

ΔΙΔΥΜΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ, ΣΕ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΕΣ, ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΤΗΡΙΟ ΜΕ ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΨΗ ΚΑΙ ΔΩΜΑ

Βασιλική Παππά^(α), Christof Gromke^(β), Δημήτρης Μπούρης^(γ)

^(α)vaspappa@mail.ntua.gr, ^(γ)dbouris@fluid.mech.ntua.gr, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773, Ζωγράφου

^(β)christof-bernhard.gromke@kit.edu, Institute for Hydromechanics, Karlsruhe Institute of Technology, Kaiserstrasse, 12, 76128 Karlsruhe, Germany

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της μελέτης της επίδρασης της βλάστησης στη ροή ανέμου στο αστικό περιβάλλον, πραγματοποιήθηκαν δίδυμες πειραματικές μελέτες της ροής γύρω από κυβικής μορφής πρότυπο κτηρίου στις αεροσήραγγες του Karlsruhe Institute of Technology (KIT) και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πανομοιότυπα πρότυπα κτηρίου με ανοίγματα μελετήθηκαν υπό τη ροή προσομοιούμενων ατμοσφαιρικών οριακών στρωμάτων με συγκρίσιμες κατατομές χαρακτηριστικών μεγεθών μέσης ταχύτητας, τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ολοκληρωτικών κλιμάκων μήκους της τύρβης. Στην ανάντη όψη και στην οροφή του κτηρίου τοποθετήθηκε κατάλληλο υλικό που προσομοίωσε τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά βλάστησης. Οι μετρήσεις ταχύτητας έγιναν με Laser Doppler Velocimetry (LDV) στο KIT και 2D-3C Particle Image Velocimetry (PIV) στο ΕΜΠ. Τα αποτελέσματα των δύο μελετών έδειξαν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά της δομής της ροής και της ποσοτικής επίδρασης της βλάστησης. Οι διαφορές στα ποσοτικά χαρακτηριστικά της ροής αναζητούνται στις (μικρές) διαφορές των χαρακτηριστικών της ανάντη ροής. Τα αποτελέσματα είναι δημοσίως διαθέσιμα (Pappa et al. 2023b) και προσφέρουν τη δυνατότητα για την ανάλυση της επίδρασης λειτουργικών πειραματικών παραμέτρων και μετρητικών τεχνικών καθώς και για πιστοποίηση αριθμητικών προσομοιώσεων.

Λέξεις Κλειδιά: Αεροδυναμική Σήραγγα, Κτήριο, Φυτεμένο Δώμα, Particle Image Velocimetry (PIV), Laser Doppler Velocimetry (LDV)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενσωμάτωση βλάστησης στα δομικά στοιχεία κτηρίων έχει τραβήξει τη προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω της επίδρασής της στο αστικό μικροκλίμα, στην άνεση πεζών και στη ποιότητα αέρα στις πόλεις αλλά και στον αερισμό των κτηρίων και στην ποιότητα αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μελέτες αεροσήραγγας χρησιμοποιούνται συχνά ως ερευνητική προσέγγιση (Li et al, 2022). Ωστόσο, παραμένουν πολλές προκλήσεις για την αξιόπιστη εφαρμογή τους, κυρίως σχετικά με την υπό κλίμακα προσομοίωση βλάστησης, ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και την αβεβαιότητα των μετρητικών τεχνικών.

Η παρούσα έρευνα μελετά την επίδραση βλάστησης, ενσωματωμένης στις εξωτερικές επιφάνειες ενός απλοποιημένου προτύπου κτηρίου, στη ροή γύρω από το κτήριο και δια των ανοιγμάτων του. Πραγματοποιήθηκαν δύο «δίδυμες» πειραματικές μελέτες: η μια στην αεροσήραγγα στο Karlsruhe Institute of Technology (KIT), της Γερμανίας και η δεύτερη στην αεροσήραγγα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Η κοινή πειραματική διάταξη ήταν ένα κτήριο κυβικού σχήματος, εκτεθειμένο σε ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, υπό κοινή κλίμακα ομοιότητας. Το κτήριο έχει δύο κάθετα ανοίγματα στις πλευρικές, ως προς τη φορά του ανέμου, επιφάνειές του και τοποθετείται

πορώδες υλικό στην ανάντη όψη ή στην οροφή (Pappa et al., 2023a). Η σημασία της έρευνας έχει δύο σκέλη α) εστιάζει στο αιολικό περιβάλλον σε αστικές περιοχές και την σημασία του για την άνεση και ασφάλεια πεζών, για την ποιότητα αέρα των πόλεων και του εσωτερικού των κτηρίων (δια του φυσικού αερισμού) και β) διερευνά τις αβεβαιότητες και τις δυνατότητες πραγματοποίησης συμπληρωματικών μελετών σε διαφορετικές εγκαταστάσεις και με διαφορετικές μεθόδους μέτρησης. Επιπλέον, τα δεδομένα των μετρήσεων είναι δημοσίως διαθέσιμα (Pappa et al., 2023b) και για να εξυπηρετήσουν ανάγκες πιστοποίησης αριθμητικών προσομοιώσεων.

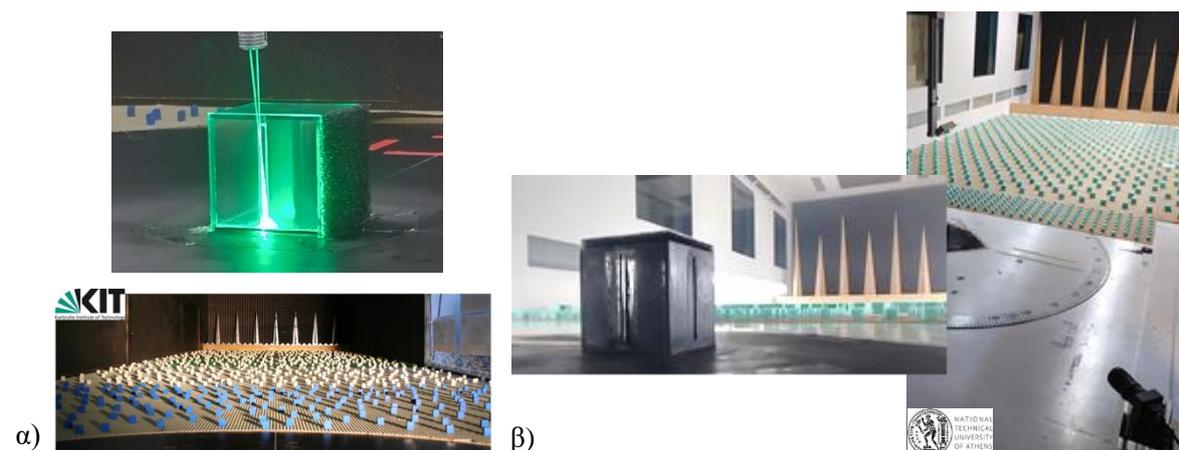
2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Προϋπόθεση των δίδυμων πειραματικών μελετών στις διαφορετικές αεροσήραγγες, ήταν η εξασφάλιση κοινών συνθηκών για τη ροή γύρω από κτήριο με ή χωρίς βλάστηση στην οροφή και στην ανάντη όψη του. Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών της ροής στις δύο μελέτες εξυπηρετούν τη συμπληρωματικότητα των αποτελεσμάτων, εκμεταλλευόμενοι τα διαφορετικά πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων μέτρησης. Εξυπηρετούν, επίσης, τη σύγκριση των δύο μελετών ως προς την επίτευξη του στόχου των κοινών συνθηκών και, τελικά, τον έλεγχο και εντοπισμό των πηγών των αβεβαιοτήτων.

Οι κοινές συνθήκες συνοψίζονται στις εξής παραμέτρους :

- Κοινή γεωμετρία και κλίμακα γεωμετρικής ομοιότητας του κτηρίου.
- Κοινά γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του υλικού με το οποίο προσομοιώνεται η βλάστηση (δυναμική ομοιότητα).
- Κοινά χαρακτηριστικά του προσομοιούμενου ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (ΑΟΣ) στο οποίο εκτίθεται το κτήριο δηλ. κοινή κατακόρυφη κατατομή της μέσης ταχύτητας και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.
- Κοινή κλίμακα δυναμικής ομοιότητας του ΑΟΣ και ίδια με αυτή της βλάστησης και του κτηρίου.

Οι μετρήσεις μέσων και τυρβωδών χαρακτηριστικών έγιναν με σημειακές μετρήσεις (Laser Doppler Velocimetry - LDV) δύο συνιστωσών της ταχύτητας με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας στο ΚΙΤ και με μετρήσεις σε επίπεδο του χώρου (Particle Image Velocimetry – PIV) για δύο ή/και τρεις (Stereoscopic PIV) συνιστώσες της ταχύτητας σε χαμηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας στο ΕΜΠ. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται εικόνες από το πρότυπο κτηρίου με βλάστηση και από το εσωτερικό της αεροσήραγγας για τη διάταξη στο ΚΙΤ (Σχήμα 1α) και στο ΕΜΠ (Σχήμα 1β).



Σχήμα 1 α) Όψη παθητικών διατάξεων σχηματισμού ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος α) στο ΚΙΤ, και β) στο ΕΜΠ και κοντινές λήψεις των όμοιων προτύπων κτηρίου με το πορώδες υλικό στην ανάντη όψη (α) και στην οροφή (β).

2.1 Κοινή φυσική προσομοίωση κτηρίου και βλάστησης

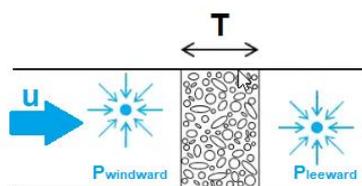
Οι μελέτες διεξάχθηκαν με υπό κλίμακα πρότυπο κτηρίου, η γεωμετρία του οποίου ήταν απλή αλλά και με σαφήνεια καθορισμένη ώστε να μπορεί εύκολα να αναπαραχθεί. Χρησιμοποιήθηκε

διαφορετικό υλικό για τις ανάγκες της κάθε διάταξης. Στο ΕΜΠ, το κτήριο ήταν κατασκευασμένο από plexiglass ενώ στο ΚΙΤ, για λόγους οπτικής πρόσβασης στο εσωτερικό του, η κατασκευή ήταν από γυαλί, το οποίο είναι λιγότερο επιρρεπές σε φθορές. Και στις δύο περιπτώσεις, το κτήριο ήταν κυβικού σχήματος με πλευρά $H=110$ mm και δύο κάθετα ανοίγματα ύψους $h=90$ mm και πλάτους 6 mm στις κάθετες όψεις που βρίσκονταν προσανατολισμένες παράλληλα στη ροή. Στο κέντρο του εσωτερικού του κτηρίου υπήρχε κατακόρυφη κολώνα με τετραγωνική διατομή πλευράς 22 mm (διακρίνεται στο Σχήμα 1α). Η κολώνα εξυπηρετεί την εσωτερική ανάμιξη που προκαλεί η διαμερισμάτωση στη φυσική κλίμακα ενώ καλύπτει και την πιθανή ανάγκη ενσωμάτωσης σωληνώσεων μέτρησης πίεσης σε άλλες, συμπληρωματικές μελέτες. Τα τοιχώματα του κτηρίου έχουν πάχος 5mm με αποτέλεσμα ο εσωτερικός όγκος (χωρίς τη κολώνα) να είναι διαστάσεων 100x100x100 mm. Η κλίμακα γεωμετρικής ομοιότητας, σε σχέση με τη πραγματική, θεωρήθηκε ίση με 1:300 και, όπως θα φανεί παρακάτω, είναι κοινή και για τη δυναμική ομοιότητα της βλάστησης και του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Η βλάστηση προσομοιώθηκε με πορώδες υλικό ανοιχτού πόρου (open cell reticulated foam) καθορισμένων γεωμετρικών διαστάσεων πάχους υλικού (T) και μεγέθους πόρου (PPI – pores per inch). Προκειμένου να εξασφαλιστεί η γεωμετρική και αεροδυναμική ομοιότητα με βλάστηση πλήρους κλίμακας, μετρήθηκε, σε ανεξάρτητη μελέτη (Pappa et al., 2023c), η αεροδυναμική του συμπεριφορά και ο χαρακτηρισμός έγινε με βάση την υπόθεση διατήρησης του λόγου αεροδυναμικής αντίστασης προς αδρανειακές δυνάμεις της ελεύθερης ροής ή, ισοδύναμα, του λόγου πτώσης πίεσης (ΔP) της διερχόμενης του πορώδους μέσου ροής, προς τη δυναμική πίεση (P_{dyn}) της ανάντη ροής (Gromke, 2011):

$$\left(\frac{\Delta P}{P_{dyn}}\right)_{full\ scale} = \left(\frac{\Delta P}{P_{dyn}}\right)_{model\ scale} \Rightarrow (\lambda T)_{full\ scale} = (\lambda T)_{model\ scale} \quad (1)$$

όπου (λ , m^{-1}) ο συντελεστής πτώσης πίεσης: $\Delta P=(P_{windward}-P_{leeward})=\lambda \cdot T \cdot P_{dyn}$. Θεωρώντας ότι η δυναμική ομοιότητα της προσομοιούμενης βλάστησης ακολουθεί τη γεωμετρική ομοιότητα του κτηρίου (1:300) μετρήθηκαν (Pappa et al., 2023c) (Σχήμα 2) τιμές του υλικού που αντιστοιχούν σε συντελεστή πτώσης πίεσης πλήρους κλίμακας στο εύρος [0.65,7.82] (m^{-1}), οι οποίες είναι σε συμφωνία με τυπικές τιμές αναρριχόμενης και θαμνώδους βλάστησης (Grunert et al, 1984).



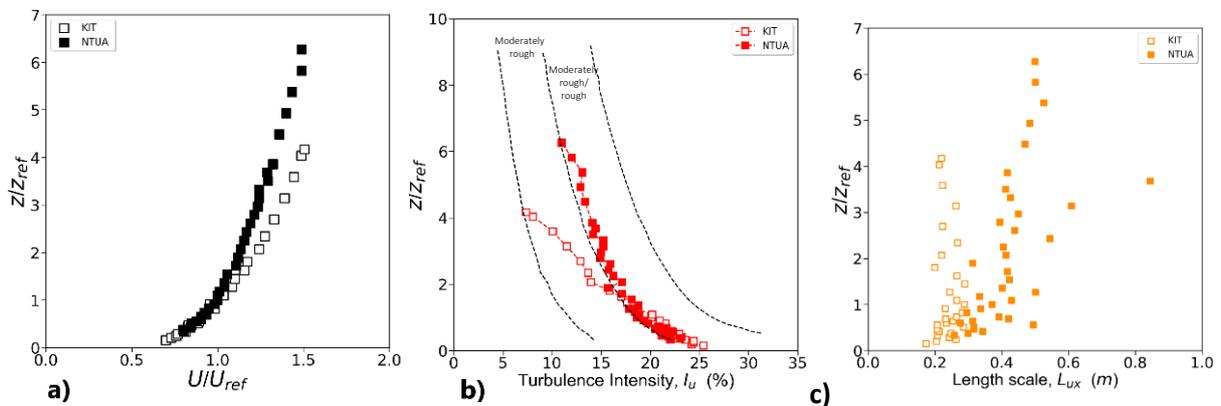
Σχήμα 2 Διάταξη μέτρησης πτώσης πίεσης και προσδιορισμού συντελεστή (λ) για το πορώδες υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση της βλάστησης.

2.2 Προσομοίωση ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος

Για τη προσομοίωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στις δύο αεροσήραγγες (ΚΙΤ, ΕΜΠ) χρησιμοποιήθηκαν παθητικά στοιχεία τραχύτητας επί του δαπέδου για τη παραγωγή της τύρβης και οβελίσκοι με στερεά φράγματα ανάντι αυτών για την εξασφάλιση της αναδιανομής της (Σχήμα 1). Οι μετρήσεις του οριακού στρώματος ανάντι του κτηρίου έγιναν με ανεμομετρία θερμού νήματος. Στο ΕΜΠ χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας μονού υμένα (single film probe) και συχνότητα δειγματοληψίας 10 kHz για 104 s σε κάθε σημείο μέτρησης. Στο ΚΙΤ, χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας μονού νήματος (single wire probe) με συχνότητα δειγματοληψίας 6 kHz για 60 s σε κάθε σημείο. Οι μετρημένες κατατομές μέσης ταχύτητας και τυρβώδους κινητικής ενέργειας φαίνονται στο Σχήμα 3a-b. Με προσαρμογή των κατατομών στον εκθετικό νόμο $(U/U_{ref})=(z/z_{ref})^a$, προκύπτουν $a_{EMΠ}=0.22$ και $a_{ΚΙΤ}=0.28$. Με προσαρμογή στον λογαριθμικό νόμο προκύπτει τραχύτητα πλήρους κλίμακας $z_{0,EMΠ}=0.39$ m και $z_{0,ΚΙΤ}=0.54$ m. Οι τιμές αντιστοιχούν στα άνω όρια της προαστιακής και τα κάτω της αστικής περιοχής, αντίστοιχα για το ΕΜΠ και το ΚΙΤ (VDI, 2000). Παρά τις αριθμητικές

διαφορές των προσαρμογών, είναι αξιοσημείωτη η γραφική συμφωνία των κατατομών στο Σχήμα 3. Τονίζεται επίσης ότι η συμφωνία αυτή είναι εμφανής μέχρι και 2 ύψη κτηρίου πάνω από το δάπεδο (έδαφος) ενώ σε μεγαλύτερη ύψη, η τυρβώδης κινητική ενέργεια που παράγεται στην αεροσήραγγα του ΚΙΤ υποεκτιμά το όριο της αστικής περιοχής με υψηλή τραχύτητα (Σχήμα 3b). Οι κλίμακες μήκους της τύρβης (Σχήμα 3c), φαίνεται να είναι μικρότερες στα ύψη αυτά, σε σχέση με τις μετρημένες στο ΕΜΠ. Εξήγηση αυτής της συμπεριφοράς της τύρβης, ενδέχεται να προκύπτει από τα μεγέθη των διατομών των αεροσηράγγων. Στο ΕΜΠ, η διατομή είναι αισθητά μεγαλύτερη με (πλάτοςxύψος)=(3.5x2.5 m) σε σύγκριση με του ΚΙΤ (2.0x1.0 m) ενώ στο ΚΙΤ είναι και μικρότερα τα στοιχεία τραχύτητας: 1-2 cm έναντι 5 cm στο ΕΜΠ. (Σχήμα 1).

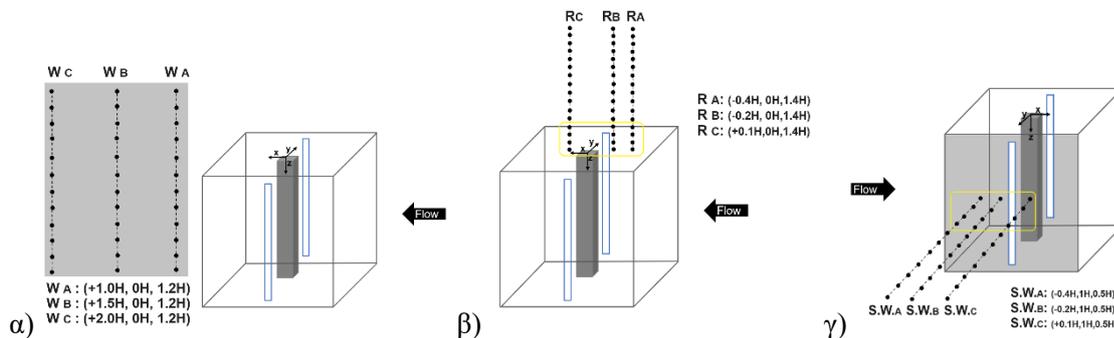
Οι διαφορές στα χαμηλά ύψη, στη περιοχή του κτηρίου, δείχνουν να είναι μικρές και θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι οι ανάντη κατατομές, τόσο της ταχύτητας όσο και των χαρακτηριστικών της τύρβης, ικανοποιούν το κριτήριο των κοινών ανάντη χαρακτηριστικών της ροής. Ωστόσο, το σημείο αυτό θα ξανασυζητηθεί και κατά την αξιολόγηση των μετρήσεων στη περιοχή του κτηρίου.



Σχήμα 3 Σύγκριση μετρημένων κατακόρυφων κατατομών a) μέσω ταχυτήτων b) έντασης τύρβης (διακρίνονται οι περιοχές κατά VDI, 2000) και c) κλιμάκων μήκους της τύρβης στις αεροδυναμικές σήραγγες ΚΙΤ και ΕΜΠ (ref στο ύψος του κτηρίου).

2.3 Μετρήσεις LDV στο ΚΙΤ

Οι μετρήσεις του πεδίου ροής στην αεροσήραγγα του ΚΙΤ έγιναν σημειακά με τη μέθοδο 2C-LDV, με μετακίνηση του αισθητήρα στο χώρο. Στη προκειμένη περίπτωση, έγιναν μετρήσεις κατά μήκος εννέα κατατομών: τρεις κατακόρυφες κατάντι του κτηρίου, τρεις κατακόρυφες, κάθετες στην οροφή του κτηρίου και τρεις οριζόντιες, κάθετες στη μία πλευρά του κτηρίου (Σχήμα 4).



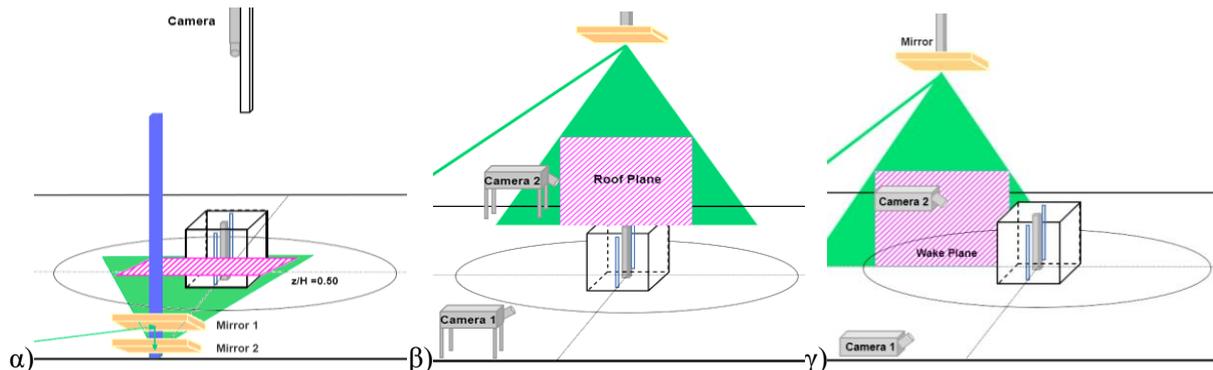
Σχήμα 4 Θέσεις μέτρησης για τη περιοχή α) κατάντι, β) άνωθεν της οροφής και γ) της πλευρικής επιφάνειας του κτηρίου

Κατά μήκος όλων των κατατομών, μετρήθηκαν σημειακά δύο συνιστώσες της ταχύτητας με συχνότητα δειγματοληψίας 100 Hz για 120s. Για τις κατακόρυφες κατατομές, οι μετρημένες συνιστώσες ήταν οι (u,w) στη φορά της ροής (x) και στη κατακόρυφη διεύθυνση (z). Για τις οριζόντιες κατατομές στο πλευρικό τοίχωμα, μετρήθηκαν οι (u,v), στη φορά της ροής και στην

οριζόντια (κάθετη στο τοίχωμα) διεύθυνση (y). Λόγω της αναμενόμενης μη μονιμότητας των περιοχών αποκόλλησης της ροής από τις ανάντη ακμές του κτηρίου, έγιναν και μετρήσεις υψηλότερης συχνότητας (500Hz, 120s) της κάθετης στο τοίχωμα συνιστώσας ταχύτητας στις περιοχές που σημειώνονται με κίτρινο περίγραμμα στο Σχήμα 4β και γ.

2.4 Μετρήσεις PIV στο ΕΜΠ

Οι μετρήσεις στο ΕΜΠ έγιναν με τη μέθοδο 2D-3C(2C) PIV, η οποία μετρά το πεδίο ταχυτήτων σε όλη την έκταση προκαθορισμένων επιπέδων στο χώρο. Τα επίπεδα μέτρησης ήταν ένα οριζόντιο: κάθετο στο πλευρικό τοίχωμα του κτηρίου και στο μέσο του ύψους του και δύο κατακόρυφα (παράλληλα με την ανάντη ροή): κατάντι του κτηρίου και στην οροφή του (Σχήμα 5).



Σχήμα 5 Επίπεδα μέτρησης με PIV α) κατάντι, β) στην οροφή, και γ) κάθετα στο πλευρικό τοίχωμα του κτηρίου.

Για τη κατάλληλη κατεύθυνση της δέσμης laser και το φωτισμό των επιπέδων, χρησιμοποιήθηκαν καθρέφτες. Για τις μετρήσεις κατάντι και στην οροφή του κτηρίου (Σχήμα 5β, γ) μετρήθηκαν και οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας (2D-3C PIV) ενώ για το οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 5α) μετρήθηκαν μόνο οι συνιστώσες επί του επιπέδου (2D-2C PIV) λόγω δυσκολίας στήριξης των δύο καμερών άνωθεν της διάταξης καθώς και της αναμενόμενης μικρής σημασίας της κατακόρυφης συνιστώσας στη περιοχή αυτή. Όλα τα επίπεδα είχαν έκταση περίπου $1.8H \times 1.8H$ (όπου H το ύψος του κτηρίου). Λήφθηκαν 1000 εικόνες με interrogation area size 32 px ($\sim 1.6-1.7\text{mm}$) και ελάχιστη διακριτή ταχύτητα 0.1 m/s (περίπου 2% της ταχύτητας ελεύθερης ροής). Τα επίπεδα στα οποία έγιναν οι μετρήσεις PIV περιλαμβάνουν τις κατατομές κατά μήκος των οποίων έγιναν και οι μετρήσεις LDV (Σχήμα 4) ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων μέτρησης των δύο μεθόδων.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

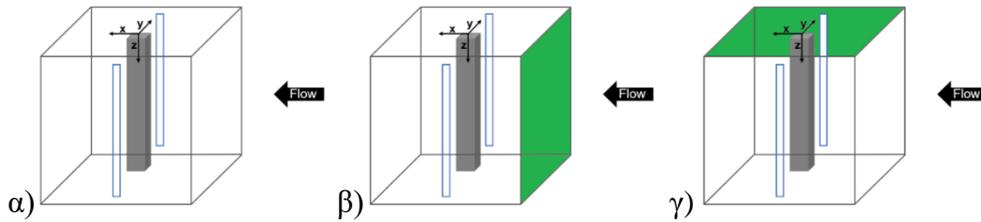
Ο αριθμός των διαφορετικών διατάξεων που μετρήθηκαν είναι μεγάλος, ξεκινώντας με το γυμνό κτήριο και στη συνέχεια με τις διατάξεις με βλάστηση στην ανάντη όψη και στην οροφή (Σχήμα 6) και με παράμετρο την πυκνότητα και το πάχος της βλάστησης. Για όλες τις διατάξεις, μετρήθηκαν ταχύτητες ροής στις προαναφερθείσες κατατομές και επίπεδα. Παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα των μετρήσεων με σκοπό να αναδειχθούν:

- ομοιότητες/διαφορές μεταξύ των δύο μελετών με διαφορετικές μεθόδους (LDV, PIV) σε διαφορετικές αεροσήραγγες (KIT, ΕΜΠ)
- η επίδραση στρώματος βλάστησης που προσομοιώθηκε από πορώδες υλικό 60 PPI, πάχους 10 mm. Η μετρημένη τιμή διαπερατότητάς του (συντελεστή πτώσης πίεσης) είναι $\lambda_{fs} = 7.82\text{ m}^{-1}$, η οποία σε πλήρη κλίμακα αντιστοιχεί σε πυκνούς θάμνους.

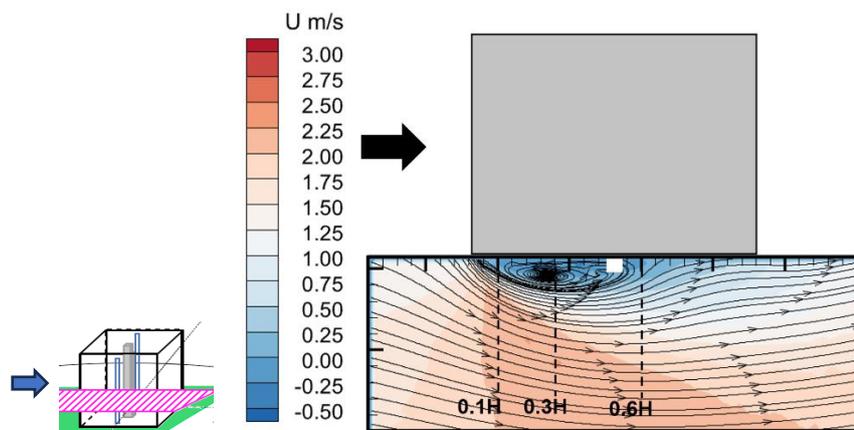
Με βάση τη μέση ταχύτητα της ροής, μετρημένη ανάντι του κτηρίου και στο ύψος της οροφής του H , οι αριθμοί Reynolds για τις δύο μελέτες ήταν $Re_H = 23500$ στο KIT και $Re_H = 16500$ στο ΕΜΠ. Και οι δύο αριθμοί πληρούν το κριτήριο ανεξαρτησίας της ροής από τον αριθμό Re (VDI, 2000) για ροή γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα με αιχμηρές ακμές, όπως το κτήριο που εξετάζεται

Όπως είναι γνωστό (Castro and Robins, 1977), η ροή γύρω από κυβικής μορφής σώμα παρουσιάζει σημαντική πολυπλοκότητα με αποκολλήσεις από την οριζόντια και τις κάθετες ανάντη ακμές καθώς

και τον σχηματισμό μεγάλης ζώνης ανακυκλοφορίας κατάντι του κτηρίου. Οι επιφάνειες κάτω από τις περιοχές αποκόλλησης της ροής υπόκεινται και σε μη μόνιμα φαινόμενα ροής, τα οποία και αναμένεται να επηρεάσουν τον αερισμό του κτηρίου μέσα από τα ανοίγματα (Carrilho da Graca, 2021). Η περιοχή του πλευρικού ανοίγματος εκτίθεται στη πλευρική ζώνη ανακυκλοφορίας της ροής, όπως φαίνεται από το PIV μετρημένο πεδίο για το γυμνό κτήριο στο Σχήμα 7. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι κατατομές κατά μήκος των οποίων λήφθηκαν οι σημειακές μετρήσεις LDV.



Σχήμα 6 Διατάξεις κτηρίου α) χωρίς βλάστηση και με βλάστηση β) στην ανάντη όψη και γ) οροφής



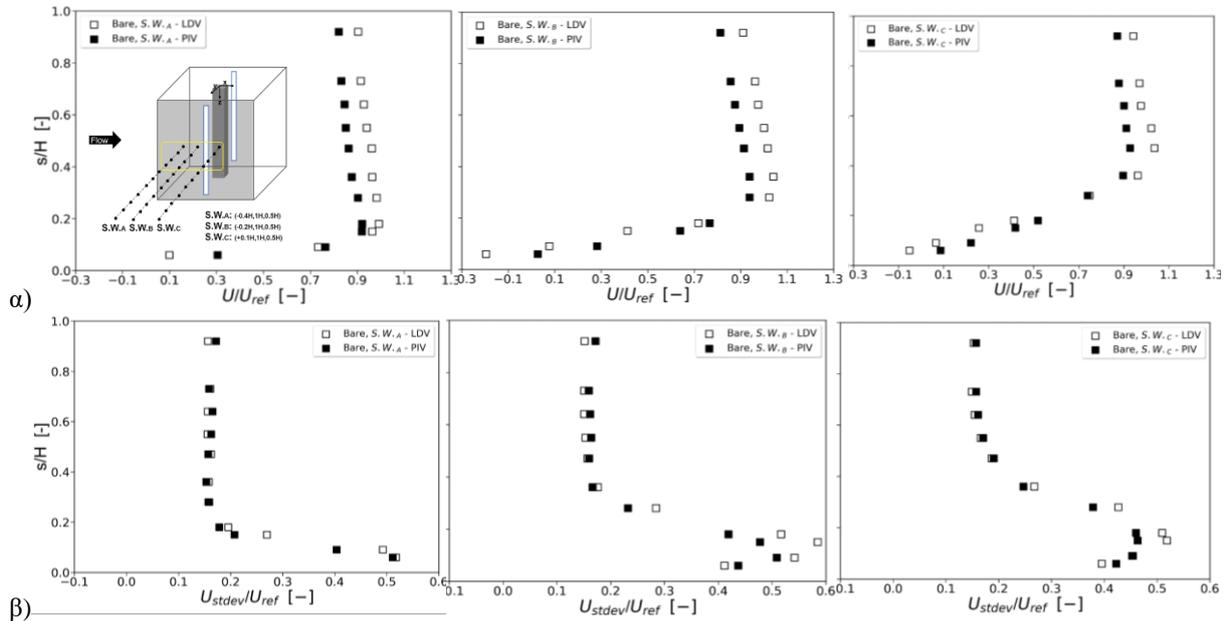
Σχήμα 7 Κάτοψη του γυμνού κτηρίου με τμήμα του οριζώντιου επιπέδου μέτρησης. Έχουν σχεδιαστεί γραμμές ροής και ισο-περιοχές της ταχύτητας της ροής (συνιστώσα x της ανάντη ροής). Το λευκό τετράγωνο δείχνει τη θέση του ανοίγματος.

Για το ίδιο επίπεδο με το Σχήμα 7, στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται οι μετρημένες, με τις δύο μεθόδους, κατατομές μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για τη κύρια συνιστώσα της ταχύτητας της ροής, αδιαστατοποιημένη κάθε φορά με τη τιμή αναφοράς, ανάντι και στο ύψος του κτηρίου ($U_{ref}=U_{z=H}$).

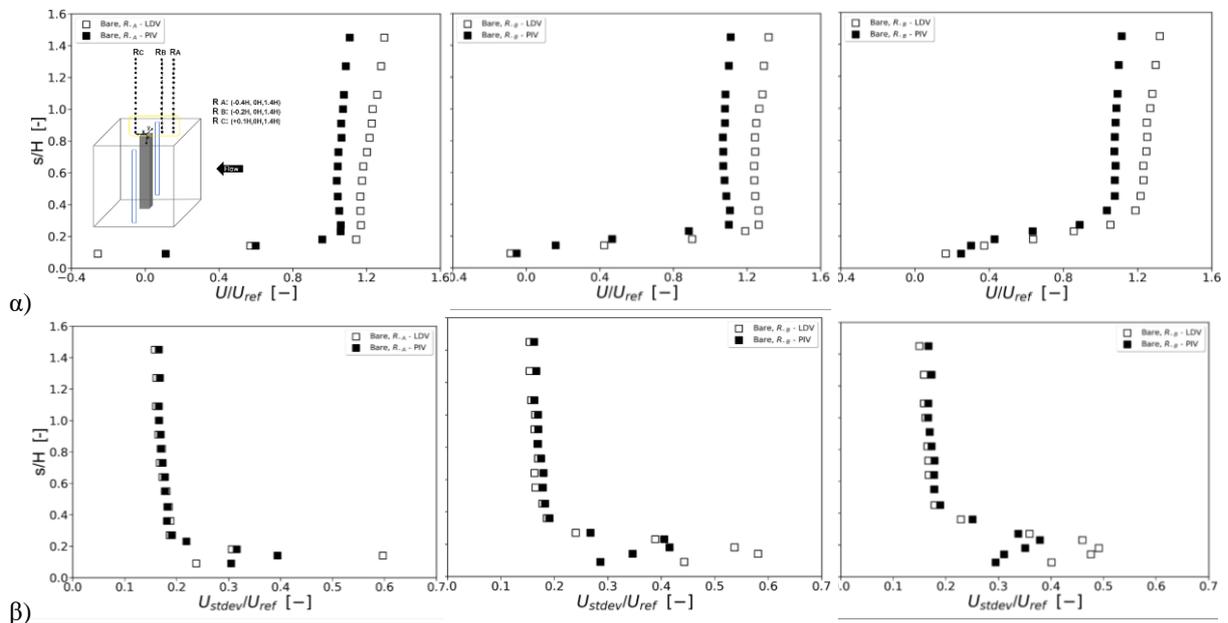
Διακρίνεται συμφωνία της μορφής του διαμορφούμενου πεδίου, με το πάχος της ζώνης επιρροής του κτηρίου να μετράται στο ίδιο ύψος και με τις δύο μεθόδους και η ανάκτηση να συμβαίνει με τον ίδιο ρυθμό. Οι μετρήσεις στο ΚΙΤ δείχνουν ελαφρώς μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις κοντά στο τοίχωμα αλλά πιο μακριά βρίσκονται σε απόλυτη συμφωνία με τις μετρήσεις στο ΕΜΠ. Μακριά από το τοίχωμα, η μέση ταχύτητα δείχνει υψηλότερη στο πείραμα του ΚΙΤ από ότι στον ΕΜΠ. Παρά το γεγονός ότι η συμφωνία των ανάντη κατατομών δείχνει ικανοποιητική (Σχήμα 3), τόσο για τη μέση ταχύτητα όσο και για τη τυρβώδη κινητική ενέργεια, μέχρι τα $2H$ από το έδαφος, οι αριθμητικές συγκρίσεις έχουν δείξει υψηλότερη μέση ταχύτητα και τυρβώδη κινητική ενέργεια στο ΚΙΤ. Επιπλέον, ενώ η παρεμπόδιση της ροής (blockage) είναι $<1\%$ στα δύο πειράματα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο ΚΙΤ το πλάτος του κτηρίου (H) αποτελεί το $0.1/2=5\%$ του πλάτους της διατομής της A/Σ ενώ στο ΕΜΠ είναι το $0.1/3.5=2.8\%$. Παρά την αδιαστατοποίηση και την όμοια μορφολογία της ροής, οι διαφορές για τη μέση ταχύτητα στην ελεύθερη ροή είναι της τάξης του 5% ενώ εντός των ζωνών αποκόλλησης φτάνουν και το 50% . Οι τυπικές αποκλίσεις είναι σε καλύτερη συμφωνία, με τις μέγιστες διαφορές να είναι $\sim 20\%$.

Οι αντίστοιχες μετρήσεις στην οροφή και κατάντι του κτηρίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 9 και Σχήμα 10, αντίστοιχα. Στην ελεύθερη ροή, πάνω από το κτήριο, διακρίνονται διαφορές στη μέση ταχύτητα (Σχήμα 9α), όπως παρατηρήθηκε και μακριά από το πλευρικό τοίχωμα. Αυτές οι διαφορές είναι μεγαλύτερες εδώ ($\sim 20\%$) και φαίνεται να συνεχίζουν και κοντά στην οροφή όπου η ροή

επιταχύνεται και αποκολλάται, ειδικά για τις δύο ανάντη θέσεις μέτρησης. Στη τελευταία θέση, 0.6H από την ανάντη ακμή, οι διαφορές δείχνουν να μικραίνουν. Οι τυπικές αποκλίσεις έχουν την ίδια συμπεριφορά με τις μετρήσεις στο πλευρικό τοίχωμα καθώς μετρώνται μεγαλύτερες διαταραχές στο ΚΙΤ, ενδεικτικές, ίσως, του ελαφρώς υψηλότερου επιπέδου τύρβης ανάντι (Σχήμα 3).



Σχήμα 8 Μετρημένες τιμές α) μέσης τιμής και β) τυπικής απόκλισης, της κύριας (x) συνιστώσας ταχύτητας σε οριζόντιες κατατομές κάθετες στο πλευρικό τοίχωμα του κτηρίου με LDV (KIT), PIV (EMPI).

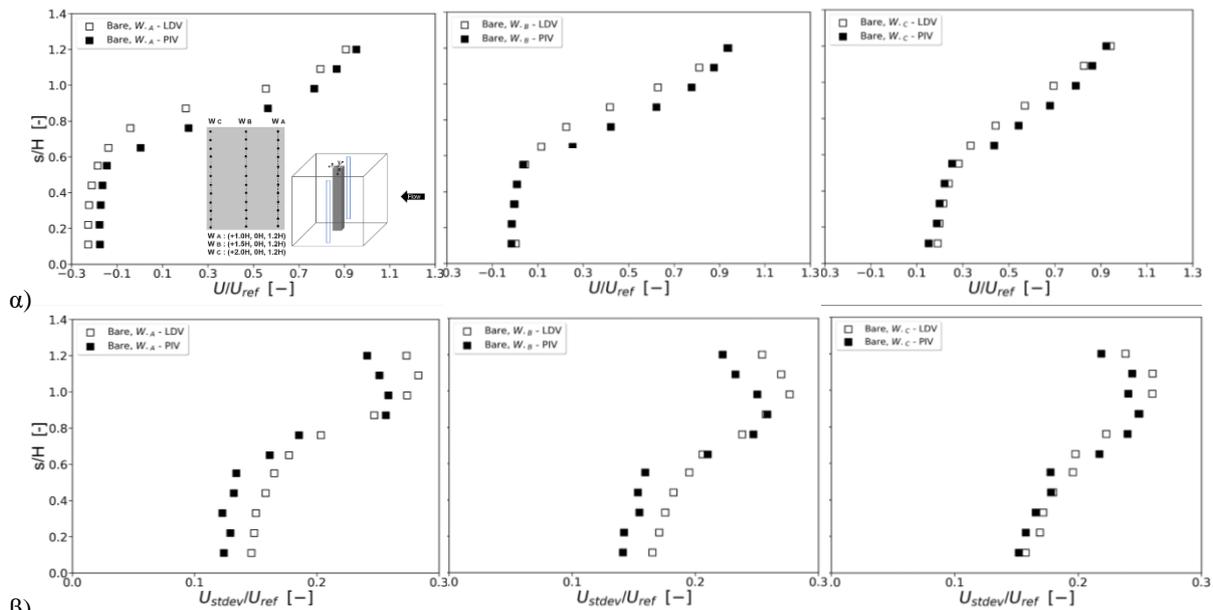


Σχήμα 9 Μετρημένες τιμές α) μέσης τιμής και β) τυπικής απόκλισης, της κύριας (x) συνιστώσας ταχύτητας σε κατακόρυφες κατατομές στην οροφή του κτηρίου με LDV (KIT), PIV (EMPI).

Κατάντι του κτηρίου, η ροή διαμορφώνεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις που αφορούν την οροφή. Διακρίνονται διαφορές μέχρι και 50% εντός της ζώνης διάτμησης και κοντά στο κτήριο ($s/H=0.6-1.0$ στις θέσεις W_A , W_B στο Σχήμα 10). Αυτές είναι όμως περιοχές με μεγάλη κλίση ταχύτητας και ακόμη και η αβεβαιότητα θέσης του μετρητικού μπορεί να επηρεάζει σημαντικά τη σύγκριση. Είναι αξιοσημείωτη η συμφωνία για τη μέση ταχύτητα τόσο μέχρι το μισό ύψος του κτηρίου όσο και σε ύψος άνω του 1.1H (Σχήμα 10α). Η περιοχή αποκόλλησης κατάντι του κτηρίου

πιθανότητα να επηρεάζεται περισσότερο από το ίδιο το κτήριο παρά από τα χαρακτηριστικά του ανάντι οριακού στρώματος. Είναι αξιοσημείωτο επίσης ότι οι μετρημένες τιμές των τυρβωδών διαταραχών είναι σημαντικά χαμηλότερες (~10%) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες εντός των αποκολλημένων ζωνών της οροφής και του πλευρικού τοιχώματος (~40-50%), ένδειξη αυξημένης κινητικότητας των τελευταίων σε σύγκριση με τον ομόρου.

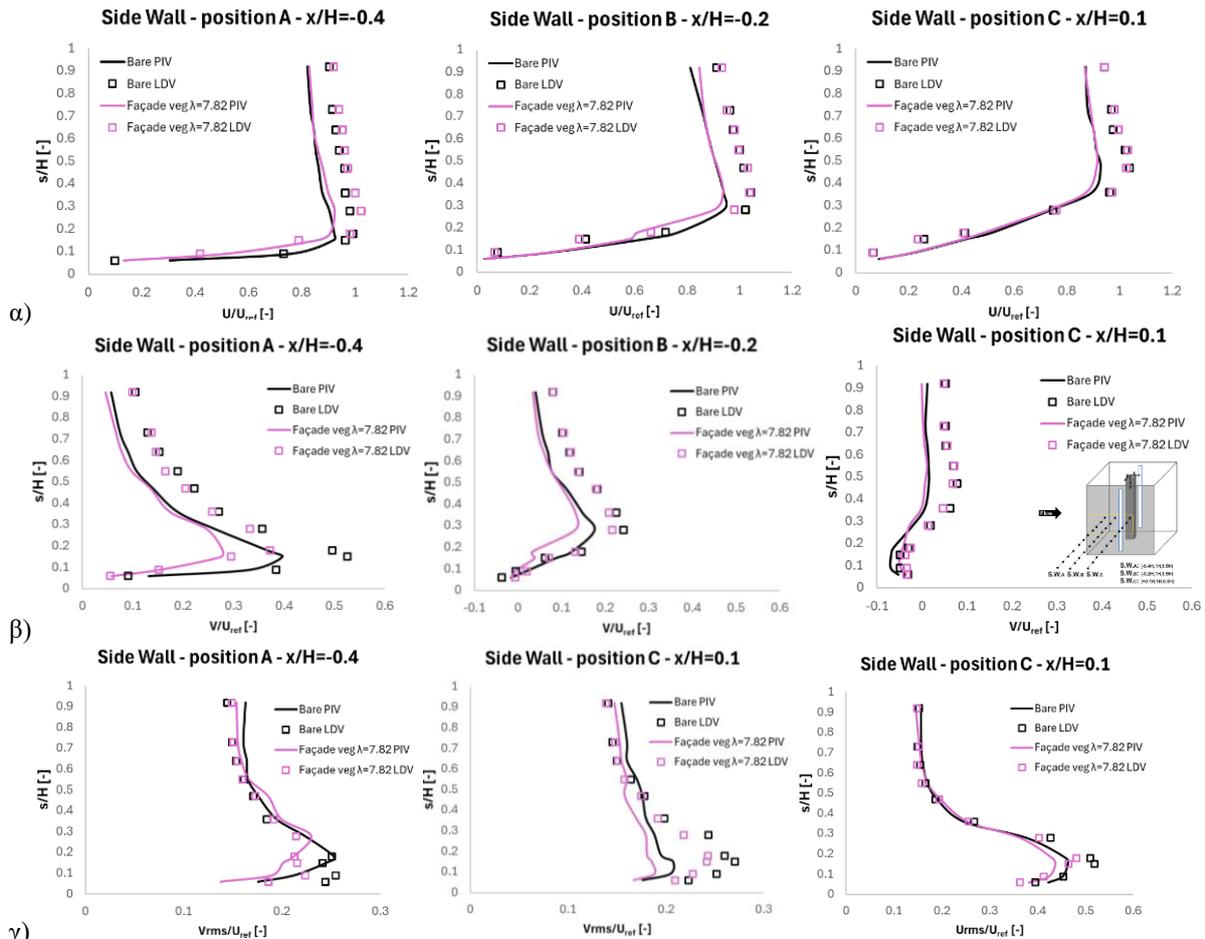
Σε όλες τις μετρήσεις, είναι οι αριθμητικές τιμές οι οποίες διαφέρουν μεταξύ των δύο πειραματικών μελετών ενώ η μορφολογία της ροής δείχνει να μετράται όμοια καθώς ταυτίζονται χωρικά οι περιοχές επιρροής του κτηρίου: μέγιστες τιμές, ζώνες διάτμησης και περιοχές επιβράδυνσης της ροής.



Σχήμα 10 Μετρημένες τιμές α) μέσης τιμής και β) τυπικής απόκλισης, της κύριας (x) συνιστώσας ταχύτητας σε κατακόρυφες κατατομές κατάντι του κτηρίου με LDV (KIT), PIV (EMΠ).

Η επίδραση της παρουσίας βλάστησης στην ανάντη επιφάνεια φαίνεται στο Σχήμα 11 για τις μετρημένες ταχύτητες στις δύο πειραματικές μελέτες, στις οριζόντιες κατατομές που είναι κάθετες στη πλευρική επιφάνεια του κτηρίου. Από το Σχήμα 11α φαίνεται ότι η επίδραση στη μέση τιμή της συνιστώσας της κύριας ροής (x) δεν είναι μεγάλη. Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από τις μετρήσεις PIV όσο και από τις LDV, αν και οι τελευταίες είναι κατά 5-10% υψηλότερες μακριά από το τοίχωμα.

Αντιθέτως, οι κάθετες ταχύτητες (y) στο πλευρικό τοίχωμα (Σχήμα 11β) επηρεάζονται σημαντικά από την ανάντι παρουσία βλάστησης, κυρίως κοντά στην ανάντη ακμή. Με τη βλάστηση στην ανάντη επιφάνεια, η εγκάρσια συνιστώσα ταχύτητας της ροής, επιβραδύνεται σημαντικά – σε σύγκριση με την κύρια συνιστώσα – και αυτό οδηγεί και σε μια ελαφριά αύξηση του πάχους της ζώνης ανακυκλοφορίας (Σχήμα 11α). Αυτό παρατηρείται στις μετρήσεις και των δύο πειραμάτων, ανεξάρτητα της μεθόδου μέτρησης. Στην θέση κατάντι του ανοίγματος και του τέλους της ζώνης ανακυκλοφορίας (δες Σχήμα 7) η συνιστώσα αυτή λαμβάνει σημαντικά μικρότερες τιμές καθώς η ροή έχει γίνει σχεδόν παράλληλη με το τοίχωμα. Η επίδραση της βλάστησης στην περιοχή αυτή φαίνεται και από τις μετρήσεις των διαταραχών ταχύτητας τόσο για τη κύρια συνιστώσα της ροής (x) όσο και για την εγκάρσια (y) (Σχήμα 11γ). Είναι εμφανής η απόσβεση των διαταραχών, μετρούμενη και στις δύο πειραματικές μελέτες.



Σχήμα 11 Μετρημένες τιμές ταχύτητας σε οριζόντιες κατατομές, κάθετες στη πλευρική επιφάνεια του με και χωρίς βλάστηση (10 mm , $\lambda=7.62 \text{ m}^{-1}$) στην ανάντι επιφάνεια, με LDV (KIT), PIV (EMPI) α) μέση τιμή της κύριας (x) συνιστώσας, β) μέση τιμή της κάθετης στο πλευρικό τοίχωμα (y) συνιστώσας και γ) τυπική απόκλιση της κύριας και της κάθετης στο τοίχωμα συνιστωσών.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πραγματοποιήθηκαν δίδυμες πειραματικές μελέτες της προσομοιούμενης ροής ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος γύρω από κυβικού σχήματος κτήριο με πλευρικά ανοίγματα, με και χωρίς τη παρουσία βλάστησης στις εξωτερικές του επιφάνειες. Καταβλήθηκαν προσπάθειες δημιουργίας οριακών στρωμάτων με ίδιες κατατομές μέσης ταχύτητας, τυρβώδους κινητικής ενέργειας και κλιμάκων μήκους στις δύο αεροσήραγγες. Παρά τη φαινομενική σύμπτωση των κατατομών μέχρι και το διπλάσιο του ύψους του κτηρίου, οι μικρές διαφορές που παρατηρήθηκαν επηρέασαν και λήφθηκαν υπόψη κατά την αξιολόγηση και των μετρημένων μέσων τιμών και διαταραχών των συνιστωσών ταχύτητας για το πεδίο ροής γύρω από το κτήριο. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με μέθοδο LDV στη μια περίπτωση και PIV στην άλλη. Τα πεδία ροής γύρω από το κτήριο που μετρήθηκαν στις δύο μελέτες έδειξαν γενική συμφωνία ως προς τη μορφολογία της ροής αλλά παρουσίασαν διαφορές μέχρι και 40-50% στις περιοχές χαμηλών ταχυτήτων και υψηλής διάτμησης κοντά στο κτήριο και της τάξης του 5-10% στις πιο απομακρυσμένες από το κτήριο μετρήσεις. Παρουσία βλάστησης στην ανάντη επιφάνεια, φάνηκε ότι και στις δύο πειραματικές μελέτες, υπάρχει ίδια επίδραση στο πεδίο ροής γύρω από τον κύβο, με επιβράδυνση της μέσης ταχύτητας και απόσβεση των διαταραχών.

Από τη σύγκριση των δύο πειραματικών μελετών φαίνεται ότι η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην ανάντη ροή δεν είναι αμελητέα ενώ το γενικά αποδεκτό όριο του $Re > 10^4$ πιθανότατα να μην είναι επαρκές για συγκρίσεις αυτού του επιπέδου. Ωστόσο, φάνηκε ότι και στις δύο μελέτες, μετράται η ίδια επίδραση της βλάστησης, επιτρέποντας την ασφαλή εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων, ακόμη και ποσοτικών, για μετρήσεις εντός της ίδιας διάταξης. Περαιτέρω διερεύνηση των συμπερασμάτων αναμένεται με τη συνέχιση της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων αλλά και με την

επόμενη συγκριτική μελέτη ίδιων διατάξεων σε διαφορετικές κλίμακες και αριθμούς Reynolds σε αεροσήραγγα άλλου φορέα συνεργαζόμενου στο χρηματοδοτούμενο έργο.

5 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ

Η έρευνα έχει χρηματοδοτηθεί από τη Ευρωπαϊκή Ένωση υπό το πλαίσιο Horizon Research and Innovation Programme HORIZON-WIDERA-2021-ACCESS-03-01. Grant Agreement Number: 101079125.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Carrilho da Graca G., Albuquerque D.P., Sandberg M., Linden P. F. (2021) “Pumping ventilation of corner and single sided rooms with two openings”. Building and Environment 205. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108171.

Castro I. P., Robins A.G. (1977) “The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams”. In: J. Fluid Mech. 79(2), pages 307–335.

F. Grunert, D. Benndorf, and K. Klingbeil. “Neuere Ergebnisse zum Aufbau von 694 Schutzpflanzungen”. In: Beitrage Forstwirtschaft. (1984).

Gromke C. (2011) “A vegetation modeling concept for building and environmental aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies”. Environmental Pollution 159.8-9, pages 2094–2099.

Gromke C. (2018) “Wind tunnel model of the forest and its Reynolds number sensitivity”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 175, p. 53-64.

Li H., Zhao Y., Shutzl B., Kubilay A., Carmeliet J., 2022. Impact of green walls on ventilation and heat removal from street canyons: Coupling of thermal and aerodynamic resistance. Building and Environment 214, 108945.

Pappa V., Bouris D., Theurer W., Gromke C. (2023a) “A wind tunnel study of aerodynamic effects of façade and roof greening on air exchange from a cubic building”. Building and Environment, Vol. 231, 110023.

Pappa, V., Gromke, C., & Bouris, D., 2023b. Twin test 1: Effect of vegetation on urban flows. PIV data from NTUA WT experiment and LDV from KIT WT experiment (1.0.0) [Data set]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.10019002

Pappa, V., Bakolas A., Gromke, C., & Bouris, D., 2023c. Effects of Façade and Rooftop Greening on the Surface Pressure Distribution of an isolated cubic Building with vertical Apertures. 16th Int. Conf. Wind Engineering, Florence Italy, 27-31 Aug. 2023.

VDI 2000. 3783/12. Environmental Meteorology Physical Modelling of Flow and Dispersion Processes in the Atmospheric Boundary Layered Applications of Wind Tunnels.” VDI.

ABSTRACT

In the context of studying vegetation effects on flow in the urban environment, twin studies of the flow past a cube shaped building are performed in the wind tunnels of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and the National Technical University of Athens (NTUA). Identically shaped buildings with openings were used with comparable upstream atmospheric boundary layer profiles in terms of mean velocity, turbulence intensity and integral length scales. Simulated vegetation was placed on the building’s upstream face and roof. Measurements were performed with Laser Doppler Velocimetry (LDV) at KIT and 2D-3C Particle Image Velocimetry (PIV) at NTUA. The two measurement sets indicate the same qualitative trends of flow structure and vegetation effects and quantitative results are in close agreement. Results are publicly available (Pappa et al. 2023b) and provide an opportunity to analyse the effects of differences in upstream conditions, wind tunnel configurations and measurement techniques.