

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΠΑΛΑΜΠΙΓΙΚ ΑΝΑΡΓΥΡΟΣ

Προσομοίωση χαρακτηριστικών ροής ανέμου και διασποράς ρύπων  
σε αστική χαράδρα με αριθμητική και πειραματική προσέγγιση

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2019- 2020

Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΛΕΚΑΚΗΣ  
Επιβλέπων: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ  
ΙΟΥΛΙΟΣ 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2020

ΠΑΛΑΜΠΙΓΙΚ ΑΝΑΡΓΥΡΟΣ

Προσομοίωση χαρακτηριστικών ροής ανέμου και διασποράς ρύπων  
σε αστική χαράδρα με αριθμητική και πειραματική προσέγγιση

Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΛΕΚΑΚΗΣ  
Επιβλέπων: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA

2020. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without the written permission of the copyright owner.

## **ABSTRACT**

There was always the need to understand the flow characteristics in an urban street canyon for planning purposes. In our days cities design is one of the most worth noting factor in order to avoid fatal accidents. In this present work, the flow characteristics and the pollutant dispersion will be studied. In order to do that we will make numerical simulations with RANS and LES models. We are going to use OpenFoam which is an opensource code for CFD analysis. We will make numerical simulation for different street canyons widths; our purpose is to define how this parameter affects the flow characteristics. Also, we are going to simulate a pollutant dispersion in the middle of our urban street canyons.

Our goal was to fully understand the flow characteristics in an urban street canyon for planning purpose. We evaluate how planning variables affects the flow in a street canyon. In order to validate our numerical simulations, we had made model of street canyon for different widths, and they were tested in our wind tunnel of thermofluids laboratory in University of West Attica. Also, our results are compared from the bibliography in this field.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Λεκάκη που δέχθηκε να επιβλέψει αυτή τη διπλωματική εργασία και για όλη του τη καθοδήγηση κατά τα τελευταία τρία έτη των σπουδών μου. Τον Δρ. Ιωάννη Σαρρή για την εξασφάλιση υπολογιστικών πόρων προκειμένου να γίνουν ορισμένα τρεξίματα υπολογιστικών προσομοιώσεων, καθώς και για τις συμβουλές του στο κομμάτι του προγραμματισμού. Τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο ο οποίος αποτέλεσε καθοριστικός παράγοντας για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, για όλη τη βοήθεια την οποία πρόσφερε απλόχερα σε τεχνικά θέματα τα οποία τύχαιναν αλλά και την υποστήριξη του. Αλλά κυρίως για το ότι με εμπιστεύτηκε να συνεχίσω ένα κομμάτι της δουλειάς του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πολύ καλό μου φίλο Χαρίτων Εμμανουήλ Παυλίδη οποίος αποτέλεσε τον άνθρωπο ο οποίος με παρακίνησε να ασχοληθώ με το πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα OpenFoam. Για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας όχι μόνο σε ακαδημαϊκό επίπεδο αλλά και φιλικό.

Επίσης τον φίλο μου Δημήτρη Φίτσαλο για όλες τις συζητήσεις που είχαμε τον τελευταίο χρόνο σε θέματα αλγορίθμων τα οποία μας παρακινούσαν να γινόμαστε καλύτεροι σε αυτό που κάνουμε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο μου Άκη και τη γυναίκα του Μαρία οι οποίοι ήταν στο πλευρό μου από την αρχή των σπουδών μου μέχρι το τέλος. Και για όλη τους τη βοήθεια όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλη τους τη στήριξη όλα αυτά τα χρόνια. Και ιδιαίτερα τη μητέρα μου Βενετσάνα η οποία με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών με κάθε δυνατό τρόπο και μου εξασφάλισε όλα τα εφόδια προκειμένου να καταστεί δυνατή η περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και των σπουδών μου.

Σας ευχαριστώ όλους από καρδιάς.

## Περιεχόμενα

ABSTRACT .....	1
Ευχαριστίες .....	2
Κατάλογος Σχημάτων .....	4
Κατάλογος Πινάκων .....	8
Κατάλογος Εξισώσεων .....	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	10
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	13
3 Μεθοδολογία .....	26
3.1 Πειραματική προσέγγιση .....	26
3.1.1 Θεωρία αεροσηράγγων .....	26
3.1.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός .....	30
3.1.3 Μακέτες για τις τυπικές αστικές χαράδρες .....	34
3.2 Αριθμητική προσέγγιση .....	35
3.2.1 Συνοπτική θεωρία προσομοίωσης μεγάλης δίνης (LES) .....	35
4 Αποτελέσματα .....	38
4.1 Υπολογιστικό Χωρίο .....	38
4.2 Πλέγμα .....	39
4.3 Ανεξαρτησία πλέγματος .....	44
4.4 Αρχικές συνθήκες .....	47
4.4.1 Προφίλ ταχύτητας εισόδου .....	48
4.4.2 Προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο .....	49
4.4.3 Προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου .....	50
5 Ανάλυση .....	52
5.1 Ισοϋψείς γραφήματα οριζόντιων επιπέδων .....	52
5.2 Ισοϋψείς γραφήματα κατακόρυφων επιπέδων .....	57
5.3 Σχήματα αδιάστατων ταχυτήτων ροής .....	59
5.4 Τρισδιάστατα ισοϋψείς γραφήματα με γραμμές ροής .....	63
5.5 Διακυμάνσεις του πεδίου ταχύτητας .....	66
5.6 Κατανομή του συντελεστή πίεσης .....	73
6 Διασπορά Ρύπου .....	78
6.1 Ισοϋψής γραφήματα διασποράς ρυπαντή .....	81
6.2 Τρισδιάστατα ισοϋψείς γραφήματα διασποράς ρύπου .....	83
7 Συμπεράσματα .....	87
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	89

## Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1-1 Α Τυπικές διαστάσεις αστικής χαράδρας	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 2-1 Flow regimes and airflow in a street canyon, from Oke (1988).	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 2-2 Μεταβολή της ροής εντός της χαράδρας (Salizzoni, Marro et al. 2011)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Σχήμα 3-1 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος τύπου <i>Gottingen</i>	30
Σχήμα 3-2 Μικρομανόμετρο FCO 560	31
Σχήμα 3-3 Θερμικό ανεμόμετρο A.A.LAB.SYSTEMS	32
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)	33
Σχήμα 3-6 Spines για τη δημιουργία οριακού στρώματος	34
Σχήμα 3-7 Μακέτα τυπικής αστικής χαράδρας με μήκος $W/H=1$	35
Σχήμα 4-1 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου βάση του ύψους των κτιρίων	38
Σχήμα 4-2 Κεντρική κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για $W/H=1$ και $Z/H=0$	40
Σχήμα 4-3 Κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για $W/H=1$ και $Y/H=0,5$	40
Σχήμα 4-4 Κεντρική κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για $W/H=3$ και $Z/H=0$	41
Σχήμα 4-5 Κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για $W/H=3$ και $Y/H=0,5$	41
Σχήμα 4-6 Κεντρική κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για $W/H=6$ και $Z/H=0$	42
Σχήμα 4-7 Κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για $W/H=6$ και $Y/H=0,5$	43
Σχήμα 4-8 Σφάλματα αδιάστατων προφίλ ταχυτήτων που προέκυψαν από τη μετάβαση αραιού πλέγματος σε μεσαίο	46
Σχήμα 4-9 Σφάλματα αδιάστατων προφίλ ταχυτήτων που προέκυψαν από τη μετάβαση μεσαίου πλέγματος σε πυκνό	47
Σχήμα 4-10 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης	49
Σχήμα 4-11 Αδιάστατο προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης	50



Σχήμα 4-12 Αδιάστατο προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης .....	51
Σχήμα 5-1 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=1$ και για $Z/H=0$ .....	54
Σχήμα 5-2 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=3$ και για $Z/H=0$ .....	55
Σχήμα 5-3 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=6$ και για $Z/H=0$ .....	56
Σχήμα 5-4 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=1$ .....	57
Σχήμα 5-5 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=3$ .....	58
Σχήμα 5-6 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο $W/H=6$ .....	59
Σχήμα 5-7 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος $W/H=1$ .....	60
Σχήμα 5-8 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος $W/H=3$ .....	61
Σχήμα 5-9 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος $W/H=6$ .....	62
Σχήμα 5-10 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος $W/H=1$ .....	64
Σχήμα 5-11 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος $W/H=3$ .....	65
Σχήμα 5-12 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος $W/H=6$ .....	66
Σχήμα 5-13 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα X για $W/H=1$ .....	67
Σχήμα 5-14 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Y για $W/H=1$ .....	68
Σχήμα 5-15 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Z για $W/H=1$ .....	68
Σχήμα 5-16 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα X για $W/H=3$ .....	69
Σχήμα 5-17 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Y για $W/H=3$ .....	70

Σχήμα 5-18 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Z για $W/H=3$ .....	70
Σχήμα 5-19 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα X για $W/H=6$ .....	71
Σχήμα 5-20 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Y για $W/H=6$ .....	72
Σχήμα 5-21 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Z για $W/H=6$ .....	72
Σχήμα 5-22 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=1$ .....	74
Σχήμα 5-23 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=1$ .....	74
Σχήμα 5-24 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=3$ .....	75
Σχήμα 5-25 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=3$ .....	76
Σχήμα 5-26 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=6$ .....	77
Σχήμα 5-27 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας $W/H=6$ .....	77
Σχήμα 6-1 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H$ ίσο με ένα .....	79
Σχήμα 6-2 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H$ ίσο με τρία.....	80
Σχήμα 6-3 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H$ ίσο με έξι.....	80
Σχήμα 6-4 Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$ και $Z/H=0$ .....	81
Σχήμα 6-5 Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$ και $Z/H=0$ .....	82
Σχήμα 6-6 Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος $W/H=6$ και $Z/H=0$ .....	83
Σχήμα 6-7 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=1$ .....	84
Σχήμα 6-8 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος $W/H=3$ .....	85

Σχήμα 6-9 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα  
με χαρακτηριστικό μήκος  $W/H=6$  ..... 86

## Κατάλογος Πινάκων

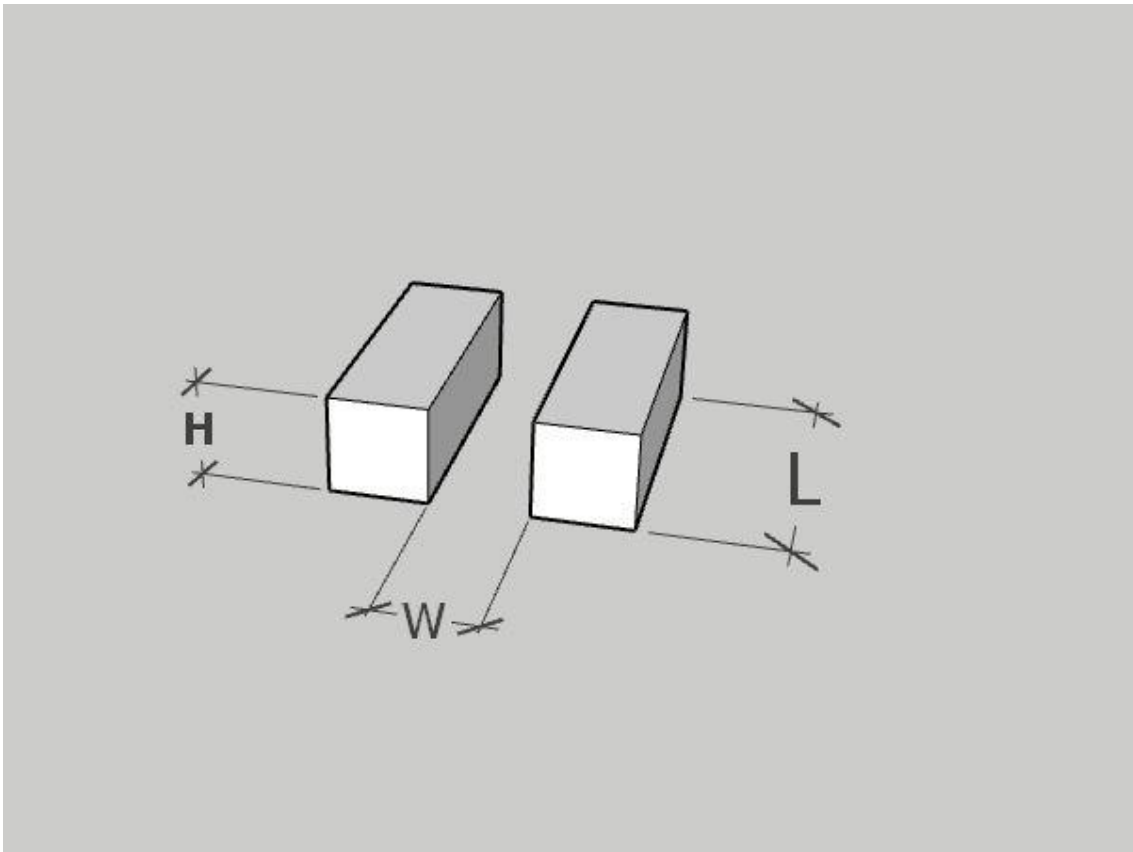
Πίνακας 5-1 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών για λόγο W/H=1 .....	53
Πίνακας 5-2 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών για λόγο W/H=3 .....	54
Πίνακας 5-3 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών για λόγο W/H=6 .....	56

## Κατάλογος Εξιιώσεων

(2-1).....	23
(2-2).....	24
(2-3).....	24
(3-1).....	36
(3-2).....	36
(3-3).....	36
(3-4).....	37
(3-5).....	37
(3-6).....	37
(3-7).....	37
(4-1).....	44
(4-2).....	48
(4-3).....	49
(5-1).....	73
(6-1).....	78

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστική χαράδρα αποτελεί τη βασική μονάδα γεωμετρίας του δομημένου αστικού περιβάλλοντος, η οποία τυπικά περιγράφει τον περιορισμένο χώρο που περικλείεται από γειτονικά κτίρια, συνήθως κατά μήκος των δύο πλευρών ενός δρόμου (Jeong et al. 2002)



Σχήμα 1-1 Τυπικές διαστάσεις αστικής χαράδρας

Στην **Error! Reference source not found.** εμφανίζεται το σχηματικό σχήμα του δρόμου (Yazid et al., 2014), η οποία συνήθως χαρακτηρίζεται από αναλογίες, όπως ο λόγος, ύψους κτιρίου ( $H$ ) με το πλάτος του δρόμου ( $W$ ) (συνήθως συμβολίζεται ως  $AR=H/W$ ) και ο λόγος του μήκους κτιρίου ( $L$ ) με το πλάτος του δρόμου ( $W$ ).

Σύμφωνα με τους Βαρδουλάκη κ.ά. (2003), τα φαράγγια του δρόμου μπορούν να ταξινομηθούν σε α) λεωφόρους ( $AR \leq 0.5$ ), β) σε συνηθισμένες αστικές χαράδρες ( $0.5 < AR < 2$ ) και γ) βαθιές αστικές χαράδρες ( $AR \geq 2$ ). Επίσης μπορούν να ταξινομηθούν ως α) μικρές αστικές χαράδρες ( $L/W \leq 3$ ), β) μεσαίες αστικές χαράδρες ( $3 < L/W < 7$ ), και γ) για επιμήκης αστικές χαράδρες ( $L/W > 7$ ).

Όταν το L είναι απείρως μεγάλο τότε αντιστοιχεί σε μια 2-διαστάσεων (2D) περίπτωση, διαφορετικά, είναι μια τρισδιάστατη (3D) περίπτωση. Ανάλογα με τα ύψη των κτιρίων που σχηματίζουν την αστική χαράδρα ορίζουμε το ύψος του ανάντη κτιρίου ( $H_u$ ) και το ύψος του κατόντη κτιρίου ( $H_d$ ). Όταν  $H_u = H_d$  έχουμε μια συμμετρική αστική χαράδρα, όταν  $H_u < H_d$  έχουμε μια ασύμμετρη αστική χαράδρα με ανάντη-βήμα (step-up) και όταν  $H_u > H_d$  ασύμμετρη αστική χαράδρα με κατόντη-βήμα (step-down) (Yazid et al. 2014)

Ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής και την γωνία που προσπίπτει στην αστική χαράδρα (Yazid et al., 2014), η ροή μπορεί να ταξινομηθεί σε κάθετη προσκρούμενη ροή, παράλληλη ροή και πλάγια ροή (Εικόνα 1.3). (Yazid et al., 2014).

Τέλος, η ταχύτητα του ανέμου καθορίζει τον σχηματισμό και την ένταση των στροβίλων που σχηματίζονται μέσα στην αστική χαράδρα καθώς επίσης και το σχήμα των στροβίλων (Yazid et al., 2014). Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο τείνει να βελτιώσει τις συνθήκες αερισμού, ενισχύοντας και τη διασπορά των ρύπων.

Η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει τις συνθήκες αερισμού σε μια αστική χαράδρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ανέμου τόσο βελτιώνονται οι συνθήκες αερισμού και αυξάνει η διασπορά των ρύπων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των χαρακτηριστικών ροής σε τυπικές αστικές χαράδρες και η κατανόηση αυτών. Προκειμένου να κατανοήσουμε όσο το δυνατό καλύτερα τα χαρακτηριστικά αυτά θα κάνουμε υπολογιστικές προσομοιώσεις και θα τις συγκρίνουμε με πειραματικά δεδομένα τα οποία θα εξάγουμε εμείς.

Στόχοι της διπλωματικής εργασίας είναι:

- 1) Προσδιορισμός χαρακτηριστικών ροής του αέρα για διαφορετικές γεωμετρίες αστικής χαράδρας.
- 2) Ο καθορισμός της ροής του ανέμου θα πραγματοποιηθεί με μετρήσεις μέσα στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου Θερμορρευτών του ΠΑΔΑ, καθώς και με κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (OpenFoam)
- 3) Να προσδιοριστεί η διασπορά παθητικού ρύπου ο οποίος εκλύεται στο εσωτερικό της αστικής χαράδρας.

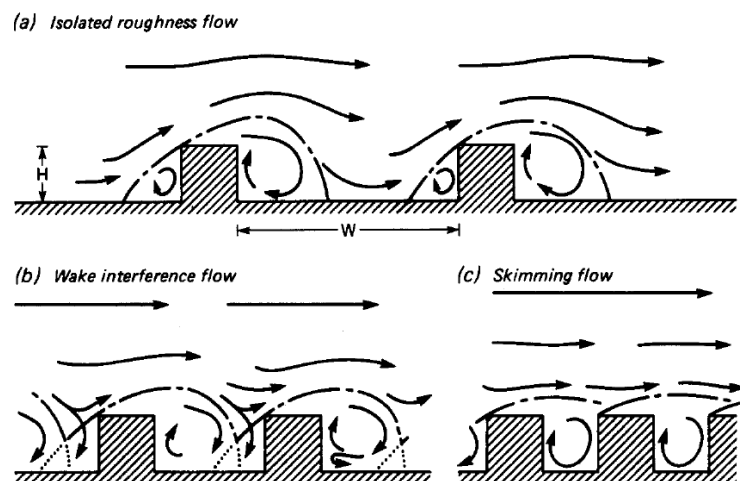


## 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται συνοπτικά όλη η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή. Όλη η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε έχει σαν αρχικό σκοπό τον έλεγχο των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν. Αλλά και να οδηγήσουν την παρούσα εργασία στη σωστή κατεύθυνση.

Ο Oke (1988) στην ερεύνα του θέτει το ερώτημα κατά πόσο η μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας αστικής περιοχής μπορεί να δώσει ποσοτικά στοιχεία για την κατανομή του αέρα μέσα σε μια αστική χαράδρα. Αρχικά ξεκινάει τονίζοντας πόσο σημαντική είναι η αναλογία του μήκους μίας αστικής χαράδρας, ως προς το ύψος του κτιρίου ( $L/H$ ). Αντίστοιχα θέτει και ένα άλλο σημαντικό μέγεθος το λόγο της απόστασης των δύο κτιρίων ως προς το ύψος του κτιρίου ( $W/H$ ). Οι δύο αυτοί λόγοι είναι πάρα πολύ σημαντικοί καθώς από αυτούς καθορίζεται το είδος της ροής αλλά και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση εντός της αστικής χαράδρας.

Στην **Error! Reference source not found.**, εμφανίζεται η κατηγοριοποίηση της ροής του αέρα σε μια αστική χαράδρα ανάλογα με τον λόγο  $W/H$ .



Σχήμα 2-1 Flow regimes and airflow in a street canyon, from Oke (1988)

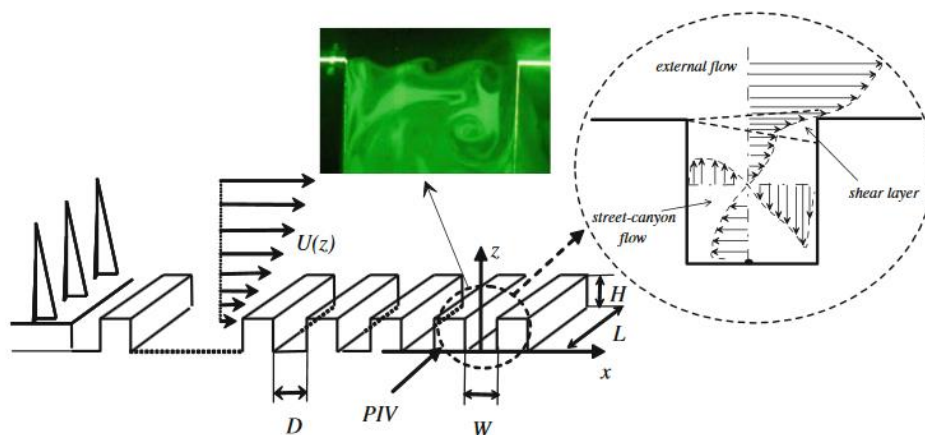
Όταν ο λόγος ( $W/H$ ) είναι μεγαλύτερος του 0,05 εμφανίζεται ροή *μεμονωμένης τραχύτητας*. Στην περίπτωση αυτή οι ροές γύρω από τα δύο κτίρια της αστικής χαράδρας είναι ανεξάρτητες και δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους εμφανίζοντας αυτονομία.

Όταν ο παραπάνω λόγος ( $W/H$ ) αρχίζει να μικραίνει εδραιώνεται η *ροή διαταραχής ομόρου*, χαρακτηριστικό της περίπτωσης αυτής είναι ότι οι δύο ροές των κτιρίων αρχίζουν η μία να επηρεάζει την άλλη δημιουργώντας αστάθειες χωρίς να επιτρέπουν την δημιουργία μια κεντρικής δίνης. Τέλος όταν ο λόγος ( $W/H$ ) είναι μικρότερος από ένα κρίσιμο σημείο έχουμε *ροή απόξεσης* κατά την οποία εμφανίζεται μία μεγάλη δίνη εντός της χαράδρας. Η τραχύτητα επίσης αποτελεί σημαντικό παράγοντά για λόγους  $W/H \approx 0,65$  καθώς βοηθά στη μετάβαση από ροή διαταραχής ομόρου σε ροή απόξεσης. Στη ροή απόξεσης η κεντρική δίνη οδηγείται από τη ροή πάνω από την αστική χαράδρα, καθώς και σε βαθιές αστικές χαράδρες παρατηρείται η δημιουργία δύο δινών.

Οι P.Kastner-Klein και E.J.Plate (Klein et al. 1999) μελέτησαν την ποιότητα του αέρα καθώς και τη διασπορά ρυπαντών εντός μιας αστικής χαράδρας. Προκειμένου να το κάνουν αυτό πραγματοποίησαν αρκετά πειράματα εντός αεροσήραγγας η οποία ενδείκνυται για περιβαλλοντολογικές δοκιμές. Θέλοντας να προσομοιώσουν όσο το δυνατό καλύτερα το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα χρησιμοποίησαν στην είσοδο της αεροσήραγγας γεννήτριες δινών, ώστε να είναι δυνατή η εδραίωση ενός εκθετικού προφίλ ταχύτητας. Αρχική παράμετρος που εξετάστηκε με πειραματικές μεθόδους ήταν η γεωμετρία της αστικής χαράδρας. Χρησιμοποιώντας ως αναφορά μία χαράδρα με λόγο πλάτους προς ύψος  $W/H=1$  και μήκους προς ύψους  $L/H=3$ , και εισάγοντας στη χαράδρα δύο πηγές ρυπαντών διαπίστωσαν ότι η μέγιστη συγκέντρωση εμφανίστηκε 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 ροή προσκολλάται στο κατάντη κτίριο. Ένας άλλος παράγοντας που εξετάστηκε ήταν η ύπαρξη κτιρίων εμπρόσθια του ανάντη κτιρίου της αστικής χαράδρας. Η αιτία που γίνεται αυτό είναι ότι η ροή που προσκρούει στο ανάντη κτίριο της αστικής χαράδρας είναι το απόρευμα των μπροστινών κτιρίων. Στη

συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα μεταβαλλόντας τη γωνία προσβολής του ανέμου με την αστική χαράδρα. 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. Τέλος ο τελευταίος παράγοντας που εξετάστηκε ήταν η επίδραση του σχήματος της στέγης των κτιρίων και η επίδραση του στη δυναμική της κεντρικής δίνης μέσα στη χαράδρα.

Οι Pietro Salizzoni, Massimo Marro, Lionel Soulhac, Nathalie Grosjean και Richard J. Perkins (Salizzoni et al. 2011) στην έρευνα τους επικεντρώθηκαν στον μηχανισμό μεταφοράς της τύρβης σε μία τυπική αστική χαράδρα όταν προσεγγίζεται από ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Για το λόγο αυτό εκτέλεσαν πειράματα που μελετούσαν την ροή του αέρα μέσα σε αστική χαράδρα με τη χρήση θερμικού ανεμόμετρου (HWA) και φωτογραφικής ταχυμετρίας (PIV). Προκειμένου λοιπόν να διαπιστώσουν κατά πόσο η εξωτερική ροή του αέρα επηρεάζει την ροή εντός της χαράδρας τοποθέτησαν ανάντη αυτής, διάταξη που περιλαμβάνει άλλες δύο αστικές χαράδρες και μετέβαλαν στην πρώτη το άνοιγμα της.



**Σχήμα 2-2 Μεταβολή της ροής εντός της χαράδρας (Salizzoni, Marro et al. 2011)**

Τα πειραματικά αποτελέσματα τους επικεντρώνονται σε τρία διαφορετικά είδη ροής:

α) Στην «εξωτερική ροή», όπου διαπιστώθηκε ότι όταν η απόσταση D είναι τέτοια ώστε να σχηματίζεται ροή απόξεσης, τότε οι δίνες που δημιουργούνται στην υπό έλεγχο αστική χαράδρα (W) είναι μικρές λόγω του μικρού χώρου ανάπτυξης που υπάρχει μεταξύ τους. Αντίθετα όταν η απόσταση D είναι τέτοιο ώστε να έχουμε ροή διαταραχής ομόρου, οι δίνες που σχηματίζονται εντός της αστικής χαράδρας είναι μεγαλύτερες. Αυτό συμβαίνει διότι οι δίνες που σχηματίζονται στην εξωτερική ροή έχουν περισσότερο χρόνο να αναπτυχθούν δημιουργώντας ένα μεγαλύτερο στρώμα ανάμειξης.

Β) Το «στρώμα ανάμειξης» είναι η περιοχή της ροής μεταξύ της εξωτερικής ροής και αυτής εντός της χαράδρας. Προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν τις μεταβολές που υφίστανται στην περιοχή αυτή χρησιμοποίησαν τον όρο «παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας». Έτσι λοιπόν απέδειξαν ότι όταν έχουμε ροή απόξεσης το πάχος της περιοχής αυτής είναι ακριβώς το ίδιο. Για τις άλλες περιπτώσεις υπάρχει αισθητή μεταβολή του πάχους του στρώματος ανάμειξης, με το μεγαλύτερο πάχος να εμφανίζεται στη τελευταία περίπτωση.

Γ) Τέλος εξετάζοντας την ροή ενός της «αστικής χαράδρας» παρατηρήθηκε ότι η κινητική τυρβώδης ενέργεια είναι μικρή. Γεγονός που αποδίδεται στην αλληλεξουδετέρωση αυτής με την κινητική ενέργεια που εισέρχεται από το στρώμα ανάμειξης. Επίσης λήφθηκαν οριζόντια και εγκάρσια προφίλ της ταχύτητας εντός της χαράδρας παρουσιάζοντας γραμμική και αρνητική κλίση κοντά στα τοιχώματα. Το παραπάνω ισχύει για όλες τις περιπτώσεις του διακένου της πρώτης χαράδρας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός της ανεξαρτητοποίησής 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. Πρώτον, ότι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας ~~να~~ οφείλονται από δομές μικρής κλίμακας. Και αντίστοιχα οι διακυμάνσεις να προκαλούνται από μεγάλες δομές εντός της αστικής χαράδρας λόγω της κεντρικής ανακυκλοφορίας.

Μία τελευταία παρατήρηση είναι ότι η μικρής κλίμακας δομές είναι ισότροπες και εισέρχονται από την εξωτερική ροή. Το οριακό στρώμα της εξωτερικής ροής δεν

είναι ισότροπο άρα και οι μικρές δομές που εισέρχονται θα έπρεπε να μην είναι ισότροπες. Για αυτή τη μετατροπή είναι υπεύθυνο το στρώμα ανάμειξης καθώς οι μικρές αυτές δομές ανταλλάσσουν ενέργεια εντός του στρώματος ανάμειξης και από ένα σημείο και μετά εισέρχονται εντός της αστικής χαράδρας.

Οι Nazridoust, K. και G. Ahmadi (Nazridoust et al. 2006) στη δημοσίευση τους μελέτησαν, τη διασπορά ρυπαντών εντός αστικής χαράδρας. Για το λόγο αυτό εκτέλεσαν υπολογιστικές προσομοιώσεις για δισδιάστατες γεωμετρικές συμμετρικών αστικών χαραδρών. Σε αντίθεση με ότι έχουμε δει μέχρι τώρα όσο αφορά τη διασπορά του ρύπου, ο ρύπος θεωρείται ως σύνολο μικροσωματιδίων τα οποία θα μελετηθούν με τη μέθοδο Lagrange. Στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης ορίστηκαν οι παράμετροι με τη βοήθεια ημιεμπιρικών εξισώσεων. Το υπολογιστικό πλέγμα πυκνότερο κοντά στα τοιχώματα και το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε είναι το RSTM. Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρήθηκε μία κεντρική ανακυκλοφορία στο κέντρο της αστικής χαράδρας με ωρολογιακή φορά περιστροφής. Η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της ταχύτητας ροής. Όσο αφορά το ρύπο παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερες οι ταχύτητες ροής τόσο μικρότερες οι συγκεντρώσεις, προκειμένου να δοκιμαστεί η ακρίβεια του παραπάνω μοντέλου έγιναν προσομοιώσεις και με τα κ-ε και RNGκ-ε. Επίσης έγινε προσομοίωση και για συμμετρικό σύμπλεγμα αστικών χαραδρών. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι αδόμητο αποτελούμενο από τριγωνικά στοιχεία με τοπικές πυκνώσεις κοντά στα τοιχώματα και εντός της αστικής χαράδρας. Προέκυψαν λοιπόν οι αναμενόμενες κεντρικές δίνες στο εσωτερικό των αστικών χαραδρών. Προκύπτουν λοιπόν τα γενικά αποτελέσματα η φορά περιστροφής είναι ωρολογιακή. Επίσης όσο αυξάνεται η ταχύτητα ροής αυξάνεται και η ένταση της τύρβης εντός της αστικής χαράδρας. Η διασπορά των ρυπαντών ελέγχεται από την ένταση της τύρβης εντός της αστικής χαράδρας. Τέλος όσο αφορά τη διασπορά των ρυπαντών προέκυψε ότι όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα της αδιατάραχτης ροής τόσο μικρότερη η συγκέντρωσή των ρυπαντών. Για όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες από τις υπάρχουσες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν στο ανάντη κτίριο.

Garcia Sagrado, A.P., J. van Beeck, P. Rambaud, και D. Olivari (Garcia Sagrado et al. 2002) προσπάθησαν να προσομοιώσουν τη ροή εντός αστικής χαράδρας και διασποράς ρυπαντών τόσο πειραματικά αλλά και υπολογιστικά. Η παραπάνω μελέτη λόγω της περιπλοκότητας της θα περιοριστεί στις δύο διαστάσεις στην υπολογιστική προσομοίωση και στην πειραματική. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην αεροσήραγγα είναι ξύλινο και βαμμένο μαύρο ώστε να μην αντανakλά τις δέσμες του laser για να μπορεί να γίνει η ανάλυση με το λογισμικό του PIV. Οι διαστάσεις του είναι 3cm x 3cm x 34.8 cm η τελευταία διάσταση είναι όλο το μήκος του χώρου δοκιμών προκειμένου να αποκλειστεί η συνιστώσα z από τις πειραματικές παρατηρήσεις. Η πηγή του ρυπαντή βρίσκεται στο κέντρο της αστικής χαράδρας. Στην είσοδο της αεροσήραγγας προκειμένου να προσομοιωθούν οι συνθήκες του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος έχει τοποθετηθεί ένα μεταλλικό πλέγμα, η μέγιστη ταχύτητα του αέρα είναι 2,5 m/s δημιουργώντας έτσι ένα αδιάστατο αριθμό Reynolds 5.200. Οι μετρήσεις στην είσοδο έχουν γίνει με θερμικό ανεμόμετρο, στην αστική χαράδρα έχουν γίνει με τη μέθοδο της φωτογραφικής ταχυμετρίας, και η μέτρηση της συγκέντρωσης έγινε με τη βοήθεια της διάθλασης των ακτινών του laser. Τα αποτελέσματα της αεροσήραγγας έδειξαν ότι πως αποκολλάται η ροή καθώς και πως επιταχύνεται όταν προσκρούει στο κτίριο ανάντη της αστικής χαράδρας. Επίσης 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. Η συγκέντρωση όπως μετρήθηκε δείχνει ότι κατευθύνεται όλη προς το κατάντη κτίριο. Στη περίπτωση όπου τα κτίρια έχουν το ίδιο ύψος παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη συγκέντρωση. Η υπολογιστική προσομοίωση έγινε με τη χρήση του reliable κ-ε μοντέλο. Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιεί δύο ζώνες κοντά στο τοίχωμα. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι δομημένο και έχει γίνει τοπική πύκνωση κοντά στα τοιχώματα. Στην είσοδο σαν οριακή συνθήκη χρησιμοποιήθηκε το προφίλ ταχύτητας που προέκυψε από ημιεμπιρική εξίσωση. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης συμφωνούν με τα πειραματικά όσο αφορά τις δομές ροής, όμως γενικά τα αποτελέσματα του PIV παρουσιάζουν πιο μειωμένες τιμές. Όσο αφορά τις δομές της ροής υπολογιστικά προκύπτει και η αποκόλληση

της ροής καθώς και η κύρια ανακυκλοφορία στην αστική χαράδρα. Οι διαφορές αυτές πολύ πιθανόν να οφείλονται στην μη ομαλή διασπορά του ρύπου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το ίδιο ισχύει και για την υπολογιστική εκτίμηση του ρύπου καθώς υπάρχουν ορισμένες διαφορές. Οι ελάχιστες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν μακριά από το δάπεδο της αστικής χαράδρας.

Οι Galani A., N.P., Venetsanos A., Bartzis J., Neville S., (Galani A. 2009) στη μελέτη τους προσομοίωσαν υπολογιστικά τη διασπορά ρυπαντών εντός της αστικής χαράδρας στη πόλη του Λονδίνου. Στη προσομοίωση τους επέλυσαν με τη μέθοδο RANS μοντελοποιώντας μια περιοχή 1000 x 940 x 200 m, με αντίστοιχα 70 x 70 x 35 κελία με πύκνωση στο σημείο ενδιαφέροντος. Τα σημεία ενδιαφέροντος είναι ουσιαστικά σημεία για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις προκειμένου να συγκριθούν με τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Οι οριακές συνθήκες έχουν ληφθεί από μετρούμενες τιμές. Οι τιμές των συγκεντρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην υπολογιστική προσομοίωση λήφθηκαν από μετρήσεις. Έτσι λοιπόν γίνεται σύγκριση για δύο σειρές μετρήσεων. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι στη πρώτη προσομοίωση η συγκέντρωση που υπολογίστηκε σε σχέση με τη σειρά μετρήσεων παρουσιάζει μια διαφορά. Η αύξηση στην συγκέντρωση οφείλεται στην αυξημένη διέλευση ή παραμονής αυτοκινήτων εντός της χαράδρας. Η συγκέντρωση στη δεύτερη περίπτωση είναι μικρότερη διότι η ταχύτητα του ανέμου εντός της αστικής χαράδρας, πάρα ταύτα ο ρυθμός εκπομπής του ρύπου ήταν μεγαλύτερος. Και στις δύο περιπτώσεις η ύπαρξη μίας κεντρικής δίνης εντός της χαράδρας μπορεί να δικαιολογήσει τη συσσώρευση ρύπου εντός αυτής. Να τονιστεί ότι μεγάλες ταχύτητες ροής δεν συνεπάγονται απαραίτητα αυξημένους ρυθμούς διάχυσης των ρύπων. Όμως καθώς αυξάνεται το ύψος αυξάνεται και η ταχύτητα ροής με αποτέλεσμα να μειώνονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων. Το παραπάνω ισχύει και για τις δύο σειρές μετρήσεων.

Chang, C.-H. και R.N. Meroney (Chang et al. 2003) στόχος τους ήταν να παρουσιάσουν τη φύση της ροής γύρω από σώματα και τη διάχυση ρυπαντών από σταθερές πηγές. Προσομοίωσαν τη ροή εντός της αστικής χαράδρας αλλά και τη διασπορά του ρύπου, τόσο πειραματικά αλλά και υπολογιστικά. Όσο

αφορά το πειραματικό κομμάτι χρησιμοποιήσαν ένα πλαστικό μοντέλο, ώστε να αποτελεί το κτίριο κατάντη της αστικής χαράδρας. Στο κτίριο κατάντη της χαράδρας ανοίχθηκαν οπές προκειμένου να μπορεί να μετρηθεί η κατανομή της πίεσης. Επίσης αριστερά και δεξιά του πλαστικού κτιρίου έχουν τοποθετηθεί μοντέλα από αφρό ώστε να προσομοιώνουν τα κτίρια στα πλάγια της αστικής χαράδρας, όμοια και το κτίριο ανάντη της αστικής χαράδρας είναι από το ίδιο υλικό. Στην είσοδο της αεροσήραγγας έχει ελεγχθεί η τοπική τραχύτητα προκειμένου το προφίλ στη είσοδο να είναι παραβολικό με εκθέτη  $n$  ίσο με 0,14. Τέλος πραγματοποιήθηκε οπτικοποίηση ροής με τη χρήση ενός laser αλλά και μιας φωτογραφικής κάμερας, στο κέντρο της αστικής χαράδρας υπάρχει μία πηγή που θα προσομοιώνει τη διασπορά ρύπου. Για την υπολογιστική προσομοίωση του RANS χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα  $k-\epsilon$  και το Spalart- Alamaras. Και για LES χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας του FDS. Μετρήθηκαν πειραματικά οι συγκεντρώσεις εντός της αστικής χαράδρας για λόγους μήκους χαράδρας προς ύψος κτιρίου ( $W/H$ ) ίσο με 0,5. Προέκυψε λοιπόν ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βρίσκονται στο ανάντη τοίχωμα της αστικής χαράδρας. Η πάνω ανακυκλοφορία περιστρέφεται ωρολογιακά ενώ η κάτω ανακυκλοφορία περιστρέφεται αντίθετα από τη πάνω. Η κάτω ανακυκλοφορία μεταφέρει ένα μέρος του ρυπαντή στη γωνία του κατάντη τοίχωμα, ενώ ο ρυπαντής που θα βρεθεί στη πάνω ανακυκλοφορία λόγω της φορά περιστροφής θα κινηθεί όλος προς το ανάντη τοίχωμα. Για 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. Σε αντίθεση με το προηγούμενο πείραμα αποδεικνύεται ότι η ροή είναι πιο ασταθής για λόγους  $W/H$  μικρότερους του 1 αλλά και ότι αν υπάρχουν και άλλα κτίρια περιμετρικά της αστικής χαράδρας μειώνονται αρκετά οι συγκεντρώσεις εντός αυτής. Η ροή διαταραχής ομόρου επηρεάζει αρκετά τις συγκεντρώσεις εντός της χαράδρας για λόγους  $W/H$  ίσους με 2 και 4 αντίστοιχα. Όμοια με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν στο ανάντη τοίχωμα. Αυτό οφείλεται διότι τοπικές δίνες οι οποίες υπάρχουν κοντά στο ανάντη τοίχωμα απορροφούν κατευθείαν τους ρύπους. Πάρα ταύτα όπου ο λόγος  $W/H$  είναι μεγαλύτερος ή ίσος με 2 το κατάντη τοίχωμα παρουσιάζει



ελάχιστες συγκεντρώσεις και αυτό διότι οι κατάντη ανακυκλοφορίες επιτρέπουν στο ρύπο να διαφύγει από τη χαράδρα. Αντίθετα όμως για λόγο  $W/H$  ίσο με 6 οι συγκεντρώσεις στο ανάντη τοίχωμα είναι σχεδόν μηδενικές διότι ο ρύπος διαφεύγει άμεσα από τη χαράδρα. Ενώ ο ρύπος διαφεύγει από τη χαράδρα ένα μεγάλο μέρος αυτό καταλήγει στη κατάντη ανακυκλοφορία και εγκλωβίζεται ξανά με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις στο κατάντη τοίχωμα να είναι αυξημένες.

Οι Chan, A.T., E.S.P. So, και S.C. Samad (Chan et al. 2001) μελέτησαν τις κρίσιμες παραμέτρους προκειμένου να αποφευχθεί η μόλυνση από ρυπαντές. Προσομοίωσαν λοιπόν μόνο υπολογιστικά τη τρισδιάστατη ροή εντός αστικής χαράδρας. Χρησιμοποίησαν το απλό κ-ε μοντέλο καθώς και ο αλγόριθμος που επέλεξαν βασίζεται στη σύζευξη πίεσης-ταχύτητας (coupled solver). Η πηγή του ρυπαντή βρίσκεται στο κέντρο της αστικής χαράδρας. Οι παράμετροι που μεταβάλλονται στις υπολογιστικές τους προσομοιώσεις είναι το ύψος των κτιρίων, το ύψος των κτιρίων προς το μήκος της αστικής χαράδρας ( $W/H$ ). 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. Αντίθετα όταν το δεύτερο κτίριο είναι πιο κοντό από το πρώτο ο ρύπος διαφεύγει καθώς δεν αναγκάζεται να ανακυκλοφορήσει επηρεαζόμενος από το ύψος του κτιρίου. Όταν το ύψος και των δύο κτιρίων είναι ίδιο ο ρύπος προσκολλάται στο τοίχωμα ανάντη της χαράδρας λόγω της φοράς περιστροφής της ανακυκλοφορίας. Στη συνέχεια μεταβάλλοντας το λόγο του μήκους της αστικής χαράδρας προς το λόγο του ύψους των κτιρίων έχουμε το εξής: κατά τη μετάβαση της ροής από μεμονωμένης τραχύτητας σε διαταραχής ομόρου οι αυξημένες συγκεντρώσεις στις γωνίες της αστικής χαράδρας αρχίζουν να μετατοπίζονται προς το κέντρο. Στη ροή διαταραχής ομόρου υπάρχει ένα τυρβώδες υπόστρωμα εντός της χαράδρας. Καθώς η απόσταση των δύο κτιρίων μειώνεται το υπόστρωμα αυτό τείνει να εξαλειφθεί καθώς μία κεντρική δίνη θα λάβει τη θέση του. Η χωρική διασπορά του ρύπου γίνεται σχεδόν ομοιόμορφη. Σε βαθιές αστικές χαράδρες δημιουργούνται δύο δίνες με αντίθετη φορά περιστροφής. Τέλος μεταβάλλοντας το πλάτος των κτιρίων σε σχέση με το ύψος αυτών προκύπτει ότι το μήκος των κτιρίων αποτελεί κύριο 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 συσκεντρώσεων.

Οι Baik, J.-J., R.-S. Park, H.-Y. Chun, and J.-J. Kim (Baik et al. 2000) στη δημοσίευση τους είχαν σαν στόχο να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός διασκορπισμού ρυπαντών εντός μιας αστικής χαράδρας. Απώτερος σκοπός τους ήταν οι σχεδιαστές αστικών περιοχών που μπορεί να περιέχουν χαράδρες να λαμβάνουν υπόψη τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Η προσέγγιση τους ήταν πειραματική αλλά και υπολογιστική. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε υδατοσήραγγα. Προκειμένου να οπτικοποιήσουν τη ροή εισήγαγαν στο κέντρο της χαράδρας σωματίδια λαδιού και σκόνη αλουμινίου. Χρησιμοποιώντας μία κάμερα λάμβαναν φωτογραφίες με χρονικό βήμα 0,5 s. Οι αριθμητικές προσεγγίσεις έγιναν σε δισδιάστατες γεωμετρικές 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). Επίσης δοκιμάστηκαν και γεωμετρίες οι οποίες μετέβαλαν το ύψος τους ενός από τα δύο κτίρια. Κατέληξαν ότι για τις περιπτώσεις όπου τα κτίρια έχουν το ίδιο ύψος υπάρχει μία κρίσιμη τιμή του λόγου  $H/W$  (~ 0.7) όπου η ροή μεταβαίνει από διαταραχής ομόρου σε απόξεσης. Για λόγο  $H/W$  ίσο με ένα έχουμε μία ανακυκλοφορία εντός της χαράδρας η οποία επιβεβαιώνεται τόσο πειραματικά αλλά και υπολογιστικά. Καθώς οι λόγοι  $H/W$  αυξάνονται οι δίνες που δημιουργούνται εντός της αστικής χαράδρας είναι δύο, με τη πάνω να είναι αισθητά μεγαλύτερη της από αυτή που εμφανίζεται χαμηλά στη χαράδρα. Για τις περιπτώσεις όπου δημιουργούνται δύο δίνες η πάνω είναι πάντα ισχυρότερη της κάτω. Αυτό γίνεται διότι η μεταφορά ορμής από την εξωτερική ροή γίνεται πρώτα στη πάνω δίνη και ύστερα στη κάτω. Τέλος πραγματοποίησαν πειράματα αλλά και υπολογιστικές προσομοιώσεις όπου πέρα από το λόγο  $H/W$  μεταβάλλεται και το ύψος ενός εκ των δύο κτιρίων. Για τα πειράματα που το πρώτο κτίριο είναι χαμηλότερο από το δεύτερο έχουμε το σχηματισμό μίας δίνης μόνο, το παραπάνω επαληθεύεται και υπολογιστικά για όλους τους λόγους  $H/W$ . Αντίστοιχα για όλα τα πειράματα που το πρώτο κτίριο είναι υψηλότερο του δεύτερου έχουμε το σχηματισμό δύο δινών για όλους τους λόγους  $H/W$ .

Οι Baik, J.-J. και J.-J. Kim (Baik et al. 2002) μελέτησαν τη ροή και το διασκορπισμό ρυπαντών εντός αστικής χαράδρας. Η παραπάνω μελέτη είναι αρκετά δύσκολη λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών ροής που οφείλονται στις μετεωρολογικές συνθήκες. Πάρα ταύτα είναι αρκετά χρήσιμες διότι συνδέουν το φυσικό αερισμό με τη ποιότητα του αέρα εντός της αστικής χαράδρας. Στόχος λοιπόν ήταν να διαπιστώσουν γιατί η κατακόρυφη τυρβώδη ροή των ρυπαντών κυριαρχεί της κατακόρυφης ροής των ρυπαντών από την εξωτερική ροή στο ύψος της οροφής των κτιρίων της αστικής χαράδρας. Η μελέτη έγινε με τη χρήση υδατοσήραγγας και αεροσήραγγας καθώς και με τη χρήση υπολογιστικής προσομοίωσης. Όσο αφορά την υπολογιστική προσομοίωση, το πεδίο ροής είναι διδιάστατο. Επιλύονται οι εξισώσεις των συνιστωσών της ορμής στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, η εξίσωση της συνέχειας αλλά και η εξίσωση διασποράς το ρύπου. Στην είσοδο του πεδίου ροής το προφίλ ταχύτητάς είναι εκθετικό. Προκειμένου να επικυρωθούν τα αποτελέσματα από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις πραγματοποίησαν πειράματα σε υδατοσήραγγας και αεροσήραγγα. Παίρνοντας δύο προφίλ ταχύτητας εντός της αστικής χαράδρας σε διαφορετικές αποστάσεις και συγκρίνοντας τα με αυτά από τις προσομοιώσεις βλέπουμε ότι είναι πανομοιότυπα. Στη συνέχεια λήφθηκαν άλλα τρία προφίλ ταχυτήτων, της συνιστώσας  $x$  και της συνιστώσας  $y$ . Παρατηρήθηκε ότι προς τη κατάντη περιοχή από το πρώτο κτίριο της αστικής χαράδρας η συνιστώσα  $x$  έχει υψηλότερες τιμές, και η συνιστώσα  $y$  έχει υψηλότερες τιμές προς την ανάντη περιοχή από το πρώτο κτίριο. Αυτό παραπέμπει ξεκάθαρα στην ύπαρξη ανακυκλοφορίας εντός τη χαράδρας. Η συγκέντρωση του ρύπου εντός της χαράδρας είναι υψηλότερη στο πάνω μέρος και χαμηλότερη στο κάτω σημείο αυτό οφείλεται ξεκάθαρα στην ανακυκλοφορία, έτσι λοιπόν ο ρύπος δραπέτεύει από τη χαράδρα προς την εξωτερική ροή. Η διαφυγή γίνεται με ορισμένους μηχανισμούς προκειμένου να τους μελετήσουν όρισαν δύο νέα μεγέθη. Το

$$F_m = C \cdot W \text{ και } F_t = -kC \cdot \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (2-1)$$

όπου  $F_m$  είναι η κατακόρυφη ροή του ρύπου από τη ροή και  $F_t$  η κατακόρυφη ροή λόγω τύρβης. Παρατηρείται ότι στο πίσω μέρος της χαράδρας το  $F_t$  είναι υψηλότερο, που σημαίνει ότι ο ρύπος δραπέτεύει από τη χαράδρα λόγω

μεταφοράς τύρβης και όχι από τη μορφολογία της ροής. Κλείνοντας με σκοπό να διερευνήσουμε τη καθαρή ροή ρυπαντών στο πάνω μέρος της αστικής χαράδρας θα ολοκληρώσουμε κατά μήκος τα δύο μεγέθη που ορίσαμε:

$$\beta_m = \int F_m dx \text{ και } \beta_t = \int F_t dx \quad (2-2)$$

Οι τιμές που προκύπτουν από την ολοκλήρωση είναι  $\beta_t=70,63 \text{ rpm} \cdot \text{m}^2\text{s}^{-1}$  και  $\beta_m= -6,57 \text{ rpm} \cdot \text{m}^2\text{s}^{-1}$  αυτό σημαίνει ότι ένα ποσό του ρύπου που θα δραπέτευε λόγω του μηχανισμού που αναφέραμε παραπάνω εγκλωβίζεται και ανακυκλοφορεί εντός της χαράδρας.

Οι Χατζημηχαηλίδης, Αργυρόπουλος, Assael και Κακοσίμος (Chatzimichailidis et al. 2019) στη δημοσίευση τους Qualitative and Quantitative Investigation of Multiple Large Eddy Simulation Aspects for Pollutant Dispersion in Street Canyons Using OpenFOAM εξέτασαν υπολογιστικά τη διασπορά ρυπαντών εντός αστικής χαράδρας με τη μέθοδο LES. Ένα από τα θέματα που εξέτασαν ήταν η πυκνότητα του πλέγματος. Προκειμένου να το επιτύχουν έτρεξαν τρεις προσωμειώσεις με διαφορετικό αριθμό κελίων σε κάθε μία. Το αραιό πλέγμα με 768,000 κελία, το μεσαίο με 2,592,000 κελία και το πυκνό με 8,748,000 κελία. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$CGI_{fine} = Fs \cdot \frac{|e_{21}|}{r21^p - 1} \quad (2-3)$$

Όπου το  $e_{21}$  η διαφορά μεταξύ των τιμών από τα δύο πλέγματα που συγκρίνονται. Υπολόγισαν το σφάλμα μετάβασης από το ένα πλέγμα στο άλλο. Για τρεις λοιπόν θέσεις υπολόγισαν τη μετάβαση από το μεσαίο στο πυκνό πλέγμα. Τελικά τα σφάλματα από τα δύο πλέγματα σε σχέση με το πυκνό ελαχιστοποιούνται λόγω της τοπικής πύκνωσης εντός της χαράδρας αλλά αυξάνονται αισθητά ανάντη και κατόντη της αστικής χαράδρας. Επίσης ανεξαρτήτως της αύξηση των σφαλμάτων συναρτήσει της τοπολογίας δειγματοληψίας υπάρχει μία αισθητή αύξηση των σφαλμάτων στην  $U_w$  συνιστώσα της ροής. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ελλειπή

πύκνωση στη συνιστώσα Z του χωρίου ή στην έλλειψη πύκνωσης των κελίων σε περιοχές υψηλών μεταβολών της ταχύτητας της ροής στη παραπάνω συνιστώσα.

## **3 Μεθοδολογία**

Όπως αναφέραμε παραπάνω στην παρούσα εργασία προκειμένου να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά της ροής θα πραγματοποιήσουμε τόσο υπολογιστικές προσομοιώσεις όσο και πειράματα. Με αυτό τον τρόπο θα μπορέσουμε να επαληθεύσουμε τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Επίσης θα είμαστε σε θέση να δούμε τυχόν αποκλίσεις μεταξύ των υπολογιστικών προσομοιώσεων μας και των πειραματικών μετρήσεων.

### **3.1 Πειραματική προσέγγιση**

Στην υποενότητα αυτή θα παραθέσουμε τη συνοπτική θεωρία αεροσηράγγων καθώς και όλο τον εξοπλισμό τον οποίο χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να φέρουμε εις πέρας το πειραματικό μέρος αυτής της εργασίας.

#### **3.1.1 Θεωρία αεροσηράγγων**

##### **3.1.1.1 Εισαγωγή**

Οι αεροσήραγγες αποτελούν συσκευές – διατάξεις με τις οποίες μπορούμε να αποκτήσουμε χρήσιμες πληροφορίες όσο αφορά την επίλυση προβλημάτων αεροδυναμικής και υδροδυναμικής. Οι αεροσήραγγες αποτελούν το κομμάτι του εξοπλισμού το οποίο είναι υπεύθυνο για τη προσομοίωση ενός υπό μελέτη πεδίου ροής. Οι αεροσήραγγες αποτελούν διατάξεις οι οποίες προκειμένου να αξιοποιηθούν χρειάζονται και τον κατάλληλο μετρητικό εξοπλισμό προκειμένου να μπορούμε να λάβουμε μετρήσεις αεροδυναμικών μεγεθών.

##### **3.1.1.2 Τύποι Αεροσηράγγων**

Υπάρχουν δύο είδη αεροσηράγγων ως προς τη μορφολογία τους και δύο είδη ως προς το χώρο δοκιμών. Βέβαια υπάρχουν πάρα πολλές παραλλαγές ως προς το είδος αν και σε γενικές γραμμές κάθε σήραγγα με χώρο δοκιμών με εμβαδόν μεγαλύτερο από 2 τετραγωνικά πόδια ( $ft^2$ ) θεωρείται μοναδική (Pope et al. 1966).

Ως προς τη μορφολογία τους διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους:

1. Ανοιχτού κυκλώματος

## 2. Κλειστού κυκλώματος (*Göttingen* ή *Prandtl*)

Και όσο αφορά το χώρο δοκιμών έχουμε:

1. Κλειστός θάλαμος δοκιμών
2. Ανοιχτός θάλαμος δοκιμών

Ένα συγκριτικό πλεονέκτημα των αεροσηράγγων ανοιχτού κυκλώματος είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας αποβάλλεται στο περιβάλλον και ένα μικρό μέρος αυτής παραμένει στο θάλαμο δοκιμών με αποτέλεσμα η απαιτούμενη ισχύς να είναι μικρότερη σε αντίθεση με μία σήραγγα κλειστού κυκλώματος. (Βασιλόπουλος 2001)

Στις σήραγγες κλειστού κυκλώματος λόγω της μορφολογίας τους η ροή περιστρέφεται σε τέσσερις γωνίες των  $90^{\circ}$ . Υπάρχει πάντα κάποιο μικρό άνοιγμα κάπου στη διατομή έτσι ώστε λόγω της θέρμανσης του αέρα να μην μειώνεται η πίεση του. Η στατική πίεση εντός της σήραγγας είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική έτσι ο αέρας εντός της σήραγγας να κινηθεί προς τις οπές όπου στηρίζεται το μοντέλο.

Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκαν οι αεροσήραγγες 'open jet' με ανοιχτούς θαλάμους δοκιμών. Η διάταξη αυτή είχε το πλεονέκτημα της εύκολης πρόσβασης στο μοντέλο, αλλά κοντά στη περιοχή ανάμειξης της ροής από τη σήραγγα με τον ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργούνταν φαινόμενα τύρβης.

### 3.1.1.3 Υποηχητικές αεροσήραγγες

Σε γενικές γραμμές η κύρια χρήση της σήραγγας είναι να προσομοιώνει όσο το δυνατό καλύτερα το πεδίο ροής. Το να πετύχουμε τη τελειότητα είναι απίθανο οπότε λαμβάνουμε υπόψιν μας παράγοντες κόστους, αποδοτικότητας και λειτουργικότητας.

Οι παράγοντες σχεδιασμού είναι οι παρακάτω:

1. Αριθμός Reynolds

Η σήραγγα θα πρέπει να λειτουργεί σε ένα φάσμα αριθμών Reynolds και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα μοντέλων. Το πρόβλημα αυτό προέκυψε

από τις αυτοκινητοβιομηχανίες οι οποίες έπρεπε να διαλέξουν ποια αεροσήραγγα θα διαλέξουν προκειμένου να διεξάγουν τα πειράματα τους σε συγκεκριμένη γκάμα μοντέλων.

Εφόσον η σήραγγα είναι υποηχητική αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός Mach είναι μικρότερος του 0,3. Αυτό συνεπάγεται ότι το μέγεθος των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα προς ένα. Ως συνέπεια του παραπάνω εκτοξεύεται το κόστος δοκιμών προκειμένου να κατασκευαστούν αρκετά μοντέλα δοκιμών σε κλίμακα ένα προς ένα.

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στην αεροναυπηγική όπου οι υποηχητικές αεροσήραγγες αποτελούν την ιδανική λύση, όπως για την προσομοίωση των συνθηκών απογείωσης και προσγείωσης των αεροσκαφών. Και ο λόγος είναι ότι οι παραπάνω διαδικασίες συμβαίνουν σε αριθμούς Mach από 0,2 έως 0,3.

## 2. Ο χώρος δοκιμών

Ο χώρος δοκιμών αποτελεί τον πρώτο παράγοντα σχεδιασμού μιας αεροσήραγγας. Η επιλογή του χώρου θα εξαρτηθεί από τον επιθυμητό αριθμό Reynolds, από το δυνατό κόστος που μπορεί να δαπανηθεί για την κατασκευή της αλλά και από τα μοντέλα που θα τοποθετηθούν εντός του χώρου.

Σε περίπτωση αεροσηράγγων οι οποίες θα λειτουργήσουν σε πανεπιστήμια ή ερευνητικά κέντρα λόγω της τεράστιας γκάμας μοντέλων που θα δοκιμαστούν και οι αριθμοί Reynolds που θα απαιτηθούν εκτοξεύουν το κόστος κατασκευής. Στην τελική ανάλυση όμως το μέγεθος του θαλάμου δοκιμών θα εξαρτηθεί κυρίως από το μέγεθος του χώρου όπου θα τοποθετηθεί η σήραγγα.

Σε γενικές γραμμές παρουσιάζουν πλεονέκτημα οι κλειστοί χώροι δοκιμών όσο αφορά δοκιμές μοντέλων για αεροναυπηγική χρήση. Το πλεονέκτημα αυτό αρχίζει να μειώνεται αισθητά καθώς το μέγεθος πλέον των γεωμετριών μεγαλώνει. Έτσι η πρόσβαση πλέον στο μοντέλο αλλά και ο χώρος που απαιτείται προκειμένου να στηθεί επιβάλλουν τη χρήση ανοιχτού χώρου δοκιμών.



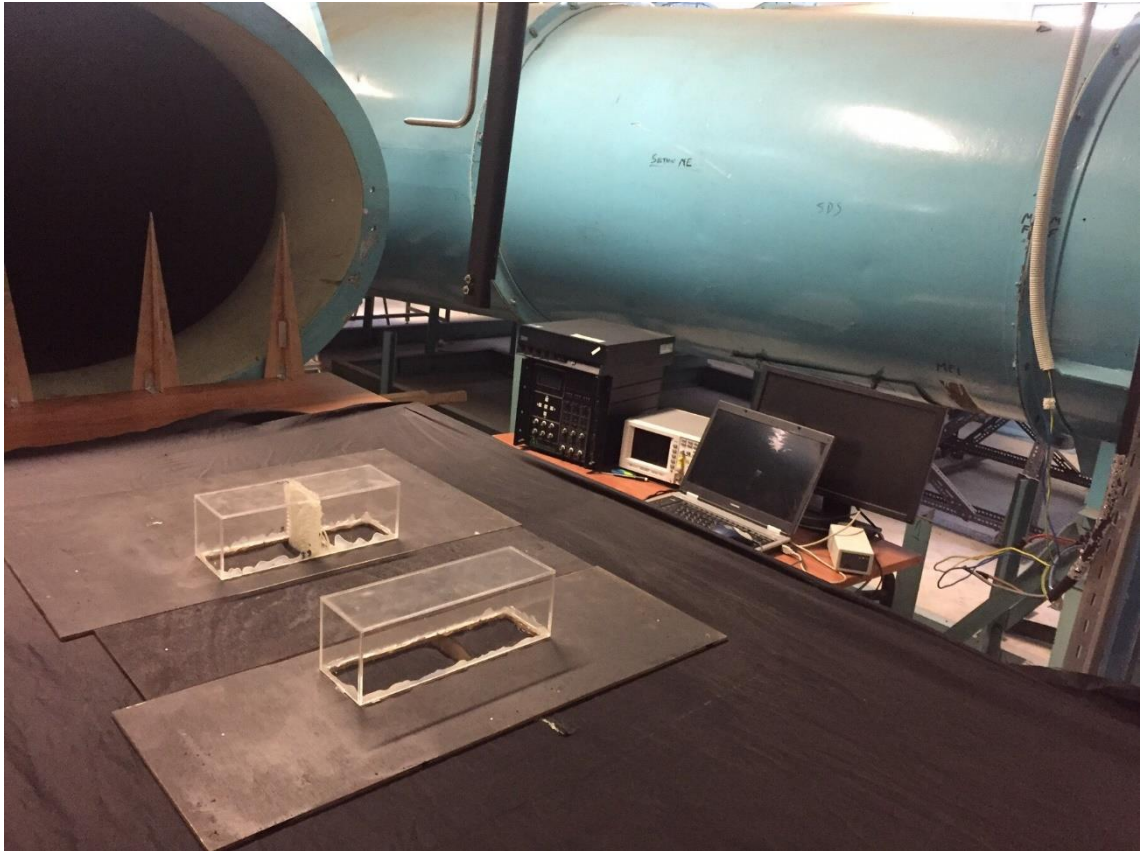
Επίσης οι αεροσήραγγες ανοιχτού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών όπου εκτονώνουν τη ροή στο περιβάλλον παρουσιάζουν το εξής μειονέκτημα, επειδή η πίεση εντός του χώρου είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική με αποτέλεσμα να αναρροφούν ποσότητες αέρα από οπές που πιθανόν να βρίσκονται στο χώρο δοκιμών. Μία συνήθης λύση είναι πριν το θάλαμο δοκιμών να υπάρχει ένα άνοιγμα το οποίο να εξισορροπεί την διαφορά της στατικής πίεσης.

### 3. Ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι αν θα είναι ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος. Αυτό κυρίως εξαρτάται από το χώρο που θα είναι η αεροσήραγγα αλλά και από τη χρήση της. Για μικρές αεροσήραγγες για εκπαιδευτικούς σκοπούς συνήθως προτιμώνται οι σήραγγες ανοιχτού κυκλώματος. Δεν λαμβάνονται βέβαια υπόψη σε αυτές τις αεροσήραγγες το κόστος λειτουργίας τους καθώς αυτό είναι αμελητέο. Σε περίπτωση όμως σηράγγων μεγάλων ισχύων χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήραγγες κλειστού κυκλώματος.

Οι κύριοι λόγοι ύπαρξης σηράγγων κλειστού κυκλώματος είναι η υψηλή απόδοση τους και η οικονομία στη κατασκευή τους. Ο αέρας ύστερα από τη διέλευση του στο χώρο δοκιμών περισυλλέγεται από το κανάλι επιστροφής εξοικονομώντας έτσι ενέργεια.

Οι λόγοι συνήθως που θα επιλεχτεί μία σήραγγα ανοιχτού κυκλώματος είναι αν ο χώρος που θα λειτουργεί η σήραγγα είναι μικρός, το αρχικό κόστος επένδυσης αλλά και κυρίως ο τύπος των φαινομένων που μπορούν να μελετηθούν, συνήθως αυτές οι σήραγγες χρησιμοποιούνται για μελέτη θεμελιωδών φαινομένων.



**Σχήμα 3-1 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος τύπου *Gottingen***

### **3.1.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός**

Το πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής αποτελείται από μετρήσεις κατανομής πίεσης στα κτίρια της τυπικής αστικής χαράδρας και από μετρήσεις θερμικής ανεμομετρίας στην είσοδο τη αεροσήραγγας προκειμένου να οριστούν οι αρχικές συνθήκες της υπολογιστικής προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 3-2 βλέπουμε το μικρομανόμετρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη όλων των πειραματικών μετρήσεων κατανομής πίεσης. Το συγκεκριμένο μανόμετρο μπορεί να μετράει τη διαφορά πίεσης μεταξύ της αδιατάραχτης ροής  $P_{inf}$  και την ολική πίεση στην επιφάνεια των κτιρίων. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και για την μέτρηση της ταχύτητας στην αδιατάραχτη ροή. Όσο αφορά τις τεχνικές προδιαγραφές ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας είναι τα 10 Hz, επίσης δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικού αισθητήρα.

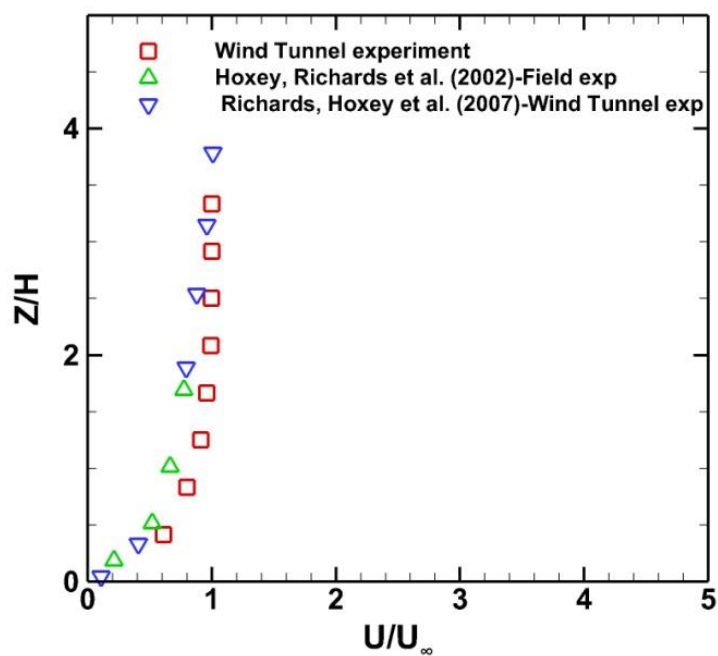


**Σχήμα 3-2 Μικρομανόμετρο FCO 560**

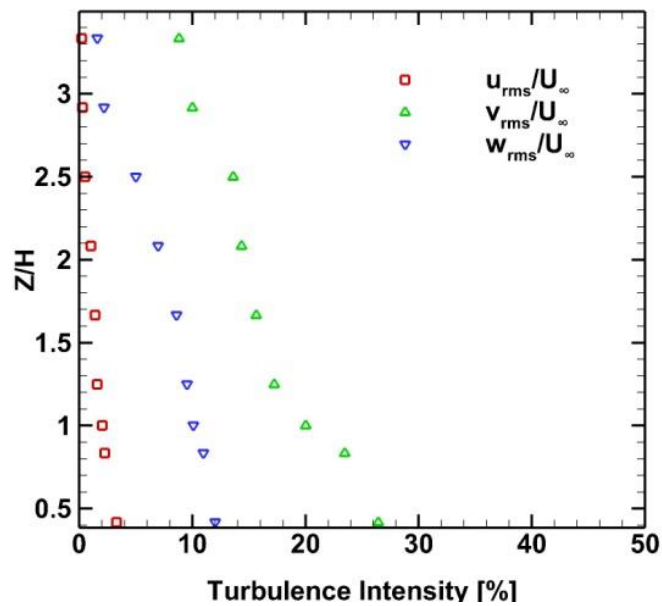
Το θερμικό ανεμόμετρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 3-3. Με το συγκεκριμένο ανεμόμετρο λήφθηκαν τιμές των διακυμάνσεων της ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας. Το συγκεκριμένο μετρικό όργανο έχει διακριτική ικανότητα 4 δεκαδικά ψηφία τάσης (Volts) και ο ρυθμός δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε είναι 20 KHz. Ο αριθμός των μετρήσεων που λήφθηκαν είναι 20,000 στο σύνολο τους. Επίσης χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του ύψους του οριακού στρώματος το οποίο δημιουργείται. Το συγκεκριμένο οριακό στρώμα πρέπει να έχει ύψος τουλάχιστον δύο ύψη σε σχέση με το ύψος των κτιρίων της αστικής χαράδρας. Στην δική μας περίπτωση το ύψος του οριακού στρώματος είναι δύο ύψη.



Σχήμα 3-3 Θερμικό ανεμόμετρο A.A.LAB.SYSTEMS

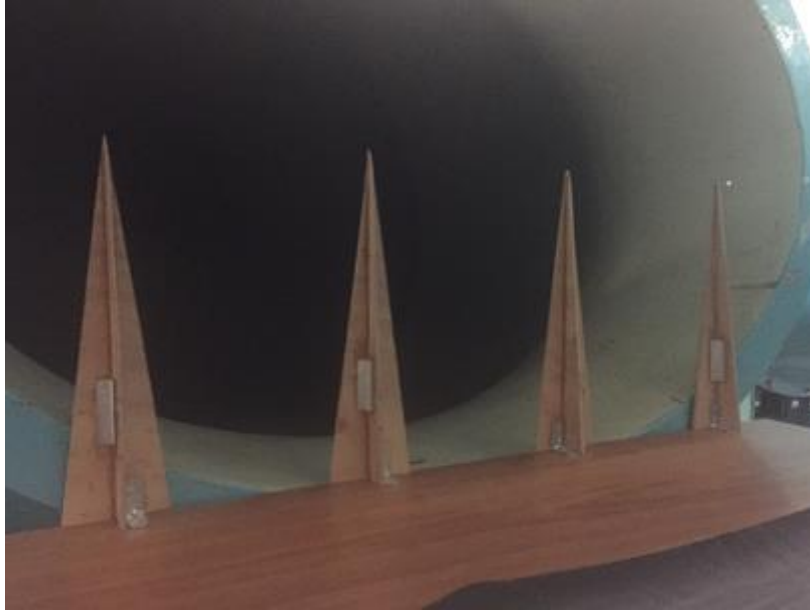


Σχήμα 3-4 Αδιαστατοποιημένο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας (Vasilopoulos 2020)



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

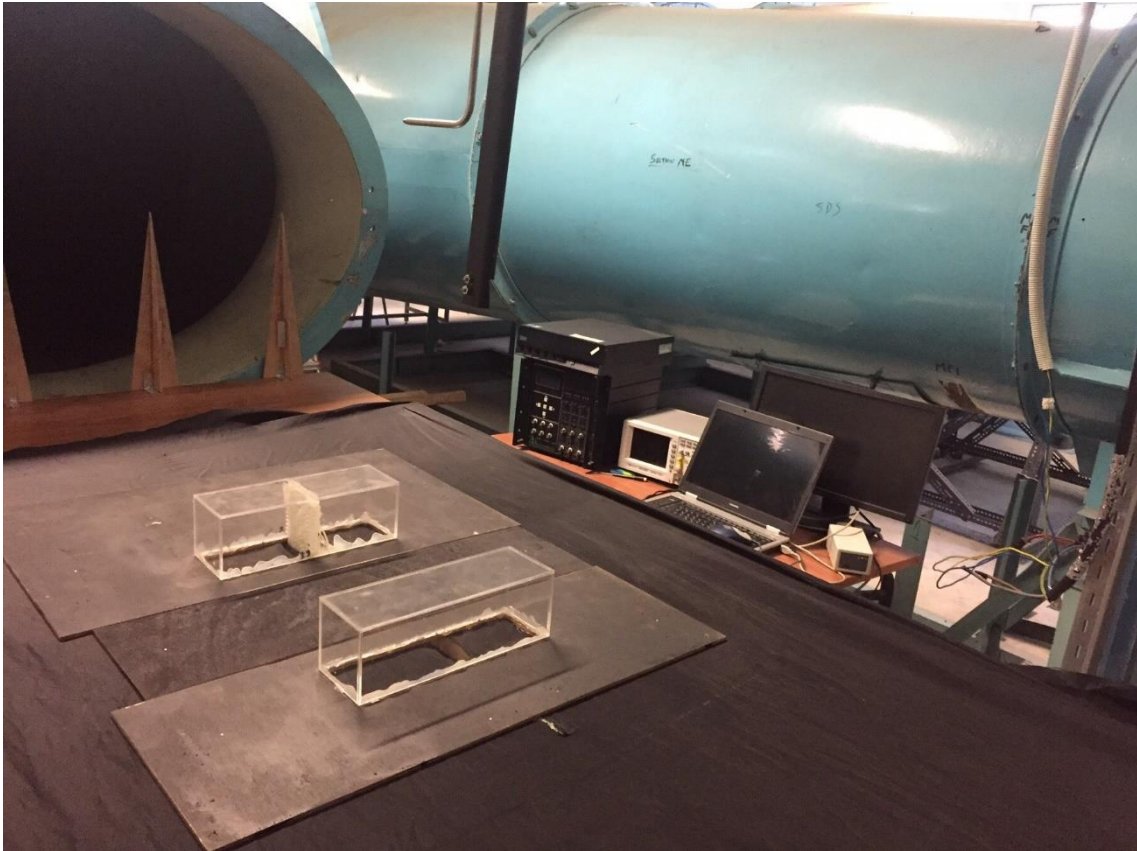
Στο Σχήμα 3-6 βλέπουμε τη πειραματική διάταξη την οποία χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να δημιουργήσουμε το οριακό στρώμα το οποίο θα πρέπει αναγκαστικά το ύψος τους να είναι μεγαλύτερο από το ύψος της μακέτας που θα κατασκευάσουμε.



**Σχήμα 3-6 Spines για τη δημιουργία οριακού στρώματος**

### **3.1.3 Μακέτες για τις τυπικές αστικές χαράδρες**

Η μακέτα που θα γίνει το πρώτο πείραμα κατανομής πίεσης φαίνεται στο Σχήμα 3-7. Όπως βλέπουμε κατά το μήκος του ενός από τα δύο κτίρια υπάρχουν οπές από τις υπάρχουν σωληνάκια τα οποία καταλήγουν στο μικρομανόμετρο προκειμένου να μετρήσουμε τη διαφορά πίεσης.



**Σχήμα 3-7 Μακέτα τυπικής αστικής χαράδρας με μήκος  $W/H=1$**

Παρατηρούμε ότι τα κτίρια της μακέτας είναι από πλαστικό υλικό (Plexiglass) γεγονός το οποίο μας βοηθάει καθώς δεν χρειάζεται να ασχοληθούμε με την τραχύτητα της επιφάνειας.

## **3.2 Αριθμητική προσέγγιση**

### **3.2.1 Συνοπτική θεωρία προσομοίωσης μεγάλης δίνης (LES)**

Η προσομοίωση μεγάλης δίνης αποτελεί μία τεχνική η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη. Η συγκεκριμένη τεχνική ξεκίνησε να εφαρμόζεται σε μεγάλης κλίμακας μοντέλα με κύρια εφαρμογή την μετεωρολογία. Σε αντίθεση με άλλες τεχνικές η παρούσα διαχωρίζει το πεδίο ροής σε μεγάλες και μικρές δίνες. Ως γνωστόν οι μεγάλες δίνες ανταλλάσσουν ενέργεια με τις μικρότερες, καθώς γίνεται αυτό οι μεγάλες δίνες χάνουν ενέργεια αλλά και χωρικά μικραίνουν. Καθώς μικραίνουν κινούνται κοντά στα τοιχώματα και μετατρέπονται σε θερμότητα. Για το λόγο αυτό οι μεγάλες δίνες μοντελοποιούνται βάσει ορισμένων μοντέλων που

υπάρχουν και οι μικρές επιλύονται με άμεση επίλυση (DNS). Τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι δυναμικά ή στατικά.

Προκειμένου να γίνει αυτό εφαρμόζεται ένα φίλτρο χωρικό το οποίο εξαρτάται από το κάθε κελί και βάσει αυτού γίνεται ο διαχωρισμός των δομών της ροής σε μεγάλες και μικρές. Επειδή όμως αυτό το φίλτρο δεν μπορεί να είναι αυθαίρετο θεωρητικά πρέπει το αδιάστατο ύψος  $y^+$  πρέπει να είναι ίσο με ένα. Αυτό συνεπάγεται ένα αρκετά πυκνό πλέγμα σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστώντας την προσομοίωση υπολογιστικά ασύμφορη και για το λόγο αυτό ορισμένες αποκλίσεις είναι αποδεκτές. Το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται στις εξισώσεις της ροής. Στην εξίσωση (3-1) δίνεται η εξίσωση της ορμής στην οποία έχουμε εφαρμόσει ένα χωρικό φίλτρο.

$$\tilde{u}_i(X) = \int G(X, X') u_i(X') dX' \quad (3-1)$$

Κατά συνέπεια αυτού η ταχύτητα θα πρέπει να αναλυθεί όπως φαίνεται στην εξίσωση (3-2).

$$U_i(X) = \tilde{u}_i(X) + u'_i(X) \quad (3-2)$$

Όπου  $\tilde{u}_i(X)$  είναι η μέση τιμή του πεδίου ταχύτητάς η οποία προκύπτει από την εξίσωση

$$\tilde{u}_i(X) = \frac{1}{T} \int U(t) \quad (3-3)$$

Και  $u'_i(X)$  είναι η διακύμανση του πεδίου ταχύτητας. Η μέση τιμή της διακύμανσης είναι ίση με το μηδέν.

Όσο αφορά τη μοντελοποίηση των μεγάλων δινών το πιο σύνηθες μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο του Smagorinsky. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στην αρχή ότι οι υποπλεγματικές τάσεις επηρεάζουν τις εξισώσεις στους όρους μεταφοράς και σκέδασης. Εφόσον αυτό ισχύει για την στρωτή ροή μπορεί να εφαρμοστεί και στην υπόθεση του Boussinesq.



Το σύνολο των εξισώσεων που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιήσαμε (OpenFoam) χρησιμοποιεί το παρακάτω σύνολο εξισώσεων.

Σαν ανάλογο του μοντέλου κ-ε της μεθόδου RANS έτσι και εδώ ορίζεται η κινητική ενέργεια.

$$k = -\frac{1}{2\rho} tr(r) \quad (3-4)$$

Όπου  $r$  είναι οι τάσεις του Reynolds. Η υποπλεγματική κινητική ενέργεια δίνεται από την εξίσωση

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \tau_{kk} = \frac{1}{2} (\overline{U_k U_k} - \widetilde{u_k u_k}) \quad (3-5)$$

Αν τώρα διασπάσουμε τις τάσεις του Reynolds σε συμμετρικές και στις τάσεις του συνδυασμού των διευθύνσεων λαμβάνουμε την εξίσωση (3-6).

$$\frac{2}{3} k_{sgs} \delta_{ij} - 2 v_{sgs} dev(\widetilde{D})_{ij} \quad (3-6)$$

Και τέλος προκειμένου να υπολογίσουμε το τυρβώδες ιξώδες προκύπτει η παρακάτω εξίσωση (3-7).

$$v_{sgs} = C_k \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (3-7)$$

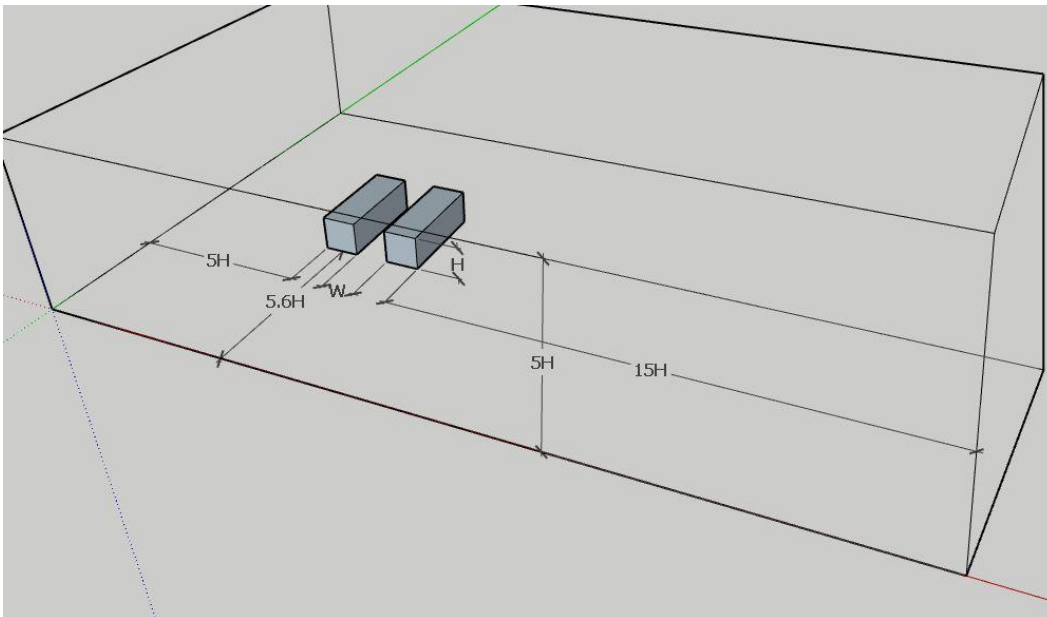
Στις δικές μας προσομοιώσεις στον ανοιχτό κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιήσαμε ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PISO. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος όταν προτάθηκε αρχικά χρησιμοποιούνταν για συμπιεστές ροές και δεν ήταν επαναληπτική. Τα σχήματα διακριτοποίησης που χρησιμοποιήσαμε είναι δευτέρας τάξης Upwind. Όσο αφορά τις μεθόδους επίλυσης για το πεδίο ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε η Gauss-Seidel. Για την πίεση χρησιμοποιήθηκε πολυπλεγματικός λύτης ο οποίος χρησιμοποιεί σαν smoother την Gauss-Seidel.

## 4 Αποτελέσματα

### 4.1 Υπολογιστικό Χωρίο

Το υπολογιστικό χωρίο ορίζεται ως ο πεπερασμένος χώρος στον οποίο θα γίνουν όλοι οι υπολογισμοί των φαινομένων ροής. Το χωρίο αυτό πρέπει να επιλεγεί ώστε να αντιπροσωπεύει το πρόβλημα ροής το οποίο θέλουμε να λύσουμε. Κατά την επιλογή των διαστάσεων του υπάρχει πληθώρα δημοσιεύσεων και βιβλιογραφίας οι οποίες για κάθε είδος ροής δίνουν ορισμένες τυπικές διαστάσεις. Αυτό γίνεται διότι δεν πρέπει η διαστάσεις αυτές αρχικά να επηρεάζουν τη φυσική της ροής μέσω στενώσεων ή ανοιγμάτων στο χωρίο. Αλλά δεν πρέπει να είναι όμως και αρκετά μεγάλο σε σχέση με την εξεταζόμενη γεωμετρία καταναλώνοντας υπολογιστικούς πόρους, διότι αυτό καθιστά την υπολογιστική προσομοίωση ασύμφορη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουμε προσομοιώσει μία τυπική αστική χαράδρα όπως αυτή ορίστηκε στην εισαγωγή. Προκειμένου να μπορέσουμε να συμπεράνουμε πως η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της αστικής χαράδρας επηρεάζει το πεδίο ροής. Για το λόγο αυτό έχουμε μεταβάλει τον λόγο  $W/H$  για τρεις περιπτώσεις στις οποίες παρατηρείται μεταβολή του είδους της ροής βάση του (Oke 1988). Οι λόγοι αυτοί είναι  $W/H$  ίσο με ένα, τρία και έξι.



Σχήμα 4-1 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου βάση του ύψους των κτιρίων

Όπως παρατηρούμε στην Σχήμα 4-1 στο υπολογιστικό χωρίο όλες οι διαστάσεις έχουν τυποποιηθεί βάση του ύψους των κτιρίων της αστικής χαράδρας. Οι διαστάσεις αυτές είναι βάση της βιβλιογραφίας καθώς ούτε επηρεάζουν τη φυσική της ροής καθώς και δεν αυξάνουν το υπολογιστικό κόστος.

Οι διαστάσεις αυτές θα μπορούσαν να είναι και μεγαλύτερες στη δική μας περίπτωση η μόνη διάσταση που ξεφύγαμε κατ' ελάχιστο είναι αυτή των πλαϊνών και αυτό διότι δεν επιβάρυνε σημαντικά την υπολογιστική προσομοίωση καθώς ο αριθμός των κελίων δεν είναι αποτρεπτικός.

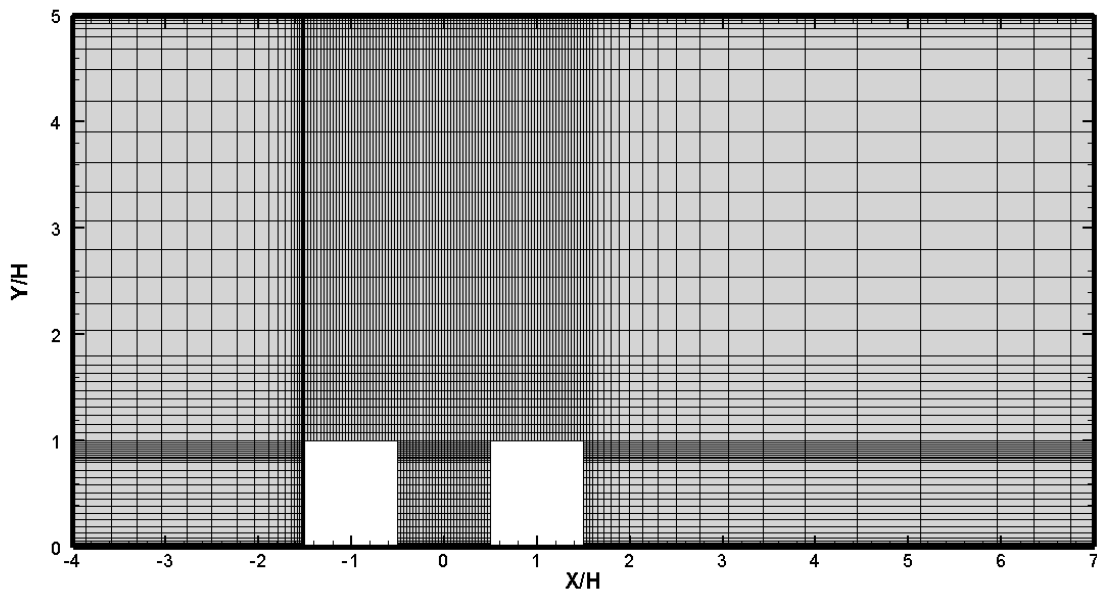
## 4.2 Πλέγμα

Οι εξισώσεις ροής όπως αυτή της ορμής και του Poisson δεν επιδέχονται αναλυτική λύση λόγω μη γραμμικών όρων που υπάρχουν. Προκειμένου λοιπόν να επιλύσουμε αυτές της διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους πρέπει να διακριτοποιήσουμε το υπολογιστικό χωρίο σε και να επιλύσουμε αριθμητικά. Η διακριτοποίηση αυτή γίνεται χωρίζοντας το χωρίο που θέλουμε να επιλύσουμε σε επιμέρους μικρότερα χωρία.

Η διακριτοποίηση αυτή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους και εξαρτάται αποκλειστικά από την προς εξέταση γεωμετρία. Το πλέγμα αυτό μπορεί να είναι:

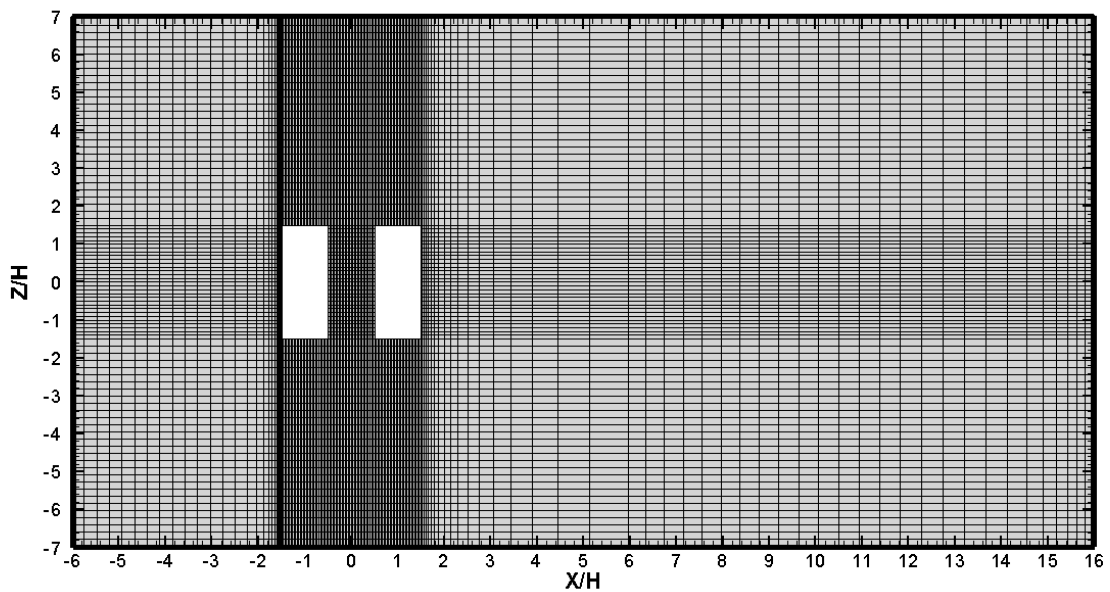
- I. Δομημένο
- II. Αδόμητο

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιούμε δομημένο πλέγμα (Structure grid) και ο λόγος είναι ότι η γεωμετρία της αστικής χαράδρας είναι ικανοποιητική καθώς είναι πλήρως ορθογωνική. Ένα άλλο πλεονέκτημα από τη χρήση του δομημένου πλέγματος πέραν της απλότητας του είναι ότι συμπεριφέρεται καλύτερα υπολογιστικά στην επίλυση εντός των οριακών στρωμάτων. Στις προσομοιώσεις μας έχουμε διαχειριστεί το πλέγμα έτσι ώστε ο αριθμός των κελίων να είναι όσο το δυνατό μικρότερος. Επίσης έχουμε εφαρμόσει και τοπικές πυκνώσεις σε σημεία ενδιαφέροντος προκειμένου να κρατήσουμε τον αριθμό κελίων σε ένα επιτρεπτό όριο.



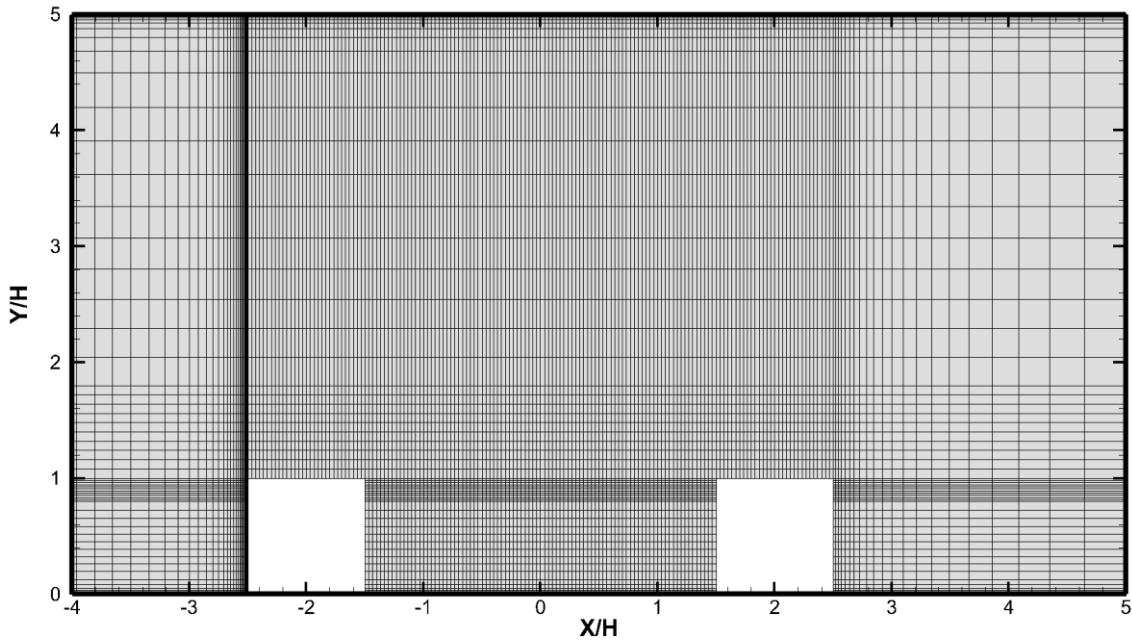
**Σχήμα 4-2 Κεντρική κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για  $W/H=1$  και  $Z/H=0$**

Στην Σχήμα 4-2 βλέπουμε τη κεντρική διαφάνεια του υπολογιστικού χωρίου το οποίο έχει 1.350.000 κελία. Η κεντρική αυτή διαφάνεια αφορά μία τυπική αστική χαράδρα για λόγο  $W/H$  ίσο με ένα. Η κατανομή των κελίων έχει γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα στα σημεία ενδιαφέροντος και πιο αραιή στα σημεία τα οποία είναι πιο μακριά από τη γεωμετρία.

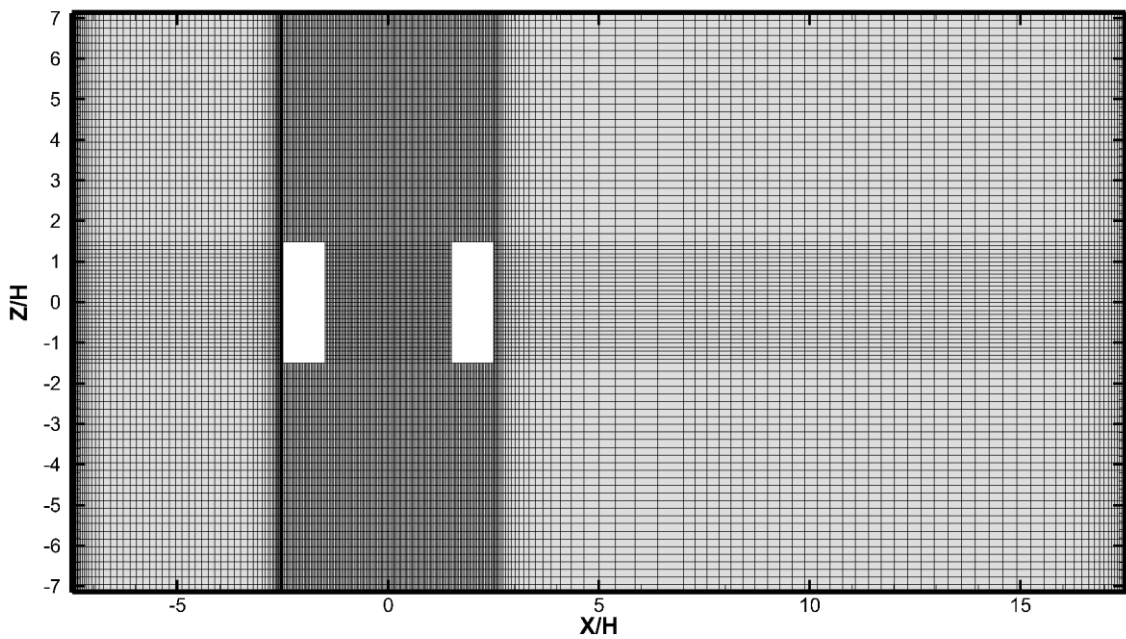


**Σχήμα 4-3 Κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για  $W/H=1$  και  $Y/H=0,5$**

Στην Σχήμα 4-3 βλέπουμε μία οριζόντια διαφάνεια του υπολογιστικού χωρίου όπως αυτό έχει διακριτοποιηθεί και παρατηρούμε ότι και στην Z διάσταση έχουμε πυκνώσει το πλέγμα πάλι σε σημεία κοντά στη γεωμετρία προκειμένου να λάβουμε όσο το δυνατό περισσότερες τιμές.

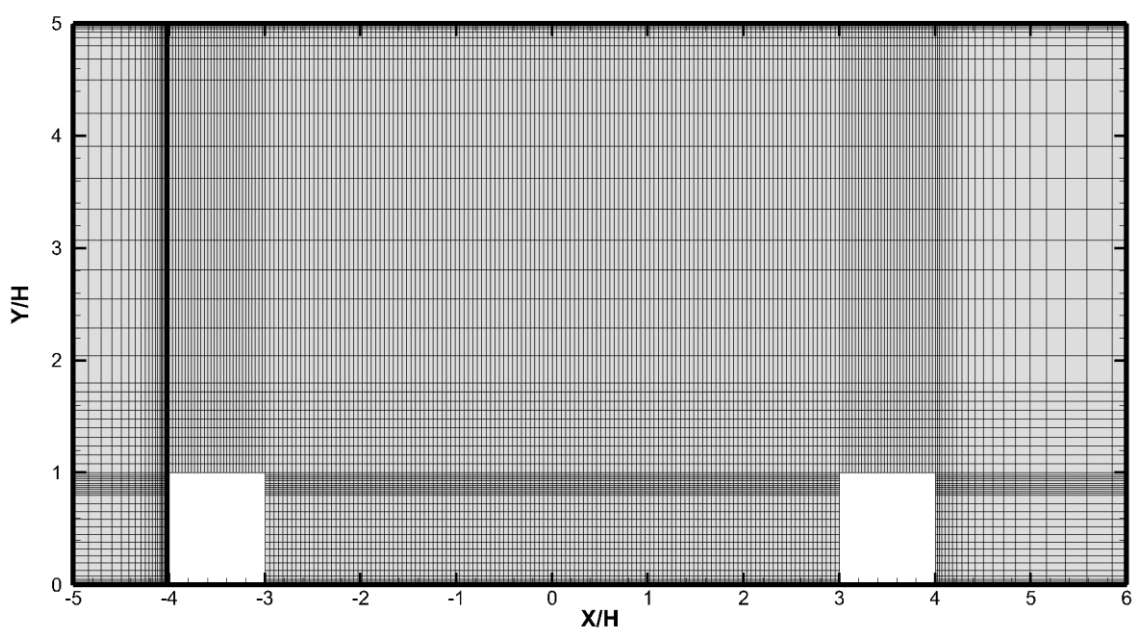


Σχήμα 4-4 Κεντρική κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για  $W/H=3$  και  $Z/H=0$

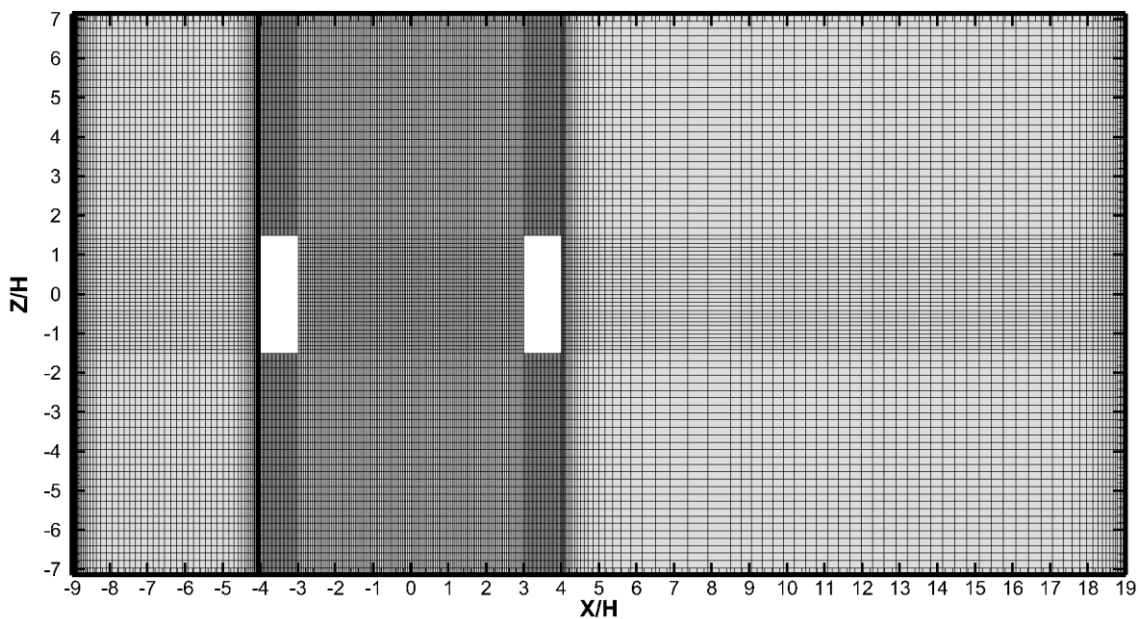


Σχήμα 4-5 Κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για  $W/H=3$  και  $Y/H=0,5$

Στην Σχήμα 4-4 και στην Σχήμα 4-5 βλέπουμε αρχικά την κεντρική κατακόρυφη διαφάνεια και μία οριζόντια διαφάνεια που δείχνουν την κατανομή του πλέγματος στο υπολογιστικό χωρίο. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου ο λόγος  $W/H$  είναι ίσος με 1 εδώ έχουμε διατηρήσει την ίδια πύκνωση στα σημεία ενδιαφέροντος. Έχουμε όμως αυξήσει τον αριθμό των κελίων προκειμένου να λάβουμε αξιόπιστα αποτελέσματα εντός της αστικής χαράδρας καθώς αυξήθηκε η απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων. Το παρών πλέγμα έχει 1,512,000 κελία δηλαδή περίπου 200,000 περισσότερα κελία.



**Σχήμα 4-6 Κεντρική κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για  $W/H=6$  1 και  $Z/H=0$**



**Σχήμα 4-7 Κατακόρυφη διαφάνεια του χωρίου για  $W/H=6$  και  $Y/H=0,5$**

Στην Σχήμα 4-6 και στην Σχήμα 4-7 βλέπουμε το υπολογιστικό χωρίο όπως αυτό έχει διακριτοποιηθεί παρατηρούμε και εδώ ότι εφόσον έχουμε αυξήσει την απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων έχει αυξηθεί και ο αριθμός των κελίων. Συγκεκριμένα στο πλέγμα αυτής της προσομοίωσης έχουμε 1,728,000 κελία δηλαδή πάλι περίπου κατά 200,000 παραπάνω από την προηγούμενη περίπτωση. Αυτή η αύξηση των κελίων έπρεπε να γίνει καθώς έπρεπε όταν αυξάνεται η απόσταση των δύο κτιρίων να εξασφαλίζουμε ότι οι λύσεις που θα λαμβάνουμε θα είναι αξιόπιστες και αντικειμενικές. Σε καμία περίπτωση η αλόγιστη αύξηση των κελίων δεν εξασφαλίζει την ποιότητα των αποτελεσμάτων αλλά και καθιστούν την προσομοίωση υπολογιστικά δυσβάσταχτη.

Οι προσομοιώσεις αυτού του είδους είναι πολύ δύσκολο να διενεργηθούν σε προσωπικό υπολογιστή και για το λόγο αυτό γίνεται χρήση υπερυπολογιστών. Μία τεχνική που εφαρμόζεται είναι αυτή της παράλληλης επεξεργασίας. Δηλαδή το υπολογιστικό χωρίο χωρίζεται σε μικρότερα χωρία και γίνεται ο επιμέρους υπολογισμός των μεγεθών ροής. Επειδή σε αυτούς τους υπερυπολογιστές λειτουργούν και άλλοι χρήστες δίνεται συγκεκριμένη υπολογιστική ισχύ στον κάθε χρήστη. Για την παρούσα διπλωματική όλα τα τρεξίματα των προσομοιώσεων έγιναν στον υπερυπολογιστή του υπουργείου παιδείας. (Link για Ari)

### 4.3 Ανεξαρτησία πλέγματος

Σε γενικές γραμμές η κατασκευή του πλέγματος αποτελεί ένα καθοριστικό παράγοντα. Και αυτό γιατί μπορεί να επηρεάσει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ποιότητα της προσομοίωσης. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω όσο περισσότερα κελία έχουμε σε ένα χωρίο τόσες περισσότερες τιμές των μεγεθών ροής θα έχουμε, αυτό κατ' επέκταση σημαίνει ότι όσο περισσότερα κελία έχουμε τόσο πιο αναλυτική θα είναι η προσομοίωση μας. Αυτό όμως δεν ισχύει ακριβώς διότι με ένα σωστό χειρισμό στην κατανομή του πλέγματος μπορούμε να επιτύχουμε εξίσου καλά αποτελέσματα με τη χρήση λιγότερων κελίων. Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα προσπαθήσουμε να δείξουμε ακριβώς αυτό.

Το σφάλμα το οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε είναι ουσιαστικά η μετάβαση από ένα πλέγμα που μπορεί να είναι αραιό σε ένα πλέγμα το οποίο να είναι πιο πυκνό. Βασιζόμενοι στην δημοσίευση των(Chatzimichailidis, Argyropoulos et al. 2019) θα κάνουμε μία ίδια προσέγγιση για σημεία τα οποία μας ενδιαφέρουν και θεωρούμε ότι είναι κρίσιμα.

Για το λόγο αυτό στην περίπτωση της τυπικής αστικής χαράδρας κάναμε το εξής στην πρώτη περίπτωση όπου ο λόγος W/H είναι ίσος με ένα δημιουργήσαμε τρία πλέγματα. Ένα αραιό πλέγμα με 918,000 κελία, ένα μεσαίο πλέγμα με 1,350,000 κελία και τέλος ένα πυκνό με 1,944,000 κελία.

Η σχέση που θα χρησιμοποιήσουμε για να υπολογίσουμε το σφάλμα είναι η εξής:

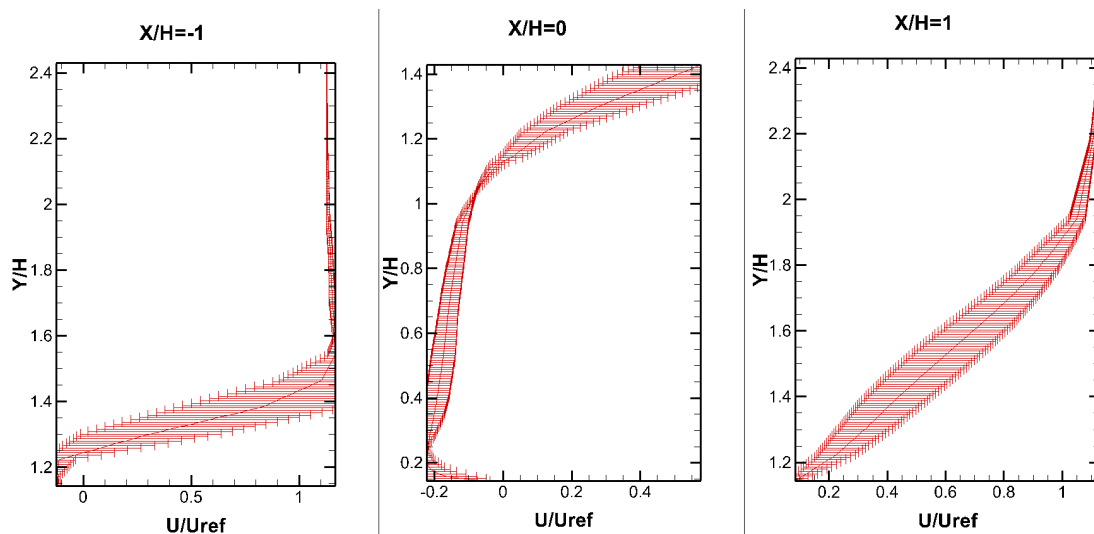
$$CGI_{fine} = Fs \cdot \frac{|e_{21}|}{r_{21}^p - 1} \quad (4-1)$$

Όπου  $F_s$  είναι ο συντελεστής ασφαλείας και λαμβάνεται ίσος με 1,25, το  $|e_{21}|$  είναι η αφαίρεση των αδιάστατων προφίλ ταχυτήτων που έχουν ληφθεί από τα εκάστοτε πλέγματα, το  $r_{21}$  είναι ο συντελεστής πύκνωσης ο οποίος υπολογίζεται ως ο λόγος των κελίων των δύο πλεγμάτων και  $p$  είναι ο βαθμός του σχήματος διακριτοποίησης που έχει χρησιμοποιηθεί.

Στο Σχήμα 4-8 βλέπουμε τα αδιάστατα προφίλ ταχυτήτων τα οποία λήφθηκαν για τις θέσεις. Η πρώτη θέση είναι στο κέντρο της οροφής του πρώτου κτιρίου, η δεύτερη στο κέντρο της αστικής χαράδρας και το τρίτο στο κέντρο της οροφής

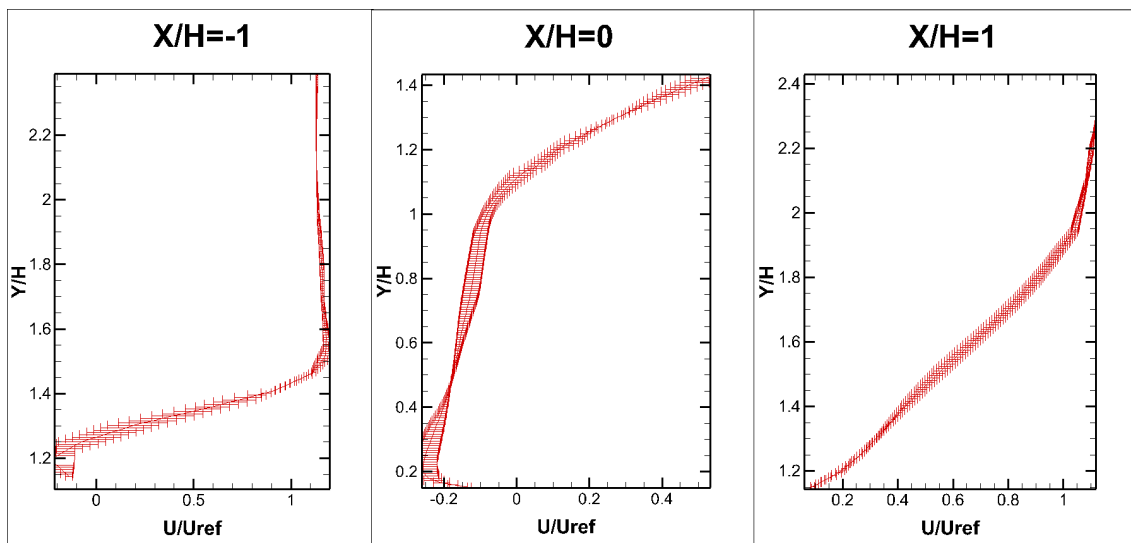


του δεύτερου κτιρίου. Οι μπάρες σφάλματος που είναι υπολογισμένες υπολογίστηκαν για το ίδιο ύψος δειγματοληψίας. Ο αριθμός των σημείων που λάβαμε είναι ο ίδιος και για τις τρεις περιπτώσεις και είναι ίσος με διακόσια σημεία. Με αυτόν τον τρόπο πλέον μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε το σφάλμα του ενός πλέγματος με το άλλο. Για την πρώτη θέση η οποία είναι πάνω από το πρώτο κτίριο βλέπουμε ένα σημαντικό σφάλμα το οποίο δικαιολογείται λόγω της μεγάλης μεταβολής της ροής καθώς βρίσκεται στην αποκόλληση του οριακού στρώματος και η έλλειψη κελίων έχει μεγάλη επιρροή καθώς η διακριτοποίηση του αραιού πλέγματος δεν ήταν αρκετή για να περιγράψει ικανοποιητικά την ροή. Στην δεύτερη θέση που είναι εντός της αστικής χαράδρας τα σφάλματα που προκύψανε ήταν μικρότερα και αυτό διότι η κατανομή του πλέγματος εντός της αστικής χαράδρας ήταν ικανοποιητική. Αν και το πλέγμα ήταν αραιό οι πυκνώσεις που είχαμε κάνει εντός της αστικής χαράδρας ήταν ικανοποιητικές για τον αριθμό των κελίων προκειμένου να μας δώσουν μία καλή απεικόνιση της ροής. Και τέλος η τρίτη θέση που είναι στη μέση του δεύτερου κτιρίου έχει και αυτή αισθητά σφάλματα καθώς και εκεί έχουμε μία έντονη περιοχή μεταβολών της ταχύτητας η οποία οφείλεται στην ανταλλαγή ενέργειας του ρευστού με την κύρια δίνη εντός της χαράδρας και μεταξύ των τοιχωμάτων της οροφής του δεύτερου κτιρίου. Και εδώ το αραιό πλέγμα δεν περιέγραψε με τον καλύτερο τρόπο την ροή καθώς τα σφάλματα είναι αισθητά για ένα σεβαστό ύψος πάνω από την οροφή μέχρι να ελαχιστοποιηθεί στα μεγαλύτερα ύψη που πλέον οι μεταβολές της ροής είναι μηδαμινές καθώς είμαστε στην αδιατάρακτη ροή. Αυτός είναι και ο λόγος που τα γραφήματα στην πρώτη και τρίτη θέση ελαχιστοποιούν το σφάλμα από ένα ύψος και μετά. Παρατηρούμε ότι το αραιό πλέγμα αν και στα κρίσιμα σημεία της ροής δημιουργεί μία απόκλιση η οποία είναι αισθητή αποτελεί δανικό για τα πρώτα αναγνωριστικά τρεξίματα προσομοιώσεων καθώς με ελάχιστους υπολογιστικούς πόρους είδαμε τα είδη της ροής που αναμένουμε στα πιο πυκνά πλέγματα χωρίς να χρειάζεται να περιμένουμε αρκετές μέρες μέχρι να λάβουμε αποτελέσματα.



**Σχήμα 4-8 Σφάλματα αδιάστατων προφίλ ταχυτήτων που προέκυψαν από τη μετάβαση αραιού πλέγματος σε μεσαίο.**

Στο Σχήμα 4-9 βλέπουμε τα σφάλματα που προέκυψαν από τη μετάβαση του μεσαίου πλέγματος σε πυκνό πλέγμα. Παρατηρούμε ότι τα σφάλματα σε αυτή τη μετάβαση είναι πολύ μικρότερα από τα προηγούμενα και αυτό είναι απολύτως λογικό, διότι είχαμε μία ανάλογη αύξηση των κελίων αλλά ήδη το μεσαίο πλέγμα είναι πολύ καλό για την περιγραφή αυτής της ροής. Στην πρώτη θέση της δειγματοληψίας βλέπουμε ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα είναι στην αρχή της δειγματοληψίας δηλαδή σε μικρή απόσταση από το τοίχωμα και αυτό είναι λογικό καθώς υπάρχει μία διαφορά στον αριθμό των κελίων. Στην δεύτερη θέση που είναι στο κέντρο της αστικής χαράδρας βλέπουμε ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα είναι στην απόσταση λίγο πάνω από το τοίχωμα στη συνέχεια μηδενίζονται λίγο κάτω από το κέντρο της αστικής χαράδρας και συνεχίζουν να αυξάνονται μέχρι και το ύψος της αστικής χαράδρας. Το μέγεθος των σφαλμάτων δεν είναι σημαντικό καθώς αν αναλογιστεί κανείς ότι το υπολογιστικό κόστος μεταξύ των δύο προσομοιώσεων είναι κατά πολύ δυσανάλογο από το μέγεθος των σφαλμάτων. Και τέλος στην τρίτη θέση δειγματοληψίας παρατηρούμε ότι τα σφάλματα είναι ελάχιστα και αυτό οφείλεται όπως αναφέραμε και πριν στο ότι η μεταβολή της ροής στο δεύτερο κτίριο δεν είναι τόσο απότομη όσο στο πρώτο κτίριο που έχουμε αποκόλληση της ροής.



**Σχήμα 4-9 Σφάλματα αδιάστατων προφίλ ταχυτήτων που προέκυψαν από τη μετάβαση μεσαίου πλέγματος σε πυκνό.**

Κλείνοντας καταλήγουμε ότι το μεσαίο πλέγμα είναι το καλύτερο καθώς και από θέμα υπολογιστικού κόστους είναι πολύ καλύτερο από το πυκνό αλλά και η διαφορά του από το αραιό είναι πολύ μικρή. Επίσης παρατηρήσαμε ότι το μέγεθος των σφαλμάτων στην μετάβαση από το μεσαίο στο πυκνό είναι αρκετά μικρό και συγκρίνοντας το με τα σφάλματα του αραιού το μεσαίο πλέγμα συμπεριφέρθηκε αρκετά καλά στη περιγραφή της ροής όχι μόνο σε μία θέση δειγματοληψίας αλλά στο σύνολο της της ροής. Για το λόγο αυτό όλες οι προσομοιώσεις που θα γίνουν θα βασιστούν στην τεχνική πύκνωσης του μεσαίου πλέγματος περιορίζοντας και τον αριθμό των κελίων κοντά σε αυτόν του μεσαίου.

#### **4.4 Αρχικές συνθήκες**

Προκειμένου να λύσουμε ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων πρέπει να ορίσουμε κάποιες αρχικές συνθήκες. Οι αρχικές συνθήκες αποτελούν ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να ορίσουμε σε προβλήματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Όμως πρέπει αυτές να είναι τέτοιες που να αντιπροσωπεύουν το πρόβλημα ροής που θέλουμε να επιλύσουμε. Στην δική μας περίπτωση έχουμε λάβει τις αρχικές συνθήκες από την αεροσήραγγα του εργαστηρίου των θερμορευστών. Αυτό το κάναμε διότι και τα μοντέλα που θα χρησιμοποιήσουμε για την πειραματική επιβεβαίωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων μας έχουν γίνει στην εργαστηριακή αεροσήραγγα.

Για να το κάνουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε αρχικά ένα ηλεκτρονικό μικρομανόμετρο καθώς και ένα σωλήνα pitot. Έτσι λοιπόν λάβαμε τη κατανομή της ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας σε απόσταση πέντε υψών κτιρίου από την είσοδο. Και με τη χρήση θερμικού ανεμόμετρου μετρήσαμε τις διακυμάνσεις της ταχύτητας προκειμένου να λάβουμε την κινητική ενέργεια της τύρβης  $K$  και τον ρυθμό σκέδασης ανά μονάδα όγκου  $\epsilon$ . Έχοντας λοιπόν αυτά τα μεγέθη από την είσοδο της αεροσήραγγας μπορούμε να ορίσουμε πλήρως τις αρχικές συνθήκες και να τις εισάγουμε στην προσομοίωση.

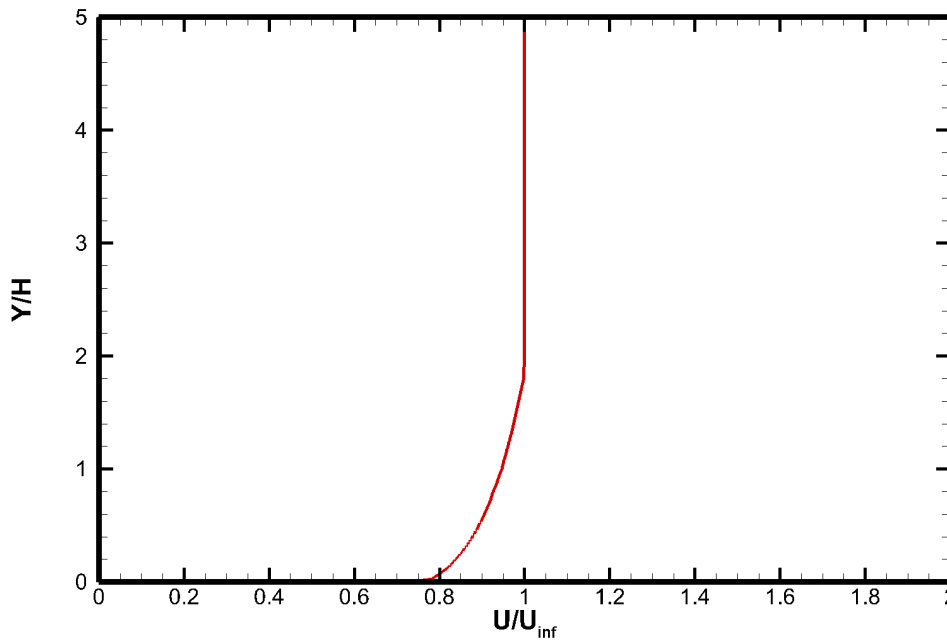
#### 4.4.1 Προφίλ ταχύτητας εισόδου

Στην είσοδο της υπολογιστική μας προσομοίωσης όσο αφορά την ταχύτητα έχουμε εισάγει ένα παραβολικό προφίλ εισόδου μέχρι τα δύο ύψη και από εκεί και πάνω μία σταθερή τιμή της αδιατάρακτης ροής.

Στο Σχήμα 4-10 βλέπουμε το αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας έτσι όπως αυτό προέκυψε από την είσοδο της αεροσήραγγας. Η σχέση που δίνει το παραβολικό προφίλ για το δύο πρώτα ύψη είναι η εξής:

$$U = \frac{y}{0.1}^{0.1} \cdot 13.16 \quad (4-2)$$

Και από τα δύο ύψη και πέρα λαμβάνει τη σταθερή τιμή 13,6103 m/s. Το προφίλ της ταχύτητας λαμβάνει την μορφή αυτή προκειμένου να προσομοιώσει όσο το δυνατό καλύτερα το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.



**Σχήμα 4-10** Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης

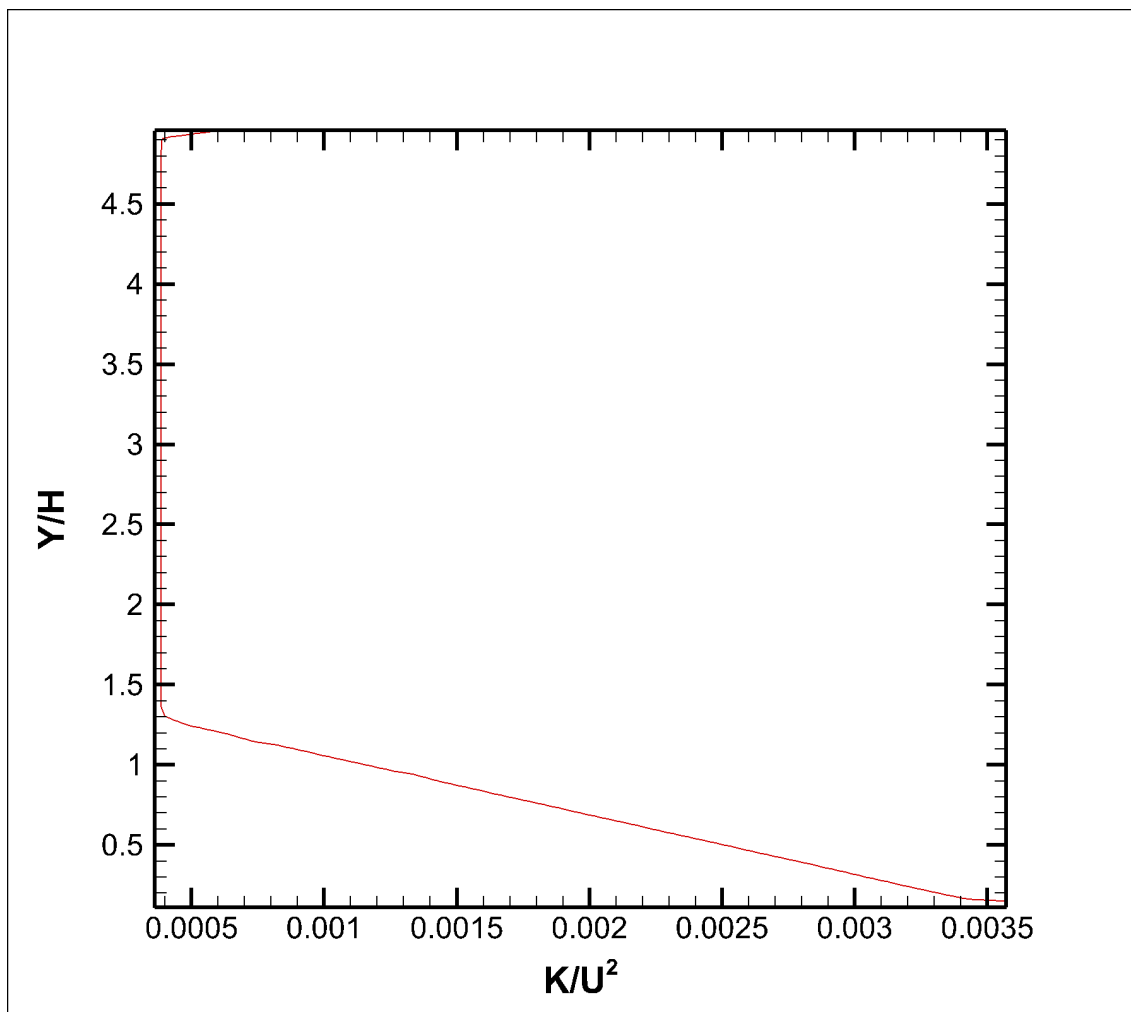
#### 4.4.2 Προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο

Προκειμένου να μπορέσουμε να τρέξουμε τις προσομοιώσεις μας έπρεπε να ορίσουμε την τυρβώδη κινητική ενέργεια στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήσαμε θερμικό ανεμόμετρο καθώς έπρεπε να δούμε τις διακυμάνσεις της ταχύτητας στην είσοδο της αεροσήραγγας.

Στο Σχήμα 4-11 δίνεται η κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας η οποία έχει αδιαστατοποιηθεί με το τετράγωνο της ταχύτητας της αδιατάραχτης ροής. Ο τύπος από τον οποίο δίνεται η κατανομή είναι ο εξής:

$$k = \frac{y^{0.1}}{0.1} \cdot 0.714 \quad (4-3)$$

Μέχρι και δύο εκατοστά πάνω από το ύψος των κτιρίων από εκεί και μετά λαμβάνει την τιμή  $0,0714 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

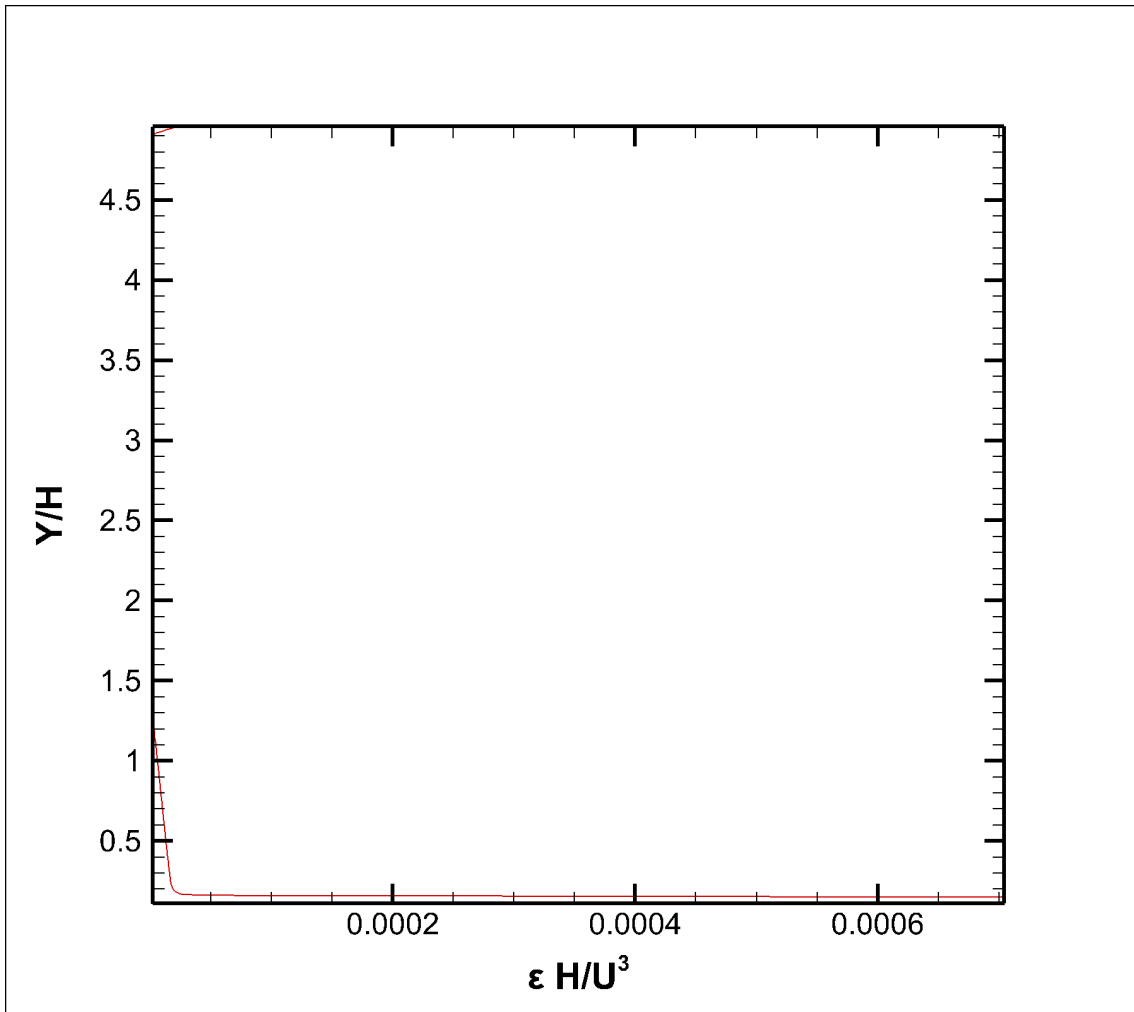


**Σχήμα 4-11 Αδιάστατο προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης**

#### **4.4.3 Προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου**

Κλείνοντας σαν τελευταία παράμετρο θα πρέπει να ορίσουμε τον ρυθμό σκέδασης ανά μονάδα όγκου στην είσοδο. Θα αδιαστατοποιήσουμε το μέγεθος στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.

Στο Σχήμα 4-12 παρατηρούμε το προφίλ του ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου. Ουσιαστικά πρόκειται για μία εναλλαγή μεταξύ δύο τιμών χωρίς να γίνεται η χρήση κάποιας εξίσωσης.



Σχήμα 4-12 Αδιάστατο προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου στην είσοδο της υπολογιστικής προσομοίωσης

## 5 Ανάλυση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις τις οποίες κάναμε. Θα ορίσουμε όλα τα απαραίτητα μεγέθη που θα χρειαστούν προκειμένου να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα και να επεξηγήσουμε όσο το δυνατό καλύτερα.

Θα δείξουμε τον απαιτούμενο αριθμό σχημάτων προκειμένου να επεξηγήσουμε πλήρως τα φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα στις ροές εντός τυπικών αστικών χαραδρών. Και πως η μεταβολή του μήκος της αστικής χαράδρας επηρεάζει το πεδίο ροής.

### 5.1 Ισοϋψείς γραφήματα οριζόντιων επιπέδων

Σε αυτό το σημείο της ανάλυσης θα παρουσιάσουμε τα ισοϋψή σχήματα των οριζοντίων επιπέδων για τις τρεις περιπτώσεις αστικής χαράδρας που παρουσιάσαμε παραπάνω. Τα σχήματα αυτά αποτελούν συσχέτιση των αδιάστατων πεδίων ταχύτητας που αναλύσαμε, επίσης θα έχουν και τις γραμμές ροής προκειμένου να μπορούμε να δικαιολογήσουμε τα ανωτέρω.

Στο Σχήμα 5-1 βλέπουμε το ισοϋψές γράφημα και τις γραμμές ροής του πεδίου. Παρατηρούμε ότι όντως εμπρός του πρώτου κτιρίου υπάρχει μία ανακυκλοφορία όπως είδαμε και στο αδιάστατο πεδίο ροής. Στην οροφή του πρώτου κτιρίου παρατηρούμε μία ανακυκλοφορία, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την αποκόλληση της ροής από την οροφή του πρώτου κτιρίου. Εντός της αστικής χαράδρας παρατηρούμε μία δίνη η οποία βρίσκεται στο πάνω μέρος του δεύτερου κτιρίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτή η δίνη έχει τη μορφή ενός πετάλου κατά το μήκος της αστικής χαράδρας. Στη συνέχεια στην οροφή του δεύτερου κτιρίου παρατηρούμε την προσκόλληση της ροής ξανά πάνω σε αυτό. Και τέλος στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου βλέπουμε τη δημιουργία μίας μεγάλης δίνης η οποία ήταν αναμενόμενη καθώς και στα αδιάστατα πεδία ροής είχαμε παρατηρήσει μία μεγάλη περιοχή μεταβολής των αδιάστατων ταχυτήτων.

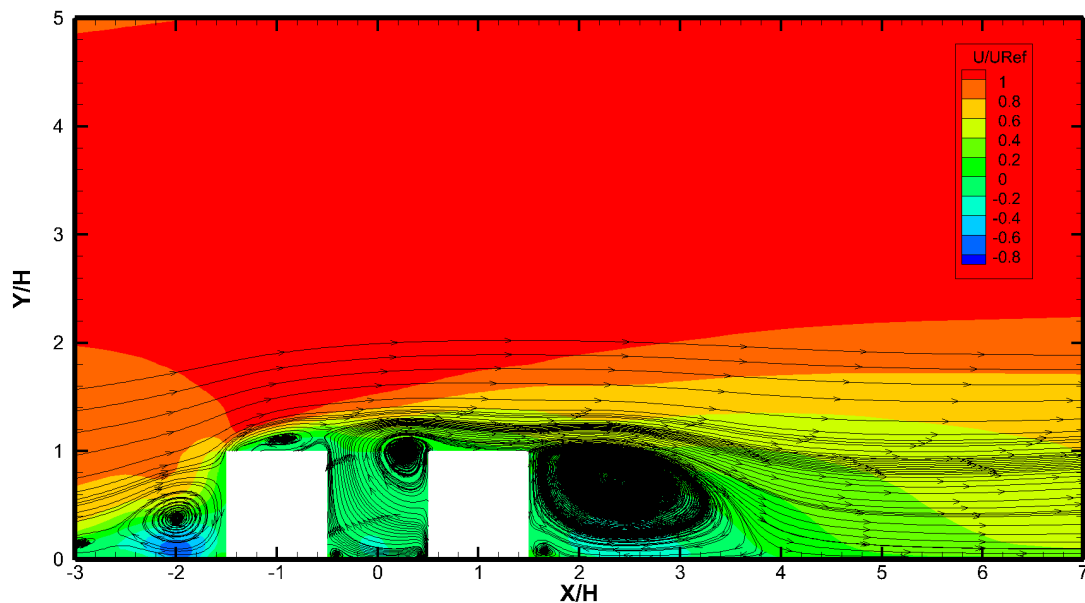
Στον Πίνακα 5-1 βλέπουμε όλα τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των ανακυκλοφοριών που φαίνονται στο Σχήμα 5-1. Παρατηρώντας τα μήκη των



ανακυκλοφοριών συναρτήσει του ύψους των κτιρίων βλέπουμε ότι τα μήκη των ανακυκλοφοριών μεγαλώνουν καθώς η ροή εξελίσσεται στο πεδίο ροής. Αυτό οφείλεται τόσο στη μορφολογία της αστικής χαράδρας αλλά και στην ενέργεια που ανταλλάσσει η αδιατάρακτη ροή με αυτές τις ανακυκλοφορίες που σχηματίζονται.

Ανακυκλοφορία	Συντεταγμένη Χ	Συντεταγμένη Υ	Μήκος σε σχέση με το ύψος του κτιρίου
Εμπρός του πρώτου κτιρίου	-0,13 m	0,026m	0,14
Οροφή πρώτου κτιρίου	-0,06 m	0,077 m	0,35
Εντός αστικής χαράδρας	0,018 m	0,069 m	0,38
Πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου	0,1649 m	0,051 m	1,62

**Πίνακας 5-1 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών για λόγο  $W/H=1$**



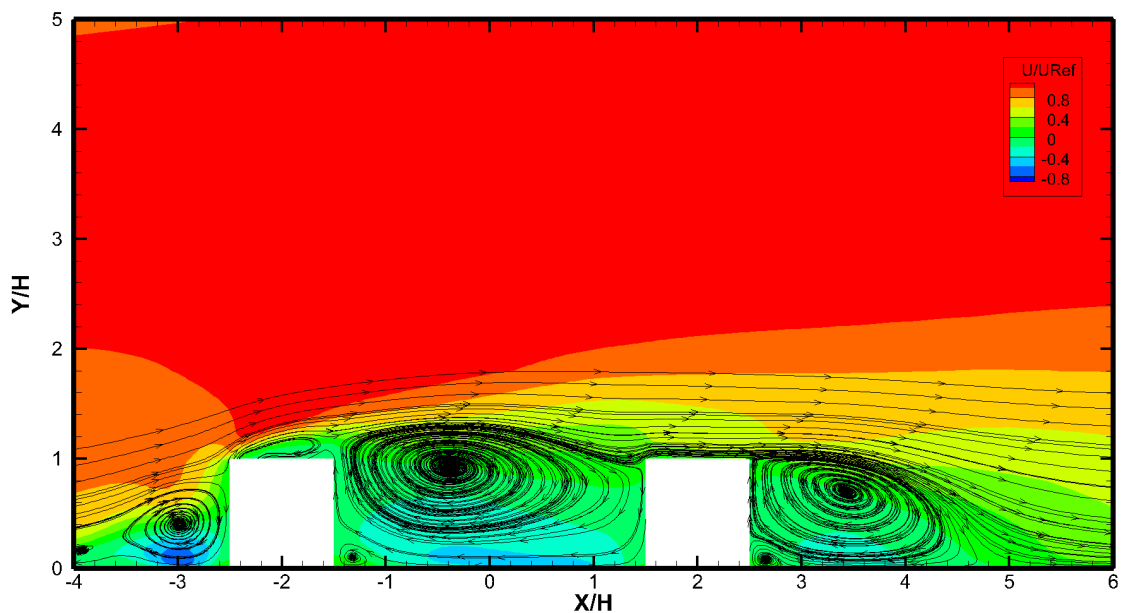
**Σχήμα 5-1 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο  $W/H=1$  και για  $Z/H=0$**

Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζεται το ισοϋψής γράφημα για τη δεύτερη περίπτωση την οποία εξετάζουμε. Σε αυτή την περίπτωση το μήκος της αστικής χαράδρας είναι τρία ύψη κτιρίου ( $W/H=3$ ). Στην πλειοψηφία των δινών δεν αλλάζει κάτι σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Εκεί που παρατηρούμε μεγάλη διαφορά είναι η δίνη εντός της αστικής χαράδρας η οποία σαφώς είναι μεγαλύτερη από την πρώτη περίπτωση και αυτό οφείλεται στο διαθέσιμο χώρο τον οποίο μπορεί να καταλάβει καθώς δεν υπάρχει κανένας υλικό περιορισμός. Πάρα ταύτα βλέπουμε ότι σχηματίζει μία περιοχή μικρής ανεξαρτησία η οποία όμως είναι αρκετά μικρή για τον χώρο που απομένει και εμφανίζεται σαν ένα πλάτεμα της κύριας δίνης αλλά δεν αποτελεί και κομμάτι της.

Στον Πίνακα 5-2 βλέπουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη όλων των ανακυκλοφοριών της δεύτερης περίπτωσης που εξετάσαμε και όπως ήταν λογικό η δίνη εντός της αστικής χαράδρας είναι σαφώς μεγαλύτερη. Παρατηρούμε ότι η ανακυκλοφορία έχει χαρακτηριστικό μήκος 2,32 άρα όπως αναφέραμε και πριν δεν καταλαμβάνει όλο το μήκος της αστικής χαράδρας.

Ανακυκλοφορία	Συντεταγμένη Χ	Συντεταγμένη Υ	Μήκος σε σχέση με το ύψος του κτιρίου
Εμπρός του πρώτου κτιρίου	-0.21 m	0,02m	1
Οροφή πρώτου κτιρίου	-0,14 m	0,078 m	0,45
Εντός αστικής χαράδρας	-0,047 m	0,065 m	2,32
Πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου	0,23 m	0,047 m	1,85

**Πίνακας 5-2 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών για λόγο  $W/H=3$**



**Σχήμα 5-2** Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο  $W/H=3$  και για  $Z/H=0$

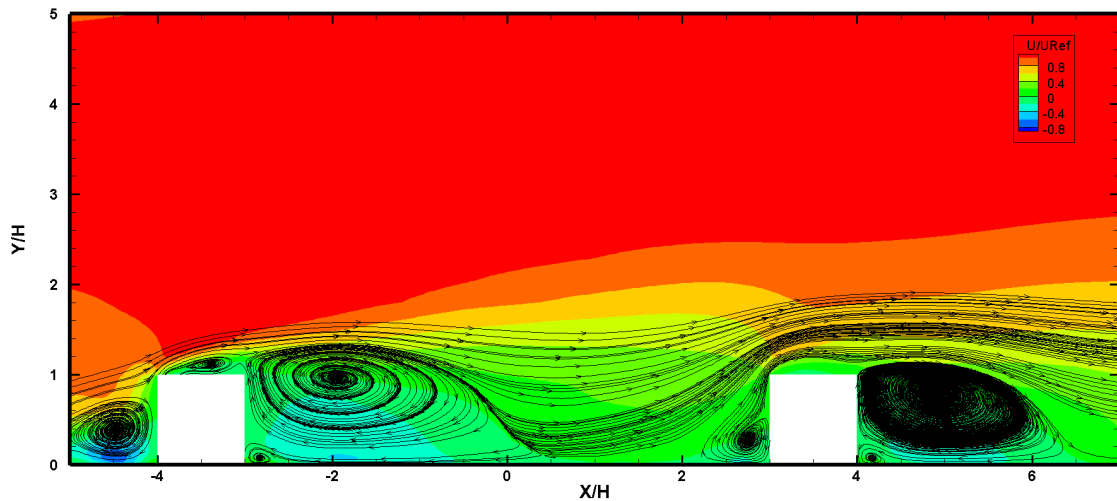
Στο Σχήμα 5-3 βλέπουμε μία τυπική αστική χαράδρα της οποίας το μήκος της είναι πλέον έξι ύψη κτιρίου. Παρατηρούμε ότι η κύρια δίνη εντός της αστικής χαράδρας είναι εξίσου μεγάλη, αλλά πλέον το μήκος της αστικής είναι αρκετά μεγάλο ώστε να υπάρχει μία ανεξαρτησία της ροής εντός αυτής. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι πλέον είναι σαν το πεδίο ροής να επηρεάζεται από το κάθε κτίριο ξεχωριστά. Οι άλλες δίνες βλέπουμε ότι δεν διαφέρουν σε καμία από τις άλλες περιπτώσεις και αυτό διότι δεν επηρεάζονται από το μήκος της αστικής χαράδρας αλλά από την μορφολογία της γεωμετρίας.

Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζονται και για αυτή την περίπτωση τα βασικά μεγέθη των δινών. Παρατηρούμε ότι για αυτή την περίπτωση η δίνη εντός της αστικής χαράδρας είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση αλλά δεν καταλαμβάνει όλο το μήκος της αστικής χαράδρας. Με το υπόλοιπο μισό μήκος ουσιαστικά να ανεξαρτητοποιεί την ροή και να την κάνει να συμπεριφέρεται σαν να είναι δύο κτίρια ξεχωριστά μεταξύ του. Τέλος βλέπουμε ότι η δίνη στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου να αυξάνεται ανάλογα με το μήκος της αστικής χαράδρας. Αυτό οφείλεται και στην μορφολογία του εκάστοτε πεδίου ροής καθώς η αποστάσεις στον X άξονα αυξάνουν αλλά και στην ορμή που έχει πλέον η

αδιατάρακτη ροή καθώς αναγκάζεται να διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις εντός τις αστικής χαράδρας.

Ανακυκλοφορία	Συντεταγμένη Χ	Συντεταγμένη Υ	Μήκος σε σχέση με το ύψος του κτιρίου
Εμπρός του πρώτου κτιρίου	-0,31 m	0,026m	0,85
Οροφή πρώτου κτιρίου	-0,23 m	0,078 m	0,42
Εντός αστικής χαράδρας	-0,13 m	0,067 m	3,1
Πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου	0,34 m	0,054 m	2

**Πίνακας 5-3 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών για λόγο  $W/H=6$**

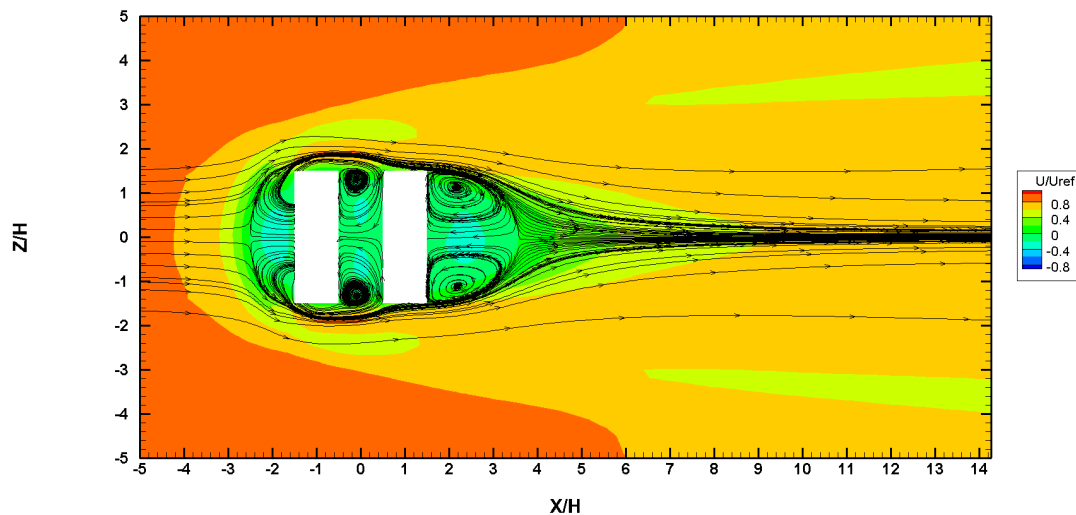


**Σχήμα 5-3 Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο  $W/H=6$  και για  $Z/H=0$**

## 5.2 Ισοϋψείς γραφήματα κατακόρυφων επιπέδων

Στο σημείο αυτό θα δείξουμε τα ισοϋψείς γραφήματα των κατακόρυφων επιπέδων των αδιάστατων πεδίων ροής. Σκοπός μας είναι να εξηγήσουμε τη μορφολογία ορισμένων δινών που είδαμε πριν.

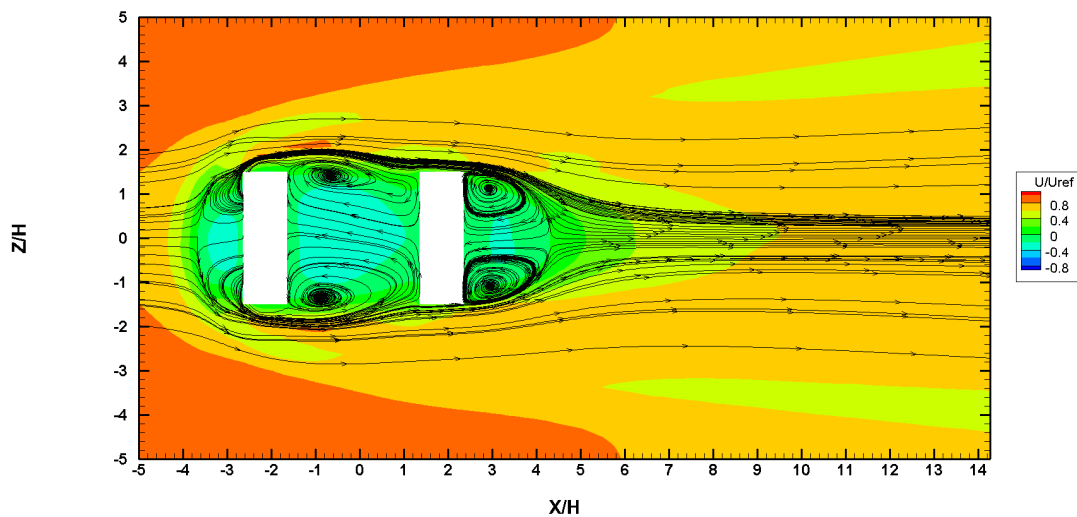
Στο Σχήμα 5-4 βλέπουμε για ένα κατακόρυφο επίπεδο το αδιάστατο πεδίο ταχύτητας όπως αυτό έχει υπολογιστεί για μία τυπική αστική χαράδρα με μήκος ίσο όσο το ύψος ενός κτιρίου. Αρχικά παρατηρούμε δύο δίνες εντός της αστικής χαράδρας οι οποίες είναι στα άκρα της. Αυτές οι δίνες δημιουργούνται λόγω αποκόλληση ροής που δημιουργείται στα πλαϊνά τοιχώματα του πρώτου κτιρίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κεντρική δίνη να συμπιέζεται στον χώρο εντός της αστικής χαράδρας και για αυτό το λόγο στο Σχήμα 5-1 είδαμε τη δίνη εντός της χαράδρας μετατοπισμένη προς τα επάνω. Επίσης βλέπουμε και δύο δίνες στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου οι οποίες είναι μεγαλύτερες σαφώς διότι δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στον χώρο τον οποίο καταλαμβάνουν. Επίσης παρατηρούμε ότι το μήκος της ανακυκλοφορίας που δείξαμε στον Πίνακα 5-1 σχετίζεται με το μέγεθος αυτών των δύο ανακυκλοφοριών καθώς όπως βλέπουμε από τις γραμμές ροής οριοθετούν το μέγεθος της.



**Σχήμα 5-4** Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο  $W/H=1$  και για  $Y/H=0,5$

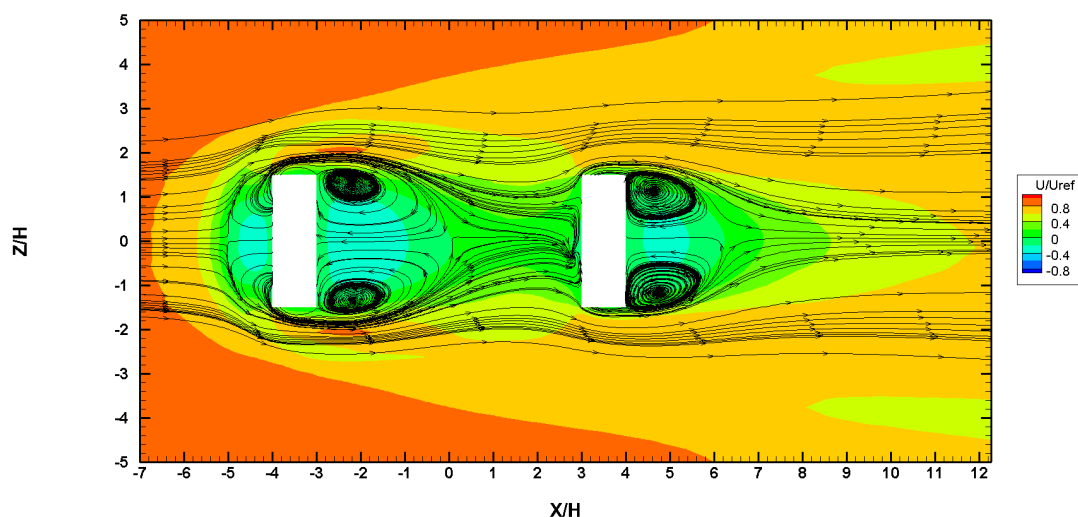
Στο Σχήμα 5-5 βλέπουμε το ισοϋψές γράφημα μία τυπική αστική χαράδρα της οποίας το μήκος είναι ίσο με τρία ύψη κτιρίου. Και εδώ παρατηρούμε δύο

ανακυκλοφορίες εντός αυτής, οι οποίες σχηματίζονται για τον ίδιο λόγο με την προηγούμενη περίπτωση. Αλλά με μία πιο προσεκτική ματιά βλέπουμε σαν να υπάρχει μία διαταραχή η οποία οφείλεται κυρίως στο μήκος της αστικής χαράδρας. Καθώς αυτό δεν είναι αρκετά μεγάλο προκειμένου να μην τις επηρεάζει αλλά και δεν είναι αρκετά μικρό ώστε να τις περιορίζει. Επίσης βλέπουμε και άλλες δύο δίνες στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου όπως και πριν φαίνεται σαν αυτές να οριοθετούν την πίσω ανακυκλοφορία. Επίσης παρατηρήσαμε στον Πίνακα 5-2 ότι η ανακυκλοφορία είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στο μέγεθος αυτών των δύο ανακυκλοφοριών.



**Σχήμα 5-5** Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο  $W/H=3$  και για  $Y/H=0,5$

Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται το ισοϋψές γράφημα των αδιάστατων ταχυτήτων για τη περίπτωση όπου το μήκος της αστικής χαράδρας είναι έξι ύψη κτιρίου. Και εδώ παρατηρούμε δύο δίνες που δημιουργούνται εντός της αστικής χαράδρας, αλλά πλέον είναι πιο ξεκάθαρο ότι οι δίνες αυτές έχουν πλέον όλο το φυσικό χώρο να αναπτυχθούν αβίαστα. Πλέον υπάρχει ξεκάθαρα μία ανεξαρτησία της ροής μεταξύ των δύο κτιρίων. Κλείνοντας και εδώ βλέπουμε ότι στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου υπάρχουν δύο ανακυκλοφορίες οι οποίες φαίνεται να επηρεάζουν το μήκος της δίνης στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου.

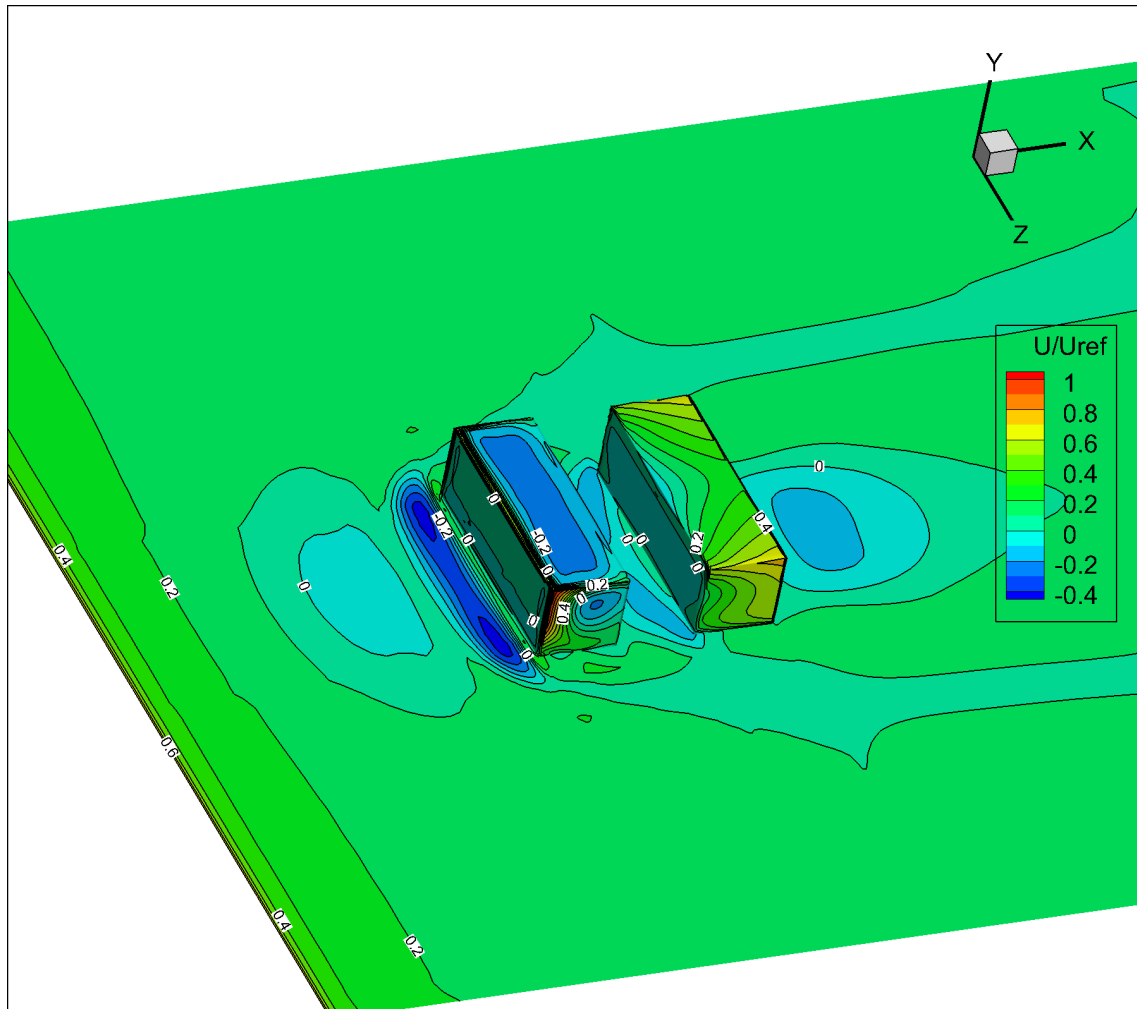


**Σχήμα 5-6** Ισοϋψής γράφημα αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μήκος αστικής χαράδρας με λόγο  $W/H=6$  και για  $Y/H=0,5$

### 5.3 Σχήματα αδιάστατων ταχυτήτων ροής

Στο Σχήμα 5-7 βλέπουμε το αδιάστατο πεδίο ροής για μία τυπική αστική χαράδρα με μήκος όσο το ύψος των κτιρίων. Αρχικά παρατηρούμε ένα συμμετρικό πεδίο ροής κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της γεωμετρικής συμμετρίας. Στην συνέχεια υπάρχει μία έντονη περιοχή εμπρός του πρώτου κτιρίου. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανακυκλοφορίας που δημιουργείται στο σημείο εκείνο. Μία άλλη έντονη περιοχή είναι η οροφή του πρώτου κτιρίου, και αυτό λόγω της αποκόλλησης της ροής σε εκείνο το σημείο που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μίας ανακυκλοφορίας. Εντός της αστικής χαράδρας παρατηρούμε μία εξίσου έντονη περιοχή αρκετών διακυμάνσεων και αυτό γίνεται λόγω της ύπαρξης μίας σπειροειδούς δίνης που δημιουργείται εντός αυτής. Συνεχίζοντας στην οροφή του δεύτερου κτιρίου παρατηρούμε μία εξομάλυνση της ροής η οποία οφείλεται στην ενέργεια που έχει ανταλλάξει το ρευστό με την δίνη εντός της αστικής χαράδρας. Και τέλος στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου παρατηρούμε μία περιοχή αρνητικής αδιάστατης ταχύτητας η οποία αντιπροσωπεύει την ανακυκλοφορία που υπάρχει στο σημείο αυτό. Η ανακυκλοφορία αυτή είναι η μεγαλύτερη του πεδίου ροής αλλά δεν είναι η πιο έντονη από πλευράς ταχυτήτων καθώς πλέον ήδη το ρευστό έχει ανταλλάξει αρκετή ενέργεια με την

ανακυκλοφορία που υπάρχει μέσα στην αστική χαράδρα και στην οροφή του πρώτου κτιρίου.

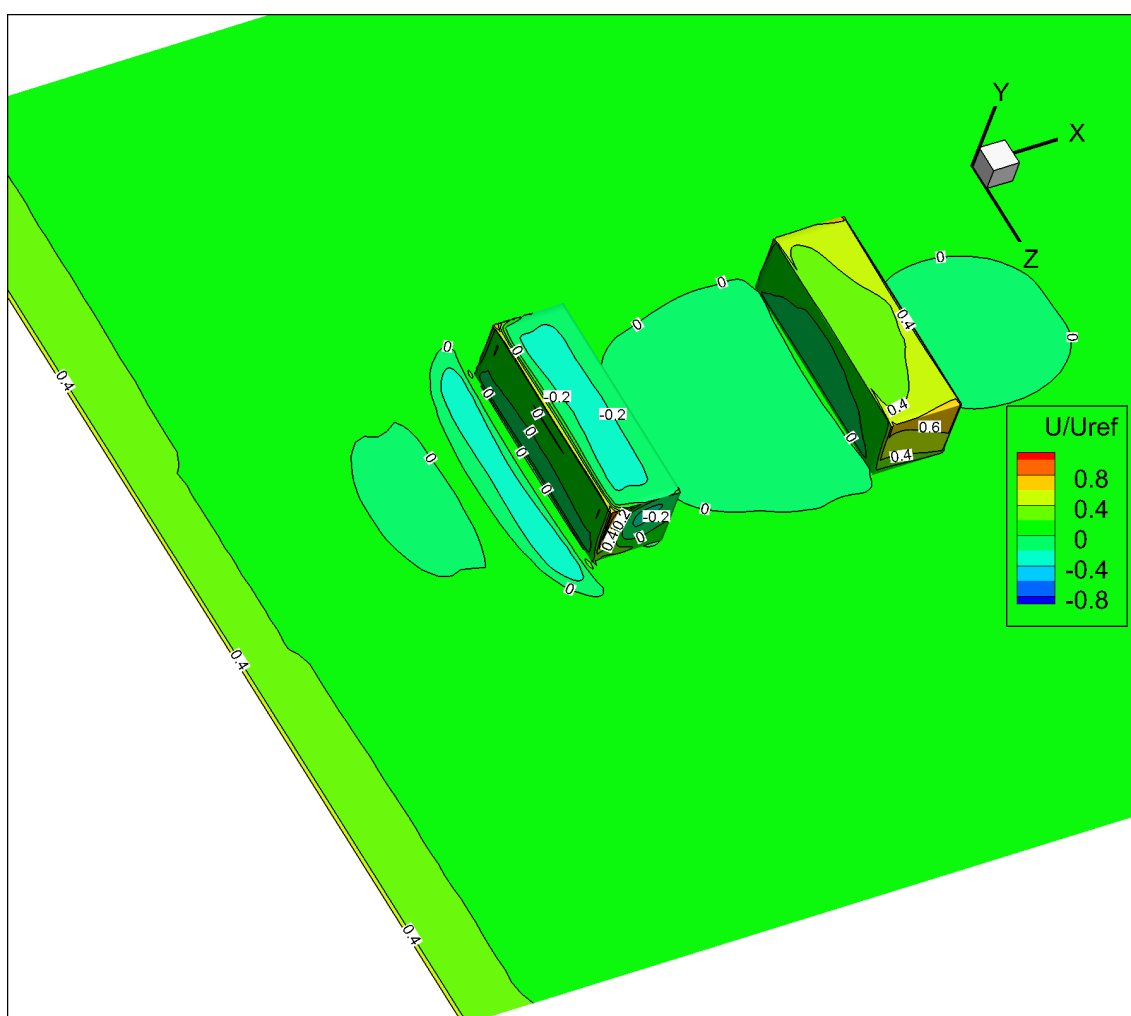


**Σχήμα 5-7 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος  $W/H=1$**

Στο Σχήμα 5-8 παρουσιάζεται το αδιάστατο πεδίο ροής μίας αστικής χαράδρας η οποία πλέον έχει μήκος  $W/H$  ίσο με 3. Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου βλέπουμε ότι δημιουργεί ένα πιο ομαλό πεδίο ροής από θέμα έντονων μεταβολών των ταχυτήτων. Αρχικά γίνεται αντιληπτό ότι η ροή εμπρός του πρώτου κτιρίου δεν μεταβάλλεται. Το ίδιο ισχύει και για την οροφή του πρώτου κτιρίου όπου και εκεί βλέπουμε ότι το μέγεθος της αδιάστατης ταχύτητας είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Οι μεταβολές στο πεδίο ροής εμφανίζονται εντός της αστικής χαράδρας όπου ουσιαστικά βλέπουμε μία κεντρική δίνη η οποία διαφέρει αρκετά από την προηγούμενη περίπτωση τόσο σε ένταση ταχυτήτων



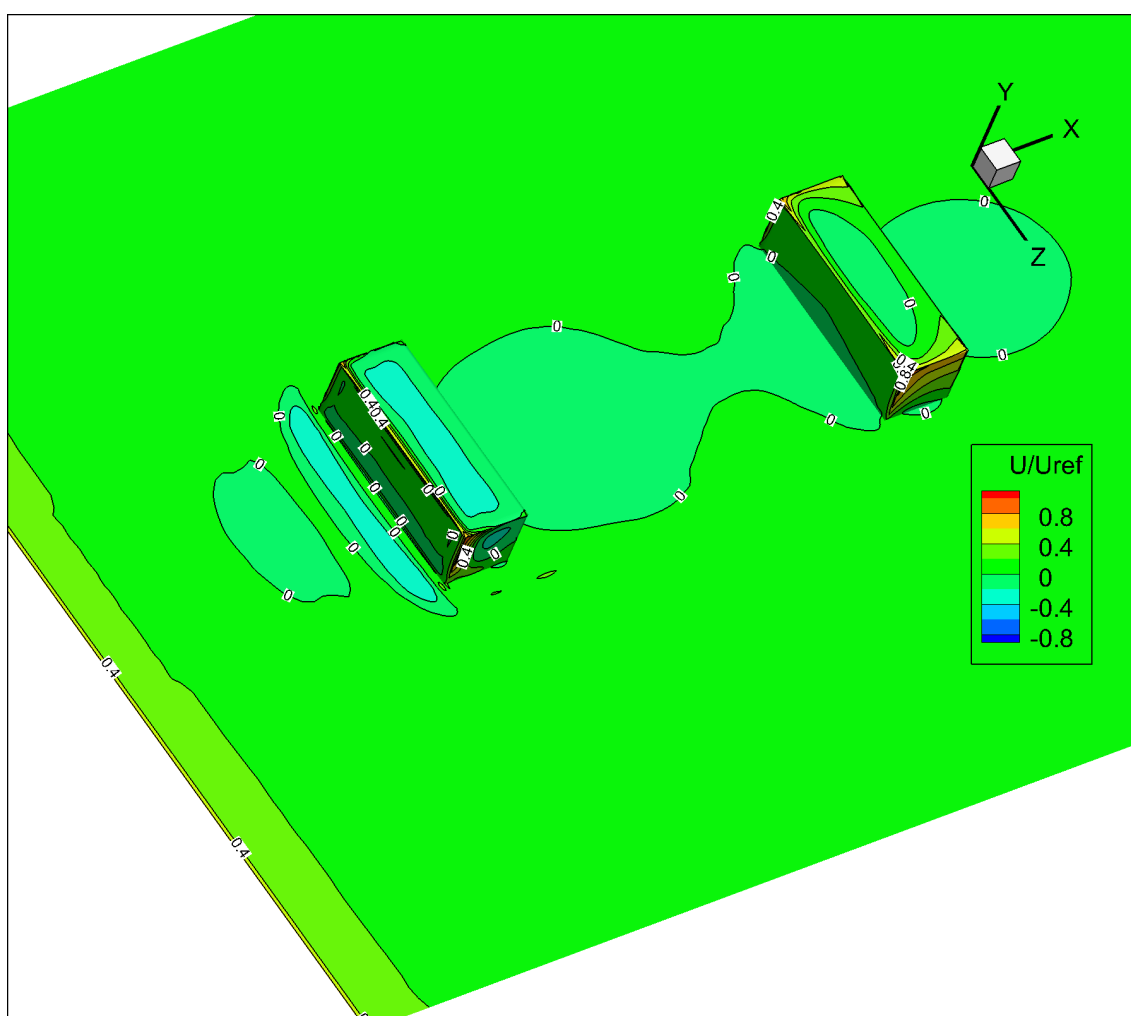
αλλά και μορφολογίας. Καθώς πρόκειται για μία ενιαία ανακυκλοφορία όπου καθώς αναπτύσσεται λαμβάνει μεγαλύτερο πλάτος. Αυτό οφείλεται στις πλαϊνές ανακυκλοφορίες που δημιουργούνται στα πλάγια του πρώτου κτιρίου καθώς όμως αυξάνεται το μήκος εξέτασης αυτές γίνονται πιο ασθενείς και επιτρέπουν στην κεντρική δίνη εντός της αστικής χαράδρας να αναπτυχθεί και στο πλάτος. Στην οροφή του δεύτερου κτιρίου βλέπουμε ένα πιο ήρεμο πεδίο σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Και τέλος η ανακυκλοφορία η οποία σχηματίζεται στο πίσω μέρος του κτιρίου έχει σαφώς και αυτή μικρότερη ένταση αλλά η μορφολογία της δεν αλλάζει σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.



**Σχήμα 5-8 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος  $W/H=3$**

Στο Σχήμα 5-9 παρατηρούμε ότι πλέον έχουμε μεταβάλει το μήκος της αστικής χαράδρας σε έξι ύψη κτιρίου. Ξεκινώντας την ανάλυση και σε αυτή την

περίπτωση βλέπουμε ότι η ροή δεν μεταβάλλεται εμπρός από το πρώτο κτίριο αλλά ούτε και στην οροφή του. Η δίνη εντός της αστικής χαράδρας πλέον έχει αλλάξει μορφολογία, βλέπουμε ότι πλέον ουσιαστικά η ροή ανεξαρτητοποιείται. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την στένωση που βλέπουμε στην κεντρική δίνη. Αυτό σημαίνει ότι ουσιαστικά μελετάμε πλέον τα δύο κτίρια σαν ξεχωριστά. Βέβαια η τιμή των αδιάστατων ταχυτήτων δεν διαφέρει από την περίπτωση όπου το μήκος της αστικής χαράδρας είναι ίσο με τρία ύψη κτιρίου. Τέλος παρατηρούμε ότι στην οροφή του δεύτερου κτιρίου έχουμε την δημιουργία μία ανακυκλοφορία η οποία δεν συμβαίνει στις άλλες δύο περιπτώσεις.

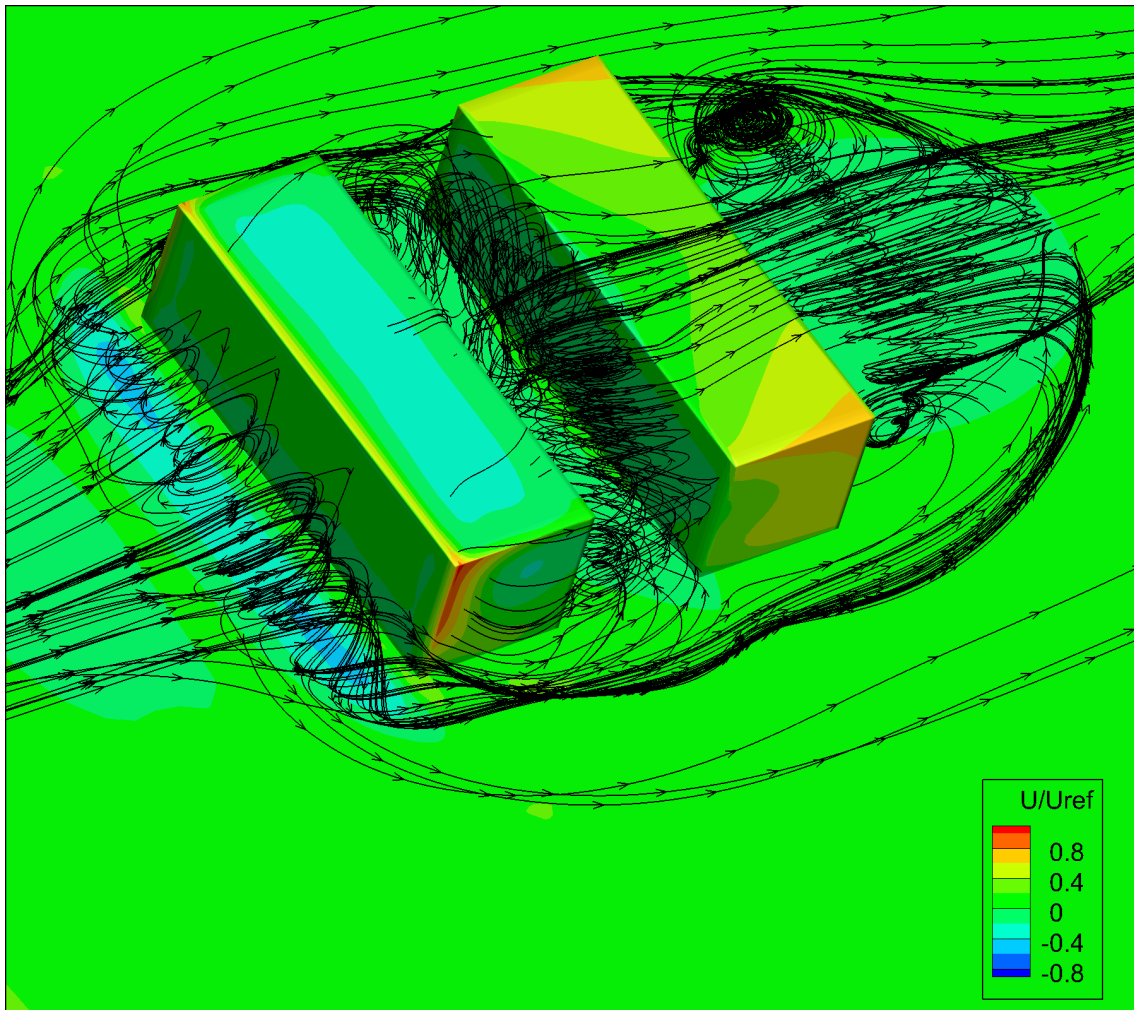


Σχήμα 5-9 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος  $W/H=6$

## 5.4 Τρισδιάστατα ισοϋψείς γραφήματα με γραμμές ροής

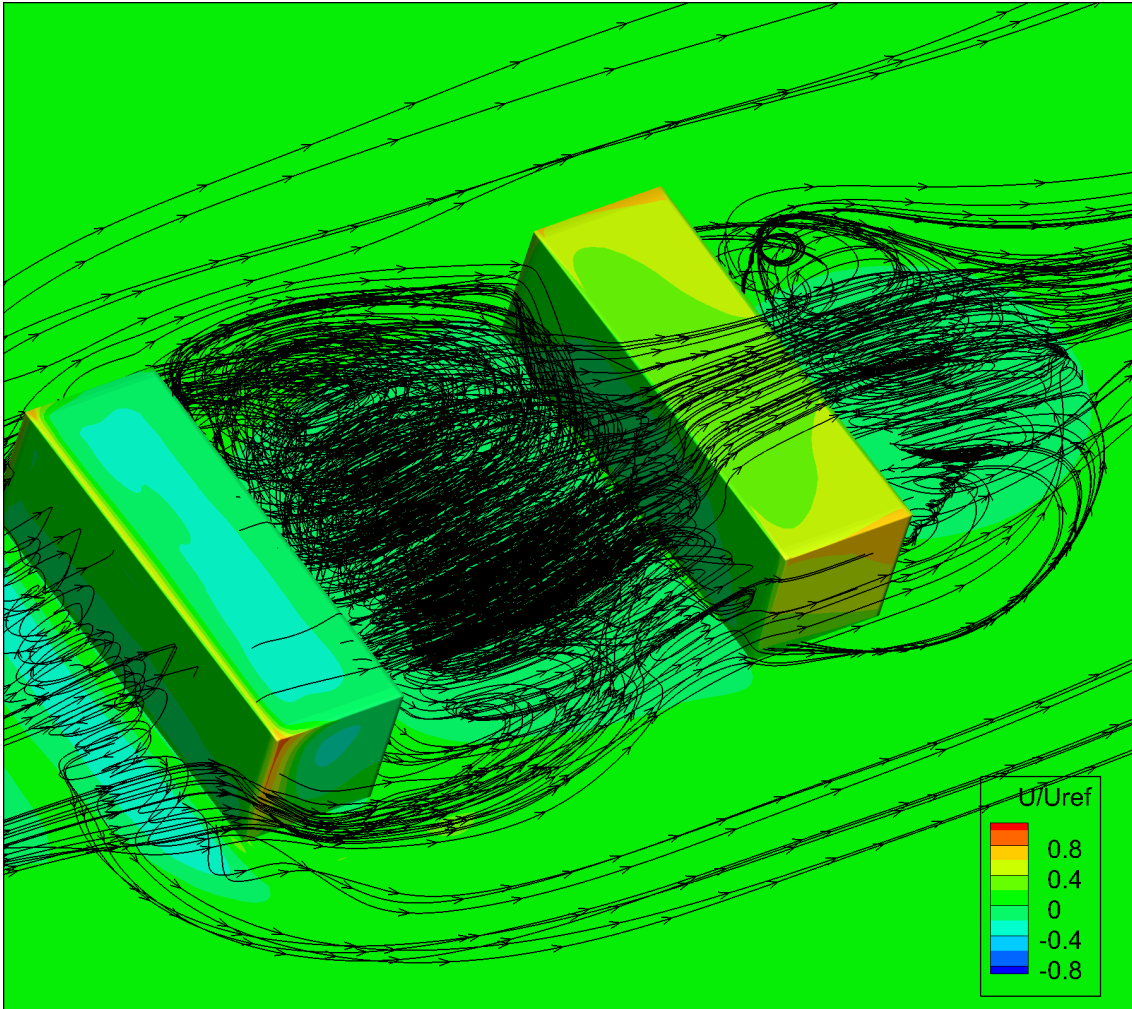
Κλείνοντας το με τα ισοϋψή γραφήματα θα κάνουμε την ανάλυση πλέον όσων είδαμε παραπάνω. Θα προσπαθήσουμε με τη βοήθεια των γραμμών ροής αλλά αυτή τη φορά στο τρισδιάστατο επίπεδο ώστε δείξουμε την μορφολογία των δινών.

Στο Σχήμα 5-10 βλέπουμε το τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα και τις γραμμές ροής όπως αυτές υπολογίστηκαν. Ξεκινώντας από το μπροστινό μέρος του πρώτου κτιρίου βλέπουμε μία ανακυκλοφορία η οποία συμφωνεί πλήρως με το Σχήμα 5-1. Εντός της αστικής χαράδρας βλέπουμε μία σπειροειδή δίνη η οποία λόγω των δύο κάθετων δινών που δημιουργούνται από τα πλαϊνά τοιχώματα του πρώτου κτιρίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να πιέζει την οριζόντια δίνη εντός της αστικής χαράδρας και να την μετατοπίζει προς τα πάνω στο κέντρο της αστικής χαράδρας. Για το λόγο αυτό στο Σχήμα 5-1 ενώ περιμέναμε να δούμε μία κεντρική δίνη εντός της αστικής χαράδρας την είδαμε μετατοπισμένη προς τα επάνω. Στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου παρατηρούμε δύο κάθετες δίνες οι οποίες προκαλούνται από τα πλαϊνά τοιχώματα του δεύτερου κτιρίου αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να οριοθετεί τον χώρο τον οποίο μπορεί να αναπτυχθεί η οριζόντια δίνη που δημιουργείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1. Επίσης βλέπουμε ότι η αδιατάραχτη ροή η οποία προέρχεται από το πάνω μέρος του δεύτερου κτιρίου πιέζει αυτές τις δύο δίνες αλλά και την οριζόντια δίνη πίσω από το δεύτερο κτίριο.



**Σχήμα 5-10 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος  $W/H=1$**

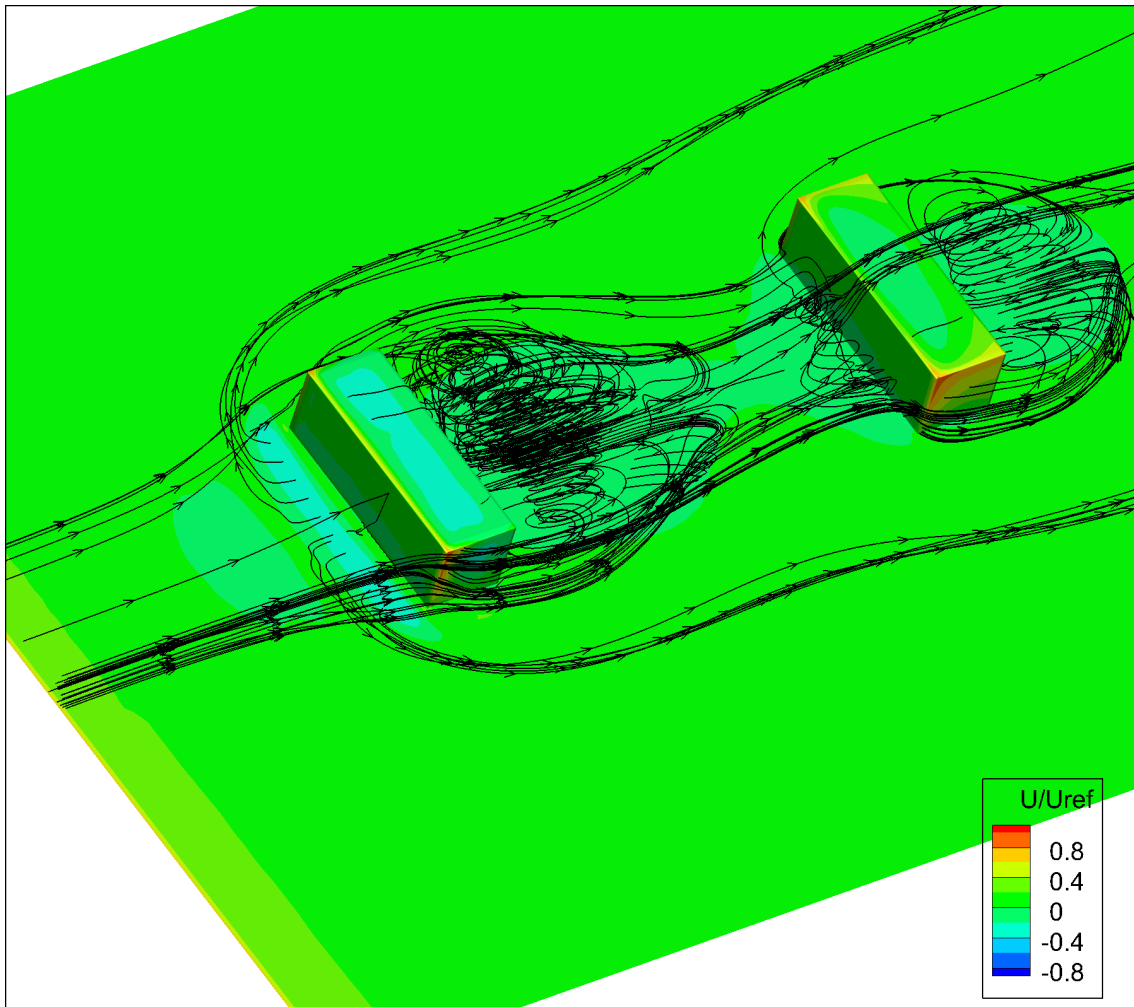
Στο Σχήμα 5-11 παρουσιάζεται το ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μία αστική χαράδρα που έχει μήκος τρία ύψη κτιρίου. Εντός της αστικής χαράδρας βλέπουμε μία μεγαλύτερη δίνη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση η οποία δεν αναπτύσσεται σε όλο το μήκος της αστικής χαράδρας. Επίσης βλέπουμε ότι η πλαϊνές δίνες εντός της αστικής χαράδρας δεν είναι τόσο έντονες λόγω του μεγαλύτερου μήκους της αστικής χαράδρας. Στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου βλέπουμε και εκεί δύο δίνες που έχουν δημιουργηθεί από τα πλαϊνά τοιχώματα οι οποίες και σε αυτή την περίπτωση οριοθετούν το μήκος της ανακυκλοφορίας και αυτές οι δίνες αυτές οριοθετούν την οριζόντια δίνη που δημιουργείται στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου.



**Σχήμα 5-11 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος  $W/H=3$**

Στο Σχήμα 5-12 βλέπουμε το ισοϋψές γράφημα του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας για μία αστική χαράδρα όπου αυτή τη φορά έχει μήκος έξι ύψη κτιρίου. Παρατηρούμε ότι σε πολλά σημεία δεν αλλάζει κάτι σε σχέση με τα προηγούμενα γραφήματα, αλλά εντός της αστικής χαράδρας αλλάζει εντελώς η μορφολογία της ροής. Βλέπουμε ότι πλέον η δίνη εντός αυτής δεν επηρεάζει το δεύτερο κτίριο αλλά η ροή ανεξαρτητοποιείται πλήρως. Είναι ουσιαστικά σαν να βλέπουμε δύο διαφορετικά κτίρια. Η δίνη στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου είναι σαφώς μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση καθώς δεν έχει κάποιον φυσικό περιορισμό. Πάρα ταύτα δεν είναι πλέον τόσο μεγάλη για να καλύψει όλο το χώρο εντός της χαράδρας. Μπροστά στο δεύτερο κτίριο παρατηρούμε μία ανακυκλοφορία η οποία δεν δημιουργήθηκε σε καμία από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Επίσης στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου παρατηρούμε μία

ανακυκλοφορία η οποία έχει τα χαρακτηριστικά και των προηγούμενων αλλά είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτές.

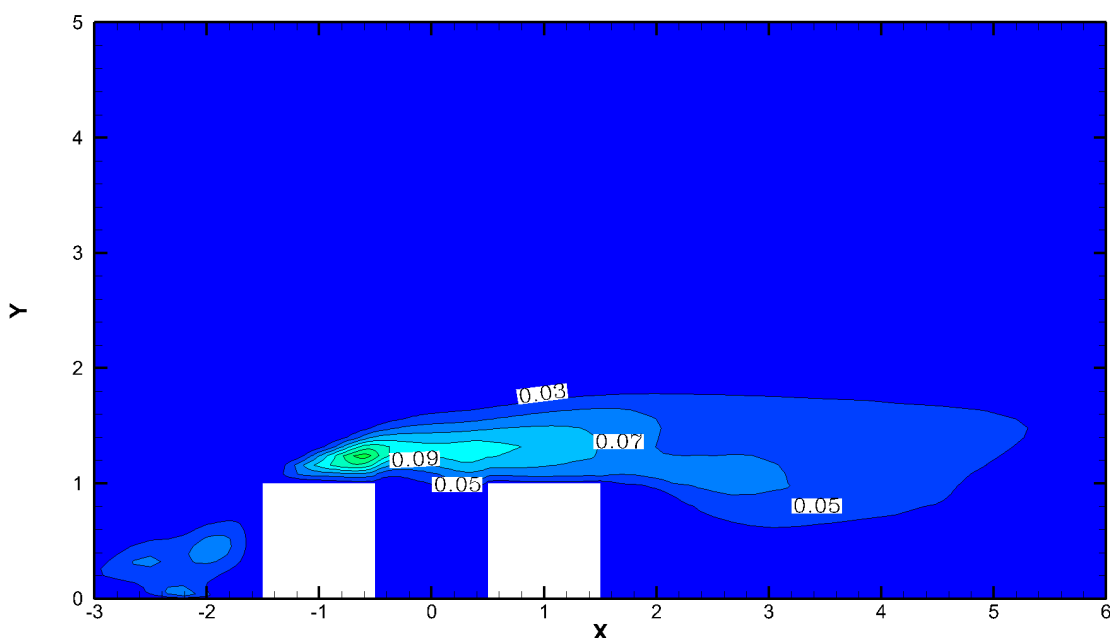


Σχήμα 5-12 Αδιάστατο πεδίο ροής για τυπική αστική χαράδρα με μήκος  $W/H=6$

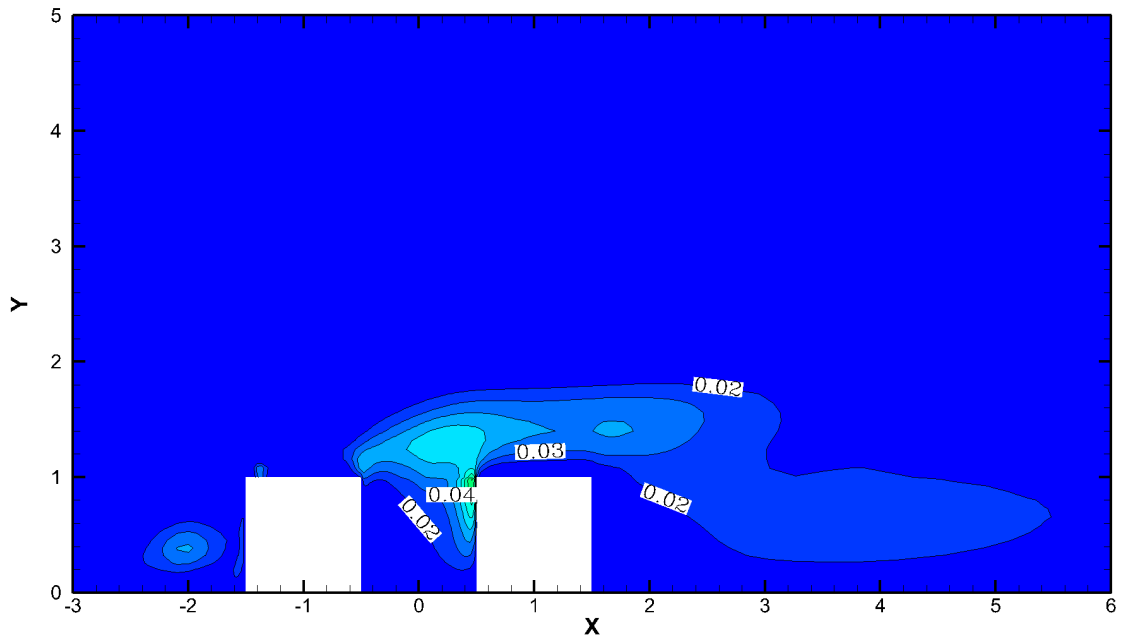
### 5.5 Διακυμάνσεις του πεδίου ταχύτητας

Στα σχήματα που θα παρουσιαστούν έχουμε τα ισουψής γραφήματα των διακυμάνσεων των γινομένων της ταχύτητας. Τα παρακάτω σχήματα είναι αρκετά χρήσιμα καθώς μπορούμε να εξάγουμε πληροφορίες για ορισμένες περιοχές της ροής που δεν μπορούμε να δούμε στα προηγούμενα. Οι περιοχές που έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας μας υποδεικνύουν σημεία όπου υπάρχουν τυρβώδεις υποστρώματα. Τα υποστρώματα αυτά είναι κεραιάς σημασίας όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο καθώς είναι οι δομές τις ροής από τις οποίες δραπετεύουν οι ρυπαντές από την αστική χαράδρα.

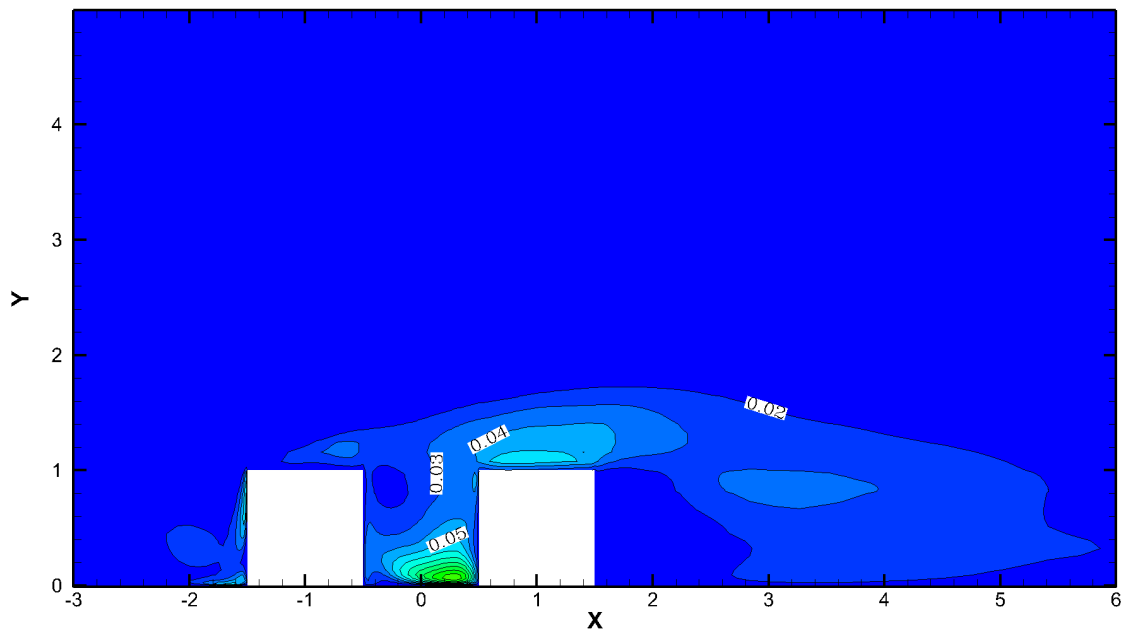
Στο Σχήμα 5-13 παρατηρούμε ορισμένες διακυμάνσεις οι οποίες δημιουργούν μία περιοχή στο ύψος των κτιρίων μέχρι και περίπου τρία ύψη από το πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε μία ανακυκλοφορία εντός της αστικής χαράδρας και μία στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου η οποία στη διεύθυνση  $X$  δημιουργούν έντονες διακυμάνσεις. Στο Σχήμα 5-14 οι ανακυκλοφορίες που αναφέρθηκαν παρουσιάζουν στο πάνω μέρος της χαράδρας ορισμένες διακυμάνσεις οι οποίες είναι πιο έντονες στο μπροστά μέρος του δεύτερου κτιρίου. Επίσης η πίσω ανακυκλοφορία επηρεάζει και στη διεύθυνση  $Y$  της ροής. Στο Σχήμα 5-15 βλέπουμε ότι οι ανακυκλοφορία εντός της χαράδρας της χαράδρας δημιουργεί έντονες διακυμάνσεις στο κάτω μέρος της χαράδρας αυτό οφείλεται στο ότι το μήκος της αστικής χαράδρας είναι πεπερασμένο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι κεντρική δίνη να έχει το σχήμα ενός πέταλου δημιουργώντας αυτές τις διακυμάνσεις. Στο πίσω μέρος του κτιρίου βλέπουμε ότι και στην διεύθυνση του άξονα  $Z$  υπάρχει διακύμανση αυτό οφείλεται στο σχήμα της δίνη στο πίσω μέρος η οποία έχει το σχήμα θόλου. Αυτό κατά συνέπεια δίνει διακυμάνσεις και στις τρεις συνιστώσες.



**Σχήμα 5-13 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα  $X$  για  $W/H=1$  και για  $Z/H=0$**



Σχήμα 5-14 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Y για  $W/H=1$  και για  $Z/H=0$

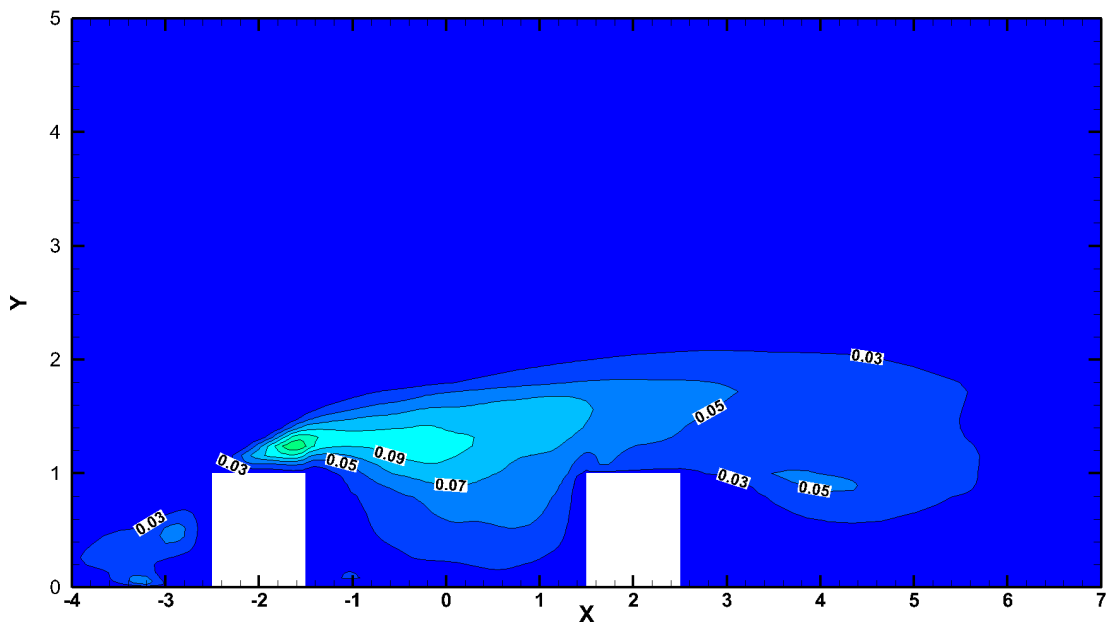


Σχήμα 5-15 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Z για  $W/H=1$  και για  $Z/H=0$

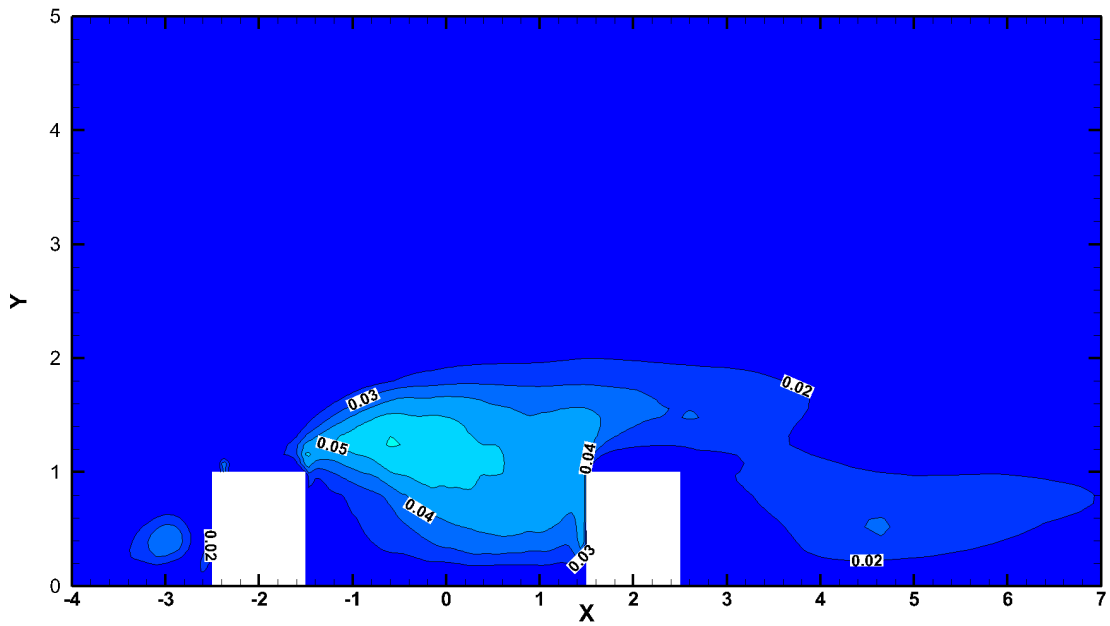
Συνεχίζοντας την ανάλυση θα εξετάσουμε την περίπτωση όπου το μήκος της τυπικής αστικής χαράδρας είναι τρία ύψη κτιρίων. Στο Σχήμα 5-16 βλέπουμε ότι η περιοχή των διακυμάνσεων στη διεύθυνση X μοιάζει με αυτή της προηγούμενης



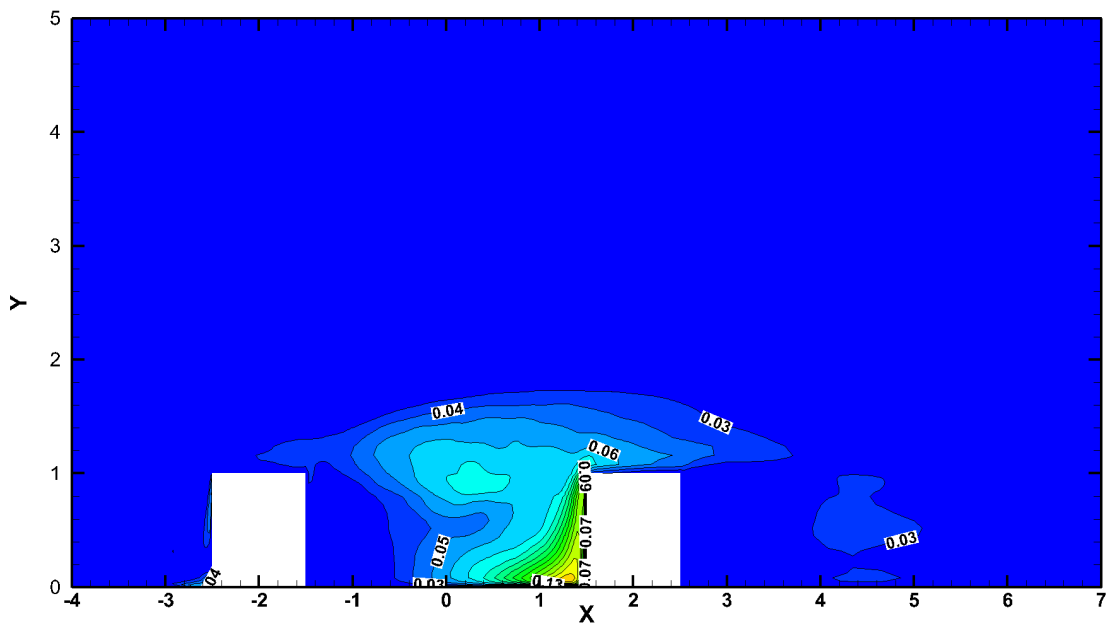
περίπτωσης. Αλλά είναι αρκετά μεγαλύτερη σε έκταση και αυτό είναι αποτέλεσμα του μεγαλύτερου μήκους που έχει η αστική χαράδρα. Επίσης παρατηρούμε ότι η περιοχή των διακυμάνσεων εισχωρεί και εντός της αστικής χαράδρας αυτό οφείλεται στην ασταθές πεδίο ταχύτητας που είδαμε παραπάνω στα ισοϋψή γραφήματα. Ουσιαστικά η δίνη εντός της αστικής χαράδρας καταλαμβάνει περίπου όλο τον χώρο που τις δίνεται και λίγο πριν το δεύτερο κτίριο τείνει να ανεξαρτητοποιηθεί. Στην διεύθυνση  $Y$  στο Σχήμα 5-17 πάλι παρατηρούμε μία ομοιότητα με την προηγούμενη περίπτωση. Αλλά και εδώ η περιοχή των διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερο λόγω του μεγαλύτερου μήκους της αστικής χαράδρας. Η επιρροή που έχει η θολωτή δίνη στο πίσω μέρος του δεύτερου κτιρίου δεν μεταβάλλεται σε καμία περίπτωση καθώς δεν μπορεί να μεταβληθεί οποιαδήποτε παράμετρος που την αφορά. Στην διεύθυνση  $Z$  υπάρχει και εδώ μία περιοχή διακυμάνσεων η οποία εστιάζεται στο μπροστά μέρος του δεύτερου κτιρίου αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η αστική χαράδρα δεν έχει άπειρο μήκος και η δίνη έχει σπειροειδής μορφή και έτσι δημιουργεί έντονες δομές διακυμάνσεων στο σημείο αυτό.



**Σχήμα 5-16** Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα  $X$  για  $W/H=3$  και για  $Z/H=0$



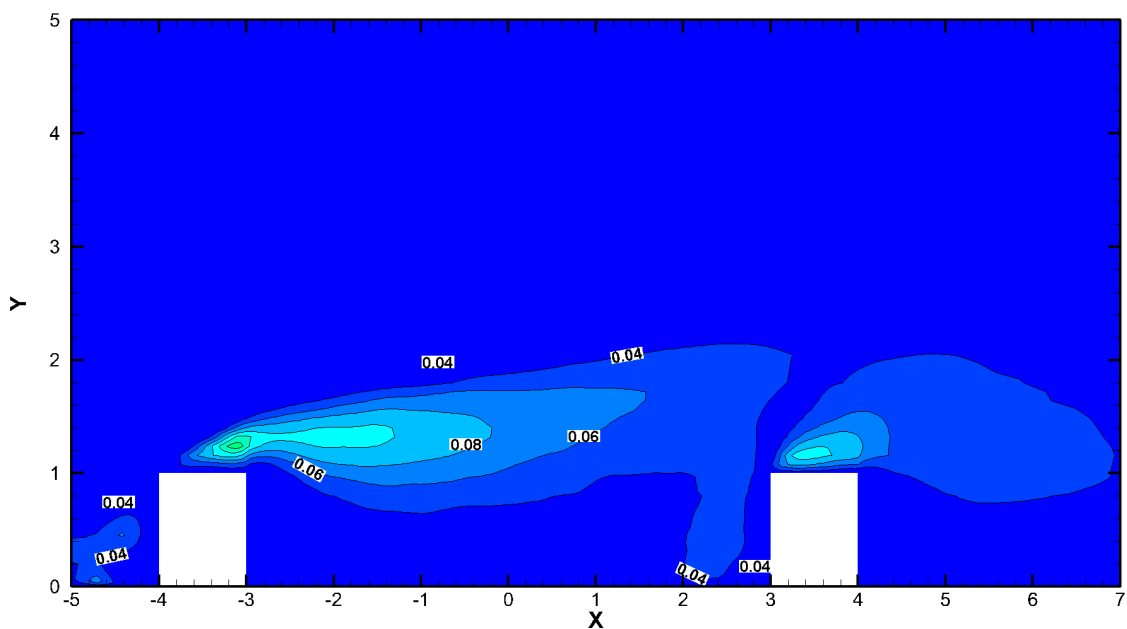
Σχήμα 5-17 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Y για  $W/H=3$  και για  $Z/H=0$



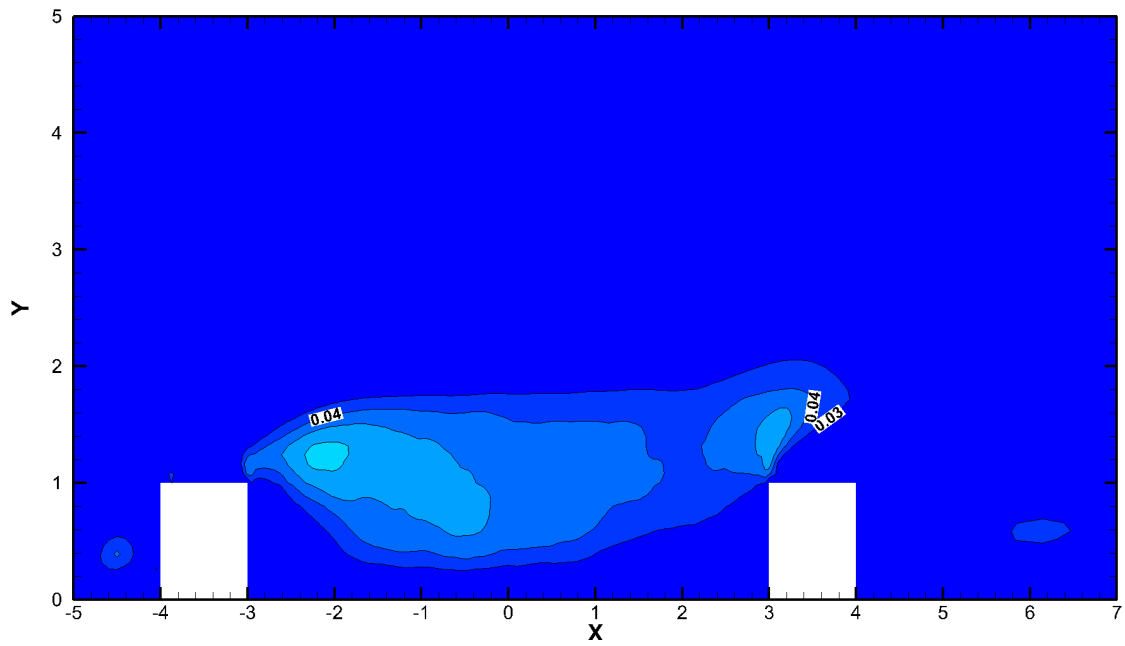
Σχήμα 5-18 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Z για  $W/H=3$  και για  $Z/H=0$

Κλείνοντας με τις διακυμάνσεις θα ασχοληθούμε με την τελευταία περίπτωση όπου το μήκος της αστικής χαράδρας είναι ίσο με έξι ύψη. Αν και εδώ υπάρχουν ορισμένες ομοιότητες έχουμε μερικές διαφορές. Στο Σχήμα 5-19 έχουμε τις

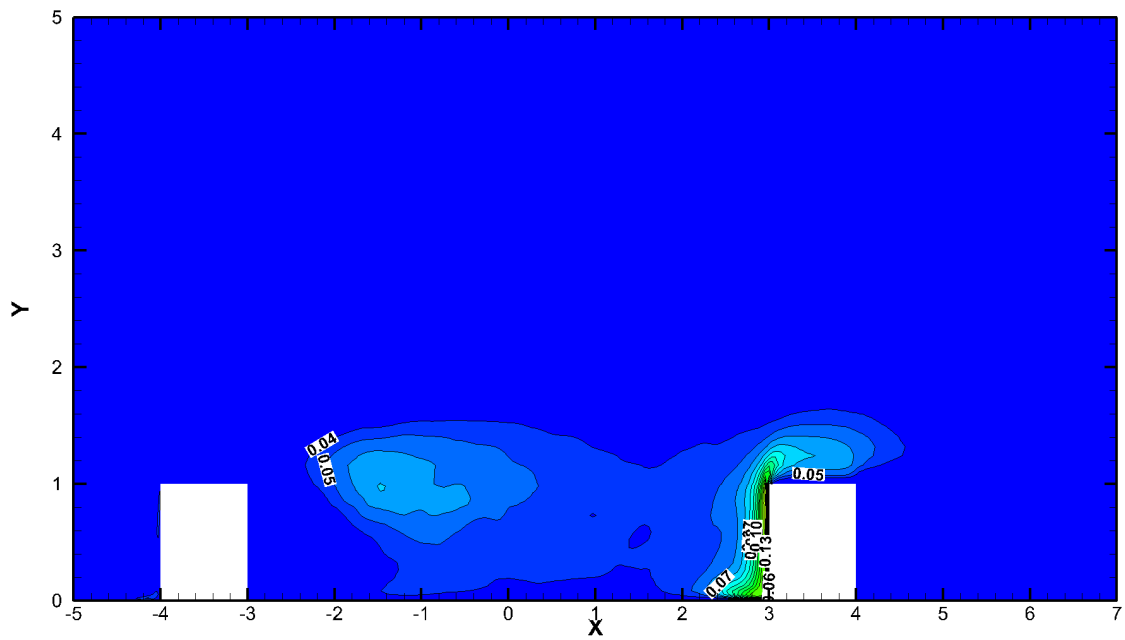
διακυμάνσεις στη διεύθυνση  $X$  αν και με τη πρώτη ματιά θα μας έμοιαζε ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση βλέπουμε ότι η δομή της ροής που είναι πάνω από τα κτίρια σταματάει λίγο πριν το δεύτερο κτίριο. Αυτό γίνεται διότι έχουμε ανεξαρτητοποίηση της ροής όπως είδαμε και στα ισούψης γραφήματα. Στην διεύθυνση  $Y$  παρατηρούμε ότι η περιοχή των διακυμάνσεων δημιουργείται αποκλειστικά από την αδιατάρακτη ροή αλλά και από τις δύο ανακυκλοφορίες πίσω από κάθε κτίριο. Τέλος στο Σχήμα 5-21 υπάρχει μία περιοχή διακυμάνσεων στο μπροστά μέρος η οποία οφείλεται στην μπροστινή ανακυκλοφορία του δεύτερου κτιρίου. Ο λόγος που δεν υπάρχει και στο μπροστά κτίριο είναι ότι η ροή ήδη από το απόρεια του πρώτου κτιρίου έχει αποκτήσει διακυμάνσεις.



**Σχήμα 5-19** Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα  $X$  για  $W/H=6$  και για  $Z/H=0$



Σχήμα 5-20 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Y για  $W/H=6$  και για  $Z/H=0$



Σχήμα 5-21 Αδιάστατο πεδίο διακυμάνσεων της ταχύτητας στη συνιστώσα Z για  $W/H=6$  και για  $Z/H=0$

## 5.6 Κατανομή του συντελεστή πίεσης

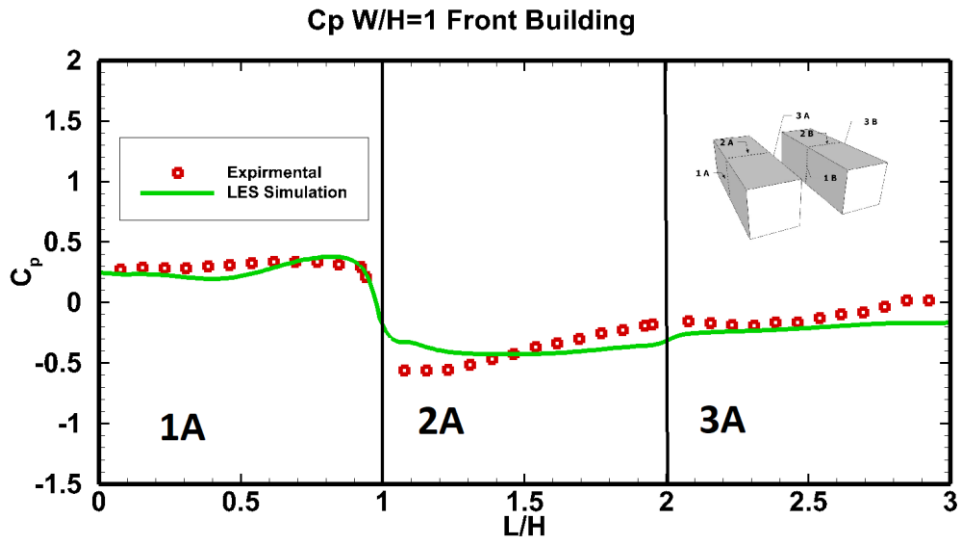
Τελειώνοντας το κεφάλαιο αυτό θα κάνουμε μία πιο ποιοτική ανάλυση. Θα συγκρίνουμε πειραματικές μετρήσεις με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Ένας τρόπος είναι μέσω του συντελεστή πίεσης. Έτσι λοιπόν θα υπολογίσουμε το συντελεστή πίεσης από τη διαφορική πίεση που λαμβάνουμε από το μικρομανόμετρο αλλά και από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις.

Ο συντελεστής πίεσης υπολογίζεται από τις μετρήσεις διαφορικής πίεσης που λαμβάνουμε από το μικρομανόμετρο. Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 10 Hz. Η εξίσωση που ορίζει το συντελεστή πίεσης είναι η εξής:

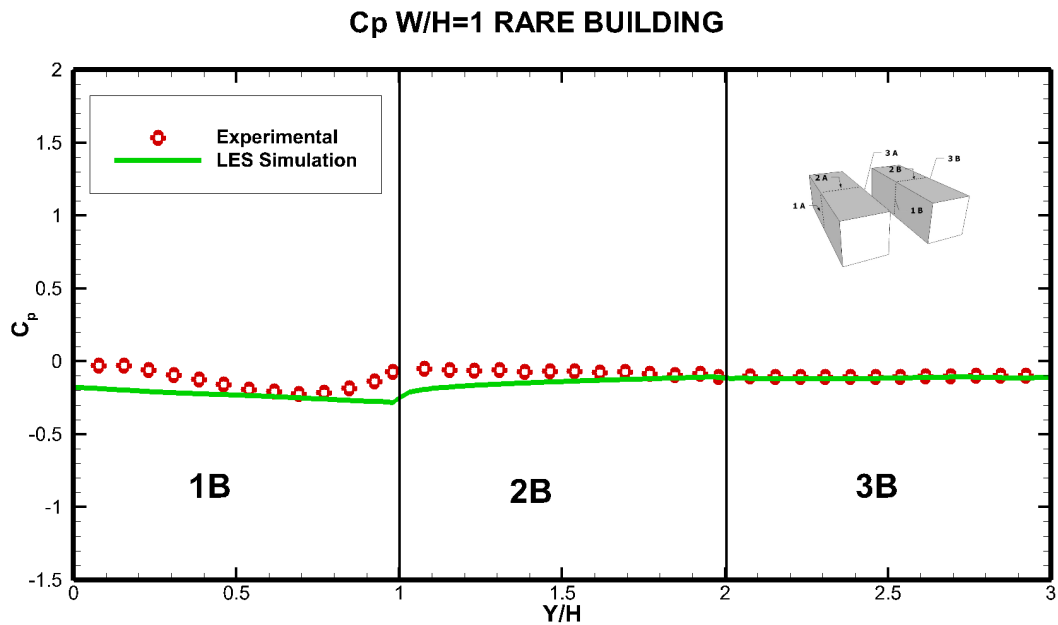
$$Cp = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2} \quad (5-1)$$

Στο Σχήμα 5-22 βλέπουμε τη κατανομή του συντελεστή πίεσης στο εμπρόσθιο κτήριο όπως αυτή προέκυψε τόσο από την υπολογιστική προσομοίωση όσο και από τις πειραματικές μετρήσεις. Παρατηρούμε ότι όπου υπάρχουν έντονες μεταβολές της πίεσης η υπολογιστική προσομοίωση δεν μπορεί να ακολουθήσει τις μεταβολές αυτές. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε επιλέξει το μεσαίο πλέγμα διακριτοποίησης άρα και κατά συνέπεια ένα κομμάτι της πληροφορίας έχει χαθεί. Όσο αφορά τη μετόπη του πρώτου κτιρίου υπάρχει μία κορύφωση του συντελεστή πίεσης πριν την απότομη πτώση. Στο πάνω μέρος του πρώτου κτιρίου βλέπουμε μία σταδιακή αύξηση του συντελεστή πίεσης παραμένοντας στις αρνητικές τιμές. Αυτή η σταδιακή αύξηση δημιουργείται από την ανακυκλοφορία στην οροφή του πρώτου κτιρίου καθώς έχουμε απώλεια ορμής. Στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου πάλι βλέπουμε ότι υπάρχει μία σταδιακή αύξηση του συντελεστή πίεσης η οποία προκαλείται από την ανακυκλοφορία εντός της αστικής χαράδρας. Στο Σχήμα 5-23 παρουσιάζεται το γράφημα κατανομής του συντελεστή πίεσης για το δεύτερο κτίριο της αστικής χαράδρας. Και εδώ πάλι παρατηρούμε κάποιες αποκλίσεις οι οποίες οφείλονται στις απότομες μεταβολές της πίεσης, η οποίες είναι μικρότερες από αυτές του προηγούμενου γραφήματος. Όπως είναι λογικό η ορμή του ρευστού είναι αρκετά μικρότερη και κατά συνέπεια παρατηρούμε ένα πιο ήπιο γράφημα. Στο δεύτερο

κτίριο βλέπουμε ότι η κλίση του συντελεστή πίεσης στο σημείο 2B είναι σχεδόν ίση με την μονάδα και αυτό οφείλεται στην προσκόλληση του οριακού στρώματος στην οροφή του δεύτερου κτιρίου.

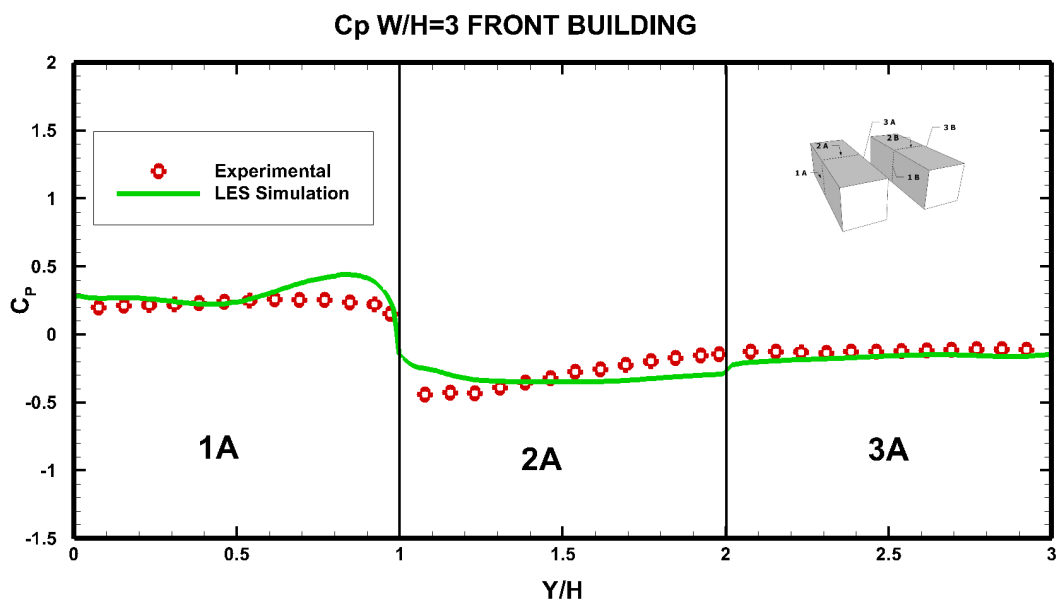


Σχήμα 5-22 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας  $W/H=1$

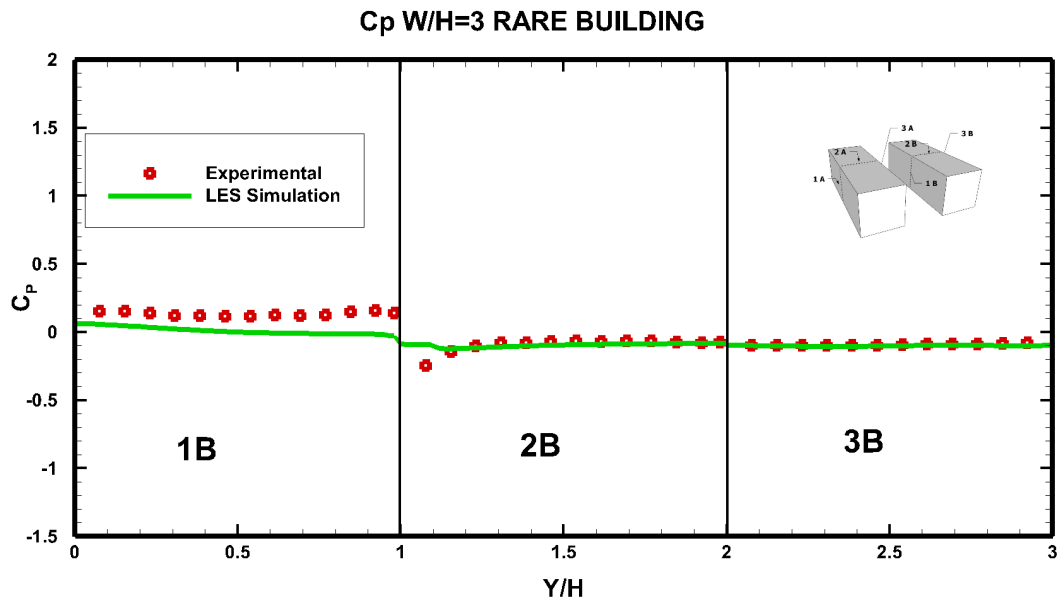


Σχήμα 5-23 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας  $W/H=1$

Στο Σχήμα 5-24 βλέπουμε το γράφημα όπου συγκρίνεται ο συντελεστής πίεσης της υπολογιστικής προσομοίωσης και των πειραματικών τιμών των οποίων λάβαμε. Και πάλι εδώ βλέπουμε ορισμένες αποκλίσεις όπου αποδώσαμε την πιθανή αιτία τους στα προηγούμενα γραφήματα. Έτσι και εδώ στο πάνω μέρος της μετόπης του πρώτου κτιρίου παρατηρούμε την κορύφωση του συντελεστή πίεσης. Η απότομη πτώση του ξεκινάει λίγο μετά την οροφή του πρώτου κτιρίου και ύστερα πάλι έχουμε μία σταδιακή αύξηση του συντελεστή πίεσης. Στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου βλέπουμε ότι οι πειραματικές τιμές ταυτίζονται με τις υπολογιστικές. Η κατανομή του συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο φαίνεται στο Σχήμα 5-25. Όμοια και με πριν βλέπουμε ένα πιο ήπιο γράφημα σε σχέση με αυτό του πρώτου κτιρίου. Εδώ βλέπουμε ότι τα δεδομένα ταυτίζονται αρκετά καλά πέραν ορισμένων σημείων τα οποία έχουν αποκλίσεις σε περιοχές έντονων μεταβολών.



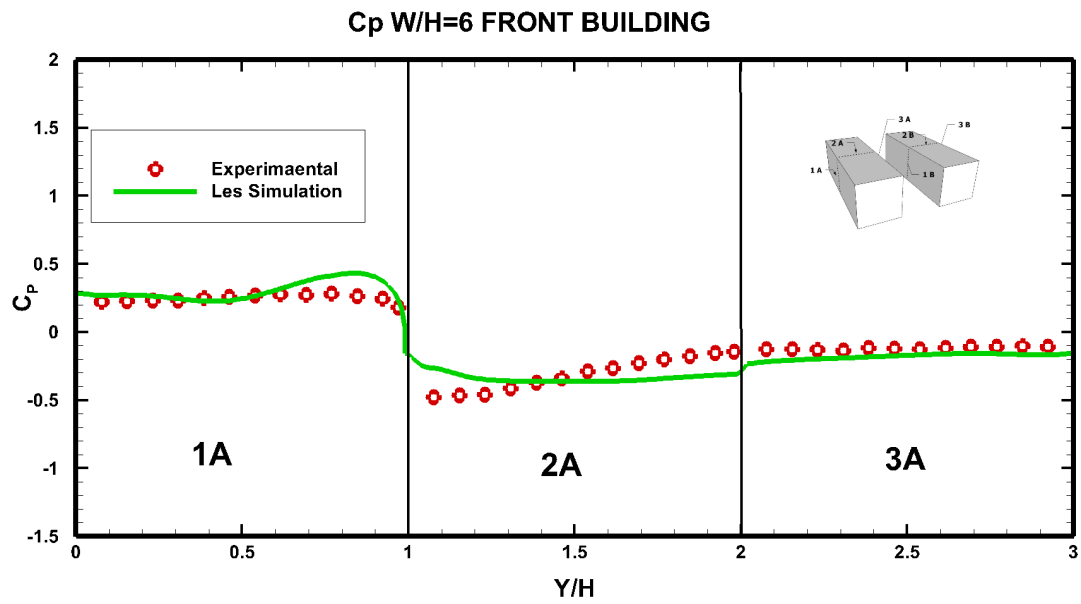
**Σχήμα 5-24 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαραδρας W/H=3**



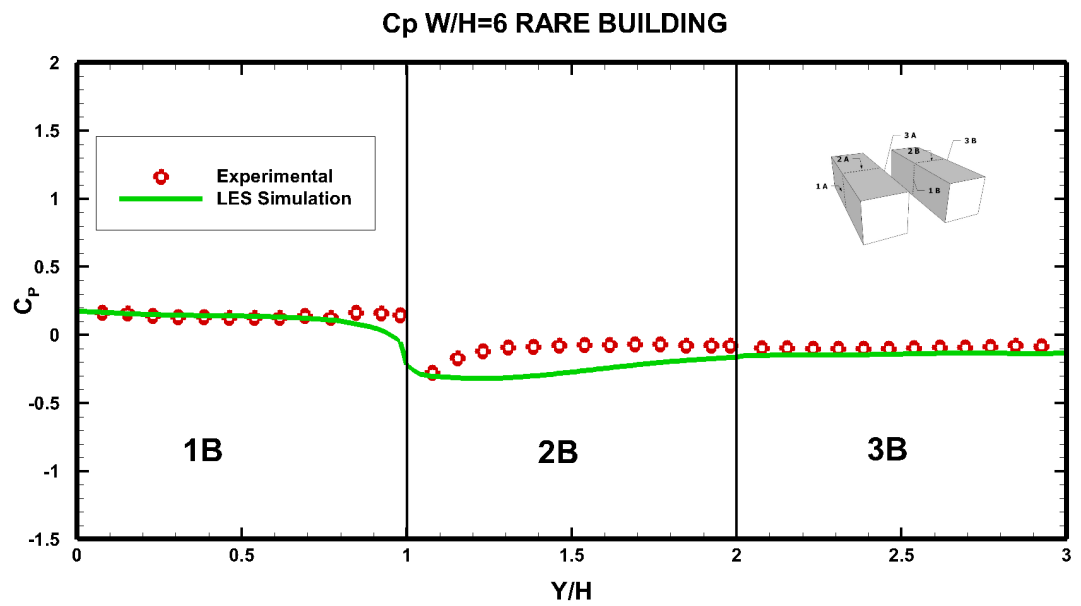
**Σχήμα 5-25 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας  $W/H=3$**

Στο Σχήμα 5-26 δίνεται το γράφημα κατανομής του συντελεστή πίεσης για το πρώτο κτίριο όταν το μήκος της αστικής χαράδρας είναι έξι ύψη. Παρατηρούμε ότι τα δεδομένα ταυτίζονται μεταξύ τους με ορισμένες αποκλίσεις. Η καλύτερη ταύτιση είναι στο πίσω μέρος του κτιρίου και στο μπροστά μέρος. Να τονιστεί ότι ο συντελεστής κατανομής της πίεσης δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του μήκους της αστικής χαράδρας όσο αφορά το πρώτο κτίριο. Ο συντελεστής κατανομής της πίεσης στο δεύτερο κτίριο φαίνεται στο Σχήμα 5-27. Βλέπουμε και εδώ ότι πάλι ο συντελεστής και στα τρία γραφήματα δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του μήκους της αστικής χαράδρας. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής κατανομής της πίεσης δεν εξαρτάται από το μήκος της αστικής χαράδρας.





Σχήμα 5-26 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο πρώτο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας  $W/H=6$



Σχήμα 5-27 Κατανομή συντελεστή πίεσης στο δεύτερο κτίριο για χαρακτηριστικό μήκος αστικής χαράδρας  $W/H=6$

## 6 Διασπορά Ρύπου

Έχοντας αναλύσει πλήρως τα χαρακτηριστικά της ροής εντός της αστικής χαράδρας, πλέον μπορούμε να εξετάσουμε πώς τα χαρακτηριστικά αυτά θα επηρεάσουν τη διασπορά ενός ρυπαντή. Για το λόγο αυτό θα κάνουμε την υπόθεση ότι σε μία ορισμένη στιγμή στην οποία θ έχει εδραιωθεί πλήρως η ροή υπάρχει μία σταθερή πηγή έκκλισης ρύπου. Ο ρύπος που επιλέξαμε είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Καθώς αποτελεί μία από τις πιο συχνές χημικές ενώσεις που συναντάμε σε ένα αστικό περιβάλλον.

Ο συγκεκριμένος ρύπος θα μοντελοποιηθεί με τη χρήση της εξίσωσης της διάχυσης που προκύπτει από τον νόμο του Fick. Πρόκειται λοιπόν για ένα βαθμωτό πεδίο το οποίο προκειμένου να επιλυθεί χρειάζεται μόνο το πεδίο της ταχύτητας. Θα χρησιμοποιήσουμε τα πεδία ταχύτητας τα οποία αναλύσαμε παραπάνω για να προβλέψουμε τη διασπορά του διοξειδίου εντός των αστικών χαραδρών.

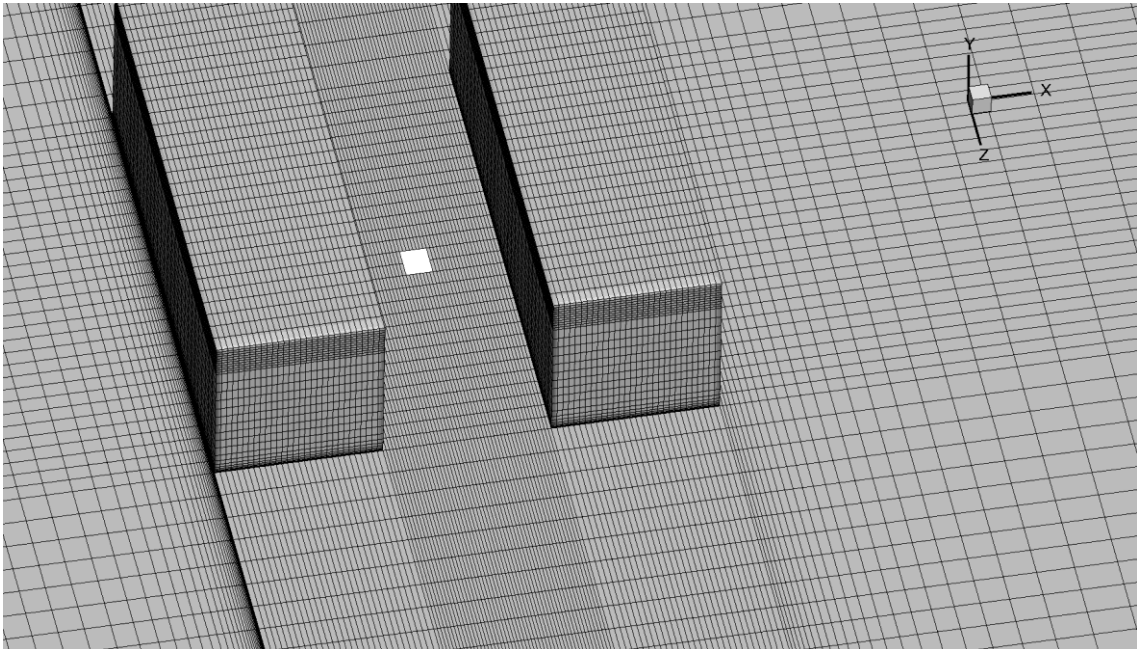
Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε το διοξείδιο θα πρέπει να βρούμε μία εξίσωση ώστε να αδιαστατοποιεί τη συγκέντρωση του ρύπου. Από τη δημοσίευση των (Ref) μας δίνεται η εξής σχέση:

$$K = \frac{C \cdot U_{\infty} \cdot H \cdot L}{Q_s} \quad (6-1)$$

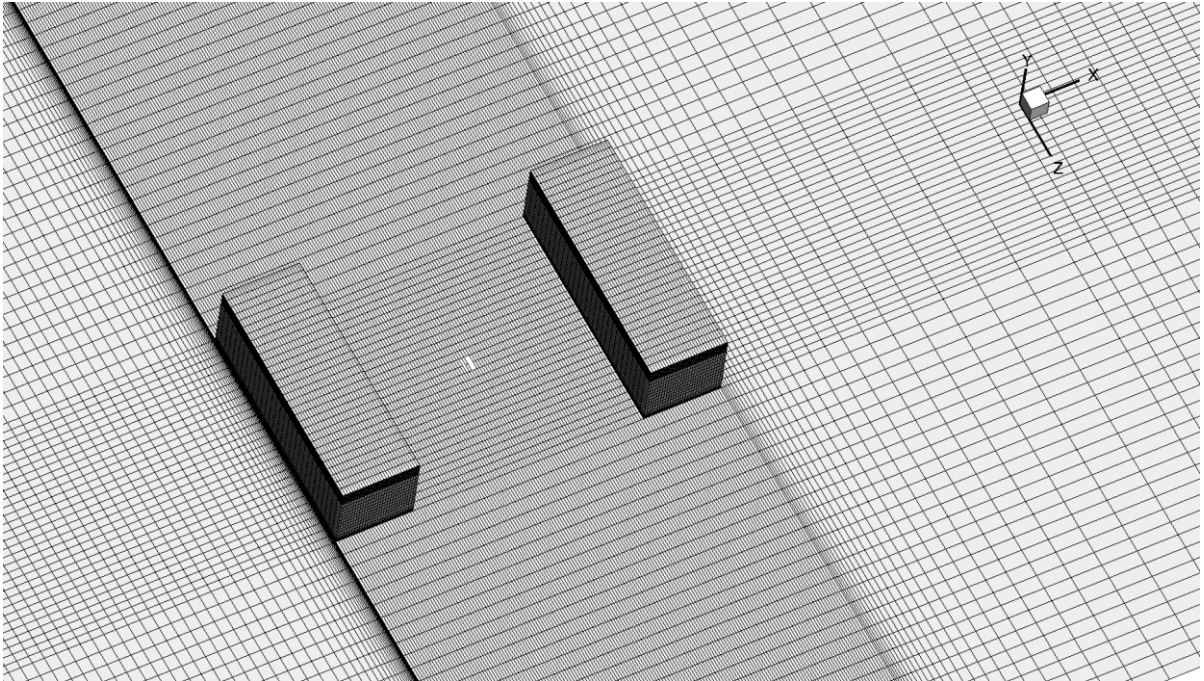
Όπου  $C$  είναι η συγκέντρωση σε ppm,  $U_{\infty}$  είναι η ταχύτητα της αδιατάραχτης ροής,  $H$  είναι το ύψος του κτιρίου και  $L$  το μήκος της πηγής. Το  $Q_s$  εκφράζει τον λόγο της παροχής του αέρα προς την παροχή του ρύπου. Έτσι θεωρήσαμε ότι για 100 l/h αέρα μπορούμε να έχουμε σταθερή έκκλιση της πηγής 18,5 l/h. Η τιμή της έκκλισης του ρύπου εκλέχθηκε έτσι ώστε η συγκέντρωση να μην είναι πολύ μικρή, αλλά και να μην είναι πολύ μεγάλη. Ο λόγος που θέλουμε η τιμή της συγκέντρωσης να μην είναι πολύ μεγάλη αλλά ούτε πολύ μικρή είναι γιατί θέλουμε να εξετάσουμε πώς τα χαρακτηριστικά της ροής εντός των τυπικών αστικών χαραδρών θα διασπείρουν τον ρύπο.

Θεωρώντας ότι το  $K$  στο σημείο της πηγής είναι ίσο με ένα και το μήκος της πηγής είναι ένα εκατοστό μπορούμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση της πηγής. Έχοντας όλα τα δεδομένα γνωστά υπολογίσαμε ότι η συγκέντρωση της πηγής είναι 600 ppm.

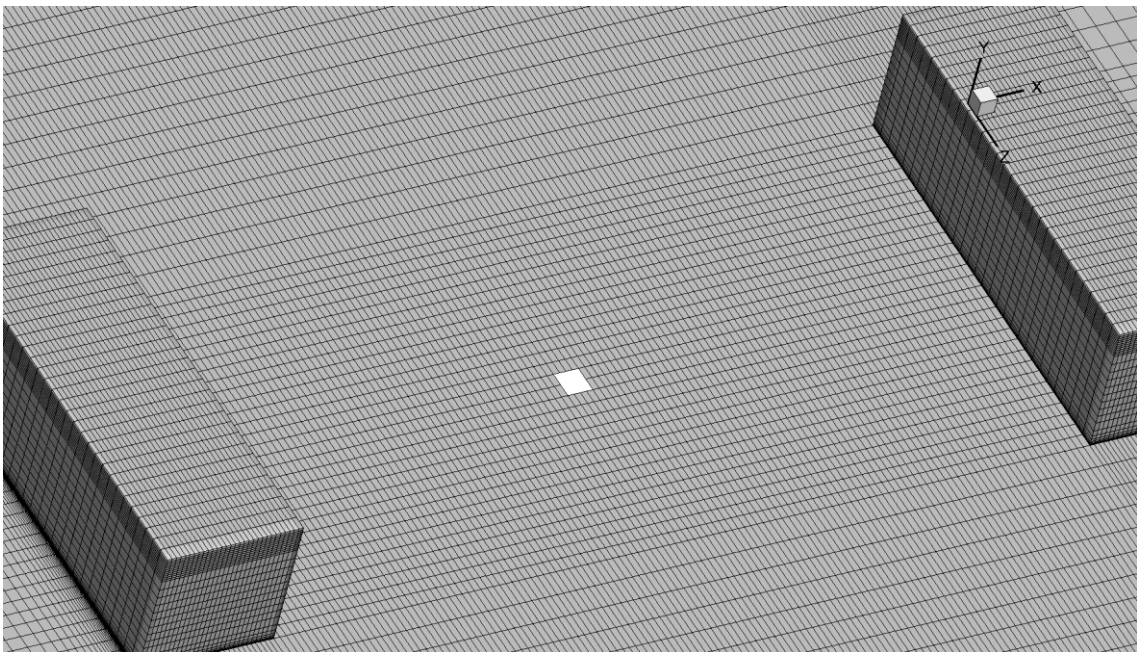
Στο Σχήμα 6-1, Σχήμα 6-2, Σχήμα 6-3 βλέπουμε ότι η πηγή του ρυπαντή βρίσκεται στο κέντρο κάθε αστικής χαραδράς. Η διάσταση των πηγών είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις, με διαστάσεις 1x1 cm. Έγινε η προσπάθεια η πηγή να διακριτοποιηθεί όσο το δυνατό καλύτερα ώστε να μην χαθεί η πληροφορία της διασποράς του ρυπαντή.



**Σχήμα 6-1** Πηγή ρυπαντή σε αστική χαραδρά με χαρακτηριστικό μήκος  $W/H$  ίσο με ένα



Σχήμα 6-2 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος  $W/H$  ίσο με τρία

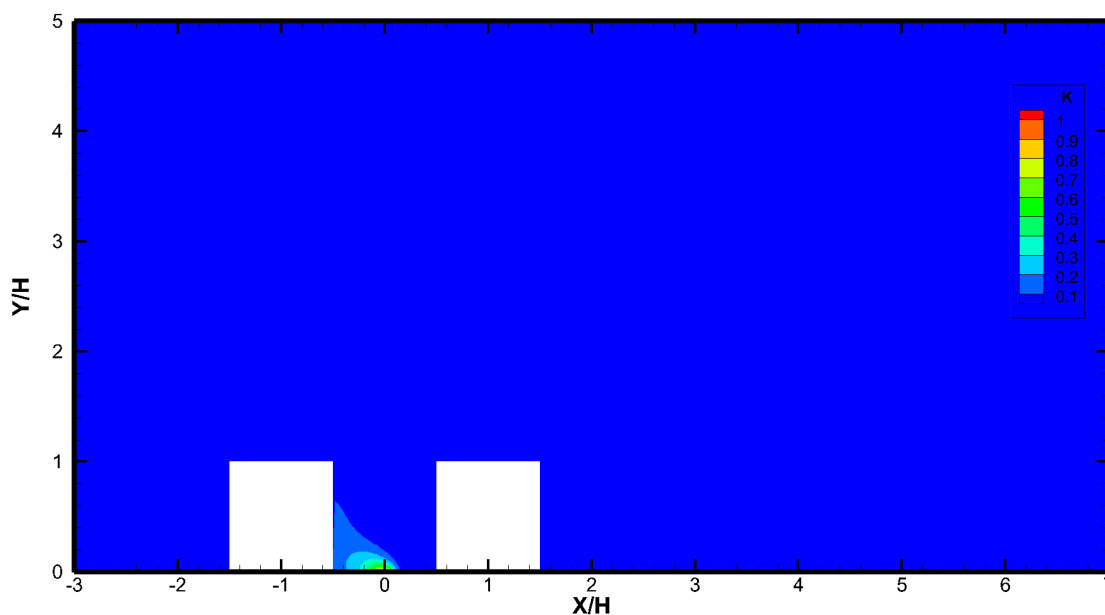


Σχήμα 6-3 Πηγή ρυπαντή σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος  $W/H$  ίσο με έξι

## 6.1 Ισοϋψής γραφήματα διασποράς ρυπαντή

Στο σημείο αυτό θα δείξουμε τα δισδιάστατα ισοϋψείς γραφήματα διασποράς του ρύπου στις αστικές χαράδρες. Θα δούμε πως και εάν δραπετεύει ο ρύπος από τις αστικές χαράδρες και την διασπορά του στην αδιατάραχτη ροή.

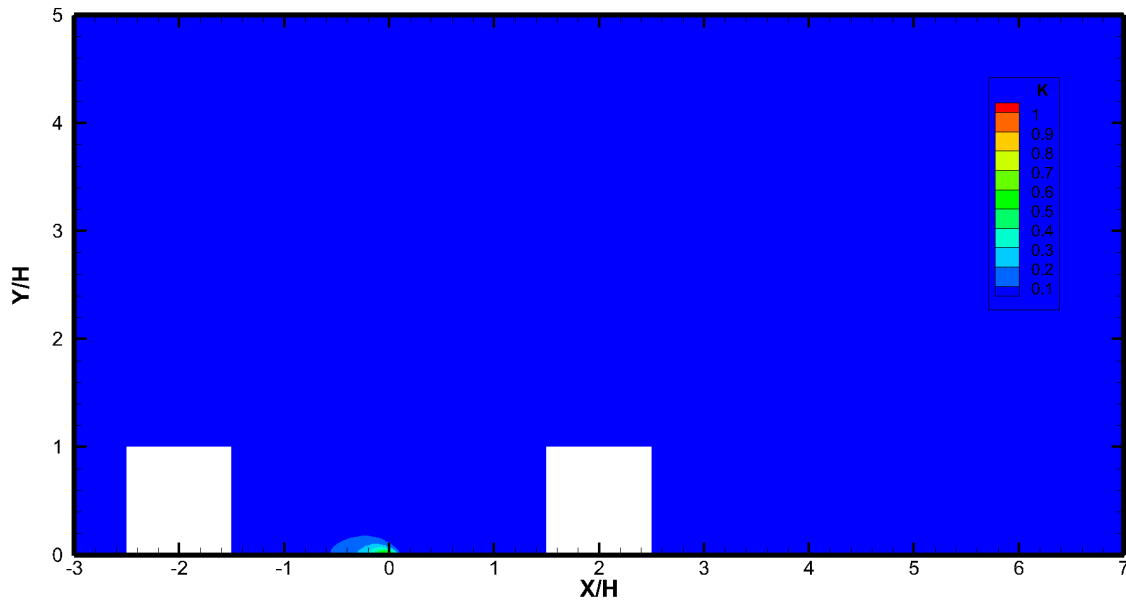
Στο Σχήμα 6-4 παρουσιάζεται το ισοϋψές γράφημα της διασποράς του ρυπαντή εντός της αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος ίσο με ένα. Παρατηρούμε ότι ο ρύπος κατά την έκκλιση του πάει και προσπίπτει στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου. Αυτό είναι απολύτως λογικό διότι η φορά περιστροφής της δίνης εντός της αστικής χαράδρας είναι ωρολογιακή και παρασέρνει τον ρυπαντή. Επίσης δεν βλέπουμε η τιμή του  $K$  στο εμπρόσθιο μέρος του δεύτερου κτιρίου να είναι σημαντική σε σχέση με το πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου, ο ρύπος δραπετεύει από το τυρβώδες υπόστρωμα που δημιουργείται στο πάνω μέρος της ανακυκλοφορίας.



Σχήμα 6-4 Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος  $W/H=1$  και  $Z/H=0$

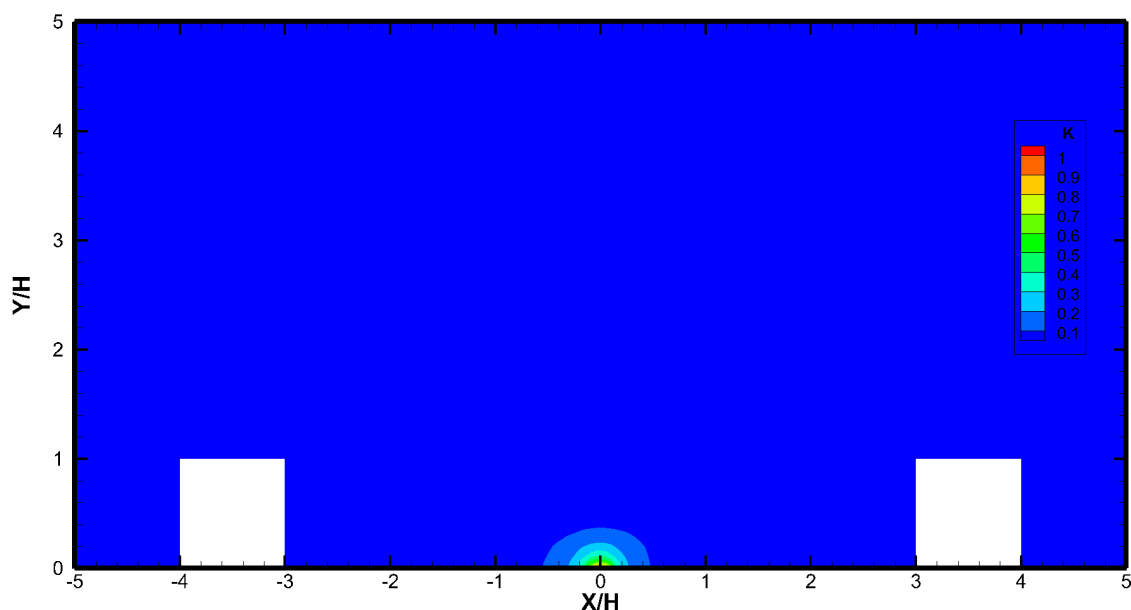
Στη δεύτερη περίπτωση που φαίνεται στο Σχήμα 6-5 βλέπουμε μία εντελώς διαφορετική συμπεριφορά του ρύπου. Επειδή πλέον το μήκος της αστικής χαράδρας έχει μήκος τρία ύψη κτιρίου ο ρύπος ναι μεν αρχικά παρασύρεται προς

τα αριστερά αλλά δεν αρκεί για να φτάσει στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι κατά την έκκλιση του αρχικά παρασύρεται από την δίνη εντός της αστικής χαράδρας αλλά λόγω της αστάθειας που υπάρχει στην περιοχή διαφεύγει.



**Σχήμα 6-5** Ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου εντός αστικής χαράδρας για χαρακτηριστικό μήκος  $W/H=3$  και  $Z/H=0$

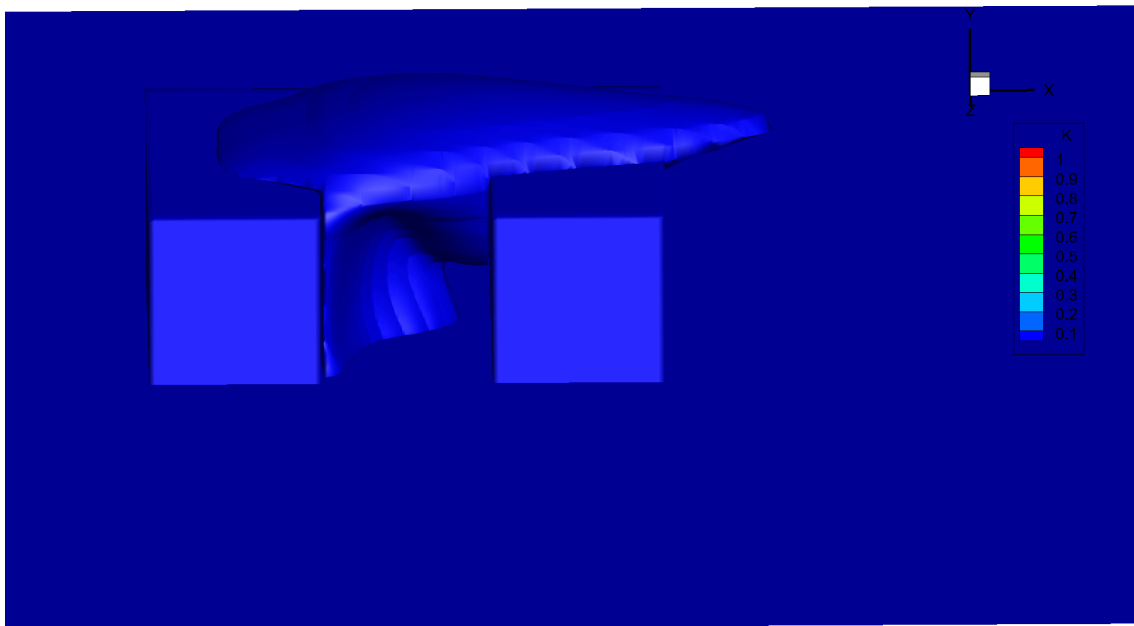
Στην τελευταία περίπτωση όπου το χαρακτηριστικό μήκος της αστικής χαράδρας είναι έξι ύψη κτιρίου η διασπορά του ρύπου είναι διαφορετική από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-6 κατά την έκκλιση του ρύπου, αυτός δεν παρασύρεται από την ροή εντός της αστικής χαράδρας. Ο λόγος είναι ότι πλέον το μήκος μεταξύ των δύο κτιρίων είναι αρκετά μεγάλο και τα κτίρια συμπεριφέρονται σαν να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν ο ρύπος δραπετεύει κατευθείαν εκτός της αστικής χαράδρας.



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

## 6.2 Τρισδιάστατα ισοϋψείς γραφήματα διασποράς ρύπου

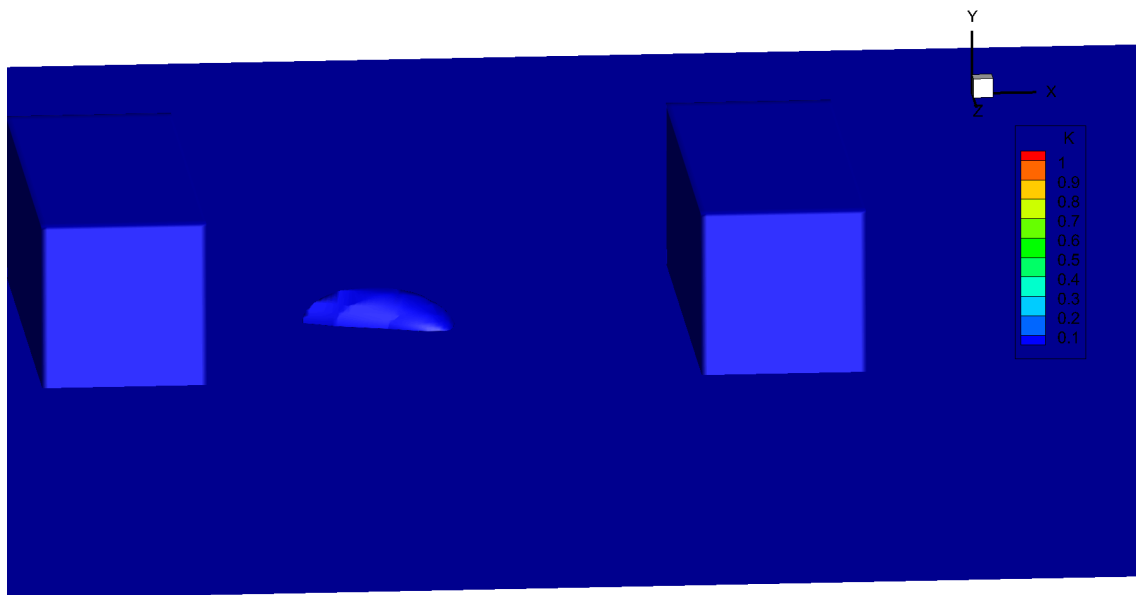
Στο Σχήμα 6-7 παρουσιάζεται το τρισδιάστατο γράφημα διασποράς του ρύπου στην αστική χαράδρα. Όπως είδαμε στο δισδιάστατο ισοϋψές γράφημα ο ρύπος κατά την έκκληση του πάει και προσπίπτει στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου. Επίσης βλέπουμε ότι ο ρύπος δραπετεύει από το τυρβώδες υπόστρωμα το οποίο σχηματίζεται πάνω από την ανακυκλοφορία της αστικής χαράδρας μεταξύ των δύο κτιρίων. Επίσης παρατηρούμε ότι η δύο δίνες που δημιουργούνται πλευρικά της αστικής χαράδρας οδηγούν και αυτές τον ρύπο στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου. Βλέπουμε ότι ένα ποσοστό του ρύπου που δεν διαφεύγει αναγκάζεται να ανακυκλοφορήσει με αποτέλεσμα να αυξάνει το  $K$  στο πάνω μέρος εμπρόσθια του δεύτερου κτιρίου.



**Σχήμα 6-7 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος  $W/H=1$**

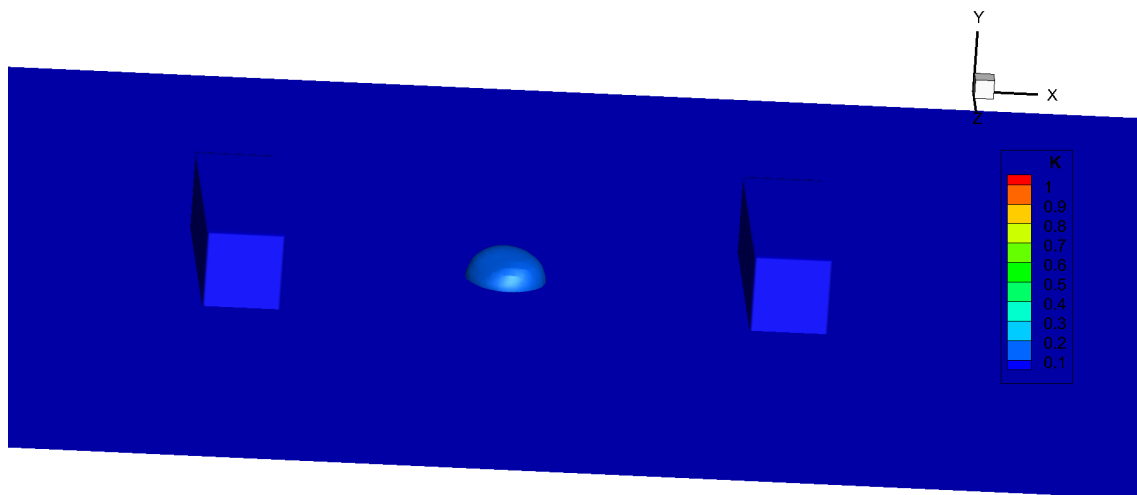
Στη δεύτερη περίπτωση όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6-8 ο ρύπος κατά την έκκληση του παρασύρεται αρχικά από την ανακυκλοφορία εντός της αστικής χαράδρας αλλά λόγω της απόστασης μεταξύ των κτιρίων. Όμως αυτός διαφεύγει κατευθείαν από την αστική χαράδρα χωρίς να προσκολλάται στο πίσω μέρος του πρώτου κτιρίου. Ο ρύπος λόγω της άμεσης διαφυγής του δεν προσκολλά καθόλου στο εμπρόσθιο του δεύτερου κτιρίου.





**Σχήμα 6-8 Τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος  $W/H=3$**

Τέλος στο Σχήμα 6-9 δίνεται το τρισδιάστατο ισοϋψές γράφημα διασποράς του ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος έξι ύψη κτιρίου. Βλέπουμε ότι ο ρύπος εδώ δεν παρασύρεται καθόλου καθώς δεν υπάρχει κάποια ανακυκλοφορία συγκεκριμένη να τον παρασύρει. Σαν αποτέλεσμα αυτό εκείνος διαφεύγει κατευθείαν στην αδιατάραχτη ροή. Επίσης βλέπουμε ότι οι συγκεντρώσεις δεν είναι πολύ μεγάλες καθώς σε πολύ μικρό ύψος η τιμή του  $K$  είναι 0,1. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση όπου ο ρύπος παρασέρνεται έστω και λίγο από την ανακυκλοφορία εντός της αστικής χαράδρας η τιμή του  $K$  όταν είναι 0,1 είναι πιο ψηλά. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διασπορά του ρύπου εντός των αστικών χαραδρών οφείλεται αποκλειστικά στο πεδίο ροής και όχι από τη διάχυση του χημικού στοιχείου. Το παραπάνω βέβαια ισχύει μόνο για ισοθερμοκρασιακές ροές.



Σχήμα 6-9 Τρισδιάστατο ισοψές γράφημα διασποράς ρύπου σε αστική χαράδρα με χαρακτηριστικό μήκος  $W/H=6$

## 7 Συμπεράσματα

Έχοντας φτάσει στο τέλος της διπλωματικής εργασίας μπορούμε πλέον να οδηγηθούμε σε ορισμένα συμπεράσματα. Αρχίζοντας από την ανεξαρτησία του πλέγματος, καταφέραμε να εξασφαλίσουμε ότι το υπολογιστικό μας χωρίο έχει διακριτοποιηθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Εξασφαλίζοντας οικονομία σε υπολογιστικούς πόρους, ο οποίος ήταν ένας σημαντικός παράγοντας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής αλλά και την καλύτερη δυνατή αξιοπιστία αποτελεσμάτων. Επίσης οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήσαμε στην υπολογιστική προσομοίωση περιέγραψαν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις συνθήκες στην είσοδο της αεροσήραγγας.

Όσο αφορά το κομμάτι της ανάλυσης είδαμε ότι όσο αυξάνουμε το χαρακτηριστικό μήκος της αστικής χαράδρας το πεδίο της ταχύτητας μεταβάλλεται αισθητά. Κ κάθε περίπτωση από μόνη της είχε διαφορετικό πεδίο ταχύτητας εφαρμόζοντας τις ίδιες οριακές συνθήκες και στις τρεις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Η μεταβολή αυτή δεν έγινε ήταν μεγάλη στις τάσεις του Reynolds, ουσιαστικά οι περιοχές των διακυμάνσεων που όριζαν τις δομές της ροής μορφολογικά ήταν σχεδόν ίδιες. Οι μεταβολές που υπήρχαν στις τάσεις του Reynolds ήταν μόνο ως προς το μέγεθος τους καθώς μεταβαλλόταν το χαρακτηριστικό μήκος της αστικής χαράδρας. Στην ποιοτική ανάλυση που κάναμε συγκρίνοντας τις υπολογιστικές τιμές του συντελεστή πίεσης με τις πειραματικές, παρατηρήσαμε μεγάλες διαφορές στις τιμές. Οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το μήκος της αστικής χαράδρας είναι ανεξάρτητο από τον συντελεστή κατανομής της πίεσης, άρα λοιπόν οι δυνάμεις που επιδρούν στις επιφάνειες των κτιρίων είναι συναρτήσει των οριακών συνθηκών.

Τέλος όσο αφορά τη διασπορά του ρύπου εντός της αστικής χαράδρας το πεδίο της ταχύτητας διαμόρφωση κατά κύριο το τρόπο διαφυγής του. Εδώ το χαρακτηριστικό μήκος της αστικής χαράδρας ήταν ο καθοριστικός παράγοντας διασπορά του ρύπου καθώς είδαμε ότι η αδιάστατη παράμετρος  $K$  άλλαζε σημαντικά για κάθε περίπτωση. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των δύο κτιρίων τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση του ρύπου εντός της χαράδρας αλλά και τόσο πιο εύκολα διαφεύγει ο ρύπος από αυτήν.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Baik, J.-J. and J.-J. Kim (2002). "On the escape of pollutants from urban street canyons." Atmospheric Environment **36**: 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.

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.

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): 321-339.

Jeong, S. J. and M. Andrews (2002). "Application of the k-ε turbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon." Atmospheric Environment **36**: 1137-1145.

Klein, P. and E. Plate (1999). Wind-Tunnel Study of Concentration Fields in Street Canyons.

Nazridoust, K. and G. Ahmadi (2006). "Airflow and pollutant transport in street canyons." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **94**: 491-522.

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

Pope, A. and J. J. Harper (1966). Low-speed wind tunnel testing, Wiley.

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.

Vasilopoulos, K. (2020). Accidents Caused by Hazardous Materials Released in an Urban Environment: A Numerical and Experimental Approach. Phd, Cranfield University

Yazid, M., N. A. Che Sidik, S. M. Salim and K. Saqr (2014). "A review on the flow structure and pollutant dispersion in urban street canyons for urban planning strategies." Simulation **90**.

Βασιλόπουλος, Κ. (2001). Δέσμη ανάμιξης τυρβωδών ροών με διαφορετικούς συνδυασμούς πλεγμάτων Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

