
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΙΜΣ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

*Εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων από έκλυση τοξικών ρύπων
για διαφορετικά χαρακτηριστικά ροής του ανέμου σε δομημένο
περιβάλλον*

Ανάργυρος Παλάμπικ , Α.Μ: msrtf21X03

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Κωνσταντίνος Βασιλόπουλος

Αιγάλεω 06/10/2023

Επιτροπή αξιολόγησης και βαθμολόγησης διπλωματικής

α/α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Κωνσταντίνος-Στέφανος Νίκας	Καθηγητής	
2	Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
3	Κωνσταντίνος Βασιλόπουλος	Έκτακτο προσωπικό από Πρόγραμμα ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ανάργυρος Παλάμπιγκ του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου msrtf21x03 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών

Ανάργυρος Παλάμπιγκ



Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
Abstract	11
1 Εισαγωγή	12
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	16
2.1 Μορφολογία ροής εντός τυπικής αστικής χαράδρας και διασποράς ρύπου	16
3 Ανάλυση υπολογιστικών προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων	24
3.1 Εισαγωγή	24
3.2 Πειραματικές μετρήσεις	26
3.2.1 Συνοπτική θεωρία Θερμικής ανεμομετρίας (HWA)	27
3.2.2 Μετάδοση θερμότητας νήματος άπειρου μήκους	27
3.2.3 Καμπύλη βαθμονόμησης	29
3.2.4 Απόκριση παλμού (Pulse Response)	30
3.2.5 Υπηρερχόμενα σφάλματα κατά την μέτρηση	31
3.2.6 Λήψη πειραματικών μετρήσεων προφίλ ταχύτητας και κινητικής ενέργειας στην είσοδο της αεροσήραγγας	32
3.2.7 Μετρήσεις πίεσης	32
3.3 Μεθοδολογία υπολογιστικής ανάλυσης	33
3.3.1 Διακριτοποίηση υπολογιστικού χωρίου	33
3.3.2 Ανεξαρτησία πλέγματος	35
3.3.3 Αρχικές – συνοριακές συνθήκες	36
3.3.4 Κατανομή συντελεστή πίεση σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων	38
3.4 Κατακόρυφα Ισοϋψή γραφήματα μέσω των ταχυτήτων	42
3.5 Οριζόντια ισοϋψή γραφήματα μέσω των ταχυτήτων	46
3.6 Διασπορά παθητικού ρύπου (CO ₂)	48
4 Μελέτη επικινδυνότητας ατυχήματος διαρροής αγωγού φυσικού αερίου σε αστικό περιβάλλον	55
4.1 Εισαγωγή	55
4.2 Χαρακτηριστικές διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου	55

4.3	Αρχικές συνοριακές συνθήκες των υπολογιστικών περιπτώσεων	56
4.4	Στιγμαίεις ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=1$	56
4.5	Μέσες ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=1$	60
4.6	Μέση τιμή θερμοκρασίας για την περίπτωση $W/H=1$	63
4.7	Μέσες τιμές του διοξειδίου του άνθρακα για την περίπτωση $W/H=1$	66
4.8	Στιγμαίεις ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=3$	69
4.9	Μέσες ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=3$	72
4.10	Μέση τιμή θερμοκρασίας για την περίπτωση $W/H=3$	74
4.11	Μέσες τιμές του διοξειδίου του άνθρακα για την περίπτωση $W/H=3$	76
4.12	Στιγμαίεις ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=6$	79
4.13	Μέσες ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=6$	82
4.14	Μέση τιμή θερμοκρασίας για την περίπτωση $W/H=3$	84
4.15	Μέσες τιμές του διοξειδίου του άνθρακα για την περίπτωση $W/H=6$	86
4.16	Εκτίμηση επικινδυνότητας εντός της αστικής χαράδρας.....	89
5	Συμπεράσματα	93
6	Βιβλιογραφία.....	95

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Τυπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αστικής χαράδρας	17
Σχήμα 2-2 Δομές και είδη ροής εντός αστικής χαράδρας, εικόνα από Oke (1988).....	17
Σχήμα 2-3 Προφίλ ταχύτητας εντός αστικής χαράδρας (Salizzoni, Marro et al. 2011).....	19
Σχήμα 3-1 Τυπική αστική χαράδρα με $W/H=1$	26
Σχήμα 3-2 Καμπύλη βαθμονόμησης single wire probe θερμικού ανεμόμετρου AN1005.....	29
Σχήμα 3-3 Απόκριση παλμού αισθητήρα θερμικής ανεμομετρίας	30
Σχήμα 3-4 Αδιαστατοποιημένο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας (Vasilopoulos 2020)	32
Σχήμα 3-5 Ένταση της τύρβης στην είσοδο της αεροσήραγγας (Vasilopoulos 2020)	32
Σχήμα 3-6 Κάτοψη της αστικής χαράδρας για $W/H=1$ και $Y/H=0,5$	34
Σχήμα 3-7 Κάτοψη της αστικής χαράδρας για $W/H=3$ και $Y/H=0,5$	34
Σχήμα 3-8 Κάτοψη της αστικής χαράδρας για $W/H=6$ και $Y/H=0,5$	35
Σχήμα 3-9 Υπολογισμός σφάλματος από αραιό πλέγμα σε μεσαίο $W/H=1$ και $Z/H=3,5$	36
Σχήμα 3-10 Υπολογισμός σφάλματος από μεσαίο πλέγμα σε πυκνό $W/H=1$ και $Z/H=3,5$	36
Σχήμα 3-11 Προφίλ ταχύτητας εισόδου συνάρτηση του αδιάστατου ύψους για $Z/H=3,5$	37
Σχήμα 3-12 Προφίλ κινητικής ενέργειας εισόδου συνάρτηση του αδιάστατου ύψους για $Z/H=3,5$	37
Σχήμα 3-13 Προφίλ σκέδασης ανα μονάδα όγκου στην εισόδου συνάρτηση του αδιάστατου ύψους για $Z/H=3,5$	38
Σχήμα 3-14 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=1$	39
Σχήμα 3-15 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=1$	40
Σχήμα 3-16 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=3$	40
Σχήμα 3-17 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=3$	41
Σχήμα 3-18 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=6$	41
Σχήμα 3-19 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=6$	42

Σχήμα 3-20	Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=1$ και για $Z/H=0$	43
Σχήμα 3-21	Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=3$ και για $Z/H=0$	44
Σχήμα 3-22	Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=6$ και για $Z/H=0$	44
Σχήμα 3-23	Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=1$	47
Σχήμα 3-24	Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=3$	47
Σχήμα 3-25	Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=6$	48
Σχήμα 3-26	Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$	49
Σχήμα 3-27	Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$	49
Σχήμα 3-28	Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$	50
Σχήμα 3-29	Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$ και $Z/H=0$	51
Σχήμα 3-30	Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$ και $Z/H=0$	51
Σχήμα 3-31	Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=6$ και $Z/H=0$	52
Σχήμα 3-32	Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$	53
Σχήμα 3-33	Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$	53
Σχήμα 3-34	Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=6$	54
Σχήμα 4-1	Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 1$ m/s και $t = 100$ s.	57
Σχήμα 4-2	Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 2$ m/s και $t = 100$ s.	58
Σχήμα 4-3	Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 3$ m/s και $t = 100$ s.	59

Σχήμα 4-4 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 4,2$ m/s και $t = 100$ s.	60
Σχήμα 4-5 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 1$ m/s.	61
Σχήμα 4-6 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 2$ m/s.	62
Σχήμα 4-7 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 3$ m/s.	62
Σχήμα 4-8 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 4,2$ m/s.	63
Σχήμα 4-9 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 1$ m/s.	64
Σχήμα 4-10 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 2$ m/s.	65
Σχήμα 4-11 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 3$ m/s.	65
Σχήμα 4-12 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 4,2$ m/s.	66
Σχήμα 4-13 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 1$ m/s.	67
Σχήμα 4-14 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 2$ m/s.	68
Σχήμα 4-15 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 3$ m/s.	68
Σχήμα 4-16 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 4,2$ m/s.	69
Σχήμα 4-17 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 1$ m/s και $t = 100$ s.	70
Σχήμα 4-18 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 2$ m/s και $t = 100$ s.	70
Σχήμα 4-19 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 3$ m/s και $t = 100$ s.	71
Σχήμα 4-20 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 4,2$ m/s και $t = 100$ s.	71
Σχήμα 4-21 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 1$ m/s.	72
Σχήμα 4-22 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 2$ m/s.	73
Σχήμα 4-23 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 3$ m/s.	73
Σχήμα 4-24 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 4,2$ m/s.	74
Σχήμα 4-25 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 1$ m/s.	75
Σχήμα 4-26 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 2$ m/s.	75
Σχήμα 4-27 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 3$ m/s.	76
Σχήμα 4-28 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 4,2$ m/s.	76
Σχήμα 4-29 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 1$ m/s.	77
Σχήμα 4-30 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 2$ m/s.	78
Σχήμα 4-31 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 3$ m/s.	78

Σχήμα 4-32 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO ₂ για U _∞ = 4,2 m/s.	79
Σχήμα 4-33 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U _∞ για U _∞ = 1 m/s και t = 100 s.	80
Σχήμα 4-34 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U _∞ για U _∞ = 2 m/s και t = 100 s.	80
Σχήμα 4-35 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U _∞ για U _∞ = 3 m/s και t = 100 s.	81
Σχήμα 4-36 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U _∞ για U _∞ = 4,2 m/s και t = 100 s.	81
Σχήμα 4-37 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V _m /U _∞ για U _∞ = 1 m/s.	82
Σχήμα 4-38 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V _m /U _∞ για U _∞ = 2 m/s.	83
Σχήμα 4-39 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V _m /U _∞ για U _∞ = 3 m/s.	83
Σχήμα 4-40 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V _m /U _∞ για U _∞ = 4,2 m/s.	84
Σχήμα 4-41 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T _m για U _∞ = 1 m/s.	85
Σχήμα 4-42 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T _m για U _∞ = 2 m/s.	85
Σχήμα 4-43 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T _m για U _∞ = 3 m/s.	86
Σχήμα 4-44 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T _m για U _∞ = 4,2 m/s.	86
Σχήμα 4-45 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO ₂ για U _∞ = 1 m/s.	87
Σχήμα 4-46 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO ₂ για U _∞ = 2 m/s.	88
Σχήμα 4-47 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO ₂ για U _∞ = 3 m/s.	88
Σχήμα 4-48 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO ₂ για U _∞ = 4,2 m/s.	89
Σχήμα 4-49 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας για την περίπτωση W/H=1.	90
Σχήμα 4-50 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας για την περίπτωση W/H=3.	91
Σχήμα 4-51 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας για την περίπτωση W/H=6.	92

Κατάλογος Εξισώσεων

(2-1).....	23
(3-1).....	27
(3-2).....	28
(3-3).....	28
(3-4).....	28
(3-5).....	28
(3-6).....	28
(3-7).....	33
(3-8).....	39
(3-9).....	48
(4-1).....	56

Abstract

Even in our days, the airflow patterns inside in urban areas presents an increased interest. Urban planners are trying to find ways to make cities safer places for citizens while increasing demand for new or existing areas. Based on these facts and considering the development of computational tools developed by engineers in the fields of fluid mechanics and fire mechanics, it is possible to predict the behavior of airflow patters during accidents in urban areas. In this current study, two different computational fluid dynamics techniques are combined to determine the structure of airflow within a street canyon. Initially, Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) models were performed for various W/H ratios of a street canyon model, which are used for the Large Eddy Simulation (LES) method initialization. The numerical models were validated with a reduce scale model which was built and tested in a wind tunnel. HWA (Hot Wire Anemometer) techniques were used in order to define the initial boundary conditions of the kinetic energy and dissipation rate. Pressure measurements with pressure taps on the building's surface are recorded, and the pressure coefficients are compared against the numerical simulations results. After the study of the airflow a risk assessment analysis was conducted. The examined accident referred to a natural gas pipe leakage at the center of the street canyon. A constant source of leakage and four different atmospheric boundary layer was studied. The flow and fire characteristics were defined for all different examined cases. The strong correlation between the flow phenomena and the thermodynamic state of the produced gases from the combustion kept under consideration. As a result, there was the influence from buoyancy forces in the airflow structure. The natural gas pool fire is transformed quickly into a fire jet creating a temperature distribution, which makes this kind of accidents more severe. Outcome of the risk assessment analysis was the distribution of the temperature field defining the fatal zones from the high temperatures inside in the street canyon.

1 Εισαγωγή

Από την εποχή που ο άνθρωπος άρχισε να αναβαθμίζει την ποιότητα ζωής του και να ζει σε αστικά κέντρα ήταν αναπόφευκτη η ανάπτυξη της βιομηχανίας και των βιομηχανικών περιοχών. Η ανάγκη για εξέλιξη και βελτίωση της καθημερινής ζωής του μέσου αστικού πληθυσμού είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πρωτογενών αναγκών. Έτσι λοιπόν το αστικό περιβάλλον έπρεπε να δομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετήσει τις ανάγκες αυτές, σαν αποτέλεσμα δημιουργήθηκαν μέσα στα αστικά κέντρα περιοχές οι οποίες είναι κατοικήσιμες και οφείλουν να είναι ασφαλείς, αλλά και βιομηχανικές ζώνες με σκοπό την παροχή αγαθών πρώτης ανάγκης.

Στις βιομηχανικές ζώνες υπήρχε η ανάγκη για αποθήκευση και διαχείριση τοξικών ή επικίνδυνων πρώτων υλών, στο πέρασμα των χρόνων έχουν συμβεί αρκετά ατυχήματα σε βιομηχανικές ζώνες. Δημιουργήθηκε η ανάγκη να τεθούν ορισμένες κλίμακες επικινδυνότητας (Vasilopoulos, Mentzos et al. 2018, Nguyen, Nguyen et al. 2019, Vasilopoulos, Sarris et al. 2019, Vasilopoulos, Sarris et al. 2019, Vasilopoulos, Lekakis et al. 2021) για την επίγνωση του ρίσκου αλλά και την τοποθέτηση των περιοχών αυτών εντός του αστικού περιβάλλοντος με την δυνατότητα επικοινωνίας με την κατοικήσιμη ζώνη.

Σε καμία περίπτωση όμως δεν γίνεται να υπάρχει αποκοπή των περιοχών υψηλής επικινδυνότητας από το δομημένο αστικό περιβάλλον το οποίο απαρτίζεται από κατοικήσιμες περιοχές, περιοχές δημόσιου υπαίθριου χώρου κτλ. Έτσι λοιπόν είναι αναγκαία η διακίνηση καυσίμων και άλλων επικίνδυνων πρώτων υλών για την εξυπηρέτηση των αναγκών της αστικής περιοχής.

Οι αστικές περιοχές κατηγοριοποιούνται βάση της γεωμετρικής κλίμακας τους ως εξής: σε μεγάλες δομές που ονομάζονται οικοδομικά τετράγωνα, σε αστικές χαράδρες οι οποίες αποτελούν μεσαία κλίμακα αστικού δομημένου περιβάλλοντος και τέλος την στοιχειώδη μονάδα αστικού περιβάλλοντος το απομονωμένο κτίριο (Oke 1987, Oke 1988).

Η πρωτοτυπία της εργασίας αυτής είναι ότι εφαρμόζονται αριθμητικές μέθοδοι μεγάλων δινών (LES), οι οποίες προσεγγίζουν με υψηλή ακρίβεια την ανάλυση της ροής του ανέμου στο εσωτερικό σε συνδυασμό με αναλυτικό μοντέλο ανάλυσης της καύσης σε μηδενικό επίπεδο χώρου και μονοδιάστατο μοντέλο χημικής κινητικής.

Δεδομένου ότι υπάρχουν μελέτες φωτιάς λίμνης στο εσωτερικό μίας αστικής χαράδρας (Kim and Baik 2001, Hu, Huo et al. 2009, Zhang, Hu et al. 2013), ελάχιστες συνδυάζουν την ακρίβεια ροής του ανέμου στο εσωτερικό της χαράδρας με λεπτομερή επίλυση του φαινομένου με μοντέλο το οποίο προσεγγίζει το ποσό θερμότητας το οποίο εκλύεται από την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων.

Θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά λογισμικά ανοιχτού κώδικα για την λεπτομερή επίλυση της καύσης, λαμβάνοντας υπόψιν ότι το ένα επιλύει με ακρίβεια την ροή λαμβάνοντας υπόψιν φαινόμενα τύρβης, ενώ το άλλο θα επιλύσει αναλυτικά τα φαινόμενα χημικής κινητικής, συνυπολογίζοντας την θερμοδυναμική των πραγματικών αερίων και της εκλυόμενης μάζας των προϊόντων της καύσης σε πολλαπλά βήματα. Τέλος στην πρωτοτυπία της εργασίας συμπεριλαμβάνεται η πραγματοποίηση πρωτότυπων πειραματικών μετρήσεων για την επικαιροποίηση των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας έρευνας θα αποτελέσει η περίπτωση ατυχήματος εντός του καναλιού μιας τυπικής αστικής χαράδρας. Σκοπός μας είναι η διερεύνηση του κατά πόσο η γεωμετρία του αστικού περιβάλλοντος αλλά και των χαρακτηριστικών ροής επηρεάζει τη διασπορά των τοξικών ρύπων εντός της αστικής χαράδρας, περιγράφοντας τον περιορισμένο χώρο που περικλείεται μεταξύ δύο κτιρίων (Baik and Kim 2002), ο χώρος αυτός αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά κατά το οποίο θα εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά τη ροής.

Η ποιότητα του αέρα εντός μίας τυπικής αστικής χαράδρας έχει αποτελέσει εκτεταμένο αντικείμενο έρευνας (Chang and Meroney 2003), καθώς σε περίπτωση πρόκλησης ατυχήματος εντός αυτής πρέπει να γίνει άμεση εκκένωση του χώρου καθώς και να υπάρχει η δυνατότητα καταστολής.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να μελετήσει ποσοτικά αλλά και ποιοτικά τα χαρακτηριστικά της ροής εντός μίας τυπικής αστικής χαράδρας καθώς και πώς αυτά επηρεάζονται από την γεωμετρία της. Μελετώντας τα χαρακτηριστικά της ροής εντός της αστικής χαράδρας μπορεί να προσδιοριστεί η διασπορά τοξικών ρύπων εντός αυτής καθώς και πώς αυτή η διασπορά μπορεί να περιορίσει την κίνδυνο των διερχομένων.

Αν γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά τη ροής εντός της αστικής χαράδρας καθώς και πώς αυτά διαχέουν τοξικούς ρύπους, γνωρίζοντας και τις ανεμολογικές και κλιματικές συνθήκες δίνεται η δυνατότητα να προβούμε σε έναν χωροταξικό σχεδιασμό ο οποίος θα είναι ασφαλής.

Λόγω της έκτασης του γνωστικού αντικειμένου πρέπει να οργανωθεί η παραπάνω μελέτη με τέτοιο τρόπο ώστε να θωρακιστεί η ερευνητική της υπόσταση και εξασφαλίζοντας ότι θα οδηγηθούμε σε επιστημονικά αποδεκτά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι αρχές καθώς και προχωρημένες τεχνικές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και της χημικής κινητικής. Έτσι λοιπόν πραγματοποιώντας και αντίστοιχα πειράματα σε πειραματικές υπό κλίμακας προπλάσματα συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις αλλά χρησιμοποιώντας και πειραματικά δεδομένα από την διεθνή βιβλιογραφία, δύναται να έχουμε έναν εποπτικό έλεγχο για τη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας.

Τα μέσα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν είναι σε αρχικό στάδιο το λογισμικό ανοιχτού κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (OpenFOAM). Με τη χρήση αυτού του λογισμικού θα διενεργηθούν προσομοιώσεις υπολογισμού των μέσων τιμών (RANS – Reynolds Averaged NavierStokes equations) (Chow, Li et al. 2001, Salim, Buccolieri et al. 2011, Tominaga and Stathopoulos 2011), Chew, Glicksman et al. (2018), (Muhammad Yazid, Salim et al. 2020) του πεδίου ροής καθώς και προσομοιώσεις μεγάλης δίνης (LES). Όσο αφορά τα ζητήματα χημείας θα χρησιμοποιηθεί πολυβηματικός χημικός επιλυτής για την καλύτερη εκτίμηση των συγκεντρώσεων των τοξικών ρύπων. Όλα τα παραπάνω υπολογιστικά εργαλεία είναι ικανά να πλαισιώσουν το υπολογιστικό κομμάτι της παρούσας έρευνας, αποτελούν τεχνικές με εκτεταμένη βιβλιογραφία η οποία αναπτύσσεται συνεχώς καθώς αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος.

Το πειραματικό κομμάτι αυτής της εργασίας αποτελείται από την δοκιμή προπλάσμάτων (Yu, Liu et al. 2018), οι οποίες προκύπτουν από τους νόμους δυναμικής και κινητικής ομοιότητας του πεδίου ροής με αυτό της μακέτας. Με τον παραπάνω ορισμό θα μπορούμε να συγκρίνουμε ποσοτικά αλλά και ποιοτικά τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων μας. Προκειμένου να καταστεί αυτό δυνατό χρειάζεται εκτενής γνώση στη διαχείριση του πειραματικού εξοπλισμού, αλλά και στο γνωστικό αντικείμενο των τεχνικών μετρήσεων. Η πειραματική μεθοδολογία θα βασιστεί πλήρως στο γνωστικό υπόβαθρο το οποίο προαναφέρθηκε ώστε να μην δοθεί η δυνατότητα αμφισβήτησης των αποτελεσμάτων.

Ολοκληρώνοντας την έρευνας στο παρών θέμα υπάρχει η ελπίδα η παραπάνω μεθοδολογία να αποτελέσει τροφή για σκέψη και αξιοποίηση από τις δημοτικές ενότητες ή από τους πολεοδομικούς φορείς προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν ή και να αποτραπούν μελλοντικά

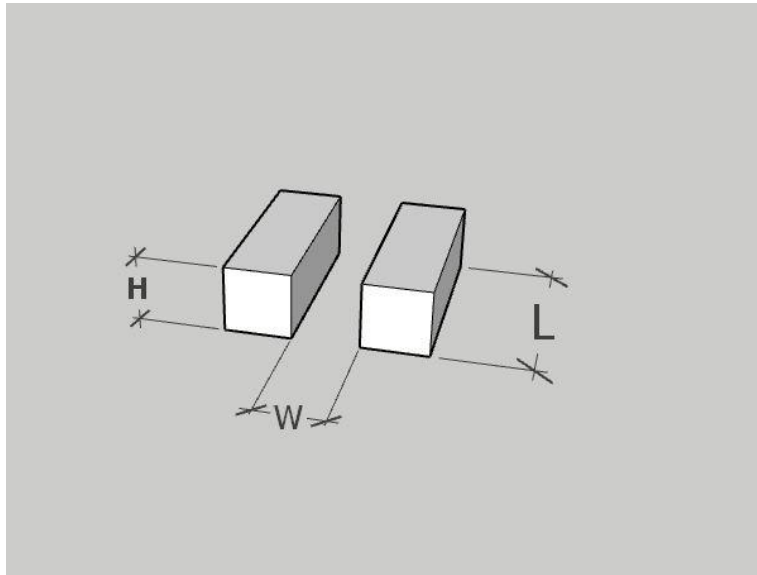
ατυχήματα σε αστικές περιοχές θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή αλλά και ευαίσθητα κομμάτια του κοινωνικού συνόλου. Σκοπός είναι να αξιοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι διαθέσιμοι πόροι που προσφέρει απλόχερα το ακαδημαϊκό περιβάλλον συνεισφέροντας και διασφαλίζοντας το δημόσιο και κοινό συμφέρον.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Όπως έγινε αντιληπτό και από την εισαγωγή η παρούσα έρευνα σκοπεύει να εντοπίσει τις αδυναμίες της διεθνούς βιβλιογραφίας στα θέματα της μορφολογίας της ροής εντός των αστικών χαραδρών, την διασπορά των ρύπων εντός αυτών αλλά και καθώς και την μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών καύσης. Από την βιβλιογραφία η οποία θα παρουσιαστεί και θα συζητηθεί με σκοπό να τονιστούν οι αδυναμίες αυτής, καθώς και πώς η παρούσα έρευνα θα αποπειραθεί να ελέγξει ή να αποτελέσει μία από τις μεθοδολογίες που θα χρησιμοποιηθούν από εδώ και στο εξής.

2.1 Μορφολογία ροής εντός τυπικής αστικής χαράδρας και διασποράς ρύπου

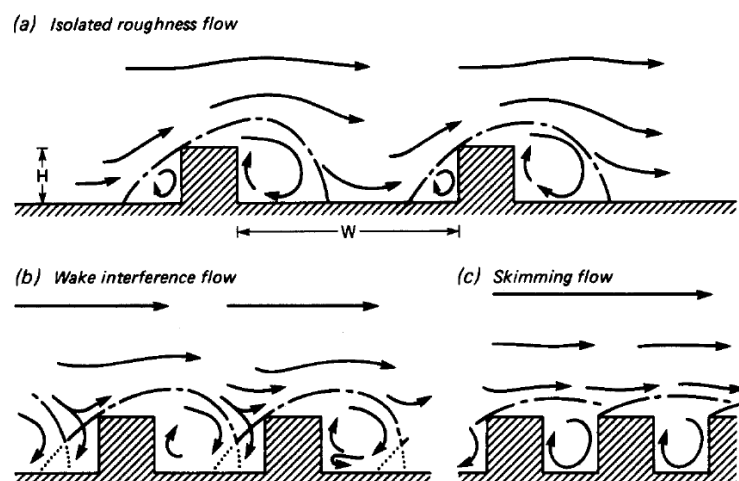
Η μορφολογία της ροής είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη γεωμετρία της αστικής χαράδρας. Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι μιας αστικής χαράδρας, βάση των ανωτέρων χαρακτηρίζεται η μορφή του πεδίου ροής. Οι χαρακτηριστικές παράμετροι οι οποίες μπορούν να οριστούν και χρησιμοποιούνται εκτενώς από την βιβλιογραφία είναι ο L/H , η μεταβολή του πλάτους ως προς το ύψος των κτιρίων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εδραίωση της ροής και για την κατηγοριοποίηση της. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστεί κατά πόσο η απόσταση W επηρεάζει την μορφολογία της ροής. Για το λόγο αυτό θα αδιαστατοποιηθεί η απόσταση αυτή με το ύψος των κτιρίων προκειμένου να είναι πιο διαχείριση της μεταβλητής αυτής. Από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ο λόγος W/H .



Σχήμα 2-1 Τυπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αστικής χαράδρας

Στην εργασία του ο Oke (1988) θέτει το ερώτημα κατά πόσο η μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας αστικής περιοχής μπορεί να δώσει ποσοτικά στοιχεία για την κατανομή του αέρα εντός μιας αστικής χαράδρας. Στην αρχή τονίζει πόσο σημαντική είναι η αναλογία του μήκους μίας αστικής χαράδρας, ως προς το ύψος του κτιρίου (L/H). Εισάγεται σαν σημαντική παράμετρος η απόσταση των δύο κτιρίων χρησιμοποιώντας σαν αναφορά το ύψος του κτιρίου. Ο καθορισμός της μορφολογίας της ροής μπορεί να γίνει από αυτούς τους δύο λόγους καθώς αποτελούν σημαντικές παραμέτρους και στη αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κτιρίων.

Στο Σχήμα 2-2, δίνονται τα είδη των διαφορετικών ροών για τον χαρακτηριστικό λόγο W/H .



Σχήμα 2-2 Δομές και είδη ροής εντός αστικής χαράδρας, εικόνα από Oke (1988)

Όταν ο λόγος (W/H) ξεπερνάει τα πέντε ύψη κτιρίου παρατηρείται ροή μεμονωμένης τραχύτητας. Τότε παρατηρείται σαν ένα είδους ανεξαρτησίας των δύο κτιρίων όσο αφορά την μορφολογία του πεδίου ροής.

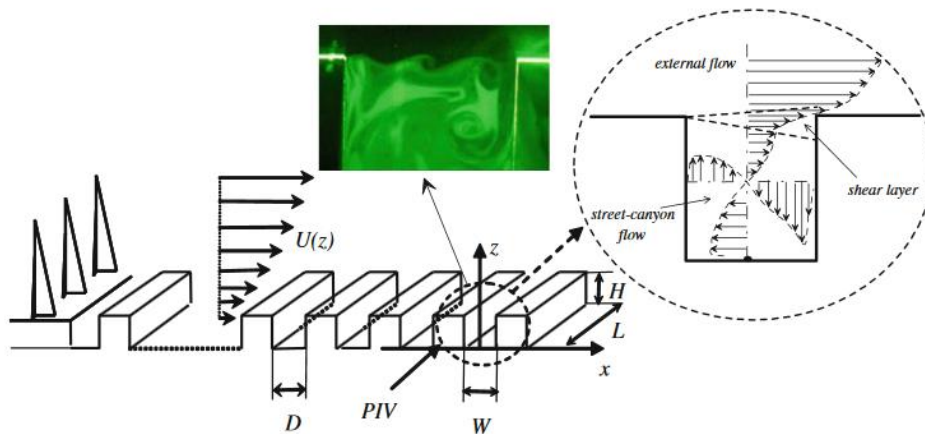
Όσο ο παραπάνω λόγο αρχίζει να μικραίνει αρχίζει και εμφανίζεται ροή διαταραχής όμορου κύριο γνώρισμα αυτής είναι η διαταραχή στο πεδίο ροής μεταξύ των δύο κτιρίων χωρίς να επιτρέπει την δημιουργία μία κεντρικής δίνης, δημιουργώντας ασταθείς καταστάσεις στα ροϊκά μεγέθη. Στην τρίτη περίπτωση όταν ο χαρακτηριστικός λόγος W/H είναι περίπου ίσος με ένα τότε παρατηρείται η δημιουργία μίας κεντρικής δίνης εντός της αστικής χαράδρας, η παραπάνω περίπτωση ονομάζεται ως ροή απόξεσης. Κατά τους ερευνητές μία παράμετρος η οποία μπορεί να επηρεάσει την μετάβαση της ροής από το ένα είδος στο άλλο ανεξαιρέτως το μήκος της αστικής χαράδρας είναι η τραχύτητα. Στην ροή απόξεσης η δίνη εντός της αστικής χαράδρας οδηγείται προς το άνω μέρος των κτιρίων εμφανίζοντας μία κλίση προς το δεύτερο κτίριο, αυτό εμφανίζεται σε αστικές χαράδρες οι οποίες έχουν πεπερασμένο μήκος κατά την διαδικασία της προσομοίωσης. Η παρούσα έρευνα στοχεύει στην διερεύνηση της μορφολογίας της ροής βάση της εργασίας του (Oke 1988) προκειμένου να επιβεβαιωθεί σαν πρώτο βήμα το πεδίο ροής και ύστερα να γίνει η μελέτη επικινδυνότητας σε περίπτωση ατυχήματος.

Η ποιότητα του αέρα και η διασπορά των ρυπαντών εντός της αστικής χαράδρας μελετήθηκαν από τους Klein and Plate (1999). Η μελέτη τους ήταν κυρίως πειραματική, προκειμένου να μπορέσουν να προσομοιώσουν το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα χρησιμοποίησαν γεννήτριες δινών στην είσοδο της αεροσήραγγας τους. Ξεκίνησαν τα πειράματα τους πειραματιζόμενοι με τις χαρακτηριστικές διαστάσεις της αστικής χαράδρας. Χρησιμοποίησαν ως αναφορά μία χαράδρα με λόγο πλάτους προς ύψος $W/H=1$ και μήκους προς ύψους $L/H=3$, εντός της χαράδρας τοποθέτησαν δύο πηγές ρυπαντών, διαπίστωσαν ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονταν όταν ο λόγος είναι $L/H=10$. Αντίθετα για λόγο $W/H=1$ παρατηρήθηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις και αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτό είναι το κρίσιμο σημείο που η ροής προσκολλάται στο κατάντη κτίριο.

Πειραματίστηκαν με την είσοδο επιπλέον κτιρίων ανάντη της υπό μελέτη αστικής χαράδρας. Κύρια αιτία του πειραματισμού αυτού ήταν να διαπιστωθεί η επιρροή της ροής όταν η είσοδος αποτελεί το απόρροια άλλων κτιρίων. Συνέχισαν τα πειράματα τους για μεταβλητές γωνίες προσβολής του οριακού στρώματος. Τα πειράματα έδειξαν ότι για λόγο $L/H=10$ και γωνία 60 μοιρών αλλά και λόγο $L/H=5$ και γωνία 60 μοιρών παρουσιάζεται αισθητή μείωση της συγκέντρωσης των ρύπων. Γίνεται πλέον αντιληπτό ότι η διασπορά ενός ρυπαντή εντός της

αστικής χαράδρας εξαρτάται πλήρως από τις δομές τύρβης η οποίες δημιουργούνται από την γεωμετρία της χαράδρας.

Τους μηχανισμούς μεταφοράς της τύρβης σε αστική χαράδρα η οποία έχει σαν είσοδο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μελέτησαν οι Salizzoni, Marro et al. (2011) Τα πειράματα τους είχαν σαν στόχο τη μελέτη της ροής του αέρα μέσα σε αστική χαράδρα με τη χρήση θερμικού ανεμομέτρου (HWA) και φωτογραφικής ταχυμετρίας (PIV). Στην είσοδο τοποθέτησαν δύο επιπλέον αστικές χαράδρες πριν από την χαράδρα προς εξέταση καθώς ήθελαν να δουν πειραματικά την επιρροή της ροής όταν το οριακό στρώμα έχει ήδη προσπέσει ήδη σε κτίρια.



Σχήμα 2-3 Προφίλ ταχύτητας εντός αστικής χαράδρας (Salizzoni, Marro et al. 2011)

Τα πειραματικά αποτελέσματα τους επικεντρώνονται σε τρία διαφορετικά είδη ροής:

Στην «εξωτερική ροή», και η απόσταση D μεταξύ των δύο κτιρίων είναι τέτοια ώστε να παρατηρείται ροής απόξεσης, οι δημιουργούμενες δίνες στην υπό έλεγχο αστική χαράδρα (W) είναι μικρές λόγω του μικρού χώρου που υπάρχει μεταξύ τους. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων είναι τέτοιο ώστε να δημιουργείται ροή διαταραχής ομόρρου οι ανακυκλοφορίες που σχηματίζονται εντός της αστικής χαράδρας είναι μεγαλύτερες. Το παραπάνω συμπέρασμα βάση των ερευνητών αποδίδεται στον περισσότερο χρόνο που χρειάζεται η αδιατάραχτη να διασχίσει την χαράδρα ενώ παράλληλα έρχεται σε επαφή με τον αέρα εντός της χαράδρας.

Σαν «στρώμα ανάμειξης» ορίζεται η περιοχή διεπαφής της αδιατάραχτης ροής και του αέρα που είναι εντός αυτής. Προκειμένου να ορισθεί κάπως το παραπάνω παρατηρούμενο φαινόμενο όρισαν την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Τελικό συμπέρασμα για το στρώμα ανάμειξης είναι ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων αυξάνεται και το πάχος αυτού, το παραπάνω είναι θετικό καθώς όπως θα δούμε παρακάτω η διαφυγή των ρύπων γίνεται από αυτή τη ζώνη ανάμειξης.

Η παραπάνω μελέτη κλείνει με τη λήψη πειραματικών μετρήσεων εντός της αστικής χαράδρας. Από εκεί παρατηρήθηκαν ότι η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι μικρή εντός της αστικής χαράδρας. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι υπάρχει ένα ισοζύγιο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που δημιουργείται από το στρώμα ανάμειξης με αυτή που παράγεται από την κεντρική ανακυκλοφορία εντός της αστικής χαράδρας. Επίσης, λήφθηκαν οριζόντια και εγκάρσια προφίλ της ταχύτητας εντός της χαράδρας παρουσιάζοντας γραμμική και αρνητική κλίση κοντά στα τοιχώματα. Από τα πιο ενδιαφέροντα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι η έλλειψη συσχέτισης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας από τις τάσεις του Reynolds. Αν και η τυρβώδης κινητική ενέργεια αυξάνεται σε ορισμένα σημεία της αστικής χαράδρας δεν υπάρχει αντίστοιχη αύξηση των τάσεων του Reynolds. Υπάρχουν δύο πιθανές εκδοχές για το παραπάνω φαινόμενο Αρχικά οι διακυμάνσεις προκαλούνται από δομές μικρής κλίμακας. Αντίστοιχα οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις μπορεί να προκαλούνται από μεγαλύτερες δομές εντός της αστικής χαράδρας. Κλείνοντας προέβησαν στο συμπέρασμα ότι η μικρής κλίμακας δομές εισέρχονται από την αδιατάραχτη ροή.

Ενδιαφέρον εμφανίζουν οι μελέτες οι οποίες αμελούν την Τρίτη διάσταση του προβλήματος και επικεντρώνονται στο υπολογιστικό σκέλος. Οι Nazridoust and Ahmadi (2006) στη δημοσίευσή τους μελέτησαν, τη διασπορά ρυπαντών εντός αστικής χαράδρας. Η μελέτη του ρύπου στην συγκεκριμένη μελέτη έχει γίνει με την μέθοδο Lagrange, ο ρυπαντής έχει θεωρηθεί σαν σύνολο αιωρούμενων σωματιδίων. Στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης ορίστηκαν οι παράμετροι με τη βοήθεια ημιεμπειρικών εξισώσεων. Δημιούργησαν το πλέγμα τους έτσι ώστε να είναι πυκνό κοντά στα τοιχώματα με τη χρήση του RSTM ως μοντέλου τύρβης. Βάση της παραπάνω βιβλιογραφικής ανασκόπησης εμφανίστηκε μία ανακυκλοφορία εντός της αστικής χαράδρας.

Η μελέτη του ρύπου σαν σύνολο σωματιδίων και όχι σαν παθητικού ρύπου συνεχούς μέσου έδειξε ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι ταχύτητες ροής τόσο μικρότερες είναι οι συγκεντρώσεις που παρατηρούνται. Επίσης έγινε προσομοίωση και για συμμετρικό σύμπλεγμα αστικών χαράδρων. Η διασπορά των ρυπαντών ελέγχεται από την ένταση της τύρβης εντός της αστικής χαράδρας. Αντίστοιχη μελέτη διενεργήθηκε από τους Garcia Sagrado, van Beeck et al. (2002) προσπάθησαν να προσομοιώσουν τη ροή εντός αστικής χαράδρας και διασποράς ρυπαντών τόσο πειραματικά αλλά και υπολογιστικά. Λόγω της περιπλοκότητας της η συγκεκριμένη μελέτη θα περιοριστεί στις δύο διαστάσεις στην υπολογιστική προσομοίωση και στην πειραματική. Το μοντέλο που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην αεροσήραγγα είναι από ξύλο και έχει βαφτεί μαύρο ώστε να μην αντανακλά τις εστιασμένες δέσμες του laser για

να μπορεί να γίνει η ανάλυση με το λογισμικό του PIV. Η πηγή έχει τοποθετηθεί στο κέντρο της αστικής χαράδρας. Στην είσοδο της αεροσήραγγας για να προσομοιωθεί ένα ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα έχει τοποθετηθεί ένα μεταλλικό πλέγμα, η μέγιστη ταχύτητα της αδιατάραχτης είναι 2,5 m/s δίνοντας έτσι ένα αριθμό Reynolds 5.200. στην είσοδο έχουν γίνει μετρήσεις θερμικό ανεμόμετρο, εντός της αστικής χαράδρας έχουν γίνει με τη μέθοδο PIV, και η μέτρηση της συγκέντρωσης έγινε με τη διάθλαση των ακτίνων του laser.

Τα αποτελέσματα της αεροσήραγγας έδειξαν την αποκόλληση της ροής και πως επιταχύνεται όταν αυτή προσκρούει στο πρώτο κτίριο της αστικής χαράδρας της αστικής χαράδρας. Σαν αποτέλεσμα δημιουργείται μία περιοχή ανακυκλοφορίας εντός της αστικής χαράδρας. Αυτή η περιοχή ανακυκλοφορίας περιέχει ουσιαστικά μία δομή της ροής η οποία μειώνεται όταν το ύψος του κατάντη κτιρίου αυξάνεται.

Οι Galani A. (2009) την δημοσίευσή τους μελέτησαν τη διασπορά ενός ρύπου σε αστική χαράδρα στο Λονδίνο. Τα σημεία ενδιαφέροντος είναι ουσιαστικά σημεία για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις προκειμένου να συγκριθούν με τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Σαν οριακές συνθήκες έλαβαν μετρούμενες τιμές από σταθμούς μέτρησης, το ίδιο ισχύει και για τις συγκεντρώσεις που προσομοιώθηκαν.

Όπως έχει γίνει αντιληπτό η ανάγκη συνδυασμού υπολογιστικών προσομοιώσεων και πειραματικών δεδομένων είναι αναγκαία καθώς το φαινόμενο διασποράς ρύπου εντός μίας αστικής χαράδρας είναι πολυδιάστατο. Η δυσκολία αυτή βασίζεται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών ροής εντός της χαράδρας, χαρακτηριστικά τα οποία είναι αρκετά ευαίσθητα στις παραμέτρους τις οποίες εξετάζονται. Στην ερευνητική εργασία Chang and Meroney (2003) παρουσίασαν τη φύση της ροής γύρω από σώματα και τη διασπορά ρυπαντών από σταθερές πηγές έκλυσης παθητικών ρύπων. Προσομοίωσαν τη ροή εντός της αστικής χαράδρας αλλά και τη διασπορά του ρύπου, τόσο πειραματικά αλλά και υπολογιστικά.

Για το πειραματικό σκέλος της έρευνας κατασκευάστηκε ένα πλαστικό μοντέλο προκειμένου να είναι το κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας. Για την πειραματική μέτρηση του συντελεστή πίεσης ανοίχθηκαν οπές στην επιφάνεια του μοντέλου. Για την προσομοίωση κτιρίων αριστερά και δεξιά των κτιρίων έχουν τοποθετηθεί μοντέλα από αφρό. Όσο αφορά την είσοδο έγινε έλεγχος της τοπικής τραχύτητας προκειμένου το σχηματιζόμενο προφίλ να είναι παραβολικό με εκθέτη n ίσο με 0,14. Η οπτικοποίηση της ροής έγινε με τη χρήση Laser και φωτογραφικής κάμερας λαμβάνοντας λήψεις στο κέντρο της χαράδρας.

Στις υπολογιστικές προσομοιώσεις RANS χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα κ-ε και το Spalart-Allmaras. Για τις προσομοιώσεις LES έγινε χρήση του FDS. Μετρήθηκαν πειραματικά οι συγκεντρώσεις εντός της αστικής χαράδρας για λόγους μήκους χαράδρας προς ύψος κτιρίου (W/H) ίσο με 0,5. Βαση των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν στο κτίριο ανάντη της χαράδρας. Η ανακυκλοφορία παρασέρνει ένα ποσοστό του ρυπαντή στη γωνία του κατάντη τοιχώματος, ενώ ο ρυπαντής που θα έχει μεταφερθεί πάνω ανακυκλοφορία λόγω της περιστροφής θα κινηθεί όλος προς το ανάντη τοίχωμα. Για χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με 1 προκύπτει μόνο μια ανακυκλοφορία εντός της αστικής χαράδρας η οποία περιστρέφεται ωρολογιακά, οπότε οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στο ανάντη τοίχωμα.

Ορισμένοι ερευνητές προτίμησαν να εργαστούν πάνω στην εξοικονόμηση εργατωρών δίνοντας έμφαση στο υπολογιστικό σκέλος του προβλήματος προσπαθώντας να βελτιστοποιήσουν τα μοντέλα τύρβης αλλά και τους αλγόριθμους. Σκοπός αυτής της σκέψης είναι η μείωση των ωρών αλλά και των πόρων που μπορούν εξοικονομηθούν από τα πειράματα. Γενικά το πειραματικό κομμάτι απαιτεί αρκετές ώρες σχεδιασμού και μελέτης προκειμένου να διενεργηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η φυσική που εξετάζεται υπολογιστικά να είναι κοινή με αυτή του πειράματος. Οι (Chan, So et al. 2001) μελέτησαν τις πως μπορεί να μειωθεί η διασπορά των ρυπαντών από τις κρίσιμες παραμέτρους. βάσισαν την μελέτη τους μόνο στο υπολογιστικό σκέλος της τρισδιάστατης ροής εντός αστικής χαράδρας. Εισήχθησαν το βασικό κ-ε μοντέλο ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στη σύζευξη πίεσης-ταχύτητας (coupled solver). Η πηγή του ρυπαντή τοποθετήθηκε ακριβώς στο μέσον της αστικής χαράδρας. Ως μεταβλητές παράμετροι στις υπολογιστικές τους προσομοιώσεις είναι το ύψος των κτιρίων, το ύψος των κτιρίων προς το μήκος της αστικής χαράδρας (W/H). Αλλά και το μήκος των κτιρίων προς το ύψος τους. Προέκυψε ότι για τη μεταβολή του ύψους των δύο κτιρίων όταν το δεύτερο κτίριο είναι υψηλότερο από το πρώτο ο ρύπος εγκλωβίζεται εντός της χαράδρας από την ανακυκλοφορία εντός αυτής.

Σε αντίθετη περίπτωση όταν το δεύτερο κτίριο έχει μικρότερο ύψος από το δεύτερο ο ρύπος διαφεύγει καθώς δεν παρασέρνεται για να ανακυκλοφορήσει επηρεαζόμενος από το ύψος του κτιρίου. Στην περίπτωση όπου το ύψος και των δύο κτιρίων είναι ίσο ο ρύπος συγκεντρώνεται στο τοίχωμα του πρώτου κτιρίου της χαράδρας λόγω της περιστροφής της δίνης. Μεταβάλλοντας το μήκος της αστικής χαράδρας προς το ύψος των κτιρίων προκύπτουν τα εξής: κατά τη μετάβαση της ροής από μεμονωμένης τραχύτητας σε διαταραχής ομόρου οι αυξημένες συγκεντρώσεις του ρυπαντή στις κάτω γωνίες της αστικής χαράδρας αρχίζουν να

μεταφέρονται προς το κέντρο. Στη ροή διαταραχής ομόρου εμφανίζεται ένα τυρβώδες υπόστρωμα στο κάτω μέρος της χαράδρας. Καθώς η απόσταση των δύο κτιρίων μειώνεται το υπόστρωμα αυτό τείνει να εξαλειφθεί καθώς η κεντρική δίνη θα λάβει τη θέση του. Η διασπορά του ρύπου τείνει να γίνει σχεδόν ομοιόμορφη. Σε βαθιές αστικές χαράδρες παρατηρούνται δύο δίνες με αντίθετη φορά περιστροφής. Τέλος μεταβάλλοντας το πλάτος των κτιρίων συναρτήσει με το ύψος τους προκύπτει ότι το μήκος των κτιρίων καταλυτικό παράγοντα μετάβασης από ροή μεμονωμένης τραχύτητας σε διαταραχής ομόρου. Οι ελάχιστες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν για λόγο L/H ίσο με 5. Τόσο πάνω από αυτό το λόγο αλλά και κάτω έχουμε αύξηση των συγκεντρώσεων .

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ερευνητική εργασία των (Baik, Park et al. 2000), στη δημοσίευση θέλησαν να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός διασποράς των ρυπαντών εντός μιας αστικής χαράδρας. Σκοπός τους ήταν οι σχεδιαστές αστικών περιοχών να λαμβάνουν υπόψη τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Προκειμένου να οπτικοποιηθεί η ροή εισήγαγαν στο κέντρο της χαράδρας σωματίδια λαδιού και σκόνη αλουμινίου. Χρησιμοποιώντας μία κάμερα λαμβάνοντας φωτογραφίες με χρονικό βήμα 0,5 s. Οι αριθμητικές προσεγγίσεις έγιναν σε δισδιάστατες γεωμετρίες δομημένου πλέγματος, το οποίο μετατοπίστηκε (staggered grid) προκειμένου να λυθεί η εξίσωση της ορμής στις δύο διαστάσεις. Οι περιπτώσεις οι οποίες μελετήθηκαν είναι για πέντε λόγους H/W (1, 1.5, 2, 2.4, 3).

Οι, (Chatzimichailidis, Argyropoulos et al. 2019) στη έρευνα τους εξέτασαν υπολογιστικά τη διασπορά ρυπαντών εντός αστικής χαράδρας με τη μέθοδο LES. Πρώτα ασχολήθηκαν με την πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος. Για τον λόγο αυτό κατασκεύασαν τρία υπολογιστικά χωρία για τα οποία έγιναν οι υπολογισμοί. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$GCI_{fine} = F_s \cdot \frac{|e_{21}|}{r^{21^p} - 1} \quad (2-1)$$

Το e_{21} είναι η διαφορά των τιμών που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στα υπό πλέγματα εξέτασης. Υπολόγισαν το σφάλμα μετάβασης από το ένα πλέγμα στο άλλο. Αυτό έγινε για την μετάβαση από μεσαίο σε πυκνό πλέγμα για τρεις θέσεις στο υπολογιστικό πλέγμα που είναι ίδια και για τα δύο πλέγματα. Τα σφάλματα εντός των περιοχών πύκνωσης ελαχιστοποιήθηκαν σε αντίθεση με τα σημεία στα οποία η πύκνωση αραίωνε. Θεώρησαν ότι το παραπάνω οφείλεται στην ελλιπή πύκνωση στην Z συνιστώσα στη χωρική διάσταση καθώς και στην έλλειψη πύκνωσης στις περιοχές υψηλών μεταβολών της συνιστώσας της ταχύτητας.

3 Ανάλυση υπολογιστικών προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η παρούσα έρευνα έχει σαν σκοπό την εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων σε δομημένο αστικό περιβάλλον. Πρόκειται για μία πολυδιάστατη ερευνητική εργασία, καθώς αποτελεί συνδυασμό υπολογιστικών προσομοιώσεων και λήψης πρωτότυπων πειραματικών μετρήσεων. Έγινε αντιληπτό από την βιβλιογραφική ανασκόπηση ότι, προκειμένου να διατηρήσουν την αξιοπιστία τους ήταν αναγκαία η ύπαρξη πειραματικού σκέλους. Για το λόγο αυτό, η παρούσα ερευνητική εργασία οφείλει να ακολουθήσει τις πρακτικές της υπάρχουσας βιβλιογραφίας στο αντικείμενο. Η μεθοδολογία απαρτίζεται από τον συνδυασμό υπολογιστικών προσομοιώσεων και διενέργειας πειραμάτων στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου Θερμορυστών του ΠΑ.Δ.Α.

Όσον αφορά το υπολογιστικό σκέλος της έρευνας, διενεργήθηκαν υπολογιστικές προσομοιώσεις με τον ανοιχτό κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής OpenFOAM. Οι υπολογιστικοί πόροι για την περάτωση της παραπάνω έρευνας δόθηκαν από: “National Infrastructures for Research and Technology S.A. (GRNET S.A.) in the National HPC facility—ARIS—under project ID pr011045-UrbanFirePlan2”. Συγκεκριμένα, για την εξακρίβωση των χαρακτηριστικών της ροής εντός τυπικής αστικής χαράδρας, εφαρμόστηκε η μέθοδος Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations (RANS). Η παρούσα μέθοδος είναι αρκετά σημαντική, καθώς μπορεί να δώσει όλες τις μέσες τιμές των ροϊκών μεγεθών. Για την εκτίμηση των διακυμάνσεων των μεγεθών αυτών γίνεται η χρήση μοντέλων τύρβης. Διενεργήθηκαν υπολογιστικές προσομοιώσεις οι οποίες είχαν σαν σκοπό να εξακριβωθεί ποιο μοντέλο τύρβης περιγράφει καλύτερα την εξεταζόμενη ροή. Τα μοντέλα τύρβης τα οποία δοκιμάστηκαν είναι το Standard K-ε. Καθώς αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα τύρβης το οποίο χρησιμοποιείται στις RANS προσομοιώσεις. Στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο RANS προσομοιώθηκε η έκλυση ρύπου, ο οποίος θα είναι το CO₂, καθώς είναι ένα ρυπαντής ο οποίος χρησιμοποιείται κατ’ εξακολούθηση στις έρευνες.

Στη συνέχεια των υπολογιστικών προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδο Large Eddy Simulation (LES) στις ίδιες ακριβώς περιπτώσεις όπου έγιναν προσομοιώσεις RANS, για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων.

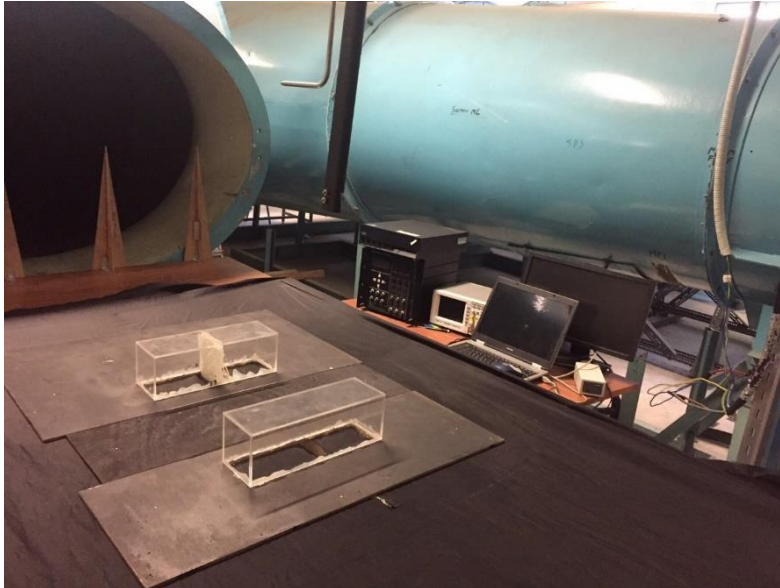
Η επικύρωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τη μέθοδο LES πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια πειραματικών μετρήσεων, τις οποίες λάβαμε από την διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και από πειράματα τα οποία διενεργήθηκαν στο εργαστήριο Θερμορευστών του ΠΑ.Δ.Α.

Όταν σε ένα λογισμικό επίλυσης δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης αρκετών αρχικών παραμέτρων από τον ίδιο τον χρήστη, γίνεται αντιληπτό ότι το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται. Μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται είναι η αρχικοποίηση των προσομοιώσεων LES με τις μέσες τιμές που θα έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις RANS. Προσθέτοντας λευκό θόρυβο στην είσοδο του πεδίου ροής, διατηρώντας το προφίλ εισόδου, προσομοιώνεται σε ικανοποιητικό βαθμό η δημιουργία διακυμάνσεων στο πεδίο ροής, δίνοντας την εικόνα ενός ρεαλιστικού πεδίου ταχύτητας. Ταυτόχρονα, εξετάστηκε ποιο χωρικό φίλτρο είναι εκείνο το οποίο μπορεί να περιγράψει καλύτερα την τύρβη της ροής, καθώς και την περίπτωση της φωτιάς, όπου θα πρέπει και εδώ να γίνει χρήση πολυβηματικού χημικού λύτη σε συνδυασμό με το μοντέλο ακτινοβολίας αλλά και την ζώνη πυρόλυσης. Τόσο για την επίλυση της χημείας, όσο και της ακτινοβολίας, έγινε χρήση διεθνών δημοσιεύσεων στα παραπάνω πεδία, διότι δεν υπάρχει η δυνατότητα λήψης πειραματικών μετρήσεων στο αντικείμενο.

Η παρούσα έρευνα αρχικά επικεντρώθηκε στην μορφολογία του πεδίου ροής εντός αστικής χαράδρας υπό την περίπτωση ατυχήματος καύσης μεθανίου. Για το λόγο αυτό έγινε αναλυτικός υπολογισμός των χαρακτηριστικών της καύσης σε πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα χημικής κινητικής, του οποίου τα αποτελέσματα θα είναι η είσοδος των χαρακτηριστικών καύσης. Το λογισμικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί είναι το Cantera. Τα πλεονεκτήματα του λογισμικού αυτού είναι, ότι είναι ανοιχτού κώδικα και βασίζεται στην πλατφόρμα ανοιχτού λογισμικού Anaconda, το οποίο είναι επέκταση της Python. Επίσης, αναλυτικός υπολογισμός θα γίνει για το φαινόμενο της ακτινοβολίας, καθώς οι θερμοκρασιακές μεταβολές εντός του πεδίου ροής θα είναι αρκετά μεγάλες. Η προσομοίωση της ακτινοβολίας και όλες οι προσομοιώσεις για την εξακρίβωση της μορφολογίας της ροής θα γίνει με τη χρήση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα OpenFOAM.

Στο πειραματικό σκέλος της έρευνας αξιοποιήθηκε πλήρως ο εργαστηριακός εξοπλισμός του εργαστηρίου Θερμορευστών. Με τη χρήση τους επικυρώθηκαν τα υπολογιστικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν. Λήφθηκαν πειραματικές μετρήσεις έντασης της τύρβης στην είσοδο της αεροσήραγγας (Σχήμα 3-5) βάσει των οποίων έχουν υπολογιστεί οι συντελεστές του μοντέλου Standard k-ε αλλά και η διακύμανση της ταχύτητας στον λευκό θόρυβο στην είσοδο του πεδίου ροής. Πραγματοποιήθηκε η μέτρηση του συντελεστή πίεσης στις υπό κλίμακα γεωμετρίες και

η λήψη χρονοσειρών με τη χρήση θερμικής ανεμομετρίας, προκειμένου να συγκριθούν με χρονοσειρές από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Η επαλήθευση της ροής έγινε με τον καθορισμό του αδιάστατου συντελεστή πιέσεων (C_p) στις επιφάνειες του ανάντη και κατόντη υπό κλίμακα κτιρίου στο θάλαμο δοκίμων της αεροσήραγγας.



Σχήμα 3-1 Τυπική αστική χαράδρα με $W/H=1$

Η παρούσα έρευνα είχε σαν αντικείμενο την διαπίστωση της μορφολογίας της ροής, καθώς και πώς αυτή επηρεάζεται από την απόσταση των δύο κτιρίων (Σχήμα 3-1). Εξετάστηκε πως επηρεάζονται όλες οι πλευρές του δεύτερου κτιρίου από την έκκληση τοξικών ρύπων, αλλά και κατά πόσο το θερμοκρασιακό πεδίο θα επηρεάσει τον χώρο που περικλείεται εντός της αστικής χαράδρας. Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι, ο χώρος μεταξύ των δύο κτιρίων αποτελεί χώρο στον οποίο μπορεί να διέρχονται πεζοί καθώς και οχήματα παντός τύπου. Η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων αποτελεί, λοιπόν, κρίσιμη παράμετρο για την εκτίμηση επικινδυνότητας. Διαπιστώνεται απουσία ύπαρξης στην βιβλιογραφία μίας αναλυτική διερεύνησης των φαινομένων καύσης εντός του αστικού περιβάλλοντος, το οποίο όπως προαναφέρθηκε αποτελεί ευαίσθητο κομμάτι της κοινωνίας. Η παρούσα έρευνα μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την βελτιστοποίηση του πολεοδομικού σχεδιασμού των αστικών κέντρων, τα οποία τα τελευταία χρόνια στη χώρα έχουν πληγεί από την έλλειψη σωστής ρυμοτόμησης.

3.2 Πειραματικές μετρήσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία ως προς την ανάλυση της χωρίζεται στο υπολογιστικό μέρος και τη λήψη πειραματικών μετρήσεων. Οι πειραματικές μετρήσεις με την μέθοδο της θερμικής ανεμομετρίας χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να οριστούν οι οριακές συνθήκες στην είσοδο

του υπολογιστικού χωρίου. Αντίστοιχα για την επικαιροποίηση των υπολογιστικών προσομοιώσεων έγιναν μετρήσεις στην επιφάνεια των υπό κλίμακα προπλασμάτων με τη χρήση του μικρομανόμετρου.

3.2.1 Συνοπτική θεωρία Θερμικής ανεμομετρίας (HWA)

Η θερμική ανεμομετρία βασίζεται στην συναγωγική μετάδοση θερμότητας ενός θερμού νήματος το οποίο τοποθετείται εντός της ροής. Οποιαδήποτε μεταβολή η οποία μπορεί να επηρεάσει την συναγωγική μετάδοση θερμότητας μπορεί να ανιχνευτεί από την διάταξη του ανεμόμετρου και να ποσοτικοποιηθεί. Η θερμική ανεμομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρησης, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ρυπαντών εντός ροϊκού πεδίου.

Πλεονεκτήματα θερμικής ανεμομετρίας:

1. Η διάταξη καθώς και βοηθητικός εξοπλισμός είναι σχετικά φθηνός σε σύγκριση πάντα με την διαδεδομένη τεχνική dopler (LDA).
2. Ανάδραση συχνότητας: Ένας τυπικός αισθητήρας θερμικής ανεμομετρίας λειτουργώντας σε συνδυασμό με την τεχνική της σταθερής θερμοκρασίας δίνει καμπύλη απόκρισης χωρίς μεταβολές, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορεί να γίνει επιτυχής δειγματοληψία μέχρι και τα 50 KHz.
3. Το μέγεθος των αισθητήρων όταν ένα τυπικός αισθητήρας έχει διάμετρο 5 μm
4. Η διαθεσιμότητα των αισθητήρων στην αγορά. Καθώς πλέον έχει εδραιωθεί η θερμική ανεμομετρία σαν τεχνική μέτρηση ροϊκών πεδίων η κατασκευή και η διαθεσιμότητα των αισθητήρων υπερτερεί σε σχέση με την lda.
5. Μέτρηση θερμοκρασίας: Η θερμική ανεμομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση διακυμάνσεων του πεδίου ταχύτητας και θερμοκρασίας.
6. Μετρήσεις ταχύτητας σε πολυφασικές ροές. Η θερμική ανεμομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση διακυμάνσεων της ταχύτητας σε πολυφασική ροή με μεγάλη αξιοπιστία.

3.2.2 Μετάδοση θερμότητας νήματος άπειρου μήκους

Η μελέτη της μετάδοσης θερμότητας βασίζεται σε όρους αδιάστατων αριθμών, όπως ο αριθμός Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr), Grashof (Gr), και Mach (M):

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k}, \quad Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k}, \quad Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} \quad (3-1)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot d^3 \cdot \beta \cdot (T_w - T_s)}{\mu^2}, \quad M = \frac{u}{a} \quad (3-2)$$

Βασιζόμενοι στην πρωτοποριακή εργασία του King ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας διαμέσου συναγωγή ορίζεται ως εξής:

$$Nu = A + B \cdot Re^{\frac{1}{2}} \quad (3-3)$$

Όπου A και B αποτελούν εμπειρικές αντισταθμιστικές μεταβλητές και είναι μοναδικές για κάθε ρευστό. Ο kramers μελέτησε την μετάδοση θερμότητας με συναγωγή, από θερμαινόμενα νήματα σε διάφορα μέσα. Επιλέγοντας την θερμοκρασία του θερμού αέρα ο οποίο απομακρύνεται από θερμαινόμενο σύρμα ίση με $T_f = (T_w + T_a)/2$ σαν θερμοκρασίας αναφοράς για τα μεγέθη ρ , μ και κ κατάφερε να λάβουν ικανοποιητικές μετρήσεις στο εύρος $0,01 < Re < 10000$, χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$Nu = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33} \cdot Re^{0.5} \quad (3-4)$$

Σε υψηλές ταχύτητες ροής η διάδοση θερμότητας από το θερμό νήμα πλέον είναι μία μεταβλητή η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψιν καθώς και λόγω της συμπίεστικότητας της ροής γύρω από το νήμα, πρέπει να λάβουμε υπόψιν και την ειδική θερμοχωρητικότητα και τον αριθμό Mach. Ο αριθμός Knudsen συσχετίζεται με τον αριθμό Mach και τον αριθμό Reynolds ως εξής:

$$Kn = \left(\frac{\gamma \cdot \pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{M}{Re} \quad (3-5)$$

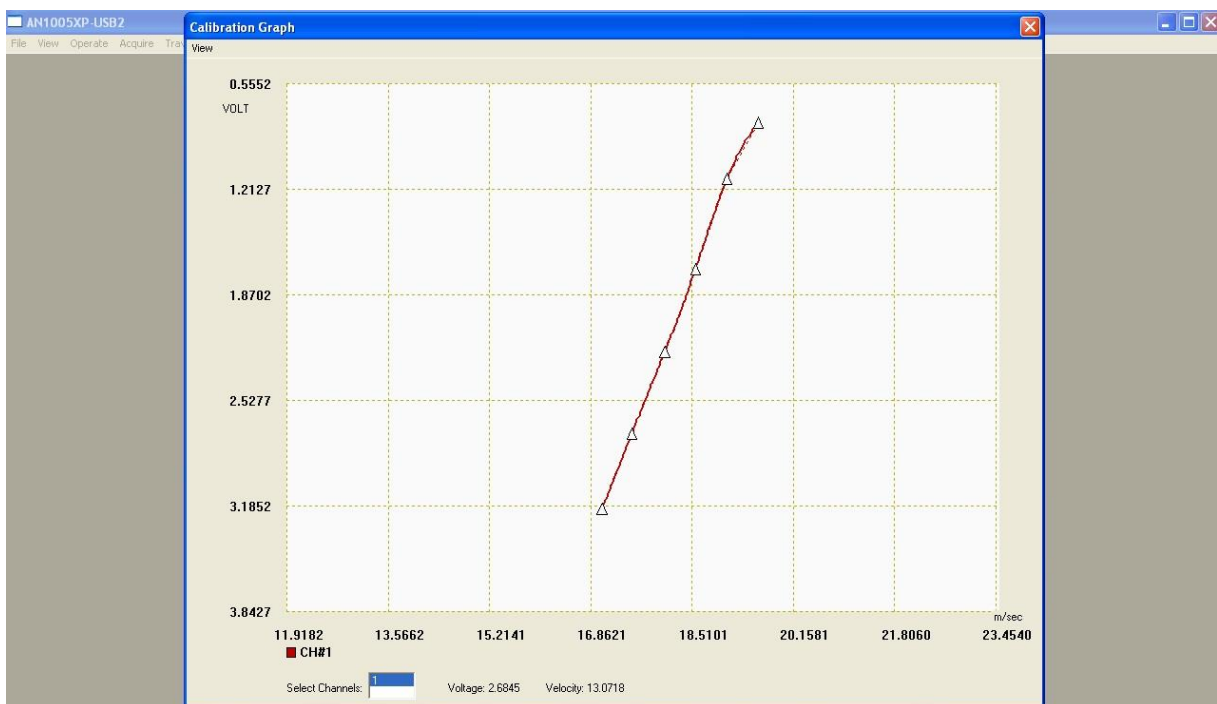
Τέλος και σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ροής πρέπει να ληφθεί υπόψιν η διάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής από το θερμό νήμα. Χρησιμοποιώντας τον αριθμό Grassof τίθεται ζήτημα ανωστικών δυνάμεων, ύστερα από πειράματα προέκυψε μία ημιεμπειρική σχέση η οποία δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

$$Nu = 0.24 + 0.56 \cdot Re^{0.45} \quad (3-6)$$

Κλείνοντας γίνεται αντιληπτό ότι τα μεγέθη ρ , μ και κ συσχετίζονται άμεσα με την ποιότητα μετρήσεων και κατά επέκταση οι αριθμοί Re και Nu οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την μελέτη και μοντελοποίηση της θερμικής ανεμομετρίας. Επίσης τα παραπάνω μεγέθη εξαρτώνται άμεσα από την θερμοκρασία αναφοράς και κατ' επέκταση επηρεάζουν και τους αριθμούς Re και Nu.

3.2.3 Καμπύλη βαθμονόμησης

Για να ληφθούν πειραματικές μετρήσεις στην είσοδο της αεροσήραγγας έπρεπε να γίνει βαθμονόμηση του αισθητήρα. Όπως είναι γνωστό το θερμικό ανεμόμετρο σαν έξοδο παράγει μία τάση συνεχούς ρεύματος. Προκειμένου να μετατραπεί αυτή η τάση σε μέτρηση ταχύτητας απαιτείται η βαθμονόμηση του καναλιού στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο αισθητήρας. Η καμπύλη βαθμονόμησης η οποία χαράσσεται για τις εκάστοτε ρυθμίσεις του καναλιού γίνεται με την πολυωνμική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.



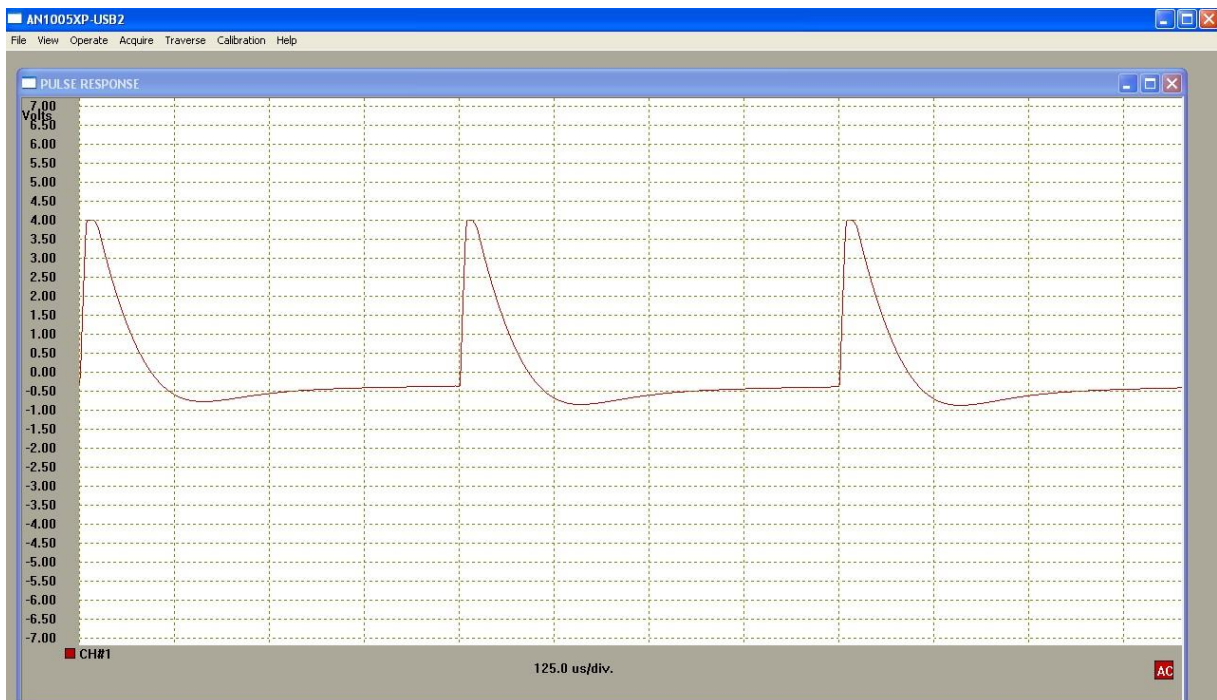
Σχήμα 3-2 Καμπύλη βαθμονόμησης single wire probe θερμικού ανεμόμετρου AN1005

Στο Σχήμα 3-2 δίνεται η καμπύλη βαθμονόμησης για μονό αισθητήρα θερμού νήματος, η καμπύλη έχει χαραχτεί με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού. Κατά αυτό τον τρόπο ύστερα από την δειγματοληψία οι μετρούμενες τάσεις με την χρήση του πολυώνυμου αντιστοιχίζονται σε ταχύτητες του πεδίου ροής. Προσοχή πρέπει να δίνεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη καμπύλη βαθμονόμησης ισχύει μόνο για την περιοχή των

ταχύτητων όπου βαθμονομήθηκε και ο αισθητήρας. Σε αντίθετη περίπτωση οι ταχύτητες αποκλίνουν σημαντικά.

3.2.4 Απόκριση παλμού (Pulse Response)

Η θερμική ανεμομετρία κατατάσσεται στα συστήματα δεύτερης τάξης και, κατ' επέκταση επιδέχεται τον όρο απόσβεσης. Ο συγκεκριμένος όρος επηρεάζει τον χρόνο τον οποίο χρειάζεται το σύστημα προκειμένου να αντιληφθεί την μεταβολή τουλάχιστον κατά το 90%. Κατά την δειγματοληψία πρέπει να υπολογιστεί ο σωστός χρόνος που θα μεσολαβεί από μέτρηση σε μέτρηση για να αποφευχθεί η αναδίπλωση του σήματος.



Σχήμα 3-3 Απόκριση παλμού αισθητήρα θερμικής ανεμομετρίας

Στο Σχήμα 3-3 δίνεται το γράφημα της απόκρισης παλμού του αισθητήρα όπως αυτός χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των μεγεθών τύρβης στην είσοδο της αεροσήραγγας. Στον κατακόρυφο άξονα δίνεται η τάση μετρούμενη στην κορυφή της γέφυρας, αντίστοιχα στον οριζόντιο άξονα δίνεται ο χρόνος που χρειάζεται ο αισθητήρας προκειμένου να αντιληφθεί την οποιαδήποτε μεταβολή. Όπως φαίνεται και στο σχήμα προκειμένου ο αισθητήρας να δώσει μία ακριβή τιμή χρειάζεται κατ' ελάχιστον 250 μ s. Ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας του ρυθμιζόμενου αισθητήρα είναι 4,000 Hz. Σε περίπτωση που αυξηθεί ο ρυθμός δειγματοληψίας οι μετρήσεις δεν μπορούν να είναι έγκυρες καθώς ο αισθητήρας δεν θα είναι σε θέση να αποκριθεί στις ενδεχόμενες μεταβολές.

3.2.5 Σφάλματα κατά την μέτρηση

Η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μέτρησης με τη χρήση της θερμικής ανεμομετρίας, μπορεί να επιτευχθεί με την ορθή ρύθμιση του ανεμόμετρου και την ποιότητα του τμήματος εξομάλυνσης της αεροσήραγγας καθώς και την ορθή λειτουργία του ηλεκτρολογικού τμήματος της αεροσήραγγας. Τα παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν προκειμένου το μόνο σφάλμα που θα επηρεάζει τις μετρήσεις να είναι το σφάλμα κβαντοποίησης. Παραπάνω αναφέρθηκε ότι το μετρητικό σύστημα του θερμικού ανεμόμετρου κατατάσσεται στα μη γραμμικά συστήματα, η ρύθμιση των εξωτερικών παραμέτρων και η σωστή βαθμονόμηση μπορούν να ισορροπήσουν το παραπάνω σύστημα.

Τόσο η διάταξη βαθμονόμησης αλλά και η αεροσήραγγα δεν πρέπει να εισάγουν θόρυβο ή αρμονικές ηλεκτρικές αρμονικές οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν και να στρεβλώσουν τις μετρήσεις. Τα παραπάνω γίνονται αντιληπτά ύστερα από την βαθμονόμηση κατά την λήψη δοκιμαστικών μετρήσεων στην διάταξη βαθμονόμησης παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις της ταχύτητας όταν εκείνη πρέπει εξ' ορισμού να είναι αδιατάραχη.

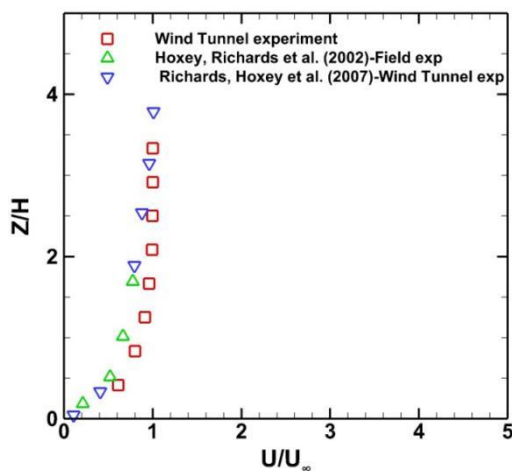
Σε συνέχεια πρέπει οι μετρήσεις να γίνονται αυστηρά εντός των ορίων της καμπύλης βαθμονόμησης, ελάχιστη απόκλιση από τα όρια δίνουν μη έγκυρα δεδομένα. Ύστερα χρησιμοποιώντας σωστά τις ρυθμίσεις που παρέχονται από το κανάλι του θερμικού ανεμόμετρου πρέπει η καμπύλη βαθμονόμησης πρέπει να είναι μακριά από τα όρια κορεσμού του μετρητικού. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να εμφανιστούν κατά την δειγματοληψία σειρά μετρήσεων που θα έχουν την ίδια τάση ενώ η ταχύτητα μεταβάλλεται. Επίσης βασική προϋπόθεση για την αποφυγή σφαλμάτων είναι να γνωρίζει ο ερευνητής τη φύση της ροής που πρόκειται να μελετήσει. Και αυτό διότι η ρύθμιση της ενίσχυσης του σήματος έχει καταλυτικό ρόλο στην αποφυγή σφαλμάτων κατά την μέτρηση της ταχύτητας. Τέλος προσοχή πρέπει να δοθεί στην ρύθμιση του φίλτρου του καναλιού προκειμένου να μην εισέρχεται θόρυβος κατά την διάρκεια των μετρήσεων αλλά και να μην αποκόβονται μετρήσεις με σημαντικό φυσικό ενδιαφέρον.

Στην διαδικασία βαθμονόμησης της πειραματικής διάταξης προκειμένου να μετρηθούν τα μεγέθη της τύρβης στην είσοδο των υπολογιστικών προσομοιώσεων ελέγχθηκαν όλα τα παραπάνω. Έγινε έλεγχος όλων των παραπάνω, τα εύρη των ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν τόσο για τις μετρήσεις αλλά και για την βαθμονόμηση ήταν τα βέλτιστα για την αεροσήραγγα καθώς παρουσίαζαν τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο και ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργούσε στο βέλτιστο σημείο που όριζε ο κατασκευαστής. Κατά την ρύθμιση του αισθητήρα όλα τα

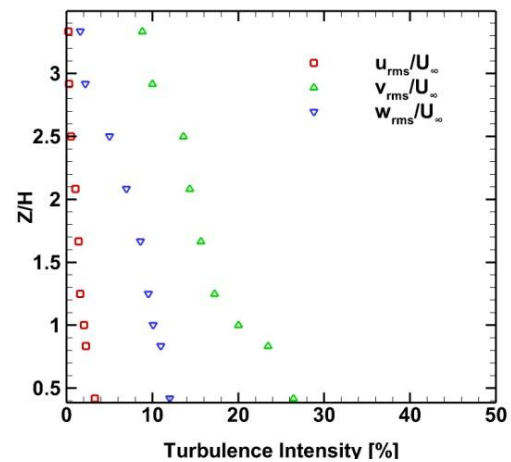
παραπάνω λήφθηκαν υπόψιν προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα υπεισερχόμενα σφάλματα. Κατά την λήψη δοκιμαστικών μετρήσεων τόσο στην διάταξη βαθμονόμησης αλλά και στο τμήμα της αεροσήραγγας όπου η ροή είναι αδιατάραχτη η διακύμανση δεν ήταν μεγαλύτερη του 1%. Βάση των παραπάνω το μέγιστο σφάλμα το οποίο μπορεί να προκύψει είναι της τάξης $1 \cdot 10^{-4}$ σφάλμα που οφείλεται στον αναλογικό ψηφιακό μετατροπέα.

3.2.6 Λήψη πειραματικών μετρήσεων προφίλ ταχύτητας και κινητικής ενέργειας στην είσοδο της αεροσήραγγας

Ύστερα από την ορθή βαθμονόμηση η οποία πραγματοποιήθηκε και δοκιμάστηκε η αξιοπιστία της από σετ πειραματικών μετρήσεων, λήφθηκαν μετρήσεις ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας. Στο Σχήμα 3-4 δίνεται το προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σαν οριακή συνθήκη στις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Ύστερα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-5 έγιναν μετρήσεις της έντασης της τύρβης για να υπολογιστεί το προφίλ της κινητικής ενέργειας όπως αυτό καταχωρήθηκε σαν οριακή συνθήκη. Βάση των παραπάνω μετρήσεων ορίστηκαν πλήρως οι οριακές συνθήκες εισόδου των υπολογιστικών προσομοιώσεων.



Σχήμα 3-4 Αδιαστατοποιημένο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας (Vasilopoulos 2020)



Σχήμα 3-5 Ένταση της τύρβης στην είσοδο της αεροσήραγγας (Vasilopoulos 2020)

3.2.7 Μετρήσεις πίεσης

Η μετρήσεις της πίεσης έγιναν με τη χρήση του μικρομανόμετρου FCO560 το οποίο διαθέτει το εργαστήριο θερμορευστών του πανεπιστημίου δυτικής αττικής. Το συγκεκριμένο μετρητικό

όργανο έχει διακριτική ικανότητα δύο δεκαδικών ψηφίων με σταθερή δειγματοληπτική ικανότητα 10 HZ. Αυτό συνεπάγεται ότι κατά την διάρκεια ενός δευτερολέπτου λαμβάνονται 10 μετρήσεις. Το συγκεκριμένο μανόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις πίεσης που δεν απαιτούν μεγάλη δειγματοληπτική ικανότητα δίνοντας την δυνατότητα αποθήκευσης και καταγραφής των δεδομένων για αρκετές ώρες μετρήσεων.

Το μέγιστο σφάλμα το οποίο μπορεί να προκύψει από το όργανο είναι του αναλογικού ψηφιακού μετατροπέα το οποίο είναι της τάξης 10^{-2} . Το μήκος από τα σωληνάκια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το μικρότερο δυνατό τοποθετώντας το όργανο κάτω από την μακέτα να για γίνει αποφυγή διόρθωσης λόγω υστέρηση της πίεσης. Η στάθμιση αυτών των σφαλμάτων έγινε με την χρήση στατιστικής επεξεργασίας, η δειγματοληψία για κάθε οπή οριζότανε στις 600 μετρήσεις. Από εκεί με την χρήση του στατιστικού μέσου:

$$P_i = \sum_{i=1,2,\dots,n}^{n-1} \frac{P}{n} \quad (3-7)$$

Δίνοντας έναν βαθμό ελευθερίας προκειμένου να γίνει έλεγχος του επίπεδου εμπιστοσύνης με την κατανομή Student.

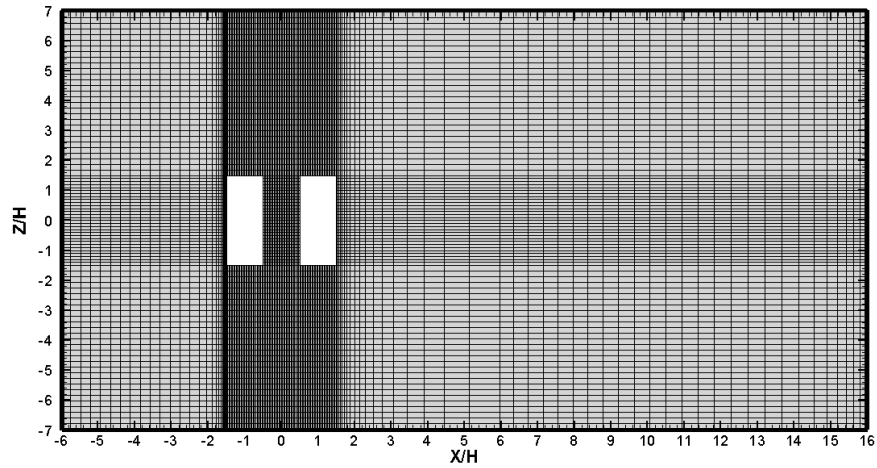
3.3 Μεθοδολογία υπολογιστικής ανάλυσης

Στο παρών εδάφιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε προκειμένου να υλοποιηθούν οι υπολογιστικές προσομοιώσεις. Συνοπτικά αναφέρεται η διακριτοποίηση του υπολογιστικού πλέγματος εντός του χωρίου. Στη συνέχεια δίνεται η ανεξαρτησία πλέγματος προκειμένου να εξακριβωθεί η μοναδικότητα της λύσης. Ύστερα εισάγονται οι οριακές συνθήκες όπως αυτές λήφθηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις με τη χρήση της θερμικής ανεμομετρίας. Τέλος γίνεται επικαιροποίηση των υπολογιστικών προσομοιώσεων με την βοήθεια των μετρήσεων πίεσης στην επιφάνεια των προπλάσμάτων.

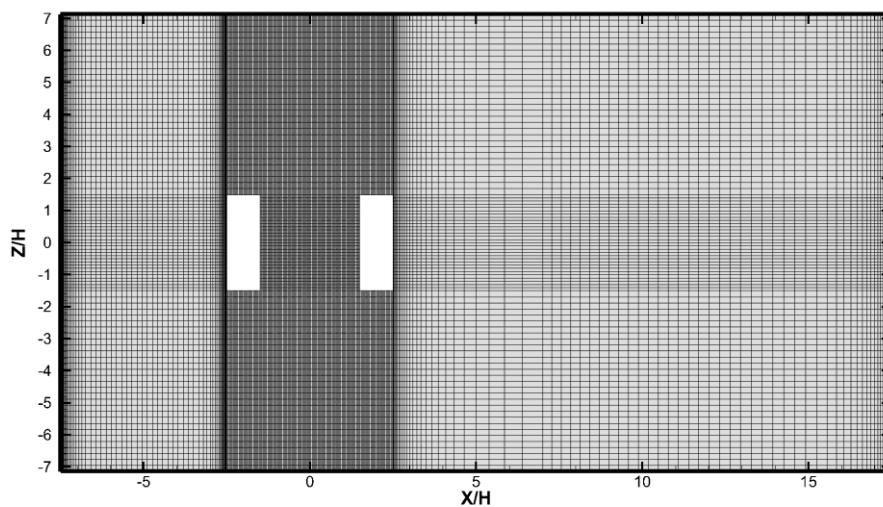
3.3.1 Διακριτοποίηση υπολογιστικού χωρίου

Στο Σχήμα 3-6, Σχήμα 3-7 και Σχήμα 3-8 δίνεται η οριζόντια τομή των υπολογιστικών χωρίων για τα οποία έγινε η ανάλυση για την εκτίμηση επικινδυνότητας διασποράς τοξικών ρύπων σε περίπτωση ατυχήματος. Η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δύο κτιρίων βάση της εργασίας του Oke (1988) επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην μορφολογία της ροής μεταξύ των δύο κτιρίων. Κατ' επέκταση αυτό θα επιφέρει και αλλαγές στην διασπορά των ρύπων καθώς αυτοί δεν θεωρούνται σαν απλές ισοθερμοκρασιακές εκλύσεις, αντιθέτως λαμβάνεται υπόψιν η θερμοδυναμική τους κατάσταση. Το μήκος μεταξύ των δύο κτιρίων εξετάζεται για τρεις

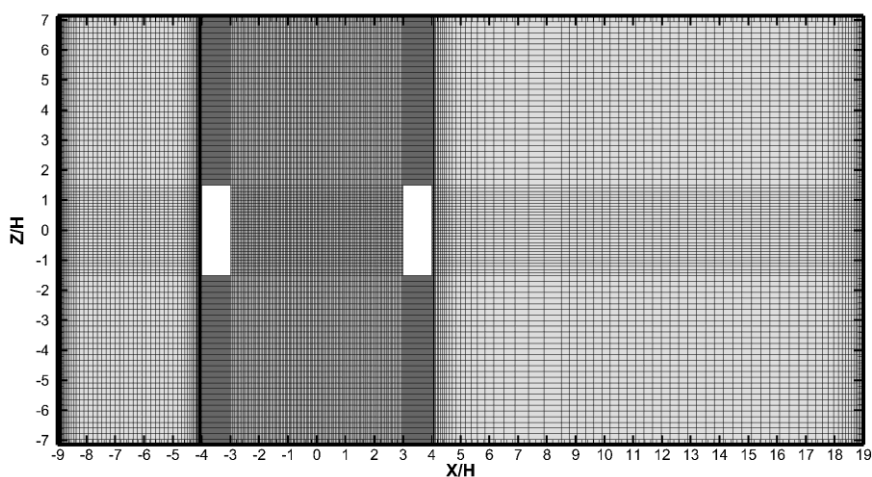
διαφορετικές περιπτώσεις , W/H ίσο με ένα, τρία και έξι αντίστοιχα. Βάση της βιβλιογραφίας οι αποστάσεις αυτές αφορούν διαφορετικές μορφολογίες ροής οι οποίες δύναται να εμφανιστούν.



Σχήμα 3-6 Κάτοψη της αστικής χαράδρας για $W/H=1$ και $Y/H=0,5$



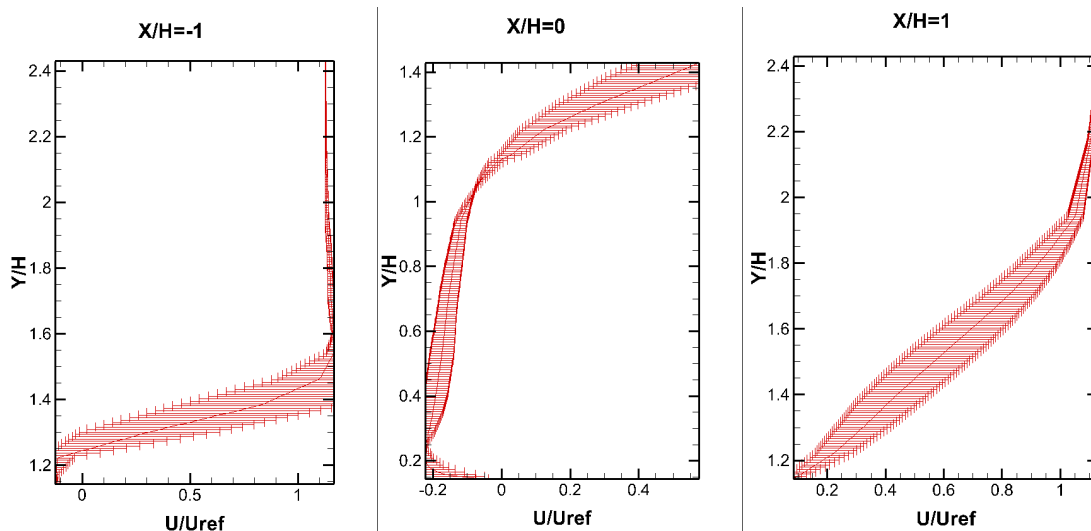
Σχήμα 3-7 Κάτοψη της αστικής χαράδρας για $W/H=3$ και $Y/H=0,5$



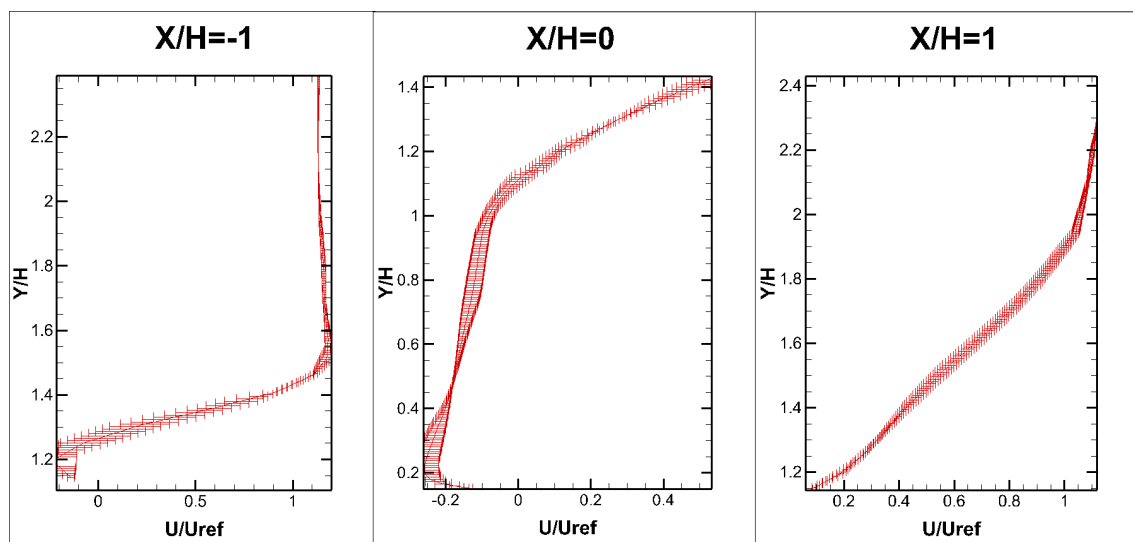
Σχήμα 3-8 Κάτοψη της αστικής χαράδρας για $W/H=6$ και $Y/H=0,5$

3.3.2 Ανεξαρτησία πλέγματος

Στο Σχήμα 3-9 και στο Σχήμα 3-10 παρουσιάζεται η ανεξαρτησία πλέγματος η οποία διενεργήθηκε για χαρακτηριστικό λόγο $W/H=1$ προκειμένου να επιλεγεί το πλέγμα εκείνο το οποίο περιγράφει καλύτερα την ροή, ταυτόχρονα όμως εξασφαλίζοντας το μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Χρησιμοποιήθηκε για το λόγο αυτό η εξίσωση (2-1). Το παραπάνω κριτήριο έχει χρησιμοποιηθεί από τους (Chatzimichailidis, Argyropoulos et al. 2019) για να ελέγξουν το υπολογιστικό χωρίο τους. Το παραπάνω κριτήριο είναι ικανό να δώσει ποσοτικά στοιχεία για ένα πλέγμα εμπλέκοντας τον συντελεστή πύκνωσης σε συνάρτηση του βαθμού του σχήματος διακριτοποίησης που χρησιμοποιείται. Στο Σχήμα 3-9 δίνεται ποσοτικά το σφάλμα μεταξύ του μεσαίου και αραιού πλέγματος για τρία σημεία. Το πρώτο σημείο είναι στην οροφή του πρώτου κτιρίου, το δεύτερο εντός της αστικής χαράδρας και το τρίτο στην οροφή του δεύτερου κτιρίου. Τα error bars τα οποία αντιπροσωπεύουν το σφάλμα είναι μεγάλα και για τις τρεις περιοχές. Σε αντίθεση με το Σχήμα 3-10 στο οποίο δίνεται το σφάλμα από το μεσαίο στο πυκνό πλέγμα για τα τρία σημεία δειγματοληψίας, τα error bars είναι αρκετά μικρότερα υποδεικνύοντας δύο πράγματα. Πρώτον ότι η ροή περιγράφεται ικανοποιητικά από το μεσαίο πλέγμα και κατά δεύτερον ότι μπορούμε να κάνουμε υπολογιστική εξοικονόμηση πόρων επιλέγοντας το μεσαίο πλέγμα.



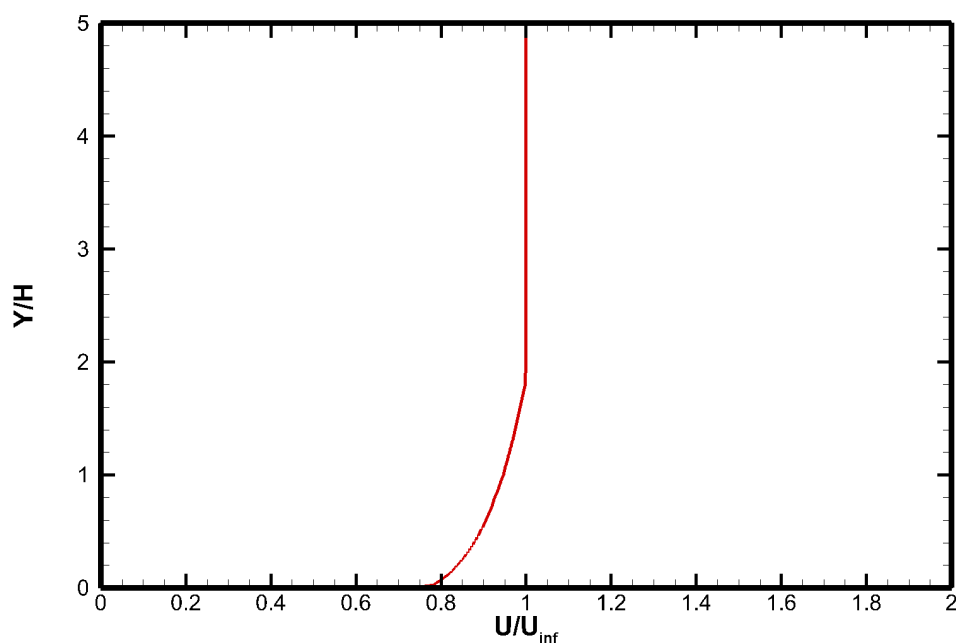
Σχήμα 3-9 Υπολογισμός σφάλματος από αραιό πλέγμα σε μεσαίο $W/H=1$ και $Z/H=3,5$



Σχήμα 3-10 Υπολογισμός σφάλματος από μεσαίο πλέγμα σε πυκνό $W/H=1$ και $Z/H=3,5$

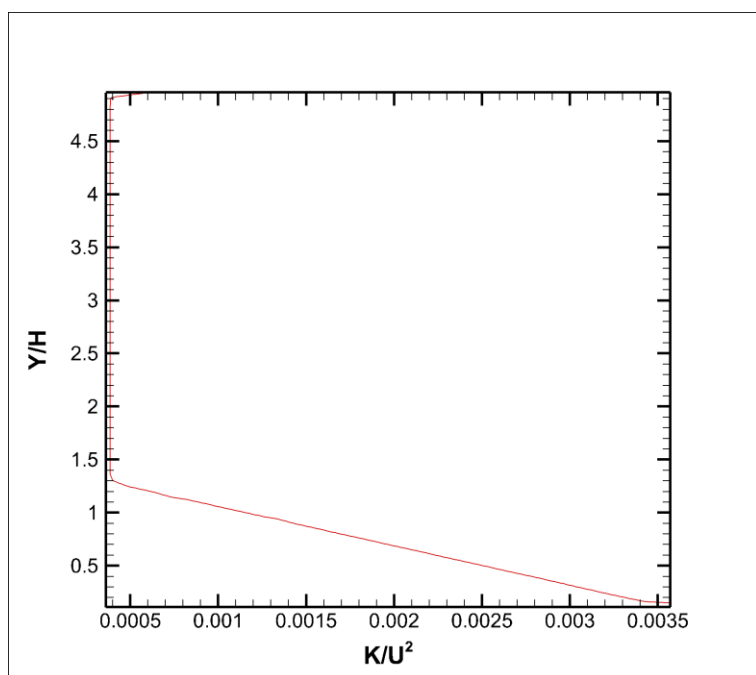
3.3.3 Αρχικές – συνοριακές συνθήκες

Στο Σχήμα 3-11 δίνεται το αδιάστατο προφίλ ταχύτητας συνάρτηση του αδιάστατου ύψους. Το συγκεκριμένο προφίλ χρησιμοποιήθηκε για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις των υποκλίμακα μοντέλων τα οποία προσομοιώθηκαν. Το συγκεκριμένο προφίλ ταχύτητας είναι ένα παραβολικό ατμοσφαιρικό προφίλ ταχύτητας το οποίο μετρήθηκε πειραματικά από την αεροσήραγγα του εργαστηρίου θερμορευστών, και χρησιμοποιήθηκε για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις.

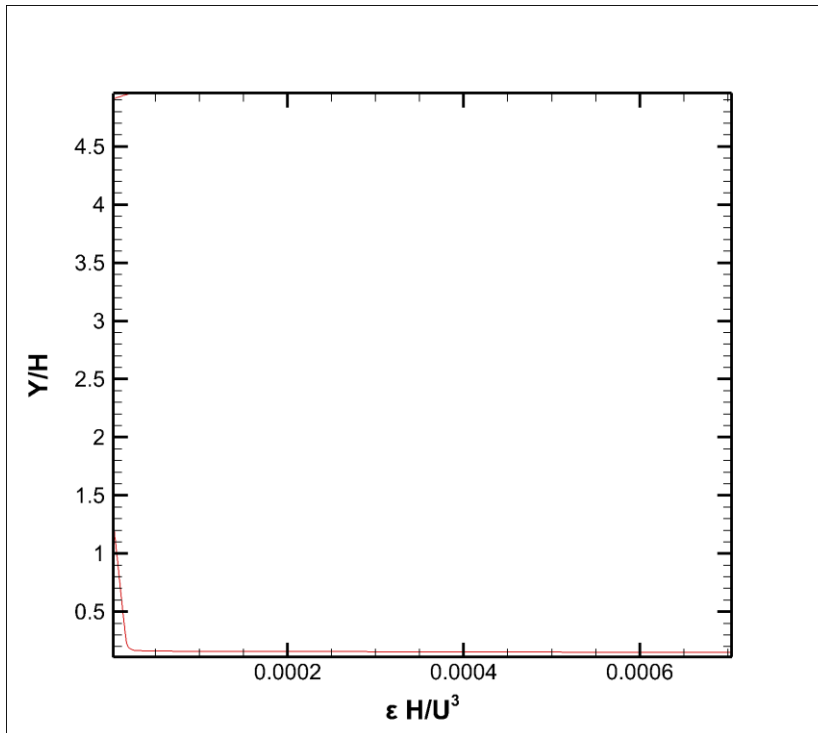


Σχήμα 3-11 Προφίλ ταχύτητας εισόδου συνάρτηση του αδιάστατου ύψους για $Z/H=3,5$

Όμοια στο Σχήμα 3-12 και Σχήμα 3-13 παρουσιάζονται τα αδιάστατα προφίλ της κινητικής ενέργειας και της ανά μονάδα όγκου σκέδασης όπως αυτά μετρήθηκαν πειραματικά στην αεροσήραγγα με την μέθοδο της θερμικής ανεμομετρίας (HWA) και χρησιμοποιήθηκαν σαν οριακές συνθήκες για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις RANS.



Σχήμα 3-12 Προφίλ κινητικής ενέργειας εισόδου συνάρτηση του αδιάστατου ύψους για $Z/H=3,5$



Σχήμα 3-13 Προφίλ σκέδασης ανα μονάδα όγκου στην είσοδο συνάρτηση του αδιάστατου ύψους για $Z/H=3,5$

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με την μέθοδο LES (Large Eddy Simulation). Για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων οι προσομοιώσεις RANS χρησιμοποιήθηκαν σαν είσοδο προκειμένου να δοθεί ένα πεδίο μέσων τιμών για τις ταχύτητες. Με την τεχνική αυτή μπορεί να εξοικονομηθεί αρκετός χρόνος από τις προσομοιώσεις.

Στην είσοδο παράλληλα με το παραβολικό προφίλ έχει εφαρμοστεί σαν οριακή συνθήκη λευκός θόρυβος προκειμένου να υπάρχει η δημιουργία διακυμάνσεων όπως ορίζει η βιβλιογραφία.

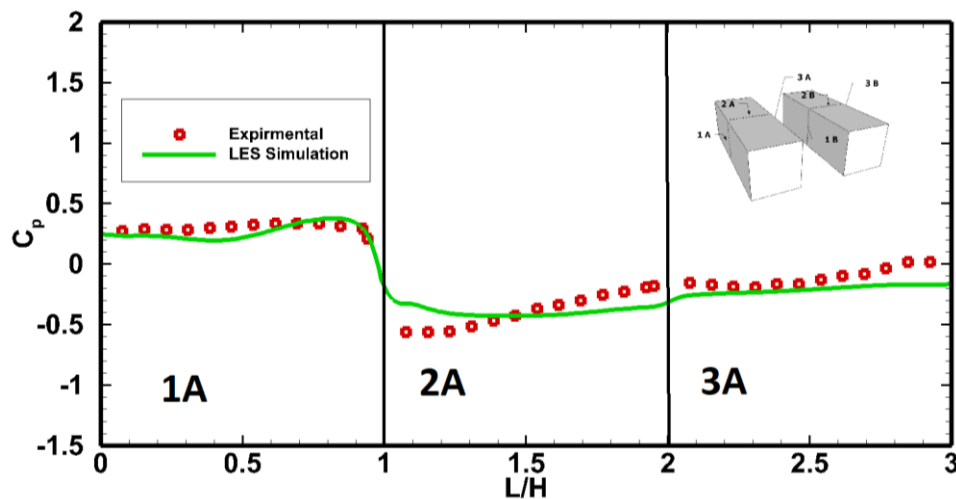
3.3.4 Κατανομή συντελεστή πίεσης σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων

Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση πειραματικών δεδομένων με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις προκειμένου να εξακριβωθεί η αξιοπιστία των προσομοιώσεων. Η σύγκριση θα γίνει με τον συντελεστή πίεσης, διενεργήθηκαν πειράματα στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου θερμορευστών. Οι διαστάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής στις υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι ίδιες με αυτές των προπλασμάτων που έγιναν τα πειράματα στην

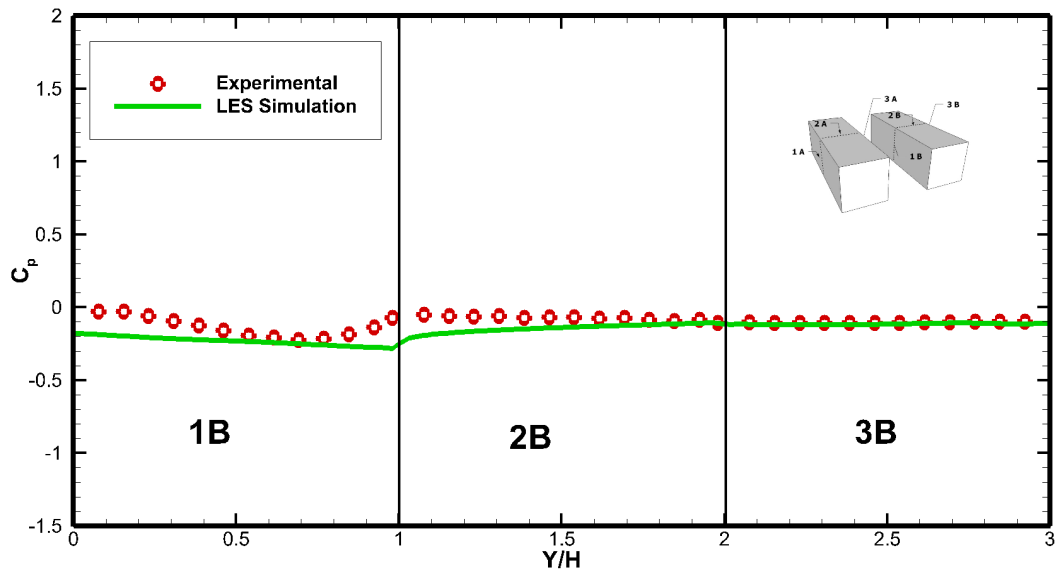
αεροσήραγγα. Κατ' επέκταση το ίδιο ισχύει και για τις οριακές συνθήκες όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στην εξίσωση 3-8 ορίζεται η σχέση από την οποία υπολογίστηκε ο αδιάστατος συντελεστής πίεσης C_p .

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2} \quad (3-8)$$

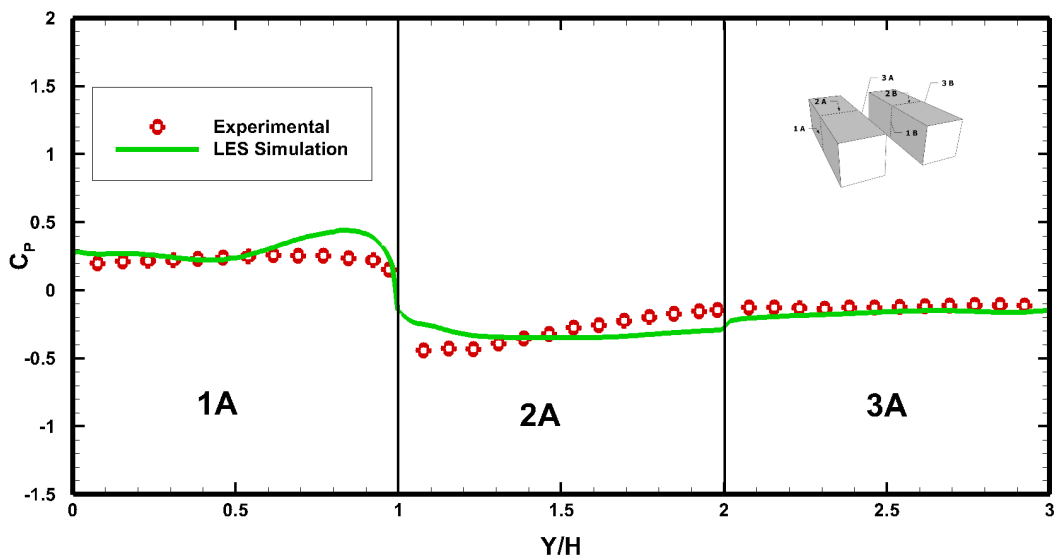
Στο Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15 δίνεται η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων και αυτών που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Η ταύτιση είναι ικανοποιητική για το εμπρόσθιο και το δεύτερο κτίριο που περικλείουν την αστική χαράδρα. Στο εμπρόσθιο κτίριο υπάρχουν μερικές διαφορές οι οποίες μπορεί να οφείλονται στην επιλογή του πλέγματος, συγκρινόμενο όμως με το υπολογιστικό κόστος τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Αντίστοιχα οι διαφορές αυτές στο εμπρόσθιο κτίριο εμφανίζονται και στο Σχήμα 3-16 Σχήμα 3-17 όπου το μήκος της χαράδρας είναι τρία ύψη κτιρίου καθώς και για τα έξι ύψη όπως δίνεται στο Σχήμα 3-18 Σχήμα 3-19. Το συγκεκριμένο σημείο καθώς υποβάλλεται σε απότομες μεταβολές της πίεσης είναι λογικό υπολογιστικά να παρουσιάζει μία απόκλιση.



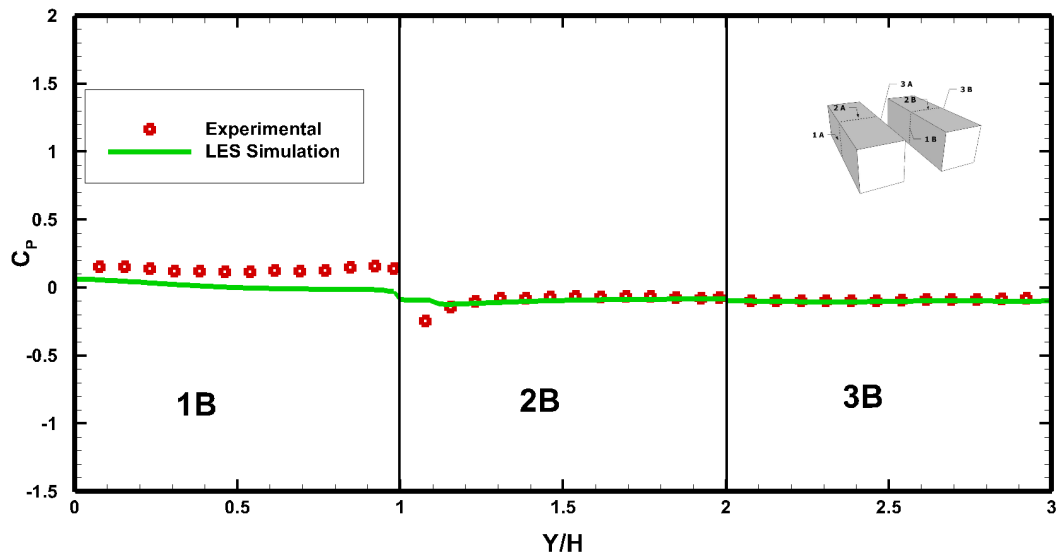
Σχήμα 3-14 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=1$



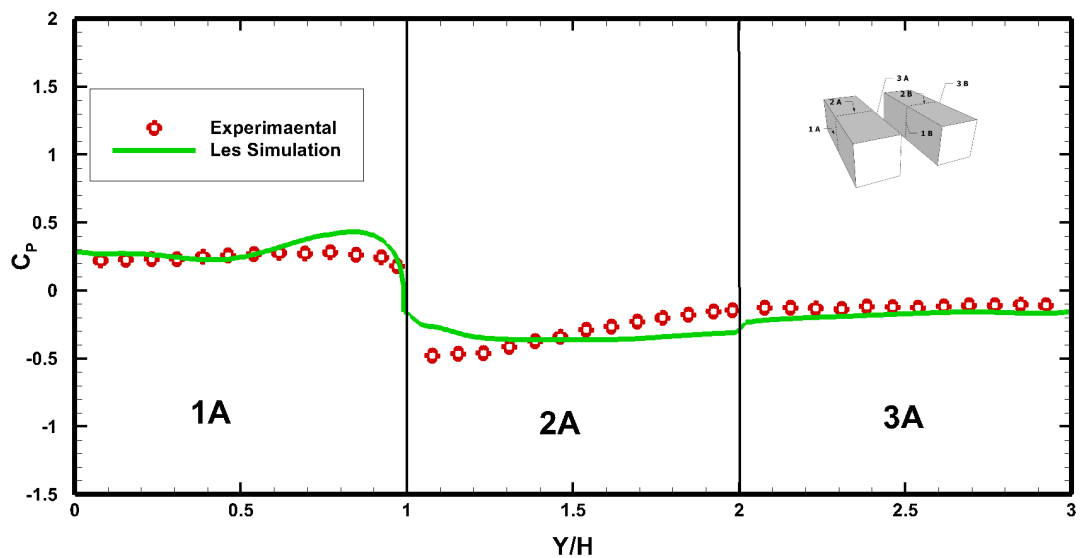
Σχήμα 3-15 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=1$



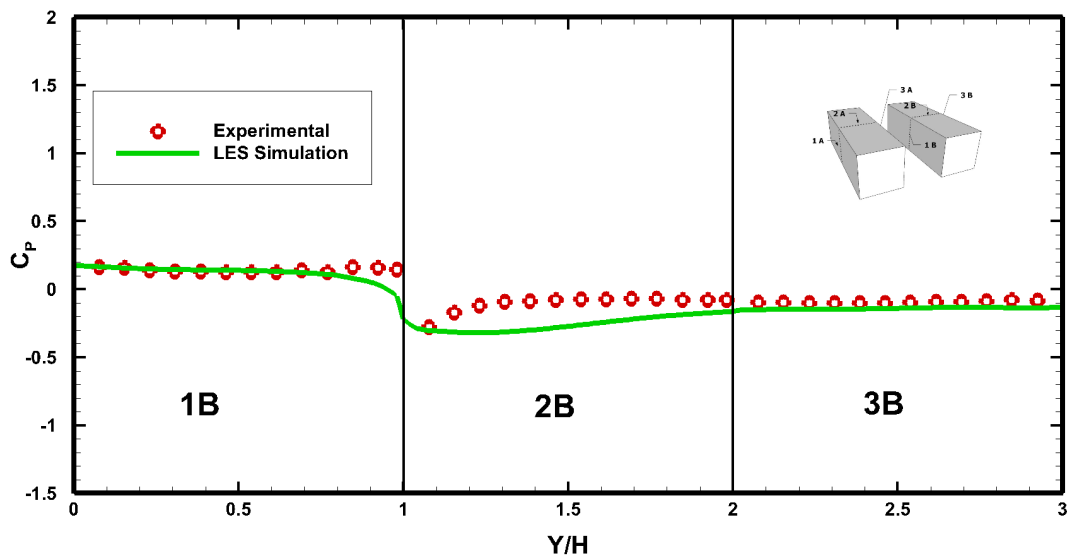
Σχήμα 3-16 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=3$



Σχήμα 3-17 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=3$



Σχήμα 3-18 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=6$

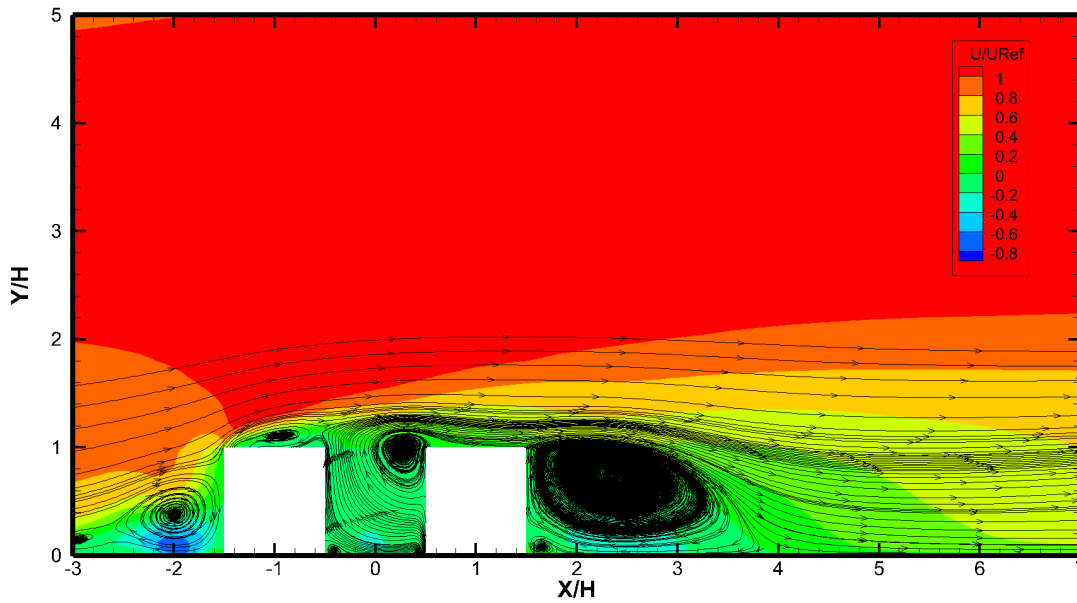


Σχήμα 3-19 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=6$

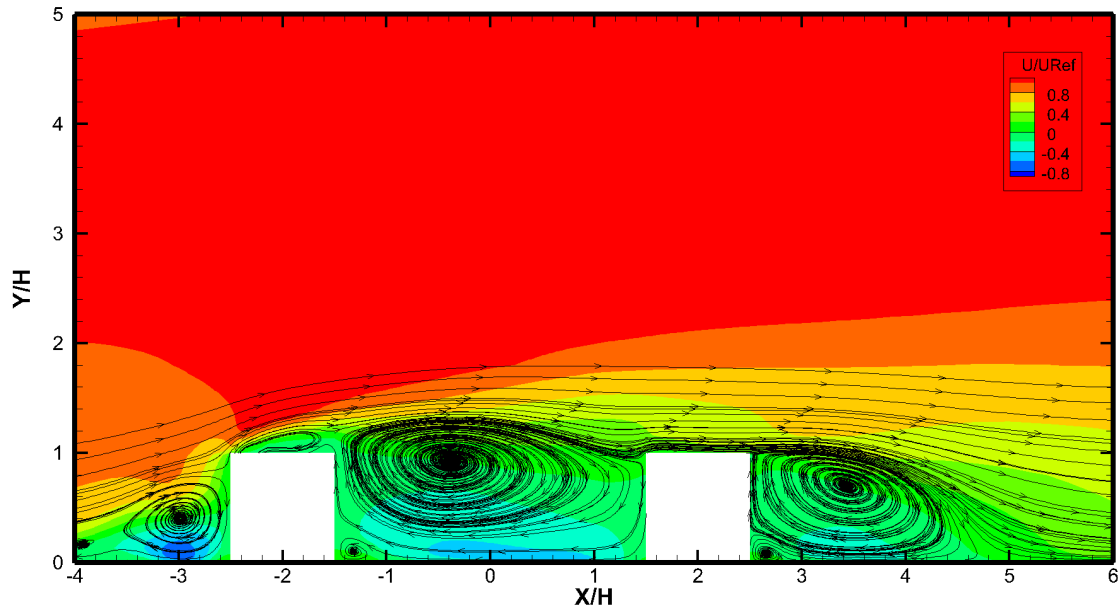
3.4 Κατακόρυφα Ισοϋψή γραφήματα μέσω των ταχυτήτων

Στο Σχήμα 3-20 δίνεται το ισοϋψές γράφημα των αδιάστατων ταχυτήτων για W/H ίσο με ένα. Παρατηρούνται τέσσερις ανακυκλοφορίες, η πρώτη εμφανίζεται στο εμπρόσθιο τμήμα του πρώτου κτιρίου καθώς εγκλωβίζεται χαμηλά στο πρώτο κτίριο. Η δεύτερη βρίσκεται στην οροφή του πρώτου κτιρίου δίνοντας αποκόλληση του οριακού στρώματος στην οροφή του πρώτου κτιρίου. Εντός της αστικής χαράδρας παρατηρείται η κεντρική δίνη μετατοπισμένη προς το άνω μέρος της αστικής χαράδρας και προς το μπροστινό μέρος του δεύτερου κτιρίου. Βάση της βιβλιογραφίας σε πεπερασμένου μήκους αστικές χαράδρες η δίνη που σχηματίζεται εντός της χαράδρας έχει την μορφή του πετάλου. Για το λόγο αυτό υπάρχει αυτή μετατόπιση της κεντρικής δίνης. Τέλος η θολωτή δίνη η οποία σχηματίζεται στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου είναι και η μεγαλύτερη σε μέγεθος που παρατηρείται, η συγκεκριμένη βάση της βιβλιογραφίας έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι έχει μήκος περίπου 1,5 ύψη κτιρίου. Στην δική μας περίπτωση έχει μήκος 1,62 ύψη κτιρίου μήκος ικανοποιητικό για υπολογιστική προσομοίωση με την μέθοδο LES. Στο Σχήμα 3-21 δίνεται το αντίστοιχο ισοϋψές γράφημα για λόγο W/H ίσο με τρία, παρατηρείται η επιπλέον έκταση που καταλαμβάνει η κεντρική δίνη εντός της αστικής χαράδρας. Η δίνη έχει την τάση να καταλάβει όλο το χώρο που περιλαμβάνεται μεταξύ των δύο κτιρίων, παρότι η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων έχει αυξηθεί στα τρία ύψη κτιρίου. Η επιπλέον απόσταση αυτή μεταξύ των δύο κτιρίων έχει σαν αποτέλεσμα να επανακολλάται η ροή αμέσως στην οροφή του δεύτερου κτιρίου. Επίσης παρατηρείται και αύξηση στο μήκος της θολωτής δίνης σε σχέση με το προηγούμενο ισοϋψές

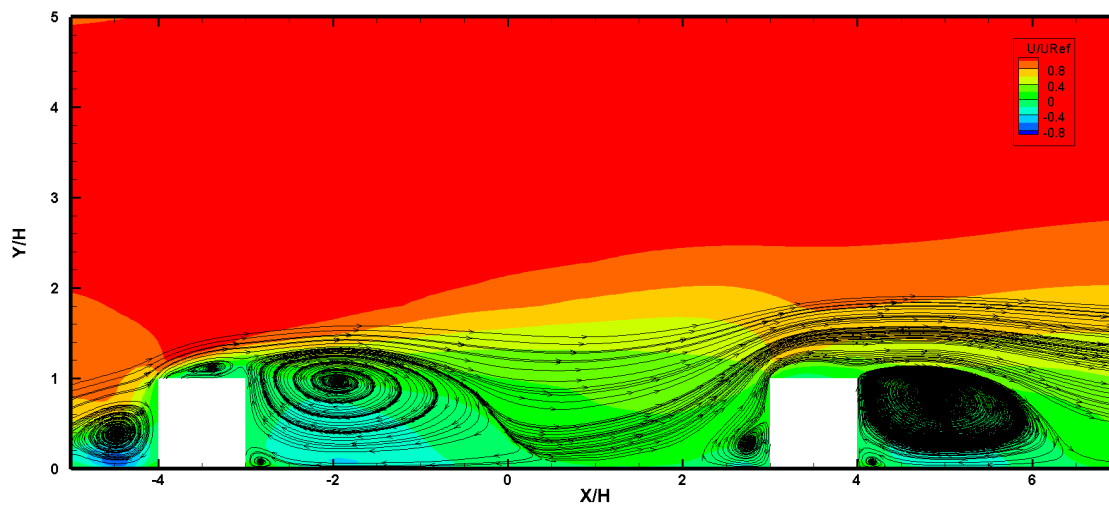
γράφημα. Αντίστοιχα στο Σχήμα 3-22 δίνεται το ισοϋψές γράφημα για χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με έξι. Πλέον η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων είναι αρκετή για να διαχωριστούν τα δύο κτίρια σαν οντότητες εντός του πεδίου ροής, ουσιαστικά πλέον το ένα κτίριο δεν επηρεάζει το άλλο όσο αφορά την μορφολογία της ροής.



Σχήμα 3-20 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=1$ και για $Z/H=0$



Σχήμα 3-21 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=3$ και για $Z/H=0$



Σχήμα 3-22 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=6$ και για $Z/H=0$

Στον Πίνακα 1 δίνονται τα χαρακτηριστικά μήκη των ανακυκλοφοριών τα οποία προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η θολωτή δίνη που δημιουργείται στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου. Καθώς

παρουσιάζει δυσκολία να υπολογιστεί σωστά του αδιάστατο μήκος της. Σε προσομοιώσεις RANS συνήθως το μήκος της κυμαίνεται από 2,3 έως 2,5 ύψη κτιρίου ενώ σε προσομοιώσεις LES το μήκος της υπολογίζεται περίπου από 2 έως 1,6 ύψη κτιρίου. Όμοια στους Πίνακες 2 και Πίνακας 3 δίνονται οι συντεταγμένες και το μήκος της ανακυκλοφορίας κατάντη του δεύτερου κτιρίου δυστυχώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα βάση της βιβλιογραφίας προκειμένου να επικαιροποιηθούν.

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικό μήκος ανακυκλοφοριών W/H=1

Εμφανιζόμενες δίνες	Συντεταγμένες X	Συντεταγμένες Y	Μήκος αναφορικά με το ύψος του κτιρίου
Κατάντη πρώτου κτιρίου	-0,13 m	0,026m	0,14
Οροφή πρώτου κτιρίου	-0,06 m	0,077 m	0,35
Εντός της αστικής χαραδρας	0,018 m	0,069 m	0,38
Κατάντη δεύτερου κτιρίου	0,1649 m	0,051 m	1,62

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικό μήκος ανακυκλοφοριών W/H=3

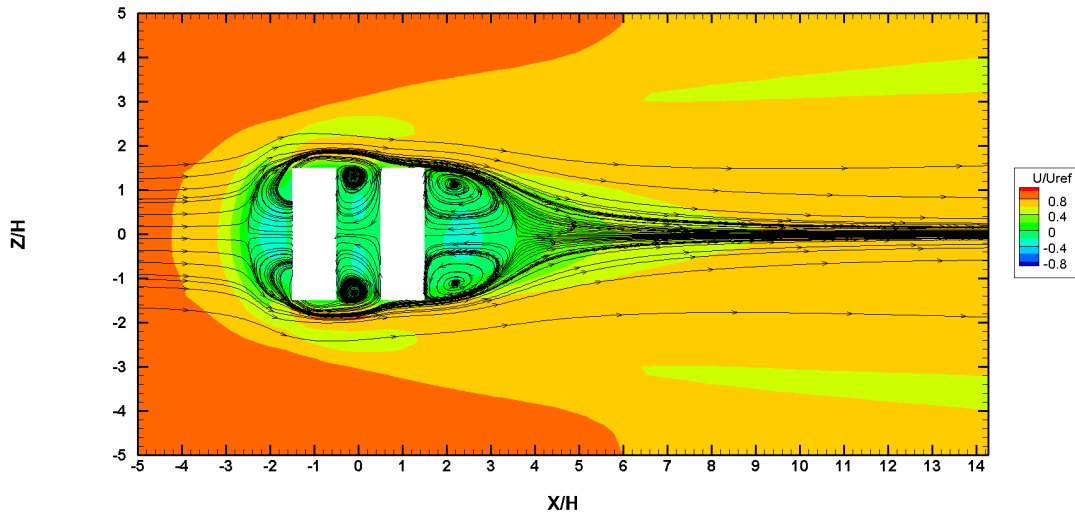
Εμφανιζόμενες δίνες	Συντεταγμένες X	Συντεταγμένες Y	Μήκος αναφορικά με το ύψος του κτιρίου
Κατάντη πρώτου κτιρίου	-0.31 m	0,026m	0,85
Οροφή πρώτου κτιρίου	-0,23 m	0,078 m	0,42
Εντός της αστικής χαραδρας	-0,13 m	0,067 m	3,1
Κατάντη δεύτερου κτιρίου	0,34 m	0,054 m	2

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικό μήκος ανακυκλοφοριών W/H=6

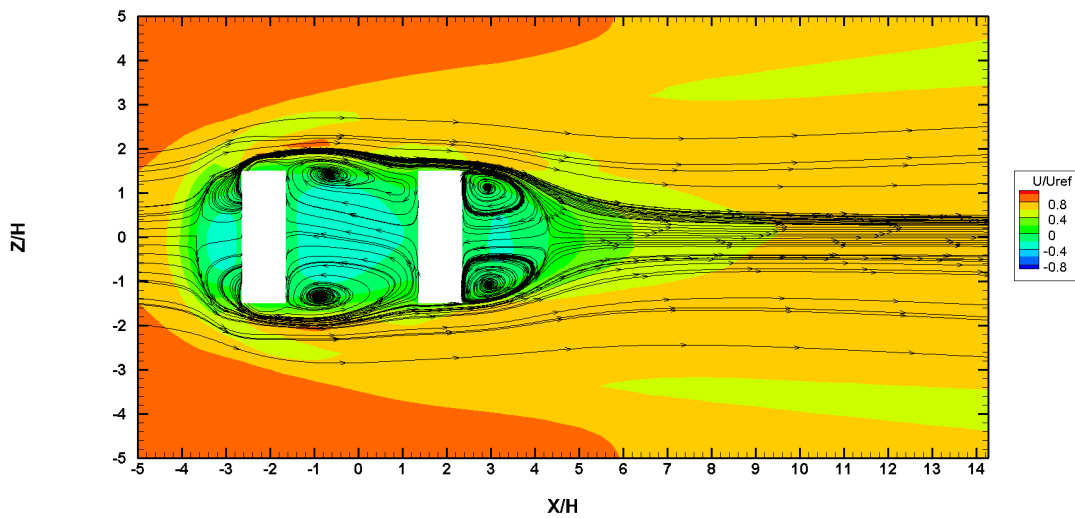
Εμφανιζόμενες δίνες	Συντεταγμένες Χ	Συντεταγμένες Υ	Μήκος αναφορικά με το ύψος του κτιρίου
Κατάντη πρώτου κτιρίου	-0.31 m	0,026m	0,85
Οροφή πρώτου κτιρίου	-0,23 m	0,078 m	0,42
Εντός της αστικής χαράδρας	-0,13 m	0,067 m	3,1
Κατάντη δεύτερου κτιρίου	0,34 m	0,054 m	2

3.5 Οριζόντια ισοϋψή γραφήματα μέσω ταχυτήτων

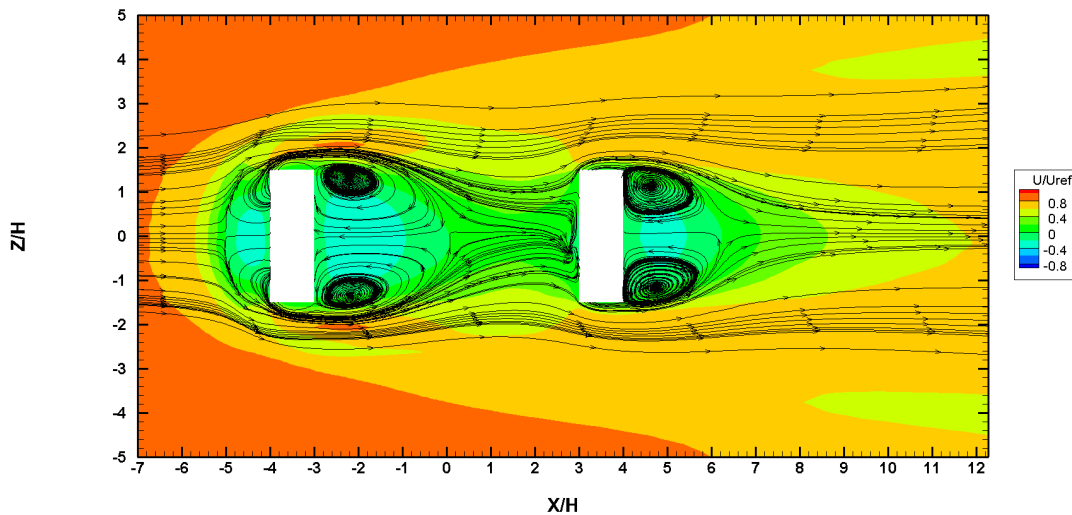
Το οριζόντιο ισοϋψές γράφημα των αδιάστατων ταχυτήτων δίνεται στο Σχήμα 3-23, βλέπουμε δύο περιοχές που παρουσιάζουν ζευγάρια ανακυκλοφοριών. Το πρώτο ζευγάρι αυτών εμφανίζεται εντός της αστικής χαράδρας. Λόγω της υψηλής ορμής το ρευστό στα πλαινά τμήμα του πρώτου κτιρίου εγκλωβίζει το ρευστό εντός και αυτό ανακυκλοφορεί. Όμοια και το ζεύγος δινών στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου. Στο δεύτερο ζεύγος παρατηρείται το εξής φαινόμενο αρχικά το ρευστό μόλις εκφύγει από τα πλαινά του δεύτερου κτιρίου η ορμή του είναι μεγαλύτερη από του ρευστού στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου. Καθώς όμως συναλλάσει ενέργεια με το ρευστό η ορμή του μειώνεται δημιουργώντας μία περιοχή ανακοπής η οποία οριοθετεί και την θολωτή δίνη. Στο Σχήμα 3-24 παρουσιάζεται το ισοϋψές γράφημα των μέσω ταχυτήτων στο οριζόντιο επίπεδο για χαρακτηριστικό λόγο τρία, το ζεύγος των δινών εντός της χαράδρας παρουσιάζει μια ανομοιομορφία όσο αφορά το μέγεθος. Η συγκεκριμένη μορφολογία της ροής βάση της βιβλιογραφίας καλείται ροή διαταραχής καθώς η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων επηρεάζει την κεντρική δίνη εντός αυτής. Το δεύτερο ζεύγος δινών δεν παρουσιάζει κάποια μεταβολή και είναι ανεξάρτητο της απόστασης των δύο κτιρίων. Στο Σχήμα 3-25 παρατηρείται ότι το ζεύγος των δινών εντός της αστικής χαράδρας έχει δημιουργήσει μία θολωτή δίνη. Αυτό οφείλεται ότι η απόσταση των δύο κτιρίων είναι έξι ύψη, και είναι αρκετή προκειμένου να δημιουργηθούν δύο θολωτές δίνες κατάντη και των δύο κτιρίων.



Σχήμα 3-23 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=1$



Σχήμα 3-24 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=3$



Σχήμα 3-25 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου μέσης ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=6$

3.6 Διασπορά παθητικού ρύπου (CO_2)

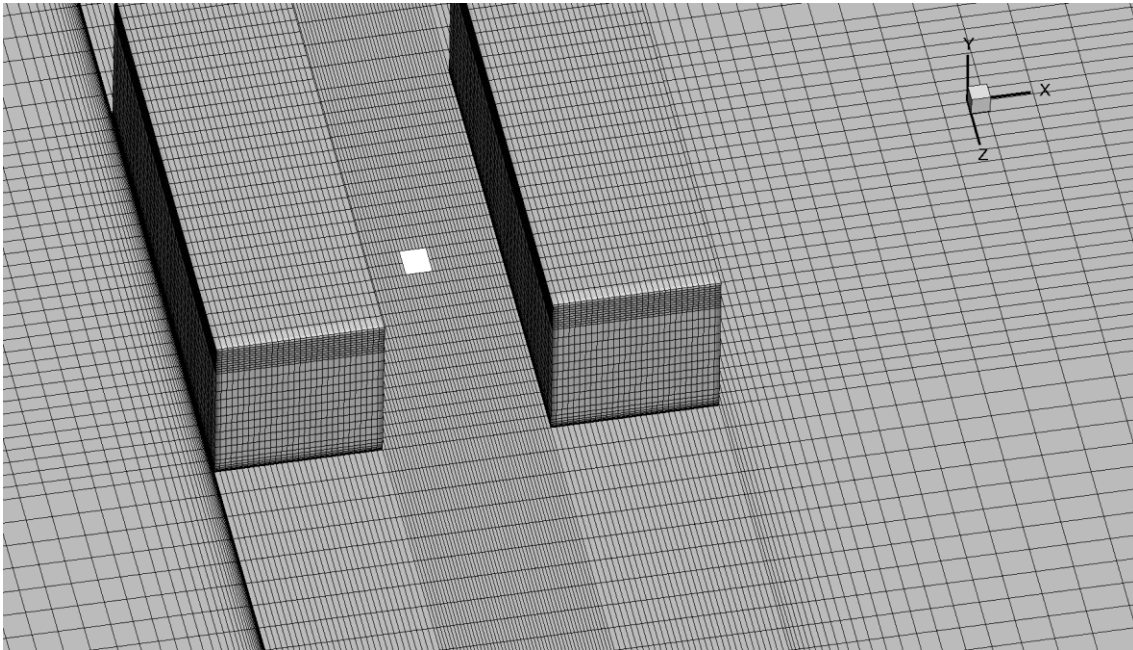
Έχοντας πλέον επικαιροποιήσει σε ικανοποιητικό βαθμό την μορφολογία της ροής και όλων των χαρακτηριστικών το επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθεί στις υπολογιστικές προσομοιώσεις μία πηγή ενός παθητικού ρύπου. Συνήθης τακτική είναι πριν γίνει η μελέτη ενός ατυχήματος καύσης το οποίο περιπλέκει αρκετά την φυσική του φαινομένου και κατά μεγάλη πιθανότητα και την ροή να τοποθετείται μία πηγή ενός παθητικού ρύπου. Στο Σχήμα 3-16 δίνεται πηγή ενός παθητικού ρύπου στο κέντρο της αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό λόγο $W/H=1$. Ο παθητικός ρύπος ο οποίος επιλέχθηκε είναι το διοξείδιο του άνθρακα καθώς αποτελεί ένα ρύπο ο οποίο παράγεται καθημερινά στα αστικά κέντρα κυρίως από τις μετακινήσεις του πληθυσμού. Η αδιαστατοποίηση της συγκέντρωσης του ρυπαντή θα γίνει με την παρακάτω εξίσωση

$$K = \frac{C \cdot U_{\infty} \cdot H \cdot L}{Q_s} \quad (3-9)$$

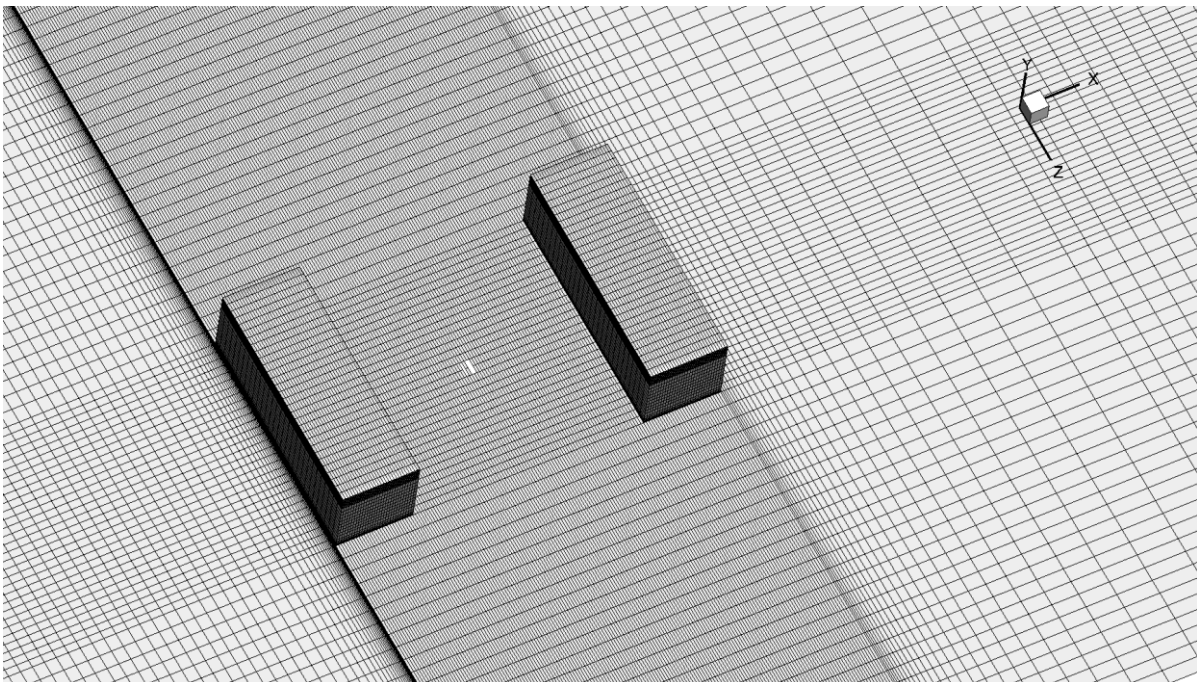
Όπου C είναι η συγκέντρωση σε ppm, U_{∞} είναι η ταχύτητα της αδιατάραχτης ροής, H είναι το ύψος του κτιρίου και L το μήκος της πηγής. Το Q_s εκφράζει τον λόγο της παροχής του αέρα προς την παροχή του ρύπου. Έτσι επιλέχθηκε ότι για 100 l/h αέρα μπορούμε να έχουμε σταθερή έκκληση της πηγής 18,5 l/h.

Η διακριτοποίηση της αστικής χαράδρας και της πηγής έκλυσης δίνεται στο Σχήμα 3-26, Σχήμα 3-27 και Σχήμα 3-28. Η πηγή έχει τοποθετηθεί στο κέντρο της αστικής χαράδρας θεωρώντας

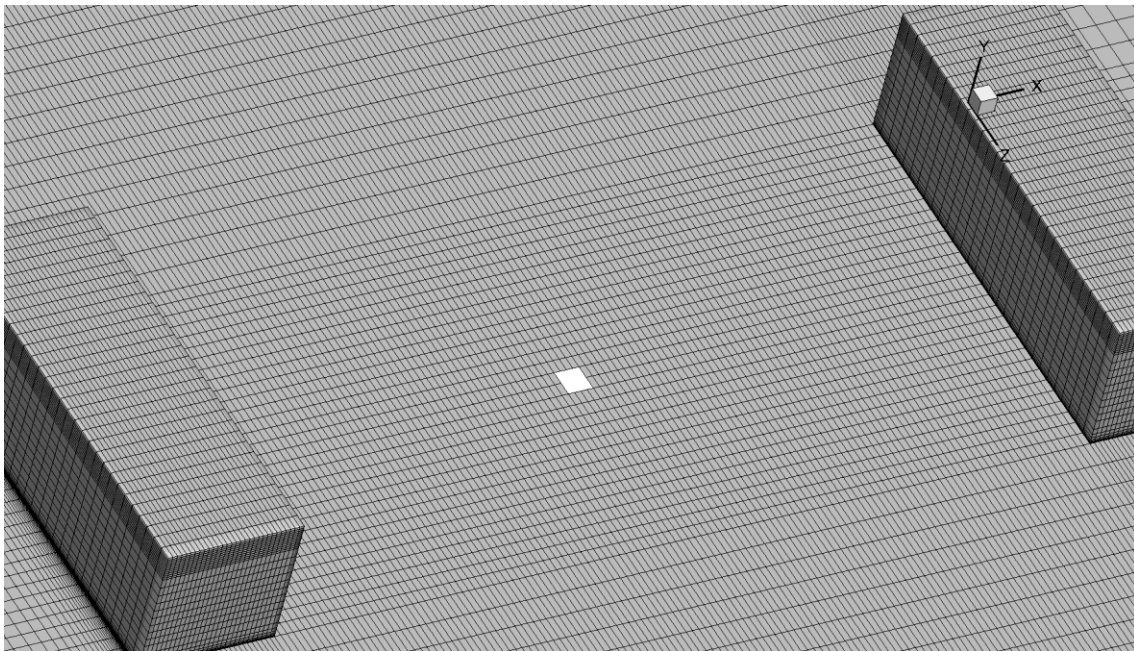
συσσωρευτική την έκλυση των παθητικών ρύπων οι οποίοι μπορούν να προσομοιώσουν ικανοποιητικά τους ρύπους των οχημάτων σε ώρα αιχμής εντός της χαράδρας.



Σχήμα 3-26 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$

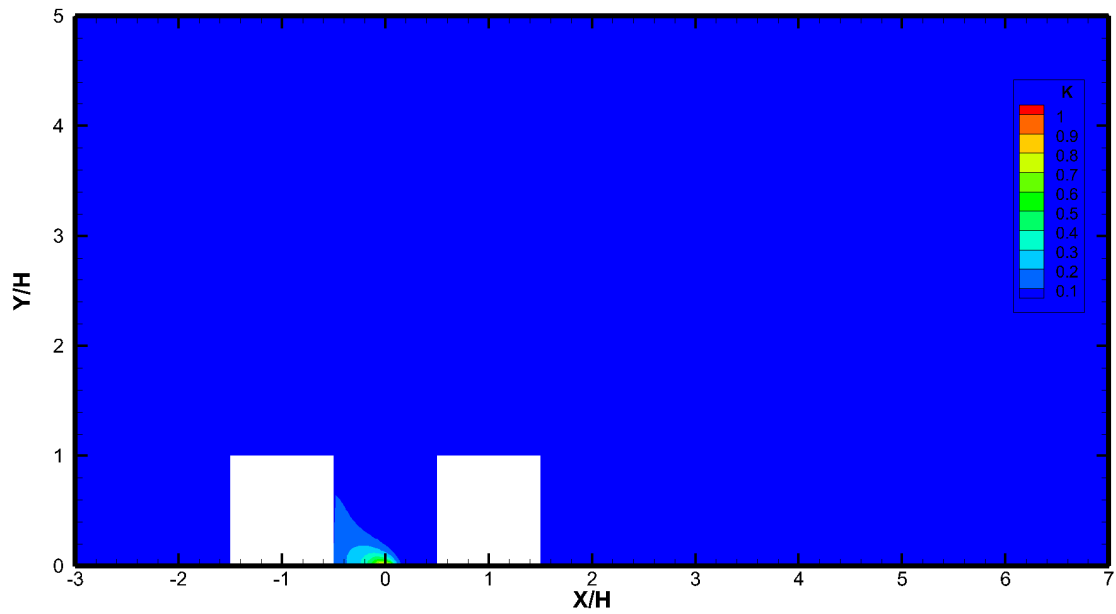


Σχήμα 3-27 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$

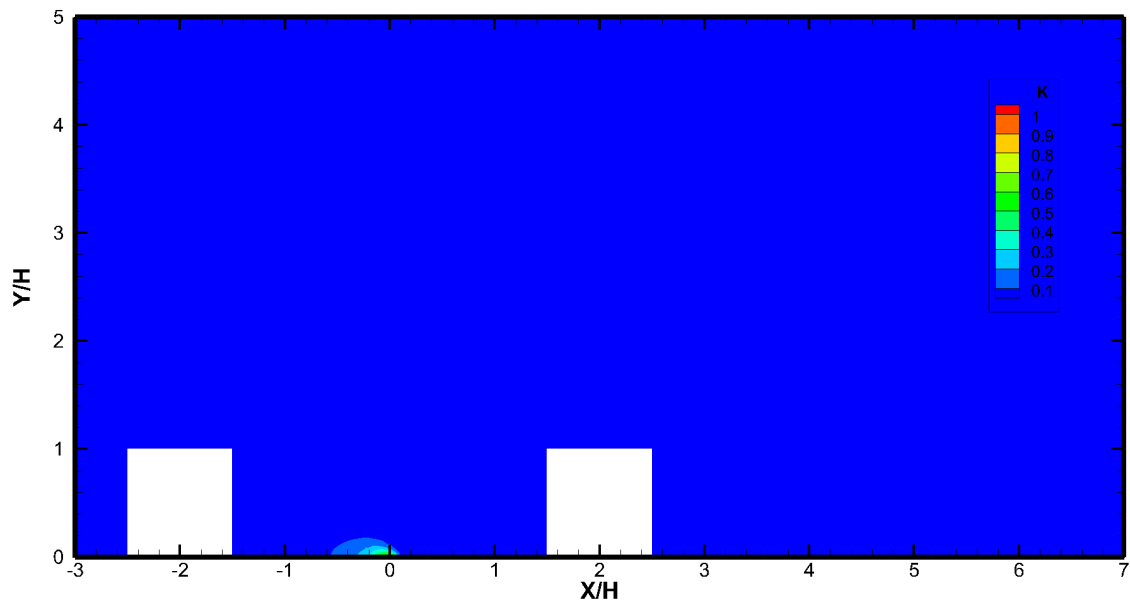


Σχήμα 3-28 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$

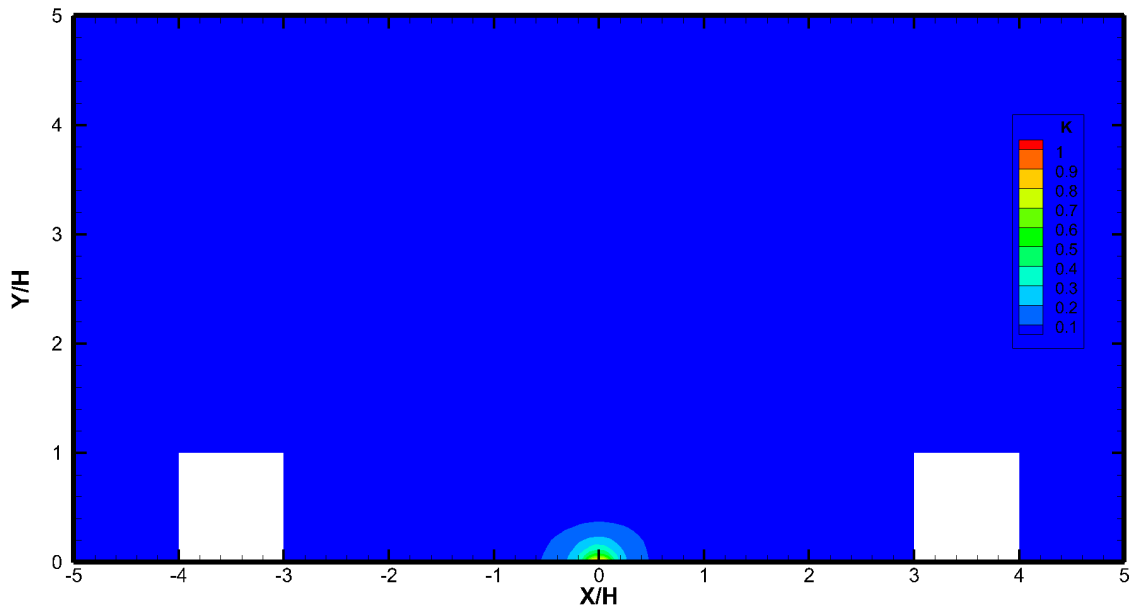
Στο Σχήμα 3-29 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του συντελεστή K όπως αυτός προέκυψε από την εξίσωση 3-1. Παρατηρείται ότι ο ρύπος προσκολλάται στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου όπως και αυτό ήταν αναμενόμενο από την φορά περιστροφής της κεντρικής δίνης εντός της χαράδρας. Η σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις φαίνονται στο κάτω μέρος της αστικής χαράδρας και στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου. Μετά η συγκέντρωση του ρύπου είναι μικρή καθώς αναμιγνύεται με τον αέρα εντός χαράδρας. Στο Σχήμα 3-30 παρατηρείται ότι με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο κτιρίων υπάρχει η τάση ο ρύπος να προσκολληθεί κατάντη του πρώτου κτιρίου χωρίς όμως να υπάρχει υψηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στη βάση του κτιρίου. Όσο αυξάνεται η απόσταση των δύο κτιρίων και αντίστοιχα το μήκος της αστικής χαράδρας ο ρύπος κινείται κατακόρυφα προς τα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας καθώς η ροή μεταξύ των δύο κτιρίων έχει ανεξαρτητοποιηθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-32. Αν το μήκος της αστικής χαράδρας είναι περίπου έξι όπως στην δική μας περίπτωση τα κτίρια αποτελούν ξεχωριστές οντότητες χωρίς το ένα να επηρεάζει το άλλο.



Σχήμα 3-29 Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$ και $Z/H=0$

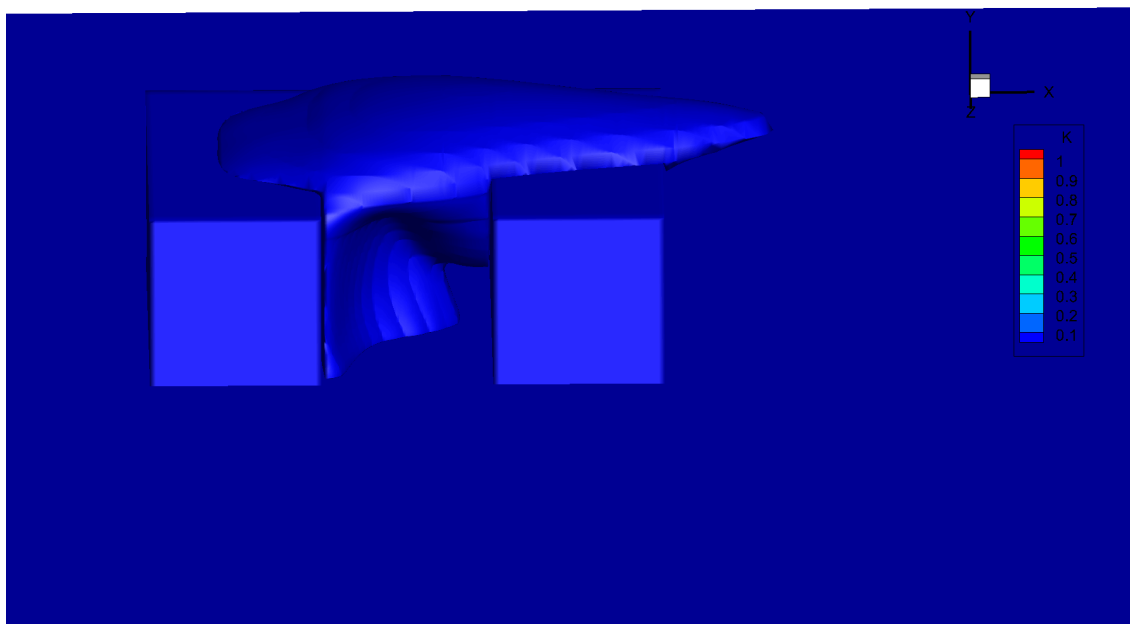


Σχήμα 3-30 Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$ και $Z/H=0$

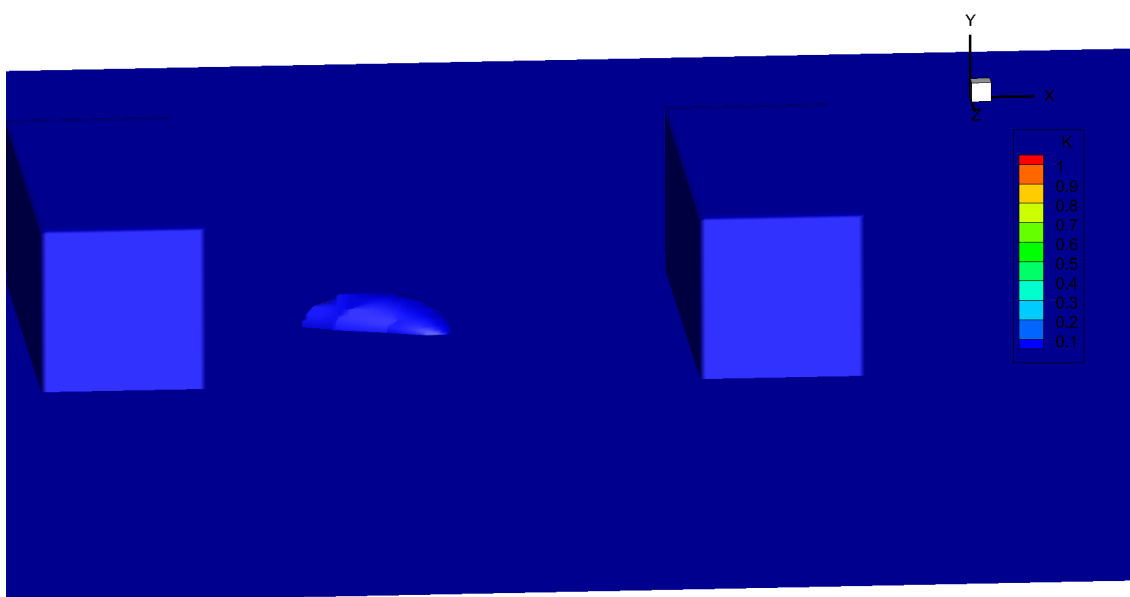


Σχήμα 3-31 Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=6$ και $Z/H=0$

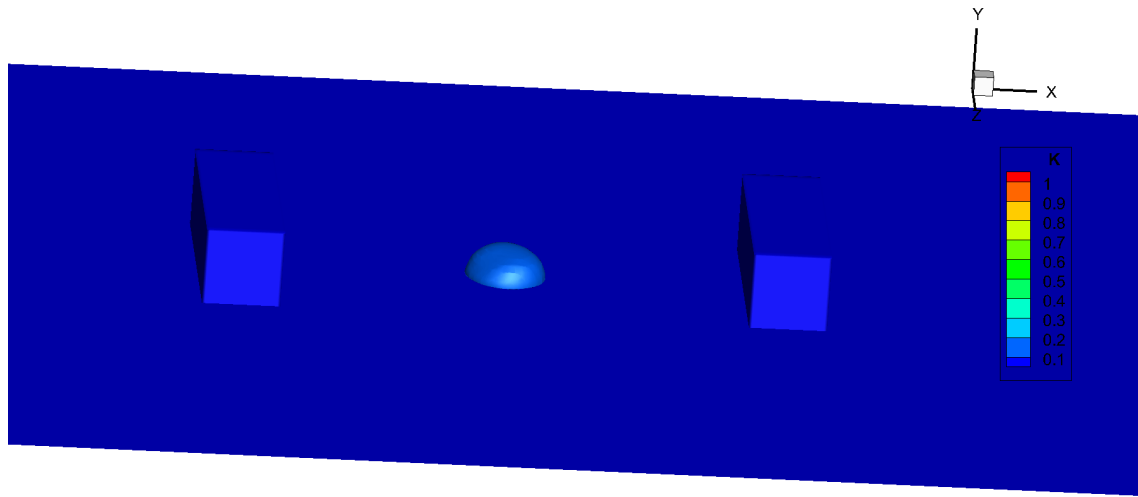
Το τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης συγκέντρωσης του ρύπου δίνεται στο Σχήμα 3-18, στο προηγούμενο γράφημα παρατηρήθηκε η συμπεριφορά του ρυπαντή εντός της χαράδρας χωρίς όμως να δίνει κάποια πληροφορία για την διαφυγή του εκτός αυτής. Στο παρακάτω γράφημα παρατηρείται ότι η διαφυγή του ρύπου συμβαίνει από τις περιοχές υψηλής κινητικής ενέργειας. Στα ισοϋψή που δόθηκαν παραπάνω παρατηρήθηκε ότι κεντρική δίνη εντός της χαράδρας είχε μετατοπιστεί προς τα επάνω και προς την οροφή του δεύτερου κτιρίου. Από το ισοϋψές στο Σχήμα 3-18 ο ρυπαντής διαφεύγει από την περιοχή όπου βρίσκεται αυτή η δίνη και ένα μικρό ποσοστό αυτού ανακυκλοφορεί εντός της χαράδρας. Σαν αποτέλεσμα αυτού μόλις ο ρύπος διαφύγει από την αστική χαράδρα επικαλύπτει την οροφή του δεύτερου κτιρίου φτάνοντας μέχρι την αρχή της θολωτής δίνης. Η εικόνα που δίνεται όταν το μήκος της αστικής χαράδρας αυξάνεται είναι διαφορετική στην περίπτωση όπου το μήκος της είναι τρία ύψη κτιρίου όπως δίνεται στο Σχήμα 3-33 παρατηρείται ότι ο ρύπος λόγω της ανακυκλοφορίας που υπάρχει εντός της χαράδρας δεν διαφεύγει προς τις οροφές των κτιρίων αλλά διαχέεται στη βάση του υπολογιστικού χωρίου με κλίση προς το πρώτο κτίριο. Αντίστοιχα στην τρίτη περίπτωση όπου το μήκος της χαράδρας είναι έξι ύψη κτιρίου καθώς πλέον δεν υφίστανται κεντρική δίνη ανακυκλοφορίας αλλά δύο θολωτές δίνες κατάντη του εκάστοτε κτιρίου ο ρύπος διαφεύγει κατακόρυφα με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις να εμφανίζονται πάνω από την πηγή και να μειώνονται κατά το ύψος.



Σχήμα 3-32 Τρισδιάστατο ισοψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$



Σχήμα 3-33 Τρισδιάστατο ισοψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$



Σχήμα 3-34 Τρισδιάστατο ισοψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=6$

4 Μελέτη επικινδυνότητας ατυχήματος διαρροής αγωγού φυσικού αερίου σε αστικό περιβάλλον

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο τρία έγινε αναλυτική περιγραφή της ροής εντός μιας τυπικής αστικής χαράδρας. Όλες οι προσομοιώσεις ήταν σε υπό κλίμακα μοντέλα τα οποία κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν πειραματικά στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου Αεροδυναμικής του Πανεπιστημίου Δυτικής αττικής. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σαν οριακές συνθήκες αποτελούσαν πειραματικές μετρήσεις οι οποίες λήφθηκαν με την μέθοδο της θερμικής ανεμομετρίας. Επικαιροποίηση του πεδίου ροής έγινε με την σύγκριση πειραματικού και υπολογιστικού συντελεστή πίεσης στις επιφάνειες και των δύο κτιρίων που πλαισιώνουν την αστική χαράδρα.

Με τη γνώση ότι τα υπολογιστικά εργαλεία τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί μπορούν να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα έγινε η μελέτη επικινδυνότητας για πραγματικές διαστάσεις κτιρίων. Το ύψος του κτιρίου βάση της βιβλιογραφίας επιλέχθηκε ίσο με δεκαοχτώ μέτρα και πλάτος τρεις φορές το ύψος. Αντίστοιχα και στην μελέτη επικινδυνότητας θα εξεταστούν τρία σενάρια για την απόσταση των δύο κτιρίων. Οι λόγοι W/H είναι ίσοι με ένα, τρία και έξι ύψη κτιρίου αντίστοιχα.

Σκοπός του παρόντος εδαφίου είναι να εξακριβωθεί η επικινδυνότητα ως προς την ανθρώπινη ζωή σε περίπτωση ατυχήματος εντός αστικής περιοχής αλλά και κατά πόσο η χωροταξία του αστικού περιβάλλοντος μπορεί να αποτελέσει δείκτη ασφαλείας σε ατυχήματα διαρροής καυσίμων.

Μέρος της παρούσας έρευνας δημοσιεύτηκε σε αναγνωρισμένο επιστημονικό περιοδικό καθώς και παρουσιάστηκε στο συνέδριο **Comecap 2023 '16th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics'** (Palampigik, Vasilopoulos et al. 2023).

4.2 Χαρακτηριστικές διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου

Όπως και στο προηγούμενο εδάφιο έτσι και εδώ διατηρήθηκαν ορισμένα χαρακτηριστικά μήκη λαμβάνοντας σαν αναφορά το ύψος του κτιρίου. Πέντε ύψη κτιρίου δόθηκε σαν απόσταση από το πρώτο κτίριο για την υπολογιστική εδραίωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Έξι ύψη κτιρίου από την βάση της αστικής χαράδρας σαν κατακόρυφη απόσταση προκειμένου να μην δημιουργηθεί υπολογιστική στένωση. Από την πίσω πλευρά του δεύτερου κτιρίου έχουν

δοθεί τουλάχιστον δεκαέξι ύψη κτιρίου για την αποφυγή αποκοπής οποιαδήποτε χρήσιμης πληροφορίας. Και τέλος πέντε ύψη αριστερά και δεξιά της αστικής χαράδρας για να υπολογιστούν τα ζεύγη των πλαϊνών δινών.

4.3 Αρχικές συνοριακές συνθήκες των υπολογιστικών περιπτώσεων

Ο ορισμός των οριακών συνθηκών έγινε προκειμένου να εξακριβωθεί κατά πόσο διαφορετικά ατμοσφαιρικά οριακά στρώματα μπορούν να επηρεάσουν την αστική περιοχή εντός της αστικής χαράδρας. Για το λόγο αυτό δοκιμάστηκαν τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου τυπικών μετεωρολογικών συνθηκών για τις βαλκανικές και ευρωπαϊκές χώρες. Οι ταχύτητες U_{∞} είναι 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s και 4,2 m/s. Μελέτη έχει γίνει και για τρεις διαφορετικούς χαρακτηριστικούς λόγους W/H ίσο με 1, 3 και 6. Η παροχή του μεθανίου έχει διατηρηθεί η ίδια και για τα τέσσερα σενάρια και για τους τρεις χαρακτηριστικούς λόγους και είναι ίση με 60 l/h. Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα που χρησιμοποιήθηκε στην είσοδο των υπολογιστικών προσομοιώσεων δίνεται στο Σχήμα 3-11 με μέγιστη ταχύτητα U_{∞} των παραπάνω ταχυτήτων.

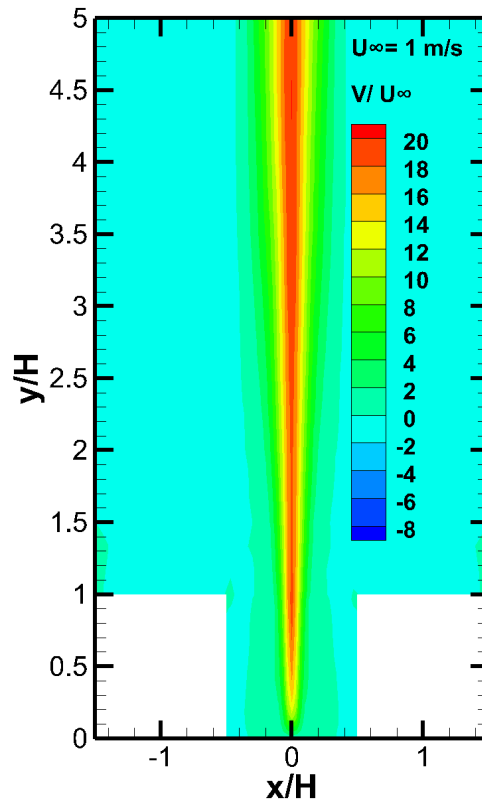
Η εξίσωση του προφίλ ταχύτητας η οποία χρησιμοποιήθηκε στις υπολογιστικές προσομοιώσεις δίνεται στην Εξίσωση 4.1:

$$U = \left(\frac{y}{z_0}\right)^{z_0} \cdot U_{\infty} \quad (4-1)$$

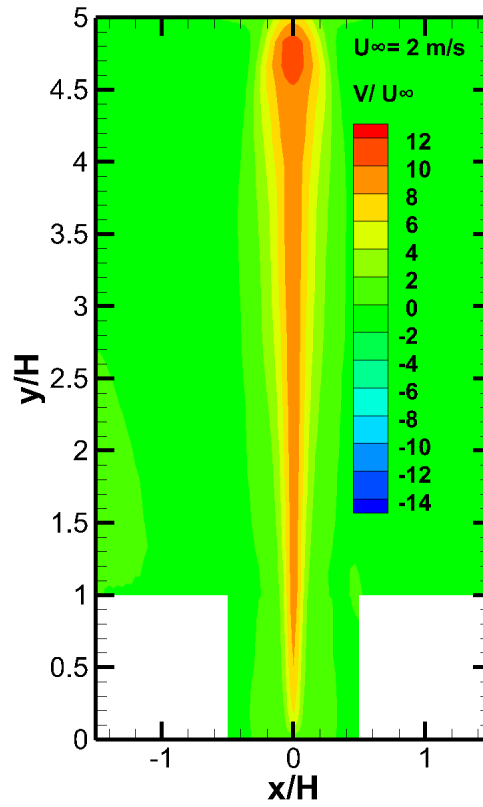
4.4 Στιγμιαίες ταχύτητες για την περίπτωση W/H=1

Στο Σχήμα 4-1, Σχήμα 4-2, Σχήμα 4-3 και Σχήμα 4-4 παρουσιάζονται τα γραφήματα της στιγμιαίας ταχύτητας για τη χρονική στιγμή $t=100$ s η οποία έχει αδιαστατοποιηθεί με την υπό μελέτη αδιατάραχτη ροή. Η αιτία που έγινε η επιλογή της U_{∞} ταχύτητας ως μεταβλητής αδιαστατοποίησης είναι η ποσοτικοποίηση των ανωστικών δυνάμεων συναρτήσει της αδιατάραχτης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχουν προσομοιωθεί τέσσερις ταχύτητες προκειμένου να δειχτεί η μετάβαση της μορφολογίας της ροής καθώς αυξάνονται οι δυνάμεις αδράνειας υπό σταθερές ανωστικές δυνάμεις που προκαλούνται από το φαινόμενο της καύσης. Στην περίπτωση όπου η ταχύτητα της U_{∞} είναι 1 m/s οι δυνάμεις αδράνειας είναι πολύ μικρές δίνοντας την εικόνα καθαρής διάχυσης καθώς το πλούμιο από την καύση του μεθανίου αναπτύσσεται κατακόρυφα προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Στις περιπτώσεις των 2 και 3 m/s οι δυνάμεις αδράνειας έχουν αυξηθεί χωρίς όμως να είναι ικανές να παρασύρουν το πλούμιο. Σαν αποτέλεσμα αυτού η αδιατάραχτη πιέζει το πλούμιο προς τα χαμηλότερα επίπεδα χωρίς όμως να πλησιάζουν τις οροφές των κτιρίων. Στην τελευταία περίπτωση όπου η ταχύτητα της U_{∞} είναι λίγο παραπάνω από τέσσερα m/s (4,2 m/s) πλέον οι δυνάμεις αδράνειας

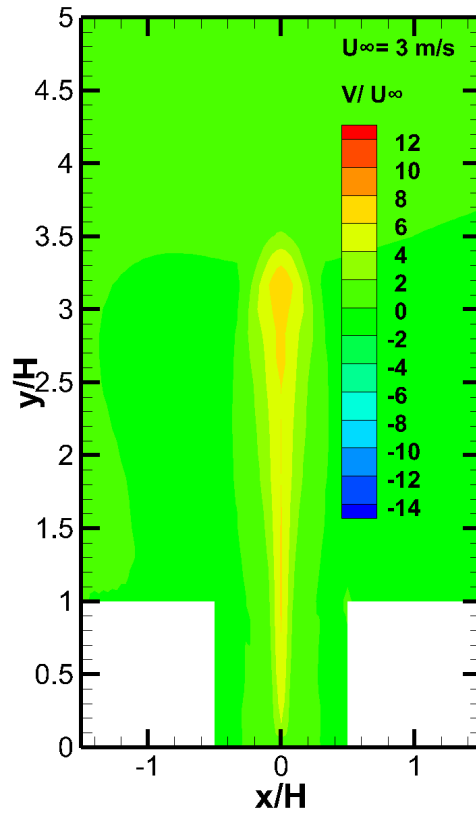
είναι ικανές να υπερνικήσουν τις ανωστικές δυνάμεις που προκαλούνται από την καύση και να παρασύρουν το πλούμιο. Έτσι στο Σχήμα 4-4 παρατηρείται ότι στο δεύτερο όρι δομές υψηλών κατακόρυφων ταχυτήτων έχουν μεταφερθεί στην οροφή του δεύτερου κτιρίου, γεγονός που θα επηρεάσει και την διασπορά του ρυπαντή.



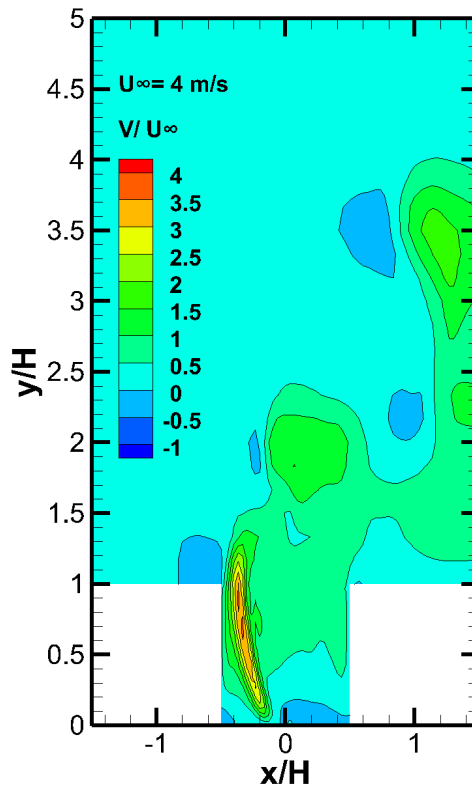
Σχήμα 4-1 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



Σχήμα 4-2 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατής στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



Σχήμα 4-3 Ισοψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατής στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.

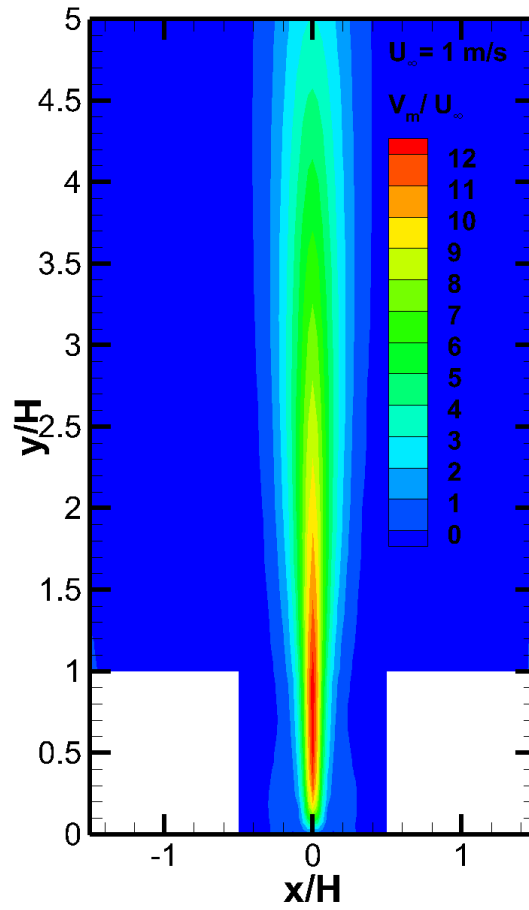


Σχήμα 4-4 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 4,2$ m/s και $t = 100$ s.

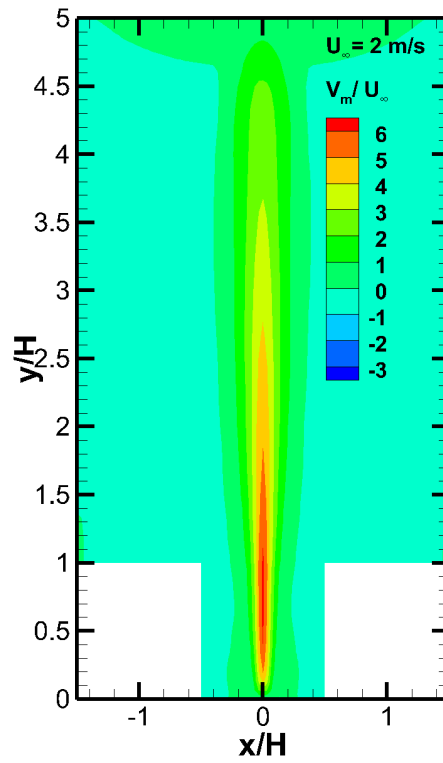
4.5 Μέσες ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=1$

Παρόμοια είναι η εικόνα που δίνεται και για το πεδίο μέσων τιμών της ταχύτητας, όπως αυτά δίνονται στο Σχήμα 4-5, Σχήμα 4-6, Σχήμα 4-7 και Σχήμα 4-8. Και εδώ είναι ευδιάκριτη η διαφορά των υπολογισμένων σεναρίων όσο μεταβάλλεται η τιμή της U_∞ . Στην πρώτη περίπτωση όπου η τιμή της U_∞ είναι 1m/s το πλούμιο παρουσιάζει συμμετρικό και υψηλή κατακόρυφη ταχύτητα κίνησης προς τα ανώτερα στρώματα. Σε αντίθεση με τις δύο επόμενες περιπτώσεις που ουσιαστικά η ροή διαπερνάει σε μεγαλύτερο ύψος το πλούμιο αναγκάζοντας το να περιοριστεί πιο κοντά προς τις οροφές των δύο κτιρίων. Στην τέταρτη περίπτωση πλέον παρατηρείται κλίση του πλουμίου εντός της αστικής χαράδρας δημιουργώντας επικίνδυνες συνθήκες όχι μόνο για τους περαστικούς εντός αυτής αλλά και για αυτούς που κατοικούν στο πρώτο κτίριο. Η κλίση αυτή οφείλεται στην υπερίσχυση των δυνάμεων αδράνειας συγκριτικά με τις ανωστικές δυνάμεις οι οποίες εμφανίζονται εντός της χαράδρας. Όπως αναφέρθηκε και στην βιβλιογραφία καθώς αυξάνονται οι ταχύτητες της U_∞ σε συνδυασμό με την ροή απόξεσης που εμφανίζεται για χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με 1, δημιουργείται πλέον η κεντρική δίνη δίνοντας έτσι την παρουσιαζόμενη κλίση του πλουμίου κατάντη της αστικής χαράδρας. Τέλος παρατηρούνται και εδώ δομές στην οροφή του δεύτερου κτιρίου οι οποίες έχουν ορμή που

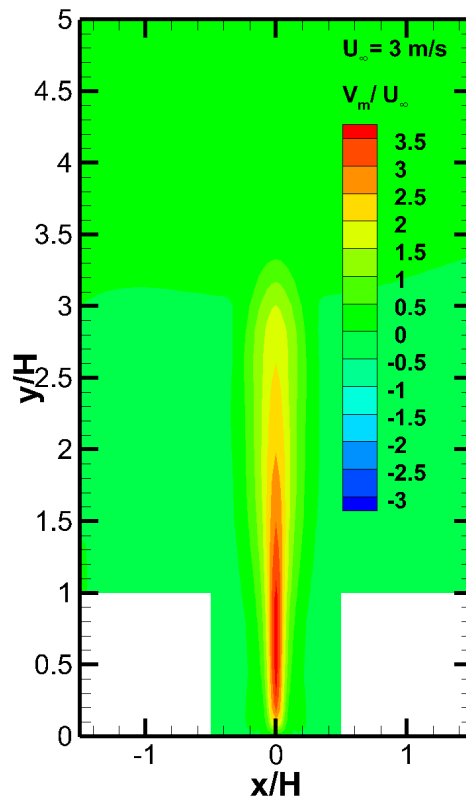
αποκτήθηκε από την αδιατάραχτη ροή. Παρακάτω που θα αναλυθούν και τα υπόλοιπα γραφήματα θα εξεταστεί κατά πόσο αυτές μπορούν να αυξήσουν τη επικινδυνότητα ενός ατυχήματος.



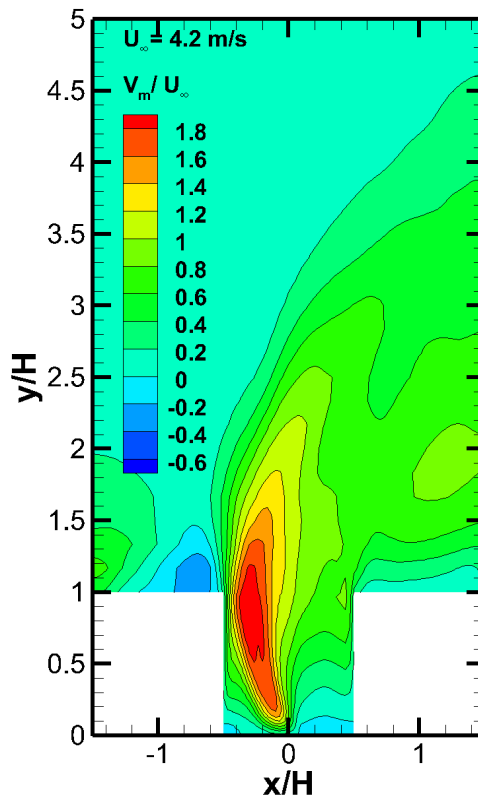
Σχήμα 4-5 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-6 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-7 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.

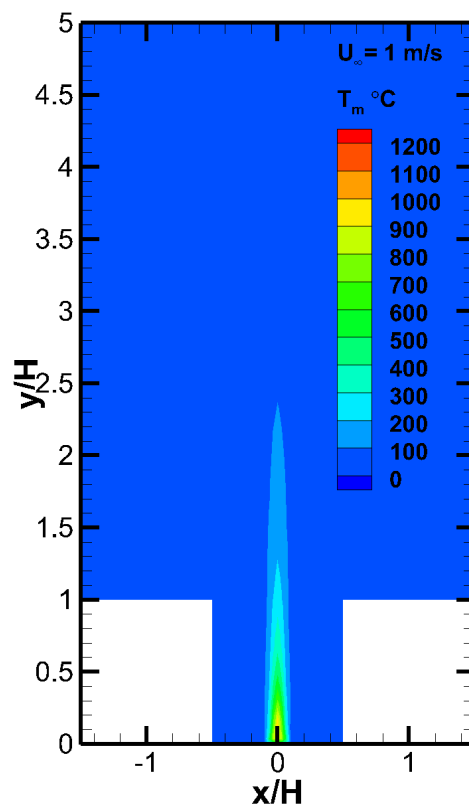


Σχήμα 4-8 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$.

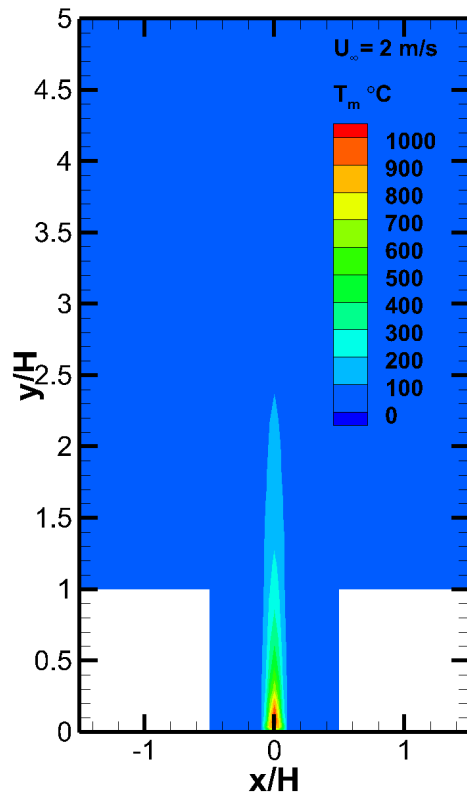
4.6 Μέση τιμή θερμοκρασίας για την περίπτωση $W/H=1$

Το πεδίο της θερμοκρασίας βάση των εξισώσεων της ρευστομηχανικής παρουσιάζουν πλήρη εξάρτηση από το πεδίο των ταχυτήτων καθώς για τον υπολογισμό του εισάγονται στιγμιαίες ταχύτητες οι οποίες υπολογίστηκαν σε προηγούμενο βήμα του υπολογιστικού αλγόριθμου. Η εξάρτηση αυτή είναι που εισάγει τις αρχές μετάδοσης θερμότητας προς εξέταση στο παρών εδάφιο. Στο Σχήμα 4-9, Σχήμα 4-10, Σχήμα 4-11 και Σχήμα 4-12 δίνονται τα ισοϋψή γραφήματα του μέσου πεδίου θερμοκρασίας. Και για τις τέσσερις υπό εξέταση περιπτώσεις U_∞ . Για τις δύο πρώτες περιπτώσεις για ταχύτητες αδιατάραχτε ίσες με 1 και 2 m/s τα γραφήματα παρουσιάζουν ομοιότητα ως προς την συμπεριφορά του πλουμίου. Παρατηρείται ότι αυτό είναι κάθετο με μέγιστο ύψος τα 2,5 ύψη κτιρίου δίνοντας θερμοκρασία τριακοσίων βαθμών Κελσίου σε εκείνο το ύψος. Το γεγονός ότι αυτό κινείται κατακόρυφα αποτελεί θετικό για αυτούς που κατά την ώρα του ατυχήματος είναι εντός των κτιρίων καθώς δεν θα επηρεαστούν από τι υψηλές θερμοκρασίες. Στην τρίτη περίπτωση με ταχύτητα $U_\infty 3 \text{ m/s}$ πλέον η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του πλουμίου και της U_∞ έχει επηρεάσει το θερμοκρασιακό πεδίο. Η ισοϋψής γραμμή των τριακοσίων βαθμών κελσίου βρίσκεται στα 2 ύψη κτιρίου, αυτό δημιουργεί πιο δυσμενείς συνθήκες τόσο για αυτούς που βρίσκονται εντός των κτιρίων αλλά και τους περαστικούς εντός της αστικής χαράδρας. Καθώς θα εκτεθούν σε υψηλότερες

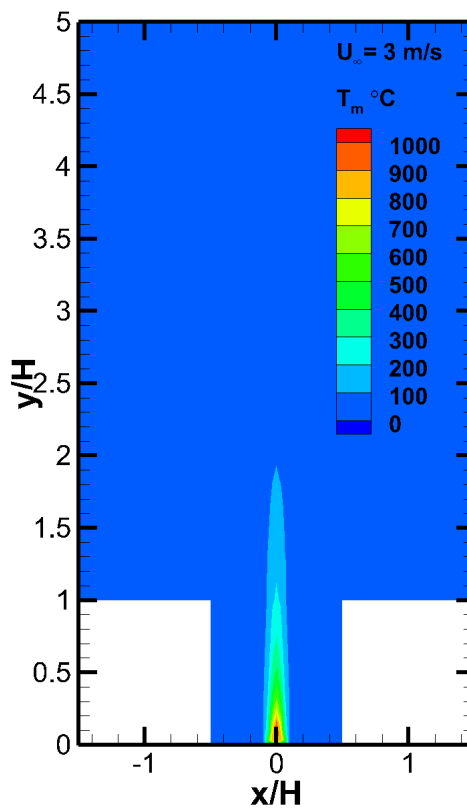
θερμοκρασίες εφόσον το πλούμιο έχει μετατοπιστεί πιο κοντά στις οροφές των κτιρίων. Στην τελευταία περίπτωση όπου πλέον η ταχύτητα της U_∞ είναι 4,2 m/s η μεταφορά θερμότητας μεταξύ πλουμίου και της U_∞ έχει περιορίσει το πλούμιο εντός της αστικής χαράδρας λαμβάνοντας και την κλίση η οποία παρατηρήθηκε στα ισοϋψή τόσο των στιγμιαίων ταχυτήτων αλλά και των μέσων τιμών. Για την τελευταία περίπτωση οι συνθήκες είναι πιο δυσχερές για αυτούς που θα βρίσκονται στο κτίριο ανάντη της χαράδρας αλλά και για του περαστικούς σε εκείνο το σημείο λόγω της κλίσης που πεδίου της θερμοκρασίας.



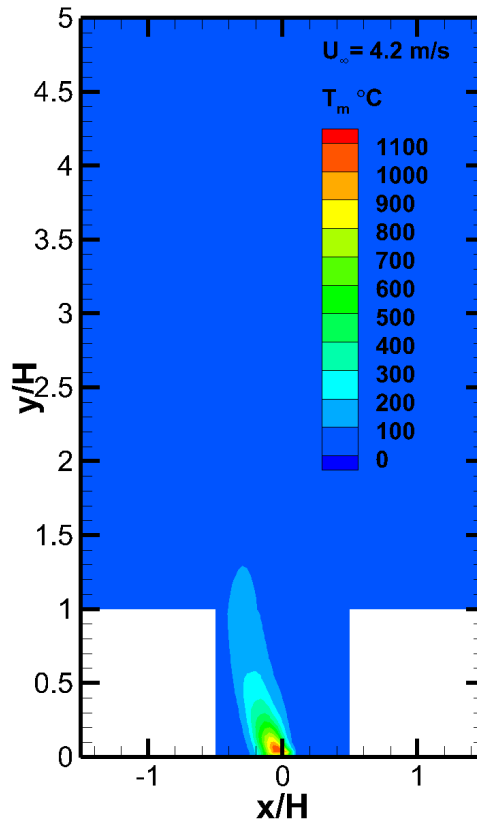
Σχήμα 4-9 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-10 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-11 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.

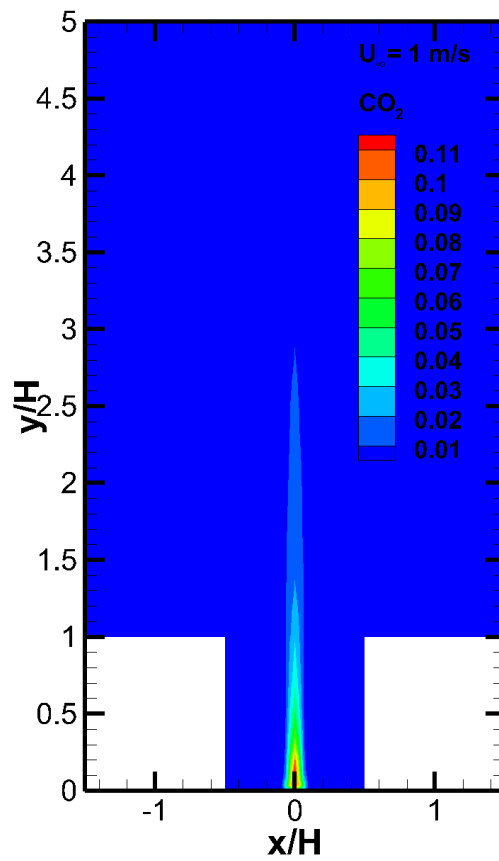


Σχήμα 4-12 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$

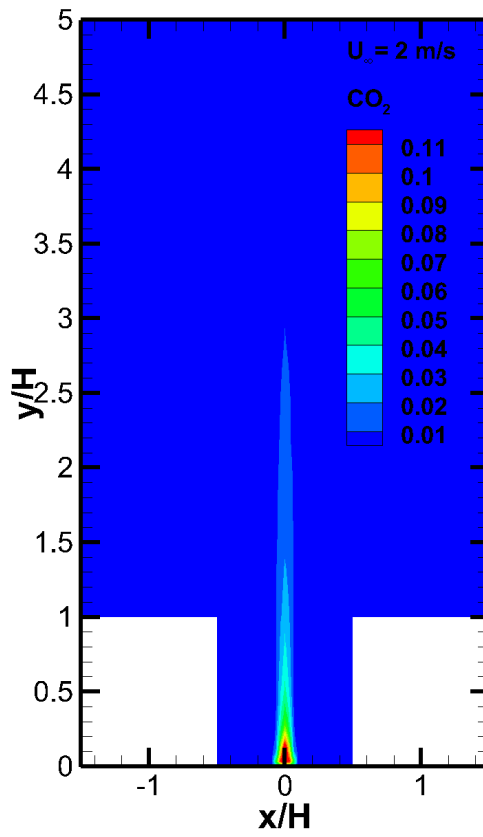
4.7 Μέσες τιμές του διοξειδίου του άνθρακα για την περίπτωση $W/H=1$

Όλη η ανάλυση που έχει γίνει παραπάνω καταλήγει στην σημασία των ισοϋψών γραφημάτων του διοξειδίου του άνθρακα. Στην περίπτωση του ατυχήματος δεν μπορεί η έκλυση του ρυπαντή να θεωρηθεί σαν παθητική καθώς υπεισέρχονται παράγοντες μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του πλουμίου και της U_∞ αλλά και θερμοδυναμικής κατάστασης του ρυπαντή καθώς η ύπαρξη θερμοκρασιακού πεδίου επηρεάζει τα ρευστομηχανικά μεγέθη διάχυσης αυτού. Η εικόνα που έχουμε για την διασπορά του διοξειδίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-13, Σχήμα 4-14, Σχήμα 4-15 και Σχήμα 4-16 για κάθε ταχύτητα η οποία προσομοιώθηκε. Όπως σχολιάστηκε στα γραφήματα της θερμοκρασίας έτσι και εδώ για τις δύο πρώτες περιπτώσεις για τιμές 1 και 2 m/s της U_∞ η διασπορά του διοξειδίου δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα και είναι πανομοιότυπη. Στην Τρίτη περίπτωση όπου η ταχύτητα της U_∞ έχει αυξηθεί παρατηρείται μείωση στο ύψος της διασποράς του διοξειδίου αυξάνοντας ελάχιστα τις συγκεντρώσεις εντός της αστικής χαράδρας. Στην τελευταία περίπτωση σχεδόν όλος ο ρύπος εγκλωβίζεται εντός της χαράδρας δίνοντας τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντός αυτής. Η κλίση του θερμοκρασιακού πεδίου για την συγκεκριμένη ταχύτητα της U_∞ επηρεάζει πλήρως την διασπορά του διοξειδίου εντός της αστικής χαράδρας. Ο ρυπαντής προσκολλάται όλος ανάντη στις χαράδρας δημιουργώντας τις πιο δυσμενείς συνθήκες από όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, καθώς

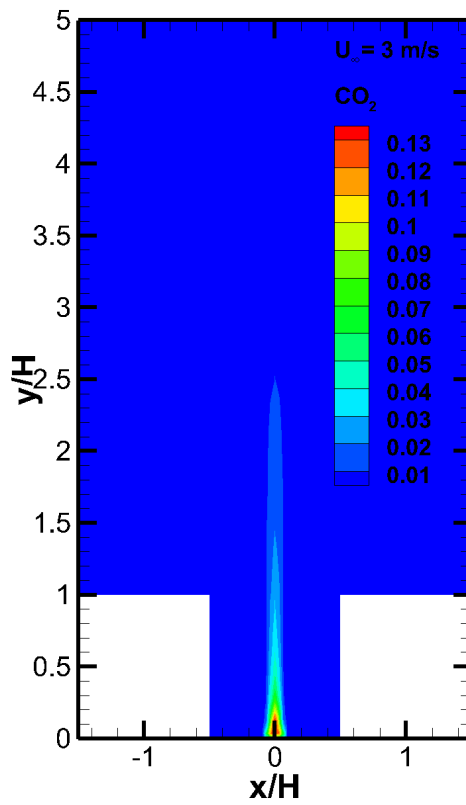
ο συνδυασμός των υψηλών θερμοκρασιών και των υψηλών συγκεντρώσεων σε συγκεκριμένο χώρο εντός της χαράδρας μπορεί να αποβεί μοιραίος.



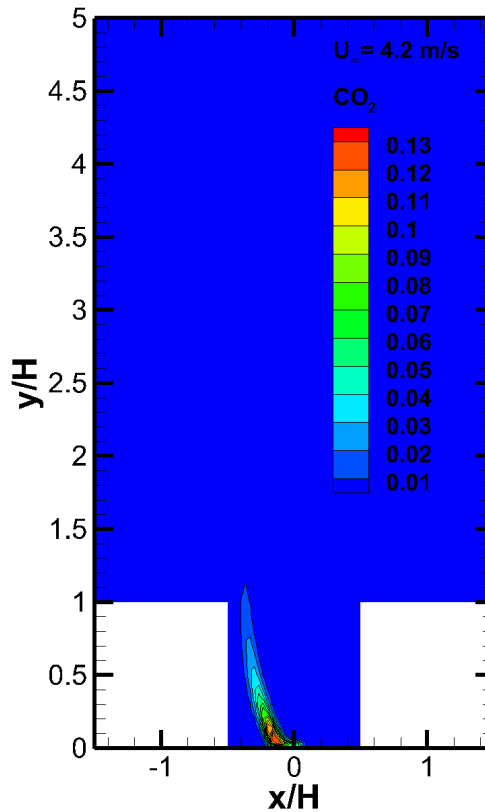
Σχήμα 4-13 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO₂ για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-14 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



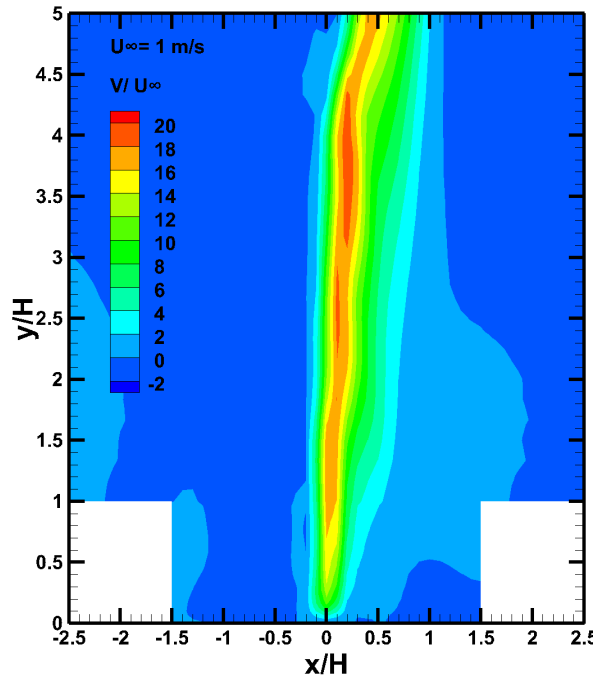
Σχήμα 4-15 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.



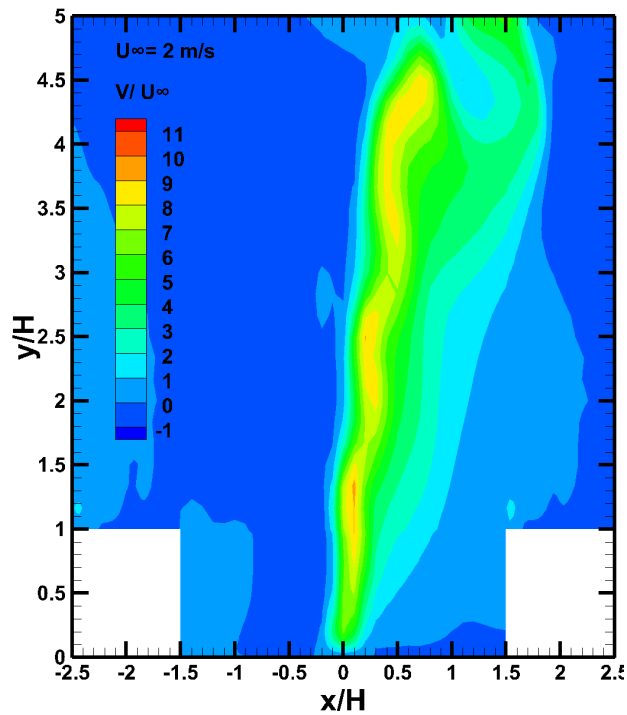
Σχήμα 4-16 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO₂ για $U_{\infty} = 4,2 \text{ m/s}$.

4.8 Στιγμαϊκές ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=3$

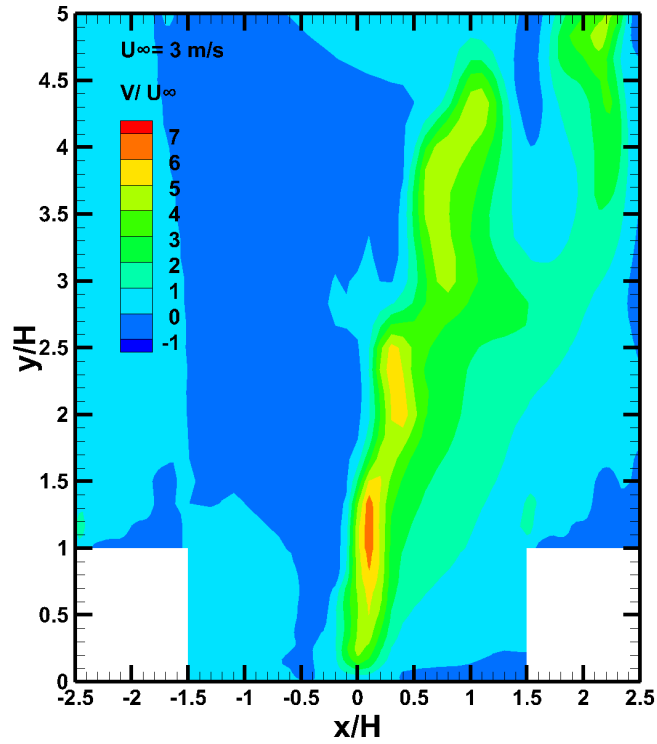
Στο Σχήμα 4-17, Σχήμα 4-18, Σχήμα 4-19 και Σχήμα 4-20 δίνονται τα ισοϋψή γραφήματα για χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με 3. Ανατρέχοντας στην βιβλιογραφική ανασκόπηση ο για τον συγκεκριμένο λόγο W/H έχουμε ροή διαταραχής ομόρου. Πλέον λόγω της αύξησης του μήκους της αστικής χαράδρας παρατηρείται ότι το πλούμιο που προκαλείται για όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζει κλίση. Στην πρώτη περίπτωση όπου η ταχύτητα της U_{∞} είναι ίση με 1 m/s παρατηρείται μία μείωση των ανωστικών δυνάμεων λόγω της αύξησης του λόγου W/H . Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από την ελαφρά παράσυρση του πλουμίου. Στην δεύτερη και τρίτη περίπτωση με ταχύτητα U_{∞} ίση με 2 και 3 m/s παρατηρείται αύξηση της κλίσης του πλουμίου καθώς και αποκόλληση δομών ροής υψηλής κινητικής ενέργειας λόγω του φαινομένου της καύσης. Σε σύγκριση των αποτελεσμάτων με της περίπτωση που ο λόγος W/H είναι 1 η αύξηση του χώρου μεταξύ των κτιρίων βοηθά στην υπερίσχυση των δυνάμεων αδράνειας. Στην τελευταία περίπτωση όπου η αδιατάραχτη ροή έχει τιμή 4,2 m/s το πλούμιο παρουσιάζει σημαντική κλίση επηρεάζοντας πλέον και το κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας, καθώς πλέον ο αριθμός των δομών που αποκολλούνται από το πλούμιο έχει αυξηθεί δείχνοντας ξεκάθαρα πλέον την υπερίσχυση των δυνάμεων αδράνειας έναντι των ανωστικών.



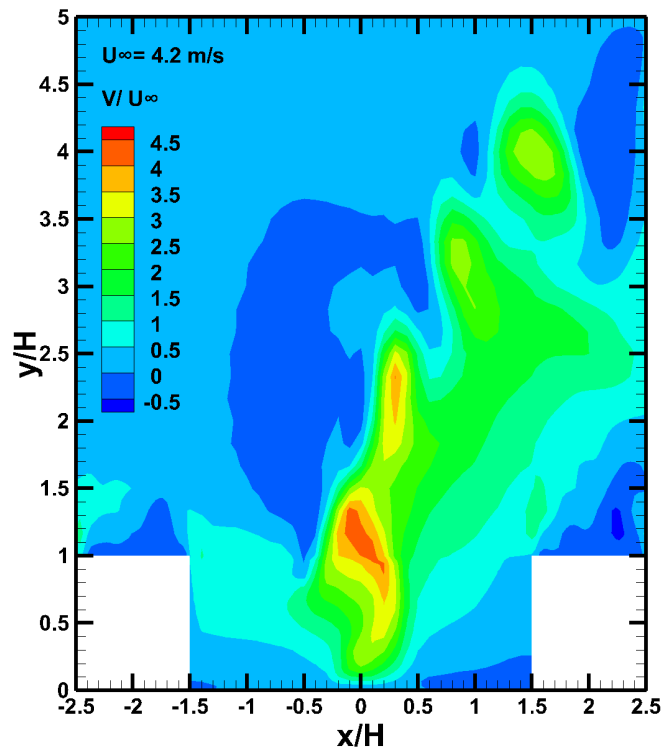
Σχήμα 4-17 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



Σχήμα 4-18 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



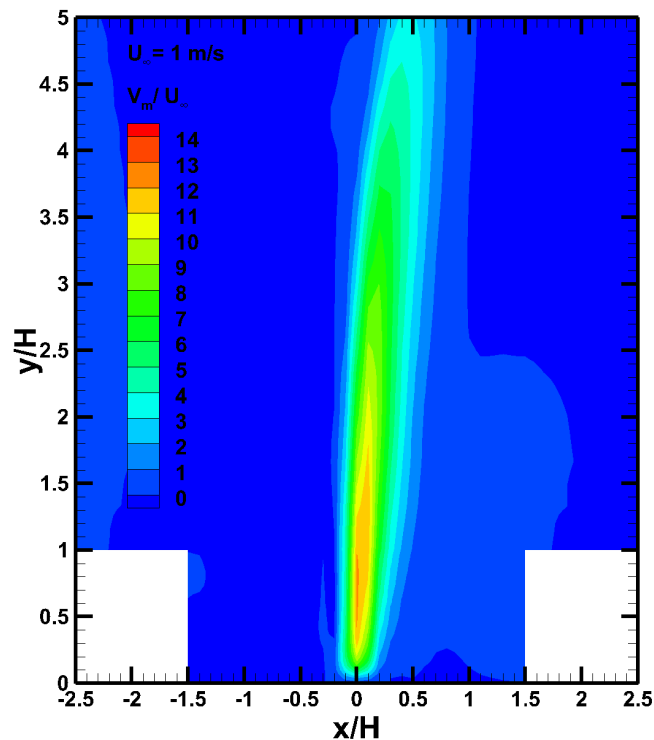
Σχήμα 4-19 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



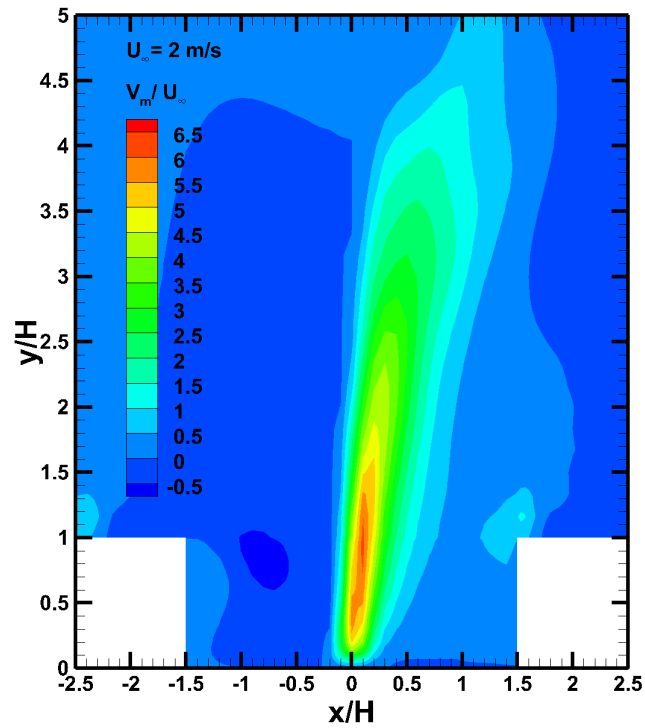
Σχήμα 4-20 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.

4.9 Μέσες ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=3$

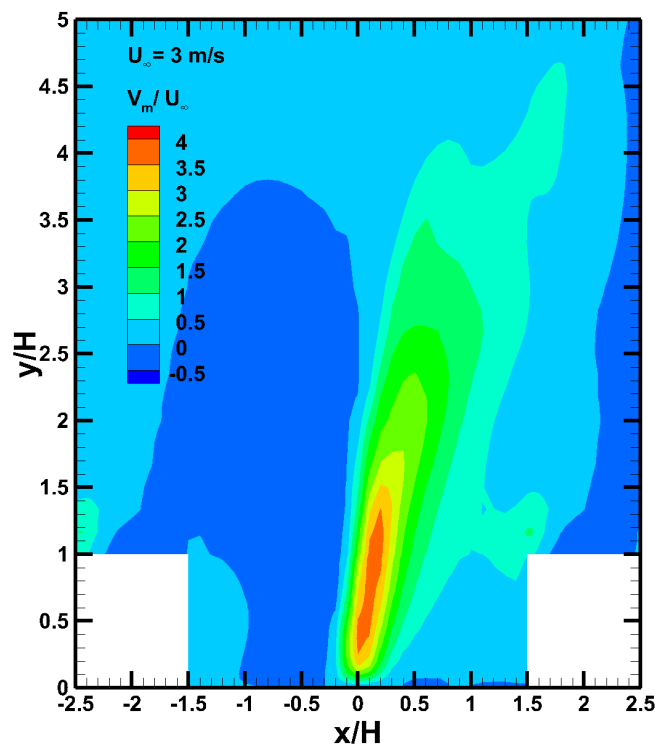
Το πεδίο των μέσων ταχυτήτων μπορεί να δώσει μία πιο σταθμισμένη εικόνα για την εξέλιξη των ταχυτήτων εντός της αστικής χαράδρας κατά την διάρκεια του ατυχήματος. Όπως και πριν έτσι και εδώ φαίνεται η επίδραση της αύξησης του μήκους μεταξύ των δύο κτιρίων. Στο Σχήμα 4-21 δίνεται το γράφημα για την πρώτη περίπτωση όπου η αδιατάραχτη ροή είναι 1 m/s. Παρατηρείται μία ελάχιστη κλίση του πλουμίου χωρίς όμως αυτή να επηρεάζει κανένα από τα δύο κτίρια. Στο Σχήμα 4-22 και Σχήμα 4-23 δίνονται τα ισοψή για τις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα της U_∞ είναι 2 και 3 m/s, πλέον η κλίσεις των πλουμίων είναι ευδιάκριτες αυτό επηρεάζει τα κτίρια κατάντη των χαραδρών καθώς ένα τμήμα των πλουμίων προσπίπτει σε αυτά. Στο Σχήμα 4-24 η αδιατάραχτη ροή έχει πλέον μέτρο ίσο με 4,2 m/s, η παράσυρση του πλουμίου πλέον είναι έντονη δείχνοντας ότι οι δυνάμεις αδράνειας πλέον είναι ισχυρότερες και ικανές να επηρεάσουν το κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας.



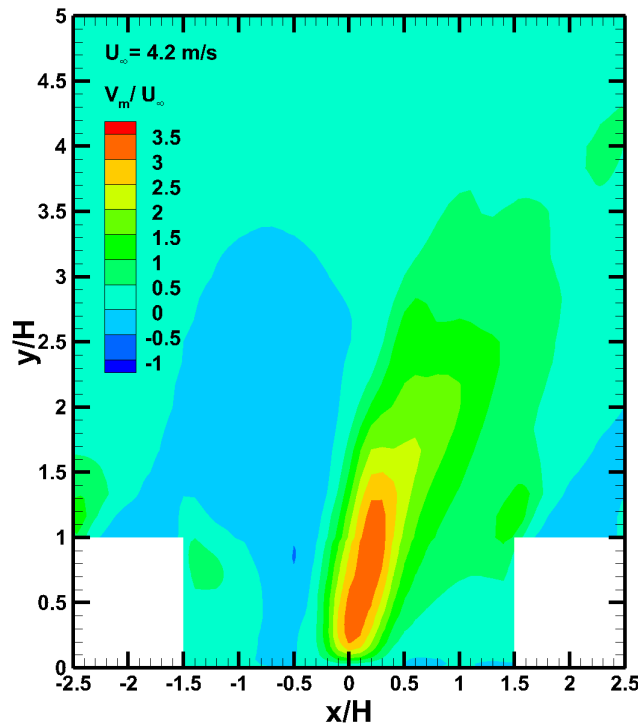
Σχήμα 4-21 Ισοψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-22 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



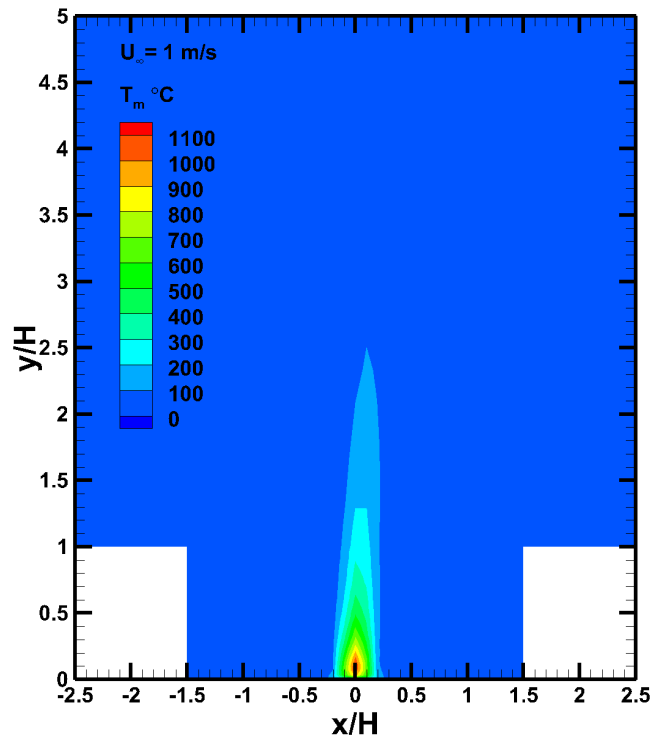
Σχήμα 4-23 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.



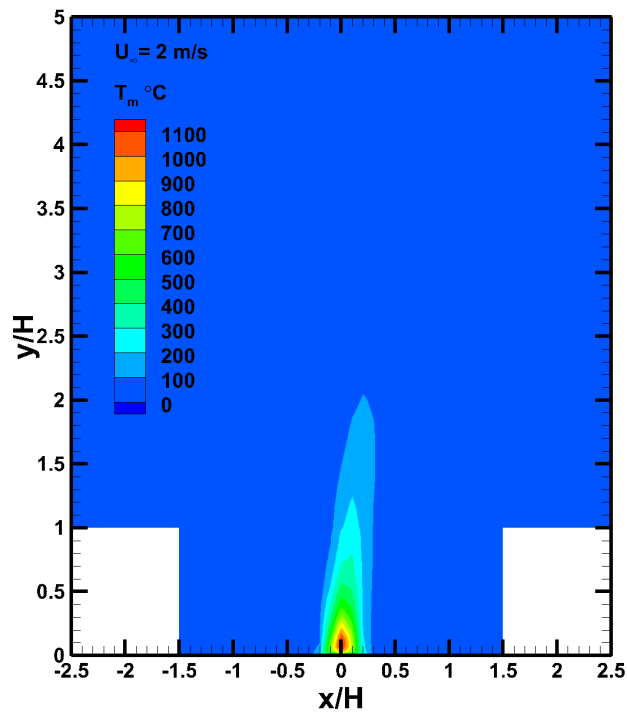
Σχήμα 4-24 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$.

4.10 Μέση τιμή θερμοκρασίας για την περίπτωση $W/H=3$

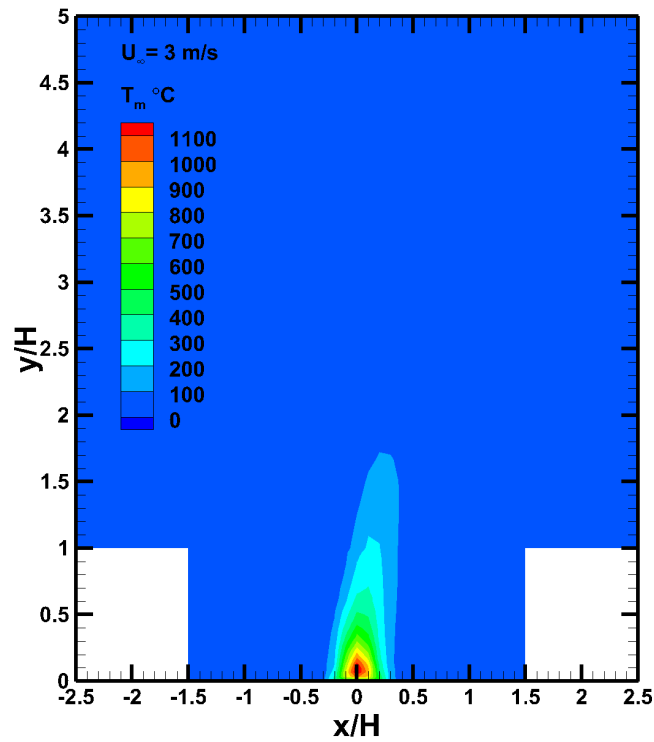
Παρακάτω δίνονται τα ισοϋψή γραφήματα του μέσου θερμοκρασιακού πεδίου που προέκυψε ανά σενάριο μελέτης. Στο Σχήμα 4-25 η ταχύτητα της U_∞ είναι 1 m/s , το θερμοκρασιακό πεδίο παρουσιάζει ομοιότητα με κείνο όταν ο λόγος W/H είναι ίσος με 1. Λόγω της μικρής ταχύτητας στην είσοδο της αστικής χαράδρας η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του πλουμίου και της ροής είναι μικρή, έτσι η ισοϋψής των 300 βαθμών κελσίου είναι στο ίδιο επίπεδο. Αντίθετα στο Σχήμα 4-26, Σχήμα 4-27 και Σχήμα 4-28 η μετάδοση θερμότητας μεταξύ U_∞ και πλουμίου πλέον είναι σημαντική καθώς το ύψος της ισοϋψούς γραμμής των 300 βαθμών κελσίου μειώνεται δραστικά ενώ παράλληλα η ταχύτητα της ροής στην είσοδο της χαράδρας αυξάνεται. Η δραστική αυτή πτώση μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του μήκους της αστικής χαράδρας καθώς περισσότερη ποσότητα αέρα θερμοκρασία 27°C εισάγεται αυξάνοντας την απαγωγή θερμότητας. Παράλληλα όσο αυξάνεται το μέτρο της ταχύτητας της U_∞ παρατηρείται κλίση του πεδίου στο κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας. Το πεδίο δεν προσπίπτει σε κάποιο από τα δύο κτίρια αλλά έχει την τάση να τροφοδοτεί μεγαλύτερες μάζες θερμού αέρα και προϊόντων καύσης προς το δεύτερο κτίριο.



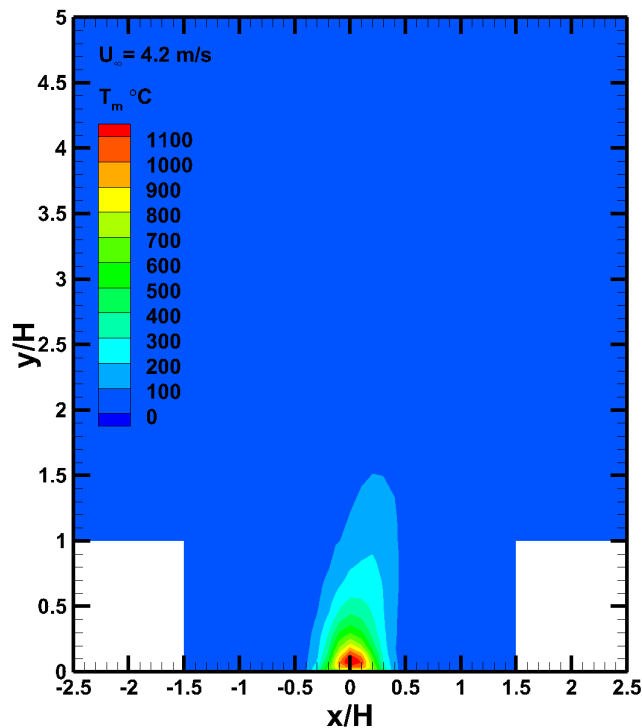
Σχήμα 4-25 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-26 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-27 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.

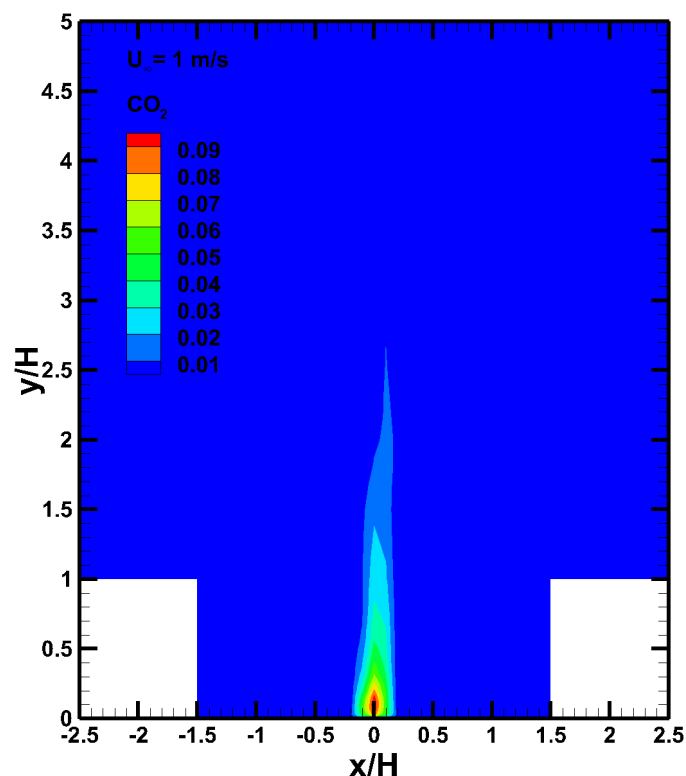


Σχήμα 4-28 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$.

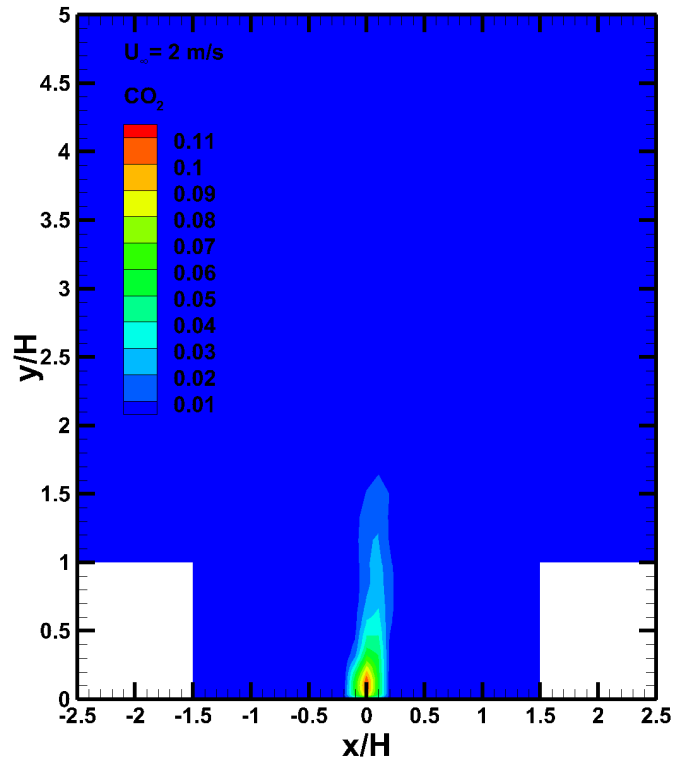
4.11 Μέσες τιμές του διοξειδίου του άνθρακα για την περίπτωση $W/H=3$

Όσο αφορά τη διασπορά το ρυπαντή εντός της αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με 3 δίνονται παρακάτω τα ισοϋψή των μέσων συγκεντρώσεων διοξειδίου του

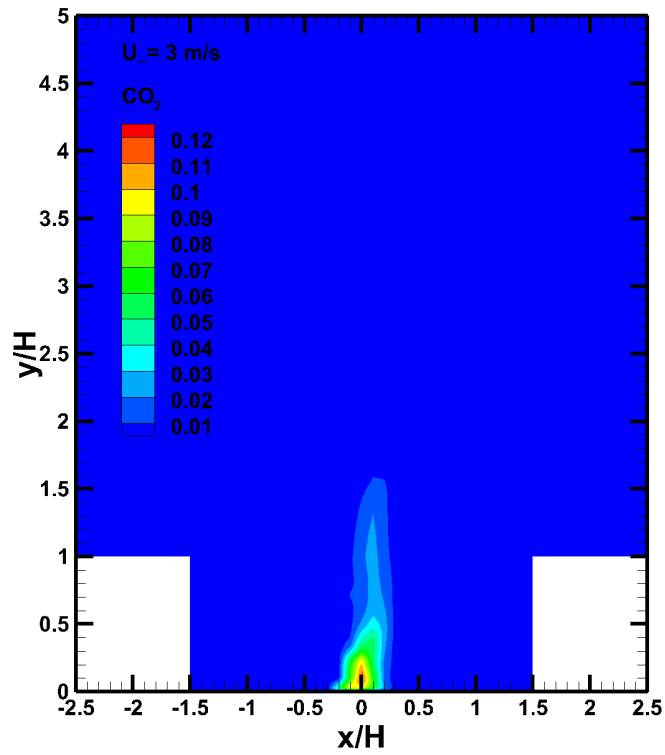
άνθρακα. Όπως και στο θερμοκρασιακό πεδίο ροής έτσι και εδώ για την περίπτωση της ταχύτητας εισόδου ίση με 1 m/s υπάρχει κατακόρυφη διασπορά του ρυπαντή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-29. Εφόσον οι δυνάμεις αδράνειας δεν είναι αρκετά μεγάλες ο ρυπαντής διαχέεται προς τα υψηλότερα στρώματα του υπολογιστικού πεδίου. Όπως δίνεται στο Σχήμα 4-30 και Σχήμα 4-31 όσο αυξάνεται η ταχύτητα στην είσοδο της αστικής χαράδρας το υψόμετρο στο οποίο φτάνει η διασπορά του ρύπου μειώνεται δραστικά πάρα ταύτα η κλίση που παρουσιάζει είναι ελάχιστη και έχει μία σχεδόν κατακόρυφη διείδυση στο πεδίο ροής. Κοντά στην εστία της πηγής όπου οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες υπάρχει μία πιο έντονη κλίση η οποία οφείλεται στην μετάδοση θερμότητας μεταξύ του θερμού αέρα και εκείνου που εισέρχεται από την αδιατάραχτη εντός της χαράδρας. Στην τελευταία περίπτωση που δίνεται στο Σχήμα 4-32 παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων εντός της χαράδρας και μεγάλο ποσοστό του ρυπαντή εγκλωβίζεται εντός αυτής λόγω της σημαντικής αύξησης των δυνάμεων αδράνειας έναντι των ανωστικών δυνάμεων.



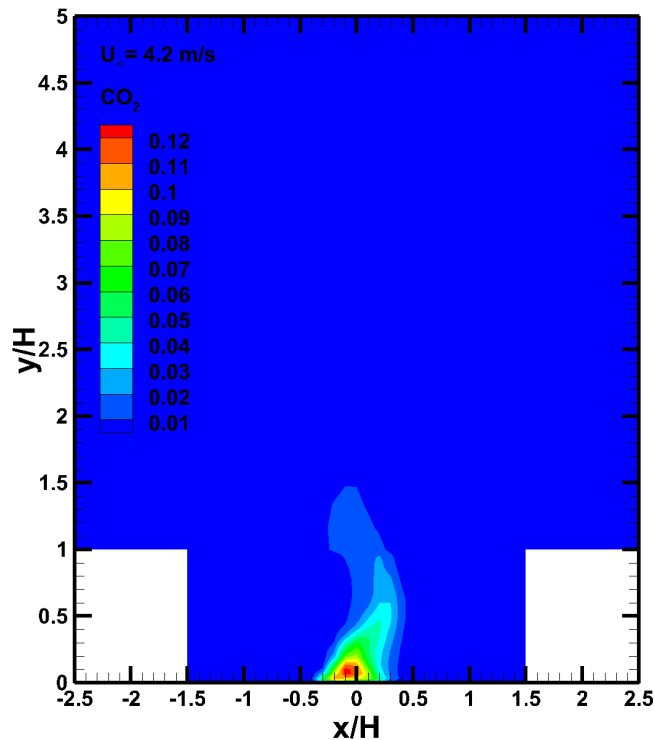
Σχήμα 4-29 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO₂ για $U_{\infty} = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-30 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



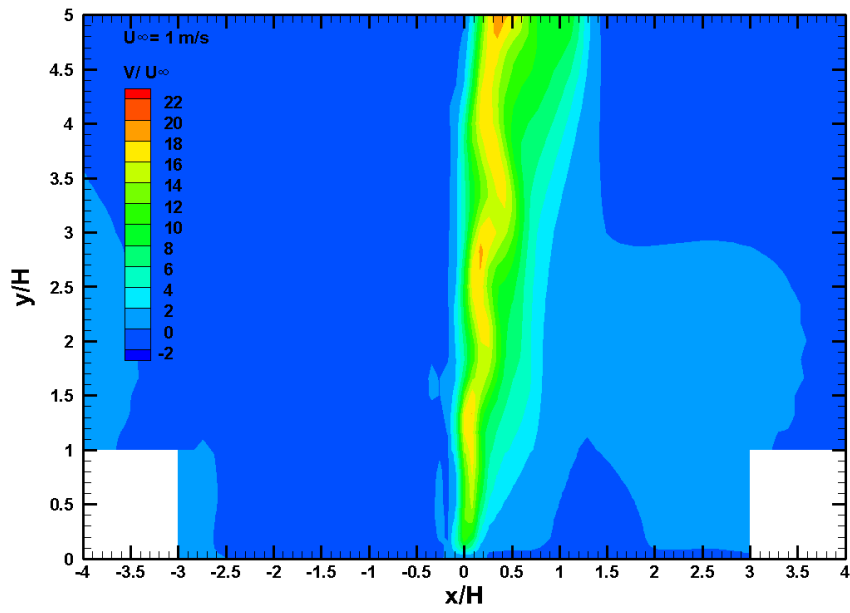
Σχήμα 4-31 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.



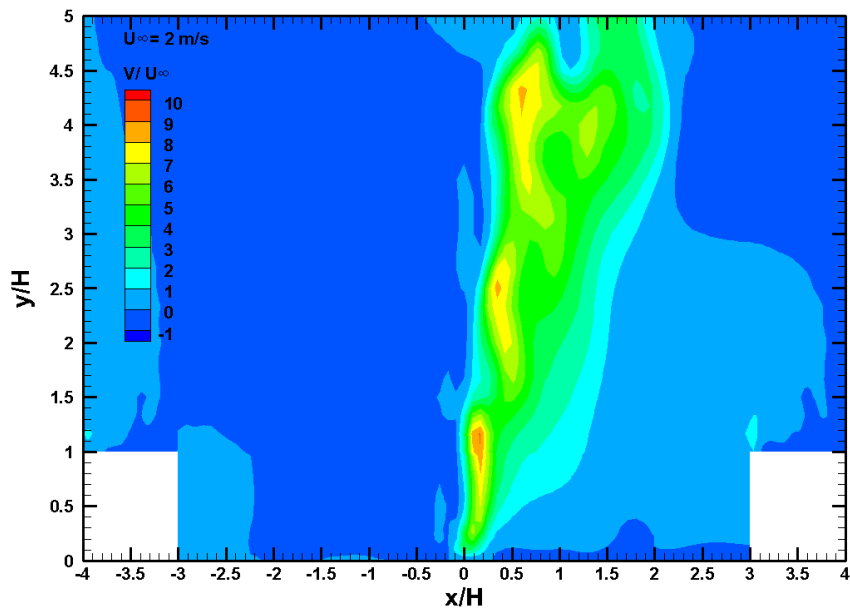
Σχήμα 4-32 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO₂ για $U_{\infty} = 4,2 \text{ m/s}$.

4.12 Στιγμαίαιες ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=6$

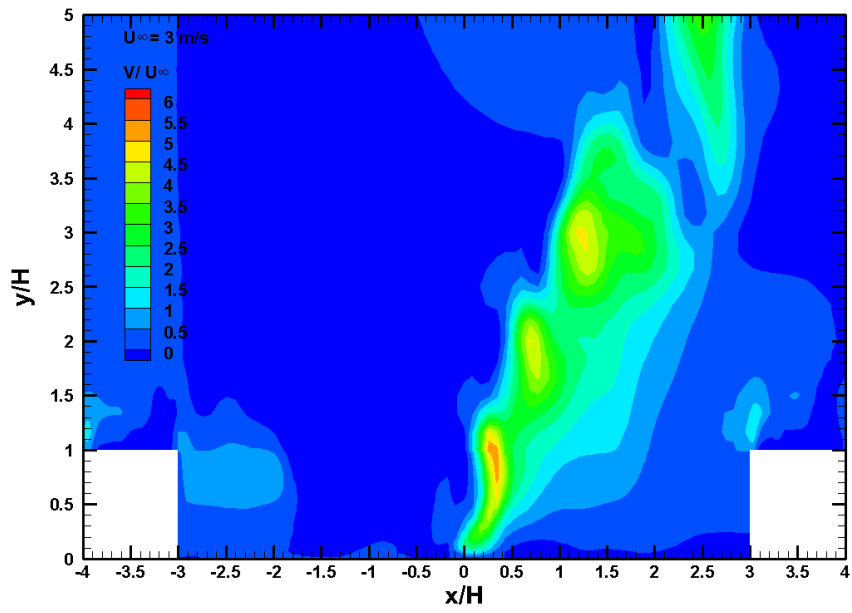
Βάση της διεθνούς βιβλιογραφίας η τελευταία περίπτωση ροής που μπορεί να εμφανιστεί εντός μίας αστικής χαράδρας είναι η ροή μεμονωμένης τραχύτητας. Η ροή αυτή εμφανίζεται όταν ο χαρακτηριστικός λόγος W/H είναι μεγαλύτερος από πέντε. Παρακάτω δίνονται τα ισοϋψή γραφήματα της στιγμιαίας ταχύτητας για ροή μεμονωμένης τραχύτητας. Για την πρώτη περίπτωση όπου η ταχύτητα της ροής στην είσοδο είναι 1 m/s δίνεται στο Σχήμα 4-33, η απόσταση μεταξύ των κτιρίων πλέον είναι αρκετά μεγάλη προκειμένου να συμπεριφέρονται σαν ξεχωριστά κτίρια προς εξέταση. Παρατηρείται και εδώ κλίση του πλουμίου αλλά μεγαλύτερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Είναι ξεκάθαρο ότι η επίδραση των ανωστικών δυνάμεων μειώνεται καθώς ο χαρακτηριστικό λόγος W/H αυξάνεται. Η μείωση της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων φαίνεται και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις που μελετήθηκαν καθώς όσο αυξάνεται η ταχύτητα στην είσοδο της αστικής χαράδρας όλο και περισσότερες δομές έντονης κινητικής ενέργειας αποκολλούνται από το πλούμιο. Οι δομές αυτές φαίνονται ξεκάθαρα στο Σχήμα 4-34, Σχήμα 4-35 και Σχήμα 4-36. Επιπλέον παρατηρείται ότι η παράσυρση του πλουμίου είναι πιο έντονη συγκριτικά με τους χαρακτηριστικούς λόγους W/H ίσους με 1 και 3.



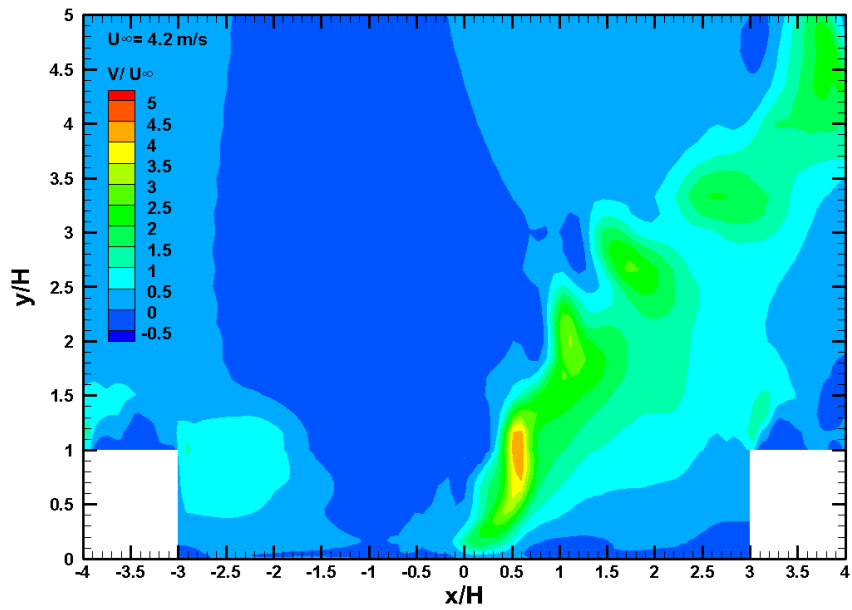
Σχήμα 4-33 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



Σχήμα 4-34 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



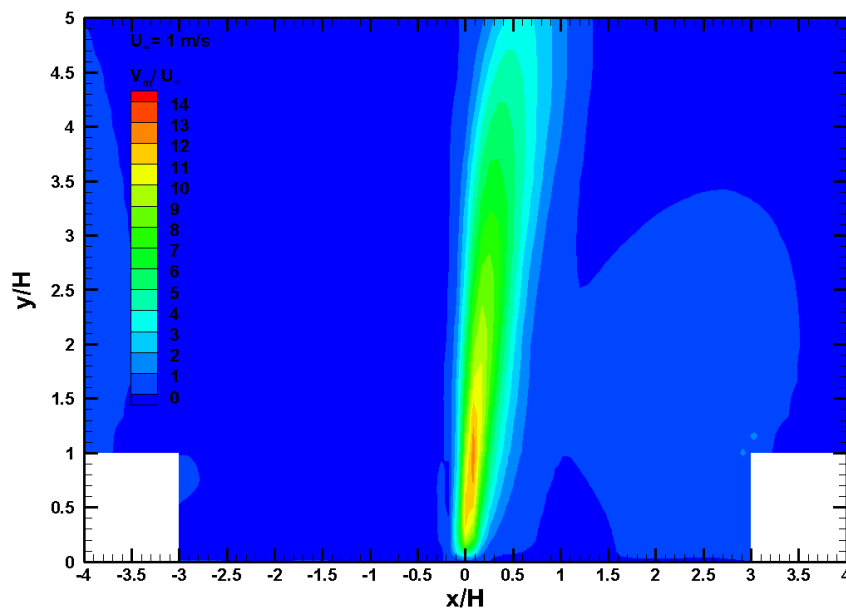
Σχήμα 4-35 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.



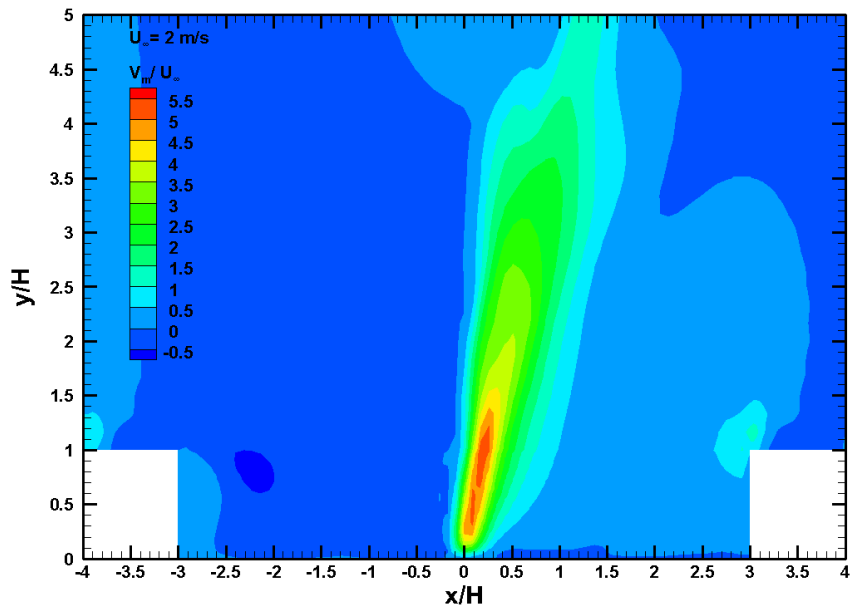
Σχήμα 4-36 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης αδιαστατης στιγμιαίας ταχύτητας V/U_∞ για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$ και $t = 100 \text{ s}$.

4.13 Μέσες ταχύτητες για την περίπτωση $W/H=6$

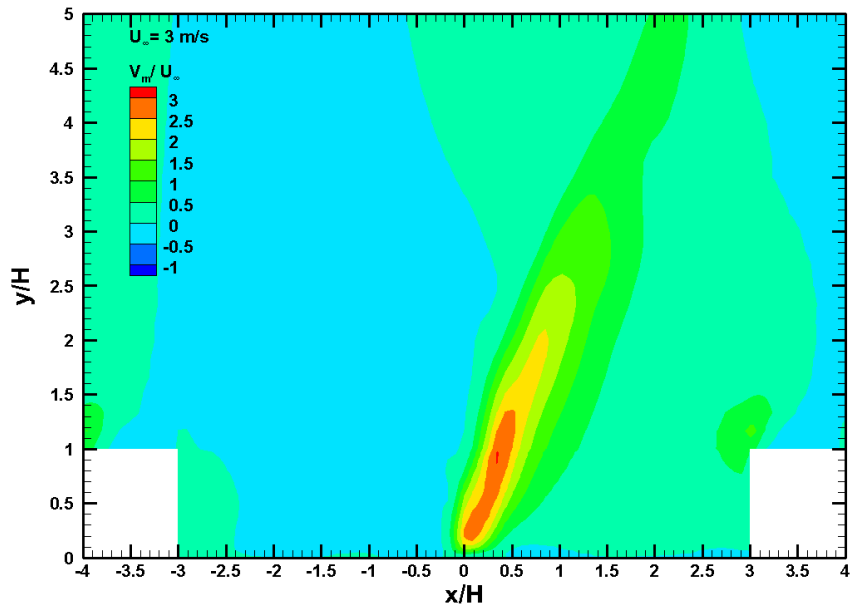
Στη συνέχεια δίνονται τα ισοϋψή γραφήματα των μέσων τιμών της ταχύτητας. Για την πρώτη περίπτωση που δίνεται στο Σχήμα 4-37 η αδιατάραχτη ροή είναι 1 m/s παρατηρείται και εδώ κλίση του πλουμίου σε σχέση με την πηγή του ατυχήματος. Όσο η ταχύτητα της U_∞ αυξάνεται και η κλίση του πλουμίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-38 και Σχήμα 4-39. Το κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας πλέον αρχίζει να επηρεάζεται από την κλίση του πλουμίου. Για χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με 3 δεν είχε παρατηρηθεί κάτι αντίστοιχο, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι για ροή μεμονωμένης τραχύτητας η κλίσεις των πλουμίων είναι σημαντικές. Στο Σχήμα 4-40 φαίνεται η αισθητή κλίση του πλουμίου στο κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας, αυτό οφείλεται στις έντονες δυνάμεις αδράνειας που οδηγούν σε έντονη παράσυρση του πλουμίου.



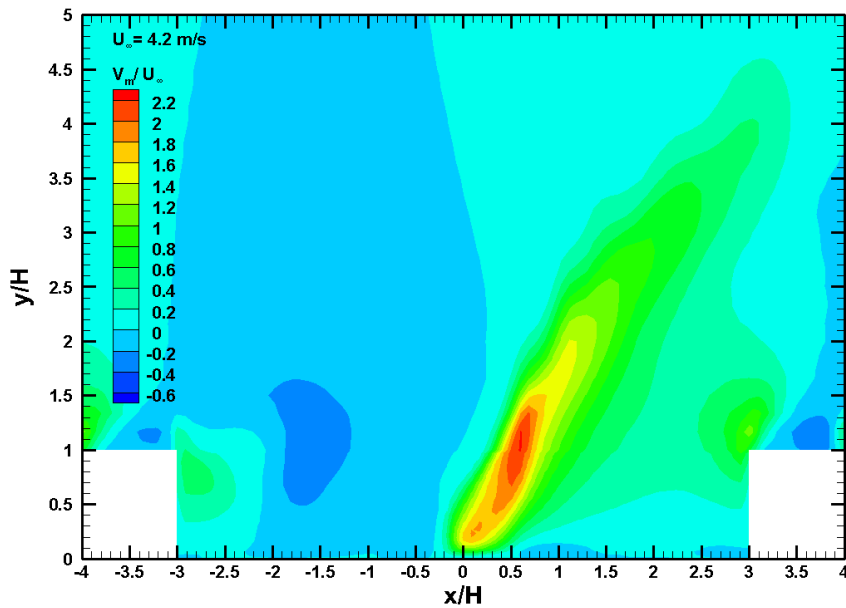
Σχήμα 4-37 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-38 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



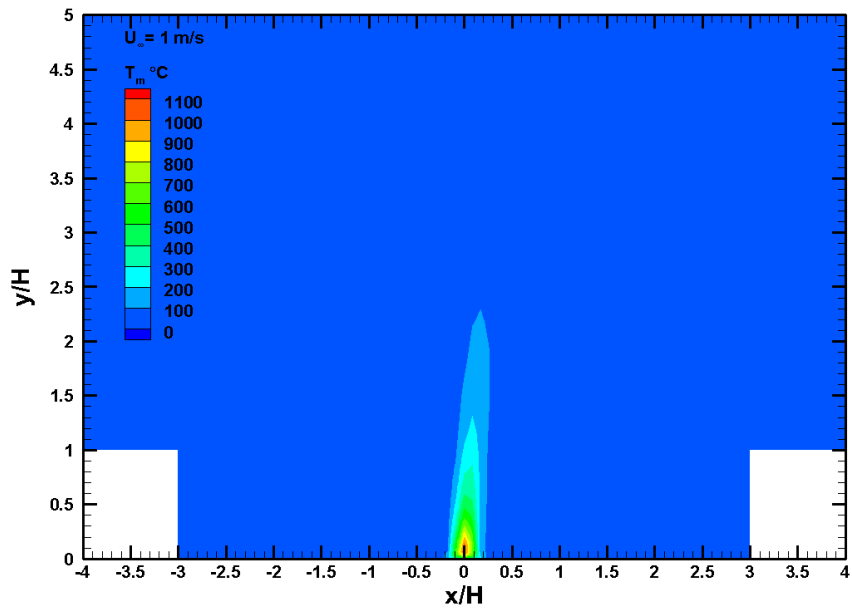
Σχήμα 4-39 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.



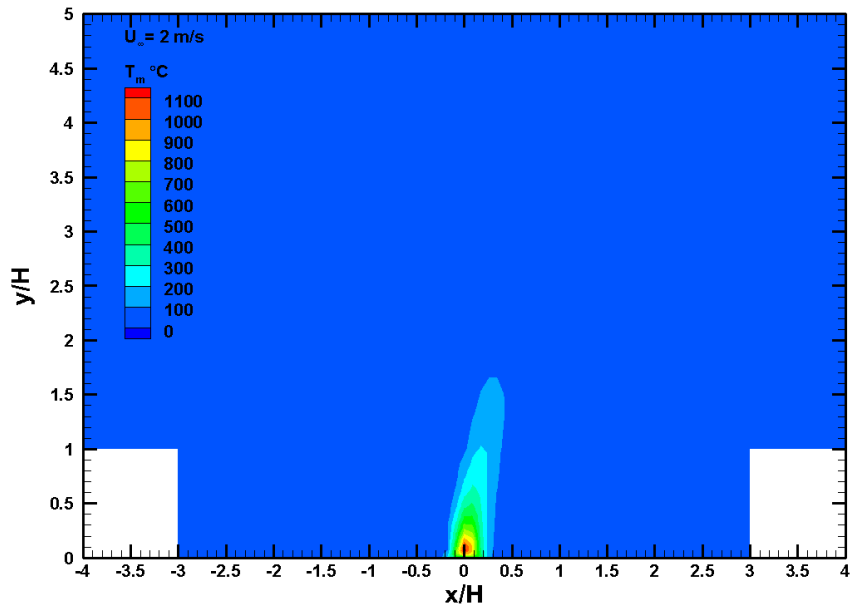
Σχήμα 4-40 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης ταχύτητας V_m/U_∞ για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$.

4.14 Μέση τιμή θερμοκρασίας για την περίπτωση $W/H=3$

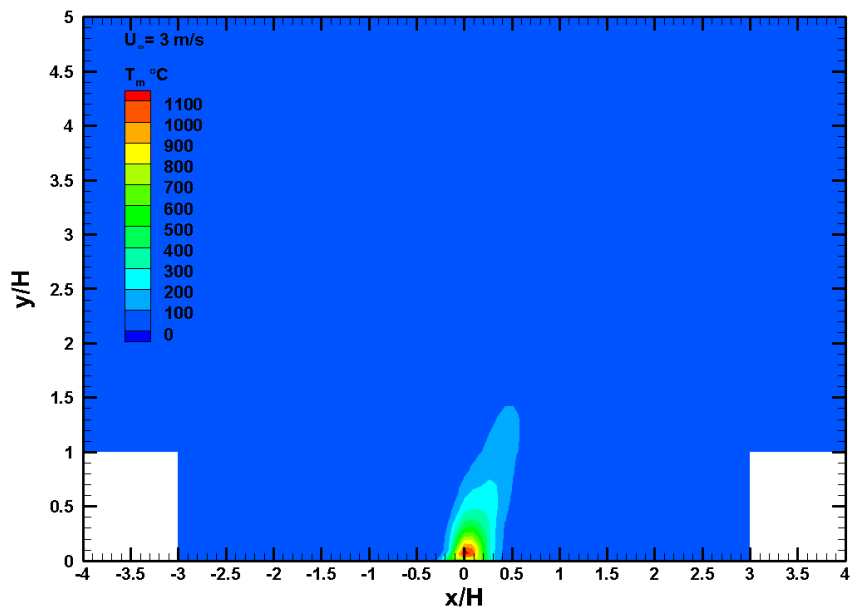
Παρακάτω δίνονται τα ισοϋψή γραφήματα των μέσων τιμών του θερμοκρασιακού πεδίου όπως αυτό υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση. Στην πρώτη περίπτωση όπου η αδιατάραχτη ροή είναι ίση με 1 m/s Σχήμα 4-41 η ισοϋψής γραμμή των 300 βαθμών κελσίου φτάνει στα $2,5$ ύψη κτιρίου εμφανίζοντας μία ελαφριά κλίση. Συγκριτικά με τους άλλους δύο χαρακτηριστικούς λόγους W/H το ύψος της συγκεκριμένης γραμμής είναι το ίδιο όσο αυξάνεται όμως η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων αυξάνεται και κλίση του πλουμίου. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις τα ισοϋψή δίνονται στο Σχήμα 4-42, Σχήμα 4-43 και Σχήμα 4-44 παρατηρείται ότι η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων πλέον είναι μεγάλη και η μετάδοση θερμότητας από την πηγή προς τις πλευρές κατάντη και ανάντη της αστικής χαράδρας είναι σημαντική. Αυτό φαίνεται από την πτώση του πλουμίου αλλά και την αύξηση κατά το πλάτος της γραμμής των 300 βαθμών κελσίου. Έτσι το θερμοκρασιακό πεδίο έχει την τάση να εξαπλωθεί εντός της αστικής χαράδρας και να καταλάβει το μέγιστο δυνατό χώρο.



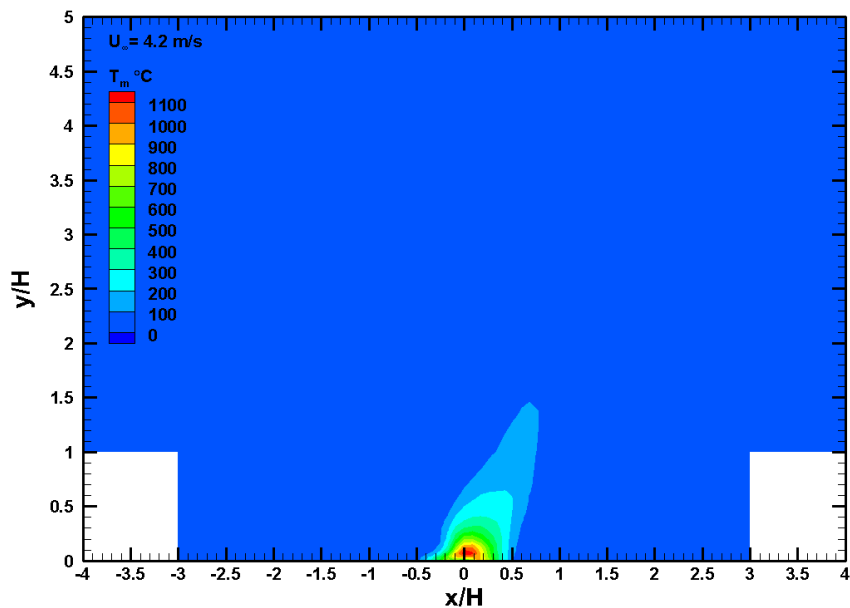
Σχήμα 4-41 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-42 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 2 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-43 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 3 \text{ m/s}$.

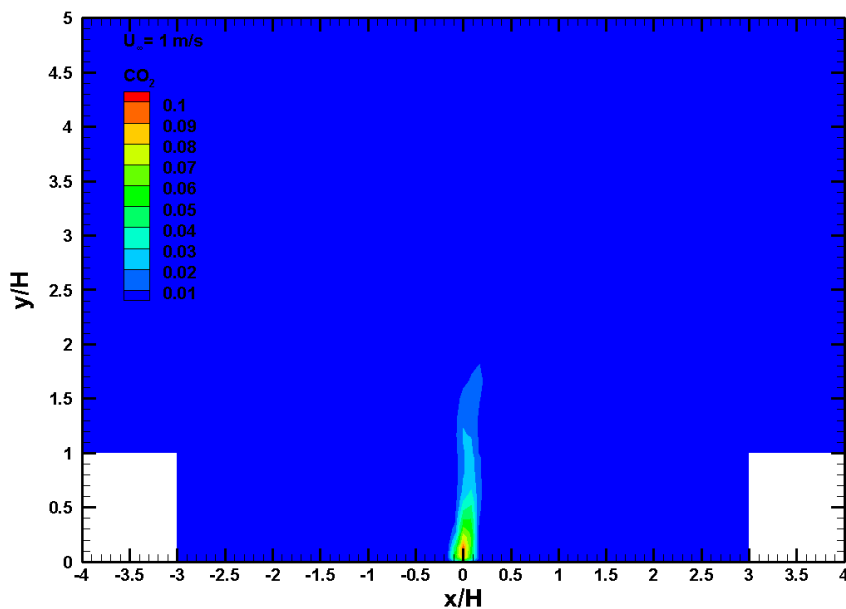


Σχήμα 4-44 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης θερμοκρασίας T_m για $U_\infty = 4,2 \text{ m/s}$.

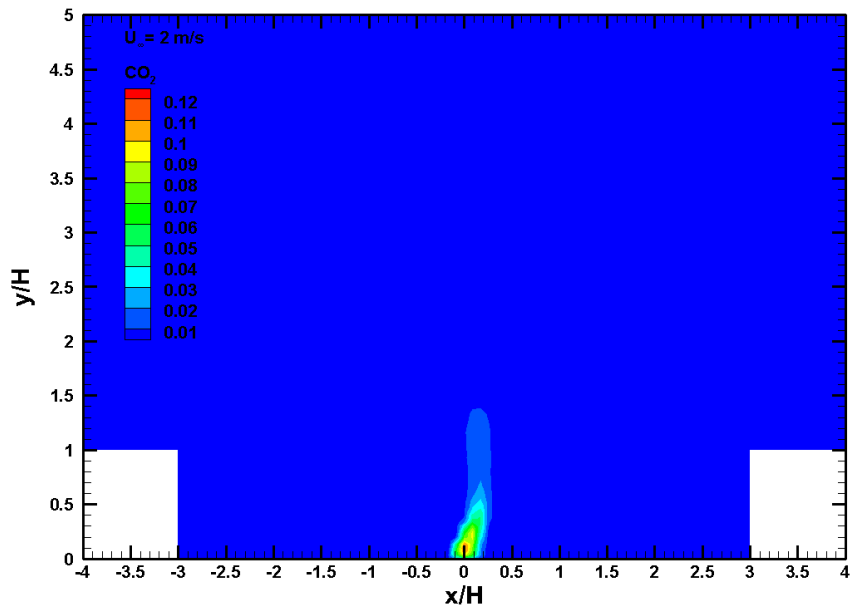
4.15 Μέσες τιμές του διοξειδίου του άνθρακα για την περίπτωση $W/H=6$

Τέλος η διασπορά του ρυπαντή για χαρακτηριστικό λόγο W/H παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στην ροή μεμονωμένης τραχύτητας και για τις τέσσερις περιπτώσεις η διασπορά του ρυπαντή όσο αυτός βρίσκεται υψομετρικά εντός της αστικής χαράδρας παρασέρνεται από

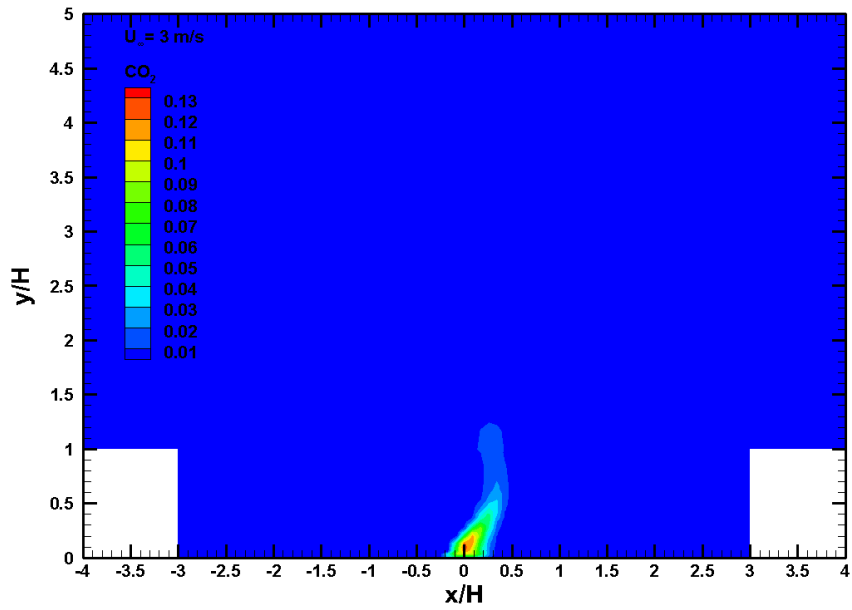
την ροή που έχει δημιουργηθεί και καθώς διαφεύγει έχει την τάση να κινηθεί κατακόρυφα προς τα ανώτερα στρώματα, για το λόγο αυτό παρατηρούνται αυτές οι κυματώσεις. Για την πρώτη και δεύτερη περίπτωση στο Σχήμα 4-45 και Σχήμα 4-46 επειδή η ταχύτητα της U_∞ είναι μικρή το παραπάνω φαινόμενο ίσα που παρατηρείται. Αλλά για την τρίτη και τέταρτη περίπτωση όπου πλέον οι δυνάμεις αδράνειας είναι υπολογίσιμες εκεί παρουσιάζονται έντονες κυματώσεις του ρυπαντή μόλις αυτός διαφεύγει από την αστική χαράδρα. Η κλίση που παρατηρείται πριν διαφύγει ο ρυπαντής είναι προς το κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας. Η συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων αποτελεί επικίνδυνη περίπτωση μόνο για εκείνους που θα είναι κοντά στην πηγή του ατυχήματος, σε αντίθεση με τους άλλους δύο χαρακτηριστικούς λόγους W/H εδώ υπάρχει ικανός χώρος για διαφυγή και καταστολή του ατυχήματος π.χ. από σωστικά συνεργεία κτλ.



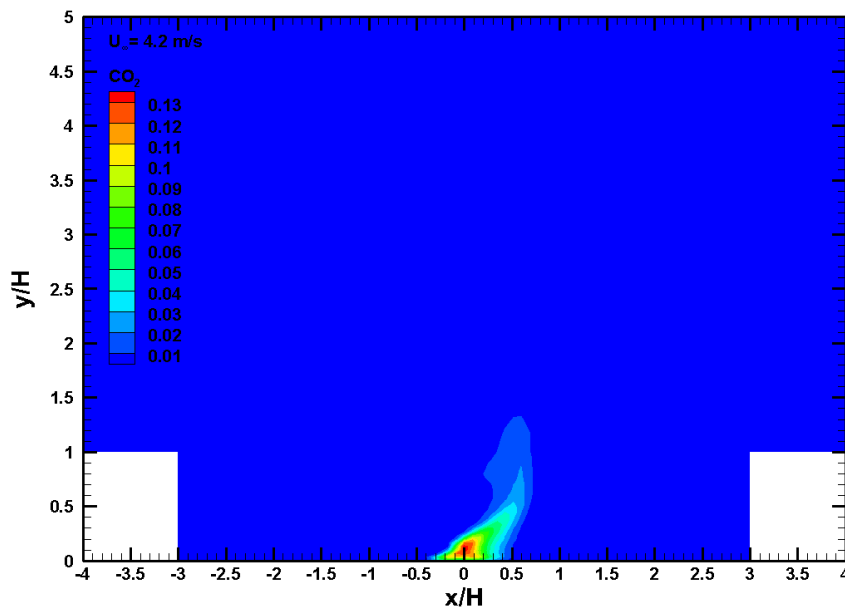
Σχήμα 4-45 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO_2 για $U_\infty = 1 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-46 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO₂ για $U_{\infty} = 2 \text{ m/s}$.



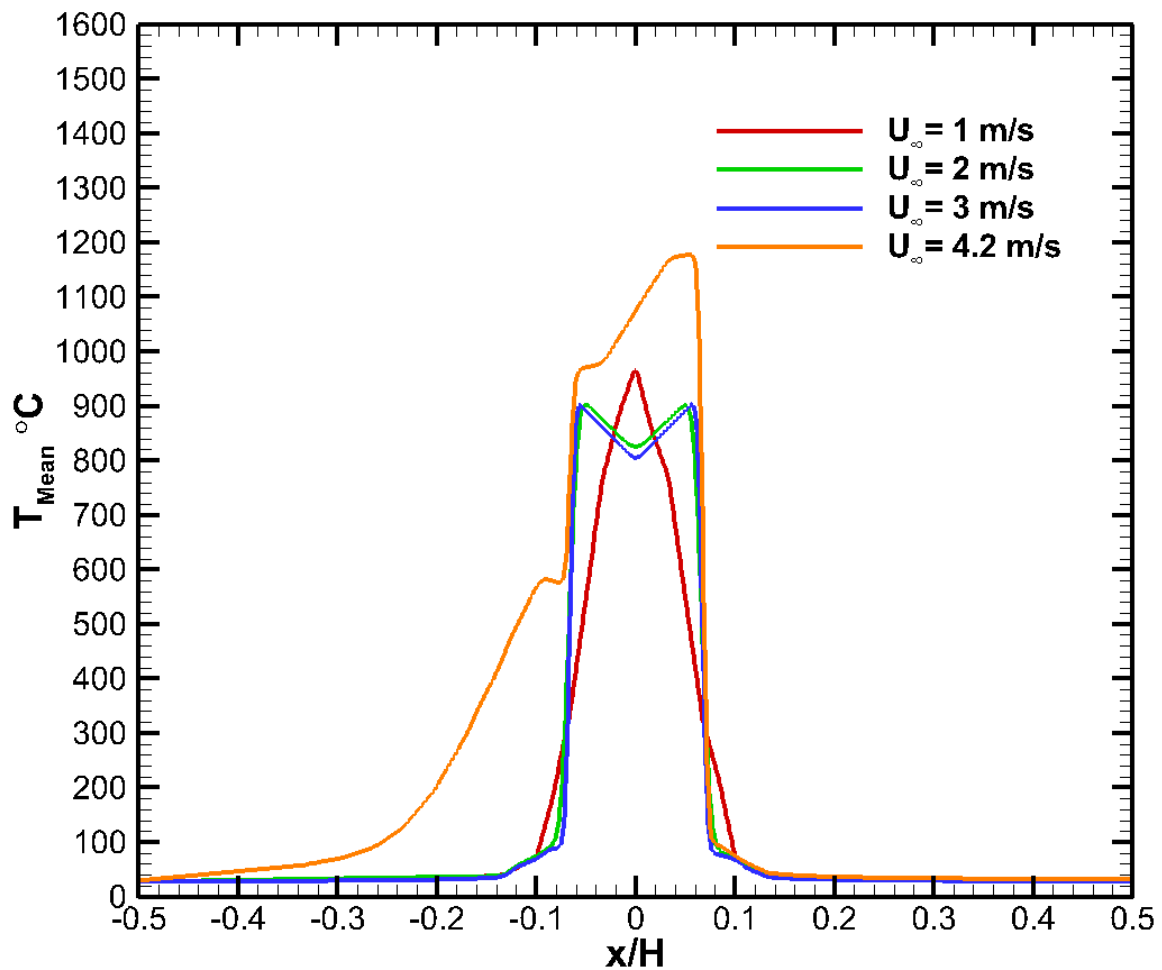
Σχήμα 4-47 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO₂ για $U_{\infty} = 3 \text{ m/s}$.



Σχήμα 4-48 Ισοϋψές γράφημα κατακόρυφης μέσης συγκέντρωσης CO₂ για $U_{\infty} = 4,2 \text{ m/s}$.

4.16 Εκτίμηση επικινδυνότητας εντός της αστικής χαράδρας

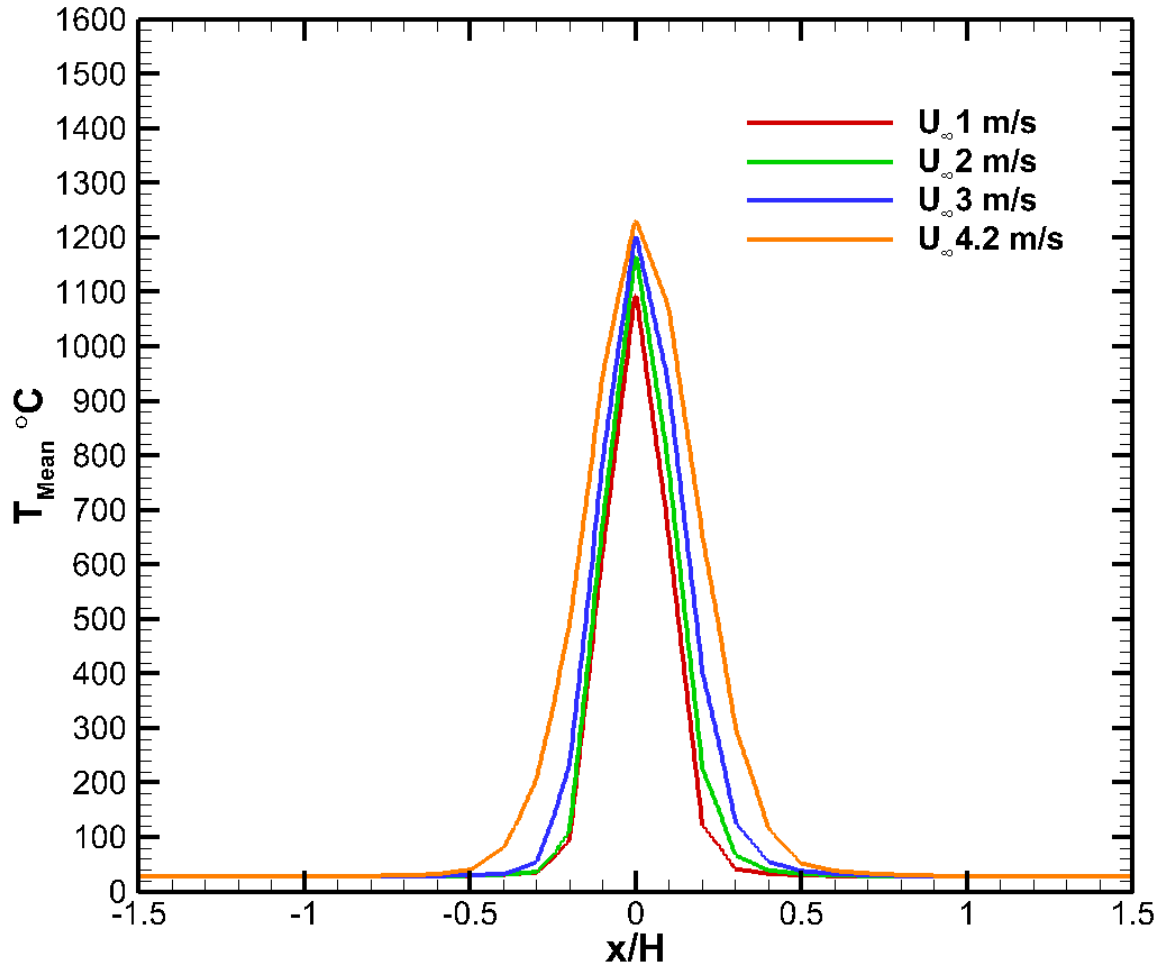
Βάση των παραπάνω το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί ρυπαντή ο οποίος επηρεάζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η παροχή των 60 l/h δεν παράγει αρκετές ποσότητες προκειμένου η εισπνοή του να αποτελεί θανατηφόρο παράγοντα. Λόγω της χημικής σύνθεσης του μεθανίου το οποίο αποτελεί αέριο καύσιμο, κατ' επέκταση χρειάζεται μικρές ποσότητες οξυγόνου για την στοιχειομετρική καύση του. Ως αποτέλεσμα δεν υπάρχει η παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα ή σωματιδίων αιθάλης τα οποία είναι τοξικά. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ατυχήματος κύριος θανατηφόρος παράγοντας είναι οι υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες εμφανίζονται κατά την καύση του μεθανίου. Στο Σχήμα 4-49 δίνεται η κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας στον άξονα X για όλες τις ταχύτητες εισόδου. Παρατηρείται ότι για το 1 m/s οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται στο κέντρο της αστικής χαράδρας πέφτοντας κάτω από τους 100 βαθμούς κελσίου στα 1,8 μέτρα περίξ της πηγής. Στις περιπτώσεις των 2 και 3 m/s υπάρχει μία βύθιση του πλουμίου το οποίο ήταν εμφανές και στα ισοϋψή γραφήματα της θερμοκρασίας, χωρίς όμως να αυξάνεται το πλάτος του πλουμίου στην βάση της πηγής. Στην περίπτωση των 4 m/s παρατηρείται αύξηση του πλάτους του πλουμίου στα 4,5 μέτρα ανάντη της αστικής χαράδρας. Υπάρχει μία αύξηση της τάξης του 15%. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ροή απόξεσης η οποία δημιουργείται για χαρακτηριστικό λόγο $W/H = 1$. Αποτέλεσμα αυτής της αύξησης είναι απώλεια χώρου διαφυγής και εκκένωσης ανάντη της χαράδρας.



Σχήμα 4-49 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας για την περίπτωση $W/H=1$.

Στο Σχήμα 4-50 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή για χαρακτηριστικό λόγο $W/H=3$ για όλες τις συνθήκες εισόδου. Για τις περιπτώσεις των 1 και 2 m/s παρατηρείται ότι το πλάτος του πλουμίου για θερμοκρασίες κάτω των 100 βαθμών κελσίου είναι 3,6 m εκατέρωθεν της πηγής. Στην περίπτωση των 3 m/s υπάρχει μία αύξηση 13%, η οποία μεταφράζεται σε εξάπλωση του πλουμίου στα 5,4 m αριστερά και δεξιά της πηγής. Για το σενάριο όπου η ταχύτητα εισόδου είναι 4,2 m/s το η περιοχή όπου η θερμοκρασία είναι κάτω από τους 100 βαθμούς είναι 8,1 m. Σε σχέση με τα 3 m/s υπάρχει μία αύξηση πλάτους 15 % και με τις δύο προηγούμενες 28 %. Η αύξηση της περιοχής όπου εμφανίζονται θερμοκρασίες μικρότερες των 100 βαθμών είναι μεγάλη μειώνοντας δραστικά την έκταση την οποία οι θερμοκρασίες λόγω του ατυχήματος είναι θανατηφόρες. Από το Σχήμα 4-50 επίσης παρατηρείται συμμετρία στην

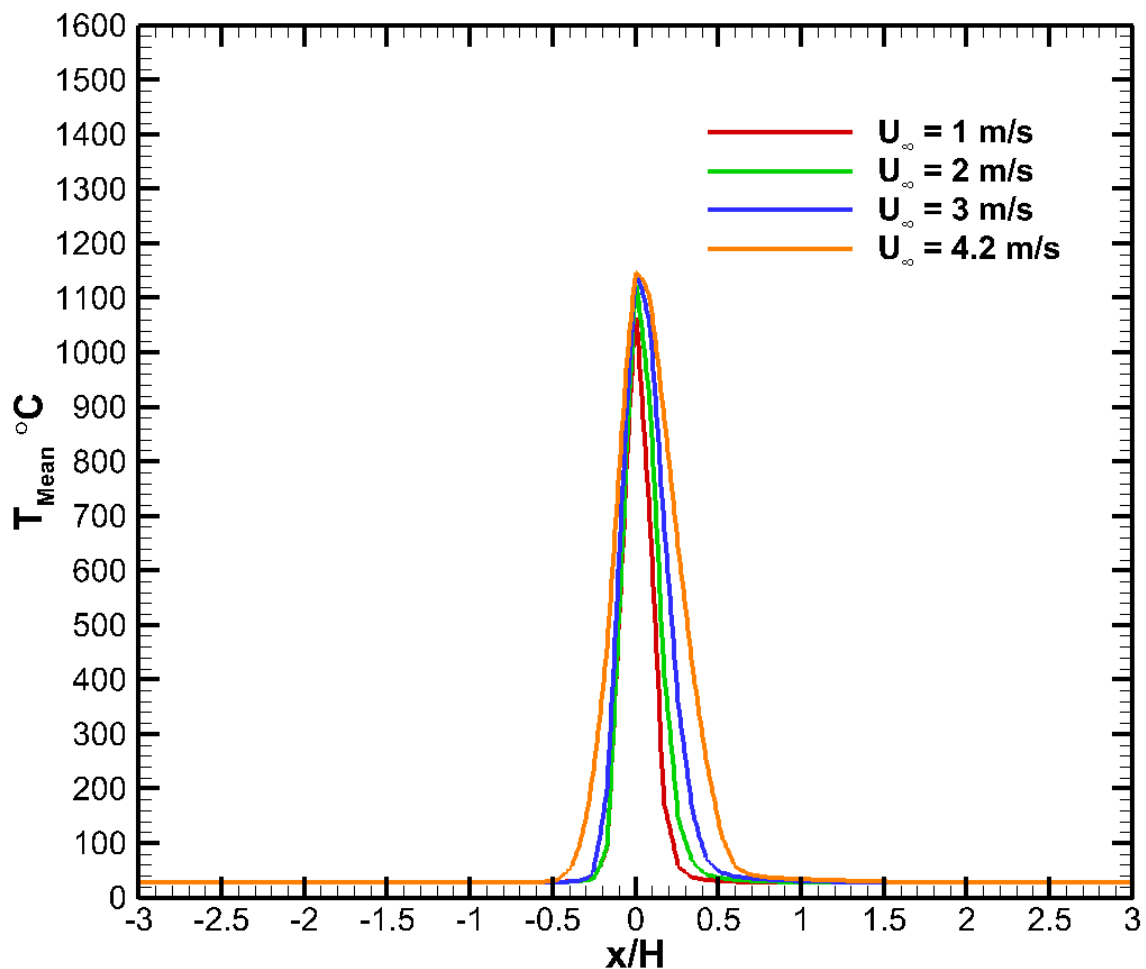
ανάπτυξη των πλουμίων, αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ροή διαταραχής όμορου η οποία εμφανίζεται για χαρακτηριστικούς λόγους $W/H > 2,9$ όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία.



Σχήμα 4-50 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας για την περίπτωση $W/H=3$.

Για τον τελευταίο χαρακτηριστικό λόγο W/H ο οποίος προσομοιώθηκε στο Σχήμα 4-51 δίνεται το θερμοκρασιακό πεδίο κατά το μήκος της αστικής χαράδρας στον άξονα X . Παρατηρείται από το σχήμα των πλουμίων ότι αυτά έχουν μία κλίση προς τα δεξιά, αυτό οφείλεται στην φορά της ροής. Για τις πρώτες δύο περιπτώσεις των 1 και 2 m/s η κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου είναι όμοια χωρίς σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους. Για τα 3 m/s παρατηρείται μία αύξηση του πλάτους του πλουμίου της τάξης του 10%, εκατέρωθεν της πηγής η απόσταση στην οποία η θερμοκρασία είναι λιγότερη των 100 βαθμών κελσίου είναι 5,4 m. Όταν η ταχύτητα εισόδου είναι 4,2 m/s η απόσταση γύρω από την πηγή στην οποία η θερμοκρασία είναι λιγότερη από 100 βαθμούς κελσίου είναι 9 m, η απόσταση αυτή ποσοτικά αντιστοιχεί σε μία αύξηση 20

% της απόστασης γύρω από την πηγή σε σχέση με τα 3 m/s. Συνολικά η αύξηση του πλάτους το πλουμίου είναι της τάξης του 30%. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της μάζας του αέρα εντός της αστικής χαράδρας. Για τον συγκεκριμένο χαρακτηριστικό λόγο W/H βάση της βιβλιογραφίας η ροή χαρακτηρίζεται ως μεμονωμένης τραχύτητας, η επιρροή του είδους της ροής γίνεται αντιληπτή στα υψηλότερα στρώματα του πλουμίου καθώς παρατηρείται παράσυρση του πεδίου προς το κτίριο κατάντη της ροής.



Σχήμα 4-51 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας για την περίπτωση $W/H=6$.

5 Συμπεράσματα

Ύστερα από την ανάλυση της ροής εντός μιας τυπικής χαράδρας και των φαινομένων της ροής κατά την μεταβατική κατάσταση του ατυχήματος αλλά και την ψευδό-μόνιμη κατάσταση, μεταβάλλοντας τον χαρακτηριστικό λόγο W/H προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

Η μορφολογία της ροής εξαρτάται από την απόσταση των δύο κτιρίων που σχηματίζουν μία τυπική αστική χαράδρα. Εξετάστηκαν ως προς την μορφολογία της ροής οι πιθανές μορφές ροής οι οποίες μπορούν να προκύψουν. Τα αποτελέσματα επικαιροποιήθηκαν τόσο υπολογιστικά όσο και με την διενέργεια πειραμάτων σε αεροσήραγγα. Τα κύρια χαρακτηριστικά ροής τα οποία προέκυψαν ήταν σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία. Επιτρέποντας η έρευνα να προχωρήσει στην διερεύνηση επικινδυνότητας ατυχήματος σε αστικό περιβάλλον.

Η εξέταση και ανάλυση διασποράς ρυπαντών κατά την διάρκεια ατυχημάτων σε αστικό περιβάλλον δεν δύναται να μελετηθούν ως βαθμωτοί παθητικοί ρυπαντές βασιζόμενοι μόνο στο πεδίο ταχύτητας καθώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η θερμοδυναμική κατάσταση των υπό μελέτη χημικών στοιχείων.

Η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων αποτελεί σημαντικό παράγοντα εξέτασης κατά τον πολεοδομικό σχεδιασμό, καθώς επηρεάζει πλήρως το θερμοκρασιακό πεδίο και κατά συνέπεια τη διασπορά του ρυπαντή. Επίσης όσο μεγαλύτερη η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων τόσο μειώνεται η επικινδυνότητα της κατάστασης για τους περαστικούς αλλά και για τα συνεργεία που θα κληθούν να εισέλθουν στην περιοχή του ατυχήματος. Για αστικές χαράδρες με χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με 1 πλήττονται τόσο οι περαστικοί οι οποίοι θα τυγχάνουν να είναι εντός της αστικής χαράδρας κατά την χρονική στιγμή του ατυχήματος αλλά και όσοι βρίσκονται εντός των κτιρίων καθώς οι θερμοκρασίες που εμφανίζονται λόγω της καύσης είναι υψηλές.

Σημαντικός παράγοντας για επίσης είναι και οι μετεωρολογικές συνθήκες που θα επικρατούν κατά την διάρκεια του ατυχήματος. Βάση των γραφημάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αέρα σαν αδιατάραχτη ροή τόσο περισσότερο το θερμοκρασιακό πεδίο βυθίζεται εντός της χαράδρας και κατά συνέπεια και ο ρυπαντής. Το ίδιο ισχύει και για μεγαλύτερη απόσταση των κτιρίων αλλά εκεί υπάρχει ο χώρος διαφυγής καθώς η πλευρική διάχυση του πλουμίου δεν είναι μεγάλη. Ευνοϊκές συνθήκες εμφανίστηκαν για χαμηλές ταχύτητες όπου το θερμοκρασιακό πεδίο αναπτύσσεται κατακόρυφα προς τα ανώτερα

στρώματα της ατμόσφαιρας χωρίς να παρουσιάζει ιδιαίτερη κλίση προς τα κτίρια ανάντη και κατάντη της αστικής χαράδρας. Αποτρέποντας τους περαστικούς αλλά και όσους βρίσκονται εντός των κτιρίων από υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν σημαντική σωματική βλάβη.

Τέλος η μετάδοση θερμότητας επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την μορφολογία της ροής, διαταράσσοντας το πεδίο ροής. Έντονη ήταν η επίδραση για χαρακτηριστικό λόγο W/H ίσο με 1 όπου για να σχηματιστεί η κεντρική δίνη εντός της αστικής χαράδρας η ταχύτητα της U_{∞} έπρεπε να ξεπερνάει τα 4 m/s.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η παραπάνω διπλωματική εργασία αποτελεί την βάση τόσο για υπολογιστική εμβάθυνση όσο και πειραματική. Από υπολογιστικής πλευράς μπορούν να εισαχθούν ποιο βαρεία καύσιμα τα οποία εμφανίζονται εντός των αστικών περιοχών προκειμένου να καλυφθούν ανάγκες θέρμανσης και παραγωγής προϊόντων πρώτης ανάγκης. Να γίνει μελέτη των χημικών μηχανισμών καύσης παράλληλα με την εξέλιξη του ατυχήματος. Πειραματικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα υπάρχοντα προπλάσματα που κατασκευάστηκαν και να γίνουν μετρήσεις με την μέθοδο της θερμικής ανεμομετρίας, προκειμένου να επικαιροποιηθούν τα χαρακτηριστικά της ροής. Και στην συνέχεια να γίνουν μετρήσεις οπτικής ταχυμετρίας για να προβλεφθεί η συμπεριφορά σωματιδίων διάφορης αεροδυναμικής διαμέτρου που προκύπτουν κατά την καύσης βαρέων καυσίμων.

6 Βιβλιογραφία

- Baik, J.-J. and J.-J. Kim (2002). "On the escape of pollutants from urban street canyons." Atmospheric Environment **36**(3): 527-536.
- Baik, J.-J., R.-S. Park, H.-Y. Chun and J.-J. Kim (2000). "A Laboratory Model of Urban Street-Canyon Flows." Journal of Applied Meteorology - J APPL METEOROL **39**: 1592-1600.
- Chan, A., E. S. P. So and S. C. Samad (2001). "Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality." Atmospheric Environment **35**.
- Chang, C.-H. and R. N. Meroney (2003). "Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **91**(9): 1141-1154.
- Chang, C. H. and R. N. Meroney (2003). "Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **91**(9): 1141-1154.
- Chatzimichailidis, A., C. Argyropoulos, M. Assael and K. Kakosimos (2019). "Qualitative and Quantitative Investigation of Multiple Large Eddy Simulation Aspects for Pollutant Dispersion in Street Canyons Using OpenFOAM." **10**: 17.
- Chew, L. W., L. R. Glicksman and L. K. Norford (2018). "Buoyant flows in street canyons: Comparison of RANS and LES at reduced and full scales." Building and Environment **146**: 77-87.
- Chow, W. K., Y. Z. Li, E. Cui and R. Huo (2001). "Natural smoke filling in atrium with liquid pool fires up to 1.6 MW." Building and Environment **36**(1): 121-127.
- Galani A., N. P., Venetsanos A., Bartzis J. and Neville S. (2009). "Prediction and study of passive pollutant dispersion in a street-canyon in London using computational fluid dynamics techniques." Global NEST Journal **Volume 11**(4): 434 - 439.
- Garcia Sagrado, A. P., J. van Beeck, P. Rambaud and D. Olivari (2002). "Numerical and experimental modelling of pollutant dispersion in a street canyon." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **90**(4-5): 321-339.
- Hu, L. H., R. Huo and D. Yang (2009). "Large eddy simulation of fire-induced buoyancy driven plume dispersion in an urban street canyon under perpendicular wind flow." Journal of Hazardous Materials **166**(1): 394-406.
- Kim, J.-J. and J.-J. Baik (2001). "Urban street-canyon flows with bottom heating." Atmospheric Environment **35**(20): 3395-3404.
- Klein, P. and E. Plate (1999). Wind-Tunnel Study of Concentration Fields in Street Canyons.
- Muhammad Yazid, A. W., S. M. Salim and S. Mansor (2020). "Numerical Simulation of Thermal Atmospheric Conditions in an Idealized Street Canyon: Comparison Between RANS and LES." Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences **1**(1): 19-27.

- Nazridoust, K. and G. Ahmadi (2006). "Airflow and pollutant transport in street canyons." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **94**(6): 491-522.
- Nguyen, V. T., T. C. Nguyen and J. Nguyen (2019). "Numerical Simulation of Turbulent Flow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons." Atmosphere **10**(11): 683.
- Oke, T. R. (1987). Boundary Layer Climates, Routledge.
- Oke, T. R. (1988). "Street design and urban canopy layer climate." Energy and Buildings **11**(1): 103-113.
- Palampigik, A., K. Vasilopoulos, I. Lekakis and I. Sarris (2023). "Risk Assessment of Toxic Pollutant Dispersion after a Methane Pool Fire Accident in a Street Canyon †." 25-29.
- Salim, S. M., R. Buccolieri, A. Chan and S. Di Sabatino (2011). "Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: Comparison between RANS and LES." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **99**(2): 103-113.
- Salizzoni, P., M. Marro, L. Soulhac, N. Grosjean and R. J. Perkins (2011). "Turbulent Transfer Between Street Canyons and the Overlying Atmospheric Boundary Layer." Boundary-Layer Meteorology **141**(3): 393-414.
- 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**(4): 340-348.
- Vasilopoulos, K. (2020). Accidents Caused by Hazardous Materials Released in an Urban Environment: A Numerical and Experimental Approach. Phd, Cranfield University
- Vasilopoulos, K., I. Lekakis, I. E. Sarris and P. Tsoutsanis (2021). "Large eddy simulation of dispersion of hazardous materials released from a fire accident around a cubical building." Environmental Science and Pollution Research **28**(36): 50363-50377.
- Vasilopoulos, K., M. Mentzos, I. E. Sarris and P. Tsoutsanis (2018). "Computational Assessment of the Hazardous Release Dispersion from a Diesel Pool Fire in a Complex Building's Area." Computation **6**(4): 65.
- Vasilopoulos, K., I. E. Sarris, I. Lekakis and P. Tsoutsanis (2019). Diesel Pool Fire Incident Inside an Urban Street Canyon, Singapore, Springer Singapore.
- Vasilopoulos, K., I. E. Sarris and P. Tsoutsanis (2019). "Assessment of air flow distribution and hazardous release dispersion around a single obstacle using Reynolds-averaged Navier-Stokes equations." Heliyon **5**(4): e01482.
- Yu, L.-X., F. Liu, Y.-Q. Liu, M.-C. Weng and S.-J. Liao (2018). "Experimental study on thermal and smoke control using transverse ventilation in a sloping urban traffic link tunnel fire." Tunnelling and Underground Space Technology **71**: 81-93.

Zhang, X., L. Hu, F. Tang and Q. Wang (2013). "Large Eddy Simulation of Fire Smoke Recirculation in Urban Street Canyons of Different Aspect Ratios." Procedia Engineering **62**: 1007-1014.