

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

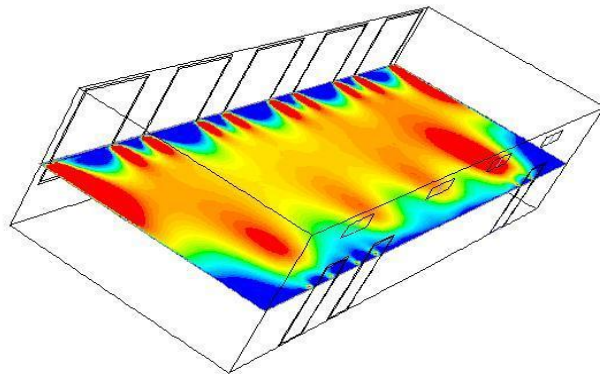
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:**

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ**

**ΑΝΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ**

**ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ**



**Φοιτητής: ΖΓΟΥΡΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

**ΑΕΜ: 670**

**Επιβλέπων καθηγητής: κ. Ιωάννης Μπάρτζης**

**ΚΟΖΑΝΗ 2014**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:**

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ  
ΑΝΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ  
ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ**

**Φοιτητής: ΖΓΟΥΡΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

**ΑΕΜ: 670**

**Επιβλέπων καθηγητής: κ. Ιωάννης Μπάρτζης**

**ΚΟΖΑΝΗ 2014**

## **Ευχαριστίες**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή ΠΔΜ κ. Ιωάννη Μπάρτζη για την δυνατότητα που μου έδωσε να εργαστώ πάνω στην συγκεκριμένη μελέτη και για την άριστη καθοδήγησή του. Επίσης για την καθοδήγησή τους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτωρ Γιώργο Ευθυμίου και την υποψήφια διδάκτωρ Αρετή Μαλκογιάννη. Ευχαριστώ επίσης τον αδερφό μου Δημήτριο Ζγούρο που μου παρείχε τον υπολογιστή του χωρίς τον οποίο δεν θα ήταν δυνατόν να διεξαχθεί η προσομοίωση αλλά και τον φίλο και συμφοιτητή μου Θεόδωρο Θεοδωρίδη για την βοήθεια που μου προσέφερε οποτεδήποτε την ζήτησα. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση σε όλους τους τομείς όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	9
1.2 Στόχος της διπλωματικής.....	10
1.3 Δομή της διπλωματικής.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ.....	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Πολυζωνικά μοντέλα.....	15
2.2.1. Εννοιολογική βάση των πολυζωνικών μοντέλων.....	15
2.2.2. Γενικές δυνατότητες των παρόντων μοντέλων.....	16
2.2.3. Πρόσφατη ανάπτυξη και μελλοντική έρευνα.....	18
2.3 Μοντέλα ζωνών.....	18
2.3.1. Εννοιολογική βάση των μοντέλων ζωνών.....	18
2.3.2. Ανάπτυξη.....	18
2.3.3. Περιορισμοί των παρόντων μοντέλων.....	19
2.4 Πολυζωνικά μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	20
2.4.1. Εννοιολογική βάση των πολυζωνικών μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	20
2.4.2. Ανάπτυξη και γενικές δυνατότητες.....	20
2.4.3. Περαιτέρω ανάπτυξη.....	20
2.5 Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	21

2.5.1. Εννοιολογική βάση των μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	21
2.5.2. Ανάπτυξη.....	28
2.5.3. Γενικές δυνατότητες των παρόντων μοντέλων.....	36
2.5.4. Μειονεκτήματα των μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	38
2.5.5. Μελλοντική ανάπτυξη.....	39
2.6 Επιλογή μοντέλου πρόγνωσης εσωτερικής ποιότητας αέρα...	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CFD-RANS.....	41
3.1 Εισαγωγή.....	41
3.2 Κοινά μοντέλα τύρβης.....	41
3.3 Υπόθεση Boussinesq.....	42
3.3.1 Το ιξώδες της τύρβης.....	43
3.3.2 Ο εμπειρικός αριθμός Schmidt.....	43
3.3.3 Πρόβλεψη του ιξώδους της τύρβης.....	43
3.3.3.1 Μοντέλο μήκους ανάμιξης.....	43
3.3.3.2 Μοντέλο μιας εξίσωσης Spalart-Allmaras.....	44
3.3.3.3 Το μοντέλο $k$ - $\epsilon$ .....	44
3.3.3.3.1 Εξίσωση της κινητικής ενέργειας της μέσης ροής $K$ .....	45
3.3.3.3.2 Τυρβώδης κινητική ενέργεια $k$ .....	45
3.3.3.3.3 Εξίσωση μοντέλου για την $k$ .....	46
3.3.3.3.4 Τυρβώδης σκέδαση.....	46
3.3.3.3.5 Ρυθμός σκέδασης – αναλυτική εξίσωση..	47
3.3.3.3.6 Εξίσωση μοντέλου για τη σκέδαση $\epsilon$ .....	47

3.3.3.3.7 Υπολογισμός των τάσεων Reynolds από την $k$ και την $\epsilon$ .....	48
3.3.3.3.8 Συζήτηση για το μοντέλο $k$ - $\epsilon$ .....	48
3.3.3.4 Περισσότερα μοντέλα δύο εξισώσεων.....	48
3.3.3.4.1 Βελτίωση: Το μοντέλο $k$ - $\epsilon$ RNG.....	49
3.3.3.4.2 Εξισώσεις RNG $k$ - $\epsilon$ .....	49
3.3.3.4.3 Το μοντέλο realisable $k$ - $\epsilon$ .....	50
3.3.3.4.4 Το μοντέλο $k$ - $\omega$ .....	52
3.3.3.4.5 Το αλγεβρικό μοντέλο τάσεων.....	52
3.3.3.4.6 Μη γραμμικά μοντέλα.....	52
3.3.3.5 Μοντέλα τάσεων Reynolds(RSM).....	53
3.4 Συμπεράσματα.....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ REALISABLE <math>k</math>-<math>\epsilon</math> ΣΕ ΕΝΑ ΑΠΛΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ... 56</b>	
4.1 Εισαγωγή.....	56
4.2 Περιγραφή του αριθμητικού κώδικα FLUENT.....	56
4.2.1 Γενικά.....	56
4.3 Μέθοδος αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.....	58
4.3.1 Διαγράμματα αξιολόγησης.....	58
4.3.2 Δείκτες αξιολόγησης.....	59
4.4 Οι αριθμητικές προσομοιώσεις του πειράματος.....	65
4.4.1 Περιγραφή του πειράματος.....	65
4.4.2 Πειραματικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων δοκιμών.....	66

4.4.3	Στρατηγική εκτέλεσης των αριθμητικών προσομοιώσεων.....	67
4.4.4	Δισδιάστατες προσομοιώσεις της ροής και θερμότητας.....	68
4.4.4.1	Το υπολογιστικό πεδίο και πλέγμα.....	68
4.4.4.2	Οριακές συνθήκες.....	70
4.4.4.3	Οριακές συνθήκες τοιχώματος.....	71
4.4.4.4	Αριθμητική επίλυση.....	72
4.4.4.5	Αποτελέσματα των τρισδιάστατων εξισώσεων..	77
4.4.4.5.1	Ροή του αέρα.....	77
4.4.4.5.2	Θερμοκρασία.....	82
4.5	Συμπεράσματα.....	85

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΣΕ ΕΝΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....

5.1	Οι αριθμητικές προσομοιώσεις του πειράματος.....	86
5.1.1	Περιγραφή του πειράματος.....	86
5.1.2	Πειραματικά χαρακτηριστικά της επιλεγμένης δοκιμής.....	87
5.1.3	Στρατηγική εκτέλεσης των αριθμητικών προσομοιώσεων.....	98
5.1.4	Τρισδιάστατη προσομοίωση της ροής της θερμότητας και της σχετικής υγρασίας.....	98

5.1.4.1	Το υπολογιστικό πεδίο και τα πλέγματα.....	98
5.1.4.2	Οριακές συνθήκες.....	106
5.1.4.3	Αριθμητική επίλυση.....	107
5.1.4.4	Αποτελέσματα της ροής του αέρα, θερμότητας και σχετικής υγρασίας των τρισδιάστατων εξισώσεων.....	107
5.1.4.4.1	Ταχύτητα.....	108
5.1.4.4.2	Θερμοκρασία.....	111
5.1.4.4.3	Σχετική υγρασία.....	113
5.1.4.4.4	Το αδιαστατοποιημένο κλάσμα συγκέντρωσης ρύπου στις θέσεις εργασίας.....	115
5.1.4.4.5	Δείκτες ποιότητας αέρα και θερμικής άνεσης.....	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....		123
7.1	Στοιχεία καινοτομίας.....	123
7.2	Μελλοντική έρευνα.....	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		124



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1. Περιγραφή του προβλήματος

Η Ποιότητα του Αέρα Εσωτερικών Χώρων (Indoor Air Quality, IAQ), αναγνωρίζεται ως ένα σημαντικό πρόβλημα του περιβάλλοντος και κυρίως της υγείας των ανθρώπων στις περισσότερες χώρες καθώς οι σύγχρονοι πληθυσμοί συνήθως δαπανούν 80-90% του χρόνου τους, είτε στο σπίτι, είτε στην εργασία ή οπουδήποτε αλλού. Η ρύπανση του αέρα στους εσωτερικούς χώρους προέρχεται από διάφορες πηγές (π.χ. εξωτερικός αέρας, οικοδομικά υλικά, μούχλα και υγρασία, χημικά, καταναλωτικά προϊόντα, πηγές καύσης, δραστηριότητες των ατόμων, συντήρηση κλπ). Αυτό ενισχύεται και από συμπεράσματα από πειράματα σε πραγματικές συνθήκες (π.χ. Wallace 1987) όπου τα επίπεδα των VOCs και SVOCs βρέθηκαν υψηλότερα από ότι στο εξωτερικό περιβάλλον. Είναι σαφές ότι ο εσωτερικός αέρας είναι η κύρια πηγή της έκθεσης του περιβάλλοντος σε ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Η εσωτερική ποιότητα του αέρα μπορεί να έχει αναπνευστικές και άλλες επιπτώσεις που σχετίζονται με την ανθρώπινη υγεία και να επηρεάζει τη γενική άνεση λόγω της πιθανής παρουσίας διάφορων ρύπων από διαφορετικές αιτίες και πηγές. Τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα έχει καταγραφεί μια αύξηση του βρογχικού άσθματος και των αλλεργιών, στο βιομηχανοποιημένο κόσμο, συμπεριλαμβανομένης της και Ευρώπης. Πολλές επιστημονικές έρευνες εστιάζουν στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα στο σπίτι, στη δουλειά, στο σχολείο, ενώ όλο και περισσότεροι άνθρωποι δείχνουν ενδιαφέρον και θέλουν να ενημερώνονται γύρω από την ποιότητα του εσωτερικού αέρα και τις επιπτώσεις της στην υγεία, όπως φαίνεται και στις έρευνες των Nero (1988) και Morris (1986).

Στους εσωτερικούς χώρους της σημερινής εποχής, αυξάνεται όλο ένα και περισσότερο η ανάγκη για ικανοποιητική θέρμανση, για αερισμό και κλιματισμό του ατόμου. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται όλο και περισσότερο, ανάμεσα σε ιδιωτικές επιχειρήσεις και κυβερνητικούς οργανισμούς, η σημασία της άνεσης, της υγείας, και της παραγωγικότητας του ατόμου, δίνοντας αφορμή για αυξημένη ζήτηση υψηλής ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων. Υπήρξε επίσης μια αύξηση του αριθμού των γραμμών επικοινωνίας και των καλωδιακών εγκαταστάσεων στα γραφεία και τους χώρους εργασίας, λόγω της αύξησης της χρήσης τεχνολογικών εγκαταστάσεων (Εικόνα 1.1). Για να ανταποκριθεί σε αυτές τις ανάγκες, ένα σύστημα κλιματισμού πρέπει να έχει μεγαλύτερη ευελιξία, να προσφέρει καλύτερη θερμική άνεση και εσωτερική ποιότητα αέρα, και μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.



Εικόνα 1.1 Τεχνολογικές εγκαταστάσεις που συναντώνται σε ένα γραφείο (π.χ. ηλεκτρονικοί υπολογιστές, εκτυπωτές, συσκευές τηλεφώνων και fax κ.α.) .

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η Ποιότητα του Αέρα Εσωτερικών χώρων πρέπει να βελτιωθεί. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος πρέπει να γίνει μια σειρά από μελέτες της Εσωτερικής Ποιότητας Αέρα.

## 1.2. Στόχος της διπλωματικής

Ο βασικός στόχος της διπλωματικής επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας υπολογιστικής μεθοδολογίας για την πρόγνωση της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους.

Τα επιμέρους βήματα που ακολουθούνται προκειμένου να ικανοποιηθεί ο στόχος είναι τα εξής:

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των διαθέσιμων μοντέλων πρόγνωσης της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους (IAQ). Επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου.
2. Αξιολόγηση του επιλεγμένου μοντέλου πρόγνωσης της ποιότητας του αέρα σε ένα απλό πρόβλημα εσωτερικής ποιότητας αέρα.
3. Αξιολόγηση του επιλεγμένου μοντέλου πρόγνωσης της ποιότητας του αέρα σε ένα πραγματικό πρόβλημα εσωτερικής ποιότητας αέρα.

### 1.3. Δομή της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται συνολικά από 8 Κεφάλαια. Η σειρά των Κεφαλαίων ακολουθεί τα βήματα που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 1.2.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων πρόγνωσης της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Γίνεται αναφορά σε διάφορα μοντέλα με κύρια τα μοντέλα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής. Στο τέλος του Κεφαλαίου γίνεται η επιλογή του μοντέλου για τη μελέτη της εσωτερικής ποιότητας του αέρα.

Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας CFD-RANS. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις εξισώσεις της μέσης τιμής της συγκέντρωσης καθώς και στην παραμετροποίηση του τυρβώδους συντελεστή διάχυσης. Επίσης γίνεται αναφορά στις παραμέτρους και στα μοντέλα της τύρβης. Στο τέλος του Κεφαλαίου γίνεται συζήτηση για την καταλληλότητα του μοντέλου τύρβης *realisable k-ε* στην παρούσα εργασία.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται αξιολόγηση του μοντέλου *k-ε realisable* σε ένα απλό πρόβλημα εσωτερικής ποιότητας αέρα. Περιγράφεται ο αριθμητικός κώδικας FLUENT και γίνεται λεπτομερής περιγραφή της μεθοδολογίας προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων. Στο τέλος του Κεφαλαίου παρατίθενται τα συμπεράσματα.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο γίνεται αξιολόγηση της μεθοδολογίας πρόγνωσης της εσωτερικής ποιότητας αέρα σε ένα πραγματικό πρόβλημα. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι προσομοιώσεις του πειράματος και τα αποτελέσματα. Επίσης γίνεται ανάλυση ευαισθησίας πλέγματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται στο έκτο Κεφάλαιο ενώ στο έβδομο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα στοιχεία καινοτομίας και περιγράφονται κάποιες ιδέες για μελλοντική έρευνα. Στο όγδοο Κεφάλαιο δίνεται η βιβλιογραφία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

#### 2.1. Εισαγωγή

Η πρόβλεψη των συγκεντρώσεων των ρύπων στους εσωτερικούς χώρους είναι πολύ σημαντική για τον καθορισμό του επιπέδου της ποιότητας του αέρα εντός του κτιρίου πριν την κατασκευή και την κατοίκησή του, για να διερευνηθούν οι επιπτώσεις των διαφόρων αποφάσεων σχεδιασμού που έχουν να κάνουν με το σύστημα εξαερισμού και την επιλογή των οικοδομικών υλικών, καθώς και για την αξιολόγηση του επιπέδου της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων ενός υφιστάμενου κτιρίου. Η πρόβλεψη των συγκεντρώσεων των ρύπων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ατομικής έκθεσης.

Για την πρόγνωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων (IAQ) στη βιβλιογραφία εμφανίζονται 4 κατηγορίες μοντέλων:

1. Τα πολυζωνικά μοντέλα,
2. Τα μοντέλα ζωνών,
3. Τα πολυζωνικά μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής,
4. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Στον επόμενο Πίνακα παρουσιάζονται τα διάφορα μοντέλα που μπορούν να καθορίσουν την ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων μαζί με την βιβλιογραφία τους.

Πίνακας 2.1. Κατηγορίες μοντέλων IAQ και βιβλιογραφία.

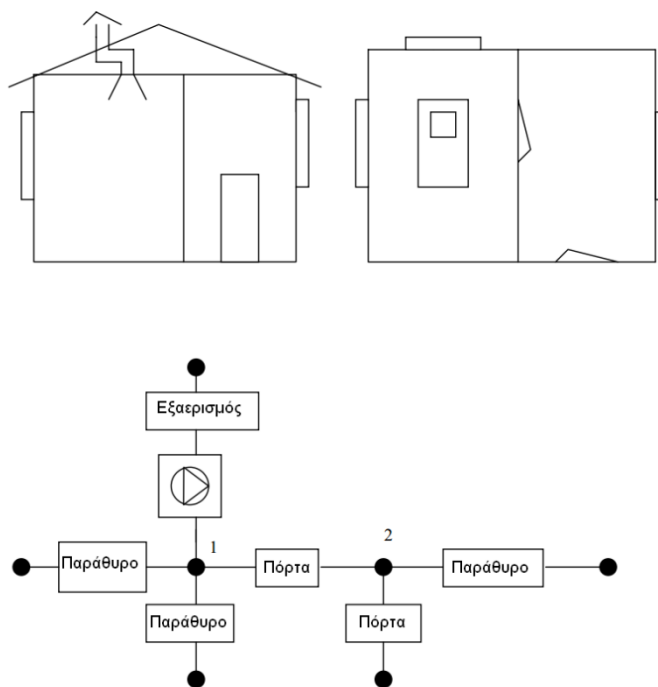
	ΜΟΝΤΕΛΑ IAQ										
	ΜΟΝΤΕΛΑ CFD						ΠΟΛΥΖΩΝΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ		ΜΟΝΤΕΛΑ ΖΩΝΩΝ		ΠΟΛΥΖΩΝΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ & CFD
	ΜΟΝΤΕΛΟ STANDARD $k-\epsilon$	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ					COMIS	CONTAM	SPARK	POMA	
		ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΤΙΜΩΝ REYNOLDS	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ $k-\epsilon$	ΥΨΗΛΟΤΕΡΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ $k-\epsilon$ ΜΟΝΤΕΛΑ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ $k-\epsilon$	ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ					
Launder & Spalding (1974)	X	X									
Lam & Bremhorst (1981)		X									
Chen (1995)		X		X							
Nielsen (1998)		X		X							
Awbi (1998)		X									
Beausoleil-Morrison (2000)			X			X					
Emmerich & McGrattan (1998)				X							
Takemasa και άλλοι (1992)					X						
Yuan και άλλοι (1994)					X						

Xu και άλλοι (1998)					X						
Neitzke (1998)					X						
Chen & Xu (1998)						X					
Srebric και άλλοι (1999)						X					
Haas και άλλοι(2002)							X				
Feustel & Raynor-Hoosen (1990)							X				
Fürbringer, Roulet & Borchellini (1996)							X				
Walton (1997)								X			
Dols (2005)								X			
Musy και άλλοι (2001)									X		
Haghighat και άλλοι (2001)										X	
Schaelin και άλλοι (1992)											X

## 2.2. Πολυζωνικά μοντέλα

### 2.2.1. Εννοιολογική βάση των πολυζωνικών μοντέλων

Τα πολυζωνικά μοντέλα (ή μοντέλα δικτύου) αποτελούνται από υπολογιστικούς κόμβους (που αντιπροσωπεύουν ζώνες) και από διαδρομές για τη ροή των εσωτερικών κόμβων (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1. Απεικόνιση ενός κτιρίου 2 δωματίων σε ένα πολυζωνικό μοντέλο (Stewart, 1998).

Στα πολυζωνικά μοντέλα οι εσωτερικές πιέσεις σε κάθε οριοθετημένη ζώνη πρέπει να είναι γνωστές (ή προσδιορισμένες) και η ροή από ζώνη σε ζώνη καθορίζεται από τον συνδυασμό της διαφοράς πίεσης και της διαδρομής της ροής μεταξύ των ζωνών. Τα πολυζωνικά μοντέλα είναι κατάλληλα για κτίρια που περιέχουν περισσότερες από μία καλά αναμεμιγμένες ζώνες. Μάλιστα, τα περισσότερα κτίρια πρέπει να χαρακτηρίζονται ως πολυζωνικά οικοδομήματα, ακόμη και όταν δεν υπάρχει κανένα εσωτερικό χώρισμα.

Σε αντίθεση με τα μονοζωνικά μοντέλα, όπου υπάρχει μόνο μία εσωτερική πίεση που πρέπει να προσδιοριστεί, στα πολυζωνικά μοντέλα πρέπει να προσδιορίζεται μία πίεση για κάθε μία από τις ζώνες. Αυτό έχει οδηγήσει σε μεγάλη δυσκολία στην αλγεβρική επίλυση. Τα μοντέλα αυτά έχουν δυνατότητα να προβλέπουν τη διεύθυνση και τον εξαερισμό του αέρα. Ένα μειονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ότι για βασικούς ρύπους σε εσωτερικούς χώρους, ο αέρας σε κάθε ζώνη θεωρείται καλά αναμεμιγμένος. Αυτό οδηγεί γενικά σε λανθασμένες υποθέσεις σχετικά με τον κίνδυνο της έκθεσης σε ρύπους. Στους χώρους με ψηλά ταβάνια τα αποτελέσματα

μπορεί να οδηγήσουν σε ρύπους που συγκεντρώνονται σε άνω ή κάτω περιοχές. Η εκτίμηση της μεταφοράς των ρύπων σε άλλα μέρη του κτιρίου, ή προς τα έξω, θα είναι εσφαλμένη εάν η διαδρομή ξεκινά σε μια περιοχή όπου η τοπική συγκέντρωση είναι πολύ διαφορετική από την υποτιθέμενη μέση συγκέντρωση.

### 2.2.2. Γενικές δυνατότητες των παρόντων μοντέλων

Τα βασικά μοντέλα που αντιπροσωπεύουν την παρούσα κατηγορία είναι το CONTAM (Walton, 1997, Dols, 2001) και το COMIS (Feustel & Raynor-Hoosen, 1990, Feustel, 1999). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της ροής του αέρα και της μεταφοράς των ρύπων σε συγκρότημα πολυζωνικών κτιρίων σε μακρο-επίπεδο. Είναι καλά τεκμηριωμένα, έχουν καλή δομή και εξελιγμένο γραφικό περιβάλλον, έχουν αξιολογηθεί εκτενώς, έχουν συνδεθεί με άλλους ενεργειακούς κώδικες και χρησιμοποιούνται στο δημόσιο τομέα (Feustel & Dieris, 1992).

Το COMIS (Conjunction Of Multizone Infiltration Specialists) είναι ένα μοντέλο πολυζωνικής ροής του αέρα και μεταφοράς των ρύπων, που αναπτύχθηκε ως αποτέλεσμα μιας διεθνούς συλλογικής ερευνητικής προσπάθειας υπό την αιγίδα του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency). Ο κώδικας προσομοίωσης είναι γραμμένος σε Fortran 77 και παλιότερα ονομάζονταν COMVEN. Περισσότερα από 200 αντίγραφα χρησιμοποιούνται σε 15 χώρες και έχει γίνει πρότυπο για την μοντελοποίηση της πολυζωνικής ροής του αέρα.

Το πρόγραμμα COMIS περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία για τη ροή: χαραμάδες, συστήματα αγωγών, ανεμιστήρες, ελεγκτές της ροής, κάθετα μεγάλα ανοίγματα (παράθυρα ή / και πόρτες), απορροφητήρες κουζίνας και παθητικά συστήματα (καπνοδόχοι). Το COMIS επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει χρονοδιαγράμματα που περιγράφουν τις μεταβολές στην κατανομή της θερμοκρασίας εσωτερικών χώρων, στη λειτουργία του ανεμιστήρα, στη συγκέντρωση ρύπων στις ζώνες, στις πηγές ρύπων και καταβοθρών, στα ανοίγματα παραθύρων και πορτών, και στα δεδομένα καιρού. Το ευέλικτο χρονικό βήμα που εφαρμόζεται στο COMIS επιτρέπει στη μοντελοποίηση να είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα με την οποία παρέχονται τα καιρικά δεδομένα. Ο υπολογισμός της ροής του αέρα με το COMIS βασίζεται στην παραδοχή ότι η ροή του αέρα εσωτερικών χώρων σταθεροποιείται σε κάθε χρονικό βήμα. Η μεταφορά ρύπων βασίζεται σε ένα δυναμικό μοντέλο και έχει το δικό της χρονικό βήμα, με βάση τη σταθερά χρόνου της πιο κρίσιμης ζώνης. Τα δύο υπομοντέλα συνδυάζονται. Τα αποτελέσματα της ροής του αέρα και των επιπέδων των ρύπων αναφέρονται σε πίνακες δεδομένων από το COMIS και σε γραφική μορφή.

Η αρχή στην οποία στηρίζεται το μοντέλο COMIS είναι ότι τα κτίρια αποτελούν περίπλοκα διασυνδεδεμένα δίκτυα διαδρομών ροής αέριας μάζας. Οι ζώνες στο κτίριο (αίθουσες ή συγκροτήματα αιθουσών) είναι συνδεδεμένες με τις διαδρομές της ροής. Κάθε διαδρομή έχει κάποια αντίσταση στη ροή είτε είναι μια ανοικτή ή κλειστή πόρτα ή παράθυρο ή χαραμάδες ανάμεσα στους τοίχους, ή άλλες ρωγμές. Το COMIS



περιλαμβάνει εξισώσεις της ροής του αέρα για μεγάλα κάθετα ανοίγματα, εξαερισμού μιας πλευράς, και διαφορετικές περιπτώσεις ανοιγμάτων για διάφορους τύπους παραθύρων. Οι οριακές συνθήκες για την κατανομή της πίεσης στο εσωτερικό του κτιρίου περιγράφονται από κόμβους ή σημεία του πλέγματος έξω από το κτίριο. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα του COMIS (<http://www-epb.lbl.gov/comis/>).

Οι Fürbringer και άλλοι (1996) σύνταξαν μια έκθεση σχετικά με την αξιολόγηση του μοντέλου COMIS. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με πάνω από (πενήντα σημεία αναφοράς ή δοκιμές) με αναλυτικές ή αριθμητικές λύσεις για να εξασφαλιστεί ότι ο κώδικας δεν περιείχε αριθμητικά σφάλματα. Δοκιμές όσον αφορά τη χρήση του προγράμματος πραγματοποιήθηκαν επίσης για την αξιολόγηση της επιρροής του χρήστη στα αποτελέσματα του προγράμματος, δηλαδή την ικανότητά τους να κατανοήσουν την τεκμηρίωση του προγράμματος και πώς να ετοιμάσουν και να διεξάγουν μια προσομοίωση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η ικανότητα των χρηστών είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την εξασφάλιση αξιόπιστων προβλέψεων.

Το πρόγραμμα ελέγχθηκε επίσης με 14 προγράμματα προσομοίωσης που διεξήχθησαν από 5 διαφορετικά εργαστήρια με διάφορα ερευνητικά αντικείμενα.

Το CONTAM (Multizone Airflow and Contaminant Transport Analysis Software) είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστή που αναλύει την ποιότητα και τον εξαερισμό του αέρα πολυζωνικών εσωτερικών χώρων. Το CONTAM βοηθάει στον καθορισμό:

1. Της ροής του αέρα: της διείσδυσης, της διαφυγής και της ροής του αέρα από δωμάτιο σε δωμάτιο σε συστήματα κτιρίου καθοδηγούμενα από μηχανικά μέσα, σε πιέσεις αέρα που δρουν στο εξωτερικό του κτιρίου, καθώς και της επίδρασης της άνωσης που προκαλείται από την εσωτερική και εξωτερική διαφορά θερμοκρασίας του αέρα.
2. Της συγκέντρωση ρύπων: της διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων που μεταφέρονται από τις ροές του αέρα, μετασχηματίζονται από μία ποικιλία διεργασιών συμπεριλαμβανομένου χημικών και ραδιοχημικών μετασχηματισμών, της προσρόφησης και εκρόφησης σε οικοδομικά υλικά, της διήθησης, και της απόθεσης σε επιφάνειες κτιρίων, κλπ. και παράγονται από μια ποικιλία μηχανικών πηγών.
3. Της ατομικής έκθεσης: οι προβλέψεις της έκθεσης των ατόμων σε ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Το CONTAM μπορεί να είναι χρήσιμο σε μια ποικιλία εφαρμογών. Η ικανότητά του να υπολογίζει τις ροές του αέρα σε ένα κτίριο είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση της επάρκειας των ποσοστών αερισμού σε ένα κτίριο, για να προσδιοριστεί η μεταβολή στα ποσοστά εξαερισμού με την πάροδο του χρόνου και τη διανομή του αέρα μέσα σε ένα κτίριο.

### **2.2.3. Πρόσφατη ανάπτυξη και μελλοντική έρευνα**

Υπάρχει μια συνεχιζόμενη έρευνα στον τομέα των πολυζωνικών μοντέλων, ειδικά για το CONTAM και το COMIS. Πιο πρόσφατα, ο Dols (2001) περιέγραψε την τελευταία έκδοση του CONTAM-CONTAMW. Τον Ιανουάριο του 2001, παρουσιάστηκε σε ημερίδα στο EMPA (<http://www.empa.ch/>) στη Ζυρίχη το COMIS v3.1 Haas και άλλοι (2002). Το COMIS έχει ενσωματωθεί στον κώδικα TRNSYS (Dorer & Weber, 1999) που αφορά την προσομοίωση κτιρίων και συστημάτων, και με το ενεργειακό πρόγραμμα προσομοίωσης EnergyPlus (Huang και άλλοι, 1999) που προσομοιώνει μεταφορά θερμότητας σε κτίρια. Υπάρχουν σχέδια για την ένταξη νέων μεθόδων για τη αντιμετώπιση των χημικών αντιδράσεων και για τις εκπομπές και τη μεταφορά των αέριων ρύπων και των σωματιδίων.

## **2.3. Μοντέλα ζωνών**

### **2.3.1. Εννοιολογική βάση των μοντέλων ζωνών**

Τα μοντέλα ζωνών έχουν αναπτυχθεί επειδή η παραδοχή ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή από δωμάτιο σε δωμάτιο δεν είναι επαρκής για να προβλέψει τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου.

Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, ο Lebrun (1970) πρότεινε το διαχωρισμό ενός δωματίου σε διαφορετικές ζώνες χαρακτηρίζοντας τις κύριες ροές και συνδέοντας αυτές τις ζώνες μέσω αγωγιμότητας της μάζας. Η μέθοδος αυτή κατέστησε δυνατό να προβλεφθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η θερμική συμπεριφορά των δωματίων και να καταστεί ευκολότερος ο συνδυασμός μεταξύ των δωματίων και των συστημάτων θέρμανσης. Από την πρωτοποριακή εργασία του Lebrun και μετά, διάφοροι ερευνητές ανέπτυξαν την ιδέα αυτή και σήμερα αυτές οι μέθοδοι είναι γνωστές ως «μοντέλα ζωνών».

Στα μοντέλα ζωνών το εσωτερικό του δωματίου διαιρείται σε ένα μικρό αριθμό ζωνών ή κελιών. Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της θερμότητας εφαρμόζονται σε κάθε ζώνη (κελιά). Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων δίνει τη ροή του αέρα και την κατανομή θερμοκρασίας στο δωμάτιο.

### **2.3.2. Ανάπτυξη**

Οι Allard και Inard (1992) δίνουν μια σύντομη ανασκόπηση των μοντέλων ζωνών. Τα πρώτα μοντέλα ζωνών (Lebrun 1970, Laret 1980, Howarth 1980 και Inard 1988) βασίστηκαν σε σταθερές κατευθύνσεις ροής του αέρα και στην εφαρμογή των συγκεκριμένων νόμων ροής για πλούμια, τζετ και οριακά στρώματα. Προκειμένου να βελτιωθεί η χρήση των μοντέλων ζωνών, οι Overby & Steen-Thode (1990) και Inard & During (1991) επέκτειναν τα προηγούμενα μοντέλα για να τρέχουν σε ασταθή κατάσταση. Οι συγκρίσεις των αριθμητικών τους προβλέψεων με τα πειράματα είναι σε καλή συμφωνία. Οι Sandberg και Linstrom (1987) πρότειναν ένα ασταθές μοντέλο κιβωτίου δύο ζωνών για να προβλέψει την εξέλιξη της συγκέντρωσης των ρύπων σε

ένα δωμάτιο που χρησιμοποιεί σύστημα εξαερισμού με μετατόπιση. Η αριθμητική πρόβλεψη φαίνεται να συμφωνεί ικανοποιητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης σημειώνουν ότι η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ποιότητα της περιγραφής της κατεύθυνσης της κύριας ροής.

Ως γενίκευση της έννοιας των μοντέλων ζωνών, οι Grelat (1987) και Dalicieux & Bouia (1991) ανέπτυξαν μοντέλα ζωνών πίεσης. Η ιδέα είναι ότι το κύριο πρόβλημα ενός συνηθισμένου μοντέλου ζώνης σχετίζεται με την πρόβλεψη των όρων μεταφοράς ανάμεσα στις ζώνες που δεν περιγράφονται άμεσα από τις κύριες εξισώσεις ροής. Ένα θερμαινόμενο δωμάτιο μπορεί να χωρισθεί σε δύο διαφορετικά είδη ζωνών: τις ζώνες «πλουμίου» και τις «τρέχουσες ζώνες». Για τις ζώνες που δεν τοποθετούνται μέσα στην κύρια ροή, εφαρμόζεται η εξίσωση Bernoulli για την εκτίμηση της πίεσης αναφοράς σε οποιαδήποτε θέση στο δωμάτιο. Οι εξισώσεις ισοζυγίου μάζας και ενέργειας υπολογίζονται για κάθε ζώνη. Ο υπολογισμός συγκλίνει επαναληπτικά σε μια λύση δίνοντας τη θερμοκρασία και την πίεση αναφοράς σε κάθε ζώνη. Οι Inard, Bouia & Dalicieux (1996) διεύρυναν αυτό το είδος μοντέλου. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα εφαρμόζονται μόνο σε μερικές απλές προσομοιώσεις (Musy και άλλοι 2001).

Άλλα μοντέλα (Bouia 1993, Wurtz και άλλοι 1996) μετέτρεψαν τους ρυθμούς ροής μεταξύ των κελιών σε μια συνάρτηση κατανομής της πίεσης. Έχει αποδειχθεί ότι η προσέγγιση αυτή δεν μπορεί να αντιπροσωπεύσει σωστά τις κύριες ροές (Musy και άλλοι 1997).

Πιο πρόσφατα, οι Musy και άλλοι (1999 και 2001) βελτίωσαν τα μοντέλα ζωνών για να προβλέπουν τη θερμική άνεση και να προσομοιώνουν τη φυσική συναγωγή σε ένα δωμάτιο με ένα θερμαντήρα ακτινοβολίας/συναγωγής με το πρόγραμμα προσομοίωσης SPARK (Simulation Problem Analysis and Research Kernel). Οι Haghghat και άλλοι (2001) ανέπτυξαν ένα μοντέλο ζωνών πίεσης με διαχύτη αέρα (POMA, Pressurized Zonal Model with Air-diffuser) για να προβλέψει τη ροή του αέρα και τη θερμική κατανομή σε ένα δωμάτιο με μηχανικό εξαερισμό.

### **2.3.3. Περιορισμοί των παρόντων μοντέλων**

Οι Allard & Inard (1992) αναφέρουν ότι τα μοντέλα ζωνών βασίζονται πάντα σε δύο βασικές παραδοχές: ότι μπορεί να προβλεφθούν οι κύριες ροές (οριακό στρώμα, τζετ ή θερμικό πλούμιο) και ότι υπάρχει μια αρκετά καλή εμπειρική γνώση αυτών των δομών για να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά τους. Αυτές οι δύο υποθέσεις παραμένουν ως περιορισμοί στη χρήση αυτών των μοντέλων σε μια διαδικασία πρόβλεψης. Παρά το γεγονός ότι έχουν γίνει ορισμένες προσπάθειες για να προβλεφθούν οι κύριες ροές, υπάρχει ακόμη πολλή δουλειά για να βελτιωθούν οι γνώσεις σχετικά με αυτές. Τα σημερινά μοντέλα ζωνών απευθύνονται μόνο σε μεμονωμένα δωμάτια με ένα περιορισμένο σύνολο κινητήριων δυνάμεων. Οι Musy και άλλοι (2001) αναπτύσσουν ένα νέο μοντέλο ζωνών για πολλά δωμάτια.

## **2.4. Πολυζωνικά μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής**

### **2.4.1. Εννοιολογική βάση των πολυζωνικών μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής**

Κάθε τύπος μοντέλου (CFD, πολυζωνικό μοντέλο, ή μοντέλο ζώνης) έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Τα τελευταία χρόνια αρκετοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να συνδέσουν τα πολυζωνικά και τα CFD μοντέλα, προκειμένου να αναγνωρίσουν τα οφέλη και των δύο. Ένα μοντέλο CFD εφαρμόζεται για να περιγράψει ένα συγκεκριμένο δωμάτιο, ενώ ένα πολυζωνικό μοντέλο χρησιμοποιείται για να προβλέψει τις ροές και τη μεταφορά στο υπόλοιπο του κτιρίου. Τα δύο μοντέλα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους: το πολυζωνικό μοντέλο παρέχει ορισμένα από τα οριακά δεδομένα που απαιτούνται για τον κώδικα CFD και τα αποτελέσματα του κώδικα CFD τροφοδοτούνται στο πολυζωνικό μοντέλο.

### **2.4.2. Ανάπτυξη και γενικές δυνατότητες**

Οι Schaelin και άλλοι (1992) περιγράφουν μια προσέγγιση που ονομάζεται «μέθοδος των αναλυτικών τιμών κόμβου». Σε αυτή τη μέθοδο ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει και να τρέξει δύο ξεχωριστά μοντέλα. Χρησιμοποίησαν το COMIS για το πολυζωνικό μέρος και το PHOENICS για τους υπολογισμούς CFD. Η ανταλλαγή παραμέτρων μεταξύ του COMIS και του CFD (PHOENICS) επιτεύχθηκε «εξωτερικά» από το χρήστη και περιγράφηκε για διάφορες διαδρομές ροής πρακτικής σημασίας. Δήλωσαν ότι η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των πολυζωνικών προσομοιώσεων.

Οι Clarke και άλλοι (1995) ανέπτυξαν μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση στην οποία συνδυάζουν πολυζωνικές μεθόδους με θερμικές ενεργειακές μονάδες και με έναν κώδικα CFD. Περιέγραψαν τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το συνδυασμό πλεγματοειδών κελιών CFD στα όρια με τους κόμβους και με τις διαδρομές της ροής στο πολυζωνικό μοντέλο, στις οποίες η κατεύθυνση της ροής πρέπει να είναι γνωστή ώστε να καθορίσει τα κατάλληλα σημεία σύνδεσης. Τα δύο μοντέλα επαναλαμβάνονται μεταξύ τους για να επιτευχθεί μια τελική λύση μέσω της «εσωτερικής» σχέσης μεταξύ των κωδικών.

### **2.4.3. Περαιτέρω ανάπτυξη**

Κατά την ημερομηνία που αναρτήθηκαν οι δημοσιεύσεις (1992 και 1995) και οι δύο ερευνητικές ομάδες απέδειξαν ότι οι μέθοδοι είχαν αναπτυχθεί επαρκώς μόνο για να προβλέπουν τη σκοπιμότητά και τη δυναμική τους για τη βελτιωμένη πρόβλεψη των ρυθμών ροής αέρα στα κτίρια. Περισσότερη δουλειά για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών, ειδικά για το τμήμα των CFD υπολογισμών, ήταν απαραίτητη για να τελειοποιηθεί και να βελτιώσει τα μοντέλα.

## 2.5. Μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής

### 2.5.1. Εννοιολογική βάση των μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική (YPM) (Computational Fluid Dynamics, CFD) δεν αναπτύχθηκε συγκεκριμένα για να προσομοιώνει κτίρια. Οι εφαρμογές της περιλαμβάνουν την αεροδυναμική των αεροσκαφών, την υδροδυναμική πλοίων, τη μετεωρολογία, τη βιοϊατρική μηχανική, τη μελέτη της διασποράς ρύπων, το σχεδιασμό μικρο-ηλεκτρονικών συστημάτων ψύξης, το σχεδιασμό στροβίλων, εξοπλισμών καύσης κλπ.

Η έννοια της YPM είναι να προσομοιώσει αριθμητικά φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν μέσα σε ένα ρευστό μέσω της λύσης ενός συνόλου μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Αυτές οι μερικές διαφορικές εξισώσεις εκφράζουν τους θεμελιώδεις φυσικούς νόμους που διέπουν τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας.

Για την κίνηση του αέρα του δωματίου οι κινητήριες δυνάμεις είναι οι διαφορές πίεσης, οι οποίες προκαλούνται από τον άνεμο, η θερμική άνωση, τα μηχανικά συστήματα αερισμού ή συνδυασμός αυτών. Τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα σε εσωτερικούς χώρους είναι η χαμηλή ταχύτητα και η υψηλή ένταση της τύρβης. Η ροή του αέρα σε ένα δωμάτιο μπορεί να θεωρηθεί ασυμπιεστή καθώς οι ταχύτητες τείνουν να είναι χαμηλές, της τάξης των μέτρων ή εκατοστών ανά δευτερόλεπτο (σε αριθμούς Mach λιγότερο από 0.3, δηλαδή ταχύτητα περίπου 100 m/s, ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί ασυμπιεστός). Όπως πολλά κοινά ρευστά, όπως για παράδειγμα το νερό, ο αέρας είναι Νευτώνειο ρευστό, εμφανίζοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης. Κατά την εφαρμογή της YPM στο πεδίο IAQ, οι εξισώσεις Navier-Stokes προκύπτουν από την εφαρμογή των αρχών της διατήρησης της μάζας και της ορμής σε έναν όγκο ελέγχου του ρευστού (Schlichting, 1968). Η διατήρηση της ενέργειας και της μάζας ενός ρύπου μπορεί επίσης να εφαρμοστεί. Στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων το ακόλουθο σύνολο των μερικών διαφορικών εξισώσεων περιγράφει την ροή του αέρα σε ένα δωμάτιο, την μεταφορά θερμότητας και ρύπων.

Διατήρηση της ορμής στην διεύθυνση- x

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u w) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

(2.1)

Διατήρηση της ορμής στην διεύθυνση-y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v$$

(2.2)

Διατήρηση της ορμής στην διεύθυνση-z

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho UV) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho UW) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

Διατήρηση της μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W) = 0 \quad (2.4)$$

Διατήρηση της ενέργειας

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \mu \nabla^2 T + \dot{q} \quad (2.5)$$

Διατήρηση των ρύπων

$$\frac{Dc}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x}(Uc) + \frac{\partial}{\partial y}(Vc) + \frac{\partial}{\partial z}(Wc) = D \nabla^2 c \quad (2.6)$$

όπου

$U$  = ταχύτητα του αέρα κατά τη διεύθυνση  $x$  (m/s)

$V$  = ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $y$  (m/s)

$W$  = ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $z$  (m/s)

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = ιξώδες του αέρα (Pa·s)

$\beta$  = ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα (1/K)

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)

$t$  = χρόνος (s)

$p$  = πίεση (Pa)

$T$  = θερμοκρασία (K)

$T_0$  = θερμοκρασία αναφοράς (K)

$c_p$  = ειδική θερμότητα του αέρα (J/kgK)

$k$  = αγωγιμότητα αέρα (W/mK)

$q$  = θερμότητα εντός του όγκου ελέγχου λόγω μιας χημικής αντίδρασης ή μιας θερμικής πηγής που βρίσκεται μέσα στο δωμάτιο (W/ )

$C$  = συγκέντρωση των ρύπων (kg/ )

$D$  = συντελεστής μοριακής διάχυσης των ρύπων ( /s)

$S$  = ποσοστό παραγωγής όγκου ρύπων (kg/ s)

Οι εξισώσεις 2.1 έως 2.3 χαρακτηρίζουν την παροδική ροή ρευστού στην κοινή φόρμουλα Navier-Stokes. Ο τελευταίος όρος της δεξιάς πλευράς αυτών των εξισώσεων, όπως για παράδειγμα στην Εξίσωση 2.1, που παρουσιάζει τον συμπαγή τανυστή 1, αντιπροσωπεύει την καθαρή δύναμη ιξώδους που εφαρμόζεται στην διεύθυνση  $x$ . Ο τανυστής 2 που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τον πρώτο όρο στην δεξιά πλευρά της Εξίσωσης 2.5 αντιπροσωπεύει την καθαρή διάχυση της ενέργειας μέσα στον όγκο ελέγχου που οφείλεται στην τυχαία μοριακή κίνηση. Ο τανυστής 3 στον πρώτο όρο της δεξιάς πλευράς της εξίσωσης 2.6 αντιπροσωπεύει την καθαρή διάχυση των ρύπων στον όγκο ελέγχου λόγω της μοριακής διάχυσης ρύπων στον αέρα. Όπως μπορεί να φανεί, οι εξισώσεις της ενέργειας και της συγκέντρωσης έχουν παρόμοιες δομές με την εξίσωση της ορμής. Η κάθε μία περιέχει παροδικότητα, συναγωγή, διάχυση και συνθήκες πηγής (βλέπε Schlichting 1968 για το νόημα του κάθε όρου στην εξίσωση Navier-Stokes).

---

—	—	—	γράφεται ως	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	γράφεται ως	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	γράφεται ως	—	—	—	—	—	—	—	—

Οι εξισώσεις 2.1 έως 2.6 χαρακτηρίζουν πλήρως την παροδική κίνηση ρευστού, την θερμότητα και την μεταφορά ρύπων σε όλο τον όγκο του αέρα σε ένα δωμάτιο. Σ' αυτές τις έξι εξισώσεις υπάρχουν έξι άγνωστοι (θερμοκρασία, πίεση, συγκέντρωση και τρεις συνιστώσες της ταχύτητας), οπότε το πρόβλημα θεωρείται κλειστό.

Δεν είναι δυνατή μία αναλυτική λύση των συζευγμένων, μη-γραμμικών, μερικών διαφορικών εξισώσεων για ένα τρισδιάστατο πεδίο τυρβώδους ροής. Η χρήση των

αριθμητικών μεθόδων είναι αναπόφευκτη και ως εκ τούτου ο υπολογισμός ενός προβλήματος ροής απαιτεί την διακριτοποίηση αυτού του πεδίου ροής στον χώρο και το χρόνο χρησιμοποιώντας μεθόδους είτε πεπερασμένων διαφορών (Patankar 1980, Fluent 1995, 1996, 1998) είτε πεπερασμένου στοιχείου (Baker και άλλοι 1994, Williams και άλλοι 1994). Ο όγκος ενδιαφέροντος (όπως ένα δωμάτιο) χωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό μικρών κελιών, επίσης γνωστός ως πλέγμα. Η δημιουργία του πλέγματος μπορεί να είναι το πιο σημαντικό στάδιο της δημιουργίας του κώδικα CFD. Αυτό συμβαίνει επειδή το μέγεθος και η κατανομή των κελιών του πλέγματος μπορεί να επηρεάσει το αν μια λύση είναι συγκλίνουσα και την ταχύτητά και ακρίβειά της.

Πιο πρακτικά οι ροές βιώνουν σε κάποιο βαθμό τυχαίες τυρβώδεις διακυμάνσεις, οι οποίες οφείλονται στις αστάθειες μεταξύ των αδρανών και των δυνάμεων ιξώδους. Επειδή οι τυρβώδεις διακυμάνσεις επηρεάζουν την μεταφορά της ορμής, της ενέργειας και των ρύπων, πρέπει να συμπεριληφθούν στην διατύπωση και επίλυση των εξισώσεων κίνησης. Αν και το πρόβλημα έχει διερευνηθεί για πάνω από έναν αιώνα, δεν υπάρχει ακόμη καμία γενική προσέγγιση για την αντιμετώπιση της τυρβώδους ροής. Οι Tennekes και Lumley (1972) δήλωσαν ότι είναι αδύνατο να γίνουν ακριβείς προβλέψεις για τυρβώδεις ροές χωρίς να στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε εμπειρικά δεδομένα.

Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές διαφόρων επιπέδων πολυπλοκότητας και υπολογιστικής έντασης για την αντιμετώπιση αυτής της χαοτικής κίνησης. Μερικές προσεγγίσεις (γνωστές ως άμεση αριθμητική προσομοίωση και προσομοίωση μεγάλης δίνης) προσπαθούν να προσομοιώσουν τις λεπτομέρειες των τυρβωδών διακυμάνσεων με λίγες ή καθόλου παραδοχές. Η Άμεση Αριθμητική Προσομοίωση (DNS) απαιτεί ένα αραιό πλέγμα και ένα μικρό χρονικό βήμα για να καθορίσει το πεδίο ροής για την μικρότερη κλίμακα μήκους (σε πεδία ροής αέρα εσωτερικών χώρων η κλίμακα μπορεί να είναι μικρότερη από 0,1 mm (Murakami και Kato 1989)). Ο αριθμός των απαιτούμενων κελιών πλέγματος (στην διάταξη της (Nieuwstadt 1992)) και των περιορισμών στην τρέχουσα ικανότητα του υπολογιστή περιορίζει την εφαρμογή του DNS στις ροές με ένα μέσο αριθμό Reynolds. Σε Προσομοιώσεις Μεγάλης Δίνης (LES), οι μικρής κλίμακας δίνες αφαιρούνται από την τυρβώδη ροή μέσω φιλτραρίσματος και μόνο οι μεγάλης κλίμακας δίνες επιλύονται πλήρως. Προσομοιώνεται η επίδραση των δινών μικρής κλίμακας στο πεδίο τυρβώδους ροής. Η προσομοίωση LES μπορεί να παρέχει μια παροδική λύση για τις εξισώσεις Navier-Stokes. Ωστόσο, σε ένα τρισδιάστατο πεδίο ροής εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για μια σχετικά μεγάλη ποσότητα υπολογιστικού χρόνου για να συμπεριλάβει όλες τις απαραίτητες χωρικές και χρονικές κλίμακες σε ένα επαρκές αραιό πλέγμα και χρονικό βήμα.

Σε αντίθεση με αυτές τις υψηλής ανάλυσης τεχνικές, μοντέλα τυρβώδους μεταφοράς, στα οποία οι εξισώσεις της κίνησης φιλτράρονται σε σχέση με το χρόνο, έχουν τη δυνατότητα να εφαρμόζουν πυκνότερα πλέγματα και μεγαλύτερα χρονικά βήματα με κατεργασία των τυχαίων διακυμάνσεων με στατιστικές μεθόδους. Αντί να



προσομοιώνουν τις λεπτομέρειες της τυρβώδους κίνησης, οι μέθοδοι αυτές αντιπροσωπεύουν την επίδραση της τύρβης στην κίνηση μέσου χρόνου. Ωστόσο, το φιλτράρισμα του χρόνου δημιουργεί νέους όρους (όρους τύρβης) στις εξισώσεις και οι εξισώσεις της κίνησης δεν είναι πλέον ένα κλειστό σύστημα. Συνεπώς, η εμπειρική πληροφορία εισάγεται για την αξιολόγηση των όρων τύρβης και για να κλείσει το σύστημα εξισώσεων. Ο Rodi (1980) προβαίνει σε λεπτομερή ανασκόπηση των διαφόρων μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την αξιολόγηση των όρων τύρβης. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν μοντέλα Reynolds-stress, μοντέλα algebraic-stress και μοντέλα μηδενικής, μίας και δύο εξισώσεων ιξώδους περιδίνησης. Το πιο διαδεδομένο μοντέλο τύρβης είναι το k-ε μοντέλο. Αυτό το μοντέλο λειτουργεί με υποκατάσταση των στιγμιαίων τιμών στις εξισώσεις 2.1 - 2.3 και με το άθροισμα μιας μέσης τιμής και μιας συνιστώσας διακύμανσης(π.χ.  $\overline{u'u'}$ ) στην εξίσωση 2.5 . Οι μέσοι όροι μπορούν να υπολογιστούν από ένα αραιότερο πλέγμα και έτσι οι χρόνοι υπολογισμού έχουν μειωθεί πολύ. Όταν οι επιπλέον όροι προστίθενται στις εξισώσεις εισάγονται πρόσθετοι άγνωστοι όροι που ονομάζονται όροι Reynolds ( $\overline{u'u'}$  και  $\overline{u'v'}$ )

Οι νέοι όροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις ορμής ( $\overline{u'u'}$ ) περιέχουν τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας διακύμανσης της ταχύτητας που ονομάζονται Reynolds stress ( $\overline{u'u'}$ ). Ο δεύτερος όρος μπορεί να θεωρηθεί ως όρος διάχυσης για την ενθαλπία ή για άλλη βαθμωτή ποσότητα υπό εξέταση.

Ο προσδιορισμός των όρων Reynolds απαιτεί επιπλέον εξισώσεις για την επίλυση του προβλήματος. Τα περισσότερα μοντέλα τύρβης βασίζονται στην υπόθεση Boussinesq (1877) ότι οι τυρβώδεις τάσεις είναι ανάλογες προς τις μέσες κλίσεις ταχύτητας,

$$\overline{u'u'} = -\mu \frac{\partial \overline{u}}{\partial x}$$

Ομοίως, οι τυρβώδεις ροές θερμότητας θεωρούνται ότι είναι ανάλογες προς τις κλίσεις μέσης θερμοκρασίας,

$$\overline{u't'} = \Gamma \frac{\partial \overline{t}}{\partial x} \tag{2.8}$$

όπου  $\mu$  είναι η τυρβώδης ή η ιξώδης περιδίνηση,  $k$  είναι η κινητική ενέργεια τύρβης (όπου  $\overline{u'u'u'}$  -  $\overline{u'u'}$   $\overline{u'u'}$ , και  $\delta_{ij}$  είναι το δέλτα του Kronecker(  $\delta_{ij} = 1$  για  $i=j$  και  $\delta_{ij} = 0$  για  $i \neq j$ ). Το μοριακό ιξώδες ( $\mu$ ) είναι μια ιδιότητα του υγρού. Αντίθετα το  $\mu$  είναι μια ιδιότητα της ροής: μπορεί να διαφέρει σημαντικά από μια ροή σε μια άλλη και μπορεί να ποικίλει μέσα σε έναν τομέα ροής. Το  $\Gamma$  είναι η τυρβώδης διάχυση της θερμότητας. Όπως και στην ιξώδης περιδίνηση, είναι μια ιδιότητα της ροής και όχι του ρευστού. Ο αριθμός τύρβης Prandtl,  $Pr$ , εισάγεται για να συνδέσει την τυρβώδη διάχυση της θερμότητας με την ιξώδης περιδίνηση,

(2.9)

Πειράματα έχουν δείξει ότι το  $\Gamma$  και το  $\epsilon$  μπορούν να ποικίλουν σημαντικά μέσα σε μια ροή ή μεταξύ ροών, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν ισχύει το ίδιο για τον  $k$  (Rodī 1980). Ως εκ τούτου ο  $\epsilon$  μπορεί να θεωρηθεί σταθερός

Ο σκοπός του μοντέλου τύρβης είναι να υπολογίσει τη διανομή της ιξώδους περιδίνησης ( $\epsilon$ ) σε όλο το πεδίο ροής. Στο μοντέλο standard k- $\epsilon$ , η ιξώδης περιδίνηση σε κάθε σημείο του πλέγματος σχετίζεται με τις τοπικές τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k$ ) και το ποσοστό σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας ( $\epsilon$ ) (Launder και Spalding 1974):

(2.10)

όπου  $C_{\epsilon 2}$  είναι μια εμπειρική σταθερά ( $C_{\epsilon 2} = 0.09$ , Launder και Spalding 1974). Ο υπολογισμός της ιξώδους τύρβης απαιτεί έτσι την παραγωγή δύο επιπλέον εξισώσεων για τον προσδιορισμό του  $k$  και του  $\epsilon$ . Οι εξισώσεις αυτές προέρχονται από τις εξισώσεις Navier-Stokes και μπορούν να βρεθούν, για παράδειγμα, στον Nieuwstadt 1992.

Η έννοια της ιξώδους περιδίνησης ελαχιστοποιεί τις ποσοτικές διακυμάνσεις των εξισώσεων κίνησης μέσων τιμών Reynolds, η τυρβώδης διάχυση τώρα χαρακτηρίζεται πλήρως από διαβαθμίσεις σε μέσες ποσότητες και σε ιξώδης περιδίνηση. Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.7 έως 2.10 στις εξισώσεις 2.1 έως 2.6 (οι όροι  $\epsilon$  απορροφώνται στις κλίσεις πίεσης, όπως συζητήθηκε απ' τον Rodī 1980), οι κύριες εξισώσεις γράφονται (το σύμβολο '-', που υποδεικνύει την μέση τιμή, παραλείπεται)

(2.11)

όπου  $\phi$  παριστά μια μέση συνιστώσα ταχύτητας ( $u$ ) ή οποιαδήποτε μέση βαθμωτή μεταβλητή ( $k$ ,  $\epsilon$ ,  $H$ ,  $C$ ). Η περιγραφή του συντελεστή διάχυσης ( $\sigma$ ) και οι όροι πηγής ( $S$ ) δίνονται στον Πίνακα 2.1. Το k- $\epsilon$  μοντέλο απαιτεί επίσης αρκετές σταθερές που έχουν καθοριστεί από τα πειράματα (τα οποία δίνονται επίσης στον Πίνακα 2.1).

Πίνακας 2.1 Περιγραφή του συντελεστή διάχυσης ( ) και των όρων πηγής ( ) για τη μεταβλητή φ.

Εξίσωση	φ		
Συνέχεια	1	0	0
Ορμή			— — —
Ενθαλπία	H		q
Συγκέντρωση	C		S
Κινητική ενέργεια	k		-
Ρυθμός σκέδασης	ε		

= — — — — —

Εμπειρικές σταθερές στις εξισώσεις του μοντέλου (Gan 1995): = 1.44 = 1.92  
 = 0.9  
 = 1.0 = 1.0 = 1.22.  
 = Πυκνότητα αέρα σε ένα σημείο αναφοράς.  
 και είναι οι γραμμικοί αριθμοί Prandtl και Schmidt αντίστοιχα.

Για την επίλυση εξισώσεων 2.11, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε και να καθορίσουμε τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Τυπικά, η ταχύτητα, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση ρύπων του αέρα που παρέχεται μέσω μηχανικού εξαερισμού ή από άλλες εισόδους πρέπει να δίνεται. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών στις εξόδους υπολογίζονται από το μοντέλο. Η αντιμετώπιση των συνθηκών ροής στις επιφάνειες των τοιχωμάτων είναι σημαντική, καθώς είναι και για τη μεταφορά θερμότητας προς ή από το τοίχωμα και σε άλλες επιφάνειες του δωματίου.

Όπως περιγράφεται στις εξισώσεις 2.11, οι εξισώσεις k-ε έχουν την ίδια γενική δομή όπως οι εξισώσεις της ορμής και της ενέργειας. Όταν εφαρμόζονται οι τεχνικές διακριτοποίησης, γραμμικοποίησης και οριακών συνθηκών που αναφέρονται παραπάνω, οι εξισώσεις k-ε μπορούν να λυθούν με τον ίδιο τρόπο όπως οι άλλες κύριες εξισώσεις, όπως περιγράφεται, για παράδειγμα, στον Patankar 1980.

## 2.5.2. Ανάπτυξη

Οι Patankar (1970, 1972 και 1980), Launder και Spalding (1974), Gosman (1977) και οι συνεργάτες τους έχουν περιγράψει την αριθμητική μέθοδο για την λύση των εξισώσεων της ροής του αέρα και της μεταφοράς θερμότητας. Οι Nielsen (1974), Nielsen και άλλοι (1979) και Gosman και άλλοι (1980) ανέπτυξαν αυτούς τους αλγόριθμους για ροή αέρα και μεταφορά θερμότητας εσωτερικών χώρων. Μετά από την ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων, η YPM αναπτύχθηκε πρώτα για την προσομοίωση θεμελιωδών μελετών του κλίματος αέρα εσωτερικών χώρων. Χρειάστηκαν περίπου δέκα χρόνια πριν η YPM να εφαρμοστεί για πιο πρακτική ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων, λόγω των περιορισμών της επεξεργαστικής ισχύος του υπολογιστή. Κατά την τελευταία δεκαετία ολοκληρώθηκε ένα σημαντικό κομμάτι του έργου χρησιμοποιώντας CFD μεθόδους για να εξετάσει διάφορες πτυχές των ροών αέρα εσωτερικών χώρων, της ποιότητας του αέρα και της μεταφοράς των ρύπων. Για παράδειγμα, δύο ΔΟΕ παραρτήματα (IEA Annex) (παράρτημα 20, Lemaire και άλλοι 1993 Παράρτημα 26, Heiselberg και άλλοι 1998), δύο ASHRAE ερευνητικά προγράμματα (Baker και άλλοι 1992, Chen και Srebric 1999), και ένα ολόκληρο τεύχος του περιοδικού Κτίριο και Περιβάλλον (1989) έχουν ασχοληθεί με το θέμα.

Οι Nielsen (1989), Chen (1995), Emmerich (1997), AIVC (1998) και Stewart (1998) παρέχουν μία καλή ανασκόπηση των εφαρμογών της YPM στην πρόβλεψη της ροής αέρα εσωτερικών χώρων και των επιπέδων ρύπων. Οι σχετικές λεπτομέρειες έχουν εξαχθεί και συνοψίζονται στις επόμενες ενότητες.

### Γενική ροή αέρα σε δωμάτιο

Ένας αριθμός ερευνητών έχει δημοσιεύσει λεπτομέρειες των μακροπρόθεσμων σχεδίων προσομοίωσης ροής του αέρα σε κτίρια.

Οι Awbi και Gan έχουν αναπτύξει έναν CFD k-ε κώδικα (γνωστό ως VORTEX), ο οποίος λαμβάνει υπόψη ανταλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Οι λεπτομέρειες του κώδικα VORTEX δίνονται στους Gan και Awbi (1994). Αυτοί εφάρμοσαν τον κώδικα CFD για να προβλέψουν την θερμική άνεση και την διασπορά των ρύπων τόσο στα μηχανικά όσο και στα φυσικά εξαεριζόμενα γραφεία (Awbi 1989, Awbi και Gan 1991, 1993, Gan 1995). Εξέτασαν διαφορετικά συστήματα εξαερισμού και την αποτελεσματικότητά τους, που περιλάμβανε την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης των ρύπων και της θερμικής άνεσης σε δωμάτια με διάφορες πηγές θερμότητας και ανοίγματα. Μετά την σύγκριση στρωτών και τυρβώδων περιπτώσεων, βρήκαν ότι η τύρβη έχει σημαντική επίδραση στην κίνηση του αέρα σε ένα δωμάτιο, και τα αξιόπιστα μοντέλα τύρβης και ακρίβειας οριακών συνθηκών είναι πολύ σημαντικά. Επιπλέον εφαρμογές που αναφέρθηκαν περιλαμβάνουν την προσομοίωση μικτής συναγωγής από θερμαινόμενες επιφάνειες δωματίων (Awbi και Hatton 2000) και μια μελέτη της ποιότητας αέρα στη αναπνευστική ζώνη σε ένα δωμάτιο με εξαερισμό μετατόπισης (Xing, Hatton και Awbi 2001).

Σε μια άλλη σημαντική προσπάθεια, οι Chen και άλλοι (1988) εφαρμόζουν ένα πρόγραμμα CFD και ένα πρόγραμμα φορτίου ενέργειας του κτιρίου για την πρόβλεψη της αποτελεσματικότητας του εξαερισμού και της αποδοτικότητας της θερμοκρασίας σε ένα εξαεριζόμενο δωμάτιο με διάφορα συστήματα εξαερισμού και ποσοστά. Βρήκαν ότι ένα μεγάλο εσωτερικό κέρδος στο δωμάτιο μείωσε την αποτελεσματικότητα εξαερισμού, αλλά είχε μικρή επίδραση στην αποδοτικότητα της θερμοκρασίας. Σε μεταγενέστερη εργασία, οι Chen και Jiang (1992) έκαναν μια μελέτη σχετικά με την απόδοση των τεσσάρων τύπων του συστήματος εξαερισμού σε μια τάξη με ένα χαμηλό ποσοστό εξαερισμού. Σε αυτή τη μελέτη οι μαθητές και τα γραφεία αναπαραστάθηκαν σαν αεραγωγοί παραγωγής θερμότητας και . Βρήκαν ότι η άνωση προκάλεσε δευτερεύουσα ροή που κυριάρχησε στο μοντέλο ροής αέρα και κατέληξαν σε παρόμοια αποτελεσματικότητα συνολικό εξαερισμό και θερμική άνεση και για τις τέσσερις περιπτώσεις (εκτός από περιοχές κοντά στους διαχύτες) και σε παρόμοια μέση συγκέντρωση σε όλες τις περιπτώσεις. Πρόσφατα, οι Chen και άλλοι (1995) εφάρμοσαν CFD συνδυαζόμενη με μεταφορά θερμότητας και με μοντέλα ακτινοβολίας για να προβλέψουν την θερμική απόκριση ενός δωματίου. Σε αυτή τη μελέτη συμπεριλήφθηκε μόνο επιφανειακή ακτινοβολία. Πιο πρόσφατα, οι Xu και Chen (2001a και 2001b) ανέπτυξαν ένα μοντέλο τύρβης δύο στρωμάτων για να προσομοιώσουν την ροή αέρα εσωτερικών χώρων με συνδυασμό εξαναγκασμένης και φυσικής συναγωγής (μικτή συναγωγή). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δεδομένα υπολογισμού τους συμφωνούν με τις μετρήσεις πολύ καλά.

Ο Li (1992) ανέπτυξε έναν κώδικα CFD που συνδύαζε μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας με CFD. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο στη θερμική διαστρωμάτωση με εξαερισμό μετατόπισης. Ο Li (1994) ανέπτυξε επίσης μια μέθοδο για να ασχοληθεί με πολύπλοκες γεωμετρίες χρησιμοποιώντας ένα non-body-fitted καρτεσιανό πλέγμα. Πρόσφατα, ο Li και άλλοι (1996c, 1996d), εφάρμοσαν CFD για να αξιολογήσουν διάφορες μετρήσεις των συστημάτων εξαερισμού. Πιο πρόσφατα, ο Li και άλλοι (2000) εφάρμοσαν CFD κώδικα για να προβλέψουν τον φυσικό εξαερισμό σε κτίρια με μεγάλα ανοίγματα.

Οι Murakami και Kato (1989) σύγκριναν τις προβλέψεις του 3-D μοντέλου τύρβης k-ε με πειραματικές μετρήσεις σε ένα αεριζόμενο καθαρό δωμάτιο με τυρβώδεις ροές ανακυκλοφορίας. Ήταν σε θέση να ανακοινώσουν καλή συμφωνία.

### **Διαφορετικές ρυθμίσεις εισόδου / εξόδου**

Μια κοινή εφαρμογή της προσομοίωσης YPM είναι η μελέτη της απόδοσης των συστημάτων εξαερισμού με διαφορετικούς διαχύτες και διαφορετικές ρυθμίσεις εισόδου και εξόδου. Οι Murakami και άλλοι (1989) ανέλυσαν την ροή αέρα και την διάχυση ρύπων σε διάφορους τύπους καθαρών δωματίων με διαφορετικές ρυθμίσεις διαχύτη παροχής και απομάκρυνσης. Εξέτασαν τις επιπτώσεις της μεταβολής του αριθμού και της ρύθμισης των αγωγών παροχής και απομάκρυνσης ροής αέρα και διασποράς ρύπων και την συμβολή των πηγών θερμότητας και των νεροχυτών στην κατανομή θερμοκρασίας σε ένα δωμάτιο. Συμπέραναν τα ακόλουθα:

- η αριθμητική προσομοίωση είναι χρήσιμη για την ανάλυση παραμετρικών αλλαγών σε συνθήκες ροής για πολύπλοκες συνθήκες
- οι αγωγοί παροχής έχουν μεγάλη επιρροή τόσο στα πεδία ροής όσο και στα πεδία διάχυσης των ρύπων
- η διάταξη των αγωγών απομάκρυνσης έχει μικρή επίδραση στα πεδία ροής, αλλά μεγάλη επιρροή στα πεδία διάχυσης των ρύπων
- η διάταξη των αγωγών παροχής in a chequered pattern είναι ανώτερη μιας γραμμικής μορφής από την άποψη της αποτελεσματικότητας εξαερισμού.

Όπως πρόβλεψε ο Moser (1991), μία από τις σημαντικές δυσκολίες στην προσομοίωση ακρίβειας με YPM είναι το πώς θα αντιμετωπιστεί ο μηχανικός εξαερισμός εισόδων ροής αέρα από διαχύτες. Αρκετοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει δοκιμές συγκρίνοντας μια σειρά από τρόπους που αναπαριστούν διαχύτες εισόδου. Οι Emvin και Davidson (1996) συζητούν τέσσερις μεθόδους που αντιπροσωπεύουν διαχύτη που αποτελείται από 84 τζετ. Οι τέσσερις μέθοδοι περιλαμβάνουν λεπτομερή μοντελοποίηση όλων των τζετ αναπαριστούν τον διαχύτη ως ένα μονό τζετ με μία περιοχή εισόδου ίση με το άθροισμα των επιμέρους ακροφύσιων (βασικό μοντέλο) αντιπροσωπεύοντας τον διαχύτη ως ένα μονό τζετ με μία περιοχή εισόδου ίση με τη συνολική περιοχή του διαχυτή με αποσυνδεδεμένη ροή μάζας και οριακές συνθήκες ροής ορμής(μέθοδος ορμής) και ένα μοντέλο «κιβωτίου», όπου ο διαχύτης αναπαρίσταται από ένα (μεγάλο) κιβώτιο με οριακές συνθήκες που δίνονται για την επιφάνεια του κιβωτίου. Μόνο το λεπτομερές μοντέλο αναφέρεται ως ακριβές, αλλά ήταν επίσης δαπανηρό.

Σε μία άλλη μελέτη, οι Skovgaard και Nielsen (1991) εφάρμοσαν δύο τεχνικές στο μοντέλο ροής του διαχύτη συμπεριλαμβανομένης της προσομοίωσης του διαχύτη άμεσα και της προσομοίωσης του αποτελέσματος σχεδίου ροής σε έναν όγκο μπροστά από τον διαχύτη (PV μέθοδος). Βρήκαν ότι η μέθοδος PV είχε τις καλύτερες επιδόσεις αλλά εξαρτιόταν από τα ειδικά δεδομένα του διαχύτη. Οι Chen και Jiang (1996) εφάρμοσαν κώδικα CFD για να προβλέψουν την ροή του αέρα από μια κυρτή επιφάνεια χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά συστήματα πλέγματος συμπεριλαμβανομένων κυλινδρικών συντεταγμένων με μικρό βήμα, κανονικοποιημένων συντεταγμένων και μη δομημένων πλεγμάτων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα body-fitted και τα μη δομημένα πλέγματα παράγουν πρότυπα ροής που συμφωνούν με τις τεχνικές απεικόνισης ροής, αλλά απαιτείται υψηλό κόστος εργασίας για τη προετοιμασία της προσομοίωσης. Οι κυλινδρικές συντεταγμένες δεν μπορούσαν να προσομοιώσουν το μοτίβο ροής αέρα σωστά. Οι Huo και άλλοι (1996) ανέπτυξαν μια νέα μέθοδο για να περιγράψουν τις οριακές συνθήκες διαχύτη, που ονομάζεται κύρια περιοχή προδιαγραφών τζετ. Βρήκαν ότι η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει με ακρίβεια τις οριακές συνθήκες διαχύτη χωρίς να περιγράψει την πολύπλοκη γεωμετρία του διαχυτή και, ως

εκ τούτου, να εξοικονομεί χρόνο προσομοίωσης χρησιμοποιώντας ένα αραιότερο πλέγμα.

Πρόσφατα, οι Svidt και άλλοι (1998a) εφάρμοσαν τον κώδικα CFD Flovent σε ένα μοντέλο ροής αέρα μέσα από ένα δάπεδο με σχάρα χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αντίστασης όγκου και ένα μοντέλο αντίστασης επιπέδου. Βρήκαν ότι ο προβλεπόμενος ρυθμός ροής αέρα ήταν 10% μικρότερος από ότι μετρήθηκε. Πιο πρόσφατα, οι Bjerg και άλλοι (2000) εφάρμοσαν ένα 3D k-ε μοντέλο τύρβης για να προσομοιώσουν ένα τοίχωμα εισόδου σε βουστάσια. Αυτοί διαπίστωσαν ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούσαν με τις μετρήσεις πολύ καλά στην ζώνη απασχόλησης και κάτω από την οροφή του χώρου δοκιμής. Η Sinha (2001) προσομοίωσε την συμπεριφορά ενός κεκλιμένου τζετ σε ένα δωμάτιο ψύξης με τη χρήση YPM. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η γωνία του κεκλιμένου τζετ έχει μια μεγάλη επιρροή στη θερμοκρασία του βουστάσιου.

### **Επιπτώσεις ενοίκων**

Υπήρξαν αρκετές μελέτες (Depecker και άλλοι 1996, Nielsen και άλλοι 1996 και Kalzuka και άλλοι 1992), οι οποίες εξέτασαν τον αντίκτυπο των ενοίκων στο καθεστώς ροής και διάχυσης των ρύπων. Οι ένοικοι συνήθως αντιμετωπίζονται τόσο ως πηγές μόλυνσης (διοξείδιο του άνθρακα και, μερικές φορές, καπνός) όσο και ως θερμότητας. Ο ένοικος συνήθως θεωρείται σταθερός κατά τη διάρκεια της CFD προσομοίωσης. Πρόσφατα, οι Svidt και άλλοι (1998b) προσομοίωσαν την ροή του αέρα σε γεμάτα βουστάσια με την χρήση CFD. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι δυνατόν να έχουμε μια καλή συμφωνία μεταξύ ενός απλού μοντέλου που βασίζεται σε μια αντίσταση όγκου και εργαστηριακών μετρήσεων για μια συγκεκριμένη περίπτωση. Οι Nielsen και άλλοι (1998) και οι Stankov και άλλοι (1999), προσομοίωσαν την επίδραση των επίπλων στην ροή και στην διασπορά ρύπων εσωτερικών χώρων. Οι Murakami και άλλοι (1998) ανέλυσαν την επίδραση των ενοίκων στην διασπορά των ρύπων.

### **Εξαερισμός μετατόπισης**

Σε ένα δωμάτιο εξαερισμού μετατόπισης, αέρας παρέχεται κοντά ή στο πάτωμα και απομακρύνεται κοντά ή στην οροφή. Σε αντίθεση με τον συμβατικό μηχανικό εξαερισμό, που συνήθως είναι τοποθετημένος για ανάμιξη του αέρα σε ένα δωμάτιο, ο αερισμός μετατόπισης έχει ως στόχο να παρέχει μια ροή αέρα «μιας διέλευσης». Μερικές από τις προσπάθειες για προσομοίωση του εξαερισμού μετατόπισης απέδειξαν ότι θερμικές επιδράσεις από την θερμική συναγωγή μέσω των τοίχων (Li και άλλοι 1996a και 1996b) και την ακτινοβολία από τα παράθυρα μπορούν να ενεργήσουν για ενισχύσουν ή να επιβραδύνουν τον εξαερισμό μετατόπισης ανάλογα με τις συνθήκες.

Μερικές μελέτες του εξαερισμού μετατόπισης έχουν επικεντρωθεί στο θερμικό περιβάλλον ή / και στην αποτελεσματικότητα του εξαερισμού. Οι Jiang και Haghghat (1992) μελέτησαν την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος εξαερισμού

μετατόπισης σε ένα γραφείο χωρισμένο σε πέντε διαφορετικά τμήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάταξη των τμημάτων ήταν πιο σημαντική για την συγκέντρωση των ρύπων και την μέση ηλικία του αέρα από ότι ο αριθμός των τμημάτων. Οι Alamdari και άλλοι (1994) εφάρμοσαν CFD για την προσομοίωση ροής αέρα και κατανομής της θερμοκρασίας σε ένα ενιαίο χώρο γραφείου με ένα σύστημα εξαερισμού μετατόπισης. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι δευτερεύουσες ροές του αέρα που προκύπτουν από την διείσδυση και τις ψυχρές επιφάνειες έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση εξαερισμού και μειώνουν την θερμική άνεση. Ο Awbi (1996) μελέτησε την απόδοση των συστημάτων εξαερισμού μετατόπισης και ανάμιξης για ένα γραφείο και διαπίστωσε ότι το σύστημα μετατόπισης θα μπορούσε να προσφέρει παρόμοια ποιότητα του αέρα στην αναπνευστική ζώνη με το ήμισυ του ποσοστού του συστήματος εξαερισμού ανάμιξης.

Μερικές μελέτες εξαερισμού μετατόπισης έχουν επικεντρωθεί στις επιδράσεις πηγών θερμότητας στα συστήματα εξαερισμού μετατόπισης. Σε μια πρώιμη μελέτη, οι Jacobsen και Nielsen (1993) προσομοίωσαν το θερμικό περιβάλλον σε ένα δωμάτιο με σύστημα εξαερισμού μετατόπισης με πηγές θερμότητας και χρησιμοποίησαν μια επέκταση του μοντέλου τύρβης k-ε με ένα συντελεστή άνωσης για να αναπαραστήσουν την εξάρτηση του τυρβώδους ιξώδους από κατακόρυφες κλίσεις της θερμοκρασίας. Οι Chen και Chao (1996) μελέτησαν την ροή σε ένα τυρβώδες πλούμιο άνωσης και σε ένα δωμάτιο με εμπόδια με σύστημα εξαερισμού μετατόπισης. Πρόσφατα, ο Loomans (1998), διεξήγαγε μετρήσεις και προσομοιώσεις στο σύστημα εξαερισμού μετατόπισης γραφείου. Πιο πρόσφατα, οι Park και Holland (2001) ερευνήσαν την επίδραση της τοποθεσίας μιας πηγής θερμικής συναγωγής για εξαερισμό μετατόπισης. Βρήκαν ότι το αποτέλεσμα άλλαξε το θερμοκρασιακό πεδίο και οδήγησε σε μια μείωση του ψυκτικού φορτίου στην ζώνη απασχόλησης.

### **Μεγάλοι εσωτερικοί χώροι**

Πολλοί ερευνητές έχουν εφαρμόσει κώδικα CFD για την προσομοίωση ροής αέρα μέσα σε ένα μεγάλο χώρο. Σε μία λεπτομερή έκθεση, ο Murakami (1992) περιγράφει πολλά από τα μοναδικά χαρακτηριστικά των μεγάλων εσωτερικών χώρων (όγκος, ύψος οροφής και μικρές ζώνες απασχόλησης), τις αρχές σχεδιασμού του εξαερισμού, και τις μεθόδους πρόβλεψης όπως είναι οι απλές εξισώσεις, τα μοντέλα κλίμακας και η CFD προσομοίωση.

Πολλοί ερευνητές (οι Kato και άλλοι 1995, οι Off και άλλοι 1996, οι Moser και άλλοι 1995, ο Schild 1996, , και οι Awbi και Baizhan 1994) έχουν επίσης συμβάλλει στις μελέτες. Άλλοι ερευνητές (οι Clancy και άλλοι 1996, οι Van der Mass και Schaelin 1995, οι Guthrie και άλλοι 1992, οι Chow και Fung 1992, οι Fontaine και Rapp 1996) μελέτησαν άλλα είδη μεγάλων εσωτερικών χώρων, όπως αμφιθέατρα, πολιτικά αεροδρόμια κτίρια αεροσταθμών, χώρους στάθμευσης και γυμναστήρια



Η ΔΟΕ(IEA) ξεκίνησε μια μελέτη της ροής του αέρα σε μεγάλους εσωτερικούς χώρους ( παράρτημα 26 ), η οποία ολοκληρώθηκε το 1996. Η τελική έκθεση σχετικά με το παρόν παράρτημα έχει εκδοθεί από τους Heiselberg και άλλους ( 1998 ) και παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου σε βιομηχανικά κτίρια . Μέρος της μελέτης αποτελεί και η αξιολόγηση της αξίας των μοντέλων YPM για μεγάλα σκέπαστρα . Μερικά από τα αποτελέσματα της τελικής έκθεσης αναφέρθηκαν από τον Stewart ( 1998 ) :

- Η συμβατικής Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής προσεγγίσεις ενσωματώνουν αναπαραστάσεις τυρβώδους τύπου  $k - \epsilon$  που βρέθηκαν να είναι σε θέση να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα πρόβλεψης για τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του αέρα και τα πεδία ρύπων

- Μικρές αλλαγές στις οριακές συνθήκες μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το κύριο μοτίβο της ροής του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας . Ήταν επομένως σημαντικό οι οριακές συνθήκες να αναπαριστώνται με ακρίβεια . Η επιπλέον προσπάθεια που καταβλήθηκε για την απόκτηση ρεαλιστικών δεδομένων έχει μεγάλη αξία

- Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας είναι ένα ευαίσθητο στοιχείο της μεταφοράς ενέργειας και πρέπει να ενσωματωθεί σε οποιαδήποτε υπολογιστική ανάλυση ρευστομηχανικής

- Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής από τα όρια στον αέρα δεν προβλέφθηκε αξιόπιστα με την χρήση πυκνότερου πλέγματος και συνάρτησης τοιχώματος  $\log$ -law. Τα αποτελέσματα έτειναν να είναι εξαρτώμενα από το μέγεθος του πλέγματος . Η χρήση καθορισμένων συντελεστών μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής προτάθηκε ως εναλλακτική λύση , αν και αναγνωρίστηκε ότι αυτό μπορεί να μην είναι εύκολο . Νέες συναρτήσεις τοιχώματος για μεταφορά θερμότητας χωρίς συναγωγή είναι προς το παρόν υπό δοκιμή

- Σε ορισμένες περιπτώσεις βρέθηκε αργή ή ανύπαρκτη σύγκλιση της διαδικασίας επίλυσης. Αυτό τείνει να συμβεί όταν η ροή κυριαρχείται από δυνάμεις χωρίς συναγωγή ( π.χ. θερμική άνωση ) . Αποδείχτηκε ότι το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση μιας « συζευγμένης » και όχι μιας συμβατικής« διαδοχικής» ( ΑΠΛΗΣ ) λύσης . Επιπλέον , σε ένα ισοθερμικό υπολογισμό των ρευμάτων αέρα ,σε ένα αθλητικό κέντρο στη Γερμανία, βρέθηκε αστάθεια σε λύσεις . Έχει επαχθεί το συμπέρασμα ότι οι εν λόγω ροές μπορούν να προσομοιωθούν μόνο από χρονικά εξαρτώμενους υπολογισμούς . Ένα μοντέλο σταθερής κατάστασης δεν θα συγκλίνει ποτέ.

Πιο πρόσφατα, οι Li και άλλοι (2000) πραγματοποίησαν πολυζωνική και CFD προσομοίωση για την πρόβλεψη του κινδύνου σχηματισμού ομίχλης σε ένα βιομηχανικό κτίριο με φυσικό εξαερισμό. Οι Moga, Gadgil και Wurtz (2000) εφάρμοσαν CFD και μοντέλα ζωνών για την προσομοίωση ροής του αέρα στους μεγάλους εσωτερικούς χώρους. Προτείνουν έναν τρόπο συνδυασμού ενός μοντέλου

λεπτομερής ροής αέρα σε μεγάλους εσωτερικούς χώρους με ένα πολυζωνικό μοντέλο διείσδυσης . Οι Lam και Chan (2001) προσομοίωσαν ένα γυμναστήριο με χρήση CFD. Διαπίστωσαν ότι στο γυμναστήριο συμβαίνει σημαντική θερμική διαστρωμάτωση και το ετήσιο φορτίο ψύξης μπορεί να υπερεκτιμηθεί κατά 45% για την καλύτερη τοποθέτηση αγωγών απομάκρυνσης, όταν η επίδραση της θερμικής στρωματοποίησης αγνοείται. Οι Lu και άλλοι (2001) εφάρμοσαν CFD για να διερευνήσουν τα πεδία ροής αέρα μέσα και γύρω από ένα συγκεκριμένο καταφύγιο σε έναν όροφο, το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για πολυώροφα κτίρια με σκοπό την παροχή ενός προσωρινού ασφαλούς μέρους για τους ενοίκους σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η μελέτη αυτή δείχνει ότι η ροή του αέρα θα μπορούσε να είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει το μοτίβο ροής καπνού.

### **Φυσικός εξαερισμός**

Ο φυσικός εξαερισμός στηρίζεται στην πίεση του ανέμου, σε κατάλληλα τοποθετημένα ανοίγματα και στην θερμική άνωση για την παροχή καθαρού φρέσκου αέρα σε κτίρια και ως εκ τούτου μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις από μηχανικά συστήματα εξαερισμού. Πολλοί ερευνητές έχουν επιδείξει ενδιαφέρον για αυτή την μέθοδο εξαερισμού. Οι Tsutsumi και άλλοι (1992) και οι Iwamoto και άλλοι (1992) εφάρμοσαν CFD για τη μελέτη διασταυρούμενου εξαερισμού σε πολυκατοικίες. Οι Barozzi και άλλοι (1991) πραγματοποίησαν προσομοιώσεις και πειράματα σε ένα παθητικά οδηγούμενο ηλιακό σύστημα εξαερισμού. Οι Jones και άλλοι (1991) μελέτησαν τα ποσοστά διείσδυσης σε ένα φυσικά εξαεριζόμενο βιομηχανικό κτίριο χρησιμοποιώντας τόσο CFD όσο και πολυζωνικά μοντέλα. Οι Kornaat και Lemaire (1994) ερεύνησαν τα επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα σε ένα κλειστό χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων με φυσικό εξαερισμό και διαπίστωσαν ότι ένα ανεμιστήρας ανάμιξης ήταν απαραίτητος για να αποφευχθούν οι απαράδεκτα υψηλές τοπικές συγκεντρώσεις.

Πιο πρόσφατα, οι Peppes και άλλοι (2001) χρησιμοποίησαν YPM και μετρήσεις για την προσομοίωση ροής καθοδηγούμενης από άνωση μέσα σε μια φυσικά εξαεριζόμενη πολυκατοικία. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όλοι οι όροφοι που συνδέονται με μια εσωτερική σκάλα αποδείχθηκε ότι συμπεριφέρονται ως διαφορετικές ζώνες.

### **Μεταφορά ρύπων**

Πολλές μελέτες έχουν αναφέρει CFD προσομοιώσεις για περιπτώσεις σταθερής κατάστασης ροής αέρα και αδρανή μεταφορά ρύπων.

Οι Nagano και Mimi (1992) μελέτησαν την ροή αέρα και τις συγκεντρώσεις ρύπων σε ένα ορθογώνιο, δισδιάστατο χώρο με διαφορετικούς συνδυασμούς παροχής και απομάκρυνσης δαπέδου οροφής και αριθμούς Reynolds από το 5 έως το 10000. Πρόβλεψαν ότι, για τις περισσότερες περιπτώσεις, η παροχή από την οροφή

προσφέρει καλύτερη απόδοση εξαερισμού από την παροχή από το πάτωμα. Οι Schaelin και άλλοι (1992) χρησιμοποίησαν τον εμπορικό κώδικα CFD PHOENICS για να προσομοιώσουν την ροή του αέρα, τη θερμοκρασία και την κατανομή ρύπων σε μια κουζίνα με ένα πάγκο εργασίας που περιέχει μία κεραμική επιφάνεια μαγειρέματος με έναν απορροφητήρα, και σε ένα άλλο κτίριο με θέρμανση καλοριφέρ και διάφορους συνδυασμούς ανοικτών και κλειστών παραθύρων με ή χωρίς εξωτερική πίεση που προκαλείται από τον άνεμο. Οι υπολογισμοί έγιναν σε σταθερή κατάσταση, αλλά θα μπορούσαν επίσης να επιλυθούν για χρονικά μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες αν και στις περισσότερες περιπτώσεις, ήταν συνήθως προτιμότερο να υπολογίσουν σταθερές λύσεις για τρεις ή τέσσερις διαφορετικές οριακές συνθήκες παρά για την δυναμική συμπεριφορά της ροής του αέρα σε ένα δωμάτιο.

Οι Kato και άλλοι (1996) προσομοίωσαν την διασπορά ρύπων σε ένα δωμάτιο με σύστημα εξαερισμού μετατόπισης και έναν ένοικο. Η διαμόρφωση της πηγής ρύπων περιλάμβανε παραγωγή ρύπων σε όλο το δωμάτιο, από την οροφή, από μια σημειακή πηγή και την επιφάνεια στην οποία βρίσκεται ο ένοικος. Οι Murakami και άλλοι (1989) και οι Kato και άλλοι (1992) επίσης πρόβλεψαν σταθερή κατάσταση συγκεντρώσεων ρύπων σε καθαρά δωμάτια.

Οι Cafaro και άλλοι (1992) εφάρμοσαν YPM για να προσομοιώσουν παροδικές περιπτώσεις τόσο ροής αέρα όσο και μεταφοράς ρύπων. Μελέτησαν την μεταφορά ρύπων σε ένα απλό δωμάτιο για να αποκτήσουν γνώσεις σχετικά με το θέμα της διαρροής φυσικού αερίου. Οι καταστάσεις που αναλύθηκαν περιλαμβάνουν τόσο μείωση ρύπων από την αρχική ενιαία συγκέντρωση όσο και συσσώρευση ρύπων λόγω μιας πηγής.

Η πιο κοινή προσέγγιση που λήφθηκε για μελέτες παροδικής μετάδοσης ρύπων περιλαμβάνει τη χρήση μιας σταθερής κατάστασης λύσης ροής για την επίλυση παροδικών συγκεντρώσεων ρύπων που παράγονται από μια πηγή. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε από τους Roy και άλλους (1993), τους Suyama και Aoyama (1992), τους Haghghat και άλλους (1994) και τους Riffat και Shao (1994).

Υπήρξαν επίσης προσπάθειες για να προσομοιωθεί η κατανομή των σωματιδίων ή αερολυμάτων που είναι πιο δύσκολη λόγω της ανάγκης για προσομοίωση κατακάθισης και πιθανής αιώρησης. Οι Lu και Howarth (1996) και οι Fontaine και άλλοι (1994) χρησιμοποίησαν Lagrangian μεθόδους εντοπισμού των σωματιδίων υποθέτοντας την μη ύπαρξη μεταφοράς θερμότητας και μάζας μεταξύ του αέρα και των σωματιδίων, την μη ύπαρξη ανάκαμψης σωματιδίων από την επιφάνεια, σφαιρικά στερεά σωματίδια, και κίνηση που διέπεται από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η κατακάθιση και η μετανάστευση είναι ως επί το πλείστον επηρεαζόμενες από τα πρότυπα ροής αέρα και τις ιδιότητες των σωματιδίων, από την πλειοψηφία των μεταναστεύσεων των σωματιδίων που παρατηρούνται εντός των πρώτων 10 λεπτών του χρόνου εντοπισμού των σωματιδίων, από το ότι τα μεγάλα σωματίδια κατακάθονται πολύ πιο γρήγορα από

ότι τα μικρά, και από το ότι τα μικρά σωματίδια μπορούν να παραμένουν σε αιώρηση περισσότερο από δύο ώρες.

Πιο πρόσφατα, οι Lin και άλλοι (2000) εφάρμοσαν YPM για την προσομοίωση της κατανομής της συγκέντρωσης του  $\text{CO}_2$ , του ραδονίου και της υγρασίας σε ένα τυπικό βιομηχανικό εργαστήριο στο Χονγκ Κονγκ με εξαερισμό μετατόπισης. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η πρόβλεψη της κατανομής ρύπων είναι πιο δύσκολη από ό, τι η πρόβλεψη της κατανομής αέρα θερμοκρασίας και της ροής. Οι Torpp, Nielsen και Heiselberg (1999) προσομοίωσαν τις εκπομπές από τα οικοδομικά υλικά με χρήση YPM. Ανέφεραν ότι οι προβλέψεις του μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν πολύ καλά. Οι Παπακωνσταντίνου και άλλοι (2000) υπολόγισαν την ταχύτητα, τις συγκεντρώσεις ρύπων και τα πεδία της θερμοκρασίας μέσα στο αρχαιολογικό μουσείο της Αθήνας χρησιμοποιώντας τρισδιάστατο μοντέλο CFD. Οι ρύποι αέρα που μετρήθηκαν ήταν οι  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{Pb}$  και  $\text{PM}_{10}$ . Ο Nazaroff (2001) πραγματοποίησε πειράματα και προσομοιώσεις με χρήση YPM για κατακράτηση των σωματιδίων σε ρωγμές, σε αγωγούς και σε δωμάτια.

### 2.5.3. Γενικές δυνατότητες των παρόντων μοντέλων

Όλα τα μοντέλα YPM βασίζονται στους νόμους της διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας), της ενέργειας (εξίσωση της εσωτερικής ενέργειας) και ορμής (Navier-Stokes), οι οποίες συνολικά ονομάζονται οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή του ρευστού και αναφέρονται στο τμήμα 2.5.1..

Οι περισσότερες εφαρμογές YPM για τη ροή του αέρα σε ένα δωμάτιο και την προσομοίωση της μεταφοράς της θερμότητας έχουν χρησιμοποιήσει το μοντέλο standard τύρβης k-ε (Launder & Spalding, 1974) το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε για ροές υψηλών τιμών αριθμών Reynolds (δηλαδή πλήρως τυρβώδης). Στην πραγματικότητα το μοντέλο τύρβης standard k-ε ισχύει μόνο για πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή. Ωστόσο, οι ροές αέρα σε ένα δωμάτιο δεν είναι πλήρως τυρβώδεις. Ο Baker και άλλοι (1994) αναφέρουν ότι οι περισσότερες ροές αέρα σε ένα δωμάτιο είναι τοπικά τυρβώδεις, αλλά ρέουν μακριά από τα συστήματα τροφοδοσίας ΘΕΚΚ (Θέρμανση, Εξαερισμός και Κλιματισμός) και από εμπόδια με άκρα που τείνουν να δημιουργούν τυρβώδη ροή. Οι Baker και άλλοι (1994) ανέφεραν ότι το μοντέλο standard k-ε θα προέβλεπε τη μεταφορά της θερμότητας και την ορμή σε περιοχές όπου η ροή είναι τυρβώδης. Αν και η ροή του αέρα στο διαχύτη εξόδου τείνει να είναι τυρβώδης, οι μετρήσεις δείχνουν ότι η ροή στο κύριο σώμα των αεριζόμενων δωματίων μπορεί να είναι μεταβατική (Jones & Whittle, 1992). Κοντά στις περισσότερες θερμές ή ψυχρές περιοχές, όπως καλοριφέρ και παράθυρα, παρατηρήθηκε μια συνδυαστική κατάσταση ροών.

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λυθεί αυτό το πρόβλημα. Η πρώτη χρησιμοποιεί τη «θεωρία του οριακού στρώματος» για την αντιμετώπιση ροών αέρα κοντά σε συμπαγείς τοίχους, όπου η ιξώδης διάχυση υπερτερεί της τυρβώδους ροής. Η κοινή προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί η

μέθοδος συνάρτησης τοιχώματος (Launder & Spalding, 1974). Η μέθοδος αυτή δεν επιχειρεί να υπολογίσει τη ροή εντός των στρωτών και των ημίστρωτων περιοχών του οριακού στρώματος, όπου η μοριακή διάχυση είναι σημαντική. Η μέθοδος συνάρτησης τοιχώματος θεωρεί ότι η ταχύτητα και τα θερμοκρασιακά προφίλ βρίσκονται εντός του οριακού στρώματος, ενώ τα γειτονικά πλεγματικά σημεία του τοίχου τοποθετούνται στην πλήρως τυρβώδη περιοχή. Οι διακυμάνσεις στην τυρβώδη κινητική ενέργεια  $k$  και στη σκέδαση  $\varepsilon$  σταθεροποιούνται με αυτές τις συναρτήσεις ταχύτητας. Από τις πολλές συναρτήσεις τοιχωμάτων που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν, οι Launder & Spalding (1974) συνιστούν αυτές τις ημειμπειρικές εξισώσεις με βάση την εμπειρία τους σε πλήρως τυρβώδη ροή.

Επειδή το λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας (White, 1979) για την εξαναγκασμένη ροή είναι η βάση των συναρτήσεων τοιχώματος των Launder & Spalding (1974), συχνά αναφέρονται ως συναρτήσεις τοιχώματος λογαριθμικού νόμου. Η μορφή του μοντέλου  $k$ - $\varepsilon$ , σε συνδυασμό με τις συναρτήσεις τοιχώματος λογαριθμικού νόμου έχουν εφαρμοστεί ευρέως στην πρόβλεψη της ροής του αέρα και της μεταφοράς θερμότητας σε ένα δωμάτιο.

Η δεύτερη προσέγγιση είναι η εναλλακτική προσομοίωση της τυρβώδους ροής, η οποία περιλαμβάνει μικρές τιμές αριθμών Reynolds που προσομοιώνονται με το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$ , εναλλακτικά μοντέλα  $k$ - $\varepsilon$ , μοντέλα  $k$ - $\varepsilon$  υψηλότερης ανάλυσης, εναλλακτικές προσεγγίσεις τοιχωμάτων για το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$  και προσεγγίσεις μοντέλων τύρβης μηδενικής εξίσωσης (Beausoleil & Morrison, 2000). Αυτά περιγράφονται εν συντομία στις ακόλουθες παραγράφους.

### **Μοντελοποίηση μικρών τιμών Reynolds**

Στην μοντελοποίηση μικρών τιμών Reynolds (Launder και Spalding 1974, Lam και Bremhorst 1981) τα πλεγματικά σημεία τοποθετούνται εντός του οριακού στρώματος, συμπεριλαμβανομένης της στρωτής περιοχής. Στη συνέχεια, κάποιες από τις εμπειρικές σταθερές θα ποικίλουν ανάλογα με τους τοπικούς αριθμούς Reynolds τυρβώδους ροής. Τα μοντέλα μικρών τιμών Reynolds εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση της ροής του αέρα εσωτερικών χώρων (Chen 1995, Nielsen 1998, Awbi 1998). Έχουν σημειωθεί ορισμένες βελτιώσεις σε σχέση με τις μεθόδους συνάρτησης τοιχώματος, εις βάρος όμως των σημαντικών υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων και της σταθερότητας.

### **Εναλλακτικά μοντέλα $k$ - $\varepsilon$**

Ο Beausoleil-Morrison (2000) ανέφεραν ότι υπάρχουν τρεις εναλλακτικές φόρμουλες: μοντέλο δύο στρωμάτων, μοντέλο διπλής κλίμακας και μοντέλο επανακανονικοποίησης συνόλου. Δήλωσε ότι τα εναλλακτικά μοντέλα  $k$ - $\varepsilon$  απέδωσαν επαρκώς, σε ορισμένες περιπτώσεις, και ανεπαρκώς σε άλλες.

## **Υψηλότερης ανάλυσης k-ε μοντέλα**

Η μέθοδος προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES), μπορεί να παρέχει μια παροδική λύση των εξισώσεων Navier-Stokes με μειονέκτημα την σχετικά μεγάλη διάρκεια υπολογιστικού χρόνου. Οι Nielsen (1998) και Emmerich και McGrattan (1998) εφάρμοσαν LES σε κτίρια για τις ισόθερμες ροές αέρα. Η επιδόση ήταν επαρκής, αλλά όχι σημαντικά καλύτερη από ό, τι το μοντέλο standard k-ε. Περαιτέρω βελτίωση είναι απαραίτητη προτού αυτή η μέθοδος χρησιμοποιηθεί ευρέως σε κτίρια. Ο Chen (1996) εφάρμοσε ένα μοντέλο Reynolds-stress για να προβλέψει την ροή αέρα και την μεταφορά θερμότητας σε ένα δωμάτιο. Βρέθηκαν μόνο μικρές βελτιώσεις ακρίβειας σε σχέση με το μοντέλο standard k-ε σε βάρους των σημαντικά υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων και της σταθερότητας.

## **Εναλλακτικές προσεγγίσεις τοιχωμάτων για το μοντέλο k-ε**

Οι Takemasa και άλλοι (1992), οι Yuan και άλλοι (1994), οι Xu και άλλοι (1998) και ο Neitzke (1998) έχουν αναπτύξει νέες συναρτήσεις τοιχώματος για χρήση με το μοντέλο standard k-ε. Τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να επεκταθούν ακόμα στην γενική περίπτωση.

## **Μοντέλα τύρβης μηδενικής εξίσωσης**

Τα μοντέλα τύρβης μηδενικής εξίσωσης χρησιμοποιούν μια σταθερή τιμή για την ιξώδη περιδίνηση ή σχετική με τη μέση κατανομή ταχύτητας. Αυτό μειώνει σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις που έχουν σχέση με το μοντέλο k-ε. Οι Chen και Xu (1998) και οι Srebric και άλλοι (1999) έχουν εφαρμόσει αυτή τη μέθοδο για ορισμένες περιπτώσεις. Βρήκαν συμφωνία μεταξύ της υπολογιζόμενης και της πειραματικής ταχύτητας του αέρα και του θερμοκρασιακού προφίλ.

Προς το παρόν, καμία από τις άλλες εναλλακτικές λύσεις δεν έχει αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλη καθολικά για αντικαταστάσεις για το μοντέλο standard k-ε (Beausoleil-Morrison 2000).

### **2.5.4. Μειονεκτήματα των μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής**

Οι περισσότερες εφαρμογές CFD για την προσομοίωση της ροής του αέρα και της μεταφοράς θερμότητας σε ένα δωμάτιο χρησιμοποίησαν το μοντέλο turbulence k-ε. Ένας σημαντικός περιορισμός για τη χρήση αυτού του τύπου μοντέλου είναι ότι η λύση του συστήματος των εξισώσεων συγκλίνει σε ένα αποτέλεσμα «σταθερής κατάστασης». Δεδομένου ότι πολλές από τις καταστάσεις διασποράς των ρύπων που μας ενδιαφέρουν θα είναι παροδικές ή δυναμικές, παρουσιάζεται ένα σοβαρό μειονέκτημα για τη χρήση αυτού του τύπου μοντέλου υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Ένας περισσότερο πρακτικός περιορισμός είναι ο χρόνος που χρειάζεται το μοντέλο για να συγκλίνει σε μια λύση. Υπάρχει πάντα ένας

συμβιβασμός μεταξύ του αριθμού των πλεγματικών κελιών που χρησιμοποιούνται και συνεπώς στο μέγεθος του πλέγματος και στον χρόνο που απαιτείται για τον υπολογισμό. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα στη βιβλιογραφία από αναλύσεις που πραγματοποιούνται σε γρήγορο υπολογιστή, αλλά αυτές συχνά έχουν διαρκέσει από δεκάδες έως εκατοντάδες ώρες και τα μεγέθη πλέγματος είναι από 10.000 έως 30.000 κελιά. Έχει αναφερθεί ότι πήρε μια εβδομάδα ή περισσότερο για την προετοιμασία, την εκτέλεση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων για μία διαμόρφωση.

Σε μεγάλους χώρους η ροή αέρα τείνει να καθορίζεται από θερμικές επιδράσεις (σε σχέση με την παροχή αέρα από ένα μηχανικό σύστημα εξαερισμού) και μπορεί επίσης να είναι σημαντικός ο συνδυασμός θερμότητας με εξωτερικό αέρα (λόγω της σημαντικής περιοχής εξωτερικών τοίχων). Δυστυχώς, είναι δύσκολο για μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής να προσομοιώσουν την φυσική συναγωγή.

Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι περίπλοκα και η εφαρμογή τους απαιτεί πολύ εξειδικευμένες γνώσεις και ορθή τεχνική κρίση. Όταν εφαρμόζεται υπολογιστική ρευστομηχανική, είναι συχνά δύσκολο να δημιουργηθεί το μοντέλο, να εντοπιστούν και να προσδιοριστούν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες.

#### **2.5.5. Μελλοντική ανάπτυξη**

Υπάρχουν συνεχείς εξελίξεις στις περισσότερες πτυχές της χρήσης της υπολογιστικής ρευστομηχανικής για τη προσομοίωση της ροής και της ποιότητας του αέρα.

Όπως συζητήθηκε στην ενότητα 2.5.3, υπάρχουν μια σειρά από προσπάθειες για τη βελτίωση της τυρβώδους προσομοίωσης, ειδικά για τις περιοχές κοντά στα τοιχώματα. Πολλές από αυτές τις μεθόδους αναπτύσσονται για ροή αέρα σε εσωτερικούς χώρους.

Μια πρόκληση για τα τρέχοντα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι η προσομοίωση φυσικού εξαερισμού. Με δεδομένο το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τον φυσικό εξαερισμό, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην προσομοίωση και ιδιαίτερα στον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών.

Επίσης βελτιώνεται το εμπορικό λογισμικό, ιδίως όσον αφορά την πρόληψη των επαφών των χρηστών που βοηθούν τον λιγότερο έμπειρο χρήστη να ρυθμίσει και να εκτελέσει σωστά μια προσομοίωση και να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα.

Αρκετές ερευνητικές ομάδες έχουν συνδυάσει τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής με πολυζωνικά μοντέλα (βλ. Ενότητα 2.4). Οι Heiselberg και άλλοι (1998) δίνουν μια ανασκόπηση ορισμένων πρόσφατων εργασιών με χρήση μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής για προσομοίωση της ροής και της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων. Εκτός από τη βελτίωση της τυρβώδους προσομοίωσης,

επίκεινται βελτιώσεις στις περισσότερες περιοχές της προσομοίωσης με υπολογιστική ρευστομηχανική συμπεριλαμβανομένης της πρόληψης για:

- βελτιωμένες μεθόδους για την επίλυση των συστημάτων των εξισώσεων
- βελτιωμένα αριθμητικά σχήματα για τις συνθήκες συναγωγής
- βελτιωμένη υπολογιστική ακρίβεια και εκτίμηση σφάλματος
- καλύτερη μελέτη των κατασκευών με τη χρήση αδόμητων υπολογιστικών πλεγμάτων
- πιο εξελιγμένη αντιμετώπιση των ανοιγμάτων εισόδου και εξόδου και των οριακών στρωματικών ροών τοιχώματος
- διερεύνηση των μοντέλων συλλογής ηλιακής θερμότητας.

Η έκθεση Heiselberg περιλαμβάνει επίσης λεπτομέρειες σχετικά με ένα ευρύ φάσμα δοκιμών και συγκρίσεων της χρήσης των πολυζωνικών και των μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής με τα πειραματικά δεδομένα.

## **2.6. Επιλογή μοντέλου πρόγνωσης εσωτερικής ποιότητας αέρα**

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα κατάλληλα μοντέλα πρόγνωσης εσωτερικής ποιότητας αέρα είναι τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι καλή επιλογή για τους χρήστες οι οποίοι επικεντρώνονται στα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά της ροής του αέρα και στην διασπορά ρύπων σε μικρά τμήματα των κτιρίων (π.χ. μονόκλινα δωμάτια). Οι μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής μπορούν να προσομοιώσουν τη λεπτομερή ενδοζωνική ροή του αέρα και τις κατανομές θερμοκρασίας σε ένα δωμάτιο με ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και άλλων σχετικών εξισώσεων. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής χαρακτηρίζονται από τον πλούτο των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις πληροφορίες σχετικά με τη ροή του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σε ένα δωμάτιο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ

#### 3.1.Εισαγωγή

Ένα μοντέλο τύρβης είναι μια υπολογιστική διαδικασία για να κλείσει το σύστημα των μέσων εξισώσεων της ροής. Για τις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές δεν είναι αναγκαίο να επιλυθούν οι λεπτομέρειες των τυρβωδών διακυμάνσεων. Τα μοντέλα τύρβης επιτρέπουν τον υπολογισμό της μέσης ροής χωρίς πρώτα να υπολογιστεί το πλήρως χρονικά εξαρτώμενο πεδίο ροής. Το μόνο που χρειάζεται να είναι γνωστό είναι το πώς η τύρβη επηρεάζει τη μέση ροή. Πιο συγκεκριμένα χρειάζονται εκφράσεις για τις τάσεις Reynolds. Για να είναι ένα μοντέλο τύρβης χρήσιμο:

- Πρέπει να έχει ευρεία εφαρμογή,
- Να είναι ακριβές,
- Να είναι απλό,
- Να είναι υπολογιστικά προσιτό για τις προσομοιώσεις.

#### 3.2.Κοινά μοντέλα τύρβης

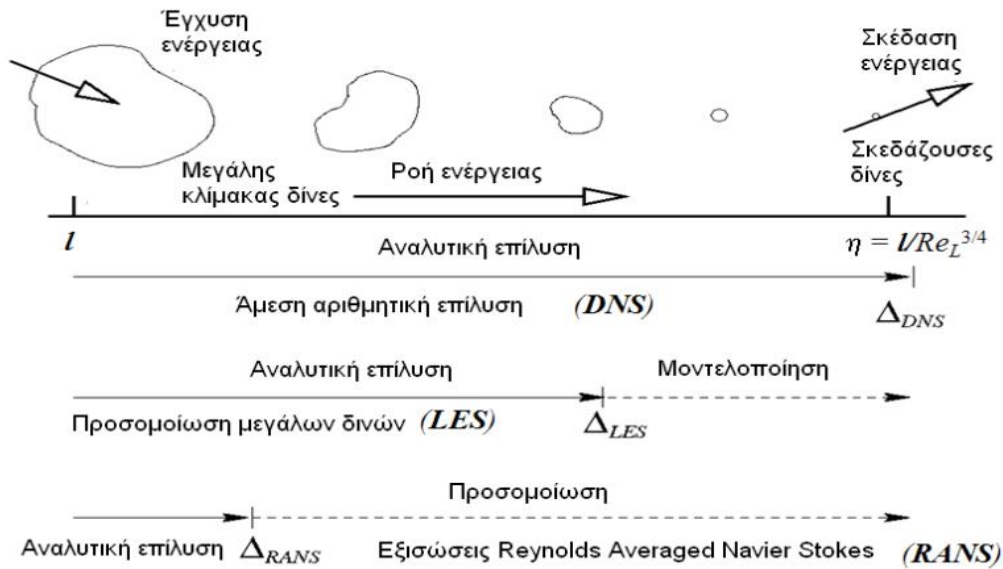
Τα κλασικά μοντέλα βασίζονται στις εξισώσεις RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes. Αυτά σύμφωνα με τον André Bakker (2005) ταξινομούνται συνήθως ως εξής:

1. Μοντέλα μηδενικής εξίσωσης: Μοντέλα μήκους ανάμιξης,
2. Μοντέλα μιας εξίσωσης: Spalart-Almaras,
3. Μοντέλα δύο εξισώσεων: Μοντέλα k-ε (standard, RNG, realisable), το μοντέλο k-ω και ASM,
4. Μοντέλα επτά εξισώσεων: Μοντέλα τάσεων Reynolds.

Ο αριθμός των εξισώσεων δηλώνει τον αριθμό των επιπρόσθετων μερικών διαφορικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν.

Η Προσομοίωση Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation) βασίζεται σε χωρικά φιλτραρισμένες εξισώσεις. Πραγματοποιούνται χρονικά εξαρτημένοι υπολογισμοί. Οι μεγάλες δίνες υπολογίζονται άμεσα. Για τις μικρές δίνες, η επίδραση τους στο πεδίο ροής λαμβάνεται υπόψη με ένα "μοντέλο υποπλέγματος" απ' το οποίο πολλές μορφές είναι διαθέσιμες.

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι μέθοδοι πρόβλεψης:



### 3.3.Υπόθεση Boussinesq

Πολλά μοντέλα τύρβης βασίζονται στην υπόθεση Boussinesq (1877):

- Είχε παρατηρηθεί πειραματικά ότι η τύρβη εξασθενεί εκτός κι αν υπάρχει διάτμηση σε ισοθερμικές ασυμπίεστες ροές.
- Βρέθηκε ότι η τύρβη αυξάνεται καθώς ο μέσος ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνεται.
- Ο Boussinesq πρότεινε το 1877 ότι οι τάσεις Reynolds θα μπορούσαν να συνδεθούν με το μέσο ρυθμό παραμόρφωσης.

Με βάση τα παραπάνω οι ιξώδεις τάσεις δίνονται από τη σχέση:

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

όπου τα  $i, j$ , και  $k$  συμβολίζουν τις  $x, y$  και  $z$  διευθύνσεις αντίστοιχα,

Παρόμοια, οι τάσεις Reynolds συνδέονται με το μέσο ρυθμό παραμόρφωσης:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

### 3.3.1. Το ιξώδες της τύρβης

Μία νέα ποσότητα εμφανίζεται: το ιξώδες της τύρβης  $\nu_t$ .

Η μονάδα της είναι η ίδια με εκείνη του μοριακού ιξώδους: Pa.s. Μπορεί να οριστεί και το κινηματικό ιξώδες της τύρβης:  $\nu_t = \mu_t/\rho$ . Η μονάδα του είναι  $m^2/s$ . Το ιξώδες της τύρβης δεν είναι ομοιογενή, δηλαδή μεταβάλλεται στο χώρο. Ωστόσο, θεωρείται σε πολλές περιπτώσεις ιστροπική δηλαδή είναι η ίδια σε όλες τις διευθύνσεις. Η υπόθεση αυτή ισχύει για πολλές ροές, αλλά όχι για όλες (π.χ. ροές με ισχυρό διαχωρισμό ή στροβιλισμό).

### 3.3.2. Ο τυρβώδης αριθμός Schmidt

Το ιξώδες της τύρβης χρησιμοποιείται για να κλείσουν οι εξισώσεις της ορμής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια παρόμοια υπόθεση για τους όρους της τυρβώδους διακύμανσης που εμφανίζονται στις εξισώσεις μεταφοράς βαθμωτών μεγεθών. Για μια βαθμωτή ποσότητα  $\phi(t) = \Phi + \phi'(t)$ :

$$-\overline{\rho u_i \phi'} = \Gamma_t \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}$$

όπου  $\Gamma_t$  είναι η τυρβώδης διάχυση. Η τυρβώδης διάχυση υπολογίζεται από το ιξώδες της τύρβης, χρησιμοποιώντας μία σταθερά που ονομάζεται τυρβώδης αριθμός Schmidt  $\sigma_t$ :

$$\sigma_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t}$$

Πειράματα έχουν δείξει ότι ο τυρβώδης αριθμός Schmidt είναι σχεδόν σταθερός με τυπικές τιμές μεταξύ 0.7 και 1.

### 3.3.3. Πρόβλεψη του ιξώδους της τύρβης

Τα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του ιξώδους της τύρβης είναι τα ακόλουθα:

- Μοντέλα μήκους ανάμιξης,
- Μοντέλο Spalart-Allmaras,
- Μοντέλο standard  $k-\epsilon$ ,
- Το μοντέλο  $k-\epsilon$  RNG,
- Το μοντέλο Realisable  $k-\epsilon$ ,
- Το μοντέλο  $k-\omega$ .

#### 3.3.3.1. Μοντέλο μήκους ανάμιξης

Σε αυτή την κατηγορία μοντέλων το κινηματικό ιξώδες της τύρβης εκφράζεται ως το γινόμενο της κλίμακας ταχύτητας και κλίμακας μήκους:

$$\nu_t (m^2 / s) \propto \mathcal{G} (m / s) \ell (m)$$

Εάν θεωρηθεί ότι η κλίμακα ταχύτητας είναι ανάλογη προς την κλίμακα μήκους και τις κλίσεις της ταχύτητας (ρυθμός διάτμησης, με διάσταση 1/s)

$$\mathcal{G} \propto \ell \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right|$$

προκύπτει το μοντέλο μήκους ανάμιξης Prandtl (1925):

$$\nu_t = \ell_m^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right|$$

Υπάρχουν αλγεβρικές εκφράσεις για το μήκος ανάμιξης για απλές δισδιάστατες ροές, όπως για ροές σε σωλήνες και κανάλια.

Τα πλεονεκτήματα αυτού το μοντέλου είναι:

- Εύκολο στην εφαρμογή,
- Γρήγοροι υπολογιστικοί χρόνοι,
- Καλές προβλέψεις για απλές ροές στις οποίες υπάρχουν πειραματικές συσχετίσεις για το μήκος ανάμιξης.

Τα μειονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι:

- Εντελώς ακατάλληλο να περιγράψει ροές όπου η κλίμακα μήκους της τύρβης μεταβάλλεται: οτιδήποτε με διαχωρισμό ή με κυκλοφορία.
- Υπολογίζει μόνο μέσες ιδιότητες της ροής και τυρβώδεις διατμητικές τάσεις.

Το παρόν μοντέλο μερικές φορές χρησιμοποιείται για απλές εξωτερικές ροές αέρα. Στα εμπορικά προγράμματα CFD αγνοείται σχεδόν τελείως.

### 3.3.3.2. Μοντέλο μιας εξίσωσης Spalart-Allmaras

Στο μοντέλο αυτό επιλύεται μια απλή εξίσωση διατήρησης, για το ιξώδες της τύρβης. Η εξίσωση διατήρησης περιέχει όρους συναγωγής και διάχυσης, καθώς και εκφράσεις για την παραγωγή και σκέδαση του  $\nu_t$ . Αναπτύχθηκε για χρήση σε μη δομημένους κώδικες στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Το μοντέλο είναι οικονομικό και ακριβές για ροές κοντά σε τοιχώματα και για ροές με μέτριο διαχωρισμό και επανακυκλοφορία. Το μοντέλο αδυνατεί σε πλήρως διαχωρισμένες ροές, σε ελεύθερες ροές και σε σκεδαζόμενη τύρβη.

### 3.3.3.3. Το μοντέλο $k$ - $\epsilon$

Το μοντέλο  $k$ - $\epsilon$  εστιάζει στους μηχανισμούς που επιδρούν στην τυρβώδη κινητική ενέργεια (ανά μονάδα μάζας)  $k$ . Η στιγμιαία κινητική ενέργεια  $k(t)$  μιας τυρβώδους ροής είναι το άθροισμα της μέσης κινητικής ενέργειας  $K$  και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $k$ :

$$K = \frac{1}{2} (U^2 + V^2 + W^2)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

$$k(t) = K + k$$

$\varepsilon$  είναι ο ρυθμός σκέδασης της  $k$ . Αν η  $k$  και η  $\varepsilon$  είναι γνωστά, μπορεί να μοντελοποιηθεί το ιξώδες της τύρβης ως εξής:

$$\nu_t \propto \mathcal{G} \ell \propto k^{1/2} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} = \frac{k^2}{\varepsilon}$$

### 3.3.3.3.1. Εξίσωση της κινητικής ενέργειας της μέσης ροής K

Η εξίσωση για τη μέση κινητική ενέργεια έχει ως εξής:

$$\frac{\partial \rho K}{\partial t} + \text{div}(\rho K \mathbf{U}) = \text{div} \left[ -P \mathbf{U} + 2\mu \mathbf{U} E_{ij} - \rho \overline{\mathbf{U} u_i' u_j'} - 2\mu E_{ij} \cdot E_{ij} - (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \cdot E_{ij} \right]$$

(I)            II                            (III)    (IV)            (V)            (VI)            (VII)

Εδώ  $E_{ij}$  είναι ο μέσος ρυθμός του τανυστή παραμόρφωσης. Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

- (I) ο ρυθμός μεταβολής της K,
- (II) η μεταφορά της K με συναγωγή,
- (III) η μεταφορά της K λόγω πίεσης,
- (IV) η μεταφορά της K λόγω τάσεων ιξώδους,
- (V) η μεταφορά της K λόγω τάσεων Reynolds,
- (VI) ρυθμός σκέδασης της K,
- (VII) παραγωγή τύρβης.

### 3.3.3.3.2. Τυρβώδης κινητική ενέργεια k

Η εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $k$  είναι η εξής:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[ -p' \mathbf{u}' + 2\mu \mathbf{u}' e_{ij} - \rho \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i' u_j'} - 2\mu e_{ij}' \cdot e_{ij}' + (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \cdot E_{ij}' \right]$$

(I)            II                            (III)    (IV)            (V)            (VI)            (VII)

Εδώ  $e_{ij}$  είναι η συνιστώσα διακύμανσης του ρυθμού του τανυστή παραμόρφωσης. Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

- (I) ο ρυθμός μεταβολής της  $k$ ,
- (II) η μεταφορά της  $k$  με συναγωγή,
- (III) η μεταφορά της  $k$  λόγω πίεσης,

- (IV) η μεταφορά της  $k$  λόγω τάσεων ιξώδους,
- (V) η μεταφορά της  $k$  λόγω τάσεων Reynolds,
- (VI) ποσοστό σκέδασης της  $k$ ,
- (VII) παραγωγή τύρβης.

### 3.3.3.3. Εξίσωση μοντέλου για την $k$

Η εξίσωση για την  $k$  περιέχει επιπρόσθετους όρους τυρβώδους διακύμανσης, που είναι άγνωστοι. Και πάλι χρησιμοποιώντας την υπόθεση Boussinesq, αυτοί οι όροι διακύμανσης μπορούν να συνδεθούν με τη μέση ροή. Συνήθως χρησιμοποιείται η ακόλουθη (απλοποιημένη) εξίσωση για την  $k$ .

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon$$

(I)
(II)
(III)
(IV)
(V)

Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

- (I) Ρυθμός αύξησης
- (II) Μεταφορά λόγω συναγωγής
- (III) Μεταφορά λόγω διάχυσης
- (IV) Ρυθμός παραγωγής
- (V) Ρυθμός καταστροφής

Ο αριθμός Prandtl  $\sigma_k$  συνδέει τη διάχυση της  $k$  με το ιξώδες των δινών. Συνήθως, χρησιμοποιείται μια τιμή ίση με 1.0.

### 3.3.3.3.4. Τυρβώδης σκέδαση

Για τη σκέδαση της τύρβης οι εξισώσεις είναι όμοιες. Ωστόσο, η εξίσωση  $k$  περιέχει κυρίως ποσότητες διακύμανσης, δηλώνοντας ότι οι μεταβολές στην  $k$  διέπονται κυρίως από τυρβώδεις αλληλεπιδράσεις. Επιπλέον, ο όρος (VII) είναι ίσος και στις δύο εξισώσεις. Αλλά στην πραγματικότητα είναι αρνητικός στην εξίσωση  $K$  (καταστροφή) και θετικός στην εξίσωση  $k$ : ενέργεια μεταφέρεται από τη μέση ροή στην τύρβη. Ο όρος ιξώδους σκέδασης (VI) στην εξίσωση  $k$   $-2\mu_t \overline{e_{ij} \cdot e_{ij}}$  περιγράφει τη σκέδαση της  $k$ , λόγω της εργασίας που επιτελείται από τις μικρότερες δίνες ως προς τις ιξώδεις τάσεις.

Μπορεί να οριστεί ο ρυθμός σκέδασης  $\varepsilon$  ανά μονάδα μάζας ως:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{e_{ij} \cdot e_{ij}}$$

### 3.3.3.3.5. Ρυθμός σκέδασης – αναλυτική εξίσωση

Η αναλυτική εξίσωση για το  $\varepsilon$  παρουσιάζεται στη συνέχεια. Λόγω των πολλών αγνώστων όρων υψηλότερης τάξης, η εξίσωση αυτή δεν μπορεί να λυθεί, και πρέπει να παραχθούν εξισώσεις απλοποιημένων μοντέλων.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = & - \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{\nu u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial u_i}{\partial x_1}} + 2 \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) \\ & - 2 \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial u_k}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_i} \frac{\partial u_1}{\partial x_k} \right) - 2 \nu u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k \partial x_1} \\ & - 2 \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial u_k}{\partial x_1} - 2 \left( \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_1} \right)^2 \end{aligned}$$

### 3.3.3.3.6. Εξίσωση μοντέλου για τη σκέδαση $\varepsilon$

Μια εξίσωση μοντέλου για την  $\varepsilon$  προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση  $k$  με τον όρο  $(\varepsilon/k)$  και εισάγοντας σταθερές. Συνήθως χρησιμοποιείται η ακόλουθη (απλοποιημένη) εξίσωση μοντέλου για το  $\varepsilon$ .

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varepsilon\mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

(I)            (II)            (III)            (IV)            (V)

Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

- (I) Ρυθμός αύξησης,
- (II) Μεταφορά λόγω συναγωγής,
- (III) Μεταφορά λόγω διάχυσης,
- (IV) Ρυθμός παραγωγής,
- (V) Ρυθμός καταστροφής,

Ο αριθμός Prandtl  $\sigma_\varepsilon$  συνδέει τη διάχυση της  $\varepsilon$  με το ιξώδες των δινών. Τυπικά χρησιμοποιείται μία τιμή ίση με 1.30. Συνήθως για τις σταθερές του μοντέλου  $C_{1\varepsilon}$  και  $C_{2\varepsilon}$  χρησιμοποιούνται τιμές ίσες με 1.44 και 1.92 αντίστοιχα.

### 3.3.3.3.7. Υπολογισμός των τάσεων Reynolds από την $k$ και την $\varepsilon$

Το ιξώδες της τύρβης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad C_\mu = 0.09$$

Οι τάσεις Reynolds στη συνέχεια υπολογίζονται ως εξής:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = 2\mu_t E_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\delta_{ij} = 1 \text{ if } i = j \text{ and } \delta_{ij} = 0 \text{ if } i \neq j$$

Σημειώνεται ότι το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$  οδηγεί όλες τις κάθετες τάσεις να είναι ίσες, το οποίο συνήθως δεν είναι ακριβές.

### 3.3.3.3.8. Συζήτηση για το μοντέλο $k$ - $\varepsilon$

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου  $k$ - $\varepsilon$  είναι:

- Σχετικά απλό στην εφαρμογή του,
- Οδηγεί σε σταθερούς υπολογισμούς που συγκλίνουν σχετικά εύκολα,
- Δίνει λογικές προβλέψεις για πολλές ροές.

Τα μειονεκτήματα του μοντέλου είναι:

- Οι προβλέψεις είναι ανεπαρκείς:
  - Για στροβιλιζόμενες και περιστρεφόμενες ροές,
  - Για ροές με ισχυρό διαχωρισμό,
  - Για αξονοσυμμετρικά τζετ,
  - Για ορισμένες ανεμπόδιστες ροές,
  - Για πλήρως αναπτυγμένες ροές σε μη κυκλικούς αγωγούς.
- Ισχύει μόνο για πλήρως τυρβώδεις ροές,
- Απλοϊκή εξίσωση για τη σκέδαση  $\varepsilon$ .

### 3.3.3.4. Περισσότερα μοντέλα δύο εξισώσεων

Το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$  αναπτύχθηκε στις αρχές του 1970. Τα πλεονεκτημά του, καθώς και οι ελλείψεις του είναι καλά τεκμηριωμένα. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την ανάπτυξη μοντέλων δύο εξισώσεων που βελτιώνουν το μοντέλο standard  $k$ - $\varepsilon$ . Κάποια από αυτά τα μοντέλα δύο εξισώσεων είναι:

- Το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$  RNG,
- Το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$  realisable,



- Το μοντέλο  $k-\omega$ ,
- Το μοντέλο αλγεβρικών τάσεων,
- Μη-γραμμικά μοντέλα.

#### 3.3.3.4.1.Βελτίωση: Το μοντέλο $k-\epsilon$ RNG

Οι εξισώσεις  $k-\epsilon$  προέρχονται από την εφαρμογή μιας αυστηρής στατιστικής τεχνικής (Renormalization Group Method) στις στιγμιαίες εξισώσεις Navier-Stokes. Το μοντέλο  $k-\epsilon$  RNG είναι παρόμοιο στην μορφή με τις standard  $k-\epsilon$  εξισώσεις, αλλά περιλαμβάνει:

- Ένα επιπρόσθετο όρο στην εξίσωση της σκέδασης  $\epsilon$  για την αλληλεπίδραση ανάμεσα στη σκέδαση της τύρβης και της μέσης διάτμησης,
- Επίδραση της στροβιλότητας στην τύρβη,
- Αναλυτικό τύπο για τον τυρβώδη αριθμό Prandtl,
- Διαφοροποιημένο τύπο για το ιξώδες.

Το μοντέλο  $k-\epsilon$  RNG παρέχει βελτιωμένες προβλέψεις για υψηλές καμπυλότητες των γραμμών της ροής και ρυθμού παραμόρφωσης, για μεταβατικές ροές και για μεταφορά θερμότητας στα τοιχώματα και στη μάζα.

#### 3.3.3.4.2.Εξισώσεις RNG $k-\epsilon$

Τυρβώδης κινητική ενέργεια:

$$\underbrace{\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i}}_{\text{(I)}} = \underbrace{\mu_t S^2}_{\text{(II)}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right)}_{\text{(III)}} - \underbrace{\rho \epsilon}_{\text{(IV)}}$$

όπου

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

(I) Συναγωγή,

(II) Παραγωγή,

(III) Διάχυση,

(IV) Σκέδαση

Ρυθμός σκέδασης:

$$\underbrace{\rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}}_{(I)} = \underbrace{C_{1\varepsilon} \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) \mu_t S^2}_{(II)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right)}_{(III)} - \underbrace{C_{2\varepsilon} \rho \left( \frac{\varepsilon^2}{k} \right)}_{(IV)} - \underbrace{R}_{(V)}$$

Όπου (I) προέρχονται από την χρήση της θεωρίας RNG.

Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

(I) Συναγωγή,

(II) Παραγωγή,

(III) Διάχυση,

(IV) Καταστροφή,

(V) Πρόσθετος όρος που σχετίζεται με τη μέση τάση και τις ποσότητες τύρβης

### 3.3.3.4.3. Το μοντέλο realisable $k$ - $\varepsilon$

Το μοντέλο realisable  $k$ - $\varepsilon$  συμμερίζεται την ίδια εξίσωση τυρβώδης κινητικής ενέργειας, όπως το μοντέλο standard  $k$ - $\varepsilon$ . Χαρακτηρίζεται από την βελτιωμένη εξίσωση για το  $\varepsilon$  και από την μεταβλητή  $C_\mu$  αντί για μια σταθερά. Το μοντέλο έχει βελτιωμένη απόδοση για ροές που περιλαμβάνουν επίπεδα και στρόγγυλα τζετ (προβλέπει την κατανομή γύρω από το τζετ σωστά), για ροές με οριακά στρώματα κάτω από ισχυρά αρνητικές κλίσεις πίεσης ή διαχωρισμού, για ροές περιστροφής, ή ανακυκλοφορίας και για ροές με έντονη ακρίβεια καμπυλότητας. Ξεχωρίζει σε σχέση με το μοντέλο standard  $k$ - $\varepsilon$  ως προς την εναλλακτική φόρμουλα της ιξώδους τύρβης:

$$\mu_t \equiv \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Όπου  $C_\mu = \frac{1}{A_o + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}}$  τώρα είναι μεταβλητή

(Τα  $A_0$ ,  $A_s$ , και  $\mu_t$  είναι συναρτήσεις των κλίσεων ταχύτητας)

Η εξίσωση διασφαλίζει θετικές φυσικές τάσεις:  $\overline{u_i^2} \geq 0$  και την ανισότητα του

$$\text{Schwarz: } (\overline{u_i u_j})^2 \leq \overline{u_i^2} \overline{u_j^2}$$

Και ως προς τη νέα εξίσωση μετάδοσης του ρυθμού σκέδασης,  $\varepsilon$ :

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}_{(I)} + \underbrace{\rho c_1 S \varepsilon}_{(II)} - \underbrace{\rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}}_{(III)} + \underbrace{c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} c_{3\varepsilon} G_b}_{(IV)}$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

(I) Διάχυση

(II) Δημιουργία

(III) Καταστροφή

(IV) Άνοση

Εξισώσεις μοντέλου realisable  $k$ - $\varepsilon$   $C_\mu$  :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}}, \quad U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$$

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \varphi, \quad \varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \sqrt{6} W, \quad W = \frac{S_{ij} S_{ji} S_{ki}}{\tilde{S}}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$$

Σύμφωνα με τον Boussinesq η σχέση για το ιξώδες είναι:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad ; \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Φυσικό συστατικό:

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3} k - 2C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial x}$$

Η φυσική τάση θα είναι αρνητική αν:

$$\frac{k}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial x} > \frac{1}{3C_\mu} \approx 3.7$$

#### 3.3.3.4.4. Το μοντέλο $k-\omega$

Το μοντέλο  $k-\omega$  είναι ένα ακόμα μοντέλο δύο εξισώσεων. Σε αυτό το μοντέλο το  $\omega$  είναι μια αντίστροφη χρονική κλίμακα που σχετίζεται με την τύρβη. Αυτό το μοντέλο λύνει δύο επιπλέον μερικές διαφορικές εξισώσεις. Μια τροποποιημένη έκδοση της εξίσωσης  $k$  που χρησιμοποιείται στο μοντέλο  $k-\varepsilon$  και μια εξίσωση μεταφοράς για το  $\omega$ . Η ιξώδης τύρβη υπολογίζεται στη συνέχεια ως εξής:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$$

Η αριθμητική συμπεριφορά του είναι παρόμοια με εκείνη των μοντέλων  $k-\varepsilon$ . Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από ορισμένα από τα ίδια μειονεκτήματα, όπως την παραδοχή ότι το  $\mu_t$  είναι ισοτροπικό.

#### 3.3.3.4.5. Το αλγεβρικό μοντέλο τάσεων

Σε αυτό το μοντέλο λύνονται οι ίδιες εξισώσεις  $k$  και  $\varepsilon$  όπως και στο μοντέλο standard  $k-\varepsilon$ . Ωστόσο, η υπόθεση Boussinesq δεν χρησιμοποιείται. Πρώτα εξάγονται οι πλήρεις εξισώσεις τάσεων Reynolds, και στη συνέχεια γίνονται κάποιες απλουστευτικές υποθέσεις που επιτρέπουν την παραγωγή των αλγεβρικών εξισώσεων για τις τάσεις Reynolds. Έτσι πρέπει να επιλυθούν λιγότερες μερικές διαφορικές εξισώσεις από ότι στα πλήρη μοντέλα τάσεων Reynolds (RMS) και είναι πολύ πιο εύκολο να εφαρμοστεί. Οι αλγεβρικές εξισώσεις δεν είναι πολύ σταθερές, ωστόσο, και ο υπολογιστικός χρόνος είναι σημαντικά περισσότερος από ότι με στο μοντέλο standard  $k-\varepsilon$ . Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε στη δεκαετία του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η έρευνα συνεχίζεται, αλλά το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται σπάνια στη βιομηχανία τώρα που οι περισσότεροι εμπορικοί κώδικες CFD έχουν εφαρμογές πλήρων RSM διαθέσιμες.

#### 3.3.3.4.6. Μη γραμμικά μοντέλα

Το μοντέλο standard  $k-\varepsilon$  επεκτάθηκε περιλαμβάνοντας δεύτερης και μερικές φορές τρίτης τάξης όρους στην εξίσωση για τις τάσεις Reynolds. Ένα παράδειγμα είναι το μοντέλο Speziale:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = -\frac{2}{3} k \delta_{ij} + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} 2E_{ij} - 4C_D C_\mu^2 \frac{k^3}{\varepsilon^2} * f(E, \partial E / \partial t, \mathbf{u}, \partial U / \partial x)$$

Εδώ η  $f(\dots)$  είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση του τανυστή παραμόρφωσης, στον του πεδίου ταχύτητας και των κλίσεων, και του ρυθμός μεταβολής του τανυστή παραμόρφωσης. Το μοντέλο standard  $k-\varepsilon$  περιορίζεται σε μια ειδική περίπτωση αυτού του μοντέλου για ροές με χαμηλά ποσοστά παραμόρφωσης. Αυτά τα μοντέλα είναι σχετικά νέα και δεν έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί ευρέως.

### 3.3.3.5. Μοντέλα τάσεων Reynolds (RSM)

Τα RSM κλείνουν τις εξισώσεις μέσω των Reynolds Navier-Stokes επιλύοντας επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς για τις έξι ανεξάρτητες τάσεις Reynolds. Οι εξισώσεις μεταφοράς παρέχουν μέσω των Reynolds το γινόμενο των εξισώσεων ορμής με μια κυμαινόμενη ιδιότητα. Το κλείσιμο απαιτεί επίσης μία εξίσωση για την τυρβώδη σκέδαση. Αποφεύγεται η υπόθεση ισοτροπικής ιξώδους περιδίνησης, με αποτέλεσμα οι εξισώσεις να περιέχουν όρους που πρέπει να προσομοιωθούν. Το RSM είναι καλό για την ακριβή πρόβλεψη των σύνθετων ροών. Λαμβάνει υπ' όψιν την ακρίβεια της καμπυλότητας, τον στροβιλισμό, την περιστροφή και τα υψηλά ποσοστά τάσης. Έχει εφαρμογή σε ροές κυκλώνων, σε στροβιλώδεις ροές καυστήρα, σε περιστρεφόμενες διόδους ροών, σε δευτερεύουσες ροές και σε ροές με διαχωρισμό.

Η ακριβής εξίσωση για τη μεταφορά των τάσεων Reynolds είναι:

\_\_\_\_\_

Αυτή η εξίσωση μπορεί να διαβαστεί ως εξής:

ρυθμός μεταβολής του  $\overline{\tau_{ij}}$ , θετικός

μεταφορά του  $\overline{\tau_{ij}}$  με συναγωγή, ισοδύναμη

ποσοστό παραγωγής του  $\overline{\tau_{ij}}$ , θετικό

μεταφορά με διάχυση του  $\overline{\tau_{ij}}$ , αρνητική

ρυθμός σκέδασης  $\overline{\tau_{ij}}$ , θετικός

μεταφορά λόγω των αλληλεπιδράσεων τυρβώδους πίεσης έντασης  $\overline{\tau_{ij}}$ , θετική

μεταφορά λόγω περιστροφής  $\overline{\tau_{ij}}$ .

Αυτή η εξίσωση περιγράφει έξι μερικές διαφορικές εξισώσεις, μία για τη μεταφορά της κάθε μίας από τις έξι ανεξάρτητες τάσεις Reynolds. Οι διάφοροι όροι προσομοιώνονται ως εξής: Η παραγωγή του  $\overline{\tau_{ij}}$  διατηρεί την ακριβή μορφή της, η μεταφορά με διάχυση του  $\overline{\tau_{ij}}$  προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας μια υπόθεση διάχυσης κλίσης, ο ρυθμός σκέδασης  $\overline{\tau_{ij}}$ , σχετίζεται με το  $\epsilon$ , όπως υπολογίζεται από την standard εξίσωση  $\epsilon$ , αν και πιο προηγμένα μοντέλα  $\epsilon$  είναι διαθέσιμα επίσης. Οι αλληλεπιδράσεις έντασης πίεσης  $\overline{\tau_{ij}}$  είναι πολύ σημαντικές. Περιλαμβάνουν τις διακυμάνσεις πίεσης λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ των δινών, και λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ δινών και περιοχών της ροής με διαφορετική μέση ταχύτητα. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι να κάνει τις φυσικές τάσεις πιο ισοτροπικές και να μειώσει τις διατμητικές τάσεις. Αυτό δεν αλλάζει την συνολική τυρβώδη

κινητική ενέργεια. Είναι ένας όρος που προσομοιώνεται δύσκολα και είναι διαθέσιμα διάφορα μοντέλα. Γνωστό είναι το μοντέλο Launder. Επίσης είναι διαθέσιμα βελτιωμένα μοντέλα αστάθειας. Η μεταφορά λόγω περιστροφής διατηρεί την ακριβή μορφή της.

Οι εξισώσεις των RSM είναι οι εξής:

$$\text{Ακρίβεια παραγωγής: } P_{ij} = - \left( R_{im} \frac{\partial U_j}{\partial x_m} + R_{jm} \frac{\partial U_i}{\partial x_m} \right)$$

Ακρίβεια μεταφοράς λόγω διάχυσης:

$$D_{ij} = \frac{\partial J_{ijk}}{\partial x_k} = \overline{u_i' u_j' u_k'} + \overline{p' (\delta_{jk} u_i' + \delta_{ik} u_j')}$$

$$\text{Μοντέλο μεταφοράς λόγω διάχυσης: } D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m} \right) = \text{div} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \text{grad}(R_{ij}) \right)$$

Το  $\nu_t$  είναι το τυρβώδες κινηματικό ιξώδες υπολογισμένο με τον καθιερωμένο τρόπο.

$$\text{Ακρίβεια σκέδασης: } \varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}$$

$$\text{Μοντέλο σκέδασης: } \varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij}$$

$$\text{Ακρίβεια έντασης πίεσης: } \Pi_{ij} = -p' \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)$$

$$\text{Μοντέλο έντασης πίεσης: } \Pi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} (R_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}) - C_2 (P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij})$$

Με  $P$  συμβολίζεται η πίεση

$$\text{Ακριβής όρος περιστροφής: } \Omega_{ij} = -2\omega_k (R_{jm} e_{ikm} + R_{im} e_{jkm})$$

Το  $e_{ijk}$  ισούται με -1,0 και 1 αναλόγως τους δείκτες

Με  $\omega_k$  συμβολίζεται το διάνυσμα περιστροφής.

### 3.4.Συμπεράσματα

Οι οριακές συνθήκες χαρακτηρίζουν την τύρβη στις εισόδους και εξόδους (πιθανή αντίστροφη ροή). Τα μοντέλα  $k$ - $\epsilon$  απαιτούν  $k$  και  $\epsilon$ . Το μοντέλο τάσεων Reynolds απαιτεί  $R_{ij}$  και  $\epsilon$ . Άλλες παράμετροι των οριακών συνθηκών είναι η ένταση της τύρβης και η κλίμακα μήκους. Η κλίμακα μήκους σχετίζεται με το μέγεθος των μεγάλων δινών που περιέχουν την περισσότερη ενέργεια. Άλλες παράμετροι είναι οι ροές οριακού στρώματος και οι ροές σε αγωγούς κάτω από το πάτωμα όπως επίσης η ένταση της τύρβης και η υδραυλική διάμετρος (ιδανική για ροή σε κλειστούς αγωγούς). Τέλος υπάρχει και η ένταση της τύρβης και ο λόγος ιξώδους τύρβης (για εξωτερικές ροές  $1 < \mu_t / \mu < 10$ ).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΥΡΒΗΣ

### REALISABLE $k$ - $\epsilon$ ΣΕ ΕΝΑ ΑΠΛΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

### ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ

#### 4.1. Εισαγωγή

Η περιβαλλοντική σχεδίαση σε εσωτερικούς χώρους απαιτεί λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του αέρα, όπως την ταχύτητα του αέρα, τη θερμοκρασία, την υγρασία και τις συγκεντρώσεις των ρύπων. Επειδή οι πειραματικές μετρήσεις δεν είναι ένα πρακτικό εργαλείο για το σχεδιασμό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες αριθμητικές μέθοδοι όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο που προσομοιώνουν το εσωτερικό περιβάλλον. Μια δημοφιλής προσέγγιση είναι η μέθοδος της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής.

Σε ένα πρόβλημα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής όταν μελετάμε τύρβη και χρησιμοποιούμε τη μεθοδολογία RANS πρέπει να επιλέξουμε μοντέλο τύρβης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα απαντήσουμε στο ερώτημα: Πιο μοντέλο τύρβης είναι πιο αξιόπιστο για την εσωτερική ποιότητα του αέρα, το standard  $k$ - $\epsilon$  ή το realisable  $k$ - $\epsilon$ ;

#### 4.2. Περιγραφή του αριθμητικού κώδικα FLUENT

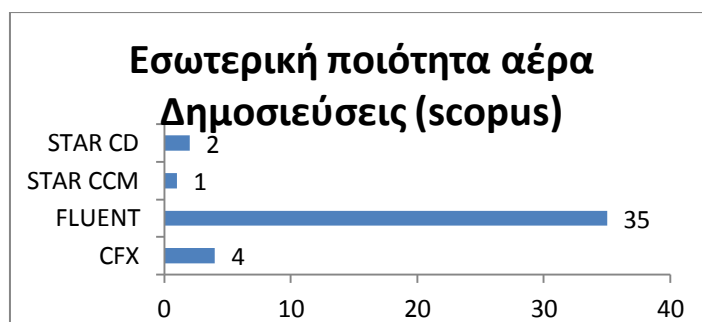
##### 4.2.1. Γενικά

Το FLUENT είναι ένας επιλυτής Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) που παρέχει ένα ευρύ φάσμα προηγμένων φυσικών μοντέλων για τη ροή του υγρού και για εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας συμπεριλαμβανομένου πολυφασικής ροής. Το ANSYS FLUENT παρέχει ολοκληρωμένες δυνατότητες μοντελοποίησης για ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων ασυμπίεστης και συμπιεστής, στρωτής και τυρβώδους ροής ρευστού. Μπορούν να διεξαχθούν αναλύσεις σταθερής ή παροδικής κατάστασης. Στο ANSYS FLUENT, ένα ευρύ φάσμα των μαθηματικών μοντέλων για φαινόμενα μεταφοράς (όπως μεταφορά θερμότητας και χημικές αντιδράσεις) συνδυάζεται με την ικανότητα μοντελοποίησης πολύπλοκων γεωμετριών. Παραδείγματα εφαρμογής του ANSYS FLUENT περιλαμβάνουν στρωτές μη Νευτώνειες ροές σε διαδικασία εξοπλισμού · συζυγούς μεταφοράς θερμότητας σε στροβιλομηχανές και σε εξαρτήματα κινητήρων αυτοκινήτων · καύση κονιοποιημένου άνθρακα σε μπόιλερ · εξωτερικές αεροδυναμικές · ροή μέσω συμπιεστών, αντλιών και ανεμιστήρων · και πολυφασικές ροές σε στήλες φυσαλίδων και fluidized beds. Για να καταστεί δυνατή η μοντελοποίηση της ροής του ρευστού και των σχετικών φαινομένων μεταφοράς σε βιομηχανικό εξοπλισμό και σε διαδικασίες, παρέχονται διάφορα χρήσιμα χαρακτηριστικά. Αυτά περιλαμβάνουν πορώδη μέσα, συγκεντρωμένων παραμέτρων (ανεμιστήρα και εναλλάκτη



θερμότητας), streamwise-περιοδική ροή και μεταφορά θερμότητας, στροβιλισμού, και κινούμενα πλαίσια μοντέλων αναφοράς. Η οικογένεια κινούμενων πλαισίων μοντέλων αναφοράς περιλαμβάνει τη δυνατότητα να διαμορφώσει μονά ή πολλαπλά πλαίσια αναφοράς. Μία μέθοδος χρονικής ακρίβειας συρόμενου πλέγματος, χρήσιμη για μοντελοποίηση σε πολλαπλά στάδια εφαρμογών στροβιλομηχανών, για παράδειγμα, παρέχεται επίσης, μαζί με το μοντέλο επίπεδης ανάμιξης για υπολογιστικά πεδία μέσης χρονικής ροής. Μία άλλη πολύ χρήσιμη ομάδα μοντέλων του ANSYS FLUENT είναι το σύνολο της ελεύθερης επιφάνειας και των πολυφασικών μοντέλων ροής. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση ροών αερίου-υγρού, αερίου-στερεού, υγρού-στερεού, και του φυσικού αερίου-υγρού-στερεού. Για αυτούς τους τύπους προβλημάτων, το ANSYS FLUENT παρέχει τον όγκο του υγρού (VOF), σε μείγμα, και σε μοντέλα Euler, καθώς και το διακριτό μοντέλο φάσης (DPM). Η DPM εκτελεί Lagrangian υπολογισμούς τροχιάς για διασπαρμένες φάσεις (σωματίδια, σταγονίδια, ή φυσαλίδες), συμπεριλαμβανομένου συνδυασμού με τη συνεχή φάση. Παραδείγματα πολυφασικών ροών περιλαμβάνουν ροές καναλιού, σπρέι, καθίζησης, διαχωρισμού, και σπηλαιώσης. Τα στιβαρά και ακριβή μοντέλα τύρβης είναι ένα ζωτικής σημασίας συνθετικό της καταλληλότητας των μοντέλων ANSYS FLUENT. Τα μοντέλα τύρβης που παρέχονται έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής, και περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα άλλων φυσικών φαινομένων, όπως η άνωση και η συμπίεση. Ιδιαίτερη προσοχή έχει αφιερωθεί στην αντιμετώπιση περιπτώσεων ακρίβειας οριακού τοιχώματος μέσω της χρήσης εκτεταμένων συναρτήσεων τοιχώματος και μοντέλων ζωνών. Διάφορα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας μπορούν να μοντελοποιηθούν, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών, εξαναγκασμένων, και μικτής συναγωγής με ή χωρίς σύζευξη μεταφοράς θερμότητας, πορώδη μέσα, κλπ. Το σύνολο των μοντέλων ακτινοβολίας και των σχετιζόμενων υπομοντέλων για επιμέρους μέσα μοντελοποίησης είναι γενικά και μπορούν να λάβουν υπόψη τις επιπλοκές της καύσης. Μια ιδιαίτερη δύναμη του ANSYS FLUENT είναι η ικανότητά του να μοντελοποιεί φαινόμενα καύσης που χρησιμοποιούν μια ποικιλία μοντέλων, συμπεριλαμβανομένων μοντέλων απαγωγής δίνης και συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Μια σειρά από άλλα μοντέλα τα οποία είναι πολύ χρήσιμα για εφαρμογές ροής αντίδρασης είναι επίσης διαθέσιμη, συμπεριλαμβανομένου της καύσης του άνθρακα και των σταγονιδίων, της επιφανειακής αντίδρασης, και των μοντέλων ρυπογόνου σχηματισμού.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται ο αριθμός των δημοσιεύσεων που έχουν γίνει για εσωτερική ποιότητα αέρα χρησιμοποιώντας γνωστούς CFD κώδικες.



### 4.3. Μέθοδος αξιολόγησης των αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση ενός μοντέλου ή μιας μεθοδολογίας πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις μεταβλητές πρόβλεψης του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις.

Οι μεταβλητές που αξιολογούνται είναι οι εξής:

1. Η ταχύτητα της ροής του αέρα  $u$  ,
2. Η θερμοκρασία κοντά στα τοιχώματα  $T$  ,
3. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια  $k$  ,
4. Ο ρυθμός σκέδασης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $\epsilon$  .

Ο κώδικας FLUENT δίνει τις τιμές των προβλέψεων στις ακριβείς θέσεις των αισθητήρων των πειραματικών μετρήσεων.

#### 4.3.1. Διαγράμματα αξιολόγησης

Κατά τη διερευνητική ανάλυση των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου, οι αριθμητικές προβλέψεις και οι πειραματικές μετρήσεις μπορούν να συγκριθούν γραφικά με διάφορους τρόπους είτε χωρικά είτε χρονικά. Καθώς η μεθοδολογία RANS παράγει μέσες τιμές των μεταβλητών η σύγκριση περιορίζεται στο χώρο. Τα διαγράμματα έχουν ποιοτικό χαρακτήρα, επισημαίνοντας τα βασικά χαρακτηριστικά των πειραματικών δεδομένων και αναδεικνύοντας τα μειονεκτήματα των μοντέλων. Κάποιοι ενδεικτικοί τύποι διαγραμμάτων είναι:

- Τα διαγράμματα διασποράς (scatter plots),
- Τα ποιοτικά διαγράμματα (contour plots),
- Τα διαγράμματα απεικόνισης κάθετων προφίλ ενός μεγέθους (vertical profile plots),
- Τα διαγράμματα διανύσματος (vector plots).

Τα διαγράμματα διασποράς είναι ένας αξιολογικός τρόπος για τη γραφική απεικόνιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων ως προς τις παρατηρήσεις, καθώς είναι δυνατή η διερεύνηση συστηματικών τάσεων υποτίμησης/υπερεκτίμησης των πειραματικών δεδομένων από το μοντέλο. Επίσης χρησιμοποιούνται και τα διαγράμματα απεικόνισης κάθετων προφίλ της ταχύτητας και της θερμοκρασίας προκειμένου να εξετασθεί η κάθετη έκταση της ταχύτητας και της θερμοκρασίας σε ορισμένες περιπτώσεις. Τέλος χρησιμοποιούνται και τα διαγράμματα διανύσματος της ταχύτητας και ποιοτικά διαγράμματα μέτρου ταχύτητας, θερμοκρασίας, τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ρυθμού σκέδασης τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

### 4.3.2. Δείκτες αξιολόγησης

Στη βιβλιογραφία η ποσοτική σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των παρατηρήσεων πραγματοποιείται συνήθως με στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης.

Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται συνήθως για προβλήματα διασποράς είναι:

- Η κλασματική μεροληψία (fractional bias (FB)):

$$FB = \frac{\overline{C_o} - \overline{C_p}}{0.5(\overline{C_o} + \overline{C_p})} \quad (4.1)$$

όπου  $\overline{C_o}$  είναι η μέση τιμή του πειράματος και  $\overline{C_p}$  είναι η μέση τιμή του μοντέλου.

Η κλασματική μεροληψία είναι μία γραμμική μέτρηση της μέσης απόκλισης και εμφανίζει, αν υπάρχουν, συστηματικά σφάλματα. Από τον ορισμό του προκύπτει ότι ένα αρνητικό  $FB$  υποδηλώνει μία συστηματική υπερεκτίμηση του μοντέλου και αντιστρόφως.

- Το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (normalized mean square error (NMSE)):

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{C_o C_p} \quad (4.2)$$

Ο δείκτης αυτός είναι μία μέτρηση της διασποράς των δεδομένων και φανερώνει συστηματικά και σφάλματα τυχαιότητας.

- Το κλάσμα των προβλέψεων μέσα στο διπλάσιο/υποδιπλάσιο εύρος των παρατηρήσεων (fraction of predictions within a factor of two of observations, FAC2):

$$FAC2 = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad \text{όπου } N_i \begin{cases} 1, & 0.5 \leq \frac{C_{pi}}{C_{oi}} \leq 2.0 \\ 0, & \frac{C_{pi}}{C_{oi}} < 0.5 \text{ ή } \frac{C_{pi}}{C_{oi}} > 2.0 \end{cases} \quad (4.3)$$

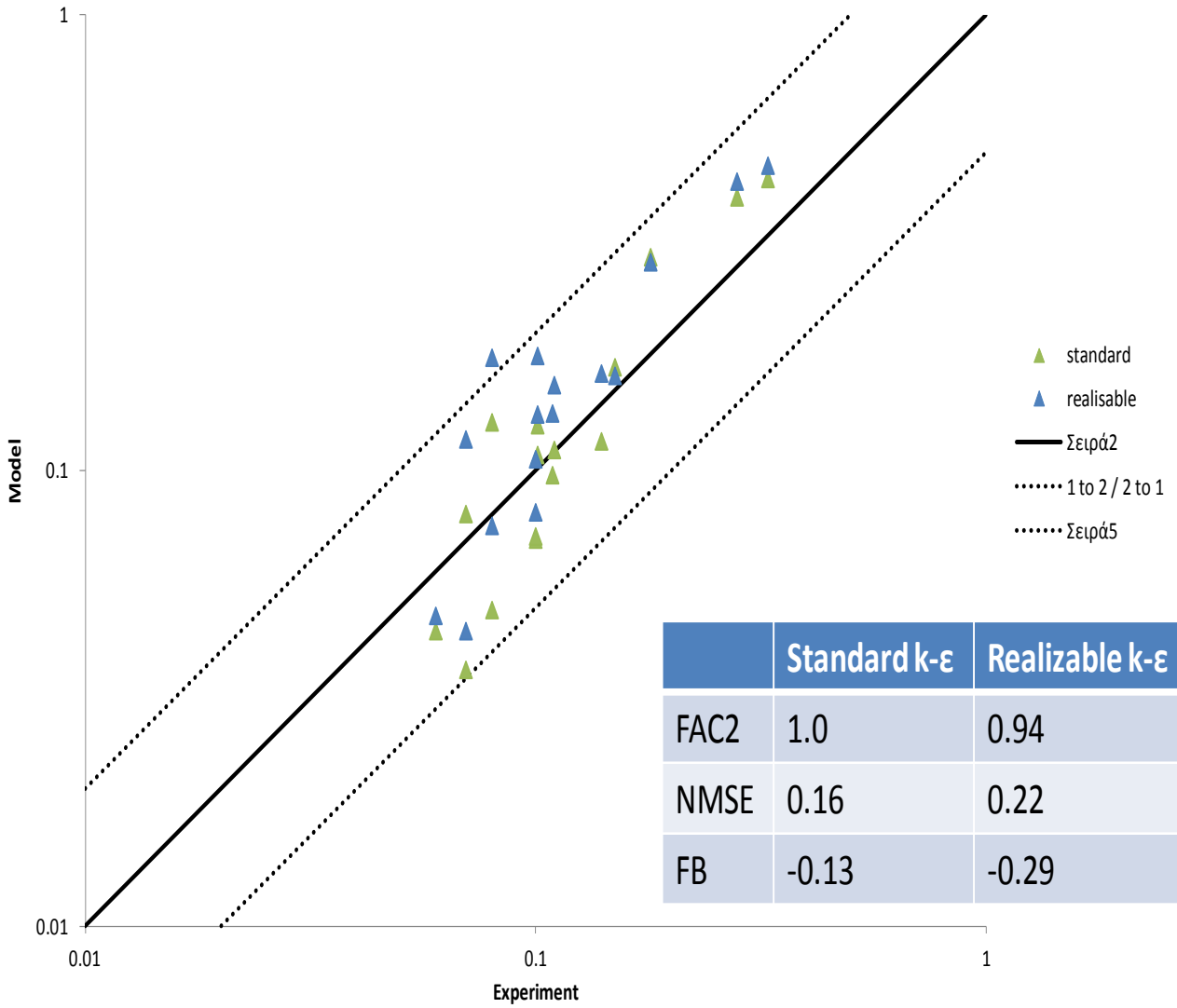
Το FAC2 υπολογίζει το ποσοστό των προβλέψεων που βρίσκονται μέσα στο διπλάσιο/υποδιπλάσιο εύρος των παρατηρήσεων με βάση το λόγο της πρόβλεψης  $C_{pi}$  προς την παρατήρηση  $C_{oi}$ .

Για ένα ιδανικό μοντέλο θα πρέπει να ισχύει  $FB$  και  $NMSE = 0$  και  $FAC2 = 1$  (δηλαδή 100%). Με βάση τη Δράση COST 732 αποδεκτά θεωρούνται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου για τα οποία ισχύει ότι:

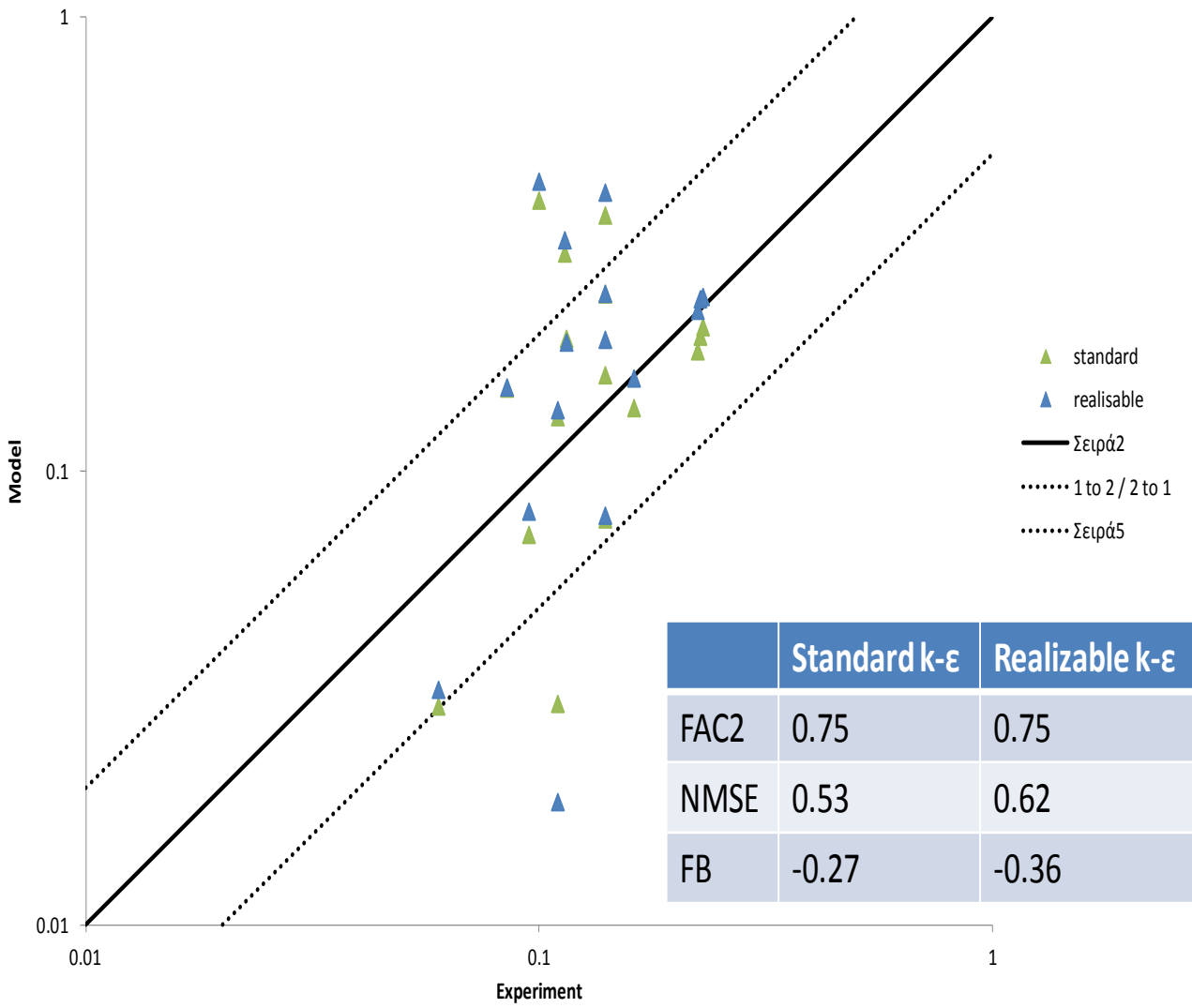
$$\begin{aligned} |FB| &< 0.3 \\ NMSE &< 4 \\ FAC2 &> 0.5 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Μαθηματικά ο δείκτης FAC2 δε μπορεί να υπολογιστεί όταν οι παρατηρήσεις εμφανίζουν μηδενικές τιμές. Για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων επιλέγεται συνήθως μία ελάχιστη τιμή (threshold), που βασίζεται είτε στην ακρίβεια του οργάνου ή στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Όταν η παρατηρούμενη τιμή βρίσκεται κάτω από την ελάχιστη τιμή τότε το συγκεκριμένο ζεύγος παρατήρηση-πρόβλεψη απομακρύνεται από την αξιολόγηση. Η ελάχιστη τιμή εφαρμόζεται συνήθως και για τους άλλους δείκτες αξιολόγησης. Στην παρούσα διπλωματική ακολουθείται μια νέα προσέγγιση κατά την οποία απομακρύνεται ένα ζεύγος μόνο όταν η παρατήρηση εμφανίζει μηδενική τιμή για να μπορεί μαθηματικά να υπολογιστεί ο δείκτης FAC2 (Εξίσωση 4.4). Υπό αυτές τις συνθήκες η αξιολόγηση γίνεται αρκετά αυστηρή για το μοντέλο καθώς συμμετέχουν στον υπολογισμό των δεικτών και οι μικρές τιμές που θεωρούνται αναπόσπαστο κομμάτι της φυσικής του προβλήματος.

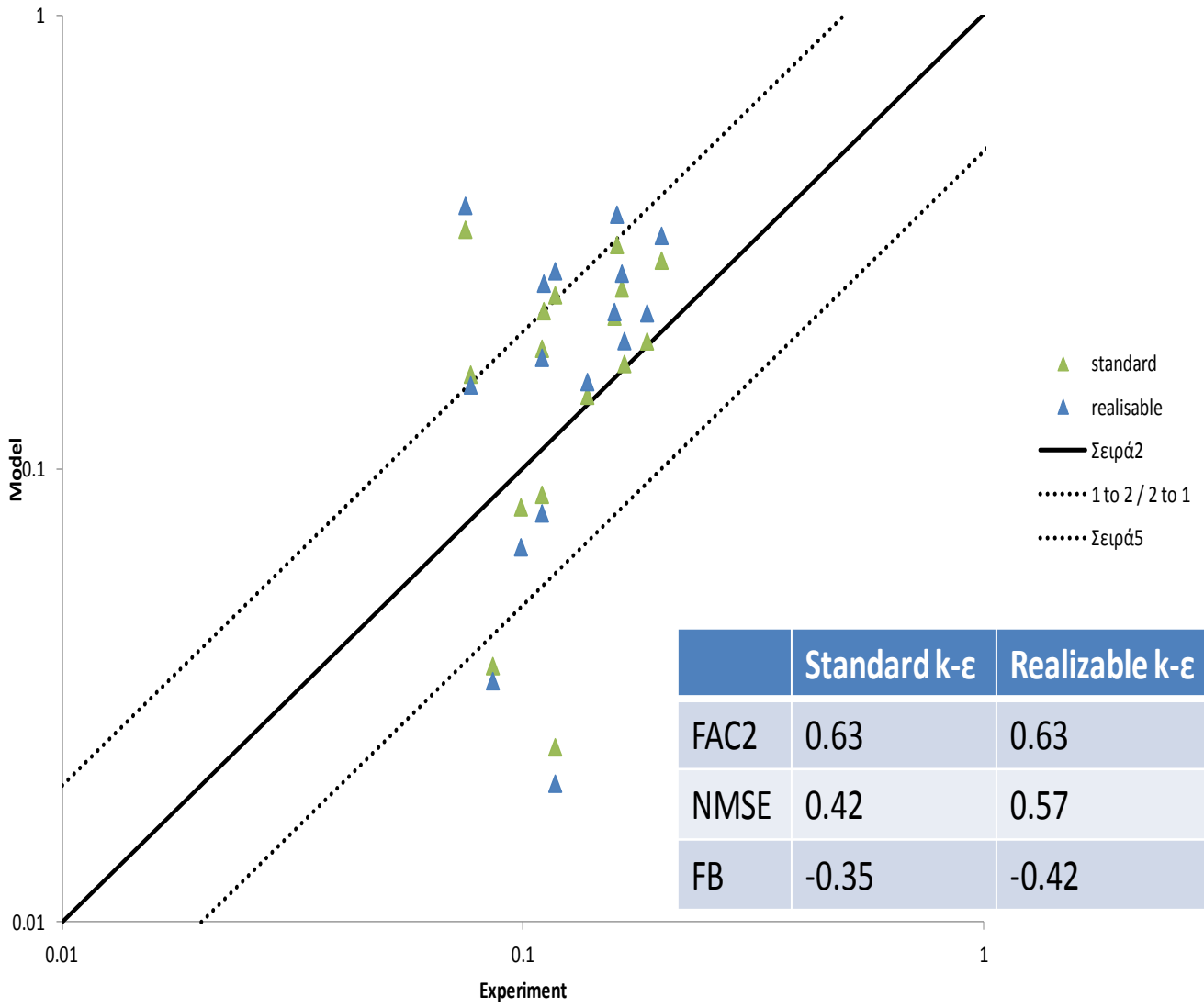
### Velocity $x=0.25$



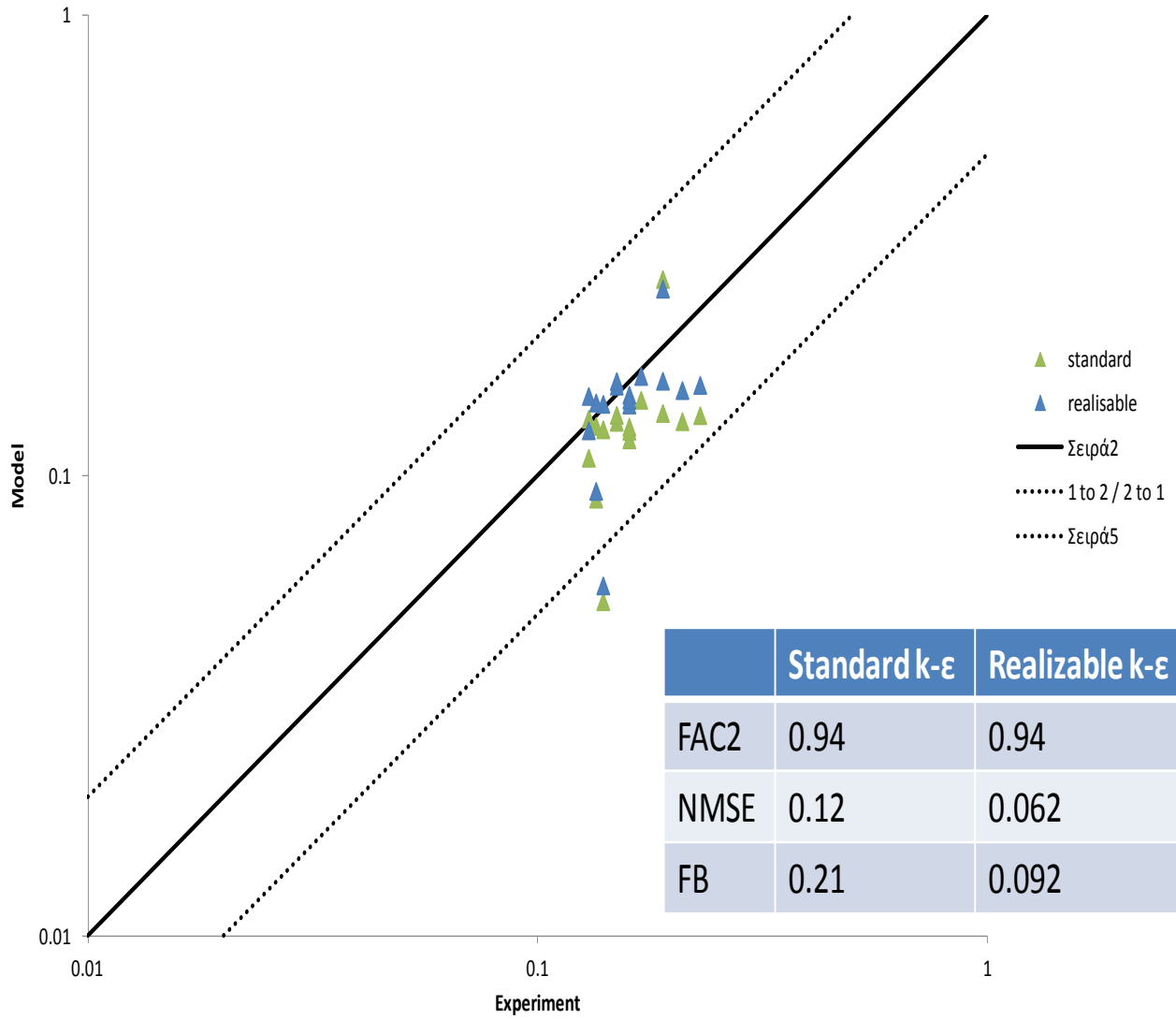
### Velocity x=0.5



### Velocity $x=0.75$



### Temperature x=0.5





## 4.4. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις του πειράματος

### 4.4.1. Περιγραφή του πειράματος

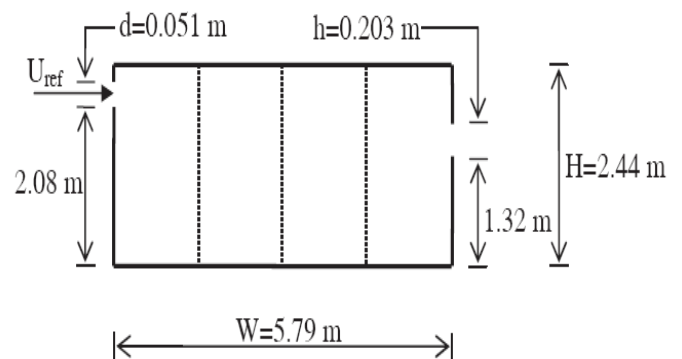
Το παρόν πείραμα αποτελεί μέρος μιας ερευνητικής προσπάθειας με στόχο την ενσωμάτωση ενός λεπτομερούς μοντέλου της ροής του αέρα σε μεγάλους χώρους σε ένα αλγεβρικό πολυζωνικό μοντέλο διείσδυσης για να περιγράψει τις μεταφορές των ρύπων και τις συνδυασμένες ροές αέρα εντός και μεταξύ των κτιρίων του συγκροτήματος και σε μεγάλους χώρους. Κατά τα τελευταία 15 χρόνια αναπτύχθηκε η μέθοδος ζωνών με στόχο να αποκτήσει μια κατά προσέγγιση πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της ροής του αέρα σε μεγάλους εσωτερικούς χώρους. Επίσης, η μείωση του αριθμού των κελιών σε CFD μοντέλα είναι ένας φυσιολογικός τρόπος μείωσης των υπολογιστικών απαιτήσεων για την επίλυση των ροών αέρα σε ένα δωμάτιο. Πρώτα παρουσιάζεται η μέθοδος ζωνών και το περιβάλλον προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για να λύσει το αντίστοιχο σύνολο των εξισώσεων, και στη συνέχεια συγκρίνεται η ικανότητα προσέγγισης τόσο του μοντέλου ζωνών όσο και του μοντέλου CFD πυκνού πλέγματος για να εκτιμηθούν οι ροές αέρα και τα προφίλ θερμοκρασίας σε ένα δωμάτιο με μικτές συνθήκες συναγωγής. Αμφότερες οι προβλέψεις των μοντέλων συγκρίνονται με τα συμβατικά CFD  $k$ - $\epsilon$  αποτελέσματα και τα πειραματικά δεδομένα.

#### 4.4.2. Πειραματικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων δοκιμών

Παρακάτω παρουσιάζονται η γεωμετρία του χώρου και οι τιμές των διαφόρων μεγεθών που εξετάζονται στο πείραμα.

## Περιγραφή της γεωμετρίας και των συνθηκών εισόδου του πειράματος

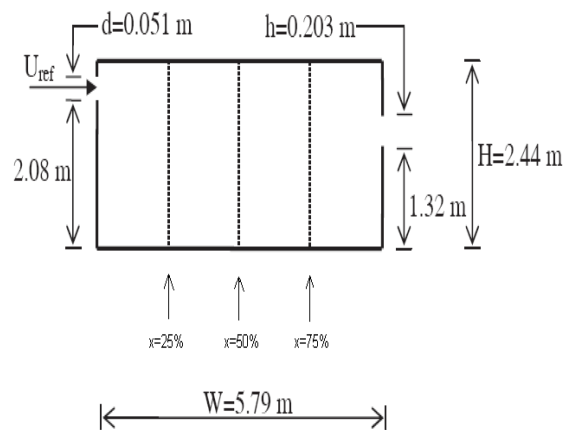
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά
  - Υψος δωματίου:2.44m
  - Μήκος δωματίου:5.79m
  - Πάχος εισόδου:0.051m
  - Πάχος εξόδου:0.203m
- Συνθήκες εισόδου
  - Ταχύτητα εισόδου:1.71m/s
  - Θερμοκρασία τοίχων:23.1 °C
  - Θερμοκρασία εδάφους:39.7 °C
  - Πίεση εξόδου:101325 Pa



#### 4.4.3. Στρατηγική εκτέλεσης των αριθμητικών προσομοιώσεων

Έγιναν 100 επαναλήψεις και η προσομοίωση διήρκησε μισή ώρα.

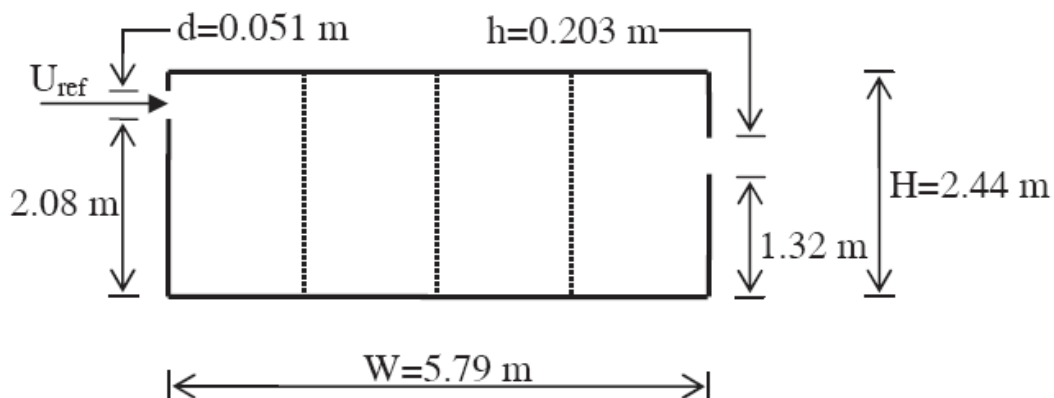
## Περιγραφή των μετρήσεων



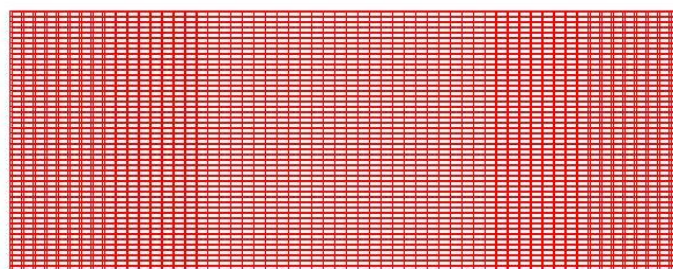
- Ταχύτητα
- Θερμοκρασία
- Οι μετρήσεις έχουν γίνει στα σημεία:
- $0.25X=1.4475\text{m}$
- $0.5X=2.895\text{m}$
- $0.75X=4.3425\text{m}$

#### 4.4.4. Δισδιάστατες προσομοιώσεις της ροής και θερμότητας

##### 4.4.4.1. Το υπολογιστικό πεδίο και πλέγμα



ANSYS  
14.0



Mesh

Jul 25, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, rke)

Εδώ βλέπουμε το πλέγμα οποίο έγινε η προσομοίωση το οποίο κατασκευάστηκε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα ANSYS ICEM. Τα κελιά δημιουργήθηκαν δίνοντας τιμές στην κατηγορία κόμβων(nodes). Έτσι για την διάσταση x δώσαμε την τιμή 57, για την διάσταση y την τιμή 48 ενώ στην διάσταση z δεν δώσαμε τιμή και προέκυψε το πλέγμα των 2842 κελιών.

Η ποιότητα του πλέγματος

Ένα σημαντικός δείκτης ποιότητας του πλέγματος που η έκδοση του ANSYS FLUENT 14.0 μας επιτρέπει να ελέγξουμε είναι μια ποσότητα που αναφέρεται ως

ορθογωνική ποιότητα. Προκειμένου να προσδιοριστεί η ορθογωνική ποιότητα ενός δεδομένου κελιού, υπολογίζονται οι ακόλουθες ποσότητες για κάθε επιφάνεια  $i$ :

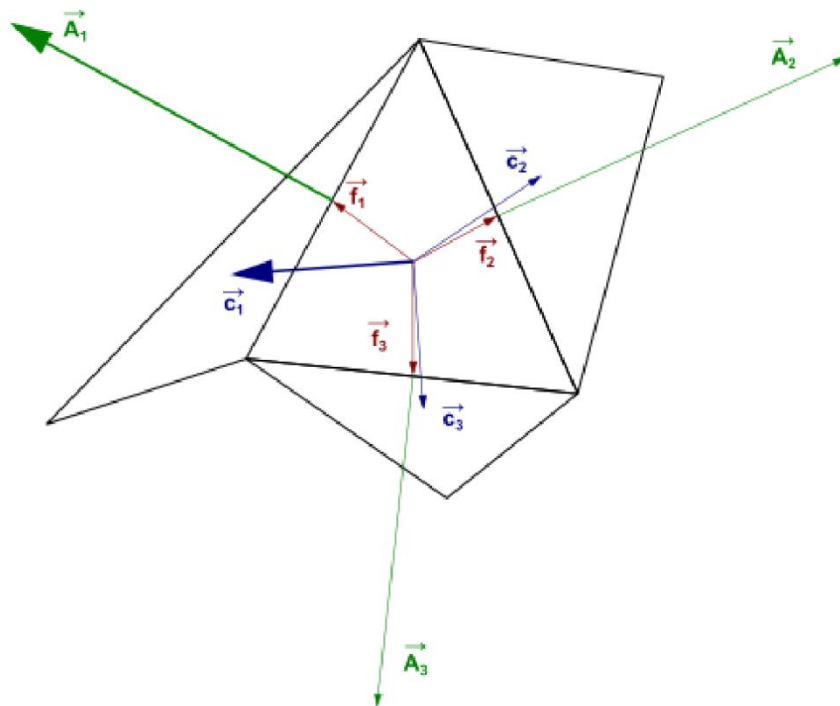
το κανονικοποιημένο γινόμενο του διανύσματος θέσης ( ) μιας επιφάνειας με ένα διάνυσμα ( ) με κατεύθυνση από το κέντρο βάρους του κελιού προς το κέντρο βάρους της επιφάνειας:

\_\_\_\_\_

το κανονικοποιημένο γινόμενο του διανύσματος θέσης ( ) μιας επιφάνειας με ένα διάνυσμα ( ) με κατεύθυνση από το κέντρο βάρους του κελιού προς το κέντρο βάρους του προσαρμοσμένου κελιού με το οποίο μοιράζεται τη επιφάνεια:

\_\_\_\_\_

Η ελάχιστη τιμή που προκύπτει από τον υπολογισμό της εξίσωσης (4.5) και της εξίσωσης (4.6) για όλες τις επιφάνειες στην συνέχεια καθορίζεται ως ορθογωνική ποιότητα του κελιού. Ως εκ τούτου, τα χειρότερα κελιά θα έχουν μια ορθογωνική ποιότητα πιο κοντά στο 0 και τα καλύτερα κελιά θα έχουν μια ορθογωνική ποιότητα πιο κοντά στο 1. Η εικόνα (4.1) απεικονίζει τα σχετικά διανύσματα και είναι ένα παράδειγμα όπου η εξίσωση (4.6) παρέχει την ελάχιστη τιμή και ως εκ τούτου, καθορίζει την ορθογωνική ποιότητα.



Εικόνα(4.1) Τα διανύσματα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ορθογωνικής ποιότητας.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση για την ποιότητα του πλέγματος ισχύουν τα εξής:

Ελάχιστη ορθογωνική ποιότητα=1

Μέγιστος λόγος διαστάσεων =3.00865

Η ποιότητα του πλέγματος είναι ορθογωνική

Μέγιστος όγκος κελιού= 4.971034

Ελάχιστος όγκος κελιού= 4.970987

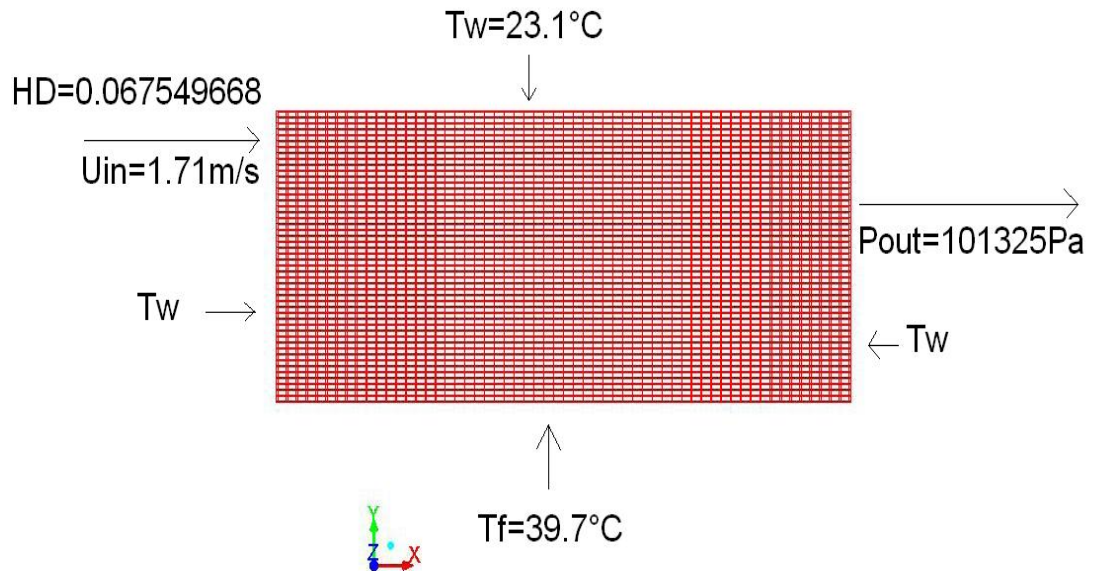
Συνολικός αριθμός κελιών πλέγματος=2842

Ο τύπος των κελιών του πλέγματος είναι εξαεδρικός.

Περισσότερες πληροφορίες για τον μέγιστο λόγο διαστάσεων και την ποιότητα του πλέγματος γενικά δίνονται στο κεφάλαιο 5 στην παράγραφο 5.1.3.1.

#### 4.4.4.2. Οριακές συνθήκες

Σε αυτήν την ενότητα παρατίθενται οι οριακές συνθήκες και οι τιμές τους. Πρώτες οριακές συνθήκες είναι η είσοδος και η έξοδος της ροής του αέρα. Η είσοδος έχει άνοιγμα 0.051μ. και η έξοδος 0.203μ. Δεύτερη οριακή συνθήκη είναι η ταχύτητα εισόδου της ροής του αέρα και είναι ίση με 1.71m/s. Τρίτη οριακή συνθήκη είναι οι θερμοκρασία των τοιχωμάτων και είναι ίση με 23.1 . Τέταρτη οριακή συνθήκη είναι η θερμοκρασία του εδάφους και είναι ίση με 37.9 . Πέμπτη οριακή συνθήκη είναι η πίεση εξόδου της ροής του αέρα και είναι ίση με 101325Pa. Έκτη οριακή συνθήκη είναι η υδραυλική διάμετρος η οποία υπολογίζεται με βάση την γεωμετρία εισόδου και είναι ίση με 0.067549668. Έβδομη οριακή συνθήκη είναι η συμμετρία στον επίπεδο z η οποία εισάγεται γιατί το πρόβλημά μας είναι δισδιάστατο. Τέλος όγδοη οριακή συνθήκη είναι η ένταση της τύρβης η οποία είναι ίση με 5%.



Mesh	Jul 25, 2013 ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, rke)
------	---

#### 4.4.4.3 Οριακές συνθήκες τοιχώματος

Πειράματα σε σωλήνες και σε κανάλια δείχνουν ότι η μέση κατανομή ταχύτητας κοντά σε τοίχους, όταν σχεδιάζεται με την συνήθη ημι-λογαριθμική κλίμακα, έχει την ίδια κλίση ( ). Έτσι, η συνάρτηση τοιχώματος για μέση ταχύτητα έχει τη μορφή

\_\_\_\_\_

όπου

#### 4.4.4.4. Αριθμητική επίλυση

Ο συνδυασμός πίεσης-ταχύτητας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.6 :

---

όπου  $u$  είναι οι πιέσεις και οι φυσιολογικές ταχύτητες, μεταξύ των δύο κελιών σε κάθε πλευρά της διατομής και το  $\rho$  περιέχει την επιρροή των ταχυτήτων σε αυτά τα κύτταρα. Ο όρος  $\frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u})$  μια συνάρτηση του  $\mathbf{u}$  που είναι ο μέσος όρος των  $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u})$  συντελεστών της εξίσωσης της ορμής για τα κελιά σε κάθε πλευρά της διατομής  $f$ . Από την εξίσωση εξάγεται μια πρόσθετη συνθήκη για την πίεση αναδιαμορφώνοντας την εξίσωση συνέχειας 4.7:

όπου  $\mathbf{u}$  είναι η ροή μάζας μέσω διατομής  $f$ . Η επίλυση με βάση την πίεση μας δίνει τη δυνατότητα να λύσουμε το πρόβλημα της ροής είτε με μεμονωμένο ή με συνδυαστικό τρόπο. Το ANSYS FLUENT παρέχει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε πέντε συνδυαστικούς αλγορίθμους πίεσης ταχύτητας: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, συνδυαστικό, και (για ασταθείς ροές χρησιμοποιώντας το μη επαναληπτικό σχήμα χρονικής προόδου (NITA)) Κλασματικό Βήμα (FSM). Όλα τα προαναφερθέντα σχήματα, εκτός από το " συνδυαστικό " σχήμα, βασίζονται στην προσέγγιση διορθωτικής πρόβλεψης.

Στην παρούσα προσομοίωση έχουμε επιλέξει το SIMPLE. Ο απλός αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια σχέση διορθώσεων μεταξύ της ταχύτητας και της πίεσης για την ενίσχυση της διατήρησης της μάζας και της απόκτησης του πεδίου πίεσης. Αν η εξίσωση ορμής επιλύεται με ένα πεδίο πρόβλεψης πίεσης  $p^*$ , η προκύπτουσα ροή διατομής,  $\mathbf{u}^*$ , που υπολογίζεται απτήν εξίσωση (4.9).

δεν ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας. Συνεπώς προστίθεται μια διόρθωση  $p'$  στην ροή διατομής  $\mathbf{u}^*$  έτσι ώστε η διορθωμένη ροή διατομής  $\mathbf{u}^*$

να ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας. Ο απλός αλγόριθμος επιτάσσει το  $\mathbf{u}^*$  να γραφτεί ως :



όπου είναι η διόρθωση της πίεσης κελιού

Ο απλός αλγόριθμος αντικαθιστά τις εξισώσεις διόρθωσης ροής της πίεσης (4.11,4.12) με την διακριτή εξίσωση συνέχειας για να διατηρήσει μια διακριτή εξίσωση για την πίεση διόρθωσης στο κελί:

όπου η πηγή του όρου είναι ο καθαρός ρυθμός ροής στο κελί:

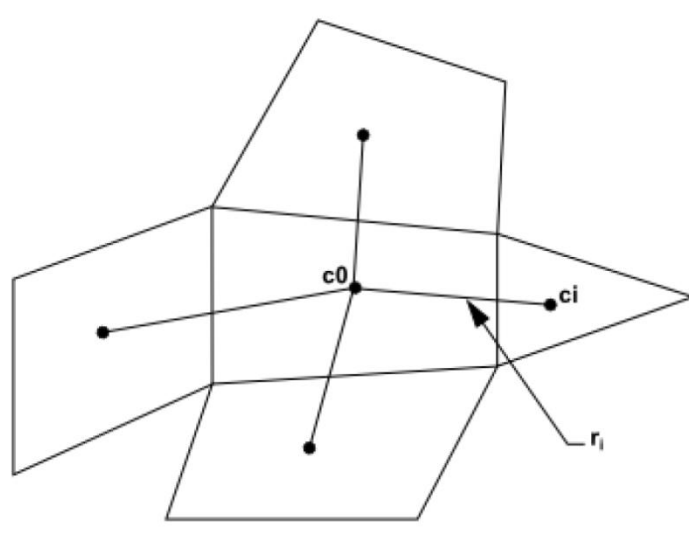
Η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης (4.11) μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο αλγεβρικού πολυπλέγματος (AMG). Μόλις προκύψει η λύση, η πίεση κελιού και η ροή διατομής διορθώνονται με την χρήση των εξισώσεων:

Εδώ το είναι παράγοντας υποχαλάρωσης της πίεσης. Η διορθωμένη ροή διατομής, ικανοποιεί την διακριτή εξίσωση συνέχειας πανομοιότυπα κατά την διάρκεια κάθε επανάληψης.

Οι κλίσεις δεν απαιτούνται μόνο για την δημιουργία τιμών ενός βαθμωτού μεγέθους στις διατομές των κελιών, αλλά και για τον υπολογισμό δευτεροβάθμιων όρων διάχυσης και παραγώγων ταχύτητας. Η κλίση μιας γνωστής μεταβλητής  $\phi$  χρησιμοποιείται για την διακριτοποίηση των όρων συναγωγής και διάχυσης στις εξισώσεις διατήρησης της ροής. Οι κλίσεις υπολογίζονται στο ANSYS FLUENT, σύμφωνα με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Green-Gauss Cell-Based
- Green-Gauss Node-Based
- Least Squares Cell-Based

Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιείται η μέθοδος Least Squares Cell-Based. Σε αυτή τη μέθοδο η λύση θεωρείται γραμμικά μεταβαλλόμενη. Στην επόμενη εικόνα (4.2)



Εικόνα(4.2) Εκτίμηση κέντρου βάρους κελιού

η αλλαγή στις τιμές των κελιών μεταξύ του κελιού και του κατά μήκος του διανύσματος με κατεύθυνση από κέντρο του κελιού στο κελί μπορεί να εκφραστεί ως:

Αν γράψουμε παρόμοιες εξισώσεις για κάθε κελί που περιβάλλει το κελί , παίρνουμε το ακόλουθο σύστημα γραμμένο σε συμπαγή μορφή:

Όπου  $[J]$  είναι η μήτρα συντελεστή ο οποίος είναι καθαρά συνάρτηση της γεωμετρίας.

Ο στόχος εδώ είναι να προσδιοριστεί η κλίση των κελιών λύνοντας το ελαχιστοποιημένο πρόβλημα για το σύστημα της μη τετραγωνικής μήτρας συντελεστή σε μια έννοια των ελαχίστων τετραγώνων.

Το παραπάνω γραμμικό σύστημα της εξίσωσης είναι καθορισμένο και μπορεί να λυθεί με την αποσύνθεση του συντελεστή μήτρας με την διαδικασία Gram-Schmidt. Αυτή η αποσύνθεση δίδει μια μήτρα των βαρών για κάθε κελί. Έτσι αυτό σημαίνει,

για το δικό μας κελί με επίκεντρο το σχήμα, ότι οι τρεις συνιστώσες των βαρών έχουν παραχθεί για κάθε μία από τις επιφάνειες του κελιού

Ως εκ τούτου, η κλίση στο κέντρο κελιού μπορεί στη συνέχεια να υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τους παράγοντες βάρους με το διάνυσμα διαφοράς

Σε ακανόνιστα (ασύμμετρα και παραμορφωμένα) αδόμητα πλέγματα, η ακρίβεια της μεθόδου κλίσεων ελαχίστων τετραγώνων είναι συγκρίσιμη με εκείνη των κλίσεων κόμβων (και οι δύο είναι πολύ πιο ανώτερες σε σύγκριση με την μέθοδο των κλίσεων κελιών). Ωστόσο, είναι λιγότερο δαπανηρό να υπολογίσουμε την μέθοδο κλίσεων ελαχίστων τετραγώνων από ό, τι μέθοδο κλίσεων κόμβων. Ως εκ τούτου, έχει επιλεγεί ως η προεπιλεγμένη μέθοδος κλίσης στην επίλυση του ANSYS FLUENT.

Μια σειρά από σχήματα παρεμβολής πίεσης είναι διαθέσιμα όταν στο ANSYS FLUENT χρησιμοποιείται επίλυση βασισμένη σε πίεση. Για τις περισσότερες περιπτώσεις, το "standard" σχήμα είναι αποδεκτό, αλλά ορισμένοι τύποι των μοντέλων μπορούν να επωφεληθούν από ένα από τα άλλα σχήματα:

- Για τα προβλήματα που αφορούν μεγάλες δυνάμεις σώματος, συνιστάται το σχήμα εξαναγκασμένου βάρους σώματος.
- Για ροές με υψηλές τιμές στροβιλισμού, υψηλών τιμών φυσικής συναγωγής Rayleigh, υψηλής ταχύτητας περιστροφής ροών, ροές που αφορούν πορώδη μέσα, και ροές σε έντονα καμπύλους τομείς, χρησιμοποιούμε το Presto! σύστημα.
- Για συμπίεστες ροές, συνιστάται το δεύτερης τάξης σύστημα.
- Για βελτιωμένη ακρίβεια χρησιμοποιούμε το δεύτερης τάξης σύστημα, όταν κάποιο από τα άλλα συστήματα δεν ισχύει.

Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε το "standard" σχήμα.

Όταν η ροή είναι ευθυγραμμισμένη με το πλέγμα (π.χ., στρωτή ροή σε ένα ορθογώνιο μοντελοποιημένο αγωγό με ένα τετράπλευρο ή εξαεδρικό πλέγμα) η διακριτοποίηση προσηνέματος πρώτης τάξης μπορεί να είναι αποδεκτή. Όμως, όταν η ροή δεν είναι

ευθυγραμμισμένη με το πλέγμα (δηλ., όταν διασχίζει τις γραμμές πλέγματος λοξά), η διακριτοποίηση συναγωγής πρώτης τάξης αυξάνει το αριθμητικό σφάλμα διακριτοποίησης (αριθμητική διάχυση). Για τριγωνικά και τετραεδρικά πλέγματα, δεδομένου ότι η ροή δεν είναι ευθυγραμμισμένη με το πλέγμα ποτέ, παίρνουμε γενικά πιο ακριβή αποτελέσματα με τη χρήση διακριτοποίησης δεύτερης τάξης. Για πλέγματα quad / hex, παίρνουμε επίσης καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τη διακριτοποίηση δεύτερης τάξης, ειδικά για πολύπλοκες ροές.

Εν ολίγοις, ενώ η διακριτοποίηση πρώτης τάξης γενικά αποδίδει καλύτερη σύγκλιση από την διακριτοποίηση δεύτερης τάξης, εν τούτοις αποδίδει λιγότερο ακριβή αποτελέσματα, ειδικά σε πλέγματα tri / tet.

Για τις περισσότερες περιπτώσεις, θα είμαστε σε θέση να χρησιμοποιήσουμε το δεύτερης τάξης σχήμα από την αρχή του υπολογισμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όμως, μπορεί να χρειαστεί να ξεκινήσουμε με το σχήμα πρώτης τάξης και στη συνέχεια να μεταβούμε στο σχήμα δεύτερης τάξης μετά από μερικές επαναλήψεις. Για παράδειγμα, αν τρέχουμε έναν υπολογισμό ροής υψηλών τιμών Mach που έχει μια αρχική λύση πολύ διαφορετική από την αναμενόμενη τελική λύση, θα πρέπει συνήθως να εκτελέσουμε μερικές επαναλήψεις με σχήμα πρώτης τάξης και στη συνέχεια να ενεργοποιήσουμε το σχήμα δεύτερης τάξης και να συνεχίσουμε τον υπολογισμό της σύγκλισης. Εναλλακτικά, είναι επίσης διαθέσιμη η αρχικοποίηση πλήρους πολυπλέγματος για ορισμένες περιπτώσεις ροής που μας επιτρέπουν να προχωρήσουμε με το σχήμα δεύτερης τάξης από την αρχή.

Για μια απλή ροή που είναι ευθυγραμμισμένη με το πλέγμα (π.χ., στρωτή ροή σε ένα ορθογώνιο μοντελοποιημένο αγωγό με ένα τετράπλευρο ή ένα εξαεδρικό πλέγμα), η αριθμητική διάχυση θα είναι φυσιολογικά χαμηλή, έτσι ώστε να μπορούμε γενικά να χρησιμοποιήσουμε το σχήμα πρώτης τάξης αντί του δεύτερης τάξης χωρίς καμία σημαντική απώλεια στην ακρίβεια.

Τέλος, αν αντιμετωπίσουμε δυσκολίες σύγκλισης με το σχήμα δεύτερης τάξης, θα πρέπει να δοκιμάσουμε το σχήμα πρώτης τάξης.

Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιούμε προσήνεμα πρώτης τάξης για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ρυθμό σκέδασης της τύρβης, και προσήνεμα δεύτερης τάξης για την ορμή και την ενέργεια.

#### 4.4.4.5. Αποτελέσματα των τρισδιάστατων εξισώσεων

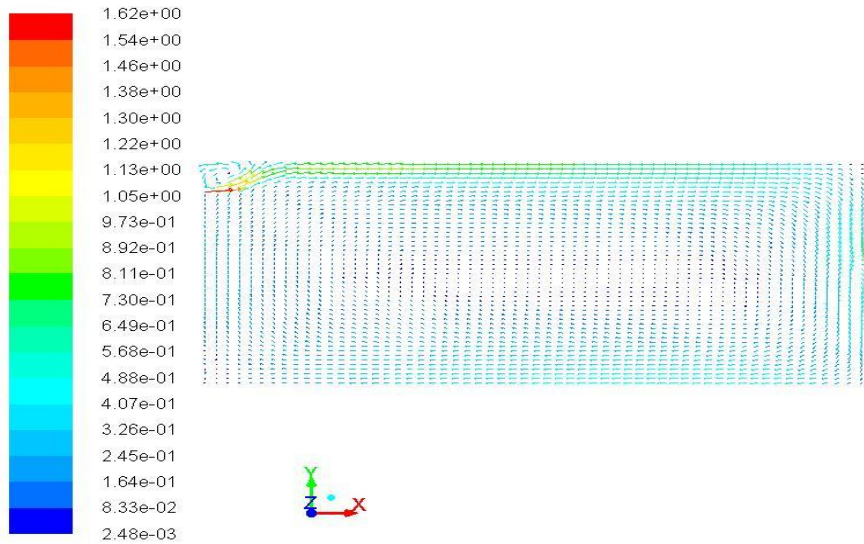
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται διάφορα διαγράμματα που δείχνουν την κατανομή της ροής του αέρα και της θερμότητας μέσα στον δισδιάστατο χώρο.

##### 4.4.4.5.1. Ροή του αέρα

Εδώ παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής του αέρα στον δισδιάστατο χώρο. Πρόκειται για το διάγραμμα του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του αέρα, για το μέτρο της ταχύτητας της ροής τόσο για το μοντέλο standard όσο και για το μοντέλο realisable  $k-\epsilon$  και τέλος για τα κάθετα προφίλ της ταχύτητας της ροής που προέκυψαν απτήν τοποθέτηση αισθητήρων στην διάσταση  $x$  στις θέσεις  $25\%x=1.4475\mu.$ ,  $50\%x=2.895\mu$  και  $75\%x=4.3425\mu$ . Παρατηρούμε γενικά απτά κάθετα προφίλ της ταχύτητας ότι υπάρχει σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Επίσης βλέπουμε ότι απ' τα δύο μοντέλα προσομοιώσεων αυτό που συγκλίνει περισσότερο με τα πειραματικά δεδομένα είναι το μοντέλο realisable  $k-\epsilon$

# Διάνυσμα της ταχύτητας

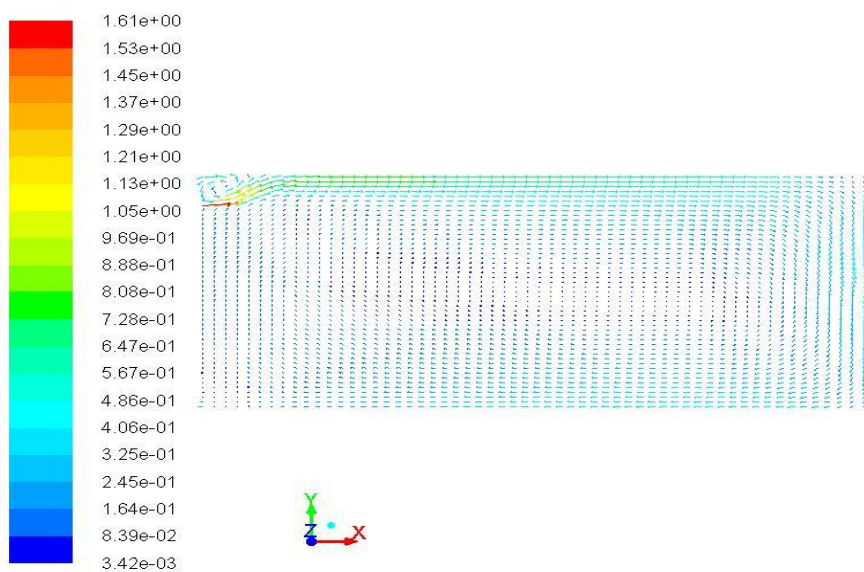
Μοντέλο τύρβης k-ε,realisable



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Feb 07, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, rke)

# Μοντέλο τύρβης k-ε,standard

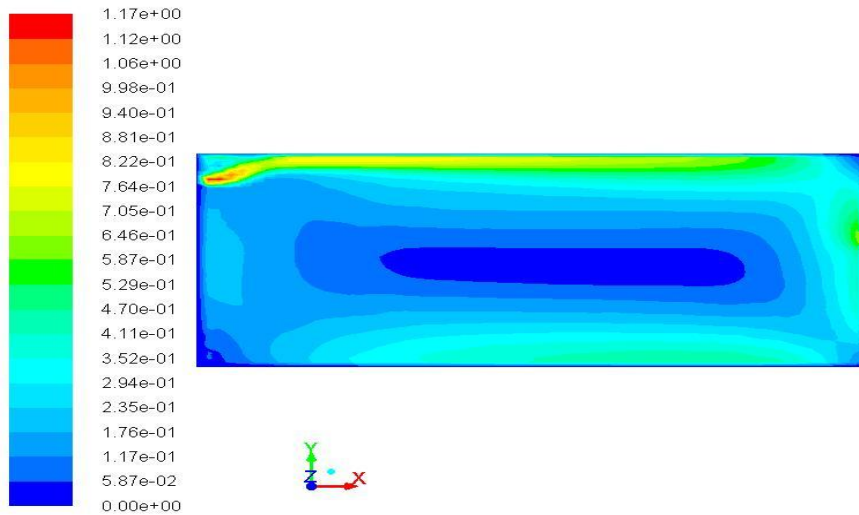


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Jul 29, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, ske)

# Μέτρο ταχύτητας

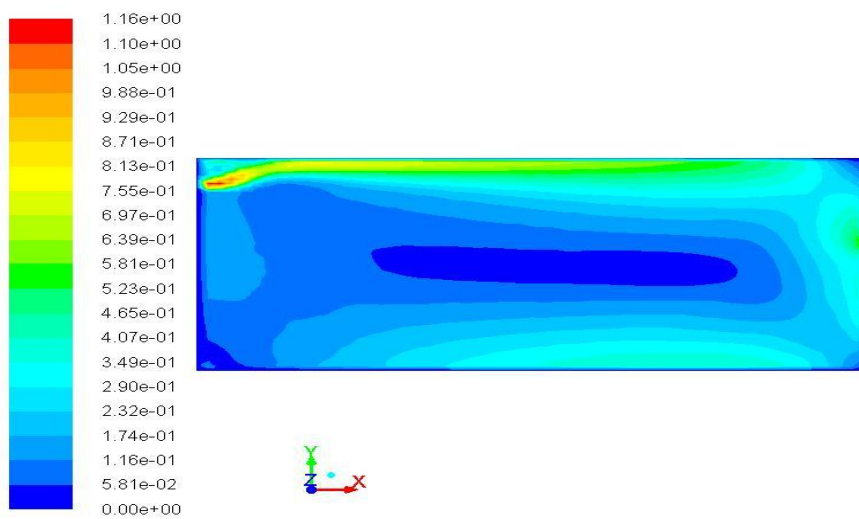
## Μοντέλο τύρβης k-ε,realisable



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 29, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, rke)

## Μοντέλο τύρβης k-ε,standard

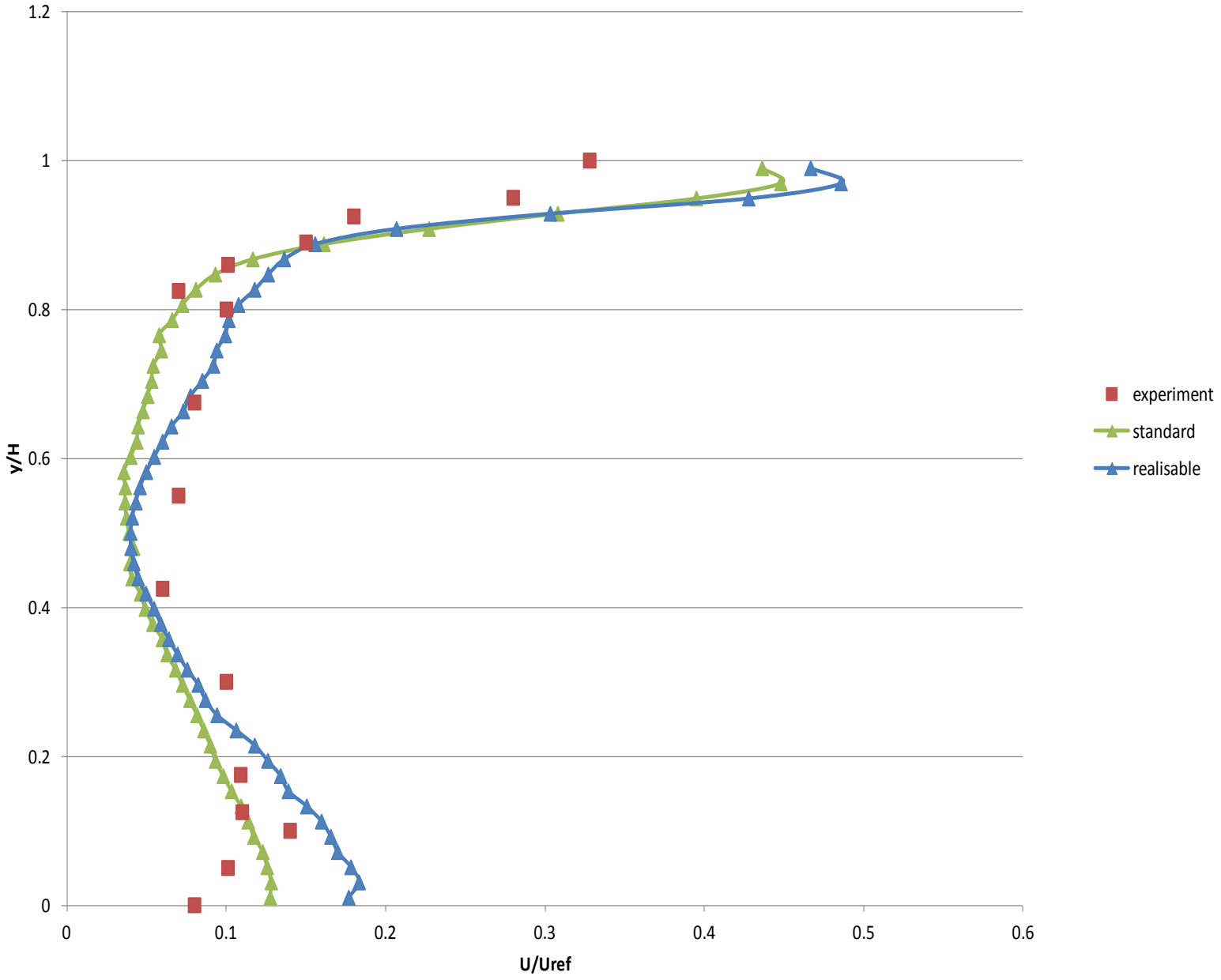


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 29, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, ske)

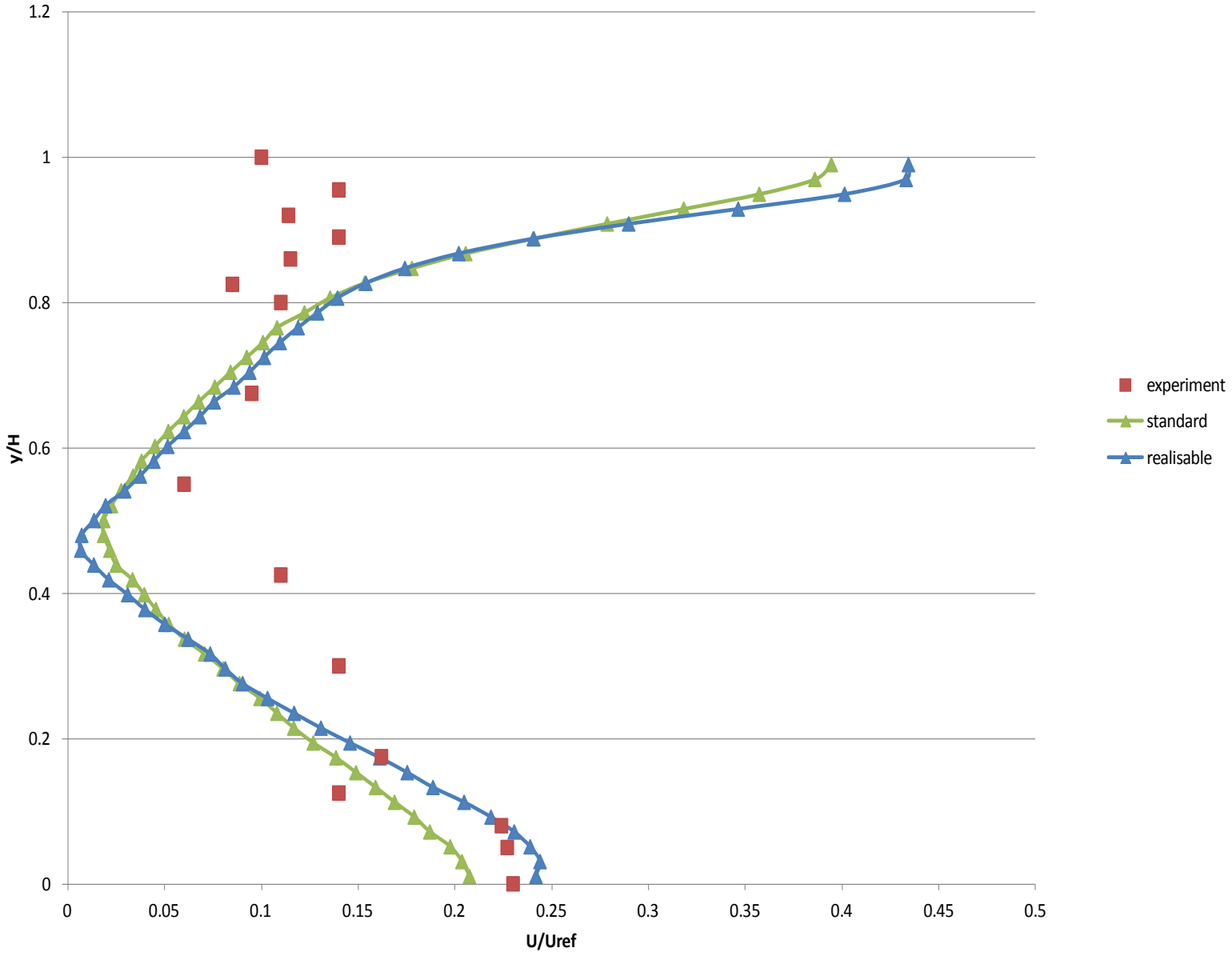
Κάθετα προφίλ ταχύτητας

Velocity  $x=0.25$

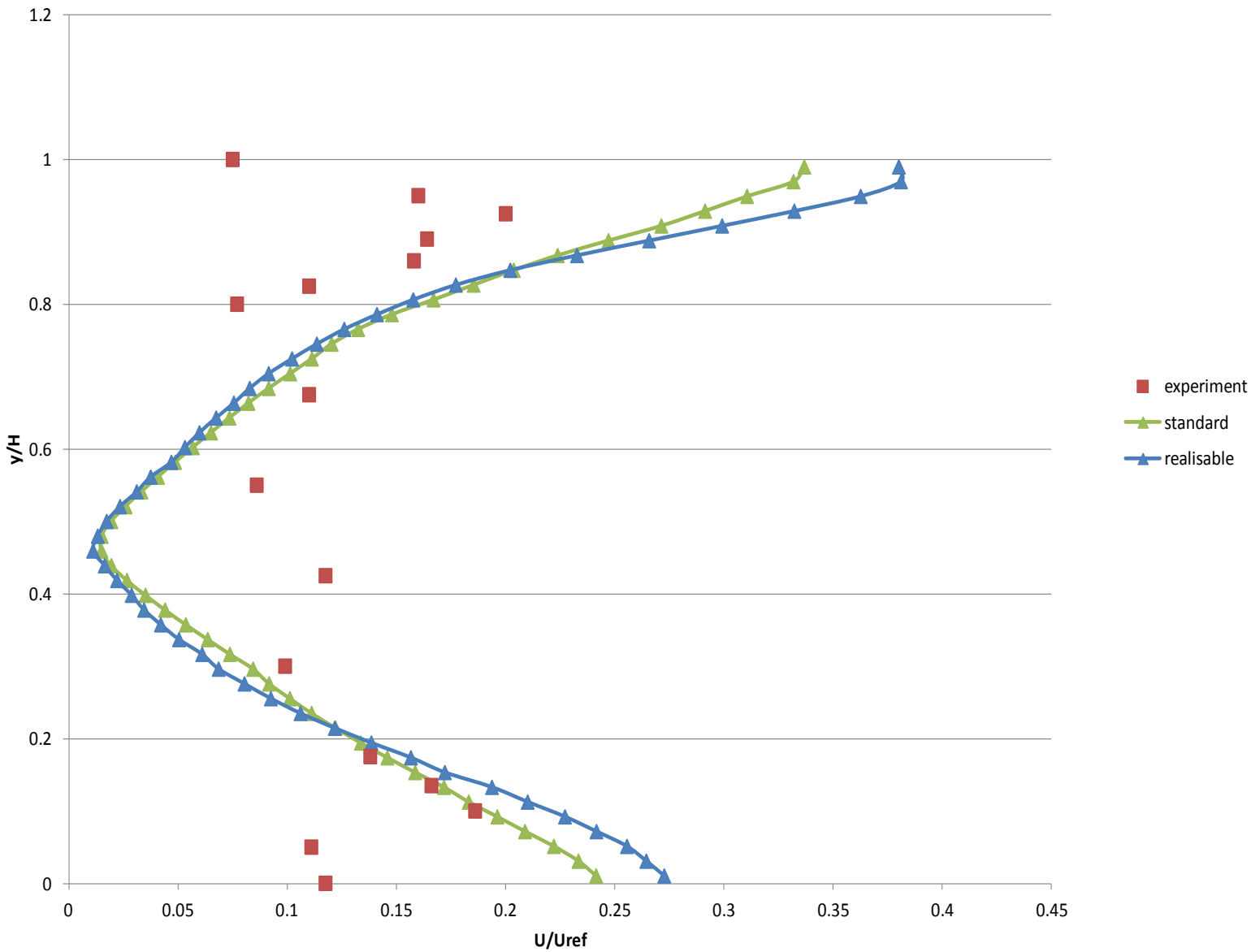




# Velocity $x=0.5$



## Velocity $x=0.75$

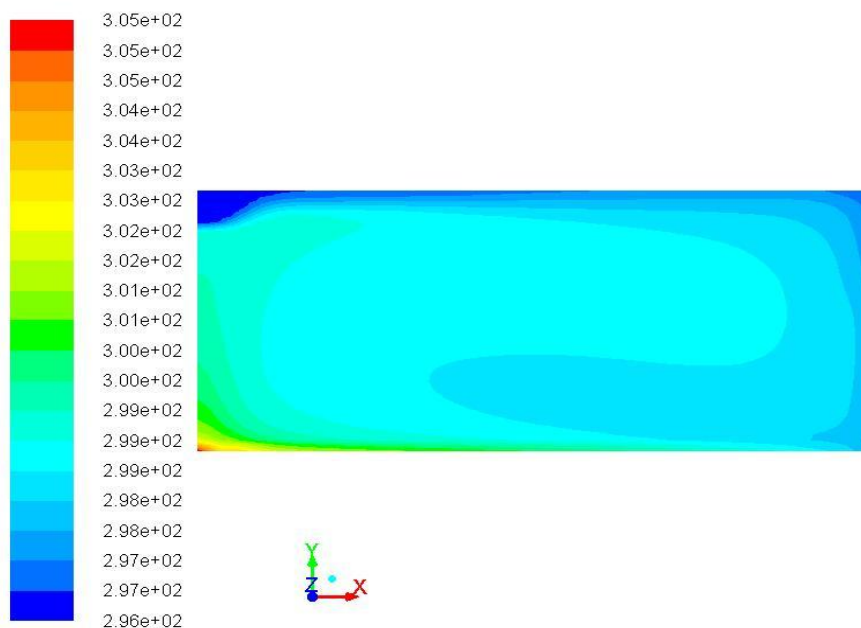


### 4.4.4.5.2. Θερμοκρασία

Εδώ παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής της θερμοκρασίας στον δισδιάστατο χώρο. Πρόκειται για το μέτρο της κατανομής της θερμοκρασίας τόσο για το μοντέλο standard όσο και για το μοντέλο realisable  $k-\epsilon$  και για το κάθετο προφίλ της κατανομής της θερμοκρασίας που προέκυψε απτήν τοποθέτηση αισθητήρων στην διάσταση  $x$  στην θέση  $50\% x=2.895\mu$ . Παρατηρούμε γενικά από κάθετο προφίλ της ταχύτητας ότι υπάρχει σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Επίσης βλέπουμε ότι απτά δύο μοντέλα προσομοιώσεων αυτό που συγκλίνει περισσότερο με τα πειραματικά δεδομένα είναι το μοντέλο realisable  $k-\epsilon$ .

## Μοντέλο τύρβης k-ε,realisable

ANSYS  
14.0

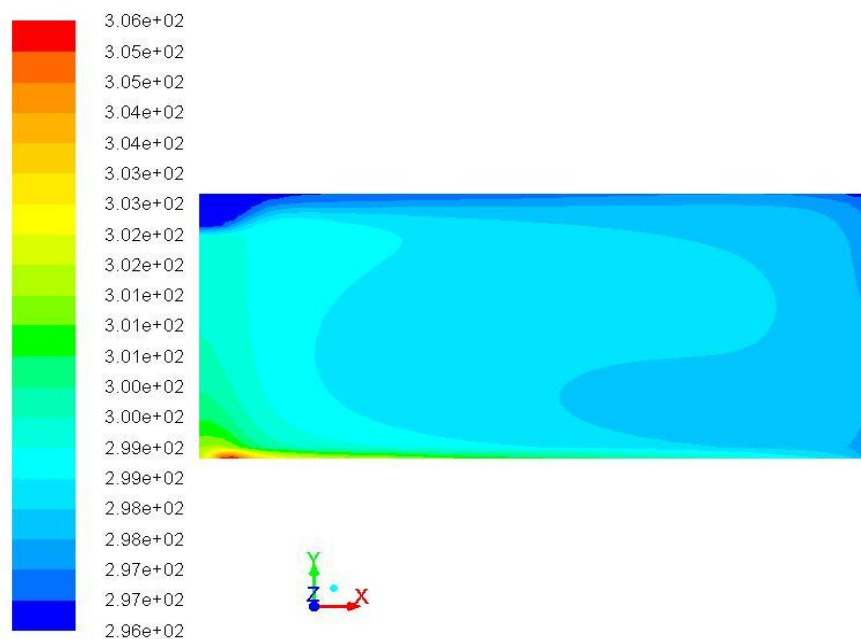


Contours of Total Temperature (k)

Jul 29, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, rke)

## Μοντέλο τύρβης k-ε,standard

ANSYS  
14.0

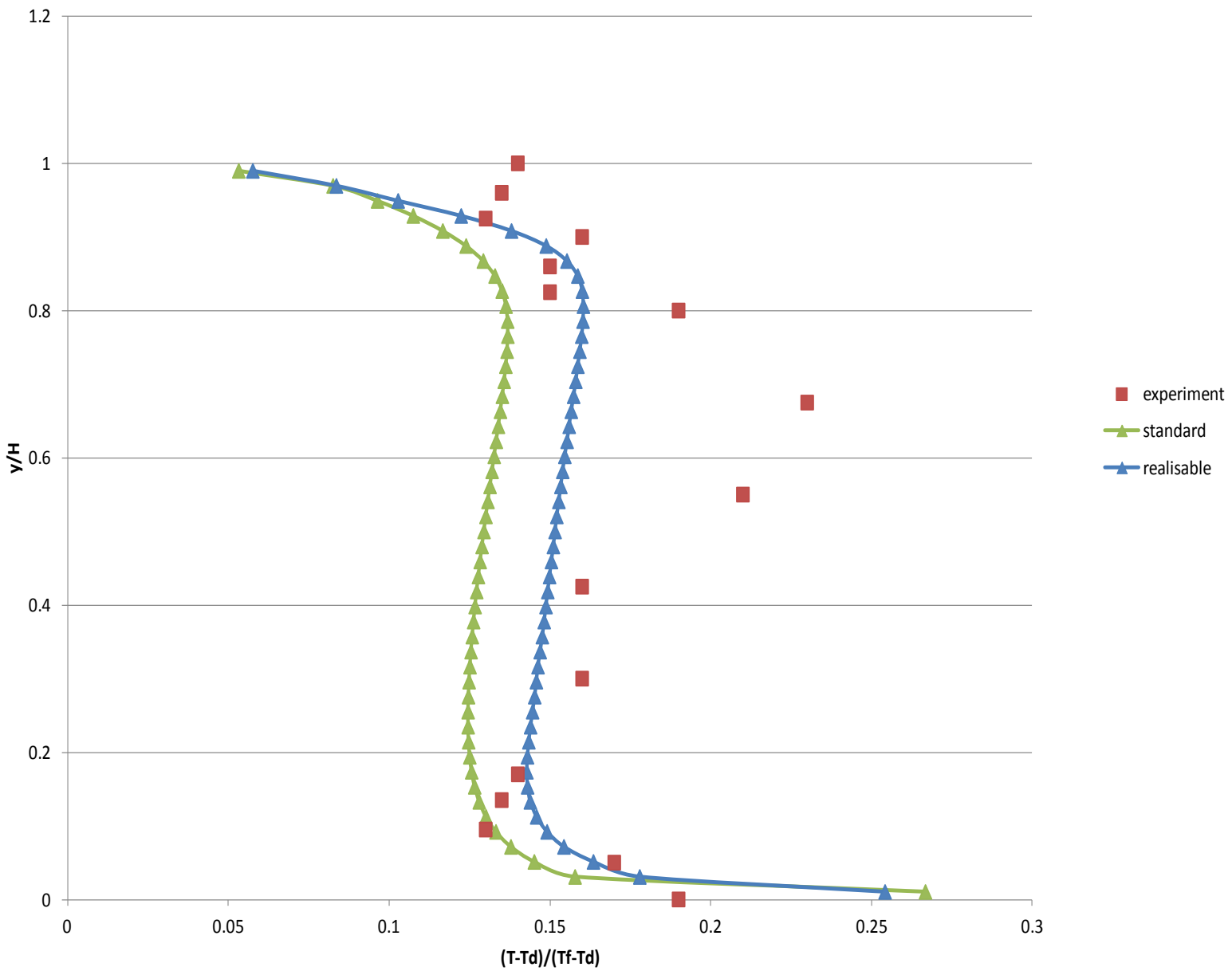


Contours of Total Temperature (k)

Jul 29, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, ske)

Κάθετο προφίλ θερμοκρασίας

Temperature x=0.5



## 4.5. Συμπεράσματα

Στα αποτελέσματα των δεικτών αξιολόγησης βλέπουμε ότι στις τιμές προσομοίωσης της ταχύτητας το μοντέλο standard k-ε είναι συγκρίσιμο με το μοντέλο realisable k-ε. Στις τιμές προσομοίωσης της θερμοκρασίας το μοντέλο realisable k-ε έχει ελαφρώς καλύτερη σύγκλιση απ' το μοντέλο standard k-ε. Η καλύτερη σύγκλιση πειραματικών και τιμών προσομοίωσης της θερμοκρασίας στο μοντέλο realisable k-ε μας οδηγεί στην επιλογή αυτού του μοντέλου για την μελέτη του πραγματικού προβλήματος που εξετάζουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Γενικά το μοντέλο realisable k-ε προσομοιώνει καλά την ροή στον χώρο. Οι συγκρίσεις της ταχύτητας και της θερμοκρασίας μεταξύ του μοντέλου και του πειράματος είναι ικανοποιητικές. Ο κώδικας FLUENT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτες εσωτερικής ποιότητας αέρα. Με τη δισδιάστατη προσομοίωση που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο τύρβης realisable k-ε είναι πιο αξιόπιστο από το μοντέλο τύρβης standard k-ε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

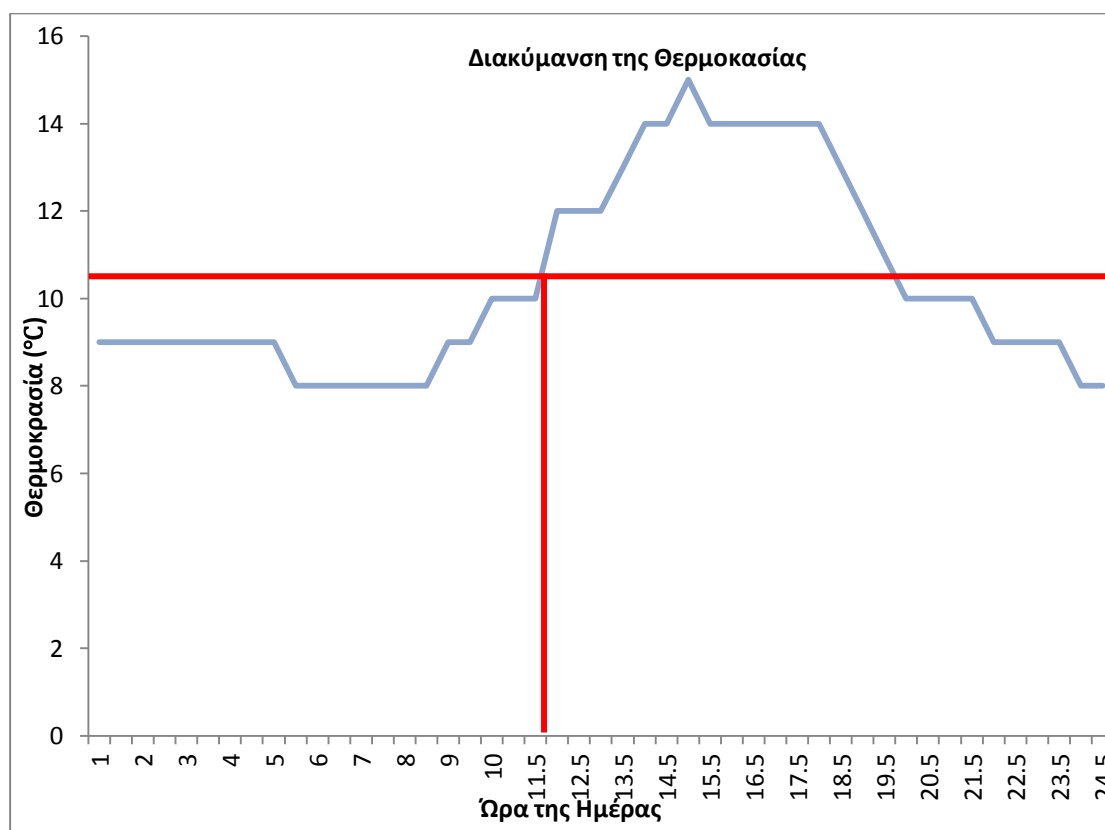
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΣΕ ΕΝΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

#### 5.1 Οι αριθμητικές προσομοιώσεις του πειράματος

##### 5.1.1. Περιγραφή του πειράματος

Το πραγματικό πρόβλημα που εξετάζουμε εδώ είναι η ποιότητα του αέρα και η θερμική άνεση που επικρατεί στο γραφείο 10 του τρίτου ορόφου του κτιρίου της τράπεζας της Φλωρεντίας. Η προσομοίωση έγινε με βάση μετρήσεις υγρασίας και θερμοκρασίας που επικρατούσαν στο περιβάλλον αλλά και στο γραφείο, τη θερμοκρασία των τοίχων της οροφής και του πατώματος και με μετρήσεις ρύπων και ροών αέριας μάζας που επικρατούσαν μέσα στο γραφείο για πέντε συνεχόμενες ημέρες από Δευτέρα 11-3-2013 ως Παρασκευή 15-3-2013. Η μέρα που επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις της είναι η Τρίτη και η ώρα 11.30 το πρωί. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέρα γιατί γι' αυτήν είχαν γίνει μετρήσεις όλο το εικοσιτετράωρο και η συγκεκριμένη ώρα ως η πρωινή ώρα της οποίας η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αντιστοιχούσε στην μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος ίση με 10.42 όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:

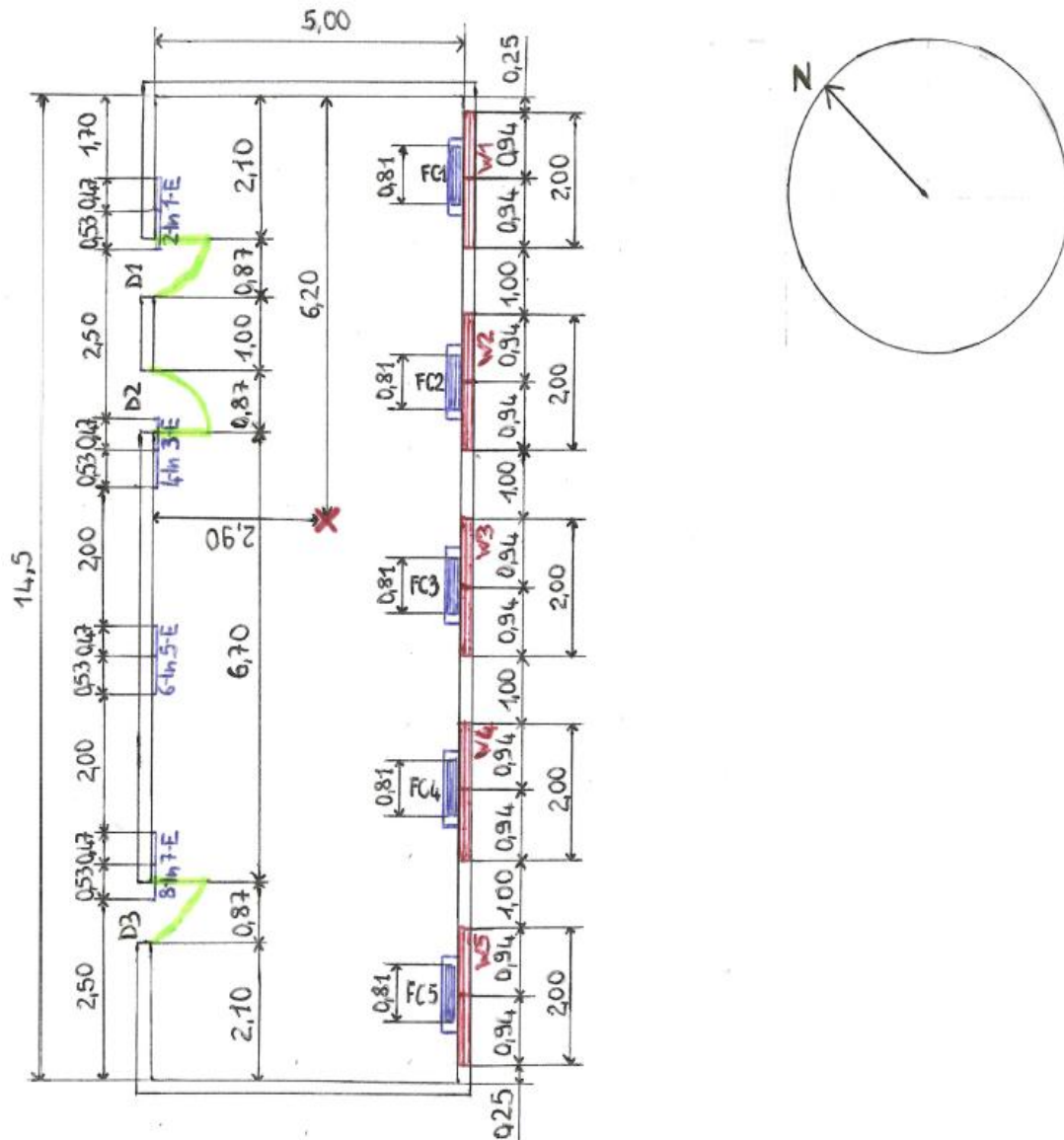


### 5.1.2 Πειραματικά χαρακτηριστικά της επιλεγμένης δοκιμής

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των διαφόρων μεγεθών που εξετάζονται στο πείραμα

#### Γεωμετρία του γραφείου

Ο προσανατολισμός του γραφείου είναι νοτιοανατολικός. Οι διαστάσεις του είναι 14.5 μ. μήκος 5 μ. πλάτος και 3.3 μ. ύψος.



Η νοτιοανατολική πλευρά έχει πέντε παράθυρα με διαστάσεις 2 μ. μήκος 2.27 μ. ύψος και ύψος από πάτωμα 0.96 μ.

Ύψος από το πάτωμα = 0,96 m

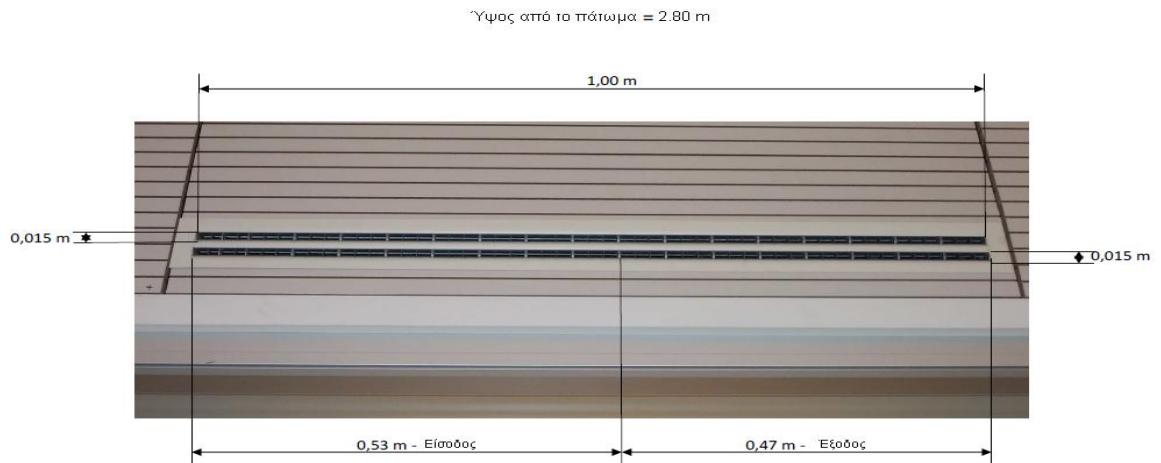




Η βορειοδυτική πλευρά έχει τρεις πόρτες με διαστάσεις 2.04 μ. ύψος και 0.87 μ. μήκος



και τέσσερις εξαεριστήρες με διαστάσεις 0.3 μ. ύψος 1 μ. μήκος και ύψος από πάτωμα 2.8 μ. Οι εξαεριστήρες χωρίζονται κατά μήκος σε δύο μέρη εισαγωγής και εξαγωγής αέρα με διαστάσεις μήκους 0.53 μ. και 0.47 μ. αντίστοιχα.



Οι υπόλοιπες πλευρές το πάτωμα και η οροφή είναι κενά. Η βορειοανατολική και η βορειοδυτική πλευρά αποτελούνται από πλαστικό υλικό



ενώ η νοτιοανατολική και η νοτιοδυτική από οικοδομικό υλικό. Τα παράθυρα αποτελούνται από αλουμίνιο και γυαλί. Οι πόρτες αποτελούνται από πλαστικό υλικό. Εντός του γραφείου υπάρχουν κάτω από κάθε παράθυρο θερμαντικά σώματα με διαστάσεις ανοίγματος παροχής 0.81 μ. μήκος και 0.12 μ. πλάτος και συνολικές διαστάσεις 1.11 μ. μήκος 0.23 μ. πλάτος 0.45 μ. ύψος και 0.21 μ. ύψος από το πάτωμα



Επίσης υπάρχουν οκτώ θρανία με διαστάσεις 3.2 μ. μήκος 0.8 μ. πλάτος και 0.7 μ. ύψος δεκαέξι συρτάρια με διαστάσεις 0.55 μ. μήκος 0.45 μ. πλάτος και 0.55 μ. ύψος τέσσερα ράφια με διαστάσεις 3.2 μ. μήκος και 0.4 μ. πλάτος και τέλος έξι ντουλάπια με διαστάσεις 0.36 μ. μήκος 1.5 μ. πλάτος και 2.05 μ. ύψος. Οι πηγές μόλυνσης είναι δεκαέξι laptops δεκαέξι οθόνες LCD και τέσσερις εκτυπωτές.



### **Ροή αέρα**

Στον χώρο παρατηρήθηκε εισαγωγή αέριας μάζας από την είσοδο των εξαεριστήρων. Επίσης παρατηρήθηκε εξαγωγή αέριας μάζας από την έξοδο των εξαεριστήρων και από τις χαραμάδες των παραθύρων. Οι παροχές δίνονται απ' το πρόγραμμα προσομοίωσης COMIS. Η παροχή του αέρα απ' τους εξαεριστήρες για την είσοδο είναι 2-in 0.021184 kg/s, 4-in 0.020544 kg/s, 6-in 0.019008 kg/s, 8-in 0.023616 kg/s. Για την έξοδο είναι 1-E 0.011788 kg/s, 3-E 0.012516 kg/s, 5-E 0.01176 kg/s, 7-E 0.013468 kg/s. Η θερμοκρασία εισόδου του αέρα απ' τους εξαεριστήρες είναι 27 και το κλάσμα μάζας υδρατμών είναι 0.0085976 kg/kg. Η εξαγωγή αέριας μάζας απ' τις χαραμάδες των παραθύρων είναι 0.00079 kg/s.

### **Κλάσμα μάζας υδρατμών περιβάλλοντος**

Όπως αναφέραμε παραπάνω η μέρα που επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις της είναι η Τρίτη και η ώρα 11.30 το πρωί. Γι αυτήν την ώρα η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος μετρήθηκε 85.54% και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος 10.42 . Το κλάσμα μάζας υδρατμών περιβάλλοντος υπολογίστηκε με την παρακάτω μεθοδολογία:

Αρχικά υπολογίζουμε την πίεση κορεσμού των υδρατμών απ' την εξίσωση:

\_\_\_\_\_

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την πραγματική τάση ατμών απ' την εξίσωση:

—

Τέλος υπολογίζουμε το:

κλάσμα μάζας υδρατμών

### **Συντελεστής θερμοπερατότητας**

Οι συντελεστές θερμοπερατότητας δίνονται απ' τον οδηγό θερμομόνωσης κτιρίων.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του νοτιανατολικού και του νοτιοδυτικού τοίχου, του δαπέδου και της πλάκας της οροφής υπολογίζεται απ' τον παρακάτω τύπο

\_\_\_\_\_

Όπου

: η εσωτερική επιφανειακή αντίσταση (ανάμεσα στο εσωτερικό περιβάλλον και στην εσωτερική επίπεδη επιφάνεια του στοιχείου) [ K / W]

: η εξωτερική επιφανειακή αντίσταση (ανάμεσα στο εξωτερικό περιβάλλον και στην εξωτερική επίπεδη επιφάνεια του στοιχείου) [ K / W]

: πάχος υλικού [m]

: θερμική αγωγιμότητα υλικού [W / m K]

Με βάση τα παραπάνω οι συντελεστές θερμοπερατότητας υπολογίζονται στους επόμενους πίνακες:

Νοτιανατολικός τοίχος:

Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας (U) τοιχοποιίας

Τύπος κατασκευής		Τοίχος θερμομονωμένος εξωτερικά			
A/A	Ονομασία Υλικού	Πάχος Υλικού <b>d</b> (m)	Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού <b>λ</b> (W/mK)	Θερμική Αντίσταση Υλικού <b>R</b> (m <sup>2</sup> K/W)	Τυπική Σχεδιαστική Λεπτομέρεια
1	Επίχρισμα (τσιμεντοκονίαμα)	0.025	1.0	0.025	
2	Τούβλο	0.2	0.4	0.5	
3	Θερμομονωτικό Υλικό	0.05	0.030	1.667	
4	Επίχρισμα (τσιμεντοκονίαμα)	0.05	1	0.05	
5	*	-	-	-	
Ροή Θερμότητας		$R_{si}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$R_{se}$ (m <sup>2</sup> K/W)	Συντελεστής Θερμοπερατότητας <b>U</b> (W/m <sup>2</sup> K)	
Οριζόντια		0.13	0.04	<b>0.419</b>	

\* Υλικά με αμελητέα θερμική αντίσταση όπως π.χ. μογιές, γόμες κ.λπ. δεν έχουν ληφθεί υπόψη

Νοτιοδυτικός τοίχος:

Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας (U) τοιχοποιίας

Τύπος κατασκευής		Τοίχος θερμομονωμένος εξωτερικά			
A/A	Ονομασία Υλικού	Πάχος Υλικού <b>d</b> (m)	Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού <b>λ</b> (W/mK)	Θερμική Αντίσταση Υλικού <b>R</b> (m <sup>2</sup> K/W)	Τυπική Σχεδιαστική Λεπτομέρεια
1	Επίχρισμα (τσιμεντοκονίαμα)	0.025	1.0	0.025	
2	Τούβλο	0.2	0.4	0.5	
3	Θερμομονωτικό Υλικό	0.1	0.030	3.333	
4	Επίχρισμα (τσιμεντοκονίαμα)	0.05	1	0.05	
5	*	-	-	-	
Ροή Θερμότητας		$R_{si}$ (m <sup>2</sup> K/W)	$R_{se}$ (m <sup>2</sup> K/W)	Συντελεστής Θερμοπερατότητας <b>U</b> (W/m <sup>2</sup> K)	
Οριζόντια		0.13	0.04	<b>0.245</b>	

\* Υλικά με αμελητέα θερμική αντίσταση όπως π.χ. μπογιές, γόμες κ.λπ. δεν έχουν ληφθεί υπόψη

Τύπος κατασκευής		Οριζόντια θερμομονωμένη πλάκα			
A/A	Ονομασία Υλικού	Πάχος Υλικού $d$ (m)	Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού $\lambda$ (W/mK)	Θερμική Αντίσταση Υλικού $R$ (m <sup>2</sup> K/W)	Τυπική Σχεδιαστική Λεπτομέρεια
1	Ασφαλτόπανο	0.004	0.230	0.017	
2	Σcreed Ρύσεων (σκυρόδεμα μέσης πυκνότητας)	0.050	1.350	0.037	
3	Θερμομονωτικό υλικό	0.050	0.033	1.515	
4	Οπλισμένο Σκυρόδεμα (2% χάλυβα)	0.150	2.500	0.073	
5	Επίχρισμα τοιμεντοκονίαμα	0.025	1	0.025	
Ροή Θερμότητας		$R_{si}$ (W/m <sup>2</sup> W)	$R_{se}$ (W/m <sup>2</sup> W)	Συντελεστής Θερμοπερατότητας $U$ (W/m <sup>2</sup> K)	
Προς τα πάνω		0.1	0.04	<b>0.553</b>	



Τύπος κατασκευής		δάπεδο			
A/A	Ονομασία Υλικού	Πάχος Υλικού <b>d</b> (m)	Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού <b>λ</b> (W/mK)	Θερμική Αντίσταση Υλικού <b>R</b> (m <sup>2</sup> K/W)	Τυπική Σχεδιαστική Λεπτομέρεια
1	Γρανίτης	0.030	2.700	0.01111	
2	Screeed Ρύσεων (σκυρόδεμα μέσης πυκνότητας)	0.050	1.350	0.037	
3	Οπλισμένο σκυρόδεμα (2% χάλυβα)	0.150	2.50	0.07389	
4	Θερμομονωτικό υλικό	0.050	0.033	1.515	
5	Επίχρισμα τσιμεντοκονίαμα	0.025	1	0.02500	
Ροή Θερμότητας		$R_{si}$ (W/m <sup>2</sup> W)	$R_{se}$ (W/m <sup>2</sup> W)	Συντελεστής Θερμοπερατότητας <b>U</b> (W/m <sup>2</sup> K)	
Προς τα κάτω		0.17	0.04	<b>0.534</b>	

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των παραθύρων που βρίσκονται στο νοτιοανατολικό τοίχο υπολογίζεται απ' τον παρακάτω τοίχο

όπου

είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοστασίου

είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας του πλαισίου

είναι η γραμμική θερμική μετάδοση

είναι η περίμετρος του ορατού υαλοστασίου ως προς το πλαίσιο

Εδώ είναι:

\_\_\_\_\_

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των πορτών και των τοίχων που αποτελούνται από πλαστικό υπολογίζεται:

—    ———                    ———  
—    ———                    ———

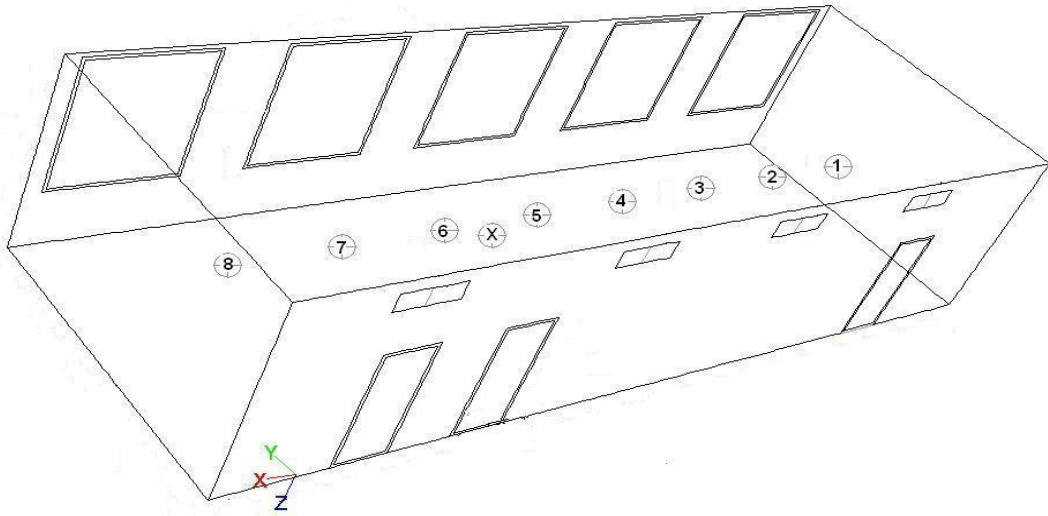
### **5.1.3 Στρατηγική εκτέλεσης των αριθμητικών προσομοιώσεων**

Για την προσομοίωση επιλέχθηκαν 219 επαναλήψεις και διάρκησε 3.5 ώρες. Επίσης επιλέχθηκε αυτόματη αποθήκευση για κάθε 73 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για τους τέσσερις τοίχους, το δάπεδο, την οροφή, το σημείο X με συντεταγμένες  $x=6.2 \mu$ .  $y=2.9\mu$ .  $z=0.8 \mu$  συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

### **5.1.4 Τρισδιάστατη προσομοίωση της ροής και της θερμότητας και της σχετικής υγρασίας**

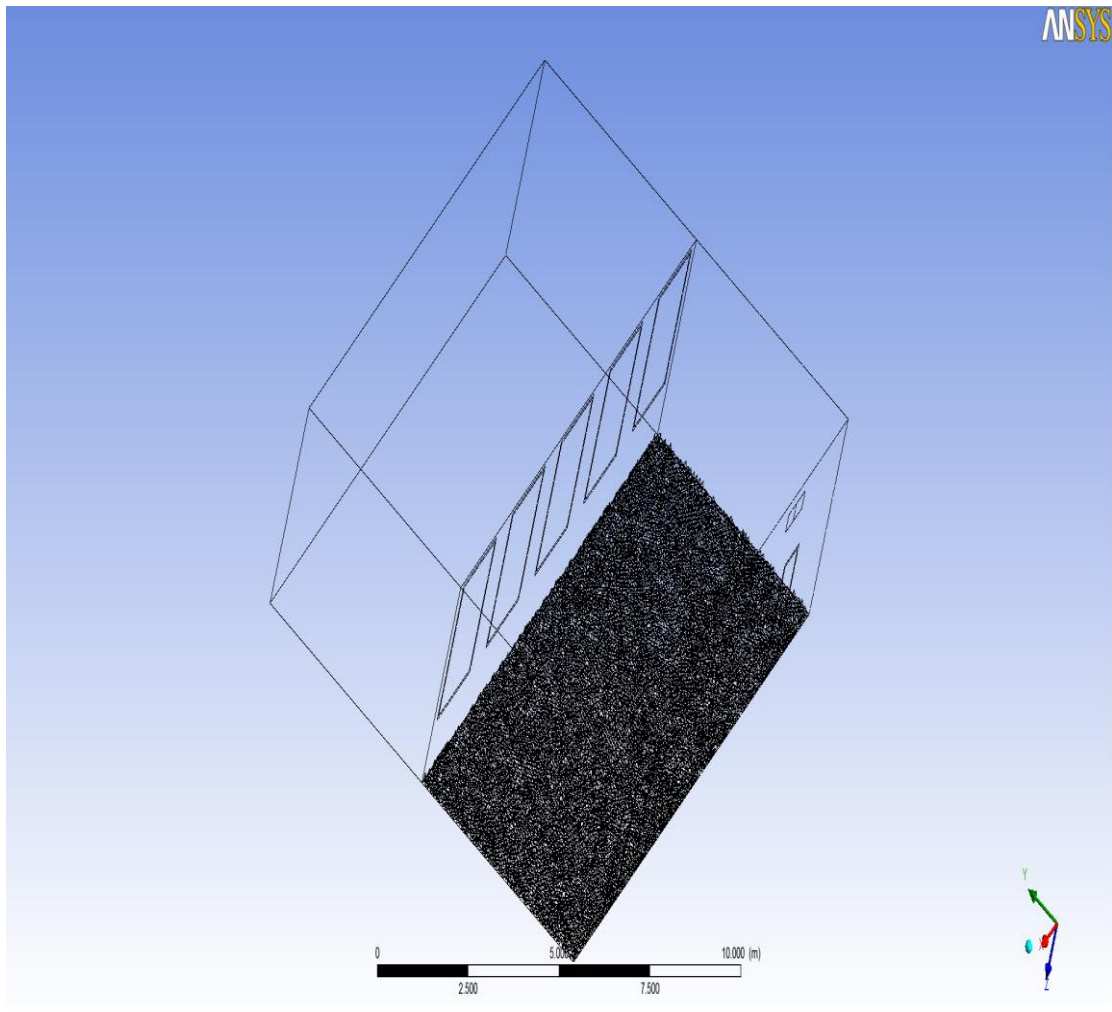
#### **5.1.4.1 Το υπολογιστικό πεδίο και τα πλέγματα και η πηγή του ρύπου**

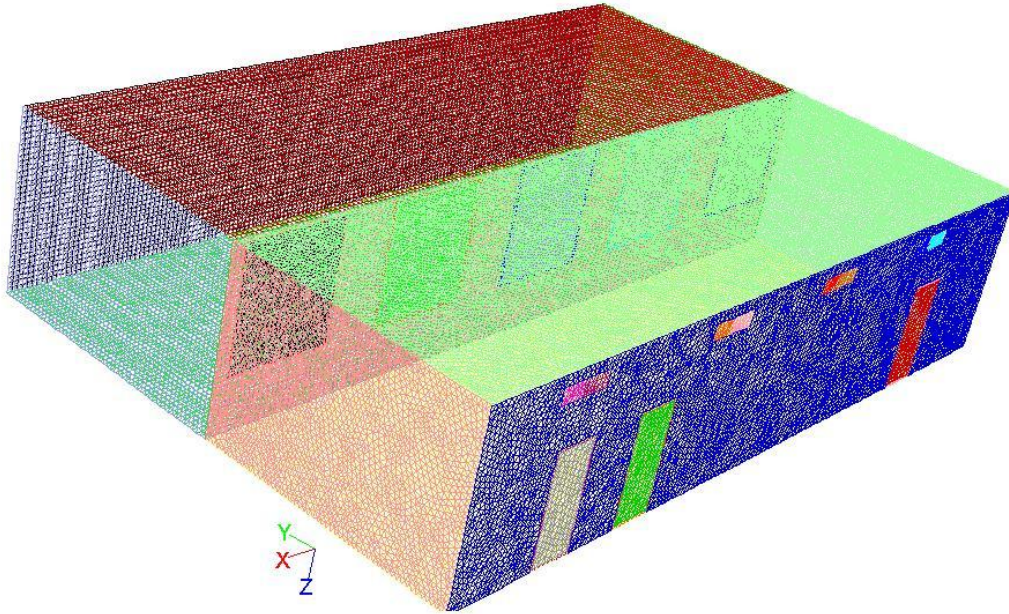
Στο εσωτερικό του γραφείου διακρίνουμε τις 8 θέσεις εργασίας και το σημείο μετρήσεων X.



Mesh

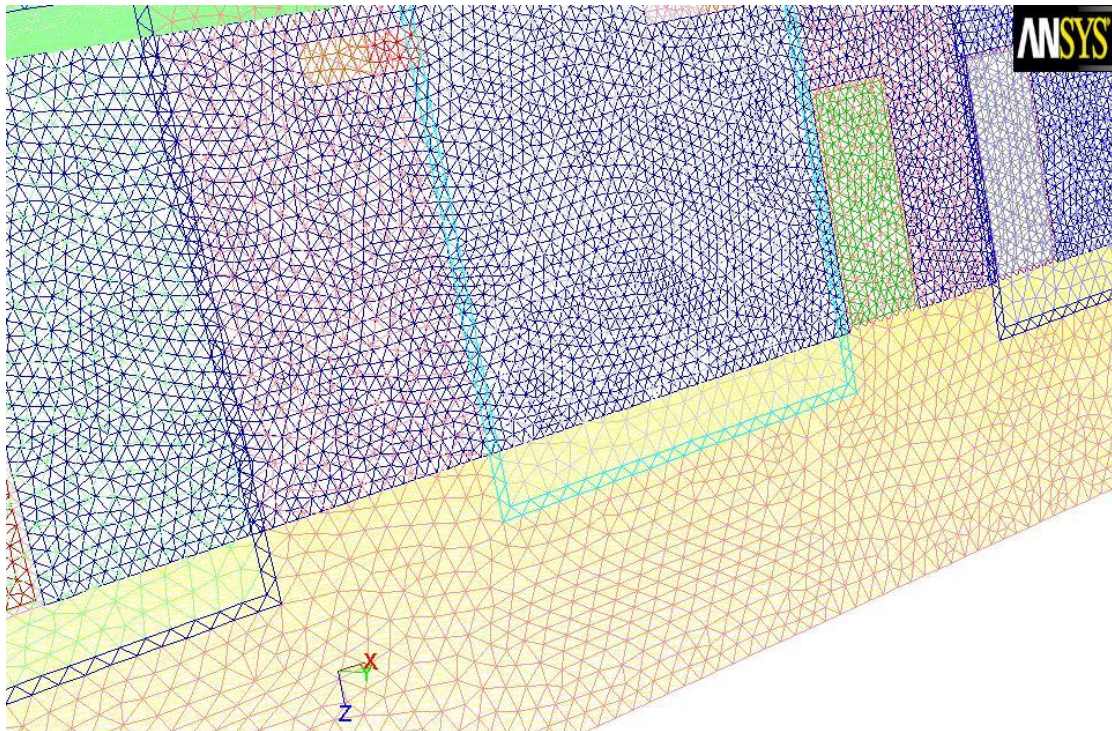
Feb 10, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)





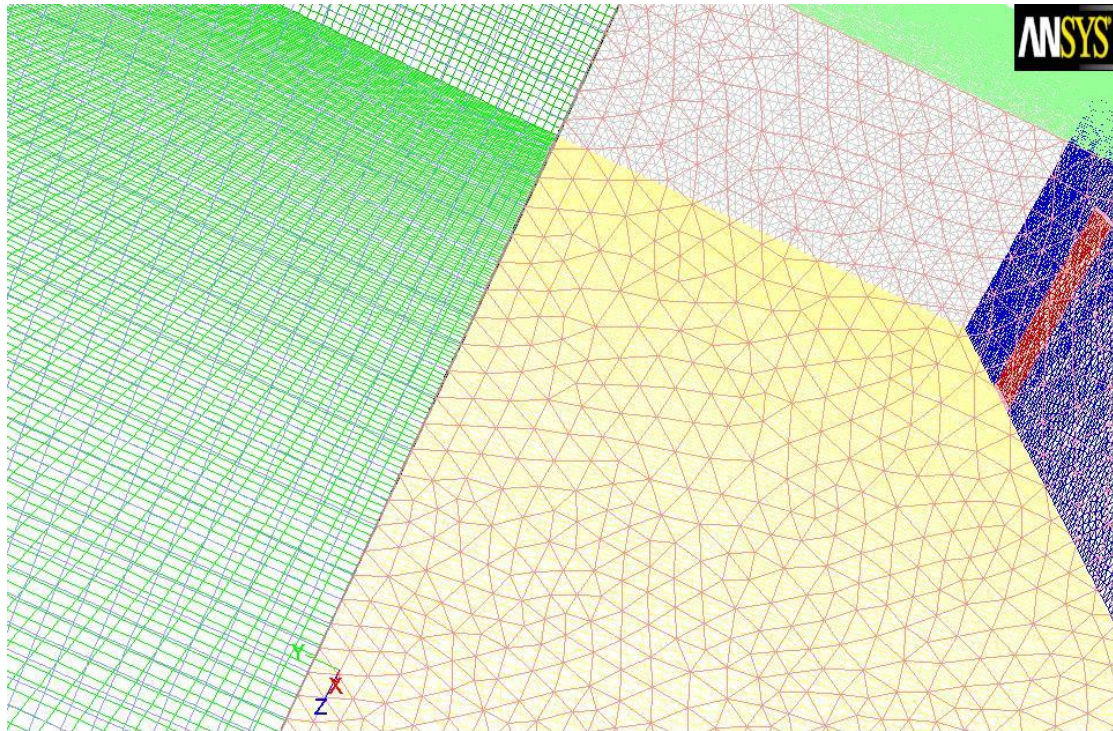
Mesh

Feb 07, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, ske)



Mesh

Feb 07, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, ske)



Mesh

Feb 10, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)

Εδώ βλέπουμε το πλέγμα οποίο έγινε η προσομοίωση το οποίο κατασκευάστηκε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα DESIGN MODELER. Τα κελιά δημιουργήθηκαν δίνοντας τιμές στις κατηγορίες μέγιστο μέγεθος επιφάνειας και μέγιστο μέγεθος tet. Έτσι δώσαμε και στις 2 κατηγορίες την τιμή 0.095 μ. και προέκυψε το πλέγμα των 2727804 κελιών. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν 2 ζώνες οι οποίες χωρίζονται μεταξύ τους απ' τον νοτιοανατολικό τοίχο στον οποίο βρίσκονται τα παράθυρα.

Η ποιότητα του πλέγματος

Η ποιότητα του πλέγματος παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και τη σταθερότητα των αριθμητικών υπολογισμών. Τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ποιότητα του πλέγματος είναι η κατανομή των κομβικών σημείων, η ομαλότητα και η ασυμμετρία. Ανεξάρτητα από τον τύπο του πλέγματος που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση, ο έλεγχος της ποιότητας του πλέγματος είναι απαραίτητος. Ανάλογα με τους τύπους των κελιών στο πλέγμα (τετραεδρικά, εξαεδρικά, πολυεδρικά, κτλ.), αξιολογούνται τα διαφορετικά κριτήρια ποιότητας:

- Κελιά squish σε όλα τα πλέγματα. Τα κελιά Squish είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της απόκλισης ενός κελιού από την ορθογωνικότητα σε σχέση με τις επιφάνειες του.
- Κελιά ίσου όγκου παραμορφωμένα σε tri / tet στοιχεία.
- Επιφάνειες squish σε πολυεδρικά πλέγματα.

- "Λόγος διαστάσεων" σε όλα τα πλέγματα.

Ο λόγος διαστάσεων είναι ένα μέτρο της επιμήκυνσης ενός κελιού. Υπολογίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τιμής προς την ελάχιστη τιμή από οποιαδήποτε από τις ακόλουθες αποστάσεις: οι κανονικές αποστάσεις μεταξύ του κέντρου βάρους των κελιών και του κέντρου βάρους των επιφανειών, και οι αποστάσεις μεταξύ του κέντρου βάρους των κελιών και των κόμβων. Για μοναδιαίο κύβο (βλέπε σχήμα 5.1), η μέγιστη απόσταση είναι 0,866, και η ελάχιστη απόσταση είναι 0,5, έτσι ώστε ο λόγος διαστάσεων είναι 1.732. Αυτό το είδος του ορισμού μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τύπο πλέγματος, συμπεριλαμβανομένου πολύεδρα.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση για την ποιότητα του πλέγματος ισχύουν τα εξής:

Μέγιστο squish κελιών = 0.802800

Μέγιστη παραμόρφωση κελιών = 0.844059

Μέγιστος λόγος διαστάσεων = 18.4002

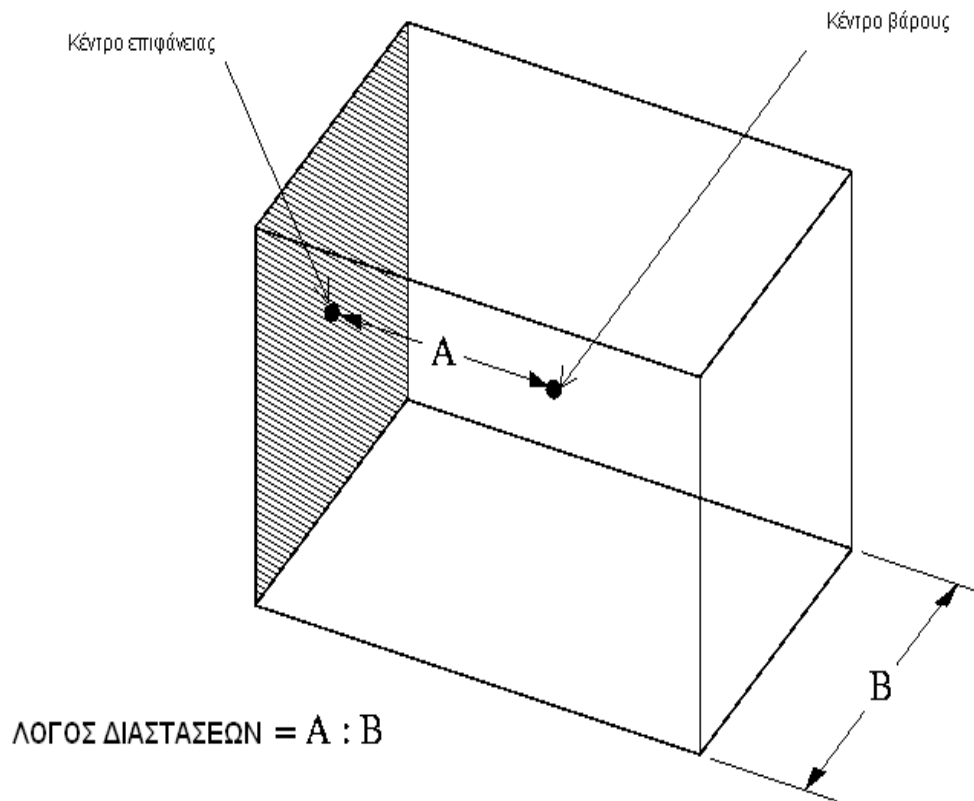
Μέγιστος όγκος κελιού= 8.429864

Ελάχιστος όγκος κελιού= 1.686805

Συνολικός αριθμός κελιών πλέγματος=2727804

Τέλος ο τύπος των κελιών του πλέγματος του γραφείου είναι τετραεδρικός/μικτός και του περιβάλλοντος εξαεδρικός.

## Σχήμα 5.1 Υπολογισμός του λόγου διαστάσεων για μοναδιαίο κύβο



### Πυκνότητα Κόμβων και Ομαδοποίηση

Από τη στιγμή που καθορίζουμε διακριτά μια συνεχής περιοχή, ο βαθμός στον οποίο επιλύονται εξοχές που χαρακτηρίζονται απ' την ροή (όπως στιβάδες διάτμησης, διαχωριζόμενες περιοχές, κρουστικά κύματα, οριακά στρώματα, και μικτές ζώνες), εξαρτάται από την πυκνότητα και την κατανομή των κόμβων στο πλέγμα. Σε πολλές περιπτώσεις, η κακή ανάλυση σε κρίσιμες περιοχές μπορεί να αλλάξει δραματικά τα χαρακτηριστικά της ροής. Για παράδειγμα, η πρόβλεψη του διαχωρισμού λόγω μιας ανεπιθύμητης κλίσης πίεσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επίλυση του πάνω οριακού στρώματος του σημείου διαχωρισμού.

Η επίλυση του οριακού στρώματος (δηλαδή, απόσταση πλέγματος κοντά σε τοίχους) παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της υπολογιζόμενης διατμητικής τάσης τοιχώματος και στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε στρωτές ροές όπου η προσαρμογή πλέγματος δίπλα στον τοίχο πρέπει να υπακούει στην εξίσωση

—  
—

Όπου = απόσταση του τοίχου από το προσαρμοσμένο κέντρο βάρους των κελιών

= ταχύτητα ελεύθερης ροής

κινηματικό ιξώδες του ρευστού

$\chi$  = απόσταση κατά μήκος του τοίχου από το σημείο εκκίνησης του οριακού στρώματος

Η σωστή ανάλυση πλέγματος τυρβωδών ροών είναι επίσης πολύ σημαντική. Λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασης της μέσης ροής και τύρβης, τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις τυρβώδεις ροές τείνουν να είναι πιο επιρρεπή σε πλέγμα εξάρτησης από εκείνα των στρωτών ροών. Στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα, απαιτούνται διαφορετικές αναλύσεις πλέγματος ανάλογα με τον τύπο μοντέλου που χρησιμοποιείται κοντά στο τοίχωμα.

Σε γενικές γραμμές, καμία δίοδος ροής δεν θα πρέπει να αντιπροσωπεύεται από λιγότερα από 5 κελιά. Οι περισσότερες περιπτώσεις θα απαιτούν πολλά περισσότερα κελιά για να επιλύσουν επαρκώς την δίοδο. Σε περιοχές μεγάλων κλίσεων, όπως σε στρώματα διάτμησης ή ζώνες ανάμειξης, το πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά πυκνό για να ελαχιστοποιηθεί η αλλαγή στην ροή που ποικίλει από κελί σε κελί. Δυστυχώς, είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν περαιτέρω οι θέσεις των σημαντικών χαρακτηριστικών ροής. Επιπλέον, η ανάλυση του πλέγματος σε πιο πολύπλοκα τρισδιάστατα πεδία ροής θα πρέπει να περιορίζεται από τον χρόνο υπολογισμού και τους περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους (δηλαδή, τη μνήμη και τον χώρο στο δίσκο). Παρά το γεγονός ότι η ακρίβεια αυξάνεται με μεγαλύτερα πλέγματα, επίσης αυξάνονται οι απαιτήσεις σε επεξεργαστή και μνήμη για τον υπολογισμό της επίλυσης και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Βελτίωση πλέγματος προσαρμοσμένη στην επίλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει ή να μειώσει την πυκνότητα του πλέγματος με βάση την εξέλιξη του πεδίου ροής, και επομένως να παρέχει τη δυνατότητα για πιο οικονομική χρήση των πλεγματικών σημείων (και επομένως μειώνονται οι απαιτήσεις χρόνου και πόρων).

### Ομαλότητα

Το σφάλμα αποκοπής είναι η διαφορά μεταξύ των επιμέρους παραγώγων στις κύριες εξισώσεις και των διακριτών προσεγγίσεων των. Ταχείες μεταβολές στον όγκο κελιού μεταξύ γειτονικών κελιών μεταφράζεται σε μεγαλύτερα σφάλματα αποκοπής. Το ANSYS FLUENT παρέχει τη δυνατότητα για βελτίωση της ομαλότητας με πύκνωση του πλέγματος μέσω της αλλαγής του όγκου ή της διαβάθμισης του όγκου κελιού.

### Σχήμα κελιού



Το σχήμα του κελιού (συμπεριλαμβανομένου της παραμόρφωσης του, του λόγου διαστάσεων, και του squish) έχει επίσης σημαντική επίπτωση στην ακρίβεια της αριθμητικής επίλυσης.

- Παραμόρφωση ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του σχήματος του κελιού και του σχήματος ενός ισόπλευρου κελιού ισοδύναμου όγκου. Κελιά μεγάλης παραμόρφωσης μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια και να αποσταθεροποιήσουν την επίλυση. Για παράδειγμα, τα βέλτιστα τετράπλευρα πλέγματα θα έχουν γωνίες δίνης κοντά στις 90 μοίρες, ενώ τα τριγωνικά πλέγματα θα πρέπει κατά προτίμηση να έχουν γωνίες κοντά στις 60 μοίρες και οι γωνίες να είναι λιγότερο από 90 μοίρες. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι η μέγιστη παραμόρφωση για ένα τριγωνικό / τετραεδρικό πλέγμα στις περισσότερες ροές θα πρέπει να διατηρείται κάτω από 0.95, με μια μέση τιμή που να είναι μικρότερη από 0,33. Μια μέγιστη τιμή πάνω από 0.95 μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολίες σύγκλισης και μπορεί να απαιτήσει αλλαγές στις ρυθμίσεις επίλυσης, όπως είναι η μείωση των παραγόντων υποχαλάρωσης ή η μετάβαση σε συνδυασμό επίλυσης με βάση την πίεση.

- Ο λόγος διαστάσεων είναι ένα μέτρο επιμήκυνσης του κελιού. Για ιδιαίτερα ανισοτροπικές ροές, ακραίοι λόγοι διαστάσεων μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα με λιγότερα κελιά. Γενικά, είναι καλύτερο να αποφευχθούν λόγοι διαστάσεων μεγαλύτεροι του 5:1 στη μαζική ροή (μακριά από τα τοιχώματα). Από την άλλη πλευρά, τα τετράπλευρα / εξαεδρικά / σφηνοειδή κελιά μέσα στο οριακό στρώμα, μπορεί να επιμηκυνθούν σε λόγο διαστάσεων μέχρι 10:1 στις περισσότερες περιπτώσεις. Όσον αφορά την σταθερότητα της επίλυσης της ροής, μπορεί να πάει όσο το δυνατόν ψηλότερα ` ωστόσο, όσον αφορά τη σταθερότητα της επίλυσης της ενέργειας, ο μέγιστος λόγος διαστάσεων θα πρέπει να διατηρείται κάτω από 35:1.

- Ο δείκτης Squish υπολογίζεται για τα κελιά χρησιμοποιώντας το διάνυσμα με κατεύθυνση από το κέντρο βάρους των κελιών σε κάθε μια από τις επιφάνειες του και το αντίστοιχο διάνυσμα περιοχής επιφάνειας. Τα χειρότερα κελιά θα έχουν ένα δείκτη squish κελιού κοντά στο 1, και τα καλύτερα κελιά κοντά στο 0. Για τετραεδρικά πλέγματα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε την παραμόρφωση είτε τον δείκτη squish κελιού για τη μέτρηση της ποιότητας του πλέγματος. Η πληροφορία παραμόρφωσης δεν είναι διαθέσιμη για πολυεδρικά πλέγματα, έτσι πρέπει να βασιστούμε στον δείκτη squish κελιού και σε ένα επιπλέον δείκτη για το squish της επιφάνειας (το οποίο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το διάνυσμα που συνδέει τα κέντρα βάρους των γειτονικών κελιών). Ένας καλός εμπειρικός κανόνας είναι ότι η μέγιστη παραμόρφωση για τετραεδρικά κελιά θα πρέπει να είναι λιγότερη από 0.95. Ο μέγιστος δείκτης squish κελιών για όλους τους τύπους των κελιών θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0,99.

Η αλλαγή του μεγέθους των κελιών και των εδρών των κελιών είναι συμπληρωματικό μέτρο ποιότητας που θα μπορούσε να επηρεάσει την σταθερότητα και την ακρίβεια.

#### Εξάρτηση απ' το πεδίο ροής

Η επίδραση της ανάλυσης, της ομαλότητας, και του σχήματος κελιού στην ακρίβεια και στη σταθερότητα της διαδικασίας επίλυσης εξαρτάται από το πεδίο ροής που προσομοιώνεται. Για παράδειγμα, πολύ παραμορφωμένα κελιά μπορούν να γίνουν αποδεκτά σε ευνοϊκές περιοχές ροής, αλλά μπορεί να είναι πολύ επιζήμια σε περιοχές με έντονη κλίση ροής.

Δεδομένου ότι οι τοποθεσίες των ισχυρών κλίσεων ροής γενικά δεν μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων, θα πρέπει να προσπαθήσουμε να επιτύχουμε ένα πλέγμα υψηλής ποιότητας σε όλο το πεδίο ροής.

#### 5.1.4.2 Οριακές συνθήκες

Οριακές συνθήκες έχουμε στους εξαεριστήρες και στις χαραμάδες των πορτών και των παραθύρων. Στους επόμενους πίνακες δίνονται οι τιμές των οριακών συνθηκών.

<b>Αέρας</b>	<b>Θερμοκρασία(°C)</b>	<b>Σχετική υγρασία(%)</b>
Περιβάλλον (πείραμα)	10.42	85.54
Εξαεριστήρες (πείραμα)	27	39

Δίοδος	Ροή αέριας μάζας(kg/s)	
	Είσοδος	Έξοδος
Εξαεριστήρας1 (πείραμα)	0.021184	0.011788
Εξαεριστήρας2 (πείραμα)	0.020544	0.012516
Εξαεριστήρας3 (πείραμα)	0.019008	0.01176
Εξαεριστήρας4 (πείραμα)	0.023616	0.013468
Παράθυρα (COMIS)		0.00079

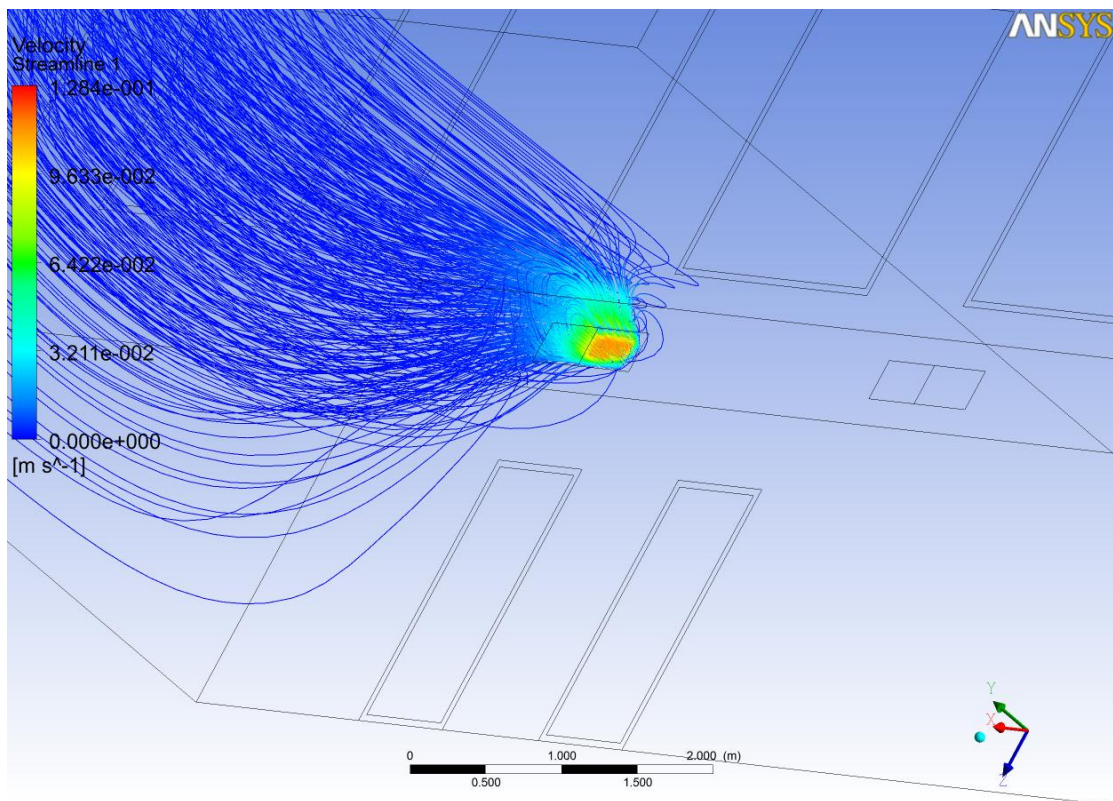
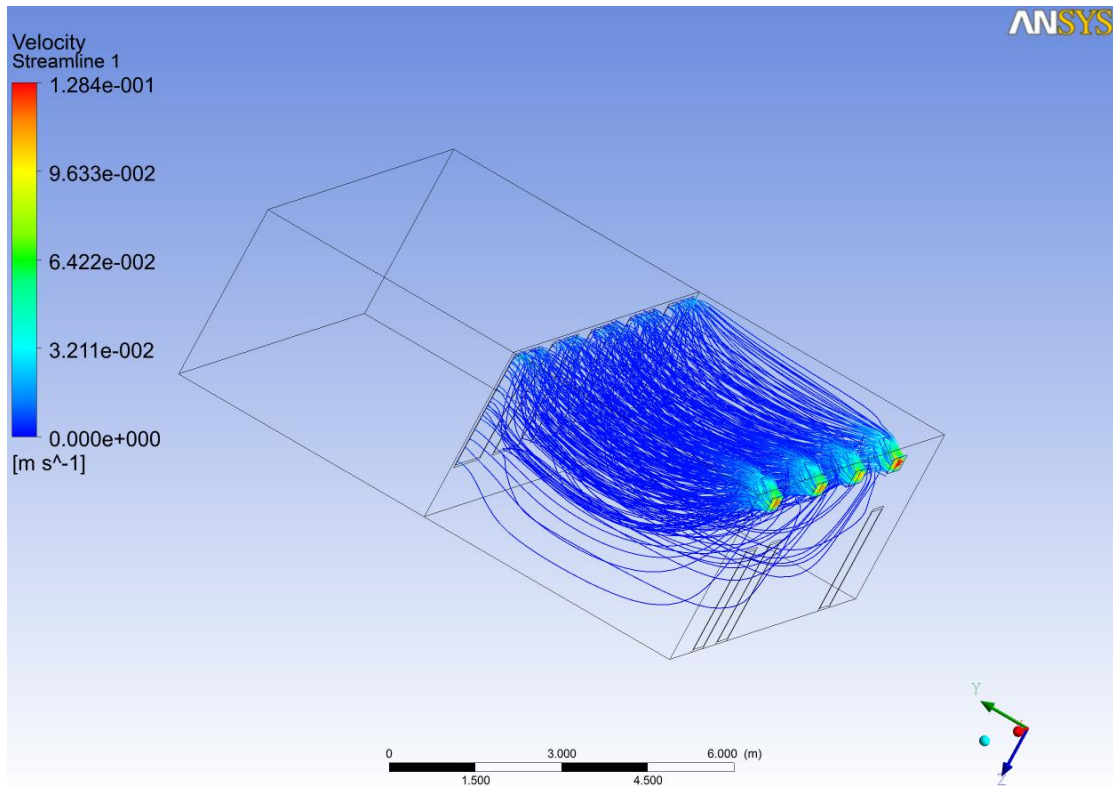
#### 5.1.4.3 Αριθμητική επίλυση

Στη παρούσα προσομοίωση έχουμε χρησιμοποιήσει αλγόριθμο πίεσης ταχύτητας SIMPLE(απλό), η κλίση υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Least Squares Cell-Based(ελαχίστων τετραγώνων), για σχήμα παρεμβολής πίεσης επιλέξαμε standard και τέλος για την ορμή, την ενέργεια, την τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ρυθμό σκέδασης της τύρβης χρησιμοποιήσαμε προσήνεμα πρώτης τάξης. Γι όλες αυτές τις έννοιες έχουμε αναφερθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 στην παράγραφο 4.4.4.4.

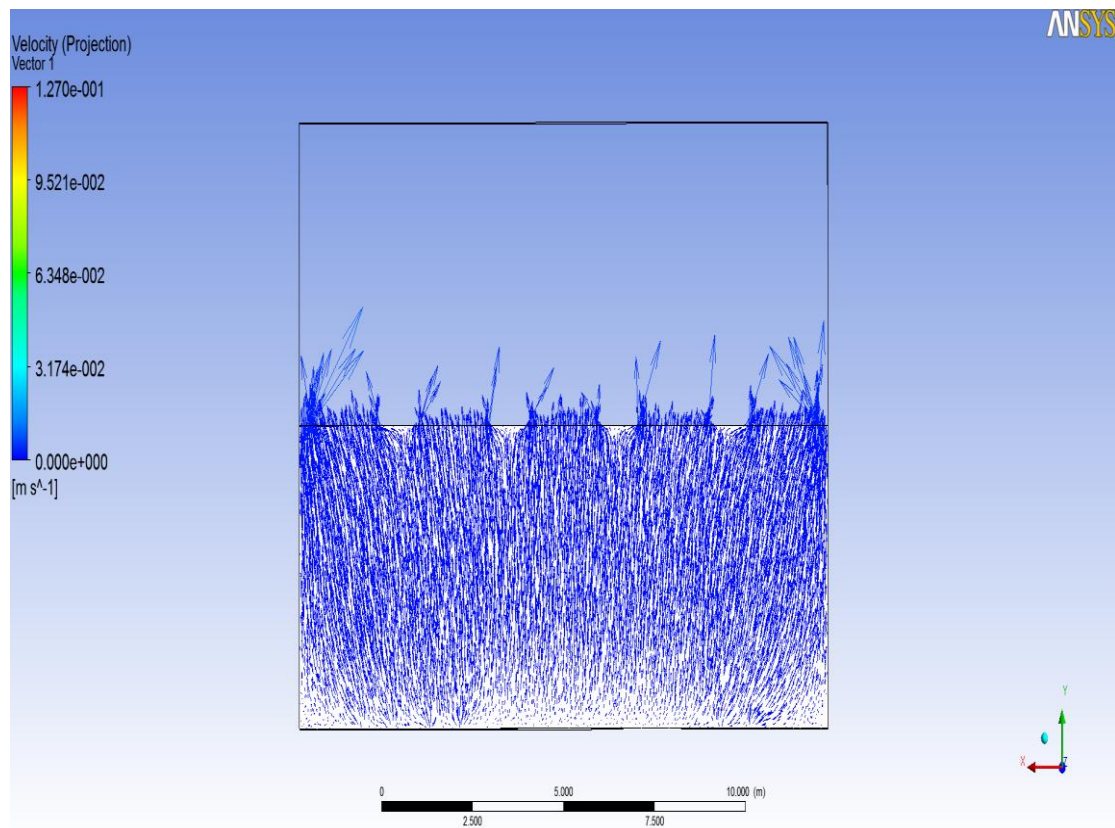
5.1.4.4 Αποτελέσματα της ροής του αέρα, θερμότητας, σχετικής υγρασίας και του αδιαστατοποιημένου κλάσματος συγκέντρωσης ρύπου στις θέσεις εργασίας των τρισδιάστατων εξισώσεων.

### 5.1.4.4.1 Ταχύτητα

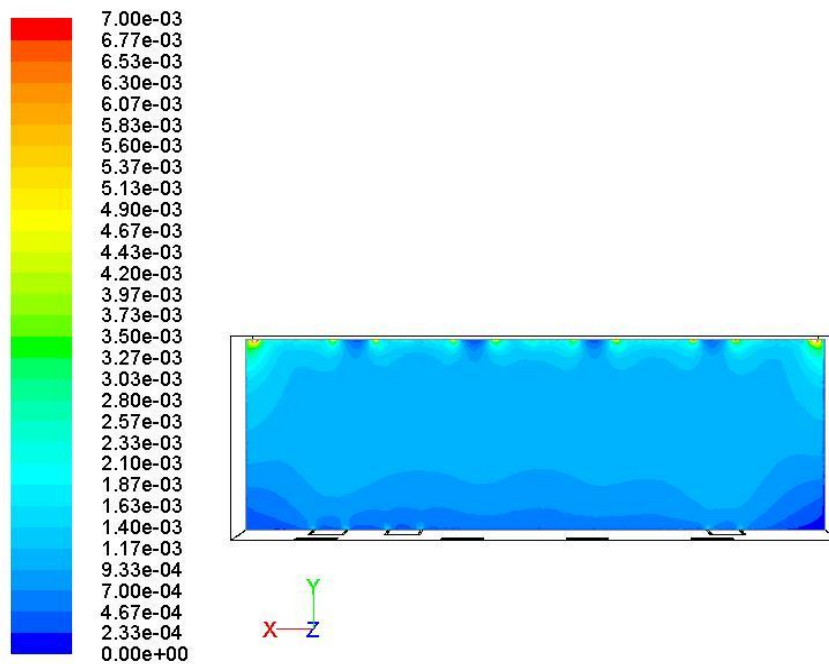
Οι ροϊκές γραμμές της αέριας μάζας στον χώρο



Το διάνυσμα της ταχύτητας στο ύψος εργασίας  $z=1.1 \mu$ .



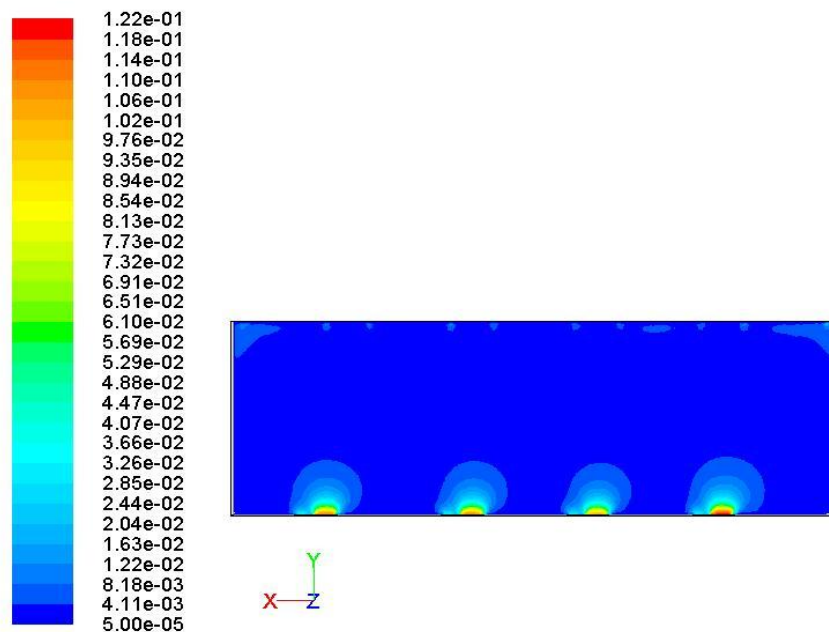
Το μέτρο της ταχύτητας στο ύψος εργασίας  $z=1.1 \mu$ .



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Mar 06, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)

Το μέτρο της ταχύτητας στο ύψος των εξαεριστήρων  $z=2.95 \mu$ .

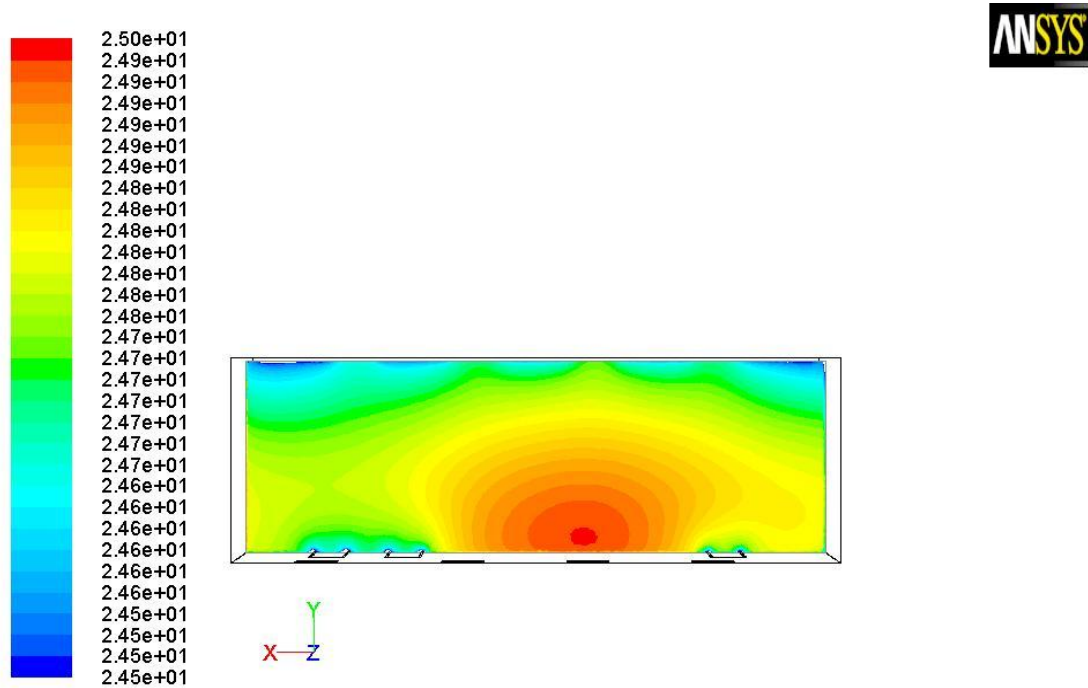


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Mar 06, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)

### 5.1.4.2 Θερμοκρασία

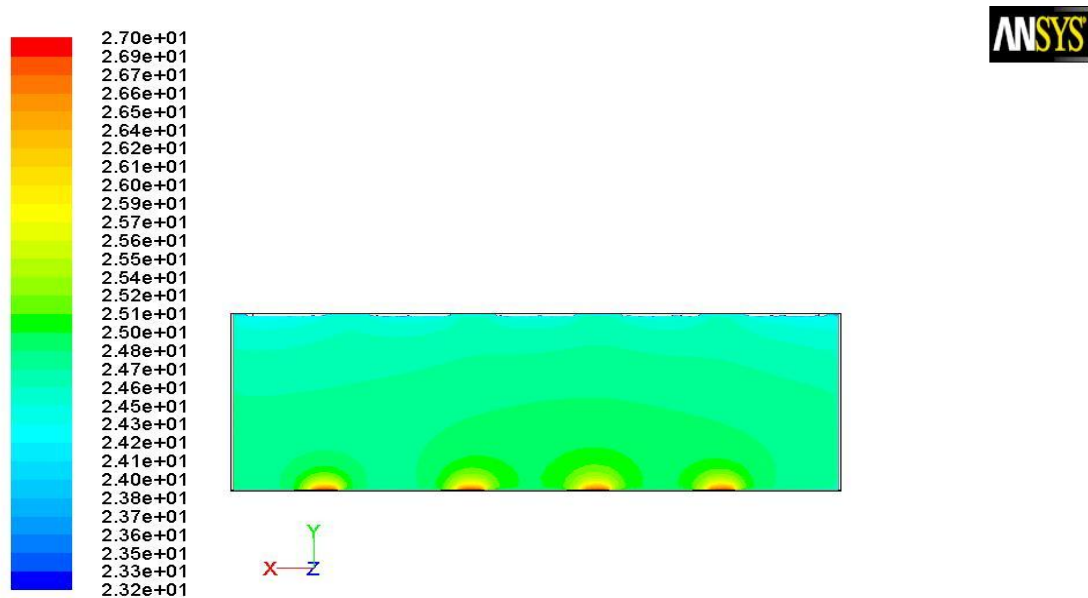
Κατανομή της θερμοκρασίας στο ύψος εργασίας  $z=1.1 \mu$ .



Contours of Static Temperature (c)

Mar 06, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)

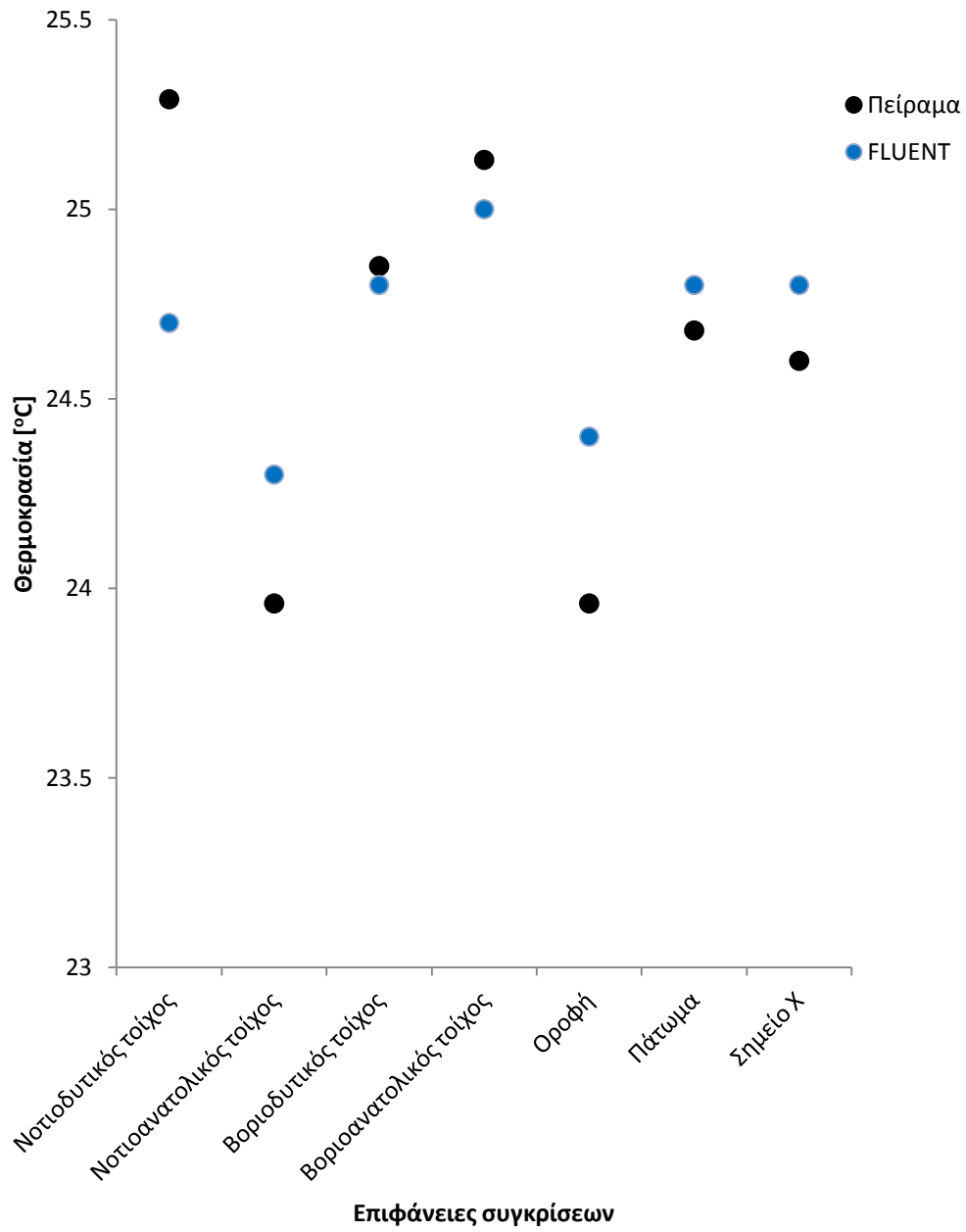
Κατανομή της θερμοκρασίας στο ύψος των εξαεριστήρων  $z=2.95 \mu$ .



Contours of Static Temperature (c)

Mar 06, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)

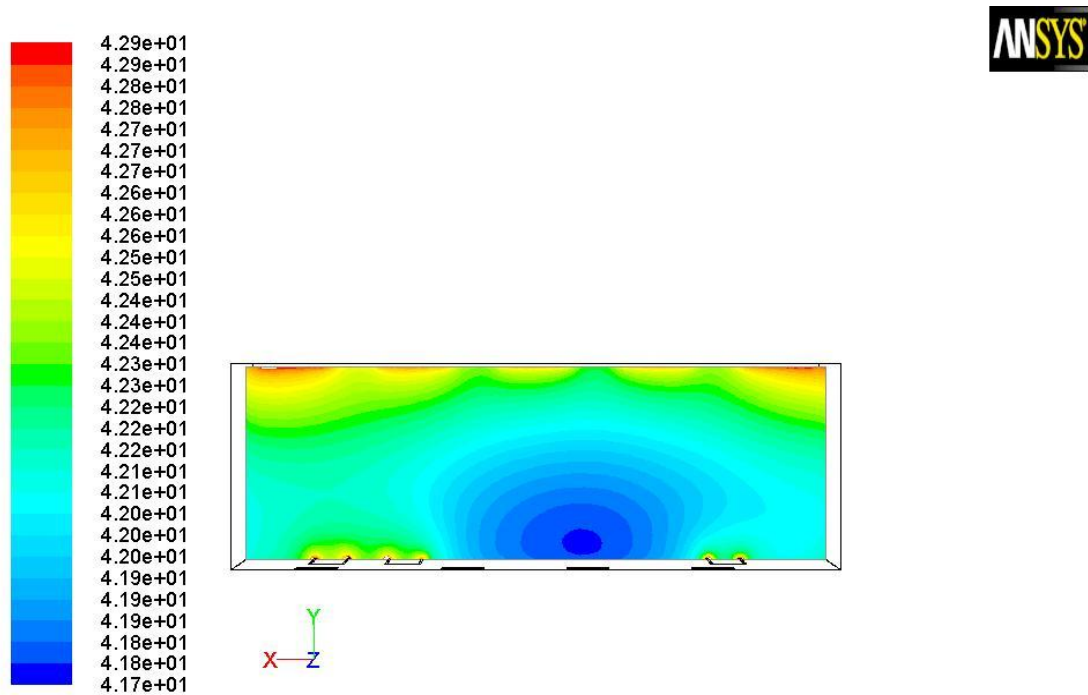
Σύγκριση πειραματικών και τιμών προσομοίωσης των θερμοκρασιών στους τοίχους, την οροφή, το δάπεδο και το σημείο μετρήσεων X:





### 5.1.4.4.3 Σχετική υγρασία

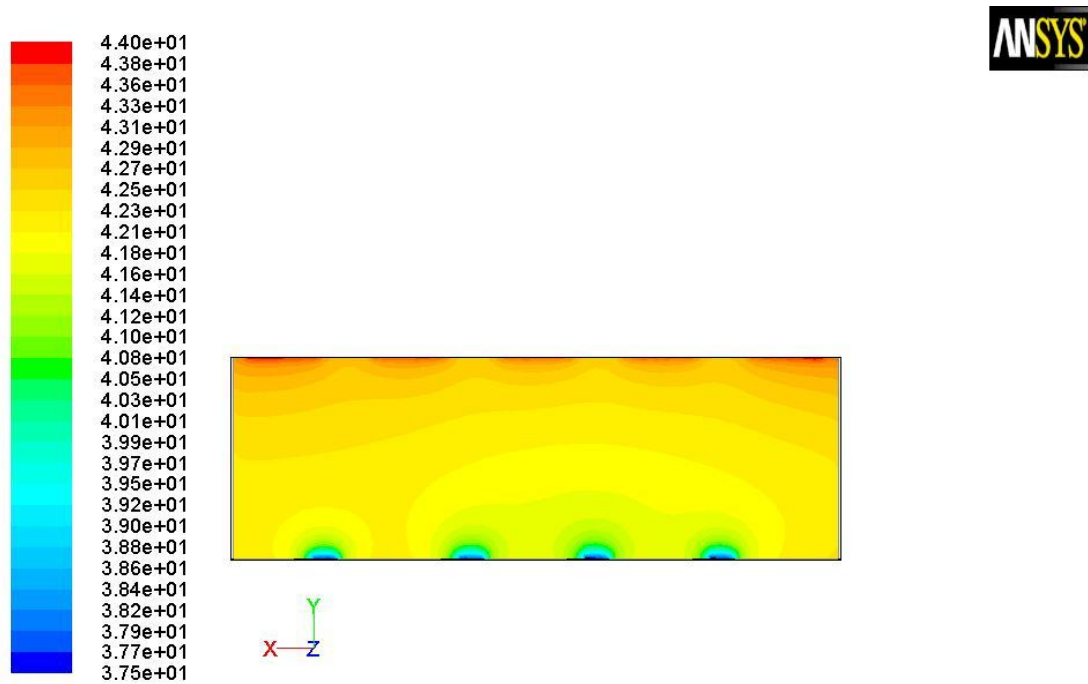
Η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο ύψος εργασίας  $z=1.1\mu$ .



Contours of Relative Humidity (%)

Mar 06, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)

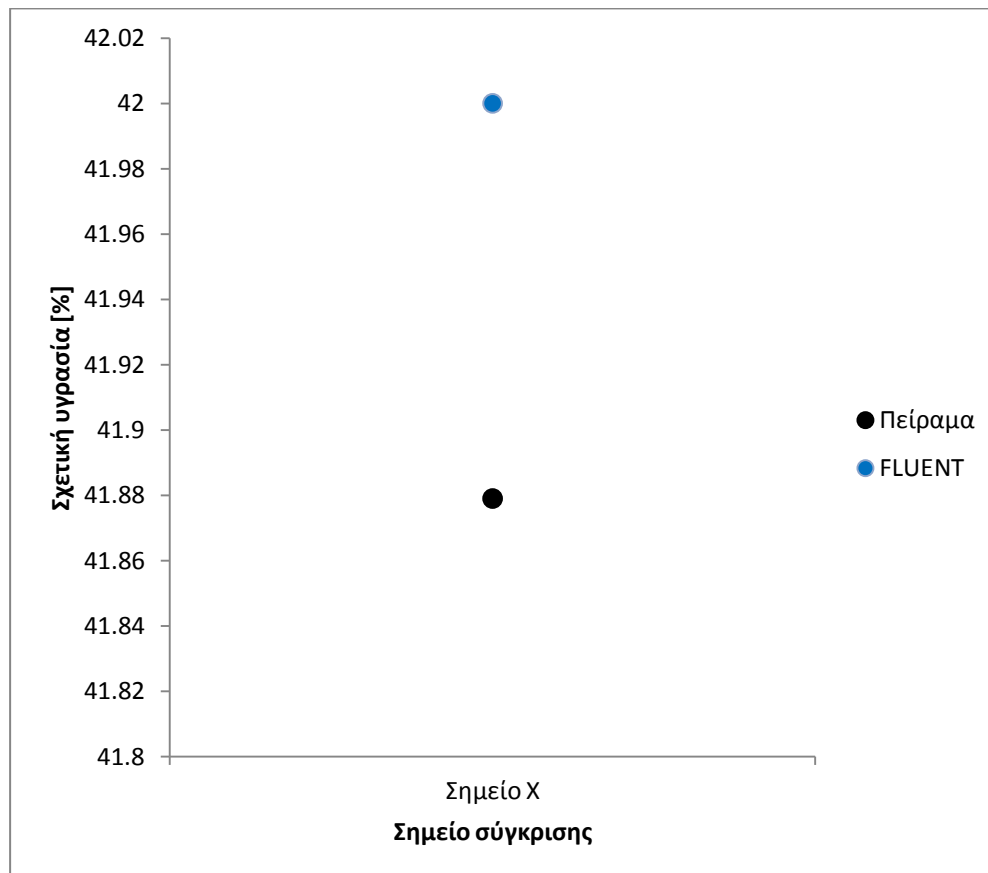
Η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο ύψος των εξαεριστήρων  $z=2.95\mu$ .



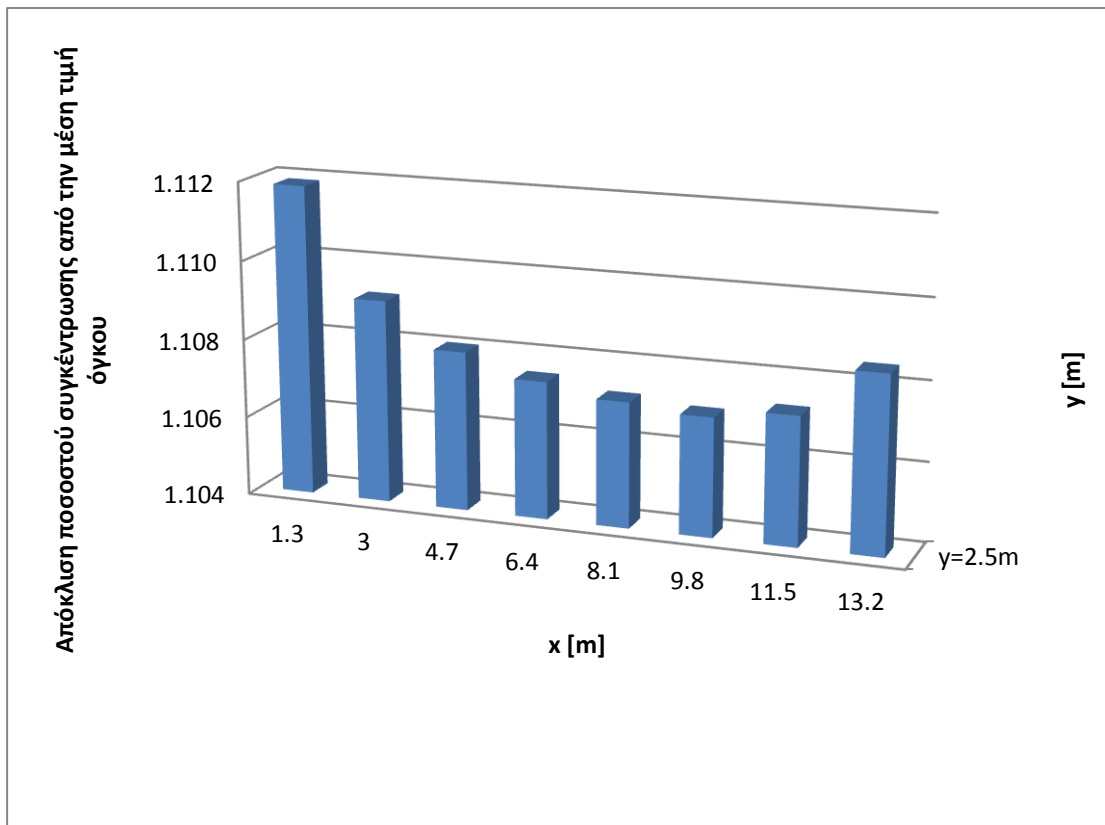
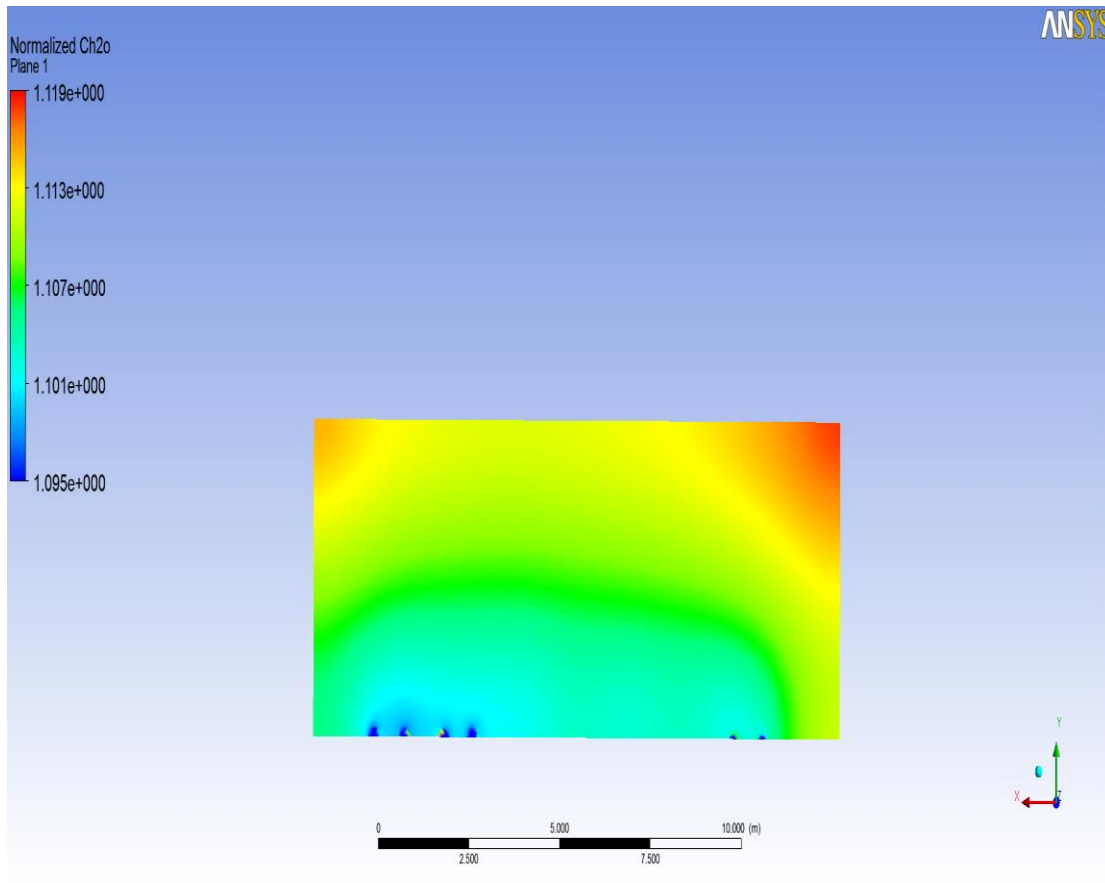
Contours of Relative Humidity (%)

Mar 06, 2014  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, spe, rke)

Σύγκριση πειραματικής και τιμής προσομοίωσης της σχετικής υγρασίας στο σημείο μετρήσεων X:



5.1.4.4.4 Το αδιαστατοποιημένο κλάσμα συγκέντρωσης ρύπου στις θέσεις εργασίας  $z=1.1\mu$ .



Υπολογισμός αδιαστατοποιημένου κλάσματος:

1.205 κλάσμα μάζας ρύπου/E A/(λ/ν)

Όπου

Κλάσμα μάζας ρύπου=— kg/

E:πειραματική τιμή εκπομπής ρύπου =2.07002 kg/

I=—

V=όγκος πηγής ρύπου=1.698541

A:εμβαδόν επιφάνειας πηγής ρύπου=72.5

λ:ρυθμός εναλλαγής αέρα=0.000361111

ν:όγκος γραφείου=239.25

#### 5.1.4.4.5 Δείκτες ποιότητας αέρα και θερμικής άνεσης

Ο δείκτης PPD(προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων) (ISO 7730:2005) υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

Ο όρος PMV(μέσος προβλεπόμενος όγκος) υπολογίζεται ως εξής:

Με

$$L = M - W - [3.96 * 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (T_{cl} - T) + 3.05 * 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - P_a] + 0.42(M - W - 58.15) + 1.7 * 10^{-5} M(5867 - P_a) + 0.0014M(34 - T)]$$

M= μεταβολισμός —

W= εξωτερική εργασία —

T= τοπική θερμοκρασία περιβάλλοντος

$P_a$  = μερική πίεση υδρατμών (Pa)

$T_{cl}$  = η επιφανειακή θερμοκρασία των ενδυμάτων (

$f_{cl}$  = ο συντελεστής επιφάνειας ενδυμάτων

Όπου

$f_{cl}$ ,  $T_{cl}$ ,  $h_c$  στις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζονται ως εξής:

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645I_{cl} \text{ για } I_{cl} \geq 0.078,$$

$$f_{cl} = 1.00 + 1.290I_{cl} \text{ για } I_{cl} < 0.078,$$

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl}\{3.96 * 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl}h_{cl}(T_{cl} - T)\}$$

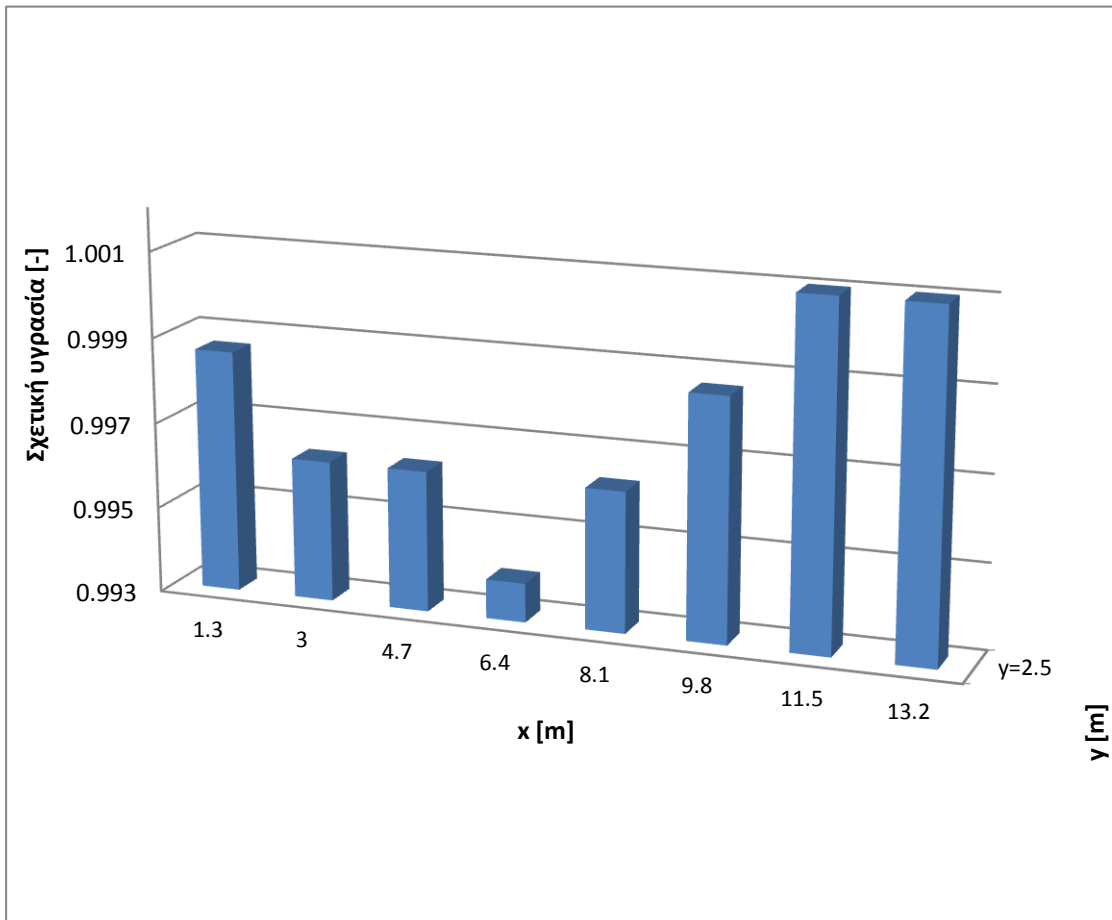
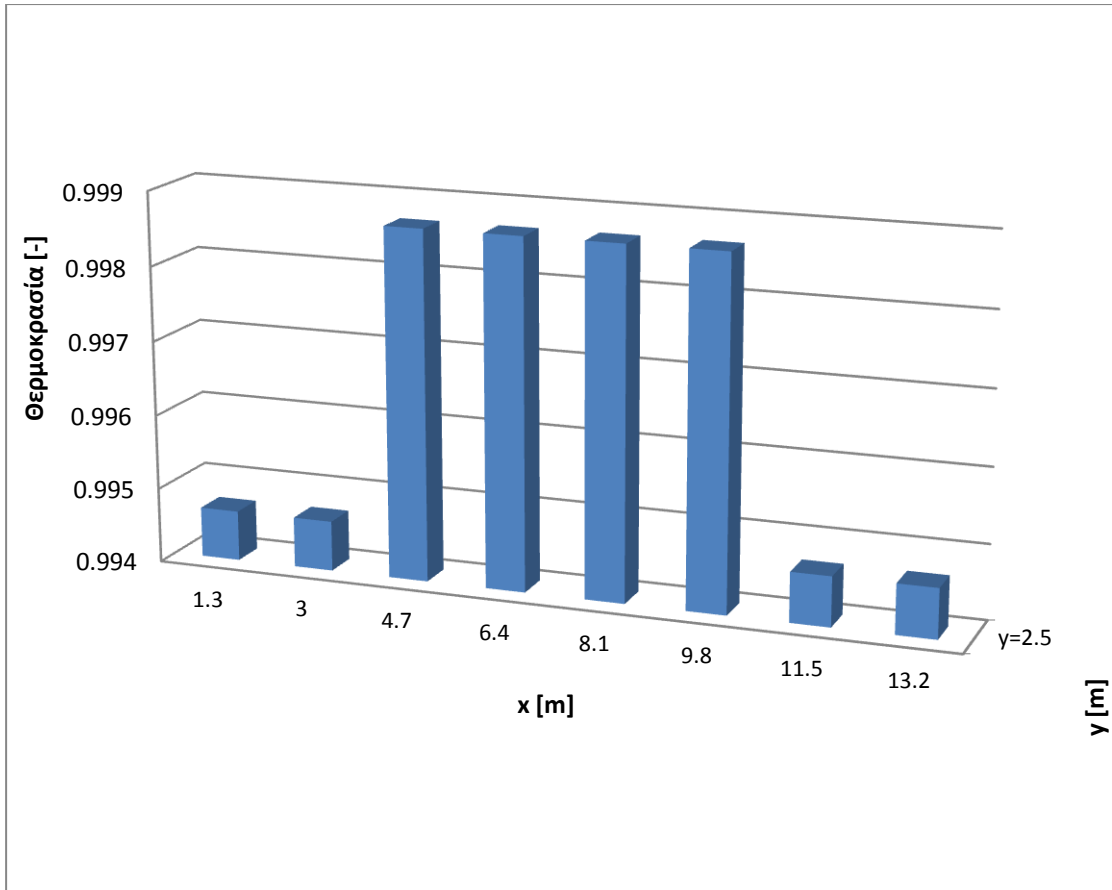
Όπου  $h_c$  η μόνωση των ρούχων(—

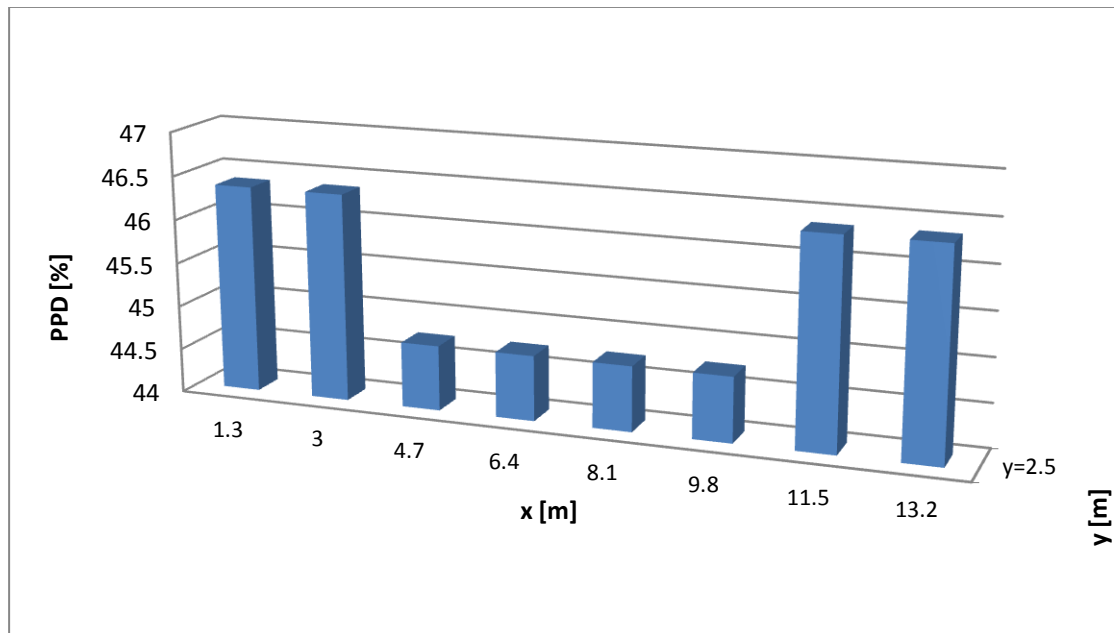
Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή,  $h_c$ (— , υπολογίζεται ως εξής:

$$h_c = 2.38(T_{cl} - T)^{0.25} \text{ για } 2.38(T_{cl} - T)^{0.25} \geq 12.1u^{0.5}$$

$$h_c = 12.1u^{0.5} \text{ για } 2.38(T_{cl} - T)^{0.25} < 12.1u^{0.5}$$

Με βάση της μετρήσεις που έγιναν στις 8 θέσεις εργασίας για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία αλλά και με τη χρήση των παραπάνω εξισώσεων για τον υπολογισμό του δείκτη θερμικής άνεσης PPD προκύπτουν τα επόμενα διαγράμματα:





Ο δείκτης PS(ποσοστό ικανοποιημένων)(Fountain et al.(1997) )

υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

PS=

Όπου  $T_{op}$ =θερμοκρασία λειτουργίας (

$v$ =ταχύτητα αέρα (m/s)

Ο δείκτης PD(ποσοστό δυσαρεστημένων λόγω σχεδίασης)(Fountain et al.(1997))υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

PD=

Όπου  $T_a$ =θερμοκρασία αέρα (

$v$ =ταχύτητα αέρα (m/s)

$T_u$ =ένταση τύρβης (%)

Ο δείκτης TS(θερμική αίσθηση) (Fountain et al.(1997) ) υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

TS=

Όπου  $T_a$ =θερμοκρασία αέρα (

$p$ =πίεση ατμών (kPa)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά η Ποιότητα του Αέρα Εσωτερικών Χώρων(Indoor Air Quality,IAQ), αναγνωρίζεται ως ένα σημαντικό πρόβλημα του περιβάλλοντος και κυρίως της υγείας των ανθρώπων στις περισσότερες χώρες καθώς οι σύγχρονοι πληθυσμοί συνήθως δαπανούν 80-90% του χρόνου τους, είτε στο σπίτι, είτε στην εργασία ή οπουδήποτε αλλού. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 για την πρόγνωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων (IAQ) στη βιβλιογραφία εμφανίζονται 4 κατηγορίες μοντέλων:

- 1 Τα πολυζωνικά μοντέλα,
- 2 Τα μοντέλα ζωνών,
- 3 Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής,
- 4 Τα πολυζωνικά μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Τα πολυζωνικά μοντέλα είναι κατάλληλα για κτίρια που περιέχουν περισσότερες από μία καλά αναμεμιγμένες ζώνες.

Τα μοντέλα ζωνών έχουν αναπτυχθεί επειδή η παραδοχή ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή από δωμάτιο σε δωμάτιο δεν είναι επαρκής για να προβλέψει τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου.

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική (YPM) (Computational Fluid Dynamics, CFD) δεν αναπτύχθηκε συγκεκριμένα για να προσομοιώνει κτίρια. Οι εφαρμογές της περιλαμβάνουν την αεροδυναμική των αεροσκαφών, την υδροδυναμική πλοίων, τη μετεωρολογία, τη βιοϊατρική μηχανική, τη μελέτη της διασποράς ρύπων το σχεδιασμό μικρο-ηλεκτρονικών συστημάτων ψύξης, το σχεδιασμό στροβίλων, εξοπλισμών καύσης κλπ. Παρόλα αυτά όπως πολλά κοινά ρευστά, όπως για παράδειγμα το νερό, ο αέρας είναι Νευτώνειο ρευστό, εμφανίζοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης. Για την κίνηση του αέρα του δωματίου οι κινητήριες δυνάμεις είναι οι διαφορές πίεσης, οι οποίες προκαλούνται από τον άνεμο, η θερμική άνοση, τα μηχανικά συστήματα αερισμού ή συνδυασμός αυτών. Τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα σε εσωτερικούς χώρους είναι η χαμηλή ταχύτητα και η υψηλή ένταση της τύρβης. Η ροή του αέρα σε ένα δωμάτιο μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη καθώς οι ταχύτητες τείνουν να είναι χαμηλές, της τάξης των μέτρων ή εκατοστών ανά δευτερόλεπτο (σε αριθμούς Mach λιγότερο από 0.3, δηλαδή ταχύτητα περίπου 100 m/s, ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστος). Έτσι τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής αποδεικνύονται κατάλληλα για την μελέτη της ποιότητας αέρα και της θερμικής άνεσης εσωτερικών χώρων. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι καλή επιλογή για τους χρήστες οι οποίοι επικεντρώνονται στα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά της ροής του αέρα και στην διασπορά ρύπων σε μικρά τμήματα των κτιρίων (π.χ. μονόκλινα



δωμάτια). Οι μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής μπορούν να προσομοιώσουν τη λεπτομερή ενδοζωνική ροή του αέρα και τις κατανομές θερμοκρασίας σε ένα δωμάτιο με ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και άλλων σχετικών εξισώσεων. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής χαρακτηρίζονται από τον πλούτο των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις πληροφορίες σχετικά με τη ροή του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σε ένα δωμάτιο.

Τέλος τα τελευταία χρόνια αρκετοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να συνδέσουν τα πολυζωνικά και τα CFD μοντέλα, προκειμένου να αναγνωρίσουν τα οφέλη και των δύο. Τα δύο μοντέλα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους: το πολυζωνικό μοντέλο παρέχει ορισμένα από τα οριακά δεδομένα που απαιτούνται για τον κώδικα CFD και τα αποτελέσματα του κώδικα CFD τροφοδοτούνται στο πολυζωνικό μοντέλο.

Σε ένα πρόβλημα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής όταν μελετάμε τύρβη και χρησιμοποιούμε τη μεθοδολογία RANS πρέπει να επιλέξουμε μοντέλο τύρβης. Τα κλασικά μοντέλα βασίζονται στις εξισώσεις RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes. Αυτά σύμφωνα με τον André Bakker (2005) ταξινομούνται συνήθως ως εξής:

- 1 Μοντέλα μηδενικής εξίσωσης: Μοντέλα μήκους ανάμιξης,
- 2 Μοντέλα μιας εξίσωσης: Spalart-Almaras,
- 3 Μοντέλα δύο εξισώσεων: Μοντέλα k-ε (standard, RNG, realisable), το μοντέλο k-ω και ASM,
- 4 Μοντέλα επτά εξισώσεων: Μοντέλα τάσεων Reynolds.

Ο αριθμός των εξισώσεων δηλώνει τον αριθμό των επιπρόσθετων μερικών διαφορικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν.

Τα μοντέλα τύρβης που επιλέγονται συχνότερα είναι τα μοντέλα δύο εξισώσεων k-ε και πιο συγκεκριμένα το standard και το realisable. Ο λόγος που επιλέγονται αυτά τα δύο μοντέλα είναι ότι το standard είναι σχετικά απλό στην εφαρμογή του, οδηγεί σε σταθερούς υπολογισμούς που συγκλίνουν σχετικά εύκολα και δίνει λογικές προβλέψεις για πολλές ροές και το realisable την ίδια εξίσωση τυρβώδης κινητικής ενέργειας, όπως το μοντέλο standard και έχει βελτιωμένη απόδοση για ροές που περιλαμβάνουν επίπεδα και στρόγγυλα τζετ(προβλέπει την κατανομή γύρω από το τζετ σωστά), για ροές με οριακά στρώματα κάτω από ισχυρά αρνητικές κλίσεις πίεσης ή διαχωρισμού, για ροές περιστροφής, ή ανακυκλοφορίας και για ροές με έντονη ακρίβεια καμπυλότητας.

Στα αποτελέσματα των δεικτών αξιολόγησης βλέπουμε ότι στις τιμές προσομοίωσης της ταχύτητας το μοντέλο standard k-ε είναι συγκρίσιμο με το μοντέλο realisable k-ε. Στις τιμές προσομοίωσης της θερμοκρασίας το μοντέλο realisable k-ε έχει ελαφρώς καλύτερη σύγκλιση απ' το μοντέλο standard k-ε. Η καλύτερη σύγκλιση πειραματικών και τιμών προσομοίωσης της θερμοκρασίας στο μοντέλο realisable k-ε μας οδηγεί στην επιλογή αυτού του μοντέλου για την μελέτη του πραγματικού προβλήματος που εξετάζουμε στο κεφάλαιο 5.

Γενικά οι συγκρίσεις της ταχύτητας και της θερμοκρασίας μεταξύ του μοντέλου και του πειράματος είναι ικανοποιητικές. Ο κώδικας FLUENT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτες εσωτερικής ποιότητας αέρα. Με τη δισδιάστατη προσομοίωση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο τύρβης realisable k-ε είναι πιο αξιόπιστο από το μοντέλο τύρβης standard k-ε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Τέλος με την μελέτη της εσωτερικής ποιότητας αέρα και της θερμικής άνεσης σε ένα πραγματικό πρόβλημα είδαμε την κατανομή της θερμοκρασίας της σχετικής υγρασίας και των ρύπων μέσα στον χώρο. Σημαντικό ρόλο έτσι ώστε να γίνει σωστά η μελέτη και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να έχουν καλή συμφωνία με αυτά των πειραματικών μετρήσεων έπαιξε το μέγεθος και ο τύπος των κελιών του πλέγματος. Έτσι κατασκευάσαμε ένα πλέγμα 2727804 κελιών το οποίο λόγω αυτού του αριθμού είχε μεγάλη ευαισθησία και ο τύπος των κελιών ήταν εξαεδρικός όσον αφορά το περιβάλλον και τετρεδρικός/μικτός όσον αφορά το γραφείο. Το αποτέλεσμα ήταν να υπάρχει μεγάλη σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών και των τιμών προσομοίωσης. Αναλύοντας τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στις 8 θέσεις εργασίας του χώρου μπορέσαμε να δούμε τις επιπτώσεις τους πάνω στους εργαζόμενους του χώρου και σε ποιο βαθμό αυτοί αισθάνονται τα δύο αυτά μεγέθη, αλλά και να υπολογίσουμε τον δείκτη θερμικής άνεσης προβλεπόμενου ποσοστού δυσαρεστημένων(PPD). Με βάση λοιπόν τα διαγράμματα που προκύπτουν απ' τις αναλύσεις αυτών των αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία αλλά και τον υπολογισμό του δείκτη θερμικής άνεσης PPD, βλέπουμε ότι το ποσοστό των δυσαρεστημένων είναι μεγαλύτερο στις 4 ακριανές θέσεις εργασίας και μικρότερο στις 4 κεντρικές θέσεις εργασίας. Τέλος αναλύοντας τα αποτελέσματα της κατανομής του ρύπου στις 8 θέσεις εργασίας του χώρου μπορέσαμε να δούμε τις επιπτώσεις του πάνω στους εργαζόμενους του χώρου και σε ποιο βαθμό αυτοί επιβαρύνονται απ' τον ρύπο. Με βάση λοιπόν τα διαγράμματα που προκύπτουν απ' τις αναλύσεις αυτών των αποτελεσμάτων για την κατανομή του ρύπου, βλέπουμε ότι οι εργαζόμενοι που κάθονται στις ακριανές θέσεις και ιδιαίτερα στην θέση 1 επιβαρύνονται περισσότερο απ' αυτούς που κάθονται στις κεντρικές θέσεις εργασίας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

### **ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

#### **7.1 Στοιχεία καινοτομίας**

Το στοιχείο καινοτομίας που παρουσιάζει αυτή η έρευνα είναι η χρήση μοντέλου τύρβης realisable k-ε για την μελέτη της ποιότητας αέρα και της θερμικής άνεσης εσωτερικών χώρων

#### **7.2 Μελλοντική έρευνα**

Στο μέλλον προτείνεται η περαιτέρω αξιολόγηση του μοντέλου σε περισσότερες εφαρμογές και η σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης προτείνεται η εφαρμογή του μοντέλου για βελτιστοποίηση συνθηκών θερμικής άνεσης και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Wallace, L.A., (1987). The Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) Study. US Environmental Protection Agency, Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory, Research Triangle Park, NC. (Report No. EPA/600/6-87/002).
- [2] Nero, A.V., (1988). Controlling indoor air pollution, *Sci Am* 258 (5) 42–48.
- [3] Morris, R. H., (1986). Indoor air pollution: airborne viruses and bacteria, *Heat, Piping, Air Cond* 58 (2) 59–68.
- [4] Launder B.E. and Spalding D.B. (1974) The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Meth. Appl. Mech. Energy*, 3, 269-289.
- [5] Lam C.K.G. and Bremhorst K. (1981) A modified form of the  $k-\epsilon$  model for predicting wall turbulence. *Transactions of the ASME*, 103, 456-460.
- [6] Chen Q. (1995) Comparison of different  $k-\epsilon$  models for indoor air flow computations. *Numerical Heat Transfer*, 28 (part B), 353-369
- [7] Nielsen P.V. (1998) The selection of turbulence models for prediction of rooms airflow. *ASHRAE Transactions*, SF-98-10-1.
- [8] Awbi H.B. (1998) Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection. *Energy and Buildings*, 28, 219-227.
- [9] Beausoleil-Morrison I. (2000) The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation. PhD thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
- [10] Emmerich S.J. and McGrattan K.B. (1998) Application of large eddy simulation model to study room airflow. *ASHRAE Transactions*, SF-98-10-2.
- [11] Takemasa Y., Kurabuchi T. and Kamata M. (1992) Numerical simulations of indoor air temperature and wall heat flow distribution of a heated and cooled room. *Proc. Int. Symp. On Room Air Convection and Ventilation Effectiveness*, 99-107, Tokyo, Japan.
- [12] Yuan X., Moser A. and Suter P. (1994) Wall functions for numerical simulation of turbulent natural convection. *Proc. 10th International Heat Transfer Conf.*, Brighton UK, 191-196.

- [13] Xu W., Chen Q. and Nieuwstadt F.T.M. (1998) A new one-equation turbulence model for near wall natural convection. *Int. J. Ambient Energy*, 7(3), 151-164.
- [14] Neitzke K.P. (1998) The behaviour of the flow in rooms near walls-measurements and computations. *Roomvent'98*, 2, 293-298.
- [15] Chen Q. and Xu W. (1998) A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation. *Energy and Buildings*, 28, 137-144.
- [16] Srebric J., Chen Q. and Glicksman L.R. (1999) Validation of a zero-equation turbulence model for complex indoor airflow simulation. *ASHRAE Transactions*, 105 (2).
- [17] Haas et al.(2002). COMIS v3.1 simulation environment for multizone airflow and pollutant transport modeling.
- [18] Feustel H.E. and Raynor-Hoosen A. (Eds, 1990) Fundamentals of the multizone airflow model – COMIS. Tech. Note TN29, Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, England.
- [19] Fürbringer J.M., Roulet C.A. and Borchiellini R. (Eds, 1996) Evaluation of COMIS. IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme Annex 23 Final Report.
- [20] Walton G.N. (1997) CONTAM 96 users manual, NISTIR 6065, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [21] Dols W.S. (2001) A tool for modelling airflow & contaminant transport. *ASHRAE Journal*, 23 (3), 35-42.
- [22] Musy M., Wurtz E., Winkelmann F. and Allard F. (2001) Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative/convective heater. *Building and Environment*, 36, 589-596.
- [23] Haghghat F., Li Y. and Megri A.C. (2001) Development and validation of a zonal model – POMA. *Building and Environment*, 36, 1039-1047.
- [24] Schaelin A., Dorer V., van der Mass J. and Moser A. (1992) A new method for linking results of detailed air flow pattern calculation with multizone models. 13th AIVE Conference, Nice, France.
- [25] Stewart J. (1998) Monitoring indoor air quality and pollution transport report on a scoping study. QUESTOR Centre, Queen's University of Belfast, United Kingdom.
- [26] Feustel H.E. and Dieris J. (1992) A survey of airflow models for multizone structures. *Energy and Buildings*, 18, 79-100.
- [27] Dorer V. and Weber A. (1999) Air, contaminant and heat transport models: integration and application. *Energy and Buildings*, 30, 97-104.

- [28] Huang, J., Winkelmann F., Buhl F., Pedersen C., Fisher D., Liesen R., Taylor R., Strand R., Crawley D., and Lawrie L. (1999) Linking the COMIS multi-zone airflow model with the EnergyPlus building energy simulation program. Proceedings of Building Simulation'99, 2, 1065-1070.
- [29] Allard F. and Inard C. (1992) Natural and mixed convection in rooms: prediction of thermal stratification and heat transfer by zonal models. Int. Symp. on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, Japan.
- [30] Lebrun J. (1970) Exigences physiologiques et modalités physiques de la climatisation par source statique concentrée. Ph.D. thesis, University of Liège.
- [31] Howarth A.T. (1980) Temperature distribution and air movements in rooms heated with a convective heat source. Ph.D. thesis, University of Manchester.
- [32] Inard C. (1988) Contribution à l'étude du couplage thermique entre une source de chaleur et un local. Ph.D. thesis, INSA de Lyon, France.
- [33] Overby H. and Steen-Thode M. (1990) Calculation of vertical temperature gradients in heated rooms. CLIMA 2000, Oslo, Section B1-5, paper 25.
- [34] Inard C. and During H. (1991) Study of unsteady thermal coupling between radiators and a dwelling cell. Part 2, CETHIL-AFME contract no. 040001 final report.
- [35] Sandberg M. and Lindström (1987) A model for ventilation by displacement. Roomvent'87, Stockholm.
- [36] Grelat A. (1987) Approche des phénomènes de circulation et de stratification de l'air dans les locaux chauffés par le programme de simulation thermique multizone BILGA. CEBTP-EDF contract final report.
- [37] Dalicieux P. and Bouia H. (1991) Présentation d'une modélisation simplifiée des mouvements d'air à l'intérieur d'une pièce d'habitation. EDF rep. HE 12 W 3269.
- [38] Inard C., Bouia H. and Dalicieux P. (1996) Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model. Energy and Buildings, 24, 125-132.
- [39] Bouia H. (1993) Modélisation simplifiée d'écoulements de convection mixte internes: application aux échanges thermo-aérauliques dans les locaux. Ph.D. thesis, University of Poitiers, France.
- [40] Wurtz E., Nataf J.M. and Winkelmann F. (1996) Two- and three-dimensional natural and

mixed convection simulation using modular zonal models. LBL Report, LBNL-39098, Lawrence Berkeley National Laboratory.

- [41] Musy M., Wurtz E. and Gagneau S. (1997) Génération automatisée d'une simulation thermique et aéraulique dans le bâtiment. Journée Innovations et perspectives de recherche, Société Francaise des Thermiciens.
- [42] Musy M., Wurtz E. and Nataf J.M. (1999) An intermediate model to predict thermal comfort and air quality in a building. *Indoor Air* 99, 1, 685-690.
- [43] Clarke J.A., Hensen J.L.M. and Negrao C.O.K. (1995) Predicting indoor air flow by combining network approach, CFD and thermal simulation. Implementing the Results of Ventilation Research: 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA.
- [44] Schlichting H. (1968) *Boundary layer theory*. 6th Edition, McGraw-Hill.
- [45] Baker A.J., Williams P.T. and Kelso R.M. (1994) Numerical calculation of room air motion – part 1: math, physics and CFD modeling. *ASHRAE Journal*, August, 51-58.
- [46] Jones P.J. and Whittle G.E. (1992) Computational fluid dynamics for building air flow prediction – current status and capabilities. *Building and Environment*, 27 (3), 321-338.
- [47] White F.M. (1979) *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, New York, USA.
- [48] Chen Q. (1996) Prediction of room air motion by Reynolds-Stress models. *Building and Environment*, 31 (3), 233-244.
- [49] Heiselberg P., Murakami S. and Roulet C-A (Eds., 1998) *Ventilation of large spaces in buildings: analysis and prediction techniques*. IEA Annex 26: Energy efficient ventilation of large enclosures. Aalborg University, Denmark.
- [50] Patankar S.V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill, New York.
- [51] Fluent, Inc. (1995) *Fluent User's Guide*, version 4.3, Lebanon, USA.
- [52] Fluent, Inc. (1996) *GeoMesh User's Guide*, release 3.0, Lebanon, USA.
- [53] Fluent, Inc. (1998) *Fluent/UNS*, release 5.0, Lebanon, USA.
- [54] Williams P.T., Baker A.J. and Kelso R.M. (1994) Numerical calculation of room air motion – part 2: The continuity constraint finite element method for three-dimensional incompressible thermal flows. *ASHRAE Transactions*, 100 (1), 531-548.
- [55] Tennekes H. and Lumley J.L. (1972) *A First Course in Turbulence*. MIT Press, London, UK.

- [56] Murakami S. and Kato S. (1989) Numerical and experimental study on room airflow-3D predictions using the k- $\epsilon$  turbulence model. *Building and Environment*, 24 (1), 85-97.
- [57] Rodi W. (1980) Turbulence models and their applications in hydraulics – A state of the art review. International Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands.
- [58] Boussinesq J. (1877) Théorie de l'écoulement tourbillant. *Mem. Pre. par. div. Sav.*, 23, Paris, France.
- [59] Nieuwstadt F.T.M. (1992) *Turbulentie*, Utrecht: Epsilon Uitgaven, The Netherlands.
- [60] Gosman A.D., Khalis E.E. and Whitelaw J.H. (1977) The calculation of two-dimensional turbulent recirculating flows. *Proceedings of the Symposium on Turbulent Shear Flows*, Pennsylvania University.
- [61] Nielsen P.V. (1974) Flow in air conditioned rooms. PhD thesis, Technical University of Denmark.
- [62] Nielsen P.V., Restivo A. and Whitelaw J.H. (1979) Buoyancy affected flows in ventilated rooms. *Numerical Heat Transfer*, 2, 115-127.
- [63] Heiselberg P., Murakami S. and Roulet C-A (Eds., 1998) Ventilation of large spaces in buildings: analysis and prediction techniques. IEA Annex 26: Energy efficient ventilation of large enclosures. Aalborg University, Denmark.
- [64] Baker A.J., Williams P.T. and Kelso R.M. (1992) A Computational Fluid Dynamics (CFD) procedure for 3D room air motion prediction. ASHRAE Research Project 464-RP Final Report.
- [65] Nielsen P.V. (1989) Airflow simulation techniques – progress and trends. *Proc. 10th AIVC Conf.*, 1, 203-223.
- [66] Emmerich S.J. (1997) Use of computational fluid dynamics to analyze indoor air quality issues. Report NISTIR 5997, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA.
- [67] AIVC (1998\*) Airbase CD-ROM. Air Infiltration and Ventilation Centre, University of Warwick, Science Park, Coventry.
- \* Contents updated and re-issued at regular intervals.
- [68] Gan G. and Awbi H.B. (1994) Numerical simulation of the indoor environment. *Building and Environment*, 29, 449-459.
- [69] Awbi H.B. (1989) Application of computational fluid dynamics in room ventilation. *Building and Environment*, 24, 73-84.



- [70] Gan G. (1995) Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics. *Energy and Buildings*, 23, 83-93.
- [71] Awbi H.B. and Gan G. (1991) Computational fluid dynamics in ventilation. *Proceedings of CFD Seminar for Environmental and Building Services Engineer*, 67-79. Institute of Mechanical Engineers, London.
- [72] Awbi H.B. and Gan G. (1993) Evaluation of the overall performance of room distribution. *Proceedings of Indoor Air'93*, 5.
- [73] Awbi H.B. and Hatton A. (2000) Mixed convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*, 32, 153-166.
- [74] Xing H., Hatton A. and Awbi H.B. (2001) A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation. *Building and Environment*, 36, 809-820.
- [75] Chen Q., van der Kooij J and Meyers A. (1988) Measurements and computations of ventilation efficiency and temperature efficiency in a ventilated room. *Energy and Buildings*, 12, 85- 99.
- [76] Chen Q. and Jiang Z. (1992) Evaluation of air supply method in a classroom with a low ventilation rate. *Proceedings of the Jacques Cartier Conference*, Montreal, Canada.
- [77] Xu W. and Chen Q. (2001a) A two-layer turbulence model for simulating indoor airflow-Part I. Model development. *Energy and Buildings*, 33, 613-625.
- [78] Xu W. and Chen Q. (2001b) A two-layer turbulence model for simulating indoor airflow-Part II. Applications. *Energy and Buildings*, 33, 627-639.
- [79] Li Y. (1992) Simulation of flow and heat transfer in ventilated rooms. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [80] Li Y. (1994) A simple assembly approach for representing complex geometry on non-body-fitted Cartesian grids. *Roomvent'94*.
- [81] Li Y., Symons J. and Holmberg S. (1996c) Contribution ratio and sojourn times of air in a ventilation flow system with multiple openings. *Roomvent'96*, 3.
- [82] Li Y., Vidakovic S. and Symons J. (1996d) Some numerical observations of colliding free convection boundary layers. *Roomvent'96*, 1.
- [83] Li Y., Chen C., Delsante A. and Hesford G. (2000) CFD and multi-zone modelling of fog formation risk in a naturally ventilated industrial building. *Roomvent'2000*, The University of Reading, UK.

- [84] Murakami S., Kato S. and Suyama Y. (1989) Numerical study on diffusion field as affected by arrangement of supply and exhaust openings in conventional flow type clean room. ASHRAE Transactions, 100 (2).
- [85] Moser A. (1991) The message of Annex 20: Air flow patterns within buildings. 12th AIVC Conference, Ottawa, Canada.
- [86] Emvin P. and Davidson L. (1996) A numerical comparison of three inlet approximations of the diffuser in case El, Annex 20. Roomvent'96, 1.
- [87] Skovgaard M. and Nielsen P.V. (1991) Modelling complex inlet geometries in CFD – applied to airflow in ventilated rooms. 12th AIVC Conference, 3.
- [88] Chen Q. and Jiang Z. (1996) Simulation of a complex air diffuser with CFD technique. Roomvent'96, 1.
- [89] Huo Y., Zhang J., Shaw C. and Haghghat F. (1996) A new method to describe the diffuser boundary conditions in CFD simulation. Roomvent'96, 2.
- [90] Svidt K., Bjerg B., Morsing S. and Zhang G. (1998a) Modelling of air flow through a slatted floor by CFD. Proceedings of AgEng98, International Conference on Agricultural Engineering, Oslo, Norway.
- [91] Bjerg B., Svidt K., Morsing S., Zhang G. and Johnsen J.O. (2000) Comparison of methods to model a wall inlet in numerical simulation of airflow in livestock rooms. EurAgEng 2000, Warwick.
- [92] Sinha S.L. (2001) Behaviour of inclined jet on room cooling. Building and Environment, 36, 569-578.
- [93] Depecker P., Rusaouen G. and Inard C. (1996) Study and comparison of two types of air flow in operating rooms using a CFD code. Indoor Air'96, 1.
- [94] Kalzuka M., Iwamoto S., Ishii A. and Sakai K. (1992) A numerical prediction of a thermal environment in a room heated with floor panels. Proceedings of Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE.
- [95] Nielsen J.R., Nielsen P.V. and Svidt K. (1996) Obstacles in the occupied zone of a room with mixing ventilation. Roomvent'96, 3
- [96] Svidt K., Zhang G. and Bjerg B. (1998b) CFD simulation of air velocity distribution in occupied livestock buildings. Proceedings of Roomvent'98, Sixth International Conference on Air Distribution in Rooms, Stockholm, Sweden, 491-496.
- [97] Stankov P., Denev J. and Stamov S. (1999) Velocity and temperature prediction in an office room with furniture. Proc. Indoor Air'99, 1, 702-708, Edinburgh, UK.

- [98] Murakami S., Kato S. and Zeng J. (1998) Numerical simulation of contaminant distribution around a modeled human body: CFD study on computational thermal manikin – Part II. ASHRAE Transactions, 104 (2), 226-233.
- [99] Li Y., Moller S. and Symons J. (1996a) Effects of outdoor thermal environment in displacement ventilation-Part 1 flow and temperature fields. Indoor Air'96, 1.
- [100] Li Y., Moller S. and Symons J. (1996b) Effects of outdoor thermal environment in displacement ventilation-Part 2 heat transfer analysis. Indoor Air'96, 1.
- [101] Jiang Z. and Haghghat F. (1992) Ventilation effectiveness in a partitioned office with displacement ventilation determined by computer simulation. Indoor Environment, 2, 365- 373.
- [102] Alamdari F., Bennett K.M. and Rose P.M. (1994) Airflow and temperature distribution within an open-plan building space using a displacement ventilation system. Proceeding of Roomvent'94, Cracow, Poland.
- [103] Awbi H.B. (1996) A CFD study of the air quality at the breathing zone. Indoor Air'96, 2.
- [104] Jacobsen T.V. and Nielsen P.V. (1993) Numerical modelling of thermal environment in displacement – ventilation. Indoor Air'93, 5.
- [105] Chen Q. and Chao N.T. (1996) Prediction of buoyant plume and displacement ventilation with different turbulence models. Indoor Air'96, 1.
- [106] Loomans M.G.L.C (1998) Measurements at and simulation of the (improved) desk displacement ventilation concept. Roomvent'98, 1, 241-248.
- [107] Park H.J. and Holland D. (2001) The effect of location of a convective heat source on displacement ventilation: CFD study. Building and Environment, 36, 883-889.
- [108] Murakami S. (1992) Prediction, analysis and design for indoor climate in large enclosures. Roomvent'92.
- [109] Kato S., Murakami S., Shoya S., Hanyu F. and Zeng J. (1995) CFD analysis of flow and temperature fields in atrium with ceiling height of 130 m. ASHRAE Transactions, 101 (2).
- [110] Off F., Moser A. and Suter P. (1996) Transient numerical modelling of heat transfer by radiation and convection in atrium with thermal inertia. Roomvent'96, 3.
- [111] Moser A., Off F., Schalin A. and Yuan X. (1995) Numerical modelling of heat transfer by radiation and convection in an atrium with thermal inertia. ASHREA Transactions, 101 (2).

- [112] Schild P.G. (1996) CFD analysis of an atrium, using a conjugate heat transfer model incorporating long-wave and solar radiation. Roomvent'96, 2.
- [113] Awbi H.B. and Baizhan L. (1994) Predicting the thermal and airflow performance of large spaces. Proceeding of Roomvent'94, Cracow, Poland.
- [114] Clancy E.M., Scholzen F. and Howarth A. (1996) Comparison of measured and calculated environment conditions for a naturally ventilated auditorium. Roomvent'96, 3.
- [115] Van der Mass J. and Schaelin A. (1995) Application of air flow models to aircraft hangars with very large openings. 16th AIVC Conference, Palm Springs, CA.
- [116] Guthrie A., Ikezawa H., Otaka K. and Yau R.M.H. (1992) Airflow studies in large spaces: a case study of an airport passenger terminal building. Proceedings of Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE.
- [117] Chow W.K. and Fung W.Y. (1992) Indoor aerodynamics and ventilation design in large enclosed spaces. Proceedings of Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE
- [118] Fontaine J.R. and Rapp R. (1996) The design of ventilation systems of large enclosures with unconfined pollutant sources. Roomvent'96, 3.
- [119] Mora L., Gadgil A. and Wurtz E. (2000) Comparing zonal and CFD model predictions of air flows in large indoor spaces to experimental data. Submitted to Indoor Air 2002.
- [120] Lam J.C. and Chan A.L.S. (2001) CFD analysis and energy simulation of a gymnasium. Building and Environment, 36, 351-358.
- [121] Lu W.Z., Lo S.M., Fang Z. and Yuen K.K. (2001) A preliminary investigation of airflow field in designated refuge floor. Building and Environment, 36, 219-230.
- [122] Tsutsumi J., Katayama T., Hayashi T. and He P. (1992) Numerical simulation of cross-ventilation in a single-unit house. Proc. of Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE.
- [123] Iwamoto S., Ishii A., Katayama T. and Tsutsumi J. (1992) Numerical prediction of indoor airflow by cross-ventilation. Proc. of Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE.
- [124] Barozzi G.S., Imbabi M.S., Nobile E. and Sousa A.C.M. (1991) Scale models and CFD for the analysis of air flow in passively ventilated buildings. Building Simulation 91, Nice, France.

- [125] Jones P.J. and Whittle G.E. (1992) Computational fluid dynamics for building air flow prediction – current status and capabilities. *Building and Environment*, 27 (3), 321-338.
- [126] Kornaat W. and Lemaire A.D. (1994) Natural ventilation of parking garages; dimensioning of ventilation units with the assistance of air flow models. *Air Infiltration Review*, 15.
- [127] Peppes A.A., Santamouris M. and Asimakopoulos D.N. (2001) Buoyancy-driven flow through a stairwell. *Building and Environment*, 36, 167-180.
- [128] Nagano S. and Mimi T. (1992) Ventilation efficiency in a two-dimensional enclosure with a supply outlet in the ceiling or in the floor. *Proceedings of Room Air Convection and Ventilation Effectiveness*, ASHRAE.
- [129] Kato S., Murakami S. and Zeng J. (1996) Numerical analysis of contaminant distribution around a human body. *Roomvent'96*, 2.
- [130] Cafaro E., Cardinale N., Fracastoro G.V., Nino E. and di Tommaso R.M. (1992) Simulation of gas leaks in ventilated rooms. 13th AIVC Conference, Coventry, UK.
- [131] Roy S., Baker A.J. and Kelso R.M. (1993) Airborne contaminant CFD modelling studies for two practical 3D room air flow fields. *Proceedings of Indoor Air 93*, 5.
- [132] Suyama Y. and Aoyama M. (1992) Numerical simulation of indoor air environment in an office building. *Proceedings of Room Air Convection and Ventilation Effectiveness*, ASHRAE.
- [133] Haghghat F., Jiang Z. and Wang J. (1994) The impact of ventilation rate and partition layout on the VOC emission rate: time-dependent contaminant removal. *Indoor Air*, 4, 276-283.
- [134] Riffat S.B. and Shao L. (1994) Investigation of effect of tracer species on tracer mixing using CFD. 15th AIVC Conference, Buxton, UK.
- [135] Lu W. and Howarth A.T. (1996) Numerical analysis of indoor aerosol particle deposition and distribution in two-zone ventilation system. *Building and Environment*, 31, 41-50.
- [136] Fontaine J.R., Rapp R., Serieys J.C. and Aubertin G. (1994) Aerosol transport in room turbulent air flows experimental. *Roomvent'94*, 2.
- [137] Lin Z., Chow T.T., Fong K.F. and Liu J.P. (2000) CFD simulation of concentration of gaseous impurities in a typical Hong Kong industrial workshop. *Roomvent'2000*.

[138] Topp C., Nielsen P.V. and Heiselberg P. (1999) Modelling emission from building materials with computational fluid dynamics. Proceedings of Indoor Air '99, 4, 737-742.

[139] Papakonstantinou K.A., Kiranoudis C.T. and Markatos N.C. (2000) Mathematical modeling of environmental conditions inside historical buildings. The case of the archaeological museum of Athens. Energy and Buildings, 31, 211-220.

[140] Nazaroff W.W. (2001) Particle deposition in cracks, ducts, and rooms. Workshop on Air Pollutant Dynamics in Buildings. University of La Rochelle, France, 20-21 August, 2001.

[141] Fanger, P.O. 1970. *Thermal comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.

[142] Fountain, M.E., E.A. Arens, R.J. de Dear, F.S. Bauman, and K. Miura. 1994. Locally controlled air movement preferred in warm isothermal environments. *ASHRAE Transactions* 100(2): 937-952.