

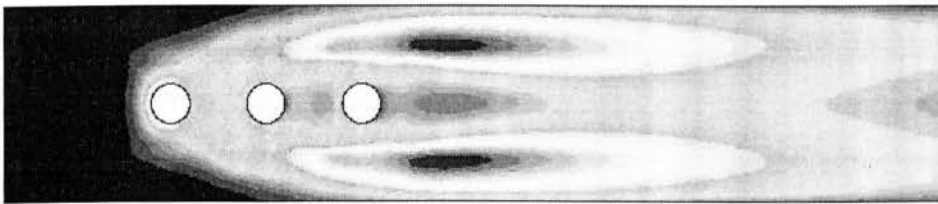
# ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧ/ΓΙΑΣ

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΜΗΧ  
676



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



**ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ:  
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΘΕΡΜΟ-ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ  
ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΑΕΡΑ**

ΟΝΟΜΑ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:

ΤΡΙΚΟΥΠΠΗΣ ΣΤΕΛΙΟΣ-ΛΑΖΑΡΟΣ (Α.Μ.:32823)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ

Πειραιάς, Σεπτέμβριος 2012

# Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>6</b>
<b>ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ.....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>KEY-WORDS.....</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>7</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	<b>9</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CFD.....</b>	<b>9</b>
2.1 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	9
2.2 ΓΙΑΤΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ.....	12
2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	13
2.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD.....	18
2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ CFD.....	19
2.6 CFD ΑΝΑΛΥΣΗ: ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ.....	20
2.6.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	20
2.6.1.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΘΑ ΕΠΙΛΥΘΕΙ (ΧΩΡΟΣ & ΧΡΟΝΟΣ).....	20
2.6.1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	20
2.6.1.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ, ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	21
2.6.1.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	21
2.6.1.5 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	22
2.6.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	22
2.6.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ).....	22

2.6.3.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ).....	23
2.6.3.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ .....	23
2.6.3.3	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ .....	24
2.6.3.4	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ.....	24
2.6.3.5	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΙ ΜΗ, ΡΟΕΣ) .....	25
2.6.3.6	ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	25
2.6.3.7	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	25
2.6.4	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	26
2.6.4.1	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	26
2.6.4.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	26
2.6.4.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SOLVERS) & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ. 27	27
2.6.4.4	ΥΨΗΛΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ...	27
2.7	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ .....	29
2.8	ΦΥΣΙΚΗ.....	29
2.9	ΠΛΕΓΜΑ.....	29
2.10	ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	30
2.11	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ / ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	30
2.12	ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ.....	31
2.13	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	31
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>33</b>
	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ GAMBIT ΚΑΙ FLUENT.....</b>	<b>33</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GAMBIT .....	33
3.2	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ .....	34
3.3	ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ [GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI)]....	34
3.3.1	ΤΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΓΡΑΦΙΚΩΝ .....	34
3.3.2	ΜΕΝΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ .....	35
3.3.3	ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ .....	36
3.3.4	ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ .....	36
3.3.5	ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΟΛΩΝ .....	36
3.4	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ .....	37
3.4.1	ΕΝΤΟΛΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	37

3.4.2	ΕΝΤΟΛΕΣ ΠΡΟΣΩΠΩΝ .....	38
3.4.3	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ .....	39
3.4.4	ΕΝΤΟΛΕΣ ΠΛΕΥΡΩΝ .....	40
3.5	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	41
3.5.1	ΔΙΑΒΑΣΜΑ/ ΜΕΡΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	42
3.5.2	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΛΥΣΗΣ .....	43
3.6	ΕΝΤΟΛΕΣ ΖΩΝΗΣ (ZONE COMMANDS) – ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	44
3.7	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ FLUENT .....	45
3.8	ΠΛΕΓΜΑ – ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ.....	45
3.8.1	ΜΗ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ .....	45
3.8.2	ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ .....	46
3.8.3	ΠΛΕΓΜΑ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	46
3.8.4	ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ.....	46
3.9	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ .....	47
3.10	ΜΕΤ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ .....	48
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>49</b>
	<b>ΔΥΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>49</b>
4.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	49
4.2	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ GAMBIT .....	49
4.2.1	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ .....	49
4.2.2	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ FACE ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ.....	51
4.2.3	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ .....	51
4.2.4	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΙΠΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ .....	53
4.2.5	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΙΩΝ .....	54
4.3	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ FLUENT .....	55
4.3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	55
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>57</b>
5.1	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 <sup>ο</sup> .....	57
5.2	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 <sup>ο</sup> .....	59
5.3	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 <sup>ο</sup> .....	61

5.4	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 <sup>ο</sup> .....	63
5.5	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5 <sup>ο</sup> .....	65
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>67</b>
6.1	ΣΧΟΛΕΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	67
6.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	68
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>69</b>

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό την εκμάθηση στη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων για την επίλυση ρευστοδυναμικών εφαρμογών. Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός εναλλάκτη θερμότητας σε δυσδιάστατο περιβάλλον. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση επιτυγχάνεται με την χρήση λογισμικού πακέτου Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής GAMBIT – FLUENT.

## **ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ**

Εναλλάκτη θερμότητας, Υπολογιστική ρευστοδυναμική, Gambit, Fluent, Μοντελοποίηση, Πλέγμα.

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is to learn to use software for applications associated with mechanics of fluids. The objective of the thesis is to design a heat exchanger in 2D. The design and analysis is accomplished by using Computational Fluid Dynamics software, called GAMBIT – FLUENT.

## **KEY-WORDS**

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

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

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

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

## 1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

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

Στο 2ο 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.

Στο 3ο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα εμπορικό λογισμικό (GAMBIT) με το οποίο κατασκευάσαμε τη γεωμετρία της άσκησης μας, δηλαδή τον εναλλάκτη θερμότητας 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.

Το 4ο κεφάλαιο ουσιαστικά αποτελεί μία πρώτη επαφή με την πειραματική διαδικασία που διεξήχθη σε αυτή την εργασία. Έτσι λοιπόν, γίνεται αναφορά στο προς εξέταση αντικείμενο, το οποίο είναι ένας εναλλάκτη θερμότητας και στη συνέχεια γίνεται λόγος για την λειτουργία του καθώς επίσης και για τα διάφορα είδη αυτού. Η διαδικασία προσομοίωσης χαρακτηριστικών μονοφασικής ροής αέρα σε εναλλάκτη θερμότητας, σε δυσδιάστατο περιβάλλον, με τη βοήθεια των δυο λογισμικών πακέτων (Gambit & Fluent) και επιλέγεται κατόπιν σύγκρισης το καταλληλότερο πλέγμα. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν.

Στο 5ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης χαρακτηριστικών διφασικής ροής σε εναλλάκτη θερμότητας, σε δυσδιάστατο περιβάλλον. Αφού έχει επιλεγεί το καταλληλότερο πλέγμα γίνεται η προσομοίωση διφασικής ροής ζεστού.

Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## 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 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

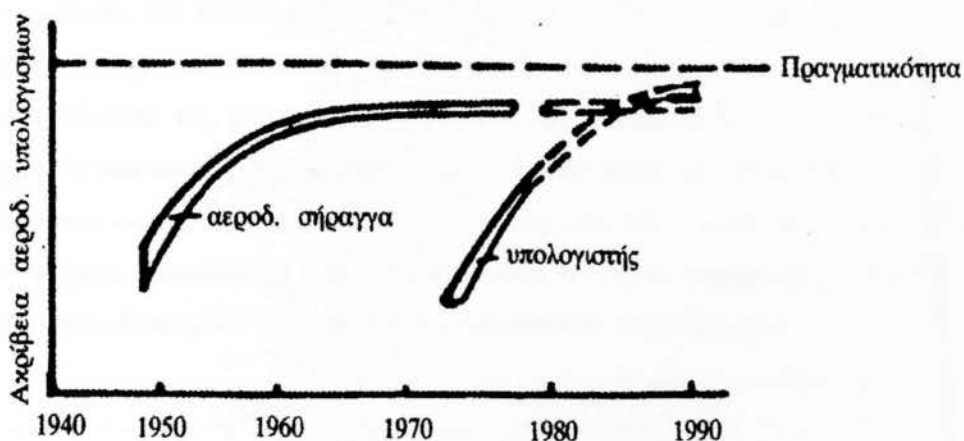
Η ανάπτυξη και η εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία 30 χρόνια είχε αρκετή επίδραση σχεδόν σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, τεχνικό, κοινωνικό, επιστημονικό. Η επίδραση των υπολογιστών στον τομέα της Μηχανικής των Ρευστών υπήρξε αρκετά σημαντική. Μέχρι το τέλος 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 πλατειά χρήση στη μελέτη των αεροδυναμικών φαινομένων μπορεί να θεωρηθεί σαν μηχανισμός ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πεδίο ροής. Συνήθως, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την αεροδυναμική σήραγγα αναφέρονται σε ολοκληρωτικά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως συντελεστής άνωσης, CL και αντίσταση του αεροσκάφους, CD, σπανιότερα δε σε σημειακά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως ταχύτητες και πιέσεις σε διάφορες θέσεις. Σήμερα, η συμμετοχή του ηλεκτρονικού υπολογιστή στη λύση των προβλημάτων της μηχανικής των ρευστών είναι σχεδόν πρωταρχική, σε ορισμένες δε περιπτώσεις οι λύσεις που παρέχει ο ηλεκτρονικός

υπολογιστής είναι αρκετά αξιόπιστες και δεν κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος των αριθμητικών αποτελεσμάτων με μετρήσεις.

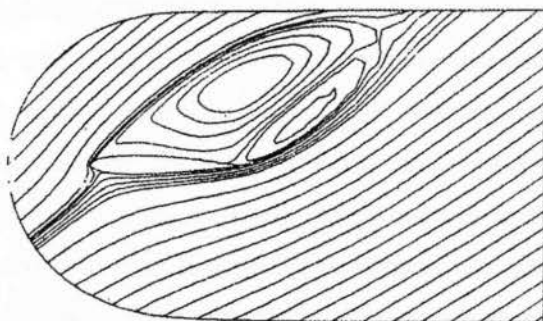
Η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος των μηχανών σε συνδυασμό με την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης φαίνεται, ότι σύντομα θα οδηγήσει στην κατάσταση, όπου η αξιοπιστία των ρευστομηχανικών υπολογισμών να είναι μεγαλύτερη από την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της πειραματικής προσομοίωσης.

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.



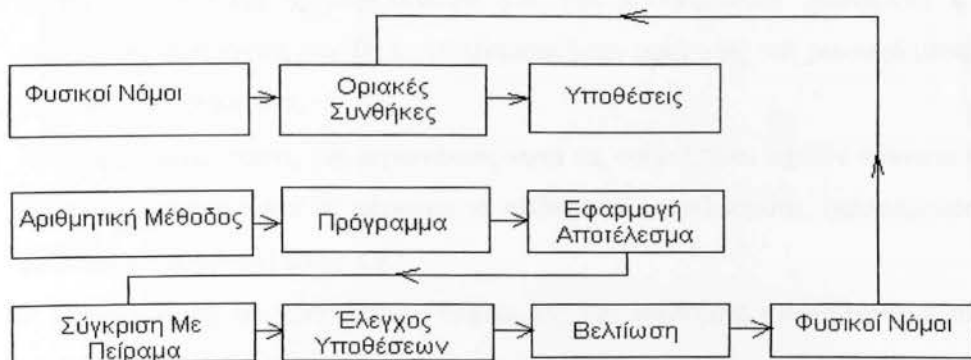
Σχήμα 2.1: Σύγκριση αξιοπιστίας H/Y και Αεροδυναμικής Σήραγγας [5]

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 CD».



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



Σχήμα 2.3: Διαδικασία ελέγχου φυσικών υποθέσεων[5]

Πολλές φορές συζητείται εκτενώς η δυνατότητα του υπολογιστή να αντικαταστήσει μελλοντικά πειράματα. Προς το παρόν τόσο ο υπολογιστής όσο και η πληθώρα των πειραματικών εφαρμογών αλληλοσυμπληρώνονται. Ο υπολογιστής όμως έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό εξέλιξης αλλά και μείωσης του κόστους εκτέλεσης των αριθμητικών πράξεων. Στο μέλλον, όταν οι υπολογιστικές μέθοδοι θα έχουν

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

## 2.2 ΓΙΑΤΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ

### Ανάλυση και σχεδιασμός

- Η τεχνολογία CFD χρησιμοποιείται για την προσομοίωση βασισμένη στο σχεδιασμό, παρέχοντας ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τη ροή ρευστού μέσα ή γύρω από μια επιφάνεια.
- Χρησιμοποιείται επίσης για περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να διεξαχθεί πείραμα ώστε να πάρουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, (προσομοίωση φυσικών φαινομένων) όπως π.χ.:
  - Προσομοίωση σε πραγματικές διαστάσεις και συνθήκες (αεροπλάνα, πλοία, κ.α.)
  - Περιβαλλοντολογικές συνθήκες (αέρας, καιρός, κ.α.)
  - Επικίνδυνες δραστηριότητες (εκρήξεις, ραδιενέργεια, κ.α.)
  - Φυσική (πλανητικές στοιβάδες, αστρική εξέλιξη, κ.α.)

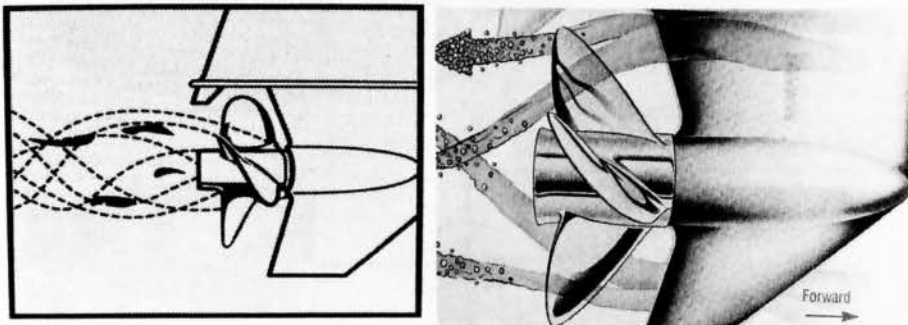
## 2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

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

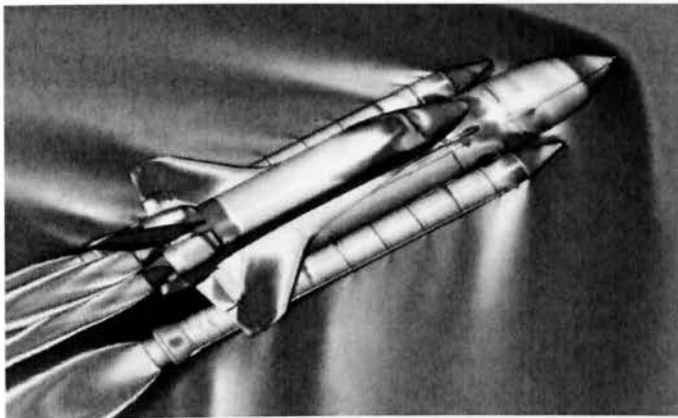
- Αεροδυναμική οχημάτων εδάφους, αεροσκαφών, πυραύλων

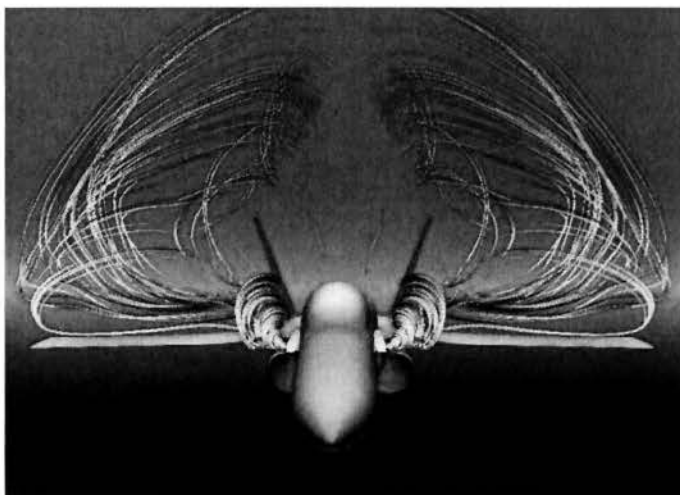


- Υδροδυναμική των σκαφών

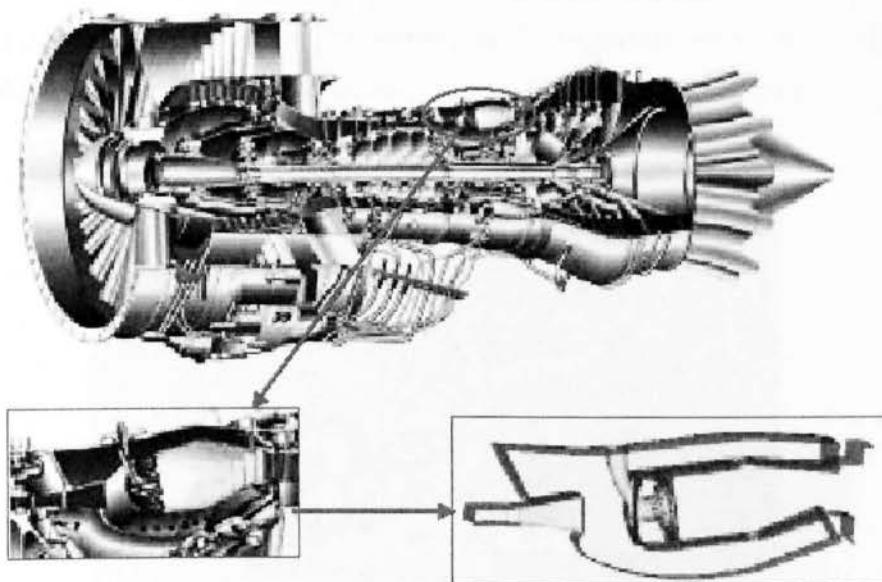


- Ροές μηχανών - μηχανές ολοκληρωμένου κυκλώματος και αεριωθούμενες μηχανές

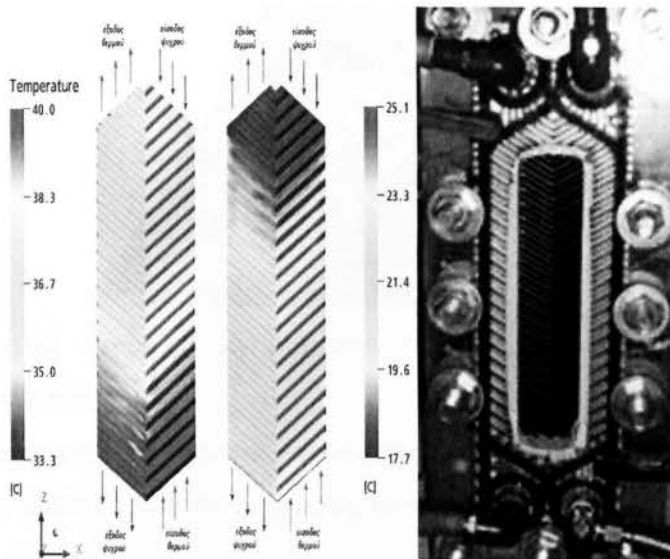




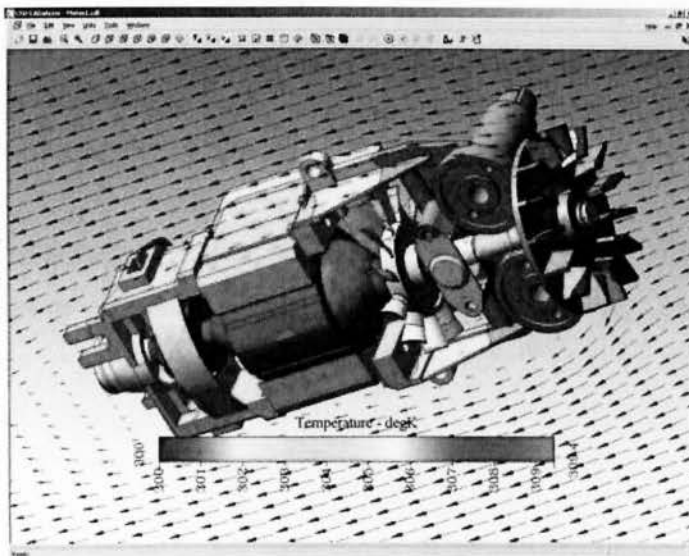
- Στροβιλοκίνητες μηχανές - αντλίες και στρόβιλοι



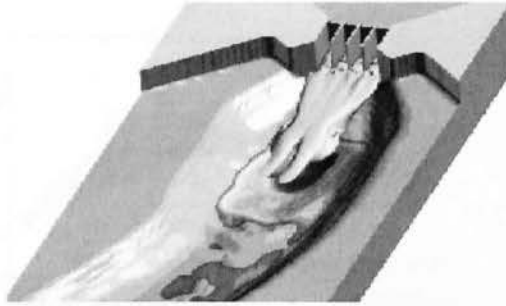
- Μεταφορά θερμότητας - θέρμανση και συστήματα ψύξης



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



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

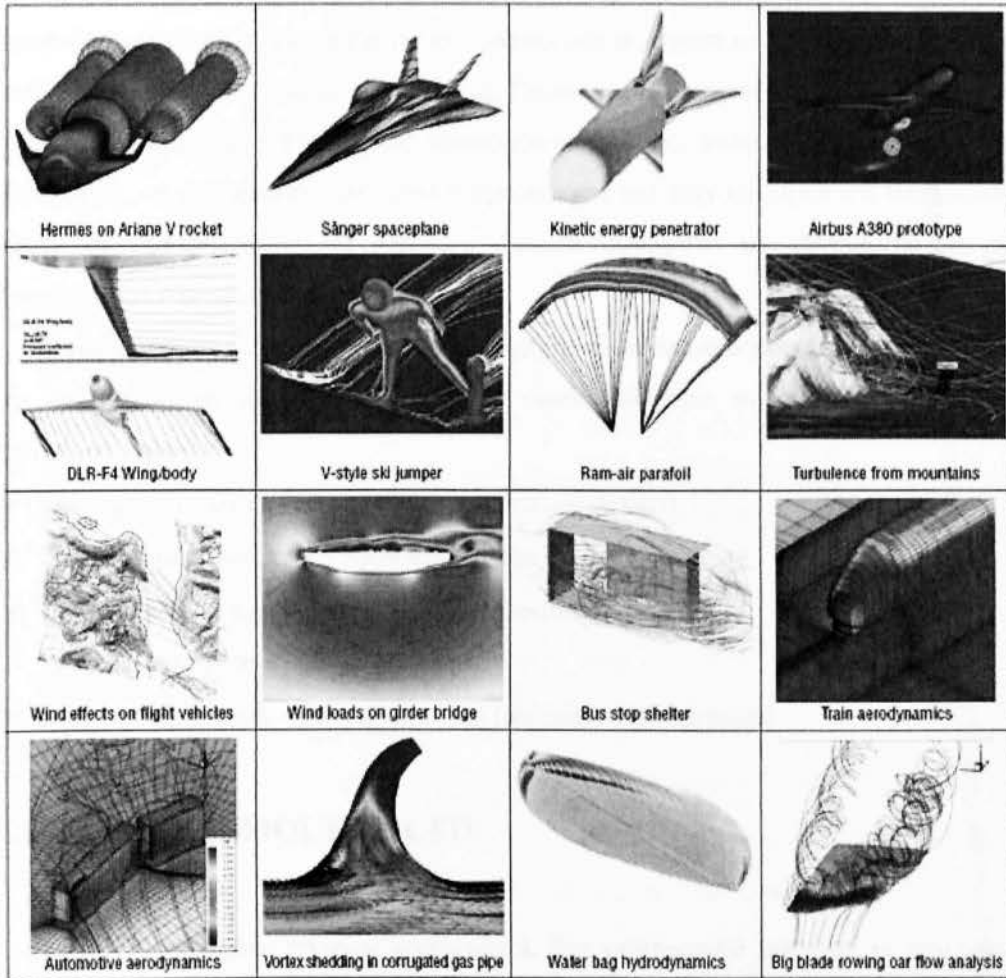


- Περιβαλλοντική εφαρμοσμένη μηχανική - μεταφορά των ρύπων και των αποβλήτων αποχέτευσης
- Παράκτια εφαρμοσμένη μηχανική - φόρτωση στις παράκτιες και θαλάσσιες δομές
- Υδραυλική - δίκτυα σωλήνων, δεξαμενές, κανάλια
- Μεταφορά ιζημάτων
- Υδρολογία - ροή στους ποταμούς και τα υδροφόρα στρώματα
- Ωκεανογραφία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

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται ορισμένες από τις εφαρμογές που αναφέρθηκαν.



From Lift-off ...



... to Splash-down

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



Σχήμα 2.4: Κατανομή πίεσης σε βαλβίδα καρδιάς (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)

## 2.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD

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

Η επίλυση με τον H/Y 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

αγωγή με απότομη διεύρυνση. Τέλος το προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο είναι πιο ρεαλιστικό να αντιστοιχεί σε αναπτυγμένη ροή, παρά να είναι ομοιόμορφη.

## 2.5 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, τόσο περισσότερα είναι τα κελιά του, άρα τόσο περισσότερα και τα σημεία προς ανάλυση). Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας.

## 2.6 CFD ΑΝΑΛΥΣΗ: ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

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

### 2.6.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.

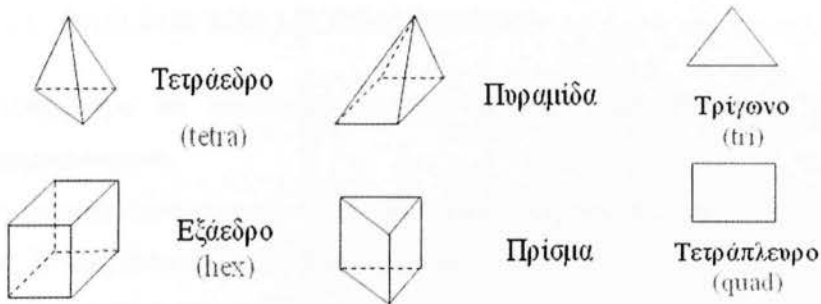
- Τι είδους αποτελέσματα ζητούμε και πως θα τα χρησιμοποιήσουμε
- Ποια μαθηματικά μοντέλα θα χρειαστεί να ενσωματώσουμε στην ανάλυση
- τι βαθμό ακρίβειας χρειαζόμαστε
- Πόσο γρήγορα χρειαζόμαστε τα αποτελέσματα

#### 2.6.1.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΘΑ ΕΠΙΛΥΘΕΙ (ΧΩΡΟΣ & ΧΡΟΝΟΣ).

- 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 ροική και γεωμετρική συμμετρία

#### 2.6.1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.

- 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



### 2.6.1.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ, ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.

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.

### 2.6.1.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ.

- 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 μίας 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)

### 2.6.1.5 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.

- 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

### 2.6.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.

Στο στάδιο αυτό καθορίζουμε το πρόβλημα και ασχολούμαστε με την προεπεξεργασίας. 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.

### 2.6.3 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.)
- 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

### 2.6.3.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ)

Μοντελοποίηση είναι η φυσικο\_ μαθηματική 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).

### 2.6.3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ

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



### 2.6.3.3 ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ.

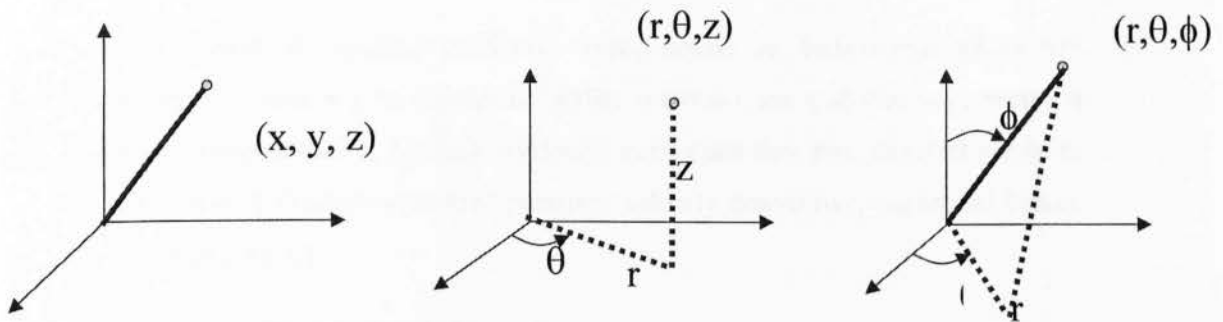
Διακρίνουμε τρία συστήματα συντεταγμένων :

- 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).

Καρτεσιανές

Κυλινδρικές

Σφαιρικές



Σχήμα 2.5: Συστήματα Συντεταγμένων.

### 2.6.3.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ

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

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



- Χημικές αντιδράσεις και καύση

#### 2.6.3.5 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΙ ΜΗ, ΡΟΕΣ)

- 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.

#### 2.6.3.6 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.).]

#### 2.6.3.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

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

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

- Μοντέλα τυρβώδους ροής

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

#### 2.6.4 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:

##### 2.6.4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

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.

##### 2.6.4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

- 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.

#### 2.6.4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SOLVERS) & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

- 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.

#### 2.6.4.4 ΥΨΗΛΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

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

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

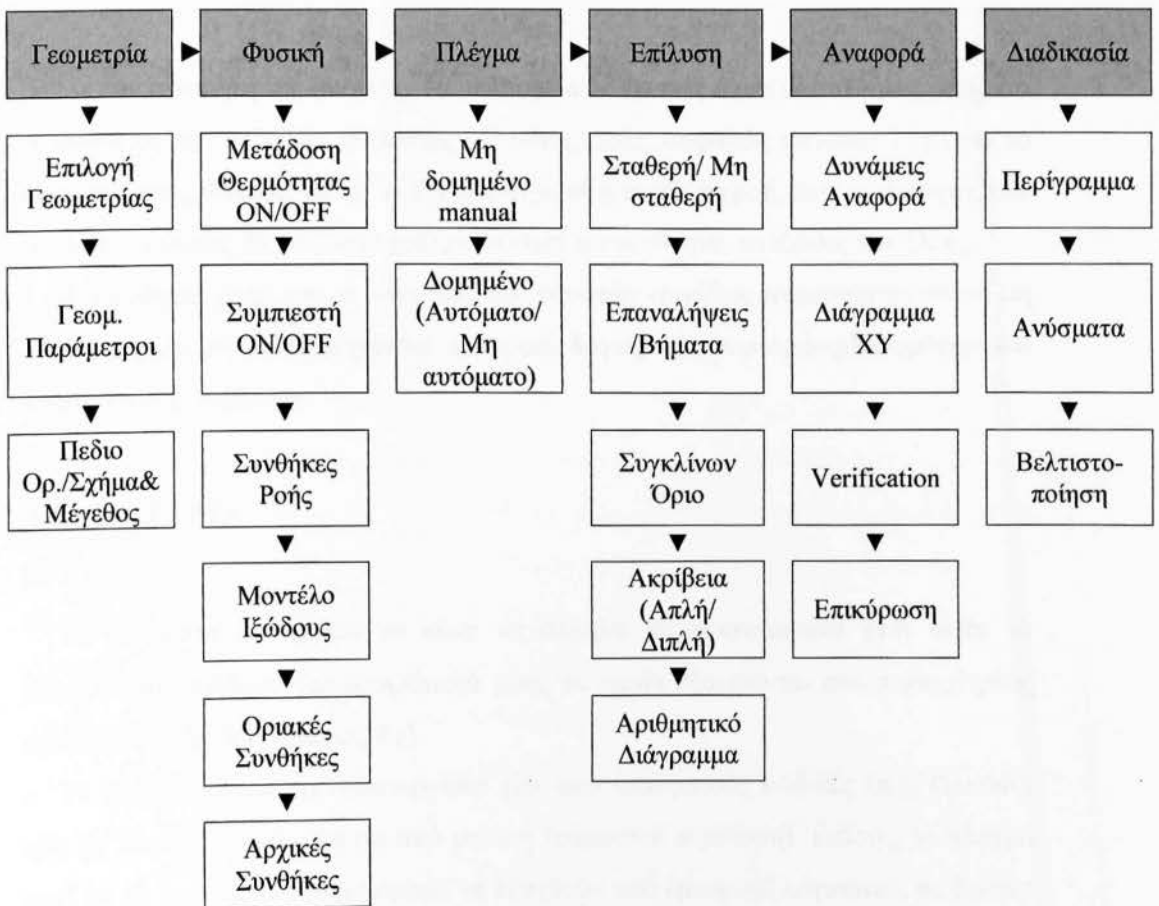
Η διαδικασία εξαρτάται από τον σκοπό και καθορίζεται από τις συνθήκες ροής του προβλήματος. Έτσι, ανάλογα με την εφαρμογή, επιλέγονται και διαφορετικοί κώδικες (π.χ. αεροσκάφη, πλοία, πολυφασικές ροές, καύση κ.α.).

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

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

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

### CFD Διαδικασία



Σχήμα 2.6: Σχεδιάγραμμα αναπαράστασης CFD διαδικασίας

## 2.7 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).

## 2.8 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.

## 2.9 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.

## 2.10 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.

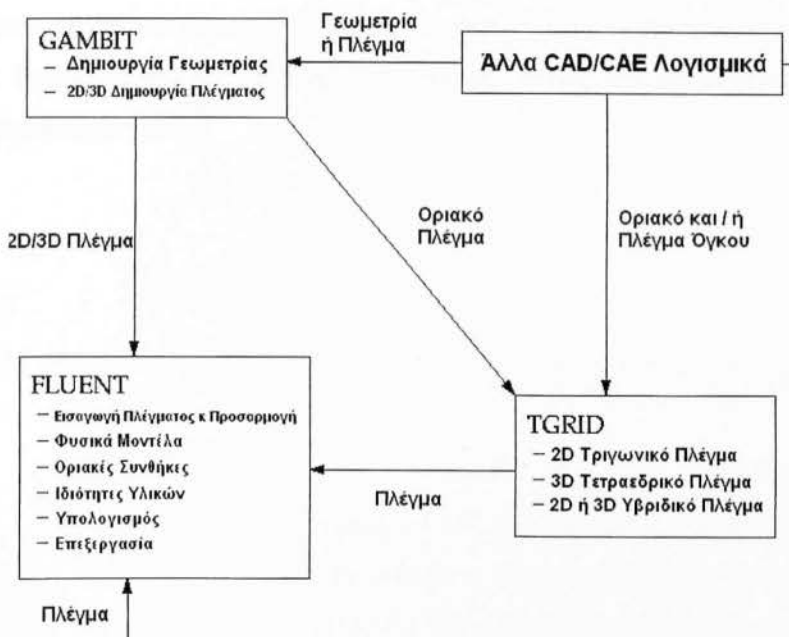
Η ακρίβεια μίας λύσης που έχει συγκλίνει εξαρτάται από την καταλληλότητα και την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων, από την πυκνότητα του πλέγματος (ανεξαρτησία), από το "στήσιμο" του προβλήματος (Problem setup). Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζουν η επιλογή των απαραίτητων αριθμητικών παραμέτρων αλλά και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

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

## 2.11 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ / ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ 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.



Σχήμα 2.7: Λογικό Διάγραμμα Διαδικασίας CFD μέσω λογισμικών πακέτων.

## 2.12 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

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

## 2.13 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν ύστερα από ένα πείραμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, παρουσιάζονται με διάφορες μορφές, με σκοπό να βοηθήσουν τον εκάστοτε χρήστη να έχει όσο το δυνατόν ολοκληρωμένη εικόνα των δεδομένων που προέκυψαν. Έτσι λοιπόν τα αποτελέσματα ενός πειράματος, μπορεί να έχουν τη μορφή γραφημάτων πλέγματος, ισουψών και ανυσμάτων, γραμμές ροής και τροχιές σωματιδίων, διαγράμματα XY, καθώς και με κινούμενα αποτελέσματα (animations). Επίσης μπορούν να παρουσιάζονται σαν δεδομένα αριθμητικής αναφοράς, τα οποία

έχουν να κάνουν με ισοζύγια μάζας και θερμότητας, ολοκληρώματα και μέσες τιμές σε σημεία, γραμμές, επιφάνειες & όγκους, καθώς και με δυνάμεις και ροπές σε στερεά τοιχώματα.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## 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, δηλαδή τον και θα κάνουμε λόγο για εναλλάκτη θερμότητας 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 τη σημασία του σε μια CFD εφαρμογή.

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GAMBIT

#### GAMBIT

Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit

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

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

- Εισαγωγή οριακών ζωνών.

### **3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ**

Η επικρατέστερη ακολουθία λειτουργιών είναι η ακόλουθη:

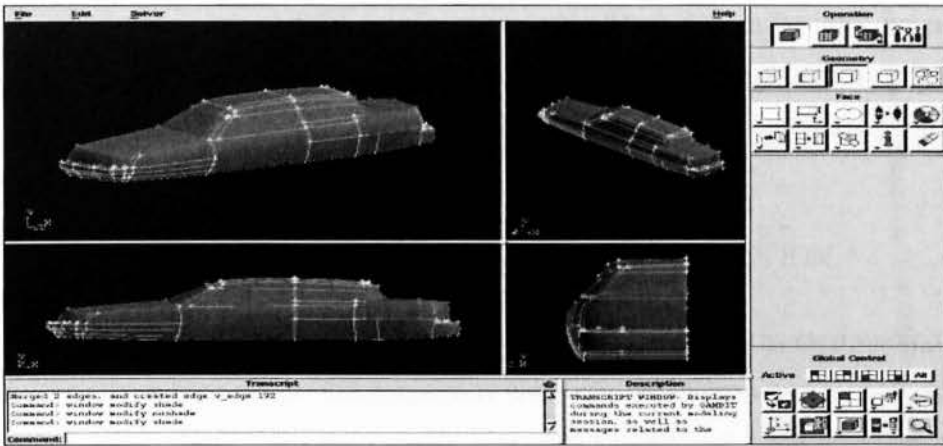
- Αρχικό Setup, το οποίο περιλαμβάνει την επιλογή λύτη, το μέγεθος πλέγματος κ.α.. Στη συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία της γεωμετρίας (και στη συνέχεια ή εισαγωγή πλέγματος). Δηλαδή θα έχουμε αναλυτικά την δημιουργία ολικής γεωμετρίας και μετέπειτα την αποσύνθεση σε τομείς που μπορούν να δημιουργηθούν 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: πρόσωπο (Face), όγκος. Τέλος ακολουθεί η εξέταση του πλέγματος και ο προσδιορισμός των ζωνών, δηλαδή αν έχουμε να κάνουμε με συνεχείς ή οριακές ζώνες.

### **3.3 ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ [GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI)]**

Το γραφικό περιβάλλον του χρήστη αποτελείται από:

#### **3.3.1 ΤΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΓΡΑΦΙΚΩΝ**

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



Σχήμα 3.1: Γραφικό περιβάλλον χρήστη.

**KYPIO MENOY**, το οποίο περιλαμβάνει τις βασικές λειτουργίες:

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

### 3.3.2 ΜΕΝΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ

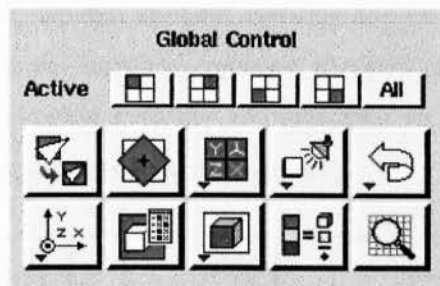


Σχήμα 3.2: Μενού Εργαλείων Λειτουργιών

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.

### 3.3.3 ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ

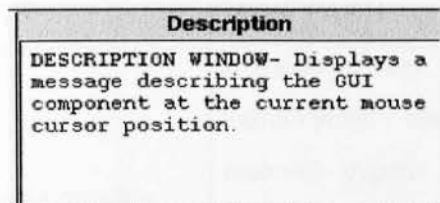
Περιέχει 15 ενεργά κουμπιά εντολών η επάνω σειρά επιτρέπει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ξεχωριστών τεταρτημόριων γραφικών παραθύρων ενώ η κάτω σειρά επιτρέπει τον έλεγχο της εμφάνισης των γραφικών παραθύρων ή του μοντέλου που φαίνεται στα γραφικά παράθυρα καθώς και τις επιλογές undo και redo, δηλαδή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



Σχήμα 3.3: Γενική Γραμμή Εργαλείων ελέγχου Λειτουργιών.

### 3.3.4 ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ

Ο σκοπός του παράθυρου περιγραφής είναι η εμφάνιση μηνυμάτων περιγράφοντας τα διάφορα συστατικά του GUI όπως πεδία, παράθυρα και κουμπιά εντολών.



Σχήμα 3.4: Παράθυρο Περιγραφής

### 3.3.5 ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΟΛΩΝ

Ο σκοπός του παραθύρου αυτού είναι να εμφανίζει και καταγράφει ένα ιστορικό των εντολών που έχουν πραγματοποιηθεί και μηνύματα του Gambit κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης. Επίσης δίνει την δυνατότητα να εκτελεστούν εντολές

που εισάγονται από την πληκτρολόγησή του σε αυτό, δείχνοντας έτσι κάθε στιγμή στο χρήστη, τις εντολές που έχει επιλέξει.

```

Transcript
Command> volume create brick width 10
Created volume: volume.1
Created volume: volume.2
Subtracting volume volume.2 from volume.1
Created Volumes: volume.1
Command:
    
```

Σχήμα 3.5: Παράθυρο Καταγραφής Και Εισαγωγής Εντολών



### 3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

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

				
Σημείο	Πλευρά	Πρόσωπο	Όγκος	Ομάδα

Πινάκας 3.1: Μενού Γεωμετρίας


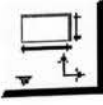

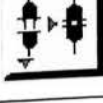
#### 3.4.1 ΕΝΤΟΛΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ

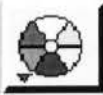





ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	Δημιουργία σημείου	Δημιουργεί ένα πραγματικό σημείο σε οποιαδήποτε τοποθεσία, πραγματικό ή εικονικό σημείο σε πλευρά ή πρόσωπο, εικονικό σημείο συσχετισμένο με όγκο, ή ένα πραγματικό ή εικονικό σημείο στην τομή δύο πλευρών.
	Ολίσθηση εικονικού σημείου	Αλλάζει την θέση ενός εικονικού σημείου κατά μήκος της πλευράς ή του προσώπου στο οποίο δημιουργήθηκε.

	Σύνδεση/ Αποσύνδεση σημείων	Συνδέει πραγματικά και εικονικά σημεία, αποσυνδέει σημεία που είναι κοινά σε δύο ή περισσότερες οντότητες.
	Επεξεργασία χρώματος και περιγραφής σημείων	Αλλάζει το χρώμα ή την περιγραφή των σημείων
	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

Πινάκας 3.2: Σχηματική Διάταξη Εντολών Σημείων

### 3.4.2 ΕΝΤΟΛΕΣ ΠΡΟΣΩΠΩΝ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	Ανάπτυξη Προσώπου	Δημιουργία προσώπου από ήδη υπάρχουσες πλευρές ή σημεία
	Δημιουργία Προσώπου	Δημιουργία προσώπου από τα τρία βασικά σχήματα (παραλληλόγραμμο, κύκλος, έλλειψη)
	Λειτουργίες Boolean	Ένωση, τομή αφαίρεση προσώπων
	Σύνδεση-Αποσύνδεση προσώπων	Συνδέει πραγματικά κ εικονικά πρόσωπα, Αποσυνδέει κοινόχρηστα πρόσωπα

	Τροποποίηση χρωμάτων προσώπων- ετικετών	Τροποποίηση χρωμάτων προσώπων- ετικετών
	Μετακίνηση, Αντιγραφή, Ευθυγράμμιση προσώπων	Μετακινεί, αντιγράφει πρόσωπα, ευθυγραμμίζει πρόσωπα κ συνδεδεμένες γεωμετρίες
	Διάσπαση, συγχώνευση, απλοποίηση προσώπων,	Διάσπαση, συγχώνευση, απλοποίηση προσώπων,
	Εξομάλυνση, επιδιόρθωση μετατροπή προσώπων	Εξομάλυνση επιδιόρθωση πραγματικών προσώπων, μετατροπή εικονικών προσώπων σε πραγματικά
	Σύνοψη προσώπων Έλεγχος προσώπων Πληροφορίες προσώπων Ολικές οντότητες	Παρουσιάζει σύνοψη πληροφοριών προσώπων, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας ενός προσώπου ή μίας γεωμετρίας, εμφανίζει λίστα πληροφοριών προσώπων
	Διαγραφή προσώπων	Διαγραφή προσώπων

Πινάκας 3.3: Σχηματική Διάταξη Εντολών Προσώπων.

### 3.4.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ





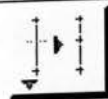
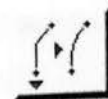

Για την δημιουργία πραγματικού σημείου απαιτείται ο προσδιορισμός του συστήματος συντεταγμένων. Οι τύποι των συστημάτων συντεταγμένων είναι όπως ήδη γνωρίζουμε το Καρτεσιανό, το Κυλινδρικό και το Σφαιρικό. Επιλέγοντας λοιπόν τον ανάλογο τύπο συστήματος συντεταγμένων ανάλογα με τη χρήση, δηλαδή αν θέλουμε 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 βρίσκουμε την θέση του συγκεκριμένου σημείου στο γραφικό περιβάλλον.

#### 3.4.4 ΕΝΤΟΛΕΣ ΠΛΕΥΡΩΝ

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



	Εξέταση πλευρών	πλευρών και της γεωμετρίας
	Διαγραφή πλευρών	Διαγράφει πραγματικές και εικονικές πλευρές

Πινάκας 3.4: Σχηματική Διάταξη Εντολών Πλευρών

### 3.5 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.

### 3.5.1 ΔΙΑΒΑΣΜΑ/ ΜΕΡΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

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

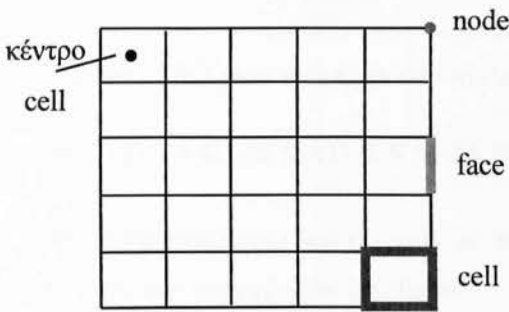
Edge = Όριο ενός face (μόνο για 3D)

Node = Σημείο πλέγματος

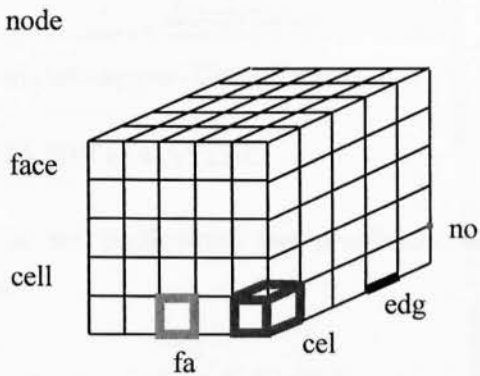
Zone = Σύνολο από nodes, faces, και/ή cells

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.

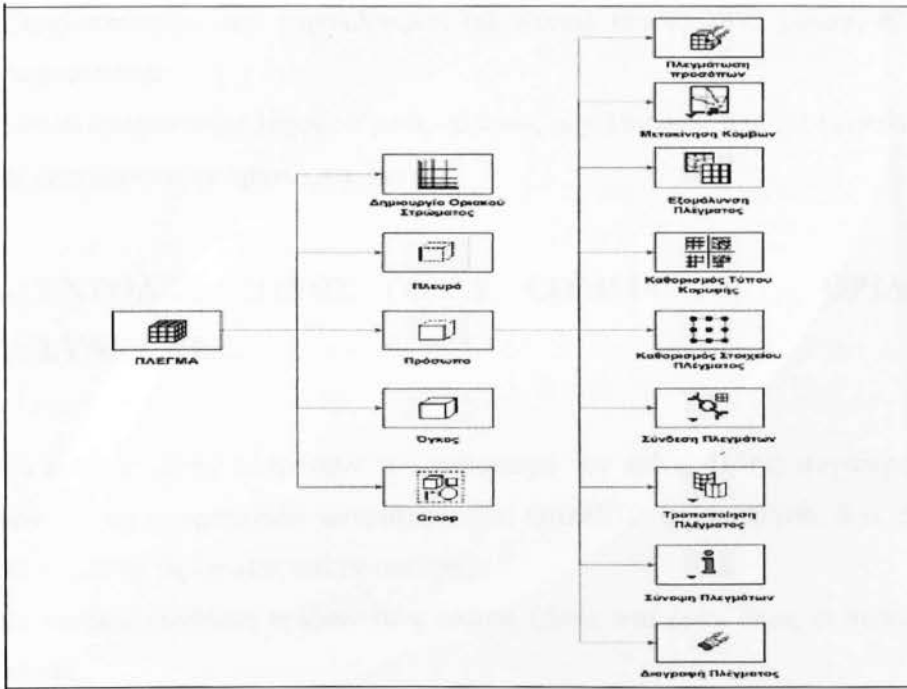


Σχήμα 3.6: Απλό 2d Πλέγμα.



Σχήμα 3.7: 3d Πλέγμα

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



Σχήμα 3.8: Σχηματική Παράσταση Λειτουργιών Προγράμματος.

### 3.5.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΛΥΣΗΣ

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 πλεγματος 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).

### 3.6 ΕΝΤΟΛΕΣ ΖΩΝΗΣ (ZONE COMMANDS) – ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.

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

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

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



Σχήμα 3.9: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.

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

### **3.8 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.

#### **3.8.1 ΜΗ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ**

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 συνδυασμός 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).

### 3.8.2 ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΛΕΓΜΑ

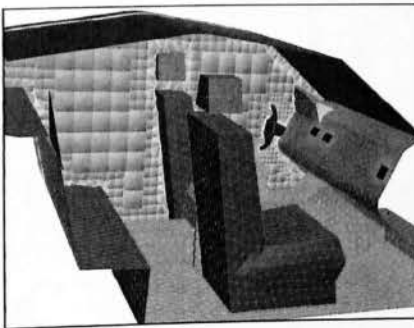
Το GAMBIT επίσης έχει τη δυνατότητα κατασκευής πλέγματος του οποίου η μορφή δημιουργείται από καθορισμένα γεωμετρικά σχήματα, περιλαμβάνοντας αλγορίθμους με ελλειπτικές και άλλες ομαλοποιημένες μεθόδους. Έτσι είναι εφικτή η κατασκευή ενός καλού ποιοτικά πλέγματος, το οποίο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί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

### 3.8.3 ΠΛΕΓΜΑ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

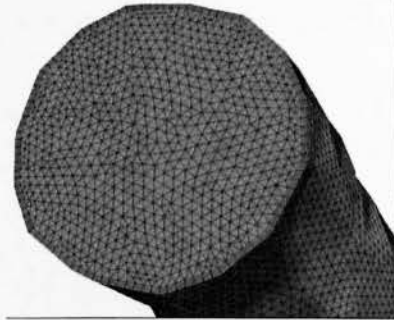
Το πρόγραμμα επιπλέον έχει δυνατότητες κατασκευής πλέγματος σε οριακό στρώμα. Τέτοια πλέγματα μπορούν να κατασκευαστούν και προσαρμοστούν εύκολα ακόμη και σε σύνθετες γεωμετρίες (όπως π.χ. σε απότομες γωνίες χωρίς ακτίνα καμπυλότητας και σε τοιχώματα απειροελάχιστου πάχους).

### 3.8.4 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

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



Σχήμα 3.10: Εφαρμογή Πλέγματος Οριακού Πλέγματος σε εσωτερικό αυτοκινήτου



Σχήμα 3.11: Εφαρμογή Υβριδικού Στώματος σε ανθρώπινη φλέβα

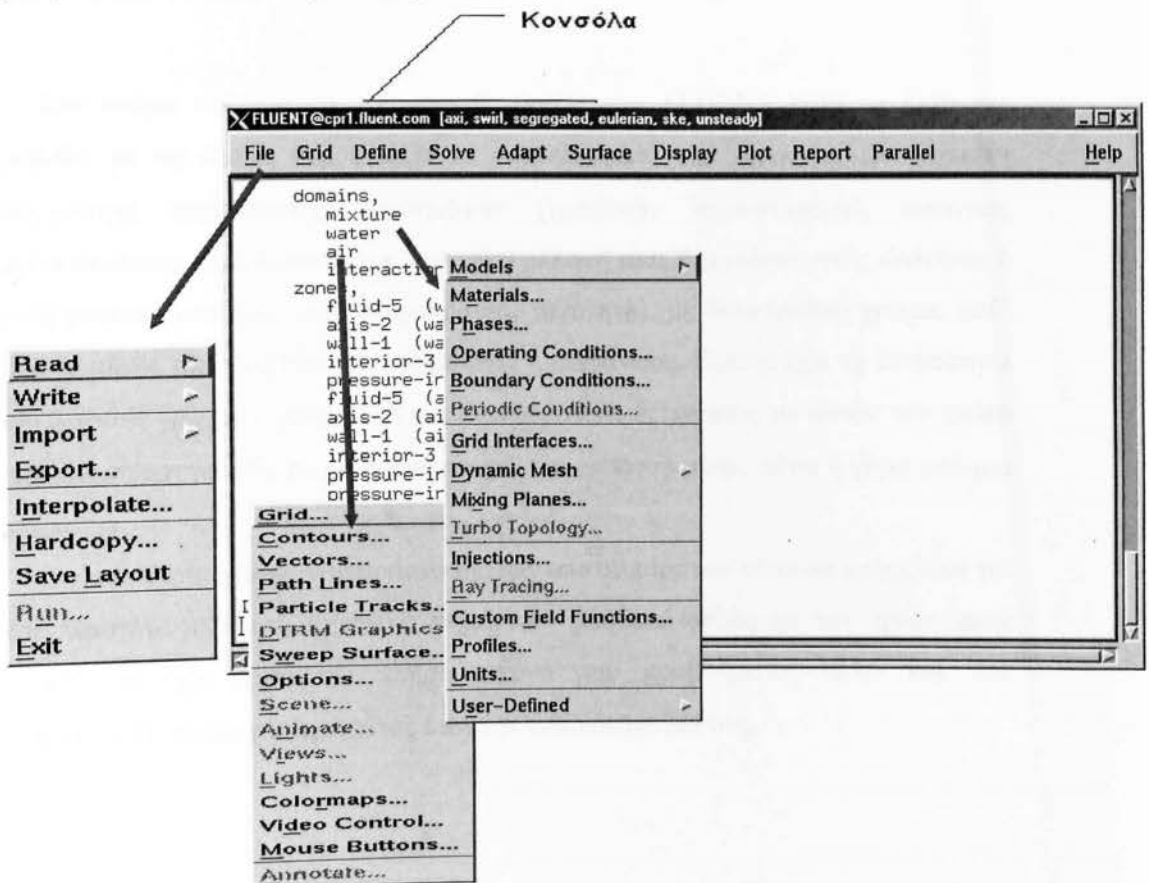
### 3.9 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

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.



### Παράθυρο Γραφικών



Σχέδιο 3.11: Βασικές Λειτουργίες menu του FLUENT

## 3.10 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, καθ' 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.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΔΥΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

### 4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

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

### 4.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ GAMBIT

Όταν ανοίγουμε το πρόγραμμα διαλέγουμε solver → fluent/ uns.

#### 4.2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

- Geometry → Edge → Create Edge → Arc  
Radius =0.02, Start Angle= -45, End Angle=45  
Press Apply  
Radius =0.02, Start Angle= 45, End Angle=135  
Press Apply  
Radius =0.02, Start Angle= 135, End Angle=225  
Press Apply  
Radius =0.02, Start Angle= 225, End Angle=315  
Press Apply  
Geometry → Vertex → Create Vertex  
Enter X=0.05, Y=-0.05, Z=0

Press Apply

Enter  $X=0.05, Y=0.05, Z=0$

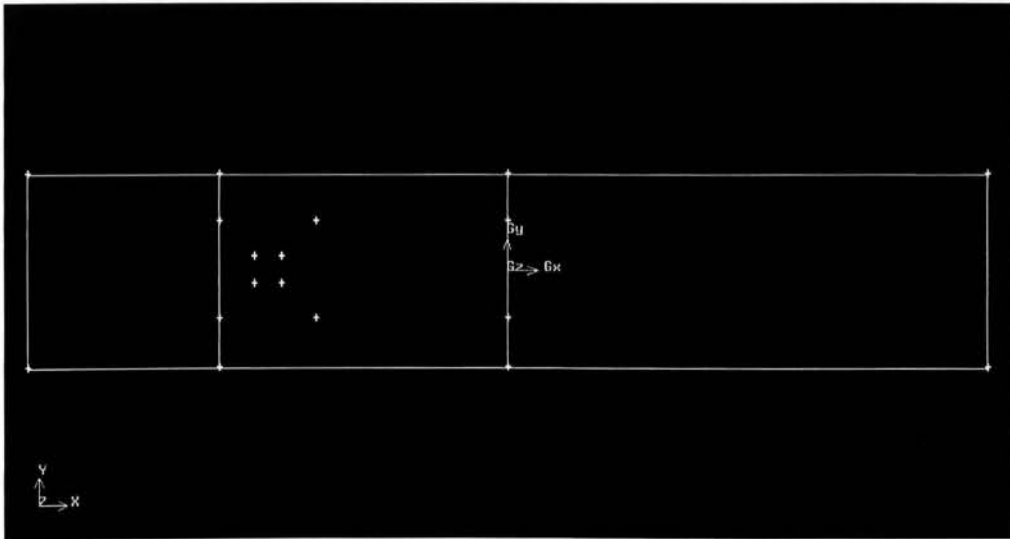
Press Apply

Enter  $X=-0.05, Y=0.05, Z=0$

Press Apply

Enter  $X=-0.05, Y=-0.05, Z=0$

Press Apply



Σχήμα 4.1: Στιγμιότυπο της οθόνης

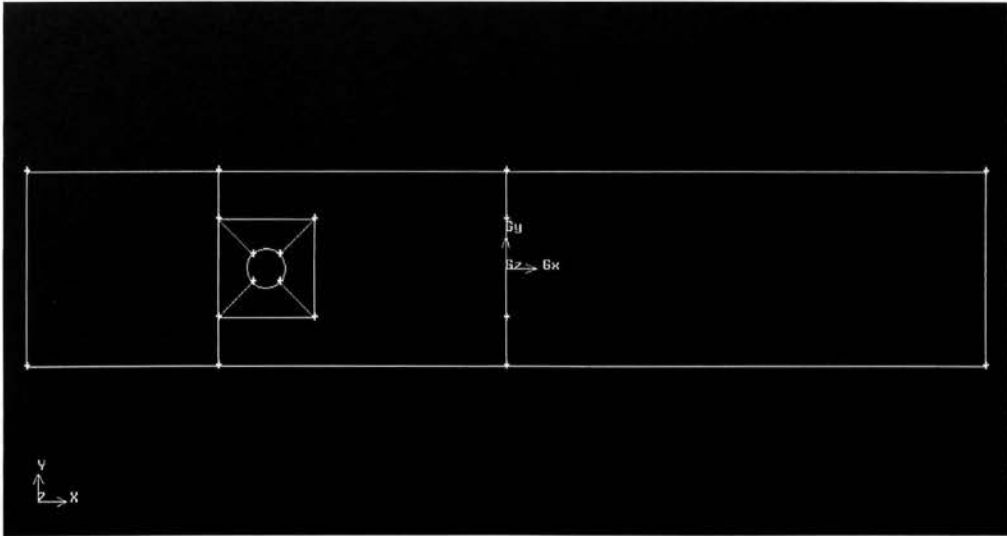
- Δημιουργήσουμε τα άκρα του σωλήνα

Geometry → Edge → Create Edge → Straight

Ενώνουμε τα σημεία ανά 2.

Press Apply

Αυτό το κάνουμε άλλες οκτώ φορές για να δημιουργήσουμε το περίβλημα του σωλήνα.



Σχήμα 4.2: Στιγμιότυπο της οθόνης

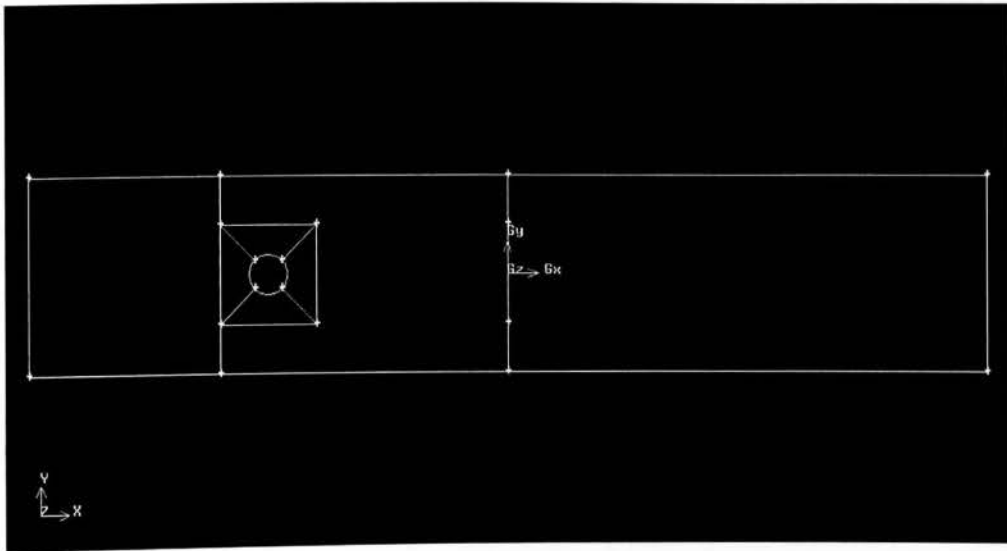
#### 4.2.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ FACE ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

- Geometry → Face → From Face → Wireframe

Διαλέγουμε τις 4 γραμμές που δημιουργούν μια από τις 4 περιοχές του σωλήνα.

Press Apply

Αυτό το κάνουμε για κάθε μια από τις 4 περιοχές του σωλήνα.



Σχήμα 4.3: Στιγμιότυπο της οθόνης

#### 4.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

- Mesh → Edge → Mesh Edge

➤ Για το πλέγμα γύρω από το πρόσωπό σωλήνα,

Deselect Grading

Select Spacing και στο Interval size=0.001

Select Option Mesh

Press Apply

➤ Για το πλέγμα που συνδέονται με τον σωλήνα

Select Grading

Select Type First length και στο Length=0.001

Select Spacing και στο Interval count=20

Select Option Mesh

Press Apply

• Mesh → Face → Mesh Face

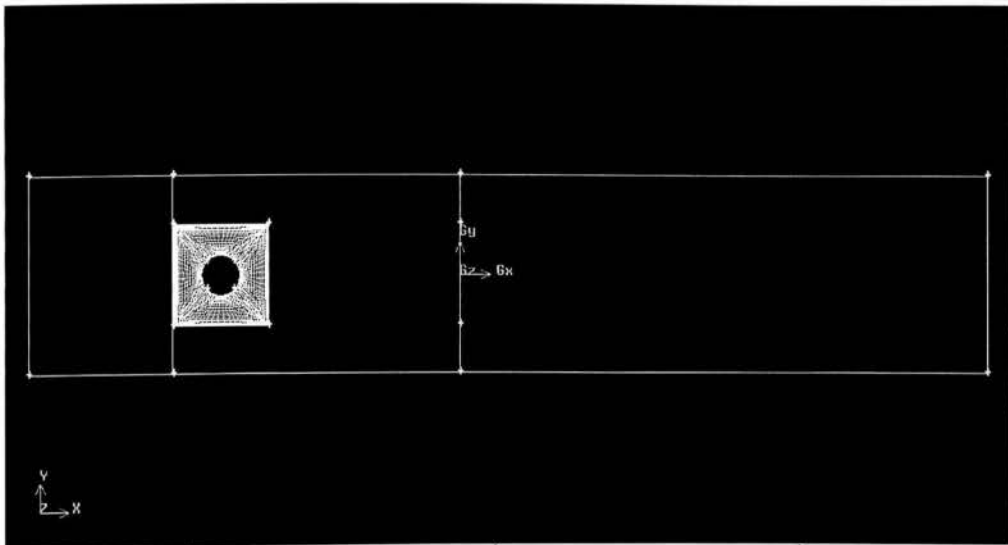
Διαλέγουμε και τις 4 face που έχουμε δημιουργήσει

Select Scheme

Select Elements → Quad

Select Type → Map

Press Apply



Σχήμα 4.4: Στιγμιότυπο της οθόνης

Τώρα θα δημιουργήσουμε και τους άλλους 2 σωλήνες

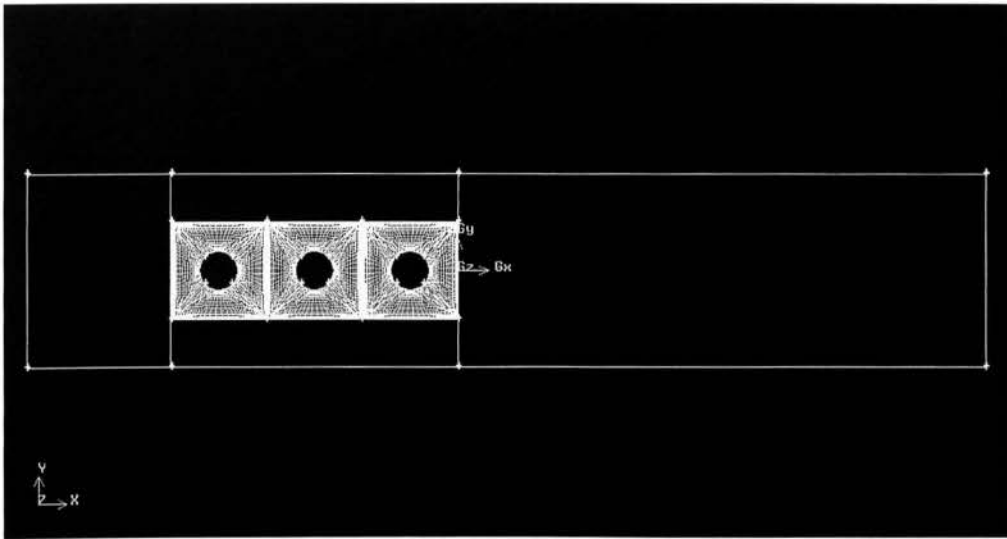
• Geometry → Face → Move/ Copy/ Align

Διαλέγουμε τις 4 face

Select Copy 2 αντίγραφα

Select Operation → Translate

X=0.1, Y=0, Z=0



Σχήμα 4.5.: Στιγμιότυπο της οθόνης

#### 4.2.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΙΠΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Για δημιουργήσουμε το υπόλοιπο πλέγμα θα πρέπει πρώτα να αφαιρέσουμε τις τυχόν δίπλες γραμμές που μπορεί να υπάρχουν στο σχέδιο μας.

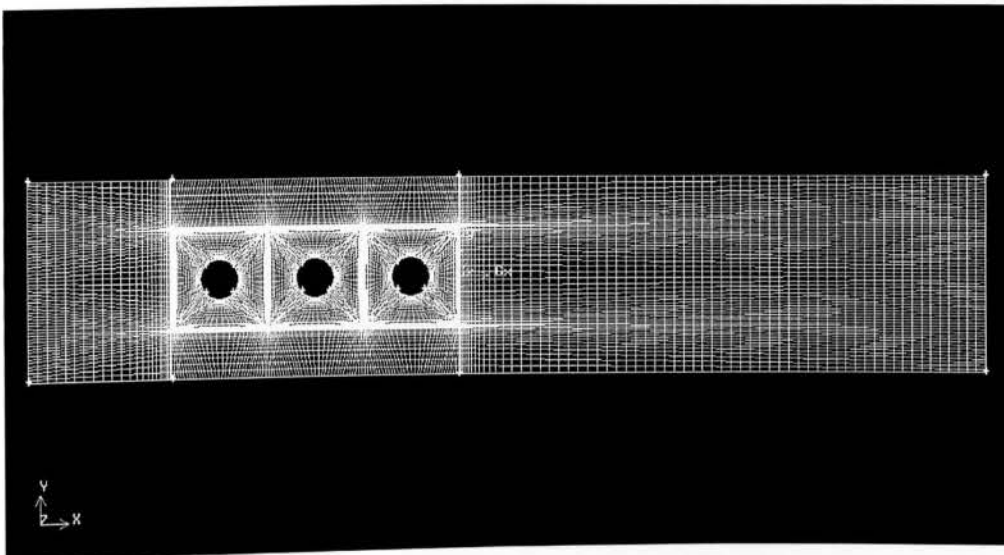
Geometry → Edge → Connect Edge

Διαλέγουμε όλο το σχέδιο μας.

Select Real

Press Apply

Μετά δημιουργούμε το πλέγμα



Σχήμα 4.6: Στιγμιότυπο της οθόνης

#### 4.2.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΙΩΝ

Σε αυτό το κομμάτι θα χαρακτηρίσουμε τις χρήσιμες επιφάνεις για τον υπολογισμό μας.

- Zones → Specify Boundary Types  
Check  
Enter Name: INLET  
Select Types: VELOCITY INLET  
Pick Entity: Edges διαλέγουμε την είσοδο του ρευστού μέσα στον εναλλάκτη που μελετάμε  
Press Apply
- Zones → Specify Boundary Types  
Check  
Enter Name: OUTLET  
Select Types: OUTFLOW  
Pick Entity: Edges διαλέγουμε την έξοδο του ρευστού μέσα στον εναλλάκτη που μελετάμε  
Press Apply
- Zones → Specify Boundary Types  
Check  
Enter Name: SIDES  
Select Types: WALL  
Pick Entity: Edges διαλέγουμε το πάνω και το κάτω μέρος του εναλλάκτη που μελετάμε  
Press Apply
- Zones → Specify Boundary Types  
Check  
Enter Name: HEATER 01  
Select Types: WALL  
Pick Entity: Edges διαλέγουμε την περίμετρο του πρώτου άυλου του εναλλάκτη που μελετάμε  
Press Apply
- Zones → Specify Boundary Types  
Check

Enter Name: HEATER 02

Select Types: WALL

Pick Entity: Edges διαλέγουμε την περίμετρο του δευτέρου άυλου του ενάλλακτη που μελετάμε

Press Apply

- Zones → Specify Boundary Types

Check

Enter Name: HEATER 03

Select Types: WALL

Pick Entity: Edges διαλέγουμε την περίμετρο του τρίτου άυλου του ενάλλακτη που μελετάμε

Press Apply

Αυτό είναι η τελευταία παρέμβαση που κάνουμε στο gambit. Τώρα πρέπει να δημιουργίσουμε ένα αρχείο που μπορεί να διαβαστεί το fluent

File → Export → Mesh...

Enter file name: HEATER.msh

Check to Export 2d Mesh

Press Apply

## 4.3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ FLUENT

Στο fluent θα εισάγουμε τα δεδομένα για να κάνουμε την προσομοίωση του ενάλλακτη που μελετάμε. Σε αυτήν την προσομοίωση θα χρησιμοποιήσουμε το fluent 12. Την προσομοίωση θα την δουλέψουμε σε δυοδιάστατο

### 4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

File → Read → Case...

Διαλέγουμε το αρχείο με την ονομασία HEATER.msh.

Models → Viscous

Διαλέγουμε το k-epsilon (2 eqn)

Materials → Fluid → Air

Density=1.225 kg/m<sup>3</sup>

Cp= 1006.43 j/kgK

Thermal Conductivity= 0.0242 W/mK

Viscosity=1.7894e-5 kg/ms

Change Create

Κλείνουμε το Material panel

Boundary Conditions

Zone- inlet

Velocity Magnitude= 5m/s

Temperature=300K

Turbulence Specification Method → Intensity and Hydraulic Diameter

Turbulence Intensity=10%

Hydraulic Diameter=0.4 m

Πατάμε OK

Zone-heater 01

Στην καρτέλα Thermal

Thermal Conditions διαλέγουμε Heat Flux

Heat Flux=16000 W/m<sup>2</sup>

Πατάμε OK

Πατάμε copy

Διαλέγουμε για αντιγραφή το Zone-heater 01

Διαλέγουμε Zone-heater 02 και Zone-heater 03 ώστε να πάρουν και αυτές τα ίδια δεδομένα.

Πάμε στην καρτέλα Solution Initialization και πατάμε το initialize

Πάμε στην καρτέλα Monitors → Residual

Μαρκάρουμε το plot και το print, στο continuity βάζουμε 10e-9

Πατάμε OK



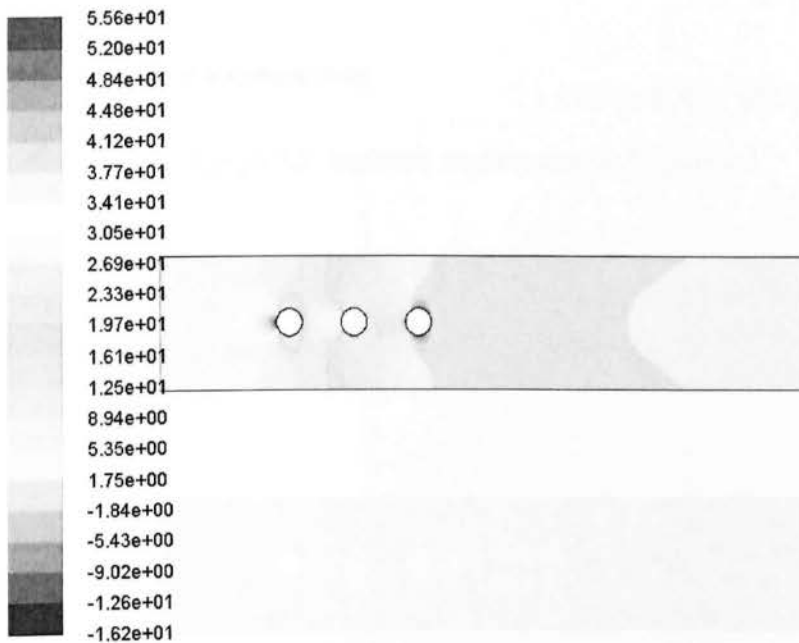


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σε αυτό το κεφαλαίο θα δούμε τα αποτελέσματα του fluent στο αρχικό μας παράδειγμα αλλά και σε άλλες 4 τροποποιήσεις των συνθηκών του εναλλαχτεί.

## 5.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1<sup>ο</sup>

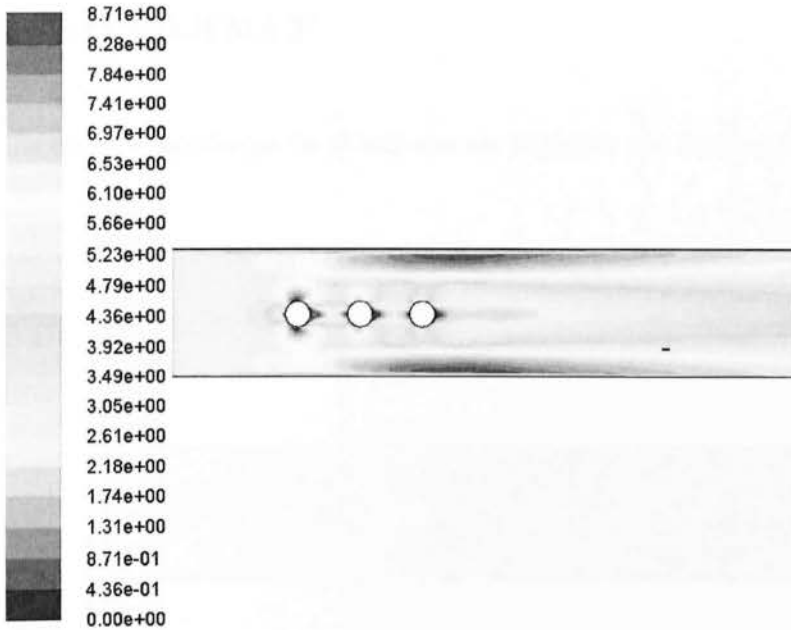
Σε αυτό το παράδειγμα οι συνθήκες και οι παράμετροι του εναλλαχτεί είναι αυτές που βάλουμε στα παραπάνω κεφάλαια.



Contours of Static Pressure (pascal)

Jun 18, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

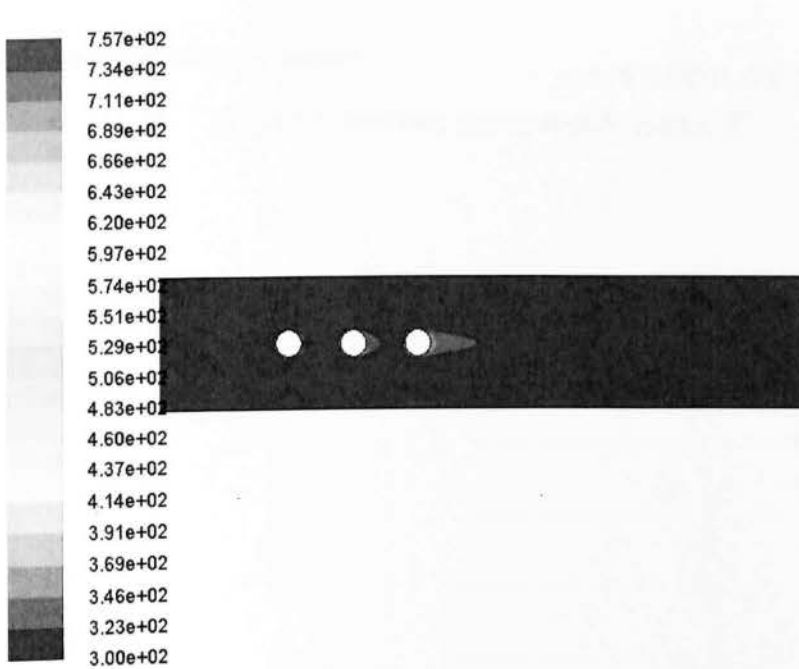
Σχήμα 5.1: Ισοϋψείς πίεσης παραδείγματος 1<sup>ου</sup>



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Sep 13, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.2: Ισοϋψείς ταχύτητας παραδείγματος 1<sup>ο</sup>



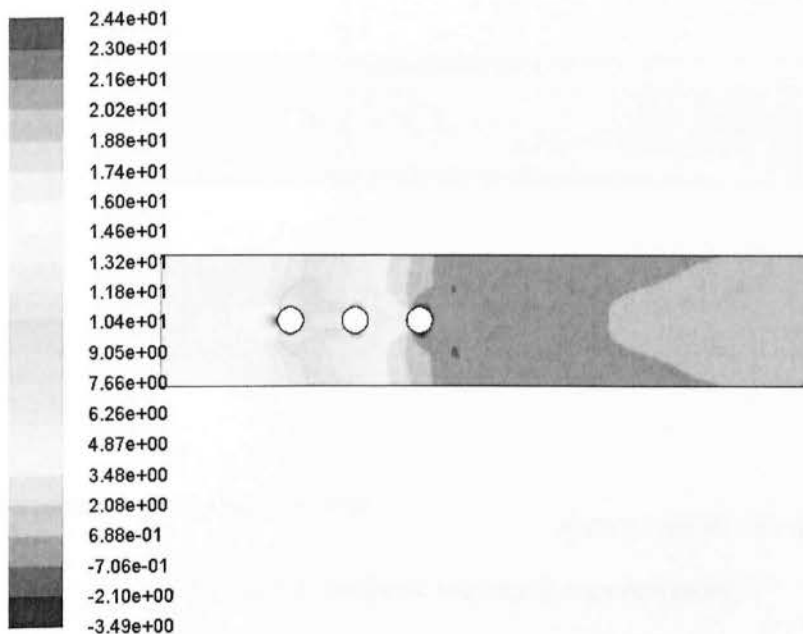
Contours of Static Temperature (k)

Jun 18, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.3: Ισοϋψείς θερμοκρασίας παραδείγματος 1<sup>ο</sup>

## 5.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2<sup>ο</sup>

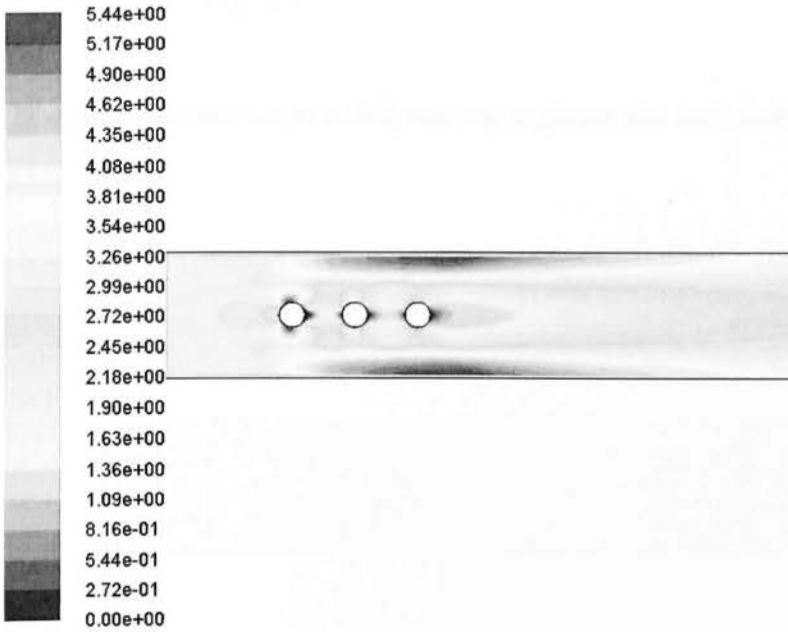
Σε αυτό το παράδειγμα θα αλλάξουμε την ταχύτητα από 5m/s σε 3m/s



Contours of Static Pressure (pascal)

ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske) Jun 18, 2012

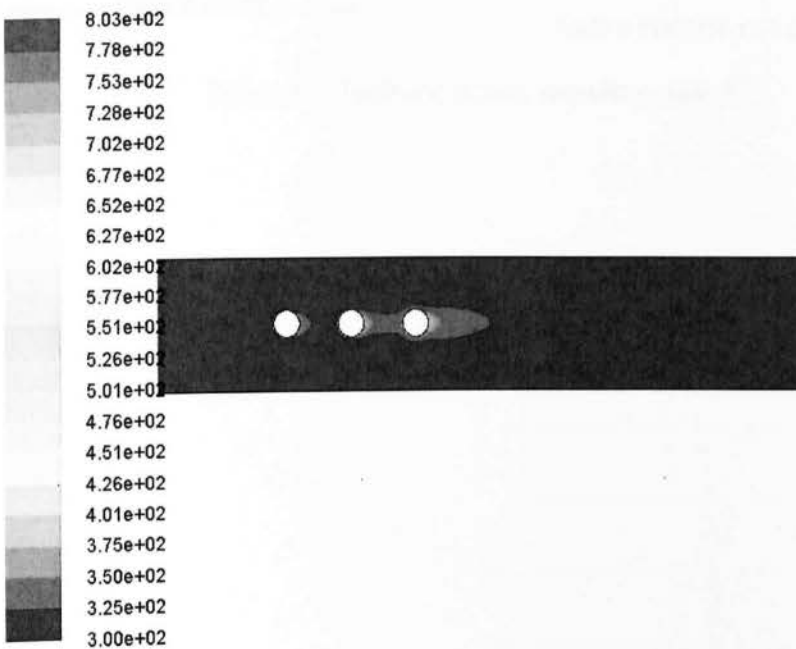
Σχήμα 5.4: Ισοϋψείς πίεσης παραδείγματος 2<sup>ο</sup>



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Sep 13, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.5: Ισοϋψείς ταχύτητας παραδείγματος 2<sup>ου</sup>



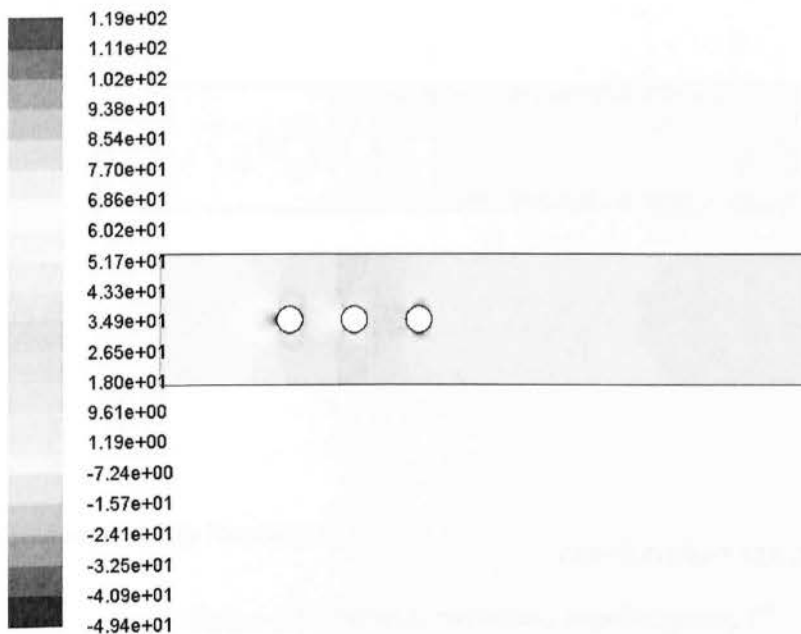
Contours of Static Temperature (k)

Jun 18, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.6: Ισοϋψείς θερμοκρασίας παραδείγματος 2<sup>ου</sup>

### 5.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3<sup>ο</sup>

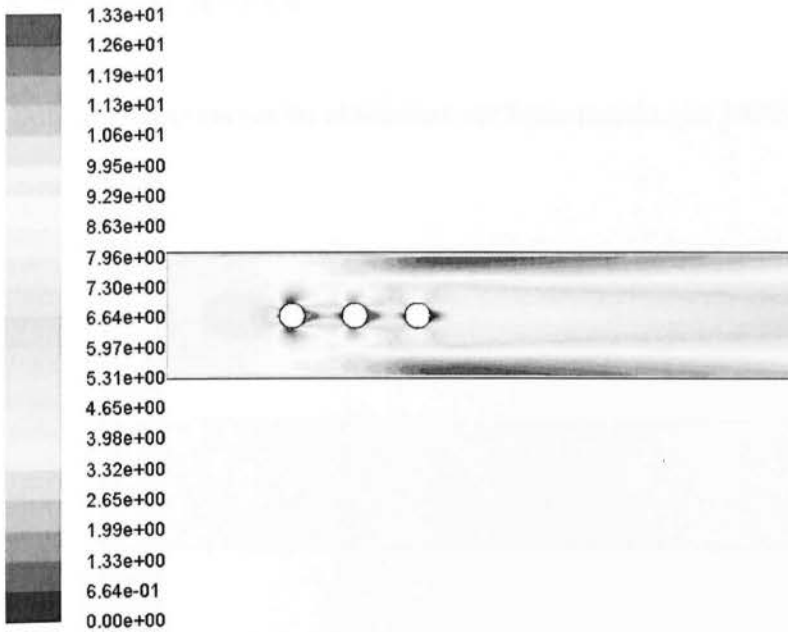
Σε αυτό το παράδειγμα θα αλλάξουμε την ταχύτητα από 5m/s σε 8m/s



Contours of Static Pressure (pascal)

ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske) Jun 18, 2012

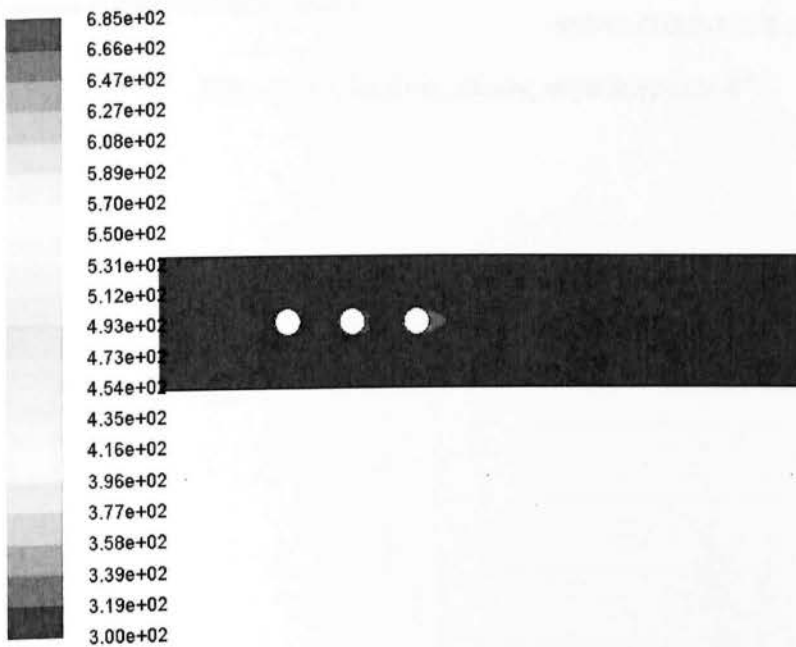
Σχήμα 5.7: Ισοϋψείς πίεσης παραδείγματος 3<sup>ου</sup>



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Sep 13, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.8: Ισοϋψείς ταχύτητας παραδείγματος 3<sup>ου</sup>



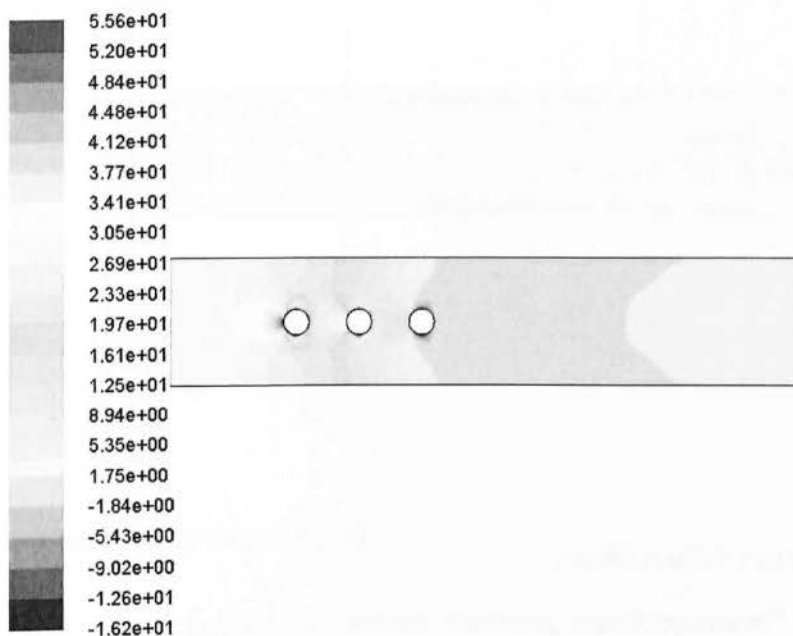
Contours of Static Temperature (K)

Jun 18, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.9: Ισοϋψείς θερμοκρασίας παραδείγματος 3<sup>ου</sup>

## 5.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4<sup>ο</sup>

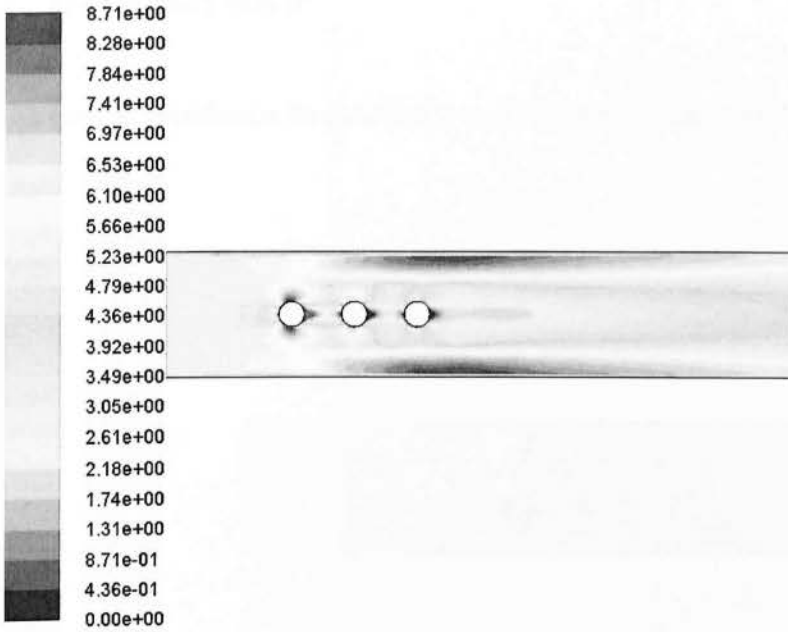
Σε αυτό το παράδειγμα θα αλλάξουμε την θερμοκρασία από 300 0K σε 200 0K.



Contours of Static Pressure (pascal)

Sep 16, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

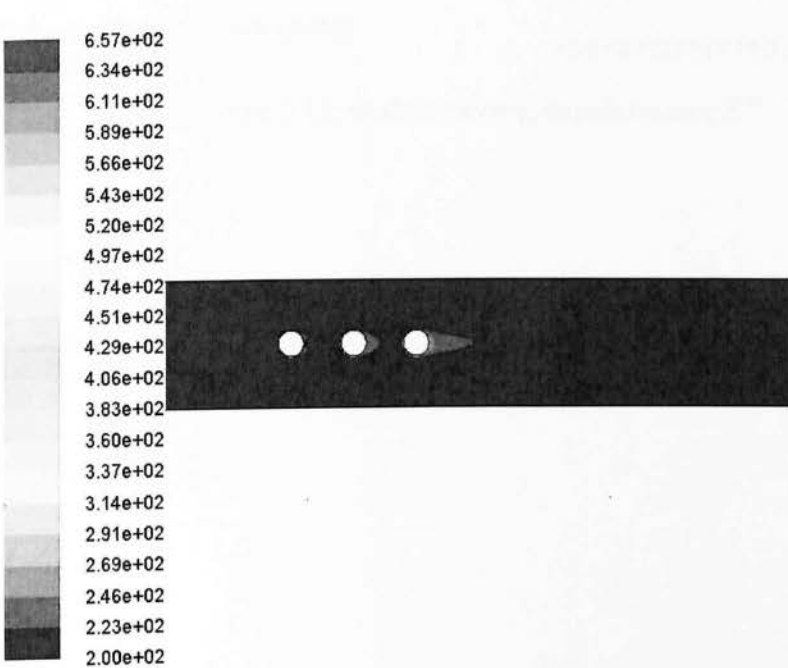
Σχήμα 5.10: Ισοϋψείς πίεσης παραδείγματος 4<sup>ο</sup>



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Sep 16, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.11: Ισοϋψείς ταχύτητας παραδείγματος 4<sup>ου</sup>



Contours of Static Temperature (k)

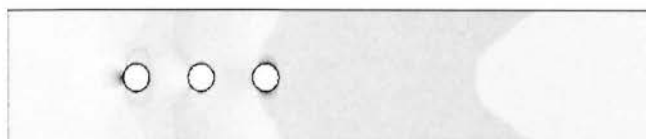
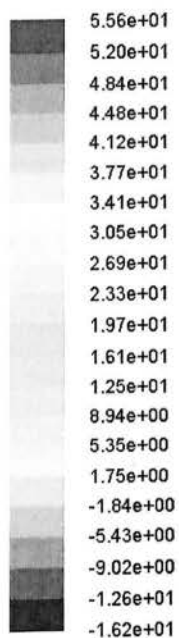
Sep 16, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.12: Ισοϋψείς θερμοκρασίας παραδείγματος 4<sup>ου</sup>



## 5.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5<sup>ο</sup>

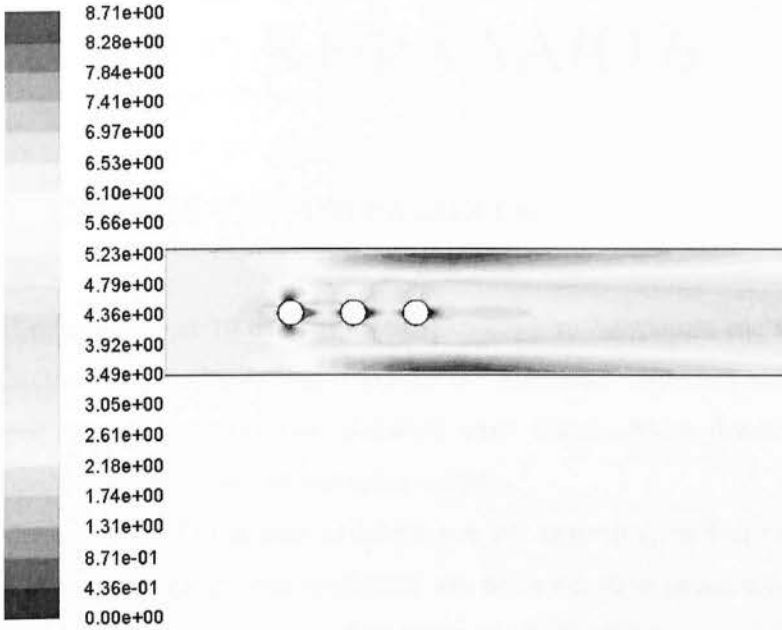
Σε αυτό το παράδειγμα θα αλλάξουμε την θερμοκρασία από 300 °K σε 600 °K.



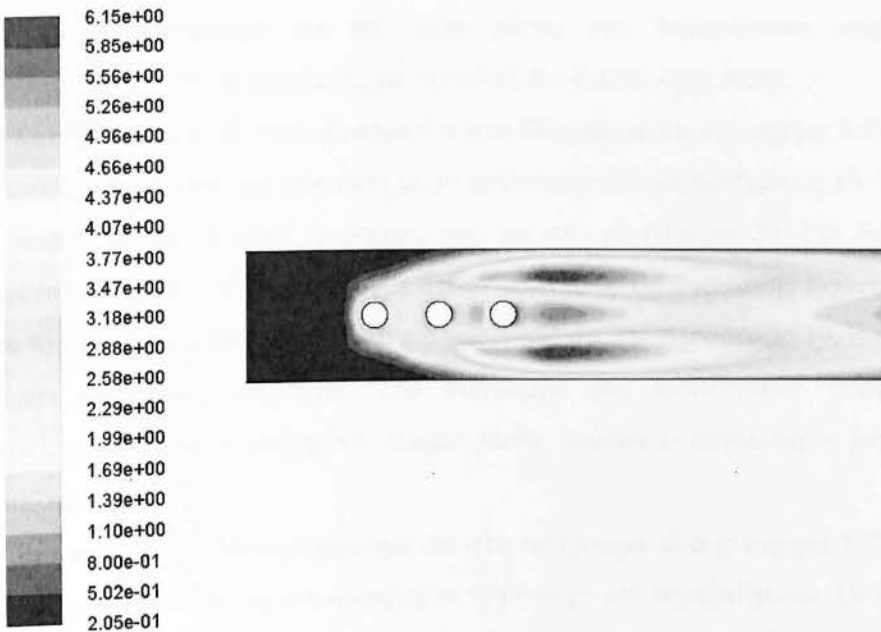
Contours of Static Pressure (pascal)

Jun 27, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)

Σχήμα 5.13: Ισοϋψείς πίεσης παραδείγματος 5<sup>ο</sup>



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Sep 13, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)Σχήμα 5.14: Ισοϋψείς ταχύτητας παραδείγματος 5<sup>ο</sup>

Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2)

Jun 27, 2012  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, ske)Σχήμα 5.15: Ισοϋψείς θερμοκρασίας παραδείγματος 5<sup>ο</sup>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## 6.1 ΣΧΟΛΕΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παράδειγμα 10 στο σχήμα 5.1 βλέπουμε το διάγραμμα της πίεση σε όλη την εφαρμογή που τρέξαμε. Παρατηρούμε ότι βλέπουμε αυξημένη πίεση στο μπροστά μέρος των σωληνώσεων και ιδιαίτερα στην πρώτη. Μετά βλέπουμε ότι η πίεση εξομαλύνετε λίγο μετά από την τρίτη σωλήνα.

Στο σχήμα 5.2 βλέπουμε το διάγραμμα της ταχύτητας σε όλη την εφαρμογή που τρέξαμε. Βλέπουμε ότι στα τοιχώματα στο πάνω και κάτω μέρος του εναλλαχτη, στην πρώτη σωλήνα στο πάνω και κάτω μέρος της αυξημένη ταχύτητα. Παρατηρούμε ότι στο πίσω μέρος των σωληνώσεων ότι η ταχύτητα είναι μηδενική ή πολύ μικρή. Ακόμα ότι η ταχύτητα τείνει να ξανά σταθεροποιηθεί σε όλοι την διατομή του εναλλαχτη στο τέλος του.

Στο σχήμα 5.3 βλέπουμε το διάγραμμα της θερμοκρασία σε όλη την εφαρμογή που τρέξαμε. Παρατηρούμε ότι στο πίσω μέρος των σωληνώσεων αυξάνετε η θερμοκρασία. Αυτό το φαινόμενο παρατηρητή πιο έντονα στην τρίτη.

Στο παράδειγμα 20 παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα πίεσης (σχήμα 5.4) η μονή διάφορα που φαίνεται σε σύγκριση με το αντίστοιχο του παραδείγματος 10. Είναι ότι η μετρούμενη πίεση είναι μικρότερη από ότι στο παράδειγμα 20. Στο διάγραμμα ταχύτητας (σχήμα 5.5) παρατηρούμε ότι το φαινόμενο τις αυξημένης ταχύτητα πάνω στα τοιχώματα του εναλλαχτη είναι πιο νωρίς από ότι στο παράδειγμα 10. Βεβαία μας δείχνει μικρότερες ταχύτητες. Στο διάγραμμα της θερμοκρασία (σχήμα 5.6) παρατηρούμε ότι η αυξημένη θερμοκρασία καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του εναλλαχτη μας.

Στο παράδειγμα 30 παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα πίεσης (σχήμα 5.7) η μονή διάφορα που φαίνεται σε σύγκριση με το αντίστοιχο του παραδείγματος 10. Είναι ότι η μετρούμενη πίεση είναι μεγαλύτερη από ότι στο παράδειγμα 30. Στο διάγραμμα ταχύτητας (σχήμα 5.8) παρατηρούμε ότι το φαινόμενο τις αυξημένης ταχύτητα πάνω στα τοιχώματα του εναλλαχτη και στις σωλήνες είναι πιο έντονο από ότι στο παράδειγμα 10. Αλλά και το φαινόμενο της χαμηλής ταχυτάτας ανάμεσα στις

σωληνώσεις. Στο διάγραμμα της θερμοκρασία (σχήμα 5.9) παρατηρούμε ότι η αυξημένη θερμοκρασία καλύπτει μικρότερο μέρος του εναλλάχτη μας.

Στο παράδειγμα 40 παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα θερμοκρασία (σχήμα 5.12) η μονή διάφορα που φαίνεται σε σύγκριση με το αντίστοιχο του παραδείγματος 10 είναι ότι μιλάμε για μικρότερες θεοκρασία, αλλά σαν μορφοποίηση της μετάδοσης θερμότητας είναι ίδιες και στα δυο διαγράμματα. Τα αλλά δυο διαγράμματα (πίεσης και θερμοκρασίας) δεν υπάρχουν φανερές διαφορές

Στο παράδειγμα 50 παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα θερμοκρασία (σχήμα 5.15) η μονή διάφορα που φαίνεται σε σύγκριση με το αντίστοιχο του παραδείγματος 10 είναι ότι μιλάμε για μεγαλύτερη θεοκρασία, αλλά σαν μορφοποίηση της μετάδοσης θερμότητας είναι ίδιες και στα δυο διαγράμματα. Τα αλλά δυο διαγράμματα (πίεσης και θερμοκρασίας) δεν υπάρχουν φανερές διαφορές

## **6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

- Με τα ίδια δεδομένα αλλά να γίνει σε 3D το σχέδιο και η εκτέλεση.
- Να τοποθετηθούν περισσότεροι αγωγή ώστε να μεγαλώσει η επιφάνια μετάδοσης της θερμότητας.
- Στην περιπτώσει 3D μπορούμε να βάλλουμε φύλλα μετάλλου στην περιοχή που είναι οι σωληνώσεις. Όστε να μεγαλώσουμε την επιφάνια μετάδοσης της θερμότητας.

# 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
- <http://www.boatfinder.gr/gr/news/view/190>
- <http://philon.cheng.auth.gr/site/research/cfd/hx0>
- Συμβιώσεις μετάδοσης θερμότητας I & II (2006)/ ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ

