

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Διπλωματική Εργασία

---

Υπολογιστική προσομοίωση ατμοσφαιρικής  
ροής γύρω από πρότυπο κτήριο με χρήση του  
Μοντέλου Μεγάλων Δινών

---

Συγγραφέας:  
Κομητόπουλος Σπυρίδων

Επιβλέπων:  
Δημήτριος Μπούρης

Εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος  
Μηχανολόγων Μηχανικών

15 Οκτωβρίου 2017



## Περίληψη

Υπολογιστική προσομοίωση ατμοσφαιρικής ροής γύρω από πρότυπο κτήριο με χρήση του Μοντέλου Μεγάλων Δινών

Το PALM αποτελεί ένα σχετικά πρόσφατο πρόγραμμα, ανοιχτού και ελεύθερου πηγαίου κώδικα, το οποίο αναπτύχθηκε με βασικό σκοπό της επίλυση ροών εντός του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος. Το μέγεθος των διαστάσεων και η συνθετότητα των ρευστοδυναμικών, φυσικών, χημικών ή άλλων χαρακτηριστικών που εμπλέκονται στην προσομοίωση μιας ατμοσφαιρικής ροής, καθιστούν απαγορευτική την κατασκευή πυκνών πλεγμάτων για τη λεπτομερή μελέτη της. Η συνήθης πρακτική είναι να κατασκευάζονται απλά και σχετικά αραιά πλέγματα, τα οποία βασίζονται σε εκτεταμένη χρήση υπολογιστικών ή/και εμπειρικών μοντέλων για την προσομοίωση της επίδρασης της τοπογραφίας και των λοιπών μετεωρολογικών φαινομένων. Το PALM, σχεδιασμένο σε αυτό το πλαίσιο, προσφέρει τη δυνατότητα της εύκολης και γρήγορης περιγραφής της τοπογραφίας, σε συνδυασμό με πληθώρα ενσωματωμένων υπολογιστικών εργαλείων, κάνοντας κατά το δυνατόν αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων ενός υπολογιστικού συστήματος Linux, οποιασδήποτε κλίμακας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το PALM χρησιμοποιείται με σκοπό την μελέτη του ΑΟΣ, με τη βοήθεια του μοντέλου LES. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις έγιναν με βάση πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην αεροσύραγμα του εργαστηρίου Αεροδυναμικής του ΕΜΠ, τα οποία χρησίμευσαν τόσο στον καθορισμό των φυσικών παραμέτρων, όσο και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στην πρώτη ενότητα, γίνεται η περιγραφή του φυσικού, μαθηματικού και αριθμητικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι συνεχείς και διακριτοποιημένες ρευστοδυναμικές εξισώσεις, το μοντέλο τύρβης, οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης των μαθηματικών συστημάτων, η μεθοδολογία επιβολής των συνοριακών συνθηκών και της τοπογραφίας.

Στη δεύτερη ενότητα αναπτύσσεται ο τρόπος με τον οποίο το μοντέλο υλοποιείται σε ένα υπολογιστικό σύστημα. Αναλύεται η βασική αρχιτεκτονική του κώδικα, οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του, καθώς και οι απαιτήσεις του όσον αφορά στο υπολογιστικό σύστημα.

Στην τρίτη ενότητα αναφέρονται οι λεπτομέρειες για τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Περιγράφονται και αιτιολογούνται οι παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και ο τρόπος με τον οποίον έγινε η μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζονται και ερμηνεύονται φυσικά τα αποτελέσματα και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

# Abstract

## **Simulation of flow around model building using a Large Eddy Model**

PALM is a relatively recently developed, open source free-ware. Its main focus is the simulation of flows inside the Atmospheric Boundary Layer. The extent of the computational domain, combined with the complexity of the rheological, natural, chemical or other characteristics of an atmospheric flow, do not allow the construction of dense meshes for it 's detailed study. The usual practice is the solution of simple and coarse meshes, combined with extensive use of numerical and/or experimental models, for the simulation of topography and other meteorological phenomena. PALM , designed in this philosophy, offers the convenience of a fast and easy description of topography, in combination with numerous integrated numerical utilities, making the best possible use of the sources of any computational system.

In this thesis, PALM is used in order to study the ABL, based on the LES model. The simulations were based on experiments that were recently conducted in the wind tunnel of the lab of Aerodynamics in the NTUA and were used for both the determination of the physical parameters and the evaluation of the results.

The first chapter begins with the description of the physical, the mathematical and the numerical models used. These include the continuous and discrete forms, the model for the closure of turbulence, the numerical methods for the solution of the mathematical systems, the methodology of imposing the boundary conditions and topography.

In the second chapter, we develop who that model is realized in a computational system. So the basic code architecture, its features and limitations as well as its demands on the hardware are analyzed.

In the third chapter follow the details of the simulations. The choice of the input parameters is presented and explained, along with the procedure for the post process of the results.

In the fourth unit, we present and explain the results, making the final conclusions. .

# Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
1 Θεμελίωση του μοντέλου του <b>PALM</b>	1
Εισαγωγή	1
1.1 Το ρευστοδυναμικό μοντέλο	2
1.1.1 Συνεχής μορφή των εξισώσεων	2
1.1.1.1 Εξισώσεις ασυμπίεστου ρευστού	2
1.1.1.2 Διαχωρισμός φάσματος τύρβης	3
1.1.1.3 Τελική μορφή των εξισώσεων	5
1.1.2 Μοντελοποίηση της τύρβης	6
1.2 Διακριτοποίηση	8
1.2.1 Όροι συναγωγής	9
1.2.1.1 Σχήμα χαμηλής τάξης	9
1.2.1.2 Σχήμα υψηλής τάξης	10
1.2.2 Χρονική ολοκλήρωση	10
1.2.2.1 Μέθοδος Euler	11
1.2.2.2 Μέθοδοι Runge-Kutta	11
1.2.2.3 Σχήμα Runge-Kutta μειωμένης μνήμης	11
1.3 Η εξίσωση Poisson	12
1.3.1 Επιλύτης FFT	13
1.3.2 Επαναληπτική μέθοδος	13
1.4 Οριακές συνθήκες	14
1.4.1 Πλευρικά όρια	16
1.4.1.1 Περιοδικά όρια	16
1.4.1.2 Μη περιοδικά όρια	17
1.4.1.3 Γένεση της τύρβης	17
1.4.2 Άνω και κάτω όρια	18
1.4.3 Όρια τοπογραφίας	20
1.4.4 Επιφάνεια εξόδου	20
1.4.5 Διόρθωση παροχής	21
1.5 Τοπογραφία	21
2 Τεχνική Υλοποίηση	25
Εισαγωγή	25
2.1 Η βασική δομή του κώδικα	26
2.1.1 Έλεγχος και ροή του προγράμματος	29
2.1.1.1 Αρχεία εισόδου/εξόδου	30
2.1.2 Ενσωμάτωση κώδικα από το χρήστη	32
2.2 Έξοδος αποτελεσμάτων	33
2.2.1 Τα αρχεία NetCDF	34
2.2.2 Εγκατάσταση	35

3	Η προσομοίωση	37
3.1	Τα πειράματα	38
3.2	Η υλοποίηση στο PALM	38
3.2.1	Παράμετροι εισόδου	39
3.2.1.1	Πλεγματοποίηση και αριθμητικές παράμετροι	39
3.2.1.2	Οριακές συνθήκες	41
3.3	Εξαγωγή των αποτελεσμάτων	43
3.3.1	Ποσοτικά αποτελέσματα	44
3.3.2	Ποιοτικά αποτελέσματα	44
3.4	Επεξεργασία αποτελεσμάτων	45
3.5	Ανάλυση Ανεξαρτησίας Αριθμητικών Παραμέτρων	49
3.5.1	Πλεγματοποίηση	49
3.5.2	Συνολικός χρόνος προσομοίωσης	52
4	Αποτελέσματα	55
4.1	Γενικά χαρακτηριστικά της ροής	55
4.2	Η τύρβη	63
4.3	Μονοδιάστατα προφίλ	67
4.4	Συμπεράσματα-Προτάσεις	88
4.4.1	Συμπεράσματα	88
4.4.2	Προτάσεις μελλοντικής μελέτης	89
	Βιβλιογραφία	91

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Το φάσμα της τύρβης . . . . .	6
1.2	Διαχωρισμός υπολογιζόμενων και μοντελοποιούμενων κλιμάκων τύρβης.	7
1.3	Το υπολογιστικό πλέγμα στο <b>PALM</b> . . . . .	9
1.4	Διαγραμματική απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου στο <b>PALM</b> . . . . .	14
1.5	Το πλέγμα στο <b>PALM</b> . . . . .	15
1.6	Δημιουργία τύρβης με μαθηματικό μοντέλο . . . . .	19
1.7	Ανακύκλωση της τύρβης . . . . .	19
1.8	Η τοπογραφία στο <b>PALM</b> . . . . .	22
1.9	Υλοποίηση κεκλιμένων επιφανειών στο <b>PALM</b> . . . . .	23
3.1	Διστάσεις υπολογιστικού χωρίου . . . . .	41
3.2	Προφίλ εισόδου για ταχύτητα και τύρβη . . . . .	43
3.3	Θέσεις ύπαρξης πειραματικών δεδομένων. . . . .	45
3.4	Θέσεις χάραξης των προφίλ . . . . .	46
3.5	Οργάνωση λογισμικού επεξεργασίας αποτελεσμάτων . . . . .	48
3.6	Κατακόρυφα προφίλ για όλα τα μεγέθη ενδιαφέροντος 150 mm ανάντι της εμπρός επιφάνειας του κύβου για τρεις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος. Η θέση που έχει επιλεχθεί είναι ενδεικτική. Αυτό που φαίνεται είναι ότι δεν έχει επιτευχθεί η πλήρης ανεξαρτησία του πλέγματος. . . . .	51
3.7	Κατακόρυφα προφίλ για όλα τα μεγέθη ενδιαφέροντος 150 mm ανάντι της εμπρός επιφάνειας του κύβου για τέσσερις διαφορετικούς συνολικούς χρόνους δειγματοληψίας. Η θέση που έχει επιλεχθεί είναι ενδεικτική. Τα 18 δευτερόλεπτα που έχουν επιλεγεί είναι επαρκή για την εξασφάλιση επαρκούς δείγματος. . . . .	53
4.1	Γενική 3-Διάστατη όψη της ροής . . . . .	57
4.2	Λεπτομέρεια των συμμετρικών στροβίλων . . . . .	58
4.3	Το σημείο ανακοπής . . . . .	58
4.4	Τα τοπικά οριακά στρώματα στον κύβο . . . . .	59
4.5	Λεπτομέρεια πεταλοειδούς στροβίλου . . . . .	60
4.6	Ο ομόρους . . . . .	61
4.14	Θέσεις χάραξης κατακόρυφων προφίλ ταχύτητας . . . . .	68
4.15	Το πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο συμμετρίας του κύβου. . . . .	69
4.16	Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο A, σε απόσταση 165 mm από την εμπρός όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15. . . . .	70
4.17	Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο A, σε απόσταση 110 mm από την εμπρός όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15. . . . .	71





# Κατάλογος Πινάκων

1.1	Συντελεστές RK 3ης τάξης μειωμένης μνήμης . . . . .	12
1.2	Σύνοψη οριακών συνθηκών . . . . .	17
3.1	Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου . . . . .	39
3.2	Χαρακτηριστικά πλέγματος . . . . .	40
3.3	Βασικότερες αριθμητικές παράμετροι της προσομοίωσης . . . . .	40
3.4	Στατιστικά στοιχεία προσομοίωσης για είσοδο προφίλ χαμηλής διάτμησης . . . . .	41
3.5	Στατιστικά στοιχεία προσομοίωσης για είσοδο προφίλ υψηλής διάτμησης . . . . .	42
3.6	Βασικότερες φυσικές παράμετροι της προσομοίωσης . . . . .	42
3.7	Οριακές συνθήκες στην προσομοίωση . . . . .	42
3.8	Θέσεις υπολογισμού προφίλ . . . . .	44
3.9	Ανάλυση ανεξαρτησίας πλέγματος . . . . .	50



# Λίστα ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ

<b>ABL</b>	<b>A</b> tmospheric <b>B</b> oundary <b>L</b> ayer
<b>DEM</b>	<b>D</b> igital <b>E</b> levation <b>M</b> odel
<b>DNS</b>	<b>D</b> irect <b>N</b> umerical <b>S</b> imulation
<b>CLI</b>	<b>C</b> ommand <b>L</b> ine <b>I</b> nterface
<b>CPU</b>	<b>C</b> entral <b>P</b> rocessing <b>U</b> nit
<b>DNS</b>	<b>D</b> irect <b>N</b> umerical <b>S</b> imulation
<b>GB</b>	<b>G</b> iga <b>B</b> ytes
<b>GIS</b>	<b>G</b> eographic <b>I</b> nformation <b>S</b> ystem
<b>GPU</b>	<b>G</b> raphics <b>P</b> rocessing <b>U</b> nit
<b>GUI</b>	<b>G</b> raphics <b>U</b> ser <b>I</b> nterface
<b>HDF</b>	<b>H</b> ierarchical <b>D</b> ata <b>F</b> ormat
<b>LES</b>	<b>L</b> arge <b>E</b> ddy <b>S</b> imulation
<b>MB</b>	<b>M</b> ega <b>B</b> ytes
<b>MOST</b>	<b>M</b> onin <b>O</b> bukhov <b>S</b> imilarity <b>T</b> heory
<b>MPI</b>	<b>M</b> essage <b>P</b> assing <b>I</b> nterface
<b>NetCDF</b>	<b>N</b> etwork <b>C</b> ommon <b>D</b> ata <b>F</b> orm
<b>RAM</b>	<b>R</b> andom <b>A</b> ccess <b>M</b> emory
<b>RANS</b>	<b>R</b> eynolds <b>A</b> veraged <b>N</b> avier <b>S</b> tokes
<b>RK</b>	<b>R</b> unge- <b>K</b> utta
<b>SGS</b>	<b>S</b> ub <b>G</b> rid <b>S</b> cale
<b>TB</b>	<b>T</b> erra <b>B</b> ytes
<b>TKE</b>	<b>T</b> urbulent <b>K</b> inetic <b>E</b> nergy
<b>URANS</b>	<b>U</b> nsteady <b>R</b> eynolds <b>A</b> veraged <b>N</b> avier <b>S</b> tokes



# Λίστα συμβόλων

$e$	$m^2s^{-2}$	Υποπλεγματική Κινητική Ενέργεια
$f$	$s^{-1}$	Παράμετρος Coriolis
$\nu_t, K_m$	$m^2s^{-1}$	Τυρβώδης συνεκτικότητα
$L$	$m$	Μήκος Obukhov
$l$	$m$	Μήκος υποπλεγματικής τυρβώδους ανάμειξης
$p$	$hPa$	Υδροστατική Πίεση
$p^*$	$hPa$	Διαταραχή Πίεσης
$Q_\theta$	$Kms^{-1}$	Θερμορροή
$q$	$kgkg^{-1}$	Διαλυμένη ποσότητα νερού
$q_l$	$kgkg^{-1}$	Ποσοστό υγρασίας ατμόσφαιρας
$s$	$kgm^{-3}$	Βαθμωτή παθητική συγκέντρωση
$U_{u_i}$	$ms^{-1}$	Φέρουσα ταχύτητα στην επιφάνεια εξόδου
$u_{g,i}$	$ms^{-1}$	Συνιστώσες γεωστροφικού ανέμου
$u_i$	$ms^{-1}$	Συνιστώσες ταχύτητας
$u_{i,LS}$	$ms^{-1}$	Ταχύτητες συναγωγής μεγάλης κλίμακας
$u_*$	$ms^{-1}$	Ταχύτητα τριβής
$x_i$	$m$	Συντεταγμένη σε καρτεσιανό πλέγμα
$z_0$	$m$	Μήκος τραχύτητας ορμής
$z_{0h}$	$m$	Μήκος τραχύτητας θερμότητας
$z_{MO}$	$m$	Ύψος στρώματος σταθερής διάτμησης κατά MOST
$\Delta$	$m$	Ονομαστική διάσταση πλέγματος
$\Delta$		Διαφορικός τελεστής
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	$m$	Διαστάσεις κελιών στις $x, y, z$ διευθύνσεις
$\Delta t$	$m$	Χρονικό βήμα για το LES
$\delta$		Δέλτα του Kronecker
$\varepsilon$		Σύμβολο Levi-Civita
$\epsilon$	$m^2s^{-3}$	Ρυθμός καταστροφής υποπλεγματικής TKE
$\theta$	$K$	Ολική Θερμοκρασία
$\theta_v$	$K$	Δυνατή Ολική Θερμοκρασία
$\Pi$		Συνάρτηση Exner
$\Phi_m$		Συνάρτηση ομοιότητας για την ορμή
$\phi$		Οποιαδήποτε Υπολογιζόμενη ποσότητα ( $u, v, w, p, \theta, q, s$ )
$\psi_q$	$kgkg^{-1}s^{-1}$	Όρος πηγής για την υγρασία
$\psi_s$	$kgkg^{-1}s^{-1}$	Όρος πηγής για βαθμωτό παθητικό μέγεθος



## Κεφάλαιο 1

# Θεμελίωση του μοντέλου του **PALM**

## Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή γίνεται η περιγραφή της φυσικής και μαθηματικής μοντελοποίησης στο PALM [1]. Επιπλέον, αναλύονται οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν, καθώς και ο τρόπος εισαγωγής των συνοριακών συνθηκών και των στοιχείων της εσωτερικής τοπογραφίας.

Αρχικά, αναφέρονται οι ρευστοδυναμικές εξισώσεις στη συνεχή τους μορφή, πριν και μετά την τη διαδικασία εφαρμογής της συνάρτησης φίλτρου που απαιτεί το LES. Στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο τύρβης που παραμετροποιεί την επίδραση των τάσεων Reynolds, με βάση την παραδοχή της τυρβώδους συνεκτικότητας, καταλήγοντας στην τελική μορφή του συνεχούς μαθηματικού προβλήματος, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διακριτοποίηση των εξισώσεων σε μετατοπισμένο καρτεσιανό πλέγμα. Η μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται η επίλυση των γραμμικών και μη γραμμικών εξισώσεων που παράγουν οι ανωτέρω διαδικασίες, σχετίζονται άμεσα με τον τρόπο επιβολής των οριακών συνθηκών, τόσο στα εξωτερικά όρια, όσο και στα εσωτερικά στοιχεία της τοπογραφίας. Αν και το PALM διαθέτει πληθώρα φυσικών μοντέλων για τη ρεαλιστική προσομοίωση πολύπλοκων ατμοσφαιρικών φαινομένων μεταφοράς θερμότητας, διασποράς ουσιών και ανάπτυξης υετού, εδώ εστιάζουμε στα κομμάτια του μοντέλου που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της εργασίας.

## 1.1 Το ρευστοδυναμικό μοντέλο

Το ρευστοδυναμικό μοντέλο του PALM βασίζεται στις μη υδροστατικές, εξισώσεις Navier-Stokes, για ασυμπίεστο, συνεκτικό ρευστό, βασιζόμενες στις παραδοχές του Boussinesq. Η διακριτοποίησή τους γίνεται σε ένα μετατοπισμένο καρτεσιανό πλέγμα [2]. Η μοντελοποίηση της τύρβης γίνεται με τη χρήση του μοντέλου LES, το οποίο δίνει τη δυνατότητα χρήσης ενός φίλτρου για την επίλυση των εξισώσεων, με τη βοήθεια μίας επιπλέον εξίσωσης για την τυρβώδη κινητική ενέργεια. Τα υπολογιζόμενα μεγέθη είναι οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας ( $u, v, w$ ), η θερμοκρασία ( $\theta$ ), η υποπλεγματική τυρβώδης κινητική ενέργεια (SGS-TKE) ( $e$ ) και το ποσοστό υγρασίας ( $q_v$ ) ή η διασπορά ενός παθητικού βαθμωτού μεγέθους ( $s$ ). Οι ανωτέρω ποσότητες υπολογίζονται από την επίλυση των εξισώσεων συνέχειας, ορμής, ενέργειας και υγρασίας (ή βαθμωτής διασποράς). Αν και στην παρούσα διπλωματική δε μελετήθηκαν φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, οπότε η θερμοκρασία δεν αποτέλεσε μεταβλητή του προβλήματος, σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί το πλήρες φυσικό μοντέλο.

### 1.1.1 Συνεχής μορφή των εξισώσεων

Το μοντέλο ξεκινά από τη διατύπωση των εξισώσεων ορμής (1.1α'), συνέχειας (1.1β'), μετάδοσης θερμότητας (1.1γ') και διασποράς (1.1δ'). Επιπλέον αυτών, απαιτείται μία εξίσωση που συνδέει την πυκνότητα με την πίεση ή τη θερμοκρασία (καταστατική εξίσωση τελείων αερίων-σχέση 1.1ε'):

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho \varepsilon_{ijk} f_j u_k - \rho \frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right\} \quad (1.1\alpha')$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial \rho u_k}{\partial x_k} \quad (1.1\beta')$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial T}{\partial x_k} = \mu_h \frac{\partial^2 T}{\partial x_k^2} + Q \quad (1.1\gamma')$$

$$\rho \frac{\partial \psi}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \psi}{\partial x_k} = \mu_\psi \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_k^2} + Q_\psi \quad (1.1\delta')$$

$$p = \rho RT \quad (1.1\epsilon')$$

Στη γενική περίπτωση το σύστημα είναι πεπλεγμένο, το οποίο σημαίνει ότι οι εξισώσεις δεν μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα μεταξύ τους, με εξαίρεση την εξίσωση για το παθητικό βαθμωτό μέγεθος που επιλύεται, αφού προκύψει η πυκνότητα και το πεδίο των ταχυτήτων μέσω των υπολοίπων εξισώσεων. Ωστόσο, από τη στιγμή που το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο και εφαρμόζοντας την παραδοχή Boussinesq το σύστημα απλοποιείται.

#### 1.1.1.1 Εξισώσεις ασυμπίεστου ρευστού

Καταρχάς χωρίζουμε τα θερμοδυναμικά μεγέθη της απόλυτης θερμοκρασίας ( $T$ ), πίεσης ( $p$ ) και πυκνότητας ( $\rho$ ), έστω ( $\Upsilon$ ), ως το άθροισμα μιας μέσης τιμής ( $\Upsilon_0$ ) και μιας διαταραχής ( $\Upsilon^*$ ), όπου ( $Y^* \ll Y_0$ ):

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) &= T_0(x, y, z) + T^*(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) &= p_0(x, y, z) + p^*(x, y, z, t) \\ \rho(x, y, z, t) &= \rho_0(z) + \rho^*(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1.2)$$



Στη συνέχεια σύμφωνα με τις σχέσεις για την υδροστατική ισορροπία και το γεωστροφικό άνεμο  $u_g, v_g$  [3]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p_0}{\partial z} &= -g\rho_0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} &= -fv_g \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} &= -fu_g\end{aligned}\quad (1.3)$$

Από την καταστατική εξίσωση και την ολοκλήρωσή της για έναν αρκετά μικρό, πεπερασμένο όγκο προκύπτει ο συσχετισμός της πυκνότητας με την πίεση και θερμοκρασία:

$$p = \rho RT \rightarrow \ln p = \ln \rho + \ln R + \ln T \rightarrow \frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \rightarrow \frac{p^*}{p_0} = \frac{\rho^*}{\rho_0} + \frac{T^*}{T_0} \quad (1.4)$$

Θεωρώντας τη σχετική μεταβολή της πίεσης αρκετά μικρότερη από τη σχετική μεταβολή της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ( $\frac{p^*}{p_0} \ll \frac{T^*}{T_0}, \frac{\rho^*}{\rho_0}$ ):

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} \approx -\frac{T^*}{T_0}, \quad (1.5)$$

καθώς και την εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστο ρευστό:

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0, \rho_0 = ct \quad (1.6)$$

καταλήγουμε σε ένα σύστημα απλούστερο από το 1.1:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p^*}{\partial x_i} - \varepsilon_{ijk} f_j u_k + \varepsilon_{i3k} f_3 u_{k_g} + g \frac{T - T_0}{T_0} \delta_{i,3} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} \quad (1.7\alpha')$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (1.7\beta')$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_k \frac{\partial T}{\partial x_k} = \nu_h \frac{\partial^2 T}{\partial x_k^2} + Q \quad (1.7\gamma')$$

$$\rho \frac{\partial \psi}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \psi}{\partial x_k} = \mu_\psi \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_k^2} + Q_\psi \quad (1.7\delta')$$

$$(1.7\epsilon')$$

Η υπόθεση της μη συμπίεστότητας εκτός του ότι απλοποιεί τη μορφή των εξισώσεων, απεμπλέκει την εξίσωση μετάδοσης θερμότητας από αυτές της ορμής και της συνέχειας, οπότε η θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί, όπως και η εξίσωση συγκέντρωσης, έπειτα και ανεξάρτητα από την ορμή.

### 1.1.1.2 Διαχωρισμός φάσματος τύρβης

Το επόμενο βήμα για την αριθμητική επίλυση του συστήματος 1.7 είναι η εφαρμογή κάποιου μοντέλου τύρβης, το οποίο σε συνδυασμό με την διακριτοποίηση του χωρίου θα οδηγήσει σε ένα επιλύσιμο σύστημα γραμμικών εξισώσεων, για τα αναζητούμενα μεγέθη. Στο PALM εφαρμόζεται το μοντέλο LES, το οποίο απαιτεί από τη μία την εφαρμογή κάποιου χωρικού φίλτρου και από την άλλη κάποιου μοντέλου τύρβης.

Σκοπός των μοντέλων τύρβης είναι να ληφθεί η επίδραση της τύρβης στο τελικό αποτέλεσμα, χωρίς να υπάρχει ανάγκη υπολογισμού ολόκληρου του φάσματός της, όπως γίνεται στα άμεσα μοντέλα (DNS). Σε αντίθεση με τις RANS, όπου η μοντελοποίηση βασίζεται στη χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier-Stokes, το LES βασίζεται στη χωρική ολοκλήρωση των εξισώσεων, με την εφαρμογή κατάλληλου φίλτρου, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να υπολογίσει το μη μόνιμο χαρακτήρα του πεδίου ροής, υπολογίζοντας τις μεγαλύτερες κλίμακες τύρβης και μοντελοποιώντας τις μικρότερες. Και στις δύο περιπτώσεις, είτε από την εφαρμογή του μέσου όρου στις RANS, είτε του χωρικού φίλτρου στο LES, από τη μη γραμμικότητα των εξισώσεων ορμής, προκύπτουν γινόμενα διαταραχών, η επίδραση των οποίων θα πρέπει να μοντελοποιηθεί.

Αν και μαθηματικά η εφαρμογή της συνάρτησης φίλτρου και της εξαγωγής των διαταραχών δε μειώνει την ακρίβεια των αρχικών εξισώσεων, στην πράξη η αριθμητική ολοκλήρωση που πραγματοποιείται κατόπιν διακριτοποίησης οδηγεί σε προσεγγιστικές λύσεις με μειωμένη πληροφορία. Σκοπός της συνάρτησης φίλτρου είναι να αντιπροσωπεύσει την κατανομή ενός χωρικά κυμαινόμενου μεγέθους, με μία μοναδική τιμή σε κάποιο σημείο που βρίσκεται εντός ενός ορίου. Αν και η επιλογή του φίλτρου δεν θα πρέπει να επηρεάζει το αποτέλεσμα, αυτό δεν είναι προφανές ότι θα συμβαίνει, χωρίς την κατάλληλη μελέτη. Η επιλογή και η εφαρμογή της συνάρτησης φίλτρου έχει να κάνει με πολλές παραμέτρους της γενικότερης μοντελοποίησης και ιδιαίτερα με την περιοχή των συχνοτήτων που πρέπει να υπολογιστούν, το μέγεθος του πλέγματος και τη μέθοδο διακριτοποίησης των εξισώσεων.

Για την εφαρμογή μιας συνάρτησης φίλτρου της μορφής:

$$\bar{\Psi}(x_i) = \int_D G(x_i - x'_i) \Psi(x'_i) dx'_i, \quad (1.8)$$

η τροποποίηση των εξισώσεων στην αρχική σε σύγκριση με την αρχική διαφορική τους μορφή, έχει να κάνει με την επιλογή της συνάρτησης φίλτρου και με τις ιδιότητές της, καθώς και με τη γεωμετρία του πλέγματος. Όποια και να είναι αυτή όμως, η μεγαλύτερη δυσκολία πηγάζει από τους μη γραμμικούς όρους συναγωγής. Στο PALM, η συνάρτηση φίλτρου είναι μια κεντροβαρική συνάρτηση, δηλαδή το χωρικό μέσο όρο της μεταβλητής, στο χωρίο ολοκλήρωσης. Ως χωρίο ολοκλήρωσης λαμβάνεται το κελί του πλέγματος που προκύπτει σύμφωνα με την ολοκλήρωση [4]:

$$\bar{\Psi}(V, t) = \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} \int \int \int_V \Psi(V', t) dV', \quad (1.9)$$

όπου

$$V = \left[ x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2} \right] \times \left[ y - \frac{\Delta y}{2}, y + \frac{\Delta y}{2} \right] \times \left[ z - \frac{\Delta z}{2}, z + \frac{\Delta z}{2} \right]$$

και για τα φιλτραρισμένα μεγέθη ισχύει:

$$\bar{\bar{\Psi}}(x_i) = \bar{\Psi}(x_i) \quad (1.10\alpha')$$

$$\overline{u_k u_i} = \overline{u_k u_i} + \underbrace{\overline{u'_k u'_i}}_{\tau_{ki}} \quad (1.10\beta')$$

Ο τανυστής  $\tau_{ki}$  ονομάζεται ολικός τανυστής τάσεων και αποτελεί κατά τον Leonard[5] το άθροισμα τριών όρων:

$$\tau_{ki} = \underbrace{(\overline{u_k u_i} - \overline{u_k} \overline{u_i})}_{L_{ki}} + \underbrace{\overline{u_k u'_i} + \overline{u'_k u_i}}_{C_{ki}} + \underbrace{\overline{u'_k u'_i}}_{R_{ki}} \quad (1.11)$$

Η ερμηνεία της επίδρασης και της φυσικής σημασίας του κάθε όρου δεν είναι ανάγκη να είναι γνωστή, αρκεί να μπορεί να μοντελοποιηθεί επαρκώς. Σύμφωνα με αυτά, οι εξισώσεις ορμής 1.7α' του συστήματος 1.7 μπορούν να γραφούν σε φιλτραρισμένη μορφή ως:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_k u_i}}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} - \varepsilon_{ijk} f_j \bar{u}_k + \varepsilon_{i3k} f_3 \overline{u_{kg}} + g \frac{\bar{T} - T_0}{T_0} \delta_{i,3} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k^2} - \frac{\partial \tau_{ki}}{\partial x_k} \quad (1.12)$$

Στη γενική περίπτωση η χωρική ολοκλήρωση δεν είναι ανάγκη να ταυτίζεται με το πλέγμα της διακριτοποίησης. Ωστόσο, στο PALM, όπως και στα περισσότερα προγράμματα που εφαρμόζουν το LES, το βήμα διακριτοποίησης ( $\Delta x_i$ ) λαμβάνεται ίσο με το βήμα της χωρικής ολοκλήρωσης του φίλτρου, για λόγους απλότητας.

### 1.1.1.3 Τελική μορφή των εξισώσεων

Για την εξαγωγή της τελικής μορφής του συστήματος των φυσικών εξισώσεων στη συνεχή τους (φιλτραρισμένη) μορφή, θα πρέπει να εισάγουμε το μέγεθος της δυνατής ολικής θερμοκρασίας ( $\theta_v$ ):

$$\theta_v = \theta(1 + 0.61q - q_L), \quad (1.13)$$

της υποπλεγματικής τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $e$ ):

$$e = \frac{1}{2} \overline{u_i'' u_i''} \quad (1.14)$$

και της διαταραχής της τροποποιημένης δυναμικής πίεσης ( $\pi^*$ ), η οποία περιλαμβάνει τις ορθές συνιστώσες του γενικού ταυυστή των τάσεων:

$$\pi^* = \bar{p}^* + \frac{1}{3} \tau_{jj} \delta_{ki}, \quad (1.15)$$

για να καταλήξουμε στην μορφή:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \varepsilon_{ijk} f_j u_k + \varepsilon_{i3j} f_3 u_{g,j} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \pi^*}{\partial x_i} + g \frac{\theta_v - \langle \theta_v \rangle}{\langle \theta_v \rangle} \delta_{i3} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} e \delta_{ij} \right) \quad (1.16\alpha')$$

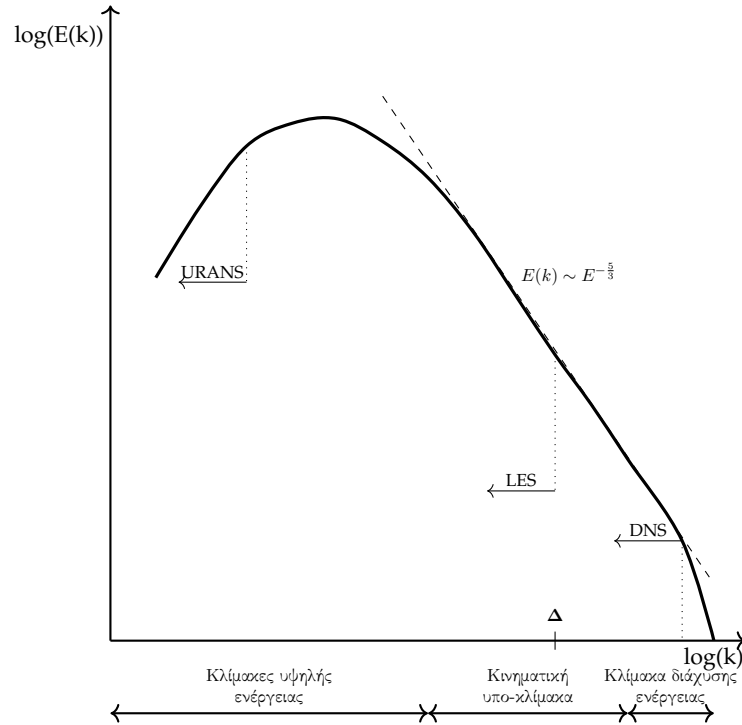
$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1.16\beta')$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial u_j \theta}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{u_j' \theta'} \right) - \frac{L_V}{c_p \Pi} \Psi_{q_v} \quad (1.16\gamma')$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -\frac{\partial u_j q_v}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{u_j' q_v'} \right) + \Psi_{q_v} \quad (1.16\delta')$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial u_j s}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{u_j' s'} \right) + \Psi_s \quad (1.16\epsilon')$$

Το σύστημα 1.16 περιλαμβάνει τη γενικότερη μορφή των εξισώσεων του PALM, η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε για αυτήν τη διπλωματική. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν σε ασυμπίεστη ροή, σε χαμηλό υψόμετρο, με αμελητέα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, για (κατά σύμβαση) ξηρό αέρα. Επιπλέον, δε μελετήθηκε η διασπορά διαλυμένων ουσιών ή στερεών σωματιδίων. Επομένως, αν και αναπτύχθηκε ο τρόπος εξαγωγής των γενικών εξισώσεων, η μορφή τους αυτή δε θα μας ξαναπασχολήσει.



Σχήμα 1.1: Διαφορές των μεθόδων URANS, LES, DNS, ως προς το ποσοστό του φάσματος της τύρβης που επιλύουν. Οι μη μόνιμες RANS υπολογίζουν μόνο τις βασικές συχνότητες της μη ροής. Το LES υπολογίζει τις μεγαλύτερες κλίμακες της τύρβης, μέχρι το μήκος κύματος αποκοπής. Στο DNS, επιλύεται, θεωρητικά τουλάχιστον, όλη η τύρβη και δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης μοντέλου.

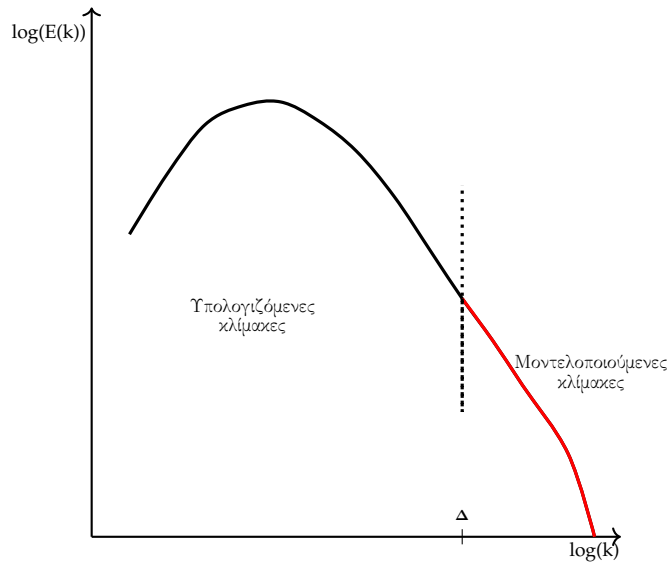
Το πραγματικό σύστημα που επιλύεται είναι αυτό των εξισώσεων ορμής και συνέχειας για ασυμπίεστο, συνεκτικό ρευστό:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \pi^*}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \epsilon \delta_{ij} \right) \quad (1.17\alpha')$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1.17\beta')$$

### 1.1.2 Μοντελοποίηση της τύρβης

Η μοντελοποίηση της τύρβης είναι απαραίτητη για την εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων στις περισσότερες εφαρμογές που ενδιαφέρουν ένα μηχανικό. Η όλη φιλοσοφία του LES βασίζεται στη θεωρία ομοιότητας του Kolmogorov και την ανάλυση του φάσματος ενέργειας της τύρβης (σχήμα 1.1). Στα μοντέλα LES, ένα μέρος της τύρβης επιλύεται, και το υπόλοιπο μοντελοποιείται, παραμετροποιώντας την η επίδρασή του στην υπόλοιπη ροή. Το ποιες κλίμακες της τύρβης θα επιλυθούν και το ποιες θα μοντελοποιηθούν, σχετίζεται με τη συνάρτηση φίλτρου και τη συχνότητα ή το μήκος κύματος αποκοπής (σχήμα 1.2). Όπως έχει αναφερθεί, η εφαρμογή ενός φίλτρου στις εξισώσεις ροής, ολοκληρώνει την επίδραση ενός όγκου σε ένα μοναδικό σημείο. Φαινόμενα και διακυμάνσεις που συμβαίνουν σε μικρότερη χωρική κλίμακα από τις διαστάσεις του χωρίου ολοκλήρωσης, δεν μπορούν να υπολογιστούν και η επίδρασή τους μπορεί μόνο να προσεγγιστεί. Η κλίμακες αυτές ονομάζονται υπο-πλεγματικές (SGS).



Σχήμα 1.2: Στα μοντέλα LES, το φάσμα της τύρβης αναλύεται σε ένα τμήμα που υπολογίζεται και σε ένα τμήμα που μοντελοποιείται, επιδρώντας στις υπολογιζόμενες κλίμακες. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση το χαρακτηριστικό μήκος  $\Delta$  της συνάρτησης φίλτρου που ορίζει και τη συχνότητα αποκοπής. Στο PALM, το μήκος  $\Delta$  ταυτίζεται με την αντίστοιχη διάσταση του πλέγματος για τη διακριτοποίηση.

Όπως συμβαίνει και με τα μοντέλα RANS, τα διάφορα μεγέθη αναλύονται σε μία μέση τιμή και μία διαταραχή. Από τη μαθηματική διαδικασία που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτει ότι οι μη γραμμικοί όροι, εισάγουν διπλά γινόμενα διαταραχών, τα οποία αποτελούν ουσιαστικά νέους αγνώστους. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη εισαγωγής τώσων εξισώσεων, όσοι και οι νέοι άγνωστοι, ώστε να προκύψει ένα καλά ορισμένο, επιλύσιμο σύστημα. Το όφελος είναι ότι τα γινόμενα διαταραχών, σχετίζονται με φυσικά μεγέθη και τα ρευστοδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής, οπότε η επίδρασή τους μπορεί να προσεγγιστεί τόσο θεωρητικά, όσο και πειραματικά.

Σκοπός κάθε καλού υπο-πλεγματοειδούς μοντέλου είναι να παράγει σωστά στατιστικά στοιχεία, για τις κλίμακες της τύρβης που φέρουν τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Απαραίτητες προϋποθέσεις για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι, το μοντέλο να:

- επιτελεί ρεαλιστικά την ενεργειακή σύζευξη των μεγάλων και των μικρών κλιμάκων της τύρβης, μέσω του μηχανισμού της διάχυσης.
- εξασφαλίζει ότι ο ρυθμός διάχυσης εξαρτάται από τις μεγάλες κλίμακες και δεν εισάγεται τεχνητά. Το υπο-πλεγματοειδές μοντέλο θα πρέπει να εξαρτάται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά μεγάλης κλίμακας και να είναι αρκετά ευέλικτο ως προς την προσαρμογή στις μεταβολές της.
- προσφέρει ως μόνη οδό για την απώλεια ενέργειας από τις υπολογιζόμενες κλίμακες το μηχανισμό διάχυσης, που προσφέρεται από το υποπλεγματοειδές μοντέλο.

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις, προτείνουν την χρήση ενός μοντέλου τυρβώδους συνεχτικότητας ( $\nu_t$  ή  $K_m$ ) [6, 7], όμοια με τη μοντελοποίηση κατά RANS. Έτσι, έχουμε:

$$\tau_{ki} = -\nu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = -2\nu_T \bar{S}_{ki} \quad (1.18)$$

όπου

$$\bar{S}_{ki} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right)$$

είναι ο φιλτραρισμένος τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης.

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της τυρβώδους συνεκτικότητας. Από διαστασιολογική ανάλυση προκύπτει ότι η τυρβώδης συνεκτικότητα  $\nu_T$ , θα πρέπει να είναι ανάλογη μίας χαρακτηριστικής ταχύτητας ( $q$ ) και ενός χαρακτηριστικού μήκους ( $l$ ):

$$\nu_T = Cql \quad (1.19)$$

Ως χαρακτηριστικό μήκος επιλέγεται το μήκος αποκοπής των υπο-πλεγματικών συχνοτήτων

$$l = \Delta$$

και ως χαρακτηριστική ταχύτητα, η μεταβολή της ταχύτητας κατά μήκος ενός υπολογιστικού κελιού:

$$q = l \frac{\partial u}{\partial x_i} = l \bar{S} \quad (1.20)$$

Στην υλοποίηση του PALM η τυρβώδης συνεκτικότητα υπολογίζεται ως:

$$\nu_t = Cql = C_M \Lambda \sqrt{\bar{e}} \quad (1.21)$$

όπου  $C_m = 0.1 = ct$ ,  $\Lambda = \min(0.7z, \Delta)$  για ουδέτερη ατμόσφαιρα και  $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}}$ .

Το κλείσιμο του συστήματος απαιτεί μία επιπλέον εξίσωση και αυτή προκύπτει από μία διαφορική εξίσωση για την υποπλεγματική τυρβώδη κινητική ενέργεια:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} - \overline{(u'_i u'_j)} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \overline{u'_j \left( e + \frac{p'}{\rho_0} \right)} \right] - \epsilon \quad (1.22)$$

Επαναδιατυπώνοντας τη σχέση 1.18 έχουμε:

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \epsilon \delta_{ij} - \nu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.23)$$

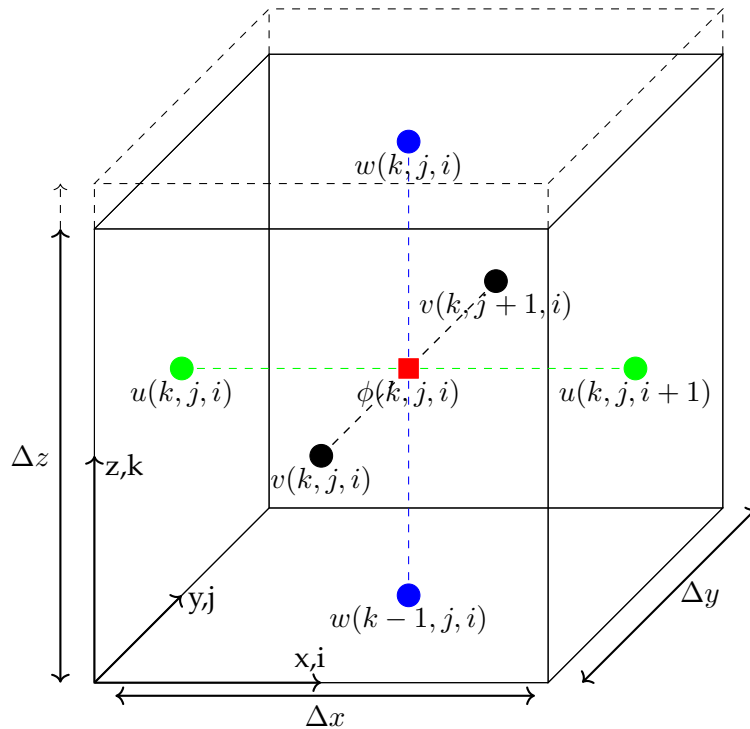
και οι όρος πίεσης και του ρυθμού διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $\epsilon$ ) παραμετροποιούνται αντίστοιχα ως:

$$\left[ \overline{u'_j \left( e + \frac{p'}{\rho_0} \right)} \right] = -2\nu_T \frac{\partial e}{\partial x_j} \quad (1.24\alpha')$$

$$\epsilon = \left( 0.19 + 0.74 \frac{l}{\Delta} \right) \frac{e^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (1.24\beta')$$

## 1.2 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση των εξισώσεων στο PALM γίνεται με πεπερασμένες διαφορές σε ένα Καρτεσινό μετατοπισμένο Arakawa  $C$ -πλέγμα (σχήμα 1.3) [2]. Τα κελιά έχουν ισομήκεις πλευρές στις οριζόντιες διευθύνσεις ( $\Delta x = \Delta y$ ), ενώ κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση το μήκος ακμής μπορεί να μεταβάλλεται με βάση γεωμετρική πρόοδο. Έτσι, τα βαθμωτά μεγέθη υπολογίζονται στο κέντρο των κελιών, ενώ οι συνιστώσες της ταχύτητας στα



Σχήμα 1.3: Μετατοπισμένο Arakawa C-πλέγμα. Στο σχήμα φαίνεται ένα υπολογιστικό κελί και οι θέσεις υπολογισμού των διαφορών μεγεθών. Οι συνιστώσες της ταχύτητας ( $u, v, w$ ) υπολογίζονται στα κέντρα των εδρών κάθε κελιού, ενώ τα βαθμωτά μεγέθη ( $\phi$ ) στο κέντρο. Το μήκος ακμής μπορεί να μεταβάλλεται στην κατακόρυφη διεύθυνση με βάση γεωμετρική πρόοδο.

κέντρα των πλευρών, μετατοπισμένες κατά μισό μήκος ακμής. Η επιλογή αυτού του τύπου πλέγματος διπλασιάζει τη χωρική ανάλυση σε σχέση με ένα μη μετατοπισμένο πλέγμα, επιτρέποντας την πραγματοποίηση προσομοιώσεων με μικρότερα πλέγματα. Για τη χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι, που ποικίλουν ως προς στην ταχύτητα, την ακρίβεια και την προγραμματιστική τους συνθετότητα.

### 1.2.1 Όροι συναγωγής

Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής γίνεται με βάση ένα ανάντι σχήμα 5ης τάξης [8] ή κεντρικό σχήμα 2ης τάξης [9]. Αν και προσφέρεται και η επιλογή ενός ανάντι σχήματος πρώτης τάξης, η επιλογή αυτή συνοδεύεται από πολύ μεγάλη διάχυση και η χρήση του δε συστήνεται για τυρβώδεις προσομοιώσεις. Το σχήμα υψηλής τάξης χαρακτηρίζεται από μεγάλη αριθμητική διάχυση, αλλά και αριθμητική ευστάθεια. Το σχήμα χαμηλής τάξης είναι απαλλαγμένο από υψηλή διάχυση, αλλά χαρακτηρίζεται από υψηλή αριθμητική διασπορά.

#### 1.2.1.1 Σχήμα χαμηλής τάξης

Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος προτάθηκε από τους Piascek και Williams για την αύξηση της ευστάθειας των μη γραμμικών όρων συναγωγής στις εξισώσεις των συνεχών μέσων. Για τη μονοδιάστατη μορφή της εξίσωσης συναγωγής κατά τη  $x$  διεύθυνση, για μία συνιστώσα της ταχύτητας ( $\psi$ ) έχουμε:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\partial(u\psi)}{\partial x} \quad (1.25)$$

ή σε ημι-διακριτοποιημένη μορφή:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = \frac{u_{i+1/2}\psi_{i+1} - u_{i-1/2}\psi_{i-1}}{2\Delta x} \quad (1.26)$$

Στο σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι τα συναγόμενα μεγέθη δεν είναι γνωστά στις θέσεις που απαιτούνται για τους υπολογισμούς (κέντρα κελιών). Για το λόγο αυτό, η τιμή τους θα πρέπει να υπολογίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής. Αν και απλούστερο στην εφαρμογή του, το σχήμα 2ης τάξης, μπορεί εμφανίσει κυματισμούς σε περιοχές με υψηλές κλίσεις ταχυτήτων.

### 1.2.1.2 Σχήμα υψηλής τάξης

Σύμφωνα με το σχήμα υψηλής τάξης, η μονοδιάστατη εξίσωση συναγωγής της σχέσης 1.25 διακριτοποιείται ως:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = -\frac{F_{i+\frac{1}{2}}(u\psi) - F_{i-\frac{1}{2}}(u\psi)}{\Delta x} \quad (1.27)$$

όπου ο όρος  $F \pm \frac{1}{2}$  υποδηλώνει τη φέρουσα ποσότητα στην επιφάνεια του κελιού (κόμβος  $i \pm \frac{1}{2}$ ) και τη συναγόμενη ποσότητα στο κέντρο του κελιού (κόμβος  $i$ ). Κατά τους Wicker και Skamarock, οι όροι του δεξιού μέλους της εξίσωσης 1.27 μπορούν να γραφούν συναρτήσει ενός όρου 5ης κι ενός όρου 6ης τάξης ως:

$$F_{i-\frac{1}{2}}^6 = \frac{u_{i-\frac{1}{2}}}{60} [37(\psi_i + \psi_{i-1}) - 8(\psi_{i+1} + \psi_{i-2}) + (\psi_{i+2} + \psi_{i-3})] \quad (1.28\alpha')$$

$$F_{i-\frac{1}{2}}^5 = F_{i-\frac{1}{2}}^6 - \frac{|u_{i-\frac{1}{2}}|}{60} [10(\psi_i - \psi_{i-1}) - 5(\psi_{i+1} - \psi_{i-2}) + (\psi_{i+2} - \psi_{i-3})] \quad (1.28\beta')$$

Ο όρος 5ης τάξης προκύπτει από τον όρο 6ης τάξης, που είναι ελεύθερος διάχυσης και από έναν όρο που εισάγει τεχνητή αριθμητική διάχυση. Η ύπαρξη του απολύτου εξασφαλίζει τη σωστή συμβολή του όρου, ανεξαρτήτως του πρόσημου της ταχύτητας. Το πλεονέκτημα του σχήματος υψηλής τάξης είναι ότι η τεχνητή διάχυση αποσβένει τις ταλαντώσεις μικρής κλίμακας και μπορεί να εξασφαλίσει την ευστάθεια της λύσης, όταν συνδυαστεί με κατάλληλο επιλύτη για τη χρονική ολοκλήρωση. Το μειονέκτημά της είναι ότι αφαιρεί με μη φυσικό (άρα και μη ρεαλιστικό) μηχανισμό, ενέργεια από τις υψίσυχνες κλίμακες τύρβης.

### 1.2.2 Χρονική ολοκλήρωση

Η χρονική ολοκλήρωση του συστήματος 1.16 απαιτεί την επίλυση πρωτοτάξιων, μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων ως προς το χρόνο, της μορφής:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = F(t, \psi) \quad (1.29)$$

Μια τέτοια εξίσωση (ή σύστημα εξισώσεων), μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικιλία μεθόδων, που διαφέρουν ως προς την προγραμματιστική τους συνθετότητα, την ακρίβεια και την ταχύτητα. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η μέθοδος Euler, είτε η μέθοδος



Runge-Kutta 1ης, 2ης ή 3ης τάξης. Ωστόσο, η διακριτοποίηση με τη χρήση της 3-βηματικής μεθόδου Runge-Kutta 3ης τάξης [10], είναι η μόνη που μπορεί να εξασφαλίσει την ευστάθεια της λύσης.

### 1.2.2.1 Μέθοδος Euler

Η μέθοδος Euler είναι πρώτης τάξης και υπό προϋποθέσεις ευσταθής. Το πλεονέκτημά της είναι η ταχύτητα, αλλά πάσχει από χαμηλή ακρίβεια και απαιτεί πυκνά πλέγματα για να προσφέρει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Για μια διαφορική εξίσωση της μορφής της σχέσης 1.29 έχουμε:

$$F(\psi(t)) = \frac{\partial \psi}{\partial t} \approx \frac{\psi(t + \Delta t) - \psi(t)}{\Delta t} \quad (1.30)$$

και

$$\psi(t + \Delta t) = \psi(t) + \Delta t F(\psi(t)) \quad (1.31)$$

Αναγκαία συνθήκη για την σταθερότητα της μεθόδου είναι να ισχύει:  $u \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$ .

### 1.2.2.2 Μέθοδοι Runge-Kutta

Οι μέθοδοι Runge-Kutta έχουν ευρεία εφαρμογή στην επίλυση συστημάτων διαφορικών εξισώσεων, καθώς η ακρίβεια και το υπολογιστικό τους κόστος μπορούν να μεταβάλλονται εύκολα, αλλάζοντας την τάξη και τον αριθμό των βημάτων. Στο PALM δίνεται η δυνατότητα χρήσης τριών μεθόδων RK (1ης, 2ης και 3ης τάξης), ωστόσο μόνο το σχήμα 3ης τάξης εγγυάται αριθμητική ευστάθεια.

Ένα  $N$ -τάξης σχήμα RK διακριτοποιεί μία εξίσωση της μορφής 1.29 ως [11]:

$$\psi^{(0)} = \psi^n \quad (1.32\alpha')$$

$$k^i = f(t^n + \Delta t \alpha_i, \psi^{i-1}) \quad (1.32\beta')$$

$$\psi^i = \psi^n + \Delta t \sum_{j=1}^i \beta_{i+1,j} k^j, \quad \text{για } i \in [1, 2, \dots, N] \quad (1.32\gamma')$$

$$\psi^{n+1} = \psi^N \quad (1.32\delta')$$

Από την εφαρμογή των σχέσεων 1.32

$$\begin{aligned} k_1 &= F(\psi(t)) \\ k_2 &= F(\psi(t) + \frac{1}{3} \Delta t k_1) \\ k_3 &= F(\psi(t) - \frac{3}{16} \Delta t k_1 + \frac{15}{16} \Delta t k_2) \\ \psi(t + \Delta t) &= \psi(t) + \frac{1}{30} \Delta t (5k_1 + 9k_2 + 16k_3) \\ \psi^{n+1} &= \psi^N, \quad \text{για } n \in [1, 2] \end{aligned} \quad (1.33)$$

### 1.2.2.3 Σχήμα Runge-Kutta μειωμένης μνήμης

Για την εξοικονόμηση μνήμης στο PALM η εφαρμογή της μεθόδου RK 3ης τάξης γίνεται με το σχήμα περιορισμένης μνήμης (low storage scheme)[10]. Κατά την επίλυση ενός

Σχήμα	$c_1$	$c_2$	$c_3$
Euler	1	1	0
Rounge-Kutta 1ης τάξης	1	$\frac{1}{3}$	0
Rounge-Kutta 2ης τάξης	1	$\frac{15}{16}$	$-\frac{25}{48}$
Rounge-Kutta 3ης τάξης	1	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{15}$

Πίνακας 1.1: Συντελεστές για τη μέθοδο Euler και για τις διάφορες τάξεις της μεθόδου Runge-Kutta.

συστήματος  $N$  διαφορικών εξισώσεων, των  $m$  βημάτων, απαιτούνται  $m + 1$  καταχωρητές μνήμης μήκους  $N$ . Οι περιορισμοί του υλικού (hardware) των υπολογιστών κατά το παρελθόν, οδήγησε τους ερευνητές στην αναζήτηση υπολογιστικών μεθόδων που δε χρειάζεται να αποθηκεύουν τα αποτελέσματα όλων των βημάτων που περιγράφει η διαδικασία στις σχέσεις 1.33. Η εξάρτηση των συντελεστών κάθε χρονικού βήματος από το προηγούμενο, αποδεικνύεται ότι μπορεί να μειώσει τον αριθμό των απαιτούμενων βημάτων, από τρία σε δύο.

Σύμφωνα με αυτά η ολοκλήρωση των συνήθων ως προς το χρόνο διαφορικών εξισώσεων του συστήματος 1.16, η εκτίμηση της ταχύτητας για το εκάστοτε χρονικό βήμα, μπορεί να γραφεί σύμφωνα με τη σχέση 1.34 ως:

$$\psi(t + \Delta t) = (1 + c_1)\psi(t - \Delta t) + c_1\psi(t) + \Delta t[c_2F(\psi(t)) + c_3F(\psi(t - \Delta t))], \quad (1.34)$$

όπου οι συντελεστές ( $c_1, c_2, c_3$ ) ποικίλλουν ανάλογα με την μέθοδο και την τάξη του σχήματος και δίνονται στον πίνακα 1.1.

### 1.3 Η εξίσωση Poisson

Η εξασφάλιση της μη συμπίεστότητας που απαιτεί η παραδοχή του Boussinesq δεν εξασφαλίζεται από την ολοκλήρωση του συστήματος 1.16. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μία μέθοδος πρόβλεψης-διόρθωσης της ταχύτητας [12] που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης της συνέχειας και την τροποποιημένη διαταραχή πίεσης  $-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \pi^*}{\partial x_i}$ . Σύμφωνα με αυτά, η μη-συμπίεστότητα εξασφαλίζεται με τον εξής τρόπο:

1. Οι εξισώσεις ορμής επιλύονται χωρίς τον όρο πίεσης, δίνοντας ένα αρχικό πεδίο ταχύτητας το οποίο χαρακτηρίζεται από απόκλιση ( $\nabla \cdot u_i \neq 0$ ):

$$u_{i,pre}^{t+\Delta t} = u_i^t + \Delta t \left( -\frac{\partial u_k^t u_i^t}{\partial x_k} - \varepsilon_{ijk} f_j u_k^t + \varepsilon_{i3k} f_3 u_{g,k} + g \frac{\theta^{*t}}{\theta_0} \delta_{i3} - \frac{\partial u_k' u_i^t}{\partial x_k} \right) \quad (1.35)$$

2. Από τη στιγμή που όποια απόκλιση της ταχύτητας οφείλεται στην διαταραχή της πίεσης ( $p^*$ ), η διορθωμένη τιμή της ταχύτητας προκύπτει ως:

$$u_i^{t+\Delta t} = u_{i,pre}^{t+\Delta t} - \Delta t \cdot \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p^{*t}}{\partial x_i} \quad (1.36)$$

3. Η εφαρμογή της υπόθεσης της μηδενικής απόκλισης της ταχύτητας οδηγεί στη σχέση:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i^{t+\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( u_{i,pre}^{t+\Delta t} - \Delta t \cdot \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \pi^{*t}}{\partial x_i} \right) \stackrel{!}{=} 0 \quad (1.37)$$

4. Πραγματοποιώντας τις πράξεις, καταλήγουμε στην εξίσωση Poisson για τη διαταραχή της πίεσης:

$$\frac{\partial^2 \pi^{*t}}{\partial x_i^2} = \frac{\rho_0}{\Delta t} \frac{\partial u_{i,pre}^{t+\Delta t}}{\partial x_i} \quad (1.38)$$

5. Όταν κατά την ολοκλήρωση των εξισώσεων ορμής χρησιμοποιείται κάποια πολυβηματική μέθοδος RK, η εξίσωση της πίεσης επιλύεται σε κάθε βήμα της μεθόδου και η τελική πίεση προκύπτει ως σταθμισμένο μέσο όρο των ενδιάμεσων τιμών.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την επίλυση της εξίσωσης 1.38: η χρήση του μετασχηματισμού Fourier Direct FFT και η επαναληπτική μέθοδος πολλαπλών πλεγμάτων (Multi-grid method)[13]. Το πλεονέκτημα της πρώτης είναι η ταχύτητα. Η δεύτερη μέθοδος είναι, ωστόσο, η μόνη που μπορεί να εφαρμοσθεί στην περίπτωση μη περιοδικών οριακών συνθηκών.

### 1.3.1 Επίλυτης FFT

Αρχικά, η σχέση 1.38 διακριτοποιείται με κεντρική παραγωγή και πραγματοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, απ' όπου προκύπτει ένα τριδιαγώνιο σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Η επίλυση του συστήματος γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Η τιμή της πίεσης ( $p^*$ ) προκύπτει από την επίλυση του συστήματος και την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη ταχύτητα σύγκλισης ( $\mathcal{O}(n \log n)$  για πλέγμα  $n$  κόμβων), που μειώνει κατά πολύ τον χρόνο ολοκλήρωσης. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει εξωτερικές βιβλιοθήκες για την πραγματοποίηση του μετασχηματισμού, ή μπορεί να επιλέξει μεταξύ δύο μεθοδολογιών που προσφέρει το PALM. Η μέθοδος Singleton-FFT [14] είναι αργότερη, αλλά δε θέτει περιορισμούς για τον αριθμό των σημείων του πλέγματος. Η μέθοδος Temperton FFT [15] είναι βελτιστοποιημένη για εφαρμογή σε παράλληλα συστήματα, αλλά θέτει περιορισμούς στον αριθμό των κόμβων του πλέγματος. Το γεγονός ότι το σύστημα προκύπτει απ' όλα τα οριζόντια σημεία του πλέγματος για κάθε σημείο στην κατακόρυφη κατεύθυνση, σημαίνει ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση των μη περιοδικών οριακών συνθηκών. Επιπλέον, συνεπάγεται την ανάγκη ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των υπο-πλεγμάτων που επιλύει ο κάθε επεξεργαστής και απαιτεί ομοιόμορφο πλέγμα κατά τους οριζόντιους άξονες.

### 1.3.2 Επαναληπτική μέθοδος

Η εφαρμογή της πολυπλεγματικής μεθόδου χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο σταθερού σημείου Gauss-Siedel για την εύρεση της πίεσης με επαναληπτικό τρόπο:

$$\vec{P}^{k+1} = \mathbf{T} \cdot \vec{p}^k + \vec{c}^k, \quad (1.39)$$

Ξεκινώντας από μία πρόβλεψη της πίεσης, η οποία συνεχώς βελτιώνεται, μέχρι την πλήρωση ενός κριτηρίου σύγκλισης ή την ολοκλήρωση κάποιου συγκεκριμένου αριθμού επαναλήψεων. Διαφορετικές μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για τις διάφορες μορφές του μητρώου  $\mathbf{T}$  και του διανύσματος  $\vec{c}$ , π.χ το σχήμα Jacobi για ομοιόμορφο 2-Διάστατο πλέγμα:

$$p_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{4}(p_{i-1,j}^k + p_{i+1}^k + p_{i,j-1}^k + p_{i,j+1}^k + \Delta x^2 f(i, j, k)) \quad (1.40)$$

Η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως πολυπλεγματική, γιατί χρησιμοποιεί διαφορετική πυκνότητα πλέγματος για την επίλυση της κάθε συχνότητας, ώστε να αξιοποιήσει την τάση του σφάλματος μηδενίζεται γρηγορότερα στις ψιλές συχνότητες, σε σύγκριση με τις χαμηλές. Έτσι, η σχέση 1.39 εφαρμόζεται για φθίνουσες πυκνότητες πλέγματος κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις, κινούμενη από το πυκνότερο πλέγμα στο αραιότερο (η επίλυση των χαμηλών συχνοτήτων αντιστοιχεί στα αραιότερα πλέγματα και το αντίστροφο για τις υψηλές συχνότητες). Η πιο ανανεωμένη εκτίμηση της πίεσης του πυκνότερου πλέγματος, χρησιμοποιείται ως αρχική τιμή για το αμέσως αραιότερο. Για κάθε πλέγμα, ο επαναληπτικός αλγόριθμος εφαρμόζεται για μικρό αριθμό επαναλήψεων (μέχρι την πλήρωση κάποιου κριτηρίου σύγκλισης) και αφού εφαρμοστεί για το αραιότερο δυνατό πλέγμα (2 κόμβοι ανά κατεύθυνση), η διαδικασία επαναλαμβάνεται, κινούμενη προς διαδοχικά όλο και πυκνότερα πλέγματα.

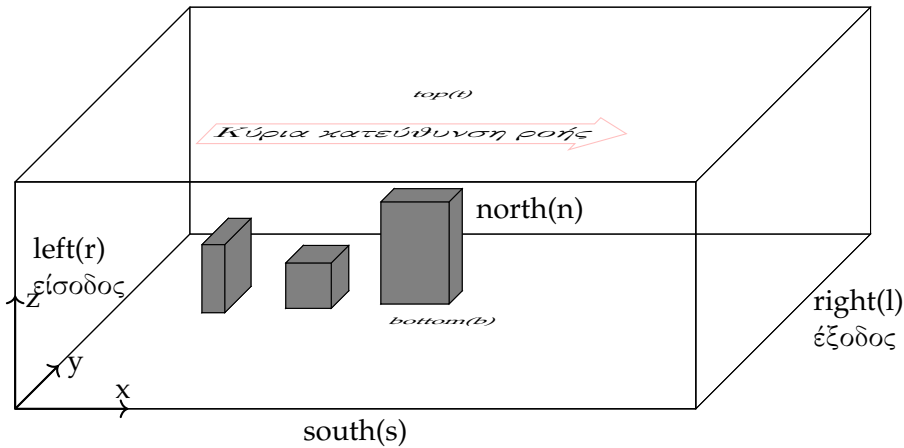
Αν και κατ' αρχήν αργότερη ( $O(n^2)$ ), η πληροφορία για την επίλυση της κάθε επανάληψης προέρχεται μόνο από τα γειτονικά του σημεία. Αυτό δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής της και σε προβλήματα με μη περιοδικές οριακές συνθήκες και συνεπάγεται τη μειωμένη ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ των επεξεργαστών (περιορίζεται μόνο στα σύνορά τους). Επιπλέον, για μεγάλα πλέγματα, λόγω του υψηλού βαθμού βελτιστοποίησης μπορεί στην πράξη να είναι το ίδιο γρήγορη ή και γρηγορότερη από τη μέθοδο Fourier. Η ελαχιστοποίηση του αριθμού των απαιτούμενων επαναλήψεων που δε συνοδεύεται από χειρότερα αποτελέσματα, μπορεί να προκύψει με πειραματισμό και είναι μεγάλης σημασίας, καθώς η επίλυση της εξίσωσης Poisson είναι από τις πιο χρονοβόρες διαδικασίες σε μία προσο-μείωση.

## 1.4 Οριακές συνθήκες

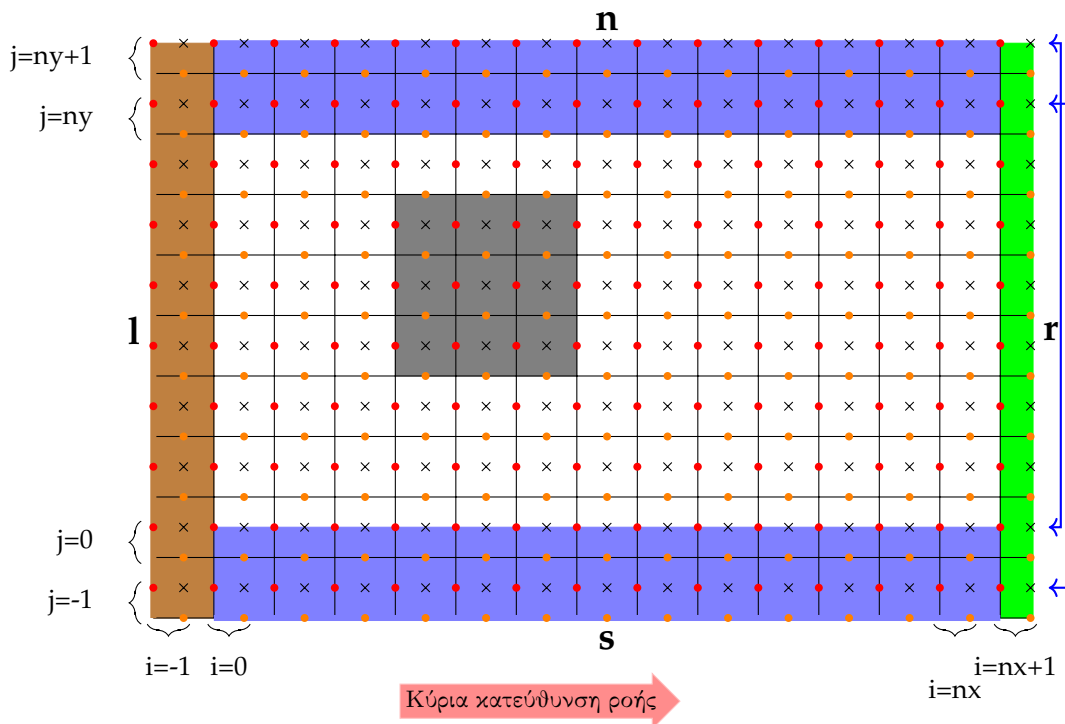
Το υπολογιστικό χωρίο στο οποίο επιλύει τις εξισώσεις το PALM, οριοθετείται από 6 όρια (σχήμα 1.4), στο καθένα εκ των οποίων θα πρέπει να οριστεί κάποια οριακή συνθήκη. Επιπλέον, εντός του χωρίου ενδέχεται να υπάρχουν στοιχεία τοπογραφίας που εισάγουν επιπλέον οριακές συνθήκες. Προφανώς το κάθε όριο επιδέχεται διαφορετικών συνθηκών, που επιβάλλονται και από τη φυσική του προβλήματος και από τους περιορισμούς/σχεδιασμό του μοντέλου που χρησιμοποιεί το λογισμικό.

Οι οριακές συνθήκες στα πλευρικά όρια((n)orth,(s)outh,(l)eft,(r)ight) μπορεί να είναι περιοδικές ή μη περιοδικές(σχήμα 1.5). Η επιλογή του είδους των συνθηκών έχει μεγάλη σημασία, κυρίως για τον τρόπο που γίνεται η γένεση και η μετάδοση της τύρβης, αλλά και για το συνολικό χρόνο προσομοίωσης, αφού επιτρέπουν τη χρήση του επιλύτη FFT, για την επίλυση της εξίσωσης Poisson. Στο κάτω όριο ((b)ottom), πραγματοποιείται συνήθως η αλληλεπίδραση (κινηματική και θερμική) του ρευστού με το έδαφος. Επιπλέον τα περισσότερα<sup>1</sup> στοιχεία της τοπογραφίας ξεκινούν από το έδαφος και προφανώς αλληλεπιδρούν και αυτά με την ροή. Στο άνω όριο ((t)op), το οποίο βρίσκεται συνήθως μακριά από το έδαφος, τα περισσότερα μεγέθη έχουν κατά κανόνα αποκατασταθεί και οι μεγάλες κλίσεις που σχετίζονται με την επίδραση των στερεών ορίων βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση. Στο άνω όριο μπορεί να τεθεί, ωστόσο η τιμή της ταχύτητας με βάση το γεωστροφικό άνεμο.

<sup>1</sup>Στις παλαιότερες εκδόσεις του PALM όλα τα στοιχεία της τοπογραφίας έπρεπε να εδράζονται στο έδαφος. Στην τελευταία έκδοση αυτό δεν είναι υποχρεωτικό



Σχήμα 1.4: Μια τυπική διάταξη των ορίων του υπολογιστικού χωρίου σε μία προσομοίωση του PALM. Υπάρχουν τέσσερα πλευρικά όρια ((r)ight,(l)eft, (n)orth, (s)outh), το άνω ((t)op) και το κάτω((b)ottom) όριο, καθώς και τα στοιχεία της τοπογραφίας. Το κάθε όριο σχετίζεται με την επιβολή διαφορετικής συνθήκης και την εκτέλεση διαφορετικού κώδικα. Ιδιαίτερη σημασία έχει η κύρια κατεύθυνση της ροής από την οποία καθορίζεται ο προσανατολισμός και η θέση των στοιχείων της τοπογραφίας.



Σχήμα 1.5: Το πλέγμα που χρησιμοποιεί το PALM εσωτερικά έχει διαστάσεις  $(nx + 2, ny + 2, nz + 1)$  εκτεινόμενο μεταξύ των  $-1 : nx + 1, -1 : ny + 1, 0 : nz$ . Τα αποτελέσματα εξάγονται σε πλέγμα  $(nx + 1, ny + 1, nz)$  σημείων. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να είναι σε όλα τα όρια περιοδικές ή μόνο στα 2 πλευρικά όρια(μπλε χρώμα). Στις επιφάνειες εισόδου (καφέ) και εξόδου (πράσινο), επιβάλλονται διαφορετικές *Dirichlet/Radiation* για τη δημιουργία και την διατήρηση τόσο της μέσης ταχύτητας όσο και ρεαλιστικής τύρβης. Τα βαθμωτά μεγέθη  $p, q, s, e$ , ορίζονται στα κέντρα των κελιών ((ξ), ενώ οι συνιστώσες της ταχύτητας (κουκίδες) στα κέντρα των πλευρών. Στην εικόνα φαίνεται και η τοποθέτηση ενός στοιχείου της τοπογραφίας (γκρίζο).

Μέγεθος	Όριο	Είδος συνθήκης	Μαθηματική διατύπωση
u,v	bottom	D,N <sup>2</sup> ,MOST	$u_i = 0, \frac{\partial u_i}{\partial z} = 0, \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{kz}$
	top	D,N	$u_i = u_{gi}, \frac{\partial u_i}{\partial z} = 0$
	left-right	D/R <sup>3</sup>	$u_i = ct / \frac{\partial u_i}{\partial t} + c_i \frac{\partial u_i}{\partial n} = 0$
	north-south	P <sup>4</sup>	$u_{is} = u_{in}$
w	bottom	D	$w = 0$
	top	D	$w = 0$
	left-right	D/R	$w = 0 / u_i = ct / \frac{\partial u_i}{\partial t} + c_i \frac{\partial u_i}{\partial n} = 0$
	north-south	P	$w_s = w_n$
e	bottom	N	$\frac{\partial e}{\partial z}$
	top	N	$\frac{\partial e}{\partial z}$
	left-right	N	$\frac{\partial e}{\partial x} = 0$
	north-south	P	$e_s = e_n$
p	bottom	D,N	$p = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0$
	top	D,N	$p = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0$
	left-right	N	$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$
	north-south	P	$p_s = p_n$

Πίνακας 1.2: Σύνοψη των δυνατών επιλογών που υπάρχουν ως προς τις οριακές συνθήκες. Υπάρχουν περιορισμοί ως προς το είδος των συνθηκών που μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους.

Τα παραπάνω προδιαθέτουν για το είδος της συνθήκης που μπορεί να λάβει το κάθε όριο. Σε κάθε περίπτωση δύο εκ των τεσσάρων πλευρικών ορίων θα πρέπει να έχουν περιοδικές συνθήκες. Τα άλλα δύο όρια μπορούν να έχουν είτε περιοδικές, είτε μη περιοδικές συνθήκες. Στο έδαφος μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε συνθήκες μη εισχώρησης, συνθήκες μη ολίσθησης ή να εφαρμοστεί θεωρία ομοιότητας **Monin-Ombukhov**(MOST). Κατά κανόνα η τιμή της ταχύτητας στο άνω όριο, μπορεί να οριστεί αυτόματα με βάση το γεωστροφικό άνεμο, ή να οριστεί μηδενική κλίση των μεγεθών ως προς την κατακόρυφη κατεύθυνση. Το μοντέλο του PALM δεν προβλέπει τη χρήση συναρτήσεων τοίχου, αλλά στα κελιά που έχουν επαφή με στερεές επιφάνειες προτείνεται η εκτέλεση ειδικού κώδικα. Θερμότητα μπορεί να εισέρχεται/εξέρχεται στο χωρίο τόσο από τα στερεά όρια (εδάφους και τοπογραφίας), όσο και από τα πλευρικά όρια.

Η κύρια κατεύθυνση της ροής θα πρέπει να είναι κάθετη στα επίπεδα που ορίζουν το αριστερό και το δεξιό όριο, αλλά μπορεί να έχει οποιαδήποτε φορά. Με βάση αυτή τη σύμβαση ορίζεται και ο προσανατολισμός των στοιχείων της τοπογραφίας (αν υπάρχουν). Η ενέργεια εισάγεται στο υπολογιστικό χωρίο, είτε μέσω της ορμής του προφίλ εισόδου, είτε μέσω της επιβολής εξωτερικής κλίσης πίεσης, είτε με συνδυασμό τους.

Στον πίνακα ;; συνοψίζονται οι σημαντικότερες οριακές συνθήκες για όλα τα όρια και παραλείπονται η πλειοψηφία των οριακών συνθηκών που αφορούν στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας.

<sup>2</sup>Οι χαρακτήρες D,N αποτελούν συντομογραφίες των λέξεων (D)irichlet και (N)eumann αντίστοιχα.

<sup>3</sup>Ο χαρακτήρας P αποτελεί συντομογραφίες της λέξης (P)eriodic

<sup>4</sup>Ο χαρακτήρας R αποτελεί συντομογραφίες της λέξης (R)adiation

### 1.4.1 Πλευρικά όρια

#### 1.4.1.1 Περιοδικά όρια

Στα δύο εκ των τεσσάρων πλευρικών ορίων, επιβάλλεται σε κάθε περίπτωση περιοδική οριακή συνθήκη. Στα άλλα δύο υπάρχει η δυνατότητα επιβολής μη περιοδικής συνθήκης. Η επιλογή των περιοδικών και των μη περιοδικών στοιχείων στην τελευταία περίπτωση έχει να κάνει με την κύρια κατεύθυνση της ροής (σχήμα 1.4). Η απλούστερη στην εφαρμογή οριακή συνθήκη είναι η περιοδική:

$$\begin{aligned}\psi(:, -1, :) &= \psi(:, ny, :) \\ \psi(:, ny + 1, :) &= \psi(:, 0, :)\end{aligned}\quad (1.41)$$

Η μάζα μπορεί να διαπερνά τα όρια και προς τις δύο κατευθύνσεις και η τύρβη που γεννάται από το μη γραμμικό χαρακτήρα των εξισώσεων ορμής, μπορεί να συντηρείται και να μεταδίδεται ελεύθερα. Η τιμή των υπολογιζόμενων μεγεθών (βαθμωτών ή μη), στον τελευταίο κόμβο ταυτίζεται με αυτήν στο δεύτερο και η τιμή στον προτελευταίο με αυτή στον πρώτο (εξίσωση 1.41, σχήμα 1.5).

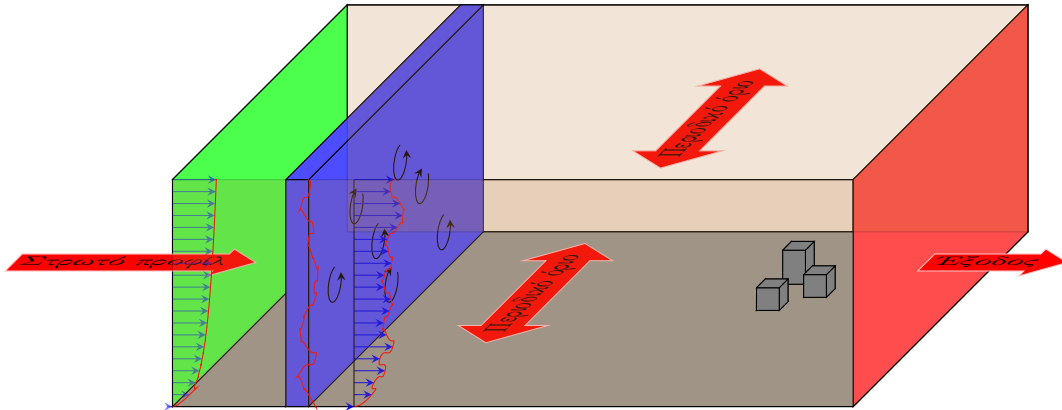
#### 1.4.1.2 Μη περιοδικά όρια

Τα μη περιοδικά όρια χρησιμοποιούνται κυρίως στην περίπτωση που είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά του προφίλ εισόδου. Σε αυτήν την περίπτωση δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ελέγξει τόσο τα μέσα χαρακτηριστικά του (συνθήκη **Dirichlet**), όσο και τα χαρακτηριστικά της τύρβης. Αν και αυτό διευρύνει τις δυνατότητες του προγράμματος, η ρεαλιστική γένεση της τύρβης αποτελεί μία πρόκληση. Για το αυτό το **PALM** προσφέρει αρκετές μεθόδους για εισαγωγή διαταραχών στο προφίλ εισόδου. Επιπλέον, στην μη περιοδική επιφάνεια εξόδου της ροής, πρέπει να επιβάλλεται μία συνθήκη που επιτρέπει την ομαλή έξοδο της ταχύτητας από το χωρίο, χωρίς να επιτρέπει την αντανάκλαση των διαταραχών προς την ανάντι ροή. Για τα βαθμωτά μεγέθη επιλέγονται συνθήκες **Neumann**.

#### 1.4.1.3 Γένεση της τύρβης

Στην περίπτωση των μη περιοδικών οριακών συνθηκών, στο προφίλ εισόδου ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να ορίσει με ακρίβεια την τιμή της μέσης ταχύτητας εισόδου και ενδεχομένως τα χαρακτηριστικά της τύρβης. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι με βάση τις οποίες μπορούν να δημιουργηθούν οι τυρβώδεις διαταραχές του πεδίου ταχυτήτων:

1. Με την επιβολή στρωτού προφίλ εισόδου και της παρεμβολής ενός επιπλέον διαστήματος μεταξύ αυτού και του πραγματικού υπολογιστικού χωρίου. Το επιπλέον χωρίο δίνει το χώρο και το χρόνο στην τύρβη να γεννηθεί αυθόρμητα από τις ρευστοδυναμικές εξισώσεις, ώστε να έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κατάντι, όπου αναπτύσσεται η προς μελέτη φαινομενολογία της ροής. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μήκος που χρειάζεται για να αναπτυχθεί η τύρβη είναι πολύ μεγάλο και η χρήση αυτής της μεθόδου είναι υπολογιστικά ασύμφορη.
2. Με την επιβολή στρωτού προφίλ εισόδου και ορισμού μιας περιοχής όπου γεννώνται διαταραχές με κάποιο στατιστικό μοντέλο. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική και ιδιαίτερα χρήσιμη όταν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της τύρβης είναι γνωστά (σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Γένεση τυρβής με γενέτειρα τυχαίων αριθμών. Ο χρήστης ορίζει στρωτό προφίλ εισόδου και μία απόσταση από αυτό όπου γεννώνται οι τυρβώδεις διαταραχές. Η περιοχή δημιουργίας των διαταραχών μπορεί να έχει οποιαδήποτε έκταση. Μέσω της χρήσης παραμέτρων εισόδου ο χρήστης μπορεί να καθορίσει κάποια από τα χαρακτηριστικά της τυρβής. Πλήρης ορισμός της συμπεριφοράς της, μπορεί να γίνει με την εισαγωγή επιπλέον κώδικα. Το πεδίο ροής χαρακτηρίζεται από τυρβή μόνο κατάντι της περιοχής δημιουργίας της. Η δημιουργία διαταραχών μπορεί να διαρκεί για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης ή να τερματίζεται από το χρήστη.

3. Με την επιβολή τυρβώδους προφίλ εισόδου, οι διαταραχές του οποίου προέρχονται από την τυρβή κατάντι. Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης ορίζει το μέσο προφίλ εισόδου και μία απόσταση από αυτό με βάση την οποία θα δημιουργηθούν οι διαταραχές (σχήμα). Στο επίπεδο γένεσης της τυρβής, λαμβάνεται σε κάθε καθ' ύψος σημείο το γραμμικό κατά την οριζόντια κατεύθυνση μέσο όρο της ταχύτητας. Ως τυρβώδης διαταραχή ορίζεται σε κάθε σημείο κατά μήκος της γραμμής η διαφορά αυτής της μέσης τιμής από την τοπική ταχύτητα:

$$\varphi'(y, z, t) = \varphi(x_{\text{recycle}}, y, z, t) - \langle \varphi \rangle_y(z, t) \quad (1.42\alpha')$$

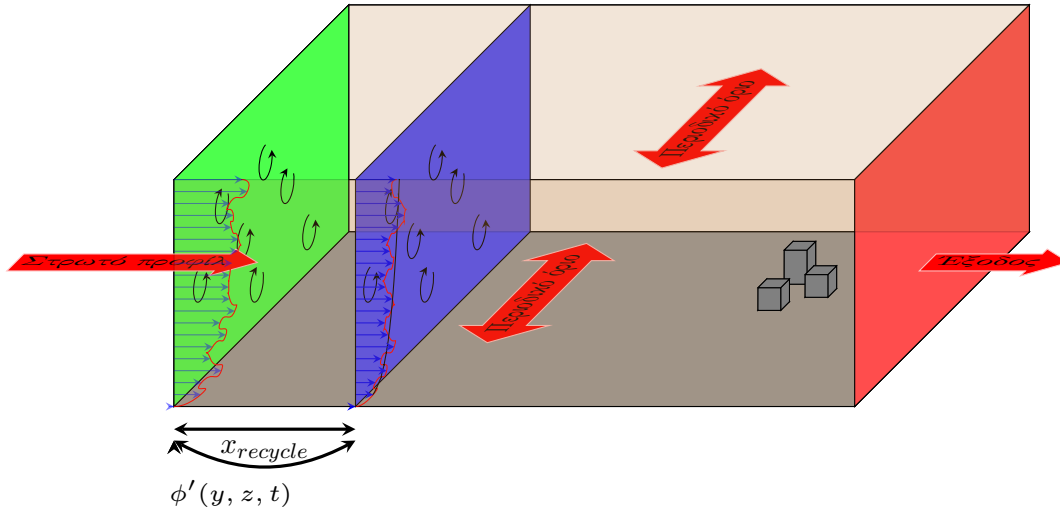
$$\varphi_{\text{inlet}}(y, z, t) = \langle \varphi_{\text{inlet}} \rangle_y(z) + \phi(z)\varphi'(y, z, t) \quad (1.42\beta')$$

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος ανακύκλωσης της τυρβής. Από τη στιγμή που το αρχικό προφίλ είναι στρωτό και η ροή κατάντι θα είναι στρωτή, οπότε στην πράξη οι τυρβώδεις διαταραχές θα είναι μηδενικές. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την πραγματοποίηση μίας πιλοτικής προσομοίωσης. Η πιλοτική προσομοίωση γίνεται με πλήρως περιοδικές συνθήκες, σε ένα πεδίο που μπορεί να είναι πολύ μικρότερο από το πεδίο της κύριας προσομοίωσης (για λόγους εξοικονόμησης χρόνου) και μπορεί να χρησιμοποιεί απλούστερο και γρηγορότερο ρευστοδυναμικό μοντέλο. Η χρονική διάρκεια του αρχικού τρεξίματος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να επιτρέπει την πλήρη αποκατάσταση της ροής. Τα αποτελέσματα του τελευταίου χρονικού βήματος αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται τόσο για την επιβολή του μέσου προφίλ (εναλλακτικά ο χρήστης μπορεί να το ορίσει από μόνος του), όσο και για την αρχικοποίηση των τυρβωδών διαταραχών σε όλο το πεδίο ροής (σχήμα 1.7).

#### 1.4.2 Άνω και κάτω όρια

Προφανώς, τα άνω ( $t$ ) και κάτω ( $b$ ) όρια απαιτούν διαφορετικές οριακές συνθήκες από τα πλευρικά και ειδικά το κάτω όριο όπου πρέπει να μοντελοποιηθεί η αλληλεπίδραση του





Σχήμα 1.7: Ανακύκλωση της τύρβης. Ο χρήστης ορίζει ένα στρωτό προφίλ εισόδου και μία απόσταση από αυτό με βάση την οποία δημιουργούνται οι τυρβώδεις διαταραχές. Η υλοποίηση αυτής της μεθόδου απαιτεί την πραγματοποίηση πρωταρχικού τρεξίματος με περιοδικές οριακές συνθήκες. Οι τυρβώδεις διαταραχές του προκαταρκτικού τρεξίματος (η τύρβη γεννιέται και συντηρείται αυτόματα όταν επικρατούν περιοδικές συνθήκες) προστίθενται στην αρχική τιμή του πεδίου ταχύτητας. Με τον τρόπο υπάρχει μια αρχικοποίηση τυρβωδών διαταραχών στο επίπεδο ανακύκλωσης. Οι διαταραχές στη συνέχεια μεταφέρονται στο στρωτό προφίλ εισόδου. Με τον τρόπο αυτό οι διαταραχές συντηρούνται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης σε όλο το υπολογιστικό χωρίο.

στερεού με το ρευστό, η οποία είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη του οριακού στρώματος. Στην γενικότερη περίπτωση, το έδαφος μπορεί να αλληλεπιδρά και θερμικά με το ρευστό. Στα άνω και κάτω όρια μπορούν να επιβληθούν, επομένως οριακές συνθήκες **Dirichlet** ή **Neumann** για τα  $u, v$ . Για την ταχύτητα οι πρώτες αντιστοιχούν στη συνθήκη μη ολίσθησης και οι δεύτερες στη συνθήκη μη εισχώρησης. Η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας λαμβάνεται ίση με το μηδέν ( $w = 0$ ), τόσο στο κάτω όριο, όσο και στο άνω. Συνθήκες **Neumann** χρησιμοποιούνται και για την υποπλεγματική Κινητική ενέργεια ( $\frac{\partial e}{\partial z} = 0$ ) και στα δύο όρια. Η μηδενική τιμή της  $w$  συνιστώσας της ταχύτητας συνεπάγεται την εφαρμογή συνθήκης **Neumann** για την πίεση ( $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$ ) ως καταλληλότερη για το έδαφος, η οποία συνίσταται να συνδυάζεται με συνθήκη **Dirichlet** για το άνω όριο.

Το πρόβλημα του ορισμού των οριακών συνθηκών μπορεί να απλουστευθεί αν ενεργοποιηθεί η επιλογή της χρήσης της θεωρίας ομοιότητας **Monin-Obukhov** για ένα στρώμα **Prandtl**, σύμφωνα με την οποία η ταχύτητα και η θερμοκρασία μπορούν να υπολογιστούν στον πρώτο εσωτερικό κόμβο ( $k = 0$ ) του πλέγματος με βάση την τιμή στο όριο ( $k = 1$ ), στηριζόμενες στην τιμή της τραχύτητας ορμής και θερμότητας ( $z_0, z_{0,h}$ ). Η θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε συνθήκες ευστάθειας ή αστάθειας, όσο και σε ουδέτερες συνθήκες. Εδώ θα ασχοληθούμε μόνο με την τελευταία περίπτωση. Αν και η θεωρία των **Monin-Obukhov** αφορά στη μέση τιμή των ποσοτήτων, στο **PALM** θεωρείται ότι η **MOST** μπορεί να εφαρμοστεί και τοπικά για τις ταχύτητες και για όλες τις παραμέτρους:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \Phi_m \quad (1.43)$$

όπου

$$u_* = \sqrt{-w'u'_0} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

$$\Phi_m = 1, \quad \text{ουδέτερη ατμόσφαιρα}$$

Η ολοκλήρωση μεταξύ του ύψους τριβής ( $z = z_0, k = 0$ ) και της κορυφής του στρώματος Prandtl ( $z = z_1, k = 1$ ) δίνει την τιμή της ταχύτητας τριβής ( $u_*$ ), η οποία θα ορίσει την ροή ορμής, η οποία είναι η ποσότητα που χρησιμοποιείται στην πράξη ως οριακή συνθήκη. Στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να ορίσει το πλήρες σετ των οριακών συνθηκών για το στερεό όριο, τα δεδομένα θα πρέπει να εισαχθούν μέσω της κατασκευής και ενσωμάτωσης δικού του κώδικα. Προφανώς, για να είναι ρεαλιστικές οι οριακές συνθήκες, θα πρέπει να προκύπτουν από την εφαρμογή κάποιου μοντέλου.

### 1.4.3 Όρια τοπογραφίας

Μία επιπλέον κατηγορία ορίων, αποτελούν τα στερεά όρια των στοιχείων της τοπογραφίας. Κατά την υλοποίηση της τοπογραφίας, κάθε κελί θεωρείται ότι ανήκει είτε 100% στο στερεό είτε 100% στο ρευστό. Κατά συνέπεια οι βρεχόμενες επιφάνειες της τοπογραφίας, μπορούν να είναι μόνο παράλληλες ή κάθετες στο επίπεδο του εδάφους.

Όσον αφορά στις συνιστώσες της ταχύτητας, η βασική συνθήκη που επιβάλλεται είναι η συνθήκη μη εισχώρησης στο στερεό. Επιπλέον, για τα κελιά του ρευστού που βρίσκονται έναν υπολογιστικό κόμβο έξω από την τοπογραφία, εφαρμόζεται η θεωρία Monin-Obukhov για ουδέτερη ατμόσφαιρα. Αν και η θεωρία αυτή αφορά μόνο σε οριζόντιο έδαφος, η εφαρμογή της σε κατακόρυφες ή οριζόντιες, από κάτω βρεχόμενες επιφάνειες αποτελεί μία παραδοχή στο PALM, λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχει επαρκής βιβλιογραφία για το ζήτημα αυτό. Η εφαρμογή της συνθήκης Monin-Obukhov ορίζει τον τρόπο με τον οποίον υπολογίζεται η TKE (συνθήκη Neumann). Η ίδια συνθήκη εφαρμόζεται και για την πίεση. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο που υλοποιείται η τοπογραφία αναφέρονται στην αντίστοιχη ενότητα (βλ. ενότητα 1.5).

### 1.4.4 Επιφάνεια εξόδου

Στην επιφάνεια εξόδου, πρέπει να υπάρχει μία οριακή συνθήκη που επιτρέπει στη ροή να εξέλθει ομαλά και ως εκ τούτου ιδανική συνθήκη είναι η συνθήκη Neumann. Η συνθήκη αυτή δεν διατίθεται, ωστόσο, για τις συνιστώσες της ταχύτητας για τεχνικούς λόγους που έχουν να κάνουν με την ενσωμάτωση της συνθήκης στην επίλυση της εξίσωση Poisson διόρθωσης της πίεσης. Για το λόγο αυτό επιλέγεται ένα είδος συνθήκης που δεν έρχεται σε σύγκρουση με την εξίσωση Poisson. Η συνθήκη προβλέπει την επίλυση μίας εξίσωσης μεταφοράς των διαταραχών τόσο με τη μέση ροή όσο και κυματικά, μέσω της εφαρμογής της εξίσωσης ακτινοβολίας του Somerfield:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + c_i \frac{\partial u_i}{\partial n} = 0 \quad (1.45)$$

Η φέρουσα ταχύτητα  $c_i$  υπολογίζεται ως:

$$c_i = \frac{\Delta n}{\Delta t} \frac{u_{i,b}^t - u_{i,b-1}^{t-1}}{u_{i,b-1}^{t-1} - u_{i,b-2}^{t-1}} \quad (1.46)$$

όπου

$$0 \leq c_i \leq \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

και  $b$  είναι ο δείκτης στο όριο. Η επιβολή αυτής της οριακής συνθήκης προϋποθέτει ότι η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας είναι έξω από το υπολογιστικό χωρίο για κάθε χρονική στιγμή.

#### 1.4.5 Διόρθωση παροχής

Το PALM προσφέρει τη δυνατότητα της διόρθωσης της παροχής στην επιφάνεια εξόδου, ώστε αυτή να είναι ίση με την παροχή στην είσοδο. Αν  $\Delta x_i = \Delta y, (\Delta_x)$  και  $\psi = u, (v)$  για μη περιοδικές συνθήκες στα αριστερά( $l$ ) και δεξιά( $r$ ), (νότιο( $s$ ) και βόρειο( $n$ )), έχουμε:

$$\dot{m} = \sum_{k=1}^{nz-1} \Delta z(k) \sum_{l=0}^{nx_i} \psi(l, k) \Delta x_i \quad (1.47)$$

εφαρμόζοντας έναν συντελεστή διόρθωσης:

$$\psi_{corr} = \frac{\dot{m}_{inflow} - \dot{m}_{outflow}}{A} \quad (1.48)$$

Το εμβαδό υπολογίζεται ως

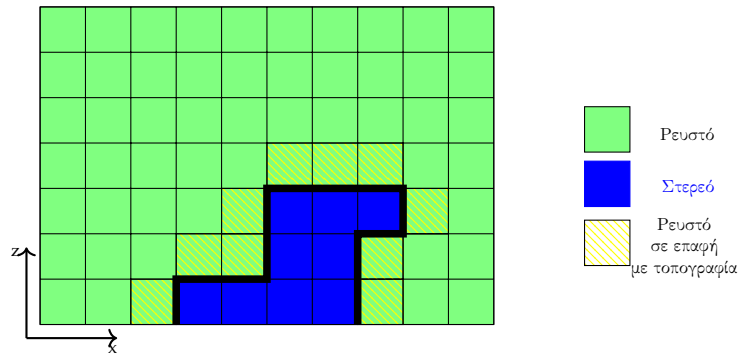
$$A = \sum_1^{nz-1} \Delta z \sum_0^{nx_i} \Delta x_i \quad (1.49)$$

Η κύρια συνιστώσα της ταχύτητας διορθώνεται σε κάθε χρονικό βήμα προσθέτοντας την τιμή  $\psi_{corr}$  σε κάθε κόμβο της επιφάνειας εξόδου από το πρώτο έως και το τελευταίο σημείο ( $k = 1 : nz$ ).

## 1.5 Τοπογραφία

Στο PALM η κατασκευή του πλέγματος γίνεται από το ίδιο το πρόγραμμα και δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης κάποιου ανεξάρτητου πλεγματοποιητή. Αυτή η δυνατότητα δε θα είχε ιδιαίτερη αξία από τη στιγμή που η διακριτοποίηση των εξισώσεων γίνεται σε καρτεσιανό, δομημένο πλέγμα και τα στοιχεία της τοπογραφίας που μπορεί να λύσει το μοντέλο είναι γεωμετρικά αρκετά απλά (1.8). Στις αρχικές εκδόσεις του PALM όλα τα στοιχεία της τοπογραφίας έπρεπε να είναι σε επαφή με το έδαφος και οι βρεχόμενες επιφάνειές του να είναι στην επάνω πλευρά κάθε κελιού που απαρτίζει το στερεό. Αυτό έχει αλλάξει στην τελευταία έκδοση, το οποίο επιτρέπει την εισαγωγή οπών, αιωρούμενων και κρεμάμενων κατασκευών.

Κατά την πρώτη φάση της πλεγματοποίησης, το PALM κατασκευάζει το πλέγμα χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα στοιχεία της τοπογραφίας. Η υλοποίησή της γίνεται σε επόμενο βήμα, όπου καθορίζεται τι είδους κώδικας θα επιλυθεί σε κάθε κελί. Κάθε κελί θεωρείται ότι ανήκει 100% στο ρευστό ή 100% στο στερεό. Στο εσωτερικό της τοπογραφίας είναι προφανές ότι δε θα πρέπει να επιλυθεί κάποια ρευστοδυναμική εξίσωση. Ωστόσο, στο όριο του θα πρέπει να γίνει η υλοποίηση κάποιας συνοριακής συνθήκης, η οποία είναι σημαντική για τη μορφή της λύσης, ειδικά αν πρέπει να εξαχθούν ρεαλιστικά συμπεράσματα για την διάτμηση. Επιπλέον, τα στερεά της τοπογραφίας αποτελούν επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας. Στην περίπτωση χρήσης του σχήματος ανώτερης τάξης για την ολοκλήρωση των εξισώσεων, η τάξη του σχήματος μειώνεται σταδιακά, καθώς πλησιάζουμε προς τα όρια της τοπογραφίας (το ίδιο γίνεται και με τα έξι εξωτερικά όρια).



Σχήμα 1.8: Υλοποίηση της τοπογραφίας στο PALM. Το κάθε κελί ανήκει 100% στο ρευστό ή 100% στο στερεό. Στα κελιά του ρευστού που συνορεύουν με το στερεό εκτελείται ειδικός κώδικας.

Κατά συνέπεια, στο σύνολο του πλέγματος, υπάρχουν τα κελιά που ανήκουν κατά 100%:

- στο ρευστό
- στο ρευστό, αλλά σε επαφή με κάποιο στερεό
- στο στερεό

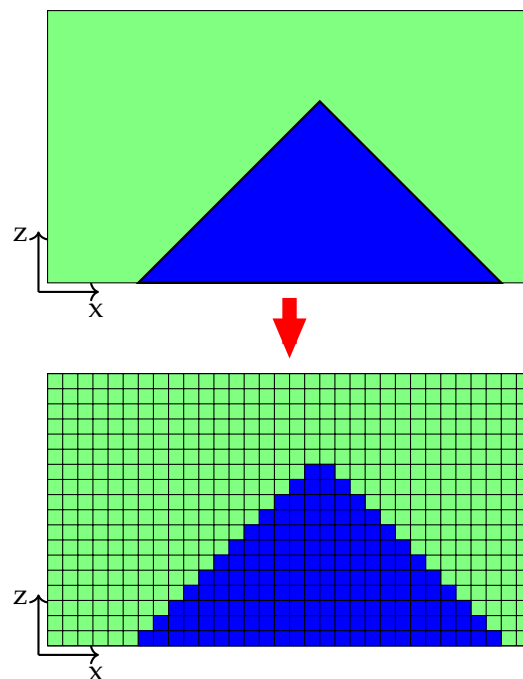
και σε κάθε περίπτωση εκτελείται διαφορετικός κώδικας.

Ο τρόπος με τον οποίον υλοποιείται η τοπογραφία, αν και είναι απλός, εύκολος και γρήγορος στη λύση και την υλοποίηση από το χρήστη, είναι προφανές ότι θέτει περιορισμούς ως προς την πολυπλοκότητα των στερεών στοιχείων που μπορούν να υλοποιηθούν για κάθε προσομοίωση. Ακόμα και στην τελευταία έκδοση, ούτε οι οριζόντιες, ούτε οι κατακόρυφες επιφάνειες δεν μπορούν να έχουν κλίση ως προς το έδαφος. Τέτοιες επιφάνειες και γενικότερα πολύπλοκες γεωμετρίες μπορούν να προκύψουν μόνο με διακριτά σκαλοπάτια (*rastered boundary*) (εικόνα 1.9). Η μέθοδος αυτή είναι απαγορευτική για μικρά πλέγματα και αν και μπορεί να εφαρμοστεί με λογική ακρίβεια σε πυκνότερα πλέγματα, εισάγει τεχνητή τραχύτητα, οπότε πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή.

Η τοπογραφία μπορεί να υλοποιηθεί από το χρήστη με τρεις τρόπους:

- Για την εισαγωγή προκαθορισμένων και αρκετά απλών στοιχείων (κτήρια, φαράγγια, κ.α.), απαιτείται μόνο η ενεργοποίηση ειδικών παραμέτρων στο βασικό αρχείο εισόδου(βλ.).
- Στην περίπτωση κάποιας γενικής τοπογραφίας 2.5 διαστάσεων (κάθε κελί στο επίπεδο του εδάφους αντιστοιχίζεται σε μοναδικό υψόμετρο), απαιτείται ένα αρχείο που εμπεριέχει για κάθε κελί την μέγιστη τιμή του ύψους στην οποία υπάρχει στερεό.
- Στην περίπτωση 3-Διάστατης τοπογραφίας, χρήστης θα πρέπει να κατασκευάσει κατάλληλο αρχείο στο οποίο ορίζει για κάθε κελί του πλέγματος, το αν ανήκει στην τοπογραφία ή στο ρευστό.

Η υλοποίηση της τοπογραφίας στο PALM, συμμορφώνεται με τα πρότυπα των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DES), οπότε τα αρχεία εισόδου για την κατασκευή του πλέγματος από το PALM μπορούν να προκύψουν από αρχεία δεδομένων τοπογραφίας GIS μέσω εξωτερικών προγραμμάτων(π.χ. GRASS GIS). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί η γρήγορη εισαγωγή πραγματικών τοπογραφιών με μεγάλη πιστότητα, ειδικά στην περίπτωση που η προσομοιούμενη περιοχή είναι χαρτογραφημένη.



Σχήμα 1.9: Υλοποίηση κεκλιμένων επιφανειών στο PALM . Από τη στιγμή που τα κελιά είναι ορθογώνια και κάθε κελί ανήκει αποκλειστικά στο ρευστό ή στο στερεό, οι κεκλιμένες επιφάνειες μπορούν να επιτευχθούν μόνο με βαθμίδες, Αυτό μπορεί να οδηγεί σε ρεαλιστικά αποτελέσματα μόνο όταν το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό.



## Κεφάλαιο 2

# Τεχνική Υλοποίηση

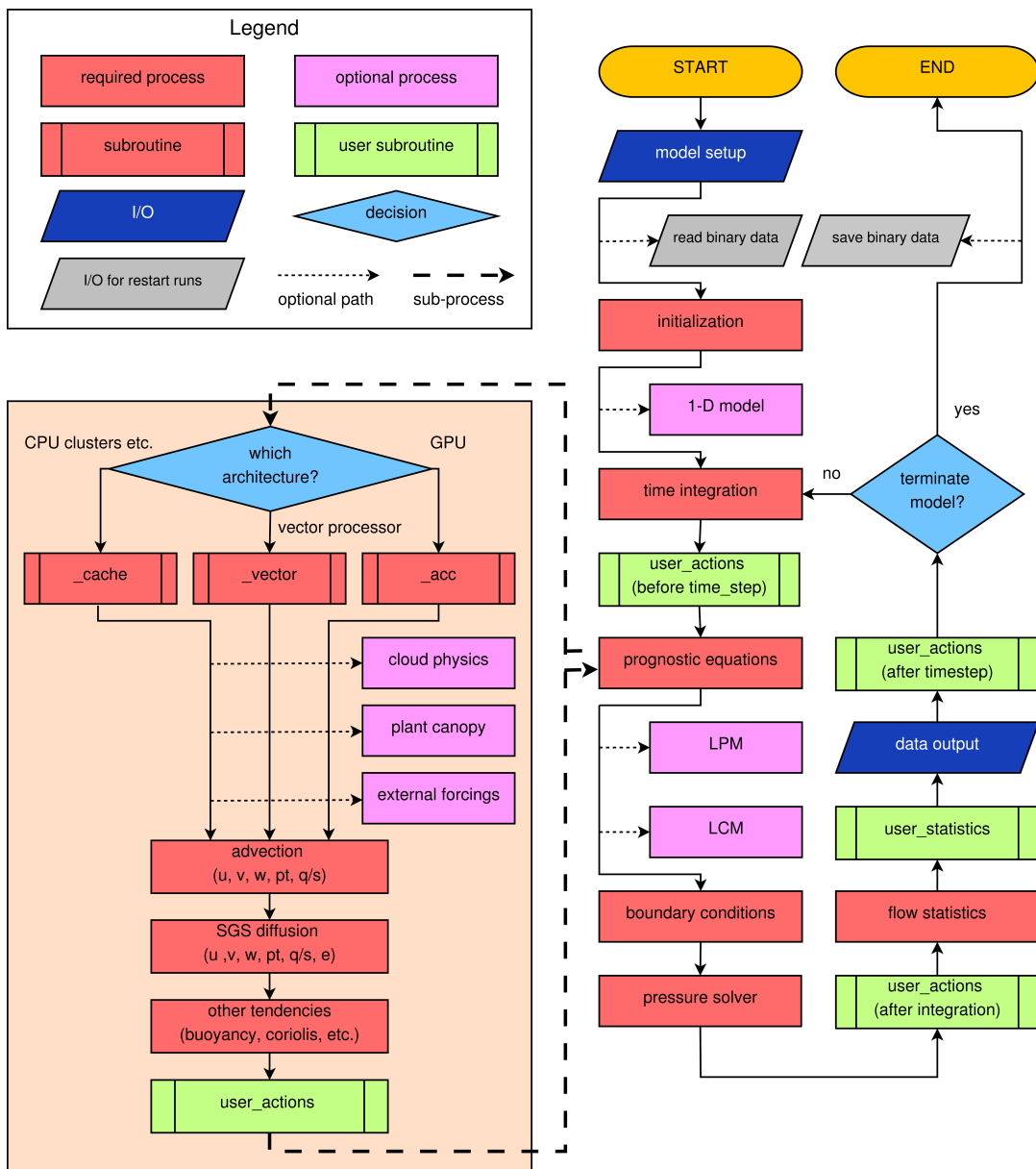
## Εισαγωγή

Το PALM , είναι ο καταρχήν σχεδιασμένο ώστε να κάνει αποτελεσματική χρήση της επεξεργαστικής ισχύος των σύγχρονων υπολογιστικών κέντρων που ενσωματώνουν από λίγους, έως κάποιες χιλιάδες υπολογιστικούς κόμβους. Εκτός από τον βασικό κώδικα (γραμμένο σε Fortran 2003), διατίθεται ένα σύνολο από βοηθητικά προγράμματα και αρχεία που βοηθούν στην εγκατάσταση, τη συντήρηση και την αναβάθμιση του συνεχώς αναπτυσσόμενου πηγαίου κώδικα, στη διαχείριση των αρχείων εισόδου/εξόδου και στο συντονισμό της γενικότερης λειτουργίας του προγράμματος. Οι σχεδιαστές του προγράμματος έχουν μεριμνήσει για τη δυνατότητα εγκατάστασης σε οποιονδήποτε υπολογιστή Linux πληρεί τις προδιαγραφές, σε επίπεδο υλικού και λογισμικού. Να τονιστεί ότι στις τελευταίες εκδόσεις του, το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιήσει τους υπολογιστικούς πυρήνες, όχι μόνο κεντρικών επεξεργαστών(CPU), αλλά και καρτών γραφικών(GPU).

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται λεπτομέρειες για τον τρόπο που υλοποιούνται τα ρευστοδυναμικά και όποια άλλα μοντέλα διατίθενται με το PALM . Επιπλέον, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εγκατάσταση, η ρύθμιση των παραμέτρων, η συντήρηση και η επαύξηση του κώδικα από το χρήστη. Κατά συνέπεια, υπάρχουν στοιχεία που σχετίζονται με το σχεδιασμό, τη φιλοσοφία και δομή του ίδιου του κώδικα, αλλά και των αρχείων, των προγραμμάτων και των επιπλέον βιβλιοθηκών λογισμικού που είναι υπεύθυνες για την ομαλή λειτουργία του προγράμματος στο περιβάλλον των Linux , καθώς και για τη διαχείριση του μεγάλου όγκου των δεδομένων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις.

## 2.1 Η βασική δομή του κώδικα

Ο συνολικός κώδικας στο PALM προκύπτει από ένα άθροισμα αρχείων στα οποία είναι διαμοιρασμένες ένα πλήθος υπορουτίνων και η λογική με την οποία οργανώνεται, έχει να κάνει με την ευκολότερη κατανόηση, συντήρηση και ανάπτυξή του. Κάθε αρχείο μπορεί να εμπεριέχει μία μοναδική, ή ένα σύνολο υπορουτίνων, οι οποίες επιτελούν αθροιστικά μία συγκεκριμένη λειτουργία. Επιπλέον, υπάρχουν αρχεία τα οποία προσφέρονται για τροποποίηση από το χρήστη. Η λειτουργία του προγράμματος εκτός από τον κώδικα που αναπτύσσεται από τους σχεδιαστές του PALM, απαιτεί τη χρήση και τη σύνδεση με προεγκατεστημένες βιβλιοθήκες λογισμικού(π.χ. χρήση FFTW,NetCDF). Στο σχήμα 2.1 φαίνεται το δομικό διάγραμμα του κώδικα.



Σχήμα 2.1: Το διάγραμμα ροής του κώδικα στο PALM

Ο κώδικας ξεκινάει από το κεντρικό πρόγραμμα στο οποίο εμπεριέχονται κλίσεις για τις υπορουτίνες, οι οποίες μπορούν να επιτελούν κάποια λειτουργία ανεξάρτητα ή



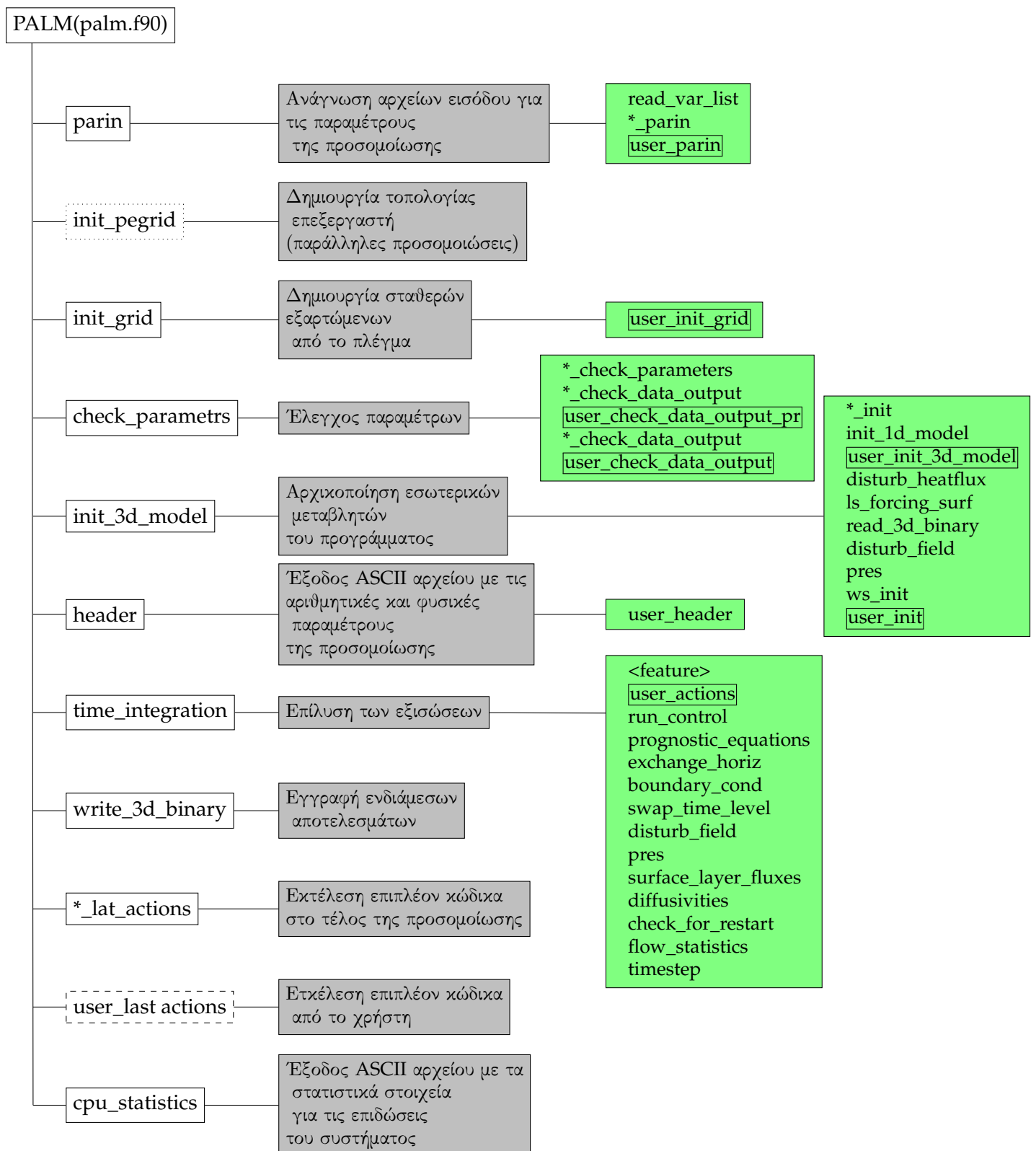
συνεργαζόμενες με άλλες υπορουτίνες. Η χρήση των **Fortran modules** συνεπάγεται τη μείωση του επαναλαμβανόμενου κώδικα και την απλούστερη και αποτελεσματικότερη οργάνωσή του. Ο συνολικός κώδικας αποτελείται από βασικό κώδικα και τα τμήματα κώδικα που εισάγει ο χρήστης.

Το πρώτο τμήμα προέρχεται από την αρχική εγκατάσταση του **PALM** και είναι πλήρως λειτουργικό, χωρίς την ανάγκη προσθήκης κώδικα (αν εξαιρεθεί η ανάγκη συνεργασίας με κάποιες εξωτερικές βιβλιοθήκες) από το χρήστη. Στο τμήμα αυτό βασίζεται όλη η λειτουργικότητα και τα χαρακτηριστικά του προγράμματος. Παρ' όλα αυτά, για να δίνεται μεγαλύτερη ελευθερία στο χρήστη όσον αφορά σε ζητήματα όπως η επιβολή οριακών συνθηκών ή η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, οι σχεδιαστές έχουν μεριμνήσει για τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος για την προσθήκη κώδικα που έχει δημιουργηθεί από το χρήστη. Για να επιτευχθεί αυτό βέβαια, ο χρήστης θα πρέπει να έχει πολύ καλή γνώση της δομής, των συμβάσεων και των λειτουργιών του **PALM**, οπότε δε συστήνεται η επαύξηση του βασικού κώδικα στα πρώτα στάδια της εξοικείωσης με το πρόγραμμα και ούτε έχει πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής. Όσον αφορά στον κεντρικό κώδικα, είναι προφανές ότι υπάρχουν υπορουτίνες, οι οποίες δεν καλούνται σε καμία φάση του προγράμματος στην περίπτωση που η λειτουργία που επιτελούν δεν είναι ενεργοποιημένη σύμφωνα με τις παραμέτρους της προσομοίωσης.

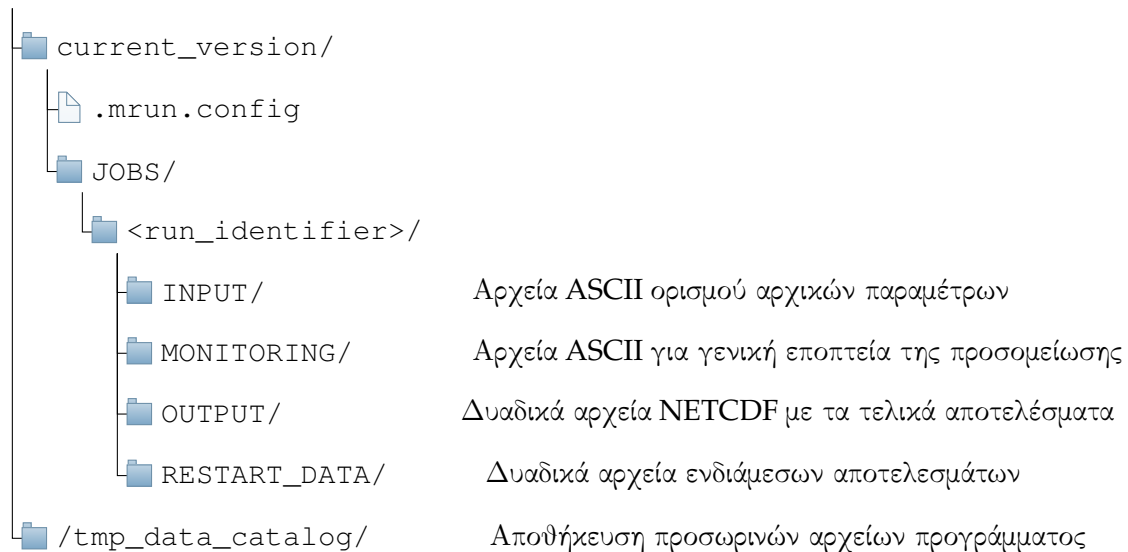
Στην περίπτωση που ο υπολογιστικός χρόνος κάποιας προσομοίωσης υπερβαίνει τον μέγιστο επιτρεπόμενο από το σύστημα, υπάρχει η δυνατότητα της προσωρινής διακοπής της. Από τη στιγμή, βέβαια, που γίνεται εκκαθάριση της μνήμης, οι παράμετροι και όλες οι τιμές των μεταβλητών που απαιτούνται για τη συνέχιση της προσομοίωσης θα πρέπει να εγγραφούν σε προσωρινά αρχεία. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται αυτόματα σε δυαδικά αρχεία, για λόγους εξοικονόμησης χρόνου και χώρου.

Οι βασικές λειτουργίες του κώδικα σε συνδυασμό με τις υπορουτίνες που τις πραγματοποιούν φαίνονται στο σχήμα 2.2 σε συνδυασμό με το σχήμα 2.1.

1. Η εκτέλεση του προγράμματος ξεκινά με την κλίση των υπορουτίνων που κάνουν ανάγνωση των αρχείων εισόδου. Τα αρχεία αυτά είναι σε μορφή **ASCII**, καθώς κατασκευάζονται από το χρήστη.
2. Το συνολικό πλέγμα χωρίζεται μικρότερα, σε καθένα εκ των οποίων οι ρευστοδυναμικές εξισώσεις επιλύονται από τους διαφορετικούς πυρήνες του κάθε επεξεργαστή. Το βήμα αυτό παραλείπεται αν ο διαμοιρασμός έχει γίνει από το χρήστη.
3. Καθορίζεται η θέση των κόμβων στους οποίους γίνεται ο υπολογισμός των βαθμωτών μεγεθών και των συνιστωσών της ταχύτητας στο μετατοπισμένο πλέγμα.
4. Γίνεται έλεγχος των παραμέτρων και το πρόβλημα τερματίζεται στην περίπτωση που υπάρχουν λάθη στις παραμέτρους της προσομοίωσης.
5. Εγγραφή των παραμέτρων της προσομοίωσης σε αρχείο **ASCII**. Το βήμα αυτό εξυπηρετεί στην επόπτευση των συνθηκών της κάθε προσομοίωσης, είτε κατά τη διάρκεια εκτέλεσης, είτε αφού αυτή έχει τερματιστεί.
6. Επίλυση των εξισώσεων. Εδώ γίνεται η εφαρμογή του ρευστοδυναμικού μοντέλου που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με βάση την παραλληλοποίηση και τις βελτιστοποιήσεις του κώδικα. Οι υπορουτίνες στη φάση αυτή εκτελούνται επαναληπτικά, για κάθε χρονικό βήμα και τα ενδιάμεσα αποτελέσματα γράφονται σε δυαδική (και συμπιεσμένη κατ' εντολή του χρήστη) μορφή για κάθε χρονικό βήμα. Η διαδικασία μπορεί να διακοπεί σε περίπτωση που ο υπολογιστικός χρόνος πλησιάσει στο μέγιστο επιτρεπόμενο από το χειριστή του συστήματος. Η συνέχιση της διαδικασίας γίνεται με τη βοήθεια δυαδικών αρχείων με τα ενδιάμεσα δεδομένα.



Σχήμα 2.2: Οι βασικότερες υπορουτίνες του κεντρικού προγράμματος και οι λειτουργίες που επιτελούν.



Σχήμα 2.3: Δομή των αρχείων μιας προσομοίωσης. Τα ονόματα των φακέλων είναι ενδεικτικά του περιεχομένου τους. Κάποια αρχεία πρέπει να προϋπάρχουν κατά την εκτέλεση. Τα υπόλοιπα αποτελούν βοηθητικά αρχεία ή αρχεία αποτελεσμάτων. Ο φάκελος `tmp_data_catalog` μπορεί να βρισκείται σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος αρχείων και το περιεχόμενό του σβήνεται αυτόματα στο τέλος κάθε προσομοίωσης.

7. Στην περίπτωση που το πρόγραμμα αποφασίσει ότι μετά το τέλος του τρέχοντος χρονικού βήματος θα γίνει παύση της προσομοίωσης, γίνεται η αποθήκευση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων και παραμέτρων.
8. Εγγραφή των στατιστικών στοιχείων της προσομοίωσης σε αρχείο ASCII. Αυτό βοηθά το χρήστη κατόπιν της εκτέλεσης της προσομοίωσης να αξιολογήσει τις επιδόσεις του συστήματος, να ελέγξει την αποτελεσματικότητα των βελτιστοποιήσεων και στην επιλογή των καταλληλότερων ρυθμίσεων για μελλοντικές προσομοιώσεις.

### 2.1.1 Έλεγχος και ροή του προγράμματος

Για την πραγματοποίηση της κάθε προσομοίωσης, θα πρέπει να προηγηθεί η κατασκευή μιας δομής αρχείων και φακέλων, τα οποία θα χρησιμεύσουν για την αποθήκευση των διαφόρων αρχείων εισόδου/εξόδου. Η ονομασία τους θα πρέπει να γίνεται με συγκεκριμένο τρόπο και σε αντίθετη περίπτωση η εκτέλεση του προγράμματος αποτυγχάνει. Το PALM έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για συστήματα με λειτουργικό Linux και πιο συγκεκριμένα στον φλοιό Korn(ksh). Αν και υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας του PALM μέσω ενός απλού γραφικού περιβάλλοντος, αυτή περιπλέκει τη διαδικασία εγκατάστασης και είναι αδύνατη σε servers που δε διαθέτουν λειτουργικό σύστημα, που υποστηρίζει γραφικό περιβάλλον(GUI). Σε κάθε περίπτωση, για τη διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκε κατά αποκλειστικότητα το περιβάλλον της γραμμής εντολών(CLI). Η ιεραρχία των φακέλων και των αρχείων κάθε προσομοίωσης φαίνεται στο σχήμα 2.3.

Ο συντονισμός της λειτουργίας του PALM στον φλοιό των Linux γίνεται μέσω του `mrun`, ενός αρχείου εντολών λειτουργικού συστήματος (shell script). Για κάθε προσομοίωση δημιουργείται ένας προσωρινός φάκελος, όπου αποθηκεύονται όλα τα προσωρινά αρχεία εισόδου/εξόδου. Ο φάκελος αυτός ορίζεται από το χρήστη και μπορεί να βρισκείται σε οποιοδήποτε μέρος του συστήματος αρχείων του συστήματος. Αν και η προσομοίωση ξεκινά από από τον κύριο φάκελο εγκατάστασης του PALM (`current_directory`),

το (`mrun`) αλλάζει αυτόματα στον προσωρινό φάκελο. Κάθε αρχείο που χρησιμοποιεί το κύριο πρόγραμμα, βρίσκεται στον προσωρινό φάκελο, αλλά όλα τα αρχεία που δημιουργεί ο χρήστης βρίσκονται στο κύριο φάκελο εγκατάστασης, όπως και τα αρχεία των αποτελεσμάτων.

Το κύριο πρόγραμμα, κατά την εκτέλεση, **PALM** διαβάζει τα αρχεία από τον προσωρινό φάκελο και εκεί αποθηκεύει και τα ενδιάμεσα αποτελέσματα. Μετά το πέρας της εκτέλεσης, το περιεχόμενο του προσωρινού φακέλου θα πρέπει να μεταφερθεί στον κύριο φάκελο της εγκατάστασης, με καινούριο όνομα ή να διαγραφεί. Τα ονόματα των αρχείων στον προσωρινό φάκελο είναι δεδομένα, αλλά στον κύριο φάκελο της εγκατάστασης η ονομασία ακολουθεί συμβάσεις που ορίζει ο χρήστης. Για το λόγο αυτό, ο τελευταίος, θα πρέπει να μπορεί να ορίσει τις μεταβλητές συστήματος και τις ονομασίες των αρχείων σύμφωνα με τον τρόπο που έχει στηθεί η ιεραρχία των φακέλων στο σύστημά του. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια του αρχείου `mrun.config`, το οποίο βρίσκεται στον κύριο φάκελο εγκατάστασης. Η μέθοδος αυτή οργάνωσης αποκτά ιδιαίτερη αξία στην περίπτωση που οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται σε παράλληλα κέντρα επεξεργασίας μέσω χρήσης δικτύου.

Το `mrun` έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί τόσο εκτελέσιμα προγράμματα, όσο και πηγαία αρχεία, αρκεί να υπάρχει στο σύστημα ο κατάλληλος μεταγλωττιστής και να δίνονται από το χρήστη οι κατάλληλες οδηγίες για τη διαδικασία μεταγλώττισης (**preprocessor directives-linker directives**). Ξεχωριστά τμήματα κώδικα μπορούν να μεταγλωττιστούν με διαφορετικές οδηγίες. Τα εκτελέσιμα αρχεία μπορούν να περιέχουν και προεγκατεστημένες βιβλιοθήκες λογισμικού.

Μία επιπλέον σημαντική λειτουργία που επιτελεί το `mrun` είναι η δυνατότητα παύσης και επανεκκίνησης του προγράμματος στην περίπτωση που ο χρόνος εκτέλεσης υπερβεί κάποιο όριο. Είναι, επιπλέον, υπεύθυνο για την αποθήκευση όλων των αναγκαίων ενδιάμεσων αρχείων και ρυθμίσεων.

#### 2.1.1.1 Αρχεία εισόδου/εξόδου

Η εκτέλεση και η καθοδήγηση του μοντέλου του **PALM** βασίζεται κατάρχας στα αρχεία εισόδου με βάση τα οποία θα οριστούν οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου, θα γίνει η κατασκευή του πλέγματος και θα καθοριστούν όλες οι αναγκαίες φυσικοί και υπολογιστικοί παράμετροι. Από την άλλη, η κάθε προσομοίωση συνοδεύεται από μεγάλο όγκο αποτελεσμάτων, τα οποία εξέρχονται σε αρχεία με κατάλληλη δομή και συμπίεση. Τα αρχεία εισόδου είναι στην πλειοψηφία τους αρχεία **ASCII** είναι εύκολα αναγνώσιμα και τροποποιήσιμα πρακτικά από όλους τους επεξεργαστές κειμένου. Τα αρχεία εξόδου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα αρχεία που χρησιμοποιούνται για την επόπτευση και την αξιολόγηση των επιδόσεων του συστήματος κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της προσομοίωσης και τα αρχεία των αποτελεσμάτων. Τα πρώτα αποθηκεύονται σε μορφή **ASCII**, λόγω του μικρού μεγέθους τους και της ανάγκης για εύκολη ανάγνωση. Τα τελευταία είναι σε μορφή **NetCDF** λόγω του τεράστιου μεγέθους τους. Κάποια εκ των αρχείων εισόδου αποθηκεύονται και αυτά σε μορφή **NetCDF**.

Η λίστα των αρχείων εισόδου/εξόδου είναι αρκετά μεγάλη, κυρίως για το λόγο ότι το **PALM** ενσωματώνει πλήθος φυσικών μοντέλων, καθένα εκ των οποίων απαιτεί δικές του παραμέτρους και δεδομένα εισόδου για την υλοποίησή του. Τα απαραίτητα, ωστόσο αρχεία για την υλοποίηση μιας βασικής προσομοίωσης είναι λιγότερα.

Οι βασικές κατηγορίες αρχείων είναι:

- Αρχεία εισόδου

**PARIN:** Αρχείο με τις βασικές φυσικές και αριθμητικές παραμέτρους του προβλήματος, καθώς και τα μεγέθη και τα χωρία που θα εξαχθούν. Θα πρέπει να βρίσκεται σε κάθε προσομοίωση.

**TOPOGRAPHY\_DATA:** Αρχείο περιγραφής της τοπογραφίας. Θα πρέπει να βρίσκεται μόνο σε προσομοιώσεις που η τοπογραφία δεν μπορεί ανήκει σε κάποια από τις προεγκατεστημένες στο βασικό πρόγραμμα. Μπορεί να είναι αρχείο ASCII ή NetCDF.

**TOPOGRAPHY2\_DATA:** Αρχείο περιγραφής της τοπογραφίας. Θα πρέπει να βρίσκεται μόνο σε προσομοιώσεις που η τοπογραφία δεν μπορεί ανήκει σε κάποια από τις προεγκατεστημένες στο βασικό πρόγραμμα. Μπορεί να είναι αποκλειστικά μορφής NetCDF. Ενσωματώθηκε στις τελευταίες εκδόσεις του PALM και χρησιμοποιείται για πολύπλοκες τοπογραφίες που δεν μπορούν να περιγραφούν με 2-Διάστατα αρχεία εισόδου

- Εποπτικά αρχεία εξόδου (ASCII)

**RUN\_CONTROL:** Εξάγει συγκεκριμένες ποσότητες που βοηθούν στην φυσική εποπτεία των αποτελεσμάτων (μέγιστη και ελάχιστη τιμή ταχύτητας, απόκλιση πεδίου ταχυτήτων, τιμή χρονικού βήματος κ.α.). Το αρχείο δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της ρεαλιστικότητας των αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Μπορεί να βοηθήσει το χρήστη στον πρόωρο τερματισμό της, στην περίπτωση που αντιληφθεί μη αναμενόμενη διακύμανση κάποιων παραμέτρων.

**CPU\_MEASURES:** Εμπεριέχει κάποια βασικά στοιχεία της προσομοίωσης (έκδοση κώδικα, ημερομηνία, ώρα έναρξης προσομοίωσης κ.α.). Επιπλέον, εμπεριέχει στατιστικά στοιχεία για το ποσοστό του συνολικού χρόνου που απαιτήσε το κάθε τμήμα του κώδικα. Το αρχείο παράγεται μετά το πέρας της προσομοίωσης. Μπορεί να βοηθήσει το χρήστη στην αξιολόγηση των επιδόσεων του συστήματος, στην πρόβλεψη του χρόνου που απαιτούν μελλοντικές προσομοιώσεις και στην αξιολόγηση των επιλογών του ως προς κάποιες από τις παραμέτρους που μπορούν να επηρεάζουν την ακρίβεια/ταχύτητα των αριθμητικών σχημάτων.

**HEADER:** Συνοψίζει τις αριθμητικές και τις φυσικές παραμέτρους της προσομοίωσης.

- Αρχεία εξόδου αποτελεσμάτων (NetCDF)

**DATA\_1D\_PR\_NETCDF:** Αρχεία δεδομένων που αφορούν σε κατακόρυφα προφίλ του χωρικού μέσου όρου των ποσοτήτων κατά την οριζόντια κατεύθυνση.

**DATA\_1D\_TS\_NETCDF:** Δεδομένα χρονοσειρών. Οι χρονοσειρές αφορούν σε μέσες χωρικά ποσότητες από όλο το πλέγμα ή από τομείς που έχει ορίσει ο χρήστης με δικό του κώδικα.

**DATA\_3D\_NETCDF:** Δεδομένα σε 3-Διαστάσεις. Εξάγονται ή για όλο το πλέγμα ή για περιοχές που έχει ορίσει ο χρήστης.

**DATA\_2D\_\*\_AV\_NETCDF:** Αφορά σε 2-Διάστατα δεδομένα σε επίπεδα που έχει ορίσει ο χρήστης μέσω του αρχείου PARIN.

**DATA\_3D\_AV\_NETCDF:** Οι μέσες τιμές των 3-Διάστατων δεδομένων. Ο υπολογισμός του μέσου όρου γίνεται εσωτερικά στο πρόγραμμα, μειώνοντας το χρόνο επεξεργασίας που καλείται να κάνει ο χρήστης.

**DATA\_MASK\_\*\_NETCDF:** Δεδομένα σε υπο-περιοχές του πλέγματος. Μπορούν να κυμαίνονται από ένα μοναδικό σημείο μέχρι 3-Διάστατα υποσύνολα. Ο ορισμός τους γίνεται μέσω των παραμέτρων του αρχείου **PARIN**.

**DATA\_MASK\_\*\_AV\_NETCDF:** Όμοια με παραπάνω, αλλά δεν αποθηκεύονται χρονοσειρές για κάθε σημείο, αλλά το χρονικό μέσο όρο.

### 2.1.2 Ενσωμάτωση κώδικα από το χρήστη

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του **palm** είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη στα ενσωματώνει δικό του κώδικα, παρέχοντας ένα έτοιμο περιβάλλον ανάπτυξης. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί τις μεταβλητές και τις συναρτήσεις του κύριου προγράμματος, για να γράφει κάποιες δικές του υπορουτίνες. Οι υπορουτίνες αυτές επιτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες και μπορούν να μεταγλωττίζονται σε κάθε προσομοίωση ανεξάρτητα από τον κύριο κώδικα, ο οποίος θα πρέπει να μεταγλωττιστεί μόνο μία φορά. Για να έχει τη δυνατότητα ο χρήστης να παρεμβαίνει ουσιαστικά και παραγωγικά στο κύριο πρόγραμμα θα πρέπει να έχει πολύ καλή γνώση της δομής, της προγραμματιστικής φιλοσοφίας και του τρόπου λειτουργίας του. Ο κύριος κώδικας έχει κατασκευαστεί με μέριμνα για την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητά του και με πλήθος βελτιστοποιήσεων. Ο επιπλέον αυτός κώδικας εκτελείται σε συγκεκριμένα σημεία του προγράμματος, κάτι για το οποίο έχουν μεριμνήσει οι σχεδιαστές του **PALM** (σχήμα 2.1).

Η ενσωμάτωση του κώδικα από το χρήστη είναι από τη μία απαραίτητη για την υλοποίηση κάποιων λειτουργιών ή μοντέλων και από την άλλη μπορεί να του προσφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα ή μεγαλύτερη ελευθερία όσον αφορά στους υπολογισμούς και τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ήδη κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης. Οδηγίες για τον τρόπο με τον οποίον μπορεί να γίνει η ενσωμάτωση αυτών των επιπλέον υπορουτίνων δίνονται στο εγχειρίδιο του **PALM**. Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε σε κάποιες μόνο:

<b>user_parin:</b>	Ορισμός παραμέτρων που ορίζονται από τον χρήστη. Οι παράμετροι αυτοί σχετίζονται με μεταβλητές και ποσότητες που έχει ορίσει ο ίδιος.
<b>user_header:</b>	Ορισμός επιπλέον δεδομένων και πληροφοριών του χρήστη που θα εξάγονται στο αντίστοιχο αρχείο εξόδου.
<b>user_init:</b>	Υλοποίηση διεργασιών που θα πρέπει να εκτελεστούν πριν την έναρξη της 3-Διάστατης προσομοίωσης. Για παράδειγμα ορισμός ανομοιογενούς τραχύτητας ή θερμοκρασίας εδάφους. Επιπλέον εδώ ορίζονται επιπλέον υπο-περιοχές του συνολικού υπολογιστικού πλέγματος στις οποίες μπορεί να γίνει επεξεργασία των δεδομένων.
<b>user_init_grid:</b>	Ορισμός διεργασιών κατά την αρχικοποίηση του πλέγματος. Εδώ υλοποιούνται τοπογραφίες πέραν των προϋπάρχοντων.
<b>user_actions:</b>	Υλοποίηση διεργασιών πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από τη χρονική ολοκλήρωση, σε κάθε χρονικό βήμα ή σε όποια χρονικά βήματα ορίσει ο χρήστης.
<b>user_statistics:</b>	Υπολογισμός μέσου όρου ποσοτήτων κατά την οριζόντια κατεύθυνση, καθώς και χρονοσειρών.
<b>user_last_actions:</b>	Διεργασίες που πρέπει να εκτελεστούν στο τέλος της κάθε προσομοίωσης.

Η παραπάνω λίστα δεν είναι επ' ουδενί εξαντλητική ή αναλυτική ως προς την επεξήγηση της λειτουργίας της κάθε υπορουτίνας. Σκοπός της είναι να τονίσει τη δυνατότητα του χρήστη να επέμβει στον βασικό κώδικα. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής δεν έχει γίνει χρήση της δυνατότητας του PALM για την ενσωμάτωση επιπλέον κώδικα.

## 2.2 Έξοδος αποτελεσμάτων

Μία από τις δυσκολίες της χρήσης των προγραμμάτων που υλοποιούν το LES, εκτός από τους πολύ μεγάλους χρόνους προσομοίωσης, ακόμη και για σχετικά μικρά πλέγματα, είναι και ο όγκος των αποτελεσμάτων. Στο LES, από τη στιγμή που υπολογίζεται η χρονική μεταβολή των κυμαινόμενων ποσοτήτων και όχι η μέση τιμή όπως στις RANS, τα αποτελέσματα για ίδιο μέγεθος πλέγματος είναι τάξης μεγέθους μεγαλύτερα. Βέβαια, η μεγαλύτερη πιστότητα του μοντέλου συνεπάγεται την ανάγκη επίλυσης αραιότερων πλεγμάτων για την εξαγωγή ίδιας ακρίβειας λύσης, κάτι που μετριάζει τη διαφορά ως ένα βαθμό. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, ακόμα και για μικρής ή μεσαίας έκτασης πλέγματα ( $10^6 - 10^9$ ), τα αποτελέσματα μπορούν να προσεγγίζουν από τις κάποιες δεκάδες GB τα κάποιες δεκάδες TB. Οι αριθμοί αυτοί αυξάνονται γεωμετρικά καθώς τα πλέγματα γίνονται μεγαλύτερα και πυκνότερα.

Για το λόγο αυτό, από τη στιγμή που δεν υπάρχει κάποιος λόγος που υπαγορεύει την ανάγκη για την εξαγωγή δεδομένων για όλο το υπολογιστικό χωρίο και για κάθε χρονική στιγμή, αυτό δεν κρίνεται αναγκαίο. Αυτό καθίσταται προφανές στο PALM αν αναλογιστεί κανείς τις επιλογές που δίνονται στο χρήστη όσον αφορά στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα από το να εξάγει όλες τις υπολογιζόμενες ποσότητες (με την προσθήκη επιπλέον των βασικών, με την εισαγωγή επιπλέον κώδικα, αν το επιθυμεί), για κάθε χρονικό βήμα, μέχρι να εξάγει τη μέση τιμή ενός μόνο μεγέθους για ένα μοναδικό σημείο, αν και οι δύο αυτές ακραίες περιπτώσεις δεν έχουν πρακτική αξία, ίσως σε καμία εφαρμογή. Το σημαντικό είναι να ξεκαθαριστεί η σημασία που πρέπει να δοθεί από το χρήστη, στην αφιέρωση σημαντικού χρόνου πριν την προσομοίωση, στο να αποφασίσει ποια είναι τα φαινόμενα που θέλει να μελετήσει. Αυτό θα καθορίσει το είδος των μεταβλητών που θα πρέπει να εξάγει, τη συχνότητα με την οποία θα το κάνει αυτό, καθώς και το αν είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της χρονικής διακύμανσης κάποιου μεγέθους ή αρκεί κάποιο στατιστικό μέγεθος.

Αν και το προφανές πρόβλημα από την εξαγωγή μεγάλου όγκου δεδομένων είναι η ανάγκη μεγάλου αποθηκευτικού χώρου, το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα είναι η δυσκολία επεξεργασίας των δεδομένων, για την οπτικοποίηση και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Από ένα μέγεθος αρχείων και πάνω, αρχίζουν να προκύπτουν σειρά προβλημάτων που ξεκινούν από την αδυναμία μεταφοράς και διαχείρισης από το λειτουργικό σύστημα και φτάνουν στην ανάγκη υλοποίησης πολύπλοκων προγραμματιστικών τεχνικών για την στατιστική επεξεργασία τους, από τη στιγμή που η μνήμη είναι κάποια λίγα GB για έναν προσωπικό υπολογιστή και μπορεί να φτάνει μία με δύο τάξεις μεγέθους πιο πάνω για κάποιους υπερυπολογιστές. Σε αυτά θα πρέπει να συνυπολογιστούν οι μεγάλοι χρόνοι που λαμβάνει η όποια επεξεργασία.

Όταν σε αντίθετη περίπτωση η στατιστική επεξεργασία, στην πληρότητά της ή όχι, από το PALM υπάρχουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Η επεξεργασία πραγματοποιείται παράλληλα από έναν υψηλών προδιαγραφών κώδικα, βελτιστοποιημένο για αποδοτική λειτουργία σε παράλληλα συστήματα.
- Τα στατιστικά μεγέθη μπορεί να προκύπτουν χωρίς την ανάγκη δέσμευσης μεγάλου αποθηκευτικού χώρου. Το PALM έχει διαθέσιμα όλα τα μεγέθη κατά την εκτέλεση

του κώδικα, οπότε οι σχεδιαστές του μπορούν να είναι πιο ευέλικτοι κατά την εφαρμογή των μαθηματικών τύπων και των στατιστικών μοντέλων.

- Εξοικονομείται ο χρόνος ανάπτυξης ή χρήσης του όποιου κώδικα θα έκανε την αντίστοιχη επεξεργασία και ταυτόχρονα μειώνεται η πιθανότητα λάθους.
- Η δυνατότητα που δίνει το PALM για προσθήκη κώδικα από το χρήστη διευρύνει τις δυνατότητες στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων σε πολύ μεγάλο βαθμό, αν κανείς υπολογίσει ότι στην βασική του έκδοση, το PALM το μόνο στατιστικό μέγεθος που μπορεί να υπολογίσει είναι η μέση τιμή.

Βέβαια, ο χρήστης δεν μπορεί να βασίζεται κατ' αποκλειστικότητα στο PALM για την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, καθώς:

- Από μόνο του το PALM δίνει περιορισμένες επιλογές ως προς τη στατιστική επεξεργασία. Η επέκταση της λειτουργικότητάς του απαιτεί τη συγγραφή επιπλέον κώδικα, η οποία θα πρέπει να γίνει υποχρεωτικά σε Fortran 2003, ακόμα και αν ο χρήστης δεν είναι εξοικειωμένος με αυτήν ή είναι πολύ καλός γνώστης κάποιας άλλης γλώσσας.
- Η μέθοδος αυτή στερεί από το χρήστη μεγάλη ευελιξία. Όταν η επεξεργασία πραγματοποιείται ξεχωριστά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτοιμο λογισμικό, βιβλιοθήκες ή ειδικά κατασκευασμένος κώδικας που θα επιτελεί την ακριβή επεξεργασία που επιθυμεί ο χρήστης. Επιπλέον, η διόρθωση του κώδικα είναι πολύ πιο άμεση, αν αναλογιστεί κανείς ότι μία προσομοίωση του PALM, η οποία θα παράγει τα λανθασμένα αποτελέσματα μπορεί να διαρκεί από ώρες έως εβδομάδες.

Λόγω της απειρίας του συγγραφέα τόσο στη χρήση του PALM, όσο και στον προγραμματισμό με την Fortran 2003, επιλέχθηκε η επιλογή της ανάπτυξης δικού του κώδικα για την επεξεργασία. Αυτό δε σημαίνει ότι αυτό δε συνοδεύτηκε από πολλές πρακτικές, τεχνικές και προγραμματιστικές δυσκολίες, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς τους περιορισμούς του υλικού ενός προσωπικού υπολογιστή.

### 2.2.1 Τα αρχεία NetCDF

Η NetCDF αποτελεί ένα περιβάλλον για δημιουργία, πρόσβαση και διανομή επιστημονικών δεδομένων, σε μητρική μορφή και διατίθεται ελεύθερα μέσω βιβλιοθηκών λογισμικού για διάφορες γλώσσες προγραμματισμού. Ο τρόπος με τον οποίο γράφονται τα δεδομένα είναι ανεξάρτητος του υλικού του συστήματος (*machine-independent*). Το περιβάλλον της NetCDF στηρίζεται και προεκτείνει τις δυνατότητες της πλατφόρμας τεχνολογιών και λογισμικού HDF, η οποία χρησιμοποιείται παγκοσμίως στο χώρο της έρευνας, της επίσημης και της τεχνολογίας. Δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης, επεξεργασίας και διαμοιρασμού αρχείων ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Για την περαιτέρω αύξηση της λειτουργικότητας των αρχείων NetCDF, δίνεται η δυνατότητα χρήση των προτύπων συμπίεσης zip, szzip, το οποίο μειώνει τις απαιτήσεις σε αποθηκευτικό χώρο.

Σημαντικά χαρακτηριστικά των δεδομένων που έχουν αποθηκευτεί με βάση τις βιβλιοθήκες NetCDF είναι ότι είναι:

**Self-Describing:** Ένα αρχείο NetCDF εμπεριέχει πληροφορίες για το περιεχόμενό του.

**Portable:** Ένα αρχείο NetCDF μπορεί να το επεξεργαστεί οποιοσδήποτε υπολογιστής, ανεξάρτητα από τον τρόπο που αποθηκευτεί τους ακέραιους αριθμούς, τους αριθμούς κινητής υποδιαστολής ή τους χαρακτήρες.



**Scalable:** Η πρόσβαση στα δεδομένα είναι το ίδιο αποδοτική, ανεξάρτητα από το μέγεθος του αρχείου.

**Sharable:** Ένας συγγραφέας και πολλοί αναγνώστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο ίδιο αρχείο ταυτόχρονα.

**Archivable:** Οι μεταγενέστερες μορφές της βιβλιοθήκης, υποστηρίζουν τις συμβάσεις και τη δομή των προγενέστερων.

Ο κώδικας του PALM, ο οποίος εξάγει τα δεδομένα αποκλειστικά σε μορφή NetCDF (είτε παράλληλα είτε σειριακά, ανάλογα με τις προδιαγραφές της αντίστοιχης βιβλιοθήκης λογισμικού), εξαρτάται από την ύπαρξη στο σύστημα των αντίστοιχων βιβλιοθηκών και δεν παρέχει κάποιο περιβάλλον εγκατάστασης για το χρήστη. Αυτό που παρέχει είναι η δυνατότητα της ευκολότερης σύνδεσης με το κύριο πρόγραμμα κατά τη μεταγλώττιση, μέσω του αρχείου `.mrun.config`.

### 2.2.2 Εγκατάσταση

Η εγκατάσταση του PALM ελέγχεται, όπως και το κύριο πρόγραμμα από ειδικό αρχείο εντολών Linux(`mbuild`). Οι βασικές διεργασίες που θα πρέπει να υλοποιηθούν κατά την εγκατάσταση είναι η μεταγλώττιση των διαφόρων πηγαίων αρχείων σε εκτελέσιμο κώδικα, η σύνδεσή τους, ώστε όλες οι διαθέσιμες υπορουτίνες να είναι προσβάσιμες από το κύριο πρόγραμμα, καθώς και η σύνδεση του κύριου προγράμματος με τις επιπλέον βιβλιοθήκες λογισμικού. Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, αλλά απαιτείται από το χρήστη να διαμορφώσει κατάλληλα το αρχείο ρύθμισης της εγκατάστασης(`.mrun.config`). Στο αρχείο αυτό δίνονται πληροφορίες για το σύστημα (ή τα συστήματα αν γίνει εγκατάσταση σε άλλο σύστημα μέσω δικτύου) στο οποίο θα εγκατασταθεί το PALM, ορίζονται οι απαραίτητες μεταβλητές συστήματος και οι διευθύνσεις (στο σύστημα αρχείων) των εξωτερικών βιβλιοθηκών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ο τρόπος που γίνεται η σύνδεση (στατική ή δυναμική) εξαρτάται από τις ρυθμίσεις του μεταγλωττιστή του συστήματος, οι παράμετροι του οποίου μπορούν να οριστούν τόσο από το αρχείο εγκατάστασης, όσο και ανεξάρτητα. Να τονιστεί πως αν και έχει γίνει προσπάθεια να δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ελέγχει τη διαδικασία από το `.mrun.config`, η σύνδεση των απαιτητών τμημάτων κώδικα, είτε αυτός ανήκει στο PALM, είτε σε εξωτερικές βιβλιοθήκες, μπορεί να επιτευχθεί και να ελεγχθεί ανεξάρτητα από το χρήστη μέσω της κατάλληλης διαχείρισης και τροποποίησης των μεταβλητών και των αρχείων συστήματος του λειτουργικού συστήματος.

Από τη στιγμή που το σύστημα διαθέτει κατάλληλο μεταγλωττιστή Fortran, η βασικότερη ευθύνη του χρήστη είναι να εξασφαλίσει την ύπαρξη των απαραίτητων βιβλιοθηκών σε μορφή εκτελέσιμου κώδικα πριν από την έναρξη της διαδικασίας εγκατάστασης του ίδιου του PALM. Στη συνέχεια θα πρέπει αν γίνει η σύνδεσή τους. Η μόνη βιβλιοθήκη που είναι απαραίτητο να υπάρχει είναι η NetCDF, ενώ μπορούν να υπάρχουν και άλλες προαιρετικές που σχετίζονται με τις επιδόσεις του προγράμματος, όπως π.χ η FFTW για την επίλυση της εξίσωσης Poisson. Η χρήση των όποιων βιβλιοθηκών ελέγχεται από κατάλληλες εντολές (`preprocessor directives`) κατά την εγκατάσταση. Η NetCDF, που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του PALM εξαρτάται από τις HDF, zlib, που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίον αποθηκεύονται και συμπίεζονται τα δεδομένα. Για την παράλληλη εκτέλεση του PALM, θα πρέπει να υπάρχει στο σύστημα κάποια υλοποίηση του προτύπου MPI.

Προφανώς, πέρα από το προαναφερόμενο λογισμικό, υπάρχει και εξάρτηση από πλήθος άλλων προγραμμάτων και εργαλείων που οι περισσότερες σύγχρονες εκδόσεις των Linux προσφέρουν προεγκατεστημένες. Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία εγκατάστασης μπορεί

να αποκλίνει από σύστημα σε σύστημα, ανάλογα με τις εκάστοτε ρυθμίσεις. Η διαδικασία εγκατάστασης του PALM, σε κέντρα παράλληλης επεξεργασίας δε διαφέρει ιδιαίτερα σε σύγκριση με την εγκατάσταση σε κάποιον προσωπικό υπολογιστή και συντονίζεται και αυτή από τα προαναφερθέντα αρχεία που διατίθενται μαζί με τον πηγαίο κώδικα. Όταν η προσομοιώσεις ελέγχονται μέσω δικτύου, είναι απαραίτητη η χρήση επιπλέον λογισμικού που φροντίζει για τον συντονισμό τους και τη μεταφορά των απαραίτητων δεδομένων.

## Κεφάλαιο 3

# Η προσομοίωση

## Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίον έγινε η υλοποίηση των προσομοιώσεων στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Γίνεται αναφορά στις φυσικές και αριθμητικές παραμέτρους, καθώς και τους λόγους για τους οποίους αυτές επελέγησαν. Οι επιλογές που έγιναν, σχετίζονταν προφανώς με τη φυσικές παραμέτρους του προβλήματος, αλλά σημαντικό ρόλο έπαιξαν και οι περιορισμοί του PALM και του υπολογιστή που πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις. Τόσο ο υπολογιστικός φόρτος της παραγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων, όσο και οι τεράστιες ανάγκες σε αποθηκευτικό χώρο, περιέπλεξαν ιδιαίτερα την τεχνική υλοποίηση των προσομοιώσεων.

Οι προσομοιώσεις που έγιναν είχαν δύο βασικούς στόχους. Ο πρώτος στόχος ήταν η αξιολόγηση των δυνατοτήτων του PALM ως λογισμικού για την επίλυση ρευστοδυναμικών προβλημάτων, δεδομένου ότι αποτελεί ένα σχετικά πρόσφατο λογισμικό, με συγκριτικά περιορισμένες αναφορές στη βιβλιογραφία. Η αξιολόγηση αυτή, γίνεται μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης ενός πειράματος που πραγματοποιήθηκε στην αεροσφήρα του ΕΜΠ [16], από το οποίο συλέγησαν δεδομένα για το πεδίο πιέσεων και ταχυτήτων για τη ροή γύρω από έναν κύβο. Ο δεύτερος στόχος, ήταν η αποτύπωση των χαρακτηριστικών της 3-Διάστατης ροής γύρω από τον κύβο, αλλά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για δύο διαφορετικά προφίλ εισόδου: ένα ατμοσφαιρικό προφίλ χαμηλής και ένα προφίλ υψηλής διάτμησης.

### 3.1 Τα πειράματα

Οι παράμετροι της αριθμητικής προσομοίωσης που έγινε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, προέρχονται κατά βάση από σειρά πειραμάτων που έγιναν πρόσφατα στην αεροσήραγγα του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής του ΕΜΠ. Στα πειράματα αυτά, μελετήθηκε η κατανομή πιέσεων, καθώς και το πεδίο ροής γύρω από ένα πρότυπο κτήριο, κυβικού σχήματος. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε το πεδίο πιέσεων στην επιφάνεια της πρότυπης κατασκευής, καθώς και το πεδίο ροής σε διάφορες περιοχές γύρω από τον κύβο. Έκτος από τις συνιστώσες της ταχύτητας, μετρήθηκαν και κάποια από τα χαρακτηριστικά της τύρβης. Οι παράμετροι του πειράματος ήταν: η μορφή του οριακού στρώματος, ο προσανατολισμός της πρότυπης κατασκευής ως προς την κύρια κατεύθυνση της ροής, καθώς και η ύπαρξη ή όχι οπής σε κάποιες εκ των επιφανειών της.

Από τις 3 βασικές παραμέτρους του πειράματος, μόνο η μία προσομοιώθηκε υπολογιστικά και αυτή ήταν η μορφή του προφίλ εισόδου. Η μοντελοποίηση των δύο υπολοίπων παραμέτρων δεν έγινε για τεχνικούς και πρακτικούς λόγους. Η μελέτη της επίδρασης της κλίσης του κύβου δεν έγινε λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στην υλοποίηση της τοπογραφίας και των οριακών συνθηκών στο PALM. Η μελέτη της επίδρασης της οπής δεν έγινε λόγω της αδυναμίας της υλοποίησης της 3-Διάστατης γεωμετρίας, γενικότερα και της οπής ειδικότερα, στον κύβο.

Στο πείραμα και κατά συνέπεια στην αριθμητική προσομοίωση, έγινε μελέτη των χαρακτηριστικών του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος, σε ουδέτερες συνθήκες ατμόσφαιρας, για δύο διαφορετικές μορφές του προφίλ εισόδου. Τα δύο προφίλ χαρακτηρίζονταν από τύρβη, η οποία στο πείραμα παρήχθη με την παρεμβολή φυσικών εμποδίων στην αεροσήραγγα, ανάντι του κύβου και με γενέτειρα τυχαίων αριθμών στην αριθμητική προσομοίωση. Στην πρώτη περίπτωση (πείραμα) τα χαρακτηριστικά της τύρβης μετρήθηκαν με μεθοδολογία, η οποία χαρακτηρίζεται από επαρκή ακρίβεια, ευαισθησία και δειγματοληπτική ικανότητα για τέτοιου είδους μετρήσεις. Στη δεύτερη περίπτωση (προσομοίωση), τα αποτελέσματα ήταν διαθέσιμα (κατόπιν επεξεργασίας με κώδικα λογισμικού) στα αρχεία εξόδου.

Για τη δυνατότητα εξαγωγής χρήσιμων συμπερασμάτων για τα πραγματικά χαρακτηριστικά της προσομοιούμενης ατμοσφαιρικής ροής, οι διαστάσεις του κτηρίου έπρεπε να υπολογιστούν με βάση τη θεωρία της ομοιότητας, ώστε ο λόγος των γεωμετρικών διαστάσεων ως προς τα σημαντικότερα μετεωρολογικά μήκη της ροής να ανταποκρίνεται κατά το δυνατόν στην πραγματικότητα. Εκτός αυτών, τόσο η μορφή των προφίλ εισόδου, όσο και η κατακόρυφη κατανομή της τύρβης θα πρέπει να παράγονται με τρόπο τέτοιο, ώστε να προσομοιώνουν με πιστότητα τα ρευστοδυναμικά χαρακτηριστικά του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος.

Η ανάλυση και η εφαρμογή των νόμων της ομοιότητας δεν έγινε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, αλλά μόνο κατά το πείραμα. Σκοπός της διπλωματικής ήταν να αναπαραχθούν με τη μέγιστη δυνατή πιστότητα οι συνθήκες του πειράματος, το οποίο καθόρισε τη μορφή των στοιχείων της τοπογραφίας, της μορφής του προφίλ εισόδου και κάποια εκ των χαρακτηριστικών της τύρβης. Για τεχνικούς λόγους δεν έγινε πιστή αντιγραφή των παραμέτρων του πειράματος, κάτι που θα απαιτούσε εκτεταμένη χρήση υπορουτίνων κατασκευασμένων από το χρήστη, κάτι που δε συνίσταται αν ο τελευταίος δεν έχει πολύ καλή γνώση της δομής και της λειτουργίας του PALM.

### 3.2 Η υλοποίηση στο PALM

Το στήσιμο της αριθμητικής προσομοίωσης στο PALM, απαίτησε βασικά την κατασκευή των αρχείων εισόδου που καθορίζουν τις φυσικές παραμέτρους της ροής, τη μορφή της τοπογραφίας και τα δεδομένα εξόδου. Η προσομοίωση αυτή καθεαυτή, πραγματοποιήθηκε

Διάσταση	Σύμβολο	Τιμή(m)
Μήκος Υ.Χ.	$L$	2.4
Πλάτος Υ.Χ.	$D$	0.8
Ύψος Υ.Χ.	$H$	0.8
Ακμή κύβου	$d$	0.11
Ανάντι θέση κύβου	$x_{cube}$	0.6

Πίνακας 3.1: Βασικές διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου.

σε προσωπικό υπολογιστή με μοναδικό επεξεργαστή τεσσάρων υπολογιστικών πυρήνων και διήρκησε από λίγες ώρες, έως λίγες δεκάδες ώρες, ανάλογα με τις παραμέτρους. Τα αποτελέσματα παρήχθησαν σε δυαδική (αλλά όχι συμπιεσμένη) μορφή (NetCDF). Λόγω περιορισμών του υλικού, τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν από σειρά προσομοιώσεων, καθεμιά εκ των οποίων μεταβαλλόταν ως προς τη διάρκεια και ως προς τα αποτελέσματα εξόδου. Τα υπολογιστικά δεδομένα, για να εξαχθούν τα απαιτούμενα συμπεράσματα υπέστησαν εκτεταμένη επεξεργασία από κώδικα, ο οποίος που κατασκευάστηκε από τον συγγραφέα. Η επεξεργασία αυτή έγινε με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Python, με εκτεταμένη χρήση των βιβλιοθηκών της, καθώς και με το πρόγραμμα οπτικοποίησης και επεξεργασίας δεδομένων Paraview.

Οι περιορισμοί του υλικού επιδρούν όχι μόνο στην υλοποίηση των προσομοιώσεων από το PALM, αλλά και στην μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Προφανώς, ο σχετικά μεγάλος χρόνος των προσομοιώσεων και οι μεγάλες αποθηκευτικές ανάγκες εισήγαγαν δυσκολίες, αλλά το μεγαλύτερο πρόβλημα ήταν η μετέπειτα ανάλυση των δεδομένων εξόδου, δεδομένης κατά κύριο λόγο της μικρής μνήμης τυχαίας προσπέλασης του υπολογιστή (RAM), σε σύγκριση με το μέγεθος των μεταβλητών στα αρχεία του δίσκου, καθώς και οι υψηλές απαιτήσεις σε προγραμματισμό. Είναι δεδομένο, ότι τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να προσεγγίζουν τις πραγματικές συνθήκες του πειράματος με μεγαλύτερη πιστότητα και λιγότερο προγραμματιστικό φόρτο αν εισάγονταν στο βασικό πρόγραμμα επιπλέον κώδικας από το χρήστη. Επιπλέον, η επεξεργασία θα ήταν απλούστερη αν γινόταν πιο εκτεταμένη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού.

### 3.2.1 Παράμετροι εισόδου

Ο ορισμός όλων των παραμέτρων εισόδου γίνεται με μοναδικό αρχείο. Σε αυτό αναγράφονται οι λεπτομέρειες που σχετίζονται με τις ρευστοδυναμικές εξισώσεις, την πλεγματοποίηση, την διακριτοποίηση και τις αριθμητικές μεθόδους. Επιπλέον, εισάγονται οι οριακές συνθήκες, καθώς και παράμετροι που ρυθμίζουν το ποια αποτελέσματα θα εξαχθούν και με ποιον τρόπο. Στο επόμενο της ενότητας θα διατυπωθούν οι παράμετροι του αρχείου αυτού και θα αναλυθεί η επίδραση και η σημασία της καθεμιάς.

#### 3.2.1.1 Πλεγματοποίηση και αριθμητικές παράμετροι

Κατά τις προσομοιώσεις, έγινε επίλυση της εξίσωσης ορμής και συνέχειας για ασυμπίεστο, συνεχτικό ρευστό (1.17). Η πυκνότητα θεωρήθηκε σταθερή και μεταφορά θερμότητας δεν υπήρχε. Επιπλέον, η μεταβολή του υψομέτρου ήταν μηδαμινή, οπότε η υδροστατική πίεση παρέμεινε σταθερή σε όλο το χωρίο. Το μοντέλο τύρβης περιελάμβανε την επίλυση μίας επιπλέον διαφορικής εξίσωσης για τη τυρβώδη κινητική ενέργεια (1.22) και παραμετροποιούσε τις υποπλεγματικές τυρβώδεις διαταραχές, τον όρο πίεσης, καθώς και

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή
Μέγεθος πλέγματος(κελιά)	$(n_x \times n_y \times n_z)$	$3 * 10^6$
Αριθμός κελιών κατά $x$	$n_x$	300
Αριθμός κελιών κατά $y$	$n_y$	100
Αριθμός κελιών κατά $z$	$n_z$	100
Διάσταση κελιού κατά $x$	$dx$	0.008m
Διάσταση κελιού κατά $y$	$dy$	0.008m
Διάσταση κελιού κατά $z$	$dz$	0.008m

Πίνακας 3.2: Τα βασικότερα χαρακτηριστικά του αριθμητικού πλέγματος. Τα χαρακτηριστικά ήταν κοινά και για τις δύο προσομοιώσεις.

Παράμετρος	Τιμή
Μέθοδος χρονικής ολοκλήρωσης	Runge-Kutta 3ης τάξης
Μέθοδος επίλυσης εξίσωσης <i>Poisson</i>	Multigrid method
Αριθμός επαναλήψεων <i>Gauss – Seidel</i>	4
Συνολική διάρκεια προσομοίωσης	18s

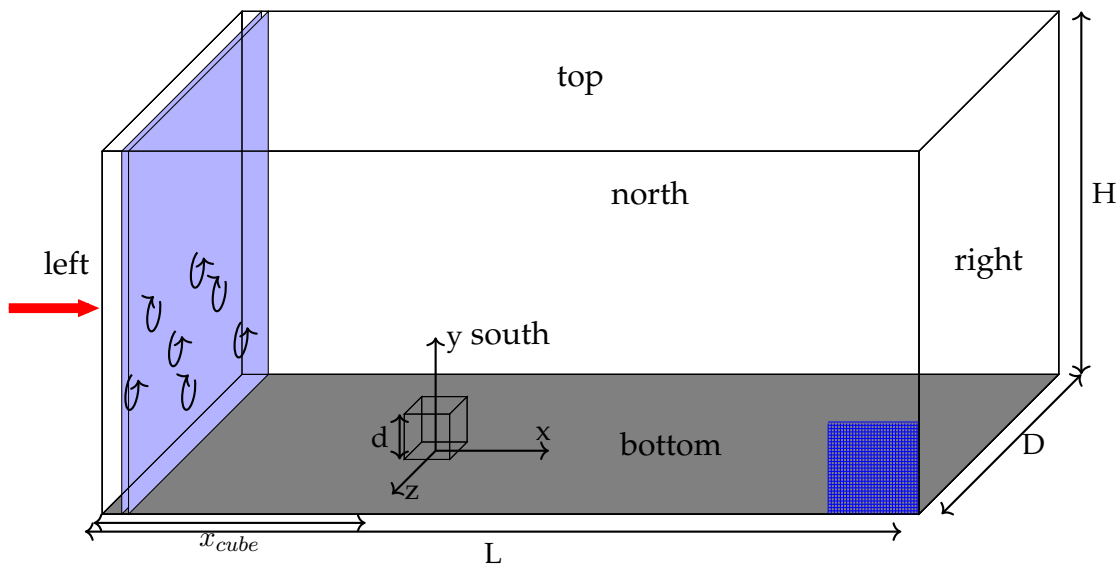
Πίνακας 3.3: Οι βασικότερες αριθμητικές παράμετροι της προσομοίωσης.

το ρυθμό καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας με βάση την παραδοχή της τυρβώδους συνεκτικότητας(1.21,1.23,1.24).

Το υπολογιστικό χωρίο(σχήμα 3.1) χαρακτηρίζεται από επίπεδο έδαφος και εμπεριέχει ένα μοναδικό στοιχείο τοπογραφίας (κύβος μικρών διαστάσεων). Όλα τα πλευρικά όρια, καθώς και το άνω όριο αποτελούνται 100% από ρευστό. Οι διαστάσεις του χωρίου έπρεπε να είναι αρκετά μεγάλες, ώστε η λύση να είναι ανεξάρτητη αυτών. Στα περισσότερα όρια επιβάλλονται συνθήκες *Neumann*, οπότε αυτά θα πρέπει να βρίσκονται αρκετά μακριά από τα σημεία που υπάρχει σημαντική μεταβολή των υπολογιζομένων μεγεθών. Επιπλέον, έπρεπε η τοπογραφία να βρίσκεται μακριά από το προφίλ εισόδου, ώστε οι μαθηματικά οριζόμενες τυρβώδεις διαταραχές να φιλτράρονται από τις εξισώσεις ορμής. Από την άλλη πλευρά, υπερβολικά μεγάλες διαστάσεις παρατείνουν κατά πολύ τον απαιτούμενο χρόνο προσομοίωσης, χωρίς να προσθέτουν ακρίβεια στη λύση.

Το υπολογιστικό χωρίο έχει διαστάσεις  $(2.4 \times 0.8 \times 0.8[m])$ . Ο κύβος έχει διαστάσεις  $(0.11 \times 0.11 \times 0.11[m])$ . Ο κύβος βρίσκεται 0.6m ανάντι της εισόδου και στο κέντρο του Υ.Χ. κατά τη  $z$  κατεύθυνση. Ο λόγος των διαστάσεων του κύβου ως προς τις διαστάσεις όλου του Υ.Χ. έχει ληφθεί τέτοιος ώστε η λύση να είναι ανεξάρτητη αυτών. Οι διαταραχές της τύρβης εισάγονται μεταξύ του 6ου και του 8ου υπολογιστικού κελιού  $(0.048 - 0.064m)$ (πίνακας 3.2).

Η κατασκευή του πλέγματος είναι η βασική παράμετρος που καθορίζει την ταχύτητα/ακρίβεια της προσομοίωσης. Επιπλέον στις μη μόνιμες προσομοιώσεις LES καθορίζει τη συχνότητα αποκοπής και το λόγο της υπολογιζόμενης και της υποπλεγματικής τυρβώδους κινητικής ενέργειας(1.2,1.1). Προφανώς, πυκνότερα πλέγματα δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα, αυξάνοντας εκθετικά τον απαιτούμενο χρόνο προσομοίωσης. Ωστόσο, το ελάχιστο όριο των διαστάσεων των υπολογιστικών κελιών τέθηκε από την οριακή συνθήκη εδάφους και την εφαρμογή της MOST, η οποία απαιτεί το μικρότερο υπολογιστικό κελί να έχει διαστάσεις τουλάχιστον διπλάσιες από το μήκος τραχύτητας. Τα



Σχήμα 3.1: Τα γενικά χαρακτηριστικά του υπολογιστικού χωρίου (Υ.Χ.). Αποτελείται από ένα ορθογώνια παραλληλεπίπεδο το οποίο εμπεριέχει σε απόσταση ένα κυβικό στοιχείο τοπογραφίας πλευράς. Τα δύο πλευρικά όρια είναι περιοδικά, στο κάτω όριο είναι το έδαφος, Το προφίλ εισόδου είναι το αριστερό και η έξοδος στα δεξιά. Στο κάτω και δεξιά μέρος της εικόνας φαίνονται οι διαστάσεις ενός υπολογιστικού κελιού

Παράμετρος	Τιμή
Πραγματικός χρόνος προσομοίωσης	48.14 h
Αριθμός χρονικών βημάτων	25009
Χρονικό βήμα(μεταβλητό)	0.5-0.7 ms

Πίνακας 3.4: Στατιστικά στοιχεία της προσομοίωσης για είσοδο προφίλ χαμηλής διάτμησης.

χαρακτηριστικά του πλέγματος φαίνονται στον πίνακα 3.2. Τα στοιχεία για την τη διάρκεια της προσομοίωσης (διαφορετική για κάθε προφίλ εισόδου) φαίνονται στους πίνακες 3.3,3.6.

### 3.2.1.2 Οριακές συνθήκες

Η προσομοίωση του πειράματος γίνεται με τη χρήση μη περιοδικών οριακών συνθηκών στα πλευρικά όρια. Στην είσοδο επιβάλλεται στρωτό προφίλ ταχυτήτων (συνθήκη **Dirichlet**) και οι διαταραχές της τύρβης επιβάλλονται με γενέτειρα τυχαίων αριθμών λίγα κελιά κατάντι. Οι διαταραχές παραμένον καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στην έξοδο επιβάλλεται συνθήκη ακτινοβολίας(**radiation**). Για τα βαθμωτά μεγέθη τόσο στην είσοδο, όσο και στην έξοδο επιβάλλεται συνθήκη **Neumann**. Στο έδαφος επιβάλλεται συνθήκη **MOST** (συνθήκη μη ολίσθησης και υπολογισμός κλίσης ταχύτητας με βάση τη θεωρία ομοιότητας **Monin-Obukhov**), με ταυτόχρονο ορισμό τραχύτητας (σχέση 1.43). Στο άνω όριο επιβάλλεται συνθήκη **Neumann** για τα βαθμωτά μεγέθη και τις ταχύτητες. Στα πλευρικά όρια, για όλα τα μεγέθη, επιβάλλονται περιοδικές οριακές συνθήκες (σχέση 1.41). Όλες οι οριακές συνθήκες φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 3.7.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν δύο βασικές προσομοιώσεις οι οποίες διέφεραν ως προς τη μορφή του προφίλ εισόδου τόσο όσο αναφορά στη μέση, όσο

Παράμετρος	Τιμή
Πραγματικός χρόνος προσομοίωσης	48.64 h
Αριθμός χρονικών βημάτων	25462
Χρονικό βήμα(μεταβλητό)	0.5-0.7 ms

Πίνακας 3.5: Στατιστικά στοιχεία της προσομοίωσης για είσοδο προφίλ υψηλής διάτμησης.

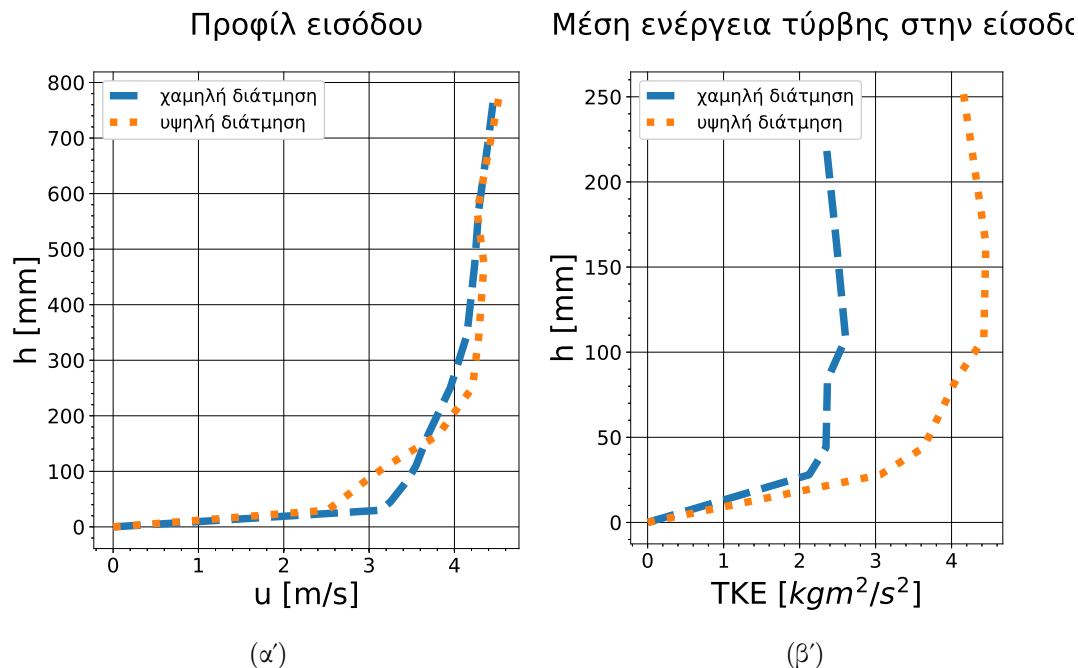
Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή
Πυκνότητα	$\rho$	$10^{-3}kg/m^3$
Ύψος τραχύτητας εδάφους	$z_0$	0.003m
Κινηματική συνεκτικότητα αέρα	$\nu$	$1.56 * 10^{-5}m^2/s$

Πίνακας 3.6: Οι βασικότερες φυσικές παράμετροι της προσομοίωσης. Οι παράμετροι ήταν κοινές και για τις δύο προσομοιώσεις.

Μεταβλητή	Όριο	Είδος συνθήκης	Υλοποίηση
u,v	bottom	MOST	-
	top	Neumann	$u_i(k = nz) = u_i(k = nz + 1)$
	left-right	Dirichlet -Radiation	-
	north-south	Περιοδική	$u_i(:, -1, :) = u_i(:, ny, :)$ $u_i(:, ny + 1, :) = u_i(:, 0, :)$
w	bottom	Dirichlet	$w = 0$
	top	Dirichlet	$w = 0$
	left-right	Dirichlet /Radiation	-
	north-south	Περιοδική	$w(:, -1, :) = w(:, ny, :)$ $w(:, ny + 1, :) = w(:, 0, :)$
e	bottom	Neumann	$e(k = 0) = e(k = 1)$
	top	Neumann	$e(k = nz) = e(k = nz + 1)$
	left-right	Neumann	$e(i = 0) = e(i = 1)$ $e(i = nx) = e(i = nx + 1)$
	north-south	Περιοδική	$e(:, -1, :) = e(:, ny, :)$ $e(:, ny + 1, :) = e(:, 0, :)$
p	bottom	Neumann	$p(k = 0) = p(k = 1)$
	top	Dirichlet	$p = 0$
	left-right	Neumann	$p(i = 0) = p(i = 1)$ $p(i = nx) = p(i = nx + 1)$
	north-south	Περιοδική	$p(:, -1, :) = p(:, ny, :)$ $p(:, ny + 1, :) = p(:, 0, :)$

Πίνακας 3.7: Σύνοψη των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.





Σχήμα 3.2: Η μορφή των προφίλ εισόδου για τις προσομοιώσεις χαμηλής και υψηλής διάτμησης εδάφους. Αριστερά: Το μέσο, στρωτό προφίλ εισόδου για την αξονική ταχύτητα που επιβλήθηκε στην επιφάνεια εισόδου. Προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις. Δεξιά: Η τιμή της μέσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας λίγα χιλιοστά κατάντι της επιφάνειας εισόδου των τυρβωδών διαταραχών. Η τιμή της ελήφθη κατόπιν δοκιμών, με κριτήριο την εγγύτητα των τελικών αποτελεσμάτων στα πειραματικά δεδομένα.

και στη διακύμανσή της. Όλες οι άλλες παράμετροι παρέμειναν σταθερές. Η μορφή των δύο μέσων προφίλ εισόδου καθορίστηκε από το πείραμα (σχήμα 3.2). Παρότι υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για την ένταση της τύρβης συναρτήσει του ύψους, η γενέτειρα τυχαίων αριθμών του PALM δεν προσφέρει τη δυνατότητα ρύθμισης της κατανομής των τυχαίων διαταραχών. Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει μόνο μία παράμετρο που σχετίζεται με την ένταση της τύρβης. Η παράμετρος αυτή, (όπως και η τιμή τραχύτητας) του εδάφους ορίστηκαν κατόπιν δοκιμών, με κριτήριο την εγγύτητα των αποτελεσμάτων στα πειραματικά δεδομένα. Ακριβέστερη περιγραφή της τύρβης ή της κατανομής της τραχύτητας του εδάφους απαιτεί επαύξηση του κώδικα του PALM.

### 3.3 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων

Οι προσομοιώσεις LES δίνουν χρονικά μεταβαλλόμενα αποτελέσματα και για δε λόγους σύγκλισης ο λόγος μίας χαρακτηριστικής διάστασης του πλέγματος ( $\Delta$ ) ως προς το χρονικό βήμα ( $dt$ ) μπορεί να λαμβάνει μία μέγιστη τιμή (στις προσομοιώσεις λήφθηκε αυτόματα από το PALM). Αυτό συνεπάγεται ότι η εξαγωγή δεδομένων για κάθε χρονική στιγμή σε κάθε σημείο του πλέγματος παράγει αποτελέσματα κάποιων εκατοντάδων GB. Έτσι ακολουθήθηκε διαφορετική στρατηγική που χρησιμοποιεί τη δυνατότητα του PALM να εξαγάγει συνδυασμό μέσων και των αντίστοιχων χρονικά μεταβαλλόμενων αποτελεσμάτων, σε οποιαδήποτε υποπεριοχή του συνολικού πλέγματος. Σύμφωνα με αυτά ακολουθήθηκε η εξής στρατηγική:

- Για τη διερεύνηση και την απεικόνιση των γενικών, 3-Διάστατων γενικών χαρακτηριστικών της ροής, εξήχθη μόνο η μέση τιμή της ταχύτητας και της πίεσης σε όλο το πλέγμα.

Επιφάνεια	Στοιχείο αναφοράς	Θέση	Απόσταση	Τιμές $\frac{d_i}{d}$
A	Εμπρός επιφάνεια	Ανάντι	$d_f$	0.2, 0.5, 0.75, 1, 1.5
B	Άξονας $y$	Ανάντι Κατάντι	$d_{cf}$ $d_{cr}$	0.2, 0.4 0.2, 0.4
C	Εμπρός επιφάνεια	Κατάντι	$d_r$	0.2, 0.5, 0.75, 1, 1.5
D	Εμπρός επιφάνεια	Αριστερά	$d_l$	0.25, 0.5, 0.75, 1.5

Πίνακας 3.8: Θέσεις γύρω από τον κύβο που σχεδιάστηκαν τα κατακόρυφα προφίλ σύγκρισης των αποτελεσμάτων (υψηλή-χαμηλή διάτμηση, πειραματικά-αριθμητικά αποτελέσματα).

- Στις επιφάνειες στις οποίες υπήρχαν πειραματικά δεδομένα (με τα οποία επρόκειτο να γίνει άμεση σύγκριση) ελήφθη η χρονική μεταβολή της ταχύτητας. Αυτό γιατί επιτρέπει τον υπολογισμό των διπλών γινομένων των τυρβωδών διαταραχών (το PALM δεν μπορεί να εξάγει ούτε τις διαταραχές, ούτε τα γινόμενά τους). Η διακύμανση των διπλών γινομένων χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της μέσης τιμής τους, η οποία διατίθεται στα πειραματικά δεδομένα.

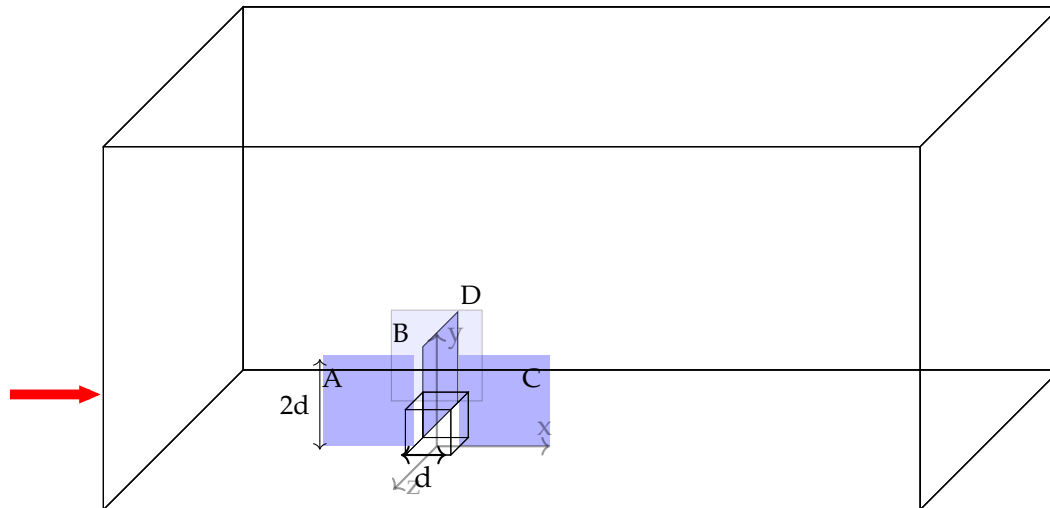
Σκοπός των αποτελεσμάτων είναι από τη μία να δοθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής ροής, γύρω από την πρότυπη κατασκευή και από την άλλη να γίνει η ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω της σύγκρισής τους με τα πειραματικά δεδομένα, όπου αυτά ήταν διαθέσιμα. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι τα εξής:

- 3-Διάστατες και 2-Διάστατες απεικονίσεις του πεδίου ταχυτήτων, του πεδίου στροβιλότητας και των τυρβωδών διαταραχών, με βασικό σκοπό την ποιοτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.
- 1-Διάστατα προφίλ με τη διακύμανση των πειραματικά μετρημένων ποσοτήτων, για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων. Στα προφίλ αυτά μπορεί να γίνει σύγκριση των πειραματικών με τα αριθμητικά δεδομένα.

### 3.3.1 Ποσοτικά αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση της ρεαλιστικότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων την αριθμητικής προσομοίωσης με αυτά του πειράματος. Πειραματικά δεδομένα από το πείραμα υπάρχουν σε περιορισμένα χωρία ανάντι, κατάντι, πάνω και αριστερά(κοιτώντας προς την κατεύθυνση της μέσης ροής)(εικόνα 3.3). Τα πειραματικά δεδομένα προκύπτουν από μετρήσεις του πεδίου ταχύτητας( $u, v, w$ ), με θερμό νήμα εντός της αεροσήραγγας. Κατόπιν επεξεργασίας, τόσο στο πείραμα, όσο και στην αριθμητική προσομοίωση υπολογίστηκαν με βάση τη διακύμανση των συνιστωσών της ταχύτητας και τα γινόμενα διπλών διαταραχών ( $u_{ij}$ ), από τα οποία προκύπτουν οι τάσεις Reynolds. Το τελευταίο δίνει τη δυνατότητα της αξιολόγησης εκτός από το μέσο πεδίο ροής και κάποιον από τα χαρακτηριστικά της τύρβης.

Οι θέσεις στις οποίες υπολογίστηκαν μέσω μέσων προφίλ η ταχύτητα και οι διαταραχές φαίνονται στο σχήμα 3.4 και στον πίνακα 3.8



Σχήμα 3.3: Οι θέσεις που έγινε η σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι θέσεις βρίσκονται σε τέσσερα επίπεδα (A,B,C,D) με σχεδόν ορθογώνιο σχήμα και διάσταση διπλάσια της ακμής του πρότυπου κύβου. Τα 3 επίπεδα είναι παράλληλα προς την ροή κύρια κατεύθυνση της ροής (A,B,C) και το ένα κάθετο προς αυτήν D.

### 3.3.2 Ποιοτικά αποτελέσματα

Δεδομένης της συνθετότητας των φαινομένων που εμπλέκονται σε μία μη μόνιμη τυρβώδη ροή, με πληθώρα στερεών ορίων, η εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων για τη γενικότερη φαινομενολογία και χαρακτηριστικά όπως η τύρβη και οι δυνάμεις στα στρώματα υψηλής διάτμησης είναι δύσκολο. Η δυσκολία αυξάνεται όταν η εξοικείωση με το υπολογιστικό εργαλείο (πρόγραμμα του PALM) δεν είναι μεγάλη. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία, η γενική περιγραφή του πεδίου ταχυτήτων και της συμπεριφοράς της τύρβης γίνεται καθαρά ποιοτικά με τη βοήθεια του προγράμματος Paraview.

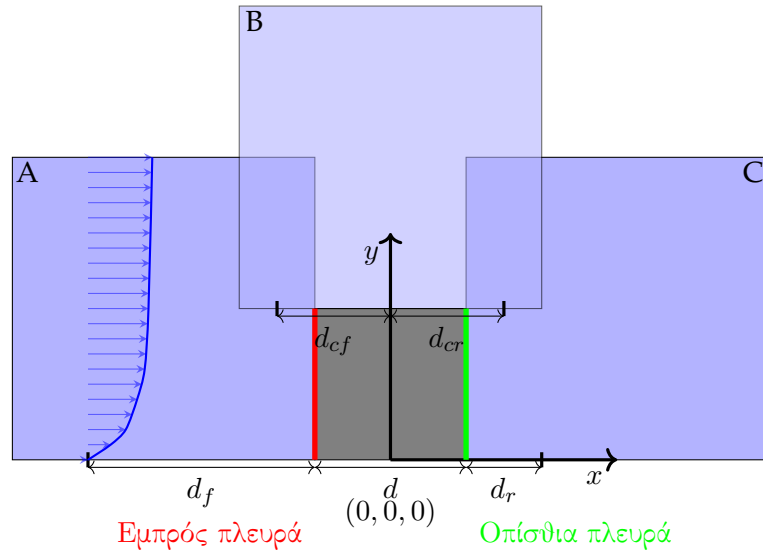
Το Paraview χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση του πεδίου ροής και των διατμητικών τάσεων με διάφορες τεχνικές. Σκοπός ήταν:

- Να γίνουν αντιληπτά τα βασικά χαρακτηριστικά και φαινομενολογία της ροής.
- Να περιγραφούν οι βασικές δομές του πεδίου ταχυτήτων, κατά βάση στον ομόρου του του κύβου.
- Να γίνει μια βασική παρατήρηση των χαρακτηριστικών της τύρβης.
- Να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο ροών με διαφορετικά προφίλ εισόδου.

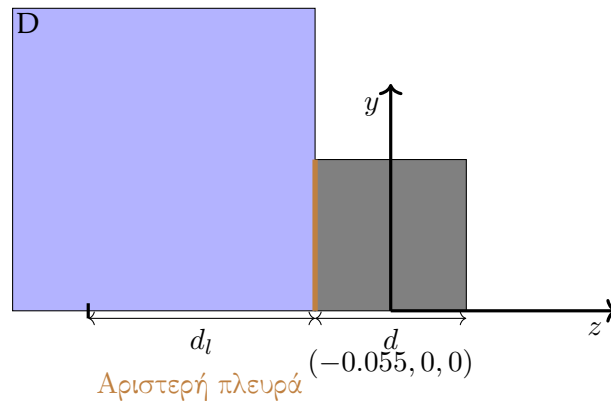
Τόσο τα ποιοτικά όσο και τα ποσοτικά αποτελέσματα βασίστηκαν σε πληθώρα προγραμμάτων τα οποία κατασκευάστηκαν από το συγγραφέα, κάνοντας χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python και της πληθώρας των μαθηματικών, προγραμματιστικών και γραφικών βιβλιοθηκών λογισμικού.

## 3.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο τρόπος και η συλλογιστική με την οποία έγινε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ξεκινώντας από τα αρχεία εξόδου του PALM και καταλήγοντας στα τελικά αποτελέσματα. Ο μεγάλος όγκος των δεδομένων του προγράμματος



(α') Επιφάνειες A, B, C. Οι επιφάνειες είναι παράλληλες προς τη ροή.



(β') Επιφάνεια D. Η επιφάνεια είναι κάθετη προς τη ροή.

Σχήμα 3.4: Τα προφίλ υπολογίστηκαν ανά τακτές αποστάσεις για κάθε χωρίο υπολογισμού. Ως σημεία αναφοράς ορίστηκαν η εμπρός επιφάνεια του κύβου (κόκκινο χρώμα), η πίσω επιφάνεια του κύβου (πράσινο χρώμα), η αριστερή επιφάνεια του κύβου και ο άξονας  $y$ . Τα προφίλ μπορούσαν να βρίσκονται ανάντι (f), κατάντι (r) ή αριστερά (l) σε αποστάσεις  $d_i$  από από τις επιφάνειες αναφοράς.

συνεπάγεται την ανάγκη χρήσης μίας συνεπτυγμένης, εύκολα προσβάσιμης και διαχειρίσιμης μορφής αρχείων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της βιβλιοθήκης NetCDF. Κατά συνέπεια η εξαγωγή των αποτελεσμάτων απαιτούσε από τη μία την ανάγνωση των αρχείων NetCDF και από την άλλη την επεξεργασία τους και αυτό επιτεύχθηκε με δύο τρόπους:

- Με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python, η οποία διαθέτει έτοιμες βιβλιοθήκες για την ανάγνωση, τροποποίηση και δημιουργία αρχείων NetCDF. Επιπλέον, είναι μία γλώσσα ευρύτατα διαδεδομένη στην επιστημονική κοινότητα και διαθέτει πληθώρα συναρτήσεων για την μαθηματική επεξεργασία και την οπτικοποίηση δεδομένων.
- Με τη χρήση του προγράμματος Paraview, το οποίο αποτελεί ένα εξελιγμένο λογισμικό επεξεργασίας και οπτικοποίησης επιστημονικών δεδομένων. Επιπλέον, υποστηρίζει τη μορφή αρχείων NetCDF.

Και τα δύο προαναφερθέντα λογισμικά διατίθενται δωρεάν. Η Python χρησιμοποιήθηκε για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και για την κατασκευή των προφίλ, για τη σύγκριση των αριθμητικών με τα πειραματικά δεδομένα. Το Paraview χρησιμοποιήθηκε για τις 2-Διάστατες και 3-Διάστατες απεικονήσεις των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η Python χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή των δεδομένων του πειράματος σε μορφή NetCDF, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση με τα αριθμητικά δεδομένα. Η χρήση του φλοιού Bash των Linux, βοήθησε στο συγχρονισμό και την αυτοματοποίηση των απαιτούμενων διεργασιών.

Ο τρόπος με τον οποία έγινε η εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων φαίνεται στο σχήμα 3.5. Δεδομένου ότι οι προσομοιώσεις που έχουν επαρκή ακρίβεια απαιτούν κάποιες δεκάδες ώρες, για τον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων εισόδου, πραγματοποιούνται αρχικά δοκιμές με αραιότερα πλέγματα ή/και για μικρά χρονικά διαστήματα. Οι πρωταρχικές αυτές προσομοιώσεις διαρκούν από κάποια λεπτά μέχρι κάποιες ώρες. Όταν κρίνεται ότι όλες οι παράμετροι είναι σωστές, επαρκείς και δεν επιδέχονται βελτίωση μπορεί να φτιαχτεί το αρχείο παραμέτρων για την τελική προσομοίωση η οποία διαρκεί περίπου 2 μέρες εκτελούμενη σε τετραπύρηνο επεξεργαστή. Ο έλεγχος, τόσο για την αξιολόγηση, όσο και για την τελική διαμόρφωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιεί από λίγο έως πολύ τον ίδιο κώδικα που αποτελείται κυρίως από αρχεία Python (.py) και εκτελέσιμα αρχεία, εντολές λειτουργικού συστήματος του φλοιού bash (.sh). Και οι δύο κατηγορίες προγραμμάτων είναι παραμετροποιημένες, ώστε να μπορούν να διαχειρίζονται αυτόματα τα αποτελέσματα εξόδου.

Αναλυτικότερα και σύμφωνα με το σχήμα 3.5. Για τα προκαταρκτικά τρεξίματα:

**Φυσικές παράμετροι:** Οι φυσικές παράμετροι του προβλήματος καθορίζουν βασικές παραμέτρους όσον αφορά στις οριακές συνθήκες, τα δεδομένα εξόδου κ.α.. Με βάση αυτές επιλέγεται μια λογική αρχικοποίηση των παραμέτρων του αρχείου εισόδου.

**Αρχείο εισόδου:** Σε αυτό το στάδιο που γίνεται πειραματισμός ως προς την καταλληλότητα των αριθμητικών παραμέτρων, φροντίζεται ώστε τα πλέγματα να είναι σχετικά αραιά ή/και οι χρόνοι προσομοίωσης μικροί. Στη συνέχεια, όσο υπάρχει σύγκλιση στις επιθυμητές τιμές αυτό σταματά να υφίσταται.

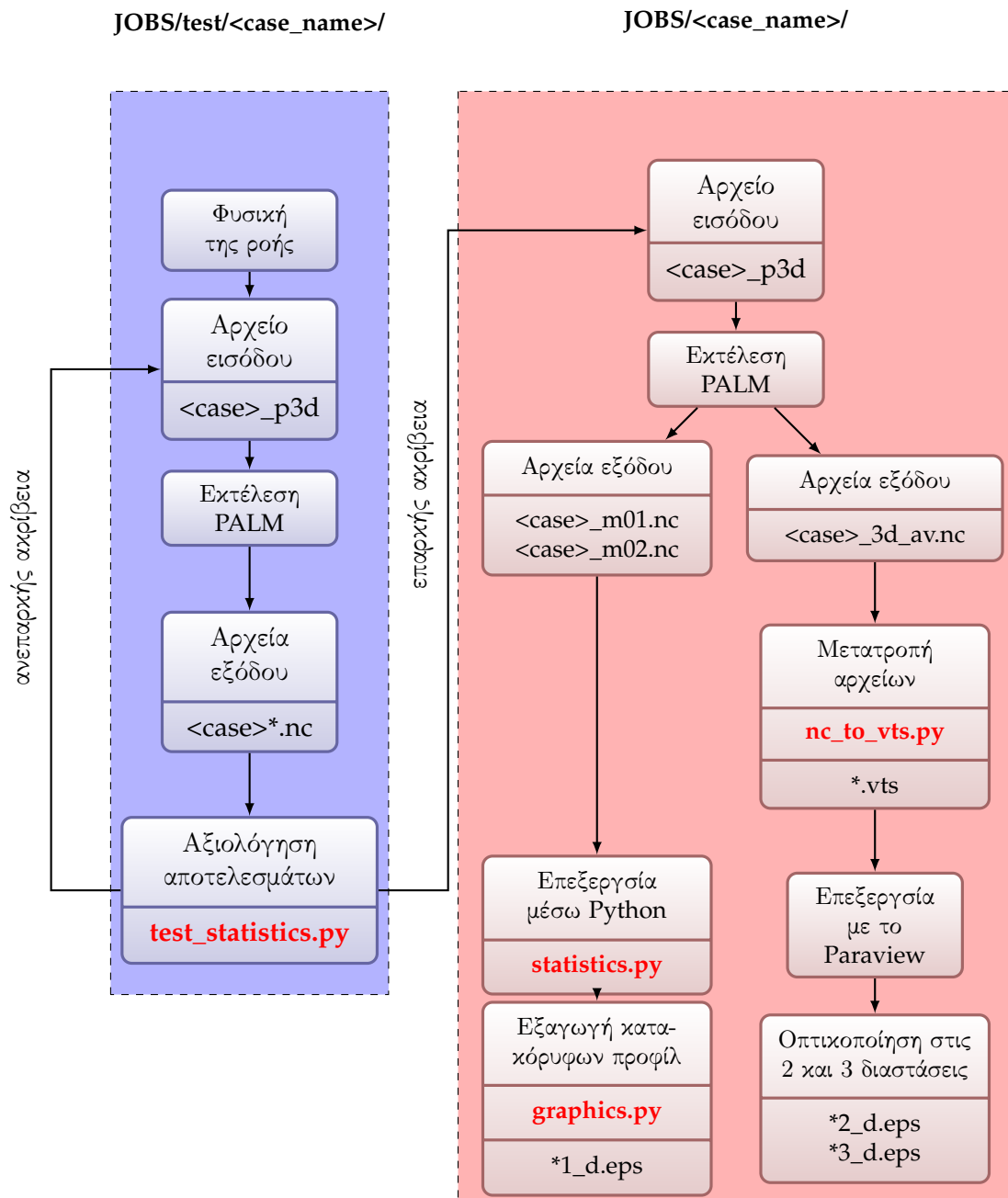
**Εκτέλεση PALM:** Οι προσομοιώσεις διαρκούν από λίγα λεπτά έως αρκετές ώρες.

**Αρχεία εξόδου:** Τα αρχεία είναι σε μορφή NetCDF και δεν είναι μεγαλύτερα από κάποιες εκατοντάδες MB έως κάποιες δεκάδες GB. Οι κώδικες που τα διαχειρίζονται μπορούν να είναι απλοί καθώς το σχετικά μικρό μέγεθος των αρχείων δεν επιβαρύνει ιδιαίτερα τον υπολογιστή.

**Αξιολόγηση:** Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται με δύο βασικούς τρόπους: μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα και μέσω της οπτικοποίησης με το Paraview. Το πρώτο είναι ακριβέστερο, αλλά το δεύτερο γρηγορότερο και βοηθά στη γρήγορη επόπτευση των αποτελεσμάτων. Κρίσιμο σε αυτό το στάδιο είναι όλα τα προγράμματα να είναι παραμετροποιημένα, ώστε η επεξεργασία να μπορεί να γίνεται άμεσα και αυτόματα. Αυτό καθίσταται δυνατό με τη χρήση αρχείων φλοιού, με την καθιέρωση συγκεκριμένου προγραμματιστικού στυλ και με την εκτεταμένη χρήση εντολών συστήματος.

Για τα τελικά τρεξίματα:

**Αρχείο εισόδου:** Το αρχείο εισόδου εμπεριέχει τις παραμέτρους που δίνουν τα αποτελέσματα που προσεγγίζουν με τη μέγιστη ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα με βάση τους περιορισμούς του συστήματος.



Σχήμα 3.5: Η διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων έγινε σε δύο στάδια. Αρχικά, έγινε έλεγχος ευαισθησίας στις διάφορες παραμέτρους εισόδου (μπλε χρώμα). Μετά από πολλές δοκιμές και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για καθεμιά από αυτές προκύπτουν οι βέλτιστες. Για τις παραμέτρους αυτές γίνονται τα τελικά τρεξίματα (κόκκινο χρώμα). Τα αρχεία εξόδου μετά από επεξεργασία δίνουν τα τελικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα εκτελέσιμα αρχεία που εκτελούν τους επιμέρους λειτουργίες.

Εκτέλεση **PALM**: Διαρκεί κάποιες δεκάδες ώρες. Επιλογή λανθασμένων παραμέτρων οδηγεί σε μεγάλη απώλεια χρόνου.

Αρχεία εξόδου: Έχουν μέγεθος από κάποια λίγα GB έως εκατοντάδες GB. Για αυτονόητους λόγους, επιλέχθηκε να εξαχθεί περιορισμένη χρονικά μεταβαλλόμενη πληροφορία και να εξαχθεί η μέση τιμή για το μεγαλύτερο μέρος του υπολογιστικού χωρίου. Έτσι, τα αρχεία εξόδου χωρίστηκαν σε αυτά που εμπεριείχαν μέσες τιμές για κάθε σημείο του υπολογιστικού χωρίου (\*\_3d\_av.nc) και σε αυτά που εμπεριείχαν πληροφορία για κάθε χρονική στιγμή (\*\_m\*.nc). Τα τελευταία χρησιμοποιήθηκαν μόνο για τα επίπεδα που υπήρχε διαθέσιμη πειραματική πληροφορία και αφορούσε σε πολύ μικρό ποσοστό (< 1%) των συνολικών σημείων του πλέγματος. Παρόλα αυτά το μέγεθός τους ανερχόταν σε κάποια GB.

Επεξεργασία: Οι κώδικες της επεξεργασίας ήταν παρόμοιοι με αυτούς της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, με τη διαφορά ότι δε δόθηκε έμφαση στην αυτοματοποίηση, αλλά στην αποδοτική διαχείριση της μνήμης και του επεξεργαστή. Αν και οι κοινές γραμμές κώδικα ήταν πολλές και οι βασικές λειτουργίες κοινές, στην περίπτωση των τελικών προσομοιώσεων τα προγράμματα επεξεργασίας έδιναν έμφαση μόνο στο κομμάτι των δεδομένων που θα χρησιμοποιούταν στο τελικό κείμενο. Η βασική διαφορά ήταν, ωστόσο πως για να είναι η διαδικασία επεξεργασίας των μέσων αποτελεσμάτων στο Paraview ευκολότερη, τα αρχεία NetCDF μετατράπηκαν σε αρχεία .vts.

Οπτικοποίηση: Τα αποτελέσματα είτε αφορούσαν σε 2 και 3-Διάστατες απεικονίσεις στο Paraview, είτε μονοδιάστατα προφίλ από την βιβλιοθήκη γραφικών της Python, έγινε σε μορφή .eps. Τα αρχεία αυτά είναι διανυσματικά (vector format) και μπορούν να εισάγονται στο ΕΤΕΧστο οποίο έγινε η συγγραφή αυτού του κειμένου, χωρίς απώλεια πληροφορίας. Ο χειρισμός του Paraview έγινε μέσω του γραφικού περιβάλλοντος, ενώ κάθε άλλου είδους επεξεργασία έγινε με τη βοήθεια κώδικα του χρήστη και με την εκτεταμένη χρήση βιβλιοθηκών λογισμικού.

### 3.5 Ανάλυση Ανεξαρτησίας Αριθμητικών Παραμέτρων

Η διακριτοποίηση ενός συνεχούς προβλήματος για την αριθμητική επίλυσή του μέσω Ηλεκτρονικού Υπολογιστή εισάγει απώλεια πληροφορίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επικύρωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων είναι η ανάλυση ανεξαρτησίας ως προς τις αριθμητικές παραμέτρους. Προφανώς, υπάρχουν πλήθος επιλογών ως προς τις παραμέτρους που θα πρέπει να οριστούν ως προς τις εξισώσεις, τις οριακές συνθήκες, το σχήμα διακριτοποίησης, τις συνθήκες σύγκλισης κ.α.. Η διαδικασία επιλογής των καταλληλότερων βασίζεται (και πραγματοποιήθηκε και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας) τόσο σε θεωρητική ανάλυση, όσο και σε πειραματισμό. Στην ενότητα αυτή θα επιμείνουμε στην ανάλυση δύο από τις σημαντικότερους παραμέτρους: στην πλεγματοποίηση και το συνολικό χρόνο προσομοίωσης.

#### 3.5.1 Πλεγματοποίηση

Το μέγεθος και μορφή του πλέγματος είναι από τις βασικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τη διάρκεια της προσομοίωσης και την επιλογή άλλων παραμέτρων όπως το σχήμα διακριτοποίησης ή η μέθοδος χρονικής ολοκλήρωσης. Προφανώς, πυκνότερα πλέγματα οδηγούν σε ακριβέστερα αποτελέσματα, καθώς μειώνουν το σφάλμα αποκοπής κατά τη διακριτοποίηση. Από την άλλη βέβαια, η ευστάθεια του αριθμητικού σχήματος, για ένα μη μόνιμο πρόβλημα, απαιτεί τη μεταβολή

Πυκν. πλέ/τος	$\Delta$	Μέγεθος πλέ/τος	Χρον. βήματα	Πραγμ. χρόνος
Χαμηλή	12.5 mm	786432	15143	11.21 h
Μέτρια	10 mm	1536000	19398	20.27 h
Υψηλή	8 mm	3000000	25462	48.64 h

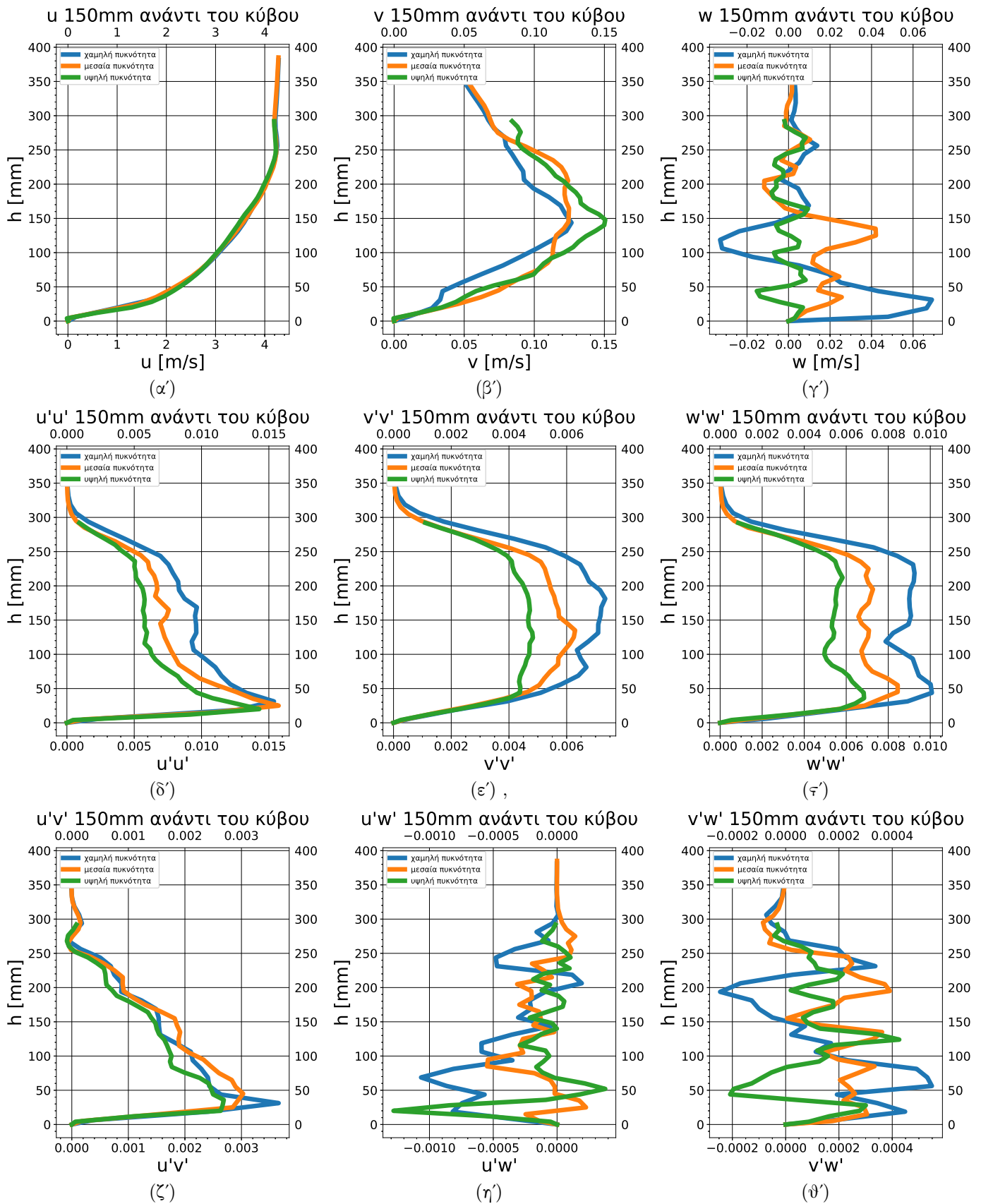
Πίνακας 3.9: Στοιχεία για τις προσομοιώσεις με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος. Όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης παρέμεναν σταθερή εκτός από την ακμή του κελιού. Ο λόγος του αριθμού των κελιών για αυξανόμενη πυκνότητα πλέγματος είναι 1.25 και ορίζεται από το χρήστη. Παρόμοιο λόγο φαίνεται να ακολουθεί και ο αριθμός των απαιτούμενων χρονικών βημάτων (που ορίζεται αυτόματα από το PALM), ενώ ο χρόνος προσομοίωσης δεν απέχει πολύ με την 4η δύναμη του λόγου ( $1.25^4 = 2.44$ ).

του αριθμητικού βήματος παράλληλα με τη μεταβολή των διαστάσεων των κελιών. Αυτό σημαίνει αύξηση των χρονικών βημάτων για πυκνότερα πλέγματα και προφανώς την ανάγκη επίλυσης μεγαλύτερων αλγεβρικών συστημάτων με αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση του πραγματικού χρόνου προσομοίωσης. Στον πίνακα 3.9 φαίνεται η εκθετική αύξηση του απαιτούμενου συνολικού χρόνου προσομοίωσης για διαδοχική πύκνωση του πλέγματος. Βέβαια, πυκνότερα πλέγματα επιτρέπουν την επιλογή σχημάτων διακριτοποίησης χαμηλότερης τάξης για την επίτευξη ίδιου απόλυτου σφάλματος.

Όσον αφορά στο πλέγμα, σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της λύσης παίζει και η μορφή των κελιών. Στην περίπτωση του PALM έχουμε δομημένο καρτεσιανό πλέγμα, ομοιόμορφο κατά τους οριζόντιους άξονες, το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή απλών αριθμητικών σχημάτων πεπερασμένων διαφορών. Αφού αξιολογήθηκε το πιθανό όφελος από τη χρήση γεωμετρικής προόδου για την πύκνωση του πλέγματος κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση, αποφασίστηκε ότι το χρονικό όφελος από την πύκνωση δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλο, οπότε αποφασίστηκε το πλέγμα να είναι ομοιόμορφο προς όλες τις διευθύνσεις για να εξαιρεθεί μία παράμετρος που θα μπορούσε να επιδρά στο τελικό αποτέλεσμα.

Στην εικόνα 3.6 φαίνεται η σύγκλιση προς τη λύση που θα ήταν ανεξάρτητη του πλέγματος για την αριθμητική προσομοίωση του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος υψηλής διάτμησης. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τη χάραξη κατακόρυφων προφίλ σε ενδεικτικό σημείο αναντι της ροής για όλα τα μεγέθη ενδιαφέροντος (συνιστώσες ταχύτητας, διπλά γινόμενα διαταραχών ταχύτητας). Αν εξαιρεθεί η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας, τα υπόλοιπα μεγέθη δε φαίνεται να έχουν συγκλίνει σε κάποια συγκεκριμένη τιμή, και που θα απαιτούσε την κατασκευή ακόμη πυκνότερου πλέγματος. Κάτι τέτοιο δεν έγινε για δύο λόγους. Ο βασικότερος ήταν η αδυναμία περαιτέρω πύκνωσης με τη δεδομένη οριακή συνθήκη στο έδαφος. Η επιλογή για το κάτω όριο ήταν επιβολή συνθήκης μη ολίσθησης και υπολογισμός της κλίσης της ταχύτητας μέσω MOST, κάτι που απαιτούσε τον ορισμό της τραχύτητας εδάφους. Κατόπιν επαναληπτικών δοκιμών και σύγκρισης με τα πειραματικά αποτελέσματα, οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη τιμή ήταν τα 3mm και απ' ότι προκύπτει, το PALM δεν μπορεί να τρέξει πλέγματα που η διάσταση του κελιού προσεγγίζει το μήκος τραχύτητας. Η τιμή των 8mm ως διάσταση του κελιού έδινε κατά συνέπεια τα καλύτερα αποτελέσματα που θα μπορούσαν να επιτευχθούν. Περαιτέρω μείωση θα απαιτούσε την αλλαγή της τραχύτητας, κάτι που θα οδηγούσε σε δυσμενή αλλαγή της οριακής συνθήκης. Μία λύση στο πρόβλημα της οριακής συνθήκης θα ήταν η επιλογή της συνθήκης Dirichlet, χωρίς την εφαρμογή της θεωρίας ομοιότητας Monin-Obukhov. Αυτό όμως απαιτεί εμπλουτισμό του κύριου κώδικα με επιπλέον υπορουτίνες ορισμένες από το χρήστη, κάτι που απαιτεί σαφώς βαθύτερη γνώση του κώδικα και που διέφευγε από τους σκοπούς της εργασίας.





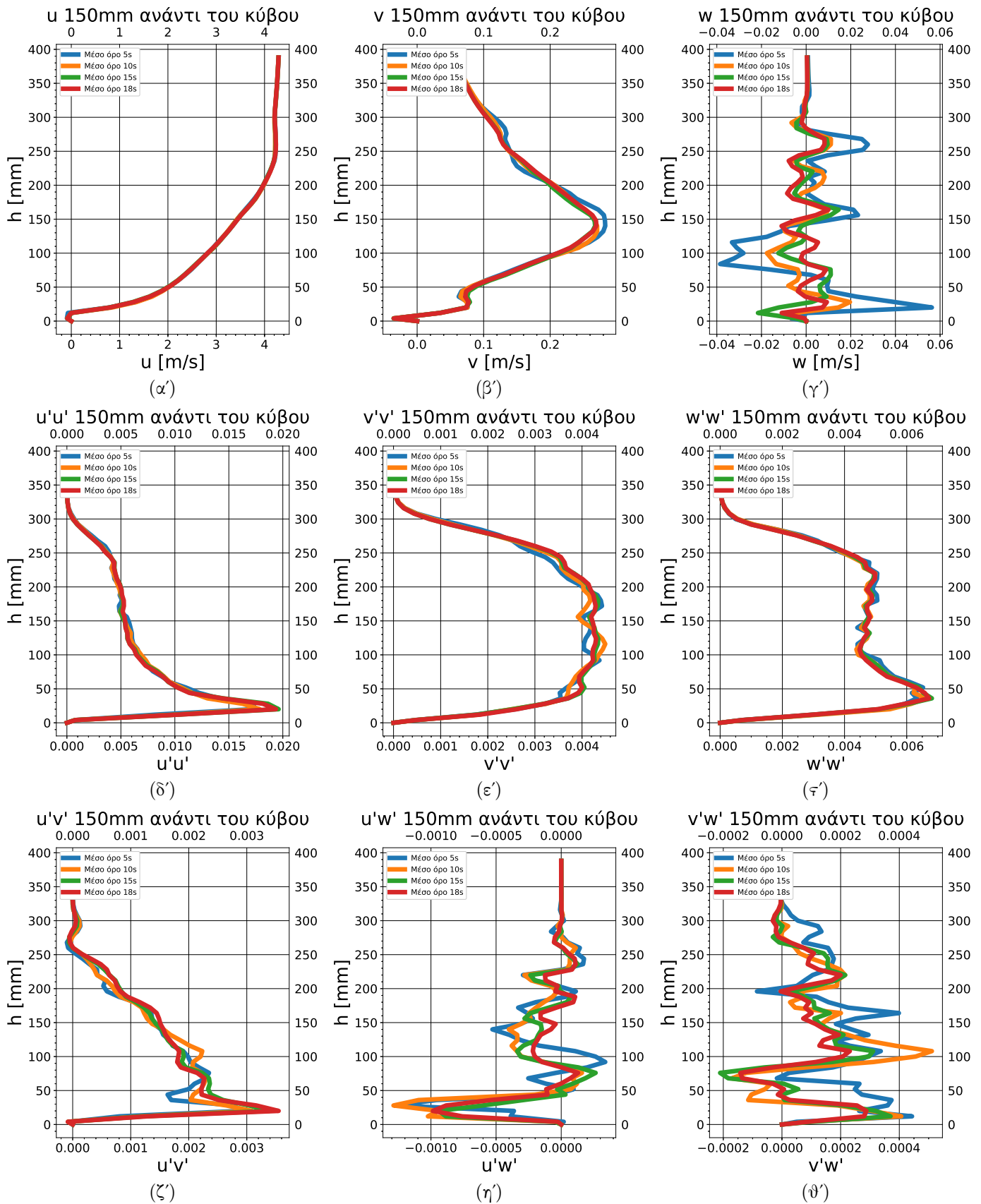
Σχήμα 3.6: Κατακόρυφα προφίλ για όλα τα μεγέθη ενδιαφέροντος 150 mm ανάντι της εμπρός επιφάνειας του κύβου για τρεις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος. Η θέση που έχει επιλεγεί είναι ενδεικτική. Αυτό που φαίνεται είναι ότι δεν έχει επιτευχθεί η πλήρης ανεξαρτησία του πλέγματος.

Ένας επιπλέον λόγος που αποφεύχθηκαν υπερβολικά πυκνά πλέγματα ήταν οι περιορισμοί του υλικού. Εκτός από τον εκθετικά αυξανόμενο χρόνο που απαιτούν τα πυκνά πλέγματα, αυξάνουν τόσο τις αποθηκευτικές ανάγκες, όσο και τη συνθετότητα των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Για ένα πλέγμα τριών εκατομμυρίων κελιών για είκοσι χιλιάδες χρονικά βήματα για κάθε μεταβλητή, απαιτείται η αποθήκευση  $24 \cdot 10^{10}$  Bytes, η 10 GB για αριθμούς κινητής υποδιαστολής μονής ακρίβειας. Αν και η επιλογή καταλλήλων παραμέτρων εισόδου μπορεί να μειώσει τον όγκο των τελικών αποτελεσμάτων, είναι προφανές ότι η πεπερασμένη μνήμη του υπολογιστή μπορεί οδηγεί αναπόφευκτα στην ανάγκη χρήσης εξειδικευμένων προγραμματιστικών τεχνικών ή λογισμικού.

### 3.5.2 Συνολικός χρόνος προσομοίωσης

. Κάθε αριθμητική προσομοίωση ξεκινά με κάποια αρχική συνθήκη για όλες τις μεταβλητές η οποία απέχει περισσότερο ή λιγότερο από την τελική λύση. Σε ένα μόνιμο πρόβλημα, απαιτείται ένας συγκεκριμένος αριθμός χρονικών βημάτων για τη σύγκλιση σε μία λύση που είναι συνάρτηση μόνο της θέσης και όχι του αύξοντα αριθμού του χρονικού βήματος. Κάτι παρόμοιο ισχύει και για ένα μη μόνιμο πρόβλημα. Υπάρχει κάποιος αριθμός χρονικών βημάτων που απαιτείται για τη σύγκλιση της λύσης σε κάποια τιμή που έχει "ξεχάσει" την αρχική συνθήκη. Ωστόσο, η τελική λύση, ούσα συνάρτηση του χρόνου, εξαρτάται και από το χρονικό βήμα. Ακόμα και για μη μόνιμη ροή ωστόσο, υπάρχει μια περιοδικότητα όσον αφορά στη μέση ροή και όλες τις υπολογιζόμενες κλίμακες τις τύρβης (όσες έχουν σημαντικά ποσά ενέργειας). Οι μικρότερες κλίμακες τείνουν να είναι ισότροπες και να χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές συχνότητες και να έχουν μικρά ποσά ενέργειας. Την περιοδικότητα αυτή εκμεταλλευόμαστε για να καταλήξουμε στον κατάλληλο χρόνο προσομοίωσης για την εξασφάλιση της μη μεταβολής των μέσων τιμών που διατίθενται στα πειραματικά δεδομένα. Υπερβολικά μικροί χρόνοι συνεπάγονται στατιστικά ακατάλληλο δείγμα και υπερβολικά μεγάλοι χρόνοι καθυστερούν άσκοπα το αποτέλεσμα.

Στο σχήμα 3.7 φαίνονται τα προφίλ των μεγεθών ενδιαφέροντος σε ενδεικτική θέση, για διαφορετικούς χρόνους συνολικής δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα αφορούν στο πυκνότερο δυνατό πλέγμα για το προφίλ υψηλής διάτμησης. Για μια μη μόνιμη ροή γύρω από έναν κύβο είναι αναμενόμενο να υπάρχουν εντόνως μη μόνιμα φαινόμενα ακόμα και για μία στρωτή ροή, πόσο μάλλον σε μια σαφώς τυρβώδη ροή με αποκολλημένα στρώματα και έντονη ανακυκλοφορία. Πολλές δε διακυμάνσεις δεν χαρακτηρίζονται από σταθερή περιοδικότητα και εξαρτώνται από το στοχαστικό χαρακτήρα της τύρβης. Δεδομένου αυτού, δεν αναμένουμε την πλήρη ταύτιση των λύσεων καθώς ο χρόνος αυξάνεται. Αναμένουμε να δούμε ταλαντώσεις με διαδοχικά μειούμενο και τελικά πρακτικά ασήμαντο πλάτος. Σύμφωνα με αυτά καταλήγουμε πως η τελική τιμή των δεκαοκτώ δευτερολέπτων που επιλέχθηκε είναι επαρκής.



Σχήμα 3.7: Κατακόρυφα προφίλ για όλα τα μεγέθη ενδιαφέροντος 150 mm ανάντι της εμπρός επιφάνειας του κύβου για τέσσερις διαφορετικούς συνολικούς χρόνους δειγματοληψίας. Η θέση που έχει επιλεγεί είναι ενδεικτική. Τα 18 δευτερόλεπτα που έχουν επιλεγεί είναι επαρκή για την εξασφάλιση επαρκούς δείγματος.



## Κεφάλαιο 4

# Αποτελέσματα

## Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή, θα εξαχθούν συμπεράσματα για τα γενικά χαρακτηριστικά της ροής με βάση 3-Διάστατες και 2-Διάστατες απεικονίσεις της ταχύτητας, της στροβιλότητας και των γινομένων των διαταραχών της ταχύτητας. Σκοπός είναι από τη μία να γίνουν αντιληπτά τα γενικά χαρακτηριστικά του πεδίου του πεδίου ταχυτήτων και από την άλλη να αναγνωριστούν και να περιγραφούν κάποιες βασικές δομές γύρω από την πρότυπη κατασκευή. Σε αντίθεση με τα αεροδυναμικά σώματα που είναι σχεδιασμένα να διατηρούν προσκολλημένη τη ροή και να αποφεύγουν τις μεγάλες αλλαγές γεωμετρίας, ειδικά σε περιοχές με αρνητική κλίση πίεσης, στην περίπτωση του κύβου τα πράγματα δεν είναι έτσι. Αν και στερεομετρικά απλό σχήμα, οι έντονες ακμές του κύβου δημιουργούν ένα πολύπλοκο τρισδιάστατο πεδίο ροής με έντονες αποκολλήσεις και ανακυκλοφορία. Ακόμα περισσότερο περιπλέκεται η κατάσταση στον ομόρου, όπου οι τοπικές περιδινήσεις από τις διάφορες ακμές και επιφάνειες ενώνονται. Το φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκο αν αναλογιστεί κανείς την επίδραση του εδάφους και το γεγονός ότι η ροή είναι τυρβώδης ήδη από το προφίλ εισόδου.

### 4.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ροής

Το πεδίο ροής για το ύψος τραχύτητας και την ταχύτητα ανέμου που μελετάμε είναι τυρβώδες ήδη πριν φτάσει στην εμπρός επιφάνεια του κύβου ( $Re_{face} > 10^5$ ), ειδικά αν αναλογιστεί κανείς ότι στην είσοδο επιβάλλονται τεχνητά διαταραχές, οπότε δεν χάνεται απόσταση μέχρι η στρωτή ροή να μεταπέσει στην τύρβη. Το δε φαινόμενο γίνεται σαφώς πιο έντονο κοντά και αρκετά μήχη ακμής κατάντι. Το πεδίο ροής αναμένουμε να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο δεδομένου ότι:

- Στα πλαϊνά του κύβου, έχουμε τρεις επιφάνειες, ανά δύο κάθετες, σε καθεμία από τις οποίες αναπτύσσεται ένα τοπικό οριακό στρώμα. Τα οριακά αυτά στρώματα, τα οποία έχουν έντονη στροβιλότητα προς διαφορετικές διευθύνσεις, συναντώνται απότομα στον ομόρου.
- Οι ακμές πρόσπτωσης στον κύβο χαρακτηρίζονται από έντονες ακμές και κατά συνέπεια πολύ μεγάλες τοπικές κλίσεις πίεσης και ταχύτητας, που οδηγούν σε έντονα αποκολλημένα οριακά στρώματα.
- Η επιφάνεια προσβολής του κύβου είναι κάθετη προς την κύρια κατεύθυνση της ροής. Αυτό δημιουργεί πολύ έντονη ανακυκλοφορία και αύξηση της στατικής πίεσης μπροστά από το στερεό τοίχωμα.
- Ο χαμηλός "λόγος επιμήκους" (αν μπορεί να επιδοθεί ένα τέτοιο χαρακτηριστικό για ένα τόσο μη αεροδυναμικό σχήμα) είναι πολύ μικρό (και ίσο με 1). Αυτό οδηγεί σε

μεγάλες κλίσεις πίεσης πίσω από τον κύβο που δημιουργεί μία πολύ έντονη περιοχή ανακυκλοφορίας.

Για την αποτύπωση των γενικών χαρακτηριστικών της ροής χρησιμοποιούνται τρεις βασικές μέθοδοι:

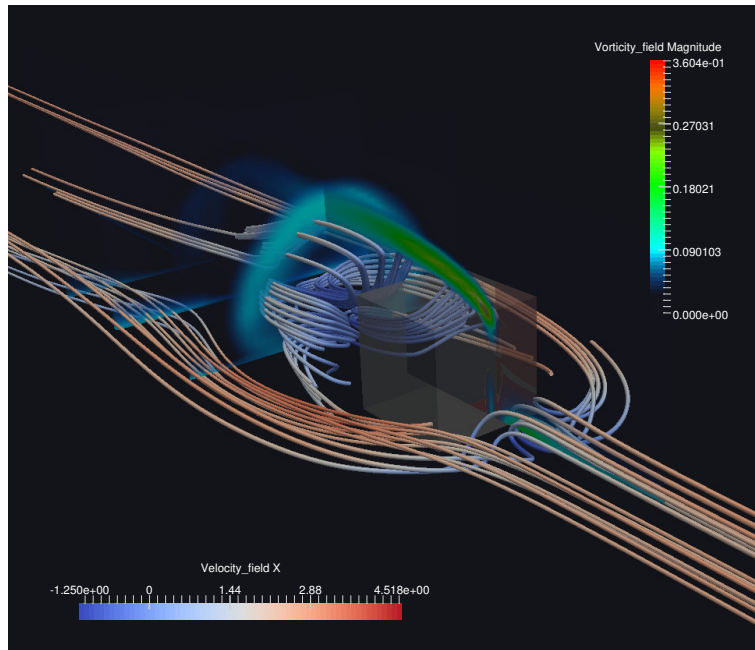
- Οπτικοποίηση των γραμμών ροής (με αντίστοιχο χρωματισμό βάσει της τιμής της ταχύτητας κατά την κύρια κατεύθυνση της ροής) που περνούν από συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου ροής.
- Εισαγωγή επιπέδων με χρωματικούς χάρτες με κάποια συνιστώσα είτε της ταχύτητας, είτε της στροβιλότητας.
- Χρήση βελών για την αποτύπωση της κατεύθυνσης της προβολής τους διανύσματος της ταχύτητας σε κάποιο επίπεδο.

Οι γραμμές ροής είναι αρχικά παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες προς τον κύβο (σχήμα 4.1α'). Στην εμπρός επιφάνεια σχηματίζεται σημείο ανακοπής (σχήμα 4.3) που εκτρέπει την κύρια ροή αρκετά πριν τον κύβο δημιουργώντας ταυτόχρονα μία μικρή περιοχή ανακυκλοφορίας (4.2). Η μεγάλη κλίση πίεσης λόγω της τελευταίας, δημιουργεί έντονη διάτμηση και γεννά λόγω συμμετρίας 2 επιμέρους στροβίλους (4.2α'). Οι δομές αυτές διατηρούν τη στροβιλότητά τους, περιπλέκοντας και συνεισφέροντας στη διαμόρφωση του ομόρου (4.6α', 4.6β').

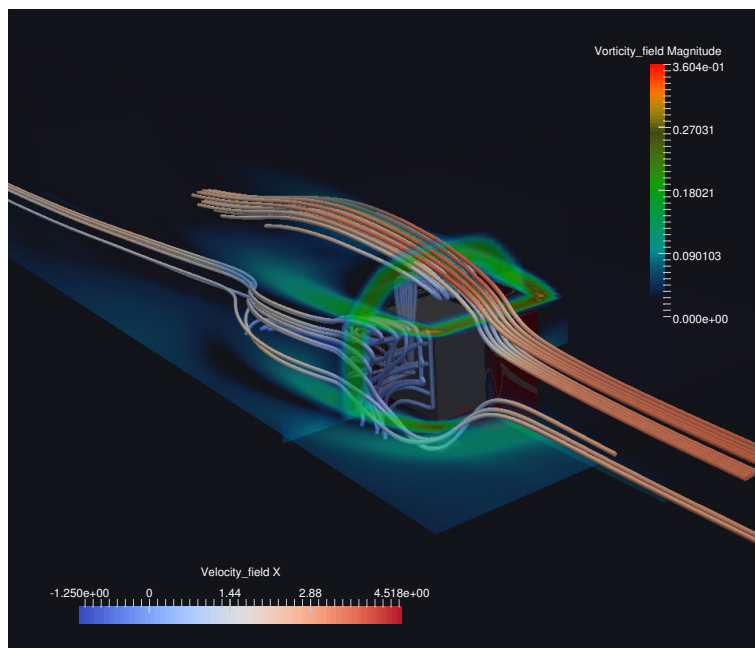
Οι τρεις επιφάνειες του κύβου που είναι παράλληλες στην κατεύθυνση της ροής, αναπτύσσουν ένα αποκολλημένο οριακό στρώμα η καθεμία (4.4), ενώ στις επάνω ακμές που έχουμε την συνένωση τριών επιφανειών οι κλίσεις της ταχύτητας αποκτούν πολύ μεγάλη τιμή (4.4α'). Σε όλες τις περιοχές κοντά στο στερεό η τιμή της στροβιλότητας είναι πολύ μεγάλη λόγω της επίδρασης του στερεού (σχήμα 4.4α').

Ιδιαίτερη μορφή έχει και ο ομόρους. Βασική αιτία ανάπτυξης των χαρακτηριστικών της ροής εκεί είναι η χαμηλή τιμή της στατικής πίεσης λόγω τόσο της απώλειας ολικής πίεσης από την έντονα τυρβώδη ανάμειξη, όσο και από την απότομη διακοπή της ύπαρξης του στερεού ορίου. Η χαμηλή πίεση 'τραβάει' το ρευστό προς τα μέσα δημιουργώντας μία μεγάλη φυσαλίδα ανακυκλοφορίας που κυριαρχείται από έναν πεταλοειδή στρόβιλο (σχήματα 4.5, 4.7).

Πίσω από τη φυσαλίδα της ανακυκλοφορίας η τύρβη αρχίζει να καταστρέφεται γρήγορα. Η πίεση αυξάνεται και οι διάφορες δομές που αναπτύσσονται λόγω της παρουσίας του στερεού χάνουν τη δομή τους και αναμειγνύονται. Ωστόσο, η ροή δεν είναι πλήρως αποκατεστημένη για αρκετά μήκη κύβου πίσω από την κατασκευή (σχήμα 4.6).

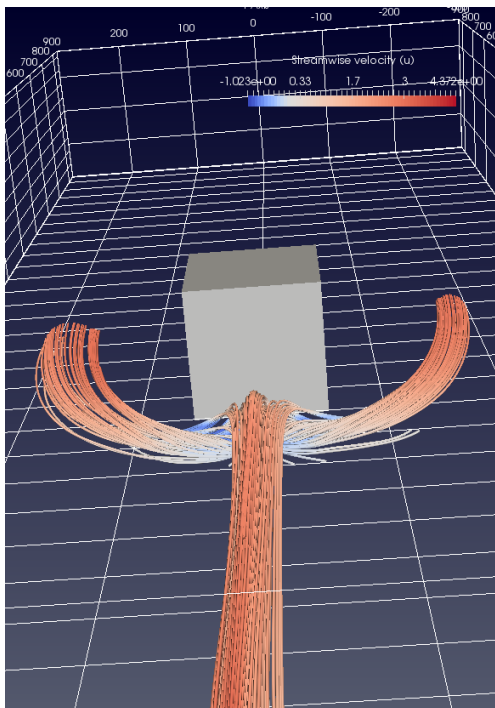


(α') Βασικά χαρακτηριστικά της ροής: περιοχή ανακυκλοφορίας μπροστά από τον κύβο και φουσαλίδα ανακυκλοφορίας από πίσω. Αποκολλημένο οριακό στρώμα στην επάνω επιφάνεια του κύβου.

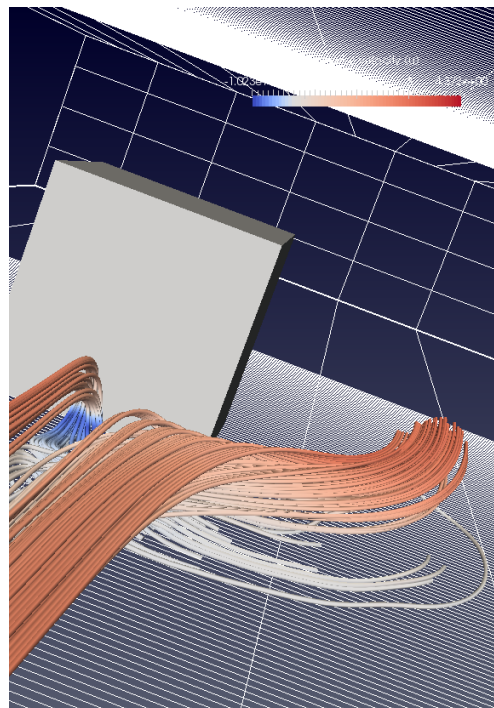


(β') Βασικά χαρακτηριστικά της ροής: Οριακά στρώματα στην επάνω και στις πλευρικές επιφάνειες και έντονη στροβιλότητα κοντά στην στερεή επιφάνεια.

Σχήμα 4.1: Γενική αποτύπωση των χαρακτηριστικών της ροής. Ο χρωματισμός των γραμμών ροής γίνεται με βάση την τιμή της αξονικής ταχύτητας, ενώ αναπαρίσταται και το μέτρο της στροβιλότητας γύρω από τον κύβο με την εισαγωγή επιπέδων με χρωματικό χάρτη. Το μπλε χρώμα στην ταχύτητα υποδηλώνει μικρό μέτρο ή αρνητική τιμή. Οι χρωματικοί χάρτες είναι διάφανοι όπου το μέτρο της στροβιλότητας είναι μικρό. Σε κάθε άλλη περίπτωση το χρώμα ποικίλλει με την ένταση.

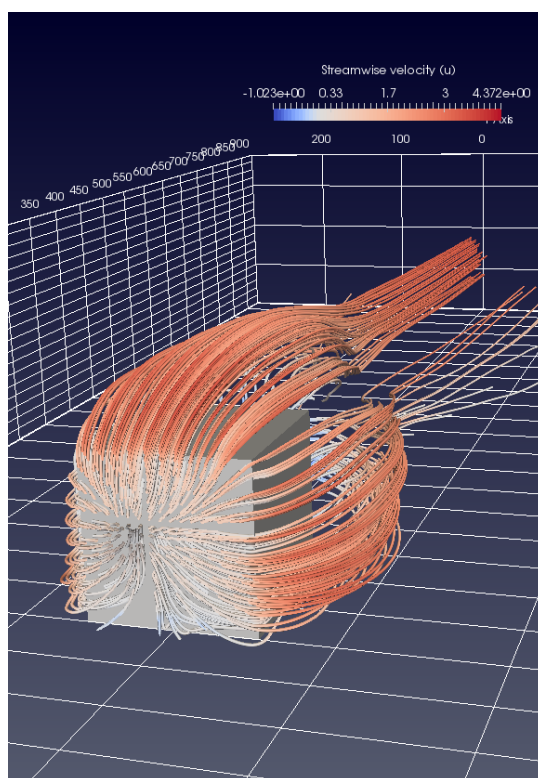


(α') Ανακυκλοφορία μπροστά από τον κύβο και δημιουργία συμμετρικών στροβίλων.



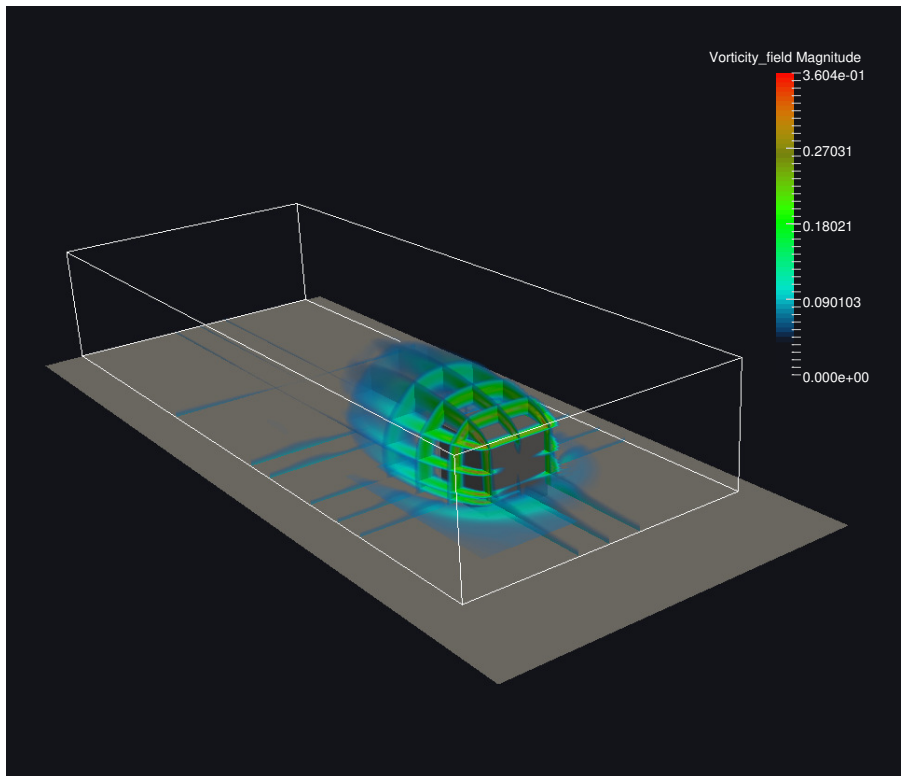
(β') Λεπτομέρεια του στροβιλισμού εμπρός από τον κύβο

Σχήμα 4.2: Λεπτομέρεια συμμετρικών στροβίλων μπροστά από τον κύβο. Η περιοχή της ανακυκλοφορίας φαίνεται με το μπλε χρώμα στις γραμμές ροής.

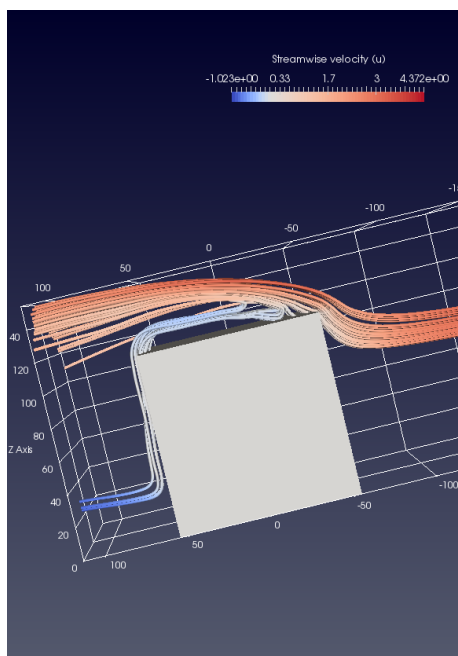


Σχήμα 4.3: Το σημείο ανακοπής.

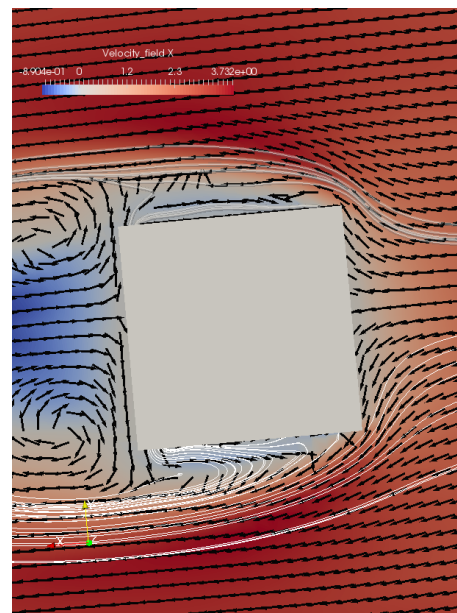




(α') Οριακά στρώματα στον κύβο και το έδαφος. Γίνεται χρήση χρωματικού χάρτη για το μέτρο της στροβιλότητας, όπου χρωματισμός υπάρχει μόνο σε περιοχές που αυτό δεν είναι πολύ μικρό.

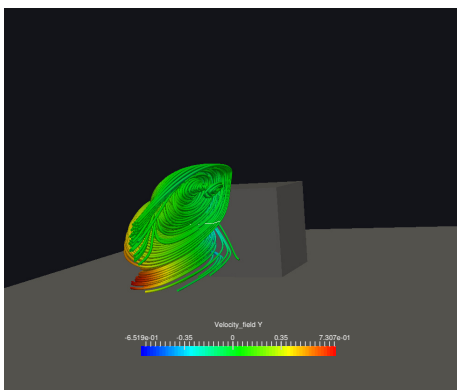


(β') Οριακό στρώμα στην επάνω πλευρά του κύβου. το μπλε χρώμα υποδηλώνει αρνητική τιμή της κύριας συνιστώσας της ταχύτητας.

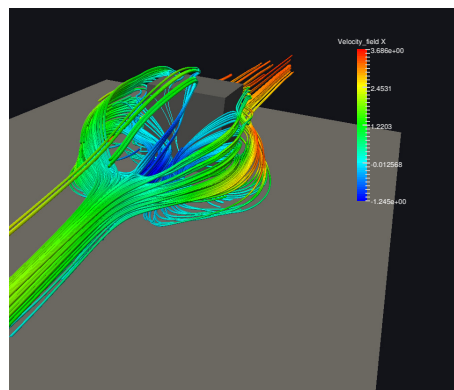


(γ') Οριακά στρώματα στις παράπλευρες επιφάνειες του κύβου. Η ασυμμετρία πηγάζει κατά βάση από το μικρό δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της μέσης ταχύτητας στο συγκεκριμένο σχήμα.

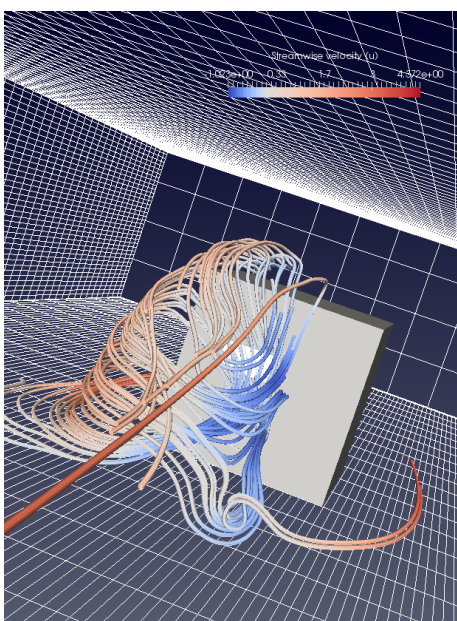
Σχήμα 4.4: Οριακά στρώματα στο έδαφος και στις επιφάνειες του κύβου.



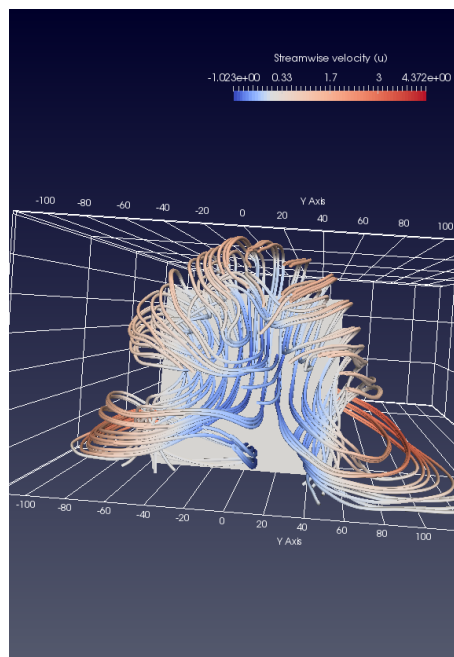
(α') Γραμμές ροής στην φυσαλίδα ανακυκλοφορίας. Έχει απομονωθεί ο μισός πεταλοειδής στρόβιλος. Ο χρωματισμός των γραμμών ροής γίνεται με βάση την εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας.



(β') Γραμμές ροής πεταλοειδούς στρόβιλου στη φυσαλίδα ανακυκλοφορίας. Ο χρωματισμός γίνεται με βάση την κύρια συνιστώσα της ταχύτητας. Κόκκινος χρωματισμός υποδηλώνει μεγάλες τιμές, ενώ μπλε χρωματισμός αρνητική τιμή.

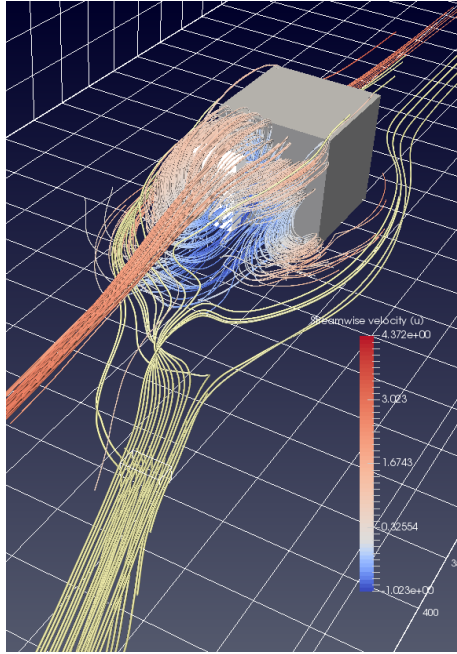


(γ') Άποψη τμήματος του πεταλοειδούς στρόβιλου στον ομόρου του κύβου. Ο χρωματισμός γίνεται με βάση την κύρια συνιστώσα της ταχύτητας

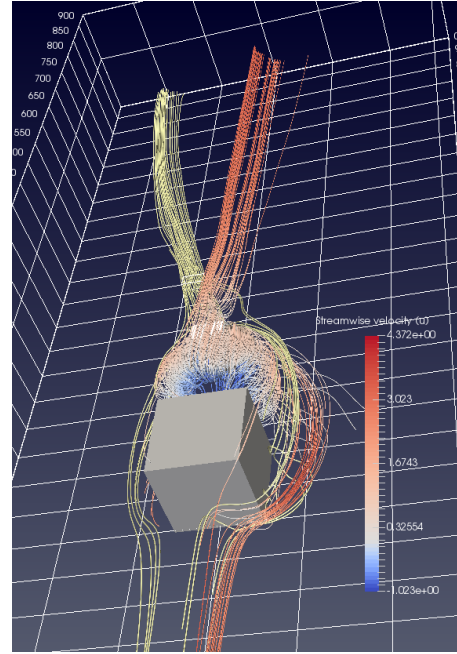


(δ') Άποψη του πεταλοειδούς στρόβιλου στον ομόρου του κύβου. Ο χρωματισμός γίνεται με βάση την κύρια συνιστώσα της ταχύτητας

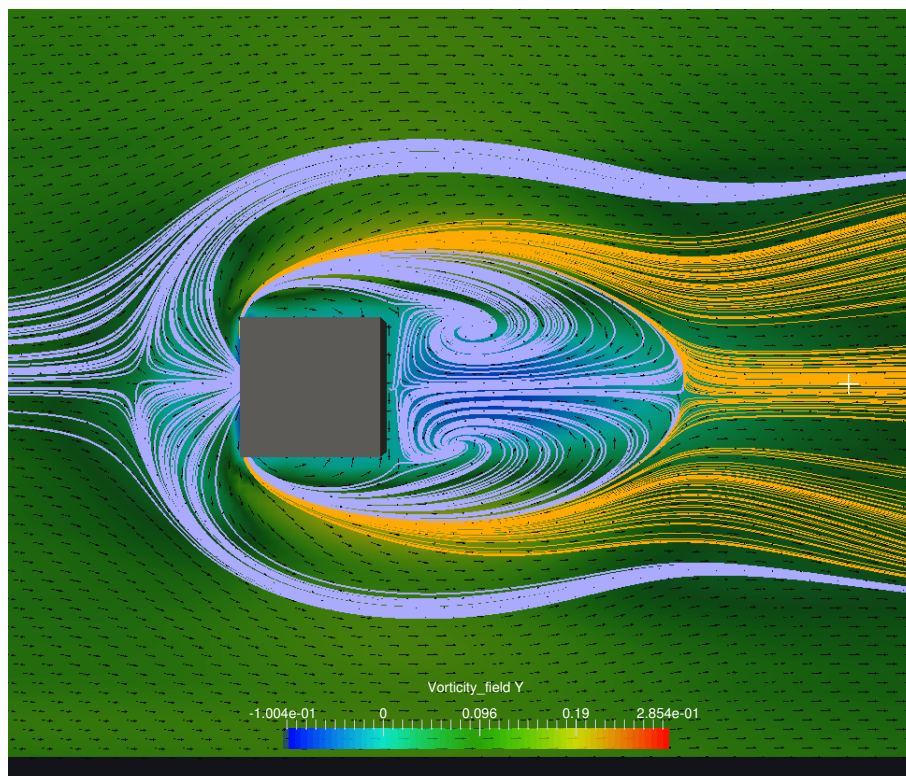
Σχήμα 4.5: Άποψη της πίσω πλευράς του κύβου. Απεικονίζεται ο πεταλοειδής στρόβιλος της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας του ομόρου. Ο χρωματισμός προκύπτει από την κύρια συνιστώσα της ταχύτητας και έχει διαφορετική κλίμακα και χρωματικό χάρτη στα σχήματα επάνω και στα σχήματα κάτω.



(α') Άποψη των χαρακτηριστικών του ομόρου από την πίσω πλευρά του κύβου. Κάποιες από τις γραμμές ροής χρωματίζονται με βάση την τιμή της κύριας συνιστώσας της ταχύτητας (μπλε και κόκκινο χρώμα) και κάποιες έχουν κίτρινο χρώμα.

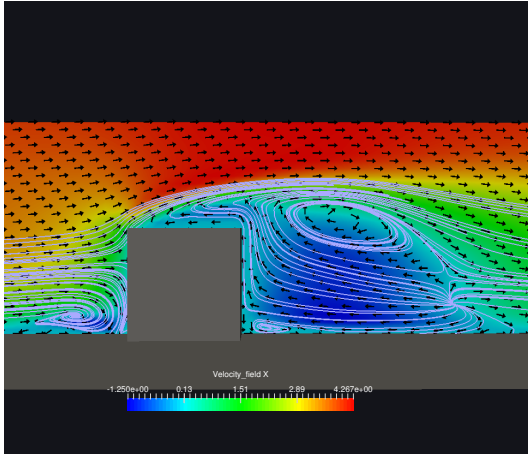


(β') Άποψη των χαρακτηριστικών του ομόρου από την εμπρός πλευρά του κύβου. Κάποιες από τις γραμμές ροής χρωματίζονται με βάση την τιμή της κύριας συνιστώσας της ταχύτητας (μπλε και κόκκινο χρώμα) και κάποιες έχουν κίτρινο χρώμα.

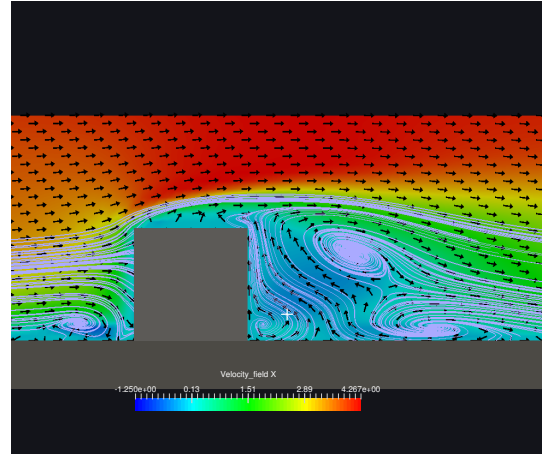


(γ') Χρωματικός χάρτης του πεδίου στροβιλότητας σε άποψη από επάνω. Με λευκό χρώμα φαίνονται γραμμές ροής, ενώ τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της ταχύτητας, προβεβλημένης στο επίπεδο. Ο χάρτης αποτυπώνεται επί του επιπέδου  $xz$  και βρίσκεται στο μέσο περίπου του κύβου κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση

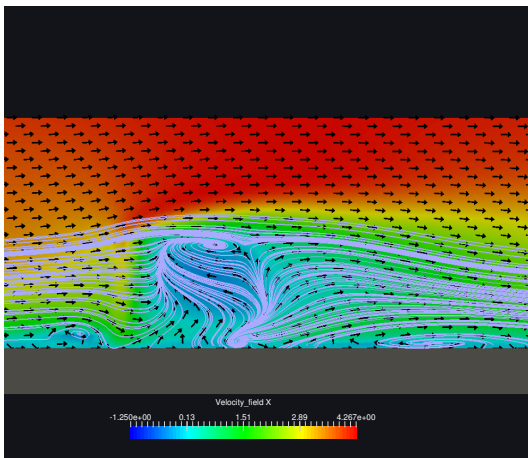
Σχήμα 4.6: Τα βασικά χαρακτηριστικά του ομόρου. Οι συμμετρικοί στρόβιλοι (σχήμα 4.2) συγγλίνουν προς το επίπεδο συμμετρίας (άξονας  $xy$ ) αναμειγνύονται με την έντονης στροβιλότητας ροή πίσω από την φουσαλίδα ανακυκλοφορίας.



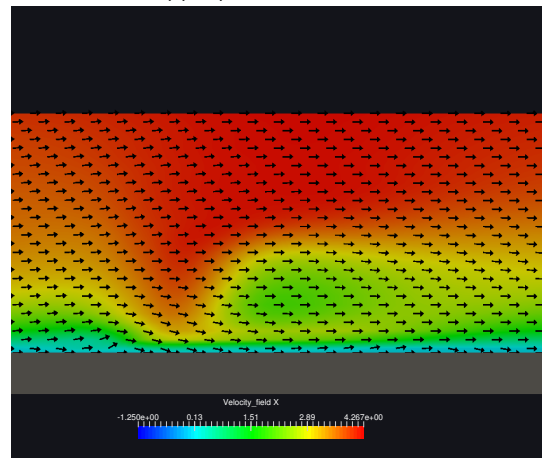
(α') Τομή στο επίπεδο συμμετρίας της τοπικής ροής γύρω από τον κύβο. Φαίνεται η ανακυκλοφορία στο οριακό στρώμα της επάνω επιφάνειας του κύβου και της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας.



(β') Τομή κοντά στην δεξιά πλευρά του κύβου. Χαρακτηριστική είναι η εμφάνιση της περιδίνησης στο κάτω δεξί μέρος της εικόνας, η οποία προκύπτει από εκτροπή των συμμετρικών στροβίλων (σχήμα 4.2) προς το επίπεδο συμμετρίας.



(γ') Τομή στο οριακό στρώμα της δεξιάς πλευράς του κύβου. Φαίνεται η ιδιαίτερη πολυπλοκότητα στην τοπική ροή, όπου συναντώνται τα οριακά στρώματα του εδάφους και της πλευρικής επιφάνειας. Αυτό γεννά στροβιλισμούς προς πολλαπλές κατευθύνσεις.



(δ') Τομή έξω από το οριακό στρώμα, αρκετά αριστερά δεξιά από τον κύβο. Αν και η ροή δεν είναι ομοιόμορφη, είναι απαλλαγμένη από την έντονη στροβιλότητα κοντά στα στερεά όρια. φαίνεται η επιτάχυνσή της καθώς περνάει δίπλα και πάνω από τον κύβο.

Σχήμα 4.7: Διαδοχικές τομές στο επίπεδο  $xy$  και σε επίπεδα παράλληλα σε σταδιακά αυξανόμενη απόσταση.

## 4.2 Η τύρβη

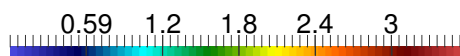
Στο σημείο αυτό θα γίνει μία απλή και γρήγορη απεικόνιση των χαρακτηριστικών της τύρβης μέσω της απεικόνισης των διπλών γινομένων των τυρβωδών διαταραχών του προσομοιούμενου πεδίου. Με βάση αυτά μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την τυρβώδη κινητική ενέργεια, για το ρυθμό γέννησης και καταστροφής της και για την (αν)ισοτροπία της τύρβης. Επιπλέον, παρατίθενται τα αποτελέσματα και για τις δύο προσομοιώσεις, κάτι που δίνει τη δυνατότητα της απευθείας σύγκρισης. Προφανώς για την εξαγωγή ασφαλών και μετρήσιμων αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η εκτενής στατιστική και μαθηματική της ανάλυση των αντίστοιχων χρονοσειρών.



(α') Χαμηλή διάτμηση

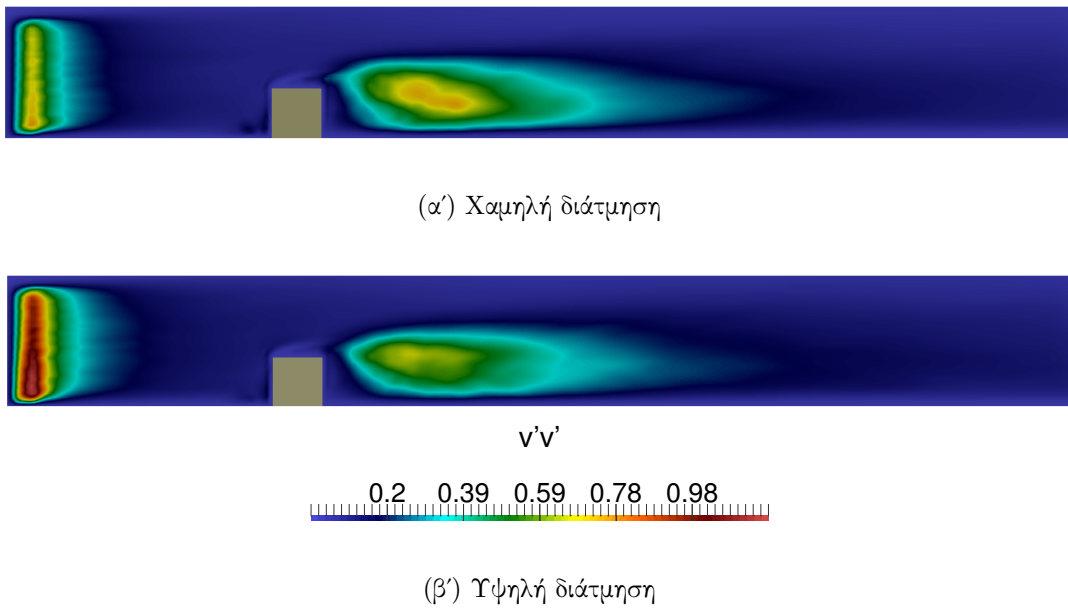


$u'u'$

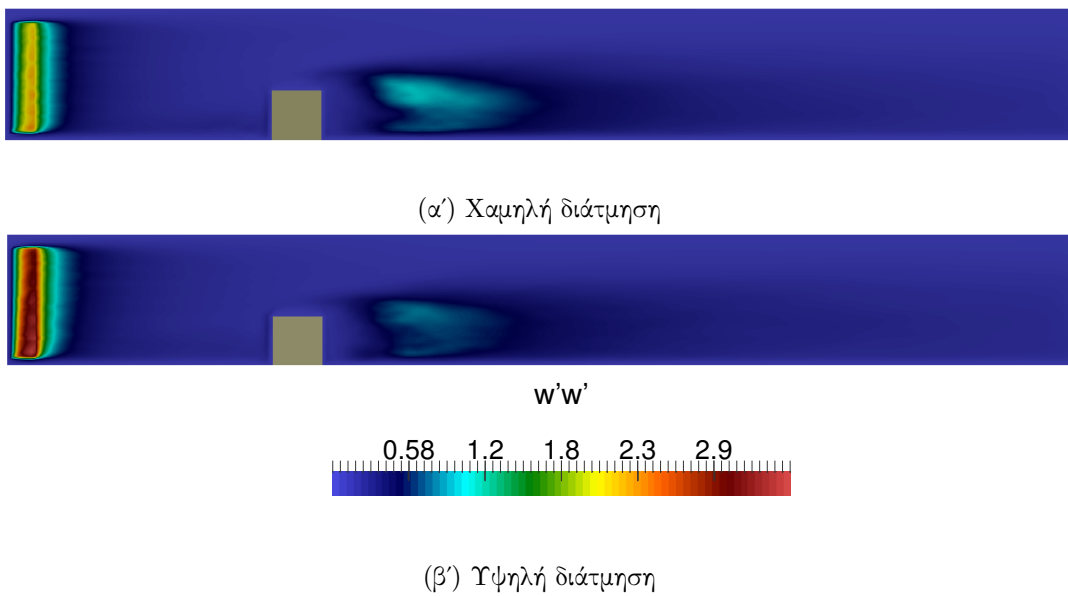


(β') Υψηλή διάτμηση

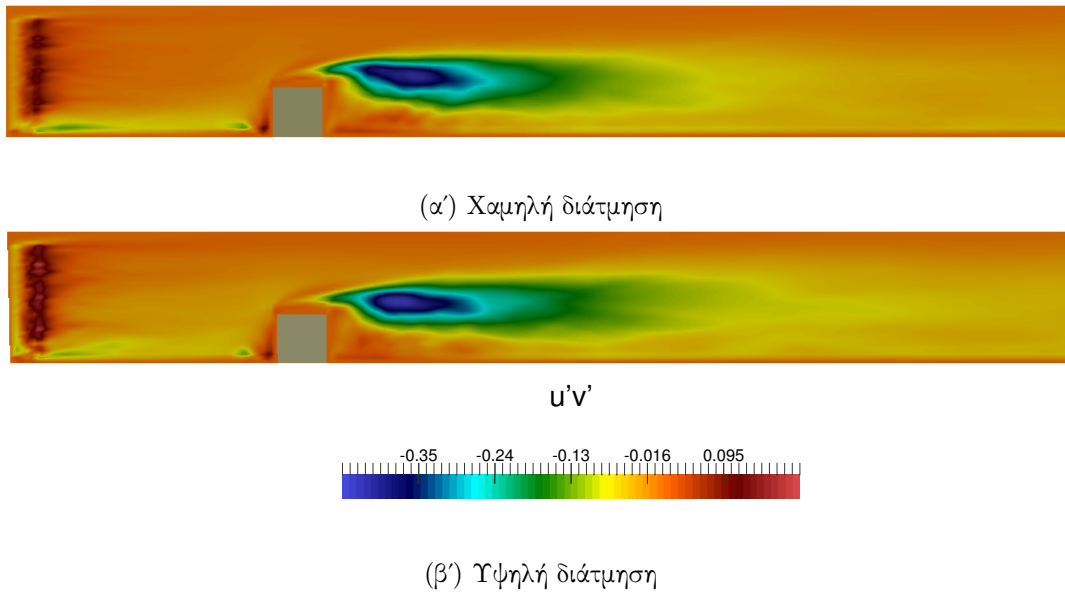
Σχήμα 4.8: Διαγράμματα γινομένου διαταραχών  $u'u'$  για υψηλή και χαμηλή διάτμηση



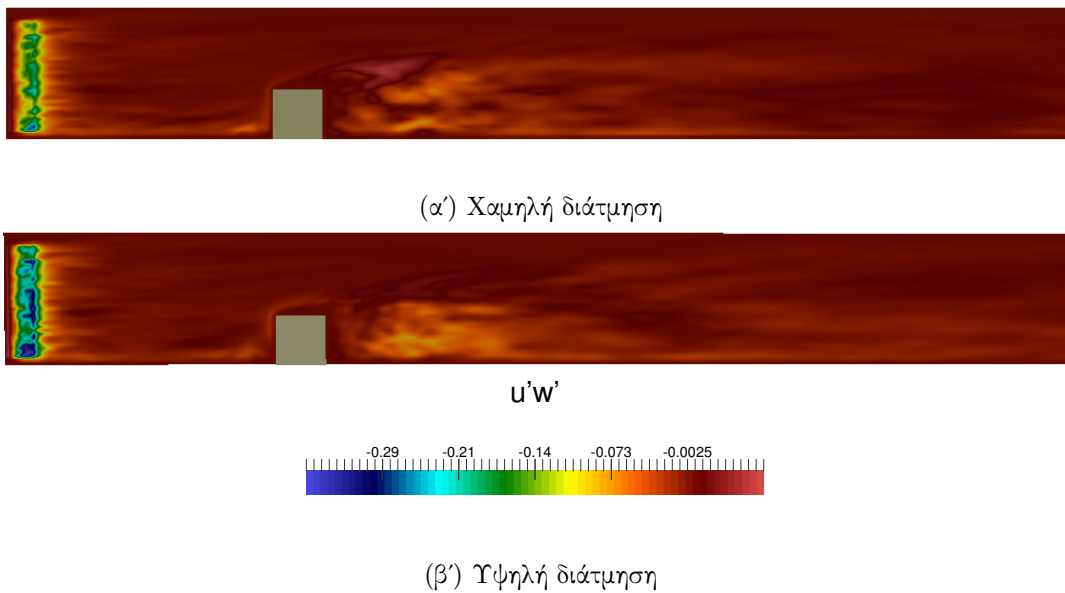
Σχήμα 4.9: Διαγράμματα γινομένου διαταραχών  $v'v'$  για υψηλή και χαμηλή διάτμηση



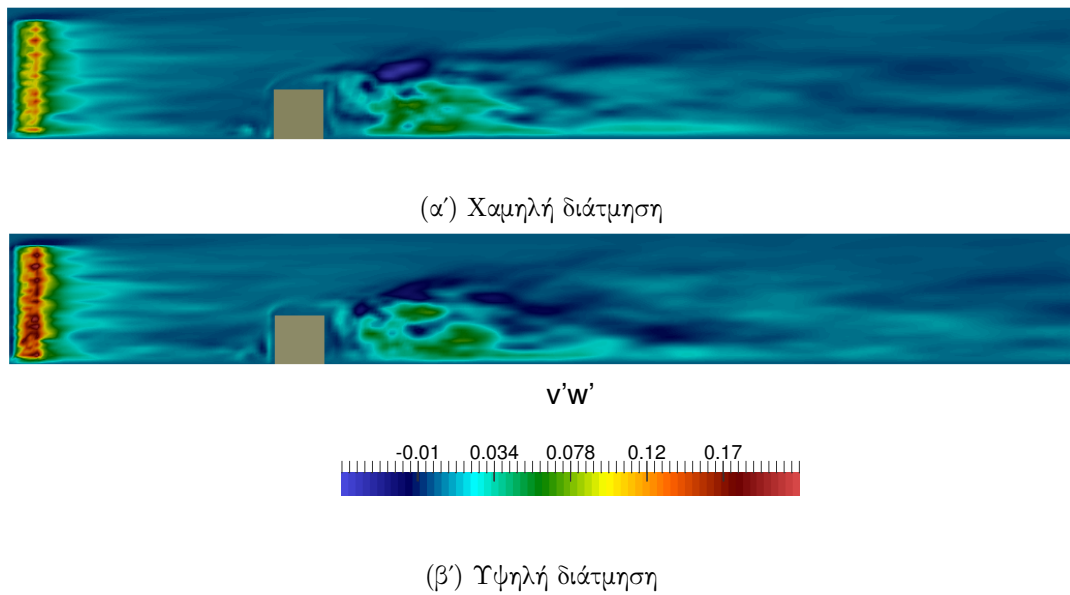
Σχήμα 4.10: Διαγράμματα γινομένου διαταραχών  $w'w'$  για υψηλή και χαμηλή διάτμηση



Σχήμα 4.11: Διαγράμματα γινομένου διαταραχών  $u'v'$  για υψηλή και χαμηλή διάτμηση



Σχήμα 4.12: Διαγράμματα γινομένου διαταραχών  $u'w'$  για υψηλή και χαμηλή διάτμηση



Σχήμα 4.13: Διαγράμματα γινομένου διαταραχών  $v'w'$  για υψηλή και χαμηλή διάτμηση

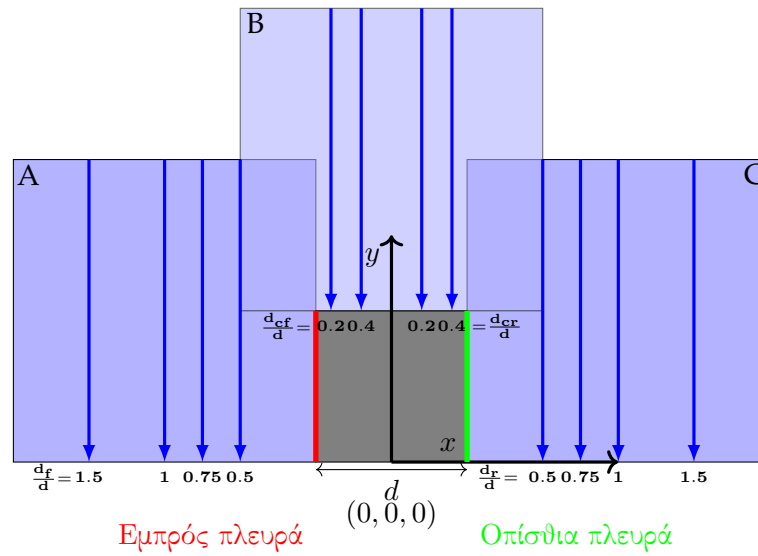


### 4.3 Μονοδιάστατα προφίλ

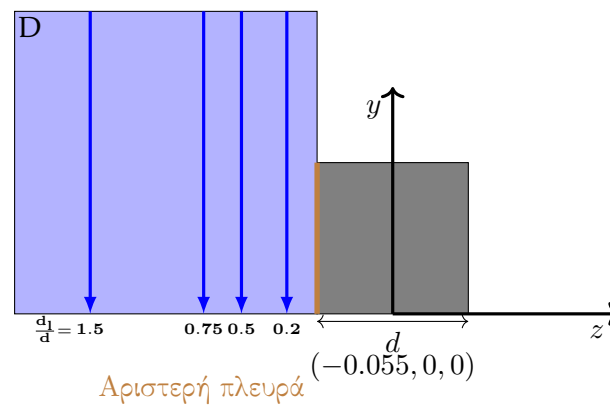
Σε αυτό το σημείο θα εξάγουμε κατά βάση ποσοτικά συμπεράσματα για τη σύγκριση της υπολογιστικής προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα, όσο και μεταξύ των προφίλ εισόδου χαμηλής και υψηλής διάτμησης. Η σύγκριση θα γίνει για δύο βασικά χαρακτηριστικά της ροής: το μέσο πεδίο ταχυτήτων και επίπεδο τύρβης. Το τελευταίο ποσοτικοποιείται (και οπτικοποιείται στην ενότητα 4.2) μέσω των διπλών γινομένων των τυρβωδών διαταραχών ( $u'u', v'v', w'w', u'v', u'w', v'w'$ ). Τα γινόμενα αυτά σχετίζονται με τα επίπεδα της ΤΚΕ και με τις τάσεις Reynolds. Αν και ο μηχανισμός δημιουργίας και μετάδοσης της τύρβης, ιδιαίτερα κοντά σε στερεά και αποκολλημένα οριακά στρώματα, είναι πολύπλοκη και θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί - κάτι που το LES δίνει σε σημαντικό βαθμό τη δυνατότητα - εδώ δε γίνει και τέτοιο. Το επίπεδο ανάλυσης που απαιτείται ξεφεύγει από τους σκοπούς της εργασίας. Εδώ θα εστιάσουμε σε δύο βασικά πράγματα:

- Στη σύγκριση των αποτελεσμάτων πειράματος-προσομοίωσης.
- Στην αξιολόγηση της επάρκειας με τον οποίον έχουν μοντελοποιηθεί οι πιο ευαίσθητες παράμετροι του προβλήματος: η επίδραση του εδάφους και διαταραχές της τύρβης στην είσοδο.

Στα σχήματα 4.16-4.33 φαίνεται η απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην υποενότητα 3.3.1. Σε κάθε διάγραμμα φαίνονται με ίδιο χρώμα περιπτώσεις ίδιας μορφής προφίλ εισόδου. Οι συνεχείς γραμμές αφορούν στις αριθμητικές προσομοιώσεις, ενώ οι μη συνεχείς στα πειραματικά δεδομένα. Σε κάθε εικόνα αναπαρίστανται όλα τα μεγέθη για μία μοναδική θέση. Συνολικά οι θέσεις είναι δεκαοκτώ (18). Οι δεκατέσσερις εξ' αυτών είναι επί του επιπέδου συμμετρίας της ροής, οι μισές ανάντι και οι μισές κατόντι. Οι υπόλοιπες βρίσκονται στο επίπεδο  $yz$ , μισό μήκος κύβου ανάντι της αρχής των αξόνων (σχήμα 3.3). Ο αριθμός των διαγραμμάτων είναι σκόπιμα μεγάλος, καθώς η φαινομενολογία είναι ιδιαίτερα έντονη γύρω από τον κύβο και τα χαρακτηριστικά της ροής μπορεί να διαφέρουν ακόμα και σε πολύ κοντινά σημεία. Η παρατήρηση των διαγραμμάτων μπορεί να γίνεται παράλληλα και με το σχήμα 4.15 για τις συνιστώσες της ταχύτητας στα επίπεδα  $A, B, C$ . Όπως φαίνεται στα σχήματα, οι ταχύτητες είναι διαστατές αλλά τα μεγέθη της τύρβης είναι αδιάστατα. Η παράμετρος αδιαστατοποίησης είναι το τετράγωνο του μέγιστου μέτρου της ταχύτητας της γενικής ροής ( $u_{max} \approx 5m/s$ ).

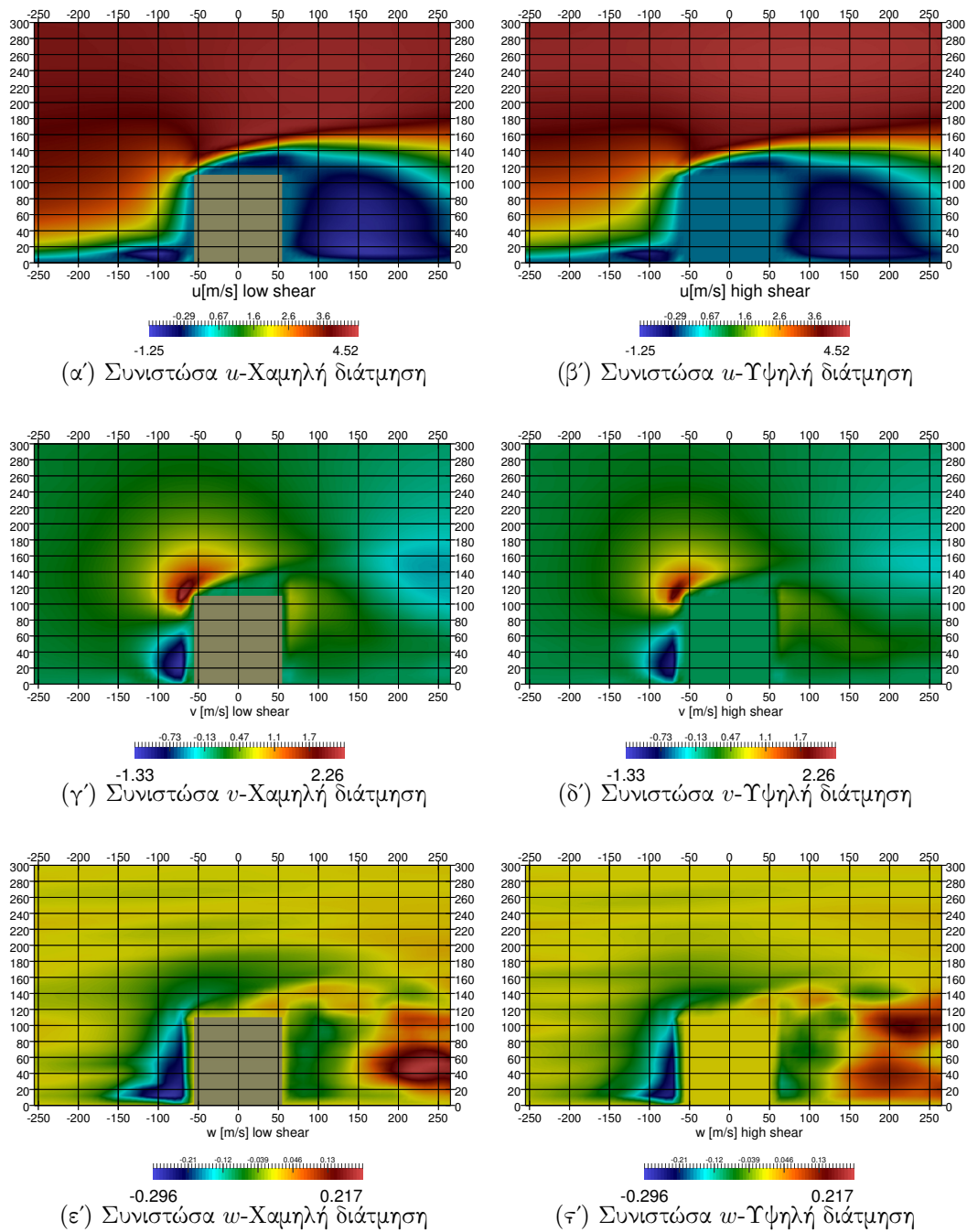


(α') Θέσεις υπολογισμού των κατακόρυφων προφίλ της ταχύτητας (σχήματα 4.16 - 4.29) επί του επιπέδου συμμετρίας  $xy$ .

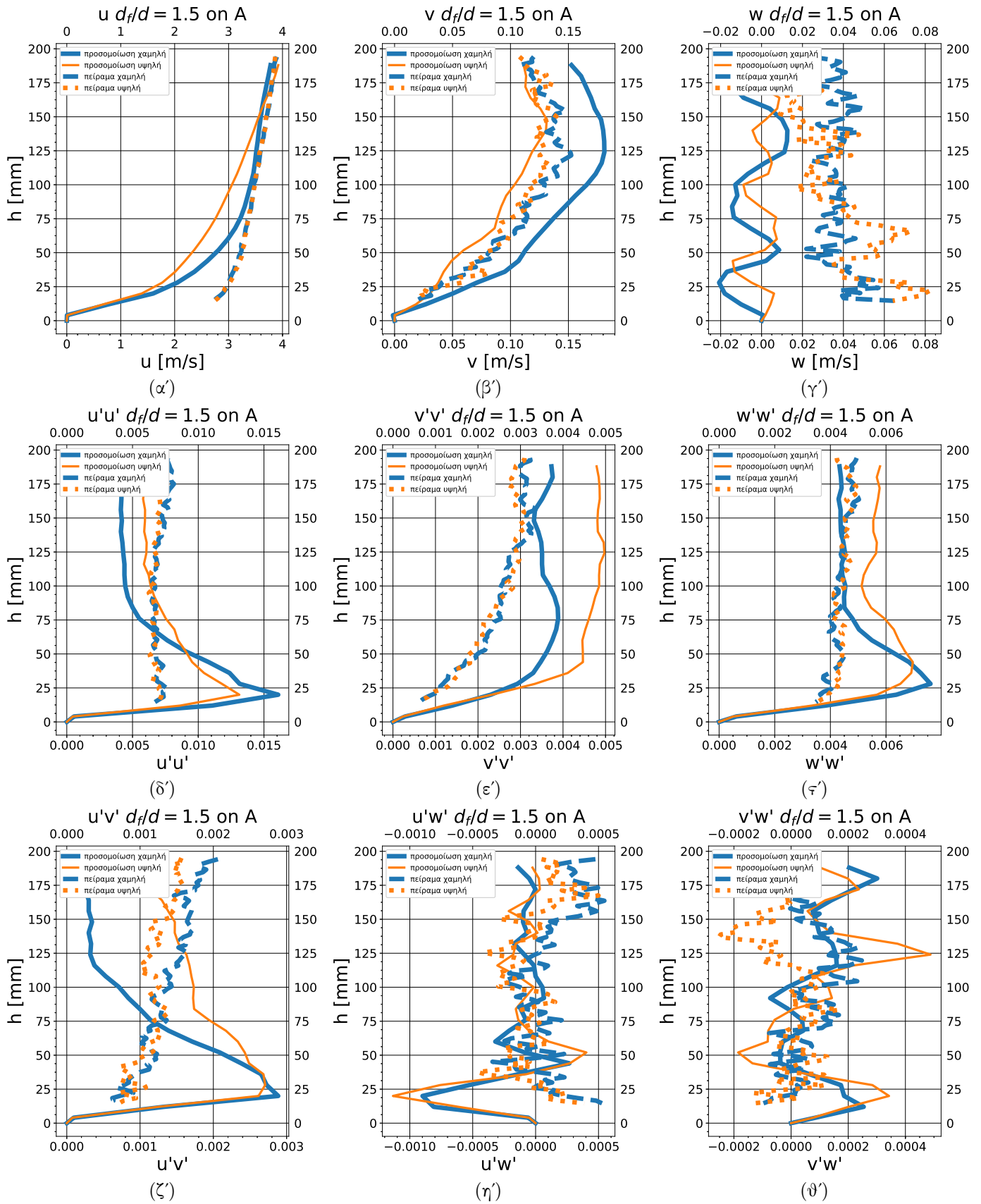


(β') Θέσεις υπολογισμού των κατακόρυφων προφίλ της ταχύτητας (σχήματα 4.30 - 4.33) επί του πλευρικού επιπέδου.

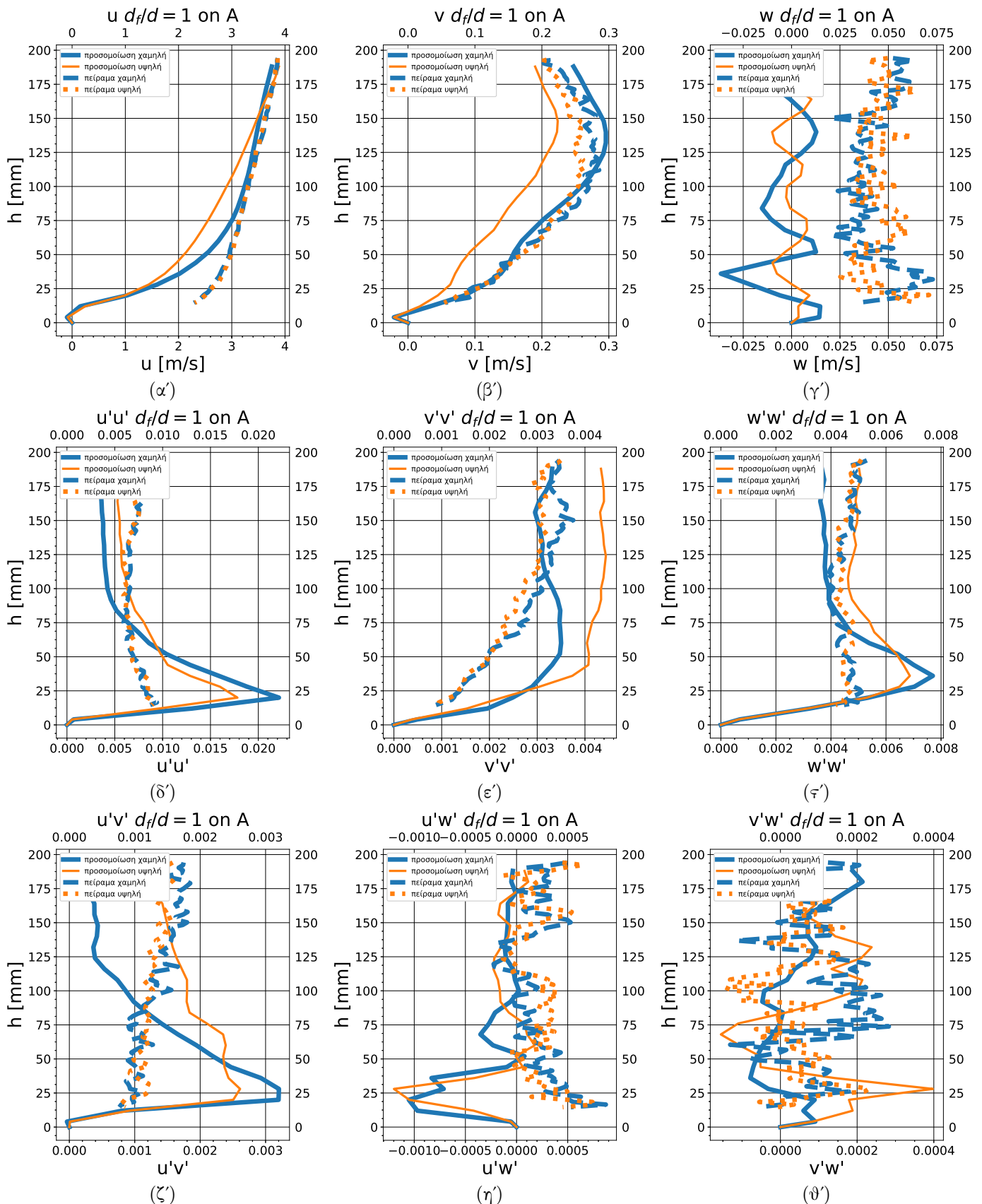
Σχήμα 4.14: Θέσεις χάραξης κατακόρυφων προφίλ ταχύτητας, σύμφωνα με τη σύμβαση αξόνων του σχήματος 3.4



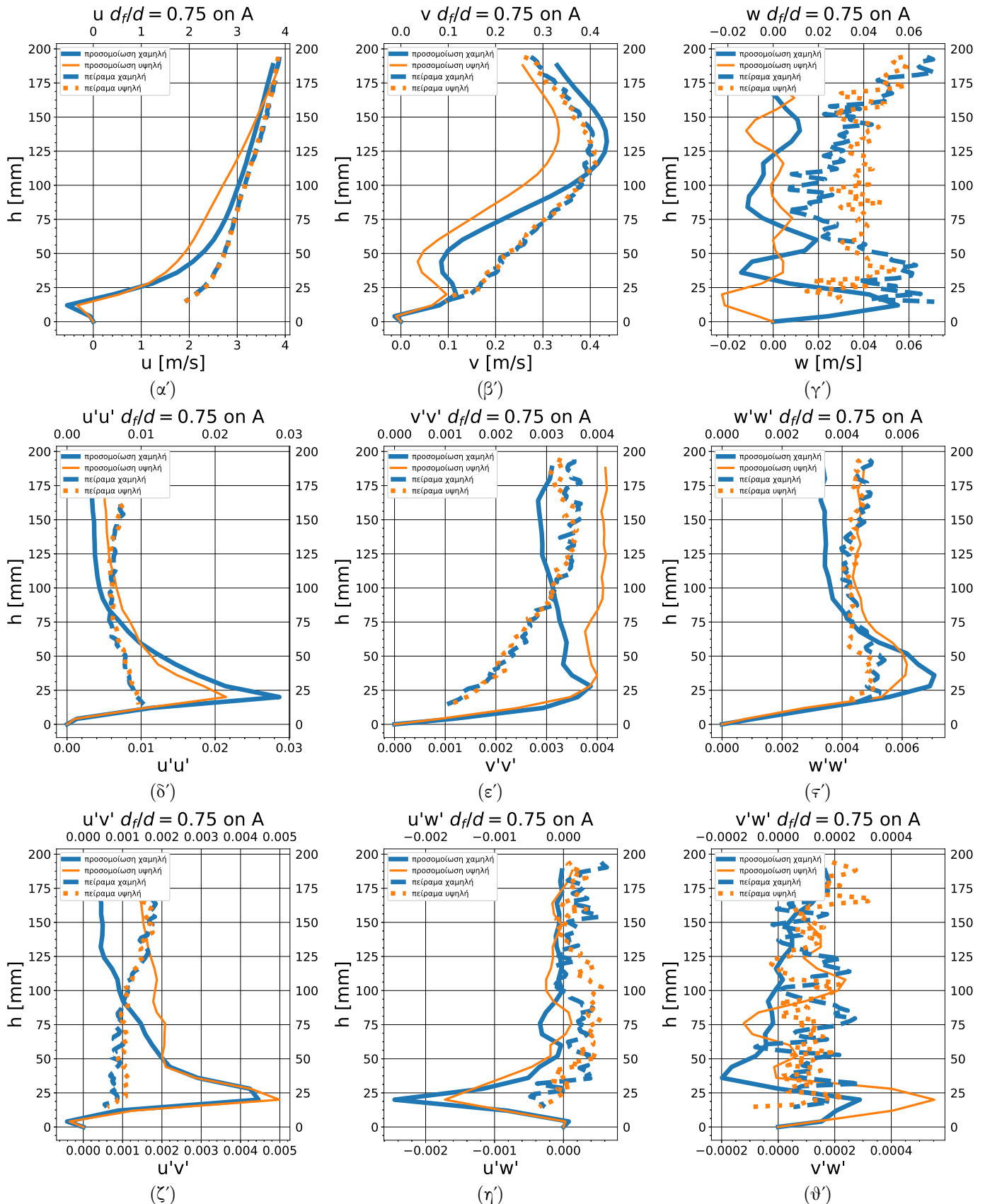
Σχήμα 4.15: Οι συνιστώσες της ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας του κύβου. Στην περιοχή που απεικονίζεται βρίσκονται τα επίπεδα A,B,C στα οποία υπάρχουν διαθέσιμα τα πειραματικά δεδομένα. Στο σχήμα τα αποτελέσματα προέρχονται από την αριθμητική προσομοίωση. Στα αριστερά φαίνονται τα δεδομένα για την χαμηλή και στα δεξιά για την υψηλή διάτμηση.



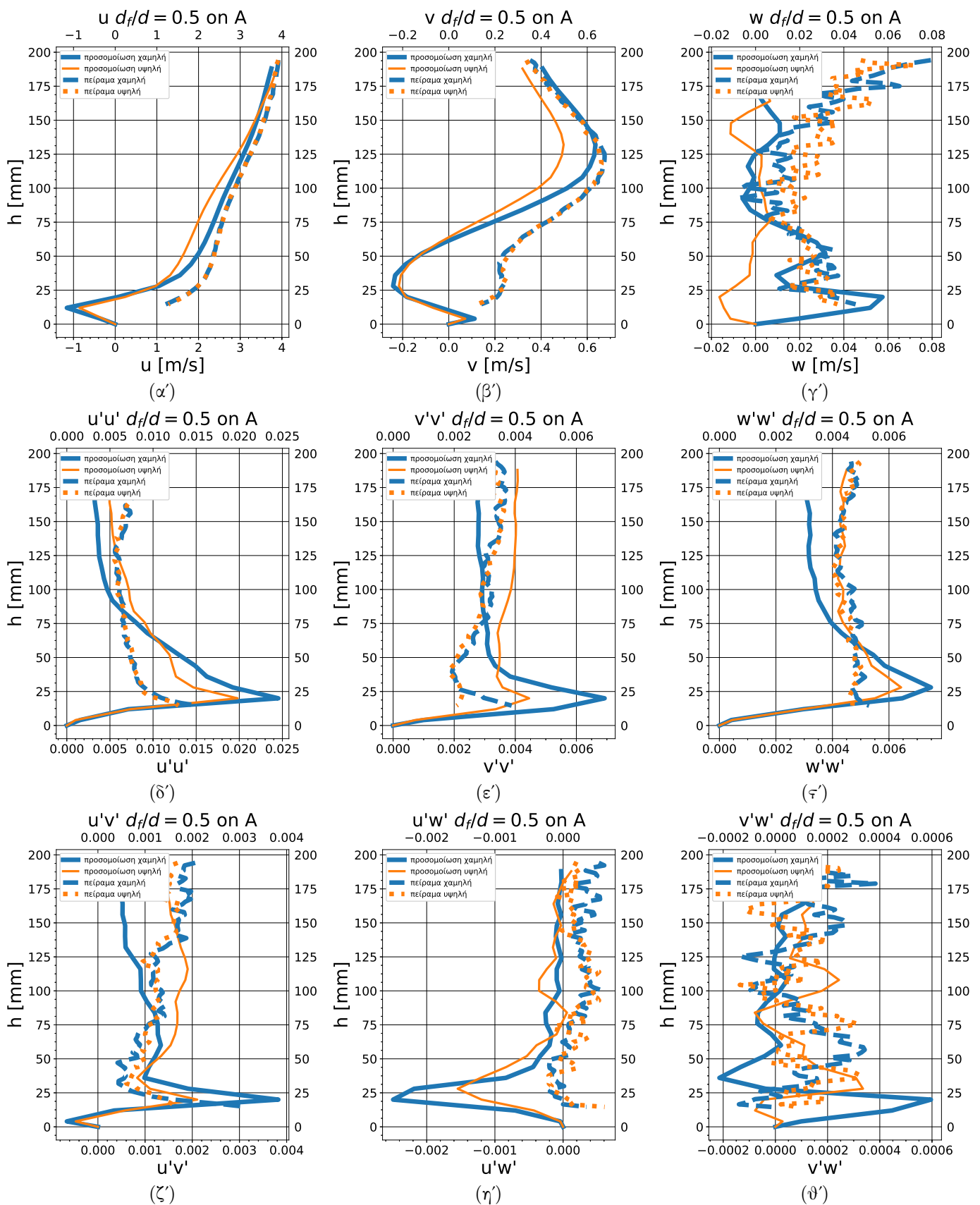
Σχήμα 4.16: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο A, σε απόσταση 165 mm από την εμπρός όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



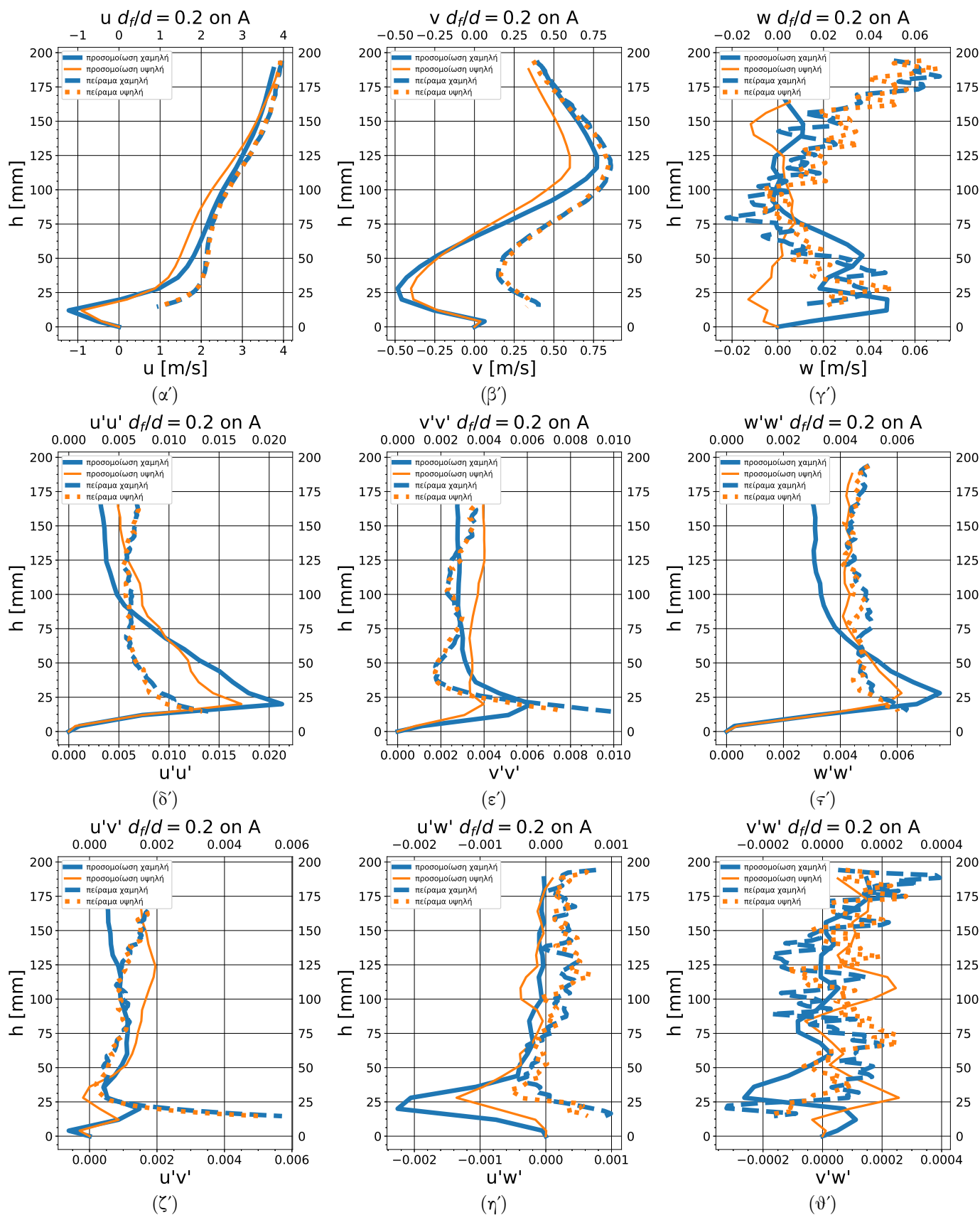
Σχήμα 4.17: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο A, σε απόσταση 110 mm από την εμπρός όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.18: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο A, σε απόσταση 82 mm από την εμπρός όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.

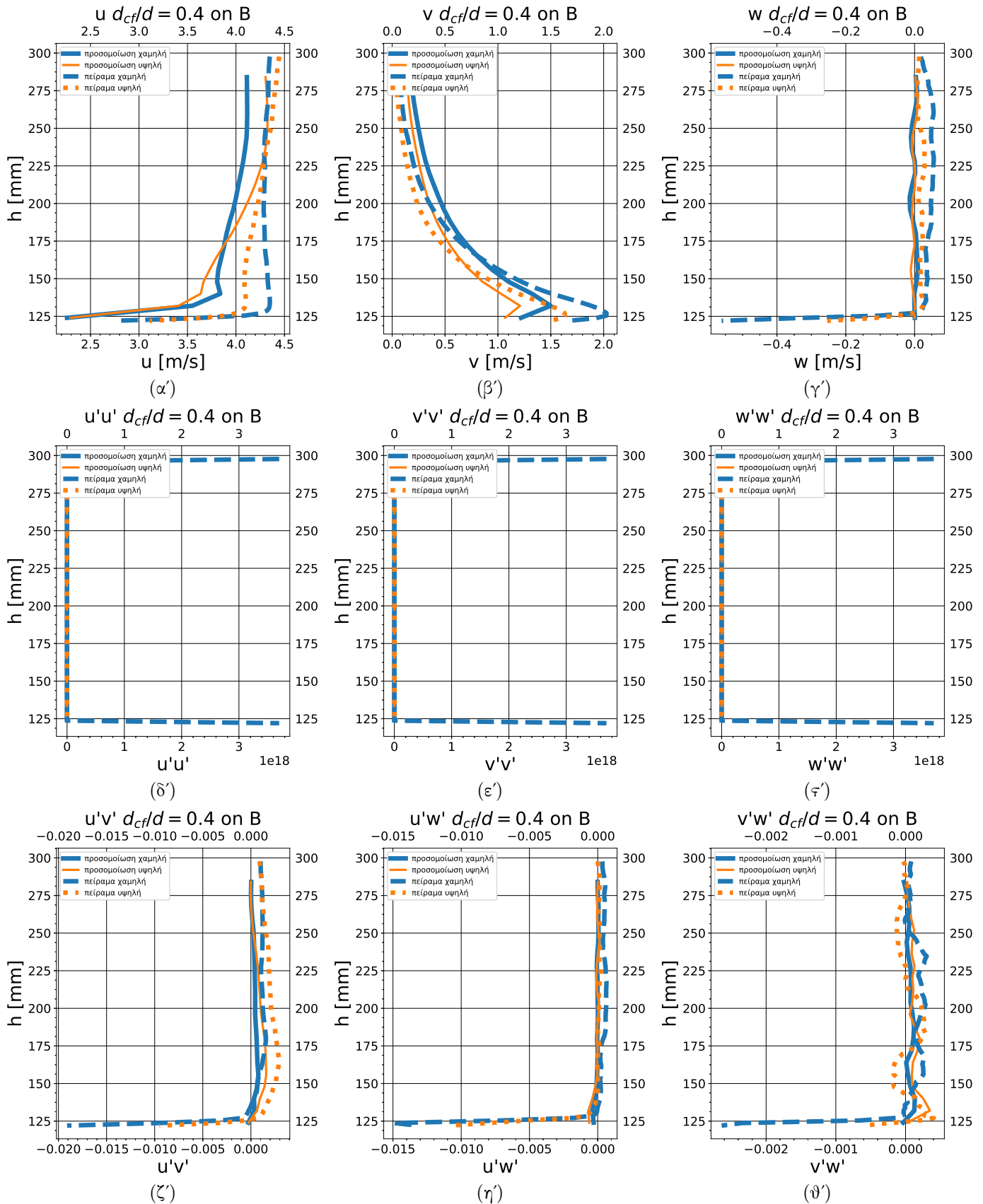


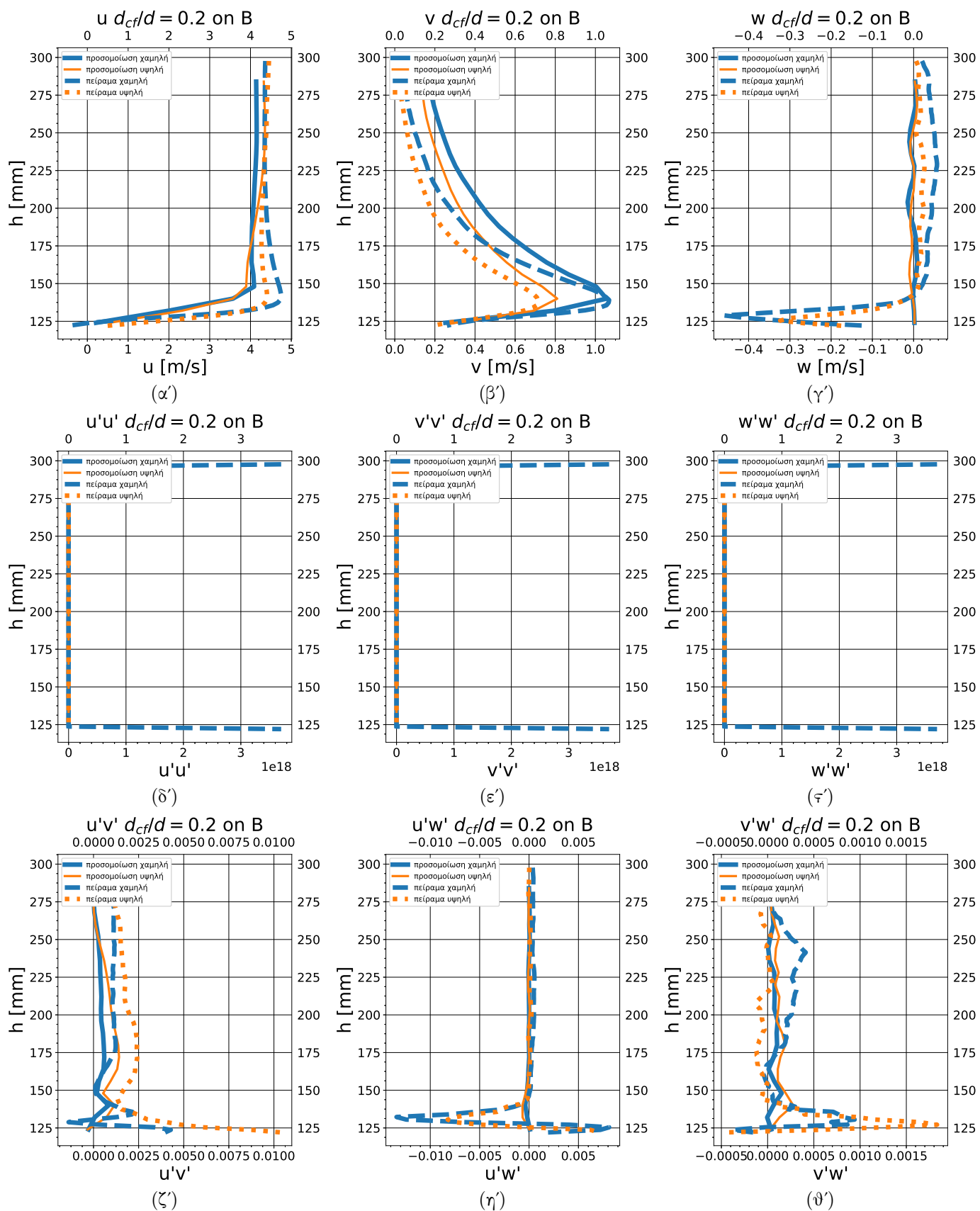
Σχήμα 4.19: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο A, σε απόσταση 55 mm από την εμπρός όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



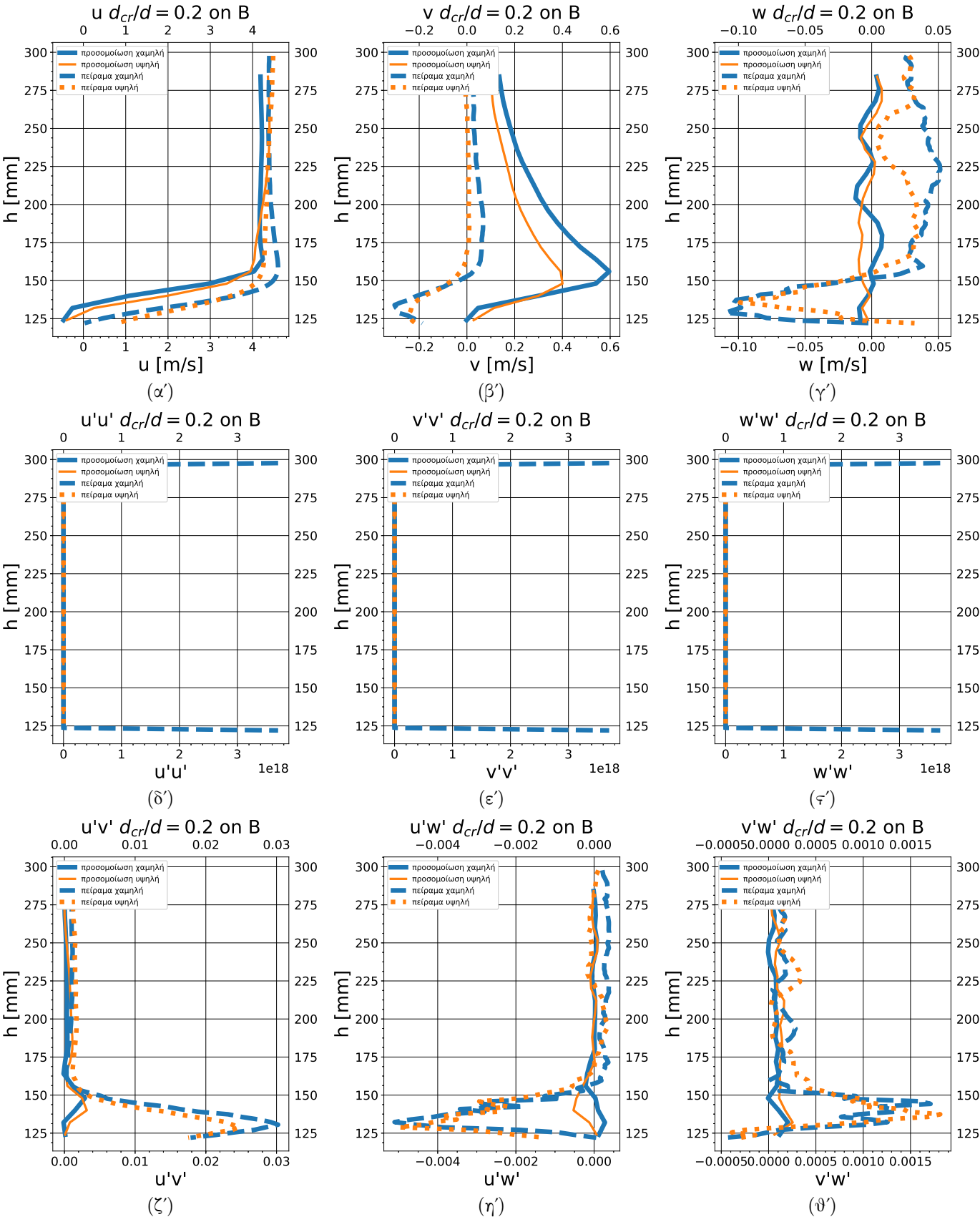
Σχήμα 4.20: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο A, σε απόσταση 22 mm από την εμπρός όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



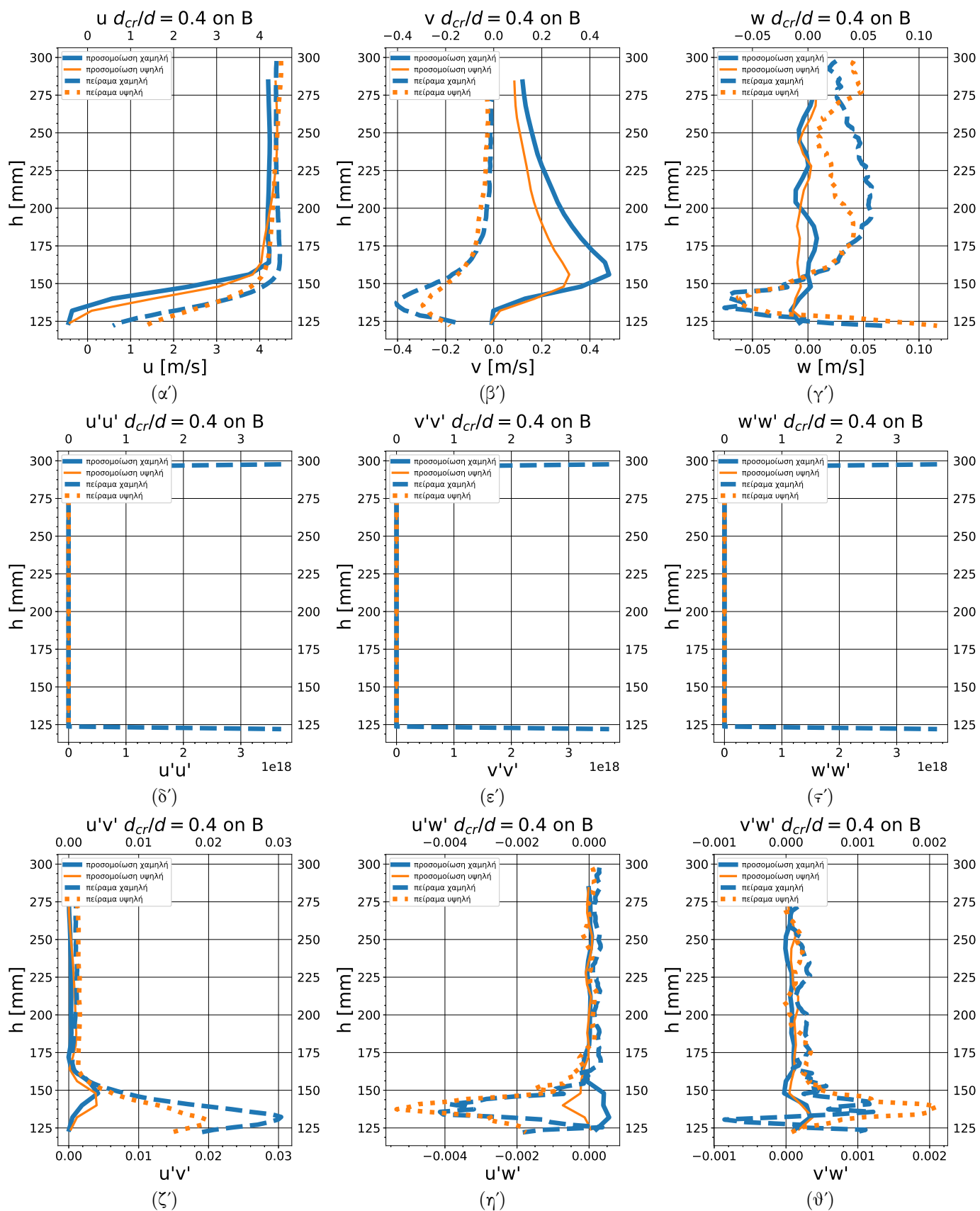
Σχήμα 4.21: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο B, σε απόσταση 44 mm ανάντι του άξονα  $y$  (σχήμα 3.4)



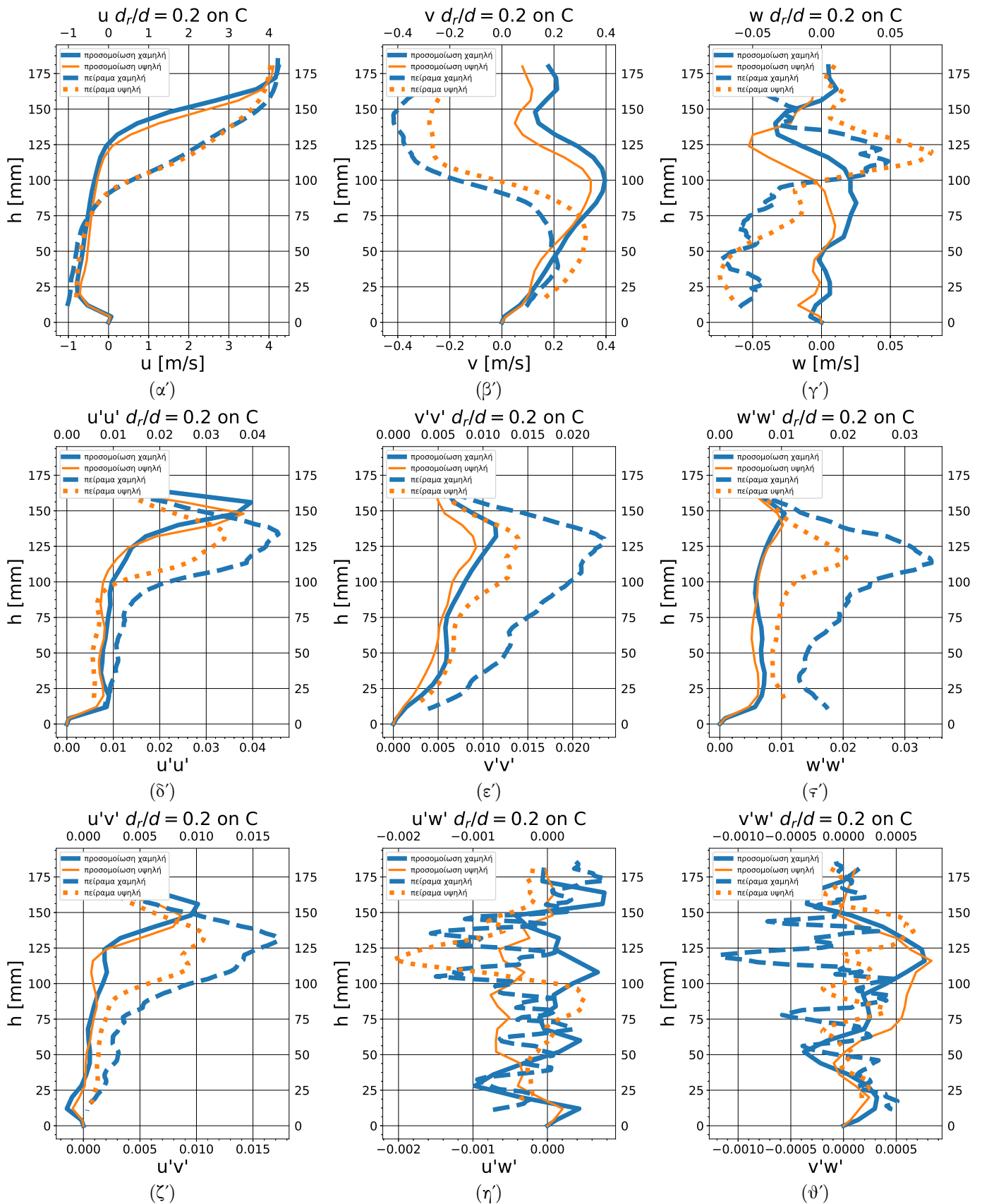
Σχήμα 4.22: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο B, σε απόσταση 2 mm ανάντι του άξονα  $y$  (σχήμα 3.4)



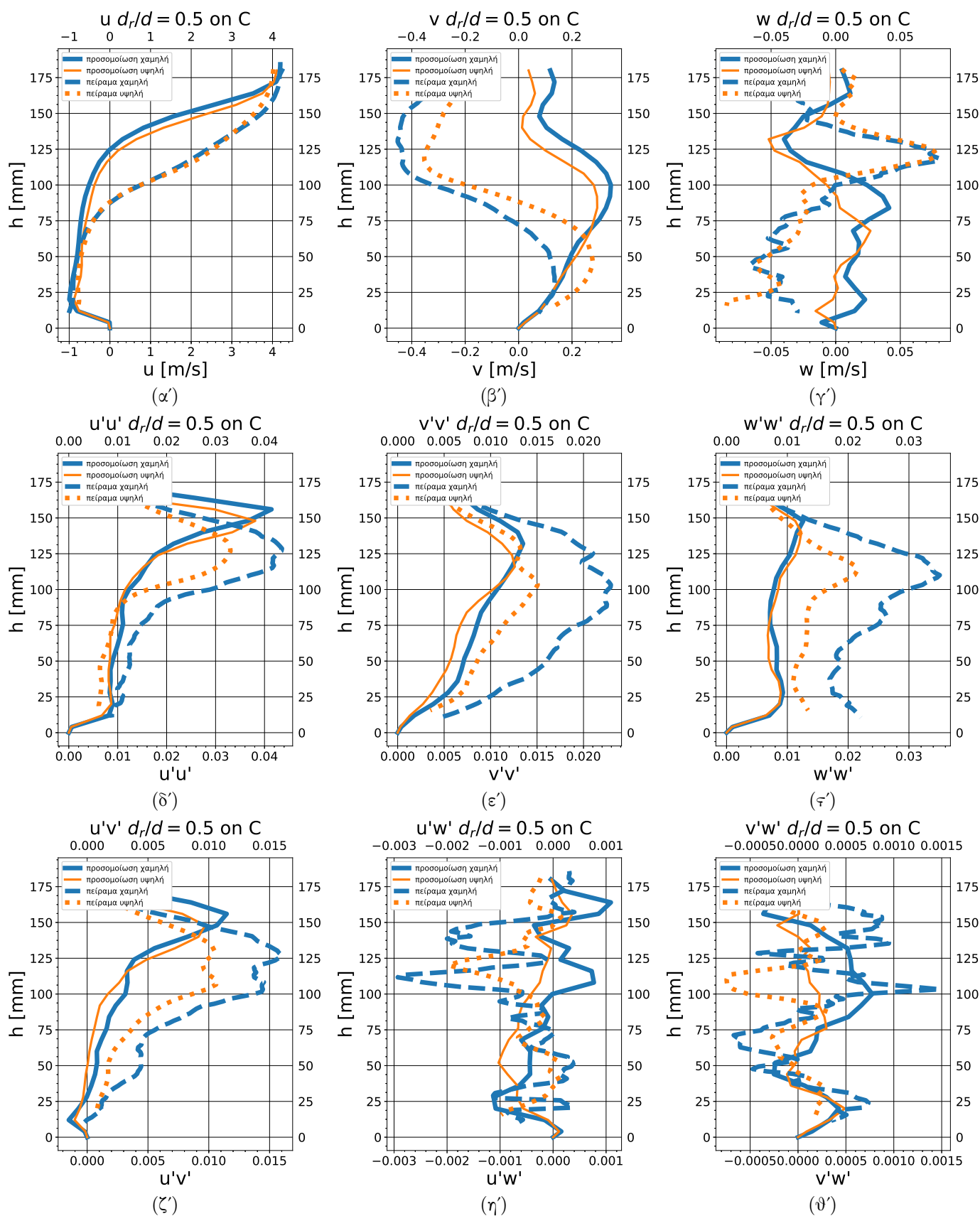
Σχήμα 4.23: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο B, σε απόσταση 22 mm κατάντι του άξονα  $y$  (σχήμα 3.4)



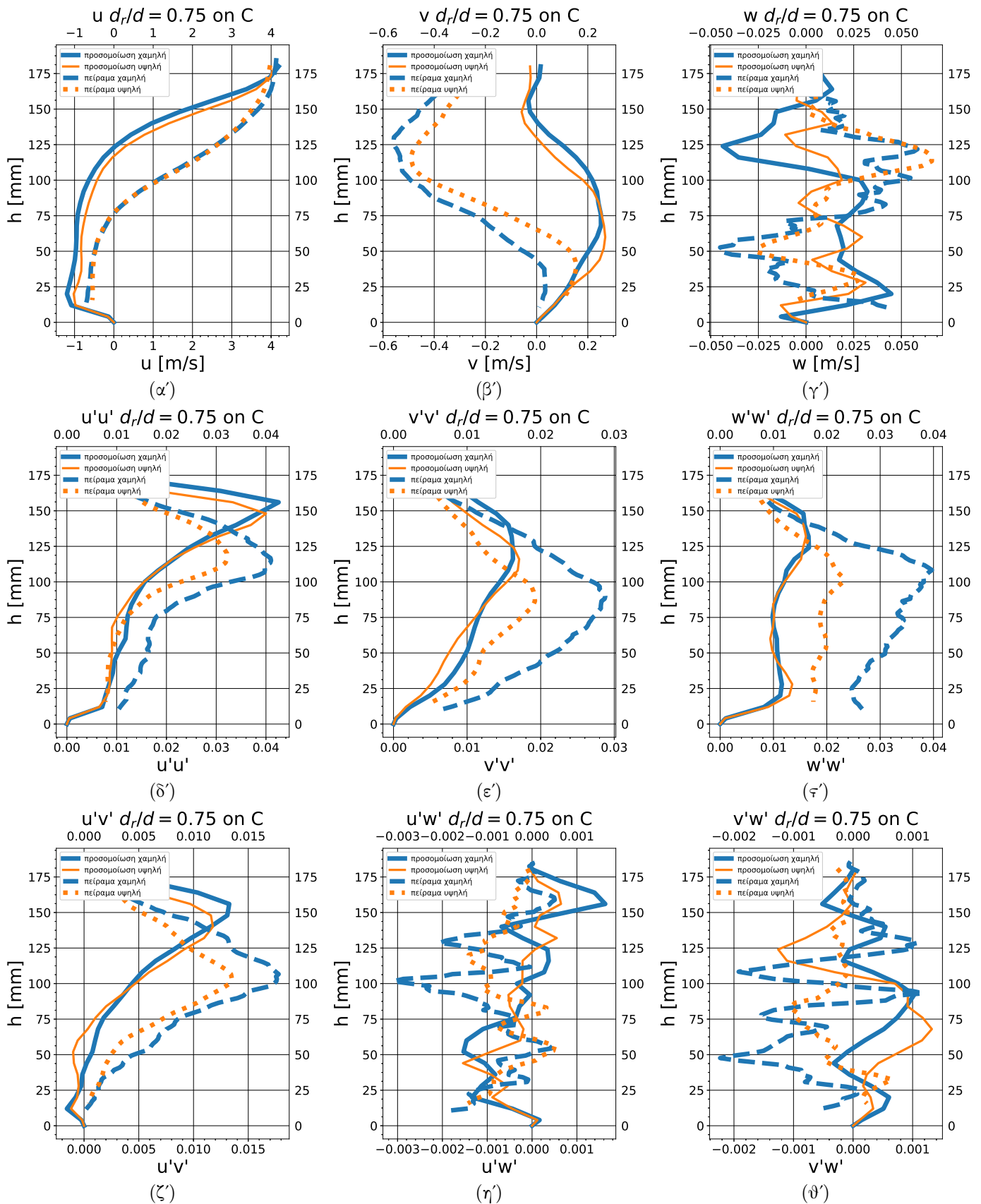
Σχήμα 4.24: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο B, σε απόσταση 44 mm κατάντι του άξονα  $y$  (σχήμα 3.4)



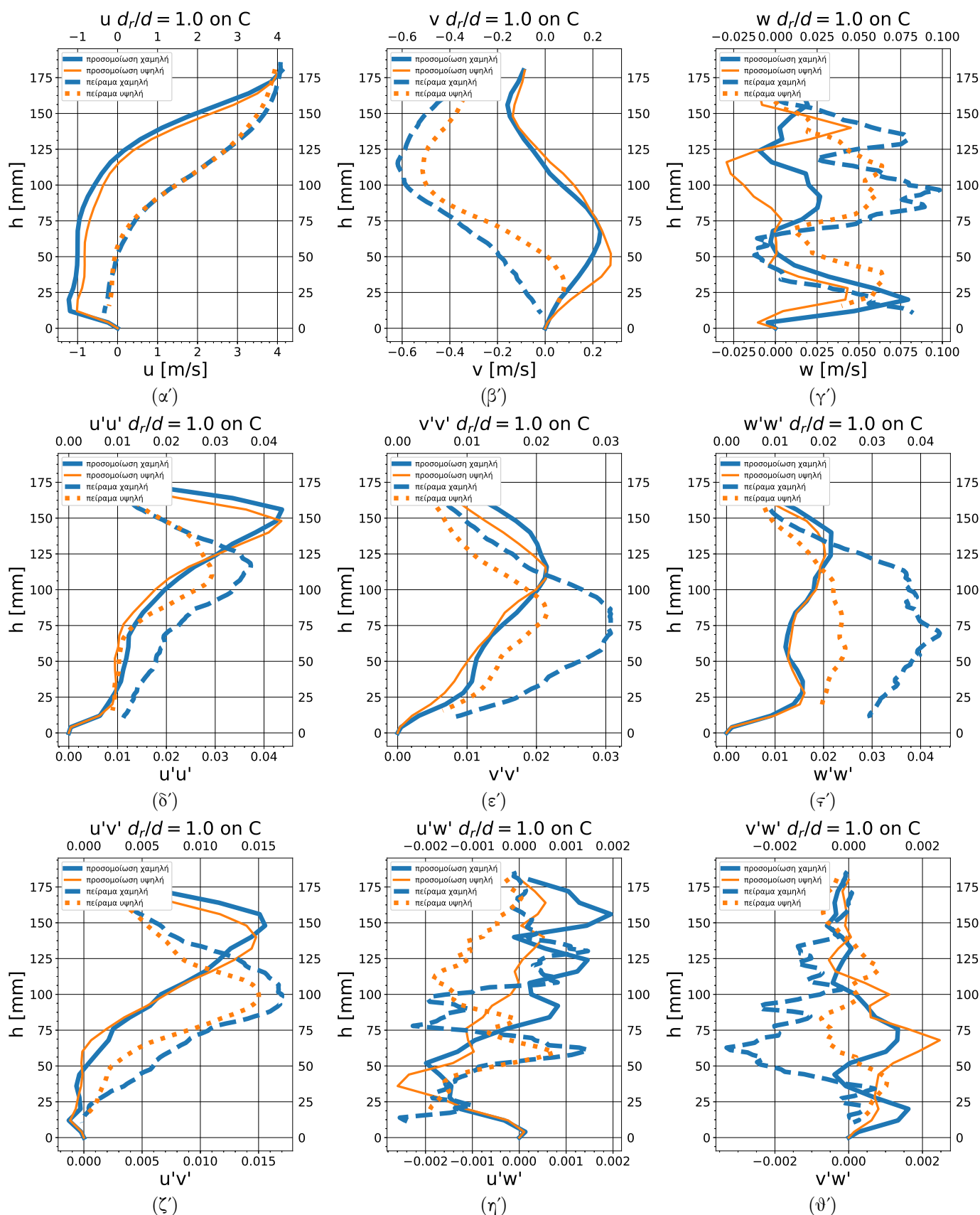
Σχήμα 4.25: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο C, σε απόσταση 22 mm από την πίσω όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.26: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο C, σε απόσταση 55 mm από την πίσω όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.

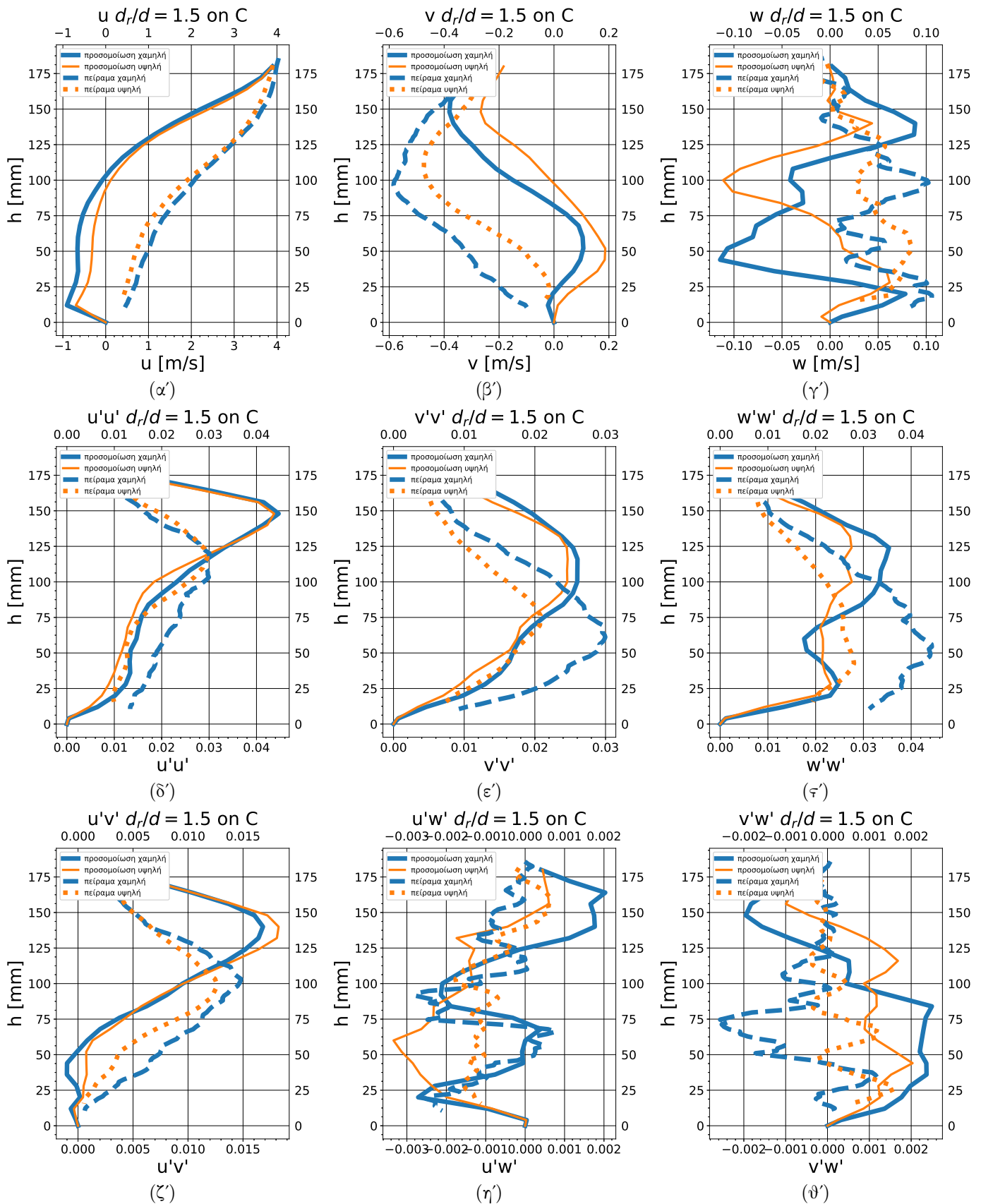


Σχήμα 4.27: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο C, σε απόσταση 82 mm από την πίσω όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.

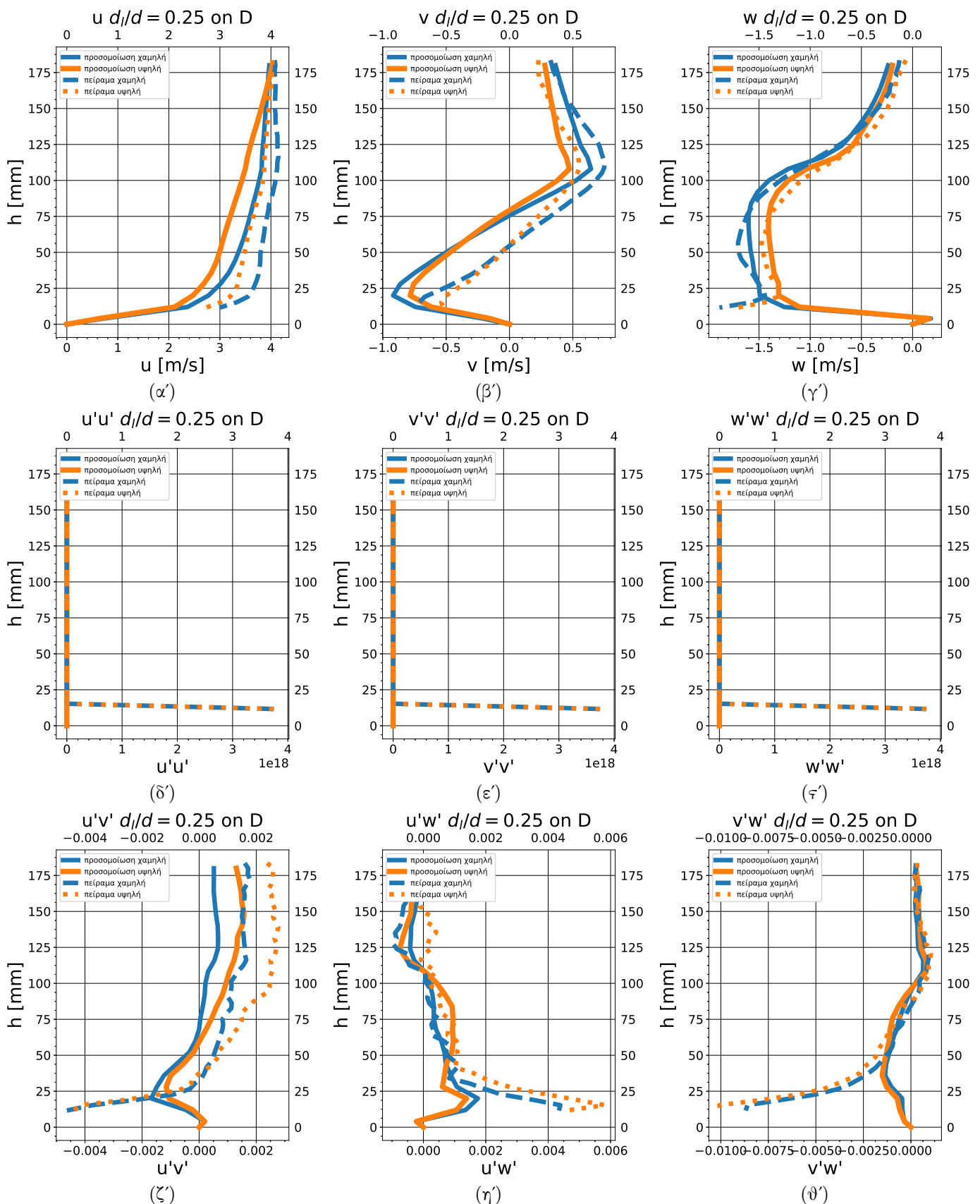


Σχήμα 4.28: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο C, σε απόσταση 110 mm από την πίσω όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.

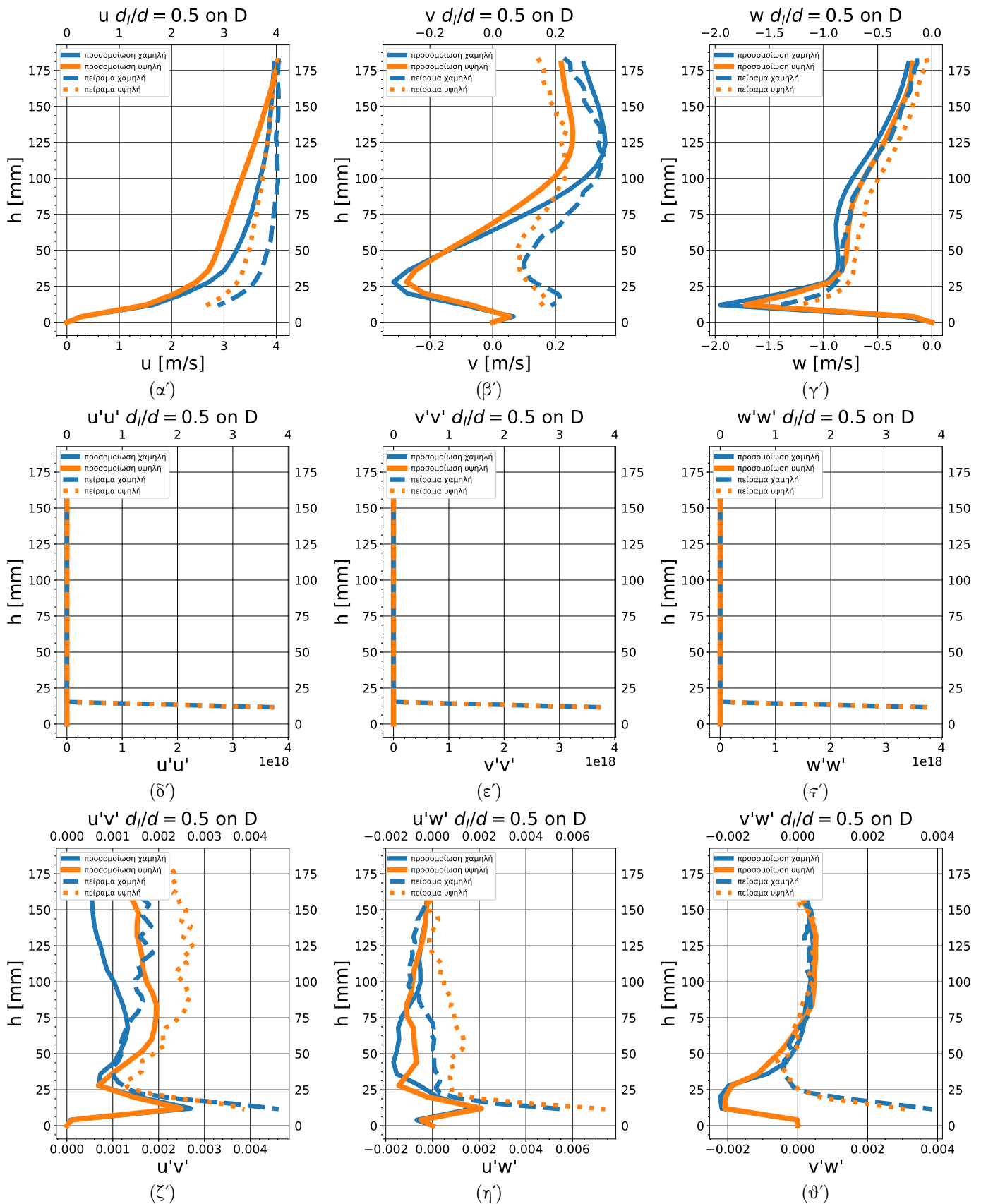




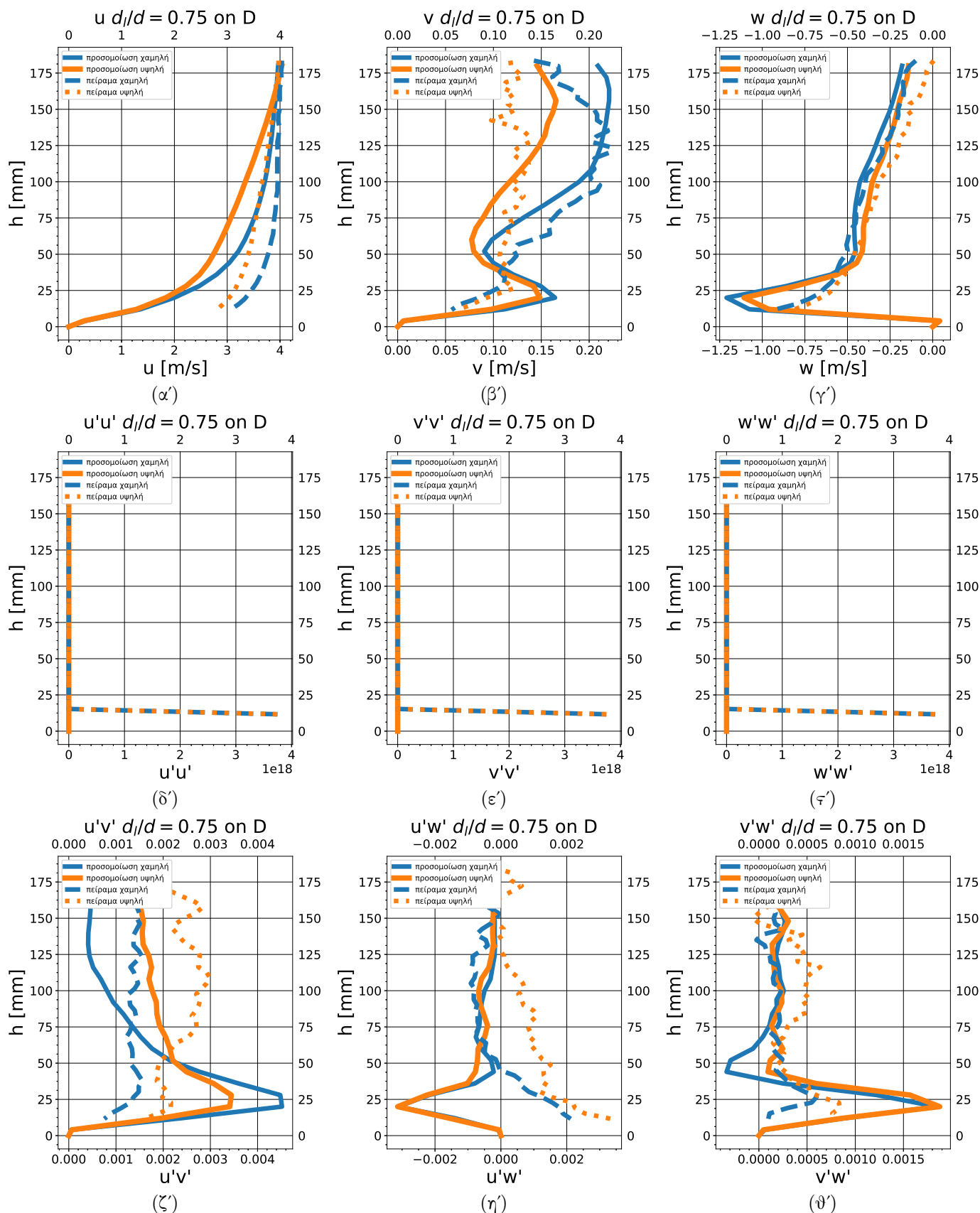
Σχήμα 4.29: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο C, σε απόσταση 165 mm από την πίσω όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



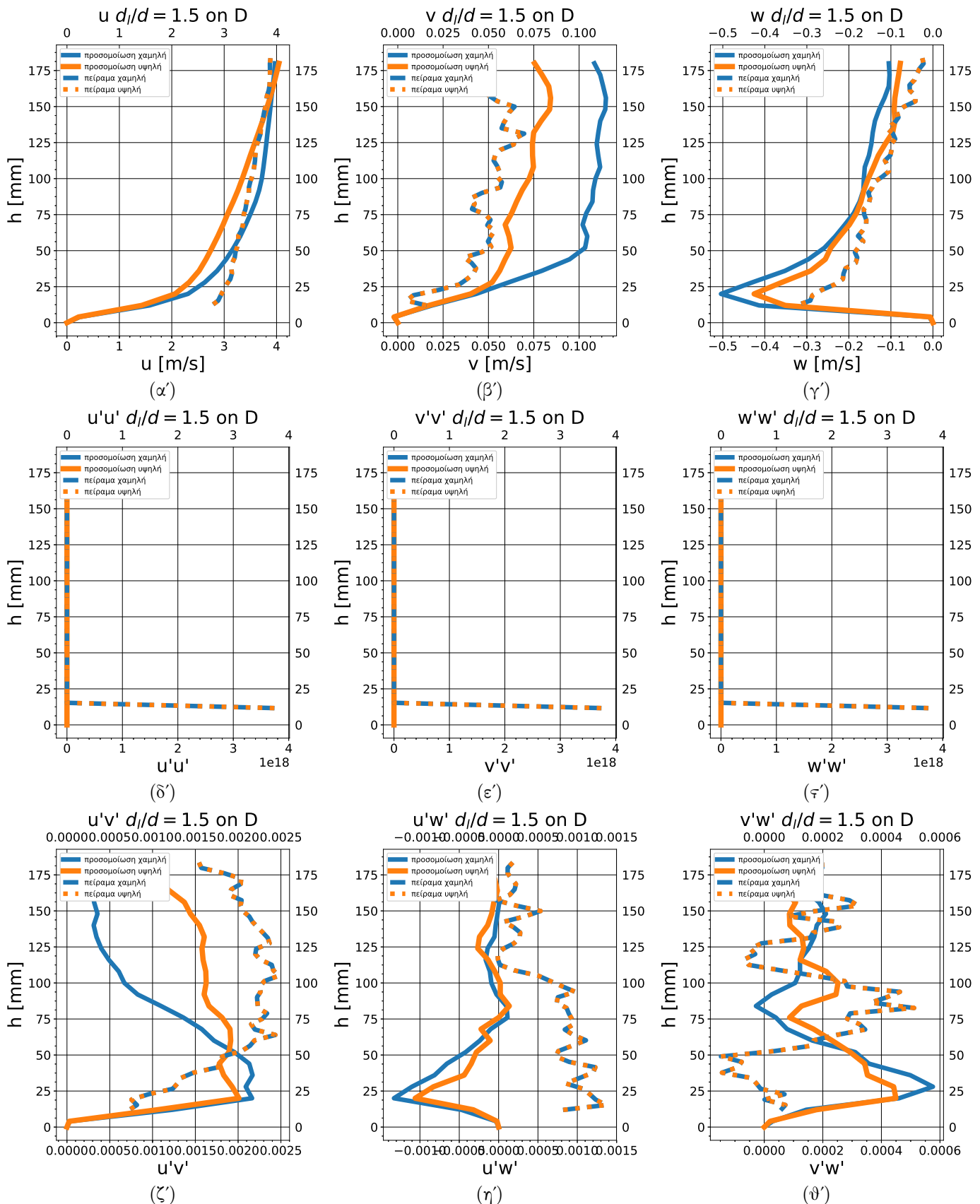
Σχήμα 4.30: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο D, σε απόσταση 27 mm αριστερά από την αριστερή όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.31: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο D, σε απόσταση 55 mm αριστερά από την αριστερή όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.32: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο D, σε απόσταση 83 mm αριστερά από την αριστερή όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.33: Μονοδιάστατα προφίλ στο επίπεδο D, σε απόσταση 165 mm αριστερά από την αριστερή όψη του κύβου, σύμφωνα με τη σύμβαση του σχήματος 3.4. Η θέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και με τη βοήθεια των σχημάτων 4.14 και 4.15.

## 4.4 Συμπεράσματα-Προτάσεις

### 4.4.1 Συμπεράσματα

Όσον αφορά στα αποτελέσματα, είναι φανερό ότι η πλεγματοποίηση και οι αριθμητικές παράμετροι που επελέγησαν και για τις δύο προσομοιώσεις, ήταν επαρκείς για την αποτύπωση των γενικών χαρακτηριστικών της ροής και αυτό με αρκετά μεγάλη λεπτομέρεια. Δεδομένου αυτού, πιστοποιείται η ικανότητα του προγράμματος να παράγει τουλάχιστον ρεαλιστικά δεδομένα, ακόμη και όταν οι διαστάσεις του πλέγματος δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Το LES είναι ένα ακριβό ακόμα υπολογιστικό εργαλείο και το PALM μπορεί να το εφαρμόσει με σχετική ευκολία και λογική ταχύτητα και ακρίβεια, ακόμη και σε έναν κοινό προσωπικό υπολογιστή.

Ωστόσο, αυτό που δε φαίνεται από τις έγχρωμες απεικονίσεις στις δύο και τρεις διαστάσεις και μπορεί εύκολα να φανεί από τα μονοδιάστατα προφίλ είναι το κατά πόσο το PALM είναι επαρκές για την εξαγωγή ακριβών ποσοτικών αποτελεσμάτων. Από τα προφίλ είναι προφανές μερικές μόνο από τις παραμέτρους έχουν μοντελοποιηθεί επαρκώς. Αν και αυτό δεν μειώνει γενικά την αξιοπιστία του PALM ως υπολογιστικού εργαλείου, επιβεβαιώνει ότι για την ακριβή μοντελοποίηση πολύπλοκων φαινομένων, όπως η τύρβη και η αλληλεπίδραση στερεού-ρευστού απαιτείται λεπτομερέστερος σχεδιασμός κατά τις προσομοιώσεις. Επιπλέον, είναι προφανές ότι για τις περισσότερες εφαρμογές πρακτικού ή ερευνητικού ενδιαφέροντος με υψηλές απαιτήσεις ως προς την πιστότητα των αποτελεσμάτων, είναι αναγκαία η επαύξηση του βασικού κώδικα μέσω των ειδικών υπορουτίνων που προσφέρονται από τους σχεδιαστές.

Το βασικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε σε αυτήν τη διπλωματική, όσον αφορά στη φυσική μοντελοποίηση, ήταν η εφαρμογή των οριακών συνθηκών, τόσο στο στερεό όσο και στην είσοδο. Είναι δεδομένο πως η συλλογιστική με την οποίαν ορίστηκαν ήταν σχετικά απλοϊκή. Από εκεί προκύπτουν και οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις πειραματικές μετρήσεις. Όσον αφορά στο μέσο πεδίο ταχυτήτων στην είσοδο, η μοντελοποίηση είχε επαρκή ακρίβεια, καθώς το προφίλ εισόδου βασίστηκε σε αρκετά μεγάλο δείγμα πειραματικών τιμών και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παρεμβολή από το PALM για να οριστεί η τιμή στους υπολογιστικούς κόμβους. Ωστόσο, η μοντελοποίηση της τύρβης δεν μπορούσε να γίνει με ακρίβεια, δεδομένου ότι το πρόγραμμα επιτρέπει μόνο τη ρύθμιση της έντασης, αλλά όχι της κατανομής της τύρβης, κάτι που οδήγησε σε συμβιβασμούς. Επιπλέον, φαίνεται ότι οριακή συνθήκη στο έδαφος δεν είναι ικανοποιητική. Αν και πειραματικά δεδομένα δεν υπάρχουν πολύ κοντά στο έδαφος, η εφαρμογή της MOST με μόνη παράμετρο την τραχύτητα του εδάφους δεν προσφέρει ευελιξία. Θα ήταν ίσως προτιμότερη, η εφαρμογή κάποιου λεπτομερέστερου και ακριβέστερου μοντέλου, δοκιμασμένου σε παρόμοια πειράματα. Κάτι τέτοιο απαιτεί βέβαια τον προγραμματισμό του και την ενσωμάτωσή του στο κύριο πρόγραμμα του PALM, κάτι που είναι τεχνικά αρκετά δύσκολο.

Το σημαντικότερο πρακτικό πρόβλημα προέκυψε από τη δυσκολία επεξεργασίας του μεγάλου όγκου δεδομένων. Η προσπάθεια περιγραφής του μη μόνιμου χαρακτήρα της ροής και των χαρακτηριστικών της τύρβης, οδήγησε σε αρχεία αποτελεσμάτων δύσκολα και χρονοβόρα στη διαχείριση χωρίς προγραμματιστικές γνώσεις υψηλού επιπέδου και εξειδικευμένου λογισμικού. Η δυσκολία αυξάνεται εκθετικά όσο μεγαλώνουν τα πλέγματα, το οποίο συνεπάγεται ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις σε πόρους συστήματος και χρόνο.

Δεδομένων αυτών συστήνεται κατά την χρήση του PALM, να δίνεται ιδιαίτερη σημασία εξ' αρχής στα δύο βασικότερα τεχνικά προβλήματα που αναφέρθηκαν. Ο χρήστης θα πρέπει να δαπανήσει τον απαιτούμενο χρόνο και προσπάθεια, ώστε να γνωρίζει κατά πόσο ο βασικός κώδικας επαρκεί για την μοντελοποίηση του φαινομένου που μελετά στην

απαιτούμενη ακρίβεια. Επιπλέον, θα πρέπει να αναζητήσει και να είναι καλός γνώστης των προγραμματιστικών και υπολογιστικών εργαλείων που απαιτούνται για την ενδιάμεση και τελική επεξεργασία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση η μελέτη της δομής του πηγαίου κώδικα και του περιβάλλοντος αλληλεπίδρασης που προσφέρεται από το PALM, κρίνεται μάλλον αναγκαία, για όλες τις περιπτώσεις πλην των απλούστερων.

#### 4.4.2 Προτάσεις μελλοντικής μελέτης

Στην παρούσα εργασία έγινε μία πρωταρχική μελέτη μίας ατμοσφαιρικής ροής γύρω από ένα πρότυπο κτήριο. Αν και τα αποτελέσματα προσέφεραν πληροφoρία για τη χρονική διακύμανση όλων των διαθέσιμων μεγεθών, αυτή δεν παρουσιάστηκε. Επιπλέον, οι οριακές συνθήκες (κατά βάση στα στερεά όρια) ορίστηκαν σχετικά πλοϊκά. Επιπλέον, όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε προσωπικό υπολογιστή μοναδικού επεξεργαστή. Όσον αφορά, επομένως στην βελτίωση και την επέκταση των αποτελεσμάτων, προτείνεται καταρχάς η λεπτομερέστερη μοντελοποίηση και μελέτη του τρόπου επίδρασης του εδάφους και των στερεών ορίων γενικότερα. Επιπλέον, προτείνεται η μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, για να μελετηθεί και ο μη μόνιμος χαρακτήρας τέτοιων ροών, καθώς και οι λεπτομέρειες του μοντέλου LES. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι σαφώς λεπτομερέστερα και ακριβέστερα, αν οι προσομοιώσεις γίνουν σε παράλληλο σύστημα πολλών επεξεργαστών, κάτι για το οποίο το PALM είναι καταρχήν σχεδιασμένο. Ακόμη, μπορεί να γίνει διερεύνηση του τρόπου με τον οποίον θα μπορούσε να αλλάξει ο προσανατολισμός του κύβου ως προς την κύρια κατεύθυνση της ροής και να προστεθούν σε αυτόν οπές (κατά το αντίστοιχο πείραμα) ή άλλα πολυπλοκότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Κάτι που θα είχε ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον, θα ήταν η χρήση των μοντέλων του PALM για τη μετάδοση θερμότητας και διασποράς στερεών σωματιδίων ή άλλων ουσιών για ουδέτερη ή μη ατμόσφαιρα. Τα αποτελέσματα σε αυτήν την περίπτωση θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη φαινομένων, όπως η διασπορά ρύπων σε αστικά περιβάλλοντα, ο αποδοτικότερος ενεργειακός σχεδιασμός των κτηρίων κ.α.





## Βιβλιογραφία

- [1] PALM, <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac>, Accessed:October 15, 2017.
- [2] F. Harlow and J. Welch, “Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface”, *Phys. Fluids*, vol. 8, pp. 2182–2189, 1965.
- [3] J Marshall, A Plumb, and L Illari, “Geostrophic balance”, p. 1, 2003. [Online]. Available: [http://paoc.mit.edu/12307/mass%20wind/geostrophic%20balance/geostrophic\\_balance.pdf](http://paoc.mit.edu/12307/mass%20wind/geostrophic%20balance/geostrophic_balance.pdf).
- [4] U Schumann, “Subgrid scale model for finite difference simulations of turbulent flows in plane channels and annuli”, *J. Comput. Phys*, vol. 18, pp. 376–404, 1975.
- [5] L. Berselli, T Iliescu, and W. Layton, *Mathematics of Large Eddy Simulation of Turbulent Flows*. Springer Science & Business Media, 2006, p. 72.
- [6] C. Moeng and J. Wyngaard, “Spectral analysis of large-eddy simulations of the convective boundary layer”, *J. Atmos. Sci.*, vol. 45, pp. 3573–3587, 1988.
- [7] E. Saiki, C. Moeng, and P. Sullivan, “Large-eddy simulation of the stably stratified planetary boundary layer”, *Bound.-Lay. Meteorol.*, vol. 95, pp. 1–30, 2000.
- [8] L. Wicker and W. Skamarock, “Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes”, *Mon. Weather*, vol. 130, pp. 2088–2097, 2002.
- [9] S. Piacsek and G. Williams, “Conservation properties of convection difference schemes”, *J. Comput. Phys*, vol. 198, pp. 580–616, 1970.
- [10] J. Williamson, “Low-storage runge-kutta schemes”, *J. Comput. Phys*, vol. 35, pp. 48–65, 1980.
- [11] M Baldauf, “Stability analysis for linear discretisations of the advection equation with runge-kutta time integration”, *J. Comput. Phys*, vol. 227, pp. 6638–6659, 2008.
- [12] A. Patrinos and A. Kistler, “A numerical study of the chicago lake breeze”, *Bound.-Lay. Meteorol.*, vol. 12, pp. 93–213, 1977.
- [13] W Hackbusch, “Multigrid methods and applications”, *Springer*, p. 378, 1985.
- [14] R. Singleton, “An algorithm for computing the mixed radix fast fourier transform”, *IEEE T. Acoust. Speech*, vol. 17, pp. 93–103, 1969.
- [15] C Temperton, “A generalized prime factor fft algorithm for any  $n = 2^p 3^q 5^r$ ”, *SIAM J. Sci. Stat. Comp*, vol. 13, pp. 676–686, 1992.
- [16] M Manolesos, Z Gao, X Shouand, M Panos, and D Bouris, “Experimental study of flow past a cube with openings embedded in a turbulent boundary layer”, *10th int.Symp.on Turbulence and Shear Flow Phenomena, July 6-10, Chicago-IL, USA*, 2017.