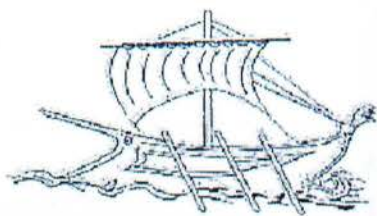


# ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

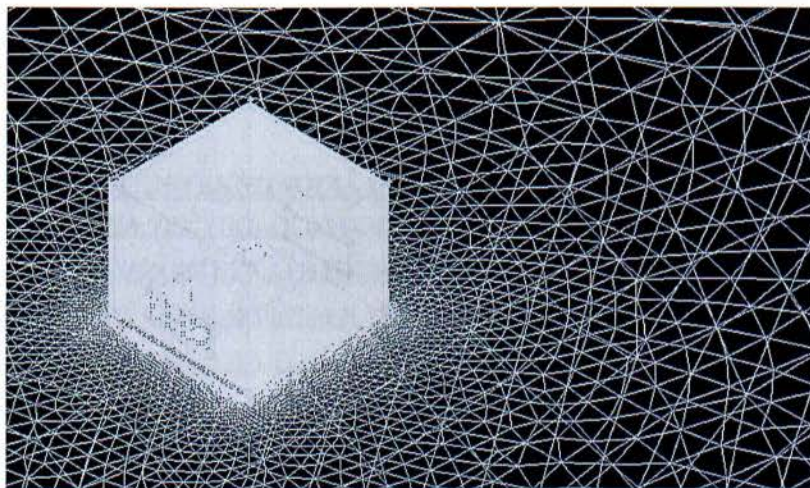
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΜΗΧ  
657

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

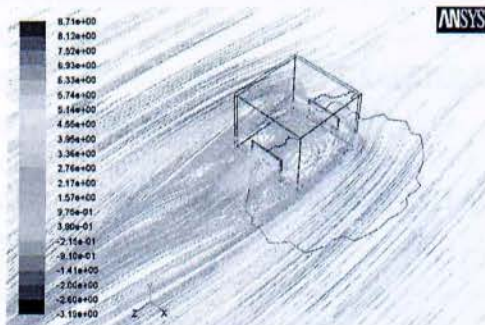
*ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ  
ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΤΙΡΙΟΥ (PARAMETRIC  
COMPUTATIONAL STUDY OF AIR-CHANGE IN A BUILDING-  
MODEL)*



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ :**

ΚΑΛΟΜΠΙΡΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΞΙΟΥΡΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ – ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2012**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	5
<b>ΛΕΞΕΙΣ - ΚΛΕΙΔΙΑ</b> .....	5
Υπολογιστική ρευστοδυναμική, Gambit, Fluent, Μοντελοποίηση, Πλέγμα. ....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>KEY-WORDS</b> .....	5
Computational Fluid Dynamics (C.F.D.), Gambit, Fluent, Modeling, Grid. ....	5
<b>1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ</b>	
<b>ΑΡΧΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ</b> .....	6
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
<b>2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ</b>	
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CFD</b> .....	7-31
2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ .....	7-8
2.2 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ .....	8-10
2.3 ΓΙΑΤΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ CFD.....	11
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ CFD .....	11-17
2.5 ΠΕΡΙΟΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD .....	17-18
2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ CFD .....	18-19
2.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ CFD-ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ .....	19
2.7.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	19
2.7.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΘΑ ΕΠΙΛΥΘΕΙ (ΧΩΡΟΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ).....	19
2.7.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	20-21
2.7.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ-ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	21
2.7.5 ΕΠΙΛΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΛΥΣΗΣ .....	22
2.7.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	22
2.8 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ .....	23
2.9 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ).....	23-24
2.10 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ .....	24

2.11	<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ</u> .....	24
2.12	<u>ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ</u> .....	25
2.13	<u>ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΙ ΜΗ.ΕΙΔΟΣ ΡΟΗΣ)</u> .....	25
2.14	<u>ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ</u> .....	25
2.15	<u>ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ</u> .....	26
2.16	<u>ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ-ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ</u> .....	26
2.16.1	<u>ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</u> .....	26-27
2.16.2	<u>ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</u> .....	27
2.16.3	<u>ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SOLVERS) ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</u> .....	27-28
2.16.4	<u>ΥΨΗΛΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u> .....	28-29
2.17	<u>ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ</u> .....	29
2.18	<u>ΦΥΣΙΚΗ</u> .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.30
2.19	<u>ΠΛΕΓΜΑ</u> .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.30
2.20	<u>ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ</u> .....	30
2.21	<u>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ-ΕΛΕΓΧΟΣ-ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</u> .....	31
2.22	<u>ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ</u> .....	31
2.23	<u>ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</u> .....	31

### **3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ GAMBIT ΚΑΙ FLUENT..... 32-47**

3.1	<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GAMBIT</u> .....	33
3.2	<u>ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ</u> .....	33
3.2.1	<u>ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ [GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI)]</u> .....	34
3.2.2	<u>ΤΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΓΡΑΦΙΚΩΝ</u> .....	34
3.2.3	<u>ΜΕΝΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ</u> .....	35
3.2.4	<u>ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ</u> .....	35
3.3	<u>ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ</u> .....	36
3.3.1	<u>ΕΝΤΟΛΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ</u> .....	36
3.3.2	<u>ΕΝΤΟΛΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ</u> .....	37
3.3.3	<u>ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ</u> .....	38
3.3.4	<u>ΕΝΤΟΛΕΣ ΠΛΕΥΡΩΝ</u> .....	38-39
3.4	<u>ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ</u> .....	39-40
3.4.1	<u>ΜΕΡΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ</u> .....	40-41
3.4.2	<u>ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΛΥΣΗΣ</u> .....	41-42

3.5	<u>ΕΝΤΟΛΕΣ ΖΩΝΗΣ (ZONE COMMANDS) – ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ</u> .....	42-43
3.6	<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ FLUENT</u> .....	43
3.7	<u>ΠΛΕΓΜΑ – ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ</u> .....	43
3.7.1	<u>ΜΗ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ</u> .....	44
3.7.2	<u>ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ</u> .....	44
3.7.3	<u>ΠΛΕΓΜΑ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ</u> .....	44
3.7.4	<u>ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ</u> .....	44-45
3.8	<u>ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ</u> .....	45-46
3.9	<u>ΜΕΤ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ</u> .....	47

#### **4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

<b><u>ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΩΝ</u></b> .....	<b>48-53</b>
4.1 <u>ΑΕΡΙΣΜΟΣ</u> .....	48
4.2 <u>ΣΤΟΧΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ</u> .....	48
4.3 <u>ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΣΜΟΥ</u> .....	48
4.3.1 <u>ΦΥΣΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ</u> .....	48-49
4.3.2 <u>ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ</u> .....	50
4.4 <u>ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΕΠΙΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΑΕΡΙΣΜΟ</u> .....	50
4.4.1 <u>ΕΙΣΟΔΟΣ ΑΕΡΑ</u> .....	50
4.4.2 <u>ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΑΕΡΑ</u> .....	50-51
4.4.3 <u>ΕΞΟΔΟΣ ΑΕΡΑ</u> .....	51-52
4.4.4 <u>ΜΕΣΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΕΡΑ</u> .....	52
4.4.5 <u>ΕΙΔΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ</u> .....	53

#### **5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

<b><u>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ</u></b> .....	<b>54-59</b>
5.1 <u>ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ</u> .....	54
5.2 <u>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (ΑΕΡΟΣΥΡΑΓΓΑ-ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ)</u> .....	54-55
5.3 <u>ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</u> .....	55-56
5.4 <u>ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ</u> .....	57
5.5 <u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</u> .....	58-59

## **6° ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

### **ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ**

#### **ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ CFD ..... 60-84**

##### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ GAMBIT ..... 60**

###### **6.1.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....60-63**

###### **6.1.2 ΕΝΤΟΛΕΣ ΖΩΝΗΣ ..... 64**

###### **6.1.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....64-65**

###### **6.1.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....66-67**

##### **6.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΣΤΟ FLUENT ..... 68**

###### **6.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ FLUENT .....68-84**

## **7° ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

### **ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ..... 85-87**

#### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....88**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται υπολογιστική μελέτη του αέρα ανανέωσης σε μοντέλο κτιρίου χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit και το υπολογιστικό πρόγραμμα Fluent. Τα αποτελέσματα που λάβαμε μέσω του Fluent χρησιμοποιώντας μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics) τα συγκρίναμε με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν σε αεροσύραγγα ώστε να ελέγξουμε το πόσο αξιόπιστη είναι η μεθοδολογία CFD σε ανάλογες εφαρμογές ρευστοδυναμικής.

## ΛΕΞΕΙΣ - ΚΛΕΙΔΙΑ

Υπολογιστική ρευστοδυναμική, Gambit, Fluent, Μοντελοποίηση, Πλέγμα.

## ABSTRACT

This thesis is a computational study of air renewal in model building using the design program Gambit and the computer program Fluent. From the results we received from Fluent by using CFD (Computational Fluid Dynamics) models, we compared them with the corresponding experimental results performed in a wind-tunnel to check how closely the experimental and computational fluid dynamics solution of a fluid dynamics problem.

## KEY-WORDS

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

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## 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 μετάδοση θερμότητας και μάζας των χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετικών ρευστομηχανικών και θερμοδυναμικών φαινομένων. Οι υπέρ-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, εξοικειωθήκαμε με την επιστήμη CFD, της δυνατότητας που έχει καθώς και το εύρος των εφαρμογών της, έτσι λοιπόν μελετήσαμε και χρησιμοποιήσαμε λογισμικά προγράμματα (Gambit και Fluent) τα οποία υπάρχουν στο εργαστήριο εφαρμοσμένης ρευστομηχανικής και με τη βοήθεια τους να πραγματοποιήσουμε προσομοίωση βασικής ρευστομηχανικής εφαρμογής.

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 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 γύρο από κύλινδρο, κλπ.
- Προσδιορισμός λάθους



*Lewis F. Richardson (1881-1953)*

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



*John von Neumann (1903-1957)*



- 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)



*Richard Courant (1888-1972)*

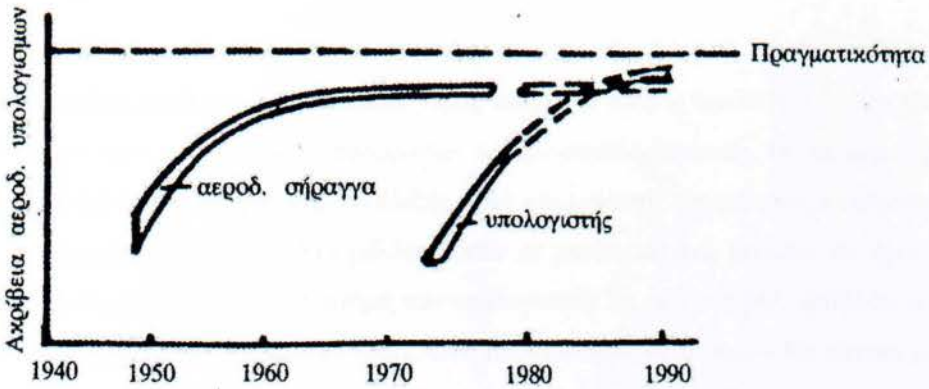
## 2.2 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

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,  $C_L$  και αντίστασης του αεροσκάφους,  $C_D$ , 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 περιπτώσεις οι λύσεις που παρέχει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι αρκετά αξιόπιστες και δεν κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος των αριθμητικών αποτελεσμάτων με μετρήσεις.

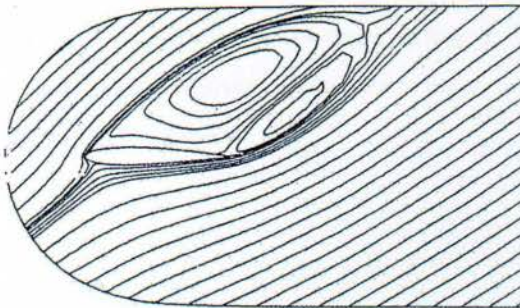
Η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος των μηχανών σε συνδυασμό με την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης φαίνεται, ότι σύντομα θα οδηγήσει στην κατάσταση, όπου η αξιοπιστία των ρευστομηχανικών υπολογισμών να είναι μεγαλύτερη από την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της πειραματικής προσομοίωσης.

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  $H/Y$  και Αεροδυναμικής Σήραγγας [5]

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  $C_D$ ».



Σχήμα 2.2 : Αεροτομή σε μεγάλη γωνία πρόσπτωσης με καθολική αποκόλληση[5]

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 οποιεσδήποτε καταστάσεις ροής. Ο μόνος προς το παρόν περιορισμός του είναι η ταχύτητα εκτέλεσης των πράξεων και η χωρητικότητα της μνήμης του.

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 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 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ CFD

- 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.

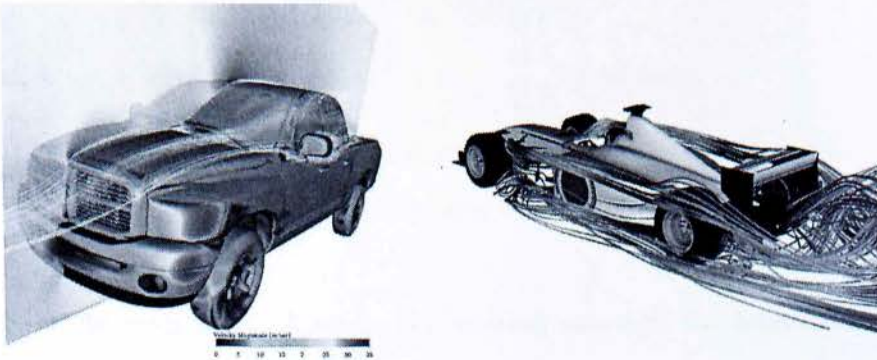
◇ Χρησιμοποιείται επίσης για περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να διεξαχθεί πείραμα ώστε να πάρουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, (προσομοίωση φυσικών φαινομένων) όπως π.χ.:

- 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.)

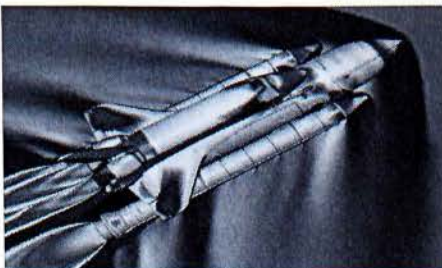
### 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ CFD

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

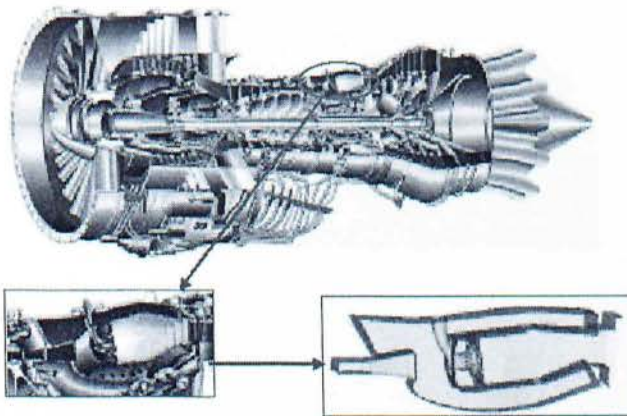
- Αεροδυναμική οχημάτων εδάφους, αεροσκαφών, πυραύλων



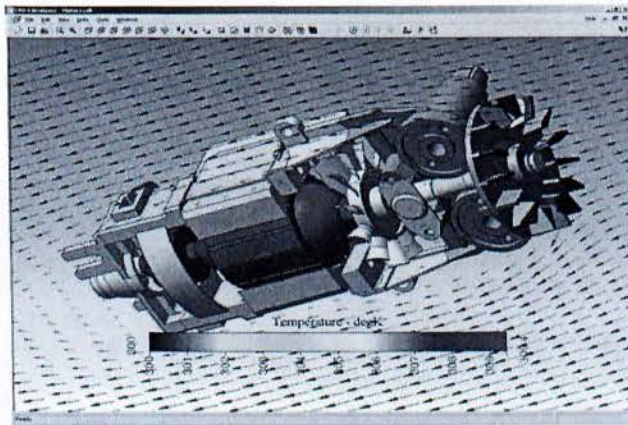
- Υδροδυναμική των σκαφών
- Ροές μηχανών - μηχανές ολοκληρωμένου κυκλώματος και αεριοθούμενες μηχανές



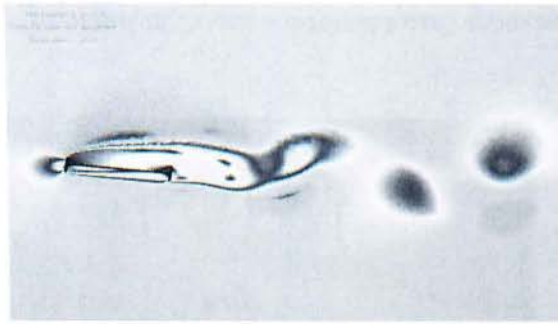
- Στροβιλοκινητήρες - αντλίες



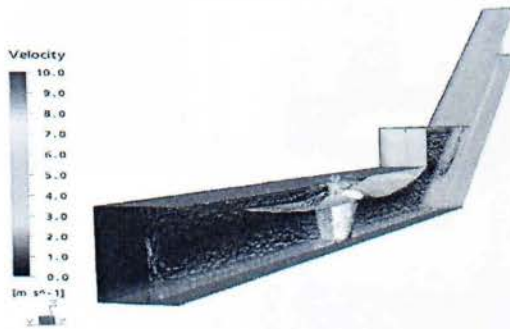
- Μεταφορά θερμότητας -θέρμανση και συστήματα ψύξης
- Ροή ρευστού και μετάδοση θερμότητας σε βιομηχανικές διεργασίες (λέβητες, εναλλάκτες, συσκευές καύσης, αντλίες, ανεμιστήρες, σωληνώσεις, κ.λπ.)



- Εφαρμοσμένη μηχανική διαδικασία - αναμιγνύοντας και αντιδρούσες χημικές ουσίες
- Φόρτωση αέρα - δυνάμεις και δυναμική απάντηση των δομών «καταπόνηση κρεμαστής γέφυρας»



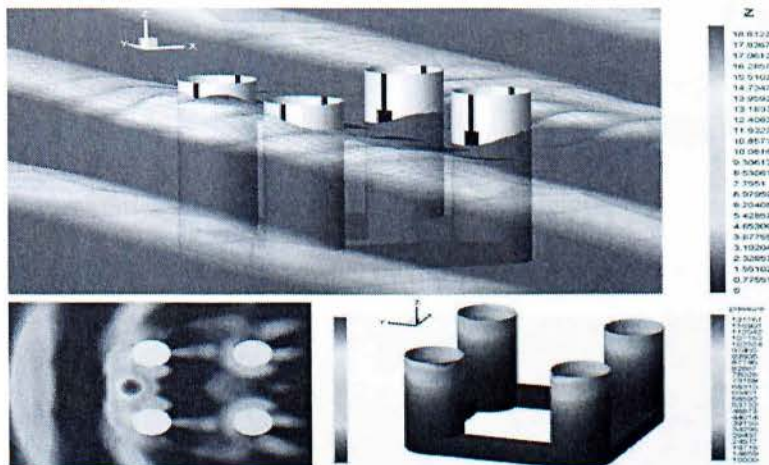
➤ Εξαερισμός κτηρίων



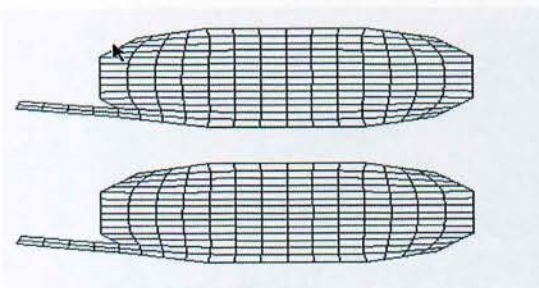
➤ Περιβαλλοντική εφαρμοσμένη μηχανική - μεταφορά των ρύπων και των αποβλήτων αποχέτευσης



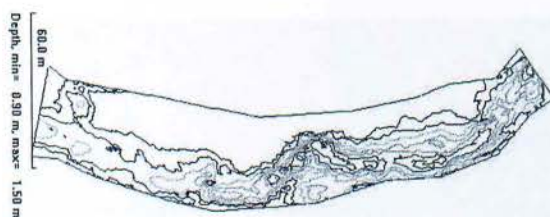
➤ Παράκτια εφαρμοσμένη μηχανική - φόρτωση στις παράκτιες και θαλάσσιες δομές .



➤ Υδραυλική - δίκτυα σωλήνων, δεξαμενές, κανάλια



➤ Μεταφορά ιζημάτων



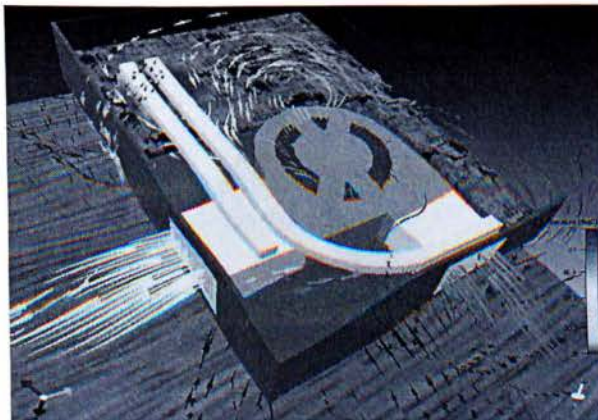
- Υδρολογία - ροή στους ποταμούς και τα υδροφόρα στρώματα



- Ωκεανογραφία - παλιρροιακές ροές, ωκεάνια ρεύματα
- Μετεωρολογία - αριθμητική καιρική πρόβλεψη



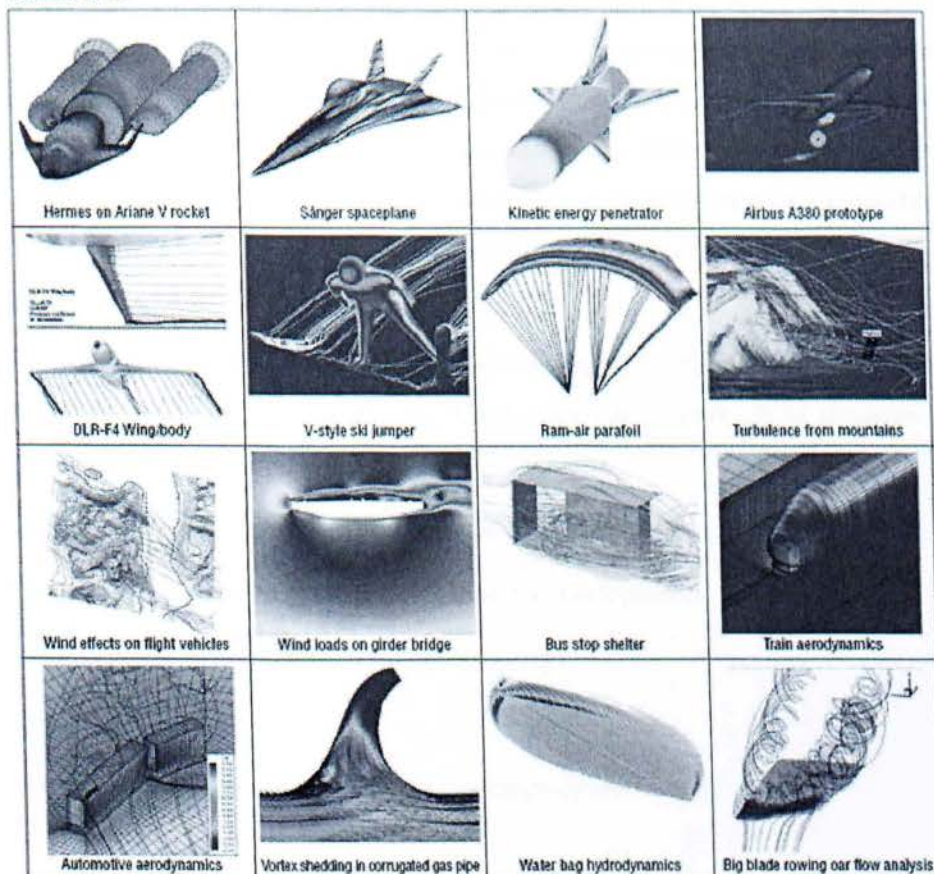
- Φυσική υψηλής ενέργειας
- Βιοϊατρική εφαρμοσμένη μηχανική - ροή αίματος στην καρδιά, τις φλέβες και τις αρτηρίες
- Μετάδοση θερμότητας για ψύξη ηλεκτρονικών συστημάτων





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

From Lift-off ...



... to Splash-down

Η βιοϊατρική (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 2.3: Κατανομή πίεσης σε βαλβίδα καρδιάς (βιοϊατρική)

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 συνδυασμό 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 επίλυσεις βασίζονται σε μοντέλα των πραγματικών φαινομένων (π.χ. μοντέλα τυρβώδους, συμπίεστικότητας, 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 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ CFD-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**

- Τι είδους αποτελέσματα ζητούμε και πως θα τα χρησιμοποιήσουμε
- Ποια μαθηματικά μοντέλα θα χρειαστεί να ενσωματώσουμε στην ανάλυση
- τι βαθμό ακρίβειας χρειαζόμαστε
- Πόσο γρήγορα χρειαζόμαστε τα αποτελέσματα

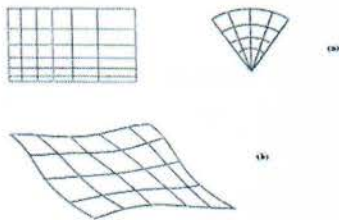
### **2.7.2 Καθορισμός Πεδίου Που Θα Επιλυθεί (Χώρος Και Χρόνος)**

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

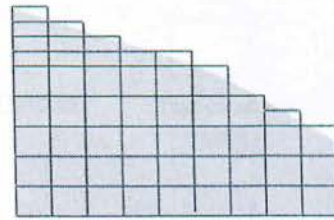
### 2.7.3 Σχεδιασμός Και Κατασκευή Του Υπολογιστικού Πλέγματος

- Θα χρησιμοποιηθεί εξαεδρικό/τετραπλευρικό ή τετραεδρικό/τριγωνικό πλέγμα, υβριδικό, μη συμβατό πλέγμα
- Τι 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

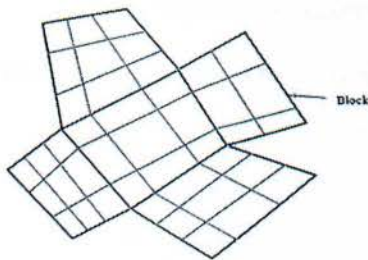
Τύποι πλεγμάτων :



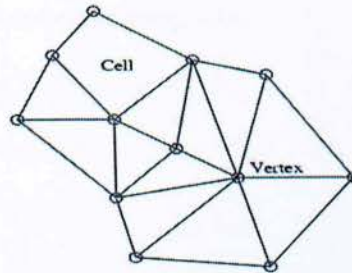
Κανονικά πλέγματα και πλέγματα 'body-fitted'



Βαθμιδωτή αναπαράσταση περίπλοκης γεωμετρίας



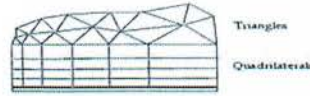
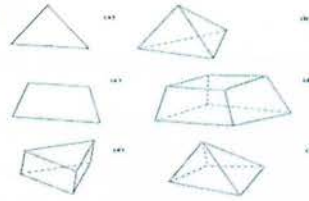
Δομημένα κατά block πλέγματα



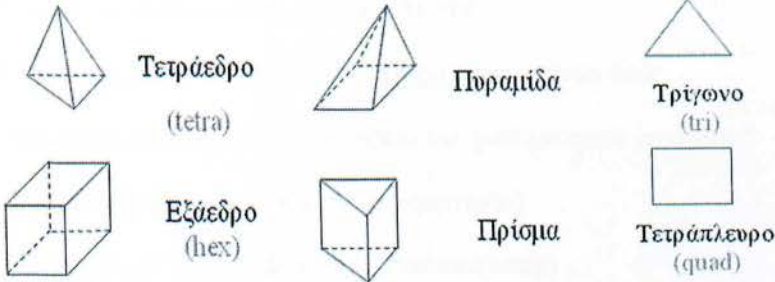
Αδόμητα (unstructured) πλέγματα



Σχήματα κελιών



Υβριδικά πλέγματα



### 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 Και Παρακολούθηση 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 ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στο στάδιο αυτό καθορίζουμε το πρόβλημα και ασχολούμαστε με την προεπεξεργασία. 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 ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ

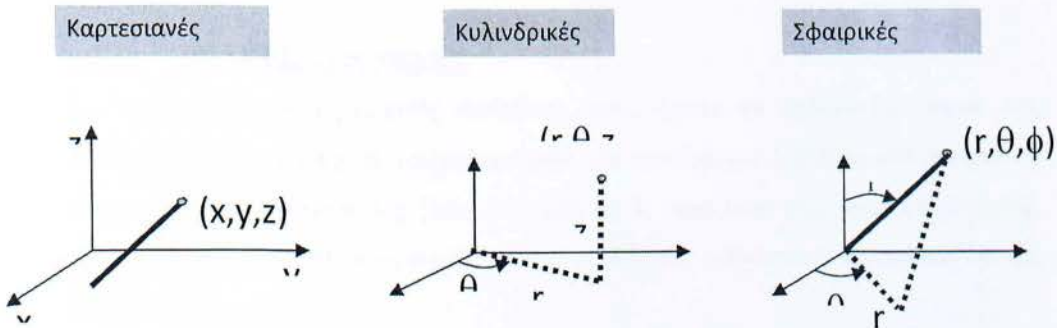
Οι σχεδιαστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι ακόλουθες :

- 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 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Διακρίνουμε τρία συστήματα συντεταγμένων :

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



Σχήμα 2.4: Συστήματα Συντεταγμένων.

## **2.12 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ**

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

- Ιξώδες ρευστού ( παχύρρευστο ή λεπτόρρευστο)
- 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 ΚΑΙ ΜΗ,ΕΙΔΟΣ ΡΟΗΣ)**

- Οι αρχικές συνθήκες δεν πρέπει να επηρεάζουν 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 ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ**

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 περιοχή.

### **• 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 ΚΑΙ 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).

• Κάθε 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 μάλλον 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) Και 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 Και Διαδικασία Εργασίας**

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

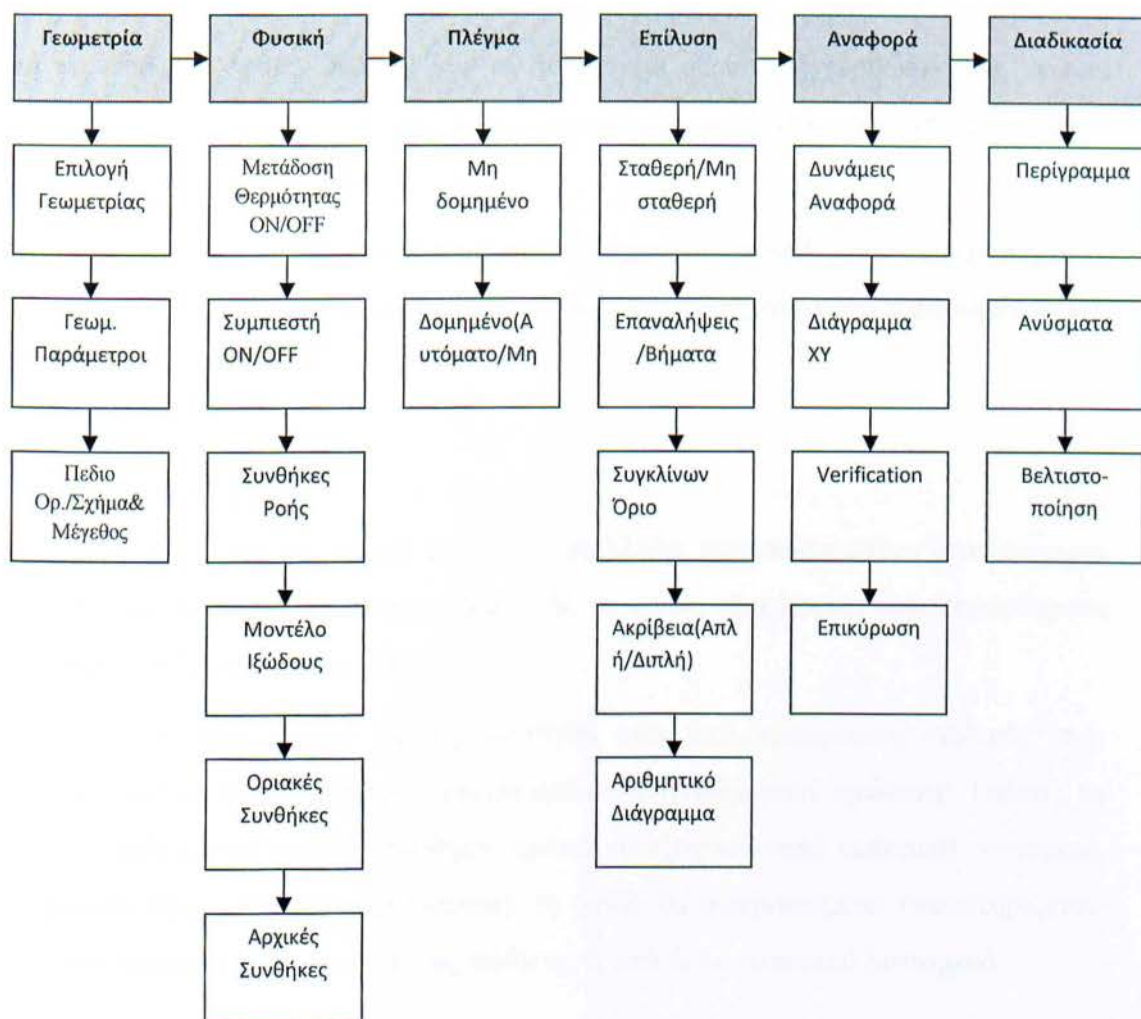
Όπως απαιτείται, με την multi-block technique, οι CFD κώδικες πρέπει να αναπτυχθούν μέσα από μια λειτουργία [Message Passing Interface] (MPI) Standard, ώστε να μεταφέρουν δεδομένα μεταξύ διαφορετικών. Επίσης, όσον αφορά στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων (περίγραμμα, βέλη ταχύτητας, γραμμές ροής), η χρησιμότητα των CFD κωδίκων ποικίλει και διαφέρει ανάλογα με τις εφαρμογές, όπως για παράδειγμα, έρευνα αλληλεπίδρασης ρευστών σε ροή με φυσαλίδες, 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 2.5.: 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 συνδυαζόμενο, 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 ΚΑΙ 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-ΕΛΕΓΧΟΣ-ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

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 επαναληπτικές μεθόδους επίλυσης.

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

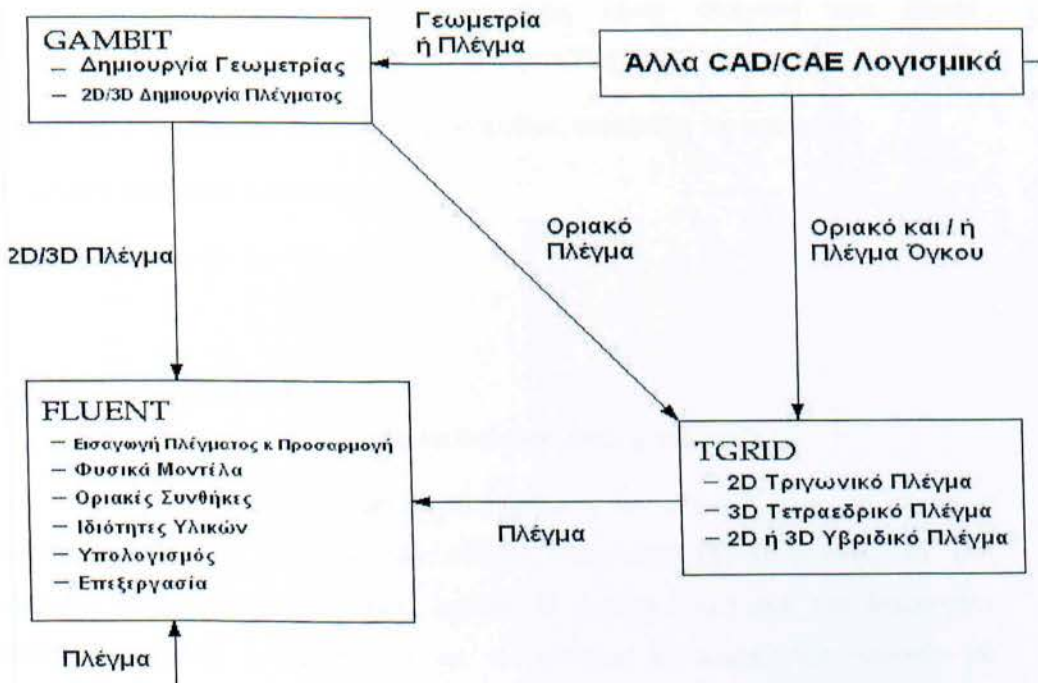
Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν ύστερα από ένα πείραμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, παρουσιάζονται με διάφορες μορφές, με σκοπό να βοηθήσουν τον εκάστοτε χρήστη να έχει όσο το δυνατόν ολοκληρωμένη εικόνα των δεδομένων που προέκυψαν. Έτσι λοιπόν τα αποτελέσματα ενός πειράματος, μπορεί να έχουν τη μορφή γραφημάτων πλέγματος, ισούψων 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.



### 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ GAMBIT ΚΑΙ FLUENT

Στο συγκεκριμένο αυτό κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα εμπορικό λογισμικό (GAMBIT) με το οποίο κατασκευάσαμε τη γεωμετρία της άσκησης μας 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 εξακύνδρα, τετρακύνδρα, 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 μέγεθος 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: επιφάνεια (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)]

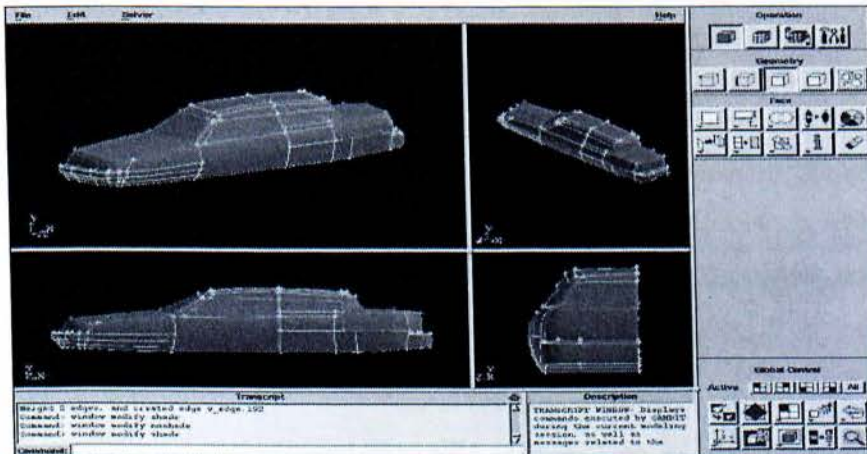
Το γραφικό περιβάλλον του χρήστη αποτελείται από:

#### 3.2.2 Το 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 του λογισμικού πακέτου και βρίσκεται στο πάνω μέρος του παραθύρου που παρουσιάζεται πιο κάτω:

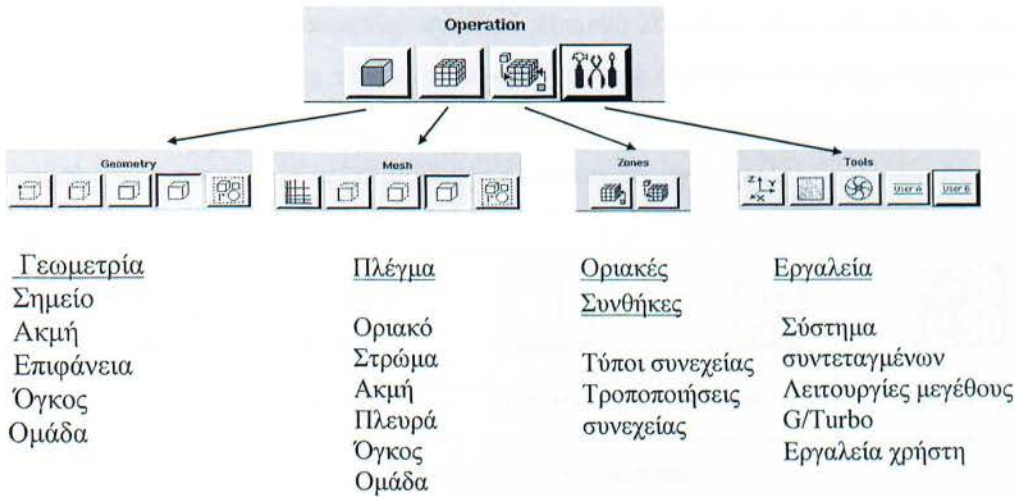
- **File**, από όπου έχουμε τις εξής επιλογές : δημιουργία, άνοιγμα, αποθήκευση, εκτύπωση γραφικών, τροποποίηση και τρέξιμο αρχείων, εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων και έξοδος.
- **Edit**, από όπου μπορούμε να κάνουμε τροποποίηση τίτλων, αρχείων, παραμέτρων.
- **Solver**, περιλαμβάνει τον ορισμό του υπολογιστικού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



Σχήμα 3.2: Γραφικό περιβάλλον χρήστη.

### 3.2.3

### Μενου Εργαλείων Λειτουργιών

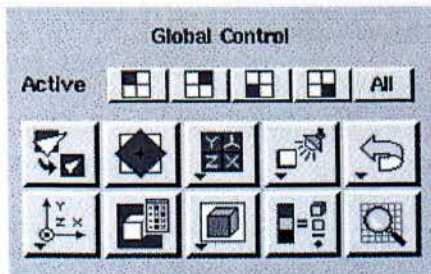


*Σχήμα 3.2. : Μενού Εργαλείων Λειτουργιών*

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.

### 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 3.3 : Γενική Γραμμή Εργαλείων ελέγχου Λειτουργιών.*



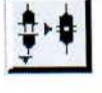





### 3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

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

				
Σημείο	Πλευρά	Επιφάνεια	Όγκος	Ομάδα


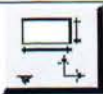

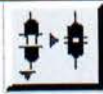


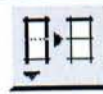



Σχήμα 3.6 : Μενού Γεωμετρίας

#### 3.3.1 Εντολές Σημείων

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	Δημιουργία σημείου	Δημιουργεί ένα πραγματικό σημείο σε οποιαδήποτε τοποθεσία, πραγματικό ή εικονικό σημείο σε πλευρά ή επιφάνεια, 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 της επιφάνειας στην οποία 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
	Μετακίνηση/Αντιγραφή σημείων Ευθυγράμμιση σημείων	Μετακινεί ή αντιγράφει σημεία,, ευθυγραμμίζει σημεία και συνδεδεμένες γεωμετρίες.
	Μετατροπή σημείων (Εικονικά σε πραγματικά)	Μετατρέπει εικονικά σημεία σε πραγματικά.
	Σύνοψη σημείων Έλεγχος σημείων Πληροφορίες σημείων Ολικές οντότητες	Παρουσιάζει σύνοψη πληροφοριών σημείων, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας ενός σημείου ή μίας γεωμετρίας, εμφανίζει λίστα πληροφοριών σημείων.
	Διαγραφή Σημείων	Διαγραφή σημείων

Σχήμα 3.7 : Σχηματική Διάταξη Εντολών Σημείων

### 3.3.2 Εντολές Επιφανειών

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	Ανάπτυξη Επιφάνειας	Δημιουργία επιφάνειας από ήδη υπάρχουσες πλευρές ή σημεία
	Δημιουργία Επιφάνειας	Δημιουργία επιφάνειας από τα τρία βασικά σχήματα (παραλληλόγραμμο, κύκλος, έλλειψη)
	Λειτουργίες Boolean	Ένωση, τομή αφαίρεση επιφανειών
	Σύνδεση-Αποσύνδεση επιφανειών	Συνδέει πραγματικές κ εικονικές επιφάνειες, Αποσυνδέει κοινόχρηστες επιφάνειες
	Τροποποίηση χρωμάτων επιφανειών-ετικετών	Τροποποίηση χρωμάτων επιφανειών-ετικετών
	Μετακίνηση, Αντιγραφή, Ευθυγράμμιση επιφανειών	Μετακινεί, αντιγράφει επιφάνειες, ευθυγραμμίζει επιφάνειες κ συνδεδεμένες γεωμετρίες
	Διάσπαση, συγχώνευση, απλοποίηση επιφανειών	Διάσπαση , συγχώνευση, απλοποίηση επιφανειών,
	Εξομάλυνση, επιδιόρθωση μετατροπή επιφανειών,	Εξομάλυνση επιδιόρθωση πραγματικών επιφανειών, μετατροπή εικονικών επιφανειών σε πραγματικές
	Σύνοψη επιφανειών Έλεγχος επιφανειών Πληροφορίες επιφανειών Ολικές οντότητες	Παρουσιάζει σύνοψη πληροφοριών επιφανειών, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας μιας επιφάνειας ή μίας γεωμετρίας, εμφανίζει λίστα πληροφοριών επιφανειών
	Διαγραφή επιφανειών	Διαγραφή επιφανειών

Σχήμα 3.7 : Σχηματική Διάταξη Εντολών Επιφανειών


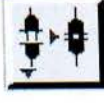

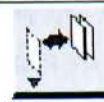
### 3.3.3 Δημιουργία Πραγματικού Σημείου

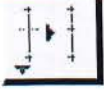
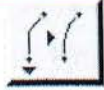


Για την δημιουργία πραγματικού σημείου απαιτείται ο προσδιορισμός του συστήματος συντεταγμένων. Οι τύποι των συστημάτων συντεταγμένων είναι όπως ήδη γνωρίζουμε το Καρτεσιανό, το Κυλινδρικό και το Σφαιρικό. Επιλέγοντας λοιπόν τον ανάλογο τύπο συστήματος συντεταγμένων ανάλογα με τη χρήση, δηλαδή αν θέλουμε για παράδειγμα να δημιουργήσουμε δυσδιάστατη 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 βρούμε 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
	Μετακίνηση/Αντιγραφή ή πλευρών Ευθυγράμμιση πλευρών	Μετακινεί ή αντιγράφει σημεία,, ευθυγραμμίζει σημεία και συνδεδεμένες γεωμετρίες

	Διαχωρισμός/Συνένωση η πλευρών	Διαχωρίζει ή ενοποιεί πλευρές
	Εξομάλυνση- μετατροπή πλευρών	Εξομαλώνει τις πλευρές για την επισκευή της κακής γεωμετρίας και την μείωση της πολυπλοκότητας, μετατρέπει πραγματικές σε εικονικές πλευρές
	Σύνοψη πλευρών Έλεγχος πλευρών Εξέταση πλευρών	Εμφανίζει σύνοψη πληροφοριών πλευρών, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας των πλευρών και της γεωμετρίας
	Διαγραφή πλευρών	Διαγράφει πραγματικές και εικονικές πλευρές

Σχήμα 3.7: 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 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

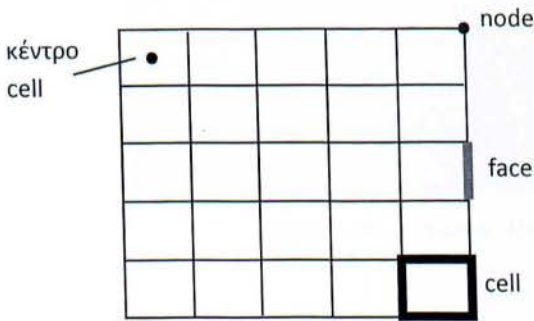
**Edge** = Όριο ενός face (μόνο για 3D)

**Node** = Σημείο πλέγματος

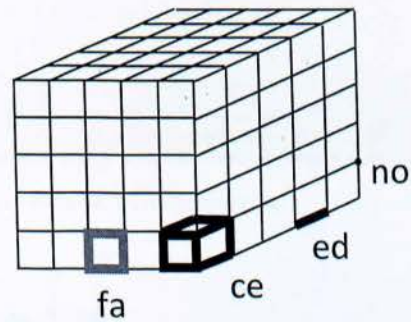
**Zone** = Σύνολο από nodes, faces, και/ή cells

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.

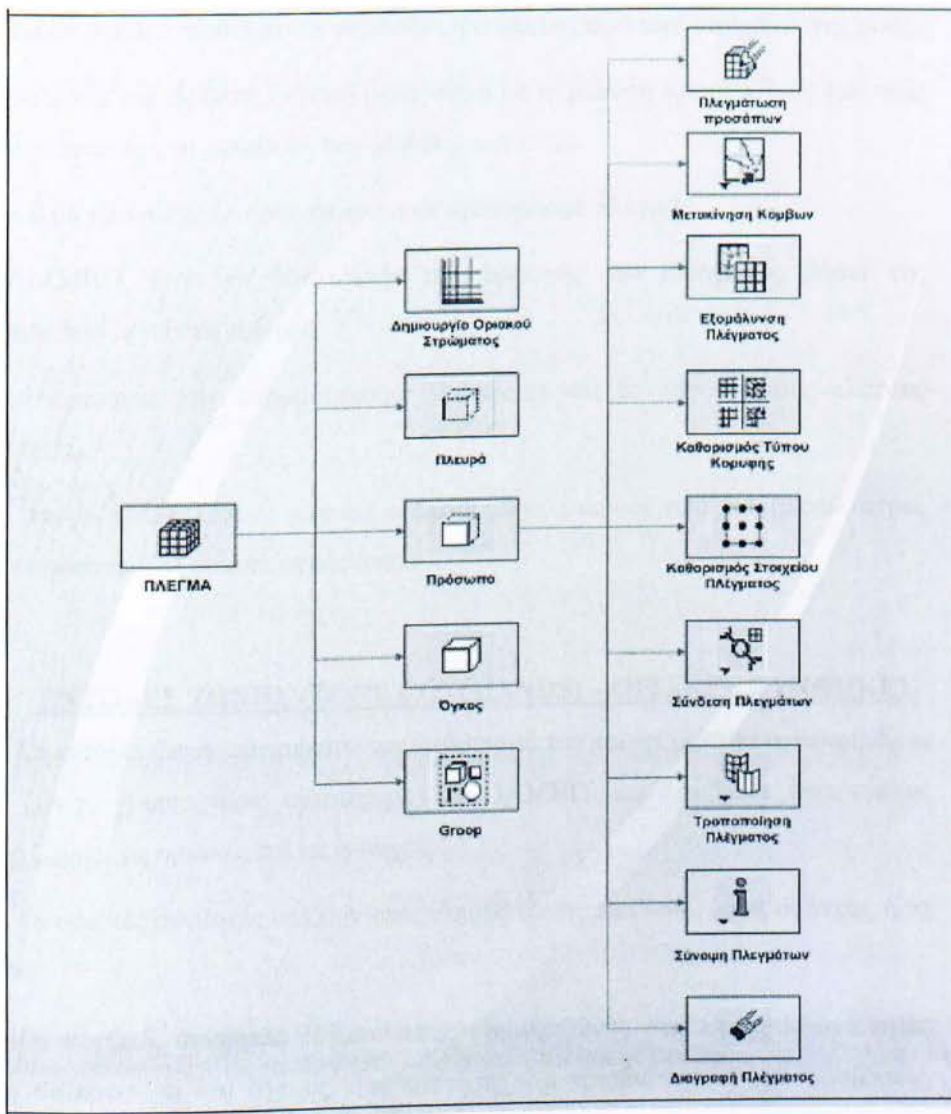


Σχήμα 3.8 : Απλό 2d Πλέγμα.



Σχήμα 3.9 : 3d Πλέγμα.

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



Σχήμα 3.10 : Σχηματική Παράσταση Λειτουργιών Προγράμματος.

### 3.4.2 Ποιότητα Πλέγματος Και Ακρίβεια Λύσης

Τα αριθμητικά σφάλματα σχετίζονται με τον υπολογισμό των μεταβολών των παραμέτρων και των παρεμβολών στα faces.

Αυτά τα σφάλματα περιορίζονται όταν:

- Χρησιμοποιούμε σχήματα υψηλής ακρίβειας.
- Το πλέγμα είναι παράλληλο με τη ροή.
- Πυκνώνουμε το πλέγμα.

Στη συνέχεια,

- Απαιτούμε ικανή πυκνότητα για τον καλύτερο υπολογισμό των στοιχείων της ροής.
- Τα σφάλματα παρεμβολής (πάντα) μειώνονται με τη μείωση του μεγέθους των cells
- Ελαχιστοποιούμε τη μεταβολή στο μέγεθος των cells.
- Το σφάλμα αποκοπής ελαχιστοποιείται σε ομοιόμορφο πλέγμα.
- Το GAMBIT δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής του πλέγματος βάσει της μεταβολής του μεγέθους του cell.
- Ελαχιστοποιούμε την παραμόρφωση (skewness) και το λόγο μήκους-πλάτους (aspect ratio).

Γενικά αποφεύγουμε λόγους μήκους-πλάτους μεγαλύτερους από 5:1 (μεγαλύτερες τιμές επιτρέπονται σε οριακά στρώματα).

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

Οι εντολές ζώνης επιτρέπουν τον καθορισμό του 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 3.11 :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 ΚΑΙ 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" (κατόπιν υπολογισμών και αποτελεσμάτων), αν είναι το κατάλληλο, για την εκάστοτε εφαρμογή, ή αν πρέπει να ξαναγυρίσουμε πίσω στο GAMBIT για επιπλέον μορφοποίηση του.

### **3.7.1 Μη Δομημένο Πλέγμα**

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει ποικιλία επιλογών μη δομημένων (ανοργάνωτων) πλεγμάτων, τα οποία μπορούν να είναι είτε τετραεδρικά είτε εξαεδρικά "υβριδικά". Αυτά με τη σειρά τους μπορούν εύκολα και με μεγάλη ευελιξία να προσαρμοστούν σχεδόν σε οποιαδήποτε γεωμετρία. Ο συνδιασμός μη δομημένων τετράπλευρων και εξάπλευρων σχημάτων συνιστά ένα ιδανικό πλέγμα, όσον αφορά περιπτώσεις εσωτερικής ροής ρευστού, σε μεγάλες επιφάνειες, σε οποιαδήποτε γεωμετρία.

Μάλιστα η τετραεδρική μορφή πλέγματος είναι αυτή που έχει καθιερωθεί περισσότερο τα τελευταία χρόνια από τις περισσότερες βιομηχανίες καθώς φαίνεται να είναι η πιο εύχρηστη επιλογή για τις περισσότερο απαιτητικές λύσεις (π.χ. προσομοίωση εξωτερικής αεροδυναμικής σε μονοθέσια Formula 1).

### **3.7.2 Δομημένο Πλέγμα**

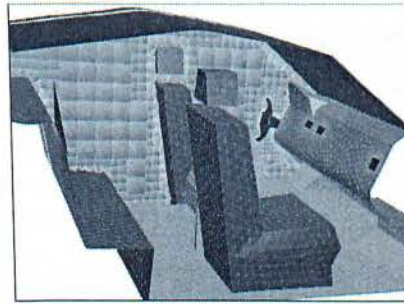
Το GAMBIT επέισης έχει τη δυνατότητα κατασκευής πλέγματος του οποίου η μορφή δημιουργείται από καθορισμένα γεωμετρικά σχήματα, περιλαμβάνοντας αλγορίθμους με ελληπτικές και άλλες ομαλοποιημένες μεθόδους. Έτσι είναι εφικτή η κατασκευή ενός καλού ποιοτικά πλέγματος, το οποίο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ακόμη και στις πιο περίπλοκες γεωμετρίες.

### **3.7.3 Πλέγμα Οριακού Στρώματος**

Το πρόγραμμα επιπλέον έχει δυνατότητες κατασκευής πλέγματος σε οριακό στρώμα. Τέτοια πλέγματα μπορούν να κατασκευαστούν και προσαρμοστούν εύκολα ακόμη και σε σύνθετες γεωμετρίες (όπως π.χ. σε απότομες γωνίες χωρίς ακτίνα καμπυλότητας και σε τοιχώματα απειροελαχίστου πάχους).

### **3.7.4 Υβριδικό Πλέγμα**

Οι προηγμένες δυνατότητες κατασκευής πλέγματος, μπορούν να συνδιαστούν και να δώσουν έτσι υβριδικά πλέγματα, επιτρέποντας έτσι αξιόπιστη ανάλυση σε δύσκολες περιοχές.



*Σχήμα 3.12: Εφαρμογή Οριακού Πλέγματος σε εσωτερικό αυτοκινήτου*



*Σχήμα 3.13: Εφαρμογή Υβριδικού Στόματος σε ανθρώπινη φλέβα*

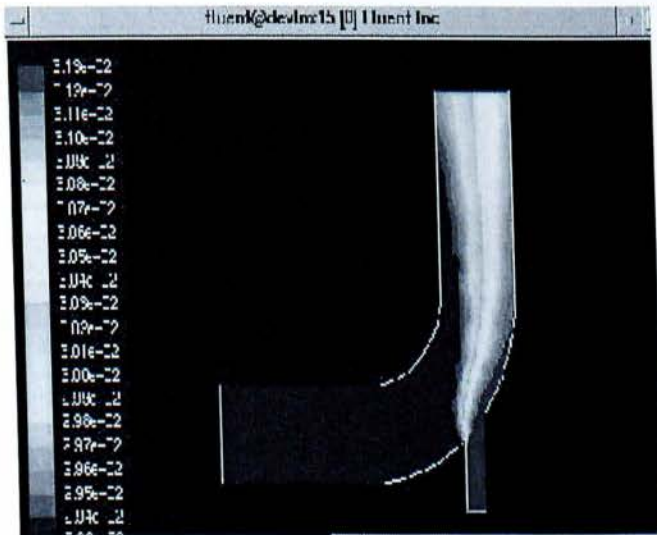
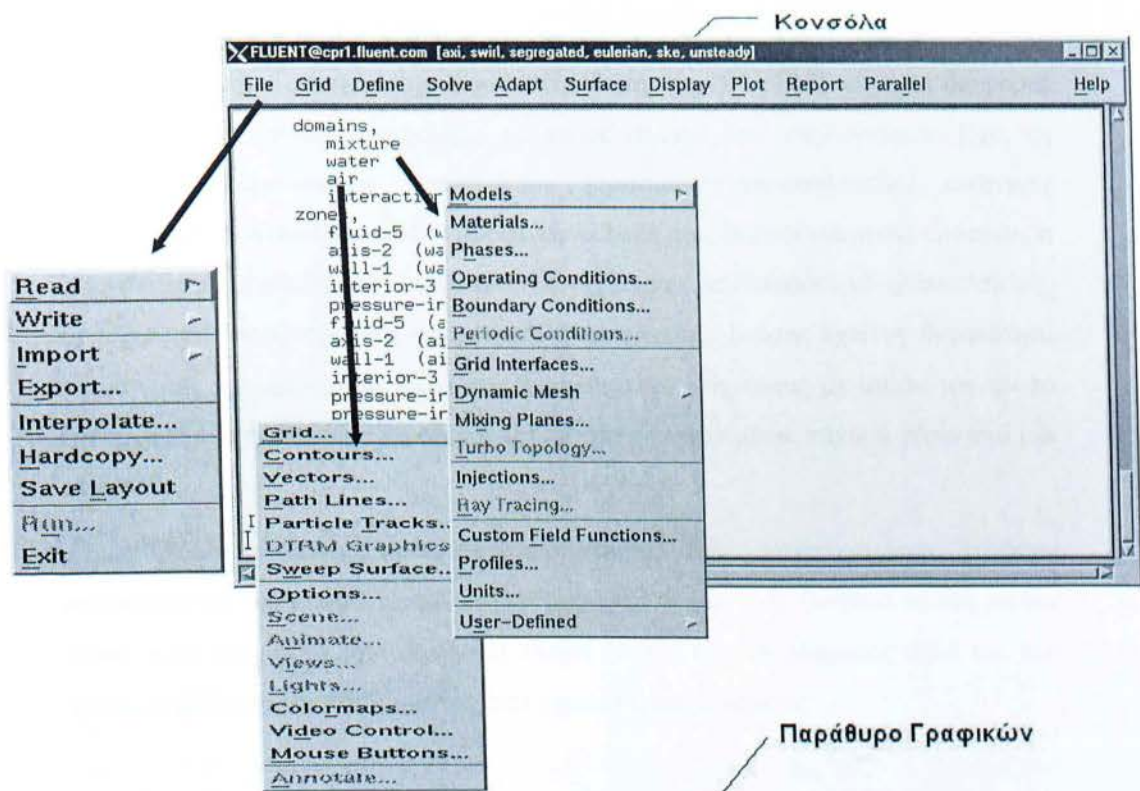
### **3.8 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ**

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.



Σχήμα 3.14: Βασικές λειτουργίες menu του FLUENT

### **3.9 ΜΕΤ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ**

Ένα ακόμη στοιχείο της ξεχωριστής δομής του FLUENT είναι οι διάφορες μέθοδοι με τις οποίες παρουσιάζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Έχει τη δυνατότητα παρουσίασης γραφημάτων (γραφικών παραστάσεων), εικονικές προσομοιώσεις, εκφράζοντας την ποσοτική αλλαγή μιας θερμοδυναμικής ιδιότητας ή ενός φυσικού μεγέθους (π.χ. θερμοκρασία, ταχύτητα), με διαφορετικό χρώμα, σε όλο το μήκος της προς εξέταση γεωμετρίας ή επιφάνειας. Επίσης έχει τη δυνατότητα απεικόνισης γραμμών ροής αλλά και διανυσμάτων, δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο την κίνηση και γενικότερα τη συμπεριφορά του ρευστού μέσα, πάνω ή γύρω από μια επιφάνεια.

Οι δυνατότητες αυτές αναπαράστασης των αποτελεσμάτων σίγουρα αποτελούν για τον εκάστοτε μελετητή μηχανικό σημαντική βοήθεια καθώς με τον τρόπο αυτό μπορεί να έχει σαφή και πλήρη εικόνα του προβλήματος αλλά και των αποτελεσμάτων, ελαχιστοποιώντας έτσι την πιθανότητα λάθους.



## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Στο τρέχων κεφάλαιο παρουσιάζονται οι στόχοι όπου επιδιώκουμε τον αερισμό σε ένα χώρο, τα είδη του αερισμού, οι παράγοντες που επηρεάζουν τον αερισμό και τέλος γίνεται αναφορά σε κάποιες ειδικές διαμορφώσεις-κατασκευές οι οποίες ενισχύουν το φαινόμενο του αερισμού.

#### 4.1 ΑΕΡΙΣΜΟΣ

**Αερισμός** είναι η βαθμιαία αντικατάσταση του αέρα ενός χώρου από νωπό αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος δηλαδή η είσοδος του ατμοσφαιρικού αέρα σε ένα χώρο μέσω κατάλληλων ανοιγμάτων.

#### 4.2 ΣΤΟΧΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Βασικός στόχος του αερισμού ενός χώρου, χειμώνα-καλοκαίρι, είναι η παροχή του αναγκαίου οξυγόνου για λόγους υγιεινής.

Παράλληλα απομακρύνονται:

- Επιβλαβή αέρια (κυρίως CO<sub>2</sub> και CO),
- Δυσάρεστες ουσίες ( οσμές, ατμός, καπνός ),
- Επικίνδυνοι ρύποι των δομικών υλικών ( φορμαλδεΐδη, ραδόνιο ) και διατηρείται η υγρασία του χώρου σε αποδεκτή στάθμη ( 40-70% ).

Πρόσθετος στόχος, μόνο το καλοκαίρι είναι ο δροσισμός με:

- Αποβολή της θερμότητας των εσωτερικών τοιχωμάτων μέσω μεταφοράς (θερμότητας).
- Δημιουργία ρεύματος αέρα για τόνωση της αίσθησης δροσισμού.

#### 4.3 ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

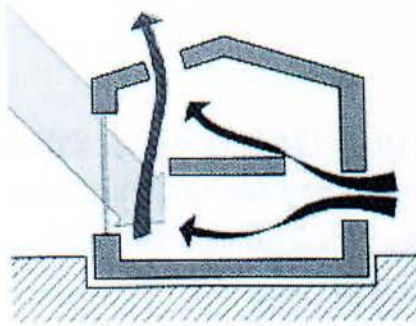
Ανάλογα με το τρόπο εισαγωγής του αέρα μέσα στο κτίριο ο αερισμός χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες: 1) φυσικός αερισμός και 2) τεχνητός αερισμός.

### 4.3.1 Φυσικός Αερισμός

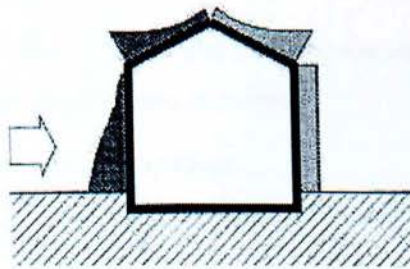
Η φυσική κίνηση του αέρα ακολουθεί τον νόμο των Boyle- Mariott κατά τον οποίο ο λόγος  $PV/T$  (Πίεση \* Όγκο / Θερμοκρασία ) μάζας αερίου παραμένει σταθερός.

Η κίνηση του αέρα γίνεται με φυσικό τρόπο λόγω:

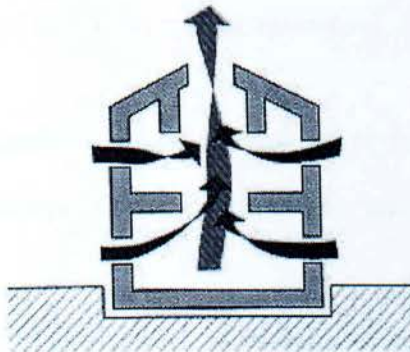
- Διαφοράς θερμοκρασίας ( από τη θερμή περιοχή στην ψυχρή ).



- Διαφοράς πίεσης λόγω ανέμου ( από τη μεγάλη πίεση στη μικρή ).

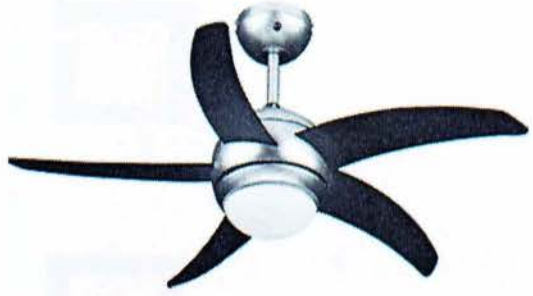


- Θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης ( βάσει των ανωστικών τάσεων που προκαλεί η διαφορετική πυκνότητα του αέρα λόγω θερμοκρασίας ).



### 4.3.2 Τεχνητός Αερισμός

Στον τεχνητό αερισμό οι φυσικές δυνάμεις υποκαθίστανται από αξονικούς ή φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες. Η προσαγωγή αέρα συνδυάζεται συχνά με ρύθμιση της θερμοκρασίας ή/και της υγρασίας του.



## 4.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΑΕΡΙΣΜΟ

Η ροή του αέρα σε ένα κτίριο επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως: α) την ταχύτητα του ανέμου-αέρα, β) την κατεύθυνση του ανέμου-αέρα, γ) την γεωμετρία του κτίριου, δ) εμπόδια στην ροή του ανέμου. Μερικά από αυτά τα στοιχεία αναλείωντε στις επόμενες παραγράφους.

### 4.4.1 Είσοδος Αέρα

**Λίθοδοι** φυσικού αερισμού είναι όλα τα σημεία επαφής του μέσα και έξω χώρου (εκούσια-ακούσια, μικρά-μεγάλα, μόνιμα-παροδικά):

- **Ανοίγματα** του χώρου ( πόρτες, παράθυρα ),
- **Αρμοί και ρωγμές** του περιβλήματος,
- **Ειδικά δομικά στοιχεία** ( καμινάδες, αεραγωγοί ).

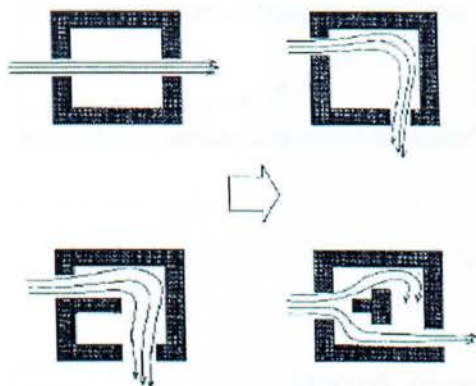
Η επιλογή θέσης και τύπου της εισόδου του αέρα εξαρτάται από:

- **Εξωτερικές συνθήκες** ( διεύθυνση ανέμου, καυσαέρια, θόρυβος, βλάστηση), καθώς και
- **Εσωτερικές** (πιθανή ενόχληση από ρεύμα, συνδυασμός με φωτισμό, ασφάλεια).

Το μέγεθος των ανοιγμάτων εισόδου εξαρτάται από την απαιτούμενη παροχή αέρα στον εσωτερικό χώρο.

### 4.4.2 Διαδρομή Αέρα

Εκτός από τον ίδιο τον εσωτερικό χώρο, ο αέρας κινείται μέσω των εσωτερικών ανοιγμάτων ή αεραγωγών, εφόσον υπάρχει η απαιτούμενη διαφορά πίεσης ή θερμοκρασίας για την πρόκληση ρεύματος.

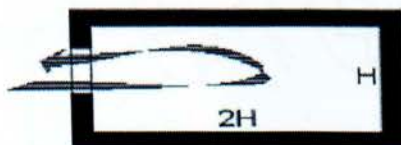


Η φυσική πορεία του αέρα μέσω χώρων είναι δύσκολο να προβλεφθεί επακριβώς επειδή επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες ( θέση ανοιγμάτων, διεύθυνση ανέμου, παρουσία εμποδίων, εξωτερικές συνθήκες, θερμοκρασία ). Για να μη προκαλείται αίσθηση δυσφορίας ή άλλα προβλήματα ( π.χ. ανέμισμα χαρτιών ) η ταχύτητα του αέρα πρέπει να είναι μικρή (  $<0.5\text{m/sec}$  ).

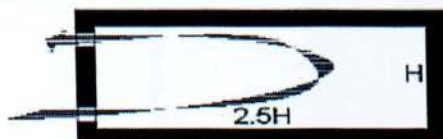
#### 4.4.3 Έξοδος Αέρα

Η έξοδος του αέρα γίνεται από ανοίγματα του περιβλήματος αντίστοιχα με εκείνα της εισόδου εφόσον η εξωτερική πίεση είναι μικρότερη από την εσωτερική. Σε σχέση με την είσοδο, η έξοδος του αέρα μπορεί να είναι:

- Το **ίδιο άνοιγμα** εισόδου ( π.χ. ενιαίο παράθυρο ), περίπτωση ικανοποιητική για σχέση βάθους προς ύψος χώρου  $<2$ .

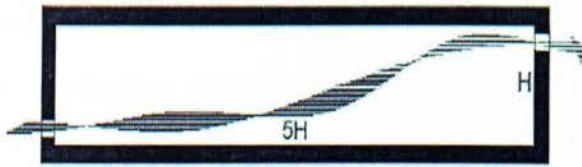


- Στην **ίδια πλευρά**, αλλά σε διαφορετική στάθμη, οπότε η ικανοποιητική αναλογία βάθους/ύψους είναι  $<2,5$ .

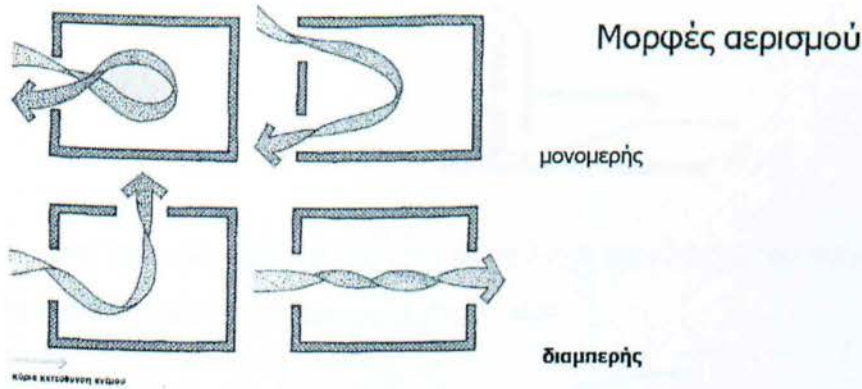


- Στην **απέναντι πλευρά**

( διαμπερής αερισμός ), με αναλογία βάθους/ύψους  $<5$ .

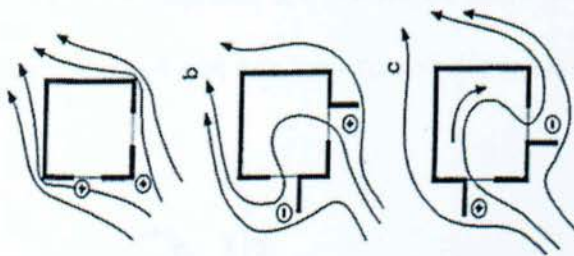


Η έξοδος του αέρα επηρεάζεται από την κατανομή της πίεσης του ανέμου στο περίβλημα του κτιρίου και από την εσωτερική διαστρωμάτωση του λόγω θερμοκρασίας

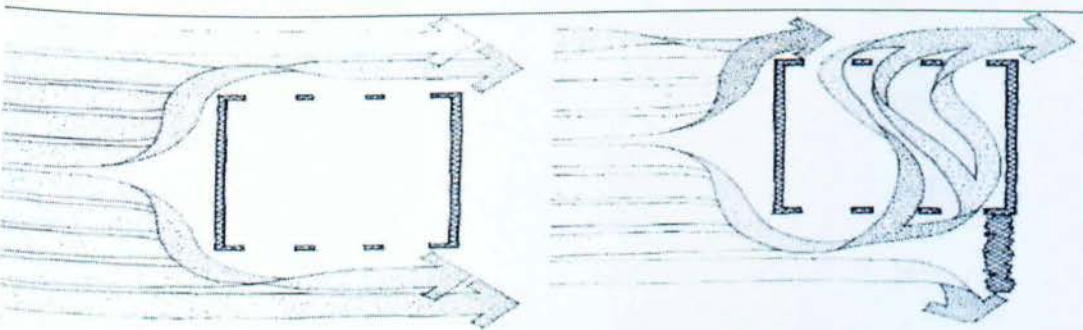


#### 4.4.4 Μέσα Ελέγχου Αέρα

Σε κάθε σημείο της πορείας του αέρα μπορεί να παρεμβάλλονται δομικά στοιχεία που επηρεάζουν την κίνηση του ( περσίδες, dampers, πτερύγια, ανακλαστήρες ).



Αξιοποιώντας φαινόμενα αεροδυναμικής είναι εφικτή η ενίσχυση ή ελάτωση της ροής του αέρα σε συγκεκριμένες διαδρομές.



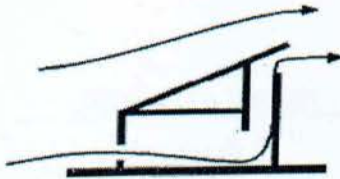
#### 4.4.5 Ειδικά Στοιχεία-Διαμορφώσεις

Εκτός από τα συνήθη ανοίγματα ( παράθυρα και στόμια ), ο αερισμός επιτυγχάνεται και μέσω κατακορύφων αγωγών, οι οποίοι διακινούν τον αέρα αξιοποιώντας διαφορετικές δυνάμεις κατά περίπτωση:

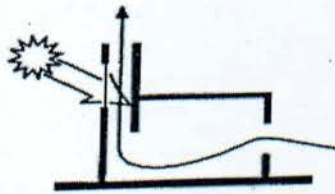
- Οι **ανεμόπυργοι** χρησιμοποιούν την ορμή του ανέμου για την διοχέτευση εξωτερικού αέρα στο εσωτερικό.



- Στις **θερμικές καμινάδες** η υποπίεση λόγω της κίνησης του ανέμου στο άνω άκρο προκαλεί αναρρόφηση του εσωτερικού αέρα.



- Στις **ηλιακές καμινάδες** η θέρμανση του άνω άκρου από την ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί ανωστική ροή του εσωτερικού αέρα, ακόμη και σε συνθήκες άπνοιας.



## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

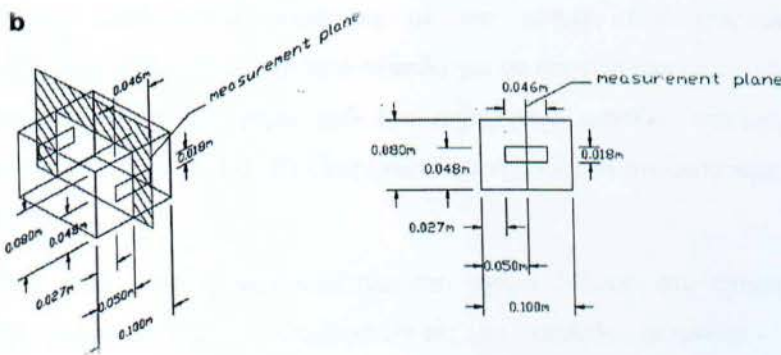
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά των πειραματικών διατάξεων και των συνθηκών όπου επικρατούσαν κατά την διεξαγωγή του πειράματος για την εκτίμηση της ροής του αέρα σε ένα αεριζόμενο κτίριο. Υπεύθυνος για την διεξαγωγή του πειράματος και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ήταν η Π. Καραβά.

#### 5.1 ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με σκοπό να μελετηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής σε αεριζόμενους χώρους καθώς και το πόσο επηρεάζουν οι θέση και το μέγεθος των ανοιγμάτων σε ένα χώρο. Όστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη μελέτη και σχεδιασμός του κτιρίου για τον φυσικό αερισμό του.

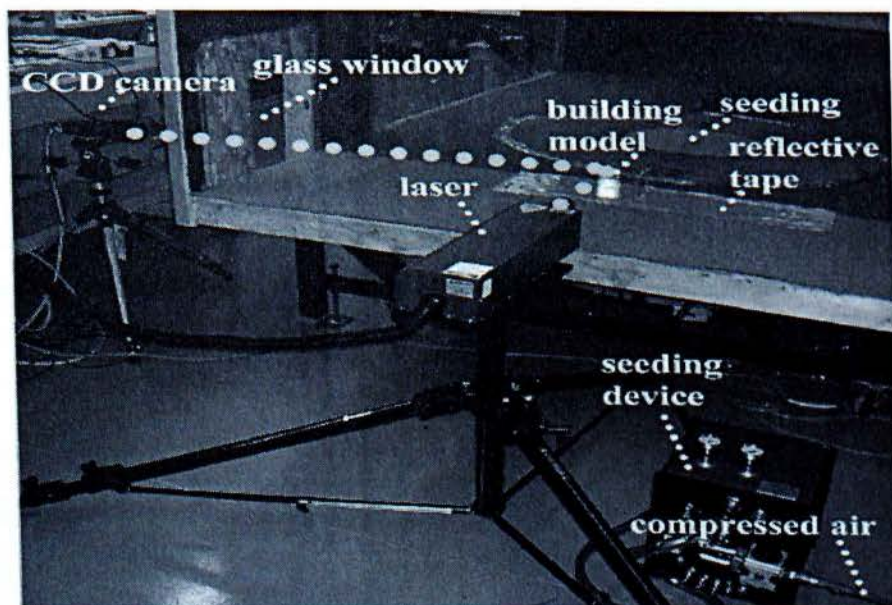
#### 5.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (ΑΕΡΟΣΥΡΑΓΓΑ-ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ)

Για την διεξαγωγή του πειράματος το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 5.1) κατασκευάστηκε από χυτό ακρυλικό και σε κλίμακα 1:200 όπου αντιστοιχεί σε κτίριο τεσσάρων ορόφων διαστάσεων 20m x 20m και ύψος 16m.



Σχήμα 5.1: Διαστάσεις δοκιμίου και επίπεδο μετρήσεων (διαμόρφωση E1)

Οι μετρήσεις του πεδίου ταχυτήτων και οι μετρήσεις εσωτερικών πιέσεων διεξήχθησαν στην αεροσύραγα του εργαστηρίου Αεροδυναμικής Κτιρίων του Πανεπιστημίου Concordia. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η αεροσύραγα καθώς και η γενική διάταξη όπου χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος.



Σχήμα 5.2: Πειραματική διάταξη (αεροσύραγα - όργανα μετρήσεων)

### 5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Διεξήχθησαν δισδιάστατα πειράματα με την μέθοδο PIV (particle image velocimetry) στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο για να αποτυπώσουμε το μέσο εύρος ταχυτήτων εσωτερικά και γύρω από ένα αεριζόμενο μοντέλο κτιρίου, για τις διαμορφώσεις A1, B1, C1, D1, E1 (στην παρούσα εργασία θα αναφερθούμε μόνο για τα A1, C1, E1).

Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2 και στο σχήμα 5.1 ένα σχηματικό μοντέλο κτιρίου υποδεικνύοντας το επίπεδο μετρήσεων για την διαμόρφωση E1.

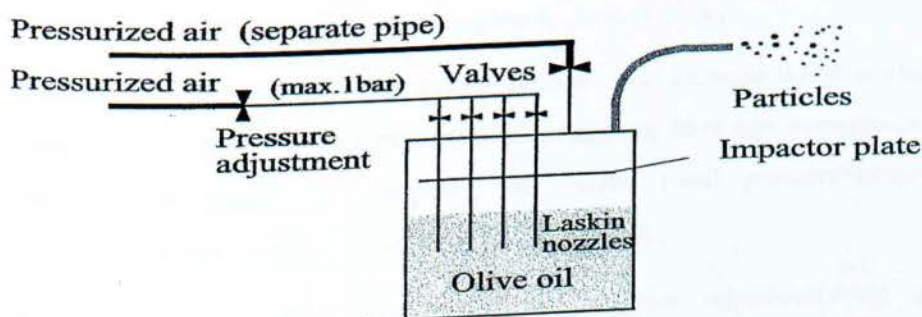
Σωματίδια ελαιολάδου διαμέτρου  $\approx 1\mu\text{m}$  παράγονται χρησιμοποιώντας ακροφύσια (σχήμα 5.3). Τα σωματίδια τροφοδοτούνται από έναν πλαστικό αγωγό τοποθετημένο στο δάπεδο της αεροσύραγας σε απόσταση 1m από το μοντέλο του κτιρίου. Για να



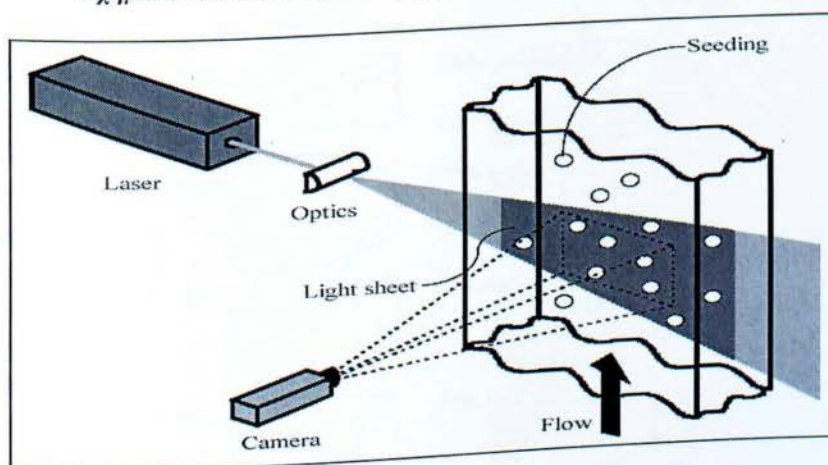
διασφαλιστεί η απαιτούμενη ποιότητα τροφοδοσίας των σωματιδίων η ταχύτητα στην αεροσύραγα ήταν 8.9 m/s.

Τα σωματίδια φωτίζονται από ένα στρώμα φωτός πάχους 1.5mm στο επίπεδο μετρήσεων. Το στρώμα φωτός παράγεται από ένα παλλόμενο laser που χρησιμοποιεί σφαιρικούς και κυλινδρικούς φακούς.

Μία CCD κάμερα είναι τοποθετημένη κάθετα στο στρώμα φωτός . Για κάθε τρέξιμο του πειράματος ο ρυθμός καταγραφής της κάμερας ήταν 26 καρέ/δευτερόλεπτο (frames per second) και για χρονικό διάστημα 5.4 sec. Βάση του ρυθμού και του χρόνου καταγραφής λήφθηκαν 140 εικόνες από την ροή στην αεροσύραγα ώστε να εκτιμηθεί το μέσο πεδίο της ροής. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η διάταξη των μετρητικών οργάνων.



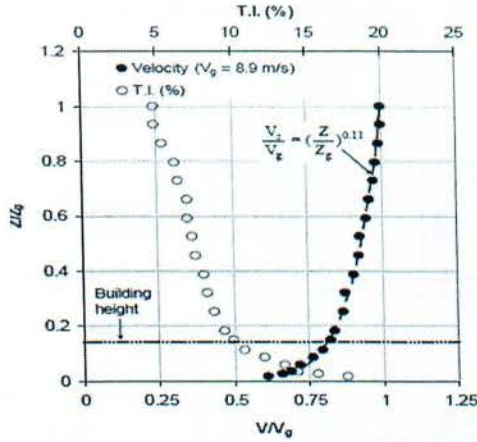
Σχήμα 5.3: Διαδικασία παράγωγής των σωματιδίων ελαιολάδου



Σχήμα 5.4: Διάταξη μετρητικών οργάνων

## 5.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

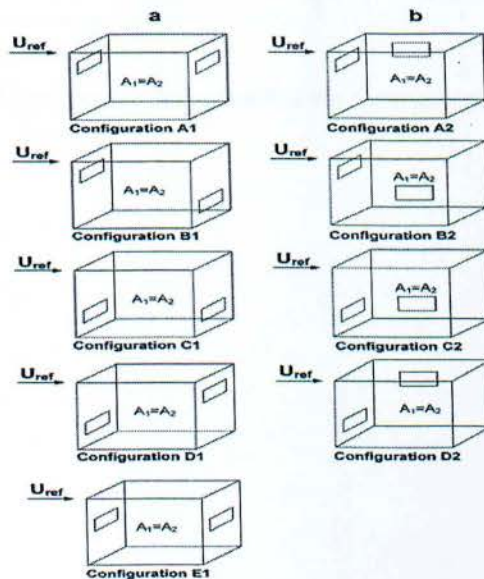
Κατά την διάρκεια των μετρήσεων το προφίλ της ταχύτητας είχε την μορφή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Κατανομή ταχύτητας- Ένταση τύρβης

Κατά την διαδικασία του πειράματος έγιναν μετρήσεις για διάφορα μοντέλα κτιρίων τα οποία διέφεραν σε δύο βασικά σημεία, α) στην σχετική θέση των ανοιγμάτων και β) στην σχετική επιφάνεια ανοίγματος και τοίχου (wall porosity=επιφάνεια ανοίγματος/επιφάνεια τοίχου) με αναλογίες 5%, 10%, 20%.

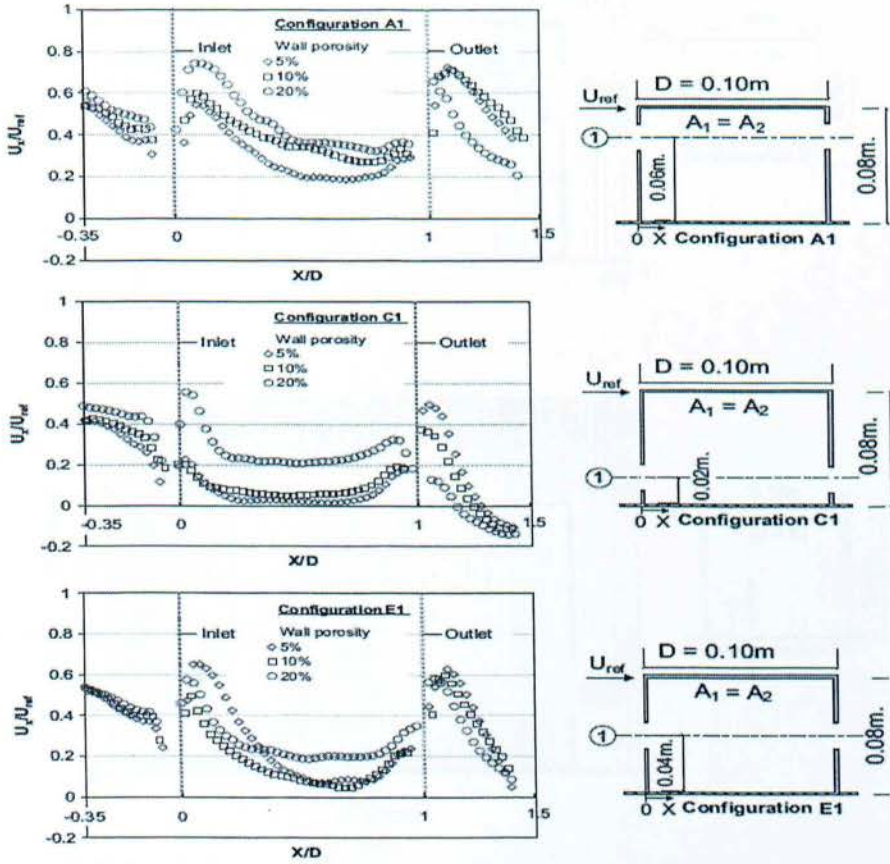
Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 5.6: Διαμορφώσεις-γεωμετρίες μοντέλων-κτιρίων

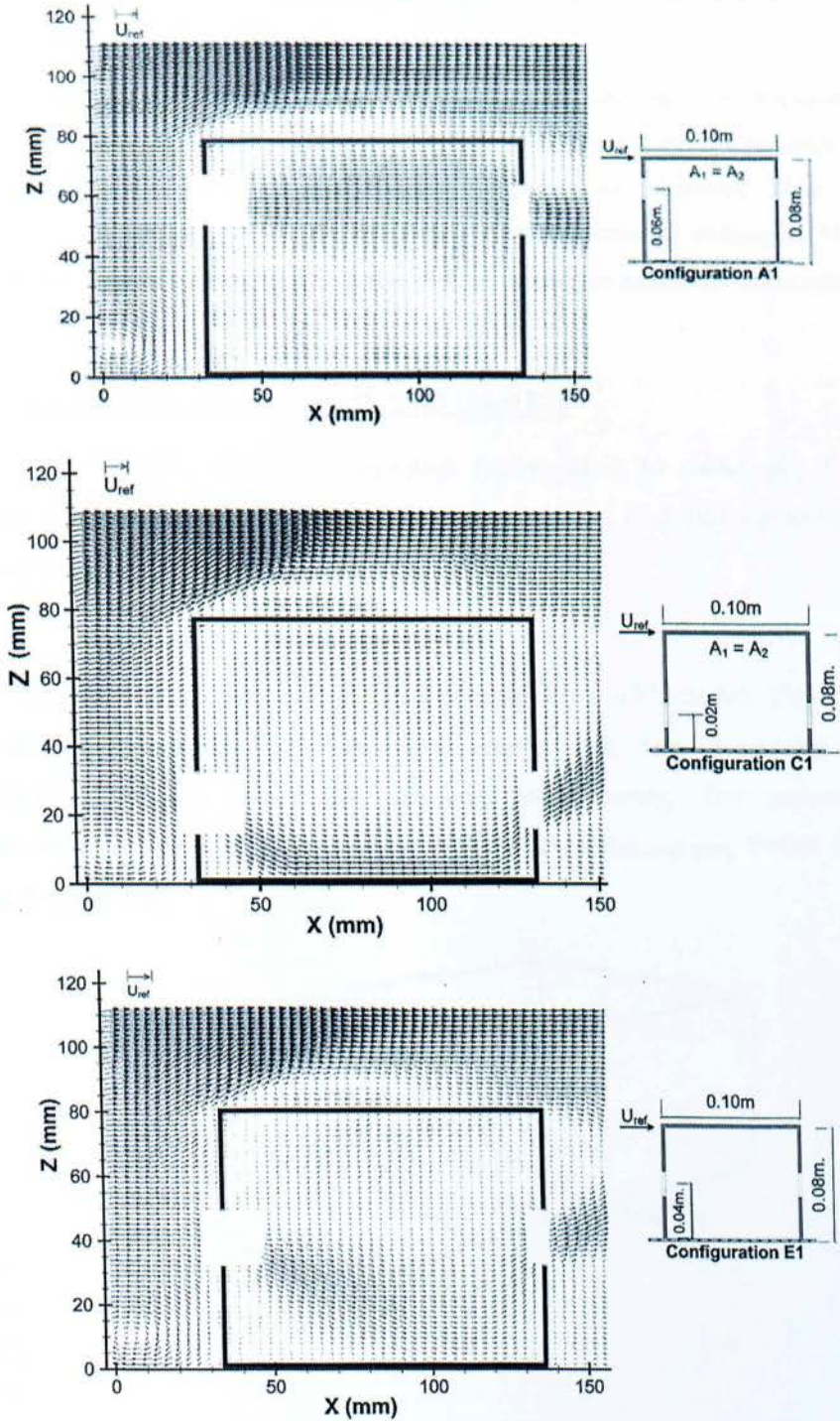
## 5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ανοιγμένης ταχύτητας ως προς το ανοιγμένο μήκος του μοντέλου για τις διαμορφώσεις A1, C1, E1 τις οποίες μελετάμε και υπολογιστικά μέσω CFD.



Σχήμα 5.7: Πειραματικά αποτελέσματα κατανομής ταχύτητας.

Στα επόμενα σχήματα απεικονίζονται τομές του πεδίου της μέσης ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο για τις διαμορφώσεις A1, C1, E1 και wall porosity 10%.



Σχήμα 5.8: Διανυσματική αναπαράσταση της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση πειραματικών δεδομένων.

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

#### CFD

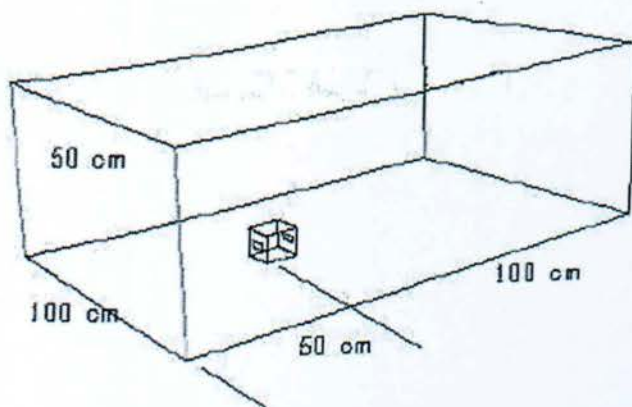
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης του πειράματος με υπολογιστικό τρόπο. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ο τρόπος σχεδιασμού των γεωμετριών στο σχεδιαστικό πρόγραμμα *GAMBIT* και αναλύεται η μορφή του πλέγματος. Τέλος γίνεται αναφορά της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος στο υπολογιστικό πρόγραμμα *FLUENT* και παρουσιάζονται τα από αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία.

#### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ GAMBIT

Το *GAMBIT* είναι ένα λογισμικό (πρόγραμμα) το οποίο μας δίνει τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε τη γεωμετρική μορφή και το αντίστοιχο πλέγμα του αντίστοιχου προβλήματος που τίθεται προς επίλυση.

##### 6.1.1 Δημιουργία Γεωμετρίας

Αρχικά, γίνεται η επιλογή του λύτη ο οποίος είναι ο *Fluent 5/6*. Στη συνέχεια κατασκευάζονται επιμέρους γεωμετρίες οι οποίες είναι στην περίπτωση μας η αεροσήραγγα και το κτίριο που βρίσκεται εντός αυτής. Σαν αεροσήραγγα κατασκευάσαμε έναν όγκο με διαστάσεις: πλάτος  $X=1000\text{mm}$ , ύψος  $Y=500\text{mm}$  και μήκος  $Z=1500\text{mm}$ .



Σχήμα 6.1: Διαστάσεις εικονικής αεροσύραγγας και σχετική θέση μοντέλου-κτιρίου σε αυτή.

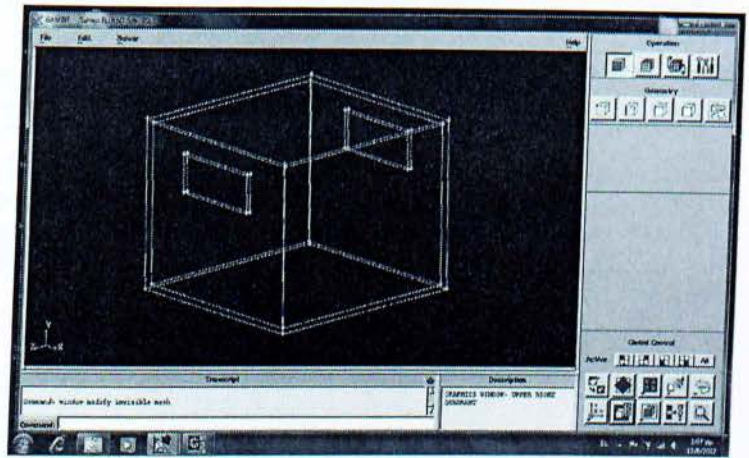
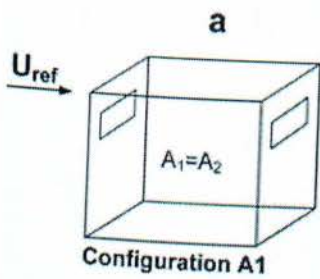
Οι διαστάσεις του περιβάλλοντος (αεροσήραγγας) έχουν αυτές τις τιμές ώστε ο όγκος της σε σχέση με τον όγκο του “μοντέλου” κτιρίου να έχουν συγκεκριμένο λόγο ώστε να αποφύγουμε διάφορα φαινόμενα στη ροή του αέρα τα οποία θα μας οδηγούσαν σε σφάλματα στα αποτελέσματα.

Οι διαστάσεις του μοντέλου-κτιρίου που σχεδιάσαμε είναι: **πλάτος  $X=100\text{mm}$ , ύψος  $Y=80\text{ mm}$  και μήκος  $Z=100\text{ mm}$ , πάχος τοιχώματος  $\Omega=2\text{mm}$** . Οι διαστάσεις των ανοιγμάτων (παραθύρων ) είναι: **πλάτος  $X=46\text{mm}$  και ύψος  $Y=18\text{mm}$**  (βλ. σχήμα 5.1)

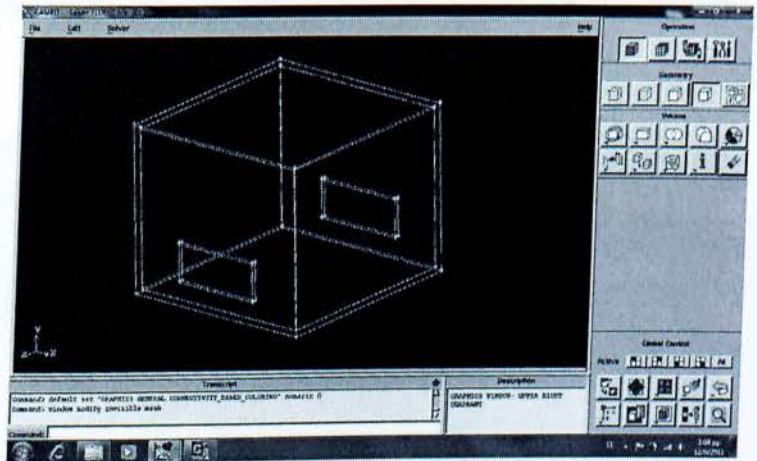
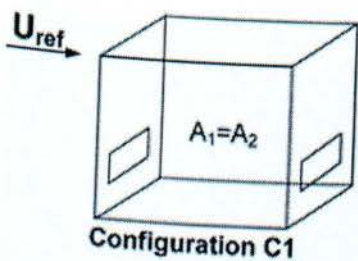
Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των μοντέλων κτιρίων έχουν να κάνουν με τη θέση των ανοιγμάτων στο κτίριο. Η θέση του “μοντέλου” κτιρίου μέσα στην αεροσύραγγα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1 βρίσκεται 500mm μετά από την είσοδο της νοητής αεροσύραγγας και στο κέντρο της.

Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε τις γεωμετρίες που μελετήσαμε και τα αντίστοιχα σχέδια από το λογισμικό GAMBIT.

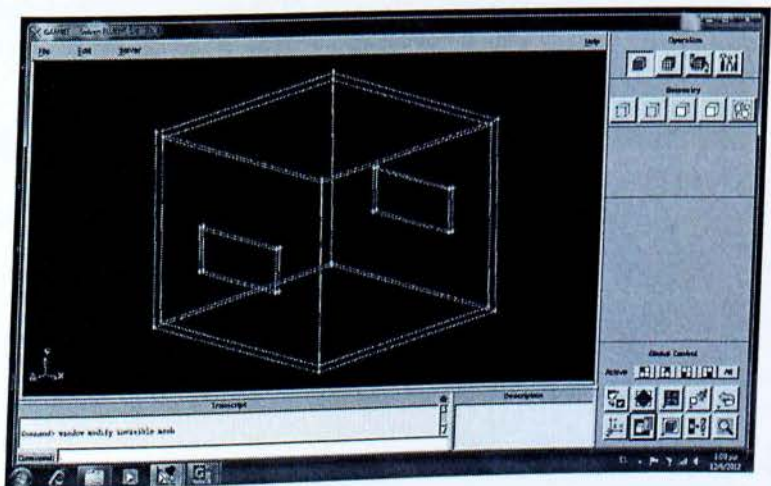
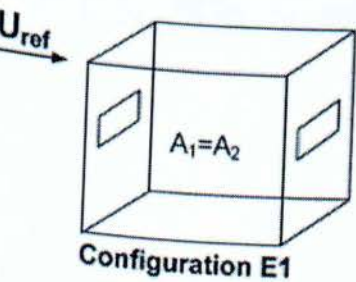
## Γεωμετρία A1

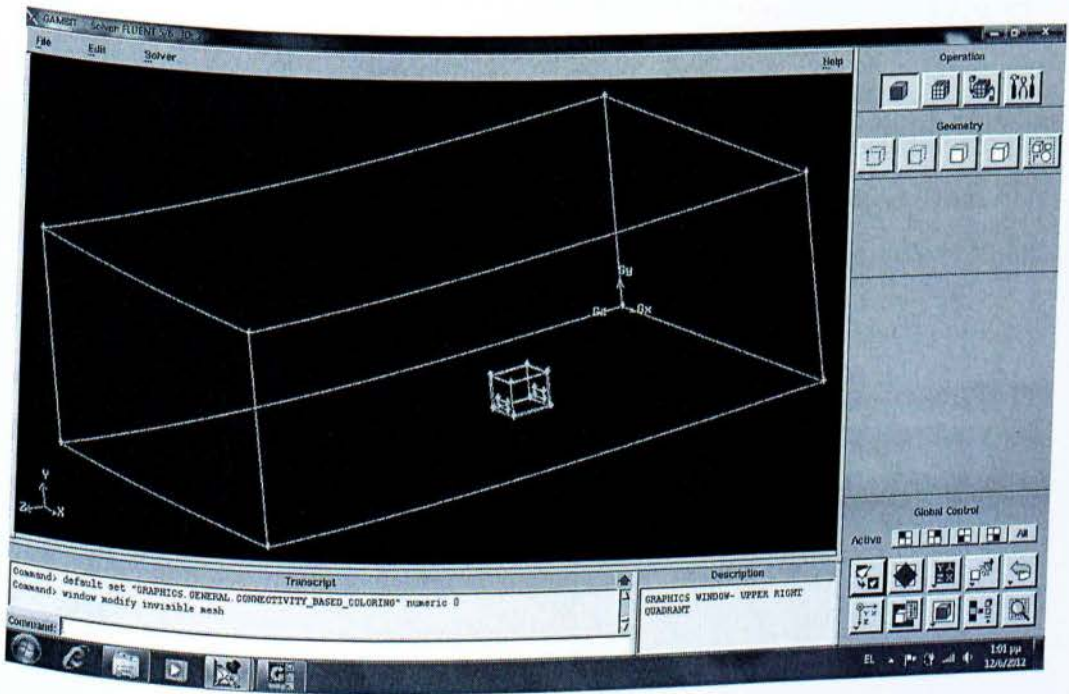
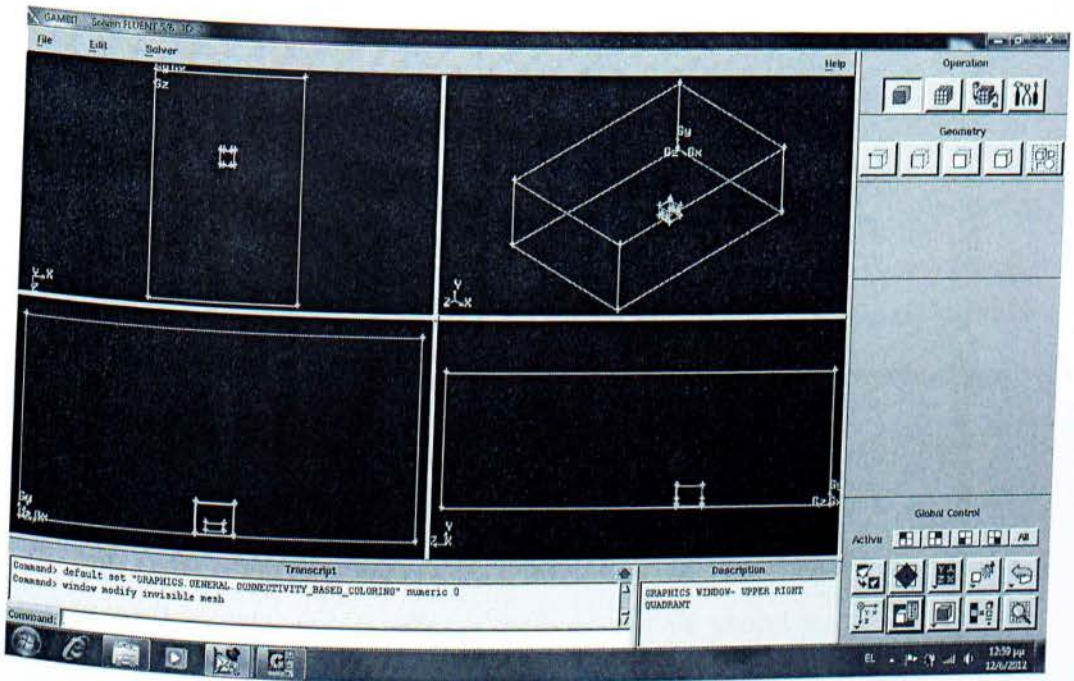


## Γεωμετρία C1



## Γεωμετρία E1





Σχήμα 6.2: Εικόνα γεωμετρίας στο GAMBIT



### **6.1.2 Εντολές Ζώνης**

Αφού έχουμε κατασκευάσει την γεωμετρία, καθορίζουμε τον τύπο των Οριακών επιφανειών (Boundary types). Οι οριακές επιφάνειες που ορίζουμε είναι :

1. Velocity Inlet : Είσοδος Αεροσήραγγας
2. Outflow : Έξοδος Αεροσήραγγας

Δεν θέτουμε τοίχους καθώς το πρόγραμμα τους θέτει αυτόματα σε όσες επιφάνειες δεν έχουμε θέσει ως διαφορετικό είδος επιφάνειας.

### **6.1.3 Δημιουργία Πλέγματος**

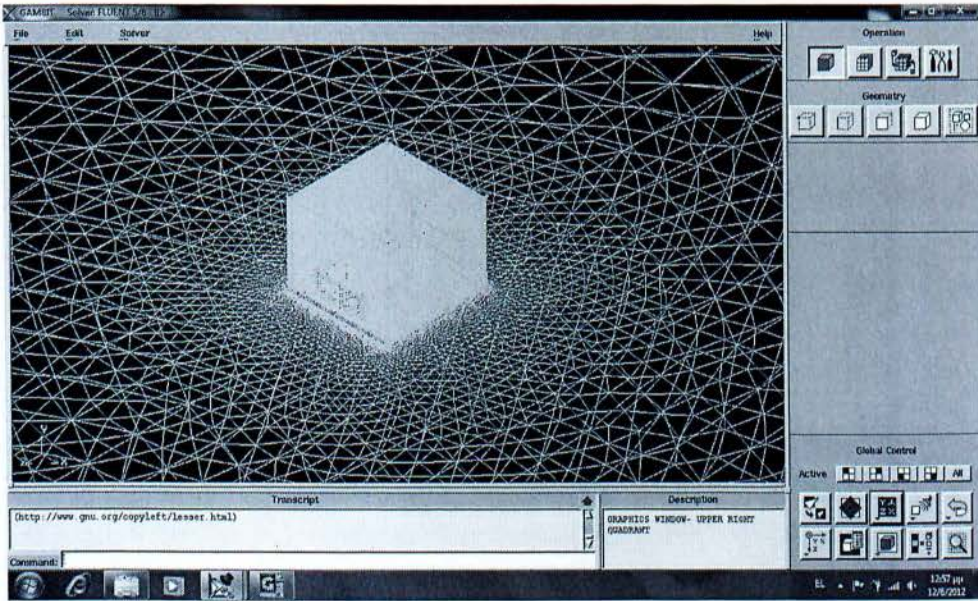
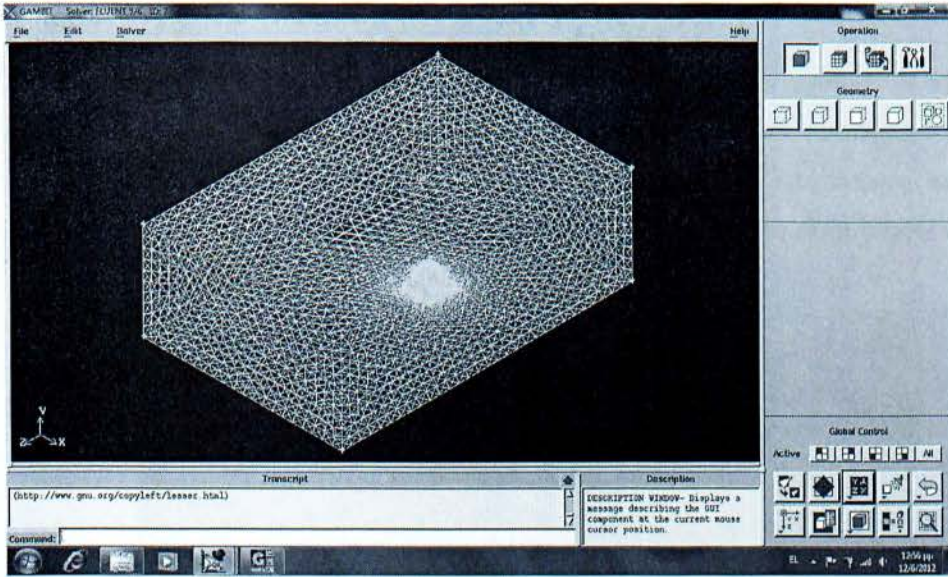
Η κατασκευή του πλέγματος έγινε μέσω πολλών διαδοχικών βημάτων. Αρχικά, υπολογίστηκε ένα μέγεθος πλέγματος που να μπορεί να εφαρμοστεί στο εξαεδρικό (Hex) σύστημα στο κτίριο. Έπειτα, δημιουργήθηκε το πλέγμα για τον όγκο του κτιρίου και τα παράθυρα μόνο, με μέγεθος πλέγματος 1.

Για την κατασκευή του πλέγματος στην υπόλοιπη γεωμετρία, δηλαδή ολόκληρη την αεροσύραγγα, χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία Size Function. Όπως έχουμε προαναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, μέσω της λειτουργίας αυτής μας επιτρέπεται να έχουμε αραιώση του πλέγματος την οποία ορίζουμε εμείς, όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο ενδιαφέροντος, για εξοικονόμηση υπολογιστικής δύναμης.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην λειτουργία αυτή είναι :

- Source : Οι 4 πλευρές, οι εξωτερικές επιφάνειες των ανοιγμάτων και η οροφή του κτιρίου,
- Growth Factor : 1,15
- Size : 1
- Max : 50

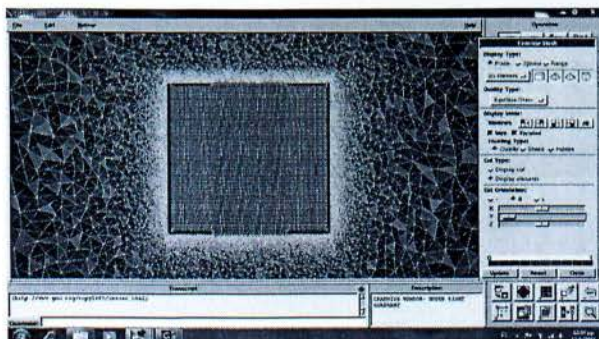
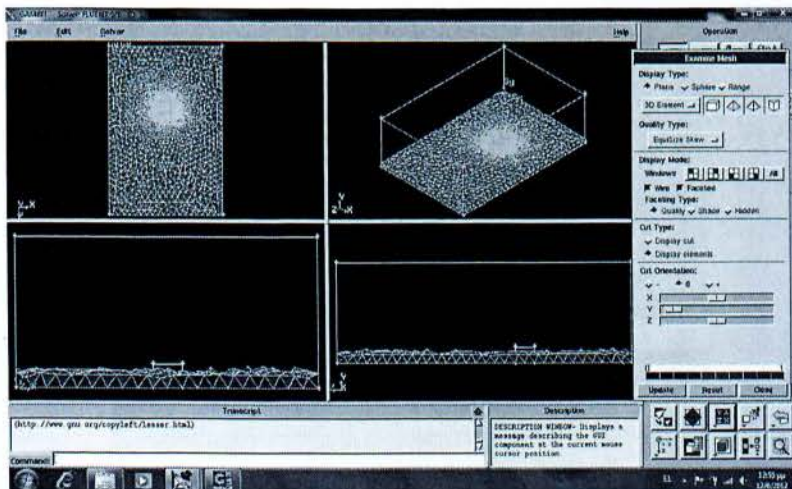
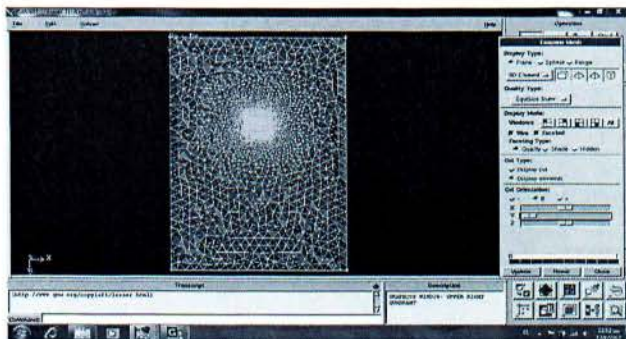
Τελικά, προκύπτει το πλέγμα που εμφανίζεται στο επόμενο σχήμα και αποτελείται περίπου από 2.800.000 κελιά. (σχήμα 6.3)

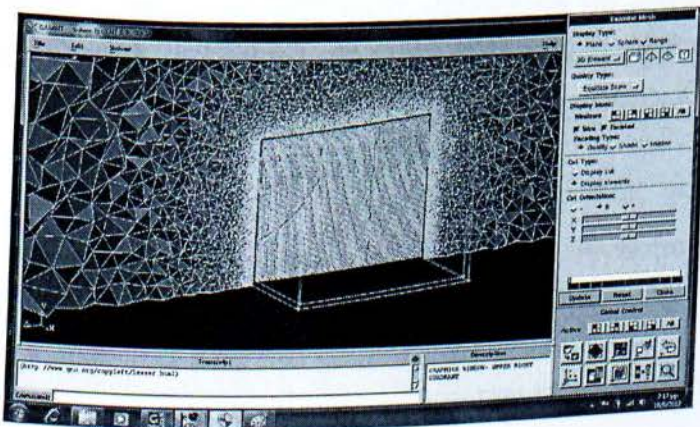
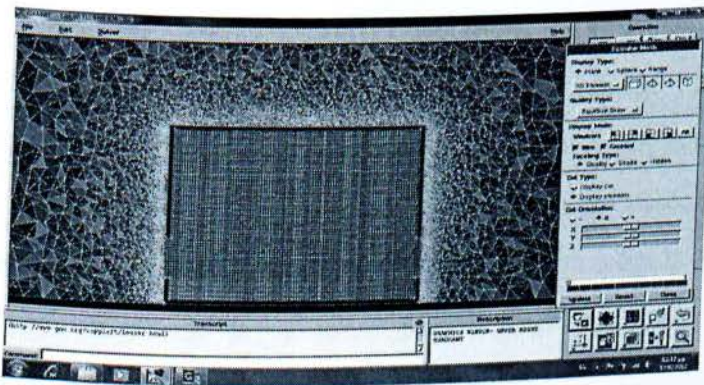
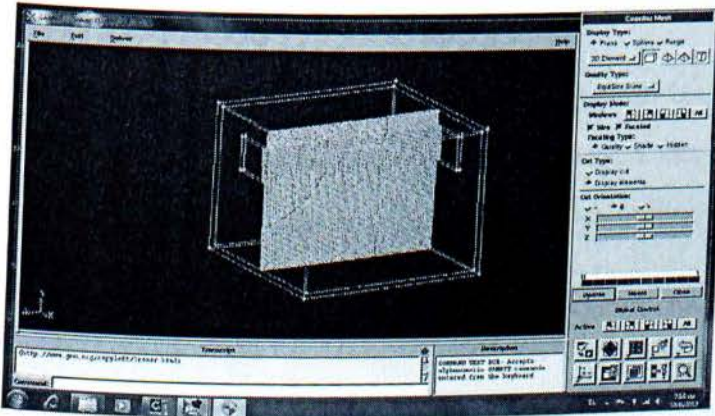
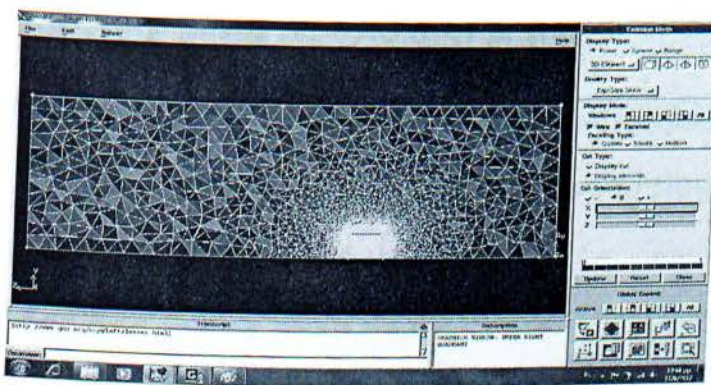


Σχήμα 6.3: Πλέγμα της γεωμετρίας

### 6.1.4 Έλεγχος Ποιότητας Πλέγματος

Στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος του πλέγματος (examine mesh) σχετικά με την ποιότητα του όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4, θέλουμε όλα τα κελιά να είναι καλής ποιότητας ώστε να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε περίπτωση που πρόκειταν κελιά κακής ποιότητας έπρεπε να γίνουν μετατροπές στο πλέγμα ώστε να διορθωθούν τα ελαττωματικά κελιά.





Σχήμα 6.4: Έλεγχος ποιότητας πλέγματος

## 6.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΣΤΟ FLUENT

Για την προσομοίωση του πειράματος ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Στην αρχική οθόνη επιλογών όπου εμφανίζεται στο FLUENT επιλέχθηκε η τρισδιάστατη επιλογή (3D), η επιλογή διπλής ακρίβειας (*double precision*) και ο αριθμός πυρήνων του επεξεργαστή όπου θα χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα κατά τους υπολογισμούς. Στον υπολογιστή που εργαστήκαμε επιλέχθηκαν 2 πυρήνες.
- Κατόπιν ακλούθησε η φόρτωση του πλέγματος (*mesh*) από το *Gambit* και έγινε έλεγχος του για να σιγουρευτούμε ότι το πλέγμα και οι οριακοί τύποι επιφανειών που ορίστηκαν στο *Gambit* μπορούν να διαβαστούν και από το *Fluent*.
- Μετά ορίστηκε το μοντέλο επίλυσης. Ορίστηκε το *Viscous model*, διότι το εργαζόμενο ρευστό είναι συνεκτικό και η ροή μας δεν είναι καθαρά στρωτή, το οποίο όμως είχε διάφορες επιλογές μοντέλων προσομοίωσης. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο *standard k-ε*: είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο που βασίζεται σε εξισώσεις για την τυρβώδη κινητική ενέργεια (*k*) και το ποσοστό διάχυσης της (*ε*). Όταν δημιουργήθηκε το μοντέλο, θεωρήθηκε ότι η ροή είναι πλήρως τυρβώδης και οι επιπτώσεις του μοριακού ιξώδους είναι αμελητέες και επομένως ισχύει μόνο για την πλήρη τυρβώδη ροή.
- Ακλούθησε ο ορισμός των οριακών συνθηκών για την ζώνη *velocity inlet*. Η ταχύτητα εισόδου του αέρα δεν ήταν σταθερή, είχε όμως ένα σταθερό προφίλ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5 (κεφάλαιο 5, σελ. 56).
- Ύστερα επιλέχθηκαν τιμές για διάφορους συντελεστές υποχαλάρωσης και μεταβλητές της επίλυσης καθώς και τα κριτήρια σύγκλισης της λύσης. Ως σχήματα διακριτοποίησης επιλέχθηκε *QUICK*.
- Επόμενο βήμα ήταν η επιλογή του αριθμού των επαναλήψεων και το τρέξιμο τους.
- Τελευταίο βήμα ήταν η ανάκτηση των αποτελεσμάτων και η οπτικοποίηση τους.

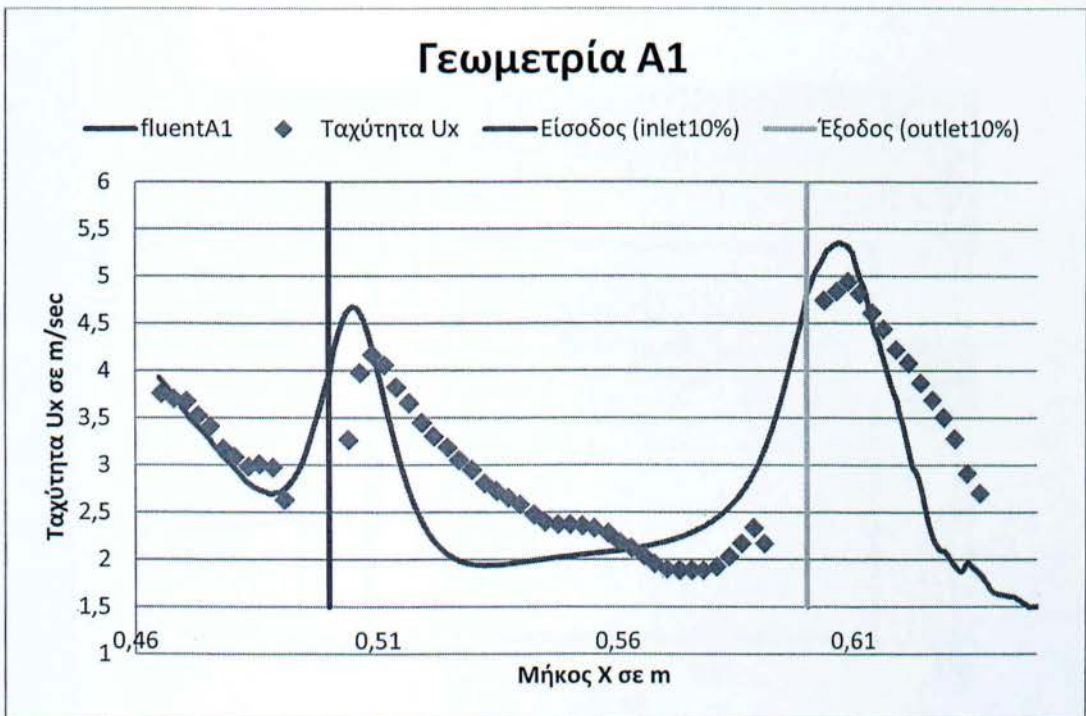
### 6.2.1 Αποτελέσματα Fluent

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπου προέκυψαν κατά τους υπολογισμούς για τις διαμορφώσεις-γεωμετρίες A1,C1,E1 μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Fluent.

Παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα το προφίλ της ταχύτητας που προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις και υπολογιστική διαδικασία.

Επίσης παρουσιάζονται περιγράμματα (contours) του προφίλ της ταχύτητας και της πίεσης.

#### ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ A1



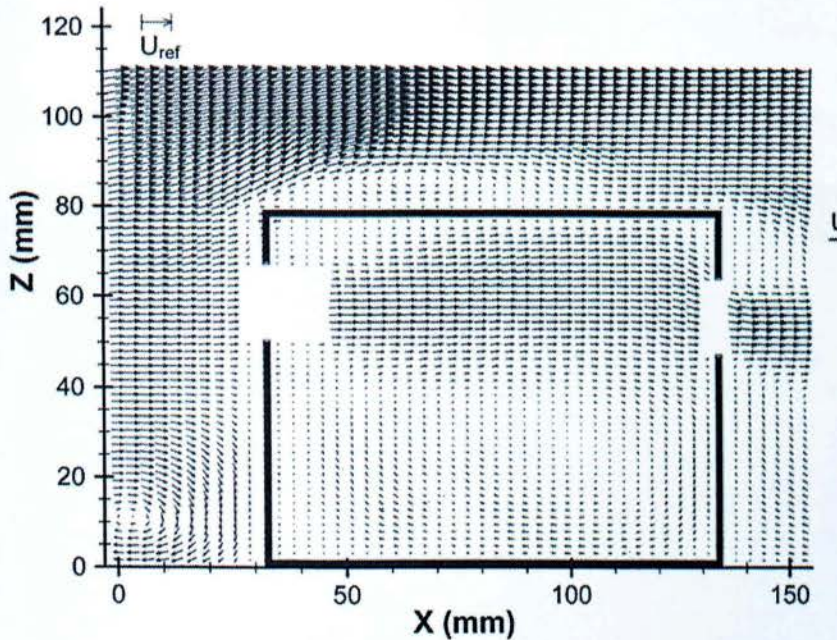
*Διάγραμμα 6.1 : Πειραματικό και υπολογιστικό προφίλ ταχύτητας της γεωμετρίας A1*

Στο παραπάνω διάγραμμα παριστάνεται η μεταβολή της ταχύτητας κατά μήκος της αεροσύραγγας στο ύψος των ανοιγμάτων (για την γεωμετρία A1 αυτό το ύψος είναι 0.06m).

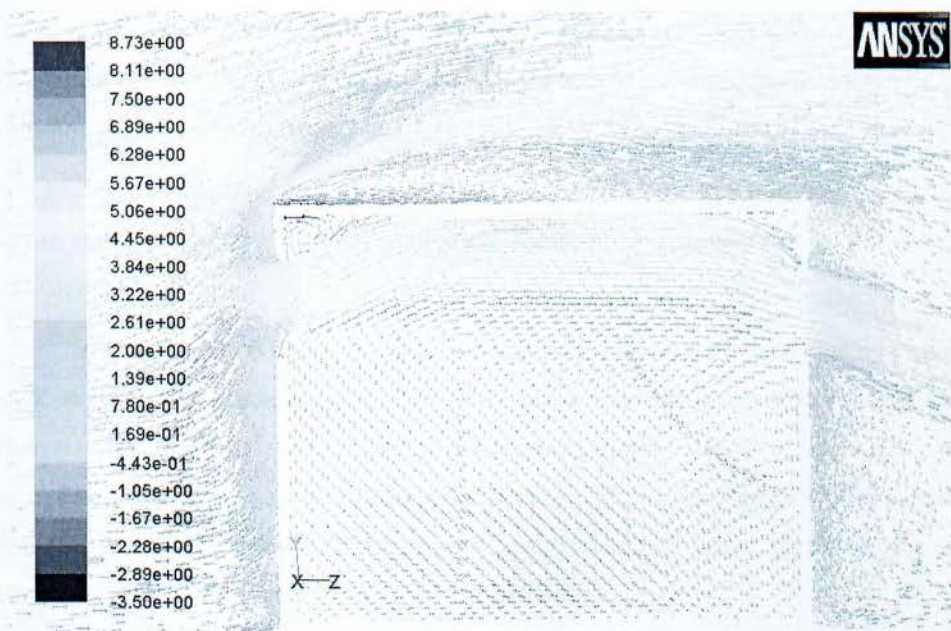
Κατά την πειραματική διαδικασία ελήφθησαν μετρήσεις 0.035m πριν από την είσοδο της γεωμετρίας και 0.05m μετά την έξοδο.

Παρατηρούμε ότι στην είσοδο οι υπολογιστικές τιμές προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές, ακριβώς μετά την είσοδο του αέρα στο πειραματικό μοντέλο-γεωμετρία παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές των υπολογιστικών ταχυτήτων σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές. Στο εσωτερικό του πειραματικού μοντέλου παρατηρούμε μια σχετικά μεγάλη απόκλιση στις τιμές των ταχυτήτων.

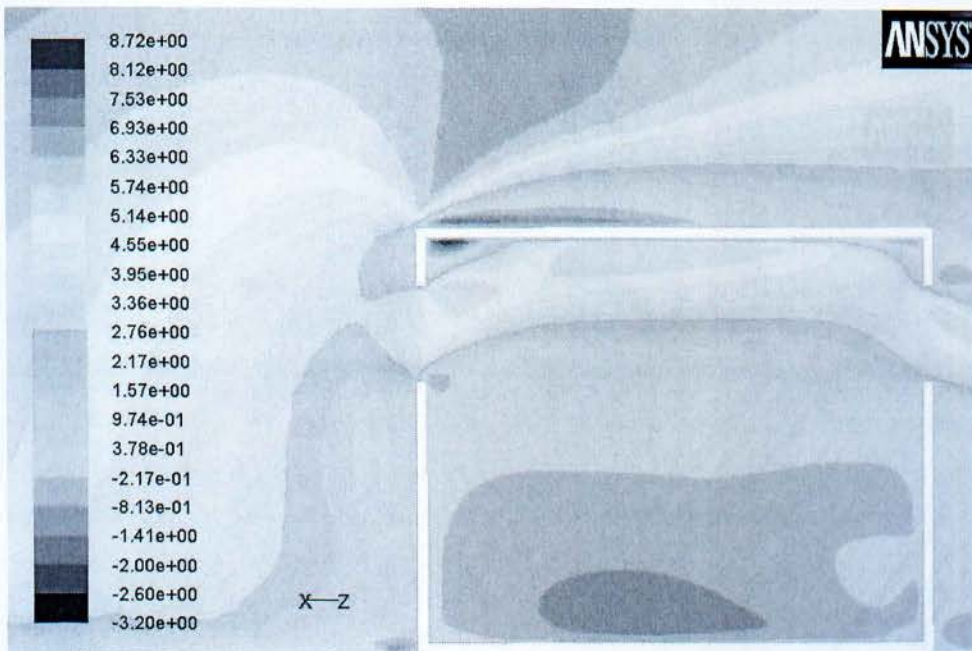
Λίγο μετά την έξοδο παρατηρούνται πάλι μεγαλύτερες τιμές της υπολογιστικής ταχύτητας σε σχέση με τις πειραματικές και καθώς απομακρυνόμαστε από την γεωμετρία οι υπολογιστικές τιμές ταχύτητας μειώνονται με μεγαλύτερο ρυθμό.



Σχήμα 6.5 : Διανυσματική αναπαράσταση της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση πειραματικών δεδομένων για την γεωμετρία A1



*Σχήμα 6.6 : Διανυσματική αναπαράσταση της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία A1*



*Σχήμα 6.7 : Κατανομή της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία A1*

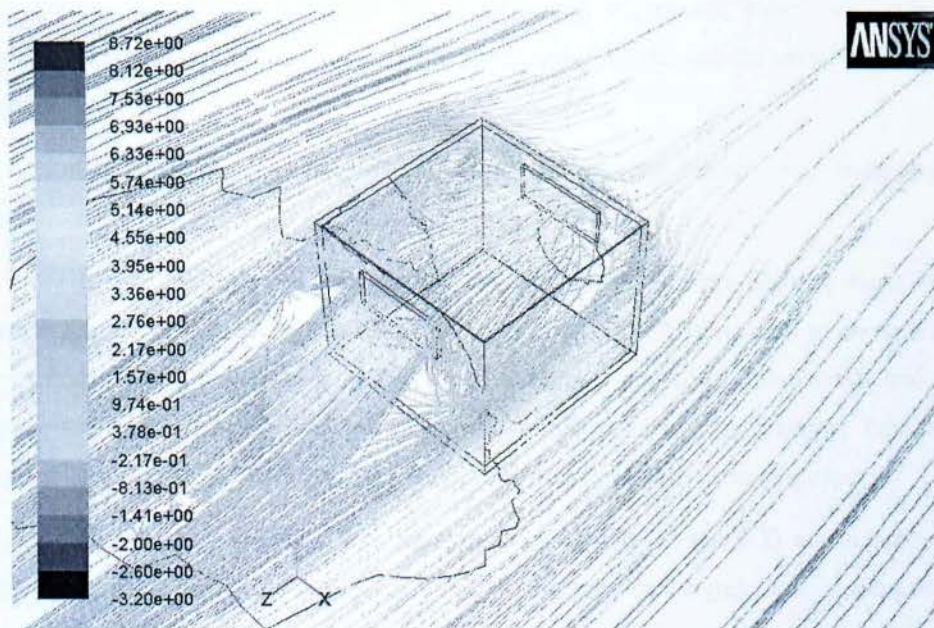


Στις τρεις παραπάνω εικόνες (σχήμα 6.5, 6.6, 6.7) παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο της γεωμετρίας A1 ( το κάθετο επίπεδο φαίνεται στο σχήμα 5.1).

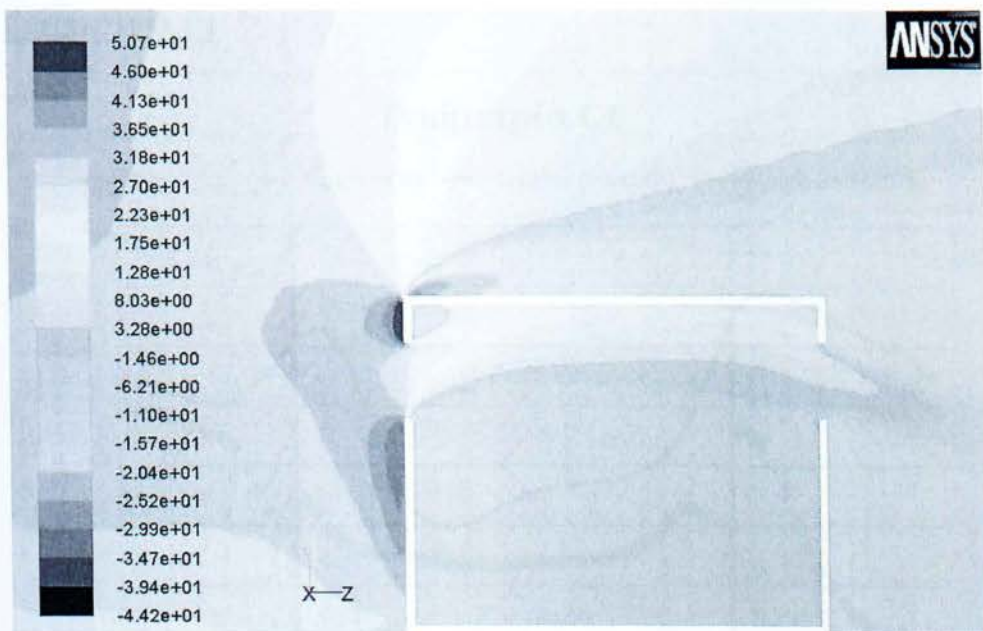
Στην πρώτη εικόνα (σχήμα 6.5) παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας κατά την πειραματική διαδικασία, στην δεύτερη παρουσιάζεται η αντίστοιχη υπολογιστική.

Από το σχήμα 6.6 παρατηρούμε ότι εμφανίζονται αρκετά σημεία με αρνητικές τιμές ταχύτητας (ανακυκλοφορία αέρα). Τα σημεία που υπάρχει ανακυκλοφορία αέρα είναι στην βάση του κτιρίου πριν την είσοδο, στο εξωτερικό μέρος της οροφή από την αρχή έως την μέση του κτιρίου, στο εσωτερικό του κτιρίου σε χαμηλό ύψος (περίπου από την μέση και κάτω) επίσης έντονη ανακυκλοφορία αέρα εμφανίζεται στην εσωτερική γωνία πάνω από το άνοιγμα της εισόδου.

Επίσης βλέπουμε ότι καθώς ο αέρας εισέρχεται στο κτίριο ένα ρεύμα αέρα εμφανίζει μεγαλύτερες ταχύτητες καθώς πλησιάζουμε την οροφή, όπως συμβαίνει και στο αντίστοιχο πειραματικό.



Σχήμα 6.8 : Προσομοίωση ροής αέρα για την γεωμετρία A1 μέσω εντολής pathline



*Σχήμα 6.9 : Κατανομή πίεσης σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία A1*

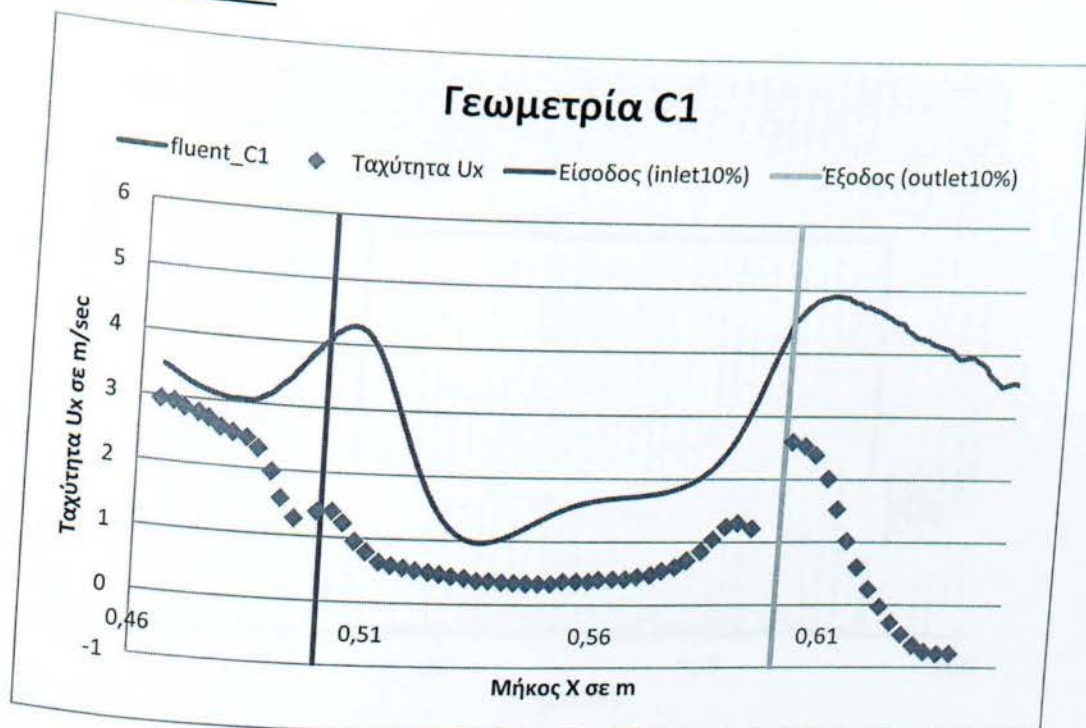
Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η κατανομή της ολικής πίεσης στο κάθετο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο της γεωμετρίας A1 (το κάθετο επίπεδο φαίνεται στο σχήμα 5.1).

Οι μεγαλύτερες τιμές πίεσης εμφανίζονται περιμετρικά του ανοίγματος εισόδου.

Στο εσωτερικό του κτιρίου από τα ανοίγματα έως την βάση η πίεση έχει αρνητικές τιμές (υποπίεση), το ίδιο συμβαίνει στις γωνίες πάνω από τα ανοίγματα, στο πάνω μέρος της οροφής καθώς και στο πίσω μέρος του κτιρίου εκτός από το ύψος του ανοίγματος εξόδου που εμφανίζεται να έχει θετικές τιμές πίεσης. Εκεί που εμφανίζεται υποπίεση ενδεχομένως να εμφανίζεται και ανακυκλοφορία αέρα.

Πράγματι όπως είδαμε σε προηγούμενη εικόνα (σχήμα 6.8) που απεικόνιζε την κατανομή της ταχύτητας, σε αρκετά σημεία (περιοχές) που εμφανιζόταν ανακυκλοφορία αέρα αντίστοιχα σε αυτό το διάγραμμα τα σημεία αυτά εμφανίζουν υποπίεση.

## ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ C1

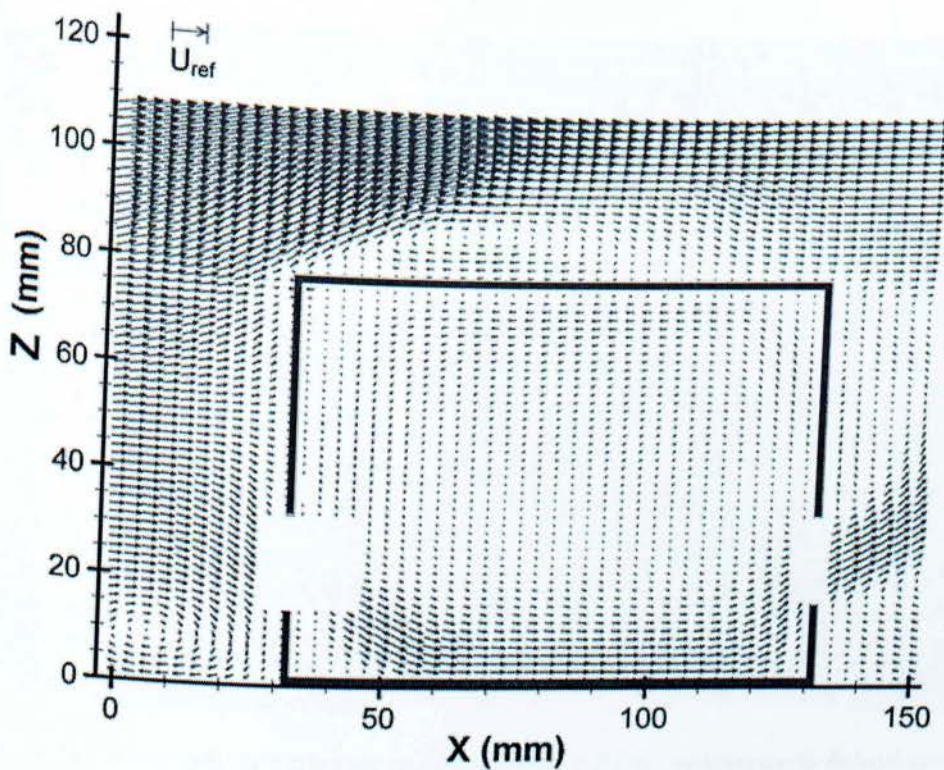


Διάγραμμα 6.2 : Πειραματικό και υπολογιστικό προφίλ ταχύτητας της γεωμετρίας C1

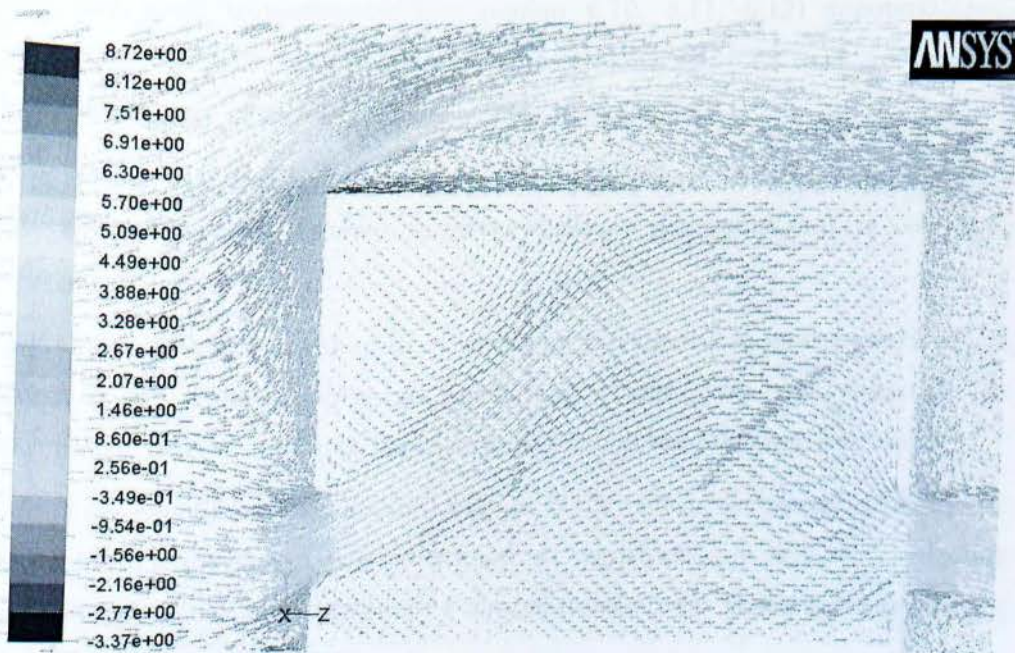
Στο διάγραμμα 6.2 παριστάνεται η μεταβολή της ταχύτητας κατά μήκος της αεροσύραγγας στο ύψος των ανοιγμάτων (για την γεωμετρία C1 αυτό το ύψος είναι 0.02m).

Κατά την πειραματική διαδικασία ελήφθησαν μετρήσεις 0.035m πριν από την είσοδο της γεωμετρίας και 0.05m μετά την έξοδο.

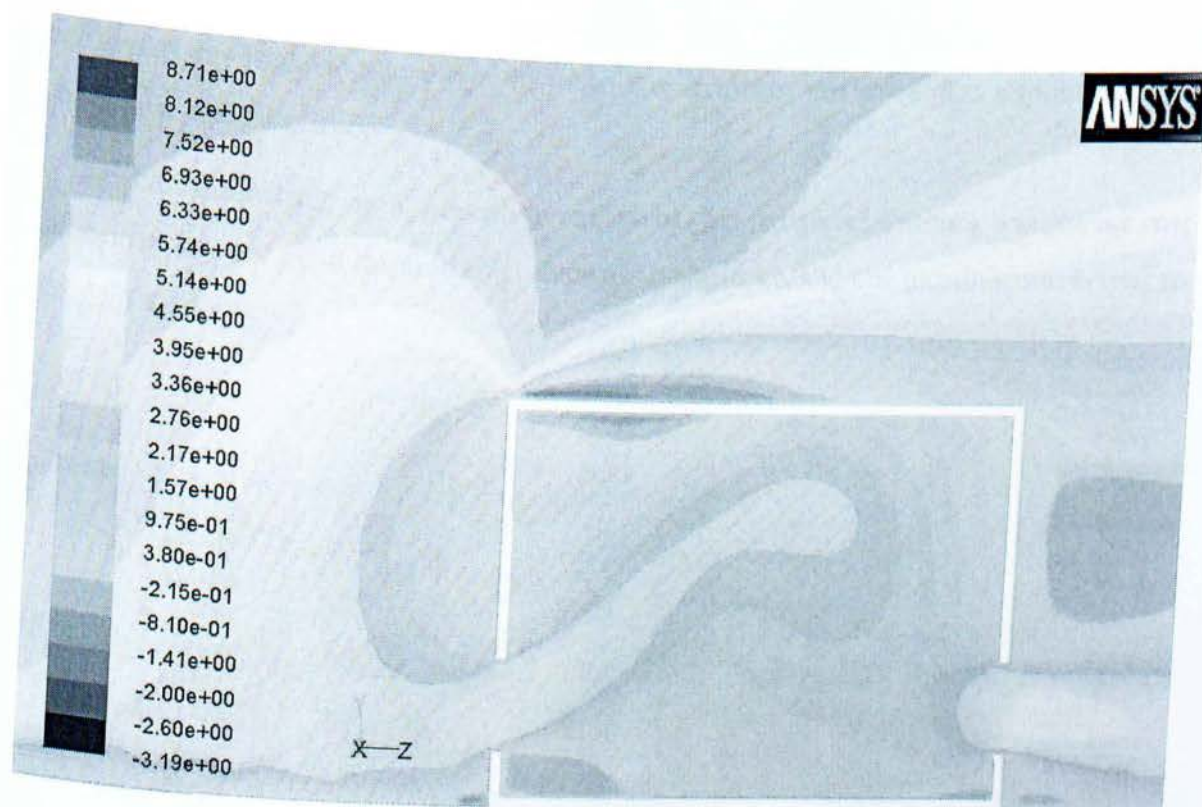
Παρατηρούμε ότι οι υπολογιστικές και οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές παρουσιάζουν έντονες αποκλίσεις σε όλο το εύρος των μετρήσεων. Αναλυτικότερα λίγο πριν την είσοδο παρατηρείται μία απόκλιση 0.5 m/s, στην είσοδο έχουμε μία απόκλιση περίπου 3m/s. Στο εσωτερικό συνεχίζουμε να έχουμε έντονες αποκλίσεις και στην έξοδο έχουμε μία απόκλιση 2.5 με 3 m/s και όσο απομακρυνόμαστε από το κτίριο αυτή η απόκλιση αυξάνεται.



Σχήμα 6.10 : Διανυσματική αναπαράσταση της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση πειραματικών δεδομένων για την γεωμετρία C1



Σχήμα 6.11 : Διανυσματική αναπαράσταση της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία C1



*Σχήμα 6.12 : Κατανομή της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία C1*

Στις τρεις παραπάνω εικόνες (σχήμα 6.10, 6.11, 6.12) παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο της γεωμετρίας C1 ( το κάθετο επίπεδο φαίνεται στο σχήμα 5.1).

Στην πρώτη εικόνα (σχήμα 6.10) παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας κατά την πειραματική διαδικασία, στην δεύτερη παρουσιάζεται η αντίστοιχη υπολογιστική.

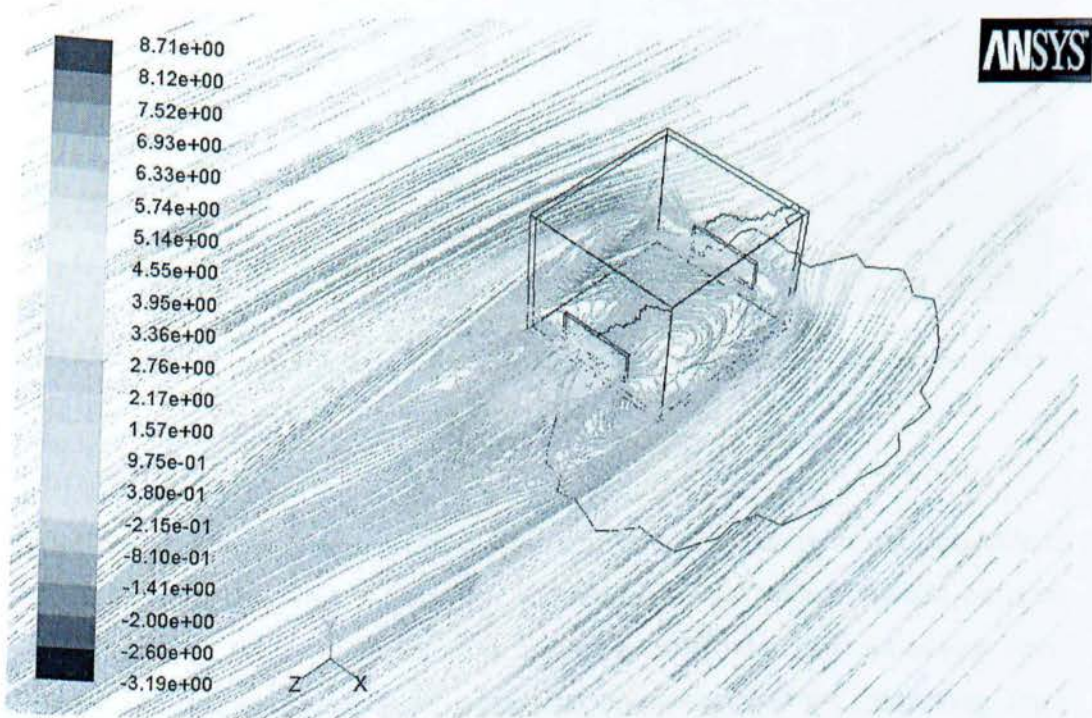
Συγκρίνοντας την πειραματική κατανομή της ταχύτητας με την κατανομή της ταχύτητας που έχουμε υπολογίσει μέσω του Fluent για την γεωμετρία C1 παρατηρούμε έντονες διαφορές, κυρίως στο εσωτερικό του μοντέλου-κτιρίου.

Στην πειραματική κατανομή (σχήμα 6.10) καθώς εισέρχεται ο αέρας στο κτίριο παρατηρείται ένα ρεύμα αέρα αυξημένων ταχυτήτων που ακολουθεί καθοδική πορεία, έως το μέσον του κτιρίου και καθώς πλησιάζει στην έξοδο έχει μια ανοδική πορεία και εξέρχεται του κτιρίου.

Αντίθετα στην κατανομή που υπολογίσαμε (σχήμα 6.11) παρατηρούμε ότι κατά την είσοδο του αέρα στο κτίριο το ρεύμα αέρα με αυξημένες ταχύτητες

ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι το μέσο του κτιρίου και συνεχίζει καθοδικά μέχρι να εξέλθει από το κτίριο.

Οι ομοιότητες που διακρίνονται είναι ότι στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής η ροή του αέρα παρουσιάζει ανακυκλοφορία καθώς και ακριβώς κάτω από το άνοιγμα εισόδου.



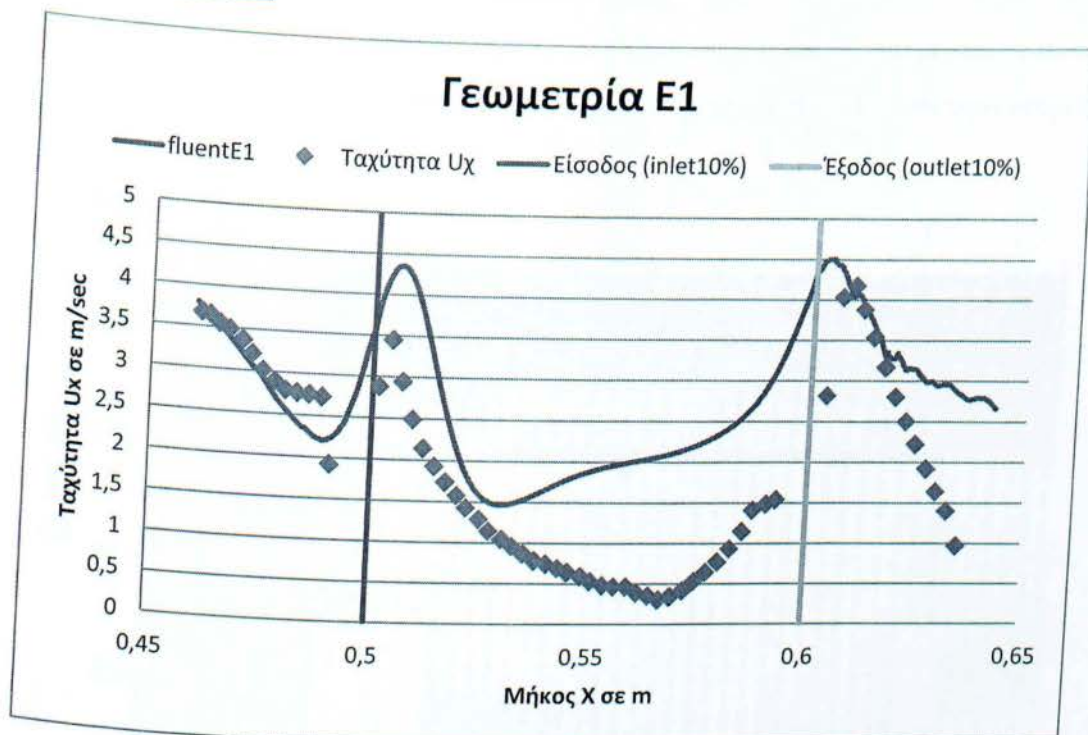
Σχήμα 6.13 : Προσομοίωση ροής αέρα για την γεωμετρία C1 μέσω εντολής pathline



Σχήμα 6.14 : Κατανομή πίεσης σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία C1

Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζεται η κατανομή της ολικής πίεσης στο κάθετο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο της γεωμετρίας C1 (το κάθετο επίπεδο φαίνεται στο σχήμα 5.1). Οι μεγαλύτερες τιμές πίεσης εμφανίζονται στην επιφάνεια όπου εφάπτεται το άνοιγμα εισόδου και κυρίως στο ανώτερο σημείο της επιφάνειας. Στην οροφή του κτιρίου στην εξωτερική επιφάνεια η πίεση έχει αρνητικές τιμές (υποπίεση) όπως επίσης και στο πίσω του κτιρίου.

## ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ E1



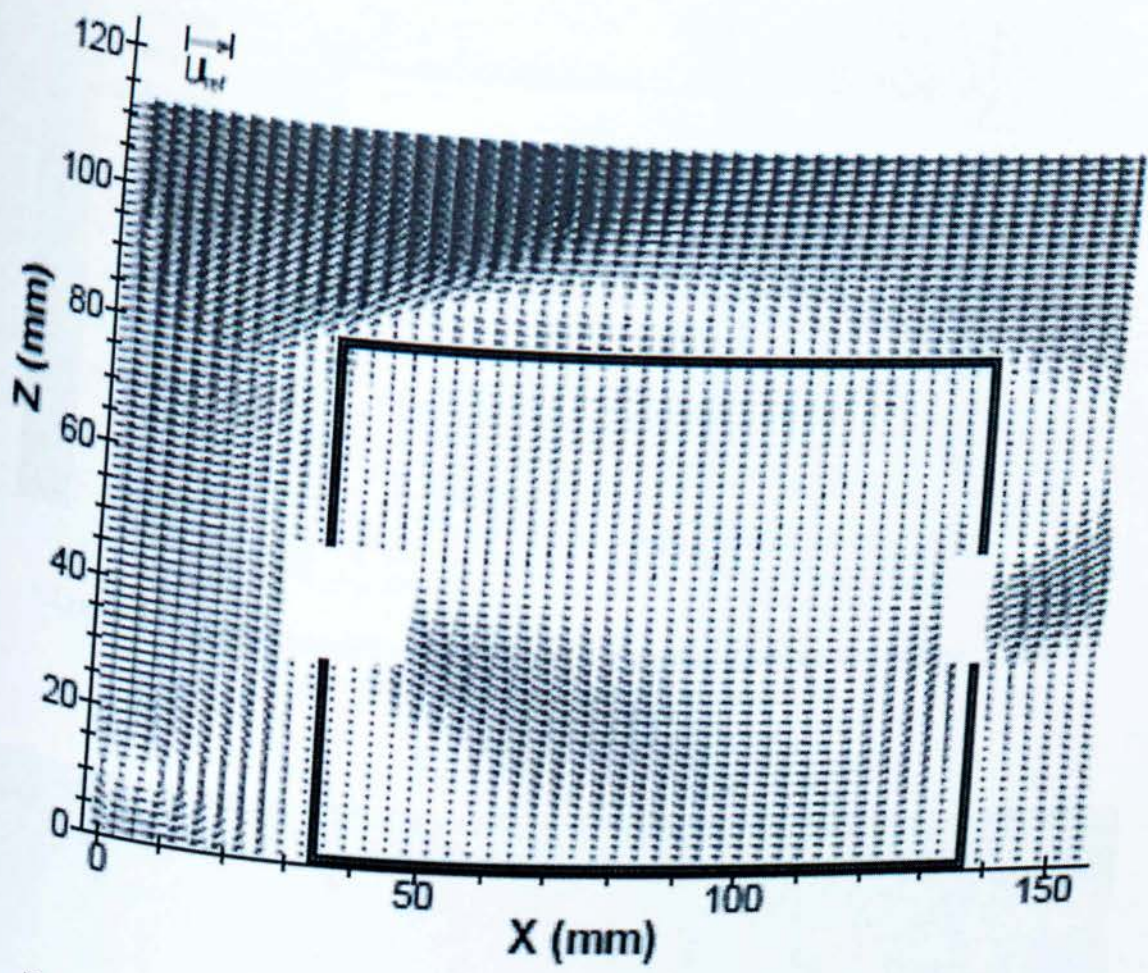
Διάγραμμα 6.3 : Πειραματικό και υπολογιστικό προφίλ ταχύτητας της γεωμετρίας E1

Στο παραπάνω διάγραμμα (διάγραμμα 6.3) παριστάνεται η μεταβολή της ταχύτητας κατά μήκος της αεροσύραγγας στο ύψος των ανοιγμάτων (για την γεωμετρία E1 αυτό το ύψος είναι 0.04m). Κατά την πειραματική διαδικασία ελήφθησαν μετρήσεις 0.035m πριν από την είσοδο της γεωμετρίας και 0.05m μετά την έξοδο.

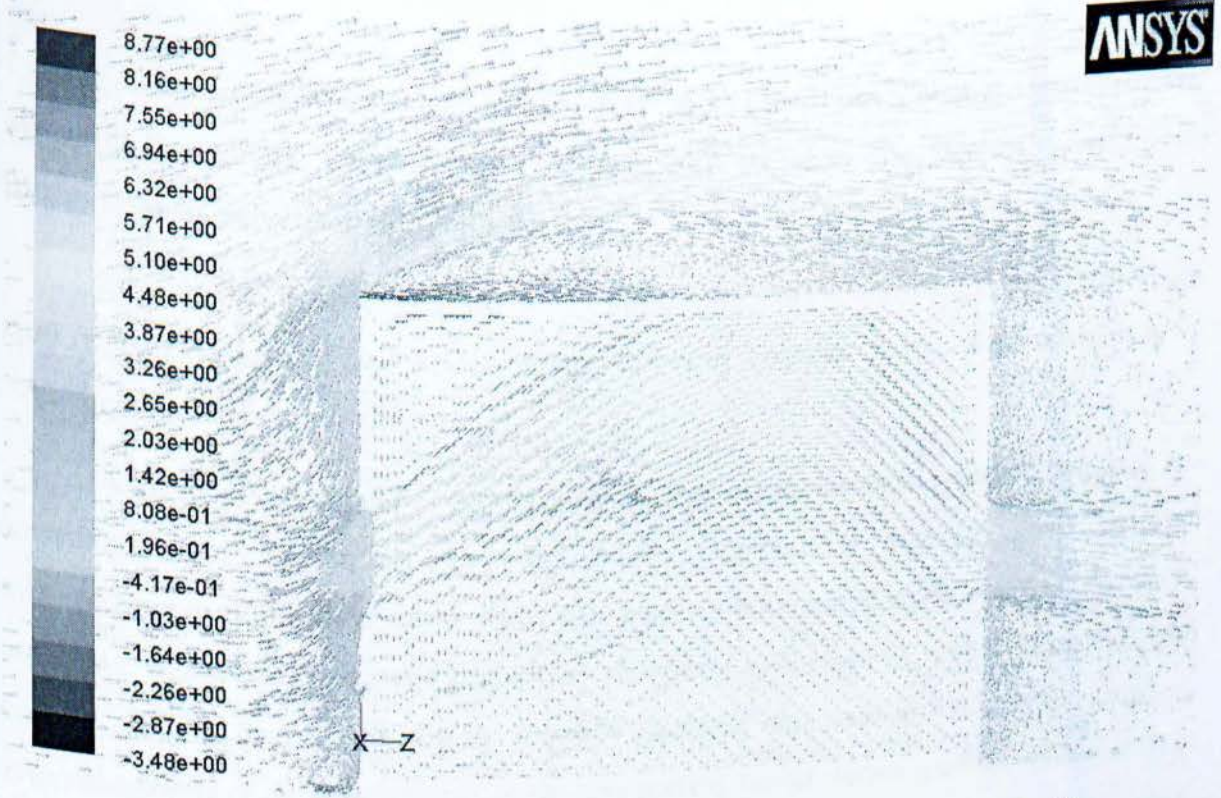
Παρατηρούμε ότι στην είσοδο οι υπολογιστικές τιμές προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές, ακριβώς μετά την είσοδο του αέρα στο πειραματικό μοντέλο-γεωμετρία παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές των υπολογιστικών ταχυτήτων σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές. Στο εσωτερικό του πειραματικού μοντέλου παρατηρούμε μια σχετικά μεγάλη απόκλιση στις τιμές των ταχυτήτων καθώς οι υπολογιστικές τιμές είναι μεγαλύτερες των πειραματικών και η απόκλιση των τιμών αυξάνει έντονα μετά τα 2/3 της διαδρομής του αέρα μέσα στο κτίριο.



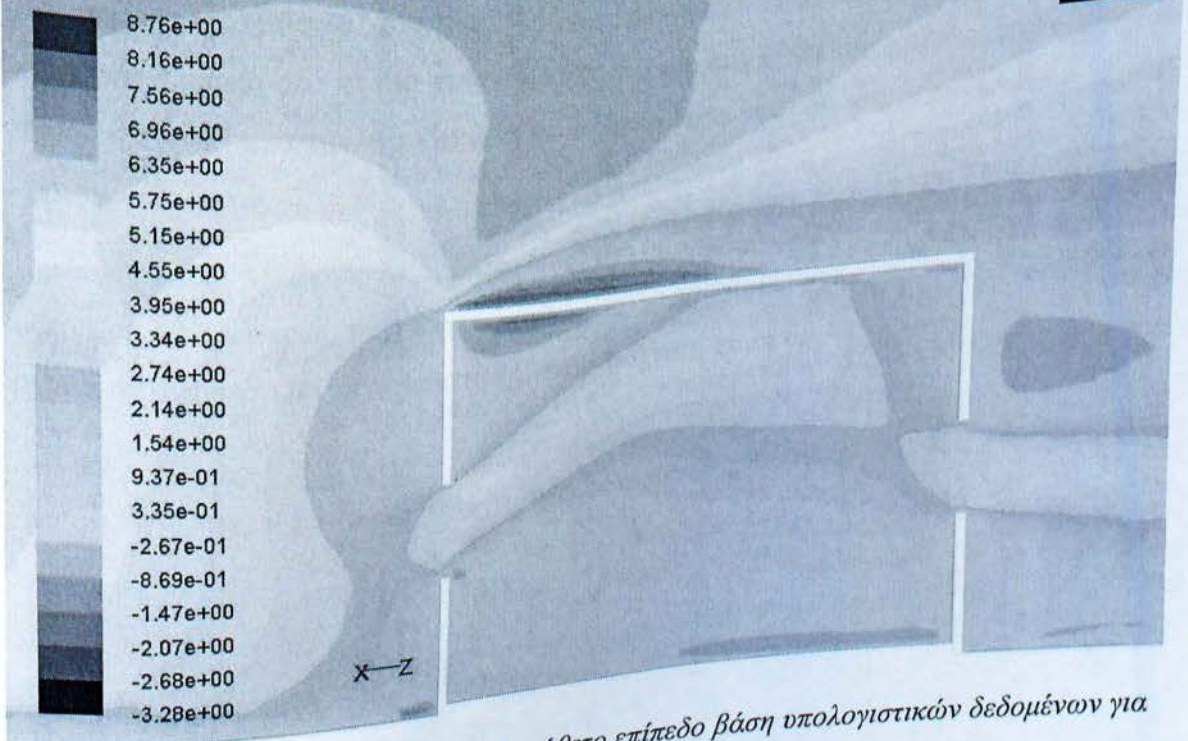
Λίγο μετά την έξοδο παρατηρούνται πάλι μεγαλύτερες τιμές της υπολογιστικής ταχύτητας σε σχέση με τις πειραματικές και καθώς απομακρυνόμαστε από την γεωμετρία οι υπολογιστικές τιμές ταχύτητας μειώνονται με μικρότερο ρυθμό.



Σχήμα 6.15 : Διανυσματική αναπαράσταση της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση πειραματικών δεδομένων για την γεωμετρία E1



Σχήμα 6.16 : Διανυσματική αναπαράσταση της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία E1



Σχήμα 6.17 : Κατανομή της ταχύτητας σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία E1

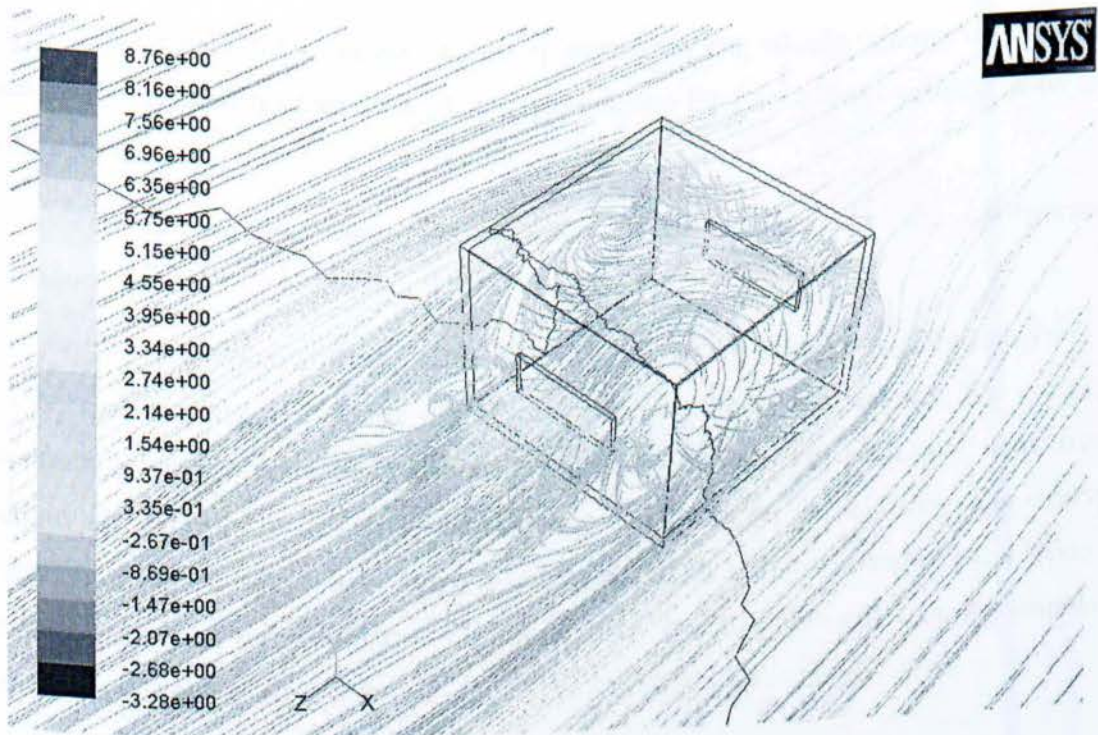
Στις τρεις παραπάνω εικόνες ( 6.15, 6.16, 6.17) παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο της γεωμετρίας E1 ( το κάθετο επίπεδο φαίνεται στο σχήμα 5.1).

Στην πρώτη εικόνα (σχήμα 6.15) παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας κατά την πειραματική διαδικασία, στην δεύτερη (σχήμα 6.16) παρουσιάζεται η αντίστοιχη υπολογιστική.

Από το σχήμα 6.17 παρατηρούμε ότι εμφανίζονται μερικά σημεία με αρνητικές τιμές ταχύτητας( ανακυκλοφορία αέρα). Τα σημεία που υπάρχει ανακυκλοφορία αέρα είναι στην βάση του κτιρίου πριν την είσοδο, στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής από την αρχή έως την μέση του κτιρίου, στο εσωτερικό του κτιρίου σε πολύ χαμηλό ύψος (σχεδόν κοντά στο πάτωμα) επίσης έντονη ανακυκλοφορία αέρα εμφανίζεται στην εσωτερική γωνία πάνω από το άνοιγμα της εισόδου και τέλος στην έξοδο από το παράθυρο εμφανίζεται μια περιοχή ανακυκλοφορίας πάνω από το άνοιγμα.

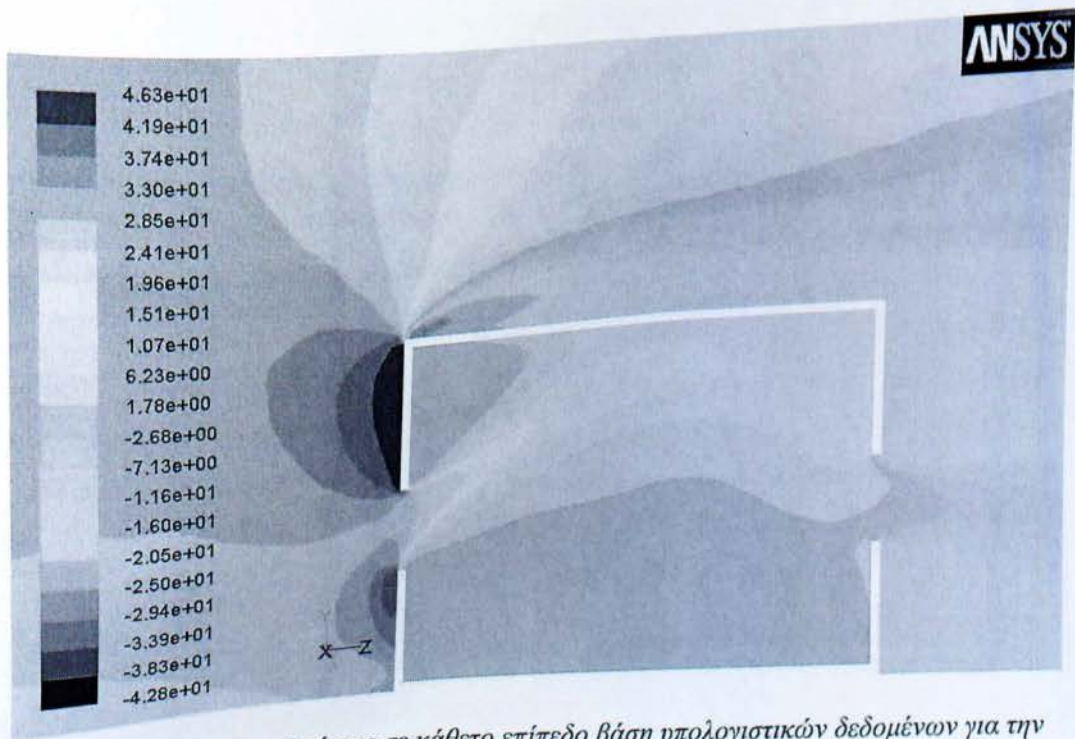
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα κατανομής ταχυτήτων πειραματικό (σχήμα 6.15) και υπολογιστικό (σχήμα 6.16), βλέπουμε ότι στο πειραματικό καθώς εισέρχεται ο αέρας στο κτίριο εμφανίζεται ένα ρεύμα αέρα αυξημένων ταχυτήτων με καθοδική πορεία από την είσοδο έως το κέντρο του κτιρίου και μετά ανοδική πορεία μέχρι την έξοδο του.

Ενώ στο υπολογιστικό βλέπουμε ότι καθώς ο αέρας εισέρχεται στο κτίριο εμφανίζει μεγαλύτερες ταχύτητες καθώς πλησιάζουμε στην οροφή. Πράγμα που έρχεται σε αντίθεση με την αντίστοιχη πειραματική εικόνα.



Σχήμα 6.18 : Προσομοίωση ροής αέρα για την γεωμετρία E1 μέσω εντολής pathline

Από την εικόνα είναι εμφανή κάποια σημεία ανακυκλοφορίας αέρα μέσα και έξω από το κτίριο.



Σχήμα 6.19 : Κατανομή πίεσης σε κάθετο επίπεδο βάση υπολογιστικών δεδομένων για την γεωμετρία E1

Στο σχήμα 6.19 παρουσιάζεται η κατανομή της ολικής πίεσης στο κάθετο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο της γεωμετρίας E1 ( το κάθετο επίπεδο φαίνεται στο σχήμα 5.1).

Οι μεγαλύτερες τιμές πίεσης εμφανίζονται περιμετρικά του ανοίγματος εισόδου.

Στο εσωτερικό του κτιρίου η πίεση είναι σχετικά μικρή ( σχεδόν μηδενική ) εκτός από μια περιοχή κοντά στο άνοιγμα στην είσοδο του κτιρίου. Σε γενικές γραμμές η πίεση παρουσιάζει μια πτώση από την είσοδο και μετά, και μέσα στο κτίριο και έξω από αυτό. Σημεία υποπίεσης εμφανίζονται κυρίως στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής ( στην αρχή ) και περιμετρικά από το άνοιγμα της εξόδου. Κάποια σημεία με υποπίεση βλέπουμε ότι συμπίπτουν με κάποια σημεία επανακυκλοφορίας αέρα.

## 7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

#### 7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προσομοίωση που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια και που βασίστηκε στο πείραμα της διδακτορικής διατριβής *Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation* της P. Karava οδήγησε σε χρήσιμα συμπεράσματα για τον φυσικό αερισμό, καθώς και για τη σύγκριση της διαδικασίας προσομοίωσης με τη διαδικασία του πειράματος σε αεροσήραγγα.

Συγκρίνοντας πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα εμφανίζονται διαφοροποιήσεις στις τιμές άλλοτε εντονότερες ή μικρότερες ανάλογα με την γεωμετρία που μελετάμε.

Οι αποκλίσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στον τρόπο της προσομοίωσης του πειράματος. Δηλαδή κατά την προσομοίωση του πειράματος έγιναν απλοποιήσεις, όπως :δεν λάβαμε υπ' όψιν τις διαμορφώσεις που δημιουργούνταν στο εσωτερικό του πειραματικού μοντέλου από τα όργανά μέτρησης της πίεσης. Επίσης κατά των ορισμό των οριακών συνθηκών θεωρήσαμε ότι η τύρβη είναι σταθερή ενώ στην πραγματικότητα ακολουθεί μια εκθετική κατανομή όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5 (σελ 57). Στο σχεδιαστικό κομμάτι το πλέγμα πριν την είσοδο και την είσοδο και κοντά στο δάπεδο δεν ήταν αρκετά πυκνό ώστε να έχουμε αναλυτικότερα αποτελέσματα πριν την είσοδο.

Παρατηρούμε ότι ανάλογα με το ύψος του ανοίγματος έχουμε και διαφορετικές αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών τιμών. Καθώς μειώνεται το ύψος του ανοίγματος οι αποκλίσεις αυξάνονται. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο οριακό στρώμα που δημιουργείται στο δάπεδο πριν από την είσοδο και επειδή το θεωρήσαμε ότι δεν θα επηρεάσει τους υπολογισμούς μας δεν κατασκευάσαμε πυκνότερο πλέγμα σε αυτόν τον χώρο.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται να επηρεάζεται έντονα η ροή του αέρα από το οριακό στρώμα σε χαμηλά ύψη.

Επίσης από τα περιγράμματα (contours) ταχύτητας και πίεσης βγαίνει το συμπέρασμα ότι το ύψος των ανοιγμάτων έχει άμεση σχέση με το ποσοστό ανακυκλοφορίας του αέρα στον εσωτερικό χώρο.

Δηλαδή όσο ψηλότερα βρίσκεται το άνοιγμα (γεωμετρία A1) τόσο μεγαλύτερη ανακυκλοφορία αέρα έχουμε στον χώρο, αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για να έχουμε μεγαλύτερη ανανέωση του αέρα σε έναν χώρο θέλουμε τα ανοίγματα να βρίσκονται σε χαμηλά ύψη.

Από τους υπολογισμούς μας φαίνεται να έχουμε μεγαλύτερη ανανέωση αέρα στο εσωτερικό του χώρου όταν το άνοιγμα βρίσκεται στο χαμηλότερο ύψος (γεωμετρία C1) σε αντίθεση με την γεωμετρία A1 που το άνοιγμα βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο και διακρίνεται να υπάρχει ανανέωση του αέρα μόνο από τα ανοίγματα και άνω ενώ κάτω από τα ανοίγματα υπάρχει εγκλωβισμένος αέρας που ανακυκλοφορεί.

Αντίθετα από τα πειραματικά περιγράμματα (contours) προκύπτει ότι καλύτερη ανανέωση του αέρα στον εσωτερικό χώρο έχουμε όταν το άνοιγμα βρίσκεται στην μέση (γεωμετρία E1), παρόλο που όταν το άνοιγμα βρίσκεται χαμηλά ( γεωμετρία C1) φαίνεται να υπάρχει καλή ανανέωση του αέρα αλλά μόνο σε χαμηλά επίπεδα. Θεωρούμε ότι καλύτερος αερισμός του χώρου πραγματοποιείται με την γεωμετρία E1 καθώς σε αυτό το επίπεδο έρχεται σε αμεσότερη επαφή με την θέση του ανθρώπου σε καθημερινές δραστηριότητες.

Από τα υπολογιστικά αποτελέσματα εμφανίζεται να υπάρχει καλύτερη ανανέωση του αέρα κατά την γεωμετρία C1, λόγω όμως των αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι τιμές τόσο στο διάγραμμα ταχυτήτων όσο και στα περιγράμματα (contours), οι οποίες αποκλίσεις ενδεχομένως σχετίζονται με σφάλματα.

Τέλος βάση των υπολογιστικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπ' όψιν σφάλματα και παραλήψεις στο υπολογιστικό κομμάτι, καλύτερη θέση ανοιγμάτων για φυσικό αερισμό χώρου φαίνεται να είναι κοντά στην μέση του κτιρίου όπως στην γεωμετρία E1.

## 7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

- Μελέτη του προβλήματος με άλλο μοντέλο επίλυσης
- Δημιουργία καλύτερου πλέγματος σε κρίσιμα σημεία
- Καλύτερος ορισμός των οριακών συνθηκών
- Μελέτη του προβλήματος με διαφορετικά μεγέθη των ανοιγμάτων (wall porosity)
- Μελέτη του προβλήματος με διαφορετική θέση των ανοιγμάτων



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Fluent.inc guide
- Simtec /Fluent 6 presentations / lectures
- Simtec /Gambit 2 presentations / lectures
- Stanford/ Fluent 6 presentation / 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
- «Φυσικός αερισμός», σημειώσεις για το μεταπτυχιακό μάθημα «Βιοκλιματικός σχεδιασμός» τμήμα Αρχιτεκτόνων Ε.Μ.Π, Θάνος Στασινόπουλος
- *PhD Thesis: Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation, Concordia University, 2008 , Panagiota Karava*
- *CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation, Wind Engineering Software Colorado State University, Robert N. Meroney*

