

«ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΤΗΡΙΑΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ»

Δέσποινα Π. Καραδήμου

Υ.Δρ Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ
MSc Υπολογιστική Μηχανική
ΕΜΠ

Γιώργος Μ. Σταυρακάκης

Υ.Δρ Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ
MSc Υπολογιστική Μηχανική
ΕΜΠ

Νίκος-Χρήστος Μαρκάτος

Καθηγητής ΕΜΠ
τ.Πρύτανης Ε. Μ. Πολυτεχνείου

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση της ροής αέρα εντός και εκτός κτηρίου φοιτητικής εστίας. Σκοπός είναι η μελέτη του μονόπλευρου φυσικού αερισμού (single-sided natural ventilation) σε ένα τυπικό φοιτητικό δωμάτιο στο ισόγειο της εστίας. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις: (α) δύο ανοίγματα, και (β) ένα άνοιγμα, στην ανάντη πλευρά του δωματίου. Στο εσωτερικό του δωματίου υπάρχουν έπιπλα και τρεις θερμικές πηγές (άνθρωπος, τηλεόραση, Η/Υ). Η τυρβώδης ροή προσομοιώνεται με χρήση δύο μαθηματικών μοντέλων ειδικά τροποποιημένων για να λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της άνωσης. Εξετάζονται δύο διαφορετικοί μηχανισμοί φυσικού αερισμού: α) φυσικός αερισμός εκτόπισης (δύο ανοίγματα) και β) φυσικός αερισμός ανάμειξης (ένα άνοιγμα). Τα αριθμητικά αποτελέσματα επαληθεύονται με σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πιστοποιημένα εμπειρικά μοντέλα, τα οποία αφορούν το ρυθμό και την ταχύτητα εισροής, καθώς και το ύψος μηδενισμού της μέσης ταχύτητας στην περίπτωση μοναδικού ανοίγματος. Τελικά, το προτεινόμενο αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των συνθηκών θερμικής άνεσης του δωματίου, και διαπιστώνεται ότι, τουλάχιστον για σχετικά μεγάλης ταχύτητας εξωτερικό άνεμο, ο καλύτερος σχεδιασμός είναι η περίπτωση με τα δύο ανοίγματα.

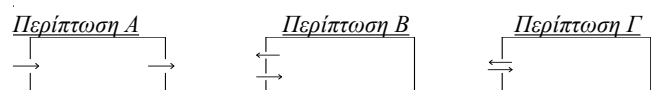
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο φυσικός αερισμός αποτελεί μία αποδοτική εναλλακτική λύση για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στα κτήρια με ταυτόχρονη διασφάλιση συνθηκών θερμικής άνεσης και καλής ποιότητας εσωτερικού αέρα. Τυπικά το ενεργειακό κόστος ενός φυσικά αεριζόμενου κτηρίου είναι 40% μικρότερο από εκείνο ενός κλιματιζόμενου κτηρίου [1].

Ο φυσικός αερισμός αξιοποιεί τις εξωτερικές συνθήκες

ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας. Γενικά, η κίνηση του αέρα σε ένα φυσικά αεριζόμενο κτήριο είναι αποτέλεσμα διαφορών πίεσης λόγω δυνάμεων ανέμου και άνωσης. Οι δυνάμεις του ανέμου είναι αποτέλεσμα της εξωτερικής τυρβώδους ροής γύρω από το κτήριο (ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα), ενώ οι δυνάμεις της άνωσης προκαλούνται από τη μεταβολή της πυκνότητας του αέρα ως συνέπεια των θερμοκρασιακών διαφορών ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον. Διαφορές στην πίεση λόγω των διαφορετικών δυνάμεων του ανέμου στις διαφορετικές πλευρές του κτηρίου ή/και λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του κτηρίου προκαλούν την ανταλλαγή αέρα ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου. Ανάλογα με τη θέση των ανοιγμάτων οι δυνάμεις της άνωσης συνεισφέρουν ή αντιτίθενται στη ροή λόγω του ανέμου και επηρεάζουν το ρυθμό ροής του αέρα μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, καθώς και τον τρόπο διείσδυσης και εξάπλωσής του στον εσωτερικό χώρο [2].

Οι σχεδιαστικοί τύποι του φυσικού αερισμού είναι: (βλ. σχήμα 1) [3,4]: α) εγκάρσιος αερισμός (cross ventilation): αερισμός που πραγματοποιείται με ανοίγματα που βρίσκονται σε διαφορετικές όψεις του κτηρίου, β) μονόπλευρος αερισμός (single-sided ventilation): αερισμός που πραγματοποιείται με ανοίγματα που βρίσκονται στην ίδια όψη του κτηρίου.



Σχήμα 1: Τύποι φυσικού αερισμού: α) εγκάρσιος αερισμός (Περίπτωση Α) β) μονόπλευρος αερισμός (Περίπτώσεις Β, Γ).

Figure 1. Natural ventilation designs: Cross Ventilation (Case A), and Single-sided ventilation (Cases B and C).

Με βάση το σχεδιασμό των ανοιγμάτων, ο μηχανισμός αερισμού που επιτυγχάνεται μπορεί να είναι είτε αερισμός με εκτόπισμό είτε αερισμός με ανάμειξη. Συγκεκριμένα, αερισμός εκτόπισης είναι ο αερισμός που πραγματοποιείται με εκτόπιση του εσωτερικού θερμού αέρα από τον εξωτερικό ψυχρό αέρα (περιπτώσεις Α και Β), και αερισμός ανάμειξης είναι ο αερισμός που πραγματοποιείται με ανάμειξη του εσωτερικού θερμού αέρα με τον εξωτερικό ψυχρό αέρα (περίπτωση Γ).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μοντέλου Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD) στην περίπτωση του φυσικού αερισμού σε

διαμέρισμα κτηρίου πραγματικής κλίμακας που βρίσκεται στην βιβλιογραφία [3], και η διερεύνηση της συμφωνίας των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου με τα αποτελέσματα υφιστάμενων εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης της ταχύτητας εισροής και του ύψους του σημείου μηδενισμού της μέσης ταχύτητας στο ένα άνοιγμα (βλ. εξισώσεις (3.1) και (3.2)). Στη συνέχεια, τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής αξιοποιούνται για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και γίνεται συζήτηση για τη συμβολή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην πρόβλεψη της θερμικής δυσφορίας σε ρεαλιστικές κτηριακές γεωμετρίες.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Πίνακας 1 - Συμβολισμοί			
Αγγλικά σύμβολα		Ελληνικά σύμβολα	
C_1	Συντελεστής ταχύτητας εμπειρικού μοντέλου	Γ	Συντελεστής διάχυσης στην εξίσωση διατήρησης
C_2	Συντελεστής άνωσης εμπειρικού μοντέλου	ε	Ρυθμός απορρόφησης της κινητικής ενέργειας της τύρβης m^2/s^3
C_3	Συντελεστής τύρβης εμπειρικού μοντέλου	ΔP	Διαφορά εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης στο ύψος του ουδέτερου σημείου Pa
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας m/s^2	ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος K
H	Ύψος ανοίγματος m	φ	Εξαρτημένη μεταβλητή, Μεταφερόμενη ποσότητα
h	Αυθαίρετο ύψος κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα m		
h_e	Ενθαλπία J/kg		
k	Κινητική ενέργεια της τύρβης m^2/s^2	Δείκτες	
P	Πίεση Pa	eff	Ενεργός ταχύτητα εισροής
ρ	Πυκνότητα kg/m^3	h	Αυθαίρετο ύψος κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα m
$S\phi$	Πηγή ή καταβόθρα της μεταβλητής ϕ	met	Μετεωρολογικός σταθμός
T	Θερμοκρασία K		
u	Διάνυσμα ταχύτητας		
u, v, w	Συνιστώσες της ταχύτητας στις διευθύνσεις x, y, z m/s		
v_{eff}	Ταχύτητα εισροής από εμπειρικό μοντέλο m/s		
V_h	Ταχύτητα επερχόμενης ροής σε ύψος h m/s		
V_{met}	Ταχύτητα μετεωρολογικού σταθμού m/s		
Z	Ύψος ουδέτερου σημείου m		

3. ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

3.1 Εμπειρικό μοντέλο των Phaff και de Gids

Οι Phaff και de Gids [5] μελέτησαν την αλληλεπίδραση ανέμου και άνωσης και ανέπτυξαν ένα εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της ταχύτητας εισόδου στο μέσο της επιφάνειας εισροής, διαμέσου μοναδικού ανοίγματος, σύμφωνα με την ακόλουθη αναλυτική σχέση:

$$v_{eff} = \sqrt{(C_1 V_{met}^2 + C_2 H \Delta T + C_3)} \quad (3.1)$$

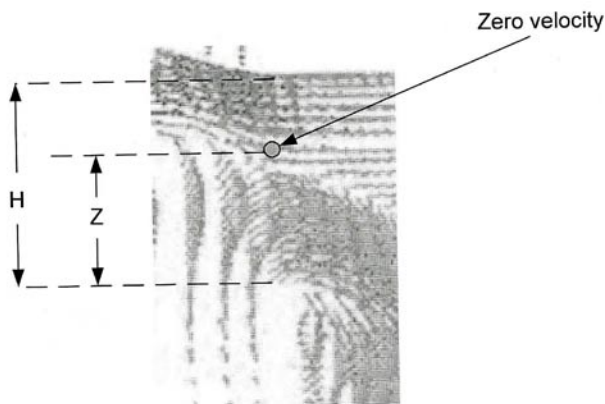
Όπου $C_1=0,001$, $C_2=0,0035$ και $C_3=0,01$.

3.2 Ουδέτερο σημείο

Το ουδέτερο σημείο σε ένα άνοιγμα αντιστοιχεί στο ύψος, στο οποίο η πίεση μέσα στο δωμάτιο είναι ίση με την πίεση του εξωτερικού πεδίου ροής, οπότε η μέση ταχύτητα του αέρα μηδενίζεται. Η μεγαλύτερη εσωτερική πίεση πάνω από αυτό το ύψος έχει ως αποτέλεσμα την εκροή αέρα και η χαμηλότερη εσωτερική πίεση κάτω από αυτό το ύψος την εισροή αέρα (βλ. σχήμα 2) [6].

Για ταχύτητες αέρα κοντά στο μηδέν το ύψος του ουδέτερου σημείου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [6, 7]:

$$Z = H - \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (3.2)$$

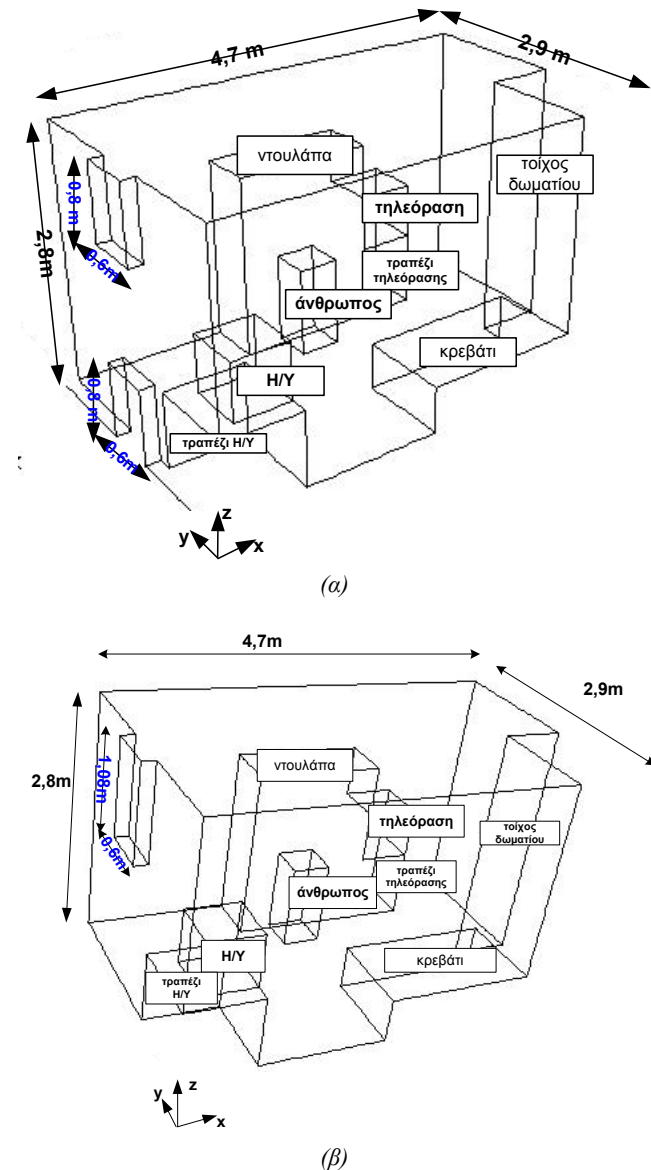


Σχήμα 2: Ροή αέρα διαμέσου ενός ανοίγματος
Figure 2: Bi-directional flow through a single vent

4. ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται αριθμητική επίλυση της ροής αέρα εντός και εκτός κτηρίου φοιτητικής εστίας [3] με διαστάσεις 8,4m ύψος, 11,7m πλάτος και 25,9m μήκος. Μελετάται το φαινόμενο του μονόπλευρου φυσικού αερισμού (single-sided natural ventilation) σε ένα δωμάτιο με

διαστάσεις 4,7m μήκος, 2,9m πλάτος και 2,8m ύψος, το οποίο βρίσκεται στο ισόγειο του κτηρίου [7]. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις: α) δύο άνω και κάτω ανοίγματα στην ανάντη πλευρά του δωματίου με διαστάσεις 0,6m πλάτος, 0,8m ύψος και 0,15m πάχος το καθένα, β) ένα άνω άνοιγμα στην ανάντη πλευρά του δωματίου με διαστάσεις 0,6m πλάτος, 1,08m ύψος και 0,15m πάχος [7]. Η διάταξη των ανοιγμάτων και η εσωτερική γεωμετρία του δωματίου απεικονίζονται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Δωμάτιο με: α) δύο άνω και κάτω ανοίγματα, και β) με ένα άνω άνοιγμα, στην ανάντη πλευρά του κτηρίου.
Figure 3: Room with: (a) two openings, and (b) one opening, located at the windward facade of the building.

Η επίπλωση στο εσωτερικό του δωματίου απαρτίζεται από ένα κρεβάτι, ένα τραπέζι (τραπέζι H/Y) πάνω στο οποίο βρίσκεται ηλεκτρονικός υπολογιστής (300W), μία ντουλάπα και ένα τραπέζι (τραπέζι τηλεόρασης) με τηλεόραση

(300W). Ο άνθρωπος (100W, θερμική πηγή ως αποτέλεσμα του ρυθμού μεταβολισμού) αντιπροσωπεύεται με ένα εξάεδρο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, θεωρείται καθιστός και βρίσκεται στο κέντρο περίπου του δωματίου. Τα εσωτερικά αντικείμενα προσομοιώνονται ως συμπαγή εμπόδια, ενώ η επίδραση του κάθε εμποδίου ορίζεται από τη θέση του, τη γεωμετρία του και το ποσό της θερμότητας που εκλύει.

Οι τοίχοι του δωματίου θεωρούνται αδιαβατικοί. Το ποσό θερμότητας που εκλύεται από τις θερμικές πηγές θεωρείται ότι μεταφέρεται εξ'ολοκλήρου με συναγωγή προς το δωμάτιο. Η αρχική θερμοκρασία σε όλο το υπολογιστικό πεδίο είναι ίση με 25,5 °C.

5. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

Για τη μαθηματική περιγραφή του προβλήματος γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές: (α) Μόνιμη, ασυμπίεστη ροή νευτονικού ρευστού, (β) Αδιαβατικά τοιχώματα (εκτός από τις θερμικές πηγές), (γ) Οι φυσικές ιδιότητες του αέρα λαμβάνονται σταθερές στη θερμοκρασία 25,5 °C, (δ) Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και αγωγή θεωρείται αμελητέα, και (ε) Ουδέτερη κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Για τη μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος εφαρμόζονται οι εξισώσεις διατήρησης της ορμής (Navier-Stokes), της συνέχειας, και της ενέργειας για τυρβώδη ροή στον τρισδιάστατο χώρο. Η γενική μορφή της εξίσωσης διατήρησης για μόνιμη ροή είναι [8, 9]:

$$\text{div}(\rho \phi \mathbf{u} - \Gamma \text{grad} \phi) = S_\phi \quad (5.1)$$

όπου ϕ είναι 1, u, v, w, h_e :

$\phi = 1$ για την εξίσωση της συνέχειας

= u, v, w για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας στις εξισώσεις ορμής

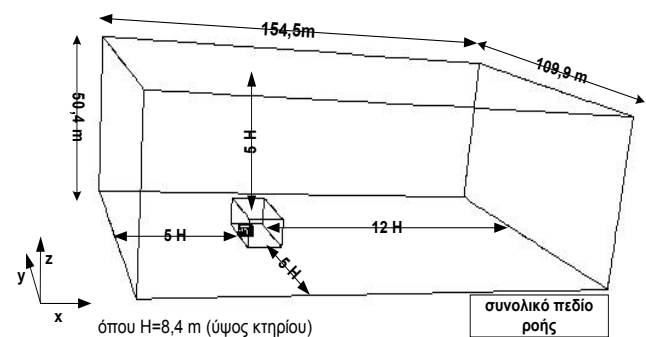
= h_e ενθαλπία στην εξίσωση της θερμικής ενέργειας

Η τυρβώδης ροή προσομοιώνεται με τη χρήση δύο μαθηματικών μοντέλων μεταφοράς της τύρβης, το πρότυπο k-ε [10, 11] και το RNG k-ε μοντέλο [12], τροποποιημένα για την επίδραση της άνωσης [13], η οποία μοντελοποιείται με την προσέγγιση Boussinesq.

Η αριθμητική μέθοδος που εφαρμόζεται για την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου [8, 9]. Η αριθμητική επίλυση πραγματοποιείται με χρήση του λογισμικού FLUENT version 6.3.26. Ο χρόνος επίλυσης εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και το μαθηματικό μοντέλο τύρβης που εφαρμόζεται. Για ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού 2 – 10 m/sec η επίλυση του προβλήματος της παρούσας εργασίας σε υπολογιστή με επεξεργαστή δύο πυρήνων 1,66 GHz και μνήμη (Random Access Memory, RAM) 1 GB σε λειτουργικό σύστημα Windows xp διαρκεί από 12 έως 24 ώρες.

Η ροή του αέρα εντός και εκτός του κτηρίου ακολουθεί τη θεωρία ροής γύρω από συμπαγές εμπόδιο, οπότε το υπο-

λογιστικό πεδίο επεκτείνεται γύρω από το κτήριο σύμφωνα με προτεινόμενες τεχνικές που βρίσκονται στη βιβλιογραφία [14, 15] (βλ. σχήμα 4). Συνεπώς, η είσοδος τοποθετείται 5 ύψη ανάντη του κτηρίου, η έξοδος 12 ύψη κατάντη του κτηρίου, οι συνθήκες συμμετρίας τοποθετούνται 5 ύψη του κτηρίου πλευρικά και πάνω από αυτό. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η πλήρης ανάπτυξη της ροής του ανέμου γύρω από το κτήριο χωρίς να περιορίζεται από τις οριακές συνθήκες συμμετρίας πλευρικά και άνω του κτηρίου, καθώς και από τις οριακές συνθήκες εισόδου και εξόδου ανάντη και κατάντη του κτηρίου αντίστοιχα, με αποτέλεσμα την ορθή επίλυση της κατανομής των εξαρτημένων μεταβλητών (u, v, w, k, ε, P, T) τόσο διαμέσου των ανοιγμάτων όσο και στον εσωτερικό χώρο του δωματίου.



Σχήμα 4: Υπολογιστικό πεδίο. Όπου H είναι το ύψος του κτηρίου.
Figure 4: Computational domain. H is the height of the building

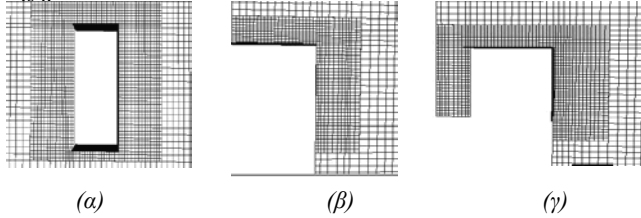
Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται για διάφορες ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού $V_{met} \in [2, 10]$ m/sec. Η ταχύτητα του επερχόμενου ανέμου ακολουθεί παραβολικό προφίλ και, για αστική περιοχή, υπακούει στην παρακάτω εξίσωση [3], η οποία τίθεται ως οριακή συνθήκη στην έδρα εισόδου:

$$V_h = 0,35 \cdot V_{met} \cdot h^{0,25} \quad (5.2)$$

5.1 Βέλτιστη χωρική διακριτοποίηση

Πραγματοποιείται χωρική διακριτοποίηση με εφαρμογή δομημένου ανομοιόμορφου πλέγματος πολλαπλών υποχωρίων. Το πρώτο πλέγμα αποτελείται από 388.070 κελιά και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ορθότητας των παραδοχών και γενικά του μαθηματικού μοντέλου. Το δεύτερο πλέγμα αποτελείται από 792.520 κελιά. Για να διαπιστωθεί αν μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το φαινόμενο γίνεται περαιτέρω πύκνωση γύρω από τις κρίσιμες περιοχές (θερμικές πηγές και ανοίγματα) [16] και προκύπτει ένα τρίτο πλέγμα με 1.087.722 κελιά (βλ. σχήμα 5). Ενδεικτικές περιοχές στις οποίες γίνεται πύκνωση του πλέγματος φαίνονται στο σχήμα 5. Οι κατανομές καθ' ύψος δύο εξαρτημένων μεταβλητών (συνιστώσα της ταχύτητας στη x-διεύθυνση και θερμοκρασία) στις κρίσιμες περιοχές απεικονίζονται στο

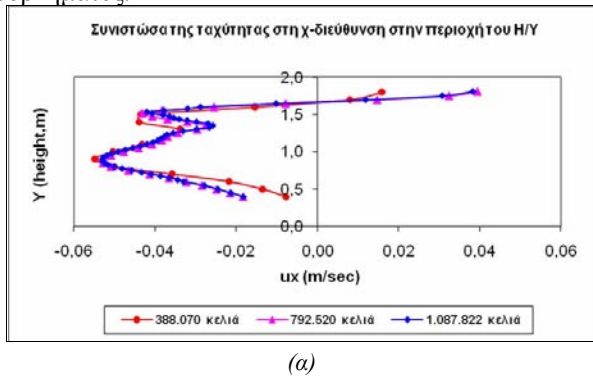
σχήμα 6.



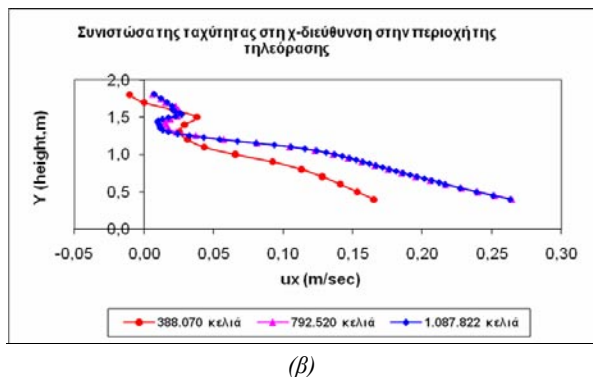
Σχήμα 5: Πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή: (α) του ανθρώπινου μοντέλου, (β) της τηλεόρασης, και (γ) του H/Y.

Figure 5: Grid refinement around the: (a) the human model, (b) the TV, and (c) the PC.

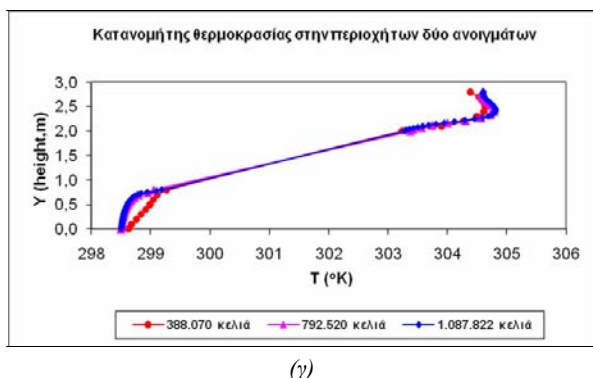
Στο σχήμα 6 παρατηρείται ότι η λύση στις περιοχές υψηλών βαθμίδων δεν παρουσιάζει μεταβολή με περαιτέρω πυκνωση άνω των 792.520 κελιών, οπότε το δεύτερο πλέγμα, με 792.520 κελιά, δίνει ανεξαρτησία λύσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μαθηματική επίλυση του αριθμητικού προβλήματος.



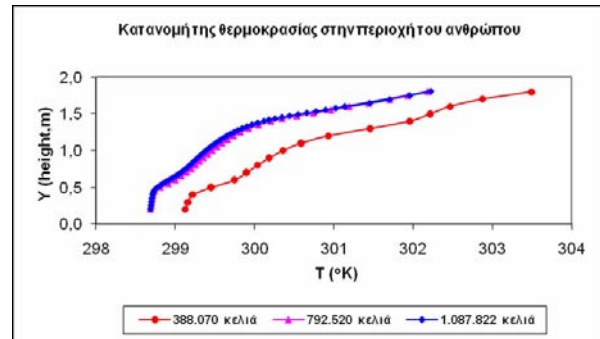
(α)



(β)



(γ)

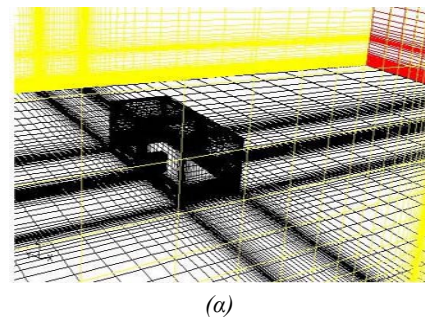


(δ)

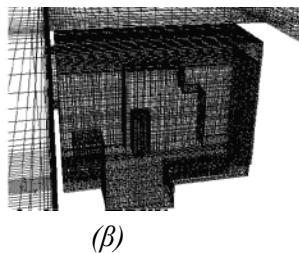
Σχήμα 6: Κατακόρυφη χ-συνιστώσα ταχύτητας στην περιοχή: (α) του H/Y, και (β) της τηλεόρασης. Κατανομή της θερμοκρασίας στην περιοχή: (γ) των δύο ανοιγμάτων, και (δ) του ανθρώπινου μοντέλου.

Figure 6: Vertical x-velocity distribution in the area of: (a) the PC, and (b) the TV. Vertical temperature distribution in the area of: (a) the openings, and (d) the human model.

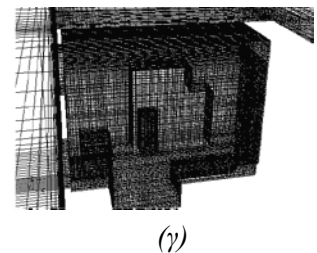
Το βέλτιστο πλέγμα επίλυσης παρουσιάζεται στο σχήμα 7.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 7: Βέλτιστη χωρική διακριτοποίηση: (α) Εξωτερικού πεδίου ροής, και δωματίου με: (β) δύο ανοίγματα και (γ) ένα άνοιγμα.

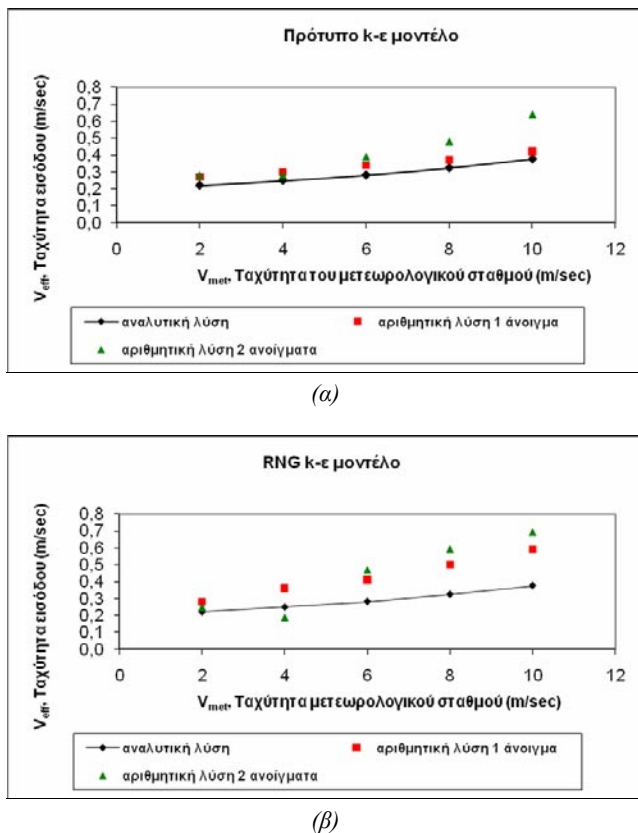
Figure 7: Optimum spatial discretization: (a) External domain, and internal domain with (b) two openings, and (c) one opening.

6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Σύγκριση με το εμπειρικό μοντέλο των Phaff και de Gids

Στην παρούσα ενότητα γίνεται σύγκριση της αριθμητικής λύσης της ταχύτητας εισόδου σε διαφορετικές ταχύτη-

τες ανέμους, η οποία προκύπτει με εφαρμογή του πρότυπου k-ε και του RNG k-ε μοντέλου για την περίπτωση του ενός ανοίγματος, με τις αντίστοιχες εμπειρικές τιμές που προκύπτουν με εφαρμογή του εμπειρικού μοντέλου των Phaff και de Gids. Η αριθμητική λύση για την περίπτωση των δύο ανοιγμάτων δε συγκρίνεται με το εμπειρικό μοντέλο των Phaff και de Gids [5], αλλά παριστάνεται στο ίδιο σύστημα αξόνων για λόγους απεικόνισης της διαφοροποίησης της τιμής της ταχύτητας εισόδου (σχήμα 8). Η μέση απόλυτη σχετική διαφορά της αριθμητικής από την εμπειρική τιμή για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού $V_{met} \in [2,10]$ m/sec είναι 18,6% και 41,4% με εφαρμογή του πρότυπου k-ε μοντέλου και του RNG k-ε μοντέλου, αντίστοιχα.



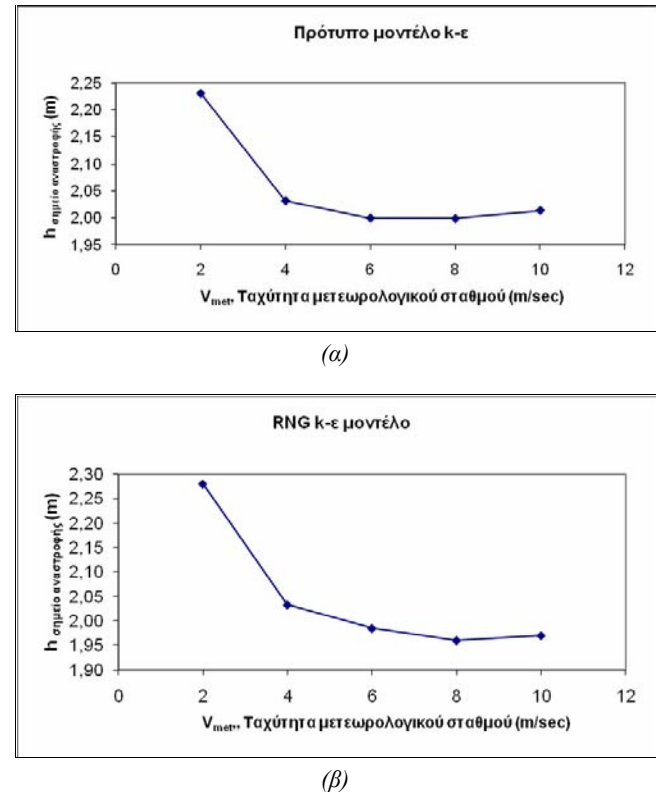
Σχήμα 8: Αριθμητικά αποτελέσματα των τιμών της ταχύτητας εισόδου και αντίστοιχα αποτελέσματα της εφαρμογής του εμπειρικού μοντέλου των Phaff και de Gids εξ. (3.1) σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού με εφαρμογή α) του πρότυπου k-ε μοντέλου β) RNG k-ε μοντέλου

Figure 8: Results obtained by the CFD model for the cases of one and two openings (windows) on the windward facade using the: (a) standard k-ε, and (b) RNG k-ε model, in comparison with the results from eqn. (3.1), for various V_{met} values.

6.2 Υπολογισμός του ύψους του ουδέτερου σημείου- Σύγκριση με την αναλυτική λύση

Στο σχήμα 9 παριστάνεται η μεταβολή του ύψους του ουδέτερου σημείου σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου με $V_{met} \in [2,10]$ m/sec.

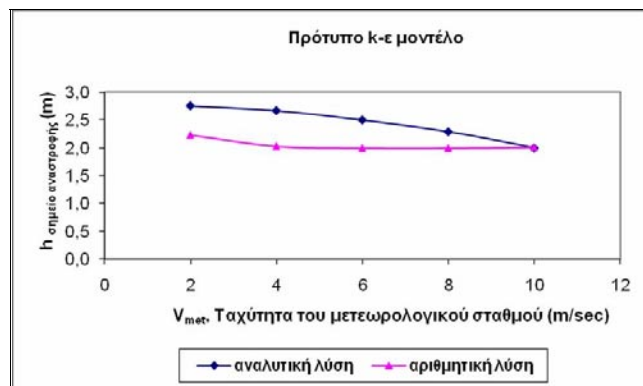
Παρατηρείται μείωση του ύψους του ουδέτερου σημείου με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.



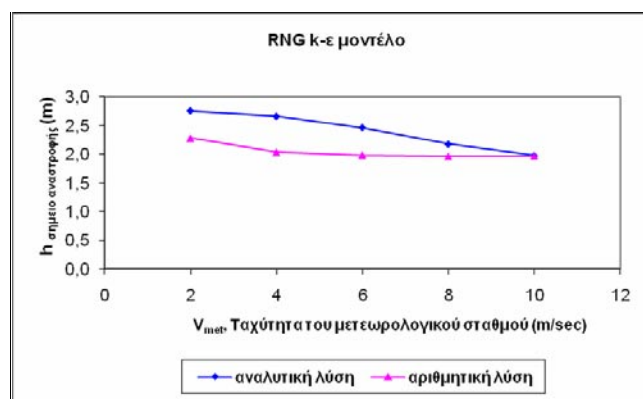
Σχήμα 9: Ύψος του ουδέτερου σημείου σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού με εφαρμογή α) του πρότυπου k-ε μοντέλου β) του RNG k-ε μοντέλου

Figure 9: Neutral level height calculated by: (a) the standard k-ε model, and (b) the RNG k-ε model.

Στο σχήμα 10 γίνεται σύγκριση της αριθμητικής με την αναλυτική λύση, που προκύπτει από την εξίσωση (3.2) για τον υπολογισμό του ύψους του ουδέτερου σημείου. Η μέση απόλυτη σχετική διαφορά της αριθμητικής λύσης από την αναλυτική λύση για διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού προκύπτει μικρότερη με την εφαρμογή του μοντέλου RNG k-ε και ίση με 14,2%, ενώ με την εφαρμογή του πρότυπου k-ε προκύπτει ίση με 15,2% σε αντίθεση με την περίπτωση του μέτρου της ταχύτητας εισροής, όπου το πρότυπο k-ε μοντέλο δίνει τη μικρότερη διαφορά.



(α)



(β)

Σχήμα 10: Σύγκριση αριθμητικής και αναλυτικής λύσης για τον υπολογισμό του ουδέτερου σημείου με εφαρμογή α) του πρότυπου k-ε μοντέλου β) του RNG k-ε μοντέλου

Figure 10: Comparison of the numerical and analytical solution for the neutral level height calculated by: (a) the standard k-ε model, and (b) the RNG k-ε model.

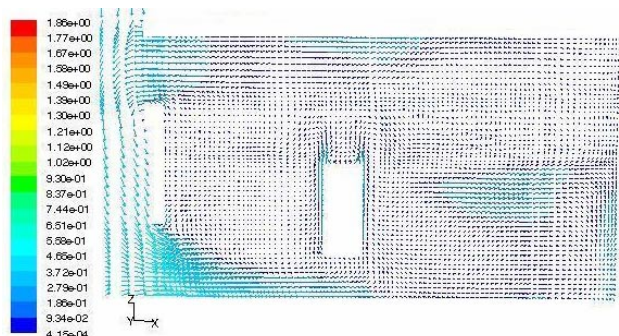
6.3 Πεδίο ροής-Κατανομή της θερμοκρασίας

Στην ανάλυση που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν με εφαρμογή του πρότυπου k-ε μοντέλου τύρβης διότι υπολογίζει την ταχύτητα εισροής με μεγαλύτερη ακρίβεια.

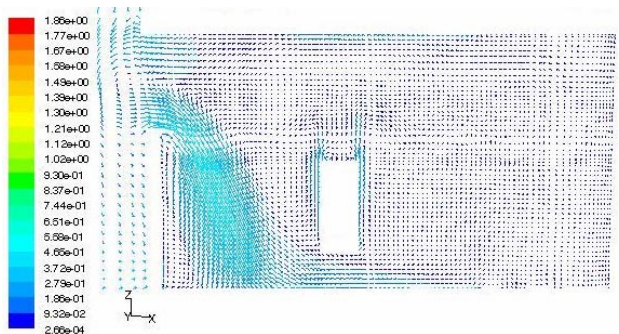
Επιπλέον, η απόκλιση του ουδέτερου σημείου είναι μικρή, ενώ η πρόβλεψη του πεδίου ροής δεν εμφανίζει σημαντική διαφορά από το ποιοτικό συμπέρασμα που προκύπτει με εφαρμογή του RNG k-ε μοντέλου.

Στο σχήμα 11 απεικονίζεται η ροή σε διαμήκη τομή, όπως επιλύεται από το αριθμητικό μοντέλο με όρους διανυσμάτων ταχύτητας.

Στην περίπτωση δύο ανοιγμάτων παρατηρείται το φαινόμενο του φυσικού αερισμού με εκτοπισμό (βλ. σχήμα 11(α)), ενώ στην περίπτωση ενός ανοίγματος επιτυγχάνεται αερισμός ανάμειξης (βλ. σχήμα 11(β)).



(α)



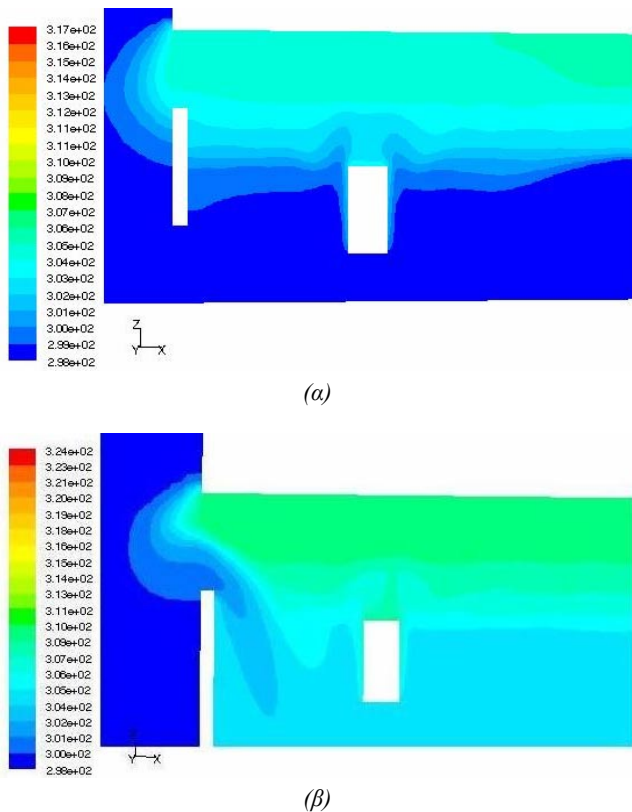
(β)

Σχήμα 11: Διανύσματα ταχύτητας σε διαμήκη τομή στη θέση του ανθρώπινου μοντέλου για ταχύτητα ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού $V_{met}=2$ m/sec, στην περίπτωση: α) δύο ανοιγμάτων, και β) ενός ανοίγματος.

Figure 11: Velocity vectors at the longitudinal plane of the domain for a room with: (a) one opening, and (b) two openings, at weather station speed $V_{met}=2$ m/sec.

Στο σχήμα 12 παριστάνεται η κατανομή θερμοκρασίας σε διαμήκη τομή του δωματίου με δύο ανοίγματα και με ένα άνοιγμα στη θέση του ανθρώπινου μοντέλου. Παρατηρείται η δημιουργία ενός άνω θερμού στρώματος αέρα στα υψηλότερα τμήματα της ροής.

Συγκεκριμένα, στο δωμάτιο με δύο ανοίγματα παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας και ίσες με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στα χαμηλότερα στρώματα (αερισμός εκτόπισης) (βλ. σχήμα 12(α)). Αντίθετα στο δωμάτιο με ένα άνοιγμα παρατηρούνται, όπως είναι αναμενόμενο, υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας και σε πιο ομοιόμορφη κατανομή (αερισμός ανάμειξης) (βλ. σχήμα 12(β)).

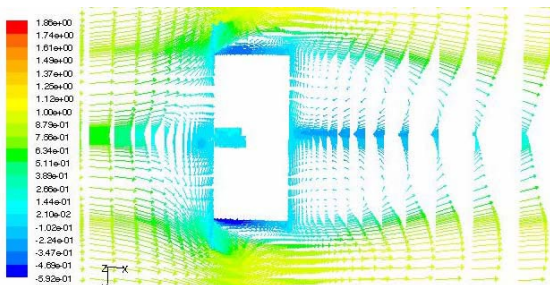


Σχήμα 12: Κατανομή της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{K}$) σε διαμήκη τομή στη θέση του ανθρώπινου μοντέλου για ταχύτητα ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού $V_{met} = 2 \text{ m/sec}$, στην περίπτωση: α) δύο ανοιγμάτων, και β) ενός ανοίγματος.

Figure 12: Temperature contours ($^{\circ}\text{K}$) at the longitudinal plane of the domain for a room with: (a) one opening, and (b) two openings at weather station speed $V_{met} = 2 \text{ m/sec}$.

Στο σχήμα 13, όπου παριστάνεται η κάτοψη του πεδίου ροής γύρω από το κτήριο, παρατηρείται: α) η απόκλιση των ροϊκών γραμμών λόγω του φυσικού εμποδίου (κτήριο) β) ο αναμενόμενος σχηματισμός «πεταλοειδούς δίνης» ανάντη και πλευρικά του κτηρίου γ) ο σχηματισμός δύο στροβίλων κατάντη του κτηρίου και η επανακόλληση της ροής [17].

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ



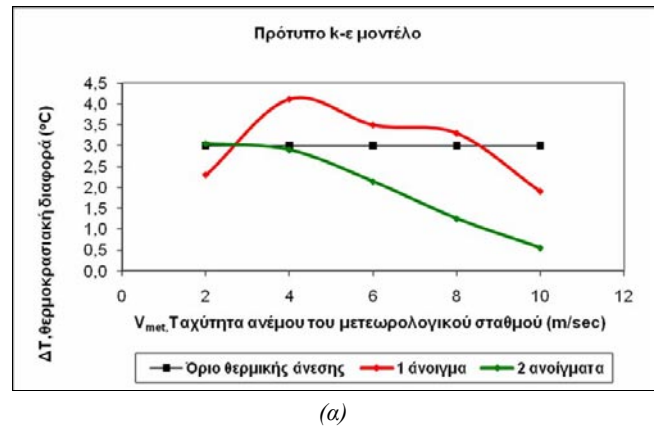
Σχήμα 13: Διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο Y-X (κάτοψη) του εξωτερικού πεδίου ροής για ταχύτητα ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού $V_{met} = 2 \text{ m/sec}$.

Figure 13: Formation of the "horse-shoe" vortex around the building at weather station speed $V_{met} = 2 \text{ m/sec}$.

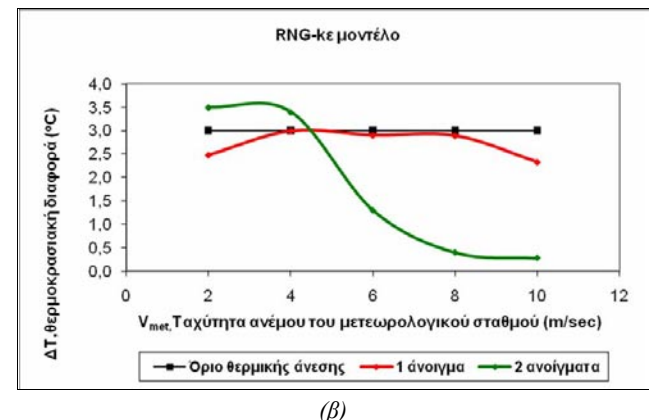
7. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ

Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης πραγματοποιείται με την εφαρμογή δύο κριτηρίων από το Αμερικάνικο Εθνικό Πρότυπο της ASHRAE [18]. Στο πρότυπο προσδιορίζονται οι συνθήκες, στις οποίες τουλάχιστον 80% των ανθρώπων σε έναν εσωτερικό χώρο νιώθουν θερμική άνεση στο χώρο αυτό.

1ο Κριτήριο: Η διαφορά θερμοκρασίας στο κατακόρυφο επίπεδο σε ύψος από 0,1 έως 1,7m (ύψος κατειλημμένης ζώνης) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3°C .



(α)



(β)

Σχήμα 14: Διαφορά θερμοκρασίας στο κατακόρυφο επίπεδο στο ύψος της κατειλημμένης ζώνης με εφαρμογή α) του πρότυπου k-ε μοντέλου και β) του RNG k-ε μοντέλου, σε ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού 2-10 m/sec. Διακρίνονται: i) Μέγιστο όριο τιμής διαφοράς θερμοκρασίας για επίτευξη θερμικής άνεσης (3°C) ii) Αριθμητικά αποτελέσματα δωματίου με ένα άνοιγμα iii) Αριθμητικά αποτελέσματα δωματίου με δύο ανοίγματα

Figure 14: Vertical temperature difference in the occupied zone in both cases studied, using: (a) the standard k-ε model, and (b) the RNG k-ε model. The barrier for thermal comfort $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$ is also presented.

Στο σχήμα 14 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της κατακόρυφης μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δωματίου στην περίπτωση με δύο ανοίγματα, και στην περίπτωση με ένα άνοιγμα για διάφορες ταχύτητες

εξωτερικού ανέμου, $V_{met} \in [2,10]$ m/sec. Προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- α) Στην περίπτωση του δωματίου με δύο ανοίγματα το 1^ο κριτήριο ικανοποιείται στις μεγαλύτερες ταχύτητες εξωτερικού ανέμου, όπου $V_{met} \in [6,10]$ m/sec. Σε μικρότερες ταχύτητες ανέμου, $V_{met} \in [2,4]$ m/sec ο εισερχόμενος αέρας λόγω μικρότερης ταχύτητας δεν καταφέρνει να εκτοπίσει τα θερμότερα στρώματα αέρα σε μεγαλύτερο ύψος από 1,7m προς το άνω άνοιγμα (displacement ventilation), με αποτέλεσμα να διατηρούνται τα θερμά στρώματα αέρα χαμηλά.
- β) Στην περίπτωση του δωματίου με ένα άνοιγμα το 1^ο κριτήριο ικανοποιείται μόνο στη μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου, όπου $V_{met}=10$ m/sec. Σε αυτή την ταχύτητα το ενεργό βάθος [19] του εισερχόμενου αέρα στο δωμάτιο είναι μεγαλύτερο, με συνέπεια να επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη του εσωτερικού θερμού αέρα του δωματίου με τον εξωτερικό ψυχρό αέρα και να δημιουργούνται συνθήκες θερμικής άνεσης για τον άνθρωπο.

2^ο Κριτήριο: Για ανθρώπους με συνήθη υποδήματα η θερμοκρασία της επιφάνειας του πατώματος πρέπει να είναι από 18°C έως 29°C. Για ανθρώπους που περπατούν με γυμνά πόδια, η επιθυμητή θερμοκρασία εξαρτάται από το είδος του πατώματος.

- α) Στην περίπτωση του δωματίου με δύο ανοίγματα το 2^ο κριτήριο ικανοποιείται πλήρως, αφού η θερμοκρασία των κατώτερων στρωμάτων της ροής, για όλες τις ταχύτητες ανέμου, όπου $V_{met} \in [2,10]$ m/sec με εφαρμογή και των δύο μοντέλων τύρβης, υπολογίζεται εντός των περιόρισμών του παραπάνω κριτηρίου (βλ. σχήμα 12(α)).
- β) Στην περίπτωση του δωματίου με ένα άνοιγμα το 2^ο κριτήριο δεν ικανοποιείται, διότι η μέση θερμοκρασία κοντά στο δάπεδο υπερβαίνει τους 29 °C (βλέπε σχήμα 12 (β)).

Συμπεραίνεται ότι ο φυσικός αερισμός με εκτοπισμό (δωμάτιο με δύο ανοίγματα) ικανοποιεί και τα δύο κριτήρια και διασφαλίζει συνθήκες θερμικής άνεσης στις περισσότερες περιπτώσεις. Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί με το συμπέρασμα και άλλων ερευνητών [20, 21], ότι ο αερισμός με εκτοπισμό διασφαλίζει καλύτερη θερμική άνεση. Διαπιστώνεται επίσης ότι και οι δύο μηχανισμοί μονόπλευρου φυσικού αερισμού (φυσικός αερισμός με εκτοπισμό, φυσικός αερισμός με ανάμειξη) αποδίδουν καλύτερα και εξασφαλίζουν συνθήκες θερμικής άνεσης στις μεγαλύτερες ταχύτητες εισερχόμενου αέρα.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

- Το προτεινόμενο μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι αξιόπιστο. Με εφαρμογή του πρότυπου k-ε μοντέλου τύρβης η μέση τιμή απόκλισης από τα αποτε-

λέσματα της εφαρμογής δύο εμπειρικών μοντέλων είναι αποδεκτή (18,6% μέση απόλυτη σχετική διαφορά στον υπολογισμό της ταχύτητας εισόδου, 15,2% μέση απόλυτη σχετική διαφορά στον υπολογισμό του ύψους του ουδέτερου σημείου).

- Στην περίπτωση του δωματίου με δύο (άνω και κάτω) ανοίγματα πραγματοποιείται αερισμός εκτόπισης (displacement ventilation). Η μέση τιμή θερμοκρασίας του δωματίου είναι χαμηλότερη από την περίπτωση με ένα άνοιγμα.
- Στην περίπτωση του ενός (άνω) ανοίγματος πραγματοποιείται αερισμός ανάμειξης (mixing ventilation). Το ύψος του ουδέτερου σημείου στο άνοιγμα μειώνεται, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα. Επίσης, όσο μειώνεται το ύψος του ουδέτερου σημείου αυξάνεται το ενεργό βάθος του εισερχόμενου εξωτερικού αέρα. Η μέση τιμή θερμοκρασίας του δωματίου είναι υψηλότερη σε σχέση με την περίπτωση με δύο ανοίγματα.
- Για την αξιολόγηση του αισθήματος θερμικής άνεσης χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια που περιγράφονται στην ενότητα 7. Στον αερισμό εκτόπισης (δωμάτιο με δύο ανοίγματα) το πρώτο κριτήριο ικανοποιείται και το όριο της θερμικής άνεσης υπερβαίνεται μόνο στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού, όπου ο εισερχόμενος αέρας λόγω μικρότερης ταχύτητας δεν καταφέρνει να εκτοπίσει τα θερμότερα στρώματα αέρα ψηλότερα από τον άνθρωπο. Το δεύτερο κριτήριο ικανοποιείται πλήρως. Στον αερισμό ανάμειξης (δωμάτιο με ένα άνω άνοιγμα) το πρώτο κριτήριο ικανοποιείται μόνο στη μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου, όπου $V_{met} = 10$ m/sec. Στην περίπτωση αυτή, το ενεργό βάθος του εισερχόμενου αέρα είναι μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα την καλύτερη ανάμειξη του με τον εσωτερικό αέρα του δωματίου. Το δεύτερο κριτήριο δεν ικανοποιείται, καθώς σε καμία από τις εξεταζόμενες ταχύτητες ο αερισμός με ένα άνοιγμα κοντά στην οροφή του δωματίου δεν καταφέρνει να εξασφαλίσει τα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας κοντά στο δάπεδο.

Διαπιστώνεται ότι: α) ο μονόπλευρος φυσικός αερισμός δε συμβάλλει στη διαμόρφωση συνθηκών θερμικής άνεσης σε χαμηλές ταχύτητες αέρα ($V_{met}=2.4$ m/sec), και β) σε μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα ($V_{met} \in [6,10]$ m/sec) ο φυσικός αερισμός εκτόπισης (δύο ανοίγματα) υπερτερεί έναντι του φυσικού αερισμού ανάμειξης (ένα άνοιγμα), γιατί διασφαλίζει συνθήκες θερμικής άνεσης στο σύνολο των περιπτώσεων. Συμπεραίνεται ότι σε φυσικά αεριζόμενα κτήρια, που εγκαθίστανται σε περιοχές σχετικά έντονων ανέμων, η κατασκευή περισσότερων του ενός ανοιγμάτων σε θέσεις τόσο ψηλά όσο και χαμηλά επί της μίας πλευράς του κτηριακού κελύφους, δημιουργεί κατάλληλες συνθήκες για τη βέλτιστη ροή του αέρα προς και από τους εσωτερικούς χώρους, με αποτέλεσμα την κατάλληλη στρωματοποίηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό περιβάλλον και τη διαμόρφωση συνθηκών θερμικής άνεσης.

Τέλος επιβεβαιώνεται ότι η πρόβλεψη της ροής του αέρα

ως αποτέλεσμα εξωτερικών και εσωτερικών επιδράσεων είναι δυνατή με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η αριθμητική προσομοίωση μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την κατανομή των ιδιοτήτων της ροής σε κτηριακούς χώρους πραγματικής κλίμακας. Οι κατανομές αυτές μπορούν στη συνέχεια να αξιοποιηθούν προς υπολογισμό της θερμικής άνεσης ενός συγκεκριμένου κτηρίου που εκτίθεται σε επικρατούντες ανέμους της ευρύτερης περιοχής της εγκατάστασης. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό, παρέχεται ορθά η πληροφορία της εσωτερικής ροής αέρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βελτίωση των συνθηκών τοπικής θερμικής άνεσης πριν, αλλά και κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός κτηρίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Energy Consumption Guide 19, Energy efficiency in offices, Energy Efficiency Office/HMSO, London, 1993
- 2 G. R. Hunt and P. F. Linden, Displacement and mixing ventilation driven by opposing wind and buoyancy, J. Fluid Mech. (2004), Cambridge University Press, vol. 527, pp. 27-55.
- 3 C. Allocca, Q. Chen, L. R. Glicksman, Design analysis of single-sided natural ventilation, Energy and Buildings 35 (8) (2003) 785-795.
- 4 G. M. Stavrakakis, M. K. Koukou, M. Gr. Vrachopoulos, N. C. Markatos, Natural Cross-Ventilation in Buildings: Building-scale Experiments, Numerical Simulation and Thermal Comfort Evaluation, Energy and Buildings 40 (9) (2008) 1666-1681.
- 5 J. C. Phaff, W. F. de Gids, J. A. Ton, D. V. van der Ree, L. L. M. Schijndel, The ventilation of buildings: Investigation of the consequences of opening one window on the internal climate of a room, Report C 448, TNO Institute for Environmental Hygiene and Health Technology (IMG-TNO), Delft, Netherlands, March 1980.
- 6 P. F. Linden, The Fluid Mechanics of Natural Ventilation, Annu. Rev. Fluid Mechanics (1999) 31: 201-38.
- 7 Δ.Π. Καραδήμου, «Προσομοίωση Φυσικού Αερισμού σε γεωμετρία κτηριακής κλίμακας με τεχνικές υπολογιστικής ρευστοδυναμικής», Μεταπτυχιακή εργασία, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.
- 8 Ν. Χ. Μαρκάτος, Δ. Ασημακόπουλος, «Υπολογιστική Ρευστοδυναμική», Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1995.
- 9 H. K. Versteeg & W. Malalasekera, «An Introduction to Computational Fluid Dynamics», The Finite Volume Method, Longman, 1996.
- 10 N. C. Markatos, «The mathematical modelling of turbulent flows», Applied Mathematical Modelling, Volume 10 (1986), June.
- 11 B.E. Launder, D.B. Spalding, Mathematical models of turbulence, 1972, Academic Press.
- 12 A. Yakhot, S.Orzag, Renormalisation group analysis of turbulence: I. Basic Theory, Journal of Scientific Computing 1 (1) (1986) 1-51.
- 13 N.C. Markatos, G. Cox, M.R. Malin, Mathematical modeling of buoyancy-induced smoke flow in enclosures, Int.J. Heat and Mass Transfer 25 (1) (1982) 63-75.
- 14 J.H. Ferziger, M. Peric, Computational methods for fluid dynamics, 3rd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002.
- 15 George M. Stavrakakis, Anastasios I. Stamou, Nicolas C. Markatos, Evaluation of thermal comfort in indoor environments using Computational Fluid Dynamics (CFD), accepted in the Edited Collection "Indoor Work and living Environments: Health, Safety and Performance", Nova Science Publishers Inc. (2009) pp. 97-166, ISBN: 978-1-60741-375-2.
- 16 P. J. Jones, G. E. Whittle, Computational Fluid Dynamics for Building Air Flow Prediction-Current Status and Capabilities, Building and Environment, Vol 27, No.3, pp. 321-338, 1992.
- 17 J.H. Ferziger, M. Peric, Computational methods for fluid dynamics, 3rd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002.
- 18 Thermal environmental conditions for human occupancy, ANSI/ASHRAE 55, 1992.
- 19 G. Gan, Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation, Energy and Buildings 31 (2000) 65-73.
- 20 Z. Lin, T.T. Chow, K.F. Fong, Q. Wang, Y. Li, Comparison of performances of displacement and mixing ventilations. Part I: thermal comfort, International Journal of Refrigeration 28 (2005) 276-287.
- 21 Q. Chen, Using computational tools to factor wind into architectural environment design, Energy and buildings 36 (12) (2004) 1197-1209.

Δέσποινα Π. Καραδήμου,

Υ.Δρ Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc Υπολογιστική Μηχανική ΕΜΠ, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα

Γιώργος Μ. Σταυρακάκης,

Υ.Δρ Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc Υπολογιστική Μηχανική ΕΜΠ, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Αθήνα

Νίκος-Χρήστος Μαρκάτος,

Καθηγητής ΕΜΠ, DIC, PhD, C. Eng, τ. Πρύτανης ΕΜΠ, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Αθήνα

Extended Summary

NUMERICAL SIMULATION OF NATURAL VENTILATION IN A BUILDING-SCALE GEOMETRY FOR THE EVALUATION OF THERMAL COMFORT CONDITIONS

Despoina P. Karadimou

Chemical Engineer NTUA
MSc in Computational Mechanics
NTUA, Phd Candidate

George M. Stavrakakis

Chemical Engineer NTUA
MSc in Computational Mechanics,
Phd Candidate

Nikos-Christos Markatos

Professor NTUA
former Rector NTUA

Abstract

The present study investigates the airflow in and around a naturally ventilated building, which represents a student dormitory, using computational fluid dynamics (CFD) techniques. Turbulence flow is simulated applying the standard $k-\epsilon$ and the RNG $k-\epsilon$ models, both modified to account for wind and buoyancy forces. The focus is to study single-sided natural ventilation in a typical room situated on the ground floor of the student dormitory. Two cases are investigated: a) two openings, and b) one opening, on the windward side of the room. Internal furnishings and three thermal sources (occupant, TV, PC) are taken into account. Two different mechanisms of natural ventilation are examined: a) displacement ventilation (two openings) and b) mixing ventilation (one opening). The numerical results are compared with those obtained by two empirical models related to the effective velocity of incoming air and to the height of neutral level in the case of one opening. It is concluded that the numerical results are in acceptable agreement with those obtained by the empirical models, especially when the standard $k-\epsilon$ model is used. Finally, the mathematical model described is used to evaluate thermal comfort inside the room and the outcome is that the best design is the case with two openings on the windward side of the room.

1. INTRODUCTION

Natural ventilation is an efficient alternative method to reduce the energy use in buildings. Generally, air-flow in a naturally ventilated building is the result of pressure differences produced by wind and buoyancy forces [1]. Depending on the location of the openings, the buoyancy forces may assist or oppose the wind-driven flow. Furthermore, the opening location strongly affects the air-exchange rate and the temperature stratification in the interior of the building [2].

Submitted: Dec. 19, 2008 Accepted: Jan. 11, 2010

The two major types of natural ventilation are (see figure 1) [3, 4]: a) cross ventilation: ventilation through openings located on different sides of the building, b) single-sided ventilation: ventilation through openings located on the same side of the building. According to the openings' design, the expected airflow may be displacement, where the incoming cold air tends to drive out and to displace the indoor warm air (cases A and B, fig.1), and mixing, where the incoming cold air spreads out and tends to mix with the interior warm air (case C, fig.1).

The objective of the present study is the application of a CFD model to investigate natural ventilation in a part of a building of real-scale geometry, such as that found in [3]. The cases considered are: a) one opening and b) two (low and high) openings on the windward façade of the building. Turbulence flow is modelled using two well-known turbulence models. Additionally, two well-known empirical models [5, 6] are applied, which predict the inlet velocity and the height of neutral level (in the case of one opening), for validation purposes. Finally, the mathematical model described is used for thermal comfort predictions, for both cases studied.

2. EMPIRICAL MODELS

a) Empirical model of Phaff and de Gids

Phaff and de Gids [5] studied the effects of both wind and buoyancy forces and developed an empirical model to predict the inlet velocity, through one opening using the equation (3.1).

b) Neutral level

The neutral level in a single opening is defined as the height where the interior pressure equals the ambient pressure, and thus the mean air velocity becomes zero. For low values of airspeed, the neutral level can be calculated through equation (3.2) [6, 7].

3. MATHEMATICAL MODELLING

Mathematical modelling consists of the Navier-Stokes (N-S), the continuity and the energy equations, for a 3D turbulent fluid flow. The general form of all the governing conservation equations, for steady-state conditions, is that of equation (5.1) [8, 9].

The assumptions made for the problem are the following:

a) steady-state incompressible flow of a Newtonian fluid, b) adiabatic walls (except for heat sources), c) constant air-properties at 298.5°K, d) heat transfer at the walls by either conduction or radiation is neglected, e) neutral atmospheric conditions of the incoming wind. The temperature of the external environment is 25.5°C.

Turbulence flow is simulated using two Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) mathematical models, standard k-ε [10, 11] and RNG k-ε [12] model, both modified to account for buoyancy effects due to density differences [13]. The numerical procedure followed is based on the Finite Volume Method (FVM) [8, 9] provided by a general CFD code, i.e. Fluent (version 6.3.26).

The computational domain is extended around the building (see figure 4.1), in order to account for external flow phenomena (stagnation, separation, reattachment) correctly, hence to obtain reliable solutions to the distribution of depended variables ($u, v, w, k, \varepsilon, P, T$) through the openings, as well as in the internal space of interest [14, 15].

Numerical simulations were performed for different values of wind speed reported by the weather station [3], in the range of 2-10 m/s.

The incoming wind velocity profile, for an urban terrain, is given by equation (5.2) [3], and is applied on the windward side of the computational domain as a boundary condition.

For the numerical solution, a multi-block structured grid for each of the two cases studied is used (see figure 8). Grid independency is tested by repeating the simulation for a gradually increased grid-cell density.

For this reason, the embedded grid method is applied, according to which the grid is locally refined around critical areas, such as the thermal sources and the opening area (see fig. 5). Three grid sizes are tested and as revealed in figure 6, the optimum spatial discretization is that of 792,520 cells. The optimum grid for the problem is presented in figure 7.

4. RESULTS

Comparing with the results obtained by the empirical model of Phaff and de Gids, the numerical results of the inlet velocity deviate by approximately 18.6% and 41.4%, in terms of mean absolute relative error, using the standard k-ε and the RNG k-ε model, respectively, for a wind speed range $V_{met} \in [2, 10]$ m/sec (see figure 8). As far as the height of neutral level is concerned, the mean discrepancy of the predicted value, compared to that obtained by the empirical model (equation 3.2) is approximately 14.2% and 15.2% using the RNG and the standard k-ε model, respectively. In figure 10 a decrease of the predicted neutral level height is observed as the wind speed increases

The predicted flow field, in terms of temperature and velocity distributions, is depicted in figures 11, 12 for both cases considered, using the standard k-ε model. The expected mean flow around the structure is illustrated in figure 13, where separation and reattachment zones on the windward and leeward sides, respectively, are shown.

5. THERMAL COMFORT

Evaluation of internal thermal conditions is based on two criteria recommended by the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Standard [18] for thermal comfort.

1st Criterion: Vertical air temperature difference within the occupied zone, measured at the 0.1m and 1.7m levels shall not exceed 3°C.

2nd Criterion: The surface temperature of the floor for people wearing typical indoor footwear shall be between 18°C and 29°C.

It is observed that in the case of the room with two openings (displacement ventilation) the first recommendation is satisfied at most of the examined wind speeds (see figure 14), with the exception of lower values of wind speed ($V_{met} \in [2, 4]$ m/sec). Additionally, the second criterion is satisfied at all wind speeds studied. In the case of the room with one opening (mixing ventilation) the first criterion is satisfied only at the highest value of external wind speed ($V_{met} \in 10$ m/sec), while the second criterion is not met at any wind speed studied.

6. CONCLUSIONS

The proposed CFD model, especially using the standard k-ε turbulence model, is considered satisfactory, as it provides acceptable agreement with the results obtained by well-known empirical models, i.e. discrepancies of only

about 18.6% and 15.2%, referring to the inlet velocity and the height of neutral level, respectively.

As far as the openings' design is concerned, it is observed that single-sided natural ventilation does not contribute to the creation of thermal comfort conditions at low wind speeds ($V_{met} \in [2,4]$ m/sec for both cases studied, while at higher wind speeds ($V_{met} \in [6,10]$ m/sec displacement ventilation (two openings) performs better than mixing ventilation (one

opening), because it creates thermal comfort conditions in most cases. Finally, it is concluded that a residential building consisting of more than one opening located at the lower and the upper heights of the windward facade may prove to be a valuable design idea, as it provides an optimum air-flow path into and out of the inside of the indoor space and meets thermal comfort recommendations, especially in areas of relatively high wind speeds.

Despoina P. Karadimou,

Chemical Engineer NTUA, MSc in Computational Mechanics NTUA, Phd Candidate, Computational Fluid Dynamics Unit, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Zografou Campus, Athens

George M. Stavrakakis,

Chemical Engineer NTUA, MSc in Computational Mechanics NTUA, Phd Candidate, Computational Fluid Dynamics Unit, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Zografou Campus, Athens

Nikos-Christos Markatos,

Professor NTUA, DIC, PhD, C. Eng, former Rector NTUA, Computational Fluid Dynamics Unit, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Zografou Campus, Iroon Polytechniou 9, 15780, Athens