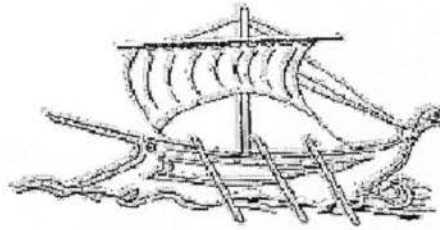


# ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧ  
654

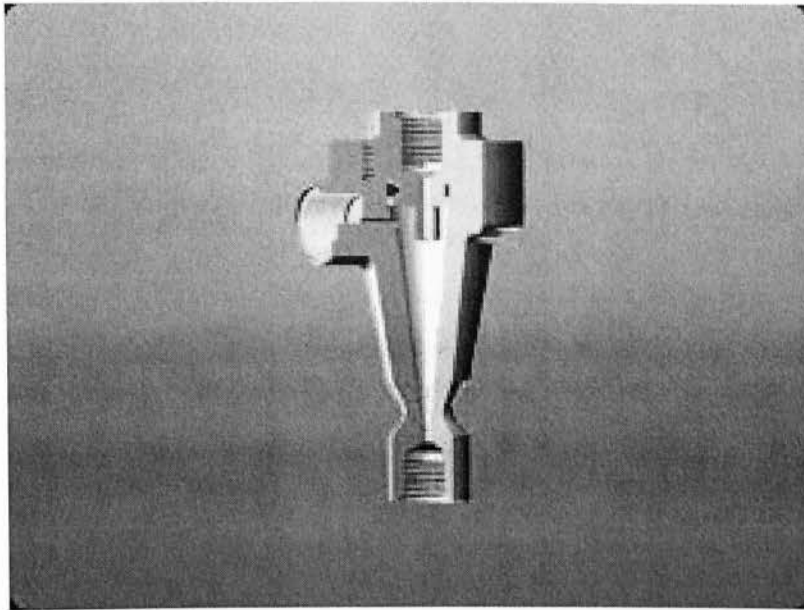


Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝΑ (Numerical simulation of fluid  
dynamics characteristics of a Cyclone)*



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΚΩΣΤΟΥΛΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ , ΚΩΣΤΟΥΛΗΣ ΛΑΜΠΡΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ

ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	σελ. 4
----------------	--------

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	σελ. 5
----------------	--------

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

2.1) Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics - C.F.D)....	σελ.7
2.2) Gambit .....	σελ. 15
2.3) Fluent .....	σελ. 24

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

3.1) Τι είναι οιΚυκλώνες .....	σελ. 27
3.2 ) Σωστή λειτουργία κυκλώνων .....	σελ. 29
3.3) Χρήση κυκλώνων .....	σελ.32
3.4) Υπολογισμός κυκλώνων .....	σελ.34
3.5) Διαστάσεις τυπικού κυκλώνα .....	σελ.35

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

4.1) Πείραμα Κυκλώνα.....	σελ.36
4.2) Κατασκευή Προσομοίωσης στο Gambit .....	σελ. 36
4.3) Προσομοίωση Πειράματος στο Fluent .....	σελ. 40
4.4) Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....	σελ. 42

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

5.1) Συμπεράσματα ..... σελ. 55

5.2) Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία ..... σελ. 56

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ** ..... σελ. 57

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σκοπό την εκμάθηση προγραμμάτων για την σχεδίαση πραγματικών προβλημάτων που σχετίζονται με τη μηχανική ρευστών και την προσομοίωση της ροής τους αντίστοιχα για την επίλυση του προβλήματος. Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατανόηση της λειτουργίας ενός μηχανολογικού φίλτρου τύπου κυκλώνα, καθώς και η εξέταση της ροής του ρευστού (αέρα) μέσα στον κυκλώνα, κάτω από καθορισμένες συνθήκες όπως ταχύτητα ρευστού, μάζα και όγκος στερεού. Η ανάλυση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση λογισμικού πακέτου Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD).

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Προσομοίωση, Πλέγμα, Στρωτή και Τυρβώδης Ροή, φυγόκεντρος δύναμη, Fluent, Gambit, κυκλώνας

## **ABSTRACT**

The present study aims at learning programs for designing real-world problems related to fluid mechanics and simulation of the flow corresponding to resolve the problem. The aim of the thesis is to design and understand of running a cyclone-type mechanical filter, and consider the flow of fluid (air) inside the cyclone, under defined conditions such as fluid velocity, mass and volume of the solid. This analysis is achieved by using software package CFD (Computational Fluid Dynamics - CFD).

## **KEYWORDS**

Computational Fluid Dynamics, Modeling, Grid, laminar and turbulent flow, centrifugal force, Fluent, Gambit, cyclone

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάπτυξη και η εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία 30 χρόνια είχε σημαντική επίδραση σχεδόν σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας και δη στους επιστημονικούς τομείς. Ένας επιστημονικός τομέας είναι και η μηχανική των ρευστών που χρησιμοποίησε τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για επίλυση προβλημάτων της ρευστοδυναμικής.

Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1960 οι λύσεις των προβλημάτων της ρευστοδυναμικής προέρχονται είτε από πειραματική προσομοίωση των προβλημάτων σε αεροδυναμική σήραγγα είτε από αναλυτικές λύσεις απλοποιημένων εξισώσεων με παραδοχές των οποίων η αξιοπιστία ήταν αμφισβητήσιμη. Όμως η κατασκευή του πειραματικού μοντέλου που δοκιμάζεται όταν μάλιστα κατασκευάζεται σε πραγματικές διαστάσεις και επιπλέον η λειτουργία της σήραγγας για μεγάλο χρονικό διάστημα έχουν πολύ μεγάλο κόστος.

Σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως ένας κλάδος της μηχανικής των ρευστών, η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) που σκοπός της είναι να επιλύσει αριθμητικά, με την βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, τις διαφορετικές εξισώσεις που εκφράζουν μαθηματικά τα πεδία ροής. Η επίλυση αυτή θα αποτελεί οδηγό για την σχεδίαση και τη βελτίωση των μηχανολογικών ή αεροπορικών κατασκευών, στη περίπτωση της πτυχιακής μας εργασίας την προσομοίωση και την παρατήρηση της συμπεριφοράς στερεών σωματιδίων μέσα σε κυκλώνα.

Γενικότερα ο κυκλώνας χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό στερεών από ρευστά (υγρά ή αέρια) με τη βοήθεια της φυγόκεντρης δύναμης. Το κυριότερο συγκριτικό πλεονέκτημά τους σε σχέση με τις υπόλοιπες φυγόκεντρες είναι, ότι δεν περιέχουν κινούμενα μέρη.

## 1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται αναφορά στα εξής:

- Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> Στην υπολογιστική ρευστομηχανική και στα δυο προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν, το GAMBIT που είναι το σχεδιαστικό πρόγραμμα και το FLUENT που είναι το πρόγραμμα προσομοίωσης.
- Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Στον τρόπο λειτουργίας ενός κυκλώνα, διαστάσεις, εφαρμογές
- Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Στη διαδικασία της προσομοίωσης ενός πειραματικού μοντέλου κυκλώνα και παρατήρηση λειτουργίας του
- Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Στα συμπεράσματα της προσομοίωσης και σε πιθανή μελλοντική εργασία.

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS – CFD)

*Στο ακόλουθο κεφάλαιο γίνεται λόγος για την τεχνολογία CFD καθώς γίνεται παρουσίαση των βασικότερων λειτουργιών και πιο συγκεκριμένα αναφέρεται γιατί χρησιμοποιείται, ποιες οι εφαρμογές της, οι περιορισμοί του, τα πλεονεκτήματα του καθώς και ποιά είναι τα βασικά στάδια μιας ανάλυσης CFD κατά την διαδικασία επίλυσης μιας ρευστομηχανικής εφαρμογής.*

#### 2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (CFD)

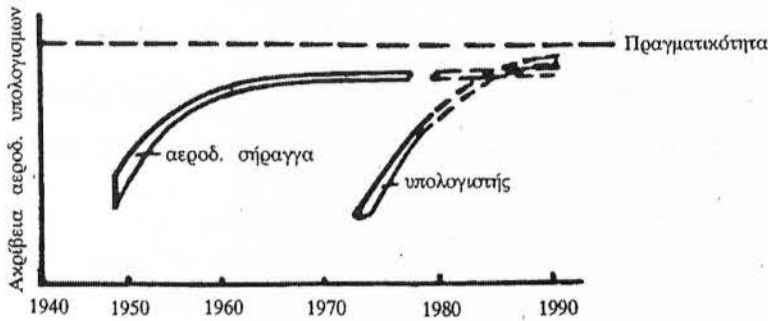
Η επιστήμη της πρόβλεψης της ροής των ρευστών, της μετάδοσης θερμότητας και μάζας, των χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετικών φαινομένων είναι η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) ή CFD, αυτό πραγματοποιήτε μέσω της επίλυσης των μαθηματικών εξισώσεων που διέπουν τις διεργασίες αυτές, χρησιμοποιώντας μια αριθμητική μέθοδο με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και όχι μέσω τεχνητών πειραμάτων.

Η αριθμητική ανάλυση έχει ως βασικό σκοπό να βρίσκει εύχρηστες μεθόδους για την λύση προβλημάτων που μπορούν να εκφραστούν με μαθηματικές εξισώσεις, επίσης χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των ρευστομηχανικών μοντέλων και συνεπώς η γνώση της είναι εξαιρετικά υψηλής σημασίας, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο.

Μια ανάλυση με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, δείνει αποτελέσματα που είναι χρήσιμα δεδομένα για ένα μηχανικό, ώστε να τα χρησιμοποιήσει στην αρχική μελέτη νέων σχεδίων (conceptual design), στην ανίχνευση προβλημάτων (troubleshooting) ή ακόμα και στον ανασχεδιασμό - βελτιστοποίηση (redesign - optimization) κατασκευών ή τμημάτων τους, με σκοπό την καλύτερη λειτουργία.

Στη τεχνολογία και τεχνογνωσία του σήμερα, περισσότερο ίσως από κάθε άλλη φορά, η τεχνολογία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) βρίσκει εφαρμογή σε όλους τους κλάδους της επιστήμης του μηχανικού που ασχολείται με την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστών, όπου πλέον αγγίζει την πραγματικότητα.. Προς την κατεύθυνση αυτή, σημαντικό ρόλο έπαιξε η ανάπτυξη καθώς και το χαμηλό κόστος των σύγχρονων ισχυρών

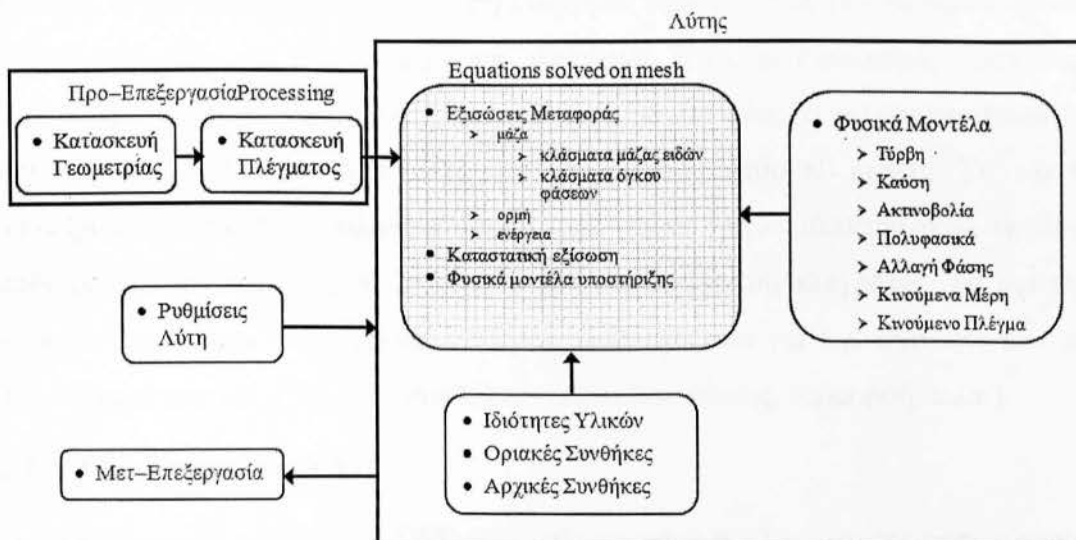
υπολογιστών, σε σχέση με την υλοποίηση ενός πειράματος αεροδυναμικής σήραγγας. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Σύγκριση αξιοπιστίας Η/Υ και Αεροδυναμικής Σήραγγας

### 2.1.1 Επισκόπηση της CFD διαδικασίας

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) όπως είπαμε και νωρίτερα ορίζεται ως μια τεχνική ανάλυσης βασισμένη σε υπολογιστές. Οπότε πριν ξεκινήσουμε την αριθμητική ανάλυση πρέπει πρώτα να κατασκευάσουμε μέσω ενός ενσωματωμένου προεπεξεργαστή (Gambit) την γεωμετρία που επιθυμούμε και μετά να προσθέσουμε το υπολογιστικό πλέγμα.



Σχήμα 2.1.1: Σχηματική αναπαράσταση της CFD διαδικασίας

Έπειτα πρέπει να κάνουμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις στον επιλυτή, όπως η επιλογή του κατάλληλου φυσικού μαθηματικού μοντέλου (τυρβώδους, καύσης, ακτινοβολίας, πολυφασικής ροής, κινούμενου πλέγματος, κινούμενων μερών κ.λπ.). Ακόμα πρέπει να ορίσουμε τις



ιδιότητες των υλικών αν είναι ρευστά, στερεά ή μίγματα, τις οριακές συνθήκες, τις συνθήκες λειτουργίας καθώς και να δώσουμε και μια αρχική λύση. Μετά ρυθμίζουμε τη διαδικασία της επίλυσης (solver controls) και οι διακριτοποιημένες (αλγεβρικές) εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά. Οι επαναλήψεις θα σταματήσουν όταν θα έχουμε λύση με σύγκλιση. Στη συνέχεια, με την μετεπεξεργασία εξετάζουμε τα αποτελέσματα για να ελέγξουμε τη λύση και χρήσιμα συμπεράσματα για να δούμε αν χρειάζονται κάποιες μετατροπές στο μοντέλο που επιλέξαμε.

### **2.1.2 Λειτουργία του CFD**

Η εφαρμογή ξεκινά από ένα μαθηματικό μοντέλο ενός φυσικού προβλήματος. Η διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας πρέπει να ικανοποιείται στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή στην περιοχή ανάλυσης της ροής. Κατά την επίλυση γίνονται απλοποιητικές παραδοχές ώστε να καταστεί εφικτή και πρακτική η προσέγγιση του φυσικού προβλήματος. Έτσι, λοιπόν, μπορούμε να θεωρούμε ως προς το χρόνο μόνιμη κατάσταση της ροής, ως προς το χώρο δισδιάστατη ροή και ως προς τη φύση ασυμπίεστη ή ακόμα και άτριβη ροή. Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι κατάλληλες αρχικές και/ ή οριακές συνθήκες για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική εφαρμόζει αριθμητικές μεθόδους (συνήθως καλούνται μέθοδοι διακριτοποίησης) ώστε να δημιουργήσει προσεγγίσεις των φυσικών εξισώσεων της ρευστοδυναμικής για την περιοχή που επιλύεται. Έτσι, οι διαφορικές εξισώσεις γίνονται αλγεβρικές ενώ ο χώρος επίλυσης μετατρέπεται σε ένα σύνολο κελιών/στοιχείων (cells) που καθορίζουν το πλέγμα ή κানাβο επίλυσης (computational mesh). Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων επιλύεται αριθμητικά, με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, για κάθε μεταβλητή της ροής σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος. Τα συστήματα των εξισώσεων επιλύονται ταυτόχρονα. Η λύση επεξεργάζεται για την εξαγωγή των ποσοτήτων που ενδιαφέρουν (π.χ. Άνοση, οπισθέλκουσα, πτώση πίεσης, θερμοροή, κ.λπ.).

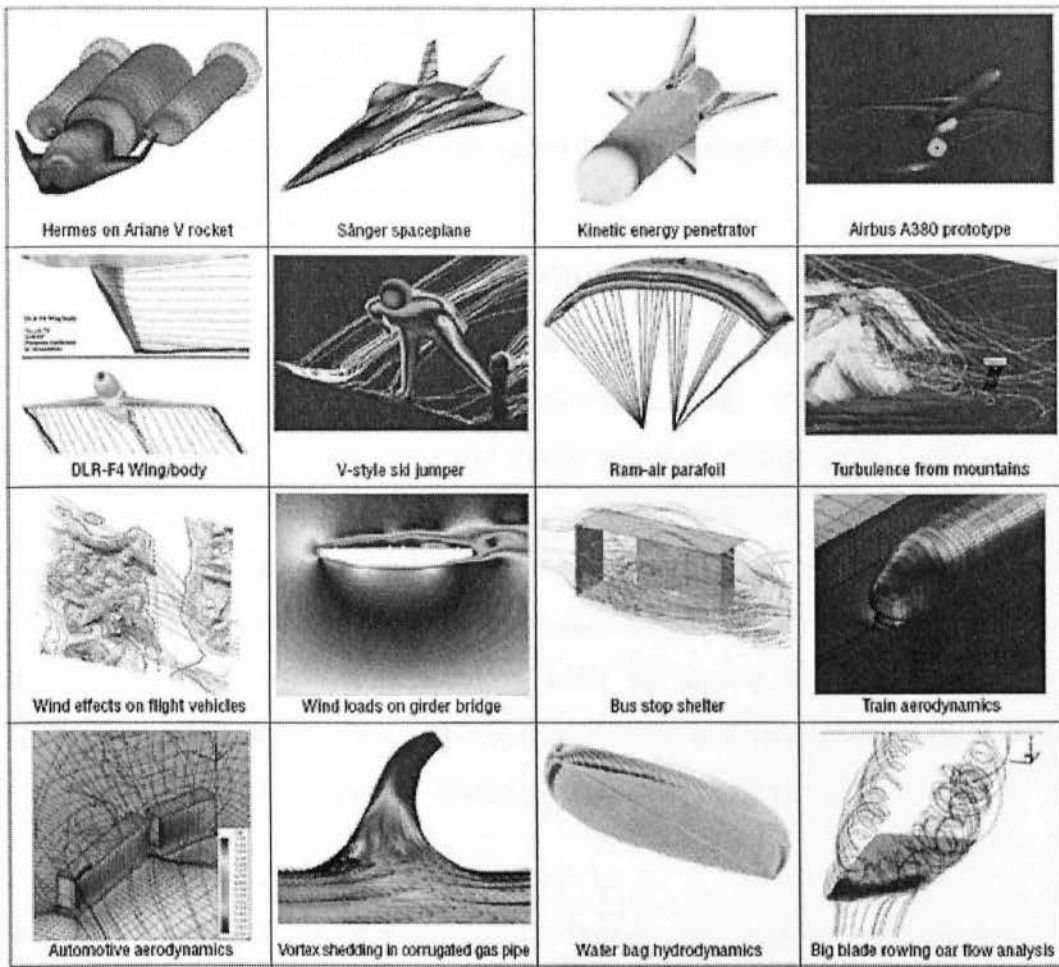
### **2.1.3 Εφαρμογές του CFD**

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας CFD είναι σήμερα πάρα πολλές, μερικές εκ των οποίων είναι :

- Ροή ρευστού και μετάδοση θερμότητας σε βιομηχανικές διεργασίες όπως λέβητες, εναλλάκτες θερμότητας, συσκευές καύσης, ανεμιστήρες κ.α.
- Αεροδυναμική οχημάτων εδάφους, αεροσκαφών, πυραύλων
- Επένδυση φιλμ, θερμοδιαμόρφωση σε εφαρμογές επεξεργασίας υλικών

- Ροή ρευστού και μετάδοση θερμότητας σε συστήματα πρόωσης και παραγωγής ενέργειας
- Αερισμός, θέρμανση και ψύξη σε κτίρια
- Χημική επικάθιση ατμών για παραγωγή ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων
- Μετάδοση θερμότητας για ψύξη ηλεκτρονικών συστημάτων
- Στροβιλοκίνητες μηχανές - αντλίες και στρόβιλοι
- Περιβαλλοντική εφαρμοσμένη μηχανική - μεταφορά των ρύπων και των αποβλήτων αποχέτευσης
- Υδραυλική - δίκτυα σωλήνων, δεξαμενές, κανάλια
- Ωκεανογραφία - παλιρροιακές ροές, ωκεάνια ρεύματα
- Μετεωρολογία - αριθμητική καιρική πρόβλεψη
- Βιοϊατρική εφαρμοσμένη μηχανική - ροή αίματος στην καρδιά, τις φλέβες και τις αρτηρίες

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται ορισμένες από τις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν (Σχήμα 2.1.3).



... to Splash-down

Σχήμα 2.3: Εφαρμογές CFD

#### 2.1.4 Πλεονεκτήματα του 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 H/Y.

- 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. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας.

## 2.1.5 Περιορισμοί του CFD

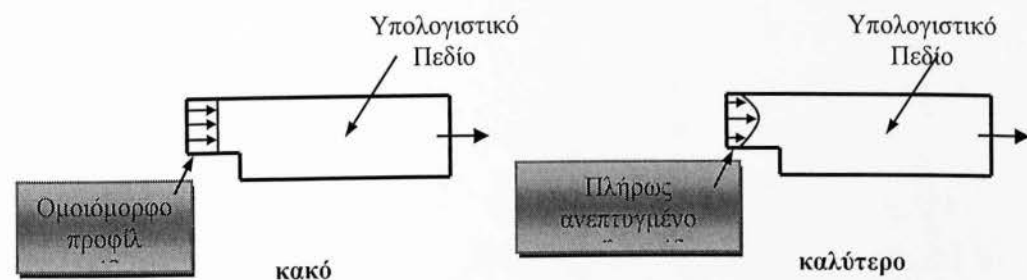
Ωστόσο, η τεχνολογία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής δεν παύει να χαρακτηρίζεται και από αρκετούς σημαντικούς περιορισμούς. Καταρχάς, ως προς τα μαθηματικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιεί. Οι επίλυσεις βασίζονται σε μοντέλα των πραγματικών φαινομένων, όπως μοντέλα τύρβης, συμπίεστος, πολυφασικής ροής ή ακόμα και χημικών αντιδράσεων. Έτσι, οι λύσεις που αποκτώνται από αυτά θα είναι τόσο ακριβείς όσο και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, το αριθμητικό σφάλμα επηρεάζει επίσης την ποιότητα της λύσης. Η επίλυση με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή αναπόφευκτα εισάγει σφάλμα. Η στρογγυλοποίηση εισάγει σφάλμα εξαιτίας της πεπερασμένης μνήμης αποθήκευσης των αριθμών, ενώ σφάλμα προκαλείται και λόγω της αποκοπής εξαιτίας της προσέγγισης κατά τη διακριτοποίηση των εξισώσεων (μετατροπή διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές). Το σφάλμα λόγω της στρογγυλοποίησης είναι σχεδόν αναπόφευκτο, ενώ το σφάλμα αποκοπής είναι δυνατόν να περιοριστεί στο ελάχιστο με την αυξημένη πυκνωση του υπολογιστικού πλέγματος ή με τη χρήση σχημάτων μεγαλύτερης ακρίβειας.

Περιορισμοί, όμως, προκύπτουν και λόγω των οριακών συνθηκών. Όπως και με τα μαθηματικά μοντέλα έτσι και εδώ η ακρίβεια της λύσης είναι τόσο καλή όσο και οι αρχικές/οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν. Η ποιότητα των αρχικών/οριακών συνθηκών ουσιαστικά εκφράζεται μέσω της ρεαλιστικότητας με την οποία αυτές χρησιμοποιούνται.

Παράδειγμα: Ροή σε αγωγό με απότομη διεύρυνση.

Το προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο είναι πιο ρεαλιστικό να αντιστοιχεί σε αναπτυγμένη ροή, παρά να είναι ομοιόμορφη όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.5 .



Σχήμα 2.1.5: Προφίλ ταχυτήτων

Η επίλυση CFD γίνεται μέσω κωδίκων που δημιουργούνται σε διάφορα ερευνητικά κέντρα, καθώς επίσης και σε εργαστήρια κάποιων ακαδημαϊκών φορέων. Ο πιο διαδεδομένος όμως

τρόπος είναι μέσω υπολογιστικών λογισμικών πακέτων από εταιρίες που ασχολούνται χρόνια με το CFD όπως είναι η Fluent Inc. Τα συγκεκριμένα λογισμικά της Fluent Inc. (Gambit, Fluent) χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία

### **2.1.6 Ανάλυση των βασικών βημάτων του CFD**

Για να λυθεί ένα πρόβλημα μέσω της CFD διαδικασίας πρέπει να ακολουθήσουμε μια μεθοδολογία ώστε να καταφέρουμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται παρακάτω:

#### **A. Καθορισμός Προβλήματος & Προεπεξεργασία**

1. Καθορισμός στόχων μοντελοποίησης.
2. Καθορισμός πεδίου που θα επιλυθεί (χώρος & χρόνος).
3. Σχεδιασμός & κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος.

#### **B. Εκτέλεση των Υπολογισμών**

4. Δημιουργία ενός αριθμητικού, μαθηματικού μοντέλου.
5. Επίλυση και παρακολούθηση της λύσης.

#### **Γ. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων**

6. Έλεγχος των αποτελεσμάτων.
7. Θεώρηση μετατροπών στο μοντέλο.



## 2.2 GAMBIT

Για να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή των μεθόδων ρευστοδυναμικής στην παρούσα εργασία, δηλαδή το κυκλώνα, μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, θα χρησιμοποιηθεί ο εμπορικός κώδικας Fluent και πιο συγκεκριμένα για την ανάλυση της ροής. Ο οποίος κώδικας έρχεται σε άμεση "συνεργασία" και από τον προεπεξεργαστή του, Gambit, όπου χρησιμοποιείται για την κατασκευή της γεωμετρίας του προβλήματος καθώς και του υπολογιστικού πλέγματος.

### 2.2.1 Εισαγωγή στο GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit)

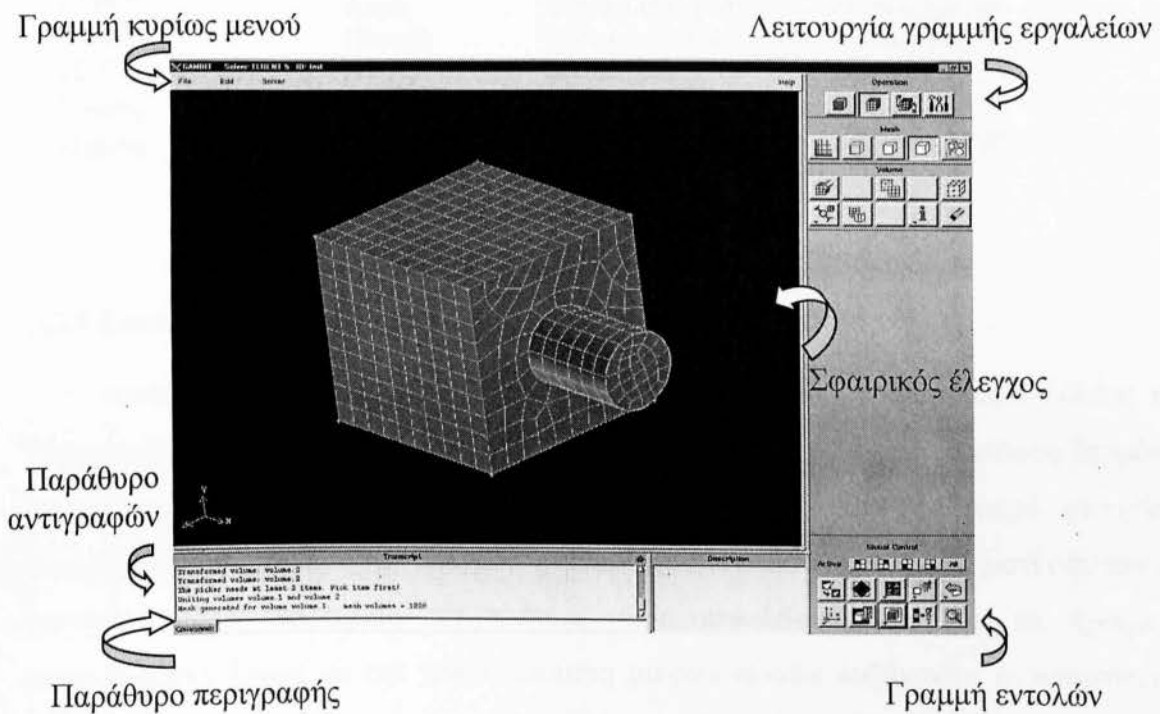
Το Gambit είναι ένας ολοκληρωμένος, ενσωματωμένος προεπεξεργαστής για την ανάλυση CFD, με αρκετά εύχρηστα εργαλεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για μια πληθώρα σχεδιαστικών αλλά και διαφόρων άλλων ενεργειών. Το Gambit περιέχει όλα τα βοηθήματα για την κατασκευή και την εισαγωγή της γεωμετρίας, ενός είτε απλού είτε πολύπλοκου σχήματος. Μοντελοποιεί στερεά βάση συστήματος ACIS, μπορεί να εισαγάγει STEP, Parasolid, IGES, κ.λπ. καθώς επίσης περιέχει δομημένα και μη δομημένα εξάεδρα, τετράεδρα, πυραμίδες και πρίσματα. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να καθαρίσει και να τροποποιήσει τα εισαγόμενα στοιχεία. Το Gambit είναι ο εύκολος τρόπος για την παραγωγή πλέγματος για όλους τους λύτες του Fluent (συμπεριλαμβανομένου των FIDAP και POLYFLOW), όπου εξετάζει ποιοτικά το πλέγμα για την καλύτερη δυνατή κατασκευή του. Τέλος, μπορεί να δημιουργήσει ζώνες οριακών συνθηκών. Είναι ένα από τα καλύτερα εργαλεία για όλες τις παραπάνω ενέργειες, πράγμα που τα καθιστά ένα αναπόσπαστο κομμάτι για την μοντελοποίηση FLUENT μηχανικών εφαρμογών. Η έκδοση του GAMBIT που χρησιμοποιήθηκε στη πτυχιακή εργασία είναι η 2.4.6.

### 2.2.2 Λειτουργία

Στο Gambit ακολουθείται μία σειρά εκτελέσεων ώστε να καταλήξουμε σε ορθό σχεδιασμό και σωστά αποτελέσματα. Η επικρατέστερη ακολουθία λειτουργιών είναι το αρχικό Setup, το οποίο περιλαμβάνει την επιλογή λύτη, το μεγέθους πλέγματος κ.α.. Στη συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία της γεωμετρίας (και στη συνέχεια ή εισαγωγή πλέγματος). Δηλαδή θα έχουμε αναλυτικά την δημιουργία ολικής γεωμετρίας και μετέπειτα την αποσύνθεση σε τομείς που μπορούν να δημιουργηθούν πλέγματα, έπειτα πραγματοποιείτε η

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

Στο Σχήμα 2.2.2 φαίνεται η επιφάνεια εργασίας του χρήστη και αναφέρονται με παραπομπές τα κύρια μέρη λειτουργιών και εντολών του προγράμματος GAMBIT.

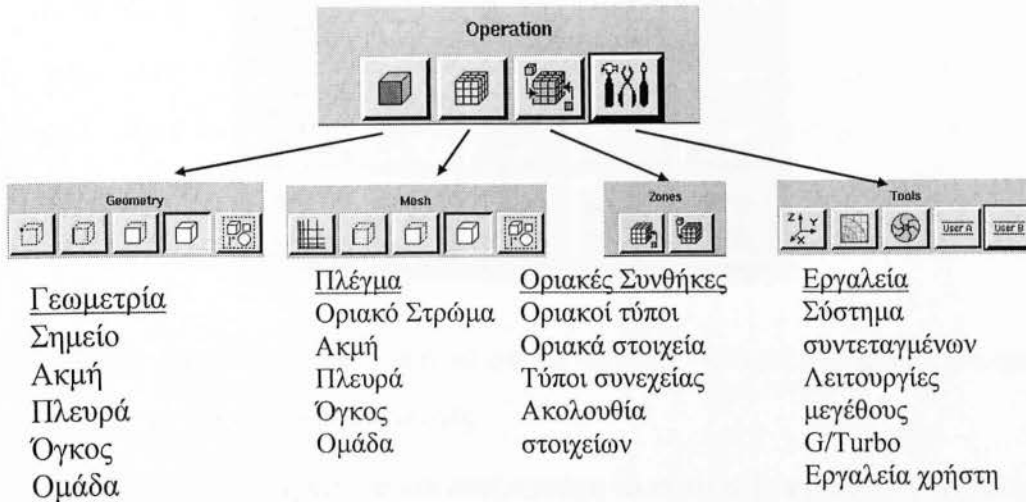


Σχήμα 2.2.2 Γραφική απεικόνιση χρήστη



### 2.2.3 Εργαλεία χειρισμού

Τα εργαλεία χειρισμού του Gambit, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.6 καλύπτουν σχεδόν όλους τους τρόπους κατασκευής γεωμετρίας, πλέγματος καθώς και εισαγωγής οριακών συνθηκών. Ύστερα από μικρή εξοικείωση, ο χρήστης μπορεί εύκολα να χρησιμοποιήσει όλες τις λειτουργίες του προγράμματος.



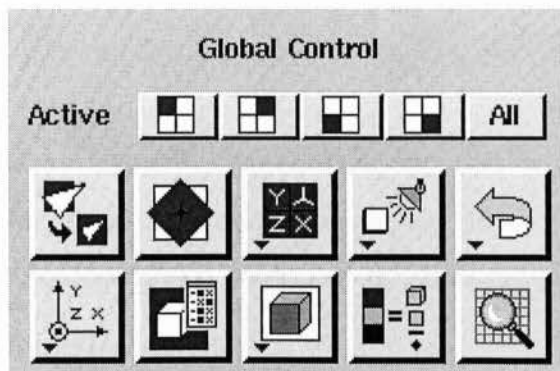
Σχήμα 2.2.3: Εργαλεία Χειρισμού

### 2.2.4 Σκοπός λειτουργίας

Ο σκοπός του Gambit είναι αρχικά η κατασκευή της γεωμετρίας/σχήματος και η δημιουργία πλέγματος για προβλήματα ροής και στερεές περιοχές για μετάδοση θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατασκευή και δουλεύοντας πάνω σε μικρά στοιχεία της γεωμετρίας Η κατασκευή του πλέγματος είναι το σημαντικότερο πράγμα, γιατί όσο πιο μικρά στοιχεία (κελιά) αποτελούν το πλέγμα, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχουμε στα αποτελέσματα. Όμως με την χρησιμοποίηση μικρών κελιών αυξάνονται οι απαιτήσεις του προγράμματος σε ισχύ του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το GAMBIT μας δίνει την δυνατότητα να έχουμε διαβάθμιση του μεγέθους του πλέγματος έτσι ώστε στα σημεία που χρειάζεται, να έχουμε πιο πυκνό πλέγμα από τα υπόλοιπα σημεία.

## 2.2.5 Γενικός έλεγχος λειτουργιών

Περιέχει εντολές όπου στην 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.



Ένα μικρό κόκκινο τρίγωνο υπονοεί ότι με το Δεξί –κουμπί του ποντικιού εμφανίζεται ένα υπό-μενού με περισσότερες επιλογές

Αρχίζουμε από πάνω αριστερά και επεξεργούμε το πίνακα: Τακτοποίηση της κλίμακας, άξονας χειρισμού της προβολής, Διάσπαση στα τέσσερα-προβολή των τεσσάρων όψεων, Πηγή φωτός-σχολιάζονται οι ειδικές ετικέτες, Ανατρέψτε/ξανακάνετε, Προσανατολισμός του πρότυπου Journal View, Τροποποίηση(on/off), Παρουσίαση πλέγματος σκιαγραφία, Κωδικοποίηση χρώματος -Entity type, Εξέταση του πλέγματος.

## 2.2.6 Προεπεξεργασία

Παρακάτω εξηγούμε την ορολογία των πιο βασικών λειτουργιών του Gambit και προσδιορίζουμε το χρώμα που συμβολίζεται η κάθε λειτουργία. Επίσης αναφέρονται και οι διαθέσιμες λειτουργίες για την δημιουργία σημείων και πλευρών για την γεωμετρία μας.

### Αντικείμενο

Δημιουργούμε και κατασκευάζουμε το πλέγμα της περιοχή του FLUENT για προβλήματα ροής και της περιοχής του στερεού για μετάδοση θερμότητας (και τη δομική ανάλυση για τους χρήστες FIDAP). Τυπικά το καταφέρνουμε κατασκευάζοντας και δουλεύοντας με απλά εισαγόμενα σχήματα.

### Ορολογία

Vertex: σημείο

Edge: καμπύλη η οποία ορίζεται από ένα τουλάχιστον σημείο (στην περίπτωση του ενός σημείου, η πλευρά σχηματίζει ένα βρόγχο)

Face: επιφάνεια (όχι απαραίτητα επίπεδη) που ορίζεται από τουλάχιστον μια πλευρά (στην περίπτωση μίας πλευράς, η πλευρά σχηματίζει ένα βρόγχο)

Volume: γεωμετρία στερεού που μπορεί να θεωρηθεί και σαν αεροστεγές σύνολο ενωμένων επιφανειών.

### Προσδιορισμός




Το κάθε είδος από τα παραπάνω προσδιορίζεται από το χρώμα: Vertex (άσπρο), Edge (κίτρινο), Face (ανοιχτό μπλε), Volume (πράσινο), Group (σκούρο πράσινο). Όταν κάποιο από αυτά συνδέεται (διαστασιακά) παίρνει το πιο πάνω χρώμα.

### Ανατρέψτε/ξανακάνετε (Undo/Redo)

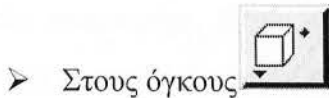
- 10 επίπεδα μπορούν να ανατραπούν έξω ορισμού.
- Ανατρέπει τη γεωμετρία, το πλέγμα, και εντολές χωρισμού.
- Το παράθυρο περιγραφής παρέχει την εντολή που ανατρέπει όταν το ποντίκι περάσει πάνω από το κουμπί undo
- Αριστερό πάτημα για να εκτελεστεί η λειτουργία της ορατής λειτουργίας του κουμπιού.
- Δεξί πάτημα για να αποκτήσουμε πρόσβαση στις επιλογές.

### Δημιουργία σημείων (Vertex Creation)

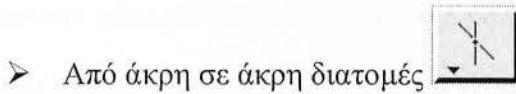
#### ◆ Πραγματική δημιουργία σημείων(Real Vertex creation)

- Από τις συντεταγμένες 
  - Καρτεσιανά, κυλινδρικά και σφαιρικά συστήματα συντεταγμένων
  - Επίσης είναι διαθέσιμα σε εικονική γεωμετρία
- Στην άκρη 
  - Εάν η πρόθεση είναι να χωριστεί η άκρη, (the Edge-Split form) αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται
- Στο πρόσωπο 

- Είναι χρήσιμο για να δημιουργήσει άκρες στην επιφάνεια για μια εικονική διάσπαση



- Δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιείται



- Τα σημεία δεν συνδέονται σε κάθε μια άκρη
- Διάσπαση άκρων με τα σημεία για τη συνδεσιμότητα

### Δημιουργία ακρών(Edge Creation)

- Πραγματική δημιουργία ακρών



Ευθεία γραμμή(Straight line)

- Οι πολλαπλάσιες άκρες μπορούν να δημιουργηθούν με την επιλογή πολλαπλών σημείων.



Τόξο(Arc),



Κύκλος(Circle)

- Το πρόσωπο δημιουργεί τα αντίστοιχα διαθέσιμα
- Μέθοδοι δημιουργιών
  - Τρία vertices στην άκρη
  - Χρησιμοποιώντας Center and End- points
  - Χρησιμοποίηση της ακτίνας και για έναρξη/τέλος τις Γωνίες (Τόξο μόνο)

### 2.2.7 Γενικά περί πλέγματος

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.

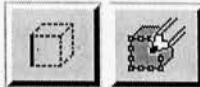
Το GAMBIT παρέχει μια μεγάλη ποικιλία εργαλείων τα οποία μπορούν να διεξάγουν με επιτυχία αναλύσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής στις εκάστοτε ανάγκες και απαιτήσεις.

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 περιγράφουμε με ποια εργαλεία μπορούμε να κατασκευάσουμε πλέγμα στις άκρες και στα πρόσωπα(faces) της γεωμετρίας μας.

#### Πλέγμα ακρών (Edge Meshing)

➤ Η διανομή πλέγματος ακρών ελέγχεται μέσω των παραμέτρων διαστήματος και βαθμονόμησης.

➤ Χρησιμοποίηση της Edge meshing μορφής 

- Επιλογή (Picking)
  - Προσωρινή γραφική παράσταση (Temporary graphics)
  - Συνδέσεις, κατευθύνσεις (Links, Directions)
- Βαθμονόμηση/διάστημα (Grading/Spacing)
- Ειδικά χαρακτηριστικά (Special characteristics)
  - Εφαρμογή και προεπιλογές (Apply and Defaults)
  - Αναστρέψτε και αντιστρέψτε (Invert and Reverse)
- Επιλογές (Options)

## Πλέγμα προσώπου (Face Meshing)



### ◆ Μορφή πλέγματος προσώπου

- Επάνω στην επιλογή ενός προσώπου
  - GAMBIT αυτόματα επιλέγει τα τετράγωνα στοιχεία
  - GAMBIT επιλέγει τον τύπο βασισμένο στο Λύτη / πρόσωπο (Solver/face) και vertex types

### ● Διαθέσιμο στοιχείο / συνδυασμοί τύπων σχεδίου

- Τετράγωνο (Quad)
  - Χάρτης (Map)
  - υποχάρτης (Submap)
  - Τρι –πρωτόγονος (Tri-Primitive)
  - Στρώστε (Wedge)
- Τετράγωνο /Τρίγωνο (Quad/Tri)
  - Χάρτης (Map)
  - Στρώστε (Pave)
  - Σφήνα (Wedge)
- Τρίγωνο (Tri)
  - Στρώστε (Pave)

### ● Ικανότητα μετατροπής τετραγωνικού πλέγματος σε τριγωνικό

(quad-to-tri).

## 2.2.8 Οριακές συνθήκες

Εφόσον κατασκευαστεί η γεωμετρία και διαμορφωθεί το υπολογιστικό πεδίο του προβλήματος θα πρέπει να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες μέσα στον προεπεξεργαστή GAMBIT. Οι οριακές αυτές συνθήκες θα μπορούν να αναγνωριστούν και να τροποποιηθούν κατά την εισαγωγή του πλέγματος στον κώδικα Fluent.

Κάθε μέρος του υπολογιστικού πεδίου αναγνωρίζεται με συγκεκριμένο όνομα που είναι ίδιο τόσο για τον προεπεξεργαστή Gambit όσο και εν συνεχεία για τον κώδικα Fluent. Κάθε υπολογιστικό κελί ονομάζεται cell και εκφράζει έναν πεπερασμένο όγκο μέσω του οποίου λαμβάνει χώρα η ροή. Το σύνολο των υπολογιστικών κελιών καθορίζει το συνολικό υπολογιστικό πεδίο. Το υπολογιστικό πεδίο περιλαμβάνει περιοχές οι οποίες αργότερα κατά την εισαγωγή στο FLUENT μπορεί να αντιπροσωπεύουν τόσο περιοχές ρευστού όσο και στερεού. Τα όρια κάθε cell ορίζονται ως faces, ενώ για την περίπτωση που χρησιμοποιείται τρισδιάστατο πλέγμα τα όρια κάθε face ονομάζονται edges. Η ίδια ονοματολογία, edges, χρησιμοποιείται και για τον ορισμό των ακμών της γεωμετρίας πριν τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Τα σημεία όπου συναντώνται οι faces (ή οι edges για την περίπτωση τρισδιάστατης γεωμετρίας) ονομάζονται nodes, ενώ το σύνολο από nodes, faces και/ ή cells ορίζει τις zones του υπολογιστικού πεδίου.

Οι οριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε face/zones. Έτσι, λοιπόν, μπορούμε να ορίζουμε σε κάθε face/zone την οριακή συνθήκη που αργότερα θέλουμε να αναγνωριστεί από τον κώδικα Fluent. Συνήθως ορίζουμε την είσοδο και την έξοδο του ρευστού ως inlet και outlet αντίστοιχα, τις ελεύθερες επιφάνειες του ρευστού, εάν υπάρχουν, ως symmetries ή pressure inlet και τα αδιαπέρατα στερεά όρια ως walls. Στη συνέχεια εξάγουμε το πλέγμα που έχουμε κατασκευάσει και το οποίο μπορεί πλέον να εισαχθεί στο πρόγραμμα Fluent για την ανάλυση.



## 2.3 FLUENT

### 2.3.1 Εισαγωγή 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 χρήσιμων συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων (κατόπιν αμέτρητων υπολογισμών), σε αρκετές εφαρμογές προσομοίωσης σε περιβάλλον κανονικών συνθηκών και φυσικά σε ικανοποιητικό χρονικό διάστημα.

Το Fluent είναι ένα λογισμικό με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε ορίζοντας παραμέτρους να αναπαραστήσουμε πραγματικές συνθήκες και να επιλύσουμε ένα πρόβλημα ρευστομηχανικής, μετάδοσης θερμότητας & μάζας, χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετικών φαινομένων. Αξιοσημείωτες εφαρμογές του σήμερα είναι : εσωτερικές & εξωτερικές ροές αυτοκινήτων, αεροδυναμική υψηλών ταχυτήτων, ροές πυραύλων, στροβιλομηχανές, δοχεία αντίδρασης, κυκλώνες, στήλες φυσαλίδων, δοχεία ανάμιξης, ρευστοποιημένες κλίνες.

### 2.3.2 Αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας του λογισμικού είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Το πεδίο του ρευστού του αγωγού χωρίζεται σε πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου ή στοιχείων / κελιών (υπολογιστικό πλέγμα). Η γενική εξίσωση διατήρησης και μεταφοράς της μάζας, ορμής, ενέργειας διακριτοποιείται πάνω στο πλέγμα και παίρνει τη μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων. Όλες οι εξισώσεις επιλύονται για την εύρεση της λύσης.

Η γενική εξίσωση διατήρησης και μεταφοράς της μάζας, ορμής, ενέργειας διακριτοποιείται πάνω στο πλέγμα και παίρνει τη μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων. Όλες οι εξισώσεις επιλύονται για την εύρεση της λύσης.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \mathbf{N} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV$$

μη-μόνιμος                      συναγωγή                      διάχυση                      παραγωγή



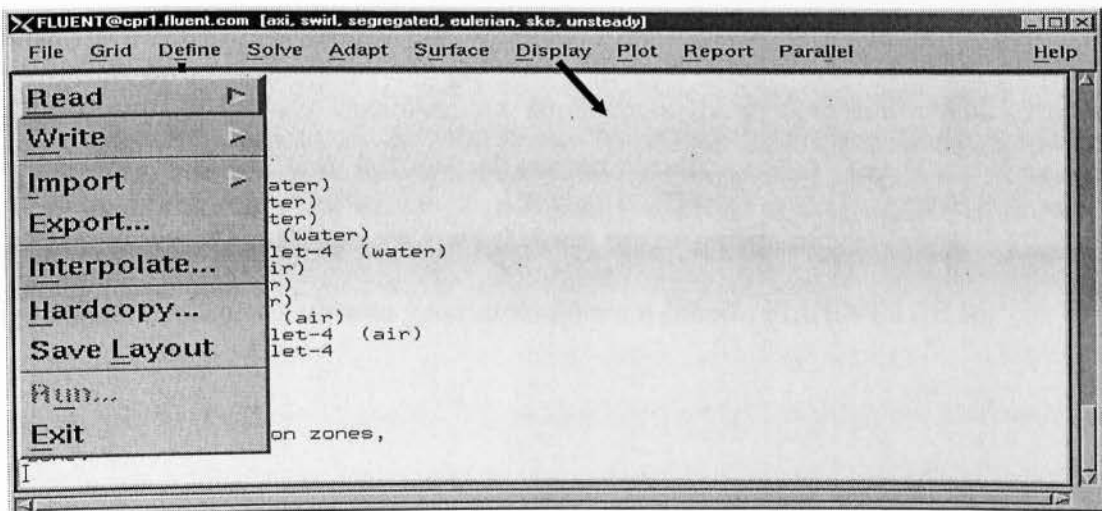
### 2.3.3 Μεθοδολογία επίλυσης προβλήματος

Στο Fluent αρχικά ξεκινάμε έχουμε την επιλογή να διαλέξουμε προσομοίωση δισδιάστατη, δισδιάστατη διπλάσιας ακρίβειας, τρισδιάστατη και τρισδιάστατη διπλάσιας ακρίβειας .



Σχήμα 2.3.3.α: Παράθυρο επιλογής προσομοίωσης

Έπειτα μπαίνουμε στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος



Σχήμα 2.3.3.β: Περιβάλλον εργασίας Fluent

- Εδώ καθορίζεται το είδος των αποτελεσμάτων που θέλουμε ,ορίζονται τα μαθηματικά μοντέλα της ανάλυσης, η ακρίβεια και το πόσο γρήγορα χρειαζόμαστε τα αποτελέσματα.
- Ορίζονται οι οριακές συνθήκες και τα όρια του υπό εξέταση συστήματος, βλέπουμε αν μπορεί να απλοποιηθεί σε δυο διαστάσεις και αν έχουμε ροϊκή και γεωμετρική συμμετρία.
- Ανάλογα με την γεωμετρία ορίζεται η μορφή των στοιχειωδών στερεών του πλέγματος για να μην υπάρχουν ασυνέχειες δομής σε εξαεδρικό / τετραπλευρικό ή τετραεδρικό / τριγωνικό πλέγμα, υβριδικό, μη συμβατό πλέγμα. Ελέγχεται η ανάλυση και η προσαρμογή του πλέγματος και κατά συνέπεια η υπολογιστική ισχύς.
- Οι αλγεβρικές διακριτοποιημένες λύσεις λύνονται επαναληπτικά μέχρι να έχουμε σύγκλιση. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν μεταξύ των επαναλήψεων υπάρχουν μικρές αριθμητικές αλλαγές. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την καταλληλότητα των μαθηματικών μοντέλων και τον σωστό ορισμό του πλέγματος.
- Βασικό πλεονέκτημα είναι η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε όλα τα σημεία το οποίο μας δίνει πληροφορίες για την μορφή της ροής, τις αποκλίσεις, βλέπουμε αν έχουμε κρουστικά κύματα, διατμητικές στοιβάδες και αλλά φαινόμενα, διαπιστώνουμε αν έχουμε κατάλληλες οριακές συνθήκες και μαθηματικά μοντέλα.
- Γίνεται θεώρηση των μετατροπών στο μοντέλο, ελέγχεται αν είναι τα μαθηματικά μοντέλα κατάλληλα , για παράδειγμα αν έχουμε τυρβώδη η στρωτή ροή.
- Ελέγχονται οι οριακές συνθήκες για παράδειγμα αν τα όρια του πεδίου είναι αρκετά μεγάλα, αν οι συνθήκες είναι κατάλληλες και ρεαλιστικές
- Τέλος ελέγχεται το πλέγμα για την βελτίωση του αν απαιτείται.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση FLUENT 12.0.16.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΚΥΚΛΩΝΕΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους κυκλώνες, αναφερόμαστε στην μορφολογία τους, στο μέγεθος τους, στον τρόπο λειτουργίας τους και στις εφαρμογές τους.

#### 3.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΚΥΚΛΩΝΕΣ

Οι κυκλώνες (cyclones) είναι κυλινδρικά δοχεία με κωνικό πυθμένα, κατάλληλου σχεδιασμού και μεγέθους, που χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό στερεών από ρευστά (υγρά ή αέρια) με τη βοήθεια της φυγόκεντρης δύναμης.

Το κυριότερο συγκριτικό πλεονέκτημά τους σε σχέση με τις υπόλοιπες φυγόκεντρες είναι, ότι δεν περιέχουν κινούμενα μέρη. Κατά βάση οι κυκλώνες είναι συσκευές κατακάθισης στην οποία χρησιμοποιείται μία ισχυρότερη φυγόκεντρη δύναμη, που επενεργεί στα στερεά με ακτινική διεύθυνση, αντί της σχετικά ασθενέστερης δύναμης της βαρύτητας, που επενεργεί κατακόρυφα. (διπλός κυκλώνας)



Η τροφοδοσία, δηλαδή το ρευστό που περιέχει στερεά, εισέρχεται εφαπτομενικά στο πάνω κυλινδρικό τμήμα του κυκλώνα (από κατάλληλη ορθογωνική είσοδο) και κατέρχεται ελικοειδώς προς τα κάτω, ακολουθώντας μία σπειροειδή διαδρομή, σχηματίζοντας την καλούμενη εξωτερική δίνη (external vortex). Εξαιτίας των αναπτυσσόμενων φυγοκεντρικών δυνάμεων τα περιεχόμενα στερεά του ρεύματος του ρευστού εκτινάσσονται ακτινικά προς την περιφέρεια, δηλαδή προς τα εσωτερικά τοιχώματα του κυκλώνα, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς τους και στη συνέχεια, γλιστρούν και πέφτουν λόγω της βαρύτητας μέσα στον κώνο, οπότε συλλέγονται στο κάτω μέρος του μηχανήματος (στο δοχείο παραλαβής στερεών).

Στο κάτω μέρος του κωνικού τμήματος το ρεύμα του ρευστού αλλάζει κατεύθυνση και ανέρχεται προς τα πάνω, σχηματίζοντας την καλούμενη εσωτερική δίνη (internal vortex). Το απαλλαγμένο από τα στερεά ρευστό εισέρχεται στον αγωγό εξόδου και απομακρύνεται από

τον κυκλώνα. Ο αγωγός εξόδου προεκτείνεται μέσα στον κύλινδρο, ώστε να προληφθεί το βραχυκύκλωμα του αέρα από την είσοδο προς την έξοδο. Όταν το ρευστό είναι αέριο τότε χρησιμοποιούνται οι αεροκυκλώνες (Σχήμα 3.2), ενώ όταν είναι υγρό, τότε χρησιμοποιούνται οι υδροκυκλώνες, που είναι γενικά συσκευές με αρκετά μικρότερο μέγεθος. Γενικά είναι απλές μηχανικές συσκευές για την αφαίρεση σχετικά μεγάλα σωματίδια (> 5 έως 10 μm) από τις ροές φυσικού αερίου.

Οι κυκλώνες υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση και επεξεργασία μεγάλων σωματιδίων. Είναι υπολογισμένοι και κατασκευασμένοι για να πετυχαίνουν χαμηλή πτώση πίεσης. Αυτό καθορίζεται από την σωστή επιλογή του τύπου και διαστασιολόγησης των κυκλώνων. Είναι η πιο οικονομική λύση σε σχέση με τις φιλτρομονάδες και τα φιλτροσιλό αλλά μειονεκτεί λόγω μικρής απόδοσης φιλτραρίσματος. Οι κυκλώνες προτιμούνται σαν λύση μόνο σε περιπτώσεις που απαιτείται προφιλτάρημα του υλικού για την αποφυγή της φθοράς των φίλτρων.

Τα θετικά του κυκλώνα είναι τα ακόλουθα:

- Χαμηλής αντίστασης ή πτώση πίεσης
- Χαμηλό κόστος συντήρησης
- Πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας
- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης.

Ενας κυκλώνας αποτελείται από

- Αριστερόστροφο ή δεξιόστροφο μορφολογία
- - Ειδικών διαστάσεων κατά παραγγελία.
- - Από χαλυβδόελασμα st37, γαλβανιζέ ή INOX.
- - Με σύρτη εκκένωσης .
- - Με στόμια εισόδου – εξόδου ορθογώνια ή κυκλικά
- - Σε συνδυασμό με φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες τύπου μεταφοράς υλικού στην αναρρόφηση ή μέσης και
- υψηλής πίεσης στην κατάθλιψη
- - Με ενσωματωμένο φυγοκεντρικό ανεμιστήρα στο

- καπέλο
- - Με ποδαρικά στήριξης.
- - Με δοχείο συλλογής
- - Ζεύγη αριστερόστροφων –δεξιόστροφων ή και
- πολυκυκλώνια για μεγαλύτερες παροχές .
- Επίσης συνδυάζονται με μονάδα σακκόφιλτρων τύπου FI
- στην έξοδο, για κατακράτηση της σκόνης

### 3.2 ΣΩΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΚΛΩΝΩΝ

Τα βασικά κριτήρια για την καλή λειτουργία ενός κυκλώνα είναι τα ακόλουθα:

Ο **βαθμός απόδοσης** (καθαρισμού), που θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερος και που εξαρτάται με τη σειρά του από το μέγεθος  $d$  και την πυκνότητα  $\rho_s$  των σωματιδίων, από την πυκνότητα  $\rho_f$  και το ιξώδες ( $\eta$ ) του ρευστού, από τον ιδιαίτερο τύπο και τις γεωμετρικές διαστάσεις του κυκλώνα και από την (εφαπτομενική) ταχύτητα του ρευστού  $u$  (που αναφέρεται στην είσοδο του κυκλώνα). Όπως φαίνεται και από τον ορισμό του συντελεστή διαχωρισμού:  $f : R \propto u^2$  ο βαθμός απόδοσης του κυκλώνα, δηλαδή ο καλύτερος διαχωρισμός των στερεών από το ρευστό, αναμένεται να αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας  $u$  και με την ελάττωση της ακτίνας  $R$  του κυλινδρικού τμήματος του κυκλώνα.

Για δεδομένη όμως ταχύτητα εισόδου και ρυθμό παροχής του ρευστού, μία μέτρια αύξηση στη διάμετρο και στο μήκος του κυκλώνα θα βελτιώσει την απόδοση συλλογής των στερεών, καθώς η επιτυγχανόμενη αύξηση στο εμβαδό της επιφάνειας, θα αντισταθμίζει επαρκώς τη μειωμένη φυγόκεντρη δύναμη.



Σχήμα 3.2.α(αεροκυκλώνες)

Η απόδοση ενός κυκλώνα προβλέπεται από εμπειρικές εξισώσεις, καθώς ο προσδιορισμός των επιμέρους τροχιών των σωματιδίων είναι δύσκολος. Όσο μειώνεται επίσης το μέγεθος του σωματιδίου, τόσο ελαττώνεται η ακτινική ταχύτητά του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση συλλογής του κυκλώνα για τα σωματίδια αυτά. Επιπλέον, η ολική απόδοση είναι συνάρτηση της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων της τροφοδοσίας και δεν μπορεί να προβλεφθεί μόνον από το μέσο μέγεθός τους, που συνήθως λαμβάνεται υπόψη.

Η απόδοση συλλογής ενός (αερο)κυκλώνα αυξάνεται με την *πυκνότητα* των στερεών, ενώ ελαττώνεται με την αύξηση της *θερμοκρασίας* του αερίου, λόγω της αύξησης του ιξώδους του. Εξαρτάται επίσης από το ρυθμό ροής του αερίου και είναι μία από τις λίγες συσκευές διαχωρισμού, που μπορούν να λειτουργούν καλύτερα με πλήρες φορτίο, παρά με μερικό.

Η **υδραυλική πτώση πίεσης** ( $\Delta P$ , αντίσταση), που πρέπει να είναι κατά το δυνατό μικρότερη. Κύριες αιτίες της πτώσης πίεσης στον κυκλώνα είναι οι αντιστάσεις στην είσοδο, οι τριβές στον κυκλώνα, η αλλαγή (κατά  $180^\circ$ ) της κατεύθυνσης του ρεύματος του ρευστού από την εξωτερική ζώνη στην εσωτερική και οι τριβές στον αγωγό εξόδου. Η πτώση πίεσης είναι ανάλογη της πυκνότητας του αερίου και του τετραγώνου της ταχύτητας εισόδου, ενώ δεν εξαρτάται από την πυκνότητα των στερεών σωματιδίων. Επιπλέον, μειώνεται λίγο, όταν αυξάνεται η συγκέντρωση των στερεών, γεγονός μη-αναμενόμενο.

Σημειώνεται επίσης, ότι η ταχύτητα  $u$  του ρευστού, που η αύξησή της βρέθηκε ότι ευνοεί την απόδοση του κυκλώνα, δεν θα πρέπει να αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό, γιατί μπορεί να επιφέρει σημαντική πτώση πίεσης. Για έναν αεροκυκλώνα με διάμετρο 0,3 m, που λειτουργεί



με εφαπτομενική ταχύτητα αερίου 15 m/s, ο συντελεστής διαχωρισμού παίρνει την τιμή 155. Ένας κυκλώνας με μεγαλύτερη διάμετρο θα παρουσιάζει για την ίδια ταχύτητα πολύ μικρότερο συντελεστή διαχωρισμού, ενώ ταχύτητες πάνω από 20 m/s δεν έχουν πρακτική εφαρμογή, εξαιτίας της υψηλής πτώσης πίεσης που προκαλούν και των αυξημένων φθορών λόγω τριβής.

Για το λόγο αυτό, στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις με μεγάλη δυναμικότητα (δηλαδή Υψηλή ογκομετρική παροχή) είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται πολλαπλοί κυκλώνες (ή συστοιχίες κυκλώνων) με μικρή διάμετρο, που να λειτουργούν παράλληλα, παρά ένας-δύο κυκλώνες με μεγάλη διάμετρο. Επίσης, ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι κυκλώνες σε σειρά, με σκοπό να επιτευχθεί πληρέστερη απομάκρυνση των στερεών, αν και η απόδοση της δεύτερης μονάδος θα είναι μικρότερη σε σχέση με την πρώτη, επειδή η τροφοδοσία της θα περιέχει σωματίδια με πολύ μικρότερο μέσο μέγεθος. Σημειώνεται επίσης, ότι στην περίπτωση των αεροκυκλώνων, οι ανεμιστήρες διακίνησης των αερίων θα πρέπει να τοποθετούνται μετά τον κυκλώνα, ώστε τα αέρια που διέρχονται από αυτούς να είναι σχετικώς καθαρά.



Σχήμα 3.2.β:(μονός κυκλώνας)

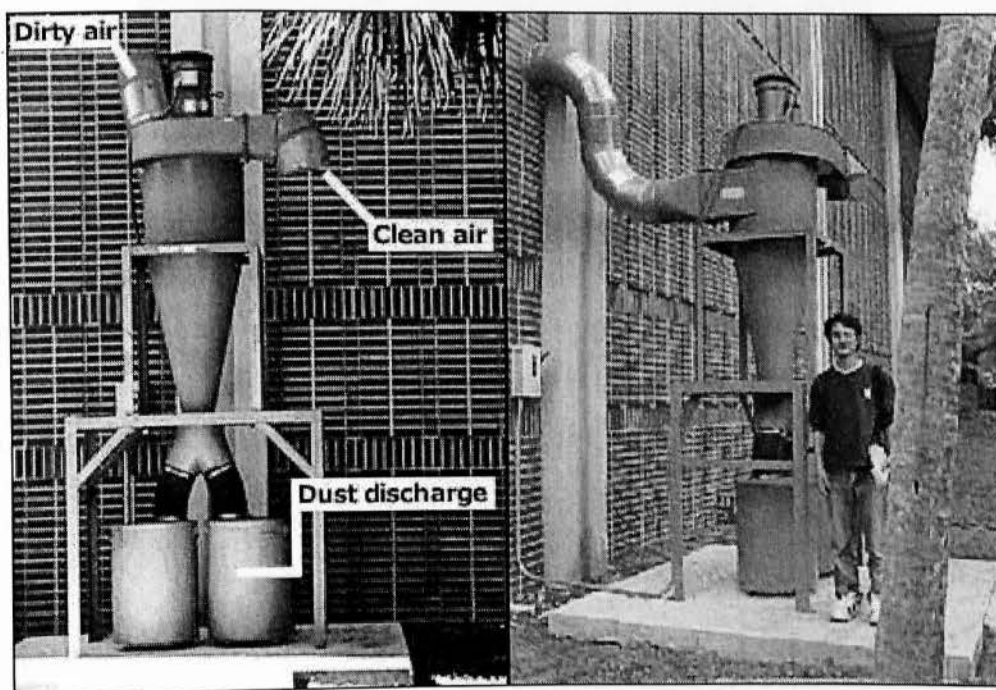
### 3.3 ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΩΝΩΝ

Χρησιμοποιούνται από τα ακόλουθα επαγγέλματα των:

- **Μηχανικών Περιβάλλοντος** για να αφαιρέσουν τους σωματιδιακούς ρύπους.
- **Χημικών Μηχανικών και Μηχανολόγων Μηχανικών** για τη συλλογή πολύτιμων προϊόντων σωματιδίων.
- **Βιομηχανικών υγιεινολόγων** για να ελέγχουν τα σωματίδια στο περιβάλλον εργασίας.
- **Φαρμακευτικών** για να παράγουν σε σκόνη τα φάρμακά τους.

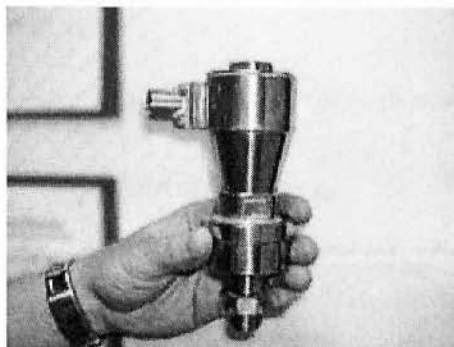
Μπορούν να εντοπιστούν κυκλώνες εύκολα στη βιομηχανία των προϊόντων ξυλείας, τα ελαιοτριβεία, εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου, και άλλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Καθώς η λειτουργία τους είναι ένα από τα λιγότερο ακριβά για την αφαίρεση / συλλογή σχετικά μεγάλα σωματίδια, έχουν επίσης συχνά χρησιμοποιείται ως συσκευή προεπεξεργασίας να μειώσει το φορτίο των λεπτών συσκευών συλλογής σωματιδίων.

Οι φωτογραφίες του Σχήματος 3.3.α δείχνουν κυκλώνες που βρίσκονται στην τοποθεσία Constance Θέατρο στο Πανεπιστήμιο της Φλόριντα. Από την αριστερή εικόνα μπορείτε να δείτε όπου ο βρώμικος αέρας έρχεται, η σκόνη έχει αποφορτιστεί και ο καθαρός αέρας αποβάλλεται.



Σχήμα 3.3.α: Τύποι κυκλώνα





Σχήμα 3.3.β: Κυκλώνας πολύ μικρού μεγέθους

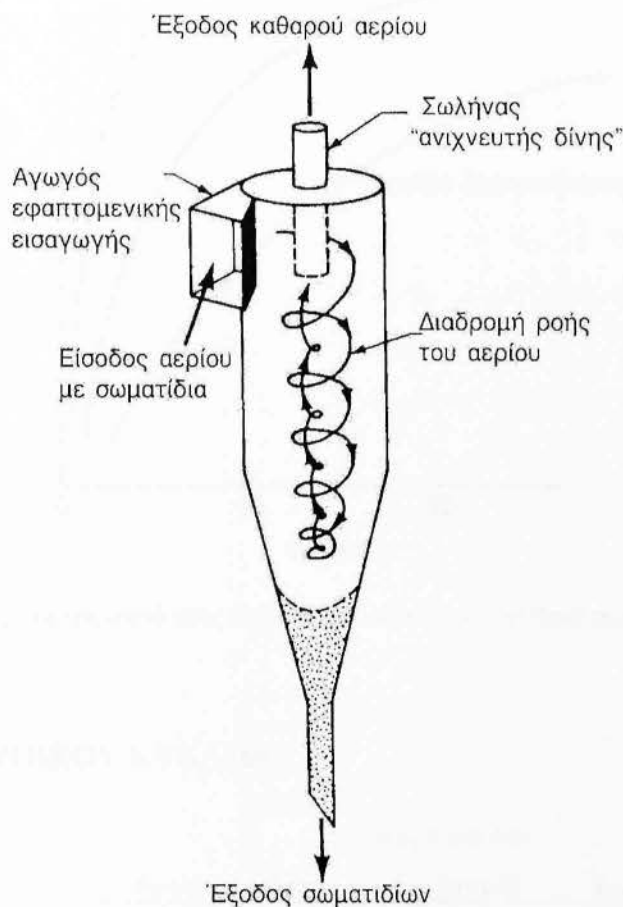


Σχήμα 3.3.γ: Εγκατάσταση πολυκυκλώνων σε ένα εργοστάσιο ξυλείας

Στο Σχήμα 3.3β βλέπουμε ένα κυκλώνα για στοίβαγμα δειγματοληψίας. Σε σύγκριση με τον κυκλώνα στη Constance Θέατρο, αυτό κυκλώνα είναι αρκετά μικρό. Ο κυκλώνας που χρησιμοποιείται από υγειονόμους είναι παρόμοια σε σχήμα, αλλά ακόμα πιο συμπαγής, έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί στο πουκάμισό του εργαζομένου για τη δειγματοληψία σε αερολύματα στο χώρο εργασίας.

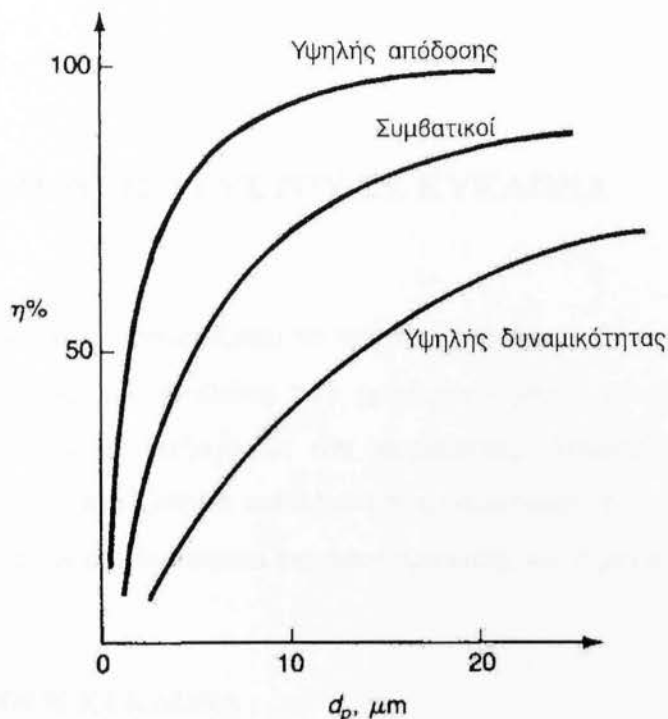
### 3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΚΛΩΝΩΝ

Στο Σχήμα 3.4α φαίνεται το διάγραμμα ροής ενός τυπικού κυκλώνα.



Σχήμα 3.4.α: Διάγραμμα ροής ενός τυπικού κυκλώνα

Ο βρώμικος αέρας εισέρχεται με μεγάλη ταχύτητα στην είσοδο του κυκλώνα (πάνω αριστερά), έπειτα στροβιλίζει προς τα κάτω στα τοιχώματα του κυκλώνα λόγω φυγόκεντρης δύναμης. Εκεί τα στερεά σωματίδια που έχει μαζί του συγκρούονται στα τοιχώματα του κυκλώνα και πέφτουν προς τα κάτω λόγω βάρους στην έξοδο των σωματιδίων, όπου και συλέγονται. Ο πλέον καθαρός αέρας στροβιλίζει προς τα πάνω και βγαίνει από την έξοδο στο περιβάλλον.



Σχήμα 3.4.β: Γενική σχέση της απόδοσης συλλογής έναντι του μεγέθους σωματιδίου για κυκλώνες

### 3.5 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ

	Τύπος Κυκλώνα					
	Υψηλής Απόδοσης		Συμβατικός		Υψηλής Δυναμικότητας	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Διάμετρος Σώματος $D/D$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ύψος Στομίου Εισόδου $H/D$	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Πλάτος Στομίου Εισόδου $W/D$	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Διάμετρος Εξόδου Αερίου $D_e/D$	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Μήκος Ανιχνευτή Δίνης $S/D$	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Μήκος Σώματος $L_b/D$	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Μήκος Κώνου $L_c/D$	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Διάμ. Εξόδου Σωματιδίων $D_d/D$	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

Οι στήλες (1) και (5) προσαρμόστηκαν από τον Stairmand, 1951· οι στήλες (2), (4) και (6) προσαρμόστηκαν από τον Swift, 1969· η στήλη (3) προσαρμόστηκε από τον Lapple, 1951.

Σχήμα 3.5: Διαστάσεις τυπικού κυκλώνα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΡΕΥΣΤΟΥ ΣΕ ΚΥΚΛΩΝΑ

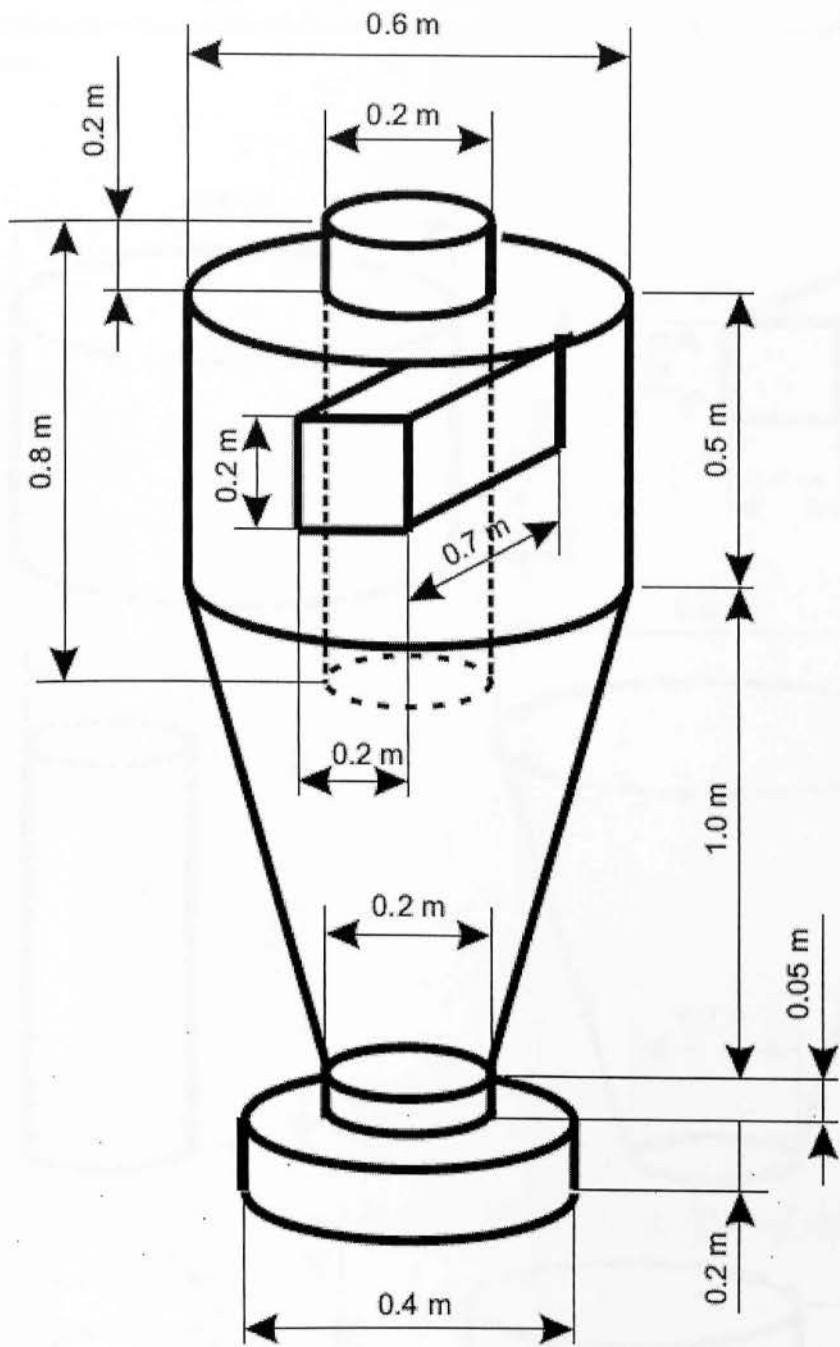
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πείραμα στο οποίο βασίστηκε η προσομοίωση. Αναλύεται η γεωμετρία του κυκλώνα που χρησιμοποιήθηκε, η προετοιμασία που έγινε καθώς και οι περιπτώσεις διεξαγωγής του πειράματος. Αναφέρεται η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο Gambit καθώς και η προσομοίωση του πειράματος στο Fluent. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η μεταξύ τους σύγκριση.

#### 4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΝΑ

Η προσομοίωση του κυκλώνα βασίστηκε σε δεδομένα που πάρθηκαν από το Fluent tutorials Gabriel Wecel, 30th March 2009 (Cyclone). Σκοπός της πτυχιακής αυτής ήταν να μελετηθεί η ροή του ρευστού και των στερεών σωματιδίων καθώς και ο διαχωρισμός τους, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού και τη μάζας των σωματιδίων. Γενικότερα όμως θα λέγαμε ότι στόχος της παρούσας εργασίας είναι να βελτιωθεί η κατανόηση των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή ρευστού σε κυκλώνα και τα αποτελέσματα της διασποράς των σωματιδίων.

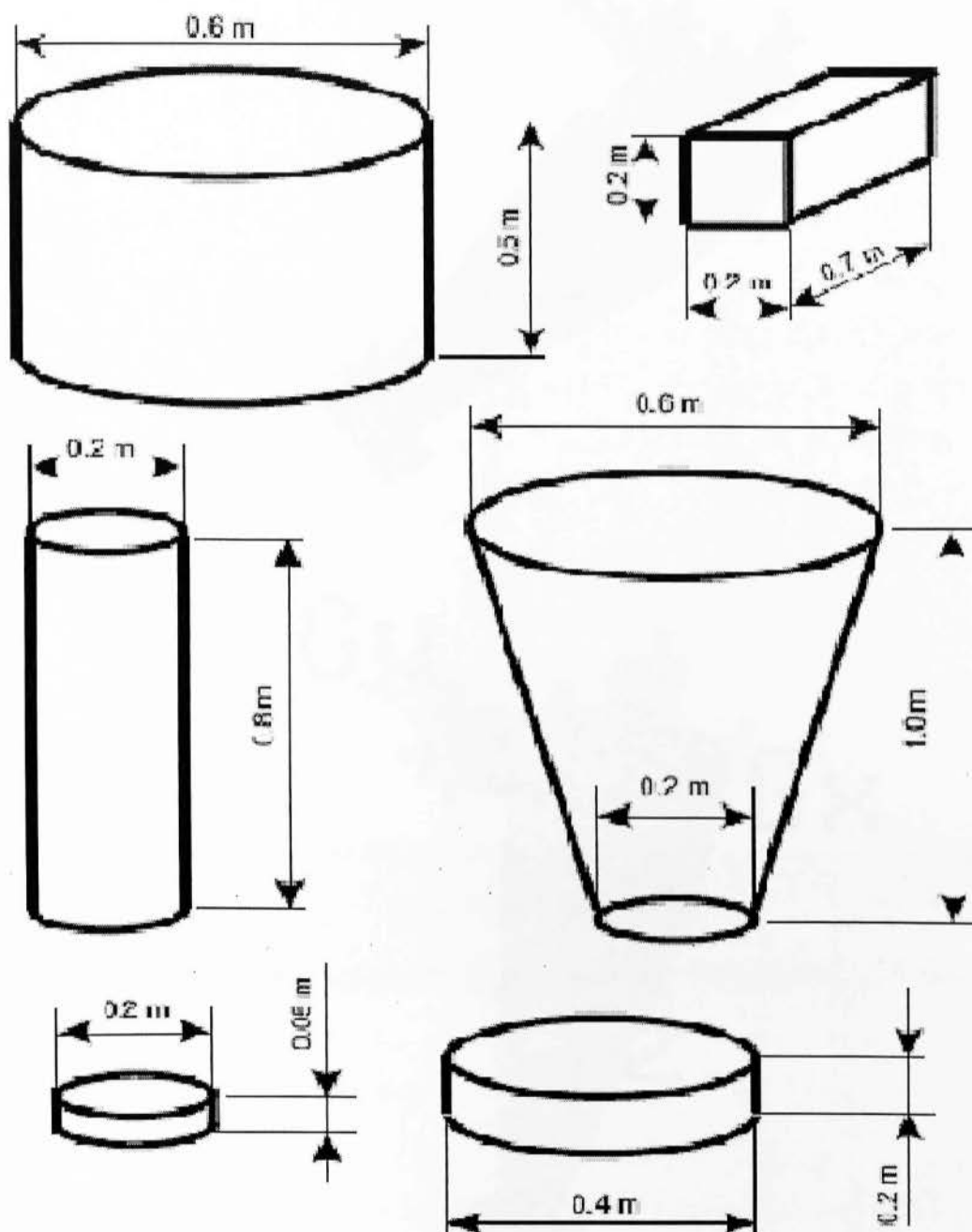
#### 4.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ GAMBIT

Για την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα. Στην αρχή έγινε η επιλογή λύτη που ήταν ο FLUENT 5/6. Κατόπιν κατασκευάστηκε η γεωμετρία του κυκλώνα με συγκεκριμένες διαστάσεις, από το Fluent tutorials Gabriel Wecel, 30th March 2009 (Cyclone), όπως μπορείτε να δείτε και βάση των παρακάτω σχημάτων.



Σχήμα 4.2.α Διαστάσεις κυκλώνα – Τελική μορφή

Στο παρακάτω σχήμα: 4.2.β , μπορούμε να διακρίνουμε τα πρωτογενή και μεμονομένα σχήματα – κομμάτια κυκλώνα, πριν την ενοποίηση τους και την ολοκληρωτική δημιουργία του.



Σχήμα: 4.2.β Πρωτογενή σχήματα κυκλώνα



Σχήμα 4.2.γ Κατασκευή γεωμετρίας και πλέγματος κυκλώνα στο Gambit

### 4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΣΤΟ FLUENT

- Αρχικά ξεκινάμε επιλέγοντας τρισδιάστατη προσομοίωση διπλάσιας ακρίβειας (*3ddp*)
- Ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά αρχικά εισάγουμε το αρχείο με τα δεδομένα από το Gambit, μέσω της εντολής File → Read → Case.
- Καθορίζουμε την κλίμακα του μοντέλου μας από την εντολή Grid → scale → και επιλέγουμε την μονάδα μήκους στην οποία έχουμε σχεδιάσει το πρόβλημα μας στο Gambit.
- Στη συνέχεια επιλέγουμε το μαθηματικό μοντέλο που θέλουμε να τρέξουμε από την εντολή Define → Model → Viscous → μαθηματικό μοντέλο

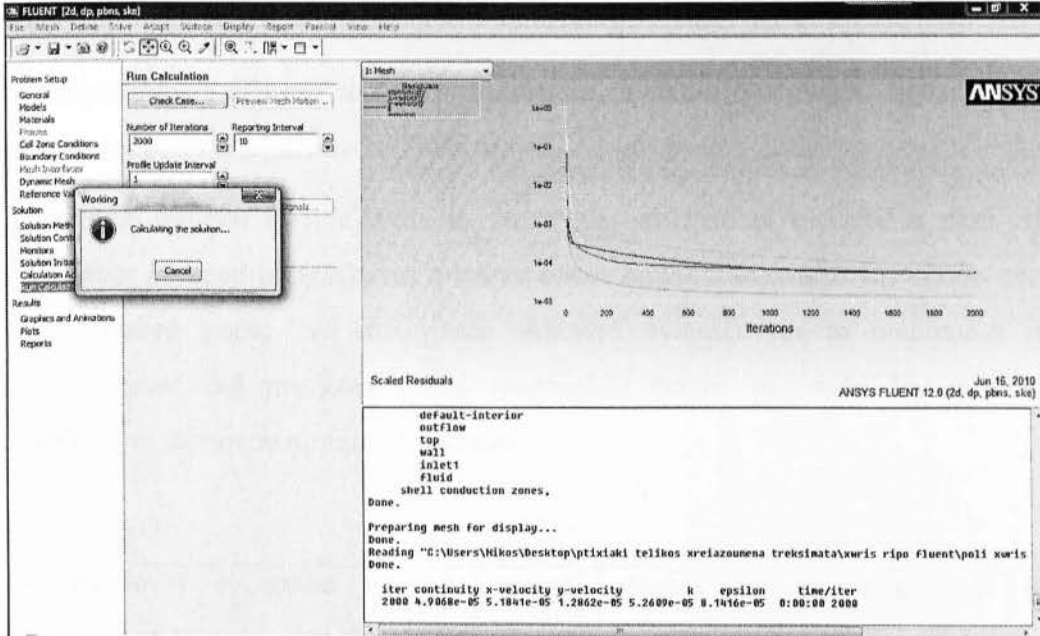
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το *standard k-ε*, το οποίο είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο που βασίζεται σε εξισώσεις για την τυρβώδη κινητική ενέργεια ( $k$ ) και το ποσοστό διάχυσης της ( $\varepsilon$ ). Όταν δημιουργήθηκε το μοντέλο, θεωρήθηκε ότι η ροή είναι πλήρως τυρβώδης και οι επιπτώσεις του μοριακού ιξώδους είναι αμελητέες και επομένως ισχύει μόνο για την πλήρη τυρβώδη ροή.

- Έπειτα εισάγουμε την ταχύτητα του ανέμου από το μενού Define → Boundary Conditions → Velocity
- Μετά επιλέγουμε τις αρχικές συνθήκες που θέλουμε να ξεκινήσει το πείραμα μας από την εντολή Solve → Control → Solution εμείς θέσαμε το momentum στο 0,5. Εδώ επιπλέον επιλέγονται και τα σχήματα διακριτοποίησης
- Έπειτα ρυθμίζω το πρόγραμμα για έναρξη λειτουργίας μέσω του Solve → Initialize → Init
- Μετά επιλέγουμε να οπτικοποιήσουμε τα δεδομένα μας και την ακρίβεια της λύσης που θέλουμε να έχουμε μέσω της εντολής Solve → Monitors → Residuals
- Και τέλος επιλέγουμε πόσες επαναλήψεις θέλουμε να γίνουν μέσω της εντολής Solve → Iterate και δίνοντας ένα αρχικό νούμερο.

Επίσης ρυθμίστηκε ο αριθμός επανάληψης, η συνέχεια, η ακρίβεια της ταχύτητας κατά τον άξονα  $x$ , η ακρίβεια της ταχύτητας κατά τον άξονα  $y$ , η ακρίβεια της ταχύτητας κατά τον άξονα  $z$ , η ακρίβεια της εξίσωσης  $k$ , η ακρίβεια της εξίσωσης  $\varepsilon$ , η ακρίβεια της μάζας και του όγκου του αέρα και ο χρόνος ανά επανάληψη.



Στο παρακάτω σχήμα: 4.3 μπορούμε να διακρίνουμε το κεντρικό μενού διαχείρισης λειτουργιών στο Fluent



Σχήμα: 4.3 Γραφική απεικόνιση του χρήστη στο Fluent

#### 4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Trapped=ονομάζονται τα παγιδευμένα σωματίδια, τα οποία συλλέχτηκαν στο ash hopper(τέφρα χοάνης)

Escaped=ονομάζονται τα σωματίδια, τα οποία δραπέτευσαν απο το outlet(έξοδος)

Aborted=ονομάζονται τα ακυρωμένα σωματίδια,τα οποία δεν εντοπίστηκαν από τον λύτη

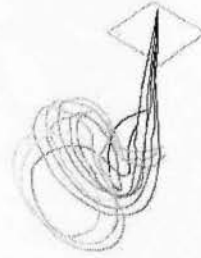
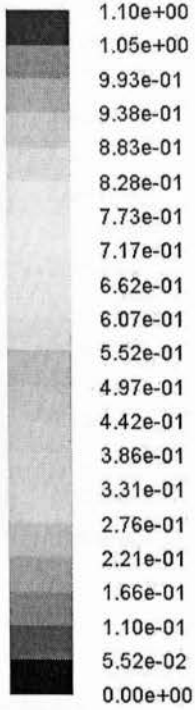
Incomplete=ονομάζονται τα ατελή σωματίδια τα οποία δεν ανιχνεύτηκαν λόγω ανεπαρκούς μέγιστου αριθμού βημάτων

Συνοπτικά trapped ονομάζονται τα επιτυχώς συλεγμένα σωματίδια στην τέφρα χοάνης ,αντιθέτως escaped ονομάζονται αυτά τα οποία δραπέτευσαν από την έξοδο στο πάνω μέρος του κυκλώνα χωρίς να συλεχθούν. Aborted ονομάζονται τα σωματίδια τα οποία δεν εντοπίστηκαν από τον λύτη , ενώ incomplete εκείνα τα οποία δεν ανιχνεύτηκαν λόγω ανεπαρκούς μέγιστου αριθμού βημάτων.

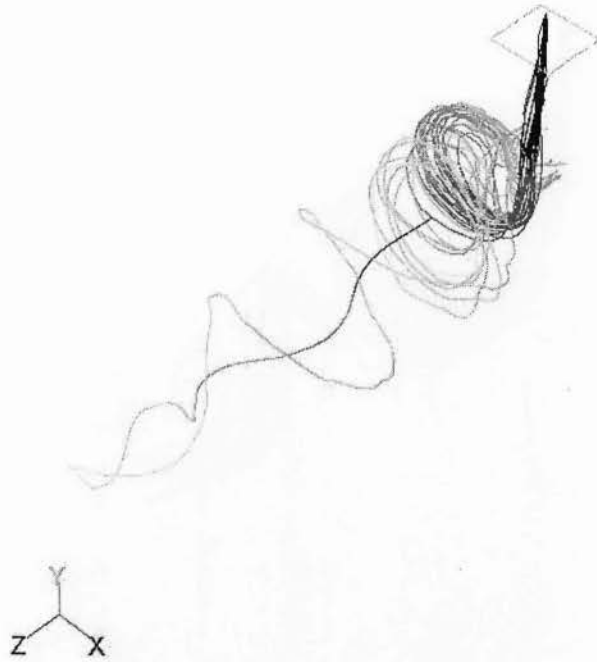
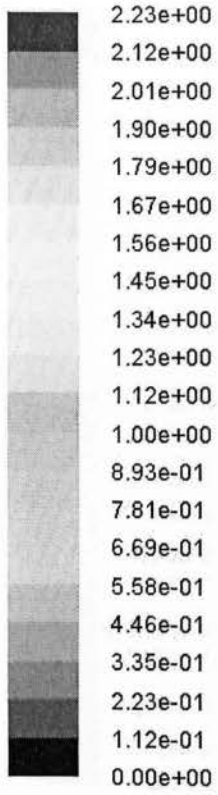
ταχύτητα(m/s)	σωματίδια	tracked	escaped	aborted	trapped	evaporated	incomplete
5	5	5	5	0	0	0	0
5	20	20	18	0	0	0	2
5	100	100	80	0	0	0	20
7.98	5	5	3	0	0	0	2
7.98	20	20	13	0	3	0	4
7.98	100	100	76	0	3	0	21
10	5	5	4	0	0	0	1
10	20	20	13	0	0	0	7
10	100	100	79	0	1	0	20
15	5	5	5	0	0	0	0
15	20	20	15	0	1	0	4
15	100	100	77	0	4	0	19

Πίνακας αποτελεσμάτων 4.4

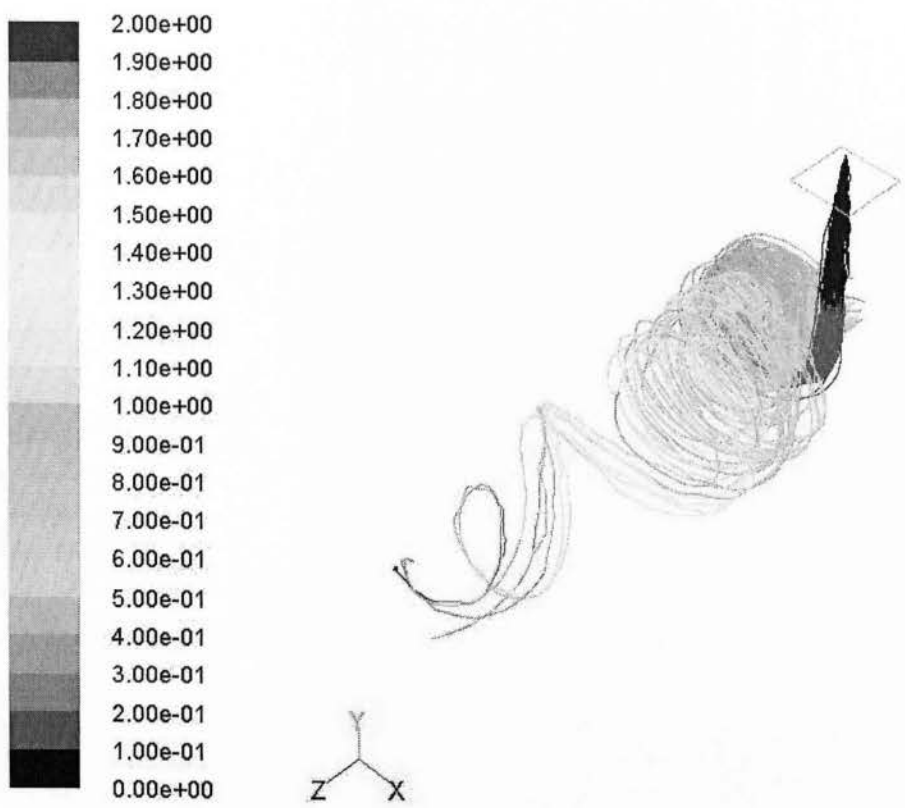
Διαγράμματα ροής αέρα στην είσοδο



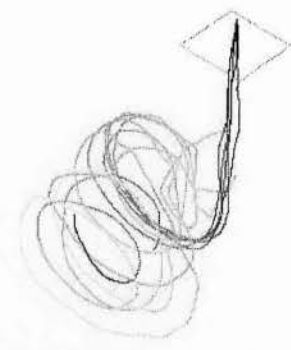
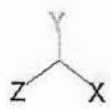
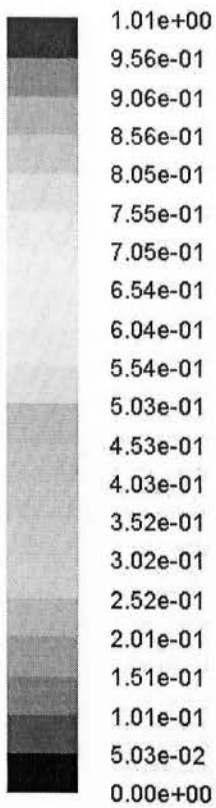
(5 m/s) 5 injections



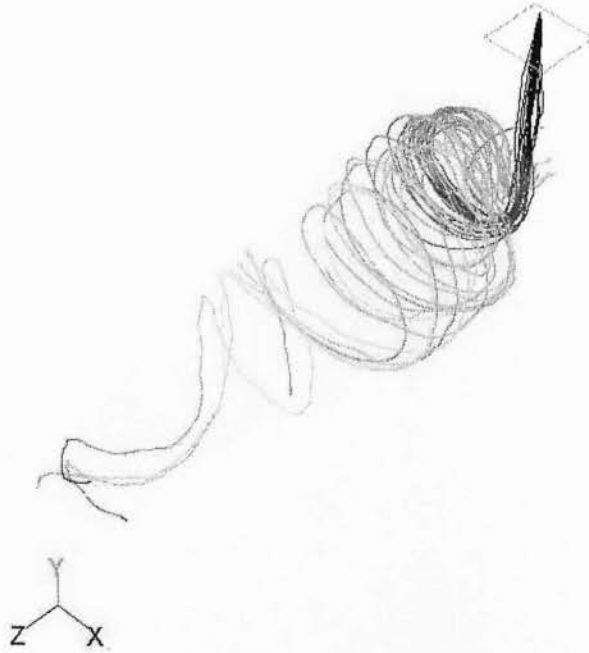
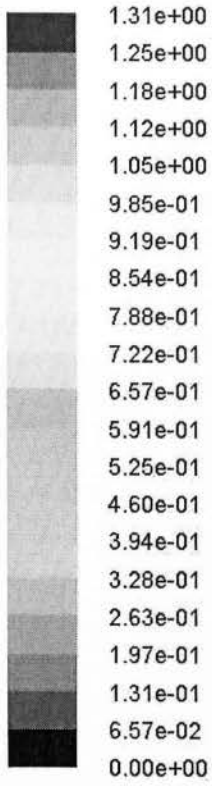
(5 m/s) 20 injections



**(5 m/s) 100 injections**

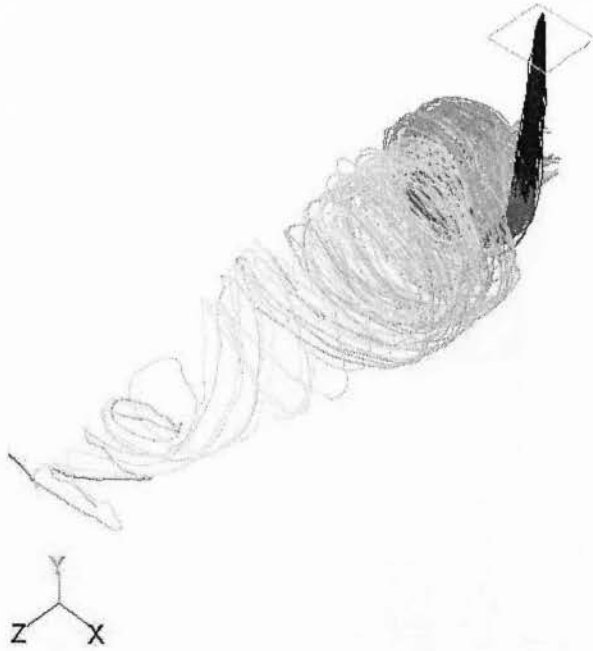
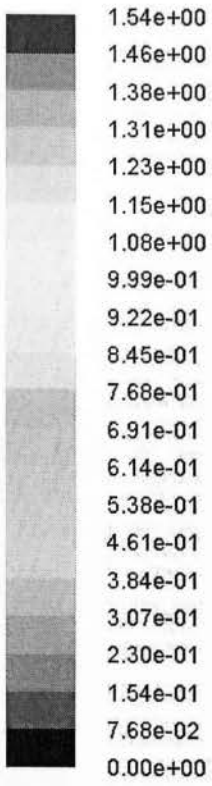


(7.98 m/s) 5 injections

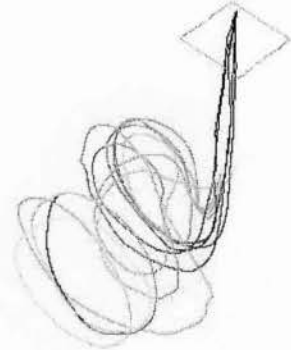
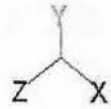
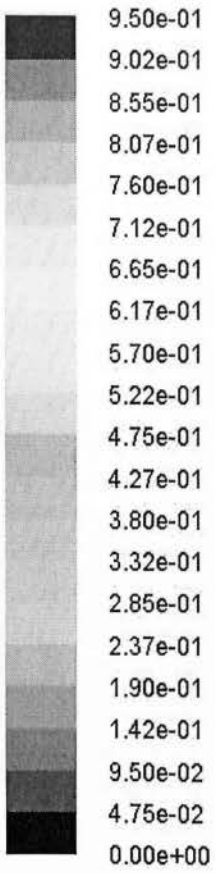


(7.98 m/s) 20 injections

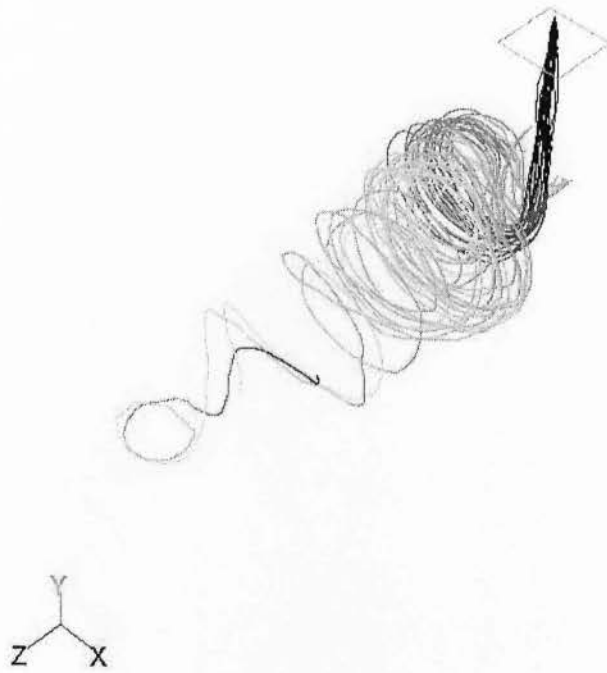
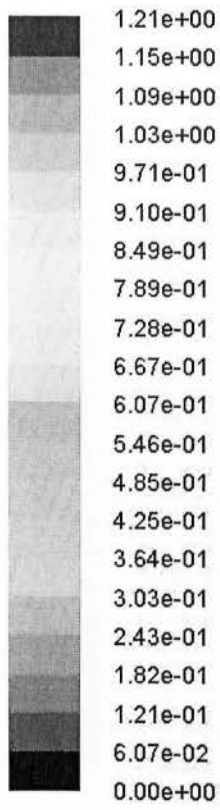




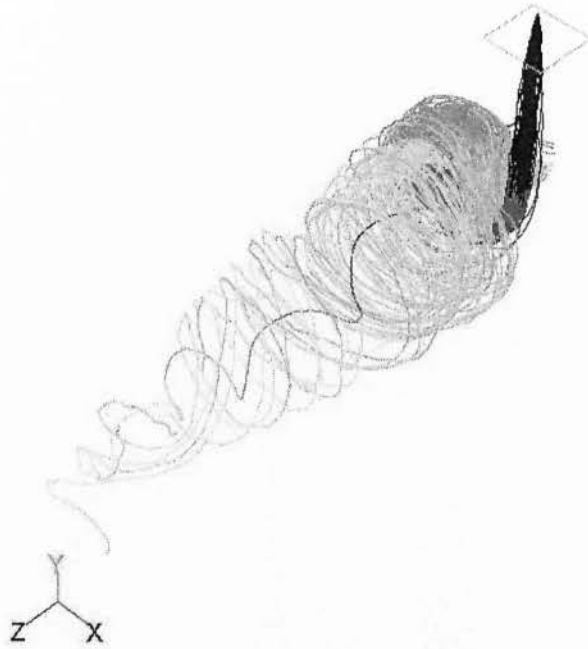
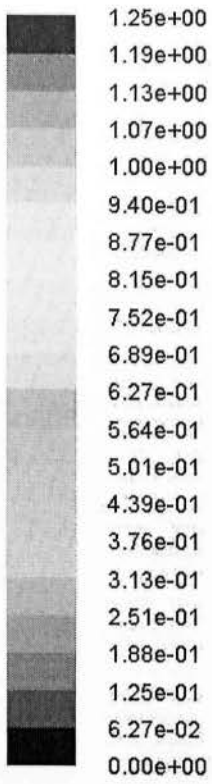
(7.98 m/s) 100 injections



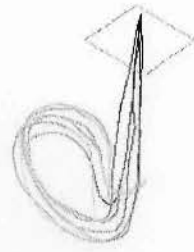
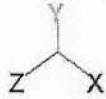
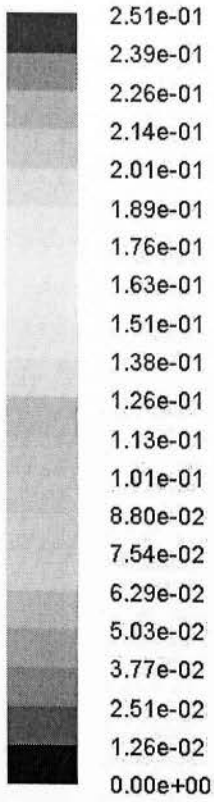
**(10 m/s) 5 injections**



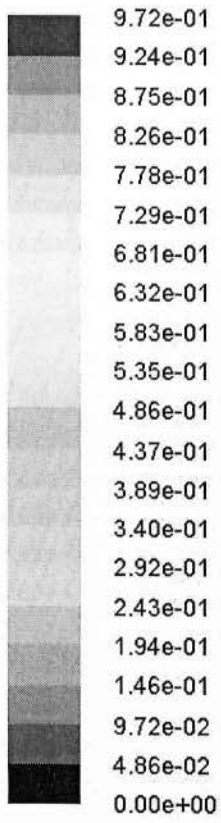
(10 m/s) 20 injections



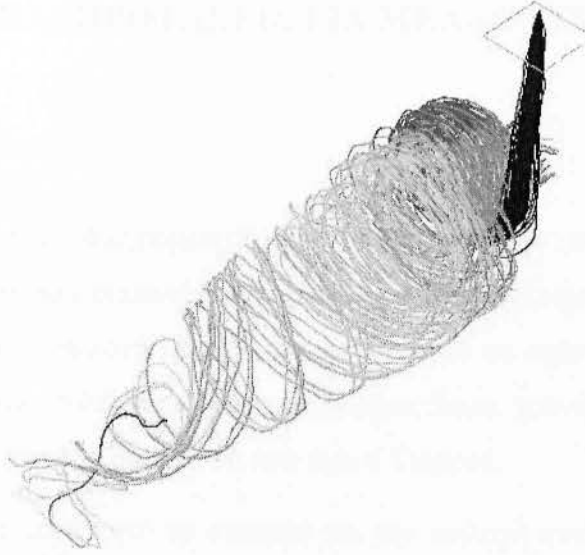
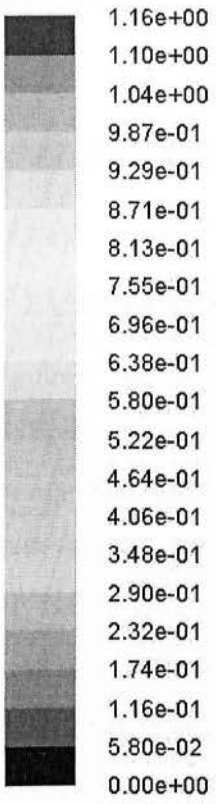
(10 m/s) 100 injections



(15 m/s) 5 injections



**(15 m/s) 20 injections**



(15 m/s) 100 injections



### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

#### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας πάντα γνώμονα τα διαγράμματα που προέκυψαν από την εργασία μας στο FLUENT και τα δαιδομένα που διατυπώθηκαν στο πίνακα αποτελεσμάτων προσομοίωσης, καταλήγουμε ότι η καλύτερη επιλογή που έχουμε να κάνουμε σε σχέση με τα περισσότερα παγιδευμένα σωματίδια που συλλέγονται στο ash hopper(τέφρα χοάνης) “ Trapped”,είναι εκείνη με ταχύτητα 15 m/s και 100 σωματίδια που έχει 4 Trapped.

Αλλά επειδή δεν αρκεί μόνο αυτό το στοιχείο για την επιλογή κυκλώνα με το βέλτιστο ποσοστό επιτυχίας, διότι έχει να λάβει μέρος και το ποσοστό αποτυχίας με τα σωματίδια τα οποία δραπετεύουν απο το κύκλωνα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω αναλυτικά:

Όσον αφορά την ταχύτητα 5m/s διαπιστώνουμε ότι έχουμε την χειρότερη λειτουργία του κυκλώνα στα 5 σωματίδια αντι στα 20 και στα 100,με αντίστοιχο ποσοστό αποτυχίας 100%, 90% και 80%. Αυτό φαίνεται στον πίνακα στην στήλη των “escaped” (τα σωματίδια τα οποία κατάφεραν να δραπετεύσουν από την έξοδο). Με γνώμονα ότι το συνολικό βάρος των σωματιδίων είναι το ίδιο πάντα καταλείγουμε οτι στην μικρή ταχύτητα δηλαδή στην 5m/s ο κυκλώνας συμπεριφέρεται καλύτερα με τα ελαφρύτερα σωματίδια δηλαδή με τα 100 σωματίδια.

Στην ταχύτητα 7.98 m/s διαπιστώνουμε οτι στα 5 σωματίδια έχουμε ποσοστό αποτυχίας 60% αφού πέρασαν 3 από τα 5 σωματίδια , στα 20 σωματίδια 65 % αφού πέρασαν 13 από τα 20 και στα 100 σωματίδια 76% επειδή πέρασαν 76 από τα 100 σωματίδια άρα διαπιστώνουμε ότι σαυτήν την ταχύτητα ο κυκλώνας λειτουργεί καλύτερα με τα βαριά και λίγα σωματίδια δηλαδή με τα 5.

Όσον αφορά την ταχύτητα 10 m/s παρατηρούμε ότι στα 5 σωματίδια έχουμε 80%, στα 20 σωματίδια 65% και στα 100 σωματίδια έχουμε 79 % ποσοστό αποτυχίας,άρα καταλείγουμε στο συμπέρασμα ότι ο κυκλώνας, για τη συγκεκριμένη ταχύτητα συμπεριφέρεται καλύτερα στα 20 σωματίδια.

Τέλος όσον αφορά την ταχύτητα των 15 m/s στα 5 σωματίδια έχουμε 100 % ,στα 20 σωματίδια έχουμε 75 % και στα 100 σωματίδια έχουμε 77 % ποσοστό αποτυχίας. Άρα καταλείγουμε στο συμπέρασμα ότι και σ'αυτήν την ταχύτητα ο κυκλώνας συμπεριφέρεται καλύτερα στα 20 σωματίδια.

Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη επιλογή που μπορούμε να κάνουμε σε σχέση με την ταχύτητα – πλήθος σωματιδίων – τα σωματίδια που δραπετεύουν (escaped), είναι αυτή των 7.98 m/s και 5 σωματιδίων, γιατί έχουμε το μικρότερο ποσοστό σωματιδίων που δραπετεύουν της τάξεως 60%, αλλά σε αυτή τη περίπτωση δεν έχουμε κανένα σωματίδιο που να συλλέγεται στο ash hopper (τέφρα χοάνης) " Trapped".

Οπότε καταλείγουμε στο συμπέρασμα, ότι για την ορθολογικότερη, σωστή και με το μέγιστο βαθμό απόδοσης λειτουργία κυκλώνα, είναι εκείνη σε συνεργασία με το μέγιστο αριθμό "Trapped", αλλά και με τον ελάχιστο αριθμό "escaped", αυτή είναι εκείνη με ταχύτητα 7.98 m/s και αριθμο σωματιδίων 20 "trapped", η οποία έχει 3 "trapped"

και σχετικά μικρό ποσοστό 65 % "escaped" αφού δραπέτευσαν μόλις 13 από τα 20 σωματίδια. Επίσης έχει πολύ μικρό ποσοστό "Incomplete" (ατελή σωματίδια τα οποία δεν ανιχνεύτηκαν λόγω ανεπαρκούς μέγιστου αριθμού βημάτων) μόλις 20%, το οποίο θεωρείται αναλογικά προστιθέμενο στα "trapped" και "escaped", με το πέρασ περισσότερου αριθμού βημάτων.

## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η προσομοίωση της ροής ρευστού και σωματιδίων μέσα σε κυκλώνα έγινε επιτυχώς . Σαν μελλοντική εργασία θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση με ακόμα μεγαλύτερο συνολικό βάρος σωματιδίων και με μικρότερες και μεγαλύτερες ταχύτητες ρευστού, για να παρθούν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα άρα και πιο αξιόλογα συμπεράσματα. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κα διάφοροι μικρότεροι και μεγαλύτεροι κυκλώνες. Τέλος σημαντική θα ήταν μια οικονομοτεχνική μελέτη με την ανάλυση νεός συστήματος φυσικού δροσισμού και της εφαρμογής του ώστε να φανεί η εξοικονόμηση που επιφέρει σε σχέση με άλλα μηχανολογικά φίλτρα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Υπολογιστική Ρευστοδυναμική Γ Μπεργελές.
- Introduction to CFD Basics', Rajesh Bhaskaran – Lance Collins
- Εισαγωγή στην ανάλυση CFD', Fluent Inc – Simtec
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics) (ορισμός CFD)
- [http://thcentral.com/CFDInfo/cfddocuments.htm#journals\\_cfd](http://thcentral.com/CFDInfo/cfddocuments.htm#journals_cfd)(CFD πληροφορίες)
- Introduction to Gambit Training – Gambit 2.2
- Fluent.inc guide
- Simtec /Fluent 6 presentations / lectures
- Simtec /Gambit 2 presentations / lectures
- Stanford/ Fluent 6 presentation / lectures
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclone>
- Σημειώσεις του Δρ. Κωνσταντίνου – Στέφανου Νίκα (Μηχανολόγος Μηχανικός, Καθηγητής Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας ΤΕΙ Πειραιά με εξειδίκευση στην αριθμητική προσομοίωση ρευστομηχανικών και θερμορευστομηχανικών διεργασιών.
- Fluent tutorials Gabriel Wece1, 30th March 2009 (Cyclone
- Πληροφοριες από την εταιρεία κατασκευης κυκλώνων **ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Ε.Β.Ε.Ε.**
- [www.aerodynamiki.gr](http://www.aerodynamiki.gr)
- Τεχνική εταιρια αντιρύπανσηςΚ. ΚΡΕΜΑΛΗΣ & ΣΙΑ Ο.Ε.
- <http://www.techflow.net>