειτουργεί το λογισμικό Fluent και πιο συγκεκριμένα τον τρόπο που μας βοηθάει όσο αναφορά τον χειρισμό προβλημάτων ροής σε πρότυπες πειραματικές συσκευές όπως είναι και η αεροσήραγγα που μελετάται στο Κεφ.(6).

Αναλύοντας το πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής, είναι εύκολο να κατανοήσουμε τις εντολές όπου χρησιμοποιεί το λογισμικό Fluent, προκειμένου να δώσει λύση σε προβλήματα ροής. Αναλυτικότερα, μελετώντας το Κεφ.(5) συμπεραίνουμε ότι κατά την αντιμετώπιση προβλημάτων ροής εντός αγωγών είναι συνετό να δίνουμε ιδιαίτερη σημασία στην εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών καθώς αυτές είναι που καθορίζουν τις τιμές εισόδου και εξόδου διάφορων μεγεθών. Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως μετά την εισαγωγή των απαραίτητων συνθηκών και ρυθμίσεων, παρουσιάζεται στην επίλυση μας ένας βαθμός σύγκλισης. Αυτό συμβαίνει όταν το κριτήριο σύγκλισης για κάθε μεταβλητή έχει επιτευχθεί όπως φαίνεται άλλωστε και στις αντίστοιχες εικόνες του κεφαλαίου αυτού.

Επιπλέον, το πειραματικό κομμάτι της παρούσας εργασίας συνεχίζεται και στο Κεφ.(6) όπου είναι και το πιο σημαντικό. Έχοντας κατανοήσει τις μεθόδους και τον τρόπο όπου λειτουργεί το λογισμικό Fluent από το Κεφ.(5), κατασκευάζουμε μία πρότυπη πειραματική συσκευή ούτως ώστε να προσομοιάσουμε μια ροή αέρα. Οπότε, από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, μπορούμε να συμπεράνουμε τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η κατανομή διαφόρων μεγεθών κατά μήκος και πλάτος της πρότυπης πειραματικής συσκευής και πώς αυτός μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Τα μεγέθη όπου δίνεται περισσότερη βάση είναι αυτά της πίεσης, ταχύτητας και ορμής και διαφοροποιούνται ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες που θα εισάγει ο χρήστης.

Τέλος, μέσω των πολλαπλών επαναλήψεων επίλυσης καθώς και την καταγραφή αυτών, το λογισμικό Fluent μας διευκολύνει να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται τα προαναφερθέντα μεγέθη σε κάθε όγκο ελέγχου της πρότυπης πειραματικής συσκευής. Στην προκειμένη περίπτωση, η ποιότητα της συμπεριφοράς είναι αποτέλεσμα διακριτοποίησης υψηλής ταχύτητας και χαμηλής (σχετικά) ακρίβειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Daugherty Franzini Finnmore, Μετάφραση: Φούντας Γ.Χ., *Μηχανική Ρευστών, Με τεχνικές εφαρμογές*, Εκδόσεις Fountas, Αθήνα, 2009, {Εισαγωγή}.
2. Γούλας Α.Κ., *Μηχανική Ρευστών*, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, 2005, {Κεφ.(2,3)}.
3. Δημητρίου Ι.Δ., *Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Τεύχος Α – Εισαγωγή*, Εκδόσεις Fountas, Αθήνα, 2008, {Κεφ.(3)}.
4. Δημητρίου Ι.Δ., *Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Τεύχος Α – Εισαγωγή*, Εκδόσεις Fountas, Αθήνα, 2008, {Κεφ.(3)}.
5. Κορωνάκης Π., *Μηχανική Ρευστών Τρίτη Έκδοση*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 2009, {Κεφ.(2)}.
6. Κουτροβέλη Θ.Ι., *Τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση τυρβώδους ροής σε ανοικτό αγωγό με εγκάρσιους προβόλους*, Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική σχολή, 2012, {Κεφ.(4,5)}
7. Μπεργελές Γ., *Υπολογιστική Ρευστομηχανική*, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Πάτρα, 2006, {Κεφ.(2,4)}.
8. Παγιατάκης Α.Χ., *Ρευστομηχανική*, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Εκτυπώσεων Τυπογραφείου, 2004, {Κεφ.(2,3)}.
9. Πρίνος Π., *Υδραυλική Αγωγών*, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθήνα, 2009, {Κεφ.(2)}.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

1. *ANSYS FLUENT Tutorial Guide:*
http://cdlab2.fluid.tuwien.ac.at/LEHRE/TURB/Fluent.Inc/v140/flu_tg.pdf
{Κεφ.(5)}
2. *Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή σε ανοικτούς αγωγούς:*
http://theoxar2.weebly.com/uploads/1/7/9/7/17970951/6-_.pdf
{Κεφ.(3)}

3. Ομοιόμορφη ροή σε ανοικτούς αγωγούς:
<http://users.auth.gr/~prinosp/downloads/EISACYCG.pdf>
{Κεφ.(2,3)}
4. Στοιχειά μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια:
http://itia.ntua.gr/~panospap/EFARMOSMENH_YDRAULIKH/SHMEIWSEIS_NOTES/Applied%20Hydraulics_2012.pdf
{Κεφ.(3)}

EIKONEΣ

- [1], [2]. H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*
- [3]. Wikipedia, *Von Karman Lines*
- [4], [5]. Εργαστηριακές σημειώσεις, *Ρευστοδυναμικές μηχανές*
- [6], [7]. [8]. Wikipedia, *Ροή γύρο από σφαίρα*
- [9], [10]. [11]. Wikipedia, *Ροή γύρο από σφαίρα*
- [12] Wikipedia, *Finite Difference*