



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΩΝ  
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# Υπολογιστική μελέτη του πεδίου ροής γύρω από κτήριο με βλάστηση επί του κελύφους του

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΛΑΜΑΡΙΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**



**Επιβλέπων:**

Δημήτριος Μπούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

**Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.**

**Κλαμαριάς Γεώργιος**



# Ευχαριστίες

---

Με την παρούσα Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θα ήθελα λοιπόν, με την αφορμή αυτή, να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν σε ολόκληρη τη φοιτητική μου σταδιοδρομία.

Θα ήθελα, καταρχήν, να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Δημήτριο Μπούρη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., τόσο για την ανάθεση αυτής της πολύ ενδιαφέρουσας Διπλωματικής Εργασίας, όσο κυρίως για τη βοήθειά του και τη συμβολή του στην περάτωσή της. Αν και οι συνθήκες αρχικά δεν υπήρξαν ιδανικές, αφού η ανάθεση της εργασίας συνέπεσε με το ξέσπασμα της πανδημίας στην Ελλάδα και το κλείσιμο των σχολών, κατορθώσαμε με εναλλακτικούς τρόπους να έχουμε εξαιρετική συνεργασία καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μελέτης.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βάθους καρδιάς όλους όσους ήταν δίπλα μου σε αυτό το όμορφο ταξίδι στα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας. Τους συμφοιτητές μου, που με συντρόφευσαν και με βοήθησαν σε όποια δυσκολία συνάντησα σε θέματα της σχολής και όχι μόνο, τους γονείς μου, Λυκούργο και Μαρία, και την αδερφή μου, Μάρθα, που είναι πάντα στήριγμα σε ό,τι κι αν κάνω στη ζωή μου, και φυσικά τους φίλους μου, Γιάννη, Νικολέτα, Τάσο και Χαρά, χωρίς τους οποίους τίποτα δεν θα ήταν το ίδιο όλα αυτά τα χρόνια.



# Περίληψη

---

Τα πεδία ροής και πιέσεων γύρω από κτήριο κυβικής μορφής επί στερεής επιφάνειας αποτελούν ένα σημαντικό αντικείμενο μελέτης του τομέα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, αφού εστιάζουν και επεξηγούν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα γύρω από κατοικημένη περιοχή.

Ένα θέμα το οποίο δεν έχει αναλυθεί διεξοδικά μέχρι στιγμής, και με το οποίο καταπιάνεται η παρούσα εργασία, είναι οι αλλαγές στα πεδία ροής και οι ευρύτερες επιδράσεις στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της παρουσίας βλάστησης στις διάφορες επιφάνειες του κτηρίου. Με παράμετρο τη θέση της βλάστησης πάνω στο κτήριο, και μέσω του ευρέως διαδεδομένου, στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική, μαθηματικού μοντέλου τύρβης 2 εξισώσεων  $k-\epsilon$ , επιχειρείται να μελετηθεί το πεδίο ροής, και πιο συγκεκριμένα η ταχύτητα και η τυρβώδης κινητική ενέργεια στην οροφή και την περιοχή πίσω από το κτήριο. Επίσης, αναζητούνται οι επιδράσεις της βλάστησης στο πεδίο πιέσεων στα τοιχώματα του κύβου.

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες της βιβλιογραφίας για ροή γύρω από κτήριο χωρίς βλάστηση, οδηγώντας σε συμπεράσματα σχετικά με τη χρησιμότητα της φύτευσης και τον αντίκτυπό της στην ανθρώπινη υγεία.

Η τοποθέτηση πρασίνου σε αστικές περιοχές και κτήρια αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον και καινοτόμο πεδίο επιστημονικής έρευνας που εάν αξιοποιηθεί σωστά μπορεί να αποβεί χρήσιμο για το σχεδιασμό της σύγχρονης πόλης και να βελτιώσει τον αστικό τρόπο ζωής.

**Λέξεις κλειδιά:** Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Κύβος, Πεδίο ροής, Πεδίο πιέσεων, Μοντέλο δύο εξισώσεων  $k - \epsilon$ , Βλάστηση, Καινοτομία





# Abstract

---

The flow and pressure fields around a cubic, surface mounted building constitute a very important topic in the field of Computational Fluid Dynamics, as they illustrate and focus on the aerodynamic processes taking place in the surroundings of an urban area.

The present study investigates how putting vegetation on buildings affects the urban flow and pressure. The specific effects of vegetation on wind velocity and turbulent kinetic energy in the roof and the backside of the building are examined using the two equation model k-e. Parameters of the investigation are the diverse location, spatial planning, drag coefficient and density of the vegetation. The effects of vegetation on the pressure fields alongside the building surfaces are examined, as well.

The results are compared to previous experimental and numerical simulations for buildings without trees, in order to inspect the advantages and disadvantages of the use of vegetation in air quality and human health.

Vegetation on buildings form an innovative method of city planning, which can lead to improvements in the urban life if used properly, consequently there is need for further research.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics, Cube, Flow field, Pressure field, Two equation model k-e, Vegetation, Innovation



# Ακρωνύμια

---

ΑΟΣ	Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα
ΟΣ	Οριακό Στρώμα
TKE	Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια
BSOU	Bounded Second Order Upwind
CD	Coefficient of Drag
CDS	Central Differencing Scheme
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
FOU	First Order Upwind
LAD	Leaf Area Density
LES	Large Eddy Simulation
MLR	Multi-Local Refinement
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RNG	Re-Normalisation Group
RSM	Reynolds Stress Model
SOU	Second Order Upwind
TDMA	Tridiagonal Matrix Algorithm



# Περιεχόμενα

<b>Περιεχόμενα.....</b>	<b>12</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή.....</b>	<b>16</b>
1.1 Βλάστηση σε αστικές περιοχές .....	16
1.2 Σκοπός της εργασίας .....	17
1.3 Οριοθέτηση .....	18
1.4 Δομή της εργασίας .....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Οριακό στρώμα .....</b>	<b>20</b>
2.1 Η έννοια του Οριακού Στρώματος .....	20
2.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα .....	21
2.2.1 Ορισμός .....	21
2.2.2 Δομή του ΑΟΣ .....	22
2.2.3 Χαρακτηριστικά ΑΟΣ .....	24
2.2.4 Τύποι ροής στο οριακό στρώμα .....	27
2.2.5 Τύρβη.....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ροή αέρα γύρω από κτήριο.....</b>	<b>32</b>
3.1 Πεδίο ροής.....	32
3.2 Κατανομή πιέσεων στο κτήριο .....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Βλάστηση σε αστικές περιοχές και κτήρια.....</b>	<b>41</b>
4.1 Γενικά.....	41
4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα – Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	43
4.3 Πειραματικές μελέτες .....	44
4.4 Βλάστηση σε κτήρια .....	45
4.4.1 Πράσινες ταράτσες.....	45
4.4.2 Πράσινοι τοίχοι .....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Μαθηματικό μοντέλο .....</b>	<b>49</b>
5.1 Γενικά.....	49
5.2 Εξισώσεις RANS .....	50
5.3 Μοντέλα τύρβης.....	51
5.3.1 $k - \epsilon$ .....	52

5.3.2 RNG.....	53
5.3.3 k-ω .....	53
5.3.4 SST k-ω.....	53
5.4 Πλήρως ανεπτυγμένο οριακό στρώμα.....	54
5.4.1 Κατώτερο τμήμα του ΑΟΣ .....	54
5.4.2 Η προσέγγιση των Richards & Hoxey .....	55
5.4.3 Οριακές συνθήκες .....	56
5.5 Μοντελοποίηση της βλάστησης.....	56
5.5.1 Παραμετροποίηση της βλάστησης .....	57
5.5.2 Υπολογιστικές μελέτες .....	62
5.5.3 Επαυξημένες μαθηματικές σχέσεις λόγω βλάστησης .....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Λογισμικό.....</b>	<b>67</b>
6.1 Γενικά.....	67
6.2 Εξισώσεις.....	68
6.3 Ολοκλήρωση των εξισώσεων.....	71
6.4 Αριθμητικό σχήμα .....	74
6.5 Διακριτοποίηση των εξισώσεων .....	75
6.6 Εξίσωση πίεσης .....	76
6.7 Όρια υπολογιστικού χώρου .....	80
6.8 Οριακές συνθήκες .....	81
6.8.1 Γενικά.....	81
6.8.2 Οριακές συνθήκες στο τοίχωμα .....	82
6.9 Διαδικασία επίλυσης.....	83
6.10 Υποχαλάρωση.....	84
6.11 Σύγκλιση .....	85
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Πρότυπος κύβος – γεωμετρική διάταξη.....</b>	<b>87</b>
7.1 Γενικά.....	87
7.2 Τεχνική προσομοίωσης ΑΟΣ.....	87
7.3 Οριακό στρώμα χαμηλής και υψηλής διάτμησης.....	88
7.4 Πρότυπος κύβος .....	92
7.5 Υπολογιστική προσομοίωση πρότυπου κύβου και υπολογιστικού χώρου .....	93
7.5.1 Διακριτοποίηση .....	93
7.5.2 Αρχικές και οριακές συνθήκες .....	99
7.5.3 Συντελεστές υποχαλάρωσης .....	99

7.6 Τοποθέτηση βλάστησης στον πρότυπο κύβο .....	100
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Αποτελέσματα.....</b>	<b>104</b>
8.1 Πεδίο ροής σε χωρίο με ομογενή βλάστηση .....	104
8.2 Πεδίο ροής γύρω από κτήριο – Γενικά στοιχεία .....	110
8.3 Σύγκριση πίεσης σε κτήριο μικρής και μεγάλης κλίμακας .....	110
8.4 Σύγκριση για κτήριο με και χωρίς βλάστηση .....	113
8.4.1 A - Βλάστηση στο κέντρο της οροφής .....	114
8.4.2 B - Βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής.....	117
8.4.3 C - Βλάστηση στην οροφή – περίφραξη .....	120
8.4.4 D - Βλάστηση στην οροφή – δενδροστοιχία ή μονή σειρά θάμνων .....	124
8.4.5 E - Βλάστηση στην πρόσοψη του κτηρίου .....	126
8.4.6 F - Βλάστηση στην πρόσοψη του κτηρίου – άκρα .....	130
8.4.7 G - Βλάστηση στην άκρη της οροφής – δενδροστοιχία ή μονή σειρά θάμνων .	133
8.4.8 Προφίλ ταχυτήτων και τυρβώδους κινητικής ενέργειας .....	136
8.5 Σύγκριση ανάλογα με τη θέση της βλάστησης .....	143
8.5.1 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην οροφή A, B & C.....	143
8.5.2 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην οροφή C & D .....	150
8.5.3 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην οροφή B & G .....	156
8.5.4 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην πρόσοψη E & F .....	162
8.5.5 Προφίλ ταχυτήτων και τυρβώδους κινητικής ενέργειας .....	168
8.6 Ισοϋψείς καμπύλες ταχυτήτων και τυρβώδους κινητικής ενέργειας.....	175
8.7 Φυσικός αερισμός κτηρίων.....	188
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Συμπεράσματα και σχόλια.....</b>	<b>192</b>
9.1 Συμπεράσματα από τη μελέτη.....	192
9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	193
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>194</b>





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

## 1.1 Βλάστηση σε αστικές περιοχές

Σήμερα, περίπου το 54% του ανθρώπινου πληθυσμού κατοικεί σε μεγάλα αστικά κέντρα, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί μέχρι και το 66% ως το 2050 [1]. Στην Ελλάδα, το 35% του πληθυσμού ζει σε μία μόνο πόλη, την Αθήνα, σύμφωνα με την Απογραφή του 2011 [2]. Αναλογικά, αυτό σημαίνει ότι παραπάνω από το 1/3 του πληθυσμού της χώρας κατοικεί σε έκταση αντίστοιχη με το 2% της συνολικής εκτάσεως της επικράτειας.

Είναι φανερό, λοιπόν, ότι ολοένα και περισσότερος κόσμος επιλέγει για λόγους που μπορούν να γίνουν εύκολα αντιληπτοί, τη ζωή στο άστυ. Προσφέρει όμως, στην πραγματικότητα, η εγκατάσταση στις πόλεις καλύτερη ποιότητα ζωής; Πρόκειται για ένα ερώτημα που απασχολεί το ανθρώπινο είδος τουλάχιστον εδώ και δύο αιώνες, από τότε που οι άνθρωποι ξεκινούσαν μαζικά να εισρέουν σε αυτές προς αναζήτηση μίας καλύτερης τύχης. Η μετακίνηση στη μεγαλούπολη φάνταζε μονόδρομος την εποχή της ταχείας εκβιομηχάνισης, καθώς προσέφερε υψηλότερη ζήτηση εργατικού δυναμικού, μεγαλύτερες δυνατότητες για σπουδές, περισσότερες επιλογές ως προς την ψυχαγωγία κτλ. Από τη μία πλευρά, όλες αυτές οι παροχές αποτελούν κίνητρο για να διαλέξει κανείς τον αστικό τρόπο ζωής, από την άλλη όμως, η υπερβολικά μεγάλη συσσώρευση ανθρώπων σε ήδη πυκνοκατοικημένες περιοχές έχει προκαλέσει ζητήματα που δυσχεραίνουν τη διαβίωση σε ένα τέτοιο περιβάλλον, όπως η έλλειψη προσωπικού χώρου, οι ιλιγγιώδεις ρυθμοί ζωής κ.ά. Όμως, το πιο χαρακτηριστικό και συνάμα πιο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι κάτοικοι των πόλεων στη σημερινή εποχή είναι το νέφος και η μόλυνση του αέρα, εξαιτίας της ολοένα αυξανόμενης χρήσης οχημάτων και των εκπομπών από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Καθώς, λοιπόν, ο παγκόσμιος αστικός πληθυσμός αυξάνεται συνεχώς, όλο και πιο αναγκαία κρίνεται η βελτίωση της ποιότητας του αέρα εντός των αστικών περιοχών. Η επιστημονική κοινότητα καταβάλλει μεγάλες προσπάθειες προκειμένου να βρει λύσεις και να βελτιώσει τη ζωή των κατοίκων των πόλεων, ωστόσο η επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί θα χρειαστεί πολλά χρόνια για να γίνει πραγματικότητα. Η αποφυγή της χρήσης των οχημάτων προκειμένου να μειωθούν κατά πολύ οι εκπομπές ρύπων είναι ασφαλώς μια όχι και τόσο εύκολη διαδικασία, αφού για να υπάρξουν άμεσα αποτελέσματα και με μεγάλη επίδραση είναι αναγκαία η βελτίωση των υποδομών και η ύπαρξη συνολικού εναλλακτικού πλάνου που δεν θα δυσχεραίνει την καθημερινότητα των πολιτών. Συνεπώς, ένα άλλο πεδίο μελέτης στο οποίο έχουν επικεντρωθεί οι έρευνες και αφορά εναλλακτικές, παθητικές μεθόδους βελτίωσης της ατμόσφαιρας των πόλεων, αποτελεί η πράσινη ανάπτυξη.

Η τοποθέτηση βλάστησης σε αστικές περιοχές και πιο συγκεκριμένα πάνω στις όψεις κτηρίων αποτελεί ένα καινοτόμο πεδίο έρευνας που γίνεται όλο και πιο δημοφιλές κατά τον πολεοδομικό και αρχιτεκτονικό σχεδιασμό ενός οικισμού ή και μεμονωμένων κτηριακών κατασκευών. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο εξαιτίας της αισθητικής βελτίωσης που εν γένει προσφέρει η ύπαρξη πρασίνου σε μια κατοικημένη περιοχή, αλλά κυρίως επειδή προτείνει και υπόσχεται λύσεις και βελτιώσεις σε πολλά ζητήματα που αφορούν τη ζωή στην πόλη, όπως ευεξία, ψυχική και σωματική υγεία, οικονομική άνθιση κτλ, μέσω ενός φιλικού προς το περιβάλλον πλάνου. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται να αναλυθεί πιο διεξοδικά το ζήτημα και να εξετασθεί αν πράγματι οι χώροι πρασίνου μπορούν να προσφέρουν μία πιο ποιοτική και ευχάριστη καθημερινότητα, με σεβασμό προς το οικοσύστημα.

## 1.2 Σκοπός της εργασίας

Κατά το παρελθόν έχουν γίνει αρκετές έρευνες σχετικά με τη ροή αέριων μαζών στο αστικό περιβάλλον, παρέχοντας μία αρκετά καλή εικόνα των ατμοσφαιρικών διεργασιών και της ρύπανσης στις πόλεις. Κάποιες από αυτές τις μελέτες ασχολήθηκαν ιδιαίτερα με τα πεδία ροής και πιέσεων γύρω από κτήριο κυβικής μορφής εκτεθειμένο σε δύο ανάντι τυρβώδη οριακά στρώματα, καθώς και με το ρυθμό αερισμού στο εσωτερικό του κτηρίου [3][4]. Παρόλα αυτά, στη βιβλιογραφία οι μελέτες σχετικά με την επίδραση της βλάστησης στα πεδία ροής μίας κατοικημένης περιοχής ή ενός μεμονωμένου κτηρίου είναι σημαντικά λιγότερες. Εξάλλου, η γενική ιδέα της διαμόρφωσης χώρων πρασίνου πάνω σε κτήρια είναι αρκετά πρόσφατη, και δημιουργήθηκε ως ανάγκη τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού των πόλεων και της πυκνής δόμησης που αυτή επέφερε. Μόλις τα τελευταία χρόνια ορισμένοι ερευνητές έχουν ασχοληθεί πιο διεξοδικά με τις επιδράσεις της βλάστησης στο χώρο [5][6][7][8][9][10], εστιάζοντας κυρίως στις ιδιότητες των δέντρων και τις επιδράσεις τους στην ποιότητα του αέρα στην οδική χαράδρα. Καμία από αυτές τις μελέτες, όμως, δεν εντρυφά συγκεκριμένα

στην τοποθέτηση φυτών πάνω στις επιφάνειες των κτηρίων. Αυτό το τελευταίο, ανεξερεύνητο, υπό ένα πρίσμα, πεδίο επιχειρείται να αναλυθεί σε βάθος στην παρούσα εργασία, με σκοπό να εξετασθεί αν τελικά η φύτευση σε κτήρια ως καινοτόμα λύση επηρεάζει σημαντικά το αστικό περιβάλλον και με ποιον τρόπο.

### 1.3 Οριοθέτηση

Φυσικά, το ζήτημα της τοποθέτησης βλάστησης πάνω σε κτήρια και της μελέτης των επιδράσεων της στην ανθρώπινη δραστηριότητα είναι αρκετά σύνθετο και εμφανίζει πολλές διαφορετικές παραμέτρους. Η παρακάτω ερευνητική διαδικασία έχει εστιάσει στις επενέργειες της βλάστησης στα πεδία ροής και πίεσης γύρω από το κτήριο. Στην πραγματικότητα, η ύπαρξη βλάστησης επιφέρει πολύπλευρα αποτελέσματα για τον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον και σε πολλούς τομείς (π.χ. ψυχολογία, χημική σύσταση του αέρα κτλ), που όμως εδώ έχουν εξαιρεθεί από τη μελέτη και στα οποία γίνεται μόνο βιβλιογραφική αναφορά. Επίσης, στην πραγματικότητα το αστικό περιβάλλον είναι αρκετά πολύπλοκο ως προς τη γεωμετρία και τις παραμέτρους του, κάτι που εδώ δεν έχει ληφθεί υπόψη, καθώς η παρούσα μελέτη αναφέρεται σε ιδανικές συνθήκες απομονωμένου κτηρίου.

### 1.4 Δομή της εργασίας

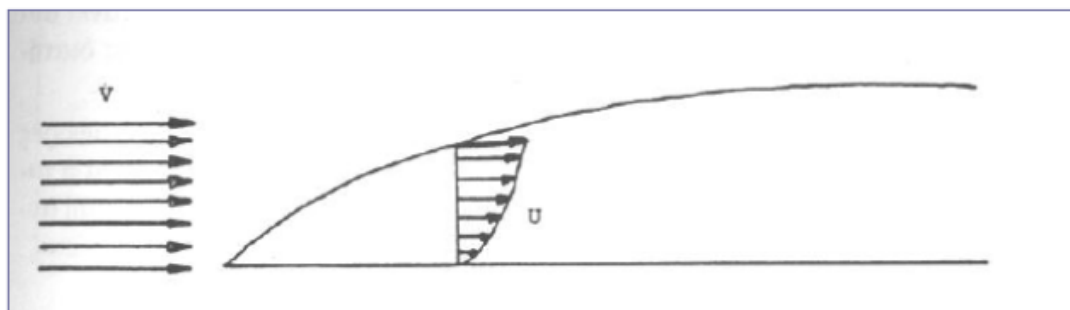
Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μία εισαγωγή στο ζήτημα και τις βασικές επιδιώξεις της τοποθέτησης βλάστησης σε αστικές περιοχές και κτήρια που μελετάται στην παρούσα εργασία. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στην έννοια και τα γνωρίσματα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, ενώ στο **τρίτο** επιχειρείται η ανάλυση της ροής του αέρα γύρω από ένα κυβικό κτήριο. Στο **τέταρτο κεφάλαιο** γίνεται εισαγωγή στα βασικά γνωρίσματα της βλάστησης σε κατοικημένη περιοχή και αναφέρονται βιβλιογραφικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της για τον αστικό πληθυσμό. Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται το μαθηματικό μοντέλο και οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τη ροή των ρευστών στην ατμόσφαιρα, και δίνονται οι επιπλέον όροι που αφορούν την ύπαρξη της βλάστησης, ενώ στο **έκτο** γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας που επιλύει αυτές τις εξισώσεις σε έναν υπολογιστικό χώρο. Στο **έβδομο κεφάλαιο**, περιγράφεται η υπολογιστική προσομοίωση του κυβικού κτηρίου που θα μελετηθεί, καθώς και οι διατάξεις χώρων πρασίνου που θα τοποθετηθούν επί αυτού. Στο **όγδοο κεφάλαιο** ερευνώνται αναλυτικά οι επιδράσεις της βλάστησης στα πεδία ροής και πιέσεων με παραμέτρους τη θέση, τη διάταξη και τις διαφορετικές ιδιότητές της. Γίνεται ακόμα μελέτη του φυσικού αερισμού των κτηρίων ανάλογα με τον εξεταζόμενο τύπο βλάστησης. Τέλος, στο **ένατο κεφάλαιο** γίνεται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων του πειράματος, ενώ προτείνονται και επεκτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο θέμα.



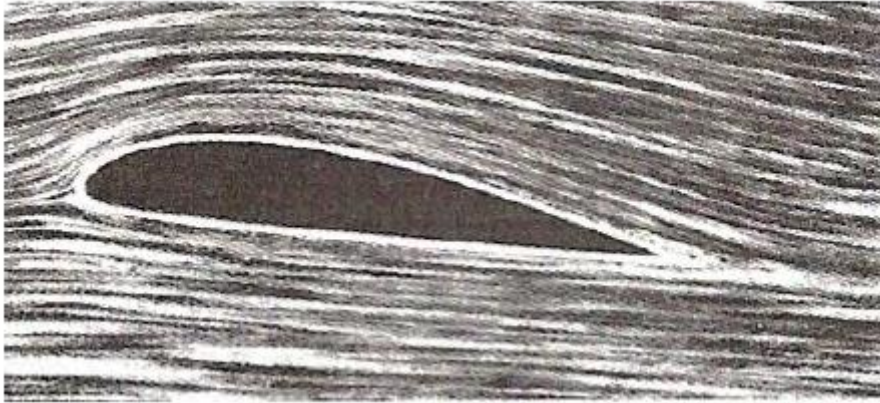
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Οριακό στρώμα

### 2.1 Η έννοια του Οριακού Στρώματος

Κατά τη μελέτη των ρευστών, έχει παρατηρηθεί ότι τα πεδία ροής πολλές φορές εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των ιδανικών ρευστών. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η ροή ρευστού γύρω από επίπεδη πλάκα (Σχήμα 2.1), όπως και η ροή γύρω από αεροτομή (Σχήμα 2.2), όπου η επίδραση του ιξώδους περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή του στερεού ορίου. Κατά τη ροή ρευστού γύρω από ένα στερεό σώμα, η ταχύτητα στα τοιχώματά του είναι μηδενική λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης. Οριακό στρώμα (boundary layer) ονομάζεται η λεπτή περιοχή γύρω από το στερεό σώμα, στην οποία η ταχύτητα λαμβάνει τιμές μεταξύ του μηδενός (στα τοιχώματα) και της ταχύτητας ελεύθερης ροής  $V$  (επάνω μέρος), όπως φαίνεται και παρακάτω στο Σχήμα 2.1. [11]



Σχήμα 2.1. Ροή αέρα γύρω από επίπεδη πλάκα άπειρου μήκους.[11]



Σχήμα 2.2 Ροή αέρα γύρω από αεροτομή πτερυγίου αεροσκάφους. [11]

Η έννοια του οριακού στρώματος επεξηγήθηκε για πρώτη φορά από τον Prandtl το 1904, ο οποίος κατάφερε να συνδέσει την άτριβη ροή με τη ροή πραγματικών ρευστών. Συγκεκριμένα, κατά τον Prandtl, στην περίπτωση κίνησης ρευστών μικρού σχετικά ιξώδους πάνω από στερεά, η επίδραση της εσωτερικής τριβής περιορίζεται μόνο σε ένα πολύ λεπτό στρώμα ρευστού που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του στερεού, το οποίο είναι γνωστό ως *Οριακό Στρώμα*. Το πεδίο ροής μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές περιοχές, το ΟΣ, όπου η ροή ελέγχεται από δυνάμεις αδράνειας και τριβής, και την περιοχή εκτός αυτού, όπου το ιξώδες δεν αποτελεί πια σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση της ροής. [12]

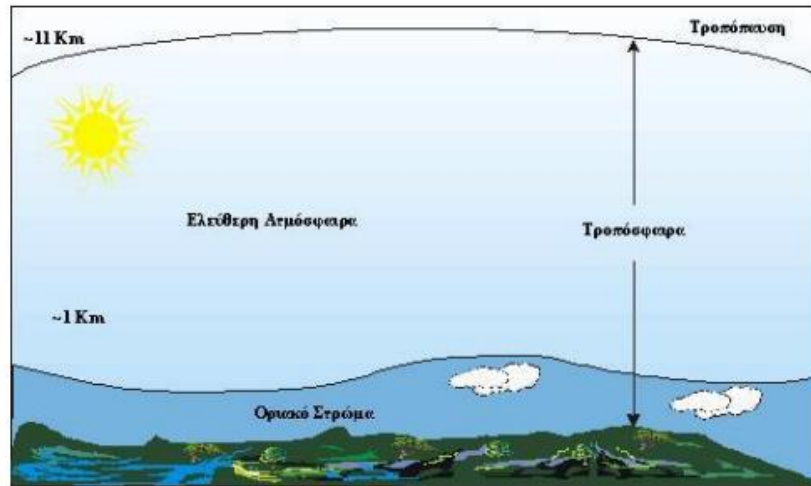
## 2.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα

### 2.2.1 Ορισμός

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) είναι το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας που συνορεύει με την επιφάνεια της Γης. Επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ύπαρξη της γήινης επιφάνειας, μέσω των τυρβωδών ροών ορμής, θερμότητας και υγρασίας. Ουσιαστικά, πρόκειται για την περιοχή της ατμόσφαιρας όπου η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδενική στο επίπεδο της Γης μέχρι μεγαλύτερες τιμές [13][14]. Στο ΑΟΣ δεν γίνεται να αγνοηθούν οι δυνάμεις τριβής, σε αντίθεση με τον αέρα έξω από αυτό.

Η έκτασή του επηρεάζεται από συνθήκες όπως η ώρα, η μορφολογία του εδάφους, η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση και η ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο, το πάχος του οριακού στρώματος είναι της τάξης των 200 μέτρων, ενώ για ανώμαλη επιφάνεια και έντονο άνεμο φτάνει μέχρι και τα 1,2 km. Οι ακραίες τιμές για το πάχος του ΑΟΣ μπορεί να είναι από λίγες δεκάδες μέτρα για πολύ ευσταθή ατμόσφαιρα, έως και 3 km για πλήρως ασταθή ατμόσφαιρα. Σε περιοχές όπου λαμβάνει κυρίως χώρα η ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως αστικά

κέντρα, λιμάνια και λοιπές παραθαλάσσιες περιοχές επικρατούν συνήθως συνθήκες ουδέτερης κατάστασης, ενώ το έδαφος παρουσιάζει ποικιλομορφία ως προς την τραχύτητα. Συνεπώς, για αυτές τις περιοχές, έχει προταθεί μία μέση τιμή για το ύψος του ΑΟΣ της τάξεως των 600 m. [3]



Σχήμα 2.3. ΑΟΣ και ατμόσφαιρα.[15]

### 2.2.2 Δομή του ΑΟΣ

Το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα χωρίζεται σε δύο υποπεριοχές:

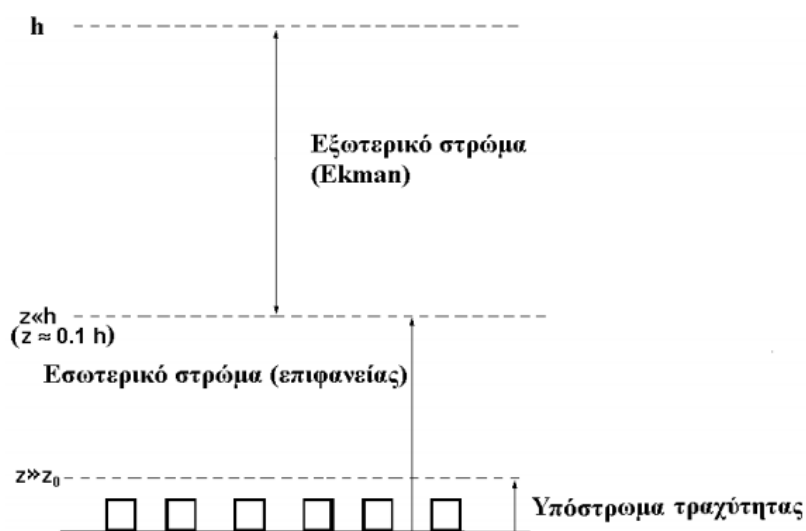
α) *Το στρωτό οριακό υπόστρωμα*, που έχει πάχος μόλις μερικά χιλιοστά και βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους. Εκεί ο αέρας προσκολλάται σε όλες τις επιφάνειες του στερεού ορίου.

β) *Το τυρβώδες οριακό στρώμα*, που βρίσκεται πάνω από το στρωτό οριακό υπόστρωμα και η τύρβη που παράγεται εκεί οφείλεται περισσότερο σε μηχανικά παρά σε θερμικά αίτια. Το τυρβώδες οριακό στρώμα με τη σειρά του χωρίζεται σε δύο υποστρώματα, το επιφανειακό (εσωτερικό) στρώμα και το στρώμα Ekman (εξωτερικό) [4]:

- *Το επιφανειακό εσωτερικό στρώμα* χαρακτηρίζεται από έντονη, μικρής κλίμακας τύρβη που δημιουργείται κυρίως από την επιφανειακή τραχύτητα και δευτερευόντως από τη μεταφορά θερμότητας λόγω ρευμάτων. Εκτείνεται από μερικά μόλις μέτρα (κατά τη διάρκεια της νύχτας), μέχρι περίπου τα 100 m (τη μέρα).
- *Το στρώμα Ekman* εκτείνεται από την κορυφή του επιφανειακού στρώματος μέχρι το ύψος του ΑΟΣ. Εκεί υπάρχει ισορροπία μεταξύ της δύναμης Coriolis,

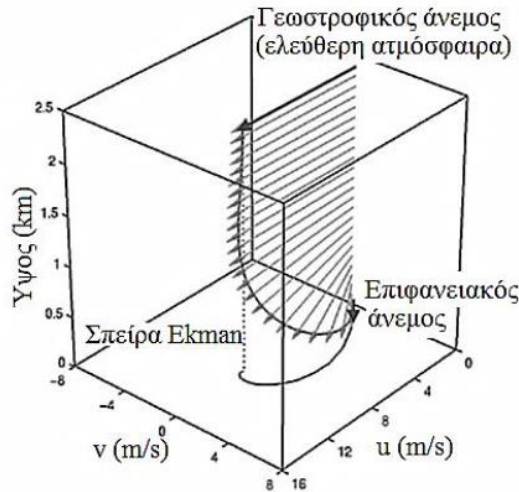
της δύναμης λόγω κλίσης της πίεσης και των διατμητικών τάσεων. Η ιδιαιτερότητα του στρώματος Ekman έγκειται στο γεγονός ότι το διάνυσμα της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας  $u$  στρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα συναρτήσει του ύψους, με αποτέλεσμα τα διανύσματα να δημιουργούν μία σπείρα, γνωστή και ως σπείρα Ekman. Αυτό συμβαίνει διότι το στρώμα του ρευστού επιβραδύνεται, λόγω τριβής, σε σχέση με το στρώμα που βρίσκεται από κάτω, και σαν αντίδραση η ταχύτητα του επάνω στρώματος στρέφεται προς τα δεξιά της τάσης που εφαρμόζεται κάθε φορά, εξαιτίας της περιστροφής της Γης (Σχήμα 2.5). [3]

Η διερεύνηση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος αποτελεί μία πολύ σημαντική διαδικασία για τη μελέτη του γήινου κλίματος και την προσομοίωση των πεδίων ροής στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική. Η αναλυτικότερη προσέγγιση και η υπολογιστική προσομοίωση του κατώτερου τμήματος του ΑΟΣ (που συγκεντρώνει το ενδιαφέρον στην παρούσα εργασία), λαμβάνει χώρα στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 2.4. Διαστρωμάτωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. [15]





Σχήμα 2.5. Σπείρα μεταβολής των ταχυτήτων Ekman.[3]

### 2.2.3 Χαρακτηριστικά ΑΟΣ

Προκειμένου να μελετηθεί και να προσομοιωθεί το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του.

Πολλοί ερευνητές κατά το παρελθόν έχουν επιχειρήσει να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά του ΑΟΣ, και συγκεκριμένα έχουν αναπτύξει εξισώσεις που δίνουν πληροφορία σχετικά με:

- i. την κατατομή της μέσης ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους για τις τρεις συνιστώσες ( $u, v, w$ )
- ii. την κατατομή της έντασης της τύρβης με το ύψος ( $I_u, I_v, I_w$ )
- iii. την κατατομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης με το ύψος ( $L_u, L_v, L_w$ )
- iv. το φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας του ανέμου

Σε μικρή απόσταση από το έδαφος ( $L_z < 100$  m) (εσωτερική περιοχή του οριακού στρώματος), με την υπόθεση ότι η αδρανειακή επιτάχυνση είναι μηδενική, προκύπτει ότι η διανομή ταχυτήτων εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z}) = 0 \quad (2.1)$$

Στην περιοχή αυτή, η εξίσωση μπορεί να ολοκληρωθεί και δίνει:

$$\rho \nu_{\text{eff}} \frac{du}{dz} = \tau_s \quad (2.2)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $\tau_s$  η διατμητική τάση που η κίνηση της αέριας μάζας ως προς το έδαφος εξασκεί σε αυτό. Έτσι το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας είναι ένα στρώμα σταθερής διατμητικής τάσης. Ορίζεται η ταχύτητα τριβής  $u^*$  ως:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}} \quad (2.3)$$

και η σχέση (2.2) γράφεται:

$$v_{\text{eff}} \frac{du}{dz} = u^{*2} \quad (2.4)$$

Η ενεργός συνεκτικότητα της ροής ( $v_{\text{eff}}$ ) σύμφωνα με τη θεωρία μείξης του Prandtl στην περιοχή του επιφανειακού οριακού στρώματος εκφράζεται από τη σχέση:

$$v_{\text{eff}} = \kappa u^* z \quad (2.5)$$

όπου  $\kappa = 0,41$  (σταθερά von Karman)

Αντικαθιστώντας τη σχέση (2.5) στη (2.4) και ολοκληρώνοντας, προκύπτει η σχέση υπολογισμού της ταχύτητας του ΑΟΣ που ονομάζεται και λογαριθμικός νόμος:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.6)$$

όπου  $z_0$  το ύψος τραχύτητας, δηλαδή η απόσταση από το έδαφος όπου η ταχύτητα του ανέμου παραμένει μηδενική. Το ύψος τραχύτητας  $z_0$  εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους, και μεταβάλλεται συνήθως από 0,001 m (επιφάνεια της θάλασσας) ως και 1 m (δασώδης περιοχή). [16]

Επιφάνεια	$z_0$ (m)
Πάγος	$10^{-5}$
Χιόνι	$10^{-3}$
Ομαλή θάλασσα	$10^{-3}$
Επίπεδη έρημος	$10^{-3}$
Γρασίδι	$10^{-2}$
Άκοφτο γρασίδι	0,05
Φυτείες δημητριακών	0,1
Δάσος	1
Προάστια	2
Κέντρο πόλης	5-10

Πίνακας 1.1. Τιμές του ύψους τραχύτητας σε διάφορες επιφάνειες. [16]

Για την περιγραφή της καθ' ύψους έντασης της τύρβης, ορίζεται η σχέση:

$$I_u = \frac{u_{rms} z}{\bar{u} z} \quad (2.7)$$

όπου  $u_{\text{rms}z}$  η τυπική απόκλιση της ταχύτητας για δεδομένο ύψος.

Παρόμοια ορίζεται η ένταση τύρβης και για τις άλλες δύο συνιστώσες ( $I_v, I_w$ ).

Τέλος, ορίζεται η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης, εφαρμόζοντας τη θεωρία παγιομένης τύρβης του Taylor, η οποία μέσω της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης παρέχει μια ένδειξη της κλίμακας της τύρβης του ανέμου. [13][17]

Η αυτοσυσχέτιση μιας χρονοσειράς  $u(t)$  για δύο τυχαίες χρονικές στιγμές  $t_1, t_2$  ορίζεται ως:

$$R(t_1, t_2) = \langle u(t_1) u(t_2) \rangle \quad (2.8)$$

Για μια στατιστικά παγιομένη χρονοσειρά, η αυτοσυσχέτιση εξαρτάται μόνο από τη διαφορά  $\tau = t_1 - t_2$  και όχι από τις χρονικές στιγμές  $t_1, t_2$ . Οπότε, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$R(\tau) = \langle u(\tau) u(\tau + t) \rangle \quad (2.9)$$

Αδιαστατοποιώντας, προκύπτει η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης:

$$R(\tau) = \frac{\langle u(\tau) u(\tau + t) \rangle}{\langle u^2 \rangle} \quad (2.10)$$

Για χρονική υστέρηση  $\tau = 0$ , η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης παίρνει τη μέγιστη τιμή 1, και φθίνει όσο αυξάνει η υστέρηση. Όταν η  $\tau$  αυξάνεται πάρα πολύ, η συνάρτηση τείνει στο 0, δεδομένου ότι η τύρβη αποτελεί στοχαστικό φαινόμενο. Έτσι, ορίζεται η ολοκληρωτική κλίμακα χρόνου της τύρβης:

$$Tu_x = \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau \quad (2.11)$$

Τελικά, βάσει της υπόθεσης Taylor, η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Lu_x = Tu_x \acute{u} \quad (2.12) \quad [17]$$

### 2.2.4 Τύποι ροής στο οριακό στρώμα

Εντός του οριακού στρώματος εντοπίζονται τρεις τύποι ροής:

1) Στρωτή Ροή

Πρόκειται για την πιο απλή μορφή ροής κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού ακολουθούν συγκεκριμένη πορεία και το καθένα λαμβάνει τη θέση του προηγούμενου. Σε αυτόν τον τύπο ροής, οι δυνάμεις συνεκτικότητας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδράνειας.

2) Μεταβατική Περιοχή

Σε αυτή την περιοχή, τα σωματίδια του ρευστού δεν ακολουθούν μια συγκεκριμένη πορεία όπως πριν και σταδιακά αναπτύσσουν άτακτες τροχιές.

3) Τυρβώδης Ροή

Σε αυτόν τον τύπο ροής, τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ακανόνιστα με πιο μεγάλη ένταση σε σχέση με την μεταβατική περιοχή. Χαρακτηρίζεται από χαώδεις ή τυχαίες μεταβολές του πεδίου ροής. Κύριο χαρακτηριστικό της ροής αυτής είναι η ανάπτυξη στροβίλων διαφόρων μεγεθών και εντάσεων. Μάλιστα, σε αυτόν τον τύπο ροής εμφανίζεται και το φαινόμενο της αποκόλλησης (το ρευστό αποκολλάται από το σώμα), που έχει ως συνέπεια την εμφάνιση δίνης, την ανάμειξη ρευστού και τελικά την αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος (Σχήμα 2.6).

Η ταχύτητα του ρευστού εκτός του οριακού στρώματος είναι μεγαλύτερη απ'ό,τι εντός, με αποτέλεσμα οι δυνάμεις τριβής να μην μπορούν να κατευνάσουν τις διαταραχές που δημιουργούνται από την αύξηση των δυνάμεων αδράνειας και αυτό οδηγεί στην εμφάνιση τύρβης. [11]

Η βασική παράμετρος που καθορίζει τους διάφορους τύπους ροής στο οριακό στρώμα είναι ο αριθμός Reynolds (Re), που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (2.13)$$

όπου  $u$ : η χαρακτηριστική ταχύτητα

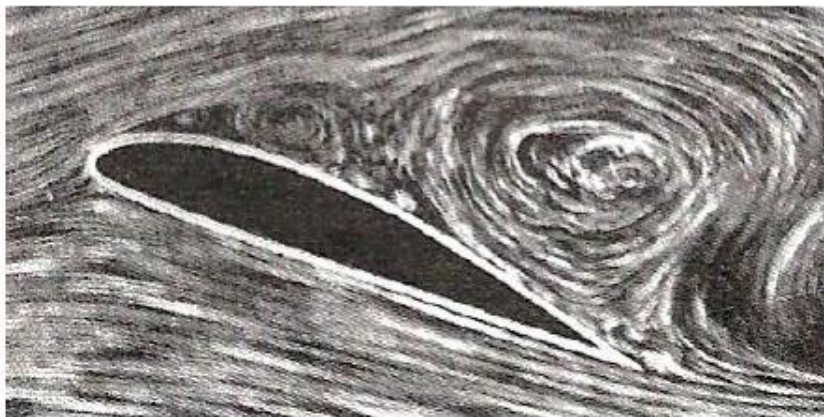
$L$ : το χαρακτηριστικό μήκος

$\nu$ : το κινηματικό ιξώδες του ρευστού ( $\nu = \mu/\rho$ )

Η στρωτή ροή χαρακτηρίζεται από μικρό αριθμό Re, ενώ η τυρβώδης ροή από μεγάλο αριθμό Re. Στην πράξη, η μετατροπή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη, θεωρείται ότι συμβαίνει όταν ο αριθμός Re υπερβεί μία κρίσιμη τιμή που ονομάζεται *κρίσιμος τοπικός αριθμός Reynolds*. Για ροή πάνω από στερεή επίπεδη επιφάνεια, ο κρίσιμος αριθμός Reynolds  $Re_{x,c}$  είναι [12]:

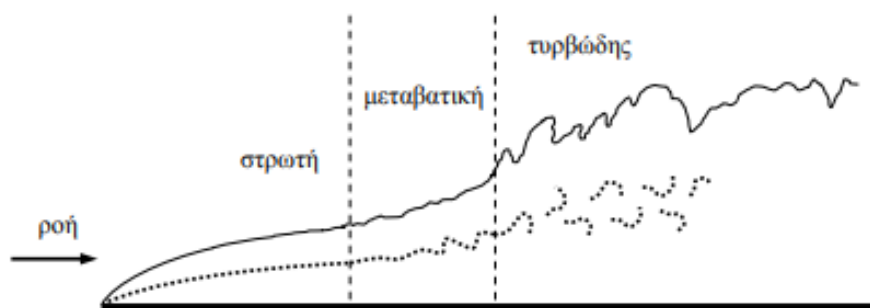
$$Re_{x,c} = 5 \times 10^5 \quad (2.14)$$

Βέβαια, σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις, όπως σε αγωγούς με πάρα πολύ λεία τοιχώματα και κατάλληλη διαμόρφωση της εισόδου, η ροή μπορεί να παραμείνει στρωτή σε τιμές του αριθμού  $Re$  αρκετά μεγαλύτερες της κρίσιμης τιμής.



Σχήμα 2.6. Αποκόλληση της ροής και εμφάνιση δίνης σε αεροτομή πτερυγίου αεροσκάφους. [11]

Οι διαφορετικοί τύποι ροής καθώς και η συσχέτιση μεταξύ τους φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 2.7. Τύποι ροής στο οριακό στρώμα. [18]

## 2.2.5 Τύρβη

### 2.2.5.1 Η έννοια της τύρβης

Η τύρβη αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πεδίο έρευνας της επιστήμης της Μηχανικής των Ρευστών, που παραμένει ακόμα ανεξιχνίαστο σε ένα βαθμό ως προς τη φυσική ερμηνεία και αρκετά πολύπλοκο ως προς τη μελέτη του. Είναι δύσκολο και

κάπως αδόκιμο να επιχειρηθεί να δοθεί ακριβής ορισμός της τύρβης. Οι τυρβώδεις ροές είναι μη μόνιμες ροές που έχουν ακανόνιστες διακυμάνσεις της ταχύτητας στις τρεις κατευθύνσεις.

Οι αταξίες στο πεδίο ταχυτήτων δημιουργούν δομές που λέγονται δίνες, δηλαδή ευδιάκριτες χωρικές δομές που παρατηρούνται για μικρό χρονικό διάστημα. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της τύρβης είναι η συνεχής κατανομή του μεγέθους των δινών. Ροές με αταξίες που όμως περιορίζονται σε συγκεκριμένες συχνότητες δεν θεωρούνται τυρβώδεις.

Οι τυρβώδεις ροές είναι ροές με υψηλή στροβιλότητα. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτού του τύπου τις ροές έχουμε εμφάνιση μικροδινών, σε αντίθεση με τις στρωτές ροές όπου εμφανίζονται εν γένει μεγάλες δίνες. Ακόμα, πρόκειται για ροές μεγάλης διάχυσης (ιξώδης, θερμική και διάχυση μάζας), οι οποίες προκαλούνται εξαιτίας των τυχαίων, στοχαστικών κινήσεων. Η τύρβη τείνει να αναμείξει ρευστό (διεισδύει στο μη τυρβώδες ρευστό) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τυρβώδης περιοχή.

Επιπλέον, οι τυρβώδεις ροές είναι εν γένει καταστροφικές (dissipative). Κάθε συνεκτική ροή έχει συνεκτική καταστροφή, όμως οι τυρβώδεις έχουν πολύ περισσότερη λόγω της απότομης κλίσης της ταχύτητας.

Τέλος, έχουν την ικανότητα κάποιες φορές να συμπεριφέρονται ως στρωτές ροές κατά τη μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διάλειψη (intermittency). [4]

#### 2.2.5.2 Μοντελοποίηση τύρβης

Το φαινόμενο της τύρβης, όπως έχουμε ήδη αναφέρει εμφανίζει πολλές ιδιαιτερότητες και είναι περίπλοκο ως προς τη μελέτη του. Στα προβλήματα της Μηχανικής των Ρευστών έχει δοθεί από την επιστημονική κοινότητα μεγάλη βαρύτητα για την κατανόηση και καταγραφή της επιδράσεως της τύρβης μέσω αριθμητικών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές φαίνονται παρακάτω [4]:

##### 1) Μεθοδολογία άμεσης αριθμητικής επίλυσης (DNS)

Η μέθοδος Direct Numerical Simulation (DNS) χρησιμοποιεί τις πλήρεις εξισώσεις Navier-Stokes (για τις οποίες γίνεται λόγος στη συνέχεια), η διακριτοποίηση των οποίων γίνεται απευθείας πάνω σε αυτές, χωρίς περαιτέρω τροποποίηση ή παραδοχή. Με αυτή τη μέθοδο γίνεται ο πλήρης υπολογισμός της τύρβης στο χώρο και το χρόνο. Όμως, πέραν του πολύ υψηλού υπολογιστικού κόστους και χρόνου που χρειάζεται, η συνολική διαδικασία πολλές φορές κρίνεται άσκοπη, καθώς συνήθως μας ενδιαφέρουν οι μέσες τιμές των ποσοτήτων και όχι κάθε ξεχωριστή τιμή της διακύμανσης.

## 2) Μοντέλα Τύρβης για τις εξισώσεις RANS

Είναι η μέθοδος με βάση την οποία επιλύεται το υπολογιστικό πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για μία μέθοδο σαφώς λιγότερο ακριβή σε σχέση με τη DNS. Οι τροποποιημένες εξισώσεις RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ασχολούνται μόνο με τις μέσες τιμές της κάθε μεταβλητής, οπότε δεν απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Η επίδραση της τύρβης παρέχεται από επιπλέον σχέσεις.

Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονται οι μέσες τιμές των μεταβλητών από τις εξισώσεις Navier-Stokes, προκειμένου να προκύψουν οι νέες εξισώσεις RANS, οι οποίες και επιλύονται. Από τη διαδικασία λήψης των μέσων τιμών, προκύπτουν και κάποιοι όροι διπλών συσχετίσεων των διακυμάνσεων των ταχυτήτων, γνωστοί και ως τάσεις Reynolds. Οι διακυμάνσεις αυτές επιδρούν καθοριστικά στη ροή, αφού οι απότομες αλλαγές ταχυτήτων επιφέρουν επιτάχυνση ή επιβράδυνση των γειτονικών στοιχείων. Πρόκειται, ουσιαστικά, για τους όρους που παρέχουν την επίδραση της τύρβης, όπως είδαμε παραπάνω.

Εξαιτίας του μικρότερου υπολογιστικού κόστους και χρόνου, οι RANS αποτελούν μία ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο σε προβλήματα πρακτικών εφαρμογών, όπως στην προκείμενη διπλωματική εργασία.

Οι εξισώσεις RANS, και τα μοντέλα τύρβης που τις χρησιμοποιούν αναλύονται πιο διεξοδικά στο Κεφάλαιο 5.

## 3) Μεθοδολογία LES

Η μεθοδολογία LES (Large eddy simulation) αποτελεί μία μίξη των δύο προαναφερθέντων μεθόδων, καθώς επιλύει μόνο ένα μέρος της τύρβης. Και αυτή η μέθοδος απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος, όμως προκρίνεται σε ορισμένες περιπτώσεις, καθώς μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς προβλήματα Ρευστομηχανικής με πιο σύνθετη γεωμετρία.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ροή αέρα γύρω από κτήριο

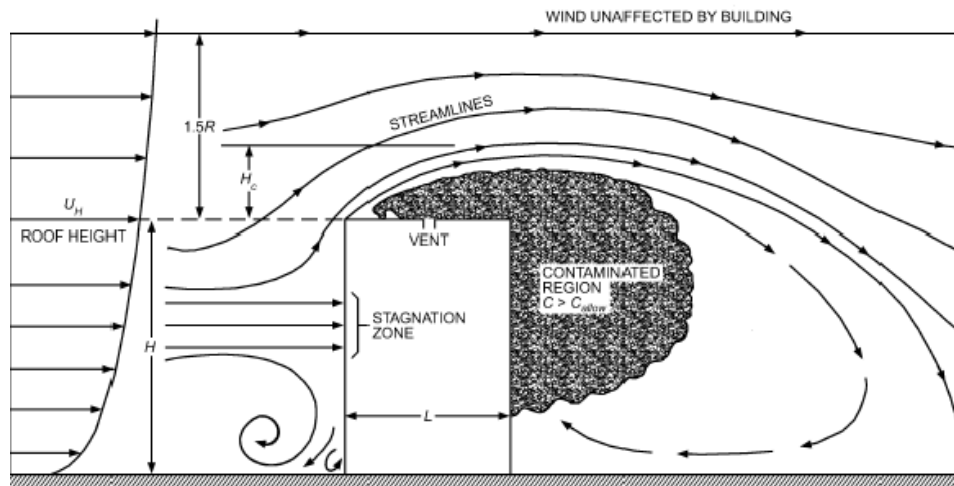
### 3.1 Πεδίο ροής

Η ροή γύρω από κτήριο επί στερεής επιφάνειας είναι ένα πεδίο έρευνας που συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και έχει μελετηθεί αναλυτικά στο παρελθόν, τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά, αφού σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητα της κατασκευής. Η μελέτη των πεδίων ροής αποτελεί μία δομικής σημασίας διαδικασία για την αντοχή των δομικών στοιχείων που εκτίθενται σε ανέμους υψηλών ταχυτήτων και φυσικά την ασφάλεια των πολιτών εντός του κτηρίου. Βέβαια, η μελέτη αυτή είναι εξίσου σημαντική και για ανέμους χαμηλών ταχυτήτων, αφού ο ρυθμός αερισμού, η διείσδυση του αέρα μέσα στο κτήριο, και η ποιότητά του εντός και εκτός αυτού εξαρτώνται από το πεδίο ροής και την κατανομή πιέσεων στις εξωτερικές του επιφάνειες.

Η πλειονότητα των ερευνών που έχουν διεξαχθεί κατά το παρελθόν αφορούν τη διερεύνηση του ροϊκού πεδίου και τη διασπορά των ρύπων γύρω από εδρασμένο κύβο σε ουδέτερες συνθήκες θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης. [19][20]

Καθώς ο άνεμος προσπίπτει κάθετα στην προσήνεμη πλευρά του κτηρίου, σχηματίζονται πολύπλοκες δομές της ροής. Στην ανάντι πλευρά σχηματίζεται μία ζώνη ανακοπής της ροής. Συνεπώς, παρατηρείται ακτινωτός διαχωρισμός της ροής από αυτή την περιοχή προς όλες τις κατευθύνσεις. Ανοδικά και καθοδικά ρεύματα σχηματίζονται πάνω και κάτω από την περιοχή ανακοπής, ενώ δεξιά και αριστερά οδηγούνται τα πλευρικά ρεύματα. Στην προσήνεμη πλευρά, η μέση ταχύτητα του ανέμου  $U$  που πλησιάζει το κτήριο, αυξάνεται με το ύψος  $H$  από το έδαφος (επίδραση οριακού στρώματος). Με άλλα λόγια, η ταχύτητα του ανέμου που προσκρούει στην

κάθετη πλευρά του κτηρίου αυξάνεται όσο πλησιάζουμε την οροφή. Η υψηλότερη ταχύτητα ανέμου κοντά στην οροφή προκαλεί μεγαλύτερη πίεση στο ανώτερο τμήμα του τοίχου σε σχέση με την περιοχή κοντά στο έδαφος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κατωρεύματος στο κάτω μέρος της ροής ανάντι του κύβου, όπου η ροή επιβραδύνεται όσο διασκορπίζεται προς τα κάτω. Αντιθέτως, στο βόρειο τμήμα, η ροή κατευθύνεται μέσω ανωρεύματος πάνω από την οροφή του κύβου, και λόγω της συμπίεσης των γραμμών εκεί, επιταχύνεται. Και οι δύο κατευθύνσεις των γραμμών ροής γίνονται ευκολότερα κατανοητές με τη σχηματική αναπαράσταση κάτωθι (Σχήμα 3.1). [4]



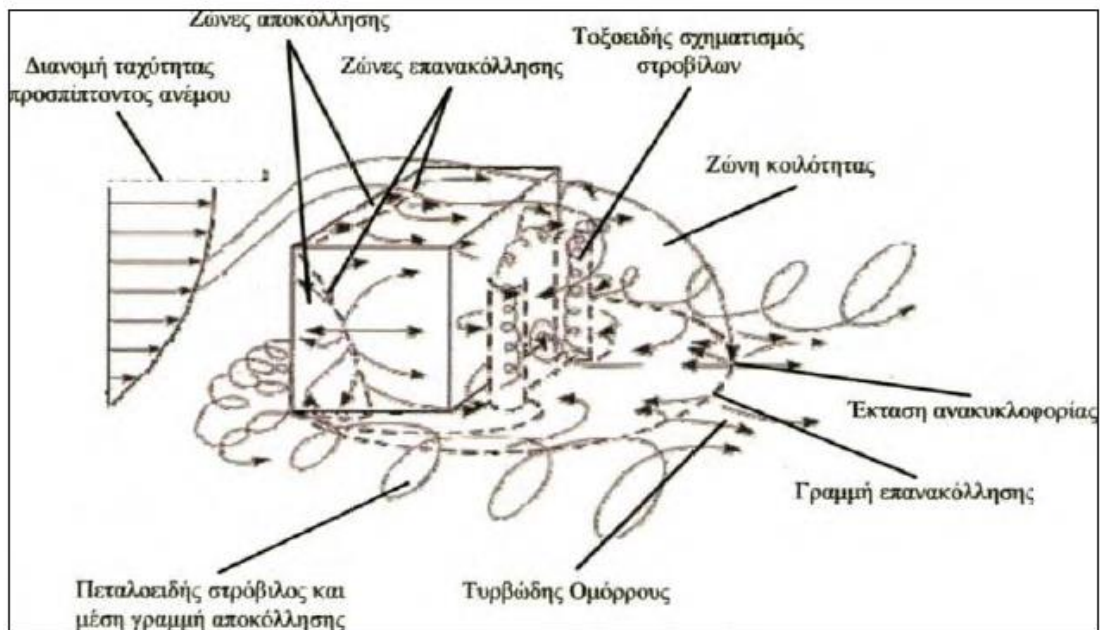
Σχήμα 3.1. Ροή γύρω από σώμα ορθογωνικής διατομής. [4]

[Η περιοχή στασιμότητας της ροής μεταξύ των δύο ρευμάτων που φαίνεται στο σχήμα, αφορά κτήρια πολύ μεγαλύτερου ύψους σε σχέση με το πλάτος, και δεν μας απασχολεί ως προς την ανάλυση της ροής γύρω από κυβικό σώμα.]

Εν συνεχεία, εξαιτίας του κατωρεύματος (χαμηλές ταχύτητες, υψηλή τύρβη), στο κάτω μέρος της προσήνεμης πλευράς σχηματίζεται στρόβιλος πεταλοειδούς μορφής (Σχήμα 3.1-Σχήμα 3.2), φαινόμενο που δεν ευνοεί την απομάκρυνση της σκόνης και των ρυπαντών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα στα επίπεδα του εδάφους.

Στην υπήνεμη πλευρά έχουμε ανάπτυξη τοξοειδούς στρόβιλου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2, και πάλι λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ανέμου (επιβραδυσμένη ροή) και των υψηλών επιπέδων τύρβης που επικρατούν εκεί, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται κατάντι μία περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής, έκτασης και ύψους μεγαλύτερων σε σχέση με την αντίστοιχη στην προσήνεμη πλευρά. Η ροή επανακολλάται κατάντι στο χαρακτηριστικό μήκος επανακόλλησης  $L_r$ .

Πλευρικά του κύβου, όπως και στην οροφή, σχηματίζονται κοντά στα τοιχώματα ζώνες αποκόλλησης και περιοχές ανακυκλοφορίας, η έκταση των οποίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και τη γεωμετρία του κύβου.



Σχήμα 3.2. Ροή γύρω από κύβο. [21]

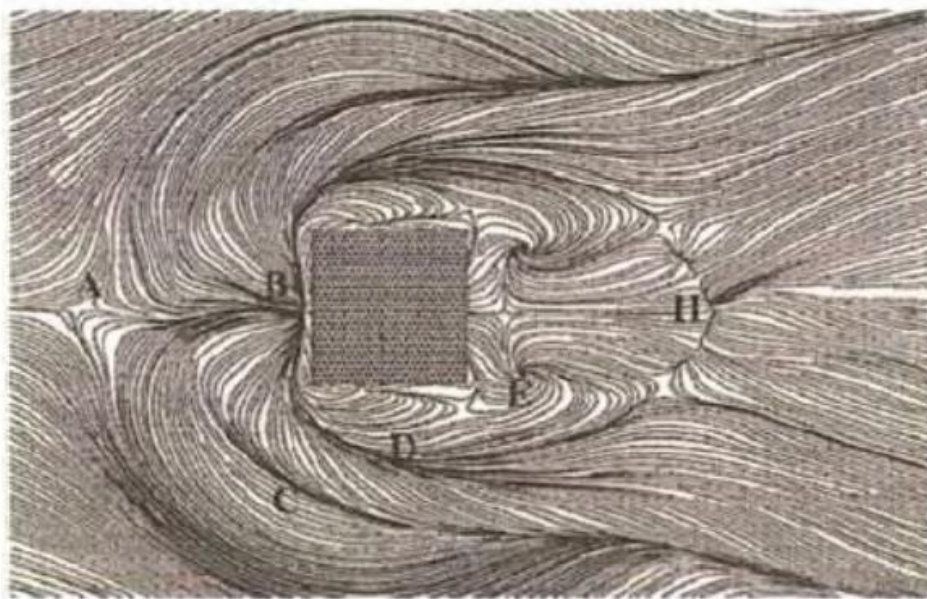
Στο Σχήμα 3.3 και Σχήμα 3.4 παρέχεται μία καλύτερη εποπτεία των φαινομένων ροής στις διάφορες θέσεις περιμετρικά του κύβου, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω [21]:

- A) Πεταλοειδής στρόβιλος
- B) Ζώνη ανακοπής της ροής
- C) Μέση γραμμή επανακόλλησης
- D) Μέση γραμμή αποκόλλησης
- E) Ελικοειδής κίνηση του αέρα
- F) Ζώνη ανακυκλοφορίας στην προσήνεμη πλευρά
- G) Κορυφή του τοξοειδούς σχηματισμού στροβίλων
- H) Μήκος επανακόλλησης
- I) Ζώνη ανακυκλοφορίας στην οροφή του κύβου

Ο άνεμος ρέει από αριστερά προς τα δεξιά στις δύο εικόνες.



Σχήμα 3.3. Γραμμές ροής. Αριστερή πλάγια όψη του κύβου (κατεύθυνση της ροής). [22]

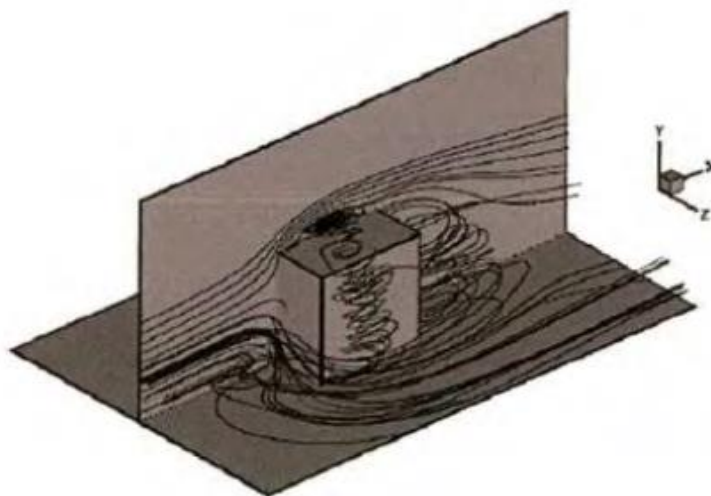


Σχήμα 3.4. Γραμμές ροής. Κάτοψη του κύβου. [22]

Οι πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει σε αεροσήραγγα προσεγγίζουν αρκετά το πεδίο ροής υπό πραγματικές συνθήκες.

Όπως θα δούμε στη συνέχεια, στο πεδίο της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) έχει αποδειχτεί ότι η επίλυση των εξισώσεων RANS με το μοντέλο τύρβης  $k-\epsilon$  υπερεκτιμά κάπως την τυρβώδη κινητική ενέργεια που παράγεται όταν ο άνεμος προσπίπτει στην προσήνεμη πλευρά του κτηρίου, σε αντίθεση με τη μέθοδο LES που δίνει μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα, αλλά έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις ως προς το υπολογιστικό κόστος. [23]

Τέλος, η μέθοδος DNS δίνει ακόμη πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, όμως και εδώ το υπολογιστικό κόστος καθιστά την εφαρμογή της αρκετά δύσκολη. [21][24]



Σχήμα 3.5. Γραμμές ροής σε χρονικά μέση τιμή πεδίου – μέθοδος DNS ( $Re = 5610$ ) [24]

### 3.2 Κατανομή πιέσεων στο κτήριο

Εξαιτίας της ροής του αέρα, κατά μήκος των διαφόρων επιφανειών του κτηρίου δημιουργείται ένα πεδίο πιέσεων. Οι πιέσεις αυτές είναι γενικά δυναμικές και όχι σταθερές, λόγω των στροβίλων, ή και γενικότερα της τύρβης του ανέμου. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του πεδίου πιέσεων παίζουν σημαντικό ρόλο ως προς τα φορτία που ασκούνται στα κτήρια, ενώ οι μέσες τιμές της πίεσης στα τοιχώματα του κτηρίου είναι χρήσιμες για υπολογισμούς που σχετίζονται με τον φυσικό αερισμό, διαδικασία πολύ σημαντική για τη βελτίωση της ανθρώπινης διαβίωσης και δραστηριότητας μέσα και γύρω από ένα κτήριο. [3][19]

Η κατανομή της πίεσης σε μια πλευρά ενός κτηρίου εξαρτάται από τη γεωμετρία του, τον προσανατολισμό του ως προς τον άνεμο, καθώς και τα χαρακτηριστικά του ανέμου, όπως ταχύτητα και τύρβη. [3]

Για την καταγραφή και μελέτη των επιφανειακών πιέσεων στις πλευρές του κτηρίου, χρησιμοποιείται ο αδιάστατος συντελεστής πίεσης  $C_p$ , ο οποίος ορίζεται ως:

$$C_p = \frac{P - P_0}{1/2 \rho U_H^2} \quad (3.1)$$

όπου  $P$  : στατική πίεση στην επιφάνεια του κτηρίου

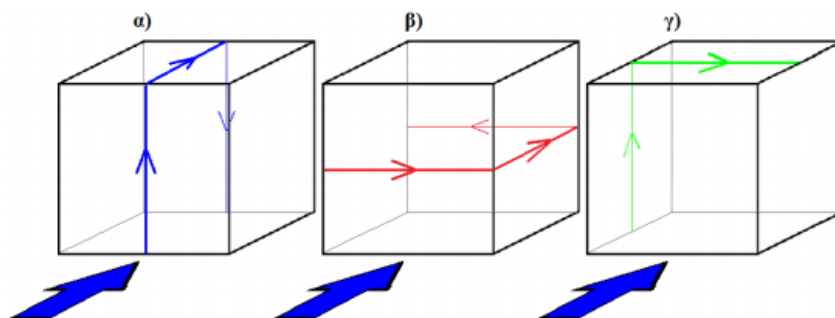
$P_o$  : στατική πίεση στην αδιατάρακτη ροή ανάντι του κτηρίου

$\rho \approx 1,16 \text{ kg/m}^3$  (πυκνότητα του αέρα)

$U_H$  : μέση ταχύτητα της ροής  $5H$  ανάντι του κτηρίου (σε ύψος  $H$ )

( $H$ : το ύψος του κτηρίου)

Προκειμένου να γίνουν οι κατάλληλες συγκρίσεις στις διάφορες μελέτες και να εξαχθούν συγκεκριμένα συμπεράσματα, η κατανομή της πίεσης απεικονίζεται συνήθως κατά διαδρομές των μέσων γραμμών των επιφανειών. Οι κύριες διαδρομές που θα εξετάσουμε διεξοδικά στην παρούσα εργασία είναι οι εξής: διαμήκης (longitudinal), οριζόντια (horizontal) και εγκάρσια (transverse) διαδρομή, οι οποίες απεικονίζονται παρακάτω [3][4]:



Σχήμα 3.6. α) Διαμήκης διαδρομή μέσης γραμμής, β) οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής, γ) εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. [3]

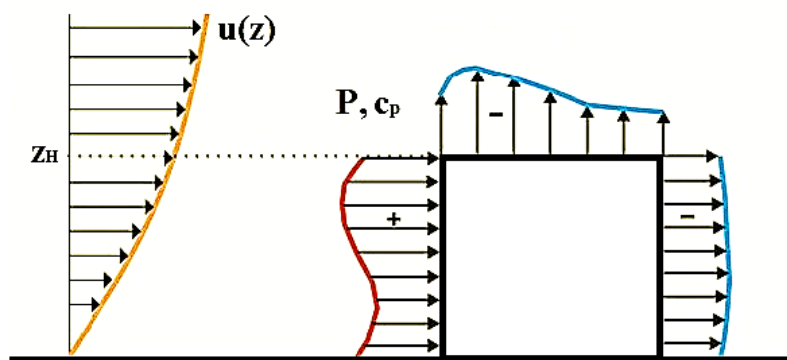
Το μπλε βέλος στα παραπάνω σχήματα δείχνει την κατεύθυνση της ροής. Κατά τη διαμήκη διαδρομή, η κατεύθυνση που ακολουθείται αφορά την προσήνεμη, την οροφή και την υπήνεμη πλευρά. Κατά την οριζόντια διαδρομή, η ροή διασχίζει την προσήνεμη, τη δεξιά – κατά την κατεύθυνση της ροής - πλαϊνή και την υπήνεμη πλευρά, ενώ κατά την εγκάρσια διαδρομή, την αριστερή πλαϊνή πλευρά και την οροφή.

Στην προσήνεμη πλευρά του κτηρίου, λόγω της ανακοπής της ροής επικρατούν υψηλές πιέσεις (Σχήμα 3.7). Υπό την επίδραση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, κατά τη διαμήκη διαδρομή, η μέγιστη τιμή του συντελεστή πίεσης σε αυτή την πλευρά εντοπίζεται προς το πάνω μέρος του κτηρίου. Κατά την οριζόντια διαδρομή, η κατανομή της πίεσης παρουσιάζει συμμετρία, καθώς ξεκινάει από

χαμηλές τιμές, φτάνει στο μέγιστό της στο κέντρο της πλευράς, για να μειωθεί και πάλι στο άλλο άκρο.

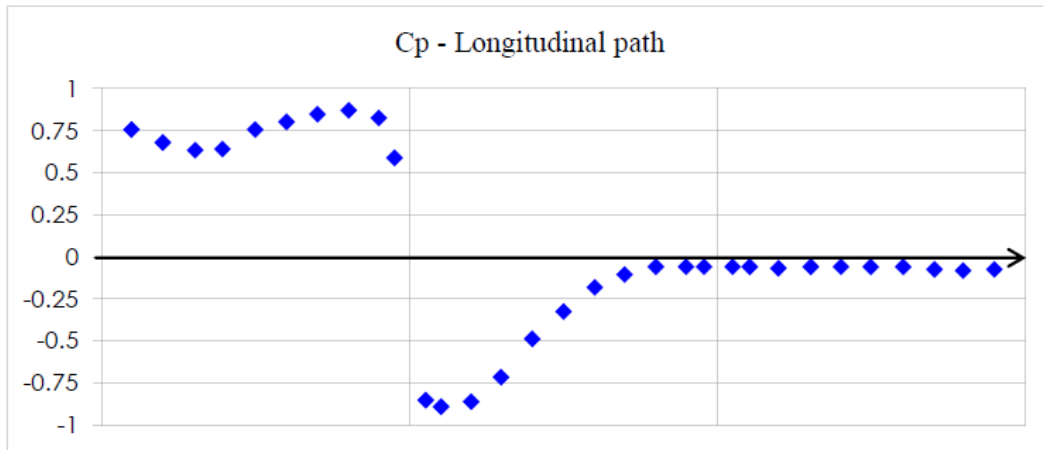
Στην οροφή του κτηρίου, καταγράφονται αρνητικές τιμές της πίεσης (υποπίεσεις) λόγω του φαινομένου της αποκόλλησης της ροής, με την ελάχιστη τιμή να εντοπίζεται κοντά στην προσήνεμη πλευρά κατά την αλλαγή της γεωμετρίας (ανάντι γωνία του κτηρίου), και σταδιακά η πίεση επανέρχεται σε σταθερά αλλά χαμηλά επίπεδα (Σχήμα 3.7). Παρόμοια συμπεριφορά της πίεσης παρατηρείται και στις πλευρικές επιφάνειες. Η κατανομή πίεσης στη διαμήκη μέση γραμμή έχει παρόμοια μορφή με αυτή στην οριζόντια, με τη διαφορά ότι η πτώση πίεσης στην πρώτη (οροφή) είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τη δεύτερη (πλευρική επιφάνεια).

Στην υπήνεμη πλευρά, τόσο κατά μήκος (οριζόντια διαδρομή) όσο και καθ' ύψος (διαμήκης διαδρομή) οι πιέσεις εξακολουθούν να είναι χαμηλές (υποπίεση) και κυμαίνονται περίπου σε σταθερά επίπεδα.

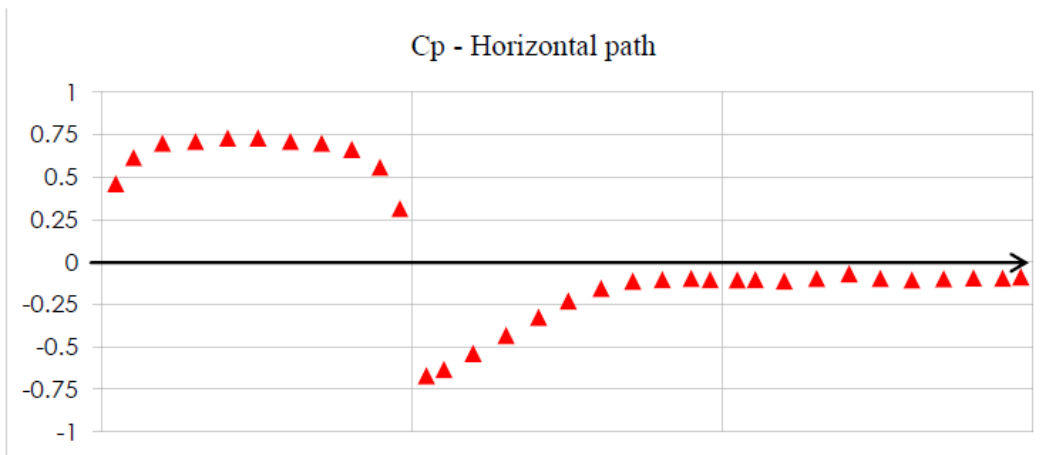


Σχήμα 3.7. Κατανομή πιέσεων στην προσήνεμη, υπήνεμη πλευρά και την οροφή του κύβου (διαμήκης διαδρομή, βλ. Σχήμα 3.6). [3]

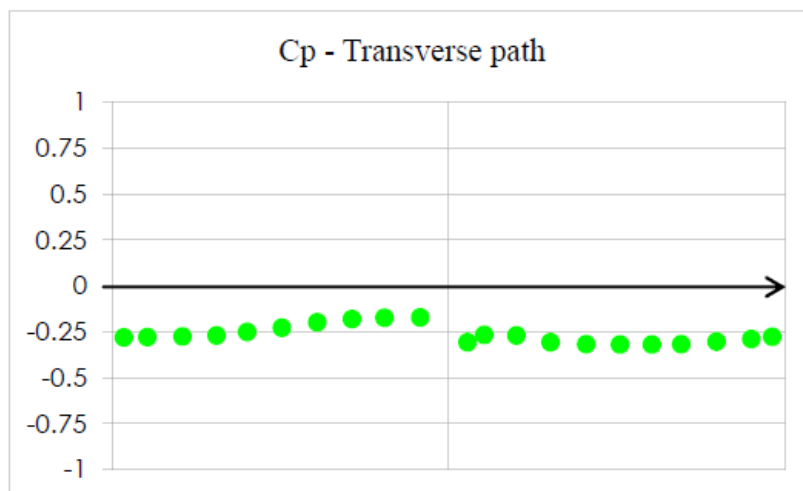
Για καλύτερη κατανόηση και εποπτεία των παραπάνω, παρατίθενται στη συνέχεια διαγράμματα που αφορούν την κατανομή του συντελεστή της πίεσης στις μέσες διαδρομές, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα των Castro & Robins. [19]



Σχήμα 3.8. Κατανομή πίεσης στη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής (βλ. Σχήμα 3.6). [3][19]



Σχήμα 3.9. Κατανομή πίεσης στην οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής (βλ. Σχήμα 3.6). [3][19]



Σχήμα 3.10. Κατανομή πίεσης στην εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής (βλ. Σχήμα 3.6). [3][19]





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Βλάστηση σε αστικές περιοχές και κτήρια

### 4.1 Γενικά

Η ζωή στην πόλη, αν και προσφέρει πολύπλευρες ευκαιρίες στο επαγγελματικό και όχι μόνο πεδίο, ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από μία σειρά προβληματικών λειτουργιών που δυσχεραίνουν την καθημερινότητα των ανθρώπων και υποβαθμίζουν το βιοτικό τους επίπεδο. Η υπερσυσσώρευση πληθυσμών στα μεγάλα αστικά κέντρα μοιραία έχει επιφέρει αύξηση του νέφους, της ηχορύπανσης και των ιλιγγιωδών ρυθμών ζωής. Οι επιστήμονες, τα τελευταία χρόνια, επιδιώκουν να δώσουν λύση σε αυτά τα ζητήματα και να βελτιώσουν τις συνθήκες διαβίωσης του μεγαλύτερου μέρους του πληθυσμού, θέτοντας την πράσινη ανάπτυξη ως μία από τις κύριες κατευθύνσεις για να το επιτύχουν. Η δόμηση με περιοχές πρασίνου μπορεί να παρέχει μία <<ασπίδα προστασίας>> μεταξύ των ρύπων των οχημάτων και του ανθρώπινου πληθυσμού, φιλτράροντας και διασκορπίζοντας τις ρυπογόνους ουσίες μακριά από τα επίπεδα της ανθρώπινης δραστηριότητας, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει και νέες πηγές οξυγόνου για τους πολίτες [25]. Επιπλέον, η ύπαρξη πρασίνου σε αστικές περιοχές συμβάλλει στην αισθητική βελτίωση της πόλης, δίνοντας μία πιο χαρούμενη νότα στο μουντό, γκρίζο αστικό τοπίο. Οι ελληνικές πόλεις, δυστυχώς, βρίσκονται ψηλά στην ευρωπαϊκή λίστα των πόλεων με σημαντική έλλειψη χώρων πρασίνου, και σε συνδυασμό με την άναρχη και ιδιαίτερα πυκνή δόμησή τους δεν προσφέρουν ένα ιδιαίτερα ευχάριστο περιβάλλον διαβίωσης.

Επίσης, ο συνδυασμός της βλάστησης π.χ. με φράχτες και άλλες γεωμετρικές διατάξεις πόλεων φαίνεται να δίνει καλύτερα αποτελέσματα, δημιουργώντας ισχυρότερες και αποδοτικότερες <<ζώνες προστασίας>> για τους κατοίκους από τις βλαβερές ρυπογόνους ουσίες του αστικού περιβάλλοντος. [8]

Το πράσινο μπορεί να ευεργετήσει συνολικά σε πολλούς τομείς τους κατοίκους μιας περιοχής, καθώς συμβάλλει στη μείωση των θορύβων, την απορρόφηση του νερού της βροχής, αλλά και τη βελτίωση της ψυχολογίας και τη μείωση του άγχους και της νευρικότητας των ανθρώπων [26][27][28]. Συγκεκριμένα, μάλιστα, σύμφωνα με μία πρόσφατη έρευνα στην οποία χρησιμοποιήθηκαν επιδημιολογικά στοιχεία, η ύπαρξη βλάστησης έχει ξεκάθαρη και σημαντική επίδραση στην ψυχική υγεία, ανάλογη με την ποσότητα του πρασίνου κάθε φορά, ενώ παρατηρήθηκε και κάποια, έστω σε μικρά επίπεδα, βελτιωμένη επίδοση γενικότερα στην υγεία των πολιτών. [29]

Παρόλα αυτά, η ύπαρξη βλάστησης από μόνης της δε σημαίνει αυτόματα και βελτίωση της ποιότητας του αέρα γύρω από αυτή. Σύμφωνα με έρευνες, η ύπαρξη περιοχών πρασίνου πολλές φορές μπορεί να προκαλέσει και τα αντίθετα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η διάχυση των ρύπων μακριά από την περιοχή πρασίνου μπορεί να φέρει αρνητικές επιπτώσεις στη συγκέντρωση της ατμόσφαιρας, εφόσον συνδυάζεται με χαμηλές ταχύτητες ανέμου, που προκαλούν ανακύκλωση του μολυσμένου αέρα.

Η επίδραση των δέντρων και της βλάστησης σε μία περιοχή σχετίζεται άμεσα με τη γεωμετρία του δρόμου ή της περιοχής, τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες (ταχύτητα, κατεύθυνση ανέμου) και τις παραμέτρους της βλάστησης. Εν προκειμένω, είναι αναγκαίο να γίνει πολύ προσεχτική σχεδίαση των χωρικών διατάξεων βλάστησης, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους, όπως η ποιότητα του πορώδους, το ύψος του, η πανίδα, η πυκνότητα των φύλλων, η απόσταση από το δρόμο κτλ. [10]



**Σχήμα 4.1. α) Συστοιχία δέντρων και β) περιφράξεις από θάμνους σε αστική περιοχή.**

[εικόνες εκλεγμένες από το διαδίκτυο]

## 4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Παρακάτω, παρατίθεται μία σειρά από φαινόμενα που επιφέρει η ύπαρξη χλωρίδας σε έναν χώρο, τα οποία μπορούν να έχουν άλλοτε θετικές και άλλοτε αρνητικές συνέπειες:

+ Ρύθμιση του μικροκλίματος. Αύξηση της βλάστησης σε αστικές περιοχές μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της περιβάλλουσας και επιφανειακής θερμοκρασίας, λόγω της σκίασης και της διαπνοής των φυτών, μετριάζοντας έτσι τα πολλές φορές υψηλά επίπεδα ζέστης στα αστικά κέντρα. Τοπικές μειώσεις της θερμοκρασίας μπορούν να μειώσουν το ρυθμό των χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα, οδηγώντας σε μικρότερες συγκεντρώσεις επιβλαβών ουσιών [30].

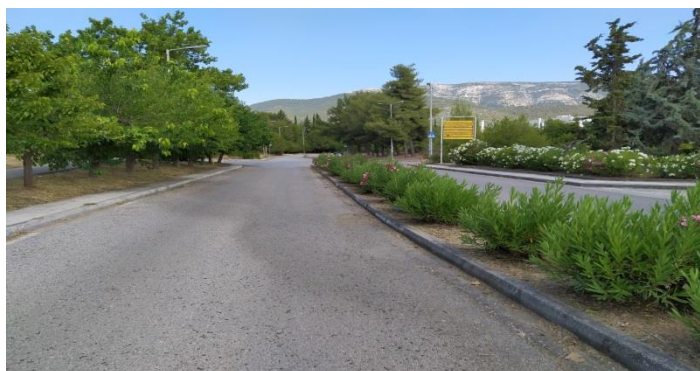
+ Μείωση του θορύβου. Πολλές φορές η ηχορύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της αστικής δόμησης. Η ύπαρξη βλάστησης είναι ικανή να ελαττώσει τα επίπεδα του θορύβου στις αρκετά πολυσύχναστες οδικές χαράδρες, αφού λειτουργεί ως εμπόδιο για τα ηχητικά κύματα [31].

+ Απορρόφηση ρυπαντών. Τα δέντρα έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την ποιότητα του αέρα απορροφώντας ρυπαντικές ουσίες μέσω των στομάτων των φυλλωμάτων τους και της επιφάνειάς τους. Μπορούν να απορροφήσουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και τις ζημιογόνες ουσίες π.χ. NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, πολύ πιο αποτελεσματικά σε σχέση με επιφάνειες άλλου τύπου, ενώ αποτελούν και πηγή παραγωγής οξυγόνου (O<sub>2</sub>) [26][32].

– Εκπομπή χημικών ουσιών. Τα δέντρα, όμως, πολλές φορές αντιδρούν με το περιβάλλον λόγω εξωγενών παραγόντων (π.χ. υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλές ποσότητες νερού), εκπέμποντας στην ατμόσφαιρα αέρια που αντιδρώντας με τις ουσίες της ατμόσφαιρας είναι ικανά να παράξουν ρυπαντές. [33]

– Απελευθέρωση γύρης. Τα δέντρα παράγουν γύρη που ιδίως σε δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ικανή να προκαλέσει αλλεργίες και διάφορα άλλα προβλήματα στην υγεία των ανθρώπων.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι πράγματι, η επιλογή του κατάλληλου τύπου βλάστησης στην κατάλληλη περιοχή δεν είναι εύκολη διαδικασία, καθώς η ύπαρξη πρασίνου επιφέρει μία πληθώρα αποτελεσμάτων, όχι πάντοτε ωφέλιμα για τον πληθυσμό. Χρειάζεται πολύ προσεκτική και σε βάθος μελέτη, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, για τη βελτίωση του αέρα και την αποφυγή επιβλαβών για την υγεία καταστάσεων. [10]



**Σχήμα 4.2.** Χώροι πρασίνου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας, τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και της αισθητικής του Ιδρύματος, παρέχοντας καλύτερες συνθήκες για φοιτητές και εργαζομένους.

### 4.3 Πειραματικές μελέτες

Ένα ζητούμενο για να καταφέρουμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της βλάστησης σε αστικές περιοχές είναι η σωστή μοντελοποίηση και παραμετροποίησή της, με σκοπό να προσεγγίζει όσο το δυνατό περισσότερο την πραγματικότητα. Αυτή είναι μία ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, καθώς η φύση, η δομή και η γεωμετρία της βλάστησης παρουσιάζουν πολυπλοκότητα και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Επί αυτού, κάποιες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε αληθινά πεδία βλάστησης, όπως του Brunet (1994) που ανέλυσε τη ροή μέσα και πάνω από ένα δάσος. Κάποια άλλα πειράματα επεδίωξαν να χρησιμοποιήσουν αληθινά δέντρα σε δοκιμές σε αεροσήραγγα, με σκοπό να ερευνήσουν την δυνατότητά τους να απορροφούν σωματίδια. [10][34][35][36]

Στο Πανεπιστήμιο της Καρλσρούης εκτελέστηκαν δύο διαφορετικά πειράματα προκειμένου να προσομοιωθεί η ροή σε οδική χαράδρα με τοποθέτηση πρασίνου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν δύο διατάξεις, η μία με χρήση δέντρων και η άλλη με σειρά από θάμνους.

Στην πρώτη περίπτωση, έγιναν πειράματα για οδικές χαράδρες με λόγο πλάτους δρόμου προς ύψος κτηρίου  $W/H = 1$  και  $W/H = 2$  και λόγο μήκους δρόμου προς ύψος κτηρίου  $L/H = 10$ . Η απόσταση των δέντρων που τοποθετήθηκαν και το πορώδες τους διέφερε σε διάφορες περιπτώσεις, όπως και η κατεύθυνση του ανέμου. Τα δέντρα δεν ήταν αληθινά, άλλα το πορώδες προσομοιώθηκε με κυψέλες δικτυωτού πλέγματος που ύστερα γέμισαν με συνθετικές ίνες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η

μεγαλύτερη διάχυση των ρυπαντών μακριά από την οδική χαράδρα εξαιτίας της σειράς των δέντρων συνέβη για άνεμο πλάγιας προς τη χαράδρα κατεύθυνσης. [10]

Στη δεύτερη περίπτωση, έγινε χρήση σειράς φραγτών από θάμνους που τοποθετήθηκαν είτε εκατέρωθεν του δρόμου είτε στο μέσο των δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Εξετάστηκαν διαφορετικά μεγέθη και ύψη θάμνων, καθώς και διαφορετική διάταξή τους στο χώρο (συνεχείς, με κενά αναμεταξύ τους κτλ). Η οδική χαράδρα είχε αναλογία  $W/H = 2$  και  $L/H = 10$ . Το συμπέρασμα που εξήχθη ήταν ότι πράγματι οι θάμνοι μπορούν να αποτελέσουν ένα αρκετά επιδραστικό μέσο για βελτίωση της ποιότητας του αέρα σε αστική περιοχή. [10]

Τα αποτελέσματα των παραπάνω δύο πειραμάτων του Πανεπιστημίου της Καρλσρούης έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς μέχρι τώρα έχουν αποτελέσει τη βάση για τη σύγκριση με αντίστοιχα πειράματα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) σε οδική χαράδρα.

#### 4.4 Βλάστηση σε κτήρια

Τα τελευταία χρόνια που τα οφέλη της πράσινης ανάπτυξης έχουν γίνει ευρέως γνωστά σε όλο και μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού, ο οικολογικός σχεδιασμός κτηρίων αναπτύσσεται συνεχώς και αποκτά κεντρική θέση στον τομέα της Αρχιτεκτονικής και της Μηχανολογίας. Η τοποθέτηση βλάστησης στις ταράτσες είτε στις κάθετες όψεις των κτηρίων μπορεί να αποφέρει πολλά κέρδη όχι μόνο στους κατοίκους του κάθε σπιτιού, αλλά και σε ολόκληρη τη γειτονιά.

##### 4.4.1 Πράσινες ταράτσες

Οι πράσινες ταράτσες, πέρα από τη διαμόρφωση ενός πιο ελκυστικού και εύρωστου αστικού τοπίου, μπορούν να μειώσουν τις ανάγκες για κλιματισμό ενός κτηρίου τους καλοκαιρινούς μήνες μέχρι και κατά 90%. Η θερμοκρασία μίας στέγης καλυμμένης με πράσινο δεν ξεπερνάει τους 25-30 βαθμούς Κελσίου, ενώ η αντίστοιχη ενός συμβατικού κτηρίου μπορεί να φτάσει ως και τους 75 βαθμούς [37]. Από την άλλη πλευρά, κατά τους χειμερινούς μήνες μειώνονται οι απώλειες θερμότητας του κτηρίου, με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι ενεργειακές ανάγκες (για θέρμανση). Φυσικά, οι θετικές επιδράσεις της βλάστησης δεν σταματούν εκεί. Ένα κτήριο με πράσινη οροφή προστατεύεται καλύτερα από την φωτιά και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ακόμα, η ύπαρξη γλωρίδας προσφέρει ηχομόνωση και προστασία από την υπερχειλίση των υδάτων, αφού έχει την ικανότητα να απορροφά τις ποσότητες του νερού. Καθόλου αμελητέο δεν είναι, επίσης, το γεγονός πως συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα μέσω της απορρόφησης των βλαβερών αιωρούμενων σωματιδίων.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι φυτεμένης στέγης που χρησιμοποιούνται σήμερα κατά τη σχεδίαση κτηρίων, και παρουσιάζονται παρακάτω [37]:

- *Εκτατικός*: η πιο ενδεδειγμένη μορφή για τα ελληνικά κτήρια, καθώς συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Το βάθος του υποστρώματος ανέρχεται μόλις στα 2-15 cm. Η βλάστηση που υποστηρίζει είναι κυρίως πορώδης και χρειάζεται ελάχιστη φροντίδα και συντήρηση.
- *Εντατικός*: συνίσταται στη δημιουργία ολόκληρου κήπου στην ταράτσα ενός κτηρίου. Έχει αρκετά μεγάλο κόστος, καθώς χρειάζεται ειδική στατική μελέτη και υπόστρωμα μεγάλου βάθους (0,15-1,5 m) και το κόστος συντήρησης είναι επίσης υψηλό. Όμως, η τελική του μορφή αποτελεί μία όαση στο αστικό τοπίο, καθώς τοποθετούνται δέντρα, μονοπάτια, στοιχεία νερού κτλ.
- *Ημιεντατικός*: συνδυάζει στοιχεία και από τους δύο παραπάνω τύπους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία πράσινης στέγης αποτελεί η στατική ικανότητα του κτηρίου να συγκρατήσει το βάρος της κατασκευής. Κατά τα άλλα, αποτελεί μία πολύ ωφέλιμη πρακτική για τους κατοίκους των πόλεων. Δεν είναι τυχαίο πως σε χώρες όπως η Γαλλία και η Γερμανία φυτεύονται κάθε χρόνο 1.000.000 m<sup>2</sup> και 11.000.000 m<sup>2</sup> πρασίνου αντίστοιχα στις στέγες κτηρίων. [37]



Σχήμα 4.3. <<Πράσινες ταράτσες>>. Βλάστηση στις οροφές κτηρίων.

[εικόνες εκλεγμένες από το διαδίκτυο]

#### 4.4.2 Πράσινοι τοίχοι

Η τοποθέτηση πρασίνου στους τοίχους κτηρίων δεν αποτελεί καινοτομία. Είναι γνωστή πρακτική ήδη από την αρχαιότητα (π.χ. Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας),

ενώ χρησιμοποιούνται ιδιαίτερος και σήμερα, αρκεί να παρατηρήσει κανείς τη διαμόρφωση των νησιωτικών παραδοσιακών κτισμάτων σε όλη τη Μεσόγειο, και φυσικά την Ελλάδα. Οι πράσινοι τοίχοι, πέρα από όλα τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν για τις πράσινες ταράτσες, προσφέρουν οπτική απομόνωση, συνήθως κοστίζουν λιγότερο, ενώ δεν απαιτούν πολύ χώρο και συντήρηση. Για την πράσινη διαμόρφωση τοίχων διακρίνονται δύο τύποι [37]:

- *Πράσινες προσόψεις*: αποτελούνται κυρίως από αναρριχώμενα φυτά που μεγαλώνουν απευθείας πάνω στο κτήριο. Τις συναντάμε αρκετά στη χώρα μας, ιδιαίτερα στα νησιά των Κυκλάδων.
- *Πράσινοι <<ζωντανοί>> τοίχοι*: αποτελούνται από σειρές κυψελών, μέσα στις οποίες τοποθετούνται τα φυτά, και είναι κατάλληλες τόσο για εσωτερικούς όσο και για εξωτερικούς χώρους. Συνήθως έχουν μήκος 1m, πλάτος 0,5 m και βάθος 0,12 m, ενώ το βάρος τους ανέρχεται στα 88 kg/m<sup>2</sup>. Τα φυτά που τοποθετούνται εκεί επιλέγονται ύστερα από ειδική μελέτη και ποικίλουν από γρασίδι μέχρι θάμνους χαμηλής ανάπτυξης και άγρια ανθοφόρα φυτά. Το επιτρεπόμενο βάρος τους εξαρτάται από το ύψος και την ηλικία τους, αλλά όταν έχουν αναπτυχθεί πλήρως δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 12 kg/m<sup>2</sup> για φυτά όπως το γρασίδι, και τα 24 kg/m<sup>2</sup> για τα υπόλοιπα.



**Σχήμα 4.4.** <<Πράσινοι τοίχοι>> (αριστερά). Βλάστηση στις κάθετες όψεις κτηρίων (δεξιά).

[εικόνες εκλεγμένες από το διαδίκτυο]





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Μαθηματικό μοντέλο

### 5.1 Γενικά

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics) είναι ευρέως διαδεδομένη στα εμπορικά λογισμικά και χρησιμοποιείται κυρίως για μελέτες σε περιβάλλοντα ανέμου κοντά στα επίπεδα της ανθρώπινης δραστηριότητας (π.χ. αστικές περιοχές κτλ).

Οι λόγοι της διαδεδομένης χρήσης των CFD είναι το εύχρηστο περιβάλλον τους, η εύκολη πρόσβαση σε αυτό, και φυσικά η ικανοποιητική ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παρέχουν. [4]

Παρόλα αυτά, δεν είναι πάντοτε τόσο απλό να αναπαρασταθούν όλα τα φυσικά περιβάλλοντα μέσω της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής. Για παράδειγμα, το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) εκτείνεται σε μεγάλη απόσταση πάνω από την επιφάνεια της Γης, σε σχέση με το ύψος ενός κτηρίου. Ακόμα πιο δύσκολη κάνει την αναπαράσταση του ΑΟΣ η πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης σε αυτήν ενός μετεωρολογικού μοντέλου. Επιπρόσθετα, τα χαρακτηριστικά μικρότερης κλίμακας, όπως η βλάστηση και τα μικρά κτήρια είναι σε ορισμένες περιπτώσεις δύσκολο να συμπεριληφθούν στο υπολογιστικό πλέγμα, και οπότε αντιπροσωπεύονται από ένα μοντέλο τραχύτητας. [4]

Βιβλιογραφικά, οι πιο πετυχημένες, ως σήμερα, προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος με CFD ανήκουν στους μελετητές Richards & Hoxey [38], οι οποίοι έκαναν μία σειρά θεωρήσεων σχετικά με το ΑΟΣ.

## 5.2 Εξισώσεις RANS

Οι Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) εξισώσεις αποτελούν μια τροποποιημένη μορφή των Navier-Stokes, των βασικών εξισώσεων στη μηχανική των ρευστών, και χρησιμοποιούνται για ροές με μεγάλο αριθμό Reynolds, όπου οι μεταβολές του πεδίου αρχίζουν και γίνονται ιδιαίτερα άτακτες (τυρβώδεις).

Οι, αρχικές, εξισώσεις Navier-Stokes είναι βασισμένες στο 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα για την επιτάχυνση στοιχειώδους σωματιδίου ρευστού, στου οποίου τη μάζα και την επιφάνεια ασκούνται δυνάμεις. Οι εξισώσεις αυτές που γράφονται και για τις τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις x,y,z, παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω [4]:

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1)$$

Εξίσωση ορμής:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \delta_{ij} \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{u}] \quad (5.2)$$

Το αριστερό μέρος της εξίσωσης της ορμής εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ορμής ( $\rho u_i$ ) ανά μονάδα όγκου ρευστού πάνω στην τροχιά κίνησης ενός στοιχειώδους σωματιδίου ρευστού που κινείται σύμφωνα με τις ταχύτητες  $u_j$ .

Στο δεξί μέρος εμπεριέχονται όλες οι δυνάμεις ανά μονάδα όγκου ρευστού που ασκούνται πάνω σε αυτό το στοιχειώδες σωματίδιο. Διακρίνονται η προσφορά ορμής λόγω της επίδρασης της πίεσης (p), και η διάχυση ορμής λόγω μοριακών ανταλλαγών του στοιχειώδους ρευστού με τα γειτονικά του, η οποία εξαρτάται άμεσα από τη δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού ( $\mu$ ). Ανάλογα το προς επίλυση πρόβλημα, στο δεξί μέλος εμφανίζονται δυνάμεις βαρύτητας, άνωσης σε περίπτωση μεταβολής της πυκνότητας, δυνάμεις Coriolis για ροές όπου υπάρχει περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων κ.τ.λ.

Στις τυρβώδεις ροές, η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό πλέγμα (πυκνές διακριτοποιήσεις στο χώρο και το χρόνο).

Ως τυρβώδη ροή ονομάζουμε, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το φαινόμενο των υψηλόσυχνων διαταραχών των ταχυτήτων και πιέσεων γύρω από μία μέση τιμή. Τα

στιγμιαία μεγέθη σε μία τυρβώδη ροή μπορούν να αναλυθούν στο άθροισμα δύο χρονικών μεταβλητών, όπως φαίνεται παρακάτω [4]:

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i + u'_i & \bar{u}'_i &= 0 \\ p_i &= \bar{p}_i + p'_i & \bar{p}'_i &= 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

όπου με  $(\bar{\quad})$  συμβολίζεται η μέση χρονική τιμή και με  $(\prime)$  η διακύμανση.

Η μέση τιμή των διακυμάνσεων είναι μηδενική. [39]

Η μέση τιμή αναφέρεται στη χρονικά μέση τιμή, η οποία ορίζεται ως

$$\bar{u}_i = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i dt \quad (5.4)$$

Οπότε, οι εξισώσεις RANS συνέχειας και ορμής (5.1),(5.2) γίνονται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu_{\text{eff}} (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j] \quad (4.6)$$

Οι εξισώσεις αυτές είναι ίδιες με τις αρχικές εξισώσεις Navier-Stokes, με τη διαφορά ότι αφορούν μέσες τιμές ποσοτήτων και έχουν ακόμα έναν όρο στο τέλος που προκύπτει από στατιστικά μεγέθη διαταραχών. Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται τυρβώδεις διατμητικές τάσεις ή αλλιώς τάσεις Reynolds. Βασίζονται στην υπόθεση Boussinesq για την τυρβώδη συνεκτικότητα  $\mu_t$ , που συνδέει τις τάσεις Reynolds με τις κλίσεις ταχυτήτων του μέσου πεδίου, όπως φαίνεται παρακάτω [4]:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (5.7)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$$

όπου ως  $k$  συμβολίζεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια.

### 5.3 Μοντέλα τύρβης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλύονται, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι εξισώσεις RANS για τη χρονικά αμετάβλητη, ασυμπίεστη, τυρβώδη ροή αέρα

γύρω από στερεό όριο. Τα μοντέλα που επιλέγονται συνήθως για τη μοντελοποίηση της τύρβης είναι τα k-ε, RNG, k-ω και k-ω SST, τα οποία αποτελούν μοντέλα δύο διαφορετικών εξισώσεων μεταφοράς. Η πρώτη είναι η εξίσωση μεταφοράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, και η δεύτερη εκφράζει ποσότητες που στη γενική τους μορφή δίνονται από τη σχέση  $k^m e^n$ .

### 5.3.1 k - ε

Το πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο για τον προσδιορισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας, είναι το μοντέλο k-ε. Πρόκειται για μοντέλο που χρησιμοποιείται ρητά σε περιπτώσεις πλήρως τυρβώδους ροής (μεγάλος αριθμός Reynolds). Συγκεκριμένα, έχοντας γίνει η υπόθεση ότι η TKE είναι ισότροπη στις μικρές κλίμακες και ότι μπορούμε να αγνοήσουμε φαινόμενα όπως μεταφορά λόγω μοριακών κινήσεων, επιλύονται δύο διαφορικές εξισώσεις. Μέσω αυτής της διαδικασίας υπολογίζεται το  $\mu_t$ , γίνεται αντικατάσταση αυτού στις εξισώσεις μεταφοράς της ορμής και ακολουθεί η επίλυση του συστήματος.

Οι δύο διαφορικές εξισώσεις που επιλύονται πρώτα, αφορούν όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και το ρυθμό καταστροφής της ε:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j}$$

$$\varepsilon = \nu \overline{\left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}} \approx \nu \overline{\left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2} \quad (5.8)$$

Η τυρβώδης συνεκτικότητα  $\mu_t$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.9)$$

όπου  $C_\mu = 0,09$  (συνήθως)

Μετασηματίζοντας τις εξισώσεις RANS με χρήση των k,ε και κάποιες παραδοχές, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \varepsilon \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \varepsilon) = C_{1\frac{\varepsilon}{k}} \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.11)$$

$$\text{όπου } c_1 = 1,44$$

$$c_2 = 1,92$$

$$\sigma_k = 1$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,3$$

Οι όροι στις παραπάνω εξισώσεις εκφράζουν αντίστοιχα: ρυθμό αλλαγής (μηδενικός για μόνιμη ροή), μεταφορά με συναγωγή, μεταφορά με διάχυση, ρυθμό παραγωγής και ρυθμό καταστροφής ή απορρόφησης.

### 5.3.2 RNG

Καθώς το μοντέλο k-ε φαίνεται να υπερεκτιμά το ρυθμό καταστροφής της τύρβης, το RNG, που αναπτύχθηκε από τον Yakhot [24], επιδιώκει να διορθώσει αυτή την αστοχία, καθώς έχει έναν επιπλέον όρο παραγωγής στην εξίσωση μεταφοράς του ε.

### 5.3.3 k-ω

Σε αυτό το μοντέλο, αντί για την εξίσωση του ε (ρυθμός καταστροφής της TKE) χρησιμοποιείται η εξίσωση του ειδικού ρυθμού καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, που δίνεται από τη σχέση

$$\omega = \varepsilon/k(s-1) \quad (5.12)$$

Το μοντέλο αυτό έχει αποδειχθεί επιτυχές τόσο σε ελεύθερες ροές, όσο και σε ροές κοντά σε στερεά όρια, αλλά έχουμε ελλιπή δεδομένα για χρήση του στην ατμόσφαιρα.

### 5.3.4 SST k-ω

Αποτελεί μία μίξη και τροποποιημένη μορφή του μοντέλου k-ω με το μοντέλο k-ε. Η χρήση του έγκειται στο γεγονός ότι εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα του k-ω που είναι πιο στιβαρό και ακριβές κοντά στο τοίχωμα, αλλά και του k-ε που αποδίδει καλύτερα στην περιοχή της ελεύθερης ροής.

## 5.4 Πλήρως ανεπτυγμένο οριακό στρώμα

### 5.4.1 Κατώτερο τμήμα του ΑΟΣ

Σε όλες σχεδόν τις προσομοιώσεις για το κατώτερο τμήμα του ΑΟΣ με χρήση του CFD, απαιτείται ακριβής περιγραφή της ροής κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Εάν η τραχύτητα του τοιχώματος εκφράζεται από μία ισοδύναμη τραχύτητα κόκκων άμμου,  $k_s$ , στις συναρτήσεις τοιχώματος, πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι παρακάτω απαιτήσεις. [40]

(Το σύνολο των απαιτήσεων αυτών έχει προκύψει από διάφορες πηγές, όπως βιβλιογραφία και εγχειρίδια λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής.) [38][41][42][43]

- 1) Επαρκώς υψηλή ανάλυση υπολογιστικού πλέγματος στην κατακόρυφη κατεύθυνση κοντά στον πυθμένα του υπολογιστικού πεδίου (π.χ. ύψος πρώτης υπολογιστικής κυψέλης  $< 1$  m).
- 2) Οριζόντια ομοιογενής ροή ΑΟΣ στην ανάντι και κατάντι περιοχή του υπολογιστικού πεδίου.
- 3) Απόσταση  $z_P$  από το κεντρικό σημείο P της υπολογιστικής κυψέλης δίπλα στο στερεό όριο (κάτω μέρος), μεγαλύτερη από την ισοδύναμη τραχύτητα κόκκων άμμου  $k_s$  του εδάφους ( $z_P > k_s$ )
- 4) Γνώση της σχέσης μεταξύ της ισοδύναμης τραχύτητας κόκκων άμμου  $k_s$  και του αντίστοιχου ύψους τραχύτητας του εδάφους  $z_o$ .

Η πρώτη απαίτηση είναι σημαντική για όλες τις υπολογιστικές μελέτες της ροής κοντά στην επιφάνεια της Γης. Η δεύτερη συνεπάγεται τη χρήση εμπειρικών πληροφοριών σχετικά με την τραχύτητα του εδάφους στην προσομοίωση για την αποτροπή των διακυμάνσεων της ροής στο ρεύμα ανάντι και κατάντι του υπολογιστικού πεδίου, δηλαδή εκτός της κύριας διαταραχής του πεδίου ροής από τα διαμορφωμένα εμπόδια [40], το οποίο απαιτεί τη χρήση των συναρτήσεων τοιχώματος. Η τρίτη απαίτηση μας δείχνει ότι δεν υπάρχει κάποιο φυσικό νόημα στην ύπαρξη υπολογιστικών κυψελών με κέντρο εντός της ισοδύναμης τραχύτητας κόκκων άμμου  $k_s$ . Αυτή η απαίτηση αναφέρεται από διάφορους εμπορικούς κώδικες CFD, όπως οι Fluent 6.2 και Ansys CFX 10.0 [42][43]. Η τέταρτη απαίτηση αφορά μία σχέση που προκύπτει από την αντιστοίχιση του ύψους τραχύτητας του εδάφους με τη συνάρτηση τοιχώματος που χρησιμοποιούν αρκετοί εμπορικοί κώδικες CFD.

Και οι τέσσερις απαιτήσεις θα πρέπει να ικανοποιούνται τόσο στην ανάντι, όσο και στην κατάντι περιοχή του υπολογιστικού πεδίου. Στο κεντρικό τμήμα αρκεί να τηρούνται μόνο η πρώτη και η τρίτη απαίτηση. Γενικά, βέβαια, δεν είναι δυνατό να ικανοποιούνται ταυτόχρονα και οι τέσσερις απαιτήσεις.

### 5.4.2 Η προσέγγιση των Richards & Hoxey

Σύμφωνα με τους Richards & Hoxey [38], για μόνιμη δισδιάστατη ροή ασυμπίεστου ρευστού, η μοντελοποίηση του ΑΟΣ με το μοντέλο τύρβης k-ε για την ύπαρξη ομογενούς ροής προϋποθέτει τις παρακάτω παραδοχές:

- 1) Η κατακόρυφη ταχύτητα είναι μηδενική.
- 2) Η πίεση είναι σταθερή τόσο στην κάθετη όσο και στην οριζόντια διεύθυνση.
- 3) Η διατμητική τάση  $\tau_0$  είναι σταθερή κατά μήκος του ορίου, δηλαδή

$$(\mu_t + \mu_l) \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_0 = \rho u_*^2 \quad (5.13)$$

όπου  $\mu_t$  η τυρβώδης συνεκτικότητα,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $u_*$  η ταχύτητα τριβής.

- 4) Η τυρβώδης κινητική ενέργεια  $k$  και ο ρυθμός καταστροφής της,  $\varepsilon$ , ικανοποιούν τις αντίστοιχες εξισώσεις διατήρησης:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho \varepsilon = 0 \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + c_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} = 0 \quad (5.15)$$

όπου  $G_k$  η παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, η οποία ισούται με

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (5.16)$$

Οι Richards & Hoxey [38] πρότειναν ότι οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να ικανοποιηθούν από τις ακόλουθες:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad (5.17)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} \quad (5.18)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)} \quad (5.19)$$

όπου  $\kappa$  η σταθερά von Karman και  $z_0$  το ύψος τραχύτητας του εδάφους.

Οι παραπάνω εξισώσεις ικανοποιούν αυτόματα την εξίσωση (5.14), και την (5.15) εφόσον



$$\sigma_\varepsilon = \frac{\kappa^2}{(c_{\varepsilon 2} - c_{\varepsilon 1})\sqrt{c_\mu}} \quad (5.20)$$

όταν η σταθερά von Karman ισούται με  $\kappa = 0,4$  και  $\sigma_\varepsilon = 1,11$ .

### 5.4.3 Οριακές συνθήκες

Όποιο μοντέλο τύρβης και αν χρησιμοποιούμε, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί κατάλληλα η οριακή συνθήκη του εδάφους. Οι δυνατότητες που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα με το CFD δεν είναι επαρκείς για την πλήρη επίλυση της περιοχής κοντά στο έδαφος. Σημαντική, όμως, κρίνεται η χρήση συναρτήσεων κοντά στο τοίχωμα, εξαιτίας της σημασίας της τραχύτητας της επιφάνειας και των υψηλών αριθμών Reynolds που σχετίζονται με τη ροή ΑΟΣ. Οι συναρτήσεις τοιχώματος στους κώδικες CFD βασίζονται γενικά στην καθολική κατανομή ταχύτητας (νόμος του τοίχου) που μπορεί να τροποποιηθεί για τις επιπτώσεις των τραχιών επιφανειών. Στόχος είναι να εκτιμηθεί η διατμητική τάση στον τοίχο χρησιμοποιώντας την εφαπτόμενη ταχύτητα της ροής. [4]

Προσπαθώντας να βελτιώσουν τη συνοχή μεταξύ των προφίλ εισόδου της ροής και των οριακών συνθηκών εδάφους, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις.

Οι Hargreaves & Wright [44] τροποποίησαν το μοντέλο για τη συνάρτηση τοιχώματος που χρησιμοποιήθηκε στο έδαφος, ακολουθώντας τη μελέτη των Richards & Hoxey [38], ώστε να παρουσιάζει μια πιο συνεπή μορφή με τα προφίλ εισόδου της ροής. Άλλοι ερευνητές προσδιόρισαν μια γενικότερη λύση στις προσεγγιστικές εξισώσεις, που τους επέτρεψε να εισάγουν περισσότερες πληροφορίες στα προφίλ εισόδου της ροής, προκειμένου να συνάδουν περισσότερο με το υπάρχον μοντέλο συνάρτησης τοιχώματος που χρησιμοποιείται στο όριο.

Σε μοντέλα μετεωρολογίας συχνά επιλύεται ένα μονοδιάστατο μοντέλο για τον προσδιορισμό του προφίλ εισόδου της ροής, αντί να γίνεται χρήση κάποιας από τις παραπάνω προσεγγίσεις. Παρόμοια τεχνική έχει επίσης προταθεί από τον Blocken και άλλους [40]. Ο λόγος που προκρίνεται αυτή η προσέγγιση είναι ότι τα αναπτυσσόμενα προφίλ είναι συμβατά με τις οριακές συνθήκες του εδάφους. Ακόμα, το μονοδιάστατο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από το μοντέλο συνάρτησης τοιχώματος που χρησιμοποιείται στο έδαφος. Αυτό επιτρέπει μελλοντικά τη διερεύνηση διαφορετικών μοντέλων συνάρτησης τοιχώματος, χωρίς να χρειάζεται να προσδιοριστούν νέα πρότυπα εισόδου της ροής [4].

## 5.5 Μοντελοποίηση της βλάστησης

Ο τρόπος αναπαράστασης της βλάστησης στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική είναι ένα κρίσιμο ζήτημα προκειμένου να εντοπιστούν οι επιδράσεις της στο πεδίο ροής σε

αστικές περιοχές. Έχουν γίνει δύο διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με αυτό το θέμα, η αναπαράσταση της βλάστησης ως α) ένα χαρακτηριστικό του εδάφους (μήκος τραχύτητας) και β) πορώδες μέσο, με τη δεύτερη να αποτελεί μία σαφώς πιο ρεαλιστική περίπτωση. Σε αυτή την προσέγγιση, είναι απαραίτητο να προστεθούν επιπλέον όροι της εξισώσεις της ταχύτητας και της τύρβης, οι οποίοι θα προσομοιώνουν τη ροή λόγω της πράσινης περιοχής, όπως θα δούμε στη συνέχεια. [45]

### 5.5.1 Παραμετροποίηση της βλάστησης

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, οι επιδράσεις της βλάστησης στην ατμόσφαιρα είναι πολύπλευρες και πολλές φορές αντικρουόμενες. Παρακάτω γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστούν οι διαφορετικές επιδράσεις, αλλά και να αναπαρασταθούν στο μαθηματικό πρόβλημα της ροής έναντι οριακού στρώματος μέσω επιπλέον όρων.

#### 5.5.1.1 Αεροδυναμικά φαινόμενα

Για να παραμετροποιηθούν τα αεροδυναμικά φαινόμενα (αλλαγές στα πεδία ροής εξαιτίας της ύπαρξης του “εμποδίου” της βλάστησης), πολλοί ερευνητές στις πιο πρόσφατες μελέτες CFD χρησιμοποιούν την ποσότητα LAD [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ] (Leaf Area Density), η οποία εκφράζει το πόσο πυκνό είναι το φύλλωμα των δέντρων και εισάγεται στις εξισώσεις ορμής μέσω του όρου καταβόθρας  $S_{ui}$  που περιγράφεται παρακάτω:

$$S_{ui} = -\rho L A C_D U u_i \quad (5.21)$$

όπου  $\rho$  : πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$u_i$  : οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας της ροής (m/s)

$U$  : ταχύτητα ανέμου (m/s)

$C_D$  : συντελεστής αντίστασης της ορμής

Ο συντελεστής αντίστασης  $C_D$  είναι μία σταθερά που σχετίζεται με τις αεροδυναμικές ιδιότητες της βλάστησης. Η τιμή του συντελεστή αντίστασης γενικά κυμαίνεται από 0,1 μέχρι 0,3 [46][47], συνήθως όμως στη μοντελοποίηση της βλάστησης με CFD επιλέγεται μία μέση τιμή (~0,2) προκειμένου να προσεγγίζει την αληθινή τιμή του  $C_D$  για ένα μέσο τύπο φυτών. [7]

Όσον αφορά την τιμή του LAD, αυτή εξαρτάται από το είδος της βλάστησης, ενώ για τα φυλλοβόλα δέντρα και από την εποχή που γίνονται οι μετρήσεις [48]. Στη βιβλιογραφία συναντάμε τιμές για το LAD στο εύρος 0,1-5 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, με μία μέση τιμή περίπου στο 1 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> [49][50][51].

Συνήθως τα πιο μεγάλα LAD αφορούν θάμνους με πολύ πυκνό φύλλωμα, ενώ για δέντρα η τιμή κυμαίνεται γύρω από τη μέση τιμή. Για την περίπτωση που μοντελοποιούμε μια δεντροστοιχία, εκτός από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απόσταση των δέντρων μεταξύ τους. Συνεπώς, το LAD που θα χρησιμοποιηθεί στη μοντελοποίηση, θα πρέπει να είναι μικρότερο από το πραγματικό LAD του απομονωμένου δέντρου, για να προσεγγισθεί με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται η συγκεκριμένη διάταξη [10]. Για καλύτερη εποπτεία των τιμών του LAD και του C<sub>D</sub> που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, παρατίθεται παρακάτω ο Πίνακας 5.2.

Ο συντελεστής C<sub>D</sub> πολλαπλασιασμένος με το LAD δίνει το χαρακτηριστικό μέγεθος λ που σε κάποιες παλιότερες μοντελοποιήσεις είναι γνωστό ως συντελεστής πτώσης πίεσης, και είναι ανάλογος της διαφοράς πίεσης στις δύο κατά τον άνεμο πλευρές της περιοχής βλάστησης [10]:

$$\lambda = C_D LAD \quad (5.22)$$

Επιπλέον, εκτός από την ανάπτυξη οπισθέλκουσας δύναμης που ‘αντιστέκεται’ στην κατεύθυνση του ανέμου, η βλάστηση προκαλεί διαταραχές στη ροή και τη μετασχηματίζει δημιουργώντας γύρω της μικρές δίνες ανακυκλοφορίας, διαδικασία που εισάγεται και περιγράφεται στις εξισώσεις που αφορούν αντίστοιχα την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και το ρυθμό καταστροφής της ε, με τους παρακάτω όρους:

$$S_k = \rho C_D LAD (\beta_p U^3 - \beta_d U k) \quad (5.23)$$

$$S_\varepsilon = \rho C_D LAD (C_{\varepsilon 4} \beta_p \frac{\varepsilon}{k} U^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d U \varepsilon) \quad (5.24)$$

Για τις τιμές των συντελεστών β<sub>p</sub> (ποσοστό μέσης κινητικής ενέργειας που μετατρέπεται σε τυρβώδη), β<sub>d</sub>, C<sub>ε4</sub>, C<sub>ε5</sub> έχουν γίνει διάφορες προσεγγίσεις από τους ερευνητές, και οι βέλτιστες λύσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

	β <sub>p</sub>	β <sub>d</sub>	C <sub>ε4</sub>	C <sub>ε5</sub>
<b>Βέλτιστες τιμές</b>	1	3-4	1,5-2	1,5-1,8

Πίνακας 5.1. Βέλτιστες τιμές που εισάγονται στους όρους τύρβης και καταστροφής της TKE. [10]

Βέβαια, βάσει ορισμένων ερευνών που έχουν διεξαχθεί κατά το παρελθόν, δεν προκύπτει κάποιο πολύ καλύτερο αποτέλεσμα λόγω της επίδρασης των  $S_k$ ,  $S_e$ . Η χρήση μόνο του  $S_u$  δίνει μία αρκετά καλή προσέγγιση των πειραματικών υπολογισμών [49][52][53]. Ωστόσο, δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την πραγματική επίδραση κάθε όρου, καθώς μέχρι τώρα δεν έχουμε επαρκή στοιχεία, και για να δοθεί μία πιο καθαρή απάντηση θα χρειαστούν περισσότερες μελέτες στο μέλλον.

### 5.5.1.2 Κατάθεση ρυπαντών

Πέρα από την επίδραση της παρουσίας βλάστησης ως προς την ταχύτητα της ροής και την τυρβώδη κινητική ενέργεια (aerodynamic effects), η ύπαρξη πρασίνου επιδρά άμεσα και στη συγκέντρωση ρυπαντών στην ατμόσφαιρα, αφού τα φυτά έχουν την ιδιότητα να <<εκολλάπουν>> στο φύλλωμά τους ποσότητες επιβλαβών για την υγεία ουσιών που υπάρχουν στον αέρα, στην ουσία καθαρίζοντάς τον από αυτές. Η διαδικασία αυτή μοντελοποιείται στο CFD μέσω του παρακάτω όρου στην εξίσωση μεταφοράς των ρύπων:

$$S_d = -LADV_dC(x,y,z) \quad (5.25)$$

όπου  $V_d$ : ταχύτητα κατάθεσης ρυπαντών στο φύλλωμα (m/s)

$C$ : συγκέντρωση ρύπων σε κάθε κυψελίδα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Υπάρχουν ποικίλες προσεγγίσεις σχετικά με την τιμή του  $V_d$ , ανάλογα με τη φύση του κάθε σωματιδίου, με τις ακραίες τιμές να είναι 0,02 cm/s (χαμηλότερη ταχύτητα) και 30 cm/s (υψηλότερη ταχύτητα) [54][55]. Ωστόσο, οι πολύ μεγάλες τιμές μάλλον αποτελούν εξαιρέσεις. Πιο συχνά, οι ταχύτητες  $V_d$  ανήκουν στο φάσμα 0,02-1 cm/s (Πίνακας 5.2).

Ο παραπάνω όρος αφορά περιοχές με ομογενή βλάστηση. Στην πραγματικότητα, κάθε φύλλο έχει διαφορετικό προσανατολισμό, παράμετρος που στις μέχρι τώρα μελέτες δεν έχει ληφθεί υπόψη. [10]

	LAD ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	$C_D$	$V_d$ (cm/s)
Εύρος τιμών	0,1 – 5	0,1 – 0,3	0,02 – 30
Μέση τιμή (CFD)	1	0,2	1

Πίνακας 5.2. Τιμές που χρησιμοποιούνται στο CFD για την παραμετροποίηση της βλάστησης. [10][49][50][51]

### 5.5.1.3 Επαναιώρηση

Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται λόγω της βλάστησης και αφορά τη συγκέντρωση ρύπων και τη σύσταση του αέρα, είναι η επαναιώρηση των σωματιδίων από τα φύλλα στην ατμόσφαιρα. Με άλλα λόγια, ένα μέρος των σωματιδίων που έχουν εγκλωβιστεί στο φύλλωμα αποκολλάται εξαιτίας του πνέοντος ανέμου και επιστρέφει στον αέρα. Σύμφωνα με έρευνες, ταχύτητες ανέμου μεταξύ 3 και 9 m/s είναι ικανές να προκαλέσουν την επαναιώρηση ενός σημαντικού ποσοστού σωματιδίων (4,5-12 %) [56]. Παρόλα αυτά, πρόκειται για μια διαδικασία που δε λαμβάνεται υπόψη στις περισσότερες μοντελοποιήσεις CFD. Πρόσφατα, ο Hong επιχείρησε να προσθέσει έναν όρο πηγής στην εξίσωση μεταφοράς των ρύπων για αυτό το σκοπό [57]:

$$S_r = LADV_r C_{\text{sink}}(x,y,z) \quad (5.26)$$

όπου  $V_r$  : ταχύτητα επαναιώρησης σωματιδίων από το φύλλωμα (m/s)

$C_{\text{sink}}$  : συγκέντρωση σωματιδίων στο φύλλωμα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

### 5.5.1.4 Ψύξη του αέρα

Ακόμα, ένα σημαντικό θέμα που δεν έχει αναλυθεί σε μεγάλο βαθμό στις μέχρι τώρα μελέτες CFD είναι η δυνατότητα των χώρων πρασίνου να μετριάσουν τις υψηλές θερμοκρασίες της ατμόσφαιρας. Στα μεγάλα αστικά κέντρα, εξαιτίας του νέφους και του τσιμέντου σημειώνονται υπερβολικά μεγάλες θερμοκρασίες ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η δημιουργία χώρων βλάστησης σε αστικές περιοχές μπορεί να δώσει λύσεις σε αυτό το ζήτημα, καθώς πρώτον παρέχουν σκίαση και προστασία από τις καυτές ακτίνες του ήλιου (αν μιλάμε για δέντρα ή ψηλούς θάμνους) και δεύτερον έχουν τη δυνατότητα να ψύχουν τις θερμές αέριες μάζες (transpirational cooling). Αυτό συμβαίνει λόγω της διαπνοής από τα στόματα των φύλλων, διαδικασία που έχει ως αποτέλεσμα την αποβολή νερού (υγρασία) και εν τέλει την πτώση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. [10]

Η θερμική ποσότητα που απαιτείται προκειμένου να αλλάξει τη θερμοκρασία ενός αντικειμένου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H = C_p m \Delta T \quad [\text{J}] \quad (5.27)$$

όπου  $C_p$  : ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK)

$m$  : μάζα του αντικειμένου (kg)

$\Delta T$ : διαφορά θερμοκρασίας (K)

Ο Gromke που ασχολήθηκε πιο διεξοδικά με τις επιδράσεις της βλάστησης στην ψύξη του αέρα, πρότεινε για τις μετρήσεις τη χρήση της ισχύος ψύξης  $P_c$  [69]:

$$P_c = \frac{\dot{H}}{V} = C_p \dot{m} \Delta T \frac{1}{V} \quad [\text{W}] \quad (5.28)$$

όπου  $\dot{H}$  : ρυθμός μεταβολής της θερμότητας (W)

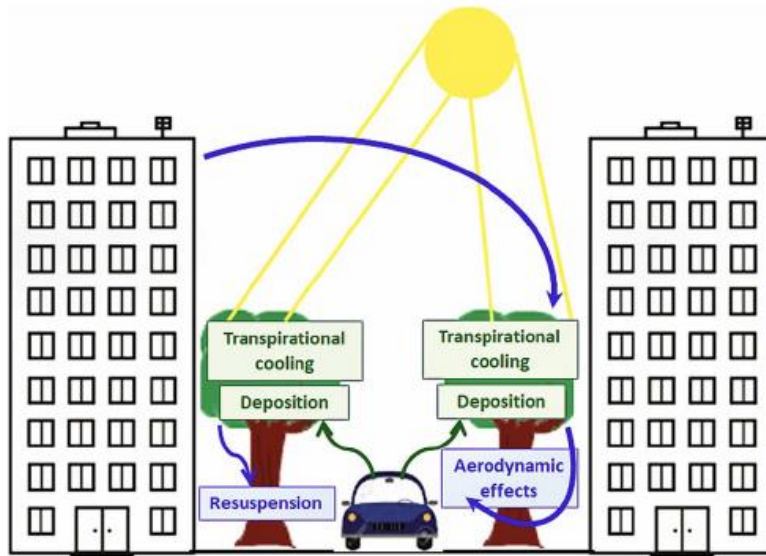
$\dot{m}$  : παροχή μάζας αέρα μέσα από τη βλάστηση (kg/s)

$V$  : όγκος της βλάστησης ( $\text{m}^3$ )

Για να παρατηρηθεί η επίδραση του φαινομένου στις μελέτες CFD, προτάθηκε ο υπολογισμός του  $P_c$  συναρτήσει της τιμής της πυκνότητας των φύλλων (LAD), και τέθηκε ως πρόσθετος όρος στην εξίσωση ενέργειας [9][58]:

$$P_c = 250LAD \quad (5.29)$$

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στο παρελθόν έχει επιχειρηθεί και η διερεύνηση της διασποράς σωματιδίων στην ατμόσφαιρα λόγω των φωτοχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στα φυτά, και κατά πόσο αυτή επηρεάζει το πεδίο ροής και τη συγκέντρωση ρύπων αλλά και την παραγωγή οξυγόνου στις αστικές περιοχές. Σχετικά με τη μοντελοποίηση αυτού του φαινομένου στο CFD, μπορεί κανείς να ανατρέξει στις πρόσφατες μελέτες των Moradpour (2017), Sanchez (2016) και Baker (2004). [9][59][60]



Σχήμα 5.1. Φαινόμενα που οφείλονται στην παρουσία δέντρων σε οδική χαράδρα. [10]

### 5.5.2 Υπολογιστικές μελέτες

Με στόχο την όσο το δυνατόν ακριβέστερη μοντελοποίηση της βλάστησης σε αστική περιοχή, έχουν δοκιμαστεί διάφορα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιούν τις τροποποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes (RANS), όπως το k-ε, καθώς και εναλλακτικά μοντέλα, όπως π.χ. το RSM (Reynolds Stress Model), που παρέχει πολύ καλύτερη πρόβλεψη του πεδίου ροής, όπως έδειξαν τα αποτελέσματα [52]. Ακόμα μεγαλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται να προσφέρει η μέθοδος LES (Large Eddy Simulations), αν και αυτή η βελτιωμένη επίδοση επιτεύχθηκε με πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με τη μεθοδολογία RANS. [61][62]

Μέχρι σήμερα, λίγες μελέτες λαμβάνουν υπόψη ταυτόχρονα τις αεροδυναμικές επιδράσεις της βλάστησης (aerodynamic effects) και τις επιδράσεις εξαιτίας της συγκέντρωσης ρύπων στο φύλλωμα (deposition effects), ενώ δεν έχουμε καθόλου στοιχεία σχετικά με την επίδραση του φαινομένου της επαναιώρησης (resuspension effects) συγκριτικά με τα δύο προηγούμενα. Στα μέχρι τώρα πειράματα που έχουν διεξαχθεί σε προσομοιώσεις αστικών περιοχών με βλάστηση, παρατηρήθηκε ότι υπερτερούν κατά πολύ τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση ρύπων στην ατμόσφαιρα λόγω της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου και της ανακυκλοφορίας, παρά να βελτιώνεται η ποιότητα του αέρα [6].

Μία μελέτη επιχείρησε να προσομοιώσει τη βλάστηση πάνω και γύρω από απομονωμένο κτήριο, προκειμένου να εξάγει συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή των δύο φαινομένων (aerodynamic & deposition effects). Το ύψος της βλάστησης και η ταχύτητα  $V_d$  αποδείχθηκε πως ήταν οι πιο κρίσιμες παράμετροι για αυτόν τον έλεγχο. Πιο συγκεκριμένα, όταν η βλάστηση τοποθετήθηκε στην οροφή του κτηρίου, φάνηκε να αυξάνεται σημαντικά η συγκέντρωση ρύπων στην επιφάνεια του εδάφους, συγκριτικά με την περίπτωση του κτηρίου χωρίς καθόλου βλάστηση. Αντιθέτως, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα του αέρα στο επίπεδο του δρόμου, επιστρατεύθηκε η χρήση δέντρων χαμηλότερων από την επιφάνεια της οροφής και με μεγάλο  $V_d$  (deposition velocity). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ενώ η παρουσία της βλάστησης εκεί συνέβαλε στη μείωση της μέσης συγκέντρωσης σωματιδίων, τα μέγιστα επίπεδα αυξήθηκαν σε αυτό το ύψος. [51]

Όσον αφορά την επίδραση της βλάστησης στη θερμοκρασία του αστικού περιβάλλοντος (thermal effects), βρέθηκε ότι πράγματι οι εκτάσεις πρασίνου αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη πηγή λύσεων κατά τις περιόδους με πολύ υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα. Η φύτευση δεντροστοιχιών στις οδικές χαράδρες μπορεί να αποφέρει ανάσα δροσιάς για τους κατοίκους τις καλοκαιρινές μέρες, ενώ ακόμα καλύτερα αποτελέσματα δίνει ο συνδυασμός της με τοποθέτηση πρασίνου στις προσόψεις των κτηρίων. Με άλλα λόγια, όσο περισσότερα  $m^2$  πρασίνου, τόσο λιγότερη ζέστη και ταλαιπωρία για τους κατοίκους των πόλεων. Επιπλέον, ανώδυνες φαίνεται να είναι οι επιπτώσεις στη συγκέντρωση ρύπων στην ατμόσφαιρα λόγω των φωτοχημικών αντιδράσεων, αφού η όποια αύξηση της συγκέντρωσης περιορίζεται στο χώρο γύρω από τη βλάστηση και δε δείχνει να επηρεάζει τόσο την ανθρώπινη υγεία. [10]

Συνολικά, και βάσει των μελετών CFD, οι διάφορες επιδράσεις της βλάστησης στα πεδία ροής, τη συγκέντρωση σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και τη θερμοκρασία αρκετές φορές φέρουν αντικρουόμενα αποτελέσματα (Πίνακας 5.3).

	Aerodynamic effects	Deposition effects	Resuspension effects	Thermal effects
Ποιότητα του αέρα	—	+	—	+

Πίνακας 5.3. Επιδράσεις της βλάστησης στην ποιότητα του αέρα σε αστική περιοχή.

### 5.5.3 Επαυξημένες μαθηματικές σχέσεις λόγω βλάστησης

Στην παρούσα εργασία θα γίνει υπολογιστική προσομοίωση μόνο για τις επιδράσεις της βλάστησης στο πεδίο ροής γύρω από (απομονωμένο) κτήριο (aerodynamic effects), που, σύμφωνα με την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι οι πιο



ισχυρές. Δεν θα ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις της βλάστησης στη σύσταση του αέρα και τη θερμοκρασία του αστικού περιβάλλοντος, συνίσταται ωστόσο η μελέτη τους στο μέλλον για μεγαλύτερη πληρότητα και εξαγωγή πιο σφαιρικών συμπερασμάτων.

Για τη μοντελοποίηση της βλάστησης είναι απαραίτητο στις μαθηματικές σχέσεις του μοντέλου δύο εξισώσεις k-ε να προστεθούν και οι όροι που δείχνουν την επίδρασή της στη γεωμετρία και το πεδίο ροής.

Η πιο απλή μορφή του μοντέλου βλάστησης βασίζεται στην ενσωμάτωση του όρου αεροδυναμικής αντίστασης (οπισθέλκουσας)  $S_{ui}$  (5.21) στις εξισώσεις ορμής [5][63]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} S_{ui} \quad (5.30)$$

Επειδή η αεροδυναμική αντίσταση της βλάστησης επηρεάζει άμεσα και την τυρβώδη κινητική ενέργεια, τα πιο αναλυτικά μοντέλα συμπεριλαμβάνουν και τους επιπλέον όρους πηγής και καταβόθρας στις εξισώσεις της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $S_k$  (5.23) και του ρυθμού καταστροφής της  $S_\varepsilon$  (5.24) [5][63]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon + \frac{1}{\rho} S_k \quad (5.31)$$

και

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon}{T} + \frac{1}{\rho} S_\varepsilon \quad (5.32)$$

Χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών δίνονται παρακάτω:

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_\mu$
1,44	1,92	1	1,3	0,09

Πίνακας 5.4. Χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών. [10]

Η παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $P_k$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_k = 2\nu_t |S|^2 \quad (5.33)$$

όπου  $S$  ο ρυθμός παραγωγής της τάσης (strain):

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.34)$$

Ο όρος  $T$  στην εξίσωση (5.32) είναι ένας χρονικός περιοριστής του Durbin, και στοχεύει στη μείωση της υπερβολικά υψηλής παραγωγής τυρβώδους κινητικής ενέργειας σε στάσιμες περιοχές ή σε περιοχές μεγάλης καμπυλότητας της ροής [64]:

$$T = \min \left( \frac{k}{\varepsilon}, \frac{0,6}{\sqrt{6} C_\mu |S|} \right) \quad (5.35)$$

Η επέκταση αυτή είναι αρκετά χρήσιμη, καθώς, όπως είδαμε, το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$  έχει την τάση να υπερεκτιμά την ΤΚΕ.

Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις της τυρβώδους πίεσης  $\overline{u_i u_j}$  και του ιξώδους  $\nu_t$ :

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.36)$$

$$\nu_t = c_\mu k T \quad (5.37)$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Λογισμικό

### 6.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για την αριθμητική επίλυση των ρευστομηχανικών πεδίων ροής ασυμπίεστων ρευστών και των θερμικών πεδίων σε ρευστά και στερεά, η μελέτη της οποίας ανήκει στον Δρ. Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, κ. Δημήτριο Μπούρη [65]. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας μπορεί να είναι ευρεία, από ροές σε κλειστούς χώρους όπως είναι αγωγοί, μέχρι τη ροή γύρω από στερεά σώματα, όπως είναι τα κτήρια, αντικείμενο που εστιάζουμε στην παρούσα εργασία.

Η μεθοδολογία και ο υπολογιστικός κώδικας σε FORTRAN που παρουσιάζονται στη συνέχεια, είναι βασισμένα σε τρισδιάστατες καρτεσιανές συντεταγμένες XYZ. Τα πεδία ροής που αντιμετωπίζει μπορεί να είναι στρωτά ή τυρβώδη με ή χωρίς μεταφορά θερμότητας. Υπάρχει μάλιστα και η δυνατότητα της επίλυσης προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας μέσα σε στερεό υλικό. Ακόμα, με αυτόν τον κώδικα μπορούν να γίνουν υπολογισμοί τέτοιοι, προκειμένου να παρακολουθηθεί η χρονική εξέλιξη ενός φαινομένου, ή και να υπολογιστεί απευθείας η μόνιμη κατάσταση στην οποία μπορεί να καταλήξει.

Η ανάπτυξη του εν λόγω κώδικα ξεκίνησε στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ και βασίστηκε πάνω στη μεθοδολογία SIMPLE των Patankar και Spalding (1972). Διαφέρει, όμως, σημαντικά από αυτή, κυρίως στον τρόπο αποθήκευσης των εξαρτημένων μεταβλητών και τη διαδικασία υπολογισμού της πίεσης. Η χρησιμοποιούμενη μορφή του μας δίνει περισσότερες δυνατότητες για επέμβαση στη γεωμετρία, καθώς και την επέκταση της επίλυσης σε τρεις διαστάσεις και σε χρονικά μεταβαλλόμενα θερμικά πεδία.

Σκοπός αυτού του χωρίου είναι η περιγραφή της αριθμητικής προσέγγισης και έπειτα η παρουσίαση του τρόπου χρήσης του προγράμματος. Παρουσιάζεται η μαθηματική θεωρία στην οποία βασίζεται η επίλυση καθώς και οι μεταβλητές που εμφανίζονται στον κώδικα. Αναλύονται τα αριθμητικά σχήματα και παρουσιάζονται η διακριτοποιημένη μορφή των εξισώσεων, οι οριακές συνθήκες, ο τρόπος επίλυσης των εξισώσεων και το κριτήριο για τη σύγκλιση του προγράμματος.

## 6.2 Εξισώσεις

Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 5, οι εξισώσεις που εκφράζουν το ρευστομηχανικό πεδίο ροής είναι οι εξισώσεις Reynolds (RANS) για τυρβώδες πεδίο ροής που προκύπτουν από τη χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier – Stokes. Θεωρώντας ένα στοιχείο ρευστού που κινείται, οι εξισώσεις Reynolds εκφράζουν αφενός το ρυθμό μεταβολής της ορμής του στοιχείου αυτού, αφετέρου όλες τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω του λόγω πίεσης και συνεκτικότητας του ρευστού (μπορεί να προστεθούν και δυνάμεις άνωσης, Coriolis κτλ, ανάλογα την περίπτωση).

Όταν η ροή που εξετάζεται είναι τυρβώδης, κατά τη χρονική ολοκλήρωση προκύπτουν οι τάσεις Reynolds (στατιστικές συσχετίσεις των διαταραχών των ρευστομηχανικών μεγεθών). Από το πλήθος των προσεγγίσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση των τάσεων Reynolds, η πιο διαδεδομένη είναι η υπόθεση Boussinesq, η οποία συνδέει τις τάσεις Reynolds με τον τοπικό ρυθμό παραμόρφωσης του μέσου πεδίου μέσω του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας  $\mu_t$ :

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \quad (6.1)$$

Όπου  $i, j = 1, 2, 3$  και υποδηλώνουν τις τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις  $x, y, z$  και τις αντίστοιχες συνιστώσες των ταχυτήτων  $u, v, w$ .

Το  $k$ , όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια, που μπορεί να θεωρηθεί ως η συνολική κινητική ενέργεια που αντιπροσωπεύεται από τις υψηλόσυχνες διαταραχές των ταχυτήτων.

Η τυρβώδης συνεκτικότητα  $\mu_t$  έρχεται να προστεθεί στη συνεκτικότητα του ρευστού  $\mu$ , η οποία είναι φυσική ιδιότητά του, και εκφράζει την αυξημένη διάχυση που παρατηρείται στα τυρβώδη πεδία ροής. Για τον υπολογισμό, όμως, της τυρβώδους συνεκτικότητας απαιτείται επίλυση επιπλέον διαφορικών εξισώσεων (βλ. Κεφάλαιο 5) μιας και δεν είναι ιδιότητα του ρευστού αλλά εξαρτάται από το πεδίο ροής και μεταβάλλεται τοπικά.

Οι εξισώσεις που επιλύονται τελικά εκφράζουν τη διατήρηση της μάζας, ορμής, τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k$ ) και του ρυθμού καταστροφής ή απορρόφησης της

τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $\varepsilon$ ). Προστίθεται, ακόμα, και η εξίσωση μεταφοράς της ενθαλπίας (ή θερμοκρασίας αν θεωρηθεί σταθερή η ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_p$ ).

Στην παρούσα ανάπτυξη οι εξισώσεις αυτές θα εκφραστούν σε καρτεσιανές συντεταγμένες για χρονικά αμετάβλητο πεδίο ροής. Οι εξισώσεις έχουν όλες την ίδια μορφή, εμφανίζοντας όρους μεταφοράς (συναγωγής) και διάχυσης, καθώς κι έναν όρο πηγής ( $S_\Phi$ ), ο οποίος είναι ο μόνος όρος στη γενική μορφή των εξισώσεων που αλλάζει ανάλογα με τη μεταβλητή ( $\Phi$ ). Η γενική μορφή των εξισώσεων φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}) = S_\Phi \quad (6.2)$$

όπου  $\Phi$  μπορεί να πάρει τις τιμές:

$1$  για εξίσωση συνέχειας

$u, v, w$  για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας

$T$  για θερμοκρασία (ή  $h$  για ενθαλπία)

$k$  για τυρβώδη κινητική ενέργεια

$\varepsilon$  για ρυθμό καταστροφής του  $k$

Έχουμε, λοιπόν, 2 μεταβλητές για το μοντέλο τύρβης ( $k, \varepsilon$ ).

Ο όρος πηγής παίρνει, ανάλογα τη μεταβλητή, τις τιμές που φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 6.1):

$\Phi$	$S_\Phi$
$1$	$0$
$u$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial x})$
$v$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial y})$

<b>w</b>	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right)$
<b>T</b>	0
<b>k</b>	G - ρε
<b>ε</b>	$(C_1\varepsilon G - C_2\rho\varepsilon^2)/k$
	$G = \mu\left\{2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right\}$

Πίνακας 6.1. Τιμές του όρου πηγής. [65]

Επίσης ορίζονται και οι υπόλοιπες μεταβλητές με βάση το μοντέλο τύρβης k-ε:

$$\Gamma_{\Phi} = \frac{\mu}{\sigma_{\Phi}}, \quad \mu_t = C_{\mu}\rho k^2/\varepsilon, \quad \mu = \mu_t + \mu \quad (6.3)$$

όπου  $\mu$  είναι η ενεργός συνεκτικότητα που ορίζεται ως το άθροισμα της  $\mu_t$  που είναι η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού και της  $\mu$  που είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα όπως ορίζεται από την υπόθεση Boussinesq. Οι σταθερές για το μοντέλο τύρβης k-ε είναι:

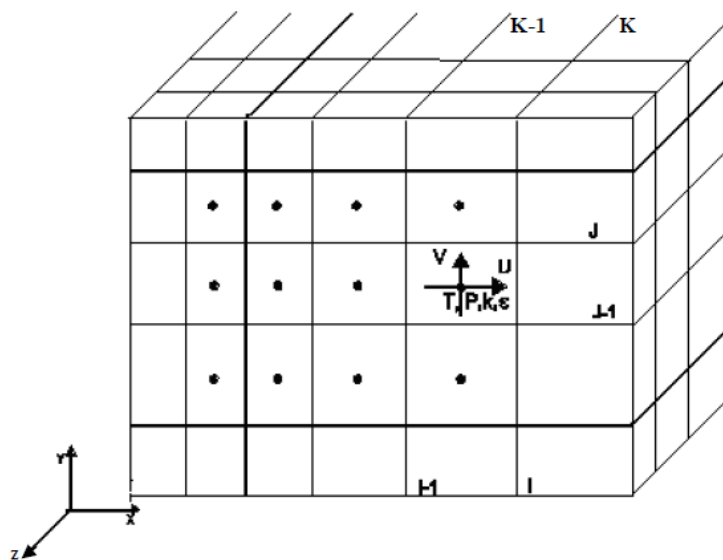
$$\begin{aligned} c_1 &= 1,44 & c_2 &= 1,92 & c_{\mu} &= 0,09 \\ \sigma_{(u,v)} &= 1 & \sigma_k &= 0,9 & \sigma_{\varepsilon} &= 1,3 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις λαμβάνουμε τις χρονικές μέσες τιμές των μεταβλητών, και με αυτές το πεδίο ροής θεωρείται γνωστό. Παρατηρώντας τις εξισώσεις των διαφόρων μεταβλητών, βλέπουμε ότι είναι στενά συνδεδεμένες μεταξύ τους (με την εμφάνιση των αγνώστων μεταβλητών σε όλες σχεδόν τις εξισώσεις) προσδίδοντας στο πρόβλημα έναν ισχυρά μη-γραμμικό χαρακτήρα. Εκτός από τις εξισώσεις αυτές, για την επίλυση των προβλημάτων είναι απαραίτητες και οι αρχικές και οριακές συνθήκες για τις οποίες θα γίνει λόγος στη συνέχεια. Η μεγαλύτερη δυσκολία κατά την επίλυση οφείλεται σε αυτήν ακριβώς την εξάρτηση των εξισώσεων μεταξύ τους, και κυρίως, όσον αφορά στις εξισώσεις ορμής, τις συνιστώσες της ταχύτητας. Σε αυτές τις εξισώσεις περιέχεται η άγνωστη κλίση της πίεσης που έχει συγχωνευτεί στους όρους πηγής  $S_{\Phi}$ , ενώ οι αντίστοιχες μεταβλητές

συνδέονται και μέσω της εξίσωσης της συνέχειας στην οποία δεν εμφανίζεται καν η πίεση. Για τη σωστή επίλυση του συστήματος των εξισώσεων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεξάρτηση των μεταβλητών, ώστε κατά τη διάρκεια της επίλυσης να γίνονται διαδοχικές διορθώσεις στις μεταβλητές και να οδηγείται το σύστημα σε σύγκλιση.

### 6.3 Ολοκλήρωση των εξισώσεων

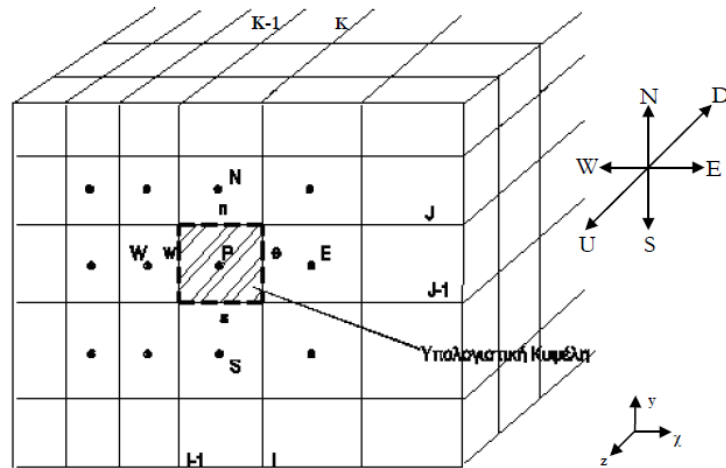
Χρησιμοποιείται ομόθετο πλέγμα (collocated grid). Όλα τα μεγέθη αποθηκεύονται στο ίδιο σημείο, το κέντρο των πλεγματικών κυψελών, δηλαδή πίσω και κάτω από τον κόμβο των αντίστοιχων πλεγματικών γραμμών. Για καλύτερη κατανόηση του πλέγματος και των θέσεων αποθήκευσης των μεταβλητών, παρατίθεται το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.1):



Σχήμα 6.1. Θέσεις αποθήκευσης μεταβλητών. [65]

Οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών για κάθε μεταβλητή  $\Phi$  προκύπτουν με ολοκλήρωση των εξισώσεων (6.2) στον όγκο αναφοράς που ορίζεται από τις πλεγματικές κυψέλες. Στην ουσία πρόκειται για εφαρμογή του θεωρήματος του Gauss ή του Green στο χώρο. Το αποτέλεσμα εκφράζεται ως συνάρτηση των τιμών της μεταβλητής στα γειτονικά πλεγματικά σημεία. Παρακάτω (Σχήμα 6.2) παρουσιάζεται ο χρησιμοποιούμενος όγκος αναφοράς, μαζί με τους απαιτούμενους συμβολισμούς. Οι όροι μεταφοράς και διάχυσης μετατρέπονται σε επιφανειακά ολοκληρώματα πάνω στις έξι επιφάνειες n (north/βόρεια), s (south/νότια), e (east/ανατολικά), w (west/δυτικά), u (upwind/ανάντι), d (downwind/κατάντι):





Σχήμα 6.2. Όγκος αναφοράς (υπολογιστική κυψέλη). [65]

Ο όρος πηγής γραμμικοποιείται, ώστε οι εξισώσεις (6.2) να γίνουν:

$$(\rho u \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x})_e A_e - (\rho u \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x})_w A_w + (\rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y})_n A_n - (\rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y})_s A_s + (\rho w \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z})_D A_D - (\rho w \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z})_U A_U = (S_P \Phi_P + S_U) Vol \quad (6.5)$$

Στην παραπάνω εξίσωση οι δείκτες των παρενθέσεων δηλώνουν μέση τιμή της εντός παρενθέσεως ποσότητας πάνω στην αντίστοιχη επιφάνεια που φαίνεται στο Σχήμα 6.2 και με Vol συμβολίζεται ο όγκος της υπολογιστικής κυψέλης ( $\delta x * \delta y * \delta z$ ). Οι γραμμικοποιημένοι όροι πηγής της παραπάνω εξίσωσης (6.5) παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.2:

$\Phi$	$S_P \Phi$	$S_U \Phi$
1	0	$\frac{\partial \rho}{\partial t}$
		$\frac{(\rho u)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial x})$

<b>u</b>	$-\frac{\rho}{\delta t}$	
<b>v</b>	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho v)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial y})$
<b>w</b>	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho w)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial z})$
<b>T</b>	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho T)^{n-1}}{\delta t} + G$
<b>k</b>	$-\frac{\rho}{\delta t} + c_{\mu} \frac{k \rho^2}{\mu_t}$	$-\frac{(\rho k)^{n-1}}{\delta t} + G$
<b>ε</b>	$-\frac{\rho}{\delta t} + c_2 \frac{\epsilon \rho}{k}$	$\frac{(\rho \epsilon)^{n-1}}{\delta t} + c_1 c_{\mu} \frac{\rho k}{\mu_t} + G$

Πίνακας 6.2. Γραμμικοποιημένοι όροι πηγής. [65]

Οι χρονικοί όροι έχουν χωριστεί στα  $S_U$  και  $S_P$  και όταν επιλύεται χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο, όλες οι μεταβλητές είναι εκφρασμένες στην προς επίλυση χρονική στιγμή εκτός από τον όρο που εμφανίζεται στο  $S_U$ , για τον οποίο απαιτείται αποθήκευση των μεταβλητών στην προηγούμενη χρονική στιγμή, n-1. Αυτή η έκφραση είναι πεπλεγμένη πρώτης τάξης ακρίβειας στο χρόνο και οδηγεί σε σταθερότητα κατά την επίλυση για αρκετά μεγάλα χρονικά βήματα. Στην περίπτωση που μελετάμε εδώ (μη χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα), οι χρονικοί όροι στα  $S_U$  και  $S_P$  είναι μηδενικοί.

Για να αποφευχθεί ασταθής συμπεριφορά στη σύγκλιση της μεθόδου, πρέπει να περιληφθούν στον παράγοντα  $S_P$  μόνο όροι πάντα αρνητικοί, ώστε να γίνεται πιο ισχυρή η διαγώνια μορφή του πίνακα των συντελεστών των αγνώστων του συστήματος που επιλύεται σε κάθε επανάληψη. Οι υπόλοιπες σταθερές έχουν ήδη οριστεί. Τέλος γίνεται χρήση ενός ακόμη όρου στους όρους πηγής που δεν φαίνεται πιο πάνω, καθώς δεν προκύπτει από τις εξισώσεις. Ο όρος αυτός έχει σταθεροποιητικό ρόλο ως προς τη σύγκλιση, δεν επιδρά στην τελική λύση και

προκύπτει ως το γινόμενο του υπολοίπου μάζας μέσα από μία υπολογιστική κυψέλη με τη διαφορά της καινούριας και της παλιάς τιμής της υπολογιζόμενης μεταβλητής:

$$S_+ = |\dot{m}_{net}| (\Phi_P^{prev} - \Phi_P) \quad (6.6)$$

Όταν ο κώδικας έχει συγκλίνει, και οι δύο πολλαπλασιαζόμενες ποσότητες θα είναι μηδενικές.

## 6.4 Αριθμητικό σχήμα

Για την αντιπροσώπευση των όρων μεταφοράς και διάχυσης, γίνεται χρήση κάποιου σχήματος ανάντι παραγωγίσης, π.χ. του υβριδικού ή του BSOU. Έστω η μεταφορά ποσότητας μέσα από μία από τις τέσσερις επιφάνειες π.χ. της  $A_e$  που βρίσκεται μεταξύ των κόμβων  $E$  και  $P$  του πλέγματος (Σχήμα 6.2). Η συνεισφορά στο επιφανειακό ολοκλήρωμα στην πλευρά  $e$  είναι:

$$(\rho u)_e \Phi_e A_e - \Gamma_{\Phi,e} \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta x_{PE}} A_e \quad (6.7)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τη μεταφορά (συναγωγή), και ο δεύτερος τη διάχυση.

Αν γίνεται χρήση του υβριδικού σχήματος που είναι συνδυασμός κεντρικής και ανάντι παραγωγίσης και είναι πρώτης τάξης ακρίβειας ( $\mathcal{O}(\delta x)$ ) θα ισχύει:

$$\begin{aligned} \Phi_e &= \Phi_P & , P_{e_e} > 2 \\ \Phi_e &= f\Phi_E + (1-f)\Phi_P & , -2 < P_{e_e} < 2 \\ \Phi_e &= \Phi_E & , P_{e_e} < -2 \end{aligned} \quad (6.8)$$

όπου  $Pe$  είναι ο αριθμός Peclet στην ανατολική πλευρά (επιφάνεια) της υπολογιστικής κυψέλης και  $f$  είναι συντελεστής που ορίζεται από τη γεωμετρία του πλέγματος για τη γραμμική παρεμβολή:

$$P_{e_e} = \left( \frac{\rho u \Delta x}{\Gamma_{\Phi}} \right)_e , \quad f = \frac{\delta x_{Pe}}{\delta x_{PE}} \quad (6.9)$$

Συνήθως όταν  $|Pe| < 2$  ο όρος διάχυσης είναι αμελητέος και λαμβάνεται μόνο η συναγωγή από τις σχέσεις του υβριδικού σχήματος (6.8). Με παρόμοιες εκφράσεις αντιμετωπίζονται και οι υπόλοιπες τρεις πλευρές. Η χρήση όμως του υβριδικού σχήματος είναι δυνατόν να εμφανίσει προβλήματα αριθμητικής διάχυσης. Αριθμητική διάχυση εμφανίζεται λόγω των προσεγγιστικών λύσεων των διαφορικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές, οπότε τυχόν σφάλμα σε κάποιο σημείο του πεδίου μεταφέρεται ανεξάρτητα από το πεδίο ταχυτήτων (αριθμητικά) στους γειτονικούς κόμβους. [66]

Για την καλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο Αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π., και πρωτότυπα σχήματα ανώτερης τάξης ακρίβειας όπως το BSOU. Το σχήμα BSOU (Bounded Second Order Upwind, Papadakis & Bergeles, 1995) είναι ένας συνδυασμός της ανάντι παραγωγίσις πρώτης (First Order Upwind) και δεύτερης τάξης (Second Order Upwind), και γενικά εισάγει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με το υβριδικό, ενώ περιορίζει τα προβλήματα αριθμητικής διάχυσης. Γενικά το BSOU κάνει χρήση κάποιων μη γραμμικών συντελεστών ανάμιξης μεταξύ των δύο ανάντι παραγωγίσεων, FOU και SOU. Ορίζονται τα μεγέθη:

$$\widehat{\Phi}_P = \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Phi_E - \Phi_W} \quad \text{και} \quad \gamma_e = \frac{(\Phi_E - \Phi_P)/(\Phi_P - \Phi_W)}{\Delta\xi_{Pe}/\Delta\xi_{WP}} \quad (6.10)$$

και για την επιφάνεια (e) του όγκου ολοκλήρωσης με  $u_e > 0$  είναι:

$$\Phi_e = \begin{cases} \Phi_P & , \widehat{\Phi}_P < 0 \\ \Phi_W + \left(1 + \frac{\Delta\xi_{Pe}}{\Delta\xi_{WP}}\right) (\Phi_P - \Phi_W), & 0 < \widehat{\Phi}_P < \frac{\Delta\xi_{WP}}{\Delta\xi_{We}} \\ \Phi_W + \left(1 + \gamma_e \frac{\Delta\xi_{Pe}}{\Delta\xi_{WP}}\right) (\Phi_P - \Phi_W), & \frac{\Delta\xi_{WP}}{\Delta\xi_{We}} < \widehat{\Phi}_P < 1 \\ \Phi_P & , \widehat{\Phi}_P > 1 \end{cases} \quad (6.11)$$

Το σχήμα αυτό κάνει χρήση και των κόμβων που εκτείνονται πέρα από τους αμέσως γειτονικούς όγκους ολοκλήρωσης (για την περίπτωση όπου  $u_e < 0$  χρειάζεται και το  $\Phi_{WW}$  κτλ.) και επομένως περιπλέκει κάπως τη διακριτοποίηση, όμως έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης τάξης ακρίβειας, ενώ σε σχέση με άλλα σχήματα ανώτερης τάξης (π.χ. QUICK) είναι επιπλέον φραγμένο.

## 6.5 Διακριτοποίηση των εξισώσεων

Αφότου όλοι οι όροι αντιμετωπιστούν είτε με υβριδικό είτε με BSOU σχήμα όπως αναλυτικά περιγράφηκε παραπάνω, η διαφορική εξίσωση λαμβάνει την εξής διακριτοποιημένη μορφή:

$$(a_P^\Phi - S_P^\Phi)\Phi_P = \alpha_N^\Phi\Phi_N + \alpha_S^\Phi\Phi_S + \alpha_E^\Phi\Phi_E + \alpha_W^\Phi\Phi_W + \alpha_D^\Phi\Phi_D + \alpha_U^\Phi\Phi_U + S_U^\Phi$$

$$\alpha_P^\Phi = \alpha_N^\Phi + \alpha_S^\Phi + \alpha_E^\Phi + \alpha_W^\Phi + \alpha_D^\Phi + \alpha_U^\Phi \quad (6.12)$$

συνδέοντας έτσι τη μεταβλητή  $\Phi$  σε κάθε σημείο με τις τιμές της στα έξι γειτονικά σημεία N,S,E,W,U,D.

Οι όροι πηγής έχουν ήδη οριστεί στον Πίνακα 6.2, ενώ οι συντελεστές  $a_j$  ( $j = N,S,E,W,U,D$ ) προκύπτουν από τη διακριτοποίηση του αριστερού μέρους των (6.5) και εξαρτώνται από το σχήμα διαφόρισης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω μόνο ορισμένοι συντελεστές με το BSOU, όπου όλοι οι όροι που σχετίζονται με τους πιο απομακρυσμένους κόμβους (WW, EE, NN, SS, UU, DD) προστίθενται τελικά στους όρους πηγής  $S_U$ . Έτσι, για τους συντελεστές E,W και για τη συμβολή του BSOU στους όρους πηγής από την επιφάνεια e, έχουμε:

$$a_w = \max\{0, (\rho u \delta y)_w\} + \frac{\Gamma_{\Phi,w}}{\delta x_{WP}} \delta y_w, \quad a_e = \max\{0, -(\rho u \delta y)_e\} + \frac{\Gamma_{\Phi,e}}{\delta x_{EP}} \delta y_e$$

$$S_{U,e}^{BSOU} = -\max\{0, -(\rho u \delta y)_e\} \frac{\delta x_{eE}}{\delta x_{E-EE}} \gamma_e (\Phi_{EE} - \Phi_E) + \max\{0, -(\rho u \delta y)_w\} \frac{\delta x_{wP}}{\delta x_{PE}} \gamma_w (\Phi_E - \Phi_P) \quad (6.13)$$

Παρόμοια προκύπτουν και οι συντελεστές για N,S,U,D και για τις συμβολές στους όρους πηγής από τις επιφάνειες n,s,u,d.

Αν ληφθεί η εξίσωση κατά μήκος μίας I γραμμής, θεωρώντας γνωστά τα μεγέθη στην προηγούμενη και επόμενη γραμμή, η (6.13) παίρνει τη μορφή τριδιαγώνιου συστήματος που επιλύεται με αλγόριθμο TDMA.

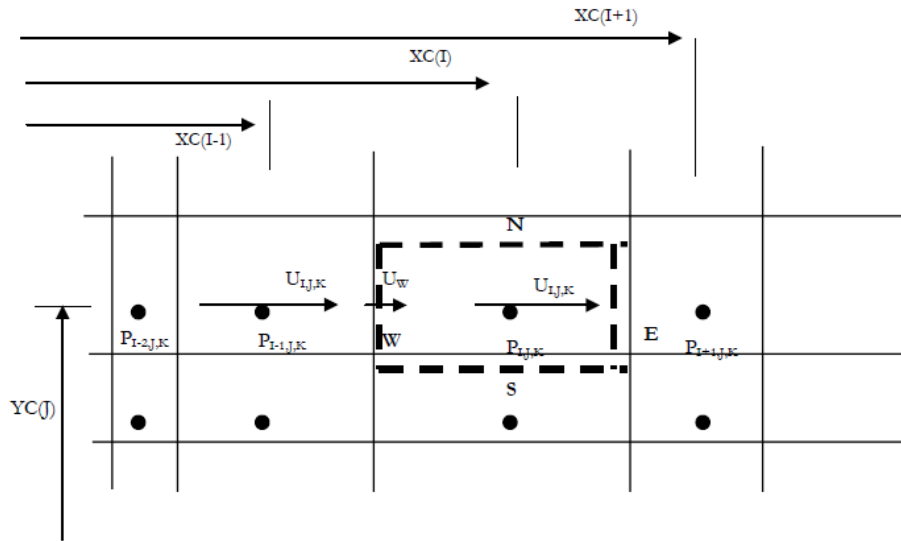
## 6.6 Εξίσωση πίεσης

Ο υπολογισμός της πίεσης είναι αυτός που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος της ιδιαιτερότητας κατά τη χρήση ομόθετου πλέγματος. Επειδή οι ταχύτητες και οι πιέσεις αποθηκεύονται στο ίδιο σημείο του πλέγματος, η πρώτη παράγωγος της πίεσης που εμφανίζεται στο δεξιό μέλος των εξισώσεων ορμής για τις u,v,w συνιστώσες της ταχύτητας (Πίνακας 6.2) θα πρέπει να εκφραστεί π.χ. για ομοιόμορφο πλέγμα ως:

$$\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{(I,J,K)} = \frac{P(I+1,J,K) - P(I-1,J,K)}{XC(I+1) - XC(I-1)}, \quad \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{(I,J,K)} = \frac{P(I,J+1,K) - P(I,J-1,K)}{YC(J+1) - YC(J-1)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{(I,J,K)} = \frac{P(I,J,K+1) - P(I,J,K-1)}{ZC(K+1) - ZC(K-1)} \quad (6.14)$$

Το Σχήμα 6.3 δείχνει την υπολογιστική κυψέλη καθώς και τις βασικές μεταβλητές που θα εμφανίζονται στις εξισώσεις πίεσης. Οι δείκτες I,J,K υποδηλώνουν τις συντεταγμένες τους ως προς το πλέγμα.



Σχήμα 6.3. Ορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλέγματος και θέσεις μεταβλητών στη βασική υπολογιστική κυψέλη. [65]

Η μορφή της (6.14) για τις πρώτες παραγώγους μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς υπολογισμούς της κλίσης της πίεσης, π.χ. κατά τη x κατεύθυνση από το (I-1,J,K) στο (I+1,J,K) επειδή χάνονται οι πληροφορίες από το (I-1,J,K) στο (I,J,K) και από το (I,J,K) στο (I+1,J,K). Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι ότι ο προκαταρκτικός υπολογισμός του πεδίου πίεσης έχει σημαντικές διακυμάνσεις και ασυνέχειες λόγω της αποσύζευξης των πιέσεων στα γειτονικά σημεία, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά και το πεδίο ταχυτήτων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί κατά το σχηματισμό της εξίσωσης για την επίλυση της πίεσης. Έτσι η (6.14) επιτρέπεται στις εξισώσεις ορμής και το πρόβλημα που μόλις αναφέρθηκε αντιμετωπίζεται μόνο μέσω της εξίσωσης της πίεσης, όπως αυτή θα προκύψει παρακάτω με εφαρμογή της εξίσωσης της συνέχειας.

Το πεδίο πίεσης θα θεωρηθεί αρχικά γνωστό, αφού οι εξισώσεις ορμής που επιλύονται πρώτες εξαρτώνται από αυτό. Η αρχική υπόθεση  $P^*$  για το πεδίο της πίεσης δεν μπορεί φυσικά να είναι σωστή, οπότε οι ταχύτητες που υπολογίζονται ικανοποιούν μεν τις εξισώσεις ορμής, αλλά συνήθως δεν συμβαίνει το ίδιο και με τις εξισώσεις συνέχειας, οδηγώντας έτσι σε κάποια υπόλοιπα μάζας. Με σκοπό τον μηδενισμό των υπολοίπων αυτών και τον εκ νέου υπολογισμό του πεδίου πίεσης, ακολουθεί στο τέλος κάθε υπολογισμού ταχυτήτων (επίλυση εξισώσεων ορμής) μία διόρθωση για το αρχικό πεδίο πίεσης (επίλυση εξίσωσης συνέχειας). Η διόρθωση αυτή θα επηρεάσει, ασφαλώς, και το πεδίο ταχυτήτων. Συμβολίζοντας τις αρχικές τιμές με εκθέτη (old) και τις διορθωμένες με ('), οι διορθωμένες τιμές πίεσης και ταχυτήτων προκύπτουν όπως παρακάτω:

$$P(I, J, K)^{\text{new}} = P(I, J, K)^{\text{old}} + P(I, J, K)'$$

$$u(I, J, K)^{\text{new}} = u(I, J, K)^{\text{old}} - DU(I, J, K) \frac{\partial P'}{\partial x} | (I, J, K)$$

$$\text{όπου } DU = \frac{\text{Vol}}{a_p^u(I, J, K) - s_p^u(I, J, K)}$$

$$v(I, J, K)^{\text{new}} = v(I, J, K)^{\text{old}} - DV(I, J, K) \frac{\partial P'}{\partial y} | (I, J, K) \quad (6.15)$$

$$\text{όπου } DV = \frac{\text{Vol}}{a_p^v(I, J, K) - s_p^v(I, J, K)}$$

$$w(I, J, K)^{\text{new}} = w(I, J, K)^{\text{old}} - DW(I, J, K) \frac{\partial P'}{\partial z} | (I, J, K)$$

$$\text{όπου } DW = \frac{\text{Vol}}{a_p^w(I, J, K) - s_p^w(I, J, K)}$$

από τις παραπάνω σχέσεις είναι ξεκάθαρο ότι έχει γίνει η υπόθεση πως οι ταχύτητες εξαρτώνται μόνο από τις πιέσεις και έχουν παραληφθεί όλοι οι υπόλοιποι όροι από τις εξισώσεις ορμής. Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (6.15) στην εξίσωση της συνέχειας ολοκληρωμένη στα όρια μιας υπολογιστικής κυψέλης:

$$-(\rho u \delta z)_e + (\rho u \delta z)_w + (\rho v \delta z)_s - (\rho v \delta z)_n + (\rho w \delta y)_d - (\rho w \delta y)_u = 0 \quad (6.16)$$

θα προκύψει η ακόλουθη εξίσωση υπολογισμού της διόρθωσης της πίεσης:

$$\begin{aligned} & -\rho_e u^*_e \delta z + \rho_w u^*_w \delta z + \rho_s v^*_s \delta z - \rho_n v^*_n \delta z + \rho_D w^*_D \delta x \delta y - \rho_u v^*_u \delta x \delta y + \\ & \rho_e DU_e \delta y \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_e - \rho_w DU_w \delta y \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_w - \rho_s DV_s \delta x \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial y} \right)_s + \rho_n DV_n \delta x \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial y} \right)_n \\ & - \rho_D DW_D \delta y \delta x \left( \frac{\partial P'}{\partial z} \right)_d + \rho_U DW_U \delta y \delta x \left( \frac{\partial P'}{\partial z} \right)_u = 0 \quad (6.17) \end{aligned}$$

Η πρώτη γραμμή της εξίσωσης (6.17) αποτελεί και το υπόλοιπο μάζας που προκύπτει από τον αρχικό υπολογισμό των τιμών των ταχυτήτων. Αυτό το υπόλοιπο θα γίνει μηδέν όταν έχουν βρεθεί τα σωστά πεδία και έχει συγκλίνει το πρόγραμμα. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στην εν λόγω εξίσωση, οι πρώτες παράγωγοι της διόρθωσης της πίεσης υπολογίζονται πάνω στο αντίστοιχο όριο n,s,e,w,u,d, και επομένως αποφεύγεται η ανεπιθύμητη και ανακριβής μορφή της (6.17). Π.χ. για το e:

$$\left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_e = \frac{P'(I+1, J, K) - P'(I, J, K)}{XC(I+1) - XC(I)} \quad (6.18)$$

Για τα υπόλοιπα μεγέθη όπως η πυκνότητα και οι συντελεστές  $DU, DV$  γίνονται απλές γραμμικές παρεμβολές με τη βοήθεια κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας σε περίπτωση ανομοιομορφου πλέγματος.

Οι Rhie & Chow (1983) αναφέρουν ότι τα προβλήματα που εισάγονται από την (5.18) στα πεδία πίεσεως και ταχυτήτων, μπορούν να διορθωθούν εδώ με κατάλληλη προσέγγιση της παρεμβολής των  $u^*, v^*, w^*$  στα όρια των κυψελών. Έτσι πρότειναν κατά τον υπολογισμό των ταχυτήτων αυτών να μην γίνει απλή γραμμική παρεμβολή, αλλά συγχρόνως να αφαιρεθούν οι υπολογισμένες διαφορές των πιέσεων των εξισώσεων ορμής και να χρησιμοποιηθεί η διαφορά πίεσης πάνω στην εν λόγω πλευρά της κυψέλης. Παρακάτω διατυπώνεται η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας  $u_w^*$  στη δυτική πλευρά της υπολογιστικής κυψέλης (με όμοιο τρόπο υπολογίζονται και οι ταχύτητες στις άλλες πλευρές της κυψέλης):

$$u_w^* = [1 - WFW(I)]\{u^*(I-1, J, K) - DU(I-1, J, K)\frac{\partial P^*}{\partial x}\bigg|_{(I-1, J, K)}\} + WFW(I)\{u^*(I, J, K) - DU(I, J, K)\frac{\partial P^*}{\partial x}\bigg|_{(I, J, K)}\} + \{[1 - WFW(I)]DU(I-1, J, K) + WFW(I)DU(I, J, K)\}\frac{P^*(I-1, J, K) - P^*(I, J, K)}{XC(I) - XC(I-1)} \quad (6.19)$$

όπου  $WFW$  είναι συντελεστής βαρύτητας για τη γραμμική παρεμβολή υπολογισμένου με βάση την ανομοιομορφία του πλέγματος (ανάλογα υπάρχουν και  $WFE, WFS, WFN$ ), ενώ τα  $XC$  ορίζονται στο Σχήμα 6.3. Στην εξίσωση (6.19) οι όροι της πρώτης αγκύλης εκφράζουν τις ταχύτητες εκατέρωθεν της επιφάνειας  $w$  αλλά χωρίς την επίδραση της κλίσης πίεσης (ο όρος που αφαιρείται έχει την έκφραση της σχέσης (6.14)). Στο τέλος, προστίθεται η επίδραση της πίεσης στην τιμή της ελλειψός (ως προς επίδραση της πίεσης) παρεμβληθείσας τιμής της ταχύτητας στην εν λόγω επιφάνεια. Είναι φανερό ότι η επίδραση αυτή υπολογίζεται με πολύ καλύτερη ακρίβεια. Τελικά, όπως και προηγούμενες εξισώσεις, η (6.19) καταλήγει στη μορφή:

$$a_P^P P'_P = a_N^P P'_N + a_S^P P'_S + a_E^P P'_E + a_W^P P'_W + a_D^P P'_D + a_U^P P'_U + S_U^P$$

$$a_P^P = a_N^P + a_S^P + a_E^P + a_W^P + a_D^P + a_U^P \quad (6.20)$$

$$S_U^P = -\rho_e u_e^* \delta z + \rho_w u_w^* \delta z + \rho_s v_s^* \delta z - \rho_n v_n^* \delta z + \rho_D v_{D_s}^* \delta x \delta y - \rho_U v_U^* \delta x \delta y$$

που έχει ίδια μορφή με την (6.12) και καταλήγει σε επίλυση τριδιαγωνίου συστήματος.

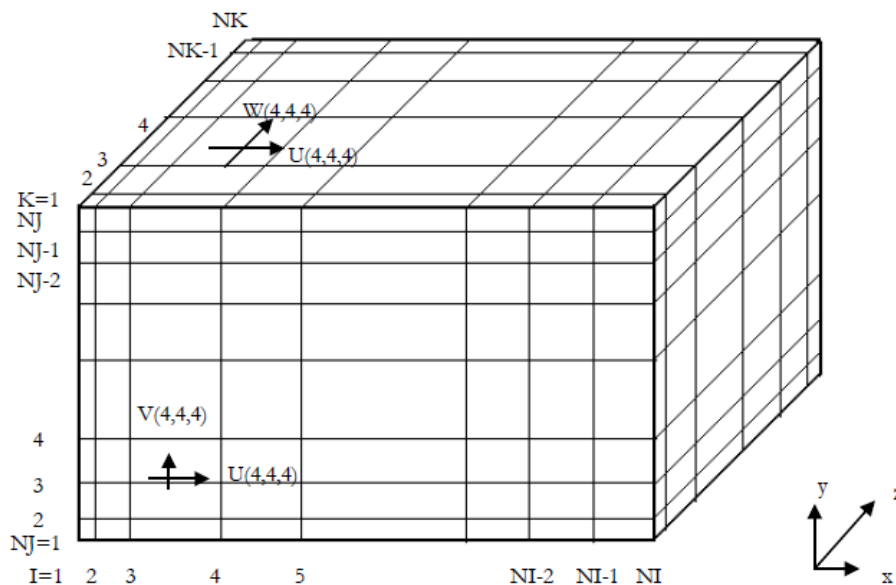
Ο όρος πηγής  $S_U$  είναι η πρώτη γραμμή της εξ. (6.17), δηλαδή το υπόλοιπο μάζας για τον όγκο αναφοράς. Από εδώ και πέρα η εξίσωση (6.17) ή η (6.20) θα αναφέρονται ως εξισώσεις της πίεσης. Τέλος, σημειώνεται ότι οι όροι της (5.16) είναι ίδιοι με ένα μέρος των συντελεστών των  $\Phi_{N,S,E,W,U,D}$  της εξίσωσης (6.5) ή (6.12). Αυτό είναι



λογικό, διότι πρόκειται για τους όρους συναγωγής οι οποίοι είναι και αυτοί που εμφανίζονται στην εξίσωση της συνέχειας.

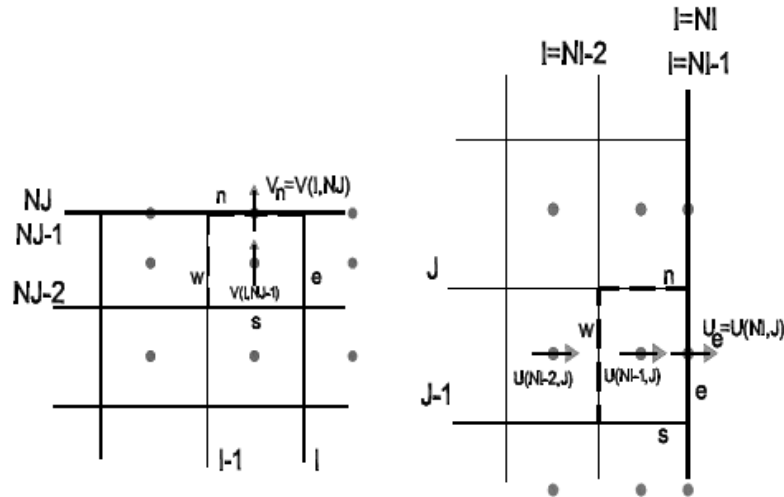
### 6.7 Όρια υπολογιστικού χώρου

Παρατηρώντας το υπολογιστικό πλέγμα στο Σχήμα 6.4, βλέπουμε ότι υπάρχει μία επιπλέον ιδιαιτερότητα στην αρίθμηση των πλεγματικών γραμμών στα όρια. Πιο συγκεκριμένα, εφόσον οι μεταβλητές αποθηκεύονται στα μέσα των πλεγματικών κυψελών, ο αριθμός των μεταβλητών σε μία πλεγματική κατεύθυνση θα είναι κατά ένα μεγαλύτερος από τον αριθμό των πλεγματικών γραμμών που τέμνουν κάθετα την κατεύθυνση αυτή. Αυτό οδηγεί τις οριακές τιμές των μεταβλητών σε αποθήκευση ακριβώς πάνω στις οριακές γραμμές. Έτσι, η μεταβλητή  $U(NI-1,J,K)$  θα αποθηκεύεται μεταξύ της τελευταίας ( $NI-1$ ) και της προτελευταίας ( $NI-2$ ) πλεγματικής γραμμής, ενώ η  $U(NI,J,K)$  θα αποθηκεύεται ακριβώς πάνω στην τελευταία γραμμή ( $NI-1$ ).



Σχήμα 6.4. Αρίθμηση πλεγματικών γραμμών. [65]

Σε όλα τα όρια του υπολογιστικού χώρου δεν γίνεται διαφορετική χρήση των παρεμβολών που περιγράφηκαν στην παράγραφο για την εξίσωση της πίεσης, αλλά αυτές συμπεριφέρονται σωστά χάρη στην ειδική μορφή της υπολογιστικής κυψέλης που γειτονεύει με το όριο. Παρακάτω παρατίθεται σχηματικά ένα παράδειγμα για το βόρειο και ανατολικό όριο του υπολογιστικού χώρου (τα άλλα όρια αντιμετωπίζονται με ανάλογο τρόπο):



Σχήμα 6.5. Αποθήκευση ταχυτήτων σε βόρειο και ανατολικό όριο του υπολογιστικού χώρου. [65]

Για το βόρειο όριο, οι ταχύτητες στις πλευρές  $e, w, s$  υπολογίζονται με τις παρεμβολές που περιγράφηκαν προηγουμένως. Για την πλευρά  $n$ , ο υπολογισμός βασίζεται στο γεγονός ότι το πάνω όριο χαρακτηρίζεται από μία υπολογιστική κυψέλη μηδενικού πάχους κατά τη  $J$  κατεύθυνση, οπότε στο όριο αυτό οι τιμές των μεταβλητών θα αποθηκεύονται ακριβώς πάνω στη γραμμή  $NJ$ , δηλαδή πάνω στο όριο. Οι παρεμβολές με τους συντελεστές βαρύτητας ( $WFN(NJ-1) = 0$ ) οδηγούν στον υπολογισμό της ταχύτητας  $V_n$  ίσο με τη  $V(I, NJ, K)$  του ορίου (υπολογίζεται όπως στη (6.19)). Για την περίπτωση, όμως, που υπάρχουν στερεά όρια στο εσωτερικό του πλέγματος, θα πρέπει να μηδενίζονται αυτές οι ταχύτητες με ειδικό τρόπο, αφού οι παρεμβολές δεν θα επιφέρουν από μόνες τους το επιθυμητό αποτέλεσμα.

## 6.8 Οριακές συνθήκες

### 6.8.1 Γενικά

Αναγκαία κρίνεται και η τροποποίηση των σχημάτων πεπερασμένων διαφορών για τα σημεία του πλέγματος που βρίσκονται κοντά σε κάποιο όριο, είτε αυτό είναι στερεό τοίχωμα, είτε άξονας συμμετρίας κτλ. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι Dirichlet για τις μεταβλητές στην είσοδο του πεδίου και Neumann για τις μεταβλητές στην έξοδο.

- Στην είσοδο, ιδιαιτερότητα παρουσιάζουν μόνο οι  $U$  και  $V$ , που δίνονται πάντα μηδενικές, όπως και η πίεση (πίεση αναφοράς).
- Οι  $U$  και  $V$  ταχύτητες μπορούν να τεθούν μηδενικές και στην έξοδο, εφόσον το όριο είναι τέτοιο που να επιτρέπει τη θεώρηση πλήρως ανεπτυγμένης ροής.

Η  $W$  ταχύτητα στην έξοδο υφίσταται κάποιον ισολογισμό μάζας ως προς την είσοδο και διορθώνεται αναλόγως σε κάθε επανάληψη.

- Στον άξονα συμμετρίας θεωρείται συνθήκη Neumann, εκτός των ταχυτήτων που είναι κάθετες στο όριο και θεωρούνται μηδενικές.
- Σε βόρειο τοίχωμα, η πίεση και η  $V$  ταχύτητα επιδέχονται Neumann οριακές συνθήκες, όπως και η  $k$ . Για τις  $U$  και  $W$  ταχύτητες παράλληλες σε τοίχωμα εφαρμόζονται οι συναρτήσεις τοιχώματος.
- Σε ανατολικό ή δυτικό τοίχωμα έχουμε Neumann συνθήκες για την πίεση, για την  $k$ , καθώς και για τη  $U$  ταχύτητα. Οι συνθήκες τοιχώματος εφαρμόζονται για τις  $V$  και  $W$  ταχύτητες που είναι παράλληλες στο τοίχωμα.
- Για τη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού δεν απαιτείται καμία παρέμβαση του χρήστη αφού επιβάλλεται αυτόματα με τον ορισμό στερεών τοιχωμάτων όπου επιλύεται και η εξίσωση θερμοκρασίας.

### 6.8.2 Οριακές συνθήκες στο τοίχωμα

Σε περιοχές κοντά στα τοιχώματα, κατά την επίλυση της τυρβώδους ροής, το υπολογιστικό κόστος είναι μεγάλο, λόγω της απαίτησης λεπτομερών υπολογισμών, και άρα πολύ πυκνού πλέγματος. Για τη μείωση αυτού του κόστους γίνεται μια ειδική θεώρηση για την εξάρτηση των ταχυτήτων, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και του ρυθμού καταστροφής της κοντά στο τοίχωμα, με την απόσταση του υπολογιζόμενου σημείου από το τοίχωμα. Αυτή η εξάρτηση εκφράζεται μέσα από κάποιες σχέσεις, τις επονομαζόμενες και ως συναρτήσεις τοιχώματος (wall functions). Οι σχέσεις αυτές έχουν προκύψει από τις πειραματικά μετρημένες διανομές των μεγεθών σε τυρβώδες οριακό στρώμα πάνω από επίπεδη πλάκα. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, οι διανομές μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούνται από δύο περιοχές, μία πολύ κοντά στο τοίχωμα που είναι γραμμικού χαρακτήρα, και μία πιο μακριά που ακολουθεί λογαριθμικό κανόνα. Αυτές οι εξισώσεις έχουν τη βασική πρακτική σημασία να επιτρέπουν το σωστό υπολογισμό των κλίσεων των μεγεθών, και άρα των όρων διάχυσης δίπλα σε στερεά όρια σε τυρβώδη ροή.

Για βόρειο σύνορο, στο οποίο είναι παράλληλη η  $U$  ταχύτητα, έχουμε για τη διατμητική τάση πάνω στο τοίχωμα ( $\tau_w = \mu \partial u / \partial y$ ):

$$\tau_w = \mu_{1,P} \frac{u_P}{\delta y_P} \quad , y^+ < 11,63 \text{ (στρωτό οριακό στρώμα)}$$

$$\tau_w = \left[ \frac{\rho c \mu^{1/4} \kappa \sqrt{k}}{\ln E y^+} \right]_P u_P \quad , y^+ > 11,63 \text{ (πλήρως τυρβώδης ροή)} \quad (6.21)$$

Για δυτικό σύνορο, η  $V$  ταχύτητα θα είναι παράλληλη, οπότε η διατμητική τάση δίνεται και πάλι από τη σχέση (6.21), με τη διαφορά ότι αντί για  $u_P$  θα είναι  $v_P$ . Ως  $\kappa$  θεωρούμε τη σταθερά von Karman ( $\kappa \approx 0,4187$ ). Ως  $E$  ορίζουμε τη συνάρτηση της τραχύτητας του τοιχώματος, η οποία ισούται με  $E = 9,793$  για λείο τοίχωμα. Ακόμα,

ως  $y^+$  ορίζεται η αδιάστατη κάθετη απόσταση του σημείου P του πλέγματος του πλέον γειτονικού στο στερεό όριο, όπου υπολογίζουμε την ταχύτητα από το τοίχωμα:

$$y_P^+ = \left[ \frac{c_\mu^{1/4} \sqrt{k}}{\nu} \right]_P \delta y_P \quad (6.22)$$

Η εισαγωγή των συναρτήσεων τοιχώματος γίνεται στο  $S_P$  λόγω της γραμμικοποίησης που έχουν υποστεί οι όροι πηγής στην (6.5), αφού και η (6.21) είναι συνάρτηση της προς επίλυση μεταβλητής στο σημείο P.

Σημειώνεται ότι οι σχέσεις αυτές εφαρμόζονται και κατά τον υπολογισμό του G (Πίνακας 6.1) κοντά σε τοιχώματα, ενώ για τον όρο (-ρε) που εμφανίζεται στους όρους πηγής εφαρμόζεται η εξής σχέση:

$$\int_V \rho \epsilon dV = \begin{cases} (\rho c_\mu^{3/4} k^{3/2} \frac{y^+}{\delta y})_P \text{ Vol} & , y^+ < 11,63 \\ (\rho c_\mu^{3/4} k^{3/2} \frac{\ln(Ey^+)}{\kappa \delta y})_P \text{ Vol} & , y^+ > 11,63 \end{cases} \quad (6.23)$$

ο οποίος εισάγεται στο  $S_P$  σε αντικατάσταση της συνηθισμένης σχέσης (Πίνακας 6.2).

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια  $k$  εφαρμόζονται συνθήκες Neumann κοντά σε τοιχώματα, ενώ για το ρυθμό καταστροφής  $\epsilon$  ισχύει η σχέση:

$$\epsilon = \frac{c_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa y_P} \quad (6.24)$$

## 6.9 Διαδικασία επίλυσης

Σε γενικές γραμμές η διαδικασία επίλυσης έχει περιγραφεί πιο πάνω. Ακολουθεί η συνοπτική και συμπυκνόμενη παρουσίαση των βημάτων:

- 1) Επιλέγεται ένα σχήμα πεπερασμένων διαφορών όπου οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι οι ταχύτητες και η πίεση, καθώς και οι μεταβλητές  $k, \epsilon$  του μοντέλου τύρβης, η θερμοκρασία  $T$  κτλ.
- 2) Γίνεται μια αρχική υπόθεση για όλες τις μεταβλητές σε όλο το πεδίο ροής. Σε αυτό το στάδιο βοηθάει πολύ η ύπαρξη προηγούμενων υπολογισμών για παρόμοια προβλήματα οπότε και οι λύσεις αυτές θεωρούνται ως αρχικές τιμές για την υπολογιζόμενη. Μαζί με τις αρχικές τιμές είναι προφανές ότι υποτίθεται και μία αρχική τιμή για το πεδίο πίεσης.
- 3) Λύνονται οι εξισώσεις ορμής για την αξονική  $U$  και ακτινική  $V$  ταχύτητα.
- 4) Λύνεται η εξίσωση της πίεσης για να βρεθεί το διορθωμένο πεδίο της πίεσης που θα ικανοποιεί και την εξίσωση της συνέχειας.
- 5) Γίνονται οι διορθώσεις στην πίεση και τις ταχύτητες.

- 6) Λύνονται οι εξισώσεις και για τις υπόλοιπες μεταβλητές. Οι νέες τιμές θεωρούνται πλέον ως βελτιωμένες αρχικές τιμές και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση.
- 7) Εφόσον η επίλυση γίνεται σε μη μόνιμη ροή (χρονική εξέλιξη του φαινομένου), η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε χρονικό βήμα. Όταν έχει επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση η λύση δεν αλλάζει από χρονικό βήμα σε χρονικό βήμα.

Κατά την επίλυση όλων των εξισώσεων, εφαρμόζεται η μέθοδος TDMA για την επίλυση τριδιαγώνιου συστήματος συντεταγμένων με τη μέθοδο εναλλαγής κατεύθυνσης. Θεωρούνται, λοιπόν, ως άγνωστες οι τιμές της προς επίλυση μεταβλητής κατά μία πλεγματική γραμμή. Κατά αυτόν τον τρόπο βρίσκονται οι νέες τιμές της μεταβλητής κατά μήκος πλεγματικών γραμμών σε μία κατεύθυνση. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η επίλυση και στην άλλη κατεύθυνση. Σημειώνεται ότι το σύστημα που επιλύεται σε κάθε γραμμή πλέγματος αποτελείται από όλα τα εσωτερικά σημεία του πεδίου πάνω στη γραμμή αυτή.

### 6.10 Υποχαλάρωση

Σε κάθε επανάληψη είναι απαραίτητη η εφαρμογή υποχαλάρωσης κατά την επίλυση των εξισώσεων, προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες διακυμάνσεις των μεταβλητών ανάμεσα σε διαδοχικές επαναλήψεις που μπορούν να προκαλέσουν απόκλιση της λύσης. Η παράμετρος της υποχαλάρωσης, βέβαια, μπορεί να επιδρά στη σύγκλιση κάνοντάς την πολύ αργή αν είναι πολύ μικρή, ή μπορεί να οδηγήσει και σε απόκλιση αν είναι πολύ μεγάλη.

Με την υποχαλάρωση, μόνο ένα ποσοστό της τιμής μιας μεταβλητής που υπολογίστηκε χρησιμοποιείται για αρχική τιμή της επόμενης επανάληψης. Το υπόλοιπο μέρος της τιμής αυτής λαμβάνεται από την προηγούμενη επανάληψη:

$$\Phi_p^{\text{νέα}} = \omega \widetilde{\Phi}_p + (1-\omega)\Phi_p^{\text{προηγ.}} \quad (6.25)$$

όπου

$\Phi_p^{\text{νέα}}$  : η νέα τιμή της μεταβλητής  $\Phi$  στους κόμβους του πλέγματος

$\Phi_p^{\text{προηγ.}}$  : η τιμή της μεταβλητής  $\Phi$  στην προηγούμενη επανάληψη στον ίδιο κόμβο του πλέγματος

$\omega$  : ο συντελεστής υποχαλάρωσης,  $\omega \in [0,1]$

## 6.11 Σύγκλιση

Σκοπός της διαδικασίας είναι εν τέλει να λάβουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τα φυσικά μεγέθη που διέπουν το φαινόμενο και τις εξισώσεις που επιλύονται. Η ελάχιστη τιμή κάτω από την οποία θεωρούμε ότι έχουμε φτάσει στη λύση, δηλαδή το πρόβλημα έχει συγκλίνει, είναι το 0,1% του ρυθμού εισόδου της αντίστοιχης μεταβλητής κάθε φορά. Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι:

- Έχει επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια στη λύση, δηλαδή τα υπόλοιπα βρίσκονται κάτω από μία προκαθορισμένη τιμή.
- Η τιμή της μεταβλητής που επιλύεται έχει ουσιαστικά σταθεροποιηθεί.
- Έχει επιτευχθεί ανεξαρτησία λύσης από το πλέγμα και τον χρόνο, δηλαδή η λύση δεν μεταβάλλεται με πύκνωση του πλέγματος ή των χρονικών βημάτων.
- Ικανοποιούνται τα ισοζύγια μάζας, ορμής και ενέργειας σε όλο το πεδίο ροής.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Πρότυπος κύβος – γεωμετρική διάταξη

### 7.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση προσομοίωσης ενός κτηρίου κυβικής μορφής, κατάλληλου για πειράματα που αφορούν τη μελέτη του αέρα εντός και γύρω από αυτό, και το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της παρούσας εργασίας.

Το κτηριακό κέλυφος έχει ανοίγματα (προσομοίωση παραθύρων) που επιτρέπουν τη διείσδυση αέρα στο εσωτερικό του, και διερευνάται η αλληλεπίδραση της εσωτερικής και εξωτερικής ροής και κατανομής πίεσης, καθώς και οι επιπτώσεις τους στην ανανέωση αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου.

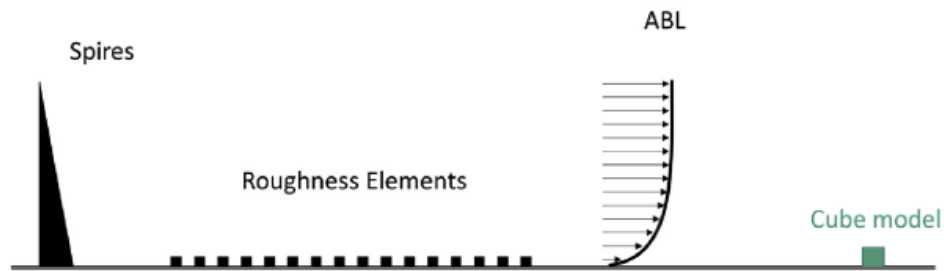
### 7.2 Τεχνική προσομοίωσης ΑΟΣ

Οι πειραματικές μετρήσεις του πεδίου ροής πραγματοποιήθηκαν για προηγούμενες έρευνες στο μεγάλο χώρο δοκιμής της αεροσήραγγας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., διαστάσεων 3,5m x 2,5m x 12m (πλάτος x ύψος x μήκος) [67]. Ο χώρος αυτός αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα ροής 17 m/s, ενώ διαθέτει ηλεκτρικά ελεγχόμενη περιστρεφόμενη τράπεζα διαμέτρου 2,5 m. [4]

Για την προσομοίωση του ανάντι οριακού στρώματος εντός της αεροσήραγγας, χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικής μορφής οβελίσκοι διαστάσεων  $h = 1,80$  m (ύψος) και



$b = 0,2 \text{ m}$  (πλάτος). Ακόμα, στο χώρο αμέσως μετά τις σπείρες, τοποθετήθηκαν κυβικά πρίσματα ως στοιχεία τραχύτητας εδάφους (roughness elements) πλευράς 5 cm, ενώ η απόσταση μεταξύ τους επιλέχθηκε ίση με 20 cm [68]. Τέλος, πίσω από τα πρίσματα και στο κέντρο της περιστρεφόμενης τράπεζας, τοποθετήθηκε ο πρότυπος κύβος για την προσομοίωση του κτηρίου του πειράματος, ο οποίος και θα μελετηθεί στη συνέχεια. Η συνολική διάταξη για την επίτευξη του ανάντι οριακού προφίλ φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 7.1. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης, αποτελούμενης από οβελίσκους και κυβικά στοιχεία τραχύτητας που προσομοιώνουν το ΑΟΣ. [69]



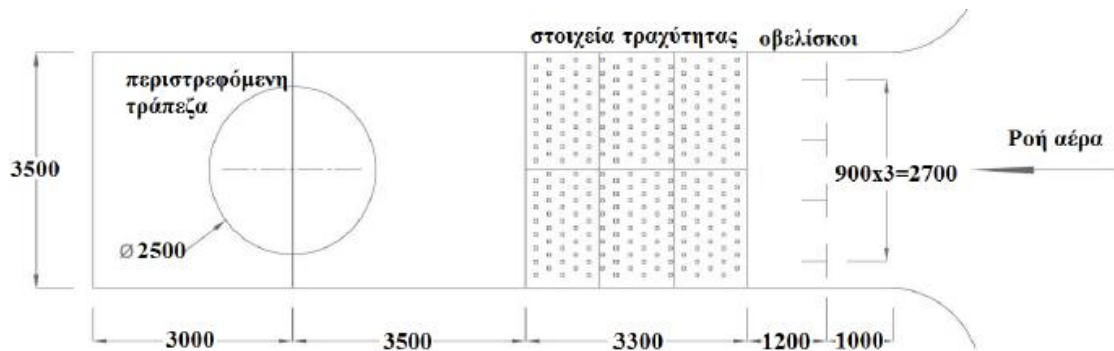
Σχήμα 7.2. Διάταξη για την προσομοίωση της ροής γύρω από πρότυπο κύβο μέσα στην αεροσήραγγα. [69]

### 7.3 Οριακό στρώμα χαμηλής και υψηλής διάτμησης

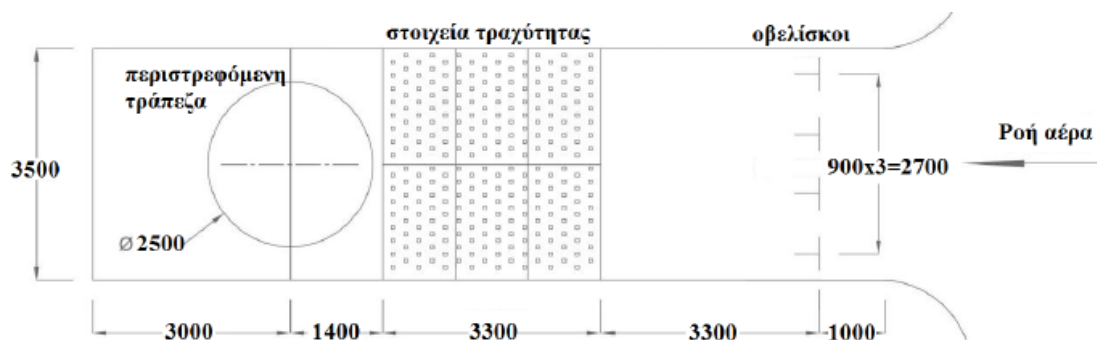
Κατά την εκπόνηση του πειράματος επιλέχθηκαν δύο διαφορετικοί συνδυασμοί διατάξεων. Τοποθετώντας, στην αεροσήραγγα, τα στοιχεία τραχύτητας κοντά στους

οβελίσκους, παράγεται οριακό στρώμα Α (χαμηλής διάτμησης), ενώ όταν τα απομακρύνουμε αρκετά από αυτούς, δημιουργείται οριακό στρώμα Β (υψηλής διάτμησης) [3][4]. Για καλύτερη εποπτεία και αντίληψη των δύο διατάξεων παρατίθεται το Σχήμα 7.3. Για τα δύο αυτά οριακά στρώματα λαμβάνουμε διαφορετικά ανάντι προφίλ και πεδία ροής που θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια.

α)

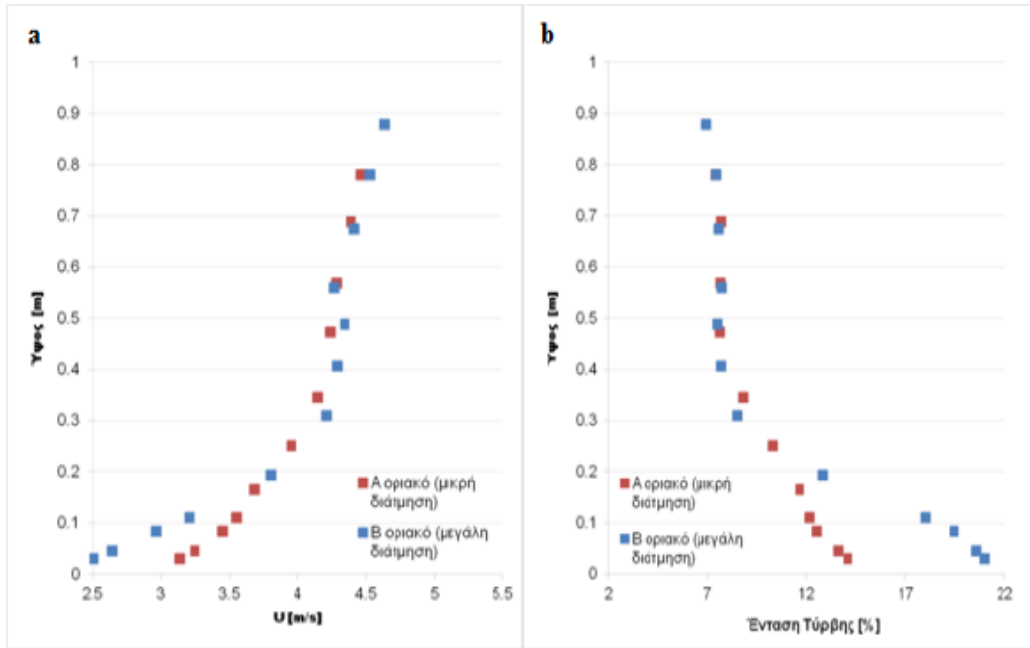


β)



Σχήμα 7.3. Διάταξη εντός της αεροσήραγγας για α) οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης, β) υψηλής διάτμησης [3]

Οι μετρημένες κατατομές μέσης ταχύτητας  $U$  και έντασης της τύρβης  $I_u$  που αφορούν καθένα από τα δύο οριακά στρώματα Α, Β, απεικονίζονται στο Σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4. Κατατομές a) μέσης ταχύτητας, b) έντασης της τύρβης για τα δύο οριακά στρώματα μικρής και μεγάλης διάτμησης. [67][68]

Το προφίλ της μέσης ταχύτητας εισόδου καθ’ ύψος  $z$  θεωρούμε ότι ακολουθεί λογαριθμική κατανομή [38]:

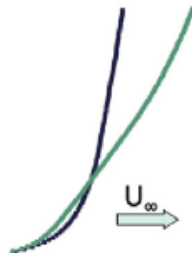
$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (7.1)$$

όπου σταθερά von Karman  $\kappa = 0,42$ .

Παρακάτω (Πίνακας 7.1) παρατίθενται οι τιμές της ταχύτητας διάτμησης  $u^*$  και του ύψους τραχύτητας  $z_0$  για τα δύο οριακά στρώματα στην αεροσήραγγα, για τις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα εισόδου στην αδιατάρακτη ροή ( $U_{ref}$ ) είναι περίπου 5 m/s:

$U_{ref} = 5 \text{ m/s}$	Ταχύτητα διάτμησης $u^*$ (m/s)	Ύψος τραχύτητας $z_0$ (mm)
Οριακό στρώμα A	0,19	0,05
Οριακό στρώμα B	0,27	0,7

Πίνακας 7.1. Τιμές ταχύτητας διάτμησης και ύψους τραχύτητας για τα δύο οριακά στρώματα A,B και για ταχύτητα ροής  $U_{ref} = 5 \text{ m/s}$ . [68][70]



Σχήμα 7.5. Σχηματική απεικόνιση οριακού στρώματος A (μαύρο) και B (πράσινο). [71]

Για τις άλλες δύο συνιστώσες ταχύτητας ( $v, w$ ) θεωρούμε μηδενικές τιμές.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια δίνεται από τη σχέση:

$$k(z) = \frac{3}{2} (I_u(z)u(z))^2 \quad (7.2)$$

όπου η ένταση της τύρβης  $I_u(z)$  δίνεται από τη σχέση:

$$I_u = \frac{u_{rmsz}}{\bar{u}z} \quad (7.3)$$

όπου  $u_{rmsz}$  η τυπική απόκλιση της ταχύτητας για δεδομένο ύψος:

$$u_{rmsz} = \sqrt{\overline{u'^2}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u'_i{}^2 \quad (7.4)$$

Για τον υπολογισμό του ρυθμού καταστροφής  $\varepsilon$  της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση των Richards & Hoxey [38]:

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)} \quad (7.5)$$

την οποία έχουμε δει και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία προκρίθηκε η χρήση της παρακάτω σχέσης για το  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{k^{1,5} C_{\mu}^{0,75}}{0,41z} \quad (7.6)$$

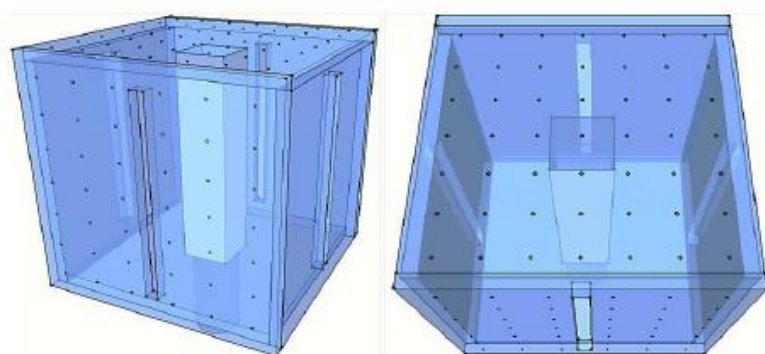
όπου  $C_{\mu} = 0,09$

Για το ύψος  $z$  κρατάμε σταθερή τιμή πολύ κοντά στο έδαφος.

## 7.4 Πρότυπος κύβος

Ο πρότυπος αυτός κύβος, αποτελούμενος από πλευρές τετράγωνων φύλλων Plexiglass, κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας του Π. Κουτσελάκη [72]. Οι διαστάσεις του είναι 0,11m x 0,11m x 0,11m. Στο κέντρο κάθε πλευράς δημιουργήθηκε άνοιγμα διαστάσεων 0,006 m x 0,09 m (μήκος x ύψος), αντίστοιχο περίπου με το 4,5% του εμβαδού της. Εσωτερικά, στο κέντρο του κύβου υπάρχει κατακόρυφη στήλη τετραγωνικής διατομής διαστάσεων 0,022 m x 0,022 m. (Σχήμα 7.6).

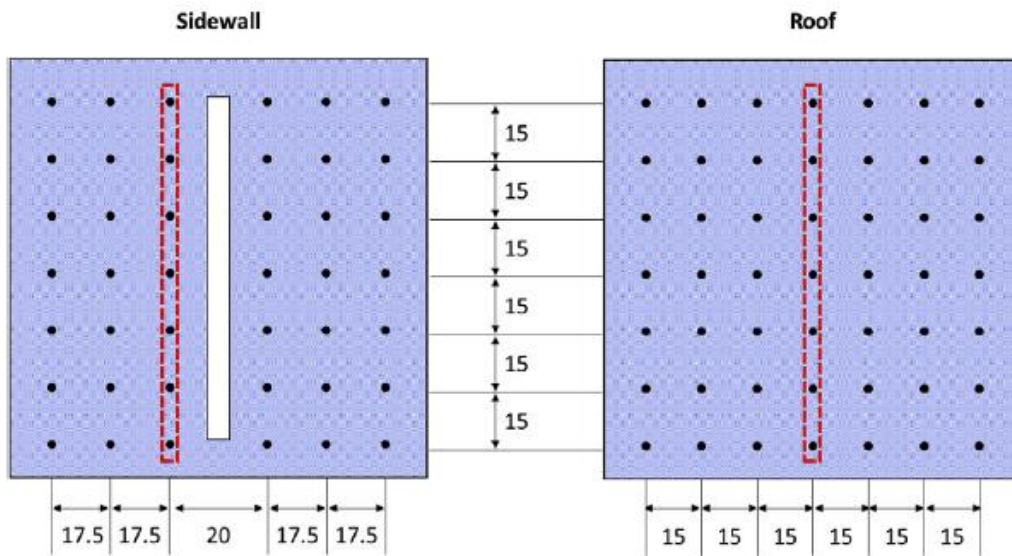
Το πάχος των τοιχωμάτων και της οροφής είναι 0,005 m. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών εξετάστηκαν διαφορετικά μοντέλα γεωμετρίας με βάση τον παραπάνω κύβο, όπως κύβος με κλειστά ανοίγματα (δεν εισέρχεται αέρας στο εσωτερικό του), κύβος με ανοίγματα σε όλες τις κάθετες πλευρές, και κύβος με ανοίγματα μόνο στην ανάντι και κατάντι πλευρά.



Σχήμα 7.6. Πρότυπος κύβος. [69]

Για τη μέτρηση κατανομής πίεσης, στη μία από τις κάθετες πλευρές τοποθετήθηκαν 42 απολήψεις πίεσης, ενώ στην οροφή άλλες 49 (Σχήμα 7.7). Στις απολήψεις συνδέθηκαν σωλήνες σιλικόνης εξωτερικής διαμέτρου 2mm και εσωτερικής 0,5mm. Οι συνδέσεις αυτές καλύφθηκαν στο εσωτερικό του κύβου με δεύτερο φύλλο

Plexiglass, προκειμένου οι επιφάνειες να παραμένουν λείες. Συνεπώς η μία κάθετη πλευρά και η οροφή έχουν πάχος διπλάσιο από τις άλλες. Μετέπειτα, τα σωληνάκια αυτά ενώθηκαν με διαφανή σωληνάκια σιλικόνης, εσωτερικής διαμέτρου 2 mm και εξωτερικής 4 mm, τα οποία με τη σειρά τους συνδέθηκαν μέσω ρακόρ σε κανάλια πολυαιθυλενίου εξωτερικής διαμέτρου 4mm και εσωτερικής 2mm. [4]



Σχήμα 7.7. Απολήψεις στην κάθετη όψη του κύβου (αριστερά) και στην οροφή του κύβου (δεξιά). [71]

## 7.5 Υπολογιστική προσομοίωση πρότυπου κύβου και υπολογιστικού χώρου

### 7.5.1 Διακριτοποίηση

#### 7.5.1.1 Πρότυπου κύβου

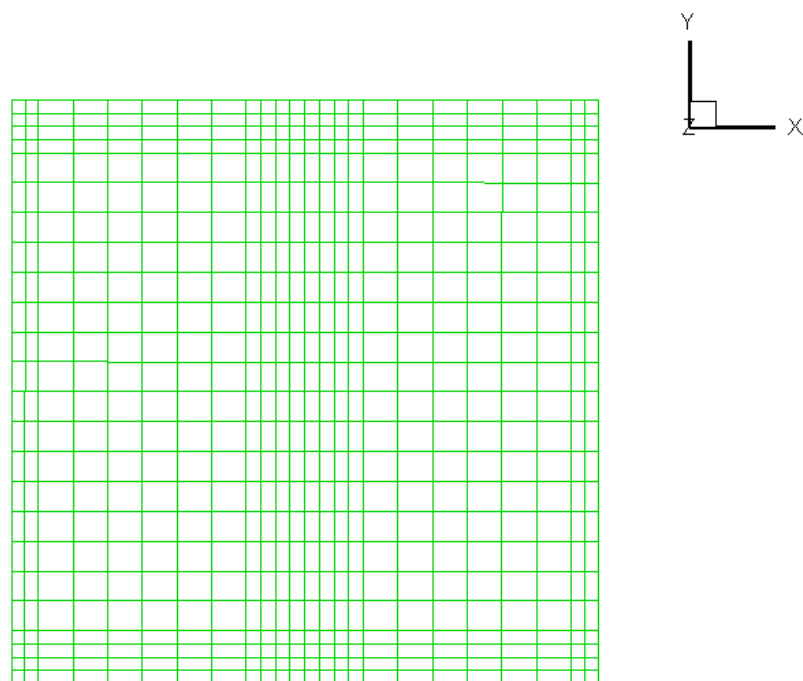
Κατά την υπολογιστική μελέτη αυτής της εργασίας, για λόγους που εξετάζονται στη συνέχεια, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί η ροή σε πραγματική κλίμακα, θέτοντας ρεαλιστικές διαστάσεις στον κύβο και το υπολογιστικό χωρίο. Οπότε, χρησιμοποιήθηκε ακριβώς το ίδιο κυβικό κτήριο και η ίδια μορφολογία, αλλά με διαστάσεις πολλαπλασιασμένες x300. Ο κύβος πλέον έχει διαστάσεις πραγματικού 10-όροφου κτηρίου ( $33 \times 33 \times 33 \text{ m}^3$ ). Αναλογικά, ασφαλώς, θα μεγαλώσουν και οι διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου, καθώς και το ύψος τραχύτητας αυτού ( $z_0$ ).

Για την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ακρίβειας στα αποτελέσματα του πεδίου ροής, επιλέγεται αρκετά πυκνή διακριτοποίηση στο όρια του κύβου. Βάση βιβλιογραφίας, σε κάθε πλευρά του κύβου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται

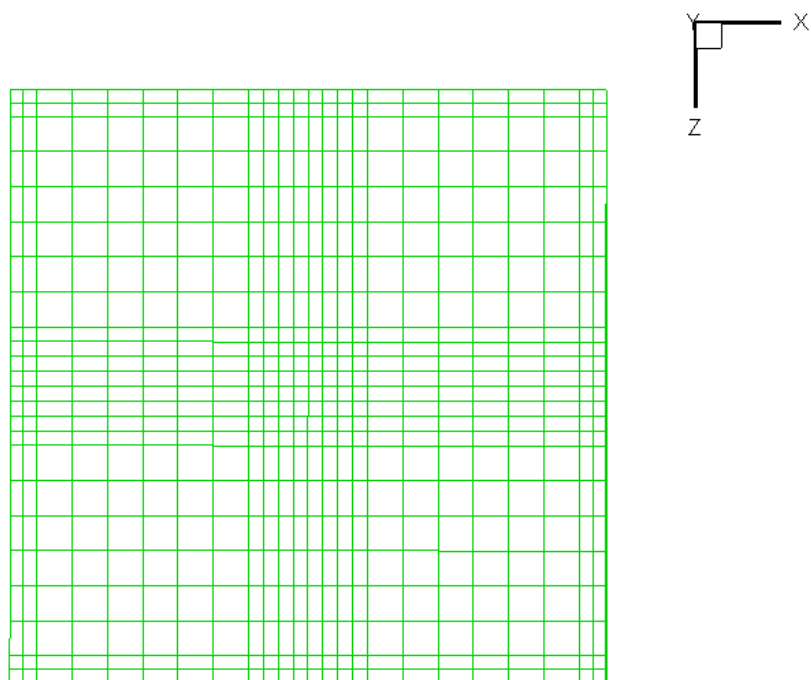
τουλάχιστον 10 κελιά και η ανάλυση του πλέγματος να ορίζεται τουλάχιστον στο 1/10 της κλίμακας του κύβου [73]. Ακόμα, στα σύνορα του κύβου (πλευρικά τοιχώματα, οροφή και έδαφος) θα πρέπει να επιλέγεται ακόμα πιο πυκνή διακριτοποίηση, καθώς εκεί μεταβάλλεται απότομα το πεδίο ροής.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε κύβος με εικοσιτέσσερα κελιά σε κάθε πλευρά και κατεύθυνση, καθώς διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός αυτός των κελιών είναι αρκετά αποδοτικός, αφού προσφέρει σχεδόν την ίδια λύση με δοκιμές πυκνότερου πλέγματος, έχοντας ταυτόχρονα πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Η επιλογή του πλέγματος έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε, πρώτον να εναρμονίζεται με τις απαιτήσεις της βιβλιογραφίας για πύκνωση σε συγκεκριμένες περιοχές (σύνορα) του κύβου, και δεύτερον για να μπορεί να καλύψει οποιαδήποτε περίπτωση μελέτης (κύβος χωρίς ανοίγματα, κύβος με ανοίγματα κτλ).

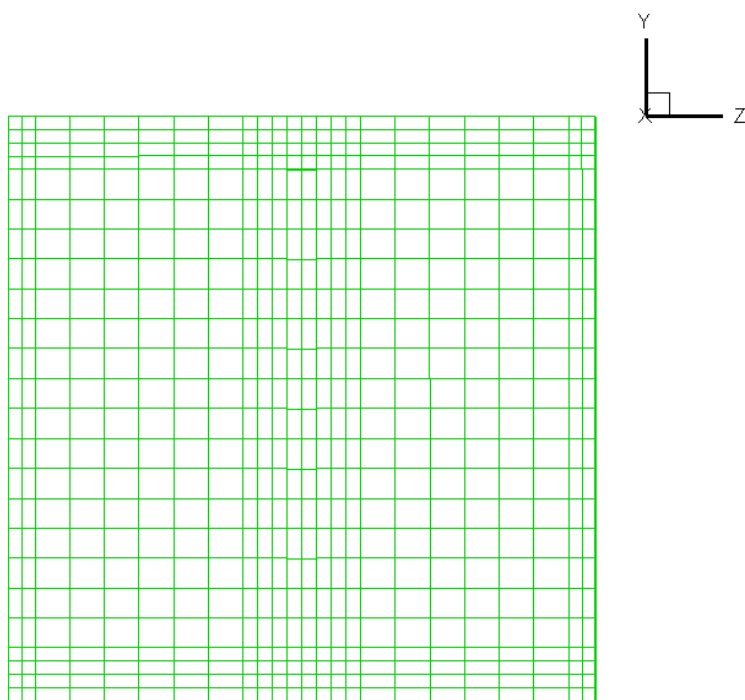
Παρακάτω (Σχήμα 7.8-Σχήμα 7.10) φαίνεται η διακριτοποίηση του κύβου σε τρία επίπεδα ( $xy$ ,  $xz$ ,  $yz$ ). Βλέπουμε ότι, η πύκνωση στο επίπεδο του εδάφους και την οροφή είναι μεγαλύτερη από την πύκνωση στα πλευρικά τοιχώματα, καθώς στα πρώτα απαιτείται ακόμα πιο υψηλή ανάλυση πλέγματος. Ακόμα, έχει επιλεγεί πύκνωση του πλέγματος και στην περιοχή της κατακόρυφης στήλης τετραγωνικής διατομής (στερεό σώμα) που βρίσκεται στο κέντρο του κύβου.



Σχήμα 7.8. Διακριτοποίηση του κύβου στο επίπεδο  $z$  (κατά την κατεύθυνση της ροής).



Σχήμα 7.9. Διακριτοποίηση του κύβου στο επίπεδο y (κάτοψη).



Σχήμα 7.10. Διακριτοποίηση του κύβου στο επίπεδο x (πλευρικά).

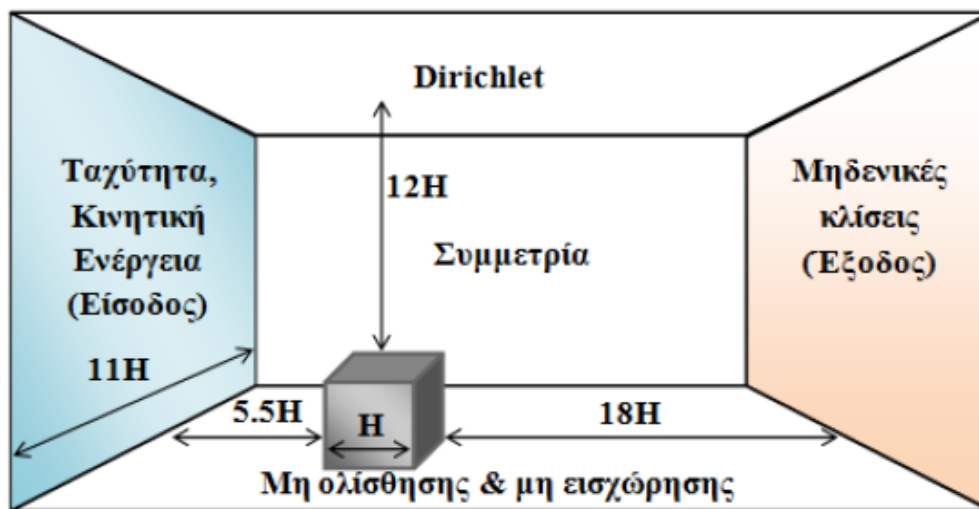


### 7.5.1.2 Υπολογιστικού χωρίου

Για την κατασκευή του πλέγματος του υπολογιστικού χώρου, προκρίνεται η εξής μέθοδος για την περίπτωση της μελέτης ροής ενός απομονωμένου κτηρίου: το άνω όριο του υπολογιστικού χωρίου τίθεται ίσο με  $5H$  ή παραπάνω, όπου  $H$  το ύψος του κτηρίου. Κατά τη  $x$  κατεύθυνση, πίσω από το κτήριο, το μήκος πρέπει να είναι τουλάχιστον  $10H$ , ενώ κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (πλευρικά του κτηρίου) να εκτείνεται περίπου κατά  $5H$ . [73]

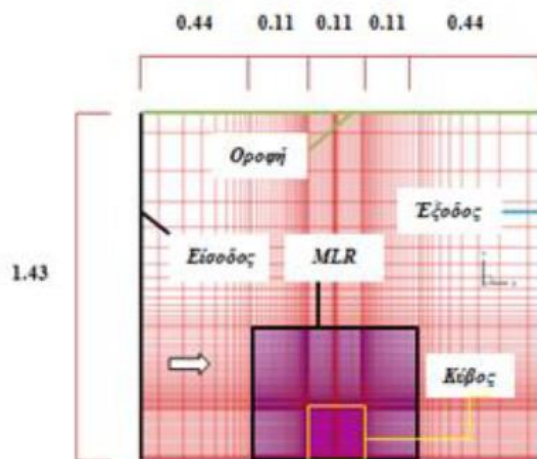
Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, επιλέχθηκε το υπολογιστικό πεδίο να εκτείνεται κατά  $12H$  (396 m) πάνω από τα όρια του κύβου και κατά  $5H$  (165 m) από κάθε πλευρικό όριο του κύβου στην εγκάρσια κατεύθυνση. Κατά την κατεύθυνση της ροής, επιλέγεται χώρος ίσος με  $5,5H$  (181,5 m) πριν τον κύβο και  $18H$  (594 m) πίσω από τον κύβο, προκειμένου οι οριακές συνθήκες να εφαρμόζονται ομαλά και να μην επηρεάζονται τα πεδία ροής από τυχόν περιορισμένα υπολογιστικά όρια.

Έτσι καταλήγουμε σε ένα υπολογιστικό πεδίο μεγέθους  $808,5\text{m} \times 429\text{m} \times 363\text{m}$  (μήκος  $\times$  ύψος  $\times$  πλάτος) με συνολικό αριθμό κελιών  $\approx 1,76 \times 10^6$  αποτελούμενο από  $151 \times 100 \times 117$  κόμβους (μήκος  $\times$  ύψος  $\times$  πλάτος), το οποίο φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 7.11. Διαστάσεις υπολογιστικού χώρου κατά την κατεύθυνση του ανέμου. [66]

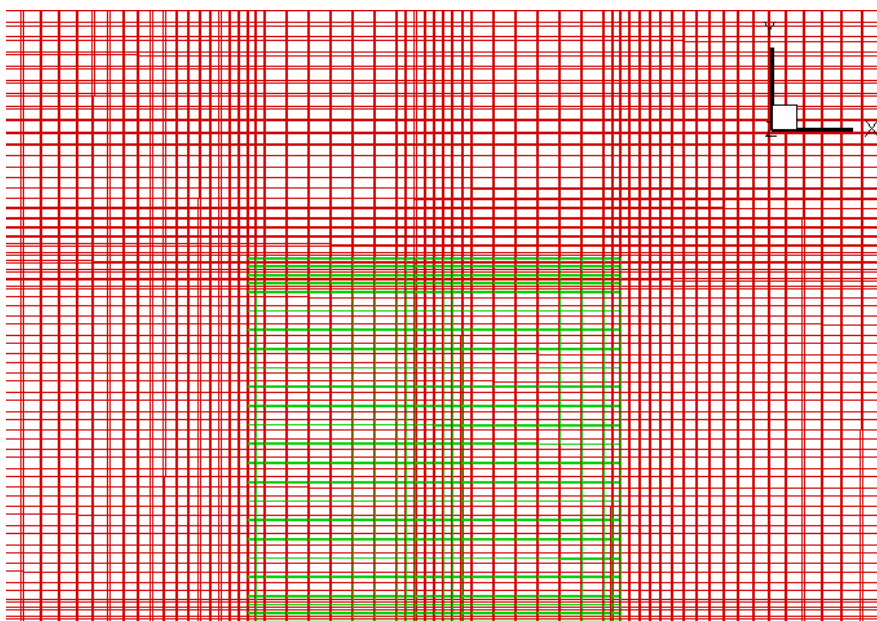
Κατά τη διακριτοποίηση αυτού του πεδίου χρησιμοποιείται και η μεθοδολογία της πολλαπλής τοπικής πυκνώσης (Multi-Local Refinement, MLR) [67]. Όσο η ροή πλησιάζει τα όρια του κύβου, έχουμε απότομη αλλαγή της μορφολογίας και συνεπώς του πεδίου ροής. Η πλεγματική ανάλυση πρέπει να είναι όλο και πιο υψηλή, έτσι ώστε να μην υπάρχουν αποκλίσεις στα αποτελέσματα του πεδίου ροής σε αυτή την περιοχή. Συνεπώς, επιλέγεται πιο πυκνό πλέγμα κατά  $1,5H$  πάνω από τον κύβο και κατά  $1H$  πέρα από κάθε άλλη πλευρά του κύβου, όπως βλέπουμε και παρακάτω:



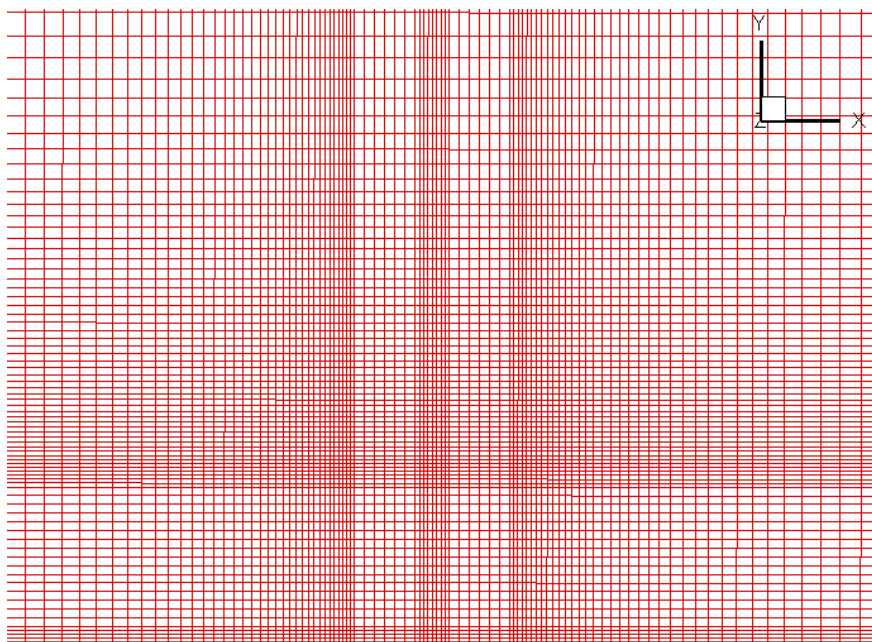
Σχήμα 7.12. Υπολογιστικό πλέγμα με τη μέθοδο MLR κατά το επίπεδο yz. [67]

[Η παραπάνω αναπαράσταση στο Σχήμα 7.12 αναφέρεται σε υπολογιστικό χώρο κατασκευασμένο για τις ανάγκες της προσομοίωσης της ροής στην αεροσήραγγα, αλλά η μορφολογία του πλέγματος είναι η ίδια]

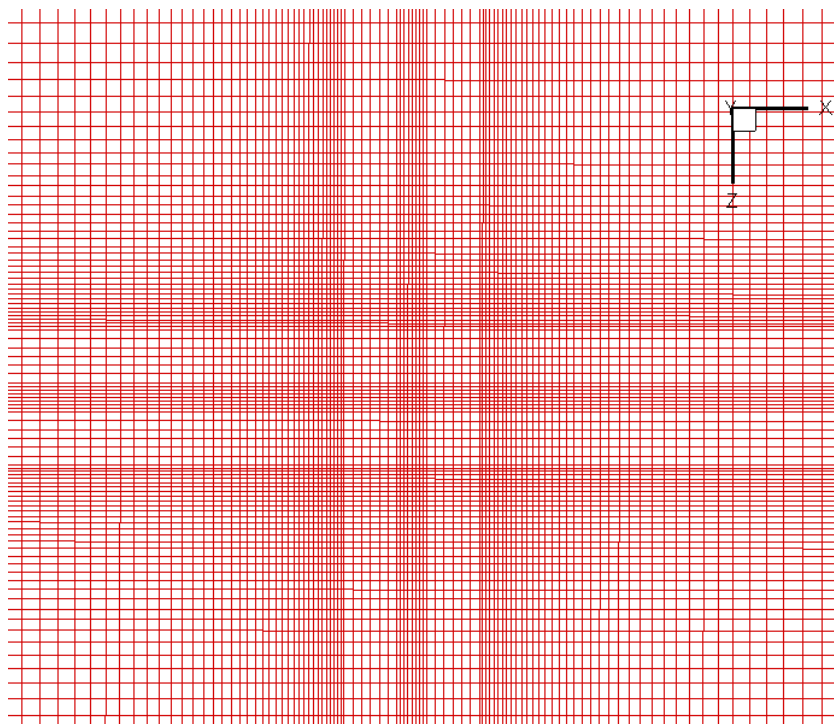
Σημαντικό, επίσης, είναι να εξασφαλίζεται συμμετρία του πλέγματος κατά την εγκάρσια κατεύθυνση εκατέρωθεν του κύβου (κατά z), αλλά και να υπάρχει σημαντική πύκνωση στην περιοχή της οροφής, όπως και ανάντι και κατάντι του κύβου, όπου αργότερα θα τοποθετηθεί βλάστηση και αναμένουμε περιοχές ανακυκλοφορίας, οπότε απαιτείται υψηλή ανάλυση. Στα σχήματα παρακάτω βλέπουμε τη μορφή του πλέγματος στην περιοχή του κύβου και της τοπικής πύκνωσης πλησίον αυτού.



Σχήμα 7.13. Διακριτοποίηση του κύβου (πράσινο χρώμα) και περιοχής γύρω από αυτόν (κατά την κατεύθυνση της ροής).



Σχήμα 7.14. Διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου στην περιοχή του κύβου και γύρω από αυτόν (κατά την κατεύθυνση της ροής).



Σχήμα 7.15. Διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου στην περιοχή του κύβου και γύρω από αυτόν (κάτοψη).

### 7.5.2 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Σύμφωνα με τους Hargreaves & Wright [44], στο κάτω όριο του πεδίου επιβάλλεται συνάρτηση τοιχώματος. Στα πλαϊνά τοιχώματα επιβάλλεται άξονας συμμετρίας, ενώ στο άνω όριο επιβάλλονται οι καταστάσεις μεσοκλίμακας που επικρατούν εκτός αυτού και θεωρούνται σταθερές. Επιβάλλεται δηλαδή μία συνθήκη Dirichlet. Στην έξοδο, οι μεταβλητές ακολουθούν οριακές συνθήκες Neumann.

Σε θερμοκρασία  $T = 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , θεωρούμε τα εξής χαρακτηριστικά για τον αέρα και το Plexiglass:

	Πυκνότητα $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ (J/kgK)	Δυναμική συνεκτικότητα $\mu$ (kg/ms)
Αέρας	1,16	1007	1,817E-05
Plexiglass	2.242	840	5,679

Πίνακας 7.2. Τιμές φυσικών παραμέτρων . [74]

Ο αριθμός Prandtl για συνθήκες αέρα ορίζεται ίσος με 0,7134.

Η αρχική ταχύτητα όλου του πεδίου είναι επιλεγμένη από προηγούμενη λύση παρόμοιου προβλήματος (ροή σε υπολογιστικό χωρίο με μεμονωμένο κτήριο) και ορίζεται  $U = 0,1 \text{ m/s}$ . Οι συνιστώσες  $V, W$  είναι αρχικά μηδενικές. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των ταχυτήτων στο πεδίο ροής έχουν αδιαστατοποιηθεί, διαιρούμενες με την τιμή της ταχύτητας στην ανάντη ελεύθερη ροή του πεδίου,  $U_{ref} = 5 \text{ m/s}$ . [75]

[Όλα τα παραπάνω δεδομένα που αφορούν αρχικές, οριακές συνθήκες και τιμές ορίζονται στον κώδικα κατά την υπολογιστική διαδικασία μέσω του αρχείου DCAFFCA3D.]

### 7.5.3 Συντελεστές υποχαλάρωσης

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 6, σημαντική παράμετρος για τη σύγκλιση του κώδικα, την ταχύτητα σύγκλισης και την εφαρμογή των αριθμητικών σχημάτων αποτελούν οι συντελεστές υποχαλάρωσης που χρησιμοποιούνται για τις υπολογιζόμενες μεταβλητές. Σύμφωνα με τους R.M. Barron και Ali A. Salehi Neyshabouri [76], τη διπλωματική εργασία της Α. Καλογεράκη [4], καθώς και την προσωπική εμπειρία από τις δοκιμές κατά την υπολογιστική προσομοίωση της παρούσας εργασίας, τελικώς προτείνονται οι παρακάτω τιμές για τους συντελεστές υποχαλάρωσης των υπολογιζόμενων μεγεθών (χρήση υβριδικού σχήματος):

	URF(U,V,W) (velocity)	URFP (pressure)	URFK (turbulent kinetic energy)	URFE (dissipation of TKE)	URFT (temperature)	URFVIS (viscosity)	URFDEN (density)
Συντελεστές υποχαλάρωσης	0,8	0,8	0,2	0,2	1	0,5	0,9

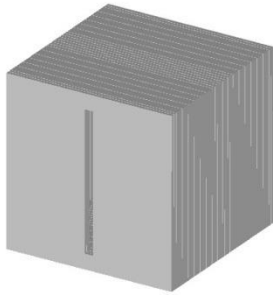
Πίνακας 7.3. Προτεινόμενοι συντελεστές υποχαλάρωσης. [4][76]

## 7.6 Τοποθέτηση βλάστησης στον πρότυπο κύβο

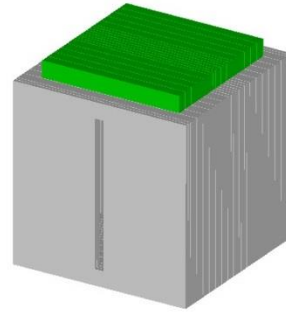
Στην παρούσα εργασία, θα γίνει προσπάθεια να εντοπιστούν οι επιδράσεις της ύπαρξης βλάστησης πάνω στον κύβο – κτήριο κι εντός του υπολογιστικού χώρου που αναλύθηκε παραπάνω, τόσο στο πεδίο ροής όσο και στις πιέσεις που ασκούνται στα τοιχώματά του κτηρίου (aerodynamic effects). Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί ήδη, κρίνεται δόκιμο να μοντελοποιηθεί η βλάστηση είτε ως σειρές θάμνων ή δεντροστοιχίες σε δύο όψεις: την οροφή του κύβου (πράσινες ταράτσες) και την πρόσοψη (πράσινες προσόψεις). Το ύψος της βλάστησης επιλέγεται ίσο με **0,1H**, όπου H το ύψος του κύβου, δηλαδή 3,3 m. Πρόκειται, δηλαδή, για φυτά αρκετά μεγάλου μεγέθους που στην πραγματικότητα απαιτούν υψηλό κόστος και ειδική στατική μελέτη, όμως αναμένεται να έχουν και μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι διαφορετικές διατάξεις βλάστησης πάνω στον κύβο που θα μελετηθούν εν συνεχεία:

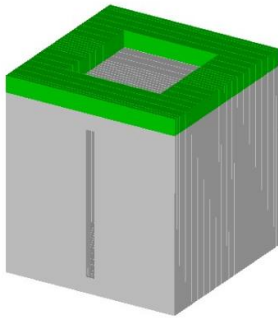
- A** – Βλάστηση στο κέντρο της οροφής
- B** – Βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής
- C** – Βλάστηση στην οροφή σε μορφή περιφραξής (τέσσερις σειρές θάμνων σε τετραγωνικό σχηματισμό)
- D** – Βλάστηση στην οροφή σε μορφή δεντροστοιχίας (ή μονής σειράς θάμνων)
- E** – Βλάστηση σε όλη την επιφάνεια της πρόσοψης (ανάντι τοίχος)
- F** – Βλάστηση ως κατακόρυφες λωρίδες στα άκρα της πρόσοψης
- G** – Βλάστηση στο ανάντι άκρο της οροφής σε μορφή δεντροστοιχίας (ή μονής σειράς θάμνων)



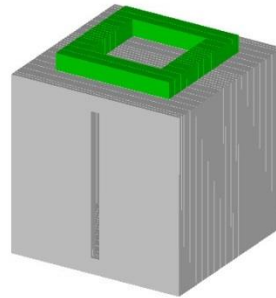
Χωρίς βλάστηση



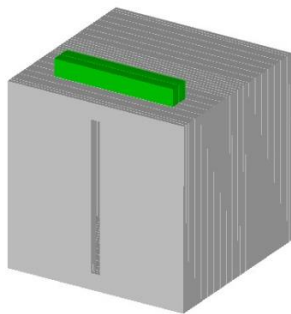
Βλάστηση Α



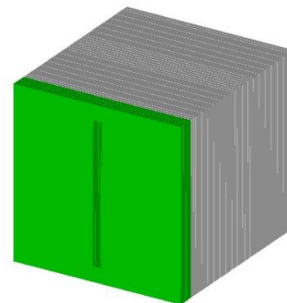
Βλάστηση Β



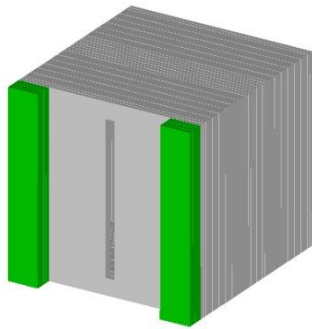
Βλάστηση C



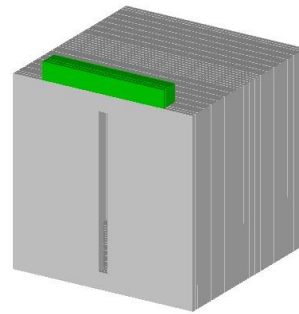
Βλάστηση D



Βλάστηση E



Βλάστηση F



Βλάστηση G

**Σχήμα 7.16.** Διατάξεις της βλάστησης στον κύβο - κτήριο





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Αποτελέσματα

### 8.1 Πεδίο ροής σε χωρίο με ομογενή βλάστηση

Σε αυτό το σημείο, προκειμένου να διαπιστώσουμε την αποδοτικότητα του μοντέλου k-ε στο πεδίο ροής, θα γίνει προσομοίωση του τυρβώδους οριακού στρώματος μέσα και πάνω από μία περιοχή ομογενούς βλάστησης (LAD = σταθερό), καθώς και σύγκριση με τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης του μοντέλου των Svensson & Häggkvist [77] και του μοντέλου RNG για την ίδια περίπτωση. Θα επιχειρηθεί να επαληθευτεί η επίδραση των πρόσθετων όρων λόγω της βλάστησης στις εξισώσεις ορμής, τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ρυθμού καταστροφής της, που περιγράφηκαν παραπάνω.

Το χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό χωρίο έχει διαστάσεις 1.870m x 370m x 134,25m (μήκος x πλάτος x ύψος) και εμπεριέχει μόνο μία περιοχή ομογενούς βλάστησης διαστάσεων 370m x 370m x 2,5m. Η βλάστηση, οπότε, επεκτείνεται σε όλη την κατά πλάτος περιοχή. Η απόσταση της βλάστησης από την είσοδο είναι 20 m, ενώ στο πίσω μέρος (κατά την οριζόντια κατεύθυνση) υπάρχει ένας κενός χώρος 1.480 μέτρων. Για τις ανάγκες της υπολογιστικής μεθόδου, κατασκευάζεται πλέγμα 260 x 80 x 80 κόμβων, ενώ η περιοχή της βλάστησης καταλαμβάνει 100 x 30 x 80 κόμβους κατά τις τρεις κατευθύνσεις. Έχει γίνει πυκνώση πλέγματος στις παρυφές της βλάστησης, με ακόμα υψηλότερη ανάλυση στο βόρειο και νότιο σύνορο.

Όσον αφορά τα τοιχώματα, πλευρικά επιλέγονται συμμετρικές συνοριακές συνθήκες, στο έδαφος έχουμε στερεό όριο (συνθήκες τοιχώματος), ενώ στο άνω όριο επιβάλλεται συνθήκη Dirichlet (καταστάσεις μεσοκλίμακας που επικρατούν εκτός αυτού). Η είσοδος του αέρα γίνεται από αριστερά και έχει οριζόντια κατεύθυνση, συνεπώς προσκρούει κάθετα στην περιοχή της βλάστησης.

Το προφίλ εισόδου περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω. [77]

Η οριζόντια ταχύτητα στην είσοδο προσομοιώνεται συναρτήσει του ύψους  $z$  με βάση τη σχέση:

$$U(z) = U_0(z/\delta_0)^{1/7} \quad (8.1)$$

όπου  $U_0 = 10 \text{ m/s}$

$\delta_0 = 110 \text{ m}$

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια δίνεται ως:

$$k(z) = k_0(L_z - z)/L_z \quad (8.2)$$

όπου  $k_0 = 1,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$

$L_z = 134,25 \text{ m}$  (συνολικό ύψος του υπολογιστικού χωρίου)

Ο ρυθμός καταστροφής της ΤΚΕ υπολογίζεται ως:

$$\varepsilon(z) = 0,41k(z)^{3/2}/z \quad (8.3)$$

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η σχέση:

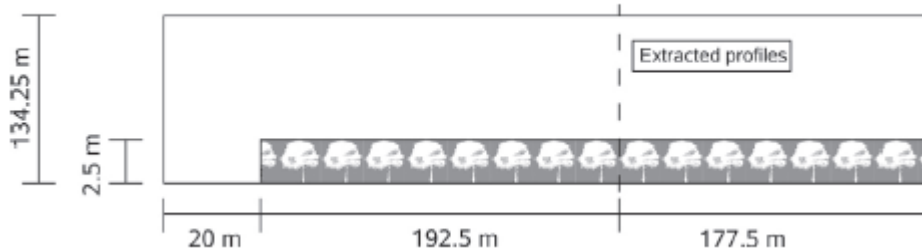
$$\varepsilon(z) = k^{1,5} C_\mu^{0,75} / (0,41z) \quad (8.4)$$

όπου  $C_\mu = 0,09$

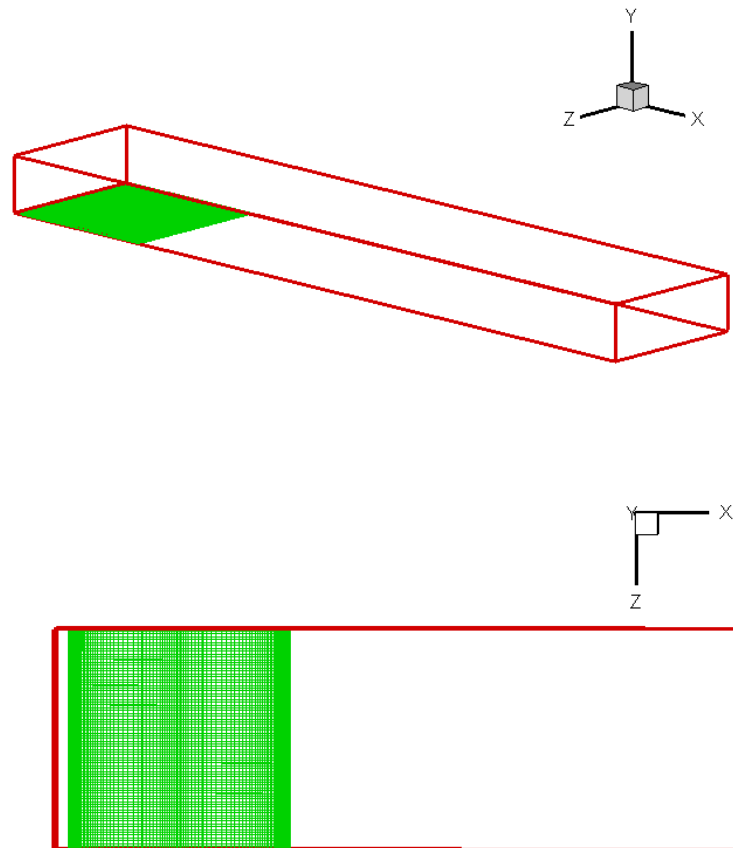
Στην τελευταία σχέση, για πολύ μικρά ύψη ( $z < 1 \text{ m}$ ) θεωρούμε  $z = 1 \text{ m}$ .

Η περιοχή της βλάστησης, τέλος, είναι ορθογώνιου σχήματος με παραμέτρους  $LAD = 2,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  και  $C_D = 0,15$ .

Στο Σχήμα 8.1 και Σχήμα 8.2 φαίνεται ένα τμήμα της διάταξης της βλάστησης στον υπολογιστικό χώρο και η αναπαράσταση της συνολικής γεωμετρίας στο πρόγραμμα Tecplot.

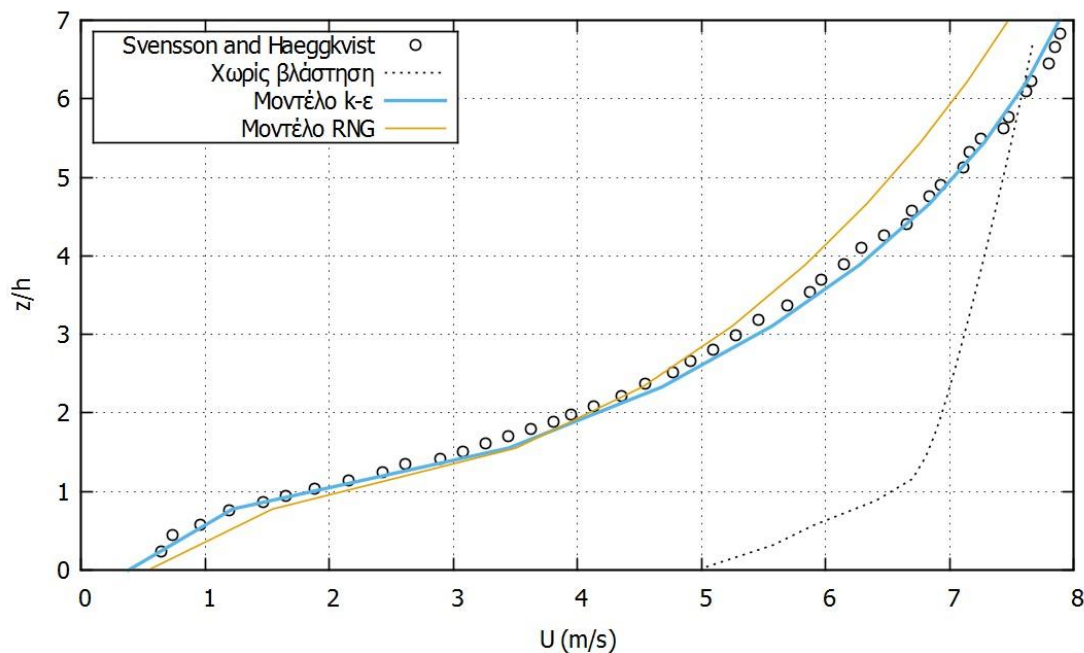


Σχήμα 8.1. Υπολογιστικό χωρίο και ομογενής βλάστηση (Svensson & Häggkvist). [5]

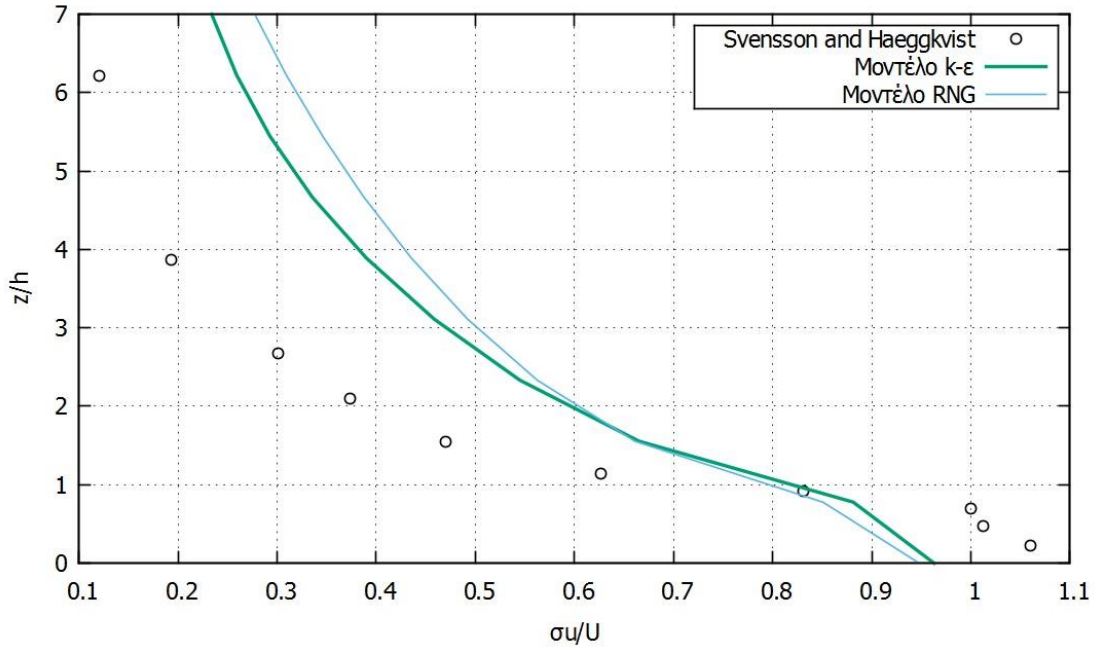


Σχήμα 8.2. Το υπολογιστικό χωρίο στο περιβάλλον Tecplot. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται η περιοχή της βλάστησης, με κόκκινο τα όρια του υπολογιστικού πεδίου.

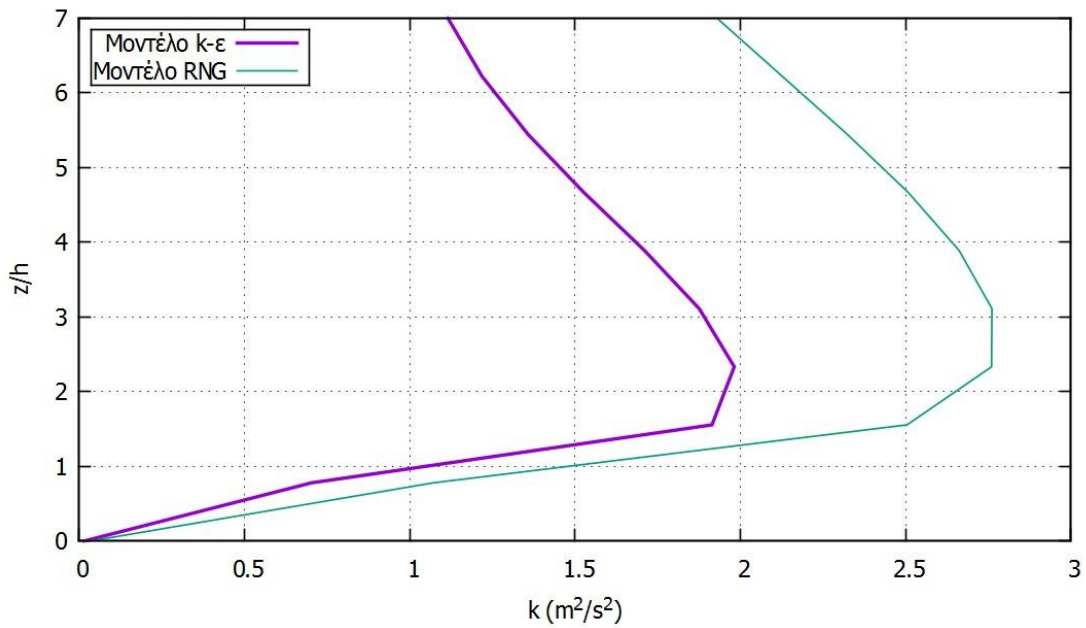
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πιστοποιούν ότι στην περιοχή της βλάστησης αλλά και για αρκετά μεγάλο ύψος πάνω από αυτή η οριζόντια ταχύτητα είναι εμφανώς μειωμένη εξαιτίας της αεροδυναμικής αντίστασης. Για την ακρίβεια, η καθ' ύψος ταχύτητα επανέρχεται στα επίπεδα της αδιατάρακτης ροής (κενό πεδίο) μετά τα 5,5 ύψη βλάστησης (Σχήμα 8.3). Υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του κώδικα που χρησιμοποιήσαμε (μοντέλο k-ε) και της προσομοίωσης των Svensson & Häggkvist. Ακόμα, παρατηρείται αρκετά μεγάλη διακύμανση της οριζόντιας ταχύτητας στην περιοχή της βλάστησης, που φθίνει απότομα όταν απομακρυνόμαστε από αυτή και σχεδόν μηδενίζεται στην περιοχή της αδιατάρακτης ροής (Σχήμα 8.4). Χρησιμοποιώντας το μοντέλο RNG αντί των δύο εξισώσεων k-ε παρατηρούμε κάποια περαιτέρω μικρή μείωση της καθ' ύψους ταχύτητας σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Επίσης, δίνει σημαντικά μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης (Σχήμα 8.5). Θα μπορούσαμε να καταλήξουμε ότι το RNG δείχνει μεγαλύτερη επίδραση των αεροδυναμικών φαινομένων συγκριτικά με το k-ε.



**Σχήμα 8.3.** Η ταχύτητα της ροής σε πεδίο με ομογενή βλάστηση ( $LAD = 2,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,  $C_D = 0,15$ ) για  $x = 192,5 \text{ m}$ . Με διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζεται η αδιατάρακτη ροή (ροή σε κενό πεδίο), ενώ με τελείες τα αποτελέσματα της μελέτης των Svensson & Häggkvist.

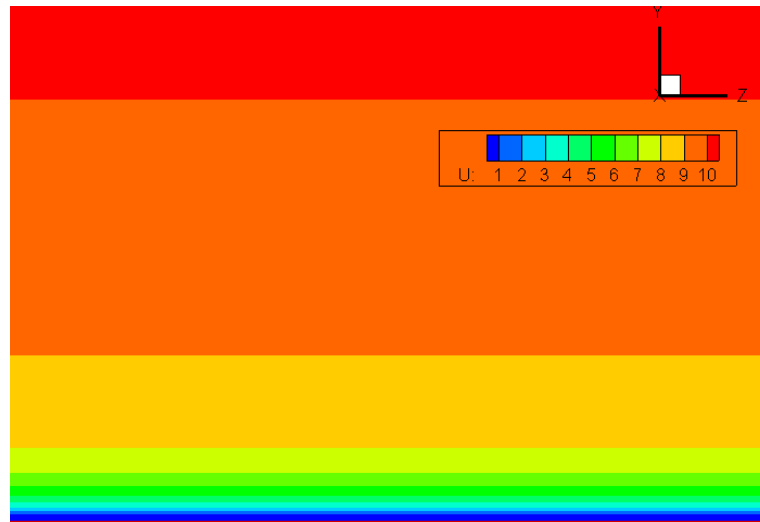


Σχήμα 8.4. Η αδιαστατοποιημένη διακύμανση της οριζόντιας ταχύτητας σε πεδίο με ομογενή βλάστηση ( $LAD = 2,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,  $C_D = 0,15$ ) για  $x = 192,5 \text{ m}$ .



Σχήμα 8.5. Τα επίπεδα τύρβης καθ' ύψος του υπολογιστικού πεδίου για τα δύο μοντέλα τύρβης k-ε και RNG ( $x = 192,5 \text{ m}$ ).

Παρακάτω (Σχήμα 8.6) παρατίθεται η κατατομή της ταχύτητας του πεδίου καθ' ύψος του υπολογιστικού χωρίου όπως εξήχθη από το Tecplot. Κάθε διαφορετικό επίπεδο ταχύτητας παρουσιάζεται με ξεχωριστό χρώμα για ευκολότερη κατανόηση. Βλέπουμε ότι η ταχύτητα μέσα στη βλάστηση (κάτω μέρος) είναι πολύ μικρή λόγω της οπισθέλκουσας δύναμης που αναπτύσσεται εκεί και σταδιακά αυξάνεται ως την αδιατάρακτη ροή.

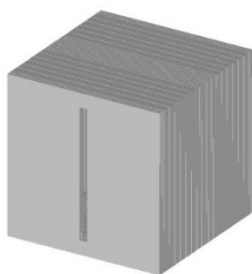


Σχήμα 8.6. Καθ' ύψος ταχύτητα του πεδίου ροής (m/s) για  $x = 192,5 \text{ m}$

Στο συγκεκριμένο πείραμα ασχοληθήκαμε με την προσομοίωση του πεδίου ροής σε χωρίο με ομογενή βλάστηση. Στην πραγματικότητα, συνήθως, η πυκνότητα του φυλλώματος αλλάζει, ιδιαίτερα όταν μιλάμε για δέντρα (διαφορετικές τιμές για το LAD). Παρόλα αυτά, γενικά στην παρούσα εργασία δεν θα μας απασχολήσει αυτή η περίπτωση, ωστόσο αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό πεδίο για μελλοντικές έρευνες.

## 8.2 Πεδίο ροής γύρω από κτήριο - Γενικά στοιχεία

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι επιδράσεις της βλάστησης επί του πρότυπου κύβου – κτηρίου του Κεφαλαίου 7 στα πεδία ροής και πιέσεων, σύμφωνα με το (προσαυξημένο) μοντέλο k-ε. Κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί η περίπτωση της ροής μόνο για **οριακό στρώμα μεγάλης διάτμησης (B)**, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το ενδιαφέρον εδώ επικεντρώνεται στις επιδράσεις της βλάστησης στα πεδία ροής και όχι στη σύγκριση των οριακών στρωμάτων μεταξύ τους. Η ταχύτητα στην αδιατάρακτη ροή είναι  $U_{ref} = 5 \text{ m/s}$ . Ο πρότυπος κύβος που θα μελετηθεί παρακάτω έχει μόνο δύο αντικριστά ανοίγματα, στην πρόσοψη και την πίσω όψη, που προσομοιώνουν την ύπαρξη παραθύρων σε ένα κτήριο, κατάλληλων για υπολογισμούς σχετικά με το φυσικό αερισμό. Ο χώρος πρασίνου θεωρείται ομογενής (σταθερό LAD σε όλη την έκτασή του). Για τη σύγκριση και την εξαγωγή συμπερασμάτων, επιλέγονται δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή πτώσης πίεσης, ή αλλιώς του γινομένου  $C_D \times LAD$ . Στη μία περίπτωση επιλέγεται από τη βιβλιογραφία μία σχετικά μικρή τιμή που συναντάμε σε αρκετές εφαρμογές, π.χ. σε δέντρα ή μέτριας πυκνότητας θάμνους ( $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ ), και στην άλλη όσο το δυνατόν μεγαλύτερη τιμή, για θάμνους πολύ πυκνού φυλλώματος ( $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ ), προκειμένου να έχουμε την καλύτερη δυνατή εποπτεία των διαφορετικών επιδράσεων.



## 8.3 Σύγκριση πίεσης σε κτήριο μικρής και μεγάλης κλίμακας

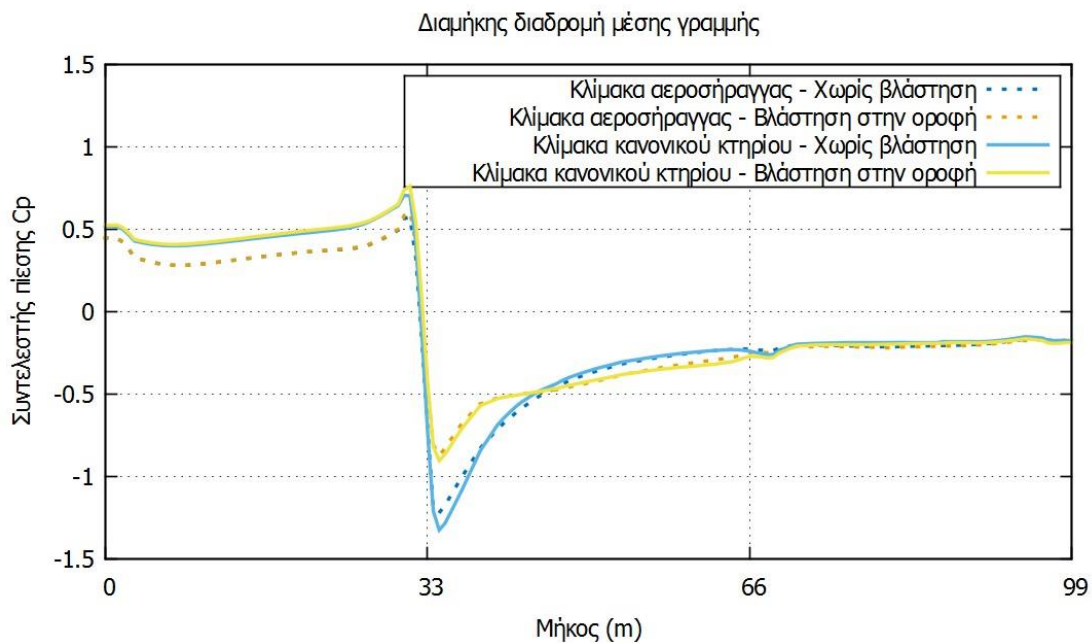
Σε προηγούμενες μελέτες που αποτέλεσαν βάση για το παρόν κείμενο, ο πρότυπος κύβος που χρησιμοποιήθηκε είχε διαστάσεις  $0,11\text{m} \times 0,11\text{m} \times 0,11\text{m}$  προκειμένου να διεξαχθεί το πείραμα στο μεγάλο χώρο δοκιμής της αεροσήραγγας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π και να γίνουν συγκρίσεις με τα υπολογιστικά αποτελέσματα [4][72].

Σε αυτή την εργασία, όμως, με σκοπό να προσδιορισθούν και να προσεγγισθούν όσο γίνεται καλύτερα οι επιδράσεις της βλάστησης πάνω σε κτήριο, επιλέχτηκε η αναπροσαρμογή του κύβου στην πραγματική κλίμακα (33m x 33m x 33m).

Χρήσιμο, όμως, θεωρήθηκε να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για την κατανομή πίεσης σε όλες τις πλευρές του κτηρίου σύμφωνα με την εκάστοτε διαδρομή μέσης γραμμής, τόσο για την περίπτωση κτηρίου χωρίς βλάστηση, όσο και για κτήριο με βλάστηση π.χ. στην οροφή. Όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση, η πτώση της πίεσης είναι συνάρτηση και της πυκνότητας του φυλλώματος:

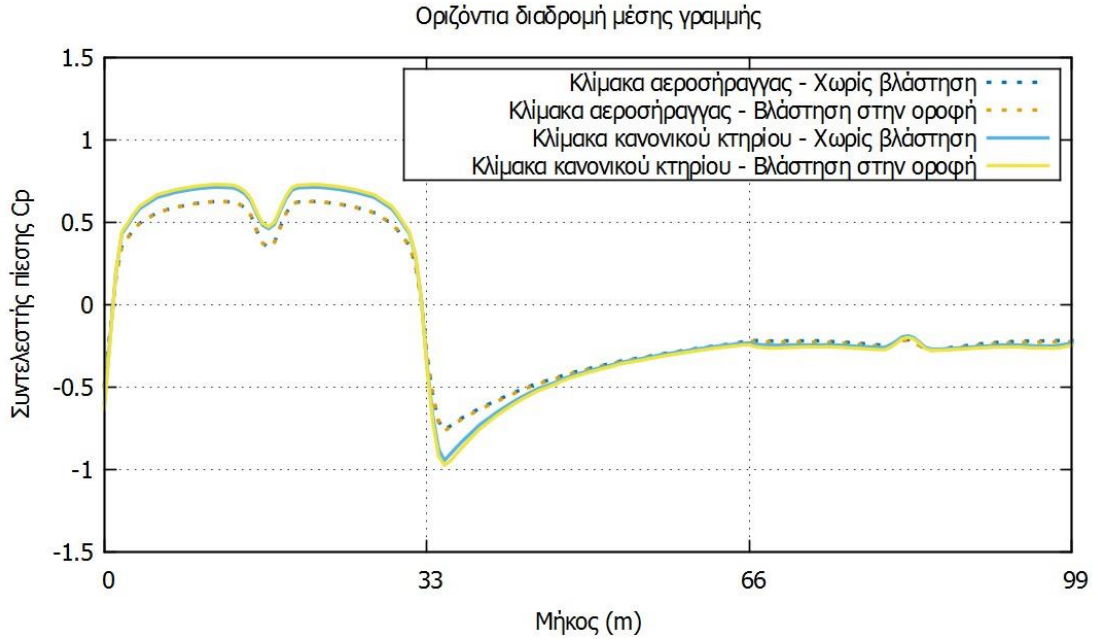
$$C_D \times LAD = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho u^2 l} \quad (8.5)$$

Συνεπώς, στην περίπτωση της μικρής κλίμακας χρειάστηκε να πολλαπλασιαστεί η ποσότητα LAD επί 300, έτσι ώστε να καταγραφεί παρόμοια επίδραση της βλάστησης στο πεδίο με αυτή της μεγάλης κλίμακας (κτήριο με διαστάσεις πρότυπου κύβου, πολλαπλασιασμένες x300). Τα αποτελέσματα της κατανομής πίεσης στη μικρή κλίμακα έχουν μεταφερθεί αυτούσια σε κοινά διαγράμματα με τα αντίστοιχα της κλίμακας 1-1 προς σύγκριση:

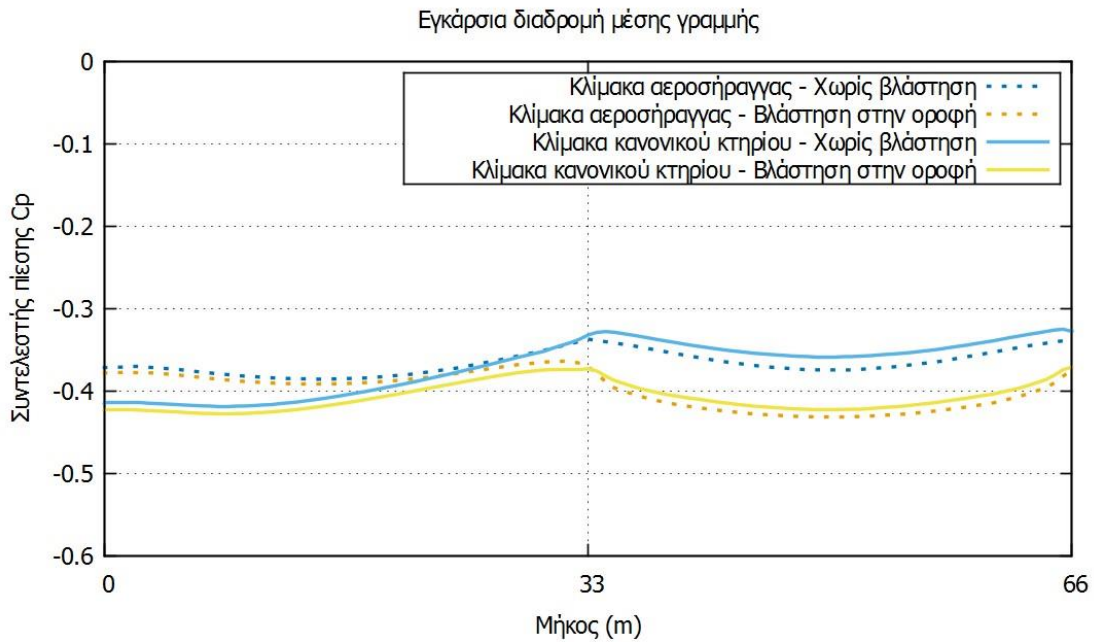


**Σχήμα 8.7.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Σύγκριση για κτήριο σε μικρή και μεγάλη κλίμακα.





**Σχήμα 8.8.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και οπίσθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Σύγκριση για κτήριο σε μικρή και μεγάλη κλίμακα.



**Σχήμα 8.9.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά, και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Σύγκριση για κτήριο σε μικρή και μεγάλη κλίμακα.

Αρχικά, χρήσιμο είναι να σχολιασθεί η μορφή των διαγραμμάτων στις τρεις υπό μελέτη διαδρομές μέσης γραμμής (διαμήκης, οριζόντια και εγκάρσια).

Στην προσήνεμη πλευρά του κτηρίου (πρόσοψη), λόγω της κατεύθυνσης του ανέμου που προσπίπτει κάθετα σε αυτή, παρατηρούνται μεγάλες περιοχές ανακοπής της ροής

(μεγάλες πιέσεις). Με απλά λόγια, η πρόσοψη λειτουργεί σε αυτή την περίπτωση ως “ασπίδα” για τους ισχυρούς ανέμους που δέχεται το κτήριο. Στην οροφή και την πλευρική επιφάνεια, εξαιτίας της αλλαγής στη γεωμετρία και των υψηλών ταχυτήτων ανέμου διακρίνονται μεγάλες περιοχές αρνητικών πιέσεων (υποπιέσεων), οι οποίες όμως προοδευτικά ανακτώνται και σταθεροποιούνται στην υπήνεμη πλευρά.

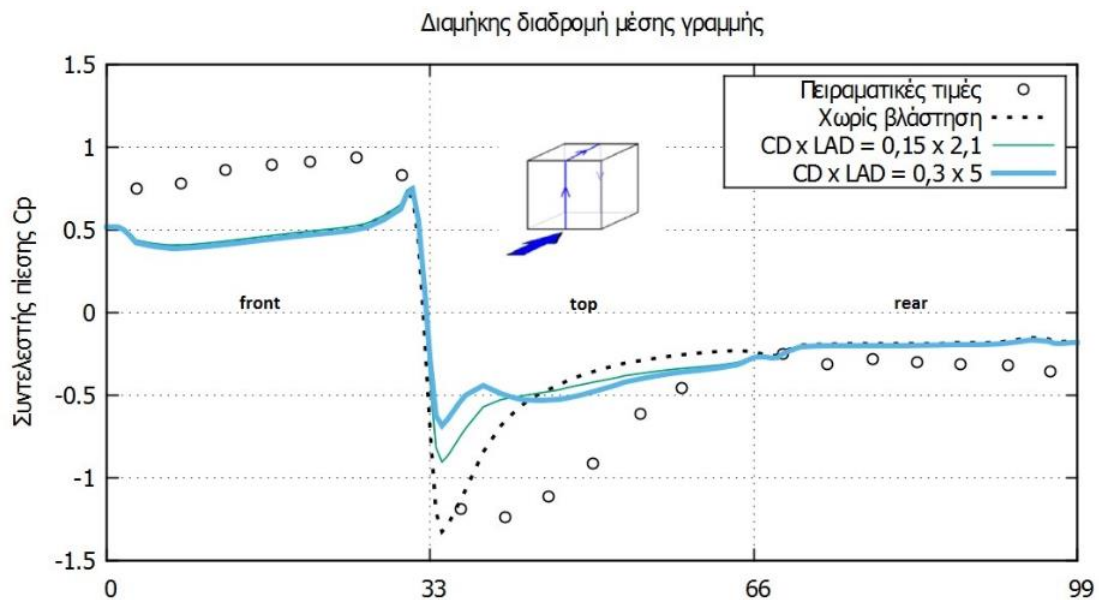
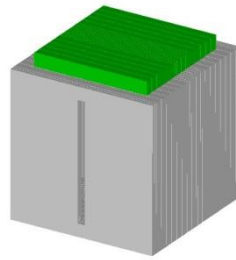
Αξίζει να αναφερθεί ότι, κατά την οριζόντια διαδρομή της μέσης γραμμής, παρατηρείται βύθιση της πίεσης στην προσήνεμη πλευρά στη θέση του ανοίγματος (η ροή στη σχισμή δεν ανακόπτεται και οι ταχύτητες σε αυτό το σημείο είναι μεγαλύτερες), και αντίστοιχα μικρή αύξηση των υποπιέσεων στην υπήνεμη πλευρά πάλι λόγω της ύπαρξης του παραθύρου.

Τώρα, σκοπός της σύγκρισης των δύο κλιμάκων είναι να επιτύχουμε ανεξαρτησία της λύσης από τις διαστάσεις του υπολογιστικού χώρου και του κύβου. Πράγματι, παρατηρούμε ότι υπάρχει αρκετά καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων για τις δύο περιπτώσεις (κλίμακα 1-1 και κλίμακα αεροσήραγγας). Οι όποιες ασυμφωνίες οφείλονται πιθανώς στον διαφορετικό αριθμό Reynolds ( $Re = uL/v$ ) των δύο περιπτώσεων (λόγω διαφορετικών διαστάσεων). Συγκεκριμένα, για την προσομοίωση σε αεροσήραγγα ισχύει  $Re_{aer} \approx 30.575$ , ενώ για μεγάλη κλίμακα  $Re_{1-1} \approx 9,17 \times 10^6$ . Ωστόσο, επειδή για  $Re > 10.000$  η λύση είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό Reynolds [19], και για τις δύο μεθόδους η ύπαρξη της βλάστησης φαίνεται να έχει την ίδια επίδραση.

#### 8.4 Σύγκριση για κτήριο με και χωρίς βλάστηση

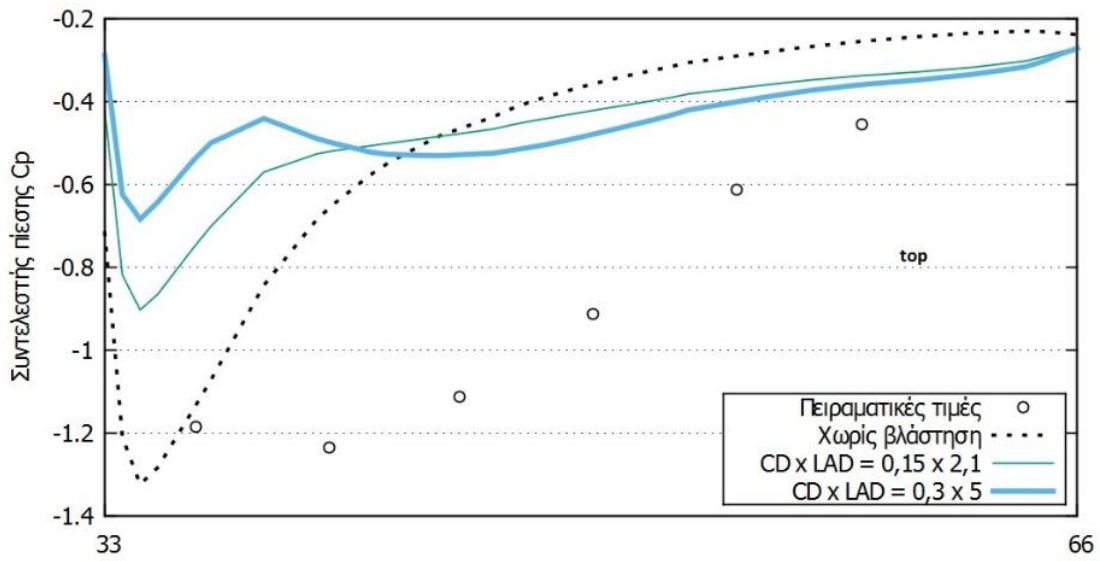
Παρακάτω, και για τις διάφορες διατάξεις της βλάστησης πάνω στον κύβο, παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή πίεσης σε όλες τις πλευρές του κτηρίου σύμφωνα με την εκάστοτε διαδρομή μέσης γραμμής. Η μελέτη και σύγκριση των συντελεστών  $c_p$  γίνεται προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της τοποθέτησης βλάστησης στο κτήριο, καθώς οι διαφορές πίεσης  $\Delta p$  σχετίζονται άμεσα με τις ασκούμενες δυνάμεις και το ρυθμό αερισμού του κτηρίου. Σκοπός εδώ είναι να συγκριθεί η πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του “γυμνού” κτηρίου (χωρίς βλάστηση) με τις αντίστοιχες ασκούμενες πιέσεις εξαιτίας της ύπαρξης του πρασίνου, αλλά και να γίνει ορατή η επίδραση της πύκνωσης του φυλλώματος (LAD) και της αεροδυναμικής αντίστασης (CD). Γι’ αυτό και παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα οι περιπτώσεις με μικρό και μεγάλο  $CD \times LAD$  (0,15 x 2,1– αραιοί θάμνοι και 0,3 x 5 – πυκνοί θάμνοι, αντίστοιχα). Οι πειραματικές τιμές παρακάτω αφορούν μελέτες που έχουν γίνει κατά το παρελθόν για κύβο χωρίς ανοίγματα στην αεροσήραγγα.

### 8.4.1 Α - Βλάστηση στο κέντρο της οροφής

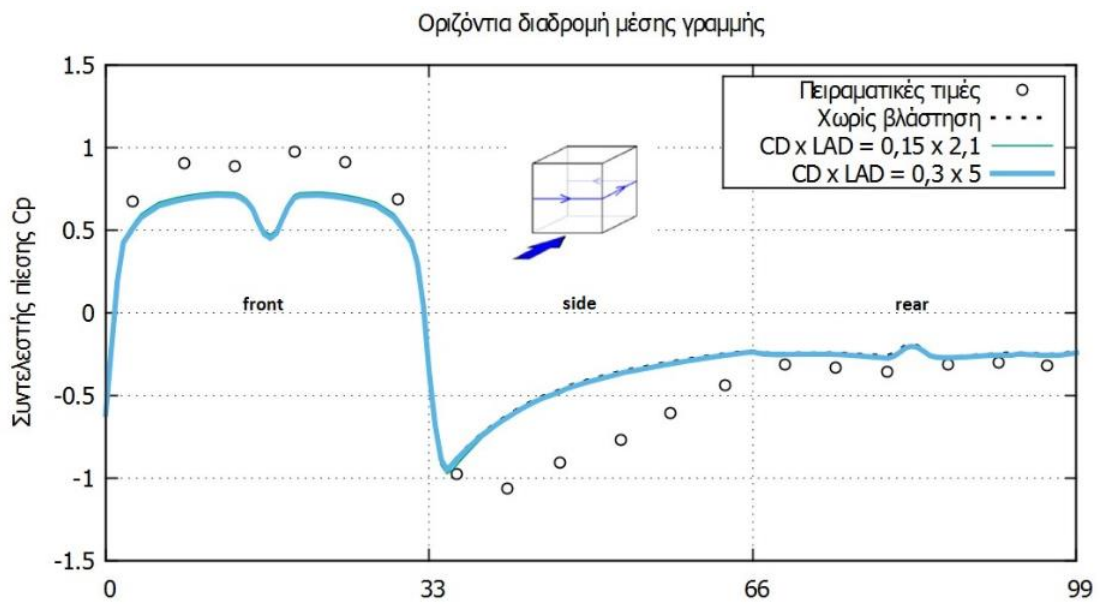


Σχήμα 8.10. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής του κτηρίου (τύπου Α).

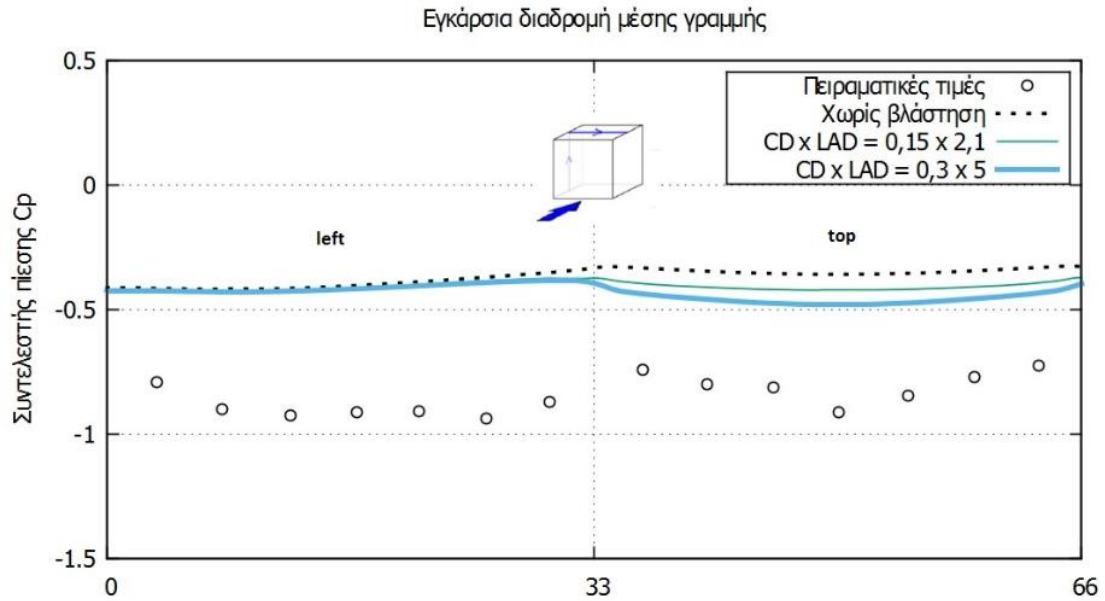
**Zoom in:**



**Σχήμα 8.11.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής του κτηρίου (τύπου Α).

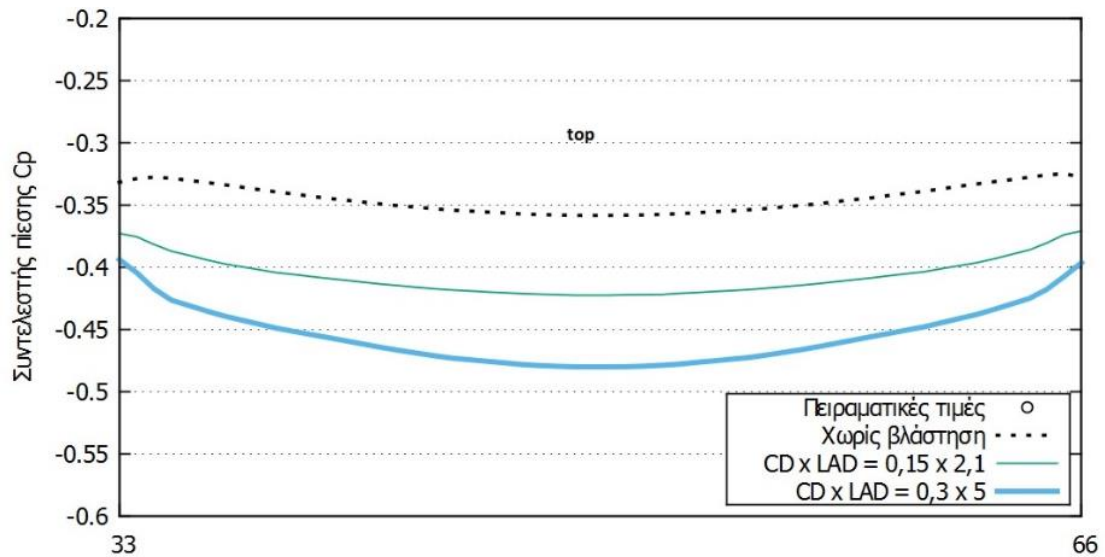


**Σχήμα 8.12.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής του κτηρίου (τύπου Α).



Σχήμα 8.13. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής του κτηρίου (τύπου Α).

**Zoom in:**



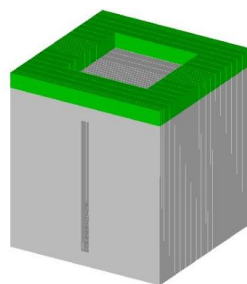
Σχήμα 8.14. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής του κτηρίου (τύπου Α).

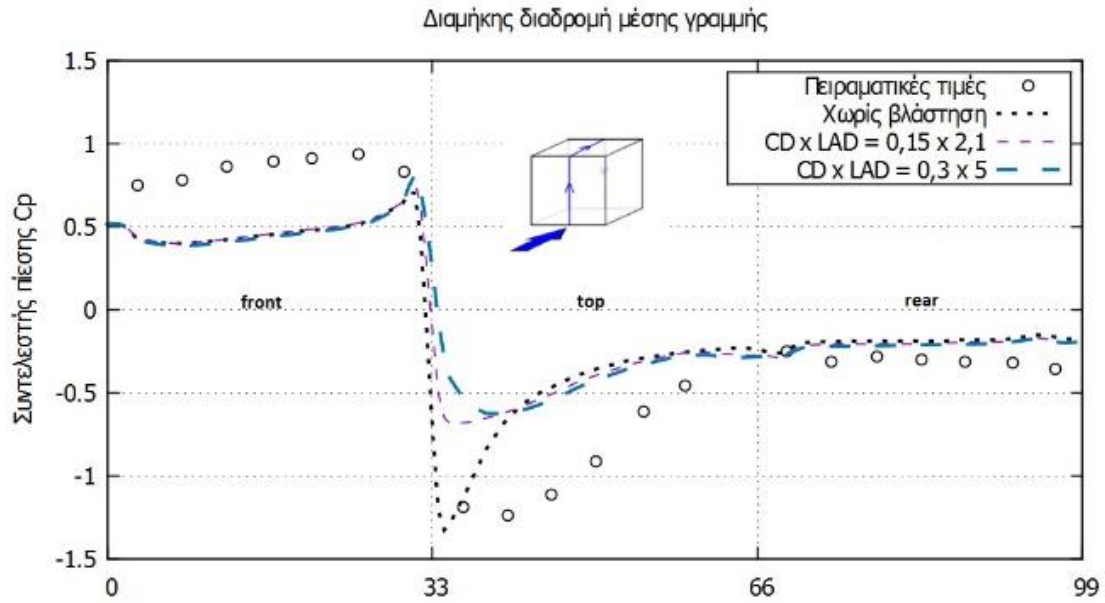
Στην περίπτωση τοποθέτησης βλάστησης στο κέντρο της οροφής, βλέπουμε ότι αυτή επηρεάζει κυρίως τις πιέσεις στα τοιχώματα αυτής.

Εξαιτίας της αλλαγής της γεωμετρίας από την προσήνεμη πλευρά προς την οροφή, παρατηρείται μεγάλη βύθιση της πίεσης στις απαρχές (edges) της οροφής, με αποτέλεσμα να ασκούνται στις επιφάνειες ισχυρά φορτία που μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στη σωστή λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού, αλλά και την ασφάλεια του κτηρίου (αντοχή των δομικών στοιχείων) σε περιπτώσεις κακοκαιρίας. Αυτή η μεγάλη πτώση πίεσης μετριάζεται μετά την τοποθέτηση της βλάστησης. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο το  $C_D \times LAD$ , τόσο μικρότερη η πτώση πίεσης στη γωνία της οροφής (Σχήμα 8.10, Σχήμα 8.11). Το γεγονός αυτό συμβάλλει θετικά στην ανθρώπινη δραστηριότητα και την ασφάλεια των πολιτών εντός και εκτός του κτηρίου. Όσο ‘προχωράμε’ πάνω στην οροφή προς το κέντρο της κατά τη διαμήκη διαδρομή, η ύπαρξη βλάστησης εκεί προκαλεί πτώση της πίεσης (λόγω του  $\lambda = C_D \times LAD$ ), η οποία είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η αεροδυναμική αντίσταση και η πυκνότητα του φυλλώματος (Σχήμα 8.11). Σταδιακά, τόσο για το ‘γυμνό’ κτήριο όσο και για κτήριο με βλάστηση, η πίεση ανακτάται, και στην υπήνεμη πλευρά τα δύο πεδία πιέσεων φαίνεται να εξισορροπούνται σε αρνητικά αλλά ήπια επίπεδα (μικρές υποπίεσεις) (Σχήμα 8.10).

Ως προς τις πιέσεις στην οροφή, στα ίδια συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του πρασίνου καταλήγουμε και κατά την εγκάρσια διαδρομή (Σχήμα 8.13, Σχήμα 8.14). Στις υπόλοιπες επιφάνειες δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη επίδραση της βλάστησης στις πιέσεις.

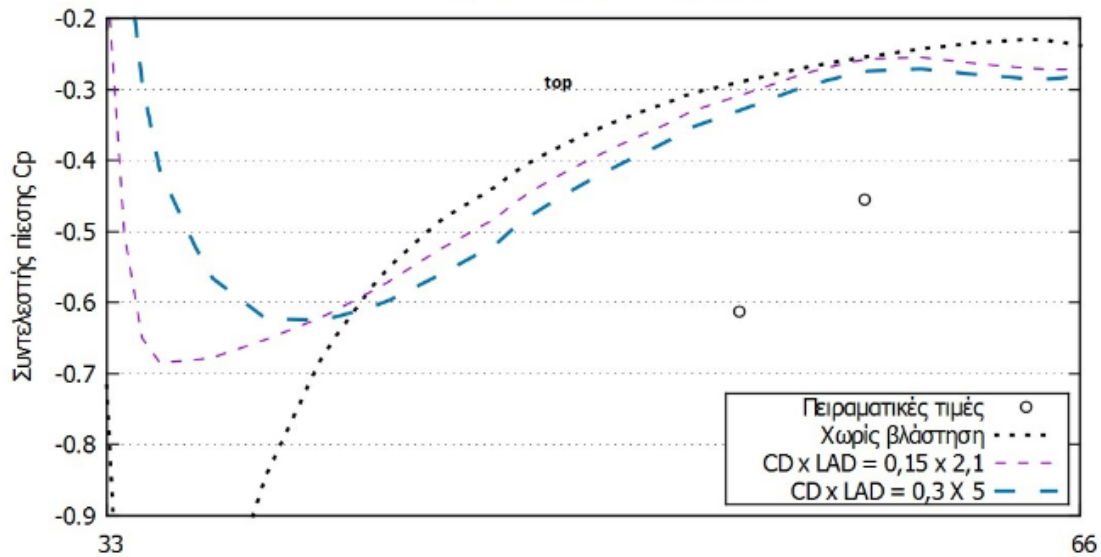
#### 8.4.2 Β - Βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής



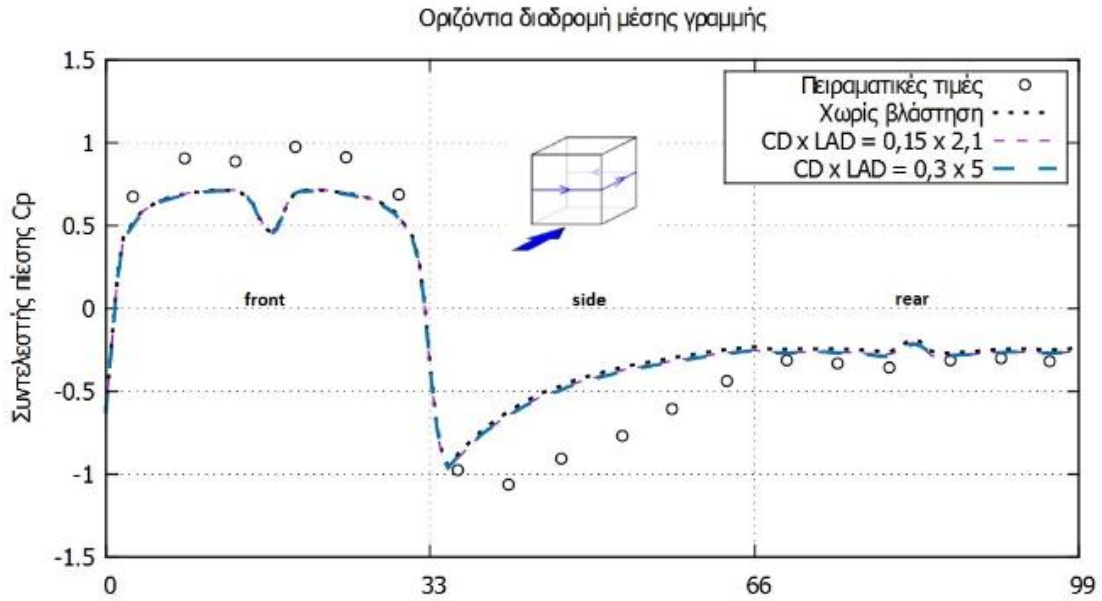


Σχήμα 8.15. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και πίσωθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής του κτηρίου (τύπου Β).

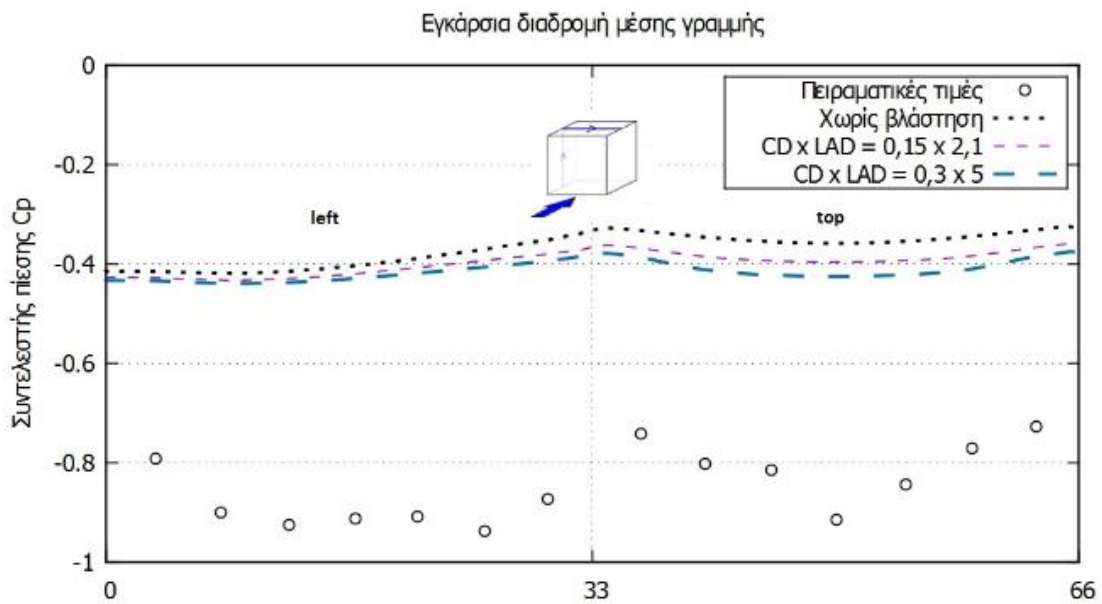
**Zoom in:**



Σχήμα 8.16. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής του κτηρίου (τύπου Β).



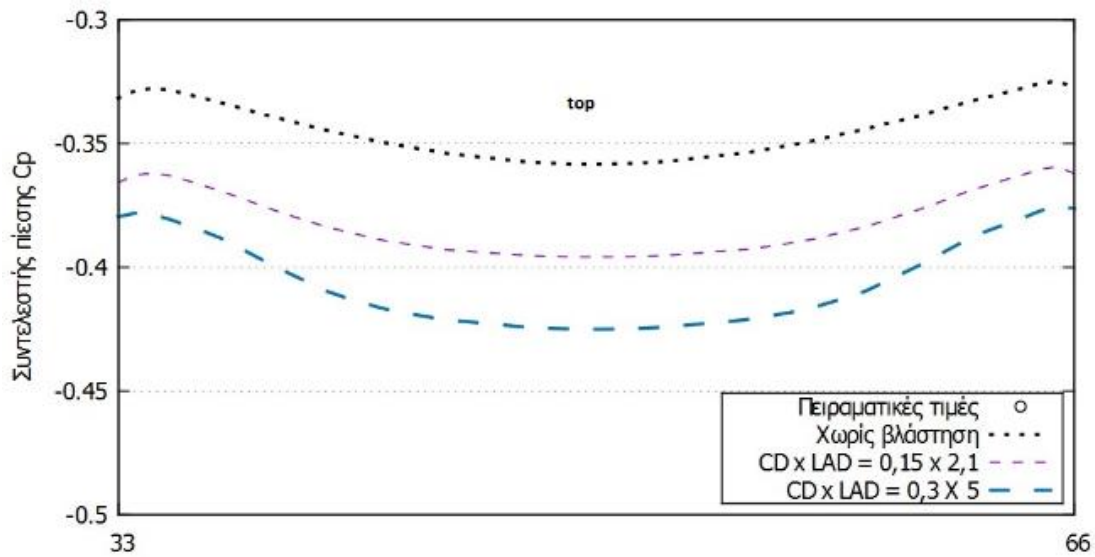
Σχήμα 8.17. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και οπίσθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής του κτηρίου (τύπου Β).



Σχήμα 8.18. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής του κτηρίου (τύπου Β).



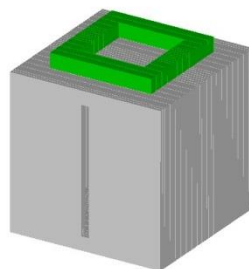
**Zoom in:**

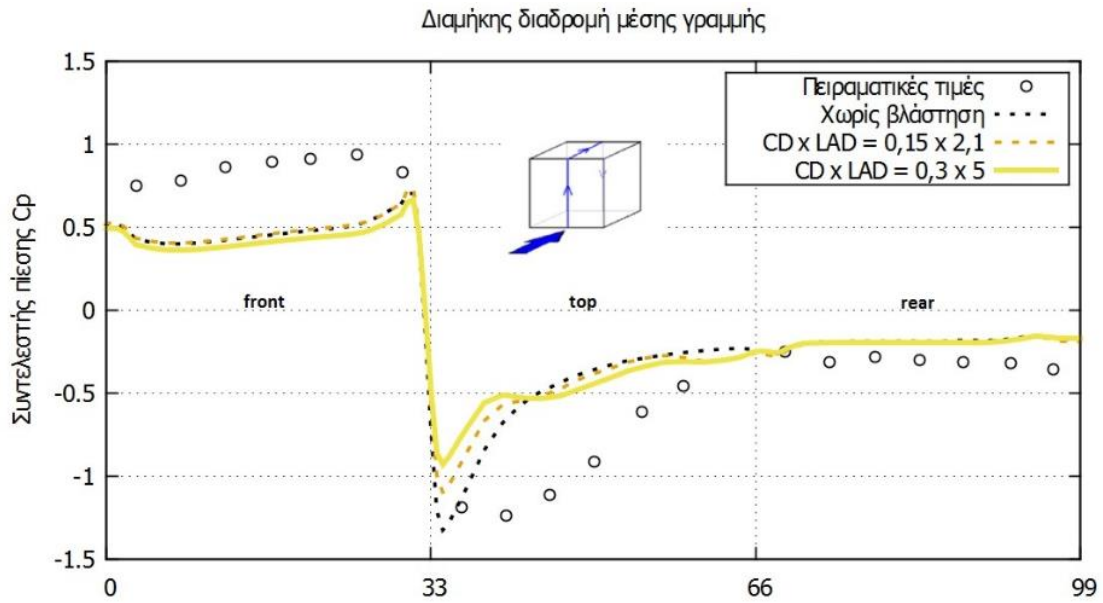


**Σχήμα 8.19.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής του κτηρίου (τύπου Β).

Στην περίπτωση της βλάστησης στην περίμετρο της οροφής, παρατηρείται και πάλι μικρότερη βύθιση της πίεσης στην αρχή της οροφής κατά τη διαμήκη διαδρομή, μετά την τοποθέτηση της βλάστησης. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη η τιμή του  $C_D \times LAD$  τόσο μικρότερη η πτώση πίεσης. Πάνω στην οροφή και κατά μήκος αυτής, η ύπαρξη του πρασίνου μειώνει την πίεση στα τοιχώματα της επιφάνειας. Η πτώση πίεσης είναι ανάλογη της τιμής του  $C_D \times LAD$  (όσο μεγαλύτερο, τόσο χαμηλότερες τιμές πίεσης). Ένα ενδιαφέρον, όμως, φαινόμενο είναι ότι στο κέντρο –και μόνο- της ταράτσας όπου δεν υπάρχει βλάστηση, η πίεση γίνεται ίση με την αντίστοιχη πίεση για “γυμνό κτήριο”, ενώ μετά ελαττώνεται ξανά, πράγμα που φανερώνει την άμεση επίδραση της παρουσίας του πορώδους στην ταράτσα (Σχήμα 8.16).

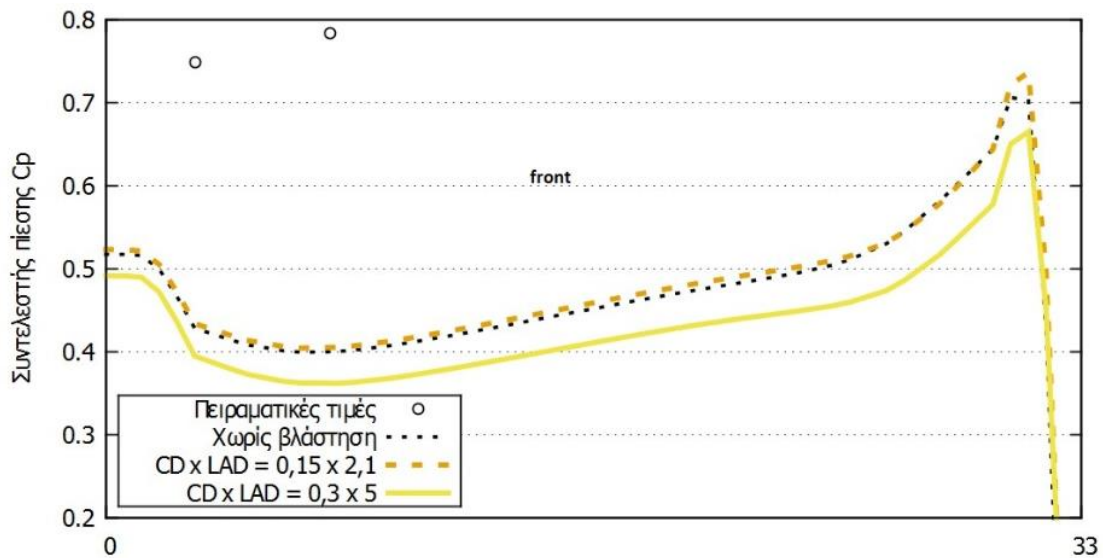
**8.4.3 C - Βλάστηση στην οροφή – περίφραξη**





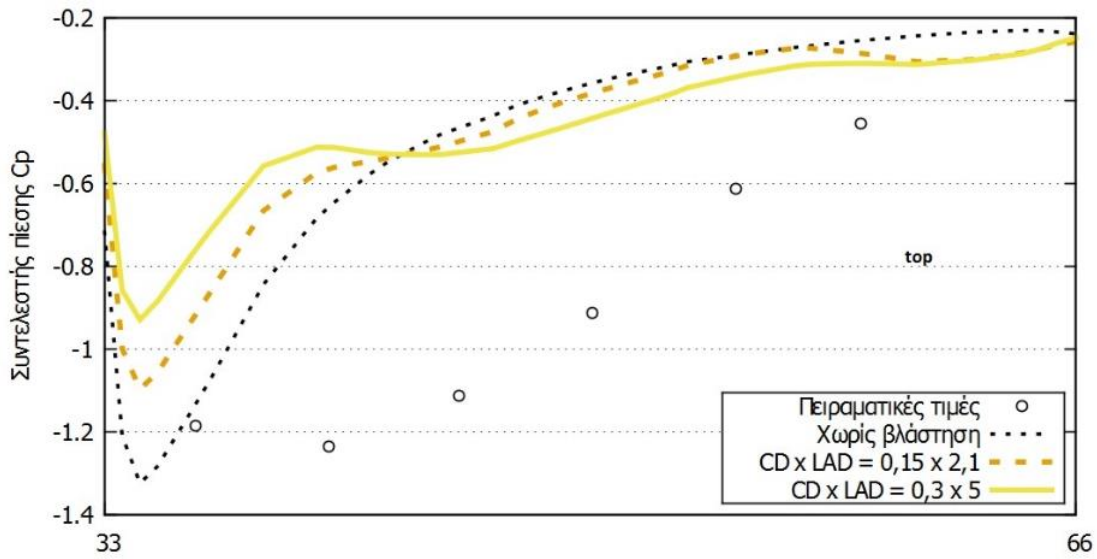
Σχήμα 8.20. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου C).

**Zoom in:**

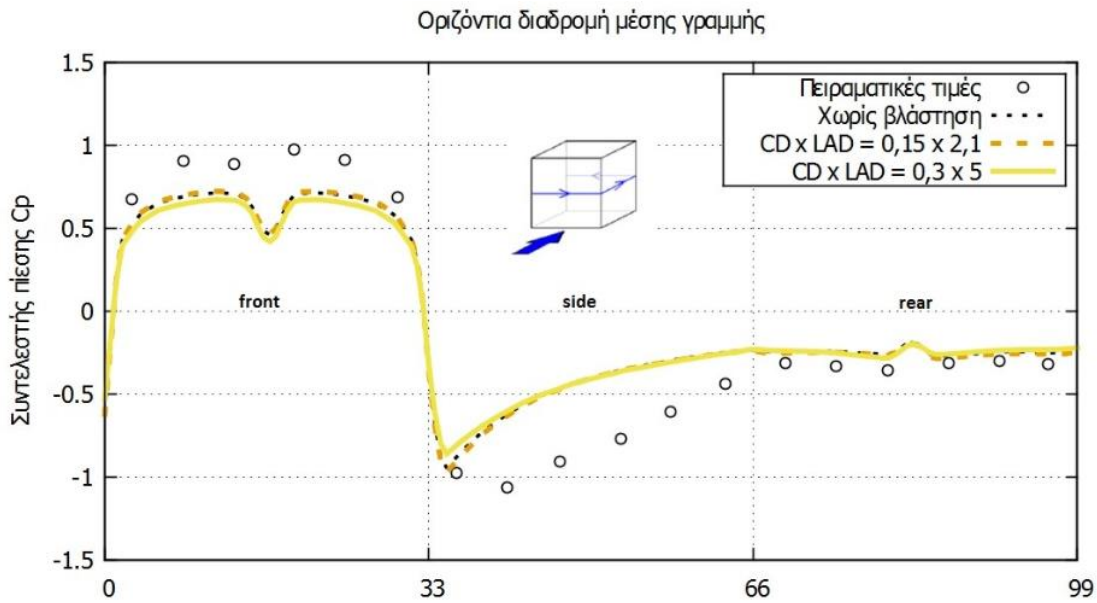


Σχήμα 8.21. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου C).

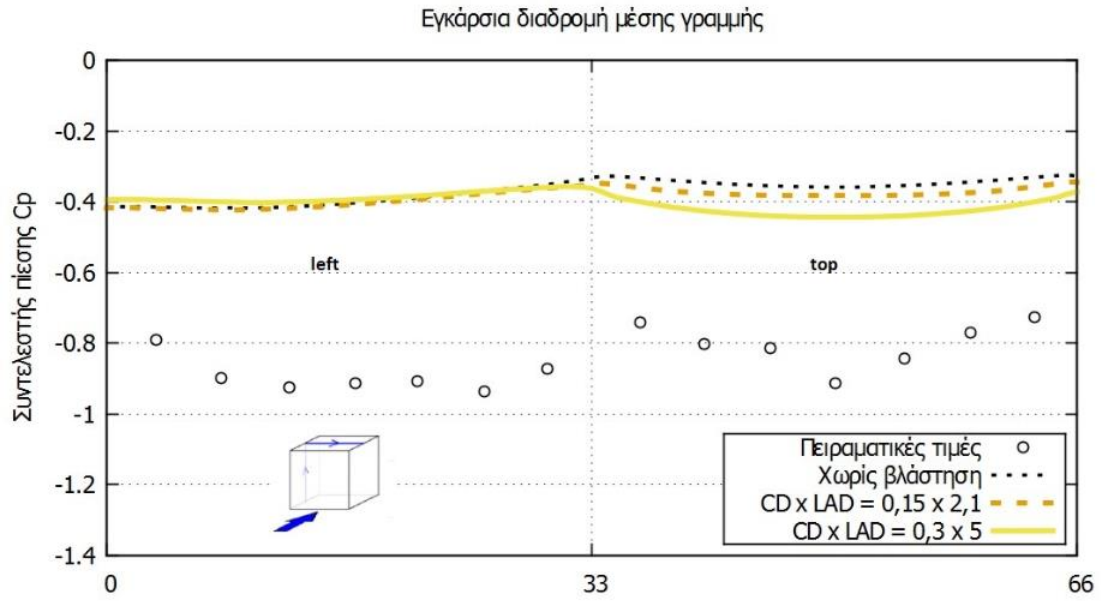
**Zoom in:**



**Σχήμα 8.22.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου C).

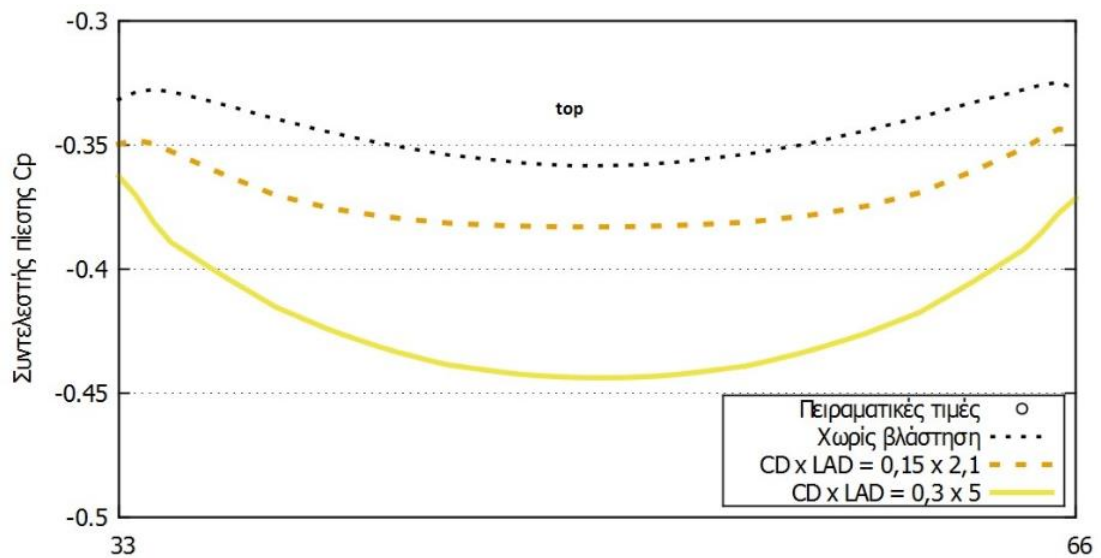


**Σχήμα 8.23.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου C).



Σχήμα 8.24. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου C).

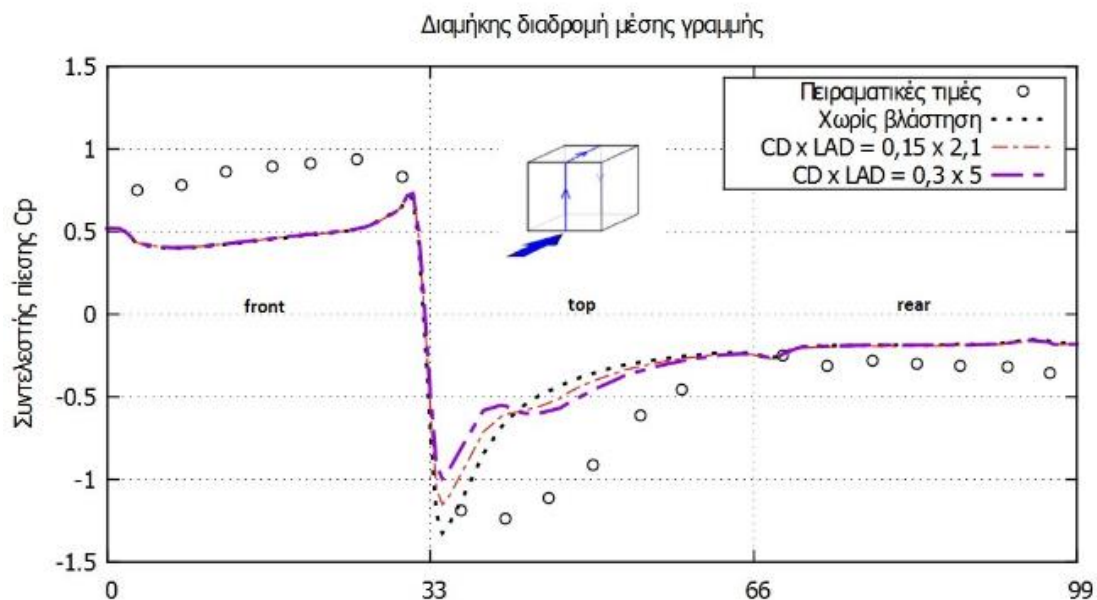
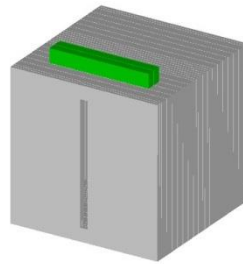
**Zoom in:**



Σχήμα 8.25. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου C).

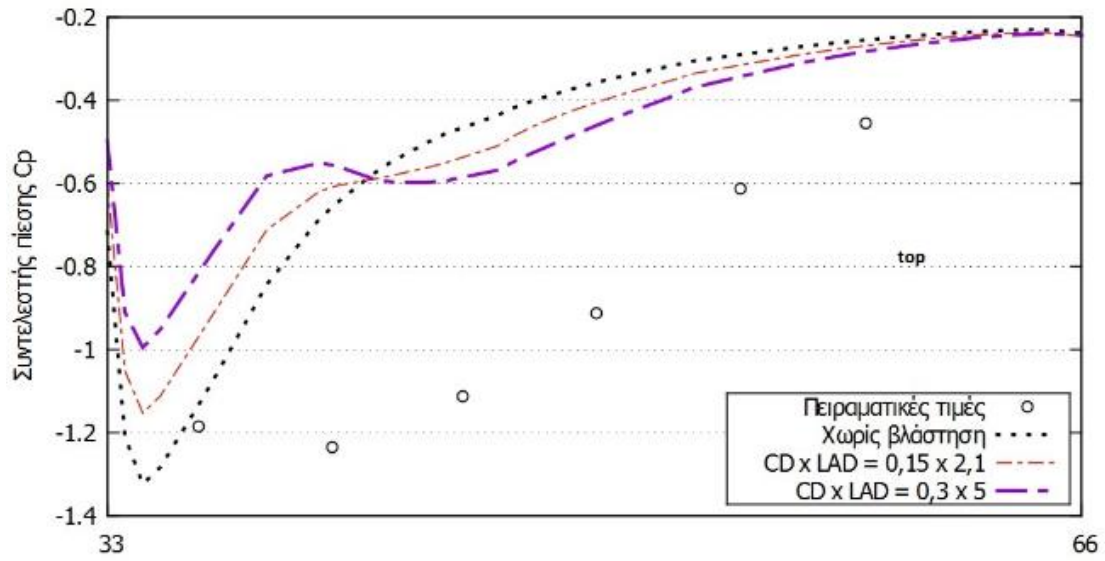
Στην περίπτωση της διάταξης βλάστησης ως περίφραξη πάνω στην οροφή, καταλήγουμε σε παρόμοια συμπεράσματα με την ακριβώς προηγούμενη περίπτωση (βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής). Ένα ενδιαφέρον στοιχείο είναι η αρκετά σημαντική πτώση πίεσης που εντοπίζεται στην πρόσοψη κατά τη διαμήκη διαδρομή για μεγάλη τιμή του  $C_D \times LAD$  (Σχήμα 8.21).

#### 8.4.4 D - Βλάστηση στην οροφή - δένδροστοιχία ή μονή σειρά θάμνων

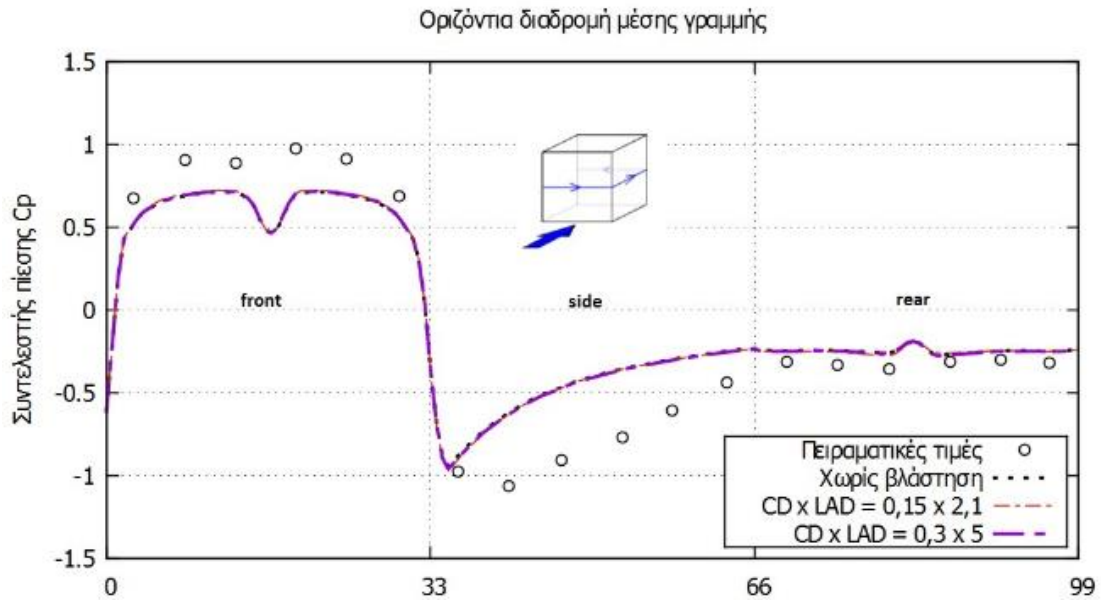


Σχήμα 8.26. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου D).

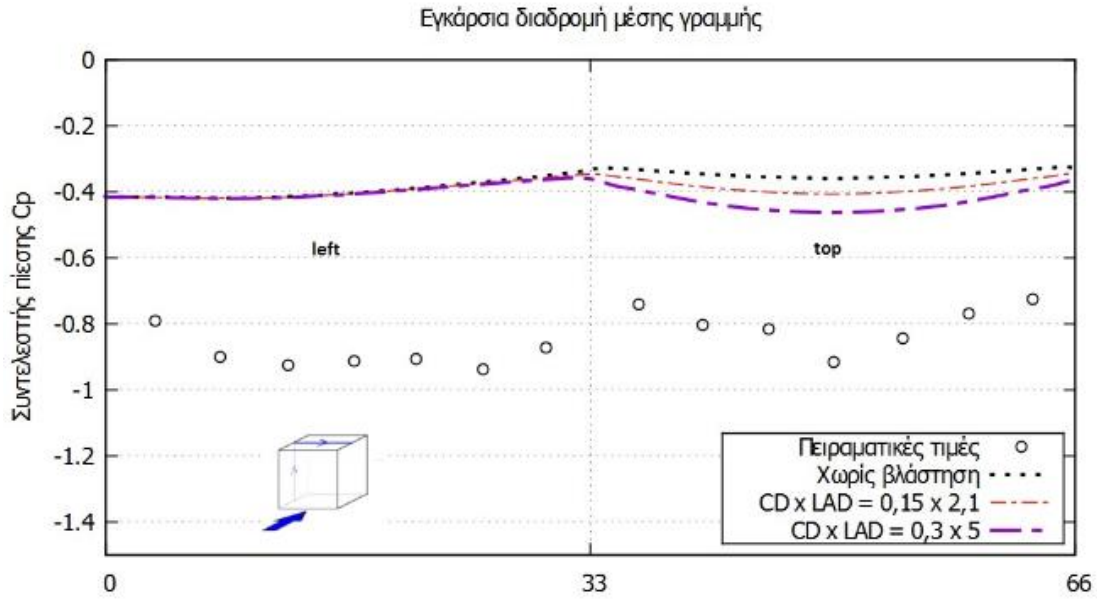
**Zoom in:**



Σχήμα 8.27. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου D).



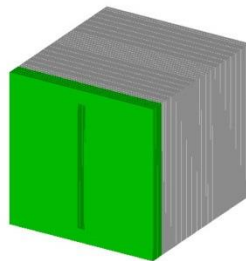
Σχήμα 8.28. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου D).

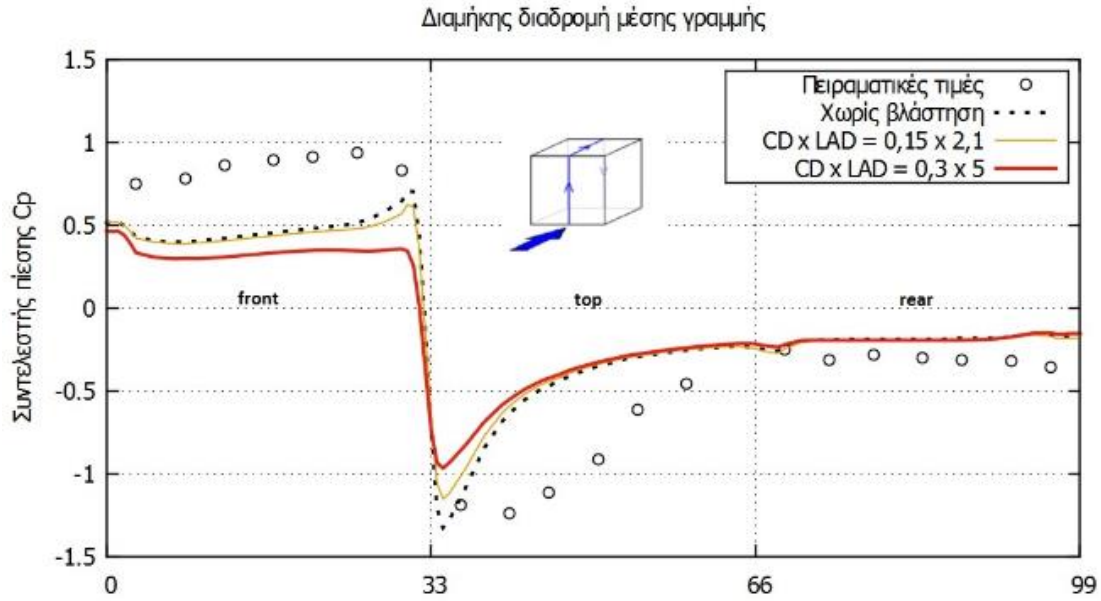


Σχήμα 8.29. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου (τύπου D).

Η παρουσία βλάστησης οδηγεί σε μικρότερη βύθιση της πίεσης στην αρχή της οροφής κατά τη διαμήκη διαδρομή (Σχήμα 8.26, Σχήμα 8.27). Στη συνέχεια, πάνω στην οροφή και στην περιοχή της βλάστησης και εκατέρωθεν παρατηρείται πτώση πίεσης σε σχέση με το ‘‘γυμνό’’ κτήριο, η οποία παύει να υπάρχει όσο προχωράμε δεξιότερα στην οροφή, όπου δεν εντοπίζεται χώρος πρασίνου (Σχήμα 8.27).

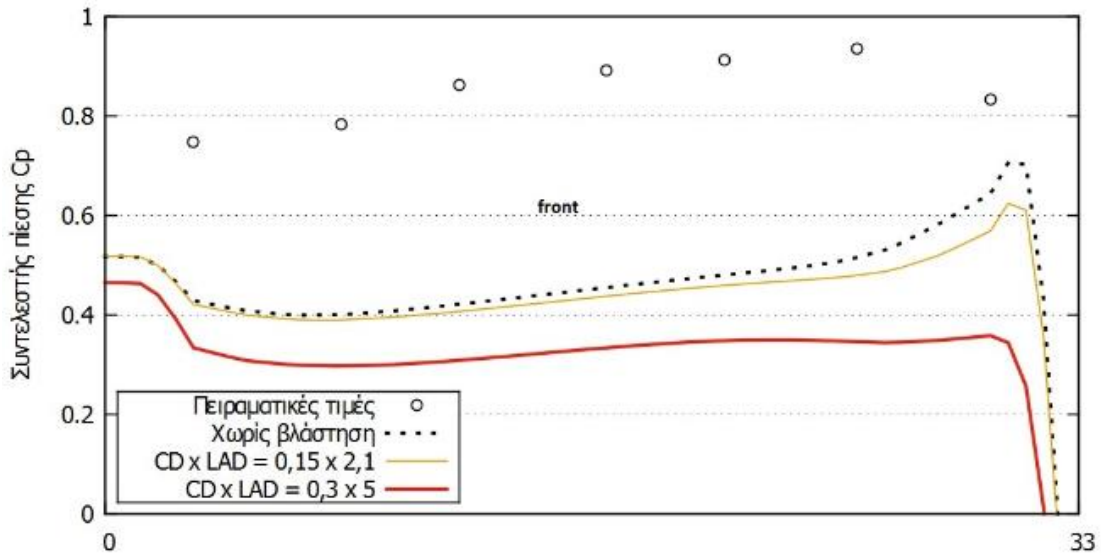
#### 8.4.5 Ε - Βλάστηση στην πρόσοψη του κτηρίου





Σχήμα 8.30. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).

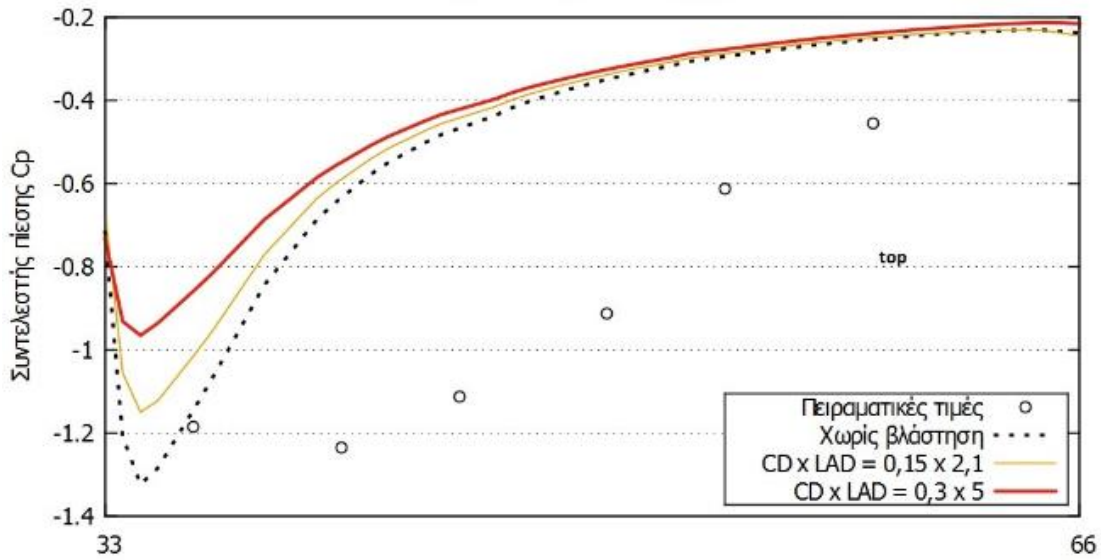
**Zoom in:**



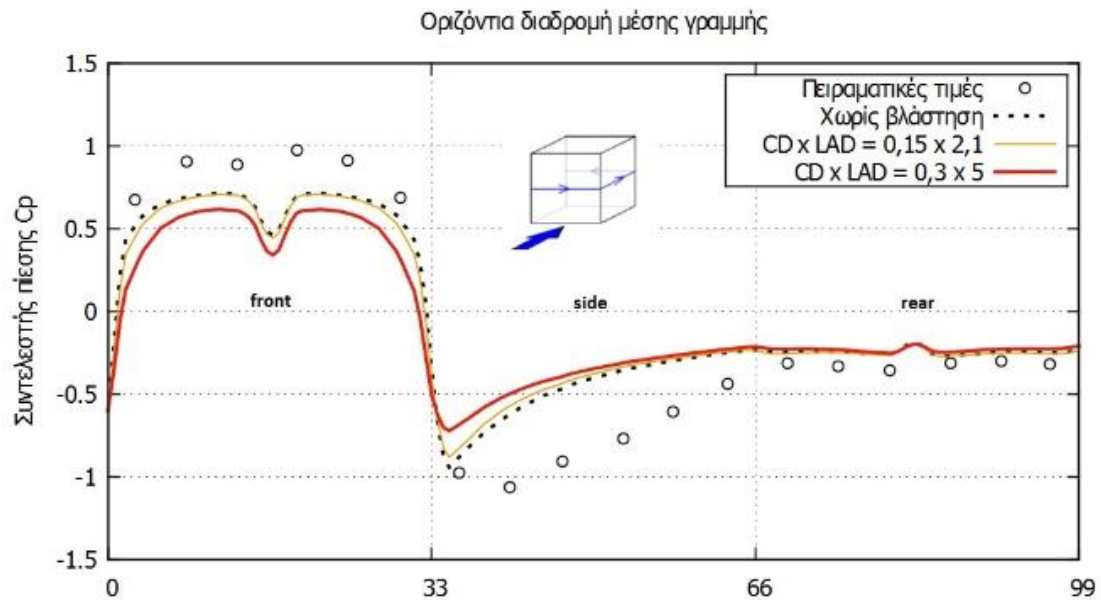
Σχήμα 8.31. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).



**Zoom in:**

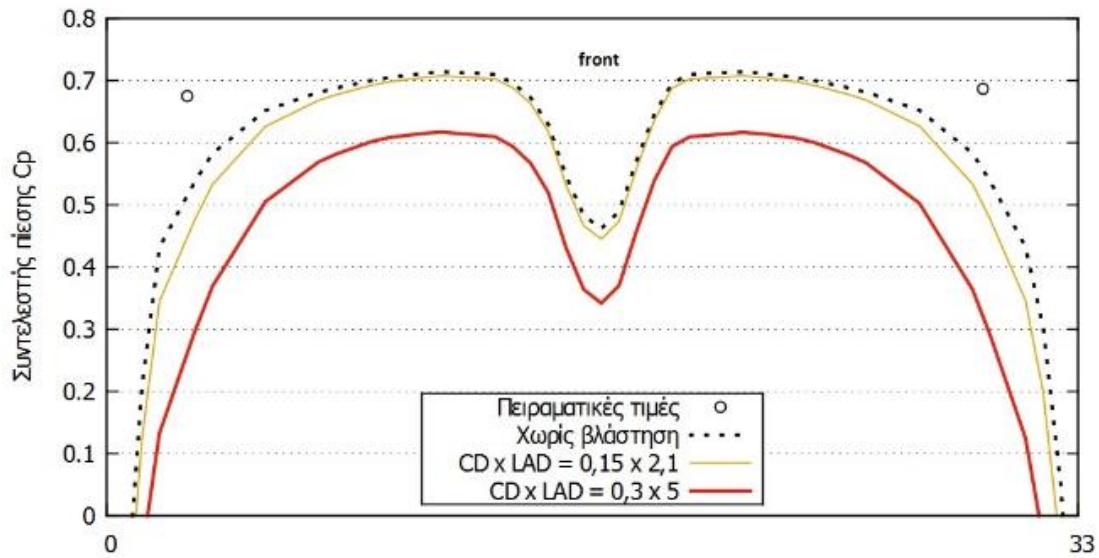


**Σχήμα 8.32.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).

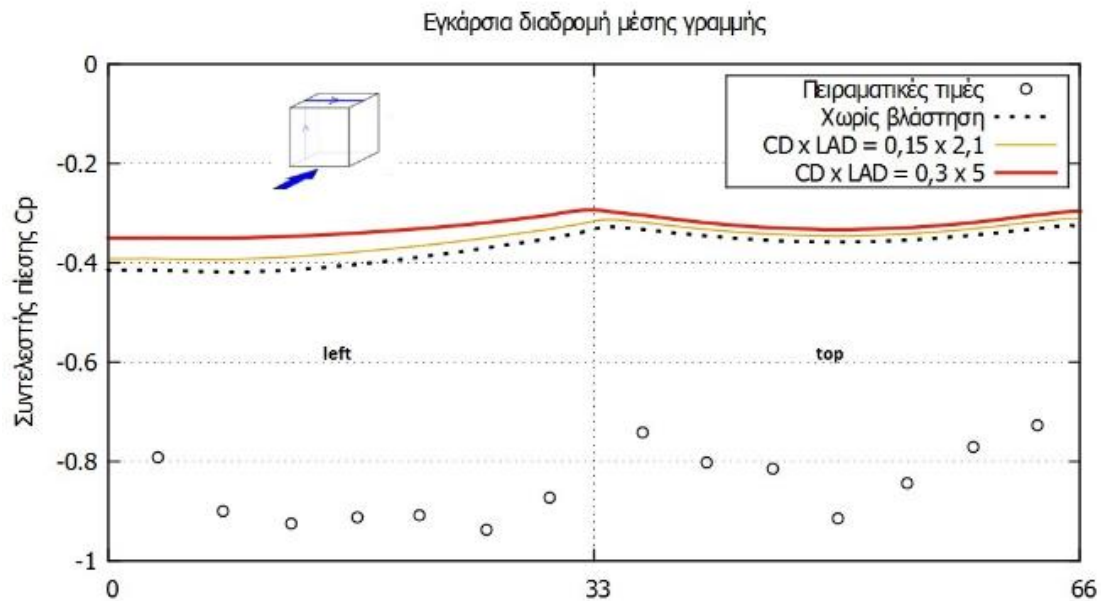


**Σχήμα 8.33.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και οπίσθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).

**Zoom in:**



Σχήμα 8.34. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).

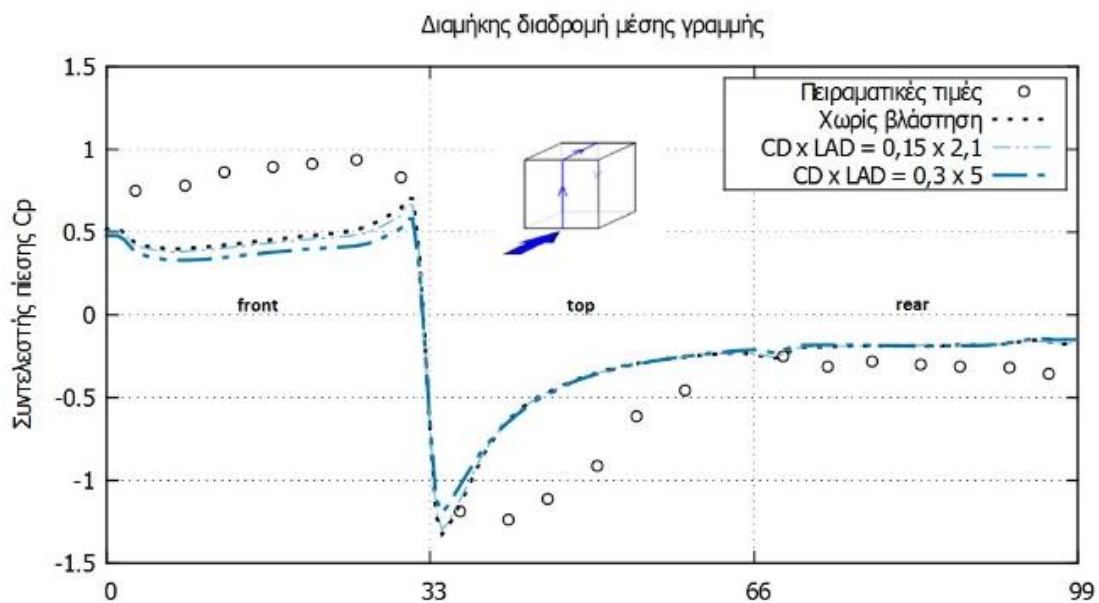
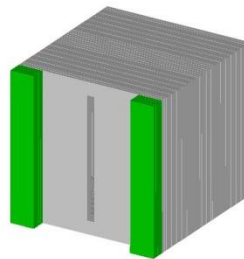


Σχήμα 8.35. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).

Κατά τη διαμήκη διαδρομή στην προσήνεμη πλευρά εντοπίζεται πτώση της πίεσης καθ' ύψος του κτηρίου και κυρίως στο πάνω μέρος, εξαιτίας της βλάστησης που είναι τοποθετημένη σε ολόκληρη την επιφάνεια της πρόσοψης, εκτός από την περιοχή του ανοίγματος. Πολύ σημαντική πτώση μάλιστα παρατηρείται όταν χρησιμοποιούμε βλάστηση με μεγάλη πυκνότητα και αντίσταση (Σχήμα 8.31). Αντίστοιχα, πτώση της

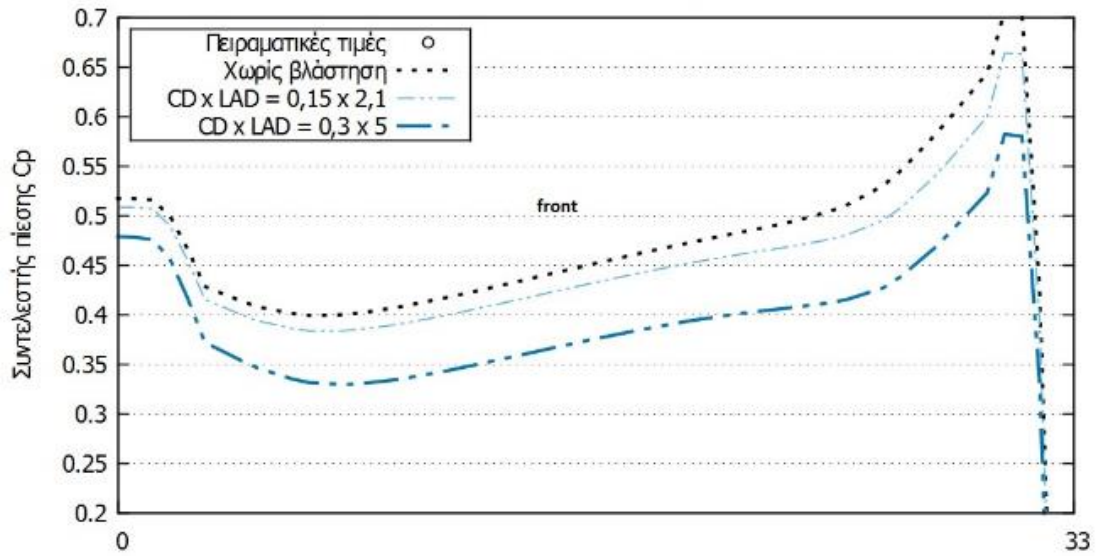
πίεσης καταγράφεται και κατά την οριζόντια διαδρομή στην ίδια πλευρά, ειδικά όσο μεγαλώνει το  $CD \times LAD$  (Σχήμα 8.34). Επιπλέον, τόσο κατά τη διαμήκη, όσο και κατά την οριζόντια διαδρομή, η πτώση πίεσης είναι μικρότερη στην αρχή της οροφής και της πλευρικής επιφάνειας αντίστοιχα, εξαιτίας της παρουσίας βλάστησης στον ανάντι τοίχο (Σχήμα 8.32, Σχήμα 8.33). Τέλος, κατά την εγκάρσια διαδρομή, καταγράφονται μεγαλύτερες (αλλά αρνητικές) τιμές στην αριστερή πλευρική επιφάνεια και την οροφή λόγω της βλάστησης. Φαίνεται, δηλαδή, ότι η παρουσία πρασίνου στην πρόσοψη επηρεάζει θετικά το πεδίο πιέσεων κυρίως στην αριστερή πλευρά (Σχήμα 8.35).

#### 8.4.6 F - Βλάστηση στην πρόσοψη του κτηρίου - άκρα

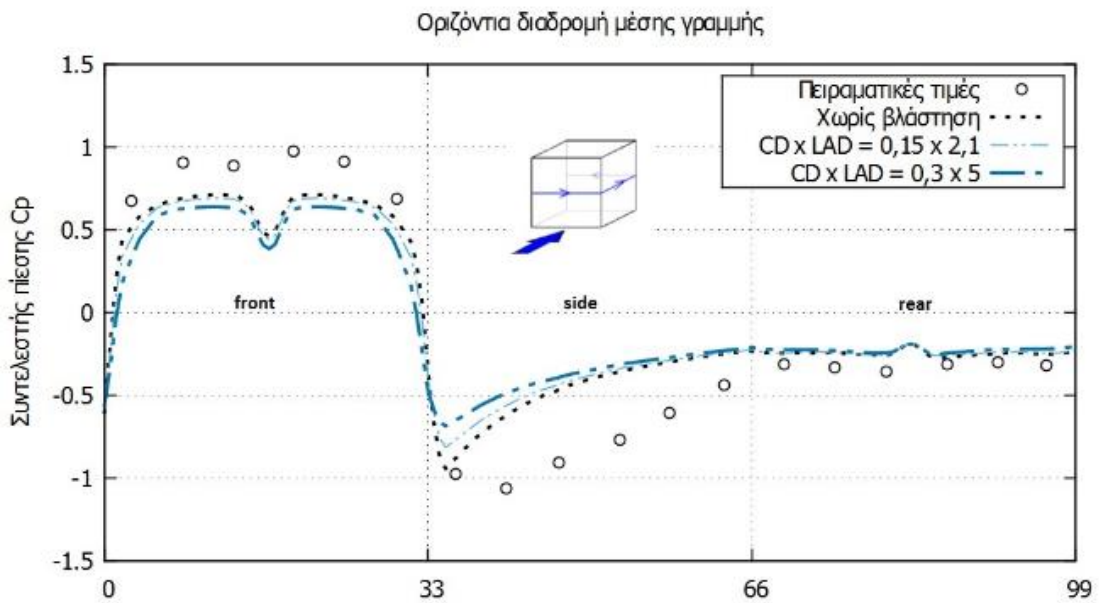


Σχήμα 8.36. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).

**Zoom in:**

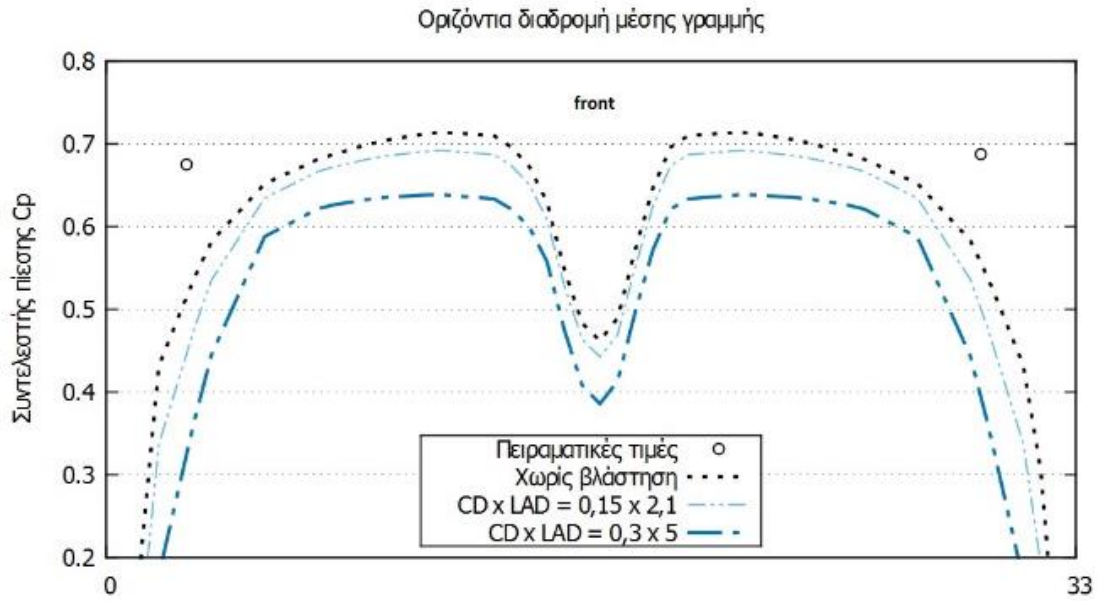


**Σχήμα 8.37.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).

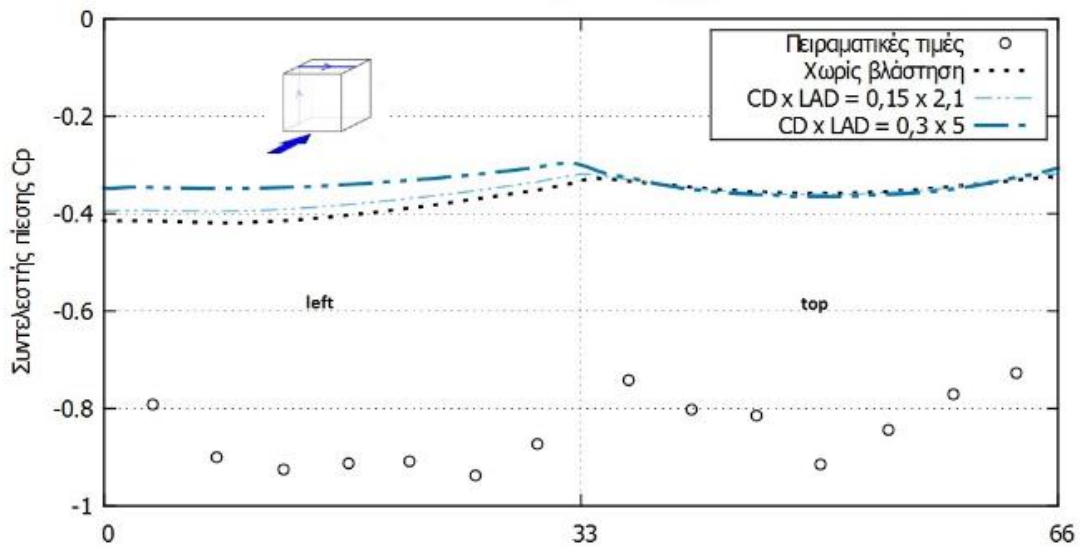


**Σχήμα 8.38.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).

**Zoom in:**

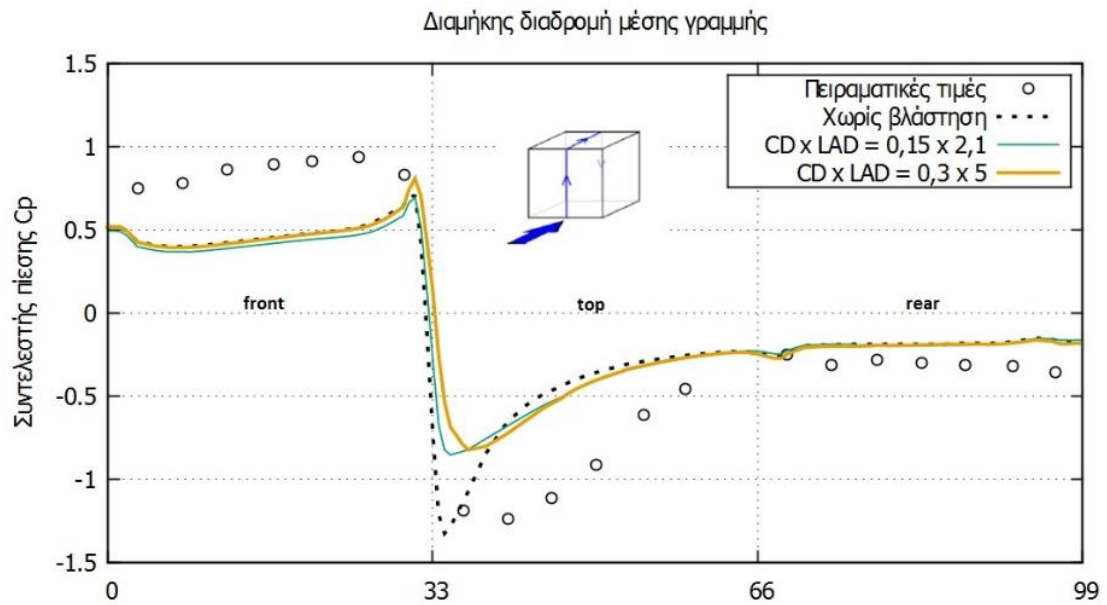
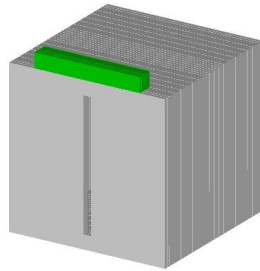


Σχήμα 8.39. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).



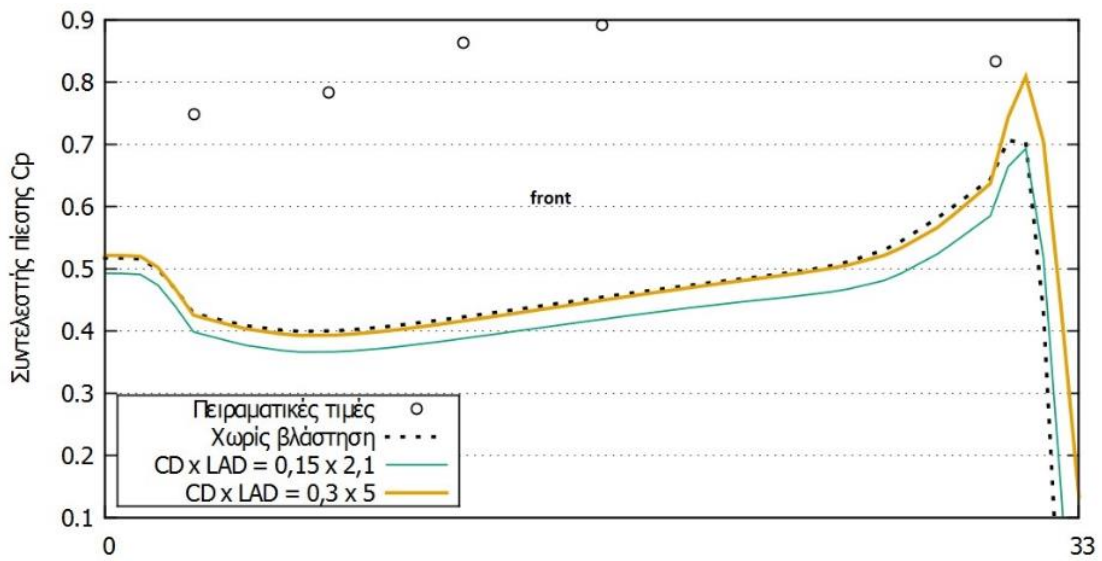
Σχήμα 8.40. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).

### 8.4.7 G - Βλάστηση στην άκρη της οροφής - δενδροστοιχία ή μονή σειρά θάμνων



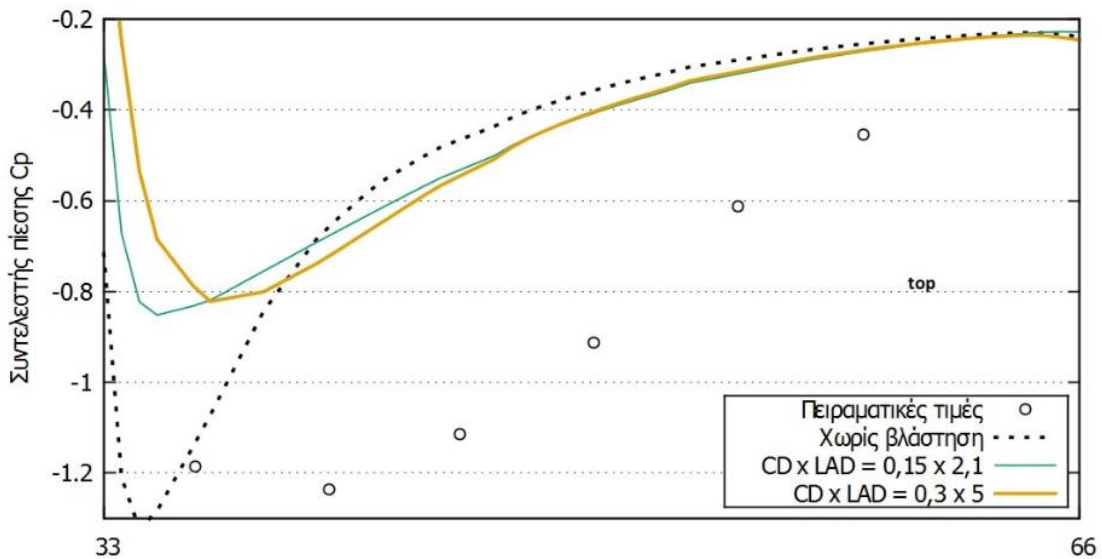
Σχήμα 8.41. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο ανάντι άκρο της οροφής (τύπου G).

**Zoom in:**

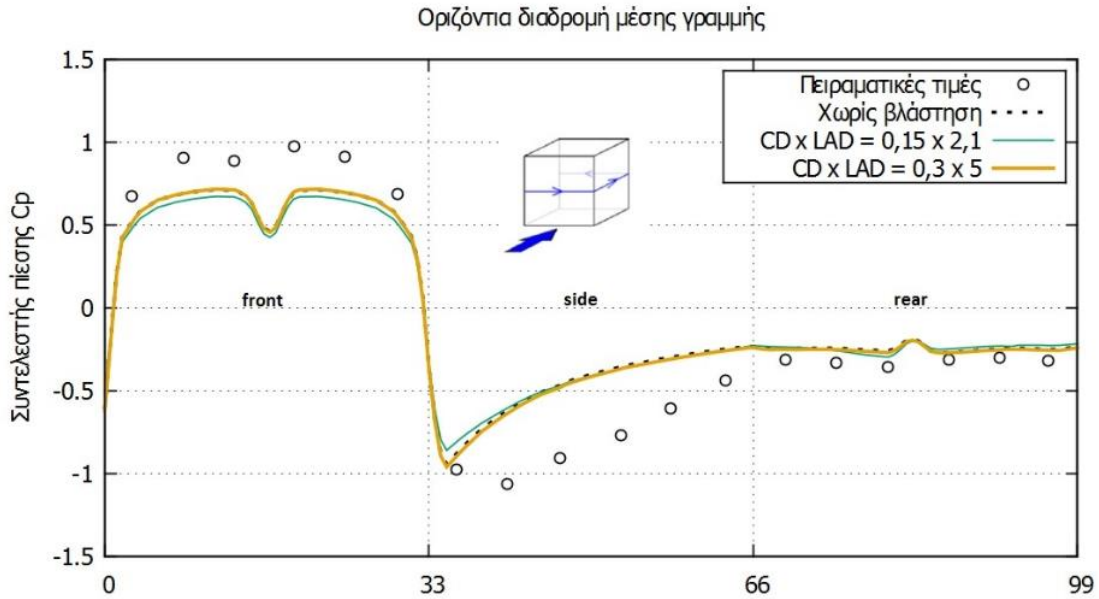


Σχήμα 8.42. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο ανάντι άκρο της οροφής (τύπου G).

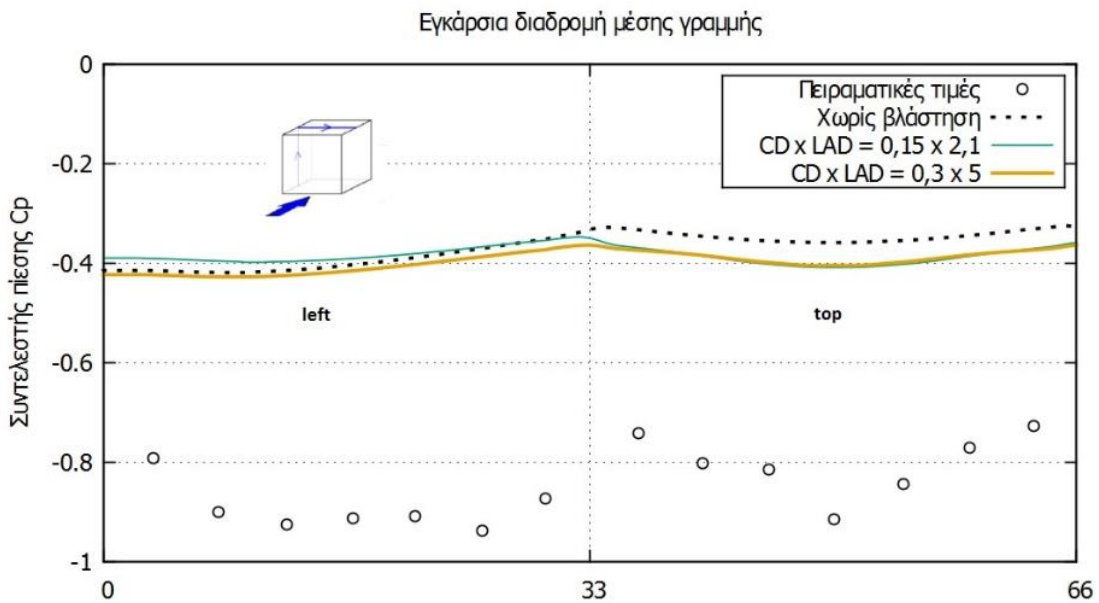
**Zoom in:**



Σχήμα 8.43. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή του κτηρίου κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο ανάντι άκρο της οροφής (τύπου G).



Σχήμα 8.44. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο ανάντι άκρο της οροφής (τύπου G).



Σχήμα 8.45. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής. Βλάστηση τοποθετημένη στο ανάντι άκρο της οροφής (τύπου G).

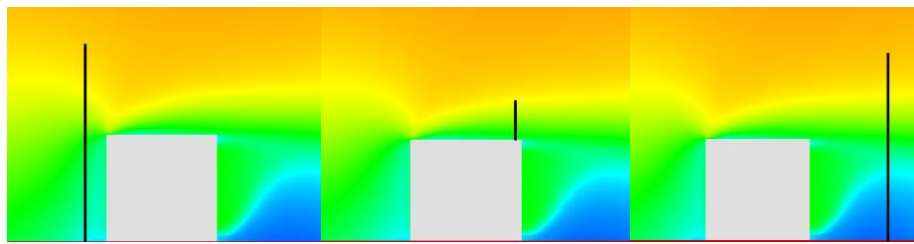
Ομοίως, στην περίπτωση όπου η βλάστηση είναι τοποθετημένη στο άκρο της οροφής, η βύθιση της πίεσης κατά την αλλαγή της γεωμετρίας στην ανάντι οριζόντια ακμή της οροφής είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το “γυμνό κτήριο” (Σχήμα 8.41, Σχήμα 8.43). Οι πιέσεις στην οροφή σταδιακά και καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή της βλάστησης επιστρέφουν στα καθορισμένα επίπεδα, ενώ η επίδραση της



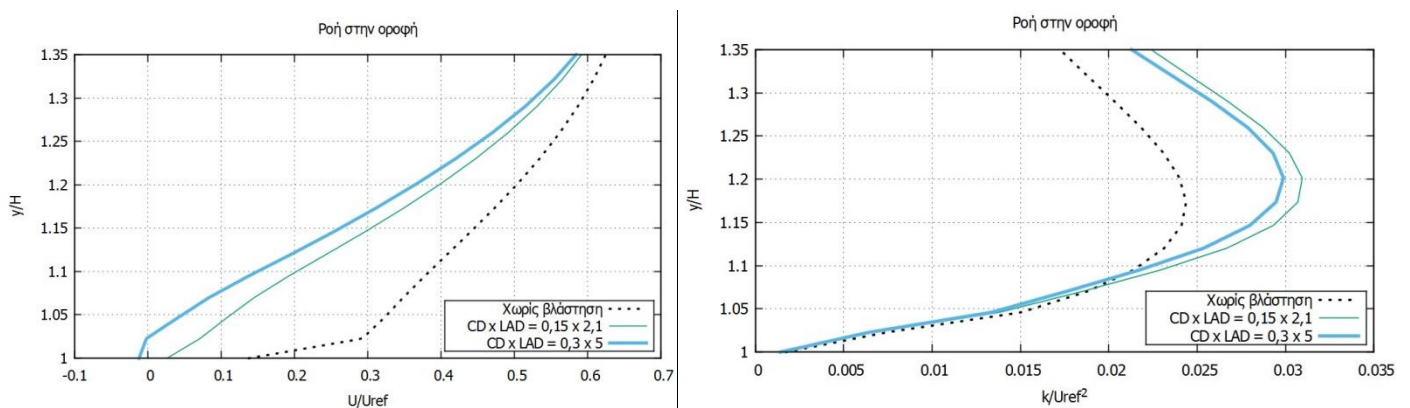
πύκνωσης φαίνεται να οριοθετείται μόλις σε μια μικρή περιοχή της οροφής πολύ κοντά στο ανάντι άκρο όπου υπάρχει πράσινο (Σχήμα 8.43).

#### 8.4.8 Προφίλ ταχυτήτων και τυρβώδους κινητικής ενέργειας

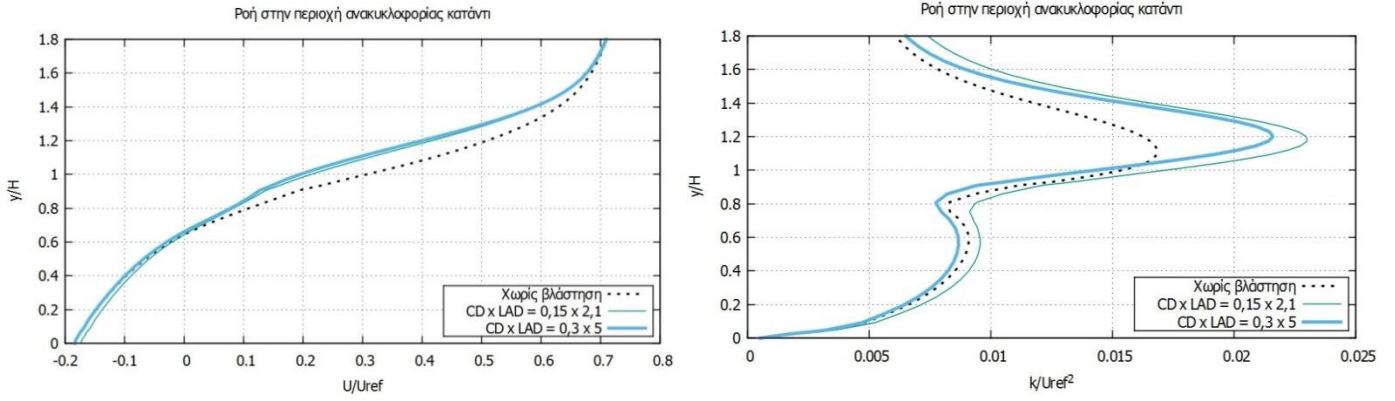
Για τη μελέτη του πεδίου ταχυτήτων ( $U$ ) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k$ ) της ροής στις περιπτώσεις με και χωρίς βλάστηση, εξήχθησαν από το Tecplot τα κατακόρυφα προφίλ τύρβης και ταχύτητας σε τρεις θέσεις: α) στη θέση  $x = 175 \text{ m}$  ανάντι του κτηρίου και σε περιοχή που εκτείνεται από το έδαφος ως την αδιατάρακτη ροή ( $y \approx 60 \text{ m}$ ), β) στο άκρο της οροφής του κτηρίου  $x = 213 \text{ m}$  και σε ύψος από την επιφάνεια της οροφής ως περίπου τα 4 ύψη βλάστησης ( $y \approx 45 \text{ m}$ ) και γ) στη θέση  $x = 240 \text{ m}$  κατάντι που διαπερνά την περιοχή ανακυκλοφορίας, από το έδαφος ως την αδιατάρακτη ροή ( $y \approx 60 \text{ m}$ ). Τα κατακόρυφα αυτά προφίλ έχουν εξαχθεί κατά πλάτος στο κέντρο του κύβου ( $z = 181,5 \text{ m}$ ). Για καλύτερη εποπτεία και σύγκριση των αποτελεσμάτων, έχει γίνει αδιαστατοποίηση του μήκους ως προς το ύψος του κύβου  $H$  και της ταχύτητας ως προς την ταχύτητα αναφοράς  $U_{\text{ref}} = 5 \text{ m/s}$ . Η ΤΚΕ έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς  $U_{\text{ref}}^2$ .



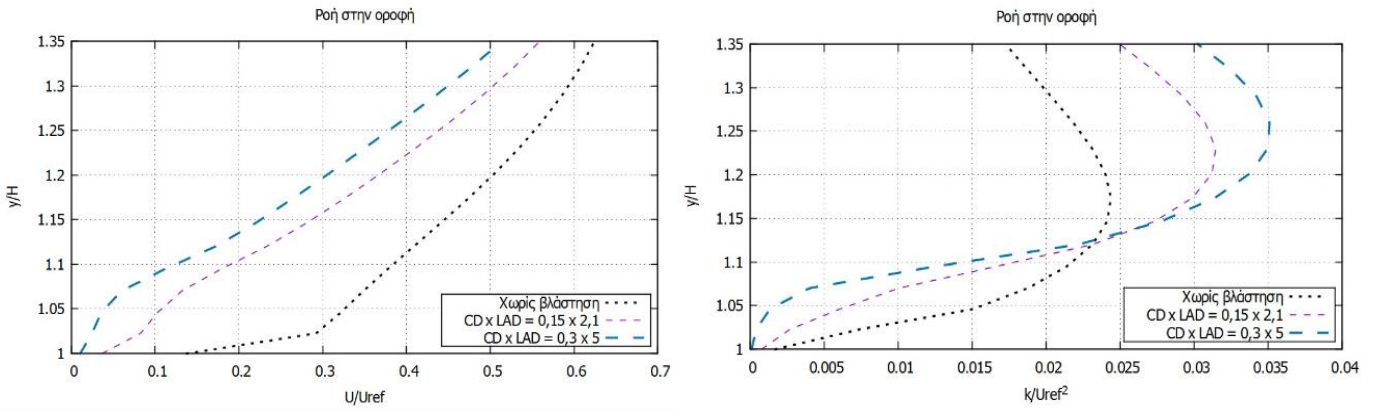
Σχήμα 8.46. Κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων και ΤΚΕ σε τρεις θέσεις:  $x = 175 \text{ m}$  (αριστερά),  $x = 213 \text{ m}$  (κέντρο),  $x = 240 \text{ m}$  (δεξιά)



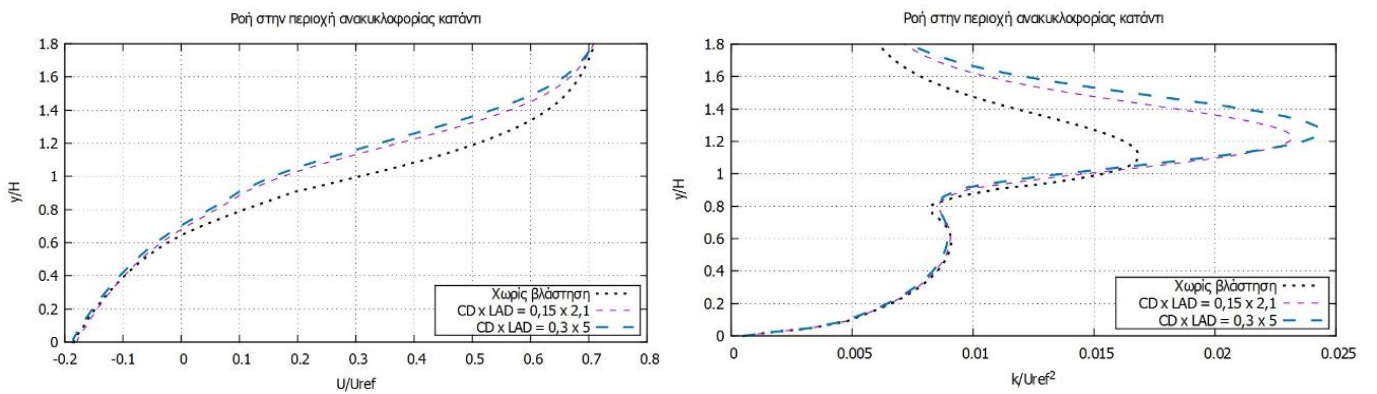
Σχήμα 8.47. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213 \text{ m}$ ). Βλάστηση στο κέντρο της οροφής (τύπου A).



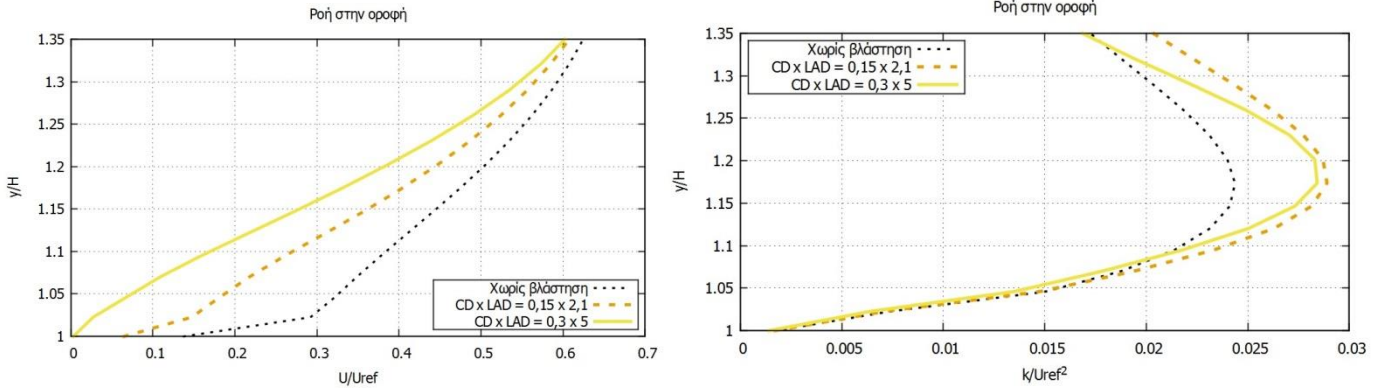
Σχήμα 8.48. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Βλάστηση στο κέντρο της οροφής (τύπου A).



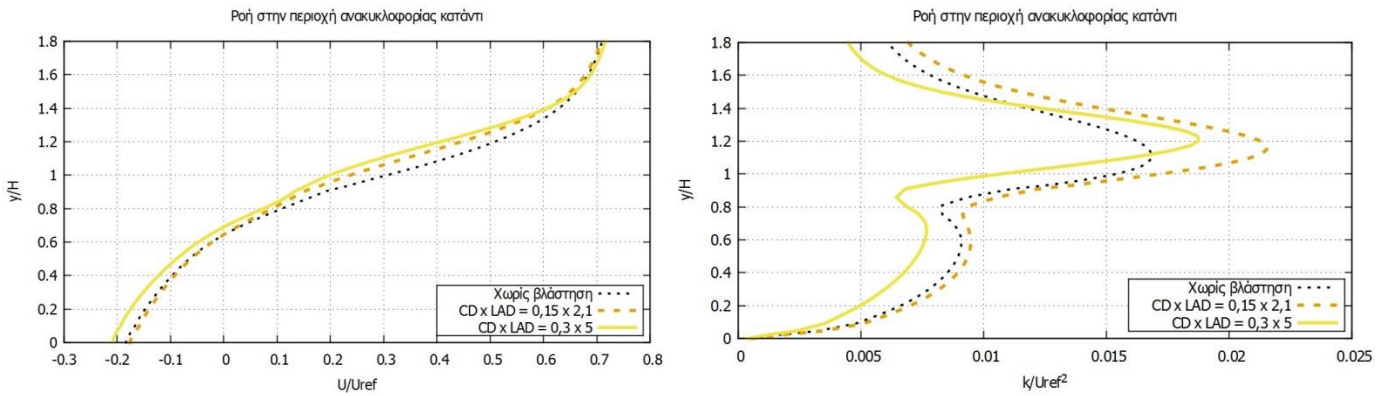
Σχήμα 8.49. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής (τύπου B).



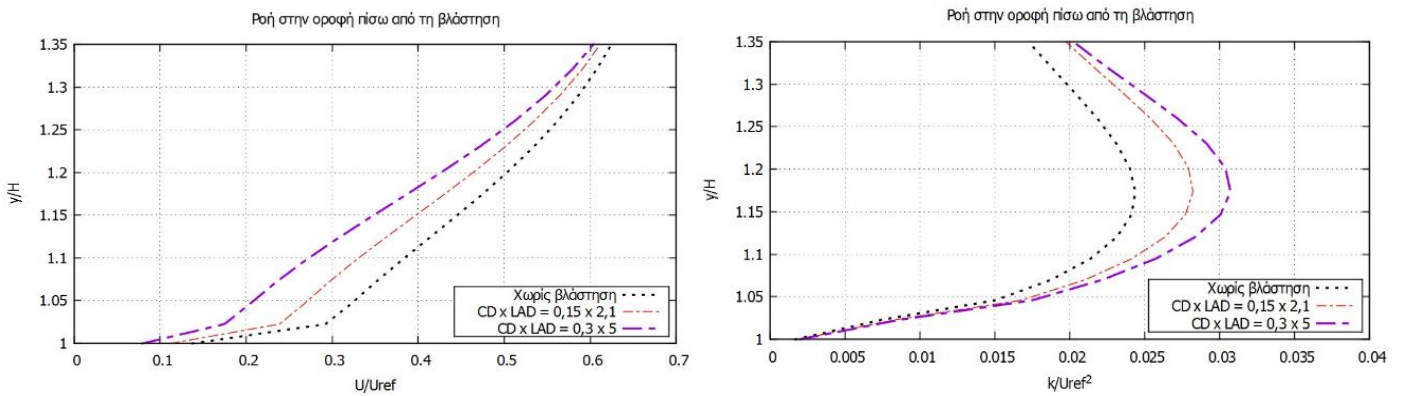
Σχήμα 8.50. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής (τύπου B).



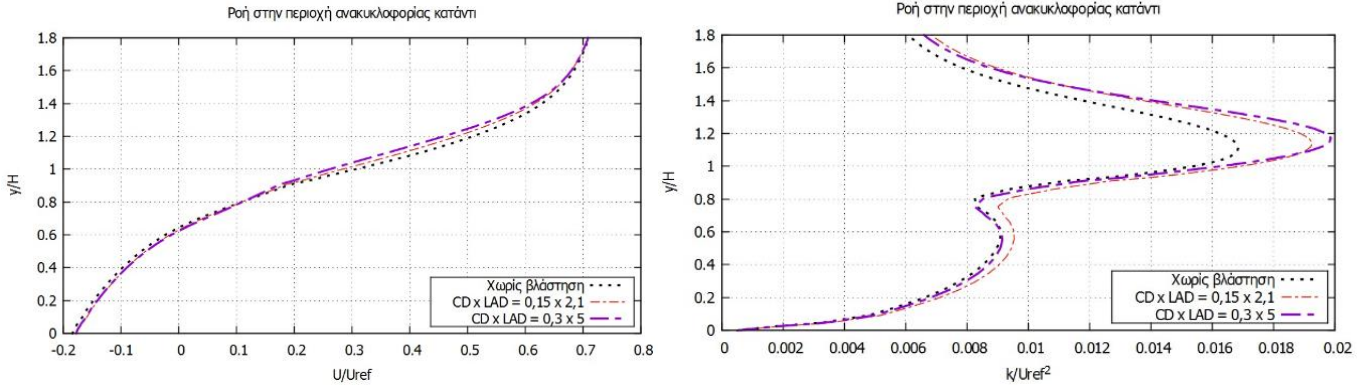
Σχήμα 8.51. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Βλάστηση στην οροφή – περίφραξη (τύπου C).



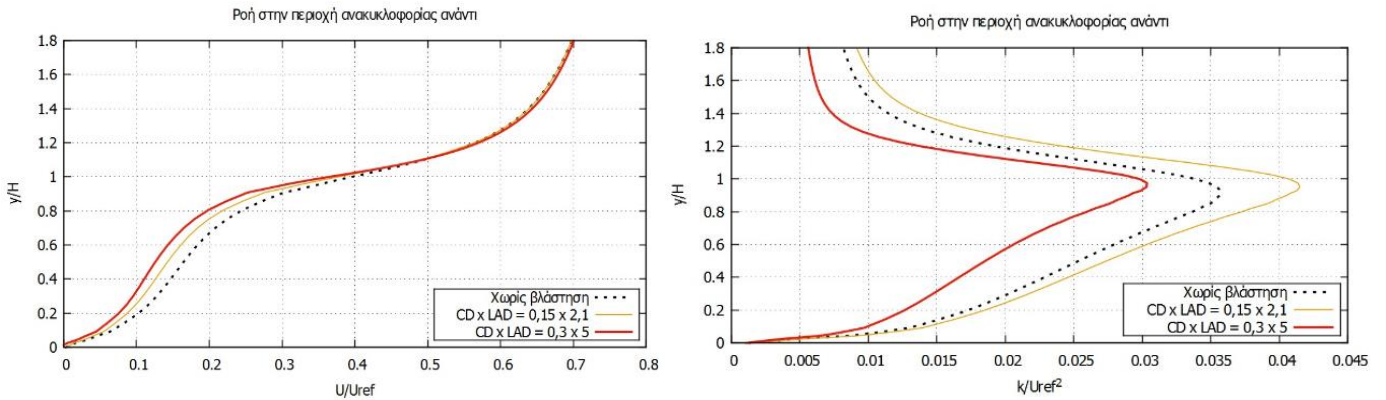
Σχήμα 8.52. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Βλάστηση στην οροφή - περίφραξη (τύπου C).



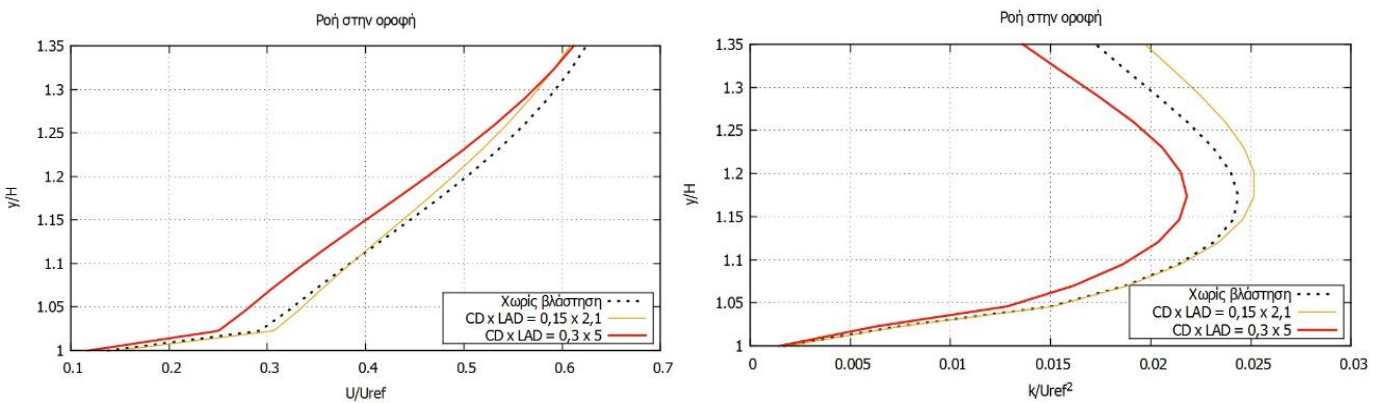
Σχήμα 8.53. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Βλάστηση στην οροφή - μονή σειρά (τύπου D).



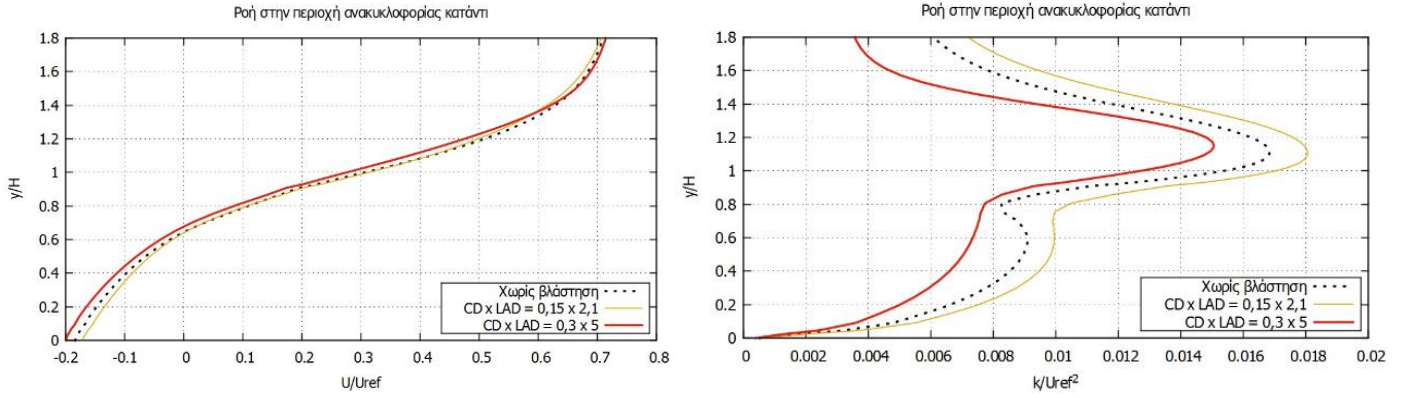
Σχήμα 8.54. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στη περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Βλάστηση στην οροφή - μονή σειρά (τύπου D).



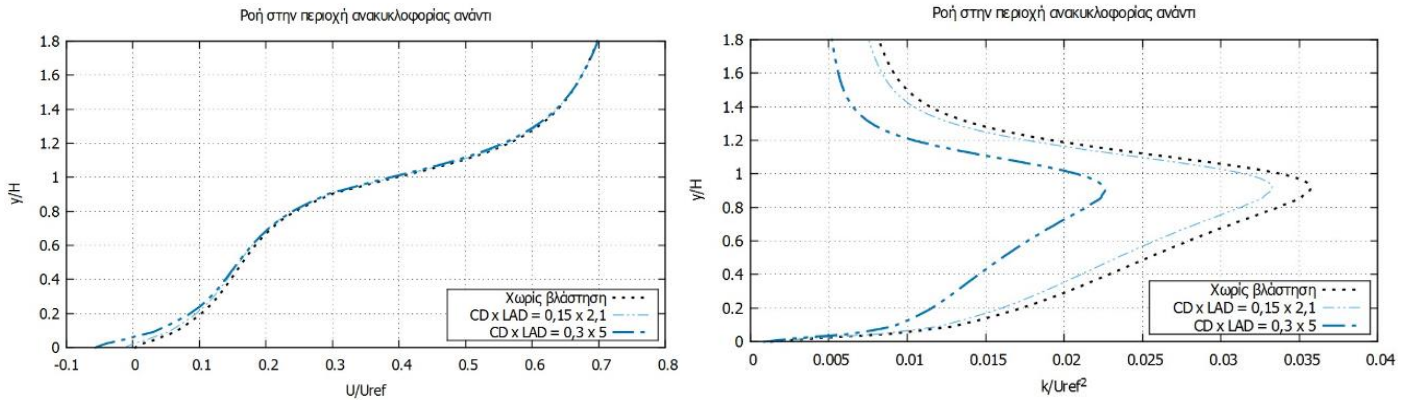
Σχήμα 8.55. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στη περιοχή μπροστά από το κτήριο ( $x = 175$  m). Βλάστηση στην μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).



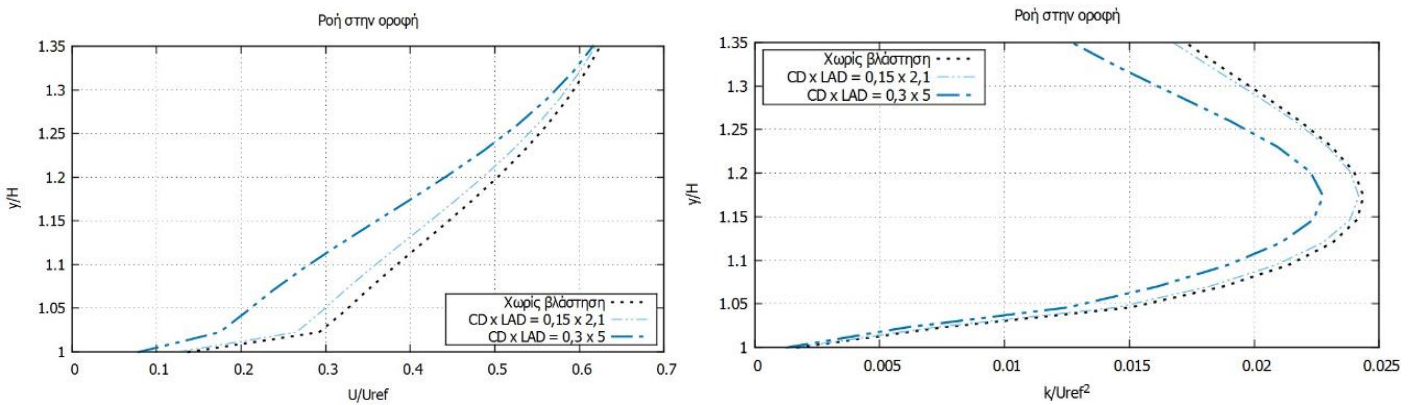
Σχήμα 8.56. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στη οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Βλάστηση στην μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).



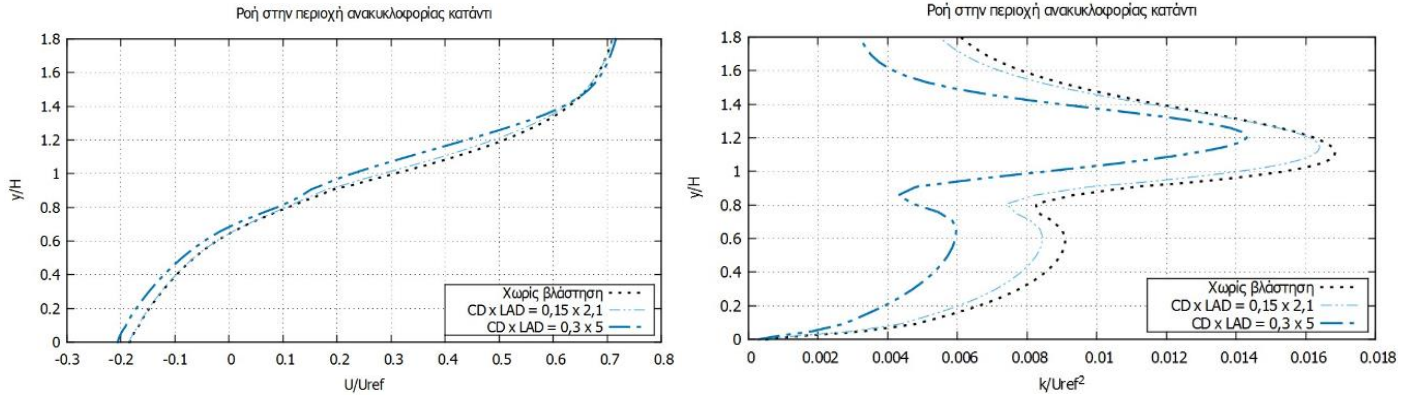
Σχήμα 8.57. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Βλάστηση στη μπροστινή πλευρά του κτηρίου (τύπου E).



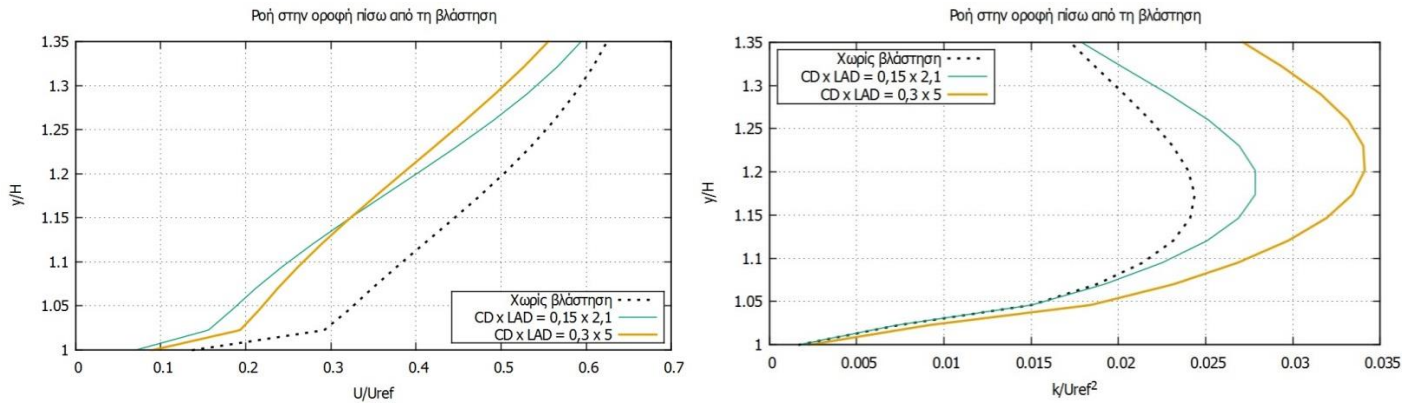
Σχήμα 8.58. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή μπροστά από το κτήριο ( $x = 175$  m). Βλάστηση στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).



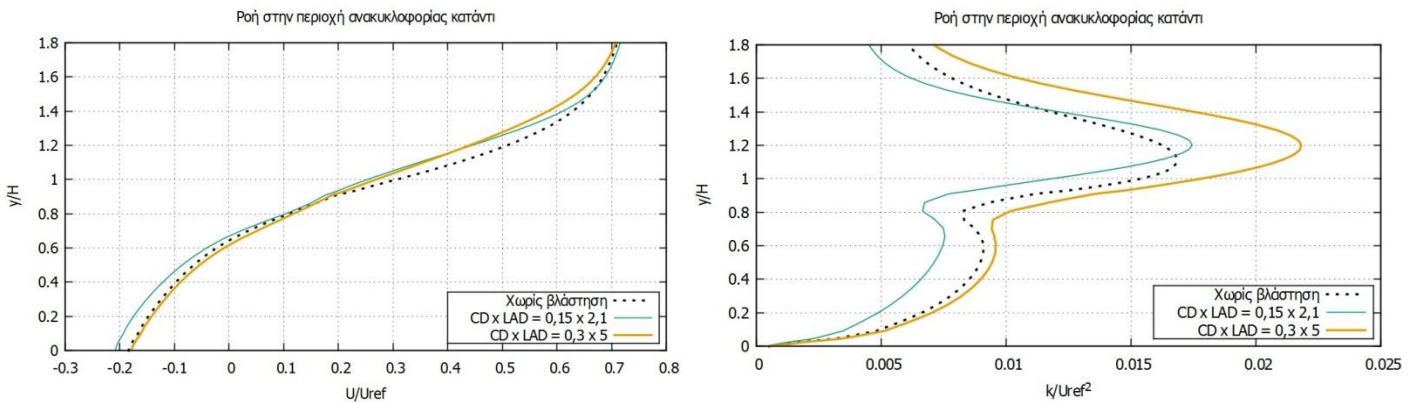
Σχήμα 8.59. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Βλάστηση στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).



Σχήμα 8.60. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Βλάστηση στα άκρα της μπροστινής πλευράς του κτηρίου (τύπου F).



Σχήμα 8.61. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Βλάστηση στο ανάντι άκρο της οροφής (τύπου G).



Σχήμα 8.62. Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Βλάστηση στο ανάντι άκρο της οροφής (τύπου G).

Η ταχύτητα της ροής αυξάνει καθ' ύψος και όσο απομακρυνόμαστε από την περιοχή του κτηρίου προς την αδιατάρακτη ροή. Στις περιοχές ανάντι και κατάντι, η ταχύτητα σε χαμηλά ύψη παίρνει αρνητικές τιμές εξαιτίας της αποκόλλησης της ροής (περιοχή ανακυκλοφορίας) (βλ. Σχήμα 8.48, Σχήμα 8.50, Σχήμα 8.52, Σχήμα 8.54, Σχήμα 8.57, Σχήμα 8.58, Σχήμα 8.60, Σχήμα 8.62).

Σε κάθε περίπτωση, η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας μειώνεται εξαιτίας της βλάστησης, τόσο στην οροφή του κτηρίου, όσο και στις περιοχές ανάντι και κατάντι. Μάλιστα, αύξηση του  $C_D \times LAD$  οδηγεί σε ακόμα μικρότερες ταχύτητες, αφού ο άνεμος βρίσκει ακόμα μεγαλύτερο "εμπόδιο" στην κίνησή του. Βέβαια, όσο προχωράμε προς τα πάνω, η ροή φαίνεται να ανακτά τα πρότερα χαρακτηριστικά της, δηλαδή όσο απομακρυνόμαστε από το ύψος της βλάστησης, η επίδρασή της φαίνεται ολοένα να μικραίνει.

Αντιθέτως, η ύπαρξη της βλάστησης προκαλεί αύξηση της τύρβης γύρω από αυτήν στις περισσότερες περιπτώσεις. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια ξεκινά από χαμηλές τιμές και αυξάνεται απότομα στο ύψος της κορυφής του κτηρίου και της περιοχής βλάστησης, ενώ φτάνει στη μέγιστη τιμή της σε ύψος λίγο πάνω από την κορυφή της βλάστησης. Μετά, και καθώς κινούμαστε προς την αδιατάρακτη ροή, η ΤΚΕ επιστρέφει σε χαμηλότερα επίπεδα.

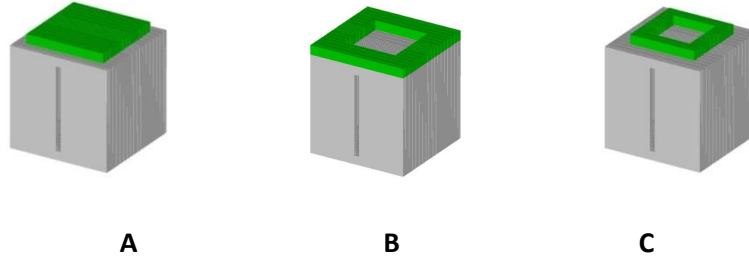
Παρουσία βλάστησης, όμως, δε σημαίνει υποχρεωτικά και αύξηση της τύρβης στη γύρω περιοχή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρήση υπερβολικά πυκνού φυλλώματος οδηγεί σε αξιοσημείωτη πτώση της ΤΚΕ, καθώς η παραγόμενη τύρβη καταστρέφεται πολύ γρήγορα (υψηλά επίπεδα  $\epsilon$ ), όπως στις περιπτώσεις E και F όπου έχει τοποθετηθεί βλάστηση στην πρόσοψη (βλ. Σχήμα 8.55-Σχήμα 8.60).

Κατά την τοποθέτηση βλάστησης στην οροφή τόσο στο κέντρο της όσο και σε μορφή περιφραξής αυξάνεται η τύρβη σε σχέση με το "γυμνό" κτήριο, όμως παρατηρείται μείωσή της όταν αυξάνουμε επιπλέον το  $C_D \times LAD$  (Σχήμα 8.47-Σχήμα 8.48, Σχήμα 8.51-Σχήμα 8.52).

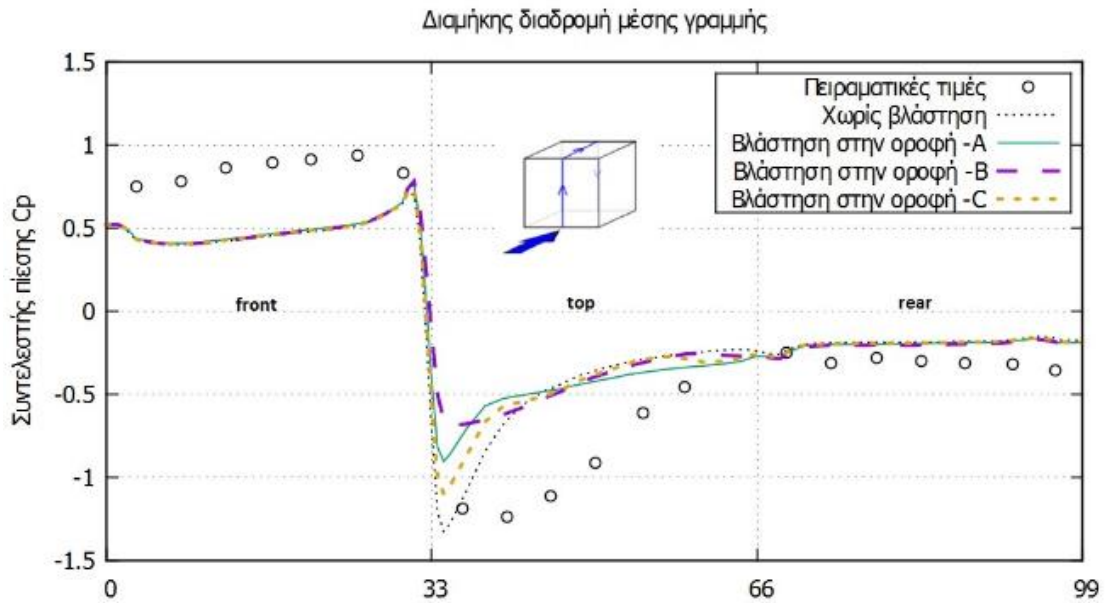
Τέλος, αν και συνήθως η βλάστηση αυξάνει την ΤΚΕ γύρω της, εντός της περιοχής πρασίνου η τύρβη μειώνεται δραστικά εξαιτίας της αεροδυναμικής αντίστασης. Σε αυτή την περιοχή σημειώνεται και επιπλέον μείωση της ταχύτητας. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 8.49, καθώς σε αυτή την περίπτωση (βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής) η περιοχή από την οποία εξήχθη το κατακόρυφο προφίλ εντάσσεται στην περιοχή πρασίνου ( $x = 213 \text{ m}$ ).

## 8.5 Σύγκριση ανάλογα με τη θέση της βλάστησης

### 8.5.1 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην οροφή A, B & C



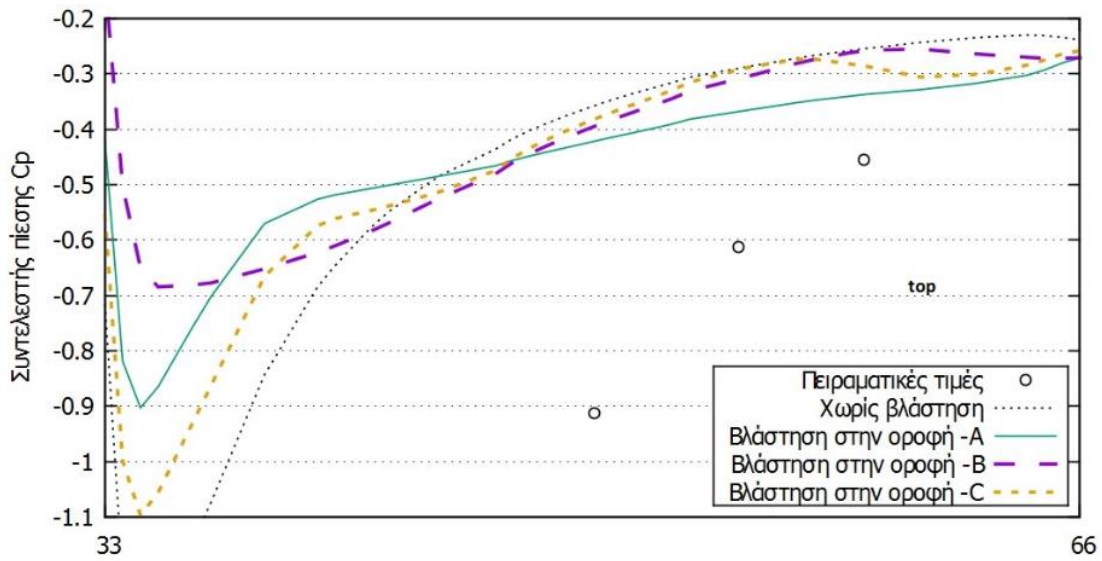
$C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$



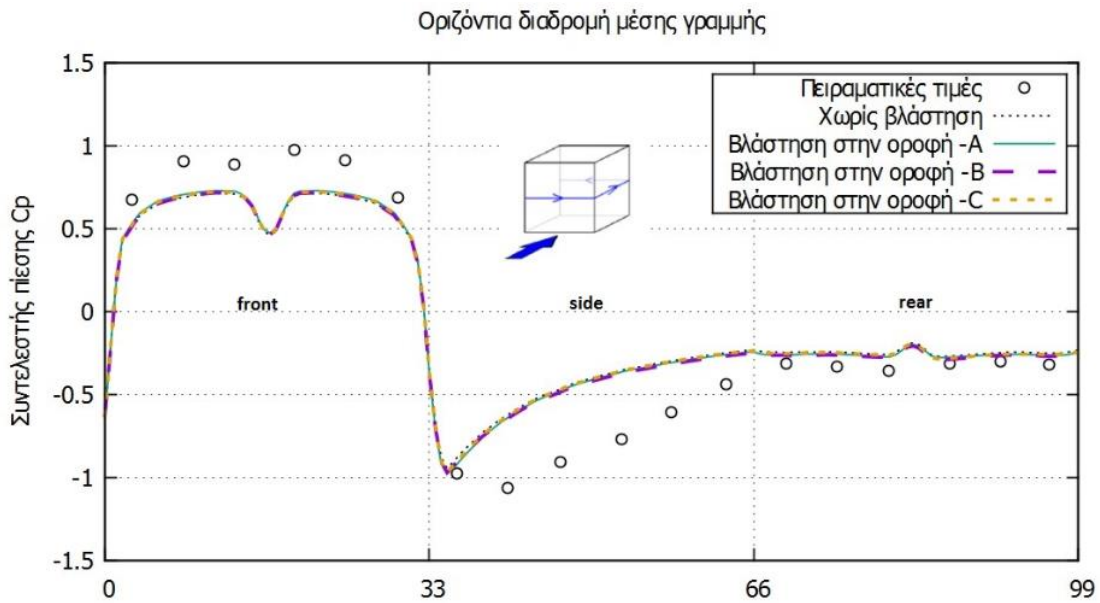
Σχήμα 8.63. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



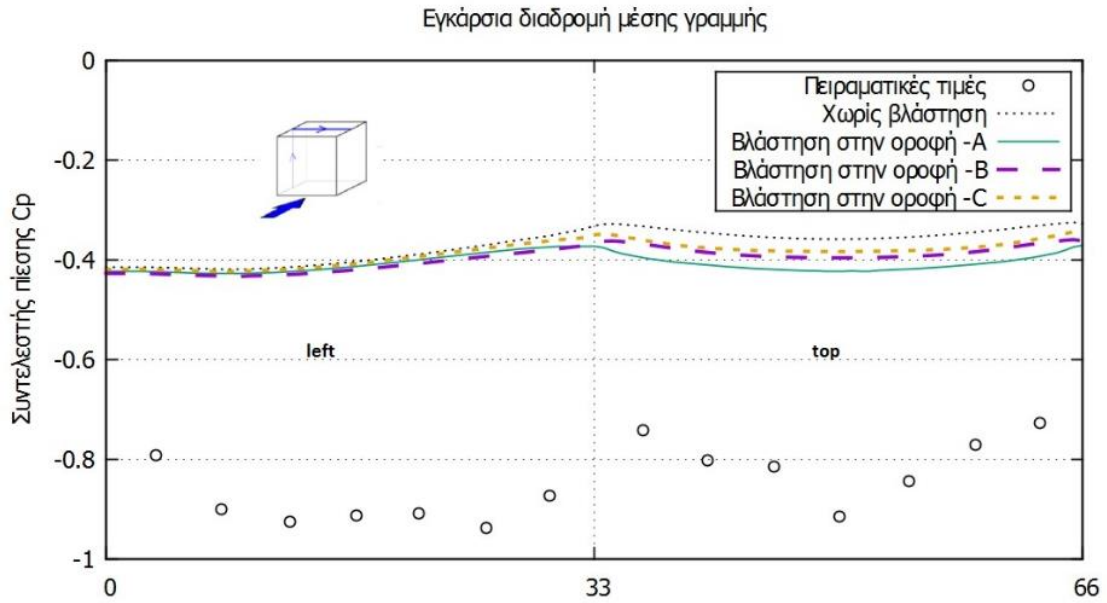
**Zoom in:**



**Σχήμα 8.64.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

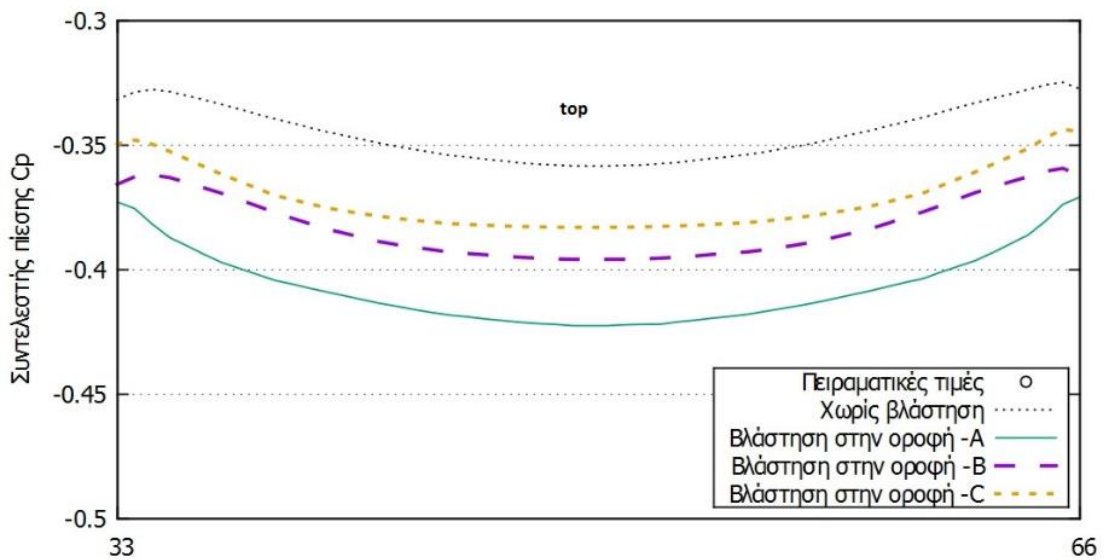


**Σχήμα 8.65.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



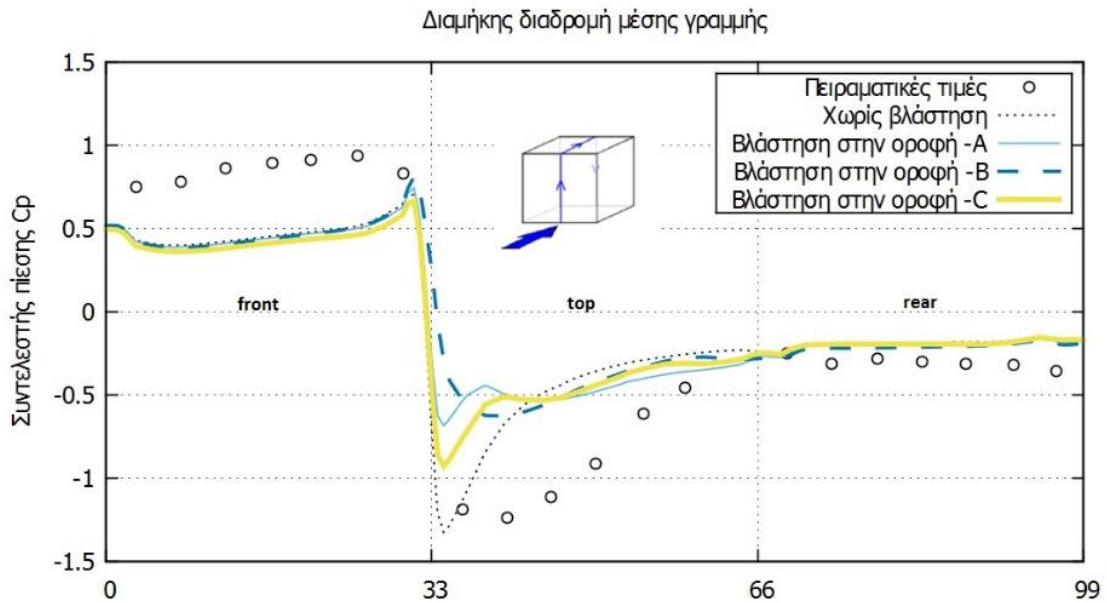
Σχήμα 8.66. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά, οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

**Zoom in:**



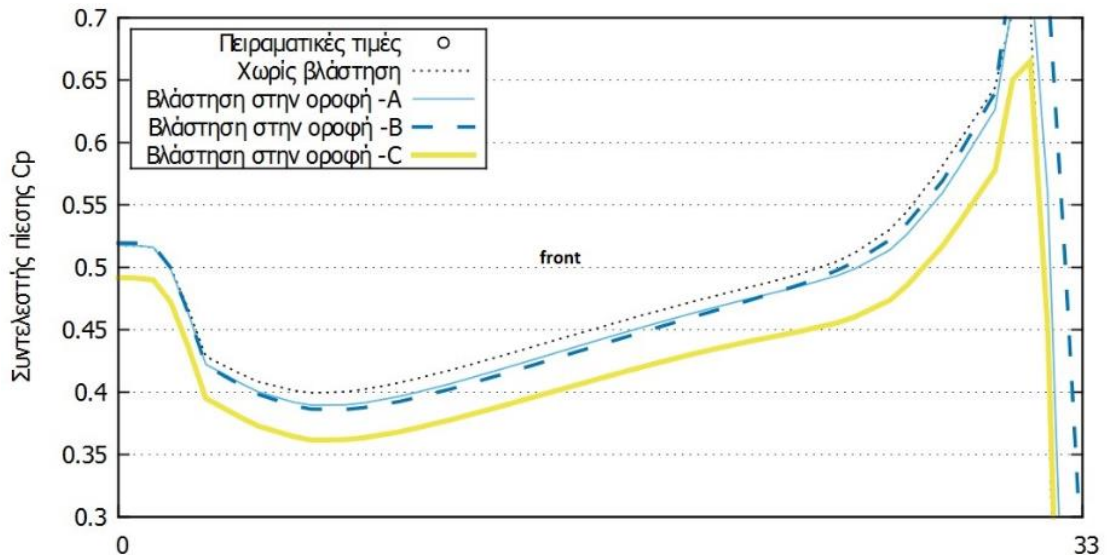
Σχήμα 8. 67. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

$C_D \times LAD = 0,3 \times 5$



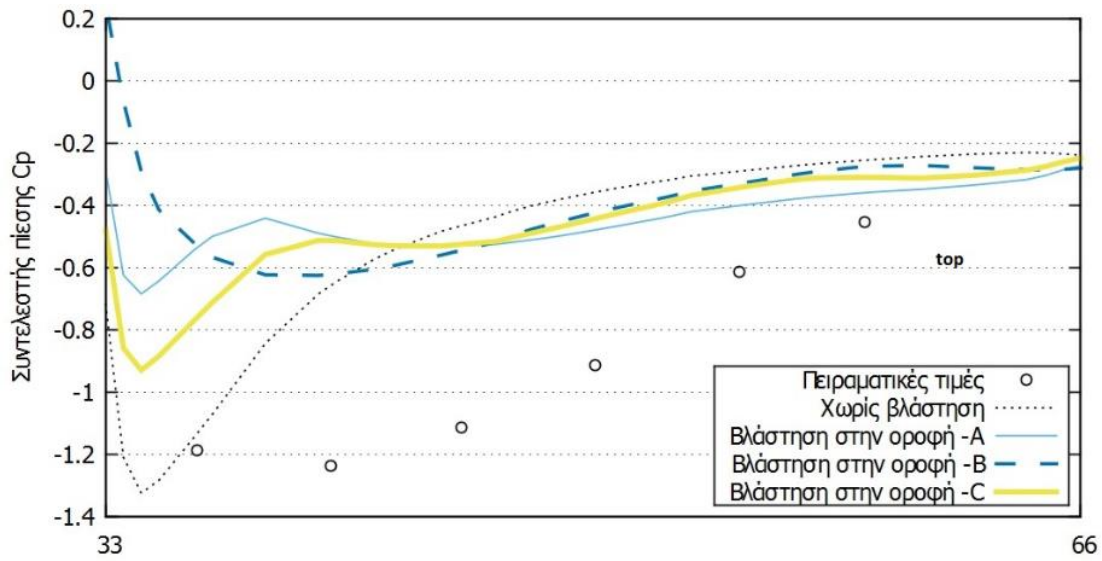
Σχήμα 8.68. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**

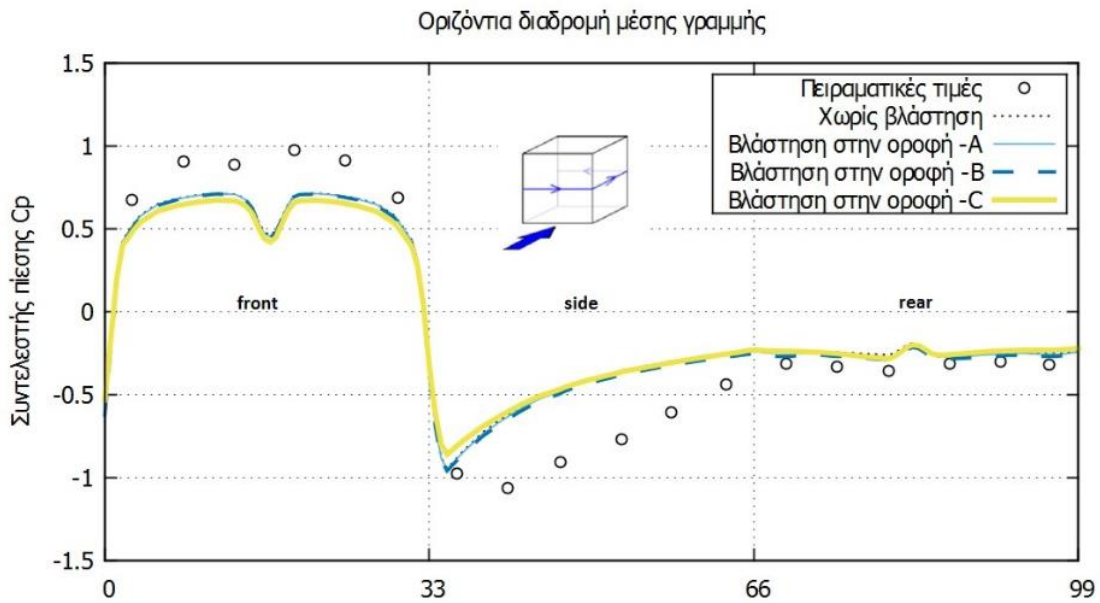


Σχήμα 8.69. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

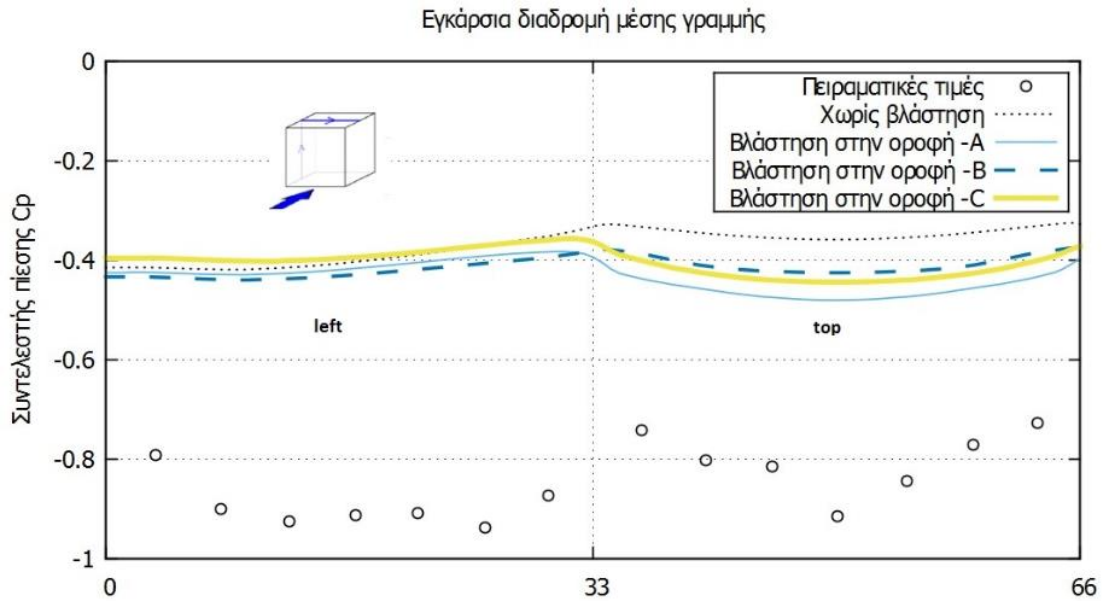
**Zoom in:**



Σχήμα 8.70. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περιφράξης (C).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

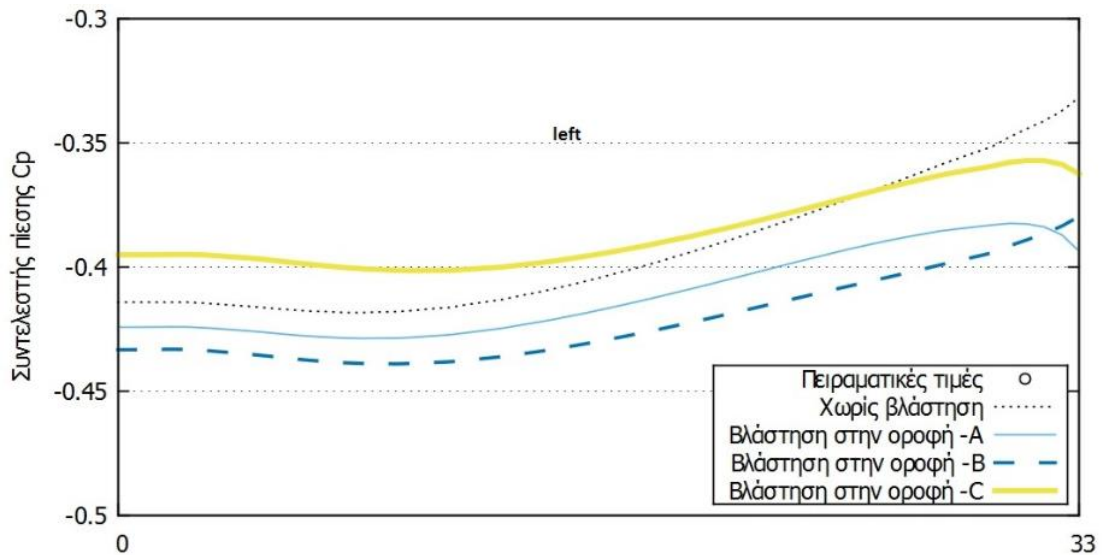


Σχήμα 8.71. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περιφράξης (C).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .



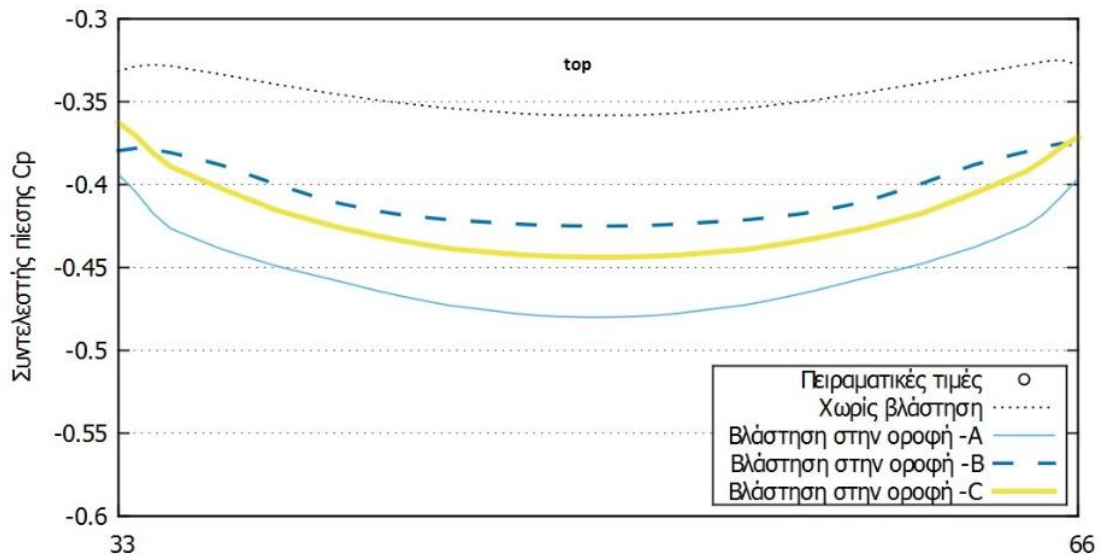
Σχήμα 8.72. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**



Σχήμα 8.73. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην αριστερή πλευρά κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**



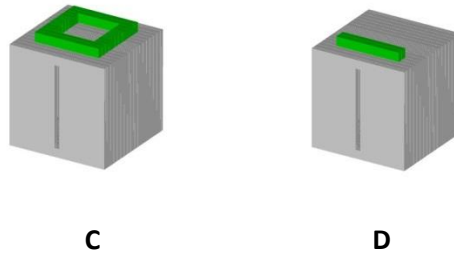
**Σχήμα 8.74.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

Βλέπουμε ότι η περίπτωση που δίνει τη μικρότερη βύθιση πίεσης στην αρχή της οροφής κατά τη διαμήκη διαδρομή είναι η διάταξη B, όπου η βλάστηση έχει τοποθετηθεί στην περιφέρεια της ταράτσας. Η παρουσία πρασίνου στην ανάντι οριζόντια ακμή της οροφής επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, καθώς ανακόπτει την απότομη αλλαγή πίεσης στο κτήριο, κάτι που πετυχαίνουν σε μικρότερο βαθμό οι διατάξεις με βλάστηση στο κέντρο του κύβου (A) και με βλάστηση ως περίφραξη (C) (Σχήμα 8.64, Σχήμα 8.70). Πάνω στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή, η πτώση πίεσης είναι σαφώς μεγαλύτερη για την περίπτωση A, αφού εκεί υπάρχει ο μεγαλύτερος όγκος πρασίνου. Στο ίδιο συμπέρασμα για την πτώση πίεσης στην οροφή καταλήγουμε και κατά την εγκάρσια διαδρομή (Σχήμα 8.64, Σχήμα 8.67, Σχήμα 8.70, Σχήμα 8.74).

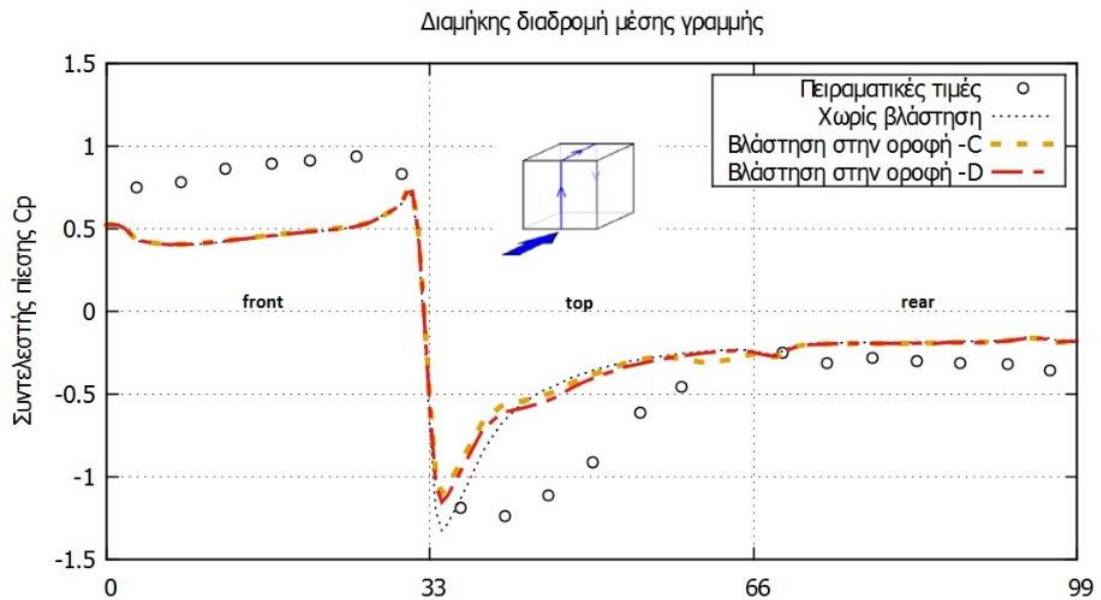
Όπως είδαμε και προηγουμένως, στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει βλάστηση στο κέντρο της οροφής του κύβου (B,C), η πίεση εκεί (κέντρο) προσεγγίζει την αντίστοιχη πίεση “γυμνού” κτηρίου (Σχήμα 8.64, Σχήμα 8.70). Σε συνέχεια αυτού, στο δεξί άκρο της οροφής στην περίπτωση C, η πίεση προσεγγίζει και πάλι την πίεση του “γυμνού” κτηρίου, σε αντίθεση με την περίπτωση B.

Γενικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι καμπύλες πίεσης στην οροφή “ομοιάζουν” στη διάταξη της βλάστησης κάθε φορά.

### 8.5.2 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην οροφή C & D

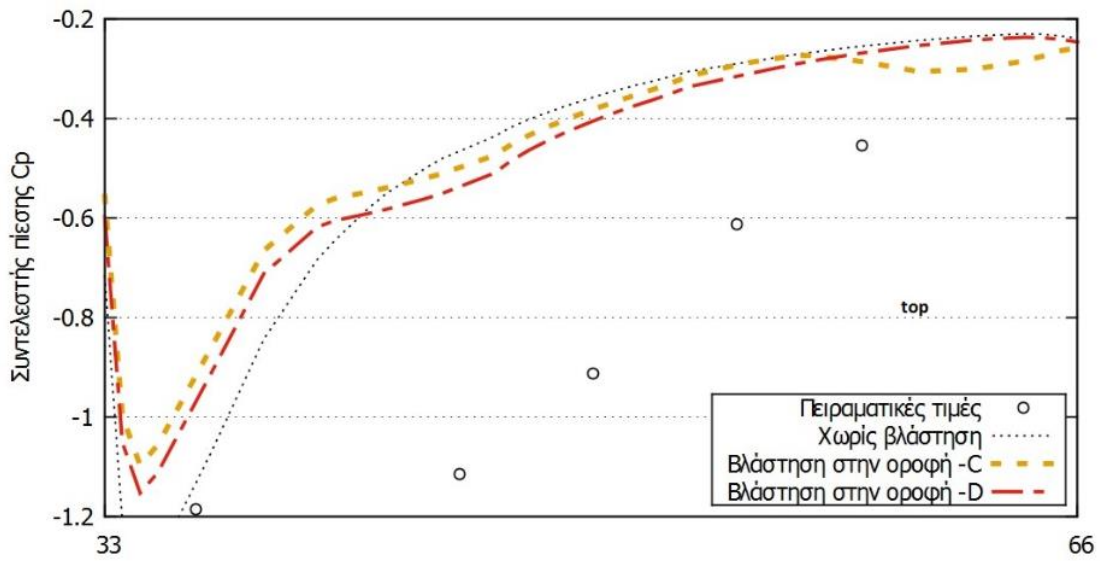


$C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$

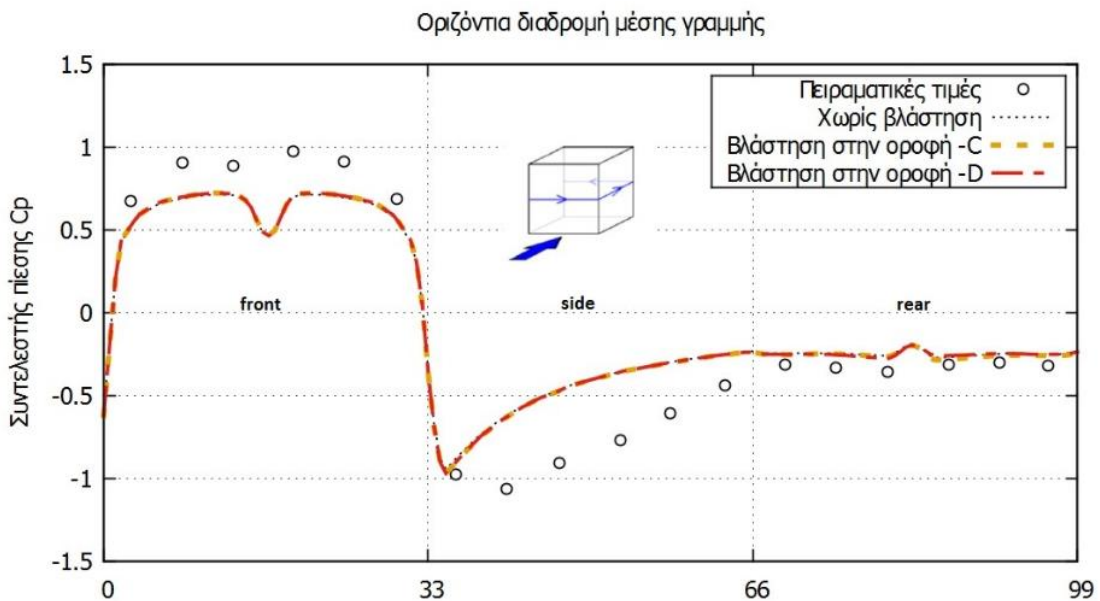


Σχήμα 8.75. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

**Zoom in:**

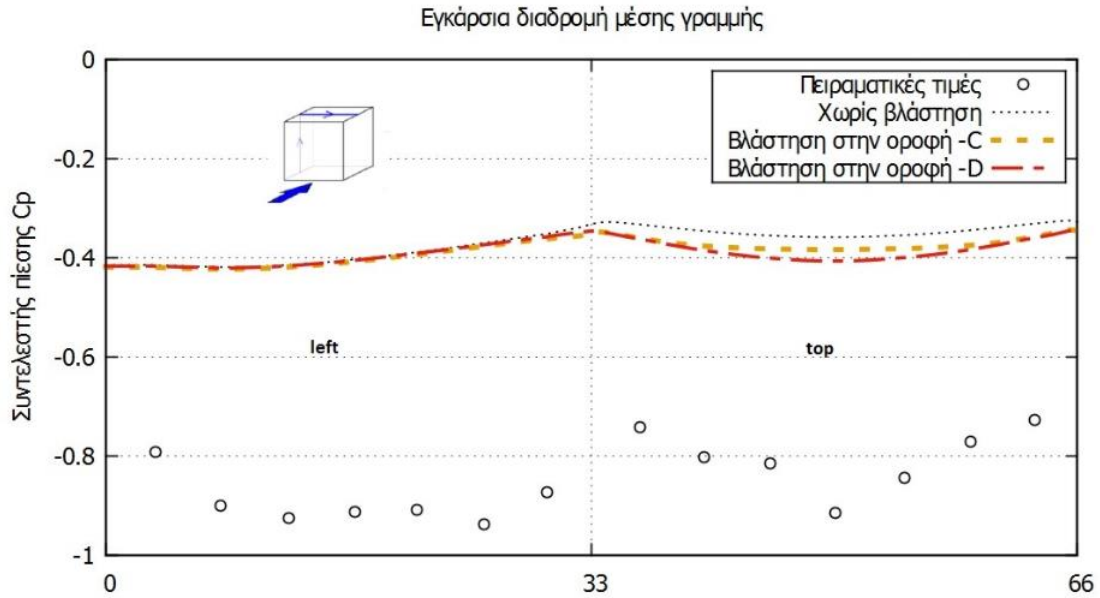


Σχήμα 8.76. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



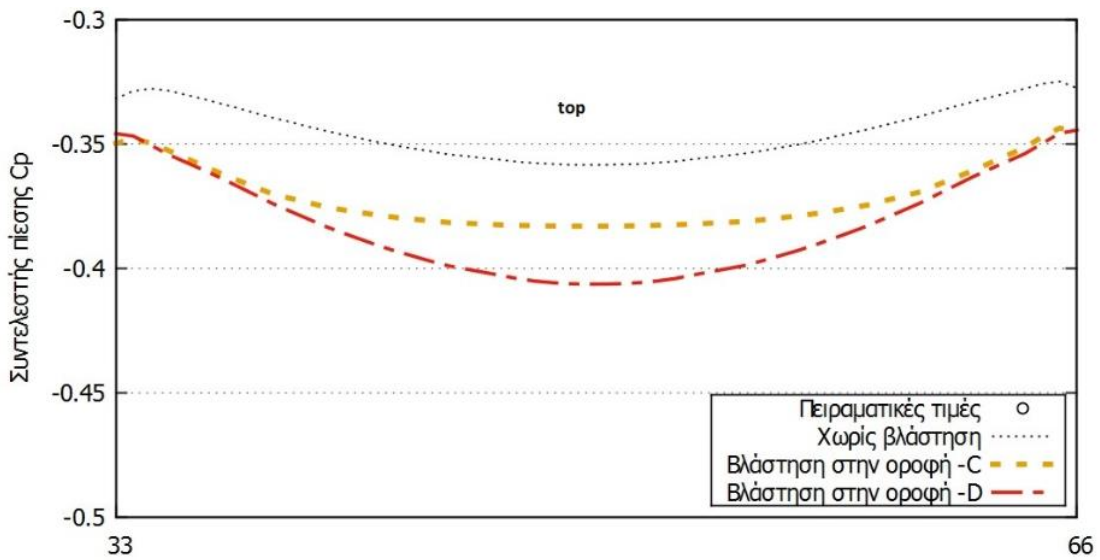
Σχήμα 8.77. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .





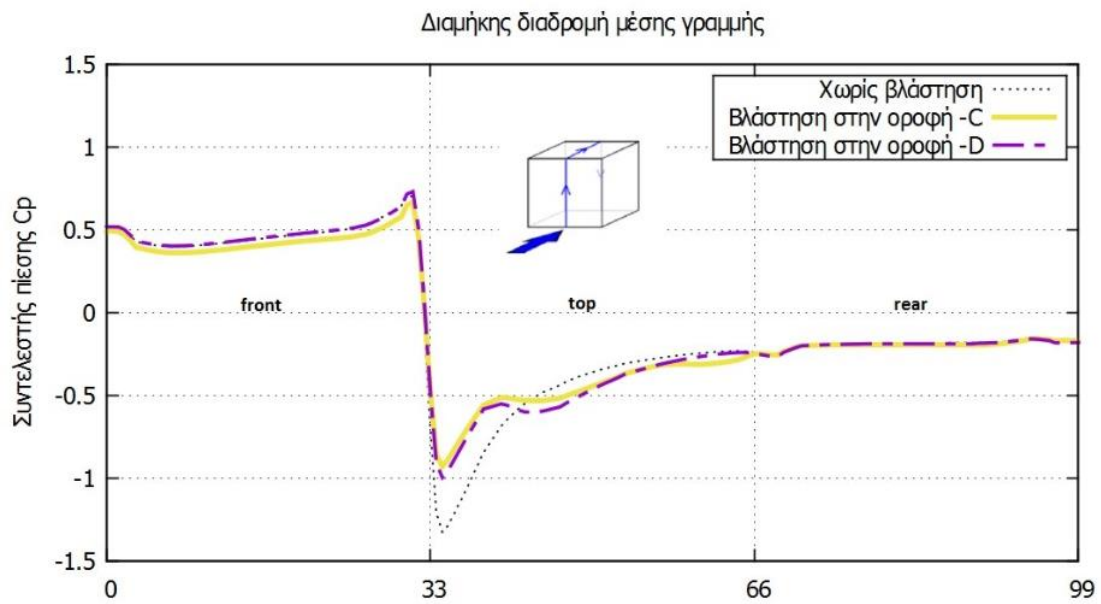
Σχήμα 8.78. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

**Zoom in:**



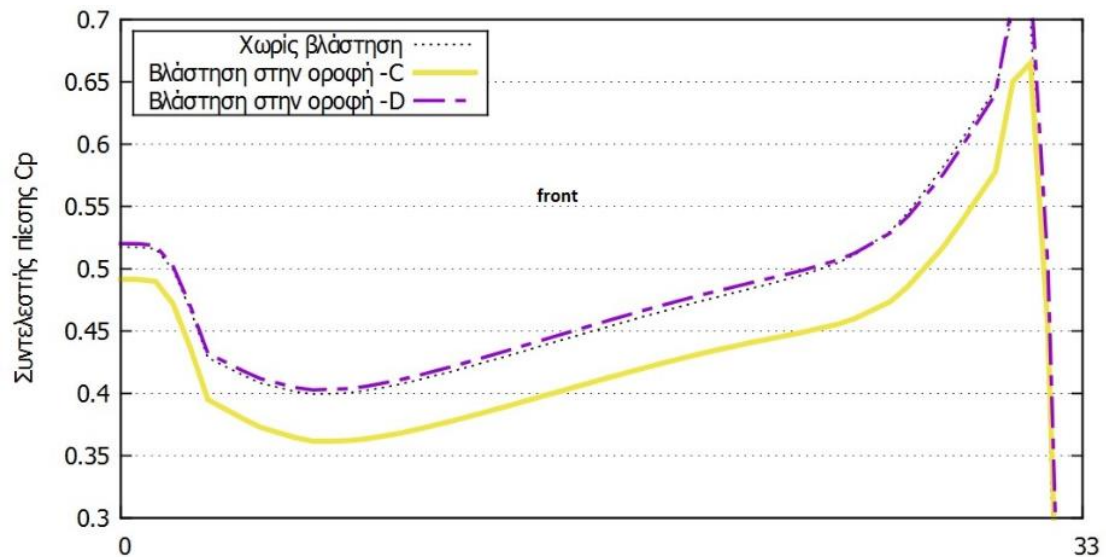
Σχήμα 8.79. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή του κτηρίου κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

$C_D \times LAD = 0,3 \times 5$



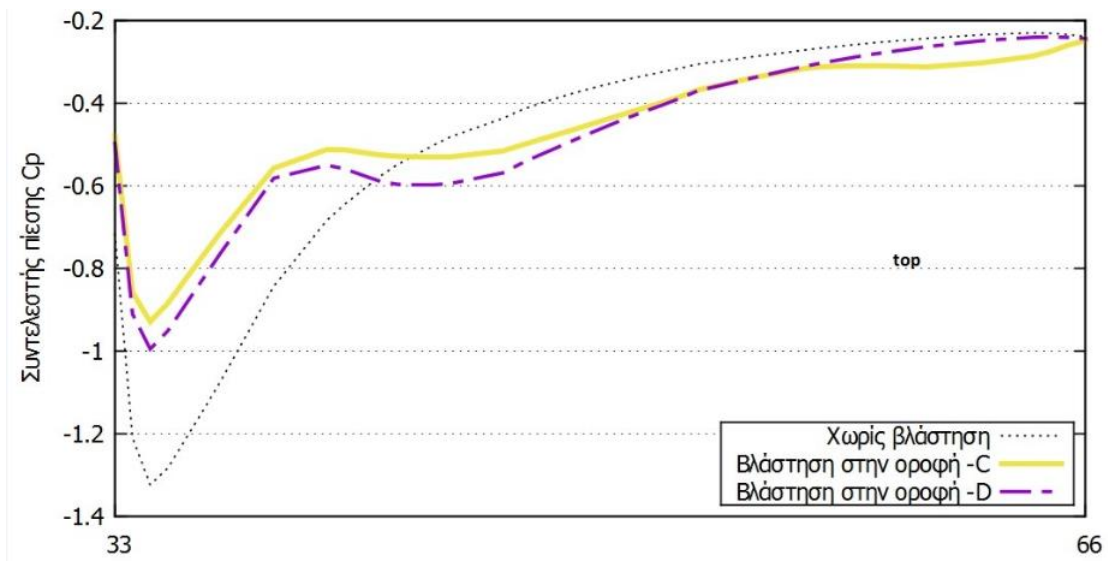
Σχήμα 8.80. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**

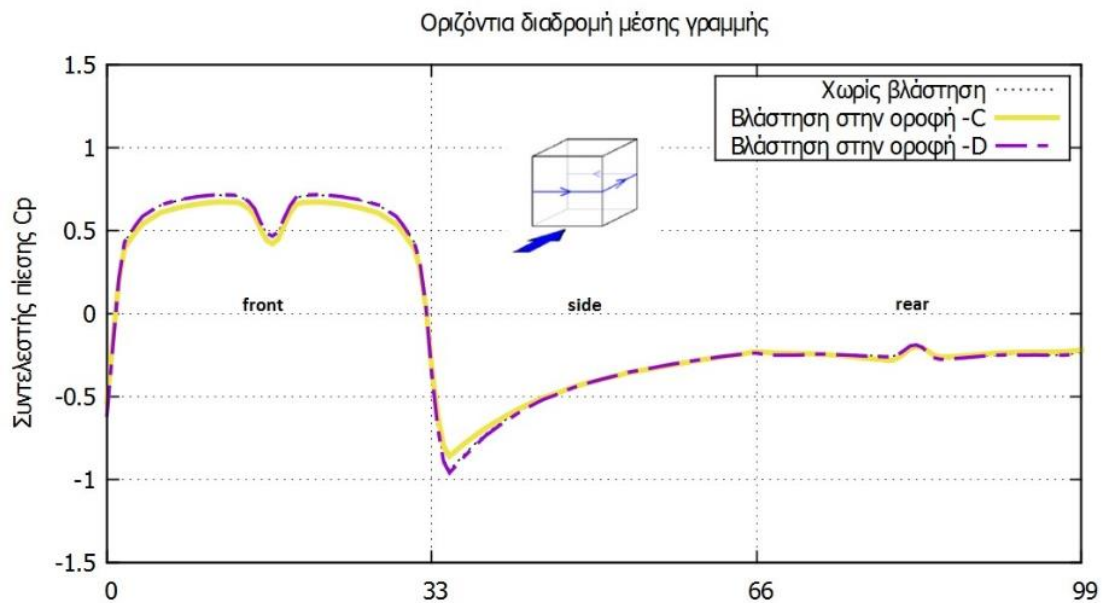


Σχήμα 8.81. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

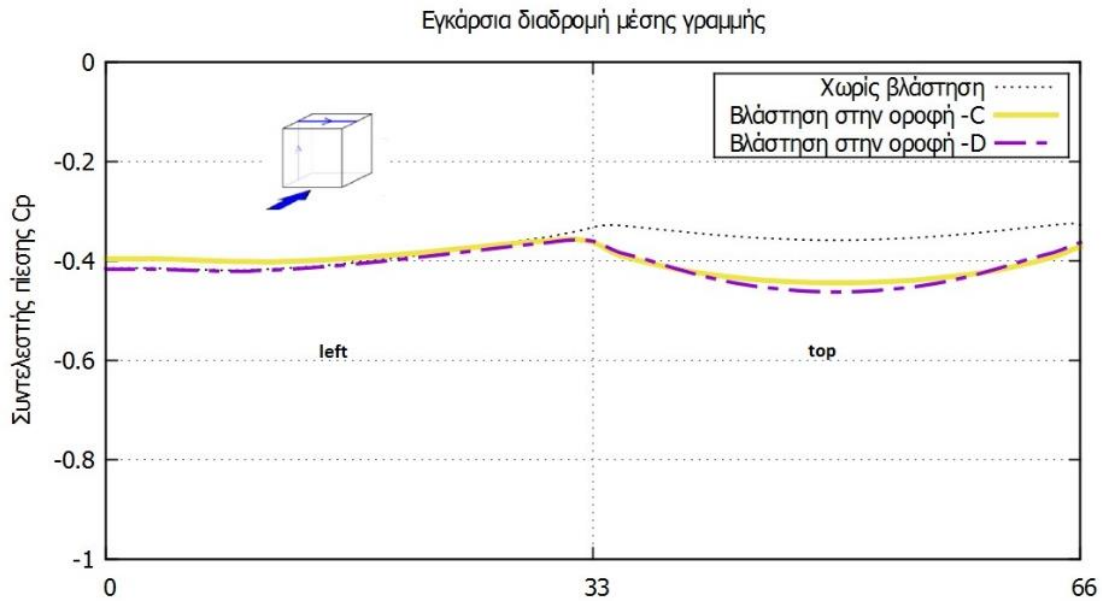
**Zoom in:**



Σχήμα 8.82. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή του κτηρίου κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

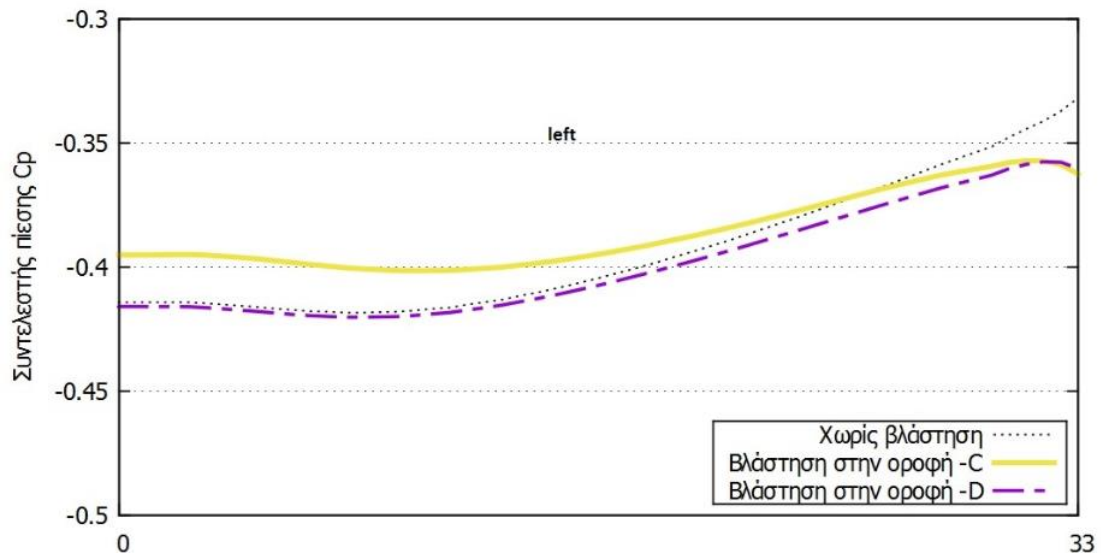


Σχήμα 8.83. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .



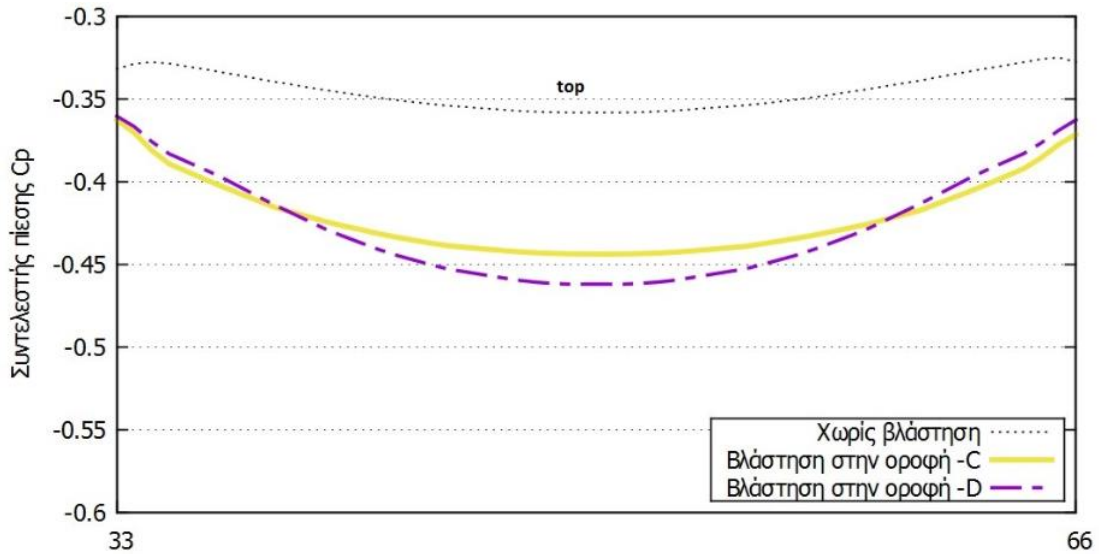
Σχήμα 8.84. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**



Σχήμα 8.85. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην αριστερή πλευρά του κτηρίου κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**

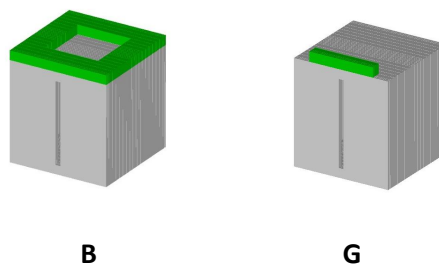


**Σχήμα 8.86.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή του κτηρίου κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

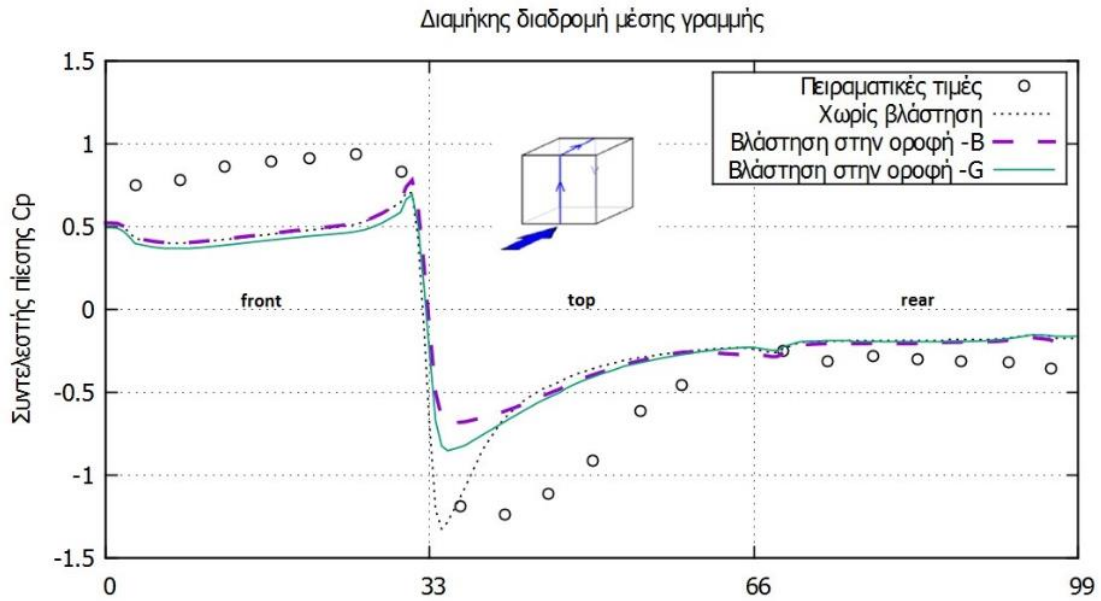
Η σύγκριση αυτών των δύο περιπτώσεων γίνεται ώστε να μελετηθούν οι διαφορές στο πεδίο πίεσης εφόσον απομονώσουμε τη μία σειρά θάμνων από τη διάταξη C (περίφραξη). Πράγματι, τα αποτελέσματα δίνουν αρκετά καλή σύγκλιση των δύο γεωμετριών (λίγο μεγαλύτερη πτώση πίεσης για τη γεωμετρία D), με τη διαφορά όμως ότι παρατηρείται εκ νέου πτώση πίεσης στην περιοχή δεξιά της οροφής για την περίπτωση C, που προφανώς οφείλεται στην ύπαρξη φυτών εκεί, εν αντιθέσει με την D (Σχήμα 8.76, Σχήμα 8.82).

Επίσης, παρατηρείται σημαντική πτώση πίεσης στην ανάντι πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή για την περίπτωση C, όταν το  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$  (Σχήμα 8.81), κάτι που δεν διαπιστώνεται για μικρότερο  $C_D \times LAD$ .

**8.5.3 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην οροφή B & G**

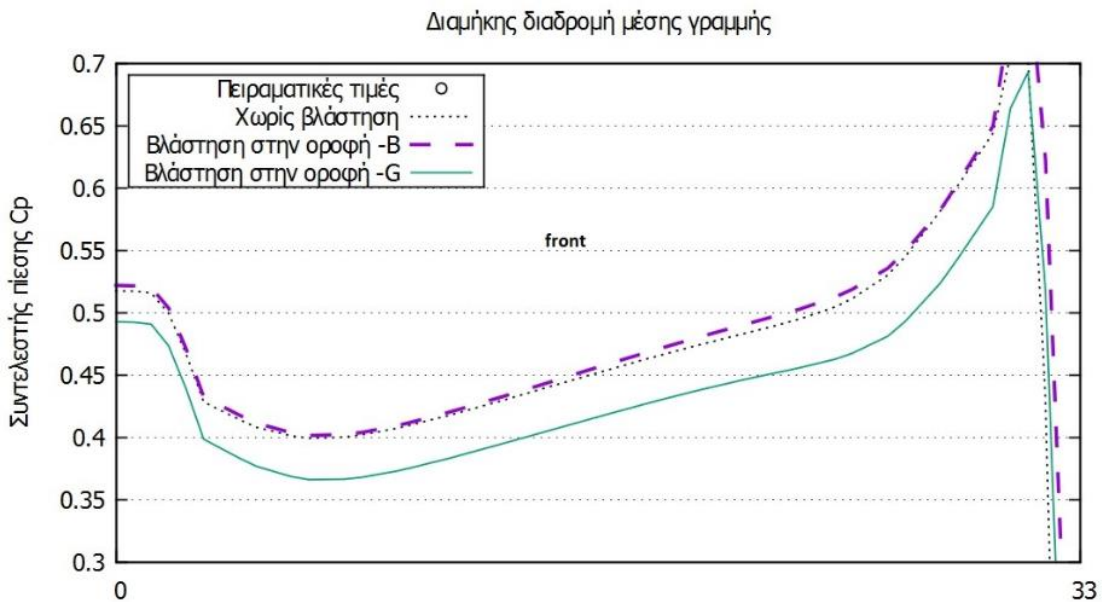


$C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$



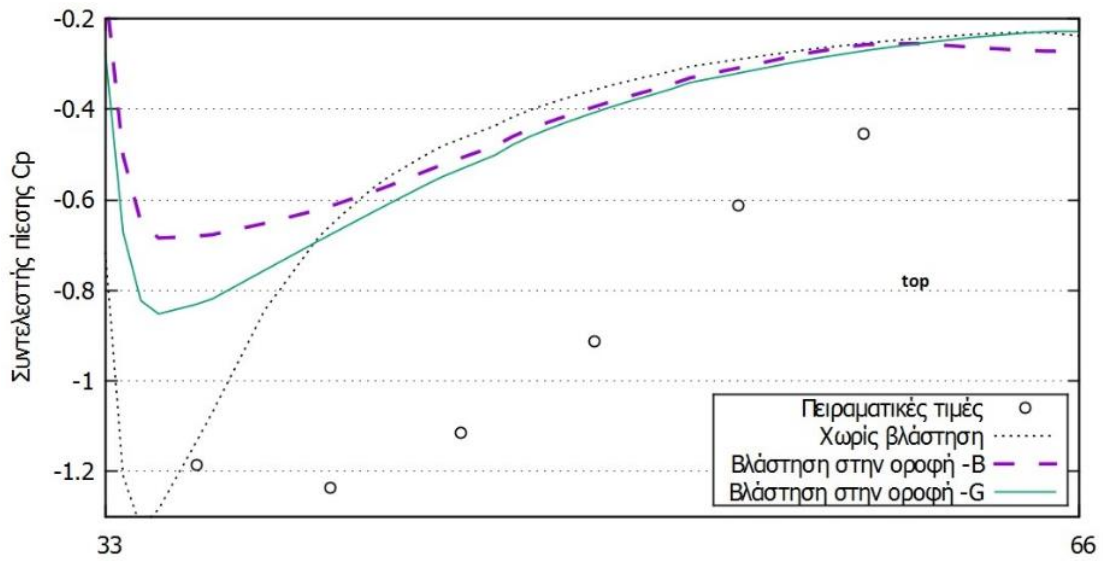
Σχήμα 8.87. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και οπίσθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

**Zoom in:**

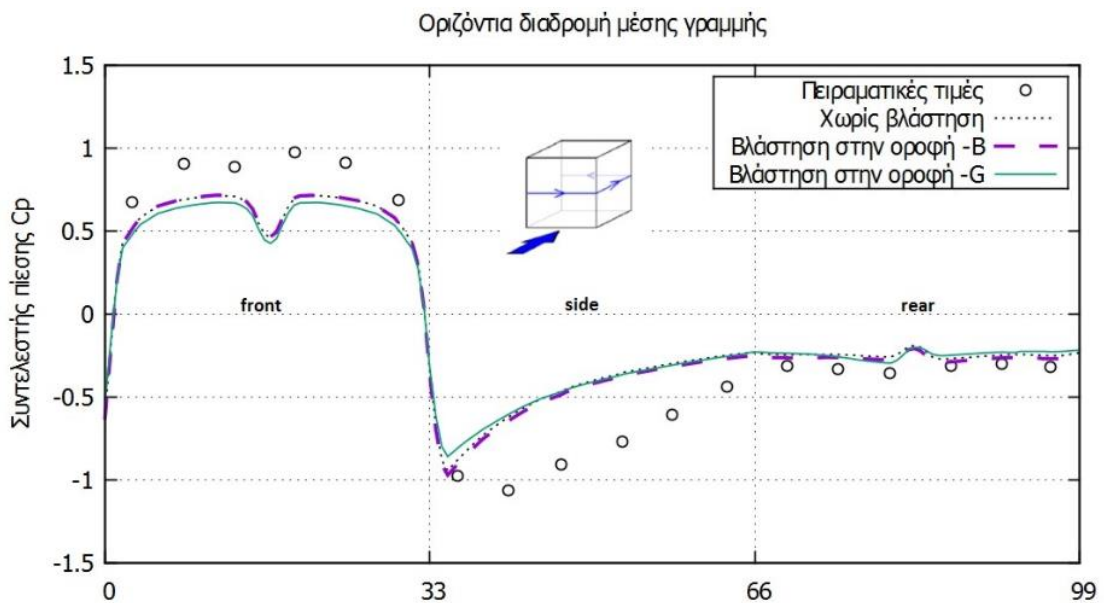


Σχήμα 8.88. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

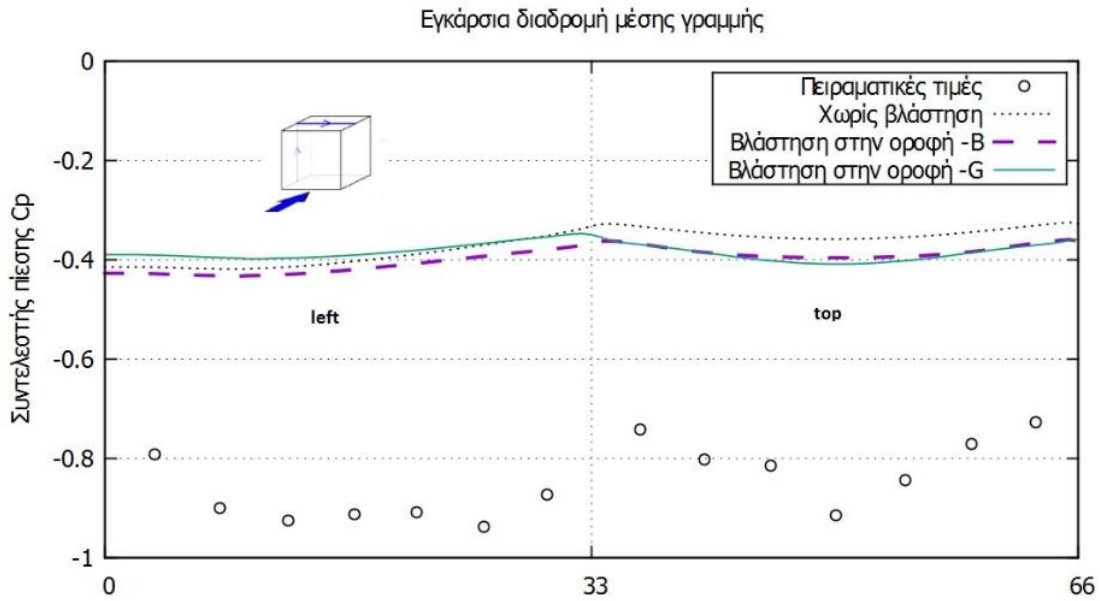
**Zoom in:**



Σχήμα 8.89. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή του κτηρίου κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

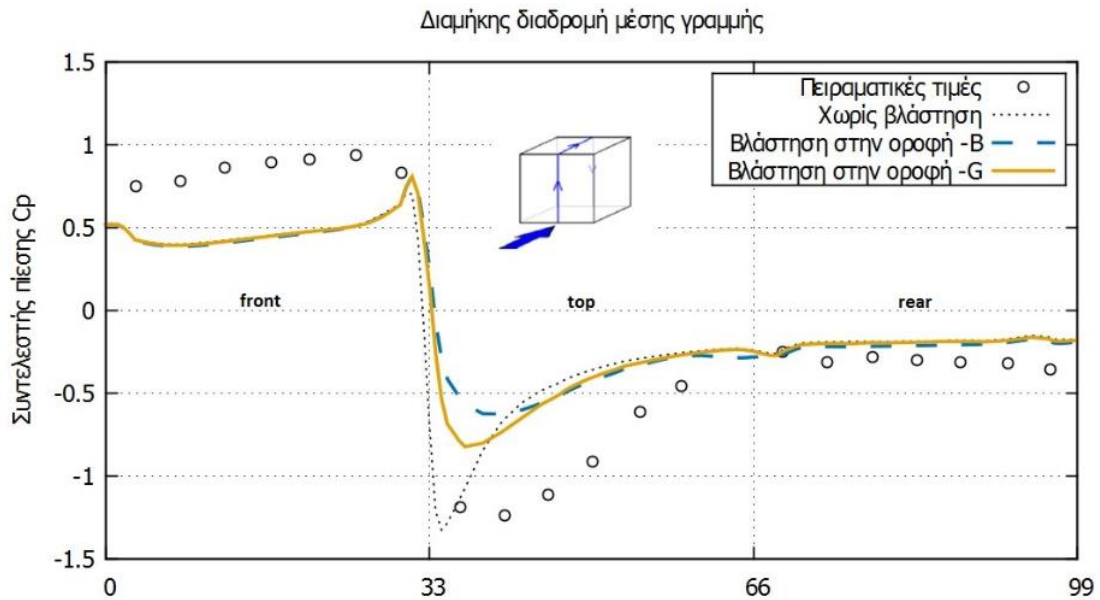


Σχήμα 8.90. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



Σχήμα 8.91. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

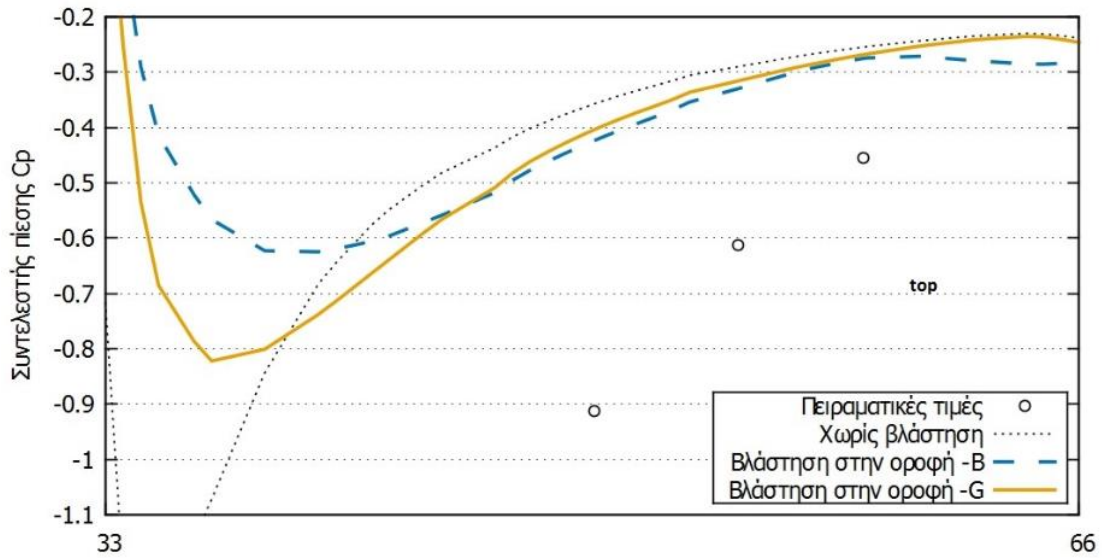
$C_D \times LAD = 0,3 \times 5$



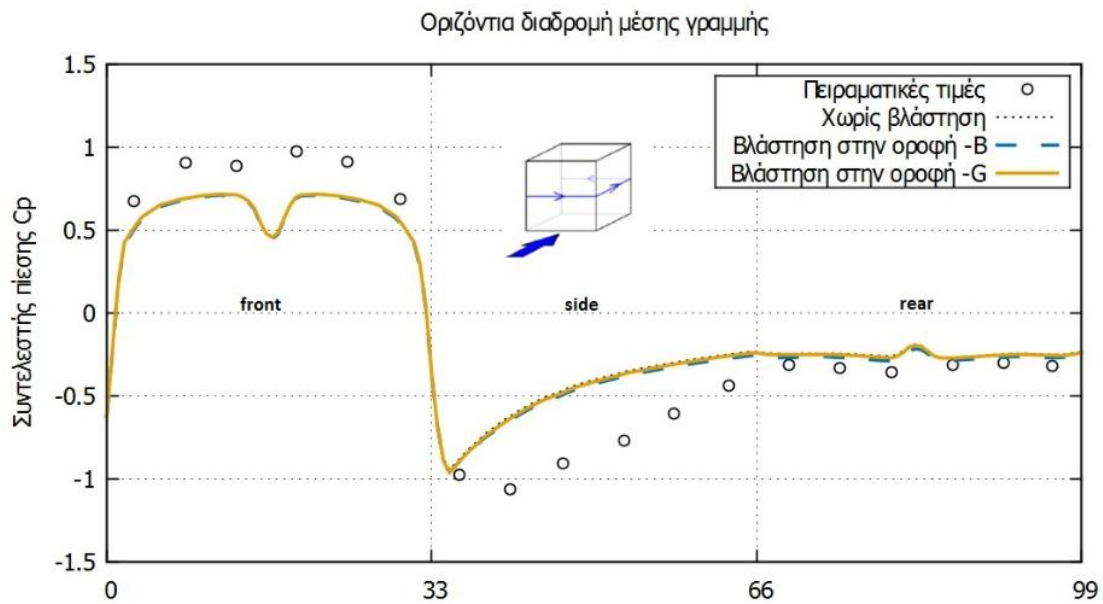
Σχήμα 8.92. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .



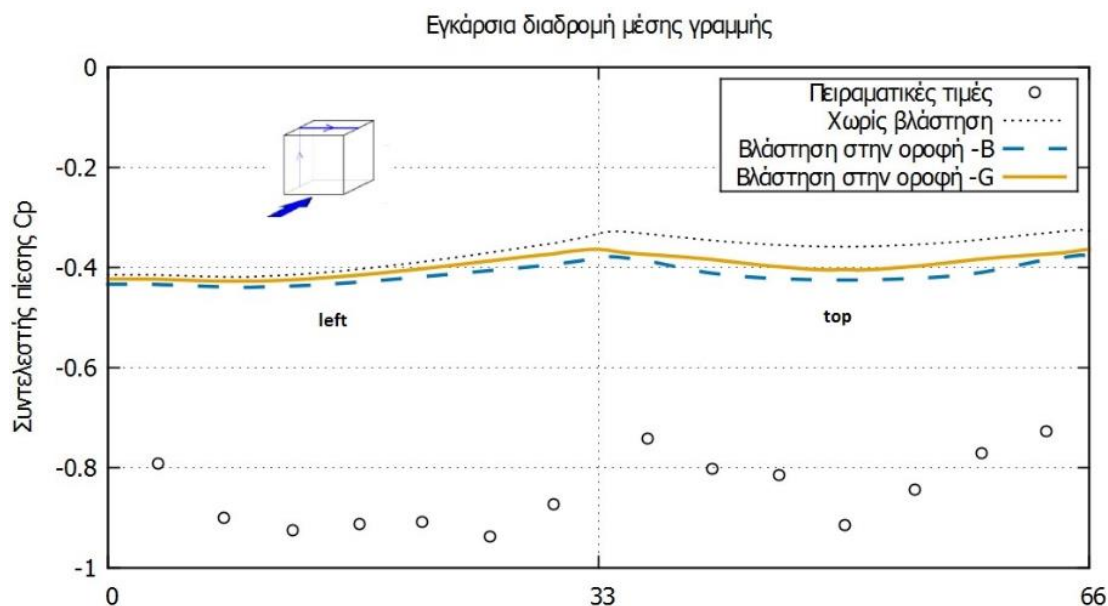
**Zoom in:**



**Σχήμα 8.93.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



**Σχήμα 8.94.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



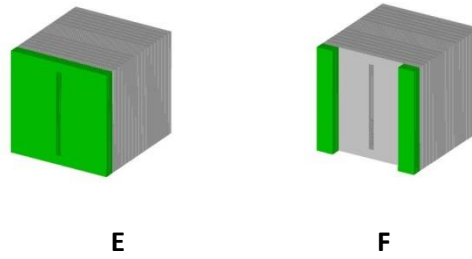
**Σχήμα 8.95.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της οροφής (G).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

Σε αυτό το σημείο, γίνεται προσπάθεια να συγκριθούν οι επιδράσεις των διαφορετικών διατάξεων της βλάστησης τοποθετημένης στην περιφέρεια της οροφής.

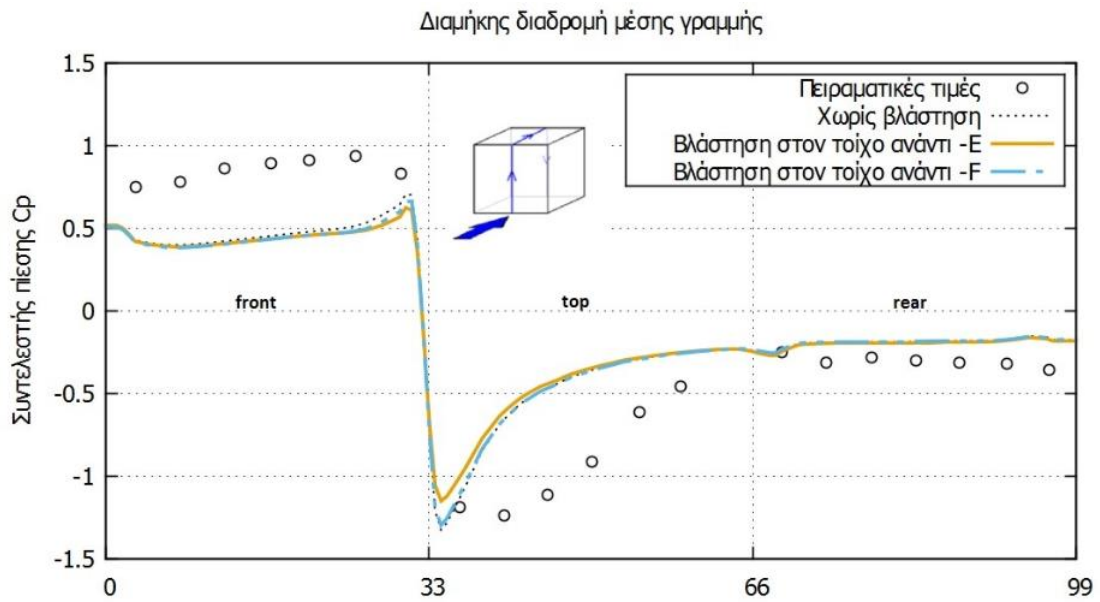
Όπως αναμενόταν, η βύθιση της πίεσης στην ανάντι οριζόντια ακμή της οροφής είναι αρκετά μικρότερη και για τις δύο περιπτώσεις σε σχέση με το ‘γυμνό κτήριο’. Όμως, ακόμα πιο καλά αποτελέσματα προκύπτουν εξαιτίας της βλάστησης σε όλη την περίμετρο, πιθανώς εξαιτίας του μεγαλύτερου όγκου πρασίνου σε αυτή την περίπτωση. Βέβαια, αφού ανακτάται η πίεση, για τον ίδιο λόγο η πτώση πίεσης κατά μήκος της οροφής είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση B (Σχήμα 8.89, Σχήμα 8.93, Σχήμα 8.95).

Επίσης, εξαιτίας της ύπαρξης πρασίνου και στη δεξιά πλευρά της οροφής (διάταξη B), εντοπίζεται εκ νέου πτώση της πίεσης εκεί, εν αντιθέσει με την περίπτωση G όπου δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο, αφού η επίδραση της βλάστησης τοποθετημένης στο ανάντι άκρο είναι πλέον μηδαμινή (Σχήμα 8.89, Σχήμα 8.93).

### 8.5.4 Σύγκριση μεταξύ των τύπων βλάστησης στην πρόσοψη E & F

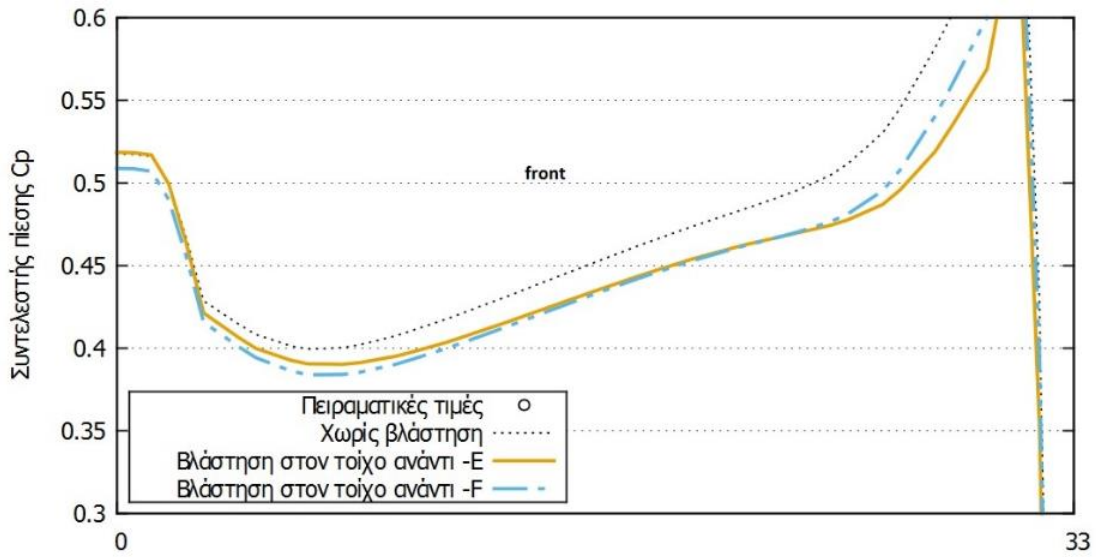


$$C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$$



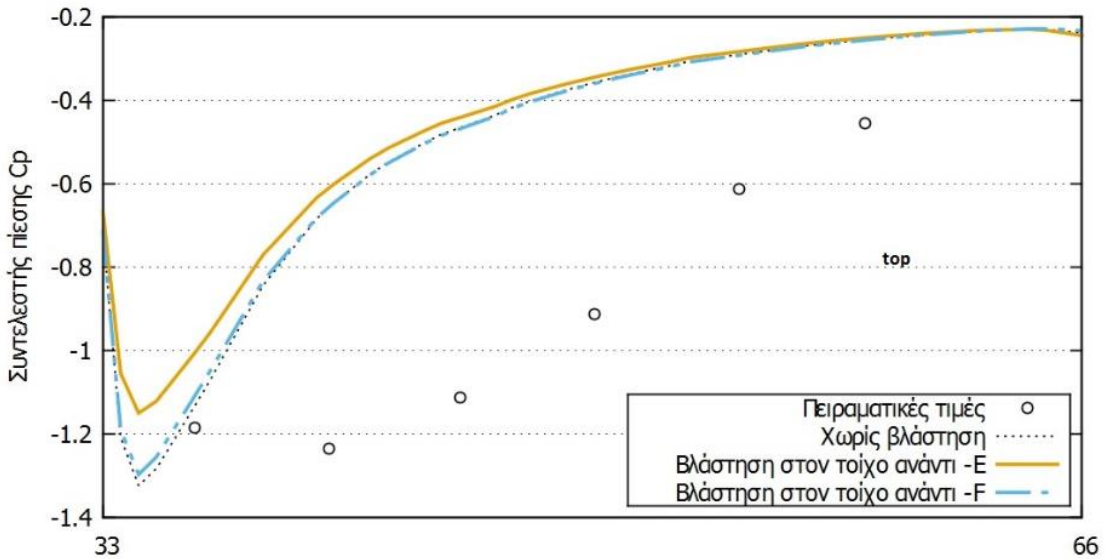
Σχήμα 8.96. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

**Zoom in:**

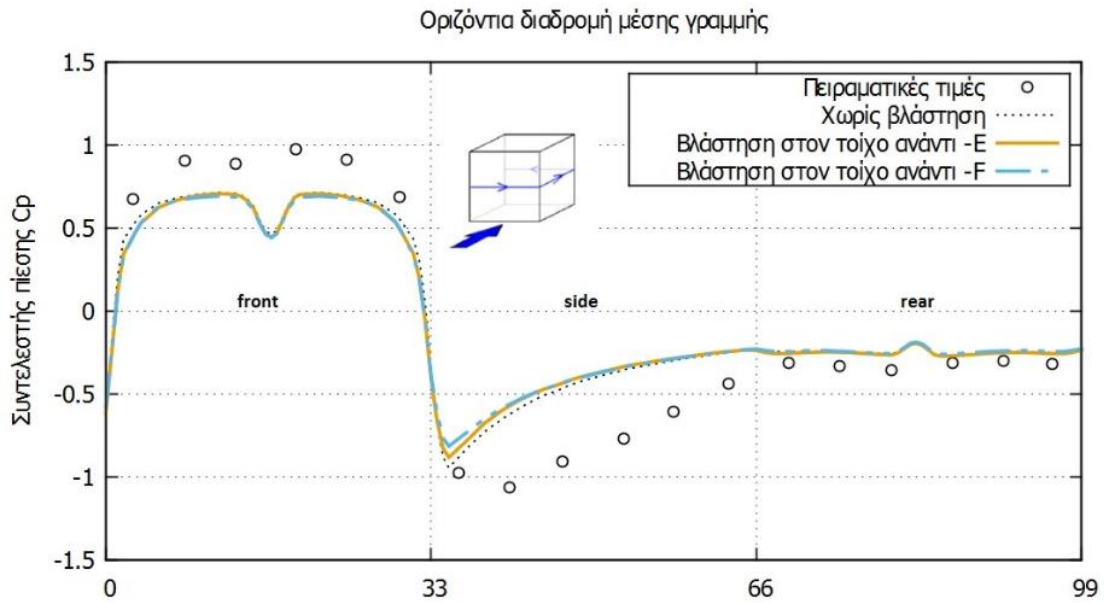


**Σχήμα 8.97.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

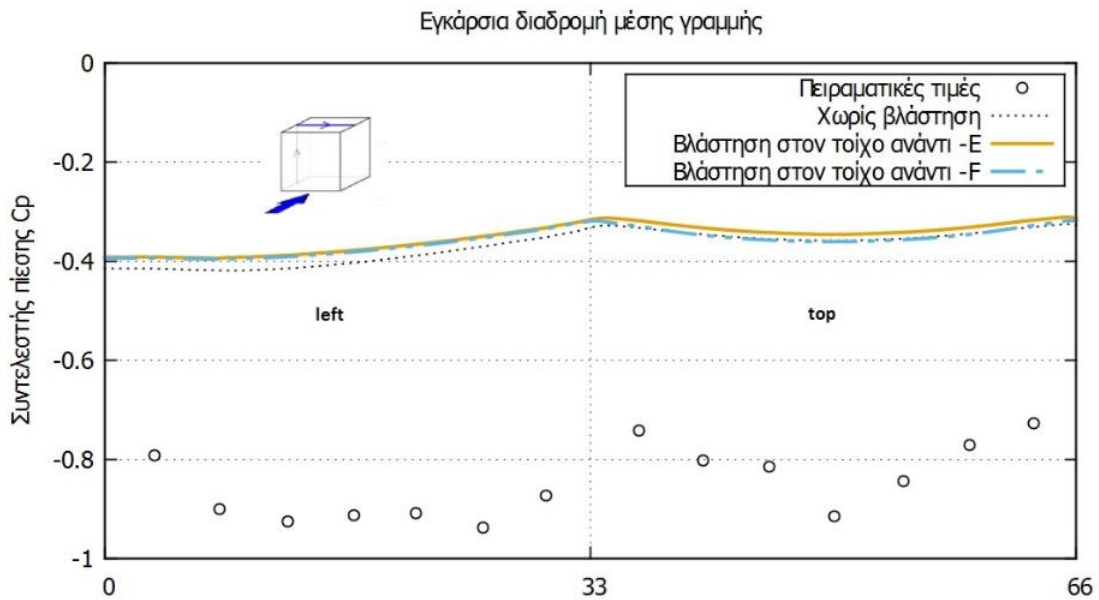
**Zoom in:**



**Σχήμα 8.98.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή του κτηρίου κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

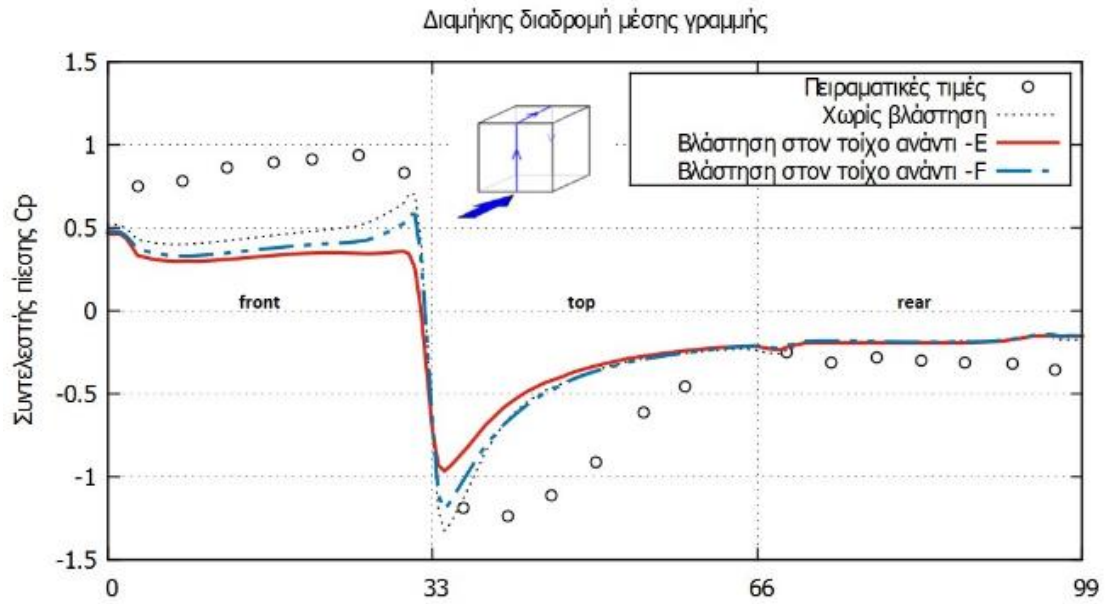


Σχήμα 8.99. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



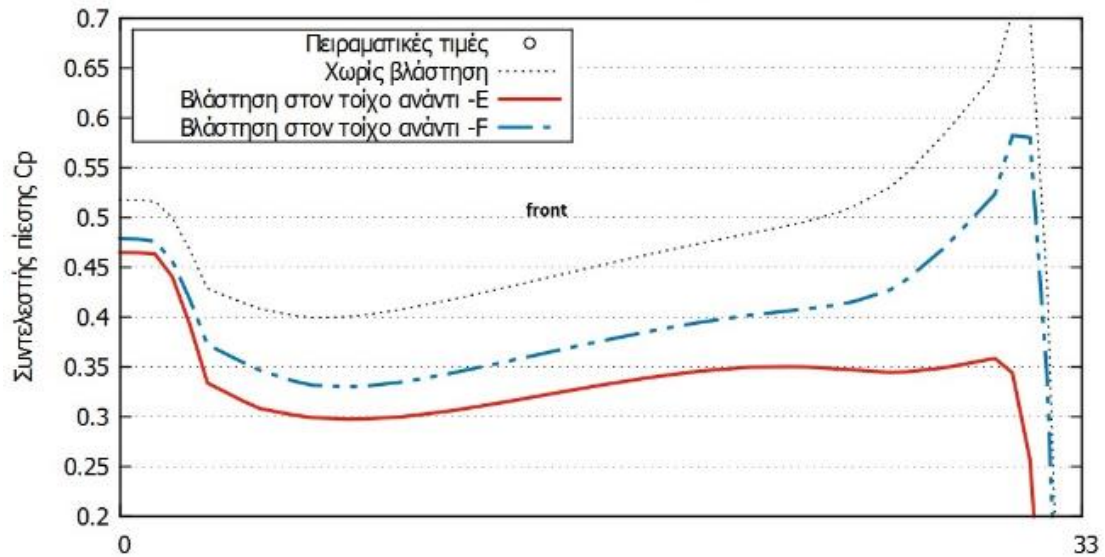
Σχήμα 8.100. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .

$C_D \times LAD = 0,3 \times 5$



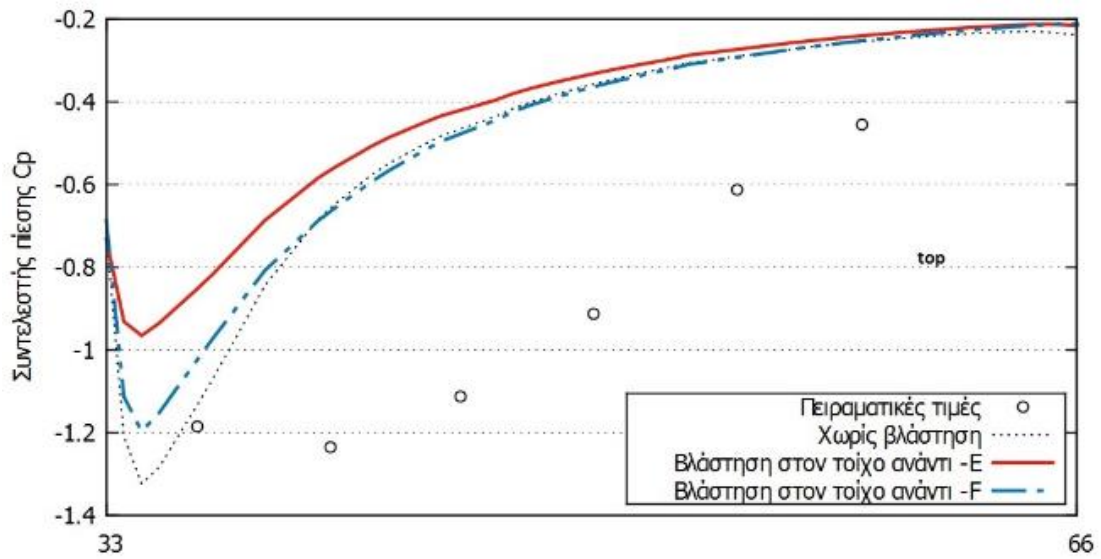
Σχήμα 8.101. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, οροφή και όπισθεν) κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**

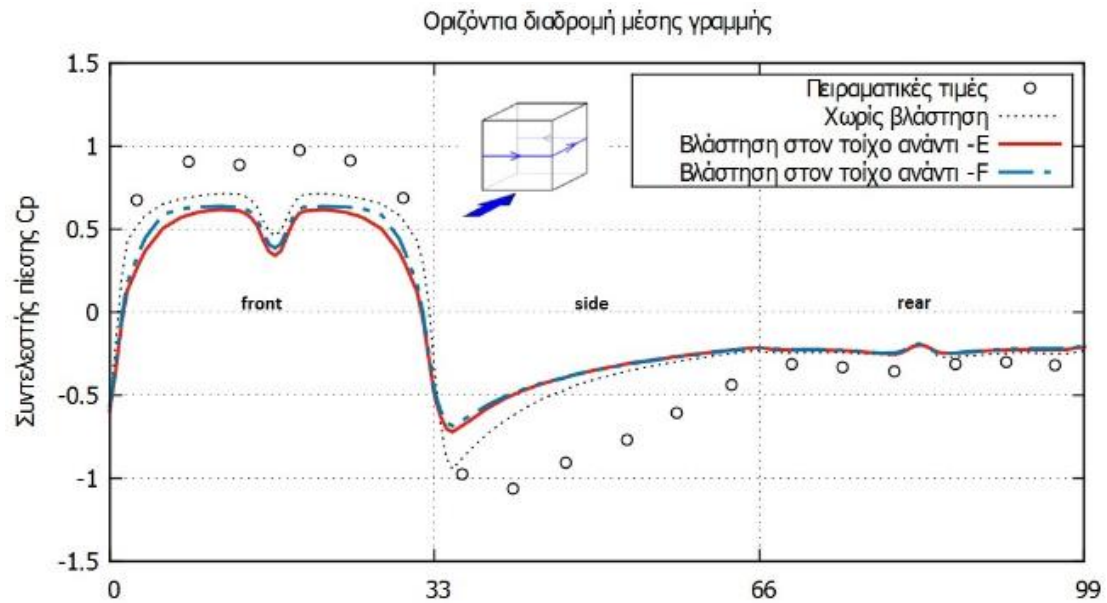


Σχήμα 8.102. Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**

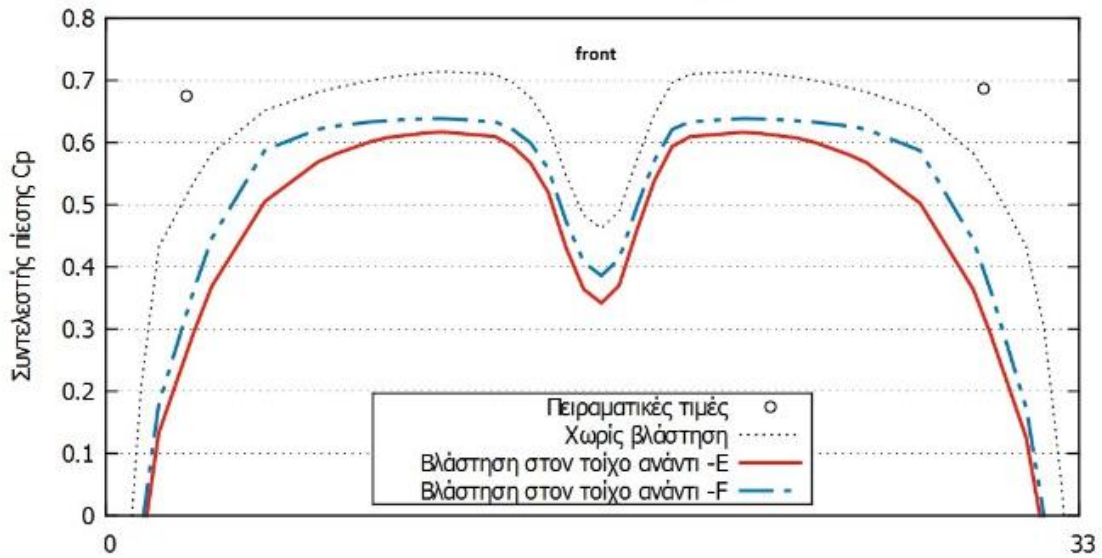


**Σχήμα 8.103.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή του κτηρίου κατά τη διαμήκη διαδρομή μέσω γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .

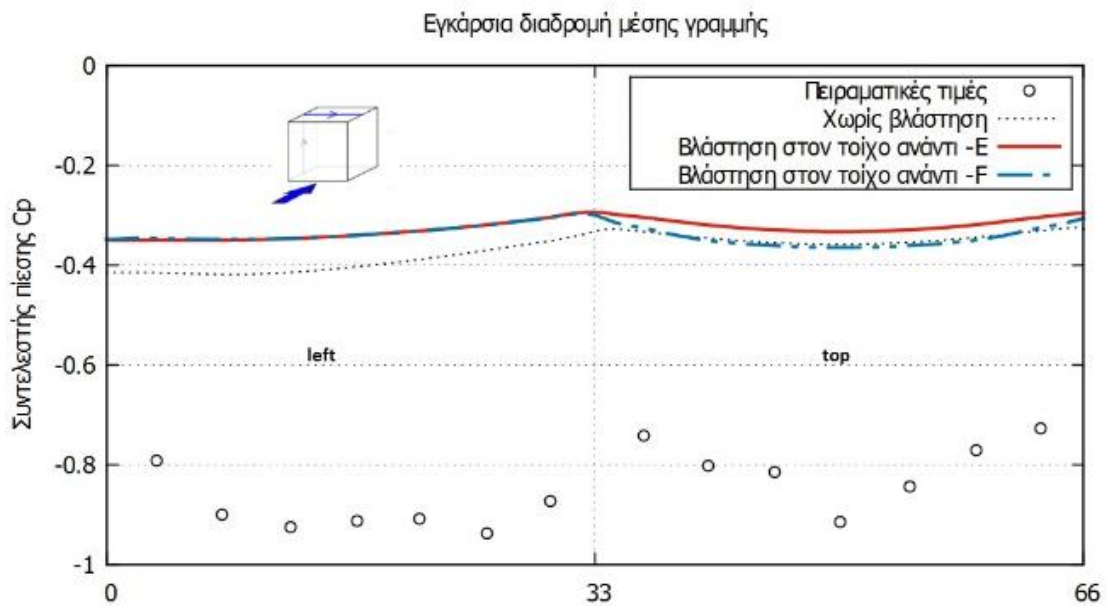


**Σχήμα 8.104.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις τρεις πλευρές του κτηρίου (μπροστινή, πλαϊνή και όπισθεν) κατά την οριζόντια διαδρομή μέσω γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .

**Zoom in:**



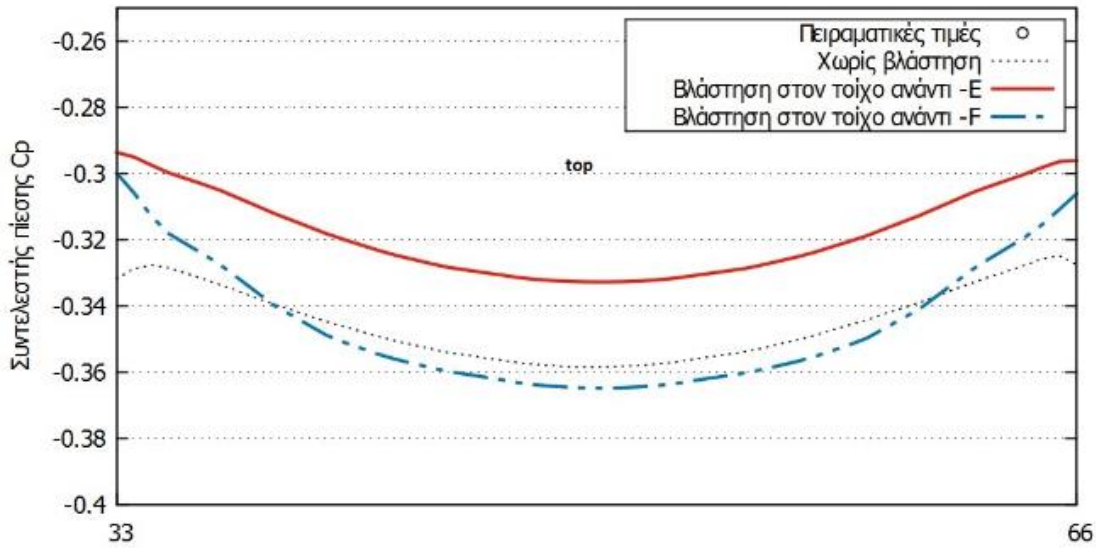
**Σχήμα 8.105.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στη μπροστινή πλευρά κατά την οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



**Σχήμα 8.106.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στις δυο πλευρές του κτηρίου (πλαϊνή αριστερά και οροφή) κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



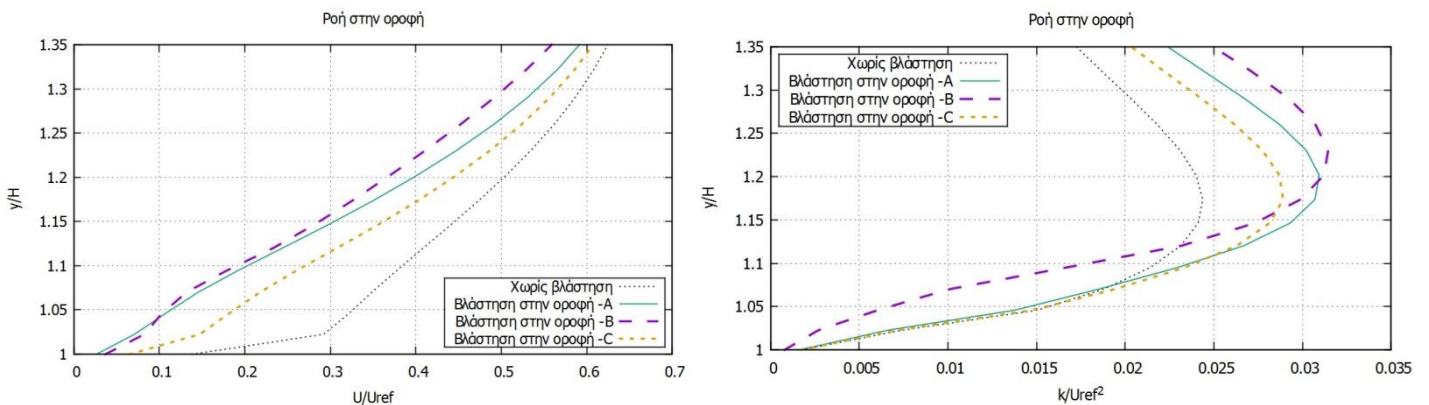
**Zoom in:**



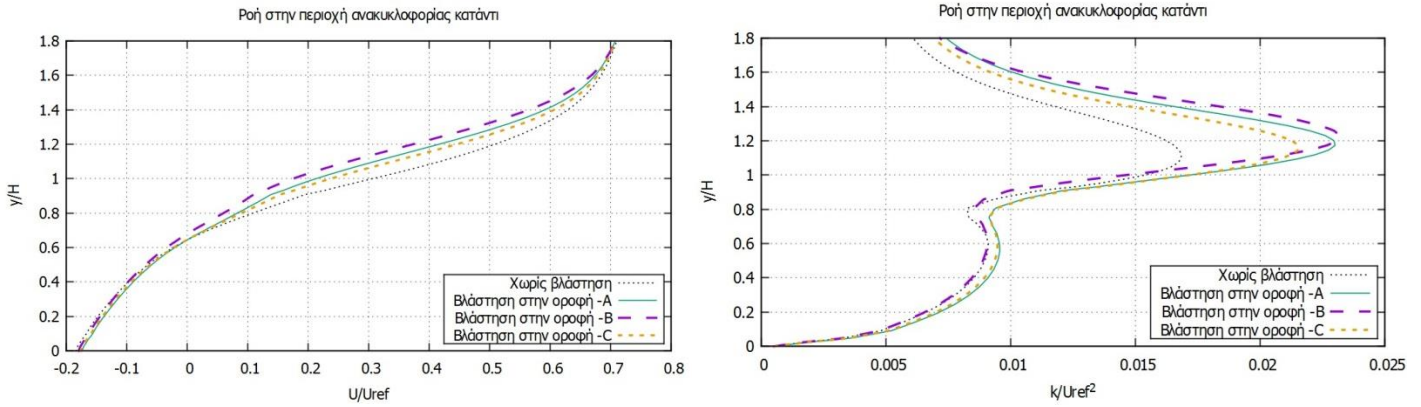
**Σχήμα 8.107.** Κατανομή του συντελεστή πίεσης στην οροφή κατά την εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής για βλάστηση τοποθετημένη στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

Όσον αφορά τις πράσινες προσόψεις, παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση πίεσης στην ανάντι πλευρά για την περίπτωση όπου έχει τοποθετηθεί βλάστηση σε όλη την επιφάνεια της πλευράς (E). Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο το  $C_D \times LAD$ , τόσο πιο σημαντική είναι η απώλεια πίεσης (Σχήμα 8.97, Σχήμα 8.102, Σχήμα 8.105). Αυτό μεταφράζεται και σε μικρότερη βύθιση της πίεσης για την περίπτωση E στην αρχή της οροφής (Σχήμα 8.98, Σχήμα 8.103).

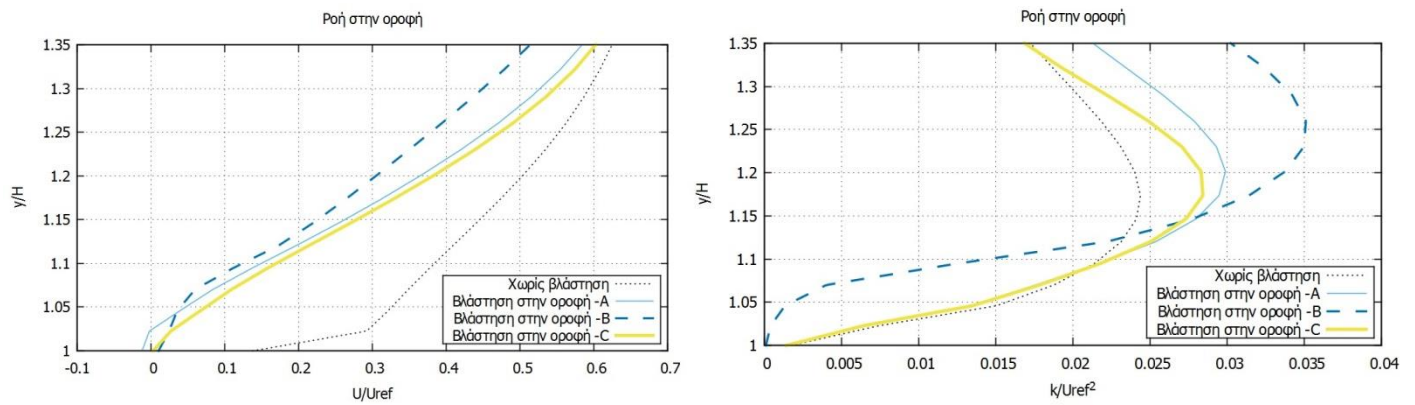
### 8.5.5 Προφίλ ταχυτήτων και τυρβώδους κινητικής ενέργειας



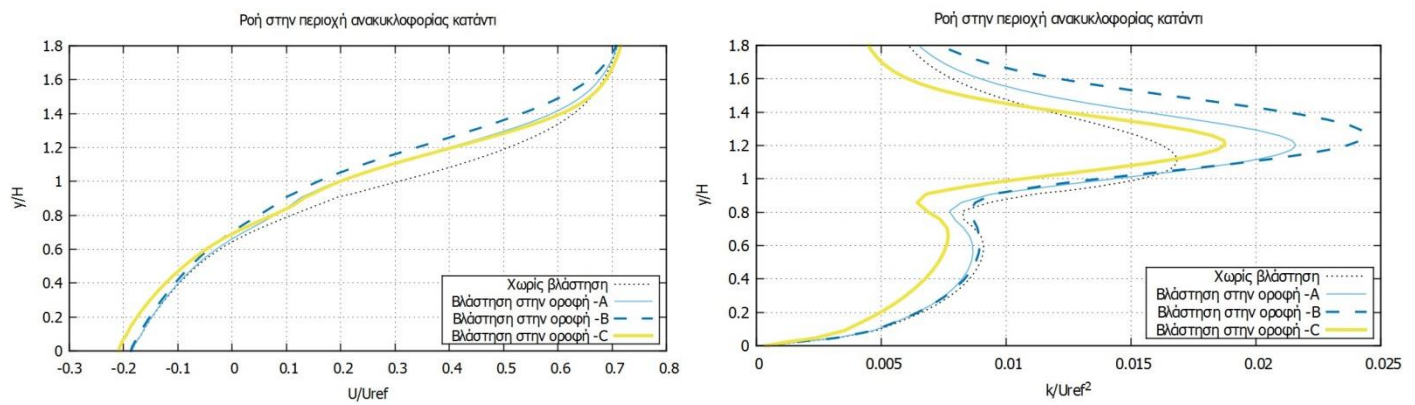
**Σχήμα 8.108.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



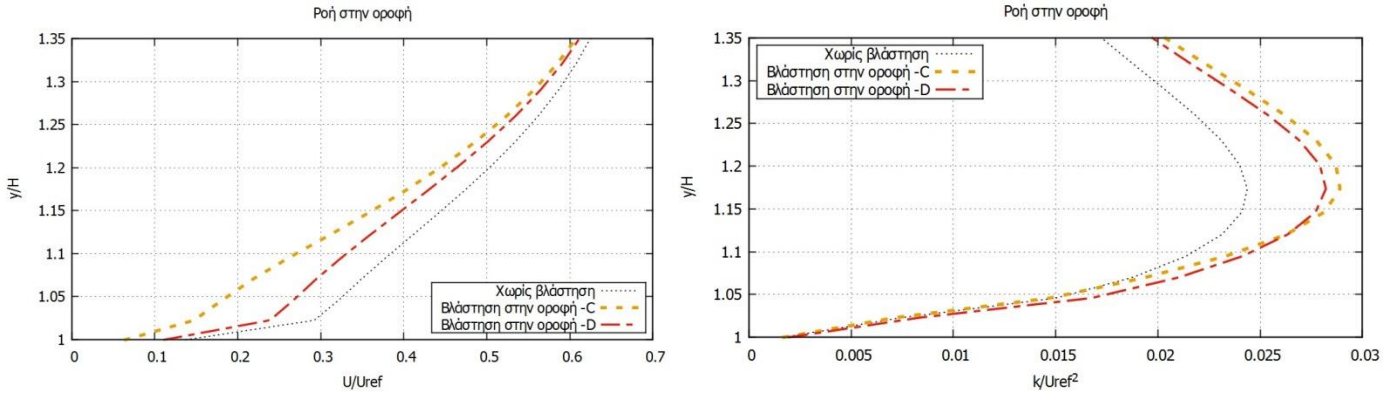
**Σχήμα 8.109.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



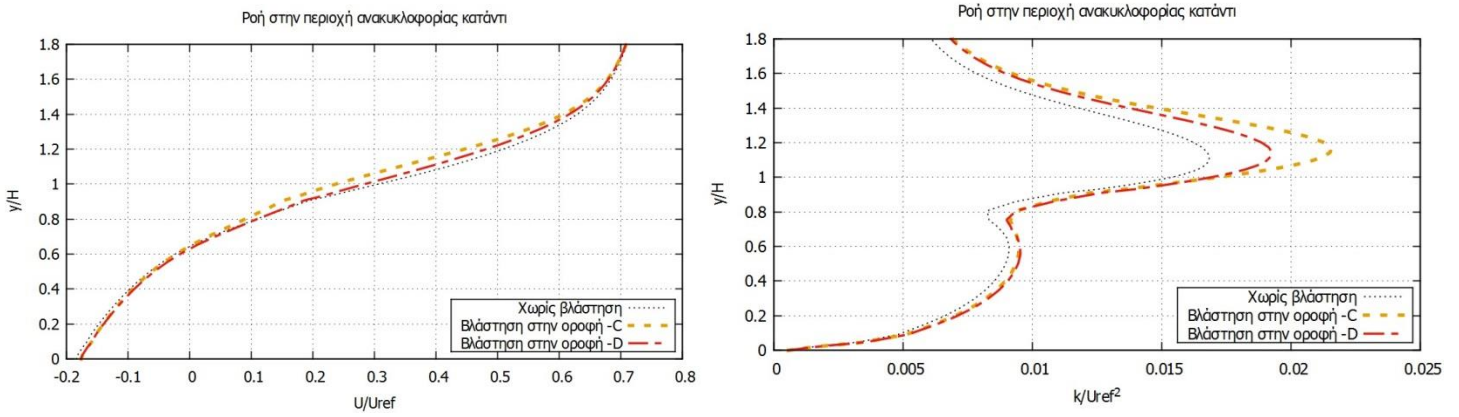
**Σχήμα 8.110.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



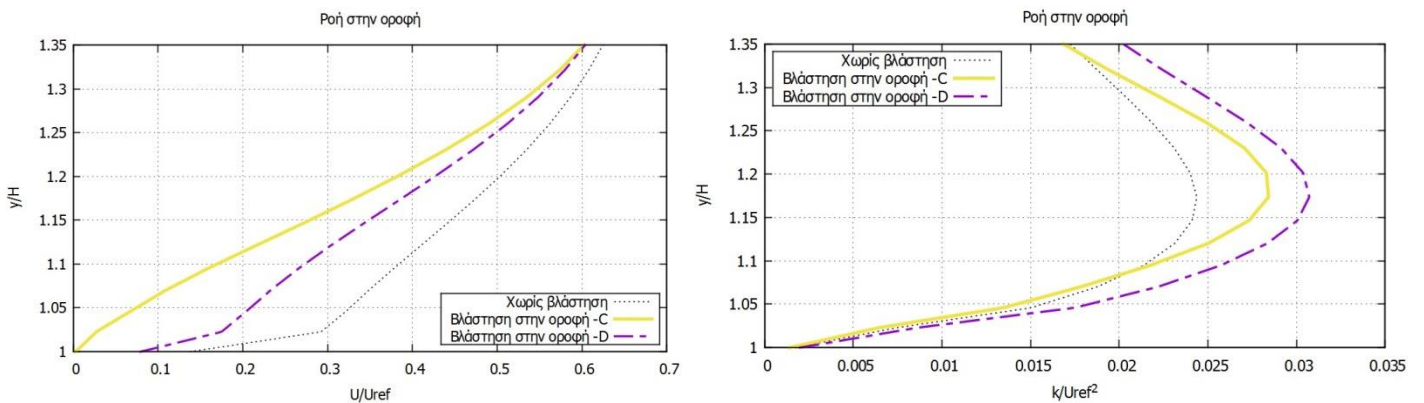
**Σχήμα 8.111.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στο κέντρο της οροφής (A), στην περιφέρεια της οροφής (B) και στην οροφή σε μορφή περίφραξης (C).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



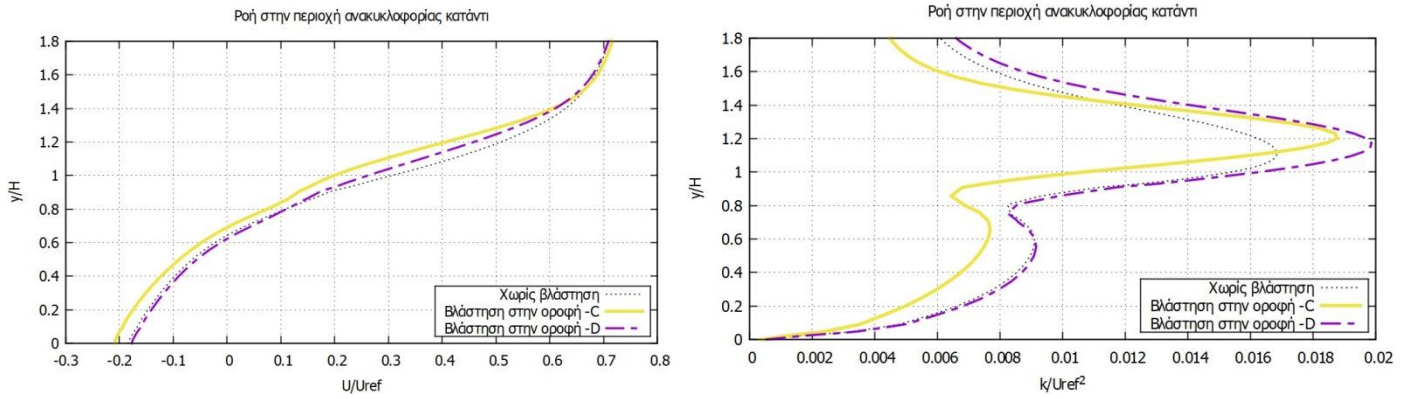
**Σχήμα 8.112.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην οροφή σε μορφή περιφραξής (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



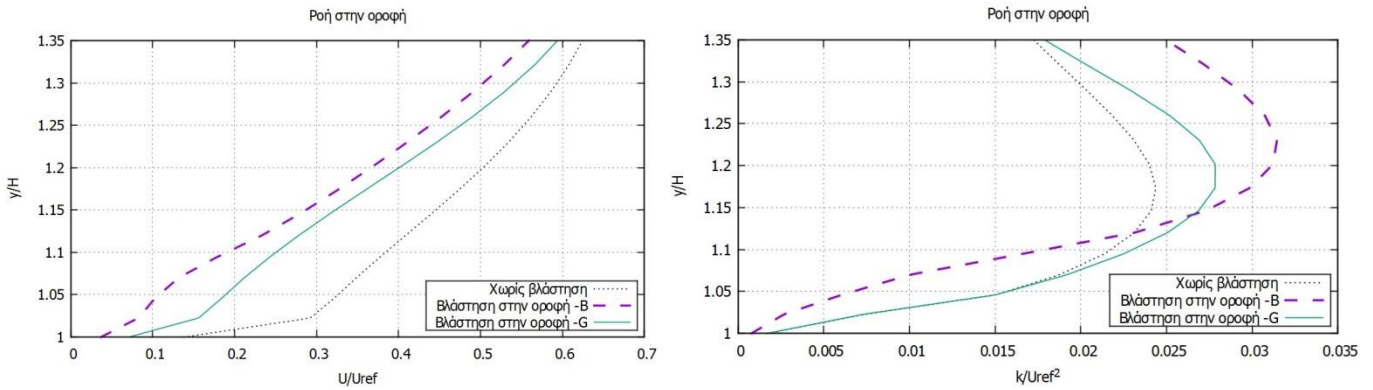
**Σχήμα 8.113.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην οροφή σε μορφή περιφραξής (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



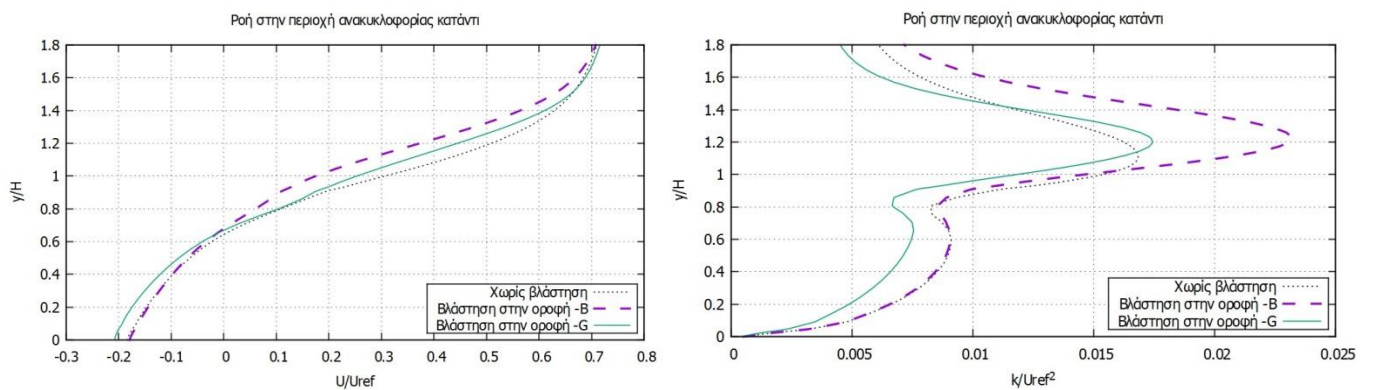
**Σχήμα 8.114.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην οροφή σε μορφή περιφραξής (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



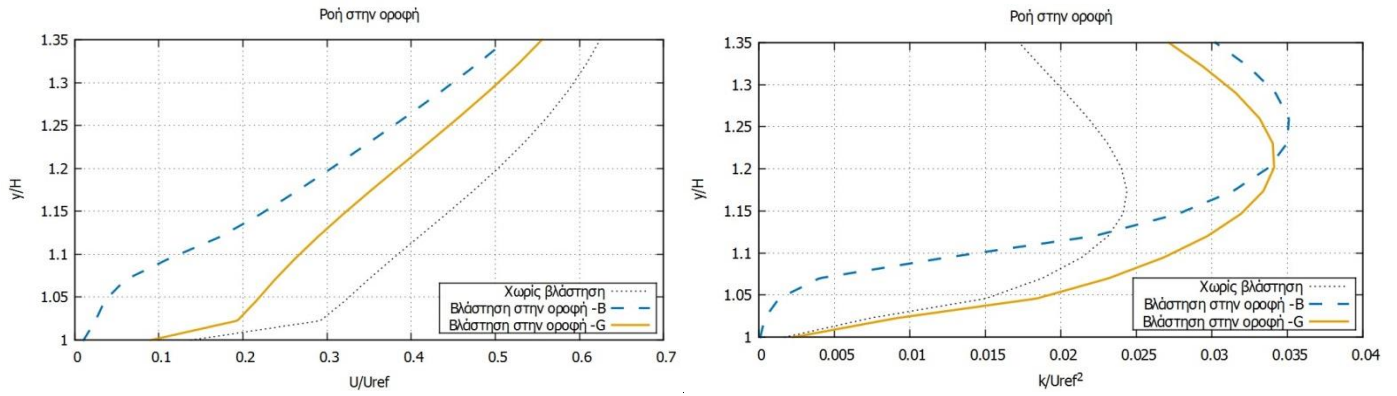
**Σχήμα 8.115.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην οροφή σε μορφή περιφραξης (C) και ως μονή σειρά (D).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



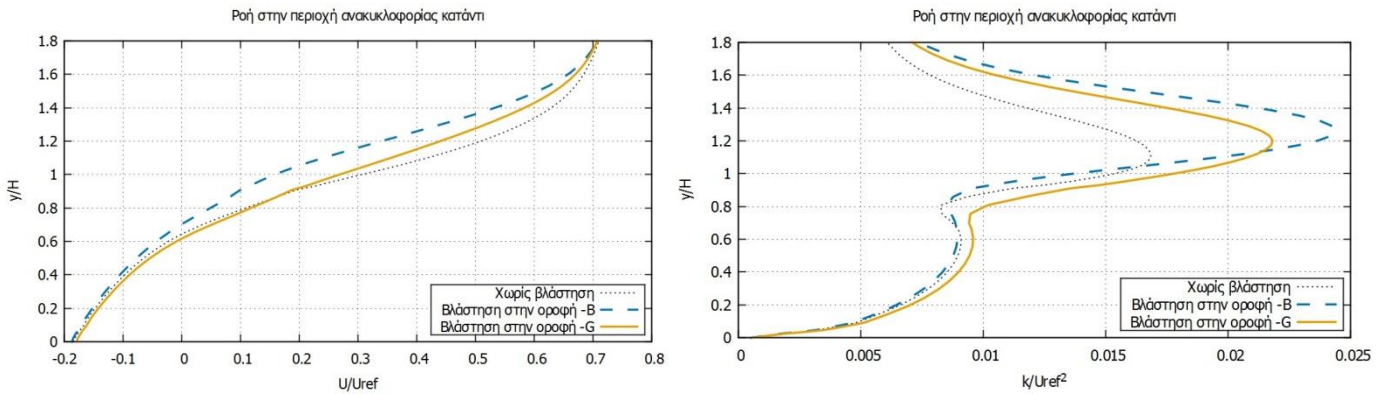
**Σχήμα 8.116.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της (G).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



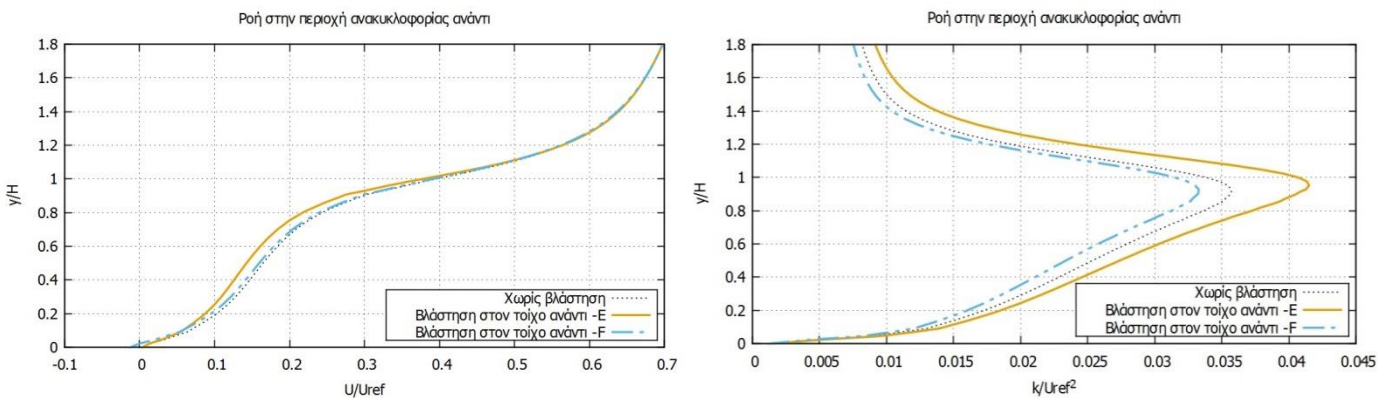
**Σχήμα 8.117.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της (G).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



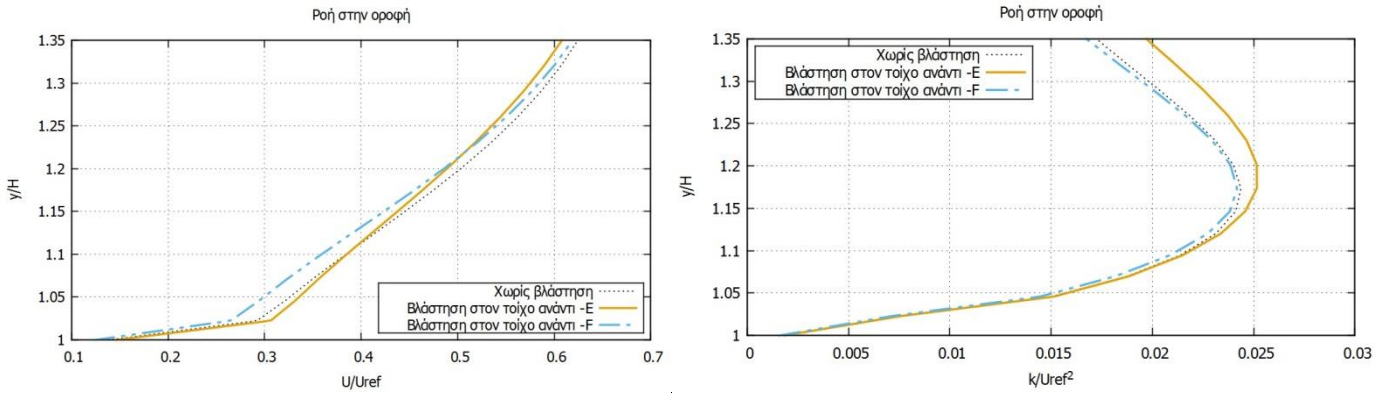
**Σχήμα 8.118.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της (G).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .



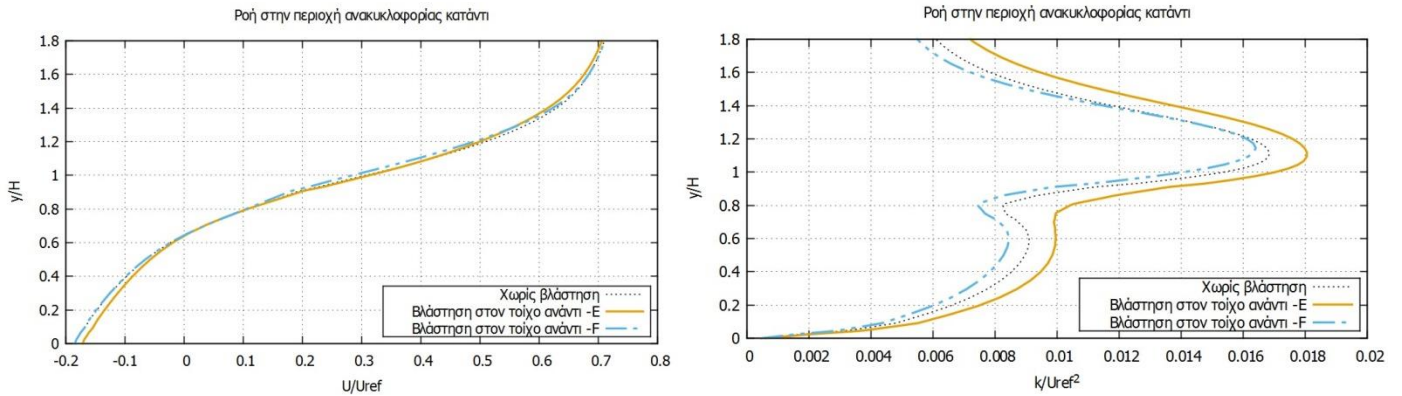
**Σχήμα 8.119.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην περιφέρεια της οροφής (B) και στο ανάντι άκρο της (G).  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .



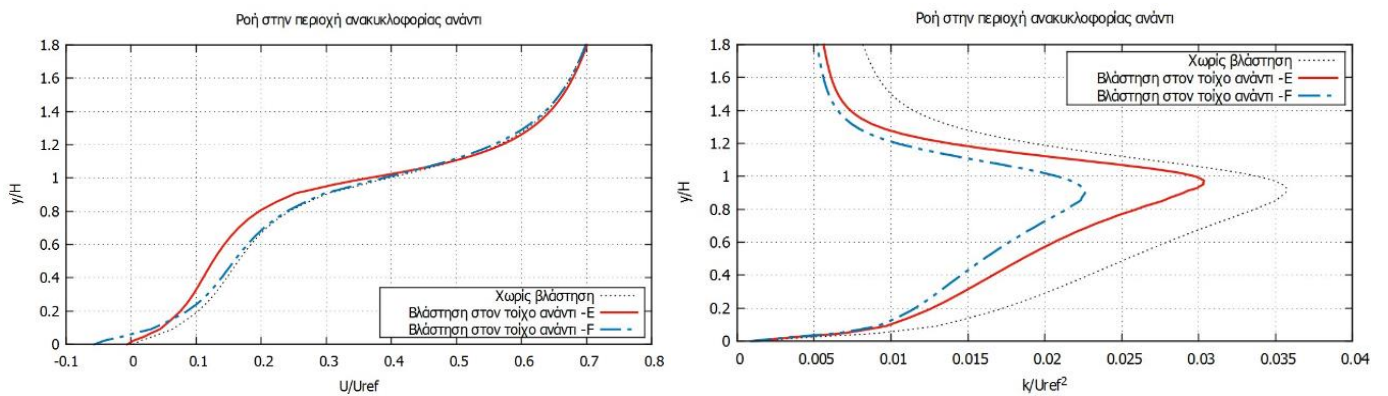
**Σχήμα 8.120.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή μπροστά από το κτήριο ( $x = 175$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



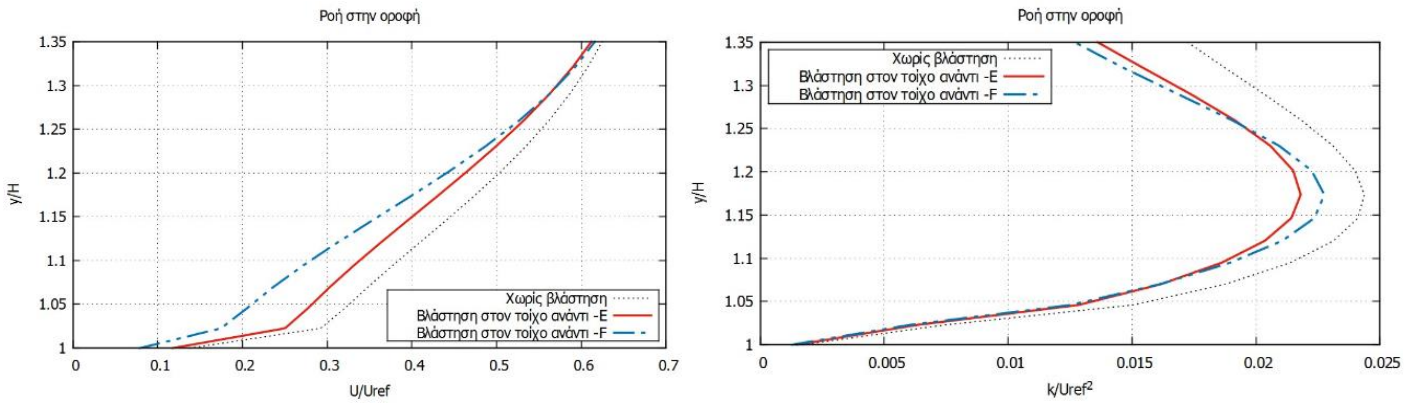
**Σχήμα 8.121.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



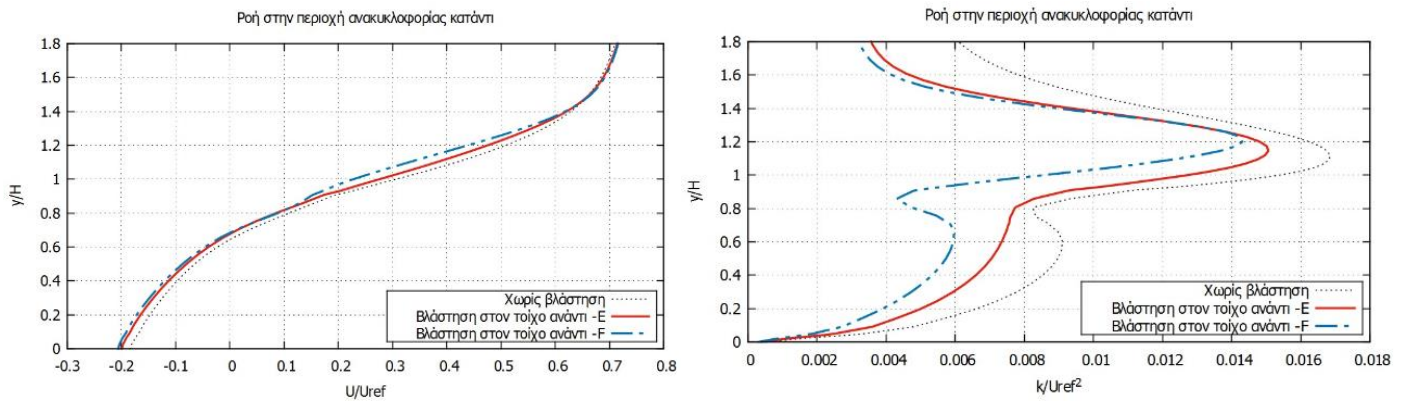
**Σχήμα 8.122.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,15 \times 2,1$ .



**Σχήμα 8.123.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή μπροστά από το κτήριο ( $x = 175$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



**Σχήμα 8.124.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην οροφή του κτηρίου ( $x = 213$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .



**Σχήμα 8.125.** Κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων (αριστερά) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δεξιά) στην περιοχή πίσω από το κτήριο ( $x = 240$  m). Παράμετρος η θέση της βλάστησης: στην πρόσοψη σε όλη την επιφάνεια (E) και στα άκρα (F).  $C_d \times LAD = 0,3 \times 5$ .

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις A, B και C, παρατηρούμε ότι η βλάστηση στην περιφέρεια του κύβου προκαλεί τη μεγαλύτερη ελάττωση της ταχύτητας της ροής, και ταυτόχρονα την μεγαλύτερη αύξηση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Αυτό πιθανώς οφείλεται στη θέση και την μεγάλη έκταση που καταλαμβάνει η βλάστηση στην οροφή, με αποτέλεσμα να επηρεάζει πιο δραστικά το πεδίο ροής πάνω από αυτή και στην περιοχή κατόντι (Σχήμα 8.108- Σχήμα 8.111).

Στις περιπτώσεις των διατάξεων C και D (περίφραξη και δεντροστοιχία/μονή σειρά), πάλι η ταχύτητα της ροής ανακόπτεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την μεγαλύτερη επιφάνεια πρασίνου (C), πιθανώς κι επειδή τα υπό μελέτη κατακόρυφα προφίλ έχουν εξαχθεί σε θέση πιο κοντά στην πράσινη περίφραξη, οπότε τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά επηρεάζονται πιο άμεσα. Τα επίπεδα της τύρβης εξαρτώνται από τις παραμέτρους της βλάστησης. Για μικρότερο  $C_d \times LAD$  η TKE της ροής είναι μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιούμε περίφραξη αντί για μονή σειρά, ενώ στα αντίθετα αποτελέσματα οδηγούμαστε για πιο πυκνή βλάστηση (Σχήμα 8.112– Σχήμα 8.115).

Εξαιτίας του μεγαλύτερου όγκου πρασίνου στην περίπτωση Β (βλάστηση στην περιφέρεια της οροφής) η μείωση ταχύτητας και η παραγωγή τύρβης είναι πιο έντονη σε σχέση με την περίπτωση Γ (βλάστηση στο ανάντι αριστερό άκρο της οροφής) (Σχήμα 8.116– Σχήμα 8.119). Βλέπουμε και πάλι την εντυπωσιακή πτώση των επιπέδων ταχύτητας και τύρβης μέσα στην περιοχή της βλάστησης στην οροφή (Σχήμα 8.116 & Σχήμα 8.118).

Επίσης, δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή και ξεκάθαρα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της ταχύτητας και της τύρβης στις περιπτώσεις όπου η βλάστηση έχει τοποθετηθεί στην πρόσοψη του κτηρίου (E,F). Η ροή εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η θέση μελέτης, η πυκνότητα του φυλλώματος, το  $C_D$  κτλ (Σχήμα 8.120- Σχήμα 8.125).

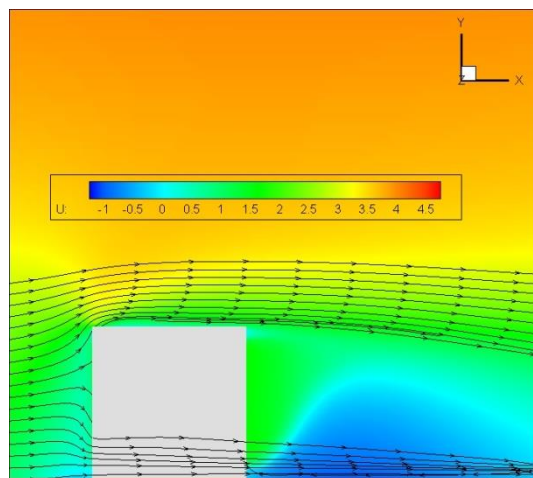
Τέλος, παρατηρώντας ποσοτικά τα διαγράμματα, συμπεραίνουμε το εξής: όταν η βλάστηση εξέχει πάνω από την κορυφή του κτηρίου, τα επίπεδα τύρβης στις υπό μελέτη περιοχές είναι αυξημένα και η ταχύτητα αέρα ελαφρώς μικρότερη, σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις για βλάστηση κάτω απ' το επίπεδο της οροφής. Με άλλα λόγια, η ανακυκλοφορία και η συγκέντρωση ρύπων στην ατμόσφαιρα αυξάνεται όταν τοποθετούμε βλάστηση στην οροφή, συγκριτικά με την πρόσοψη. Γενικά, οι πράσινες προσόψεις δείχνουν να μην επηρεάζουν σημαντικά τα προφίλ ταχύτητας και τύρβης στην οροφή και πίσω από το κτήριο, τουλάχιστον όχι στο βαθμό που το πετυχαίνουν οι πράσινες ταράτσες.

## 8.6 Ισοϋψείς καμπύλες ταχυτήτων και τυρβώδους κινητικής ενέργειας

Για την καλύτερη εποπτεία των πεδίων ροής στις διαφορετικές περιπτώσεις, εξήχθησαν οι ισοϋψείς καμπύλες για την ταχύτητα και την τυρβώδη κινητική ενέργεια σε δύο επίπεδα ( $z$  και  $y$ ) που διέρχονται από το μέσο του κύβου, με χρήση του προγράμματος Tecplot. Μάλιστα, παρακάτω διακρίνεται και η κίνηση των στοιχείων ρευστού της ατμόσφαιρας με σημείο αφετηρίας κάποια θέση πριν τον κύβο και καθ' ύψος αυτού. Η διεύθυνση του ανέμου είναι κάθετη στο κτήριο και με φορά προς τα δεξιά (κατεύθυνση  $x$ ).

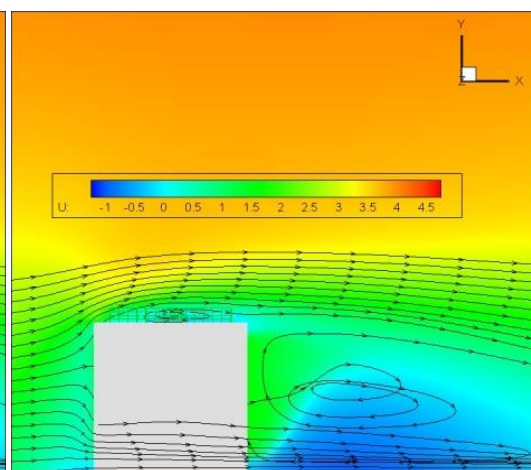
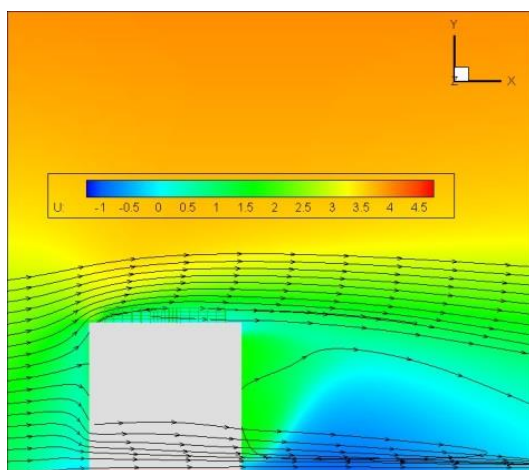


Χωρίς βλάστηση



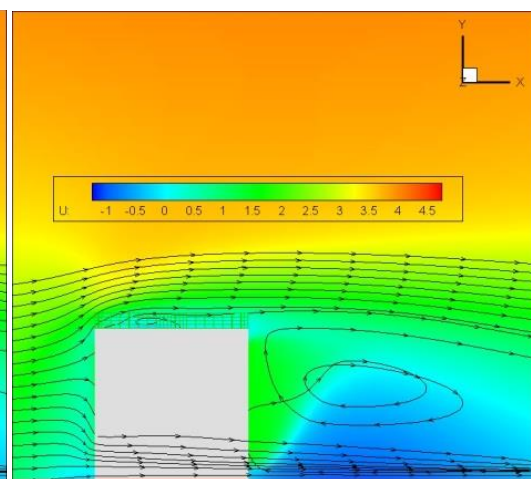
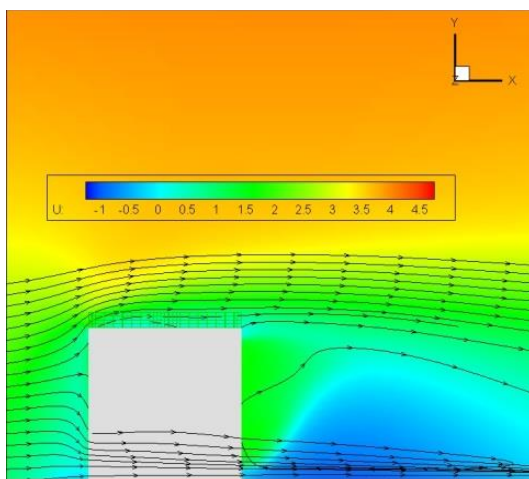
**A** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

**A** - CD x LAD = 0,3 x 5

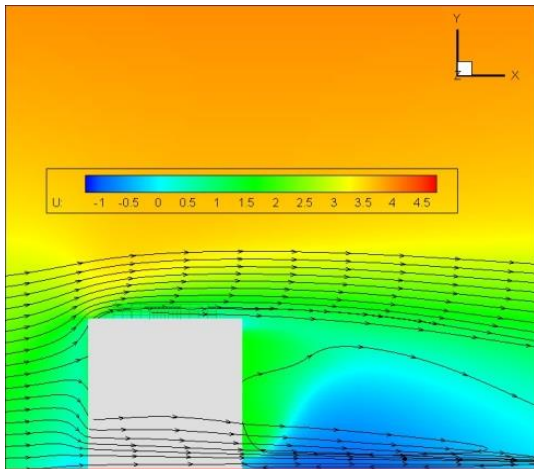


**B** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

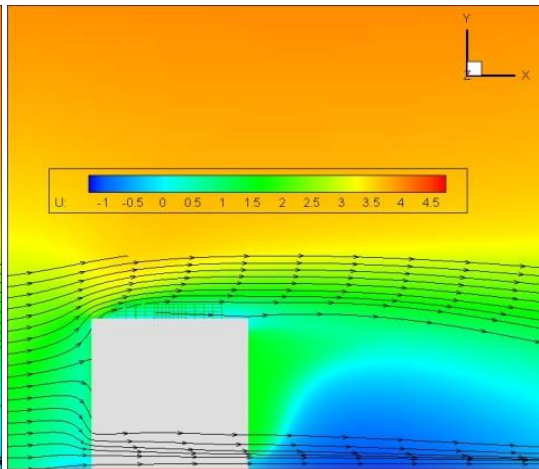
**B** - CD x LAD = 0,3 x 5



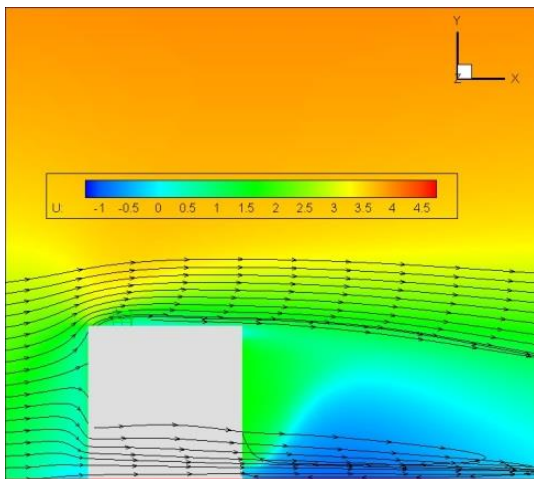
**C** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$



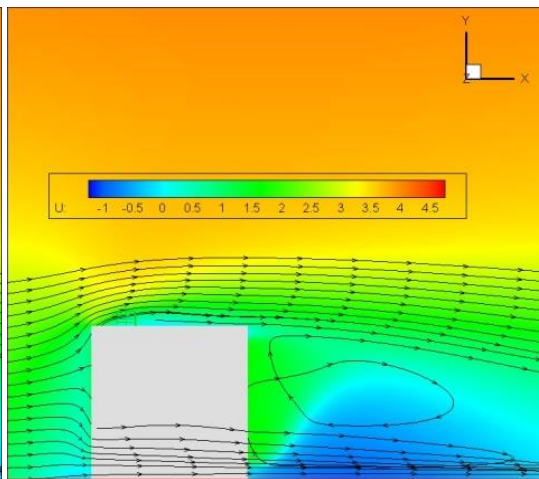
**C** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



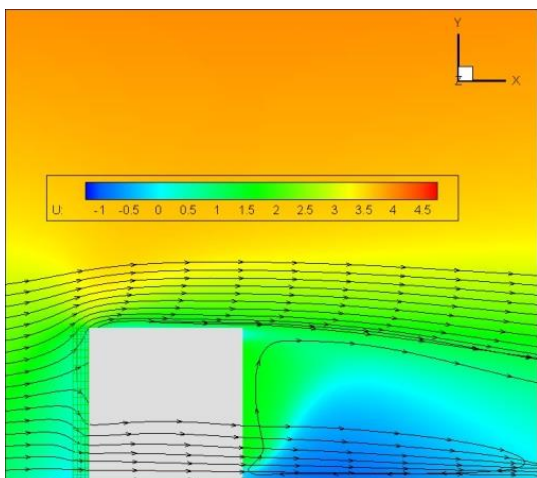
**D** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$



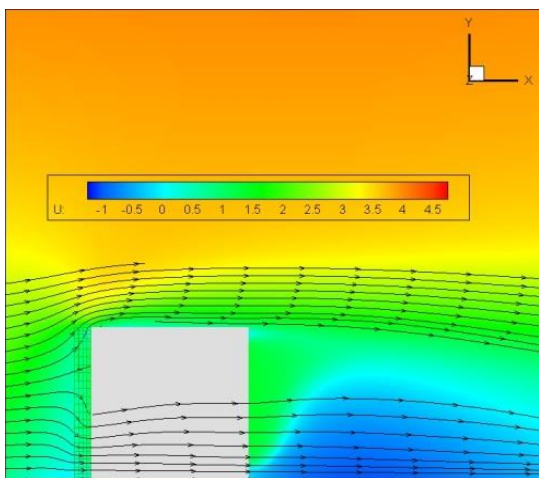
**D** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



**E** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$

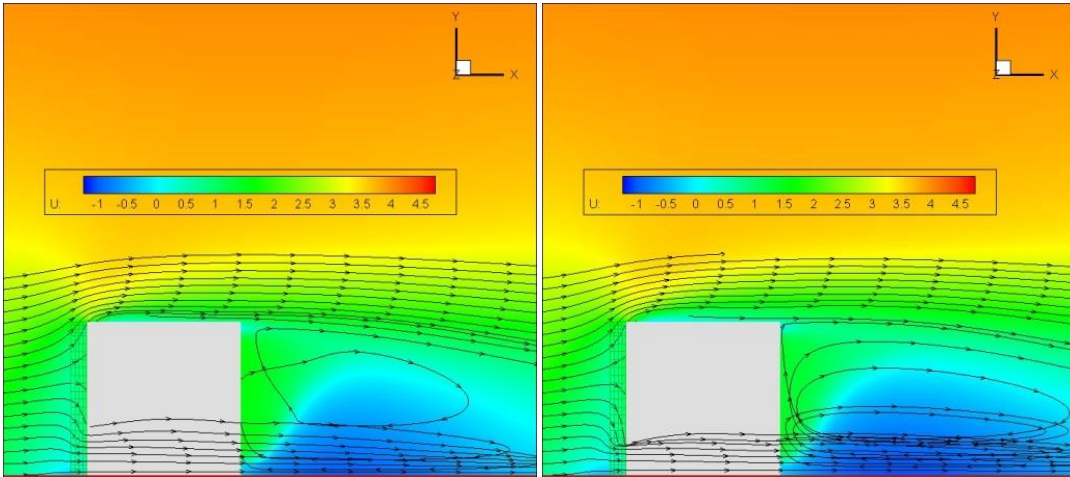


**E** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



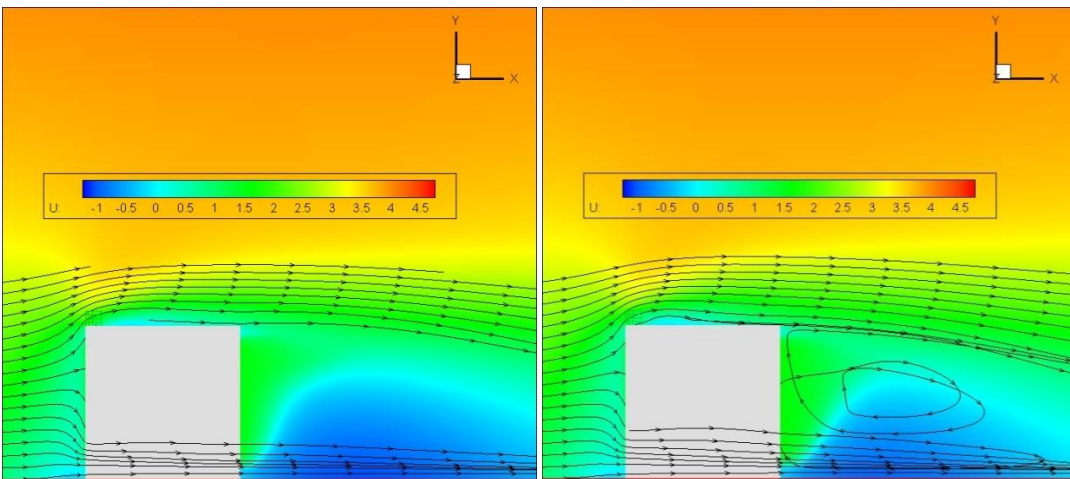
**F** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

**F** - CD x LAD = 0,3 x 5



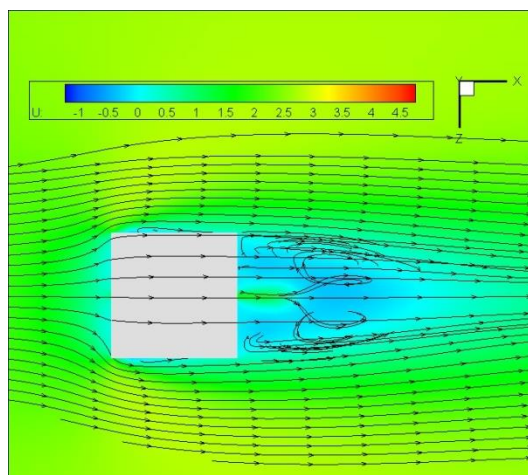
**G** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

**G** - CD x LAD = 0,3 x 5

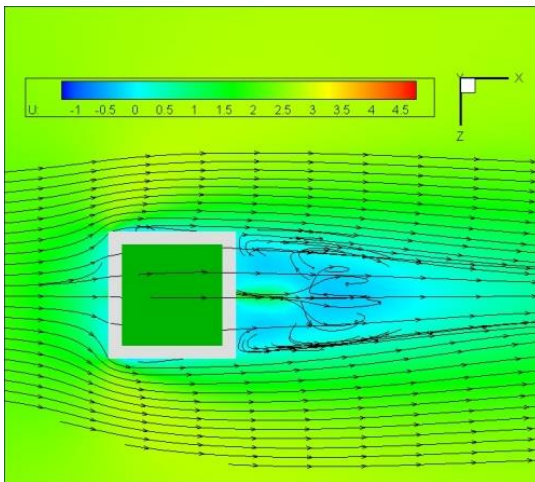


**Σχήμα 8.126.** Κατανομές της ταχύτητας της ροής  $U$  (m/s) κατά την κατεύθυνση του ανέμου για βλάστηση στις διάφορες περιπτώσεις A-G. Διακρίνονται οι τροχιές στοιχείων ρευστού που ελευθερώνονται στην ανάντι πλευρά του κτηρίου.  $z = 5,5H$  (επίπεδο διερχόμενο από το κέντρο του κόβου)

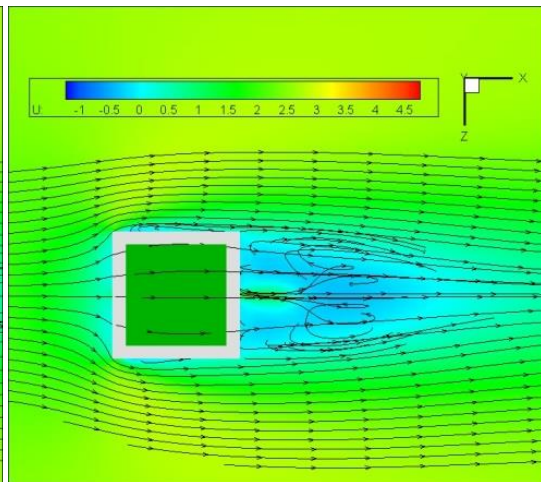
Χωρίς βλάστηση



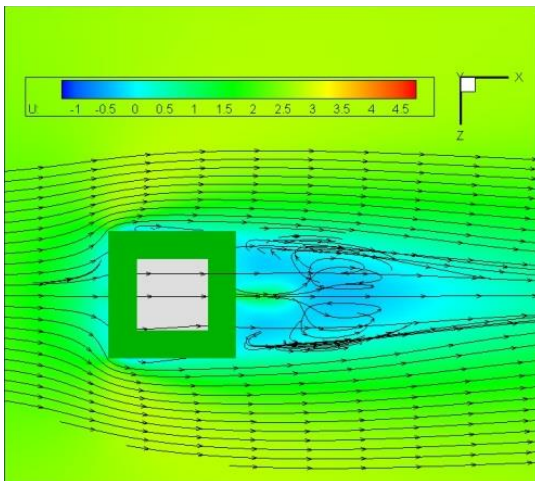
**A** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$



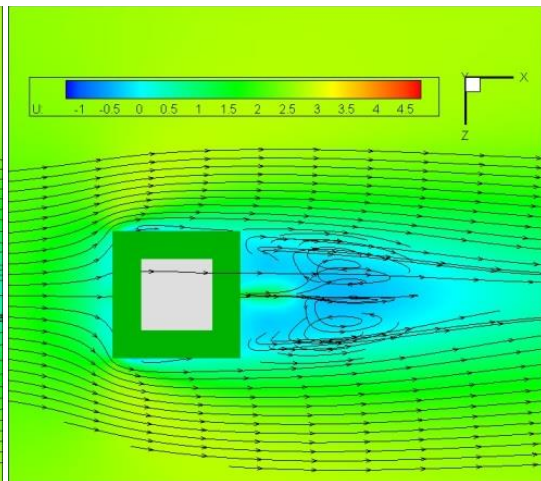
**A** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



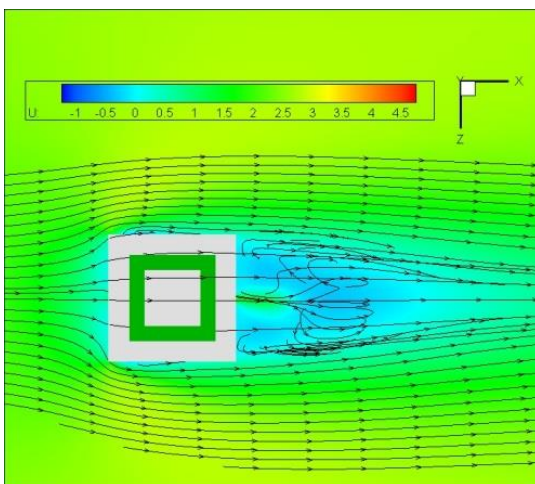
**B** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$



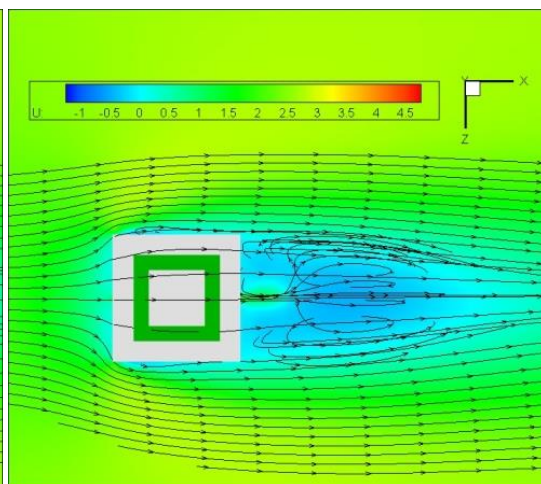
**B** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



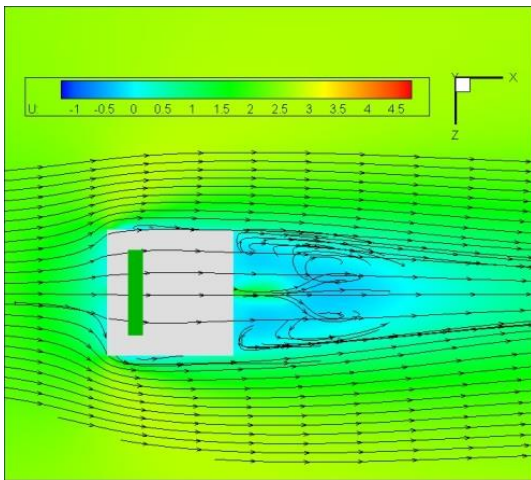
**C** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$



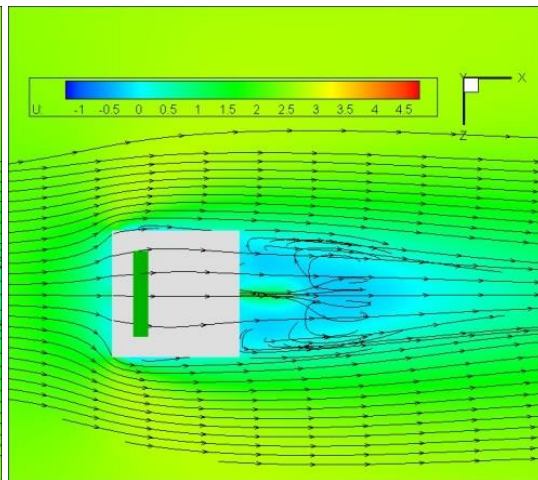
**C** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



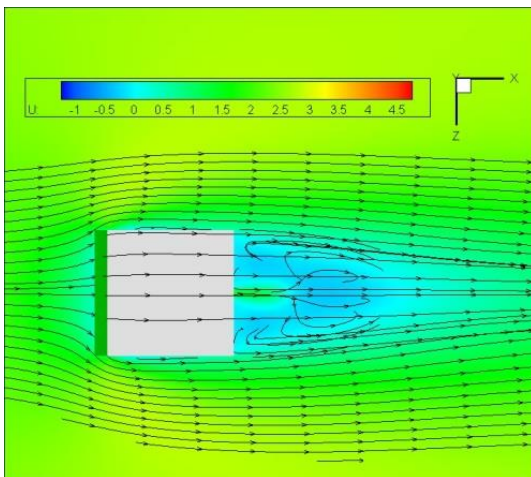
**D** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$



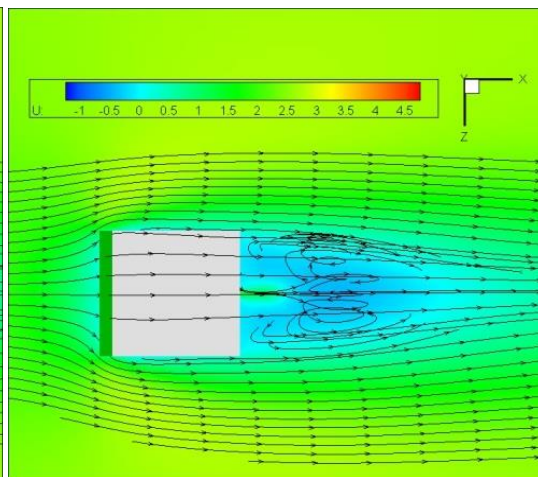
**D** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



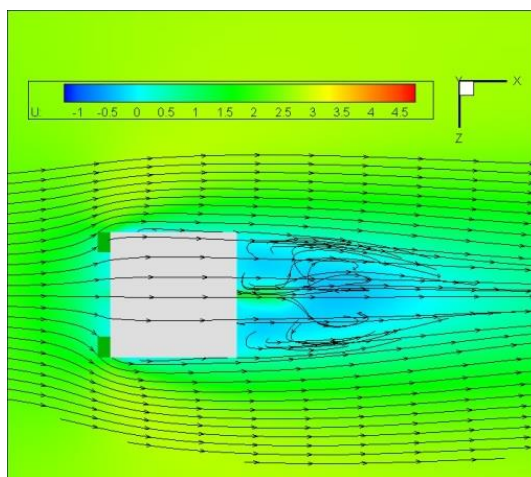
**E** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$



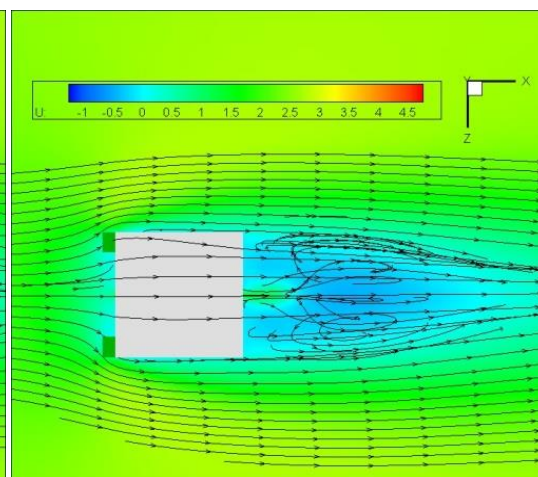
**E** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



**F** -  $CD \times LAD = 0,15 \times 2,1$

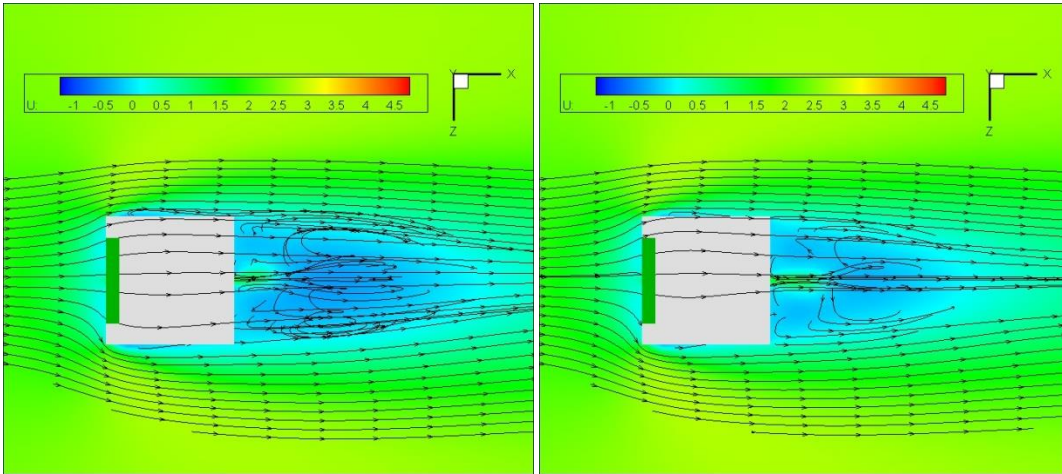


**F** -  $CD \times LAD = 0,3 \times 5$



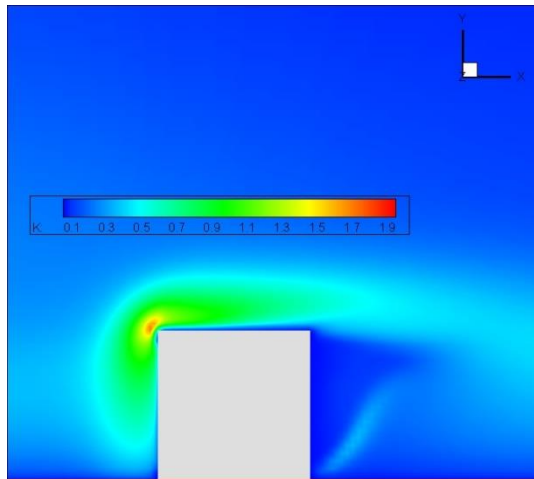
**G** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

**G** - CD x LAD = 0,3 x 5



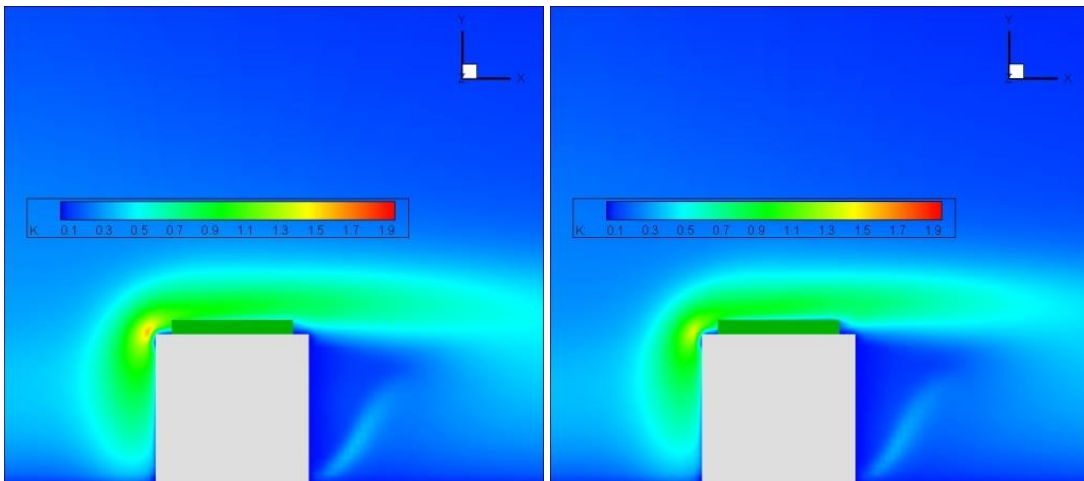
Σχήμα 8.127. Κατανομές της ταχύτητας της ροής U (m/s) σε κάτοψη για βλάστηση στις διάφορες περιπτώσεις A-G. Διακρίνονται οι τροχιές στοιχείων ρευστού που ελευθερώνονται στην ανάντι πλευρά του κτηρίου.  $y = 0,5H$  (επίπεδο διερχόμενο από το κέντρο του κύβου).

Χωρίς βλάστηση

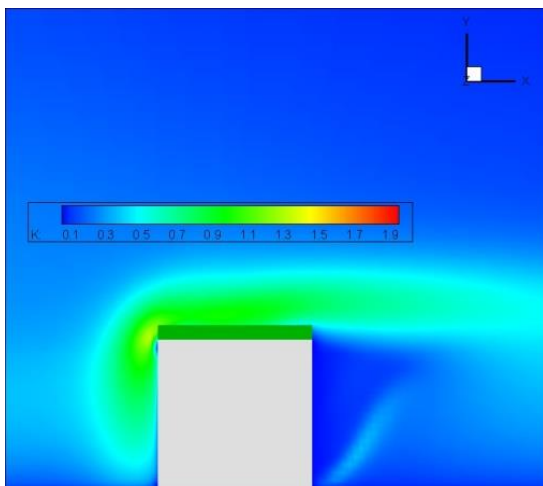


**A** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

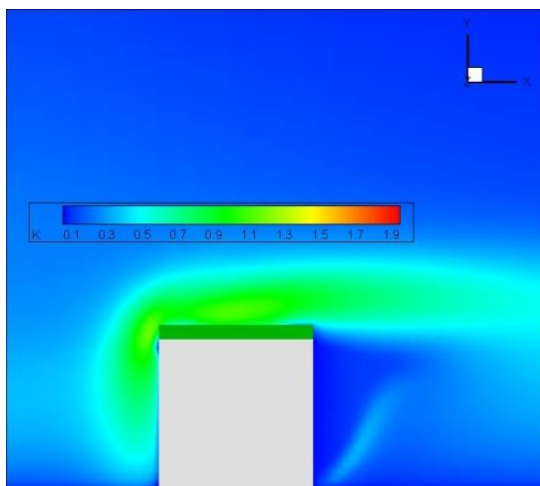
**A** - CD x LAD = 0,3 x 5



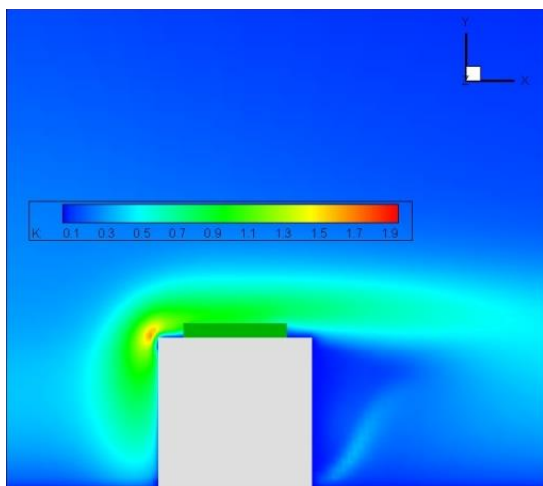
**B** - CD x LAD = 0,15 x 2,1



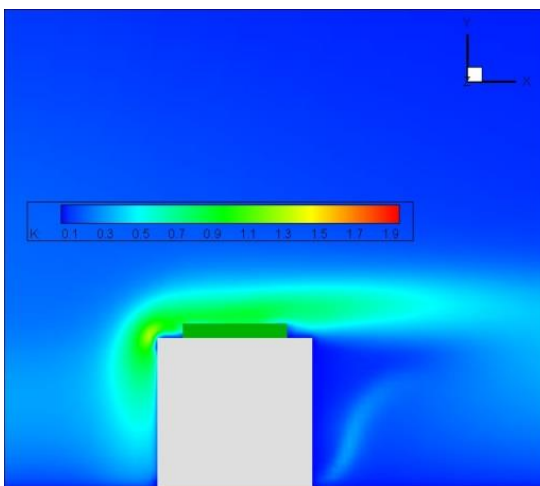
**B** - CD x LAD = 0,3 x 5



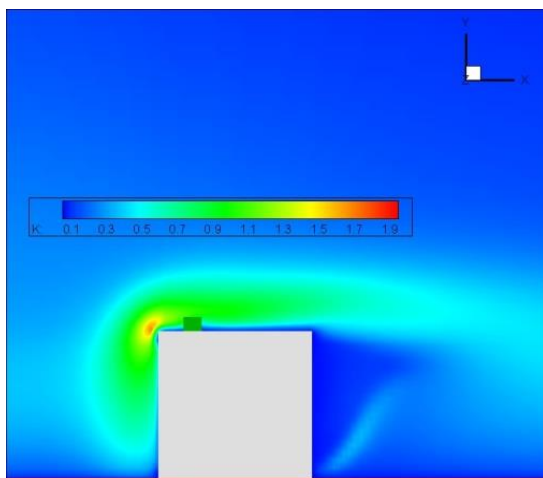
**C** - CD x LAD = 0,15 x 2,1



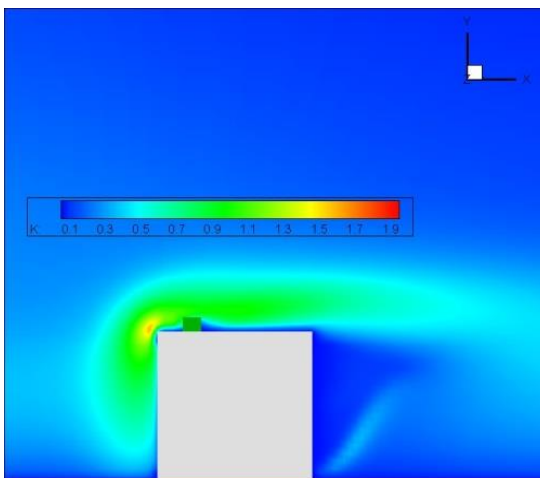
**C** - CD x LAD = 0,3 x 5



**D** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

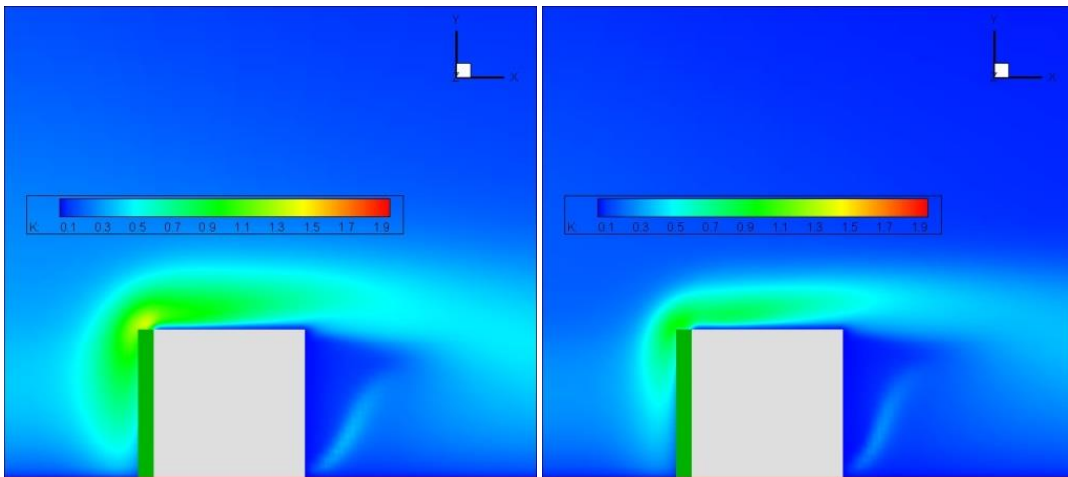


**D** - CD x LAD = 0,3 x 5



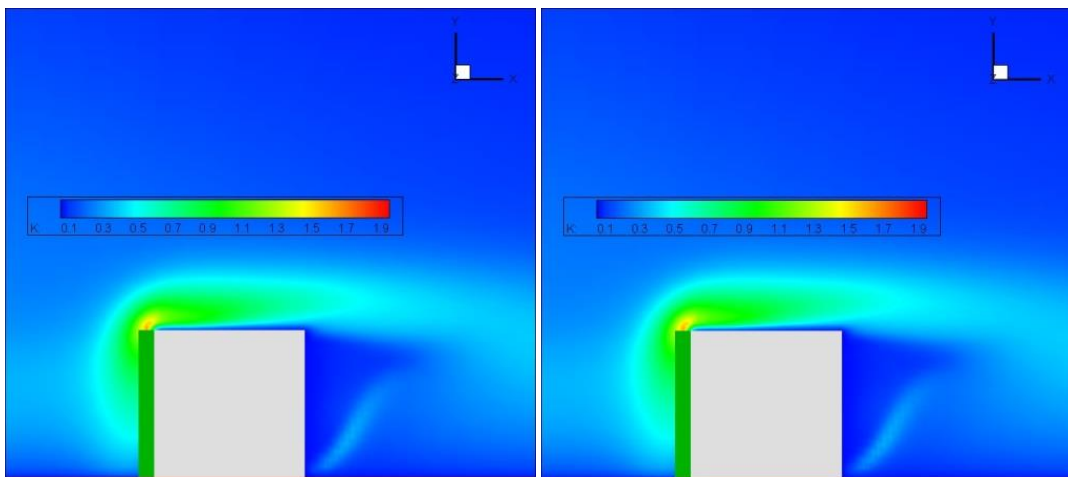
**E** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

**E** - CD x LAD = 0,3 x 5



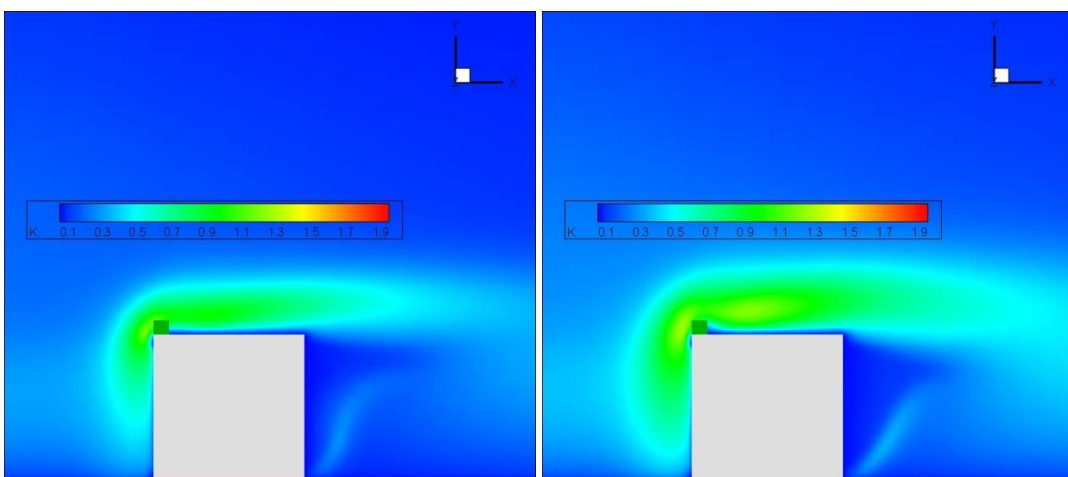
**F** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

**F** - CD x LAD = 0,3 x 5



**G** - CD x LAD = 0,15 x 2,1

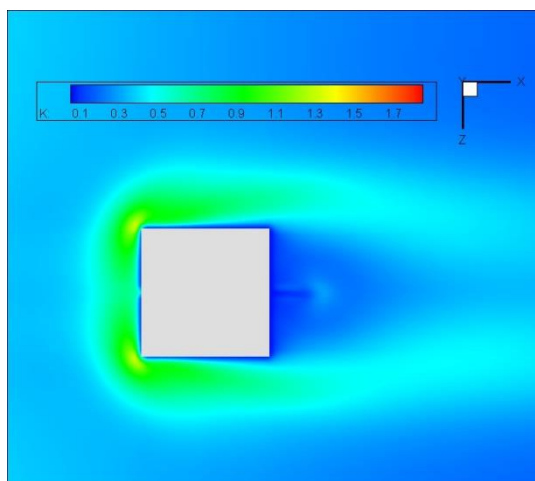
**G** - CD x LAD = 0,3 x 5



Σχήμα 8.128. Κατανομές της ΤΚΕ ( $m^2/s^2$ ) κατά την κατεύθυνση του ανέμου για βλάστηση στις διάφορες περιπτώσεις A-G.  $z = 5,5H$  (επίπεδο διαρχόμενο από το κέντρο του κύβου).

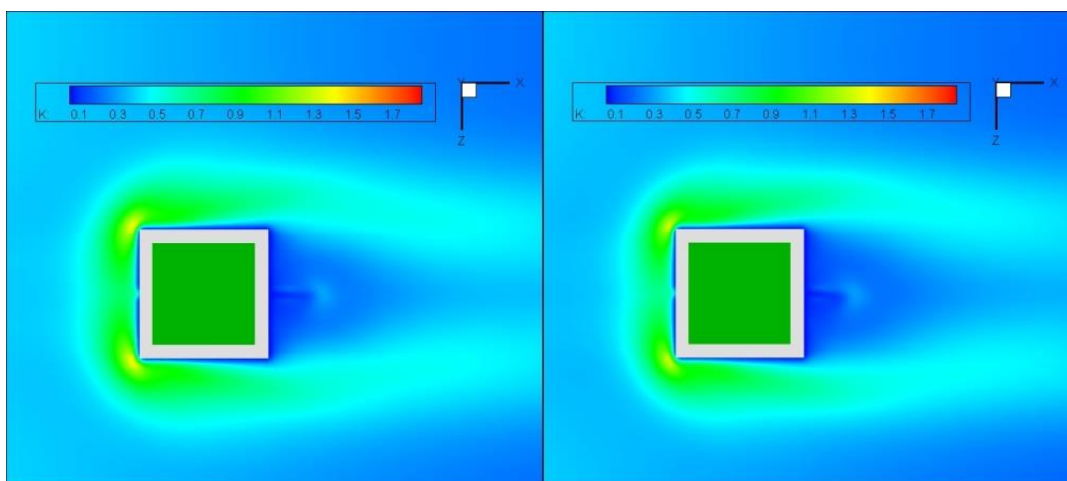


Χωρίς βλάστηση



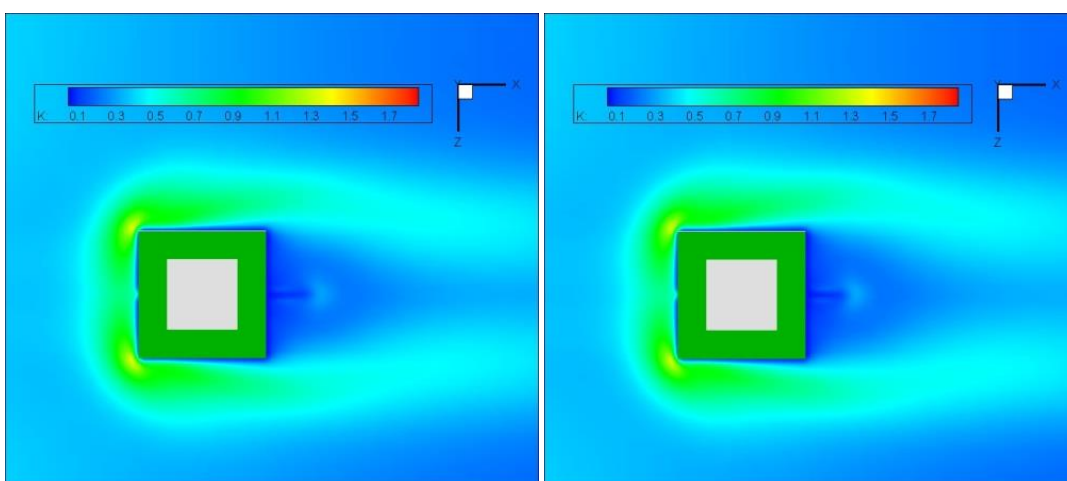
A - CD x LAD = 0,15 x 2,1

A - CD x LAD = 0,3 x 5

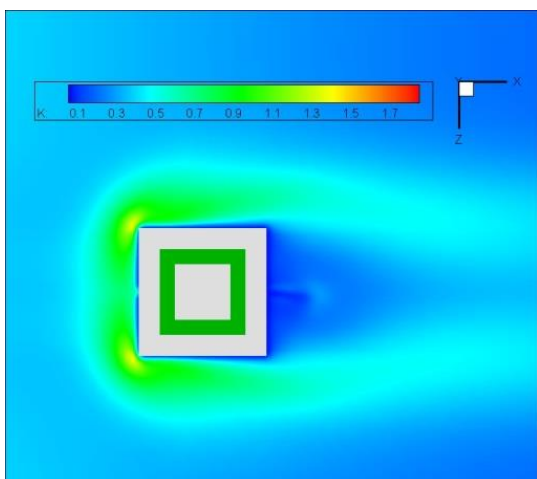


B - CD x LAD = 0,15 x 2,1

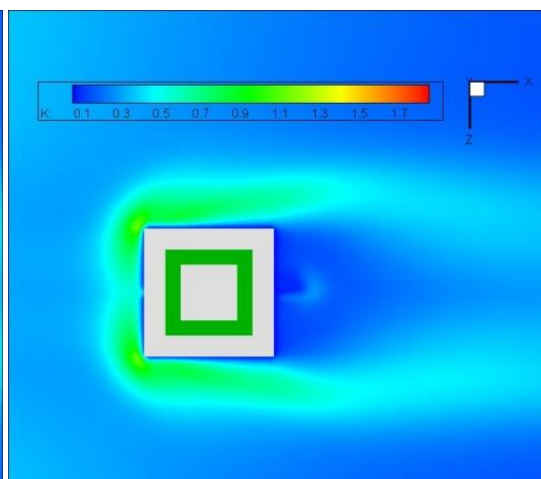
B - CD x LAD = 0,3 x 5



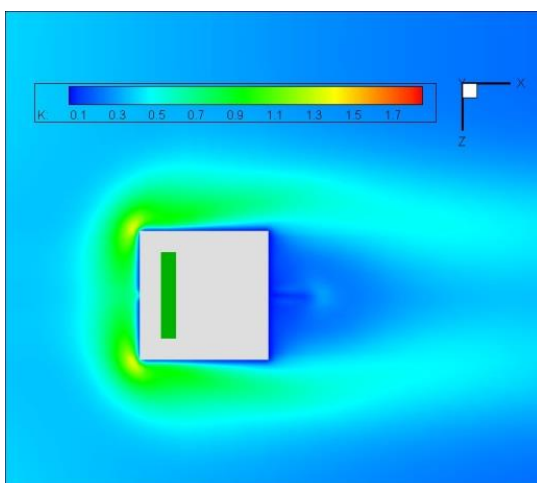
**C** - CD x LAD = 0,15 x 2,1



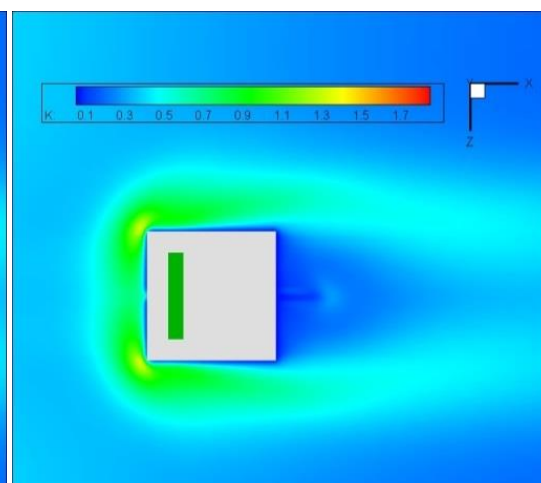
**C** - CD x LAD = 0,3 x 5



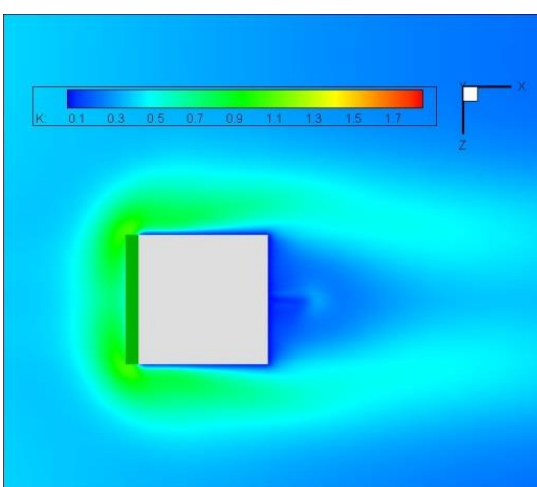
**D** - CD x LAD = 0,15 x 2,1



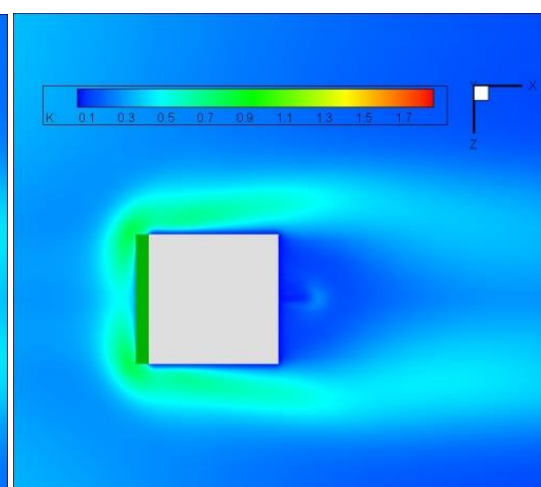
**D** - CD x LAD = 0,3 x 5

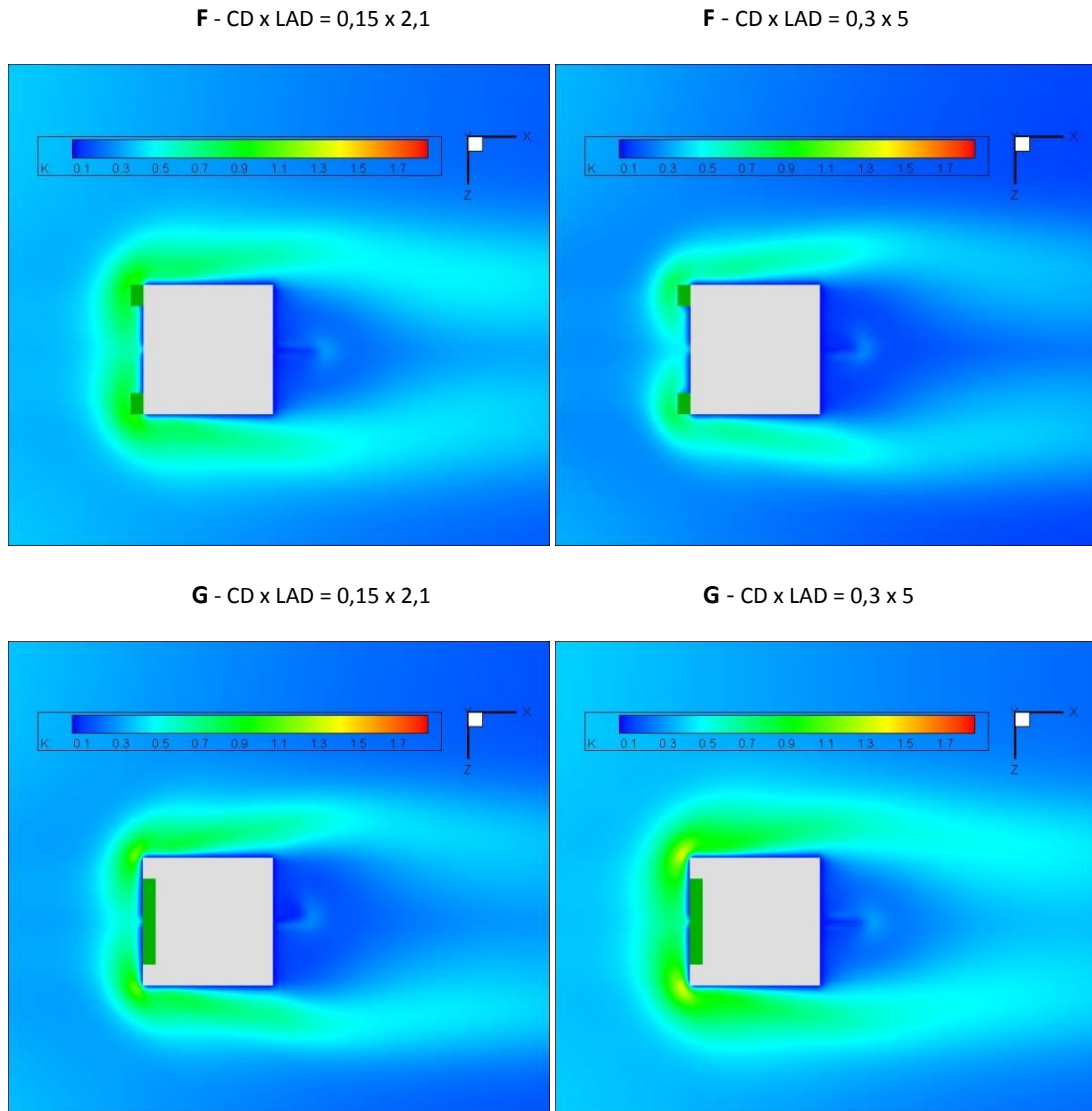


**E** - CD x LAD = 0,15 x 2,1



**E** - CD x LAD = 0,3 x 5





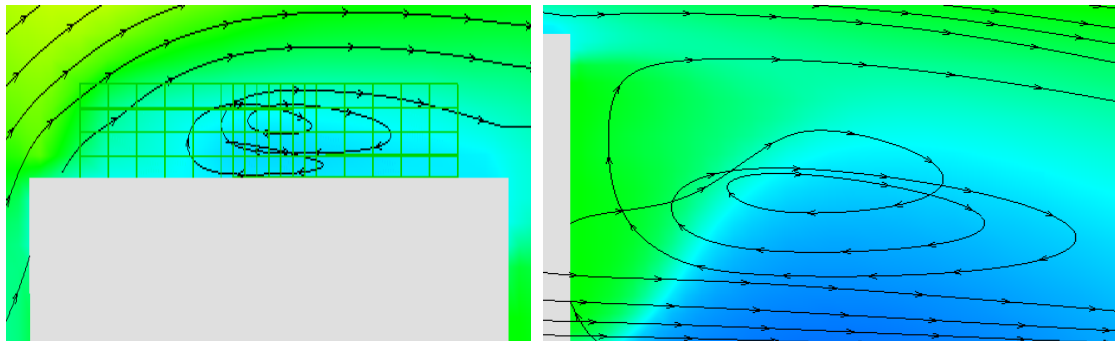
Σχήμα 8.129. Κατανομές της TKE ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) σε κάτοψη για βλάστηση στις διάφορες περιπτώσεις A-G.  $y = 0,5H$  (επίπεδο διερχόμενο από το κέντρο του κύβου).

Στα ανωτέρω σχήματα παρουσιάζονται οι κατανομές ταχυτήτων και τύρβης κατά την κατεύθυνση του ανέμου (επίπεδο  $xy$ ) και σε κάτοψη (επίπεδο  $xz$ ). Με γκρι χρώμα παρίσταται το κτήριο και με πράσινο η βλάστηση που είναι τοποθετημένη πάνω σε αυτό σε διάφορες μορφές. Στις εικόνες των κατανομών ταχύτητας στο επίπεδο  $xy$ , η βλάστηση παρίσταται με διακριτοποίηση, προκειμένου να είναι ορατές οι τροχιές των στοιχείων ρευστού, ιδίως στις περιοχές ανακυκλοφορίας (βλ. οροφή).

Όπως έχουμε δει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς ο άνεμος προσπίπτει κάθετα στην προσήνεμη επιφάνεια, δημιουργείται μία ζώνη ανακοπής της ροής (ζώνη στασιμότητας) και εκατέρωθεν αυτής δημιουργούνται ανωρεύματα και κατωρεύματα, ενώ η ροή διασκορπίζεται και πλευρικά των τοιχωμάτων του κτηρίου. Το ανοδικό ρεύμα επιχειρεί να κινηθεί πάνω από το κτήριο με μεγάλη ταχύτητα, ενώ το καθοδικό ρεύμα επιβραδύνεται, δημιουργώντας μικρές δίνες κοντά στο έδαφος. Τα ρεύματα που

διαφεύγουν πλευρικά προς την κατάντι περιοχή δημιουργούν στροβίλους εξαιτίας των χαμηλών ταχυτήτων και των υψηλών επιπέδων τύρβης που επικρατούν στην υπήνεμη και τις πλευρικές επιφάνειες. Η χρήση βλάστησης ευνοεί την ανακυκλοφορία της ροής στην κατάντι περιοχή (μικρές ταχύτητες, μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης - τοξοειδής στρόβιλος), φαινόμενο που γίνεται ακόμα πιο έντονο όταν αυξάνεται το  $C_D \times LAD$  (βλ. διατάξεις βλάστησης στην οροφή - Σχήμα 8.126, Σχήμα 8.127). Αυτό πιθανώς να έχει αρνητική επίδραση στην περιβαλλοντική υγεία και την ανθρώπινη δραστηριότητα γύρω από το κτήριο, καθώς ο αέρας ανακυκλώνεται συνεχώς, με αποτέλεσμα να μην απομακρύνονται άμεσα τα επιβλαβή σωματίδια (ρύποι), αλλά και να υπάρχουν στην περιοχή χαμηλά επίπεδα οξυγόνου. Σε μεγαλύτερη απόσταση από τον κύβο, η ροή πλέον φαίνεται να επανακολλάται.

Επιπλέον, εντοπίζονται μικρές δίνες στην οροφή εντός της περιοχής βλάστησης για τις περιπτώσεις A και B (για μεγάλο  $C_D \times LAD$ ), καθώς, αν και η τύρβη εκεί καταστρέφεται, οι ταχύτητες επίσης μειώνονται δραστικά, οπότε και εμφανίζεται το φαινόμενο της αποκόλλησης (A,B – Σχήμα 8.126).



Σχήμα 8.130. Ανακυκλοφορία της ροής στην οροφή και την κατάντι πλευρά για βλάστηση στο κέντρο της οροφής (A) με  $C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ .

Ακόμα, αν και η ύπαρξη βλάστησης προκαλεί συνήθως αύξηση της τύρβης στην γύρω περιοχή, η περαιτέρω πύκνωση του φυλλώματος φαίνεται κάποιες φορές να την περιορίζει σε ένα βαθμό (A,C,E – Σχήμα 8.128 & C,E,F – Σχήμα 8.129), πιθανώς εξαιτίας του υψηλού ρυθμού καταστροφής της ( $\epsilon$ ). Επίσης, επιβεβαιώνεται ότι μέσα ή πολύ κοντά στις περιοχές βλάστησης καταγράφονται αρκετά μικρότερες τιμές TKE, όπως στην ανάντι άνω γωνία του κτηρίου για τις διατάξεις B,E,G σε σύγκριση με τις A,C,D (Σχήμα 8.128).

## 8.7 Φυσικός αερισμός κτηρίων

Η είσοδος ατμοσφαιρικού αέρα εντός του κτηρίου μέσω ανοιγμάτων με φυσικό τρόπο και χωρίς τη χρήση φυσητήρων, ονομάζεται φυσικός αερισμός κτηρίων [78]. Πρόκειται για μία πολύ σημαντική διαδικασία με την οποία ελέγχεται η καταλληλότητα του κτηρίου προς κατοίκηση και εκμετάλλευσή του, καθώς με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ανανεωθεί ο εισπνεόμενος αέρας, να προσαρμοσθεί η θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα και να απομακρυνθούν οι αέριοι ρύποι.

Η είσοδος και έξοδος αέρα σε και από κτήριο μέσω ανοιγμάτων οφείλεται στη διαφορά της στατικής πίεσης εντός κι εκτός αυτού ( $\Delta p = p - p_o$ ). Αυτή η διαφορά των πιέσεων προκύπτει από την ανισοκατανομή της πίεσης στα τοιχώματα του κτηρίου εξαιτίας του ανέμου (π.χ. μεγαλύτερες πιέσεις στα τοιχώματα της προσήνεμης πλευράς σε σχέση με την υπήνεμη), αλλά και από τη θερμοκρασιακή διαφορά εσωτερικού χώρου και περιβάλλοντος ( $T - T_o$ ) [78]. Το φαινόμενο αυτό κάποιες φορές ενισχύεται και άλλοτε αμβλύνεται λόγω της παρουσίας βλάστησης.

Φυσικά, όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή αέρα που εισέρχεται στο κτήριο, τόσο το καλύτερο, αρκεί να μην υπερβαίνει τα φυσιολογικά επίπεδα. Υπερβολικά μεγάλες ποσότητες εισερχόμενου αέρα μπορούν κάποιες φορές να φέρουν τα αντίθετα αποτελέσματα (π.χ. ενόχληση λόγω δυνατών ανέμων, υλικές ζημιές, ψύχρανση του κτηρίου κτλ).

Η παροχή αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$Q = c(\Delta p)^n \quad (8.6)$$

όπου το  $n$  παίρνει τιμές κοντά στο 1 για στρωτή και στο 2 για τυρβώδη ροή [78].

Στην περίπτωση κτηρίου με κεντρικά ανοίγματα, ο ρυθμός αερισμού μπορεί πιο απλά να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$Q = \int U dA = \sum_{i=1}^N U_i dA_i \quad (8.7)$$

όπου  $A$  το συνολικό εμβαδό του ανοίγματος και  $U_i$  η ταχύτητα κάθε στοιχειώδους επιφάνειας  $dA_i$  του ανοίγματος. Ως στοιχειώδεις επιφάνειες επιλέχθηκαν οι επιφάνειες που ορίζουν οι κυψέλες του διακριτοποιημένου σώματος και αντιστοιχούν στο κατακόρυφο άνοιγμα, και ως  $U_i$  οι στοιχειώδεις ταχύτητες στο κέντρο κάθε κυψελίδας.



Σχήμα 8.131. Αερισμός κτηρίου μέσω ανοιγμάτων.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της παροχής αέρα σε κάθε περίπτωση:

		Παροχή αέρα Q (m <sup>3</sup> /s)	
		C <sub>D</sub> x LAD = 0,15 x 2,1	C <sub>D</sub> x LAD = 0,3 x 5
	Χωρίς βλάστηση	32,5071	
	Βλάστηση τύπου A	32,30006	33,30168
	Βλάστηση τύπου B	32,34745	33,46841
	Βλάστηση τύπου C	32,33102	34,49471
	Βλάστηση τύπου D	32,50479	32,28814
	Βλάστηση τύπου E	30,24424	32,93822
	Βλάστηση τύπου F	32,79396	35,18248
	Βλάστηση τύπου G	34,04065	33,11667

Πίνακας 8.1. Παροχές του εισερχόμενου αέρα μέσω ανοίγματος κατά τον φυσικό αερισμό του κτηρίου για τις διάφορες διατάξεις της βλάστησης.

Όπως παρατηρούμε, σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχει αύξηση του εισερχόμενου αέρα όταν αυξάνεται η παράμετρος  $C_D \times LAD$ , που δείχνει ότι η ροή στην περιοχή του ανοίγματος επιταχύνεται με την πυκνωση της βλάστησης, παρότι, όπως είδαμε, στην οροφή και την κατάντι πλευρά η ροή επιβραδύνεται.

Ο καλύτερος αερισμός επιτυγχάνεται κατά την τοποθέτηση βλάστησης πολύ πυκνού φυλλώματος στα άκρα της πρόσοψης. Γενικά, οι αποκλίσεις ανάμεσα στις παροχές για τις διάφορες περιπτώσεις είναι μικρές, αφού κυμαίνονται από 0,007% (χωρίς βλάστηση &  $D - C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$ ) έως και 16% ( $E - C_D \times LAD = 0,15 \times 2,1$  &  $F - C_D \times LAD = 0,3 \times 5$ ).

Αυτό που με βεβαιότητα μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα είναι ότι η ύπαρξη πρασίνου δεν εγγυάται από μόνη της τον βέλτιστο αερισμό ενός κτηρίου, ο οποίος τελικά εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η τοποθέτηση της βλάστησης σε κατάλληλη θέση και με καθορισμένη μορφή και ιδιότητες.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Συμπεράσματα και σχόλια

### 9.1 Συμπεράσματα από τη μελέτη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε να γίνει μία εισαγωγική προσπάθεια μελέτης των αεροδυναμικών επιδράσεων της βλάστησης στα πεδία ροής γύρω από μεμονωμένο κτήριο με ανοίγματα, αλλά και στις πιέσεις που ασκούνται στα τοιχώματα αυτού. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι οι επιδράσεις των φυτών στο αστικό περιβάλλον ποικίλουν ανάλογα με το είδος τους, τις ιδιότητές τους (αεροδυναμική αντίσταση, πυκνότητα του φυλλώματος κ.ά.), τη διάταξή τους στο χώρο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. κατεύθυνση και ένταση του ανέμου).

Συνήθως, η ύπαρξη βλάστησης πάνω στα κτήρια συμβάλλει στη μείωση της ταχύτητας του ανέμου γύρω από αυτή, αφού λειτουργεί ως “ζωντανό” εμπόδιο, παράγοντας δυνάμεις αντίστασης στην κίνησή του και ανακόπτοντας έτσι την ορμή του. Όμως, σε κάποιες περιπτώσεις, και σε συνδυασμό με την αύξηση της τύρβης, το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στον ανθρώπινο και ζωικό πληθυσμό, εξαιτίας της αποκόλλησης της ροής και της δημιουργίας δινών, που ανακυκλώνουν τον – πολύ συχνά – μολυσμένο αέρα μιας κατοικημένης περιοχής. Μάλιστα, η τοποθέτηση της βλάστησης σε ψηλότερο σημείο (οροφή), σε συνδυασμό με αύξηση της πυκνότητας και της αεροδυναμικής αντίστασης των φυτών οδηγεί σε ακόμα χαμηλότερες ταχύτητες και μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης γύρω από το εξεταζόμενο κτήριο, ενισχύοντας το πρόβλημα.

Η παρουσία βλάστησης, όμως, έχει άμεση επίδραση και στο πεδίο των πιέσεων που ασκούνται στις επιφάνειες του κτηρίου εξαιτίας των ανέμων. Λόγω των ιδιοτήτων της, προκαλεί πτώση πίεσης στα τοιχώματα των επιφανειών που καταλαμβάνει, αλλά ταυτόχρονα εμποδίζει τις ακραίες μεταπτώσεις στην άνω οριζόντια ακμή της οροφής

που δέχεται τα πιο μεγάλα φορτία. Συνήθως, όμως, η βλάστηση δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις πιέσεις στις πιο απομακρυσμένες, από αυτή, επιφάνειες του κτηρίου.

Συνολικά, δεν μπορούν να εξαχθούν γενικευμένα συμπεράσματα για τη χρησιμότητά της όσον αφορά τα πεδία ροής, λόγω της ποικιλομορφίας και πολυπλοκότητας του θέματος. Η παρουσία πρασίνου αν και συμβάλλει συνήθως στον καλύτερο αερισμό του κτηρίου και την προστασία του από θυελλώδεις ανέμους και ακραία καιρικά φαινόμενα, πολλές φορές και για μικρούς ανέμους ευθύνεται για τον εγκλωβισμό ρυπογόνων ουσιών γύρω από αυτό στο επίπεδο του εδάφους. Σε κάθε περίπτωση, δεν μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η άναρχη και χωρίς σχεδιασμό τοποθέτηση βλάστησης είναι αρκετή και ικανοποιητική λύση για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και των συνθηκών διαβίωσης σε μία κατοικημένη περιοχή.

## 9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παρούσα μελέτη ασχολήθηκε αποκλειστικά με την επίδραση της βλάστησης στα πεδία ροής και πιέσεων. Ασφαλώς, οι αεροδυναμικές επιδράσεις αποτελούν μόλις ένα από τα πεδία που πρέπει να μελετηθούν για την εξαγωγή ασφαλών και συνολικών συμπερασμάτων σχετικά με τη χρήση ή όχι βλάστησης πάνω σε κτήρια (βλ. 5.5 Μοντελοποίηση της βλάστησης). Για να έχουμε σφαιρική εικόνα ως προς αυτό το ζήτημα, χρειάζεται να εξεταστούν και να συγκριθούν κριτικά αρκετά φαινόμενα, όπως η επίδραση της βλάστησης:

- στη θερμοκρασία του αστικού περιβάλλοντος
- στη σύσταση του αέρα (λόγω της φωτοσύνθεσης, της επαναϊώρησης κτλ)
- στην αισθητική και την οικονομική άνθιση της γειτονιάς

Ασφαλώς πρόκειται για μία διαδικασία αρκετά χρονοβόρα και πολύπλοκη, που όμως παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον.

Επιπλέον, όσον αφορά τα αεροδυναμικά φαινόμενα, αρκετά χρήσιμη θα ήταν η υπολογιστική μελέτη των πεδίων ροής για τοποθέτηση βλάστησης σε περισσότερες επιφάνειες και για κτήριο με πιο σύνθετες γεωμετρίες. Ακόμα, ενδιαφέρον θα είχε να εξετασθεί το πεδίο ροής για μη ομογενή βλάστηση (διαφορετικό LAD στα επιμέρους τμήματά της), για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου ή και για κτήριο εκτεθειμένο σε διαφορετικές γωνίες ως προς τη ροή τυρβώδους οριακού στρώματος. Τέλος, για ακόμα πιο ρεαλιστική προσέγγιση του ζητήματος, θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση της παρουσίας οχημάτων και γειτονικών κτηρίων, με ή χωρίς την παρουσία βλάστησης, και πιστοποίηση των αποτελεσμάτων με παρόμοιες έρευνες που έχουν γίνει κατά το παρελθόν, όπως των Krayenhoff et al [79].

# Βιβλιογραφία

1. United Nations, 2018. Revision of World Urbanization Projects.
2. Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2014. Απογραφή Πληθυσμού – Κατοικιών 2011, Πειραιάς, σσ.1-2.
3. Μ.Ι. Πάνος. Διπλωματική Εργασία: Πειραματική Προσομοίωση Πρότυπου Κτηρίου Εκτεθειμένου σε Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα. Ε.Μ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα: 2017, σσ. 2, 14-15, 22, 34, 51.
4. Α. Καλογεράκη. Διπλωματική Εργασία: Υπολογιστική Προσομοίωση της Επίδρασης του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος στη Διείσδυση Αέρα στα Κτήρια. Ε.Μ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα: 2018, σσ. 8-10, 14, 21-24, 33-39, 62, 64-65, 71-72.
5. S. Kenjereš, B. ter Kuile, 2013. Modelling and simulations of turbulent flows in urban areas with vegetation. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 123, pp. 43-55.
6. P.E. Vos, B. Maiheu, J. Vankerkom, S. Janssen, 2013. Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environ. Pollut.* 183, pp. 113-122.
7. C. Gromke, B. Blocken, 2015a. Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighbourhood scale. Part I: quality assurance studies and turbulent Schmidt number analysis for RANS CFD simulations. *Environ. Pollut.* 196, pp. 214-223.
8. J. Gallagher, R. Baldauf, C.H. Fuller, P. Kumar, L.W. Gill, A. McNabola, 2015. Passive methods for improving air quality in the built environment: A review of porous and solid barriers. *Atmos. Environ.*, 120, pp. 61-70.
9. M. Moradpour, H. Afshin, B. Farhanieh, 2017. A numerical investigation of reactive air pollutant dispersion in urban street canyon with tree planting. *Atmos. Pollut. Res* 8, pp. 253-266.
10. A. Buccolieri, J.-L. Santiago, E. Rivas, B. Sanchez, 2018. Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects. *Urban For. And Urban Green.* 31, pp. 212-220.
11. Α. Μωραΐτη. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: Βελτιστοποίηση Χωροταξικής Διαμόρφωσης Οικισμών με Στόχο τη Μείωση Εναπόθεσης Ρύπων επί των Κτηρίων. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πάτρα: 2017, σσ. 37-38, 41-44.
12. Α.Θ. Παπαϊωάννου. Οριακό Στρώμα: Βασικές Έννοιες και Θεωρητική Ανάλυση. Ε.Μ.Π., Αθήνα: 2013, σσ. 1-2.
13. Γ. Μπεργελές. Ανεμοκινητήρες. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Επανεκδοση 2005. ISBN: 960-7888-57-x.
14. Α. Ζερβός, Γ. Κάραλης. Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας. Ε.Μ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα: 2009.
15. Κ. Τουρπάλη. Φυσική Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος: Σημειώσεις. Α.Π.Θ., Σχολή Θετικών Επιστημών, Θεσσαλονίκη: 2020, σσ. 39, 41.
16. Γ. Μπεργελές. Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Επανεκδοση 2010. ISBN: 960-254-660-3. σσ. 100-101, 111.
17. Α. Λαγγίδης. Διπλωματική Εργασία: Πειραματική Διερεύνηση της Αλληλεπίδρασης Δύο Κτηρίων Εκτεθειμένων σε Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα. Ε.Μ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα: 2018, σσ.14.
18. Α. Φατσή. Οπτικοποίηση Ροϊκού Πεδίου γύρω από Πτερυγία Στροβιλοκινητήρων: Εργαστηριακή Άσκηση 11. Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Χαλκίδα: 2011, σσ.3.
19. I. Castro, A. Robins, 1977. The flow around a surface mounted cube in uniform and turbulent streams. *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, No. 2, pp. 307-335.

20. A. Hunt, 1982. Wind tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 10, pp. 137-163.
21. Δ. Αγγελίδης. Αριθμητική Μελέτη Χαρακτηριστικών Ροής Ανέμου και Διασποράς Ρυπαντών σε μια Τυπική Αστική Οδική Χαράδρα των Αθηνών. Ε.Μ.Π., Αθήνα: 2010.
22. Shah et al. Scaling and Parametrization of Stratified Homogenous Turbulent Shear Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 1-20.
23. Murakami, Mochida et al., 1992. Numerical Study on Velocity-Pressure Field and Wind Forces for Bluff Bodies by k-ε, ASM and LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 41-44, pp. 2841-2852.
24. Yakhot et al.. Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow Around a Wall-Mounted Cube: Spatio-Temporal Evolution of Large-Scale Vortices, 2006. *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 1-9.
25. S. Janhäll, 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution – deposition and dispersion. *Atmos. Environ.*, 105, pp. 130-137.
26. J.A. Salmond, M. Tadaki, S. Vardoulakis, K. Arbuhtnott, A. Coutts, M. Demuzere, K.N. Dirks, C. Heaviside, S. Lim, H. Macintyre, R.N. McInnes, B.W. Wheeler, 2016. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environ. Health* 15 (1), pp. 36.
27. S.J. Livesley, E.G. McPherson, C. Calfapietra, 2016. The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat and pollution cycles at the tree, street and city scale. *J. Environ. Qual.* 45, pp. 119-124.
28. C. Haaland, C.K. van den Bosch, 2015. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: a review. *Urban For. Urban Green.* 14, pp. 760-771.
29. M. Van den Berg, W. Wendel-Vos, M. van Poppel, H. Kemper, W. van Mechelen, J. Maas, 2015. Health benefits of green spaces in the living environment: a systematic review of epidemiological studies. *Urban For. Urban Green.* 14, pp. 806-816.
30. S.E. Gill, J.F. Handley, A.R. Ennos, S. Pauleit, 2007. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environ.* 33 (1), pp. 115-133.
31. C.M. Kalansuriya, A.S. Pannila, D.U. Sonnadara, 2009. Effect of roadside vegetation on the reduction of traffic noise levels. In: *Proceedings of the Technical Sessions*, 25, 1-6. Institute of Physics, Sri Lanka, 2009.
32. F.J. Escopedo, D.J. Novak, 2008. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape Urban Plann.* 90, pp. 102-110.
33. C. Calfapietra, S. Fares, F. Manes, A. Morani, G. Sgrigna, F. Loreto, 2013. Role of biogenic volatile organic compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: a review. *Environ Pollut.* 183, pp.71-80.
34. J.V. Rasanen, T. Holopainen, J. Joutsensaari, C. Ndam, P. Pasanen, A. Rinnan et al., 2013. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees. *Environ. Pollut.* 183, pp. 64-70.
35. C.W. Huang, M.Y. Lin, A. Khlystov, G. Katul, 2013. The effects of leaf area density variation on the particle collection efficiency in the size range of ultrafine particles (UFP). *Environ. Sci. Technol.* 47, pp. 11607-11615.
36. M.-Y. Lin, A. Khlystov, 2012. Investigation of ultrafine particle deposition to vegetation branches in a wind tunnel. *Aerosol. Sci. Technol.* 46, pp. 465-472.
37. 4GREEN, (2020). Πράσινες ταράτσες και <<ζωντανοί>> τοίχοι. [online] Available at: <https://4green.gr/news/data/g-ebuildings/88767.asp> [Accessed Day Mo. Year]
38. P.J. Richards, R.P. Hoxey, 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 46&47, pp. 145-153
39. Σ. Τσαγγάρης. Μηχανική των Ρευστών: θεωρία και ασκήσεις. Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων, 2013. ISBN:978-960-940038-1.

40. B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet, 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment.*, 41, pp. 238-252.
41. J. Franke, C. Hirsch, A.G. Jensen, H.W. Krušs, Schatzmann. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In: *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*. In: van Beeck JPAJ (Ed.), COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life Built Environment. Von Karman Institute. 5-7 May 2004.
42. Inc., Fluent. *Fluent 6.2 User's Guide*. Lebanon: Fluent Inc., 2005.
43. Ltd., Ansys. *Ansys CFX-Solver, Release 10.0: Theory*. Canonsburg: s.n., 2005.
44. D.M. Hargreaves, N.G. Wright, 2011. On the use of the k-ε model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.*,99, pp. 257-266.
45. M.H. Salim, K.H. Schlünzen, D. Grawe, 2015. Including trees in the numerical simulations of the wind flow in urban areas: should we care? *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 144, pp. 84-95.
46. Z.J. Li, D.R. Miller, J.D. Lin, 1985. A first-order closure scheme to describe counter-gradient momentum transport in plant canopies. *Bound. Layer Meteorol.* 33, pp. 77-83.
47. W. Massman, 1987. A comparative study of some mathematical models of the mean wind structure and aerodynamic drag of plant canopies. *Bound. Layer Meteorol.* 40, pp. 179-197.
48. S. Di Sabatino, R. Buccolieri, G. Pappacogli, L.S. Leo, 2015. The effects of trees on micrometeorology in a real street canyon: consequences for local air quality. *Int. J. Environ. Pollut.* 58, pp. 100-111.
49. S. Vranckx, P. Vos, B. Maiheu, S. Janssen, 2015. Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: a numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium. *Sci. Total Environ.* 532, pp. 474-483.
50. B. Lalic, D.T. Mihailovic, 2004. An empirical relation describing leaf area density inside the forest for environmental modeling. *J. Appl. Meteorol.* 43, pp. 641-645.
51. J.L. Santiago, A. Martilli, F. Martin, 2017a. On dry deposition modelling of atmospheric pollutants on vegetation at the microscale: application to the impact of street vegetation on air quality. *Bound. Layer Meteorol.* 162, pp. 451-474.
52. C. Gromke, R. Buccolieri, S. Di Sabatino, B. Ruck, 2008. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations evaluation of CFD data with experimental data. *Atmos. Environ.* 42, pp. 8640-8650.
53. J.L. Santiago, R. Borge, F. Martin, D. de la Paz, A. Martilli, J. Lumbreras, B. Sanchez, 2017. Evaluation of a CFD-based approach to estimate pollutant distribution within a real urban canopy by means of passive samplers. *Sci. Total Environ.* 576, pp. 46-58.
54. K. Peters, R. Eiden, 1992. Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest. *Atmos. Environ.* 26, pp. 2555-2564.
55. E.J. White, F. Turner, 1970. A method of estimating income of nutrients in a catch of airborne particles by a woodland canopy. *J. Appl. Ecol.* 7, pp. 441-461.
56. D.J. Novak, S. Hirabayashi, A. Bodine, R. Hoehn, 2013. Modeled pm 2.5 removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environ. Pollut.* 178, pp. 395-402.
57. B. Hong, H. Qin, B. Lin, 2018. Prediction of wind environment and indoor/outdoor relationships for PM2.5 in different building-tree grouping patterns. *Atmosphere* 9, pp. 39.
58. C. Gromke, B. Blocken, W. Janssen, B. Merema, T. van Hooff, H. Timmermans, 2015. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: case study for specific meteorological conditions during a heatwave in Arnhem, Netherlands. *Build. Environ.* 83, pp. 11-26.
59. B. Sanchez, J.-L. Santiago, A. Martilli, M. Palacios, F. Kirchner, 2016. CFD modelling of reactive pollutant dispersion in simplified urban configurations with different chemical mechanisms. *Atmos. Chem. Phys.* 16, pp. 12143-12157.

60. J. Baker, H.L. Walker, X. Cai, 2004. A study of the dispersion and transport of reactive pollutants in and above street canyons- a large eddy simulation. *Atmos. Environ.* 38, pp. 6883-6892.
61. S.M. Salim, A. Chan, S.C. Cheah, 2011. Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in tree-lined street canyons: comparison between RANS and LES. *J. Build. Environ.* 46, pp. 1735- 1746.
62. P. Moonen, C. Gromke, V. Dorer, 2013. Performance assessment of large eddy simulation (LES) for modelling dispersion in an urban street canyon with tree planting. *Atmos. Environ.* 75, pp. 66-76.
63. S.R. Green, 1992. Modelling turbulent air flow in stand of widely-spaced trees. *Phoenixes J.* 5, pp. 294-312.
64. P.A. Durbin, 1991. Near-wall turbulence closure modeling without damping functions. *Theoretical & Computational Fluid Dynamics.* 3, pp. 1-13.
65. Δ. Μπούρης, Υπολογιστικό Εργαλείο για την Αριθμητική Διερεύνηση Ρευστομηχανικών Προβλημάτων. Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα: 2013, σσ. 5-58.
66. Γ. Μπεργελές, Υπολογιστική Ρευστομηχανική. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2012. ISBN: 978-960-9400-37-4.
67. Β. Παππά, Μ. Πάνος, Μ. Μανωλέσος, Δ. Μπούρης. Εργασία για Διδακτορική Διατριβή: Υπολογιστική & Πειραματική Προσομοίωση Ατμοσφαιρικής Ροής Αέρα δια Ομοιόματος Κτηρίου με Ανοίγματα. Ε.Μ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, σσ. 3-6.
68. H. Irwin. The design of spires for wind simulation. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 7(3), pp. 361-366.
69. Μ. Πάνος, Μ. Μανωλέσος, Δ. Μπούρης. Πειραματική προσομοίωση προτύπου κτηρίου εκτεθειμένου σε ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, 10<sup>th</sup> Επιστημονική Συνάντηση, Πανελλήνιο Συνέδριο για τα Φαινόμενα Μηχανικής Ρευστών, Πάτρα, 2-3 Δεκεμβρίου, 2016.
70. F.R. Menter, 1993. Zonal Two Equation k- $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906.
71. M. Manolesos, Z. Gao, D. Bouris, 2018. Experimental Investigation of the Atmospheric Boundary Layer Flow Past a Building Model with Openings. *Building and Environment*, 141, pp. 166-181.
72. P. Koutselakis. Experimental Study of Surface Pressure Distribution on a Cubic Building Model. Diploma Thesis. University of Western Macedonia. Dept: Mechanical Engineering.
73. T. Yoshihide, M. Akashi, Y. Ryuichiro, K. Hiroto, N. Tsuyoshi, Y. Masaru, S. Taichi. AIJ Guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 2008, 96.
74. Engineering Toolbox, (2001). [online] Available at: <http://www.engineeringtoolbox.com> [Accessed Day Mo. Year]
75. I. Abohela, N. Hamza, S. Dudek. Validating CFD Simulation Results: Wind Flow around a surface mounted cube in a turbulent channel flow. Lima, Peru: Opportunities, Limits & Needs towards an environmentally responsible architecture, 7-9, November 2012. 28<sup>th</sup> Conference.
76. R.M. Barron, A. Ali, Salehi Neyshabouri, 2003. Effects of under-relaxation factors on turbulent flow simulations. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 42, pp. 923-928.
77. U. Svensson, Häggkvist, 1990. A two-equation turbulence model for canopy flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 35, pp. 201-211.
78. Δ. Μαθιουλάκης, Ι. Αναγνωστόπουλος, Δ. Τουζόπουλος. Βιομηχανική Ρευστομηχανική: Σημειώσεις. Ε.Μ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών., Αθήνα: 2005
79. E. S. Krayenhoff, J.-L. Santiago., A. Martilli, A. Christen, T. R. Oke, 2015. Parametrization of Drag and Turbulence for Urban Neighbourhoods with Trees. *Boundary-Layer Meteorol*, 156, pp. 157–189