

Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΜΗΧ
655

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΣΕΩΝ ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΠΑΝΕΛ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

(PARAMETRIC STUDY OF WIND PRESSURE IN SOLAR
PANELS WITH THE USE OF C.F.D.)



ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΤΣΟΥΚΛΑΣ ΘΑΝΑΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ - ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΝΙΚΑΣ

Αθήνα, 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	7
2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ	7
2.2 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ	9
2.3 ΓΙΑΤΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CFD.....	12
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	12
2.5 ΠΕΡΙΟΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD.....	19
2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ CFD.....	19
2.7 CFD ΑΝΑΛΥΣΗ: ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ	21
2.7.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	21
2.7.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΘΑ ΕΠΙΛΥΘΕΙ (ΧΩΡΟΣ & ΧΡΟΝΟΣ)	21
2.7.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	21
2.7.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ, ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	23
2.7.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ	23
2.7.6 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	24
2.8 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	25
2.9 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	25
2.10 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ	26
2.11 ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	26
2.12 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ	27
2.13 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΙ ΜΗ, ΡΟΕΣ).....	28
2.14 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	28
2.15 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	28
2.16 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ	29
2.16.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	29
2.16.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	30
2.16.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (SOLVERS) & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	30
2.16.4 ΥΨΗΛΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	31

2.17 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	32
2.18 ΦΥΣΙΚΗ.....	32
2.19 ΠΛΕΓΜΑ	33
2.20 ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ.....	33
2.21 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ / ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	34
2.22 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ.....	34
2.23 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	36
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GAMBIT	36
3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ	36
3.3 ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ [GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI)].....	38
3.3.1 ΤΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΓΡΑΦΙΚΩΝ.....	38
3.3.2 ΜΕΝΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ	39
3.3.3 ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ	39
3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	40
3.4.1 ΕΝΤΟΛΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	40
3.4.2 ΕΝΤΟΛΕΣ ΠΡΟΣΩΠΩΝ	41
3.4.3 ΕΝΤΟΛΕΣ ΠΛΕΥΡΩΝ.....	42
3.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	42
3.6 ΕΝΤΟΛΕΣ ΖΩΝΗΣ (ZONE COMMANDS) – ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	43
3.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ FLUENT	44
3.7.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ FLUENT	45
3.7.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ FLUENT.....	46
3.7.3 ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	50
4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	50
4.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	53
4.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	54
4.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	55
4.5 ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	57
4.6 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	58
4.7 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ	58
4.8 ΧΡΗΣΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	59
4.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	61

4.10 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ	62
4.11 ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	64
4.12 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΩΤΟΣ	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	69
5.1 GAMBIT	69
5.1.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΠΟΥ ΘΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΟΥΝ ΣΤΟ GAMBIT	70
5.1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ GAMBIT	72
5.2 FLUENT	77
5.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ FLUENT	78
5.2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ	79
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	82
5.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ k-ε	82
5.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ k-ω - SST	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	103
6.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	103
6.1.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ k-ε ΚΑΙ k-ω	103
6.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΑΕΡΑ ΑΠΟ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟ ΔΕΞΙΑ	104
6.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	105
6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η ενασχόληση με λογισμικά προγράμματα σχεδιασμού και επίλυσης ρευστοδυναμικών εφαρμογών. Στόχος είναι να σχεδιάσουμε μία σειρά από φωτοβολταϊκά πάνελ, σε λογισμικό GAMBIT και να την προσομοιάσουμε σε συνθήκες λειτουργίας, μέσω FLUENT για να υπολογίσουμε τις ανεμοπιέσεις που ασκούνται σε αυτά. Ακόμα εξετάζουμε τις διαφορές στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αλλαγές των μοντέλων προσομοίωσης. Τέλος θα παρατηρήσουμε και τις αλλαγές που επιφέρουν αυτές για διαφορετικές κατευθύνσεις του ανέμου.

ΛΕΞΕΙΣ - ΚΛΕΙΔΙΑ

Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Φωτοβολταϊκά Πάνελ, Άνεμος, Κατεύθυνση Ανέμου, Κατανομή Πιέσεων, Κατανομή Ταχυτήτων, Στρωτή και Τυρβώδης Ροή, Συντελεστής Θερμικής Αγωγημότητας, Μοντελοποίηση, Πλέγμα, Fluent, Gambit.

ABSTRACT

The purpose of this project is the avocation with software referring to design and fluid dynamics application solving. The goal is to design a series of photovoltaic panels, using GAMBIT software and simulate it under operating conditions, using FLUENT software to calculate the wind loads exerted on them. Furthermore we will examine the differences that occur from the changes of the simulation models. Finally we will observe the changes that the increase for different wind directios

KEY - WORDS

Computational Fluid Dynamics (CFD), Photovoltaics Panels, Wind, Wind Direction, Pressure Distribution, Velocity Distribution, Laminar and Turbulent Flow, Heat Transfer Coefficient, Modeling, Grid, Gambit, Fluent.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

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 ανα αντικατάστατο εργαλείο επίλυσης των προβλημάτων της.

Ένας από τους κλάδους της μηχανικής των ρευστών (Fluid Mechanics), είναι η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD - Computational Fluid Dynamics). Σκοπός της είναι, χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους και αλγόριθμους, να επιλύσει και να αναλύσει τα προβλήματα που περιλαμβάνουν τις ροές των ρευστών, τη μετάδοσης θερμότητας και μάζας των χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετικών ρευστομηχανικών και θερμορευστομηχανικών φαινομένων. Οι υπέρ-υπολογιστές χρησιμοποιούνται για να εκτελέσουν τα εκατομμύρια των υπολογισμών (επιλύσεις μαθηματικών εξισώσεων) που απαιτούνται για να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση των ρευστών 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 θα πραγματοποιήσουμε προσομοίωση βασικής ρευστομηχανικής εφαρμογής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CFD

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

2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

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

Lewis F. Richardson (1881-1953)



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

Και ακολουθούν:

Richard Courant (1888-1972)



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

John von Neumann (1903-1957)



- Μέθοδοι υπο-χαλάρωσης (1920-1950)
- Βασικό άρθρο από τους Courant, Friedrichs και Lewy για τις υπερβολικές εξισώσεις (1928)

- Ανάλυση ευστάθειας κατά Von Neumann για παραβολικά προβλήματα (1950)
- Οι Harlow και Fromm (1963) υπολόγισαν χρονικά μεταβαλλόμενη ροή (vortex street) με υπολογιστή.
- Δημοσίευσαν ένα άρθρο στο Scientific America (1965) για τη χρήση του CFD σε αριθμητικά πειράματα.

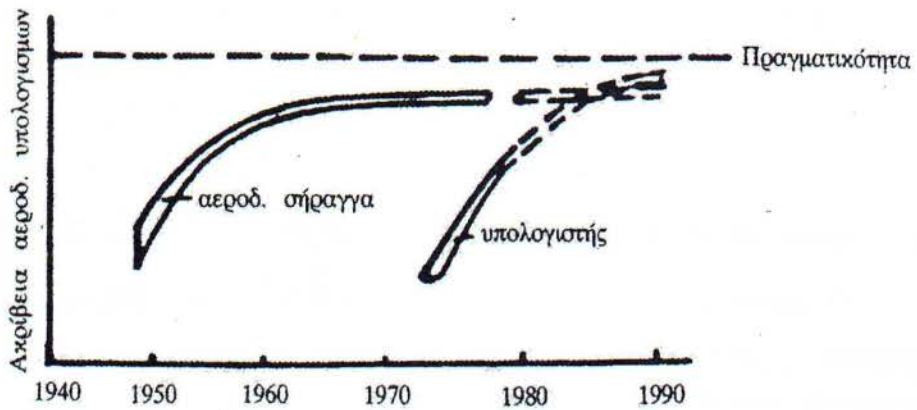
2.2 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

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

Η αεροδυναμική σήραγγα, η οποία έχει τόσο πλατιά χρήση στη μελέτη των αεροδυναμικών φαινομένων μπορεί να θεωρηθεί σαν μηχανισμός ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πεδίο ροής. Συνήθως, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την αεροδυναμική σήραγγα αναφέρονται σε ολοκληρωτικά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως συντελεστής άνωσης, C_L και αντίστασης του αεροσκάφους, C_D , σπανιότερα δε σε σημειακά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως ταχύτητες και πιέσεις σε διάφορες θέσεις. Σήμερα, η συμμετοχή του ηλεκτρονικού υπολογιστή στη λύση των προβλημάτων της μηχανικής των ρευστών είναι σχεδόν πρωταρχική, σε ορισμένες δε περιπτώσεις οι λύσεις που παρέχει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι αρκετά αξιόπιστες και δεν κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος των αριθμητικών αποτελεσμάτων με μετρήσεις.

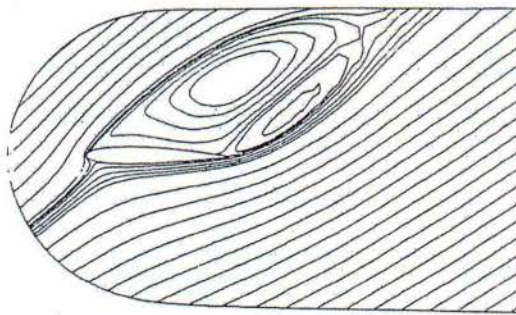
Η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος των μηχανών σε συνδυασμό με την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης φαίνεται, ότι σύντομα θα οδηγήσει στην κατάσταση, όπου η αξιοπιστία των ρευστομηχανικών υπολογισμών να

είναι μεγαλύτερη από την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της πειραματικής προσομοίωσης.



Σχήμα 2.1: Σύγκριση αξιοπιστίας H/Y και αεροδυναμικής σήραγγας

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 2.2: Αεροτομή σε μεγάλη γωνία πρόσπτωσης με καθολική αποκόλληση

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

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

Πολλές φορές συζητείται εκτενώς η δυνατότητα του υπολογιστή να αντικαταστήσει μελλοντικά πειράματα. Προς το παρόν τόσο ο υπολογιστής όσο και η πληθώρα των πειραματικών εφαρμογών αλληλοσυμπληρώνονται. Ο υπολογιστής όμως έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό εξέλιξης αλλά και μείωσης του κόστους εκτέλεσης των αριθμητικών πράξεων. Στο μέλλον, όταν οι υπολογιστικές μέθοδοι θα έχουν βελτιωθεί και η ταχύτητα και η μνήμη των υπολογιστών θα έχει αυξηθεί, προβλέπεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της σχεδίασης των πειραματικών εφαρμογών θα γίνεται με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή και μόνο σε ορισμένες οριακές περιπτώσεις θα ελέγχονται πειραματικά. Τέλος, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής εκτός από τη χρησιμότητα του ως εργαλείου επίλυσης προβλημάτων πρακτικού ενδιαφέροντος συμβάλλει σημαντικότερα στον έλεγχο της ορθότητας των φυσικών υποθέσεων που συνυπάρχουν στις βασικές ρευστομηχανικές εξισώσεις ή σε απλουστευμένες μορφές τους. Η συμφωνία ή η διαφωνία της αριθμητικής και της πειραματικής λύσης οδηγεί στην βελτίωση των φυσικών υποθέσεων. Σήμερα, η μεγάλη ερευνητική προσπάθεια που καταβάλλεται διεθνώς εντοπίζεται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της τυρβώδους ροής.

2.3 ΓΙΑΤΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CFD

Η τεχνολογία CFD χρησιμοποιείται κυρίως για τους ακόλουθους λόγους:

◇ Για την προσομοίωση βασισμένη στο σχεδιασμό, παρέχοντας ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τη ροή ρευστού μέσα ή γύρω από μια επιφάνεια.

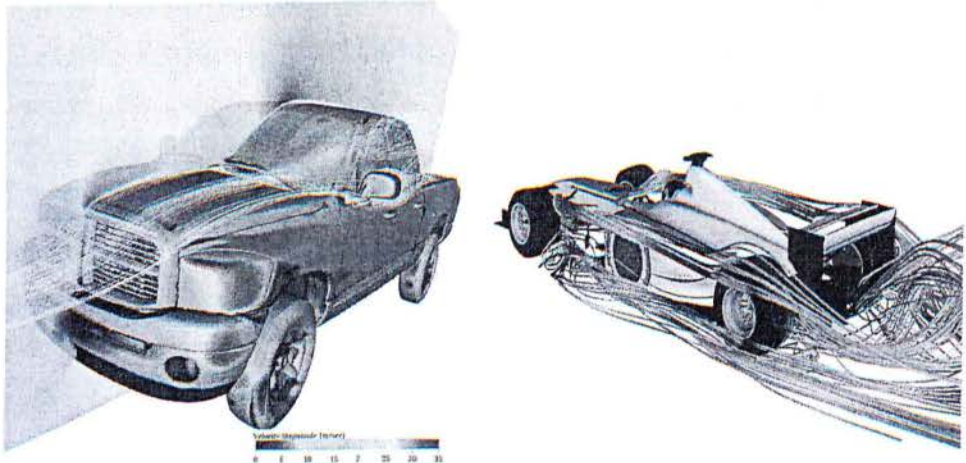
◇ Για περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να διεξαχθεί πείραμα ώστε να πάρουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, (προσομοίωση φυσικών φαινομένων) όπως π.χ.:

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

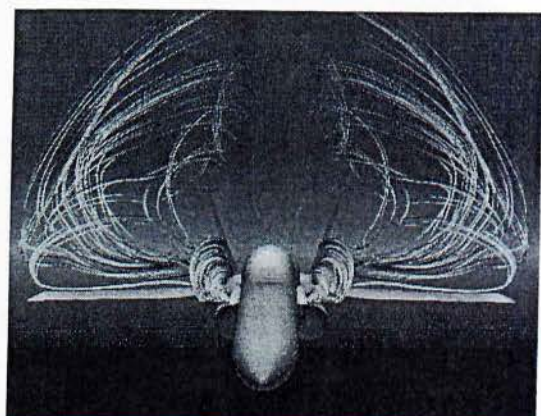
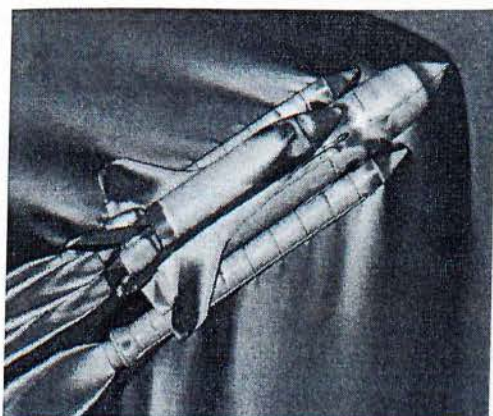
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

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

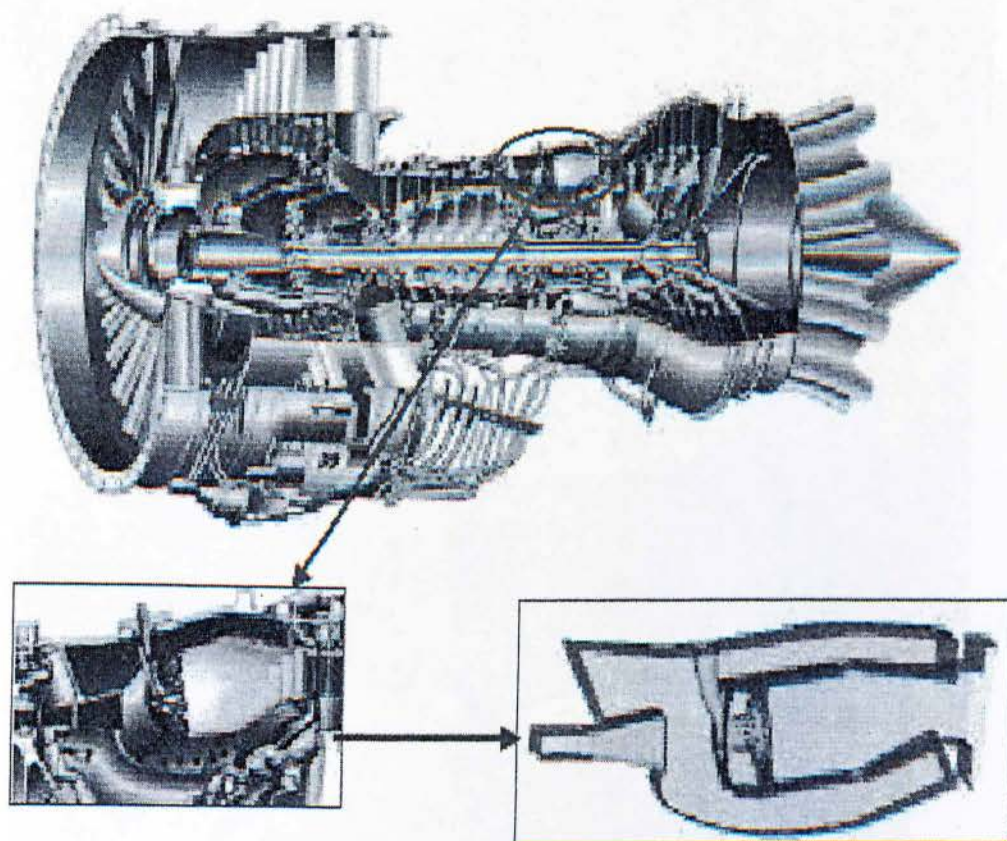
- Αεροδυναμική οχημάτων εδάφους, αεροσκαφών, πυραύλων κ.τ.λ.



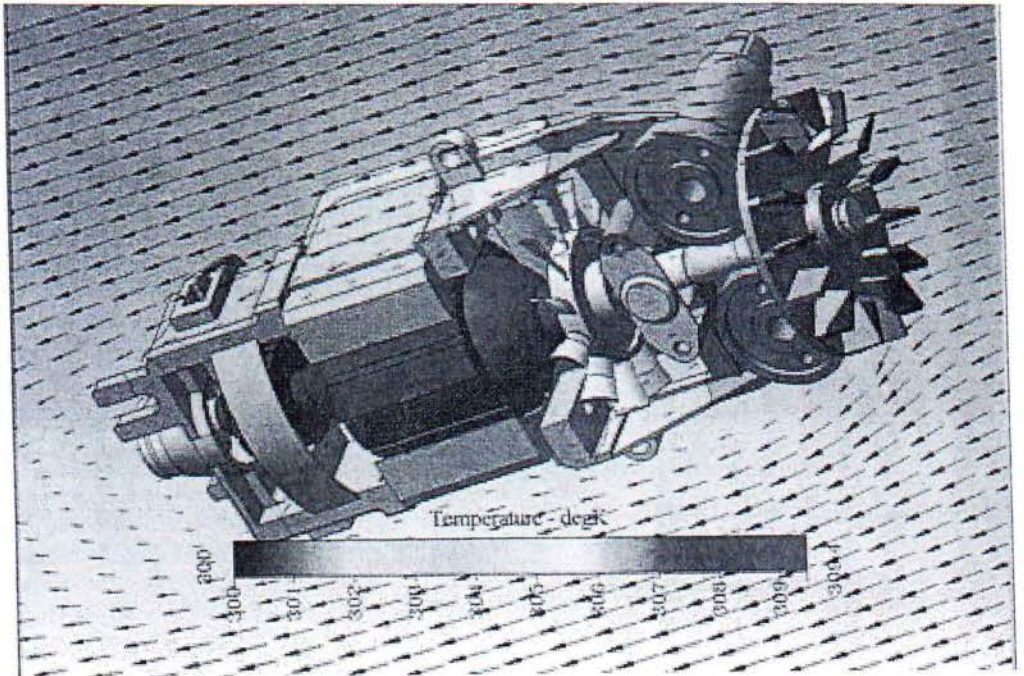
- Υδροδυναμική των σκαφών
- Αεροδυναμική οχημάτων εδάφους, αεροσκαφών, πυραύλων κ.τ.λ
- Ροές μηχανών - μηχανές ολοκληρωμένου κυκλώματος και αεριωθούμενες μηχανές



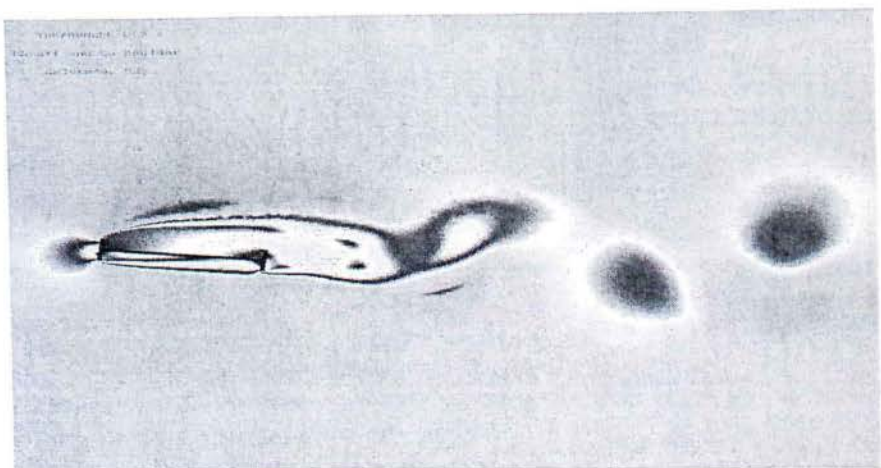
- Στροβιλοκινητήρες - αντλίες



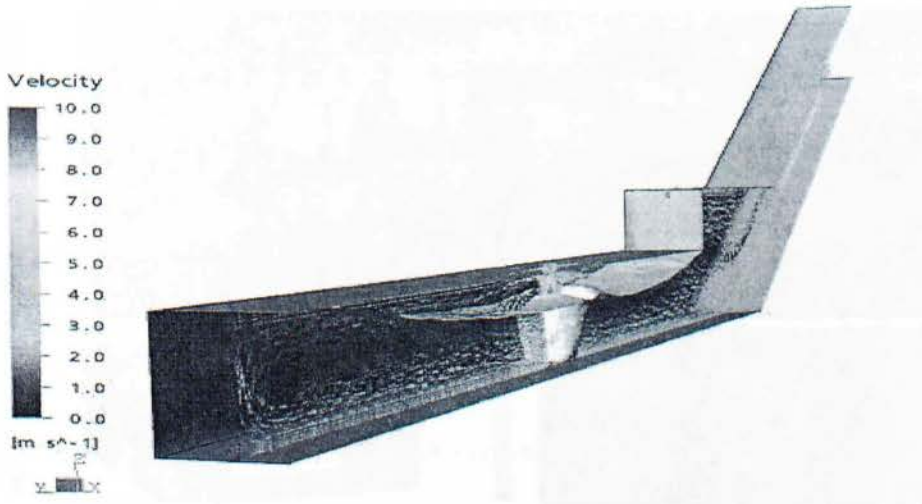
- Μεταφορά θερμότητας - θέρμανση και συστήματα ψύξης
- Ροή ρευστού και μετάδοση θερμότητας σε βιομηχανικές διεργασίες (λέβητες, εναλλάκτες, συσκευές καύσης, αντλίες, ανεμιστήρες, σωληνώσεις, κ.λπ.)



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



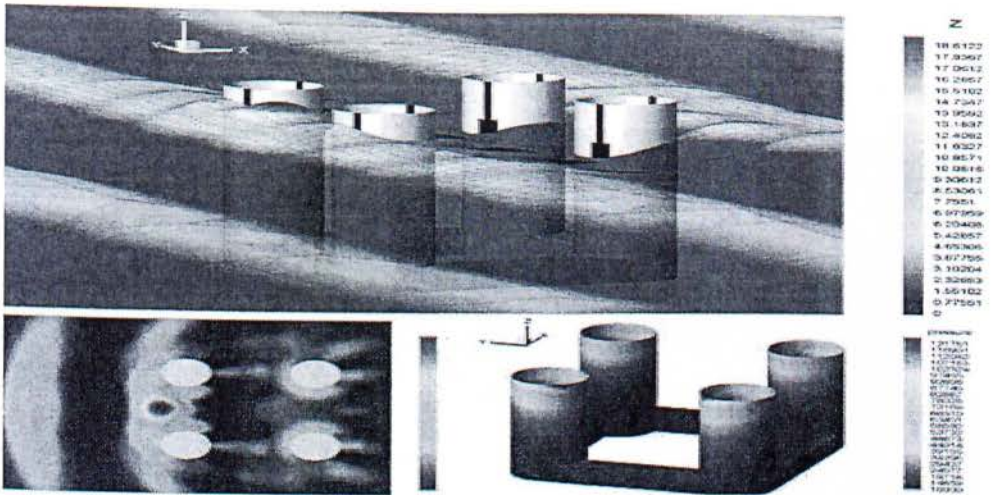
➤ Εξαερισμός κτηρίων



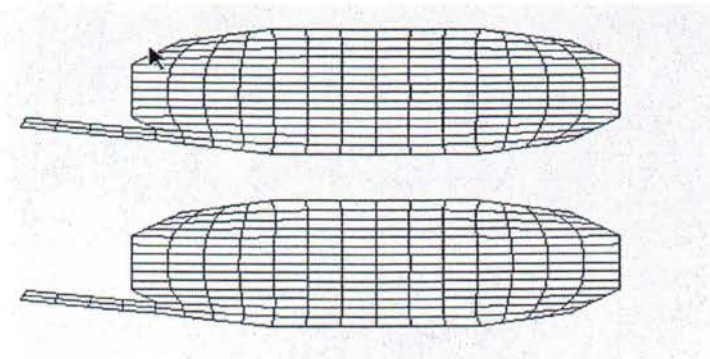
➤ Περιβαλλοντική εφαρμοσμένη μηχανική - μεταφορά των ρύπων και των αποβλήτων αποχέτευσης



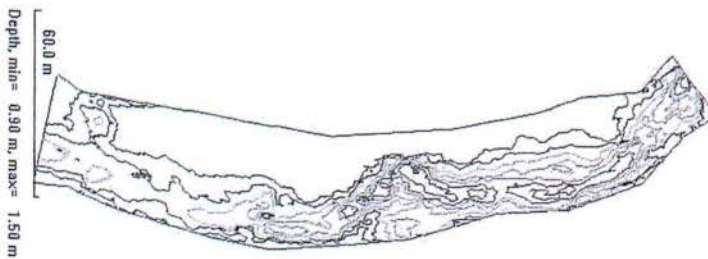
- Παράκτια εφαρμοσμένη μηχανική - φόρτωση στις παράκτιες και θαλάσσιες δομές



- Υδραυλική - δίκτυα σωλήνων, δεξαμενές, κανάλια



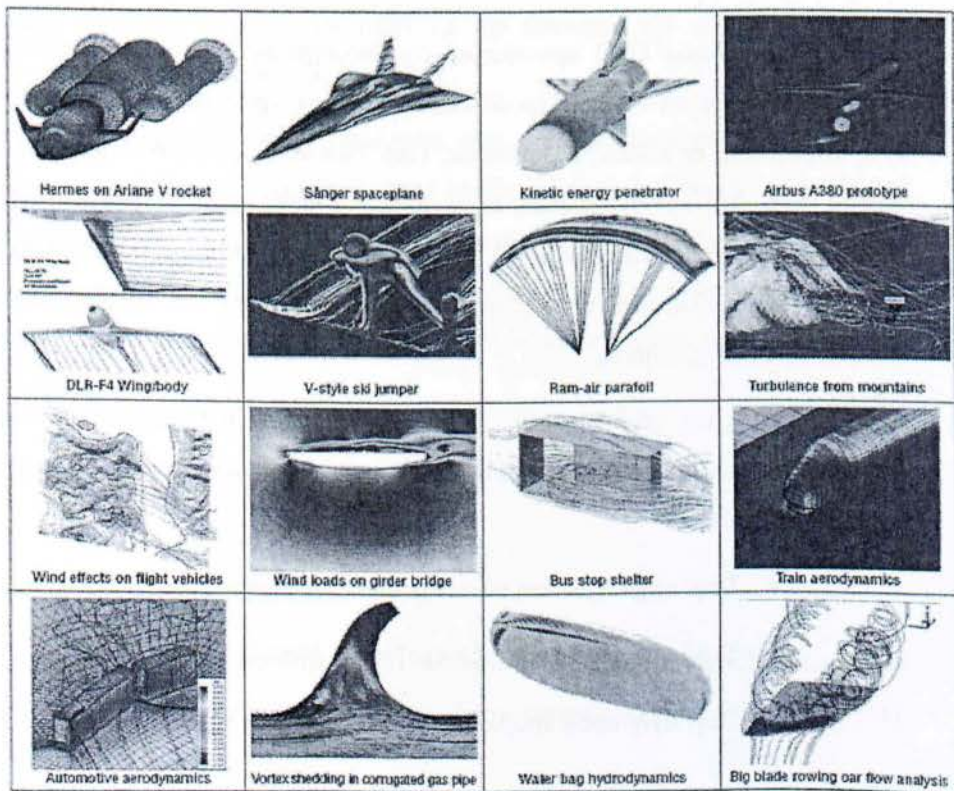
- Μεταφορά ιζημάτων



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 ακόμη εφαρμογές της CFD...



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



Σχήμα 2.3: Κατανομή πίεσης σε βαλβίδα καρδιάς (βιοϊατρική)

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

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

- Στην αρχική μελέτη νέων σχεδίων (conceptual design)
- Στη λεπτομερή ανάπτυξη προϊόντων (detailed development)
- Στην ανίχνευση προβλημάτων (troubleshooting)

Συμβάλλοντας έτσι:

- Στον ανασχεδιασμό-βελτιστοποίηση (redesign-optimization)

2.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD

Στο CFD υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί. Στα μαθηματικά μοντέλα, οι επιλύσεις βασίζονται σε μοντέλα των πραγματικών φαινομένων (π.χ. μοντέλα τυρβώδους, συμπεστότητας, 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 πυκνωση του πλέγματος ή με τη χρήση σχημάτων μεγαλύτερης ακρίβειας.

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

2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ CFD

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

- Είναι φθηνότερη και πιο γρήγορη στη διεξαγωγή.

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

- Πραγματοποιείται σε πραγματική κλίμακα, χωρίς περιορισμούς και όρια.

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

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

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

2.7 CFD ΑΝΑΛΥΣΗ: ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

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

2.7.1 Καθορισμός Στόχων Μοντελοποίησης

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

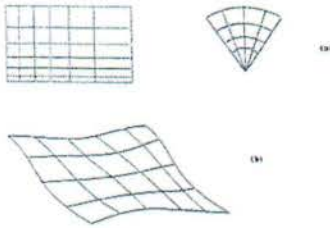
2.7.2 Καθορισμός Πεδίου Που Θα Επιλυθεί (Χώρος & Χρόνος)

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

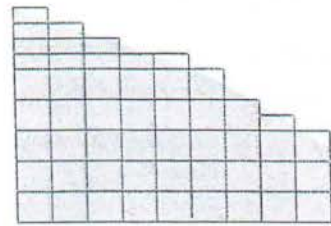
2.7.3 Σχεδιασμός & Κατασκευή Του Υπολογιστικού Πλέγματος

- Θα χρησιμοποιηθεί εξαεδρικό/τετραπλευρικό ή τετραεδρικό / τριγωνικό πλέγμα, υβριδικό, μη συμβατό πλέγμα
- Τι βαθμός ανάλυσης (resolution) πλέγματος απαιτείται σε κάθε τμήμα του πεδίου
- Θα χρησιμοποιηθεί προσαρμογή του πλέγματος για αύξηση της ανάλυσης (resolution)
- Πόσα στοιχεία πλέγματος απαιτούνται για το πρόβλημα

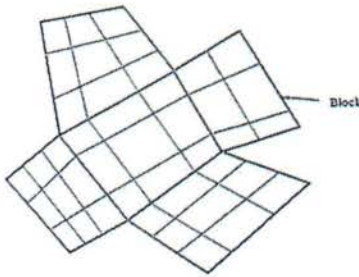
Τύποι πλεγμάτων:



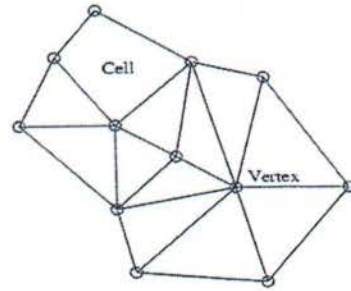
Κανονικά πλέγματα και πλέγματα 'body-fitted'



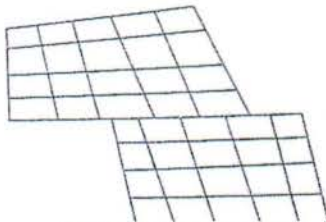
Βαθμιδωτή αναπαράσταση περιτπλοκής γεωμετρίας



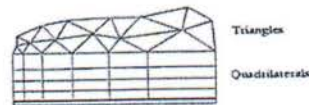
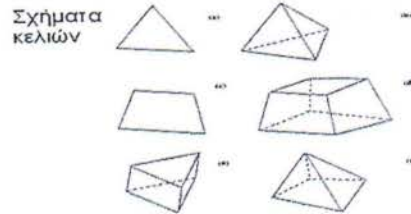
Δομημένα κατά block πλέγματα



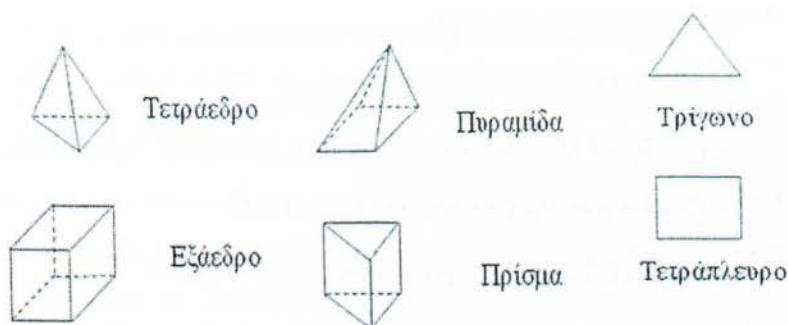
Αδόμητα (unstructured) πλέγματα



Πλέγματα με κελιά που δεν συμπίπτουν οι ακμές τους



Υβριδικά πλέγματα



Σχήμα 2.4: Τύποι πλεγμάτων

2.7.4 Δημιουργία Ενός Αριθμητικού, Μαθηματικού Μοντέλου

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

2.7.5 Επίλυση Και Παρακολούθηση Της Λύσης

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

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

2.7.6 Έλεγχος Των Αποτελεσμάτων

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

2.8 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

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

2.9 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

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

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

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

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

Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει:

- Γεωμετρία και πεδίο ορισμού
- Συντεταγμένες
- Εξισώσεις
- Συνθήκες ροής
- Αρχικές & οριακές συνθήκες
- Επιλογή του μοντέλου (για τις διάφορες εφαρμογές)

2.10 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ

Οι σχεδιαστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι ακόλουθες:

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

2.11 ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ

Διακρίνουμε τρία συστήματα συντεταγμένων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5:

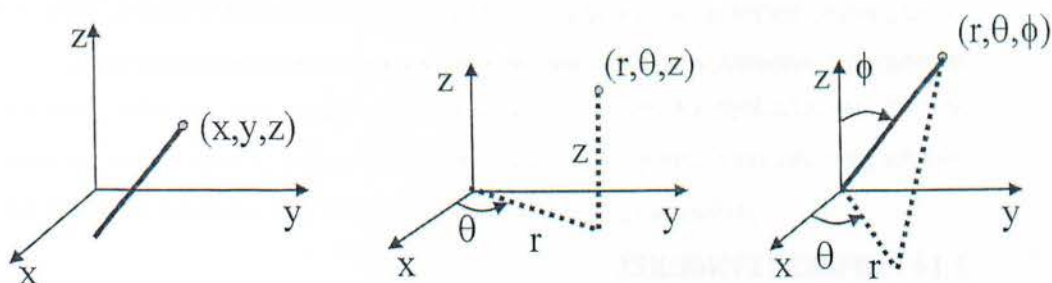
- i) Καρτεσιανό (x,y,z),
- ii) Κυλινδρικό (r, θ, z),
- iii) Σφαιρικό (r, θ, Φ),

καθένα από τα οποία πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα, για την ορθότερη ανάλυση της γεωμετρίας (π.χ. κυλινδρικό σύστημα για ένα κυλινδρικό σωλήνα).

Καρτεσιανές

Κυλινδρικές

Σφαιρικές



Σχήμα 2.5: Συστήματα συντεταγμένων

2.12 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ

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

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

2.13 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ 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, ενώ για σύνθετα προβλήματα ασταθούς ροής, πολλές φορές τρέχουμε το πρόγραμμα σαν να είχαμε πρόβλημα σταθερής ροής για περισσότερες επαναλήψεις, έτσι ώστε να πάρουμε καλύτερες αρχικές συνθήκες.

2.14 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

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

2.15 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

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

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

- Μοντέλα τυρβώδους ροής

Τα μοντέλα αυτά είναι πιο ακριβή όσον αφορά την επίλυση εξισώσεων, αλλά πιο ακριβά για τις τυρβώδεις ροές ενώ παράλληλα κάνουν προβλέψεις για τη ροή,

αποτελεσματικές (αξιόπιστές) μέσα στο οριακό στρώμα, αλλά όχι τόσο ακριβείς και στην χωρισμένη περιοχή.

- Μοντέλα ελεύθερης επιφανειακής ροής

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

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

2.16 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ / ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ

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

2.16.1 Αριθμητικές Μέθοδοι

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

Οι αριθμητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν:

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

2.16.2 Περιγραφικές Μέθοδοι

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (όταν πρόκειται για πλέγμα καθορισμένης μορφής) και μέθοδος πεπερασμένων όγκων (για πλέγμα ακανόνιστης μορφής).
- Κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους αποφέρει την ίδια λύση, εάν το πλέγμα είναι αρκετά καλό. Ωστόσο, τότε η μια μέθοδος και τότε η άλλη, είναι περισσότερο χρήσιμη (και κατά συνθήκη κατάλληλη) από την άλλη, ανάλογα με τη χρήση.
- Οι περισσότερο ποιοτικές αριθμητικές μέθοδοι συνήθως αποφέρουν αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια αλλά μάλλον ασταθή εξαιτίας λιγότερης αριθμητικής dissipation.
- Explicit μέθοδοι μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν αλλά θα δώσουν μόνο κατά συνθήκη σωστές μερικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιορίζονται από το χρόνο του βήματος.
- Η περιγραφική μέθοδος θεωρείται ευσταθής αν δεν μεγαλώνει τα σφάλματα τα οποία εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της αριθμητικής επίλυσης.
- Pre-conditioning μέθοδος χρησιμοποιείται όταν είναι αδύνατο να επιλυθεί το γραμμικό σύστημα, όπως π.χ. περιπτώσεις πολυφασικής ροής.

2.16.3 Μέθοδοι Επίλυσης (Solvers) & Αριθμητικές Παράμετροι

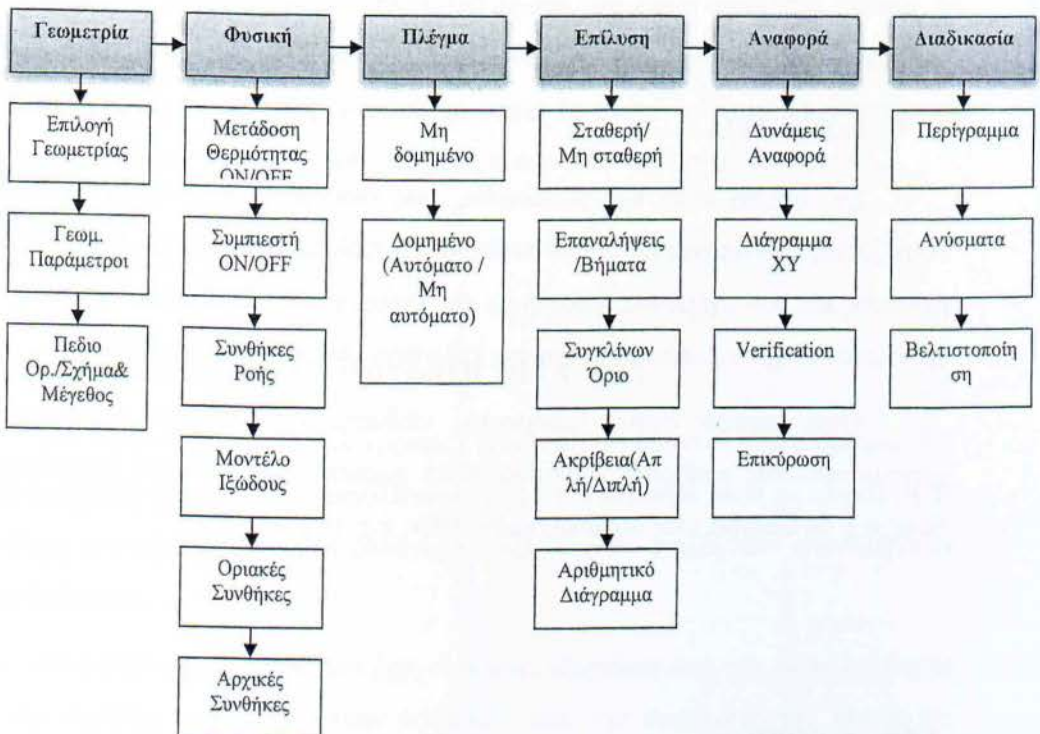
- Τα είδη των επιλυτών (Solvers) μπορούν να είναι PETSC solver, tridiagonal, pentadiagonal solvers, solution-adaptive solver, πολλαπλού πλέγματος (multi-grid solvers) κ.α.
- Οι μέθοδοι επίλυσης (solvers) μπορούν να είναι είτε άμεσες είτε επαναληπτικές. Οι αριθμητικές παράμετροι πρέπει να είναι καθορισμένες, για τον έλεγχο των υπολογισμών.
- Οι αριθμητικές παράμετροι πρέπει να προσδιορίζονται ώστε να ελέγχουν τους υπολογισμούς.
- Διαφορετική απεικόνιση αριθμητικών συμβόλων
- Αλλαγές των αποτελεσμάτων μεταξύ των επαναλήψεων

- Αριθμός επαναλήψεων για σταθερή ροή ή αριθμός βημάτων για μεταβλητή ροή
- Απλές / Διπλές ακρίβειες

2.16.4 Υψηλή Υπολογιστική Λειτουργία & Διαδικασία Εργασίας

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

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



Σχήμα 2.6: Διαδικασία CFD ανάλυσης

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 σχεδιάγραμμα του Σχήματος 2.6

2.17 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

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

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

2.18 ΦΥΣΙΚΗ

Με την επιστήμη της φυσικής, θα μελετήσουμε έννοιες όπως οι συνθήκες

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

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

2.19 ΠΛΕΓΜΑ

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

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

2.20 ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ

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

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

και η επιλογή των κατάλληλων Solvers.

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

2.21 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ / ΈΛΕΓΧΟΣ 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.

2.22 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

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

2.23 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

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

GAMBIT ΚΑΙ FLUENT

Στο συγκεκριμένο αυτό κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα εμπορικό λογισμικό (GAMBIT) με το οποίο κατασκευάσαμε τη γεωμετρία της άσκησης μας, δηλαδή την σειρά των φωτοβολταϊκών πάνελ 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.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GAMBIT

Το GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit) είναι ένας ολοκληρωμένος προεπεξεργαστής για την ανάλυση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) με τις παρακάτω δυνατότητες:

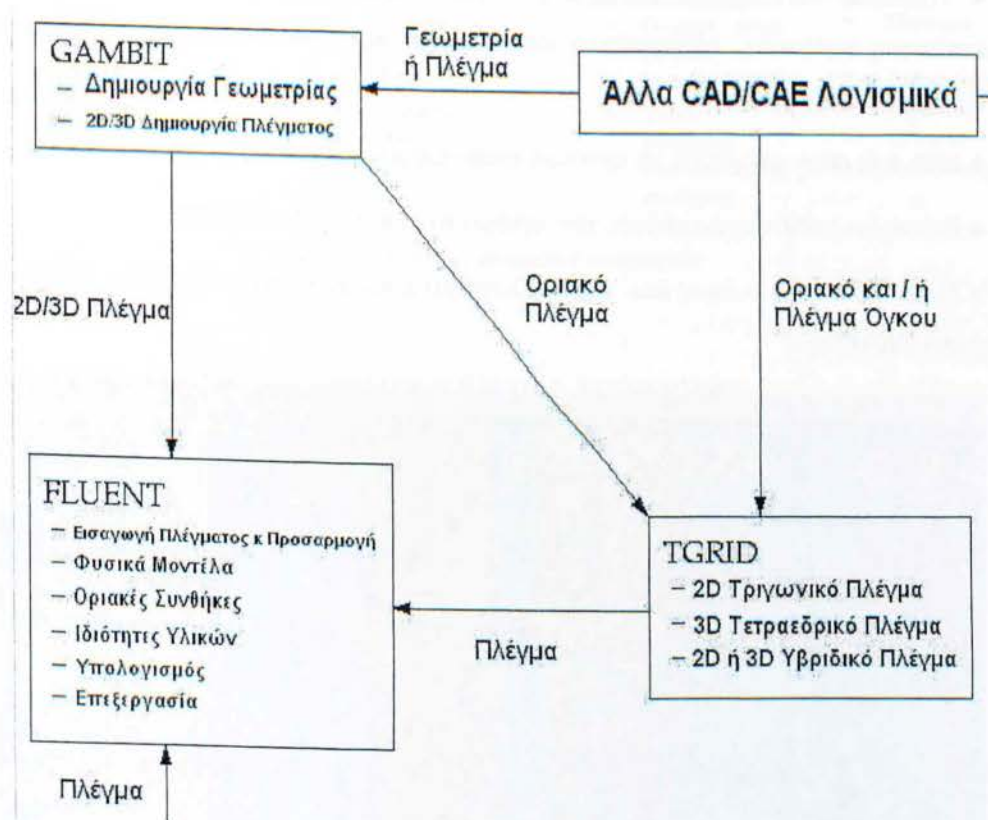
- Κατασκευή και εισαγωγή γεωμετρίας
 - Χρησιμοποιώντας σύστημα ACIS για την μοντελοποίηση στερεών
 - Εισαγωγή STEP, Parasolid, IGES κ.α.
 - Τροποποίηση και 'καθαρισμός' των εισαχθέντων δεδομένων.
- Δημιουργία πλέγματος για όλους τους λύτες (Solvers) του Fluent συμπεριλαμβανομένου και των FIDAP και POLYFLOW
 - 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 μεγέθος 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, όγκος. Τέλος ακολουθεί η εξέταση του πλέγματος και ο προσδιορισμός των ζωνών, δηλαδή αν έχουμε να κάνουμε με συνεχείς ή οριακές ζώνες.



Σχήμα 3.1: Λογικό διάγραμμα διαδικασίας CFD μέσω λογισμικών πακέτων

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

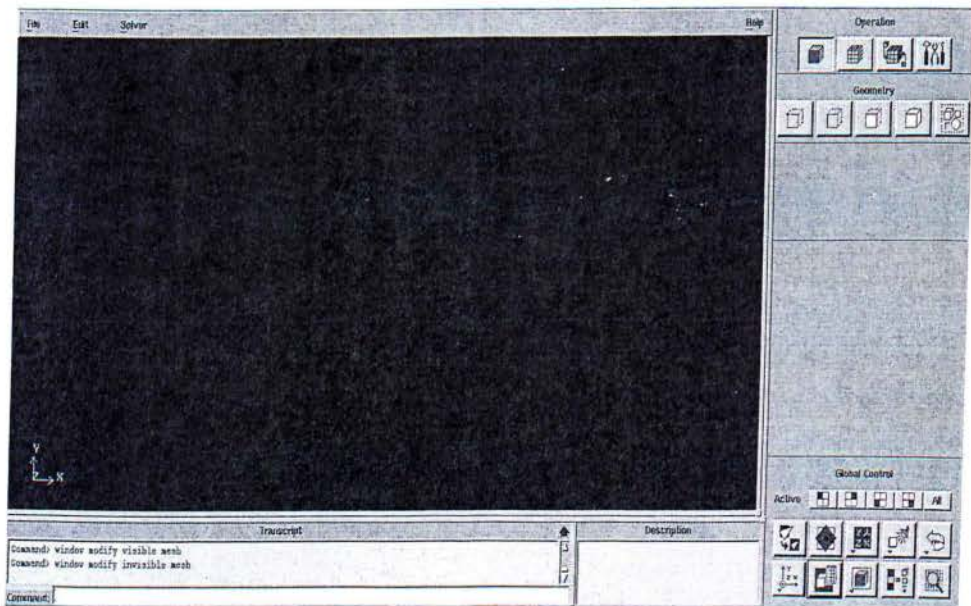
Το γραφικό περιβάλλον του χρήστη αποτελείται από:

3.3.1 Το Παράθυρο Γραφικών

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

ΚΥΡΙΟ ΜΕΝΟΥ, το οποίο περιλαμβάνει τις βασικές λειτουργίες του λογισμικού πακέτου και βρίσκεται στο πάνω μέρος του παραθύρου που παρουσιάζεται πιο κάτω:

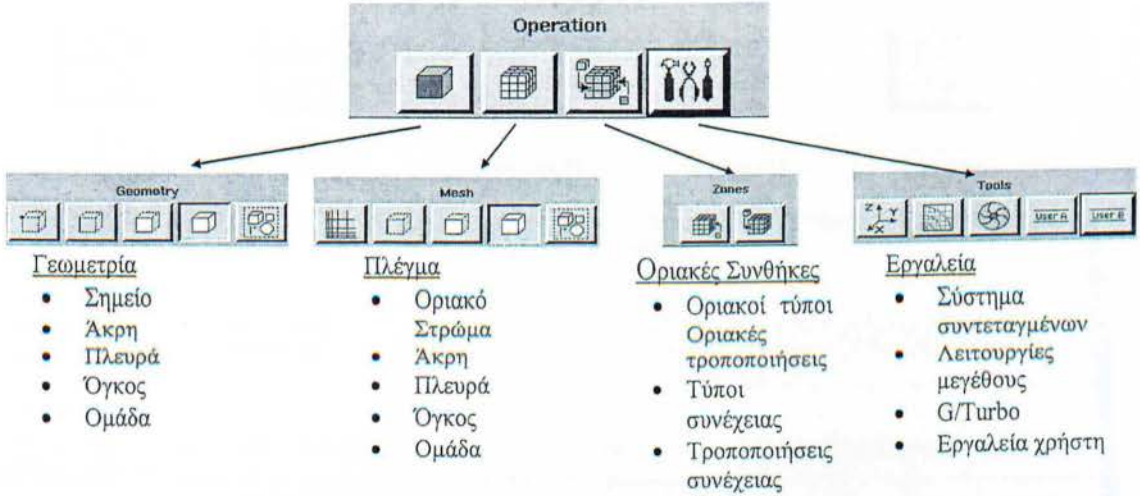
- **File**, από όπου έχουμε τις εξής επιλογές: δημιουργία, άνοιγμα, αποθήκευση, εκτύπωση γραφικών, τροποποίηση και τρέξιμο αρχείων, εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων και έξοδος.
- **Edit**, από όπου μπορούμε να κάνουμε τροποποίηση: τίτλων, αρχείων, παραμέτρων.
- **Solver**, το οποίο περιλαμβάνει τον ορισμό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



Σχήμα 3.2: Γραφικό περιβάλλον χρήστη

3.3.2 Μενού Εργαλείων Λειτουργιών

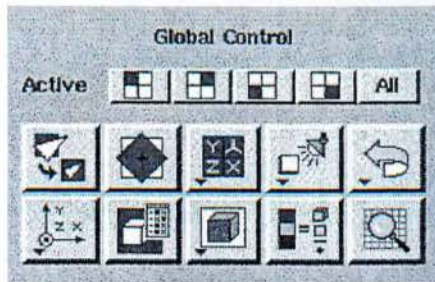
Βρίσκεται στο επάνω δεξιά μέρος και περιλαμβάνει ένα πεδίο από κουμπιά εντολών, καθένα από τα οποία εκτελεί μία συγκεκριμένη εντολή που συσχετίζεται με την διαδικασία δημιουργίας γεωμετρικού μοντέλου και πλέγματος, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 3.3: Μενού εργαλείων λειτουργιών

3.3.3 Γενική Γραμμή Εργαλείων Ελέγχου Λειτουργιών

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



Σχήμα 3.4: Γενική γραμμή εργαλείων ελέγχου λειτουργιών

3.4 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

Σχήμα 3.5: Μενού γεωμετρίας











3.4.1 Εντολές Σημείων

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, έλεγχος και πληροφορίες σημείων Ολικές οντότητες	Παρουσιάζει σύνοψη πληροφοριών σημείων, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας ενός σημείου ή μιας γεωμετρίας, εμφανίζει λίστα πληροφοριών σημείων.

	Διαγραφή σημείων	Διαγραφή σημείων.
---	------------------	-------------------


Σχήμα 3.6: Σχηματική διάταξη εντολών σημείων

3.4.2 Εντολές Προσώπων

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 και εικονικά πρόσωπα, αποσυνδέει κοινόχρηστα πρόσωπα.
	Επεξεργασία χρώματος και περιγραφής προσώπων	Τροποποίηση χρωμάτων προσώπων και ετικετών.
	Μετακίνηση / Αντιγραφή προσώπων Ευθυγράμμιση προσώπων	Μετακινεί, αντιγράφει πρόσωπα, ευθυγραμμίζει πρόσωπα και συνδεδεμένες γεωμετρίες.
	Διάσπαση, συγχώνευση, και απλοποίηση προσώπων	Διάσπαση, συγχώνευση και απλοποίηση προσώπων.
	Εξομάλυνση, επιδιόρθωση και μετατροπή προσώπων	Εξομάλυνση επιδιόρθωση πραγματικών προσώπων, μετατροπή εικονικών προσώπων σε πραγματικά.
	Σύνοψη, έλεγχος και 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.

Σχήμα 3.7: Σχηματική διάταξη εντολών προσώπων

3.4.3 Εντολές Πλευρών

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΝΤΟΛΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
	Δημιουργία πλευράς	Δημιουργία πραγματικής ή εικονικής πλευράς.
	Σύνδεση / Αποσύνδεση πλευρών	Συνδέει πραγματικές και εικονικές πλευρές που είναι κοινές σε δύο ή περισσότερες οντότητες.
	Επεξεργασία χρώματος και περιγραφής πλευρών	Αλλάζει το χρώμα ή την περιγραφή των πλευρών.
	Μετακίνηση / Αντιγράφη πλευρών Ευθυγράμμιση πλευρών	Μετακινεί ή αντιγράφει σημεία, ευθυγραμμίζει σημεία και συνδεδεμένες γεωμετρίες.
	Διαχωρισμός και συνένωση πλευρών	Διαχωρίζει ή ενοποιεί πλευρές.
	Εξομάλυνση και μετατροπή πλευρών	Εξομαλύνει τις πλευρές για την επισκευή της κακής γεωμετρίας και την μείωση της πολυπλοκότητας, μετατρέπει πραγματικές σε εικονικές πλευρές.
	Σύνοψη, έλεγχος και εξέταση πλευρών	Εμφανίζει σύνοψη πληροφοριών πλευρών, ελέγχει την εγκυρότητα της τοπολογίας των πλευρών και της γεωμετρίας.
	Διαγραφή πλευρών	Διαγράφει πραγματικές και εικονικές πλευρές.

Σχήμα 3.8: 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 ραγιές, 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.

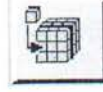
Παρακάτω φαίνεται η γενική μορφή ενός πλέγματος(mesh or grid) και τα μέρη που το συνθέτουν.

3.6 ΕΝΤΟΛΕΣ ΖΩΝΗΣ (ZONE COMMANDS) - ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

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

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

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



Σχήμα 3.9: 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.

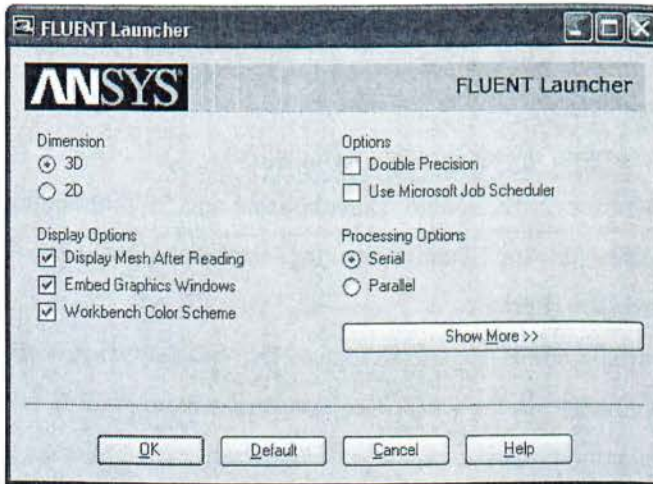
3.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ FLUENT

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.

3.7.1 Λειτουργία Fluent

Στην αρχική φόρτωση του προγράμματος έχουμε την επιλογή να διαλέξουμε μεταξύ κάποιων παραμέτρων ανάλυσης :

- 2d (Δισδιάστατη Προσομοίωση)
- 2d-dp (Δισδιάστατη Προσομοίωση Διπλής Ακριβείας)
- 3d (Τρισδιάστατη Προσομοίωση)
- 3d-dp (Τρισδιάστατη Προσομοίωση Διπλής Ακριβείας)



Σχήμα 3.10: Παράθυρο αρχικής φόρτωσης fluent

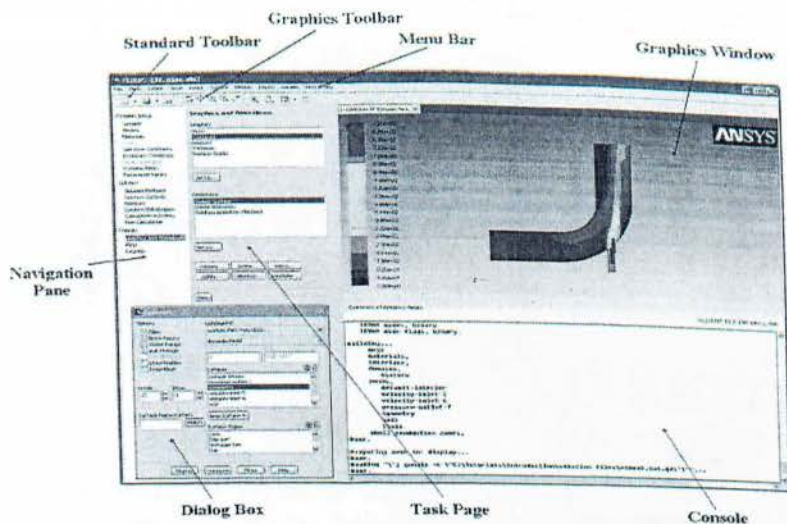
Στη συνέχεια εισάγουμε το αρχείο που δημιουργήσαμε στο Gambit. Αυτόματα μας εμφανίζει τη γεωμετρία με το κατασκευασμένο πλέγμα στην οθόνη οπτικοποίησης του GUI του προγράμματος. Στη συνέχεια ακολουθούνται κάποια βήματα που ορίζουν τις συνθήκες της προσομοίωσης, τα οποία είναι :

- Επιλέγουμε μοντέλο επίλυσης (πχ. Μοντέλα k-ε, k-ω)
- Ορίζουμε το υλικό του στερεού όγκου και του είδους του ρευστού
- Θέτουμε τις οριακές συνθήκες λειτουργίας (πχ. Ταχύτητα εισόδου ρευστού)
- Ορίζουμε την μέθοδο διακριτοποίησης (πχ. first-second order upwind, Quick)

- Ορίζουμε τους Under-relaxation factors για κάποιες απο τις παραμέτρους (πχ. Momentum, Pressure, Turbulent Kinetic Energy, Turbulent Dissipation Rate)
- Θέτουμε το αποτέλεσμα στο οποίο η διαδικασία της επίλυσης θα διακοπεί και την θεωρούμε ως λύση (Convergence Criterion)
- Κάνουμε έλεγχο του πλέγματος (Check Grid) και ολόκληρης της προσομοίωσης (Check Case). Αυτά τα βήματα μας δείχνουν αν κάτι δεν λειτουργεί σωστά στην προσομοίωση και τυχόν διορθώσεις που χρειάζονται.
- Ορίζουμε κάποιες συνθήκες για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (πχ. Plot)
- Εκκινούμε την προσομοίωση (Initialize)
- Θέτουμε έναν αριθμό επαναλήψεων για την προσομοίωση μας και εκκινούμε την διαδικασία της επαναλαμβανόμενης επίλυσης του μοντέλου (Iterate).
- Οπτικοποιούμε τα αποτελέσματα της επίλυσης (πχ. Vectors, Contours, Pathlines) για τις επιφάνειες που μας ενδιαφέρουν ή για όλο το πεδίο επίλυσης. Συγκεκριμένες επιφάνειες ή σημεία μπορούν να οπτικοποιηθούν μέσω κατασκευής νέων ενδιάμεσων επιφανειών (Planes)

3.7.2 Επιφάνεια Εργασίας Fluent

Στην χρησιμοποιούμενη έκδοση FLUENT υπάρχει ένα κυρίως GUI για όλες τις λειτουργίες, σε αντίθεση με παλαιότερες εκδόσεις όπου η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γινόταν μέσω δεύτερου παραθύρου. Στο συγκεκριμένο GUI υπάρχουν δύο μενού, ένα οριζόντιο (Κυρίως Μενού) και ένα κατακόρυφο (Δευτερεύον Μενού) στο οποίο εμφανίζονται κάποιες συντομεύσεις για τις κυριότερες και πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συντομεύσεις.



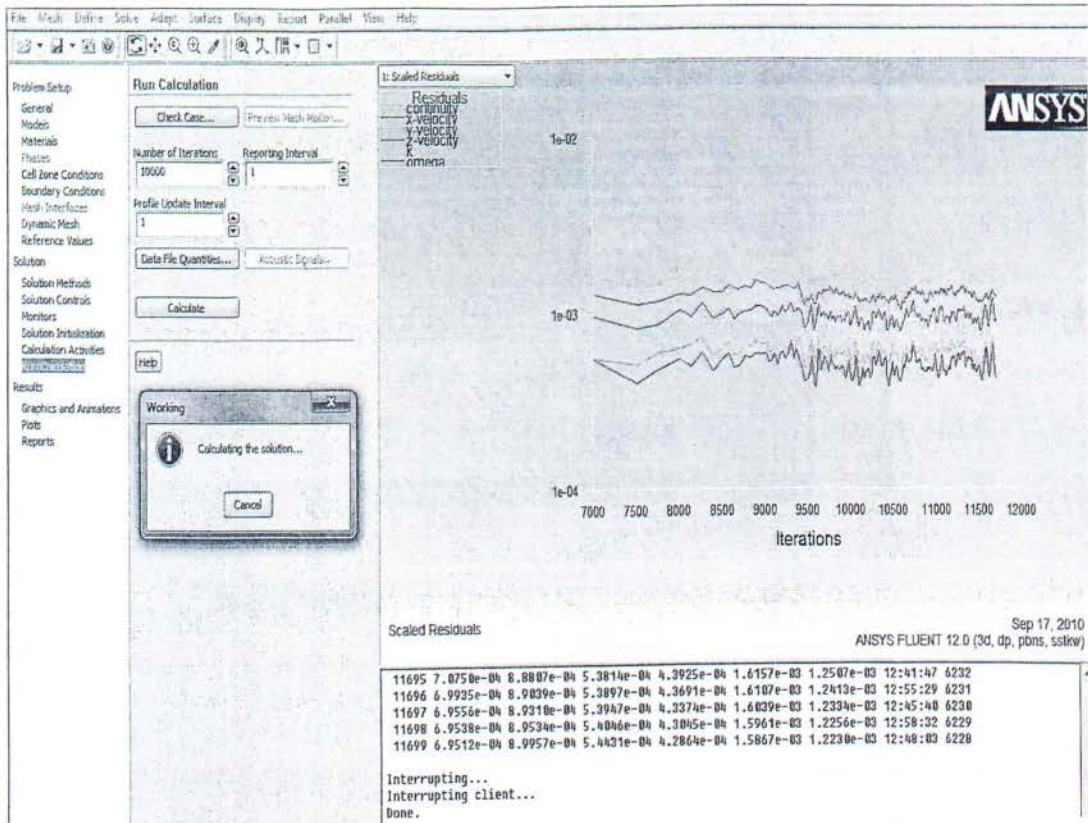
Σχήμα 3.11: Fluent - graphical user interface

Στο κυρίως μενού κάθε στήλη σχετίζεται με συγκεκριμένες λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα :

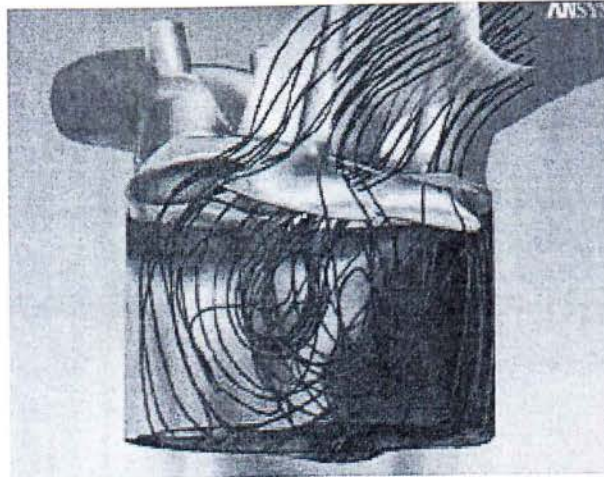
- *File* → Εισαγωγή πλέγματος, εισαγωγή και εγγραφή Case και Data
- *Grid* → Έλεγχος και άλλες σχετικές με το πλέγμα λειτουργίες.
- *Define* → Ορισμός συνθηκών λειτουργίας μοντέλου
- *Solve* → Επιλογές που αφορούν τη διαδικασία επίλυσης
- *Surface* → Επεξεργασία επιπέδων και επιφανειών
- *Display* → Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της επίλυσης

3.7.3 Γραφικές Απεικονίσεις

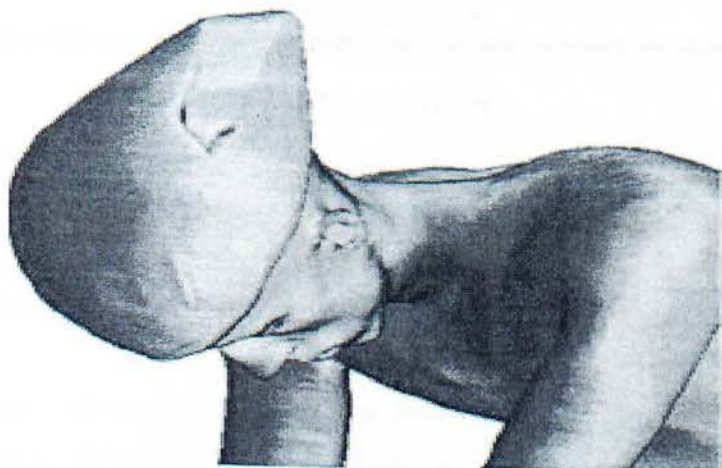
Στην συνέχεια παρατίθενται κάποια παράθυρα εργασίας από το GUI του FLUENT καθώς και οπτικοποιημένα παραδείγματα :



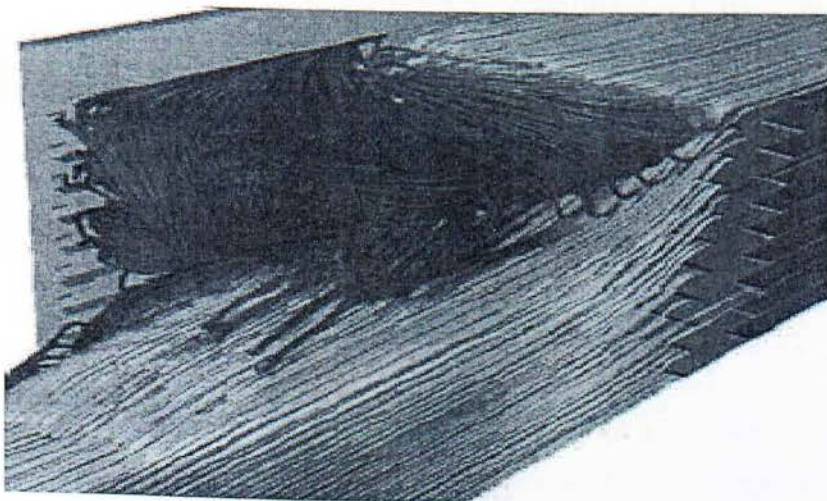
Σχήμα 3.12: GUI κατά την διάρκεια επίλυσης



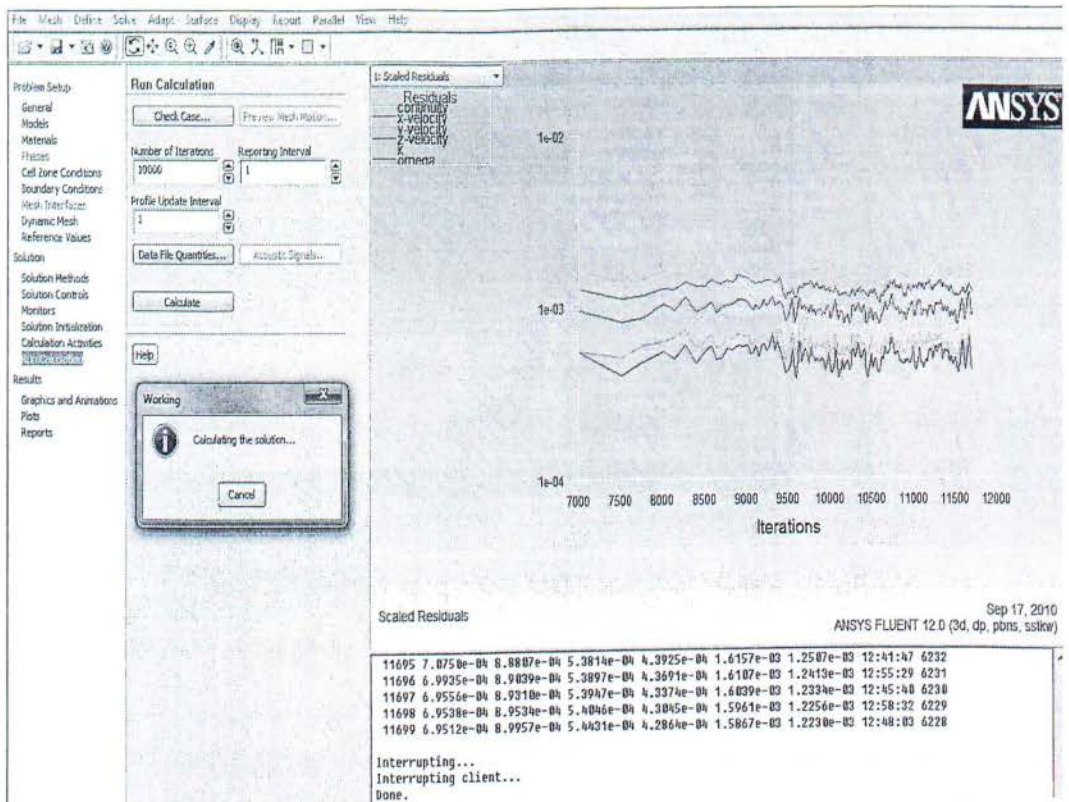
Σχήμα 3.13: Προσομοίωση θαλάμου καύσης



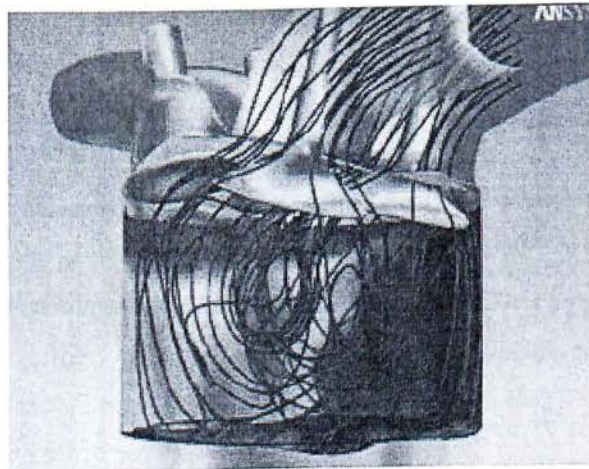
Σχήμα 3.14: Οπτικοποίηση πίεσης ποδηλάτη



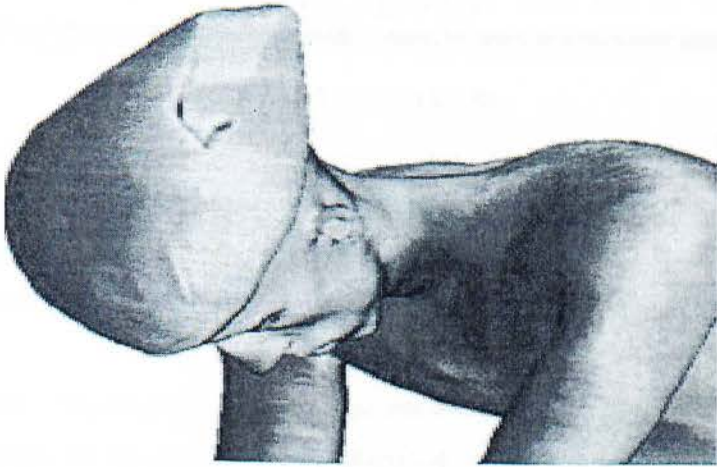
Σχήμα 3.15: Οπτικοποίησης αποτελεσμάτων σε Pathline εντός πυρηνικού αντιδραστήρα



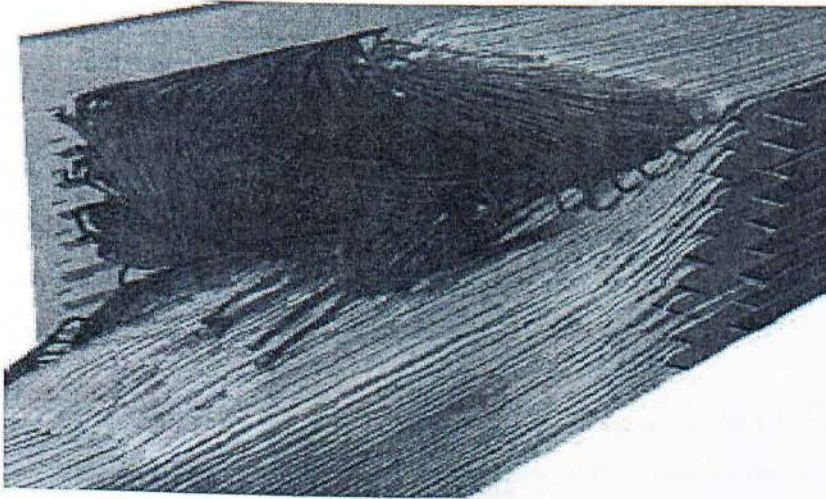
Σχήμα 3.12: GUI κατά την διάρκεια επίλυσης



Σχήμα 3.13: Προσομοίωση θαλάμου καύσης



Σχήμα 3.14: Οπτικοποίηση πίεσης ποδηλάτη



Σχήμα 3.15: Οπτικοποίησης αποτελεσμάτων σε Pathline εντός πυρηνικού αντιδραστήρα

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Με τον γενικό όρο φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται οι βιομηχανικές διατάξεις μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στην ουσία πρόκειται για ηλεκτρογενήτριες που συγκροτούνται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε επίπεδη διάταξη που έχουν ως βάση λειτουργίας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα φωτοβολταϊκά ανήκουν στη κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

- **1839:** Η Παρατήρηση του ανθρώπου για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ξεκίνησε όταν ο 19χρονος τότε Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820 - 1891) ανακαλύπτει κατά την διάρκεια πειραμάτων του με δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό ότι η ροή αυξανόταν με την έκθεσή του στον ήλιο.

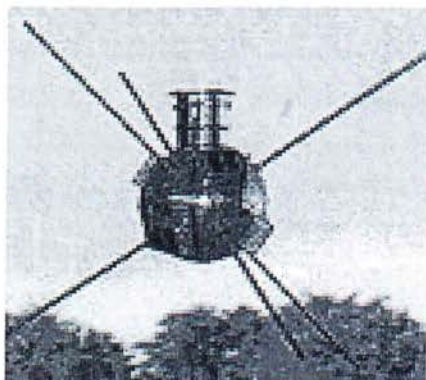


Σχήμα 4.1: Edmond Becquerel

- **1876:** Ο Willougndy Smith με τον μαθητή του William Adams παρατηρούν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος απο το σελίνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στον ήλιο.
- **1883:** Ο Charles Fritz παράγει φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 1-2%.
- **1887:** Ο Heinrich Hertz ανακαλύπτει πως ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια μετάλλων, μπορούμε να αλλάξουμε την τάση.

- **1904:** Ο Albert Einstein γράφει την θεωρία γύρω από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Για την εργασία του αυτή τιμήθηκε το 1921 με το βραβείο Nobel.
- **1918:** Ο Πολωνός φυσικός Jan Czochralski ανακαλύπτει την μέθοδο παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Η πιο αξιοποιήσιμες ακόμα και σήμερα φωτοβολταϊκές κυψέλες (βελτιωμένες) βασίζονται στο μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.
- **1932:** Παρατηρείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο κάδμιο σελήνιο. Σήμερα για την παραγωγή φωτοβολταϊκών πάνελ αποτελεί το *cds* ένα από τα σημαντικότερα υλικά.
- **1949:** Οι Mott και Schottly αναπτύσσουν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Η κβαντική θεωρία ξεδιπλώνεται. Ανοίγει ο δρόμος για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές.
- **1950:** Αναπτύσσεται ο μετρητής Czochralski για την μαζική παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Είναι απαραίτητο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών υψηλής απόδοσης.
- **1954:** Οι Chapin, Fuller και Pearson στα εργαστήρια της Bell Laboratories ανακαλύπτουν ότι το πυρίτιο μαζί με συγκεκριμένα ρυπαρότητες είναι πολύ ευαίσθητο στο φως. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός. Το αποτέλεσμα είναι τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία με απόδοση 6% (εκμετάλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας).
- **1958:** Κατασκευάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο, με απόδοση 9%. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών. Στις 17 Μαρτίου του 1958 εκτοξεύεται το Vanguard I, ο πρώτος δορυφόρος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά στοιχεία που θα δουλέψει για 8 χρόνια. Εκτοξεύονται δύο ακόμη δορυφόροι από τους Αμερικανούς, ο Explorer III και ο Vanguard II. Οι Σοβιετικοί κατασκευάζουν

στήν Γεωργία τον πρώτο τροφοδοτούμενο από φωτοβολταϊκά στοιχεία τηλεφωνικό αναμεταδότη.



Σχήμα 4.2: Τηλεφωνικός αναμεταδότης τροφοδοτούμενος από φ/β

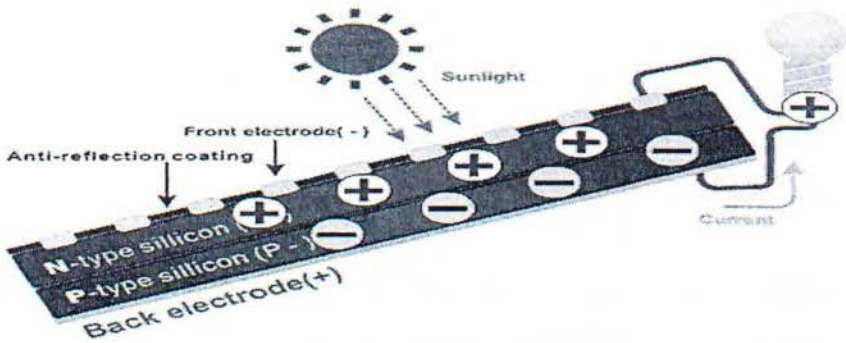
- **1959:** Παράγονται φωτοβολταϊκά με απόδοση 10%. Η Αμερική εκτοξεύει άλλους δύο δορυφόρους. Τον Explorer VI και Explorer VII με 9.600 φωτοβολταϊκά στοιχεία.
- **1960:** Παράγονται φωτοβολταϊκά με απόδοση 14%.
- **1962:** Η Bell Telephone Laboratories θέτει σε τροχιά τον πρώτο τηλεπικοινωνιακό δορυφόρο (Telstar) με φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η εταιρία Sarp Corporation εγκαθιστά στην Ιαπωνία την μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή διάταξη της επαχής σε έναν φάρο. Η ισχύς του συστήματος είναι 242 Wp.
- **1972:** Γάλλοι επιστήμονες εγκαθιστούν σε χωριό του Νίγηρα σε σχολείο φωτοβολταϊκό σύστημα θείουχου καδμίου *cds* για την τροφοδοσία εκπαιδευτικής τηλεόρασης.
- **1973-1974:** Ιδρύεται στις ΗΠΑ απο το Υπουργείο Ενέργειας το πρόγραμμα για την εκμετάλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου (Federal Photovoltaic Utilization Program). Πολλά απο τα 3.000 συστήματα οπου εγκαταστάθηκαν τότε στα πλαίσια του προγράμματος και εξακολουθούν να λειτουργούν ακόμα και σήμερα.

- **1976:** Στην εταιρεία RCA Laboratories οι David Carlson και Christopher Wronski κατασκευάζουν τις πρώτες φωτοβολταϊκές κυψέλες άμορφου πυριτίου. Αυτές είναι που επέτρεψαν και την ανάπτυξη των τεχνολογιών λεπτής μεμβράνης.
- **1970-1990:** Εξαγοράζονται πολλές εταιρείες των ΗΠΑ από Γερμανικά και Ιαπωνικά συμφέροντα εξ αιτίας της κρίσης του κόλπου που υπήρχε τότε.
- **1980:** Η πρώτη εγκατάσταση στα επίπεδα του 1MW γίνεται στην Καλιφόρνια απο την ARCO SOLAR. Χρησιμοποιείται και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δύο αξόνων.
- **1983:** Η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών ξεπερνά τα 21,3 MW.
- **1988:** Η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών ξεπερνά τα 33 MW.
- **1999:** Η παγκόσμια εγκαταστημένη ισχύ σε φωτοβολταϊκά φτάνει τα 1 GW.
- **2002:** Η εγκαταστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά φτάνει τα 2 GW.
- **2009:** Η εγκαταστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά φτάνει τα 24 GW.
- **2011:** Σύμφωνα με την έκθεση που δημοσίευσε η EPIA (European Photovoltaic Industry Association), παρ'όλη την οικονομική κρίση οι συνολικές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών για ήταν πάνω απο 27,7 GW.

4.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το φωτοβολταϊκό (Φ/Β) φαινόμενο αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το Φ/Β φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Εντμόντ Μπεκερέλ. Περιληπτικά πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. Το

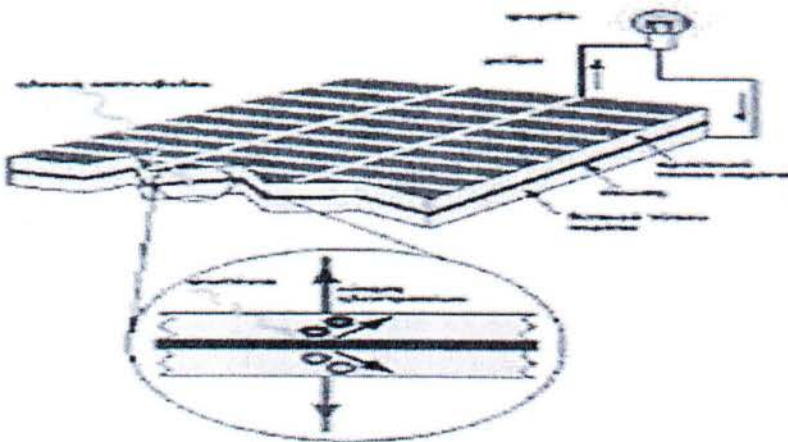
ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο.



Σχήμα 4.3: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

4.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Τα Φ/Β πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο (solar cell) που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Τα Φ/Β στοιχεία ομαδοποιούνται κατάλληλα και συγκροτούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή γεννήτριες (module), τυπικής ισχύος από 20W έως 300W. Οι Φ/Β γεννήτριες συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους και δημιουργούνται οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες (arrays).



Σχήμα 4.4: Φωτοβολταϊκή διάταξη

4.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ




Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

1. Κρυσταλλικού Πυριτίου

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 14,5% έως 21%
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 13% έως 14,5%

2. Λεπτών Μεμβρανών

- Άμορφου Πυριτίου, ονομαστικής απόδοσης ~7%.
- Χαλκοπυριτών CIS / CIGS, ονομαστικής απόδοσης από 7% έως 11%.

ΤΥΠΟΣ	‘Λεπτού υμενίου’ ή ‘Thin Film’	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση	a-Si: 4,2-6,6% μ-Si: 8,1-8,5% CIS-CIGS: 6-11% CdTe: 6-11,1%	11-14,8%	11-19,3%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	1.300-1.450	1.300	1.300
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m ²) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	50-160	145-185	145-235
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO ₂ ανά kWp)	1.300-1.450	1.300	1.300

Σχήμα 4.5: Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β. Η κυριαρχία αυτή οφείλεται αρχικά στην τεράστια παγκόσμια επιστημονική και τεχνική υποδομή για το υλικό αυτό από τη δεκαετία του '60. Μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις έγιναν σε προγράμματα για τις χημικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες του Si, ώστε να δημιουργηθεί ο εξοπλισμός που απαιτείται στα βήματα της επεξεργασίας για την απόκτηση της απαραίτητης καθαρότητας και της κρυσταλλικής δομής του υλικού.

Η γνώση που προέκυψε έτσι για το πυρίτιο, τα χαρακτηριστικά του και η αφθονία του στη γη, το κατέστησαν ικανό και συμφέρον μέσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Εντούτοις, λόγω του ότι είναι εύθραυστο, το πυρίτιο απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων σχετικά μεγάλου πάχους. Αυτό σημαίνει ότι μερικά από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται μετά την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας πρέπει να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις για να ενταχθούν στην ροή του ρεύματος και να συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Συνεπώς, το υλικό θα πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα, ώστε να αποτρέψει την επιστροφή των ηλεκτρονίων στις φυσικές τους θέσεις. Οι ατέλειες πρέπει να αποφευχθούν ώστε η ενέργεια του ηλεκτρονίου να μην μετατραπεί σε θερμότητα. Η παραγωγή θερμότητας, η οποία είναι επιθυμητή στα ηλιακά θερμικά πλαίσια, όπου αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό, είναι ανεπιθύμητη στα Φ/Β πλαίσια, όπου η ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική.

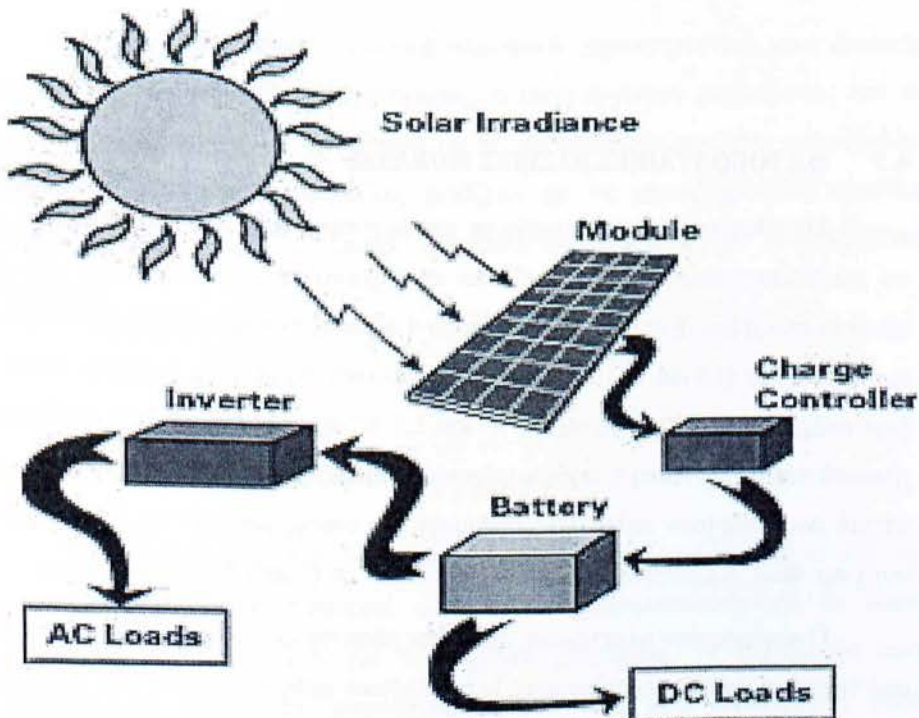
Το πυρίτιο, ανάλογα με την επεξεργασία του, δίνει μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά, από τα οποία παράγονται τα Φ/Β στοιχεία. Τα λεπτά υλικά είναι ένας τρόπος να μειωθεί το κόστος των Φ/Β πλαισίων και να αυξηθεί η απόδοσή τους. Εκτός από τη χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι ολόκληρα πλαίσια μπορούν να κατασκευαστούν παράλληλα με τη διαδικασία απόθεσης. Αυτό είναι συμφέρον οικονομικά, αλλά επίσης πολύ απαιτητικό τεχνικά, επειδή η επεξεργασία χωρίς ατέλειες αφορά μεγαλύτερη επιφάνεια.

Στα πλεονεκτήματα των λεπτών πλαισίων τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να αντιπαρατεθεί η χαμηλότερη ως τώρα απόδοσή τους, η οποία περιορίζεται στο 5-10%, ανάλογα με το υλικό. Πάντως η τεχνολογία λεπτού στρώματος (thin film) είναι σε φάση ανάπτυξης, αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα πάντως αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή Φ/Β πλαισίων.

4.5 ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα αριθμό μερών ή υποσυστημάτων:

- (α) Τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια με τη μηχανική υποστήριξη και πιθανόν ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς.
- (β) Μπαταρίες (υποσύστημα αποθήκευσης) - πλέον δεν χρησιμοποιούνται, εκτός σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις, όπως είναι π.χ. οι Φάροι, διαφορετικά η σύνδεση του πάνελ γίνεται απευθείας με το υφιστάμενο δίκτυο της ΔΕΗ.
- (γ) Καθορισμό ισχύος και συσκευή ελέγχου που περιλαμβάνει φροντίδα για μέτρηση και παρατήρηση.
- (δ) Εφεδρική γεννήτρια. Η επιλογή του πώς και ποια από αυτά τα στοιχεία ολοκληρώνονται μέσα στο σύστημα εξαρτάται από ποικίλες εκτιμήσεις.



Σχήμα 4.6: Δομή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

4.6 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες συστημάτων, το διασυνδεδεμένο με το δίκτυο και το αυτόνομο. Η απλούστερη μορφή του δεύτερου εκ των δυο αποτελείται απλώς από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, η οποία μόνη της τροφοδοτεί με συνεχές ρεύμα ένα φορτίο οποτεδήποτε υπάρχει επαρκής φωτεινότητα. Αυτού του τύπου το σύστημα είναι κοινό σε εφαρμογές άντλησης. Σε άλλες περιπτώσεις το σύστημα περιέχει συνήθως μια φροντίδα για αποθήκευση ενέργειας από τις μπαταρίες. Συχνά συμπεριλαμβάνεται κάποια μορφή ρύθμισης της ισχύος, όπως στην περίπτωση που απαιτείται εναλλασσόμενο ρεύμα να εξέρχεται από το σύστημα. Σε μερικές περιπτώσεις το σύστημα περιέχει μια εφεδρική γεννήτρια.

Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα μπορούν να υποδιαιρεθούν σ' εκείνα στα οποία το δίκτυο ενεργεί απλώς ως μια βοηθητική τροφοδοσία (εφεδρικό δίκτυο) και εκείνα τα οποία ίσως λάβουν επίσης πρόσθετη ισχύ από τη Φ/Β γεννήτρια (αλληλοεπιδρώμενο δίκτυο). Μέσα στους Φ/Β σταθμούς όλη η παραγόμενη ισχύς τροφοδοτείται στο δίκτυο.

4.7 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

Συνήθως τα ηλιακά στοιχεία σε μια βασική μονάδα συνδέονται μεταξύ τους σε μια βασική σειρά. Αυτό οφείλεται στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κάθε ηλιακού στοιχείου. Ένα τυπικό (διαμέτρου 4 ιντσών) ηλιακό στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου ή ένα (10 cm X 10 cm) πολυκρυσταλλικό στοιχείο θα παρέχουν κάτω από κανονικές συνθήκες ισχύ μεταξύ 1 W και 1,5 W, εξαρτώμενη από την απόδοση του ηλιακού στοιχείου. Αυτή η ισχύς παρέχεται συνήθως υπό τάση 0,5 V ή 0,6 V. Από τη στιγμή που υπάρχουν πολύ λίγες εφαρμογές, οι οποίες μπορούν να λειτουργούν σε αυτή την τάση, η άμεση λύση είναι να συνδεθούν τα ηλιακά στοιχεία σε σειρά.

Ο αριθμός των ηλεκτρικών στοιχείων μέσα σε μια βασική μονάδα ρυθμίζεται από την τάση της βασικής μονάδας. Η ονομαστική τάση λειτουργίας του συστήματος συνήθως πρέπει να ταιριάζει με την ονομαστική τάση του υποσυστήματος αποθήκευσης. Οι περισσότερες εκ των φωτοβολταϊκών βασικών μονάδων, που κατασκευάζονται βιομηχανικά έχουν, επομένως, σταθερές διατάξεις, οι οποίες

μπορούν να συνεργασθούν ακόμη και με μπαταρίες των 12Volt. Προνοώντας για κάποια υπέρταση προκειμένου να φορτιστεί η μπαταρία και να αντισταθμιστεί χαμηλότερη έξοδος, κάτω από συνθήκες χαμηλότερες των κανονικών, έχει βρεθεί ότι μια ομάδα των 33 έως 36 ηλιακών στοιχείων σε σειρά συνήθως εξασφαλίζουν αξιόπιστη λειτουργία.

Έτσι η ισχύς των βασικών μονάδων πυριτίου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 40W και 60W. Οι παράμετροι της βασικής μονάδας καθορίζονται από τον κατασκευαστή κάτω από τις ακόλουθες κανονικές συνθήκες:

- Ακτινοβολία 1 kW/m^2
- Φασματική κατανομή AM 1,5
- Θερμοκρασία ηλιακού στοιχείου 25°C

Πρόκειται για τις ίδιες συνθήκες με αυτές που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρισθούν τα ηλιακά στοιχεία. Η ονομαστική έξοδος συνήθως ονομάζεται ισχύς κορυφής μιας βασικής μονάδας και εκφράζεται σε Watt κορυφής (Wp).

Τα τρία περισσότερο σημαντικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας βασικής μονάδας είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η τάση ανοικτού κυκλώματος και το σημείο μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Αυτές οι χαρακτηριστικές καμπύλες μοιάζουν με τη χαρακτηριστική καμπύλη εντάσεως-τάσεως (I-V) ενός ηλιακού στοιχείου, ωστόσο υπάρχουν συγκεκριμένες ιδιομορφίες.

4.8 ΧΡΗΣΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά είναι διατάξεις που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα από την ηλιακή ακτινοβολία. Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα χρησιμοποιείται για να δώσει ενέργεια σε μια συσκευή ή για τη φόρτιση μπαταρίας. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε μικροϋπολογιστές τσέπης που λειτουργούν χωρίς μπαταρία, απλώς με την έκθεσή τους στο φως.

Τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται συχνά σε συστοιχίες για την παραγωγή

ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Σε τέτοια μορφή χρησιμοποιούνται για να δίνουν ενέργεια σε δορυφόρους, διαστημόπλοια, αλλά και σε απλούστερες εφαρμογές, όπως για την ενεργειοδότηση απομακρυσμένων τηλεφώνων εκτάκτου ανάγκης σε εθνικές οδούς, σε σπίτια κλπ.

Σε πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει προγράμματα επιδότησης των επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά, τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια που μεταπωλείται και εισάγεται στα δημόσια δίκτυα μεταφοράς. Τα προγράμματα αυτά έχουν στόχο τη διαφοροποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τη σταδιακή απεξάρτησή της από το πετρέλαιο.

Η θερμοκρασία είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος. Όπως έχουμε δει ο συντελεστής θερμοκρασίας για την τάση ανοικτού κυκλώματος είναι κατά προσέγγιση ίσος με $-2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ για καθένα ηλιακό στοιχείο. Ο συντελεστής τάσης μιας βασικής μονάδας είναι επομένως αρνητικός και πολύ μεγάλος από τη στιγμή που συνδέονται σε σειρά 33 έως 36 ηλιακά στοιχεία. Ο συντελεστής ρεύματος, από την άλλη πλευρά, είναι θετικός και μικρός, περίπου $+6 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ ανά τετραγωνικό εκατοστό της βασικής μονάδας. Συνεπώς, μόνο η μεταβολή τάσης σε σχέση μ' αυτή της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη για πρακτικούς κυρίως υπολογισμούς.

Είναι σημαντικό να σημειώσετε ότι η τάση καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών στοιχείων, η οποία διαφέρει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όπως και για καθένα ηλιακό στοιχείο, το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} μιας βασικής μονάδας είναι ανάλογο προς την ακτινοβολία και επομένως θα ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας κατά τον ίδιο τρόπο. Εφόσον η τάση είναι λογαριθμική συνάρτηση του ρεύματος, θα εξαρτάται επίσης λογαριθμικά και από την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια της ημέρας επομένως η τάση θα μεταβάλλεται λιγότερο από ότι το ρεύμα. Στο σχεδιασμό της Φ/Β γεννήτριας είναι συνηθισμένο να παραμελείται η μεταβολή της τάσης και να λαμβάνεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος ανάλογο προς την ακτινοβολία.

Η λειτουργία μιας βασικής μονάδας θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Είναι ένα σημαντικό γνώρισμα της χαρακτηριστικής της βασικής μονάδας, το ότι η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος

V_m είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ακτινοβολία. Η μέση τιμή αυτής της τάσης κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να εκτιμηθεί στο 80% της τάσης ανοικτού κυκλώματος κάτω από κανονικές συνθήκες ακτινοβολίας. Αυτή η ιδιότητα είναι χρήσιμη για τη σχεδίαση της μονάδας ελέγχου της ισχύος της συσκευής.

Ο χαρακτηρισμός της βασικής Φ/Β μονάδας συμπληρώνεται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός κανονικά λειτουργούντος ηλιακού στοιχείου (NOCT) (Normal Operating Cell Temperature), οριζόμενης ως η θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου, όταν η βασική μονάδα λειτουργεί κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες σε ανοικτό κύκλωμα:

- Ακτινοβολία $0,8 \text{ kW/m}^2$
- Φασματική κατανομή AM 1,5
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος 0°C
- Ταχύτητα ανέμου 1 m/s

Η NOCT (συνήθως μεταξύ 42°C και 46°C) χρησιμοποιείται τότε για να καθορίσει τη θερμοκρασία του ηλιακού ηλεκτρικού στοιχείου T_c κατά τη διάρκεια της λειτουργίας βασικής μονάδας. Συνήθως υποθέτουμε ότι η διαφορά μεταξύ T_c και θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a εξαρτάται γραμμικά από την ακτινοβολία G_r .

4.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα βασικά χαρακτηριστικά των Φ/Β συστημάτων, που τα διαφοροποιούν από τις άλλες μορφές ΑΠΕ είναι:

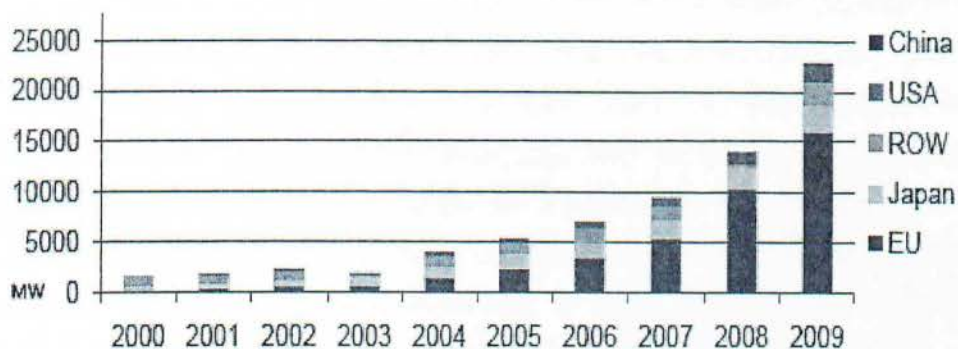
- Απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε πολύ μικρή κλίμακα (π.χ. σε επίπεδο μερικών δεκάδων W ή και mW).
- Είναι εύχρηστα. Τα μικρά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν από τους ίδιους τους χρήστες.
- Μπορούν να εγκατασταθούν μέσα στις πόλεις, ενσωματωμένα σε κτίρια και δεν προσβάλλουν αισθητικά το περιβάλλον.
- Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας (υβριδικά συστήματα).

- Είναι βαθμωτά συστήματα, δηλαδή μπορούν να επεκταθούν σε μεταγενέστερη φάση για να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών, χωρίς μετατροπή του αρχικού συστήματος.
- Λειτουργούν αθόρυβα, εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους, χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Οι απαιτήσεις συντήρησης είναι σχεδόν μηδενικές.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία κατά τη λειτουργία. Οι εγγυήσεις που δίνονται από τους κατασκευαστές για τις Φ/Β γεννήτριες είναι περισσότερο από 25 χρόνια καλής λειτουργίας.
- Η ενεργειακή ανεξαρτησία του χρήστη είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των Φ/Β συστημάτων. Το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β συστήματα είναι σήμερα συγκρίσιμο με το κόστος αιχμής ισχύος, που χρεώνει η εταιρεία ηλεκτρισμού τους πελάτες της.
- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη λεγόμενη «Διάσπαρτη Παραγωγή Ενέργειας» (Distributed Power Generation), η οποία αποτελεί το νέο μοντέλο ανάπτυξης σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφοροποίηση στην παραγωγή ενέργειας, που προσφέρεται από τα Φ/Β συστήματα, σε συνδυασμό με την κατά μεγάλο ποσοστό απεξάρτηση από το πετρέλαιο και την αποφυγή περαιτέρω ρύπανσης του περιβάλλοντος, μπορούν να δημιουργήσουν συνθήκες οικονομικής ανάπτυξης σε ένα νέο ενεργειακό τοπίο που αυτή τη στιγμή διαμορφώνεται στις αναπτυσσόμενες χώρες.

4.10 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ

Η αγορά των Φ/Β στον κόσμο σημειώνει χαρακτηριστική αύξηση τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της σταδιακής μείωσης του αρχικά υψηλού κόστους, καθώς και λόγω των κινήτρων που προσφέρονται σε εθνικό επίπεδο στις διάφορες χώρες. Ενδεικτικά, το 1988 είχαν εγκατασταθεί Φ/Β συνολικής ισχύος 33 MWp και στο τέλος του 2009 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε περίπου τα 24000 MWp. Η τιμή αυτή έχει επιτευχθεί κυρίως λόγω της υψηλής ανάπτυξης των Φ/Β σε

τρεις χώρες, Γερμανία, Ισπανία και Ιαπωνία, στις οποίες αντιστοιχεί το 76% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η Γερμανία, στην οποία αντιστοιχεί το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος, δεν έχει καλύτερο ηλιακό δυναμικό (ηλιακή ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο) από την Ελλάδα.



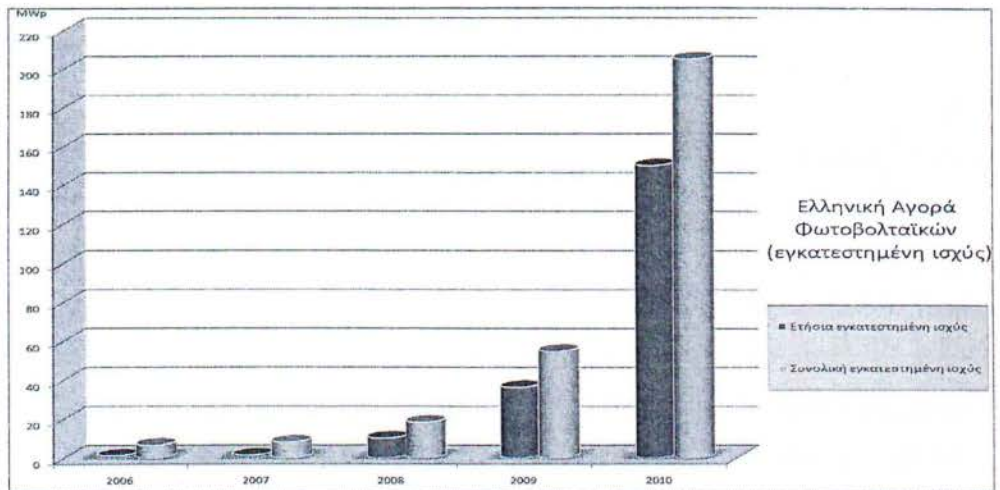
Σχήμα 4.7: Παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών 2000-2009

Εφόσον το κόστος των Φ/Β συνεχίζει να μειώνεται και δεδομένων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συμβατικών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρισμού, η αγορά των Φ/Β αναμένεται να αναπτυχθεί με τον ίδιο ή και μεγαλύτερο βαθμό στο μέλλον. Αυτό εντάσσεται και στην πολιτική των διεθνών φορέων και οργανισμών, με αποτέλεσμα η υποστήριξη, τα κίνητρα και οι επενδύσεις σε αυτή την τεχνολογία να είναι σημαντικές. Η δυνατότητα των Φ/Β να εγκαθίστανται σε διάφορα σημεία (σκεπές, πολυκατοικίες, οικόπεδα κλπ), χωρίς ιδιαίτερους περιορισμούς και χωρίς σημαντική οπτική όχληση, δημιουργεί, εν δυνάμει, ανεξάντλητα περιθώρια ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας.

Τα κίνητρα που δίνονται από τις χώρες και εφαρμόζονται μέσω της νομοθεσίας είναι αντίστοιχα με αυτά της αιολικής ενέργειας. Δηλαδή, χωρίζονται πάλι σε συστήματα σταθερής τιμής (Fixed Price) και συστήματα σταθερής ποσότητας (Fixed Quantity). Η διαφορά με την αιολική ενέργεια είναι ότι συνήθως για τον ηλεκτρισμό που παράγεται από Φ/Β, οι τιμές πώλησης και οι επιδοτήσεις, είναι υψηλότερες, κυρίως λόγω του υψηλού αρχικού κόστους μίας επένδυσης.

4.11 ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Εξετάζοντας την Ελληνική αγορά και την ανάπτυξη των Φ/Β, μπορεί να διαπιστωθεί το καθεστώς που διέπει εν γένει τον κλάδο των ΑΠΕ στη χώρα μας. Επιγραμματικά, η ανάπτυξή τους υπήρξε μηδαμινή (2.2 MWp το 2003) τουλάχιστον μέχρι το 2006, όπου οι εγκαταστάσεις Φ/Β περιορίζονταν σε αυτές της ΔΕΗ σε νησιά (Κύθνος, Αντικύθηρα κλπ) και σε εγκαταστάσεις ιδιωτών σε απομακρυσμένες κατοικίες. Μια τέτοια ανάπτυξη ήταν σαφώς απογοητευτική, δεδομένου του εξαιρετικού ηλιακού δυναμικού της χώρας μας. Οι κύριοι λόγοι για την μικρή αυτή ανάπτυξη ήταν τα συνήθη γραφειοκρατικά προβλήματα, η ελλιπής ενημέρωση των μικροεπενδυτών, τα μηδαμινά κίνητρα τα οποία καθιστούσαν ασύμφορη μια επένδυση σε Φ/Β και ο μονοπωλιακός χαρακτήρας του ενεργειακού τομέα μέχρι το 2001.



Σχήμα 4.8: Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών 2006-2010

Το 2006, με το νόμο 3468/2006, δημιουργήθηκε ένα σαφέστερο νομοθετικό πλαίσιο σε σχέση με τις ΑΠΕ και κατά συνέπεια και με τα Φ/Β. Ταυτόχρονα με τις ευνοϊκές τιμολογιακές ρυθμίσεις και επιχορηγήσεις για τους ενδιαφερόμενους επενδυτές σε μικρομεσαία κλίμακα, θεσμοθετήθηκε ένα πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών (ΑΦΣ) με σκοπό την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών, αμιγώς για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο νόμος αυτός σε συνδυασμό με επιδοτήσεις που είχαν αναγγελθεί για το κόστος της επένδυσης, κίνησαν το

ενδιαφέρον πολλών μικροεπενδυτών με αποτέλεσμα ο αριθμός των αιτήσεων για άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να ξεπερνάει κατά πολύ (2489 MWp) το στόχο του προγράμματος ΑΦΣ. Αυτό το γεγονός είχε ως αποτέλεσμα το Υπουργείο Ανάπτυξης να αναστείλει την αδειοδοτική διαδικασία στα τέλη του 2007.

Συγκεκριμένα, μέχρι το τέλος του 2007 η εγκατεστημένη ισχύς είχε φτάσει μόλις τα 8.2 MW με ετήσιες αυξήσεις της τάξης των 1-1.5 MW. Από το 2008 αρχικά και ακόμα περισσότερο μετά τα μέσα του 2009 με την ψήφιση του νόμου 3851/2010, ο οποίος εισήγαγε σημαντική αύξηση του ορίου ισχύος των Φ/Β πάρκων που απαλλάσσονται από την ανάγκη λήψης άδειας παραγωγής και από την ανάγκη λήψης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, η αύξηση στο ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά και αντίστοιχα η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ήταν κατακόρυφη. Μέχρι το τέλος του 2010 οι αιτήσεις για άδεια παραγωγής ή εξαίρεση από άδεια για Φ/Β αντιστοιχούσαν σε ισχύ ίση με 9437 MW. Συνολικά, στο τέλος του 2010 η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β ήταν 205,4 MW ενώ η ετήσια αύξηση άγγιξε το 27,4 %.

Παρ' ότι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος πρόκειται να συνεχιστεί με αντίστοιχους ρυθμούς τουλάχιστον μέχρι το 2015, πρέπει να τονιστεί ότι η, εθνικά ορισμένη, επιδιωκόμενη ισχύς από τα Φ/Β είναι ίση με 2200 MW μέχρι το 2020, οπότε γίνεται κατανοητό ότι ουσιαστικά, ένα μικρό ποσοστό των σημερινών ή και μελλοντικών αιτήσεων θα υλοποιηθεί. Είναι επομένως κατανοητό ότι απαιτείται επαρκής σχεδιασμός τόσο από την πλευρά της πολιτείας όσον αφορά την καθοδήγηση για νέες αιτήσεις και την κατανομή των αιτήσεων που θα υλοποιηθούν, όσο και από την πλευρά των επενδυτών για το αν ένα έργο μπορεί να είναι βιώσιμο μετά την υλοποίησή του.

4.12 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΩΤΟΣ

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής μιας διάταξης είναι το που θα στερεωθούν οι βασικές μονάδες, αν θα στερεωθούν σε σταθερές θέσεις ή οι προσανατολισμοί τους θα ακολουθούν (ιχνηλατούν) την κίνηση του ηλίου.

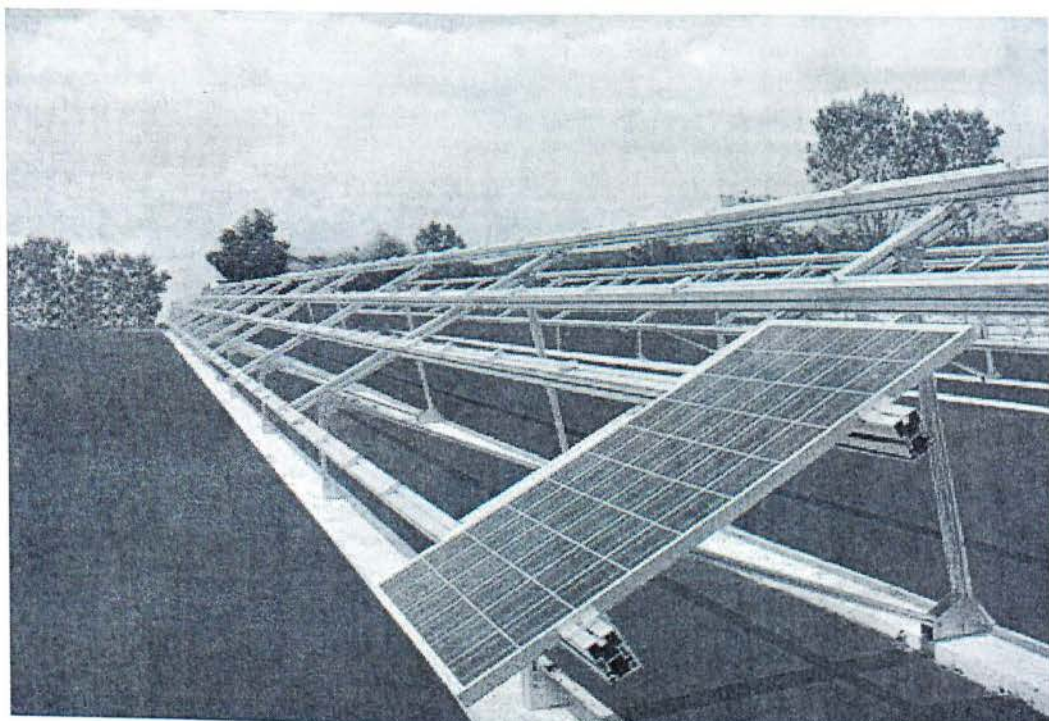
Στις περισσότερες διατάξεις οι βασικές μονάδες στερεώνονται σ' ένα σταθερό κεκλιμένο επίπεδο με την πρόσοψη προς τον ισημερινό. Αυτό έχει την αρετή της

απλότητας, δηλαδή κανένα κινούμενο τμήμα και χαμηλό κόστος. Η άριστη γωνία κλίσης εξαρτάται κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος, την αναλογία της διάχυτης ακτινοβολίας στην τοποθεσία και το είδος του φορτίου.

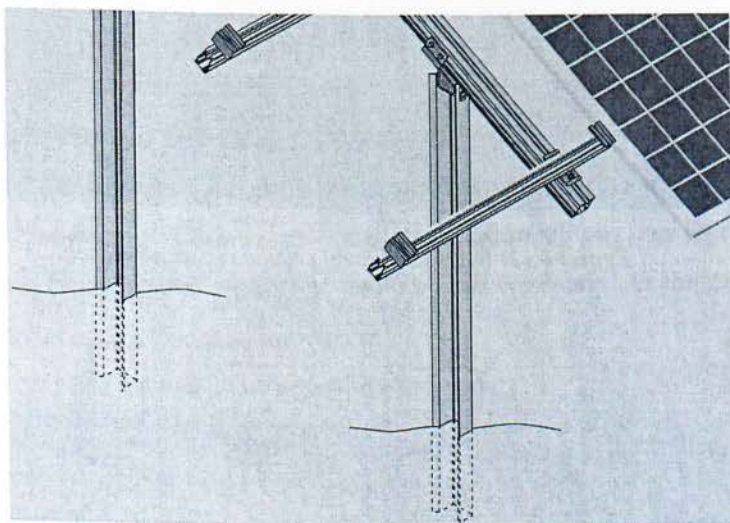
Στερεώνοντας τη διάταξη πάνω σε σύστημα με δύο άξονες παρακολούθησης του Ηλίου, μπορεί να συλλεχθεί μέχρι 25% περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης. Κάτι τέτοιο όμως αυξάνει την πολυπλοκότητα και έχει ως αποτέλεσμα μια χαμηλότερης αξιοπιστίας και υψηλότερου κόστους συντήρησης. Η μονού άξονα παρακολούθηση (ιχνηλάτηση) είναι λιγότερο σύνθετη αλλά παρουσιάζει μικρότερο κέρδος. Ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα, εκεί που η προσφορά εργασίας είναι διαθέσιμη, αυξάνοντας έτσι τις όποιες απολαβές. Έχει υπολογιστεί ότι σε κλίματα με ηλιοφάνεια μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας που έχει κατάλληλη ρύθμιση ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δυο φορές την ημέρα και να παίρνει την κατάλληλη κρίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί να συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγετε με ένα σύστημα δυο αξόνων παρακολούθησης πλήρως αυτοματοποιημένο.

Το σύστημα παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα συστήματα, που λειτουργούν κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Η δομή αυτών των συστημάτων εκτείνεται από έναν απλό σχεδιασμό βασισμένο πάνω σε πλευρικούς ενισχυτικούς καθρέπτες μέχρι τα συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν υπερσύγχρονες οπτικές τεχνικές, για να αυξήσουν την είσοδο φωτός προς τα ηλιακά στοιχεία κατά μερικές τάξεις του μεγέθους. Αυτά τα συστήματα πρέπει να προνοούν για ένα σημαντικό γεγονός, ότι δηλαδή συγκεντρώνοντας το ηλιακό φως ελαττώνουν το γωνιακό άνοιγμα των ακτίνων, που το σύστημα μπορεί να δεχθεί. Η παρακολούθηση γίνεται απαραίτητη από τη στιγμή που ο λόγος συγκέντρωσης υπερβαίνει το 10 περίπου και το σύστημα μπορεί να μετατρέψει μόνο την άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας.

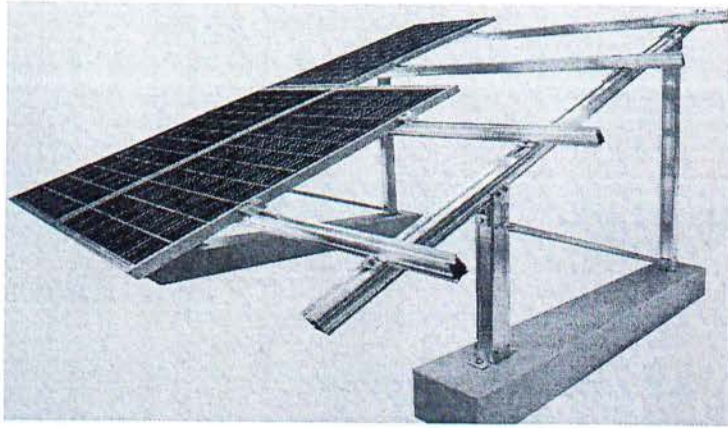
Εν ολίγοις, ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά για τη μεγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, είναι ο σωστός προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πάνελ, ο οποίος με τη σειρά του επιτυγχάνεται με τις βάσεις στήριξης των πάνελ. Αυτές οι βάσεις όμως επηρεάζονται από αρκετούς παράγοντες, ένας εκ των οποίων είναι και τα καιρικά φαινόμενα. Έτσι με την παρούσα εργασία θα μελετήσουμε τις πιέσεις και τις ταχύτητες των ανέμων πάνω στα πάνελ.



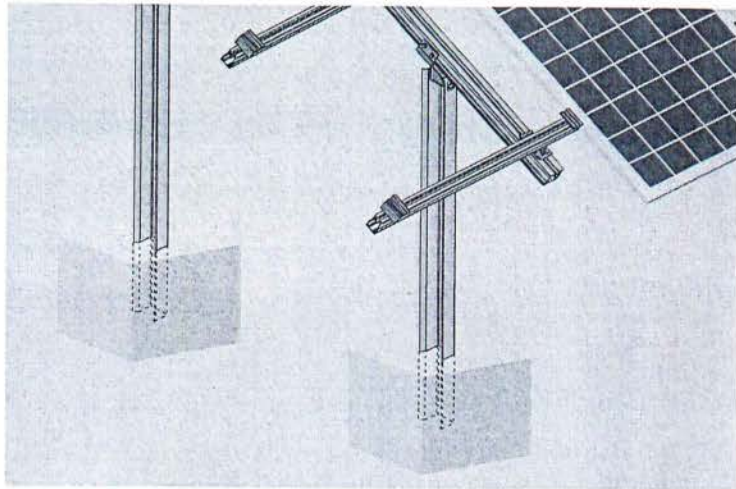
Σχήμα 4.9: Βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ



Σχήμα 4.10: Θεμελίωση με τη μέθοδο της πασσαλόπιξης



Σχήμα 4.11: Θεμελίωση σε μπετό



Σχήμα 4.12: Θεμελίωση με τη μέθοδο της μπετόπληξης

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

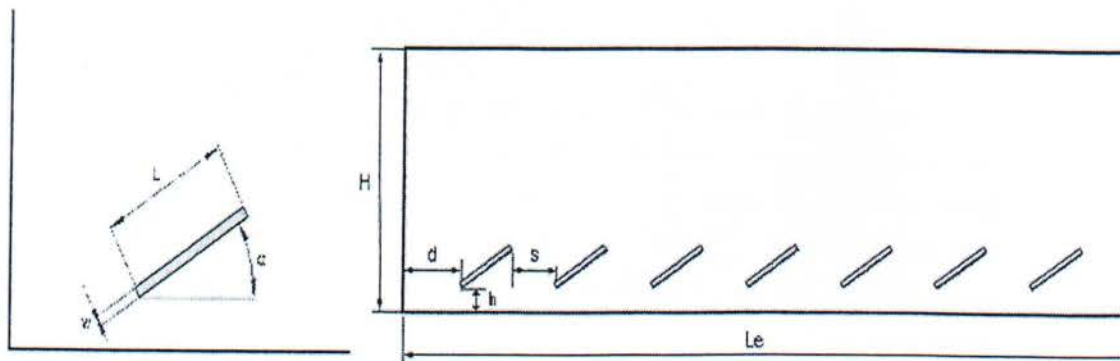
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης ανεμοπιέσεων σε φωτοβολταϊκά πάνελ, σε δυσδιάστατο περιβάλλον, με τη βοήθεια των δυο λογισμικών πακέτων (*Gambit & Fluent*) και επιλέγεται κατόπιν σύγκρισης διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης, γεωμετριών και οριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα θα δημιουργηθούν τέσσερα μοντέλα. Ένα μικρό κι ένα μεγάλο εκ των οποίων το καθ' ένα θα εξετάζεται για είσοδο του αέρα από δεξιά και από αριστερά. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν.

5.1 GAMBIT

Το Gambit είναι το πρόγραμμα που χρησιμοποιούμε για να σχεδιάσουμε τη γεωμετρία την οποία θα εξετάσουμε μέσω της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Μέσα στο Gambit υπάρχουν όλα εκείνα τα εργαλεία τα οποία χρειαζόμαστε για να σχεδιάσουμε από την πιο απλή έως την πιο συνθετη γεωμετρία που θέλουμε να μελετήσουμε. Παρέχει έτοιμες γεωμετρίες στις οποίες μπορούμε να κάνουμε παραλλαγές. Ακόμα μας δίνει την δυνατότητα να προσθέτουμε, να αφαιρούμε αλλά και να τροποποιούμε οτιδήποτε στοιχείο εισάγουμε. Εκτός της σχεδίασης της γεωμετρίας, στο Gambit σχεδιάζουμε και το πλέγμα που θα το χρησιμοποιήσουμε στο άλλο πρόγραμμα (Fluent) έτσι ώστε να εξετάσουμε την κατασκευή μας σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος το οποίο έχουμε σχεδιάσει. Ακόμα μας δίνει την δυνατότητα να ορίσουμε οριακές συνθήκες.

5.1.1 Γεωμετρίες Που Θα Δημιουργηθούν Στο Gambit

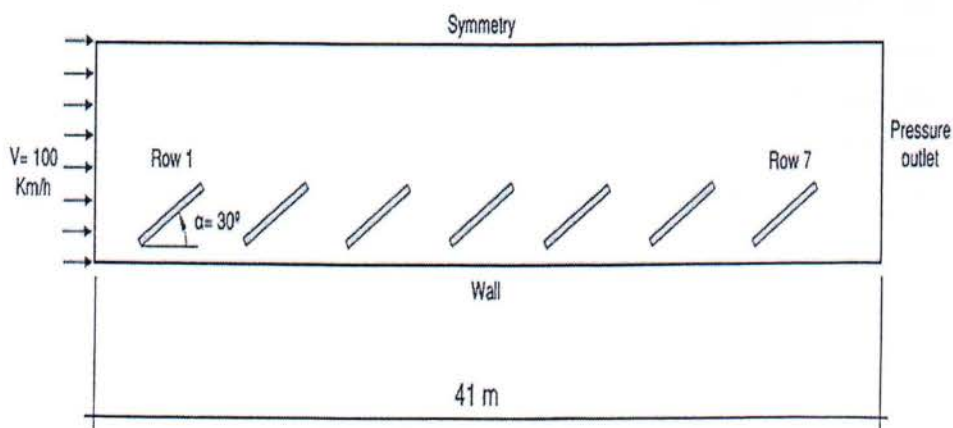
◇ Διαστάσεις μοντέλων:



Simulation No.	Total No. of rows	L (m)	W (m)	α (°)	h (m)	d (m)	s (m)	H (m)	Le (m)
1	7	3	0.040	30	1	4	2.25	13.5	41
2	7	3	0.040	30	1	4	2.25	13.5	41
3	7	3	0.040	30	1	4	5	13.5	54.5
4	7	3	0.040	30	1	4	5	13.5	54.5

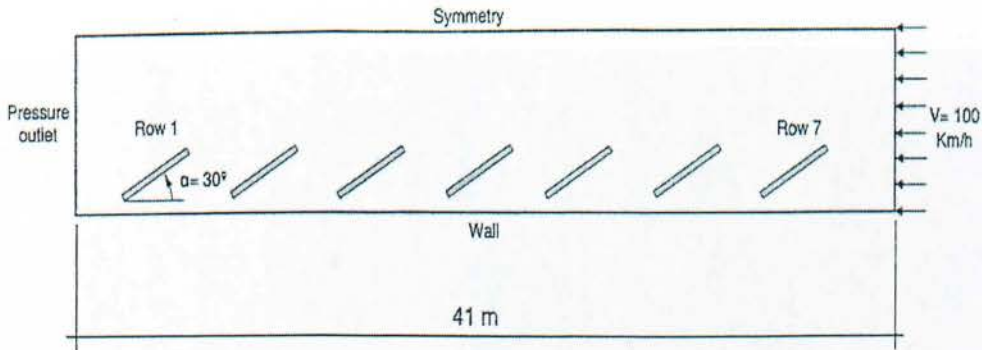
Σχήμα 5.1: Διαστάσεις μοντέλων

- **Μοντέλο 1:** Μικρό μήκος τοίχου (μικρό πλέγμα) και είσοδος του αέρα από αριστερά:



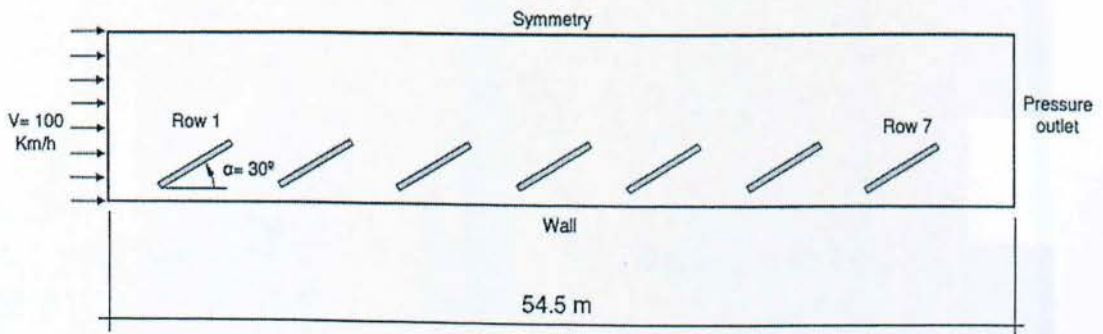
Σχήμα 5.2: Μοντέλο 1

- **Μοντέλο 2:** Μικρό μήκος τοίχου (μικρό πλέγμα) και είσοδος του αέρα από δεξιά:



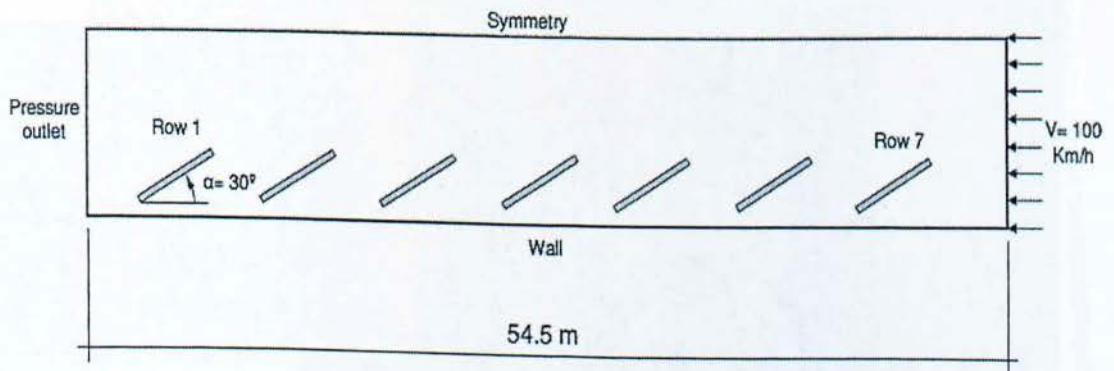
Σχήμα 5.3: Μοντέλο 2

- **Μοντέλο 3:** Μεγάλο μήκος τοίχου (μεγάλο πλέγμα) και είσοδος του αέρα από αριστερά:



Σχήμα 5.4: Μοντέλο 3

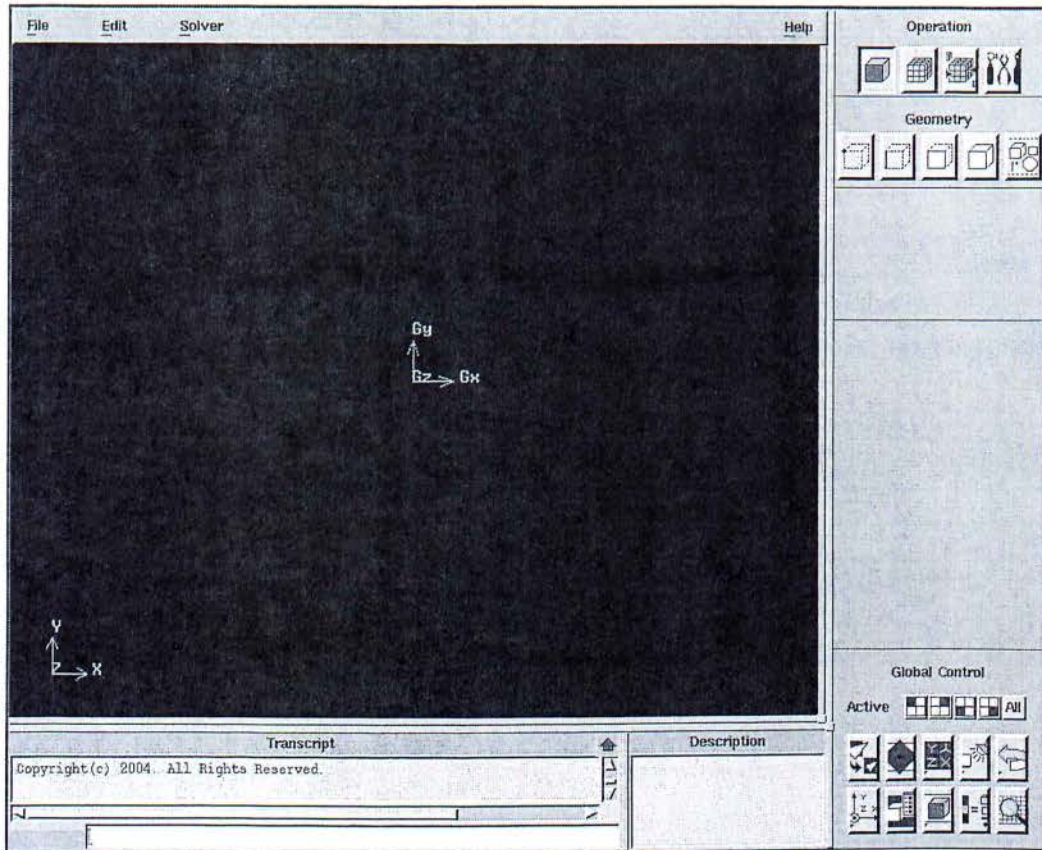
- **Μοντέλο 4:** Μεγάλο μήκος τοίχου (μεγάλο πλέγμα) και είσοδος του αέρα από δεξιά:



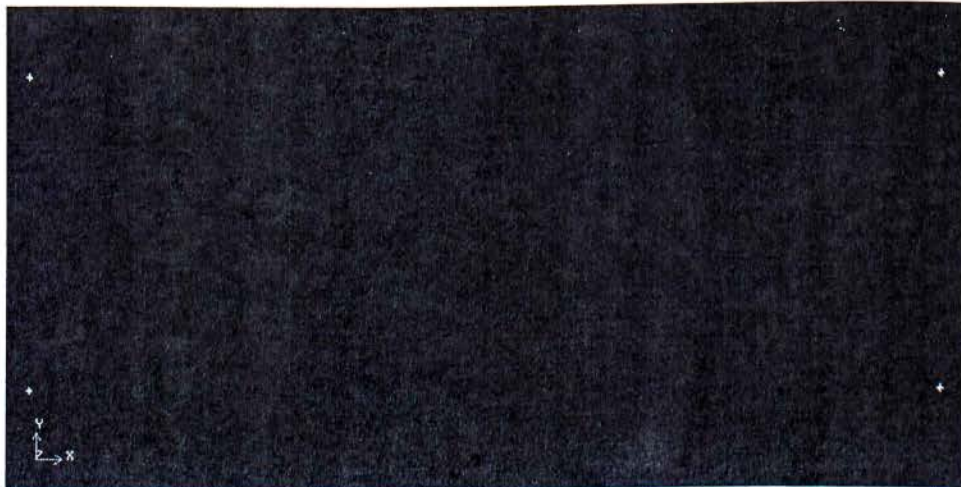
Σχήμα 5.5: Μοντέλο 4

5.1.2 Διαδικασία Δημιουργίας Μοντέλων Στο Gambit

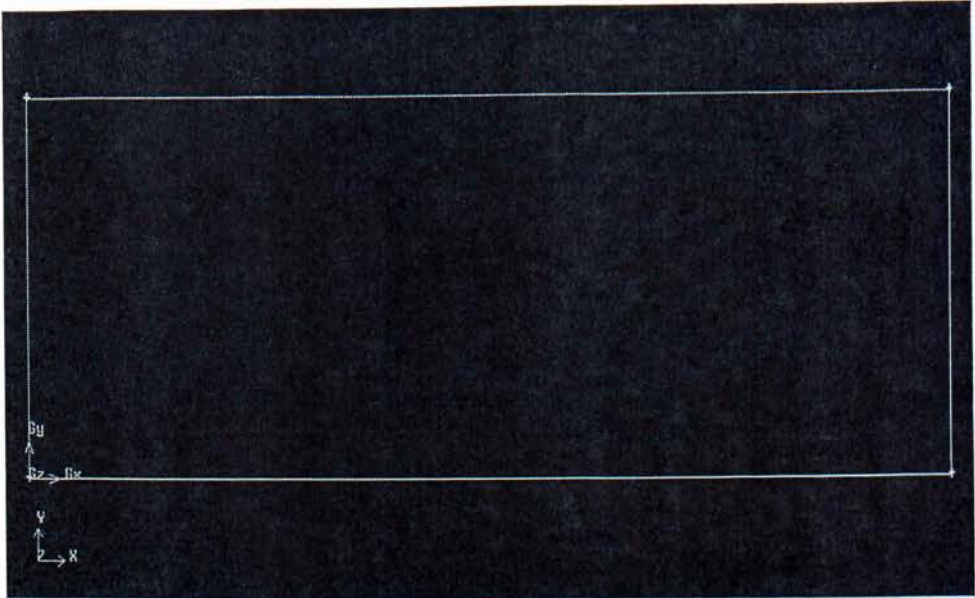
◊ Γραφικό περιβάλλον Gambit:



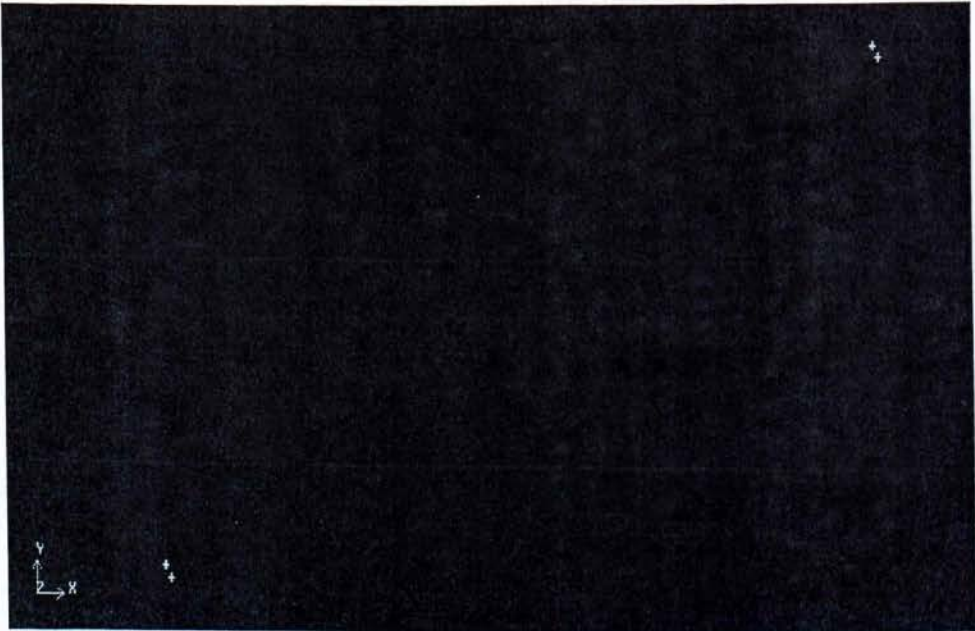
- Ορισμός σημείων (vertex) τοίχων:



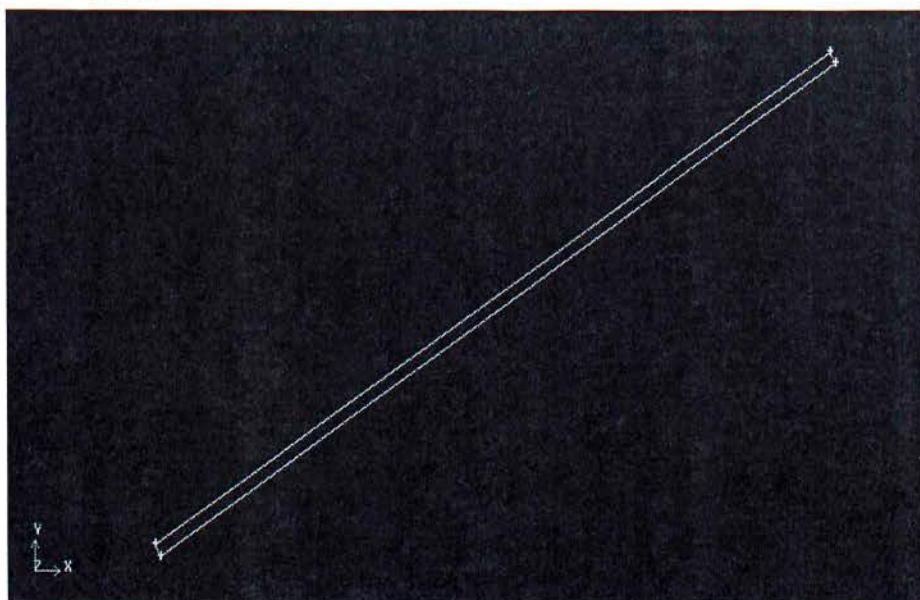
- Ενώνουμε τα σημεία που έχουμε ορίσει στο επίπεδο για να σχηματίσουμε τις γραμμές (edge) οι οποίες ορίζουν τους τοίχους:



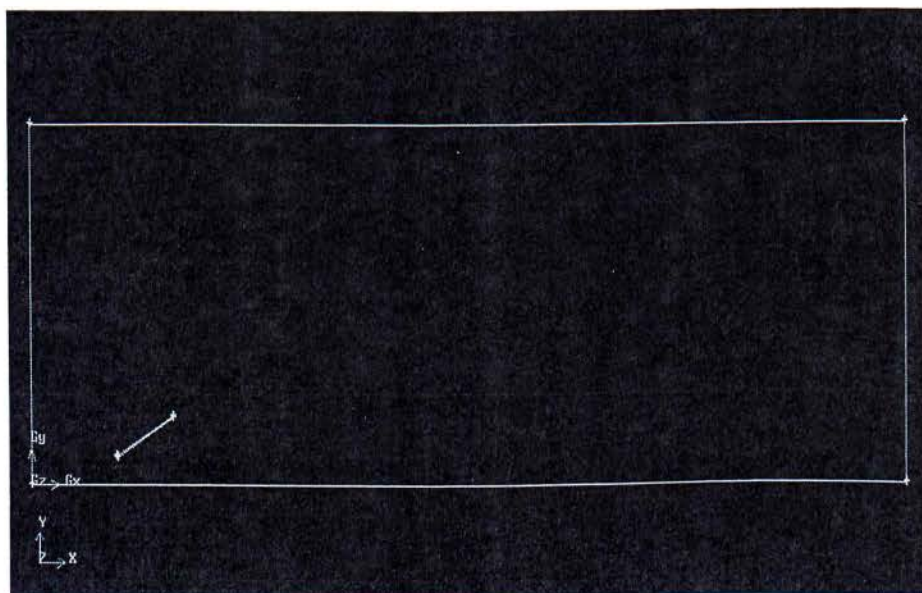
- Ορισμός σημείων πάνελ:



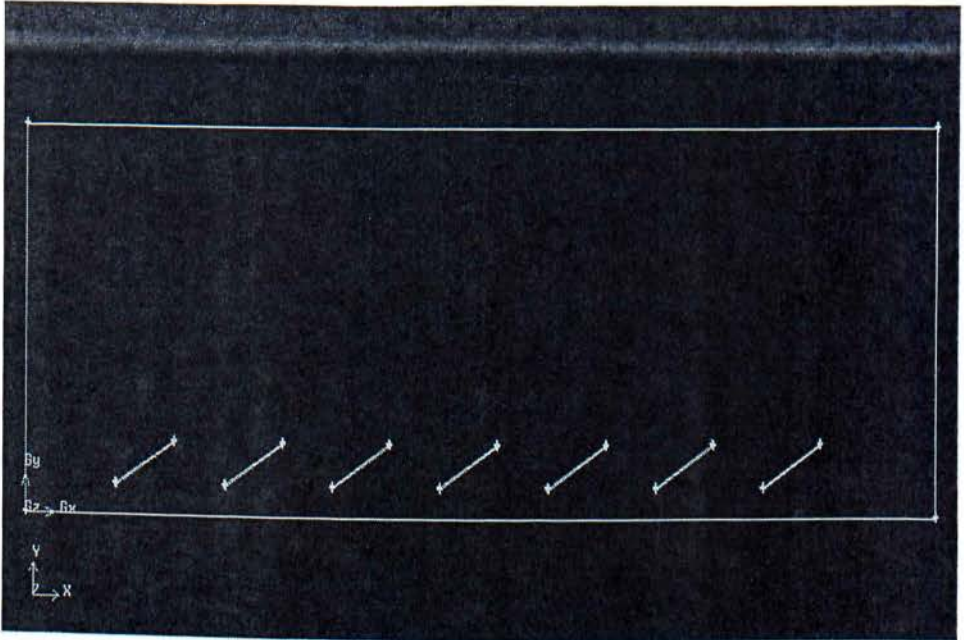
- Ενώνουμε τα σημεία που έχουμε ορίσει στο επίπεδο για να σχηματίσουμε τις γραμμές οι οποίες ορίζουν τα πάνελ:



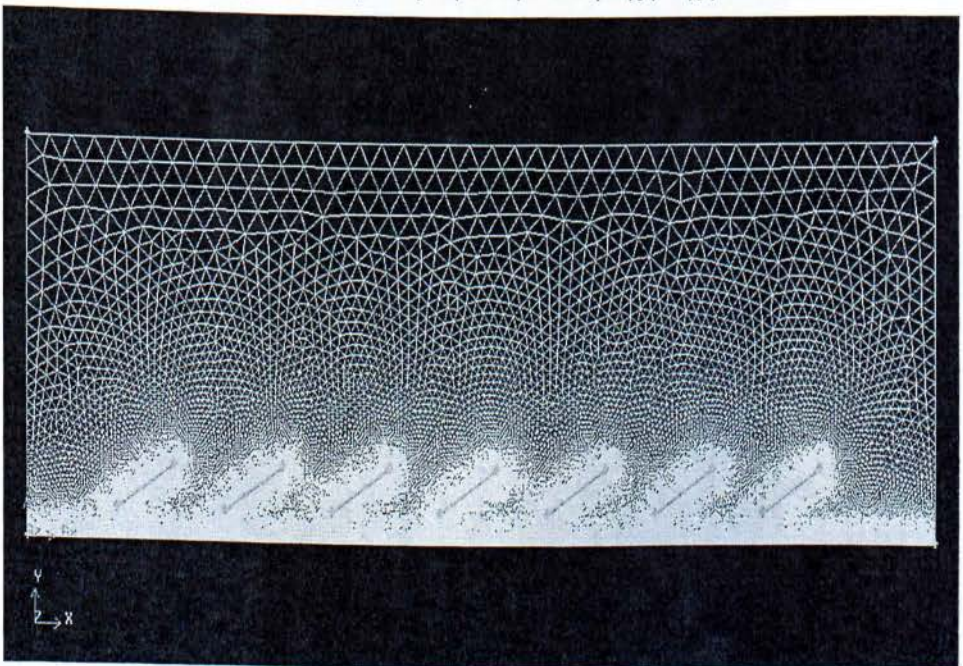
- Αποτελέσματα δημιουργίας του πρώτου πάνελ:

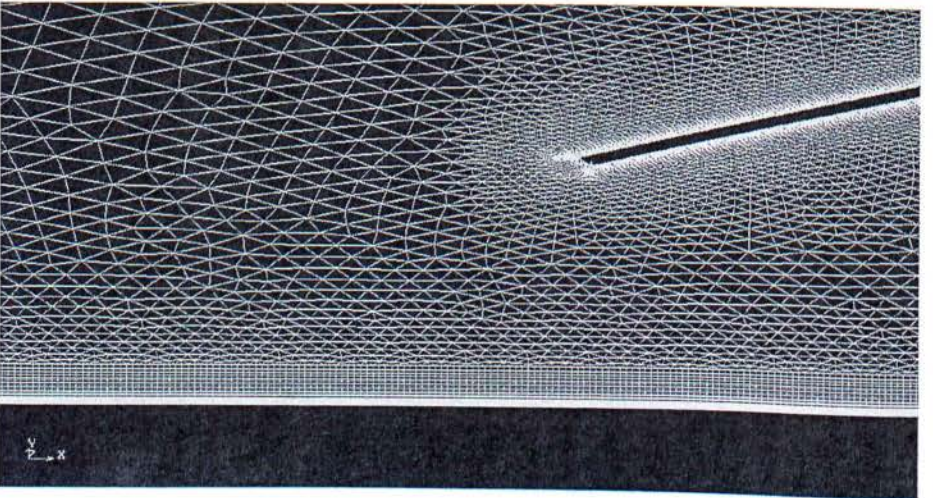
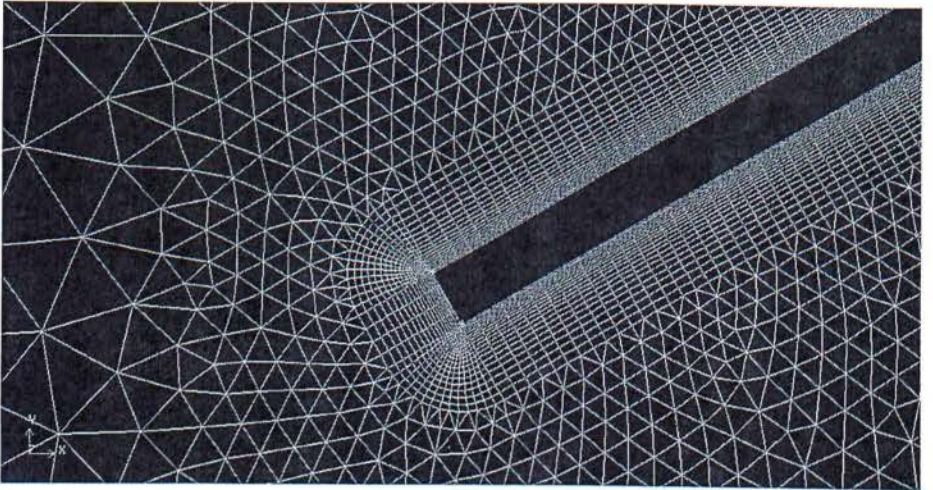
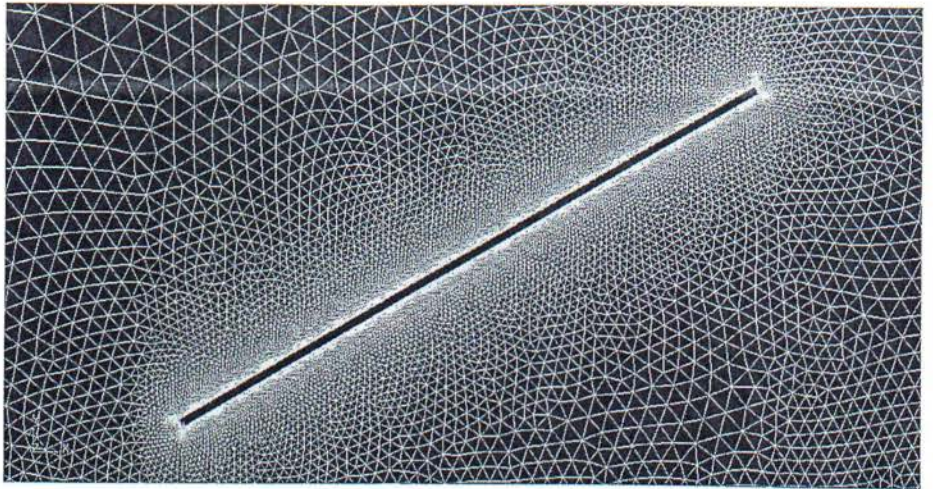


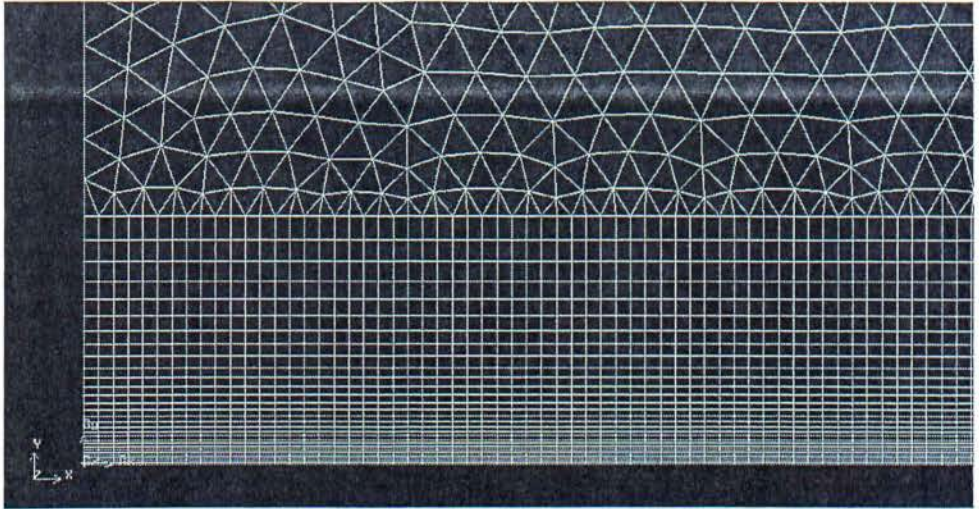
- Κάνουμε αντιγραφή (copy) το πρώτο πάνελ και δημιουργούμε και τα υπόλοιπα έξι:



- Τέλος, ορίζουμε το πλέγμα (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα από το πρόγραμμα Fluent για την επίλυση των παραμετρικών εξισώσεων σε κάθε κελί για να έχουμε ως αποτέλεσμα την προσωμοίωση της ροής ρευστού.







5.2 FLUENT

Το Fluent είναι το πρόγραμμα το οποίο θα επεξεργαστεί το υπολογιστικό κομμάτι. Δίνοντάς στοιχεία για της συνθήκες που επικρατούν μέσα στην γεωμετρία μας, όπως για παράδειγμα το τι ρευστό ρέει μέσα, την θερμοκρασία του, την πυκνότητα του, την αρχική του ταχύτητα κ.τ.λ., μας δίνει αποτελέσματα για τα φυσικά μεγέθη μέσα σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος θέλουμε. Έτσι μπορούμε να εξετάσουμε τι συμβαίνει σε όλα τα σημεία εκείνα που μας ενδιαφέρουν είτε σε ταχύτητα, είτε σε θερμοκρασίες είτε σε πιέσεις. Με όλα αυτά τα στοιχεία που μπορεί να μας παρέχει μπορούμε να δούμε αν η κατασκευή μας είναι αξιόπιστη (από πλευρά καταπονήσεων), είτε αν είναι ενεργειακά και οικονομικά συμφέρουσα, είτε αν πληρεί τις απαιτήσεις για την οποία προορίζεται να κατασκευαστεί κ.ο.κ..

Η αρχή λειτουργίας του προγράμματος Fluent στηρίζεται στην επίλυση παραμετρικών εξισώσεων μέσα στα κελιά του πλέγματος που έχουμε εξάγει από το Gambit. Η επίλυση ξεκινάει δίνοντας στο πρόγραμμα αρχικές τιμές στις παραμέτρους και πραγματοποιεί επαναλύσεις μέχρι οι λύσεις των εξισώσεων να συγκλίνουν με αυτές της προηγούμενης επανάληψης. Η επιτρεπτή απόκλιση των τιμών ορίζεται από τον χρήστη, ο οποίος επιλέγει πολύ μικρή απόκλιση για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά όχι τόσο μικρή, ώστε η χρονική διάρκεια του «τρεξίματος» του Fluent για μία δεδομένη εφαρμογή να γίνει ασύμφορη. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση

χρησιμοποιήθηκε απόκλιση τιμών των λύσεων 10^{-7} . Όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα που έχουμε επιλέξει, τόσο περισσότερες επαναλήψεις θα χρειαστεί το πρόγραμμα για να επιτεύξει την ίδια απόκλιση τιμών των λύσεων που έχουμε ορίσει.

Με τη βοήθεια του προγράμματος Fluent, αφού επιλυθεί το δεδομένο πρόβλημα, μπορούμε να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα της ροής σε διαγράμματα X-Ψ, σε διανυσματικές απεικονίσεις (vectors), αλλά και σε ποιοτικές απεικονίσεις στην συνολική επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου (contours). Οι δύο τελευταίοι τρόποι απεικονίσεις των δεδομένων μας βοηθούν να βγάλουμε άμεσα συμπεράσματα για την εξέλιξη της ροής, ανάλογα με την παράμετρο που μελετάμε, και να εντοπίσουμε τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

5.2.1 Εισαγωγή Δεδομένων Στο Fluent

1. Εισάγουμε το πλέγμα (read mesh) που έχουμε δημιουργήσει στο Gambit
2. Φτιάχνουμε την κλίμακα των διαστάσεων (scale)
3. Δηλώνουμε το μοντέλο προσομοίωσης (models) το οποίο θα τρέξει
4. Δηλώνουμε το υλικό (material) που θα εισάγουμε
5. Φτιάχνουμε τις οριακές συνθήκες (boundary conditions). Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες, αφού επιλέξουμε την είσοδο του ρευστού, στη συνέχεια ορίζουμε την ροή μάζας (mass flow rate) και τη διάμετρο εισαγωγής (hydraulic diameter)
6. Ελέγχουμε τις μεθόδους της λύσης μας (solution methods)
7. Αρχικοποιούμε τη λύση μας (solution initialization)
8. Αρχίζουμε να τρέχουμε το πρόγραμμα για να μας βγάλει λύση (run calculation)
9. Τέλος μετά από αρκετές επαναλήψεις κατασκευάζουμε τα διαγράμματα (graphics and animations) ποιοτικών απεικονίσεων πιέσεων ανέμου (pressure contours), ποιοτικών απεικονίσεων ταχυτήτων ανέμου (velocity contours) και διανυσματικών απεικονίσεων ταχυτήτων ανέμου (velocity vectors)

5.2.2 Μοντέλα Τύρβης

Ως τυρβώδης ροή (turbulent flow) μπορεί να οριστεί η ιξώδης ροή στην οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται με ακανόνιστο, τυχαίο τρόπο στο πεδίο ροής. Ο όρος ιξώδης ροή χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την ροή οποιουδήποτε πραγματικού ρευστού, άσχετα με την χαμηλή ή όχι τιμή του ιξώδους του. Η ταχύτητα και όλες οι υπόλοιπες ιδιότητες του ρευστού μεταβάλλονται συνεχώς με έντονη ταυτόχρονα ανάμιξη σε μοριακό επίπεδο μεταξύ γειτονικών στοιβάδων του ρευστού.

Από τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για την προσέγγιση αυτού του πολύπλοκου φαινομένου, τα περισσότερα είναι βασισμένα στις μέσες κατά Reynolds εξισώσεις Navier-Stokes (RANS equations) και διαχωρίζονται στα μοντέλα δίνης-ιξώδους (eddy-viscosity) και στα μοντέλα τάσεων Reynolds (Reynolds stress models). Τα μοντέλα δίνης-ιξώδους δέχονται ότι η τύρβη αποτελείται από μικρές δίνες οι οποίες σχηματίζονται και διαχέονται συνεχώς, ενώ οι τάσεις Reynolds λαμβάνονται ως ανάλογες με τις μέσες βαθμίδες ταχύτητας. Αντίθετα, τα μοντέλα τάσεων Reynolds βασίζονται σε εξισώσεις μεταφοράς για όλες τις συνιστώσες των τάσεων Reynolds κι έτσι μπορούν να εκτιμήσουν ανισοτροπίες των τάσεων. Από τα μοντέλα που αναλύονται παρακάτω, τα $k-\epsilon$, $k-\omega$ και SST ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, ενώ είναι γνωστά και ως μοντέλα δύο εξισώσεων (two – equation models).

Μοντελο $k - \epsilon$

Η ενσωμάτωση του μοντέλου $k-\epsilon$ στο σύστημα των τριών εξισώσεων που περιγράφουν τα ισοζύγια, πραγματοποιείται με την εισαγωγή δύο νέων μεταβλητών: της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (turbulence kinetic energy) $[k]$ και του ρυθμού διασκόρπισης των δινών της τύρβης (turbulence eddy dissipation rate) $[\epsilon]$ οδηγώντας στις ακόλουθες εξισώσεις:

Ισοζύγιο μάζας:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla (\rho U) = 0 \quad (5.1)$$

Ισοζύγιο ενέργειας:

$$\partial (\rho h_{tot}) / \partial t - \partial P / \partial t + \nabla (\rho U h_{tot}) = \nabla [\lambda \nabla(T) + (\mu_t / Pr_t) \nabla(h)] + SE \quad (5.2)$$

Ισοζύγιο ορμής:

$$\partial \rho U / \partial t + \nabla(\rho U \otimes U) - \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla U) = \nabla p' + \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla U)^T + B \quad (5.3)$$

όπου (B) είναι το άθροισμα των δυνάμεων σώματος και (p') είναι η τροποποιημένη πίεση υπολογιζόμενη από τη σχέση:

$$p' = p + 2/3 (\rho k) \quad (5.4)$$

και

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (5.5)$$

Η μέση τιμή της συνολικής ενθαλπίας (h_{tot}) δίνεται από τον τύπο:

$$h_{\text{tot}} = h + 1/2 (U^2) + k \quad (5.6)$$

και η συνεισφορά της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) από τον τύπο:

$$k = 1/2 (u^2) \quad (5.7)$$

Το μοντέλο k-ε υποθέτει ότι το ιξώδες της τύρβης συνδέεται με την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ρυθμό διασκόρπισης των δινών μέσω της σχέσης:

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (5.8)$$

Οι τιμές των (k) και (ε) υπολογίζονται ευθέως από τις αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς τους:

$$\partial (\rho k) / \partial t + \nabla(\rho U k) = \nabla[(\mu + \mu_t / \sigma_k) \nabla k] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5.9)$$

$$\partial (\rho \varepsilon) / \partial t + \nabla(\rho U \varepsilon) = \nabla[(\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + \varepsilon / k (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (5.10)$$

όπου ο όρος (P_k) εκφράζει τον ρυθμό παραγωγής τύρβης εξαιτίας των ιξωδών και ανωστικών δυνάμεων, ενώ προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$P_k = \mu_t \nabla U (\nabla U + \nabla U^T) - 2/3 (\nabla U) (3\mu_t \nabla U + \rho k) + P_{kb} \quad (5.11)$$

Σταθερές μοντέλου:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

$$C_\mu = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3$$

Μοντελο k - ω και SST

Ένα από τα προβλήματα στην προτυποποίηση της τύρβης είναι η ακριβής πρόβλεψη της αποκόλλησης της ροής από μια λεία επιφάνεια, κάτι που απαντάται συχνά σε τεχνικές εφαρμογές ροών και μικρής και μεγάλης κλίμακας. Ο λόγος είναι ότι στην πραγματικότητα, τα μοντέλα που βασίζονται στο ρυθμό διασκόρπισης των δινών της τύρβης (ϵ) υπερεκτιμούν τον χρόνο έναρξης της αποκόλλησης.

Στην κατεύθυνση αυτή έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται με επιτυχία τα μοντέλα που βασίζονται στην συχνότητα των δινών (ω). Το πλέον ολοκληρωμένο μοντέλο θεωρείται αυτό της μεταφοράς διατμητικών τάσεων που είναι γνωστό και ως SST (Shear Stress Transport). Το μοντέλο αυτό καλύπτει αδυναμίες του κλασσικού μοντέλου k- ω και συνιστάται για υψηλής ακρίβειας προβλέψεις του οριακού στρώματος (Park and Kwon, 2004). Αυτό επιτυγχάνεται με την επίλυση του μοντέλου k- ω κοντά στο τοίχωμα που συνοδεύεται από την επίλυση του μοντέλου k- ϵ στο κύριο σώμα της ροής.

Το μοντέλο k- ω υποθέτει ότι το ιξώδες της τύρβης συνδέεται με την τυρβώδη κινητική ενέργεια και την συχνότητα των δινών μέσω της σχέσης:

$$\mu_t = \rho k / \omega \quad (5.12)$$

Με το μοντέλο αυτό, επιλύονται δύο επιπλέον εξισώσεις, μία για την τυρβώδη κινητική ενέργεια (k) και μία για συχνότητα των δινών της τύρβης (ω):

Εξίσωση - k:

$$\partial(\rho k) / \partial t + \nabla(\rho U k) = \nabla[(\mu + \mu_t / \sigma_k) \nabla k] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (5.13)$$

Εξίσωση - ω :

$$\partial(\rho \omega) / \partial t + \nabla(\rho U \omega) = \nabla[(\mu + \mu_t / \sigma_\omega) \nabla \omega] + (\alpha \omega P_k) / \kappa - \beta \rho \omega^2 \quad (5.14)$$

όπου ο όρος (P_k) εκφράζει τον ρυθμό παραγωγής τύρβης εξαιτίας των ιξωδών και ανωστικών δυνάμεων, και προσδιορίζεται από την σχέση:

$$P_k = \mu_t \nabla U (\nabla U + \nabla U^T) - 2 / 3 (\nabla U) (3 \mu_t \nabla U + \rho k) + P_{kb} \quad (5.15)$$

Σταθερές μοντέλου:

$$\beta' = 0.09$$

$$\alpha = 5/9$$

$$\beta = 0.075$$

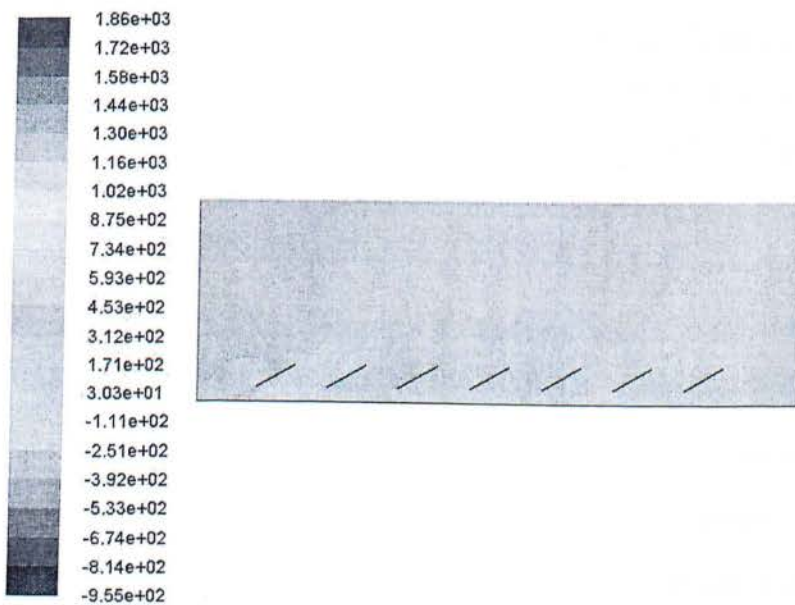
$$\sigma_k = \sigma_w = 2.0$$

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ακολουθούν τα διαγράμματα αποτελεσμάτων της πίεσης και της ταχύτητας για τα δύο πρότυπα μοντέλα προσομοίωσης k-ε και k-ω:

5.3.1 Αποτελέσματα k-ε

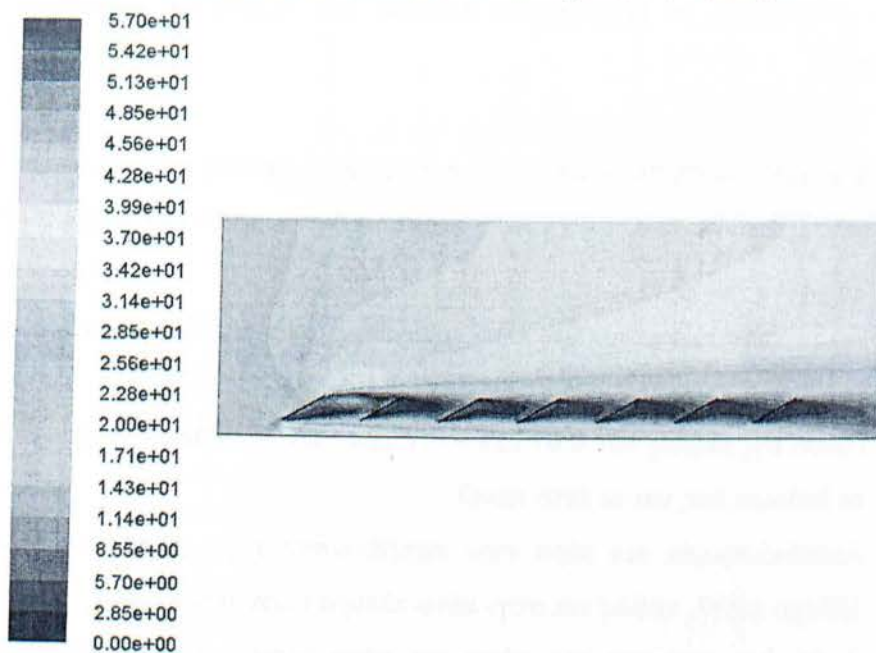
- Μοντέλο 1 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.6: Μοντέλο 1

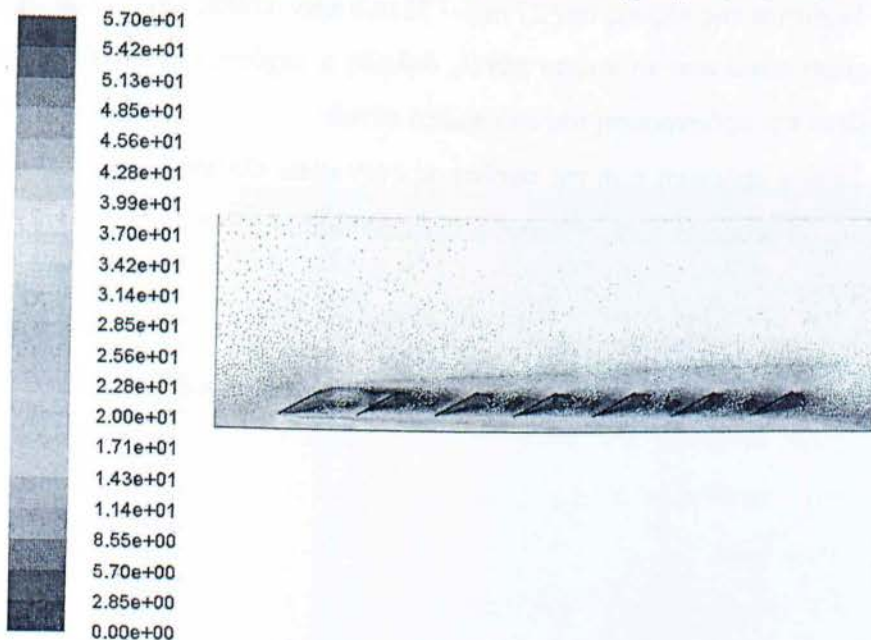
- Μοντέλο 1 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.7: Μοντέλο 1

- Μοντέλο 1 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

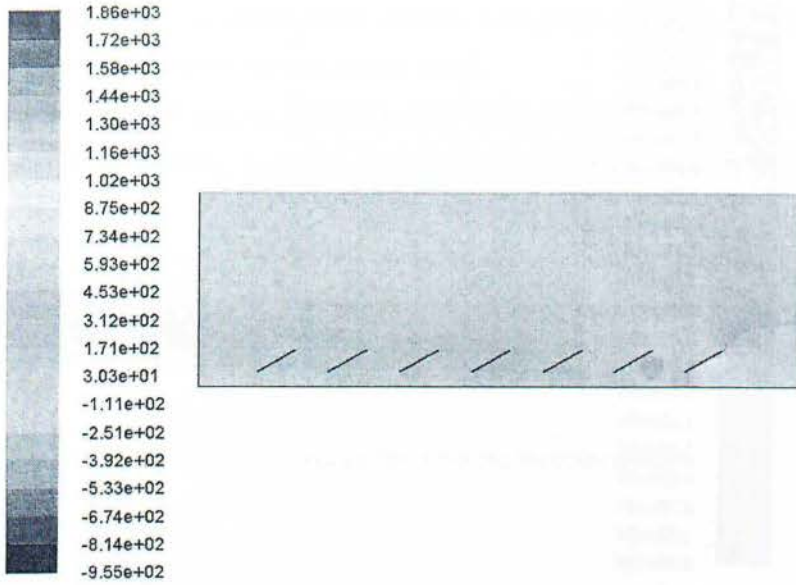
Σχήμα 5.8: Μοντέλο 1

Στο πρώτο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από αριστερά και μικρό πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Αυξημένη πίεση στο κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 0.8 kPa – 1.0 kPa, η οποία σταδιακά μειώνεται προχωρώντας στις επόμενες σειρές
2. Πίεση της τάξεως των 0.1 kPa – 0.5 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και πριν από το πρώτο πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έκτο πάνελ
4. Ανακυκλοφορία του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και μετά από το έβδομο πάνελ, καθώς και στην κάτω πλευρά όλων των πάνελ
5. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 38 m/s – 41 m/s
6. Ταχύτητα της τάξεως των 32 m/s – 38 m/s στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ, καθώς και κάτω από τα δύο πρώτα πάνελ
7. Ταχύτητα της τάξεως των 27 m/s – 32 m/s πριν, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ
8. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην κάτω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

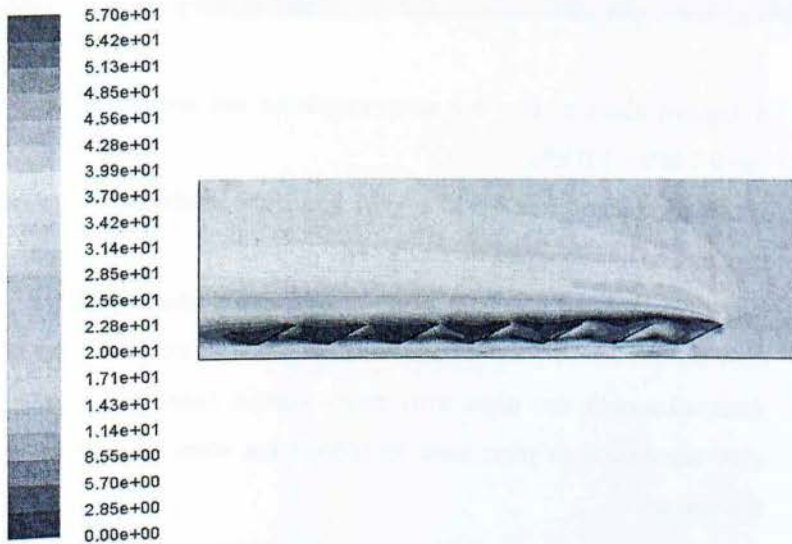
- Μοντέλο 2 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.9: Μοντέλο 2

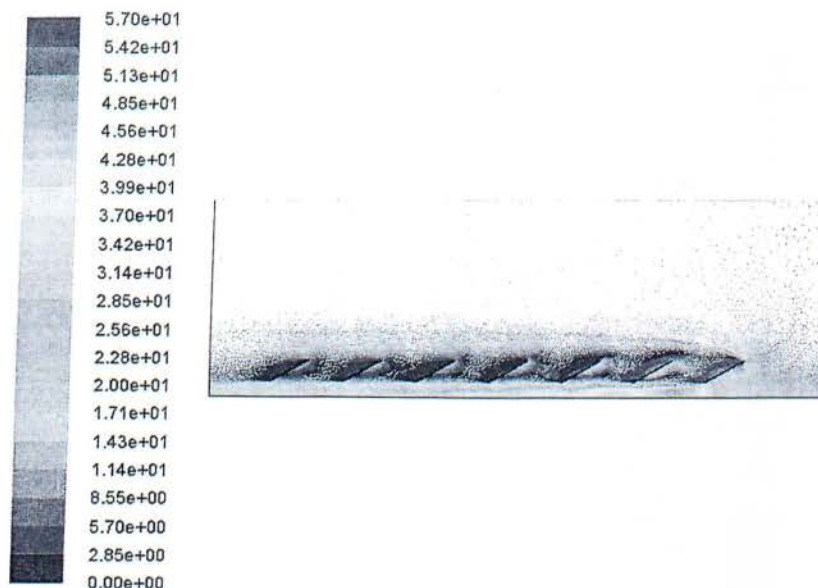
- Μοντέλο 2 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.10: Μοντέλο 2

- Μοντέλο 2 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.11: Μοντέλο 2

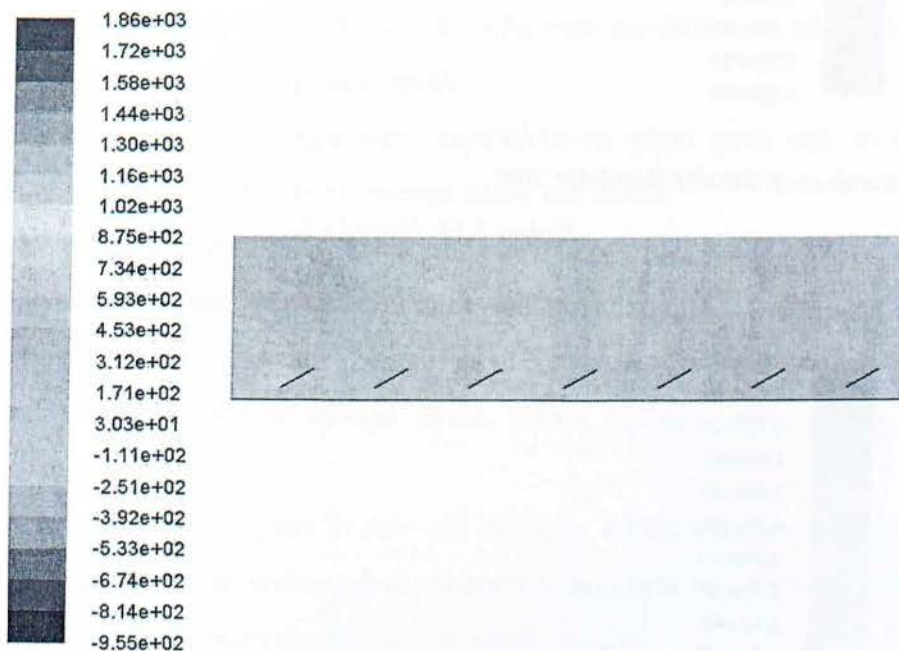
Στο δεύτερο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από δεξιά και μικρό πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Αυξημένη πίεση σ' όλη την κάτω επιφάνεια του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 0.7 kPa – 1.0 kPa
2. Πίεση της τάξεως των 0.3 kPa – 0.7 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και πριν από το πρώτο πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στη κάτω επιφάνεια, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο κάτω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ
4. Ανακυκλοφορία του αέρα στην πάνω πλευρά όλων των πάνελ, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο μετά το έβδομο και πάνω από όλα τα πάνελ εκτός του πρώτου
5. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της κάτω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 38 m/s – 45 m/s
6. Ταχύτητα της τάξεως των 34 m/s – 38 m/s στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ, καθώς και κάτω από τα τρία πρώτα πάνελ.

7. Ταχύτητα της τάξεως των 27 m/s – 34 m/s πριν, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ
8. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην πάνω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

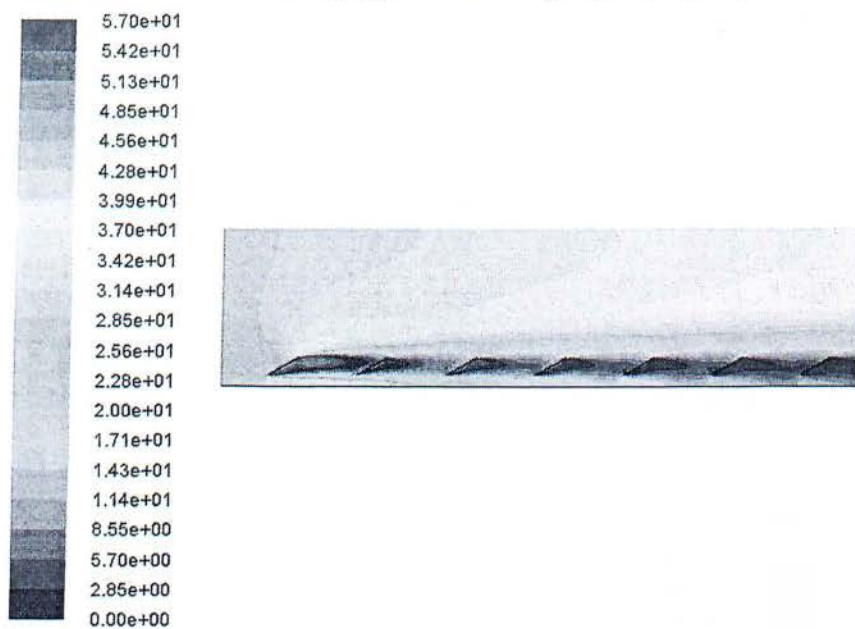
- Μοντέλο 3 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.12: Μοντέλο 3

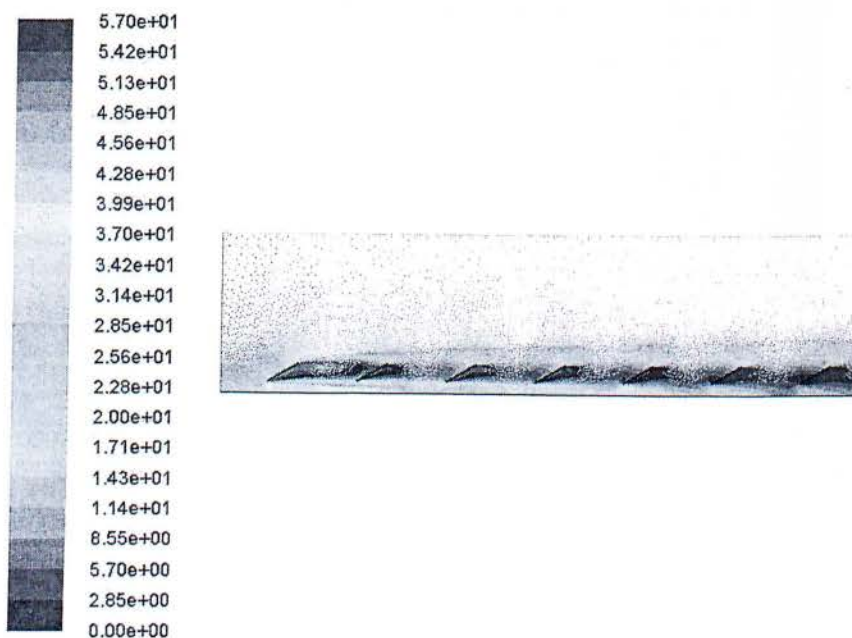
- Μοντέλο 3 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.13: Μοντέλο 3

- Μοντέλο 3 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

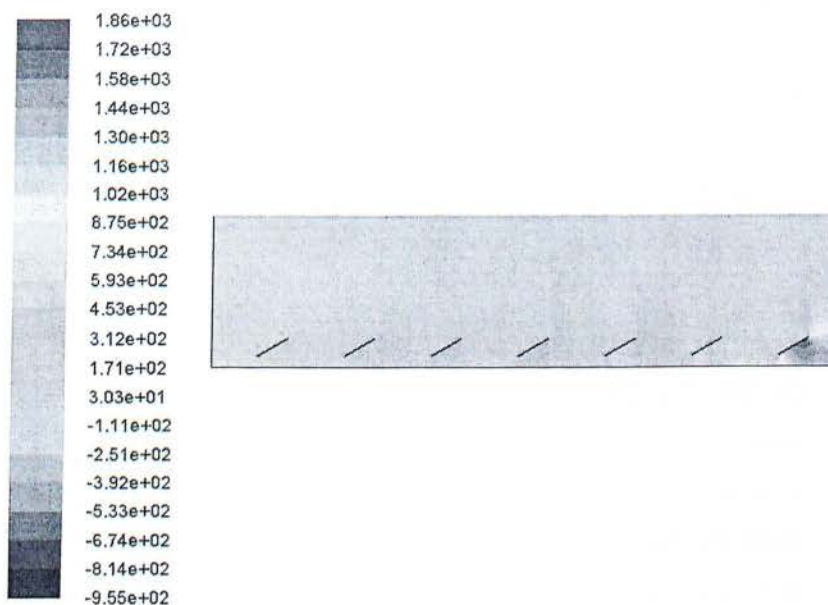
Σχήμα 5.14: Μοντέλο 3

Στο τρίτο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από αριστερά και μεγάλο πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Αυξημένη πίεση στο κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 0.7 kPa – 1.0 kPa, η οποία σταδιακά μειώνεται προχωρώντας στις επόμενες σειρές
2. Πίεση της τάξεως των 0.4 kPa – 0.7 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και πριν από το πρώτο πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.1 kPa – 0.4 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το τέταρτο πάνελ
4. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το τέταρτο έως και το έβδομο πάνελ
5. Ανακυκλοφορία του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο μετά από το έβδομο πάνελ, καθώς και στην κάτω πλευρά όλων των πάνελ
6. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 38 m/s – 42 m/s
7. Ταχύτητα της τάξεως των 32 m/s – 38 m/s στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ, καθώς και κάτω από τα δύο πρώτα πάνελ
8. Ταχύτητα της τάξεως των 27 m/s – 32 m/s πριν, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ
9. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην κάτω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

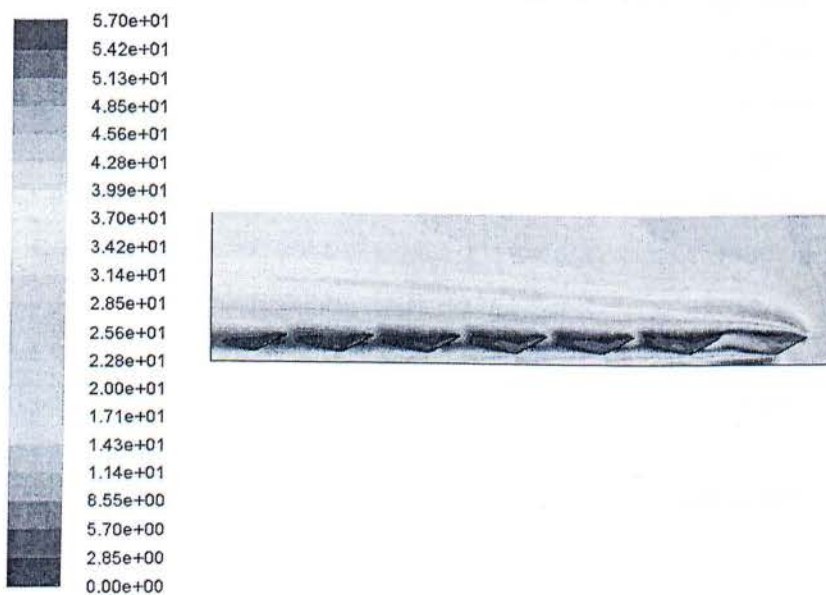
- Μοντέλο 4 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.15: Μοντέλο 4

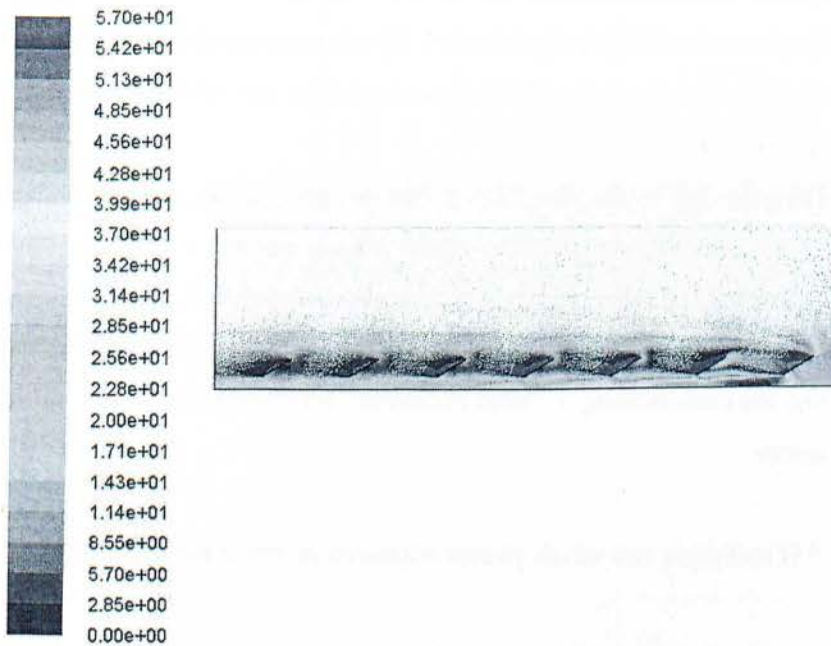
- Μοντέλο 4 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.16: Μοντέλο 4

- Μοντέλο 4 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.17: Μοντέλο 4

Στο τέταρτο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από δεξιά και μεγάλο πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

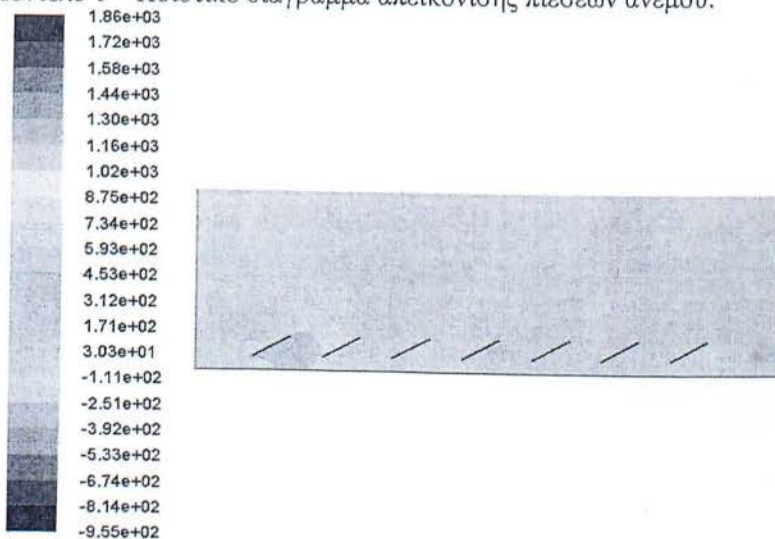
1. Αυξημένη πίεση σ' όλη την κάτω επιφάνεια του πρώτου πάνελ, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο κάτω από αυτό, της τάξεως των 1.0 kPa – 1.8 kPa
2. Πίεση της τάξεως των 0.7 kPa – 1.0 kPa στο κάτω μέρος της κάτω επιφάνειας του δεύτερου και τρίτου πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.3 kPa – 0.6 kPa στον περιβάλλοντα χώρο κάτω από όλα τα πάνελ
4. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το τέταρτο πάνελ
5. Ανακυκλοφορία του αέρα στην πάνω πλευρά του τέταρτου έως και του έβδομου πάνελ, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πέμπτο έως και μετά το έβδομο πάνελ

6. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της κάτω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 45 m/s – 55 m/s
7. Ταχύτητα της τάξεως των 36 m/s – 45 m/s στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ, καθώς και κάτω από το δεύτερο και τρίτο πάνελ.
8. Ταχύτητα της τάξεως των 27 m/s – 36 m/s πριν, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και κάτω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ.
9. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην πάνω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

5.3.2 Αποτελέσματα k- ω - SST

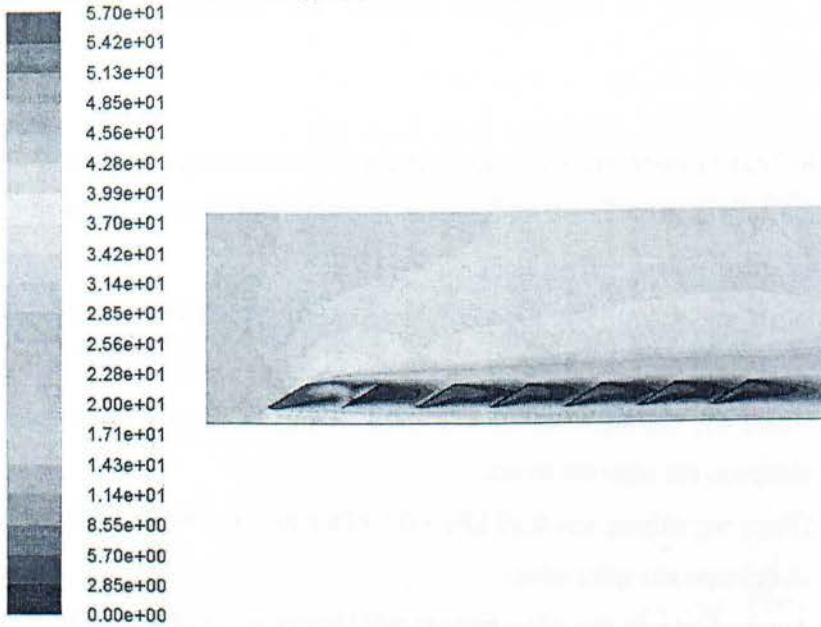
- Μοντέλο 1 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.18: Μοντέλο 1

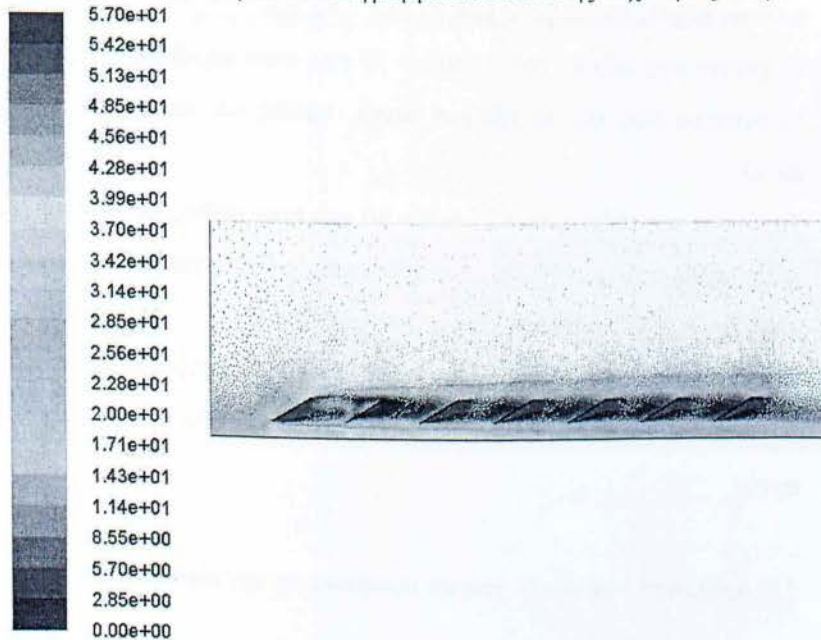
- Μοντέλο 1 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.19: Μοντέλο 1

- Μοντέλο 1 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

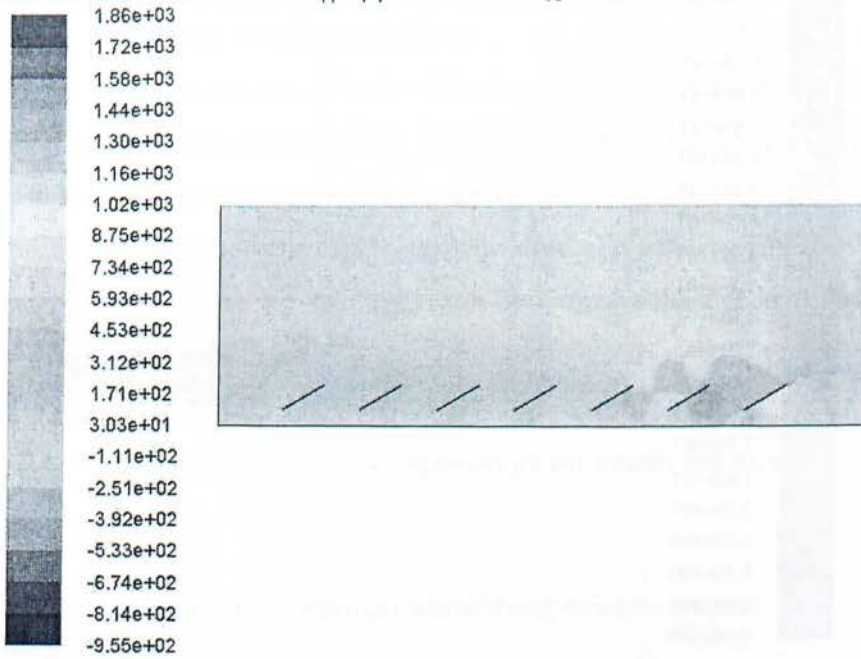
Σχήμα 5.20: Μοντέλο 1

Στο πρώτο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από αριστερά και μικρό πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Αυξημένη πίεση στο κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 0.6 kPa – 0.9 kPa, η οποία σταδιακά μειώνεται προχωρώντας στις επόμενες σειρές
2. Πίεση της τάξεως των 0.3 kPa – 0.6 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και πριν από το πρώτο πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στην πάνω επιφάνεια του τρίτου, τέταρτου και πέμπτου πάνελ
4. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο και τρίτο πάνελ
5. Ανακυκλοφορία του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο μετά από το τρίτο πάνελ, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο μεταξύ του πρώτου και δεύτερου πάνελ
6. Μέγιστη ανακυκλοφορία μεταξύ του πρώτου και δεύτερου πάνελ
7. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 37 m/s – 42 m/s
8. Ταχύτητα της τάξεως των 30 m/s – 37 m/s στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ, καθώς και κάτω από τα δύο πρώτα πάνελ
9. Ταχύτητα της τάξεως των 27 m/s – 30 m/s πριν καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ
10. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην κάτω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

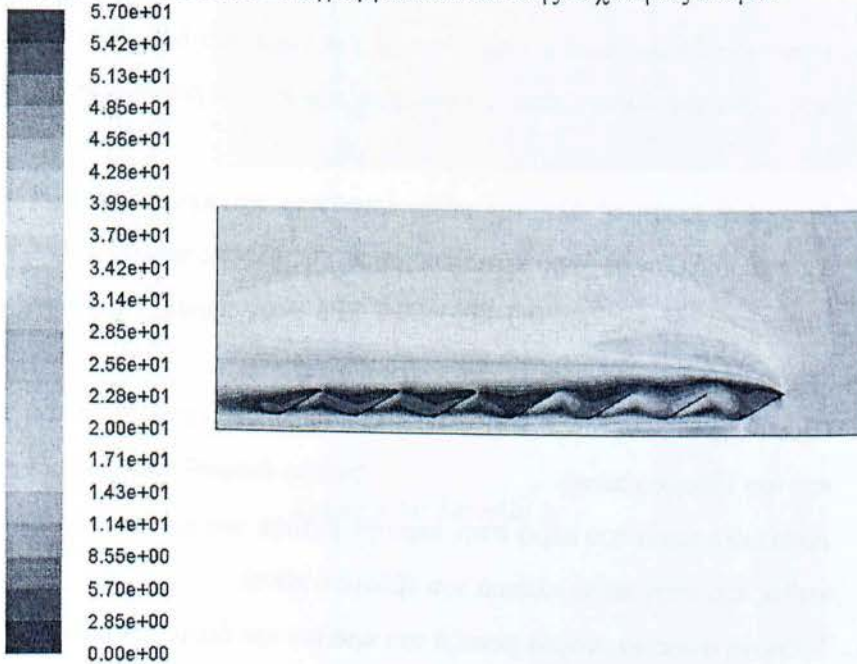
- Μοντέλο 2 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.21: Μοντέλο 2

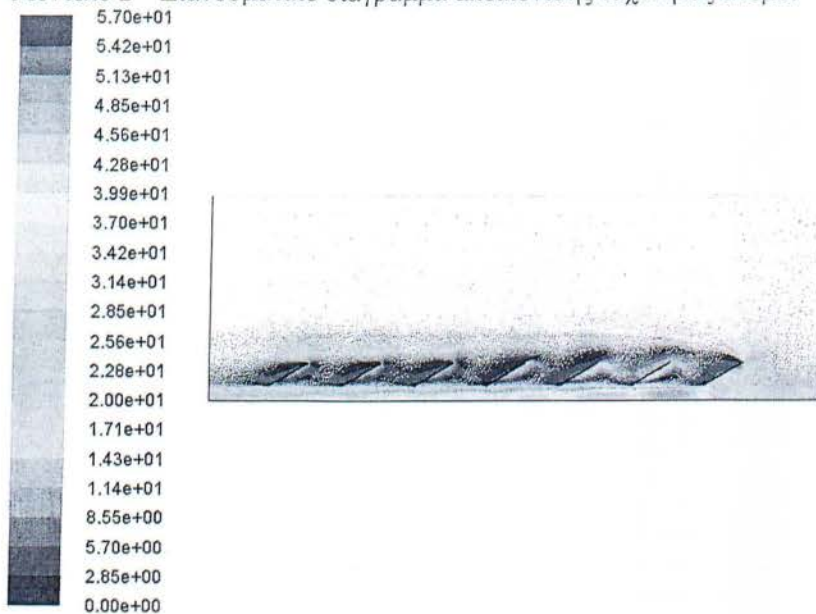
- Μοντέλο 2 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.22: Μοντέλο 2

- Μοντέλο 2 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.23: Μοντέλο 2

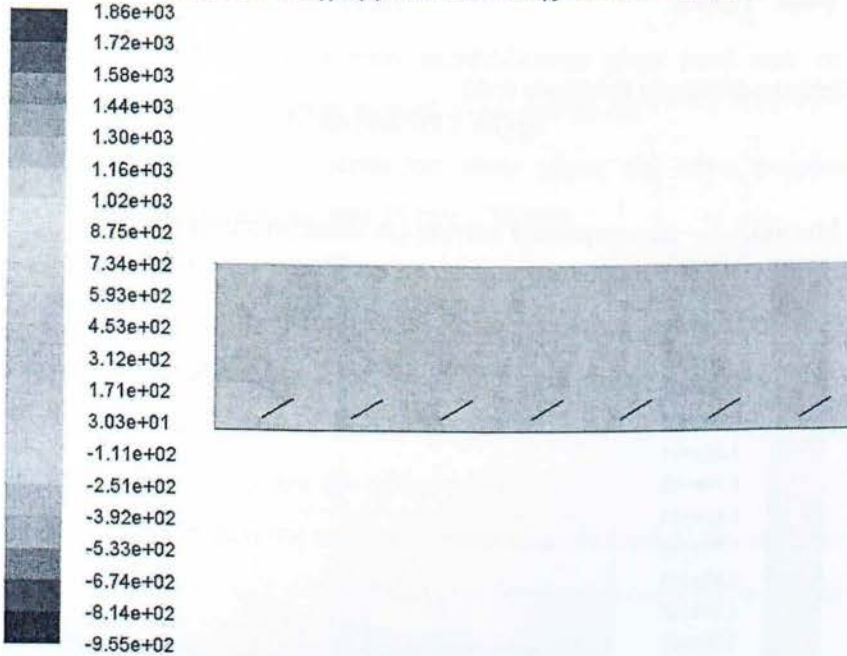
Στο δεύτερο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από δεξιά και μικρό πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Αυξημένη πίεση σ' όλη την κάτω επιφάνεια του πρώτου πάνελ, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο κάτω από αυτό, της τάξεως των 0.7 kPa – 0.9 kPa
2. Πίεση της τάξεως των 0.3 kPa – 0.7 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πριν το πρώτο πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.1 kPa – 0.3 kPa στην κάτω επιφάνεια του τρίτου έως και του έβδομου πάνελ
4. Ανακυκλοφορία του αέρα στην περιοχή μεταξύ του πρώτου και τρίτου πάνελ, καθώς και στην πάνω πλευρά του έβδομου πάνελ
5. Μέγιστη ανακυκλοφορία μεταξύ του πρώτου και δεύτερου πάνελ
6. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της κάτω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 40 m/s – 47 m/s

7. Ταχύτητα της τάξεως των 32 m/s – 40 m/s στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ
8. Ταχύτητα της τάξεως των 27 m/s – 32 m/s πριν, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ
9. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην πάνω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

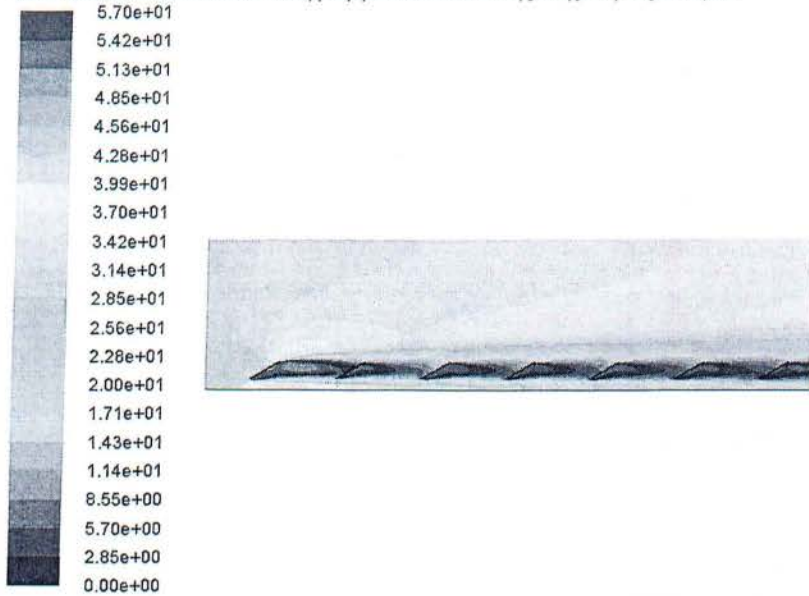
- Μοντέλο 3 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.24: Μοντέλο 3

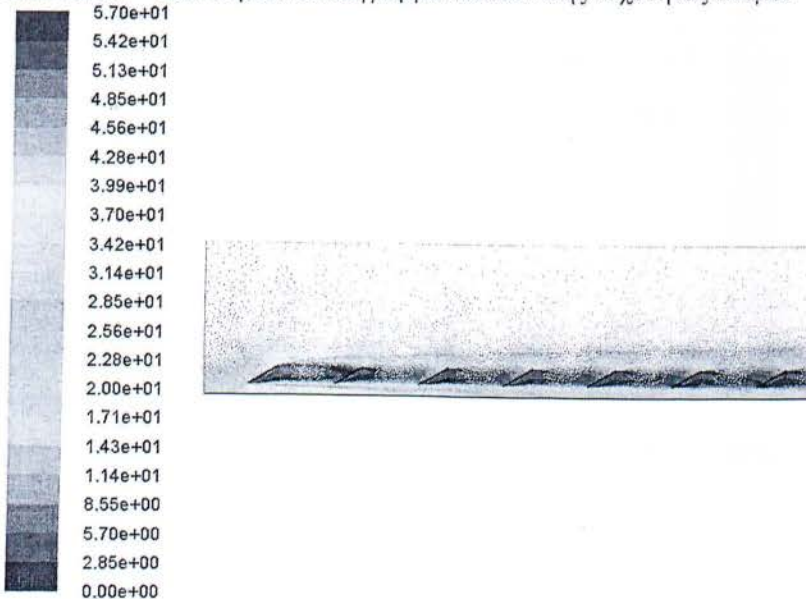
- Μοντέλο 3 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.25: Μοντέλο 3

- Μοντέλο 3 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

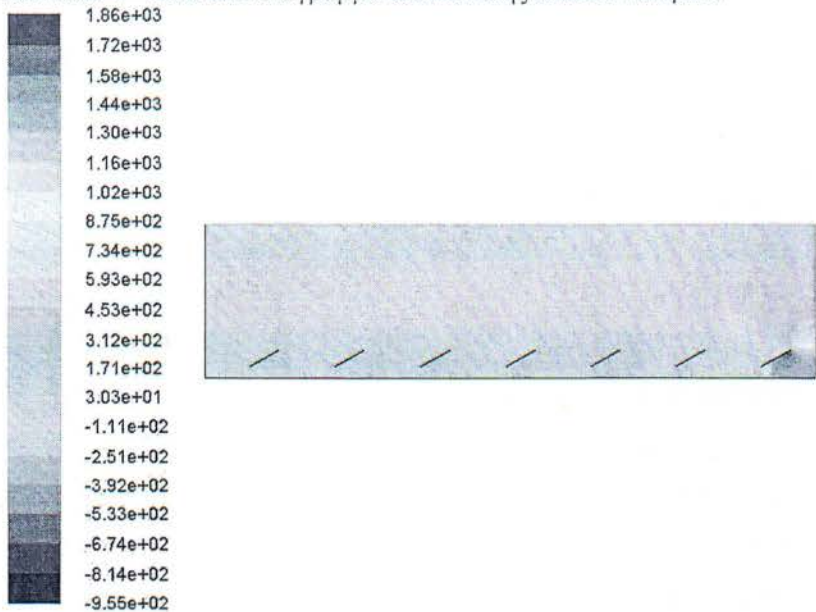
Σχήμα 5.26: Μοντέλο 3

Στο τρίτο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από αριστερά και μεγάλο πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Αυξημένη πίεση στο κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 0.5 kPa – 0.8 kPa, η οποία σταδιακά μειώνεται προχωρώντας στις επόμενες σειρές
2. Πίεση της τάξεως των 0.1 kPa – 0.5 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και πριν από το πρώτο πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.1 kPa – 0.3 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το τρίτο πάνελ
4. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το τρίτο έως και το έβδομο πάνελ
5. Ανακυκλοφορία του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο μετά από το έβδομο πάνελ, καθώς και στην κάτω πλευρά όλων των πάνελ
6. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της πάνω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 35 m/s – 38 m/s
7. Ταχύτητα της τάξεως των 30 m/s – 35 m/s στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ καθώς και κάτω από τα δύο πρώτα πάνελ
8. Ταχύτητα της τάξεως των 27 m/s – 30 m/s πριν καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ
9. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην κάτω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

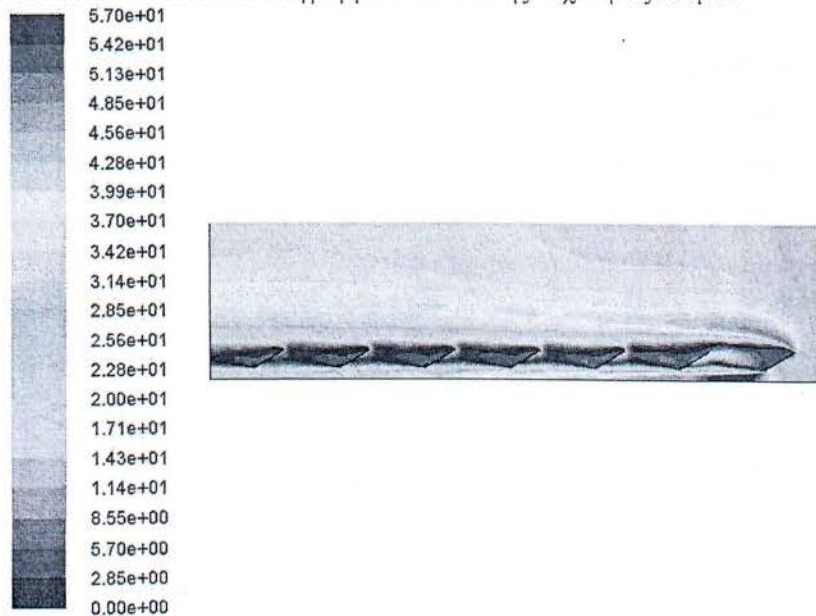
- Μοντέλο 4 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης πιέσεων ανέμου:



Contours of Static Pressure (pascal)

Σχήμα 5.27: Μοντέλο 4

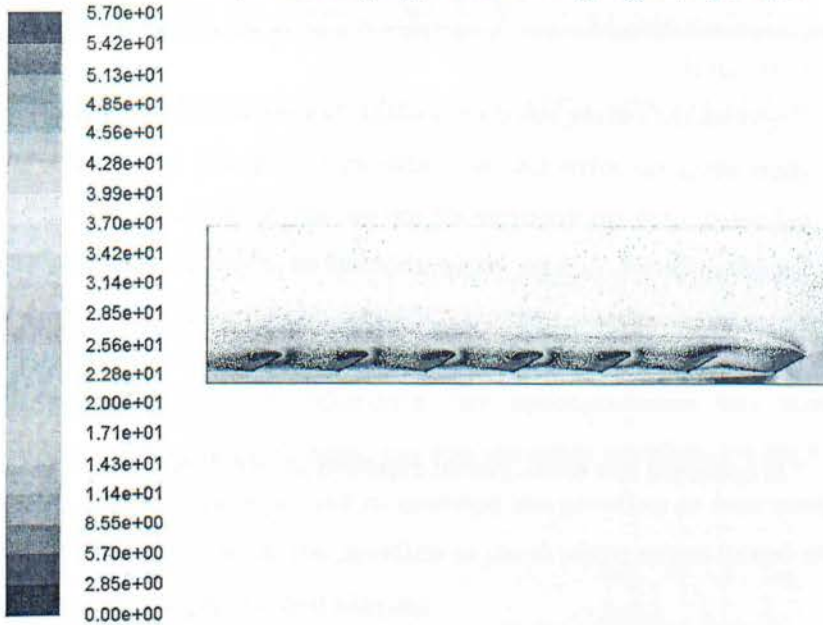
- Μοντέλο 4 – Ποιοτικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.28: Μοντέλο 4

- Μοντέλο 4 – Διανυσματικό διάγραμμα απεικόνισης ταχύτητας ανέμο:



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Σχήμα 5.29: Μοντέλο 4

Στο τέταρτο μοντέλο προσομοίωσης (είσοδος του αέρα από δεξιά και μεγάλο πλέγμα) μελετώντας τα διαγράμματα πιέσεων και ταχυτήτων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

1. Αυξημένη πίεση σ' όλη την κάτω επιφάνεια του πρώτου πάνελ, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο κάτω από αυτό, της τάξεως των 1.0 kPa – 1.7 kPa
2. Πίεση της τάξεως των 0.5 kPa – 0.8 kPa στο κάτω μέρος της κάτω επιφάνειας του δεύτερου και τρίτου πάνελ
3. Πίεση της τάξεως των 0.1 kPa – 0.4 kPa στον περιβάλλοντα χώρο κάτω από όλα τα πάνελ
4. Πίεση της τάξεως των 0.03 kPa – 0.1 kPa στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το τέταρτο πάνελ.
5. Ανακυκλοφορία του αέρα στην πάνω πλευρά του τέταρτου έως και έβδομου πάνελ, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το πέμπτο έως και μετά το έβδομο πάνελ
6. Αυξημένη ταχύτητα στο πάνω και κάτω μέρος της κάτω επιφάνειας του πρώτου πάνελ, της τάξεως των 45 m/s – 57 m/s

7. Ταχύτητα της τάξεως των $32 \text{ m/s} - 42 \text{ m/s}$ στον περιβάλλοντα χώρο πάνω από το δεύτερο έως και το έβδομο πάνελ, καθώς και κάτω από το δεύτερο και τρίτο πάνελ
8. Ταχύτητα της τάξεως των $27 \text{ m/s} - 32 \text{ m/s}$ πριν, καθώς και στον περιβάλλοντα χώρο πάνω και κάτω από το πρώτο πάνελ, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μετά την πρόσκρουση του στο πρώτο πάνελ
9. Σχεδόν μηδενική τιμή της ταχύτητας στην πάνω πλευρά όλων των πάνελ λόγω της ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πάνω και κάτω από αυτήν

* Η αρίθμηση των πάνελ γίνεται σύμφωνα με την είσοδο του αέρα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

6.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των τεσσάρων μοντέλων. Θα συγκρίνουμε τις διαφορές των δύο πρότυπων μοντέλων k-ε και k-ω, τις διαφορές όταν ο αέρας εισέρχεται από τα αριστερα του μοντέλου με όταν εισέρχεται από δεξιά και τέλος τις διαφορές του μοντέλου με μικρό μήκος τοίχου (μικρό πλέγμα) και με μεγάλο μήκος τοίχου (μεγάλο πλέγμα).

6.1.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων k-ε Και k-ω

Και τα δύο μοντέλα είναι δύο μεταβλητών. Το μοντέλο k-ε όμως βασίζεται στο *ρυθμό* διασκόρπισης των δινών της τήρβης (ε), ενώ το μοντέλο k-ω βασίζεται στη *συχρότητα* των δινών της τήρβης (ω). Συγκρίνοντας τώρα τα αποτελέσματα, της προσομοίωσης, των πιέσεων και των ταχυτήτων του ανέμου, παρατηρείται ότι στην προσομοίωση του πρότυπου μοντέλου k-ε, για τις ίδιες συνθήκες κάθε φορά έχουμε μεγαλύτερες τιμές απ' ότι στο πρότυπο μοντέλο k-ω. Δηλαδή το πρότυπο μοντέλο k-ε υπερεκτιμά τις συνθήκες.

Συγκρινόμενα διαγράμματα:

Model No.	vs.	Model No.
1 (k-ε)	=>	1 (k-ω)
2 (k-ε)	=>	2 (k-ω)
3 (k-ε)	=>	3 (k-ω)
4 (k-ε)	=>	4 (k-ω)

Σχήμα 5.6 => Σχήμα 5.18

Σχήμα 5.7 => Σχήμα 5.19

Σχήμα 5.8 => Σχήμα 5.20

Σχήμα 5.9 => Σχήμα 5.21
 Σχήμα 5.10 => Σχήμα 5.22
 Σχήμα 5.11 => Σχήμα 5.23
 Σχήμα 5.12 => Σχήμα 5.24
 Σχήμα 5.13 => Σχήμα 5.25
 Σχήμα 5.14 => Σχήμα 5.26
 Σχήμα 5.15 => Σχήμα 5.27
 Σχήμα 5.16 => Σχήμα 5.28
 Σχήμα 5.17 => Σχήμα 5.29

6.1.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Εισόδου Αέρα Από Αριστερά Και Δεξιά

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πιέσεων και των ταχυτήτων του ανέμου, της κάθε προσομοίωσης και για τα δύο πρότυπα μοντέλα (k-ε και k-ω), με γνώμονα της εισόδου του αέρα (είτε από αριστερά, είτε από δεξιά), παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις τη μεγαλύτερη πίεση τη δέχεται στο πρώτο πάνελ, ενώ τα υπόλοιπα αρκετά μικρότερη. Στην περίπτωση της εισόδου του αέρα από δεξιά οι τιμές και των πιέσεων και των ταχυτήτων, είναι μεγαλύτερες. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι ο αέρας προσκρούει σε διαφορετική γεωμετρία (πάνελ) όταν εισέρχεται από δεξιά απ' ότι όταν εισέρχεται από αριστερά.

Συγκρινόμενα διαγράμματα:

Model No.	vs.	Model No.
1 (k-ε)	=>	2 (k-ε)
3 (k-ε)	=>	4 (k-ε)
1 (k-ω)	=>	2 (k-ω)
3 (k-ω)	=>	4 (k-ω)

Σχήμα 5.6 => Σχήμα 5.9
 Σχήμα 5.7 => Σχήμα 5.10
 Σχήμα 5.8 => Σχήμα 5.11
 Σχήμα 5.12 => Σχήμα 5.15
 Σχήμα 5.13 => Σχήμα 5.16
 Σχήμα 5.14 => Σχήμα 5.17
 Σχήμα 5.18 => Σχήμα 5.21
 Σχήμα 5.19 => Σχήμα 5.22
 Σχήμα 5.20 => Σχήμα 5.23
 Σχήμα 5.24 => Σχήμα 5.27
 Σχήμα 5.25 => Σχήμα 5.28
 Σχήμα 5.26 => Σχήμα 5.29

6.1.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μικρού Και Μεγάλου Πλέγματος

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πιέσεων και των ταχυτήτων του ανέμου, της κάθε προσομοίωσης και για τα δύο πρότυπα μοντέλα (k-ε και k-ω), με γνώμονα το μέγεθος του πλέγματος (είτε μικρο, είτε μεγάλο), παρατηρείται κι εδώ και για τις δύο περιπτώσεις ότι το πρώτο πάνελ δέχεται τη μεγαλύτερη πίεση, ενώ τα υπόλοιπα αρκετά μικρότερη. Στην περίπτωση του μεγάλου πλέγματος, οι τιμές και των πιέσεων και των ταχυτήτων του ανέμου, είναι μεγαλύτερες. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα να οφείλεται στη μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των πάνελ, με αποτέλεσμα να προστατεύονται λιγότερο από το μπροστινό τους πάνελ.

Συγκρινόμενα διαγράμματα:

Model No.	vs.	Model No.
1 (k-ε)	=>	3 (k-ε)
2 (k-ε)	=>	4 (k-ε)
1 (k-ω)	=>	3 (k-ω)
2 (k-ω)	=>	4 (k-ω)

Σχήμα 5.6 => Σχήμα 5.12
Σχήμα 5.7 => Σχήμα 5.13
Σχήμα 5.8 => Σχήμα 5.14
Σχήμα 5.9 => Σχήμα 5.15
Σχήμα 5.10 => Σχήμα 5.16
Σχήμα 5.11 => Σχήμα 5.17
Σχήμα 5.18 => Σχήμα 5.24
Σχήμα 5.19 => Σχήμα 5.25
Σχήμα 5.20 => Σχήμα 5.26
Σχήμα 5.21 => Σχήμα 5.27
Σχήμα 5.22 => Σχήμα 5.28
Σχήμα 5.23 => Σχήμα 5.29

6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας καταλήγουμε στα εξής:

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

- Ένα πολύ πυκνό πλέγμα προσφέρει μεγάλη ακρίβεια όμως μεγαλώνει το χρόνο επίλυσης και καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο στην μνήμη του υπολογιστή, ενώ ένα σχετικά αραιό πλέγμα προσφέρει μικρότερης ακρίβειας λύση σε ποιο σύντομο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα μειώνει τις θέσεις που κατακρατούνται στην μνήμη του H/Y.
- Η κατανομή της πυκνότητας του πλέγματος εξαρτάται από την ταχύτητα και από τις μεταβολές της ταχύτητας σε περιορισμένο χώρο.
- Συγκρίνοντας κάθε περίπτωση προσομοιώσεις, η μέγιστη πίεση και ταχύτητα ανέμου (ακραίες τιμές) παρατηρείται στην περίπτωση του μεγάλου πλέγματος και εισόδου του αέρα από τα δεξιά (μοντέλο 4) [Σχήματα: 5.15, 5.16, 5.17, 5.27, 5.28, 5.29]

6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σαν μελλοντική εργασία, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η ανάλυση των ανεμοπιέσεων και η σύγκριση τους με περισσότερα πρότυπα μοντέλα προσομοίωσης, εκτός των $k - \epsilon$ και $k - \omega$.

Επίσης θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση και σε περισσότερα πιθανά μοντέλα εκτός αυτών των τεσσάρων. Για παράδειγμα θα μπορούσαμε να προσθέσουμε κι άλλες σειρές από φωτοβολταϊκά πάνελ, ή θα μπορούσαμε να τα εξετάζαμε για διαφορετική κλίση των πάνελ ή για διαφορετική απόσταση των πάνελ μεταξύ τους κ.ο.κ..

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

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Measurement And Modeling of the Air Flow Pattern In a Pilot - Plant Spray Dryer by F.G. Kieviet, J. Van Raaij, P. P. E. A. De Moor and P. J. A. M. Kerkhof
- A Parametric Study of the Gas Flow Patterns and Drying Performance of Co Current Spray Dryer: Results of a Computational Fluid Dynamics Study by Lixin Huang, Kurichi Kumar, and A. S. Mujumdar
- 'Introduction to CFD Basics', Rajesh Bhaskaran – Lance Collins
- 'Εισαγωγή στην ανάλυση CFD', Fluent Inc – Simtec
- 'Introduction to Gambit Training – Gambit 2.2', Fluent Inc
- 'Υπολογιστική Ρευστοδυναμική' Γ. Μπεργελές
- Fluent.inc guide
- Simtec /Fluent 6 presentations / lectures
- Simtec /Gambit 2 presentations / lectures
- Stanford/ Fluent 6 presentation / lectures
- <http://irakleitos.ntua.gr>
- <http://www.covertec.gr>
- <http://el.wikipedia.org>