

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΤΖΕΚΟΣ Κ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ
ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2020 - 2021

Επιβλέπων: Δρ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021

ΤΖΕΚΟΣ Κ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ
ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Επιβλέπων: Δρ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA
2021. All rights reserved. No part of this publication may be
reproduced without the written permission of the copyright owner.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ
ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/a	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Δρ. Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Δρ. Κωνσταντίνος Ιωάννης Βασιλόπουλος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	
3	Δρ. Απόστολος Γκούντας	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	

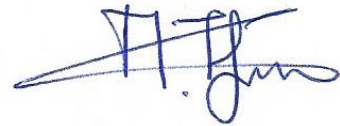
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τζέκος Παναγιώτης του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 46145121 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



ABSTRACT

An accident which includes a fire and a hazardous release of pollutants due to combustion inside a complex urban setting could put human health and safety in grave danger, while also becoming a threat to the environment. This accident could have an unpredictable development due to unstable parameters; the distribution of the flow and the turbulent diffusion around urban blocks of buildings. The main goal of this thesis is to study the characteristics of the air flow and the pollutant dispersion due to a methane fire accident in the field with numerical and experimental methods. The simulation was conducted with OpenFoam and the solver FireFoam which is a LES, fire dynamics, transient solver. The results of the simulations were compared with experimental data and other simulations. The results indicated that urban geometry and the buoyant forces induced from changes in temperature had an impact on the dispersion of pollutants around the buildings.

Keywords: CH₄ large pool fire; OpenFoam; FireFoam; LES method; urban array; urban accident

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Λεκάκη για τη συμβολή του, ώστε να ξεκινήσω την ενασχόλησή μου με τη ρευστομηχανική, καθώς αποτέλεσε έμπνευση για εμβάθυνση στο πεδίο αυτό, καθώς και για την επίβλεψη της διπλωματικής μου έως την αφυπηρέτησή του. Τον Δρ. Ιωάννη Σαρρή για την εξασφάλιση υπολογιστικών πόρων για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις καθώς και την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο για την ανάθεση του θέματος το οποίο αποτέλεσε αφορμή για ένα πολύ όμορφο ταξίδι. Για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να συνεχίσω ένα κομμάτι της δουλειάς του, καθώς και για την ένταξή μου στην ομάδα του εργαστηρίου αεροδυναμικής. Για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ανάργυρο Παλάμπιγκ και Χαρίτων Λ. Παυλίδη για όλη την πολύτιμη βοήθεια, την οποία μου χάρισαν απλόχερα όποτε τη χρειάστηκα, σε θέματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, κώδικα και post-processing, καθώς και σε φιλικό και ανθρώπινο επίπεδο. Αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και ήταν παρόντες σε όλες τις όμορφες και δύσκολες στιγμές.

Τους φίλους και συμφοιτητές μου Μάριο Γκιόγκεζα, Νικόλαο Χάϊκο και Φρανς Τσούλη για την βοήθεια τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Το φίλο μου Σταμάτη Τσαχσιρίη που αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για να αποκτήσω παραπάνω ενδιαφέρον για τον κόσμο του μηχανικού καθώς και για τη διεύρυνση των γνώσεων μου πέραν του πεδίου του μηχανολόγου. Ευχαριστώ την κοπέλα μου Ευσεβεία Καζαντζίδη για την υποστήριξή και την υπομονή της τα τελευταία έτη των σπουδών μου και ιδιαίτερα τους τελευταίους μήνες.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαίτερα τον πατέρα μου Κωνσταντίνο Τζέκο και τη μητέρα μου Αφροδίτη Μπενδέλα για την πίστη τους σε εμένα και την υποστήριξή τους σε όλα τα έτη των σπουδών μου. Τους ευχαριστώ για όλες τις θυσίες που έχουν κάνει και ελπίζω να τους κάνω περήφανους.

Σας ευχαριστώ όλους.

Στη μνήμη του ξαδέρφου μου, Σάββα Τζέκου.

“Nobody ever figures out what life is all about, and it doesn't matter. Explore the world. Nearly everything is really interesting if you go into it deeply enough.”

Richard P. Feynman

Περιεχόμενα

ABSTRACT	i
Ευχαριστίες	ii
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εξισώσεων	xi
Λίστα Συντομογραφιών	xii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	3
2.1 Αστικές Περιοχές.....	3
2.1.1 Ροή γύρω από Αστική Χαράδρα.....	4
2.1.2 Απλοποίηση των Αστικών Περιοχών.....	5
2.1.3 Απλοποίηση Αστικών Συστοιχιών	7
2.2 Καύσιμη Ύλη	13
2.2.1 Εισαγωγή	13
2.2.2 Ιδιότητες του Φυσικού Αερίου.....	14
2.2.3 Μηχανισμός Έκλυσης του Φυσικού Αερίου	15
2.3 Ατμοσφαιρικά Οριακά Στρώματα	16
2.3.1 Δομή του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος.....	16
2.3.2 Αστικό Επιφανειακό Οριακό Στρώμα.....	18
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	21
3.1 Αριθμητική Προσέγγιση.....	21
3.1.1 Μαθηματική Μοντελοποίηση	21
3.1.2 Αριθμητικά Χαρακτηριστικά των Προσομοιώσεων	24
3.1.3 Υπολογιστικό Χωρίο	26
3.2 Πειραματική Προσέγγιση.....	29
3.2.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	29
4 ΡΟΗ ΑΝΕΜΟΥ ΑΝΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ.....	32
4.1 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες	32
4.1.1 Προφίλ Ταχύτητας και Τύρβης στην Είσοδο.....	32
4.2 Συνθήκες Ροϊκής Επαναληψιμότητας.....	34
4.3 Κατανομή της Ταχύτητας σε επιλεγμένες Θέσεις ανάμεσα στα Κτίρια	36
4.4 Ισοϋψή Γραφήματα Κατακόρυφων και Οριζόντιων Επιπέδων	38
4.5 Κατανομή του Συντελεστή Πίεσης σε Κτίριο της Συστοιχίας.....	44
5 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΤΥΧΜΑΤΟΣ ΜΕ ΦΩΤΙΑ ΛΙΜΝΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ.....	46
5.1 Αξονικές Ταχύτητες στην περιοχή του Πλουμίου	49
5.2 Ισοϋψή Γραφήματα Οριζοντίων Επιπέδων	52
6 ΡΟΗ ΑΝΕΜΟΥ ΑΝΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΙΑΣ ΛΙΜΝΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ.....	54
6.1 Κατανομή της Ταχύτητας σε επιλεγμένες Θέσεις ανάμεσα στα Κτίρια	54
6.2 Ισοϋψή Γραφήματα Κατακόρυφων και Οριζοντίων Επιπέδων	56

6.3 Συγκέντρωση Ρύπου	63
6.4 Τρισδιάστατα Ισοϋψή Γραφήματα Διασποράς του Ρύπου	65
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Απεικόνιση των διαφορετικών οριζόντιων κλιμάκων εντός μιας πόλης, και το εύρος κλίμακας κάποιων πεδίων έρευνας αστικής μετεωρολογίας (Gough 2017).....	3
Σχήμα 2-2 Περιπτώσεις ροής που σχετίζονται με διαφορετικές αστικές γεωμετρίες. (a) Ροή απομονωμένων στοιχείων τραχύτητας, (b) Ροή διαταραχής ομόρρου, (c) Ροή απόξεσης (Oke 1988).	5
Σχήμα 2-3 Σχηματική παράσταση των μορφολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και το χαρακτηρισμό μιας αστικής περιοχής (Gough 2017).....	5
Σχήμα 2-4 α. Ευθυγραμμισμένη συστοιχία, β. Κατανεμημένη συστοιχία (Gough 2017).	8
Σχήμα 2-5 Φωτογραφία του COSMO από την βόρειο-δυτική πλευρά. Οι κύβοι έχουν 1.5m ύψος (Inagaki and Kanda 2008).....	11
Σχήμα 2-6 Διάταξη κτιρίων μη ομοιόμορφης αστικής συστοιχίας με μεταβαλλόμενα ύψη κτιρίων.	12
Σχήμα 2-7 Ημερήσια διακύμανση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από το έδαφος (Barbas 2013).	17
Σχήμα 2-8 Διαχωρισμός του επιφανειακού στρώματος σε επιμέρους υποστρώματα (Barbas 2013).	20
Σχήμα 3-1 Υπολογιστικό πεδίο με διαστάσεις X:26H, Y:6H, Z:15H.....	26
Σχήμα 3-2 Κεντρικό κατακόρυφο επίπεδο του χωρίου για Z/H=0.....	27
Σχήμα 3-3 Κατακόρυφο επίπεδο του χωρίου για Z/H=6.....	28
Σχήμα 3-4 Κατακόρυφο επίπεδο του χωρίου για Z/H=-6.....	28
Σχήμα 3-5 Οριζόντιο επίπεδο του χωρίου σε ύψος Y/H=0.5.	29
Σχήμα 3-6 Μικρομανόμετρο FCO 560.....	30
Σχήμα 3-7 Spires για τη δημιουργία οριακού στρώματος.	30
Σχήμα 3-8 Υπό κλίμακα γεωμετρία αστικής συστοιχίας.....	31
Σχήμα 4-1 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα	33
Σχήμα 4-2 Αδιάστατο προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης.....	34
Σχήμα 4-3 Αδιάστατο προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης.....	34

Σχήμα 4-4 Στιγμαϊκές μεταβολές της ταχύτητας για κάθε συνιστώσα ($UxU_{\infty}, UyU_{\infty}, UzU_{\infty}$) στο σημείο $X:-44m, Y:3m, Z:0$ για τη χρονική περίοδο από 50 έως 100 sec.....	35
Σχήμα 4-5 Θέσεις των αδιάστατων προφίλ μέσης ταχύτητας στο υπολογιστικό πεδίο.....	36
Σχήμα 4-6 Αδιάστατο προφίλ μέσης ταχύτητας εντός της συστοιχίας για $Z/H=0$ και a) $X/H=-2.5$, b) $X/H=-1.5$, c) $X/H=0.5$	36
Σχήμα 4-7 Αδιάστατο προφίλ μέσης ταχύτητας στο απόρρευμα της συστοιχίας για $Z/H=0$ και για $X/H=10.5$	37
Σχήμα 4-8 Ροϊκές γραμμές της μέσης ροής στο επίπεδο συμμετρίας, $Z/H=0$, και χαρακτηριστικά μήκη των ανακυκλοφοριών.	39
Σχήμα 4-9 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$	39
Σχήμα 4-10 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=6$	40
Σχήμα 4-11 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=-6$	41
Σχήμα 4-12 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Y/H=0.008$	42
Σχήμα 4-13 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Y/H=0.5$	43
Σχήμα 4-14 Κατανομή του συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο στο επίπεδο $Z/H=0$	45
Σχήμα 5-1 Υπολογιστικό πλέγμα για την επαλήθευση της φωτιάς μεθανίου. ...	49
Σχήμα 5-2 Διάγραμμα αξονικών ταχυτήτων στο ύψος $y=0.3m$	50
Σχήμα 5-3 Διάγραμμα αξονικών ταχυτήτων στο ύψος $y=0.5m$	51
Σχήμα 5-4 Διάγραμμα αξονικών ταχυτήτων στο ύψος $y=0.9m$	51
Σχήμα 5-5 Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας στο πεδίο.....	52
Σχήμα 5-6 Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης a) του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και b) των υδρατμών (H_2O).....	53
Σχήμα 6-1 Απεικόνιση αστικής συστοιχίας και της θέσης της φωτιάς μεθανίου στο πεδίο.	54
Σχήμα 6-2 Συγκριτικά διαγράμματα των αδιάστατων προφίλ μέσης ταχύτητας εντός της συστοιχίας για $Z=0$ και (a) $X:-15$, (b) $X:-9$, (c) $X:3$ για τις προσομοιώσεις ροής γύρω από αστική συστοιχία και της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου.	55

Σχήμα 6-3 Συγκριτικό διάγραμμα των αδιάστατων προφίλ μέσης ταχύτητας στο απόρρευμα της συστοιχίας για $Z=0$ και για $X:63$ ή $X/H:10.5$, για τις προσομοιώσεις ροής γύρω από αστική συστοιχία και της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου.	56
Σχήμα 6-4 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$	57
Σχήμα 6-5 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=6$	59
Σχήμα 6-6 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=-6$	59
Σχήμα 6-7 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο κατακόρυφο επίπεδο $Y/H=0.008$	60
Σχήμα 6-8 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο κατακόρυφο επίπεδο $Y/H=0.5$	61
Σχήμα 6-9 Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας στο επίπεδο $Z/H=0$	62
Σχήμα 6-10 Ισοϋψές γράφημα του διοξειδίου του άνθρακα, CO_2 , στο επίπεδο $Z/H=0$	62
Σχήμα 6-11 Ισοϋψές γράφημα των υδρατμών στο επίπεδο $Z/H=0$	63
Σχήμα 6-12 Κατανομή της συγκέντρωσης του ρύπου CO_2 κατά μήκος της a)Line A, b)Line B, c)Line C και d)Line D.	64
Σχήμα 6-13 Κατανομή της συγκέντρωσης του ρύπου CO_2 στο επίπεδο $Z/H=0$	65
Σχήμα 6-14 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα της διασποράς του ρύπου εντός της αστικής συστοιχίας.	66
Σχήμα 6-15 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα της διασποράς του ρύπου εντός της αστικής συστοιχίας από άλλη προοπτική.	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0$	38
Πίνακας 2 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=6$ και $Z/H=-6$	40
Πίνακας 3 Αρχικές και οριακές συνθήκες του πειράματος FLAME και της προσομοίωσης.....	47
Πίνακας 4 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0$	57
Πίνακας 5 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=-6$ και $Z/H=6$	58

Κατάλογος Εξισώσεων

(2-1).....	6
(2-2).....	6
(2-3).....	6
(2-4).....	6
(2-5).....	19
(2-6).....	19
(3-1).....	21
(3-2).....	21
(3-3).....	21
(3-4).....	22
(3-5).....	22
(3-6).....	22
(3-7).....	22
(3-8).....	23
(3-9).....	23
(3-10).....	23
(4-1).....	32
(4-2).....	32
(4-3).....	33
(4-4).....	33
(4-5).....	44
(5-1).....	47
(5-2).....	47
(5-3).....	47
(5-4).....	48

Λίστα Συντομογραφιών

ΑΟΣ	Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα
RANS	Reynolds Average Navier Stokes
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
ILES	Implicit-Eddy Large Simulation
OpenFOAM	Open Field Operation And Manipulation
FLAME	Fire Laboratory for Accreditation of Modeling by Experiment
PRI	Plume Resolution Index
CFD	Computational Fluid Dynamics

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα αστικό περιβάλλον αποτελείται από κτίρια, δρόμους, λεωφόρους, σιδηροδρομικά δίκτυα και αεροδρόμια, καθώς και φύτευση, πάρκα και βιομηχανικές περιοχές. Η συνεχής εξέλιξη της ανθρώπινης δραστηριότητας και οι ενεργειακές ανάγκες έχουν οδηγήσει σε μία συνεχόμενη παραγωγή και αξιοποίηση καυσίμων προκειμένου να μειωθούν οι παραγόμενοι ρύποι (Bariha, Srivastava et al. 2017). Παρόλα αυτά οι δραστηριότητες αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε ατυχήματα με απελευθέρωση επικίνδυνων και τοξικών ρύπων. Η κατανομή της ροής του αέρα και τα τυρβώδη φαινόμενα διασποράς σε ένα τέτοιο πολύπλοκο περιβάλλον μίας πόλης μπορεί να οδηγήσουν στην απρόβλεπτη εξέλιξη ενός ατυχήματος (Vasilopoulos, Mentzos et al. 2018) το οποίο οδηγεί όχι μόνο στη σοβαρή ρύπανση του περιβάλλοντος, αλλά μπορεί να στοιχίσει ανθρώπινες ζωές. Για τους παραπάνω λόγους είναι αναγκαία η κατανόηση της αστικής γεωμετρίας και της επίδρασης της ροή του αέρα για την αποφυγή τέτοιων ατυχημάτων.

Για την κατανόηση της διασποράς ρύπων σε αστικό περιβάλλον έχουν γίνει κάποια πειράματα στο πεδίο (Dobre, Arnold et al. 2005). Τα πειράματα αυτά μελετούν τη διασπορά του ρύπου στο αστικό περιβάλλον. Δεδομένου ότι είναι δύσκολα και δαπανηρά, γίνονται μελέτες με πακέτα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Για τη μελέτη της διασποράς ρύπου εντός αστικού ιστού μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές όπως μοντέλα τύρβης των μέσων τιμών του Reynolds για τις εξισώσεις Navier Stokes (RANS-Reynolds Average Navier Stokes) (Santese, Buccolieri et al. 2007), μοντέλα μεγάλων δινών (LES-Large Eddy Simulation) (Tominaga and Stathopoulos 2011, Saeedi and Wang 2015, Idrissi, Lakhal et al. 2018), έμμεσα μοντέλα μεγάλων δινών (ILES-Implicit-Eddy Large Simulation) (Drikakis 2003), καθώς και μοντέλα άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (DNS-Direct Numerical Simulation).

Για την πλήρη κατανόηση των φαινομένων ροής αέρα και διασποράς ρύπου σε ένα πολύπλοκο αστικό περιβάλλον είναι αναγκαία η μελέτη απλούστερων δομών. Οι αστικές δομές μίας πόλης μπορούν να απλοποιηθούν σε συστοιχίες κτιρίων, ομοιόμορφες ή μη, σε αστικές χαράδρες και άλλα. Ο χαρακτηρισμός

των δομών αυτών μπορεί να γίνει μέσω του ύψους των κτιρίων και της απόστασης μεταξύ τους.

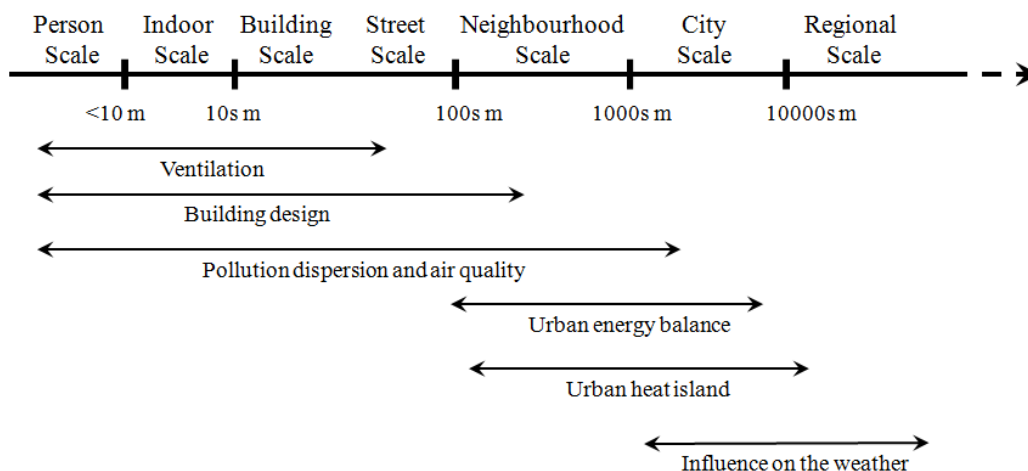
Ένα ατύχημα πυρκαγιάς μπορεί να συμβεί εντός των αστικών δομών ανάμεσα στα κτίρια. Διάφορες μελέτες έχουν γίνει για ατυχήματα με φωτιές υδρογονανθράκων (Markatos, Christolis et al. 2009, Argyropoulos, Sideris et al. 2010, Argyropoulos, Christolis et al. 2012), καθώς και για φωτιές μεθανίου με το υπολογιστικό πακέτο OpenFoam και τον επιλυτή FireFoam (Wang, Chatterjee et al. 2011). Επίσης, μελέτες έχουν γίνει για την προσομοίωση φωτιάς μεθανίου σε υπαίθριο περιβάλλον κοντά σε αστική περιοχή (Ghaderi, Ghodrati et al. 2021) με τον επιλυτή FireFoam και για τη διασπορά μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα σε αστική περιοχή (Idrissi, Lakhali et al. 2018). Η διασπορά ρύπων εντός αστικής συστοιχίας έχει μελετηθεί πειραματικά και αριθμητικά (Inagaki and Kanda 2008, Coceal, Goulart et al. 2014, Shen, Wang et al. 2015). Παρόλα αυτά υπάρχει έλλειψη στη βιβλιογραφία για ατυχήματα με φωτιά εντός αστικής συστοιχίας κύβων και συγκεκριμένα για φωτιά μεθανίου μεγάλης κλίμακας με τη χρήση του επιλυτή FireFoam.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη μελέτη της ροής γύρω από ομοιόμορφη κατανομημένη αστική συστοιχία με τη μέθοδο μεγάλων δινών και την παρουσία φωτιάς μεθανίου στο πεδίο με το πακέτο ελεύθερου λογισμικού OpenFoam και με τον επιλυτή FireFoam. Ο επιλυτής αυτός έχει αναπτυχθεί συγκεκριμένα για προσομοιώσεις φωτιάς. Πρόκειται για λύση που αφορά προσομοιώσεις μεγάλης δίνης, ο οποίος είναι μεταβατικός και αφορά τη μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας φωτιάς και φλόγας τυρβώδους διάχυσης, καθώς και της πυρόλυσης. Θα γίνει συγκριτική μελέτη του πεδίου πριν το ατύχημα με τη φωτιά και μετά, καθώς και επαλήθευση της φωτιάς μεθανίου με πειραματικά δεδομένα και προσομοιώσεις (Maragkos and Merci 2017). Η αριθμητική προσέγγιση για τη ροή γύρω από αστική συστοιχία θα επαληθευθεί μέσω πειραμάτων για την κατανομή του συντελεστή πίεσης γύρω από τα κτίρια.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Αστικές Περιοχές

Η μελέτη των ατμοσφαιρικών διεργασιών χωρίζεται συνήθως σε οριζόντιες κλίμακες οι οποίες ξεκινούν από την ανθρώπινη κλίμακα και φτάνουν ως την παγκόσμια κλίμακα (Gough 2017).



Σχήμα 2-1 Απεικόνιση των διαφορετικών οριζόντιων κλιμάκων εντός μιας πόλης, και το εύρος κλίμακας κάποιων πεδίων έρευνας αστικής μετεωρολογίας (Gough 2017).

Η αστική περιοχή μπορεί να επηρεάσει την τοπική ροή, προκαλώντας την επιβράδυνση και την εκτροπή της. Γενικά, οι διακυμάνσεις της ροής και η διασπορά γύρω από μεμονωμένα κτίρια ή συστοιχίες παρόμοιων κτιρίων εξομαλύνονται, κατά κύριο λόγο, στην κλίμακα μιας πόλης (Gough 2017).

Γενικά, οι μελέτες στο πεδίο που γίνονται σε διάφορες πόλεις με διαφορετικές διατάξεις και τύπους κτιρίων, διαφορετικών αποστάσεων μεταξύ τους είναι αντισυμβατικές. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι, συχνά, δύσκολο να ερμηνευθούν, λόγω έλλειψης κατανόησης των σύνθετων τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής γύρω και πάνω από συστοιχίες κτιρίων ή ακόμα και απλοποιημένων κτιρίων (Gough 2017).

Οι αστικές περιοχές σχηματίζονται από γειτονιές διαφορετικών κτιρίων, γεγονός που κάνει πολύ δύσκολη τη γενίκευση των αποτελεσμάτων των μελετών για μια αστική περιοχή λόγω του μεγάλου αριθμού των μεταβλητών οι οποίες μπορούν

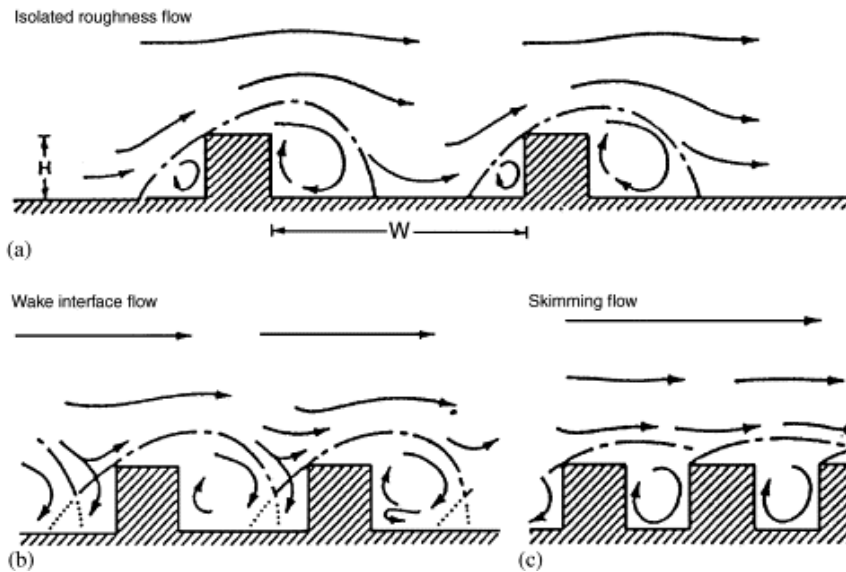
να επηρεάσουν τη ροή. Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να είναι: η σχετική θέση ενός κτιρίου ως προς το γειτονικό του, η γεωμετρία του κτιρίου, η πυκνότητα των κτιρίων, η κυκλοφορία των αυτοκινήτων, κ.α. (Gough 2017).

Για την απαλοιφή κάποιας πολυπλοκότητας, η αστική περιοχή απλοποιείται, είτε στη διάταξη, είτε στη γεωμετρία των κτιρίων. Η απλοποίηση αυτή αποσκοπεί στο γεγονός ότι η έρευνα της μιας κλίμακας σε βάθος βοηθάει την ερμηνεία της μεγαλύτερης κλίμακας (Gough 2017).

2.1.1 Ροή γύρω από Αστική Χαράδρα

Ένα από τα επαναλαμβανόμενα στοιχεία εντός μιας αστικής περιοχής είναι η χαράδρα (Gough 2017). Δηλαδή, μια περιοχή η οποία αποτελείται από δύο παράλληλα τοποθετημένα κτίρια με ένα διάκενο ανάμεσά τους (Nakamura and Oke 1988). Μία αστική χαράδρα χαρακτηρίζεται από τον αδιάστατο λόγο ύψους ως προς το πλάτος H/W , όπου W είναι η απόσταση ανάμεσα στα κτίρια και H είναι το μέσο ύψος του κτιρίου (Σχήμα 2-2) (Gough 2017). Η συμπεριφορά του αέρα εντός της χαράδρας χαρακτηρίζεται από τις ανακυκλοφορίες των απορρευμάτων των ανάντη κτιρίων, λόγω της αποκόλλησης της ροής. Επίσης, η συμπεριφορά της ροής επηρεάζεται από τη διεύθυνση του ανέμου (Gough 2017).

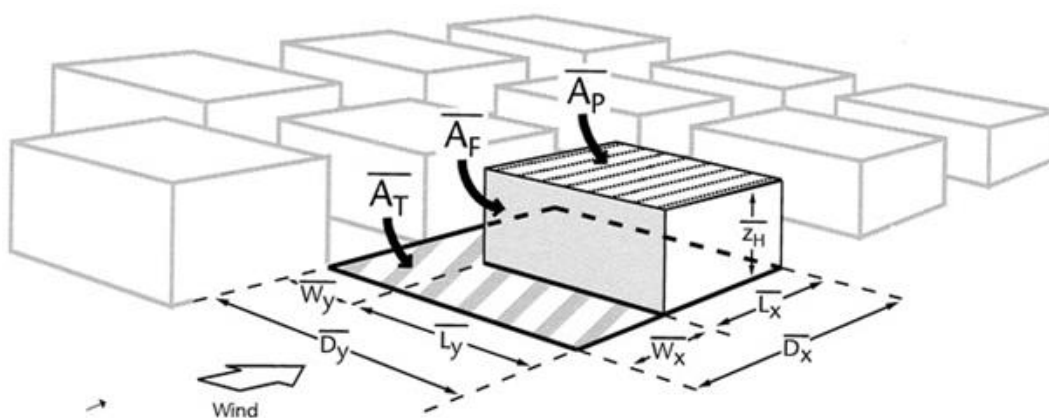
Αν τα κτίρια έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, δηλαδή ο λόγος $0,05 < H/W < 0,3$, τα πεδία ροής γύρω από τα δύο κτίρια δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (Oke 1988, Gough 2017). Η ροή αυτή ονομάζεται, «ροή απομονωμένων στοιχείων τραχύτητας» (Barbas 2013) (Σχήμα 2-2α). Για μεγαλύτερους λόγους ύψους προς πλάτος, $H/W > 0,65$, δημιουργείται μία ανακυκλοφορία εντός της κοιλότητας ανάμεσα στα κτίρια και η ροή αλληλεπιδρά ελάχιστα με την αδιατάρακτη ροή πάνω από τα κτίρια. Η ροή αυτή ονομάζεται «ροή απόξεσης» (Σχήμα 2-2γ). Για λόγο $0,3 < H/W < 0,65$, το απόρρευμα του ενός κτιρίου αλληλεπιδρά με την αδιατάρακτη ροή πάνω από το άλλο. Η ροή αυτή ονομάζεται «ροή διαταραχής ομόρρου» (Σχήμα 2-2β) (Gough 2017).



Σχήμα 2-2 Περιπτώσεις ροής που σχετίζονται με διαφορετικές αστικές γεωμετρίες. (a) Ροή απομονωμένων στοιχείων τραχύτητας, (b) Ροή διαταραχής ομόρρου, (c) Ροή απόξεσης (Oke 1988).

2.1.2 Απλοποίηση των Αστικών Περιοχών

Οι συστοιχίες κτιρίων, συνήθως, απλοποιούνται σε συστοιχίες κύβων, οι οποίες κάνουν τους βασικούς μηχανισμούς πιο κατανοητούς και εμφανείς, αλλά αγνοούν την επιρροή των υπόλοιπων, μικρότερων στοιχείων που βρίσκονται εντός της αστικής περιοχής, όπως η βλάστηση και ο δομικός εξοπλισμός (Gough 2017).



Σχήμα 2-3 Σχηματική παράσταση των μορφολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και το χαρακτηρισμό μιας αστικής περιοχής (Gough 2017).

Κάθε κτίριο έχει ύψος H ή z_H , όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 2-3, μία διάσταση κατά τη διεύθυνση της ροής, L_x , και κάθετα προς τη διεύθυνση της ροής, L_y , καθώς και διαστάσεις για τις αποστάσεις ανάμεσα στα κτίρια, W_x (κατά τη διεύθυνση της ροής) και W_y (κάθετα ως προς τη ροή) (Gough 2017).

Δύο παράμετροι χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τα κτίρια. Οι παράμετροι είναι η πυκνότητα της επιφάνειας της κάτοψης (λ_p) και η πυκνότητα της επιφάνειας πρόοψης (λ_f). Η πυκνότητα της επιφάνειας κάτοψης, λ_p , είναι ο λόγος της συνολικής επιφάνειας κάτοψης που καταλαμβάνεται από τα στοιχεία τραχύτητας, δηλαδή τα κτίρια, ως προς τη συνολική επιφάνεια της κάτοψης. Η πυκνότητα της επιφάνειας πρόοψης, λ_f , είναι ο λόγος της συνολικής επιφάνειας πρόοψης των κτιρίων, ως προς τη συνολική επιφάνεια της κάτοψης (Gough 2017).

το λ_p δίνεται από τον τύπο,

$$\lambda_p = \frac{\sum_i A_{pi}}{\sum_i A_{Ti}} \quad (2-1)$$

όπου το A_{pi} είναι το εμβαδόν της επιφάνειας κάτοψης για κάθε κτίριο και το A_{Ti} είναι το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας κάτοψης για κάθε στοιχείο τραχύτητας. Τα παραπάνω υπολογίζονται ως εξής,

$$A_{pi} = L_{xi}L_{yi} \quad (2-2)$$

$$A_{Ti} = (W_{xi} + L_{xi})(W_{yi} + L_{yi}) \quad (2-3)$$

το λ_f δίνεται από τον τύπο,

$$\lambda_f = \frac{\sum_i A_{fi}}{\sum_i A_{Ti}} \quad (2-4)$$

όπου το A_{fi} είναι το εμβαδόν της επιφάνειας πρόοψης για κάθε κτίριο και υπολογίζεται από το μήκος L_y επί το ύψος του κτιρίου (Gough 2017).

2.1.3 Απλοποίηση Αστικών Συστοιχιών

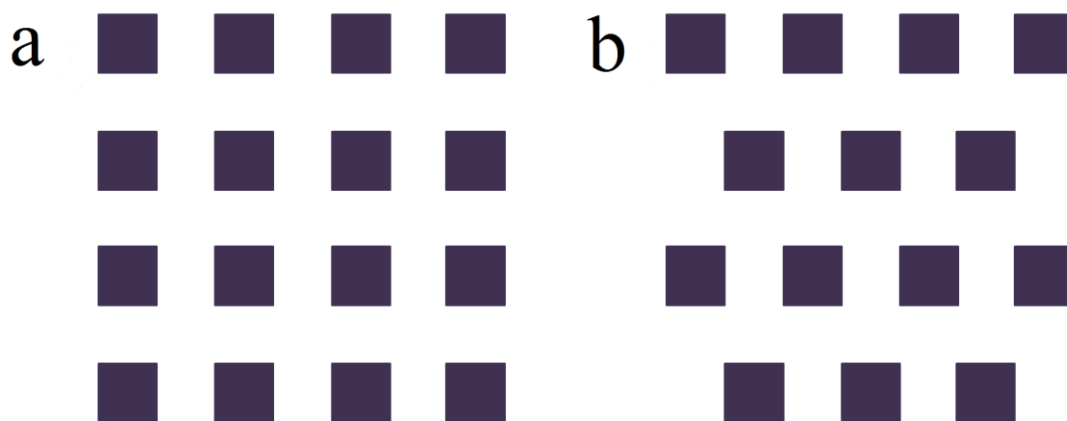
Η χρήση κύβων, ως στοιχείων τραχύτητας, δημιουργεί ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός αστικού περιβάλλοντος το οποίο επιτρέπει στα αποτελέσματα να είναι προσαρμόσιμα (Gough 2017).

Για αραιές διατάξεις κύβων (απόσταση μεταξύ κύβων $>10H$), σε ένα πεδίο ροής, το κάθε κτίριο είναι αποτελεσματικά απομονωμένο και υφίσταται αδιατάρακτες οριακές συνθήκες όπως στην περίπτωση της ροής μεμονωμένης τραχύτητας για ροές γύρω από αστική χαράδρα ($H/W < 0.3$). Για αποστάσεις μεταξύ κύβων $5H < x < 10H$, οι συνθήκες της ροής επηρεάζονται από τα απορρεύματα των κτιρίων. Για αποστάσεις μικρότερες από $5H$, τα απορρεύματα αλληλεπιδρούν άμεσα. Επίσης, η ροή πάνω από κτίρια πυκνά διατεταγμένα ξεκινά να παίρνει τη μορφή ροής απόξεσης (Cheng, Hayden et al. 2007).

Στα παρακάτω υπό-κεφάλαια θα δούμε τις διαφορές μεταξύ ομοιόμορφων και μη ομοιόμορφων αστικών συστοιχιών. Η Gough (2017) στη διατριβή της αναφέρει ότι μελέτες που αφορούν μη ομοιόμορφες συστοιχίες είναι λιγότερο συνήθεις από εκείνες που αφορούν ομοιόμορφες συστοιχίες. Παρόλα αυτά το θέμα αναπτύσσεται λόγω της ανάγκης να γνωρίζουμε πότε η παρουσία ενός μεγάλου κτιρίου εντός μιας αστικής συστοιχίας ακυρώνει όλες τις άλλες διεργασίες.

2.1.3.1 Ομοιόμορφες Αστικές Συστοιχίες

Οι ομοιόμορφες αστικές συστοιχίες είναι συστοιχίες κύβων με τις ίδιες διαστάσεις, οργανωμένες σε ευθυγραμμισμένες (Σχήμα 2-4α) ή κατανεμημένες (Σχήμα 2-4β) συστοιχίες. Οι κατανεμημένες συστοιχίες κύβων έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη οπισθέλκουσα δύναμη από τις ευθυγραμμισμένες, υπό τις ίδιες συνθήκες ροής (Gough 2017).



Σχήμα 2-4 α. Ευθυγραμμισμένη συστοιχία, β. Κατανεμημένη συστοιχία (Gough 2017).

Η επίδραση στο οριακό στρώμα από κατανεμημένες συστοιχίες με διαφορετικές πυκνότητες, λ_p , (6.25% έως 25%) έχει ερευνηθεί από τον Cheng, Hayden et al. (2007) με τη χρήση ενός, υπό κλίμακα, μοντέλου αεροσήραγγας ξύλινων κύβων με διάσταση πλευράς 20mm. Για μια περιοχή με επαρκώς χαμηλή επιφάνεια κάλυψης από κτίρια ($\lambda_p=6.25\%$), το υπόστρωμα τραχύτητας μπορεί να επεκταθεί και να καταλάβει ένα μεγάλο μέρος του συνολικού βάθους του οριακού στρώματος, το οποίο εξαρτάται από τη διεύθυνση του ανέμου.

Οι Abd Razak, Hagishima et al. (2012), μέσω αριθμητικής προσομοίωσης με τη μέθοδο μεγάλων δινών για τον προσδιορισμό της επίδρασης της αστικής γεωμετρίας εντός ενός αστικού θόλου στη ροή του ανέμου, συμπεραίνουν ότι στην περίπτωση των ομοιόμορφων συστοιχιών, η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος πάνω από $0.02h$ (h : ύψος του κτιρίου) μειωνόταν μονότονα με την αύξηση του λ_p , ενώ σε ύψος 0.02 έφτανε στο μέγιστο για $\lambda_p=25\%$. Τα αποτελέσματα αυτά ερμηνεύτηκαν από τους ίδιους με τον παρακάτω τρόπο: 1) Για ένα αστικό περιβάλλον το οποίο απαρτίζεται από κτίρια με χαμηλό ύψος, η βαθμωτή ταχύτητα στο ύψος των πεζών μειώνεται μονότονα με την αύξηση της κτιριακής κάλυψης, λ_p . 2) Για μια αστική περιοχή με κτίρια μεγάλου ύψους, η βαθμωτή ταχύτητα κοντά στο επίπεδο των δρόμων είναι ανεπηρέαστη από την κτιριακή κάλυψη, για $\lambda_p < 25\%$.

Η ροή εντός μιας κατανεμημένης συστοιχίας είναι αρκετά πιο περίπλοκη από εκείνη εντός μιας ευθυγραμμισμένης συστοιχίας για ισοδύναμο λ_p , λόγω της

αλληλεπίδρασης των απορρευμάτων. Για την ευθυγραμμισμένη συστοιχία η ροή έχει τη μεγαλύτερη ταχύτητα στις ανεμπόδιστες περιοχές, ενώ στις σειρές μεταξύ διαδοχικών κύβων δημιουργούνται ανακυκλοφορίες. Λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ κύβων στην κατανεμημένη συστοιχία η ροή συμπεριφέρεται διαφορετικά, με απουσία στιγμιαίων ανακυκλοφοριών κατάντη των κύβων και μεγάλες διαφορές της δομής της ροής σε διαφορετικά ύψη (Coceal, Thomas et al. 2006).

Προσομοιώσεις άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (Direct Numerical Simulation) ροής γύρω από κατανεμημένη συστοιχία δείχνουν μεγάλες τοπικές διακυμάνσεις της ροής κοντά σε ακμές, οι οποίες δημιουργούνται λόγω της διαταραχής της μέσης ροής λόγω των αυξημένων επιπέδων τύρβης γύρω από ένα κτίριο (Coceal, Thomas et al. 2007). Η στιγμιαία ροή φάνηκε να είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από τη μέση ροή εντός ενός ισχυρού ανομοιογενούς πεδίου ροής αέρα (Coceal, Thomas et al. 2006). Από τα παραπάνω επισημαίνεται η ανάγκη να ληφθεί υπόψη η τρισδιάστατη συμπεριφορά της ροής και ότι η μέση «εικόνα» της ροής δεν είναι πάντα ακριβής, ειδικά σε περιοχές απορρεύματος (Gough 2017).

Επίσης, άμεσες αριθμητικές προσομοιώσεις και προσομοιώσεις μεγάλων δυνάμεων που έγιναν από τους Claus, Coceal et al. (2012) σε μία ευθυγραμμισμένη και μία κατανεμημένη συστοιχία αντίστοιχα, δείχνουν ότι αλλάζοντας τη διεύθυνση του ανέμου πάνω από μία συστοιχία μπορεί να αυξήσει την οπισθέλκουσα δύναμη που προκύπτει από την επιφάνεια σε ποσοστό πάνω από 300%.

Οι Macdonald, Griffiths et al. (1998) δημιούργησαν μία ευθυγραμμισμένη συστοιχία κλίμακας 1:10 από κύβους ($\lambda_p=16\%$). Οι κύβοι ήταν κατασκευασμένοι από γαλβανισμένο ατσάλι με ύψος 1.12m και συγκρίθηκαν με ένα μοντέλο αεροσήραγγας 1:100 κλίμακας για την έρευνα της διασποράς του πλουμίου γύρω από τα κτίρια. Σε σύγκριση με το μοντέλο αεροσήραγγας υπήρχε μεγαλύτερη σκέδαση στο μέγεθος του πλουμίου στα αποτελέσματα του πεδίου και παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες κλίμακες τύρβης. Συνολικά τα μοτίβα της

διασποράς (πεδίο ροής και μετρήσεις συγκέντρωσης) ήταν ποιοτικά και σε κάποιες περιπτώσεις ποσοτικά παρόμοια με εκείνα της αεροσήραγγας.

Μία ζώνη ρίσκου είναι μία κυκλική περιοχή με κέντρο την πηγή της πηγής εκπομπής ρύπου και εκτείνεται έως το όριο για το οποίο εξασφαλίζεται η ασφάλεια. Οι ζώνες αυτές ορίζονται ως:

- a) Ζώνη I – Ζώνη πολύ σοβαρών επιπτώσεων, Θανατηφόρα συγκέντρωση 50% (περιοχή LC50). Η πιθανότητα θνησιμότητας του πληθυσμού σε αυτή τη ζώνη είναι 50% λόγω εισπνοής τοξικών ουσιών.
- b) Ζώνη II – Ζώνη σοβαρών επιπτώσεων, Θανατηφόρα συγκέντρωση 1% (περιοχή LC1). Η πιθανότητα θνησιμότητας του πληθυσμού σε αυτή τη ζώνη είναι 1% λόγω εισπνοής τοξικών ουσιών.
- c) Ζώνη III – Ζώνη μεσαίας σοβαρότητας επιπτώσεων, Άμεσα Επικίνδυνη για τη Ζωή και την Υγεία (περιοχή IDLH). Η ζώνη αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αναστρέψιμους τραυματισμούς μετά από την εισπνοή τοξικών ουσιών. Έξω από τη ζώνη αυτή η περιοχή είναι ασφαλής.

Οι Vasilopoulos, Mentzos et al. (2018) μελέτησαν την επίδραση ενός περιστατικού πυρκαγιάς diesel στη ροή του ανέμου εντός τριών περιπτώσεων κατανεμημένων συστοιχιών κύβων. Όπως αναφέρουν, οι διαφορετικές αστικές γεωμετρίες καθόρισαν την κατανομή του ανέμου και τη διασπορά του καπνού. Μέσω της μελέτης τους ορίστηκαν οι άμεσα επικίνδυνες για τη ζωή και την υγεία (IDLH-Immediately Dangerous to Life and Health) ζώνες καπνού για ένα περιστατικό εντός πολύπλοκης αστικής μορφολογίας και προτάθηκαν τα μέτρα για την έγκαιρη παρέμβαση. Οι Assael and Kakosimos (2012) όρισαν τις ζώνες όπου η συγκέντρωση των τοξικών ρύπων θα μπορούσε να αποτελέσει κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή. Για μικρές αποστάσεις μεταξύ κτιρίων και κάθετη διεύθυνση ανέμου, ο καπνός οδηγήθηκε προς το προσήνεμο κτίριο. Σε μία συμμετρική γεωμετρία κτιρίων, ο καπνός θα παρουσιάσει, επίσης, συμμετρική διασπορά. Αν η φωτιά βρίσκεται ανάμεσα σε δύο κτίρια με μεγάλη απόσταση ανάμεσά τους, ο καπνός θα οδηγηθεί προς το υπήνεμο κτίριο. Οι περίπλοκες γεωμετρίες χωρίς άξονα συμμετρίας μπορούν να οδηγήσουν σε απρόβλεπτες ροές, λόγω του γεγονότος ότι ο άνεμος μπορεί να ακολουθήσει μια

συγκεκριμένη τροχιά που μπορεί να μην είχε προβλεφθεί. Τέλος, αναφέρουν ότι, αν η φωτιά τοποθετηθεί σε έναν δρόμο και ο άνεμος είναι παράλληλος με αυτόν, ο καπνός ακολουθεί τη διεύθυνση του ανέμου αλλά διαταράσσεται από τις πλευρικές ανακυκλοφορίες του κτιρίου (Vasilopoulos, Mentzos et al. 2018). Επίσης, προτείνουν την μελέτη διαφορετικής έντασης ταχυτήτων ανέμου για να καθοριστεί η πιθανότητα της επανεισόδου του καπνού στην συστοιχία των κύβων.

Άξια αναφοράς είναι επίσης η εγκατάσταση συστοιχίας κύβων μεγάλης κλίμακας COSMO (Comprehensive Outdoor Scale Model) (Σχήμα 2-5). Είναι μία συστοιχία που αποτελείται από 512 ευθυγραμμισμένους τσιμεντένιους κύβους 1.5m. Στη μελέτη αυτή επισημαίνεται ότι υπάρχει ανάγκη να λάβουμε υπόψη όλες τις κλίμακες της ροής όταν γίνεται κάποια έρευνα εντός του αστικού περιβάλλοντος. Αν, για παράδειγμα, δεν συμπεριληφθεί η βλάστηση στα μοντέλα εντός της αστικής περιοχής μπορεί να οδηγηθούμε σε υπερεκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στο εσωτερικό της αστικής χαράδρας (Inagaki and Kanda 2008).



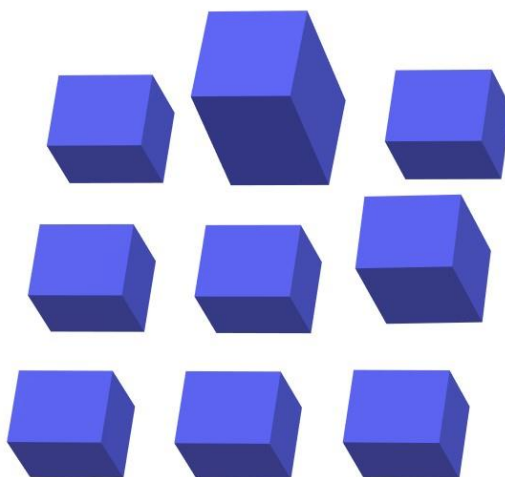
Σχήμα 2-5 Φωτογραφία του COSMO από την βόρειο-δυτική πλευρά. Οι κύβοι έχουν 1.5m ύψος (Inagaki and Kanda 2008).

Η Gough (2017) στη διατριβή της αναφέρει ότι χρήζει περισσότερης μελέτης το αντικείμενο της μη-μόνιμης ροής, η επίδραση του λ_p , η επίδραση της

διεύθυνσης του ανέμου και του ύψους του κτιρίου για την πλήρη κατανόηση των διαφορών και των ομοιοτήτων ανάμεσα στις ομοιόμορφες και τις πραγματικές αστικές συστοιχίες. Οι ομοιόμορφες συστοιχίες αποτελούν καλό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση προϋπαρχόντων αποτελεσμάτων και βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας μοντέλα όπως σε αριθμητικές προγνώσεις καιρού.

2.1.3.2 Μη Ομοιόμορφες Αστικές Συστοιχίες

Η μη ομοιομορφία των αστικών περιοχών δημιουργεί μεγάλη και ανομοιόμορφη μεταφορά ενέργειας, ορμής και μάζας εντός της ατμόσφαιρας πάνω από την περιοχή (Gough 2017).



Σχήμα 2-6 Διάταξη κτιρίων μη ομοιόμορφης αστικής συστοιχίας με μεταβαλλόμενα ύψη κτιρίων.

Από τη συγκριτική μελέτη των Kanda, Inagaki et al. (2013) επισημαίνεται ότι τα απλοποιημένα αστικά δίκτυα φαίνονταν να αυξάνουν τη ροή κοντά στο επίπεδο του εδάφους και να μειώνουν τις αλληλεπιδράσεις των ορόρων των μεμονωμένων κτιρίων. Μεταβάλλοντας το ύψος των κτιρίων, ακόμα και σε απλές συστοιχίες, παρήχθησαν αποτελέσματα τα οποία ήταν πιο κοντά σε εκείνα από πραγματικές αστικές επιφάνειες, υποδεικνύοντας ότι η μεταβολή του ύψους των κτιρίων είναι πιο σχετική από την πολυπλοκότητα των αστικών

δικτύων για την παραμετροποίηση της αστικής τραχύτητας και του λογαριθμικού οριακού στρώματος πάνω από τα κτίρια (Kanda, Inagaki et al. 2013).

Για συστοιχίες οι οποίες έχουν υψηλή κάθετη τυχαιότητα, ως προς το ύψος των κτιρίων, ο συντελεστής οπισθέλκουσας αυξάνεται με την αύξηση του λ_p (7.7% έως 48.1%)(Gough 2017). Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολο το σχηματισμό ροής απόξεσης σε αστικές περιοχές με μεταβαλλόμενα ύψη κτιρίων. Επίσης, η κάθετη τυχαιότητα οδηγεί σε παχύτερα υποστρώματα τραχύτητας και σε μη ύπαρξη αδρανειακών υποστρωμάτων πάνω από τις συστοιχίες (Cheng and Castro 2002, Gough 2017).

Όπως αναφέρεται από τους Cheng and Castro (2002), η μελέτη των μη ομοιόμορφων συστοιχιών απαιτεί μεγαλύτερη τυχαιοποίηση όσον αφορά τη θέση των κτιρίων, του μεγέθους της συστοιχίας και την περιστροφή των κτιρίων. Γενικότερα, οι μη ομοιόμορφες συστοιχίες παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για την επίδραση των ψηλότερων κτιρίων στη μεταφορά ορμής και στα μοτίβα της ροής, καθώς και για την επίδραση των μεμονωμένων κτιρίων, συνολικά, στη ροή (Gough 2017)

Η Gough (2017) αναφέρει ότι για την περίπτωση των ομοιόμορφων συστοιχιών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλλαγή στη διεύθυνση του ανέμου. Επίσης, επισημαίνει ότι λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών που ήδη λαμβάνονται υπόψη για την περίπτωση των μη ομοιόμορφων συστοιχιών, τα πειράματα είναι συνήθως ισόθερμα και, έτσι, αγνοούν την επίδραση της άνωσης στην τύρβη της ροής καθώς και την επίδραση των κτιρίων στην τοπική θερμοκρασία.

2.2 Καύσιμη Ύλη

2.2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέξαμε το καύσιμο CH_4 , το οποίο βρίσκεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στο φυσικό αέριο, η χρήση του οποίου παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο (Wang, Wen et al. 2014). Στην αέρια μορφή του το φυσικό αέριο, NG (Natural Gas), θεωρείται ως ζωτικής σημασίας πόρος για την αναζήτηση της αειφόρου ενέργειας στο μέλλον. Καθώς

η Ευρώπη έχει έλλειμμα στο καύσιμο αυτό υπάρχει η ανάγκη της εισαγωγής του ως υγροποιημένο φυσικό αέριο, LNG. Για τους παραπάνω λόγους θεωρήθηκε σημαντική η αναφορά στο φυσικό αέριο.

Οι ενεργειακές ανάγκες έχουν οδηγήσει σε μία συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση και αξιοποίηση παραγώγων του πετρελαίου όπως το ντίζελ, το petrol, υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG), και φυσικού αερίου (NG), το οποίο περιλαμβάνει το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και το συμπιεσμένο φυσικό αέριο, τον άνθρακα και τη βιομάζα (Bariha, Srivastava et al. 2017). Οι ενεργειακές ανάγκες των ανεπτυγμένων χωρών καλύπτονται κυρίως από ενεργειακές πηγές όπως παράγωγα πετρελαίου, φυσικό αέριο και άνθρακα. Όσον αφορά τις υπό ανάπτυξη χώρες, η ανάγκη για «καθαρά» καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, για τον εγχώριο τομέα και τον τομέα μεταφορών αυξάνεται με σταθερό ρυθμό.

2.2.2 Ιδιότητες του Φυσικού Αερίου

Το φυσικό αέριο (NG) είναι ένα αέριο μείγμα υδρογονανθράκων το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) (Bariha, Srivastava et al. 2017). Το LNG είναι η υγρή μορφή του φυσικού αερίου και λόγω της υψηλής πυκνότητάς του καταλαμβάνει 600 φορές λιγότερο χώρο από το αέριο σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση. Η σύνθεσή του εξαρτάται από την πηγή του φυσικού αερίου και την επεξεργασία του πριν τη διανομή του. Συνήθως, περιέχει κυρίως 85%-99% μεθάνιο και το υπόλοιπο είναι αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και ίχνη από βαρύτερους υδρογονάνθρακες και αδρανές άζωτο (N_2). Το φυσικό αέριο συμπυκνώνεται σε υγρό (LNG) μέσω της ψύξης του περίπου στους -162°C σε ατμοσφαιρική πίεση. Η θερμοκρασία που απαιτείται για τη συμπύκνωση του εξαρτάται από τη σύνθεση του και είναι μεταξύ των -120°C και -170°C σε πίεση από 3.5 έως 10 bar. Οπότε, το LNG μπορεί να μεταφερθεί χωρίς υψηλή συμπίεση. Η θερμική αξία του φυσικού αερίου είναι περίπου 38 MJ/m^3 και το εύρος της ευφλεκτότητας της σύνθεσης στον αέρα ποικίλει από το 5% (LFL-Lower Flammability Limit) έως το 15% (UFL-Upper Flammability Limit). Αυτά τα όρια θεωρούνται και ως «όρια έκρηξης» του αερίου. Η θερμοκρασία ανάφλεξης του αερίου είναι 612°C - 622°C με 9.78 m^3 καυσίμου ανά κυβικό

μέτρο φυσικού αερίου να είναι αναγκαία για την πλήρη καύση του. Η μέγιστη θερμοκρασία φλόγας του αερίου είναι 1964°C.

2.2.3 Μηχανισμός Έκλυσης του Φυσικού Αερίου

Το βάρος του LNG είναι περίπου το 45% του βάρους του νερού. Όταν εξατμίζεται, το LNG καίγεται μόνο σε συγκεντρώσεις από 5% έως 15%, όταν αναμειγνύεται με τον αέρα (Bariha, Srivastava et al. 2017). Όταν εκλύεται από κάποιο δοχείο λόγω ατυχήματος δεν υπάρχει πρόσμειξη, αφού ο ατμός βράζει απευθείας από το LNG και είναι 100% αέριο. Το νέφος του φυσικού αερίου, το οποίο εκλύεται μετά το ατύχημα, είναι συνήθως ορατό λόγω της εισαγωγής και της συμπύκνωσης υδρατμών από την ατμόσφαιρα. Ανάλογα με το μέγεθος του νέφους και την σταθερότητα της ατμόσφαιρας, η ταχύτητα διάδοσης του νέφους μπορεί να φτάσει και την ταχύτητα της κύριας ροής. Λόγω της υψηλότερης πυκνότητας ατμού του φυσικού αερίου σε σχέση με τον αέρα, τα νέφη του NG έχουν πολύ χαμηλό λόγο ύψους προς πλάτος.

Η ικανότητά του LNG να αποδίδει μεγάλο όγκο αερίου, μια αναλογία περίπου 600:1 για δεδομένη θερμοκρασία και πίεση, το καθιστά σημαντικό στοιχείο της βιομηχανίας φυσικού αερίου, όσον αφορά την αποθήκευση και τη μεταφορά του, αλλά, ταυτόχρονα, είναι και αναγκαία τα υψηλού επιπέδου πρότυπα ασφαλείας για τη διαχείρισή του. Το γεγονός αυτό έχει ανανεώσει το ενδιαφέρον για την ασφάλεια του LNG από τη σκοπιά ενεργειακής ασφάλειας και αξιοπιστίας. Παρόλο που η ασφάλεια του φυσικού αερίου έχει λάβει αρκετή προσοχή, δεν ισχύει το ίδιο και για το LNG. Ο κύριος κίνδυνος του LNG είναι ο εύφλεκτος ατμός, ο οποίος μπορεί να διαχυθεί σε αρκετά χιλιόμετρα ή να αναφλεχθεί προκαλώντας μεγάλης κλίμακας πυρκαγιές, ακόμα και εκρήξεις, όταν υπάρχει, σε κάποιο βαθμό, περιορισμός. Οι πυρκαγιές από LNG έχουν έκταση δεκάδες ή και εκατοντάδες μέτρα, με σχετικά μεγάλο ύψος φλόγας, περίπου 1.2~3 φορές τη διάμετρό της. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η ακτινοβολούσα θερμότητα μπορούν να προκαλέσουν άμεσους τραυματισμούς ή θάνατο σε ανθρώπους και καταστροφές σε εγκαταστάσεις. Για τους λόγους αυτούς οι πυρκαγιές LNG χρήζουν ειδικού ενδιαφέροντος για θέματα ασφαλείας.

2.3 Ατμοσφαιρικά Οριακά Στρώματα

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (Atmospheric Boundary Layer-ABL) ή αλλιώς πλανητικό οριακό στρώμα (Planetary Boundary Layer-PBL) είναι το τμήμα της τροπόσφαιρας, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από την επιφάνεια της γης και αντιδρά στις επιδράσεις αυτής σε κλίμακα χρόνου της τάξης της μίας ώρας ή και μικρότερης (Barbas 2013). Οι επιδράσεις αυτές μπορεί να είναι δυνάμεις τριβής, εξάτμιση νερού, μετάδοση θερμότητας, εκπομπές ρύπων, μεταβολές στη ροή του ανέμου λόγω μορφολογίας εδάφους.

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαπερνά το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% και απορροφάται από το έδαφος. Η θέρμανση του εδάφους είναι αυτό που προκαλεί τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εντός του ΑΟΣ μέσω των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας και μάζας (Barbas 2013). Η αποτελεσματική μεταφορά ορμής και μετάδοσης θερμότητας εντός του ΑΟΣ οφείλεται κατά κύριο λόγο στον τυρβώδη χαρακτήρα του.

2.3.1 Δομή του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος

Στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας υπάρχουν υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας, ορμής και θερμότητας που συντηρούνται από τυρβώδεις κινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην ίδια κλίμακα μήκους με αυτό (Barbas 2013).

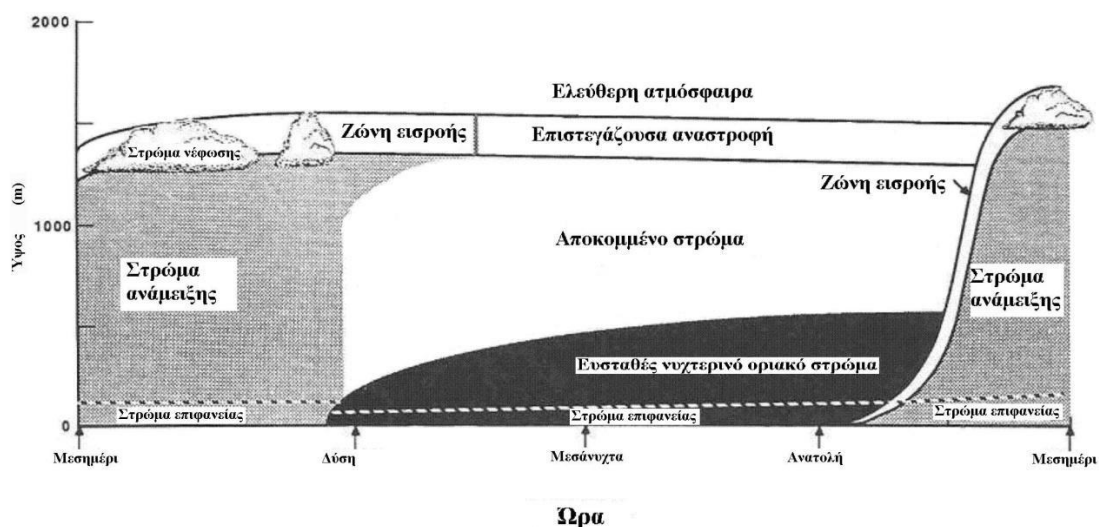
Το πάχος του ΑΟΣ μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά και κυμαίνεται από 100 έως 500m κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν είναι ευσταθές, έως το μέγιστο των 1 έως 2km κατά τις μεσημεριανές ώρες όταν είναι πλήρως ασταθές (Barbas 2013).

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα έχει μία καθορισμένη δομή η οποία εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου (Σχήμα 2-7). Τα τρία δομικά στοιχεία του είναι τα παρακάτω (Barbas 2013):

- Το «Στρώμα Ανάμειξης» (“Mixed Layer”), το οποίο αποτελεί περίπου το 75% του ασταθούς οριακού στρώματος (Barbas 2013). Όταν υπάρχει ηλιοφάνεια και κατ’ επέκταση θέρμανση του εδάφους, μεταδίδεται

θερμότητα από την επιφάνεια του προς τα κατώτερα στρώματα του ΑΟΣ ως αποτέλεσμα είτε εξαναγκασμένης, είτε συνδυασμού ελεύθερης και εξαναγκασμένης συναγωγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έντονες ανωστικές κινήσεις αερίων μαζών και ισχυρές τυρβώδεις ροές. Εντός του στρώματος, οι κύριες μεταβλητές, λόγω της έντασης της τύρβης είναι σταθερές. Γενικά, η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από έντονη ανάμειξη, δηλαδή αστάθεια (Barbas 2013).

- Το «Ευσταθές Οριακό Στρώμα» (“Stable Layer”), το οποίο σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας (Barbas 2013). Η εμφάνιση της ευστάθειας συνδέεται άμεσα με την ψύξη του εδάφους την οποία προκαλεί η εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας τη νύχτα. Η ευστάθεια αυτή συμβάλλει στην εξασθένιση της τύρβης, η οποία, παρόλα αυτά, μπορεί να υπάρχει κοντά στο έδαφος λόγω της παραγωγής της μέσω της διάτμησης (Barbas 2013). Το φαινόμενο αυτό λέγεται «ουδέτερη διαστρωμάτωση» (“neutral stratification”) (Zhang 2009).
- Το «Αποκομμένο Οριακό Στρώμα» (“Residual Layer”). Μετά από τον σχηματισμό του νυχτερινού οριακού στρώματος, το υπερκείμενο στρώμα αέρα αποκόβεται από το έδαφος με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται άμεσα από αυτό και κατά συνέπεια να διατηρεί τις αρχικές του ιδιότητες, όπως η ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας (Barbas 2013).



Σχήμα 2-7 Ημερήσια διακύμανση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από το έδαφος (Barbas 2013).

Το στρώμα που βρίσκεται στο κατώτερο μέρος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος ονομάζεται επιφανειακό στρώμα, το οποίο μπορεί να οριστεί ως η κατώτερη περιοχή του οριακού στρώματος πολύ κοντά στο έδαφος στην οποία οι τυρβώδεις ροές μεταβάλλονται λιγότερο από το 10% του μέτρου τους (Barbas 2013). Το επιφανειακό τυρβώδες αυτό στρώμα χαρακτηρίζεται από έντονη, μικρής κλίμακας τύρβη, που παράγεται κατά κύριο λόγο από την επιφανειακή τραχύτητα και κατά δεύτερο λόγο από την μεταφορά θερμότητας λόγω ρευμάτων. Η κατανομή της ταχύτητας είναι τέτοια ώστε η οριζόντια διατμητική τάση να είναι σχεδόν σταθερή, ανεξάρτητα από το ύψος (Barbas 2013).

Σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται το «στρωτό οριακό υπόστρωμα» (“laminar sub-layer”), το πάχος του οποίου περιορίζεται στα πρώτα εκατοστά ύψους από την επιφάνεια του εδάφους εντός του οποίου η μοριακή διάχυση υπερिशύει της τυρβώδους μεταφοράς (Barbas 2013).

2.3.2 Αστικό Επιφανειακό Οριακό Στρώμα

Το αστικό επιφανειακό στρώμα ή «στρώμα Prandtl», όπου η τύρβη είναι πλήρως ανεπτυγμένη, εκτείνεται κάθετα από 20 έως 100m, ανάλογα με τη διαστρωμάτωση του αέρα (Zhang 2009).

Οι επιφάνειες στις αστικές περιοχές αποτελούνται από κτίρια διαφορετικού ύψους και μεγέθους, δέντρα και άλλα στοιχεία τραχύτητας τα οποία καθιστούν τη μορφολογία τους περίπλοκη (Barbas 2013). Η πολυπλοκότητα αυτή αποτελεί την αιτία για την εμφάνιση τροποποιήσεων στις τυρβώδεις δομές.

Γενικά, το οριακό στρώμα πάνω από μία τραχιά επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως επιφανειακό στρώμα, το οποίο υποδιαιρείται σε «υπόστρωμα αδράνειας» (“inertial sublayer”) και «υπόστρωμα τραχύτητας» (“roughness sublayer”) εντός του οποίου βρίσκεται το «στρώμα αστικού θόλου» (“urban canopy layer”) (Cheng and Castro 2002, Barbas 2013). Εντός του υποστρώματος αδράνειας η κάθετη μεταβολή της διατμητικής τάσης μπορεί να αγνοηθεί. Η κάθετη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να περιγραφεί από το λογαριθμικό νόμο (Cheng and Castro 2002):

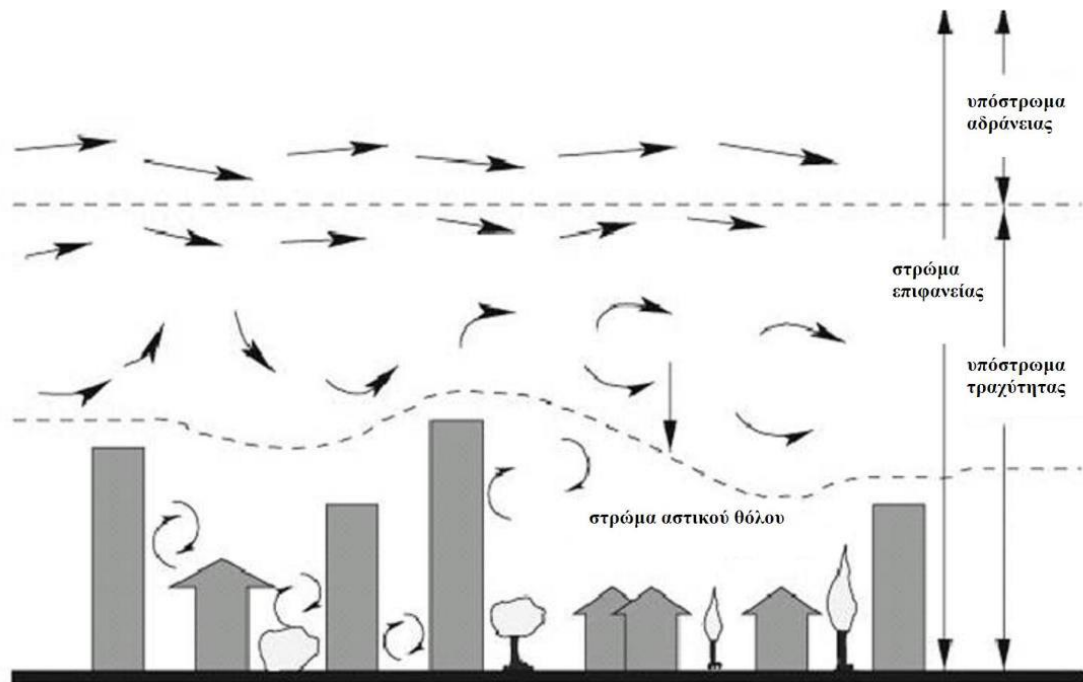
$$U = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2-5)$$

όπου το k είναι η σταθερά von Karman, η οποία συνήθως είναι 0.4, το u_* είναι η «ταχύτητα τριβής» (“friction velocity”), η οποία αναπαριστά την επίδραση της τάσης τ_0 του ανέμου στο έδαφος και ορίζεται ως,

$$u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{0.5} \quad (2-6)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, τ_0 είναι οι επιφανειακές τάσεις Reynolds, z_0 είναι το «μήκος τραχύτητας» του εδάφους και d είναι «ύψος μετατόπισης» (Cheng and Castro 2002, Barbas 2013). Οι Cheng and Castro (2002) αναφέρουν ότι το μήκος τραχύτητας μπορεί να προσδιοριστεί μόνο όταν υπάρχει ένα λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας.

Η περιοχή της ροής κάτω από το υπόστρωμα αδράνειας ονομάζεται υπόστρωμα τραχύτητας, εντός του οποίου η ροή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα στοιχεία τραχύτητας και κατά συνέπεια δεν είναι χωρικά ομοιογενής (Cheng and Castro 2002). Οι Cheng and Castro (2002) υποστηρίζουν ότι η κορυφή του υποστρώματος τραχύτητας είναι 2 με 5 φορές το ύψος του στοιχείου τραχύτητας από το έδαφος. Για αστικές επιφάνειες, το κατώτερο μέρος του υποστρώματος τραχύτητας αποτελεί το «στρώμα αστικού θόλου» το οποίο έχει πάχος ίσο με το μέσο ύψος των κτιρίων (h) ή με το «ύψος μετατόπισης», d .



Σχήμα 2-8 Διαχωρισμός του επιφανειακού στρώματος σε επιμέρους υποστρώματα (Barbas 2013).

Οι Cheng and Castro (2002) αναφέρουν ότι πάνω από μία αστική περιοχή, το υπόστρωμα τραχύτητας μπορεί να επεκταθεί έως ένα αρκετά μεγάλο ύψος και το κατ' επέκταση το υπόστρωμα αδράνειας να συμπιεστεί ανάμεσα στο υπόστρωμα τραχύτητας και το εξωτερικό στρώμα. Επίσης, αναφέρουν ότι το πάχος του υποστρώματος τραχύτητας είναι ένα ζήτημα υπό συζήτηση, καθώς υπάρχουν λίγες πληροφορίες πάνω στο χαρακτηρισμό της ροής εντός του. Με βάση άλλες παρατηρήσεις και μετρήσεις είναι πιθανό, όπως και το μήκος τραχύτητας z_0 , έτσι και το πάχος του υποστρώματος τραχύτητας, να εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, όπως το σχήμα και το μέγεθος των εμποδίων, τη διάταξη και την πυκνότητα των εμποδίων ως προς το συνολικό εμβαδό της περιοχής.

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής πραγματοποιήθηκαν υπολογιστικές προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις στην αεροσήραγγα για την επαλήθευση των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Επίσης, με τον τρόπο αυτό θα μπορέσουμε να δούμε τυχόν αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων και των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί πειραματικά η ροή γύρω από υπό κλίμακα γεωμετρία αστικής συστοιχίας εννέα κύβων στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου και θα γίνουν προσομοιώσεις για τη ροή γύρω από αστική συστοιχία, για τη φωτιά μεθανίου και για τη ροή γύρω από αστική συστοιχία παρουσία φωτιάς μεθανίου εντός του πεδίου.

3.1 Αριθμητική Προσέγγιση

3.1.1 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Η υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία φωτιάς στο πεδίο έγινε με τη χρήση του επιλυτή πεπερασμένων όγκων FireFOAM, ο οποίος είναι βασισμένος στο μοντέλο τύρβης μεγάλων δινών, LES. Ο λύτης αυτός είναι διαθέσιμος ως μια βιβλιοθήκη της γλώσσας C++ εντός του CFD πακέτου ελεύθερου λογισμικού OpenFOAM. Πρόκειται για μεταβατικό λύτη, ο οποίος ενσωματώνει υπομοντέλα για την περιγραφή διεργασιών όπως μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, πυρόλυση, καύση και τυρβώδη φαινόμενα (Maragkos and Merci 2017, Ghaderi, Ghodrati et al. 2021). Παρακάτω εφαρμόζεται το χωρικό φίλτρο Favre στις εξισώσεις Navier-Stokes για συμπιεστή ροή η οποίες παρουσιάζονται ως ένα σύστημα εξισώσεων μεταφοράς μάζας, ορμής, ενέργειας και κλασμάτων μάζας χημικών ειδών.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u}) = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \left[(\mu + \mu_{sgs}) \left(\nabla \tilde{u} + (\nabla \tilde{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{u}) I \right) \right] + \bar{\rho} g \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{Y}_k) = \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_k + \frac{\nu_{sgs}}{Sc_t} \right) \nabla \tilde{Y}_k \right] + \bar{\omega}_k''' , \quad (k = 1, \dots, N_s - 1) \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{h}_s) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_{th} + \frac{v_{sgs}}{Pr_t} \right) \nabla \tilde{h}_s \right] - \nabla \cdot \bar{q}_r'' + \bar{q}_c''' \quad (3-4)$$

Στις εξισώσεις αυτές τα μεγέθη $\bar{\rho}$, \bar{p} , \tilde{u} , \tilde{h}_s , \tilde{Y}_k και Sc_t αφορούν την πυκνότητα, την πίεση, ταχύτητα, την αισθητή ενθαλπία, το κλάσμα μάζας των χημικών ειδών και τον τυρβώδη αριθμό Schmidt, αντίστοιχα. Τα σύμβολα $\tilde{\quad}$ και $\bar{\quad}$ αναπαριστούν το χωρικό φίλτρο “Favre” (Favre 1983) που εφαρμόζεται στα μεγέθη. Το I είναι ο τανυστής ταυτότητας, το $\bar{\omega}_k'''$ είναι ο ρυθμός αντίδρασης των χημικών ειδών, το D_{th} είναι η θερμική διαχυτότητα και Pr_t είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl. Το μέγεθος \bar{q}_r'' είναι η συνολική ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας (W/m^2) του αέριου μείγματος και το \bar{q}_c''' είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου λόγω της καύσης και εκφράζεται ως ο ρυθμός αντίδρασης του καυσίμου επί τη θερμότητα της καύσης, ΔH_c , με την παραδοχή της τέλει καύσης ($\chi=1$).

$$\bar{q}_c''' = \bar{\omega}_F''' \cdot \Delta H_c \quad (3-5)$$

Ο συντελεστής διάχυσης μάζας, D_k , υπολογίζεται ως:

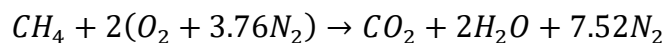
$$D_k = \frac{\mu}{\bar{\rho} Sc_c} \quad (3-6)$$

Το μοντέλο υποπλεγματικής κλίμακας για τη μοντελοποίηση της τύρβης που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο Smagorinsky σταθερού συντελεστή. Το υποπλεγματικής κλίμακας δυναμικό ιξώδες υπολογίζεται ως,

$$\mu_{sgs} = \bar{\rho} (C_s \Delta)^2 |\tilde{S}| \quad (3-7)$$

Όπου το C_s είναι σταθερά του μοντέλου, Δ είναι το μέγεθος του φίλτρου του LES και $\tilde{S} = \frac{1}{2} (\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T)$ είναι ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης.

Το μοντέλο της καύσης το οποίο εφαρμόζεται χρησιμοποιεί μονοβηματική, απείρως ταχεία, μη αναστρέψιμη χημική αντίδραση για το μεθάνιο (CH_4) (Maragkos and Merci 2017):



το οποίο συνδυάζεται με ένα μοντέλο διάχυσης τύρβης (EDM – Eddy Dissipation Model). Εντός του μοντέλου EDM, ο ρυθμός αντίδρασης μάζας καυσίμου υπολογίζεται ως:

$$\overline{\dot{\omega}}_F''' = C_{EDC} \frac{\bar{\rho}}{\tau_{EDC}} \min\left(\tilde{Y}_f, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{r_S}\right) \quad (3-8)$$

Όπου το C_{EDC} είναι συντελεστής του μοντέλου με τιμή ίση με 4 και το τ_{EDC} είναι η χρονική κλίμακα ανάμειξης. Τα \tilde{Y}_f , \tilde{Y}_{O_2} και r_S είναι το κλάσμα μάζας του καυσίμου, το κλάσμα μάζας οξυγόνου και ο στοιχειομετρικός λόγος μάζας οξυγόνου – καυσίμου, αντίστοιχα.

Ένα μοντέλο ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται συχνά, στο οποίο, η ένταση της ακτινοβολίας αναλύεται ως συνάρτηση του χώρου και της γωνιακής διεύθυνσης, λαμβάνεται μέσω της επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς ακτινοβολίας (RTE- Radiative transfer equation) μέσω του μοντέλου πεπερασμένων όγκων διακριτών συνιστωσών (fvDOM - Finite volume discrete ordinates model) το οποίο είναι υπεύθυνο για την εξασθένιση και επαύξηση της ακτινοβολίας μέσω απορρόφησης και εκπομπής, αντίστοιχα:

$$\frac{\partial \tilde{I}}{\partial s} = \tilde{\kappa} \tilde{I}_b - \tilde{\kappa} \tilde{I} \quad (3-9)$$

όπου το \tilde{I} είναι η ένταση της ακτινοβολίας, s είναι η στερεή γωνία, \tilde{I}_b είναι η ένταση της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος και $\tilde{\kappa}$ είναι ο συντελεστής απορρόφησης. Μέσω της υπόθεσης του «γκρίζου αερίου» ($\kappa_p = \kappa$) και λαμβάνοντας υπόψη οπτικά λεπτή φλόγα, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τη σκέδαση, η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας υπολογίζεται ως:

$$\nabla \cdot \overline{\dot{q}}_r'' = \tilde{\kappa}_p \left(4\pi \tilde{I}_b - \int_{4\pi} \tilde{I} d\Omega \right) = \tilde{\kappa}_p (4\sigma \tilde{T}^4 - \tilde{G}), \quad (3-10)$$

όπου το $\tilde{\kappa}_p$ είναι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του Planck, σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann, T είναι η φιλτραρισμένη θερμοκρασία και G είναι η συνολική ακτινοβολία. Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του Planck για τα χημικά είδη εξαρτάται από τη θερμοκρασία και υπολογίζεται από το μοντέλο

RADCAL. Δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο μοντέλο για την αιθάλη καθώς η παραγωγή αιθάλης από καύσης μεθανίου δεν είναι σημαντική (Drysdale 2011).

3.1.2 Αριθμητικά Χαρακτηριστικά των Προσομοιώσεων

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των αριθμητικών προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν, όσον αφορά την προσομοίωση της ροής γύρω από την αστική συστοιχία, του ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου και της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου εντός της.

3.1.2.1 Υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από αστική συστοιχία

Η υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από την αστική συστοιχία προσομοιώθηκε για 150 sec με σταθερό χρονικό βήμα ίσο με 5×10^{-4} με μέγιστο αριθμό Courant, ίσο με 0.6. Για την αρχικοποίηση του πεδίου ροής, έγινε μία προσομοίωση RANS με το μοντέλο k-epsilon για τη μείωση του συνολικού χρόνου για την επίτευξη στατιστικής σταθερότητας της ροής γρηγορότερα (Vasaturo, Kalkman et al. 2018). Οι εξισώσεις αναπτύσσονται στο χρόνο μέσω ενός δευτέρας τάξης αριθμητικού σχήματος Crank Nicolson με συντελεστή 0.9, ο οποίος αφορά τη μίξη των σχημάτων Crank Nicolson και Euler. Όλες οι ποσότητες αναθέτονται στα κέντρα των κελιών με τις ταχύτητες να παρεμβάλλονται γραμμικά στις επιφάνειές τους. Για τους όρους συναγωγής επιλέχθηκε το σχήμα πρώτης τάξης upwind. Για τη μεταφορά βαθμωτών ποσοτήτων καθώς και για τους όρους διάχυσης χρησιμοποιήθηκε ένα σχήμα κεντρικών διαφορών. Για τη σύζευξη της πίεσης και της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PISO. Η εξίσωση της πίεσης λύνεται από έναν GAMG (Geometric Algebraic Multi-Grid) λύτη με έναν Gauss Seidel “smoother”.

3.1.2.2 Υπολογιστική προσομοίωση του ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου

Η υπολογιστική προσομοίωση του ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου (CH_4) προσομοιώθηκε για 50 sec με μεταβλητό χρονικό βήμα, το οποίο οριοθετείται από το μέγιστο αριθμό Courant, ο οποίος είναι ίσος με 0.9. Οι εξισώσεις αναπτύσσονται στο χρόνο μέσω ενός δευτέρας τάξης αριθμητικού σχήματος

Crank Nicolson με συντελεστή 0.5, ο οποίος αφορά τη μίξη των σχημάτων Crank Nicolson και Euler. Όλες οι ποσότητες αναθέτονται στα κέντρα των κελιών με τις ταχύτητες να παρεμβάλλονται γραμμικά στις επιφάνειές τους. Για τους όρους συναγωγής επιλέχθηκε το σχήμα πρώτης τάξης upwind. Για τους όρους μεταφοράς μάζας των χημικών ειδών, καθώς και για την ενθαλπία χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό σχήμα κεντρικών διαφορών κάνοντας χρήση του σχήματος upwind ως “limiter”. Για τη μεταφορά βαθμωτών ποσοτήτων καθώς και για τους όρους διάχυσης χρησιμοποιήθηκε ένα σχήμα κεντρικών διαφορών. Για τη σύζευξη της πίεσης και της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PISO. Η εξίσωση της πίεσης λύνεται από έναν GAMG (Geometric Algebraic Multi-Grid) λύτη με έναν Gauss Seidel “smoother”.

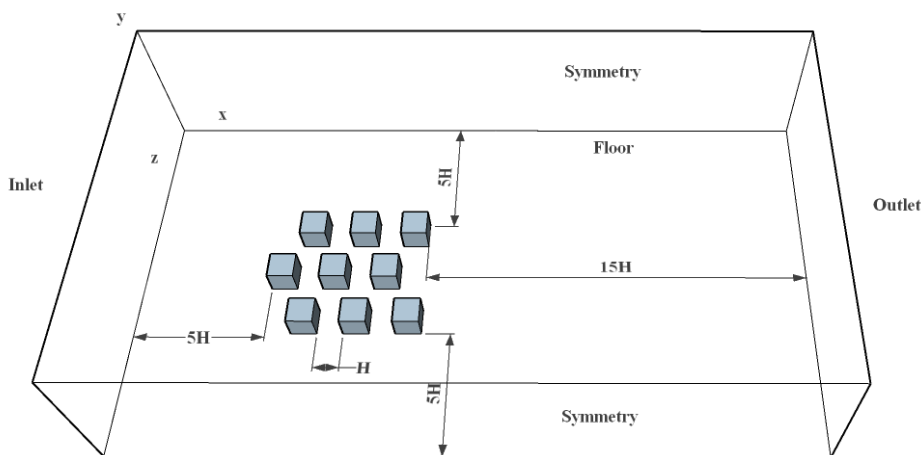
3.1.2.3 Υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου στο πεδίο

Η υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου εντός του πεδίου προσομοιώθηκε για 100 sec με μεταβλητό χρονικό βήμα, το οποίο οριοθετείται από το μέγιστο αριθμό Courant, ο οποίος είναι ίσος με 0.6. Οι εξισώσεις αναπτύσσονται στο χρόνο μέσω ενός δευτέρας τάξης αριθμητικού σχήματος Crank Nicolson με συντελεστή 0.5, ο οποίος αφορά τη μίξη των σχημάτων Crank Nicolson και Euler. Όλες οι ποσότητες αναθέτονται στα κέντρα των κελιών με τις ταχύτητες να παρεμβάλλονται γραμμικά στις επιφάνειές τους. Για τους όρους συναγωγής επιλέχθηκε το σχήμα πρώτης τάξης upwind. Για τους όρους μεταφοράς μάζας των χημικών ειδών, καθώς και για την ενθαλπία χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό σχήμα κεντρικών διαφορών κάνοντας χρήση του σχήματος upwind ως “limiter”. Για τη μεταφορά βαθμωτών ποσοτήτων καθώς και για τους όρους διάχυσης χρησιμοποιήθηκε ένα σχήμα κεντρικών διαφορών. Για τη σύζευξη της πίεσης και της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PISO. Η εξίσωση της πίεσης λύνεται από έναν GAMG (Geometric Algebraic Multi-Grid) λύτη με έναν Gauss Seidel “smoother”.

3.1.3 Υπολογιστικό Χωρίο

Το υπολογιστικό χωρίο αποτελεί τον πεπερασμένο χώρο στον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί όλων των φαινομένων και μεγεθών της ροής. Η επιλογή του θα πρέπει να αντιπροσωπεύει το προς επίλυση πρόβλημα και η επιλογή των διαστάσεων πρέπει να γίνει έτσι ώστε να μην επηρεάζουν τη ροή. Για το λόγο αυτό και ανάλογα το εκάστοτε είδος ροής ακολουθούνται τυπικές διαστάσεις από δημοσιεύσεις και βιβλιογραφία. Το υπολογιστικό πεδίο θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με την εξεταζόμενη γεωμετρία, ώστε να μπορούν να αναπτυχθούν επαρκώς τα φαινόμενα ροής, αλλά και τόσο ώστε να μην καταναλώνονται υπολογιστικοί πόροι και η προσομοίωση να είναι ασύμφορη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώνεται μια αστική χαράδρα, οι διαστάσεις της οποίας ορίζονται παρακάτω. Οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου (βλ. Σχήμα 3-1) επιλέχθηκαν σύμφωνα με τους Franke and Baklanov (2007) και τους Tominaga, Mochida et al. (2008). Κάθε διάσταση του υπολογιστικού πεδίου, ορίζεται με αναλογία ως προς το κτιριακό ύψος, το οποίο είναι $H=6m$. Οι διαστάσεις της συστοιχίας είναι $6H$ μήκος και $5H$ πλάτος. Οι αποστάσεις ανάμεσα στα κτίρια, ισούνται με ένα κτιριακό ύψος, H . Το υπολογιστικό χωρίο έχει διαστάσεις $26H$ μήκος, $15H$ πλάτος και $6H$ ύψος. Η απόσταση ανάντη της συστοιχίας έως την είσοδο είναι $5H$, η απόσταση κατάντη της συστοιχίας έως την έξοδο είναι $15H$ και τα πλευρικά πλάτη είναι $5H$ (Zheng, Montazeri et al. 2020).

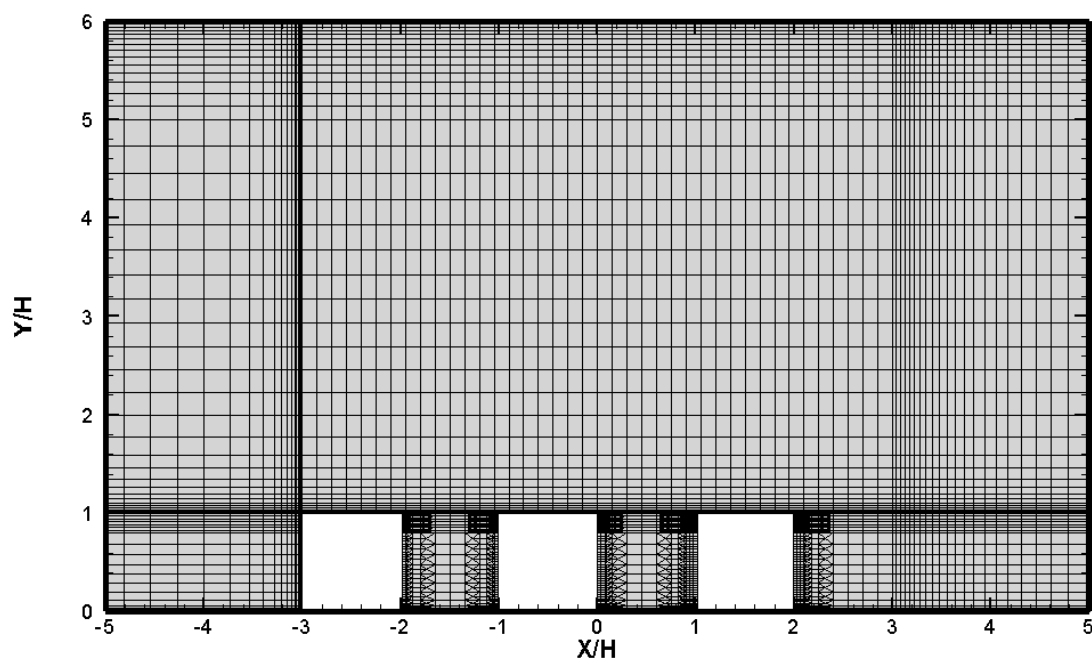


Σχήμα 3-1 Υπολογιστικό πεδίο με διαστάσεις X:26H, Y:6H, Z:15H.

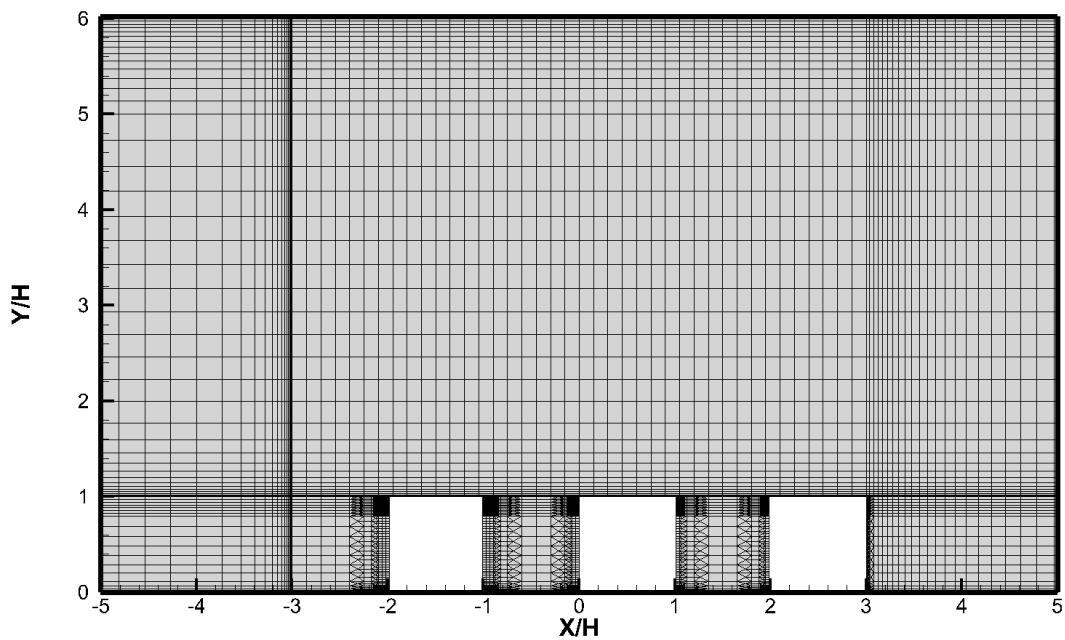
Για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων της ροής, όπως η εξίσωση της ορμής και του Poisson, οι οποίες δεν επιδέχονται αναλυτική λύση, πρέπει να γίνει διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου ώστε να επιλυθούν αριθμητικά. Η διακριτοποίηση αυτή γίνεται χωρίζοντας το πεδίο προς επίλυση σε επιμέρους μικρότερα χωρία.

Η διακριτοποίηση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους και εξαρτάται από την προς εξέταση γεωμετρία. Το πλέγμα αυτό μπορεί να είναι δομημένο ή αδόμητο.

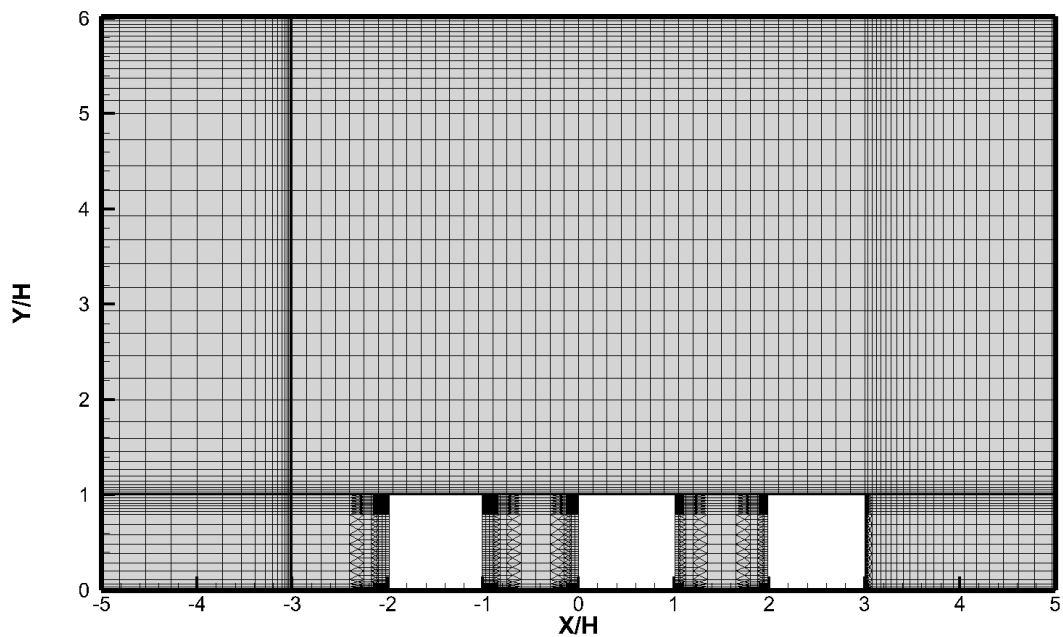
Στην παρούσα διπλωματική η διακριτοποίηση έγινε με δομημένο πλέγμα, λόγω της πλήρως ορθογωνικής γεωμετρίας. Στο Σχήμα 3-2, Σχήμα 3-3 και Σχήμα 3-4 παρουσιάζονται κατακόρυφα επίπεδα του υπολογιστικού χωρίου, το οποίο αποτελείται από 1.200.000 κελιά. Τα κατακόρυφα αυτά επίπεδα αφορούν την αστική χαράδρα και συγκεκριμένα τα επίπεδα συμμετρίας $Z/H=0$, $Z/H=6$, $Z/H=-6$, αντίστοιχα. Η κατανομή των κελιών έχει γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα στα σημεία ενδιαφέροντος και μικρότερη στα σημεία τα οποία είναι μακριά από τη γεωμετρία.



Σχήμα 3-2 Κεντρικό κατακόρυφο επίπεδο του χωρίου για $Z/H=0$.



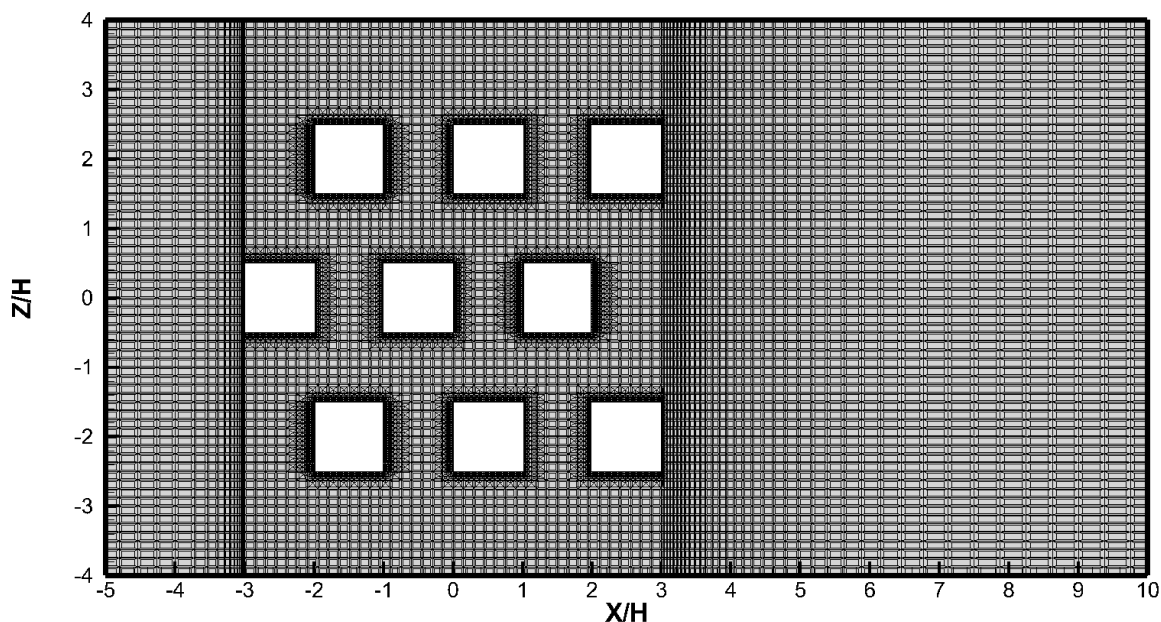
Σχήμα 3-3 Κατακόρυφο επίπεδο του χωρίου για $Z/H=6$.



Σχήμα 3-4 Κατακόρυφο επίπεδο του χωρίου για $Z/H=-6$.

Στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζεται ένα οριζόντιο επίπεδο του υπολογιστικού χωρίου όπως αυτό έχει διακριτοποιηθεί και παρατηρείται ότι και στη Z διάσταση έχει γίνει πύκνωση του πλέγματος σε σημεία κοντά στη γεωμετρία, ώστε να λάβουμε όσο το δυνατό περισσότερες τιμές. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα κελιά είναι εξαέδρα το οποίο προέρχεται από το εργαλείο δημιουργίας πλέγματος

SnappyHexMesh το οποίο παρέχεται εντός του πακέτου ελεύθερου λογισμικού OpenFoam.



Σχήμα 3-5 Οριζόντιο επίπεδο του χωρίου σε ύψος $Y/H=0.5$.

3.2 Πειραματική Προσέγγιση

Παρακάτω παρουσιάζεται ο εξοπλισμός ο οποίος χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να πραγματοποιήσουμε το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας.

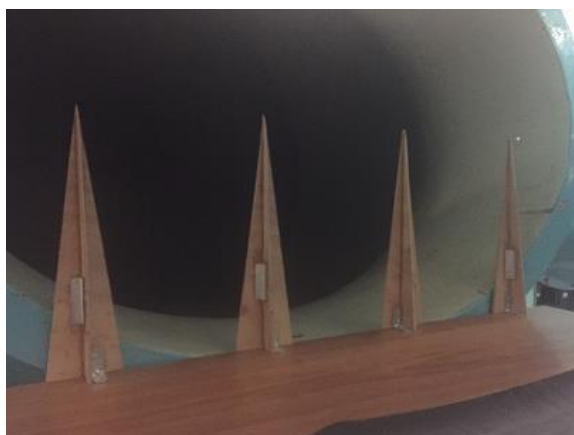
3.2.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Το πειραματικό μέρος της διπλωματικής αφορά την επανάληψη μετρήσεων της κατανομής πίεσης στα κτίρια της αστικής συστοιχίας όπως έγινε στη διδακτορική διατριβή του Vasilopoulos (2019). Οι μετρήσεις έγιναν εντός της αεροσήραγγας κλειστού κυκλώματος του Prandtl, τύπου Göttingen και ανοιχτού θαλάμου δοκιμών του εργαστηρίου αεροδυναμικής.



Σχήμα 3-6 Μικρομανόμετρο FCO 560.

Στο Σχήμα 3-6 απεικονίζεται το μικρομανόμετρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων κατανομής πίεσης. Ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας του είναι 10 Hz και δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικού αισθητήρα.



Σχήμα 3-7 Spires για τη δημιουργία οριακού στρώματος.

Στο Σχήμα 3-7 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των “spires”, τα οποία τοποθετούνται στην είσοδο του χώρου δοκιμών της αεροσήραγγας, για τη δημιουργία του οριακού στρώματος (Irwin 1981, Vasilopoulos 2019), καθώς η αεροσήραγγα του εργαστηρίου παρουσιάζει ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο. Το οριακό στρώμα αυτό θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ύψος της μακέτας (Σχήμα 3-8).



Σχήμα 3-8 Υπό κλίμακα γεωμετρία αστικής συστοιχίας.

Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται η υπό κλίμακα γεωμετρία της αστικής συστοιχίας που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις της κατανομής του συντελεστή πίεσης.

4 ΡΟΗ ΑΝΕΜΟΥ ΑΝΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεγάλων δινών (LES) που έγιναν για τη ροή γύρω από αστική συστοιχία. Συγκεκριμένα θα αναλυθούν οι αρχικές και οριακές συνθήκες της προσομοίωσης, οι συνθήκες ροϊκής επαναληψιμότητας, τα αδιάστατα προφίλ ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=0$ και στις θέσεις $X/H:-2.5$, $X/H:-1.5$, $X/H:0.5$ και $X/H:10.5$. Επίσης, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα ισοϋψή γραφήματα των οριζόντιων και κατακόρυφων επιπέδων του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας, καθώς και οι ροϊκές γραμμές. Τέλος, θα αναλυθούν τα διαγράμματα της κατανομής του συντελεστή πίεσης και θα παρουσιαστεί το διάγραμμα των στιγμιαίων μεταβολών των συνιστωσών της ταχύτητας για την επαλήθευση της ροής.

4.1 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες

Για την επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων είναι αναγκαίος ο ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών. Ο ορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό για ένα πρόβλημα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες πρέπει να οριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιπροσωπεύουν το προς επίλυση πρόβλημα ροής.

4.1.1 Προφίλ Ταχύτητας και Τύρβης στην Είσοδο

Στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης όσον αφορά την κατατομή της ταχύτητας εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος έχει εισαχθεί ένα λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας (Σχήμα 4-1), το οποίο συγκρίνεται με πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου (Vasilopoulos 2019), και ορίζεται πειραματικά από τους Richards and Hoxey (1993) ως:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (4-1)$$

$$u_* = \frac{\kappa U_{ref}}{\ln \left(\frac{z_{ref}}{z_0} \right)} \quad (4-2)$$

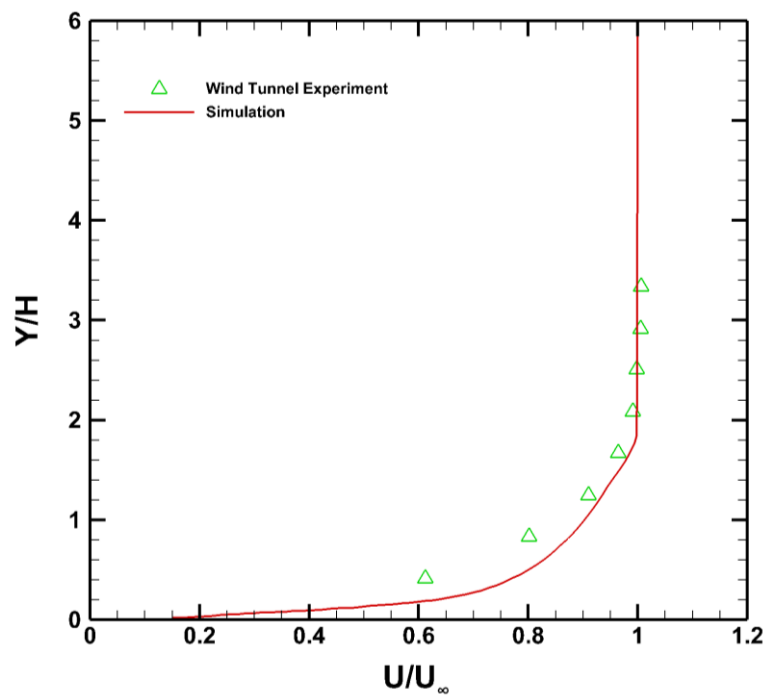
Όπου, η ταχύτητα του αέρα στο ύψος αναφοράς, $z_{ref} = 10 \text{ m}$ είναι $U_{ref} = 10,13 \text{ m/sec}$ και το ύψος τραχύτητας είναι $z_0 = 0,01 \text{ m}$.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια (Σχήμα 4-2) και ο ρυθμός σκέδασης ανά μονάδα όγκου (Σχήμα 4-3) στην είσοδο ορίζονται ως:

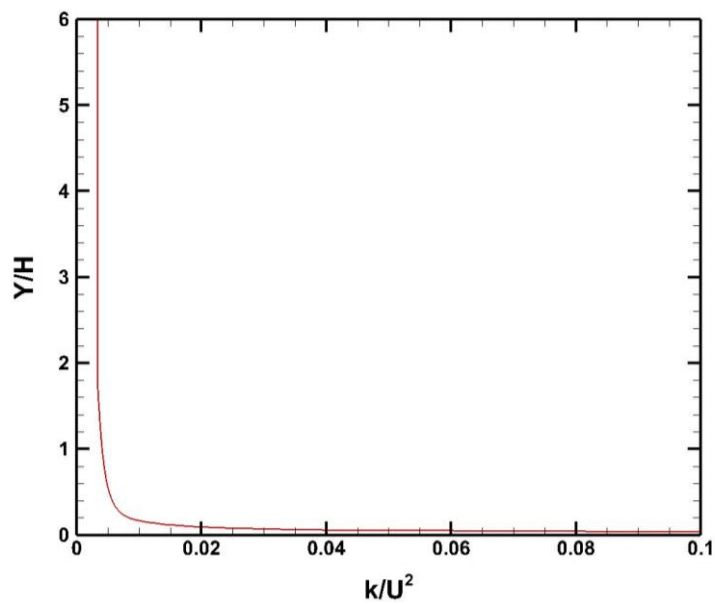
$$k(z) = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (4-3)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_\tau^3}{\kappa (z + z_0)} \quad (4-4)$$

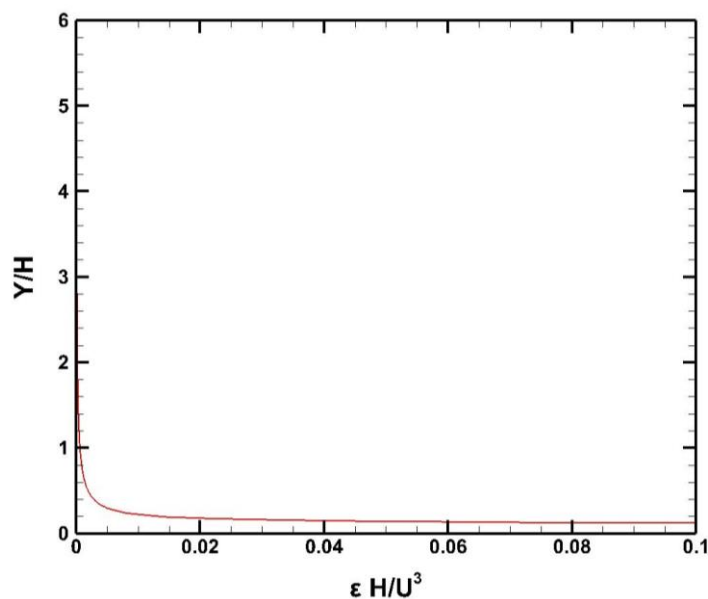
Όπου, το $C_\mu = 0,09$ είναι σταθερά του μοντέλου, $u_\tau = 0,63 \text{ m/sec}$ είναι η ταχύτητα τραχύτητας και $\kappa = 0,4$ είναι η σταθερά του von Karman.



Σχήμα 4-1 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα .



Σχήμα 4-2 Αδιάστατο προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης.

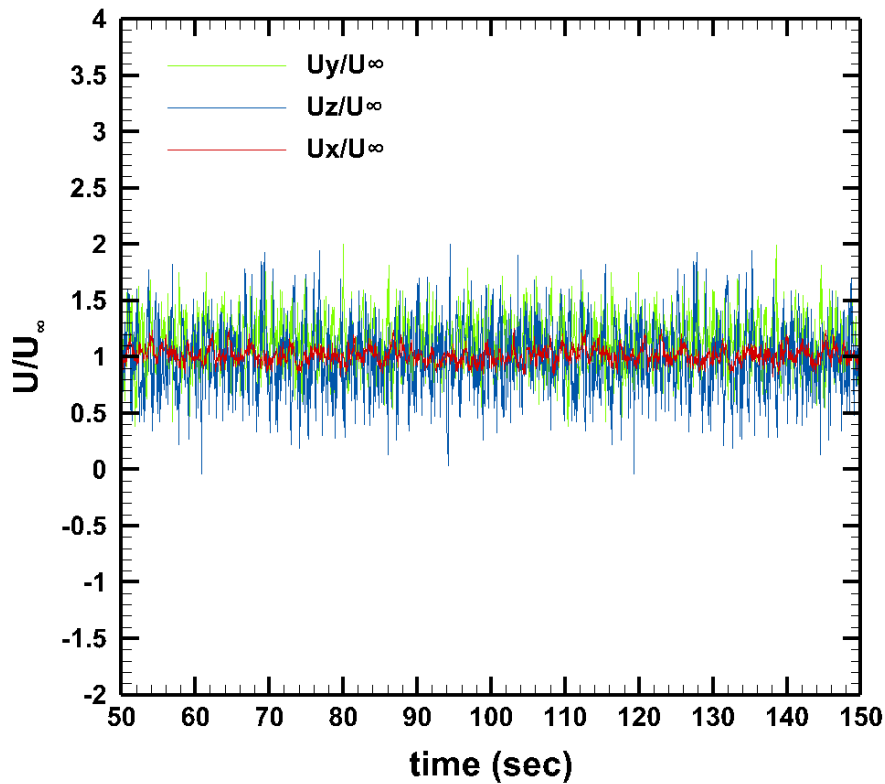


Σχήμα 4-3 Αδιάστατο προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης.

4.2 Συνθήκες Ροϊκής Επαναληψιμότητας

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το διάγραμμα των στιγμιαίων μεταβολών των συνιστωσών της ταχύτητας στο σημείο $X:-44m$, $Y:3m$, $Z:0$ και για χρονική περίοδο από 50 έως 150sec. Ο σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η απόδειξη ότι η ροή έχει φτάσει στο σημείο να επαναλαμβάνεται χρονικά, δηλαδή είναι

στατιστικά ανεξάρτητη. Με την απόδειξη αυτή θα έχουμε κατάλληλες συνθήκες ώστε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα που είναι η ένταξη φωτιάς λίμνης μεθανίου στο εδραιωμένο πεδίο.

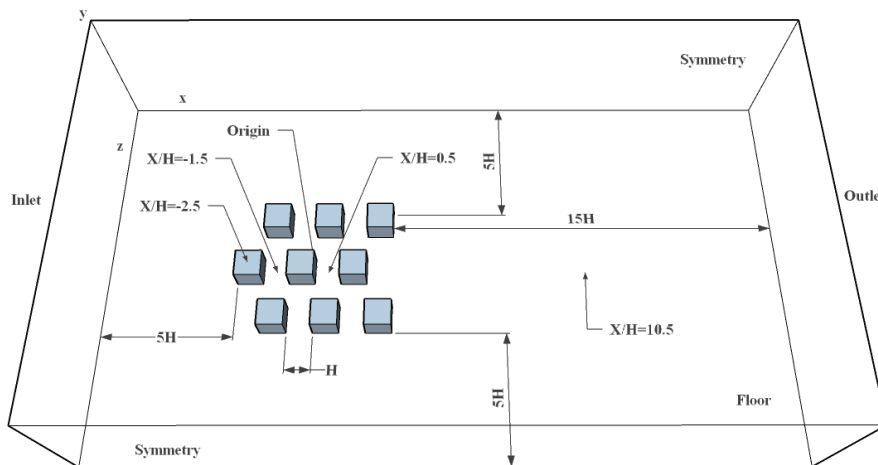


Σχήμα 4-4 Στιγμιαίες μεταβολές της ταχύτητας για κάθε συνιστώσα ($U_x/U_\infty, U_y/U_\infty, U_z/U_\infty$) στο σημείο $X:-44m, Y:3m, Z:0$ για τη χρονική περίοδο από 50 έως 100 sec.

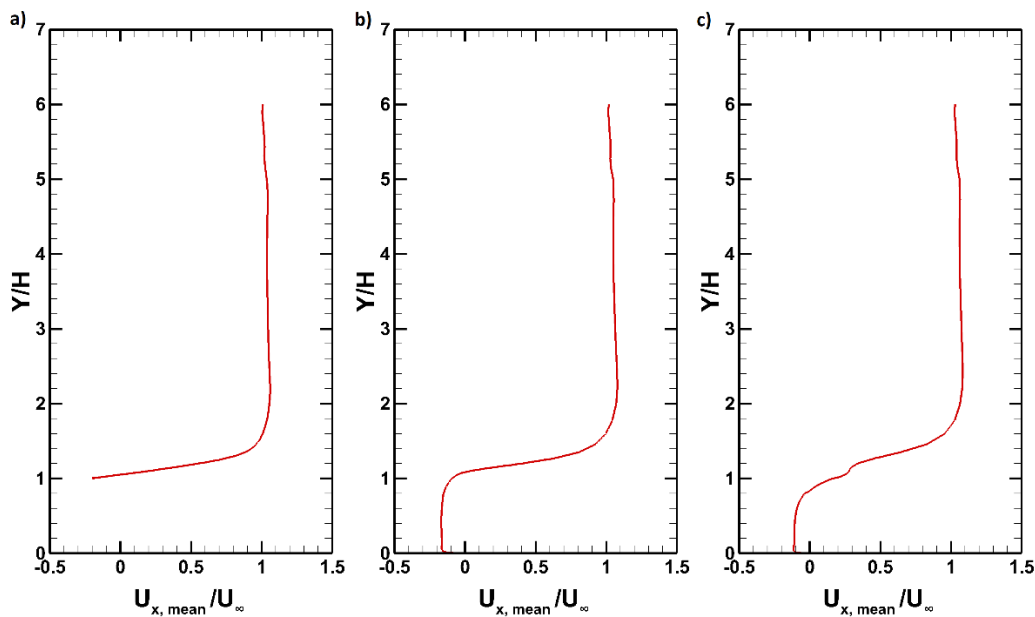
Στο Σχήμα 4-4 παρατηρούμε ότι η ροή έχει φτάσει σε συνθήκες επαναληψιμότητας και το πεδίο έχει εδραιωθεί. Για περαιτέρω διερεύνηση έχουν υπολογιστεί για το διάστημα από 50 έως 150 sec οι χρονικές μέσες τιμές της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής, U_x/U_∞ . Οι τιμές αυτές στο σημείο $X:-44m, Y:3m, Z:0$ για τη χρονική περίοδο από 50 έως 75 sec είναι 1.0196, από 75 έως 100sec είναι 1.0069, από 100 έως 125 sec είναι 1.0211 και από 125 έως 150 sec είναι 1.0121.

4.3 Κατανομή της Ταχύτητας σε επιλεγμένες Θέσεις ανάμεσα στα Κτίρια

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αδιάστατα προφίλ της ταχύτητας, κατά τη διεύθυνση της ροής, σε διάφορες θέσεις εντός της συστοιχίας, καθώς και στο απόρρευμα αυτής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-5.

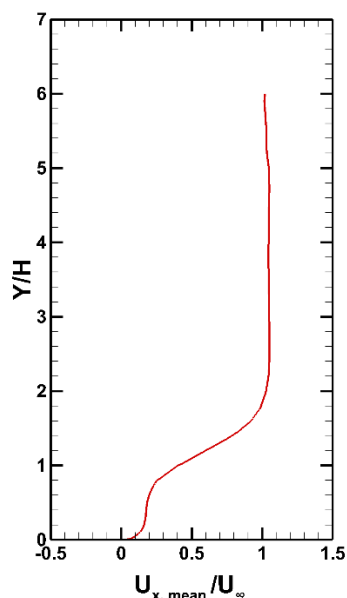


Σχήμα 4-5 Θέσεις των αδιάστατων προφίλ μέσης ταχύτητας στο υπολογιστικό πεδίο.



Σχήμα 4-6 Αδιάστατο προφίλ μέσης ταχύτητας εντός της συστοιχίας για $Z/H=0$ και α) $X/H=-2.5$, β) $X/H=-1.5$, γ) $X/H=0.5$.

Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζονται τα προφίλ αδιάστατης ταχύτητας, κατά τη διεύθυνση της ροής, στο επίπεδο συμμετρίας, $Z/H=0$ και εντός της αστικής συστοιχίας. Στο Σχήμα 4-6(a) παρουσιάζεται το προφίλ ταχύτητας στο μέσο της οροφής του πρώτου κύβου, όπου παρατηρείται η δημιουργία ενός οριακού στρώματος. Στο Σχήμα 4-6(b) παρουσιάζεται το αδιάστατο προφίλ ταχύτητας ενδιάμεσα του πρώτου και του δεύτερου κύβου. Παρατηρείται ότι μέχρι το ύψος του κτιρίου η ταχύτητα παραμένει σταθερή και αντίθετη με τη διεύθυνση της ροής. Το γεγονός αυτό αιτιολογείται λόγω των δύο ανακυκλοφοριών που έχουν δημιουργηθεί στο διάστημα ανάμεσα στον πρώτο και στον δεύτερο κύβο συμμετρικά ως προς το επίπεδο $Z/H=0$. Από το ύψος του κτιρίου και μέχρι, περίπου, τα δύο ύψη παρατηρούμε το λογαριθμικό προφίλ που δημιουργείται εντός του οριακού στρώματος. Στο Σχήμα 4-6(c) παρουσιάζεται το αδιάστατο προφίλ ταχύτητας ενδιάμεσα του δεύτερου και τρίτου κτιρίου. Παρατηρείται ότι έως το ύψος $0.9H$ η ταχύτητα είναι σταθερή και αντίθετη της διεύθυνσης της κύριας ροής καθώς εντός του διαστήματος των δύο κύβων δημιουργείται μια κλειστή ανακυκλοφορία όπως θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης, παρατηρείται κοντά στο ύψος του κτιρίου επανακόλληση του οριακού στρώματος.



Σχήμα 4-7 Αδιάστατο προφίλ μέσης ταχύτητας στο απόρρευμα της συστοιχίας για $Z/H=0$ και για $X/H=10.5$.

Στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζεται το αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής στο απόρρευμα της συστοιχίας. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται η επανακόλληση του οριακού στρώματος μετά την αποκόλλησή του λόγω της ροής πάνω από τη συστοιχία.

4.4 Ισοϋψή Γραφήματα Κατακόρυφων και Οριζόντιων Επιπέδων

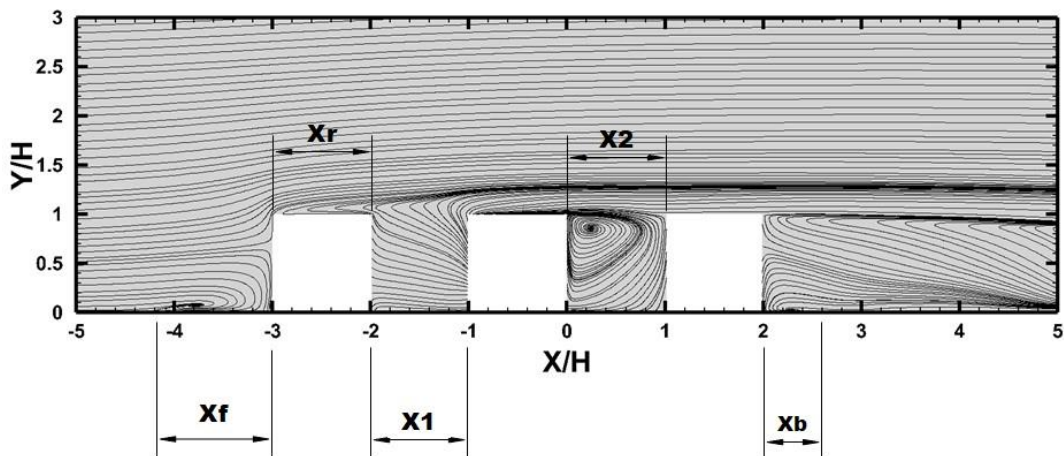
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα των κατακόρυφων και οριζόντιων επιπέδων $Z/H=0$, $Z/H=6$, $Z/H=-6$ και για $Y/H=0.008$ και $Y/H=0.5$ και αναλύονται οι ανακυκλοφορίες εντός της αστικής συστοιχίας σε κάθε ένα από τα επίπεδα.

Και στα τρία σχήματα, ανάντη του πρώτου κτιρίου, παρατηρείται η δημιουργία μιας ανακυκλοφορίας με μήκος 1.2 ύψη κτιρίου η οποία είναι χαρακτηριστικό στοιχείο της δίνης «πεταλοειδούς σχήματος» (Saeedi and Wang 2015) την οποία θα δούμε στο επόμενο υποκεφάλαιο. Επίσης, στην οροφή των πρώτων κτιρίων παρατηρείται δημιουργία ανακυκλοφορίας λόγω αποκόλληση της ροής εξαιτίας της ακμής του κτιρίου.

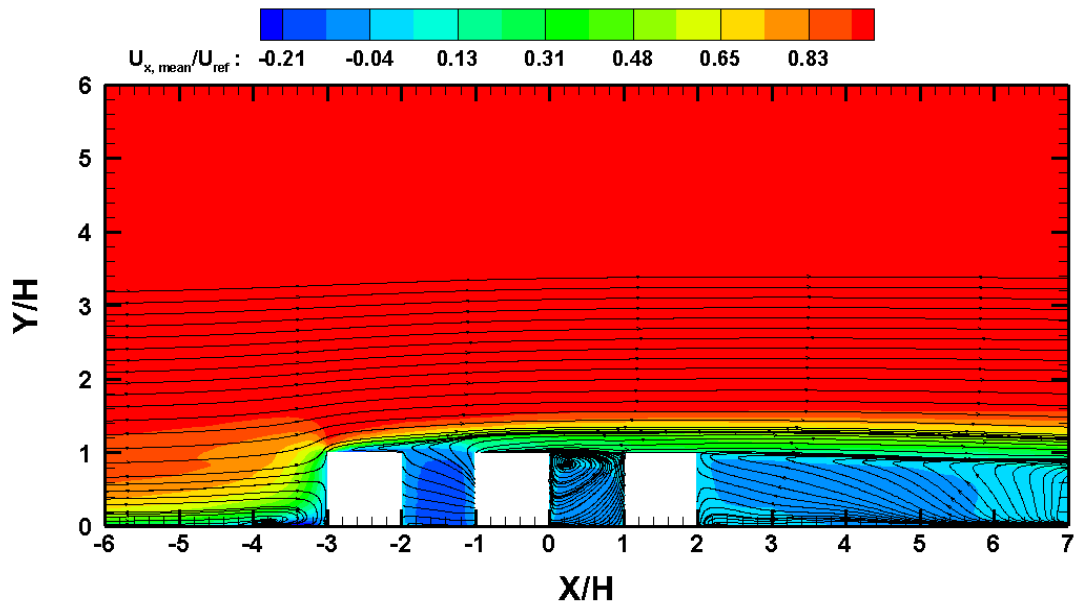
Η ροή ανάμεσα στα κτίρια μπορεί να χαρακτηριστεί και να κατηγοριοποιηθεί ως ροή απόξεσης, λόγω της απόστασης των κτιρίων μεταξύ τους και της μορφολογίας των δινών εντός τους.

Πίνακας 1 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0$.

Ανακυκλοφορία	Ανάντη του πρώτου κτιρίου X_f	Στην οροφή του πρώτου κτιρίου X_1	Ενδιάμεσα του δεύτερου και τρίτου κτιρίου X_2	Κατάντη του τρίτου κτιρίου X_b
Αδιάστατο Μήκος, X/H	1.2H	1H	1H	0.6H
Αδιάστατο Ύψος, Y/H	0.6H	0.2H	1H	0.2H



Σχήμα 4-8 Ροϊκές γραμμές της μέσης ροής στο επίπεδο συμμετρίας, $Z/H=0$, και χαρακτηριστικά μήκη των ανακυκλοφοριών.



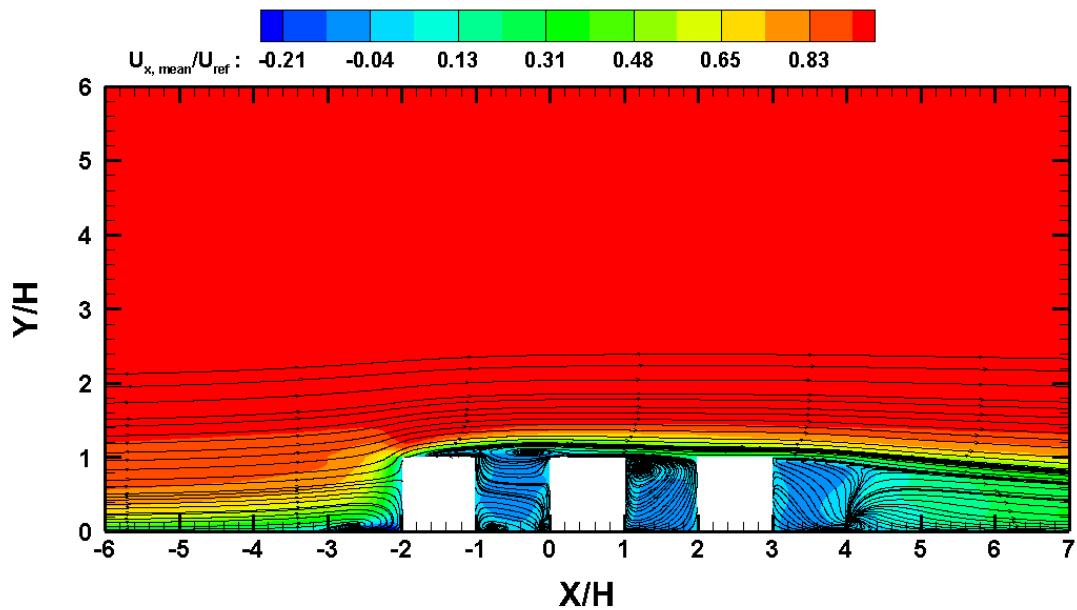
Σχήμα 4-9 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$.

Στο Σχήμα 4-9, το οποίο αφορά το επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$, παρατηρείται εντός του διαστήματος του πρώτου και του δεύτερου κτιρίου, μια ανακυκλοφορία η οποία προκύπτει από την επαλληλία των δύο κατακορυφών ανακυκλοφοριών οι οποίες θα φανούν καλύτερα στο επόμενο υποκεφάλαιο. Επίσης, παρατηρείται ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο κτίριο μία κλειστή ανακυκλοφορία η οποία έχει μήκος ενός κτιριακού ύψους, λόγω του περιορισμού της από τα κτίρια. Τελος, παρατηρείται μία δίνη κατάντη του τρίτου

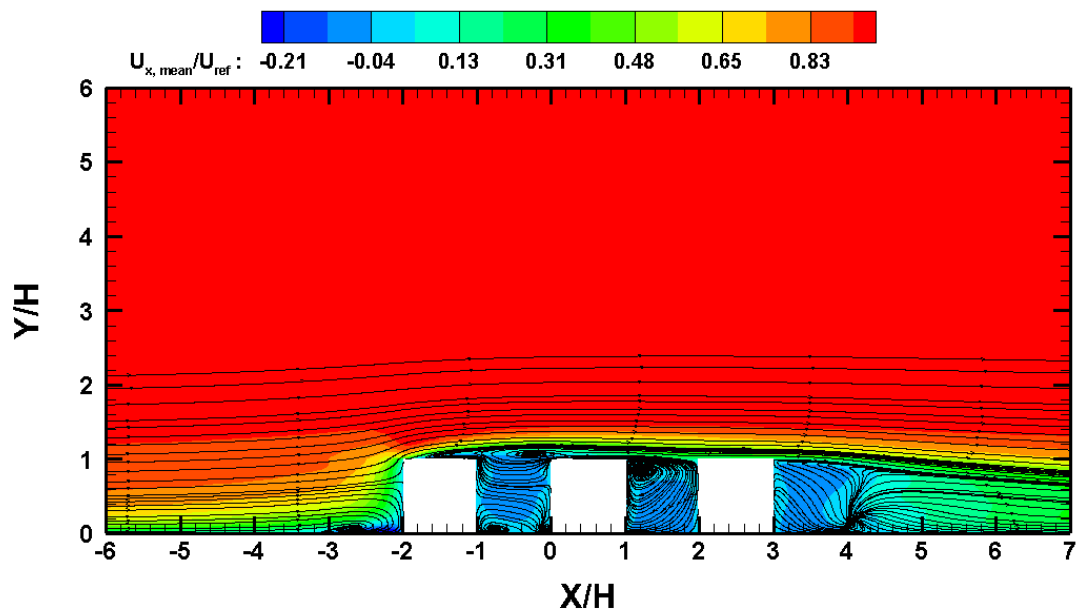
κτιρίου η οποία προκύπτει από την ανακυκλοφορία της ροής στο απόρευμα της συστοιχίας.

Πίνακας 2 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=6$ και $Z/H=-6$.

Ανακυκλοφορία	Ανάπτυξη του πρώτου κτιρίου	Στην οροφή του πρώτου κτιρίου	Ανάπτυξη του δεύτερου κτιρίου	Ενδιάμεσα του δεύτερου και τρίτου κτιρίου και άνω	Ενδιάμεσα του δεύτερου και τρίτου κτιρίου και κάτω
Αδιάστατο Μήκος, X/H	1.2H	0.8H	0.2H	1H	0.8H
Αδιάστατο Ύψος, Y/H	0.6H	0.2H	0.2H	0.4H	0.4H

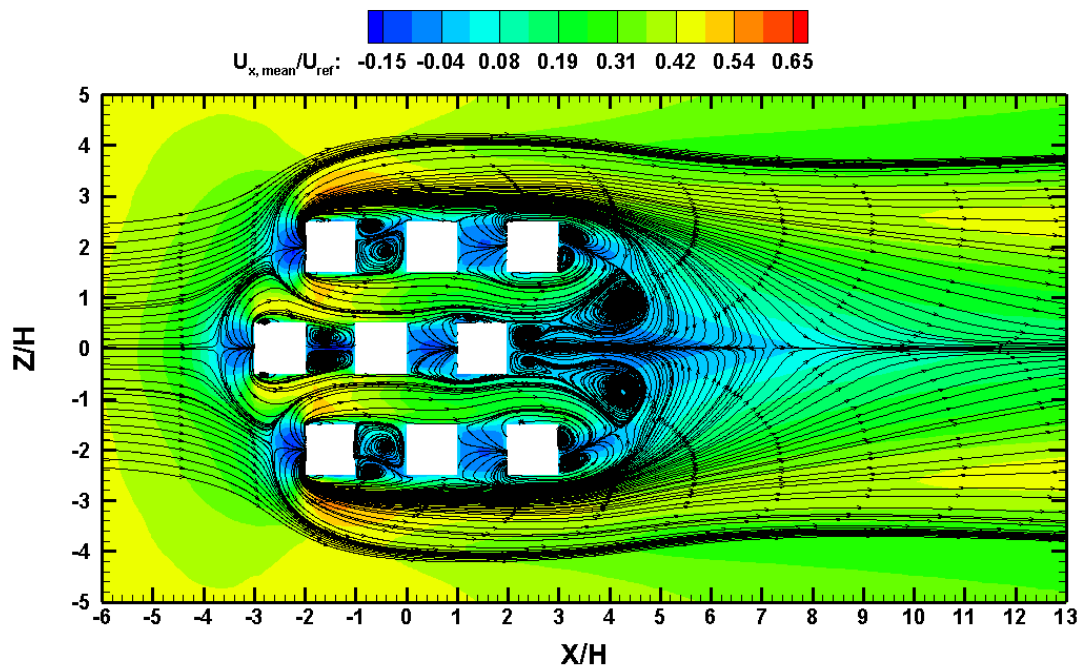


Σχήμα 4-10 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=6$.



Σχήμα 4-11 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=-6$.

Στο Σχήμα 4-10 και Σχήμα 4-11, τα οποία αφορούν τα επίπεδα $Z/H=6$ και $Z/H=-6$, αντίστοιχα, παρατηρείται ομοιότητα στη μορφολογία των δινών λόγω της συμμετρίας του πεδίου ταχύτητας γύρω από το επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$. Παρατηρείται εντός του διαστήματος του δεύτερου και τρίτου κτιρίου η αλληλεπίδραση δύο ανακυκλοφοριών και η δημιουργία μίας τρίτης ανάντη του τρίτου κτιρίου. Τέλος, παρατηρείται κατάντη του τρίτου κτιρίου, εντός του απορρεύματος της συστοιχίας, μία πηγή ροϊκών γραμμών η οποία αιτιολογείται από τα σχήματα του επόμενου υποκεφαλαίου. Οι διαστάσεις των ανακυκλοφοριών παρουσιάζονται για όλα τα σχήματα στον Πίνακας 1 και Πίνακας 2.

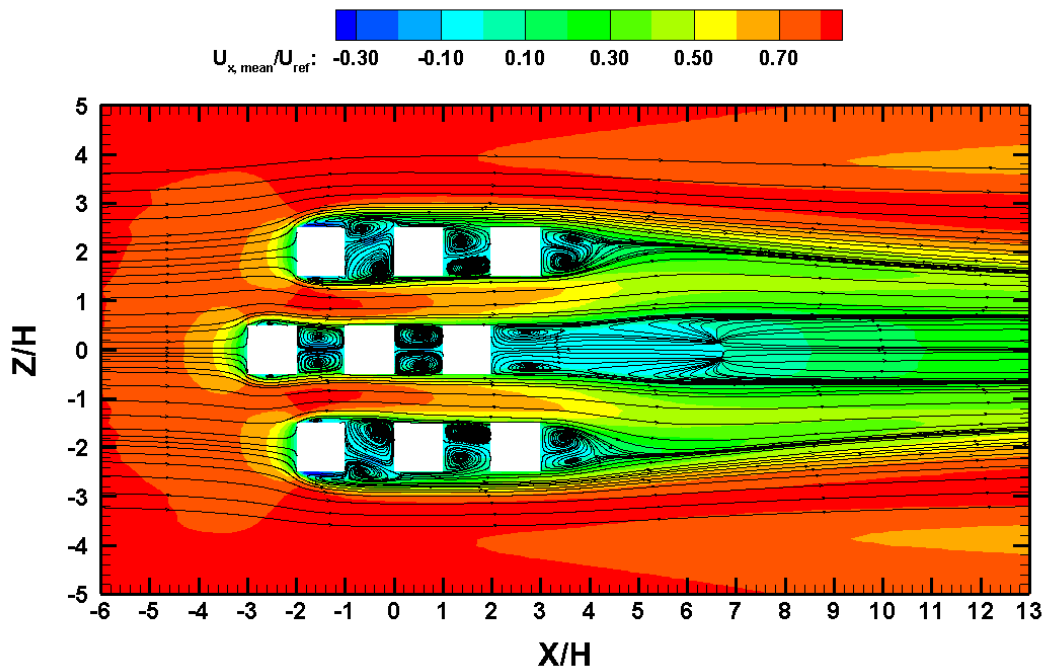


Σχήμα 4-12 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Y/H=0.008$.

Στο Σχήμα 4-12 το οποίο αφορά το κατακόρυφο επίπεδο $Y/H=0.008$, παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά των ανακυκλοφοριών και για τις τρεις οριζόντιες σειρές των κύβων. Υπάρχουν, όμως, κάποιες διαφορές λόγω της κατανομημένης μορφής της αστικής συστοιχίας οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Αρχικά, στους πρώτους κύβους οι οποίοι έρχονται σε επαφή με την κύρια ροή παρατηρούμε κάποιες χαρακτηριστικές περιοχές. Στην περιοχή ανάντη και πολύ κοντά στην πλευρά του κτιρίου παρατηρείται μία περιοχή αποκοπής της ροής λόγω της πρόσκρουσής της με τη γεωμετρία. Μπροστά από αυτή την περιοχή παρατηρείται μία ζώνη που αποτελείται από αρνητικές τιμές της ταχύτητας και έχει τοξοειδές σχήμα. Στις πλαϊνές πλευρές των κτιρίων παρατηρείται η δημιουργία δύο ζωνών επιτάχυνσης, όπου η ταχύτητα κατά τη διεύθυνση της ροής αυξάνεται λόγω της τοπικής επίδρασης της στένωσης που δημιουργείται από την παρουσία των κτιρίων. Στην κεντρική συστοιχία οι ζώνες αυτές επηρεάζονται από τις ροϊκές γραμμές των γειτονικών κτιρίων με αποτέλεσμα τη μικρότερη επιτάχυνση της ροής σε σχέση με αυτά. Στην άνω και κάτω συστοιχία και στις πλευρές που δεν γειτονεύουν με κτίρια η επιτάχυνση της ροής είναι μεγαλύτερη. Επίσης, στις πλαϊνές πλευρές των κτιρίων και κοντά

στο τοίχωμα δημιουργείται ένα ζεύγος μικρών ανακυκλοφοριών, κάτω από τις ζώνες επιτάχυνσης, οι οποίες δημιουργούνται από την αποκόλληση του οριακού στρώματος στην περιοχή αυτή. Κατόντη των κτιρίων δημιουργούνται ζεύγη κλειστών ανακυκλοφοριών των οποίων το μήκος περιορίζεται από τη γεωμετρία των κύβων. Στην κεντρική συστοιχία η ανακυκλοφορίες ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο κτίριο περιορίζονται, επίσης, από το ρεύμα αέρα ενδιάμεσα των συστοιχιών και είναι συμμετρικές ως προς το επίπεδο $Z/H=0$. Ενώ, για την άνω και κάτω συστοιχία, οι δίνες κατόντη των πρώτων κτιρίων δεν είναι συμμετρικές, επειδή η ροή εξωτερικά της συστοιχίας δεν επηρεάζεται από κάποιο εμπόδιο.

Ανάμεσα στο δεύτερο και στο τρίτο κτίριο παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά της ανακυκλοφορίας και στις τρεις σειρές κύβων. Στο απόρρευμα τα ζεύγη δινών κατόντη των κτιρίων αλληλεπιδρούν με τις δύο μεγάλες δίνες που δημιουργούνται λόγω της αλληλεπίδρασης της ροής ανάμεσα στα κτίρια και της ροής με αντίθετη προς την κύρια ροή ταχύτητα στο απόρρευμα.



Σχήμα 4-13 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Y/H=0.5$.

Στο Σχήμα 4-13, το οποίο αφορά το κατακόρυφο επίπεδο $Y/H=0.5$, δηλαδή μισό κτιριακό ύψος, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με το παραπάνω με τη διαφορά ότι η ροή ανάντη των πρώτων κτιρίων της συστοιχίας δεν παρουσιάζει ζώνη με τοξοειδές σχήμα. Επίσης, ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο κτίριο παρουσιάζεται ένα ζεύγος κλειστών ανακυκλοφοριών. Στο απόρρευμα η ροή έχει ομαλοποιηθεί και δεν παρατηρούνται οι δύο μεγάλες ανακυκλοφορίες του προηγούμενου σχήματος με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφοροποίηση στις δίνες κατάντη των τελευταίων κτιρίων.

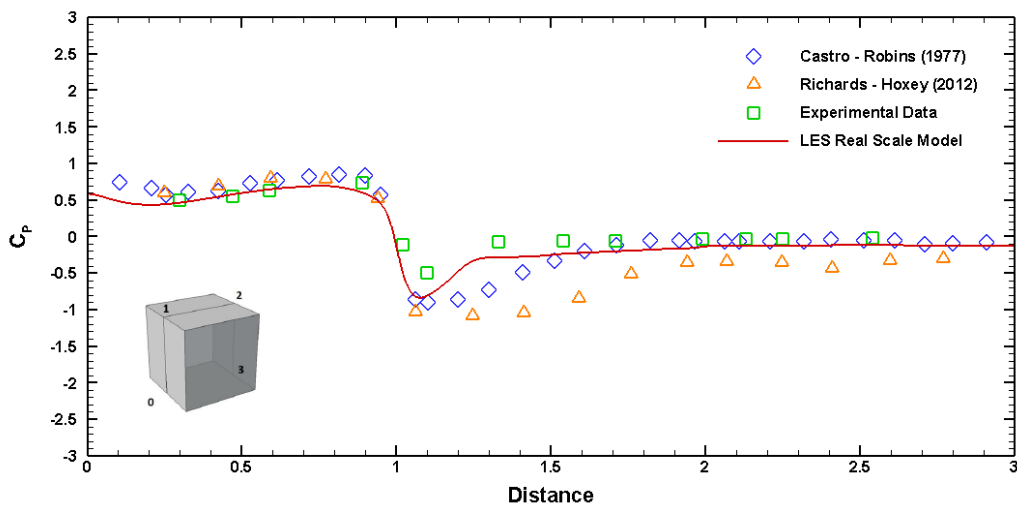
Οι ροϊκές γραμμές οι οποίες διέρχονται διαμέσου των κτιρίων αποκλίνουν προς την περιοχή της ανακυκλοφορίας κατάντη των τελευταίων κτιρίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την τοπική επιβράδυνση της ροής στην περιοχή αυτή.

4.5 Κατανομή του Συντελεστή Πίεσης σε Κτίριο της Συστοιχίας

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών προσομοιώσεων έγινε σύγκριση του συντελεστή πίεσης γύρω από το πρώτο κτίριο της κεντρικής συστοιχίας, δηλαδή στο επίπεδο $Z/H=0$, με πειραματικά δεδομένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-14. Ο συντελεστής πίεσης υπολογίζεται ως:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho_{ref} U_{\infty}^2} \quad (4-5)$$

όπου p είναι η στατική πίεση του αέρα στο τοίχωμα του κτιρίου και p_{ref} , ρ_{ref} , U_{∞} είναι η στατική πίεση, η πυκνότητα και η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-14 Κατανομή του συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο στο επίπεδο $Z/H=0$.

Στο Σχήμα 4-14 παρατηρούμε ότι στην ανάντη πλευρά του κτιρίου η στατική πίεση είναι μεγαλύτερη της στατικής πίεσης της ελεύθερης ροής λόγω της πρόσκρουσης της ροής με την πλευρά του κτιρίου. Στην οροφή του κτιρίου παρατηρείται πτώση του συντελεστή πίεσης, αρχικά, λόγω της αποκόλλησης της ροής στην ακμή του κύβου, και μετά σταδιακή αύξηση παραμένοντας στις αρνητικές τιμές. Στο πίσω μέρος του κτιρίου παρατηρείται ότι ο συντελεστής πίεσης παραμένει σταθερός και περίπου ίσος με το μηδέν, δηλαδή οι δύο στατικές πιέσεις είναι ίσες.

Τα πειραματικά δεδομένα αφορούν, αφενός, πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής με μικρομανόμετρο και, αφετέρου, δεδομένα από πειραματικές μετρήσεις συντελεστή πίεσης γύρω από κύβο των Castro and Robins (1977) και των Richards and Hoxey (2012). Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα πειραματικά δεδομένα. Η περιοχή που υπάρχει απόκλιση αφορά την οροφή του κτιρίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα των Castro and Robins (1977) αποκλίνουν κατά το πρώτο μισό της οροφής. Τα πειραματικά αποτελέσματα των Richards and Hoxey (2012) αποκλίνουν σχεδόν σε όλο το μήκος της οροφής του κτιρίου με τη μέγιστη απόκλιση να βρίσκεται σε απόσταση 0.25 κτιριακά ύψη από την ακμή της οροφής.

5 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΤΥΧΜΑΤΟΣ ΜΕ ΦΩΤΙΑ ΛΙΜΝΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ

Για την κατανόηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων της φωτιάς λίμνης μεθανίου εντός του πεδίου πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση μόνο με τη φωτιά εντός υπολογιστικού πεδίου κυλινδρικού σχήματος διαστάσεων $4m \times 6m$. Η επιλογή των διαστάσεων του υπολογιστικού πεδίου, έγινε βάση το άρθρο των Maragkos and Merci (2017).

Το μέγεθος της πηγής, καθώς και οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες επιλέχθηκαν με βάση τα πειράματα που έγιναν στις εγκαταστάσεις FLAME (Fire Laboratory for Accreditation of Modeling by Experiment) στα Sandia National Laboratories, στο Νέο Μεξικό από τους Tieszen, O'Hern et al. (2002) και Tieszen, O'Hern et al. (2004). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, για τη μέτρηση του πεδίου ταχύτητας εντός του πλουμίου της φωτιάς CH_4 με εύρος ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας από 1.59 MWatt έως 2.61 MWatt, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry). Παρόλα αυτά δεν έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας. Η αβεβαιότητα του πειράματος των μετρούμενων ποσοτήτων ήταν της τάξης του 20% και 30%, για τις μέσες και τυρβώδεις τιμές, αντίστοιχα. Είναι άξιο αναφοράς, ότι η αβεβαιότητα του πειράματος είναι σχετικά μεγάλη. Το γεγονός αυτό αιτιολογείται επειδή, γενικά, τα πειράματα τέτοιου είδους χρειάζονται μεγαλύτερα πεδία, κάνοντας τις συνθήκες του περιβάλλοντος λιγότερο προβλέψιμες, είναι μεγαλύτερης κλίμακας, δηλαδή μεγαλύτερες διάμετροι πηγής της φλόγας και άλλα.

Η πηγή μεθανίου έχει διάμετρο 1m και προσομοιώνεται μέσω του ορισμού του ρυθμού ροής μάζας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3. Οι συνθήκες ροής στην πηγή ήταν στρωτές καθώς η ταχύτητα ήταν μερικά cm/sec. Το πλέγμα (Σχήμα 5-1) πυκνώθηκε γύρω από την πηγή και μέχρι το ύψος μιας διαμέτρου και αποτελείται από περίπου 700.000 κελιά, έναντι των 2.38 εκατομμυρίων που χρησιμοποιούν οι Maragkos and Merci (2017), καθώς κρίθηκε σκόπιμο στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής να διατηρηθεί χαμηλό το υπολογιστικό κόστος για το σκοπό της επαλήθευσης.

Ο ρυθμός ροής μάζας \dot{m}'' και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας \dot{Q}_c (HRR) ορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις (Babrauskas 1983),

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D}) \quad (5-1)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}'' \Delta H_{c,eff} A_f \quad (5-2)$$

όπου, το \dot{m}''_{∞} , είναι ο ρυθμός απώλειας μάζας φωτιάς άπειρης διαμέτρου, το $\Delta H_{c,eff}$, είναι η θερμότητα της καύσης, A_f , είναι το εμβαδόν της επιφάνειας της φωτιάς, β είναι ο διορθωτής μέσου μήκους ακτίνας και k είναι ο συντελεστής απορρόφησης-εξάλειψης.

Πίνακας 3 Αρχικές και οριακές συνθήκες του πειράματος FLAME και της προσομοίωσης.

<i>Test</i>	<i>Fuel</i>	<i>D</i>	\dot{m}''_{fuel}	\dot{Q}_c	T_{fuel}	T_{∞}	P_{∞}
		(m)	(kg/sec)	(MWatt)	(K)	(K)	(kPa)
#24	CH ₄	1.0	0.053	2.07	286	290	81.0

Σύμφωνα με τους Maragkos and Merci (2017) για την ακριβή πρόβλεψη της δημιουργίας της αστάθειας στη βάση της πηγής και για τη σωστή συχνότητα παφλασμού θα πρέπει το μέγεθος του πλέγματος κοντά στην πηγή να είναι επαρκώς μικρό, δηλαδή κάτω από 1.5cm. Το μέγεθος του πλέγματος μπορεί να εκφραστεί ως αδιάστατο, αν ορίσουμε έναν δείκτη ανάλυσης πλουμίου, PRI (Plume Resolution Index), εκφράζοντας τον αριθμό των κελιών του πλέγματος, μήκους Δx (m), που περιλαμβάνονται εντός της χαρακτηριστικής διαμέτρου της φωτιάς, D^* , που ορίζεται ως:

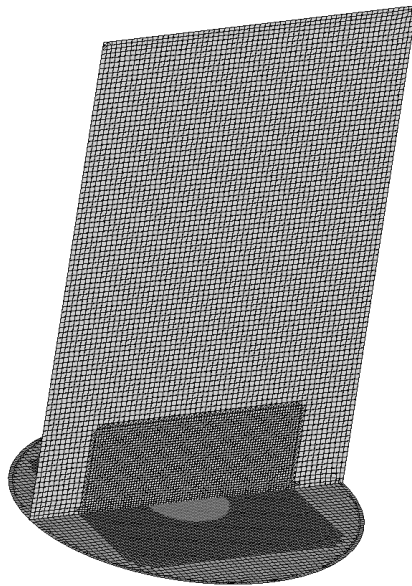
$$PRI = \frac{D^*}{\Delta x} \quad (5-3)$$

με τη χαρακτηριστική διάμετρο να ορίζεται ως (McGrattan, Floyd et al. 2003),

(5-4)

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

όπου, το \dot{Q} (kW) είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, το ρ_{∞} (kg/m^3) είναι η πυκνότητα του περιβάλλοντος, c_p ($kJ/kg \cdot K$) είναι η θερμοχωρητικότητα, T_{∞} (K) είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, g (m/s^2) είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και Δx (m) είναι το πλάτος του κελιού του πλέγματος στην περιοχή της πηγής. Όσο πιο μεγάλο είναι το PRI τόσο καλύτερα επιλύεται η δυναμική της φωτιάς στην αριθμητική προσομοίωση, αλλά δεν αντικαθιστά τη μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος. Στη βιβλιογραφία, τιμές του PRI από 5-15 δίνουν επαρκή ακρίβεια με έναν ικανοποιητικό υπολογιστικό χρόνο για πολλά σενάρια φωτιάς. Τιμές πάνω από 16 έχουν χρησιμοποιηθεί όταν προσομοιώνονται σενάρια με πλούμια από πυρκαγιά και τιμές πάνω από 40, έχει αναφερθεί ότι είναι αρκετές για την προσομοίωση τυρβώδους ανωστικού πλουμίου ηλίου διαμέτρου 1m (Chung and Devaud 2008, Maragkos and Merci 2017). Για τη δική μας περίπτωση, όπου στην περιοχή του πλουμίου, έχουμε πλάτος κελιού $\Delta x = 0,032 m$ και χαρακτηριστική διάμετρο φλόγας $D^* = 1,33 m$, η τιμή του PRI είναι 41.5. Το μέγεθος αυτό του πλέγματος δε μπορεί να αποδώσει πλήρως την ανάμειξη σε μικρές κλίμακες, οπότε οι θερμοκρασίες υποεκτιμούνται, έχοντας ως αποτέλεσμα μικρότερες κλίσεις της πυκνότητας.



Σχήμα 5-1 Υπολογιστικό πλέγμα για την επαλήθευση της φωτιάς μεθανίου.

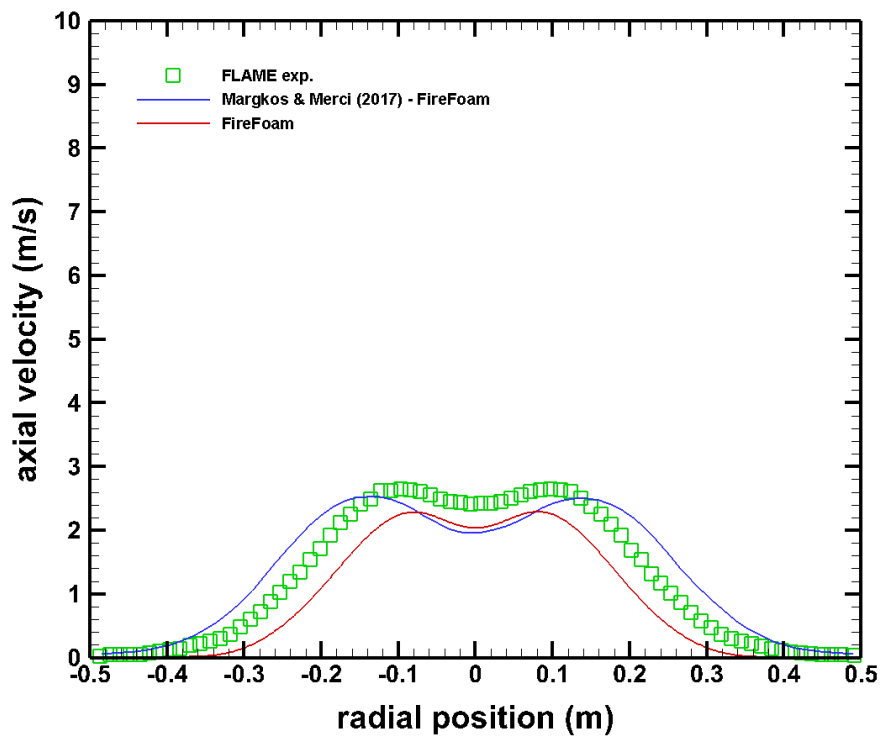
5.1 Αξονικές Ταχύτητες στην περιοχή του Πλουμίου

Οι αξονικές ταχύτητες στην περιοχή του πλουμίου της φωτιάς παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-2, Σχήμα 5-3 και Σχήμα 5-4 για διαφορετικά ύψη 0.3m, 0.5m και 0.9m, αντίστοιχα. Οι ταχύτητες που προκύπτουν από την υπολογιστική μας προσομοίωση συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα του πειράματος FLAME (Tieszen, O'Hern et al. 2002, Tieszen, O'Hern et al. 2004) και με την υπολογιστική προσομοίωση των Maragkos and Merci (2017).

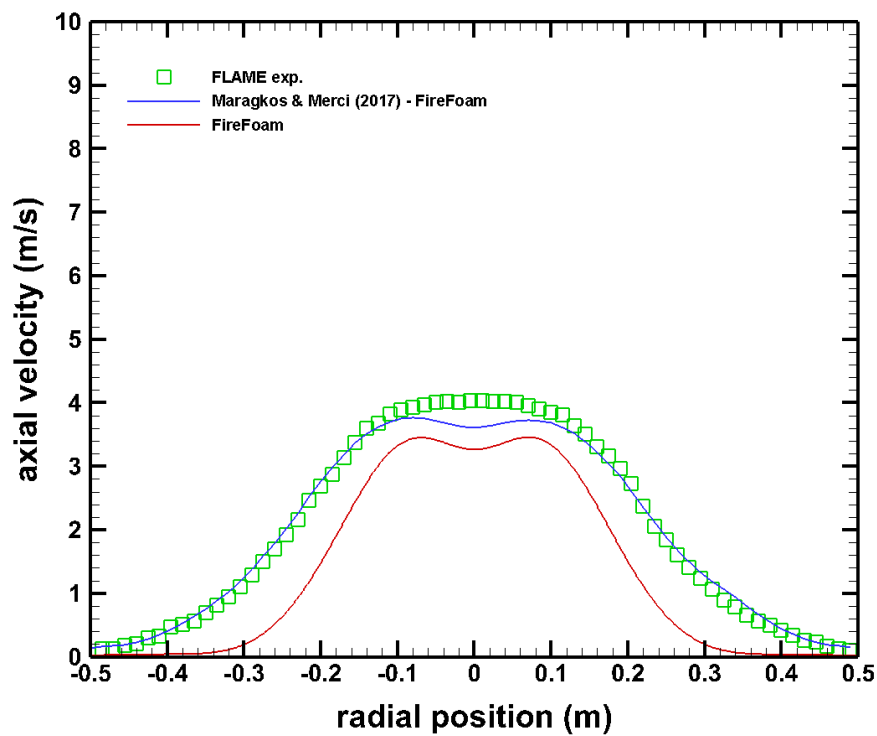
Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το ύψος από την πηγή οι αξονικές ταχύτητες αυξάνονται, λόγω της επιτάχυνσης που προκαλείται από τις ισχυρές ανωστικές δυνάμεις κατά τον άξονα του πλουμίου. Από τα πειραματικά δεδομένα και την προσομοίωση των Maragkos and Merci (2017) παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το ύψος, οι κατατομές της ταχύτητας γίνονται όλο και πιο ευρείς λόγω της επέκτασης του πλουμίου. Στη δική μας περίπτωση αυτό δεν φαίνεται στα διαγράμματα και οφείλεται στον αριθμό των κελιών που επιλέξαμε καθώς χάνεται ένα ποσοστό της πληροφορίας. Έτσι, καθώς

αυξάνεται το ύψος παρατηρούμε ότι το μέγιστη απόκλιση παρουσιάζεται κοντά στα άκρα της πηγής, καθώς στο κέντρο έχουμε προσεγγίσει επαρκώς τα πειραματικά δεδομένα.

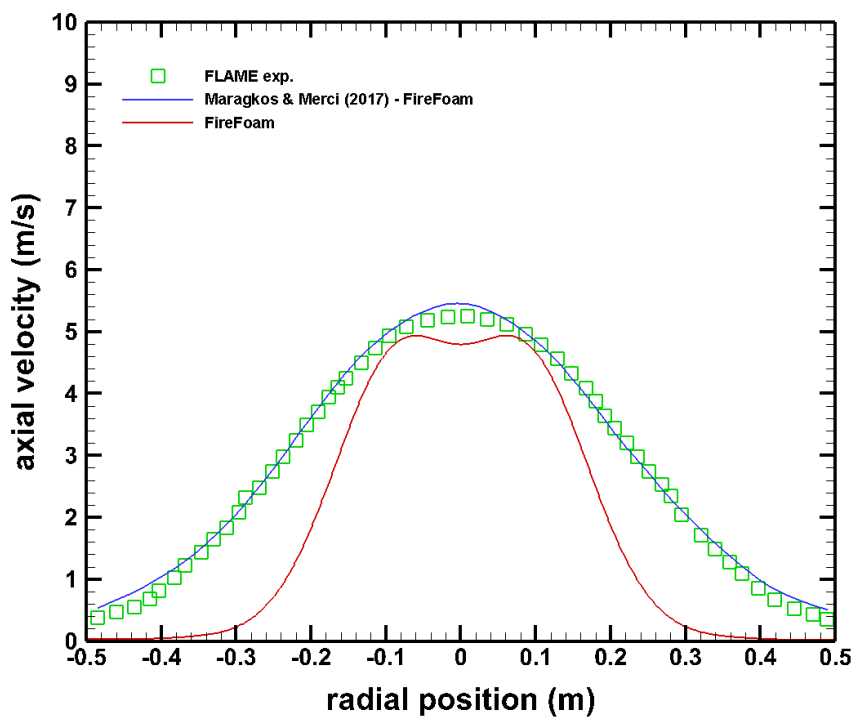
Επίσης, παρατηρείται, ότι και για τα τρία ύψη που έχουν επιλεγεί για τη δική μας προσομοίωση, οι κατατομές της ταχύτητας παρουσιάζουν δύο μέγιστα, συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα, το οποίο προκαλεί μεγαλύτερη επιτάχυνση στις περιοχές αυτές.



Σχήμα 5-2 Διάγραμμα αξονικών ταχυτήτων στο ύψος $y=0.3\text{m}$.



Σχήμα 5-3 Διάγραμμα αξονικών ταχυτήτων στο ύψος $y=0.5\text{m}$.

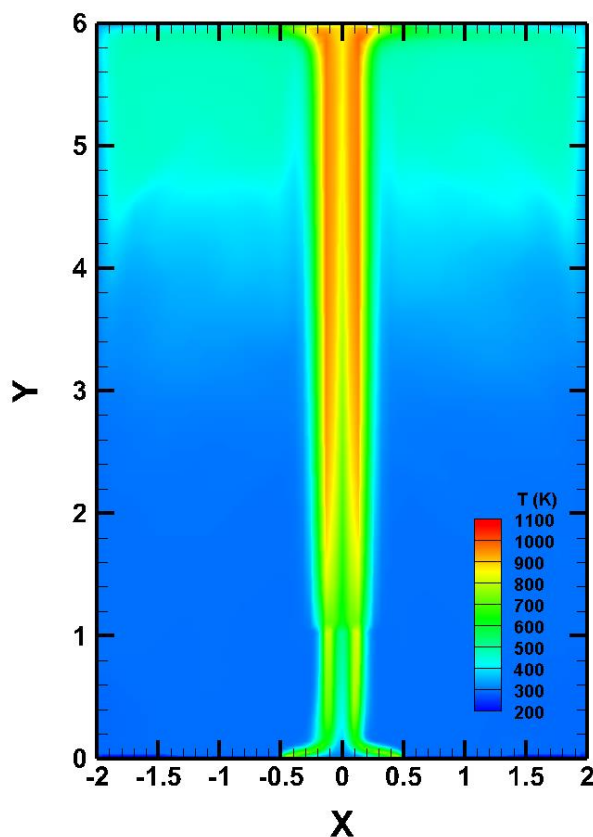


Σχήμα 5-4 Διάγραμμα αξονικών ταχυτήτων στο ύψος $y=0.9\text{m}$.

5.2 Ισοϋψή Γραφήματα Οριζοντίων Επιπέδων

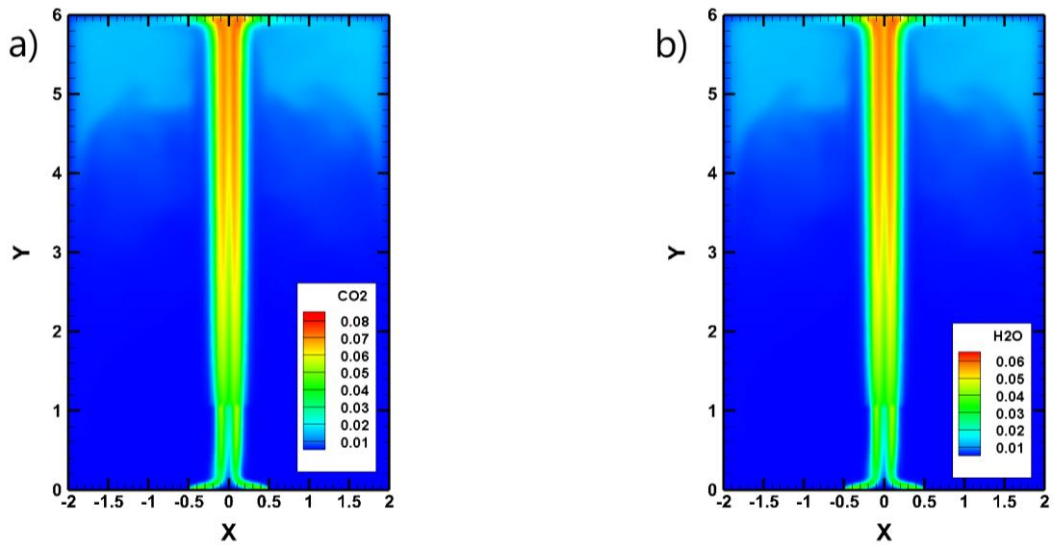
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν ισοϋψή γραφήματα για τα μεγέθη, CO_2, H_2O (υδρατμοί) και της θερμοκρασίας, T , και θα σχολιαστούν.

Αρχικά, σε όλα τα γραφήματα παρατηρείται μία αλλαγή στη συμπεριφορά του πλουμίου στο ύψος, $y=1m$. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί, καθώς στο σημείο αυτό τελειώνει η πύκνωση του πλέγματος που έχει δημιουργηθεί. Για τη σωστή και ομοιόμορφη επίλυσή του θα έπρεπε η πύκνωση να εκτεινόταν σε όλο το ύψος του υπολογιστικού πεδίου.



Σχήμα 5-5 Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας στο πεδίο.

Στο Σχήμα 5-5 παρατηρείται ότι υπάρχουν και εδώ, όπως και στα γραφήματα της ταχύτητας, παραπάνω, δύο περιοχές γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, όπου για κάθε ύψος παρατηρείται μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της επιρροής του πεδίου ταχύτητας στη θερμοκρασία μέσω του όρου συναγωγής στην εξίσωση (3-4) και της καλύτερης ανάμειξης στις περιοχές αυτές.

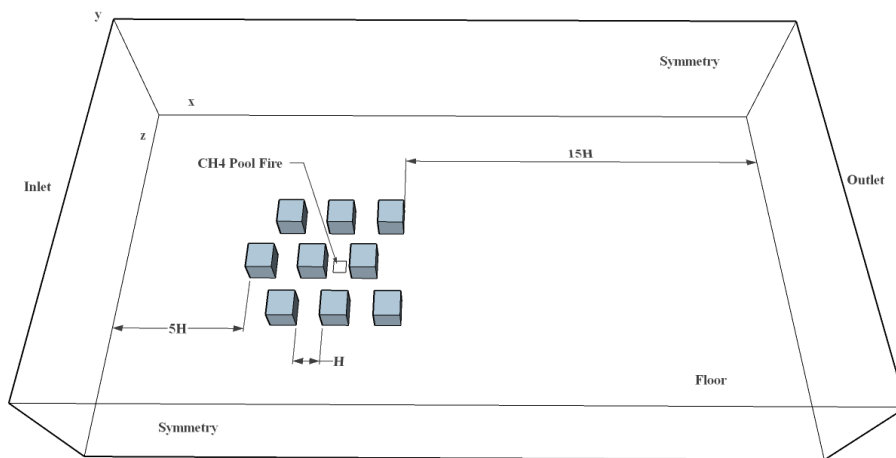


Σχήμα 5-6 Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης a) του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και b) των υδρατμών (H_2O).

Στο Σχήμα 5-6 παρατηρείται ότι υπάρχουν και εδώ, όπως και στα γραφήματα της ταχύτητας, παραπάνω, δύο περιοχές γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, όπου για κάθε ύψος παρατηρείται μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης των χημικών ειδών. Αυτό συμβαίνει λόγω της επιρροής του πεδίου ταχύτητας στα χημικά είδη μέσω του όρου συναγωγής στην εξίσωση (3-4) και της καλύτερης ανάμειξης στις περιοχές αυτές.

6 ΡΟΗ ΑΝΕΜΟΥ ΑΝΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΙΑΣ ΛΙΜΝΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ

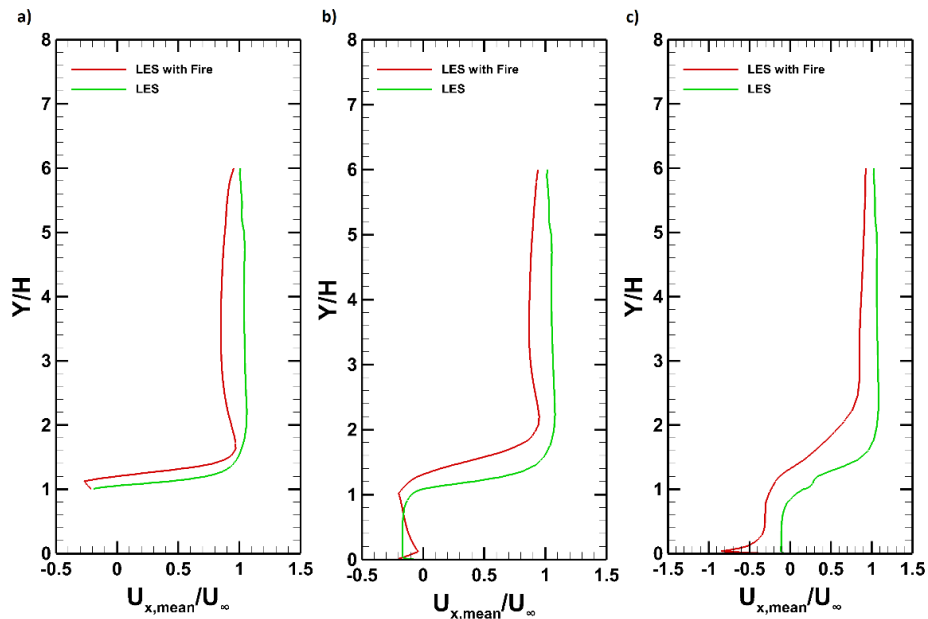
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης LES που έγινε για ροή γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου. Η θέση του κέντρου της πηγής της φωτιάς μεθανίου βρίσκεται στο σημείο $X/H=0.5$, $Y/H=0$ και $Z/H=0$. Η πηγή της φωτιάς είναι τετραγωνικής διατομής με διαστάσεις $3 \times 3 \text{ m}^2$. Ο ρυθμός απώλειας μάζας είναι 0.053 kg/sec και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας 26.5 MWatt .



Σχήμα 6-1 Απεικόνιση αστικής συστοιχίας και της θέσης της φωτιάς μεθανίου στο πεδίο.

6.1 Κατανομή της Ταχύτητας σε επιλεγμένες Θέσεις ανάμεσα στα Κτίρια

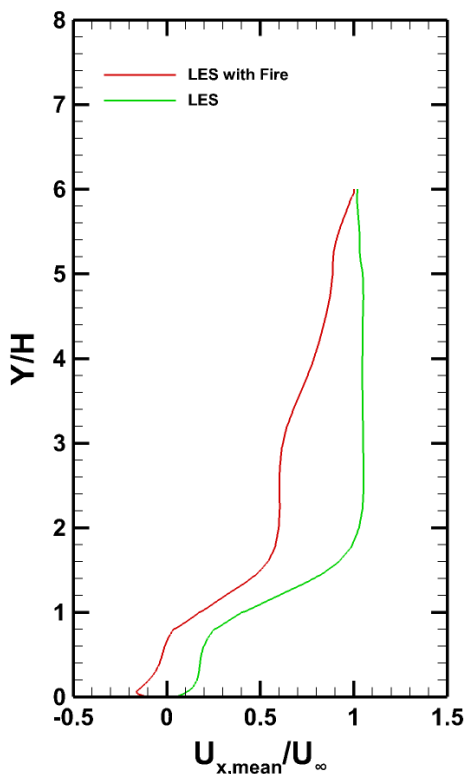
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αδιάστατα προφίλ της ταχύτητας, κατά τη διεύθυνση της ροής, σε διάφορες θέσεις εντός της συστοιχίας, καθώς και στο απόρρευμα αυτής.



Σχήμα 6-2 Συγκριτικά διαγράμματα των αδιάστατων προφίλ μέσης ταχύτητας εντός της συστοιχίας για $Z=0$ και (a) $X:-15$, (b) $X:-9$, (c) $X:3$ για τις προσομοιώσεις ροής γύρω από αστική συστοιχία και της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου.

Στο Σχήμα 6-2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αδιάστατων προφίλ μέσης ταχύτητας εντός της αστικής συστοιχίας στο επίπεδο $Z/H=0$ και για τις θέσεις $X:-15$, $X:-9$, $X:3$. Στο Σχήμα 6-2(a) παρουσιάζεται το προφίλ ταχύτητας στο μέσο της οροφής του πρώτου κτιρίου. Παρατηρείται ότι σε σύγκριση με το προφίλ από την προσομοίωση LES δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Παρόλα αυτά παρατηρείται μικρή αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος, καθώς και κάποιες μεταβολές της ταχύτητας στην αδιατάρακτη ροή. Στο Σχήμα 6-2(b) παρουσιάζεται το προφίλ ταχύτητας ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο κτίριο και παρατηρείται η αύξηση του οριακού στρώματος. Στο Σχήμα 6-2(c) παρουσιάζεται το προφίλ ταχύτητας ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο κτίριο και πάνω από την πηγή της φωτιάς. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται η δημιουργία ενός συναγωγικού οριακού στρώματος λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της ροής τα οποία δημιουργούν μεγάλες ανωστικές δυνάμεις. Επίσης, παρατηρείται ότι η ταχύτητα η οποία είναι αντίθετη της ροής λόγω της ανακυκλοφορίας είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το προφίλ από την προσομοίωση LES χωρίς την φωτιά. Παρατηρείται και εδώ η αύξηση του οριακού στρώματος πάνω από τα

κτίρια λόγω των ανωστικών δυνάμεων καθώς και η επανακόλληση του οριακού στρώματος μετά από ένα ύψος κτιρίου.



Σχήμα 6-3 Συγκριτικό διάγραμμα των αδιάστατων προφίλ μέσης ταχύτητας στο απόρρευμα της συστοιχίας για $Z=0$ και για $X:63$ ή $X/H:10.5$, για τις προσομοιώσεις ροής γύρω από αστική συστοιχία και της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου.

Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται το προφίλ ταχύτητας στο απόρρευμα της συστοιχίας. Παρατηρείται ότι έχει δημιουργηθεί μία ανακυκλοφορία έως το ύψος των κτιρίων και επανακόλληση του οριακού στρώματος στο ύψος αυτό. Παρατηρείται και εδώ, σε μεγαλύτερο βαθμό, η αύξηση του οριακού στρώματος λόγω των ανωστικών δυνάμεων που δημιουργούνται λόγω της φωτιάς. Παρατηρείται, επίσης, η επανακόλληση του οριακού στρώματος σε δύο σημεία.

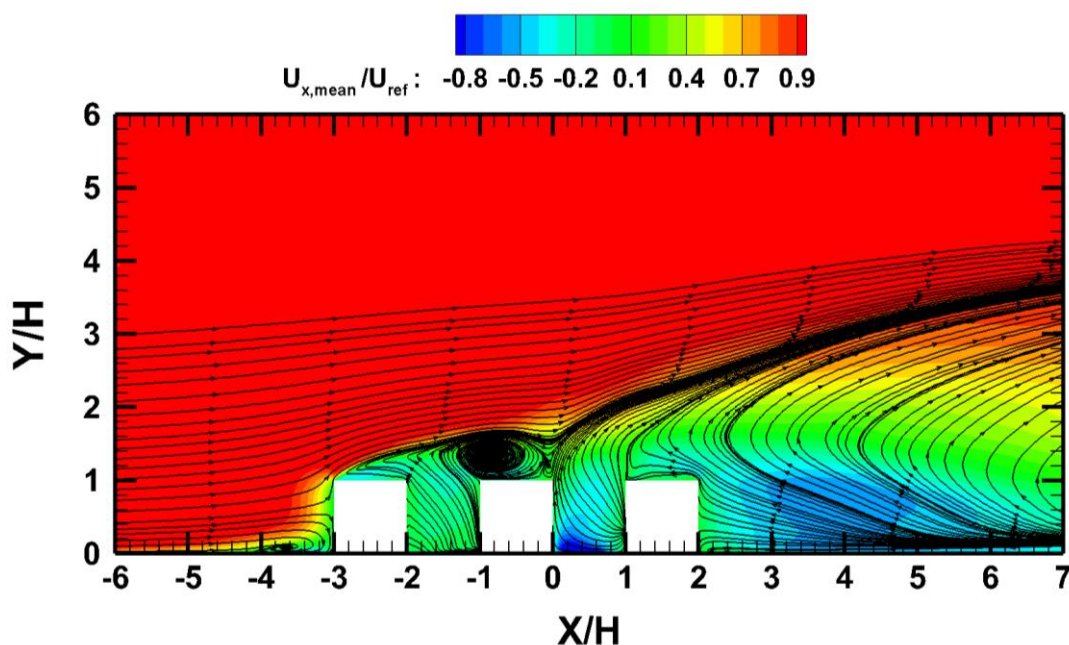
6.2 Ισοϋψή Γραφήματα Κατακόρυφων και Οριζοντίων Επιπέδων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα των κατακόρυφων και οριζοντίων επιπέδων του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για

$Z/H=0$, $Z/H=6$, $Z/H=-6$ και για $Y/H=0.008$ και $Y/H=0.5$, καθώς και τα τα ισοϋψή γραφήματα κατακόρυφων επιπέδων της θερμοκρασίας, του διοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών και αναλύονται οι ανακυκλοφορίες εντός της αστικής συστοιχίας σε κάθε ένα από τα επίπεδα. Επίσης, σχολιάζεται η επιρροή της παρουσίας της φωτιάς στο πεδίο ταχύτητας.

Πίνακας 4 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0$.

Ανακυκλοφορία	Ανάντη του πρώτου κτιρίου	Στην οροφή του πρώτου κτιρίου	Στην οροφή του δεύτερου κτιρίου	Κατάντη του τρίτου κτιρίου
Αδιάστατο Μήκος, X/H	1.2H	1H	1.2H	0.8H
Αδιάστατο Ύψος, Y/H	0.6H	0.4H	0.6H	0.2H

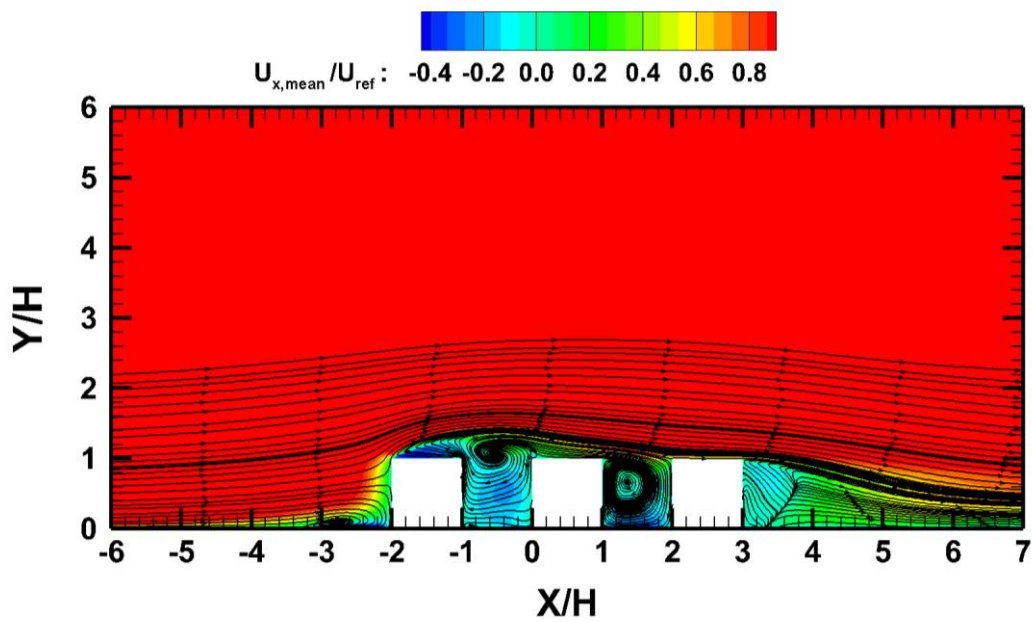


Σχήμα 6-4 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$.

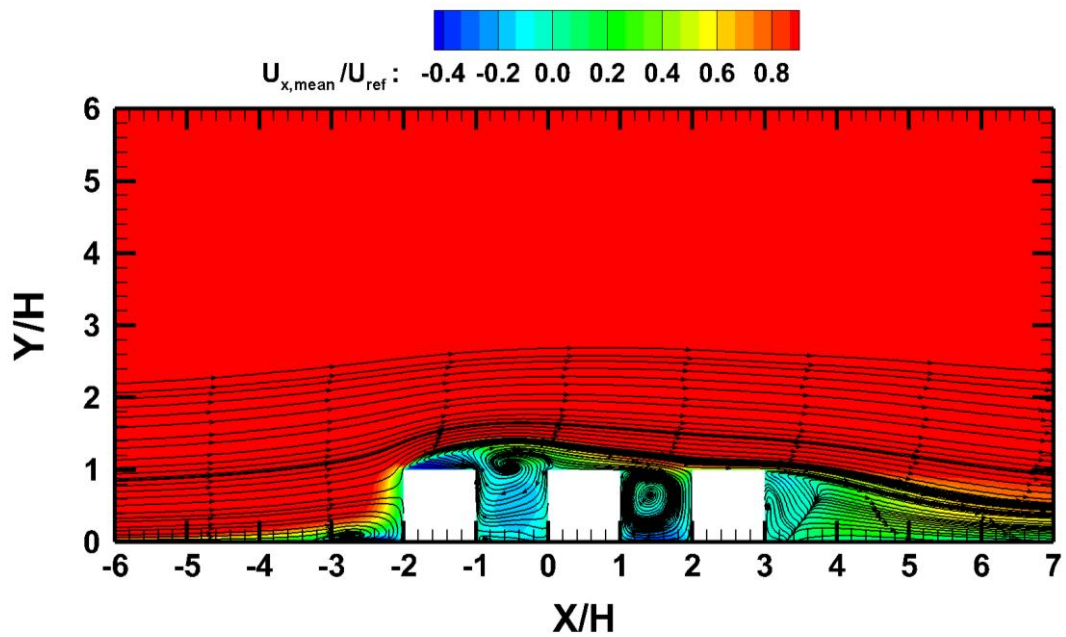
Στο Σχήμα 6-4 παρουσιάζεται το ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$. Παρατηρείται ότι το οριακό στρώμα, όπως ήταν αναμενόμενο, έχει αυξηθεί λόγω των μεγάλων ανωστικών δυνάμεων που δημιουργούνται από την παρουσία της φωτιάς στο πεδίο. Επίσης, παρατηρείται ότι στην περιοχή της φωτιάς, ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο κτίριο εμφανίζονται περιοχές με ταχύτητα σχεδόν ίση σε μέτρο και αντίθετη σε σχέση με την κύρια ροή. Στην οροφή του δεύτερου κτιρίου έχει δημιουργηθεί μία κλειστή ανακυκλοφορία της οποίας το ύψος οριοθετείται από το πάχος του οριακού στρώματος στην περιοχή αυτή. Η ανακυκλοφορία ανάντη του πρώτου κτιρίου δεν έχει μεταβληθεί, όπως ήταν αναμενόμενο σε σχέση με τα γραφήματα του προηγούμενου κεφαλαίου. Παρατηρείται, επίσης, η δημιουργία μιας μικρής ανακυκλοφορίας κατόντη του τρίτου κτιρίου.

Πίνακας 5 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=-6$ και $Z/H=6$.

Ανακυκλοφορία	Ανάντη του πρώτου κτιρίου	Στην οροφή του πρώτου κτιρίου	Ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο κτίριο	Ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο κτίριο
Αδιάστατο Μήκος, X/H	1.2H	1H	1H	1H
Αδιάστατο Ύψος, Y/H	0.4H	0.4H	1.4H	1H



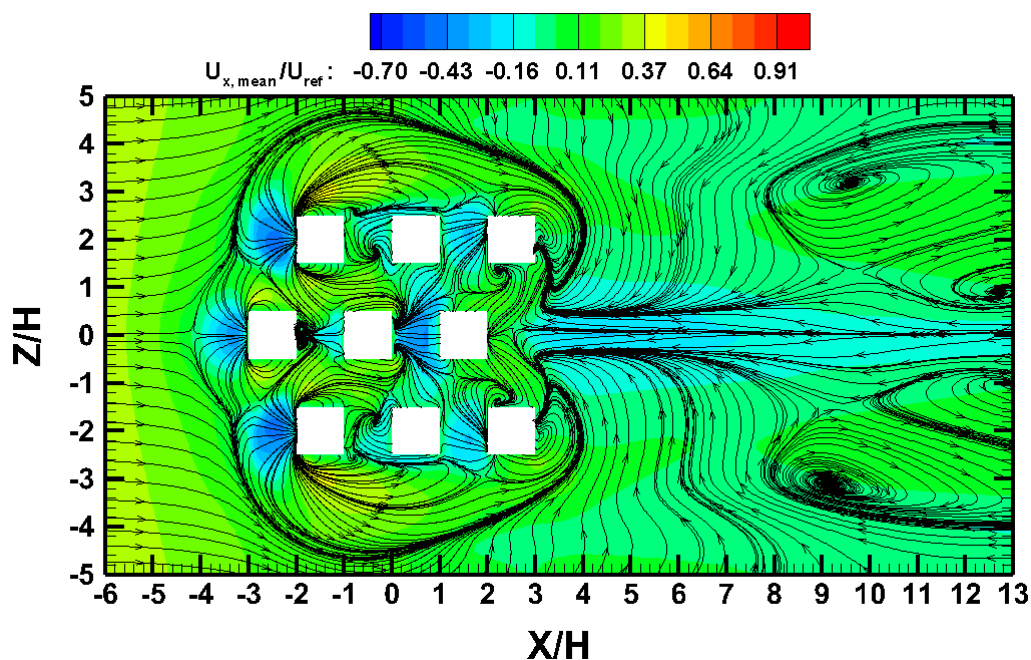
Σχήμα 6-5 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=6$.



Σχήμα 6-6 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=-6$.

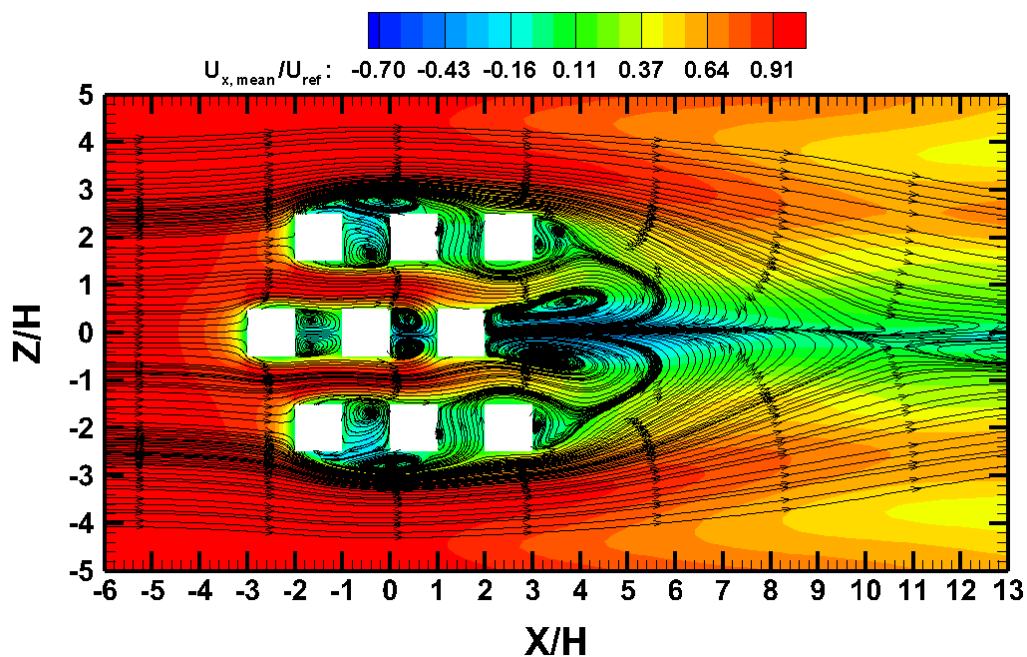
Στο Σχήμα 6-5 και Σχήμα 6-6 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στα επίπεδα $Z/H=-6$ και $Z/H=6$. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το Σχήμα 4-10 και Σχήμα 4-11 του προηγούμενου κεφαλαίου δεν

υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Η κύρια διαφορά είναι η δημιουργία της κλειστής ανακυκλοφορίας ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο κτίριο, οι διαστάσεις της οποίας αναφέρονται στον Πίνακα 5. Επίσης, παρατηρείται συμμετρία σε αυτά τα δύο επίπεδα.



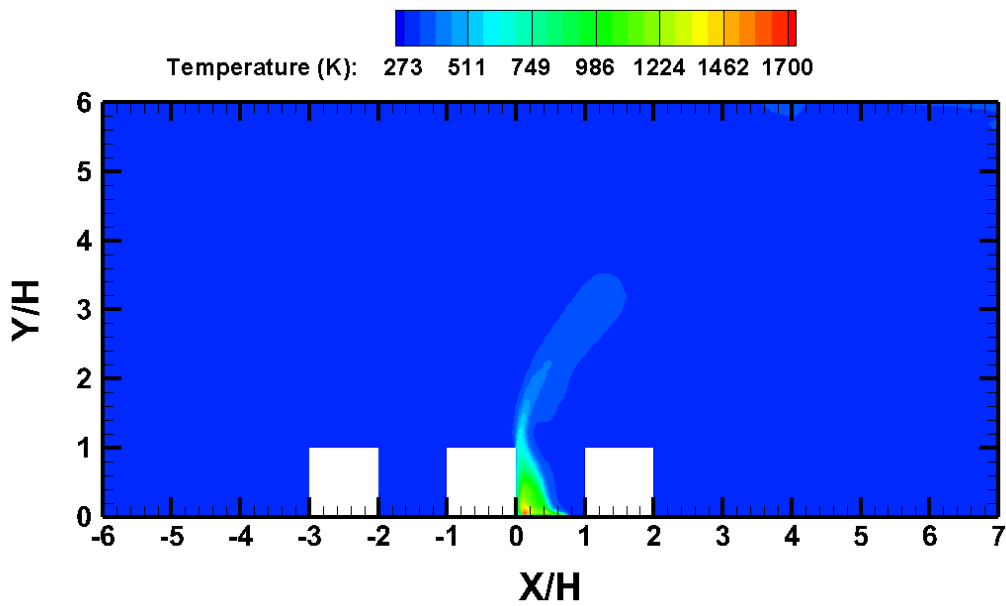
Σχήμα 6-7 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο κατακόρυφο επίπεδο $Y/H=0.008$.

Στο Σχήμα 6-7 παρουσιάζεται το ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Y/H=0.008$. Παρατηρείται η χρονική μεταβολή των δινών σε σχέση με το Σχήμα 4-12 του προηγούμενου κεφαλαίου. Οι δύο μεγάλες δίνες που βρίσκονταν κοντά στα τελευταία κτίρια της συστοιχίας έχουν προχωρήσει το απόρρευμα αυτής. Οι τοξοειδείς περιοχές ανάντη των πρώτων κτιρίων είναι και εδώ εμφανείς.



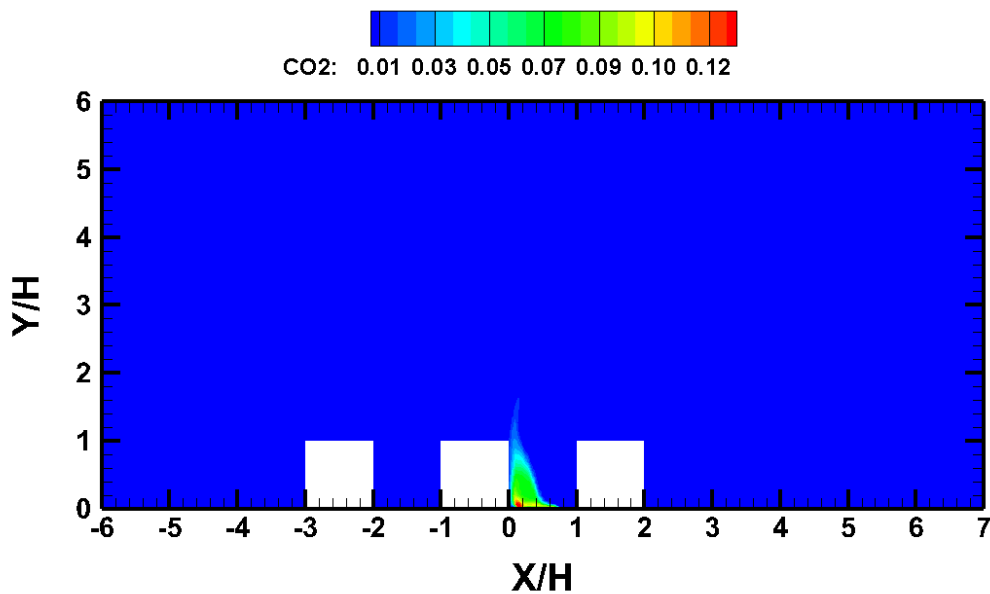
Σχήμα 6-8 Ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο κατακόρυφο επίπεδο $Y/H=0.5$.

Στο Σχήμα 6-8 παρουσιάζεται το γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας στο κατακόρυφο επίπεδο $Y/H=0.5$. Παρατηρείται η χρονική μεταβολή των δινών σε σχέση με το Σχήμα 4-13. Παρατηρείται ότι τα ζεύγη των ανακυκλοφοριών ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο κτίριο της άνω και κάτω συστοιχίας δεν υπάρχουν πλέον και η ροή στην περιοχή αυτή συμβάλλει στη δημιουργία του ζεύγους δινών στο απόρρευμα της συστοιχίας. Επίσης παρατηρείται η μετακίνηση των δινών που βρίσκονταν ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο κτίριο της άνω και κάτω συστοιχίας. Στο σημείο που βρίσκεται η φωτιά παρατηρείται η σχετικά μεγάλη τιμή της ταχύτητας, η οποία έχει διεύθυνση αντίθετη της κύριας ροής. Το ζεύγος δινών στο σημείο αυτό παρουσιάζει μικρή ασυμμετρία σε σχέση με το επίπεδο $Z/H=0$. Τέλος, παρατηρείται μικρή ασυμμετρία στο πεδίο ροής, λόγω της διεύθυνσης του πλουμίου της φωτιάς, όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο υποκεφάλαιο, που επιδρά στο πεδίο ταχύτητας.

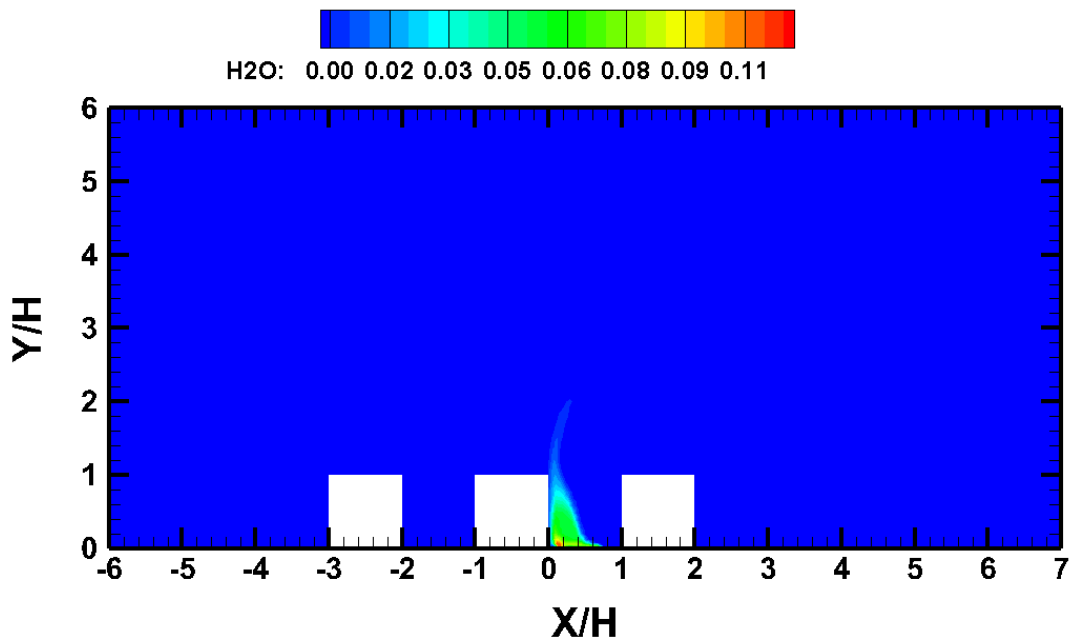


Σχήμα 6-9 Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας στο επίπεδο $Z/H=0$.

Στο Σχήμα 6-9 παρουσιάζεται το ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας στο επίπεδο $Z/H=0$. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία βρίσκεται κοντά στο τοίχωμα του δεύτερου κτιρίου καθώς η ανακυκλοφορία οδηγεί το πλούμιο σε αυτή την περιοχή.



Σχήμα 6-10 Ισοϋψές γράφημα του διοξειδίου του άνθρακα, CO_2 , στο επίπεδο $Z/H=0$.

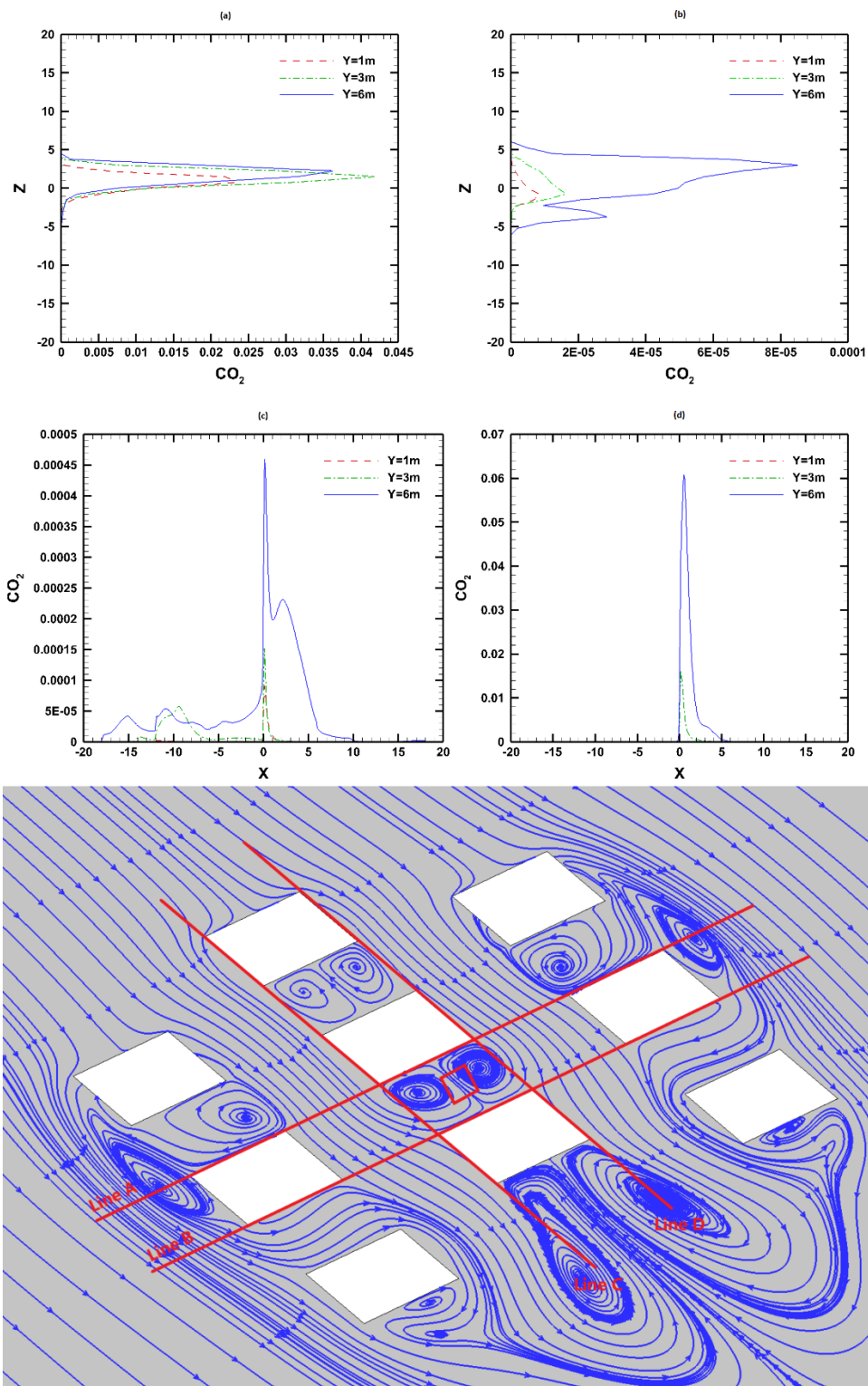


Σχήμα 6-11 Ισοϋψές γράφημα των υδρατμών στο επίπεδο $Z/H=0$.

Στο Σχήμα 6-10 και Σχήμα 6-11 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα του διοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η μέγιστη συγκέντρωση βρίσκεται στο ίδιο σημείο που βρίσκεται και η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας. Η διασπορά του ρύπου και των υδρατμών επηρεάζεται από την ανακυκλοφορία που υπάρχει στην περιοχή αυτή.

6.3 Συγκέντρωση Ρύπου

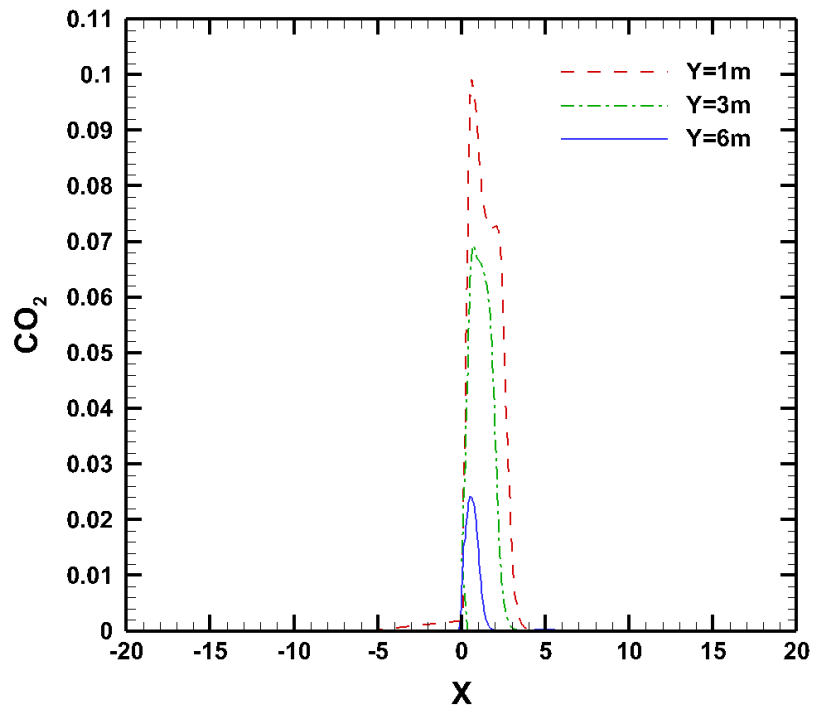
Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα γραφήματα της κατανομής της συγκέντρωσης του ρύπου, CO_2 , στα επίπεδα $X/H=0$, $X/H=1$, $Z/H=-0.5$ και $Z/H=0.5$, δηλαδή κατά μήκος της a)Line A, b)Line B, c)Line C και d)Line D.



Σχήμα 6-12 Κατανομή της συγκέντρωσης του ρύπου CO₂ κατά μήκος της a)Line A, b)Line B, c)Line C και d)Line D.

Στο Σχήμα 6-12 παρουσιάζεται η κατανομή της συγκέντρωσης του ρύπου, CO₂, στα επίπεδα $X/H=0$, $X/H=1$, $Z/H=-0.5$ και $Z/H=0.5$. Παρατηρείται ότι οι

μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βρίσκονται στα επίπεδα $X/H=0$ και $Z/H=0.5$. Στα επίπεδα $X/H=1$ και $Z/H=-0.5$ η συγκέντρωση του ρύπου είναι αρκετά χαμηλή. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση παρατηρείται στο επίπεδο $Z/H=0.5$ στο ύψος $Y=6m$, δηλαδή στο ύψος της οροφής του κτιρίου.

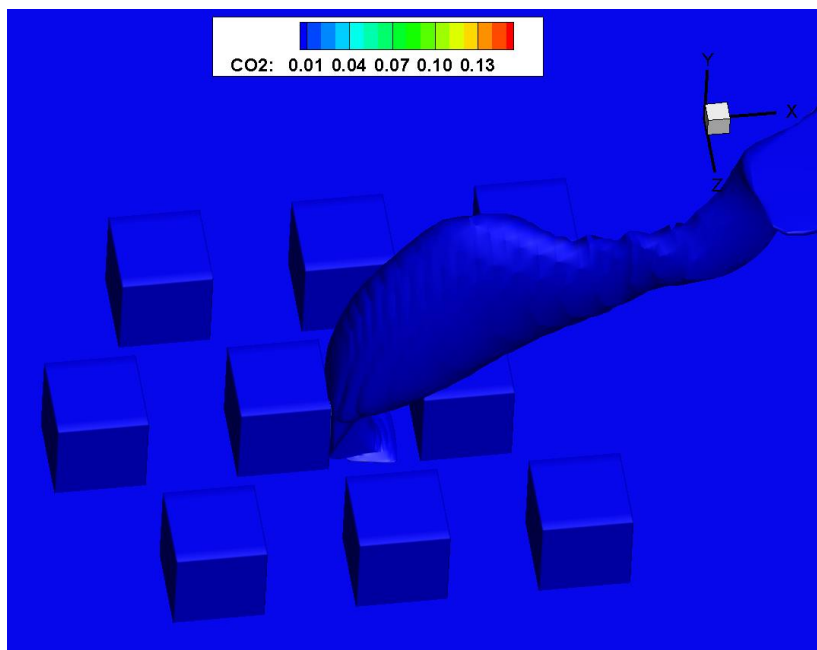


Σχήμα 6-13 Κατανομή της συγκέντρωσης του ρύπου CO_2 στο επίπεδο $Z/H=0$.

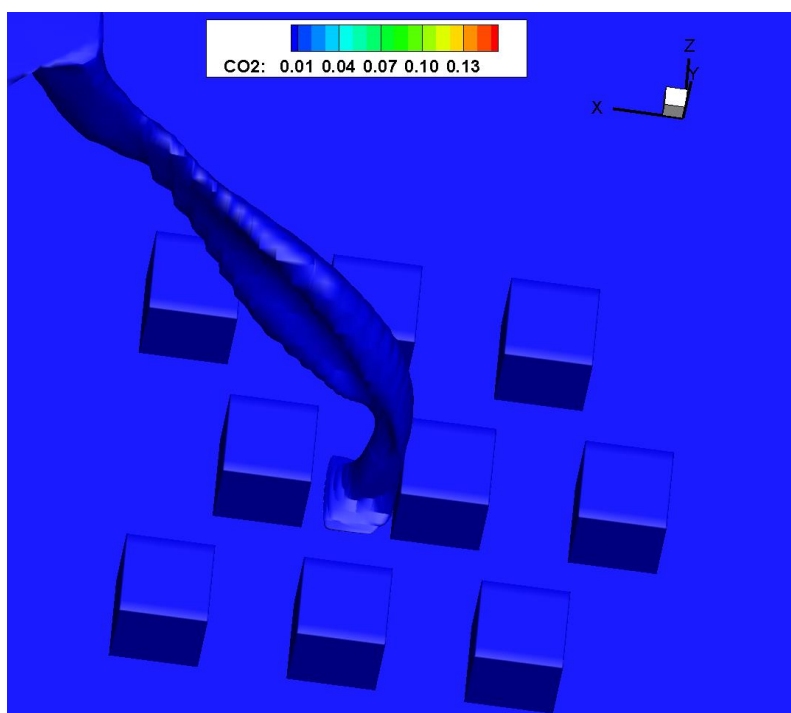
Στο Σχήμα 6-13 παρουσιάζεται η κατανομή της συγκέντρωσης του ρύπου στο επίπεδο $Z/H=0$, δηλαδή στο μέσο της πηγής της φωτιάς. Παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η μέγιστη συγκέντρωση βρίσκεται στο ύψος $Y=1m$.

6.4 Τρισδιάστατα Ισοϋψή Γραφήματα Διασποράς του Ρύπου

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα γραφήματα της διασποράς του διοξειδίου του άνθρακα.



Σχήμα 6-14 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα της διασποράς του ρύπου εντός της αστικής συστοιχίας.



Σχήμα 6-15 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα της διασποράς του ρύπου εντός της αστικής συστοιχίας από άλλη προοπτική.

Στο Σχήμα 6-14 και Σχήμα 6-15 παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα ισοϋψή γραφήματα της συγκέντρωσης τους ρύπου εντός της αστικής χαράδρας. Παρατηρείται ότι το πλούμιο οδηγείται μέσω του οριακού στρώματος έξω από

την αστική συστοιχία και δεν είναι απόλυτα συμμετρικό σε σχέση το επίπεδο $Z/H=0$.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω της διπλωματικής αυτής μελετήθηκε η ροή γύρω από αστική συστοιχία και η επιρροή ενός ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου στο πεδίο ταχύτητας με το πακέτο ελεύθερου λογισμικού OpenFoam και τον επιλυτή FireFoam.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μεγάλης δίνης (LES) για τη ροή γύρω από αστική συστοιχία. Αρχικά, ορίστηκαν οι αρχικές και οριακές συνθήκες της ταχύτητας και της τύρβης στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης. Το προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της προσομοίωσης συγκρίθηκε με πειραματικές μετρήσεις. Στη συνέχεια η ροή γύρω από την αστική συστοιχία προσομοιώθηκε για 150 sec έως την στατιστική ανεξαρτησία της. Εφόσον η ροή επαναλαμβάνεται χρονικά μπορούν να εξαχθούν τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αφορούν τα αδιάστατα προφίλ μέσης ταχύτητας εντός τη συστοιχίας στο επίπεδο $Z/H=0$ και στις θέσεις $X/H=-2.5$, $X/H=-1.5$ και $X/H=0.5$, καθώς και στο απόρρευμα αυτής, στη θέση $X/H=10.5$. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν τα ισοϋψή γραφήματα των κατακόρυφων και οριζόντιων επιπέδων του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας $Z/H=0$, $Z/H=6$, $Z/H=-6$ και για $Y/H=0.008$ και $Y/H=0.5$ και αναλύθηκαν οι ανακυκλοφορίες σε καθένα από αυτά. Τέλος, για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, έγινε σύγκριση της κατανομής του συντελεστή πίεσης γύρω από το πρώτο κτίριο στο επίπεδο $Z/H=0$ με πειραματικά δεδομένα.

Το Κεφάλαιο 5 αφορά την περίπτωση ατυχήματος με φωτιά λίμνης μεθανίου και αποσκοπεί στην επαλήθευση των αποτελεσμάτων της φωτιάς λίμνης εντός της συστοιχίας κτιρίων. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων έγινε μέσω σύγκρισης της προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα του εργαστηρίου FLAME, καθώς και με άλλες υπολογιστικές προσομοιώσεις από τους Maragkos and Merci (2017). Αναλυτικότερα έγινε σύγκριση της αξονικής ταχύτητας του πλουμίου, για τρία διαφορετικά ύψη από την πηγή φωτιάς λίμνης μεθανίου: $y=0.3$ m, $y=0.5$ m και $y=0.9$ m. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν τα ισοϋψή γραφήματα των οριζόντιων επιπέδων της θερμοκρασίας του πλουμίου, καθώς και τα παράγωγα της καύσης, του διοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μεγάλης δίνης (LES), με τον επιλυτή FireFOAM, για τη ροή γύρω από αστική συστοιχία παρουσία φωτιάς λίμνης μεθανίου εντός της. Η ένταξη της φωτιάς λίμνης μεθανίου στο υπολογιστικό χωρίο έγινε μετά τη στατιστική ανεξαρτησία της ροής και την εδραίωση του πεδίου ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα αφορούν συγκριτικά διαγράμματα των αδιάστατων προφίλ ταχύτητας εντός της συστοιχίας και στο απόρρευμα αυτής, στις θέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, για τις προσομοιώσεις ροής γύρω από αστική συστοιχία και της ροής γύρω από αστική συστοιχία παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης μεθανίου. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα ισοϋψή γραφήματα κατακόρυφων και οριζόντιων επιπέδων του αδιάστατου πεδίου ταχυτήτων στις θέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και της θερμοκρασίας, του διοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών στο επίπεδο $Z/H=0$. Επίσης, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν τα γραφήματα κατανομής της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα σε επίπεδα γύρω από την πηγή καθώς και στο επίπεδο συμμετρίας $Z/H=0$. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα τρισδιάστατα ισοϋψή γραφήματα διασποράς του διοξειδίου του άνθρακα για την καλύτερη ανάδειξη της πορείας του ρύπου πάνω από την αστική συστοιχία κτιρίων.

Η θέση της πηγής της φωτιάς λίμνης μεθανίου σε συνδυασμό με τις ανακυκλοφορίες στο σημείο αυτό και τις μικρές ασυμμετρίες στο πεδίο ταχύτητας οδήγησαν σε μία μη συμμετρική διασπορά του ρύπου πάνω από την αστική συστοιχία. Οι μεγάλες ανωστικές δυνάμεις που δημιουργήθηκαν λόγω της θερμοκρασίας είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος πάνω από τη συστοιχία, με αποτέλεσμα το πλούμιο να ακολουθήσει τη ροή του αέρα εντός του. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την απομάκρυνση του ρύπου από την αστική συστοιχία.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ατυχήματος με φωτιά λίμνης μεθανίου έδειξαν ότι το πλέγμα έπρεπε να είναι πιο πυκνό στην περιοχή του πλουμίου και η πύκνωση γύρω από την πηγή της φωτιάς θα πρέπει να εκτείνεται σε όλο το ύψος του υπολογιστικού πεδίου.

Για την πλήρη κατανόηση της επιρροής του πεδίου ροής γύρω από την αστική συστοιχία στη διασπορά ενός ρύπου από φωτιά μεθανίου μπορούν να γίνουν μελλοντικές εργασίες για τη διεξαγωγή περαιτέρω προσομοιώσεων όσον αφορά τη θέση της φωτιάς εντός του, διαφορετικών ταχυτήτων ροής και διαφορετικός προσανατολισμός της αστικής συστοιχίας ως προς τη διεύθυνση της κύριας ροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abd Razak, A., et al. (2012). Large-Eddy Simulation on Airflow over a Building Array for Assessment of Well Ventilated City.

Argyropoulos, C. D., et al. (2012). "A hazards assessment methodology for large liquid hydrocarbon fuel tanks." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **25**(2): 329-335.

Argyropoulos, C. D., et al. (2010). "Modelling pollutants dispersion and plume rise from large hydrocarbon tank fires in neutrally stratified atmosphere." Atmospheric Environment **44**(6): 803-813.

Assael, M. J. and K. E. Kakosimos (2012). "Fires, explosions, and toxic gas dispersions: Effects calculation and risk analysis (2010)." Process Safety Progress **31**(3): 319-319.

Babrauskas, V. (1983). "Estimating large pool fire burning rates." Fire Technology **19**(4): 251-261.

Barbas, F. E. (2013). <<Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση της δυνατότητας περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με χρήση φωτοκαταλυτικών επιστρώσεων>>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: 251.

Bariha, N., et al. (2017). "Theoretical and experimental studies on hazard analysis of LPG/LNG release: a review." Reviews in Chemical Engineering **33**(4): 387-432.

Castro, I. and A. Robins (1977). "The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams." Journal of Fluid Mechanics **79**: 307-335.

Cheng, H. and I. Castro (2002). "Near Wall Flow over Urban-like Roughness." Boundary-Layer Meteorology **104**: 229-259.

Cheng, H., et al. (2007). "Flow over cube arrays of different packing densities." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **95**: 715-740.

Chung, W. and C. B. Devaud (2008). "Buoyancy-corrected k- ϵ models and large eddy simulation applied to a large axisymmetric helium plume." International Journal for Numerical Methods in Fluids **58**(1): 57-89.

Claus, J., et al. (2012). "Wind-Direction Effects on Urban-Type Flows." Boundary-Layer Meteorology **142**(2): 265-287.

Coceal, O., et al. (2014). "Flow structure and near-field dispersion in arrays of building-like obstacles." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **125**: 52-68.

Coceal, O., et al. (2007). "Spatial Variability of Flow Statistics within Regular Building Arrays." Boundary-Layer Meteorology **125**(3): 537-552.

Coceal, O., et al. (2006). "Mean Flow and Turbulence Statistics Over Groups of Urban-like Cubical Obstacles." Boundary-Layer Meteorology **121**(3): 491-519.

Dobre, A., et al. (2005). "Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK." Atmospheric Environment **39**(26): 4647-4657.

Drikakis, D. (2003). "Advances in turbulent flow computations using high-resolution methods." Progress in Aerospace Sciences **39**(6): 405-424.

Drysdale, D. (2011). An introduction to fire dynamics, John Wiley & Sons.

Favre, A. (1983). "Turbulence: Space-time statistical properties and behavior in supersonic flows." The Physics of Fluids **26**(10): 2851-2863.

Franke, J. and A. Baklanov (2007). Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment: COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models.

Ghaderi, M., et al. (2021). "LES Simulation of Wind-Driven Wildfire Interaction with Idealized Structures in the Wildland-Urban Interface." Atmosphere **12**(1): 21.

Gough, H. (2017). Effects of meteorological conditions on building natural ventilation in idealised urban settings. Department of Meteorology, University of Reading. **Doctor of Philosophy**: 318.

Idrissi, M., et al. (2018). CFD Modeling of Air Pollution Dispersion in Complex Urban Area.

Inagaki, A. and M. Kanda (2008). "Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow." Journal of Fluid Mechanics **615**: 101-120.

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

Kanda, M., et al. (2013). "A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces." Boundary-Layer Meteorology **148**: 357-377.

Macdonald, R. W., et al. (1998). "A comparison of results from scaled field and wind tunnel modelling of dispersion in arrays of obstacles." Atmospheric Environment **32**(22): 3845-3862.

Maragkos, G. and B. Merci (2017). "Large Eddy Simulations of CH₄ Fire Plumes." Flow, Turbulence and Combustion **99**.

Markatos, N. C., et al. (2009). "Mathematical modeling of toxic pollutants dispersion from large tank fires and assessment of acute effects for fire fighters." International Journal of Heat and Mass Transfer **52**(17): 4021-4030.

McGrattan, K., et al. (2003). "Improved Radiation And Combustion Routines For A Large Eddy Simulation Fire Model." Fire Safety Science **7**: 827-838.

Nakamura, Y. and T. R. Oke (1988). "Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon." Atmospheric Environment (1967) **22**(12): 2691-2700.

Oke, T. R. (1988). "Street design and urban canopy layer climate." Energy and Buildings **11**(1): 103-113.

Richards, P. J. and R. P. Hoxey (1993). "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **46-47**: 145-153.

Richards, P. J. and R. P. Hoxey (2012). "Pressures on a cubic building—Part 1: Full-scale results." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **102**: 72-86.

Saeedi, M. and B.-C. Wang (2015). "Large-eddy simulation of turbulent flow and dispersion over a matrix of wall-mounted cubes." Physics of Fluids **27**(11): 115104.

Santese, F., et al. (2007). "CFD SIMULATIONS FOR THE STUDY OF THERMAL EFFECTS ON FLOW AND POLLUTANT DISPERSION IN URBAN GEOMETRIES."

Shen, Z., et al. (2015). "Flow pattern and pollutant dispersion over three dimensional building arrays." Atmospheric Environment **116**: 202-215.

Tieszen, S. R., et al. (2004). "Experimental study of the effect of fuel mass flux on a 1-m-diameter methane fire and comparison with a hydrogen fire." Combustion and Flame **139**(1-2): 126-141.

Tieszen, S. R., et al. (2002). "Experimental study of the flow field in and around a one meter diameter methane fire." Combustion and Flame **129**(4): 378-391.

Tominaga, Y., et al. (2008). "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **96**(10): 1749-1761.

Tominaga, Y. and T. Stathopoulos (2011). "CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **99**: 340-348.

Vasaturo, R., et al. (2018). "Large eddy simulation of the neutral atmospheric boundary layer: performance evaluation of three inflow methods for terrains with different roughness." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **173**: 241-261.

Vasilopoulos, K. (2019). Accidents caused by hazardous materials released in an urban environment: a numerical and experimental approach. School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University. **Ph.D.**: 198.

Vasilopoulos, K., et al. (2018). "Computational Assessment of the Hazardous Release Dispersion from a Diesel Pool Fire in a Complex Building's Area."

Wang, C. J., et al. (2014). "Simulation of Large-Scale LNG Pool Fires Using FireFoam." Combustion Science and Technology **186**(10-11): 1632-1649.

Wang, Y., et al. (2011). "Large eddy simulation of fire plumes." Proceedings of the Combustion Institute **33**(2): 2473-2480.

Zhang, X. (2009). CFD simulation of neutral ABL flows. Denmark, Forskningscenter Risoe, Risoe-R. Roskilde, Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi: 41.

Zheng, X., et al. (2020). "CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES." Building and Environment **173**: 106747.

