

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧ
656



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (ΑΤΕΙ) ΠΕΙΡΑΙΑ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ, ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΤΗΡΙΩΝ**

ΤΖΙΩΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α.Μ.:26091

ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α.Μ.:31100

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Νίκος Κωσ/νος-Στεφανος

Περιεχόμενα

Πίνακας Εικόνων	4
1. Εισαγωγή	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2. Φυσικός Αερισμός	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.1 Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός ενός προηγμένου συστήματος φυσικού αερισμού σε κτήρια.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.2 Σύγκριση φυσικών, μηχανικών και υβριδικών συστημάτων αερισμού στις αστικές περιοχές.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3 Φυσικός αερισμός σε κτήρια	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1. Φυσικός εξαερισμός σε κτήρια με διπλές προσόψεις	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
σελιδοδείκτης.	
3.2 Ο φυσικός εξαερισμός σε πολυώροφα κτήρια με διπλή πρόσοψη.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
οριστεί σελιδοδείκτης.	
3.3 Μελέτη φυσικού αερισμού στους ορόφους καταφυγίων.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
σελιδοδείκτης.	
3.3.1 Ο άνεμος πνέει σε κανονική πρόσπτωση στο κτήριο	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
σελιδοδείκτης.	
3.3.2 Ροή ανέμου σε επιλεγμένο κάθετο επίπεδο ...	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.3.3 Ροή ανέμου σε επιλεγμένο οριζόντιο επίπεδο	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.4. Φυσικός αερισμός σε ευήλια διαμερισμάτα πολυώροφων κτηρίων.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
οριστεί σελιδοδείκτης.	
3.5 Φυσικός αερισμός σε ηλιακές καμινάδες.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.5.1 Πειραματική διαδικασία	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.5.2 Ενίσχυση του ρυθμού φυσικού αερισμού και μείωση της αύξησης θερμότητας σε στέγη σοφίτας με ηλιακό συλλέκτη με ηλιακά πετάσματα.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
σελιδοδείκτης.	
4. Μέθοδοι προσομοίωσης σε κτήρια με φυσικό αερισμό	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
σελιδοδείκτης.	
4.1 Διαδικασία Σχεδιασμού	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.1.1 Ανάλυση και εργασία σχεδιασμού	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.1.2. Θεωρίες ροής κελύφους.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

4.2. Χρήση ντετερμινιστικών και έξυπνων τεχνικών για την παραγωγή της κατανομής της ταχύτητας του αέρα στα εξωτερικά ανοίγματα σε απλές μονοδιάστατες διαμορφώσεις φυσικού αερισμού.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.3 Ανάπτυξη και επικύρωση ενός διζωνικού μοντέλου –POMA	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.3.1 Περιγραφή του POMA	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.3.2 Προσομοίωση και εκτίμηση	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.4. Αριθμητική Προσομοίωση της παροδικά αναπτυσσόμενης ροής σε ένα δωμάτιο με φυσικό αερισμό.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.4.1 Περιοδικό Μοντέλο	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.4.2 Τεχνική αριθμητικής προσομοίωσης	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.4.3 Αποτελέσματα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5 Πειραματικές μετρήσεις εσωτερικού περιβάλλοντος	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.1. Μετρήσεις στο εσωτερικό θερμικό περιβάλλον και ενεργειακή ανάλυση σε μεγάλα κτήρια τις τυπικές εποχές.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.1.2 Γενικές μετρήσεις	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.1.2.1 Σύστημα αερισμού.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.1.2.2 Το περίγραμμα των μετρήσεων στο χώρο ..	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.1.3 Συμπεράσματα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.2 Μεγέθη που εξαρτώνται από το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων για τον εσωτερικό / εξωτερικό φυσικά αεριζόμενο χώρο.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.3. Η επίδραση της ανθρώπινης συμπεριφοράς στο ρυθμό φυσικού αερισμού στο εσωτερικό περιβάλλον το καλοκαίρι.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Βιβλιογραφία	89



Πίνακας Εικόνων

- Σχήμα 1: Κατανομή στατικής πίεσης κατά το ύψος του κτηρίου (μέσα-έξω) (Μαθιουλάκης Δ.)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 2: Πεδίο ροής γύρω από το κτήριο.....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 3: Οι απώλειες του CO₂ για 20 κτήρια [Lamas, 2007, Brescu 2000].Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 4: Συστήματα υβριδικού εξαερισμού που μελετήθηκαν πειραματικά (Νιαχου και συν., 2005).....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 5: Κάτοψη ορόφου (Grattia και De Herde, 2004)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 6: Κτήριο γραφείων με διπλή πρόσοψη (Grattia και De Herde, 2004)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 7: Πίεση του αέρα σε ένα κτήριο και ταχύτητα του ανέμου συναρτήσει της κατεύθυνσης (Grattia και De Herde, 2004).Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 8: Οι θερμοκρασίες κατά την θερμότερη περίοδο του 1998 στο κτήριο της Siemens (Pasquay, 2004).Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 9: Υπολογιστικός προσδιορισμός του διανύσματος της ταχύτητας και των ροϊκών γραμμών σε κάθετο επίπεδο που κόβει στη μέση το πάχος του κτηρίου. (Cheng και συν. 2007).....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 10: Υπολογιστικά υπολογισμένο διάνυσμα ταχύτητας στο οριζόντιο επίπεδο στο μέσο του ορόφου καταφυγίου σύμφωνα με τις γωνίες του ανέμου: α) 0°, β)30°, γ) 45°, δ) 60° ε) 90° (Cheng και συν. 2007).Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 11: Το δωμάτιο που δημιουργήθηκε με ηλιακές καμινάδες (Bacharoulis και συν., 2007).....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 12: Η ροή του αέρα μέσω του τοιχώματος με ηλιακή καμινάδα και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες.(Bacharoulis και συν. 2007)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 13: Πειραματική διάταξη κεκλιμένου καναλιού (W.Puangsoambut και συν., 2007)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 14: Το κτήριο: Ένα ολοκληρωμένο σύστημαΣφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 15: Το κελί δοκιμών (Dascalaki και συν. 1999)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 16: Μοντελοποίηση του κάθετου συνόρου (Haghighat και συν., 2001)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

- Σχήμα 17: Μοντελοποίηση του ορίου ακροφυσίου (Haghighat και συν., 2001).....Σφάλμα!
Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 18: Ένα αεριζόμενο περίβλημα με τοπική πηγή με μια τοπική πηγή θερμότητας (Linden και συν.1990) που δείχνει το ρυθμό ροής μέσα από το περίβλημα από το θερμό ανώτερο επίπεδο.....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 19: Αεριζόμενο περίβλημα με κατανεμημένη πηγή θερμότητας (Gladstone C και Woods AW.,2001) που δείχνει το ρυθμό ροής μέσω του περιβλήματος εξαιτίας του θερμού αέρα που κατανέμεται μέσα στο δωμάτιο. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 20: Η γεωμετρία του ενός τετάρτου του δωματίου που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις (Kaye και συν., 2009)\Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 21: Γενική άποψη και εσωτερική σκηνή του σταδίου στη Σαγκάη (Huang και συν., 2007).....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 22: Σχεδιασμός ροής εσωτερικού αέρα (Huang και συν. 2007)Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
- Σχήμα 23: Θέση των σημείων μέτρησης της θερμοκρασίας για το θερμικό περιβάλλον (Huang και συν., 2007).Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

1. Εισαγωγή

Ένας σημαντικός κλάδος της αρχιτεκτονικής είναι η βιοκλιματική αρχιτεκτονική που στοχεύει στην ικανοποίηση της θερμικής άνεσης των χρηστών με τη μικρότερη δυνατή ενεργειακή επιβάρυνση.

Οι κυριότεροι κλιματικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στη βιοκλιματική αρχιτεκτονική είναι η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία του αέρα, ο άνεμος και η υγρασία. Όσον αφορά σε μικρές περιοχές, όπως το οικόπεδο στο οποίο είναι χτισμένο ένα κτήριο, η χαρακτηριστική διαμόρφωση των κλιματικών παραγόντων, το επονομαζόμενο μικροκλίμα, αφορά στο ίδιο το κτήριο καθώς και το περιβάλλον γύρω από αυτό. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση είναι η θερμοκρασία του αέρα, η μέση θερμοκρασία όλων των επιφανειών που περιβάλλουν το χώρο, η σχετική υγρασία του αέρα, η ταχύτητα του αέρα και η δραστηριότητα των χρηστών του κτηρίου (Ευαγγελινός Ε., Ζαχαρόπουλος Η.).

Στην περίπτωση που ο εσωτερικός αέρας ενός κτηρίου έχει υψηλότερη θερμοκρασία από τον εξωτερικό, ο αερισμός του κτηρίου θεωρείται απαραίτητος. Η κίνηση του αέρα στο κτήριο καθορίζεται από το μέγεθος και τη θέση των ανοιγμάτων. Η ταχύτητα του αέρα είναι μέγιστη όταν τα ανοίγματα από τα οποία εξέρχεται ο αέρας είναι μεγαλύτερα από αυτά από τα οποία εισέρχεται, ενώ η καλύτερη κατανομή του αέρα στο χώρο επιτυγχάνεται με τα διαμερή ανοίγματα.

Εκτός από το φυσικό αερισμό, σημαντικό ρόλο παίζει και ο φυσικός δροσισμός ο οποίος στην ουσία στοχεύει στη μείωση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα στο κτήριο. Ο φυσικός δροσισμός μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διέλευσης του εισερχόμενου στο κτήριο αέρα πάνω από τις επιφάνειες νερού, από σωληνώσεις που τοποθετούνται μέσα στο έδαφος ή σε νερό που έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από εκείνη του περιβάλλοντος, καθώς και μέσω της αύξησης της ταχύτητας του αέρα για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης.

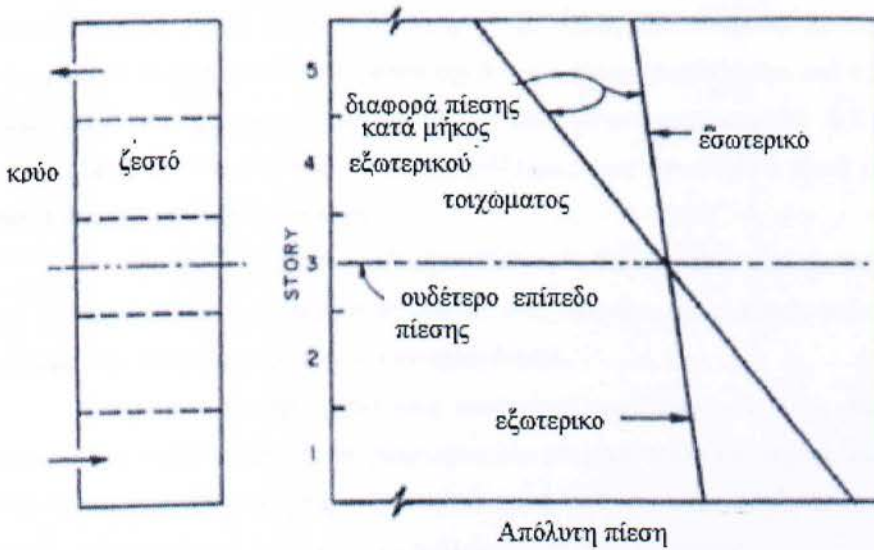
Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι φυσικού αερισμού κτηρίων, θα αναλυθεί η θεωρία του φυσικού αερισμού και οι συνθήκες θερμικής άνεσης στο χώρο. Στη συνέχεια θα γίνει βιβλιογραφική ανασκόπηση των διαφόρων εργασιών που αναφέρονται στο φυσικό αερισμό των κτηρίων και θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι προσομοίωσης της μελέτης των προβλημάτων του φυσικού αερισμού.

2. Φυσικός Αερισμός

Με τον όρο φυσικός αερισμός κτηρίων αναφερόμαστε στην είσοδο του ατμοσφαιρικού αέρα μέσω κατάλληλων ανοιγμάτων, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η είσοδος και έξοδος του αέρα στο κτήριο. Η παροχή του εισερχόμενου αέρα περιγράφεται ως το γινόμενο του εσωτερικού όγκου του κτηρίου επί τις ωριαίες αλλαγές του αέρα. $Q=V \times I$ (m^3/h), όπου με V συμβολίζεται ο εσωτερικός όγκος του κτηρίου (m^3) και με I οι ωριαίες αλλαγές του αέρα (h^{-1}).

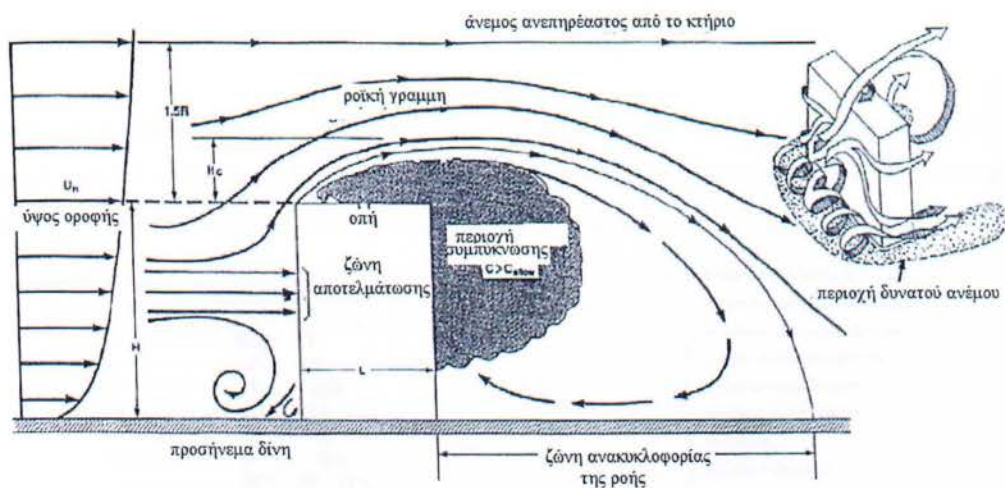
Στην περίπτωση που η θερμοκρασία στο εξωτερικό του κτηρίου είναι διαφορετική από τη θερμοκρασία στο εσωτερικό όπως επίσης και στην περίπτωση που υπάρχει πνοή ανέμου στο εξωτερικό του κτηρίου που προκαλεί ανισοκατανομή της πίεσης στην εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου επάγεται διαφορά μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης.

Η πίεση μειώνεται γραμμικά με το ύψος σύμφωνα με την εξίσωση της αεροστατικής $dp/dz=-\rho g$, όπου z είναι η κατακόρυφη απόσταση από οριζόντιο επίπεδο αναφοράς. Στο Σχήμα 1 δείχνεται το παράδειγμα της κατανομής των πιέσεων σένα πολυώροφο κτίριο.



Σχήμα 1: Κατανομή στατικής πίεσης κατά το ύψος του κτηρίου (μέσα-έξω) (Μαθιουλάκης Δ.)

Η κατανομή της πίεσης στην εξωτερική πλευρά ενός κτηρίου εξαιτίας του αέρα που φυσάει εξαρτάται από το σχήμα του κτηρίου και τον προσανατολισμό του ως προς τον αέρα που ρέει στο γειτονικό περιβάλλον του κτηρίου.



Σχήμα 2: Πεδίο ροής γύρω από το κτήριο.

Το μέγιστο σημείο πίεσης, το οποίο ονομάζεται σημείο ανακοπής, εμφανίζεται ψηλότερα από το κέντρο βάρους της επιφάνειας της προσήνεμης πλευράς και οφείλεται στην άνιση κατανομή της ταχύτητας του ανέμου. Στις περιοχές της αποκολλημένης ροής η ροή είναι γενικά ομοιόμορφη και χαμηλή.

Η στατική πίεση στην επιφάνεια ενός κτηρίου μπορεί να προσδιοριστεί με πειραματικές μετρήσεις σε μοντέλα κτηρίων τα οποία τοποθετούνται σε αεροδυναμικές σήραγγες. Σε κτήρια απλού ορθογώνιου σχήματος η πίεση μεταβάλλεται από 0.5 έως 0.9 σε σχέση με την πίεση ανακοπής του αέρα που πνέει, ενώ στην υπήνεμη από -0.2 έως -0.7 της πίεσης ανακοπής. Στις πλευρές που είναι παράλληλες προς τον άνεμο η πίεση μεταβάλλεται από -1 έως 0.2 της πίεσης ανακοπής.

Το άθροισμα της πίεσης εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας και της πίεσης εξαιτίας της πνοής αέρα στην εξωτερική επιφάνεια ενός κτηρίου, αρχικά μας δίνει μια πρώτη εκτίμηση της επίδρασης των δύο αυτών παραγόντων.

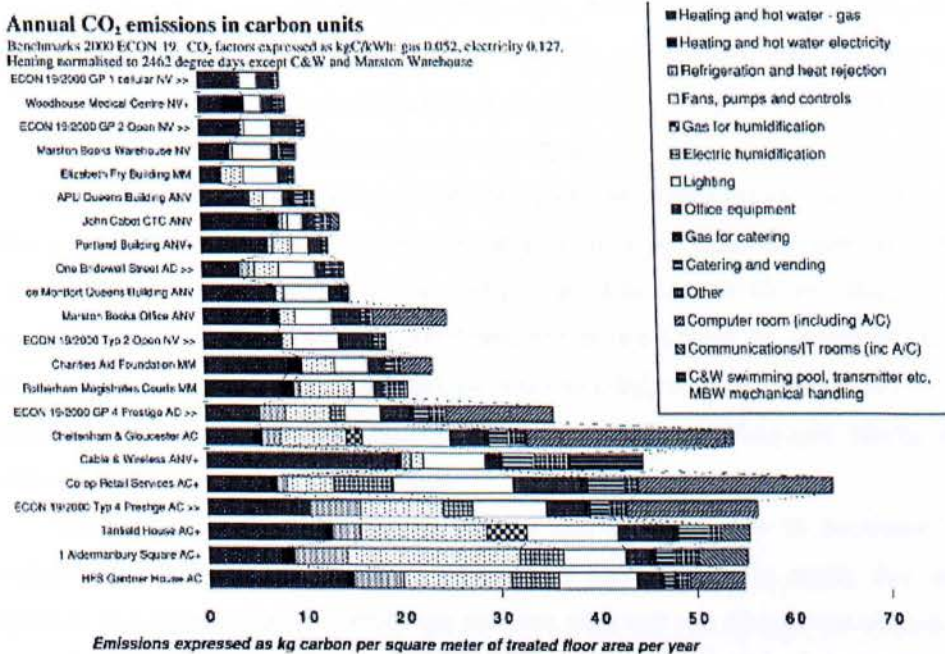
Η παροχή του αέρα μέσω ενός ανοίγματος με διατομή A είναι συνάρτηση της διαφοράς της στατικής πίεσης, της γεωμετρίας του ανοίγματος και του μήκους του.

Όταν η ροή είναι στρωτή, η παροχή είναι γραμμική συνάρτηση της διαφοράς πίεσης, ενώ αν είναι τυρβώδης, μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαφορά πίεσης.

2.1 Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός ενός προηγμένου συστήματος φυσικού αερισμού σε κτήρια.

Η ανάγκη για τη μείωση των εκπομπών του φαινομένου του θερμοκηπίου και ειδικότερα του CO_2 , που προκαλείται από την καύση των ορυκτών καυσίμων οδήγησε στην ανάγκη για κτήρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Ο Bordas και οι συνεργάτες του

(2001) μελέτησαν 20 κτήρια στην Αμερική και συμπέραναν πως ο λόγος του CO₂ που παράγεται κατά την προετοιμασία του χώρου προς το CO₂ που απαιτείται για το φωτισμό του χώρου, για μια επιφάνεια ορισμένου εμβαδού, ισούται με 6.



Σχήμα 3: Οι απώλειες του CO₂ για 20 κτήρια [Lamas, 2007, Brescu 2000].

Εννέα από τις 10 υψηλότερες εκπομπές CO₂ παρατηρήθηκαν στα κλιματιστικά ενώ 9 στις 10 χαμηλότερες εκπομπές επετεύχθησαν χρησιμοποιώντας μεθόδους φυσικού ή προηγμένου φυσικού αερισμού. Με τον όρο «προηγμένος φυσικός αερισμός» αναφερόμαστε στα συστήματα που χρησιμοποιούν το φαινόμενο συσσώρευσης και της καθοδηγούμενης ροής αέρα. Στα κτήρια όπου ο αερισμός γίνεται με τεχνητούς τρόπους οι εκπομπές του CO₂ προέρχονται από τους ανεμιστήρες και τις αντλίες που χρησιμοποιούνται για να μετακινήσουν τον αέρα και υπολογίζεται πως αποτελούν το 50% των απωλειών που σχετίζονται με τη θέρμανση και την ψύξη του χώρου. Επειδή τα αεριζόμενα κτήρια τείνουν να σχεδιάζονται εις βάθος, οι εκπομπές CO₂ εξαιτίας της χρήσης τεχνικού φωτισμού είναι επίσης σημαντικές.

Τα κτήρια με φυσικό αερισμό και προηγμένο φυσικό αερισμό χρησιμοποιούν τις διαφορές πίεσης που αναπτύσσονται από τους φυσικούς ανέμους και/ή τη δύναμη άνωσης, που προέρχονται από τις εσωτερικές πηγές θερμότητας οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο στην αποφυγή της χρήσης των ανεμιστήρων.

Προσθέτοντας τον ψυχρό αέρα μέσα στο κτήριο αποφεύγεται η συσσώρευση θερμότητας στη θερμική μάζα με αποτέλεσμα να μπορεί να αποφευχθεί η ανάγκη για ψύξη με μηχανικό τρόπο στο εσωτερικό του. Στις θερμότερες περιοχές είναι εφικτό να μειωθούν τα

ψυκτικά φορτία και η χρησιμοποιούμενη ενέργεια που σχετίζεται με τις εκπομπές CO₂ (Lomas and Cook, 2005, Krauss και συν.).

Κτήρια με φυσικό εξαερισμό είναι σχεδιασμένα με εκτεταμένη περίμετρο, ανοίγματα στην πρόσοψη που επιτείνουν την είσοδο φρέσκου αέρα. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι ασύμβατα με τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού που επιβάλλονται εξαιτίας των πυκνοδομημένων αστικών κέντρων. Η χρήση χειροκίνητων παραθύρων διακινδυνεύει την ασφάλεια και αυξάνει την ανησυχία για κλοπές στα κτήρια.

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού είναι εφικτό να προβλεφτούν οι εσωτερικές συνθήκες σε ένα κτήριο με τη χρησιμοποίηση δυναμικών θερμικών μοντέλων και υπολογιστικών προγραμμάτων ρευστοδυναμικής, ενώ είναι σημαντικό να υπάρχει μια καθαρή ιδέα για το πώς οι εσωτερικές συνθήκες στο τελικό κτήριο θα ελεγχθούν. Κατά κανόνα είναι δύσκολο να εξάγουμε συμπεράσματα και να ελέγξουμε την απόδοση των απλών κτηρίων με φυσικό αερισμό βασιζόμενοι μόνο στις μεταβλητές διαφορές πίεσης που αναπτύσσονται εξαιτίας της ροής του ανέμου.

Στα προηγμένα κτήρια με φυσικό αερισμό που χρησιμοποιούν το φαινόμενο της συσσώρευσης και στα οποία ο αέρας θερμαίνεται από εσωτερικές πηγές, δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει εξάρτηση μεταξύ της ροής του αέρα από των πιέσεων του ανέμου. Αν είναι κατάλληλα σχεδιασμένο το κτήριο, η ροή του αέρα μπορεί να διασφαλιστεί όλες τις ώρες κατά τις οποίες υπάρχει πηγή θερμότητας, ακόμα και κατά τη διάρκεια της νύκτας. Στην περίπτωση που η μετατόπιση της ροής γίνεται χωρίς περιορισμούς, οι πηγές θερμότητας δημιουργούν μονωμένες περιοχές θερμού αέρα και ο ρυθμός ροής είναι ανάλογος με την ισχύ της πηγής. Επιπλέον η διεπιφάνεια μεταξύ του ψυχρού και του θερμού ρεύματος αέρα παραμένει σταθερή (P.F. Linden, και συν., 1990). Επειδή οι πηγές θερμότητας κατανέμονται πάνω στην επιφάνεια του κτηρίου, η ροή του αέρα θα εξαρτάται από την ισχύ της πηγής σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (Gladstones and Woods, 2001). Αυτός ο συσχετισμός μεταξύ της πηγής θερμότητας και της ροής του αέρα επιτρέπει τον εύκολο έλεγχο της ροής του αέρα και τον προσδιορισμό της απόδοσης σε σχεδιαστικό επίπεδο που είναι αρκετά αξιόπιστος.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρονται από τη δυνατότητα ελέγχου και πρόβλεψης των δυνατοτήτων του φυσικού αερισμού μπορούν να εξαφανιστούν αν οι πιέσεις του ανέμου κυριαρχήσουν. Η μη δυνατότητα προσδιορισμού αυτών των πιέσεων δεν αποτελεί μειονέκτημα, καθώς συνήθως αυτές παρατηρούνται κατά την καλοκαιρινή περίοδο που γενικά είναι δύσκολο ο προηγμένος φυσικός αερισμός των κτηρίων να διατηρήσει συνθήκες θερμικής άνεσης. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητο ο σχεδιασμός των κτηρίων να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε αυτά να είναι «ουδέτερα στην επίδραση του ανέμου».

Ο Lomas (2007) μελέτησε για τέσσερις διαφορετικούς τύπους κτηρίων δύο διαφορετικούς τύπους αερισμού, ήτοι τον φυσικό αερισμό και τον προηγμένο φυσικό αερισμό συνοψίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά καθενός:

- τις αρχιτεκτονικές επιπτώσεις,
- την ποιότητα του παρεχόμενου εσωτερικού αέρα,
- το βαθμό προστασίας από το γειτονικό περιβάλλον και
- την αντοχή του στην κλιματική αλλαγή.

Τα κτήρια με προηγμένο φυσικό αερισμό, με κεντρικό σύστημα παροχής αέρα και περιμετρικές καμινάδες εξόδου αποδείχθηκε πως παρουσιάζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα ανεξάρτητα με την περιοχή που βρίσκονται. Επιπλέον, βασιζόμενος στην εμπειρία του σχεδιασμού αυτών των κτηρίων εξήγαγε απλές εξισώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Τα μεγέθη που υπολογίστηκαν εξαρτώνται από τον όγκο της ροής του αέρα που απαιτείται την καλοκαιρινή περίοδο.

2.2 Σύγκριση φυσικών, μηχανικών και υβριδικών συστημάτων αερισμού στις αστικές περιοχές.

Στις περισσότερες μεσογειακές χώρες ο κύριος μηχανισμός παθητικής ψύξης των κτηρίων ήταν ο φυσικός αερισμός που προφανώς ήταν και ο μοναδικός τρόπος πριν την εφεύρεση του κλιματιστικού, η χρήση του οποίου αυξήθηκε δραματικά τη δεκαετία του 90 ειδικά στις αστικές περιοχές. Εκτός από μηχανισμός ψύξης ο φυσικός αερισμός χρησιμοποιείται ευρέως και κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών έτσι ώστε να διατηρείται η ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Για τον ίδιο λόγο υπάρχει η περιορισμένη χρήση εξαερισμού στις κουζίνες και τα μπάνια, η οποία γίνεται για περιορισμένο χρονικό διάστημα προκειμένου να απομακρύνονται δυσάρεστες οσμές από την κουζίνα και η υγρασία από το μπάνιο. Ο υβριδικός αερισμός συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του φυσικού και του μηχανικού αερισμού από πλευράς θερμικής άνεσης και ποιότητας αέρα στο εσωτερικό του κτηρίου (P. Heiselberg, 2002).

Στις αστικές περιοχές ο υβριδικός αερισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός, δεδομένου ότι μειώνεται το δυναμικό του φυσικού εξαερισμού εξαιτίας της εξασθένησης της ταχύτητας του ανέμου και των παρατηρούμενων διαφορών πίεσης στις προσόψεις των κτηρίων (Santamouris, 2001).

Ο Yoshimo και οι συνεργάτες του (2002) μελέτησαν την απόδοση ενός μηχανικού συστήματος εξαερισμού και ενός υβριδικού συστήματος εξαερισμού σε δοκιμή κλίμακας σε ένα σπίτι στην Ιαπωνία κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Από την άλλη ο Brohus και οι συνεργάτες του (2003) μελέτησαν την απόδοση ενός υβριδικού συστήματος εξαερισμού σε ένα κτήριο στη Δανία. Ο Rowe (2003) μελέτησε ένα μικτό περιβάλλον 25 γραφείων του Πανεπιστημίου του Σίνδεν. Τα γραφεία αερίζονταν μέσω ανοικτών παράθυρων και πορτών

και με ένα επιπρόσθετο σύστημα αντίστροφου κύκλου ψύξης/ θέρμανσης και επιπλέον κάθε ένοικος διέθετε ένα ελεγχόμενο σύστημα αερισμού σε κάθε δωμάτιο. Επιπλέον ο Principi (2001) και οι συνεργάτες του μελέτησαν τις συνθήκες θερμικής άνεσης σε ένα καινοτόμο γραφείο με υβριδικό εξαερισμό στην κεντρική Ιταλία. Τα δεδομένα που μετρήθηκαν παρείχαν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του εξαερισμού και τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο κτήριο κάτω από διάφορες κλιματικές συνθήκες.

Η Νιάχου και οι συνεργάτες της (2005) πραγματοποίησαν μια μελέτη στην οποία ανέλυσαν διαφορετικές μεθοδολογίες για την εκτίμηση του ρυθμού εναλλαγής αέρα από τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων του αερίου ανίχνευσης, διαπιστώνοντας τη βελτίωση του αστικού περιβάλλοντος στην αποτελεσματικότητα του φυσικού και του υβριδικού εξαερισμού δεδομένου ότι η απόδοση αυτών των συστημάτων στα αστικά κτήρια είναι πολύ σημαντική για τον εξαερισμό, την ποιότητα του εσωτερικού αέρα και τις ενεργειακές απαιτήσεις κυρίως για την ψύξη. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν διαφορετικές διαμορφώσεις εξαερισμού και συγκρίθηκαν με πραγματικά διαμερίσματα σε αστικές περιοχές κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές μέθοδοι για την εκτίμηση του ρυθμού ανταλλαγής αέρα. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εργασίας πραγματοποιήθηκαν 114 πειράματα, εκ των οποίων 3 πειράματα διήθησης, 30 πειράματα φυσικού εξαερισμού, 34 μηχανικού και 47 υβριδικού εξαερισμού.

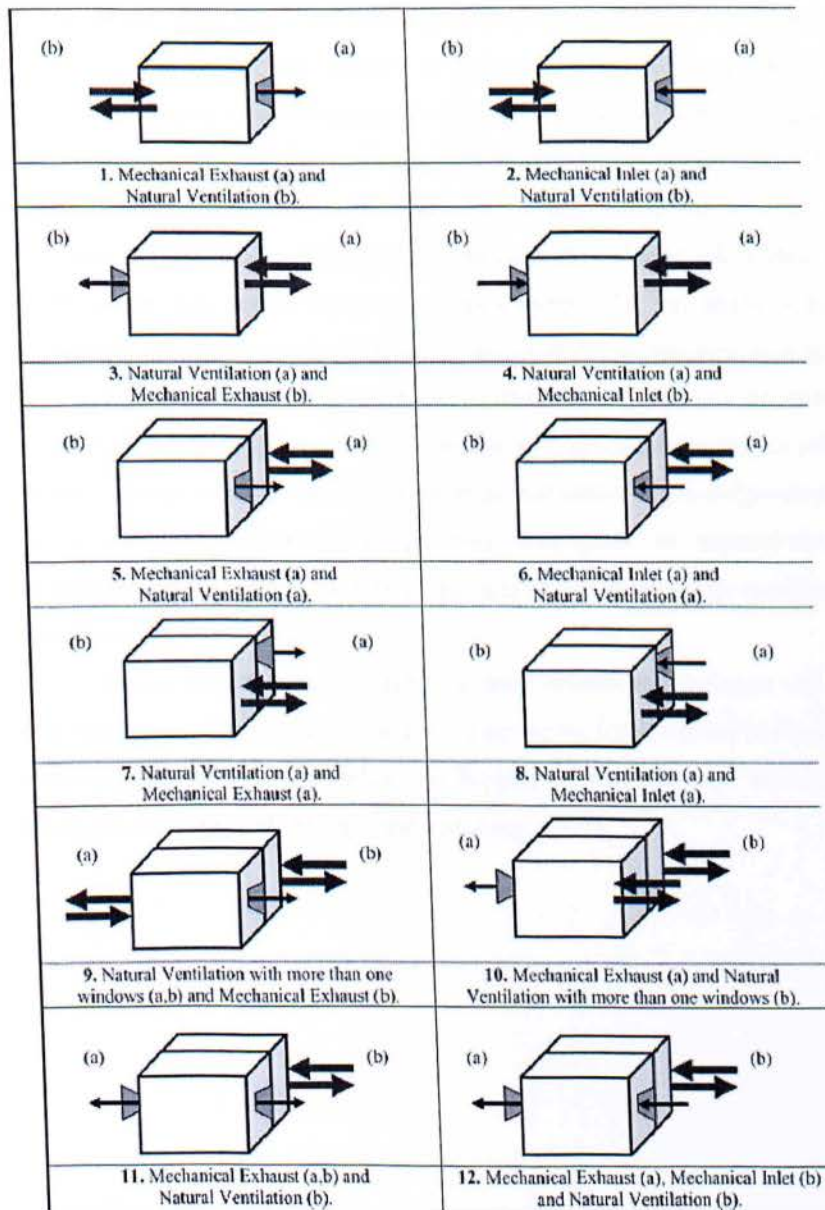
Κάθε πείραμα αποτελούταν από δύο στάδια: στο πρώτο το αέριο ανίχνευσης εγγέονταν στο εσωτερικό των δωματίων με εσωτερικούς ανεμιστήρες που χρησιμοποιούνταν για την ομογενοποίηση της εσωτερικής συγκέντρωσης και στο δεύτερο οι εσωτερικοί ανεμιστήρες απενεργοποιούνταν και καταγραφόταν η μείωση του αερίου ανίχνευσης.

Τα πειράματα φυσικού εξαερισμού πραγματοποιήθηκαν με διαμόρφωση απλή ή με διασταυρωμένη διαμόρφωση εξαερισμού. Στην περίπτωση του απλού εξαερισμού τα ανοίγματα ήταν τοποθετημένα είτε από την μπροστινή είτε από την πίσω πρόσοψη του κτηρίου. Στα πειράματα διασταυρούμενου εξαερισμού τα πειράματα μελετήθηκαν με δύο ή περισσότερα ανοίγματα που τοποθετήθηκαν στη μπροστινή και στην πίσω πλευρά.

Τα πειράματα με υβριδικό εξαερισμό εστίαζαν στον φυσικό εξαερισμό με υποβοήθηση από ανεμιστήρες όπου εφαρμόζονταν και επιπλέον ανεμιστήρες για την ενίσχυση των διαφορών πίεσης που δημιουργούνται από μηχανικούς ανεμιστήρες. Οι ανεμιστήρες εγκαταστάθηκαν στα ανοίγματα ανάλογα με το αν αυτά βρίσκονταν στη μπροστινή ή στην πίσω πρόσοψη και λειτουργούσαν είτε για εισαγωγή αέρα είτε για εξαγωγή μαζί με τον φυσικό εξαερισμό διαμέσω ενός ή δύο ανοιγμάτων. Μελετήθηκαν συνολικά 12 διαμορφώσεις υβριδικού εξαερισμού όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.

Ο μηχανικός εξαερισμός μελετήθηκε πειραματικά με έναν ή δύο ανεμιστήρες να λειτουργούν ως είσοδος ή έξοδος. Όλες οι πιθανές διαμορφώσεις μελετήθηκαν με τους

ανεμιστήρες να είναι τοποθετημένοι στους εξωτερικούς τοίχους των κτηρίων που μελετήθηκαν.



Σχήμα 4: Συστήματα υβριδικού εξαερισμού που μελετήθηκαν πειραματικά (Niachou και συν., 2005)

Στη συγκεκριμένη εργασία ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα μετρήθηκε σε τρία συμβατικά διαμερίσματα που βρίσκονταν σε αστική περιοχή στην Αθήνα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο υποβάθμισης (decay method) του αερίου αντίχενωσης. Επιπλέον συγκρίθηκαν διαφορετικά συστήματα εξαερισμού, ο φυσικός, ο μηχανικός και ο υβριδικός εξαερισμός χρησιμοποιώντας έναν ή δύο ανεμιστήρες. Σε σχέση με τον απλό φυσικό εξαερισμό ο

φυσικός διασταυρούμενος οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές ACH τιμές. Ο υβριδικός εξαερισμός σχετίζεται όπως αποδείχθηκε με μικρότερες τιμές ACH σε σχέση με τον φυσικό αλλά έχει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ACH υπό φυσιολογικές συνθήκες. Αυτό φυσικά δε σημαίνει ότι ο υβριδικός εξαερισμός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα ή εκείνες τις ημέρες του καλοκαιριού κατά τις οποίες ο φυσικός εξαερισμός δεν είναι αποτελεσματικός για ψύξη είτε λόγω των χαμηλών ανέμων είτε λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον, τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έλαβαν υπόψη τους διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης των ρυθμών ανταλλαγής αέρα από τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του αερίου ανίχνευσης. Αποδείχθηκε ότι για πολυζωνικές μετρήσεις είναι απαραίτητα πολλαπλά αέρια ανίχνευσης. Σε αντίθετη περίπτωση, που χρησιμοποιείται ένα αέριο ανίχνευσης, η πολυζωνική ανάλυση είναι ανακριβής και σε αυτήν την περίπτωση επιβάλλεται, προφανώς, η χρήση της μονοζωνικής μεθόδου. Επίσης, οι μέθοδοι απλής ζώνης μπορούν επίσης να αναλύσουν πειράματα με πολλαπλά αέρια ανίχνευσης. Παρά το γεγονός ότι οι μέθοδοι πολλαπλής ζώνης είναι θεωρητικά οι περισσότερο κατάλληλες, οι μεθοδολογίες απλής ζώνης είναι λιγότερο ευαίσθητες ως προς την ακρίβεια των μετρούμενων δεδομένων.

Σε μια πλήρη σύγκριση ανάμεσα στην αποτελεσματικότητα του αερισμού ανάμεσα στον φυσικό και στον υβριδικό θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του όχι μόνο τους ρυθμούς ανταλλαγής αέρα αλλά επιπλέον, τη θερμική άνεση και την αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση οσμών (Etheridge and Sandberg, 1996).

3 Φυσικός αερισμός σε κτήρια

3.1. Φυσικός εξαερισμός σε κτήρια με διπλές προσόψεις

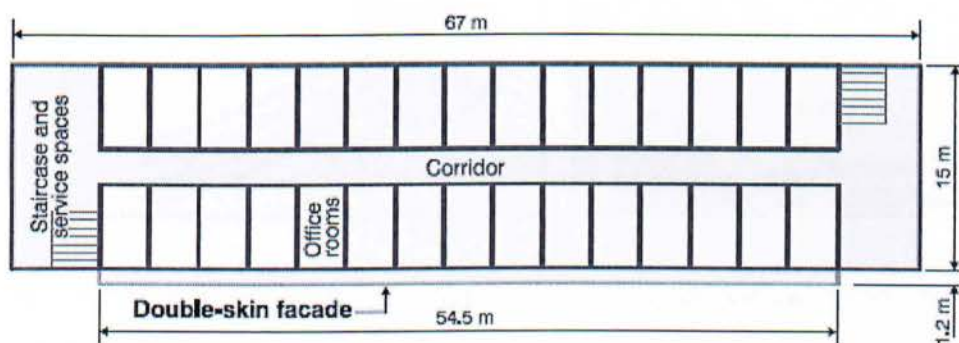
Στην αρχιτεκτονική των σύγχρονων κτηρίων οι διπλές προσόψεις αποτελούν μια πρακτική ιδιαίτερης σημασίας. Παρά το γεγονός ότι εμφανίζονται σε πολλούς διαγωνισμούς αρχιτεκτονικής στην Ευρώπη δεν είναι και πολύ συνηθισμένες στην πράξη και υπάρχει πολύ μικρή εμπειρία ως προς τη λειτουργικότητά τους (Zolner και συν., 2002, Zalewski και συν., 2002).

Τα πλεονεκτήματα των διπλών προσόψεων συνδυάζονται με τη βελτιωμένη ηχομόνωση των κτηρίων και τη μεγαλύτερη άνεση του χρήστη κυρίως στα ήπια κλίματα. Για να μειωθεί η ταχύτητα του ανέμου και ο θόρυβος στην εσωτερική πρόσοψη του κτηρίου τοποθετείται μια δεύτερη επιφάνεια. Το κενό μεταξύ των δύο προσόψεων χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των αντιηλιακών συσκευών, για τις οποίες το ιδανικό είναι να τοποθετούνται έξω από το κτήριο αλλά παράλληλα θα πρέπει να προστατεύονται από τον άνεμο και τις καιρικές συνθήκες.

Ο κίνδυνος υπερθέρμανσης των διπλών προσόψεων την καλοκαιρινή περίοδο είναι πιθανός αλλά κάποιιο υποστηρίζουν ότι μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση καλά διαστασιολογημένων ανοιγμάτων, μιας κατάλληλα τοποθετημένης συσκευής σκίασης και με βέλτιστο χώρο μεταξύ των προσόψεων (Oesterle και συν., 2001, Wigginton και συν., 2002, Schittich και συν., 2001).

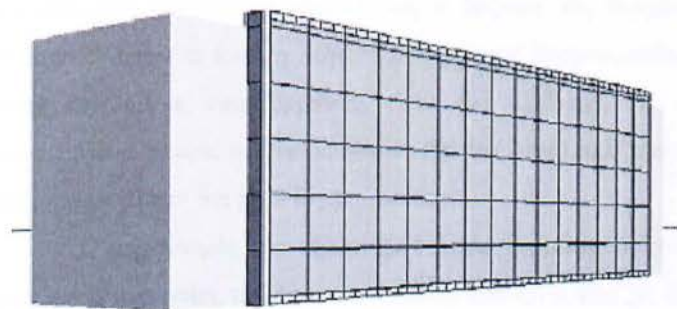
Το κλίμα πολλών χωρών όπως του Βελγίου είναι κατάλληλο για την ψύξη με φυσικό αερισμό. Εκτός από λίγες ώρες το χρόνο, η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από την εσωτερική τόσο κατά τη διάρκεια της νύκτας όσο και κατά τη διάρκεια της μέρας. Κατά συνέπεια τα ανοίγματα των παραθύρων είναι αρκετά για τη ψύξη της διπλής πρόσοψης για το μεγαλύτερο διάστημα (Grattia and Herde, 2003, Grattia and Herde, 2002). Οι Grattia και Herde (2004) μελέτησαν το κτήριο ενός γραφείου με υψηλό επίπεδο θερμικής μόνωσης και προσομοίωσαν με κατάλληλο λογισμικό διάφορες λειτουργίες της διπλής πρόσοψης προσπαθώντας να ερμηνεύσουν τη λειτουργία της διπλής πρόσοψης.

Το κτήριο το οποίο μελέτησαν είναι μέσου μεγέθους, με γραφεία ευθυγραμμισμένα στις δύο όψεις του κτηρίου, χωριζόμενα μεταξύ τους από έναν κεντρικό διάδρομο με σκάλες και στα δύο άκρα του κτηρίου. Το κτήριο αποτελείται από 150 γραφεία κατανεμημένα σε πέντε ορόφους και σε δύο κατευθύνσεις. Κατά μέσο όρο υπάρχουν 15 γραφεία ανά όροφο προς κάθε κατεύθυνση. Η διαμόρφωση του κτηρίου φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



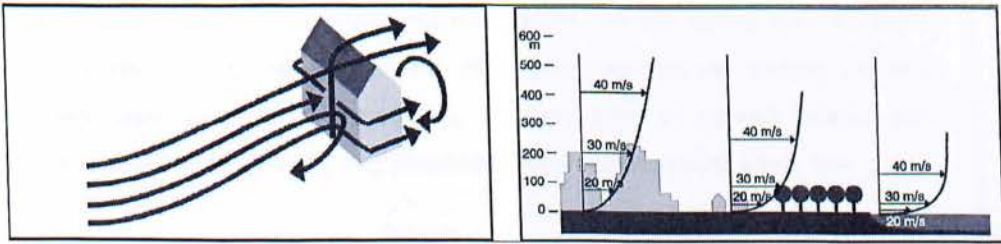
Σχήμα 5: Κάτοψη ορόφου (Grattia και De Herde, 2004)

Οι προσομοιώσεις στη συγκεκριμένη ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκαν με βάση τα κλιματικά δεδομένα του Βελγίου. Τα καιρικά δεδομένα καταγράφηκαν από την Βελγική Μετεωρολογική Υπηρεσία και αποτελούνταν από τα δεδομένα για 12 πραγματικούς μήνες, τα οποία ήταν αντιπροσωπευτικά για την υπό εξέταση περιοχή.



Σχήμα 6: Κτήριο γραφείων με διπλή πρόσοψη (Grattia και De Herde, 2004)

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης οι Grattia και de Herde (2004) επέλεξαν μια συγκεκριμένη καλοκαιρινή ημέρα (24 Ιουλίου). Η πρότυπη ημέρα μοντελοποιήθηκε μαζί με τις 10 προηγούμενες προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αδράνεια. Η εξωτερική θερμοκρασία θεωρήθηκε ανάμεσα στους 11.4°C και 23.3°C . Η ταχύτητα του ανέμου ήταν κοντά στα 4m/sec ενώ οι συγγραφείς θεώρησαν σταθερή την ταχύτητα του ανέμου, ενώ η διεύθυνση του ανέμου ήταν μεταβαλλόμενη.



Σχήμα 7: Πίεση του αέρα σε ένα κτήριο και ταχύτητα του ανέμου συναρτήσει της κατεύθυνσης (Grattia και De Herde, 2004).

Ο αέρας και η άνωση εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας είναι οι δύο δυνάμεις που κινούν τον φυσικό εξαερισμό. Σε ένα κτήριο χωρίς διπλή πρόσοψη, τις περισσότερες μέρες του χρόνου οι δυνάμεις του ανέμου είναι μεγαλύτερες από αυτές που προκαλούνται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας και είναι ευκολότερο να αξιοποιηθούν. Εντούτοις, στη διπλή πρόσοψη, η διαφορά στα επίπεδα που βρίσκονται μεταξύ των υψηλότερων και των χαμηλότερων ανοιγμάτων και κυρίως η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει τόσο σημαντική ώστε η άνωση λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας τελικά κυριαρχεί. Επιπλέον, λόγω του ότι η υπερθέρμανση είναι πιο αξιόλογη τις λίγες μέρες κατά τις οποίες παρατηρείται άπνοια οι Grattia και de Herde (2004) μελέτησαν τον εξαερισμό λόγω άνωσης που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας.

Ο μηχανισμός του εξαερισμού λόγω θερμικής άνωσης είναι πιο πολύ γνωστός ως φαινόμενο ακινησίας μαζών (stack effect) που είναι ίδιο με το φαινόμενο που παρατηρείται στις συμβατικές καπνοδόχους, περιγράφοντας τη φυσική κίνηση ενός όγκου θερμού προς τον ψυχρό περιβάλλοντα αέρα (Oesteler και συν., 2001).

Το μέγεθος του φαινομένου ακινησίας των μαζών εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον εσωτερικό και εξωτερικό αέρα και από το ύψος της στήλης του εσωτερικού αέρα.

Οι διπλές προσόψεις παρέχουν ένα καλό παράδειγμα της ύπαρξης διαφορών πίεσης. Ως αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας ο αέρας που βρίσκεται στο διάστημα ανάμεσα στις δύο προσόψεις γίνεται πιο θερμός από τον εξωτερικό αέρα. Ο αέρας που βρίσκεται σε αυτόν το χώρο θα είναι κατά συνέπεια ελαφρύτερος από τον εξωτερικό. Ο ενδιάμεσος χώρος είναι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα μέσω ανοιγμάτων στην κορυφή και στο πάτωμα έτσι ώστε να υφίσταται η εξισορρόπηση της πίεσης. Ο ψυχρότερος εξωτερικός αέρας είναι βαρύτερος και προκαλεί κατάσταση υπερπίεσης στο κάτω μέρος. Ο θερμότερος αέρας που βρίσκεται σε αυτόν το χώρο είναι ελαφρύτερος και φτάνει στο πάνω μέρος προκαλώντας μια κατάσταση υπερπίεσης στο πάνω μέρος από όπου ο θερμότερος αέρας αποβάλλεται.

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται συναρτήσει του του ύψους από το έδαφος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η τριβή στο έδαφος επιβραδύνει την κίνηση του κάτω στρώματος του αέρα. Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές αυτό το οριακό επίπεδο είναι μεγαλύτερο εξαιτίας της τραχύτητας της επιφάνειας που δημιουργείται λόγω των πολλών κτηρίων.

Στη συγκεκριμένη εργασία αποδείχθηκε ότι αν η διπλή πρόσοψη είναι προσανατολισμένη στο νότο και δεν αεριίζεται η θερμοκρασία της μπορεί να φτάσει τους 47° C αν δεν υπάρχει σκίαση ενώ η θερμοκρασία θα φτάσει τους 52° C αν στα παράθυρα υπάρχει πρόβλεψη για σκίαση. Στην πραγματικότητα εξαιτίας των περσίδων αυξάνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στο χώρο μεταξύ των προσόψεων το καλοκαίρι παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα ως προς τη θερμική άνεση των ενοίκων εξαιτίας της θερμής ακτινοβολίας που έρχεται από το εσωτερικό δέρμα. Όταν ο ήλιος λάμπει, οι καθοριστικοί παράγοντες είναι ο προσανατολισμός της διπλής πρόσοψης και η θερμοότητα που απελευθερώνεται ως αποτέλεσμα της απορρόφησης της από τις περιοχές με ηλιοπροστασία. Για αυτές τις περιοχές είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ο αποτελεσματικός εξαερισμός.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ο σωστός αερισμός τόσο τα πάνω όσο και τα κάτω παράθυρα της διπλής πρόσοψης θα πρέπει να είναι ανοιχτά καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η κατεύθυνση της ροής και ο ρυθμός μεταβολής της ζώνης του αέρα είναι συνάρτηση του φαινομένου ακινησίας των μαζών και της πίεσης του ανέμου στο κτήριο.

Επιπλέον, απέδειξαν ότι αν η διπλή πρόσοψη είναι ηλιόλουστη κυριαρχεί το φαινόμενο ακινησίας των μαζών. Ένα άνοιγμα 50 cm πάνω και κάτω κατά μήκος της διπλής πρόσοψης ενισχύει το ρυθμό μεταβολής στη ζώνη του αέρα κατά 100Vol/h ενώ η θερμοκρασία της διπλής πρόσοψης φτάνει στους 27° C.

Η επίδραση του ανέμου και του φαινομένου ακινησίας των μαζών δεν συμβαδίζουν πάντα μεταξύ τους αλλά μερικές φορές είναι και αντίθετα. Έτσι, κατά τη διάρκεια μιας ηλιόλουστης μέρας ο ρυθμός μεταβολής της ζώνης του αέρα στη νότια διπλή πρόσοψη μεταβάλλεται από 90 έως 135 Vol/h σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου.

Αντίθετα και κατά τη διάρκεια της νύκτας και για τη νοτιότερη πρόσοψη κυριαρχεί συνήθως η επίδραση του ανέμου και η κατεύθυνση της ροής του αέρα καθώς και ο ρυθμός μεταβολής της ζώνης του αέρα καθορίζονται από την ταχύτητα του ανέμου και τον προσανατολισμό του. Ο ρυθμός μεταβολής της ζώνης του αέρα κυμαίνεται από 20 έως 120 Vol/h.

Εξαιτίας της πολλαπλότητας των πιθανών διαμορφώσεων της διπλής πρόσοψης και της πολυπλοκότητας των υδραυλικών φαινομένων που πραγματοποιούνται στο κανάλι της διπλής πρόσοψης καθιστά τον ρεαλιστικό σχεδιασμό της διπλής πρόσοψης ως ένα αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης. Η εργασία των Grattia και De Herde, (2004) δίνει

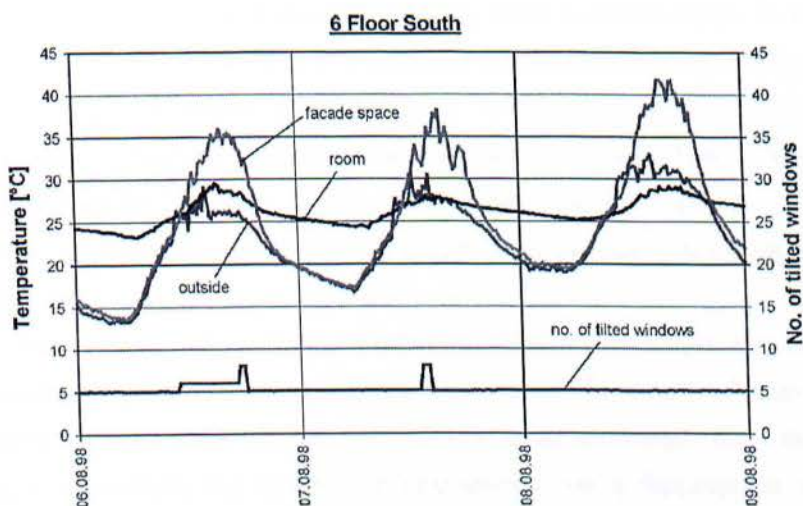
αποτελέσματα σχετικά με τη θερμική συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου τύπου διπλής πρόσοψης και δεν μπορούν τα αποτελέσματα αυτά να γενικευτούν για όλες τις πιθανές διαμορφώσεις των διπλών προσόψεων.

3.2 Ο φυσικός εξαερισμός σε πολυώροφα κτήρια με διπλή πρόσοψη.

Οι διπλές προσόψεις κατασκευάζονται για να επιτρέπουν το φυσικό εξαερισμό στα πολυώροφα κτήρια καθώς και στα κτήρια με μεγάλο εξωτερικό θόρυβο. Για την εκτίμηση της ενεργητικής απόδοσης ο Pasquay (2004) μελέτησε τρία κτήρια για τουλάχιστον ένα χρόνο. Τα κτήρια αυτά ήταν το κτήριο της Siemens στο Ντορντμουντ, της ασφαλιστικής εταιρείας Victoria στο Ντίσελντοφ και του πύργου RWE στο Έσσεν. Στο ένα κτήριο όλες οι εγκαταστάσεις κλιματισμού είχαν αποσυρθεί και η πρόσοψη αντικαταστάθηκε με διπλή πρόσοψη, στο άλλο υπήρχε συσκευή ψύξης χωρίς μηχανικό εξαερισμό και στο τρίτο υπήρχε συσκευή ψύξης σε συνδυασμό με μηχανικό εξαερισμό. Τα αποτελέσματα βασίστηκαν στις εσωτερικές κλιματικές συνθήκες για περαιτέρω σχεδιασμό και στις πιθανότητες για πολυώροφα κτήρια με καθόλου ή περιορισμένο κλιματισμό.

Το κτήριο της Siemens βρίσκεται στο Ντόρντμουντ και είναι ένα σχετικά μικρό πολυώροφο κτήριο με 11 πατώματα που κτίστηκε τη δεκαετία του 1960. Βρίσκεται στο κέντρο της πόλης σε έναν δρόμο με μεγάλη κυκλοφορία.

Μετά από μια πυρκαγιά το 1996/1997 η συνολική πρόσοψη αντικαταστάθηκε από μια διπλή καινούρια πρόσοψη. Το διάστημα ανάμεσα στις δύο προσόψεις αερίζεται σε μόνιμη βάση. Εκτός από το χώρο του κυλικείου σε όλο το υπόλοιπο κτήριο τα κλιματιστικά αφαιρέθηκαν χωρίς να αντικατασταθούν. Τα εσωτερικά παράθυρα ανοίγουν και χρησιμοποιούνται όλο το χρόνο για τον φυσικό αερισμό του κτηρίου. Καθώς το κτήριο δεν είχε ψυκτικές συσκευές οι καλοκαιρινές θερμοκρασίες εξαρτώνται εκτός από τα θερμικά φορτία και από τον αερισμό κατά τη διάρκεια της μέρας και της νύκτας κυρίως εξαρτώνται από την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής για την προστασία από τον ήλιο.



Σχήμα 8: Οι θερμοκρασίες κατά την θερμότερη περίοδο του 1998 στο κτήριο της Siemens (Pasquay, 2004).

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας για τρεις ημέρες κατά τη θερμότερη περίοδο του 1998 για το δωμάτιο που χρησιμοποιείται ως τηλεφωνικό κέντρο με υψηλά θερμικά φορτία λόγω ανθρώπων, υπολογιστών και συσκευών τηλεφώνου. Οι άνθρωποι που δουλεύουν εκεί κρατούν τα παράθυρα ανοικτά όλη τη νύκτα. Όταν δεν υπάρχει μια ψευδοροφή ανάμεσα στην οροφή και το δωμάτιο τότε η επίδραση του νυκτερινού εξαερισμού μπορεί να βελτιωθεί. Από τη μελέτη αυτή αποδείχτηκε ότι ακόμα και στην περίπτωση που η θερμοκρασία στο χώρο της πρόσοψης φτάσει να είναι πάνω από 10°C μεγαλύτερη από την εξωτερική θερμοκρασία η εσωτερική θερμοκρασία θα διατηρηθεί εντός αποδεκτών ορίων.

Η ασφαλιστική εταιρεία Victoria στη Γερμανία βρίσκεται στο Ντίσελντοφ και κτίστηκε το 1997 με μια διπλή πρόσοψη. Το κτήριο έχει δύο τμήματα, ένα πολυώροφο και ένα επτάώροφο κτήριο κατά μήκος ενός κεντρικού δρόμου με πολύ εξωτερικό θόρυβο. Οι μετρήσεις έγιναν το καλοκαίρι του 1997 σε ένα γραφείο στην ανατολική πλευρά του επτάώροφου κτηρίου (Pasquay, 2004). Τα γραφεία κλιματιζόνταν με σωλήνες νερού που περνούσαν από την οροφή. Για να εμποδιστεί μια ανάμιξη του εξωτερικού και του εσωτερικού αέρα οι είσοδοι στο χώρο της πρόσοψης τοποθετήθηκαν στο εξωτερικό τμήμα της πρόσοψης.

Οι μεγάλες θερμοκρασίες της πρόσοψης δεν οδηγούν σε άβολες θερμοκρασίες στο εσωτερικό. Κατά τη διάρκεια ενός έτους η θερμοκρασία των 26°C ξεπεράστηκε μόνο για 46h ενώ η θερμοκρασία της πρόσοψης αυξήθηκε μόνο κατά 8°C πάνω από την εξωτερική θερμοκρασία.

Το κύριο κτήριο της ηλεκτρικής εταιρείας RWE κατασκευάστηκε το 1996 ως ένας κύλινδρος με 29 πατώματα και με μια διπλή γυάλινη πρόσοψη (Company Headquarter Tower in Essen, 1997). Το κτήριο κατασκευάστηκε με κλιματιζόμενες οροφές και πλήρη κλιματιστικά συστήματα. Τα παράθυρα μπορούν να είναι ανοικτά. Η ψύξη και η θέρμανση της οροφής σταματάει αυτόματα σε κάθε δωμάτιο όταν ανοίγει το παράθυρο. Ο χώρος της διπλής πρόσοψης που είναι 50cm εξαερίζεται από ανοίγματα που είναι τοποθετημένα οριζόντια.

Οι μετρήσεις από τον Pasquay (2004) στο συγκεκριμένο κτήριο πραγματοποιήθηκαν από τον Οκτώβρη του 1998 έως το Μάρτη του 2001 σε δύο δωμάτια ένα βόρειο και ένα νότιο που βρίσκονταν στο πρώτο και στο δέκατο έκτο πάτωμα αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο κλιματισμός της οροφής δεν λειτουργούσε και η θερμοκρασία του δωματίου διατηρούνταν κάτω από τους 28° C (Hense, 2000). Γενικά, ο κλιματισμός της οροφής μπορεί να διατηρεί τη θερμοκρασία των δωματίων στο επιθυμητό επίπεδο. Η μέση θερμοκρασία του αέρα στην πρόσοψη είναι κατά 15° C μεγαλύτερη από την μπροστινή πρόσοψη. Οι θερμοκρασίες στο χώρο της πρόσοψης επηρεάζει οριακά τη θερμοκρασία δωματίου θεωρώντας ότι τα παράθυρα είναι κλειστά.

Τα παράθυρα μπορούν να ανοίξουν κάθετα κατά 10cm από το πάτωμα ως την οροφή. Για τον σχεδιασμό του κτηρίου είναι σημαντικό να εκτιμηθεί ο φυσικός εξαερισμός του χώρου της πρόσοψης προκειμένου να υπολογιστεί η θερμοκρασία στο χώρο της πρόσοψης και στο εσωτερικό ενός φυσικά αεριζόμενου κτηρίου. Όπως και στο κτήριο της Siemens η κίνηση του αέρα στην πρόσοψη μετρήθηκε με δυο ανεμόμετρα.

Οι μακροχρόνιες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Pasquay (2004) έδειξαν ότι μια διπλή πρόσοψη είναι λογικό να επιτρέπουν το φυσικό αερισμό στα πολώροφα κτήρια με μεγάλα επίπεδα εξωτερικού θορύβου.

Τα πλεονεκτήματα των διπλών προσόψεων στα κτήρια που μελετήθηκαν είναι:

- Ο άνεμος προστατεύει τα στοιχεία σκίασης στο χώρο της πρόσοψης.
- Μείωση του θορύβου
- Πιθανότητα για νυκτερινό εξαερισμό
- Στα κτήρια με συστήματα εξαερισμού η ηλιοπροστασία λειτουργεί κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες ανέμου και δεν είχε καμία θερμική επίδραση στη θερμοκρασία δωματίου.

Τα μειονεκτήματα των διπλών προσόψεων είναι:

- Υψηλότερες θερμοκρασίες στο μπροστινό παράθυρο από ότι στις πίσω εξωτερικές περσίδες.
- Σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης

- **Μεγαλύτερο κόστος καθαρισμού.**

Ένας εντελώς φυσικός αερισμός στα πολυώροφα κτήρια είναι πιθανός όταν οι εσωτερικές θερμοκρασίες είναι κοντά στην εξωτερική θερμοκρασία. Οι εντελώς γυάλινες προσόψεις μπορούν να προστατευτούν αποτελεσματικά από τα ηλιακά φορτία. Άλλες πιθανές λύσεις όπως η ηλιοπροστασία και η εσωτερική προστασία του ήλιου δεν μπορεί να μειώσει τα ηλιακά φορτία αποτελεσματικά.

Σε ειδικές περιπτώσεις, οι διπλές προσόψεις εξοικονομούν ενέργεια συγκριτικά με τις συμβατικές λύσεις που χρησιμοποιούν πλήρη κλιματιστικά συστήματα. Παρόλα αυτά δεν μπορεί να θεωρηθούν ως ιδανική λύση σε όλες τις περιπτώσεις κτηρίων. Ένα άλλο πεδίο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διπλές προσόψεις είναι η αναστύλωση των παλιών κτηρίων με απλή ή διπλή γυάλινη πρόσοψη. Μια επιπλέον ιδέα στο σχεδιασμό διπλών προσόψεων είναι ο διαχωρισμός του χώρου της πρόσοψης και τα ανοίγματα αερισμού προκειμένου να αποφευχθούν τα θερμικά φορτία αερισμού το καλοκαίρι. Μια άλλη λύση για την αποφυγή των εκτεταμένων ηλιακών φορτίων είναι να δημιουργηθούν μικρότερα παράθυρα στις διπλές προσόψεις αντί για μια πλήρη γυάλινη πρόσοψη. Ένας άλλος ακριβός τρόπος για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση είναι να ανοιχθεί η εξωτερική πρόσοψη πλήρως κατά τη διάρκεια των συνθηκών θέρμανσης.

3.3 Μελέτη φυσικού αερισμού στους ορόφους καταφυγίων.

Από το 1996 οι διοικητικές αρχές του Χόνγκ Κονγκ απαιτούν τη χρήση ορόφου καταφυγίου (refuge floor) στα κτήρια που είναι ψηλότερα από 25 ορόφους ως κύριο στοιχείο στο σχέδιο αντιμετώπισης πυρκαγιάς. Ο όροφος καταφυγής είναι ένα ημιπερατό κενό χαρακτηριστικό σε κάθε ψηλό κτήριο. Ο συγκεκριμένος όροφος πρόκειται να είναι ένα προσωρινό ασφαλές μέρος σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο του κτηρίου όπου κατά τη διάρκεια εκκένωσης του κτηρίου οι άνθρωποι μπορούν να ξεκουραστούν σύντομα πριν επιχειρήσουν να εγκαταλείψουν το κτήριο (Lo and Will, 1997). Σύμφωνα με τον κώδικα κτηρίων του Χόνγκ Κονγκ (MOE: 1996) όταν υπάρχουν περισσότεροι από 20 και 25 ορόφους απαιτείται όροφος καταφυγίου τόσο σε βιομηχανικά όσο και σε μη βιομηχανικά κτήρια. Όταν πάνω από τον πρώτο όροφο υπάρχουν 20 ή 25 πατώματα απαιτείται και ένα δεύτερο πάτωμα διαφυγής. Οι όροφοι περιέχουν μεμονωμένα μηχανικά σχέδια που δεν συνυπολογίζονται σε αυτόν τον αριθμό ορόφων.

Στον όροφο καταφυγίου τουλάχιστον το 50% του ορόφου θα πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένο ως καταφύγιο π.χ. να έχει ανοικτό μέρος. Ο χώρος του καταφυγίου απαιτείται να είναι πλήρως διαχωρισμένος από την εναπομένουσα περιοχή του κτηρίου και

να προστατεύεται από εύφλεκτα υλικά όπως οι τοίχοι και τα πατώματα. Δύο τουλάχιστον από τους εξωτερικούς τοίχους του συγκεκριμένου ορόφου πρέπει να είναι ανοιχτοί ώστε να υπάρχει ικανοποιητικός διασταυρούμενος αερισμός. Ο διασταυρούμενος αερισμός διευκολύνει την κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του χώρου έτι ώστε να διώχνει μακριά τον καπνό που μπαίνει στον όροφο. Ο μη ικανοποιητικός αερισμός θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια του ορόφου καταφυγίου.

Ο καπνός που προέρχεται από φωτιά σε ένα ψηλό κτήριο δημιουργεί θανατηφόρες συνθήκες σε απομακρυσμένες περιοχές από τη φωτιά. Οι άνθρωποι μπορεί να πεθάνουν όταν εισπνεύσουν μεγάλη δόση καπνού ενώ αποτελεί και τη βασική αιτία θανάτου στις πυρκαγιές στα πολώροφα κτήρια (Hartzell GE, 1987). Κατά συνέπεια είναι σημαντικό να μπορεί ο καπνός να απομακρυνθεί από τα συστήματα εκκένωσης και κατά συνέπεια, από τους ορόφους καταφύγια (Lo, 1998).

Στο μέσο της δεκαετίας του 1970 ο Liu (1975) δοκίμασε σε μια αεροσύραγγα ένα μοντέλο κτηρίου με δύο εξωτερικά ανοίγματα στους εξωτερικά αντίθετους τοίχους. Οι κατανομές της πίεσης του ανέμου στο κτήριο με τα ανοίγματα καλυμμένα ή ακάλυπτα εκτιμήθηκε όταν ο άνεμος φυσούσε σε φυσιολογική πρόσπτωση πάνω στο κτήριο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν τα καλύμματα ήταν ακάλυπτα ο αέρα εισερχόταν μέσω στο κτήριο.

Στα τέλη της δεκαετίας του '90 πραγματοποιήθηκε από τον Yuen και τους συνεργάτες του (1999) μια μελέτη με CFD που απέδειξε ότι τα θερμά αέρα που είναι έξω από το κτήριο εκτρέπονται από μια ροή αέρα που φυσάει πάνω στο κτήριο και εισέρχεται στον όροφο του καταφυγίου ακριβώς πάνω από το επίπεδο που φεύγει ο καπνός.

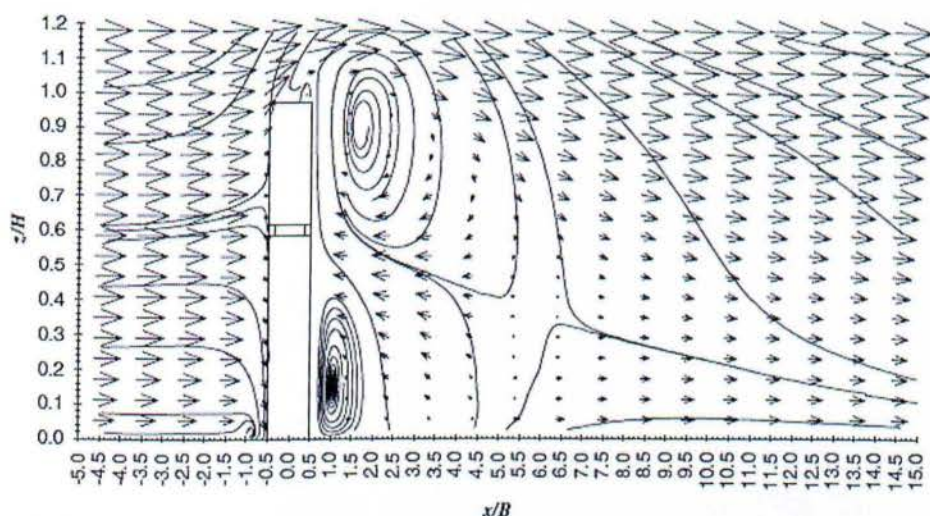
Ο Cheng και οι συνεργάτες του (2007) πραγματοποίησαν μια μελέτη με σχέδια ροής του ανέμου στα επιλεγμένα κάθετα και οριζόντια επίπεδα στο χώρο του καταφυγίου που βρίσκεται σε ένα ψηλό κτήριο. Η ροή του ανέμου γύρω από ένα τετράγωνο ψηλό κτήριο μελετήθηκε για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Η επαλήθευση των αριθμητικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τα αποτελέσματα πειραμάτων που έγιναν σε αεροσύραγγα για συνθήκες φυσιολογικής πρόσπτωσης πάνω στο κτήριο.

3.3.1 Ο άνεμος πνέει σε κανονική πρόσπτωση στο κτήριο (Wind-induced cross natural ventilation)

Για τη μελέτη αυτής της περίπτωσης πραγματοποιήθηκαν τόσο πειράματα σε αεροσύραγγα όσο και προσομοιώσεις CFD. Οι μετρήσεις θερμού νήματος είναι γνωστό ότι είναι ανακριβείς σε συνθήκες ανακυκλοφορίας της ροής όπου η κύρια ταχύτητα του ανέμου

προσανατολίζεται στην κατεύθυνση του αισθητήρα μέτρησης με γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη των 30° (Bruun,1995, Jørgensen FE.,2002). Εντούτοις, αποτελέσματα από κάποιες μελέτες σχετικές με τη ροή του ανέμου γύρω από κτήρια έδειξαν ότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις μπορούν να αποδώσουν τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν στο διαχωρισμό της ροής του αέρα πάνω από τη γωνία του πάνω ορόφου και στις γωνίες του εξωτερικού τοίχου και την ανακυκλοφορία της ροής μετά από το σημείο διαχωρισμού και στην αδύναμη περιοχή του κτηρίου.

3.3.2 Ροή ανέμου σε επιλεγμένο κάθετο επίπεδο



Σχήμα 9: Υπολογιστικός προσδιορισμός του διανύσματος της ταχύτητας και των ροϊκών γραμμών σε κάθετο επίπεδο που κόβει στη μέση το πάχος του κτηρίου. (Cheng και συν. 2007).

Από το σχήμα 9 φαίνεται ότι όταν ο άνεμος προσπίπτει στην μπροστινή πρόσοψη του κτηρίου παρατηρείται σημείο ανακοπής του αέρα στο μπροστινό τοίχωμα σε απόσταση $0.73 H$ (30° πάτωμα). Σε μικρότερες τιμές από αυτό το σημείο ο αέρας μειώνεται στην πρόσοψη του κτηρίου σε πιο χαμηλά επίπεδα. Στο πίσω τοίχωμα του εξεταζόμενου κτηρίου ένα επιπλέον σημείο ανακοπής παρατηρείται στο 22° πάτωμα σε απόσταση $0.52 H$. Πάνω από αυτό το σημείο ο άνεμος φτάνει στα ψηλότερα επίπεδα του κτηρίου.

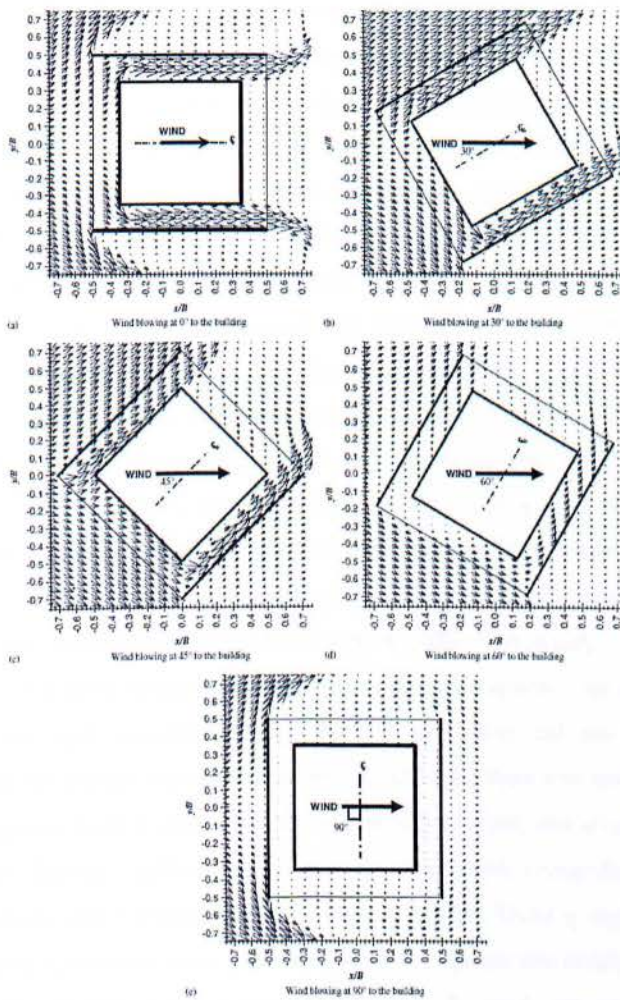
Καθώς η ροή του ανέμου κινείται κάτω από το σημείο ανακοπής στον μπροστινό τοίχωμα αυτός εισέρχεται στον όροφο καταφύγιο και παρατηρείται περιστροφή της ροής

αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού κάτω από την οροφή και στο μισό της διατομής του ορόφου. Από την άλλη ενώ ο άνεμος φυσάει κατά μήκος του πίσω τοίχου η χαμηλή ταχύτητα του αέρα ξανά-εισέρχεται στον όροφο κοντά στο σημείο της εσωτερικής απόφραξης και σχηματίζει ασθενή ανακυκλοφορία με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Οι κατανομές της πίεσης του αέρα υπολογίζονται από τους συντελεστές πίεσης χρησιμοποιώντας μια πίεση αναφοράς για το επίπεδο του ορόφου. Η κατανομή της πίεσης εξαιτίας της ροής του αέρα που εισέρχεται και ανακυκλοφορεί στον όροφο του καταφυγίου προκαλείται λόγω των ανοιγμάτων στο μπροστινό και πίσω μέρος αντίστοιχα.

3.3.3 Ροή ανέμου σε επιλεγμένο οριζόντιο επίπεδο

Ο διαχωρισμός της ροής του ανέμου πραγματοποιείται στις πλευρικές γωνίες του κτηρίου. Πίσω από το κτήριο υπάρχει ένα μεγάλο κενό που εκτείνεται σε μια απόσταση μερικού πάχους του κτηρίου. Η ανακυκλοφορία της ροής παρατηρείται σε αυτήν την περιοχή του τοιχώματος και προκαλείται από το κύριο επίπεδο ροής υπό τη μορφή περιστρεφόμενης δίνης.



Σχήμα 10: Υπολογιστικά υπολογισμένο διάνυσμα ταχύτητας στο οριζόντιο επίπεδο στο μέσο του ορόφου καταφυγίου σύμφωνα με τις γωνίες του ανέμου: α) 0° , β) 30° , γ) 45° , δ) 60° ε) 90° (Cheng και συν. 2007).

Στο Σχήμα 10 φαίνεται η ροή μέσω στον ορόφο-καταφυγίο σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Στο κέντρο της μπροστινής πρόσοψης στην εσωτερική απόφραξη παρατηρείται ένα στάσιμο σημείο ροής. Από αυτό το σημείο ο άνεμος εισέρχεται στον όροφο και ρέει στα πλαϊνά ενώ εν συνεχεία διαφεύγει από τις πλευρές. Η ροή διοχετεύεται σε δύο διαδρομές που σχηματίζονται από τους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους του ορόφου του καταφυγίου. Όλες οι γωνίες όπως φαίνεται από το Σχήμα 10 αφήνουν την είσοδο μιας ροής μέσα στο χώρο του καταφυγίου από τα μπροστινά και τα πίσω ανοίγματα. Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου έχει σαν αποτέλεσμα ο άνεμος να εισέρχεται στο άνοιγμα του θαλάμου αέρα με μεγαλύτερες ταχύτητες.

Από την κατανομή της πίεσης που υπολογίστηκε αποδείχθηκε ότι και για τις τρεις γωνίες πρόσπτωσης του αέρα. Το προσήνεμο άνοιγμα βρίσκεται υπό θετική πίεση, ενώ το υπήνεμο άνοιγμα υπό αρνητική. Επιπλέον, η αρνητική πίεση είναι μεγαλύτερη όταν το η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με 45° . Το γεγονός αυτό εξηγεί το γιατί η ροή εισέρχεται με μεγαλύτερη ταχύτητα όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι 45° . Η είσοδος της ροής μέσω του προσήνεμου ανοίγματος τότε οι ροές μέσω των δύο πλευρικών διαδρομών σχηματίζονται ανάμεσα στον κύριο πυρήνα και τους δύο πλαϊνούς τοίχους. Η ροή είναι δρομολογημένη εκτός από τον μερικό διαχωρισμό της ροής στη γωνία του πυρήνα στην πιο προσήνεμη πλευρά του και με μεγαλύτερες ταχύτητες στην πιο υπήνεμη ροή του.

Όταν η γωνία ροής του αέρα είναι 60° το υπήνεμο πλευρικό τοίχωμα σταδιακά εμποδίζει την είσοδο του ανέμου στο χώρο του καταφυγίου. Υπάρχει λιγότερη ροή μέσω του χώρου του καταφυγίου και η μεγαλύτερη ροή παρατηρείται στην προσήνεμη πλευρά του πυρήνα. Όταν ο αέρας ρέει με 90° η ροή του αέρα εμποδίζεται εντελώς από το υπήνεμο πλευρικό τοίχωμα και η ροή μέσω του καταφυγίου παρασύρεται περισσότερο από τα πλάγια μέσω των δύο ανοιγμάτων που τώρα είναι παράλληλα στη ροή.

Τα αποτελέσματα του Cheng και των συνεργατών του αφορούν σε όλες τις γωνίες ροής του αέρα, μερικές από τις ροές του αέρα μέσα από τον όροφο του καταφυγίου και μερικά την ανακυκλοφορία του αέρα στις περιοχές πίσω από τον πυρήνα. Η ροή κοντά στην περιοχή του πυρήνα είναι σχεδόν στάσιμη όταν ο αέρας φυσάει με κανονική κατεύθυνση στο κτήριο. Επίσης σχεδόν στατική ροή παρατηρήθηκε στους πυρήνες όταν ο άνεμος ρέει παράλληλα στους πλευρικούς τοίχους του κτηρίου. Όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μικρή και αυτή προσπίπτει κανονικά στο πλευρικό τοίχωμα του κτηρίου υπάρχει κίνδυνος από τη συσσώρευση καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Σε αυτήν την περίπτωση ο καπνός διαχέεται αμέσως σε ένα επίπεδο κάτω από τον όροφο-καταφύγιο στο μέσο του κτηρίου στην υπήνεμη πλευρά επάγοντας ακόμα και ανακυκλοφορία της ροής. Εξαιτίας των συνθηκών στασιμότητας στην περιοχή ροής, ο καπνός που μπαίνει στην περιοχή είναι πιθανό να είναι επικίνδυνος στον όροφο του καταφυγίου. Επιπλέον, ο κίνδυνος από τον καπνό είναι μεγαλύτερος όταν η γωνία ροής του αέρα είναι 90° . Αν ο καπνός διαχέεται στους πυρήνες η σχεδόν στάσιμη ροή μπορεί να προκαλέσει την υπερθέρμανση του καπνού.

3.4. Φυσικός αερισμός σε ευήλια διαμερίσματα πολυώροφων κτηρίων.

Σε πολλές χώρες όπως στην Ιαπωνία υπάρχουν διαμερίσματα σε πολυώροφα κτήρια που έχουν πολύ καλό φωτισμό και ονομάζονται Void. Σε ένα τέτοιο διαμέρισμα υπάρχει ένας κοινός διάδρομος στην εσωτερική περιφέρεια. Οι θερμοσίφωνες αερίου συχνά τοποθετούνται σε ανοικτούς διαδρόμους και τα απαέρια εξέρχονται μέσα στο συγκεκριμένο

διαμέρισμα. Για να διατηρηθεί μέσα στο Void η ποιότητα του εσωτερικού αέρα απαιτείται να υπάρχει φυσικός αερισμός.

Ο μηχανικός αερισμός με ανεμιστήρες δεν είναι ρεαλιστικός εξαιτίας του μεγάλου χώρου αλλά ο φυσικός αερισμός έχει το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης ενέργειας αν το Void μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αγωγός παροχής και εξάτμισης.

Τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα στον ευήλιο ή στον εσωτερικό χώρο έχουν μελετηθεί. Ο Walker και οι συνεργάτες του (1993) διατύπωσε την άποψη ότι πολλές ασάφειες και κενά παραμένουν στους κανονισμούς που σχετίζονται με τα κατοικήσιμα κτήρια που αερίζονται φυσικά μέσω των αυλών. Ο Hayakawa (1988) και ο Kobayashi (1989) πραγματοποίησαν δοκιμές σε αεροσύραγμα προκειμένου να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά της πρόσπτωσης του αέρα. Ο Wong και οι συνεργάτες του (1996) πραγματοποίησαν επίσης μελέτη σε αεροσύραγμα προκειμένου να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά του αερισμού τεσσάρων χαρακτηριστικών κτηρίων στη Σιγκαπούρη.

Ο Kotani και οι συνεργάτες του (2004) μελέτησαν τις λεπτομέρειες των χαρακτηριστικών ροής, τις θερμοκρασίες αέρα ή τους ρυθμούς αερισμού στους ηλιόλουστους και εσωτερικούς χώρους σε διαφορετικές συνθήκες. Όμως ο ρυθμός αερισμού από τη δύναμη του ανέμου και το φαινόμενο ακινησίας μεταβάλλεται με το χρόνο και ο ρυθμός αερισμού εξαιτίας του αέρα γενικά δεν ήταν σταθερός. Κατά συνέπεια, η συγκέντρωση των ρύπων παρομοίως ήταν ασταθής γενικά. Για να εξακριβωθεί πόσο μεγάλο άνοιγμα απαιτείται η κατανομή της συχνότητας των ρύπων πρέπει να εξεταστεί. Καθώς η συγκέντρωση των ρύπων που αποβάλλεται στο Void δεν είναι γραμμική ως προς το ρυθμό αερισμού του, θα πρέπει να υπολογιστούν οι διαφορετικές συγκεντρώσεις των ρύπων από τους διαφορετικούς ρυθμούς αερισμού χρησιμοποιώντας διαφορετικές εξισώσεις ισοζύγιου μάζας για τους ρύπους. Αυτού του είδους οι υπολογισμοί χρειάζονται διαφορετικά δεδομένα αερισμού έτσι ώστε οι ρυθμοί αερισμού να μπορούν να υπολογιστούν από τα δεδομένα του αέρα πριν τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων.

Ως μια απλή μέθοδος για τον υπολογισμό του φυσικού αερισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Bernoulli. Στη συγκεκριμένη εργασία ο ρυθμός αερισμού οφείλεται τόσο στη ροή του αέρα όσο και στη θερμότητα ενώ γίνεται προσπάθεια να εξεταστεί η εφαρμοσιμότητα της τροποποιημένης εξίσωσης Bernoulli. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ένα κλιμακωτό μοντέλο ενός διαμερίσματος σε ένα πολώροφο κτήριο με Void να είναι τοποθετημένο στον όροφο μιας αεροσύραγγας με ατμοσφαιρικά όρια και θερμότητα να παράγεται από σύρματα νικελίου χρωμίου. Οι ρυθμοί αερισμού στις διάφορες συνθήκες του Void μετρήθηκαν με την τεχνική ανίχνευσης αερίου και η κατανομή της θερμοκρασίας με πολλά διαφορετικά θερμοστοιχεία. Ο μετρούμενος ρυθμό αερισμού και η κατανομή της θερμοκρασίας στο Void συγκρίθηκε με αυτά που υπολογίστηκαν.

Οι μετρήσιμες θερμοκρασίες αποδείχθηκε ότι συμφωνούν με αυτές που υπολογίστηκαν στις περισσότερες θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά οι υπολογισμοί δεν μπορούν να προβλέψουν την μέγιστη θερμοκρασία στο Void. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αέρας θεωρείται πως ρέει σε μια κατεύθυνση και η ανακυκλοφορία της ροής δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Παρόλα αυτά υπολογίστηκαν δυο θερμοκρασίες στην κορυφή του Void με τη χρήση δυο μοντέλων οι οποίες ήταν σε καλή συμφωνία με τη μετρούμενη θερμοκρασία. Καθώς η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη στην κορυφή του Void η συμφωνία αυτή εξασφαλίζει την εγκυρότητα των υπολογισμών για τον υπολογισμό της μεγαλύτερης θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας μπορούν να προσδιοριστούν στα επόμενα:

1. Η ροή ανακυκλοφορίας στο χαμηλότερο σημείο του διαμερίσματος και ένα πλήθος αντιστρεπτών ροών από το εξωτερικό προς το πάνω μέρος του Void παρατηρήθηκαν μέσω της προσομοίωσης της ροής.
2. Η θερμοκρασία στο πάνω μέρος του διαμερίσματος είχε αρνητική συσχέτιση με την ταχύτητα του ανέμου και θετική με το ρυθμό παραγωγής θερμότητας. Ο ρυθμός αερισμού είχε θετικό συσχετισμό τόσο με την ταχύτητα του αέρα όσο και με τους ρυθμούς παραγωγής θερμότητας.
3. Οι υπολογιστικές μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στη μελέτη του Kotani και των συνεργατών του (2003) είναι αξιόπιστες ως προς τον προσδιορισμό της κάθετης κατανομής της θερμοκρασίας και το ρυθμό αερισμού του Void.
4. Το πολυζωνικό μοντέλο έχει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με το μονοζωνικό
5. Οι μέθοδοι υπολογισμού τείνουν να υπερεκτιμούν το ρυθμό αερισμού αλλά αυτό μπορεί να οφείλεται σε λάθη στον υπολογισμό των ρυθμών παραγωγής θερμότητας.
6. Οι απαιτήσεις ομοιότητας δεν καλύφθηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις και για αυτό τα αποτελέσματα δεν εφαρμόζονται αναγκαστικά σε όλη την κλίμακα του κτηρίου.
7. Πρακτικά το υπολογιστικό μοντέλο θα πρέπει να αντανakλά την πραγματική κατάσταση. Για παράδειγμα μπορεί τα εσωτερικά ανοίγματα να σχεδιαστούν στους πάνω ορόφους ή να χωριστούν τα ανοίγματα.
8. Οι υπολογιστικές μέθοδοι πρέπει να επιβεβαιώνονται από μετρήσεις πλήρους κλίμακας επειδή το σχήμα του κτηρίου σε μικρή κλίμακα θεωρείται απλοποιημένο.

3.5 Φυσικός αερισμός σε ηλιακές καμινάδες.

Στις μεσογειακές χώρες η ηλιακή ακτινοβολία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες είναι πολύ έντονη και η θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να φτάσει και τους 40° C. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τους περιορισμούς των συμβατικών ενεργειακών πηγών σε όρους κόστους και διαθεσιμότητας καθώς και η αυξανόμενη ανησυχία για τα περιβαλλοντικά ζητήματα οδήγησαν σε αυξανόμενο ενδιαφέρον για το σχεδιασμό παθητικών κτηρίων. Η παθητική ηλιακή θέρμανση κατά την οποία όλο ή μέρος του κτηρίου είναι ηλιακός συλλέκτης έχει μελετηθεί εκτενώς κάτι που δεν έχει γίνει για την ηλιακή ψύξη. Ανάμεσα σε όλες τις εφαρμογές αυτών των τεχνολογιών, οι πλέον κατάλληλες για τα ζεστά υγρά κλίματα των μεσογειακών περιοχών είναι οι ηλιακές καμινάδες που είναι μια αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός κτηρίου και επίσης για τον φυσικό αερισμό που βοηθά στη μείωση της υγρασίας και την επίτευξη άνετων συνθηκών στο εσωτερικό του χώρου. Μια ηλιακή καμινάδα παράγει την κίνηση αέρα λόγω θερμικών δυνάμεων στις οποίες ο ζεστός αέρας φτάνει και εξέρχεται από το πάνω μέρος της καμινάδας. Η εφαρμογή τους στα κτήρια μπορεί να αποδώσει τον απαιτούμενο αερισμό ενώ παράλληλα καλύπτει μέρος των απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη. Η ροή του θερμού αέρα εξαρτάται από τη διαφορά πυκνότητας του αέρα ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό της ηλιακής καμινάδας.

Προκειμένου να αυξηθεί η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας και ο ρυθμός αερισμού μπορεί να θεωρηθεί η αντικατάσταση του νότιου τοίχου της ηλιακής καμινάδας με γυαλί, να βαφτούν άσπροι οι εσωτερικοί υπόλοιποι τοίχοι και να μονωθεί το εξωτερικό της,

Οι ηλιακές καμινάδες έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές και για διαφορετικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένου της παθητικής ηλιακής θέρμανσης και ψύξης των κτηρίων, τον αερισμό και την παραγωγή ισχύος (Barozzi και συν., 1992, Bansal και συν. 1993, Gan και συν. 1998, Afonso και συν. 2000). Πειραματικές και θεωρητικές μελέτες έχουν γίνει για τον καθορισμό του μεγέθους της ηλιακής καμινάδας και έχουν επιβεβαιώσει ότι η ταχύτητα της ροής του αέρα και η θερμοκρασία διαφόρων τμημάτων είναι συνάρτηση του κενού ανάμεσα στον αποροφητήρα και στους τοίχους και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Παρά το γεγονός ότι η συμπεριφορά των ηλιακών καμινάδων στη γενική τους μορφή έχει μελετηθεί και πιστοποιηθεί θεωρητικά και πειραματικά (Chen και συν., 2003, Ong 2003, Ong και συν., 2003), τα τοιχώματα της ηλιακής καμινάδας έχουν μελετηθεί θεωρητικά και όχι πειραματικά (AbulNaga και συν., 2000, Chantawong και συν., 2006). Ο AbulNaga και οι συνεργάτες του (2000) μελέτησαν θεωρητικά combined wall-roof μιας ηλιακής καμινάδας ώστε να βελτιωθεί ο νυκτερινός αερισμός στα κτήρια. Προκειμένου να πετύχουν τη βέλτιστη διαμόρφωση του τοιχώματος της ηλιακής καμινάδας ανέπτυξαν ένα υπολογιστικό πρόγραμμα. Ο Chantawong και οι συνεργάτες του (2006) πραγματοποίησαν μια πειραματική και αριθμητική μελέτη της θερμικής απόδοσης του γυάλινου τοιχώματος της ηλιακής καμινάδας.

Η ερευνητική δουλειά μπορεί να διεξαχθεί σύμφωνα με το Bacharouli και τους συνεργάτες του (2007) σε διάφορα στάδια θεωρώντας διαφορετικές διαμορφώσεις με διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας. Σε πρώτο επίπεδο ο εξωτερικός αέρας εισέρχεται στην ηλιακή καμινάδα από το κάτω μέρος και φεύγει από την κορυφή χωρίς να υπάρχει σύνδεση με το εσωτερικό του δωματίου. Με αυτήν τη διαμόρφωση η έρευνα εστιάζεται στην αλλαγή του πεδίου ροής και της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοιχώματος της ηλιακής καμινάδας έτσι ώστε να γίνει αντιληπτή η συμπεριφορά του συστήματος κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σε ένα δεύτερο στάδιο θα εφαρμοστούν διάφορες διαμορφώσεις όπου ο αέρας θα ρέει από ή προς το εσωτερικό του δωματίου μέσω των ανοιγμάτων των τοιχωμάτων. Με αυτές τις διαμορφώσεις πρόκειται να μελετηθεί η απόδοση της ηλιακής καμινάδας εστιάζοντας στην ικανότητα του συστήματος να μειώνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του δωματίου προσφέροντας θερμική άνεση και αερισμό είτε με εξαγωγή του αέρα ή με ανακύκλωση του αέρα.

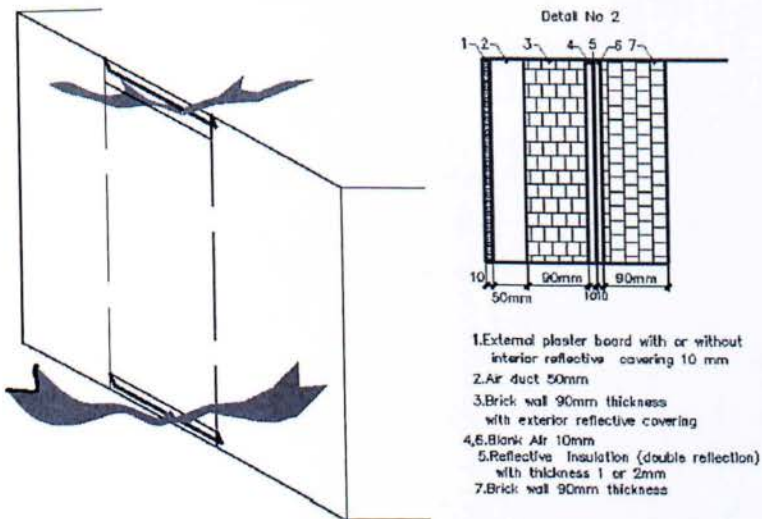
Στην εργασία του Bacharouli και των συνεργατών του (2007) παρουσιάζεται μια αριθμητική μελέτη των θερμορευτοδυναμικών φαινομένων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του τοιχώματος των ηλιακών καμινάδων. Το μοντέλο που αναπτύξαν αντιμετώπιζει το πρόβλημα ως φυσική συναγωγή ανάμεσα σε δύο κάθετες παράλληλες πλάκες και λύνει τις κυρίαρχες ελλειπτικές εξισώσεις σε διδιάστατο πλέγμα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελέγχου όγκου. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι συνθήκες ροής στο εσωτερικό της ηλιακής καμινάδας που χαρακτηρίζονται από υψηλή τύρβη εστίασαν ιδιαίτερα στη σωστή περιγραφή της τύρβης και για αυτό δοκιμάστηκαν διάφορα μοντέλα τυρβώδους ροής. Στο τοίχωμα των ηλιακών καμινάδων που μελετήθηκαν τα κανάλια του αέρα είχαν πολύ μικρό πάχος και η επιφάνεια της ηλιακής πρόσπτωσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις ηλιακές καμινάδες παλιότερου τύπου. Η διαδικασία που παρουσιάζεται είναι γενική και μπορεί να εφαρμοστεί για την προσομοίωση διαφορετικών ηλιακών καμινάδων με διαφορετικές αναλογίες διαστάσεων και συνθήκες. Τα πρώτα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο αναπαράγει ρεαλιστικά τη συμπεριφορά του συστήματος για διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

3.5.1 Πειραματική διαδικασία

Στα πλαίσια της εργασίας του Bacharouli και των συνεργατών του (2007) κατασκευάστηκε ένα δωμάτιο με διαστάσεις 4x6x4m και του οποίου η οροφή καλύπτονταν με ρωμαϊκά κεραμίδια και με ένα σύστημα εμπόδισης της αντανάκλασης.



Σχήμα 11: Το δωμάτιο που δημιουργήθηκε με ηλιακές καμινάδες (Bacharoulis και συν., 2007).



Σχήμα 12: Η ροή του αέρα μέσω του τοιχώματος με ηλιακή καμινάδα και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες.(Bacharoulis και συν. 2007)

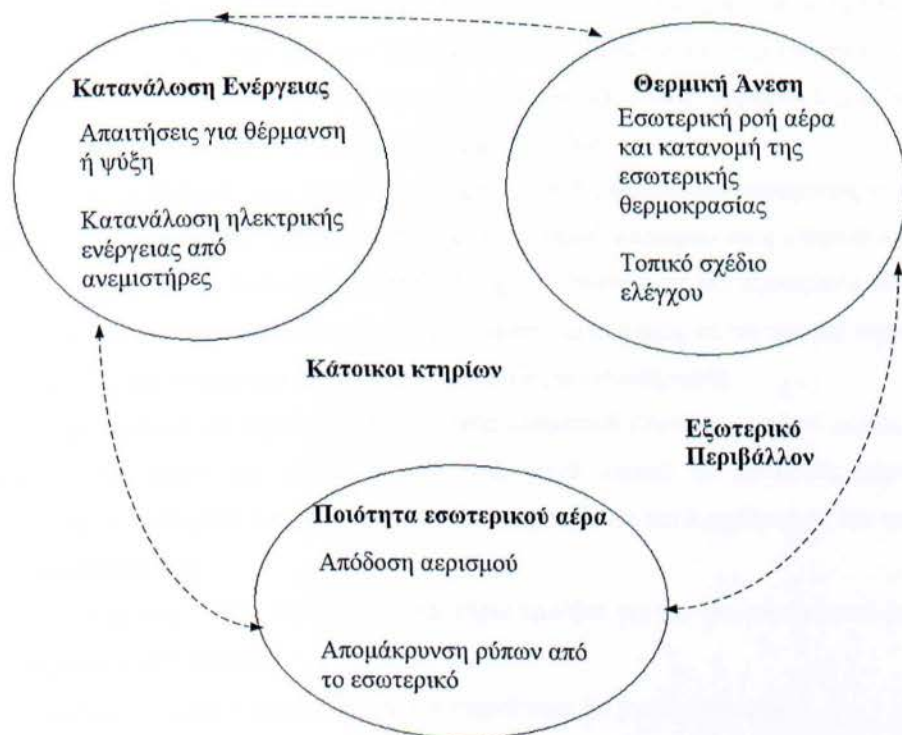
Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της ροής μέσω του τοιχώματος των ηλιακών καμινάδων και η κατασκευή τους φαίνεται μαζί με το μέγεθος του κενού αέρα. Σε αυτό το πρώτο στάδιο ο αέρας από τον εξωτερικό χώρο εισέρχεται στην ηλιακή καμινάδα από το κάτω μέρος και διαφεύγει από την κορυφή ενώ δεν υπάρχει σύνδεση με το εσωτερικό. Για τις μετρήσεις στη συγκεκριμένη διαμόρφωση του τοιχώματος των ηλιακών καμινάδων ανοίχθηκαν κατά μήκος της καμινάδας μικρές τρύπες έτσι ώστε οι μετρήσεις της ταχύτητας και της θερμοκρασίας να είναι κοντά στην είσοδο, κοντά στην έξοδο και στο μέσο της ηλιακής καμινάδας.

Σε αυτήν την εργασία η έρευνα εστιάστηκε στη μελέτη των ρευστοδυναμικών φαινομένων που υπάρχουν στο εσωτερικό τοίχωμα των ηλιακών καμινάδων που έχουν κατασκευαστεί και τοποθετηθεί σε ένα μικρής κλίμακας δωμάτιο δοκιμής. Οι κυρίαρχες ελλειπτικές εξισώσεις λύθηκαν σε διδιάστατο πλέγμα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελέγχου όγκου. Η διαδικασία που αναπτύχθηκε ήταν γενική και μπορεί να εφαρμοστεί στην προσομοίωση των ηλιακών καμινάδων διαφορετικών διαστάσεων και για διαφορετικές συνθήκες.

Για την αριθμητική προσομοίωση της τυρβώδους ροής στο τοίχωμα της ηλιακής καμινάδας δοκιμάστηκαν έξι μοντέλα τύρβης και αποδείχθηκε ότι η χρήση του μοντέλου $k-\epsilon$ και Low Re διασφαλίζει την πρόβλεψη ακριβούς ταχύτητας και των θερμοκρασιακών προφίλ όπως προβλέπεται από τη θεωρία.

4. Μέθοδοι προσομοίωσης σε κτήρια με φυσικό αερισμό

Όπως ήδη έχει αναφερθεί ο φυσικός αερισμός των κτηρίων μπορεί και προσδίδει το απαραίτητο ποσό φρέσκου αέρα μέσα σε ένα κτήριο σε δεδομένες καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Η διαδικασία του αερισμού περιλαμβάνει την εισαγωγή του αέρα και την απομάκρυνσή του από τα ανοίγματα με τρόπο ώστε να ανακυκλώνεται και να εμποδίζεται η συμπύκνωση του σε υδρατμούς εσωτερικά του χώρου.



Σχήμα 13: Το κτήριο: Ένα ολοκληρωμένο σύστημα

Τα κτήρια τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες καταναλώνουν το 40 με το 50% της πρωτογενούς ενέργειας (Lindammet and Orme 1998) για αερισμό και δροσισμό των κτιρίων. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο η αμερικανική κυβέρνηση έθεσε σα στόχο στη Λευκή Βίβλο της Ενέργειας τη μείωση των απωλειών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 60% μέχρι το 2050. Η ενεργειακή απόδοση στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των κτηρίων μπορούν να έχουν σημαντική συνεισφορά στη μείωση του συνολικού αποτυπώματος CO₂.

Ο αερισμός του κτηρίου παίζει σημαντικό ρόλο στην παροχή καλής ποιότητας αέρα και θερμικής άνεσης στους κατοίκους του κτηρίου. Ο αερισμός του κτηρίου μπορεί να επιτευχθεί όπως ήδη έχει αναφερθεί με φυσικό, μηχανικό και υβριδικό αερισμό.

Τα συστήματα αερισμού, ανεξαρτήτως του αν είναι φυσικά ή μηχανικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα στο εσωτερικό ενός κτηρίου, το σχεδιασμό της κατανομής του αέρα προκειμένου να επιτυγχάνεται θερμική άνεση, καθώς και για την παθητική θέρμανση ή ψύξη σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες.

Ο κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος αερισμού μπορεί να αποδώσει αποδεκτή ποιότητα αέρα και να ικανοποιήσει τις ανάγκες για θερμική άνεση ανεξαρτήτως κλιματικών συνθηκών. Το χειμώνα, ο σχεδιασμός μπορεί να ελαχιστοποιήσει περίσσεια αερισμού διασφαλίζοντας παράλληλα την απαραίτητη ποιότητα του στο εσωτερικό του κτηρίου, ώστε να καλύπτει τις ανάγκες των ενοίκων. Στον καλοκαιρινό σχεδιασμό το ζητούμενο είναι να υπάρχει θερμική άνεση για τους ενοίκους για να αποφεύγεται η υπερθέρμανση π.χ. ο έλεγχος των θερμοκρασιών δωματίου, το ηλιακό και θερμικό κέρδος.

Κατά τον Kukadia και τους συνεργάτες του (1998), σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό το φυσικού αερισμού ενός κτηρίου και των επιμέρους χώρων αυτού είναι η δυνατότητα ελέγχου, ο εσωτερικός και εξωτερικός θόρυβος, η εσωτερική και εξωτερική μόλυνση του αέρα, καθώς και οι οσμές, οι κανονισμοί ασφάλειας και πυρκαγιάς, και το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης.

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αποτελεσματικό σύστημα φυσικού αερισμού θα πρέπει να θεωρηθούν και να εξεταστούν υπό κοινή σκοπιά τα ακόλουθα σημεία: η στεγανότητα του κτηρίου, ο καλός αερισμός για τους ενοίκους και ο σχεδιασμός του φυσικού αερισμού (BRE,1997).

Ο Marmont (2003) καθόρισε ότι τα κύρια εμπόδια για τον αποτελεσματικό αερισμό στα κτήρια στις ΗΠΑ είναι:

- η έλλειψη δυναμικών αποφάσεων των κυβερνήσεων, το μικρό ενδιαφέρον
- η μικρή διαφήμιση για την καινοτόμα ανάπτυξη της τεχνολογίας,
- το συντηρητικό εθνικό σύστημα παραγωγής ενέργειας και λειτουργία του, και
- η έλλειψη των αυτόνομων προϊόντων για δυναμικούς χρήστες συγκριτικά με την αμερικανική αγορά.

Τα καινοτόμα προϊόντα σχεδιασμού με τη μέση επαγγελματική κρίση αποτελούν τα κύρια συστατικά της επίτευξης του στόχου «συμπαγές κτήριο –αεριζόμενο κτήριο». Ειδικότερα ο προηγμένος σχεδιασμός της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορεί να δημιουργήσει την επιθυμητή απόδοση του φυσικού αερισμού στον πελάτη και επίσης να ενισχύσει την ευαισθητοποίηση της αγοράς.

4.1 Διαδικασία Σχεδιασμού

Στα κτήρια με φυσικό αερισμό, λόγω των δυνάμεων του αέρα και της θερμικής άνωσης, οι οποίες αλληλεπιδρούν προκειμένου να δημιουργηθούν οι ροές αερισμού, πρέπει να

αναπτυχθούν δύο ξεχωριστές στρατηγικές αερισμού, για το καλοκαίρι και τον χειμώνα αντίστοιχα.

Το κύριο χαρακτηριστικό για το σχεδιασμό του συστήματος αερισμού το χειμώνα είναι ο έλεγχος της ποιότητας του αέρα στο εσωτερικό. Ο Etheridge (2002) καθόρισε πως η βασική σχεδιαστική διαδικασία για τη χειμερινή περίοδο μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα βήματα:

- Απόφαση για τον ελάχιστο ρυθμό αερισμού για την ποιότητα του αέρα (έλεγχος οσμών)
- Καθορισμός της χειρότερης περίπτωσης για τις συνθήκες (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία, υγρασία κτλ).
- Υπολογισμός της ελάχιστης περιοχής του ανοίγματος για να ικανοποιούνται οι παραπάνω συνθήκες.

Η διαδικασία σχεδιασμού για την περίοδο του καλοκαιριού καθορίστηκε και πάλι από τον Etheridge (2002) και συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

- Καθορισμός της αποδεκτής μέγιστης θερμοκρασίας
- Υπολογισμός του ρυθμού αερισμού χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο δυναμικής απόκρισης (Kendrick, 1993) για να εξασφαλιστεί πως η θερμοκρασία δεν θα ξεπερνά αυτό το μέγιστο.
- Επιλογή της «χειρότερης περίπτωσης» ως μηδενική ταχύτητα ανέμου, έτσι ώστε η πίεση στη συστοιχία να είναι η μόνη φυσική δύναμη που οδηγεί σε ροή αερισμού.
- Υπολογισμός της μέγιστης περιοχής των ανοιγμάτων κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες.

Ο Ainsley (1999) εκτίμησε την επίδραση του ανέμου στη θερμική άνεση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός σπιτιού στην Αυστραλία βασιζόμενος στα διαθέσιμα μηνιαία κλιματικά δεδομένα για την περιοχή, αποδεικνύοντας ότι η θερμική άνεση μπορεί να επιτευχθεί με φυσικό αερισμό όταν η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι μεγαλύτερη και η σχετική υγρασία είναι μικρότερη από τα αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της νύκτας στα θερμά τροπικά κλίματα.

Επιπλέον από το σχεδιασμό των συνθηκών συχνά υπάρχουν αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στο βασικό σχεδιασμό για τις καλοκαιρινές και για τις χειμερινές συνθήκες όπως:

- Τυχαίες διαρροές
- Ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου,
- Αστάθειες εξαιτίας τυρβώδους ροής του ανέμου
- Εξειδικευμένες συνθήκες όπως π.χ. πυρκαγιές και εκρήξεις αερίων.

Για παράδειγμα οι τυχαίες διαρροές έχουν διάφορες επιπτώσεις στην απόδοση των κτηρίων. Ο αερισμός που φτάνει από τη ροή μέσω τυχαίων ανοιγμάτων είναι γνωστός ως διήθηση (Wilson 1961).

4.1.1 Ανάλυση και εργαλεία σχεδιασμού

Προσιτές και έγκυρες αναλυτικές μέθοδοι των συστημάτων φυσικού αερισμού μπορούν να προσφέρουν στους μηχανικούς τα απαραίτητα εργαλεία όσον αφορά στην απόδοση του συστήματος αερισμού που είναι επίσης ένας αποφασιστικός παράγοντας επιλογής για το σύστημα σχεδιασμού.

Ο αέρας που περνάει μέσα από το κέλυφος του κτηρίου ονομάζεται envelope flow. Με τον όρο κέλυφος του κτηρίου εννοείται οτιδήποτε χωρίζει το εσωτερικό του κτηρίου από το εξωτερικό συμπεριλαμβανομένου των πορτών, των παραθύρων, τους τοίχους τα πατώματα και τη μόνωση.

Η envelope flow είναι ο ρυθμός με τον οποίο ο αέρας εισέρχεται και εξέρχεται από το κτήριο (Etheridge και Sandberg, 1996). Αυτό είναι το πρωταρχικό μέλημα για το σχεδιασμό του φυσικού αερισμού όπου βασικός στόχος είναι να διασφαλιστεί ο τρόπος με τον οποίο τα ανοίγματα θα διαστασιολογούνται και θα είναι τοποθετημένα έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες απαραίτητες ροές υπό καλοκαιρινές και χειμερινές συνθήκες. Επιπλέον η παραγόμενη ροή του αέρα στο εσωτερικό απαιτεί λεπτομερείς πληροφορίες για τη διανομή του αέρα στο εσωτερικό όπως το είδος της ροής, την ταχύτητα, τη θερμοκρασία, τις συγκεντρώσεις των συμπυκνωμάτων και την πίεση.

Υπάρχουν διάφορες δημοσιεύσεις (Liddament, 1991, Allard 1998, Chen and Xu 1998, Li και συν. 1998, Hunt and Linden, 1999, Straw, 2000, Etheridge 2002, Jiang και συν., 2003) που καλύπτουν τις θεωρητικές προσεγγίσεις, τα πειράματα του εργαστηρίου, τα πεδία μελέτης και τις αριθμητικές προσομοιώσεις της απόδοσης των συστημάτων του φυσικού αερισμού. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2: Προσεγγίσεις για το φυσικό αερισμό (Gan, 1999).

Προσέγγιση		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Θεωρητική	Μοντέλα ροής κελύφους	1. Απλό συνήθως σε τύπους ή γραφικά	1. Περιορίζεται στην απλή γεωμετρία 2. χρειάζονται θεωρήσεις σχετικά με τις λεπτομέρειες της ροής προκειμένου να επιτευχθούν απλοποιημένες εξισώσεις ροής.
	Μοντέλα CFD	1. Παράγουν λεπτομερή πεδία ροής. 2. Επιλύουν συναρτήσεις ροής με το χρόνο 3. Μεγαλύτερη ευελιξία	1. Αριθμητικά σφάλματα περικοπής 2. Προβλήματα συνοριακών συνθηκών 3. Θεωρήσεις σχετικά με την τυρβώδη ροή και τη ροή κοντά στα τοιχώματα 4. Κόστος υπολογιστών 5. Κόστος εκπαίδευσης των χρηστών
	Πειραματικά	1. Πιο ρεαλιστικά	1. Απαιτείται εξοπλισμός 2. Προβλήματα κλίμακας 3. Δυσκολίες μέτρησης 4. Κόστος λειτουργίας

Η μοντελοποίηση σε αεροσύραγμα χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των δεδομένων του συντελεστή πίεσης σε συμβατικά σχήματα κτηρίων και για ειδικούς σχεδιασμούς κτηρίων. Οι πειραματικές μετρήσεις είναι αξιόπιστες αλλά απαιτούν μεγαλύτερη εργαστηριακή προσπάθεια και χρόνο. Κατά συνέπεια, η πειραματική προσέγγιση δεν θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη για γενικό σχεδιαστικό εργαλείο εκτός από ειδικούς σχεδιασμούς κτηρίων.

Για τη ροή στο κέλυφος του κτηρίου είναι διαθέσιμα δυο είδη μοντέλων (Yang, 2004):

τα μοντέλα απλής ζώνης και τα μοντέλα πολλαπλής ζώνης.

Και τα δύο είδη μοντέλων χρησιμοποιούν την κατανομή της εξωτερικής πίεσης για να παράγουν τους ρυθμούς αερισμού στους εσωτερικούς χώρους. Παρά το γεγονός πως η κατανομή της εξωτερικής πίεσης εξαρτάται από την ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα και την διεύθυνση του ως προς τη γεωμετρία του ανοίγματος, την τοπική τοπογραφία, το μέγεθος και το σχήμα του κτηρίου και το μέγεθος και την τοποθεσία των ανοιγμάτων αερισμού, η

ακρίβεια των μοντέλων ζώνης εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια της πρόβλεψης στην κατανομή της πίεσης.

Ο άλλος τύπος θεωρητικών μοντέλων όπως τα μοντέλα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής βασίζονται στην επίλυση των βασικών εξισώσεων ροής του ρευστού σε συνδυασμό με τα μοντέλα τύρβης. Αυτά τα εργαλεία μπορούν να αναπαράγουν λεπτομερώς την κατανομή της ροής, το ρυθμό ροής και τη μεταφορά θερμότητας μέσω διαφόρων στοιχείων καθώς και τη συγκέντρωση των εσωτερικών ρύπων. Όμως στην υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι μεγάλο τόσο το υπολογιστικό κόστος όσο και το κόστος του ανθρώπινου δυναμικού. Πρακτικά, η σωστή αναπαράσταση των κλιματικών συνοριακών συνθηκών και ο συνδυασμός του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος στην υπολογιστική ρευστοδυναμική αποτελούν τα κύρια εμπόδια στη χρήση της για το σχεδιασμό του φυσικού αερισμού.

4.1.2. Θεωρίες ροής κελύφους

Ο αερισμός που πραγματοποιείται εξαιτίας του φυσικού ανέμου και των thermal force ποικίλει με το χρόνο. Στο μεγαλύτερο μέρος των περιπτώσεων ο αερισμός φαίνεται να είναι σταθερός χωρίς να σημαίνει πως είναι πραγματικά σταθερός. Τα περισσότερα θεωρητικά μοντέλα θεωρούν ότι οι ροές στο κέλυφος συμπεριφέρονται σαν να είναι οι συνθήκες μόνιμες. Τα μοντέλα για σταθερό αερισμό μπορούν να διακριθούν σε εμπειρικά ή θεωρητικά και πολυζωνικά ή μονής ζώνης.

Τα εμπειρικά μοντέλα εξάγονται απευθείας από μετρήσεις του εύρους των ρυθμών αερισμού ενός κτηρίου. Αυτά τα μοντέλα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μέσα στο εύρος της εφαρμοσιμότητάς τους, ήτοι όταν το εύρος των παραμέτρων καλύπτεται από τις μετρήσεις.

Τα θεωρητικά μοντέλα βασίζονται σε περισσότερο θεμελιώδη προσέγγιση περιλαμβάνοντας την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης των μεγθών που περιγράφουν το φυσικό πρόβλημα, ξεκινώντας από την απλή εξίσωση ροής του αέρα στα ανοίγματα του κτηρίου μέχρι τα περίπλοκα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την κίνηση του αέρα στο δωμάτιο.

Ένα μοντέλο απλής ζώνης θεωρεί ότι οι εσωτερικές πόρτες είναι ανοικτές και αγνοεί κάθε εσωτερική αντίσταση στη ροή. Με ένα τέτοιο μοντέλο αναπαράγεται και εκτιμάται αριθμητικά ο συνολικός ρυθμός ροής μέσα στο κτήριο.

Ένα πολυζωνικό μοντέλο ροής αέρα χωρίζει το κτήριο σε στοιχειώδη στοιχεία. Βασίζεται στο ισοζύγιο μάζας για τη ροή στο χώρο σε συνδυασμό με την επίδραση του ανέμου και τη fluidity για τον υπολογισμό των διαφορών πίεσης κατά μήκος των κόμβων

στις ροές ανάμεσα στις ζώνες του κτηρίου και στο εξωτερικό περιβάλλον, υπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο συνολικό ρυθμό ροής κατά μήκος κάθε κελιού.

Μερικά από τα πολυζωνικά μοντέλα παρέχουν τη δυνατότητα να προβλέπεται η μόνιμη κατάσταση όπως επίσης και η σχεδόν μόνιμη κατάσταση με τελικό στόχο την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των τεχνικών του φυσικού αερισμού στο θερμικό ισοζύγιο του κτηρίου [Kendrick, 1993].

Οι περιορισμοί των μοντέλων του δικτύου ροής είναι γνωστοί. Ενώ τα δικτυωτά μοντέλα μπορούν να παράγουν τους ρυθμούς ροής των ζωνών ενός κτηρίου και του εξωτερικού χώρου, δεν μπορούν να δώσουν καμία πληροφορία σχετικά με τη ροή του αέρα και το πεδίο ταχύτητας της ροής μέσα στα δωμάτια. Προφανώς αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα όταν αναφέρεται κάποιος θέλει να εκτιμήσει την απόδοση της θερμικής άνεσης ή του φυσικού αερισμού που επιτυγχάνεται. Επιπλέον, τιμές του εξωτερικού συντελεστή πίεσης είναι διαθέσιμες για έναν περιορισμένο αριθμό γεωμετρικών διαμορφώσεων και γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου καθώς εξάγονται είτε από πειραματικές μετρήσεις σε αεροσύραγγα είτε από παραμετρική ανάλυση. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη την τύρβη του ανέμου.

4.2. Χρήση ντετερμινιστικών και έξυπνων τεχνικών για την παραγωγή της κατανομής της ταχύτητας του αέρα στα εξωτερικά ανοίγματα σε απλές μονοδιάστατες διαμορφώσεις φυσικού αερισμού.

Η αναπαραγωγή του πεδίου της ταχύτητας του αέρα σε ένα χώρο με φυσικό αερισμό αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο όταν το ζητούμενο είναι να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της θερμικής άνεσης ή της απομάκρυνσης της μόλυνσης του εσωτερικού αέρα. Για να εξαχθεί η συμπεριφορά ενός συστήματος όπως η ροή του αέρα μέσω ενός ανοίγματος κάτω από τυχαίες συνοριακές συνθήκες είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί ένα μοντέλο που να βασίζεται στις θεωρητικές προσεγγίσεις και στη συνέχεια να χρησιμοποιεί ως δεδομένα πειραματικές μετρήσεις. Παρόλα αυτά όταν η τυχαιότητα του συστήματος είναι αποτέλεσμα σύνθετων αλληλεπιδράσεων που περιλαμβάνουν πολλούς ανεξάρτητους και τελικά αμειώτους βαθμούς ελευθερίας είναι πιθανόν να δοκιμαστούν μοντέλα κτηρίων χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.

Ο μονοδιάστατος φυσικός αερισμός πραγματοποιείται όταν ένας εσωτερικός χώρος επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον μόνο μέσω ενός ή περισσότερων ανοιγμάτων που τοποθετούνται στον ίδιο εξωτερικό τοίχο. Μια τέτοια διαμόρφωση ανοίγματος συναντάται συχνά σε αστικά περιβάλλοντα όπου η μεγάλη πυκνότητα κατασκευής επιβάλλει μια

διευθέτηση που να περιλαμβάνει μικρούς χώρους ανεξάρτητους μεταξύ τους ή χώρους με μια εκτεθειμένη πρόσοψη και στην οποία ο διασταυρούμενος αερισμός δεν είναι πάντα πιθανός.

Οι δύο κύριες φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν τη ροή του αέρα στο φυσικό αερισμό είναι η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος των ανοιγμάτων και η ταχύτητα του εξωτερικού ανέμου. Ο μονοδιάστατος αερισμός εξαρτάται από την αλληλεπίδραση αυτών των παραμέτρων που επάγει διαφορές πίεσης κατά μήκος των ανοιγμάτων οδηγώντας τον αέρα στο εσωτερικό του αεριζόμενου χώρου. Οι σχετικές φυσικές διαδικασίες είναι πολύ σύνθετες και η εξήγηση του ρόλου τους στην αποτελεσματικότητα του αερισμού είναι ένα δύσκολο θέμα. Οι απλές καθημερινές παρατηρήσεις της κίνησης του αέρα κοντά στα ανοίγματα στις απλές μονοδιάστατες διαμορφώσεις υποδεικνύουν ότι η ροή του αέρα μέσω των ανοιγμάτων δεν είναι ομοιόμορφη (Daskalaki και συν. 1999). Αυτό υποδηλώνει μια μη ομοιόμορφη χωρική κατανομή της πίεσης κατά μήκος της επιφάνειας του ανοίγματος καταδεικνύοντας ότι η αλληλεπίδραση των εμπλεκόμενων φυσικών παραμέτρων παρουσιάζει μια χωρική και χρονική διακύμανση στο χώρο και στο χρόνο. Αυτό αποδίδεται στην ποικιλία των εξωτερικών συνθηκών και ειδικότερα στην τυρβώδη κίνηση του ρεύματος του αέρα. Η μεταβλητότητα στην κατανομή της διαφοράς πίεσης στην επιφάνεια του ανοίγματος έχει ως αποτέλεσμα μια τοπική τυρβώδη κίνηση του αέρα που αποτελεί σημαντική κινητήρια δύναμη στην περίπτωση του μονοδιάστατου αερισμού.

Η φυσική περιγραφή και η μαθηματική εξήγηση των φαινομένων που σχετίζονται με το φυσικό αερισμό μέχρι σήμερα πραγματοποιείται με εμπειρικά και ντετερμινιστικά μοντέλα προσομοίωσης. Μερικά από αυτά τα μοντέλα είναι προσιτά για τον υπολογισμό του ρυθμού ροής του αέρα ενώ οι ντετερμινιστικές μεθοδολογίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το επαγόμενο πεδίο ροής και ταχύτητας στους μελετώμενους χώρους.

Η εξαγωγή του ρυθμού ροής του αέρα στα κτήρια με φυσικό αερισμό είναι πολύ σημαντική για τον υπολογισμό της θερμικής απόκρισης των κτηρίων όπως επίσης και για τη διατήρηση των κατάλληλων ρυθμών ανανέωσης του αέρα ώστε να διασφαλίζεται ένα υγιές εσωτερικό περιβάλλον (Daskalaki και συν., 1999).

Η μαθηματική μοντελοποίηση για τον ρυθμό ροής του αέρα περιλαμβάνει εμπειρικά μοντέλα, και πλήρη μοντέλα που βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για τη διατήρηση μάζας, ορμής και της ενέργειας συνδυασμένα με τα κατάλληλα μοντέλα τύρβης. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει απλοποιημένες μεθόδους για τον υπολογισμό των ρυθμών ανταλλαγής αέρα σε κτήρια μονής ζώνης με φυσικό αερισμό. Παρέχουν εκτιμήσεις του συνολικού ρυθμού ροής αέρα χρησιμοποιώντας εξισώσεις συσχετισμού αλλά δεν παρέχουν πληροφορίες για τους μεμονωμένους ρυθμούς ανταλλαγής αέρα η το πεδίο της ταχύτητας του αέρα στους αεριζόμενους χώρους. Επιπλέον, δεδομένου πως οι προτεινόμενες εξισώσεις προέρχονται από ένα συγκεκριμένο αριθμό πειραμάτων σε αεροσύραγα ή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και γεωμετρικές διαμορφώσεις το πεδίο εφαρμογής τους είναι

περιορισμένο. Η μοντελοποίηση του δικτύου βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων ισοζυγίου μάζας για τον υπολογισμό της πίεσης σε διακριτούς κόμβους που αναπαριστούν τις ζώνες προσομοίωσης. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις των κτηρίων πολλαπλών ζωνών με φυσικό αερισμό και παρέχουν πληροφορίες για τις μεμονωμένες ροές αέρα σε κάθε ζώνη προσομοίωσης όπως επίσης και διαμέσω κάθε ανοίγματος. Ένα πλήθος μοντέλων αυτού του είδους αναπτύχθηκαν την περασμένη δεκαετία συμπεριλαμβανομένου των COMIS (Feuster και συν. 1990), ESP (Clarke 1993), AIRNET (Walton 1988), BREEZE (BRE, 1992) και PASSPORT AIR (Dascalaki και συν., 1995). Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των μοντέλων είναι πως είναι γρήγορα, εύκολα στη χρήση και απαιτούν απλά δεδομένα εισαγωγής ενώ παράγουν το ρυθμό ροής του αέρα με ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτή η προσέγγιση της μοντελοποίησης θεωρεί ότι η πίεση σε κάθε ζώνη προσομοίωσης μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά γύρω από μια τιμή αναφοράς. Στην περίπτωση του φυσικού αερισμού μονής ζώνης όπου η ανομοιομορφία και οι σχεδόν τυχαίες διαφορές της πίεσης οφείλονται στον αέρα αυτή η υπόθεση δεν ισχύει. Αυτή είναι και η βασική αιτία που τα μοντέλα δικτύου αποτυγχάνουν να παράγουν με ακρίβεια το ρυθμό ροής του αέρα σε αυτήν την περίπτωση ειδικά όταν η επίδραση των δυνάμεων αδρανείας είναι πιο σημαντική από την πλευστότητα (Limam και συν., 1997).

Πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί νέοι αλγόριθμοι για να λαμβάνουν υπόψην στους υπολογισμούς την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων και των δυνάμεων αδρανείας και οι οποίοι βελτιώνουν θεωρητικά την ακρίβεια των μοντέλων δικτύου στην περίπτωση των διαμορφώσεων απλής ζώνης με φυσικό αερισμό (Dascalaki και συν. 1995). Παρά την ευελιξία του συγκεκριμένου είδους μοντελοποίησης αυτό δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά το πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του αέρα στους υπό μελέτη χώρους.

Οι υπολογιστικές μέθοδοι που βασίζονται στις ρευστοδυναμικές μεθόδους και συνήθως αναφέρονται ως CFD μοντέλα, παριστάνουν την τελευταία ντετερμινιστική προσέγγιση και επιτρέπουν τον υπολογισμό της ταχύτητας του αέρα και τη θερμοκρασία στις ζώνες που μελετώνται μέσω της επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων Navier Stokes σε συνδυασμό με το κατάλληλο μοντέλο τύρβης που περιγράφει καλύτερα το πρόβλημα. Όταν το πεδίο ταχύτητας είναι γνωστό ο υπολογισμός του ρυθμού της ροής του αέρα αποτελεί έναν απλό τρόπο ολοκλήρωσης του προφίλ της ταχύτητας του αέρα. Η εφαρμογή των μοντέλων αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα σύνθετη και απαιτεί λεπτομερή δεδομένα εισαγωγής που δεν είναι πάντα διαθέσιμα και συχνά χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα ασαφή. Αυτός ο τύπος μοντελοποίησης παριστάνει τη συνολική ντετερμινιστική προσέγγιση καθώς περιλαμβάνει μια πολύ λεπτομερή μαθηματική περιγραφή των φυσικών φαινομένων.

Η πρόβλεψη του πεδίου ταχύτητας του αέρα σε έναν φυσικά αεριζόμενο χώρο είναι ένα σημαντικό θέμα όταν κάποιος αντιμετωπίζει τα προβλήματα της θερμικής άνεσης ή της απομάκρυνσης μόλυνσης του εσωτερικού αέρα. Στις περισσότερες μελέτες

συμπεριλαμβάνεται ο καθορισμός του πεδίου ταχύτητας του αέρα και η υπό υιοθέτηση μαθηματική προσέγγιση είναι αυτή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Κατά συνέπεια η πλειονότητα των μελετών που εφαρμόζει αυτές τις μελέτες στα προβλήματα αερισμού αναφέρεται στην πρόβλεψη της ροής γύρω από ένα κτήριο ή σε μοντέλα κλίμακας ο διασταυρούμενος αερισμός αναπαρίσταται κάτω από απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες όπως για παράδειγμα σε μια αεροσύραγα.

Ένας σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων αναφέρεται στον υπολογισμό της ροής του αέρα γύρω από ένα κτήριο. Στις περισσότερες συμπεριλαμβάνονται οι συγκρίσεις των διαφόρων μοντέλων τύρβης για την πρόβλεψη των συνθηκών αέρα γύρω από το κτήριο με στόχο την βελτίωση της ακρίβειας με την οποία τα μοντέλα προσεγγίζουν τις πραγματικές εξωτερικές συνθήκες του κτηρίου.

Ο Mukarami και οι συνεργάτες του (1996) μελέτησαν τη ροή του αέρα γύρω από ένα κτήριο με προσομοιώσεις CFD χρησιμοποιώντας τέσσερα γνωστά μοντέλα τύρβης προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβειά τους. Η σχετική αποτελεσματικότητα πρόβλεψης της τύρβης από αντίστοιχα αριθμητικά μοντέλα εξετάστηκε συγκρίνοντας τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης με αυτά που εξήχθησαν από ένα πείραμα σε αεροσύραγα.

Ο Selvam (1996) μελέτησε την εφαρμογή μεθόδων δυο επιπέδων για την εκτίμηση της επίδρασης του ανέμου σε ένα κυβικό κτήριο και σύγκριναν τις προβλέψεις με τα πειραματικά αποτελέσματα από τα πειράματα της αεροσύραγας. Ο Zhou και ο Stathopoulos (1996) αναφέρει ότι η καλύτερη προσέγγιση των όρων συναγωγής αναφέρονται στη βελτιωμένη ακρίβεια των προβλέψεων της αριθμητικής προσομοίωσης όταν τα μοντέλα τύρβης k-ε χρησιμοποιούνται. Σε όλες τις παραπάνω μελέτες το κτήριο αντιμετωπίζεται ως ένα κλειστό κυβικό κουτί που στέκεται σαν εμπόδιο στο ρεύμα ελεύθερης ροής του αέρα. Κατά συνέπεια, οι πιθανότητες των μοντέλων αριθμητικής προσομοίωσης να παράγουν την κατανομή της πίεσης σε ανοικτές επιφάνειες στη διαμόρφωση φυσικού αερισμού δεν έχουν ερευνηθεί.

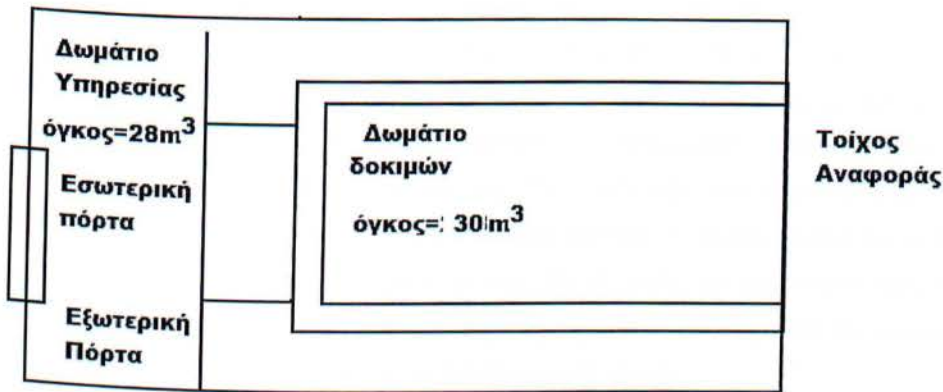
Εκτός από τις αριθμητικές μελέτες και τις μελέτες σε αεροσύραγες η χρήση των πειραμάτων ανοικτού πεδίου για την έρευνα του πεδίου ταχύτητας της ροής σε ένα εξωτερικό άνοιγμα μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες. Η Dascalaki και οι συνεργάτες της μελέτησαν τη σχέση των μετρήσεων της ταχύτητας του αέρα τη σχέση της ταχύτητας του αέρα στο ανοικτό επίπεδο με το ρυθμό ροής του αέρα μέσω των ανοιγμάτων όπως προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης αερίου σε μια μονοδιάστατη διαμόρφωση αερισμού.

Εκτός από τα αριθμητικά αποτελέσματα που έχουν ήδη αναφερθεί στους υπολογισμούς της ταχύτητας του αέρα γύρω από ένα κτήριο και την πίεση που είναι ως αποτέλεσμα στο εξωτερικό κέλυφος είναι λίγες οι μελέτες που αναφέρονται στη μελέτη του πεδίου της ταχύτητας στους εσωτερικούς χώρους. Ο Ernest και οι συνεργάτες του (1991) και

ο Kindagen και οι συνεργάτες του (1997) σύγκριναν τις προβλέψεις της μοντελοποίησης CFD σύμφωνα με το μέσο συντελεστή ταχύτητας του αέρα σε διαμορφώσεις διασταυρούμενου αερισμού με τα αποτελέσματα των δοκιμών σε αεροσύραγγα. Ο τελευταίος χρησιμοποίησε δεκατρία διαφορετικά μοντέλα απλής ζώνης προκειμένου να μελετήσει τη βελτίωση της γεωμετρίας της οροφής στην αποτελεσματικότητα του φυσικού αερισμού για εννέα διαφορετικές γωνίες αέρα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο τύρβης k-ε ήταν σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ο Schaelin και οι συνεργάτες του (1992) πραγματοποίησαν μια αριθμητική μελέτη για την αλληλεπίδραση του αέρα με την αμφίδρομη ροή στη συστοιχία μέσω ενός απλού ανοίγματος σε μια θερμαινόμενη κοιλότητα. Το υπολογισμένο πεδίο ταχύτητας του αέρα στο άνοιγμα συγκρίνεται με υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα από δοκιμές σε αεροσύραγγα και με απλά αναλυτικά μοντέλα βασισμένα στην εξίσωση Bernoulli. Οι προβλέψεις CFD των προφίλ ταχύτητας στο κάθετο ημιπίεδο του ανοίγματος είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα από τα πειράματα που έγιναν σε συνθήκες άπνοιας. Αυτές οι προβλέψεις αποδείχθηκαν πιο ρεαλιστικές από αυτές που επιτεύχθηκαν από το αναλυτικό μοντέλο Bernoulli. Στην ίδια εργασία τα αποτελέσματα από τις διδιάστατες και τρισδιάστατες προσομοιώσεις συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα και τα τελευταία βρέθηκαν να προσομοιώνονται πιο σωστά με την ταχύτητα ως συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα.

Η Dascalaki και οι συνεργάτες της (1999) μελέτησαν σε βάθος χρησιμοποιώντας πειραματικές διαδικασίες τη δυνατότητα της ντετερμινιστικής μαθηματικής μοντελοποίησης για την αναπαράσταση των σχετικών φυσικών φαινομένων με ικανοποιητική ακρίβεια. Επίσης μελέτησαν τη δυνατότητα των έξυπνων τεχνικών και ειδικά της ασαφούς λογικής να εξάγουν φυσικούς κανόνες, να δημιουργούν μοντέλα από υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα και να μελετάνε τις πιθανότητες των υπεχουσών μεθοδολογιών για την πρόβλεψη της ταχύτητας του αέρα στο ανοικτό επίπεδο στην περίπτωση του μονοδιάστατου αερισμού στα κτήρια. Η σύγκριση των προβλέψεων με τα πειραματικά δεδομένα κάτω από «πραγματικές» συνθήκες ξεκαθαρίζει σε ποια έκταση οι υπάρχουσες μεθοδολογίες αναπαράγουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της παραπάνω σύγκρισης έδειξαν τα αδύναμα σημεία ή τα υπάρχοντα κενά σε κάθε μεθοδολογία. Τα πειραματικά δεδομένα προήρθαν από τέσσερα μονοδιάστατα πειράματα φυσικού αερισμού που πραγματοποιήθηκαν σε ένα πλήρης κλίμακας κελί στην Αθήνα.



Σχήμα 14: Το κελί δοκιμών (Dascalaki και συν. 1999)

Η ταχύτητα του αέρα μετρήθηκε σε διάφορα ύψη από το μέσο του ανοίγματος. Η πρόβλεψη τεσσάρων διαφορετικών θεωρητικών μεθοδολογιών για τον υπολογισμό του πεδίου ταχύτητας συγκρίθηκε με τις μετρήσεις. Οι υπό μελέτη ντετερμινιστικές μεθοδολογίες περιλαμβάνουν τόσο ντετερμινιστικές όσο και μη ντετερμινιστικές προσεγγίσεις. Οι πρώτες συνοψίζουν τεχνικές συσχετισμού της θεωρίας του Bernoulli και των μοντέλων CFD. Η μη ντετερμινιστική προσέγγιση περιλαμβάνει μια εφαρμογή της ασαφούς θεωρίας για την παραγωγή των φυσικών κανόνων που περιγράφουν τα σχετικά φαινόμενα και κατά συνέπεια συνεισφέρουν στην πρόβλεψη της ταχύτητας του αέρα στο ανοικτό επίπεδο.

Στη συνέχεια θα αναφερθεί η απόκριση κάθε μιας από τις παραπάνω μεθοδολογίες στην πρόβλεψη της ταχύτητας του αέρα στην περίπτωση του μονοδιάστατου αερισμού.

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι υπάρχουσες προσεγγίσεις μοντελοποίησης για την πρόβλεψη της ταχύτητας του αέρα σε διαμορφώσεις φυσικού αερισμού μπορούν να ταξινομηθούν σε ντετερμινιστικές και μη ντετερμινιστικές μεθοδολογίες. Η πρώτη κατηγορία συμπεριλαμβάνει μοντέλα που υπολογίζουν την ταχύτητα του αέρα ως τη λύση μιας ομάδας εξισώσεων που προέρχονται από τη μαθηματική εξήγηση των φυσικών μηχανισμών που δρουν ως κινητήριες δυνάμεις στον φυσικό αερισμό. Προσπάθειες να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην πραγματικότητα αυξάνουν την πολυπλοκότητα των μοντέλων. Στην εργασία της Dascalaki και των συνεργατών της (1997) χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες ντετερμινιστικές μεθοδολογίες με αύξουσα σειρά πολυπλοκότητας.

- Τεχνικές συσχετισμού
- Μοντέλα ισοζυγίων μάζας (θεωρία Bernoulli) και
- Υπολογιστική ρευστοδυναμική

Τα ασαφή λογικά συστήματα έχουν ήδη εφαρμοστεί στον έλεγχο και την αποτελεσματική λειτουργία των φυσικά αεριζόμενων κτηρίων (Bruant και συν., 1996, Dounis

και συν. 1994). Καθώς τα ασαφή λογικά συστήματα θεωρούνται ως καθολικοί προσεγγιστές (approximates) αυτά τα συστήματα προσεγγίζουν ομοιόμορφα κάθε μη γραμμική συνεχή άγνωστη συνάρτηση και κατά συνέπεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μη γραμμικοί αναγνωριστές (identifiers) δυναμικών συστημάτων. Βασιζόμενοι στα πειραματικά αποτελέσματα η Dascalaki και οι συνεργάτες της (1999) ανέπτυξαν έναν ασαφή εκτιμητή για την πρόβλεψη της ροής του αέρα σε μονοδιάστατο αερισμό. Ο συγκεκριμένος εκτιμητής χρησιμοποιεί τρεις παραμέτρους εισόδου: το λόγο της περιοχής του παραθύρου προς την επιφάνεια του τοίχου, την προβολή της ταχύτητας του αέρα στο παράθυρο και την απόλυτη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου.

Οι ντετερμινιστικές μεθοδολογίες που περιλαμβάνουν τις τεχνικές συσχετισμού, δικτύων και μοντέλων CFD αποδείχθηκε ότι είναι ανεπαρκές για μια ακριβή πρόβλεψη της ταχύτητας του αέρα. Ανεξάρτητα από τους διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας οι παραπάνω μεθοδολογίες απέτυχαν να περιγράψουν με ακρίβεια την τοπική τυρβώδη κίνηση που είναι αποτέλεσμα της μη ομοιόμορφης κατανομής της διαφοράς πίεσης στο επίπεδο του ανοίγματος στην περίπτωση του μονοδιάστατου αερισμού. Στην πραγματικότητα οι δύο πρώτες προσεγγίσεις πρακτικά αγνοούν την επίδραση της τύρβης. Η μοντελοποίηση CFD χρησιμοποιεί ειδικούς αλγορίθμους για τον υπολογισμό της τύρβης και θεωρείται ως εξέλιξη της τεχνολογίας για το χειρισμό των φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τη ρευστοδυναμική. Όμως η αβεβαιότητα στον καθορισμό των συνοριακών συνθηκών όπως επίσης και οι χωρικές και οι χρονικές μεταβολές μεταβάλλουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση του μονοδιάστατου αερισμού ο συνεχώς μεταβαλλόμενος άνεμος δημιουργεί μια μη ομοιόμορφη διαφορά πίεσης στο επίπεδο του ανοίγματος που θεωρείται υπεύθυνη για την κίνηση του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό αεριζόμενο χώρο. Η τυχαία αυτή μεταβολή δεν είναι δυνατόν να ερμηνευτεί με τα χαρακτηριστικά του ανέμου με βάση μια ντετερμινιστική προσέγγιση. Κατά συνέπεια οι τεχνητές «έξυπνες» τεχνικές φαίνεται να είναι οι ιδανικές εναλλακτικές.

4.3 Ανάπτυξη και επικύρωση ενός διζωνικού μοντέλου –POMA (Pressurized zOnal Model with Air-diffuser)

Πρόσφατα τα μοντέλα πολλαπλών χώρων και υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανάλυση της ροής του αέρα, της κατανομής της θερμοκρασίας και των προσμίξεων (Feustel HE.,1998, Haghighat F και συν.,1992).

Η μοντελοποίηση πολλαπλών χώρων είναι η απλούστερη μέθοδος. Θεωρεί ένα δωμάτιο μέσα στο κτήριο ως ομογενή κόμβο που συνδέεται με τους άλλους με ανοίγματα ανάμεσα στα δωμάτια και/ή με ανοίγματα στο εξωτερικό. Αυτή η προσέγγιση έχει το

πλεονέκτημα της ευκολίας του χρήστη όσον αφορά στον καθορισμό του προβλήματος, στην απλή εσωτερική αναπαράσταση και στη διαδικασία υπολογισμού. Τα πλεονεκτήματα αυτά επιτρέπουν την πρόβλεψη της εσωτερικής ροής σε όλο το κτήριο που προκαλείται από τον άνεμο, τις θερμοκρασιακές διαφορές και/ή από μηχανικά συστήματα. Παρόλα αυτά δεν μπορεί όμως να δώσει λεπτομερή αναπαράσταση των κατανομών της ροής του αέρα και της θερμοκρασίας μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της απλοποίησης του προβλήματος (Feustel HE.,1998, Haghghat F and Megri AC,1996).

Στο άλλο άκρο της μοντελοποίησης είναι η προσομοίωση της λεπτομερούς ενδο-διζωνικής ροής αέρα και της κατανομής της θερμοκρασίας με μια μέθοδο CFD [Haghghat F και συν.,1992, Murakami S και συν., 1998]. Παρά τα πλούσια αποτελέσματα σχετικά με τις πληροφορίες που αφορούν στη ροή του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σε ένα δωμάτιο προσδίδει η συγκεκριμένη μέθοδος υπερβολικό φόρτο εργασίας στο χρήστη σε όρους καθορισμού προβλήματος και υπολογιστικής προσπάθειας. Κατά συνέπεια είναι πρακτικά δύσκολο να εφαρμοστεί αυτή η προσέγγιση ως καθημερινό εργαλείο και να μετατραπεί σε ολοκληρωμένο πρόγραμμα ενεργειακής προσομοίωσης του κτηρίου.

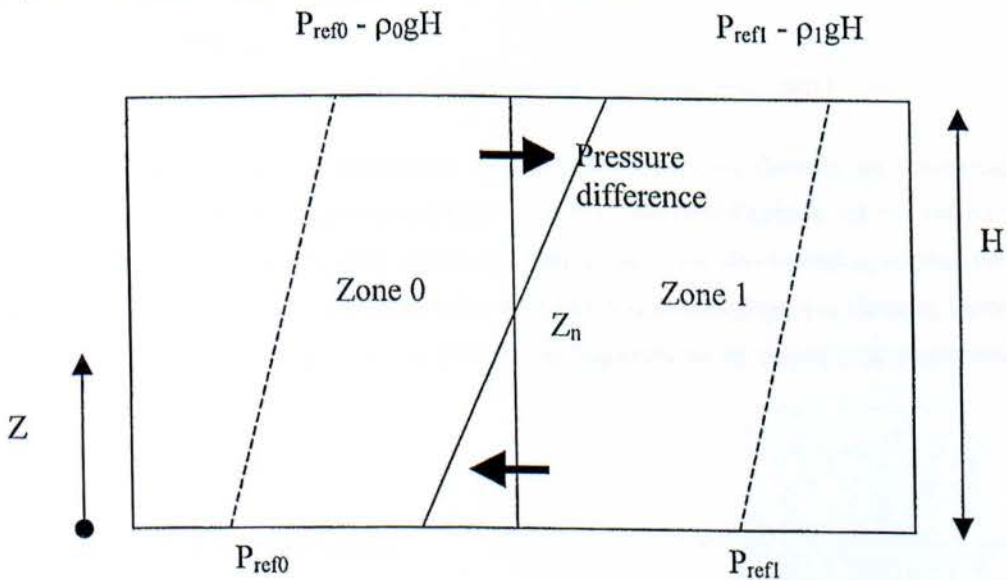
Ένα «Διζωνικό μοντέλο» είναι μια ενδιάμεση προσέγγιση ανάμεσα στα CFD μοντέλα και τα μοντέλα multi-room models και ικανοποιεί με σημαντική ακρίβεια την συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για την εκτίμηση των συνθηκών θερμικής άνεσης και της ποιότητας του εσωτερικού αέρα σε διαφορετικές ζώνες του κτηρίου. Το μοντέλο μπορεί να προβλέψει μερικές πληροφορίες σχετικά με θερμικές παραμέτρους σε ένα δωμάτιο και καθιστά εύκολο στο χρήστη τον ορισμό του προβλήματος. Σε αυτήν την προσέγγιση ένα δωμάτιο χωρίζεται σε διάφορες μακροσκοπικές ζώνες στις οποίες ισχύει η αρχή διατήρησης μάζας και θερμότητας. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσέγγισης χρησιμοποιήθηκε από διάφορους ερευνητές για την προσομοίωση της ροής του αέρα σε ένα δωμάτιο (Leburn, 1970, Inard C και συν.1996, Howarth AT., 1985, Togari S και συν. 1993, Rodriguez EA και συν.1994, Inard C and Buty D.,1991, Wurtz E και συν., 1996). Οι Inard και Buty (1991) πραγματοποίησαν μια συγκριτική εκτίμηση αυτών των μοντέλων με το κ-ε μοντέλο και έδειξαν ότι τα διζωνικά μοντέλα μπορούν να προβλέψουν την διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας με εξαιρετική ακρίβεια. Όμως ο κύριος περιορισμός αυτού του μοντέλου είναι ότι απαιτείται το πρότυπο μιας ροής. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός ο Bouia (1993) πρότεινε τη ροή της μάζας εισάγοντας όρους διαφοράς πίεσης ανάμεσα στις ζώνες. Επιπλέον, ο Wurtz και οι συνεργάτες του (1996) πρότειναν μια πρακτική προσέγγιση του φυσικού αερισμού αλλά δεν ήταν εφαρμόσιμη στα κτήρια με μηχανικό αερισμό. Ο Inard και οι συνεργάτες του (1996) πρότειναν μια μέθοδο στην οποία δύο είδη ζωνών οι υφιστάμενες και οι ειδικές ζώνες ροής καθορίστηκαν ανάλογα με το μέγεθος της ορμής.

Ο Haghghat και οι συνεργάτες του (2001) ανέπτυξαν ένα νέο διζωνικό μοντέλο που ονομάζεται υπό πίεση διζωνικό μοντέλο με διαχυτή αέρα (Pressurized zOnal Model with Air-

diffuser, POMA). Το POMA χρησιμοποιεί το νόμο της δύναμης για να αναπαραστήσει τη ροή μάζας ανάμεσα στις ζώνες. Η εξαγόμενη χαρακτηριστική εξίσωση ολοκληρώνεται στο μοντέλο POMA για να γενικευτεί η εφαρμογή τους στα δωμάτια με μηχανικό αερισμό.

4.3.1 Περιγραφή του POMA - Pressurized zOnal Model with Air-diffuser

Ο πυρήνας του διζωνικού μοντέλου βασίζεται στην επεξεργασία των κινητήριων δυνάμεων και των ορίων όπως επίσης και στις θεωρήσεις που γίνονται για το πρότυπο της ροής του αέρα μεταξύ της διζωνικής περιοχής. Ο ορισμός του μοντέλου έγινε σε όρους υποθέσεων στα συνολικά πρότυπα ροής μέσα στο δωμάτιο. Στο POMA το δωμάτιο χωρίζεται σε περιορισμένο αριθμό ζωνών με μόνο οριζόντια και κάθετα σύνορα. Θεωρείται ότι η θερμοκρασία του αέρα και η πυκνότητα είναι ομοιόμορφα σε κάθε ζώνη. Τα όρια ανάμεσα σε αυτές τις ζώνες μπορούν να θεωρηθούν εντελώς διαπερατά. Στο κάτω μέρος κάθε ζώνης υπάρχει μια ανεξάρτητη πίεση αναφοράς. Η πίεση του αέρα στη ζώνη θεωρείται πως είναι υδροστατικά κατανεμημένη βασιζόμενη στην πίεση αναφοράς.



Σχήμα 15: Μοντελοποίηση του κάθετου συνόρου (Haghighat και συν., 2001)

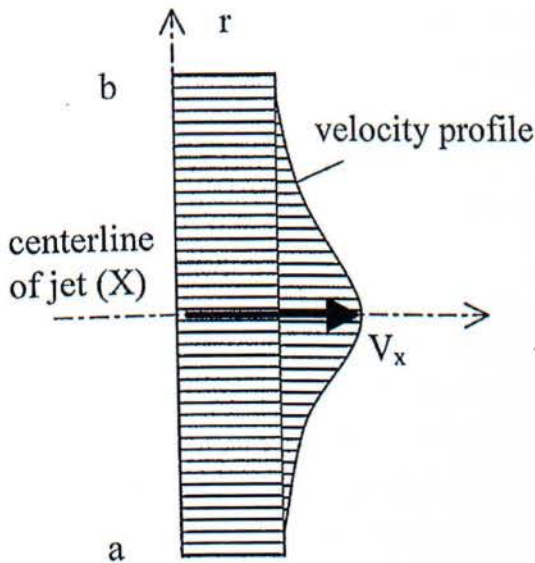
Στην ανάπτυξη του POMA καθορίζονται τρία είδη ορίων:

- 1) φυσιολογικό όριο: το σύνορο χωρίς την επίδραση jet
- 2) όριο ακροφυσίου: το συνολικό σύνορο με το φτερό του ακροφυσίου και
- 3) συνδυαστικό όριο: το όριο στο άκρο ενός φτερού.

Η ροή μάζας κατά μήκος τόσο του οριζώντιου όσο και των κάθετων κανονικών ορίων μοντελοποιούνται με μια μη γραμμική συνάρτηση δυνάμεων που εξαρτάται από την

παράγωγο του μη γραμμικού ρυθμού ροής μάζας προς τη στατική τοπική διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δύο πλευρές που ορίζει το σύνορο.

Ο ρυθμός ροής του αέρα που προέρχεται από την εφαρμογή ενός διαχύτη μοντελοποιείται βάσει της χαρακτηριστικής εξίσωσης του ακροφυσίου (ASHRAE, 1993).



Σχήμα 16: Μοντελοποίηση του ορίου ακροφυσίου (Haghighat και συν., 2001)

Ο Haghighat και οι συνεργάτες του αφού καθόρισαν τις βασικές μη γραμμικές εξισώσεις του προβλήματος χρησιμοποίησαν τη μέθοδο Newton-Raphson για την επίλυσή τους. Η συγκεκριμένη ταυτόχρονη τεχνική επίλυσης απαιτεί τον ίδιο αριθμό αγνώστων και ανεξάρτητων μεταβλητών. Το συγκεκριμένο σύστημα που αναπτύχθηκε για τέσσερις ζώνες μπορεί να επεκταθεί σε περισσότερες ζώνες ενός δωματίου με τη χρήση ενός γραμμικού αλγόριθμου.

4.3.2 Προσομοίωση και εκτίμηση

Η εκτίμηση του POMA διεξήχθη με τη σύγκριση της πρόβλεψης του POMA με τα πειραματικά δεδομένα με την πρόβλεψη που έγινε χρησιμοποιώντας ένα άλλο διζωνικό μοντέλο καθώς και με την πρόβλεψη που έγινε με ένα μοντέλο CFD. Οι συγκρίσεις έγιναν και για την περίπτωση του φυσικού αερισμού και για την περίπτωση του εξαναγκασμένου.

Η συμφωνία ανάμεσα στην προσομοίωση και στα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύει ότι το μοντέλο POMA είναι μια εφικτή προσέγγιση θερμικής προσομοίωσης.

Το μοντέλο μπορεί να κάνει γενικές προβλέψεις σύμφωνα με τις θερμικές παραμέτρους μέσα σε ένα δωμάτιο και είναι εύκολο για το χρήστη να καθορίσει το

πρόβλημα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών του δωματίου στη θερμική άνεση και στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα.

Ένα πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η ικανότητα του να ενσωματώνεται σε υπάρχοντα προγράμματα πρόβλεψης για την ενέργεια και τη ροή του αέρα σε κτήρια με πολλά δωμάτια. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της επίδρασης της ακτινοβολίας και της συναγωγής στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης στη θερμική άνεση προκειμένου να ληφθούν χρήσιμες σχεδιαστικές πληροφορίες.

4.4. Αριθμητική Προσομοίωση της παροδικά αναπτυσσόμενης ροής σε ένα δωμάτιο με φυσικό αερισμό.

Η ανυσηχία σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας και την ποιότητα του εσωτερικού αέρα οδήγησε σε ανανεωμένο ενδιαφέρον σχετικά με τη δυνατότητα του φυσικού αερισμού να ψύχει και να αερίζει κτήρια. Αυτό αληθεύει πρακτικά στα εύκρατα κλίματα όπου τόσο ο φυσικός αερισμός όσο και η νυκτερινή ψύξη είναι ιδιαίτερης σημασίας. Εκτιμάται ότι για παράδειγμα στο Ηνωμένο Βασίλειο το 23% της πρωτογενούς ενέργειας χρησιμοποιείται για τη διατήρηση ενός άνετου εσωτερικού περιβάλλοντος (Holford JM, Woods AW.,2007). Αυτή η ανυσηχία οδήγησε σε διάφορους καινοτόμους σχεδιασμούς για τα καινούρια κτήρια που έχουν το πλεονέκτημα της φυσικής ροής αέρα και παράλληλα μειώνουν την ενεργειακή απαίτηση για αερισμό.

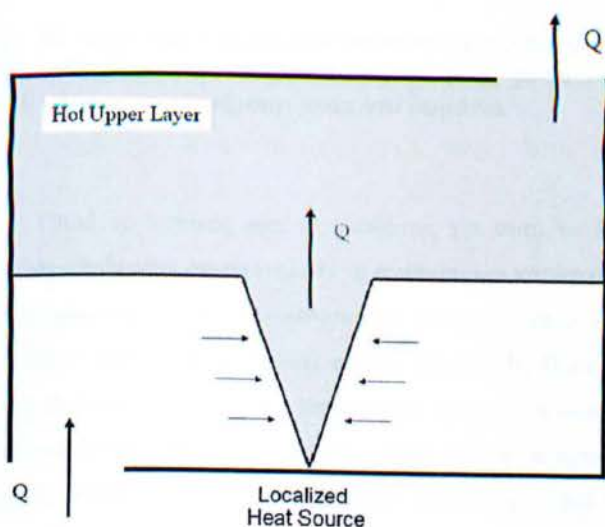
Η υπολογιστική ρευστοδυναμική παρέχει τη δυνατότητα για την ανάλυση των στρατηγικών χαμηλής ενεργειακής ψύξης και αερισμού νωρίτερα στη διαδικασία σχεδιασμού διαρκώντας ταυτόχρονα και μικρό χρονικό διάστημα. Έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πιο γρήγορη διαδικασία σε σχέση με τις πειραματικές τεχνικές και παρέχει περισσότερες λεπτομέρειες συγκριτικά με τα απλοποιημένα διζωνικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη δυναμική θερμική προσομοίωση.

Τα CFD μοντέλα βελτιώνονται συνεχώς και χρησιμοποιούνται σε περίπλοκες πλέον καταστάσεις όπως ο φυσικός αερισμός λόγω αιολικής ενέργειας (Asfour OS, Gadi MB,2003), ηλιακές καμινάδες (Harris D, Helwig N,2007), την απομάκρυνση των ρύπων (Rouaud O και Havet M.,2005, Yang J και συν,2004) και στις προσομοιώσεις πυρκαγιών (Lo και συν. 2002. Yang και συν. 2006).

Τα θεωρητικά μοντέλα της φυσικής ροής του αέρα στα κτήρια αναπτύχθηκαν και εκτιμήθηκαν με τη χρήση εργαστηριακών πειραμάτων μικρής κλίμακας (Linden και συν., 1990, Gladstone και Woods, 2006). Γενικά αυτά τα μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες αυτά που θεωρούν τις πηγές θερμότητας στα κτήρια (Linden και συν. 1990) και αυτές που θεωρούν ότι τα θερμικά φορτία κατανέμονται σε ένα επίπεδο (Gladstone και

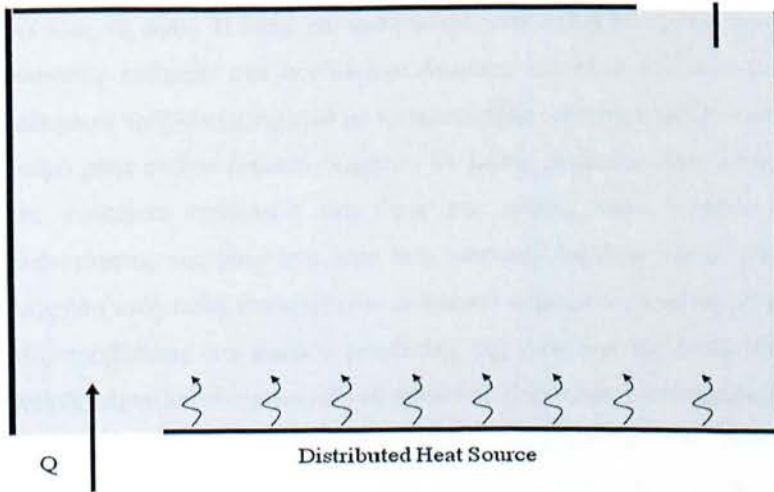
Woods, 2006). Αυτού του είδους τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν το ρυθμό ροής του αέρα και τη θερμική διαστρωμάτωση για να χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις CFD (Ji και συν., 2007). Αυτή η συγκριτική αξιολόγηση επέτρεψε το CFD να χρησιμοποιείται ως αποτελεσματικό εργαλείο για το σχεδιασμό κτηρίων χαμηλής ενέργειας (Cook και Short, 2005).

Το αρχικό μοντέλο του Linden και των συνεργατών του (1990) θεωρεί ότι όλα τα θερμικά φορτία σε ένα δεδομένο δωμάτιο μπορούν να μοντελοποιηθούν ως τοπικά. Το μέγεθος της πηγής θερμότητας είναι μικρό συγκρινόμενο με την επιφάνεια του ορόφου. Αυτές οι πηγές θερμότητας όπως είναι ένας υπολογιστής ή ένα άτομο που κάθεται στο γραφείο παράγουν τυρβώδη ροές που αυξάνονται και παρασύρουν τον ατμοσφαιρικό αέρα. Όταν μια τέτοια ροή φτάσει στην οροφή απλώνεται οριζόντια και κατεβαίνει καθώς έρχεται σε επαφή με τα πλευρικά τοιχώματα σχηματίζοντας ένα ανοδικό στρώμα θερμού αέρα κάτω από την οροφή. Αυτό το ανοδικό στρώμα οδηγεί σε ένα εκτόπισμα ροής μέσω αεραγωγών στο επίπεδο της οροφής και εισάγει τον αέρα μέσω αεραγωγών που βρίσκονται στο επίπεδο του πατώματος. Αναπτύσσεται μια ροή μόνιμης κατάστασης στην οποία το ανώτερο θερμικό στρώμα έχει σταθερό βάθος και ο ρυθμός ροής αερισμού μέσω του δωματίου είναι ίσος με το ρυθμό ροής στο σημείο στο οποίο φτάνει στο ανώτερο θερμικό επίπεδο. Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η αναπαράσταση της συγκεκριμένης ροής.



Σχήμα 17: Ένα αεριζόμενο περίβλημα με τοπική πηγή με μια τοπική πηγή θερμότητας (Linden και συν.1990) που δείχνει το ρυθμό ροής μέσα από το περίβλημα από το θερμό ανώτερο επίπεδο.

Το μοντέλο κατανεμημένης πηγής θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε από τον Gladstone και τον Woods (2001) θεωρεί ότι οι πηγές θερμότητας μπορούν να θεωρηθούν ως ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος του πατώματος του δωματίου και ότι η συναγωγή επιτυγχάνεται ομοιόμορφα μέσω του δωματίου. Κατά συνέπεια το εσωτερικό του δωματίου γεμίζει με θερμό αέρα που κατευθύνει τη ροή μέσω εξαεριστήρων. Στο Σχήμα 18 παριστάνεται αυτό το είδος της ροής.



Σχήμα 18: Αεριζόμενο περίβλημα με κατανεμημένη πηγή θερμότητας (Gladstone C και Woods AW.,2001) που δείχνει το ρυθμό ροής μέσω του περιβλήματος εξαιτίας του θερμού αέρα που κατανέμεται μέσα στο δωμάτιο.

Παρά το γεγονός πως οι υποθέσεις για αυτά τα δύο μοντέλα είναι διαφορετικές μπορεί να αποδειχθεί ότι αποτελούν τα ανώτερα και κατώτερα όρια σε όρους τόσο ροής αέρα και διαστρωμάτωσης του δωματίου για δεδομένη γεωμετρία δωματίου με αερισμό που προκαλείται από γνωστά θερμικά φορτία (Kaye NB, Hunt GR.,2007). Αυτά τα θεωρητικά μοντέλα αυξάνουν συνεχώς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να θεωρηθούν η επίδραση του ανέμου (Hunt GR και Linden PF, 2001), τα τοπικά τοπογραφικά κτηρίων (Syrios K and Hunt GR, 2008) και τη μεταφορά ρύπων (Kaye NB, Hunt GR., 2007, Hunt GR και Kaye NB.,2006).

Όλα τα μοντέλα που περιγράφηκαν παραπάνω είναι μοντέλα μόνιμης κατάστασης που προβλέπουν την ροή αερισμού ως αποτέλεσμα συνθηκών σταθερών ορίων. Εντούτοις, στην πραγματικότητα, οι ροές αυτές μεταβάλλονται συναρτήσει των θερμικών φορτίων και της ανόδου της θέσης του ήλιου. Μια πρωταρχική έρευνα της ανάπτυξης της μεταβλητής ροής αερισμού παρουσιάστηκε από τους Kaye και Hunt (Kaye NB και Hunt GR, 2004) που

θεώρησαν την απλούστερη περίπτωση της τοπικής πηγής θερμότητας που υπάρχει σε ένα άδειο δωμάτιο με ανοίγματα ψηλού και χαμηλού επιπέδου. Το μοντέλο τους έδειξε ότι ο χρόνος που αναπτύσσεται η ροή ελέγχθηκε από το ρυθμό στον οποίο το δωμάτιο γεμίζει θερμό αέρα και το ρυθμό στον οποίο ο θερμός αέρας ξηραίνει το δωμάτιο από τις αποχετεύσεις.

Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο των Kaye και Hunt (2004) συγκρίθηκε με πειραματικές μετρήσεις το μοντέλο επικρίθηκε (Flynn MR και Caulfield CP., 2006) για τη θεώρηση ότι το αναπτυσσόμενο ανώτατο θερμικό επίπεδο στη ροή είναι πλήρως αναμιγμένο για όλες τις ώρες. Η θεώρηση αυτή οδηγεί στη λαθεμένη πρόβλεψη ότι υπάρχει μεταφορά buoyancy ανάμεσα στα συνδεδεμένα δωμάτια και κατά συνέπεια μπορεί να οδηγήσει σε λαθεμένες προβλέψεις σχετικά με το τελικό βάθος του στρώματος, τη διαστρωμάτωση και το ρυθμό ροής σε ένα διπλανό δωμάτιο. Το λάθος οφείλεται στην υποεκτίμηση της buoyancy του ανώτερου στρώματος στο ύψος της οροφής κατά συνέπεια στην υποτίμηση της πλευστότητας της ροής του αέρα στο γειτονικό δωμάτιο. Όμως για ένα απλό δωμάτιο η θεώρηση ενός καλά αναμιγμένου ανώτερου στρώματος δημιουργεί μια αμελητέα διαφορά στις προβλέψεις του ρυθμού μεταβολής της ροής και της μέσης θερμοκρασίας καθώς ο ρυθμός αερισμού ελέγχεται από τη συνολική πλευστότητα στο περίβλημα.

Η διαφορά ανάμεσα στη μέση θερμοκρασία στο ανώτερο στρώμα και τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο σε αυτό το στρώμα είναι μικρή έτσι η απόκλιση ανάμεσα στην προβλεπόμενη θερμοκρασία της εξωτερικής ροής και στην πραγματική θερμοκρασία εξωτερικής ροής θα είναι επίσης μικρή.

Τα μοντέλα CFD χρησιμοποιούνται επίσης για την πρόβλεψη της μεταβολής της ροής αερισμού (Fracastoro GV και συν., 2002) όπως επίσης και για άλλα φαινόμενα μεταφοράς όπως η διάδοση του καπνού από τη φωτιά (Kim και συν. 2008) και την απομάκρυνση ρύπων από ένα δωμάτιο (Rouaud O και Havet M., 2005). Και αυτά έχουν συγκριθεί με πειραματικές δοκιμές πλήρους κλίμακας (Rouaud O και Havet M., 2005). Όμως δεν υπάρχουν μελέτες σχετικές με τη σύγκριση των προσομοιώσεων CFD είτε με γενικά θεωρητικά μοντέλα για την ανάπτυξη μεταβλητής ροής είτε με εργαστηριακές πειραματικές μετρήσεις μικρής κλίμακας.

Ο Kaye και οι συνεργάτες του (Kaye και συν., 2009) πραγματοποίησαν μια μελέτη με στόχο να χρησιμοποιήσουν CFD προσομοιώσεις για να αναπαραστήσουν τα πειραματικά δεδομένα των Kaye και Hunt, 2004. η σύγκριση των αποτελεσμάτων από το CFD και τα πειραματικά αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία αναφοράς σε πιο σύνθετες μεταβλητές ροές που δεν εξυπηρετούν τους σκοπούς των εργαστηριακών πειραμάτων.

4.4.1 Περιοδικό Μοντέλο

Το αντικείμενο της εργασίας του Kaye και των συνεργατών του (2009) ήταν να καταλήξουν εάν τα εργαλεία CFD μπορούν ή όχι να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν την ανάπτυξη μεταβλητής ροής σε ένα κτήριο με φυσικό αερισμό. Για το σκοπό αυτό σύγκριναν τις προσομοιώσεις CFD με το θεωρητικό μοντέλο και τα πειραματικά αποτελέσματα των Kaye και Hunt (2004). Στην συνέχεια περιγράφεται εν συντομία το μοντέλο και τα αποτελέσματα των Kaye και Hunt (2004) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα CFD της εργασίας του Kaye και των συνεργατών του (2009).

Οι Baines WD, Turner JS. (1969) απέδειξαν ότι ο ρυθμός με τον οποίο γεμίζει με ρευστό ένα απλό δωμάτιο με μια τοπική πηγή θερμότητας και απουσία εξαεριστήρων σχετίζεται με τη χρονική κλίμακα γεμίματος ενός κουτιού.

Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης το εκτόπισμα της ροής περιγράφεται από τον Linden και τους συνεργάτες του (1990) καταδεικνύοντας ότι ο ρυθμός με τον οποίο η πλευστότητα του ρευστού που γεμίζει το δωμάτιο εξισορροπείται από το ρυθμό με τον οποίο περνάει μέσα από τους αεραγωγούς.

Αυτές οι δύο χρονικές κλίμακες αναπαριστούν τις δύο επικρατούσες διαδικασίες στην ανάπτυξη της ροής αερισμού σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Οι Kaye και Hunt (2004) έδειξαν ότι σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, η αδιάστατη απόσταση από το πάτωμα στην διεπιφάνεια με το ανώτερο θερμικό στρώμα μπορεί να γραφτεί σε όρους αναλογίας των δύο χρονικών κλιμάκων. Οι ίδιοι ανέπτυξαν δυο διαφορετικές εξισώσεις για τη μοντελοποίηση της ανάπτυξης του ύψους του στρώματος της διεπιφάνειας και της πλευστότητας του ανώτερου στρώματος ξεκινώντας από ένα μη στρωματοποιημένο δωμάτιο με μια μη ενιαία πηγή θερμότητας. Οι εξισώσεις γράφονται σε όρους αδιάστατου χρόνου, αδιάστατου ύψους διεπιφάνειας και αδιάστατης πλευστότητας του στρωματοποιημένου επιπέδου. Το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτουν επιλύεται στη συνέχεια αριθμητικά για την πραγματοποίηση προβλέψεων για την χρονική ανάπτυξη της ροής αερισμού. Για ένα μεγάλο εύρος αεραγωγών το βάθος του στρώματος πλευστότητας υπερβαίνει το ύψος μόνιμης κατάστασης και στη συνέχεια μειώνεται σε βάθος πίσω στο βάθος της μόνιμης κατάστασης όπως προβλέπεται στην εργασία του Linden και των συνεργατών του (1990). Στην εργασία του Kaye και των συνεργατών του έγιναν προβλέψεις για την κίνηση της διεπιφάνειας με το χρόνο όπως επίσης και για το χρόνο που απαιτείται να φτάσει το στρώμα πλευστότητας στο μέγιστο βάθος του καθώς και στο βάθος της μόνιμης κατάστασης.

Πειραματικά αποτελέσματα με μικρής κλίμακας λουτρά αλατιού χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των προβλέψεων για την ανάπτυξη του ύψους της διεπιφάνειας με το χρόνο.

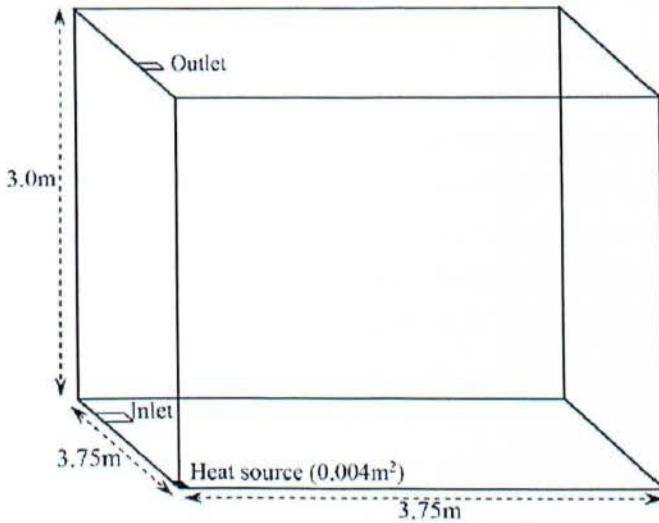
Παρά το γεγονός ότι υπήρχε κάποια διασπορά παρουσιάστηκε η γενική τάση των δεδομένων που υποστήριζαν το μοντέλο.

4.4.2 Τεχνική αριθμητικής προσομοίωσης

Τα αριθμητικά πειράματα μεταβολής πραγματοποιήθηκαν με το εμπορικό πρόγραμμα CFD Ansys CFX (Ansys CFX 2001). Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων με ένα δομημένο πλέγμα και επιλύει την ομάδα υδροδυναμικών εξισώσεων με έναν ξεχωριστό τρόπο συνδυάζοντας τη μέθοδο του δικτύου με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Οι γεωμετρίες καθορίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα τοπολογικά ορθογώνια καθένα από τα οποία καλύπτονταν από ένα δίκτυο. Το κεντρικό διαφορικό σχήμα διαφύρισης χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση της εξίσωσης διατήρησης μάζας. Ο συγκεκριμένος κώδικας CFD χρησιμοποιείται ευρέως για τη μοντελοποίηση της φυσικής συναγωγής σε κτήρια με φυσικό αερισμό (Ji και Cook, 2007).

Προηγούμενες μελέτες (Chen, 1995) απέδειξαν ότι τα μοντέλα ιξώδους- τύρβης δύο εξισώσεων εφαρμόζονται γενικά για τη μοντελοποίηση της πλευστότητας και της φυσικής συναγωγής. Αυτός ο τύπος ροής μπορεί να περιλαμβάνει τόσο το γραμμικό όσο και το τυρβώδες πεδίο στο υπολογιστικό πλέγμα και τη χρήση της επαναληπτικής κανονικοποίησης του μοντέλου k-ε (Yakhot V και συν. 1992).

Οι τοπικές πηγές θερμότητας μοντελοποιούνται ως επιφάνειες σταθερής ροής θερμότητας. Τα όρια του πλέγματος μοντελοποιήθηκαν ως αδιαβατικές ενώ οι αεραγωγοί μοντελοποιούνται ως όρια πίεσης με μια μηδενική πίεση αναφοράς που επιτρέπει στον αέρα να ρέει ελεύθερα σε κάθε κατεύθυνση. Χρησιμοποιήθηκαν συμμετρικές επίπεδες συνοριακές συνθήκες στο επίπεδο που διχοτομεί τις σπές και την πηγή θερμότητας του υπολογιστικού πλέγματος. Στην εργασία του Kaye και των συνεργατών του το ένα τέταρτο του πλέγματος μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα δομημένο πλέγμα και συμμετρικά επίπεδα που αναπαριστούν την πλήρη γεωμετρία.



Σχήμα 19: Η γεωμετρία του ενός τετάρτου του δωματίου που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις (Kaye και συν., 2009)

Αποδείχθηκε ότι ένα πλέγμα με περίπου 90000 κελιά δίνει μια εύρωστη και ανεξάρτητη του πλέγματος λύση. Όμως η προεπιλογή με τους προβλεπόμενους παράγοντες χαλάρωσης που χρησιμοποιήθηκαν από τους κώδικες δεν ήταν ικανοποιητικοί για να πετύχουν σύγκλιση για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν από τον Kaye και τους συνεργάτες του (2009).

4.4.3 Αποτελέσματα

Οι προσομοιώσεις CFD ενός δωματίου με φυσικό αερισμό με απλή τοπική πηγή θερμότητας πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να συγκριθεί η ανάπτυξη μη μόνιμης ροής με τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα των Kaye και Hunt (2004). Εξετάστηκαν 11 διαφορετικές περιπτώσεις καλύπτοντας ένα μεγάλο μέρος αεριζόμενων ανοικτών επιφανειών. Οι προβλέψεις CFD του μέγιστου ύψους και του ύψους της διεπιφάνειας μόνιμης κατάστασης συμφωνούν ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα των Kaye και Hunt (2004) με το χρόνο που λήφθηκε να είναι ίσος με τον αντίστοιχο χρόνο για την αρχική ανάπτυξη του ανώτερου στρώματος θερμού αέρα. Για μεγαλύτερους χρόνους η συμφωνία των αποτελεσμάτων είναι φτωχότερη. Οι προσομοιώσεις CFD παράγουν σημαντικά μεγαλύτερους χρόνους για να επιτευχθεί το ύψος της τελικής διεπιφάνειας. Η φύση της διαστρωμάτωσης είναι επίσης διαφορετική. Ενώ οι Kaye και Hunt (2004) θεώρησαν μια απλή διαστρωμάτωση δύο επιπέδων με μια ήπια διεπιφάνεια οι προσομοιώσεις CFD

προβλέπουν ένα πολύ ομαλότερο θερμοκρασιακό προφίλ με μια κηλιδωμένη διεπιφάνεια ανάμεσα στο ανώτερο θερμό επίπεδο και το χαμηλότερο επίπεδο του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην ανάμειξη της διεπιφάνειας από τους πίδακες που εισέρχονται μέσω των χαμηλότερων αεραγωγών ή τη θερμική διάχυση.

Ο στόχος της εργασίας του Kaye και των συνεργατών του (2009) ήταν να εκτιμηθεί η εφαρμογή των προσομοιώσεων CFD για την προσομοίωση της ανάπτυξης μεταβλητής ροής σε κτήρια με φυσικό αερισμό. με βάση αυτά τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρο ότι η αρχική ανάπτυξη της διαστρωμάτωσης προβλέπεται ικανοποιητικά από τις προσομοιώσεις και συγκρίνεται ικανοποιητικά με το θεωρητικό μοντέλο και τα πειράματα των Kaye και Hunt (2004). Ο Kaye και οι συνεργάτες του (2009) συμπέραναν ότι η προσεκτική χρήση των εργαλείων CFD μπορεί να δώσει έγκυρες προβλέψεις τόσο για την ανάπτυξη του αρχικού χρόνου ροής του φυσικού αερισμού κατά το αρχικό στρώμα πλευστότητας όσο και για το ύψος των διεπιφανειών σε μόνιμη κατάσταση.

5 Πειραματικές μετρήσεις εσωτερικού περιβάλλοντος

5.1. Μετρήσεις στο εσωτερικό θερμικό περιβάλλον και ενεργειακή ανάλυση σε μεγάλα κτήρια τις τυπικές εποχές.

Σε όλον τον κόσμο υπάρχουν μεγάλα κτήρια ενώ τα τελευταία χρόνια δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην έρευνα της εσωτερικής θερμικής άνεσης στους μεγάλους χώρους. Στην εργασία του Huang και των συνεργατών του (2007) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στη Σαγκάη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, του χειμώνα αλλά και των ενδιάμεσων εποχών. Τα αποτελέσματα αυτά θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

5.1.2 Γενικές μετρήσεις

Από μια γενική άποψη η εσωτερική σκηνή του διεθνούς γυμναστικού σταδίου φαίνεται στο Σχήμα 20.



Bird's eye of stadium



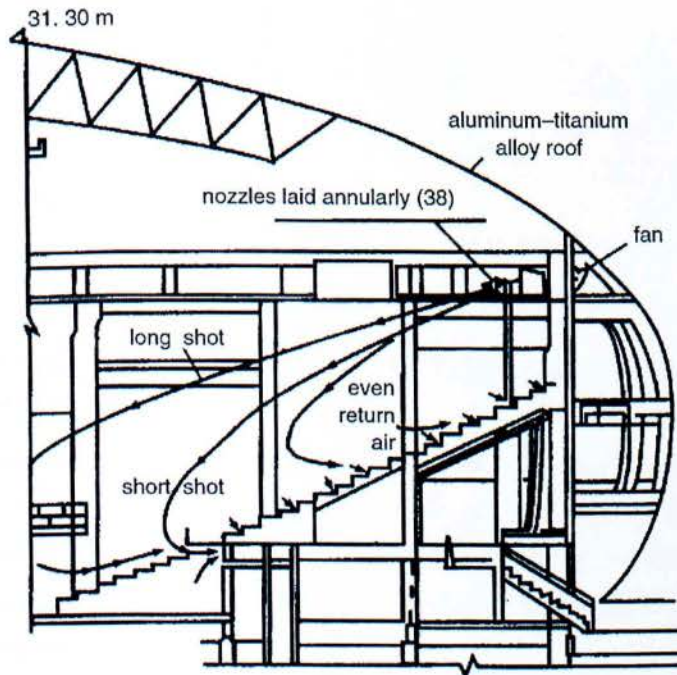
Indoor scene of dome

Σχήμα 20: Γενική άποψη και εσωτερική σκηνή του σταδίου στη Σαγκάη (Huang και συν., 2007)

Το κτήριο ήταν χωρητικότητας 4330 ατόμων και είχε διάμετρο 68m και ύψος 26m. Η στρογγυλή οροφή έχει γίνει από αλουμίνιο- τιτάνιο. Το κτήριο είχε μια πόρτα ύψους 5m και περιφερειακούς διαδρόμους γύρω από το κύριο κτήριο και σε ύψος 11m και 15m αντίστοιχα. Το κύριο κτήριο επίσης περιβάλλεται από έναν περιφερειακό διάδρομο ανοικτό ύψους 19.5m στο σημείο σύνδεσης με την οροφή. Θεωρώντας τις απαιτήσεις της κατασκευής υπάρχει μια δακτυλιοειδής ρωγμή 25m σε ύψος στον τοίχο με τον περιφερειακό διάδρομο των 19.5m.

5.1.2.1 Σύστημα αερισμού

Δύο ειδικά κεντρικά συστήματα κλιματισμού είναι συμμετρικά εγκατεστημένα στο στάδιο. Ο συνολικός ρυθμός αέρα που προβλέπεται στο σχεδιασμό είναι 240000m³/h. Ένα σύνολο των 4750kW του σχεδιαστικού φορτίου ψύξης παρέχονται από τρεις βιδωτούς ψύκτες για το κτήριο και μερικά κοντινά γραφεία. Το χειμώνα ατμός 0.4MPa παρέχονται από ένα βραστήρα για την τροφοδοσία με ζεστό νερό εναλλάκτη ατμού – νερού. Στο Σχήμα 21 φαίνεται η τυπική σχηματική αναπαράσταση της εσωτερικής ροής.



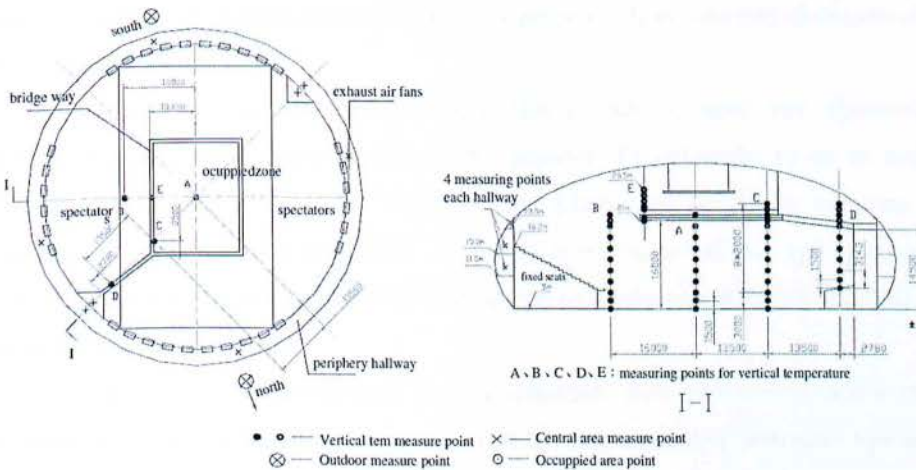
Σχήμα 21: Σχεδιασμός ροής εσωτερικού αέρα (Huang και συν. 2007)

Ο αέρας μεταφέρεται από τα ακροφύσια που είναι τοποθετημένα στο πάνω μέρος του τοίχου με ύψος 15m. Ο αέρα που επιστρέφει εξέρχεται κυρίως από τα ανοίγματα που είναι τοποθετημένα κάτω από τα καθίσματα και ο υπόλοιπος από τα ανοίγματα που υπάρχουν στον τοίχο. Υπάρχουν συνολικά 38 ακροφύσια αέρα. Επιπρόσθετα υπάρχουν 32 αεραγωγοί με διάμετρο 600mm εγκατεστημένα κυκλικά πάνω από την δακτυλιοειδή ρωγμή.

5.1.2.2 Το περίγραμμα των μετρήσεων στο χώρο

Οι μετρήσεις στο χώρο για το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον αυτού του θόλου πραγματοποιήθηκαν 9 φορές (Huang και συν., 2000, Huang και συν. 2002). Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα αποτελέσματα του Huang και των συνεργατών του (2007) από τρεις τυπικές περιπτώσεις: το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον ελέγχεται από συνεχή κλιματισμό, διακοπτόμενο κλιματισμό και φυσικό αερισμό.

Οι μετρήσεις των καιρικών συνθηκών λήφθηκαν στην ατμόσφαιρα του θόλου βόρεια και νότια. Η θερμοκρασία των περιφερειακών διαδρόμων μετρήθηκε βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 24.



Σχήμα 22: Θέση των σημείων μέτρησης της θερμοκρασίας για το θερμικό περιβάλλον (Huang και συν., 2007).

Σύμφωνα με τη συμμετρική δομή μια σειρά μετρούμενων σημείων όπως το A, B, C, D κτλ σε ένα οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της κάθετης θερμοκρασίας όπου τα κάθετα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στα εξεταζόμενα σημεία είναι περίπου 1 με 4 m. Το καλοκαίρι η θερμοκρασία στη ζώνη των επιβατών μετρήθηκε σε 221 μετρητικά σημεία και κάθε σημείο είχε επιφάνεια 16m².

Τα καλοκαιρινά δεδομένα έδειξαν ότι υπάρχουν σημαντικές απώλειες ψύξης μέσω των άνω ανοιγμάτων των 32 εξαεριστήρων και της 25μετρης κυκλικής ρωγμής στον εξωτερικό τοίχο. Κατά συνέπεια, στην κυκλική ρωγμή εγκαταστάθηκαν κουρτίνες από κράμα

αλουμινίου που μπορούν να ανοίξουν και να κλείσουν εύκολα. Κατά τις μετρήσεις στο χώρο τις μεταβατικές εποχές και το χειμώνα αυτές οι κουρτίνες ανοιγοκλείνουν προκειμένου να μειωθεί το εσωτερικό φορτίο.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία, γυάλινα εργαστηριακά θερμόμετρα και ηλεκτρικά υγρόμετρα. Οι κάθετες θερμοκρασίες καταγράφονται από υπολογιστή. Οι ρυθμοί αέρα μετρήθηκαν από θερμικούς μετρητές ταχύτητας και η ροή του νερού από υπερηχητικά ροόμετρα. Οι κάθετες θερμοκρασίες καταγράφονται κάθε 15 λεπτά και οι άλλες παράμετροι των δοκιμών καταγράφονται κάθε μισή με μια ώρα.

5.1.3 Συμπεράσματα

Οι μετρήσεις στο θερμικό περιβάλλον είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού σε ένα σύστημα κλιματισμού σε μεγάλο χώρο για καλύτερη θερμική απόδοση και ενεργειακή οικονομία.

Οι πολλαπλοί περιφερειακοί διάδρομοι μπορούν να μειώσουν σημαντικά το εσωτερικό φορτίο. Οι περιφερειακοί διάδρομοι σε μεγάλα κτήρια είναι αποτελεσματικοί στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Τα ανώτερα ανοίγματα είναι πάντα πλεονεκτικά ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας τις μεταβατικές εποχές αλλά όχι το χειμώνα. Το καλοκαίρι το αν τα ανώτερα ανοίγματα είναι επιθυμητά ή όχι συμπεραίνεται βάσει των ενθαλιπών ανάμεσα στον εσωτερικό και εξωτερικό αέρα. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται ανώτερα ανοίγματα λογικά και αποτελεσματικά για το σχεδιασμό θερμικού περιβάλλοντος των μεγάλων κτηρίων.

Το χειμώνα η διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας είναι περισσότερο προφανής. Οι θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στην ανώτερη και στην κατώτερη ζώνη του κτηρίου είναι 15° C το χειμώνα, 12° C το καλοκαίρι και λιγότερο από 21° C τις μεταβατικές εποχές.

Το χειμώνα ο εφαρμοζόμενος θερμός αέρας είναι δύσκολο να φτάσει στη ζώνη του πλήθους. Αυτό καθιστά επιτακτική ανάγκη την επίλυση ενός κοινού προβλήματος για το σχεδιασμό του θερμικού περιβάλλοντος στα μεγάλα κτήρια.

Ο Huang και οι συνεργάτες του (2007) βρήκαν ότι ο μέγιστος λόγος στο συνολικό φορτίο ψύξης ήταν το φορτίο οροφής και ήταν ίσο με 42.1% και το δεύτερο ήταν το φορτίο αερισμού και διήθησης που ήταν 56.9% και 46.1% αντίστοιχα πριν το τέλος του διακοπώμενου κλιματισμού. Κατά συνέπεια, η μόνωση της οροφής και ο λογικός σχεδιασμός των ανώτερων ανοιγμάτων είναι πιλοτικές προσεγγίσεις για τη μείωση του εσωτερικού φορτίου στο σχεδιασμό μεγάλων κτηρίων.

Το χειμώνα το φορτίο αποθήκευσης θερμότητας ήταν πάνω από 60% του συνολικού φορτίου στο ξεκίνημα. Είναι σημαντικό να κρατηθεί ο χρόνος λειτουργίας του κλιματισμού και να ταιριάζει με την αποθηκευμένη θερμότητα και την θερμότητα που ελευθερώνεται για να υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας.

5.2 Μεγέθη που εξαρτώνται από το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων για τον εσωτερικό / εξωτερικό φυσικά αεριζόμενο χώρο.

Τα εξωτερικά αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM) υπάρχουν στην επιφάνεια των δρόμων και μπορούν να αποτελούνται από ένα σύνθετο μίγμα στερεάς σκόνης, σωματιδίων που προέρχονται από τις εξατμίσεις οχημάτων, σκόνη ελαστικών και άλλα βιολογικά υλικά.

Οι Pope και Dockery (1992), ο Dockery και οι συνεργάτες του (1993), ο Schwartz (1993), ο Seaton και οι συν. του (1995) και ο Ackermann- Liebrich και οι συνεργάτες του (1997) στις επιδημιολογικές τους εργασίες έδειξαν ότι τα αιωρούμενα σωματίδια στον εξωτερικό αέρα σχετίζονταν με τη λειτουργία των πνευμόνων, αναπνευστικά προβλήματα αλλά και θνησιμότητα. Αυτά τα συμπεράσματα ήταν ιδιαίτερα έντονα στην περίπτωση εισπνεόμενων σωματιδίων στο θώρακα που συνήθως επρόκειτο για σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10 μm PM₁₀ και λεπτά σωματίδια με ισοδύναμη διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm (PM_{2.5}).

Ο Guo και οι συνεργάτες του (1999) έδειξαν ότι τα PM₁₀ σχετίζονται θετικά με την εμφάνιση άσθματος σε μαθητές γυμνασίου στην Ταϊβάν. Ο Hwang και ο Chen (2002) απέδειξαν ότι οι ημερήσιες επισκέψεις στα νοσοκομεία της Ταϊβάν έχουν άμεση σχέση με τις καθημερινές συγκεντρώσεις του PM₁₀ στην περιοχή. Καθώς το 70-90% του ανθρώπινου χρόνου ξοδεύεται στο εσωτερικό των κτηρίων είναι σημαντικό να συσχετιστούν οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον. Τα εσωτερικά σωματίδια PM στις αστικές και ημιαστικές περιοχές σχετίζονται με τον εξωτερικό αέρα. Οι τύποι αερισμού, τα εξωτερικά στρώματα και τα κλίματα μπορούν να επηρεάσουν τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM.

Ο φυσικός αερισμός χρησιμοποιείται ευρέως στην Ταϊβάν με τα πλεονεκτήματα της εξοικονόμησης ενέργειας, τα έξοδα και το χρόνο εγκατάστασης στις κατοικίες οι οποίες ελέγχονται από τη φυσική συναγωγή για την απομάκρυνση της πλεονάζουσας θερμότητας και υγρασίας. Ο μηχανισμός του φυσικού αερισμού εξαρτάται από την επίδραση του ανέμου, την θερμική πλευστότητα και το συνδυασμό τόσο του ανέμου όσο και της πλευστότητας.

Η ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνσή του είναι οι κύριοι παράγοντες για τα αποτελέσματα του εισαγόμενου αέρα. Οι de Jong και Bot (1992) και ο Miguel και οι συνεργάτες του (2001) έδειξαν ότι η πλήρης κατανόηση του συσχετισμού ανάμεσα στα

χαρακτηριστικά του ανέμου και τα χαρακτηριστικά του αερισμού απαιτεί να έχει επιτευχθεί πρώτα ικανοποιητικός φυσικός αερισμός. Οι πιο διάσημοι τύποι ανοιγμάτων φυσικού αερισμού που εμφανίζονται στην Ταιβάν είναι τα παράθυρα, οι πόρτες και οι αεραγωγοί των οροφών. Τα χαρακτηριστικά των ανοιγμάτων επηρεάζουν την απόδοση του φυσικού αερισμού με τη διεύθυνση, την τοποθέτηση και τον έλεγχο των ανοιγμάτων αερισμού για να επιτευχθεί ένας επιθυμητός ρυθμός αερισμού και καλή κατανομή του αέρα αερισμού μέσω των κτηρίων (ASHRAE, 1997, Miguel 1998). Κατά συνέπεια μια μελέτη για την εσωτερική απομάκρυνση των σωματιδίων PM από ένα χώρο που αερίζεται φυσικά είναι θεμελιώδους πρακτικής σημασίας. Σε ένα φυσικά αεριζόμενο χώρο αναπτύσσεται τυρβώδης διάχυση, καθίζηση και γραμμική όπως και ροή συναγωγής σε διάφορους βαθμούς που οδηγεί στην εναπόθεση σωματιδίων στα τοιχώματα και σε άλλες επιφάνειες. Ανάλογα με το πεδίο ροής, έχουν προταθεί να διάφορα μοντέλα για την εναπόθεση των σωματιδίων σε ένα αεριζόμενο χώρο. Η τυρβώδης ροή εμφανίζεται στις τέλειες συνθήκες φυσικού αερισμού.

Ο Liao και οι συνεργάτες του (2004) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο που βασίστηκε σε προηγούμενη δουλειά των Crump και Seinfeld (1981) για το ρυθμό εναπόθεσης αερολυμάτων σε ένα χώρο τυρβώδους ανάμιξης τυχαίου σχήματος κάνοντας την υπόθεση της ομογενούς τυρβώδους ροής κοντά στις επιφάνειες. Οι εσωτερικές πηγές όπως ο καπνός του τσιγάρου, το μαγείρεμα ή το καθάρισμα μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στα επίπεδα εσωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων έτσι ώστε να απαιτείται η επιπλέον έρευνα για τον χαρακτηρισμό των επιδράσεων των εσωτερικών πηγών (Abt και συν. 2000, Jones και συν., 2000). Ο Liao και οι συνεργάτες του (2004) δεν περιέλαβαν στην ανάλυσή τους τις εσωτερικές πηγές και εστίασαν στο συσχετισμό των εσωτερικών και εξωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων. Στη συγκεκριμένη μελέτη προσπάθησαν να κατανοήσουν τις σχέσεις μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων εστιάζοντας στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κτηρίου που αερίζεται φυσιολογικά με την εισαγωγή αέρα και τις επιδράσεις του μεγέθους των σωματιδίων στα επίπεδα τους. Πραγματοποίησαν ένα πρόγραμμα προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν τον φυσικό αερισμό για τα πλαϊνά ανοίγματα και καλύπτοντας τα γεφυρώματα με τα πλαϊνά ανοίγματα. Εξάγανε τους λόγους εσωτερικών/ εξωτερικών σωματιδίων που εξαρτώνται από το μέγεθος από τη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων και επέλεξαν τα χημικά είδη των θεϊκών και νιτρικών ουσιών για αστικές και ημιαστικά φυσικά αεριζόμενα σπίτια και σύγκριναν τα αποτελέσματά τους με εμπειρικές εξισώσεις.

Ο Thatcher και ο Layton (1995), ο Abt και οι συνεργάτες του (2000) και ο Riley και οι συνεργάτες του (2002) ανέπτυξαν αυστηρά μοντέλα για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα για τη μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων εσωτερικά/ εξωτερικά και τους μηχανισμούς απομάκρυνσης σε μια κατοικία και το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από αυτούς εφαρμόστηκε και από τον Liao και των συνεργατών του (2004). Συνδυάζοντας τις

φυσικές διεργασίες ελέγχοντας τους ρυθμούς κέρδους και απωλειών την εναπόθεση και την ανταλλαγή αέρα παράγεται μια δυναμική εξίσωση που περιγράφει το προφίλ της συγκέντρωσης των σχέσεων εσωτερικών/ εξωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων σε ένα χώρο με φυσικό αερισμό.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης μάζας σε ισοθερμικές συνθήκες στο συγκεκριμένο χώρο, την επανέωρηση, τη συσσώρευση των σωματιδίων και αγνοώντας τη μεταβολή των διεργασιών προκύπτει μια νέα δυναμική εξίσωση συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων και του χρόνου.

Τα σωματίδια χωρίζονται σε γεωμετρικά ισοδύναμα μεγέθη στο μέγεθος που ενδιαφέρει. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων θεωρείται ότι είναι σταθερή.

Στην εργασία του Liao και των συνεργατών του (2004) περιγράφεται ένα απλό αλλά ακριβές μοντέλο για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα με βάση τη σχέση εσωτερικών / εξωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων και τους μηχανισμούς απώλειας σωματιδίων σε ένα φυσικά αεριζόμενο κτήριο. Καθορίστηκε ο φυσικός αερισμός από την αποτελεσματικότητα των ανοιγμάτων με την εφαρμογή ενός μοντέλου σε έναν φυσικά αεριζόμενο χώρο όπου όλα τα πλευρικά ανοίγματα και τα καλύμματα των πλευρικών ανοιγμάτων μελετήθηκαν υπό κλίμακα. Χρησιμοποιώντας ένα καλά εδραιωμένο μοντέλο με ισοζύγιο μάζας και τις μετρήσεις των εξωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων και των πληροφοριών της βιβλιογραφίας για το χημικό προφίλ των αιωρούμενων σωματιδίων έδειξαν ότι οι λόγοι εσωτερικών/ εξωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να μεταβληθούν από 0.22 έως 0.65 ενώ για τα θεϊκά και τα νιτρικά αιωρούμενα σωματίδια κυμαίνονται από 0.22 έως 0.43.

Οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης περιλαμβάνονται στο φυσικό αερισμό μέσω της εναπόθεσης σωματιδίων στην εσωτερική επιφάνεια. Οι μοντελοποιημένοι λόγοι αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτώνται από την φυσική κατανομή του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων και τον σχεδιασμό του κτηρίου που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των ανοιγμάτων και κατά συνέπεια έχουν σημαντική επίδραση στην εκτίμηση της ανθρώπινης έκθεσης.

5.3. Η επίδραση της ανθρώπινης συμπεριφοράς στο ρυθμό φυσικού αερισμού στο εσωτερικό περιβάλλον το καλοκαίρι.

Εξαιτίας του ζεστού και υγρού καλοκαιριού στη νότια Ιαπωνία οι Ιάπωνες χρησιμοποιούν παθητικά συστήματα ψύξης στις κατοικίες τους όπως για παράδειγμα ψηλά φυτά και δέντρα για τη δημιουργία σκιάς και μεγάλα ανοίγματα ώστε να επιτυγχάνεται ο διαμπερής φυσικός αερισμός. Ο διαμπερής αερισμός προτιμάται ιδιαίτερα το καλοκαίρι όχι μόνο για την ανταλλαγή αέρα στην κατοικία αλλά και για την επιτάχυνση της απώλειας

θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα για θερμική άνεση. Κατά συνέπεια, οι Ιαπωνικές κατοικίες είναι με μεγάλα παράθυρα μέσω των οποίων κινείται ο αέρας μέσα στα δωμάτια. Όμως πολλοί Ιάπωνες χρησιμοποιούν συστήματα κλιματισμού ενώ στις πυκνοκατοικημένες περιοχές δεν αναμένεται να είναι ικανοποιητικός ο διαμπερής κλιματισμός επειδή επικρατεί το «φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας». Σε αυτήν την περίπτωση οι παραδοσιακές κατοικίες στην Ιαπωνία είναι λιγότερο μονωμένες και με λιγότερη αεροστεγή μόνωση και δεν είναι προσιτές για θέρμανση ψύξη στον εσωτερικό χώρο. Ειδικότερα μετά την κρίση πετρελαίου το 1973 η θερμική μόνωση και η στεγανότητα των κτηρίων έγινε δημοφιλής για την ελαχιστοποίηση της διήθησης του εξωτερικού αέρα για τη διατήρηση της ενέργειας στα κτήρια. Ενώ υπάρχει μείωση του ρυθμού του φρέσκου αέρα που εισέρχεται είναι αποτελεσματικός ως προς την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από τον κλιματισμό, η μόλυνση του εσωτερικού αέρα από τον καπνό, το ανθρώπινο σώμα ή τα υλικά του κτηρίου εντείνεται λόγω της στεγανότητας του κτηρίου. Παρά το γεγονός πως οι περισσότερες ιαπωνικές κατοικίες έχουν σύστημα κλιματισμού αλλά όχι αερισμού, η καλή ποιότητα του εσωτερικού αέρα συνήθως πετυχαίνεται από το άνοιγμα των πορτοπαράθυρων.

Πρόσφατα εξαιτίας της αύξησης της ποιότητας των νέων κτηρίων και της στεγανότητας των υπαρχόντων κτηρίων, η επίδραση των κλιματικών παραμέτρων μειώνεται ενώ άλλοι παράγοντες όπως η ανθρώπινη συμπεριφορά έχει μεγαλύτερη επίδραση στο ρυθμό αερισμού. Ο B. Knvisgaard και P.F. Collet (1990) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο ανίχνευσης του αερίου για να μελετήσουν την επίδραση του χρήστη στη μεταβολή του ρυθμού του αέρα σε 28 κατοικίες στη Δανία. Καθόρισαν τέσσερις τύπους μεταβολής του αέρα:

1. *Βασική Μεταβολή του αέρα:* Η βασική μεταβολή του αέρα είναι η μεταβολή του αέρα που προκαλείται από τις ροές του αέρα μέσω των διαρροών του κτηρίου. Μετρήθηκε όταν δεν υπήρχαν κάτοικοι στο κτήριο και με όλες τις πόρτες και τα παράθυρα ανοικτά και κλειστά τα συστήματα αερισμού. Η βασική μεταβολή του αέρα μεταβάλλεται με την ταχύτητα του αέρα και τις διαφορές μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας.
2. *Μεταβολή του αέρα από το σύστημα αερισμού:* η μεταβολή του αέρα από το σύστημα αερισμού είναι η μεταβολή του αέρα από όλες τις μηχανικές μεταβολές και τα συστήματα αερισμού.
3. *Μεταβολή του αέρα που επηρεάζεται από το χρήστη:* η μεταβολή του αέρα που επηρεάζεται από το χρήστη είναι η μεταβολή του αέρα που προκαλείται από το άνοιγμα των παράθυρων και των πορτών.

4. *Συνολική μεταβολή του αέρα*: Η συνολική μεταβολή του αέρα είναι το άθροισμα της βασικής μεταβολής του αέρα, της μεταβολής του αέρα από το σύστημα αερισμού και την μεταβολή του αέρα που επηρεάζεται από το χρήστη.

Στην Ιαπωνία όμως υπάρχουν ελάχιστες μελέτες που μετράνε τους ρυθμούς μεταβολής του αέρα που επηρεάζονται από το χρήστη σε μη πειραματικά κατοικήσιμα οικήματα. Οι Iwasaka και Akasaka (1997) μέτρησαν το ρυθμό αερισμού σε κατοικήσιμα κτήρια στη Νότια Ιαπωνία χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανίχνευσης αερίου και μελέτησαν τη σχέση ανάμεσα στη μεταβολή του ρυθμού του αέρα που επηρεάζεται από τον αέρα σε κάθε κατοικία και την ενεργειακή κατανάλωση του κλιματισμού κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου. Επιπλέον, ενώ τα περισσότερα Ιαπωνικά σπίτια δεν έχουν κεντρικό σύστημα κλιματισμού αλλά αντίθετα έχουν μια αντλία θερμότητας εγκατεστημένη σε κάθε δωμάτιο μελέτησαν τη συχνότητα με την οποία χρησιμοποιούνται τα κλιματιστικά σε κάθε οικία.

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε το περιβάλλον του εσωτερικού αέρα. Ο ρυθμός αερισμού μετρήθηκε με τη μέθοδο ανίχνευσης του αερίου, τη θερμοκρασία του αέρα και τη σχετική υγρασία διεξήχθη σε οκτώ κτήρια σε ένα σύνθετο κτήριο στη νότια Ιαπωνία. Συμπληρώθηκε από τους κατοίκους ένα ερωτηματολόγιο για το εσωτερικό περιβάλλον και τη συμπεριφορά τους. Η συγκεκριμένη έρευνα επίσης συνέλεξε δεδομένα σχετικά με το αν οι κάτοικοι ανοίγουν παράθυρα ή πόρτες όταν λειτουργούν τα κλιματιστικά και όταν τα σπίτια είναι άδεια κατά την περίοδο των μετρήσεων. Από την συγκεκριμένη μελέτη διεξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Υπάρχουν μεγάλες διαφορές ανάμεσα στο ρυθμό του βασικού αερισμού. Για παράδειγμα ο ρυθμός αερισμού μετρήθηκε την περίοδο που δεν υπήρχαν κάτοικοι όταν τα παράθυρα ήταν κλειστά και ο συνολικός ρυθμός αερισμού περιλάμβανε το βασικό ρυθμό αερισμού και τον ρυθμό αερισμού που επηρεάζεται από τους πολίτες για παράδειγμα ο ρυθμός αερισμού που προέρχεται από το άνοιγμα των παραθύρων.
- Υπάρχει σημαντική διαφορά στο συνολικό ρυθμό αερισμού ανάμεσα στα ξεχωριστά κτήρια. Καθώς οι βασικοί ρυθμοί μεταβολής του αέρα είναι παρόμοιοι, οι διαφορές αυτές αποδίδονται στη συμπεριφορά των χρηστών.
- Ο τρόπος ζωής των κατοίκων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού για παράδειγμα το πώς οι κάτοικοι ανοίγουν τα παράθυρα/ πόρτες ή λειτουργούν τα κλιματιστικά είναι πολύ διαφορετικά ανάμεσα στις κατοικίες που μελετήθηκαν.
- Ο συνολικός ρυθμός αερισμού μπορεί να θεωρηθεί ως ένας παράγοντας που επηρεάζει την κατανάλωση της ηλεκτρικής ισχύος για ψύξη ακόμα και αν ο

συντελεστής συσχετισμού ανάμεσα στο συνολικό ρυθμό αερισμού και την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος είναι χαμηλή.

- Ενώ μερικοί κάτοικοι λειτουργούν τα κλιματιστικά περισσότερο κατά τη διάρκεια της νύκτας άλλοι τα χρησιμοποιούν περισσότερο κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Το 50% των ερωτηθέντων απάντησε ότι προτιμά να μην χρησιμοποιούν τα κλιματιστικά όταν κοιμούνται γιατί θεωρούν ότι είναι επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία.

6. Υπολογιστικές Προσομοιώσεις

Προσφάτως έγιναν διαθέσιμες ορισμένες σχετικά εκτεταμένες μετρήσεις οι οποίες προέρχονται από ένα τριώροφο αίθριο (όροφοι 14 έως 16) με ένα υβριδικό σύστημα φυσικού εξαερισμού, υποβοηθούμενο από τον ήλιο (hybrid solar-assisted natural ventilation system) στο κτήριο Μηχανικής του Πανεπιστημίου Concordia, στο Μόντρεαλ του Καναδά. Οι θερμικές συνθήκες του χώρου του αιθρίου μελετήθηκαν αριθμητικά χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του μοντέλου RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes. Τα μοντέλα αναταράξεων (turbulence models) που δοκιμάστηκαν περιλαμβάνουν τα k-ε, RNG k-ε, 'realizable' k-ε, and SST k-u μοντέλα. Η ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ των επιφανειών του χώρου του αιθρίου υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το Discrete Transfer Radiation Model. Οι εξισώσεις της σταθερής κατάστασης επιλύθηκαν χρησιμοποιώντας έναν εμπορικό επίλυτή CFD FLUENT (commercial CFD solver FLUENT). Τα αριθμητικά αποτελέσματα που εξάχθηκαν αφορούσαν στις συνθήκες που επικρατούσαν όταν γινόταν λήψη μετρήσεων στο αίθριο του Concordia, για καθαρές μέρες, με τις περσίδες πλήρως ανοιχτές ή κλειστές και με το σύστημα φυσικού εξαερισμού (NV - Natural Ventilation system) ON ή OFF. Οι προβλέψεις του μοντέλου CFD επικυρώθηκαν από τη σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις που ήταν διαθέσιμες και βρέθηκε ότι οι αριθμητικές προβλέψεις του μοντέλου CFD συμφωνούν με τις μετρήσεις.

Ένα υβριδικό σύστημα εξαερισμού στο αίθριο ενός κτηρίου μπορεί να αξιοποιηθεί ως ένα αποτελεσματικό σύστημα ψήξης προκειμένου να μειωθεί σημαντικά η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος κλιματισμού. Μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύστημα διπλής λειτουργίας (two-mode system), το οποίο χρησιμοποιεί τόσο μηχανικά όσο και καθοδηγούμενα από την πλευστότητα (buoyancy-driven) συστήματα ψύξης, ή ένα συνδυασμό των δύο σε διαφορετικές ώρες της ημέρας ή της εποχής. Η σχεδίαση ανοιχτού χώρου του αιθρίου, με ψηλές οροφές, προσφέρει πρόσφορο έδαφος για την προώθηση της στρωματοποίησης των φυσικών θερμοκρασιών (natural temperature stratification), και επομένως ενισχύει το φαινόμενο της στοιβας (stack effect). Τα αίθρια με εξελεγμένο εξαερισμό στοιβας (stack ventilated) έχουν τη δυνατότητα να καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια για την ψήξη του χώρου σε σχέση με τα τυπικά κτήρια που χρησιμοποιούν μηχανικό εξαερισμό. Ο σωστός φυσικός εξαερισμός πρέπει να βασίζεται στη λεπτομερή κατανόηση της ροής του αέρα εντός κλειστών χώρων στις οποίες κυριαρχούν διαφορές στην πίεση εξαιτίας των δυνάμεων του αέρα και της πλευστότητας (wind and buoyancy forces). Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται ευρέως ο CFD για το σχεδιασμό και τη λειτουργία κτηρίων και κτηριακών συστημάτων και αποδεικνύεται ότι είναι ένα εξαιρετικά πολύτιμο εργαλείο στο σχεδιασμό των προαναφερθέντων εγκαταστάσεων. Σχετικές αναλύσεις για την εφαρμογή

του CFD στο πεδίο των συστημάτων κτηρίων δίνονται στα [1-8]. Η εφαρμογή του CFD σε κτήρια-αίθρια (atrium type buildings) έχει λάβει αρκετή προσοχή, π.χ. [9-13], λόγω όμως της πολύπλοκότητας των ροών που απαιτούνται και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφορετικών τρόπων ανταλλαγής θερμότητας, παραμένουν ορισμένες αμφιβολίες που σχετίζονται με την ακρίβεια των δεδομένων που λαμβάνονται. Μια ευρύτερη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του CFD και των πειραματικών αποτελεσμάτων θα απαντούσε ορισμένους από αυτούς τους προβληματισμούς. Υπάρχουν ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα για κτήρια-αίθρια [14-19], υπάρχει όμως η ανάγκη για αναλυτικότερες, εκτεταμένες και μακροπρόθεσμες μετρήσεις σε διαφορετικά μέρη ανά τον κόσμιο. Ο Guohui Gan [20] μελέτησε ανοιχτές κοιλότητες, θερμενόμενες από τον ήλιο, περιλαμβανομένων και των ηλιακών καπνοδόχων (solar chimneys), για την ενίσχυση του φυσικού αερισμού σε κτήρια, χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό πακέτο CFD για την πρόβλεψη του ρυθμού ρευστότητας των ροών αέρος στις κοιλότητες. Το μοντέλο CFD επικυρώθηκε μέσω της σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα μετρηθέντα δεδομένα, από την οποία προέκυψε ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων και των μετρήσεων. Ο Σταβρακάκης και οι συνεργάτες του [21] εξέτασαν το φυσικό διασταυτούμενο αερισμό με ανοίγματα σε μη συμμετρικές θέσεις σε ένα θάλαμο δοκιμών, τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά, χρησιμοποιώντας εξελιγμένες υπολογιστικές μεθόδους δυναμικής ρευστών για να καθορίσουν το μοντέλο ροής αέρα και το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον. Οι θερμοκρασίες και οι ταχύτητες μετρήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις εντός του θαλάμου, κατά τη διάρκεια μεσημεριανών και απογευματικών ορών, κατά τη διάρκεια τυπικών καλοκαιρινών ημερών. Στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποίησαν τρία Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) μοντέλα αναταράξεων: το standard k-epsilon, το RNG k-epsilon και το "realizable" k-epsilon, ώστε να συλλέξουν τα αριθμητικά αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε πως όλα τα μοντέλα αναταράξεων που εφαρμόστηκαν ήταν σε σχετική συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Οι Rohdin και B.Moshfegh[22], παρουσίασαν μια σύγκριση μεταξύ τριών μοντέλων eddy-viscosity turbulence, δηλαδή τα standard k-epsilon, το RNG k-epsilon και το "realizable" k-epsilon, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις προβλέψεις του μοντέλου ροής και της κατανομής της θερμοκρασίας σε μια μεγάλη βιομηχανική εγκατάσταση. Οι προβλέψεις συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις πεδίου και το μοντέλο RNG k-ε βρέθηκε ότι ήταν το περισσότερο σύμφωνο με τις μετρημένες τιμές. Ο Rundle [23] υλοποίησε μια συστηματική αξιολόγηση ενός εμπορικού CFD κώδικα, έναντι πειραματικών μετρήσεων και κατέληξε στο ότι ο CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας και της ροής ρευστών σε γεωμετρικές αιθρίες. Επίσης, παρέχει υποδείξεις οι οποίες σχετίζονται με τη μοντελοποίηση των αναταράξεων και της μεταφοράς της σχετικής θερμότητας. Επιπλέον, έχει δοθεί προσοχή στην αξιολόγηση της χρήσης πολλαπλών μοντέλων αναταράξεων στην CFD των κτηρίων,

π.χ. [27-34]. Μια ανασκόπηση της χρήσης των μεθόδων CFD σε μελέτες της κατανομής ροής και θερμοκρασίας σε κτήρια τα οποία ενσωματώνουν αίθρια, δίνονται στο [35].

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι να χρησιμοποιήσει διαφορετικά μοντέλα αναταράξεων για την ανάλυση των υβριδικών συστημάτων αερισμού που ενσωματώνονται με αίθρια στα οποία οι περσίδες είναι ανοιχτές ή κλειστές, και να αξιολογηθούν τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν, συγκρινόμενα με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα διαθέσιμα πειραματικά, επιτρέποντας να πραγματοποιήσουμε μια εκτίμηση της ακρίβειας των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω των ποικίλων μοντέλων αναταράξεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα που χρησιμοποιούνται από την παρούσα εργασία για την επικύρωση των αριθμητικών προβλέψεων, δίνονται στο [18].

6.2 Περιγραφή Κτιρίου

Ο βασικός σχεδιασμός του συστήματος υβριδικού αερισμού του κτηρίου Μηχανικής του πανεπιστημίου Concordia, αποτελείται από πέντε αίθρια τριών ορόφων το καθένα (χωριζόμενα με πλάκες δαπέδου (floor slab), συνδεδεμένα με μάσκες ορόφου (floor grilles) με μηχανοκίνητους αποσβεστήρες (motorized dampers) για να επιτυγχάνεται ροή που καθοδηγείται από την πλευστότητα (buoyance driven flow) και στόρια εισόδου διαδρόμου (inlet corridor grilles) με μηχανοκίνητους αποσβεστήρες (επιφάνειας περίπου 1.4m²), τοποθετημένους στο τέλος των διαδρόμων της Νότιας και Βόρειας πρόσοψης κάθε ορόφου. Η Εικ.1 δείχνει την εξωτερική όψη του αιθρίου.



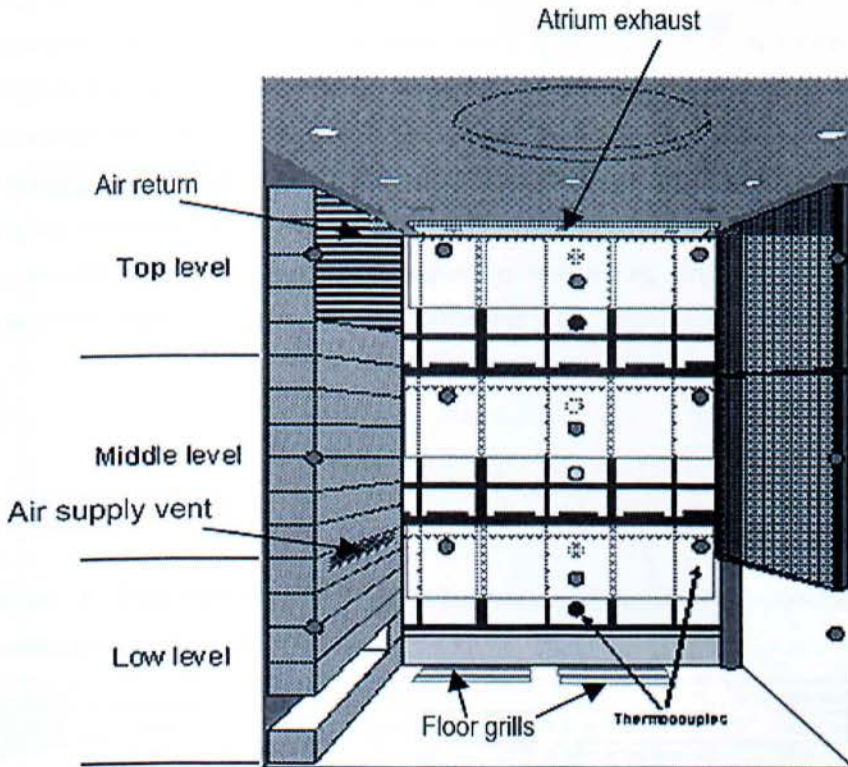
Εικ.1: Εξωτερική όψη του αιθρίου

Το σύστημα φυσικού αερισμού λειτουργεί όταν η εξωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 15 οC και 25οC, και η σχετική υγρασία είναι μικρότερη από 60%. Τα στόρια εισόδου του διαδρόμου και τα στόρια ορόφου που συνδέουν τα αίθρια, ελέγχονται από το αυτοματοποιημένο σύστημα του κτηρίου, και ο έλεγχος πραγματοποιείται βάσει παρακολούθησης μετεωρολογικών δεδομένων. Το σύστημα ελέγχου είτε ανοίγει είτε κλείνει τις βαλβίδες ταυτόχρονα. Τα αίθρια βρίσκονται στη Νοτιοδυτική πρόσοψη του κτηρίου, -35ο δυτικά από το Βορρά, και είναι εξοπλισμένα με μηχανικές περσίδες. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη σχεδιαστική προσέγγιση που ακολουθήθηκε, είναι διαθέσιμες στο [17]. Σημαντικές περιοχές και διαστάσεις του αιθρίου δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Διαστάσεις και σημαντικές περιοχές του αιθρίου

Dimensions					
Atrium height	13.02 m	Façade Glass Area	97.00 m ²	Floor Grills(net) Area	1.97 m ²
Atrium Width	9.39 m	Façade Blind Area	82.00 m ²	Corridor grills(net) Area	1.40 m ²
Atrium Depth	12.05 m	Air Supply (net) Area	0.40 m ²	Air Exhaust(net) Area	5.40 m ²
		Air Return(net) Area	7.44 m ²	Floor Grills(net) Area	1.97 m ²

Στο αίθριο υπάρχει ένα μηχανικό σύστημα παροχής και επιστροφής αέρα, όπως φαίνεται στην Εικ.2. Όταν το κτήριο είναι στη λειτουργία φυσικού αερισμού: (i) οι περσίδες εισόδου διαδρόμου που βρίσκονται στη Βόρεια και τη Νότια πρόσοψη, και οι περσίδες ορόφου που συνδέουν τα αίθρια, ανοίγουν ταυτόχρονα (ii) ο ρυθμός μηχανικής παροχής ροής στο αίθριο μειώνεται σε μια ελάχιστη τιμή, (iii) το άνοιγμα διαφυγής αερίων του αιθρίου (atrium exhaust) που βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο του αιθρίου ανοίγει και (iv) κλείνουν οι μονάδες παροχής που βρίσκονται στους διαδρόμους.



Εικ.2: Γραφική απεικόνιση του αιθρίου]

6.3. Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν από την Ε. Μουρίκη (2009) [18] που χρησιμοποιήθηκαν για την πιστοποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις CFD περιγράφονται αναλυτικά σε αυτήν την ενότητα. Η Μουρίκη [18] μέτρησε τις επιφάνειες του γυαλιού και των περσίδων και τη θερμοκρασία του αέρα σε διάφορες θέσεις στο ψηλότερο αίθριο (14ος – 16ος) όροφος, για

διαφορετικές θέσεις των περσίδων (κλειστές/ανοιχτές), εστιάζονται κυρίως σε καθαρές ημέρες. Θερμοστοιχεία με ακρίβεια καλύτερη από 0.5oC τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις (Πίνακας 2) στο αίθριο, προκειμένου να καταγράφουν τις θερμοκρασίες του γυαλιού, των περσίδων και του αέρα. Ένα σχήμα του αιθρίου στο οποίο προσδιορίζονται οι θέσεις των θερμοστοιχείων είναι αυτό στην Εικ.2. Τέσσερις αισθητήρες ταχύτητας εγκαταστάθηκαν στην παροχή και τον εξαερισμό του αιθρίου, καθώς και στα πλέγματα ορόφων (Βόρεια και Νότια πρόσοψη) για να παρακολουθούν την ταχύτητα του αέρα σε ένα εύρος 0.5-10 m/s με μια ακρίβεια 0.03±1 m/s. Θερμοκρασίες, ταχύτητες παροχής και εξαερισμού καταγράφονται κάθε 1 λεπτό, ενώ η ταχύτητα αέρα και η πτώση πίεσης στα πλέγματα των διαδρόμων καταγράφονται κάθε 5 sec. Επιπλέον, καταγραφόταν και η ηλιακή ακτινοβολία στο αίθριο και οι αντίστοιχες καιρικές συνθήκες (θερμοκρασίες και υγρασία) ήταν διαθέσιμες μέσω του σταθμού μετεωρολογικών δεδομένων στην οροφή του κτηρίου. Τα δεδομένα ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου λαμβάνονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του αεροδρομίου του Dorval. Λεπτομέριες σχετικά με τις πειραματικές μετρήσεις σε διαφορετικές περιπτώσεις μπορούν να βρεθούν στο [18].

Πίνακας 2: Θερμοκρασίες αέρος και επιφάνειας – στοιχεία που τοποθετήθηκαν στην πρόσοψη και το εσωτερικό του αιθρίου.

Left façade		Middle façade				Right façade	
Height (m)	Number of t/c	Height (m)	Number of t/c		Height (m)	Number of t/c	
10.25	3 (glass, blind, room air)	10.9	4 (glass, blind, cavity, room air)		10.25	3 (glass, blind, room air)	
		9.35	4 (glass, blind, cavity, room air)				
6.165	3 (glass, blind, room air)	6.9	4 (glass, blind, cavity, room air)		6.165	3 (glass, blind, room air)	
		5.2	4 (glass, blind, cavity, room air)				
2.1	3 (glass, blind, room air)	3.05	4 (glass, blind, cavity, room air)		2.1	3 (glass, blind, room air)	
		1.35	4 (glass, blind, cavity, room air)				
Total	9		24			9	
Height (m)	East wall number of t/c	West wall number of t/c	East corridors number of t/c	West corridors number of t/c	Staircase number of t/c	Air supply number of t/c	Exhaust number of t/c
10.25	1	1	1	1	1	1	1
6.165	1	1	1	1	1		
2.1	1	1	1	1	1		
Total	3	3	3	3	3	1	1

6.4. Αριθμητική μοντελοποίηση

Ένα μοντέλο CFD ενός αιθρίου σαν αυτό της Ευκ.2 χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του εσωτερικού θερμικού περιβάλλοντος του αιθρίου, χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό λογισμικό CFD, το FLUENT 6.3.26. Το σχέδιο της ροής του αέρα και οι θερμοκρασιακές κατανομές στο αίθριο ελέγχονται από τους νόμους διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Λόγω του ότι ο φυσικός αερισμός είναι ένα φαινόμενο τυχαίου χαρακτήρα (random nature) εξαιτίας των συνεχών αλλαγών στις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, οποιοδήποτε μαθηματικό μοντέλο εφαρμόζεται για την πρόβλεψη του φυσικού αερισμού θα πρέπει να περιλαμβάνει και το δυναμικό χαρακτήρα των εξωτερικών συνθηκών. Εφαρμόζοντας μια μέθοδο CFD κανείς, θα χρησιμοποιήσει ιδανικά μια προσέγγιση χρόνου, η οποία εντούτοις, θα απαιτούσαι γνώση των χρονικών μεταβολών στις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται. Αυτή η τεχνική θα παρείτε πολύ αναλυτικές και χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το φυσικό αερισμό, αλλά απαιτεί υπερβολικούς υπολογιστικούς πόρους για πρακτικ'ε εφαρμογές. Μια απλοποιημένη προσέγγιση, ώστε να ξεπεράσουμε τέτοιους περιορισμούς, είναι η κατάσταση σταθερής κατάστασης, καθώς τα περισσότερα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της ημέρας σε πραγματικά κτήρια, προκύπτουν θερμοκρασιακές αλλαγές, αλλά η παραδοχή της σταθερής κατάστασης θεωρείται έγκυρη για μεγάλες χρονικές περιόδους. Επομένως, προκειμένου να αναγνωρίσουμε την πιθανή μέση τιμή ταχυτήτων και θερμοκρασιών, συναρτήση του χρόνου, η λύση δόθηκε χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Reynolds για σταθερή, ασυμπίεστη, τρισδιάστατη και ταραχώδη ροή. Το μοντέλο CFD θεωρήθηκε ότι είναι αυτό της σταθερής κατάστασης και ο χρόνος προσομοίωσης επιλέχθηκε να είναι οι 16 ώρες, όταν και πραγματοποιείται η καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων. Για τη διαχείριση των δυνάμεων πλευστότητας στις εξισώσεις ορμής, υιοθετήθηκε η προσέγγιση Boussinesq, δηλαδή, θεωρήθηκε ότι οι ιδιότητες του ρευστού είναι σταθερές, εκτός από την αλλαγή στην πυκνότητα συναρτήση της θερμοκρασίας, η οποία αυξάνει τις δυνάμεις πλευστότητας, το οποίο όμως αντιμετωπίζεται με μια γραμμική σχέση μεταξύ της αλλαγής πυκνότητας και της αλλαγής θερμοκρασίας. Επιπλέον, ο όρος όρος της απαγωγής στην εξίσωση ενέργειας παραλήφθηκε εξαιτίας των χαμηλών ταχυτήτων που λαμβάνουν μέρος.

Τέσσερα μοντέλα αναταράξεων: (1) k-epsilon-standard (k-εSTD), (2)k-epsilon-renormalization group (k-ε-RNG) (3) k-epsilon- realiz-able και (4) k-omega-shear stress transport (k-ω-SST) χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν τη μελέτη για την εκτίμηση του εσωτερικού θερμικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι μέτρησης μέσου βάρους και SIMPLE για την διακριτικοποίηση του χώρου και τη σύζευξη πίεσης και ταχύτητας, ενώ ένα μοντέλο upwind δεύτερης τάξης χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτικοποίηση της ορμής και των άλλων εξισώσεων στις αριθμητικές προσομοιώσεις. Θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί σύγκλιση όταν η εναπομείνουσα ενέργεια ήταν χαμηλότερη από 0.001% και οι

εναπομείνουσες μεταβλητές ροής έφτασαν σε επίπεδα χαμηλότερα από 0.1% κατά τις τελευταίες 100 επαναλήψεις.

Τα αρχικά αριθμητικά αποτελέσματα εξήχθησαν με τρία διαφορετικά πλέγματα, για να καθοριστεί ότι το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά καλό ώστε να επιτρέψει την πρόβλεψη των λεπτομεριών της ροής με επαρκή ακρίβεια, αλλά δεν ήταν τόσο ακριβές ώστε να απαιτεί πολύ υψηλούς υπολογιστικούς χρόνους.

6.5.

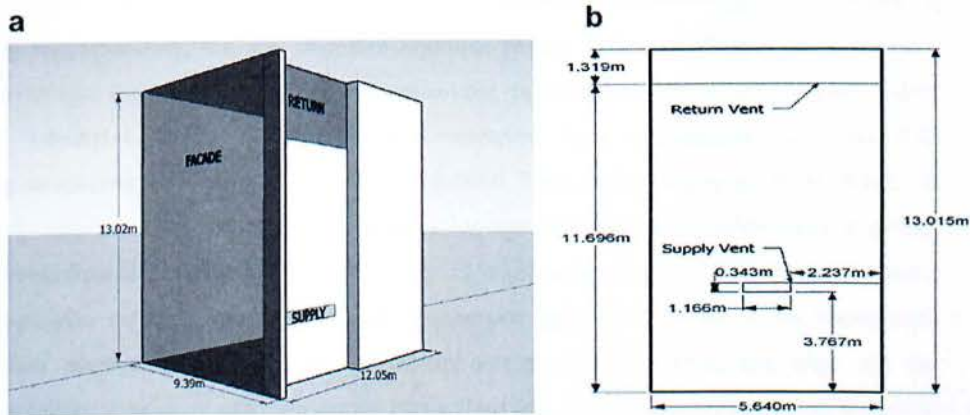
Μοντέλα

Ακτινοβολίας

Η μεταφορά θερμότητας από τη θερμική ακτινοβολία είναι εξαιρετικά σημαντική ώστε να ληφθεί υπόψη κατά τη μοντελοποίηση ενός χώρου αιθρίου. Για να υπολογίσουμε την ακτινοβολία, πρέπει να επιλυθούν εξισώσεις έντασης μεταφοράς ακτινοβολίας (intensity transport equations (RTEs)). Η τοπική απορρόφηση από το ρευστό και στα όρια, συνδέει τις RTEs με τις εξισώσεις ενέργειας. Το FLUENT προσφέρει πέντε μοντέλα ακτινοβολίας: Discrete Transfer Radiation Model (DTRM); P-1 Radiation Model; Rossel and Radiation Model; Surface to Surface (S2S) Radiation Model; Discrete Ordinates (DO) Radiation Model. Το μοντέλο DTTRM θεωρήθηκε επαρκές για τις παρούσες μετάλλες. Η κύρια υπόθεση που ακολούθησε το μοντέλο DTRM ήταν ότι η ακτινοβολία που απομακρύνεται από ένα επιφανειακό στοιχείο σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση στερεών γωνιών (solid angles) μπορεί να προσεγγιστεί από μια μοναδική ακτίνα. Επίσης με στο FLUENT είναι διαθέσιμη μια ηλιακή υπολογιστική μηχανή (solar calculator) για τον υπολογισμό της κατεύθυνσης της ακτίνας και της ακτινοβολίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της θέσης του ήλιου βάση των δοσμένων εισόδων της ώρας, της ημερομηνίας και της γεωγραφικής τοποθεσίας.

6.5.1. Γεωμετρικό μοντέλο

Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας ένα σχετικά απλοποιημένο γεωμετρικό μοντέλο του εσωτερικού χώρου του αιθρίου. Οι γενικές διαστάσεις χρησιμοποιήθηκαν, αλλά για ευκολία η σκάλα, τα έπιπλα και τα ανοίγματα προς το διάδρομο δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς επίσης και μικρές γωνίες στο αίθρο. Οι γενικές διαστάσεις του γεωμετρικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στην Εικ.3. Το αίθριο έχει συνολικό μέγεθος 12.05 m x 9.39 m x 13.02 m και ο όγκος του αιθρίου είναι 1345m³.



Εικ.3: Γεωμετρία του αιθρίου (α) και πλευρικοί τοίχοι που περιέχουν την οπή παροχής και εξαερισμού (β)

6.5.2. Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες ρυθμίστηκαν ώστε να είναι πολύ κοντά με τις πειραματικές που αναφέρονται στον Πίνακα 3. Οι κατάλληλες οριακές συνθήκες προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα που ήταν διαθέσιμα και τις μετεωρολογικές πληροφορίες που λήφθηκαν από το Environment Canada (2008). Οι επιφάνειες των τοίχων στο εσωτερικό του κτηρίου θεωρήθηκαν αδιαβατικές. Οι μικτές θερμικές οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν για την επιφάνεια του γυαλιού των προσόψεων. Το γυαλί της πρόσοψης που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο αίθριο ήταν τύπου argon filled double glazing (6 mm glass/12 mm air space/6 mm glass), με ένα 0.1 ελάχιστο e-coating προς την εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού παραθύρου. Οι οπτικές ιδιότητες του γυαλίσματος (glazing) (ημι διαφανές) που χρησιμοποιήθηκε στις προηγούμενες μελέτες με ηλιακή διαπερατότητα 36% και απορροφητικότητα 17.5% χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτήν την περίπτωση. Η μοντελοποίηση του γυαλίσματος απλοποιήθηκε ως ένα απλό γυάλισμα και αποτελεσματική θερμική απορροφητικότητα 0.0626 W/m² K για το γυάλισμα με ολικό πάχος 24mm. Η μεταφορά θερμότητας στο εξωτερικό, λόγω της μεταγωγής από τον αέρα, συμπεριλήφθηκε στο μοντέλο. Η εξωτερική θερμοκρασία αέρα, η διεύθυνση του αέρα και το μέγεθος (magnitude) που δόθηκε στα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν επίσης. Η επιφάνεια της πρόσοψης είναι στις 35ο βορειοδυτικά. Η εξωτερική συνισταμένη της μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκε ότι είναι 31.84 χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση Palyvos (2008) [37] για επιφάνειες προς τον άνεμο ο οποίος είναι: $hw=7.4+4Vw$. Η αντίστοιχη ταχύτητα ανέμου

(Vw) των 6.1 m/s χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εξίσωση. Η ανταλλαγή της ακτινοβολίας μεταξύ της πρόσοψης και του ουρανού λήφθηκε επίσης υπόψιν. Η θερμοκρασία ουρανού υπολογίστηκε ότι είναι 14.1oC χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση Mills (1999) [38], $T_{sky} = [e_{sky} T_{4out}]^{1/4}$, όπου η εκπομπή του ουρανού έχει υπολογιστεί ότι είναι 0.82 χρησιμοποιώντας τη σχέση, $e_{sky} = 0.727 + 0.0060 T_{out}$ με θερμοκρασία $T_{out} = 28.60C$. Η καθαρή επιφάνεια της παροχής αερισμού επιλέχτηκε ώστε να περιλαμβάνει την παρουσία των ανεμοδεικτών κατά μήκος της οπής. Ο πλευρικός τοίχος του αιθρίου ο οποίος περιλαμάνει τις οπές τροφοδοσίας και εξαερισμού φαίνεται στην Εικ.3. Τα πειραματικά δεδομένα παρέχουν τις τιμές της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας του αέρα που εισέρχεται στο αίθριο από την οπή παροχής. Η ροή θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλες τις εισόδους παροχής με σταθερή οριζόντια ταχύτητα. Επιπλέον, στις οπές εξαερισμού, υποθέτουμε ότι υπάρχουν μηδενικές βαθμίδες στα ανοίγματα για όλες τις μεταβλητές, και οι ρυθμοί ροής είναι ίσοι με τις πραγματικές τιμές τους. Οι εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις [18] και στις παρούσες προσομοιώσεις κατά τη διάρκεια καθαρών ημερών, φαίνονται στον Πίνακα 3.

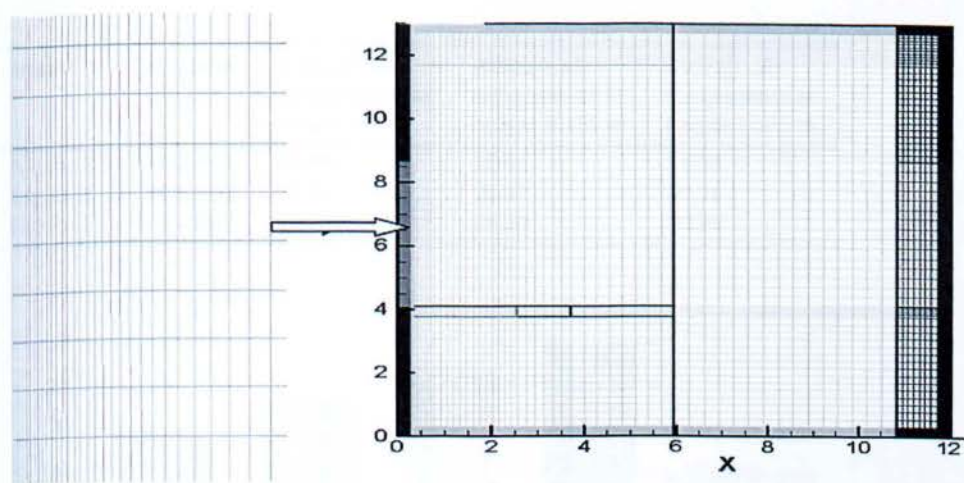
Πίνακας 3: Εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες κατά τη διάρκεια μιας καθαρής μέρας.

Cases	Date/Time (16:00 h)	Outdoor air temperature (°C)	Solar radiation (w/m ²)	Natural ventilation	Mechanical air		Blinds
					Temp. (°C)	Flow rate (m ³ /s)	
Case A	Sep 23rd, 2007	20	250	ON	17	0.20	Closed
Case B	Sep 1st, 2007	20	205	ON	17	0.12	Open
Case C	July 25th, 2007	25	130–180	OFF	14	1.60	Closed
Case D	Nov 2nd, 2007	6	280	OFF	14	1.20	Open

6.5.3. Σχεδιασμός πλέγματος

Μια μοντελοποίηση των φαινομένων αναταράξεων που περιλαμβάνονται στο χώρο του αιθρίου προϋποθέτει ότι το πλέγμα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα προκειμένου να ορίσει ένα ελάχιστο μέγεθος κυψελίδας για τον υπολογισμό της ανατάραξης ώστε να συντίθεται κατάλληλα με την προτεινόμενη γεωμετρία. Η πυκνότητα πλέγματος που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη στρατηγική μοντελοποίησης near-wall, η οποία καθορίζεται από την χαρακτηριστική παράμετρο y^+ . Χρησιμοποιήθηκαν οι συνολικές διαστάσεις του πεδίου όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως, καθώς κ ένα μοντέλο τριών διαστάσεων προκειμένου να εκτελεστεί η κατάλληλη μοντελοποίηση των αναταράξεων. Ο Nielsen (2007) [36] παρέχει μια συσχέτιση για την επιλογή της αρχικής κυψελίδας για το

πλέγμα. Η συσχέτιση που χρησιμοποιείται είναι η $N=44000 \times V^{0.38}$, όπου N είναι ο αριθμός των κυψελίδων και V είναι ο όγκος σε m^3 . Είναι σημαντικό να δώσουμε έμφαση στο ότι δεν μπορεί να υπάρξει μια πραγματικά καθολική συσχέτιση μεταξύ του όγκου και του αριθμού των κυψελίδων, η πολυπλοκότητες των ροών στα κτήρια μπορούν να διαφέρουν σημαντικά και επομένως επηρεάζουν τον αριθμό των κυψελίδων που απαιτούνται. Ο όγκος του αιθρίου υπολογίστηκε σε $1345 m^3$ ο οποίος σύμφωνα με το συσχετισμό του Nielsen αντιστοιχεί περίπου σε 808000 κυψελίδες. Συμπεριλαμβάνοντας και τις απαιτούμενες τιμές y^+ κοντά στα τοιχώματα και την υπολογιστική χωρητικότητα των διαθέσιμων υπολογιστών, ο αριθμός των κυψελίδων που χρησιμοποιήθηκαν στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις ήταν μεταξύ 800000 και 1200000. Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκαν οι επιθυμητές τιμές y^+ για τα μοντέλα $k-\epsilon$ που χρησιμοποιούν συγκεκριμένες συναρτήσεις τοίχων (wall functions) στο εύρος τιμών 30-300 και για τα μοντέλα $k-u$ που χρησιμοποιούν εξελιγμένες συναρτήσεις τοίχους οι αντίστοιχες τιμές ήταν ~ 10 . Για να επιτύχουμε τις επιθυμητές τιμές y^+ , οι κυψελίδες κατά μήκος του τοίχους έπρεπε να είναι πολύ μικρές. Για να επιπλέον υπολογιστικό κόστος, χρησιμοποιήθηκε ψηλό πλέγμα κοντά στους τοίχους και χονδρό μακτρά από αυτούς, όπως φαίνεται στην Εικ.4



Εικ.4: Δομή πλέγματος για προσομοιώσεις CFD (Πλέγμα 2)

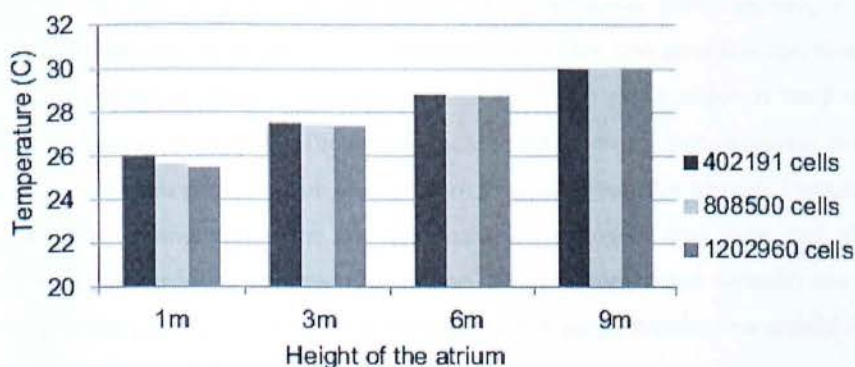
6.5.4. Έλεγχος ευαισθησίας πλέγματος

Προκειμένου να εξετασθεί η ανεξαρτησία του πλέγματος από τις αριθμητικές τιμές πραγματοποιήθηκε ένα τεστ ελέγχου της ευαισθησίας του. Εξετάστηκαν τρεις πυκνότητες πλέγματος: 1) 402K στοιχεία, 2) 808K στοιχεία και 3) 120K στοιχεία. Τα αποτελέσματα των

προσομοιώσεων που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα εξάχθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο αναταράξεων k-u-SST παράλληλα με το μοντέλο ακτινοβολίας DTRM που εφαρμόστηκε στις συνθήκες που επικρατούσαν για τις πειραματικές μετρήσεις. Οι μέσες θερμοκρασίες αέρος σε ένα οριζόντιο επίπεδο για τρεις πυκνότητες πλέγματος σε τρία διαφορετικά ύψη, φαίνεται στον Πίνακα 4. Οι προβλεπόμενες τιμές κάθετης θερμοκρασίας σε διαφορετικά ύψη παράλληλα με την κάθετη γραμμή στο κέντρο του αιθρίου χρησιμοποιώντας τρεις πυκνότητες πλέγματος φαίνονται στην Εικ.5. Από τις κατανομές της προβλεπόμενης θερμοκρασίας υπολογίστηκε πως τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ως αποτέλεσμα πολύ μικρή διαφορά και παρείχαν ισορροπία μεταξύ των απαιτούμενων υπολογιστικών πόρων και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4: Τυπικό αποτέλεσμα πυκνότητας πλέγματος σε προβλεπόμενες θερμοκρασίες (οC)

Mesh	Cell count	Average air temperature at height 2.1 m	Average air temperature at height 6.165 m	Average air temperature at height 10.25 m
Mesh-1	402,191	26.93	28.63	31.06
Mesh-2	808,500	26.76	28.61	30.81
Mesh-3	1,202,960	26.69	28.59	30.76



Εικ.5: Προβλεπόμενες κάθετες θερμοκρασίες σε διάφορα ύψη κατά μήκος της κάθετης γραμμής στο κέντρο του αιθρίου για τρεις πυκνότητες πλέγματος.

6.6. Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω σε δύο ενότητες: η ενότητα 5.1 παρουσιάζει τα ποιοτικά αποτελέσματα και τη Ενότητα 5.2 τα ποσοτικά αριθμητικά αποτελέσματα για τις διαφορετικές περιπτώσεις. Επίσης σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών προβλέψεων.

6.6.1. Περιπτώσεις προσομοιώσεων

Προκειμένου να μελετηθεί το αποτέλεσμα του υβριδικού αερισμού προσομοιώθηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις εσωτερικών και εξωτερικών συνθηκών του χώρου του αιθρίου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, με τις περσίδες πλήρως ανοιχτές ή κλειστές, χρησιμοποιώντας τέσσερα μοντέλα αναταράξεων: το standard k-ε, RNG k-ε, 'realizable' k-ε, και το SST k-turbulence, παράλληλα με το μοντέλο ακτινοβολίας, και είναι τα παρακάτω:

Case-A: φυσικός αερισμός ON, κλειστές περσίδες και μειωμένη παροχή ροής αέρα (0.2 m³/s).

Case-B: φυσικός αερισμός ON, ανοιχτές περσίδες και μειωμένη παροχή ροής αέρα (0.12 m³/s).

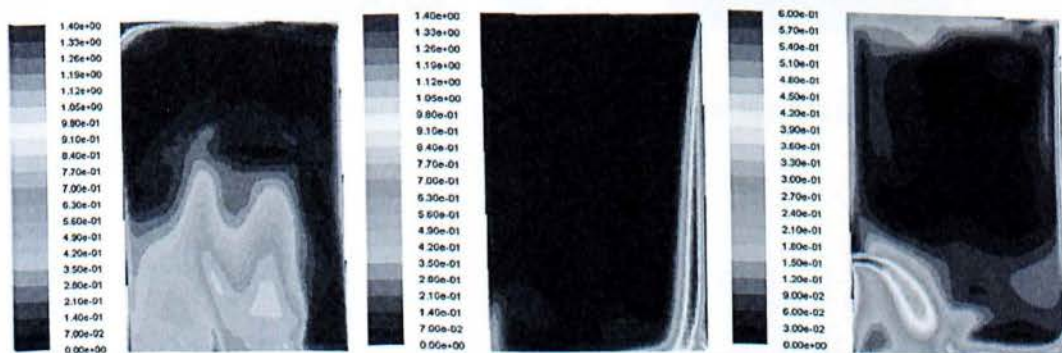
Case-C: φυσικός αερισμός OFF, κλειστές περσίδες και παροχή ροής αέρα (1.6 m³/s).

Case-D: φυσικός αερισμός OFF, ανοιχτές περσίδες και παροχή ροής αέρα (1.2 m³/s).

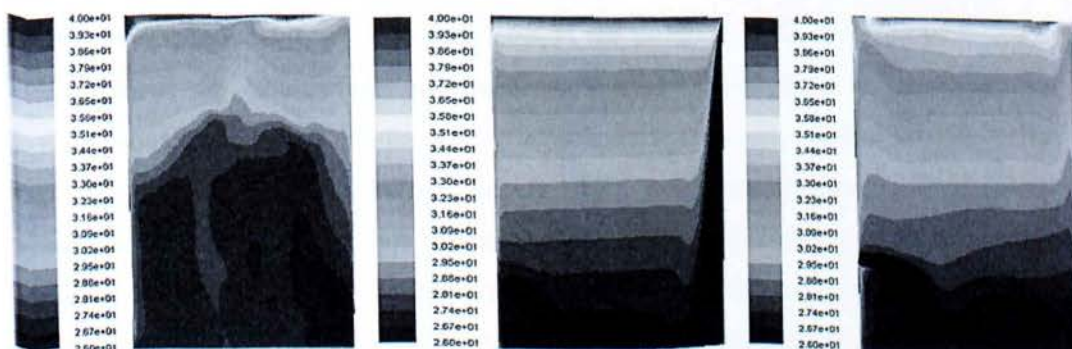
Τα ποσοτικά αριθμητικά αποτελέσματα που εξάχθηκαν για την case-A στις 16:00 h στις 23/09/2007 με ανοιχτές περσίδες και φυσικό αερισμό σε λειτουργία (ON), φαίνονται στις Εικ.6-8. Οι Εικ. 6 και 7 αναπαριστούν τα διαγράμματα περιγράμματος (contours) της ταχύτητας και της θερμοκρασίας αντίστοιχα, κατά μήκος των επιπέδων που είναι παράλληλα με την πρόσοψη κοντά στις εισόδους ($\chi=0.5, 3$ και 11 m) για το αίθριο. Η Εικ.8 απεικονίζει τα διαγράμματα περιγράμματος (contours) της ταχύτητας και της θερμοκρασίας κατά μήκος του μεσαίου κάθετου επιπέδου που είναι κάθετο στην πρόσοψη του αιθρίου. Είναι εμφανές ότι η τα επίπεδα στρωματοποίησης της θερμοκρασίας υπάρχουν στο χώρο του αιθρίου και η θερμοκρασία αυξάνει από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο επίπεδο του αιθρίου. Οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στη συγκεκριμένη περιοχή κυμαίνονται μεταξύ 26 και 27 οC, εντός της ζώνης άνεσης (comfortable zone).

Στη φάση του ρευστού μπορούν να παρατηρηθούν φαινόμενα ελεύθερης και εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας, λόγω της παρουσίας διαφοροποιημένων ζωνών ροής εντός του υπολογιστικού μοντέλου. Επίσης μπορεί να φανεί ότι κατά την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχει ελεύθερη μεταφορά θερμότητας η οποία φαίνεται από το σχηματισμό ροών αέρα που κινούνται ανοδικά εντός του αιθρίου. Από αυτές τις εικόνες μπορεί να φανεί πως η στρωματοποίηση της θερμοκρασίας τυπικά κυμαίνεται από 2 έως 7οC

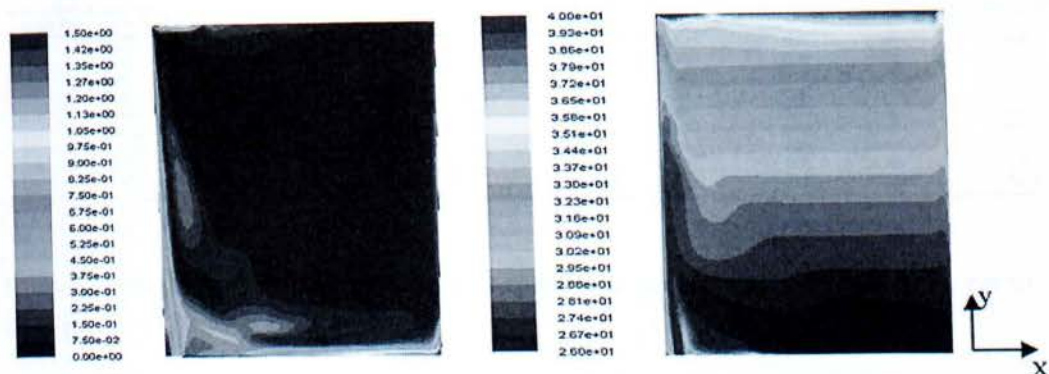
από το κατώτερο στο ανώτερο επίπεδο του αιθρίου με όταν λειτουργεί ο φυσικός αερισμός και οι περσίδες είναι κλειστές, αναλόγως των καιρικών συνθηκών και των επιπέδων ψύξης. Η ταχύτητα κυμαίνεται από 0.01 έως 0.4 m/s και η ένταση των αναταράξεων 2-12% από το χαμηλότερο προς το ψηλότερο επίπεδο στο κέντρο του αιθρίου. Οι μέγιστες θερμοκρασίες βρίσκονται συνήθως στο ανώτερο τμήμα του αιθρίου, ενώ οι χαμηλότερες στα χαμηλότερα επίπεδα κοντά στο δάπεδο.



Εικ.6: Διάγραμμα ταχύτητας κοντά στις εισόδους του αιθρίου με κλειστές περσίδες και το φυσικό αερισμό σε λειτουργία στις 16:00 την 23/09/2007.



Εικ.7: Διάγραμμα θερμοκρασίας κοντά στις εισόδους του αιθρίου κατά μήκος των κάθετων επιπέδων, παράλληλα με το γαλι της πρόσοψης.



Εικ.8: Διαγράμματα ταχύτητας και θερμοκρασίας κατά μήκος του μεσαίου κάθετου επιπέδου που είναι κάθετο με την πρόσοψη του αιθρίου.

6.6.2. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών προβλέψεων

Η συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζει μια σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των προβλεφθέντων τιμών θερμοκρασίας για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, χρησιμοποιώντας τέσσερα μοντέλα αναταράξεων, τα k-ε-STD, k-εRNG, k-ε-‘real-izable’, k-u-SST. Στόχος τους δεν ήταν μόνο η αξιολόγηση του μοντέλου CFD, αλλά και η σύγκριση της απόδοσης των διαφορετικών μοντέλων αναταράξεων προκειμένου να καταγραφεί το μοντέλο ροής του αέρα και η κατανομή της θερμοκρασίας εντός του αιθρίου. Οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας στα ανώτερα, μεσαία και κατώτερα επίπεδα του αιθρίου, χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των μετρήσεων και των προβλέψεων και φαίνονται στους Πίνακες 5-8, παράλληλα με το ποσοστό λάθους μεταξύ των προβλεφθέντων και των μετρημένων τιμών. Η Εικ. 9 δείχνει την προβλεφθείσα και τη μετρημένη μέση θερμοκρασία κατά μήκος του ύψους του αιθρίου στις 16:00 h, για τυπικές καθαρές ημέρες για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, με τις περσίδες πλήρως ανοιχτές ή κλειστές και με το σύστημα αερισμού σε λειτουργία ή εκτός λειτουργίας (ON – OFF).

Οι αντίστοιχες εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Για την case-D, οι συγκρίσεις των προβλέψεων της έντασης των αναταράξεων (%) με διαφορετικά μοντέλα αναταράξεων σε διαφορετικές θέσεις του αιθρίου (a) $x=0.24\text{m}$, $z=4.22\text{m}$, (b) $x=5.96\text{m}$, $z=7\text{m}$, (c) $x=8.8\text{m}$, $z=4.44\text{m}$, φαίνονται στην Εικ.10.

Πίνακας 6: Σύγκριση προβλεφθέντων και μετρηθέντων μέσων τιμών θερμοκρασίας για το Case-B.

Height (m)	Measured T(°C)	k-u-SST T(°C)	% error	k-e-STD T(°C)	% error	k-e-RNG T(°C)	% error	k-e-Relizable (°C)	% error
1090	30.00	28.74	0.04	28.34	0.05	27.92	0.07	28.07	0.06
1025	29.20	28.44	0.02	28.18	0.03	27.98	0.04	28.22	0.03
935	29.10	27.64	0.05	27.88	0.04	27.56	0.05	28.05	0.03
690	28.10	27.24	0.03	27.76	0.01	27.30	0.03	27.84	0.01
616	28.00	27.24	0.02	27.40	0.02	27.20	0.03	27.35	0.02
520	27.90	27.5	0.01	27.46	0.01	26.92	0.03	27.17	0.02
305	27.70	27.39	0.01	26.93	0.02	27.01	0.02	26.83	0.03
210	27.40	26.69	0.02	26.63	0.03	26.78	0.02	26.50	0.03
135	27.00	27.73	0.02	27.02	0.0007	27.04	0.001	27.17	0.006

Πίνακας 7: Σύγκριση προβλεφθέντων και μετρηθέντων μέσω των τιμών θερμοκρασίας για το Case-B.

Height (m)	Measured T(°C)	k-u-SST T(°C)	% error	k-e-STD T(°C)	% error	k-e-RNG T(°C)	% error	k-e-reizable (°C)	% error
1090	28.00	26.48	0.05	26.03	0.07	25.97	0.07	27.58	0.01
1025	27.80	26.26	0.05	25.91	0.06	25.56	0.08	27.37	0.01
935	27.20	25.44	0.06	25.12	0.07	25.05	0.08	26.61	0.02
690	25.80	23.97	0.07	23.73	0.08	23.85	0.07	25.14	0.02
616	25.50	23.47	0.08	22.72	0.10	22.17	0.13	24.49	0.04
520	25.30	22.94	0.09	23.21	0.08	22.68	0.10	24.40	0.03
305	23.00	21.50	0.06	21.58	0.06	21.34	0.07	23.27	0.01
210	22.00	20.88	0.05	22.72	0.03	20.84	0.05	22.50	0.02
135	21.70	20.68	0.04	21.04	0.03	20.39	0.06	23.32	0.07

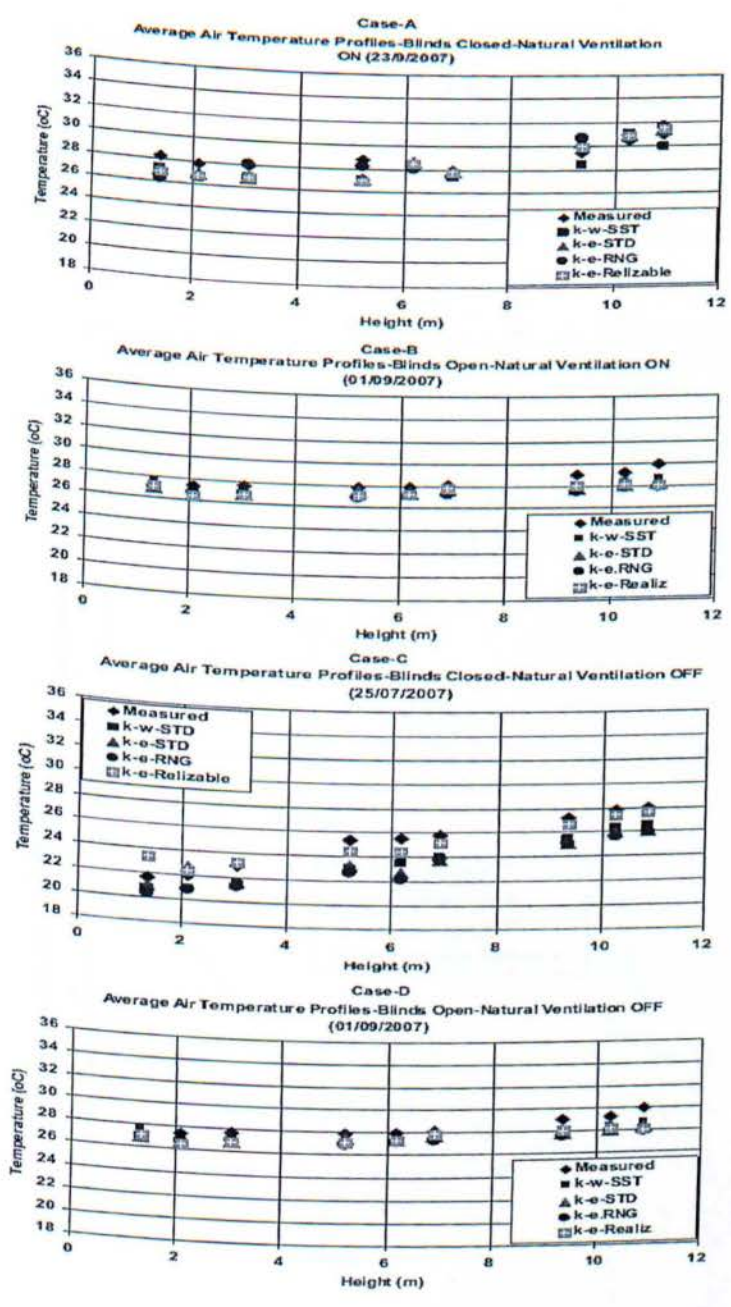
Όλα τα μοντέλα αναταράξεων προέβλεψαν αρκετά καλά τις μετρήσεις τις θερμοκρασίας, όπως αποδεικνύεται και από τις πειραματικές τιμές, για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Εντούτοις, το μοντέλο k-uSST έδωσε αποτελέσματα κοντινότερα στις μετρήσεις και καλύτερη πρόβλεψη της έντασης των αναταράξεων (Εικ.10). Οι τελικές μέσες θερμοκρασίες της Case-B, με το φυσικό αερισμό σε λειτουργία και τις περσίδες ανοιχτές, κυμαίνονται από 27.50°C έως 28.50°C κοντά στην οροφή. Στα χαμηλά και μεσαία επίπεδα, οι προβλεφθείσες τιμές βρίσκονται πολύ κοντά στις μετρηθείσες, αλλά στο ανώτερο επίπεδο υπάρχει μια διαφορά 0.2-2.0°C η οποία μπορεί να οφείλεται στη θερμική μάζα της οροφής η οποία θεωρήθηκε αδιαβατική στις προσομοιώσεις. Στην Case-C με το φυσικό αερισμό εκτός λειτουργίας και τις περσίδες κλειστές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η θερμοκρασία κυμαίνεται από 20.50°C στο επίπεδο του ορόφου έως 26.00°C κοντά στην οροφή. Η διαφορά μεταξύ των προβλεφθέντων και των πειραματικών τιμών των θερμοκρασιών στα μεσαία και υψηλά επίπεδα, σε σύγκριση με το χαμηλό επίπεδο, μπορούν να αιτιολογηθούν λόγω της θερμικής μάζας του κτηρίου. Η Case-D με το φυσικό αερισμό εκτός λειτουργίας και τις περσίδες ανοιχτές κατά την περίοδο του χειμώνα παρουσιάζει θερμοκρασία που κυμαίνεται από 22.00°C στο επίπεδο ορόφου έως περίπου 28.00°C κοντά στην οροφή. Σε αυτήν την περίπτωση οι υπολογισμένες τιμές είναι χαμηλότερες των προβλεφθέντων στο χαμηλό επίπεδο και υψηλότερες στο ανώτερο κατά περίπου 2.0°C, γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί στη θερμική μάζα του ορόφου και της οροφής, η οποίες θεωρήθηκαν αδιαβατικές στις προσομοιώσεις.

Πίνακας 8: Σύγκριση προβλεφθέντων και μετρηθέντων μέσων τιμών θερμοκρασίας για το Case-B.

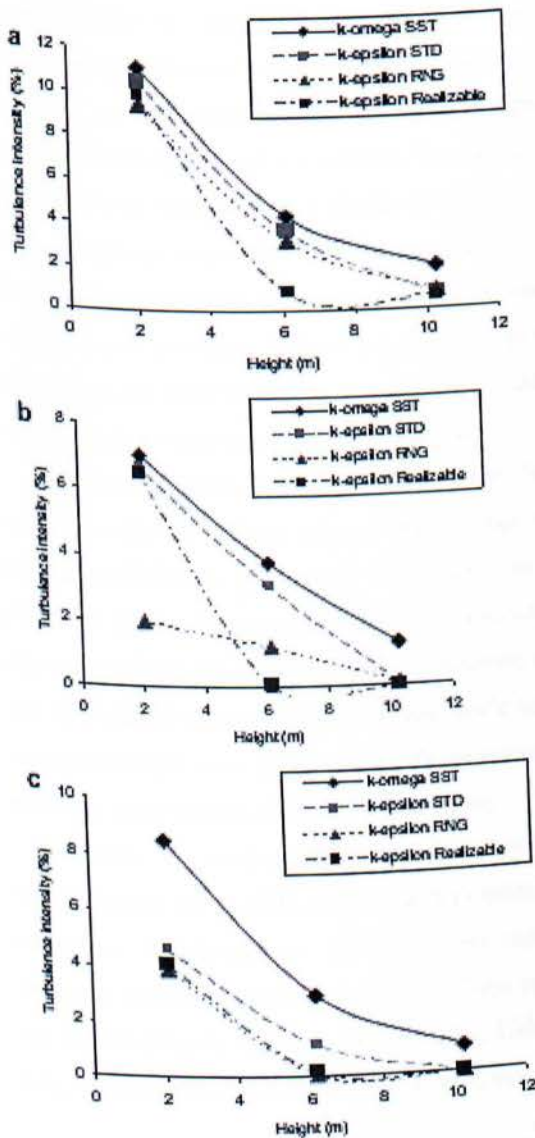
Height (m)	Measured T(°C)	k-u-SST T(°C)	% error	k-r-STD T(°C)	% error	k-r-RNG T(°C)	% error	k-r-reliable T(°C)	% error
1090	29.60	30.34	0.02	30.66	0.03	32.28	0.09	32.07	0.08
1025	29.00	29.73	0.02	30.45	0.05	31.84	0.09	31.40	0.08
9.35	27.60	29.00	0.05	29.60	0.07	31.00	0.12	30.64	0.11
6.90	26.50	27.08	0.02	26.71	0.008	28.67	0.08	28.40	0.07
6.16	26.00	26.30	0.01	26.15	0.005	27.89	0.07	27.6	0.06
5.20	25.50	25.74	0.01	25.18	0.01	27.07	0.06	27.07	0.06
3.05	25.00	23.30	0.06	23.12	0.07	25.91	0.03	25.01	0.0004
2.10	24.50	23.18	0.05	22.55	0.08	24.36	0.005	24.16	0.01
1.35	24.00	21.69	0.01	22.72	0.05	23.38	0.02	23.22	0.03

Όλα τα μοντέλα αναταράξεων προέβλεψαν αρκετά καλά τις μετρήσεις τις θερμοκρασίας, όπως αποδεικνύεται και από τις πειραματικές τιμές, για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Εντούτοις, το μοντέλο k-uSST έδωσε αποτελέσματα κοντινότερα στις μετρήσεις και καλύτερη πρόβλεψη της έντασης των αναταράξεων (Εικ.10). Οι τελικές μέσες θερμοκρασίες της Case-B, με το φυσικό αερισμό σε λειτουργία και τις περσίδες ανοιχτές, κυμαίνονται από 27.50C έως 28.50C κοντά στην οροφή. Στα χαμηλά και μεσαία επίπεδα, οι προβλεφθείσες τιμές βρίσκονται πολύ κοντά στις μετρηθείσες, αλλά στο ανώτερο επίπεδο υπάρχει μια διαφορά 0.2-20C η οποία μπορεί να οφείλεται στη θερμική μάζα της οροφής η οποία θεωρήθηκε αδιαβατική στις προσομοιώσεις. Στην Case-C με το φυσικό αερισμό εκτός λειτουργίας και τις περσίδες κλειστές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η θερμοκρασία κυμαίνεται από 20.50C στο επίπεδο του ορόφου έως 260C κοντά στην οροφή. Η διαφορά μεταξύ των προβλεφθέντων και των πειραματικών τιμών των θερμοκρασιών στα μεσαία και υψηλά επίπεδα, σε σύγκριση με το χαμηλό επίπεδο, μπορούν να αιτιολογηθούν λόγω της θερμικής μάζας του κτηρίου. Η Case-D με το φυσικό αερισμό εκτός λειτουργίας και τις περσίδες ανοιχτές κατά την περίοδο του χειμώνα παρουσιάζει θερμοκρασία που καυμαίνεται από 220C στο επίπεδο ορόφου έως περίπου 280C κοντά στην οροφή. Σε αυτήν την περίπτωση οι υπολογισμένες τιμές είναι χαμηλότερες των προβλεφθέντων στο χαμηλό επίπεδο και υψηλότερες στο ανώτερο κατά περίπου 20C, γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί στη θερμική μάζα του ορόφου και της οροφής, η οποίες θεωρήθηκαν αδιαβατικές στις προσομοιώσεις.

Φαίνεται ότι οι αριθμητικές προβλέψεις που λήφθηκαν βρίσκονται γενικά σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Η μέση διαφορά μεταξύ των προβλεφθέντων και των μετρηθέντων θερμοκρασιών αέρα κυμαίνεται από 1 έως 8%. Ο πιθανός λόγος αυτής της διαφοράς μπορεί να οφείλεται σε πειραματικό λάθος, το λάθος το οποίο οφείλεται στις παραδοχές που υιοθετούνται στο αριθμητικό μοντέλο, δηλ., τη θερμική μάζα των τοιχών που θεωρούνται μονωμένοι κατά τις προσομοιώσεις και σε άλλες πηγές θερμότητας στο αίθριο οι οποίες δεν λήφθηκαν υπόψη κατά τις προσομοιώσεις.



Εικ.9: Προφίλ θερμοκρασίας αέρα στο αίθριο σε τυπικές μέρες με τις περσίδες ανοιχτές ή κλειστές και με το σύστημα φυσικού αερισμού ON ή OFF.



Εικ. 10: Συγκρίσεις προβλέψεων της έντασης αναταράξεω (%) με διαφορετικά μοντέλα αναταράξεων σε διάφορες τοποθεσίες στο αίθριο (a) $x=0.24m$, $z=4.22m$, (b) $x=5.96m$, $z=7m$, (c) $x=8.8m$, $z=4.44m$

6.7. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη ερευνητική δουλειά εστίασε στην επικύρωση (validation) του μοντέλου CFD για τη ροή του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας σε ένα αίθριο τριών ορόφων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά. Τα αριθμητικά μοντέλα που συλλέχθηκαν αποδεικνύουν ότι τα μοντέλα αναταράξεων RANS τα οποία

περιλαμβάνουν τα standard k-epsilon, RNG k-epsilon, 'realizable' k-epsilon, και SST k-omega, δίνουν αποτελέσματα τα οποία συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια, τουλάχιστον, κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του αιθρίου. Εντούτοις, το μοντέλο k-uSST, έδωσε αποτελέσματα κοντικά με τις μετρήσεις και έδειξε καλύτερη πρόβλεψη της έντασης των αναταράξεων συγκρινόμενο με τα μοντέλα k-ε. Το μοντέλο SST – Shear Stress Transport του Menter [39], το οποίο δημιουργήθηκε για σύνθετες ροές, συνδυάζει τις εξισώσεις του μοντέλου k-ε με τις εξισώσεις του μοντέλου Wilcox k-u [40]. Το μοντέλο SST χρησιμοποιεί έναν περιοριστή (limiter) για το eddy-viscosity, ο οποίος έχει παρατηρηθεί ότι βρίσκεται σε μεγαλύτερη συμφωνία με τα πειράματα για σύνθετες ροές.

Παρατηρήθηκε επίσης η επιρροή των βαρυτικών δυνάμεων στα πεδία ταχύτητας εντός του αιθρίου. Επίσης, φάνηκε ότι υπό την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχουν φαινόμενα ελεύθεσης μεταφοράς θερμότητας, τα οποία αποδεικνύονται από το σχηματισμό ρευμάτων αέρος που κινούνται ανοδικά γύρω από τις θερμές επιφάνειες. Παρατηρήθηκε η στρωματοποίηση της υψηλότερης θερμοκρασίας αέρα στο τριόροφο αίθριο, στην περίπτωση που το σύστημα φυσικού αερισμού είναι εκτός λειτουργίας και οι περσίδες είναι κλειστές. Η στρωματοποίηση των χαμηλότερων θερμοκρασιών με το φυσικό αερισμό σε λειτουργία οφείλεται στην ισχυρή μεταφορά θερμότητας.

Από τη συγκεκριμένη εργασία, καθώς και από άλλες στη βιβλιογραφία, συμπεραίνεται ότι το CFD αποδεικνύεται αξιόπιστο για τη μοντελοποίηση των ροής και της μεταφοράς θερμότητας σε ένα αίθριο το οποίο υλοποιείται με ένα υβριδικό σύστημα αερισμού περιλαμβανομένων των φαινομένων της αγωγιμότητας, της μεταφοράς θερμότητας και της ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας. Επίσης, είναι δυνατόν να αναλύσουμε το ρυθμό ροής και τις κατανομές θερμοκρασίας εντός του αιθρίου, αριθμητικά.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ο φυσικός αερισμός αποτελεί τη βασικότερη τεχνική απομάκρυνσης της θερμότητας από το κτίριο τους θερμούς μήνες, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με φυσικά μέσα. Αποτελεί τη σημαντικότερη και συνηθέστερη μέθοδο φυσικού δροσισμού, εφόσον γίνεται με τον κατάλληλο τρόπο. Ο φυσικός αερισμός των κτιρίων μπορεί να εξοικονομήσει μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Από μετρήσεις και ενεργειακές καταγραφές και προσομοιώσεις σε κατοικίες στην Ελλάδα, προκύπτει μείωση της τάξης του 75 με 100% του ψυκτικού φορτίου λόγω του αερισμού (εφόσον εφαρμόζεται επαρκής ηλιοπροστασία στα κτίρια), γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να υποκαταστήσει ένα κλιματιστικό σύστημα, καθώς δημιουργούνται συνθήκες θερμικής άνεσης μέσα στους χώρους. Έιδικα στην εποχή μας είναι πολύ σημαντικός γιατί εξοικονομούμε σημαντικά πόσα ενέργειας και προστατεύουμε το περιβάλλον πολύ περισσότερο από ότι με την χρήση μη φυσικών μέσων αερισμού.

Βιβλιογραφία

Ευαγγελινός Ε., Ζαχαρόπουλος Η., Βιοκλιματικός Σχεδιασμός. Μαθιουλάκης Δ., <http://courseware.mech.ntua.gr/ml25285/ventihouse.pdf>

M.M. AboulNaga, S.N. Abdrabboh, Improving night ventilation into low-rise buildings in hot-arid climates exploring a combined wall-roof solar chimney, *Renew. Energ.* 19 (1–2) (2000) 47–54.

Abt E, Suh HH, Catalano P, Koutrakis P. Relative contribution of outdoor and indoor particle sources to indoor concentrations. *Environmental Science and Technology* 2000;34:3579–87.

Ackermann-Liebrich UA, Leuenberger Ph, ScwartzJ, Schindler C, Monn C, Sapaldia T. Lung function and long term exposure to air pollutions in Switzerland. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 1997;155:122–9.

C. Afonso, A. Oliveira, Solar chimneys: simulation and experiment, *Energ. Build.* 32 (2000) 71–79.

Al-Asmar HR, Jones BW, Matteson DK. Experimental evaluation of attic radiant barriers. *ASHRAE Transactions* 1996;102:297–306.

Allard F., *Natural ventilation in buildings: a design handbook*, London, (1998), James and James Ltd.

Ansys CFX 2001 version 4, user manual. Available from: <<http://www.ansys.com/products/cfx-4.asp>>.

ASHRAE fundamentals. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1993 [Chapter 31].

ASHRAE handbook of fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; 1997.

Asfour OS, Gadi MB. A comparison between cfd and network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. *Build Environ* 2007;42:4079–85.

Arnold JN, Catton I, Edwards DK. Experimental investigation of natural convection in inclined rectangular region of differing aspect ratio. *Journal of Heat Transfer* 1976:67–71.

Aynsley R., Estimating summer wind driven natural ventilation potential for indoor thermal comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, (1999), 515-525.

Azevedo LFA, Sparrow EM. Natural convection in open-ended inclined channel. *Journal of Heat Transfer* 1985;107:893–901.

Bacharoudis E, Vrachopoulos M.G., Koukou M.K., Margaritis D, Filios A.E, Mavrommatis S.E., Study of the natural convection phenomena inside a wall solar chimney with one wall adiabatic and one wall under a heat flux, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2266–2275

Baines WD, Turner JS. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region. *J Fluid Mech* 1969;37:51–80.

N.K. Bansal, R. Mathur, M.S. Bhandari, Solar chimney for enhanced stack ventilation, *Build. Environ.* 28 (1993) 373–377

G.S. Barozzi, M.S.E. Imbabi, E. Nobile, A.C.M. Sousa, Physical and numerical modelling of a solar chimney-based ventilation system for buildings, *Build. Environ.* 27 (4) (1992) 433–445.

B. Bordass, R. Cohen, M. Standeven, A. Leaman, Assessing building performance in use: energy performance of the PROBE buildings, *Building Research and Information* 29 (2) (2001) 114–128.

Bouia H. Modélisation simplifiée d'écoulements de convection mixte internes: application aux échanges thermo-aérodynamiques dans les locaux. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 1993.

BRE (Building Research Establishment) (1992) *Manual of BREEZE*, Garston, Watford, UK.

BRE NAT-VENT Overcoming technical barriers to low energy natural ventilation in office type buildings in moderate and cold climates, Building Research Establishment, <http://projects.bre.co.uk/natvent/index.html>

BRECSU, Energy Use in Offices, Energy Consumption Guide 19, Building Research Energy Conservation Support Unit, Energy Efficiency Best Practice Programme, 2000, p. 24.

H. Brohus, C. Frier, O.J. Hendriksen, P. Heiselberg, measurements of hybrid ventilation performance in an office building, *International Journal of Ventilation*, Hybvent-Hybrid Ventilation Special Edition 1(2003) 77–88.

Bruant M., Dounis A. I., Guarracino G., Michel P. and Santamouris M. (1996). Indoor air-quality by a fuzzy reasoning machine in naturally ventilated buildings, *J. Applied Energy*.

Bruun HH. *Hot-wire anemometry—principles and signal analysis*. New York: Oxford University Press; 1995

Building Authority of Hong Kong, MOE: 1996, Code of practice of the provision of means of escape in case of fire, 1996, pp. 29–33.

Bunnag T, Khedari J, Hirunlabh J, Teekasap S, Elegant L. Experimental investigation of free convection in an open ended vertical rectangular channel. *COMPL ES* 2002(25):2–17.

Bunnag T, Sarachitti R, Khedari J, Hirunlabh J, Elegant L. An Experimental and numerical investigation of free convection in open ended horizontal rectangular channel heated from the top. *HEFAT2002*, the first international conference on heat transfer, fluid mechanics, and thermodynamics, South Africa 8–10 April 2002. p.684–9.

Bunnag T, Khedari J, Hirunlabh J, Zeghmami B. Experimental investigation of free convection in open ended inclined rectangular channel heated from the top. In: first international conference on sustainable energy and green architecture, Bangkok, Thailand. GA 2003. p.238–43.

Bunnag T, Khedari J, Hirunlabh J, Zeghmami B. Experimental investigation of free convection in an open-ended inclined rectangular channel heated from the top. *The International Journal of Ambient Energy* 2004;25(3):151–62.

P. Chantawong, J. Hirunlabh, B. Zeghmati, J. Khedari, S. Teekasap, M.M. Win, Investigation on thermal performance of glazed solar chimney walls, *Sol. Energ.* 80 (3) (2006) 288–297.

Z.D. Chen, P. Bandopadhyay, J. Halldorsson, C. Byrjalsen, P. Heiselberg, Y. Lic, An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux, *Build. Environ.* 38 (2003) 893–906.

Chen Q., Xu W., A zero equation turbulence model for indoor airflow simulation, *Energy and Buildings*, 28, (1998), 137-144.

Chen Q. Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations. *Numer Heat Transf Part B* 1995;28:353–69.

C. C.K. Cheng, K.M. Lam, R. K.K. Yuen, S.M. Lo, J. Liang, A study of natural ventilation in a refuge floor, *Building and Environment* 42 (2007) 3322–3332

Clarke J. (1993) *Manual of ESP*, University of Strathclyde Glasgow, UK.

Company Headquarter Tower in Essen, *Detail (Solar Architecture)*, vol. 3, 1997, pp. 355–362.

Cook MJ, Short CA. Natural ventilation and low energy cooling of large, nondomestic buildings – four case studies. *Int J Ventilation* 2005;3(4):283–94.

Crump JG, Seinfeld JH. Turbulent deposition and gravitational sedimentation of an aerosol in a vessel of arbitrary shape. *Journal of Aerosol Science* 1981;12:405–15.

Dascalaki E., Santamouris M., Argiriou A., Helmis C., Asimakopoulos D. N., Papadopoulos K. and Soilemes A (1995) Predicting single sided natural ventilation rates in buildings. *Solar Energy* 55(5), 327–341.

Daskalaki E., Santamouris M., Asimakopoulos D.N., On the use of deterministic and intelligent techniques to predict the air velocity distribution on external openings in single sided natural ventilation configurations, *Solar Energy*, 66, (1999), 223-243.

de Jong T, Bot GPA. Air exchange caused by wind effects through (window) openings distributed evenly on a quasi-infinite surface. *Energy and Buildings* 1992;19:93–103.

Dockery DW, Pope CA, Xu XP, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG, Speizer FE. An association between air pollution and mortality in 6 united states. *New England Journal of Medicine* 1993;329:1753–9.

Dounis A. I., Santamouris M., Lefas C. C. and Manolakis D. E. (1994) Thermal comfort degradation by a visual comfort fuzzy reasoning machine under natural ventilation. *J. Applied Energy* 48, 115–130.

Elsherbiny SM. Free convection in inclined air layers heated from above. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1996;39(18):3925–30.

Ernest D. R., Bauman F. S. and Arens E. A. (1991) The prediction of indoor air motion for occupant cooling in naturally ventilated building. *ASHRAE Transactions* 97(1), 539-552.

D. Etheridge, M. Sandberg, *Building Ventilation—Theory and Measurement*, John Wiley & Sons, 1996.

Etheridge D.W., Non dimensional methods for natural ventilation design, *Building and Environment*, 37 (2002), 1057-1072

Feustel H. E., Allard F., Dorer V. B., Garcia Rodriguez E., Herrlin M. K., Mingsheng L., Phaff H. C., Utsumi Y., Yoshino H. (1990) *Fundamentals of the Multizone Air Flow Model-COMIS*, IEA-AIVC, Technical Note AIVC 29, Coventry, UK.

Feustel HE. COMIS — An international multizone airflow and contaminant transport model. LNBL Report, Berkeley, USA, 1998.2.

Flynn MR, Caulfield CP. Natural ventilation of interconnected chambers. *J Fluid Mech* 2006;564:139–58.

Fracastoro GV, Mutani G, Perino M. Experimental and theoretical analysis of natural ventilation by windows opening. *Energy Build* 2002;34: 817–27.

G. Gan, S.B. Riffat, A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery, *Appl. Therm. Eng.* 18 (1998) 1171–1187.

Gan G., Lecture-notes – Building ventilation. Msc in Renewable Energy and Architecture Course. (1999), University of Nottingham.

C. Gladstone, A.W. Woods, On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor, *Journal of Fluid Mechanics* 441 (2001) 293–314.

E. Gratia, A. De Herde, Design of low energy office buildings, *Energy and Buildings* 35 (5) (2003) 473–491.

E. Gratia, A. De Herde, A simple design tool for the thermal study of an office building, *Energy and Buildings* 34 (3) (2002) 279–289.

E. Grattia, A. De Herde, Natural ventilation in a double-skin façade, *Energy and Buildings*, 36, (2004), 137–146.

Guo Y, Lin YC, Sung FC, Huang SL, Ko YC, Lai JS, Su HJ, Shaw CK, Lin RS, Dockery DW. Climate, trace-related airpollutants, and asthma prevalence in middle-school children in Taiwan. *Environmental Health Perspectives* 1999;107:1001–6.

Haghighat F, Jiang J, Wang JCY, Allard F. Air movement in building using computational fluid dynamics. *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering* 1992;114:84–92.

Haghighat F, Megri AC. A comprehensive validation of two airflow models — COMIS and CONTAM. *Indoor Air* 1996;6:278–88.

Haghighat F., Li Y., Megri A.C., Development and validation of a zonal model — POMA, *Building and Environment* 36 (2001) 1039–1047

Harris D, Helwig N. Solar chimney and building ventilation. *Appl Energy* 2007;84:135–46.

Hartzell GE. Criteria and method for evaluation of toxic hazard. *Fire Safety Journal* 1987;12:179–82.

Hayakawa S., Wind Tunnel Experiment on the natural ventilation of the court of a high rise residential building in Sumaries Technical Papers of Annual meeting AIJ, Vol D., 1988, pp.891-892.

P. Heiselberg, Principles of Hybrid Ventilation IEA, Annex 35, Hybrid Ventilation Centre, Aalborg University, 2002

D. Hense, Company Headquarter Tower in Essen, Detail (Review of Architecture), vol. 8, 2000, pp. 1504–1505.

Holford JM, Woods AW. On the thermal buffering of naturally ventilated buildings through internal thermal mass. *J Fluid Mech* 2007;580:3–29.

Howarth AT. The prediction of air temperature variations in naturally ventilated rooms with convective heating. *Building Service Engineering Research and Technology* 1985;64:169–75.

Huang C, Li ML, Zou ZJ, etc. Site-measurement and energy consume analysis of indoor thermal environment in a large space building. *HVAC*, 2000

Huang C, Li ML, Zou ZJ, etc. Site-measurement and energy consume analysis of indoor thermal environment in a large space building in winter. *HVAC*, 2002

Huang C., Zhou Z., Li M., Wang X., Li W., Huang W., Yang J., Xiao X., Measurements of indoor thermal environment and energy analysis in a large space building in typical seasons, *Building and Environment* 42 (2007) 1869–1877

Hunt G.R., Linden P.F., The fluids mechanics of natural ventilation displacement ventilation by buoyancy driven flows assisted by wind, *Building and environment* 34, (1999), 707-720.

Hunt GR, Linden PF. Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind. *J Fluid Mech* 2001;426:355–86.

Hunt GR, Kaye NB. Pollutant flushing with natural displacement ventilation. *Build Environ* 2006;41:1190–7

Hwang JS, Chan CC. Effects of air pollution on daily clinic visits for lower respiratory tract illness. *American Journal of Epidemiology* 2002;155:1–10.

Ji Y, Cook MJ, Hanby VI. CFD modeling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium. *Build Environ* 2007;42:1158–72.

Ji Y, Cook MJ. Numerical studies of displacement natural ventilation in multistory buildings connected to an atrium. *Build Serv Eng Res Technol* 2007;28:207–22.

Jiang Y., Alexander A.,Jeckins H., Arthur R.,Chen Q., Natural ventilation in buildings measurements in a wind tunnel and numerical simulation with large eddy simulations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, (3),331-353.

Jones NC, Thornton C, Mark D, Harrison RM. Indoor/outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside,urban and rural locations. *Atmospheric Environment* 2000;34:2603–12.

Jørgensen FE. How to measure turbulence with hot-wire anemometers—a practical guide. Dantec dynamics; 2002

Inard C, Bouia H, Dalicieux P. Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model. *Energy and Buildings* 1996;24:125–32.

Inard C, Buty D. Simulation of thermal coupling between a radiator and a room with zonal models. *Proceeding of 12th AIVC Conference, Vol. 2, Ottawa, Canada, 1991. p. 125–31.*

Iwashita G. Akasaka H., The effects of human behavior on natural ventilation rate and indoor air environment in summer- a field study in southern Japan, *Energy and Buildings* 25 (1997) 195-205

Kaye NB, Hunt GR. Time-dependent flows in an emptying filling box. *J Fluid Mech* 2004;520:135–56.

Kaye NB, Hunt GR. Heat source modeling and natural ventilation efficiency. *Build Environ* 2007;42:1624–31.

- Kaye N.B., Ji Y., Cook M.J., Numerical simulation of transient flow development in a naturally ventilated room, *Building and Environment* 44 (2009) 889–897
- Kendrick J.F., An overview of combined modeling of heat transport and air movement AIVC Technical note 40, Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK, www.aivc.org/Publications/Technical_reports/TN40.htm
- Khedari J, Yimsamerjit P, Hirunlabh J. Experimental investigation of free convection in roof solar collector. *Building and Environment* 2002;37:455–9.
- Kim E, Woycheese JP, Demsbey NA. Fire dynamics simulator (version 4.0) simulation for tunnel fire scenarios with forced, transient, longitudinal ventilation flows. *Fire Technol* 2008;44:137–66
- Kindangen J., Krauss G. and Depecker P. (1997) Effects of roof shapes on wind-induced air motion inside buildings. *Building and Environment* 32(1), 1–11
- Kobayashi N., Wind Tunnel Experiments on the Air change rate of the court space of a tall building in Summaries of Technical paper of Annual Meeting AIJ (1989) vol D., pp.511-512.
- Kotani H., Satoh R., Yamanaka T., Natural ventilation of light well in high rise apartment building, *Energy and buildings*, 35, (2003), pp.427-434
- B. Krause, M.J. Cook, K.J. Lomas. Environmental performance of a naturally ventilated city centre library, in: *Proceedings of the Conference Comfort and Energy Use in Buildings—Getting Them Right*, Windsor, UK, p. 12.
- Kukadia V., Kolokotroni M., Perera E., Ajiboye P., Hesketh M., Willan P., Barriers to natural ventilation design of office buildings, Report Great Britain. Nat Vent publications (1998), <http://projects.bre.co.uk/natvent/reports/barrier/ukbar.pdf>
- B. Kvisgaard and P.F. Collet, in M.H. Sherman (ed.), *The User's Influence on Air Change, Air Change Rate and Airtightness in Buildings*. ASTM STP 1067, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 67-76.

La Pica A, Rodono G, Volpes R. An experimental investigation on natural convection of air in a vertical channel. *International Journal of Heat & Mass Transfer* 1993;36(3):611-6.

Leburn J. Exigences physiologiques et modalites physiques de la climatisation par source statique concentree. PhD thesis, University of Liege, 1970.

Liao C.M., Huang S.J., Yu H., Size-dependent particulate matter indoor/outdoor relationships for a wind-induced naturally ventilated airspace *Building and Environment* 39 (2004) 411 - 420

Li Y., Delsante A., Symons J.G., Chen L., Comparison of zonal and CFD modeling of natural ventilation in a thermally stratified building, 6th International Conference on Air Distribution in Rooms, Roomvent 98, Stockholm, Sweden, (1998).

Liddament M.W., A review of building air flow simulation. AIVC Technical note 33, (1991), Air Infiltration and Ventilation Center, Convery, UK.

Liddament M.W., and Orme M, Energy and ventilation, *Applied Thermal Engineering*, 18, (1998), 1101-1109.

Limam K., Allard F. and Dascalaki E. (1997) Natural ventilation research activities undertaken in the framework of PASCOOL. *Int. J. of Solar Energy* 19, 81-119.

P.F. Linden, G.F. Lane-Serff, D.A. Smeed, Emptying filling boxes; the fluid mechanics of natural ventilation, *Journal for Fluid Mechanics* 22 (1990) 309-335

Liu H. Wind pressure inside buildings. *Proceedings of 2nd US National Conference on Wind Engineering Research*. June 22-25, Colorado State University; 1975. p. III-3-1 to 3.

Lo SM. The use of designated refuge floors in high-rise buildings: Hong Kong perspective. *Journal of Applied Fire Science* 1998; 7(3):287-99.

Lo SM, Will BF. A view to the requirement of designated refuge floors in high-rise buildings in Hong Kong, *Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia; 1997. p. 737-45.

Lo SM, Yuen KK, Lu WZ, Chen DH. A CFD study of buoyancy effects on smoke spread in a refuge floor of a high-rise building. *J Fire Sci* 2002;20:439-63.

Lomas K.J., Architectural design of an advanced naturally ventilated building form, *Energy and Buildings* 39 (2007) 166–181.

K.J. Lomas, M.J. Cook, Sustainable buildings for a warmer World, in: *Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Aberdeen, May22–27*, Elsevier, (2005), p. 26, ISBN: 0-080-44671-X.

Marmont T., Renewable energy in the millennium economic environmental and social aspects, Ellis memorial lecture, Mindland branch of the Institute of Energy, Beacon Energy. Botanical garden, Birmingham 8 May, (2003).

Medina MA, O'Neal DL, Turner WD. Effect of attic ventilation on the performance of radiant barriers. *Journal of Solar Engineering* 1992;114:234–9

Medina MA. On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels. *Energy and Buildings* 2000;33:31–40..

Miguel AF, van de Braak NJ, Silva AM, Bot GPA. Wind-induced airflow through permeable materials part : air infiltration in enclosure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic* 2001;89:59–72.

Miguel AF. Airflow through porous screen: from theory to practical considerations. *Energy and Buildings* 1998;28:63–9.

Miranville F, Boyer H, Mara T, Garde F. On the thermal behavior of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions: modelling and empirical validation. *Energy and Building* 2003;35:997–1008.

Moshfegh B, Sandberg M. Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panel. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 1998;2:287–301.

Murakami S., Mochida A., Ooka R., Kato S. and Iizuka S. (1996) Numerical prediction of flow around a building with various turbulence models: Comparison of $k-\epsilon$ EVM, ASM, DSM and LES with wind tunnel tests. *ASHRAE Transactions* 96, 741–753.

Murakami S, Kato S, Ito K. Coupled analysis of TVOC emission and discussion in a ventilated room by CFD. Proceedings of EPIC'98, Lyon, France, 1998.

Niachou K., Hassid S., Santamouris M., Livada I., Comparative monitoring of natural, hybrid and mechanical ventilation systems in urban canyons, *Energy and Buildings* 37 (2005) 503–513

E. Oesterle, R. Lieb, M. Lutz, W. Heusler, *Double-skin Facades, Integrated Planning*, Prestel Verlag, Munich, 2001, p. 207.

K.S. Ong, A mathematical model of a solar chimney, *Renew. Energ.* 28 (2003) 1047–1060.

K.S. Ong, C.C. Chow, Performance of solar chimney, *Sol. Energ.* 74 (2003) 1–17.

Onur N, Sivrioglu M, Aktas MK. An experimental study on the natural convection heat transfer between inclined plates (lower plate isothermally heated and the upper plate thermally insulated as well as unheated). *Heat and Mass transfer* 1997;32:471–6.

Pasquay T., Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy, *Energy and Buildings* 36 (2004) 381–389

Pope CA, Dockery DW. Acute health effects of PM10 pollution on symptomatic and asymptomatic children. *American Review of Respiratory Disease* 1992;145:1123–8.

W. Puangsombut, J. Hirunlabh, J. Khedari, B. Zeghamati, M.M. Win, Enhancement of natural ventilation rate and attic heat gain reduction of roof solar collector using radiant barrier *Building and Environment* 42 (2007) 2218–2226

Rodriguez EA, Alvarez S, Coronel JF. Modeling stratification patterns in detailed building simulation codes. Proceedings of European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings. Lyon, France, 1994.

Rouaud O, Havet M. Numerical investigation on the efficiency of transient contaminant removal from a food processing clean room using ventilation effectiveness concepts. *J Food Eng* 2005;68:173–4.

- D. Rowe, A study of a mixed mode environment in 25 cellular offices at the University of Sydney, *International Journal of Ventilation, Hybvent-Hybrid Ventilation Special Edition 1* (2003) 53–64.
- Sandberg M, Moshfegh B. Ventilation-solar roof air flow and heat transfer investigation. *Renewable Energy* 1998;15:287–92.
- M. Santamouris, *Energy and Climate in the Urban Environment*, James and James, LTD, London, 2001
- Schaelin A., Van der Maas J. and Moser A. (1992) Simulation of airflow through large openings in buildings. *ASHRAE Transactions* 98(2), 319–328.
- C. Schittich, *Building Skins, Concepts, Layers, Materials, Edition Detail*, 2001, p. 196.
- Schwarz J. Particulate air pollution and chronic respiratory disease. *Environment Research* 1993;62:7–13.
- Seaton A, MacNee W, Donaldson K, Godden D. Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet* 1995;345:176–8.
- Selvam P. R. (1996) Numerical simulation of flow and pressure around a building. *ASHRAE Transactions* 96, 765–772
- Straw M.P., *Computation and measurement of wind included ventilation*, PhD Thesis, School of civil Engineering, Nottingham, (2000), University of Nottingham, UK., <http://www.nottingham.ac.uk/~evzngwv/download.htm>
- Stoecker WF. *Design of thermal systems*. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill; 1995. p.67–73.
- Syrios K, Hunt GR. Passive air exchanges between building and urban canyon via openings in a single façade. *Int. J Heat Fluid Flow* 2008; 29:364–73.
- Thatcher TL, Layton DW. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment* 1995;29:1487–97.

Togari S, Arai Y, Miura K, A simplified model for predicting vertical temperature distribution in a large space. ASHRAE Transactions 1993;99: 84–99.

Walker R.R., Shao L., Wooliscroft M., Natural ventilation via courtyards Theory and Measurements in Proceedings on the 14th AIVC Conference, Copenhagen, Denmark, 1993, pp.235-250.

Walton G. (1988) AIRNET, A computer program for building airflow network modeling, NISTR 89-4072, National Institute of Standards and Technology

M. Wigginton, J. Harris, Intelligent Skins, Gray Publishing, Tunbridge, Wells, Kent, 2002, p. 176.

Wilson A.G., GBD-23, Air leakage in Buildings. Institute for research in construction, Canadian building digest, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd023e.htm>

Wong N.H., Feriadi H., Tham K.W., Sekhar C., Cheong K.W., Natural ventilation characteristics of courtyard buildings in Singapore in Proceedings of ROOMVENT 96 vol 3 Yokohama Japan 1996 pp.255-262

Wirtz RA, Stutzman RJ. Experiments on free convection between vertical plates with symmetric heating. Journal of Heat Transfer 1982;104:501–7.

Wurtz E, Nataf J, Winkelmann FC. Two and three-dimensional natural and mixed convection simulation using modular zonal model. LBNL Report, Berkeley, USA, 1996.7

Yakhot V, Orszag SA, Thangham S, Gatski TB, Speziale CG. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Phys Fluids A 1992;4(7):1510–20.

Yang T., CFD and Field Testing of a naturally ventilated full scale building, PhD Thesis, University of Nottingham, 2004

Yang J, Li X, Zhao B. Prediction of transient contaminant dispersion and ventilation performance using the concept of accessibility. Energy Build 2004;36:293–9.

Yang G, An Y, Peng L, Zhang J. Simulation of smoke flow and longitudinal ventilation in tunnel fire. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2006;16:741–6.

H. Yoshino, J. Lee, J. Wada, Experimental study on performance evaluation of ventilation systems in a test house, *International Journal of Ventilation* 1 (2002) 23–31

Yuen KK, Lo SM, Yeoh GH. Numerical simulation of wind-smoke effect on the designated refuge floor in high-rise buildings. *Proceedings of Interflame 99', Conference on Fire Science and Engineering, Edinburgh; 1999, p. 1273–80.*

Zhai XQ, Dai YJ, Wang RZ. Experimental investigation on air heating and natural ventilation of a solar air collector. *Energy and Building* 2005;37(4):373–81.

L. Zalewski, S. Lassue, B. Duthoit, M. Butez, Study of solar walls—validating a simulation model, *Building and Environment* 37 (1) (2002) 109–121.

Zhou Y. and Stathopoulos T. (1996) Application of two-layer methods for the evaluation of wind effects on a cubic building. *ASHRAE Transactions* 96, 754–764.

A. Zöllner, E.R.F. Winter, R. Viskanta, Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-facades, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (22) (2002) 4401–4408.