



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Δ.Π.Μ.Σ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

*Μεταπτυχιακή Εργασία*

Προσομοίωση Φαινομένων Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας  
στο Εσωτερικό Κτιρίων

**Λεκκάκης Νικόλαος**

Επιβλέπων: Φούντη Μαρία, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κ. Μαρία Φούντη για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την μεταπτυχιακή μου εργασία στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης και ιδιαίτερα τον Διονύση Κολαΐτη με τον οποίο συνεργάστηκα στενά και ήταν βασικός συντελεστής της επιτυχούς ολοκλήρωσης της παρούσας εργασίας.

## **Περίληψη**

Ο φυσικός αερισμός στο εσωτερικό κτιρίων έχει γνωρίσει μεγάλη διάδοση τα τελευταία χρόνια. Τα οφέλη του, εκτός από οικονομικά και περιβαλλοντικά είναι και λειτουργικά καθώς εμφανίζεται να προσφέρει σε πολλές περιπτώσεις καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης από τον τεχνητό. Με αυτά ως δεδομένα, η παρούσα μελέτη δίνει βάση στη μεταφορά θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό κτιρίων και μέσω των εξαγόμενων αποτελεσμάτων προσφέρει πληροφορίες για μεγέθη όπως, η ταχύτητα αέρα, η θερμοκρασία, η υγρασία κτλ. λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως είναι ο προσανατολισμός των κτιρίων και φυσικά η γεωμετρία τους. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και των μοντέλων της.

## **Abstract**

Natural ventilation in buildings has met big spread in recent years. The benefits of it, outside financial and environmental, they are also functional, as it seems to offer, in many cases, better thermal comfort conditions than mechanical ventilation. Taking these as facts, the present work focuses on heat and mass transport inside buildings and through the exported results, it offers information about variables as air velocity, temperature, humidity etc., taking into account parameters like building's orientation and of course geometry. This procedure is taking place with the use of computational fluid dynamics and its models.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Θερμική Άνεση</b>	<b>11</b>
2.1	Ορισμός . . . . .	11
2.2	Ιστορικά Στοιχεία . . . . .	12
2.3	Θερμοκρασία . . . . .	13
2.3.1	Θερμοκρασία Αέρα . . . . .	13
2.3.2	Θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας . . . . .	14
2.4	Υγρασία . . . . .	15
2.5	Ταχύτητα Αέρα . . . . .	16
2.6	Ρυθμός Μεταβολισμού . . . . .	16
2.7	Μόνωση από Ένδυση . . . . .	17
2.8	Προσεγγίσεις Θερμικής Άνεσης . . . . .	17
2.8.1	Προσέγγιση Θερμικού Ισοζυγίου . . . . .	18
2.8.2	Προσαρμοστική Προσέγγιση . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Αερισμός</b>	<b>23</b>
3.1	Ορισμός . . . . .	23
3.2	Φυσικός Αερισμός και Στρατηγικές . . . . .	24
3.2.1	Στρατηγικές Φυσικού Αερισμού . . . . .	24
3.2.2	Στρατηγικές Φυσικού Αερισμού σε Αστικό Περιβάλλον . . . . .	25
3.3	Διερεύνηση Φυσικού Αερισμού . . . . .	27
3.3.1	Γενικά . . . . .	27
3.3.2	Μέθοδοι για την Πρόβλεψη του Φυσικού Αερισμού σε Κτίρια . . . . .	28
3.4	Τεχνητός Αερισμός . . . . .	33

<b>4</b>	<b>Θεωρητικό Υπόβαθρο για τη Χρήση CFD</b>	<b>34</b>
4.1	Χρήση Μοντέλων CFD για το σχεδιασμό Φυσικού Αερισμού . . . . .	34
4.2	Βασικές Εξισώσεις Ροής . . . . .	35
4.3	Μοντελοποίηση της Τύρβης . . . . .	37
4.3.1	Ανάλυση Βασικών Μεθόδων Μοντελοποίησης Τύρβης . . . . .	37
4.3.2	Μοντέλο Μηδενικής Τάξης- Zero-Equation Model . . . . .	39
4.3.3	Μοντέλο Standard k-ε . . . . .	39
4.3.4	Μοντέλο RNG k-ε . . . . .	40
4.4	Επαλήθευση Μοντέλων CFD . . . . .	41
4.5	Σύζευξη Μοντέλων CFD με άλλα Μοντέλα Προσομοίωσης σε Κτίρια . . . . .	42
4.6	Χρήση Μοντέλων CFD για μελέτες Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Πρώτη Περίπτωση Μελέτης</b>	<b>44</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	44
5.2	Σύστημα Οργάνων και Παρακολούθησης . . . . .	46
5.3	Διαμόρφωση Υπολογιστικής Προσομοίωσης . . . . .	46
5.3.1	Υπολογιστικό Πλέγμα . . . . .	46
5.3.2	Οριακές Συνθήκες . . . . .	48
5.3.3	Πιστοποίηση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων . . . . .	48
5.3.4	Πεδία Θερμοκρασιών-Ταχυτήτων . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Δεύτερη Περίπτωση Μελέτης</b>	<b>58</b>
6.1	Εισαγωγή . . . . .	58
6.2	Σύστημα Οργάνων και Παρακολούθησης . . . . .	60
6.2.1	Αισθητήρας Θερμοκρασίας . . . . .	60
6.2.2	Αισθητήρας Υγρασίας . . . . .	60
6.2.3	Αισθητήρες Θερμορροής . . . . .	61
6.2.4	Απεικονίσεις Θέσεων Αισθητήρων . . . . .	61
6.2.5	Μετεωρολογικά δεδομένα . . . . .	63
6.2.6	Σύστημα λήψης δεδομένων . . . . .	63
6.3	Διαμόρφωση Υπολογιστικής Προσομοίωσης . . . . .	63
6.3.1	Υπολογιστικό Πλέγμα . . . . .	63
6.3.2	Οριακές Συνθήκες . . . . .	64
6.3.3	Πιστοποίηση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων . . . . .	65

6.3.4	Πεδία Θερμοκρασιών-Ταχυτήτων . . . . .	68
6.4	Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις . . . . .	69



# Κατάλογος πινάκων

2.1	Συστάσεις Προτύπου ASHRAE . . . . .	21
2.2	PPD με βάση τον PMV . . . . .	21
4.1	Χαρακτηριστικές τιμές σταθερών των μοντέλων $k - \epsilon$ . . . . .	41
5.1	Οριακές Συνθήκες . . . . .	48
6.1	Κωδικοποίηση των αισθητήρων του οικίσκου . . . . .	61

# Κατάλογος σχημάτων

2.1	Σχέση μεταξύ PPD και PMV . . . . .	20
2.2	Περιοχή Θερμικής Άνεσης για διάφορες τιμές Θερμοκρασίας και Σχετικής Υγρασίας	22
3.1	Στρατηγικές Φυσικού Αερισμού σε ένα Κτίριο . . . . .	26
4.1	Ποσοστό Χρήσης των διαφορετικών Μοντέλων Εκτίμησης Αερισμού Κτιρίων το 2007	35
5.1	Τριδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου . . . . .	45
5.2	Κάτοψη κάτω ορόφου με τις θέσεις των αισθητήρων . . . . .	45
5.3	Optional caption for list of figures . . . . .	47
5.4	Θερμοκρασία - Ύψος Οικίσκου για A1, A2 και RHT1 . . . . .	50
5.5	Θερμοκρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT2, RHT3 και RHT4 . . . . .	50
5.6	Θερμοκρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT5, RHT6 και RHT7 . . . . .	51
5.7	Σχ. Υγρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT1, RHT2, RHT3 και RHT4 . . . . .	52
5.8	Σχ. Υγρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT5, RHT6 και RHT7 . . . . .	52
5.9	Ταχύτητα - Ύψος Οικίσκου για A1 και A2 . . . . .	53
5.10	Σχετικά Σφάλματα - Θερμοκρασία . . . . .	54
5.11	Σχετικά Σφάλματα - Σχετική Υγρασία . . . . .	54
5.12	Σχετικά Σφάλματα - Ταχύτητα Αέρα . . . . .	55
5.13	Πεδία θερμοκρασιών- Τομές 1 (αριστερά) και 2 (δεξιά) . . . . .	56
5.14	Πεδίο ταχυτήτων: Διανύσματα (αριστερά) και Γραμμές Ροής (δεξιά)- Τομή 1 . . . . .	56
5.15	Πεδίο ταχυτήτων: Διανύσματα (αριστερά) και Γραμμές Ροής (δεξιά)- Τομή 2 . . . . .	57
6.1	Optional caption for list of figures . . . . .	59
6.2	Τριδιάστατη απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου . . . . .	59
6.3	Optional caption for list of figures . . . . .	62
6.4	Υπολογιστικό πλέγμα . . . . .	64
6.5	Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στον όροφο . . . . .	65

6.6	Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο ισόγειο και το δάπεδο . . . . .	65
6.7	Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο σημείο GF-1-AMB . . . . .	67
6.8	Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο σημείο UF-1-AMB . . . . .	67
6.9	Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο σημείο UF-2-AMB . . . . .	67
6.10	Πεδία Ταχυτήτων στην Τομή 1 . . . . .	68
6.11	Πεδία Θερμοκρασιών στην Τομή 1 . . . . .	69

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Στις μέρες μας παρατηρείται γενικά μια αναγκαστική, για διάφορους λόγους, στροφή προς την προστασία του περιβάλλοντος και την εξοικονόμηση ενέργειας. Ένας τομέας όπου η στροφή αυτή είναι ιδιαίτερα αισθητή είναι και αυτός των κατασκευών, σε όλο το εύρος τους. Προηγμένα υλικά ή μέθοδοι με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αντικαθιστούν άλλες παλαιότερες με σκοπό, εκτός από τη βελτίωση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής και των συνθηκών που την περιβάλλουν και μια πιο φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία. Μια κατηγορία με την οποία καταπιάνεται η παρούσα μελέτη αφορά στον αερισμό των κατασκευών και συγκεκριμένα κτιρίων με στόχευση στο φυσικό αερισμό. Οι μέθοδοι και οι τεχνικές φυσικού αερισμού έχουν αρχίσει εδώ και χρόνια να κερδίζουν έδαφος απέναντι στις καθιερωμένες ενεργοβόρες και κοστοβόρες κλασικές μεθόδους, όπως η θέρμανση και ο κλιματισμός. Οι επιστήμονες προσπαθούν με άλλους τρόπους να εκμεταλλευθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του κτιρίου ή της τοποθεσίας στην οποία βρίσκεται, ώστε να πετύχουν ευχάριστο περιβάλλον για τα άτομα που ζουν ή εργάζονται σε αυτό, με την επίδραση κατά το δυνατόν λιγότερων τεχνητών μέσων.

Στα πλαίσια, λοιπόν, της εργασίας αυτής θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές του φυσικού αερισμού, αλλά και της θερμικής άνεσης που πρέπει να επιτευχθεί, ώστε να θεωρείται λειτουργικός ο αερισμός. Επίσης, μέσω πειραμάτων αλλά και υπολογιστικών προσομοιώσεων εξετάζεται η μεταφορά θερμότητας και μάζας στα κτίρια, η οποία μέσω του υπολογισμού χρήσιμων για τον αερισμό μεγεθών (ταχύτητα του αέρα, θερμοκρασία, υγρασία) προσφέρει πληροφορίες για το πώς λειτουργεί ο αερισμός. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών μέσω της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη μελέτη του φυσικού αερισμού και στην επίτευξη θερμικής άνεσης, που είναι και το ουσιαστικό ζητούμενο.

## Κεφάλαιο 2

# Θερμική Άνεση

### 2.1 Ορισμός

Ως θερμική άνεση ορίζεται η υποκειμενική κατάσταση που εκφράζει την ευχαρίστηση για το θερμικό περιβάλλον. Λόγω του ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις, τόσο σωματικά όσο και ψυχολογικά, από άτομο σε άτομο, είναι δύσκολο να ικανοποιούνται όλα τα άτομα σε έναν χώρο. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες για άνεση δεν είναι ίδιες για όλους. Ωστόσο, έχουν συλλεχθεί αναλυτικά δεδομένα που προσφέρουν τις απαραίτητες στατιστικές πληροφορίες για να ορίσουν συνθήκες τις οποίες ένα συγκεκριμένο ποσοστό ατόμων στο χώρο θεωρεί θερμικά άνετες.

Υπάρχουν έξι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης:

1. Ρυθμός Μεταβολισμού
2. Μόνωση από Ένδυση
3. Θερμοκρασία Αέρα
4. Θερμοκρασία λόγω Ακτινοβολίας
5. Ταχύτητα Αέρα
6. Υγρασία

Οι παράγοντες 2 έως 6 μπορεί να είναι μη-ομοιόμορφοι πάνω στο σώμα του ατόμου και αυτή η ανομοιομορφία μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμικής άνεσης. Οι έξι παραπάνω παράγοντες ενδέχεται να μεταβάλλονται και με το χρόνο. Παρ' όλα αυτά, οι συγκεκριμένοι παράγοντες, τους οποίους προτείνει η ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) στο πρότυπο "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy",

που αφορά σε συνθήκες σε χώρους που κατοικούνται από ανθρώπους, ορίζουν τη θερμική άνεση σε σταθερή μόνο κατάσταση, αν εξαιρεθούν κάποιες μικρές θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις με το χρόνο. Για το λόγο αυτό, ενδέχεται να εμπεριέχεται λανθασμένη αντίληψη της άνεσης για άτομα που προέρχονται από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες πριν εισέλθουν στον υπό μελέτη χώρο.

Οι συνθήκες που απαιτούνται για θερμική άνεση σε χώρους φυσικά κλιματιζόμενους δεν είναι απαραίτητα ίδιες με αυτές που απαιτούνται σε άλλους εσωτερικούς χώρους. Πειράματα έχουν δείξει ότι σε φυσικά κλιματιζόμενους χώρους, όπου τα άτομα έχουν έλεγχο των παραθύρων, η υποκειμενική έννοια της άνεσης είναι διαφορετική λόγω διαφορετικών θερμικών "εμπειριών", δυνατότητας ελέγχου και επακόλουθων αλλαγών στις απαιτήσεις των ατόμων.[1]

## 2.2 Ιστορικά Στοιχεία

Η μελέτη της σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας, ως αντικειμενικό μέτρο, και της αντίληψης θερμικής άνεσης, ως υποκειμενικό μέτρο, ξεκίνησε τη δεκαετία του 1920, ακολουθώντας δύο γραμμές έρευνας: πεδιακές παρατηρήσεις και εργαστηριακά πειράματα, η κάθε μία από τις οποίες είχε τα θετικά χαρακτηριστικά και τις αδυναμίες της.[2]

Ένας χειροπιαστός ορισμός της θερμικής άνεσης θα ήταν ορθότερο και πιο κατανοητό να συνδέεται με κάποιους "δείκτες". Στο παρελθόν ένας τέτοιος ορισμός αποδείχτηκε ότι δεν ήταν εύκολος. Η θερμική άνεση ως μετρήσιμη ποσότητα, αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά από μηχανικούς σχετικούς με θέρμανση και αερισμό (Houghten και Yaglou [3]). Αυτοί όρισαν ως "άνετο" περιβάλλον αυτό το οποίο το άτομο δεν θεωρούσε ούτε θερμό ούτε ψυχρό. Μέχρι τη δεκαετία του 1960, οι μηχανικοί συνέχισαν να μετρούν την άνεση ποσοτικά με τη χρήση κλιμάκων που περιείχαν την εξής αλληλουχία:

ψυχρό (cold)- δροσερό (cool)- ελαφρώς δροσερό (slightly cool)- άνετο (comfortable)- ελαφρώς θερμό (slightly warm)- θερμό (warm)- καυτό (hot)

Για σκοπούς στατιστικών αναλύσεων σε κάθε κατηγορία από τις παραπάνω δόθηκε ένας αριθμός από το 1 μέχρι το 7, ή σε θετική και αρνητική κλίμακα (+3 έως -3), με σκοπό τη διάκριση μεταξύ κρύου και ζέστης, με το μηδέν να θεωρείται το ουδέτερο ή αλλιώς άνετο.

Η παραπάνω προσέγγιση έγινε δεκτή αρχικά από τους μηχανικούς και ίσως τους πρώτους ψυχολόγους. Όμως δεν έγινε ποτέ πλήρως αποδεκτή από τους φυσιολόγους. Σύμφωνα με αυτούς, μια κατάσταση θερμικής δυσφορίας δε σχετιζόταν πάντα με θετική θερμική αίσθηση. Αντιδράσεις όπως εφίδρωση, μυικές αλλαγές και τρέμουλο, παίζουν σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση σημαντικό ρόλο, στο χαρακτηρισμό μιας κατάστασης ως θερμικά άνετης. Γι' αυτό το λόγο οι Winslow, Herrington

και Gagge [4] εισήγαγαν τις αισθητήριες κλίμακες του "ευχάριστου"- "δυσάρεστου"- "πολύ δυσάρεστου" ("pleasant"- "unpleasant"- "very unpleasant") των οποίων οι αισθήσεις θεωρούνται σαφείς και διαφορετικές αυτών που έχουν βάση τη θερμοκρασία. Σε μεταγενέστερη έρευνα οι Gagge, Stolwijk και Hardy [5], χρησιμοποίησαν κατηγορίες "άνετου"- "ελαφρώς άβολου"- "πολύ άβολου". Αποδείχτηκε ότι οι αισθήσεις του "ελαφρώς δροσερού" ή ελαφρώς θερμού" μπορούν επίσης να συνδεθούν με ευχαρίστηση ή άνεση. Οι μελέτες των Chatonnet και Cabanac [6] και αργότερα του Cabanac [7] και των Stevens, Marks και Simonson [8], έφεραν επανάσταση στην κατανόηση των παραπάνω αισθήσεων. Αυτές έδειξαν ότι οι αισθήσεις τοπικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του δέρματος, είτε θερμή, είτε ψυχρή, μπορεί να είναι ευχάριστες ή μη, με αυτό να εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία του σώματος και/ή του δέρματος. Ο Givoni [9] εξέφρασε τη θερμική άνεση ως την απουσία ενόχλησης και δυσφορίας λόγω ζέστης ή κρύου και την κατάσταση ευχαρίστησης. Ο Hensen [10] όρισε αιτίες δυσανεξίας με βάση ολόκληρο το σώμα (whole body) του ατόμου ως ζεστό ή ψυχρό, καθώς επίσης αθέλιτη θέρμανση ή ψύξη σε ένα μέρος του σώματος (local body). Ο Benzinger [11] εξέτασε τη θερμική άνεση σε όρους "ιδανικής" θερμικής άνεσης και σχετικής ή μικτής άνεσης.

Επί του παρόντος, ο πιο ξεκάθαρος ορισμός της "άνεσης" είναι αυτός που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα και χρησιμοποιείται από την ASHRAE. Με έναν τέτοιο ορισμό δίνεται στον όρο "άνεση" τόσο φυσιολογική όσο και αισθητήρια βάση. Η θερμική δυσφορία είτε λόγω ζέστης είτε λόγω κρύου μπορεί να ληφθεί ως απλή μεταβλητή η οποία έχει αποδειχτεί ότι ακολουθεί έναν νόμο δύναμης (Stevens, Marks και Gagge [12]).

Εναλλακτικά, εάν υπάρχει ενδιαφέρον για έναν πληθυσμό και όχι για το άτομο, η κατάσταση "θερμικής άνεσης" ορίζεται από ένα ποσοστό των ατόμων που εκτίθενται σε ένα περιβάλλον που υποδηλώνεται ως "αποδεκτό". Ποτέ δεν υπάρχει ένα τέλειο περιβάλλον για όλους, καθώς πάντα θα υπάρχει ένα μικρό ποσοστό το οποίο δεν είναι ικανοποιημένο. Από στατιστικής άποψης, ο Fanger [13] όρισε το ιδανικό ποσοστό ευχαριστημένων στο 95%. Για εφαρμογές μηχανικής, το πρότυπο της ASHRAE δίνει ποσοστό 85% για να θεωρηθεί άνετο ένα περιβάλλον.[14] [15]

## **2.3 Θερμοκρασία**

### **2.3.1 Θερμοκρασία Αέρα**

Η θερμοκρασία είναι ίσως ο σημαντικότερος από τους περιβαλλοντικούς συντελεστές που επηρεάζουν τη θερμική άνεση. Για την επιλογή της επιθυμητής θερμοκρασίας αέρα για θερμική άνεση γίνεται χρήση της στατιστικής, με χρήση δείγματος που αφορά τις διαπιστωμένες προτιμήσεις μεγάλου αριθμού ανθρώπων. Με βάση τέτοιου είδους έρευνες εξάγονται πίνακες με χαρακτηριστικές

τιμές, που μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις κατηγορίες των ατόμων που βρίσκονται στο εκάστοτε περιβάλλον. Σαν μια γενική καταγραφή μπορούν να θεωρηθούν τα παρακάτω:

Όπως διαπιστώνεται, οι γυναίκες προτιμούν λίγο υψηλότερες θερμοκρασίες από τους άντρες, περίπου 0.5 °C, καθώς υπάρχουν διαφορές στον μεταβολικό ρυθμό μεταξύ των δύο φύλων. Αυξανόμενης της ηλικίας, επίσης υπάρχει μια προτίμηση σε λίγο υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη μείωση του μεταβολικού ρυθμού σε μεγαλύτερες ηλικίες, στη μείωση της δραστηριότητας, στην αλλαγή των διατροφικών συνηθειών, σε πιθανά προβλήματα υγείας, στη φυσική κατάσταση κτλ.

Οι κάτοικοι των ψυχρότερων περιοχών προτιμούν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτούς των πιο θερμών περιοχών, κάτι αναμενόμενο αφού ο άνθρωπος έχει τη δυνατότητα προσαρμογής στο περιβάλλον που ζει.

Τα παράπανω δείχνουν λίγες μόνο διαφοροποιήσεις που μπορεί να παρουσιαστούν κατά τον ορισμό μιας θερμοκρασίας θερμικής άνεσης. Για το λόγο αυτό, μια τέτοια θερμοκρασία θα πρέπει να ληφθεί με πολλή προσοχή. Ως ένα επιπλέον παράδειγμα έχει αναφερθεί ότι πολλές φορές το καλοκαίρι, σε πολύ ζεστό περιβάλλον, προτιμάται πιο δροσερό περιβάλλον από αυτό που θα θεωρούταν φυσιολογικό. Αντίστοιχα το χειμώνα ή σε πολύ κρύο περιβάλλον, προτιμάται πιο θερμό κλίμα από το κανονικό. Αυτό πιθανόν οφείλεται σε ψυχολογικούς παράγοντες αφού ένας άνθρωπος εκτεθειμένος στη ζέστη αισθάνεται πολύ ελκυστική την ιδέα να αισθανθεί δροσιά και αντίστοιχα, πολύ ελκυστική την ιδέα ενός ζεστού περιβάλλοντος όταν βρίσκεται στο κρύο.

Η ενδεικτική θερμοκρασία που χαρακτηρίζει τη συνδυασμένη επίδραση θερμοκρασίας και υγρασίας ενός χώρου στο αίσθημα της άνεσης, ονομάζεται αισθητή ή ενεργός θερμοκρασία.

Μελετώντας τη θερμική άνεση, όπως και στην περίπτωση μελέτης κλιματισμού χρησιμοποιούνται δύο θερμοκρασίες, η θερμοκρασία υγρού βολβού και η θερμοκρασία ξηρού βολβού. Η θερμοκρασία υγρού βολβού (wet bulb-WB) είναι η θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών είναι ίση με τη θερμοκρασία κορεσμένου ατμού. Η θερμοκρασία ξηρού βολβού (dry bulb-DB) είναι η θερμοκρασία του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και μετριέται με ένα συνηθισμένο θερμόμετρο. Η θερμοκρασία ξηρού βολβού είναι πάντα υψηλότερη από τη θερμοκρασία υγρού βολβού.

### **2.3.2 Θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας**

Εκτός της θερμοκρασίας αέρα, σημαντικό ρόλο για την επίτευξη θερμικής άνεσης παίζει και η θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας. Η μέση θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας είναι η γεωμετρική μέση τιμή της θερμοκρασίας των επιφανειών που περιβάλλουν το χώρο. Θα μπορούσε ακόμα να



περιγραφεί σαν τη θερμοκρασία μιας υποθετικής επιφάνειας που θα περιέβαλε το ανθρώπινο σώμα, στην οποία η μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας προς τον άνθρωπο θα ήταν ισοδύναμη με αυτή της πραγματικής κατάστασης.

Το πεδίο θερμικής ακτινοβολίας γύρω από το σώμα μπορεί να είναι ανομοιόμορφο λόγω των θερμών και ψυχρών επιφανειών ή του άμεσου ηλιακού φωτός. Αυτή η ασυμμετρία μπορεί να προκαλέσει τοπική δυσφορία και να μειώσει τη θερμική ανεκτικότητα του ατόμου στο χώρο. Γενικά, οι άνθρωποι είναι περισσότερο ευαίσθητοι στην ασύμμετρη ακτινοβολία που προκαλείται από μια θερμή οροφή σε σχέση με αυτή που προκαλείται από θερμές ή ψυχρές κατακόρυφες επιφάνειες.[1]  
[16]

## 2.4 Υγρασία

Η επίτευξη θερμικής άνεσης εξαρτάται κυρίως από το συνδυασμό θερμοκρασίας και υγρασίας στο χώρο. Η υγρασία εκφράζει τη συγκέντρωση των υδρατμών στον αέρα του χώρου. Με τον όρο απόλυτη υγρασία, πιο σωστά, νοείται η ποσότητα των υδρατμών (σε g) που περιέχεται σε  $1m^3$  αέρα. Η τιμή της, γενικά, επιδιώκεται να κυμαίνεται σε καθορισμένα όρια για συγκεκριμένες θερμοκρασίες εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος, αλλά ο έλεγχός της είναι αρκετά δύσκολος.

Σχετική υγρασία ονομάζεται ο λόγος της υγρασίας στον αέρα προς την υγρασία που θα περιείχε αν ήταν κορεσμένος σε ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ενώ εκφράζεται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Σε μέσες θερμοκρασίες αέρα, η επίδραση της υγρασίας στη θερμική άνεση είναι σχετικά μικρή. Αύξηση της σχετικής υγρασίας κατά 10%, ισοδυναμεί κατ' εκτίμηση με αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά  $0.3^{\circ}C$ . Σε πολύ θερμό περιβάλλον, η αύξηση της υγρασίας έχει σημαντικές επιπτώσεις στη θερμική άνεση. Επίσης, μεγάλη σημασία έχει ο χρόνος παραμονής ενός ατόμου σε κάποιο συγκεκριμένο χώρο. Η επίδραση της υγρασίας σε ένα άτομο που μετακινείται σε χώρους με διαφορετική υγρασία είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επίδρασή της σε ένα άτομο που παραμένει διαρκώς σε κάποιο συγκεκριμένο χώρο.

Οι επιθυμητές τιμές της σχετικής υγρασίας ενός χώρου κυμαίνονται μεταξύ 40% και 50% με ακραία όρια 30%-70%. Ποσοστό μικρότερο του 20% προκαλεί αποξήρανση των βλεννογόνων αδένων του αναπνευστικού συστήματος, ενώ ο σχηματισμός μούχλας είναι εμφανής σε ποσοστά πάνω από 80%.

Η υγρασία του αέρα επηρεάζει το μηχανισμό εξάτμισης του ιδρώτα, δηλαδή την εξάτμιση του νερού από την επιδερμίδα, μεταβάλλοντας, έτσι, το θερμικό ισοζύγιο του σώματος. Αν η σχετική υγρα-

σία και η θερμοκρασία του αέρα είναι πολύ υψηλές, ενεργοποιείται ο μηχανισμός της εφίδρωσης. Όμως, ο ιδρώτας παραμένει στην επιδερμίδα, αφού η εξάτμιση του είναι αδύνατη, δημιουργώντας την εντύπωση υψηλότερης θερμοκρασίας και αίσθημα δυσαρέσκειας. Πολύ μικρή σχετική υγρασία προκαλεί μεγάλη εξάτμιση ιδρώτα, που δημιουργεί την αίσθηση του ψύχους. Σε συνθήκες όπου το δέρμα δεν υγραίνεται επαρκώς, προκαλείται μείωση της ανοσοποιητικής ικανότητάς του.

Υψηλές τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας μειώνουν την ικανότητα για ψύξη του εισπνεόμενου αέρα και δημιουργούν την εντύπωση του θερμότερου και αποπνικτικού αέρα. Χαμηλές τιμές υγρασίας προκαλούν μείωση της ικανότητας καθαρισμού και ρύθμισης της θερμοκρασίας του αέρα.

Σημαντική προσοχή πρέπει να δίνεται και στις επιπτώσεις που μπορεί να έχει η υγρασία στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής και στα αντικείμενα που υπάρχουν εντός ενός χώρου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα όπου απαιτείται αυστηρός έλεγχος της υγρασίας είναι οι χώροι όπου φυλάσσονται ευπαθή αντικείμενα όπως μουσεία, βιβλιοθήκες, αποθηκευτικοί χώροι, χώροι διατήρησης τροφίμων κτλ.[16]

## 2.5 Ταχύτητα Αέρα

Η κίνηση του αέρα γύρω από ένα σώμα προκαλεί τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής με αποτέλεσμα το δροσισμό. Ο ακίνητος αέρας που περιβάλλει το σώμα, δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα μόνωσης γύρω από αυτό. Η κίνηση του αέρα μειώνει το πάχος αυτής της μόνωσης με αποτέλεσμα να προσφέρει δροσισμό. Πρόκειται για έναν σημαντικό μηχανισμό για την απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται από το σώμα, κυρίως όταν τα επίπεδα υγρασίας είναι υψηλά. Η αύξηση της ταχύτητας του αέρα μειώνει το ποσό της υγρασίας στον αέρα γύρω από το σώμα και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εξάτμισης.

Ως εκ τούτου, η ευεργετική επίδραση της ταχύτητας του αέρα δεν πρέπει να αγνοείται για έναν αποτελεσματικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα σε υγρά κλίματα, καθώς μπορεί να μειώσει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις ψύξης. Αυτό είναι ένα σημείο-κλειδί στο σχεδιασμό κτιρίων με φυσικό αερισμό. Η χρήση μιας συγκεκριμένης στρατηγικής που να παρέχει μέγιστη κυκλοφορία αέρα σε εσωτερικούς χώρους θα πρέπει να είναι μια από τις προτεραιότητες στο σχεδιασμό τέτοιων κτιρίων σε ήπια κλίματα με σχετικά υψηλή υγρασία.[17]

## 2.6 Ρυθμός Μεταβολισμού

Ως μεταβολισμός νοείται το σύνολο των χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο ανθρώπινο σώμα. Επειδή η θερμοκρασία του σώματος είναι συνήθως υψηλότερη από αυτή του περι-

βάλλοντα χώρο, οι αντιδράσεις του μεταβολισμού πραγματοποιούνται προκειμένου να αντισταθμίσουν τις απώλειες προς το περιβάλλον.

Θεωρώντας ότι ένας μέσος άνθρωπος έχει εμβαδόν επιφάνειας σώματος περίπου  $1.8m^2$ , ο μεταβολισμός ενός μέσου ενήλικα, σε ώρα ανάπαυσης, ισοδυναμεί με  $58.2W/m^2$  ή  $50kcal/(hm^2)$ . Ως μια πιο εύχρηστη μονάδα που αντιστοιχεί στις παραπάνω τιμές έχει οριστεί το  $1met$  ( $1met = 58.2W/m^2$ ).

Ο μεταβολισμός σχετίζεται άμεσα με την ηλικία, το φύλο και το βάρος του σώματος. Ο βασικός παράγοντας, όμως, από τον οποίο εξαρτάται, είναι το επίπεδο της δραστηριότητας. Όταν υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολισμού ενός ατόμου, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται μια μέση τιμή για τις δραστηριότητές του την τελευταία ώρα. Ο λόγος είναι ότι η θερμοχωρητικότητα του σώματος επηρεάζει τη ροή θερμότητας με βάση το επίπεδο δραστηριότητας της τελευταίας μίας ώρας. Σε κάθε περίπτωση, οι δραστηριότητες των τελευταίων 15 λεπτών έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το ανθρώπινο σώμα χρειάζεται 15 λεπτά ώστε να μεταβεί θερμικά από μία κατάσταση σε μία άλλη.

## 2.7 Μόνωση από Ένδυση

Η ένδυση λειτουργεί ως ένα είδος θερμικής αντίστασης στην αποβολή θερμότητας από την επιφάνεια του σώματος προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η μονάδα της θερμικής αυτής αντίστασης ονομάζεται  $clo$  και χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη θερμική μόνωση που παρέχουν τα ενδύματα και τα σύνολα ρουχισμού, ενώ ισοδυναμεί με  $0.155m^2K/W$ .

Η ένδυση αποτελεί μια από τις παραμέτρους που εύκολα μπορεί να ρυθμίσει ο κάθε άνθρωπος προκειμένου να αισθανθεί άνετα, χωρίς να καταναλωθεί κάποια μορφή ενέργειας. Για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης του ρουχισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικοί πίνακες ενδυματολογικών συνόλων, σχέσεις υπολογισμού κ.ά. [18]

## 2.8 Προσεγγίσεις Θερμικής Άνεσης

Σήμερα, συνυπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον ορισμό της θερμικής άνεσης, η προσέγγιση του θερμικού ισοζυγίου (rational ή thermal-balance approach) και η προσαρμοστική προσέγγιση (adaptive approach). Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιεί δεδομένα από μελέτες σε κλιματικούς θαλάμους και είναι διαδεδομένη κυρίως από τις μελέτες του Fanger, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί δεδομένα από πεδιακές μελέτες ατόμων σε κτίρια.

### 2.8.1 Προσέγγιση Θερμικού Ισοζυγίου

Πειράματα σε σταθερή κατάσταση έδειξαν ότι η δυσφορία λόγω κρύου σχετίζεται άμεσα με τη μέση θερμοκρασία του δέρματος και η δυσφορία λόγω ζέστης σχετίζεται άμεσα με την υγρασία στο δέρμα που προκαλείται από την έκκριση ιδρώτα. Δυσανεξία μπορεί να προκληθεί λόγω ζέστης ή κρύου σε ολόκληρο το σώμα, ή λόγω αθέλητης θέρμανσης ή ψύξης ενός συγκεκριμένου σημείου του σώματος (local discomfort). Αυτές οι σχέσεις αποτελούν τη βάση μεθόδων όπως το μοντέλο άνεσης του Fanger [19] που ενσωματώνει τους έξι παράγοντες που δόθηκαν από τον Macpherson και το μοντέλο 2 κόμβων (two-node model) των Gagge, Fobelets και Berglund [20]. Σε μια εκτίμηση από τους Doherty και Arens [21], αποδείχτηκε ότι τα παραπάνω μοντέλα είναι ακριβή για άτομα σε σχεδόν καθιστική δραστηριότητα και σε σταθερή κατάσταση.

Η προσέγγιση Θερμικού Ισοζυγίου βασίζεται στα πειράματα του Fanger (1967, 1970) [19], σε ένα κλιματικό θάλαμο, όπου ένας αριθμός ατόμων με συγκεκριμένη ένδυση και δραστηριότητα, εξέφρασε την κατάσταση που ένιωθε όσον αφορά στη ζέστη και το κρύο. Από τα πειράματα αυτά προέκυψε η εξίσωση άνεσης η οποία περιγράφει τη θερμική άνεση ως την ανισορροπία μεταξύ της πραγματικής ροής θερμότητας από το σώμα σε ένα δεδομένο θερμικό περιβάλλον και της ροής θερμότητας που απαιτείται για βέλτιστη (ουδέτερη) άνεση για μια συγκεκριμένη δραστηριότητα. Η εξίσωση αυτή συνδύασε τις θερμικές συνθήκες με την κλίμακα επτά σημείων της ASHRAE και έγινε γνωστή ως "Δείκτης Μέσης Ψήφου", PMV (Predicted Mean Vote). Ο PMV ενσωματώθηκε αργότερα στο δείκτη "Εκατοστιαίου Ποσοστού Δυσανεστημένων Ατόμων", PPD (Predicted Percent of Dissatisfied People). Το μοντέλο PMV- PPD του Fanger για τη θερμική άνεση αποτέλεσε σημαντική συνεισφορά στη θεωρία της θερμικής άνεσης και την εκτίμηση εσωτερικών θερμικών περιβάλλοντων σε κτίρια. Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο και αποδεκτό για σχεδιασμό και πεδιακή εκτίμηση της θερμικής άνεσης.

Εκτός από το μοντέλο PMV- PPD του Fanger, ένα άλλο μοντέλο που βασίζεται στην εξίσωση θερμικού ισοζυγίου των Stolwijk, Hardy [22], και Gagge, Nishi [23], αναπτύχθηκε από τους Gagge, Fobelets και Berglund. Το μοντέλο ονομάζεται μοντέλο δύο κόμβων (two- node model ή Pierce two- node model). Αυτό το μοντέλο άνεσης χρησιμοποιεί μια δομή σώματος αποτελούμενη από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους. Τον εσωτερικό κύλινδρο για τον πυρήνα του σώματος με θερμοκρασία  $T_{ci}=37.1^{\circ}\text{C}$  και τον εξωτερικό για το δέρμα με θερμοκρασία  $T_{sk}=33.1^{\circ}\text{C}$ .

Να σημειωθεί ότι, το μοντέλο PMV- PPD είναι χρήσιμο μόνο για απόκριση σε σταθερή κατάσταση, σε αντίθεση με το μοντέλο δύο κόμβων το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη φυσιολογικών αποκρίσεων ή αποκρίσεων σε μεταβατική κατάσταση.

Έχουν πραγματοποιηθεί αναλυτικές μελέτες για την εκτίμηση της θερμικής άνεσης σε θαλάμους ελέγχου, όπως του Fanger (Δανία) [19], των Tanabe, Kimura και Hara (Ιαπωνία) [24], των Chung και Tong (Χονγκ Κονγκ) [25], των De Dear και Leow (Σιγκαπούρη) [26], κτλ.

### Δείκτης Μέσης Ψήφου (PMV)

Ο δείκτης PMV προτάθηκε από τον Fanger και προβλέπει τη μέση απόκριση μιας μεγάλης ομάδας ατόμων σύμφωνα με την κλίμακα θερμικής αίσθησης της ASHRAE. Στα άτομα που εκτέθηκαν στους κλιματικούς θαλάμους ζητήθηκε να εκφράσουν την άποψή τους σύμφωνα με την κλίμακα επτά σημείων της ASHRAE. Με βάση αυτήν, εξάχθηκε μία μέση ψήφος, MV (Mean Vote) για μια δοσμένη κατάσταση, βρίσκοντας τη μέση τιμή του αισθήματος από όλα τα άτομα στην κατάσταση αυτή. Ο Fanger συσχέτισε το PMV με την ανισορροπία μεταξύ της πραγματικής ροής θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα σε ένα δοσμένο περιβάλλον και της ροής θερμότητας που απαιτείται για βέλτιστη άνεση σε μια συγκεκριμένη δραστηριότητα, με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$PMV = [0.303exp(-0.036M) + 0.028]L = \alpha L \quad (2.1)$$

όπου  $L[W/m^2]$  είναι το θερμικό φορτίο στο ανθρώπινο σώμα, που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής παραγωγής θερμότητας και απώλειας θερμότητας στο περιβάλλον για ένα άτομο που υποθετικά παραμένει σε τιμές άνεσης, για θερμοκρασία δέρματος και απώλεια θερμότητας από εξάτμιση λόγω εφίδρωσης, στο δεδομένο επίπεδο δραστηριότητας,  $M[W/m^2]$  η μεταβολική παραγωγή θερμότητας και  $\alpha$  ο συντελεστής ευαισθησίας.

Το Ινστιτούτο Περιβαλλοντικής Έρευνας του State University του Κάνσας διεξήγαγε εκτενείς έρευνες στα θέματα της θερμικής άνεσης σε καθιστική κατάσταση. Σκοπός αυτών των ερευνών ήταν η εξαγωγή ενός μοντέλου το οποίο θα εκφράζει το δείκτη PMV σε όρους παραμέτρων οι οποίοι θα λαμβάνονται εύκολα σε ένα περιβάλλον. Τα αποτελέσματα κατέληξαν σε μία εξίσωση της μορφής.

$$PMV = aT + bP_v - c \quad (2.2)$$

όπου  $P_v$  είναι η πίεση των ατμών νερού στον περιβάλλοντα αέρα και  $T$  η θερμοκρασία. Οι συντελεστές  $a$ ,  $b$  και  $c$  είναι συνάρτηση της διάρκειας παραμονής στο χώρο και του φύλου του ατόμου που εξετάζεται και οι τιμές τους λαμβάνονται από κατάλληλους πίνακες. Με βάση τα κριτήρια αυτά προσδιορίζεται μια ζώνη άνεσης η οποία, κατά μέσο όρο, είναι μεταξύ συνθηκών σχετικής υγρασίας 26%- 50%. Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε με άτομα σε καθιστική μεταβολική δραστηριότητα, με κανονική ένδυση και με θερμική αντίσταση περίπου 0.6clo, ενώ η έκθεση στο εσωτερικό περιβάλλον

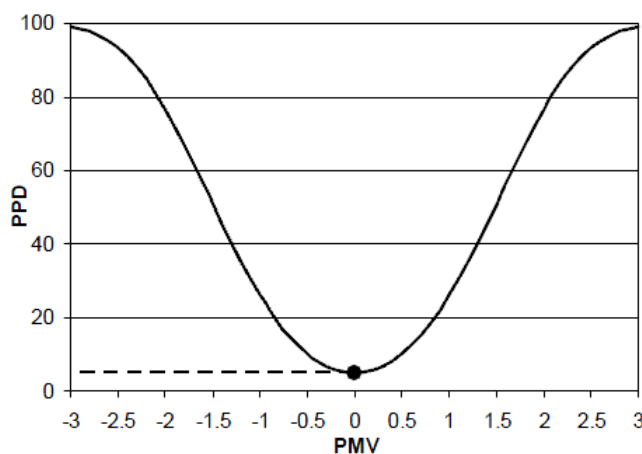
διήρκησε 3 ώρες.

### Δείκτης Ποσοστού Δυσανεστημένων Ατόμων (PPD)

Ο δείκτης PPD προβλέπει το ποσοστό των ανθρώπων που νιώθουν κάτι περισσότερο από "ελαφρώς ζεστό" ή "ελαφρώς ψυχρό" (δηλ. το ποσοστό των ανθρώπων που τείνουν να διαμαρτυρηθούν για το περιβάλλον). Χρησιμοποιώντας την κλίμακα επτά σημείων θερμικής αίσθησης (-3 έως +3), ο Fanger [27] ισχυρίστηκε ότι θεωρούνται σε μη άνετη κατάσταση όσοι απάντησαν  $\pm 2$  και  $\pm 3$ . Όσοι απάντησαν  $\pm 1$  και 0 θεωρούνται σε άνετη κατάσταση. Τα ποσοστά των ατόμων που απάντησαν  $\pm 2$  και  $\pm 3$  υπολογίζονται για κάθε κλίμακα του δείκτη PMV· αυτή η μεταβλητή ονομάστηκε PPD. Η σχέση μεταξύ PPD και PMV δίνεται από:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] \quad (2.3)$$

Η αξία της παραπάνω σχέσης δηλώνεται από το γεγονός ότι φανερώνει μια τέλεια συμμετρία σε σχέση με τη θερμική ουδετερότητα ( $PMV=0$ ). Είναι φανερό (Σχήμα 2.1) ότι ακόμα και στην τιμή 0 του δείκτη PMV παρατηρούνται περιπτώσεις δυσανεσκειας με το επίπεδο της θερμοκρασίας, παρ' ότι όλα τα εξεταζόμενα άτομα παρουσιάζουν ίδια ένδυση και ίδιο επίπεδο δραστηριότητας. Ο λόγος γι' αυτό είναι η διαφορετική προσέγγιση στην εκτίμηση της θερμικής άνεσης μεταξύ των ατόμων. Φαίνεται ότι στην τιμή  $PMV=0$ , παρατηρείται ένα ποσοστό δυσανεστημένων της τάξης του 5%.



Σχήμα 2.1: Σχέση μεταξύ PPD και PMV

Τα πρότυπα θερμικής άνεσης χρησιμοποιούν το μοντέλο PMV για να προσδιοριστούν οι συνιστώμενες αποδεκτές συνθήκες θερμικής άνεσης. Οι συστάσεις του προτύπου ASHRAE Standard 55 δίνονται στον Πίνακα 2.1. Οι συνθήκες αυτές θεωρήθηκαν για σχετική υγρασία ίση με 50%, μέση σχετική ταχύτητα αέρα μικρότερη από  $0.15 m/s$ , μέση θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας ίση με τη

	Θερμοκρασία Λειτουργίας	Αποδεκτό Εύρος
Καλοκαίρι	22°C	20-23°C
Χειμώνας	24.5°C	23-26°C

Πίνακας 2.1: Συστάσεις Προτύπου ASHRAE

Άνεση	PPD	Εύρος PMV
1	<6	-0.2<PMV<0.2
2	<10	-0.5<PMV<0.5
3	<15	-0.7<PMV<0.7

Πίνακας 2.2: PPD με βάση τον PMV

θερμοκρασία του αέρα και ρυθμό μεταβολισμού ίσο με  $1.2\text{met}$ . Η μόνωση από τα ρούχα ορίστηκε ίση με  $0.9\text{clo}$  για το χειμώνα και  $0.5\text{clo}$  για το καλοκαίρι.

Ανάλογα με τα επιτρεπτά όρια των PPD και PMV, ο πίνακας 2.2 καθορίζει τρεις ζώνες θερμικής άνεσης.

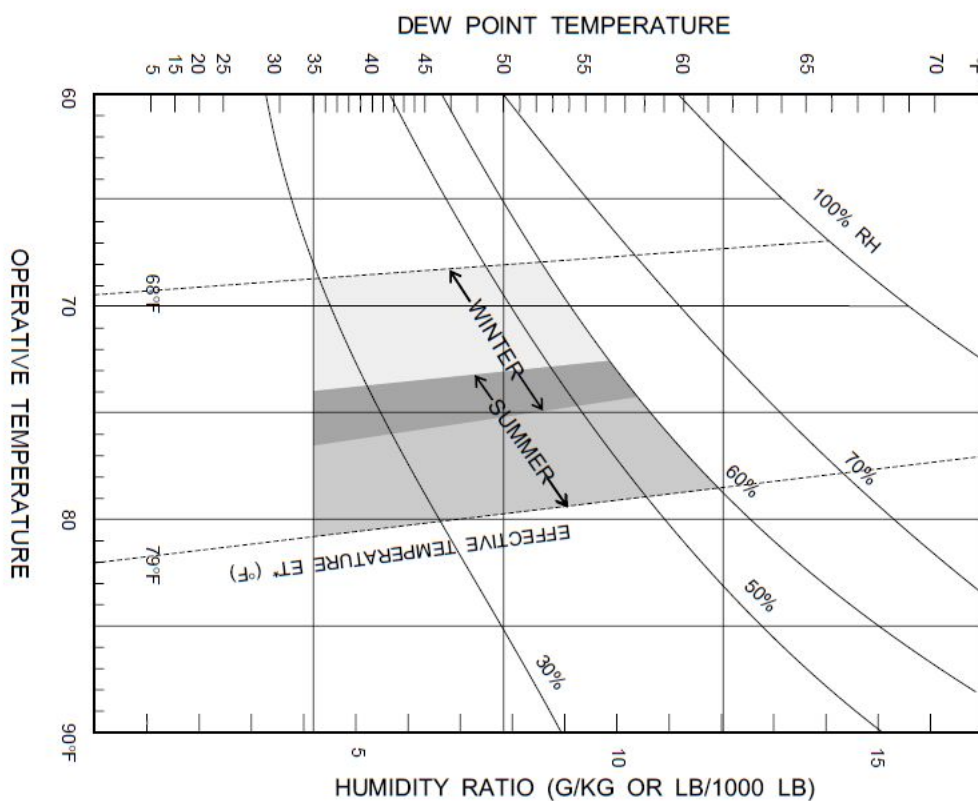
Παρ' ότι οι εργαστηριακές μελέτες προσφέρουν στατικές και σταθερές καταστάσεις μετρήσεων κάτι που δεν είναι δυνατό στις πεδιακές μετρήσεις, είναι ευρέως αποδεκτό πλέον, ότι οι χρησιμοποιούμενοι θάλαμοι αδυνατούν να προσφέρουν στους ανθρώπους που συμμετέχουν, το λεγόμενο "βιωματικό ρεαλισμό" στον καθορισμό θερμικής άνεσης, καθώς, στην πράξη, οι άνθρωποι ζουν σε μεταβλητά, μη-σταθερά περιβάλλοντα.

Ο McIntyre (1978) [28] παρουσίασε μια σύγκριση μεταξύ της μελέτης του Fanger σε κλιματικούς θαλάμους και των πεδιακών μελετών που παρουσιάστηκαν από τον Humphreys (1976) [29], εκτιμώντας ότι συγκεκριμένες μεταβλητές που παρατηρούνται στον "πραγματικό κόσμο" ενδέχεται να μην "μεταφέρονται" στον κλιματικό θάλαμο. Ο Oseland (1995) [30] ανέφερε σημαντικές ασυμφωνίες που παρατηρούνται μεταξύ των τιμών του δείκτη PMV και του πραγματικού δείκτη AMV (Actual Mean Vote) σε μελέτες γραφείων και κατοικιών, συγκρινόμενες με μελέτες σε κλιματικούς θαλάμους, αποδίδοντας τις διαφορές σε φαινόμενα συνάφειας και προσαρμογής. Συγκεκριμένα, από την ανάπτυξη της εξίσωσης του PMV και μετά, πολλές πεδιακές μελέτες έδειξαν διαφορές μεταξύ της αναφερόμενης θερμικής αίσθησης και αυτής που προβλέπεται από τον PMV και τις αντίστοιχες ουδέτερες θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό, οι πλησιέστερες στον "πραγματικό" κόσμο πεδιακές μελέτες ίσως είναι προτιμότερες από τις αντίστοιχες σε κλιματικούς θαλάμους.

## 2.8.2 Προσαρμοστική Προσέγγιση

Η προσαρμοστική προσέγγιση προέρχεται από πεδιακές μελέτες που έχουν σκοπό την ανάλυση της πραγματικής αποδοχής του θερμικού περιβάλλοντος το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το γενικό πλαίσιο, τη συμπεριφορά των ατόμων και τις προσδοκίες τους. Οι προσαρμογές συνοψί-

ζονται από τον De Dear (2004) [31] φυσιολογική προσαρμογή και την ψυχολογική προσαρμογή. Τα τελευταία χρόνια, διάφοροι μελετητές ενθάρρυναν τις πεδιακές μελέτες εκτός από τα εργαστηριακά πειράματα, με σκοπό την εξαγωγή περισσότερο αξιόπιστων πληροφοριών για την πραγματική άνεση σε ένα χώρο εργασίας και τις σχετικές παραμέτρους (αλληλεπίδρασης). Οι πεδιακές μελέτες επιτρέπουν, επίσης, την ανάλυση άλλων παραγόντων από αυτούς που προσομοιώνονται σε θαλάμους, καθώς τα άτομα παρέχουν αποκρίσεις των καθημερινών τους ασχολιών, φορώντας τα καθημερινά τους ρούχα και συμπεριφέρονται χωρίς κάποιον επιπλέον περιορισμό. Η υποκειμενικότητα της θερμικής εμπειρίας και οι ερμηνείες που απορρέουν από μια πολύ σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων και του θερμικού περιβάλλοντος αποτελούν το επίκεντρο μελετών και παρέχει τα θεωρητικά θεμέλια της προσαρμοστικής προσέγγισης στις μελέτες θερμικής άνεσης. Στη βιβλιογραφία, αναφέρονται διάφορες προσαρμοστικές μελέτες οι οποίες περιλαμβάνουν: (i) μοντέλα και τεχνικές θερμικής άνεσης, (ii) συγκριτικές μελέτες μεταξύ παραδοσιακών και μοντέρνων χώρων διαβίωσης, (iii) μέθοδοι αξιολόγησης της συμπεριφοράς των κτιρίων, (iv) συστήματα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, (v) συγκριτικές μελέτες με βάση το φύλο, (vi) επιδράσεις εσωτερικού κλίματος στη θερμική αντίληψη, (vii) θερμική άνεση σε σχολικές αίθουσες, (viii) προσαρμοστικοί αλγόριθμοι, (ix) θερμική άνεση ασθενών σε νοσοκομείο, (x) θερμική άνεση σε εξωτερικά περιβάλλοντα, κτλ. [32]



Σχήμα 2.2: Περιοχή Θερμικής Άνεσης για διάφορες τιμές Θερμοκρασίας και Σχετικής Υγρασίας



## Κεφάλαιο 3

# Αερισμός

### 3.1 Ορισμός

Με τον όρο αερισμό σε ένα κτίριο, νοείται η βαθμιαία αντικατάσταση του αέρα του χώρου από νωπό αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Βασικός στόχος του αερισμού ενός χώρου είναι η παροχή του αναγκαίου οξυγόνου για λόγους υγιεινής. Εκτός αυτού, ο αερισμός συνεισφέρει στην απομάκρυνση επιβλαβών αερίων ( $CO_2$ ,  $CO$ ), δυσάρεστων ουσιών και επικίνδυνων ρύπων, ενώ διατηρεί την υγρασία του χώρου σε αποδεκτά επίπεδα (40-70%). Ως πρόσθετος στόχος, για το καλοκαίρι, σημειώνεται και ο δροσισμός μέσω της αποβολής της θερμότητας των εσωτερικών τοιχωμάτων μέσω μεταφοράς και της δημιουργίας ρεύματος αέρα για τόνωση της αίσθησης δροσισμού.

Η μέτρηση της ροής του αέρα γίνεται σε μονάδες απόλυτου όγκου ( $m^3/s$ ,  $min$  ή  $h$ ) ή σχετικού όγκου, σε αναλογία προς τον όγκο του χώρου (αλλαγές ανά ώρα,  $ach$ ). Η φυσική κίνηση αέρα ακολουθεί το "Νόμο των Boyle- Mariott" κατά τον οποίο η αναλογία  $PV/T$  (Πίεση  $\times$  Όγκος / Θερμοκρασία) μάζας αερίου, παραμένει σταθερή.

Κατά το φυσικό αερισμό, στον οποίο εστιάζει η παρούσα μελέτη, η κίνηση του αέρα γίνεται με φυσικό τρόπο λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (από τη θερμή στην ψυχρή περιοχή), διαφοράς πίεσης λόγω ανέμου (από την υψηλή στη χαμηλή πίεση) και λόγω θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης (βάσει των ανωστικών τάσεων που προκαλεί η διαφορετική πυκνότητα του αέρα λόγω θερμοκρασίας). Στον τεχνητό αερισμό, οι φυσικές δυνამείς υποκαθίστανται από αξονικούς ή φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες, ενώ η προσαγωγή αέρα συνδυάζεται συχνά με ρύθμιση της θερμοκρασίας ή/και της υγρασίας του.[33]

## 3.2 Φυσικός Αερισμός και Στρατηγικές

Η εφεύρεση των λεβήτων και των ψυκτών έκανε το εσωτερικό περιβάλλον να μπορεί να ελεγχθεί πλήρως με τεχνικά μέσα, ανεξαρτήτως των εξωτερικών συνθηκών, της αρχιτεκτονικής του κτιρίου και της χρήσης του. Όπως προμηνύει ο αρχιτέκτονας Le Corbusier τη δεκαετία του '30, τα κτίρια έγιναν όλα του ίδιου τύπου: ερμητικά κλειστά και ελεγχόμενα σε μια σταθερή θερμοκρασία σε όλα τα κλίματα (Mahdavi και Kumar, 1996 [34]). Αυτή η ενεργοβόρα λύση υποστηρίζεται από την πεποίθηση ότι διατηρώντας σταθερές συνθήκες διασφαλίζεται άνεση και ευχαρίστηση. Εφαρμόζοντας αυτή την προσέγγιση, όμως, η βιομηχανία των κτιρίων απέτυχε σε πολλές περιπτώσεις να ικανοποιήσει τις ανάγκες άνεσης των κατοίκων. Διάφορες μελέτες ισχυρίζονται ότι ποσοστά έως 43% των ατόμων είναι δυσαρεστημένα με τη θέρμανση, τον αερισμό και τον κλιματισμό (συστήματα HVAC) και 56-89% των δημοσίων υπαλλήλων στην Ευρώπη και τις Η.Π.Α. θεωρούν τα συστήματα αυτά ως πρόβλημα.

Για τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε μια σταθερή τιμή απαιτείται υψηλό κόστος επένδυσης ενώ ταυτόχρονα είναι ενεργοβόρα με επιπτώσεις στην κατανάλωση πόρων και στο περιβάλλον. Σημαντικά ενεργειακά κέρδη μπορούν να επιτευχθούν εάν το κτίριο έχει ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος όπου θα μπορεί να "λειτουργεί" ελεύθερα. Το κέρδος αυτό μπορεί να επαυξηθεί εάν χρησιμοποιηθεί αερισμός για την ψύξη του. Στην πραγματικότητα, μελέτες πεδίου έχουν δείξει ότι οι άνθρωποι αποδέχονται μεγαλύτερα εύρη θερμοκρασιών σε φυσικά αεριζόμενους χώρους απ' ό,τι σε κλιματιζόμενους (de Dear et al, 1997 [35]; Brager και de Dear, 1998 [36], 2000 [37]).[38]

### 3.2.1 Στρατηγικές Φυσικού Αερισμού

#### Μονομερής Αερισμός

Με αυτό τον όρο, νοείται ο αερισμός που προκαλείται από το άνοιγμα ενός παραθύρου σε ένα δωμάτιο που θεωρείται αεροστεγές. Η ροή του αέρα μέσω του ανοίγματος δημιουργείται λόγω του ανέμου και της άνωσης. Ο άνεμος έχει μια μέση και μια διακυμαινόμενη συνιστώσα οι οποίες μπορεί να διαφέρουν στην επιφάνεια του ανοίγματος και να δημιουργούν το λεγόμενο "pumping effect". Όταν η εσωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική, η άνωση κάνει τον ψυχρό αέρα να εισέρχεται από το κατώτερο μέρος του ανοίγματος, ενώ ο θερμός αέρας εξέρχεται από το ανώτερο.

## **Διαμερήs Αερισμός**

Η ροή του εξωτερικού αέρα σε ένα κτίριο τείνει να προκαλέσει θετικές (με δράση προς τα μέσα) πιέσεις στις προσήνεμες επιφάνειες και αρνητικές (με δράση προς τα έξω) πιέσεις στις υπήνεμες επιφάνειες, δημιουργώντας έτσι μια καθαρή διαφορά πίεσης κατά μήκος της τομής του κτιρίου που οδηγεί τη ροή στο διαμερή αερισμό.

## **Αερισμός οδηγούμενος από την Άνωση**

Σύμφωνα με τον αερισμό λόγω άνωσης, ο θερμός αέρας σε ένα κτίριο τείνει να ανεβαίνει ψηλά και να ρέει εκτός του κτιρίου μέσω ανοιγμάτων σε υψηλότερα επίπεδα, ενώ ο ψυχρότερος εξωτερικός αέρας τείνει να εισέλθει εντός του κτιρίου μέσω ανοιγμάτων που βρίσκονται χαμηλά, για να τον αντικαταστήσει.

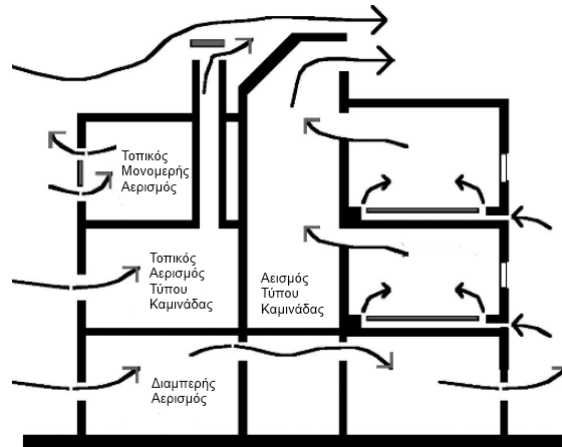
## **Συνδιασμένος Αερισμός**

Όταν η προηγούμενη στρατηγική αερισμού σχεδιαστεί σωστά, χρησιμοποιεί διαφορές πίεσης οδηγούμενες τόσο από τον άνεμο (όπως στις δύο πρώτες στρατηγικές που παρουσιάστηκαν), όσο και από την άνωση. Η στρατηγική αυτή είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω με τη διαφορά ότι στα οριζόντια υψηλά ανοίγματα χρησιμοποιείται μια συσκευή η οποία μπορεί να εκμεταλλευτεί την επικρατούσα διεύθυνση ανέμου και να μεγιστοποιήσει έτσι την αρνητική πίεση που προκαλείται από τον άνεμο (π.χ. προσαρμόσιμες γρίλιες και περιστρεφόμενες κεφαλές). Τέλος, σε άλλα κτίρια που χρησιμοποιούν φυσικό αερισμό, απαντάται και η τεχνική του ανυψωμένου/ προσβάσιμου δαπέδου που συνεισφέρει στη διανομή του αέρα στο κτίριο και ρυθμίζει τη θερμοκρασία του.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται μια γενική απεικόνιση των στρατηγικών που αναφέρθηκαν.

### **3.2.2 Στρατηγικές Φυσικού Αερισμού σε Αστικό Περιβάλλον**

Η χρήση φυσικού αερισμού σε αστικά περιβάλλοντα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις μικρότερες ταχύτητες αέρα, καθώς επίσης το θόρυβο και τη ρύπανση. Τα συστήματα αερισμού δεν είναι δυνατό να βασίζονται σε ανοίγματα στα χαμηλά επίπεδα, καθώς ο εξωτερικός αέρας στο επίπεδο του δρόμου μπορεί να είναι μολυσμένος και τα ανοίγματα αυτά θα είναι ασφαλισμένα από τον άνεμο. Ακολουθεί η παρουσίαση των πιο γνωστών στρατηγικών για αστικό περιβάλλον.



Σχήμα 3.1: Στρατηγικές Φυσικού Αερισμού σε ένα Κτίριο

### Στρατηγική "Balance Stack Ventilation"

Ένας αριθμός αρχαίων στρατηγικών στη Μέση Ανατολή, που χρησιμοποιούν τόσο εισόδους όσο και εξαγωγές αέρα στο επίπεδο της οροφής- συμπεριλαμβανομένων των παραδοσιακών Ιρανικών πύργων ανέμου, ή bagdir, και των συλλεκτών αέρα, malkaf, της Αραβίας και της Ανατολικής Ασίας- επανεξετάζονται για ευρύτερη εφαρμογή και τεχνικές βελτιώσεις. Σε αυτά τα σχέδια αερισμού, ο αέρας παροχετεύεται σε μια ψυχρή καμινάδα(η οποία μέσω της σωστής μόνωσης, διατηρεί τον αέρα στις εξωτερικές συνθήκες) και εξάγεται μέσω μιας θερμής καμινάδας.

### Στρατηγική "Passive Evaporative Cooling"

Μια βελτίωση του προαναφερθέντος συστήματος, επίσης βασισμένη στις λύσεις από τη Μεσανατολική και Ανατολική Ασία, βασίζεται στην προσθήκη συστήματος δροσισμού με υδρονέφωση στην καμινάδα εισαγωγής. Παραδοσιακά, το σύστημα αυτό επιτυγχανόταν μέσω πορωδών δοχείων γεμισμένων με νερό μέσα στο σύστημα παροχέτευσης αέρα ή με τη χρήση δεξαμενής νερού στη βάση της καμινάδας παροχέτευσης. Ως μια περαιτέρω εξέλιξη, εκτοξεύεται νερό σε μορφή σπρέυ ψηλά στον αέρα που εισέρχεται, αυξάνει την πυκνότητα του αέρα που παροχετεύεται και ως εκ τούτου αυξάνει τις διαφορές πίεσης λόγω άνωσης, που οδηγούν τη ροή (Bowman et al, 2000 [39]).

### Στρατηγική "Πρόσοψης Διπλού Κελύφους"

Μια κατασκευή πρόσοψης διπλού κελύφους αποτελείται από έναν κανονικό τσιμεντένιο ή γυάλινο τοίχο συνδυασμένο με μια γυάλινη κατασκευή εξωτερικά του τοίχου. Οι προσόψεις αυτές προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα. Μπορούν να λειτουργήσουν ως νεκρές ζώνες μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών συνθηκών, μειώνοντας τις θερμικές απώλειες το χειμώνα και τα θερ-

μικά κέρδη το καλοκαίρι. Σε συνδυασμό με τον αερισμό του χώρου μεταξύ των δύο προσόψεων, τα παθητικά θερμικά φαινόμενα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μέγιστο αποτέλεσμα. Είναι δυνατό να επιτευχθεί φυσικός αερισμός από τη νεκρή ζώνη, ανοίγοντας τα παράθυρα της εσωτερικής πρόσοψης. Το φαινόμενο της καμινάδας (stack effect) για τα θερμικά ρεύματα αέρα σε ψηλά κτίρια, προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με τα χαμηλότερα. Η τεχνική αυτή εξαλείφει πιθανά προβλήματα ασφάλειας που προκαλούνται έχοντας ανοιχτά τα παράθυρα, καθώς επίσης και τις διαφορές πίεσης του αέρα γύρω από το κτίριο. Οι προσόψεις διπλού κελύφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλιακά υποβοηθούμενο αερισμό τύπου καμινάδας (solar assisted stack ventilation) ή για balanced stack ventilation.[38]

### **3.3 Διερεύνηση Φυσικού Αερισμού**

#### **3.3.1 Γενικά**

Εάν ένα κτίριο είναι σωστά σχεδιασμένο, ο φυσικός αερισμός μπορεί να προσφέρει τόσο ένα άνετο και υγιές εσωτερικό περιβάλλον, όσο και εξοικονόμηση ενέργειας. Ο φυσικός αερισμός και η θερμική άνεση, όμως, είναι δύσκολο να κατανοηθούν και να μοντελοποιηθούν, ακόμα και για απλές κατασκευές. Είναι σημαντικό οι αρχιτέκτονες και οι υπόλοιποι σχετικοί μηχανικοί να συνεργαστούν από τα πρώτα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού, όταν λαμβάνονται σημαντικές αποφάσεις για το γενικό σχεδιασμό και τη γεωμετρία ενός κτιρίου. Με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, προτείνεται μια διαδικασία η οποία έχει ως εξής: Πρώτα, ο αρχιτέκτονας δημιουργεί ένα αρχικό σχέδιο. Στη συνέχεια, ο μηχανικός χρησιμοποιεί τις τεχνικές της υπολογιστικής ρευστομηχανικής για να υπολογίσει τις ροές αέρα, μέσα και γύρω από τα κτίρια. Βασισμένος στα υπολογισμένα αποτελέσματα, ο αρχιτέκτονας τροποποιεί το σχεδιασμό. Πολλές φορές, είναι απαραίτητες αρκετές επαναλήψεις για την επίτευξη ικανοποιητικών εσωτερικών και εξωτερικών συνθηκών για το κτίριο. Καθώς ο αρχιτέκτονας δεν έχει συνήθως την απαιτούμενη γνώση υπολογιστικής μηχανικής ή υπολογιστικές ικανότητες, ο σχετικός μηχανικός παίζει ένα σημαντικό ρόλο στο να βοηθήσει τον αρχιτέκτονα να εξάγει λεπτομερείς πληροφορίες όσον αφορά στις ροές. Ο μηχανικός, με τη σειρά του, βασίζεται στον αρχιτέκτονα, ώστε ο τελευταίος να κάνει το κτίριο άνετο και υγιεινό.[40]

### **3.3.2 Μέθοδοι για την Πρόβλεψη του Φυσικού Αερισμού σε Κτίρια**

#### **Αναλυτικά Μοντέλα**

Τα αναλυτικά μοντέλα προέρχονται από θεμελιώδεις εξισώσεις της ρευστοδυναμικής και της μετάδοσης θερμότητας, όπως οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής, ενέργειας και χημικών συστατικών. Τα αναλυτικά μοντέλα χρησιμοποιούν απλοποιήσεις τόσο στη γεωμετρία, όσο και στις οριακές συνθήκες θερμότητας και ρευστού για να εξάγουν μια λύση. Σαν αποτέλεσμα αυτού, οι τελικές εξισώσεις που εξάγονται για μια περίπτωση, ενδέχεται να μην χρησιμοποιούνται για άλλη περίπτωση, χωρίς τροποποιήσεις. Παρ' όλα αυτά, η μεθοδολογία και οι προσεγγίσεις μπορεί να είναι παρόμοιες για τις διαφορετικές περιπτώσεις.

Τα αναλυτικά μοντέλα είναι πιθανώς η παλαιότερη μέθοδος για την εκτίμηση του φυσικού αερισμού. Αυτή η μέθοδος είναι ακόμα και σήμερα ευρέως χρησιμοποιούμενη λόγω του ότι είναι απλή, πλούσια σε φυσικό νόημα και δεν απαιτεί μεγάλους υπολογιστικούς πόρους, παρ' ότι μπορεί να μην είναι ακριβής για σύνθετες περιπτώσεις αερισμού και τα αποτελέσματα να μην προσφέρουν ενδιαφέρουσες πληροφορίες.

#### **Εμπειρικά Μοντέλα**

Παρόμοια με τα αναλυτικά μοντέλα, τα εμπειρικά δημιουργούνται από τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ενέργειας και χημικών συστατικών. Σε πολλές περιπτώσεις, τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων ή των προχωρημένων υπολογιστικών προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται επίσης στην ανάπτυξη των εμπειρικών μοντέλων με σκοπό την εξαγωγή κάποιων συντελεστών που καθιστούν τα εμπειρικά μοντέλα κατάλληλα για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό. Στο θεωρητικό μέρος, τα αναλυτικά και τα εμπειρικά μοντέλα δεν διαφέρουν ιδιαίτερα. Η αντίληψη είναι ότι τα εμπειρικά μοντέλα ίσως χρησιμοποιούν περισσότερες προσεγγίσεις από τα αναλυτικά μοντέλα. Οι εφαρμογές δείχνουν ότι τα μοντέλα αυτά είναι αποτελεσματικά εργαλεία χαμηλού κόστους για την εκτίμηση του αερισμού από μηχανικούς και σχεδιαστές. Η συμπεριφορά των εμπειρικών και των αναλυτικών μοντέλων είναι παρόμοια. Και τα δυο εξαρτώνται από την φύση του εκάστοτε προβλήματος.

#### **Πειραματικά Μοντέλα Μικρής Κλίμακας**

Τα πειραματικά μοντέλα μικρής κλίμακας χρησιμοποιούν τεχνικές μέτρησης για να προβλέψουν ή να αξιολογήσουν τη συμπεριφορά αερισμού σε μια μειωμένη κλίμακα των κτιρίων ή των δωματίων. Είναι πολύ οικονομικότερη η χρήση πειραματικών μοντέλων μικρής κλίμακας από το να χρησιμοποιηθεί ένα πλήρες κτίριο ή δωμάτιο. Μπορεί κάποιος να λάβει ρεαλιστική συμπεριφορά αερισμού

με απευθείας μέτρηση των συνθηκών θερμότητας και ροής σε ένα μοντέλο μικρής κλίμακας, εάν η ροή στο μοντέλο είναι παρόμοια με αυτή στην πραγματικότητα. Για να επιτευχθεί ομοιότητα της ροής μεταξύ της μικρής κλίμακας και του πραγματικού κτιρίου ή δωματίου, πρέπει σημαντικές αδιάστατες παράμετροι της ροής σε ένα μοντέλο μικρής κλίμακας, όπως οι αριθμοί Reynolds, Grashof, Prandtl κτλ. να παραμένουν ίδιες, όπως στο πραγματικό κτίριο ή δωμάτιο. Όταν σε ένα δωμάτιο εμπλέκεται μετάδοση θερμότητας, είναι δύσκολο να εξαχθούν ίδιοι αριθμοί Reynolds και Grashof. Μια δυνατότητα είναι να χρησιμοποιηθεί υγρό με διαφορετική πυκνότητα, όπως το νερό ή το Freon για την προσομοίωση της θερμικής άνωσης. Σε αντίθετη περίπτωση, το μοντέλο μικρής κλίμακας δεν θα προσομοιώσει την πραγματική ροή στα κτίρια ή τα δωμάτια.

Τα πειραματικά μοντέλα μικρής κλίμακας είναι πολύ αποτελεσματικά και σχετικά οικονομικά για τη μελέτη αερισμού σε κτίρια. Παρ' όλα αυτά, εκτός από τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την αλλαγή κλίμακας και που σχετίζονται με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω, αποτελεί επίσης πρόκληση η αλλαγή κλίμακας σε πολύπλοκες γεωμετρικές ροής, όπως για παράδειγμα στη δημιουργία ενός σύνθετου διαχύτη. Από τη βιβλιογραφία γίνεται φανερό ότι η καλύτερη χρήση των μοντέλων αυτών, είναι για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τα αναλυτικά, τα εμπειρικά ή τα αριθμητικά μοντέλα.

### **Πειραματικά Μοντέλα Πλήρους Κλίμακας**

Τα πειραματικά μοντέλα πλήρους κλίμακας έχουν γίνει ευρέως διαδεδομένα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού σε κτίρια. Παρ' όλα αυτά, η πρόσφατη βιβλιογραφία δείχνει ότι η τάση χρήσης μοντέλων πλήρους κλίμακας είναι παρόμοια με αυτή των μοντέλων μικρής κλίμακας. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως για εξαγωγή αποτελεσμάτων προς επιβεβαίωση των αριθμητικών μοντέλων και κυρίως των μοντέλων CFD, τα οποία επιλύουν αριθμητικά ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων και θα αναπτυχθούν στη συνέχεια. Πολλοί γνωστοί πειραματιστές έστρεψαν την εργασία τους στα αριθμητικά μοντέλα.

Τα πειραματικά μοντέλα πλήρους κλίμακας μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε δύο κατηγορίες: τα εργαστηριακά πειράματα και τις επί τόπου (in-situ) μετρήσεις. Το εργαστηριακό πείραμα συχνά χρησιμοποιεί ένα περιβαλλοντικό θάλαμο για τη μίμηση ενός δωματίου ή ενός μονώροφου κτιρίου με πολλά μικρά δωμάτια. Εάν πρέπει να οριστούν οι εξωτερικές συνθήκες αέρα, ο θάλαμος θα πρέπει να βρίσκεται σε αεροσήραγγα, κάτι που κάνει την εγκατάσταση πολύ ακριβή. Σε έναν θάλαμο, οι οριακές συνθήκες θερμότητας και ρευστού μπορούν συνήθως να ελεγχθούν με ακρίβεια. Ακόμα και ένα πειραματικό μοντέλο πλήρους κλίμακας, όμως, μπορεί πολλές φορές να δώσει μόνο προσεγγίσεις των οριακών συνθηκών και της γεωμετρίας της ροής.

Ενδέχεται, σε πολλές περιπτώσεις να μην θεωρείται λογική η κατασκευή μοντέλου πλήρους κλίμακας, εάν, για παράδειγμα, απαιτείται η εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού σε ένα θέατρο ή σε ολόκληρο πολυώροφο κτίριο. Μία λύση είναι η χρήση ενός υπάρχοντος παρόμοιου κτιρίου για τη μελέτη αερισμού. Αυτά, τα in-situ πειράματα μπορεί να είναι δύσκολα, καθώς οι οριακές συνθήκες συνήθως δεν είναι ελεγχόμενες και είναι πιθανό να παρατηρηθούν διαταραχές κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Η ποιότητα των δεδομένων μπορεί να είναι χαμηλή, καθώς δεν είναι πρακτικά εύκολη η μέτρηση συγκεκριμένων παραμέτρων αερισμού σε πολλές περιοχές, σε ένα μεγάλο κτίριο, καθώς επίσης ενδέχεται τα δεδομένα που λαμβάνονται για ένα κτίριο να μην είναι εφαρμόσιμα για ένα παρόμοιο κτίριο.

Να σημειωθεί, τέλος, ότι οι πειραματικές μετρήσεις δεν στερούνται σφαλμάτων, όσον αφορά και τον μετρητικό εξοπλισμό ο οποίος απαιτεί συχνή βαθμονόμηση, ενώ έχει και αυτός τους περιορισμούς του.

Οι πιο πρόσφατες εφαρμογές δείχνουν ότι τα μοντέλα πλήρους κλίμακας από εργαστηριακά ή in-situ πειράματα δίνουν την πιο ρεαλιστική εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού σε ένα κτίριο. Παρ' όλα αυτά, είναι γενικά πολύ ακριβά και χρονοβόρα. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, δε στερούνται σφαλμάτων. Η κύρια τάση και εδώ είναι η χρήση των μοντέλων πλήρους κλίμακας για επιβεβαίωση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων των υπολογιστικών μοντέλων, όπως τα CFD, και η χρησιμοποίησή τους στη συνέχεια για την εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού ή για σχεδιασμό συστημάτων αερισμού. Τα in-situ πειράματα χρησιμοποιούνται συχνότερα για αξιολόγηση της συμπεριφοράς υπάρχοντων κτιρίων.

### **Πολυζωνικά Μοντέλα**

Τα πολυζωνικά μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως για την πρόβλεψη του ρυθμού ανταλλαγής αέρα και της κατανομής της ροής σε κτίρια με μηχανικό ή φυσικό αερισμό. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της απόδοσης, της ενεργειακής ζήτησης, της μεταφοράς ρύπων και τον έλεγχο καπνού. Στα πολυζωνικά μοντέλα επιλύονται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ενέργειας και χημικών συστατικών. Παρ' όλα αυτά, στα μοντέλα θεωρείται ήρεμος αέρας ή νηνεμία σε κάθε ζώνη, ώστε να μπορεί να αμεληθεί η επίδραση της ορμής. Στα μοντέλα αυτά, επίσης, θεωρείται ομοιόμορφη θερμοκρασία αέρα και συγκέντρωση χημικών συστατικών σε κάθε ζώνη. Οι Wang και Chen (2008) [41] βρήκαν ότι τέτοιες παραδοχές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα σε κάποιες περιπτώσεις. Πρότειναν, με βάση αυτό, τη σύζευξη ενός πολυζωνικού μοντέλου με ένα πρόγραμμα CFD και παρατήρησαν σημαντική βελτίωση στα αποτελέσματα. Ένα τυπικό πολυζωνικό μοντέλο υπολογίζει τη ροή και τη μεταφορά ρύπων μεταξύ των ζωνών (ή των δωματίων)



ενός κτιρίου και μεταξύ του κτιρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Αντίθετα με τα περισσότερα προγράμματα CFD, τα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούν πολυζωνικά μοντέλα δεν διαθέτουν φιλικό για το χρήστη περιβάλλον και η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων δεν είναι ιδιαίτερα ελκυστική. Οι ατέλειες αυτές έχουν περιορίσει σε μεγάλο βαθμό την πρακτική εφαρμογή τους. Να σημειωθεί, ότι τα πολυζωνικά μοντέλα είναι τα μόνα που εξάγουν αρκετά καλά αποτελέσματα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού σε ολόκληρο κτίριο.

### **Ζωνικά Μοντέλα**

Η υπόθεση της πλήρους ανάμιξης που χρησιμοποιείται στα πολυζωνικά μοντέλα δεν ισχύει για μεγάλους εσωτερικούς χώρους ή δωμάτια με σύστημα στρωματοποιημένου αερισμού, όπως ο αερισμός εκτόπισης (displacement ventilation). Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθούν ζωνικά μοντέλα για να λυθεί το πρόβλημα εκτίμησης των κατανομών της θερμοκρασίας αέρα. Τα ζωνικά μοντέλα χωρίζουν το δωμάτιο σε ορισμένο αριθμό κελιών, συνήθως λιγότερων από 1000 για έναν τριδιάστατο χώρο. Η θερμοκρασία του αέρα υπολογίζεται σε κάθε κελί ώστε να οριστεί η μη-ομοιόμορφη κατανομή της στο χώρο.

Οι Megri και Haghghat (2007) [42] εξέτασαν την ανάπτυξη των ζωνικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά αναπτύχθηκαν βασισμένα στα μετρημένα πρότυπα ροής αέρα ή στις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας. Αυτά που βασίζονται στα μετρημένα πρότυπα ροής στηρίχθηκαν στα πρότυπα για να υπολογίσουν τις κατανομές της θερμοκρασίας αέρα. Οι εφαρμογές του ήταν περιορισμένες με βάση τη διαθεσιμότητα των προτύπων ροής. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τις εξισώσεις διατήρησης ήταν τα πιο διαδεδομένα μέχρι τώρα. Οι Song et al (2008) [43] ανέπτυξαν ένα ζωνικό μοντέλο ενοποιώντας το περαιτέρω με δυναμικά μοντέλα για τη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας και μοντέλα πηγής/καταβόθρας για αέριους ρυπαντές. Εφάρμοσαν το μοντέλο για να υπολογίσουν τη δυναμική θερμοκρασία αέρα, την υγρασία και τις συγκεντρώσεις ρυπαντών σε ένα δωμάτιο με αερισμό εκτόπισης. Η συμπεριφορά του ζωνικού μοντέλου ήταν πολύ καλή.

Πρόσφατες εφαρμογές περιλαμβάνουν την ενοποίηση του ζωνικού μοντέλου με άλλα μοντέλα, για τον υπολογισμό όχι μόνο της εσωτερικής θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης ρυπαντών, αλλά και το θερμικό/ψυκτικό φορτίο των συστημάτων θερμικού ελέγχου των κτιρίων (HVAC). Οι Jiru και Haghghat (2008) [44] χρησιμοποίησαν ένα ζωνικό μοντέλο για τη μοντελοποίηση της ροής του αέρα και της θερμοκρασίας σε ένα αεριζόμενο σύστημα πρόσοψης διπλού κελύφους. Τα ζωνικά μοντέλα έχουν, επίσης, χρησιμοποιηθεί για να προβλέψουν την κλιματική δυναμική σε αεριζόμενους χώρους αποθήκευσης αγροτικών προϊόντων.

Να σημειωθεί ότι, οι περισσότερες πρόσφατες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν για ροή με ασθε-

νείς δυνάμεις ορμής στον αέρα του δωματίου. Εάν η ορμή της ροής είναι μεγάλη, η ακρίβεια των προσομοιώσεων του ζωνικού μοντέλου θα έπασχε σε σημαντικό βαθμό. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ζωνικά μοντέλα που βασίζονται στις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας, δε λύνουν την εξίσωση ορμής με σκοπό να μειώσουν το υπολογιστικό κόστος. Σε περιπτώσεις όπου η ορμή είναι ισχυρή, απαιτείται ειδική διαδικασία που θα αύξανε σημαντικά την πολυπλοκότητα των ζωνικών μοντέλων. Η πολυπλοκότητα αυτή, θα αύξανε και το υπολογιστικό κόστος και θα έκανε το σύστημα των εξισώσεων των μοντέλων αυτών λιγότερο ευσταθές. Σε αυτή την περίπτωση, ένα τροποποιημένο ζωνικό μοντέλο θα απαιτούσε παρόμοια υπολογιστική προσπάθεια με ένα μοντέλο CFD με τον ίδιο αριθμό κελιών. Τα ζωνικά μοντέλα που βασίζονται στα μετρημένα πρότυπα ροής αέρα προσφέρουν μικρό κίνητρο για τον υπολογισμό της κατανομής της θερμοκρασίας, καθώς μπορεί να είναι αμεσότερο να μετρηθεί απλά η θερμοκρασία με ελάχιστη επιπλέον προσπάθεια.

Το μεγαλύτερο κομμάτι της βιβλιογραφίας αφορά την ανάπτυξη και τη βελτίωση των ζωνικών μοντέλων. Ένα μικρό μόνο μέρος ασχολείται με τις πρακτικές εφαρμογές τους. Η χρήση των μοντέλων αυτών δεν είναι τόσο εύκολη, όσο κάποιοι θεωρούν. Ειδικά όταν κάποιος πρέπει να χειριστεί ειδικά κελιά. Συγκρίνοντας με ρευστοδυναμικές προσομοιώσεις με πολύ αραιά πλέγματα, τα ζωνικά μοντέλα δεν παρουσιάζουν μεγάλο πλεονέκτημα, όσον αφορά στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Σε πολλές περιπτώσεις ο πρόσθετος χρόνος που απαιτείται για την προετοιμασία των δεδομένων εισόδου μπορεί να είναι μεγαλύτερος από αυτόν για μια προσομοίωση CFD. Στο μέλλον, τα ζωνικά μοντέλα θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από τα μοντέλα CFD, καθώς οι υπολογιστές γίνονται όλο και ταχύτεροι και το περιβάλλον εργασίας τους είναι πιο φιλικό για το χρήστη.

## **Μοντέλα CFD**

Στα μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics) επιλύεται αριθμητικά ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για τη διατήρηση της μάζας, της ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes), της ενέργειας, της συγκέντρωσης χημικών συστατικών και των ποσοτήτων τύρβης. Η λύση προσφέρει το πεδίο κατανομών της πίεσης, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του αέρα, τις συγκεντρώσεις των ατμών νερού (σχετική υγρασία) και των ρύπων και τις παραμέτρους τύρβης τόσο για εσωτερικούς, όσο και για εξωτερικούς χώρους. Παρά τη χρήση απλουστευτικών παραδοχών, που απαιτούν καλή γνώση μηχανικής ρευστών από το χρήστη και την ανάγκη για υπολογιστές υψηλών δυνατοτήτων, τα μοντέλα CFD γίνονται όλο και πιο δημοφιλή για την εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού, λόγω της ταχείας ανάπτυξης των δυνατοτήτων των υπολογιστών και της δημιουργίας περιβάλλοντων πολύ φιλικών για το χρήστη.

Τα μοντέλα CFD έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μελέτη ποιότητας εσωτερικού αέρα, θερ-

μικής άνεσης, πυρασφάλειας, συμπεριφοράς συστημάτων θερμικού ελέγχου (HVAC) κ.α. σε διάφορα κτίρια (εμπορικά, κτίρια κατοικίας, σχολεία, εγκαταστάσεις υπηρεσιών υγείας, δημόσια κτίρια και βιομηχανικά), υπόγειες εγκαταστάσεις, οχήματα μαζικής μεταφοράς, θερμοκήπια, κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις κτλ. Οι Norton et al (2006,2007) [45] [46] διεξήγαγαν πολύ περιεκτικές ανασκοπήσεις των CFD εφαρμογών για μελέτες αερισμού στην αγροτική βιομηχανία και στη βιομηχανία τροφίμων (θερμοκήπια, κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις) [47].

### 3.4 Τεχνητός Αερισμός

Παρά το γεγονός ότι η παρούσα εργασία θα εστιάσει σε μελέτες που αφορούν φυσικό αερισμό, αξίζει να δοθούν λίγα λόγια για τον τεχνητό αερισμό, αλλά και για το πως αυτός μπορεί να λειτουργήσει συνδυαστικά με το φυσικό. Ως τεχνητός ή μηχανικός αερισμός νοείται η εισαγωγή εξωτερικού αέρα ή η εξαγωγή εσωτερικού αέρα με τη χρήση ενός ή περισσότερων ανεμιστήρων. Σε αντίθεση με το φυσικό αερισμό, αυτός ο τύπος αερισμού προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου του αέρα που εισέρχεται σε ένα κτίριο ανάλογα με τις απαιτήσεις και είναι ουσιαστικά ανεξάρτητος από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Υπάρχουν δύο είδη συστημάτων μηχανικού αερισμού: τα μη-ισορροπημένα και τα ισορροπημένα συστήματα. Στα μη-ισορροπημένα, ο αέρας είτε τροφοδοτείται στο κτίριο, ή εξάγεται από αυτό με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα. Σε ένα ισορροπημένο σύστημα, ο αέρας τροφοδοτείται και εξάγεται από το κτίριο ταυτόχρονα, με τη χρήση ανεμιστήρων.[48] Εκτός από τη χρήση αμιγώς τεχνητού αερισμού σε ένα κτίριο, είναι δυνατό να γίνει συνδυασμός των δύο τύπων αερισμού. Αυτή η αρχή βασίζεται σε δύο πλήρως αυτόνομα συστήματα, όπου η στρατηγική ελέγχου είτε εναλλάσσει τα δύο συστήματα, ή χρησιμοποιεί το ένα σύστημα για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό και το άλλο για διαφορετικό. Χρησιμοποιεί, δηλαδή, συστήματα με μηχανικό αερισμό π.χ. στη μέση του καλοκαιριού και του χειμώνα και φυσικό αερισμό τις ενδιάμεσες εποχές.[38]

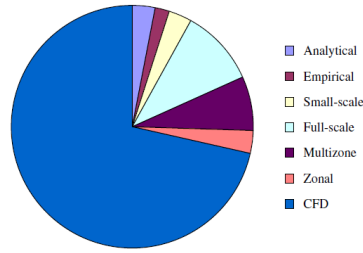
## Κεφάλαιο 4

# Θεωρητικό Υπόβαθρο για τη Χρήση CFD

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια αναλυτικότερη παρουσίαση των μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής, καθώς και εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται τα μοντέλα CFD, η ιδιαίτερη χρήση κάθε μιας από αυτές, καθώς και οι παραλλαγές που λειτουργούν καλύτερα για κάθε εφαρμογή. Η ανάλυση εστιάζει σε εφαρμογές αερισμού για εσωτερικούς χώρους.

### 4.1 Χρήση Μοντέλων CFD για το σχεδιασμό Φυσικού Αερισμού

Ο σχεδιασμός φυσικού αερισμού αποτελεί πρόκληση για τους μηχανικούς οι οποίοι πρέπει να λάβουν υπόψη τις αλλαγές στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου με το χρόνο, καθώς επίσης και την ύπαρξη γειτονικών κτιρίων που λειτουργούν ως εμπόδια και επηρεάζουν το ρυθμό αερισμού μέσω των ανοιγμάτων του κτιρίου. Τα πολυζωνικά μοντέλα δεν είναι ικανά να προσομοιώσουν σύνθετες περιπτώσεις ροής. Γι' αυτό το λόγο, αλλά και για την ανάγκη χρήσης φυσικού αερισμού για εξοικονόμηση ενέργειας, η χρήση των μοντέλων CFD για τέτοιου είδους προβλήματα είναι πολύ δημοφιλής σήμερα. Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει τα ποσοστά χρήσης των μοντέλων εκτίμησης αερισμού κτιρίων για το έτος 2007. Η μελέτη των Asfour και Gadi (2007) [49] παρουσίασε το CFD ως ένα καλό εργαλείο για την εκτίμηση φυσικού αερισμού, ενώ και η μελέτη των Ji, Cook και Hanby (2007) [50] για ένα μονώροφο χώρο που συνδέεται με αίθριο, έδωσε πολύ καλή συμφωνία με τα αναλυτικά μοντέλα και τα πειράματα [47].



Σχήμα 4.1: Ποσοστό Χρήσης των διαφορετικών Μοντέλων Εκτίμησης Αερισμού Κτιρίων το 2007

## 4.2 Βασικές Εξισώσεις Ροής

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που εκφράζουν τη ροή ενός ρευστού, γενικά, ή του αέρα στην περίπτωση της παρούσας εργασίας. Οι εξισώσεις αυτές, με τη γενική ονομασία των εξισώσεων μεταφοράς ή διατήρησης, είναι οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής, ενέργειας και συστατικών.

### Εξίσωση Διατήρησης Μάζας

Η εξίσωση διατήρησης μάζας ή εξίσωση συνέχειας έχει ως εξής:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

### Εξίσωση Διατήρησης Ορμής

Η εξίσωση διατήρησης ορμής, στη μορφή των εξισώσεων Navier-Stokes, είναι:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.2)$$

όπου ως  $f_i$  νοούνται οι εξωτερικές δυνάμεις (π.χ. βαρύτητα) και  $\tau_{ij}$  ο τελεστής τάσεων.

### Εξίσωση Διατήρησης Ενέργειας

Η εξίσωση ενέργειας μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση της ενθαλπίας όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \sigma_T - \frac{\partial q_{Tj}}{\partial x_j} \quad (4.3)$$

όπου  $q_T$  είναι η θερμική ροή. Η εξίσωση αυτή μπορεί, επίσης, να εκφραστεί με χρήση της εσωτερικής ενέργειας.

## Εξίσωση Διατήρησης Χημικών Συστατικών

Η εξίσωση αυτή παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Y_i u_i)}{\partial x_i} = \omega_i \quad (4.4)$$

όπου  $Y_i$  είναι το κλάσμα μάζας και  $\omega_i$  είναι ο ρυθμός αντίδρασης για το κάθε συστατικό [51].  
[52]

## Γενικευμένη Εξίσωση Μεταφοράς

Η γενική μορφή όλων των παραπάνω εξισώσεων, μπορεί να εκφραστεί σε 2 διαστάσεις ως εξής:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\Phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) + S_\Phi \quad (4.5)$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης είναι ο μεταβατικός όρος, οι δύο επόμενοι είναι οι όροι συναγωγής στη  $x$  και την  $y$  διεύθυνση, οι δύο πρώτοι όροι του δεξιού μέλους είναι οι αντίστοιχοι όροι διάχυσης, ενώ ο τελευταίος είναι ο όρος παραγωγής ή κατανάλωσης (δηλαδή πηγή ή καταβόθρα της ποσότητας  $\Phi$ ).

Η ποσότητα  $\Phi$  ανάλογα με την εξίσωση που ζητείται, μπορεί να παίρνει τις τιμές:

$$\Phi = \begin{cases} 1 & \text{συνέχειας} \\ u & \text{x-ορμής} \\ v & \text{y-ορμής} \\ h & \text{ενέργειας} \\ Y_i & \text{χημικών συστατικών} \end{cases} \quad (4.6)$$

Με τον παραπάνω τρόπο, επιτυγχάνεται η επίλυση μόνο ενός είδους εξίσωσης, η οποία έχει τη μορφή της γενικής εξίσωσης διατήρησης. Αυτή η ιδέα οδηγεί σε μια σοβαρότατη οικονομία χρόνου. Σε έναν κώδικα CFD χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης της γενικής εξίσωσης διατήρησης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν επαναληπτικά για οποιοδήποτε αριθμό εξαρτημένων μεταβλητών  $\Phi$ , απλώς και μόνο με αλλαγή των εκφράσεων για  $\Gamma_\Phi$ ,  $S_\Phi$  και των αρχικών και οριακών συνθηκών. Επομένως, μπορεί να θεμελιωθεί μια γενική μέθοδος επίλυσης και να αναπτυχθεί ένα μόνο γενικό πρόγραμμα υπολογιστή, για οποιαδήποτε εφαρμογή.[53] [54]

Τα εμπορικά πακέτα CFD που χρησιμοποιούνται στην πράξη, αποτελούνται, γενικά, από τρία βασικά μέρη:

1. Τον προ-επεξεργαστή (pre-processor), όπου ο χρήστης θέτει τις οριακές συνθήκες (γεωμετρία, αριθμός κελιών υπολογιστικού πλέγματος, άνεμος, θερμοκρασία κτλ.)
2. Τον επιλύτη (solver), ο οποίος υπολογίζει την αριθμητική λύση και "τρέχει" μέχρι την επίτευξη σύγκλισης (με προεπιλεγμένα κριτήρια)
3. Τον μετα-επεξεργαστή (post-processor), όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στον χρήστη (π.χ. διαγράμματα ταχύτητας, θερμοκρασίας ή πίεσης).

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, τα μοντέλα CFD και τα εμπορικά πακέτα τα οποία τα συνοδεύουν αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία, τόσο λόγω της σχετικά εύκολης εφαρμογής τους, όσο και λόγω του πολύ φιλικού για το χρήστη περιβάλλοντος εργασίας. Δεν απαιτείται, δηλαδή, εξειδικευμένη γνώση χρήσης ηλεκτρονικού υπολογιστή για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Απαιτείται βέβαια καλή γνώση των αρχών της υπολογιστικής μηχανικής. [55]

### 4.3 Μοντελοποίηση της Τύρβης

#### 4.3.1 Ανάλυση Βασικών Μεθόδων Μοντελοποίησης Τύρβης

Τα μοντέλα CFD περιλαμβάνουν, γενικά, τη μοντελοποίηση RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) και τη μοντελοποίηση LES (Large Eddy Simulation). Στην πρώτη λύνεται ένα σύστημα εξισώσεων μεταφοράς για τη συνέχεια, την ορμή, την ενέργεια και τη συγκέντρωση χημικών συστατικών. Για ασυμπιεστή ροή Νευτωνικού ρευστού, η εξίσωση Navier-Stokes μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(U_j U_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right) + S \quad (4.7)$$

όπου η μπάρα υποδηλώνει τις μέσες τάσεις Reynolds. Οι τυρβώδεις τάσεις Reynolds  $\overline{u_i u_j}$  μπορούν να λυθούν απευθείας από ένα σύστημα εξισώσεων μεταφοράς. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται μοντελοποίηση τάσεων Reynolds. Μια άλλη προσέγγιση δίνεται από τη σύνδεση των τυρβωδών τάσεων Reynolds με την προσέγγιση ιξώδους δίνης του Boussinesq ως εξής:

$$-\overline{u_i u_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4.8)$$

όπου  $\mu_t$  είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα που πρέπει να προσδιοριστεί. Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή σαν μοντέλο τυρβώδους συνεκτικότητας. Ανάλογα με το πόσες εξισώσεις μεταφοράς πρέπει να επιλυθούν, για να υπολογιστεί η τυρβώδης συνεκτικότητα, τα μοντέλα αυτά κατηγοριοποιούνται

περαιτέρω σε μηδενικής εξίσωσης, μιας, δύο, τριών και τεσσάρων εξισώσεων. Τα πιο γνωστά μοντέλα δύο εξισώσεων είναι το μοντέλο Standard k-ε και το RNG k-ε.

Η προσέγγιση LES απαιτεί το διαχωρισμό των μικρών δινών από τις μεγάλες με ένα φίλτρο. Για λόγους απλότητας, ακολουθεί εξήγηση σε μια διάσταση. Η "φιλτραρισμένη" ταχύτητα είναι:

$$\bar{U}_i = \int G(x, x') U_i(x) dx' \quad (4.9)$$

όπου  $G(x, x')$  είναι η συνάρτηση "φιλτραρίσματος". Η συνάρτηση αυτή είναι μεγάλη μόνο όταν το  $G(x, x')$  είναι μικρότερο από το πάχος φίλτρου, μία κλίμακα μήκους πάνω στην οποία γίνεται η εξαγωγή του μέσου όρου. Οι δίνες που είναι μεγαλύτερες από το πάχος φίλτρου θεωρούνται "μεγάλες δίνες", ενώ αυτές που είναι μικρότερες, θεωρούνται "μικρές δίνες". Εάν χρησιμοποιηθεί τετραγωνικό φίλτρο (box filter) όπως το παρακάτω

$$G(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta_i} & |x_i| \leq \frac{\Delta_i}{2} \\ 0 & |x_i| > \frac{\Delta_i}{2} \end{cases} \quad (4.10)$$

τότε είναι δυνατόν να εξαχθούν οι εξισώσεις διατήρησης ορμής (Navier-Stokes), συνέχειας, ενέργειας και συγκέντρωσης χημικών συστατικών. Η "φιλτραρισμένη" εξίσωση Navier-Stokes για ασυμπίεστη νευτωνική ροή είναι:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_j \bar{U}_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right) + S \quad (4.11)$$

όπου η μπάρα υποδηλώνει τη "φιλτραρισμένη τιμή" η οποία είναι διαφορετική από τη μέση τιμή Reynolds. Οι τάσεις Reynolds (subgrid) είναι:

$$\tau_{ij} = \bar{U}_i \bar{U}_j - \bar{U}_i \cdot \bar{U}_j \quad (4.12)$$

Το μοντέλο Smagorinsky, μοντελοποιεί τις άγνωστες  $\tau_{ij}$  ως εξής:

$$\tau_{ij} = 2C \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (4.13)$$

όπου,

$$|\bar{S}| = (2 \times \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij})^{1/2}, \quad \bar{S}_{ij} = 1/2((\partial \bar{U}_i / \partial x_j) + (\partial \bar{U}_j / \partial x_i)), \quad C = C_s^2 \quad \text{και} \quad C_s = 0.1 - 0.25$$

Το μοντέλο LES έχει μόνο έναν ή και κανέναν εμπειρικό συντελεστή. Για το λόγο αυτό, θεωρείται



ανώτερο από τα μοντέλα RANS. Παρ' όλα αυτά, με το LES πρέπει να λύνεται δυναμική ροή ακόμα και αν η πραγματική ροή είναι σταθερή και δεν απαιτούνται οι λεπτομέρειές της. Η ακρίβεια μιας προσομοίωσης LES εξαρτάται από την ανάλυση του πλέγματος. Έτσι, το LES απαιτεί πολύ περισσότερο υπολογιστικό χρόνο(τουλάχιστον δυο φορές περισσότερο) απ' ότι η μοντελοποίηση RANS για ροή σε σταθερή κατάσταση.

#### 4.3.2 Μοντέλο Μηδενικής Τάξης- Zero-Equation Model

Πολύ απλά μοντέλα τυρβώδους συνεκτικότητας υπολογίζουν μια καθολική τιμή για την τυρβώδη συνεκτικότητα  $\mu_t$ , από τη μέση ταχύτητα και από μία γεωμετρική κλίμακα μήκους, χρησιμοποιώντας μια εμπειρική σχέση. Επειδή δεν λύνονται πρόσθετες εξισώσεις μεταφοράς, τα μοντέλα αυτά ονομάζονται "μηδενικής τάξης". Το μοντέλο Μηδενικής Τάξης χρησιμοποιεί μια αλγεβρική εξίσωση για να υπολογίσει την ιζώδη συνεισφορά από τις τυρβώδεις δίνες. Για όλο το πεδίο ροής υπολογίζεται μια σταθερή τιμή συνεκτικότητας τυρβώδους δίνης.

Η τυρβώδης συνεκτικότητα μοντελοποιείται ως το γινόμενο μιας κλίμακας τυρβώδους ταχύτητας,  $U_t$  και μιας κλίμακας μήκους τύρβης,  $l_t$ , όπως προτείνεται από τους Prandtl και Kolmogorov,

$$\mu_t = \rho f_\mu U_t l_t \quad (4.14)$$

όπου  $f_\mu$  είναι μια σταθερά αναλογίας. Ως κλίμακα ταχύτητας λαμβάνεται η μέγιστη ταχύτητα στο πεδίο ροής. Η κλίμακα μήκους εξάγεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$l_t = (V_D^{1/3})/7 \quad (4.15)$$

όπου  $V_D$  είναι ο όγκος του πεδίου ροής. Το μοντέλο αυτό έχει μικρή φυσική θεμελίωση και η χρήση του δεν προτείνεται.[56]

#### 4.3.3 Μοντέλο Standard k-ε

Το μοντέλο αυτό αποτελεί το απλούστερο μοντέλο που βασίζεται στις τάσεις Reynolds. Είναι το μοντέλο δύο εξισώσεων στο οποίο η λύση δύο ξεχωριστών εξισώσεων μεταφοράς επιτρέπει στην τυρβώδη ταχύτητα και στις κλίμακες μήκους να προσδιοριστούν ανεξάρτητα. Οι Launder και Spalding[57] πρότειναν ότι η κλίμακα μιας μεγάλης δίνης σε ένα πεδίο τυρβώδους ροής πρέπει να σχετίζεται με την τυρβώδη κινητική ενέργεια  $k$  και το ρυθμό καταστροφής της ενέργειας,  $\epsilon$ . Έτσι, οι εξισώσεις μεταφοράς για τα  $k$  και  $\epsilon$  λύνονται για να εξαχθούν οι σχετικές τυρβώδεις ποσότητες.

### Εξίσωση $k$

$$\rho \frac{dk}{dt} = \underbrace{\rho \frac{\partial k}{\partial t}}_{(i)} + \underbrace{\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_{(ii)} = \underbrace{\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{(iii)} - \underbrace{\rho \epsilon}_{(iv)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_{(v)} \quad (4.16)$$

όπου  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$

Συγκεκριμένα, ο κάθε όρος της παραπάνω εξίσωσης δίνει:

- i) Ρυθμός αλλαγής του  $k$
- ii) Μεταφορά του  $k$  με συναγωγή
- iii) Ρυθμός παραγωγής του  $k$
- iv) Ρυθμός ιξώδους απορρόφησης του  $k$
- v) Μεταφορά του  $k$  με διάχυση

### Εξίσωση $\epsilon$

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \underbrace{\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t}}_{(i)} + \underbrace{\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}}_{(ii)} = \underbrace{C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{(iii)} - \underbrace{C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}}_{(iv)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]}_{(v)} \quad (4.17)$$

Αντίστοιχα με την εξίσωση του  $k$ , ο κάθε όρος της εξίσωσης  $\epsilon$  δίνει:

- i) Ρυθμός αλλαγής του  $\epsilon$
- ii) Μεταφορά του  $\epsilon$  με συναγωγή
- iii) Ρυθμός παραγωγής του  $\epsilon$
- iv) Ρυθμός απορρόφησης του  $\epsilon$
- v) Μεταφορά του  $\epsilon$  με διάχυση

#### 4.3.4 Μοντέλο RNG $k$ - $\epsilon$

Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από τους Yakhot et al.[58] χρησιμοποιώντας τη θεωρία Επανακανονικοποίησης (Renormalization Group). Η βασική διαφοροποίησή του σε σχέση με το κλασικό

	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
Standard $k - \epsilon$	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3
RNG $k - \epsilon$	1.42	1.68	0.0845	0.7194	0.7194

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικές τιμές σταθερών των μοντέλων  $k - \epsilon$

μοντέλο  $k - \epsilon$  είναι ο πρόσθετος όρος στην εξίσωση  $\epsilon$ . Η διαφοροποίηση αυτή δίνει τη δυνατότητα στο μοντέλο να μπορεί να προβλέψει καλύτερα διαφορετικές κλίμακες κίνησης μέσα από αλλαγές στον όρο παραγωγής της εξίσωσης. Αυτό, επίσης, σημαίνει ότι το μοντέλο δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε ένα πιο ευρύ φάσμα ροών και ιδιαίτερα για ροές με χαμηλούς αριθμούς Reynolds, ενώ προβλέπει καλύτερα και το μήκος επανακόλλησης της ροής.

Η διαφοροποιημένη εξίσωση  $\epsilon$ , έχει ως εξής:

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4.18)$$

Όπου

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (4.19)$$

$$\eta = \sqrt{2 \tau_{ij} \tau_{ij}} \frac{k}{\epsilon} \quad (4.20)$$

Οι τιμές των πρόσθετων σταθερών που χρησιμοποιούνται στο RNG  $k - \epsilon$  μοντέλο είναι:

$$\eta_0 = 4.38$$

$$\beta = 0.012 \text{ (πειραματικό)}$$

Επειδή οι χαρακτηριστικές τιμές των σταθερών υπολογίζονται ανεξάρτητα για το κάθε μοντέλο, ο πίνακας 4.1 δίνει τις τιμές τους στο κάθε ένα από αυτά.

## 4.4 Επαλήθευση Μοντέλων CFD

Μέχρι και σήμερα τα μοντέλα CFD χρησιμοποιούν προσεγγίσεις για την εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού. Οι προσπάθειες για ακριβέστερα, ταχύτερα και γενικά πιο αξιόπιστα μοντέλα είναι συνεχείς εδώ και πολλά χρόνια. Μια ανασκόπηση από τους Zhai et al.(2007) [59] παρουσίασε τα πιο

δημοφιλή τυρβώδη μοντέλα από οκτώ διαφορετικές κατηγορίες μεταξύ των οποίων τα μοντέλα ιξώδους δίνης, τα μοντέλα τάσεων Reynolds, τα LES και τα μοντέλα DES (Detached Eddy Simulation). Τα τελευταία μοντέλα αποτελούν ένα υβρίδιο που χρησιμοποιούν την προσέγγιση LES για την κύρια ροή και τη RANS για τη ροή του οριακού στρώματος.

Η χρήση των μοντέλων CFD και η επαλήθευσή τους με πειραματικά δεδομένα δίνει πληροφορίες για την ακρίβεια του κάθε μοντέλου. Οι Zhang et al.(2007) [60] σε έρευνά τους, μελέτησαν τις οκτώ κατηγορίες που αναφέρθηκαν πιο πάνω, για εξαναγκασμένη συναγωγή και μικτή συναγωγή σε αεριζόμενους χώρους, φυσική συναγωγή με μέση κλίση θερμοκρασίας σε κοιλότητα με μεγάλο ύψος και φυσική συναγωγή με μεγάλη κλίση θερμοκρασίας σε μοντέλο πυρκαγιάς. Παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά των μοντέλων δεν ήταν πάντα συνεπής για διαφορετικές ροές. Μεταξύ των μοντέλων RANS που εξέτασαν, το  $\nu$ 2f-dav και το RNG k-ε έδειξαν την καλύτερη συμπεριφορά. Πολλοί άλλοι ερευνητές εξέτασαν, επίσης, διάφορα μοντέλα RANS για εκτίμηση αερισμού σε κτίρια. Ως συμπέρασμα και εδώ, ήταν η διαφορετική συμπεριφορά των μοντέλων για διαφορετικού τύπου ροές, με το μοντέλο RNG k-ε, όμως, να δείχνει συνέπεια σε αρκετά μεγάλο βαθμό.

Τα μοντέλα LES και DES δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με χρήση ενός σχετικά πυκνού υπολογιστικού πλέγματος. Το LES φαίνεται δημοφιλέστερο σε ροές όπου ζητείται η κατανομή σωματιδίων, λόγω της λεπτομερέστερης ανάλυσης της τυρβώδους ροής που μπορεί να προσφέρει. Με το πέρασμα του χρόνου, το μοντέλο LES παρουσιάζει βελτίωση παρά τις αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Παρ' ότι χρησιμοποιείται σήμερα ως εργαλείο σε τομείς έρευνας, η χρήση του σε εφαρμογές σχεδιασμού ίσως απαιτήσει ακόμα χρόνο.

Παράλληλα με τις μελέτες για την επαλήθευση αποτελεσμάτων, γίνονται προσπάθειες βελτίωσης των αριθμητικών σχημάτων που χρησιμοποιούνται από τα μοντέλα, όπως π.χ. η μελέτη των Ng et al.(2008) [61] για σχήματα ανώτερης τάξης στην επίλυση ροής εσωτερικού αέρα.

## **4.5 Σύζευξη Μοντέλων CFD με άλλα Μοντέλα Προσομοίωσης σε Κτίρια**

Τα μοντέλα CFD χρησιμοποιούνται, επίσης, για να βελτιώσουν άλλα εργαλεία προσομοίωσης, ώστε η εκτίμηση αερισμού στα κτίρια να γίνει ακριβέστερη. Η τάση αυτή είναι συνήθης, τελευταία, σε περιοχές που περιλαμβάνουν ροή πολλαπλής κλίμακας και μετάδοση θερμότητας. Παρατηρείται, λοιπόν, σύζευξη (coupling) μοντέλων CFD με ενεργειακές προσομοιώσεις, με πολυζωνικά μοντέλα, καθώς επίσης και με γενετικούς αλγορίθμους, με σκοπό τη βέλτιστη εκτίμηση της συμπεριφοράς αερισμού σε εσωτερικό περιβάλλον. Η σύζευξη, μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο υπολογιστικό κό-

στος, αλλά και σε μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Ένα παράδειγμα τέτοιας σύζευξης είναι οι πρόσφατες μελέτες των Stavrakakis, Markatos [62][63] που αναφέρονται σε κτίρια και ερευνούν το βέλτιστο σχεδιασμό ανοιγμάτων για επίτευξη θερμικής άνεσης.

#### **4.6 Χρήση Μοντέλων CFD για μελέτες Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα**

Η μελέτη αερισμού αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν εφαρμόζεται σε χώρους με ιδιαίτερες απαιτήσεις. Οι Zhang et al.(2008) [64] και Zhao et al.(2007,2008) [65] [66] χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο CFD για τη μελέτη μεταφοράς σωματιδίων σε διαφορετικά περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις υγιεινής. Άλλες εφαρμογές προσανατολίζονται στη μεταφορά και τη διασπορά σωματιδίων λόγω εκπνοής σε εσωτερικό περιβάλλον, ενώ άλλες έχουν σκοπό τη σύγκριση μεταξύ των προσεγγίσεων Euler και Lagrange στην εκτίμηση της διασποράς σωματιδίων. Εκτός από τις μελέτες που αφορούν σωματιδιακούς ρυπαντές, παρατηρούνται και άλλες που εκτιμούν την ποιότητα αέρα, λόγω της ύπαρξης αερίων ρύπων. Ένα παράδειγμα είναι η μελέτη των Kassomenos et al.(2008) [67], που αφορά την ποιότητα αέρα σε μία χημική εγκατάσταση πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) και την επίδραση στους εργαζόμενους που εκτίθενται σε τέτοιου είδους ρυπαντές.

## Κεφάλαιο 5

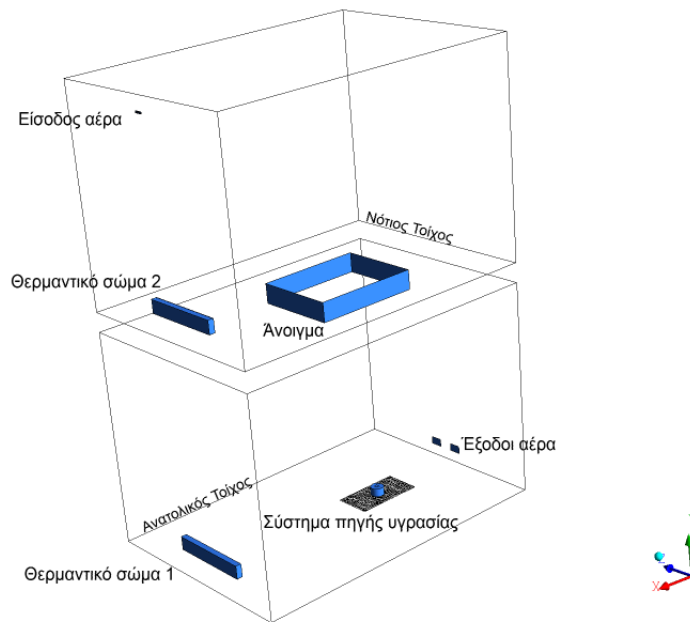
# Πρώτη Περίπτωση Μελέτης

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πρώτη περίπτωση μελέτης. Στην περίπτωση αυτή, για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις των Vera et al.[68] [69], οι οποίες αφορούν στην ταχύτητα αέρα, τη θερμοκρασία και την υγρασία στο εσωτερικό πειραματικού οικίσκου δύο ορόφων. Με βάση τη γεωμετρία του κτιρίου και τις συνθήκες του πειράματος, έγινε προσομοίωση υπολογιστικής ρευστομηχανικής, με σκοπό τη σύγκριση και τον έλεγχο ορθότητας των αποτελεσμάτων του κώδικα CFX.

Πριν την παράθεση των αποτελεσμάτων, θεωρείται χρήσιμη μια συνοπτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης, καθώς και της αναπαράστασης της διάταξης αυτής με βάση τις δυνατότητες του λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής (μοντελοποίηση CFD).

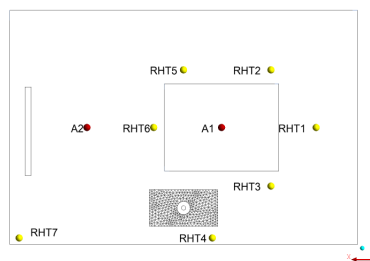
Όπως αναφέρθηκε, πρόκειται για έναν οικίσκο δύο ορόφων στον οποίο θα γίνει μελέτη αερισμού με μετρήσεις που αφορούν τη ταχύτητα του αέρα, τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία. Η γεωμετρία φαίνεται στα Σχήματα 5.1 και 5.2.



Σχήμα 5.1: Τριδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου

Οι εσωτερικές διαστάσεις του κάθε ορόφου είναι 3.62m x 2.44m x 2.43m και οι όροφοι επικοινωνούν μεταξύ τους με άνοιγμα διαστάσεων 1.19m x 0.91m και ύψος 0.22m. Για την εισαγωγή και την εξαγωγή του αέρα υπάρχουν, αντίστοιχα, είσοδος στο βόρειο τοίχο του άνω ορόφου με διαστάσεις 96.5mm x 21.8mm και δύο έξοδοι στο νότιο τοίχο του κάτω ορόφου με διαστάσεις 135mm x 85mm η κάθε μία. Οι ακριβείς θέσεις των παραπάνω, φαίνονται στο Σχήμα 5.1.

Στο εσωτερικό του κτιρίου υπάρχουν δύο θερμαντικά σώματα, ένα σε κάθε όροφο, με διαστάσεις 0.92m x 0.15m x 0.065m. Τέλος, υπάρχει ένα σύστημα πηγής υγρασίας στον κάτω όροφο, κυλινδρικού σχήματος πάνω σε ένα τραπέζι διαστάσεων 0.71m x 0.38m. Στο Σχήμα 5.2, απεικονίζεται κάτοψη του κάτω ορόφου του κτιρίου καθώς και η θέση των αισθητήρων-σημείων όπου λήφθηκαν οι διάφορες μετρήσεις.



Σχήμα 5.2: Κάτοψη κάτω ορόφου με τις θέσεις των αισθητήρων

## 5.2 Σύστημα Οργάνων και Παρακολούθησης

Η σχετική υγρασία και θερμοκρασία του εσωτερικού, του τροφοδοτούμενου και εξαγόμενου αέρα, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας κατά μήκος του ανοίγματος και ο ρυθμός αερισμού παρακολούθηθηκαν μέσω ηλεκτρονικών αισθητήρων και συστήματος συλλογής δεδομένων (Data Acquisition System, DAS).

Οι θερμοκρασίες στις εσωτερικές επιφάνειες του οικίσκου μετρήθηκαν από 145 θερμοζεύγη με ακρίβεια  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ .

Η εσωτερική σχετική υγρασία και θερμοκρασία παρακολούθηθηκαν από 32 αισθητήρες σχετικής υγρασίας (RH) οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε κάθε δωμάτιο και βαθμονομήθηκαν με ακρίβεια  $\pm 2\%RH$ . Στον καθένα από αυτούς τους αισθητήρες τοποθετήθηκε και ένας αισθητήρας θερμοκρασίας (ακρίβεια  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ).

Οι συνθήκες του τροφοδοτούμενου αέρα πριν την είσοδο, του εξαγόμενου αέρα μετά τις εξόδους καθώς και στις μονάδες χειρισμού του αέρα, παρακολούθηθηκε με ακριβείς αισθητήρες σχετικής υγρασίας (ακρίβειας  $\pm 1\%RH$  και  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ). Μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 30 ή 60 δευτερόλεπτα συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας με τη χρήση συστήματος συλλογής δεδομένων (DAS).

Οι ταχύτητες του αέρα και οι θερμοκρασίες σε κάθε δωμάτιο μετρήθηκαν από 14 κατευθυντικά ανεμόμετρα. Επίσης, 5 μονάδες ίδιων αισθητήρων εγκαταστάθηκαν στο άνοιγμα. Τα δεδομένα συλλέγονταν 5 φορές του δευτερόλεπτο συνεχώς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας [68].

## 5.3 Διαμόρφωση Υπολογιστικής Προσομοίωσης

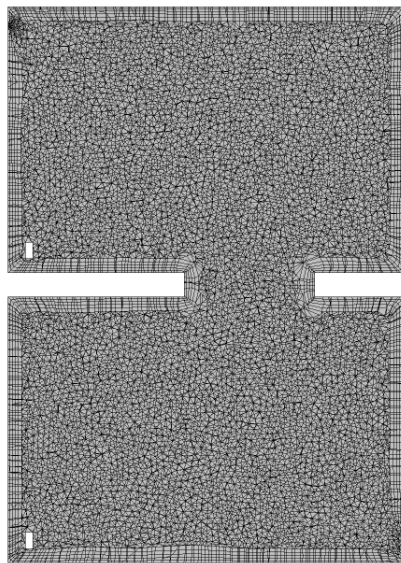
Η προσομοίωση που παρουσιάζεται πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής CFX της ANSYS και αφορά τριδιάστατη, όπως αναφέρθηκε, γεωμετρία και επίλυση, σε μόνιμη κατάσταση, ενώ για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε σχήμα διακριτοποίησης ανάντι διαφορών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά, το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε, τα γραφήματα των ζητούμενων μεγεθών σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, καθώς και τα αναπτυσσόμενα πεδία ροής.

### 5.3.1 Υπολογιστικό Πλέγμα

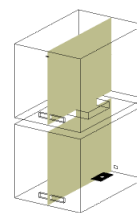
Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι μη δομημένο πλέγμα 2.104.799 στοιχείων. Δομημένο πλέγμα, με παράλληλες και κάθετες προς τα όρια της γεωμετρίας γραμμές, δημιουργήθηκε για καλύτερο υπολογισμό του οριακού στρώματος. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε τοπική πύκνωση του



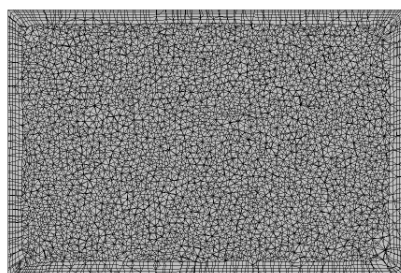
πλέγματος στις περιοχές ενδιαφέροντος, όπως στην είσοδο, στις εξόδους και στην πηγή υγρασίας (Σχήμα 5.3.1).



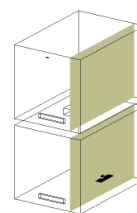
(α') Υπολογιστικό Πλέγμα - Τομή 1



(β') Τομή 1



(γ') Υπολογιστικό Πλέγμα - Τομή 2



(δ') Τομή 2

Σχήμα 5.3: Υπολογιστικό Πλέγμα Προσομοίωσης

### 5.3.2 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.1.

Παράμετρος	Οριακή Συνθήκη
Παραγωγή Υγρασίας (g/h)	109.4
<b>Συνθήκες αέρα εισόδου:</b>	
Ογκομετρική παροχή Αέρα (l/s)	5.905
Θερμοκρασία (°C)	18.0
Σχετική Υγρασία (g/kg)	4.96
<b>Πηγές Θερμότητας:</b>	
Παραγόμενη αισθητή θερμότητα από την Πηγή Υγρασίας (W)	85
Θερμαντικό Σώμα 1 (W)	252
Θερμαντικό Σώμα 2 (W)	91
<b>Θερμοκρασίες Τοίχων (Κάτω όροφος (°C)):</b>	
Βόρειος Τοίχος	20.3
Ανατολικός Τοίχος	18.8
Νότιος Τοίχος	18.6
Δυτικός Τοίχος	18.7
Πάτωμα	18.2
Οροφή	21.1
<b>Θερμοκρασίες Τοίχων (Πάνω όροφος (°C)):</b>	
Βόρειος Τοίχος	16.5
Ανατολικός Τοίχος	17.2
Νότιος Τοίχος	16.7
Δυτικός Τοίχος	17.3
Πάτωμα	17.8
Οροφή	18.0

Πίνακας 5.1: Οριακές Συνθήκες

Η είσοδος του αέρα γίνεται από το άνοιγμα στον άνω όροφο, το οποίο χωρίστηκε σε εννέα ίσα ορθογωνικά μέρη. Από το καθένα από αυτά, ο αέρας εισέρχεται με διαφορετική κατεύθυνση με σκοπό την καλύτερη διασπορά του στο χώρο. Όσον αφορά στα θερμαντικά σώματα, αυτά εισάγουν θερμότητα στο χώρο από την άνω πλευρά, ενώ το σύστημα πηγής υγρασίας όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 εισάγει θερμότητα από ολόκληρη την παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου.

### 5.3.3 Πιστοποίηση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή γίνεται πιστοποίηση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής προσομοίωσης, μέσω της σύγκρισης αυτών με τα πειραματικά δεδομένα της μελέτης των Vera et al. [68] [69] Πα-

ρουσιάζονται τα γραφήματα της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της ταχύτητας αέρα σε διάφορες θέσεις του οικίσκου, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 5.2 και ακολουθεί η εξαγωγή συμπερασμάτων. Η υπολογιστική προσομοίωση έγινε με χρήση δύο μοντέλων τύρβης, του μοντέλου Μηδενικής Τάξης και του μοντέλου δύο εξισώσεων RNG k-ε. Η συμπεριφορά των δύο αυτών μοντέλων θα εκτιμηθεί, επίσης.

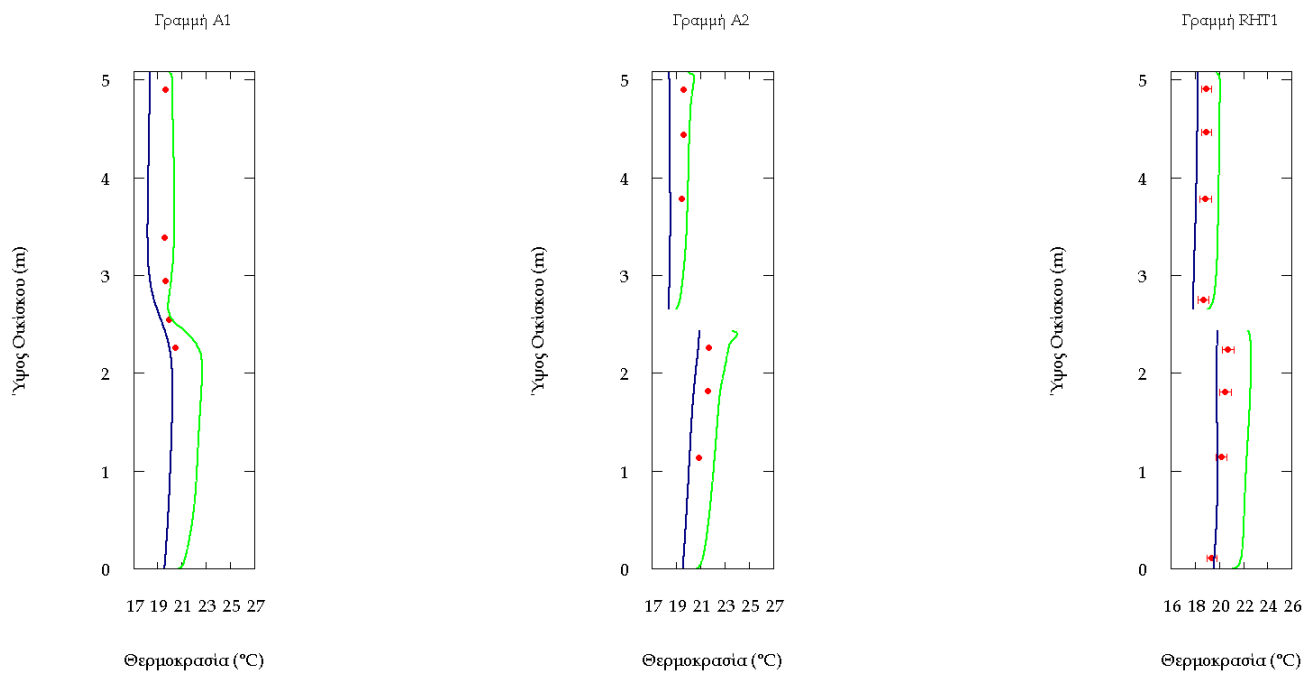
### **Θερμοκρασία**

Η σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις υπολογισμένες τιμές της προσομοίωσης καθ' ύψος των γραμμών-αισθητήρων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις (Σχήματα 5.4-5.6). Η καμπύλη των υπολογισμών ακολουθεί την τάση των πειραματικών δεδομένων και οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν τους  $2.5^{\circ}\text{C}$ , στη χειρότερη περίπτωση. Σε αρκετές περιπτώσεις η απόκλιση βρίσκεται εντός των ορίων του μετρητικού σφάλματος.

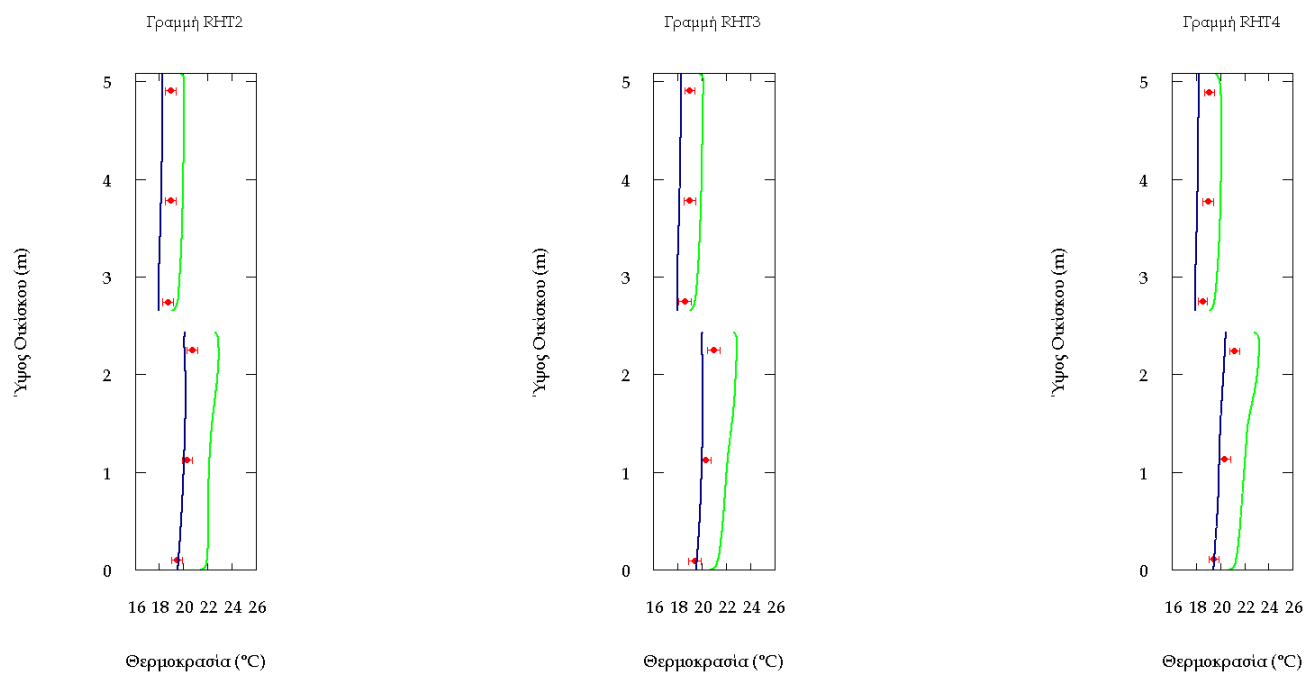
Το μοντέλο τύρβης Μηδενικής Τάξης φαίνεται να συμπεριφέρεται το ίδιο καλά στον κάτω και τον πάνω όροφο του κτιρίου, ενώ το RNG k-ε μοντέλο ακολουθεί σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό το πείραμα στον πάνω όροφο, αλλά εμφανίζει μεγαλύτερη απόκλιση στον κάτω.

Επίσης, σαν γενική παρατήρηση, φαίνεται ότι το μοντέλο Μηδενικής Τάξης υποεκτιμά τις πειραματικές τιμές, ενώ το μοντέλο RNG k-ε τις υπερεκτιμά.

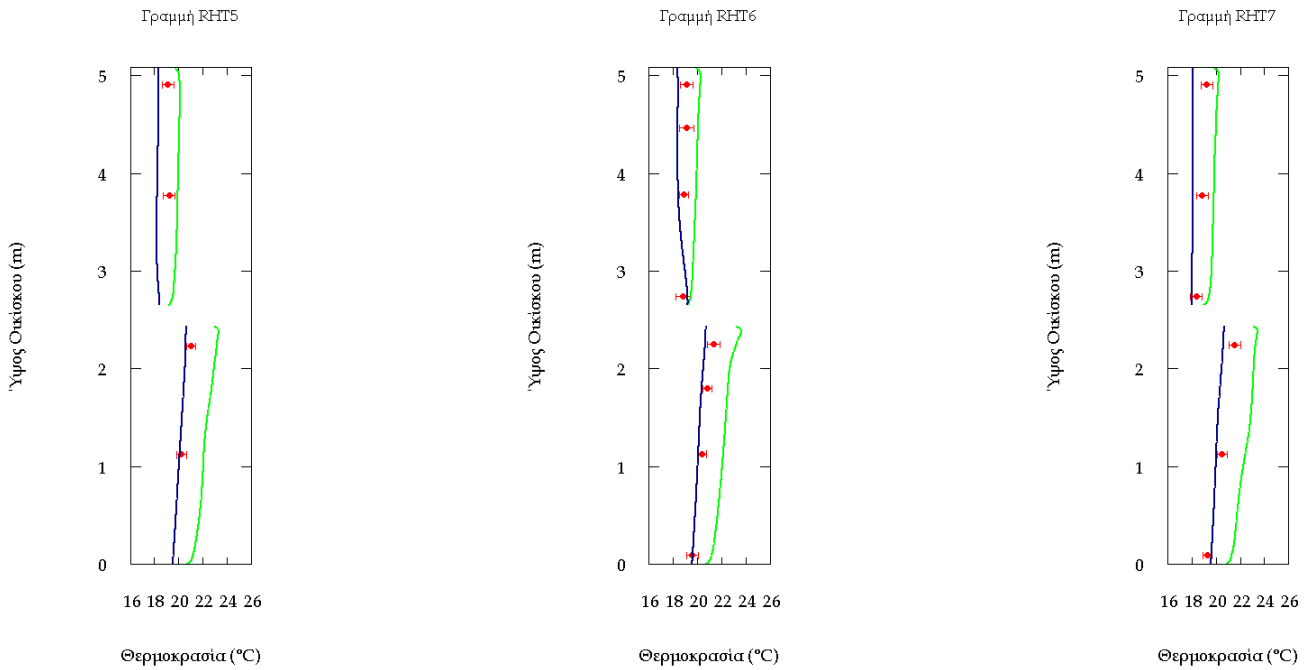
Γενικά, ένα σφάλμα της τάξης του 2.5-5% για το μοντέλο Μηδενικής Τάξης και 4-8% για το μοντέλο RNG k-ε, θεωρείται ανεκτό για την προσομοίωση της θερμοκρασίας, ως εκ τούτου τα αποτελέσματα κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά. Ακριβείς και αναλυτικές τιμές των σφαλμάτων που μετρήθηκαν δίνονται συγκεντρωμένες σε πίνακες του παραρτήματος και σε γράφημα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.4: Θερμοκρασία - Ύψος Οικίσκου για A1, A2 και RHT1



Σχήμα 5.5: Θερμοκρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT2, RHT3 και RHT4



Σχήμα 5.6: Θερμοκρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT5, RHT6 και RHT7

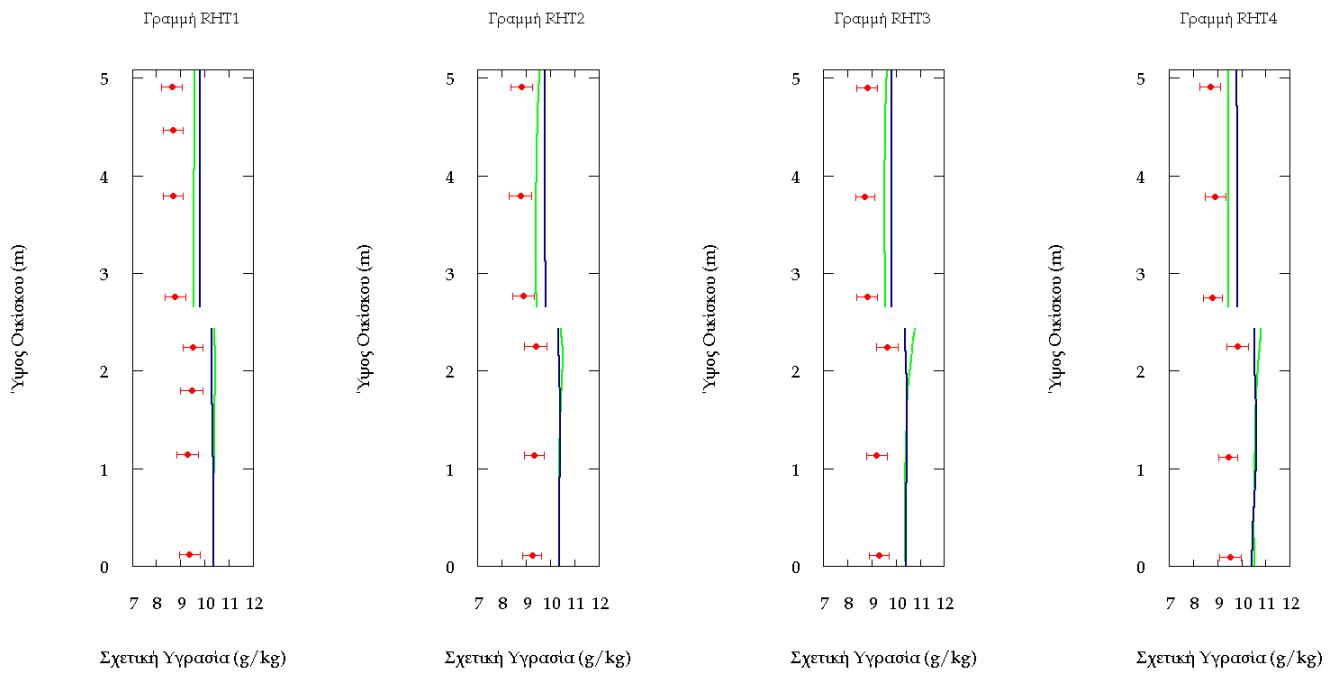


## Σχετική Υγρασία

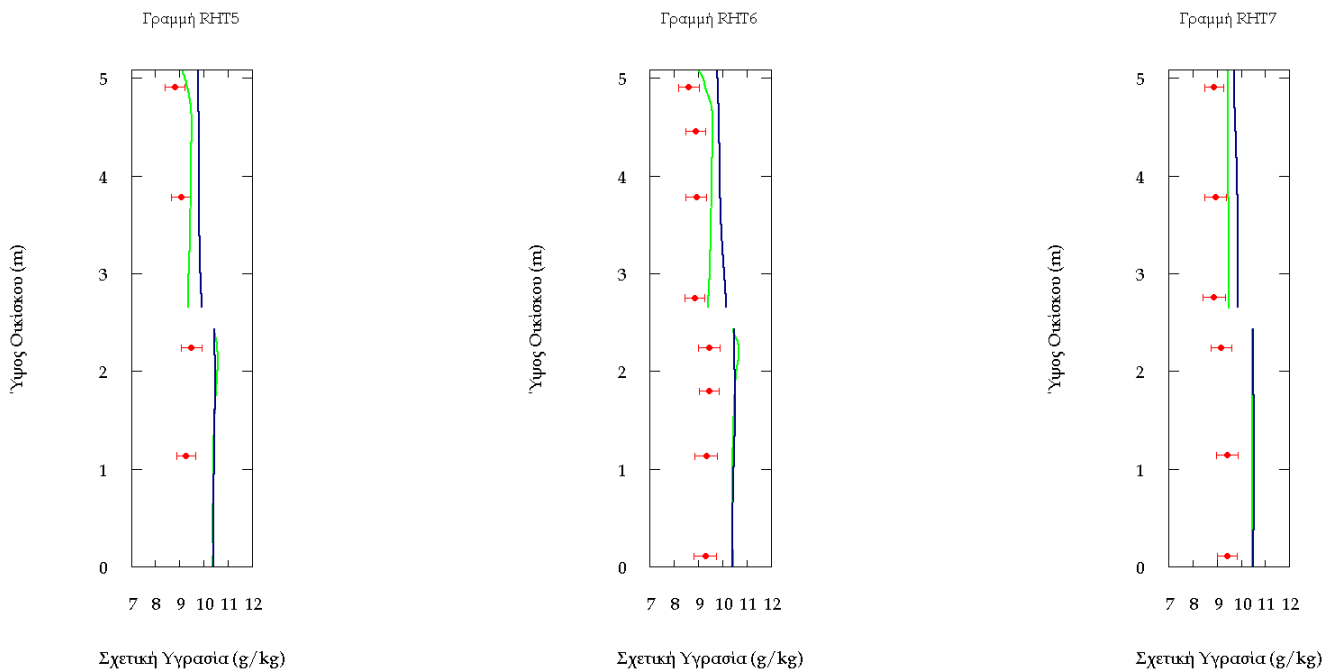
Η σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και των πειραματικών μετρήσεων απεικονίζεται στα Σχήματα 5.7 και 5.8. Ως πρώτη παρατήρηση, όσον αφορά στη σχετική υγρασία μπορεί να σημειωθεί η υπερεκτίμησή της και από τα δύο μοντέλα. Γενικά, τόσο από το μοντέλο Μηδενικής Τάξης, όσο και από το RNG k-ε φαίνεται να ακολουθείται η τάση των πειραματικών δεδομένων, με το δεύτερο μοντέλο ωστόσο να συμπεριφέρεται αρκετά καλύτερα και κάποιες φορές να είναι εντός ορίων μετρητικού σφάλματος.

Οι πολύ μικρές τιμές σχετικής υγρασίας (5-10%) κάνουν πιο δύσκολο τον υπολογισμό της, καθώς απαιτείται πολύ αναλυτικότερη προσομοίωση ώστε για τέτοια μεγέθη να ληφθούν απόλυτα ακριβή αποτελέσματα. Παρ'όλα αυτά, τα σφάλματα της τάξης 10-12% για το μοντέλο Μηδενικής Τάξης και 8-10% για το RNG k-ε θεωρούνται ανεκτά για τους σκοπούς της μελέτης.

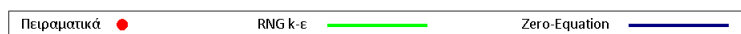
Τέλος, και σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο RNG k-ε φαίνεται να έχει καλύτερη συμπεριφορά στον πάνω όροφο, σε σχέση με τον κάτω.



Σχήμα 5.7: Σχ. Υγρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT1, RHT2, RHT3 και RHT4



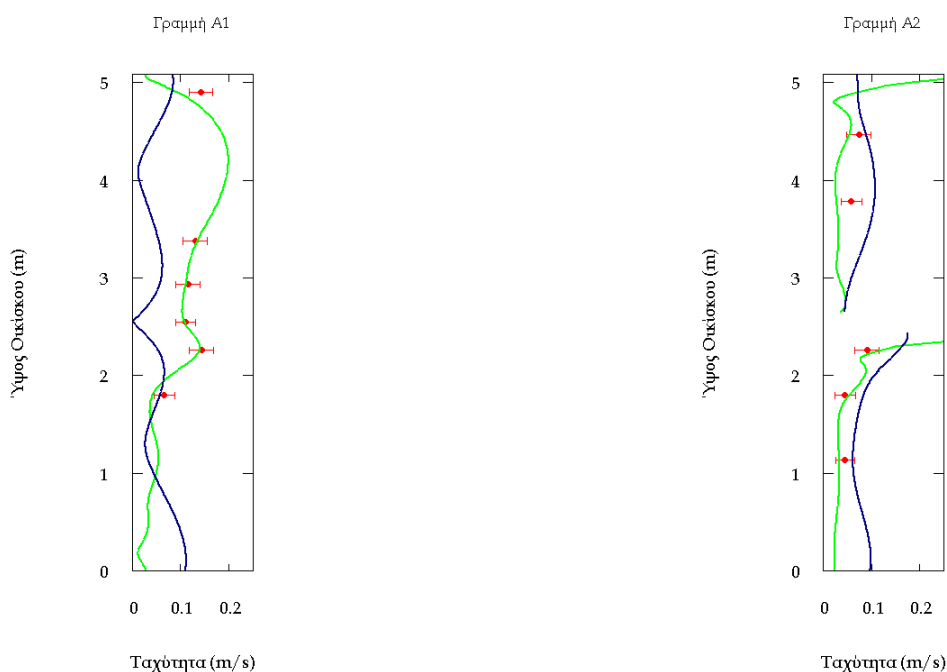
Σχήμα 5.8: Σχ. Υγρασία - Ύψος Οικίσκου για RHT5, RHT6 και RHT7



## Ταχύτητα Αέρα

Οι τιμές της ταχύτητας που προέκυψαν από την υπολογιστική προσομοίωση και τα πειράματα απεικονίζονται στο Σχήμα 5.9. Στην περίπτωση αυτή, είναι φανερή η μεγάλη υπεροχή του μοντέλου RNG k-ε. Το μοντέλο βρίσκεται στις περισσότερες περιπτώσεις εντός ορίων μετρητικού σφάλματος και ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό την τάση των πειραματικών δεδομένων. Αντίθετα, το μοντέλο Μη-δενικής Τάξης παρουσιάζει αισθητά χειρότερη συμπεριφορά, με σχετικά σφάλματα που αγγίζουν το 60%.

Το μοντέλο RNG k-ε, με σφάλματα 15-30% ικανοποιεί σε μεγάλο βαθμό τους σκοπούς της μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα απόλυτα μετρητικά σφάλματα που αφορούν στην ταχύτητα του αέρα είναι της τάξης του  $0.001\text{m/s}$ .

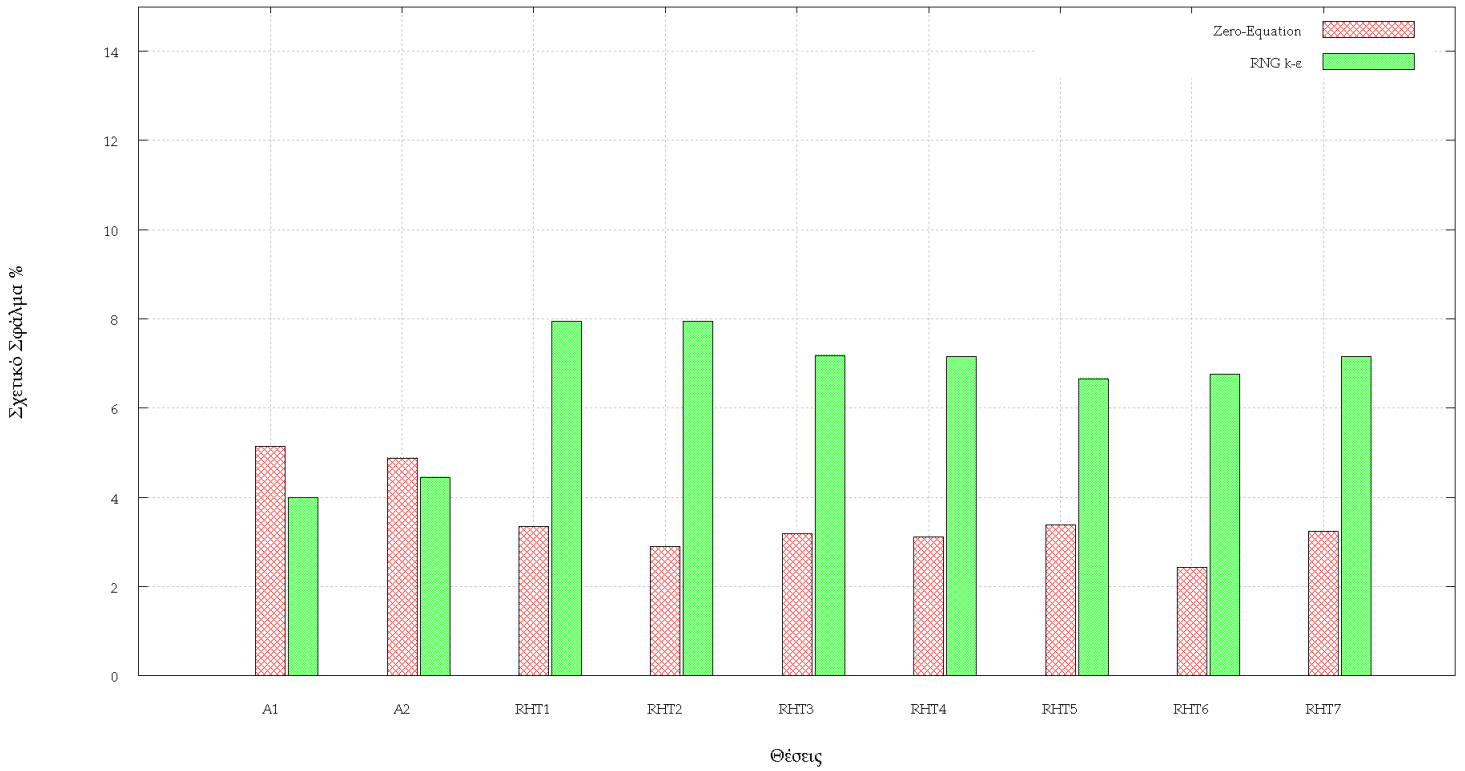


Σχήμα 5.9: Ταχύτητα - Ύψος Οικίσκου για A1 και A2

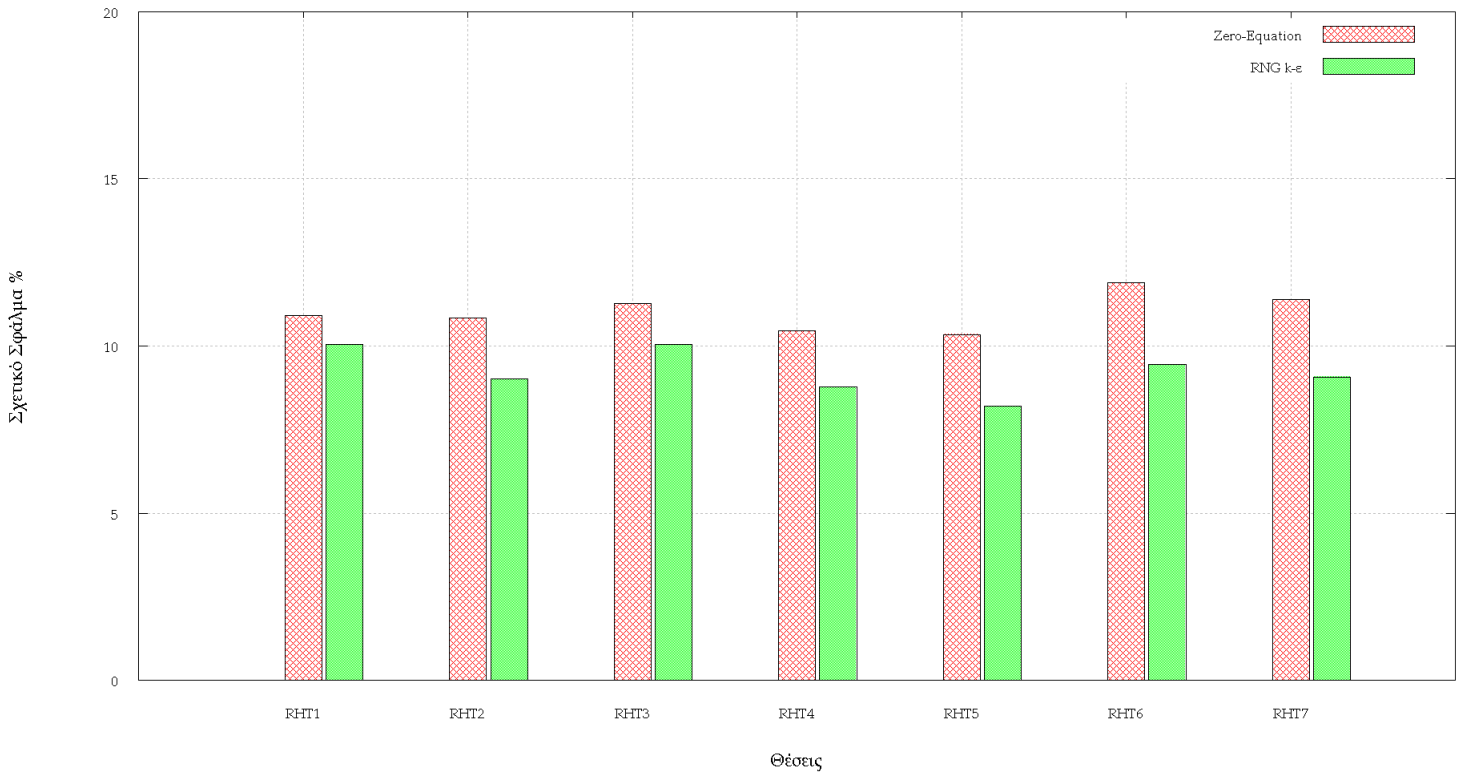


## Σχετικά Σφάλματα

Στα Σχήματα 5.10-5.12 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των σχετικών σφαλμάτων ως προς τα πειραματικά δεδομένα για κάθε μετρούμενο μέγεθος, ώστε να δοθεί μία πιο παραστατική εικόνα για τη συμπεριφορά κάθε μοντέλου τύρβης.

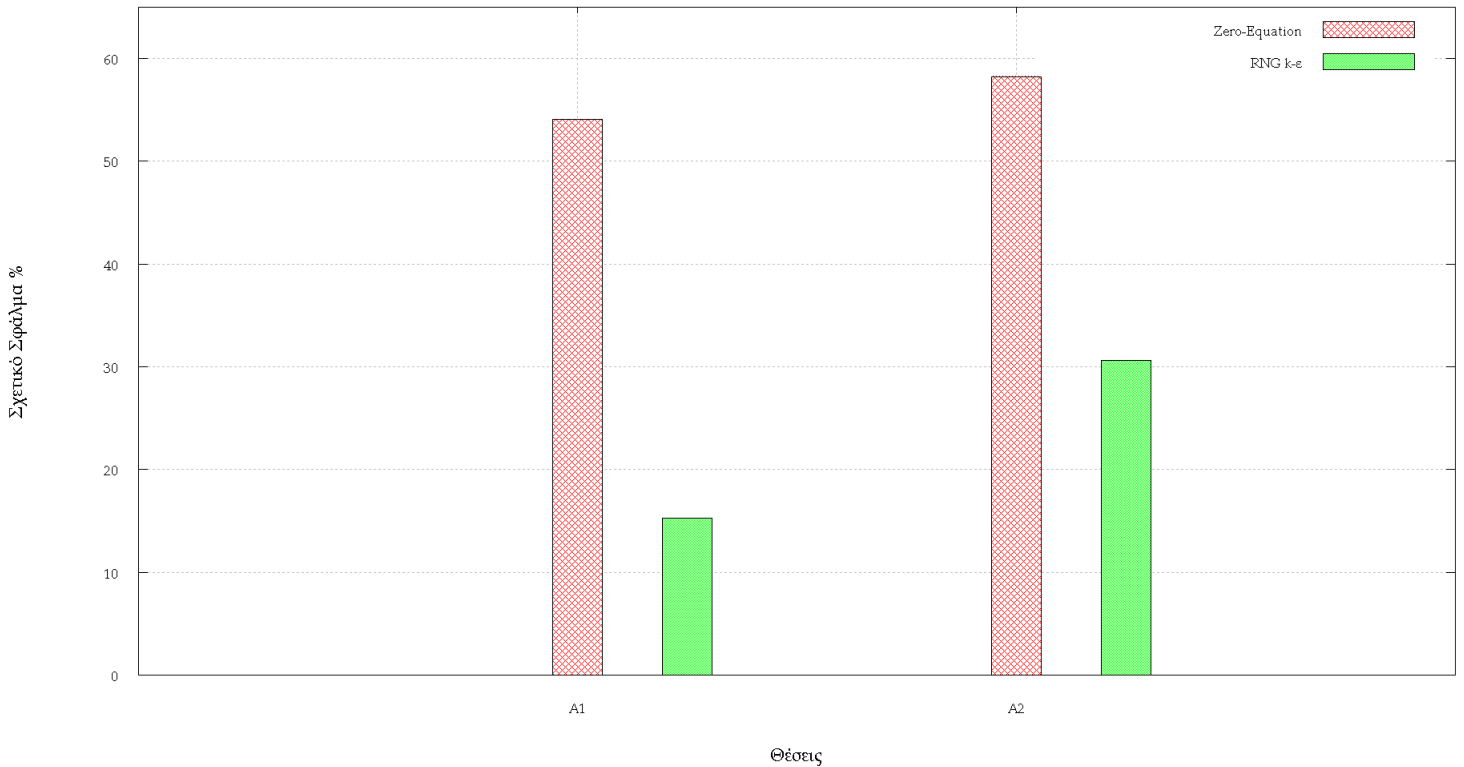


Σχήμα 5.10: Σχετικά Σφάλματα - Θερμοκρασία



Σχήμα 5.11: Σχετικά Σφάλματα - Σχετική Υγρασία



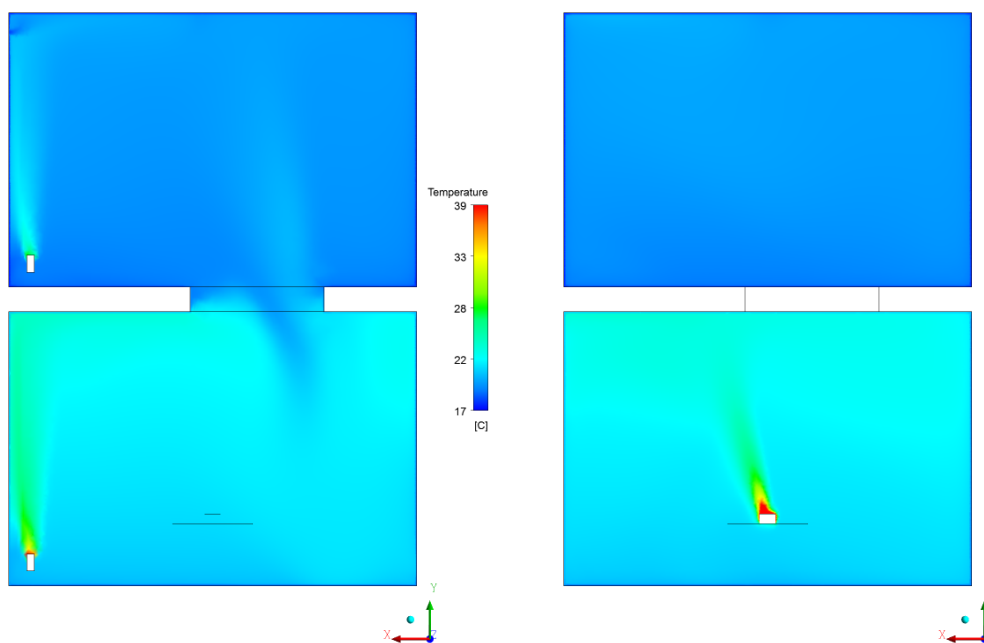


Σχήμα 5.12: Σχετικά Σφάλματα - Ταχύτητα Αέρα

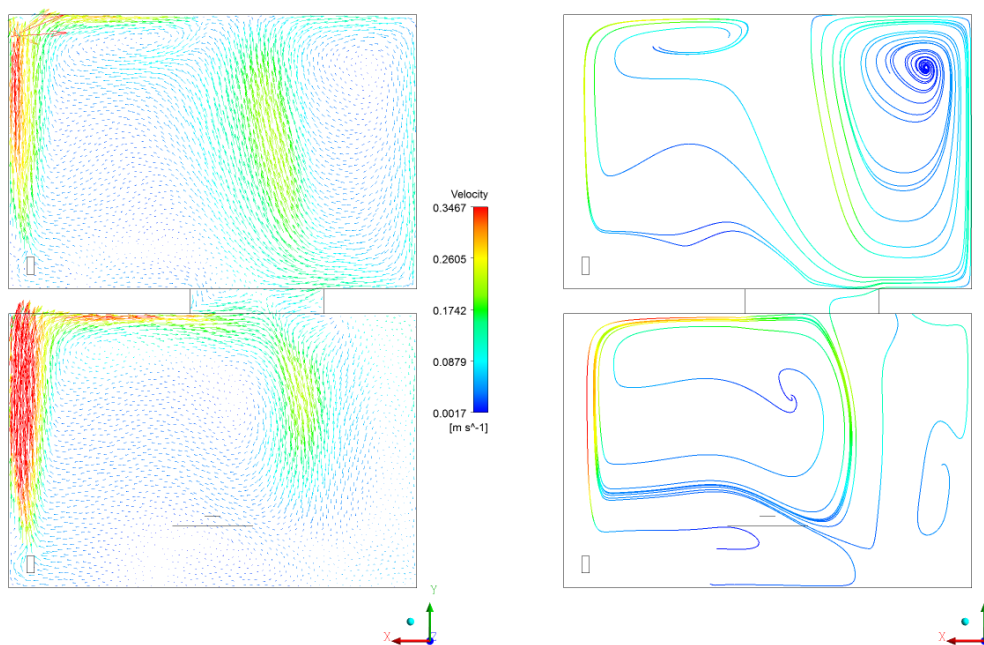
Τα αποτελέσματα από την εξαγωγή των σχετικών σφαλμάτων δίνουν μια μικρή υπεροχή του μοντέλου Μηδενικής Τάξης όσον αφορά στη θερμοκρασία και ξεκάθαρη υπεροχή του RNG k-ε στη σχετική υγρασία και την ταχύτητα αέρα. Λαμβάνοντας υπόψη τα ούτως ή άλλως μικρά συνολικά σφάλματα στη θερμοκρασία καθώς και τη θεαματικά καλύτερη συμπεριφορά του μοντέλου RNG k-ε στον υπολογισμό της ταχύτητας, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μοντέλο RNG k-ε υπερτερεί και κρίνεται καταλληλότερο.

### 5.3.4 Πεδία Θερμοκρασιών-Ταχυτήτων

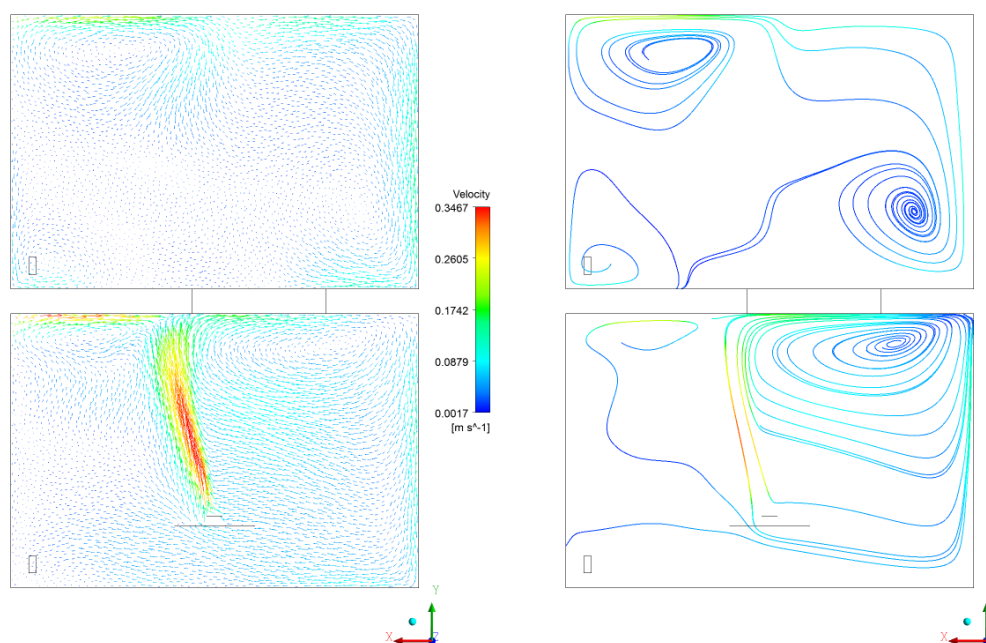
Στα Σχήματα 5.13-5.15 απεικονίζονται τα πεδία θερμοκρασιών σε δύο τομές (Τομή 1, Τομή 2) της γεωμετρίας, όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3.1, καθώς και τα αντίστοιχα πεδία ταχυτήτων. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν θεωρούνται ενδεικτικές, καθώς η μία διαπερνά το άνοιγμα και παρουσιάζει τη ροή μεταξύ των δύο ορόφων διαμέσου του ανοίγματος, ενώ η άλλη εστιάζει στην περιοχή πλησίον του συστήματος πηγής υγρασίας.



Σχήμα 5.13: Πεδία θερμοκρασιών- Τομές 1 (αριστερά) και 2 (δεξιά)



Σχήμα 5.14: Πεδίο ταχυτήτων: Διανύσματα (αριστερά) και Γραμμές Ροής (δεξιά)- Τομή 1



Σχήμα 5.15: Πεδίο ταχυτήτων: Διανύσματα (αριστερά) και Γραμμές Ροής (δεξιά)- Τομή 2

Στο Σχήμα 5.13 απεικονίζεται η κατανομή των θερμοκρασιών στην επιφάνεια των τομών 1 και 2. Για την Τομή 1, είναι εμφανείς οι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίες στην περιοχή των θερμαντικών σωμάτων και σε κάποια απόσταση πάνω από αυτά. Επίσης, φαίνεται ο ψυχρότερος αέρας που εισέρχεται στο κτίριο από την είσοδο στον πάνω όροφο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η διαστρωμάτωση που παρατηρείται στην περιοχή του ανοίγματος μεταξύ των δύο ορόφων. Στο γράφημα της τομής 2, αξίζει να σχολιαστεί η εμφανώς υψηλότερη θερμοκρασία στην περιοχή πάνω από την πηγή υγρασίας. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούνται γενικά υψηλότερες θερμοκρασίες στον κάτω όροφο του κτιρίου.

Στα Σχήματα 5.14 και 5.15 απεικονίζονται τα πεδία ταχυτήτων. Τα διανύσματα των ταχυτήτων δίνουν την κατεύθυνση και την ταχύτητα του αέρα, ενώ οι γραμμές ροής επιτρέπουν την απεικόνιση των στροβίλων που δημιουργούνται από τη ροή. Στις περιοχές όπου βρίσκονται τα θερμαντικά σώματα, η πηγή υγρασίας και η είσοδος, παρουσιάζονται υψηλότερες ταχύτητες και με βάση τη θέση που βρίσκονται στη γεωμετρία και τις ταχύτητες που αναπτύσσονται δημιουργούνται οι στροβίλοι.

Κλείνοντας το κομμάτι της παρουσίασης των αποτελεσμάτων της δημοσιευμένης αυτής μελέτης και θεωρώντας τα αποτελέσματα αρκετά ικανοποιητικά, στο επόμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιώντας την εμπειρία και τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν, θα γίνει προσομοίωση ενός παρόμοιου γεωμετρικά οικίσκου.

## Κεφάλαιο 6

# Δεύτερη Περίπτωση Μελέτης

### 6.1 Εισαγωγή

Στη δεύτερη περίπτωση μελέτης, εξετάζεται ο οικίσκος επίδειξης ενεργειακών τεχνολογιών του εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. Ο οικίσκος είναι τετραγωνικής βάσης διαστάσεων 3.65m x 3.65m και ύψους 7.53m. Διαθέτει δίρριχτη κεραμοσκεπή ύψους (μετρημένο από τη βάση της) 1.57m, πλάτους βάσης 4.23m και κλίσης 31°. Η κεραμοσκεπή εξέχει της κατασκευής κατά 0.29m σχηματίζοντας κορωνίδα. Οι όψεις του οικίσκου δεν διαθέτουν κανένα είδος σκιάστρου και χαρακτηρίζονται από χαμηλό συντελεστή απορροφητικότητας εξαιτίας των ανοιχτόχρωμων επιχρισμάτων. 6.1(α')

Ο προσανατολισμός του οικίσκου ευνοεί τη χρήση νότιων ανοιγμάτων για την μέγιστη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ποσότητας φυσικού φωτός, ενώ αποφεύγονται και οι σημαντικές απώλειες θερμότητας του βόρειου προσανατολισμού. Η νότια όψη διαθέτει δύο εκ των τριών ανοιγμάτων του οικίσκου, διαστάσεων 2.15m x 0.84m στον πρώτο όροφο και 1.18m x 0.84m στο ισόγειο. Παράλληλα, στη δυτική όψη έχει τοποθετηθεί ένα άνοιγμα διαστάσεων 1.18m x 0.83m στον πρώτο όροφο, καθώς και η εξωτερική θύρα στο ισόγειο, διαστάσεων 2.19m x 0.83m.

Η διαμόρφωση του οικίσκου είναι μια πλήρους κλίμακας, διώροφη δομή που αποτελείται από χαλύβδινο φέροντα οργανισμό, ο οποίος αφορά υποστυλώματα, δοκούς, δάπεδο, οροφή και σκελετό στέγης. Η επένδυση του οικίσκου γίνεται με ξηρά δόμηση.



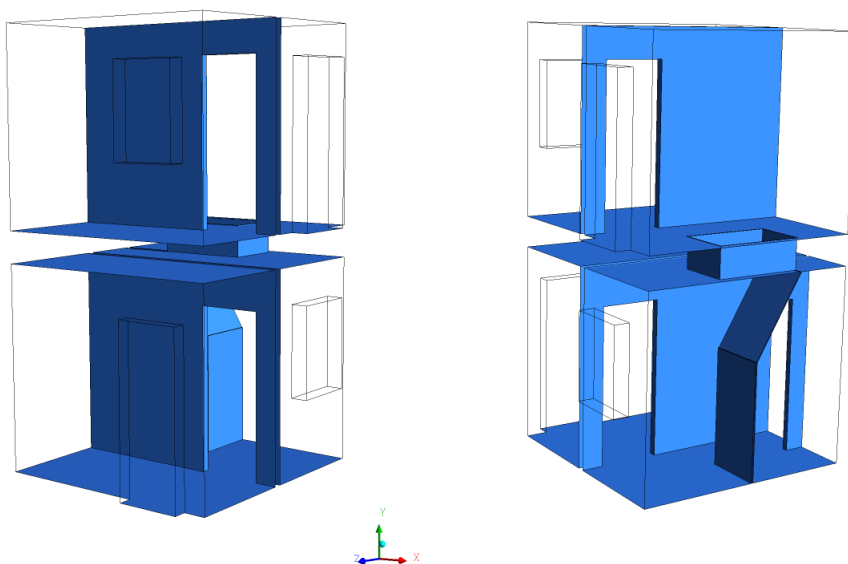
(α') Γενική άποψη του οικίσκου



(β') Μερική άποψη του μεταλλικού σκελετού

Σχήμα 6.1: Απόψεις του υπό μελέτη οικίσκου

Για τη δημιουργία του υπολογιστικού χωρίου στο πρόγραμμα ANSYS χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς διαστάσεις του πραγματικού οικίσκου. Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζονται η νοτιοδυτική πλευρά (αριστερά) και η βορειοδυτική (δεξιά), με σκοπό την ευκολότερη αντίληψη του υπολογιστικού χωρίου.



Σχήμα 6.2: Τριδιάστατη απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου

## 6.2 Σύστημα Οργάνων και Παρακολούθησης

Ο οικίσκος διαθέτει πληθώρα μετρητικών συσκευών για την καταγραφή των φυσικών μεγεθών τα οποία επιτρέπουν τον προσδιορισμό της ενεργειακής συμπεριφοράς του.

### 6.2.1 Αισθητήρας Θερμοκρασίας

#### Μετρητικά Όργανα

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται αισθητήρες thermistor τύπου NTC. Τα thermistors κατασκευάζονται από την εταιρεία Betatherm και ο τύπος τους είναι Polyimide Micro BetaCHIP Probes (MCD).

Το μικρό μέγεθος του αισθητήρα συμβάλλει στην:

- ταχεία απόκριση στις μεταβολές θερμοκρασίας
- εύκολη ενσωμάτωση στα σημεία μέτρησης

#### Τοποθεσία Μετρητικών Οργάνων

Τα σημεία όπου έχουν τοποθετηθεί οι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι:

- Τοιχοποιία. Σε όλους τους τοίχους έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες κατά τον εγκάρσιο άξονα της τοιχοποιίας. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη μέτρηση της θερμοκρασίας στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια, με σκοπό τον προσδιορισμό της ολικής θερμοβαθμίδας κατά το πάχος του τοίχου, καθώς και στο εσωτερικό τους, ώστε να καταγράφεται η θερμοβαθμίδα στο ενδιάμεσο τμήμα.
- Εσωτερικοί χώροι. Σε τρεις από τους τέσσερις χώρους μετράται η θερμοκρασία χώρου με thermistors σε ύψος 180 cm από το δάπεδο.

### 6.2.2 Αισθητήρας Υγρασίας

#### Μετρητικά Όργανα

Στον οικίσκο έχουν εγκατασταθεί δύο αισθητήρες υγρασίας. Το παραγόμενο μέγεθος είναι τάση μέσω της οποίας υπολογίζεται η σχετική υγρασία (RH %). Για τη λειτουργία των αισθητήρων απαιτείται τροφοδότηση με συνεχή τάση 5 V.

## Τοποθεσία Μετρητικών Οργάνων

Οι αισθητήρες υγρασίας έχουν τοποθετηθεί σε δυο σημεία στον οικίσκο, ένας στο ισόγειο και ένας στον πρώτο όροφο.

### 6.2.3 Αισθητήρες Θερμορροής

#### Μετρητικά Όργανα

Με τον αισθητήρα θερμορροής μετράται η πυκνότητα ροής θερμότητας στην περιοχή της επιφάνειας του αισθητήρα, η οποία εκφράζεται σε  $W/m^2$ . Οι αισθητήρες εκτός από την πυκνότητα της ροής θερμότητας, καταδεικνύουν επίσης και τη φορά της ροής (εισερχόμενη ή εξερχόμενη ενέργεια). Οι εγκατεστημένοι αισθητήρες είναι τύπου λεπτού φιλμ και προσκολλώνται στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Το παραγόμενο φυσικό μέγεθος είναι τάση η οποία είναι ευθέως ανάλογη της ροής θερμότητας.

#### Τοποθεσία Μετρητικών Οργάνων

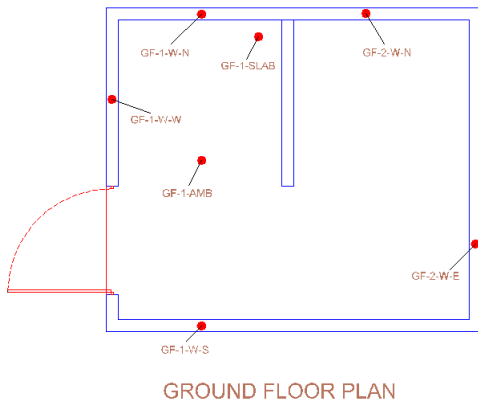
Οι αισθητήρες θερμορροής έχουν τοποθετηθεί σε δύο σημεία της εσωτερικής τοιχοποιίας στο ισόγειο, ένα στον ανατολικό τοίχο και ένα στο βόρειο.

### 6.2.4 Απεικονίσεις Θέσεων Αισθητήρων

Η κωδικοποίηση της ονοματολογίας των αισθητήρων φαίνεται στον Πίνακα 6.1, ενώ τα σημεία τοποθέτησής τους απεικονίζονται στο Σχήμα 6.2.4

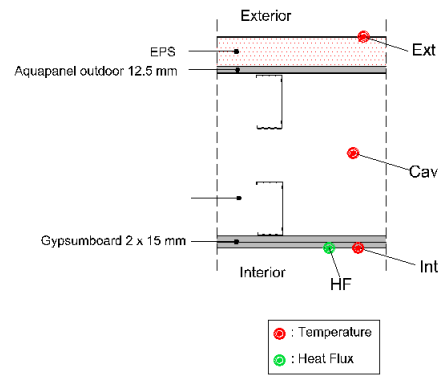
ΧΩΡΟΣ		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ		ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ		ΣΗΜΕΙΟ	
Ground Floor 1	GF1	Wall	W	North	N	Εξωτερική επιφάνεια	Ext
Ground Floor 2	GF2	Ceiling	C	East	E	Εσωτερική επιφάνεια	Int
Upper Floor 1	UF1	Floor	F	South	S	Cavity-Εσωτερικό κενό	Cav
Upper Floor 2	UF2			West	W	Heat Flux-Θερμορροή	HF

Πίνακας 6.1: Κωδικοποίηση των αισθητήρων του οικίσκου

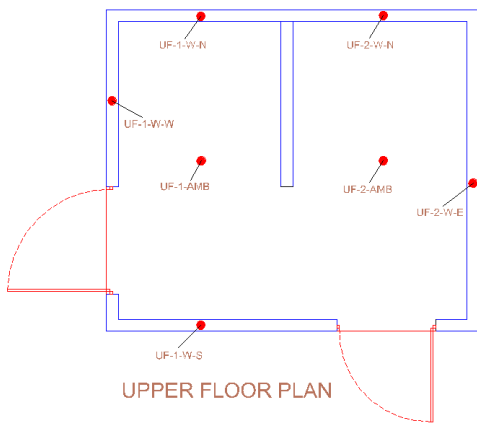


(α') Σημεία μέτρησης στο ισόγειο

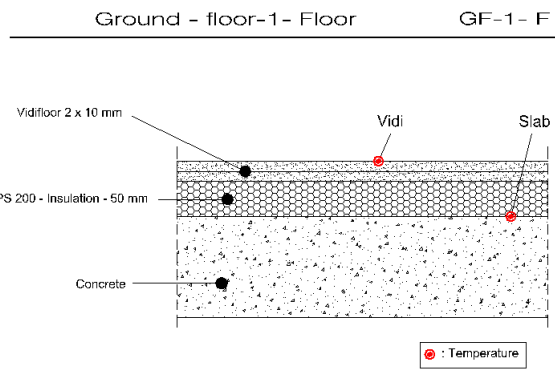
Ground floor-2- Wall - East GF-2- W - E



(β') Σημεία μέτρησης εγκάρσια στην τοιχοποιία



(γ') Σημεία μέτρησης στον όροφο



(δ') Σημεία μέτρησης στο δάπεδο

Σχήμα 6.3: Σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων



## **6.2.5 Μετεωρολογικά δεδομένα**

Για την καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων είναι εγκατεστημένος ένας μετεωρολογικός σταθμός πλησίον του οικίσκου. Η ενεργειακή αυτονομία του σταθμού εξασφαλίζεται μέσω φωτοβολταϊκού στοιχείου. Τα δεδομένα που παρέχει ο μετεωρολογικός σταθμός είναι τα εξής:

- Θερμοκρασία
- Ατμοσφαιρική πίεση
- Υγρασία
- Κατεύθυνση ανέμου
- Ταχύτητα ανέμου
- Μέγιστη ταχύτητα αέρα
- Ημερήσια βροχόπτωση
- Ηλιακή ακτινοβολία
- Υπεριώδης ακτινοβολία (δείκτης)

## **6.2.6 Σύστημα λήψης δεδομένων**

Τα thermistors, τα θερμορόμετρα και οι αισθητήρες υγρασίας συνδέονται μέσω καλωδίων με τη συσκευή δειγματοληψίας Agilent 34972 A, η οποία φέρει 2 κάρτες των 40 καναλιών έκαστη.

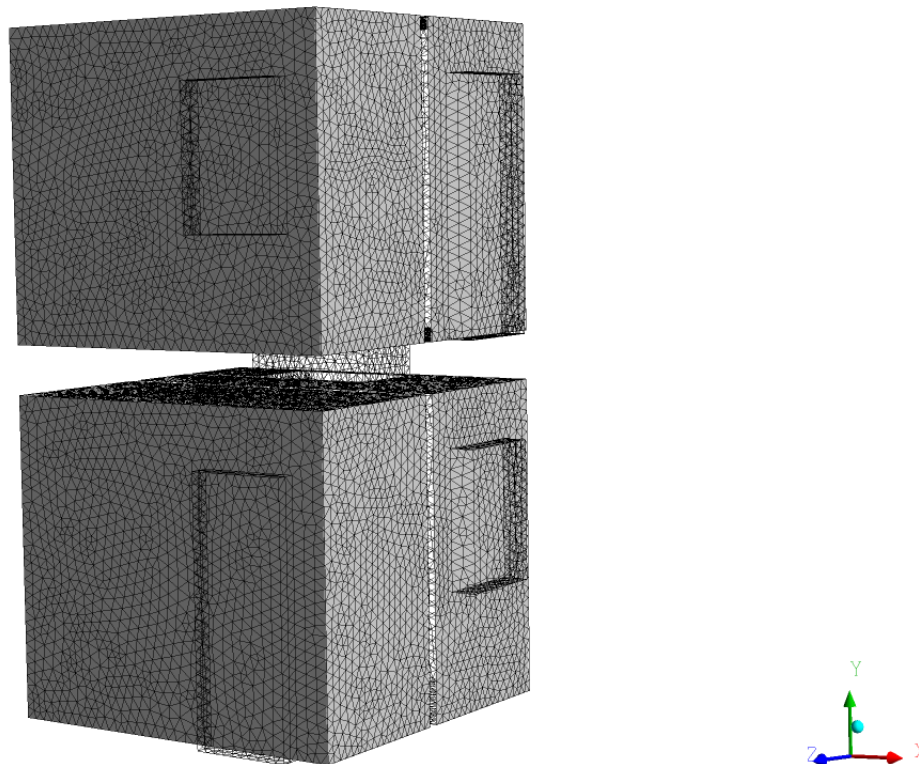
## **6.3 Διαμόρφωση Υπολογιστικής Προσομοίωσης**

Η προσομοίωση και σε αυτή την περίπτωση έγινε με χρήση του λογισμικού CFX της ANSYS σε μεταβατική, αυτή τη φορά, κατάσταση. Στη συνέχεια και κατ' αντιστοιχία με το προηγούμενο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν αναλυτικά το υπολογιστικό πλέγμα, τα γραφήματα των ζητούμενων μεγεθών και τα αναπτυσσόμενα πεδία ροής.

### **6.3.1 Υπολογιστικό Πλέγμα**

Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιήθηκε μη-δομημένο υπολογιστικό πλέγμα 629.731 στοιχείων. Το πρόβλημα της απλής συναγωγής που επιλύθηκε θεωρήθηκε ότι δεν απαιτεί μεγαλύτερη πύκνωση,

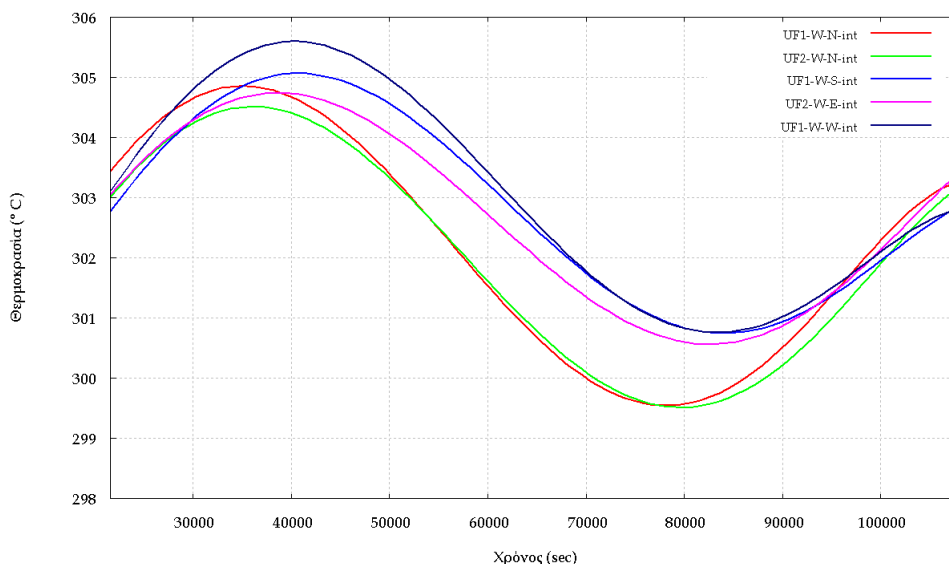
ούτε τοπική πύκνωση σε συγκεκριμένα σημεία, έτσι για εξοικονόμηση υπολογιστικού χώρου και χρόνου η μελέτη ολοκληρώθηκε με το πλέγμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.



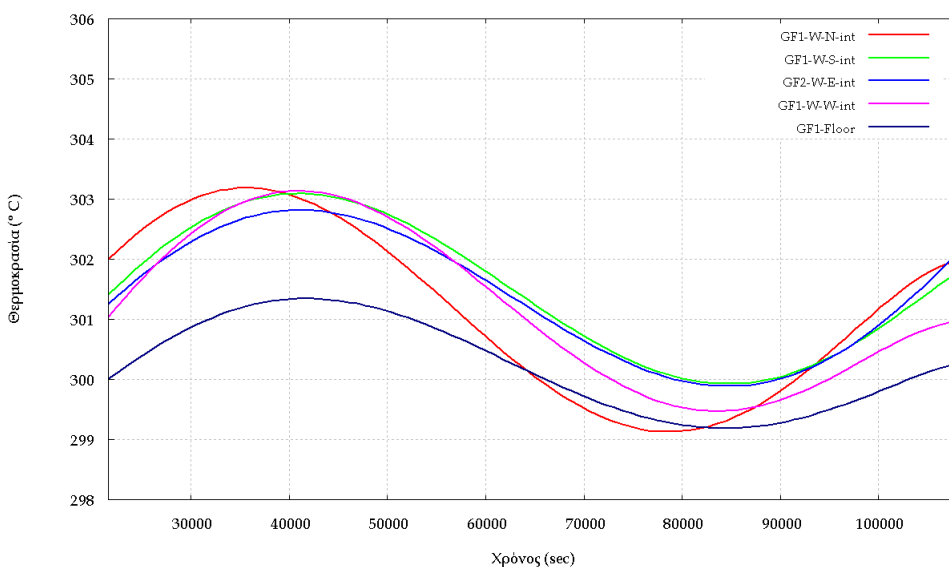
Σχήμα 6.4: Υπολογιστικό πλέγμα

### 6.3.2 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που αφορούν στις θερμοκρασίες των τοίχων και του δαπέδου του οικίσκου είναι μεταβλητές με τον χρόνο. Στην προσομοίωση έγινε χρήση των μετρήσεων ενός 24ώρου. Η χρονική κατανομή των θερμοκρασιών στις διάφορες επιφάνειες του οικίσκου απεικονίζεται στα Σχήματα 6.5 και 6.6. Η μορφή των καμπυλών οφείλεται στην κίνηση του ηλίου, ο οποίος θερμαίνει σε διαφορετικό χρόνο και με διαφορετικό τρόπο την κάθε επιφάνεια κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 6.5: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στον όροφο



Σχήμα 6.6: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο ισόγειο και το δάπεδο

### 6.3.3 Πιστοποίηση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή θα γίνει πιστοποίηση των μετρημένων πειραματικών αποτελεσμάτων, όπως αυτά λήφθηκαν από τις μετρήσεις στον οικίσκο, με τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από το λογισμικό στον υπολογιστή. Το 24ωρο που επιλέχθηκε ξεκινάει από τις 12:00 το μεσημέρι. Η ημέρα κατά την οποία λήφθηκαν τα αποτελέσματα είναι η 27η Ιουνίου 2012.

Για να έχουν επιτευχθεί οι επιθυμητές αρχικές συνθήκες στις 12:00, η προσομοίωση ξεκίνησε 6 ώρες νωρίτερα, χωρίς δηλαδή τον ορισμό των αρχικών συνθηκών. Έτσι, η σύγκριση στη συνέχεια θα αφορά χρονικές στιγμές μετά το πέρας του αρχικού βάρου.

Η πιστοποίηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων αφορά στη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του οικίσκου και συγκεκριμένα σε τρία εσωτερικά σημεία του. Το πρώτο σημείο όπου έχει τοποθετηθεί αισθητήρας θερμοκρασίας βρίσκεται στο ισόγειο και σε ύψος 180cm από το δάπεδο. Τα άλλα δύο σημεία βρίσκονται στον όροφο ένα σε κάθε δωμάτιο και στο ίδιο ύψος από το δάπεδο. Η ακριβής θέση των αισθητήρων αυτών παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2.4 με την κωδικοποίηση GF-1-AMB, UF-1-AMB και UF-2-AMB.

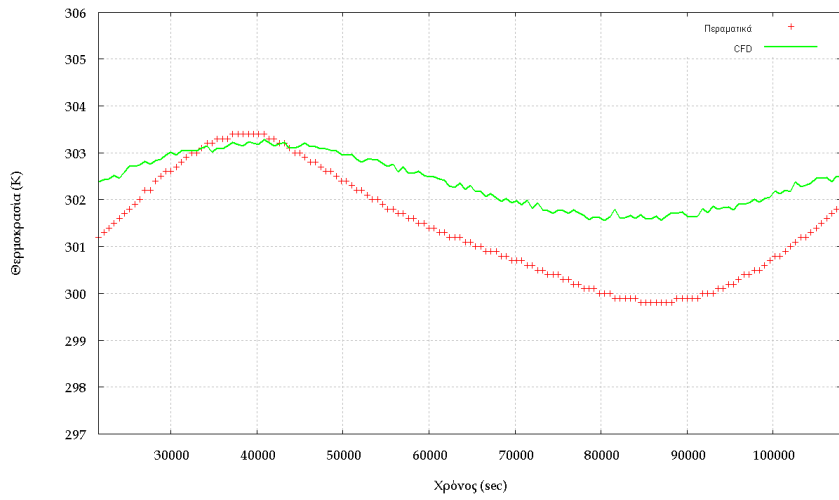
Τα αποτελέσματα που ακολουθούν εξάχθηκαν από προσομοίωση με μοντέλο στρωτής ροής. Οι πειραματικές μετρήσεις λαμβάνονταν ανά λεπτό. Στα Σχήματα 6.7-6.9 ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τη διάρκεια της ημέρας σε δευτερόλεπτα, ενώ ο κάθετος δίνει τη θερμοκρασία.

Μια πρώτη γενική παρατήρηση και για τα τρία σημεία μέτρησης είναι η ποιοτική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων και των πειραματικών μετρήσεων. Τα ακρότατα, δηλαδή, των καμπυλών εμφανίζονται στην ίδια χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, τόσο ο αισθητήρας θερμοκρασίας, όσο και η προσομοίωση δίνουν μια μέγιστη θερμοκρασία στις 17:00 και μια ελάχιστη στις 05:00, περίπου.

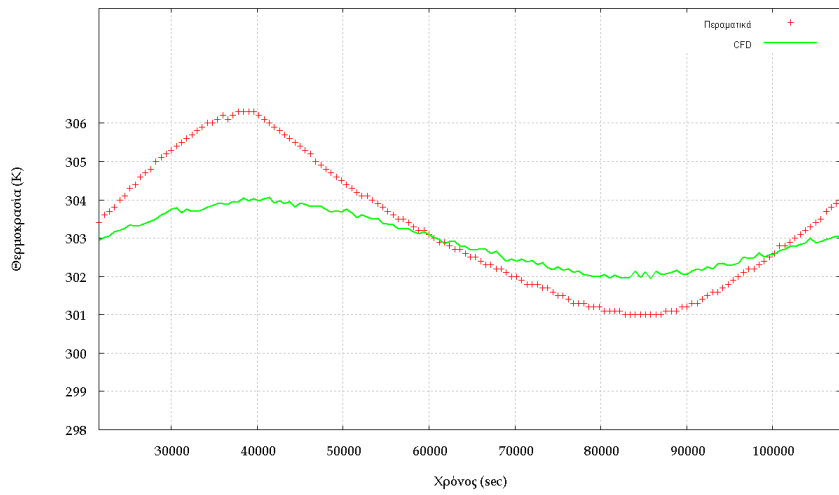
Τα υπολογιστικά αποτελέσματα και οι μετρήσεις στον όροφο (Σχήματα 6.8 και 6.9) εμφανίζουν μία διακύμανση γύρω από την ίδια μέση θερμοκρασία, με το μοντέλο όμως να υποεκτιμά τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τον αισθητήρα. Το σφάλμα σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται μεταξύ 1.5 και 2 βαθμών.

Με τη χρήση του αρχικού δώρου με σκοπό την επίτευξη ορθών αρχικών συνθηκών, αναμενόταν οι καμπύλες να ξεκινούσαν από την ίδια ακριβώς θερμοκρασία. Αυτές οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται, αλλού μικρές και αλλού μεγαλύτερες, ίσως να υπονοούν την μη πλήρη σύγκλιση μέχρι τη στιγμή αυτή και να οδηγούν στις αποκλίσεις που παρουσιάζονται καθ'όλο το μήκος των καμπυλών.

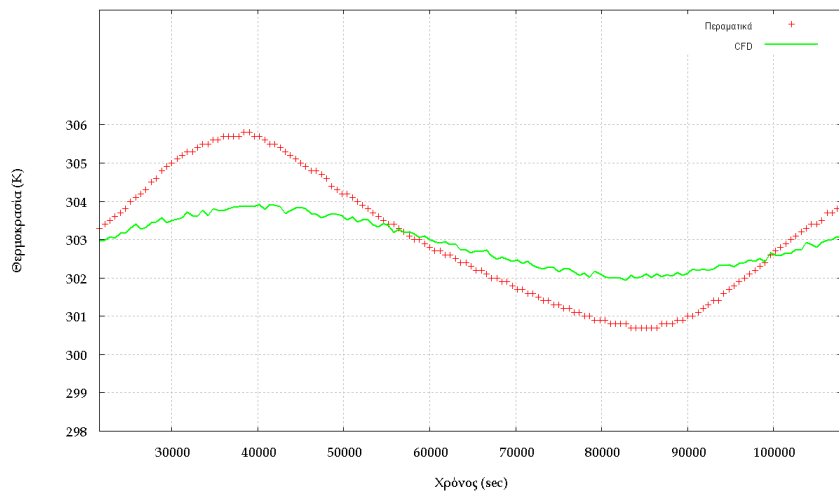
Μια άλλη πιθανή πηγή των παρατηρούμενων αποκλίσεων είναι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία εισέρχεται στον οικίσκο μέσω των παραθύρων, η οποία δεν λήφθηκε υπόψη στις προσομοιώσεις.



Σχήμα 6.7: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο σημείο GF-1-AMB



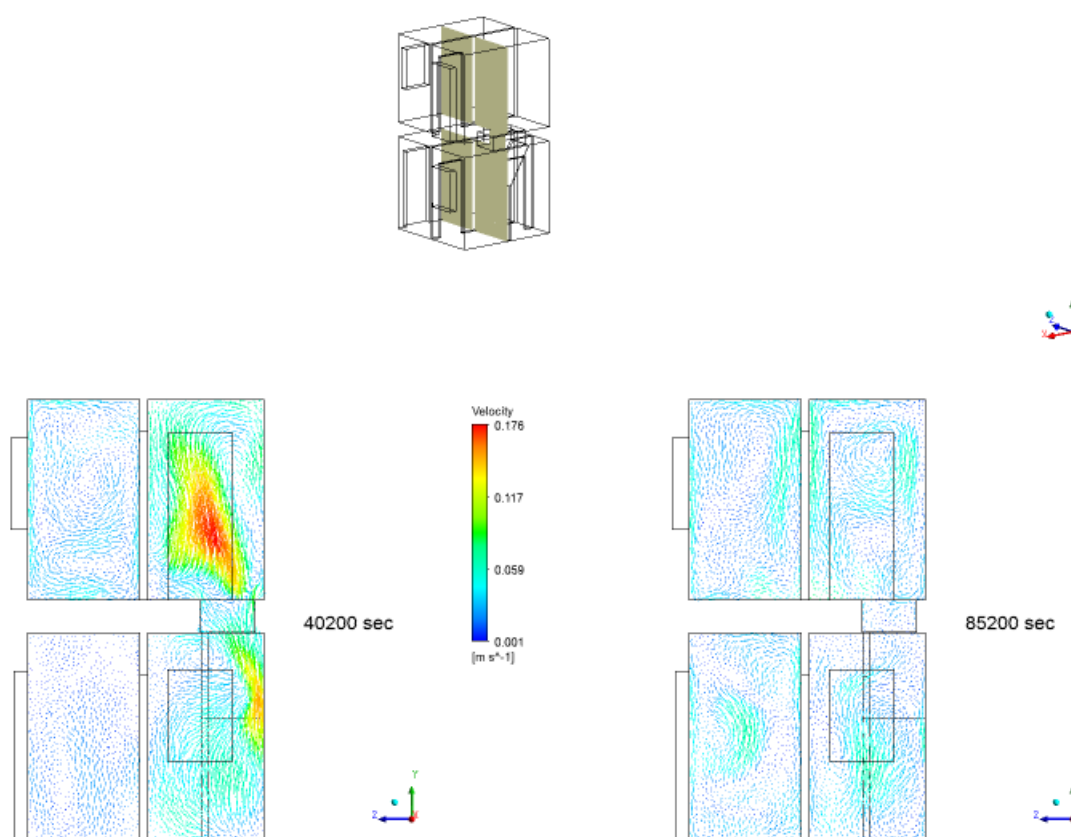
Σχήμα 6.8: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο σημείο UF-1-AMB



Σχήμα 6.9: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών στο σημείο UF-2-AMB

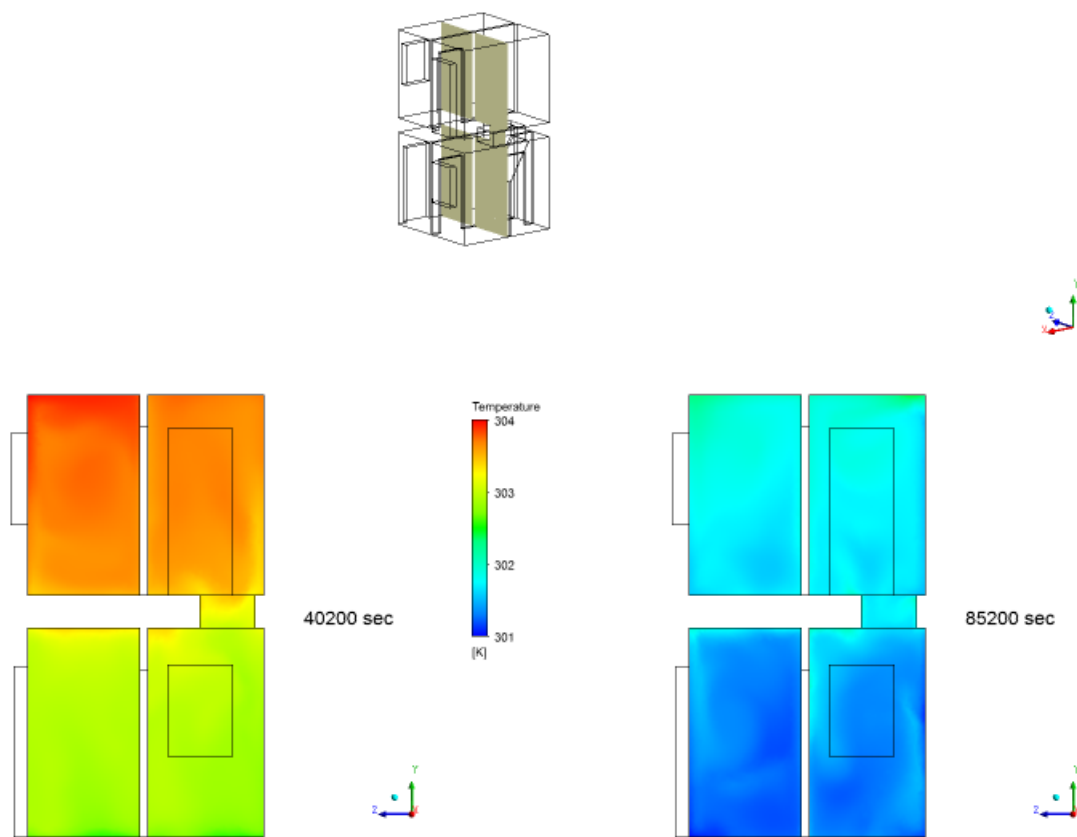
### 6.3.4 Πεδία Θερμοκρασιών-Ταχυτήτων

Στα Σχήματα 6.10 και 6.11 παρουσιάζονται τα πεδία ταχυτήτων και θερμοκρασιών αντίστοιχα, σε μία τομή της γεωμετρίας (Τομή 1). Επιλέχθηκε η τομή αυτή διότι διαπερνά το άνοιγμα μεταξύ των ορόφων και παρουσιάζει τη ροή του αέρα αλλά και την κατανομή της θερμοκρασίας μεταξύ του ισογείου και του ορόφου. Τα σχήματα παρουσιάζουν τα πεδία σε δύο χρονικές στιγμές, αυτές στις οποίες παρουσιάζεται η μέγιστη ( $t=40200$  sec) και η ελάχιστη ( $t=85200$  sec) θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 6.10: Πεδία Ταχυτήτων στην Τομή 1

Τα διανύσματα ταχύτητας στο Σχήμα 6.10 απεικονίζουν τη ροή του αέρα στις δύο χρονικές στιγμές που αναφέρθηκαν. Αριστερά, τη στιγμή κατά την οποία η θερμοκρασία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της σύμφωνα με τα Σχήματα 6.7-6.9, η ροή του αέρα είναι πιο έντονη και οι ταχύτητες μεγαλύτερες, σε σχέση με την απεικόνιση δεξιά. Και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρείται η εμφάνιση ενός ανωστικού ρεύματος αέρα με υψηλή ταχύτητα, σε σχέση με το υπόλοιπο πεδίο, στην περιοχή μετά το άνοιγμα.



Σχήμα 6.11: Πεδία Θερμοκρασιών στην Τομή 1

Το πεδίο θερμοκρασιών δείχνει ξεκάθαρα την υψηλότερη θερμοκρασία που επικρατεί γενικά στον οικίσκο την πρώτη χρονική στιγμή, με τιμές σχεδόν κατά 3 βαθμούς υψηλότερες σε σχέση με την απεικόνιση δεξιά, η οποία αντιστοιχεί στις πρώτες πρωινές, δηλαδή, ώρες (περίπου 05:00). Επίσης, και στις δύο περιπτώσεις είναι φανερή η υψηλότερη θερμοκρασία που παρουσιάζεται στον όροφο. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί και με τις οριακές συνθήκες, όπως αυτές ορίστηκαν και παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 6.5 και 6.6 και οφείλεται στα φαινόμενα θερμικής άνωσης που εμφανίζονται στο εσωτερικό του οικίσκου.

## 6.4 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Κλείνοντας τη μελέτη αυτή, κρίνεται σημαντικό να αναφερθούν συνοπτικά και να τονιστούν κάποια ιδιαίτερα σημεία της. Ξεκινώντας με κάποια γενικά συμπεράσματα θα μπορούσαν να σημειωθούν τα παρακάτω.

Αρχικά και στα πρώτα κεφάλαια, δόθηκε έμφαση στην αξία και τα οφέλη του φυσικού αερι-

σμού, έστω και αν αυτό έγινε σε θεωρητικό, κυρίως, επίπεδο. Ταυτόχρονα με το φυσικό αερισμό, η παρουσίαση της θερμικής άνεσης ως έννοιας, έδωσε μια αρκετά αναλυτική εικόνα των κατάλληλων συνθηκών διαβίωσης σε ένα χώρο με την κατά το δυνατόν μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον.

Συνδυάζοντας, τώρα, τη γενική παρουσίαση της ρευστοδυναμικής και των μοντέλων CFD με τα αποτελέσματα των επόμενων κεφαλαίων, έγινε φανερή η μεγάλη χρησιμότητα των μοντέλων αυτών για την επίλυση προβλημάτων του είδους αυτού. Με πολύ μικρό κόστος σε χρήμα και χρόνο δίνεται η δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα και να δοθούν λύσεις παράλληλα με την πολύπλοκη διαδικασία των πειραμάτων ή ακόμα και χωρίς αυτήν.

Περνώντας τώρα στο καθαρά υπολογιστικό σκέλος της εργασίας, εμφανίζονται επίσης θέματα προς συζήτηση. Για την πρώτη περίπτωση μελέτης ο απολογισμός είναι σίγουρα θετικός. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν λειτούργησαν αρκετά ικανοποιητικά, με το μοντέλο δύο εξισώσεων RNG k-ε ως πιο διαδεδομένο και κατάλληλο για αυτή την κατηγορία προβλημάτων, να συμπεριφέρεται σαφώς καλύτερα. Η δυσκολία παρουσιάστηκε και για τα δύο μοντέλα τύρβης στον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας, μια διαδικασία σίγουρα πολυπλοκότερη. Τα μοντέλα δεν κατάφεραν σε κάποιες περιπτώσεις να βρίσκονται εντός των ορίων του μετρητικού σφάλματος, χωρίς αυτό να αποκλείει προβλήματα στην ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων.

Η δεύτερη περίπτωση μελέτης περιείχε από την αρχή μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας. Αν και αφορούσε μια γεωμετρία πιο οικεία σε σχέση με αυτή της δημοσιευμένης μελέτης, η επίλυση σε μεταβατική κατάσταση την έκανε πολύ πιο σύνθετη. Οι οριακές συνθήκες ήταν, επίσης, σύνθετες, αλλά παρ'όλα αυτά, επιτεύχθηκε μια σχετικά ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων. Πιθανή βελτίωση του υπολογιστικού πλέγματος ή αλλαγή του μοντέλου τύρβης, που όμως λόγω της έλλειψης χρόνου ήταν δύσκολο να ολοκληρωθεί στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, ίσως βελτιώνε αισθητά τα αποτελέσματα.



# Βιβλιογραφία

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 2004.
- [2] Morris G. Davies. *Building Heat Transfer*. Wiley, 2004.
- [3] F.C. Houghten and C.P. Yaglou. Determining lines of equal comfort. *ASHVE Trans.*, 28:163–176 and 361–384, 1923.
- [4] C-E.A. Winslow, L.P. Herrington, and A.P. Gagge. Relations between atmospheric conditions, physiological reactions and sensations of pleasantness. *Amer. J. Hyg.*, 26:103–115, 1937.
- [5] A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, and J.D. Hardy. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 1:1–20, 1967.
- [6] J. Chatonnet and M. Cabanac. The perception of thermal comfort. *Journal of Biometeorology*, 9:183–193, 1965.
- [7] M. Cabanac. Physiological role of pleasure. *Science*, 173:1103–7, 1971.
- [8] J.C. Stevens, L.E. Marks, and D. Simonson. Regional sensitivity and spacial summation in the warmth sense. *Physical Behavior*, 13:825–836, 1974.
- [9] B. Givoni. Man, climate and architecture. *Applied Science Publishers, London, UK*, page 137, 1976.
- [10] J.L.M. Hensen. Literature review on thermal comfort in transient conditions. *Building and Environment*, 25(4):309–316, 1990.
- [11] T.H. Benzinger. The physiological basis for thermal comfort. *Indoor Climate*, ed. P.O. Fanger and O. Valbjorn, Danish Building Research Institute, Copenhagen, pages 441–476, 1979.

- [12] J.C. Stevens, L.E. Marks, and A.P. Gagge. The quantitative assessment of thermal discomfort. *Environ. Res.*, 2:149–165, 1969.
- [13] P.O. Fanger. Thermal comfort. *Copenhagen: Danish Technical Press*, 1970.
- [14] K. Cena and J.A. Clark. *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Elsevier, 1981.
- [15] Maria Kordjamshidi. *House Rating Schemes*. Springer, 2011.
- [16] Τσιμπάνος Παναγιώτης. *Επίδραση Ηλιακής Ακτινοβολίας στην Εσωτερική Θερμική Άνεση Κτιρίων*. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2008.
- [17] ASHRAE Handbook 1981. *Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1981.
- [18] Φραγγής Φωκάς. *Θερμική Άνεση σε Κτήρια Γραφείων*. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2011.
- [19] P.O. Fanger. Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering. *Copenhagen: Danish Technical Press*, 1970.
- [20] A.P. Gagge, A.P. Fobelets, and L.G. Berglund. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92(2B):709–31, 1986.
- [21] T.J. Doherty and E. Arens. Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models. *ASHRAE Transactions*, 94(1), 1988.
- [22] J.A.J. Stolwijk and J.D. Hardy. Control of body temperature. *Handbook of physiology, reaction to environment agents*. American Physiological Society, Chapter 4, 1977.
- [23] A.P. Gagge and Y. Nishi. Heat exchange between human skin surface and thermal environment. *Handbook of physiology, reaction to environment agents*. American Physiological Society, Chapter 5, 1977.
- [24] S. Tanabe, K. Kimura, and T. Hara. Thermal comfort requirements during the summer season in Japan. *ASHRAE Transactions*, 93(1):564–77, 1987.
- [25] T.M. Chung and W.C. Tong. Thermal comfort study of young chinese people in Hong Kong. *Building and Environment*, 25(4):317–28, 1990.

- [26] R.J. De Dear and K.G. Leow. Indoor climate and thermal comfort in high-rise public housing in an equatorial climate: a field study in Singapore. *Atmospheric Environment*, 24B(2):313–20, 1990.
- [27] P.O. Fanger. *Thermal comfort. In: Analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [28] D.A. McIntyre. Three approaches to thermal comfort. *ASHRAE Transactions*, 84:101–9, 1978.
- [29] M.A. Humphreys. Comfortable indoor temperatures related to the air temperature. *BRE Publication Draft PD117/76, Garston, Building Research Establishment*, 1976.
- [30] N.A. Oseland. Predicted and reported thermal sensation in climatic chamber, offices and homes. *Energy and Building*, 23:110–5, 1995.
- [31] Richard De Dear. Rp-884 project. 2004. Available from: [http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae\\_rp884\\_home.html](http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae_rp884_home.html).
- [32] N. Djongyang, R. Tchinda, and D. Njomo. Thermal comfort: a review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:2626–2640, 2010.
- [33] Θάνος Ν. Στασινόπουλος. *Φυσικός Αερισμός- Σημειώσεις για το Μεταπτυχιακό Μάθημα 'Βιοκλιματικός Σχεδιασμός'*. Τμήμα Αρχιτεκτόνων, ΕΜΠ, 2001.
- [34] A. Mahdavi and S. Kumar. Implications of indoor climate control for comfort, energy, and environment. *Energy and Buildings*, 24:167–177, 1996.
- [35] R. De Dear, G. Brager, and D. Cooper. *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. Final report, ASHRAE RP-884, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, and Macquarie Research, Ltd, Sydney, 1997.
- [36] G. Brager and R. De Dear. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27:83–96, 1998.
- [37] G. Brager and R. De Dear. A standard for natural ventilation. *ASHRAE Journal*, pages 21–28, October 2000.
- [38] M. Santamouris and P. Wouters. *Building Ventilation- The State of the Art*. Earthscan, 2006.
- [39] N.T. Bowman. Passive downdraught evaporative cooling. *Indoor and Built Environment*, 9(5):284–290, 2000.

- [40] Q. Chen. *Chapter 7: Design of natural ventilation with CFD, Sustainable Urban Housing in China, Edited by L.R. Glicksman and J. Lin.* Springer, 2007.
- [41] Liangzhu (Leon) Wang and Qingyan Chen. Evaluation of some assumptions used in multizone airflow network models. *Building and Environment*, 43(10):1671 – 1677, 2008.
- [42] A.C. Megri and F. Haghightat. Zonal modeling for simulating indoor environment of buildings: review, recent developments, and applications. *HVAC& R Research*, 13(6):887 – 905, 2007.
- [43] Fangting Song, Bin Zhao, Xudong Yang, Yi Jiang, Vipin Gopal, Gregory Dobbs, and Michael Sahm. A new approach on zonal modeling of indoor environment with mechanical ventilation. *Building and Environment*, 43(3):278 – 286, 2008.
- [44] Teshome Edae Jiru and Fariborz Haghightat. Modeling ventilated double skin façade—a zonal approach. *Energy and Buildings*, 40(8):1567 – 1576, 2008.
- [45] Tomás Norton and Da-Wen Sun. Computational fluid dynamics (cfd) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 17(11):600 – 620, 2006.
- [46] Tomás Norton, Da-Wen Sun, Jim Grant, Richard Fallon, and Vincent Dodd. Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, 98(12):2386 – 2414, 2007.
- [47] Qingyan Chen. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4):848–858, 2009.
- [48] C. Gallo, M. Sala, and A.M.M. Sayigh. *Architecture- Comfort and Energy.* Pergamon, 1998.
- [49] Omar S. Asfour and Mohamed B. Gadi. A comparison between cfd and network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. *Building and Environment*, 42(12):4079 – 4085, 2007.
- [50] Y. Ji, M.J. Cook, and V. Hanby. Cfd modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium. *Building and Environment*, 42(3):1158 – 1172, 2007.
- [51] Jean-Laurent Peube. *Fundamentals of Fluid Mechanics and Transport Phenomena.* Wiley, 2009.
- [52] J.H.M. ten Thijsse Boonkamp. *The conservation equations for reacting gas flow.* Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology, 1993.

- [53] Μαρία Φούντη, Δημήτρης Κατσουρίνης. *Υπολογιστικές Μέθοδοι Επίλυσης Πολυφασικών Ροών*. Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων & Συστημάτων Καύσης, Ε.Μ.Π., 2010.
- [54] Νικόλαος Μαρκάτος, Διονύσης Ασημακόπουλος. *Υπολογιστική Ρευστοδυναμική*. Παπασωτηρίου, 1995.
- [55] Diego Ibarra. *Computational Approaches to Natural Ventilation - Concepts and Fundamentals*. Harvard Design School.
- [56] *ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 12.0*. 2009.
- [57] B.E. Launder and D.B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 3:269–289, 1973.
- [58] V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski and C.G. Speziale. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*, 4(7):1510–1520, 1992.
- [59] Z. Zhai, Z. Zhang, W. Zhang, and Q. Chen. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by cfd: part 1 - summary of prevalent turbulence models. *HVAC& R Research*, 13(6):853 – 70, 2007.
- [60] Z. Zhang, W. Zhang, Z. Zhai, and Q. Chen. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by cfd: part 2 - comparison with experimental data from literature. *HVAC& R Research*, 13(6):871 – 86, 2007.
- [61] K.C. Ng, E.Y.K. Ng, M.Z. Yusoff, and T.K. Lim. Applications of high-resolution schemes based on normalized variable formulation for 3d indoor airflow simulations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 73(7):948 – 81, 2008.
- [62] G.M. Stavrakakis, D.P. Karadimou, P.L. Zervas, H. Sarimveis, and N.C. Markatos. Selection of window sizes for optimizing occupational comfort and hygiene based on computational fluid dynamics and neural networks. *Building and Environment*, 46(2):298 – 314, 2011.
- [63] G.M. Stavrakakis, P.L. Zervas, H. Sarimveis, and N.C. Markatos. Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings. *Applied Mathematical Modelling*, 36(1):193 – 211, 2012.

- [64] R. Zhang, G. Tu, and J. Ling. Study on biological contaminant control strategies under different ventilation models in hospital operating room. *Building and Environment*, 43(5):793 – 803, 2008.
- [65] B. Zhao and P. Guan. Modeling particle dispersion in personalized ventilated room. *Building and Environment*, 42(3):1099 – 109, 2007.
- [66] B. Zhao, C. Yang, X. Yang, and S. Liu. Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models. *Building and Environment*, 43(4):388 – 397, 2008.
- [67] P. Kassomenos, A. Karayannis, I. Panagopoulos, S. Karakitsios, and M. Petrakis. Modelling the dispersion of a toxic substance at a workplace. *Environmental Modelling and Software*, 23(1):82 – 9, 2008.
- [68] J. Rao S. Vera, P. Fazio. Interzonal air and moisture transport through large horizontal openings in a full-scale two-story test-hut: Part 1 - Experimental study. *Building and Environment*, 45:1192–1201, 2010.
- [69] J. Rao S. Vera, P. Fazio. Interzonal air and moisture transport through large horizontal openings in a full-scale two-story test-hut: Part 2 - CFD study. *Building and Environment*, 45:622–631, 2010.