

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΠΙΚΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ

Β. Παππά¹, Α. Λαγγίδης², Μ. Μανωλέσος³, Δ. Μπούρης⁴

Εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
15780 Ζωγράφου

e-mail: vaswpappa@gmail.com¹, aostl@hotmail.com², marinos.manolesos@swansea.ac.uk³,
dbouris@fluid.mech.ntua.gr⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο αερισμός των κτηρίων αποτελεί στην σημερινή εποχή ένα ζήτημα ύψιστης σημασίας για τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου του σύγχρονου ανθρώπου στα μεγάλα αστικά κέντρα. Με αφετηρία την προαναφερθείσα σκέψη και με απώτερο στόχο την εύρεση λύσεων και απαντήσεων, η εν λόγω εργασία εστιάζει το ενδιαφέρον της στον υπολογισμό του ρυθμού αερισμού ενεργού διατομής (cross-sectional flow rate) ενός μεμονωμένου κτηριακού κελύφους τόσο πειραματικά (μετρήσεις σε αεροσήραγγα) όσο και υπολογιστικά (υπολογιστική ρευστομηχανική). Το πρότυπο κτηριακό μοντέλο κυβικής μορφής εκτίθεται κάθετα (0^0), ως προς τη ροή δύο διαφορετικών ανάντι τυρβωδών οριακών στρωμάτων. Η πειραματική διερεύνηση του πεδίου ροής εφαρμόζοντας την μέθοδο Stereo Particle Image Velocimetry (Stereo PIV), επιτυγχάνει την λεπτομερή καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων και τύρβης και κατ' επέκταση τον υπολογισμό του τοπικού ρυθμού αερισμού καθ' ύψος των ανοιγμάτων του πρότυπου κτηρίου. Παράλληλα, η διαδικασία προσομοιώνεται αριθμητικά, ως πρόβλημα μόνιμης κατάστασης, τρισδιάστατης τυρβώδους ροής με μη εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Παρατηρείται σημαντική εξάρτηση του πεδίου ροής γύρω από το κτήριο αλλά και του ρυθμού ανανέωσης αέρα από τα ανάντι χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος. Ωστόσο, αυτού του είδους η εξάρτηση δεν είναι εμφανής στην κατανομή της πίεσης στις εξωτερικές επιφάνειες του κτηρίου. Αυτό έχει άμεσο ενδιαφέρον στη σύγκριση του υπολογισμού του ρυθμού αερισμού με τις ευρέως εφαρμοζόμενες εμπειρικές μεθόδους, οι οποίες στηρίζονται σε αυτή τη κατανομή. Σημείο αναφοράς αποτελεί ο μετρούμενος ρυθμός διείσδυσης αέρα ο οποίος εξαρτάται από το επίπεδο μέτρησης (παράλληλα ή/και εγκάρσια) στη ροή αλλά κυρίως από την εγγύτητα της μέτρησης (απόσταση $0.09H$ και $0.05H$, όπου H το ύψος κτηρίου) στα κάθετα ανοίγματα του κτηριακού μοντέλου. Η τελευταία οδηγεί σε μετρούμενες τιμές ρυθμού αερισμού μεγαλύτερης ακρίβειας.

Λέξεις Κλειδιά: *Αερισμός κτηρίου, Stereo Particle Image Velocimetry, Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα, Ανοίγματα κτηρίου*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός του ρυθμού αερισμού ενός κτηρίου αποτελεί, ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα ροής, λόγω της έντονης εξάρτησης της τιμής του από τα ανάντι χαρακτηριστικά του ανέμου, κυρίως της διάτμησης και της τύρβης. Η πρόβλεψη του φυσικού ρυθμού αερισμού ενός κτηριακού κελύφους αποτελεί αντικείμενο τρέχουσας έρευνας μιας και ο υπολογισμός του επηρεάζει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και τη ποιότητα αέρα μιας κτηριακής εγκατάστασης. Ο υπολογισμός του ρυθμού αερισμού συνήθως βασίζεται σε εμπειρικές μεθόδους οι οποίες στηρίζονται στην εξίσωση Bernoulli αλλά δεν μπορούν να εφαρμοστούν για κτήρια με διαμερή ανοίγματα δεδομένου ότι η κατανομή πίεσης κατά μήκος του ανοίγματος δεν είναι σταθερή συνεπώς και τα αποτελέσματα διαφορούμενα (Murakami,1991,Manolesos et al.,2018). Στον διαμερή φυσικό αερισμό (cross-ventilation), το ρευστό έχει «επιλογή», είτε να περάσει διαμέσου του ανοίγματος είτε να προσπεράσει ολόκληρο το κτήριο, η οποία επιλογή δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή της ημ εμπειρικής μεθόδου (Kobayashi et al.,2010). Προκειμένου λοιπόν να κατανοηθεί ο μηχανισμός του διαμερούς φυσικού αερισμού, έχουν εκτελεστεί ερευνητικές πειραματικές μελέτες εντός αεροδυναμικής σήραγγας. Σε τέτοιου είδους μελέτες είτε εφαρμόζονται παρεμβατικές μέθοδοι όπως η ανεμομετρία μονού-θερμού νήματος (Murakami et al.,1991, Kato et al.,1992) είτε μέθοδοι μέτρησης συγκέντρωσης στο εσωτερικό του κτηρίου (Tomimaga and Blocken, 2015). Η υιοθέτηση μη παρεμβατικών μεθόδων όπως η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV) είναι περιορισμένη (Karava et al.,2011) ενώ η Stereo Particle Velocimetry (Stereo PIV) ακόμη πιο σπάνια (Cao et al.,2014). Στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, διερευνώνται τα χαρακτηριστικά του πεδίου ταχύτητας, σε ένα μεμονωμένο κυβικό πρότυπο μοντέλο με διαμερή ανοίγματα, εκτιθέμενο σε δύο διαφορετικά, ανάντι τυρβώδη οριακά στρώματα. Το κτήριο διαθέτει κάθετα ανοίγματα τα οποία αποτελούν μια καινοτόμα προσέγγιση στην προσπάθεια μελέτης της κάθετης μεταβολής της ροής, στις ανάντι και κατάντι επιφάνειες του κτηριακού κελύφους (Manolesos et al., 2018). Σε συνδυασμό με την εγγύτητα των επιπέδων μέτρησης στα ανοίγματα αλλά και την υπολογιστική προσομοίωση των πειραματικών μετρήσεων, επιτυγχάνεται μια συνολική εποπτεία των τοπικών ρυθμών ροής διά των ανοιγμάτων.

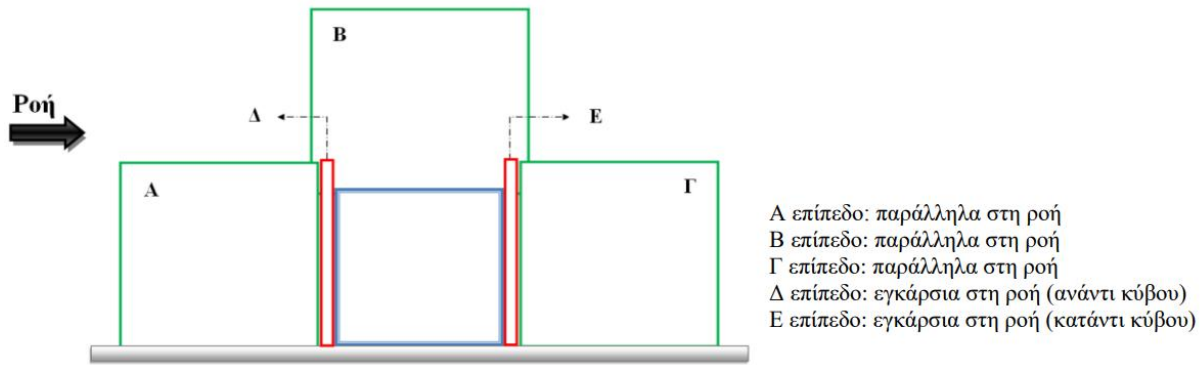
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Πειραματική Διαδικασία

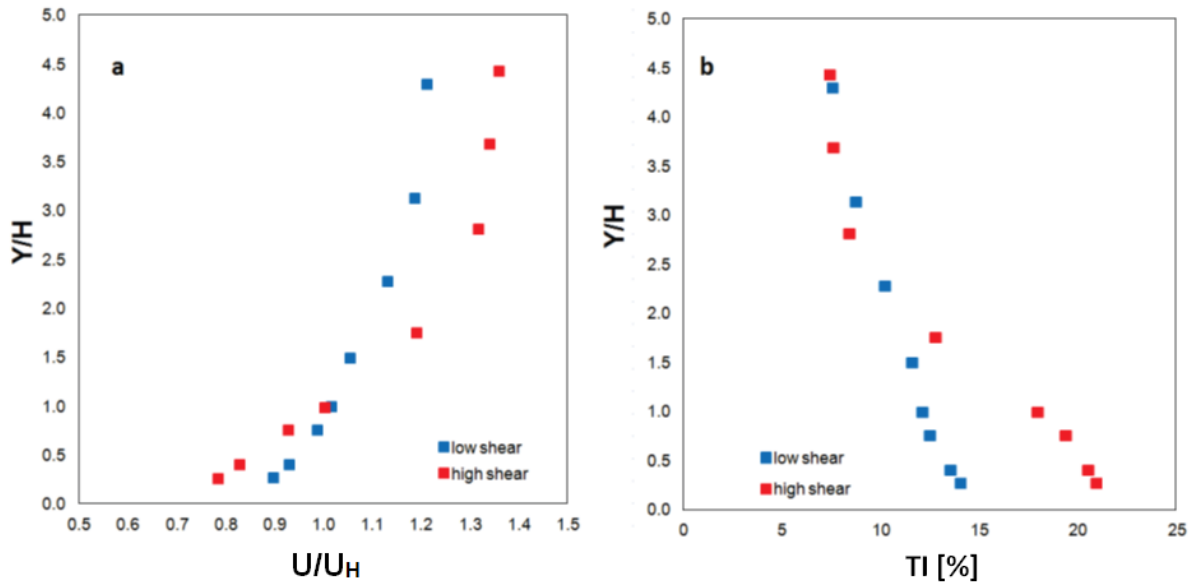
Το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο μεγάλο χώρο δοκιμών (3.5 m×2.5m× 12m) της αεροσήραγγας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων, Ε.Μ.Π. Εντός της αεροσήραγγας τοποθετήθηκε κυβικό πρότυπο κτηρίου, ύψους 0.11 m κατασκευασμένο από φύλλα Plexiglass. Η κάθε κατακόρυφη πλευρά περιλαμβάνει ένα λεπτό κατακόρυφο άνοιγμα (0.09m x 0.006m), το οποίο αντιστοιχεί στο 4.5% του εμβαδού της. Εσωτερικά στο κέντρο του κύβου, περιέχεται κατακόρυφη στήλη τετραγωνικής διατομής, πλευράς 0.022m. Το πάχος του τοιχώματος και της οροφής είναι 0.005m. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, προσομοιώθηκε ροή, με και χωρίς τη παρουσία ανοιγμάτων - η μελέτη περίπτωσης με ανοίγματα αφορά ανοίγματα στην ανάντι και στην κατάντι πλευρά του κύβου (Σχήμα 1). Δύο διαφορετικά ανάντι τυρβώδη οριακά στρώματα εξετάστηκαν - χαμηλής (Α) και υψηλής (Β) διάτμησης -, χρησιμοποιώντας συνδυασμούς οβελίσκων και στοιχείων τραχύτητας κατά τη μέθοδο του Irwin (Irwin,1981, Manolesos et al.,2018) σε επιτυγχανόμενη κλίμακα ~ 1:400. Τα δύο μετρούμενα οριακά στρώματα είχαν κοινές ταχύτητες στο ύψος του κύβου αλλά συνολικά διαφορετικά προφίλ έντασης τύρβης και μέσης ταχύτητας. Συγκεκριμένα, τα υπολογιζόμενα ύψη τραχύτητας και ταχύτητας τριβής αντιστοιχούν σε $z_0=0.12\text{mm}$ και $u_*=0.2\text{ m/s}$ για το χαμηλής (Α) διάτμησης και $z_0=2.6\text{mm}$ και $u_*=0.37\text{ m/s}$ για το υψηλής (Β) διάτμησης οριακό στρώμα. Η μετρούμενη ταχύτητα στο ύψος του κύβου ήταν ίση με $U_H=3.5\text{ m/s}$ και $U_H=3.2\text{ m/s}$ για το χαμηλής και υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα, το οποίο αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds ίσο με $Re\approx 2.4\times 10^4$, τιμή μεγαλύτερη από την τιμή ανεξαρτησίας του αριθμού Reynolds από τη ροή (Castro and Robins,1977, Lim et al.,2007). Η κλίμακα ομοιότητας, σύμφωνα με τον (Cook,1978), ήταν 1:400, μέχρι 3H, ενώ η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης ήταν $Lu_x\approx 2.5H$ και για τα δύο οριακά στρώματα. Η τιμή της ταχύτητας στην ελεύθερη ροή, πάνω από το οριακό στρώμα, διατηρήθηκε ίση με $U_\infty\approx 5.1\text{ m/s}$ και για τις δύο περιπτώσεις οριακών στρωμάτων.

Κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας Stereo Particle Image Velocimetry (Stereo PIV), χρησιμοποιήθηκαν δύο κάμερες TSI Powerview Plus™ 4MPixel οι οποίες τοποθετήθηκαν στις πλευρές του κυβικού μοντέλου, λέιζερ 200mJ Nd:YAG Litron laser και γεννήτορας σταγονιδίων ελαιόλαδου μέσης διαμέτρου 1-2μm (TSI model 9307). Η καταγραφή και επεξεργασία των εικόνων

πραγματοποιήθηκε με το εμπορικό λογισμικό INSIGHT 4G. Για τις περιπτώσεις καταγραφής του πεδίου ροής παράλληλα στη ροή (Manolesos et al., 2018), είτε ανάντι είτε κατάντι του κύβου, το φύλλο λέιζερ κατευθύνθηκε στην επιθυμητή θέση μέσω ενός καθρέφτη ο οποίος τοποθετήθηκε εγκάρσια, στον άξονα της αεροσήραγγας, αρκετά πάνω από τον κύβο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για προσανατολισμό κτηρίου 0° . Για κάθε επίπεδο, λαμβάνονται 1000 στιγμιότυπα και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αποτελούν τις μέσες τιμές των μετρούμενων μεγεθών.



Σχήμα 1. Πλάγια όψη των επιπέδων μέτρησης με τη Stereo PIV μέθοδο.



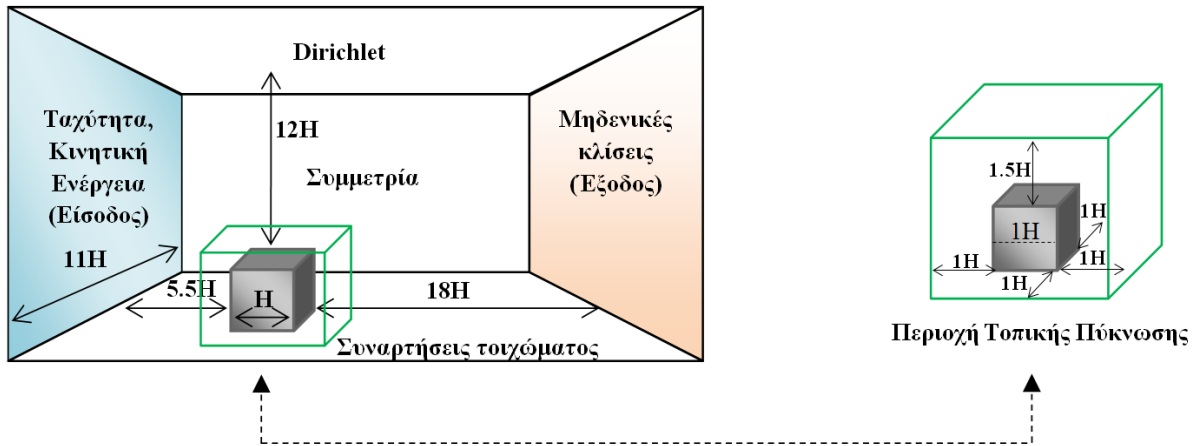
Σχήμα 2. Μετρημένες κατατομές μέσης ταχύτητας (a) και έντασης τύρβης (b) για τα δύο οριακά στρώματα χαμηλής [A] και υψηλής [B] διάτμησης.

2.2 Υπολογιστική Διαδικασία

2.2.1 Υπολογιστικό χωρίο, Πλέγμα και Οριακές Συνθήκες

Το υπολογιστικό μοντέλο αντιπροσωπεύει το μοντέλο μειωμένης κλίμακας των πειραματικών μετρήσεων της αεροδυναμικής σήραγγας. Το πάχος του τοιχώματος σε συνδυασμό με το πάχος του δαπέδου των 5mm λήφθηκε υπόψη κατά τη δημιουργία του πλέγματος. Το υπολογιστικό χωρίο κατασκευάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις συστάσεις του COST Action 732 και τις οδηγίες του AII που αφορούν μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πεζών.

Οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου απεικονίζονται στο Σχήμα 3. Η είσοδος του υπολογιστικού χωρίου τέθηκε ίση με $5.5H$ (0.605m) από το κυβικό κτήριο - ίδια απόσταση με τα πειραματικά μετρούμενα προφίλ ταχυτήτων και έντασης τύρβης -, η απόσταση κατάντι του κτηρίου ίση με $18H$ (1.98m), οι πλευρικές επιφάνειες ίσες με $5H$ (0.55m) και τέλος, το συνολικό ύψος του υπολογιστικού χωρίου ίσο με $13H$ (1.43m). Συνεπώς, οι συνολικές διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου ήταν ίσες με: $1.21m \times 1.43m \times 2.695m$ (πλάτος \times ύψος \times μήκος).



Σχήμα 3: Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου, οριακές συνθήκες, περιοχή τοπική πύκνωσης.

Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε κατά τις προσομοιώσεις, εξήχθη από μη εμπορικό λογισμικό, αφορά 3D δομημένο, καρτεσιανό πλέγμα, χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό αλγόριθμο για τον ορισμό των στερεών περιοχών εντός του. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση 3 πλεγμάτων διαφορετικού μεγέθους, με 3.3×10^6 , 5×10^6 και 8×10^6 αριθμό κελιών. Ο αριθμός των κελιών επί του κτηρίου σε κάθε πλέγμα και σε κάθε διεύθυνση, ισοδυναμούσε με 50,60 και 78 αντίστοιχα. Η εξασφάλιση ανεξαρτησίας πλέγματος επιτεύχθηκε με το αραιότερο πλέγμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός τέταρτου πλέγματος, ίδιου συνολικού αριθμού κελιών ($\approx 3.3 \times 10^6$), ενσωματώνοντας μια περιοχή τοπικής πύκνωσης να περιβάλλει τον κύβο και 52 κελιά ανά πλευρά κύβου στην περιοχή αυτή). Η περιοχή περιελάμβανε τον κύβο και εκτεινόταν σε οριζόντιες αποστάσεις $1H$ από τις κάθετες πλευρές του κύβου και $1.5H$ άνωθεν της οροφής του κτηρίου.

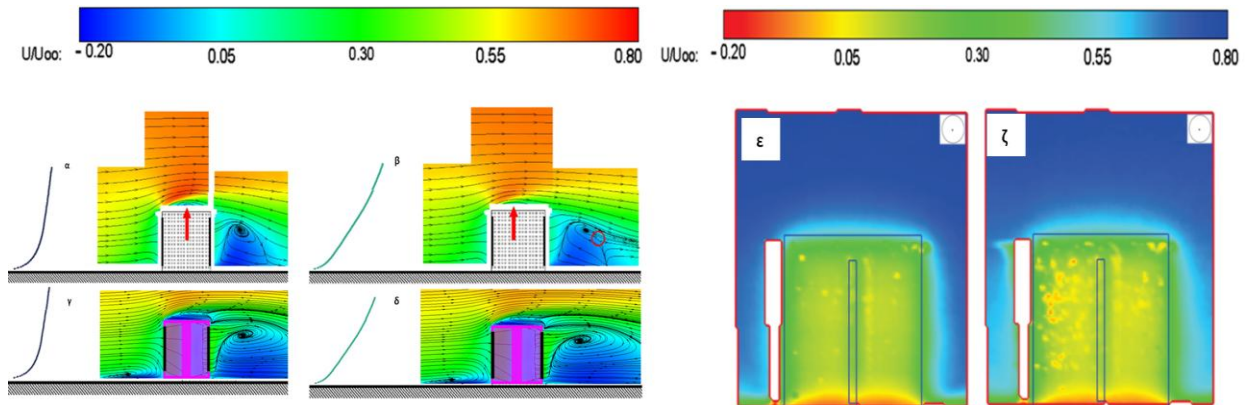
Εφαρμόστηκε το μοντέλο τύρβης SST k- ω . Στην είσοδο επιβλήθηκε το μετρούμενο πειραματικό προφίλ ταχύτητας και τύρβης, ενώ στις υπόλοιπες πλευρές του υπολογιστικού χωρίου τέθηκαν κατάλληλες συνθήκες (στέρεε επιφάνειες: συναρτήσεις τοιχώματος, κορυφή: συνθήκη καταστάσεων μεσοκλίμακας, πλευρικές επιφάνειες: συνθήκες συμμετρίας, έξοδος: συνθήκες Neumann) (Παππά κ.ά.,2018).Επιλύθηκαν οι εξισώσεις RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) οι οποίες ολοκληρώθηκαν σε όγκους αναφοράς και σε καρτεσιανές συντεταγμένες χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SIMPLE(Παππά κ.ά.,2018).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Πεδίο κατανομής ταχύτητας

Το Σχήμα 4 απεικονίζει τις ροϊκές γραμμές του πεδίου κατά μήκος και εγκάρσια του κεντρικού άξονα του κύβου με ανοιχτά ανοίγματα, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις με τη Stereo PIV μεθοδολογία και από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις (Παππά κ.ά.,2018). Όλες οι μεταβλητές οι οποίες παριστάνονται στα επόμενα διαγράμματα έχουν αδιαστατοποιηθεί με βάση την τιμή της ελεύθερης ταχύτητας η οποία είναι ίση με $U_\infty \approx 5.1$ m/s και για τις δύο περιπτώσεις οριακών στρωμάτων.

Παρατηρείται ότι η ροή μεταξύ των δύο οριακών στρωμάτων παρουσιάζει διαφορές οι οποίες είναι εμφανείς τόσο στα πειραματικά όσα και στα υπολογιστικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό ενδυναμώνει την άποψη ότι τα ανάντι χαρακτηριστικά του εισερχόμενου οριακού στρώματος επηρεάζουν τη μορφή του πεδίου ροής εκατέρωθεν του κτηρίου. Πιο συγκεκριμένα τόσο στις πειραματικές όσο και στις υπολογιστικές μετρήσεις (Σχήμα 4. α,β,γ,δ) οι ροϊκές γραμμές σχηματίζουν τον πυρήνα του στροβίλου κατάντι του κύβου που αποτελεί και το «ίχνος» του τοξωτού στροβίλου (arc-type vortex) όπου για την περίπτωση του οριακού στρώματος υψηλής διάτμησης το κέντρο του στροβίλου μετατοπίζεται κατάντι. Η διαφορά αυτή είναι εμφανής και στις υπολογιστικές προσομοιώσεις μεταξύ των δύο οριακών στρωμάτων ενώ είναι εμφανής και η περιοχή ανακυκλοφορίας ανάντι του κύβου, γεγονός που δεν παρατηρείται στα πειραματικά αποτελέσματα λόγω των έντονων ανακλάσεων.



Σχήμα 4: Ροϊκές γραμμές κατά μήκος του κεντρικού άξονα του κύβου με ανοιχτά ανοίγματα για α) Stereo PIV-χαμηλής διάτμησης ΟΣ, β) Stereo PIV-υψηλής διάτμησης ΟΣ, γ) CFD-χαμηλής διάτμησης ΟΣ, δ) CFD-υψηλής διάτμησης ΟΣ, και εγκάρσια του κεντρικού άξονα του κύβου με ανοιχτά ανοίγματα για ε) Stereo PIV-χαμηλής διάτμησης ΟΣ, ζ) Stereo PIV-υψηλής διάτμησης ΟΣ.

Από την άλλη πλευρά, είναι φανερό ότι στις Stereo PIV μετρήσεις, το προφίλ χαμηλής διάτμησης Α περιέχει συνολικά υψηλότερη ορμή μέχρι το ύψος του κύβου με αποτέλεσμα η περιοχή επανακόλλησης της ροής στην οροφή του κύβου να είναι μεγαλύτερη (κατά μήκος) και υψηλότερη συγκριτικά με το χαμηλής διάτμησης Β οριακό στρώμα. Ωστόσο οι υπολογιστικές προσομοιώσεις παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις αντίστοιχες πειραματικές γεγονός που οφείλεται σε γνωστές αδυναμίες των μοντέλων τύρβης RANS να προλέξουν με ακρίβεια περιοχές ανακοπής και αποκόλλησης της ροής. Συνεπώς, επιτυγχάνεται μια ποιοτική περιγραφή των τρισδιάστατων φαινομένων που περικλείουν ένα στερεό σώμα όπως είναι ο κύβος αλλά παρατηρούνται ποσοτικές αστοχίες μεταξύ πειραματικών-αριθμητικών αποτελεσμάτων. Συνοπτικά, συμπεραίνεται ότι το πεδίο ταχυτήτων της ροής ακολουθεί όμοια συμπεριφορά με αυτή του πεδίου των πιέσεων όπως είχε αναλυθεί σε προηγούμενα άρθρα (Manolesos et al., 2018, Παππά κ.ά., 2018). Επιβεβαιώνεται δηλαδή ότι η ροή έχει έντονη εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του ανάντι, τυρβώδους πεδίου.

3.2 Ρυθμός Αερισμού

Ο υπολογισμός του ρυθμού αερισμού με βάση τη βιβλιογραφία (Etheridge et al., 1996) βασίζεται σε ημιεμπειρικές σχέσεις οι οποίες στηρίζονται στην εξίσωση Bernoulli και δίνεται από τον τύπο:

$$Q_{CR} = C_d \cdot A_{eff} \cdot U_{bh} \cdot \sqrt{\Delta C_p} \quad (1)$$

όπου C_d : συντελεστής παροχής των ανοιγμάτων με τυπική τιμή 0.61, ΔC_p : η διαφορά μεταξύ των μέσων συντελεστών πίεσης που συνδέονται με τα απέναντι ανοίγματα, U_{bh} : η ταχύτητα αναφοράς του αέρα μετρημένη στο ύψος του κύβου και A_{eff} (m^2): η ενεργός ζώνη η οποία ορίζεται ως:

$$\frac{1}{A_{eff}^2} = \frac{1}{A_{in}^2} + \frac{1}{A_{out}^2} \quad (2)$$

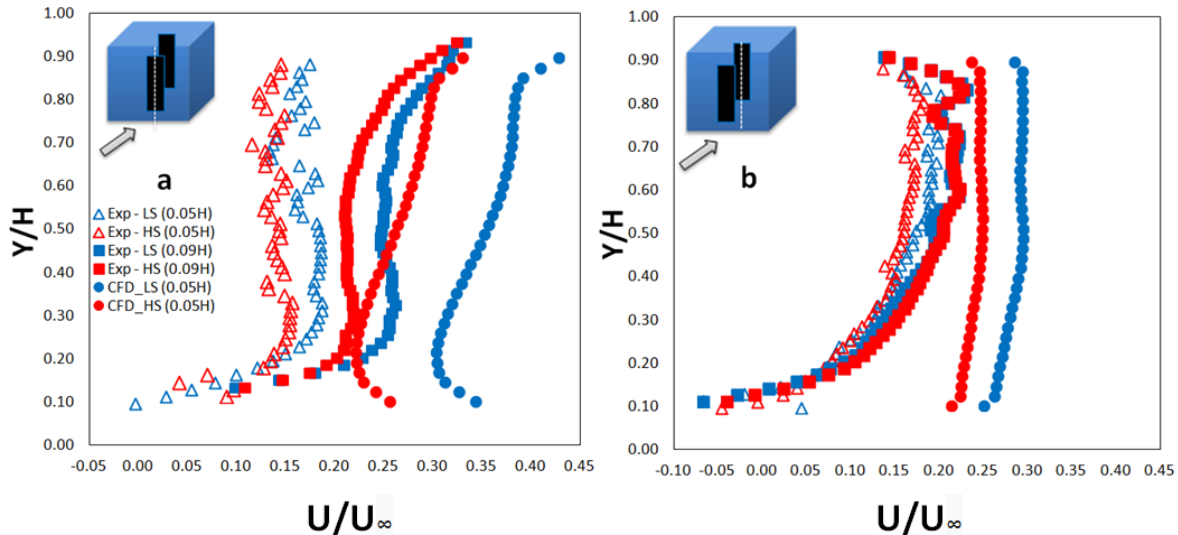
Στην παρούσα μελέτη περίπτωσης η ενεργός ζώνη είναι ίση με $A_{eff} = 3.82 \times 10^{-4} m^2$. Το ημιεμπειρικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη το πεδίο κατανομής της πίεσης επί των επιφανειών των εγκάρσιων ανοιγμάτων, ωστόσο καταλήγει σε τιμές οι οποίες ενέχουν ερωτηματικά. Αφενός γιατί ο τύπος της εξίσωσης περιλαμβάνει τις τυπικές τιμές των αδιάστατων συντελεστών πίεσης ενός κλειστού στερεού σώματος και όχι ενός στερεού σώματος με ανοίγματα, και αφετέρου, αν ακόμη ληφθούν υπόψη οι πειραματικές τιμές των αδιάστατων συντελεστών πίεσης, οι μετρούμενες τιμές λαμβάνονται σε μικρή απόσταση από το άνοιγμα και όχι επί του ανοίγματος. Εναλλακτικά, ο μέσος ρυθμός αερισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{average} = \int_{y=0}^h u(y) b dy \quad (3)$$

όπου $u(y)$ είναι η μέση ταχύτητα στη φορά της ροής σε ύψος y , b είναι το πλάτος ανοίγματος και h είναι το ύψος του ανοίγματος.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα του ρυθμού αερισμού [m^3/s] των υπο εξέταση περιπτώσεων.

		Χαμηλής διάτμησης (A) οριακό στρώμα	Υψηλής διάτμησης (B) οριακό στρώμα
Πειραματική Προσομοίωση :0.09H	(Εξ.3)	7.00×10^{-4}	6.20×10^{-4}
Πειραματική Προσομοίωση :0.05H	(Εξ.3)	4.18×10^{-4}	3.48×10^{-4}
Ημιεμπειρική Μέθοδος (Πειραματική)	(Εξ.1)	8.10×10^{-4}	7.00×10^{-4}
Υπολογιστική Προσομοίωση	(Εξ.3)	9.68×10^{-4}	7.27×10^{-4}
Ημιεμπειρική Μέθοδος (Υπολογιστική)	(Εξ.1)	7.84×10^{-4}	7.09×10^{-4}



Σχήμα 5: Προφίλ u ταχυτήτων καθ’ ύψος των ανάντι (a) και κατάντι (b) ανοιγμάτων του κύβου, για οριακά στρώματα χαμηλής διάτμησης (LS) και υψηλής διάτμησης (HS), για πειραματικές μετρήσεις απόστασης 0.09H από το κάθετο άνοιγμα (Exp. 0.09H) (επίπεδα: A,Γ, Σχήμα 1), πειραματικές μετρήσεις απόστασης 0.05H από το άνοιγμα (Exp. 0.05H) (επίπεδα: Δ,Ε, Σχήμα 1), υπολογιστικές προσομοιώσεις (CFD) (επίπεδα: Δ,Ε, Σχήμα 1)

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές του ρυθμού αερισμού που έχουν υπολογιστεί με βάση την (3) και με βάση την ημιεμπειρική εξίσωση (1), τόσο για τις πειραματικές μετρήσεις όσο και για τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Πιο συγκεκριμένα ο ρυθμός αερισμού με βάση την ημιεμπειρική μέθοδο για τα πειραματικά αποτελέσματα έχει προκύψει αντικαθιστώντας στην (1) τους αδιάστατους συντελεστές πίεσης όπως έχουν υπολογιστεί από τις μετρήσεις των (Πάνος κ.ά., 2016), την τυπική τιμή $C_d = 0.61$ και την υπολογισμένη A_{eff} . Αντίστοιχα έχει υπολογιστεί και ο ρυθμός αερισμού για την υπολογιστική προσομοίωση, μόνο που εδώ οι τιμές των αδιάστατων συντελεστών πίεσης αντιστοιχούν στις τιμές των υπολογιστικών προσομοιώσεων (Παππά κ.ά., 2018), ενώ οι τιμές των C_d και A_{eff} είναι όμοιες με προηγούμενως. Στο Σχήμα 5, απεικονίζονται τα προφίλ ταχυτήτων $u(y)$ καθ’ ύψος των κάθετων ανοιγμάτων του κύβου, με βάση τα οποία υπολογίζονται οι ρυθμοί αερισμού του Πίνακα 1, με βάση την (3). Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί αερισμού για το χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα είναι υψηλότεροι συγκριτικά με το υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα κάτι που είναι λογικό μια και οι τιμές των ταχυτήτων στο χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα είναι υψηλότερες στην περιοχή από το έδαφος μέχρι την οροφή του κύβου (Σχήμα 4). Ωστόσο ενδιαφέρον εντοπίζεται στη σύγκριση των μετρούμενων πειραματικών μετρήσεων με βάση το επίπεδο μέτρησης και την εγγύτητα της μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για επίπεδο μέτρησης παράλληλο στη ροή (Σχήμα 1, επίπεδα A,Γ) και σε απόσταση 0.09H (~1cm) από το άνοιγμα για το ίδιο οριακό στρώμα (χαμηλής διάτμησης) υπάρχει διαφορά της τάξεως του 67% σε σχέση με το εγκάρσιο επίπεδο μέτρησης (Σχήμα 1, επίπεδα μέτρησης Δ,Ε) και σε απόσταση 0.05H (~0.5cm) από το άνοιγμα. Ομοίως για το οριακό στρώμα B, η μεταξύ τους διαφορά αντιστοιχεί σε 78%. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των νέων επιπέδων μέτρησης ενισχύεται από την επιβολή του ισοζυγίου μάζας όπου και παρατηρούνται διαφορές της τάξης του 5% για τα ανάντι και κατάντι επίπεδα μέτρησης και για τα δύο επιβαλλόμενα οριακά στρώματα, τιμές πολύ μικρότερες των προηγούμενων μετρήσεων. Επιπρόσθετα, η επιβολή της (3) στα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων δίνει τιμές που συμφωνούν με τις μετρήσεις

ως προς την εξάρτηση του αερισμού από τα χαρακτηριστικά του ανάντι οριακού στρώματος, αλλά η υπολογιζόμενη τιμή του ρυθμού αερισμού αποκλίνει από αυτή των μετρήσεων, λόγω υπερεκτίμηση των ταχυτήτων (Σχήμα 4, Παππά κ.α., 2018).

Τέλος, η εφαρμογή της ημιεμπειρικής μεθόδου, παρουσιάζει τις μικρότερες διαφορές ανάμεσα στις πειραματικά και υπολογιστικά εκτιμώμενες τιμές ρυθμού αερισμού. Αυτό όμως, ενισχύει την αρχική υπόθεση ότι ο υπολογιζόμενος ρυθμός αερισμού με βάση τις επιφανειακές πιέσεις δεν είναι πάντα ευαίσθητος σε τοπικές μεταβολές της παροχής δια των ανοιγμάτων και ενδεχομένως να οδηγεί σε χαμηλής ακρίβειας ενδείξεις. Πιθανή εξήγηση είναι ότι οι μετρήσεις των αδιάστατων πειραματικών συντελεστών πίεσης δεν αφορούν τιμές επί του ανοίγματος αλλά επί των στέρεων επιφανειών του κτηρίου σε μικρή απόσταση από το άνοιγμα. Η δε ροή δια του ανοίγματος πιθανότατα να μην αποτυπώνεται σε μεταβολή αυτών των επιφανειακών πιέσεων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί μια προσπάθεια κατανόησης των τρισδιάστατων φαινομένων γύρω από ένα μεμονωμένο, κυβικής μορφής πρότυπο κτήριο με/χωρίς ανοίγματα, όταν εκτίθεται σε δύο ανάντι οριακά στρώματα (χαμηλής και υψηλής διάτμησης) επιλέγοντας ως βασική μεταβλητή εξέτασης την τιμή του ρυθμού αερισμού. Η προσέγγιση ήταν διττή: αρχικά εφαρμόστηκε η Stereo PIV μεθοδολογία για τον υπολογισμό του πεδίου κατανομής ταχυτήτων δια του κύβου, σε επίπεδα παράλληλα και εγκάρσια της ροής, σε απόσταση $0.09H$ (~1cm) και $0.05H$ (~0.5cm) από τα κάθετα ανοίγματα του κύβου και εν συνεχεία προσομοιώθηκε υπολογιστικά η ίδια πειραματική προσέγγιση, επιλύοντας τις RANS εξισώσεις και εφαρμόζοντας το μοντέλο τύρβης 2 εξισώσεων, SST k- ω . Από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις προέκυψε το πεδίο κατανομής της ταχύτητας το οποίο συγκρίθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα ενώ αναφορικά με τον ρυθμό αερισμού υπολογίστηκε και συγκρίθηκε η τιμή του με δύο μεθόδους. Αρχικά εφαρμόζοντας την ημιεμπειρική μέθοδο βασιζόμενοι στο πεδίο κατανομής επιφανειακών πιέσεων και δευτερευόντως από το πεδίο κατανομής ταχυτήτων, εφαρμόζοντας τις (1)-(3).

Τόσο ο πειραματικά όσο και ο αριθμητικά υπολογιζόμενος ρυθμός αερισμού δίνει σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο οριακών στρωμάτων, ιδιαίτερα έντονες για την περίπτωση υπολογισμού του με βάση το πεδίο κατανομής ταχυτήτων και λιγότερο σημαντικές με βάση το πεδίο κατανομής πιέσεων (από την ημιεμπειρική σχέση). Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τα χαρακτηριστικά του ανάντι οριακού στρώματος επηρεάζουν την τιμή του ρυθμού αερισμού. Επιπλέον, ο πειραματικά μετρούμενος ρυθμός αερισμού επηρεάζεται σημαντικά από το επίπεδο μέτρησης αλλά και από την εγγύτητα μέτρησης στο κάθετο άνοιγμα του κτηριακού κελύφους για το ίδιο οριακό στρώμα. Δηλαδή και για τα δύο οριακά στρώματα, ο μετρούμενος ρυθμός αερισμού σε απόσταση $0.05H$ από το άνοιγμα διαφέρει κατά 65% σε σχέση με τον μετρούμενο ρυθμό σε απόσταση $0.09H$. Ενισχύεται έτσι η υπόθεση ότι η εγγύτητα μέτρησης της υπό εξέταση μεταβλητής (ρυθμός αερισμού) είναι σημαντικός παράγοντας για την ακρίβειά της. Το τελευταίο πιστοποιείται από την εφαρμογή του ισοζυγίου μάζας μεταξύ των ανάντι και κατάντι ανοιγμάτων, όπου παρατηρούνται διαφορές μικρότερες του 5%.

Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της ημιεμπειρικής μεθόδου, η οποία στηρίζεται στις διαφορές των επιφανειακών πιέσεων, αποδίδει μικρότερες διαφορές μεταξύ των δύο οριακών στρωμάτων τόσο με την πειραματική όσο και με την υπολογιστική προσέγγιση. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στις μεταβλητές της εξίσωσης οι οποίες προκύπτουν εμπειρικά, για «κλειστό» σώμα, λαμβάνοντας υπόψη πρωτίστως την κατανομή της πίεσης στην εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου, αδυνατώντας να ενσωματώσουν την επίδραση της παρουσίας ανοιγμάτων στον τύπο της εξίσωσης.

Τέλος οι διαφορές μεταξύ πειραματικά και αριθμητικά υπολογιζόμενων τιμών αερισμού πιθανότατα βασίζονται στην γενική αδυναμία των μοντέλων τύρβης να προλέξουν με ακρίβεια σημεία ανακοπής και επανακόλλησης της ροής, παρουσιάζοντας ποιοτικές ομοιότητες αλλά ποσοτικές διαφορές από τις πειραματικές τιμές.

Συμπερασματικά, κατά τη μελέτη ροής δια και επί κτηριακού κελύφους, με σκοπό τον προσδιορισμό του ρυθμού διεξόδου αέρα στο κτήριο, εκτιμάται ότι είναι επιθυμητή η γνώση του πεδίου κατανομής της πίεσης αλλά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι αυτό μπορεί να μην αποτυπώνει με ακρίβεια και το τοπικό πεδίο ταχυτήτων στα ανοίγματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η 1η συγγραφέας Παππά Βασιλική επιθυμεί να εκφράσει τις ευχαριστίες της προς το Ευγενίδειο Ίδρυμα για την υποστήριξη εκπόνησης της διδακτορικής της διατριβής, μέρος της οποίας αποτελεί και η παρούσα εργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cao X., Liu J. and Jiang N. 2014 "An Overview of the Applications of Particle Image Velocimetry for Indoor Airflow Field Measurement" Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning: Volume 3: Building Simulation and Information Management Springer Berlin Heidelberg Berlin, Heidelberg pp 223-231

Castro I. and Robins A., 1977, "The flow around a surface mounted cube in uniform and turbulent streams". J. Fluid Mech., Vol. 79, No. 2, pp. 307-335

Cook N J. 1978, "Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 2(4), pp 311-321

Etheridge D. ,Sandberg M., Building Ventilation: Theory and Measurements, Wiley, Chichester, UK, 1996.

Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B. (Eds.), Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment, COST Office Brussels, 2007. ISBN 3-00018312-4.

Irwin, H. (1981). The design of spires for wind simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7(3), 361-366.

Karava P., Stathopoulos T. and Athienitis A., 2011 "Airflow assessment in cross ventilated buildings with operable facade elements" Building and Environment Vol 46 No 1 2011 pp 266-279

Kato S. Murakami, S., Mochida A., Akabayashi S., and Tominaga, Y. 1992, "Velocity pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol 44 No 1 1992 pp 2575-2586

Kobayashi T., Sandberg M., Kotani H., Claesson L., (2010) "Experimental investigation and CFD analysis of cross-ventilated flow through single room detached house model". Building and Environment 45(2010) 2723-2734

Lim, Hee Chang, Castro I. P., and Hoxey R. P., 2007. "Bluff bodies in deep turbulent boundary layers: Reynolds-number issues." J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Vol 571 pp. 97-118

Manolesos M., Gao Z., Bouris D.,(2018) "Experimental investigation of the atmospheric boundary layer flow past a building model with openings". *Building and Environment*, DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.049

Murakami, S. 1991 "Wind tunnel test on velocity-pressure field of cross-ventilation with open windows" *ASHRAE Transactions* Vol 97 1991 pp 525-538

Murakami S., Kato S., Akabashi S., Mizutani K., Kim Y-D. "Wind tunnel test on velocity-pressure field of cross-ventilation with open windows". *ASHRAE Transactions* 1991;(97)(1):525-38

Tominaga Y. Blocken B. (2015) "Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions". *Building and Environment* 92 (2015) 452-461

Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T., AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (2008) 1749-1761.

Πάνος Μ., Μανωλέσος Μ., Μπούρης Δ., Πειραματική Προσομοίωση προτύπου κτηρίου εκτεθειμένου σε ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, 10η Επιστημονική Συνάντηση, Πανελλήνιο Συνέδριο για τα Φαινόμενα Μηχανικής Ρευστών, Πάτρα, 2-3 Δεκεμβρίου, (2016)

Παπά Β., Πάνος Μ., Μανωλέσος Μ., Μπούρης Δ., Υπολογιστική και Πειραματική Προσομοίωση Ατμοσφαιρικής Ροής Αέρα Δια Ομοιώματος Κτηρίου με Ανοίγματα, 11ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 14-16 Μαρτίου 2018

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION OF THE LOCAL VENTILATION RATE OF A CUBIC BUILDING MODEL WITH OPENINGS

V. Pappa¹, A. Langidis², M. Manolesos³, D. Bouris⁴

Laboratory for Innovative Environmental Technologies, National technical University of Athens,
9 Heroon Polytechniou, 15780, Zografou

e-mail: vaswpappa@gmail.com¹, aostl@hotmail.com², marinos.manolesos@swansea.ac.uk³,
dbouris@fluid.mech.ntua.gr⁴

ABSTRACT

Natural building ventilation is nowadays a matter of utmost importance for improving the lifestyle of human beings in urban dwells. Taking into consideration the aforementioned point of view, and aiming to provide solutions, the present study focuses its interest on the calculation of the cross-sectional flow rate of a single building, both experimentally (wind tunnel experiments) and numerically. The cubic building model is exposed vertically (0^0) to the air flow of two different upstream, turbulent boundary layers. Stereo Particle Image Velocimetry (Stereo PIV) methodology is adopted, as for the experimental calculation of the flow field. The outcome was the detailed documentation of the velocity and turbulence intensity profiles around the building model and thus the calculation of the mean ventilation rate, at the vertical building apertures. The experimental process is simulated also numerically. The computational model represents the reduced-scale model used in the wind-tunnel measurements. The Finite Volume Method in the In-house CFD code, is used to solve the approximate forms of the 3D steady RANS equations in combination with SST $k-\omega$ turbulence model. The coupled CFD simulation (indoor and outdoor airflow modeled simultaneously in the same computational domain) achieved the calculation of ventilation rate, which was associated with the characteristics of the upstream boundary layer. A considerable dependence of the flow field and the ventilation rate around the building is observed along with the upstream boundary layer. This dependence, though, is not evident to the outer surface of the cubic building and its pressure distribution. The fact comes to contradiction to the empirical methods that are widely used for the numerical calculation of the ventilation rate. It is observed that the local ventilation rate, which is the telling parameter of the present study, depends on the measurement plane (parallel or vertical to the flow), and on the same time, depends on the proximity of the measurement plane - within a distance of $0.09H$ ($\sim 1.0\text{cm}$) and $0.05H$ ($\sim 0.5\text{cm}$) where H : building model height- from the cross-sectional building openings. The measurement proximity is a key factor for the accuracy of the measurement results.

Keywords: *Mean Ventilation Rate, Stereo Particle Image Velocimetry, Computational Fluid Dynamics (CFD), Atmospheric Boundary Layer (ABL), Building with apertures.*