Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αποτίμηση της ποιότητας του αέρα στο δομημένο περιβάλλον με τεχνικές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Πιτσουλάκης Δημήτριος - Ευάγγελος
ΑΜ: ΤΜ20199

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Γεώργιος Μ. Σταυρακάκης

Ηράκλειο, 2025

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της φοίτησής μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Η επιτυχής ολοκλήρωσή της, δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη στήριξη και τη βοήθεια κάποιων ανθρώπων στους οποίους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Σταυρακάκη Γεώργιο, για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία καθ' όλο το διάστημα, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Οι γνώσεις και η συμβολή του τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο, έδρασαν καταλυτικά στην εκπόνηση της εργασίας. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ το σύνολο των καθηγητών και καθηγητριών του τμήματος, για τις σημαντικές γνώσεις που μου προσέφεραν και την εξαιρετική επικοινωνία και σχέση που είχαμε σε όλη την διάρκεια των σπουδών. Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, αλλά και όλους τους ανθρώπους του στενού μου περιβάλλοντος, για την υποστήριξη και την συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια.

Πιτσουλάκης Δημήτριος Ευάγγελος

Περίληψη

Η ποιότητα του αέρα στο δομημένο περιβάλλον αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα δημόσιας υγείας, με σοβαρές επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον. Ιδίως στις περιοχές πυκνής δόμησης, οι κατασκευές σχηματίζουν κοιλότητες, δημιουργώντας ένα είδος φαραγγιού, όπου η ροή του αέρα περιορίζεται, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων. Η κυκλοφορία των οχημάτων, αναγνωρίζεται ως η κύρια πηγή εκπομπών ρύπων σε αυτές τις περιοχές. Τα επίπεδα εκπομπών, εκτιμώνται κυρίως από συμβατικές προσεγγίσεις, οι οποίες πολλές φορές αποτυγχάνουν να συλλάβουν τη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων των ρύπων, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση προηγμένων μεθοδολογιών για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα.

Στην παρούσα εργασία, αναπτύσσεται μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στο πρόγραμμα SolidWorks, με σκοπό την διερεύνηση της ποιότητας του αέρα στο δομημένο περιβάλλον, βασιζόμενο σε πειραματική διαδικασία κλίμακας αεροσήραγγας ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, που αποτελεί την μελέτη περίπτωσης. Αφού δοθούν βασικοί ορισμοί που αφορούν το αντικείμενο της εργασίας, και παρατεθούν δεδομένα και πορίσματα από την επιστημονική βιβλιογραφία, αρχικό στάδιο της μελέτης είναι η ανάπτυξη της γεωμετρίας του αστικού φαραγγιού και της αεροσήραγγας, με γνώμονα τη μελέτη περίπτωσης. Οι επιφανειακές πηγές του ρύπου θεωρούνται ιδανικές, έτσι προσομοιώνονται με τέσσερις γραμμές επίπεδο του εδάφους. Για την προσομοίωση του τυρβώδους υδροδυναμικού πεδίου, γίνεται χρήση του τροποποιημένου μοντέλου τύρβης k-ε των Lam & Bremhorst. Για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων της ροής χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου, ενώ για τη σύζευξη ταχύτητας–πίεσης εφαρμόζεται ο αλγόριθμος SIMPLE. Το υπολογιστικό πεδίο και οι οριακές συνθήκες δίδονται με βάση τη μελέτη περίπτωσης. Παράλληλα, εφαρμόζεται καρτεσιανό δομημένο πλέγμα, το οποίο προκύπτει έπειτα από την αρχή της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα.

Για την επαλήθευση του μοντέλου, αξιοποιούνται στατιστικοί δείκτες με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα, καθώς και με τα αποτελέσματα δύο αντίστοιχων μελετών, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα τύρβης και λογισμικά επίλυσης. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα μοντέλα LES και SAS, στο λογισμικό Ansys Fluent. Προκύπτει ότι το παρόν μοντέλο παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα όσον αφορά την προσομοίωση του πεδίου ροής του ανέμου, ενώ αναφορικά με την προσομοίωση της διασποράς του ρύπου το μοντέλο LES καθίσταται πιο ακριβές, κυρίως στο κέντρο του δρόμου, ενώ ακολουθεί το μοντέλο L-B k-ε, το οποίο είναι πιο αποτελεσματικό στα άκρα του δρόμου. Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι επιτυγχάνεται η προσομοίωση της αποκόλλησης και επανακόλλησης του οριακού στρώματος. Εφόσον η αποτελεσματικότητα του λογισμικού επίλυσης δεν έχει επαληθευτεί από προηγούμενες επιστημονικές έρευνες, τα αποτελέσματα της μελέτης τεκμηριώνουν την ικανότητα του συγκεκριμένου λογισμικού, ως προς την προσομοίωση ατμοσφαιρικών ροών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται παραμετρικές μελέτες, οι οποίες αποσκοπούν στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς και διασποράς του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι ο λόγος του ύψους των κτηρίων προς το πλάτος του δρόμου (H/W) σε συνδυασμό με τη διεύθυνση του ανέμου, καθώς και η ταχύτητα των οχημάτων. Για κάθε μελέτη, υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού, στο ύψος της αναπνοής. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι δυσμενέστερες συνθήκες ως προς την ποιότητα του αέρα προκύπτουν με την αύξηση του λόγου H/W, καθώς και στην περίπτωση κάθετης ροής ως προς το μήκος των κτηριοσειρών. Επιπροσθέτως, προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ της ταχύτητας των οχημάτων και της συγκέντρωσης του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού, είναι γραμμική και ανάλογη.

Λέξεις κλειδιά: Αστικά φαράγγια, Αστική ρύπανση, Ποιότητα Αέρα, SolidWorks, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Μοντέλα Τύρβης, Τυρβώδης ροή, Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

Abstract

Air quality in the built environment is a critical public health issue, with serious impacts on both human health and the environment. Especially in densely built-up areas, constructions form cavities, creating a kind of canyon, where air flow is restricted, resulting in an increase in the concentration of pollutants. Vehicle traffic is recognized as the main source of pollutant emissions in these areas. Emission levels are mainly estimated by conventional approaches, which often fail to capture the variability of pollutant concentrations, making it necessary to use advanced methodologies for air quality assessment.

In the present work, a computational fluid dynamics model is developed in the SolidWorks program, with the aim of investigating air quality in the built environment, based on an experimental procedure of an atmospheric boundary layer wind tunnel scale, which constitutes the case study. After providing basic definitions concerning the subject of the work, and citing data and findings from the scientific literature, the initial stage of the study is the development of the geometry of the urban canyon and the wind tunnel, based on the case study. The surface sources of the pollutant are considered ideal, so they are simulated with four ground level lines. To simulate the turbulent hydrodynamic field, the modified k-ε turbulence model of Lam & Bremhorst is used. The finite volume method is used to discretize the differential equations of the flow, while the SIMPLE algorithm is applied for the velocity-pressure coupling. The computational domain and the boundary conditions are given based on the case study. At the same time, a Cartesian structured grid is applied, which arises from the principle of the independence of the solution from the grid.

For the verification of the model, statistical indicators are utilized with the aim of comparing the results with the experimental data, as well as with the results of two corresponding studies, which use different turbulence models and solution software. Specifically, the LES and SAS models are examined, in the Ansys Fluent software. It arises that the present model shows a better correlation with the experimental data in terms of the simulation of the wind flow field, while with regard to the simulation of the dispersion of the pollutant, the LES model becomes more accurate, mainly in the center of the road, while the L-B k-ε model follows, which is more effective at the edges of the road. The results also show that the simulation of the detachment and reattachment of the boundary layer is achieved. Since the effectiveness of the solution software has not been verified by previous scientific research, the results of the study document the ability of this software to simulate atmospheric flows.

Subsequently, parametric studies are performed, to investigate the behavior and dispersion of the pollutant within the urban canyon under different conditions. The parameters examined are the ratio of the height of the buildings to the width of the road (H/W) in combination with the wind direction, as well as the speed of the vehicles. For each study, the average concentration of the pollutant within the urban canyon is calculated, at the height of breathing. It is concluded that more unfavorable conditions in terms of air quality arise with an increase in the H/W ratio, as well as in the case of vertical flow with respect to the length of the building rows. Additionally, it appears that the relationship between vehicle speed and pollutant concentration within the urban canyon is linear and proportional.

Key words: Street canyons, Urban pollution, Air quality, SolidWorks, CFD, Turbulence models, Turbulence flow, Atmospheric boundary layer

Ορολογία

C	μετρούμενη συγκέντρωση ρύπου	
C^*	αδιάστατη συγκέντρωση ρύπου	
C_1, C_2, σ_k, σ_ε	εμπειρικές σταθερές standard k-ε μοντέλου	
C_b	συγκέντρωση μάζας αέρα	
CV	όγκος κελιού	
C_μ, $C_{\varepsilon1}$, $C_{\varepsilon2}$, σ_k, σ_ε, σ_B, C_B	εμπειρικές σταθερές L-B k-ε μοντέλου	
D	μοριακός συντελεστής διάχυσης	
DSF_6	συντελεστής διάχυσης ρύπου	m^2/s
D^T	τυρβώδης συντελεστής διάχυσης	
f	συντελεστής εκπομπής	g/km
f_μ, f_1, f_2	Εξισώσεις απόσβεσης Lam&Bremhorst	
G	συνάρτηση φίλτρου μοντέλου LES	
GB	ρυθμός παραγωγής κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης	
g_i	συνιστώσα της επιτάχυνσης της βαρύτητας στην i διεύθυνση	
H	ύψος κτηρίων	m
H_d	ύψος κατάντη κτηρίου	m
H_u	ύψος ανάντη κτηρίου	m
k	τυρβώδης κινητική ενέργεια	m^2/s^2
L	μήκος κτηρίων	m
l	μήκος επιφάνειας πηγής	m
Mr	γραμμομοριακή μάζα	kg/mol
P	Πίεση	Pa
P_k	Ρυθμός παραγωγής κινητικής ενέργειας	
Pr_t	τυρβώδης αριθμός Prandlt	
Q	ογκομετρική παροχή ρύπου	kg/m^3
R	παγκόσμια σταθερά αερίων	atm*L/(mol*K)
R^2	συντελεστής προσδιορισμού	
Re	Αριθμός Reynolds	
$Re_{x,crit}$	Αριθμός Reynolds στο σημείο αστάθειας	
$Re_{x,tr}$	Αριθμός Reynolds στο σημείο μετάβασης	
Re_y	Αριθμός Reynolds σε απόσταση y από το τοίχωμα	
S	τανυστής μέσου ρυθμού καταπόνησης	

s_{ij}	ρυθμός παραμόρφωσης	
S_k, S_ε	Όροι πηγής των k και ε στις αντίστοιχες εξισώσεις διατήρησης	
S_φ	Όρος πηγής της μεταβλητής ϕ στις εξισώσεις διατήρησης	
T	θερμοκρασία	K
u	διάνυσμα ταχύτητας	
U	μέση τιμή ταχύτητας	m/s
u'(t)	στιγμιαία τιμή ταχύτητας	m/s
u^*	ταχύτητα τριβής	m/s
u^+		
U_H	ταχύτητα ανέμου στο ύψος των κτηρίων	m/s
U_x, U_y, U_z	συνιστώσες ταχύτητας στους άξονες x,y,z	m/s
Uz^*	αδιάστατη συνιστώσα ταχύτητας στον άξονα z	
V_{car}	ταχύτητα οχημάτων	km/h
W	πλάτος δρόμου	m
z_0	αεροδυναμική τραχύτητα	m
A_v	συντελεστής van Driest	
α_W, α_E, α_S, α_N	Συντελεστές των φ_W, φ_E, φ_S, φ_N μεταβλητών στην διακριτοποιημένη εξίσωση διατήρησης	
α_P	Συντελεστής της φ_P μεταβλητής στην διακριτοποιημένη εξίσωση διατήρησης	
β	συντελεστής θερμικής διαστολής	
Γ_t	διαχυτότητα της τύρβης	
Γ_φ	Συντελεστής διάχυσης στις εξισώσεις διατήρησης	
δ	πάχος οριακού στρώματος	
Δ	πλάτος αποκοπής φίλτρου	
δ_{ij}	δέλτα του Kronecker	
ε	Ρυθμός απορρόφησης κινητικής ενέργειας της τύρβης	m^2/s^3
κ	σταθερά von Karman	
μ	δυναμικό μοριακό ιξώδες	kg/(ms)
μ_t	τυρβώδες ιξώδες	Pa*s
ρ	πυκνότητα αερίου	kg/m^3
σ_t	Αριθμός Prandtl/Schmidt	
τ_{ij}	διατμητική τάση	Pa
φ	μεταφερόμενη ποσότητα στις εξισώσεις διατήρησης	

$\overline{\varphi}(x,t)$	φιλτραρισμένη συνάρτηση μοντέλου LES
$\varphi(x,t)$	αρχική μη φιλτραρισμένη συνάρτηση μοντέλου LES
φ_W, φ_E, φ_S, φ_N	Τιμές της μεταφερόμενης μεταβλητής στους κεντρικούς κόμβους των γειτονικών κελιών
φ_P	Τιμή της μεταφερόμενης μεταβλητής στον κεντρικό κόμβο του υπολογιστικού κελιού

Συντομεύσεις

2SWF	Two-Scale Wall Function
ABLWT	Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel
ACH	Air Changes per Hour
AE	Absolute Error
AR	aspect ratio
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CFD	Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics)
CODASC	Concentration Data of Street Canyon
DDES	Detached Eddy Simulation
ECD	Electron Capture Detector
FVM	Μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (Finite Volume method)
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
L-B k-ε	Τροποποιημένο μοντέλο τύρβης k-ε των Lam & Bremhorst
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LES	Μοντέλο μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation)
MAE	Mean Absolute Error
RANS	Μοντέλα με μέσους όρους κατά Reynolds των εξισώσεων Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)
RMSE	Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error)
RSM	Μοντέλο τάσεων Reynolds (Reynolds Stress Model)
SAS	Scale Adaptive Simulation

SGS	Sub Grid Scale
SIMPLE	Semi-implicit Method for Pressure-Linked Equations
SST	Shear Stress Transport
TRAPOS	Traffic Pollution in Streets
T-S	Tollmien-Schlichting
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

Χημικά Είδη

C_2H_6	Αιθάνιο
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα
CO_2	Διοξείδιο του άνθρακα
NO_2	Διοξείδιο του αζώτου
NO_x	Οξείδια του αζώτου
O_3	Όζον
PM	Σωματίδια
SF_6	Εξαφθοριούχο θείο
VOC_s	Πτητικές οργανικές ενώσεις

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες ... 3
Περίληψη ... 4
Abstract ... 6
Ορολογία ... 7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ... 14
Εισαγωγή ... 14
1.1 Η σημασία της ποιότητας του αστικού αέρα ... 14
1.2 Προκλήσεις στην παρακολούθηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας ... 15
1.3 Πρόοδος στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική ... 15
1.4 Εισαγωγή στο φαινόμενο του αστικού φαραγγιού ... 16
1.5 Στόχοι της διατριβής ... 16
1.6 Σημασία της έρευνας ... 16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ... 18
Θεωρητικό Υπόβαθρο ... 18
2.1 Αστικά Φαράγγια ... 18
2.2 Αστική Ρύπανση ... 20
2.3 Προηγούμενες Έρευνες ... 20
2.4 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική ... 22
2.5 Λειτουργία κώδικα CFD ... 24
2.5.1 Προ-επεξεργαστής ... 25
2.5.2 Επιλύτης ... 25
2.5.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων ελέγχου (FVM) ... 26
2.5.2.2 Αλγόριθμος SIMPLE ... 27
2.5.3 Μετα-επεξεργαστής ... 27
2.6 Λογισμικό επίλυσης ... 28
2.6.1 Flow Simulation στο SolidWorks ... 28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ... 30
Η τύρβη και η μοντελοποίησή της ... 30
3.1 Χαρακτηριστικά τύρβης ... 30
3.2 Μετάβαση στην τύρβη ... 31
3.3 Ροή οριακού στρώματος επίπεδης πλάκας ... 32
3.3.1 Ροή κοντά στο τοίχωμα ... 33
3.4 Μοντέλα τύρβης ... 34
3.4.1 Εξισώσεις Navier-Stokes με μέσους όρους κατά Reynolds ... 34
3.4.1.1 Συμβατικό μοντέλο k-ε (standard k-ε) ... 35
3.4.2 Προσομοίωση μεγάλων δινών (LES) ... 36

3.4.3 Υβριδικό μοντέλο SAS (Scale Adaptive Simulation) 37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 39
Ανάπτυξη μοντέλου 39
4.1 Μελέτη περίπτωσης 39
4.2 Σχεδιασμός γεωμετρίας 40
4.3 Χαρακτηριστικά ροής – Παραδοχές 42
4.4 Μαθηματικό μοντέλο και κυβερνούσες εξισώσεις 43
4.4.1 Χειρισμός οριακού στρώματος 45
4.4.1.1 Προσέγγιση λεπτού οριακού στρώματος 45
4.4.1.2 Προσέγγιση πυκνού οριακού στρώματος 46
4.4.2 Υπολογιστικές παράμετροι 46
4.4.2.1 Στόχοι και κριτήρια σύγκλισης 46
4.5 Υπολογιστικό πεδίο και χωρική διακριτοποίηση 48
4.5.1 Τεκμηρίωση συμμετρικού προβλήματος 48
4.5.2 Ανεξαρτησία λύσης από το πλέγμα 54
4.6 Οριακές συνθήκες 58
4.6.1 Είσοδος 58
4.6.2 Έξοδος 59
4.6.3 Στερεά όρια 60
4.6.4 Όριο συμμετρίας 60
4.6.5 Πηγές 60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 62
Αποτελέσματα – Επαλήθευση μοντέλου 62
5.1 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα και άλλα μοντέλα τύρβης 62
5.2 Αξιολόγηση σφάλματος και σχολιασμός 67
5.3 Απεικόνιση τυρβώδους υδροδυναμικού πεδίου και συγκέντρωσης ρύπου 70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 75
Παραμετρική ανάλυση 75
6.1 Εξέταση μεταβολής διεύθυνσης ανέμου σε συνδυασμό με λόγο αναλογίας AR 75
6.1.1 Ανάπτυξη μοντέλων 76
6.1.2 Απεικόνιση αποτελεσμάτων 80
6.1.3 Σύγκριση παραμέτρων 83
6.2 Εξέταση μεταβολής ταχύτητας οχημάτων 84
6.2.1 Κατανομή ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού 85
6.2.2 Ανάλυση σχέσης συγκέντρωσης CO με την ταχύτητα των οχημάτων V_{car} 86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 87
Συμπεράσματα - Προτάσεις 87
7.1 Μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής σε αστικά φαράγγια 87

7.2 Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων 88
7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα..... 88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. 95
Τοπικό απόλυτο σφάλμα κατακόρυφης συνιστώσας ταχύτητας 95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. 99
Τοπικό απόλυτο σφάλμα συγκέντρωσης ρύπου 99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Η σημασία της ποιότητας του αστικού αέρα

Η ποιότητα του αέρα των πόλεων είναι ένα κρίσιμο ζήτημα δημόσιας υγείας που έχει συγκεντρώσει αυξανόμενη προσοχή λόγω των σοβαρών επιπτώσεών του στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι αποτέλεσμα της εκπομπής στην ατμόσφαιρα αερίων και σωματιδιακών ρύπων από ανθρώπινες δραστηριότητες και φυσικές διεργασίες. Οι ρύποι αυτοί μεταφέρονται και μεταβάλλονται μέσα στην ατμόσφαιρα, επηρεάζονται και επηρεάζουν το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Η ταχεία αστικοποίηση και οι βιομηχανικές δραστηριότητες έχουν οδηγήσει σε υψηλά επίπεδα ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου (NOx), τα σωματίδια (PM) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), που σχετίζονται με διάφορα προβλήματα υγείας, συμπεριλαμβανομένων των αναπνευστικών ασθενειών, των καρδιαγγειακών προβλημάτων, των εγκεφαλικών επεισοδίων, ακόμη και πρόωρη θνησιμότητα. Βάσει του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας (Π.Ο.Υ.), η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί το σημαντικότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς υπολογίζεται ότι το 92% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε συνθήκες ποιότητας αέρα που δεν πληρούν τα θεσπισμένα όρια ασφαλείας για την υγεία του, κάτι που απαιτεί αποτελεσματικές στρατηγικές αξιολόγησης και διαχείρισης για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων [1].

Αν και η ποιότητα της ατμόσφαιρας έχει σημειώσει σημαντική βελτίωση τα τελευταία είκοσι χρόνια, η ατμοσφαιρική ρύπανση παραμένει ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός κίνδυνος για την υγεία στην Ευρώπη. Σε ολόκληρη την ήπειρο, τα επίπεδα ρύπανσης συχνά ξεπερνούν τις πρόσφατες συστάσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (Π.Ο.Υ.). Η έκθεση του πληθυσμού σε συγκεντρώσεις μικροσωματιδίων και διοξειδίου του αζώτου που υπερβαίνουν τις προτεινόμενες τιμές, είχε ως αποτέλεσμα το 2021, 253.000 και 52.000 πρόωρους θανάτους αντίστοιχα. Την ίδια χρονιά, το 97% του αστικού πληθυσμού της ΕΕ εκτέθηκε σε επίπεδα μικροσωματιδίων άνω των τελευταίων κατευθυντήριων γραμμών που όρισε ο Π.Ο.Υ. [2].

Οι πιο ευάλωτες κοινωνικοοικονομικές ομάδες συχνά εκτίθενται σε υψηλότερα επίπεδα ρύπανσης, ενώ οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά και τα άτομα με προϋπάρχουσες παθήσεις είναι πιο ευαίσθητοι και εκτεθειμένοι

στις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ιδιαίτερα για τους νέους, υπολογίζεται ότι πάνω από 1.200 θάνατοι ετησίως σε άτομα κάτω των 18 ετών αποδίδονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση στην Ευρώπη. Εκτός από τα ζητήματα υγείας, η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για την ευρωπαϊκή οικονομία λόγω των αυξημένων δαπανών υγειονομικής περίθαλψης, της μείωσης του προσδόκιμου ζωής και των χαμένων ημερών εργασίας σε όλους τους τομείς.

1.2 Προκλήσεις στην παρακολούθηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας

Οι παραδοσιακές μέθοδοι παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα βασίζονται συχνά σε σταθερούς σταθμούς παρακολούθησης που παρέχουν περιορισμένη χωρική κάλυψη και χρονική ανάλυση. Αυτές οι μέθοδοι ενδέχεται να αποτύχουν να συλλάβουν τη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων ρύπων σε διαφορετικά αστικά μικροπεριβάλλοντα, ιδιαίτερα σε περιοχές με πολύπλοκες τοπογραφίες και διαφορετικές πηγές εκπομπών. Η ανεπάρκεια αυτών των συμβατικών προσεγγίσεων υπογραμμίζει την ανάγκη για προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης που μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες υψηλής ανάλυσης σχετικά με τη δυναμική της ποιότητας του αέρα σε αστικές περιοχές.



Εικόνα 1 Πλατφόρμα παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας της Περιφέρειας Κρήτης. (Πηγή: [1])

1.3 Πρόοδος στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση της διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε αστικά περιβάλλοντα. Το CFD δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να μοντελοποιήσουν τις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορφών ατμοσφαιρικής ροής, των εκπομπών ρύπων και της αστικής μορφολογίας. Με την επίλυση των εξισώσεων της κίνησης του ρευστού, η υπολογιστική ρευστοδυναμική μπορεί να παρέχει λεπτομερείς τρισδιάστατες αναπαραστάσεις της διασποράς των ρύπων, επιτρέποντας την καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι αστικές δομές επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει την αποτελεσματικότητα των μοντέλων CFD στην αξιολόγηση των συγκεντρώσεων, αποκαλύπτοντας κρίσιμες περιοχές όπου τα επίπεδα έκθεσης μπορεί να υπερβαίνουν τα ασφαλή όρια [3].

Η έρευνα έχει δείξει ότι τα επικυρωμένα μοντέλα CFD μπορούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια τη διασπορά των ρύπων κάτω από διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες και αστικές διαμορφώσεις. Για παράδειγμα, μια μελέτη που διεξήχθη στο Άουγκσμπουργκ της Γερμανίας χρησιμοποίησε μοντέλα CFD για την

αξιολόγηση πεδίων συγκέντρωσης ρύπων με βάση τη δραστηριότητα της κυκλοφορίας, επιτυγχάνοντας υψηλή χωρική ανάλυση που επέτρεψε στοχευμένες στρατηγικές μείωσης της ρύπανσης [4]. Ομοίως, μια άλλη μελέτη τόνισε τη σημασία της ενσωμάτωσης του CFD με μετεωρολογικά μοντέλα μέσης κλίμακας να βελτιώσει την ακρίβεια των προσομοιώσεων ποιότητας του αέρα εντός του αστικού ιστού [5].

1.4 Εισαγωγή στο φαινόμενο του αστικού φαραγγιού

Το φαινόμενο του αστικού φαραγγιού αναφέρεται στην ανάπτυξη και την επίδραση των ψηλών κτηρίων και των στενών δρόμων στις αστικές περιοχές, οι οποίοι δημιουργούν ένα είδος «φαραγγιού» που επηρεάζει τις συνθήκες του αέρα και το μικροκλίμα. Σε αυτές τις περιοχές, οι κατασκευές σχηματίζουν κοιλότητες όπου η ανανέωση του αέρα περιορίζεται και παγιδεύεται η ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης ρύπων και της θερμοκρασίας [6]. Αυτό το φαινόμενο έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής των κατοίκων, καθώς και στην υγεία τους, λόγω της αυξημένης έκθεσης σε ατμοσφαιρικούς ρύπους και ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες. Η πυκνή δόμηση στο αστικό σύνολο συμβάλλει στη δημιουργία θερμικών νησίδων, όπου οι θερμοκρασίες είναι σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με τις περιαστικές περιοχές. Αυτές οι θερμικές νησίδες ενισχύονται από την απορρόφηση και την επανεκπομπή θερμότητας από τις επιφάνειες των κτηρίων και των δρόμων, ιδίως όταν εφαρμόζονται συμβατικά υλικά κατασκευής που συχνά έχουν χαμηλή ανακλαστικότητα και υψηλούς συντελεστές εκπομπής [7],[8]. Επιπλέον, οι περιορισμένες ροές αέρα δυσχεραίνουν τη διάχυση και τον εκτοπισμό των ρύπων, οδηγώντας σε αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η κατανόηση του φαινομένου του αστικού φαραγγιού είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη βιώσιμων αστικών σχεδίων και στρατηγικών που στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και της γενικής ευημερίας των κατοίκων. Μέσω της εφαρμογής κατάλληλων αρχιτεκτονικών και πολεοδομικών πρακτικών, μπορεί να επιτευχθεί η μείωση των αρνητικών επιπτώσεων αυτού του φαινομένου, προάγοντας έτσι ένα βιώσιμο δομημένο περιβάλλον.

1.5 Στόχοι της διατριβής

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει να διερευνήσει την εφαρμογή των τεχνικών CFD για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα σε αστικά περιβάλλοντα. Οι ειδικοί στόχοι περιλαμβάνουν:

- Συγκριτική Αξιολόγηση: Αξιολόγηση της ακρίβειας της προσομοίωσης CFD έναντι πειραματικών δεδομένων σε κλίμακα αεροσήραγγας, καθώς και σύγκριση με άλλες μελέτες CFD οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικό λογισμικό και μοντέλο επίλυσης.
- Στρατηγικές μετριασμού: Προσδιορισμός πιθανών παρεμβάσεων με βάση τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα των πόλεων.

1.6 Σημασία της έρευνας

Τα ευρήματα αυτής της έρευνας μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην κατανόηση της δυναμικής της ποιότητας του αέρα στις πόλεις και να αναδείξουν τις δυνατότητες του CFD ως ουσιαστικού εργαλείου για την περιβαλλοντική αξιολόγηση. Παρέχοντας δεδομένα για τη διασπορά των ρύπων, η μελέτη στοχεύει στην ενημέρωση σχετικά με αποτελεσματικές στρατηγικές για τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα στις ταχέως αναπτυσσόμενες πόλεις. Καθώς οι αστικές περιοχές συνεχίζουν να αντιμετωπίζουν προκλήσεις που σχετίζονται με τη ρύπανση και τη δημόσια υγεία, η χρήση προηγμένων τεχνικών μοντελοποίησης όπως το

CFD θα είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων που προστατεύουν τόσο την ανθρώπινη υγεία όσο και το περιβάλλον.

Συμπερασματικά, αυτή η έρευνα όχι μόνο μπορεί να ενισχύσει την κατανόηση για τη δυναμική της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αλλά υποστηρίζει επίσης διαδικασίες λήψης αποφάσεων που βασίζονται σε τεκμήρια που στοχεύουν στη δημιουργία υγιέστερων αστικών περιβαλλόντων. Τέλος, το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση του φαινομένου, έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα από την επιστημονική κοινότητα για αντίστοιχους σκοπούς, κάτι που χαρακτηρίζει τη συνεισφορά της παρούσας εργασίας [9].

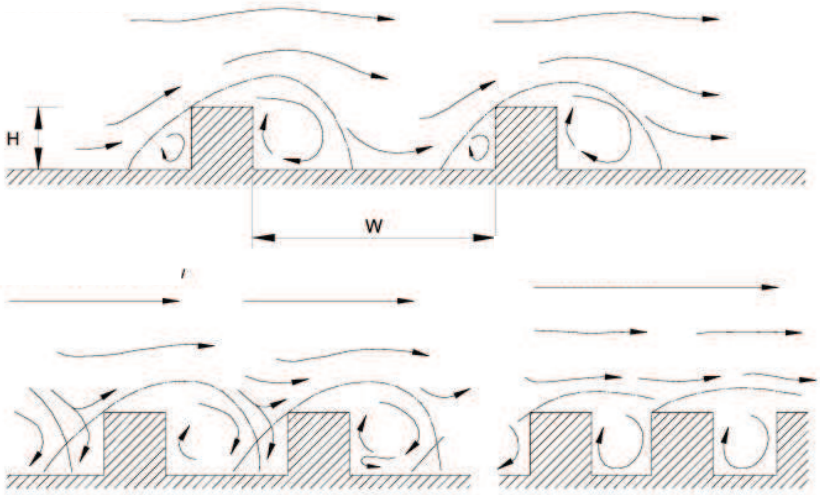
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Αστικά Φαράγγια

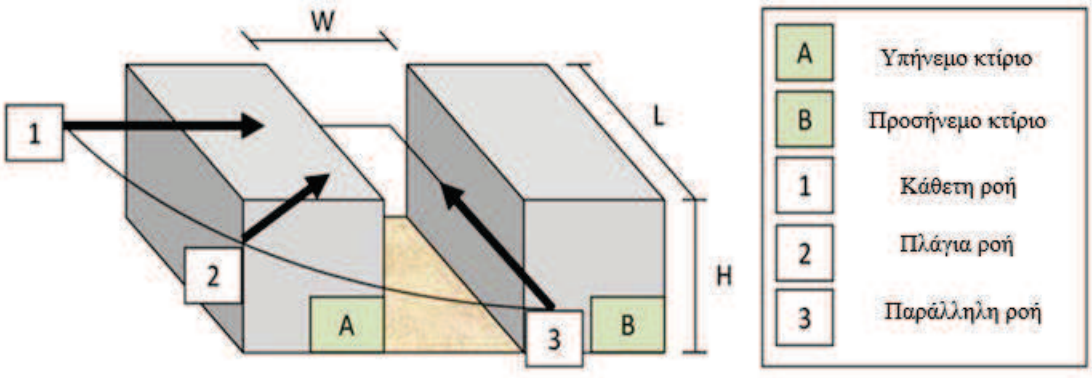
Τα αστικά φαράγγια αποτελούν τη βασική γεωμετρία του δομημένου περιβάλλοντος στον αστικό ιστό. Περιγράφονται από έναν περιορισμένο χώρο, συνήθως ένα στενό δρόμο, ανάμεσα σε δύο κτήρια, τα οποία είναι σχεδιασμένα κατά μήκος των δύο πλευρών του δρόμου. Όπως αναφέρεται και παραπάνω, βασικά χαρακτηριστικά της ροής εντός του αστικού φαραγγιού είναι οι ανακυκλοφορίες, η αυξημένες θερμοκρασίες καθώς και οι αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων. Η ροή του ανέμου εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αστικού φαραγγιού, όπως το ύψος των κτηρίων (H) προς το πλάτος του δρόμου (W) (AR, aspect ratio) και ο λόγος του μήκους των κτηρίων (L) προς το πλάτος του δρόμου (W). Με βάση τις παραπάνω αναλογίες των διαστάσεων, τα αστικά φαράγγια μπορούν να ταξινομηθούν σε [6]:

- Λεωφόρος: $AR \leq 0.5$
- Κανονικό: $0.5 \leq AR \leq 2$
- Βαθύ: $AR \geq 2$
- Κοντό: $L/W \leq 3$
- Μεσαίο: $3 \leq L/W \leq 7$
- Μακρύ: $L/W \geq 3$



Εικόνα 2 Τρεις περιπτώσεις ροής που σχετίζονται με διαφορετικές αναλογίες ύψος κτηρίου προς πλάτος δρόμου. (Πηγή: [10])

Τα αστικά φαράγγια μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σε συμμετρικά (H_u=H_d) και μη συμμετρικά (H_u≠H_d), με βάση το ύψος του ανάντη κτηρίου (H_u) και του κατάντη κτηρίου (H_d) ως προς τη ροή του ανέμου. Ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής του ανέμου, ως προς τα δύο κτήρια, η ροή του αστικού φαραγγιού μπορεί να χαρακτηριστεί κάθετη, παράλληλη, ή στρεβλή. Η ένταση και ο σχηματισμός των στροβιλισμών καθορίζονται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου, ενώ η κατεύθυνσή του επηρεάζει το σχήμα και την κλίμακα μήκους των δινών. Η υψηλότερη ταχύτητα ανέμου τείνει να βελτιώνει τις συνθήκες αερισμού, και ως εκ τούτου ενισχύει τη διασπορά και την απομάκρυνση των ρύπων [6]. Σύμφωνα με τις μελέτες, η κάθετη ροή προς τις κτηριοσειρές αντιπροσωπεύει το χειρότερο σενάριο εξαερισμού αστικών φαραγγιών και εκτοπισμού ρύπων.



Εικόνα 3 Βασική γεωμετρία αστικού φαραγγιού. (Πηγή: [6])

2.2 Αστική Ρύπανση

Η κυκλοφορία των οχημάτων αναγνωρίζεται ως η κύρια πηγή εκπομπών ρύπου στα αστικά φαράγγια. Η μεταφορά ρύπων εξαρτάται από το πόσο καλά το φαράγγι ανταλλάσσει αέρα με την ατμόσφαιρα πάνω από αυτό και με τους συνδεόμενους δρόμους. Τα επίπεδα εκπομπών μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας δεδομένα κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης του στόλου των οχημάτων, των μέσων ταχυτήτων και της έντασης της κυκλοφορίας. Για τους δρόμους που είναι εξοπλισμένοι με αυτόματα συστήματα μέτρησης κυκλοφορίας, αυτά τα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν εύκολα. Μελέτες έχουν δείξει γραμμική σχέση μεταξύ συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και έντασης κυκλοφορίας, υποδεικνύοντας ότι το CO είναι σχετικά αδρανές σε αυτά τα περιβάλλοντα. Ο λόγος εκπομπών διοξειδίου του αζώτου (NO2) προς οξειδωτικά του αζώτου (NOx) από τα οχήματα είναι συνήθως γύρω στο 1/10 έως 1/11, υποδεικνύοντας ότι η παραγωγή NO2 μέσω χημικών αντιδράσεων είναι σημαντική. Οι συγκεντρώσεις όζοντος (O3) στα αστικά φαράγγια εξαρτώνται από πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και εκπομπές NOx [6].

Παράλληλα, οι εκπομπές από τα οχήματα υφίστανται χημικούς μετασχηματισμούς που αλλάζουν τη χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας εντός των αστικών φαραγγιών. Αυτοί οι μετασχηματισμοί μπορεί να ποικίλλουν σε μεγάλο εύρος χρονικής κλίμακας, καθιστώντας δύσκολη την υπολογιστική μοντελοποίηση λόγω της μη γραμμικής φύσης των εξισώσεων που διέπουν το σύστημα. Σημαντική επίδραση στην ποιότητα του αέρα διαδραματίζει ακόμα το εξαφθοριούχο θείο (SF_6), το οποίο αν και δεν είναι άμεσο ρύπος όπως τα NO_x ή τα σωματίδια, η παρουσία του σε αστικές περιοχές συμβάλλει στο συνολικό προφίλ εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Καθώς οι πόλεις προσπαθούν να μειώσουν το αποτύπωμά τους σε άνθρακα, η διαχείριση των εκπομπών SF6 γίνεται ολοένα και πιο σημαντική.

2.3 Προηγούμενες Έρευνες

Έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον αστικό ιστό, δεδομένων των διαστάσεων που έχει λάβει το συγκεκριμένο ζήτημα τις τελευταίες δεκαετίες. Γι' αυτό το λόγο, έχουν γίνει πολλές μελέτες, οι οποίες έχουν ως στόχο την πειραματική διερεύνηση της ροής και της διάχυσης ρύπων σε αστικά φαράγγια, με τη χρήση αεροσήραγγας. Οι ερευνητές Vardoulakis et al. (2003) [11], Johnson et al. (1973) [12], Dabberdt et al. (1973) [13] και Ahmad et al. (2005) [14], ήταν από τους πρώτους οι οποίοι εξέτασαν τη συμπεριφορά και την κατανομή ρυπαντών ουσιών εντός αστικών φαραγγιών. Για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς ρύπων αλλά και της επίδρασης των συνθηκών της ροής σε αστικά φαράγγια μελετώντας δισδιάστατα (2D) υπολογιστικά πεδία, έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο τα μοντέλα RANS ([15]–[21]), όσο και προσομοιώσεις LES ([22]–[28]). Σημαντική έρευνα έχει διεξαχθεί επίσης για τη μοντελοποίηση τρισδιάστατων (3D) αστικών φαραγγιών, χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα τύρβης ([29]–[41]). Πολλές φορές, με σκοπό την μελέτη της συμπεριφοράς της ροής γύρω από κτήρια, χρησιμοποιούνται και υβριδικές προσεγγίσεις. Ένα παράδειγμα είναι η μελέτη του Ευρωπαϊκού ερευνητικού δικτύου TRAPOS (Traffic Pollution in Streets) [42], η οποία συνδυάζει τόσο την πειραματική μελέτη μέσω συνεχούς δειγματοληψίας συγκεντρώσεων ρύπου εντός του αστικού ιστού, προσομοιώσεις σε κλίμακα αεροσήραγγας, καθώς και επίλυση της ροής σε υπολογιστικό μοντέλο (CFD).

Από τις παραπάνω μελέτες μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

- Περισσότερο χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης είναι το standard k-ε, και η προσομοίωση LES, με πιο διαδεδομένο το standard k-ε μοντέλο [11].
- Οι σημαντικότεροι ρύποι που εξετάζονται στις έρευνες είναι οι NO_2, CO, CO_2, C_2H_6 και SF_6. Από αυτούς τους ρύπους, περισσότερο χρησιμοποιείται ο CO (μονοξείδιο του άνθρακα) [12],[37].
- Η χρήση υπολογιστικού πεδίου τριών διαστάσεων υπερτερεί στις έρευνες συγκριτικά με δισδιάστατα υπολογιστικά πεδία. Οι μελέτες αυτές, εξετάζουν επίσης τις τρισδιάστατες πλευρικές και δευτερεύουσες ροές, οι οποίες απουσιάζουν από τις δισδιάστατες προσομοιώσεις, επηρεάζουν όμως σημαντικά την συμπεριφορά της συγκέντρωσης των ρύπων [43],[29],[36].
- Το μοντέλο LES παρουσιάζει ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τα συμβατικά μοντέλα RANS, συγκριτικά με πειράματα αεροσήραγγας. Με την χρήση της προσομοίωσης LES προβλέπονται καλύτερα τόσο η συμπεριφορά της ροής, όσο και η κατανομή και η διασπορά του ρύπου [39]. Μεταξύ των μοντέλων RANS, το RSM είχε ελαφρώς καλύτερη απόδοση [40].
- Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ρύπου παρατηρούνται στο τοίχωμα του υπήνεμου κτηρίου. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις στο προσήνεμο τοίχωμα του δρόμου είναι περίπου δύο φορές χαμηλότερες [11], [27],[15],[19].
- Στις ημέρες με μεγαλύτερη ηλιοφάνεια, παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις δευτερευουσών ρυπαντών ουσίων, λόγω αυξημένης φωτοχημικής δραστηριότητας [11].
- Οι πραγματικές συνθήκες συνήθως προσομοιώνονται με μοντέλα μειωμένης κλίμακας. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε αεροσήραγγα ή σε εγκαταστάσεις εντός νερού. Κυρίως χρησιμοποιούνται πειράματα αεροσήραγγας, καθώς παρουσιάζει πλεονεκτήματα ως προς τον έλεγχο των συνθηκών διασποράς [11].
- Μία παράμετρος που εξετάζεται ευρέως είναι η κατεύθυνση του ανέμου ως προς το μήκος του δρόμου, με την πλειοψηφία των ερευνών να εστιάζει περισσότερο σε παράλληλες και κάθετες ροές και λιγότερο στις λοξές ροές του ανέμου ως προς τον δρόμο. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συγκέντρωση του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού είναι υψηλότερη στην περίπτωση της κάθετης ροής. Αντίθετα, παρατηρείται ότι όταν η ροή του ανέμου είναι παράλληλη στο μήκος του δρόμου, διευκολύνεται ο αερισμός, και οι συγκεντρώσεις του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού ελαττώνονται. [14],[26].
- Τα μοτίβα της ροής και της διασποράς των ρύπων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αστικού φαραγγιού. Σε αστικά φαράγγια βάθους, δηλαδή με αναλογία διαστάσεων ύψους κτηρίου προς το πλάτος του δρόμου AR≥2, οι δίνες εντός του δρόμου δεν αλληλεπιδρούν με την εξωτερική ροή, με αποτέλεσμα αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπου στο στην περιοχή αυτή. Αντίθετα, αστικά φαράγγια μειωμένου βάθους παρουσιάζουν καλύτερο αερισμό εξ΄αιτίας των δινών στις γωνίες των κτηρίων. Αυτό το φαινόμενο ελαττώνεται με την αύξηση του μήκους του δρόμου [14],[21],[18].
- Στο σύνολο των ερευνών η απεικόνιση της συγκέντρωσης του ρύπου πραγματοποιείται μέσω ενός αδιάστατου μεγέθους, με σκοπό την σύμπτυξη των δεδομένων για μία σειρά από ταχύτητες ανέμου και γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Με αυτόν τον τρόπο τα μεγέθη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για δεδομένα πραγματικής κλίμακας [15].
- Στην περίπτωση κάθετης ροής και αναλογία διαστάσεων AR=1, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού [15]. Αντίστοιχα, χαμηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, επιταχύνουν την συσσώρευση των ρύπων [44].
- Η αύξηση της έντασης της τύρβης στην είσοδο της ροής, οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού [16].

- Οι συγκεντρώσεις στο υπήνεμο τοίχωμα του δρόμου μειώνονται καθώς αυξάνεται το ύψος από το έδαφος του δρόμου έως το ύψος του κτηρίου. Αντίθετα, στο προσήνεμο τοίχωμα του δρόμου, η συγκέντρωση του ρύπου είναι σχεδόν σταθερή σε ως προς το ύψος του τοιχώματος [19].
- Για την προσομοίωση της πηγής της ρύπανσης από τα οχήματα, γίνεται κυρίως χρήση μιας σταθερής και πλευρικά ομογενούς γραμμής, που θεωρείται ιδανική πηγή [20].
- Ένα απομονωμένο αστικό φαράγγι σε ανοιχτό πεδίο παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά ροής από ένα αστικό φαράγγι εντός αστικού περιβάλλοντος. Στην πρώτη περίπτωση, οι δίνες εντός του δρόμου είναι ασταθείς και εκκενώνονται προς τα πάνω, οδηγώντας σε καλύτερη διασπορά του ρύπου. Στη δεύτερη περίπτωση, ανάμεσα στα κτήρια αναπτύσσονται περιστροφικές δίνες, με αποτέλεσμα την καταστολή του αερισμού, και την παγίδευση του ρύπου [20].
- Σε πολλές μελέτες, εξετάζεται ο δείκτης συναλλαγής αέρα με το περιβάλλον (ACH). Συμπεραίνεται ότι στην πλειοψηφία των ερευνών κάθετης ροής, το 95% του ρύπου εγκλοβίζεται εντός του αστικού φαραγγιού [18].
- Το λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής FLUENT είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιείται στις περισσότερες έρευνες για την προσομοίωση της ροής [30],[31],[34],[37],[38].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι για την μοντελοποίηση της αστικής ρύπανσης, ελάχιστα έχει χρησιμοποιηθεί το λογισμικό SolidWorks. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται μόλις μία μελέτη που αξιοποιεί το συγκεκριμένο λογισμικό, αυτή των A. Akhatova et al. (2015) [9], στην οποία γίνεται η χρήση του προγράμματος, με σκοπό την προσομοίωση της διασποράς των ρύπων, δεδομένων των εκτιμώμενων ρυθμών εκπομπών και των καιρικών συνθηκών. Ο στόχος της συγκεκριμένης έρευνας είναι η εξέταση μίας επιβαρυμένης περιοχής, όσο αφορά την αστική ρύπανση, της πόλης Αστάνα του Καζακστάν, και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στον αέρα τις ώρες αιχμής. Η μοντελοποίηση της τύρβης βασίζεται στο μοντέλο k-ε. Το υπολογιστικό πεδίο που εξετάζεται είναι τριών διαστάσεων, και για τις εκπομπές του ιχνηθέτη (CO) λαμβάνονται υπόψη γραμμικές πηγές στο επίπεδο της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα της μελέτης, δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις CO είναι σε χαμηλότερα επίπεδα από τα μέγιστα επιτρεπόμενα, ωστόσο παρατηρείται ότι αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα οι τιμές αυτές θα ξεπεράσουν τα επιτρεπόμενα όρια στα επόμενα χρόνια. Συμπεραίνεται επίσης, ότι υψηλότερες συγκεντρώσεις CO καταγράφονται το καλοκαίρι, συγκριτικά με τις άλλες εποχές του χρόνου. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο λογισμικό σε πρόβλημα αεροσήραγγας με στόχο τη συμβολή στην περαιτέρω διερεύνηση της χρήσης του SolidWorks σε προβλήματα διασποράς ρύπων σε αστικά φαράγγια.

2.4 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Υπολογιστική Ρευστοδυναμική ή CFD είναι η ανάλυση συστημάτων τα οποία περιλαμβάνουν ροή ρευστού, μεταφορά θερμότητας και συσχετιζόμενων φαινομένων, όπως χημικές αντιδράσεις μέσω προσομοίωσης, με τη βοήθεια υπολογιστικών εργαλείων. Αυτή η τεχνική είναι αρκετά αποτελεσματική και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και μη, πεδίων εφαρμογής. Παραδείγματα στα οποία χρησιμοποιείται είναι τα εξής [45]:

- Αεροδυναμική οχημάτων και αεροσκαφών.
- Υδροδυναμική πλοίων.
- Μονάδες παραγωγής ισχύος (κινητήρες εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλοι).

- Στροβιλομηχανές.
- Ηλεκτρική και ηλεκτρονική μηχανική. Μελέτη ψύξης ηλεκτρονικού εξοπλισμού.
- Χημική μηχανική: Παραγωγή πολυμερών υλικών, ανάμιξη και διαχωρισμός.
- Κτηριακό εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον: αερισμός, θέρμανση, φορτίου ανέμου.
- Θαλάσσια μηχανική και παράκτιες κατασκευές.
- Μηχανική περιβάλλοντος: διασπορά ρύπων.
- Μετεωρολογία και πρόβλεψη καιρικών συνθηκών.
- Βιοϊατρική: ροή αίματος στο σώμα.
- Υδρολογία και ωκεανογραφία.

Αρχικά, τεχνικές CFD ενσωματώθηκαν στην αεροδιαστημική βιομηχανία στην δεκαετία του 60. Αργότερα, οι μέθοδοι εφαρμόστηκαν στο σχεδιασμό κινητήρων εσωτερικής καύσης και θαλάμων καύσης αεριοστρόβιλων και κλιβάνων. Πλέον, η χρήση CFD για την πρόβλεψη των δυνάμεων οπισθέλκουσας, των ροών του αέρα κάτω από το κάλυμμα της μηχανής και του περιβάλλοντος εντός του οχήματος, αποτελούν βασικές μέθοδοι στην μηχανοκίνητη βιομηχανία. Με το πέρασμα του χρόνου, η υπολογιστική ρευστοδυναμική διαδραματίζει όλο και σημαντικότερο ρόλο στον σχεδιασμό βιομηχανικών προϊόντων και διεργασιών.

Βασικός στόχος σκοπός των εξελίξεων στον τομέα του CFD είναι να παρέχει εξίσου δυνατότητες με άλλα υπολογιστικά εργαλεία (πχ. CAE), όπως οι κώδικες ανάλυσης τάσης. Από την άλλη πλευρά, το CFD εξελίσσεται με βραδύ ρυθμό λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας της υποκείμενης συμπεριφοράς, η οποία καθιστά αδύνατη την οικονομική και πλήρη περιγραφή της ροής του ρευστού. Η διαθεσιμότητα προσιτών υλισμικών καθώς και η εισαγωγή φιλικών διεπαφών στο χρήστη, οδήγησαν στην εισαγωγή του CFD στην ευρύτερη βιομηχανία, την δεκαετία του 90.

Το ελάχιστο ετήσιο κόστος συντήρησης υλισμικού εκτιμάται μεταξύ 4800€ και 9600€. Επίσης, το κόστος άδειας χρήσης για τη χρήση του εμπορικού λογισμικού, κυμαίνεται από 9600€ έως και 48000€, ανάλογα τις πρόσθετες λειτουργίες του λογισμικού. Συνήθως οι εταιρίες προσφέρουν ετήσιες άδειες. Είναι εμφανές ότι τα έξοδα για τη χρήση CFD είναι αρκετά υψηλά, είναι όμως πιο οικονομική από μία πειραματική εγκατάσταση υψηλής ποιότητας. Επίσης η χρήση CFD παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες προσεγγίσεις σχεδιασμού [45]:

- Μείωση του χρόνου προετοιμασίας και του κόστους νέων σχεδιασμών.
- Δίνεται η ικανότητα μελέτης συστημάτων στα οποία η διεξαγωγή ελεγχόμενων πειραμάτων καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη.
- Ικανότητα μελέτης συστημάτων στα όρια της κανονικής τους απόδοσης (σενάρια ατυχημάτων, μελέτες ασφαλείας).
- Απεριόριστο επίπεδο λεπτομέρειας του αποτελέσματος.

Οι κώδικες CFD μπορούν να παράγουν μεγάλο όγκο αποτελεσμάτων, χωρίς επιπλέον κόστος, σε αντίθεση με το κόστος μίας πειραματικής διάταξης, το οποίο είναι ανάλογο με την πολυπλοκότητα, των αριθμό των δεδομένων και των αριθμό των θέσεων των μετρήσεων.

2.5 Λειτουργία κώδικα CFD

Οι κώδικες CFD δομούνται με βάση αριθμητικούς αλγορίθμους οι οποίοι επιλύουν προβήματα ροής των ρευστών. Όλα τα εμπορικά πακέτα CFD περιλαμβάνουν σύγχρονες διεπαφές χρηστών και φιλικά περιβάλλοντα στο χρήστη, τόσο για την εισαγωγή των παραμέτρων του προβλήματος, τόσο και για την απεικόνιση και εξέταση των αποτελεσμάτων. Γενικά, η ροή των ρευστών περιγράφεται από τις εξής θεμελιώδεις αρχές [46]:

1. Διατήρηση Μάζας
2. Διατήρηση της ενέργειας
3. Διατήρηση της Ορμής
4. Διατήρηση της συγκέντρωσης χημικού είδους

Οι παραπάνω νόμοι εκφράζονται με τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες διακριτοποιούνται και μετατρέπονται σε συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων. Από την επίλυση αυτών των συστημάτων, προκύπτουν οι αριθμητικές τιμές των μεταφερόμενων μεταβλητών, σε διακριτά σημεία στο χώρο και στο χρόνο. Σε περιπτώσεις όπως στην παρούσα εργασία, όπου εξετάζεται η ροή αέρα σε κτηριακούς χώρους, η ροή είναι τυρβώδης, και απαιτείται είτε η χρήση ενός μοντέλου τύρβης για την επίλυση των εξισώσεων, είτε να ληφθούν παραδοχές που αφορούν το μέγεθος των φαινομένων διάχυσης που προκαλεί η τύρβη. Όλες οι κυβερνούσες εξισώσεις διατήρησης που αναφέρονται παραπάνω μπορούν να γραφούν στην παρακάτω γενική μορφή [47]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \mathrm{div}\left(\rho\,\vec{u}\,\varphi - \Gamma_{\varphi}\mathrm{grad}\varphi\right) = S_{\varphi} \tag{2.1}$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, ή στην περίπτωση που εμπλέκονται χημικά είδη, η πυκνότητα του μίγματος, φ είναι η μεταφερόμενη ποσότητα, t ο χρόνος, $\vec{u}$ το διάνυσμα της ταχύτητας, Γ_{φ} ο συντελεστής διάχυσης, και S_{φ} ο όρος πηγής/καταβόθρας. Το παραπάνω ισοζύγιο μπορεί να γραφεί ως εξής:

Πίνακας 1 Ισοζύγιο μεταβλητής ροής φ.

Ρυθμός μεταβολής του φ στον όγκο ελέγχου ως προς το χρόνο	=	Καθαρός ρυθμός αύξησης του φ λόγω συναγωγής εντός του όγκου ελέγχου	+	Καθαρός ρυθμός αύξησης του φ λόγω διάχυσης εντός του όγκου ελέγχου	+	Καθαρός ρυθμός παραγωγής του φ εντός του όγκου ελέγχου

Ο όρος φ μπορεί να είναι 1 για την εξίσωση συνέχειας, u_x,u_y,u_z για την εξίσωση ορμής σε τρεις διαστάσεις (σε καρτεσιανές συντεταγμένες), θερμοκρασία ή ενθαλπία για την εξίσωση ενέργειας, και Y_{cs} για την εξίσωση της συγκέντρωσης του χημικού είδους cs, πχ. ρύποι. Στην περίπτωση της τύρβης, η μεταφερόμενη ποσότητα φ εξαρτάται από το μοντέλο τύρβης το οποίο επιλέγεται.

Έτσι, όλοι οι κώδικες καλύπτουν τρία βασικά στοιχεία: i) προ-επεξεργαστή, ii) επιλύτη, και iii) μετα-επεξεργαστή.

2.5.1 Προ-επεξεργαστής

Το στάδιο της προ-επεξεργασίας αποτελείται από την εισαγωγή στο πρόγραμμα CFD ενός προβλήματος ροής, μέσω μίας φιλικής διεπαφής στο χρήστη, και στον μετασχηματισμό του προβλήματος σε κατάλληλη μορφή για τον επιλύτη. Οι ενέργειες του χρήστη στο συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνουν τα παρακάτω βήματα:

- Ορισμός υπολογιστικού χώρου, ή αλλιώς της γεωμετρίας της εξετάζουσας περιοχής.
- Γένεση πλέγματος: Υποδιαίρεση του υπολογιστικού χώρου σε μικρότερο αριθμό υπο-χώρων, που αποτελούν το υπολογιστικό πλέγμα (κελιών, όγκων ελέγχου ή στοιχείων).
- Επιλογή φυσικών και χημικών φαινομένων που θα μοντελοποιηθούν.
- Ορισμός ιδιοτήτων του ρευστού.
- Προσδιορισμός οριακών συνθηκών στα κελιά τα οποία είναι σε επαφή με τα όρια του χωρίου ή συμπίπτουν με αυτά.

Η λύση ενός ροϊκού προβλήματος ορίζεται στους κόμβους, στο εσωτερικό κάθε κελιού. Ο αριθμός των κελιών του πλέγματος καθορίζουν και την ακρίβεια της λύσης, όπου όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των κελιών, τόσο ακριβέστερη είναι η λύση. Εκτός της ακρίβειας, ο αριθμός των κελιών καθορίζει επίσης το κόστος, ως προς το λογισμικό και το χρόνο υπολογισμού. Συνήθως τα βέλτιστα πλέγματα είναι μη-ομοιόμορφα: αραιά σε περιοχές μικρής διακύμανσης από σημείο σε σημείο, και πυκνότερα σε περιοχές με μεγάλες διακυμάνσεις. Σε κάποια λογισμικά (π.χ. SolidWorks) αυτή η πύκνωση γίνεται αυτόματα. Στα περισσότερα, ο σχεδιασμός ενός πλέγματος και ως αποτέλεσμα η καλύτερη σχέση ακρίβειας-κόστους εξαρτάται από την τεχνική κατάρτιση του χρήστη.

Πάνω από το 50% του χρόνου που καταναλώνεται για ένα πρόβλημα CFD, αποδίδεται στο σχεδιασμό της γεωμετρίας, και στην δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Για αυτό το λόγο τα περισσότερα λογισμικά τη σημερινή εποχή παρέχουν τη δική τους διεπαφή τύπου CAD ή και τα δικά τους μέσα εισαγωγής δεδομένων. Εκτός από την εφαρμογή των βασικών εξισώσεων ροής, παρέχουν ακόμα πρόσβαση σε βιβλιοθήκες ιδιοτήτων υλικών για κοινά ρευστά, και μέσα για την εφαρμογή ειδικών μοντέλων φυσικών και χημικών διεργασιών, όπως μοντέλα τύρβης και μοντέλα καύσης.

2.5.2 Επιλύτης

Όπως αναφέρεται παραπάνω, οι κυβερνούσες εξισώσεις είναι μη γραμμικές και δεν επιδέχονται αριθμητική λύση. Γι΄ αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι κατά τις οποίες οι εξισώσεις επαναγραμμικοποιούνται και επιλύονται μέχρι την ικανοποίηση κριτηρίων σύγκλισης που ορίζονται από τον χρήστη. Οι τρεις βασικές κατευθύνσεις στις τεχνικές αριθμητικής επίλυσης είναι οι εξής: η τεχνική των πεπερασμένων διαφορών, η τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων και η τεχνική των φασματικών μεθόδων. Το λογισμικό SolidWorks που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ενσωματώνει τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (FVM-Finite Volume Method), μία ειδική διαμόρφωση των πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την ανάλυση ροής ρευστών και επιτρέπει την διακριτοποίηση και επίλυση των νόμων διατήρησης, όπως η μάζα, η ορμή και η ενέργεια.

2.5.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων ελέγχου (FVM)

Η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου για την επίλυση των εξισώσεων αποτελείται από τα παρακάτω βήματα [48]:

1. Ολοκλήρωση των κυβερνουσών εξισώσεων της ροής του ρευστού για το σύνολο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου.
2. Διακριτοποίηση των ολοκληρωτικών εξισώσεων που προκύπτουν, σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων.
3. Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με μία επαναληπτική μέθοδο.

Σύμφωνα με την FVM, η διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης 1 για δισδιάστατο πλέγμα γίνεται:

$$\alpha_P \varphi_P = \alpha_W \varphi_W + \alpha_E \varphi_E + \alpha_N \varphi_N + \alpha_S \varphi_S + B_\varphi \tag{2.2}$$

Στον τύπο 2.2 οι συντελεστές συμβολίζουν τις συναρτήσεις των ρυθμών μεταφοράς της ποσότητας φ με συναγωγή και διάχυση στα μέτωπα των κελιών. Για τον υπολογισμό της, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όπως το σχήμα ανάντη, κεντρικών διαφορών, υβριδικό, κλπ. :

$$\alpha_P = \alpha_W + \alpha_E + \alpha_S + a_N + CV \cdot \frac{\rho_P}{dt} \tag{2.3}$$

$$B_\varphi = S_{\varphi,\rho} \cdot CV + CV \cdot \rho_P^0 \varphi_P^0 / dt \tag{2.4}$$

CV: Όγκος κελιού

ρ_P: τιμή πυκνότητας στον κεντρικό κόμβο P

dt: χρονικό βήμα

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων διαφοροποιείται από τις άλλες τεχνικές CFD στο πρώτο βήμα, δηλαδή στην ολοκλήρωση σε όγκο ελέγχου. Οι εξισώσεις οι οποίες προκύπτουν, εκφράζουν την διατήρηση των σχετικών ιδιοτήτων για κάθε κελί πεπερασμένου μεγέθους. Αυτή η άμεση σχέση μεταξύ του αριθμητικού αλγορίθμου και της υποκείμενης αρχής διατήρησης δίνει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην συγκεκριμένη μέθοδο για την κατανόησή της, συγκριτικά με άλλες μεθόδους, όπως τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι τεχνικές διακριτοποίησης που παρέχονται από τους CFD κώδικες είναι κατάλληλες για βασικά φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, όπως συναγωγή και διάχυση, καθώς και για τους όρους πηγής, που συνδέονται με την παραγωγή ή την απορρόφηση του φ, και τον ρυθμό μεταβολής ως προς το χρόνο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικών δεδομένων, απαιτείται μία επαναληπτική μέθοδος για την προσέγγιση της λύσης. Μερικές τέτοιες διαδικασίες επίλυσης είναι αυτές με το γραμμικό επιλύτη TDMA (αλγόριθμος τριδιαγώνιου πίνακα) αλγεβρικών εξισώσεων, και με τον αλγόριθμο SIMPLE, με στόχο τη διασφάλιση της σωστής σύνδεσης μεταξύ πίεσης και ταχύτητας. Για τον συγκεκριμένο αλγόριθμο γίνεται περιγραφή στη συνέχεια, καθώς αποτελεί την επαναληπτική μέθοδο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα SolidWorks Flow Simulation. Τέλος, επιγραμματικά αναφέρονται νεότερες τεχνικές όπως οι επαναληπτικές τεχνικές σημείου Gauss-Seidel, με πολυπλεγματικούς επιταχυντές και μεθόδους συζυγών κλίσεων.

2.5.2.2 Αλγόριθμος SIMPLE

Ο αλγόριθμος SIMPLE (Semi-implicit Method for Pressure-Linked Equations) διατυπώθηκε από τους Patankar και Spalding (1972) [49] και αποτελεί μία διαδικασία εκτίμησης-διόρθωσης για τον υπολογισμό της πίεσης στη διάταξη του μετατοπισμένου πλέγματος. Η ιδέα της χρήσης του μετατοπισμένου πλέγματος είναι να εκτιμηθούν βαθμωτές μεταβλητές, όπως για παράδειγμα η πίεση η πυκνότητα και η θερμοκρασία, σε συνηθισμένα κομβικά σημεία, αλλά και ο υπολογισμός των συνιστωσών της ταχύτητας να γίνεται σε μετατοπισμένα πλέγματα που έχουν ως επίκεντρο τις έδρες των κελιών. Η μέθοδος είναι επαναληπτική, ενώ όταν άλλες βαθμωτές μεταβλητές συζεύγυνται με τις εξισώσεις ορμής, ο υπολογισμός πρέπει να γίνεται σειριακά. Παρακάτω φαίνεται η σειρά των ενεργειών που ακολουθείται σε μία διαδικασία CFD στην οποία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SIMPLE [45].

Βήμα 1: Λύνονται οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής χρησιμοποιώντας το υποθετικό πεδίο πίεσης p*.

$$a_{i,J}u^*_{i,J} = \Sigma a_{nb}u^*_{nb} + \left(p^*_{I-1,J} - p^*\right)A_{i,J} + b_{i,J} \tag{2.5}$$

$$a_{i,j}v^*_{i,j} = \Sigma a_{nb}v^*_{nb} + \left(p^*_{I,J-1} - p^*_{I,J}\right)A_{I,J} + b_{I,j} \tag{2.6}$$

Βήμα 2: Λύνεται η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης

$$a_{I,J}p'_{I,J} = a_{I-1,J}p'_{I-1,J} + a_{I+1,J}p'_{I+1,J} + a_{I,J-1}p'_{I,J-1} + a_{I,J+1}p'_{I,J+1} + b'_{I,J} \tag{2.7}$$

Βήμα 3: Διόρθωση της πίεσης και των ταχυτήτων.

$$p_{I,J} = p^*_{I,J} + p'_{I,J} \tag{2.8}$$

$$u_{i,J} = u^*_{i,J} + d_{i,J}(p'_{I-1,J} - p'_{I,J}) \tag{2.9}$$

$$v_{I,j} = v^*_{I,j} + d_{I,j}(p'_{I,J-1} - p'_{I,J}) \tag{2.10}$$

Βήμα 4: Λύση όλων των άλλων διακριτοποιημένων εξισώσεων μεταφοράς .

$$a_{I,J}\varphi_{I,J} = a_{I-1,J}\varphi_{I-1,J} + a_{I+1,J}\varphi_{I+1,J} + a_{I,J-1}\varphi_{I,J-1} + a_{I,J+1}\varphi_{I,J+1} + b_{\varphi I,J} \tag{2.11}$$

Σε περίπτωση σύγκλισης, ο αλγόριθμος λήγει, ενώ σε αντίθετη περίπτωση επιστρέφει στο Βήμα 1 και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

2.5.3 Μετα-επεξεργαστής

Ο τομέας της μετα-επεξεργασίας αφορά την οπτικοποίηση των δεδομένων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα εργαλεία αυτά περιλαμβάνουν:

- Παρουσίαση υπολογιστικού χώρου και πλέγματος.
- Διανυσματικά γραφήματα.
- Διαγράμματα ισοϋψών.
- Δισδιάστατα και τρισδιάστατα διαγράμματα επιφανειών.

- Προσομοίωση τροχιών σωματιδίων.
- Χειρισμός όψης (περιστροφή, μετατόπιση, κλιμακοποίηση, κ.λπ.).
- Έγχρωμες PostScript εικόνες.

Τα τελευταία χρόνια, έχει προστεθεί η δυνατότητα κίνησης για παρουσίαση δυναμικού αποτελέσματος, ενώ παράλληλα όλοι οι κώδικες διαθέτουν μονάδες εξαγωγής για περαιτέρω χειρισμό, εξωτερικά του κώδικα.

2.6 Λογισμικό επίλυσης

Το υπολογιστικό λογισμικό που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και την επίλυση του προβλήματος είναι το SolidWorks. Σχεδιάστηκε από την Dassault Systèmes το 1995, και είναι ένα από τα πιο δημοφιλή λογισμικά CAD (Computer-Aided Design) που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για το σχεδιασμό μηχανικών εξαρτημάτων και συστημάτων. Με μια φιλική προς τον χρήστη διεπαφή και ισχυρές παραμετρικές δυνατότητες, το λογισμικό επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν τρισδιάστατα μοντέλα με ευκολία και ακρίβεια.

2.6.1 Flow Simulation στο SolidWorks

Μία από τις πιο ισχυρές δυνατότητες του SolidWorks είναι η Προσομοίωση Ροής (Flow Simulation), η οποία επιτρέπει την ανάλυση ροής ρευστών. Αυτή η λειτουργία είναι κρίσιμη για την κατανόηση του τρόπου αλληλεπίδρασης των ρευστών με τα σχεδιαζόμενα εξαρτήματα, διευκολύνοντας έτσι τη διαδικασία σχεδίασης και βελτιστοποίησης προϊόντων. Η δυνατότητα Flow Simulation είναι ένα καινοτόμο παράδειγμα προσαρμογής της ενημερωμένης τεχνολογίας CAE (ρευστοδυναμική και μεταφορά θερμότητας) για τις ανάγκες προβλημάτων μηχανικού. Η μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (FVM) σε δομημένα ή μη δομημένα πλέγματα. Σε διαφορετικό κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς πώς η συγκεκριμένη λειτουργία διακριτοποιεί τις εξισώσεις που διέπουν την κίνηση του ρευστού, και πιο συγκεκριμένα τις εξισώσεις Navier-Stokes [50]. Βασικές δυνατότητες της λειτουργίας Flow Simulation είναι οι εξής:

- Ανάλυση Ροής: Δυνατότητα προσομοίωσης ροών αέρα, νερού ή άλλων ρευστών γύρω από τα μοντέλα, επιτρέποντας στους χρήστες να κατανοήσουν πώς οι δυνάμεις των ρευστών επηρεάζουν την απόδοση του προϊόντος.
- Θερμική Ανάλυση: Εκτίμηση της θερμοκρασίας και της θερμικής κατανομής στα μοντέλα, βοηθώντας στην αποφυγή υπερθέρμανσης ή άλλων θερμικών προβλημάτων.
- Διαχείριση Πίεσης: Παρακολούθηση των πιέσεων που ασκούνται στα εξαρτήματα κατά τη διάρκεια της ροής, γεγονός που είναι κρίσιμο για την αντοχή και τη σταθερότητα των σχεδίων.

Για την σύζευξη πίεσης-ταχύτητας χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SIMPLE, ενώ για την μοντελοποίηση της τύρβης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται τροποποιημένο μοντέλο τύρβης k-ε, μία παραλλαγή του standard k-ε, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Lam και Bremhorst (1981) με βασικό γνώμονα την βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμών πολύ κοντά σε τοιχώματα λαμβάνοντας υπόψη την μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη στο οριακό στρώμα [51].

Τέλος, η τεχνολογία βασίζεται στις εξής αρχές:

- Τεχνολογία καρτεσιανού πλέγματος που ασχολείται άμεσα με εγγενή πολύπλοκες CAD γεωμετρίες.
- Τεχνολογία επεξεργασίας οριακού στρώματος που επιτρέπει την εκτέλεση υπολογισμών ροής ρευστού με σχετικά αραιά πλέγματα. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στην μοντελοποίηση της μετάβασης από το στρωτό στο τυρβώδες υπόστρωμα μέσω ειδικών συναρτήσεων τοίχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η τύρβη και η μοντελοποίησή της

3.1 Χαρακτηριστικά τύρβης

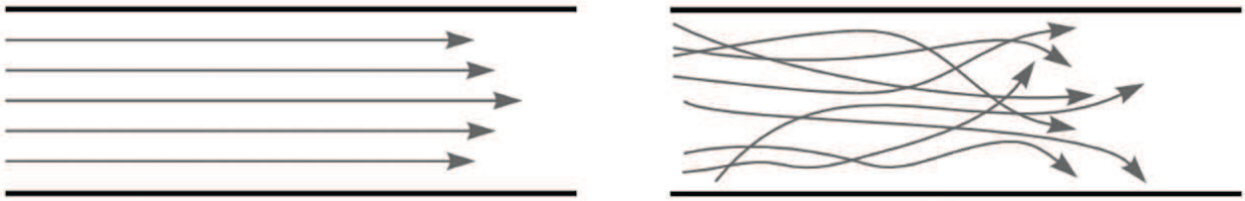
Με τον όρο τύρβη ονομάζεται η κατάσταση στην οποία η ταχύτητα και όλες οι ιδιότητες της ροής ποικίλουν με τυχαίο και χαοτικό τρόπο. Η τυχαία αυτή κίνηση είναι μη μόνιμη, κυρίως περιστροφική, διαχυτική και αποθετική, ακόμα και με σταθερές επιβεβλημένες οριακές συνθήκες (τύπου Dirichlet). Βασικό χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής είναι η μεταφορά ενέργειας στις μικρότερες χωρικές κλίμακες κατά μήκος ενός συνεχούς φάσματος κυματικού αριθμού, πρόκειται δηλαδή για τρισδιάστατη μη γραμμική διεργασία. Ο δείκτης ελέγχου του είδους της ροής, είναι ο αδιάστατος αριθμός Reynolds:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u x}{\mu} \tag{3.1}$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού σε kg/m^3, u η ταχύτητά του σε m/s, μ η συνεκτικότητα ή το δυναμικό ιξώδες, σε kg/(ms) και x το χαρακτηριστικό μήκος του πεδίου ροής σε m. Αποτελεί ένα μέτρο της σχετικής επίδρασης των δυνάμεων αδράνειας (που συνδέονται με φαινόμενα συναγωγής) στον αριθμητή, και των δυνάμεων εξαιτίας του ιξώδους, στον παρανομαστή. Πειράματα δείχνουν ότι σε τιμές κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds Re_{crit}, η ροή του ρευστού είναι ομαλή, και τα γειτονικά στρώματα του ρευστού γλιστρούν το ένα πλάι στο άλλο, χωρίς συναλλαγές μάζας μεταξύ των στρωμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση, με την υπόθεση ότι εφαρμόζονται σταθερές οριακές συνθήκες, οι ιδιότητες της ροής είναι χρονικά σταθερές και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στρωτή ροή. Όταν οι τιμές του αριθμού Reynolds ξεπεράσουν την κρίσιμη τιμή Re_{crit}, τότε οι αδρανειακές δυνάμεις υπερτερούν έναντι των ιξωδών, εμφανίζονται μεταβολές των ιδιοτήτων της ροής με τυχαίο τρόπο, και κατάσταση αυτή λέγεται τυρβώδης ροή [45].

Όταν εμφανίζεται τύρβη, η διακυμαινόμενη συνιστώσα ταχύτητας u' παύει να είναι αμελητέα, συνεπώς λαμβάνει σημαντική συνεισφορά στην στιγμιαία ταχύτητα. Κατά Reynolds, η στιγμιαία ταχύτητα εκφράζεται ως ακολούθως:

$$u(t) = U + u'(t) \tag{3.2}$$



Εικόνα 4 Απεικόνιση στρωτής (αριστερά) και τυρβώδους ροής (δεξιά). (Πηγή: [52])

Η αναπαράσταση της τυρβώδους ροής αποκαλύπτει δομές στροβιλότητας, οι οποίες επιτρέπουν στα σωματίδια του ρευστού τα οποία βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις να πλησιάσουν το ένα στο άλλο. Με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ πιο αποτελεσματική η ανταλλαγή θερμότητας, μάζας και ορμής, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών στους συντελεστές διάχυσης των φαινομενολογικών νόμων που διέπουν μαθηματικά τις συναλλαγές των αντίστοιχων ιδιοτήτων. Με άλλα λόγια, τα φαινόμενα που αναπτύσσονται οφείλονται κυρίως στις δίνες που δημιουργούνται από τη στροβιλότητα της ροής.

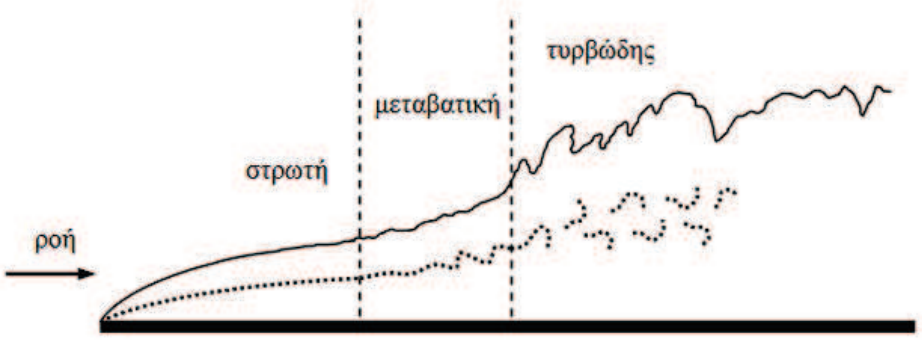
Με βάση την θεώρηση της δίνης (eddy concept) [53], η δίνη δύναται να χαρακτηριστεί ως μια τυπική τυρβώδης δομή, που καλύπτει ένα εύρος μηκών κύματος μεγάλων και μικρών δινών που συνυπάρχουν σε ένα όγκο ρευστού. Κύρια δομικά χαρακτηριστικά μίας τυρβώδους ροής είναι οι ανακυκλοφορίες και οι δίνες. Για να περιγραφεί η τυρβώδης ροή χρησιμοποιείται το τυρβώδες ιξώδες, το οποίο εκπροσωπεί τοπική ιδιότητα του ρευστού και είναι ανάλογο του μοριακού ιξώδους. Οι μεγαλύτερες τυρβώδεις δίνες αλληλεπιδρούν με και αφαιρούν ενέργεια από τη μέση ροή με μία διαδικασία, η οποία ονομάζεται επιμήκυνση της δίνης (vortex stretching). Η παρουσία συνιστωσών μέσης ταχύτητας σε διατμητικές ροές προκαλεί την παραμόρφωση των περιστροφικών τυρβωδών ροών. Οι κατάλληλα ευθυγραμμισμένες δίνες εμφανίζουν επιμήκυνση, λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας του ενός άκρου από το άλλο αποδίδοντας φαινόμενα ανισοτροπίας. Οι μεγάλες δίνες, θεωρούνται ως ιδανικές χωρίς ιξώδες, ενώ, κατά τη διάρκεια της επιμήκυνσης της δίνης, η γωνιακή ορμή διατηρείται. Έτσι, προκαλείται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και ελάττωση της ακτίνας διατομής τους. Η διαδικασία αυτή προκαλεί κινήσεις σε μικρότερες κλίμακες χρόνου και εγκάρσιου μήκους. Το έργο επιμήκυνσης το οποίο παράγεται από τη μέση ροή στις μεγάλες δίνες κατά τη διάρκεια των γεγονότων αυτών, παρέχει την ενέργεια που διατηρεί την τύρβη.

Οι μικρότερες δίνες επιμηκύνονται ισχυρά από τις μεγαλύτερες, και ασθενέστερα από τη μέση ροή. Έτσι, η μεταφορά της κινητικής ενέργειας γίνεται από τις μεγαλύτερες προς τις μικρότερες δίνες, και αυτή η διαδικασία ονομάζεται εξελικτική σειρά ενέργειας (ή καταρράκτης ενέργειας). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το ιξώδες δεν διαδραματίζει κανένα ρόλο στην επιμήκυνση των στροβίλων αλλά ούτε και καθορίζει το ποσό της αποτιθέμενης ενέργειας, καθορίζει απλώς τις μικρότερες κλίμακες στις οποίες καταλήγει η ενεργειακή απόθεση. Αυτές που καθορίζουν το ρυθμό με τον οποίο η κινητική ενέργεια της μέσης ροής τροφοδοτείται στην τυρβώδη κίνηση είναι οι δίνες μεγάλης κλίμακας [45]. Επομένως, οι μεγαλύτερες δίνες είναι υπεύθυνες για την μεταφορά ορμής και θερμότητας. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να προσομοιώνονται κατάλληλα με τη χρήση ενός μοντέλου τύρβης.

3.2 Μετάβαση στην τύρβη

Το σημείο στο οποίο εμφανίζεται πρώτα η αστάθεια είναι πάντα ανάντη του σημείου μετάβασης στην πλήρως τυρβώδη ροή. Η απόσταση μεταξύ του σημείου αστάθειας με το σημείο μετάβασης (δηλαδή των σημείων όπου ο αριθμός Reynolds ισούται με $Re_{x,crit}$ και $Re_{x,tr}$ αντίστοιχα) εξαρτάται από το βαθμό ενίσχυσης

των ασταθών διαταραχών. Η έναρξη του μηχανισμού μετάβασης, καθώς και το σημείο αστάθειας μπορούν να προβλεφθούν με τη γραμμική θεωρία υδροδυναμικής αστάθειας. Για την περιγραφή της πορείας που οδηγεί από την αρχική αστάθεια στην πλήρως τυρβώδη ροή, έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα πρόβλεψης, βασισμένα σε πειραματικές παρατηρήσεις της συμπεριφοράς της ροής σε τυπικές ροές, όπως ροή δέσμης, οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας και ροής σε αγωγό. Παρακάτω περιγράφεται εκτενέστερα η ροή του οριακού στρώματος σε επίπεδη πλάκα, που αφορά την συγκεκριμένη εργασία.

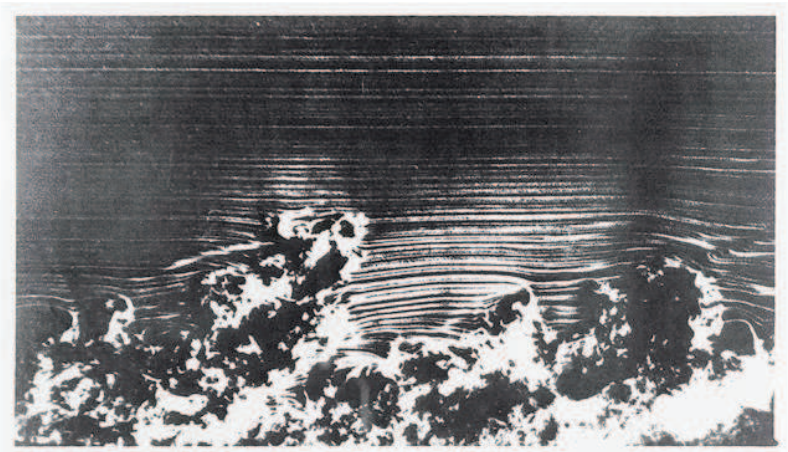


Εικόνα 5 Μετάβαση από την στρωτή στην τυρβώδη ροή. (Πηγή: [45])

3.3 Ροή οριακού στρώματος επίπεδης πλάκας

Στις περιπτώσεις ροών με κατανομή ταχύτητας χωρίς σημείο καμπής, σύμφωνα με τη θεωρία της αστάθειας με ιξώδες υπάρχει μία πεπερασμένη περιοχή αριθμών Reynolds περί του Re_{δ}=1000, όπου δ το πάχος του οριακού στρώματος, στην οποία οι απειροστές διαταραχές ενισχύονται. Τέτοια περίπτωση είναι και η ροή πάνω από επίπεδη πλάκα. Όταν η εισερχόμενη ροή είναι στρωτή, η αρχική γραμμική αστάθεια εμφανίζεται για $Re_{x,crit}$=91.000. Από εκεί και μετά, οι διαταραχές ξεκινούν και μεγεθύνονται στη διεύθυνση της ροής. Οι ασταθείς δισδιάστατες διαταραχές ονομάζονται κύματα Tollmien-Schlichting (κύματα T-S) [45]. Η ανάπτυξη που ακολουθεί εξαρτάται από το πλάτος των κυμάτων στη μέγιστη ενίσχυση.

Σε περίπτωση που το πλάτος είναι μεγάλο, ένας δευτερογενής, μη γραμμικός μηχανισμός αστάθειας προκαλεί την μετατροπή των κυμάτων T-S σε τρισδιάστατα κύματα, και την διαμόρφωσή τους σε διατεταγμένες δίνες Λ σχήματος φουρκέτας, γνωστό ως μηχανισμός τύπου Κ. Λόγω της διάδοσης της διατμητικής διαταραχής πάνω από τις δίνες, ακολουθεί μία αλυσιδωτή διάσπαση του στρώματος διάτμησης σε μικρότερες μονάδες με εμφάνιση τριγωνικών τυρβωδών κηλίδων. Οι κηλίδες αυτές παρασύρονται με τη ροή και αναπτύσσονται επεκτεινόμενες πλάγια, προς μία κατάσταση συνένωσής τους προς την πλήρως ανεπτυγμένη τύρβη. Το σημείο μετάβασης της ροής οριακού στρώματος λαμβάνει χώρα σε αριθμούς $Re_{x,tr}\approx 5*10^5$. Η περιοχή μετάβασης δηλαδή είναι: $91.000<Re<5*10^5$



Εικόνα 6 Τυρβώδες οριακό στρώμα σε ροή πάνω από επίπεδη πλάκα. (Πηγή: [45])

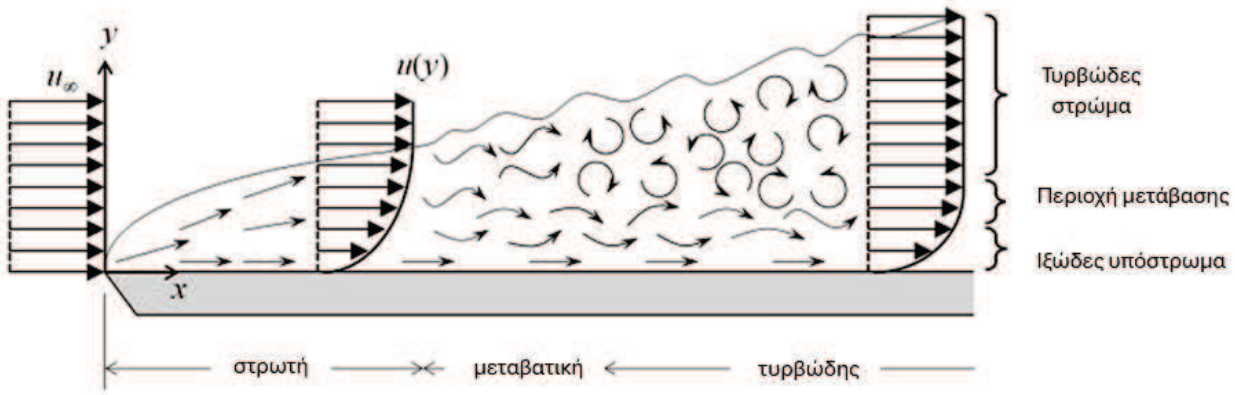
3.3.1 Ροή κοντά στο τοίχωμα

Αναφορικά με την κατακόρυφη διεύθυνση της ταχύτητας ροής, ο αριθμός Reynolds μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathrm{Re_y} = \frac{\rho U y}{\mu} = \frac{U y}{\nu} \tag{3.3}$$

Όπου y η κατακόρυφη απόσταση από το τοίχωμα. Φαίνεται ότι με την αύξηση του y, δηλαδή όσο η απόσταση από το τοίχωμα αυξάνεται, ο αριθμός Re αυξάνεται, και η ροή κυριαρχείται από τις αδρανειακές δυνάμεις. Από την άλλη πλευρά, για μικρές τιμές του y η ροή κυριαρχείται από τις ιξώδεις δυνάμεις, και αυτό οδηγεί στο διαχωρισμό της ροής σε τρεις περιπτώσεις:

1. Ιξώδες υπόστρωμα: Ροή πολύ κοντά στο τοίχωμα, κυριαρχούν οι ιξώδες δυνάμεις και η ροή είναι στρωτή.
2. Περιοχή μετάβασης: Η περιοχή όπου εμφανίζονται οι πρώτες αστάθειες, και η επίδραση των ιξωδών και αδρανειακών δυνάμεων είναι ίδια.
3. Τυρβώδες στρώμα: Η ροή είναι τυρβώδης, και κυριαρχούν οι αδρανειακές δυνάμεις.



Εικόνα 7 Μετάβαση της ροής στην κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. (Πηγή: [52])

3.4 Μοντέλα τύρβης

3.4.1 Εξισώσεις Navier-Stokes με μέσους όρους κατά Reynolds

Τα μοντέλα RANS επικεντρώνονται στη μέση ροή και εκπροσωπούν εξισώσεις μεταφοράς των μέσων τιμών της ροής. Στη μέθοδο RANS, οι πρόσθετοι όροι διακυμαινόμενης ιδιότητας μοντελοποιούνται αντί να επιλύονται. Για τον υπολογισμό τυρβωδών ροών με τις εξισώσεις RANS, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα τύρβης, τα οποία έχουν μεγάλη εφαρμοσιμότητα, εμφανίζουν σχετική ακρίβεια για πρακτικές εφαρμογές, και είναι οικονομικά. Τα συνηθέστερα μοντέλα αυτού του τύπου που χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία των ερευνών της ροής αέρα σε κτήρια είναι το συμβατικό μοντέλο k-ε, το επανακανονικοποιημένο k-ε, το μοντέλο εφικτών λύσεων k-ε, το συμβατικό k-ω, το SST k-ω, το μοντέλο μήκους ανάμιξης, και το μοντέλο τάσεων Reynolds [45].

Τα μοντέλα RANS, βασίζονται στην παραδοχή ότι οι τάσεις ιξώδους και οι τάσεις Reynolds στη μέση ροή είναι ανάλογες. Και τα δύο είδη τάσεων εμφανίζονται στο αριστερό σκέλος της εξίσωσης ορμής, και στο νόμο Newton για το ιξώδες, οι τάσεις λόγω του ιξώδους θεωρούνται ανάλογες με το ρυθμό παραμόρφωσης των στοιχείων του ρευστού. Με βάση τα παραπάνω, για ασυμπίεστο ρευστό, ισχύει:

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{3.4}$$

Όπου s_{ij} είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης.

Οι τυρβώδεις τάσεις, αυξάνουν με την αύξηση του μέσου ρυθμού παραμόρφωσης, σε αναλογία με το νόμο του Newton. Ο Boussinesq, το 1877 πρότεινε ότι οι τάσεις Reynolds μπορεί να είναι ανάλογες προς τους μέσους ρυθμούς παραμόρφωσης [55]. Προκύπτει λοιπόν η παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \tag{3.5}$$

Όπου

$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ η τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας

δ_{ij} το δέλτα του Kronecker, με $\delta_{ij}=1$ i=j και $\delta_{ij}=0$ αν i≠j

μ_t το τυρβώδες ιξώδες (Pa*s)

Κατ' αναλογία, η τυρβώδης μεταφορά βαθμωτών ιδιοτήτων όπως μάζα, θερμότητα και άλλα, μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως παραπάνω, και λαμβάνεται ως ανάλογη της κλίσης της μέσης τιμής της μεταφερόμενης ποσότητας. Με συμβολισμό αυτό εκφράζεται ως:

$$-\overline{\rho u_i' \varphi'} = \Gamma_t \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \tag{3.6}$$

Όπου Γ_t είναι η διαχυτότητα της τύρβης. Η τιμή αυτή αναμένεται να είναι αρκετά κοντά σε αυτή του ιξώδους της τύρβης μ_t. Για τη σύνδεση με τις εξισώσεις ορμής εισάγεται ο τυρβώδης αριθμός Prandtl/Schmidt, που ορίζεται ως:

$$\sigma_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t} \tag{3.7}$$

Πολλά ροϊκά πειράματα αποδεικνύουν ότι ο λόγος αυτός είναι σχεδόν σταθερός [56],[57]. Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο Lam-Bremhorst για την προσομοίωση της τύρβης, το οποίο παρουσιάζεται στο επόμενο Κεφάλαιο, και βασίζεται στο μοντέλο k-ε. Για λόγους πληρότητας, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της εργασίας συγκρίνονται με εκείνα από άλλες έρευνες που χρησιμοποιούν το LES και το SAS, δίδεται παρακάτω συνοπτική περιγραφή αυτών των μοντέλων.

3.4.1.1 Συμβατικό μοντέλο k-ε (standard k-ε)

Το συμβατικό μοντέλο k-ε εισάγει δύο ιδιότητες της ροής, την κινητική ενέργεια της τύρβης k, και το ρυθμό απορρόφησης αυτής ε [58]. Υπό μόνιμες συνθήκες, οι εξισώσεις που τις διέπουν είναι αντίστοιχα [59]:

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k + G_B - \rho\varepsilon + S_k \tag{3.8}$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{\varepsilon}{k}(C_1 P_k - C_2\rho\varepsilon + C_3 G_B) + S_\varepsilon \tag{3.9}$$

όπου μ_t είναι το δυναμικό τυρβώδες το οποίο συνδέει τους όρους k και ε, και ισούται με:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.10}$$

Οι όροι S_k και S_ε δηλώνουν τους όρους πηγής-καταβόθρας. Ο όρος P_k υπολογίζεται με βάση την υπόθεση Boussinesq, και συμβολίζει τον ρυθμό παραγωγής της κινητικής ενέργειας λόγω βαθμίδων ταχύτητας.

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon + \mu_t P_B \tag{3.11}$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B\right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho\varepsilon^2}{k} \tag{3.12}$$

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B}\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \tag{3.13}$$

Όπου $g_i = (g_x, g_y, g_z)$ το διάνυσμα της βαρύτητας

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu}\right)^3 \quad f_2 = 1 - \exp\left(-R_T^2\right) \tag{3.14}$$

$$P_k = \mu_t S^2 \tag{3.15}$$

S είναι ο τανυστής του μέσου ρυθμού καταπόνησης, και ορίζεται ως:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{3.16}$$

Ο όρος G_B δηλώνει τον ρυθμό παραγωγής της κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης, και ορίζεται ως:

$$G_B = -\beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{3.17}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_\rho \tag{3.18}$$

Στους παραπάνω τύπους, β είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής, g_i η συνιστώσα της επιτάχυνσης της βαρύτητας στην i διεύθυνση, T η θερμοκρασία, και Pr_t ο τυρβώδης αριθμός Prandtl για τη θερμική ενέργεια, και ισούται με 0,85.

Οι εμπειρικές σταθερές του μοντέλου είναι:

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_B = 0.9$$

Για την μοντελοποίηση των k και ε, αποδίδεται η ανάγκη για τις παρακάτω οριακές συνθήκες [60]:

- Είσοδος: πρέπει να δίνονται οι κατανομές των k και ε
- Έξοδος, άξονας συμμετρίας: $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ και $\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$
- Κοντά στο τοίχωμα, για υψηλούς αριθμούς Reynolds οι συναρτήσεις τοίχου για τις παραμέτρους τις τύρβης αναπτύσσονται ως εξής:

$$k_w = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \tag{3.19}$$

$$\varepsilon_w = \frac{u_*^3}{\kappa y} \tag{3.20}$$

Όπου κ=0.42 η σταθερά von Karman. Για χαμηλούς αριθμούς Reynolds, εφαρμόζονται παραλλαγές το μοντέλου, με ειδικό χειρισμό στις συναρτήσεις τοίχου.

Βασικά πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι η απλότητά του, η πολύ καλή του απόδοση για ροές σχετικές με τη βιομηχανία και ότι αποτελεί το πιο καθιερωμένο και πιστοποιημένο μοντέλο τύρβης. Από την άλλη πλευρά, μειονεκτεί στην αποδοτικότητα όταν χρησιμοποιείται σε ροές με πρόσθετες μεγάλες τάσεις, περιστρεφόμενες ροές ή ροές λόγω ανισοτροπίας ορθών τάσεων (πχ. πλήρως ανεπτυγμένες ροές σε μη κυκλικούς αγωγούς).

3.4.2 Προσομοίωση μεγάλων δινών (LES)

Η προσομοίωση των μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation, LES) είναι μία μορφή υπολογισμών η οποία βασίζεται στην ανίχνευση συμπεριφοράς και ανάπτυξης των μεγαλύτερων δινών [54]. Χρησιμοποιεί μία διεργασία χωρικού φιλτραρίσματος μεταξύ των μεγαλύτερων και των μικρότερων δινών. Αρχικά, επιλέγεται μία συνάρτηση φιλτραρίσματος και ένα πλάτος αποκοπής, με σκοπό την επίλυση σε έναν υπολογισμό μη μόνιμης ροής των δινών με κλίμακα μήκους μεγαλύτερη από το πλάτος αποκοπής. Στη συνέχεια, η διεργασία χωρικού φιλτραρίσματος πραγματοποιείται στις εξισώσεις ροής, οι οποίες είναι χρονικά εξαρτώμενες. Η παραπάνω διεργασία, σε συνδυασμό με τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των μεγαλύτερων επιλυόμενων δινών, και των μικρότερων δινών που δεν επιλύονται, οδηγούν σε τάσεις υποπλεγματικής κλίμακας (sub grid scale) ή τάσεις SGS. Για την περιγραφή των συγκεκριμένων τάσεων και της επίδρασής τους στην επιλυόμενη ροή είναι απαραίτητη η χρήση ενός μοντέλου SGC. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος

των πεπερασμένων όγκων, οι φιλτραρισμένες εξισώσεις ροής επιλύονται σε ένα πλέγμα όγκων ελέγχου μαζί με το μοντέλου SGS των μη επιλυόμενων τάσεων.

Στη LES ορίζεται η πράξη χωρικού φιλτραρίσματος για την ανάλυση της συνάρτησης φ, μέσω μία συνάρτησης φίλτρου, ως εξής:

$$\overline{\varphi}(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} G(x,x',\Delta)\varphi(x',t)dx_1'dx_2'dx_3' \quad (3.21)$$

Όπου:

$\overline{\varphi}(x,t)$ η φιλτραρισμένη συνάρτηση

φ(x,t) η αρχική, μη φιλτραρισμένη συνάρτηση

$G(x,x',\Delta)$ η συνάρτηση φίλτρου

Δ το πλάτος αποκοπής του φίλτρου, το οποίο σε τρισδιάστατους υπολογισμούς συνήθως λαμβάνεται ίσο με $\sqrt[3]{\Delta x\Delta y\Delta z}$, δηλαδή ίσο με την κυβική ρίζα του όγκου του κελιού του πλέγματος.

3.4.3 Υβριδικό μοντέλο SAS (Scale Adaptive Simulation)

Το Scale-Adaptive Simulation (SAS) είναι μία υβριδική προσέγγιση μοντελοποίησης της τύρβης, που συνδυάζει τα δυνατά σημεία των τεχνικών Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) και Large Eddy Simulation (LES). Αναπτύχθηκε από τους Menter και Egorov, και σχεδιάστηκε για να καταγράφει αποτελεσματικά την δυναμική των τυρβωδών ροών, και ιδιαίτερα τα σενάρια όπου οι συνθήκες ροής μπορούν να αλλάξουν από σταθερές σε ασταθείς [55].

Το μοντέλο SAS προσαρμόζει την υπολογιστική του στρατηγική με βάση τα χαρακτηριστικά ροής. Σε περιοχές όπου η ροή είναι σταθερή, συμπεριφέρεται σαν μοντέλο RANS, παρέχοντας υπολογιστική απόδοση και σταθερότητα. Αντίθετα, σε περιοχές όπου η ροή γίνεται ασταθής ή τυρβώδης, μεταβαίνει σε συμπεριφορά παρόμοια με το μοντέλο LES, επιτρέποντας την επίλυση τυρβωδών δομών μεγάλης κλίμακας. Αυτή η προσαρμοστικότητα βοηθά στην αποφυγή των περιορισμών που σχετίζονται με τα παραδοσιακά μοντέλα RANS, ιδιαίτερα σε σύνθετα σενάρια ροής.

Η μεθοδολογία SAS τροποποιεί τις εξισώσεις της τυρβώδους ροής, εισάγοντας έναν πρόσθετο όρο πηγής Q, στην εξίσωση του ειδικού ρυθμού διάχυσης ω. Αυτός ο όρος επιτρέπει μια πιο ακριβή αναπαράσταση των αναταράξεων επιτρέποντας στο μοντέλο να ανταποκρίνεται δυναμικά σε αλλαγές στις συνθήκες ροής. Ο όρος πηγής είναι κρίσιμος για την ενεργοποίηση πλήρους λειτουργικότητας SAS υπό ασταθείς συνθήκες, λειτουργώντας ουσιαστικά ως μοντέλο υποδικτύου για το μοντέλο LES.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του μοντέλου SAS είναι η ικανότητά του να επιλύει μεγάλες κλίμακες αναταράξεων χωρίς να απαιτεί υπερβολικά λεπτά πλέγματα που είναι συνήθως απαραίτητα για καθαρές προσεγγίσεις μοντέλων LES. Αυτή η δυνατότητα μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος, ενώ εξακολουθεί να καταγράφει βασικά χαρακτηριστικά ροής.

Μελέτες έχουν δείξει ότι το μοντέλο SAS παρέχει βελτιωμένες προβλέψεις για πολύπλοκες ροές σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μοντέλα RANS και άλλα υβριδικά μοντέλα όπως η Προσομοίωση Καθυστερημένης Αποσυναρμολόγησης Δινών (DDES) [55]. Για παράδειγμα, όταν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις

αναφοράς, όπως η ροή γύρω από οχήματα ή κτήρια, το μοντέλο SAS έχει επιδείξει ακρίβεια στην πρόβλεψη των συντελεστών οπισθέλκουσας και στην καταγραφή φαινομένων διαχωρισμού ροής.

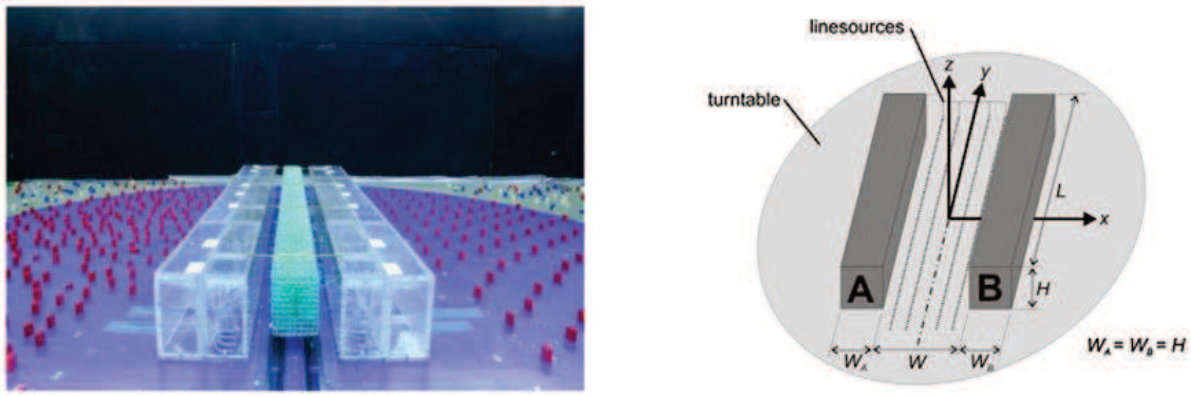
Σχετικά με το πεδίο εφαρμογών, το μοντέλο SAS είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές μηχανικής όπου οι ακριβείς προβλέψεις των τυρβωδών ροών είναι κρίσιμες, όπως στην αεροδυναμική, στις περιβαλλοντικές μελέτες και στις βιομηχανικές διεργασίες. Η ικανότητά του για απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ RANS και LES το καθιστά κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα σεναρίων που περιλαμβάνουν ποικίλα χαρακτηριστικά αναταράξεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάπτυξη μοντέλου

4.1 Μελέτη περίπτωσης

Ως μελέτη περίπτωσης λαμβάνεται η πειραματική εργασία των Gromke και Ruck (2009) [56], η οποία πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καρλσρούης στη Γερμανία (KIT). Η βάση δεδομένων του πειράματος είναι γνωστή με το ακρωνύμιο CODASC (Concentration Data of Street Canyon) [57]. Κύριος σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης, ήταν η διερεύνηση των επιπτώσεων των δέντρων στη διασπορά των κυκλοφοριακών ρύπων εντός αστικού φαραγγιού. Για αυτό το λόγο, θεωρήθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις, με και χωρίς ύπαρξη δέντρων. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν χωρίς την ύπαρξη δέντρων, με την ροή του ανέμου να είναι κάθετη στο μήκος του αστικού φαραγγιού.



Εικόνα 8 (αριστερά) Εγκατάσταση αεροσήραγγας. Διακρίνονται τα ελάσματα επιβολής συγκεκριμένης αεροδυναμικής τραχύτητας στο πάτωμα της διάταξης, για την ορθή εκπροσώπηση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος της επερχόμενης ροής και (δεξιά) σχηματική απεικόνιση αστικού φαραγγιού. (Πηγή: [58])

Για την πειραματική ανάλυση αστικού φαραγγιού κλίμακας: 1:150 χρησιμοποιείται αεροσήραγγα ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (ABLWT, atmospheric boundary layer wind tunnel). Οι διαστάσεις του δρόμου ανάμεσα στις κτηριοσειρές είναι 0.12m x 0.12m x 1.2m, οπότε ο λόγος των διαστάσεων ύψος προς πλάτος (AR) είναι 1, και ο λόγος μήκος προς ύψος είναι 10. Η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου στο ύψος των κτηρίων (H=0.12m) είναι ίση με U_H=4.65 m/s. Για τις μετρήσεις της ταχύτητας, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα LDV (Laser Doppler Velocimetry), το οποίο είναι εξοπλισμένο με λέιζερ ιόντων αργού 4W και οπτικό

σύστημα TSI. Οι μετρήσεις, αφορούν την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας εντός του φαραγγιού, κοντά στο κεντρικό κατακόρυφο επίπεδο.

Με σκοπό την προσομοίωση της αστικής ρύπανσης, χρησιμοποιείται το εξαφθοριούχο θείο (SF_6) ως ιχνηθέτης, το οποίο εκλύεται από τέσσερις πηγές, τοποθετημένες στο επίπεδο του εδάφους. Οι πηγές θεωρούνται ιδανικές, και προσομοιάζονται με τέσσερις γραμμές, οι οποίες προεκτείνονται κατά 10% του μήκους των κτηριοσειρών εκατέρωθεν αυτών, ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα καυσαέρια κυκλοφορίας που απελευθερώνονται σε πλευρικές διασταυρώσεις οδών [59],[60]. Η ισχύς των πηγών παρακολουθούνταν και ελέγχονταν από έναν μετρητή ροής τύπου 1258B και ελεγκτή ροής τύπου 1259B από την MKS Instruments, εξασφαλίζοντας σταθερή παροχή αερίου ιχνηθέτη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ρύπου χρησιμοποιήθηκε ένας ανιχνευτής δέσμευσης ηλεκτρονίων (ECD) τύπου Meltron 108, σε απόσταση 5 χιλιοστών από τα εσωτερικά τοιχώματα των δύο κτηρίων.

Τα μετρούμενα μεγέθη, δηλαδή η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας (U_z) και η συγκέντρωση του ρύπου (C), εκφράζονται σε αδιάστατη μορφή, μέσω των παρακάτω εξισώσεων [56]:

$$U_z^* = \frac{U_z}{U_H} \tag{4.1}$$

$$C^* = \frac{CU_H H}{Q/l} \tag{4.2}$$

Όπου:

- U_H: η ταχύτητα στο ύψος των κτηρίων, H (m/s)
- H: το ύψος των κτηρίων (m)
- C: η μετρούμενη συγκέντρωση ρύπου (-)
- Q: η ογκομετρική παροχή του ρύπου (m^3/s)
- l: το μήκος της πηγής

Η επιλογή του όρου U_H στις εξισώσεις (4.1) και (4.2) είναι αυθαίρετη, όμως λαμβάνοντας υπόψη ότι η μορφή της ροής και η διασπορά ρύπων εντός του αστικού φαραγγιού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο της οροφής των κτηρίων, αποδεικνύεται ότι η επιλογή είναι ορθή.

4.2 Σχεδιασμός γεωμετρίας

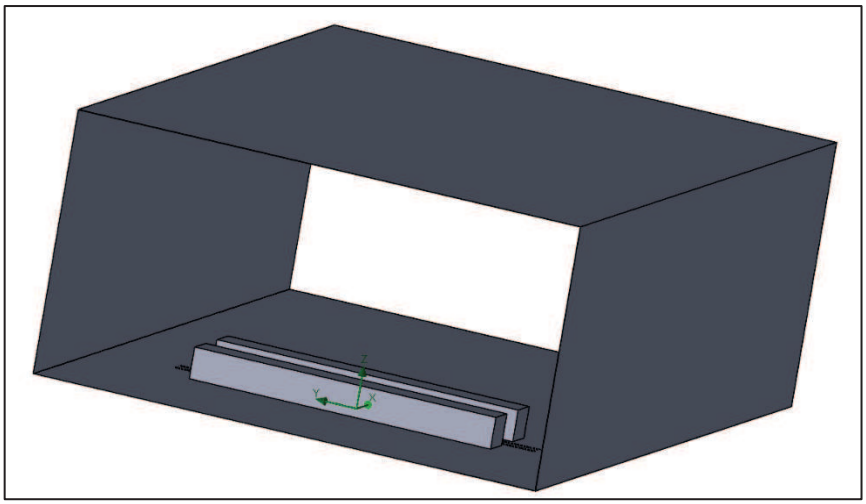
Όπως έχει ειπωθεί παραπάνω, το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι το SolidWorks, το οποίο διαθέτει τόσο πρόγραμμα σχεδιασμού (CAD), όσο και πρόγραμμα προσομοίωσης της ροής (CFD). Σε αρχικό στάδιο, είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί η κατάλληλη γεωμετρία, ώστε να προσομοιωθεί κατάλληλα η ροή. Ο σχεδιασμός γίνεται καθαρά με βάση τα δεδομένα της πειραματικής διαδικασίας, και τα χαρακτηριστικά της αεροσήραγγας.

Πρώτο βήμα, είναι να σχεδιαστεί το έδαφος, ή αλλιώς το κάτω όριο της αεροσήραγγας το οποίο ορίζεται στο επίπεδο x-y. Θεωρείται δύο διαστάσεων, γι' αυτό το λόγο δίνεται αμελητέο πάχος 1 χιλιοστού. Οι διαστάσεις του είναι 2.76m στον άξονα x, δηλαδή ίση με 23H, όπου H το ύψος των κτηρίων, και 1m στον άξονα y. Στη συνέχεια, σχεδιάζονται τα δύο κτήρια, των οποίων οι διαστάσεις είναι ίσες με 0.12m x 0.12m x

1.2m, και η απόσταση μεταξύ τους, δηλαδή ο δρόμος εντός του αστικού φαραγγιού είναι 0.12m. Σύμφωνα πάντα με την πειραματική διαδικασία, το εξωτερικό τοίχωμα του ανάντη κτηρίου απέχει από την αριστερή πλευρά της πλάκας 5H (0.6m), ενώ αντίστοιχα το εξωτερικό τοίχωμα του κατάντη κτηρίου απέχει 15H (1.8m) από την δεξιά πλευρά της της πλάκας που προσομοιάζει το έδαφος. Η αρχή των αξόνων του συστήματος, τοποθετείται στο επίπεδο του εδάφους, στο κέντρο εντός του αστικού φαραγγιού. Ο άξονας x και y αντιστοιχούν στην παράλληλη και πλευρική διεύθυνση του ανέμου αντίστοιχα, ενώ ο άξονας z στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Με σκοπό την προσομοίωση του άνω και των πλευρικών τοιχωμάτων της αεροσήραγγας, είναι αναγκαίο να σχεδιαστούν οι αντίστοιχες επιφάνειες. Με βάση αυτή τη λογική δημιουργείται τρισδιάστατη γεωμετρία σχήματος 'Π', με επίπεδο αναφοράς το επίπεδο y-z της εισόδου της ροής, και διαστάσεις 2m στον άξονα y, 1m στον άξονα z και 2.76m στον άξονα x, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα κούφιο δωμάτιο με μοναδικά ανοίγματα την είσοδο και την έξοδο της ροής. Το πάχος των παραπάνω τοιχωμάτων είναι ξανά ίσο με 1mm.

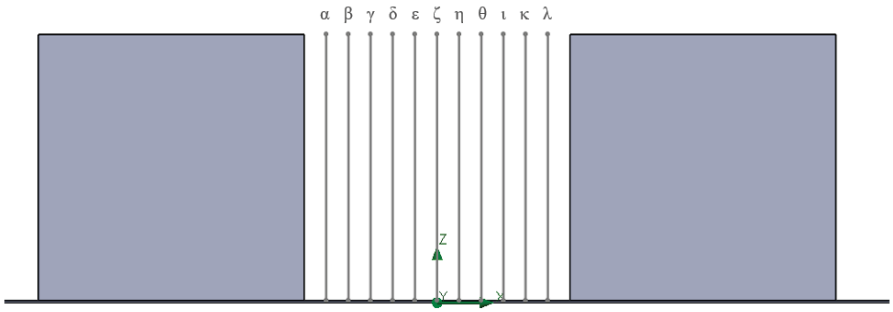
Επόμενο βήμα, είναι να σχεδιαστούν οι πηγές του ρύπου. Ακολουθώντας τη διαμόρφωση του πειράματος, ορίζονται τέσσερα ορθογώνια παραλληλόγραμμα στο επίπεδο του εδάφους, με αποστάσεις κάθε στοιχείου από το υπήνεμο τοίχωμα του αστικού φαραγγιού 0.23H, 0.35H, 0.65H, and 0.77H αντίστοιχα. Κάθε πηγή έχει διαστάσεις 1.44m (μήκος), 0.003m (πλάτος) και 0.1mm (ύψος), και είναι συμμετρική ως προς το κεντρικό κατακόρυφο επίπεδο x-z. Φαίνεται έτσι ότι οι πηγές προεκτείνονται και εκτός του αστικού φαραγγιού, από τις δύο πλευρές.



Εικόνα 9 Γεωμετρία της πειραματικής διάταξης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του παρόντος CFD μοντέλου.

Στο εξής, το άνω και τα πλευρικά τοιχώματα θα αποκρύπτονται στις απεικονίσεις, για πρακτικούς λόγους. Τελικό βήμα είναι ο σχεδιασμός κατακόρυφων δισδιάστατων γραμμών, με σκοπό την λήψη δεδομένων, και συγκεκριμένα της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας της ροής, και της συγκέντρωσης του ρύπου, στις ίδιες θέσεις από τις οποίες λαμβάνονται τα αντίστοιχα μεγέθη από αισθητήρες στο πείραμα. Πιο αναλυτικά, αυτές οι θέσεις είναι:

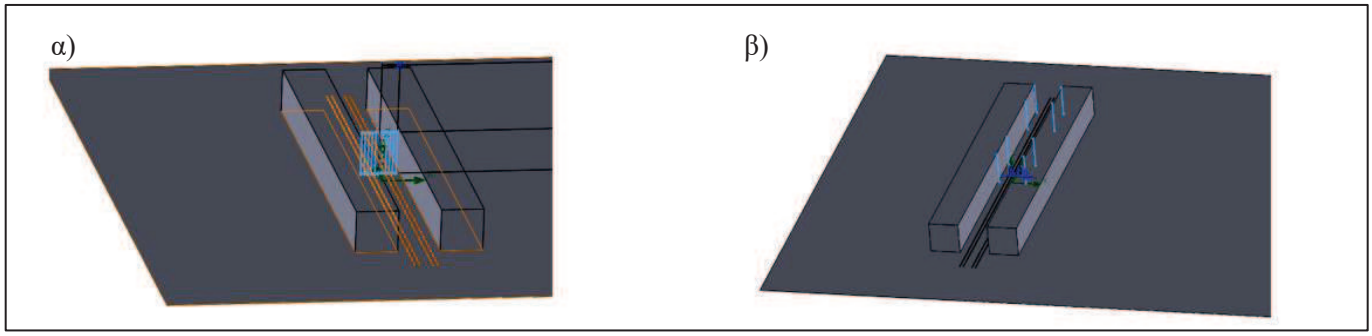
- x/H= α)-0,417 β)-0,333 γ)-0,25 δ)-0,167 ε)-0,083 ζ)0 η)0,083 θ)0,167 ι)0,25 κ)0,333 λ)0,417 στο κατακόρυφο επίπεδο x-z για το οποίο ισχύει y/H=0,5 για την μέτρηση της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας U_z.



Εικόνα 10 Κατακόρυφες θέσεις μέτρησης της ταχύτητας.

- y/H=0, 1,25, 3,75, 4,92 στα επίπεδα y-z 5mm μακριά από το υπήνεμο τοίχωμα (α-δ), και 5mm μακριά από το προσήνεμο τοίχωμα (ε-θ) του αστικού φαραγγιού, για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ρύπου (λαμβάνοντας υπόψη ότι η κατεύθυνση του ανέμου είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά, κατά μήκος του άξονα x.)

Η αρχή των γραμμών βρίσκεται στο ύψος του εδάφους, και καταλήγουν στο ύψος των κτηρίων.



Εικόνα 11 Υπόδειξη των θέσεων μετρητικών για την (α) ταχύτητα και (β) συγκέντρωση χημικού είδους SF_6.

4.3 Χαρακτηριστικά ροής – Παραδοχές

Για την προσομοίωση της ροής, τα χαρακτηριστικά και οι παραδοχές που υιοθετούνται για την επίλυση του προβλήματος είναι:

- Ισοθερμοκρασιακή ροή.
- Μόνιμη ροή.
- Η πυκνότητα του αέρα είναι σταθερή σε όλο το πεδίο ροής.
- Είσοδος του αέρα με όρους ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος κατά Richards-Hoxey [61].
- Λαμβάνεται υπόψη η δύναμη της βαρύτητας.
- Δεν υπάρχει μετάδοση θερμότητας λόγω συναγωγής.
- Θεωρείται εξωτερική ροή.

- Στο σύνολο του υπολογιστικού πεδίου επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία ίση με 293.2 K.
- Όλα τα τοιχώματα θεωρούνται αδιαβατικά.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω του πεδίου 'Γενικές Ρυθμίσεις'.

4.4 Μαθηματικό μοντέλο και κυβερνούσες εξισώσεις

Το μαθηματικό μοντέλο βασίζεται στο σύνολο των εξισώσεων ρευστοδυναμικής, και στις αντίστοιχες οριακές και αρχικές συνθήκες.

Οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή του ρευστού είναι η εξίσωση συνέχειας που αφορά την διατήρηση της μάζας, η διατήρηση της ορμής που διατυπώνεται με τις εξισώσεις Navier-Stokes, καθώς και η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας. Οι εξισώσεις αυτές φαίνονται παρακάτω, αντίστοιχα:

- Εξίσωση Διατήρησης Μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho u) = 0 \tag{4.3}$$

Για ασυμπίεστο ρευστό, η εξίσωση γίνεται:

$$\mathrm{div} u = 0 \tag{4.4}$$

- Εξίσωση Διατήρησης Ορμής:

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{4.5}$$

- Εξίσωση διατήρησης ενέργειας

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_j\left(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R\right) + q_i\right) + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho\varepsilon + S_i u_i + Q_H \tag{4.6}$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}$$

Για την ροή του αέρα, ισχύει η καταστατική εξίσωση ιδανικού αερίου για τον υπολογισμό της πυκνότητας, ως συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

$$\rho = \frac{P M_r}{RT} \tag{4.7}$$

Όπου:

- ρ: η πυκνότητα του αερίου (kg/m^3)
- P: πίεση (Pa)
- Mr: η μοριακή μάζα του αερίου (kg/mol)
- R: η παγκόσμια σταθερά των αερίων =0.08205 $atm*L*mol^{-1}*K^{-1}$

Η εξίσωση μεταφοράς χημικού είδους στο ρευστό αναφοράς (στην παρούσα εργασία, SF_6 στον αέρα):

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(D + D^T\right)\frac{\partial C}{\partial x_i}\right) \tag{4.8}$$

Όπου:

$$D^T = \frac{\mu_t}{\sigma} \tag{4.9}$$

$$C + C_b = 1 \tag{4.10}$$

Με τον όρο C συμβολίζεται η συγκέντρωση της μάζας του ρύπου (SF_6) ο οποίος διαχέεται στον αέρα, C_b είναι η συγκέντρωση μάζας του αέρα, D και D^T οι μοριακοί και τυρβώδεις συντελεστές διάχυσης αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ρυθμό απορρόφησής της, αναπτύσσονται με βάση το μοντέλο k-ε. Το τροποποιημένο μοντέλο k-ε το οποίο χρησιμοποιείται, μπορεί να περιγράψει στρωτές, τυρβώδεις και μεταβατικές ροές ρευστών, και αποτελείται από τις ακόλουθες εξισώσεις [62]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon + \mu_t P_B \tag{4.11}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B\right) - f_2 C_{\varepsilon 2}\frac{\rho\varepsilon^2}{k} \tag{4.12}$$

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij}, \tau_{ij}^R = \mu_t s_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}, s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \tag{4.13}$$

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B}\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \tag{4.14}$$

Όπου C_μ=0.09, $C_{\varepsilon 1}$=1.44, $C_{\varepsilon 2}$=1.92, σ_k =1, σ_ε =1.3, σ_B =0.9, C_B =1 αν P_B >0, C_B =0 αν P_B <0. Το τυρβώδες ιξώδες ορίζεται ως:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \tag{4.15}$$

Οι εξισώσεις απόσβεσης Lam & Bremhorst f_μ, f_1 και f_2 ορίζεται ως:

$$f_\mu = \left(1 - e^{-0.025 R_y}\right)^2 \left(1 + \frac{20.5}{R_t}\right) \tag{4.16}$$

Όπου:

$$R_y = \frac{\rho\sqrt{k}y}{\mu} \tag{4.17}$$

$$R_t = \frac{\rho k^2}{\mu\varepsilon} \tag{4.18}$$

Με y να είναι η απόσταση από το τοίχωμα.

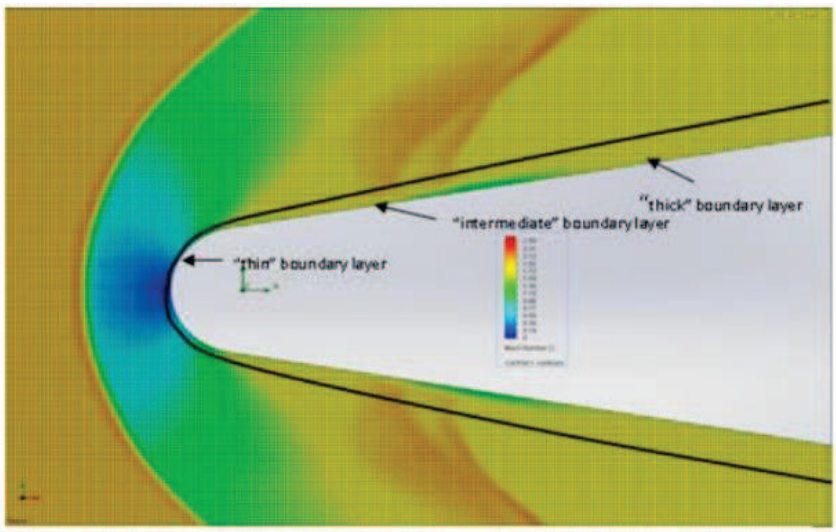
$$f_1 = 1 + (\frac{0.05}{f_\mu})^3, f_2 = 1 - e^{R_t^2} \quad (4.19)$$

Όταν ο αριθμός Reynolds R_y με βάση την μέση ταχύτητα των διακυμάνσεων και την απόσταση από το τοίχωμα γίνεται πολύ μικρός, οι εξισώσεις (4.16), (4.19) οδηγούν σε μείωση της κινητικής ενέργειας της τύρβης και του τυρβώδους ιξώδους. Όταν f_μ=1, f_1=1, και f_2=1, η προσέγγιση επιστρέφει στο αρχικό μοντέλο k-ε.

4.4.1 Χειρισμός οριακού στρώματος

Μείζον θέμα για τη σύνδεση μεταξύ CAD και CFD στο SolidWorks λαμβάνει η ανάλυση του οριακού στρώματος. Προκειμένου να υπολογιστεί η ροή κοντά στο τοίχωμα χρησιμοποιείται η προσέγγιση Prandtl για το οριακό στρώμα. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία Two-Scale Wall Function (2SWF) που χρησιμοποιείται από το SolidWorks Flow Simulation [62], αποτελείται από δύο μεθόδους σύζευξης του υπολογισμού του οριακού στρώματος με τη λύση της κύριας ροής:

1. Μεταχείριση λεπτού οριακού στρώματος όταν ο αριθμός των κελιών κατά μήκος του οριακού στρώματος δεν επαρκεί για άμεσο προσδιορισμό της ροής.
2. Μεταχείριση πυκνού οριακού στρώματος όταν ο αριθμός των κελιών κατά μήκος του οριακού στρώματος υπερβαίνει τον αριθμό των κελιών που απαιτούνται για την ακριβή επίλυση.
3. Σε ενδιάμεσες περιπτώσεις γίνεται μίξη των παραπάνω προσεγγίσεων, διασφαλίζοντας την ομαλή μετάβαση μεταξύ των δύο μοντέλων.



Εικόνα 12 Πεδίο ροής με λεπτό, ενδιάμεσο και παχύ οριακό στρώμα. (Πηγή: [62])

4.4.1.1 Προσέγγιση λεπτού οριακού στρώματος

Στην προσέγγιση αυτή, οι εξισώσεις του οριακού στρώματος Prandtl ενσωματώνονται κατά μήκος της διεύθυνσης προς τον τοίχο από 0 (πάνω στο τοίχωμα) στο πάχος του οριακού στρώματος δ και επιλύονται κατά μήκος των ροϊκών γραμμών που καλύπτουν το τοίχωμα. Εάν το οριακό στρώμα είναι στρωτό, οι εξισώσεις λύνονται με μια μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων βασισμένες στην τεχνολογία δοκιμαστικών

συναρτήσεων Shvetz [62]. Αν το οριακό στρώμα είναι τυρβώδες ή μεταβατικό, χρησιμοποιείται μια γενίκευση αυτής της μεθόδου που συμπεριλαμβάνει το μήκος ανάμειξης σε τυρβώδη οριακά στρώματα.

Η επίδραση της τραχύτητας, που θεωρείται ως η ισοδύναμη τραχύτητα κόκκων άμμου, και οι εξωτερικές αναταράξεις της ροής στο οριακό στρώμα μοντελοποιούνται μέσω ημι-εμπειρικών συντελεστών διόρθωση της διατμητικής τάσης του τοίχου και της ροής θερμότητας από το ρευστό στον τοίχο. Η συμπιεστότητα ρευστού και η διασπορά της κινητικής ενέργειας της λαμβάνονται επίσης υπόψη μέσα από αντίστοιχα εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα.

Από τον υπολογισμό του οριακού στρώματος, το λογισμικό λαμβάνει το πάχος του οριακού στρώματος δ, τη διατμητική τάση στο τοίχωμα t_w^e και τη ροή θερμότητας από το ρευστό στο τοίχωμα q_w^e, τα οποία χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες για τις εξισώσεις Navier-Stokes:

$$t_w = t_w^e, q_w = q_w^e \tag{4.20}$$

Οι οριακές συνθήκες για τα k και ε προσδιορίζονται από την συνθήκη της ισορροπίας της τύρβης στο κελί του υπολογιστικού πλέγματος κοντά στον τοίχο:

$$\frac{\partial k}{\partial y} = 0, \varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{\kappa y} \tag{4.21}$$

4.4.1.2 Προσέγγιση πυκνού οριακού στρώματος

Όταν ο αριθμός των κελιών κατά μήκος του οριακού στρώματος είναι επαρκής, η προσομοίωση των γραμμικών οριακών στρωμάτων γίνεται με βάση τις εξισώσεις Navier-Stokes. Για τυρβώδες οριακό στρώμα, γίνεται τροποποίηση των βασικών συναρτήσεων τοίχου. Ωστόσο, αντί για την κλασσική προσέγγιση όπου χρησιμοποιείται το λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας, στο λογισμικό γίνεται χρήση του πλήρους προφίλ που προτείνεται από τον Van Driest (1956) [63]:

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2d\eta}{1+\sqrt{1+4\kappa^2\eta^2[1-\exp\left(-\frac{\eta}{A_v}\right)]^2}} \tag{4.22}$$

Όπου κ είναι η σταθερά von Karman ίση με 0.4054 και A_v=26 ο συντελεστής van Driest.

4.4.2 Υπολογιστικές παράμετροι

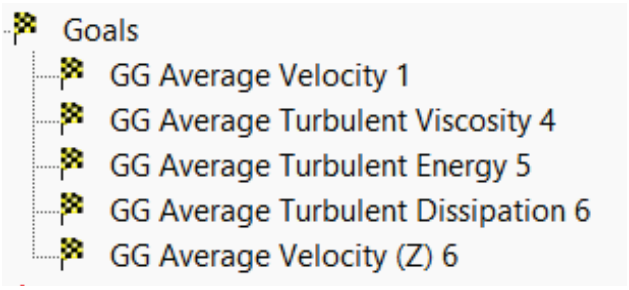
Το σχήμα διακριτοποίησης των αλγεβρικών εξισώσεων που χρησιμοποιείται από το λογισμικό ως προεπιλογή είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου. Με τον ίδιο τρόπο, γίνεται χρήση του αλγορίθμου SIMPLE για την σύζευξη ταχύτητας-πίεσης [9]. Περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω χαρακτηριστικών γίνεται στις ενότητες 2.5.2.1 και 2.5.2.2 αντίστοιχα. Το πρόβλημα επιλύεται σε Windows11 Laptop, με επεξεργαστές AMD Ryzen 5 3500U, 2100 MHz CPU και 16GB RAM.

4.4.2.1 Στόχοι και κριτήρια σύγκλισης

Για τη σύγκλιση των κατάλληλων παραμέτρων, είναι σημαντικό να οριστούν κάποιοι στόχοι, ώστε να γίνει γνωστό στο λογισμικό ποιες μεταβλητές είναι σημαντικές για σύγκλιση, και ποιες μπορούν να είναι

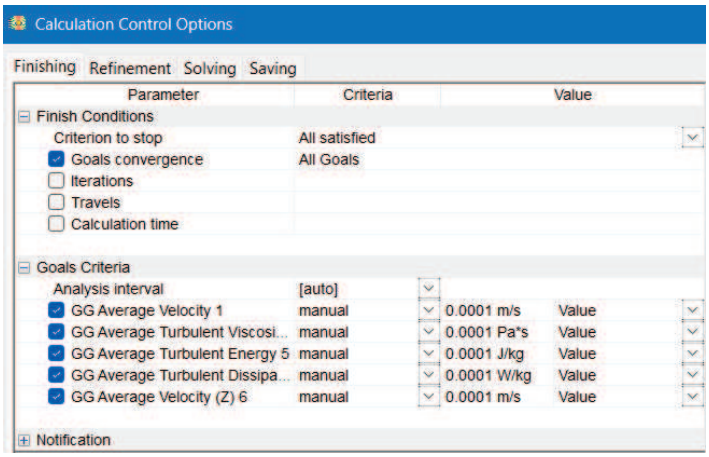
λιγότερο ακριβείς. Η συμπεριφορά της σύγκλισης των παραμέτρων αυτών μπορεί να παρακολουθείται κατά τη διάρκεια της λύσης. Για αυτό το λόγο ορίζονται ως στόχοι (Global Goals) οι μέσες τιμές των:

- Ταχύτητα
- Κατακόρυφη συνιστώσα ταχύτητας
- Κινητική ενέργεια τύρβης
- Τυρβώδες Ιξώδες
- Ρυθμός απορρόφησης κινητικής ενέργειας τύρβης



Εικόνα 13 Ορισμός στόχων.

Κάθε παράμετρος δεν φτάνει σε μία σταθερή τιμή, αλλά ταλαντώνεται κοντά σε αυτή από επανάληψη σε επανάληψη. Έτσι, η σύγκλιση προκύπτει μετά από την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης του αλγεβρικού συστήματος των διακριτοποιημένων εξισώσεων. Κατά την ανάλυση της σύγκλισης του στόχου, το Solidworks υπολογίζει τη διασπορά του υπολοίπου (delta ή residual), ως την διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του στόχου κατά την τελευταία επανάληψη. Η τιμή αυτή συγκρίνεται με το κριτήριο σύγκλισης (criterion) το οποίο είτε καθορίζεται αυτόματα κατά την προσομοίωση από το λογισμικό, είτε δίνεται από το χρήστη [64]. Στην παρούσα επίλυση έχει τεθεί ως κριτήριο σύγκλισης για τα υπόλοιπα (residuals) της επαναληπτικής διαδικασίας, η τιμή 10^{-4}, για όλες τις παραμέτρους. Ρυθμίζεται ακόμα η επίλυση να εξαρτάται μόνο από τα κριτήρια σύγκλισης, και τέλος η λύση να ολοκληρώνεται αν και μόνο αν όλοι οι στόχοι ικανοποιούν αυτά τα κριτήρια, δηλαδή ισχύει delta < criterion.



Εικόνα 14 Επιβολή κριτηρίων σύγκλισης στο λογισμικό.

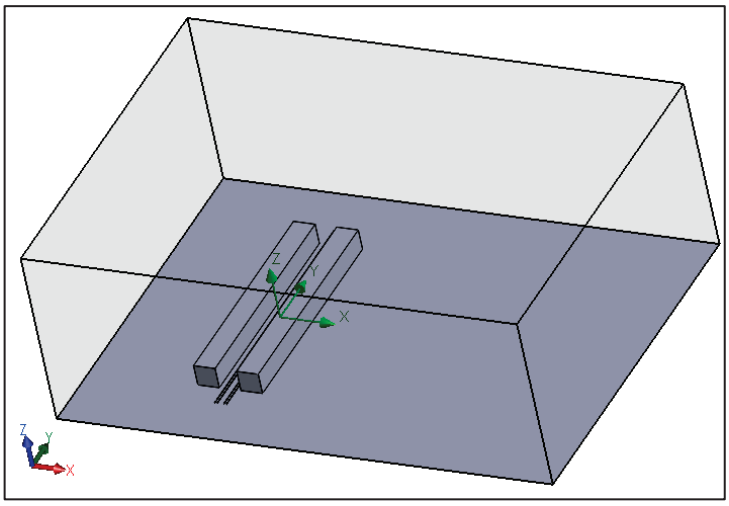
4.5 Υπολογιστικό πεδίο και χωρική διακριτοποίηση

Το υπολογιστικό πεδίο σχεδιάζεται με βάση τη σχετική επιστημονική βιβλιογραφία (βλ. ενότητες 4.1 και 4.2). Πιο συγκεκριμένα, η έδρα εισόδου τοποθετείται σε απόσταση 6.5H αριστερά από την αρχή των αξόνων, ή διαφορετικά 5H από το εξωτερικό τοίχωμα του ανάντη κτηρίου (0.6m), ενώ η έδρα εξόδου τοποθετείται 15H δεξιά από το εξωτερικό τοίχωμα του κατάντη κτηρίου (0.18m). Οι πλευρικές έδρες, τοποθετούνται σε απόσταση 1m από την αρχή των αξόνων, δηλαδή από το κέντρο του δρόμου. Η κάτω έδρα, τοποθετείται στο επίπεδο x-y με z=0, και κατά συνέπεια η γεωμετρία του εδάφους συμπεριλαμβάνεται στο υπολογιστικό πεδίο. Τέλος, η άνω έδρα τοποθετείται σε απόσταση 1m από το επίπεδο του εδάφους. Με βάση τα παραπάνω, το υπολογιστικό πεδίο θα έχει διαστάσεις 2,76m x 2m x 1m στους άξονες x,y και z αντίστοιχα.

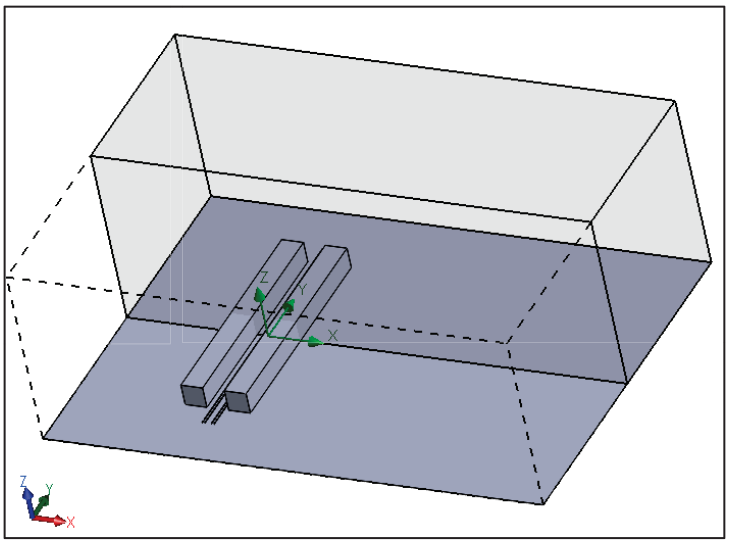
Όσον αφορά τη χωρική διακριτοποίηση, εφαρμόζεται καρτεσιανό δομημένο πλέγμα. Η κατασκευή πλέγματος δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το πεδίο, καθώς σχεδιάζεται περαιτέρω πύκνωση στις περιοχές κοντά στα τοιχώματα των κτηρίων και εντός του αστικού φαραγγιού, περιοχές δηλαδή που συγκριτικά με άλλες παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς την ανάλυση της ροής.

4.5.1 Τεκμηρίωση συμμετρικού προβλήματος

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, το πρόβλημα αφορά σε αξονοσυμμετρική γεωμετρία. Συνεπώς, με επερχόμενο άνεμο κάθετο στις κτηριοσειρές, αναμένεται αξονοσυμμετρική ροή σε μόνιμη κατάσταση. Στην παρούσα ενότητα, προς τεκμηρίωση της παραδοχής αξονοσυμμετρικής ροής, γίνεται έλεγχος αν το μοντέλο μπορεί να επιλυθεί στο μισό υπολογιστικό πεδίο από το αρχικό, ως προς το συγκεκριμένο επίπεδο. Ο έλεγχος βασίζεται στην σύγκριση βασικών παραμέτρων, όπως την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου, U_x και U_y αντίστοιχα, ιδίως σε περιοχές έντονων διαταραχών, δηλαδή ανάμεσα στα δύο κτήρια. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι η σύγκριση γίνεται με αραιό υπολογιστικό πλέγμα, δεδομένου ότι η διερεύνηση αξονοσυμμετρικής φύσης της ροής, σε μόνιμη κατάσταση, δεν εξαρτάται από το κατά πόσον το πλέγμα είναι ανεξάρτητο της λύσης.



Εικόνα 15 Απεικόνιση υπολογιστικού πεδίου το οποίο συμπεριλαμβάνει το σύνολο του όγκου ενδιαφέροντος.

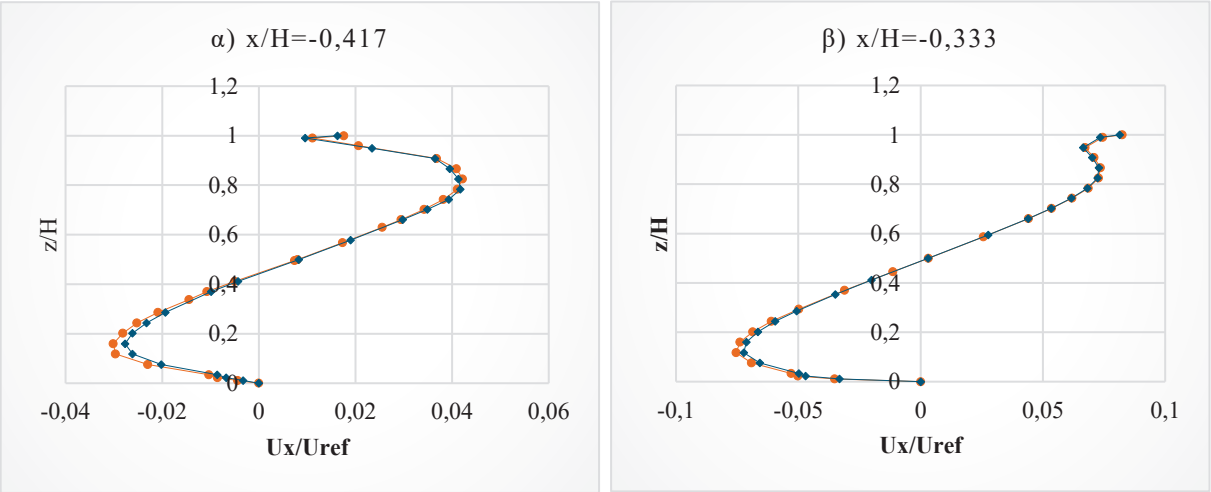


Εικόνα 16 Υιοθέτηση του μισού υπολογιστικού πεδίου ως προς το κεντρικό διαμήκες κατακόρυφο επίπεδο x-z.

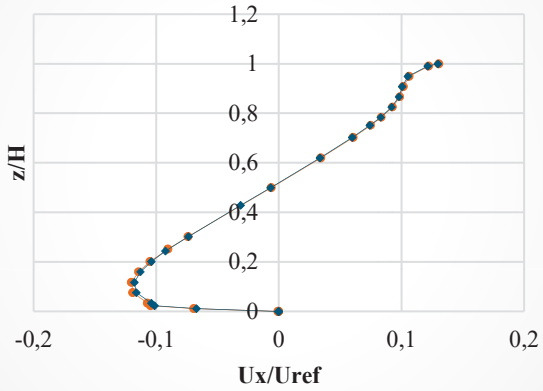
Πίνακας 2 Τεχνικά χαρακτηριστικά επίλυσης δύο περιπτώσεων.

Αριθμός κελίων	Επαναλήψεις	Χρόνος επίλυσης (λεπτά)	Μνήμη (KB)
328.718	553	55,73	76,213
164.362	439	23,5	38,287

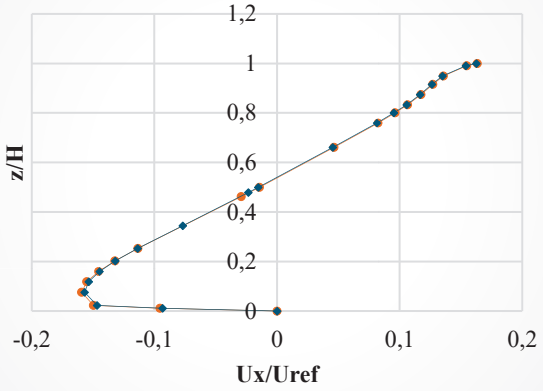
Όπως προαναφέρθηκε, αντιπροσωπευτική περιοχή έντονων διαταραχών είναι αυτή ανάμεσα στα δύο κτήρια. Γι' αυτό το λόγο η σύγκριση των μεγεθών, γίνεται κατά μήκος 11 κατακόρυφων γραμμών, για τις οποίες ισχύει: α) x/H=-0.417 β) x/H=-0.333 γ) x/H=-0.25 δ) x/H=-0.167 ε) x/H=-0.083 ζ) x/H=0 η) x/H=0.083 θ) x/H0.167 ι) x/H=0.25 κ) x/H=0.333 λ) x/H=0.417 στο κατακόρυφο επίπεδο x-z με y/H=0.5.



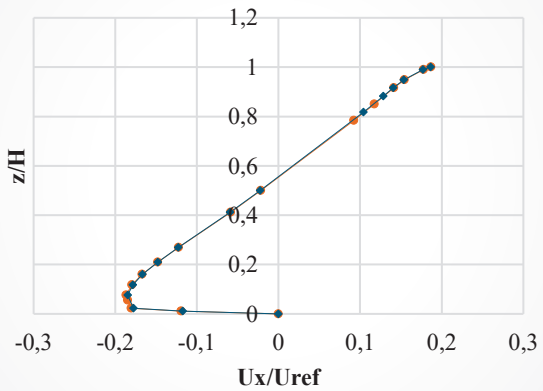
γ) x/H=-0,25



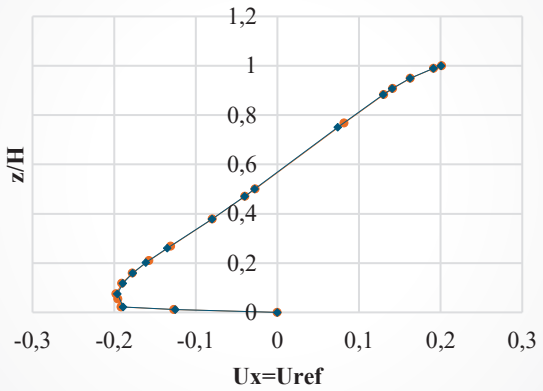
δ) x/H=-0,167



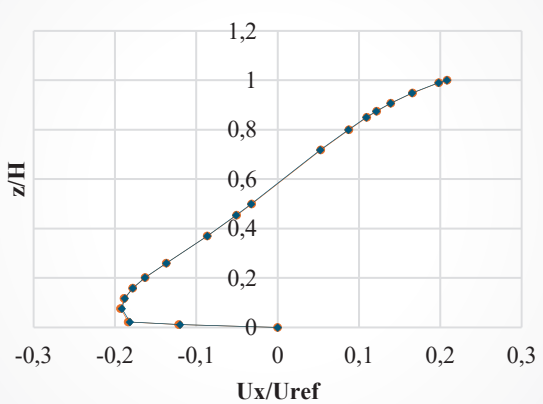
ε) x/H=-0,083



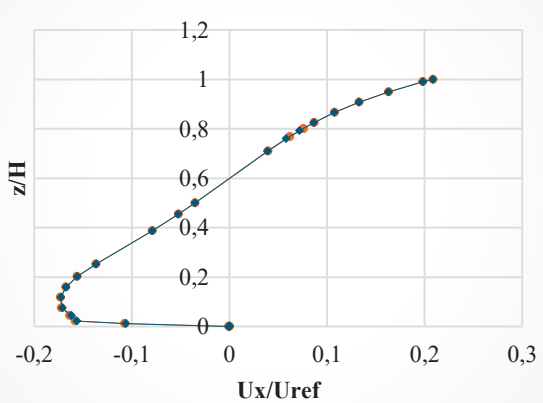
ζ) x/H=0

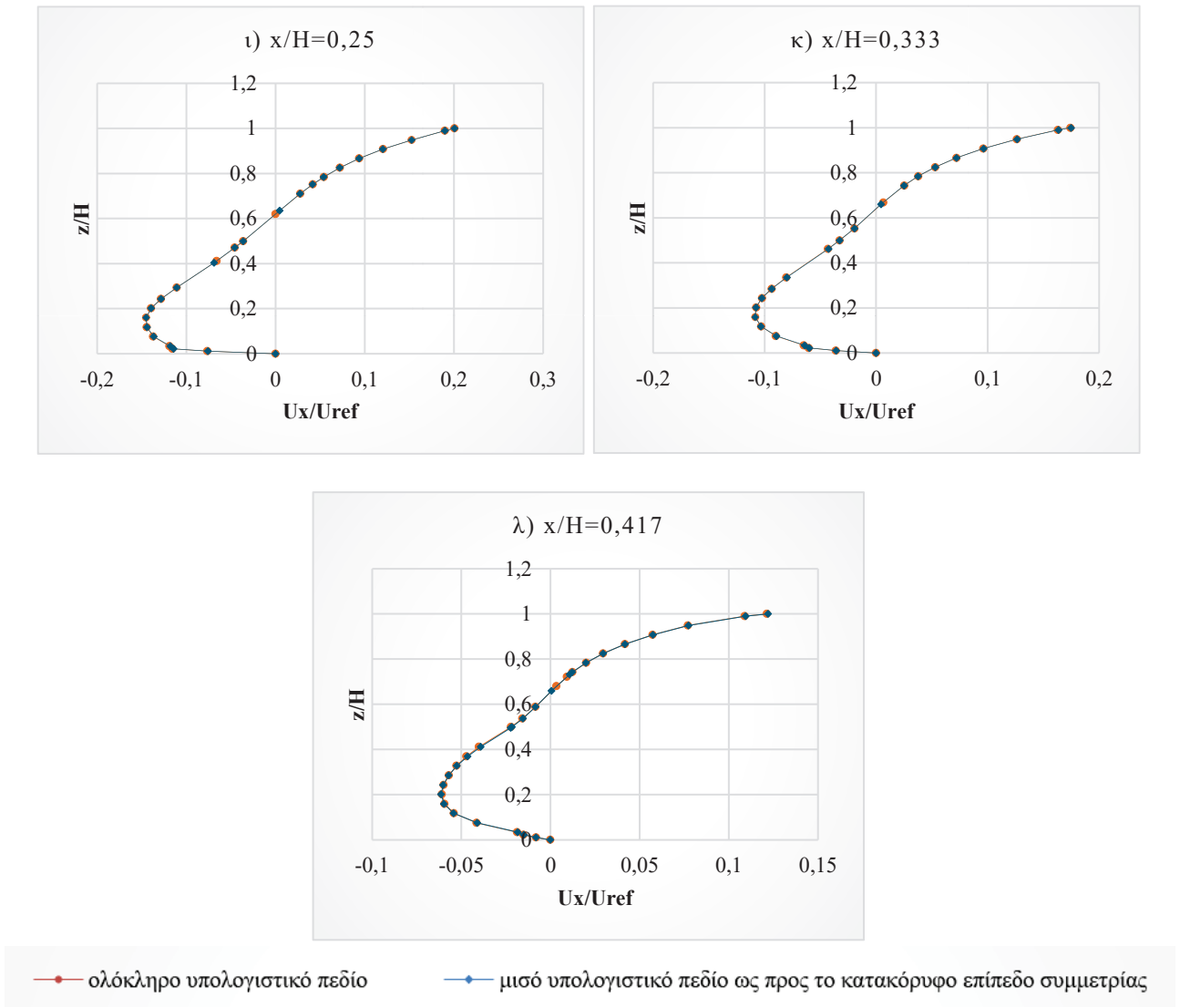


η) x/H=0,083

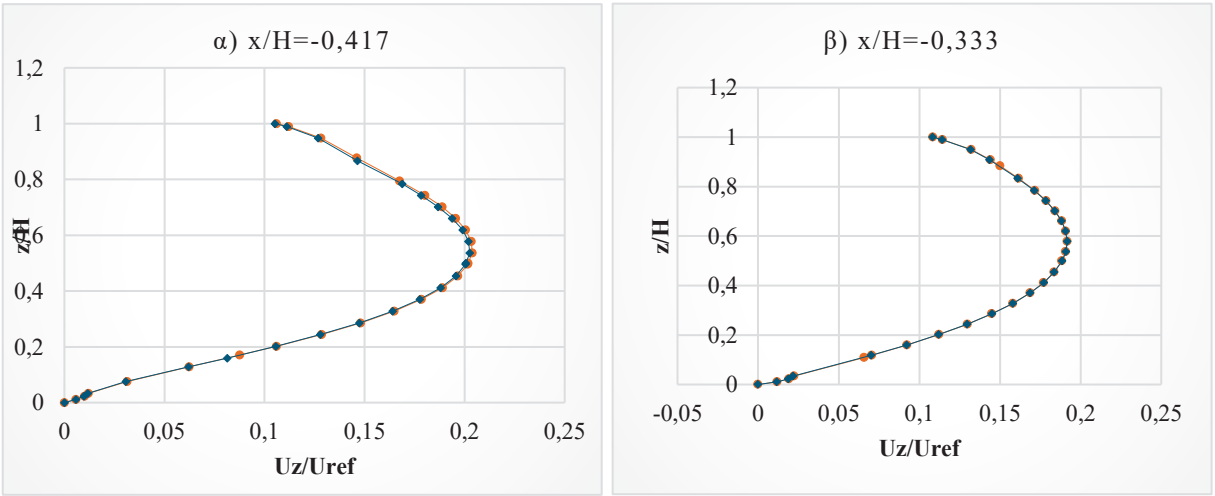


θ) x/H=0,167

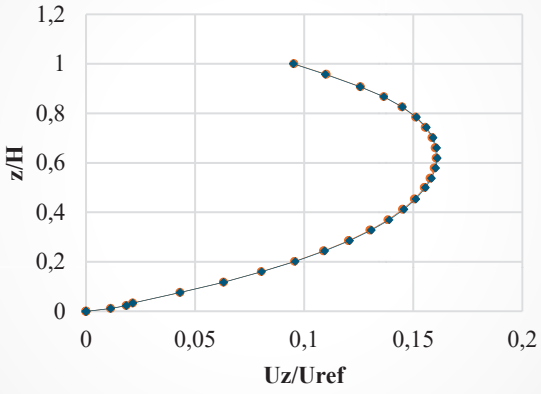




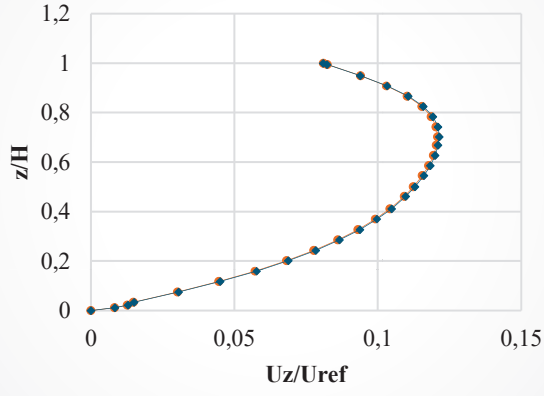
Εικόνα 17 Σύγκριση οριζόντιας συνιστώσας ταχύτητας U_x στις δύο περιπτώσεις επίλυσης.



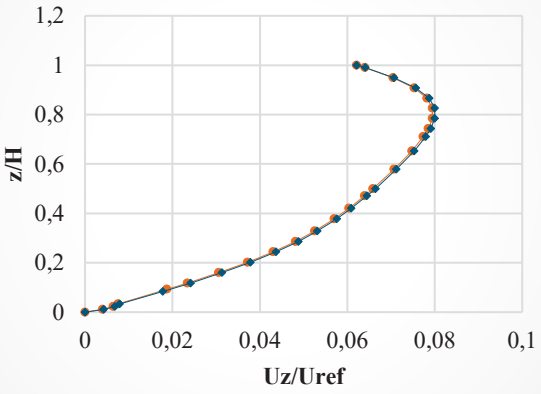
γ) x/H=-0,25



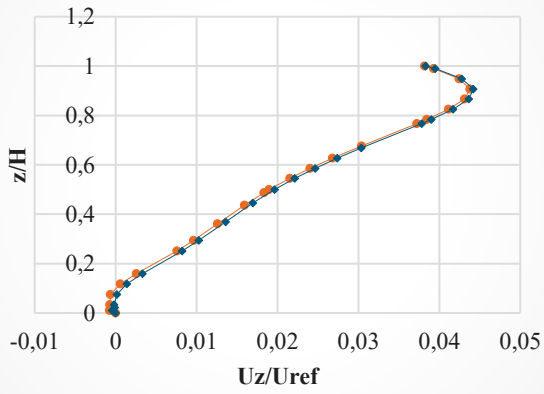
δ) x/H=-0,167



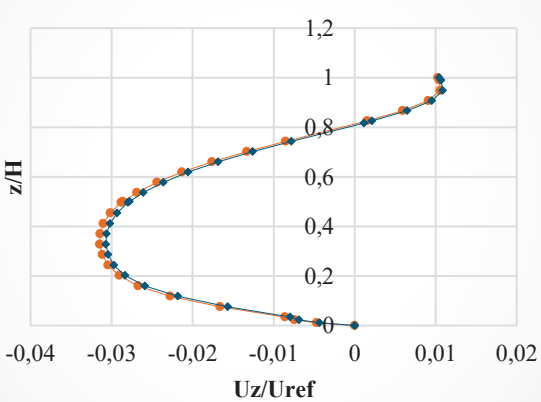
ε) x/H=-0,083



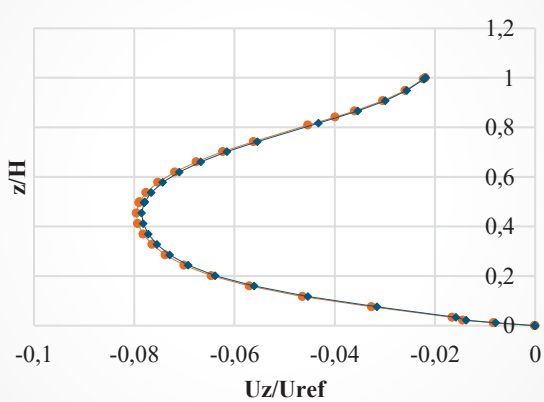
ζ) x/H=0

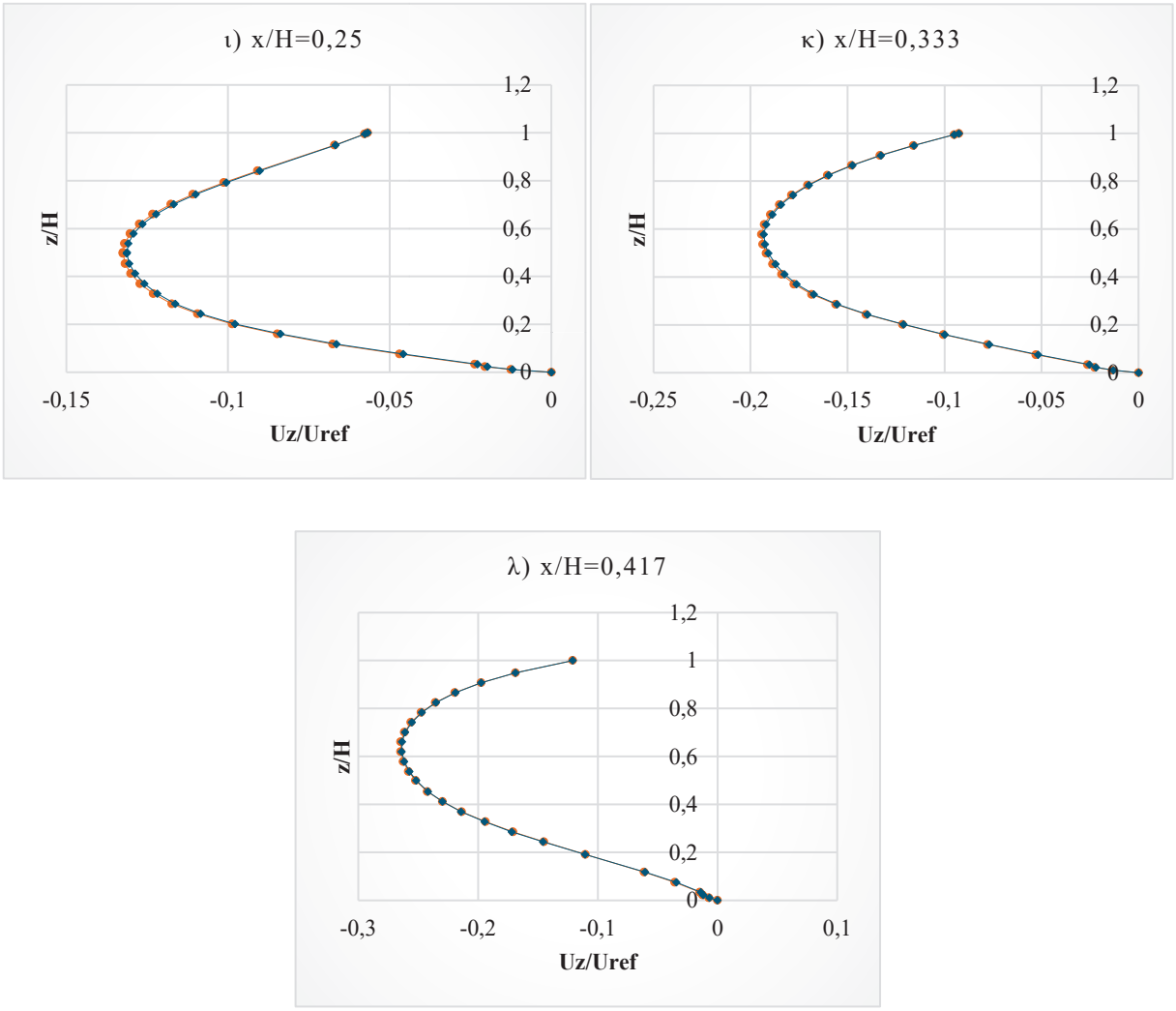


η) x/H=0,083

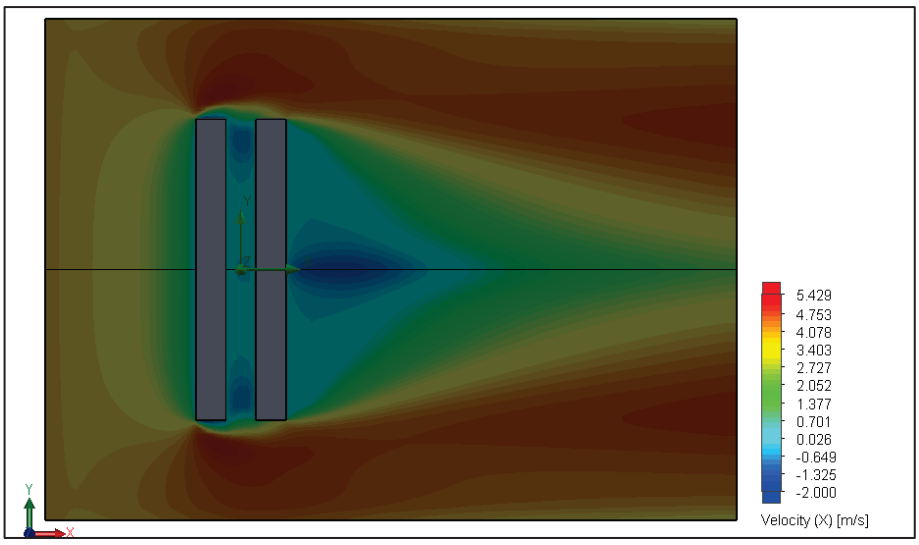


θ) x/H=0,167





Εικόνα 18 Σύγκριση κατακόρυφης συνιστώσας ταχύτητας U_z στις δύο περιπτώσεις επίλυσης.



Εικόνα 19 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας ταχύτητας στο διαμήκες οριζόντιο επίπεδο σε ύψος z/H=0.5.

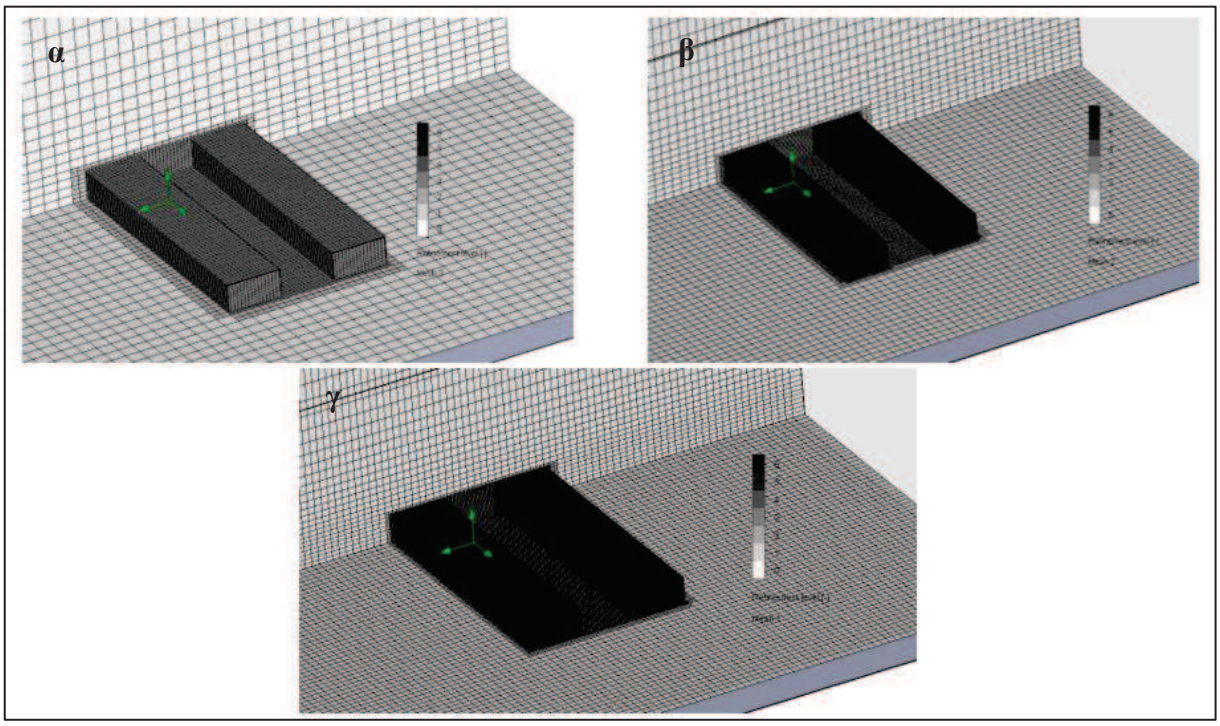
Στις Εικόνες 17,18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας αντίστοιχα, σε δύο περιπτώσεις επίλυσης. Αρχικά συμπεριλαμβάνοντας το σύνολο της γεωμετρίας στο υπολογιστικό πεδίο, και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το μισό πεδίο, ώστε να συγκριθούν τα μεγέθη. Επίσης στην Εικόνα 19 διαπιστώνεται η απόλυτη συμμετρία της ταχύτητας ως προς το κεντρικό επίπεδο. Με βάση τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα μεταξύ του συνολικού και του μισού πεδίου συμφωνούν σχεδόν απόλυτα, οπότε το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση του μισού υπολογιστικού πεδίου. Φαίνεται δηλαδή ότι με την συγκεκριμένη παραδοχή δεν υπάρχουν αποκλίσεις στους υπολογισμούς του μοντέλου. Όπως καταγράφεται στον Πίνακα 3, η προτεινόμενη προσέγγιση μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος χωρίς να υστερεί σε ακρίβεια υπολογισμών.

4.5.2 Ανεξαρτησία λύσης από το πλέγμα

Ένα πολύ σημαντικό θέμα είναι να βρεθεί ποιο είναι το βέλτιστο πλέγμα για το πρόβλημα. Το βέλτιστο πλέγμα αντιστοιχεί σε αυτό που αν εφαρμοστεί περαιτέρω πύκνωση, η λύση σε σημεία με υψηλές αναμενόμενες βαθμίδες (π.χ. κοντά και ανάμεσα στα δύο κτήρια) δεν θα αλλάξει ή τουλάχιστον δεν θα έχει σημαντικές μεταβολές. Οι θέσεις με αναμενόμενες μεγάλες βαθμίδες μπορούν να εκληφθούν οι θέσεις i) x/H=-0,417 ii) x/H=--0,25 iii) x/H=0 iv) x/H=0,25 v) x/H=0.417 στο κατακόρυφο επίπεδο y/H=0,5. Για την επιλογή του βέλτιστου πλέγματος ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Το πρόβλημα επιλύεται αρχικά με ένα αραιό πλέγμα.
2. Το πρόβλημα επιλύεται ξανά με ένα πιο πυκνό πλέγμα με πύκνωση πιο κοντά στα στερεά όρια, όπου αναμένονται έντονες πηγές διαταραχών.
3. Το πρόβλημα επιλύεται με ένα πολύ πυκνό πλέγμα.

Σκοπός των παραπάνω βημάτων είναι το πλέγμα να σχεδιαστεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη οικονομία ως προς τον αριθμό των κόμβων χωρίς να μειωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά να προκύπτει αποδεκτή λύση σε ρεαλιστικό χρόνο επίλυσης. Με βάση την παραπάνω λογική, το πρόβλημα θα λυθεί για διάφορα πλέγματα, ξεκινώντας από ένα λογικό πλέγμα και σταδιακά θα πυκνώνει, και θα επιλύεται ξανά μέχρι να φανεί σε ποιο πλέγμα η λύση στις κρίσιμες θέσεις σταθεροποιείται με την περαιτέρω πύκνωση. Το πρόβλημα επιλύεται για πλέγματα: αραιό:164.362 κελιά, μεσαίο: 402.810 κελιά, πολύ πυκνό: 985.510 κελιά.



Εικόνα 20 Τρεις περιπτώσεις χωρικής διακριτοποίησης, με α) αραιό πλέγμα, β) μεσαίο πλέγμα και γ) πυκνό πλέγμα.

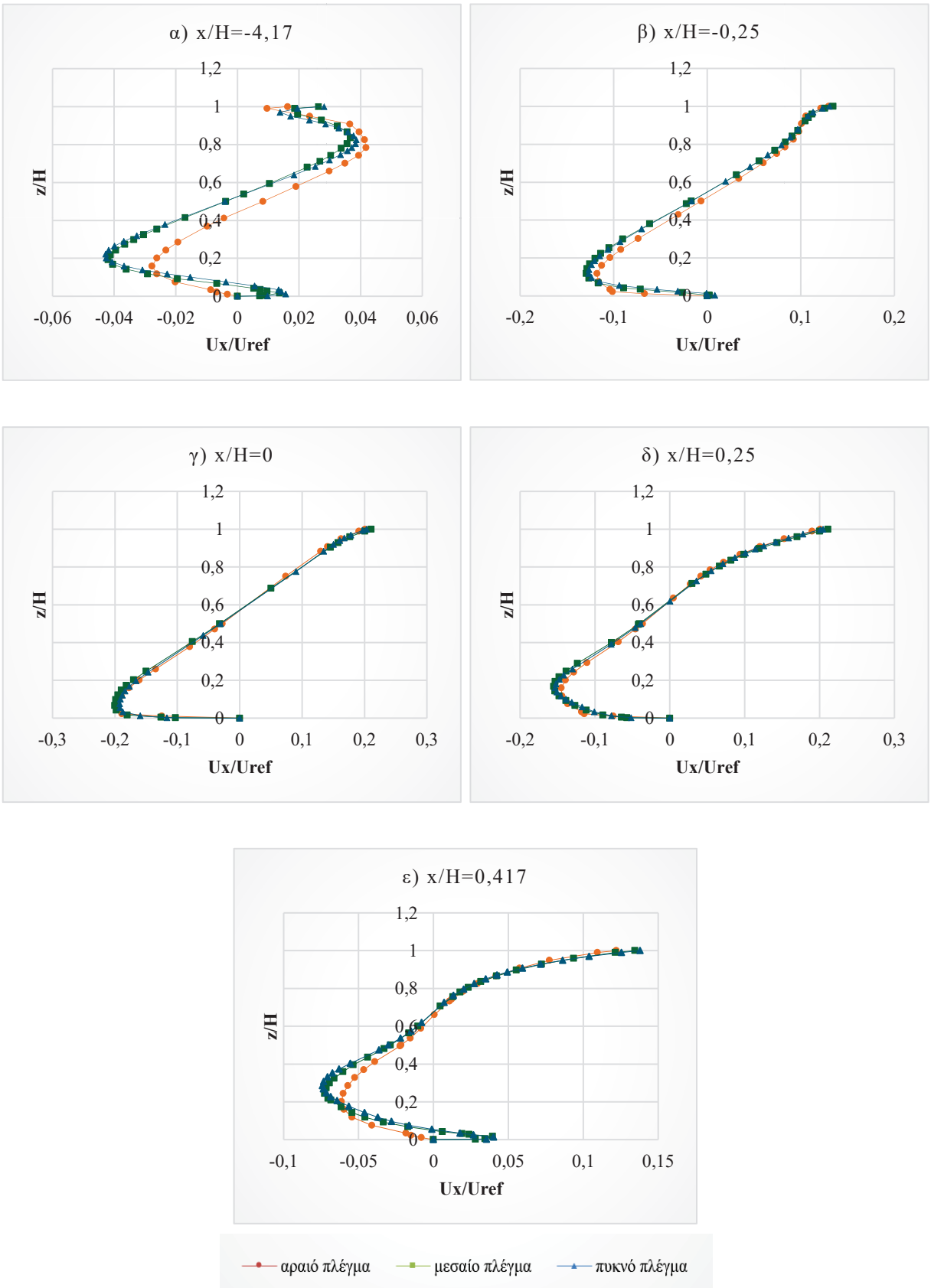
Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης επίλυσης, και οι γραφικές παραστάσεις οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας ταχύτητας, σε σχέση με το ύψος. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα γίνεται η επιλογή ανεξάρτητου πλέγματος. Για την σύγκριση των τιμών, χρησιμοποιείται ο δείκτης του μέσου απολύτου σφάλματος, MAE, ως προς το πυκνό πλέγμα των 985.130 κελιών. Ισχύει:

$$\mathrm{MAE} = \frac{\Sigma_{i=1}^{n}|y_i^{**} - y_i^{*}|}{n} \tag{4.23}$$

Όπου y^{**} η τιμή της ταχύτητας στο πυκνό πλέγμα, y^{*} η τιμή της ταχύτητας στο αραιό και στο μεσαίο πλέγμα, και n ο αριθμός των μετρήσεων σε κάθε κατακόρυφη γραμμή. Καλύτερη συσχέτιση των δεδομένων υπάρχει όσο ο δείκτης πλησιάζει στο 0. Με έντονους χαρακτήρες επισημαίνονται οι τιμές του πλέγματος το οποίο παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τις τιμές του πυκνού πλέγματος.

Πίνακας 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά επίλυσης για ανεξαρτησία πλέγματος.

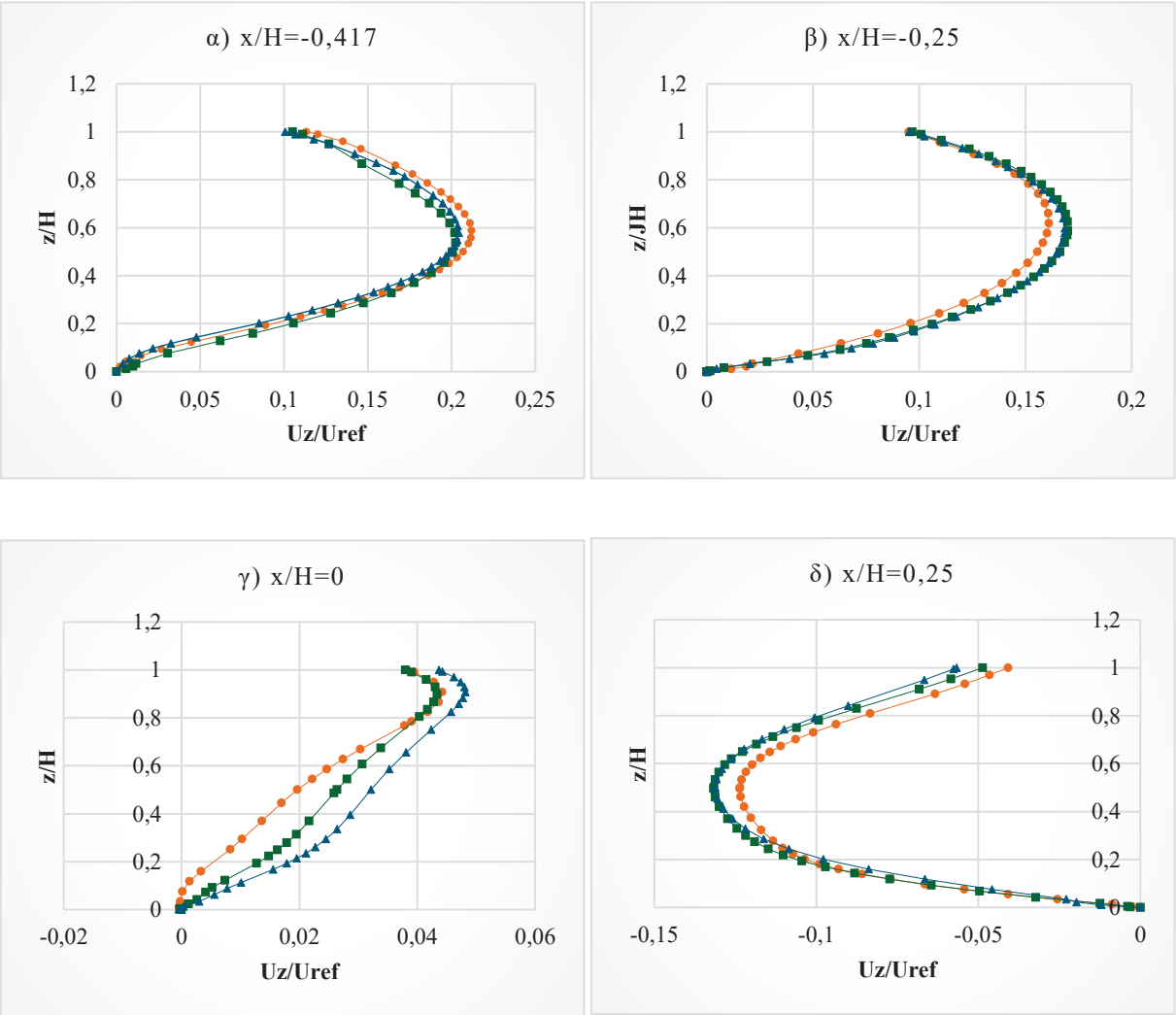
	Αραιό Πλέγμα	**Μεσαίο Πλέγμα**	**Πυκνό Πλέγμα**
Αριθμός κελιών	164.362	402.810	985.130
Διαστάσεις κελιών	86x31x25	118x43x32	170x61x38
Χρόνος επίλυσης	23,5 λεπτά	69,22 λεπτά	222,15 λεπτά
Επαναλήψεις	439	591	797

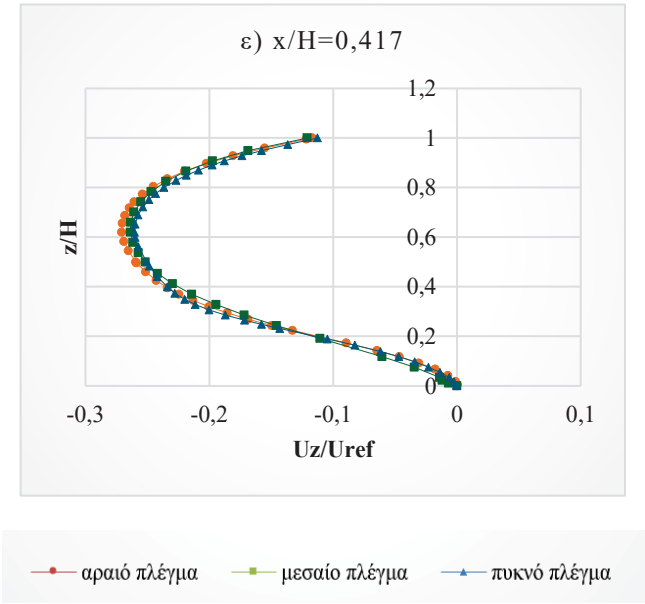


Εικόνα 21 Απεικόνιση οριζόντιας συνιστώσας ταχύτητας στις τρεις περιπτώσεις διακριτοποίησης, σε πέντε διαφορετικές θέσεις.

Πίνακας 4 Απεικόνιση σφάλματος MAE (%) για την οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας.

Σύγκριση πυκνού πλέγματος με:		
x/H	Αραιό πλέγμα	Μεσαίο πλέγμα
-4,17	1,004	**0,276**
-0,25	1,255	**0,686**
0	1,624	**1,469**
0,25	1,164	**0,901**
4,17	1,404	**0,493**





Εικόνα 22 Απεικόνιση κατακόρυφης συνιστώσας ταχύτητας στις τρεις περιπτώσεις διακριτοποίησης σε πέντε διαφορετικές θέσεις.

Πίνακας 5 Απεικόνιση σφάλματος MAE (%) για την κατακόρυφη συνιστώσα ταχύτητας.

Σύγκριση πυκνού πλέγματος με:		
x/H	Αραιό πλέγμα	Μεσαίο πλέγμα
-4,17	0,533	**0,465**
-0,25	1,050	**0,476**
0	0,857	**0,525**
0,25	1,263	**0,820**
4,17	1,504	**1,123**

Από τις Εικόνες 21 και 22 μπορεί να παρατηρηθεί ότι με την αύξηση των υπολογιστικών κελιών από 164.362 σε 402.810 υπάρχει μεταβολή και στις δύο συνιστώσες της ταχύτητας. Στη συνέχεια όταν τα κελιά αυξηθούν σε 985.130 η μεταβολή αυτή γίνεται αμελητέα. Αυτό τεκμηριώνεται μέσω των Πινάκων 4 και 5, όπου είναι εμφανές ότι το μέσο απόλυτο σφάλμα των συνιστωσών της ταχύτητας μεταξύ του πυκνού και του μεσαίου πλέγματος, είναι σημαντικά μικρότερο από το αντίστοιχο σφάλμα μεταξύ πυκνού και αραιού πλέγματος. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το ανεξάρτητο πλέγμα μπορεί να θεωρηθεί αυτό των 402.810 κελιών και με βάση αυτό να εκπονηθεί η μελέτη περίπτωσης.

4.6 Οριακές συνθήκες

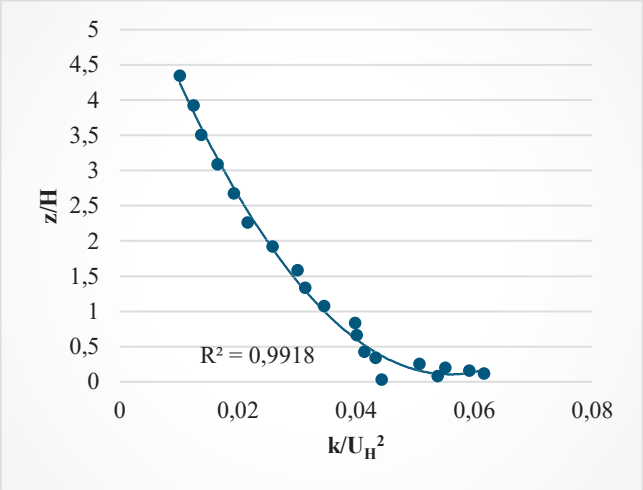
4.6.1 Είσοδος

Το προφίλ της ταχύτητας εισόδου, δίνεται με βάση τα δεδομένα μετρήσεων της αεροσήραγγας. Σύμφωνα με το λογαριθμικό νόμο, ισχύει [55]:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad (4.24)$$

Όπου u_* και z_0 είναι η ταχύτητα τριβής και η αεροδυναμική τραχύτητα, και ισούται με 0.59 m/s και 0.004 m αντίστοιχα, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα. Τέλος, με κ συμβολίζεται η σταθερά von Karman και είναι ίση με 0.42. Η ταχύτητα δίνεται στον άξονα x, δηλαδή ισχύει $U(z)=U_x(z)$.

Επίσης, η κατανομή της κινητικής ενέργειας στην είσοδο δίνεται με τη βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος:



Εικόνα 23 Κατανομή της κινητικής ενέργειας της τύρβης προς το τετράγωνο της ταχύτητας αναφοράς στην είσοδο της ροής. (Πηγή: [55])

Μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η συνάρτηση της κινητικής ενέργειας της τύρβης ως προς το ύψος z, και μέσω του Microsoft Excel προκύπτει η εξίσωση:

$$k(z) = 3.4145z^2 - 3.5664z + 1.1849 \tag{4.25}$$

Η εξίσωση απορρόφησης της κινητικής ενέργειας δίνεται με βάση τον τύπο [55]:

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)} \tag{4.26}$$

4.6.2 Έξοδος

Στο όριο εξόδου, η ροή είναι σταθερή τόσο θερμικά όσο και υδροδυναμικά. Για όλες τις μεταφερόμενες ποσότητες εφαρμόζεται η συνθήκη Neumann. Η συνθήκη αυτή συνεπάγεται μη αντιστροφή της ροής διαμέσου του συνόρου εξόδου και μηδενική μεταβολή των κατανομών εξόδου, συνεπώς εφαρμόζεται μετά το σημείο επανακόλλησης της ροής κατάντη του κτηρίου. Με βάση την συνθήκη, ισχύει [46]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_{jj}} = 0 \tag{4.27}$$

$\vec{jj}//\vec{n}$, όπου $\vec{jj}$ είναι το διάνυσμα διεύθυνσης της ταχύτητας και $\vec{n}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα ορισμού του συνόρου εξόδου.

4.6.3 Στερεά όρια

Με σκοπό τη μίμηση των συνθηκών της αεροσήραγγας, εφαρμόζεται συνθήκη μη ολίσθησης σε όλα τα στερεά όρια. Αυτό σημαίνει ότι το ρευστό στο τοίχωμα λαμβάνει την ταχύτητα του τοιχώματος. Επίσης εφαρμόζονται συναρτήσεις τοίχου (wall functions) για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ι-ξώδους και της τυρβώδους περιοχής. Τα όρια αυτά περιλαμβάνουν το έδαφος, όλες τις όψεις των κτηρίων του αστικού φαραγγιού, το άνω όριο και το πλευρικό όριο του υπολογιστικού πεδίου.

4.6.4 Όριο συμμετρίας

Το κατακόρυφο κεντρικό επίπεδο x-y μεταχειρίζεται ως όριο συμμετρίας, καθώς όπως αναφέρεται παραπάνω η συνολική γεωμετρία παρουσιάζει συμμετρία ως προς αυτό το επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι οι κάθετες συνιστώσες ταχύτητας ως προς το σύνορο, καθώς και οι κάθετες χωρικές βαθμίδες των λοιπών μεταβλητών τίθενται ίσες με μηδέν, δηλαδή $\frac{\partial \varphi}{\partial x_{jj}} = 0$, $u_{jj} = 0$.

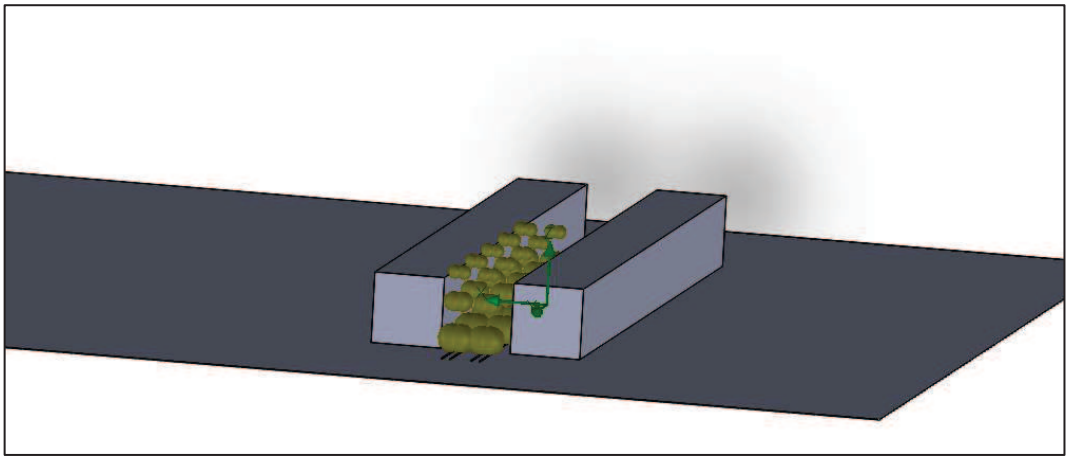
4.6.5 Πηγές

Για την προσομοίωση των πηγών των ρύπων, χρησιμοποιείται η δυνατότητα Tracer Study (Μελέτη Ιχνηθέτη). Πρώτο βήμα είναι να οριστεί ο κατάλληλος ρύπος που θα εκλυθεί από την πηγή. Το λογισμικό παρέχει βιβλιοθήκη χημικών ενώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για την εισαγωγή του ρύπου SF_6, είναι απαραίτητο να δοθούν η γραμμομοριακή μάζα, και ο συντελεστής διάχυσης του ρύπου. Αντίστοιχα αυτές οι τιμές είναι [65]:

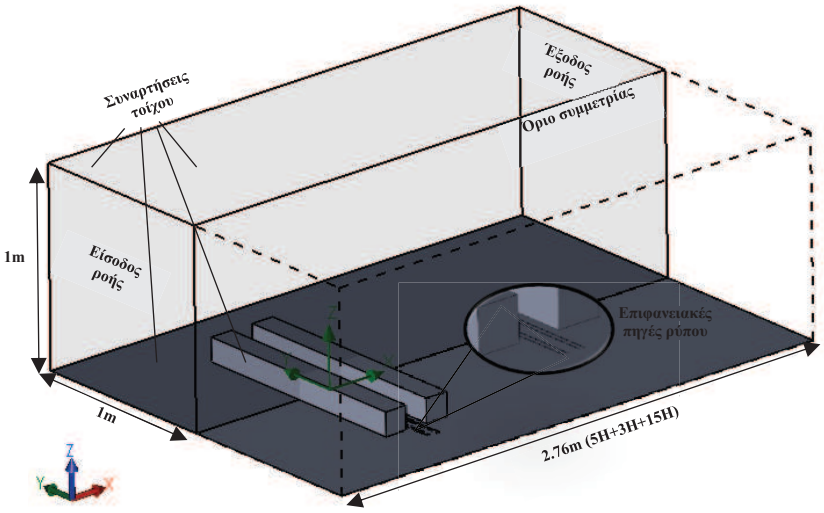
$Mr_{SF6} = 0.14606$ kg/mol

$D_{SF6} = 2.33 \cdot 10^{-5}$ m^2/s

Στη συνέχεια ορίζονται οι επιφάνειες των πηγών, ως οι οριζόντιες επιφάνειες των τεσσάρων γραμμών. Τέλος, η παροχή του ρύπου σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία ισούται με 10 g/s, [55]. Καθώς στο υπολογιστικό πεδίο συμπεριλαμβάνεται η μισή επιφάνεια της πηγής, η παροχή που δίνεται για τον ρύπο στις οριακές συνθήκες είναι ίση με 5 g/s.



Εικόνα 24 Απεικόνιση μελέτης ιχνηθέτη.



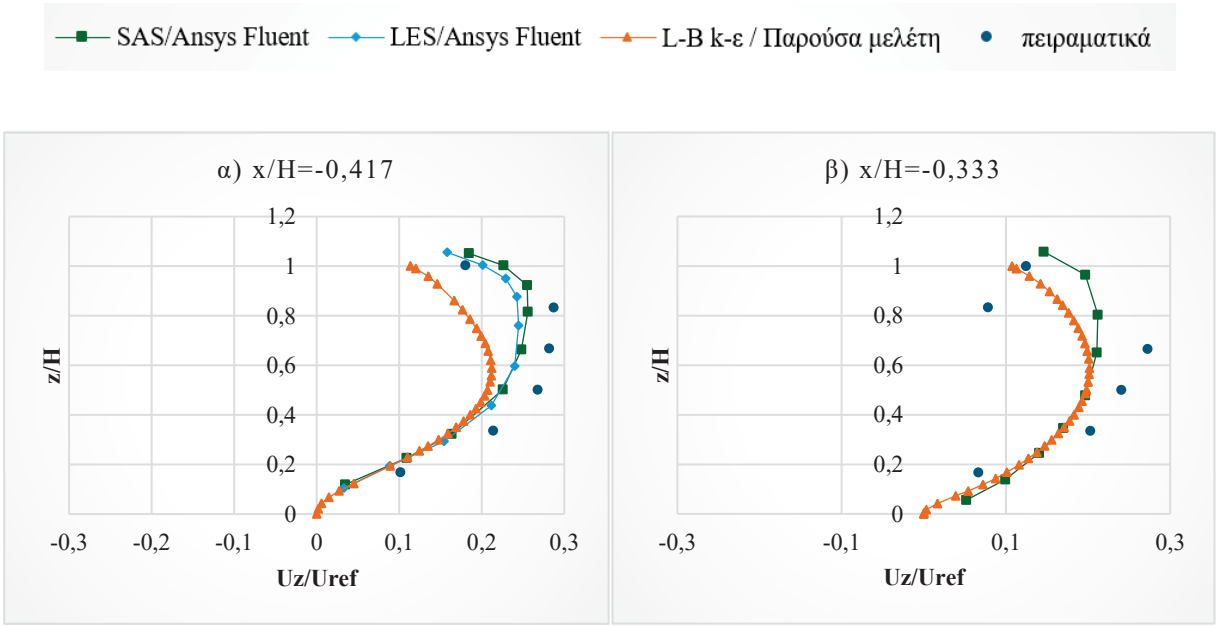
Εικόνα 25 Διαστάσεις υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

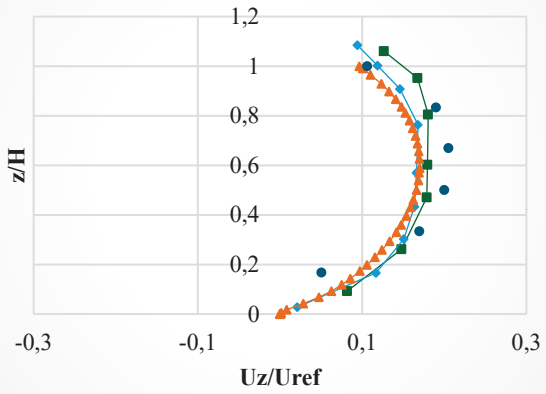
Αποτελέσματα – Επαλήθευση μοντέλου

5.1 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα και άλλα μοντέλα τύρβης

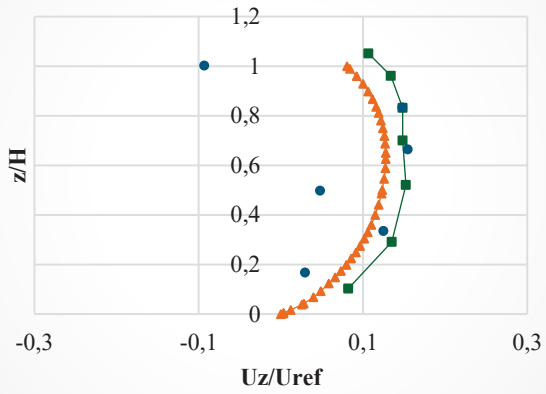
Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης με το παρόν μοντέλο και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη του πειράματος της αεροσήραγγας. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου, στη σύγκριση συμπεριλαμβάνονται τα αποτελέσματα από άλλες έρευνες που χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα σε διαφορετικά λογισμικά. Τα μοντέλα αυτά είναι το υβριδικό μοντέλο SAS [55], και το μοντέλο τύρβης LES [54]. Σε προηγούμενο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των δύο. Στο υπόμνημα, αναγράφονται το μοντέλο επίλυσης, καθώς και το λογισμικό που χρησιμοποιείται σε κάθε μελέτη:



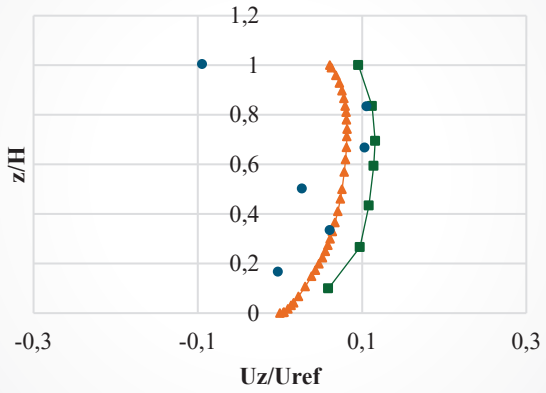
γ) x/H=-0,25



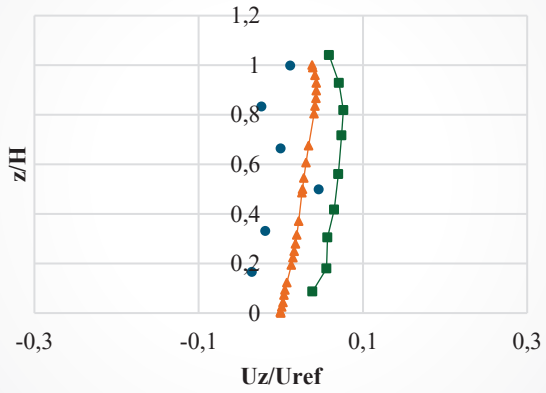
δ) x/H=-0,167



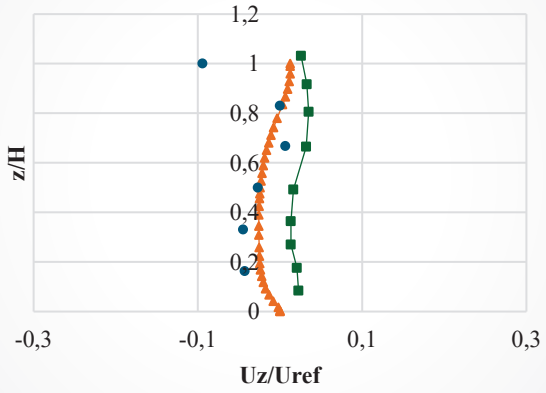
ε) x/H=-0,083



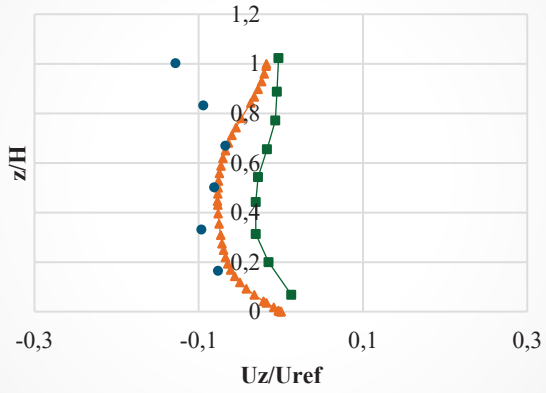
ζ) x/H=0

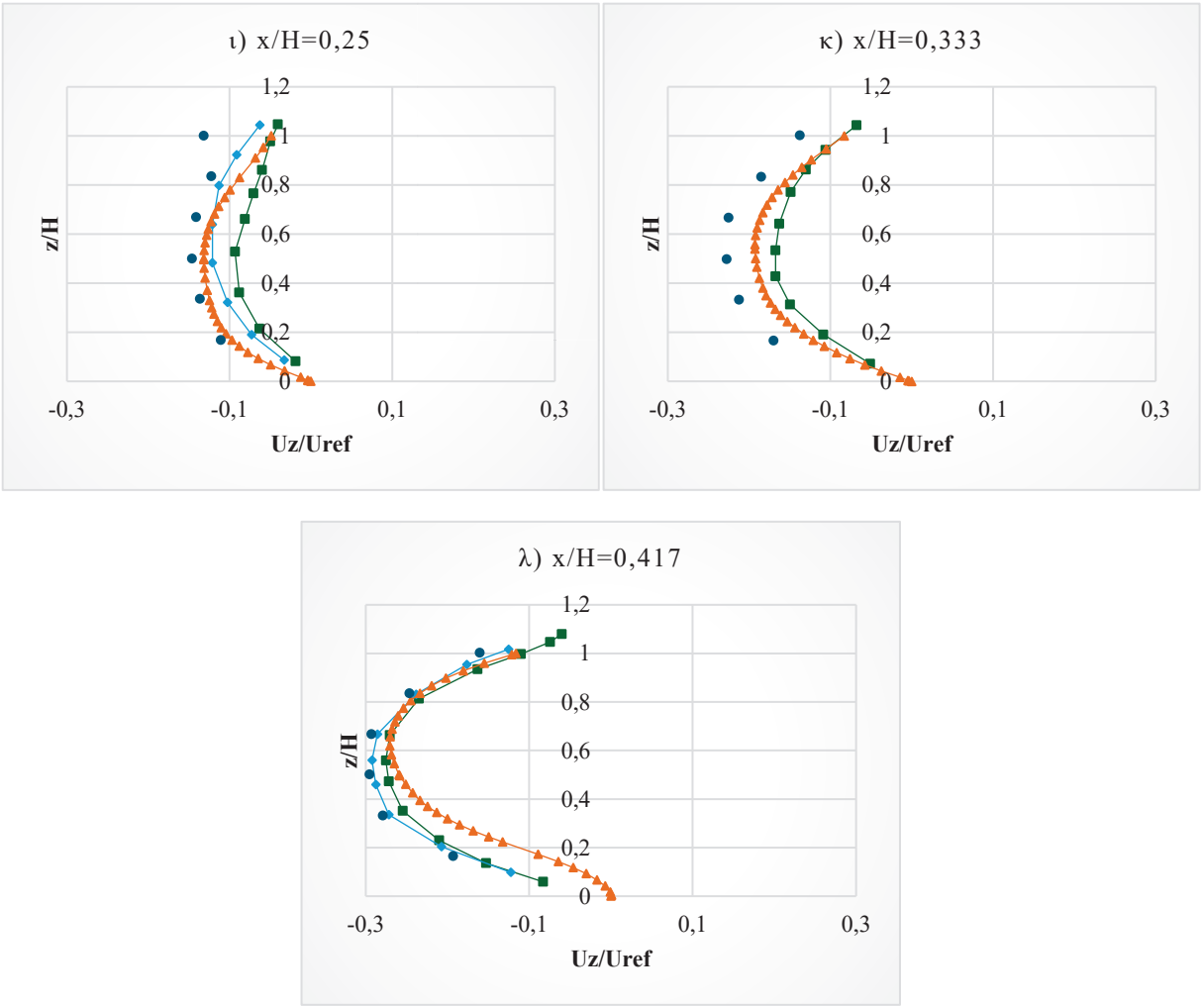


η) x/H=0,083

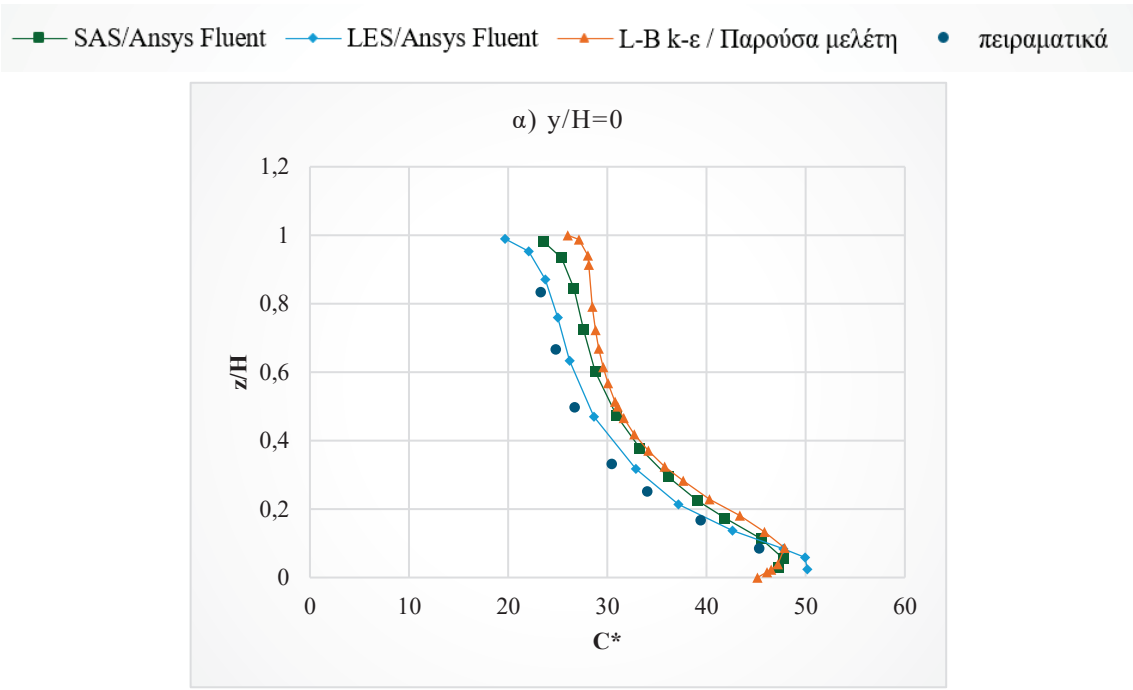


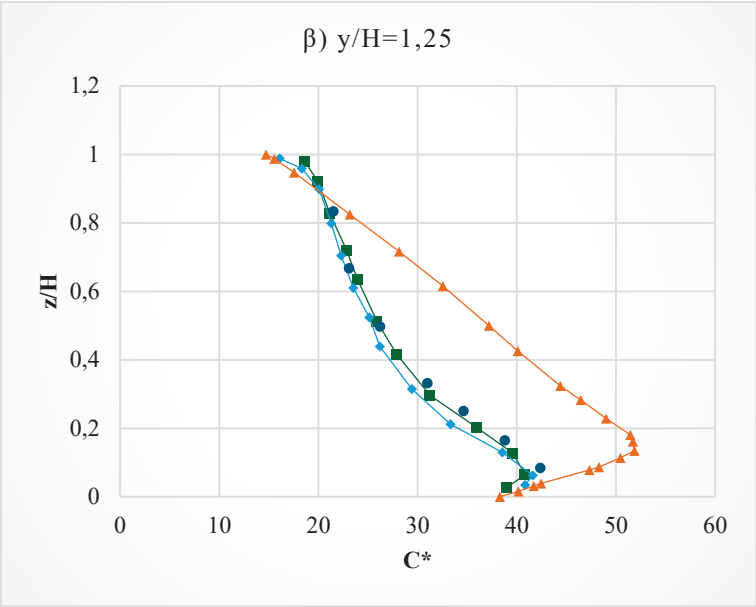
θ) x/H=0,167

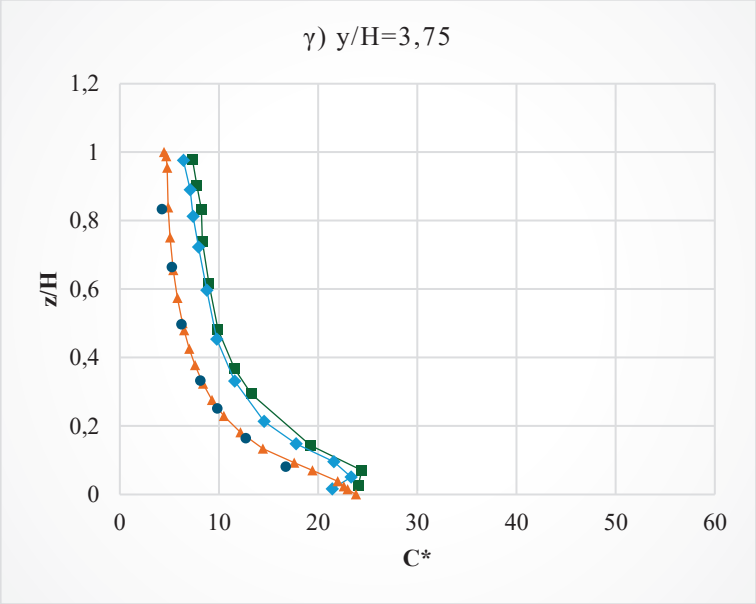


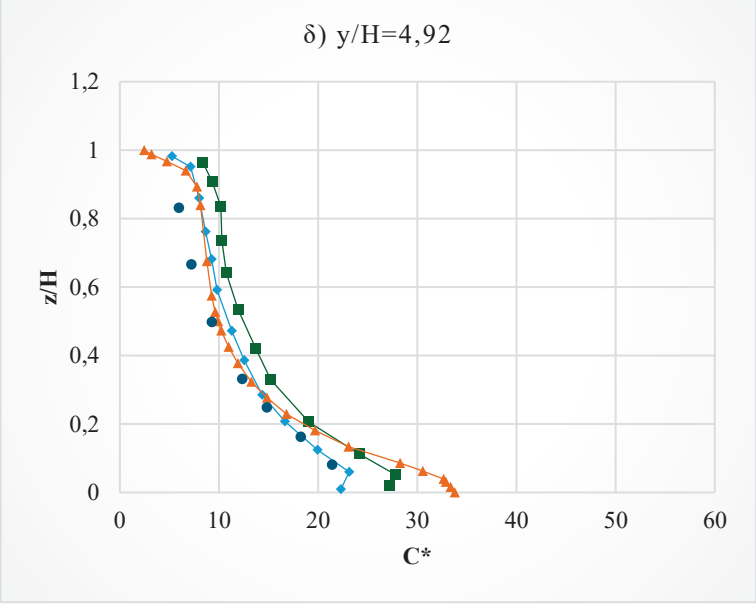


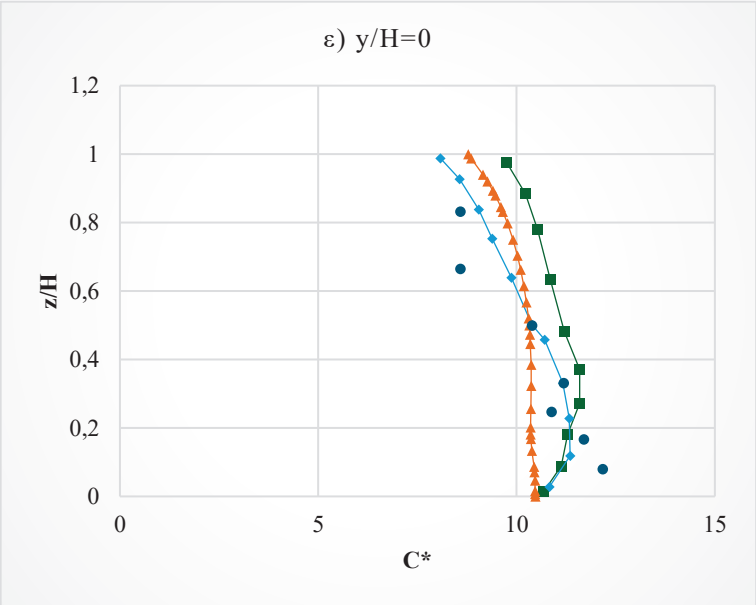
Εικόνα 26 Σύγκριση του μοντέλου k-ε με τα πειραματικά, για την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας στις 11 θέσεις μετρήσεων. Απεικονίζονται επίσης τα δεδομένα των μοντέλων SAS και LES.

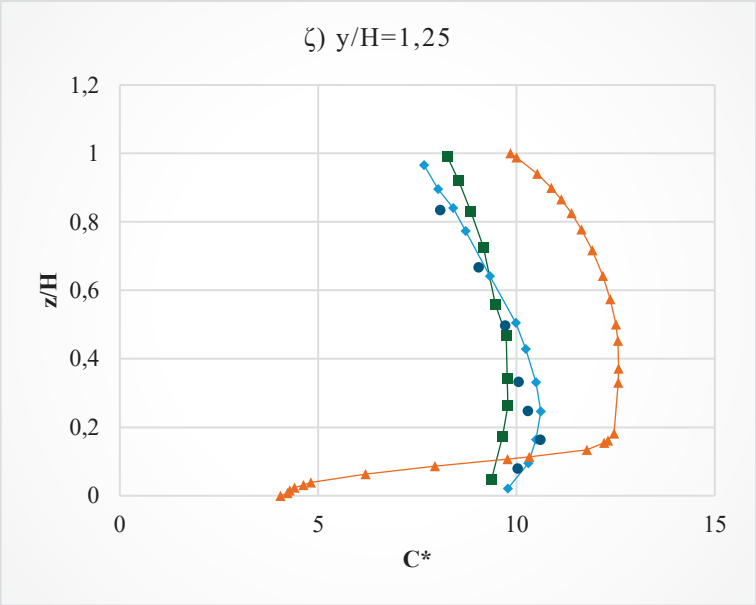


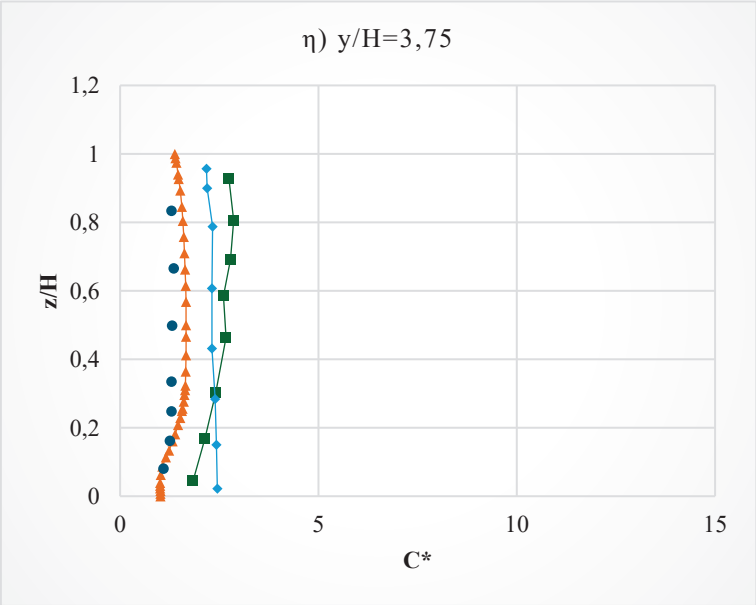

β) y/H=1,25
z/H
C*
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
0
10
20
30
40
50
60

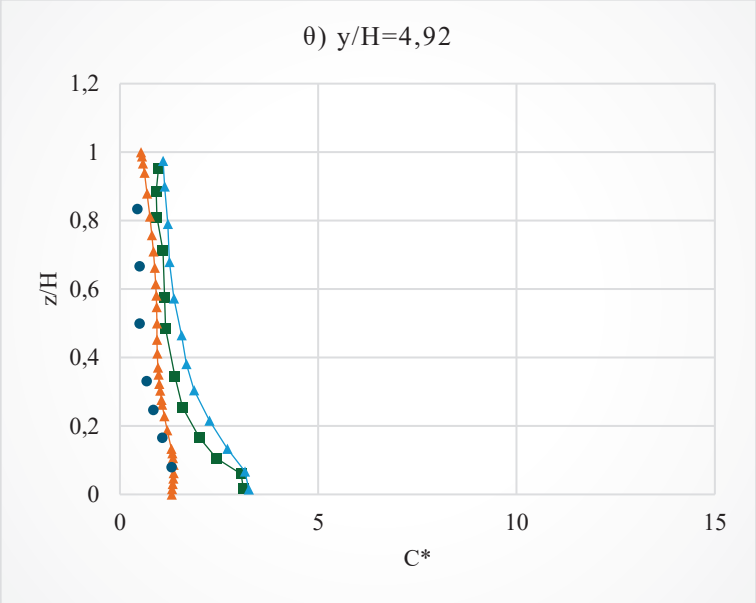

γ) y/H=3,75
z/H
C*
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
0
10
20
30
40
50
60


δ) y/H=4,92
z/H
C*
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
0
10
20
30
40
50
60


ε) y/H=0
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
z/H
0
5
10
15
C*


ζ) y/H=1,25
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
z/H
0
5
10
15
C*


η) y/H=3,75
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
z/H
0
5
10
15
C*



Εικόνα 27 Σύγκριση του μοντέλου k-ε με τα πειραματικά, για την αδιάστατη συγκέντρωση του ρύπου, στις 8 θέσεις μετρήσεων. Απεικονίζονται επίσης τα δεδομένα των μοντέλων SAS και LES.

5.2 Αξιολόγηση σφάλματος και σχολιασμός

Προκειμένου να παραχθεί μία συνολική αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου, επιλέγονται οι εξής δείκτες για την απεικόνιση του σφάλματος συγκριτικά με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα:

- Απόλυτο σφάλμα, $AE = 100 \cdot \left| \frac{y_i^{exp} - y_i^{pred}}{y_i^{exp}} \right| \%$ (5.1)
- Μέσο απόλυτο σφάλμα, $MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| y_i^{exp} - y_i^{pred} \right|}{n}$ (5.2)
- Συντελεστής προσδιορισμού, R^2
- $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{qq=1}^{NEL} [y_{exp,qq} - y_{pred,qq}]^2}{NEL}}$ (5.3)

Παρακάτω παρουσιάζεται σε πίνακες η απόκλιση των μοντέλων k-ε, SAS και LES, σε σχέση με τα δεδομένα του πειράματος της αεροσήραγγας, αναφορικά με την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας και τη συγκέντρωση του ρύπου. Το σφάλμα απεικονίζεται μέσω των δεικτών MAE, R^2 και RMSE για κάθε θέση μέτρησης. Στα Παραρτήματα 1 και 2, παρουσιάζεται το τοπικό απόλυτο σφάλμα για τα παραπάνω μεγέθη, σε κάθε κατακόρυφο σημείο λήψης μέτρησης σε κάθε θέση, από το έδαφος έως το ύψος των κτηρίων, δηλαδή στο εύρος από z=0 ως z=0.12m. Με έντονους χαρακτήρες επισημαίνονται οι τιμές όπου υπάρχει η καλύτερη συσχέτιση ανά θέση. Αυτό συμβαίνει όταν:

- AE→0
- MAE→0
- R^2→1
- RMSE→0

Πίνακας 6 Δείκτης MAE για τη σύγκριση της αδιάστατης κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας.

MAE	Πειραματικά σε σύγκριση με:		
y/H=0,5 x/H:	L-B k-ε	SAS	LES
-0,417	0,07064934	0,06017418	**0,05291002**
-0,333	**0,0484898**	0,06772948	
-0,25	**0,03062148**	0,02839769	0,0370346
-0,167	**0,05999764**	0,06332681	
-0,083	**0,04944123**	0,06505634	
0	**0,03711578**	0,06604487	
0,083	**0,02928258**	0,05900702	
0,167	**0,03409988**	0,07782859	
0,25	**0,02916898**	0,06954179	0,03444955
0,333	**0,04331054**	0,06190891	
0,417	0,05193384	0,03608354	**0,02897868**

Πίνακας 7 Δείκτης R^2 για τη σύγκριση της αδιάστατης κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας.

R^2	Πειραματικά σε σύγκριση με:		
y/H=0,5 x/H:	L-B k-ε	SAS	LES
-0,417	**0,92660532**	0,5304307	0,72229757
-0,333	**0,54046128**	0,14468945	
-0,25	**0,95894634**	0,72337988	0,9150001
-0,167	**0,47786401**	0,15851781	
-0,083	**0,34920902**	0,25772002	
0	0,10741201	**0,17766022**	
0,083	**0,1910273**	0,01848097	
0,167	**0,61451067**	0,00382974	
0,25	0,37984687	**0,72683803**	0,68646654
0,333	**0,95429835**	0,52153488	
0,417	0,74762581	**0,90342554**	0,67485926

Πίνακας 8 Δείκτης RMSE για τη σύγκριση της αδιάστατης κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας.

RMSE	Πειραματικά σε σύγκριση με:		
y/H=0,5 x/H:	L-B k-ε	SAS	LES
-0,417	0,07315279	0,06521478	**0,05375159**
-0,333	0,05637145	0,07499314	
-0,25	**0,03218013**	0,03260724	0,0401109
-0,167	**0,08070489**	0,10175059	
-0,083	**0,0698923**	0,08947963	
0	**0,03958244**	0,07041699	
0,083	**0,04604746**	0,06777524	
0,167	**0,05055798**	0,08190661	
0,25	**0,03596902**	0,07097134	0,04072497
0,333	**0,04478896**	0,06810738	
0,417	0,06646418	**0,04089225**	

Πίνακας 9 Δείκτης MAE για τη σύγκριση της αδιάστατης συγκέντρωσης C^*.

MAE	Πειραματικά σε σύγκριση με:		
ανάντη τοίχωμα, y/H	L-B k-ε	SAS	LES
0	4,970424	4,530597	**2,311117**
1,25	10,08138	0,985875	**0,653937**
3,75	**0,916274**	5,728942	4,280404
4,92	3,220919	4,510501	**2,05672**
κατάντη τοίχωμα, y/H			
0	1,019511	1,127362	**0,651433**
1,25	2,784454	0,576273	**0,393959**
3,75	**0,23009**	1,063493	1,10551
4,92	**0,284548**	0,930824	1,253225

Πίνακας 10 Δείκτης R^2 για τη σύγκριση της αδιάστατης συγκέντρωσης C^*.

R^2	Πειραματικά σε σύγκριση με:		
ανάντη τοίχωμα, y/H	L-B k-ε	SAS	LES
0	0,967252	0,977372	**0,996739**
1,25	0,768164	0,981564	**0,99314**
3,75	0,993154	0,94095	**0,997097**
4,92	0,944435	0,983697	**0,998925**
κατάντη τοίχωμα, y/H			
0	**0,784887**	0,173488	0,759696
1,25	0,000813	0,443362	**0,825864**
3,75	**0,898756**	0,482593	0,509755
4,92	0,946417	0,939404	**0,987198**

Πίνακας 11 Δείκτης RMSE για τη σύγκριση της αδιάστατης συγκέντρωσης C^*.

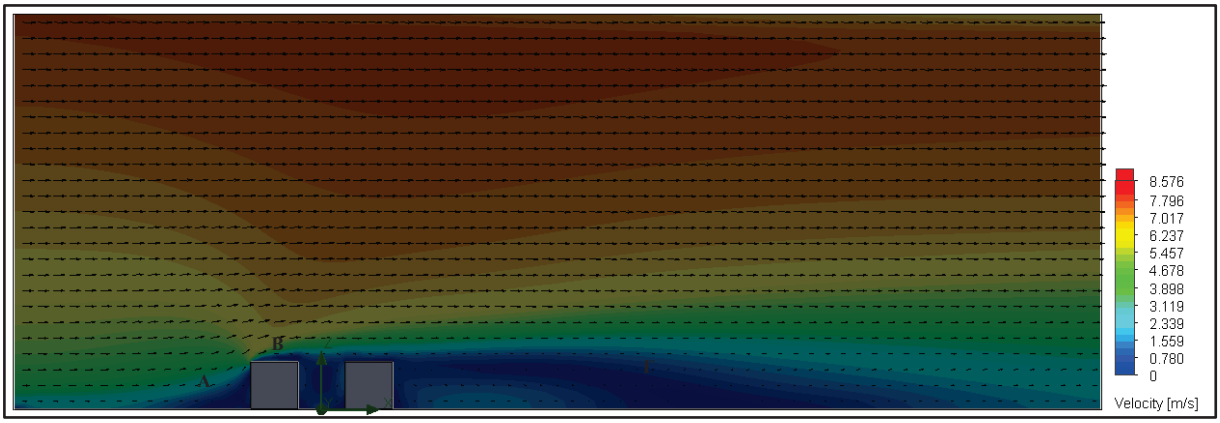
RMSE	Πειραματικά σε σύγκριση με:		
ανάντη τοίχωμα, y/H	L-B k-ε	SAS	LES
0	5,161576	4,669271	**2,396225**
1,25	11,0906	1,113297	**0,855905**
3,75	**1,261296**	6,077961	4,431908
4,92	4,197425	4,652662	**2,090227**
κατάντη τοίχωμα, y/H			
0	1,155442	1,332118	**0,802539**
1,25	2,863338	0,679689	**0,415399**
3,75	**0,254629**	1,112762	1,112338
4,92	**0,307039**	1,010761	1,306386

Με βάση τα γραφήματα 26 και 27, και τους πίνακες από 6 ως 11, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

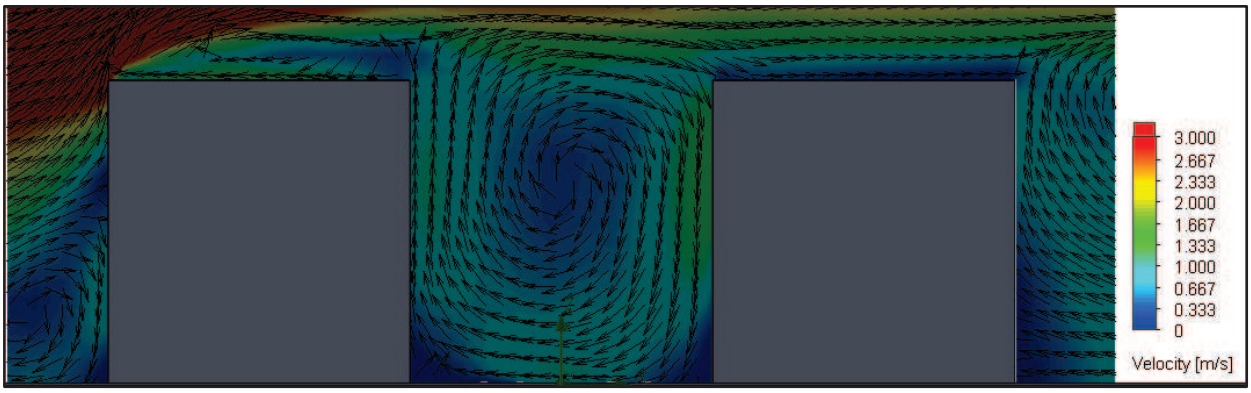
- Αναφορικά με την αδιάστατη κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας U_z^*, οι τιμές του μοντέλου L-B k-ε είναι ελαφρώς χαμηλότερες στο σύνολο των θέσεων, σε σχέση με τα μοντέλα SAS και LES. Στις περισσότερες θέσεις μετρήσεων, φαίνεται ότι το παρόν μοντέλο παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα, συγκριτικά με τα δύο μοντέλα. Από την άλλη πλευρά, τα μοντέλα SAS και LES δείχνουν μεγαλύτερη ακρίβεια στις θέσεις κοντά στα τοιχώματα των κτηρίων (θέσεις α και λ).
- Όσον αφορά την αδιάστατη συγκέντρωση του ρύπου C^*, με μία γενική ματιά το μοντέλο LES φαίνεται να καθίσταται πιο αποτελεσματικό στην προσομοίωση της διασποράς του ρύπου συγκριτικά με τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης, ιδιαίτερα στις κεντρικές θέσεις των τοιχωμάτων, όπου επικρατούν υψηλές δίνες. Το μοντέλο L-B k-ε, προκύπτει ότι παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα στις θέσεις κοντά στο τοίχωμα του προσήνεμο κτηρίου, και ιδιαίτερα στις άκρες του δρόμου.

5.3 Απεικόνιση τυρβώδους υδροδυναμικού πεδίου και συγκέντρωσης ρύπου

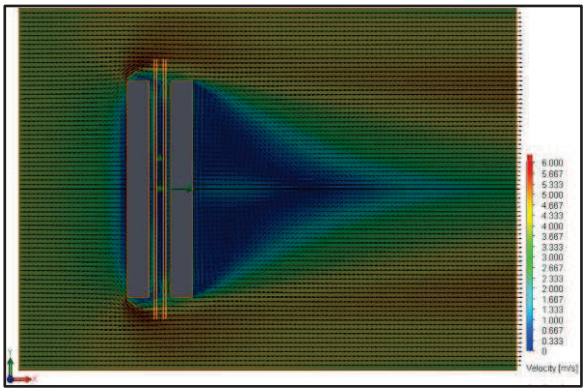
Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται και αναλύονται βασικά μεγέθη της ροής. Αρχικά η ταχύτητα και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της, και στη συνέχεια η συγκέντρωση του ρύπου και η κατανομή του στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή ανάμεσα και κοντά στα δύο κτήρια. Η απεικόνιση γίνεται μέσω ενός επιπέδου αναφοράς με χρωματική διαβάθμιση, ροϊκών γραμμών και διανυσμάτων ροής, και μέσω ισοεπιφανειών. Τέλος γίνεται σχολιασμός.



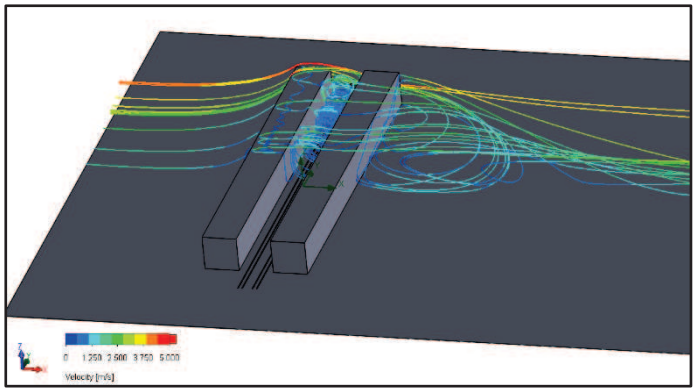
Εικόνα 28 Συνισταμένη ταχύτητα στο διαμήκες κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας x-z.



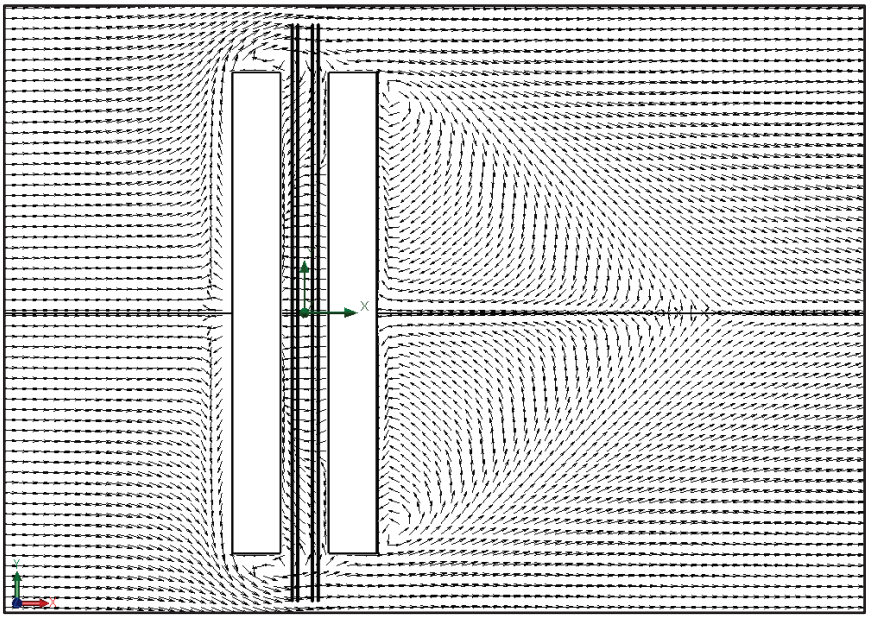
Εικόνα 29 Συνισταμένη ταχύτητα εντός του αστικού φαραγγιού, στο κεντρικό κατακόρυφο επίπεδο x-z.



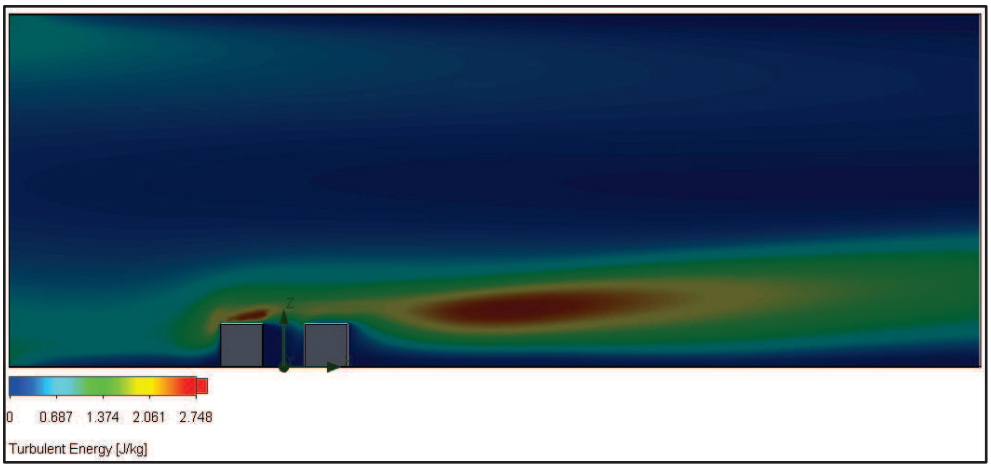
Εικόνα 30 Συνισταμένη ταχύτητα στο επίπεδο x-y όπου z/H=0.5.



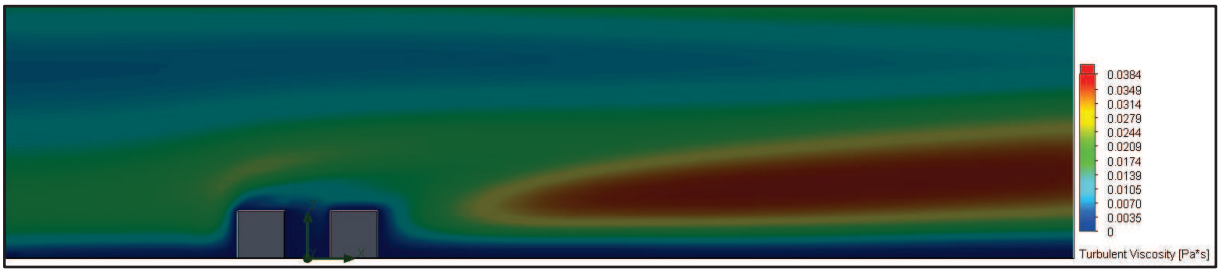
Εικόνα 31 Απεικόνιση ροϊκών γραμμών για την συνισταμένη ταχύτητα του ανέμου.



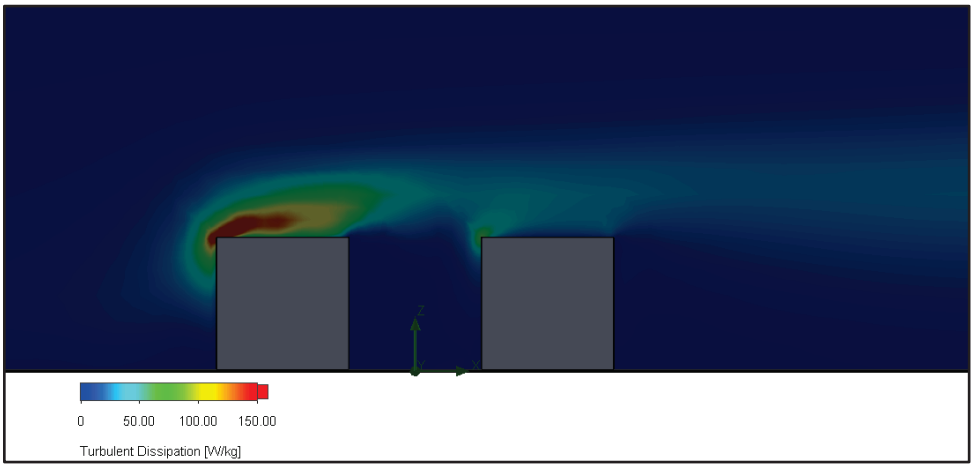
Εικόνα 32 Ροϊκές γραμμές της συνισταμένης ταχύτητας στο επίπεδο πολύ κοντά στο έδαφος.



Εικόνα 33 Τυρβώδης κινητική ενέργεια.



Εικόνα 34 Τυρβώδες ιξώδες.



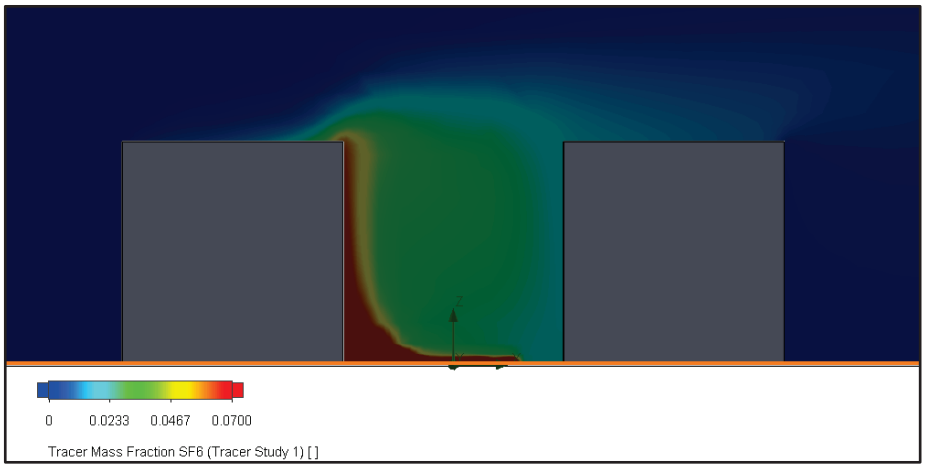
Εικόνα 35 Ρυθμός απορρόφησης τυρβώδους κινητικής ενέργειας ε.

Μέσω των παραπάνω εικόνων, μπορούν να γίνουν αντιληπτές οι ζώνες του υπολογιστικού πεδίου στις οποίες η ροή του εισερχόμενου ανέμου, ο οποίος είναι κάθετος κατά μήκος των κτηρίων, δεν διαταράσσεται από τα δύο κτήρια, καθώς και οι περιοχές όπου αυτή επηρεάζεται από τις δομημένες γεωμετρίες. Οι περιοχές αυτές είναι κυρίως ανάντη, κατάντη, πλευρικά και ανάμεσα στα δύο κτήρια. Πιο συγκεκριμένα, σημειώνονται οι εξής κρίσιμες περιοχές της ροής: ανακοπή ανάντη του κτηριακού μοντέλου (A), ανακυκλοφορία άνω της οροφής που δεν επανακολλάται (B), και ανακυκλοφορία κατάντη του μοντέλου, προς την περιοχή

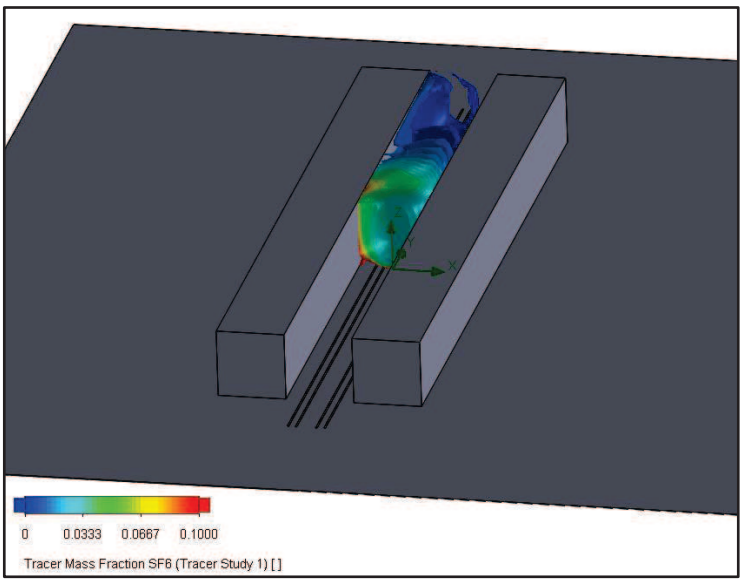
επανακόλλησης (Γ). Η θεώρηση αυτή γίνεται εμφανής στην Εικόνα 28. Στην Εικόνα 29, φαίνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι ανακυκλοφορίες και ο εγκλωβισμός του αέρα εντός του δρόμου, καθώς η ταχύτητα είναι αρκετά μειωμένη σε αυτήν την περιοχή, κάτι που αναμένεται να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διασποράς του ρύπου.

Από την ίδια εικόνα μπορεί ακόμα να παρατηρηθεί ότι με το συγκεκριμένο πλέγμα, έχουν προσομοιωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό οι δίνες της ροής στις γωνίες των κτηρίων. Από την Εικόνα 30, καθώς και από τις ροϊκές γραμμές της Εικόνας 31 παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας του ανέμου πλευρικά της ροής, αλλά και μείωση αυτής κατάντη των κτηρίων και σχηματισμών δινών και ανακυκλοφοριών. Ακόμα, ίχνη πεταλοειδούς δίνης (horseshoe-vortex traces) [58] κατά μήκος του επιπέδου κοντά στο έδαφος (για πλήρως ανεπτυγμένη τύρβη), απεικονίζονται στην Εικόνα 32.

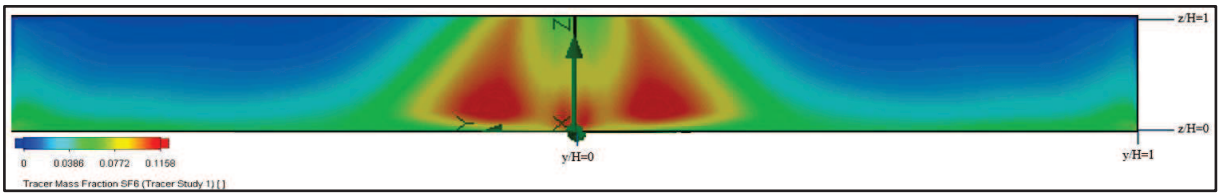
Φαινόμενα στροβιλισμού και υψηλής τύρβης εμφανίζονται επίσης κατάντη των κτηρίων (Εικ.33-35). Τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί ότι διασφαλίζεται η επανακόλληση του οριακού στρώματος, στην έξοδο της ροής, δηλαδή το προφίλ της ταχύτητας επανέρχεται όπως στη συνθήκη εισόδου.



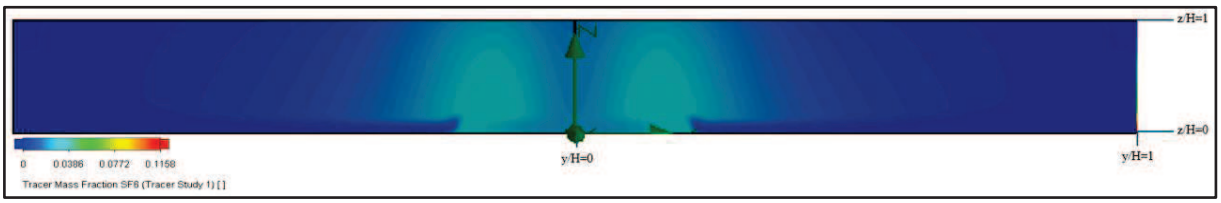
Εικόνα 36 Συγκέντρωση ρύπου SF_6, στο κεντρικό κατακόρυφο επίπεδο x-z.



Εικόνα 37 Κατανομή συγκέντρωσης ρύπου SF_6 εντός του δρόμου.



Εικόνα 38 Συγκέντρωση ρύπου SF_6 στο εσωτερικό τοίχωμα του ανάντη κτηρίου.



Εικόνα 39 Συγκέντρωση ρύπου SF_6 στο εσωτερικό τοίχωμα του κατάντη κτηρίου.

Από τις Εικόνες 36-39,συμπεραίνεται ότι στην περίπτωση της κάθετης ροής, η έκλυση του ρύπου από τις πηγές εντός των δύο κτηρίων οδηγεί στις υψηλές συγκεντρώσεις του στην περιοχή αυτή, λόγω των ανακυκλοφοριών, και της μη ανανέωσης του αέρα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι ροϊκές γραμμές που εξελίσσονται σε δίνες εντός της κοιλότητας, των οποίων η κατεύθυνση είναι σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού (Εικ.29) ωθούν τον ρύπο στο τοίχωμα του ανάντη κτηρίου, και μειώνουν αντίστοιχα τη συγκέντρωσή του στο τοίχωμα του κατάντη κτηρίου. Ιδιαίτερα στις Εικόνες 38,39 παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις του εκλυόμενου ρύπου κοντά στο τοίχωμα του ανάντη κτηρίου είναι περίπου δύο φορές υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις στο τοίχωμα του κατάντη κτηρίου. Το αποτέλεσμα αυτό, επαληθεύει πλήρως τα πορίσματα προηγούμενων ερευνών [11],[15],[19],[27]. Παράλληλα, οι πλευρικές δίνες στα άκρα των κτηρίων σε συνδυασμό με τις εσωτερικές δίνες του ανέμου ενισχύουν τον αερισμό στα άκρα του δρόμου, κάτι που οδηγεί σε σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου από το κέντρο προς τα άκρα του δρόμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Παραμετρική ανάλυση

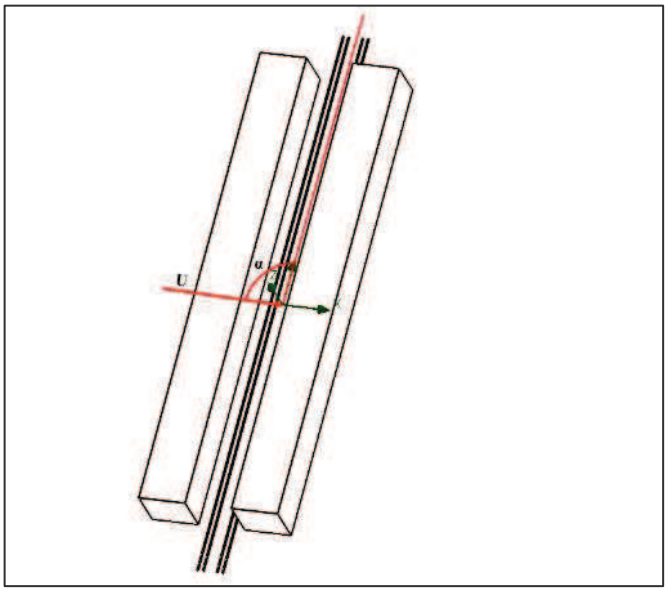
6.1 Εξέταση μεταβολής διεύθυνσης ανέμου σε συνδυασμό με λόγο αναλογίας AR

Κατόπιν της ικανοποιητικής σύγκρισης του μοντέλου σε σχέση με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση με στόχο την μελέτη της συμπεριφοράς του ρύπου για διαφορετικές διαμορφώσεις εντός του αστικού φαραγγιού. Όπως αναφέρεται παραπάνω, σημαντική παράμετρος για την ανανέωση του αέρα εντός του δρόμου ανάμεσα στα κτήρια λαμβάνει η κατεύθυνση του ανέμου. Για αυτό το λόγο μία παράμετρος που εξετάζεται είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του εισερχόμενου ανέμου σε σχέση με τον οδικό άξονα. Οι περιπτώσεις που επιλύονται είναι για γωνία α=90°, 45° και 0°, που αφορούν κάθετη, στρεβλή και παράλληλη ροή αντίστοιχα (Εικ. 40).

Επιπλέον, εξετάζεται η αναλογία ύψους προς το πλάτος του δρόμου (H/W), ως προς τις εξής περιπτώσεις: H/W=0.5, 1, 2. Δηλαδή αρχικά με ύψος μισό, ίσο και διπλάσιο του πλάτους του δρόμου αντίστοιχα. Η αναλογία μήκους προς ύψους των κτηρίων παραμένει σταθερή L/W=10, καθώς και η συνεχής έκλυση του χημικού είδους SF_6 από τις τέσσερις επιφανειακές πηγές γραμμών εντός του δρόμου, σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις. Συνοψίζοντας, το μοντέλο επιλύεται στις παραπάνω 9 διαφορετικές περιπτώσεις, και συγκρίνεται η μέση συγκέντρωση του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού, σε ένα τυπικό ύψος ενός ατόμου. Το ύψος αυτό ορίζεται στα 1.8 μέτρα.

Πίνακας 12 Σύνοψη περιπτώσεων παραμετρικής ανάλυσης.

	Λόγος H/W	Γωνία ανέμου α°
Περίπτωση **1**	0,5	90°
Περίπτωση **2**	0,5	45°
Περίπτωση **3**	0,5	0°
Περίπτωση **4**	1	90°
Περίπτωση **5**	1	45°
Περίπτωση **6**	1	0°
Περίπτωση **7**	2	90°
Περίπτωση **8**	2	45°
Περίπτωση **9**	2	0°



Εικόνα 40 Σχέση κατεύθυνσης ανέμου με τη γεωμετρία των κτηρίων.

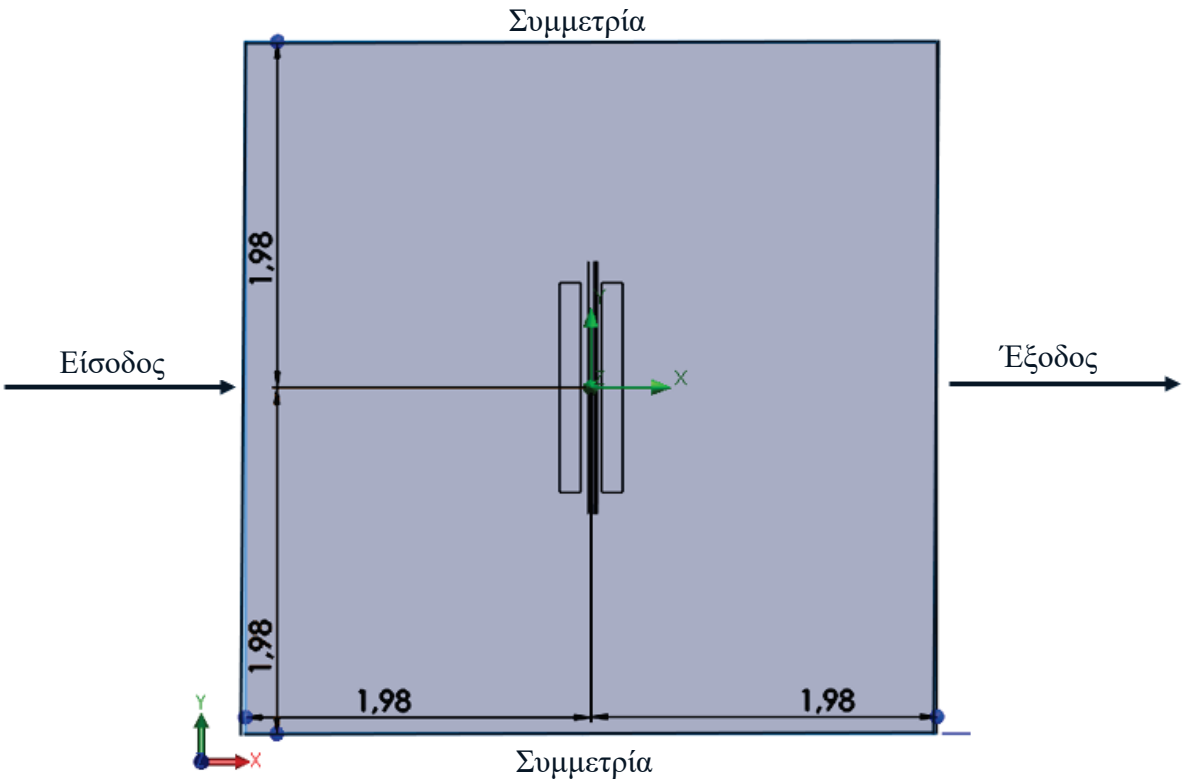
6.1.1 Ανάπτυξη μοντέλων

Προκειμένου να επιτυγχάνεται η επανακόλληση του οριακού στρώματος σε όλες τις περιπτώσεις ροής, το υπολογιστικό πεδίο επεκτείνεται στα 1.98m (16.5H) από το κέντρο, αριστερά και πλευρικά των κτηρίων. Οι άλλες διαστάσεις μένουν σταθερές σύμφωνα με την Ενότητα 4.5. Για την χωρική διακριτοποίηση, χρησιμοποιούνται οι ρυθμίσεις του ανεξάρτητου πλέγματος της Ενότητας 4.5.2. Επίσης, τα κριτήρια σύγκλισης και οι ρυθμίσεις επίλυσης ορίζονται σύμφωνα με την Ενότητα 4.4.2.1. Οι οριακές συνθήκες, ορίζονται ως εξής σε όλες τις περιπτώσεις:

- Συναρτήσεις τοίχου στο κάτω όριο του υπολογιστικού πεδίου (§4.6.3)
- Συναρτήσεις συμμετρίας στο άνω όριο του υπολογιστικού πεδίου (§4.6.4)
- Συναρτήσεις τοίχου στα τοιχώματα των κτηρίων (§4.6.3)
- Σταθερή παροχή ρύπου SF_6 μέσω των 4 γραμμών εντός του αστικού φαραγγιού ίση με 10 g/s. (§4.6.5)

Ανάλογα την διεύθυνση του ανέμου, τα οριακά επίπεδα α) y-z (x=-1.98), β) y-z (x=1.98), γ) x-z (y=1.98) και δ) x-z (y=1.98) του υπολογιστικού πεδίου διαφέρουν, και ορίζονται ως εξής:

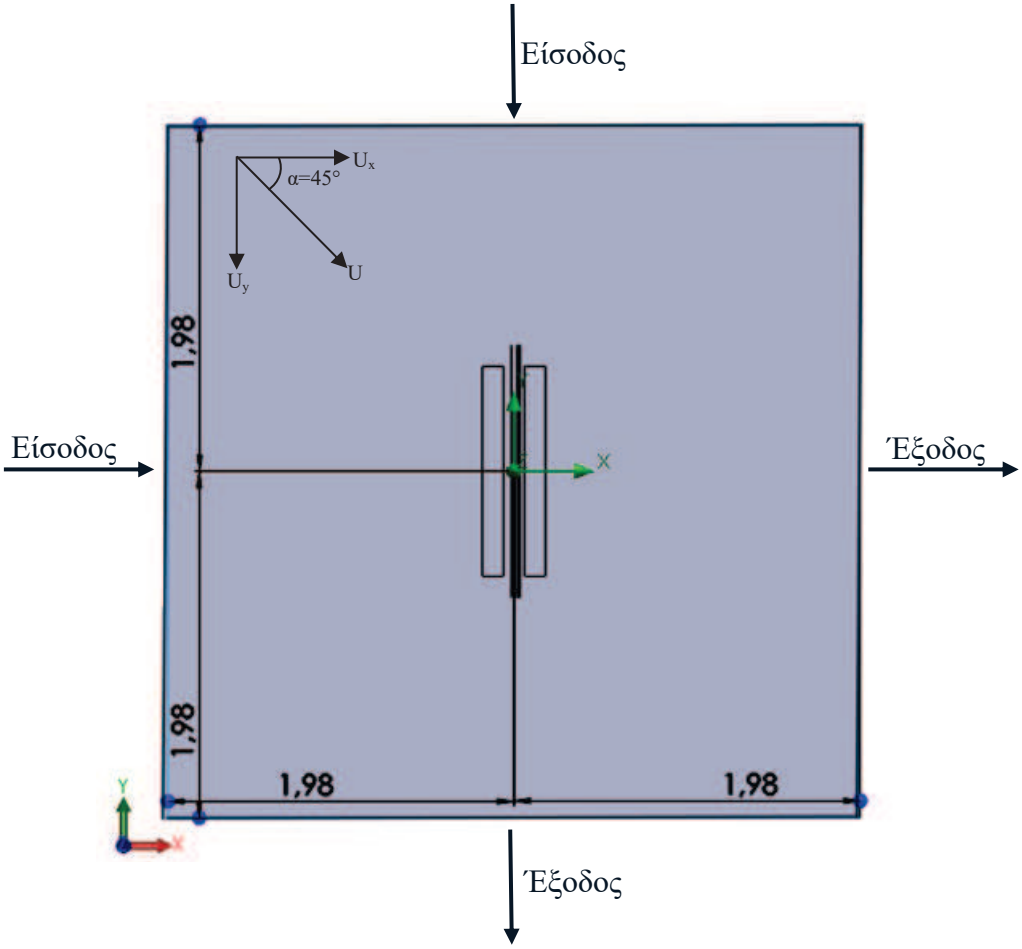
- Κάθετη ροή (α=90°)



Εικόνα 41 Οριακές συνθήκες για α=90°.

Το προφίλ της ταχύτητας εισόδου δίνεται στον άξονα x, σύμφωνα με το λογαριθμικό νόμο (Εξ. 4.24) όπου u_* και z_0 είναι η ταχύτητα τριβής και η αεροδυναμική τραχύτητα, και ισούται με 0.59 m/s και 0.004 m αντίστοιχα. Η κατανομή της κινητικής ενέργειας της τύρβης (k) και η απορρόφηση αυτής (ε) στην είσοδο, δίνονται με βάση τις Εξισώσεις 4.25 και 4.26 αντίστοιχα.

- Στρεβλή ροή (α=45°)



Εικόνα 42 Οριακές συνθήκες για α=45°.

Με σκοπό το μέτρο της συνισταμένης ταχύτητας εισόδου να είναι ίδια στις τρεις περιπτώσεις ώστε αυτές να έιναι συγκρίσιμες, πρέπει το μέτρο της συνισταμένης ταχύτητας στην είσοδο της ροής να είναι ίσο με (4.24):

$$U(z) = \frac{0,59}{0,42} \ln\left(\frac{z+0,004}{0,004}\right)$$

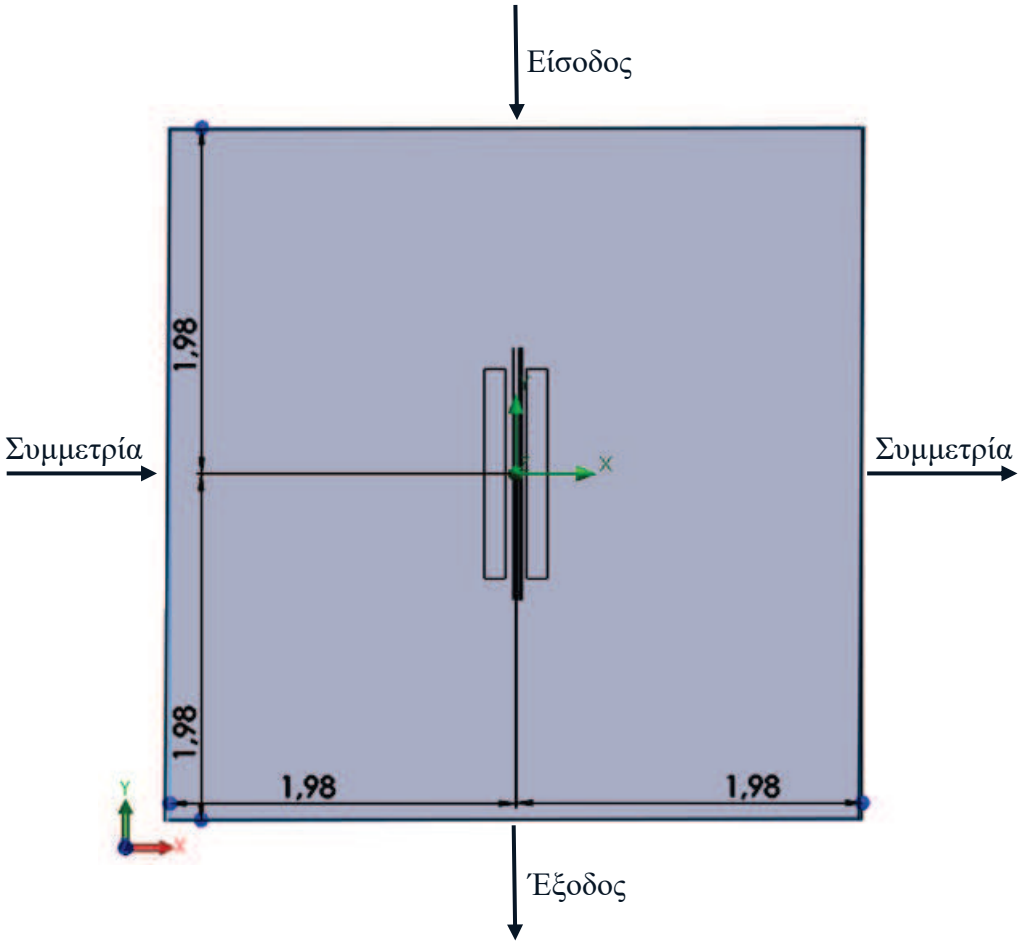
Αυτό σύμφωνα με την Εικόνα 41, επιτυγχάνεται όταν:

$$U_x = U_y = U \cdot \cos(\alpha) = U \cdot \sin(\alpha) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{0,59}{0,42} \cdot \ln\left(\frac{z+0,004}{0,004}\right) \quad (6.1)$$

Παρατηρείται ότι η κατεύθυνση της συνιστώσας της ταχύτητας στον y άξονα είναι αντίθετη από τη θετική φορά, και γι' αυτό το λόγο στην συγκεκριμένη διεύθυνση η παραπάνω εξίσωση δίνεται με αρνητικό πρόσημο. Οι εξισώσεις για την κατανομή της κινητικής ενέργειας της τύρβης και την απορρόφησή της μένουν σταθερές σύμφωνα με τις Εξισώσεις 4.25 και 4.26. Ο περιγραφόμενος χειρισμός της ροής υπό κλίση αποτελεί μία πρακτική προσέγγιση για σκοπούς μηχανικού. Αναγνωρίζεται ότι η διατήρηση αραιού πλέγματος ανάντη και κατάντη του πεδίου κτηριοσειρών και μάλιστα κατά τρόπο που οι πλεγματικές γραμμές δεν είναι παράλληλες με την κύρια διεύθυνση της ροής αυξάνει την αριθμητική διάχυση και συνεπώς οδηγεί σε αύξηση των

σφαλμάτων. Ωστόσο, ποιοτικά τουλάχιστον, ο παρόν χειρισμός δεν εμποδίζει τη συγκριτική ανάλυση των εξεταζόμενων σχεδιαστικών περιπτώσεων και την εξαγωγή σχετικά ασφαλών συμπερασμάτων. Η τεχνική βρίσκεται και σε άλλες συναφείς μελέτες που βρίσκονται στη βιβλιογραφία [66].

- Παράλληλη ροή (α=0°)

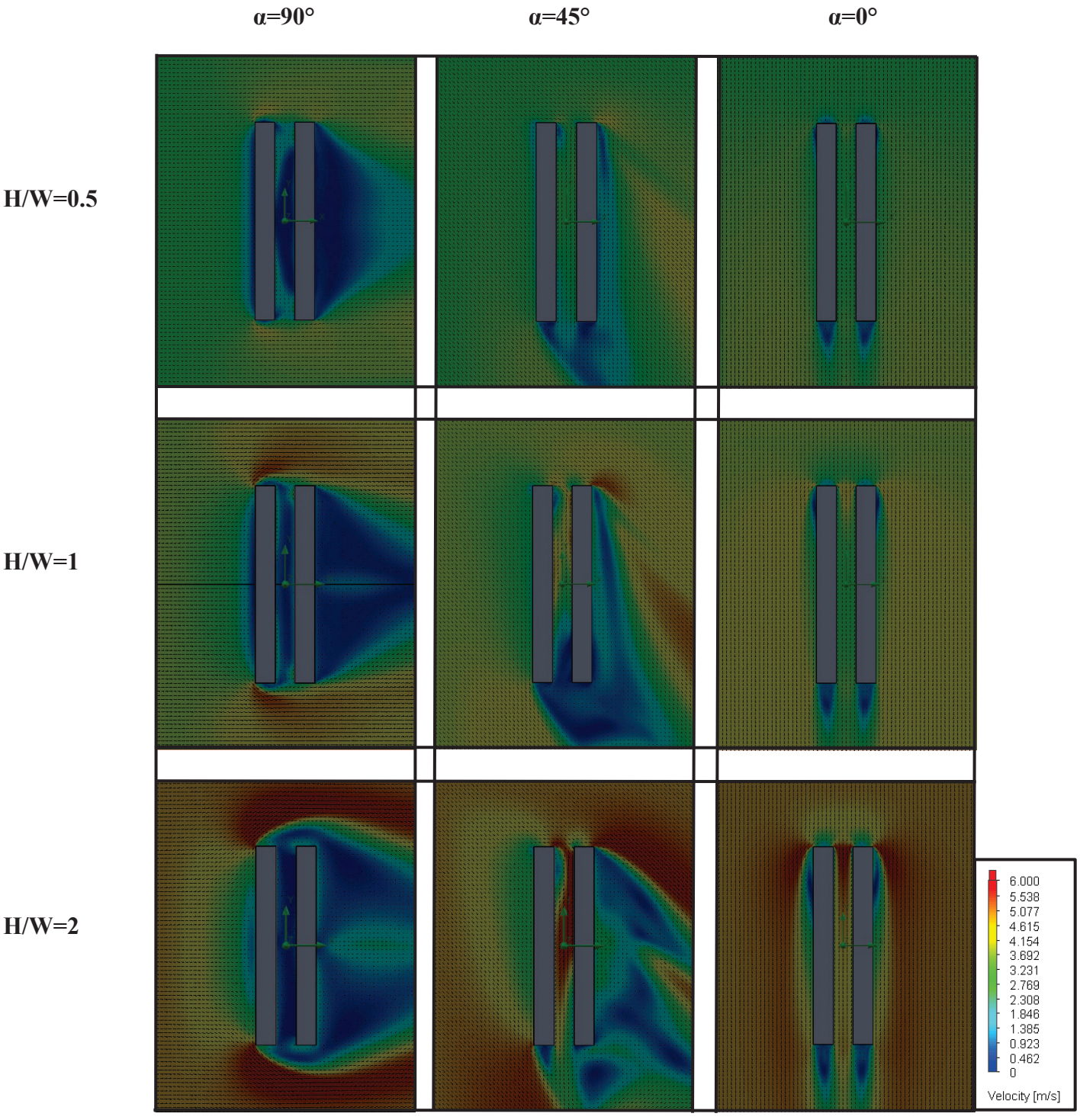


Εικόνα 43 Οριακές συνθήκες για α=0°.

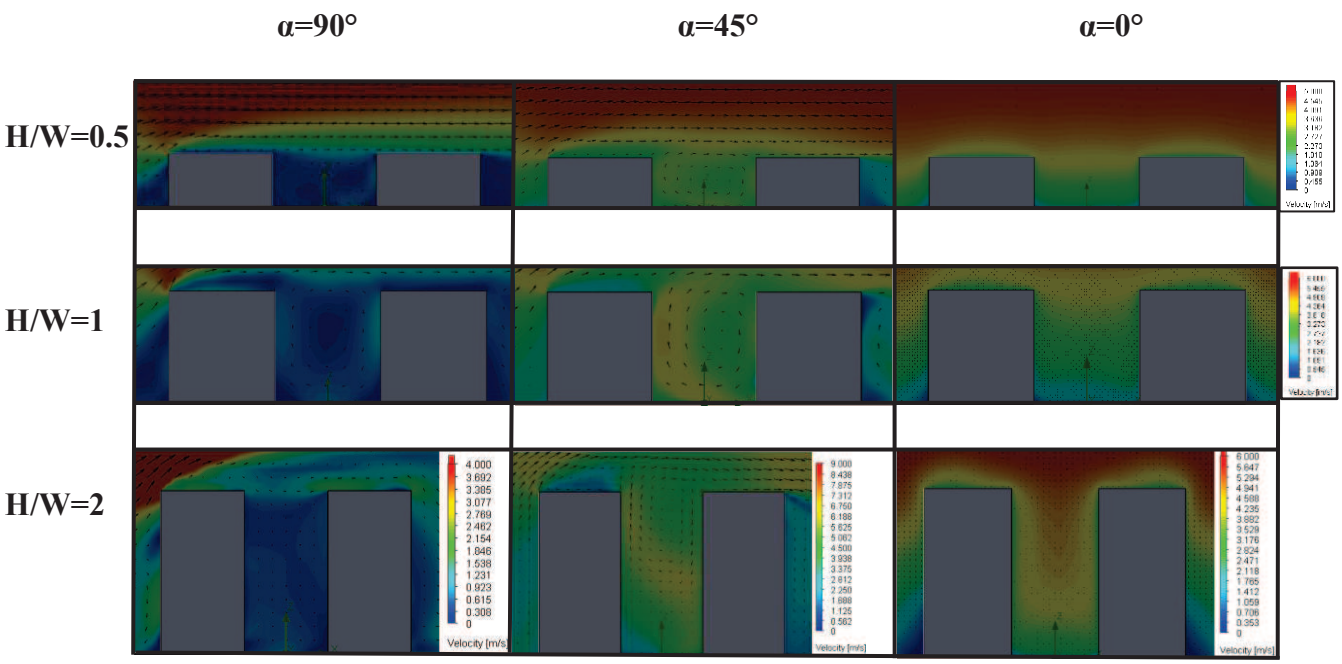
Σε αυτήν την περίπτωση, η ταχύτητα εισόδου αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονα y, με αρνητική φορά. Έτσι, στις οριακές συνθήκες δίνεται $U_y(z)=-U(z)$. Και πάλι οι εξισώσεις k και ε μένουν σταθερές.

6.1.2 Απεικόνιση αποτελεσμάτων

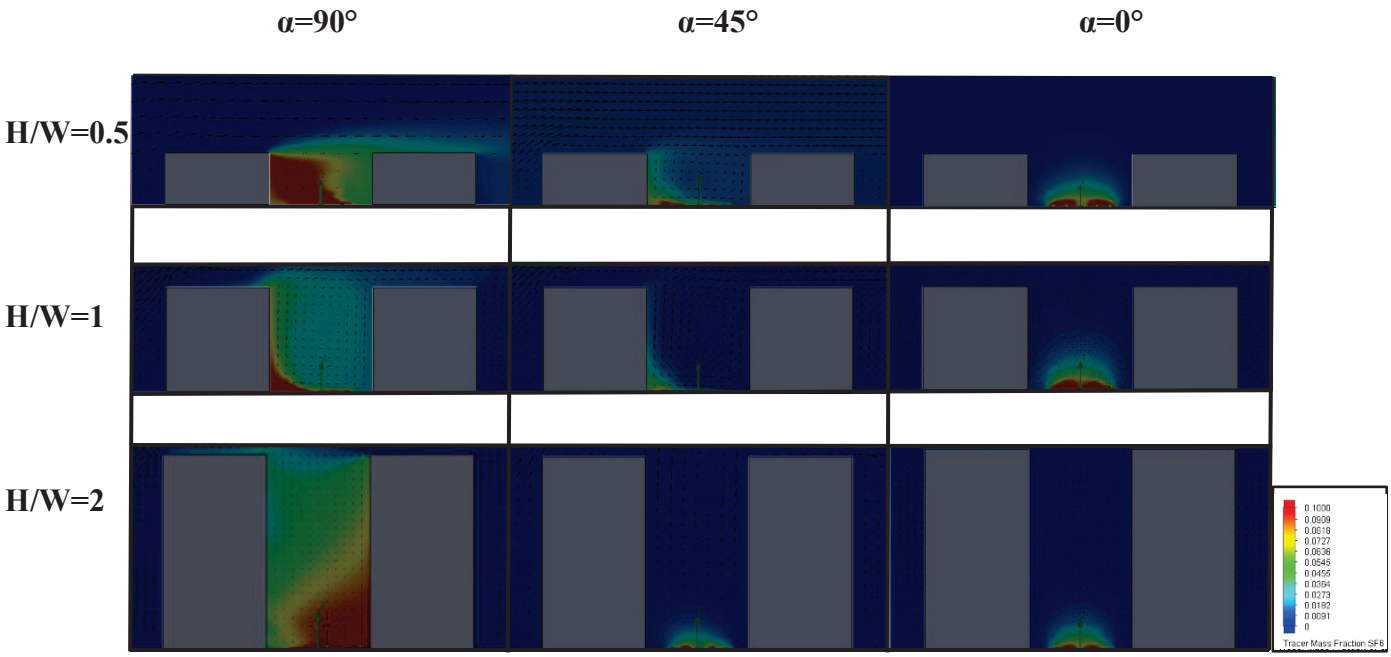
Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται αρχικά η συνισταμένη ταχύτητα του ανέμου στο οριζόντιο επίπεδο για το οποίο ισχύει z/H=0.5. Αυτό σημαίνει ότι το επίπεδο αυτό διαφέρει ανάλογα με τον λόγο H/W. Η περιοχή που εξετάζεται είναι κοντά στα κτήρια, και συγκεκριμένα 1μ. πλευρικά των κτηρίων, και 0,78μ. (6,5H) ανάντη και κατάντη των κτηρίων Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του κάθετου ανέμου (α=90°) η ροή είναι συμμετρική ως προς το κεντρικό κάθετο επίπεδο. Ακόμα, φαίνεται ότι με την αύξηση του ύψους του επιπέδου αναφοράς η τιμές της ταχύτητας αυξάνονται.



Εικόνα 44 Απεικόνιση συνισταμένης ταχύτητας στο οριζόντιο επίπεδο z/H=0.5.



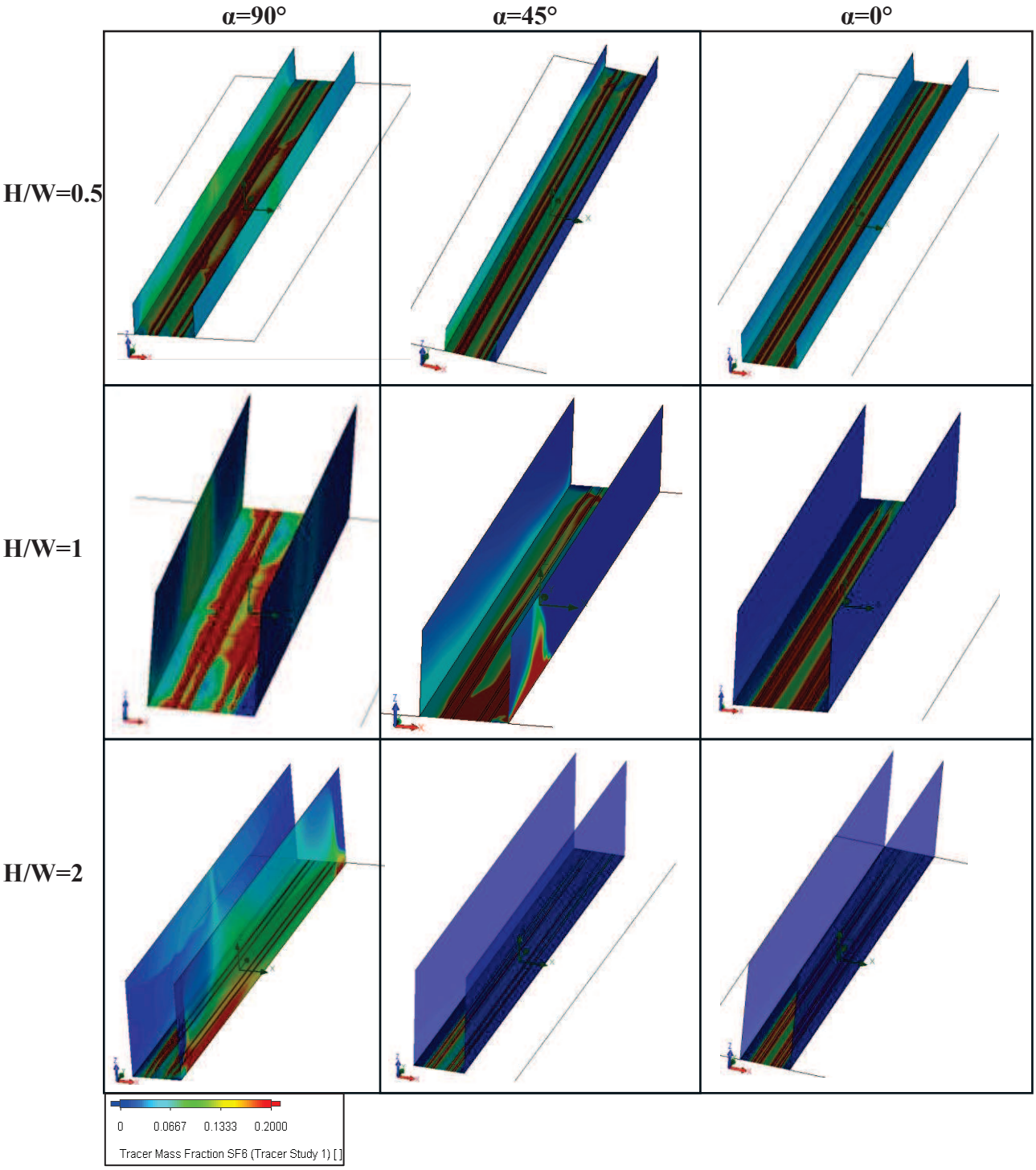
Εικόνα 45 Απεικόνιση συνισταμένης ταχύτητας του ανέμου ανάμεσα στα δύο κτήρια κάτω από διαφορετικές συνθήκες, στο κεντρικό επίπεδο x-z.



Εικόνα 46 Κατανομή της συγκέντρωσης ρύπου SF_6 ανάμεσα στα δύο κτήρια κάτω από διαφορετικές συνθήκες, στο κεντρικό επίπεδο x-z.

Παρατηρείται ότι η στην περίπτωση της κάθετης ροής (α=90°), η συνισταμένη ταχύτητα του αέρα μειώνεται σημαντικά εντός των δύο κτηρίων συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις. Αυτό οδηγεί σε δυσμενέστερες συνθήκες ως προς την ικανότητα εκτοπισμού του ρύπου. Αντίθετα στην παράλληλη ροή (θ=0°), οι

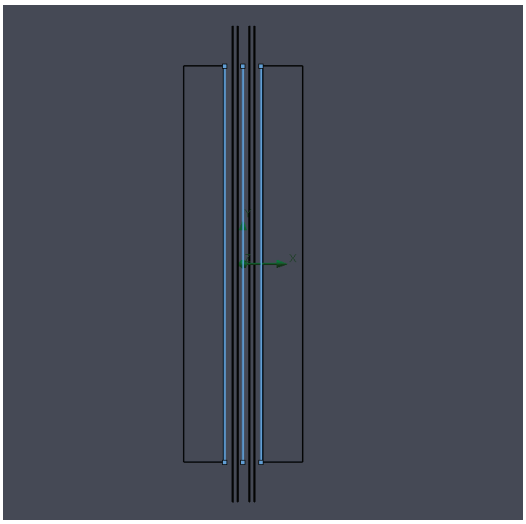
επιφάνειες των κτηρίων εμποδίζουν λιγότερο τον εισερχόμενο αέρα, με αποτέλεσμα τη μείωση των ανακυκλοφοριών εντός του δρόμου, άρα και την καλύτερη εκτόπιση του ρύπου. Στο επίπεδο του εδάφους, όταν η γωνία α είναι ίση με 45°, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ρύπου σημειώνονται στην κάτω πλευρά του δρόμου, λόγω της ώθησης του ανέμου. Επίσης, φαίνεται ότι για H/W=2 και κάθετη ροή (Περίπτωση 7), οι ανακυκλοφορίες οδηγούν σε υψηλότερες συγκεντρώσεις του ρύπου στην προσήνεμη πλευρά του δρόμου. Ακόμα, με την αύξηση του λόγου H/W, προκύπτει ότι η συγκέντρωση του ρύπου στα τοιχώματα των κτηρίων μειώνεται.



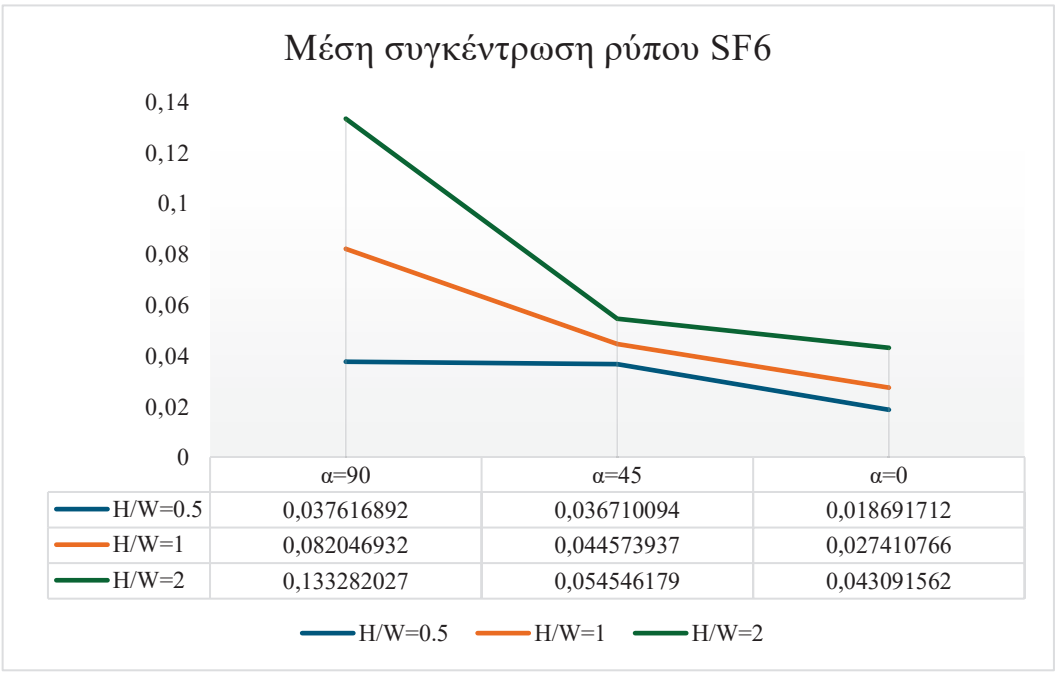
Εικόνα 47 Κατανομή συγκέντρωσης ρύπου SF_6 στις επιφάνειες εντός του αστικού φαραγγιού, για κάθε περίπτωση.

6.1.3 Σύγκριση παραμέτρων

Για την αξιολόγηση της επίδρασης των παραπάνω μεταβολών, υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού, σε τρεις γραμμές κατά μήκος του δρόμου: κοντά στο υπήνεμο τοίχωμα, στο κέντρο, και κοντά στο προσήνεμο τοίχωμα του δρόμου. Με σκοπό την εξέταση του αέρα στο ύψος της εισπνοής, το ύψος των γραμμών λαμβάνεται ίσο με το τυπικό ύψος ενός ατόμου δηλαδή τα 1,80 μέτρα. Έτσι, καθώς το μοντέλο έχει σχεδιαστεί σε κλίμακα 1:150, το ύψος αυτό ορίζεται ως 0,012 μέτρα.



Εικόνα 48 Σχεδιασμός τριών γραμμών για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ρύπου.



	α=90	α=45	α=0
H/W=0.5	0,037616892	0,036710094	0,018691712
H/W=1	0,082046932	0,044573937	0,027410766
H/W=2	0,133282027	0,054546179	0,043091562

Εικόνα 49 Κατανομή συγκέντρωσης ρύπου κάτω από διαφορετικές συνθήκες, στο ύψος του επιπέδου αναπνοής.

Μέσω της Εικόνας 49 συμπεραίνεται ότι οι δυσμενέστερες συνθήκες εντός του αστικού φαραγγιού, σημειώνονται με άνεμο κάθετο ως προς το μήκος του δρόμου, καθώς και με αύξηση του λόγου H/W. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι όταν το ύψος των κτηρίων είναι διπλάσιο από το μήκος του δρόμου (H/W=2),

οι συγκεντρώσεις του ρύπου στο ύψος αναφοράς είναι οι υψηλότερες, λόγω την δυσκολίας της ανακύκλωσης του ανέμου, ενώ παράλληλα η αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου (γωνία α), οδηγεί σε σημαντική μεταβολή της μέσης τιμής της συγκέντρωσης του ρύπου. Από την άλλη πλευρά, όταν ο λόγος H/W είναι ίσος με 1, η μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου σε σχέση με την γωνία α είναι σχεδόν γραμμική, και επίσης μειώνεται όσο η γωνία μειώνεται από τις 90° στις 0°. Μικρότερες συγκεντρώσεις οι οποίες δεν μεταβάλλονται σημαντικά με την αλλαγή της γωνίας α, παρατηρούνται στην περίπτωση όπου H/W=0,5.

Παράλληλα, όταν η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του δρόμου είναι ίση με α=90°, η σταδιακή μεταβολή του λόγου H/W από 0,5 σε 1 και στη συνέχεια σε 2, οδηγεί σε διπλασιασμό κάθε φορά, της μέσης συγκέντρωσης του ρύπου. Για γωνία α=45° και α=0°, οι διαφορές αυτές είναι μικρότερες. Σε κάθε περίπτωση, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται όπως ειπώθηκε στην κάθετη ροή, ενώ αποτελεσματικότερος αερισμός σημειώνεται στην περίπτωση της παράλληλης ροής. Τα παραπάνω αποτελέσματα, επιβεβαιώνουν τις ποιοτικές απεικονίσεις των Εικόνων 44, 45, 46 και 47.

6.2 Εξέταση μεταβολής ταχύτητας οχημάτων

Σε αυτή την ενότητα, μελετάται η συμπεριφορά του ρύπου των οχημάτων εντός του αστικού φαραγγιού, με την αλλαγή της παροχής του από τις τέσσερις ιδανικές πηγές. Ως αέριο ιχνηθέτη, επιλέγεται το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), λόγω της χημικής του σταθερότητας [67]. Η μαζική παροχή του ρύπου εξαρτάται από την ταχύτητα των οχημάτων, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [55]:

$$Q = f \cdot V_{car} \tag{6.2}$$

Όπου:

- Q (g/h) η παροχή μάζας του ρύπου από την πηγή.
- f ο συντελεστής εκπομπής, που ισούται με 0,68 g/km για μικρό επιβατικό αυτοκίνητο το οποίο κυκλοφορεί σε τυπικούς αστικούς δρόμους [68].
- V_{car} (km/h) η ταχύτητα των οχημάτων στο δρόμο.

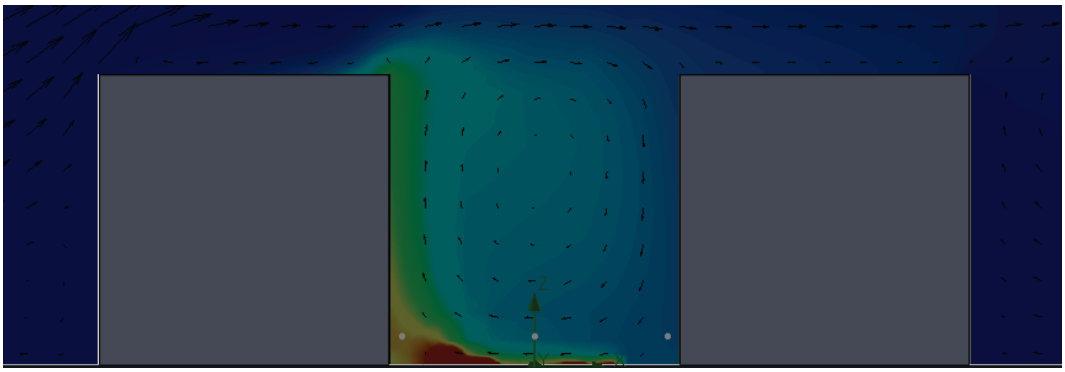
Ο σχεδιασμός των γεωμετριών, καθώς και το υπολογιστικό μοντέλο αναπτύσσονται σύμφωνα με τις οδηγίες, τις ρυθμίσεις και τις παραδοχές του Κεφαλαίου 4. Μοναδική διαφορά, καθίσταται στην οριακή συνθήκη της πηγής ρύπου, και στο αέριο ιχνηθέτη. Οι ταχύτητες των αυτοκινήτων που εξετάζονται, αντιστοιχούν στις εξής τιμές: V_{car1}=20 km/h, V_{car2}=30 km/h και V_{car3}=40 km/h, οι οποίες αποτελούν τυπικές ταχύτητες για μικρά οχήματα σε δρόμους εντός του αστικού ιστού. Αυτές οι τιμές ταχύτητας, οδηγούν στις ακόλουθες τιμές παροχής ρύπου αντίστοιχα, σύμφωνα με την Εξ. (6.2):

1. $Q_1 = 13{,}6 \frac{g}{h} = 3{,}78 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s}$
2. $Q_2 = 20{,}4 \frac{g}{h} = 5{,}67 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s}$
3. $Q_3 = 27{,}2 \frac{g}{h} = 7{,}56 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s}$

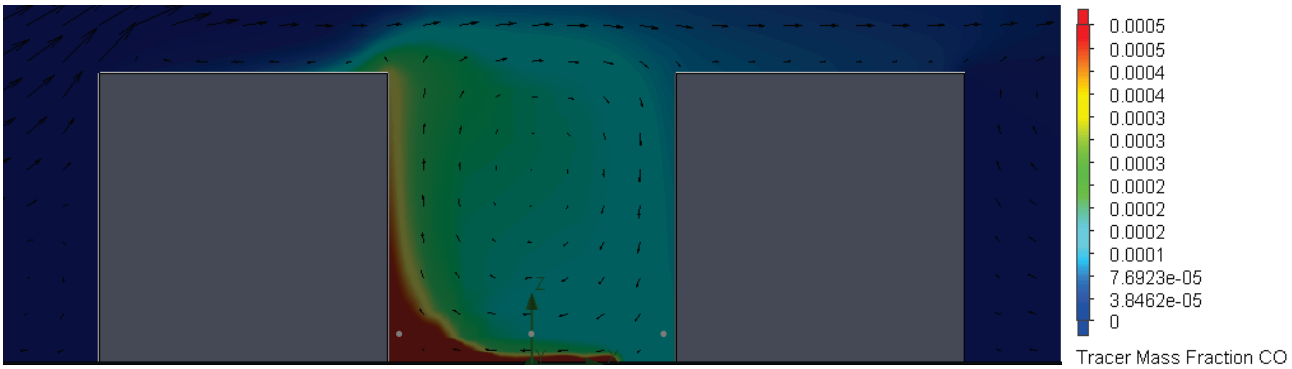
Στην μελέτη ιχνηθέτη, δίνεται η ειδική παροχή μάζας, ως ο λόγος Q_i/A, όπου A είναι το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας των 4 πηγών, δηλαδή A = 1,44m x 0,003m x 4 = 0,01728m^2. Έτσι, η τιμή της οριακής συνθήκης δεν επηρεάζεται από την επιφάνεια της πηγής που συμπεριλαμβάνεται στο υπολογιστικό πεδίο.

6.2.1 Κατανομή ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού

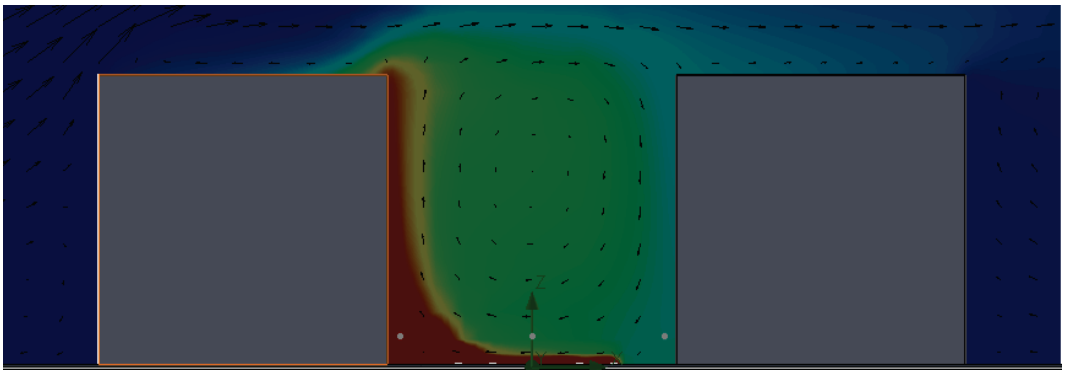
Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν την συγκέντρωση του ρύπου CO ανάμεσα στα δύο κτήρια, ανάλογα την ταχύτητα των οχημάτων, στο κεντρικό κατακόρυφο επίπεδο x-z, δηλαδή στη μέση του δρόμου. Τα διανυσματικά βέλη, δηλώνουν τις σχηματιζόμενες δίνες του εισερχόμενου ανέμου.



Εικόνα 50 Κατανομή ρύπου CO για V_{car}=20km/h.



Εικόνα 51 Κατανομή ρύπου CO για V_{car}=30km/h.

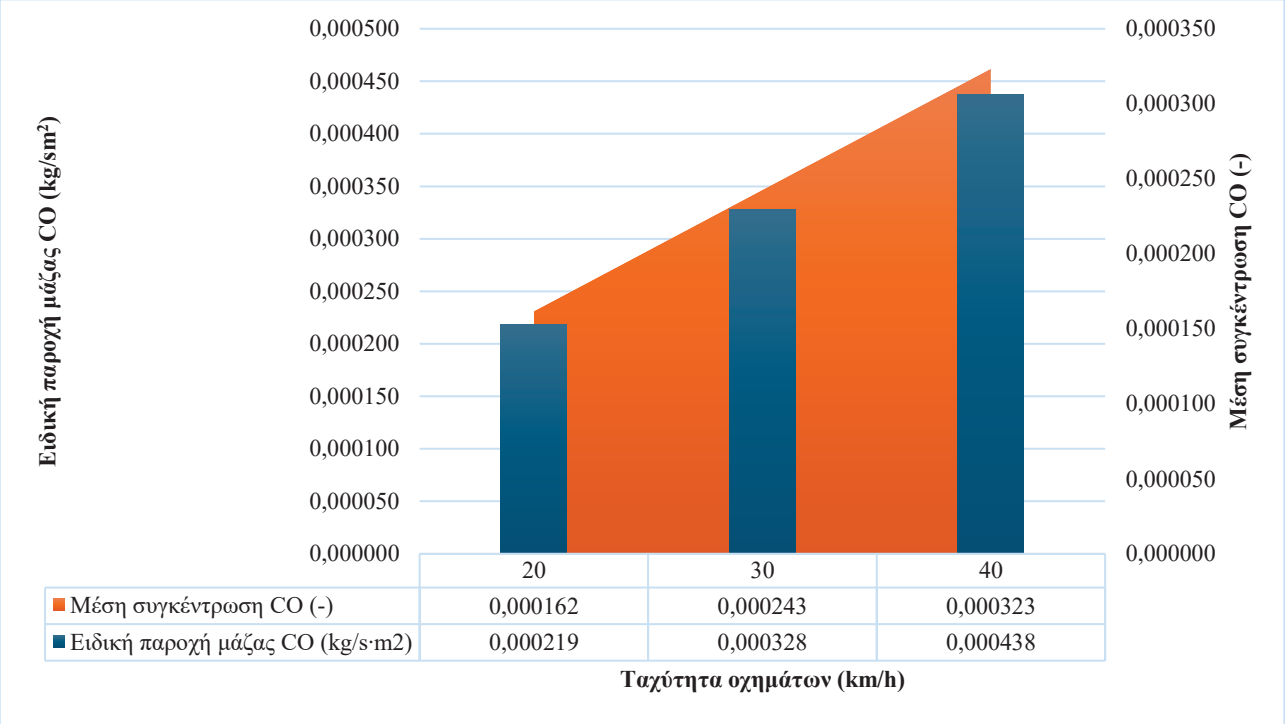


Εικόνα 52 Κατανομή ρύπου CO για V_{car}=40km/h.

Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η συμπεριφορά του ρύπου δεν μεταβάλλεται, και λειτουργεί σύμφωνα με τα συμπεράσματα της Ενότητας 5.3, ενώ στο σύνολο των θέσεων, φαίνεται ότι η τιμή της συγκέντρωσης αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας των οχημάτων.

6.2.2 Ανάλυση σχέσης συγκέντρωσης CO με την ταχύτητα των οχημάτων V_{car}

Για την σύγκριση της συγκέντρωσης του ρύπου και συνεπώς της ποιότητας του αέρα εντός του αστικού φαραγγιού, η συγκέντρωση μετριέται κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών, η θέσεις των οποίων περιγράφονται στο Κεφάλαιο 6.1.3. Σε γενικές γραμμές, υπολογίζεται ο μέσος όρος της συγκέντρωσης του ρύπου CO στο ύψος ενός ατόμου και συγκεκριμένα στα 1,80 μέτρα από το έδαφος.



Εικόνα 53 Σχέση μεταξύ της μέσης συγκέντρωσης CO στο ύψος του ατόμου, με την ταχύτητα των οχημάτων και την ειδική παροχή μάζας.

Από το παραπάνω γράφημα, προκύπτει ότι η εξίσωση που συνδέει τα μεγέθη V_{car} και C_{CO} είναι της μορφής y=αx+β. Διαφορετικά, η συγκέντρωση των ρύπων που οφείλονται στα οχήματα, εντός του αστικού ιστού, είναι ανάλογη, και αυξάνεται γραμμικά, σε σχέση με την μέση ταχύτητα των οχημάτων στην περιοχή αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα - Προτάσεις

7.1 Μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής σε αστικά φαράγγια

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αφορούν την CFD προσομοίωση του πεδίου ροής σε αστικά φαράγγια. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του τροποποιημένου μοντέλου k-ε των Lam & Bremhorst, αλλά και του λογισμικού επίλυσης SolidWorks, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με την πειραματική μελέτη περίπτωσης, αλλά και με δύο επιπλέον μελέτες οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικό λογισμικό επίλυσης και μοντέλο τύρβης. Τα μοντέλα αυτά είναι η προσομοίωση μεγάλων δινών (LES) και το υβριδικό μοντέλο SAS.

Μέσω των Εικόνων 26,27 και των χρησιμοποιούμενων δεικτών (AE, MAE, R^2, RMSE) οι οποίοι απεικονίζονται στους Πίνακες 6-11, προκύπτει η καταλληλότητα του παρόντος μοντέλου τύρβης, για την προσομοίωση ατμοσφαιρικών ροών και της διασποράς των ρύπων, στο αστικό περιβάλλον. Συμπεραίνεται ότι στις περισσότερες θέσεις μετρήσεων, στην περιοχή καίριου ενδιαφέροντος, το παρόν μοντέλο παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα, αναφορικά με την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου. Παράλληλα, όσον αφορά την συγκέντρωση του ρύπου, το μοντέλο LES δείχνει μεγαλύτερη ακρίβεια σε ορισμένες θέσεις, λόγω της αποτελεσματικότητάς του σε φαινόμενα υψηλού στροβιλισμού. Το μοντέλο της παρούσας εργασίας παρουσιάζει επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα στις θέσεις κοντά στο τοίχωμα του προσήνεμου κτηρίου, και στα άκρα του δρόμου.

Ακόμα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι προσομοιώνονται ορθά η αποκόλληση και η επανακόλληση του οριακού στρώματος. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται επίσης ότι στην περίπτωση κάθετης ροής ανέμου, η ταχύτητα της ροής μειώνεται αισθητά εντός του αστικού φαραγγιού, προκαλώντας τον εγκλωβισμό των ρύπων και ελαττώνοντας την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Τέλος, καθώς το λογισμικό επίλυσης της συγκεκριμένης μελέτης δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες έρευνες μοντελοποίησης αστικής ρύπανσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί η ευελιξία του SolidWorks για CFD προσομοιώσεις, καθώς παρέχει αρκετές δυνατότητες για τη μοντελοποίηση της ροής. Επιπροσθέτως, κύριο πλεονέκτημά του είναι η ενσωμάτωση λογισμικού CAD με μεγάλο εύρος δυνατοτήτων και λειτουργιών, για τον σχεδιασμό της κατάλληλης γεωμετρίας, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος της επίλυσης.

7.2 Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων

Με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 4, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικοί υπολογισμοί, για διάφορους συνδυασμούς λόγου διαστάσεων H/W, όπου H το ύψος των κτηρίων και W το πλάτος του δρόμου, και γωνίας μεταξύ κατεύθυνσης του ανέμου και οδικού άξονα. Εξετάστηκε επίσης η επίδραση της ταχύτητας των οχημάτων στο δρόμο εντός των δύο κτηρίων. Σκοπός των παραπάνω υπολογισμών είναι η εξέταση της συμπεριφοράς και διασποράς του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού, και κατ' επέκταση η εξέταση της ποιότητας του αέρα, κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Για κάθε συνδυασμό, υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού, στο ύψος της αναπνοής. Το ύψος αυτό ορίζεται στα 1,80 μέτρα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Δυσμενέστερες συνθήκες ως προς την ποιότητα του αέρα εντός του αστικού φαραγγιού σημειώνονται στην περίπτωση της κάθετης ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις αυξημένες τιμές στην συγκέντρωση του ρύπου.
- Όταν η ροή του ανέμου είναι κάθετη ως προς τον δρόμο, οι ανακυκλοφορίες εντός του αστικού φαραγγιού ωθούν το ρύπο στο τοίχωμα του ανάντη κτηρίου. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις του ρύπου στο σε αυτήν την πλευρά είναι διπλάσιες από τις συγκεντρώσεις στο τοίχωμα του προσήνεμου κτηρίου.
- Βέλτιστες συνθήκες αερισμού και ανακύκλωσης του αέρα προκύπτουν στην περίπτωση της παράλληλης ροής.
- Η αύξηση του λόγου H/W οδηγεί στον εγκλωβισμό του αέρα και κατ' επέκταση του ρύπου εντός του φαραγγιού, με αποτέλεσμα τις αυξημένες συγκεντρώσεις του χημικού είδους.
- Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας μικρού επιβατικού οχήματος και της μέσης συγκέντρωσης του ρύπου εντός του αστικού φαραγγιού, είναι ανάλογη, και γραμμική.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό, απορρέουν κυρίως από τις παραδοχές και τους περιορισμούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και στοχεύουν στην βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης της ροής. Έτσι, προκύπτουν οι παρακάτω πιθανές τροποποιήσεις:

- Επίλυση του μοντέλου σε μη μόνιμη κατάσταση: Η ροή του ανέμου καθώς και η ρύπανση στον αστικό ιστό είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, έτσι η επίλυση του προβλήματος σε μη μόνιμη κατάσταση θα οδηγήσει σε πιο λεπτομερή ανάλυση του πεδίου ροής.
- Χρήση διαφορετικών μοντέλων τύρβης: Η δοκιμή εναλλακτικών μοντέλων τύρβης, μπορεί να οδηγήσει στον εντοπισμό του καλύτερου μοντέλου προσομοίωσης του φυσικού φαινομένου.
- Επίλυση χρησιμοποιώντας διαφορετικό σχήμα διακριτοποίησης: Εξέταση του χρόνου και του κόστους της επίλυσης χρησιμοποιώντας διαφορετικό σχήμα για την διακριτοποίηση των εξισώσεων.
- Εξέταση του φαινομένου χωρίς την παραδοχή ισοθερμοκρασιακής ροής: Λαμβάνοντας υπ' όψη τη συναγωγή της θερμότητας στα τοιχώματα των κτηριοσειρών, και το φαινόμενο της θερμικής νησίδας, θα προκύψουν πιο ρεαλιστικά και ακριβή αποτελέσματα.
- Χρήση ρεαλιστικών γεωμετριών για την προσομοίωση των πηγών ρύπου: Σχεδιασμός οχημάτων και επιβολή οριακών συνθηκών, ώστε η επιφανειακή παροχή του ρύπου να ορίζεται στις εξατμίσεις. Επίσης, μπορεί να δοθεί σχετική κίνηση μεταξύ των οχημάτων και των κτηριοσειρών, για την ακριβέστερη αναπαράσταση της οδικής κυκλοφορίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης της ροής συνοδεύεται από σημαντική αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Ένα παράδειγμα είναι το μοντέλο

μεγάλων δινών (LES), όπου απαιτείται πολύ πυκνό πλέγμα, και η εφαρμογή του δυσχεραίνει, από άποψη υπολογιστικού φόρτου, την αξιοποίησή του σε ρεαλιστικά προβλήματα προσομοίωσης κτηρίων. Προκύπτει λοιπόν ότι η σχέση ακρίβειας των αποτελεσμάτων και του κόστους επίλυσης, είναι μία σημαντική παράμετρος για την υιοθέτηση των παραδοχών, στη μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής και στα προβλήματα σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] "Περιφέρεια Κρήτης," www.airquality.crete.gov.gr/.

[2] "World Health Organization," www.who.int/.

[3] M. Pantusheva, R. Mitkov, P. O. Hristov, and D. Petrova-Antonova, "Air Pollution Dispersion Modelling in Urban Environment Using CFD: A Systematic Review," Atmosphere (Basel), vol. 13, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/atmos13101640.

[4] G. Ioannidis, C. Li, P. Tremper, T. Riedel, and L. Ntziachristos, "Application of CFD Modelling for Pollutant Dispersion at an Urban Traffic Hotspot," Atmosphere (Basel), vol. 15, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/atmos15010113.

[5] K.-H. Kwak, J.-J. Baik, Y.-H. Ryu, and S.-H. Lee, "Urban air quality simulation in a high-rise building area using a CFD model coupled with mesoscale meteorological and chemistry-transport models," Atmos Environ, vol. 100, pp. 167–177, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.059.

[6] J. Zhong, "Modelling Air Pollution Within A Street Canyon," University of Birmingham, 2015.

[7] G. M. Stavrakakis, D. A. Katsaprakakis, and K. Braimakis, "A Computational Fluid Dynamics Modelling Approach for the Numerical Verification of the Bioclimatic Design of a Public Urban Area in Greece," Sustainability, vol. 15, no. 15, p. 11642, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151511642.

[8] G. M. Stavrakakis, D. Al. Katsaprakakis, and M. Damasiotis, "Basic Principles, Most Common Computational Tools, and Capabilities for Building Energy and Urban Microclimate Simulations," Energies (Basel), vol. 14, no. 20, p. 6707, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206707.

[9] A. Akhatova, A. Kassymov, M. Kazmaganbetova, and L. Rojas-Solórzano, "CFD simulation of the dispersion of exhaust gases in a traffic-loaded street of Astana, Kazakhstan," Journal of Urban and Environmental Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 158–166, 2015, doi: 10.4090/juee.2015.v9n2.158166.

[10] X. X. Li, C. H. Liu, D. Y. C. Leung, and K. M. Lam, "Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons," Atmos Environ, vol. 40, no. 29, pp. 5640–5658, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.055.

[11] S. Vardoulakis, B. E. A. Fisher, K. Pericleous, and N. Gonzalez-Flesca, "Modelling air quality in street canyons: a review," Atmos Environ, vol. 37, no. 2, pp. 155–182, Jan. 2003, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00857-9.

[12] W. B. Johnson, F. L. Ludwig, W. F. Dabberdt, and R. J. Allen, "An Urban Diffusion Simulation Model For Carbon Monoxide," J Air Pollut Control Assoc, vol. 23, no. 6, pp. 490–498, Jun. 1973, doi: 10.1080/00022470.1973.10469794.

[13] W. F. Dabberdt, F. L. Ludwig, and W. B. Johnson, "Validation and applications of an urban diffusion model for vehicular pollutants," Atmospheric Environment (1967), vol. 7, no. 6, pp. 603–618, Jun. 1973, doi: 10.1016/0004-6981(73)90019-X.

[14] K. Ahmad, M. Khare, and K. K. Chaudhry, "Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 93, no. 9, pp. 697–717, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.jweia.2005.04.002.

[15] K. Nazridoust and G. Ahmadi, "Airflow and pollutant transport in street canyons," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 94, no. 6, pp. 491–522, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.jweia.2006.01.012.

[16] J.-J. Kim and J.-J. Baik, “Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 91, no. 3, pp. 309–329, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0167-6105(02)00395-1.

[17] J.-J. Baik and J.-J. Kim, “On the escape of pollutants from urban street canyons,” Atmos Environ, vol. 36, no. 3, pp. 527–536, Jan. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00438-1.

[18] C.-H. Liu, M. C. Barth, and D. Y. C. Leung, “Large-Eddy Simulation of Flow and Pollutant Transport in Street Canyons of Different Building-Height-to-Street-Width Ratios,” Journal of Applied Meteorology, vol. 43, no. 10, pp. 1410–1424, Oct. 2004, doi: 10.1175/JAM2143.1.

[19] T. L. Chan, G. Dong, C. W. Leung, C. S. Cheung, and W. T. Hung, “Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon,” Atmos Environ, vol. 36, no. 5, pp. 861–872, Feb. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00490-3.

[20] R. N. Meroney, M. Pavageau, S. Rafailidis, and M. Schatzmann, “Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 62, no. 1, pp. 37–56, Aug. 1996, doi: 10.1016/S0167-6105(96)00057-8.

[21] J.-J. Baik and J.-J. Kim, “A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyons,” Journal of Applied Meteorology, vol. 38, no. 11, pp. 1576–1589, Nov. 1999, doi: 10.1175/1520-0450(1999)038<1576:ANSOFA>2.0.CO;2.

[22] C. LIU, D. LEUNG, and M. BARTH, “On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation,” Atmos Environ, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.08.036.

[23] X.-X. Li, C.-H. Liu, and D. Y. C. Leung, “Large-Eddy Simulation of Flow and Pollutant Dispersion in High-Aspect-Ratio Urban Street Canyons with Wall Model,” Boundary Layer Meteorol, vol. 129, no. 2, pp. 249–268, Nov. 2008, doi: 10.1007/s10546-008-9313-y.

[24] X.-X. Li, C.-H. Liu, and D. Y. C. Leung, “Numerical investigation of pollutant transport characteristics inside deep urban street canyons,” Atmos Environ, vol. 43, no. 15, pp. 2410–2418, May 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.02.022.

[25] X.-M. Cai, J. F. Barlow, and S. E. Belcher, “Dispersion and transfer of passive scalars in and above street canyons—Large-eddy simulations,” Atmos Environ, vol. 42, no. 23, pp. 5885–5895, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.03.040.

[26] Y.-W. Zhang, Z.-L. Gu, Y. Cheng, and S.-C. Lee, “Effect of real-time boundary wind conditions on the air flow and pollutant dispersion in an urban street canyon—Large eddy simulations,” Atmos Environ, vol. 45, no. 20, pp. 3352–3359, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.03.055.

[27] W. C. Cheng and C.-H. Liu, “Large-Eddy Simulation of Flow and Pollutant Transports in and Above Two-Dimensional Idealized Street Canyons,” Boundary Layer Meteorol, vol. 139, no. 3, pp. 411–437, Jun. 2011, doi: 10.1007/s10546-010-9584-y.

[28] W. C. Cheng and C.-H. Liu, “Large-eddy simulation of turbulent transports in urban street canyons in different thermal stabilities,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 99, no. 4, pp. 434–442, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.jweia.2010.12.009.

[29] L. J. Hunter, G. T. Johnson, and I. D. Watson, “An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon,” Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere, vol. 26, no. 4, pp. 425–432, Dec. 1992, doi: 10.1016/0957-1272(92)90049-X.

[30] B. M. Leitl and R. N. Meroney, "Car exhaust dispersion in a street canyon. Numerical critique of a wind tunnel experiment," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 67–68, pp. 293–304, Apr. 1997, doi: 10.1016/S0167-6105(97)00080-9.

[31] C.-H. Chang and R. N. Meroney, "Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 89, no. 14–15, pp. 1325–1334, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0167-6105(01)00129-5.

[32] A. Walton, A. Y. S. Cheng, and W. C. Yeung, "Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon—Part I: comparison with field data," Atmos Environ, vol. 36, no. 22, pp. 3601–3613, Aug. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00259-5.

[33] A. Walton and A. Y. S. Cheng, "Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon—Part II: idealised canyon simulation," Atmos Environ, vol. 36, no. 22, pp. 3615–3627, Aug. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00260-1.

[34] C.-H. Chang and R. N. Meroney, "Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 91, no. 9, pp. 1141–1154, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0167-6105(03)00056-4.

[35] J.-J. Baik, J.-J. Kim, and H. J. S. Fernando, "A CFD Model for Simulating Urban Flow and Dispersion," Journal of Applied Meteorology, vol. 42, no. 11, pp. 1636–1648, Nov. 2003, doi: 10.1175/1520-0450(2003)042<1636:ACMFSU>2.0.CO;2.

[36] Y. Yang and Y. Shao, "Numerical simulations of flow and pollution dispersion in urban atmospheric boundary layers," Environmental Modelling & Software, vol. 23, no. 7, pp. 906–921, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.envsoft.2007.10.005.

[37] F. Murena, G. Favale, S. Vardoulakis, and E. Solazzo, "Modelling dispersion of traffic pollution in a deep street canyon: Application of CFD and operational models," Atmos Environ, vol. 43, no. 14, pp. 2303–2311, May 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.01.038.

[38] E. Solazzo, X. Cai, and S. Vardoulakis, "Improved parameterisation for the numerical modelling of air pollution within an urban street canyon," Environmental Modelling & Software, vol. 24, no. 3, pp. 381–388, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.envsoft.2008.08.001.

[39] Y. Tominaga and T. Stathopoulos, "CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 99, no. 4, pp. 340–348, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.jweia.2010.12.005.

[40] S. M. Salim, R. Buccolieri, A. Chan, and S. Di Sabatino, "Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: Comparison between RANS and LES," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 99, no. 2–3, pp. 103–113, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.jweia.2010.12.002.

[41] N. Koutsourakis, J. G. Bartzis, and N. C. Markatos, "Evaluation of Reynolds stress, k-ε and RNG k-ε turbulence models in street canyon flows using various experimental datasets," Environmental Fluid Mechanics, vol. 12, no. 4, pp. 379–403, Aug. 2012, doi: 10.1007/s10652-012-9240-9.

[42] R. Berkowicz, "The European Research Network TRAPOS - Results and Achievements," 2001.

[43] Y. Tominaga and T. Stathopoulos, "CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques," Nov. 2013. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.028.

[44] J. Pan and J. Ji, "Influence of Building Height Variation on Air Pollution Dispersion in Different Wind Directions: A Numerical Simulation Study," Applied Sciences (Switzerland), vol. 14, no. 3, Feb. 2024, doi: 10.3390/app14030979.

[45] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική - Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων, 2η Έκδοση. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021, ISBN: 978-960-418-343-2.

[46] Γεώργιος Μ. Σταυρακάκης, "Μαθηματική μοντελοποίηση της θερμικής άνεσης και της ποιότητας εσωτερικού αέρα και προχωρημένες τεχνικές βελτιστοποίησης του κτιριακού σχεδιασμού: Εφαρμογές σε φυσικά αεριζόμενα κτίρια" Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012.

[47] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow. Washington: Hemisphere, 1980.

[48] P. J. Jones and G. E. Whittle, "Computational fluid dynamics for building air flow prediction—current status and capabilities," Build Environ, vol. 27, no. 3, pp. 321–338, Jul. 1992, doi: 10.1016/0360-1323(92)90033-L.

[49] S. V. Patankar and D. B. Spalding, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows," Int J Heat Mass Transf, vol. 15, no. 10, pp. 1787–1806, Oct. 1972, doi: 10.1016/0017-9310(72)90054-3.

[50] www.solidworks.com/sw/docs/FlowSimProductEngineers.pdf.

[51] C. K. G. Lam and K. Bremhorst, "A Modified Form of the k-ε Model for Predicting Wall Turbulence," J Fluids Eng, vol. 103, no. 3, pp. 456–460, Sep. 1981, doi: 10.1115/1.3240815.

[52] Βλαχάκης Γεώργιος, "Υπολογιστική Μελέτη Ρευστοδυναμικών μεγεθών πίσω από επίπεδη πλάκα," 2024.

[53] N. C. Markatos, "The mathematical modelling of turbulent flows The mathematical modelling of turbulent fl.ows," 1986. Available: https://www.researchgate.net/publication/275522877

[54] J.H. Ferziger and M. Peric, Computational methods for fluid dynamics, 3rd edition. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002.

[55] A. Ricci, I. Kalkman, B. Blocken, M. Burlando, and M. P. Repetto, "Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment," Build Environ, vol. 171, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106617.

[56] B. Blocken, "LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion?" Oct. 01, 2018, Tsinghua University Press. doi: 10.1007/s12273-018-0459-3.

[57] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," Comput Methods Appl Mech Eng, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, Mar. 1974, doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.

[58] G. Stavrakakis, N. Tomazinakis, and N. Markatos, "Modified 'closure' constants of the Standard k–ε turbulence model for the prediction of wind-induced natural ventilation," Building Services Engineering Research and Technology, vol. 33, no. 3, pp. 241–261, Aug. 2012, doi: 10.1177/0143624411407950.

[59] P. J. Richards and R. P. Hoxey, "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-E turbulence model," 1993.

[60] X. Zheng, H. Montazeri, and B. Blocken, "Large-eddy simulation of pollutant dispersion in generic urban street canyons: Guidelines for domain size," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 211, p. 104527, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jweia.2021.104527.

[61] P. Qin, A. Ricci, and B. Blocken, "On the accuracy of idealized sources in CFD simulations of pollutant dispersion in an urban street canyon," Build Environ, vol. 265, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111950.

[62] C. Gromke and B. Ruck, "On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons," in Boundary-Layer Meteorology, 2009, pp. 19–34. doi: 10.1007/s10546-008-9301-2.

[63] "CODASC," www.umweltaerodynamik.de/bilder-originale/CODA/CODASC.html.

[64] R. Buccolieri, C. Gromke, S. Di Sabatino, and B. Ruck, "Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons," Science of the Total Environment, vol. 407, no. 19, pp. 5247–5256, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.06.016.

[65] S. M. Salim, R. Buccolieri, A. Chan, S. Di Sabatino, and S. C. Cheaha, "Large Eddy Simulation of the aerodynamic effects of trees on pollutant concentrations in street canyons," in Procedia Environmental Sciences, Elsevier B.V., 2011, pp. 17–24. doi: 10.1016/j.proenv.2011.03.003.

[66] F. Baghlad, B. Douaiba, and A. Azzi, "Aerodynamics effects on pollution concentrations of through-passages in building indoors urban street canyon," J. Mater. Environ. Sci, vol. 9, no. 11, pp. 3124–3133, 2018.

[67] www.solidworks.com/sw/docs/flow_basis_of_cad_embedded_cfd_whitepaper.pdf.

[68] E. R. VAN DRIEST, "On Turbulent Flow Near a Wall," Journal of the Aeronautical Sciences, vol. 23, no. 11, pp. 1007–1011, Nov. 1956, doi: 10.2514/8.3713.

[69] www.solidworks.com/sw/docs/flow_sim_studentwb_2011_eng.pdf.

[70] J. M. Pedersen et al., "Fluid Dynamic Modeling to Support the Development of Flow-Based Hepatocyte Culture Systems for Metabolism Studies," Front Bioeng Biotechnol, vol. 4, Sep. 2016, doi: 10.3389/fbioe.2016.00072.

[71] G. M. Stavrakakis, M. K. Koukou, M. Gr. Vrachopoulos, and N. C. Markatos, "Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation," Energy Build, vol. 40, no. 9, pp. 1666–1681, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.02.022.

[72] D. Sun, X. Shi, Y. Zhang, and L. Zhang, "Spatiotemporal distribution of traffic emission based on wind tunnel experiment and computational fluid dynamics (CFD) simulation," J Clean Prod, vol. 282, p. 124495, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124495.

[73] X. Shi, D. (Jian) Sun, Y. Zhang, J. Xiong, and Z. Zhao, "Modeling Emission Flow Pattern of a Single Cruising Vehicle on Urban Streets with CFD Simulation and Wind Tunnel Validation," Int J Environ Res Public Health, vol. 17, no. 12, p. 4557, Jun. 2020, doi: 10.3390/ijerph17124557.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Τοπικό απόλυτο σφάλμα κατακόρυφης συνιστώσας ταχύτητας

x/H=-0,417					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,167866	**55,86445**	66,16288	67,44859	0,101408254	0,044757088
0,335731	25,81376	**23,52287**	27,89336	0,214084197	0,158821021
0,501199	22,63043	38,81829	**20,90941**	0,267605188	0,207044979
0,666667	26,20408	11,94592	**14,86872**	0,281689621	0,207875449
0,832134	38,51791	**10,94272**	14,84846	0,287323348	0,176652403
1,002398	37,12885	41,39117	**27,09376**	0,180281367	0,113344975

x/H=-0,333				
z/H	L-B k-ε	SAS	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,167476	**31,19836**	49,18941	0,066666586	0,087465465
0,334951	**19,2386**	30,73362	0,202898642	0,163863784
0,5	**17,6472**	18,21559	0,240579777	0,198124174
0,665048	26,95382	**22,62799**	0,27246387	0,199024456
0,832524	**125,3337**	170,7506	0,078260912	0,176348184
1	**13,73802**	57,8626	0,124637974	0,107515188

x/H=-0,25					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,166666	69,41244	**61,67418**	130,8673	0,050632984	0,085778573
0,333333	16,53848	12,80119	**11,16348**	0,16962038	0,141567754
0,5	18,7447	**10,69769**	18,26489	0,2	0,162510608
0,668803	17,60913	**12,44919**	18,94714	0,20506366	0,16895374
0,833333	19,62338	**4,955039**	11,50087	0,189873531	0,152613921
1	**9,096046**	57,47505	37,42099	0,106329203	0,096657449

x/H=-0,167				
z/H	L-B k-ε	SAS	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,166667	**123,3083**	178,3292	0,029545403	0,065977331
0,335294	15,40527	**8,020278**	0,125	0,10574341
0,498039	**156,6815**	182,9107	0,047727203	0,12250688
0,664706	17,40537	**1,4631**	0,154545403	0,127646196
0,833333	19,4401	**0,335817**	0,147727203	0,11900889
1,001961	**186,6246**	243,8159	-0,093181801	0,08071835

x/H=-0,083				
z/H	L-B k-ε	SAS	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,166023	**1825,055**	2722,627	-0,002247259	0,038766454
0,333977	**5,632712**	60,83387	0,060674102	0,064091699
0,50193	**180,3992**	301,2872	0,026966351	0,07561343
0,667954	22,53783	**10,29203**	0,1033707	0,080073182
0,833977	23,77108	**9,774684**	0,105618147	0,080511569
1,003861	**164,4009**	201,3457	-0,094382042	0,060782858

x/H=0				
z/H	L-B k-ε	SAS	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,165354	**121,0748**	210,5934	-0,03488341	0,007351614
0,330709	**204,7133**	405,5842	-0,018604628	0,019481521
0,498031	44,42671	**39,69532**	0,046511669	0,025848066
0,663386	-	-	0	0,030669671
0,832677	**273,5239**	427,4123	-0,023255737	0,040354262
0,998032	**235,897**	511,1602	0,011628064	0,03905832

x/H=0,083				
z/H	L-B k-ε	SAS	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,163462	**47,58381**	152,8473	-0,042696826	-0,022380049
0,330769	**42,68787**	129,6669	-0,04494371	-0,025758198
0,5	**11,05059**	160,8552	-0,026966188	-0,023986264
0,667308	**342,2261**	371,6347	0,006741406	-0,016329445
0,830769	-	-	0	-0,003425599
1	**113,0691**	134,7741	-0,094381942	0,012334866

x/H=0,167				
z/H	L-B k-ε	SAS	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,164751	**26,43339**	116,7632	-0,076404348	-0,056208092
0,331418	**24,02477**	68,39249	-0,096628923	-0,073414046
0,501916	**5,302882**	62,2467	-0,080898866	-0,076608894
0,668582	**0,139671**	75,15582	-0,06741569	-0,067509851
0,831418	**48,91932**	92,69279	-0,094381853	-0,048210891
1,001916	**86,37147**	96,15412	-0,128089792	-0,017456754

x/H=0,25					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,167677	**20,28028**	83,13303	70,32194	-0,110588263	-0,088160657
0,335353	**8,768139**	53,68063	24,84539	-0,136470618	-0,124504685
0,49899	**9,743792**	39,62068	17,03902	-0,145882474	-0,131667989
0,668687	**13,02543**	42,74603	14,27345	-0,14117625	-0,122787437
0,834344	28,39491	42,40722	**7,790849**	-0,122352737	-0,08761079
1	55,61053	62,2502	**30,72359**	-0,13176479	-0,05848969

x/H=0,333				
z/H	L-B k-ε	SAS	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,166667	**36,75995**	69,90423	-0,169999927	-0,107508044
0,333333	**18,20372**	29,52121	-0,212499961	-0,173817069
0,49789	**16,25779**	26,39921	-0,227499997	-0,190513537
0,666667	**16,83436**	27,64857	-0,224999921	-0,187122634
0,833333	**15,83163**	19,54744	-0,184999963	-0,155711458
1,00211	39,66271	**22,87529**	-0,137499987	-0,082963768

x/H=0,417					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή Uz/Uref πειράματος	τιμή Uz/Uref μοντέλου k-ε
0,164682	66,60192	**20,82307**	36,46299	-0,193023623	-0,064466176
0,331349	28,29381	**24,61492**	25,62907	-0,279070285	-0,200110655
0,501984	12,17979	8,007873	**2,577777**	-0,295349277	-0,259376357
0,666667	7,807205	7,599704	**0,194805**	-0,293023623	-0,27014667
0,835317	**0,556864**	4,708316	3,177478	-0,246512104	-0,245139368
1,001984	27,33509	31,21432	**9,939614**	-0,160465443	-0,116602069

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.

Τοπικό απόλυτο σφάλμα συγκέντρωσης ρύπου

y/H=0 κοντά στο ανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,084871	**4,152672**	5,308423	5,308423	45,3134349	47,19515341
0,166974	16,33076	15,47191	**8,1493**	39,40298687	45,83779518
0,250922	18,37558	14,79003	**9,13748**	34,02986118	40,28304647
0,332103	17,50167	18,57547	**7,884238**	30,44775985	35,77662762
0,497232	18,52078	15,88148	**7,287421**	26,6865636	31,62912215
0,666052	19,1672	16,01757	**5,579005**	24,80596923	29,5605778
0,833948	22,32141	18,51941	**7,398291**	23,28357973	28,48080333

y/H=1,25 κοντά στο ανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,083951	11,66696	3,650645	**1,842971**	42,39043644	47,33611366
0,164609	33,30236	2,092705	**0,671863**	38,80478345	51,72769107
0,250206	41,34617	3,906294	**3,831439**	34,66135791	48,99250094
0,331687	43,23197	**0,865757**	5,067497	30,99601453	44,39620144
0,497119	52,95843	6,39927	**0,031456**	26,21513942	40,09826464
0,66749	40,86217	3,795749	**1,806049**	23,1075686	32,54982306
0,832922	7,643265	1,694372	**0,98202**	21,51394802	23,15831608

y/H=3,75 κοντά στο ανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,080851	**15,92861**	45,70097	39,32655	16,74418765	19,41130422
0,164255	**13,33316**	51,01201	39,62619	12,72230099	14,41858568
0,251064	**6,275423**	95,05719	47,84103	9,849522349	10,46762152
0,331915	**3,048365**	63,25133	42,61036	8,125855163	8,373560847
0,49617	**4,062297**	58,88116	56,43686	6,238031165	6,491438497
0,66383	**2,786297**	71,25549	66,90147	5,253083408	5,399449897
0,833191	**18,39077**	94,69997	73,26514	4,268125318	5,053066285

y/H=4,92 κοντά στο ανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,080233	42,47979	29,56863	**7,973851**	21,42857374	30,53138605
0,161926	26,16527	32,24333	**9,057828**	18,26697911	23,04658443
0,247994	13,3708	28,56426	**12,16305**	14,82435725	16,80649192
0,331145	**7,198908**	23,0511	16,07397	12,36534247	13,25551216
0,497447	**10,31278**	47,99965	21,78256	9,274004642	10,23041273
0,665937	**28,0863**	48,48403	35,47827	7,236533658	9,269008397
0,83078	46,93368	72,04776	**44,46752**	5,971896393	8,774726917

y/H=0 κοντά στο κανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,079325	14,13763	12,18873	**11,03547**	12,17213089	10,45127988
0,166245	11,25947	4,881226	**2,995989**	11,70082224	10,38337121
0,247257	4,856553	**3,758416**	4,127034	10,88114747	10,35269878
0,330802	7,304301	3,596398	**0,167495**	11,18852529	10,37128174
0,498734	**0,511301**	7,897982	3,07249	10,38934467	10,33622382
0,664979	17,64804	26,35507	**14,91071**	8,58606602	10,1013385
0,832068	13,79197	22,61814	**9,305318**	8,58606602	9,770253416

y/H=1,25 κοντά στο κανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,07867	38,23948	6,630833	**2,494214**	10,03284975	6,196339924
0,163017	16,06705	11,66375	**2,90467**	10,60446684	12,30829216
0,247364	21,07366	6,267054	**3,144685**	10,28909104	12,45737884
0,332522	25,00176	**2,685408**	4,392018	10,05256125	12,5658789
0,49635	29,20461	**0,263544**	5,347868	9,717475604	12,55542632
0,666667	34,54791	4,632313	**3,10323**	9,047304302	12,17295905
0,833739	40,90383	9,556261	**7,844414**	8,081470359	11,38710156

y/H=3,75 κοντά στο κανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,080232	**6,983302**	67,78131	123,1135	1,098535214	1,02182118
0,16129	**5,051818**	46,47577	93,22348	1,258322002	1,321890143
0,248139	**16,63699**	64,6235	87,27809	1,298269118	1,51426204
0,33416	**26,5016**	85,76767	84,25738	1,298269118	1,642331258
0,497932	**26,22443**	102,2896	75,51595	1,318242256	1,663943712
0,66584	**20,85142**	92,00879	70,35367	1,358189373	1,641391117
0,833747	**21,67412**	120,5047	79,72645	1,298269118	1,57965754

y/H=4,92 κοντά στο κανάντη τοίχωμα					
z/H	L-B k-ε	SAS	LES	τιμή C* πειράματος	τιμή C* k-ε μοντέλου
0,079114	**3,757654**	134,1764	141,6342	1,304347931	1,353360811
0,165348	**20,86009**	86,5525	151,7554	1,074169973	1,298242769
0,246835	**32,28916**	137,4308	167,3978	0,843989601	1,116506754
0,330696	**47,79298**	134,7303	178,1989	0,67135573	0,992216644
0,499209	**87,78624**	130,1607	212,0823	0,498721055	0,936529539
0,666139	**75,33052**	126,2597	173,072	0,498721055	0,874410209
0,833861	**70,6907**	111,6725	173,4104	0,441177773	0,753049448