

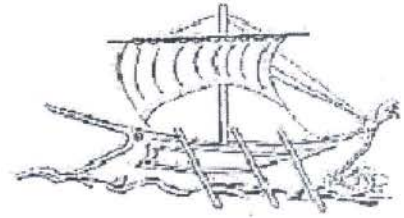
# ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧ  
670

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

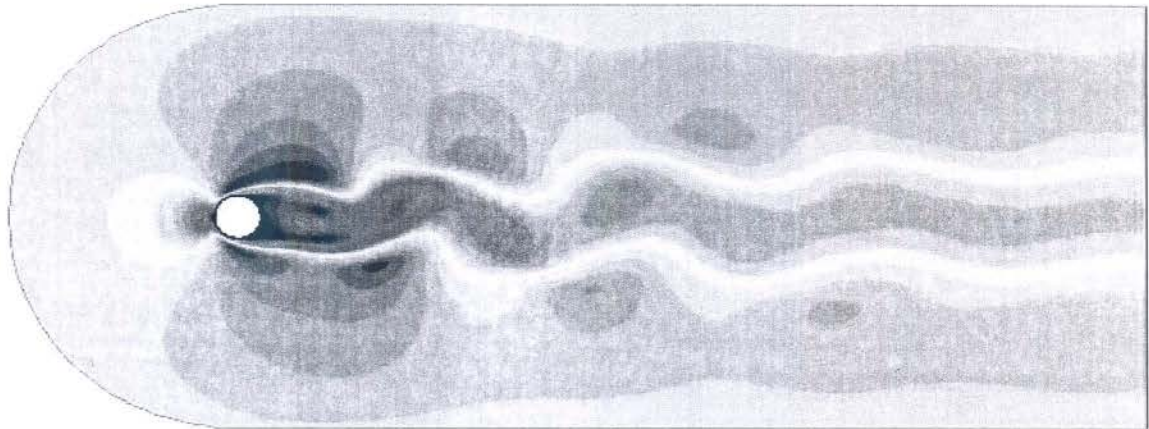
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ  
(COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF UNSTEADY FLOW AROUND A  
CYLINDER)



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝ/ΝΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΝΙΚΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

- 1.1 Εισαγωγή .....σελ. 8
- 1.2 Δομή Εργασίας .....σελ. 9

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

#### **ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (CFD)**

- 2.1 Ιστορία της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής .....σελ. 10
- 2.2 Ο Υπολογιστής και η Μηχανική Ρευστών .....σελ. 11
- 2.3 Γιατί Χρησιμοποιείται .....σελ. 14
- 2.4 Εφαρμογές .....σελ. 15
- 2.5 Περιορισμοί του CFD .....σελ. 19
- 2.6 Πλεονεκτήματα CFD .....σελ. 20
- 2.7 CFD Ανάλυση: Βασικά Βήματα .....σελ. 21
- 2.7.1 Καθορισμός Στόχων Μοντελοποίησης .....σελ. 21
- 2.7.2 Καθορισμός Πεδίου που θα Επιλυθεί (Χώρος & Χρόνος) .....σελ. 21
- 2.7.3 Σχεδιασμός & Κατασκευή του Υπολογιστικού Πλέγματος .....σελ. 21
- 2.7.4 Δημιουργία ενός Αριθμητικού, Μαθηματικού Μοντέλου .....σελ. 22
- 2.7.5 Επίλυση και Παρακολούθηση της Λύσης .....σελ. 22
- 2.7.6 Έλεγχος των Αποτελεσμάτων .....σελ. 23
- 2.8 Καθορισμός Προβλήματος & Προεπεξεργασία .....σελ. 24

<b>2.9</b> Εκτέλεση των Υπολογισμών / Δημιουργία ενός Αριθμητικού Μαθηματικού Μοντέλου (Μοντελοποίηση).....σελ. 24	σελ. 24
<b>2.10</b> Γεωμετρία & Πεδίο Ορισμού .....σελ. 25	σελ. 25
<b>2.11</b> Συντεταγμένες .....σελ. 25	σελ. 25
<b>2.12</b> Συνθήκες Ροής .....σελ. 26	σελ. 26
<b>2.13</b> Αρχικές Συνθήκες (Σταθερές & μη, Ροές) .....σελ. 26	σελ. 26
<b>2.14</b> Οριακές Συνθήκες .....σελ. 27	σελ. 27
<b>2.15</b> Επιλογή των Μοντέλων .....σελ. 27	σελ. 27
<b>2.16</b> Εκτέλεση των Υπολογισμών / Επίλυση & Παρακολούθηση της Λύσης .....σελ. 28	σελ. 28
<b>2.16.1</b> Αριθμητικές Μέθοδοι .....σελ. 28	σελ. 28
<b>2.16.2</b> Περιγραφικές Μέθοδοι .....σελ. 28	σελ. 28
<b>2.16.3</b> Μέθοδοι Επίλυσης (Solvers) & Αριθμητικές Παράμετροι .....σελ. 29	σελ. 29
<b>2.16.4</b> Υψηλή Υπολογιστική Λειτουργία & Διαδικασία Εργασίας .....σελ. 29	σελ. 29
<b>2.17</b> Γεωμετρία .....σελ. 31	σελ. 31
<b>2.18</b> Φυσική .....σελ. 31	σελ. 31
<b>2.19</b> Πλέγμα .....σελ. 31	σελ. 31
<b>2.20</b> Επίλυση & Παρακολούθηση της Λύσης .....σελ. 32	σελ. 32
<b>2.21</b> Επεξεργασία των Αποτελεσμάτων / Έλεγχος & Αναφορά των Αποτελεσμάτων .....σελ. 32	σελ. 32
<b>2.22</b> Επαλήθευση .....σελ. 33	σελ. 33
<b>2.23</b> Εργαλεία για την Εξέταση των Αποτελεσμάτων .....σελ. 33	σελ. 33

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### **GAMBIT & FLUENT**

<b>3.1</b>	Εισαγωγή στο Gambit .....	σελ. 34
<b>3.2</b>	Λειτουργίες .....	σελ. 35
<b>3.2.1</b>	Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη [Graphical User Interface (GUI)] ....	σελ. 35
<b>3.2.2</b>	Το Παράθυρο Γραφικών .....	σελ. 35
<b>3.2.3</b>	Μενού Εργαλείων Λειτουργιών .....	σελ. 37
<b>3.2.4</b>	Γενική Γραμμή Εργαλείων Ελέγχου Λειτουργιών .....	σελ. 37
<b>3.3</b>	Δημιουργία Γεωμετρίας .....	σελ. 38
<b>3.3.1</b>	Εντολές Σημείων .....	σελ. 38
<b>3.3.2</b>	Εντολές Προσώπων .....	σελ. 39
<b>3.3.3</b>	Δημιουργία Πραγματικού σημείου .....	σελ. 40
<b>3.3.4</b>	Εντολές Πλευρών .....	σελ. 40
<b>3.4</b>	Δημιουργία Πλέγματος .....	σελ. 41
<b>3.4.1</b>	Διάβασμα / Μέρη Πλέγματος .....	σελ. 42
<b>3.5</b>	Εντολές Ζώνης (Zone Commands) – Οριακές Συνθήκες .....	σελ. 43
<b>3.6</b>	Εισαγωγή στο Fluent .....	σελ. 44
<b>3.7</b>	Πλέγμα-Μορφοποίηση & Λειτουργικότητα .....	σελ. 45
<b>3.8</b>	διαδικασία – Εκτέλεση Επίλυσης .....	σελ. 45

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

<b>4.1</b>	Ροή Γύρω από Κύλινδρο .....	σελ. 47
<b>4.2</b>	Ροή για Μικρούς Αριθμούς Reynolds .....	σελ. 47

4.3 Ροή για Μεγάλους Αριθμούς Reynolds .....	σελ. 47
4.4 Το φαινόμενο Συντονισμού .....	σελ. 48
4.5 Ροή για Πολύ Μεγάλους Αριθμούς Reynolds .....	σελ. 49
4.5.1 Μετατόπιση των Σημείων Αποκόλλησης .....	σελ. 50

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

### **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

5.1 Μοντελοποίηση .....	σελ. 52
5.1.1 Γεωμετρία .....	σελ. 52
5.1.2 Συνθήκες Ροής .....	σελ. 52
5.1.3 Οριακές Συνθήκες .....	σελ. 53
5.1.4 Πλέγμα .....	σελ. 54
5.1.5 Επιλογή Φυσικού Μοντέλου .....	σελ. 56
5.2 Διαδικασία Προσομοίωσης .....	σελ. 56
5.2.1 Εκκίνηση του Fluent .....	σελ. 56
5.2.2 Εισαγωγή Δεδομένων στο Fluent .....	σελ. 58
5.3 Διεξαγωγή Αποτελεσμάτων .....	σελ. 60
5.3.1 Σχόλια Συμπεράσματα .....	σελ. 62
5.3.2 Επιλογή καταλληλότερου Πλέγματος .....	σελ. 63
5.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .....	σελ. 69

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**6.1 Συμπεράσματα .....σελ. 70**

**6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία .....σελ. 70**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....σελ. 72**

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό την εκμάθηση στη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων για την επίλυση ρευστοδυναμικών εφαρμογών. Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση χαρακτηριστικών μη μόνιμης ροής γύρω από κύλινδρο, σε δισδιάστατο περιβάλλον. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση επιτυγχάνεται με την χρήση του λογισμικού πακέτου Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής GAMBIT - FLUENT.

## **ΛΕΞΕΙΣ - ΚΛΕΙΔΙΑ**

Κύλινδρος, Υπολογιστική ρευστοδυναμική, Gambit, Fluent, Μοντελοποίηση, Πλέγμα.

## **ABSTRACT**

This project is aimed at learning to use computer programs to solve fluid dynamics applications. The aim of this work is to simulate non-permanent flow characteristics around the cylinder in two-dimensional simulation environment. The design and analysis is achieved using the CFD software package GAMBIT - FLUENT

## **KEY-WORDS**

Cylinder, Computational Fluid Dynamics (C.F.D.), Gambit, Fluent, Modeling, Grid.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

#### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η συνεχής εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είχε ως συνέπεια σοβαρές επιδράσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες και κατά συνέπεια στις περισσότερες επιστήμες. Η μηχανική των ρευστών ήταν από τους πρώτους επιστημονικούς κλάδους που χρησιμοποίησε τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και τον έκανε αναντικατάστατο εργαλείο επίλυσης των προβλημάτων της.

Ένας από τους κλάδους της μηχανικής των ρευστών (Fluid\_mechanics), είναι η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD/Computational Fluid Dynamics). Σκοπός της είναι, χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους και αλγόριθμους, να επιλύσει και να αναλύσει τα προβλήματα που περιλαμβάνουν τις ροές των ρευστών, τη μετάδοσης θερμότητας και μάζας των χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετικών ρευστομηχανικών και θερμοδυναμικών φαινομένων. Οι υπερ-υπολογιστές χρησιμοποιούνται για να εκτελέσουν τα εκατομμύρια των υπολογισμών (επιλύσεις μαθηματικών εξισώσεων) που απαιτούνται για να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση των ρευστών και των αερίων με τις σύνθετες επιφάνειες που χρησιμοποιούνται στην εφαρμοσμένη μηχανική. Αυτός ο συνδυασμός υπολογιστή και αριθμητικής μεθοδολογίας της υπολογιστικής ρευστομηχανικής αποτελούν ισχυρά εργαλεία επίλυσης πολύπλοκων ρευστομηχανικών προβλημάτων για τους μηχανικούς εφαρμογής ή έρευνας.

Εντούτοις, ακόμη και με απλουστευμένες εξισώσεις καθώς επίσης και με τους μεγάλους υπερυπολογιστές, μόνο οι κατά προσέγγιση λύσεις μπορούν να επιτευχθούν σε πολλές περιπτώσεις. Οι ακριβέστεροι κώδικες που μπορούν με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα να μιμηθούν ακόμη και τα σύνθετα σενάρια όπως η υπερηχητική και η τυρβώδης ροή, είναι ένας τρέχων τομέας της έρευνας.



## **1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Κατά την εκπόνηση της εργασίας, αρχικά εξοικειωθήκαμε με την επιστήμη CFD, της δυνατότητες που έχει καθώς και το εύρος των εφαρμογών της, έτσι λοιπόν μελετήσαμε και χρησιμοποιήσαμε λογισμικά εμπορικά προγράμματα (Gambit και Fluent) τα οποία υπάρχουν στο εργαστήριο εφαρμοσμένης ρευστομηχανικής και με τη βοήθεια τους να πραγματοποιήσουμε προσομοίωση βασικής ρευστομηχανικής εφαρμογής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (CFD)

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται λόγος για την τεχνολογία CFD και πιο συγκεκριμένα αναφέρεται γιατί χρησιμοποιείται, ποιες οι εφαρμογές της, καθώς και ποιά είναι τα βασικά στάδια μιας ανάλυσης CFD κατά την διαδικασία επίλυσης μιας ρευστομηχανικής εφαρμογής.

#### 2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Πρώτη εργασία υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) πραγματοποιήθηκε από τον L.F. Richardson (1910) με την εξής θεματολογία:

- Αντί για H/Y η αριθμητική επίλυση γινόταν από ανθρώπους.
- Επαναληπτική επίλυση της εξίσωσης Laplace χρησιμοποιώντας μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για τη ροή γύρω από κύλινδρο, κλπ.



Lewis F. Richardson (1881-1953)

- Προσδιορισμός λάθους
- Μέθοδοι υποχαλάρωσης (1920-50)
- Βασικό άρθρο από τους Courant, Friedrichs και Lewy για τις υπερβολικές εξισώσεις (1928)
- Ανάλυση ευστάθειας κατά Von Neumann για παραβολικά προβλήματα (1950)
- Οι Harlow και Fromm (1963) υπολόγισαν χρονικά μεταβαλλόμενη ροή (vortex street) με υπολογιστή.



John von Neumann (1903-1957)

- Δημοσίευσαν ένα άρθρο στο Scientific America (1965) για τη χρήση του CFD σε αριθμητικά πειράματα.



Richard Courant (1888-1972)

- 1960-1970, δημιουργία κωδίκων οριακού στρώματος (boundary layer) πχ, GENMIX από τους Patankar και Spalding στα 1972
- Τεχνικές επίλυσης για ασυμπίεστες ροές στη δεκαετία 1970 (πχ. αλγόριθμοι SIMPLE από Patankar και Spalding)
- Ο Jameson υπολόγισε ροή τύπου Euler σε ένα ολόκληρο αεροπλάνο (1981).

## 2.2 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ & Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

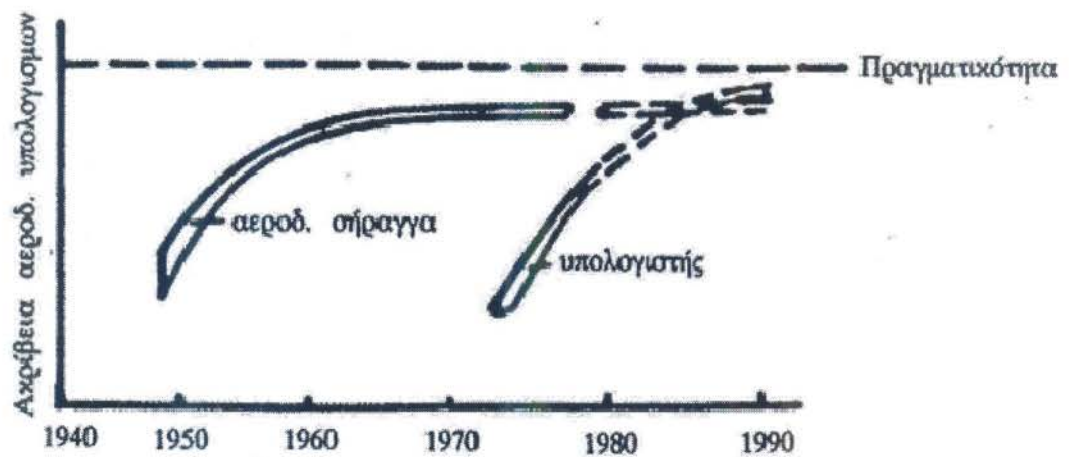
Η ανάπτυξη και η εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία 30 χρόνια είχε αρκετή επίδραση σχεδόν σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, τεχνικό, κοινωνικό, επιστημονικό. Η επίδραση των υπολογιστών στον τομέα της Μηχανικής των Ρευστών υπήρξε αρκετά σημαντική. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1960 οι λύσεις των προβλημάτων της ρευστομηχανικής προέρχονταν, είτε από πειραματική προσομοίωση των προβλημάτων σε αεροδυναμική σήραγγα, είτε από αναλυτικές λύσεις απλοποιημένων εξισώσεων με παραδοχές, των οποίων η αξιοπιστία ήταν αμφισβητήσιμη.

Η αεροδυναμική σήραγγα, η οποία έχει τόσο πλατιά χρήση στη μελέτη των αεροδυναμικών φαινομένων μπορεί να θεωρηθεί σαν μηχανισμός ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πεδίο ροής. Συνήθως, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την αεροδυναμική σήραγγα αναφέρονται σε ολοκληρωτικά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως συντελεστής άνωσης, CL και αντίστασης του αεροσκάφους, CD, σπανιότερα δε σε σημειακά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως ταχύτητες και πιέσεις σε διάφορες θέσεις. Σήμερα, η συμμετοχή του ηλεκτρονικού υπολογιστή στη λύση των προβλημάτων της μηχανικής των ρευστών είναι σχεδόν πρωταρχική, σε ορισμένες δε περιπτώ-

σεις οι λύσεις που παρέχει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι αρκετά αξιόπιστες και δεν κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος των αριθμητικών αποτελεσμάτων με μετρήσεις.

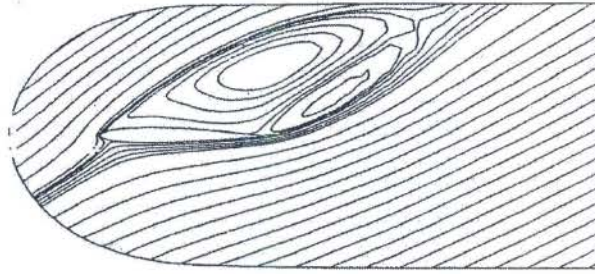
Η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος των μηχανών σε συνδυασμό με την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης φαίνεται, ότι σύντομα θα οδηγήσει στην κατάσταση, όπου η αξιοπιστία των ρευστομηχανικών υπολογισμών να είναι μεγαλύτερη από την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της πειραματικής προσομοίωσης.

Σήμερα, χωρίς σοβαρές απλουστευτικές παραδοχές, μπορούν να επιλυθούν, αριθμητικά, δισδιάστατα τυρβώδη πεδία ροής, όπως αυτό που η λύση του παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2, να επιχειρείται και η επίλυση τρισδιάστατων πεδίων ροής, όπως της δυναμικής ροής γύρω από ολόκληρο το αεροσκάφος ή της τρισδιάστατης ροής γύρω από ολόκληρο αυτοκίνητο.



Σχήμα 2.1 : Σύγκριση αξιοπιστίας Η/Υ και Αεροδυναμικής Σήραγγας

Σήμερα, η μελέτη ή η εκλογή της κατάλληλης αεροτομής για τις διάφορες εφαρμογές στην Αεροναυπηγική βιομηχανία γίνεται θεωρητικά με την αριθμητική επίλυση (με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή) της δυναμικής ροής γύρω από την αεροτομή ή με τη σχεδίαση εκείνης της αεροτομής που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του προβλήματος, «π.χ. μέγιστο Q με ελάχιστο CD».



**Σχήμα 2.2 :** Αεροτομή σε μεγάλη γωνία πρόσπτωσης με καθολική αποκόλληση

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, όταν μπορεί αξιόπιστα να επιλύσει ένα πεδίο ροής, έχει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες από την εναλλακτική λύση της φυσικής προσομοίωσης του πεδίου ροής σε Αεροδυναμική σήραγγα, γιατί η πειραματική προσομοίωση του πεδίου ροής συνήθως δεν μπορεί να είναι πλήρης, όπως στην περίπτωση της προσομοίωσης της διηθητικής ροής, λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης της ροής με τα τοιχώματα της σήραγγας ή της αδυναμίας της σύγχρονης προσομοίωσης των αριθμών Reynolds και Mach της ροής. Ο υπολογιστής, όπως είναι φανερό δεν έχει τέτοιες δεσμεύσεις μια και μπορεί να προσομοιώσει οποιοσδήποτε καταστάσεις ροής. Ο μόνος προς το παρόν περιορισμός του είναι η ταχύτητα εκτέλεσης των πράξεων και η χωρητικότητα της μνήμης του.



**Σχήμα 2.3 :** Διαδικασία ελέγχου φυσικών υποθέσεων

Πολλές φορές συζητείται εκτενώς η δυνατότητα του υπολογιστή να αντικαταστήσει μελλοντικά πειράματα. Προς το παρόν τόσο ο υπολογιστής όσο και η πληθώρα των πειραματικών εφαρμογών αλληλοσυμπληρώνονται. Ο υπολογιστής όμως έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό εξέλιξης αλλά και μείωσης του κόστους εκτέλεσης των αριθμητικών

πράξεων. Στο μέλλον, όταν οι υπολογιστικές μέθοδοι θα έχουν βελτιωθεί και η ταχύτητα και η μνήμη των υπολογιστών θα έχει αυξηθεί, προβλέπεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της σχεδίασης των πειραματικών εφαρμογών θα γίνεται με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή και μόνο σε ορισμένες οριακές περιπτώσεις θα ελέγχονται πειραματικά. Τέλος, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής εκτός από τη χρησιμότητα του ως εργαλείου επίλυσης προβλημάτων πρακτικού ενδιαφέροντος συμβάλλει σημαντικότερα στον έλεγχο της ορθότητας των φυσικών υποθέσεων που συνυπάρχουν στις βασικές ρευστομηχανικές εξισώσεις ή σε απλουστευμένες μορφές τους. Ενδεικτικά η όλη μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων με υπολογιστή φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.3, όπου τα θεωρητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική λύση συγκρίνονται με πειραματικά. Η συμφωνία ή η διαφωνία της αριθμητικής και της πειραματικής λύσης οδηγεί στην βελτίωση των φυσικών υποθέσεων. Σήμερα, η μεγάλη ερευνητική προσπάθεια που καταβάλλεται διεθνώς εντοπίζεται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της τυρβώδους ροής.

### 2.3 ΓΙΑΤΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ

- Ανάλυση και σχεδιασμός

<> Η τεχνολογία CFD χρησιμοποιείται για την προσομοίωση βασισμένη στο σχεδιασμό, παρέχοντας ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τη ροή ρευστού μέσα ή γύρω από μια επιφάνεια.

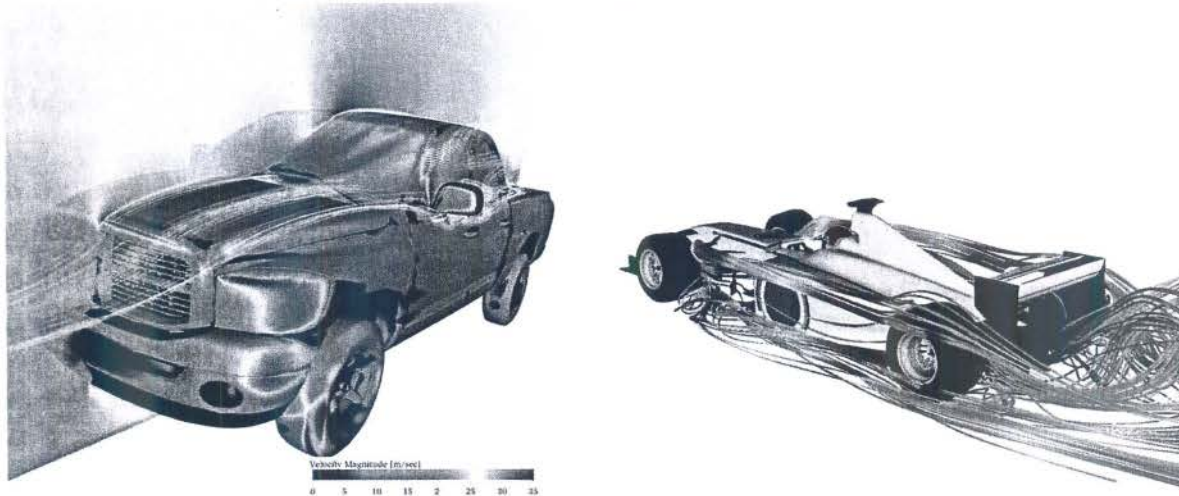
<> Χρησιμοποιείται επίσης για περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να διεξαχθεί πείραμα ώστε να πάρουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, (προσομοίωση φυσικών φαινομένων) όπως π.χ:

- Προσομοίωση σε πραγματικές διαστάσεις και συνθήκες (αεροπλάνα, πλοία, κ.α.)
- Περιβαλλοντολογικές συνθήκες (αέρας, καιρός, κ.α.)
- Επικίνδυνες δραστηριότητες (εκρήξεις, ραδιενέργεια, κ.α.)
- Φυσική (πλανητικές στοιβάδες, αστρική εξέλιξη, κ.α.)

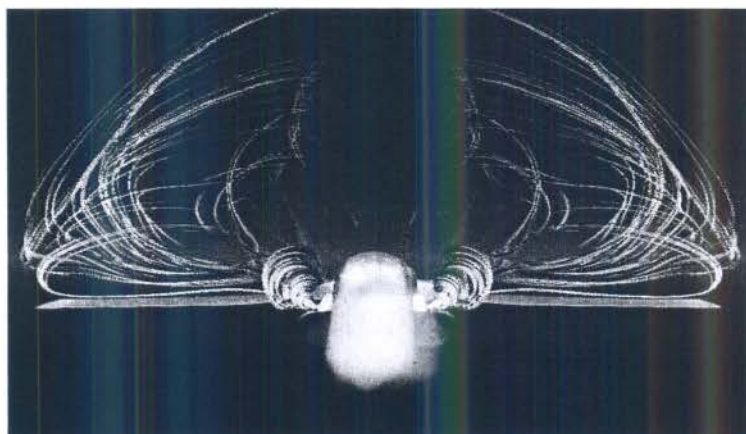
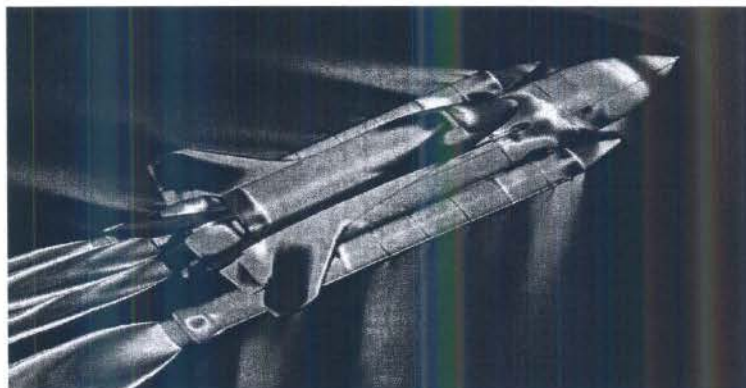
## 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας CFD είναι πραγματικά αμέτρητες. Ορισμένες από αυτές αναφέρονται παρακάτω :

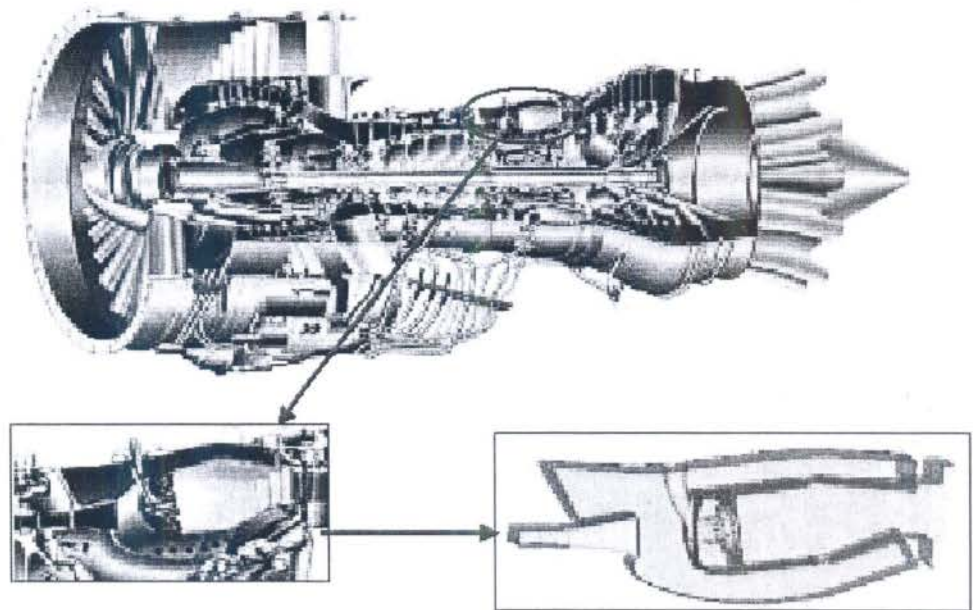
- Αεροδυναμική οχημάτων εδάφους, αεροσκαφών, πυραύλων



- Υδροδυναμική των σκαφών
- Ροές μηχανών - μηχανές ολοκληρωμένου κυκλώματος και αεριωθούμενες μηχανές



- Στροβιλοκίνητες μηχανές - αντλίες και στρόβιλοι

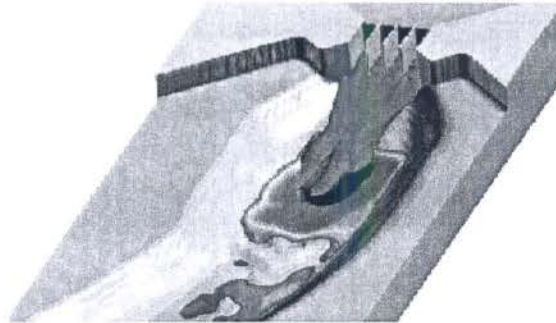


- Μεταφορά θερμότητας - θέρμανση και συστήματα ψύξης
- Ροή ρευστού και μετάδοση θερμότητας σε βιομηχανικές διεργασίες (λέβητες, εναλλάκτες, συσκευές καύσης, αντλίες, ανεμιστήρες, σωληνώσεις, κ.λπ.)





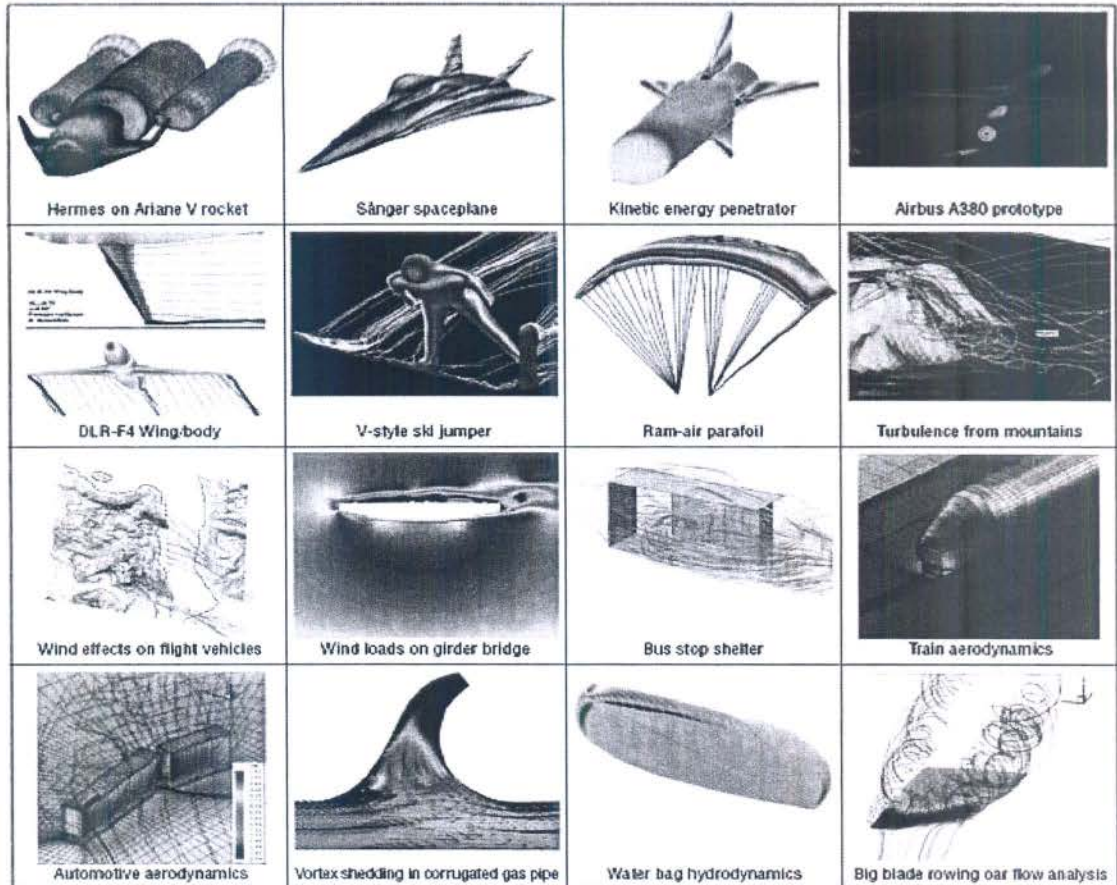
- Εφαρμοσμένη μηχανική διαδικασία - αναμιγνύοντας και αντιδρούσες χημικές ουσίες
- Φόρτωση αέρα - δυνάμεις και δυναμική απάντηση των δομών
- Εξαερισμός κτηρίων



- Περιβαλλοντική εφαρμοσμένη μηχανική - μεταφορά των ρύπων και των αποβλήτων αποχέτευσης
- Παράκτια εφαρμοσμένη μηχανική - φόρτωση στις παράκτιες και θαλάσσιες δομές
- Υδραυλική - δίκτυα σωλήνων, δεξαμενές, κανάλια
- Μεταφορά ιζημάτων
- Υδρολογία - ροή στους ποταμούς και τα υδροφόρα στρώματα
- Ωκεανογραφία - παλιρροιακές ροές, ωκεάνια ρεύματα
- Μετεωρολογία - αριθμητική καιρική πρόβλεψη
- Φυσική υψηλής ενέργειας
- Βιοϊατρική εφαρμοσμένη μηχανική - ροή αίματος στην καρδιά, τις φλέβες και τις αρτηρίες
- Μετάδοση θερμότητας για ψύξη ηλεκτρονικών συστημάτων

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται ορισμένες από τις εφαρμογές που αναφέρθηκαν...

From Lift-off ...



... to Splash-down

Η βιοιατρική (όπως έχουμε ήδη αναφέρει), είναι ένας τομέας, ταχύτατα εξελισσόμενος, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνολογία CFD για να μελετήσει το κυκλοφοριακό και το αναπνευστικό σύστημα. Στην παρακάτω εικόνα αναπαριστάται η διαμόρφωση της πίεσης σε μια όψη σε τομή, στην οποία φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας κατά την άντληση αίματος, το οποίο μας δείχνει τη σημασία της καρδιάς κατά την εγχείρηση ανοιχτής καρδιάς.



Σχήμα 2.4: Κατανομή πίεσης σε βαλβίδα καρδιάς (βιοιατρική)

Η τεχνολογία CFD προσελκύει την βιομηχανία καθώς είναι περισσότερο αποτελεσματική αλλά και συμφέρουσα οικονομικά σε σχέση με την πραγματοποίηση ενός πειράματος, σε πολλές περιπτώσεις. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι σε αρκετά δύσκολες και περίπλοκες προσομοιώσεις ροής, πολύ συχνά εμφανίζονται σφάλματα, τα οποία απαιτούν μεγάλη εξειδίκευση και τεχνική-μηχανική κατάρτιση, ώστε να εξασφαλιστούν τα λιγότερα δυνατά σφάλματα σε συνδιασμό με τα ακριβέστερα αποτελέσματα.

Ο ρόλος της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι πρωτεύουσας σημασίας καθώς τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης CFD είναι δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

<> Στην αρχική μελέτη νέων σχεδίων (conceptual design)

<> Στη λεπτομερή ανάπτυξη προϊόντων (detailed development)

<> Στην ανίχνευση προβλημάτων (troubleshooting)

Συμβάλλοντας έτσι:

<> Στον ανασχεδιασμό-βελτιστοποίηση (redesign-optimization)

## 2.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD

Στο CFD υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί. Στα μαθηματικά μοντέλα, οι επιλύσεις βασίζονται σε μοντέλα των πραγματικών φαινομένων (π.χ. μοντέλα τυρβώδους, συμπιεστότητας, χημικών αντιδράσεων, πολυφασικής ροής, κ.λπ.) και η ακρίβεια των λύσεων που αποκτώνται εξαρτάται από το πόσο θα είναι ακριβή τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

Η επίλυση με τον Η/Υ αναπόφευκτα εισάγει αριθμητικά σφάλματα. Πιο συγκεκριμένα, σφάλματα στρογγυλοποίησης εξαιτίας της πεπερασμένης μνήμης αποθήκευσης των αριθμών και σφάλματα αποκοπής εξαιτίας της προσέγγισης κατά τη διακριτοποίηση (μετατροπή διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές). Τα σφάλματα στρογγυλοποίησης θα υπάρχουν πάντα (αν και συνήθως είναι μικρά) ενώ τα σφάλματα αποκοπής τείνουν στο μηδέν με την πύκνωση του πλέγματος ή με τη χρήση σχημάτων μεγαλύτερης ακρίβειας.

Ακόμα έχουμε κάποια σφάλματα στις οριακές συνθήκες. Όπως με τα μαθηματικά μοντέλα, η ακρίβεια της λύσης είναι τόσο καλή όσο και οι αρχικές/οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν (δηλ. πόσο ρεαλιστικές είναι). Για παράδειγμα η ροή σε αγωγό με απότομη διεύρυνση. Τέλος το προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο είναι πιο ρεαλιστικό να αντιστοιχεί σε αναπτυγμένη ροή, παρά να είναι ομοιόμορφη.

## 2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ CFD

Η σημασία του πειράματος είναι δεδομένη. Μία ανάλυση CFD σε καμία περίπτωση δεν αντικαθιστά ένα πείραμα. Στην πραγματικότητα το συμπληρώνει. Βέβαια υπερέχει αυτού καθώς :

- Είναι φθηνότερη και πιο γρήγορη στη διεξαγωγή.

Η διεξαγωγή ενός πειράματος, ταυτίζεται με μια χρονοβόρα διαδικασία καθώς επίσης συνεπάγεται και έναν δαπανηρό προϋπολογισμό. Μια ανάλυση CFD είναι σαφώς πιο γρήγορη στη διεξαγωγή της, από την συντέλεση ενός πραγματικού πειράματος, μιας και η προσομοίωση του, αλλά και τα εκατομμύρια των υπολογισμών, πραγματοποιούνται σε πολύ πιο σύντομο χρονικό διάστημα, εν συγκρίσει με την πραγματική διαδικαστική μέθοδο. Μικρός χρονικός κύκλος σημαίνει ότι χρήσιμα δεδομένα μπορεί να εισαχθούν νωρίτερα στο στάδιο της σχεδίασης, και βέβαια, σε κάθε περίπτωση είναι πιο οικονομική από την πραγματική διαδικασία καθώς οι αριθμητικές προσομοιώσεις είναι σχετικά οικονομικές, με πτωτική τάση κόστους λόγω της συνεχώς μειούμενης τιμής των Η/Υ.

- Πραγματοποιείται σε πραγματική κλίμακα, χωρίς περιορισμούς και όρια.

Οι αναλύσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής έχουν την δυνατότητα προσομοίωσης πραγματικών συνθηκών και σε πραγματική κλίμακα όπως για παράδειγμα είναι μια πυρηνική αντίδραση, μια υπερηχητική ροή και άλλες πολλές πραγματικές εφαρμογές, οι οποίες βέβαια σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσαν να αναλυθούν και να μελετηθούν με πειραματική διαδικασία. Έτσι λοιπόν, αμέτρητες εφαρμογές που στην πράξη θα ήταν πολύ δύσκολο και σε αρκετές περιπτώσεις αδύνατο να μελετηθούν, πλέον με την βοήθεια του CFD, η μελέτη τους καθίσταται δυνατή.

- Δίνει πληροφορίες σε όλο το χώρο και όχι μόνο σε μεμονωμένα σημεία

Ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα του CFD είναι ότι, ενώ με ένα πείραμα τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι περιορισμένα, δηλαδή το εύρος του συστήματος προς ανάλυση είναι περιορισμένο, τα αποτελέσματα που μας δίνει το CFD αναφέρονται σαφώς σε ευρύτερο πεδίο του συστήματος, γεγονός που επιτυγχάνεται με τη δημιουργία του πλέγματος και με την πυκνότητα του. ( Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσα περισσότερα είναι τα κελιά του, άρα τόσα περισσότερα και τα σημεία προς ανάλυση). Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας.

## 2.7 CFD ΑΝΑΛΥΣΗ: ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε με την βασική διαδικασία που ακολουθούμε, καθώς μελετούμε μια πραγματική εφαρμογή με τη βοήθεια του CFD. Έτσι λοιπόν, τα βασικά βήματα κατά την ανάλυση προβλήματος με τη βοήθεια υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι συνοπτικά τα ακόλουθα :

### 2.7.1 Καθορισμός στόχων μοντελοποίησης

- Τί είδους αποτελέσματα ζητούμε και πώς θα τα χρησιμοποιήσουμε
- Ποία μαθηματικά μοντέλα θα χρειαστεί να ενσωματώσουμε στην ανάλυση
- Τί βαθμό ακρίβειας χρειαζόμαστε
- Πόσο γρήγορα χρειαζόμαστε τα αποτελέσματα

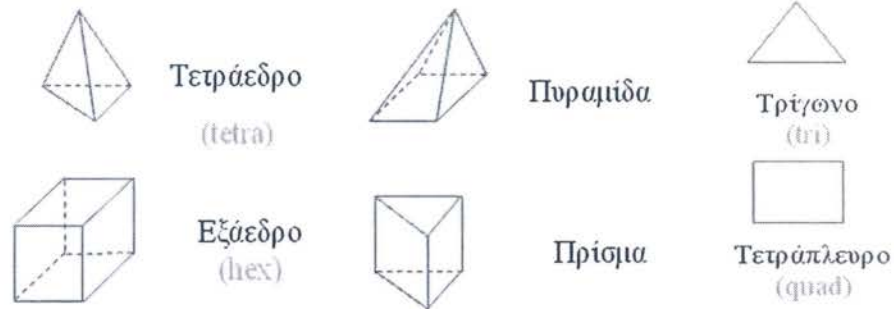
### 2.7.2 Καθορισμός πεδίου που θα επιλυθεί (χώρος & χρόνος)

- Πώς θα απομονωθεί ένα κομμάτι του ολικού φυσικού συστήματος
- Πού θα αρχίζει και θα τελειώνει το υπολογιστικό πεδίο
- Τί είδους οριακές συνθήκες θα χρειαστούν
- Μπορεί το πρόβλημα να απλοποιηθεί στις δυο διαστάσεις, υπάρχει ροϊκή και γεωμετρική συμμετρία

### 2.7.3 Σχεδιασμός & κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος

- Θα χρησιμοποιηθεί εξαεδρικό/τετραπλευρικό ή τετραεδρικό/τριγωνικό πλέγμα, υβριδικό, μη συμβατό πλέγμα
- Τί βαθμός ανάλυσης (resolution) πλέγματος απαιτείται σε κάθε τμήμα του πεδίου

- Θα χρησιμοποιηθεί προσαρμογή του πλέγματος για αύξηση της ανάλυσης (resolution)
- Πόσα στοιχεία πλέγματος απαιτούνται για το πρόβλημα



#### 2.7.4 Δημιουργία ενός αριθμητικού, μαθηματικού μοντέλου

- Για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να:
  - Επιλέξουμε τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα.
    - ↳ Τυρβώδους, καύσης, πολυφασικής ροής, κ.λπ.
  - Να ορίσουμε τις ιδιότητες των υλικών.
    - ↳ Ρευστά
    - ↳ Στερεά
    - ↳ Μίγματα
  - Να προδιαγράψουμε τις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. βαρύτητα, πίεση λειτουργίας).
  - Να προδιαγράψουμε τις οριακές συνθήκες σε όλα τα όρια.
  - Να δώσουμε μία αρχική λύση.
  - Να ρυθμίσουμε τη διαδικασία της επίλυσης (solver controls).
  - Να ρυθμίσουμε την παρακολούθηση της λύσης.

#### 2.7.5 Επίλυση & παρακολούθηση της λύσης

- Οι διακριτοποιημένες (αλγεβρικές) εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά.
  - Απαιτείται ένας αριθμός επαναλήψεων, έως ότου πάρουμε λύση με σύγκλιση.

- Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν:
  - Οι αλλαγές μεταξύ λύσεων διαδοχικών επαναλήψεων είναι αμελητέες.
    - ✦ Τα υπόλοιπα είναι ένας καλός δείκτης για τη σύγκλιση.
  - Overall property conservation is achieved.
- Η ακρίβεια μιας λύσης που έχει **συγκλίνει** εξαρτάται από:
  - Την καταλληλότητα και την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων.
  - Την πυκνότητα του πλέγματος (ανεξαρτησία)
  - Το "στήσιμο" του προβλήματος (Problem setup)

#### 2.7.6 Έλεγχος των αποτελεσμάτων

- Εξετάζουμε τα αποτελέσματα για να ελέγξουμε τη λύση για χρήσιμα συμπεράσματα.
- Η οπτικοποίηση μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για:
  - Το πως είναι η βασική δομή της ροής
  - Το αν υπάρχει αποκόλληση
  - Το αν δημιουργούνται κρουστικά κύματα, διατμητικές στοιβάδες, κ.λπ.
  - Το αν έχουν προβλεφθεί τα βασικά στοιχεία του προβλήματος
  - Το αν τα μαθηματικά μοντέλα και οι οριακές συνθήκες είναι κατάλληλες
  - Το αν υπάρχει τοπικό πρόβλημα σύγκλισης
- Τα εργαλεία για αριθμητική αναφορά των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται για ποσοτικές απαντήσεις για:
  - Την άνωση και την οπισθέλκουσα (γενικά για δυνάμεις σε τοιχώματα)
  - Μέση τιμή συντελεστή μετάδοσης θερμότητας
  - Μέσες τιμές σε επιλεγμένες επιφάνειες/όγκους

#### 2.8 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ & ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στο στάδιο αυτό καθορίζουμε το πρόβλημα και ασχολούμαστε με την προεπε-

ξεργασίας. Έτσι λοιπόν ξεκινώντας καθορίζουμε αρχικά τους στόχους μοντελοποίησης και στη συνέχεια το πεδίο στο οποίο θα επιλυθεί (δηλαδή το χώρο και το χρόνο). Αφού ολοκληρώσουμε το μέρος αυτό, συνεχίζουμε με το σχεδιασμό και στην κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος.

## 2.9 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ)

Τα βασικά βήματα σε αυτό το στάδιο είναι η δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου και η επίλυση και παρακολούθηση της λύσης. Για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να:

- Επιλέξουμε τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα. (Τυρβώδη, καύσης, πολυφασικής ροής, κ.λπ.)
- Ορίσουμε τις ιδιότητες των υλικών.  
(Ρευστά / Στερεά / Μίγματα)
- Προδιαγράψουμε τις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. βαρύτητα, πίεση λειτουργίας).
- Προδιαγράψουμε τις οριακές συνθήκες σε όλα τα όρια.
- Δώσουμε μία αρχική λύση.
- Ρυθμίσουμε τη διαδικασία της επίλυσης (solver controls).
- Ρυθμίσουμε την παρακολούθηση της λύσης

Μοντελοποίηση είναι η φυσικομαθηματική διατύπωση του προβλήματος σύμφωνα με τις συνεχείς αρχικές οριακές συνθήκες του προβλήματος / initial boundary value problem (IBVP)

Οι (IBVP) βρίσκονται σε μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων με τις κατάλληλες αρχικές οριακές συνθήκες.

Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει :

- <> Γεωμετρία και πεδίο ορισμού.
- <> Συντεταγμένες.



- <> Εξισώσεις.
- <> Συνθήκες ροής.
- <> Αρχικές & οριακές συνθήκες.
- <> Επιλογή του μοντέλου (για τις διάφορες εφαρμογές).

## **2.10 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ & ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ**

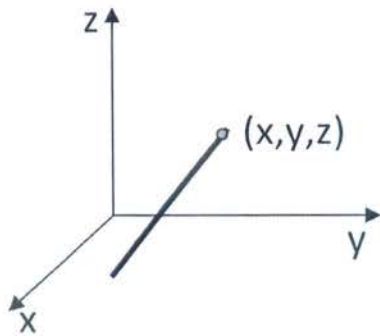
- Οι απλές γεωμετρίες μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν από ελάχιστες γεωμετρικές παραμέτρους (π.χ. κυλινδρικός σωλήνας ).
- Οι σύνθετες γεωμετρίες μπορούν να κατασκευαστούν είτε από τις διαφορικές εξισώσεις είτε καθώς εισάγονται οι βάσεις δεδομένων (database) της γεωμετρίας, στο λογισμικό του υπολογιστή,(π.χ. αεροτομή ).
- Όσον αφορά το πεδίο ορισμού, μας ενδιαφέρει το σχήμα και το μέγεθος.
- Τυπικές μέθοδοι
  - Γεωμετρική προσέγγιση
  - Ενοποίηση CAD/CAE : χρήση βιομηχανικών προτύπων όπως τα Parasolid, ACIS, STEP, or IGES, κ.α.

## **2.11 ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ**

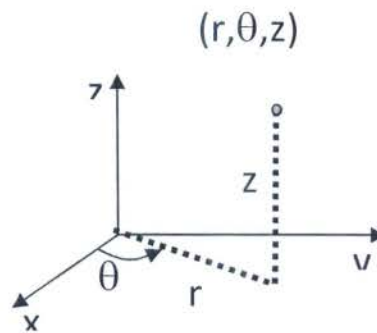
Διακρίνουμε τρία συστήματα συντεταγμένων :

- i) Καρτεσιανό (x,y,z),
- ii) Κυλινδρικό (r, θ, z), και
- iii) Σφαιρικό (r, θ, Φ), καθένα από τα οποία πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα, για την ορθότερη ανάλυση της γεωμετρίας (π.χ. κυλινδρικό σύστημα για ένα κυλινδρικό σωλήνα).

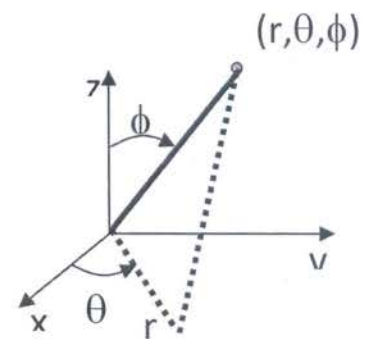
Καρτεσιανές



Κυλινδρικές



Σφαιρικές



Σχήμα 2.5: Συστήματα Συντεταγμένων.

## 2.12 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ

Βασισμένη στα φυσικά φαινόμενα της ρευστομηχανικής, η υπολογιστική ρευστοδυναμική διακρίνεται σε διαφορετικές κατηγορίες, χρησιμοποιώντας διαφορετικά κριτήρια :

- Ιξώδες ρευστού ( παχύρευστο ή λεπτόρευστο)
- Εξωτερική - Εσωτερική ροή ( όρια τοιχώματος)
- Τυρβώδης - Στρωτή ροή (αριθμός Reynolds)
- Ασυμπίεστη- Συμπιεστή
- Απλή-Πολυφασική
- Φαινόμενα που εξαρτώνται από θερμοκρασία-πυκνότητα
- Ελεύθερη επιφανειακή ροή και επιφανειακή τάση
- Χημικές αντιδράσεις και καύση

### 2.13 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ & ΜΗ, ΡΟΕΣ)

- Οι αρχικές συνθήκες δεν πρέπει να επιρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, παρά μόνο την διαδικασία της ανάλυσης, π.χ. ο αριθμός των επαναλήψεων (σταθερή ροή), ή ο χρόνος των βημάτων (μη σταθερή ροή).
- Περισσότερες δικαιολογημένες υποθέσεις επιταχύνουν τη διαδικασία.
- Για σύνθετα προβλήματα ασταθούς ροής, πολλές φορές τρέχουμε το πρόγραμμα σαν να είχαμε πρόβλημα σταθερής ροής για περισσότερες επαναλήψεις, έτσι ώστε να πάρουμε καλύτερες αρχικές συνθήκες.

### 2.14 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες, αυτές πρέπει να δηλώνονται πάνω στη δεδομένη γεωμετρία, π.χ. τα τοιχώματα (walls), η είσοδος και η έξοδος του ρευστού ή των σωματιδίων ανάλογα, π.χ. [inlet (velocity inlet, mass flow rate, constant pressure, κ.τ.λ.), Outlet ή Outflow (constant pressure, velocity convective, numerical beach, zero-gradient, κ.τ.λ.).]

### 2.15 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Οι κώδικες CFD έχουν σχεδιαστεί /προγραμματιστεί ώστε να επιλύουν βασικά φαινόμενα μηχανικής ρευστών, εφαρμόζοντας διαφορετικά μοντέλα. Τέτοια μοντέλα είναι τα μοντέλα τυρβώδους ροής και τα μοντέλα ελεύθερης επιφανειακής ροής.

Τυρβώδεις ροές με μεγάλο αριθμό Reynolds συνήθως περιλαμβάνουν μικρές και μεγάλες κλίμακες στροβιλοειδών κατασκευών καθώς και πολύ λεπτό οριακό στρώμα δίπλα στο τοίχωμα.

- *Μοντέλα τυρβώδους ροής*

Τα μοντέλα αυτά είναι πιο ακριβή όσον αφορά την επίλυση εξισώσεων, αλλά πιο ακριβά για τις τυρβώδεις ροές ενώ παράλληλα κάνουν προβλέψεις για τη ροή, αποτελεσματικές (αξιόπιστες) μέσα στο οριακό στρώμα, αλλά όχι τόσο ακριβείς και στην χωρισμένη περοχή.

- *Μοντέλα ελεύθερης επιφανειακής ροής*

Στα μοντέλα αυτής της μορφής, το πλέγμα μετακινείται καταλαμβάνοντας την ελεύθερη επιφάνεια, περιορισμένο σε πλάγια κυματοειδή μορφή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι μέσα στις επιλογές του χρήστη, συμπεριλαμβάνεται και η επιλογή των μοντέλων τα οποία προσχεδιάζονται από τους κώδικες, ενώ οι αρχικές και οριακές συνθήκες :δεν προσχεδιάζονται από τους κώδικες και πρέπει να οριστούν από τον χρήστη, ανάλογα με τις εφαρμογές

## **2.16 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΕΠΙΛΥΣΗ & ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ**

Αφού έχει ολοκληρωθεί η δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου, επόμενο βήμα είναι η επίλυση και η παρακολούθηση της λύσης, η οποία γίνεται με τις παρακάτω μεθόδους :

### **2.16.1 Αριθμητικές μέθοδοι**

Οι συνεχείς αρχικές οριακές συνθήκες χαρακτηρίζονται από αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες επιλύουν το σύστημα με προσεγγιστικές λύσεις.

Οι αριθμητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν :

- Περιγραφικές μεθόδους.
- Μεθόδους επίλυσης(Solvers) και αριθμητικές παραμέτρους
- Δημιουργία πλέγματος και μετασχηματισμό του.
- Μεγάλης ακρίβειας υπολογισμούς.

### **2.16.2 Περιγραφικές μέθοδοι**

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (όταν πρόκειται για πλέγμα καθορισμένης μορφής) και μέθοδος πεπερασμένων όγκων (για πλέγμα ακανόνιστης μορφής).
- Καθε μια από τις παραπάνω μεθόδους αποφέρει την ίδια λύση, εάν το πλέγμα είναι αρκετά καλό. Ωστόσο, τότε η μια μέθοδος και τότε η άλλη, είναι περισσότερο χρήσιμη (και κατά συνθήκη κατάλληλη) από την άλλη, ανάλογα με τη χρήση.
- Οι περισσότερο ποιοτικές αριθμητικές μέθοδοι συνήθως αποφέρουν αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια αλλά **μαλλον** ασταθή εξαιτίας λιγότερης αριθμητικής dissipation.

- Explicit μέθοδοι μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν αλλά θα δώσουν μόνο κατά συνθήκη σωστές μερικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιορίζονται από το χρόνο του βήματος.

- Η περιγραφική μέθοδος θεωρείται ευσταθής αν δεν μεγαλώνει τα σφάλματα τα οποία εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της αριθμητικής επίλυσης.

- Pre-conditioning μέθοδος χρησιμοποιείται όταν είναι αδύνατο να επιλυθεί το γραμμικό σύστημα, όπως π.χ. περιπτώσεις πολυφασικής ροής.

### **2.16.3 Μέθοδοι επίλυσης (solvers) & αριθμητικές παράμετροι**

<> Τα είδη των Solvers μπορούν να είναι PETSC solver, tridiagonal, pentadiagonal solvers, solution-adaptive solver, πολλαπλού πλέγματος (multi-grid solvers) κ.α.

<> Οι μέθοδοι επίλυσης (Solvers) μπορούν να είναι είτε άμεσες είτε επαναληπτικές. Οι αριθμητικές παράμετροι πρέπει να είναι καθορισμένες, για τον έλεγχο των υπολογισμών.

<> Οι αριθμητικές παράμετροι πρέπει να προσδιορίζονται 'ώστε να ελέγχουν τους υπολογισμούς.

- Διαφορετική απεικόνιση αριθμητικών συμβόλων
- Αλλαγές των αποτελεσμάτων μεταξύ των επαναλήψεων
- Αριθμός επαναλήψεων για σταθερή ροή ή αριθμός βημάτων για μεταβλητή ροή
- Απλές / Διπλές ακρίβειες.

### **2.16.4 Υψηλή υπολογιστική λειτουργία & διαδικασία εργασίας**

Οι υπολογισμοί μιας ανάλυσης CFD απαιτούν υψηλή υπολογιστική ικανότητα η οποία επιτυγχάνεται με τους υπερ\_υπολογιστές με μια μέθοδο πολλαπλών περασμάτων (multi-block technique).

Όπως απαιτείται, με την multi-block technique, οι CFD κώδικες πρέπει να αναπτυχθούν μέσα από μια λειτουργία [Message Passing Interface] (MPI) Standard, ώστε να μεταφέρουν δεδομένα μεταξύ διαφορετικών. Επίσης, όσον αφορά στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων (περίγραμμα, βέλη ταχύτητας, γραμμές ροής), η χρησιμότητα των CFD κωδίκων ποικίλει και διαφέρει ανάλογα με τις εφαρμογές, όπως για παράδειγμα, έρευνα αλληλεπίδρασης ρευστών σε ροή με φουσαλίδες, μελέτη μεγάλων, χωρισμένων

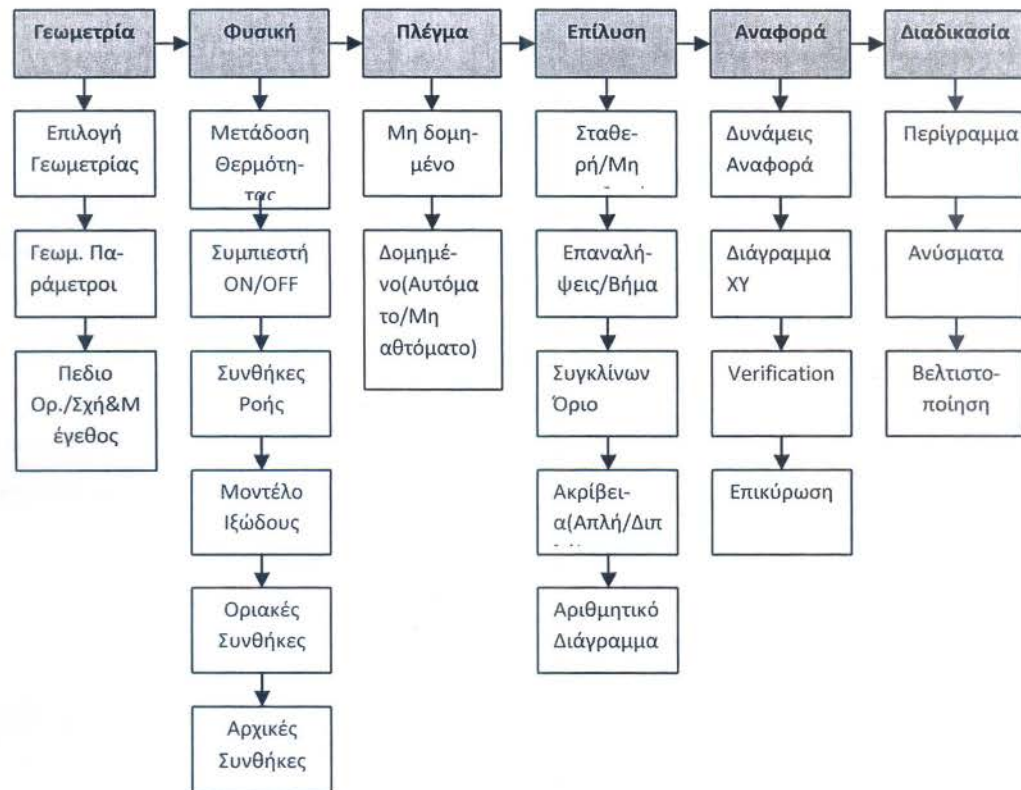
κυματοειδών ροών σε ελεύθερη επιφάνεια.

Η διαδικασία εξαρτάται από τον σκοπό και καθορίζεται από τις συνθήκες ροής του προβλήματος. Έτσι, ανάλογα με την εφαρμογή, επιλέγονται και διαφορετικοί κώδικες (π.χ. αεροσκάφη, πλοία, πολυφασικές ροές, καύση κ.α.).

Έτσι λοιπόν κάθε φορά που επιλέγουμε τους ανάλογους CFD κώδικες, τα στάδια από τα οποία περνάμε, για την επίλυση του προβλήματος, είναι τα εξής::

- Γεωμετρία
- Φυσική
- Πλέγμα
- Επίλυση (Solve)
- Αναφορά (Report)
- Διαδικασία (Post Processing)

Η διαδικασία της CFD ανάλυσης, μπορεί να παρουσιαστεί συνοπτικά, με το παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Σχήμα 2.6: Σχεδιάγραμμα αναπαράστασης CFD διαδικασίας

## 2.17 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Στο στάδιο αυτό της γεωμετρίας, μας ενδιαφέρει η επιλογή κατάλληλου συστήματος συντεταγμένων. Πιο αναλυτικά ασχολούμαστε με τον καθορισμό του μεγέθους και του σχήματος, δηλαδή με την επιλογή των κατάλληλων σχημάτων που χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη επίλυση της γεωμετρίας.

Όσον αφορά στους εμπορικούς κώδικες, η γεωμετρία κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας εμπορικό λογισμικό(είτε χωριστά από εμπορική κωδικοποίηση, όπως π.χ. το Gambit, είτε συνδιαζόμενο, όπως π.χ. το Fluent).

## 2.18 ΦΥΣΙΚΗ

Με την επιστήμη της φυσικής, θα μελετήσουμε έννοιες όπως οι συνθήκες ροής και οι ιδιότητες των ρευστών. Λέγοντας συνθήκες ροής, ασφαλώς κάνουμε λόγο για το είδος της ροής, δηλαδή για το αν έχουμε στρωτή ή τυρβώδη ροή, ενώ οι ιδιότητες των ρευστών οι οποίες θα μας απασχολήσουν είναι η πυκνότητα, το ιξώδες και άλλες.

Οι συνθήκες ροής και οι ιδιότητες των ρευστών συνήθως αναπαρίστανται σε μη αδιάστατη μορφή με βιομηχανικό\_εμπορικό λογισμικό, συμπεριλαμβανομένων και αδιάστατων μεταβλητών.

## 2.19 ΠΛΕΓΜΑ

Τα πλέγματα θα πρέπει να είναι κατάλληλα κατασκευασμένα έτσι ώστε να μπορούν να επιλύουν χαρακτηριστικά ροής τα οποία εξαρτώνται από παραμέτρους συνθηκών ροής (π.χ. αριθμός Re).

Το πλέγμα μπορεί να δημιουργηθεί είτε από εμπορικούς κώδικες (π.χ. Gambit), είτε με διερευνητικούς /έπειτα από μελέτη (σύμφωνη σχεδίαση). Επίσης, το πλέγμα μαζί με τις οριακές συνθήκες πρέπει να εξαχθούν από εμπορικό λογισμικό, σε βασικό σχήμα και διάταξη (format), το οποίο θα αναγνωρίζεται (υποστηρίζεται) από τους παραπάνω διερευνητικούς κώδικες, ή από άλλο εμπορικό λογισμικό.

## 2.20 ΕΠΙΛΥΣΗ & ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ

Οι διακριτοποιημένες (αλγεβρικές) εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά. Γι'αυτό απαιτείται ένας αριθμός επαναλήψεων, έως ότου πάρουμε λύση με σύγκλιση. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν οι αλλαγές μεταξύ λύσεων διαδοχικών επαναλήψεων είναι αμελητέες.

Η ακρίβεια μίας λύσης που έχει συγκλίνει εξαρτάται από την καταλληλότητα και την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων, από την πυκνότητα του πλέγματος (ανεξαρτησία), από το "στήσιμο" του προβλήματος (Problem setup). Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζουν η επιλογή των απαραίτητων αριθμητικών παραμέτρων αλλά και η επιλογή των κατάλληλων Solvers.

Μία λύση που έχει συγκλίνει και είναι ανεξάρτητη του πλέγματος, ενός καλά "στημένου" μοντέλου μας δίνει χρήσιμα αποτελέσματα.

## 2.21 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ / ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΣΜΑΤΩΝ

Στο στάδιο του ελέγχου ασχολούμαστε με την εξέταση των αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να ελέγξουμε τη λύση με σκοπό να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Η οπτικοποίηση μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για το πως είναι η βασική δομή της ροής και για το αν υπάρχει αποκόλληση. Επίσης μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για το αν δημιουργούνται κρουστικά κύματα, διατμητικές στοιβάδες, κ.λπ. Ακόμα, για το αν έχουν προβλεφθεί τα βασικά στοιχεία του προβλήματος, αν τα μαθηματικά μοντέλα και οι οριακές συνθήκες είναι κατάλληλες ακόμα και για το αν υπάρχει τοπικό πρόβλημα σύγκλισης.

Τα εργαλεία για αριθμητική αναφορά των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται για ποσοτικές απαντήσεις για την άνωση και την οπισθέλκουσα (γενικά για δυνάμεις σε τοιχώματα), για μέση τιμή συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και για μέσες τιμές σε επιλεγμένες επιφάνειες ή όγκους.



## **2.22 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ**

Οι τυπικές μέθοδοι επίλυσης ενός προβλήματος CFD για την διασφάλιση μιας αξιόπιστης λύσης ξεκινούν με μια αρχική υπόθεση κ μια πορεία εκτέλεσης ή επαναλήψεων, μέχρις ότου επιτευχθεί μια τέτοια λύση. Το μέγεθος στο οποίο θα σταματήσει η σειρά των συνεχόμενων πράξεων καθώς και τα τελικά επίπεδα επίλυσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια τέλους στις επαναλυτικές μεθόδους επίλυσης.

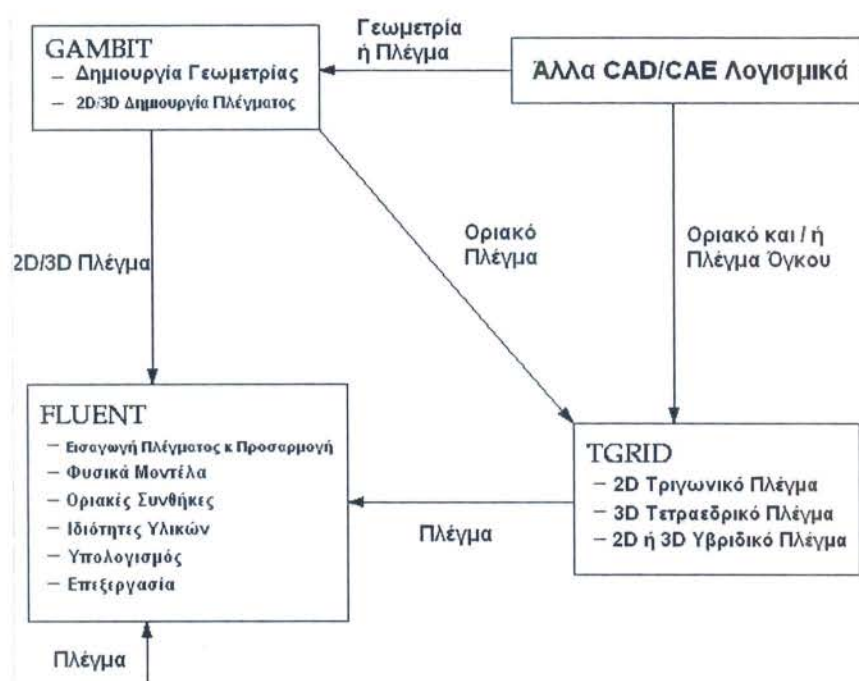
## **2.23 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν ύστερα από ένα πείραμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, παρουσιάζονται με διάφορες μορφές, με σκοπό να βοηθήσουν τον εκάστοτε χρήστη να έχει όσο το δυνατόν ολοκληρωμένη εικόνα των δεδομένων που προέκυψαν. Έτσι λοιπόν τα αποτελέσματα ενός πειράματος, μπορεί να έχουν τη μορφή γραφημάτων πλέγματος, ισουψών και ανυσμάτων, γραμμές ροής και τροχιές σωματιδίων, διαγράμματα XY, καθώς και με κινούμενα αποτελέσματα (animations). Επίσης μπορούν να παρουσιάζονται σαν δεδομένα αριθμητικής αναφοράς, τα οποία έχουν να κάνουν με ισοζύγια μάζας και θερμότητας, ολοκληρώματα και μέσες τιμές σε σημεία, γραμμές, επιφάνειες & όγκους, καθώς και με δυνάμεις και ροπές σε στερεά τοιχώματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### GAMBIT & FLUENT

Στο συγκεκριμένο αυτό κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα εμπορικό λογισμικό (GAMBIT) με το οποίο κατασκευάσαμε τη γεωμετρία της άσκησης μας, δηλαδή τον αφυγραντήρα και θα κάνουμε λόγο για τις βασικές λειτουργίες του, τις δυνατότητες του και τη σημασία που έχει, όχι μόνο στη δική μας περίπτωση αλλά και γενικότερα σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Επίσης θα γίνει αναφορά και στο (FLUENT) που χρησιμοποιήσαμε για το πείραμα μας, το οποίο έρχεται σε άμεση "συνεργασία" με το GAMBIT και θα μιλήσουμε για τις βασικές λειτουργίες του και την σημασία του σε μια CFD εφαρμογή.



Σχήμα 3.1: Λογικό Διάγραμμα Διαδικασίας CFD μέσω λογισμικών πακέτων.

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GAMBIT

#### GAMBIT

#### Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit

Το GAMBIT είναι ένας ολοκληρωμένος προεπεξεργαστής για την ανάλυση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (C.F.D.) με τις παρακάτω δυνατότητες:

- Κατασκευή και εισαγωγή γεωμετρίας

- Χρησιμοποιώντας σύστημα ACIS για την μοντελοποίηση στερεών
- Εισαγωγή STEP, Parasolid, IGES κ.α.
- Τροποποίηση και 'καθαρισμός' των εισαχθέντων δεδομένων.
- Δημιουργία πλέγματος για όλους τους λύτες (Solvers) του Fluent συμπεριλαμβανομένου και των FIDAP και POLYFLOW
- Δομημένα και μη εξακύλινδρα, τετρακύλινδρα, πυραμίδες και πρίσματα.
- Εξέταση ποιότητας πλέγματος.
- Εισαγωγή οριακών ζωνών.

### 3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ

Η επικρατέστερη ακολουθία λειτουργιών είναι η ακόλουθη :

- Αρχικό Setup, το οποίο περιλαμβάνει την επιλογή λύτη, το μεγέθους πλέγματος κ.α.. Στη συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία της γεωμετρίας (και στη συνέχεια ή εισαγωγή πλέγματος). Δηλαδή θα έχουμε αναλυτικά την δημιουργία ολικής γεωμετρίας και μετέπειτα την αποσύνθεση σε τομείς που μπορούν να δημιουργηθούν πλέγματα

- Δημιουργία πλέγματος η οποία περιλαμβάνει την τοπική δημιουργία πλέγματος, δηλαδή σε μια πλευρά, στο οριακό στρώμα για παράδειγμα και επίσης την γενική δημιουργία πλέγματος: πρόσωπο (Face), όγκος. Τέλος ακολουθεί η εξέταση του πλέγματος και ο προσδιορισμός των ζωνών, δηλαδή αν έχουμε να κάνουμε με συνεχείς ή οριακές ζώνες.

#### 3.2.1 Γραφικό περιβάλλον χρήστη [graphical user interface (GUI)]

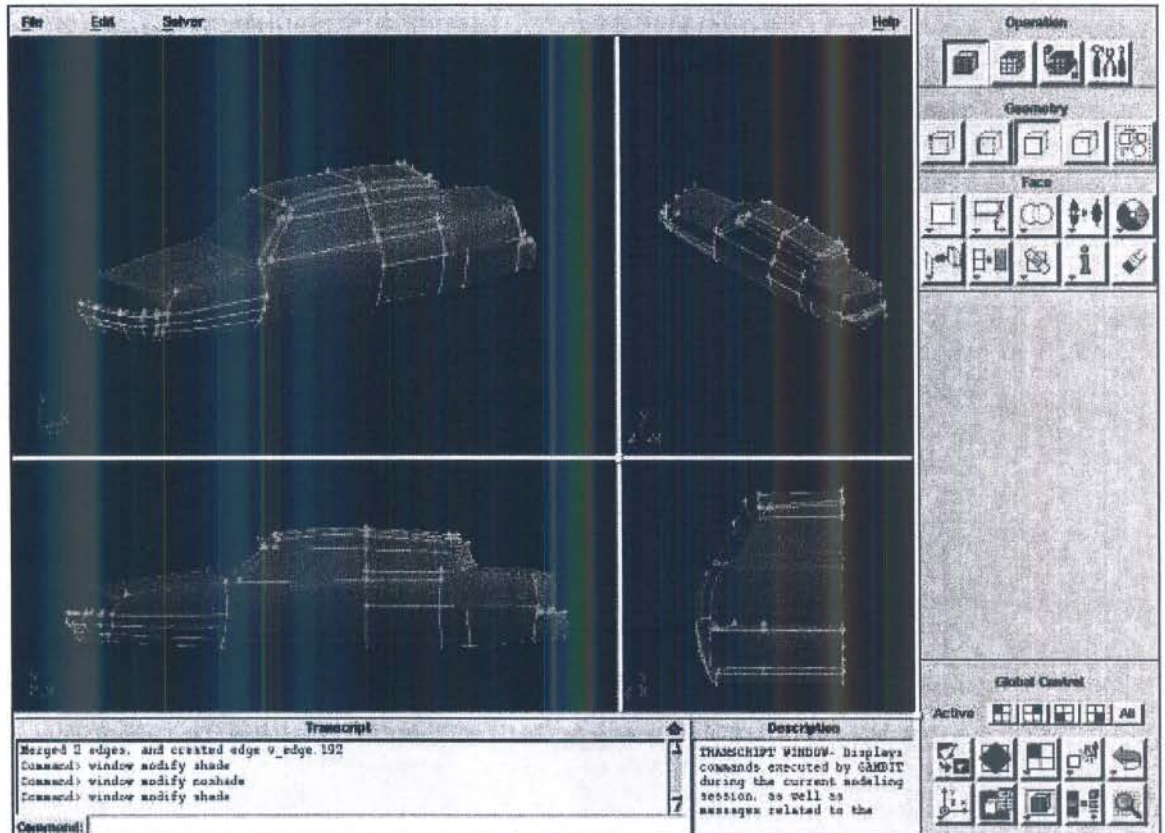
Το γραφικό περιβάλλον του χρήστη αποτελείται από:

#### 3.2.2 Παράθυρο γραφικών

Είναι η περιοχή στην οποία εμφανίζεται το γεωμετρικό μοντέλο και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του GUI.

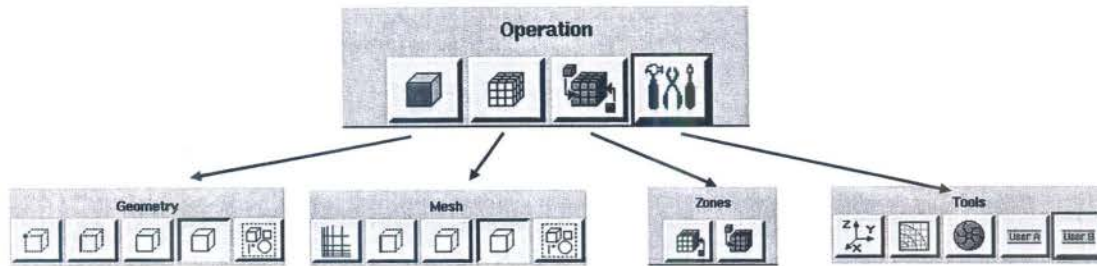
**ΚΥΡΙΟ ΜΕΝΟΥ**, το οποίο περιλαμβάνει τις βασικές λειτουργίες:

- File, από όπου έχουμε τις εξής επιλογές : δημιουργία, άνοιγμα, αποθήκευση, εκτύπωση γραφικών, τροποποίηση και τρέξιμο αρχείων, εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων και έξοδος.
- Edit, από όπου μπορούμε να κάνουμε τροποποίηση τίτλων, αρχείων, παραμέτρων.
- Solver, περιλαμβάνει τον ορισμό του υπολογιστικού λύτη.
- Help, όπως και όλα τα λογισμικά προγράμματα, επιτρέπει βοήθεια μέσω διαδικτύου.



Σχήμα 3.2.: Γραφικό περιβάλλον χρήστη.

### 3.2.3 Μενού εργαλείων λειτουργιών



#### Γεωμετρία

Σημείο  
Άκρη  
Πλευρά  
Όγκος  
Ομάδα

#### Πλέγμα

Οριακό Στρώμα  
Άκρη  
Πλευρά  
Όγκος  
Ομάδα

#### Οριακές Συνθήκες

Οριακοί τύποι Οριακές τροποποιήσεις  
Τύποι συνεχείας  
Τροποποιήσεις συνεχείας

#### Εργαλεία

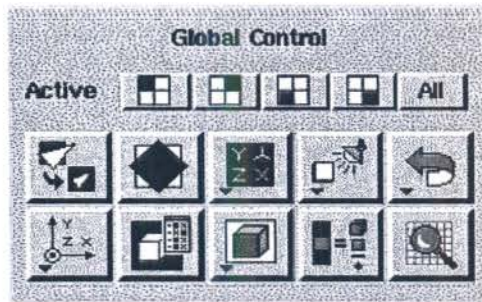
Σύστημα συντεταγμένων  
Λειτουργίες μεγέθους  
G/Turbo  
Εργαλεία χρήστη

**Σχήμα 3.3:** Μενού Εργαλείων Λειτουργιών

Βρίσκεται στο επάνω δεξιά μέρος και περιλαμβάνει ένα πεδίο από κουμπιά εντολών, καθένα από τα οποία εκτελεί μία συγκεκριμένη εντολή που συσχετίζεται με την διαδικασία δημιουργίας γεωμετρικού μοντέλου και πλέγματος, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα

### 3.2.4 Γενική γραμμή εργαλείων ελέγχου λειτουργιών

Περιέχει 15 ενεργά κουμπιά εντολών η επάνω σειρά επιτρέπει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ξεχωριστών τεταρτημόριων γραφικών παραθύρων ενώ η κάτω σειρά επιτρέπει τον έλεγχο της εμφάνισης των γραφικών παραθύρων ή του μοντέλου που φαίνεται στα γραφικά παράθυρα καθώς και τις επιλογές undo και redo, δηλαδή αναίρεση και το αντίθετο.



Σχήμα 3.4 : Γενική Γραμμή Εργαλείων ελέγχου Λειτουργιών.

### 3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ




Το Μενού γεωμετρίας περιέχει κουμπιά εντολών που επιτρέπουν την δημιουργία, μετακίνηση, επεξεργασία και διαγραφή σημείων, πλευρών, προσώπων και όγκων. Το μενού περιέχει επίσης κουμπιά εντολών που επιτρέπει να εκτελούνται λειτουργίες συσχετισμένες με ομάδες και τοπολογικές οντότητες.

Σημείο	Πλευρά	Πρόσωπο	Όγκος	Ομάδα

Πίνακας 3.1 : Μενού Γεωμετρίας










#### 3.3.1 Εντολές σημείων

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	Δημιουργία σημείου	Δημιουργεί ένα πραγματικό σημείο σε οποιαδήποτε τοποθεσία, πραγματικό η εικονικό σημείο σε πλευρά ή πρόσωπο, εικονικό σημείο συσχετισμένο με όγκο, ή ένα πραγματικό ή εικονικό σημείο στην τομή δύο πλευρών.
	Ολίσθηση εικονικού σημείου	Αλλάζει την θέση ενός εικονικού σημείου κατά μήκος της πλευράς ή του προσώπου στο οποίο δημιουργήθηκε.
	Σύνδεση/Αποσύνδεση σημείων	Συνδέει πραγματικά και εικονικά σημεία, αποσυνδέει σημεία που είναι κοινά σε δύο ή περισσότερες οντότητες.
	Επεξεργασία χρώματος και περιγραφής σημείων	Αλλάζει το χρώμα ή την περιγραφή των σημείων

	<b>Μετακίνηση/Αντιγραφή σημείων</b> <b>Ευθυγράμμιση σημείων</b>	Μετακινεί ή αντιγράφει σημεία,, ευθυγραμμίζει σημεία και συνδεδεμένες γεωμετρίες.
	<b>Μετατροπή σημείων</b> <b>(Εικονικά σε πραγματικά)</b>	Μετατρέπει εικονικά σημεία σε πραγματικά.
	<b>Σύνοψη σημείων</b> <b>Έλεγχος σημείων</b> <b>Πληροφορίες σημείων</b> <b>Ολικές οντότητες</b>	Παρουσιάζει σύνοψη πληροφοριών σημείων, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας ενός σημείου ή μίας γεωμετρίας, εμφανίζει λίστα πληροφοριών σημείων.
	<b>Διαγραφή Σημείων</b>	Διαγραφή σημείων

*Πίνακας 3.2: Σχηματική Διάταξη Εντολών Σημείων*

### 3.3.2 Εντολές προσώπων

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	<b>Ανάπτυξη Προσώπου</b>	Δημιουργία προσώπου από ήδη υπάρχουσες πλευρές ή σημεία
	<b>Δημιουργία Προσώπου</b>	Δημιουργία προσώπου από τα τρία βασικά σχήματα (παράλληλογράμμο, κύκλος, έλλειψη)
	<b>Λειτουργίες Boolean</b>	Ένωση, τομή αφαίρεση προσώπων
	<b>Σύνδεση-Αποσύνδεση προσώπων</b>	Συνδέει πραγματικά και εικονικά πρόσωπα, Αποσυνδέει κοινόχρηστα πρόσωπα
	<b>Τροποποίηση χρωμάτων προσώπων-ετικετών</b>	Τροποποίηση χρωμάτων προσώπων-ετικετών
	<b>Μετακίνηση, Αντιγραφή, Ευθυγράμμιση προσώπων</b>	Μετακινεί, αντιγράφει πρόσωπα, ευθυγραμμίζει πρόσωπα και συνδεδεμένες γεωμετρίες
	<b>Διάσπαση, συγχώνευση, απλοποίηση προσώπων,</b>	Διάσπαση ,συγχώνευση, απλοποίηση προσώπων,
	<b>Εξομάλυνση, επιδιόρθωση μετατροπή προσώπων,</b>	Εξομάλυνση επιδιόρθωση πραγματικών προσώπων, μετατροπή εικονικών προσώπων σε πραγματικά
	<b>Σύνοψη προσώπων</b> <b>Έλεγχος προσώπων</b> <b>Πληροφορίες προσώπων</b> <b>Ολικές οντότητες</b>	Παρουσιάζει σύνοψη πληροφοριών <b>προσώπων</b> , ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας ενός <b>προσώπου</b> ή μίας γεωμετρίας, εμφανίζει λίστα πληροφοριών <b>προσώπων</b>

	Διαγραφή προσώπων	Διαγραφή προσώπων
---	-------------------	-------------------

*Πίνακας 3.3: Σχηματική Διάταξη Εντολών Προσώπων.*




### 3.3.3 Δημιουργία πραγματικού σημείου

Για την δημιουργία πραγματικού σημείου απαιτείται ο προσδιορισμός του συστήματος συντεταγμένων. Οι τύποι των συστημάτων συντεταγμένων είναι όπως ήδη γνωρίζουμε το Καρτεσιανό, το Κυλινδρικό και το Σφαιρικό. Επιλέγοντας λοιπόν τον ανάλογο τύπο συστήματος συντεταγμένων ανάλογα με τη χρήση, δηλαδή αν θέλουμε για παράδειγμα να δημιουργήσουμε δυσδιάστη ή τρισδιάστατη γεωμετρία, δημιουργούμε κάθε φορά, πραγματικά σημεία.


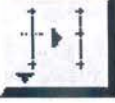



Ένα σημείο που επίσης πρέπει να προσέξουμε είναι εάν το σύστημα συντεταγμένων μας, βάσει του οποίου εμείς καλούμαστε να δημιουργήσουμε πραγματικά σημεία, είναι εάν το σύστημα μας είναι Γενικό ή Ειδικό. Γνωρίζοντας κάθε φορά το είδος του συστήματος, καθορίζεται η τοποθεσία του σημείου στο χώρο ή στο επίπεδο, ανάλογα. Με λίγα λόγια ανάλογα με το εκάστοτε σύστημα, ορίζουμε με διαφορετικό τρόπο τις συντεταγμένες των σημείων, δηλαδή στο γενικό σύστημα, οι συντεταγμένες ορίζονται κάθε φορά από την αρχή των αξόνων του συστήματος (0,0) ή (0,0,0,), ενώ στο ειδικό, οι συντεταγμένες ορίζονται κάθε φορά με βάση τις συντεταγμένες του προηγούμενου σημείου.

Τέλος, κάθε σημείο έχουμε τη δυνατότητα να το κάνουμε "ορατό" και ευδιάκριτο μέσα στο γραφικό περιβάλλον και φυσικά στη γεωμετρία μας μετέπειτα προσδίδοντας του ετικέτα ( vertex1.). Με τον τρόπο αυτό μπορούμε, όποτε χρειάζεται να βρίσκουμε την θέση του συγκεκριμένου σημείου στο γραφικό περιβάλλον.

### 3.3.4 Εντολές πλευρών

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	Δημιουργία πλευράς	Δημιουργία πραγματικής ή εικονικής πλευράς
	Σύνδεση/Αποσύνδεση πλευρών	Συνδέει πραγματικές και εικονικές πλευρές που είναι κοινές σε δύο ή περισσότερες οντότητες
	Επεξεργασία χρώματος και περιγραφής πλευρών	Αλλάζει το χρώμα ή την περιγραφή των πλευρών



	<b>Μετακίνηση/Αντιγραφή πλευρών</b> <b>Ευθυγράμμιση πλευρών</b>	Μετακινεί ή αντιγράφει σημεία,, ευθυγραμμίζει σημεία και συνδεδεμένες γεωμετρίες
	<b>Διαχωρισμός/Συνένωση πλευρών</b>	Διαχωρίζει ή ενοποιεί πλευρές
	<b>Εξομάλυνση-μετατροπή πλευρών</b>	Εξομαλύνει τις πλευρές για την επισκευή της κακής γεωμετρίας και την μείωση της πολυπλοκότητας, μετατρέπει πραγματικές σε εικονικές πλευρές
	<b>Σύνοψη πλευρών</b> <b>Έλεγχος πλευρών</b> <b>Εξέταση πλευρών</b>	Εμφανίζει σύνοψη πληροφοριών πλευρών, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας των πλευρών και της γεωμετρίας
	<b>Διαγραφή πλευρών</b>	Διαγράφει πραγματικές και εικονικές πλευρές

*Πίνακας 3.4: Σχηματική Διάταξη Εντολών Πλευρών.*

### 3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Το GAMBIT παρέχει ένα πλήρες σετ από γραμμές εργαλείων δημιουργίας πλέγματος. Η σωστή κατασκευή ενός πλέγματος είναι σημαντική έτσι ώστε να πάρουμε αποτελέσματα ακριβείας. Αυτό επιτυγχάνεται με τις αυτοματοποιημένες επιλογές μορφοποίησης πλέγματος που παρέχει το πρόγραμμα. Επίσης μπορεί να επεξεργαστεί το πλέγμα αυτό κάνοντας το πιο πυκνό στα επιθυμητά σημεία.

Γεωμετρικά μοντέλα τα οποία περιέχουν ρωγμές, τρύπες ή κενά, θα δημιουργήσουν προβλήματα στη διαδικασία κατασκευής του πλέγματος. Επομένως έχει σημασία να παρεμβληθεί ένα στάδιο ελέγχου της γεωμετρίας. Στο στάδιο αυτό διεξάγεται έλεγχος της αρχικής γεωμετρίας, ώστε να εξασφαλίσουμε ότι δεν υπάρχουν παράγοντες(γεωμετρικές ατέλειες) οι οποίοι θα μπορούσαν να προκαλέσουν σφάλματα στη συνέχεια. Οι γεωμετρικές αυτές ατέλειες οι οποίες εντοπίζονται από αυτό τον έλεγχο, επισημαίνονται με σκοπό να διορθωθούν μέσα σε ένα γεωμετρικό περιβάλλον.

Το GAMBIT παρέχει μια μεγάλη ποικιλία εργαλείων τα οποία μπορούν να διεξάγουν με επιτυχία αναλύσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής στις εκάστοτε ανάγκες και απαιτήσεις.

Για πολλούς μηχανικούς η μοντελοποίηση CFD έχει μεγαλύτερη σημασία, όσον αφορά στη φυσική παρά στη γεωμετρία. Σε αυτή την περίπτωση αρκεί η γεωμετρία να

παρουσιαστεί με απλά σχήματα όπως με σφαίρες, πρίσματα, κώνους και κυλίνδρους. Το GAMBIT παρέχει ένα περιβάλλον πρότυπων γεωμετρικών κατασκευών, το οποίο απευθύνεται σε χρήστες οι οποίοι επιδιώκουν, ακόμη και στις απλές γεωμετρίες που δημιουργούν, να "τρέχει" αμέσως το πρόγραμμα.

Παρακάτω φαίνεται η γενική μορφή ενός πλέγματος(mesh or grid) και τα μέρη που το συνθέτουν.

### 3.4.1 Διάβασμα / μέρη πλέγματος

Τα μέρη του πλέγματος ορίζονται στο GAMBIT και είναι τα παρακάτω :

**Cell:** Είναι πεπερασμένοι όγκοι από τους οποίους αποτελείτε το πεδίο .Το υπολογιστικό πεδίο παριστάνεται από πλέγμα που αντιπροσωπεύει περιοχές ρευστού και στερεού.

**Face** = Είναι το όριο ενός cell

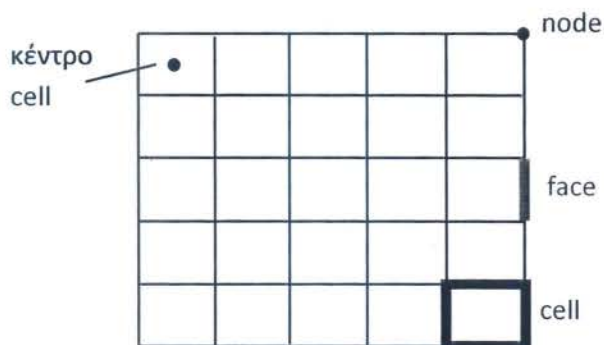
**Edge** = Όριο ενός face (μόνο για 3D)

**Node** = Σημείο πλέγματος

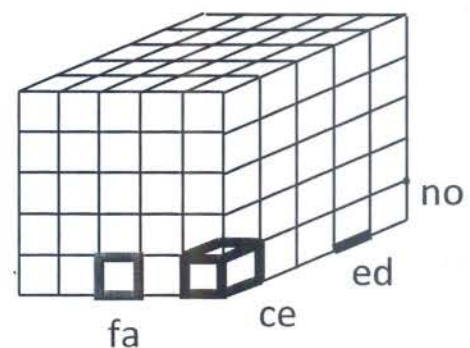
**Zone** = Σύνολο από nodes, faces, και/ή cells

Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονίσουμε ότι οι οριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε face zones.

-Οι ιδιότητες των υλικών και οι όροι πηγής εφαρμόζονται σε cell zones.

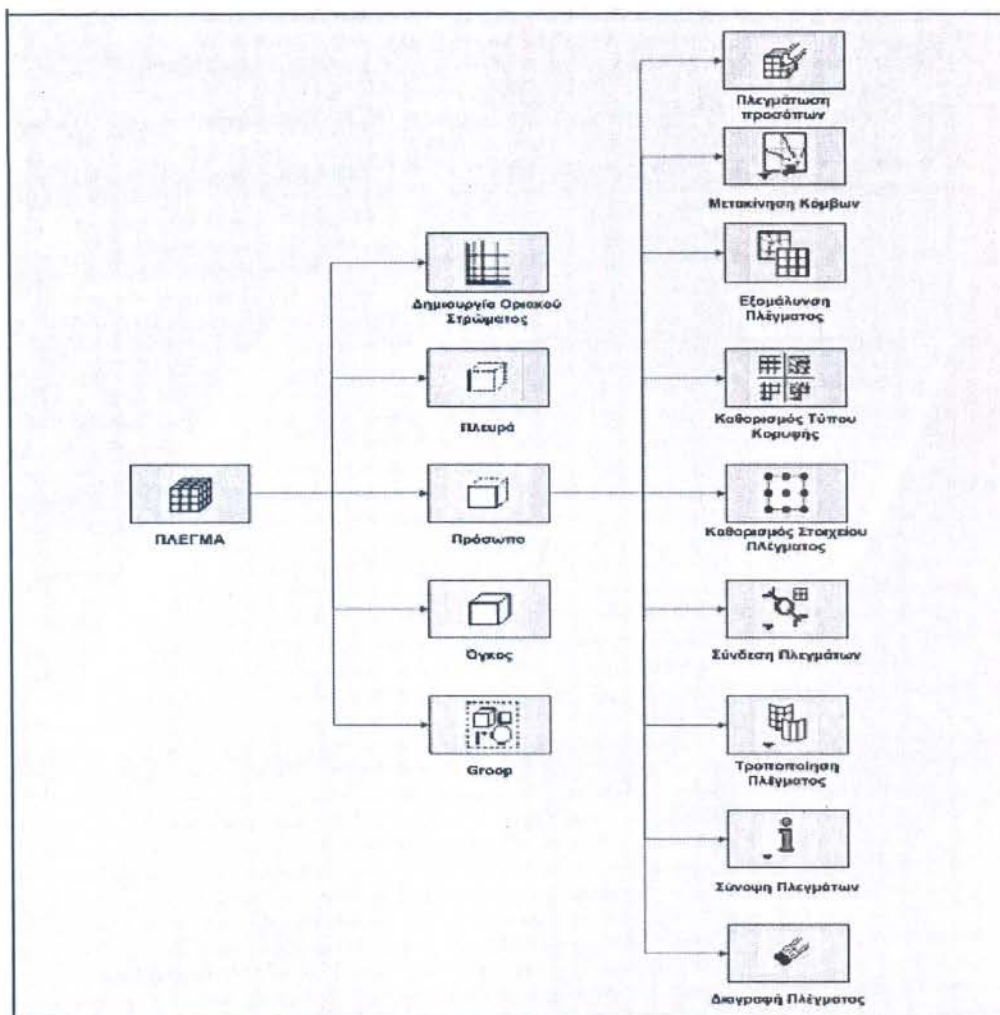


Σχήμα 3.5α : 2d Πλέγμα



Σχήμα 3.5β : 3d Πλέγμα

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα ενδεικτικό διάγραμμα στο οποίο φαίνονται οι λειτουργίες του προγράμματος όπως αυτές απεικονίζονται στο GAMBIT.



Σχήμα 3.6 : Σχηματική Παράσταση Λειτουργιών Προγράμματος.

### 3.5 ΕΝΤΟΛΕΣ ΖΩΝΗΣ (ZONE COMMANDS) – ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι εντολές ζώνης επιτρέπουν τον καθορισμό των solver (λύτη) συγκεκριμένων τύπων ζώνης γεωμετρικών οντοτήτων. Το GAMBIT περιλαμβάνει δυο τύπους εντολής ζώνης: τις οριακές και τις συνεχείς .

Οι οριακές συνθήκες ορίζουν τους τύπους ζώνης στα όρια, όπως οι άκρες ή τα πρόσωπα.

Οι συνεχείς συνθήκες ορίζουν τους τύπους ζώνης στις συνεχείς οντότητες δηλαδή σε πρόσωπα και όγκους, δυσδιάστατες και τρισδιάστατες προσομοιώσεις, αντίστοιχα.



*Σχήμα 3.7 :Εικονίδια Εντολών Ζώνης*

Για να έχει ένα πρόβλημα μοναδική λύση, πρέπει να δοθεί πληροφορία για όλες τις εξαρτημένες μεταβλητές σε όλα τα όρια του πεδίου. Επίσης είναι σημαντικό να καθορίσουμε τις ροές μάζας, θερμότητας, ορμής, κ.λπ. μέσα στο πεδίο.

Ο καθορισμός των Οριακών Συνθηκών περιλαμβάνει :

- Καθορισμό της θέσης των ορίων (π.χ. είσοδοι, έξοδοι, τοίχοι, συμμετρίες)
- Προμήθεια πληροφορίας στα όρια
- Τα απαιτούμενα δεδομένα στα όρια εξαρτώνται από το είδος των οριακών συνθηκών και τα φυσικά μοντέλα που είναι ενεργοποιημένα
- Πρέπει να γνωρίζουμε την απαιτούμενη πληροφορία στα όρια, ώστε να καθορίζουμε τα όρια σε τέτοιες θέσεις όπου γνωρίζουμε την πληροφορία αυτή ή μπορούμε να την υπολογίσουμε/υποθέσουμε.

Το GAMBIT παρέχει την δυνατότητα προσθήκης, επεξεργασίας και διαγραφής οριακών ή συνεχών συνθηκών. Το στάδιο αυτό έχει μεγάλη σημασία καθώς από εδώ ορίζουμε συνθήκες, οι οποίες χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του ρευστού όταν έρχεται σε επαφή με την δεδομένη γεωμετρία.

### **3.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ FLUENT**

Με την πάροδο του χρόνου, τα διάφορα εμπορικά λογισμικά προγράμματα έχουν βοηθήσει και φυσικά εξακολουθούν να βοηθούν ακόμη τις περισσότερες εταιρίες (βιομηχανικές, κατασκευαστικές, ιατρικές, κ.α.) στην εξέλιξη των διάφορων αυτών τομέων, καθώς αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας και της μελέτης τους. Ένας από τους κυριότερους εκπροσώπους των εμπορικών λογισμικών αυτών προγραμμάτων είναι το FLUENT, του οποίου οι δυνατότητες καθιστούν εφικτές τις λύσεις αλλά και την λήψη χρησιμων συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων (κατόπιν αμέτρητων υπολογισμών), σε αρκετές εφαρμογές προσομοίωσης σε περιβάλλον κανονικών συνθηκών και φυσικά σε ικανοποιητικό χρονικό διάστημα.

### 3.7 ΠΛΕΓΜΑ – ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ & ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ

Όπως έχουμε αναφέρει, η δημιουργία του πλέγματος είναι μια λειτουργία η οποία πραγματοποιείται στο λογισμικό πρόγραμμα GAMBIT. Παρόλα αυτά με την εισαγωγή του στο λογισμικό πρόγραμμα FLUENT ελέγχεται η λειτουργικότητα και η αξιοπιστία του καθώς το FLUENT είναι αυτό το οποίο θα διαβάσει το πλέγμα και θα “κρίνει” (κατοπιν υπολογισμών και αποτελεσμάτων), αν είναι το κατάλληλο, για την εκάστοτε εφαρμογή, ή αν πρέπει να ξαναγυρίσουμε πίσω στο GAMBIT για επιπλέον μορφοποίηση του.

### 3.8 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

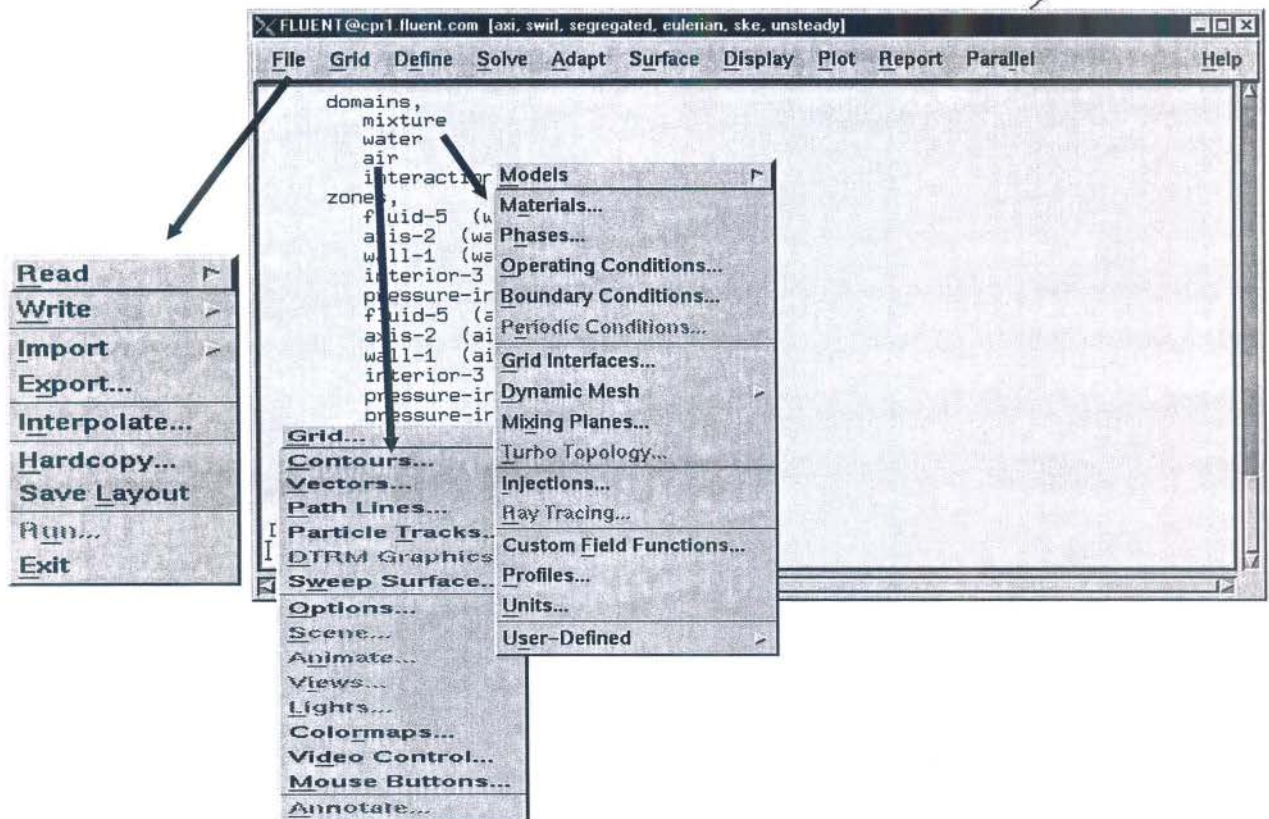
Όπως έχει αναφερθεί, αφού κατασκευάσουμε τη γεωμετρία, δημιουργήσουμε το κατάλληλο πλέγμα και βάλουμε τις οριακές συνθήκες, επιλέγουμε τις κατάλληλες μεθόδους επίλυσης (solvers). Μία από αυτές είναι και το FLUENT.

Το menu του FLUENT είναι “κατασκευασμένο” με τρόπο τέτοιο ώστε η ανάγνωσή του να πραγματοποιείται από αριστερά προς τα δεξιά. Από τις εντολές του GUI (Graphical Users Interface), μπορούμε να επεξεργαστούμε δεδομένα όπως τα παρακάτω :

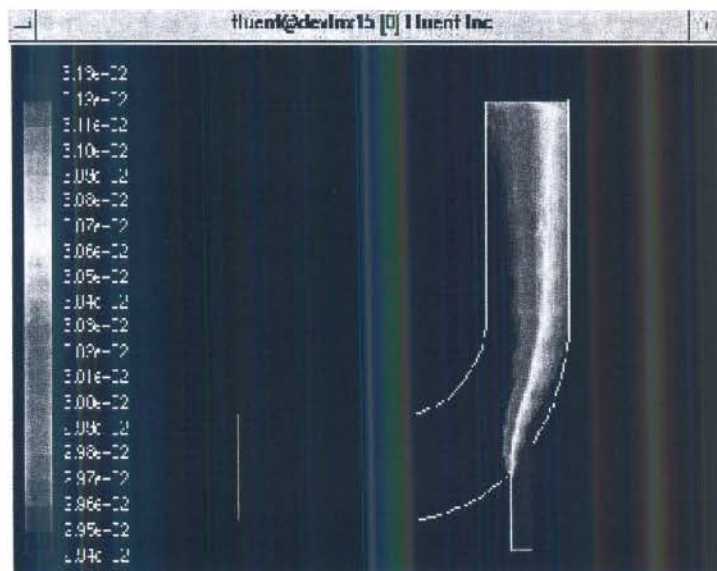
Εισαγωγή και scaling πλέγματος, Έλεγχος πλέγματος (προσοχή στους αρνητικούς όγκους!), Επιλογή φυσικών μοντέλων, Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών, Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας (operating conditions), Καθορισμός οριακών συνθηκών (boundary conditions). Καθορισμός solver controls, Καθορισμός ελέγχου σύγκλισης, Υπολογισμός και παρακολούθηση λύσης, Επεξεργασία αποτελεσμάτων.

Στο παρακάτω σκίτσο που ακολουθεί, φαίνεται το menu του FLUENT και οι GUI (Graphical Users Interface), εντολές του.

Κονσόλα



Παράθυρο Γραφικών



Σχέδιο 3.8: Βασικές Λειτουργίες menu του FLUENT

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία σχετική με τα χαρακτηριστικά ροής γύρω από κύλινδρο.

#### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ροή γύρω από κύλινδρο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού πολλές κατασκευές που λειτουργούν μέσα σε ρεύματα έχουν κυκλική διατομή. Λόγω της απλότητας του σχήματος του κυλίνδρου, που χαρακτηρίζεται μόνο από μια διάσταση (την διάμετρο), η ροή γύρω από τον κύλινδρο εξαρτάται μόνο από τον αριθμό του Reynolds βασισμένο πάνω στην ταχύτητα της εξωτερικής ροής  $U$ , και την διάμετρο  $D$  του κυλίνδρου:  $R=UD/\nu$ .

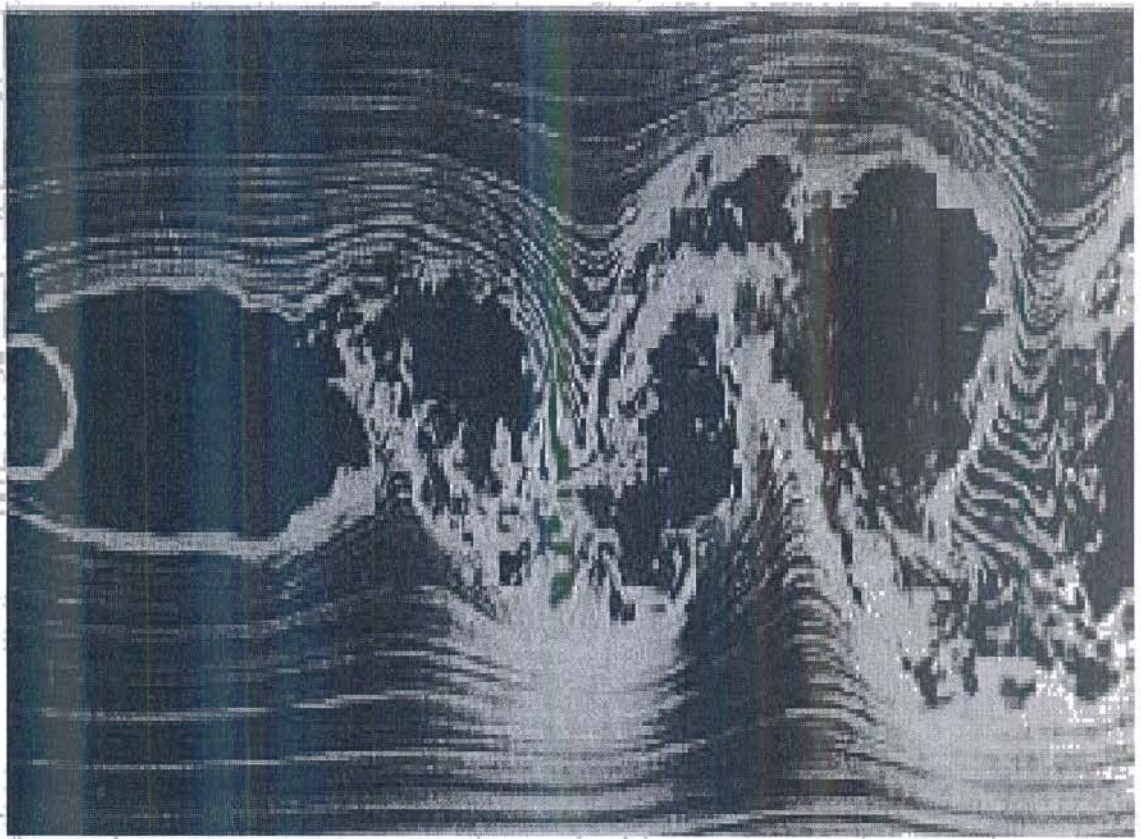
#### 4.2 ΡΟΗ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ REYNOLDS

Για πολύ μικρές τιμές του αριθμού Reynolds  $R$ , γύρω στην μονάδα, η ροή γύρω από τον κύλινδρο είναι συμμετρική, η πίεση στην πίσω πλευρά περίπου ίση με αυτήν μπροστά, και κατά συνέπεια η αντίσταση του κυλίνδρου οφείλεται αποκλειστικά στην τριβή. Καθώς η τιμή του  $R$  αυξάνει, αποκόλληση της ροής αρχίζει να παρατηρείται. Πίσω από τον κύλινδρο εμφανίζονται δύο συμμετρικές δίνες που παραμένουν προσκολλημένες στον κύλινδρο. Μέρος της αντίστασης οφείλεται τώρα σε διαφορά πίεσης ανάμεσα στην ανάντη και κατάντη πλευρές (αντίσταση μορφής), Η ροη παραμένει μόνιμη μέχρι αριθμό Reynolds περίπου 48, οπότε γίνεται ασταθής και μετατρέπεται σε μη μόνιμη.

#### 4.3 ΡΟΗ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ REYNOLDS

Δίνες σχηματίζονται τώρα εναλλάξ στην πάνω και στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου οι οποίες εγκαταλείπουν τον κύλινδρο και μετακινούνται στον ομορρο με ταχύτητα λίγο μικρότερη από αυτή της εξωτερικής ροής. Παρατηρούνται έτσι πίσω από τον κύλινδρο δύο σειρές δινών που είναι γνωστές με το όνομα «σειρές του Von Karman».

(Karman vortex street). Ο σχηματισμός δινών είναι περιοδικό φαινόμενο με καλά καθορισμένη συχνότητα. Αν  $f$  συμβολίζει την συχνότητα σχηματισμού των δινών (σε Hertz) η αδιάστατη ποσότητα (αριθμός Strouhal) είναι συνάρτηση του αριθμού του Reynolds. Για μια μεγάλη περιοχή αριθμών Reynolds από 1000 έως 200000, ο αριθμός Strouhal παραμένει σταθερός, περίπου ίσος με 0.2. Ο συντελεστής αντίστασης (που οφείλεται κατά κύριο λόγο σε διαφορά πίεσης) επίσης παραμένει σταθερός σε αυτή την περιοχή, περίπου 1.15.



*Σχήμα 4.1: Φωτογραφία τυρβώδους ομορρου κυλίνδρου σε αριθμό Reynolds 10000. Η παρουσία μεγάλων δινών στον ομορρο φαίνεται από τις συγκεντρώσεις καπνού. (Φωτογραφία από Corke και Nagib).*

#### 4.4 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

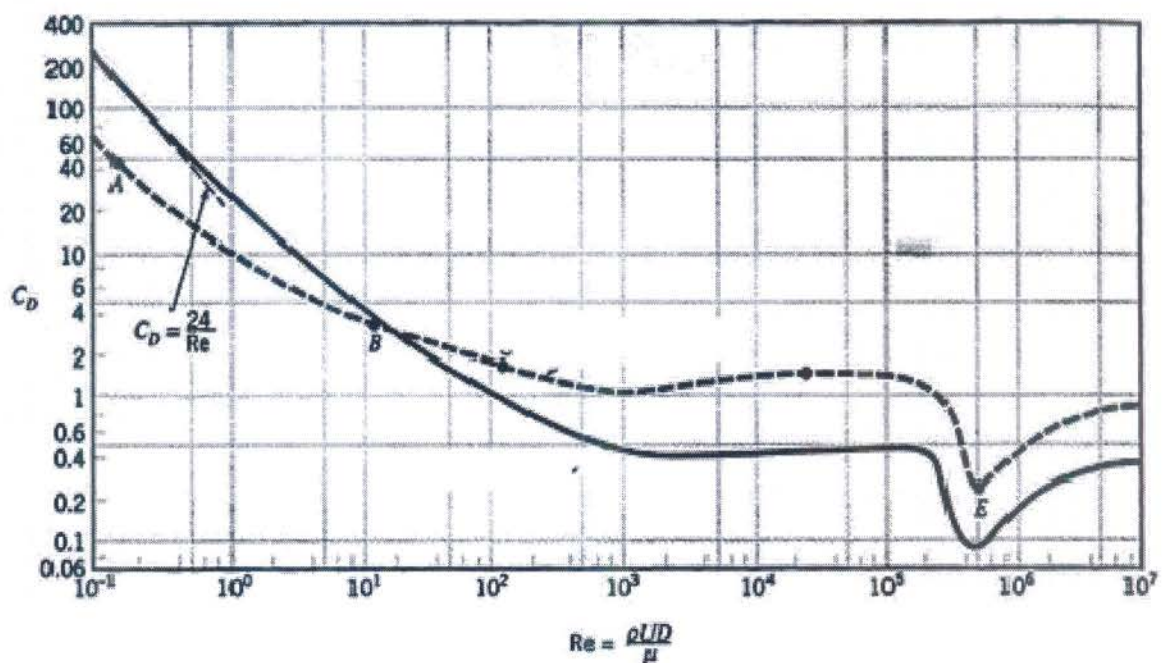
Ο σχηματισμός δινών εναλλάξ στην πάνω και κάτω πλευρά του κυλίνδρου προκαλεί αρμονική δύναμη στον κύλινδρο σε κατεύθυνση κάθετη προς την ροή και με συχνότητα ίση προς την συχνότητα σχηματισμού δινών. Έτσι αν ο κύλινδρος είναι μέρος



εύκαμπτης κατασκευής (π.χ. καλώδιο), υπάρχει δυνατότητα συντονισμού όταν η συχνότητα σχηματισμού δινών γίνει περίπου ίση με μια από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Τότε η κατασκευή ταλαντώνεται με κίνδυνο αστοχίας λόγω κοπώσεως. Το φαινόμενο συντονισμού ανήκει στην κατηγορία των υδροελαστικών φαινομένων, και είναι υπεύθυνο για πολλές αστοχίες κατασκευών που λειτουργούν μέσα σε θαλάσσιο ρεύμα, αλλά και κατασκευών στην ξηρά που λειτουργούν σε περιοχές με συχνούς δυνατούς ανέμους.

#### 4.5 ΡΟΗ ΓΙΑ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ REYNOLDS

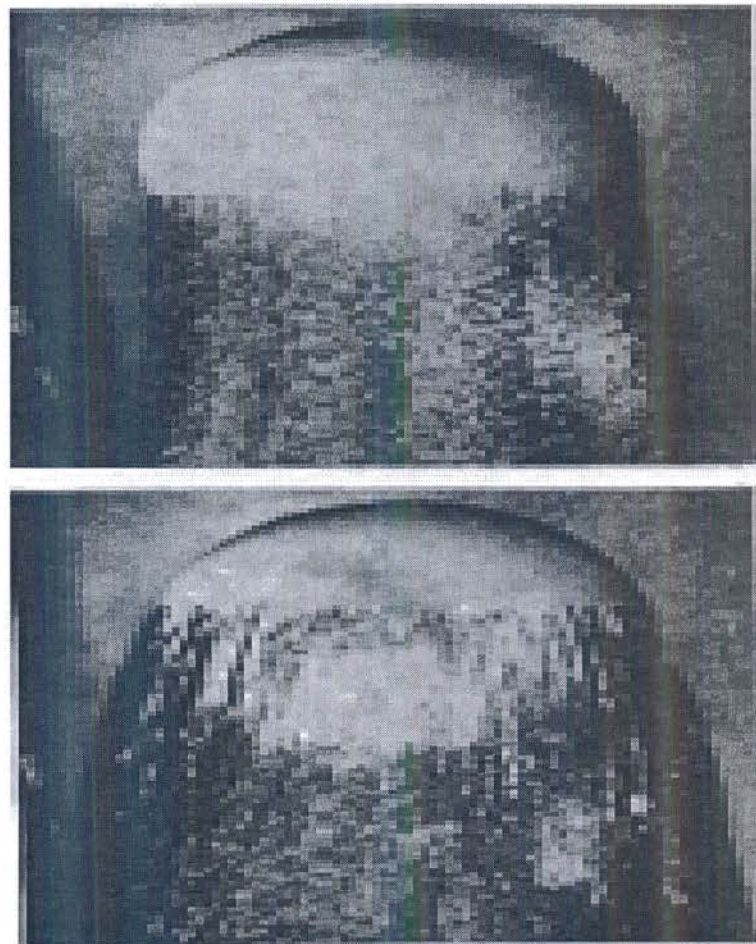
Όταν ο αριθμός του Reynolds υπερβεί την τιμή των 200000 το οριακό στρώμα του κυλίνδρου γίνεται τυρβώδες. Τα σημεία αποκόλλησης της ροής μετακινούνται κατάντη, και το πλάτος του ομορρου μειώνεται. Ο συντελεστής αντίστασης του κυλίνδρου επίσης μειώνεται, και φτάνει στην τιμή 0.3 όταν ο αριθμός του Reynolds φτάσει την τιμή 300000. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds ο συντελεστής αντίστασης ανεβαίνει, παραμένει όμως χαμηλότερος από την τιμή που έχει όταν το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Η μεταβολή του συντελεστή αντίστασης κυλίνδρου συναρτήσει του αριθμού Reynolds φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης κυλίνδρου με λεία επιφάνεια (διακεκομμένη γραμμή), και σφαίρας (συνεχής γραμμή) στην συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

#### 4.5.1 Μετατόπιση των σημείων αποκόλλησης

Η μείωση του συντελεστή αντίστασης όταν το οριακό στρώμα γίνει τυρβώδες χαρακτηρίζει όλα τα σώματα με καμπυλωμένο περίβλημα (όπως η σφαίρα, της οποίας ο συντελεστής αντίστασης επίσης φαίνεται στο Σχήμα 4.2). Η μείωση είναι λιγότερο αισθητή για υδροδυναμικά σώματα, επειδή σε αυτά τα σημεία αποκόλλησης είναι κοντά στο κατάντη άκρω του σώματος, και δεν έχουν πολλά περιθώρια μετατόπισης κατάντη. Η εξήγηση για την μετατόπιση των σημείων αποκόλλησης είναι η εξής: Όταν το οριακό στρώμα γίνει τυρβώδες, τα σωματίδια του ρευστού μέσα στο οριακό στρώμα έχουν αυξημένη ορμή (επειδή έχουν αυξημένη ταχύτητα). Κατά συνέπεια, χρειάζονται μεγαλύτερες δυνάμεις πίεσης για να προκαλέσουν αποκόλληση. Τέτοιες δυνάμεις πίεσης αναπτύσσονται σε σημεία κατάντη από το σημείο αποκόλλησης του στρωτού οριακού στρώματος



*Σχήμα 4.3: Ροή γύρω από σφαίρα με (α) στρωτό οριακό στρώμα (κάτω εικόνα), και (β) Τυρβώδες οριακό στρώμα (άνω εικόνα).*

Η μετατόπιση των σημείων αποκόλλησης λόγω της μετατροπής του οριακού στρώματος σε τυρβώδες φαίνεται στο Σχήμα 4.3 για ροή γύρω από σφαίρα. Η μείωση του πάχους του ομορρου της σφαίρας είναι επίσης εμφανής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

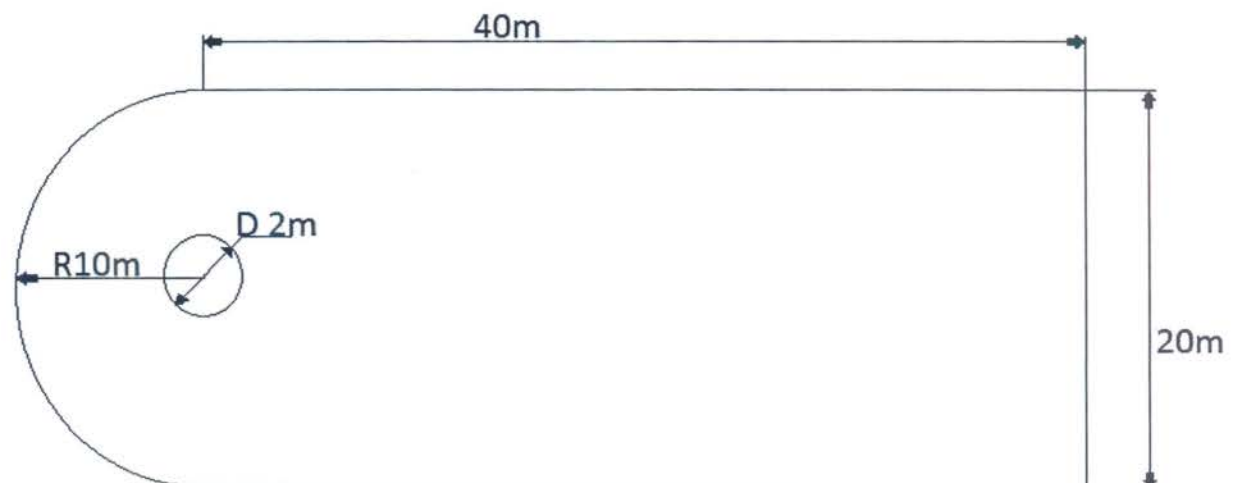
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης χαρακτηριστικών μη μόνιμης ροής γύρω από κύλινδρο, σε δυσδιάστατο περιβάλλον, με τη βοήθεια των δύο λογισμικών πακέτων ( *Gambit & Fluent* ) και επιλέγεται κατόπιν σύγκρισης το καταλληλότερο πλέγμα. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν.

#### 5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το βασικό μέρος της προετοιμασίας στην επίλυση μιας υπολογιστικής ρευστομηχανικής εφαρμογής είναι η μοντελοποίηση. Το στάδιο αυτό έχει να κάνει με την εισαγωγή, από τον εκάστοτε χρήστη, στοιχείων όπως η γεωμετρία, συνθήκες ροής, οριακές συνθήκες, πλέγμα αλλά και επιλογή του φυσικού μοντέλου επίλυσης.

##### 5.1.1 Γεωμετρία

Με τη βοήθεια του εμπορικού λογισμικού GAMBIT, σχεδιάσαμε τη γεωμετρία της άσκησης μας, ο οποίος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 5.1.** Γεωμετρία της άσκησης

##### 5.1.2 Συνθήκες ροής

Όσον αφορά τις συνθήκες ροής, η ροή μας είναι στρωτή και φυσικά μονοφασική (το μόνο ρευστό που εξετάζουμε είναι ο αέρας).

### 5.1.3 Οριακές συνθήκες

Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των Οριακών Συνθηκών. Το στάδιο αυτό έχει μεγάλη σημασία καθώς από εδώ ορίζουμε συνθήκες, οι οποίες χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του ρευστού όταν έρχεται σε επαφή με την δεδομένη γεωμετρία, στοιχεία δηλαδή τα οποία πρέπει να οριστούν σωστά αφού παίζουν καθοριστικό ρόλο στους μετέπειτα υπολογισμούς.

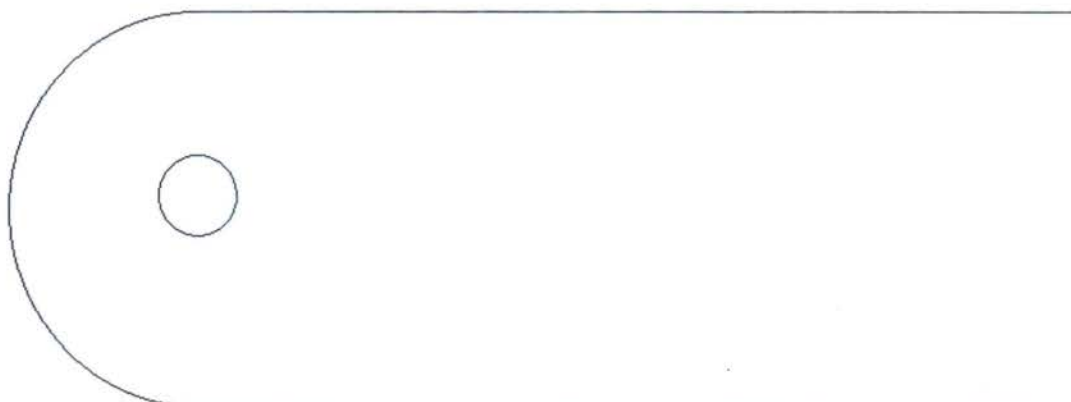
Συγκεκριμένα, στη δική μας περίπτωση, ορίζουμε την είσοδο του ρευστού, τα όρια της γεωμετρίας (τοιχώματα), δηλαδή τα πλαίσια μέσα στα οποία θα κινείται το ρευστό, και τέλος, ορίζουμε και την έξοδο του. Ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών φαίνεται αναλυτικά (με κόκκινο χρώμα) στα παρακάτω σχήματα :

- Velocity Inlet (Είσοδος Ρευστού)



*Σχήμα 5.2α: Σχηματική απεικόνιση εισόδου του ρευστού.*

- Pressure Outlet (Έξοδος Ρευστού)



*Σχήμα 5.2β: Σχηματική απεικόνιση εξόδου του ρευστού.*

- Walls (Τοιχώματα)



*Σχήμα 5.2γ: Σχηματική απεικόνιση των τοιχωμάτων.*

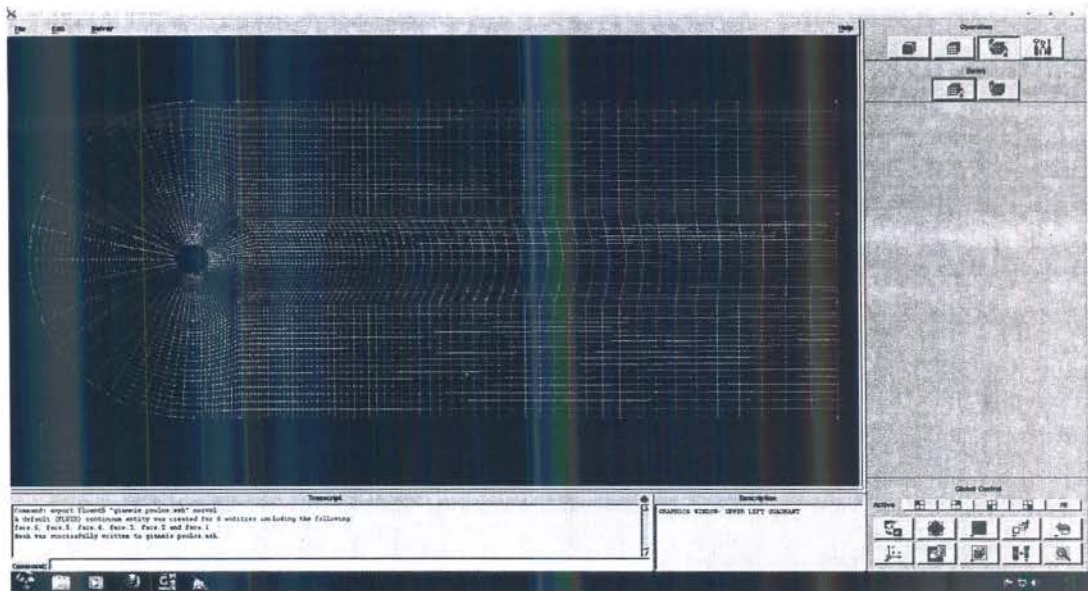
#### 5.1.4 Πλέγμα

Ένα από τα ζητήματα με τα οποία ασχοληθήκαμε στην εργασία μας ήταν η επιλογή κατάλληλου πλέγματος. Άλλωστε, η επιλογή κατάλληλου πλέγματος είναι μια διαδικασία, που σίγουρα έχει ιδιαίτερη σημασία σε κάθε μελέτη υπολογιστικής ρευστομηχανικής εφαρμογής.

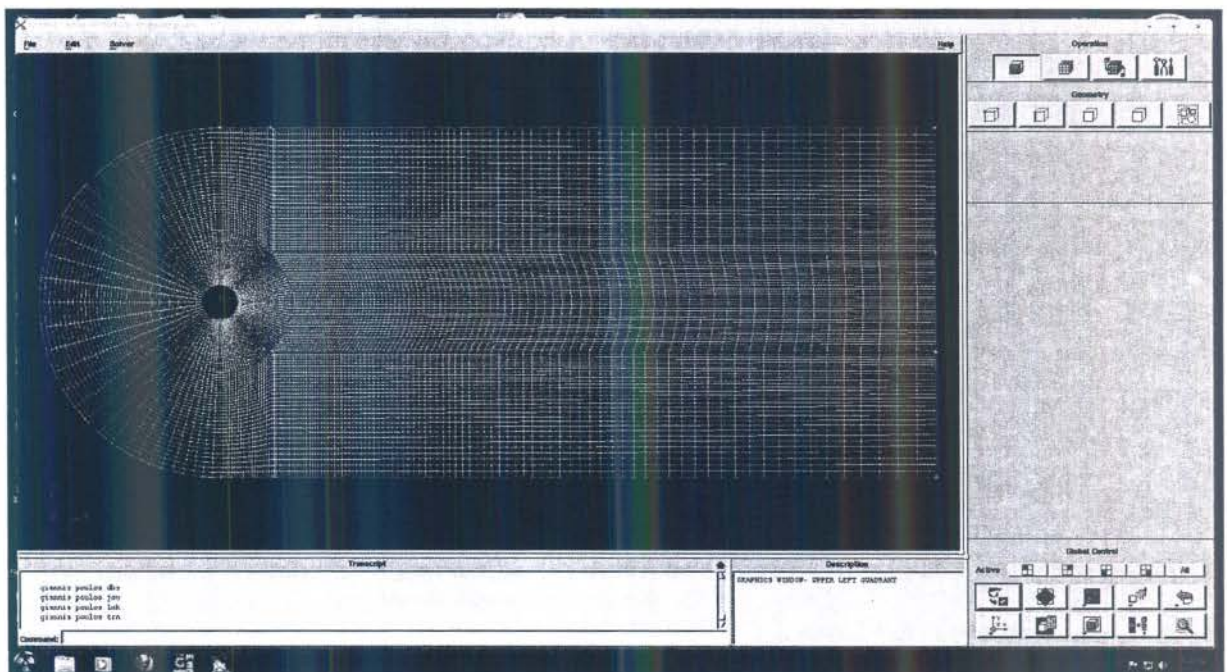
Η δημιουργία του πλέγματος γίνεται είτε ορίζοντας τον αριθμό των κόμβων (nodes), τα σημεία δηλαδή από τα οποία θα ξεκινά το πλέγμα, επιλέγοντας (Interval count), είτε ορίζοντας την απόσταση (Spacing) που θα έχουν μεταξύ τους οι αρχές του πλέγματος, επιλέγοντας (Internal size). Όλα τα πλέγματα που δημιουργήσαμε στην εργασία μας, κατασκευάστηκαν με την επιλογή create boundary layer, όπου στο μενού αυτό δημιουργείς το πλέγμα ορίζοντας τα σημεία από όπου θα ξεκινάει η κάθε γραμμή και θα τελειώνει, δημιουργώντας έτσι το πλέγμα.

Φτάσαμε στην κατασκευή τριών διαφορετικών πλεγμάτων, με σκοπό στη συνέχεια να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους και να καταλήξουμε στο περισσότερο ποιοτικό, δηλαδή σε αυτό το οποίο θα μας δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα. Έτσι λοιπόν τα πλέγματα αυτά ήταν τα εξής :

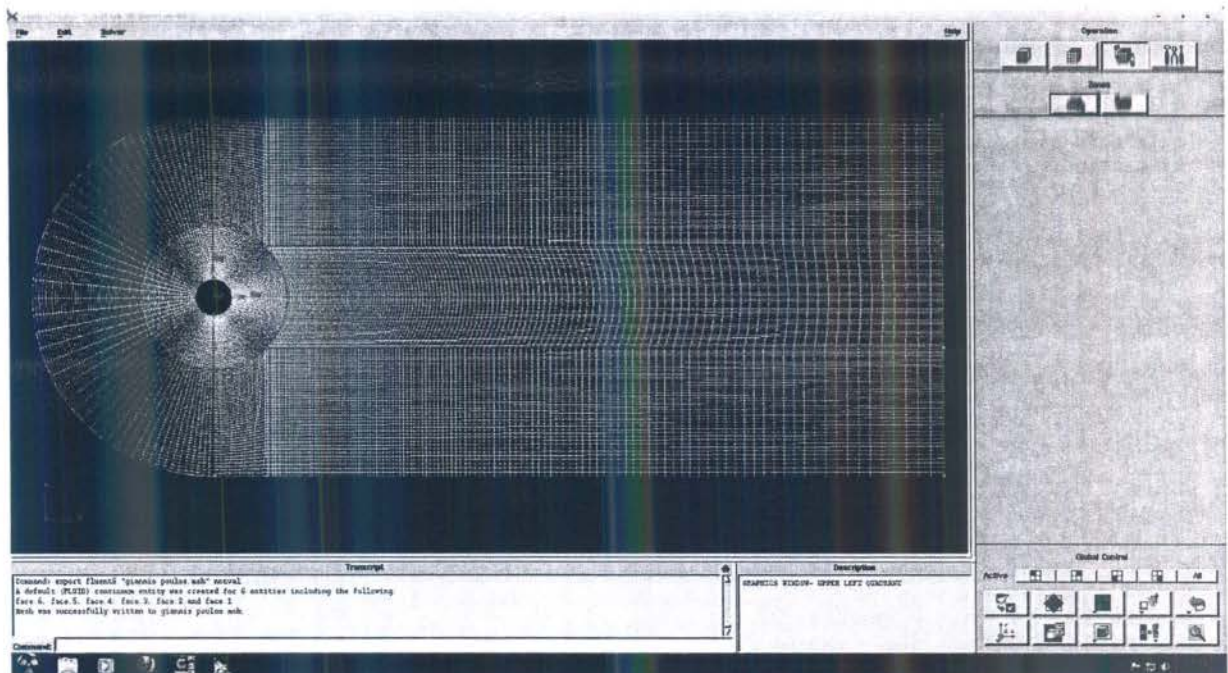
1<sup>ο</sup> Πλέγμα: cells: 6240



2<sup>ο</sup> Πλέγμα: cells: 14040



3<sup>ο</sup> Πλέγμα: cells: 31590



**Σημείωση :** Αφού ολοκληρώσουμε τις εργασίες στο λογισμικό πρόγραμμα GAMBIT, τότε επιλέγουμε : File -> Export -> Mesh. Με τον τρόπο αυτό μετατρέπουμε την μορφή του αρχείου σε μορφή .msh, δηλαδή σε μια μορφή την οποία υποστηρίζει το λογισμικό FLUENT και τέλος επιλέγουμε τον λύτη (Solver), επιλέγοντας : Solver -> FLUENT 5/6.

#### 5.1.5 Επιλογή φυσικού μοντέλου

Το φυσικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή μας ήταν το μοντέλο Laminar.

#### 5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο στάδιο αυτό, ξεκινάει ουσιαστικά η μετάβαση από το λογισμικό πρόγραμμα GAMBIT στο FLUENT. Στο λογισμικό FLUENT θα εισαχθούν και θα επεξεργαστούν τα δεδομένα από το GAMBIT αλλά και άλλα χρήσιμα στοιχεία από τον χρήστη.

##### 5.2.1 Εκκίνηση του fluent

Από την επιφάνεια εργασίας επιλέγουμε το παρακάτω εικονίδιο του FLUENT :

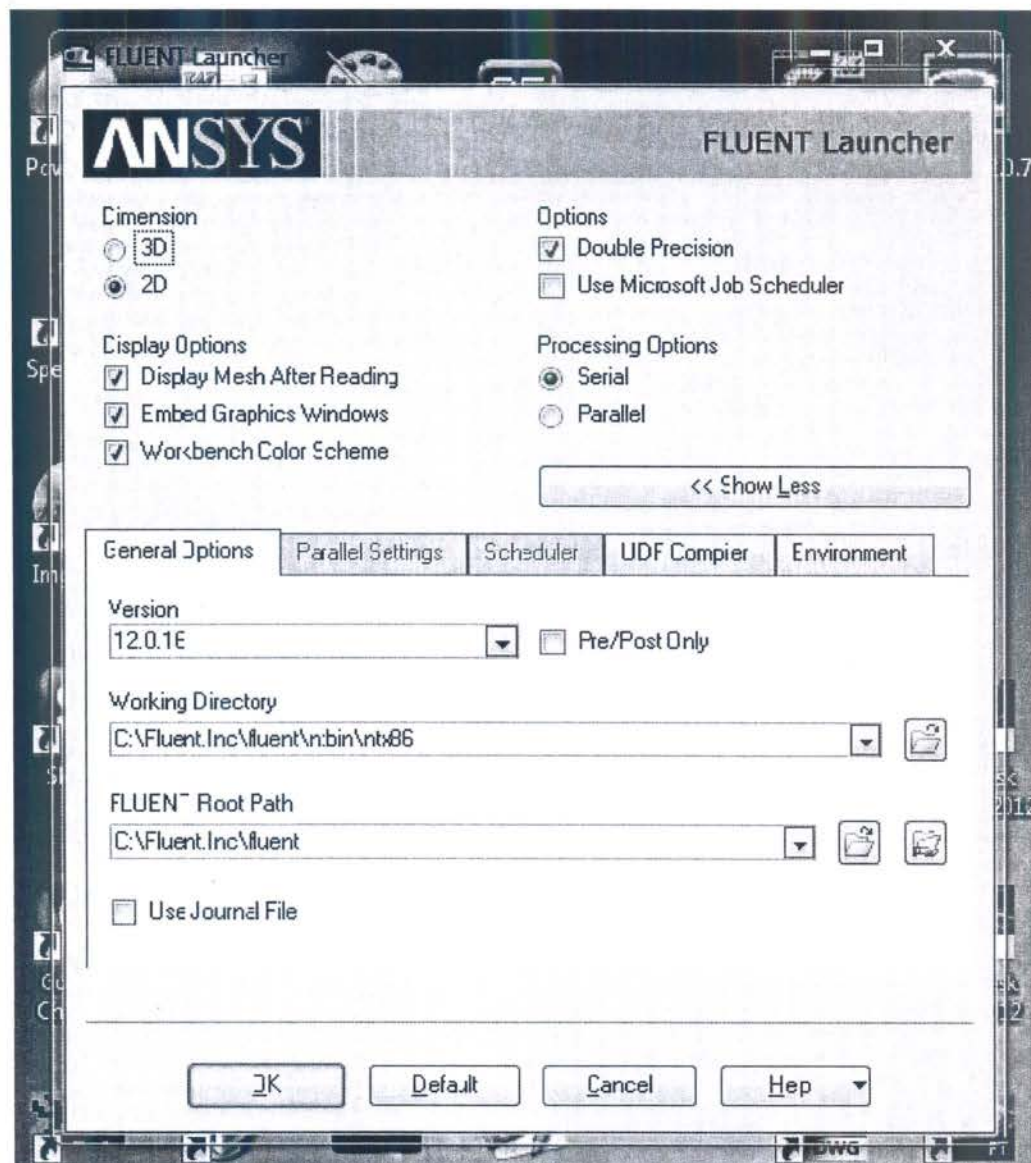




Στο πρώτο παράθυρο επιλέγουμε το dimension δηλαδή εάν είναι τρισδιάστατη ή δισδιάστατη η γεωμετρία οπότε στην δική μας περίπτωση που η γεωμετρία είναι δισδιάστατη επιλέγουμε το 2D.

Στη συνέχεια, από το παράθυρο του FLUENT αρχικά "εντοπίζουμε" το προηγούμενο αρχείο από τον χώρο που το είχαμε σώσει επιλέγοντας :

File -> Read -> Case & Data



Σχήμα 5.3: Παράθυρο επιλογής dimension στο FLUENT.

### 5.2.2 Εισαγωγή δεδομένων στο fluent

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη μη μόνιμης ροής γύρω από κύλινδρο, οπότε

θα εξετάσουμε την περίπτωση με αριθμό Reynolds 150, έχουμε :

$$Re=(\rho \cdot V \cdot D / \mu)$$

Γνωρίζουμε ότι  $D=2m$ . Για να αποκτήσουμε  $Re=150$ , ορίζουμε αυθαίρετα  $\rho=75kg/m^3$ ,  $V=1m/s$  και  $\mu=1kg/ms$ , οπότε εισάγουμε δεδομένα όπου έχουν να κάνουν με:

#### Χαρακτηριστικά του Αέρα

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του αέρα (Materials), ορίζουμε:

- Πυκνότητα (Density) =  $75kg/m^3$
- Ιξώδες (Viscosity) =  $1kg/ms$

#### Οριακές Συνθήκες

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες (Boundary Conditions), στην είσοδο του ρευστού, ορίζουμε την ταχύτητα του, δηλαδή την ταχύτητα του αέρα συγκεκριμένα ορίζουμε :

- Αξονική ταχύτητα (Axial velocity) =  $1 m/s$
- Ακτινική ταχύτητα (Radial velocity) =  $0 m/s$

Επίσης εισάγουμε δεδομένα, τα οποία έχουν να κάνουν με:

- Το φυσικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή μας ήταν το μοντέλο Laminar.
- Ο χρόνος (time) στον solver θα είναι transient.
- Στην μέθοδο λύσης (solution methods), πίεσης-ταχύτητας (pressure-velocity coupling) επιλέγουμε PISO. Η επιλογή PISO επιτρέπει την χρήση μεγαλύτερου μεγέθους του βήματος του χρόνου χωρίς να επηρεάζεται η σταθερότητα της λύσης μας.
- Θα πρέπει να επιδιορθώσουμε τα ανώτερα κατάντη περιοχή της ροής για να δημιουργήσουμε ασυμμετρία, έτσι ώστε να μπορέσουμε να αποκτήσουμε σταθερή ταλάντωση της δίνης γρηγορότερα. Για να το κάνουμε αυτό θα δημιουργήσουμε ένα μητρώο για να επιδιορθώσουμε την ακτινική ταχύτητα (Y velocity) στην κα-

τάντη του κυλίνδρου, οπότε στο region adaption θα βάλουμε  $X_{min}=1m$ ,  $X_{max}=40m$ ,  $Y_{min}=0m$ ,  $Y_{max}=10m$ .

- Τώρα θα επιδιορθώσουμε την ακτινική ταχύτητα (Y velocity) στην περιοχή που δημιουργήσαμε το μητρώο. Οπότε στο: solution initialization -> patch, επιλέγουμε: hexahedron-r0, Y velocity και στην περιοχή (value) αναγράφουμε 0.3m/s.
- Για να ξέρουμε τί μεγέθους χρόνο βήματος (time step size) θα βάλουμε για να τρέξουμε το πρόβλημά μας θα πρέπει να υπολογίσουμε τον χρόνο μεγέθους βήματος. Οπότε ο αριθμός Strouhal για μη μόνιμη ροή γύρω από κύλινδρο είναι 0.183 όπως αναφέρει ο Williamson. Για να συλλάβουμε την αποβολή σωστά, θα πρέπει να έχουμε τουλάχιστον 20 με 25 βήματα κατά την διάρκεια σκορπίσματος ενός κύκλου. Ας χρησιμοποιήσουμε 25 στην περίπτωσή μας, οπότε:  $Sr=(f*D/U)=0.183$

Στην περίπτωσή μας, έχουμε:  $D=2$ ,  $U=1$

Επομένως, η συχνότητα σχηματισμού δινών είναι  $f=0.0915$

Οπότε:  $t=(1/f)=10.9sec$

Άρα ο χρόνος μεγέθους βήματος είναι:  $time\ step\ size=10.9/25=0.4sec$ .

Προηγουμένως, όπως έχουμε αναφέρει, έχουμε καταλήξει, στην κατασκευή τριών διαφορετικών πλεγμάτων. Αντικείμενο μελέτης, σαφώς είναι η ταχύτητα του εισερχόμενου ρευστού (αέρα), σε τέσσερις θέσεις, δηλαδή σε αποστάσεις: -4m, -8m, 15m και 30m από το κέντρο του κυλίνδρου.

Έτσι, ύστερα από όλα αυτά, σκοπός μας τώρα είναι να συγκρίνουμε μεταξύ τους αυτές τις διαφορετικές περιπτώσεις που έχουν προκύψει, έτσι ώστε να εντοπιστεί η ποιά κατάλληλη γεωμετρία.

### 5.3 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

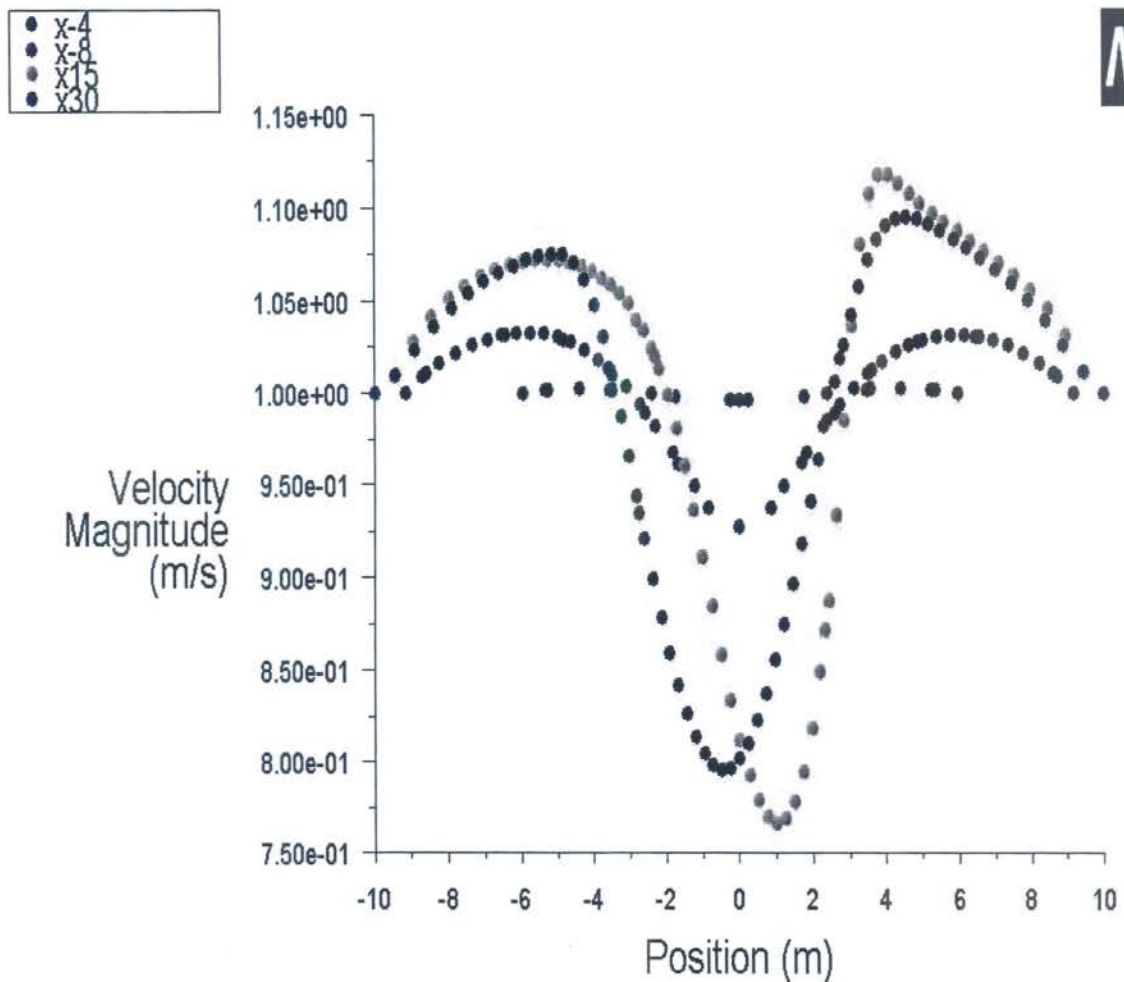
Αφού έχουμε τρέξει καθεμία από τις περιπτώσεις που εν τέλει προέκυψαν, έχουμε λάβει τα αποτελέσματα τα οποία και παρουσιάζονται με την μορφή γραφημάτων. Έτσι

λοιπόν παρακάτω φαίνονται οι υπολογισμοί με τη μορφή γραφικής παράστασης της κατανομής της ταχύτητας (Velocity Magnitude) σε συνάρτηση με τον άξονα y.

Σε κάθε γράφημα υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές καμπύλες οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις τέσσερις διαφορετικές περιοχές (θέσεις) μελέτης, δηλαδή -4m, -8m, 15m και 30m αντίστοιχα αποστάσεις από το κέντρο του κυλίνδρου.

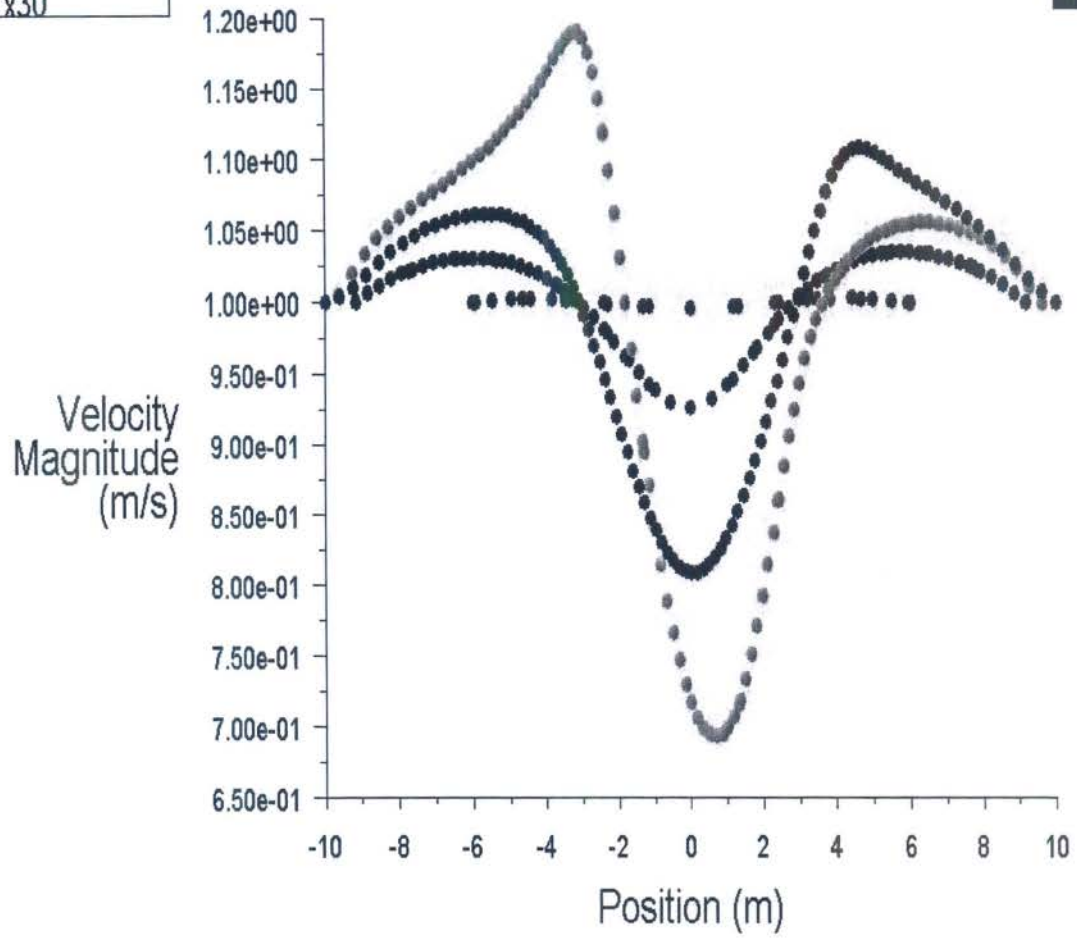
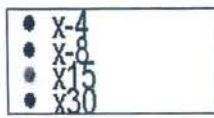
Στη συνέχεια ακολουθεί η σύγκριση όλων των διαγραμμάτων με σκοπό να επιλεγεί το περισσότερο ακριβές από αυτά.

1ο ΠΛΕΓΜΑ 6240 cells

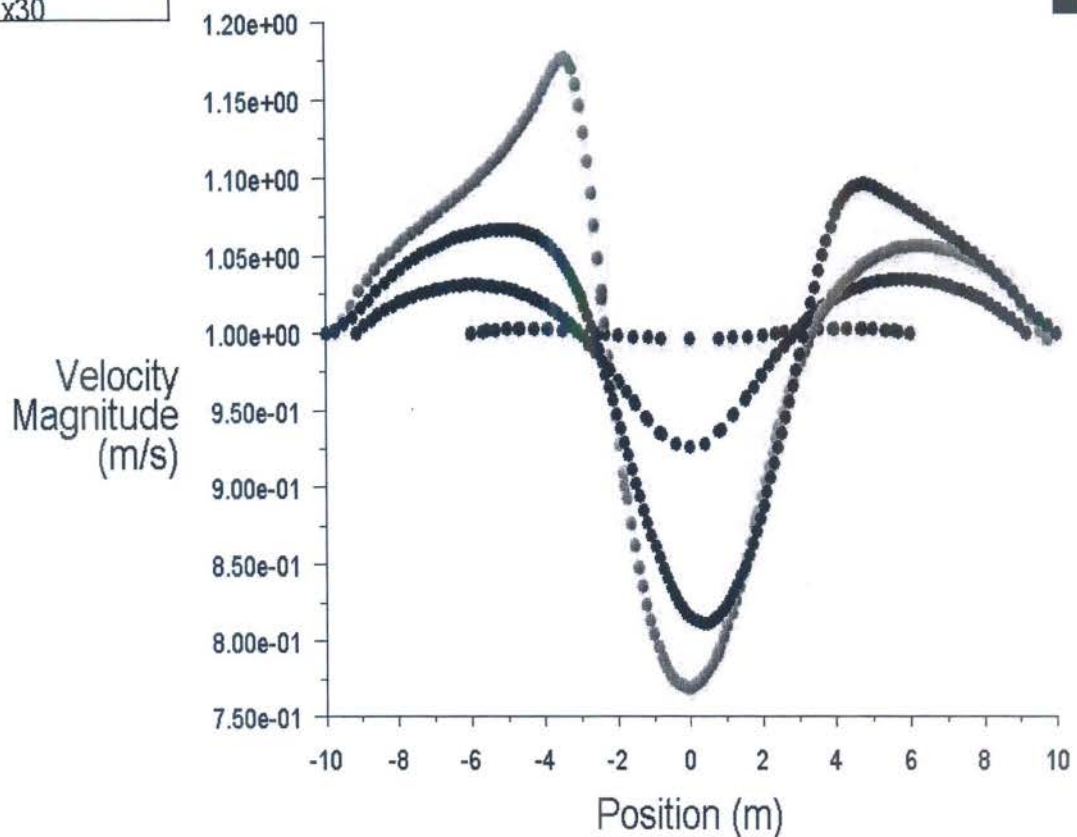
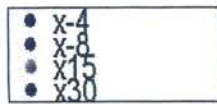


*Σχήμα 5.4α: Γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει του άξονα y.*

2° ΠΛΕΓΜΑ 14040 cells



Σχήμα 5.4β: Γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει του άξονα y.



**Σχήμα 5.4γ:** Γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει του άξονα  $y$ .

### 5.3.1 Σχόλια Συμπεράσματα

**Σημείωση:** Τα σημεία (x-4) και (x-8) είναι πριν τον κύλινδρο ενώ τα σημεία (x15) και (x30) είναι μετά τον κύλινδρο.

Από τα διαγράμματα των μέτρων ταχυτήτων παρατηρούμε ότι στο σημείο (x-8) των σχημάτων (5.4α, 5.4β, 5.4γ) δεν έχουμε κάποια διαφορά στην ταχύτητα του αέρα αλλά παραμένει σχεδόν σταθερή, αυτό συμβαίνει διότι είμαστε αρκετά κοντά στην είσοδο ροής του αέρα και για αυτό τον λόγο δεν βλέπουμε αυξομειώσεις της ταχύτητας του αέρα. Ενώ στο σημείο (x-4) των σχημάτων (5.4α, 5.4β, 5.4γ) βλέπουμε μείωση της ταχύτητας του αέρα και αυτό συμβαίνει διότι όσο απομακρυνόμαστε από την είσοδο ροής του αέρα τόσο μείωση της ταχύτητας του αέρα θα έχουμε, επίσης παρατηρούμε

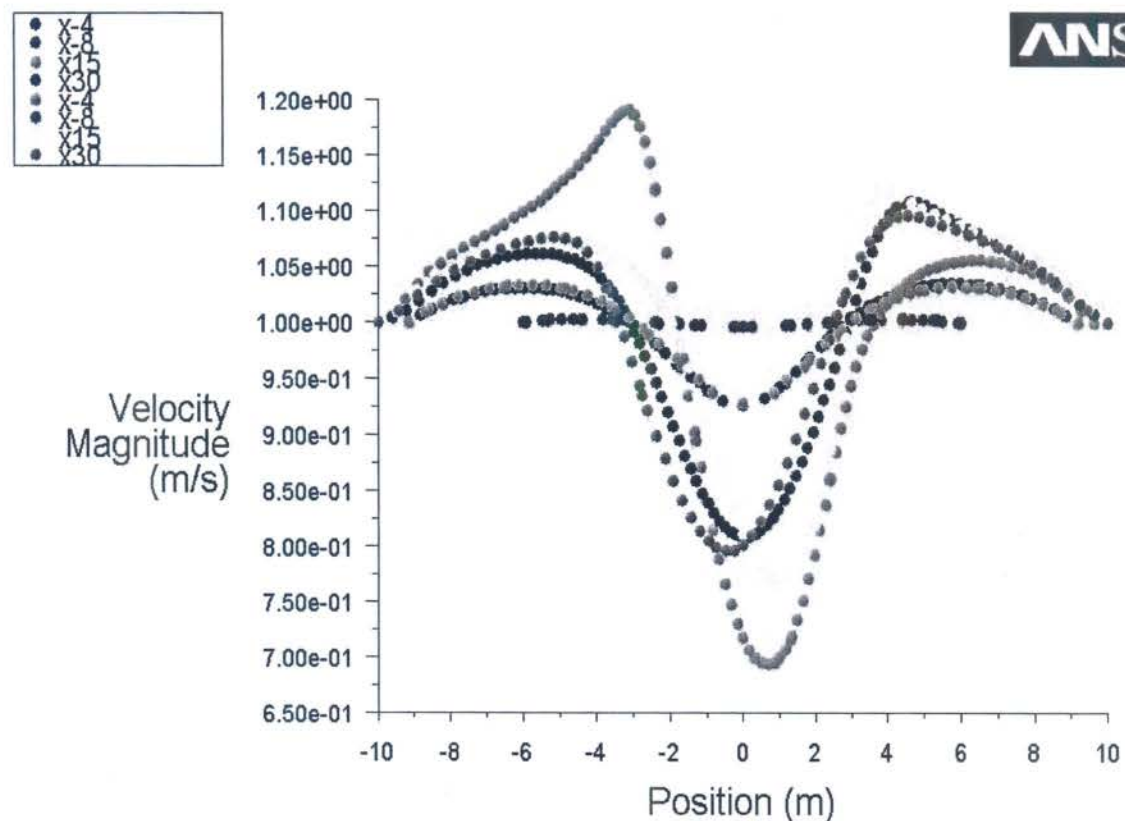
στο ότι προς τις άκρες έχουμε αύξηση της ταχύτητας του αέρα και αυτό συμβαίνει διότι ο αέρας προσκρούεται πάνω στον κύλινδρο και εκτινάσσεται με μεγάλη ταχύτητα προς στις άκρες.

Στο σημείο (χ15) των σχημάτων (5.4α, 5.4β, 5.4γ) παρατηρούμε αρκετά μεγάλη μείωση της ταχύτητας του αέρα και αυτό συμβαίνει διότι είμαστε αρκετά κοντά πίσω από τον κύλινδρο και για αυτό τον λόγο παρατηρούμε αυτή την μεγάλη μείωση της ταχύτητας. Ενώ στο σημείο (χ30) των σχημάτων (5.4α, 5.4β, 5.4γ) παρατηρούμε μικρότερη μείωση της ταχύτητας του αέρα και αυτό συμβαίνει διότι είμαστε πιο μακριά από τον κύλινδρο. Επίσης στα δύο αυτά σημεία παρατηρούμε την αύξηση της ταχύτητας προς στις άκρες και ο λόγος είναι ο ίδιος που έχουμε αναφέρει παραπάνω.

Επίσης έχει παρατηρηθεί όσο μεγαλύτερο αριθμό πλέγματος χρησιμοποιήσαμε υπήρχε αύξηση του χρόνου σύγκλισης της λύση του κάθε προβλήματος.

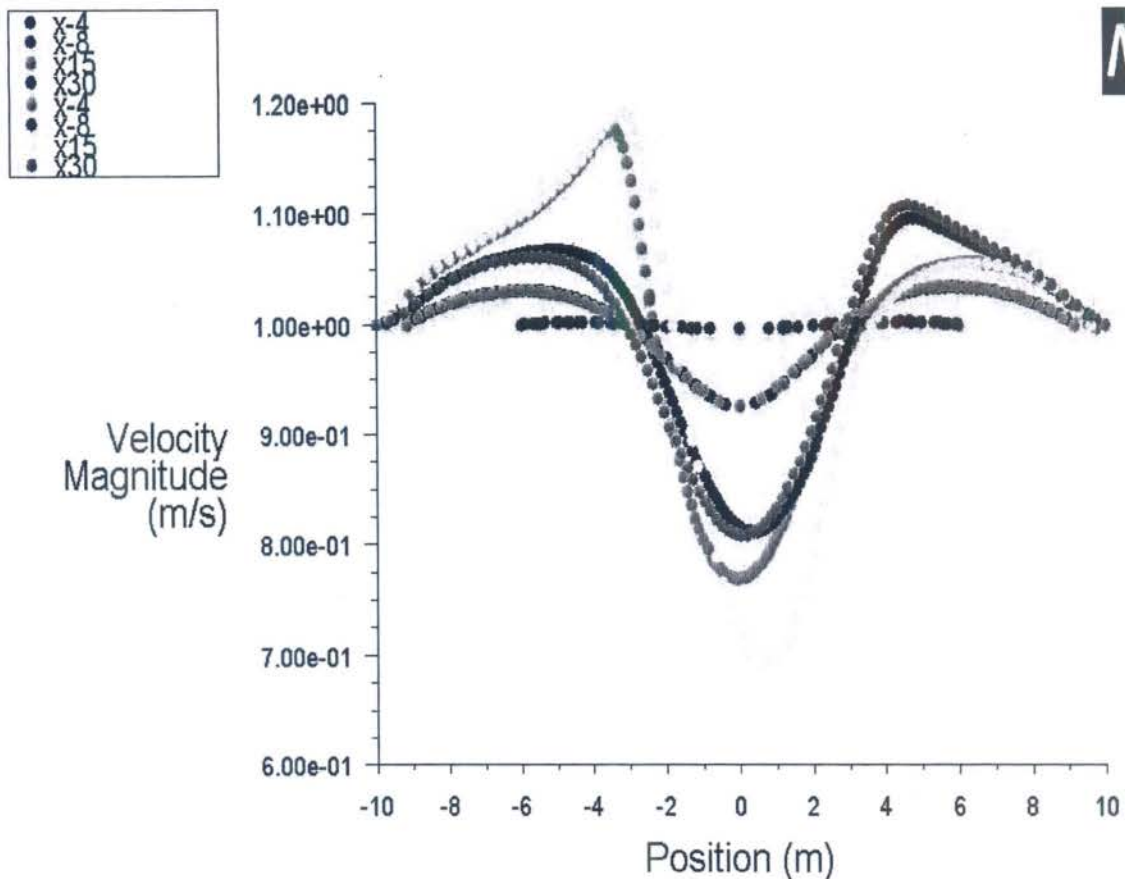
### 5.3.2 Επιλογή καταλληλότερου πλέγματος

ΠΛΕΓΜΑ: 6240 - 14040 cells



Σχήμα 5.5α: Γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει του άξονα y

ΠΛΕΓΜΑ: 14040 - 31590 cells



**Σχήμα 5.5β:** Γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει του άξονα y

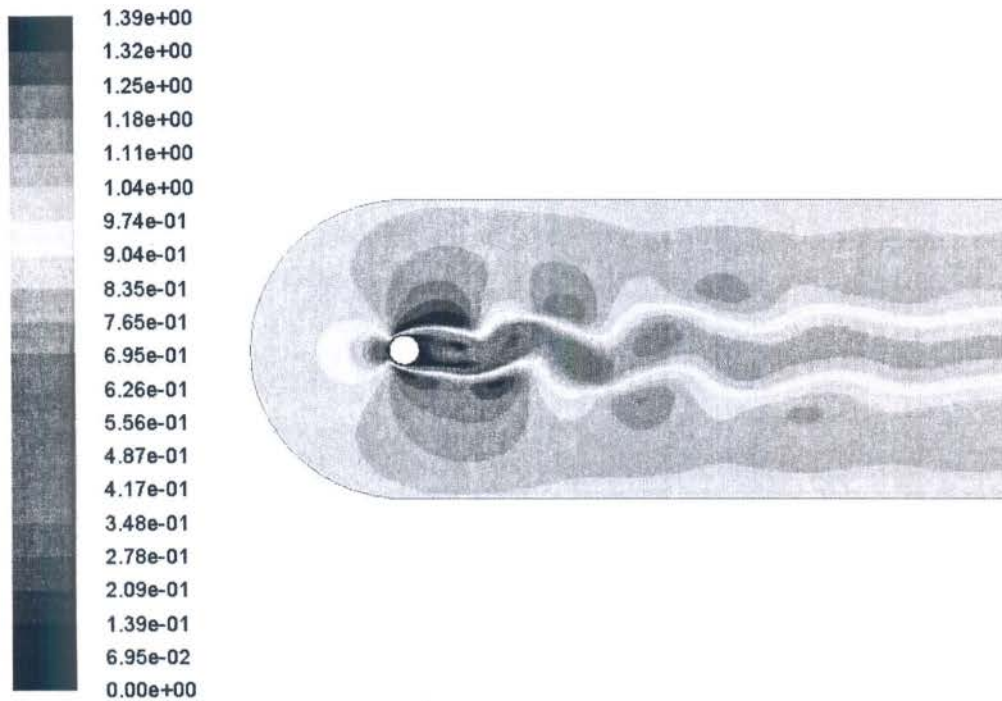
Στο σχήμα (5.5α) γίνεται σύγκριση μεταξύ των 6240 κελιών και 14040 κελιών. Παρατηρώντας την γραφική παράσταση του σχήματος (5.5α) βλέπουμε ότι οι καμπύλες του πλέγματος των 6240 κελιών έχουν αρκετά μεγάλες διαφορές με τις καμπύλες του πλέγματος των 14040 κελιών, ενώ στο σχήμα (5.5β) που γίνεται η σύγκριση μεταξύ των 14040 κελιών και των 31590 κελιών έχουμε μικρότερες διαφορές. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι όταν το ένα πλέγμα έχει μικρές διαφορές με το άλλο πλέγμα τότε είναι αυτές οι περιπτώσεις που μας δίνουν την καλύτερη λύση στο πρόβλημά μας, οπότε σύμφωνα με τα παραπάνω απορρίπτουμε το πλέγμα των 6240 κελιών.

Τώρα συγκρίνουμε τα πλέγματα των 14040 κελιών και των 31590 κελιών, ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα πυκνό πλέγμα προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην λύση μας από ότι ένα αραιό πλέγμα και για αυτό τον λόγο επιλέγουμε σαν καλύτερη λύση το πλέγμα των 31590 κελιών.

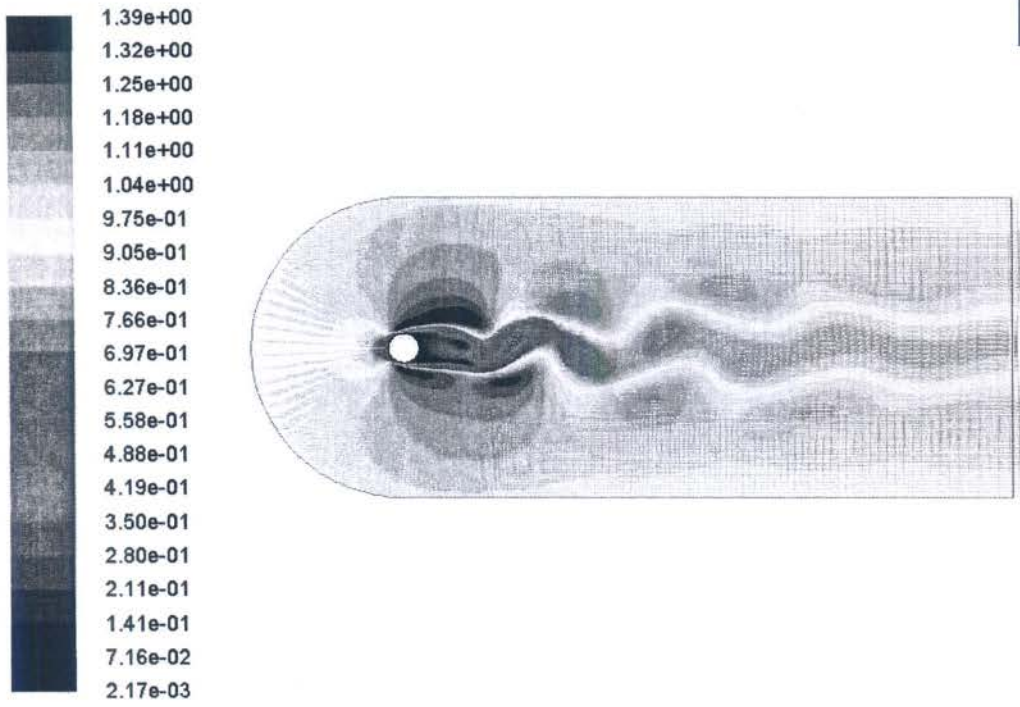


Όπως γνωρίζουμε, τα αποτελέσματα μίας μελέτης υπολογιστικής ρευστομηχανικής, μπορούν να παρουσιαστούν, όχι μόνο με διαγράμματα των μέτρων ταχύτητας, αλλά και απεικόνιση γραμμών ροής του ρευστού (contours) ή διανυσμάτων (vectors).

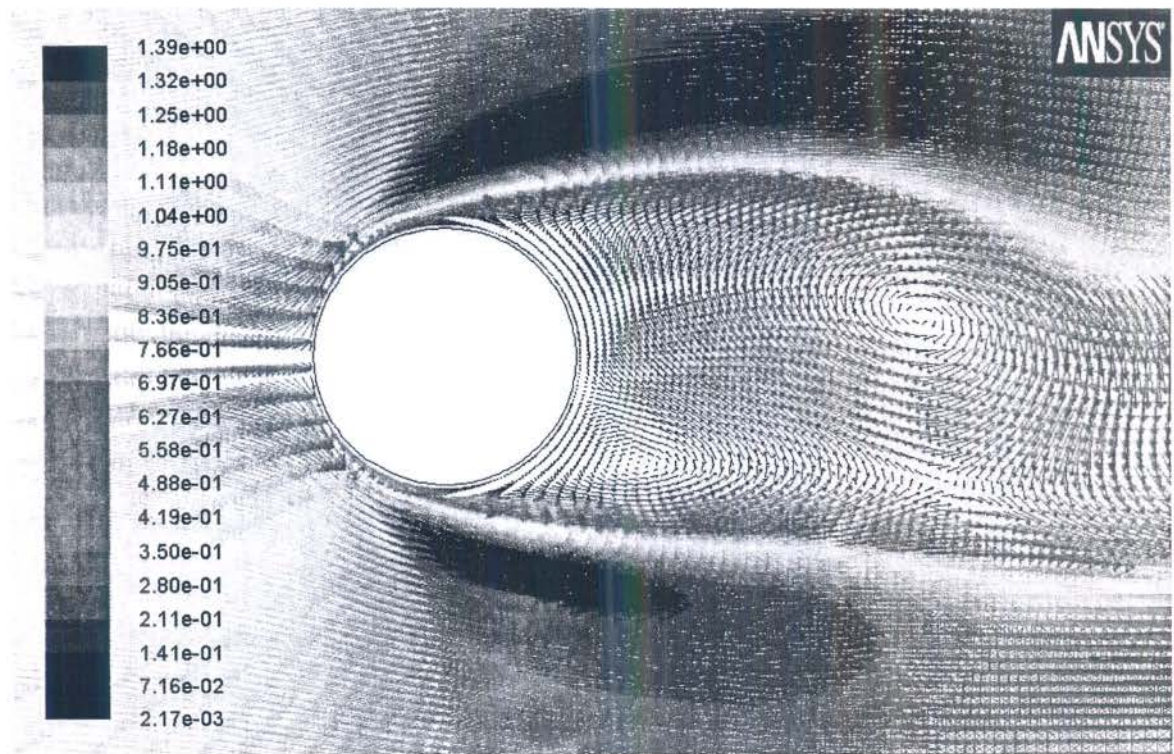
Στη συνέχεια παρουσιάζεται με τους τρόπους αυτούς και η δική μας λύση.



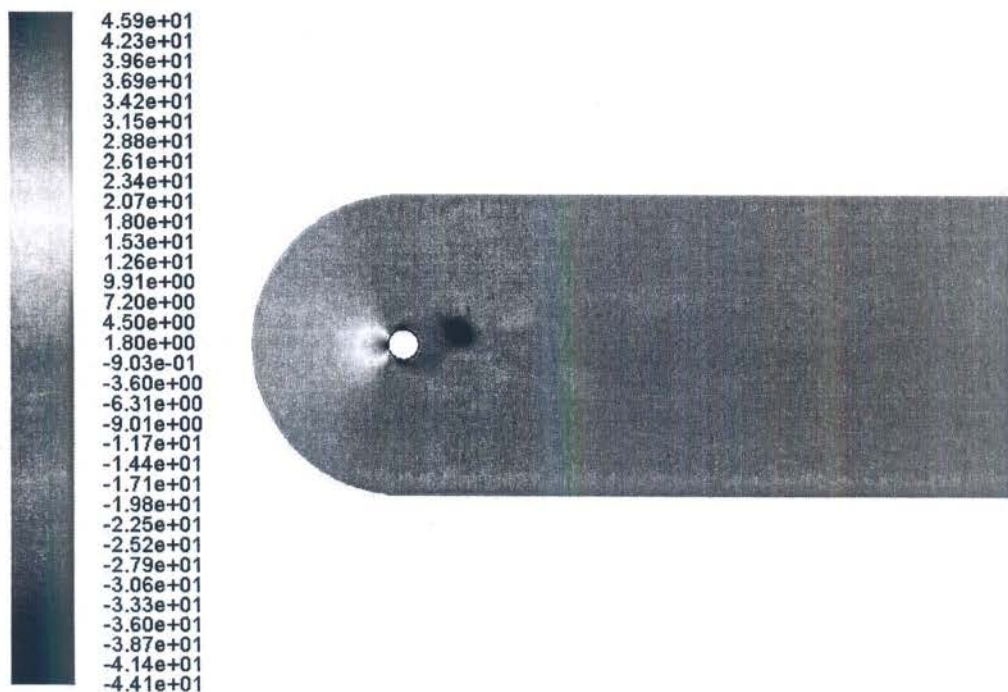
*Σχήμα 5.6α: Απεικόνιση γραμμών ροής της ταχύτητας του αέρα.*



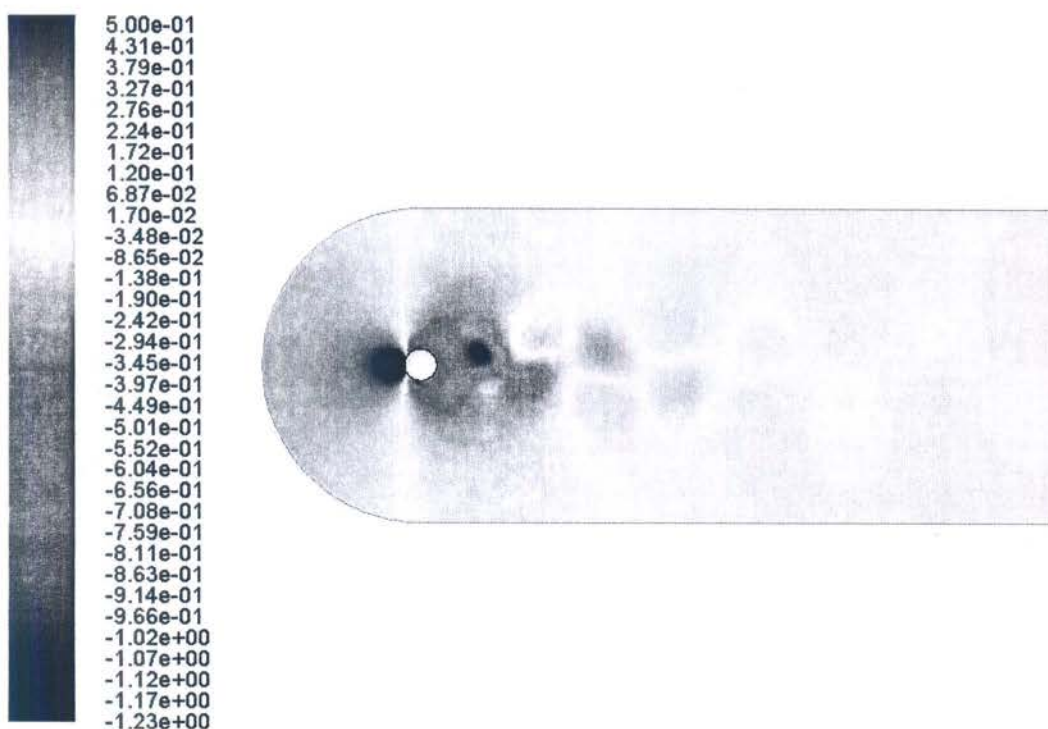
Σχήμα 5.6β: Απεικόνιση διανυσμάτων της ταχύτητας του αέρα.



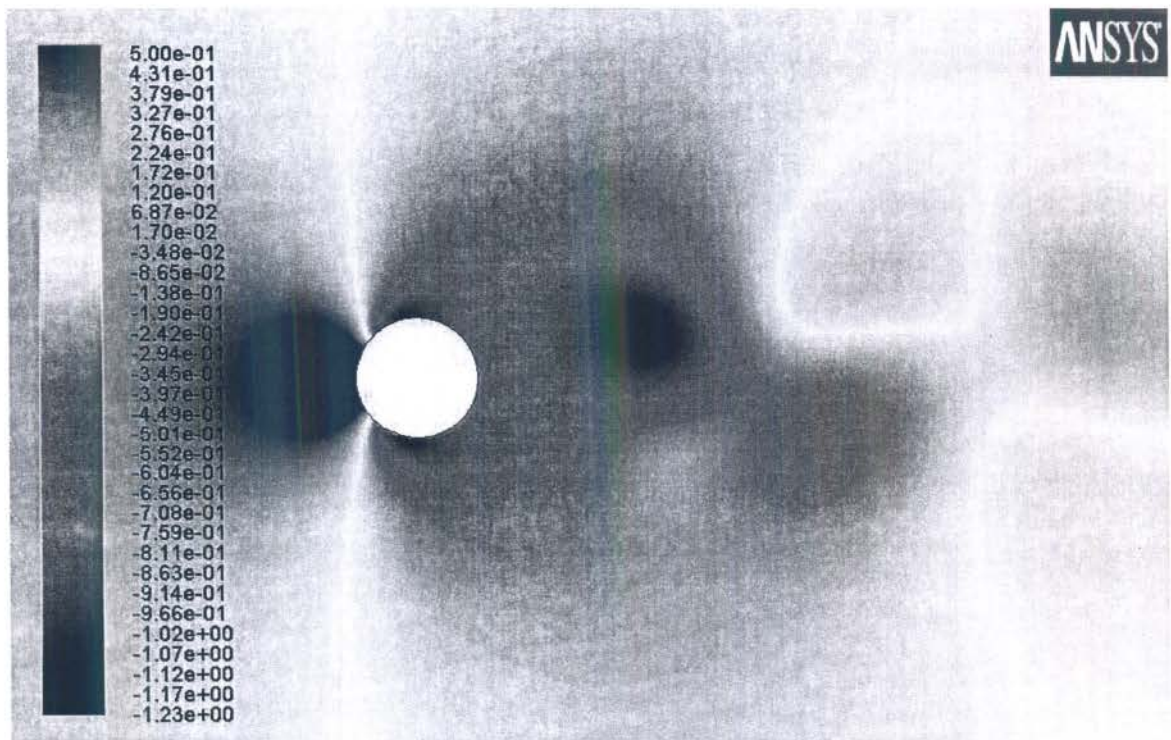
Σχήμα 5.6γ: Απεικόνιση διανυσμάτων της ταχύτητας του αέρα στο σημείο του κυλίνδρου.



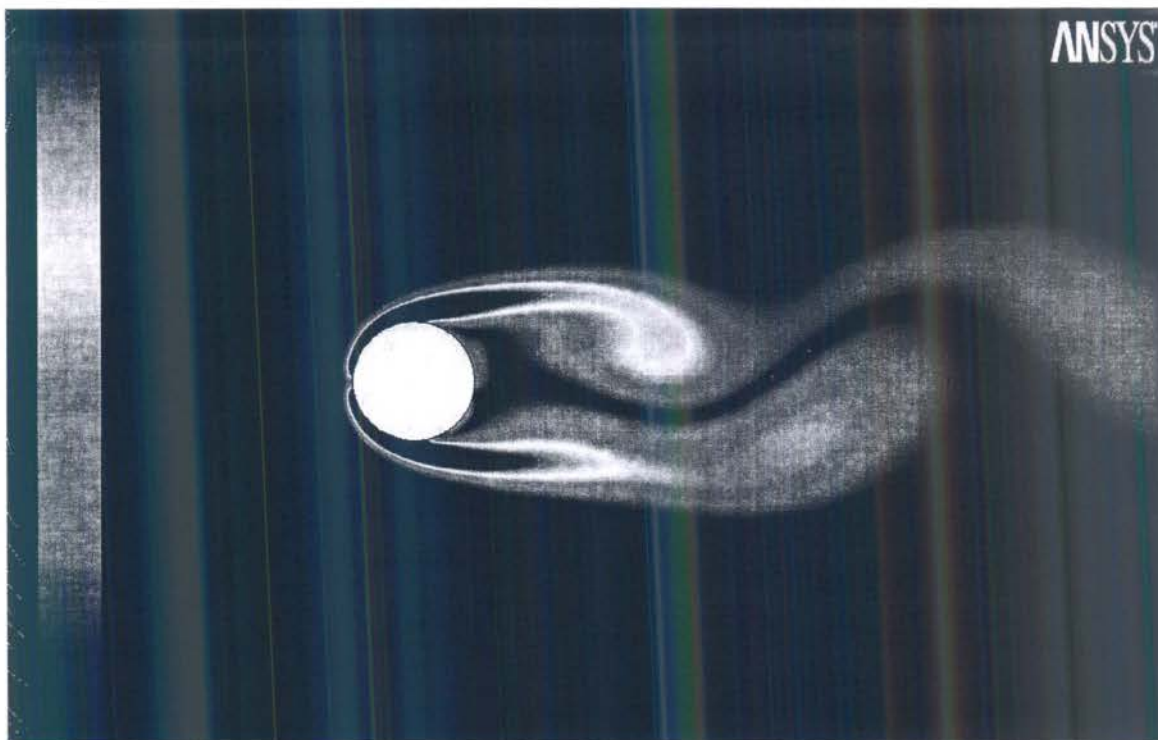
Σχήμα 5.6δ: Απεικόνιση της στατικής πίεσης.



Σχήμα 5.6ε: Απεικόνιση του συντελεστή πίεσης.



Σχήμα 5.6ζ: Απεικόνιση του συντελεστή πίεσης στο σημείο του κυλίνδρου.



Σχήμα 5.6η: Απεικόνιση του μεγέθους στροβιλισμού στο σημείο του κυλίνδρου.

### 5.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα πίσω από τον κύλινδρο είναι πολύ χαμηλή σχεδόν μηδενική ( σχήμα 5.6α), αυτό συμβαίνει διότι ο κύλινδρος δεν αφήνει την ροή του αέρα σε εκείνο το σημείο και για αυτόν τον λόγο βλέπουμε αυτήν την χαμηλή ταχύτητα. Επίσης παρατηρούμε ότι πίσω από τον κύλινδρο (σχήμα 5.6γ) δημιουργούνται στροβιλισμοί, αυτό συμβαίνει διότι ένα μικρό μέρος της ροής του αέρα με χαμηλή ταχύτητα να στρέφεται προς το σημείο αυτό και λόγω του κενού που υπάρχει σε αυτό το σημείο να δημιουργούνται οι στροβιλισμοί.

Καθώς επίσης βλέπουμε ότι η ταχύτητα προς τις άκρες του κυλίνδρου αυξάνεται, αυτό συμβαίνει διότι ο αέρας προσκρούεται πάνω στον κύλινδρο και εκτινάζεται με μεγάλη ταχύτητα προς στις άκρες και για αυτό τον λόγο βλέπουμε αυτήν την αύξηση της ταχύτητας.

Δίνες σχηματίζονται εναλλάξ στην πάνω και στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου οι οποίες εγκαταλείπουν τον κύλινδρο και μετακινούνται στον ομορρο με ταχύτητα λίγο μικρότερη από αυτή της εξωτερικής ροής. Παρατηρούνται έτσι πίσω από τον κύλινδρο δύο σειρές δινών που είναι γνωστές με το όνομα «σειρές του Von Karman». (Karman vortex street). Ο σχηματισμός δινών είναι περιοδικό φαινόμενο με καλά καθορισμένη συχνότητα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

#### **6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Συνοψίζοντας καταλήγουμε στα εξής:

Ανάλογα με την ακρίβεια που χρειαζόμαστε σύμφωνα πάντα με την φύση του προβλήματος ρυθμίζουμε και την πυκνότητα του πλέγματος.

Ένα πολύ πυκνό πλέγμα προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στην λύση μας, ενώ ένα σχετικά αραιό πλέγμα προσφέρει μικρότερης ακρίβειας λύση.

Η κατανομή της πυκνότητας του πλέγματος εξαρτάται από το σημείο που θέλουμε να εξετάσουμε για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη ανάλυση σε εκείνο σημείο.

Η ταχύτητα ροής του αέρα όσο κινείται προς και μετά τον κύλινδρο έχουμε μείωση της ταχύτητας, ενώ όσο κινούμαστε προς στις άκρες του κυλίνδρου παρουσιάζει αύξηση της ταχύτητας.

Ο σχηματισμός δινών εναλλάξ στην πάνω και κάτω πλευρά του κυλίνδρου προκαλεί αρμονική δύναμη στον κύλινδρο σε κατεύθυνση κάθετη προς την ροή και με συχνότητα ίση προς την συχνότητα σχηματισμού δινών. Έτσι αν ο κύλινδρος είναι μέρος εύκαμπτης κατασκευής (π.χ. καλώδιο), υπάρχει δυνατότητα συντονισμού όταν η συχνότητα σχηματισμού δινών γίνει περίπου ίση με μια από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Τότε η κατασκευή ταλαντώνεται με κίνδυνο αστοχίας λόγω κοπώσεως. Το φαινόμενο συντονισμού ανήκει στην κατηγορία των υδροελαστικών φαινομένων, και είναι υπεύθυνο για πολλές αστοχίες κατασκευών που λειτουργούν μέσα σε θαλάσσιο ρεύμα, αλλά και κατασκευών στην ξηρά που λειτουργούν σε περιοχές με συχνούς δυνατούς ανέμους.

#### **6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Σαν μελλοντική εργασία, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η ανάλυση και μελέτη των ταχυτήτων του ρευστού σε περισσότερα σημεία της γεωμετρίας με σκοπό την πλη-

ρέστερη παρουσίαση της συμπεριφοράς του αέρα.

Μεγάλο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε επίσης ο υπολογισμός ροής υγρού γύρω από κύλινδρο.

Τέλος συμβαδίζοντας με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την αύξηση των υπολογιστικών ισχύων θα μπορούσε να μελετηθεί η προσομοίωση της γεωμετρίας μας σε τρισδιάστατο περιβάλλον με την χρήση ενός καταλληλότερου πλέγματος που θα ήταν ικανό να αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Measurement And Modeling of the Air Flow Pattern In a Pilot - Plant Spray Dryer by F.G. Kieviet, J. Van Raaij, P. P. E. A. De Moor and P. J. A. M. Kerkhof
- A Parametric Study of the Gas Flow Patterns and Drying Performance of Co0current Spray Dryer: Results of a Computational Fluid Dynamics Study by Lixin Huang, Kurichi Kumar, and A. S. Mujumdar
- Fluent. inc guide
- Simtec lectures
- 'Introduction to CFD Basics', Rajesh Bhaskaran – Lance Collins
- 'Εισαγωγή στην ανάλυση CFD', Fluent Inc – Simtec
- 'Introduction to Gambit Training – Gambit 2.2', Fluent Inc