

# Ροή και Διασπορά Ρύπων σε Οδικές Χαράδρες: Ανασκόπηση

**Ν. ΚΟΥΤΣΟΥΡΑΚΗΣ**

Μηχανολόγος Μηχανικός

## Περίληψη

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε να συγκεντρωθούν από τη βιβλιογραφία και να παρουσιαστούν με κατανοητό τρόπο τα κύρια χαρακτηριστικά του πεδίου ροής και των συγκεντρώσεων ρύπων στην οδική χαράδρα, δηλαδή, στον χώρο πάνω από ένα αστικό δρόμο εκατέρωθεν του οποίου υπάρχουν κτίρια. Πάνω από τα τελευταία θεωρείται ότι πνέει, κυρίως, κάθετος στον άξονα του δρόμου άνεμος, που είναι ο κοινός παράγοντας των βασικών φαινομένων που παρατηρούνται, δηλαδή της ανακυκλοφορίας του αέρα και της παγίδευσης των ρύπων μέσα στη χαράδρα. Γίνεται αναφορά σε πολλές από τις πιο σημαντικές δημοσιεύσεις, που αφορούν στο συγκεκριμένο θέμα, με τη φιλοδοξία η εργασία αυτή ν' αποτελέσει το αρχικό βοήθημα όποιων ενδιαφέρονται να μάθουν ή να μελετήσουν τα φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα μέσα στις οδικές χαράδρες.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την πεντηκονταετία 1950–2000, ενώ ο πληθυσμός της γης περίπου διπλασιάστηκε, το ποσοστό των ανθρώπων που ζουν στις πόλεις αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα 4, αποτελώντας τον μισό πληθυσμό της γης. Την ίδια περίοδο ο αριθμός των αυτοκινήτων παγκοσμίως και η βιομηχανική παραγωγή αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα 10 [22].

Η συνεχιζόμενη αυτή συγκέντρωση των ανθρώπων στις πόλεις [38, 11], σε συνδυασμό με τους αυξημένους ρυθμούς που εκπέμπονται εξαιτίας του αριθμού των κυκλοφορούντων οχημάτων εγείρει εύλογες ανησυχίες για την ποιότητα του αέρα στα αστικά κέντρα κάνοντας την εξέταση της διασποράς των ρύπων στις οδικές χαράδρες, που ουσιαστικά αποτελούν τα δομικά στοιχεία της πόλης, θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

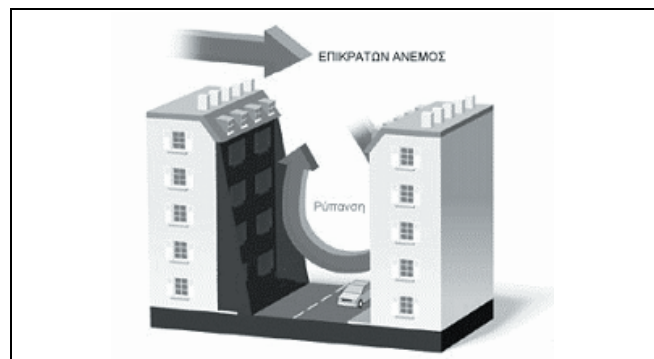
Να σημειωθεί ότι παρόλη την εντυπωσιακή μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων ανά διανυόμενο χιλιόμετρο με τη χρήση της καταλυτικής τεχνολογίας στα καινούρια οχήματα, η συνεχόμενη αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων έχει ως αποτέλεσμα τα μέσα μεταφοράς να εξακολουθούν να είναι η κύρια πηγή ρύπων στις πόλεις σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια το αζώτου (NO<sub>x</sub>) και άκαυστους υδρογονάνθρακες (HC) [22, 47, 26].

Παρόλη τη σπουδαιότητα του θέματος δεν κατέστη

δυνατό να βρεθούν από τον γράφοντα συγκεντρωμένα σε μία εργασία ή βιβλίο τα χαρακτηριστικά της ροής και της διασποράς ρύπων στις οδικές χαράδρες, με μορφή που να βοηθούν κάποιον που αρχίζει ν' ασχολείται με το θέμα. Αυτό το κενό προσπαθεί να καλύψει το παρόν άρθρο. Η πιο κοντινή σχετική εργασία είναι η εκτενής ανασκόπηση των Vardoulakis et al. [73], που εστιάζει, κυρίως, στον τομέα της μοντελοποίησης και περιλαμβάνει παραπομπές σε εκατοντάδες δημοσιεύσεις. Και οι Vardoulakis et al., όμως, δεν παρέχουν συστηματική περιγραφή των φυσικών φαινομένων των οδικών χαράδρων.

## 2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΧΑΡΑΔΡΑΣ

Με τον όρο αστική ή οδική χαράδρα (street canyon) εννοούμε τον σχηματισμό του αστικού δρόμου μαζί με τα κτίρια που τον περιβάλλουν και από τις δύο μεριές [52], σχήμα 1.



Σχήμα 1: Οδική χαράδρα [πηγή: Α.Π.Θ., Εργαστήριο μετάδοσης θερμότητας και περιβαλλοντικής μηχανικής].

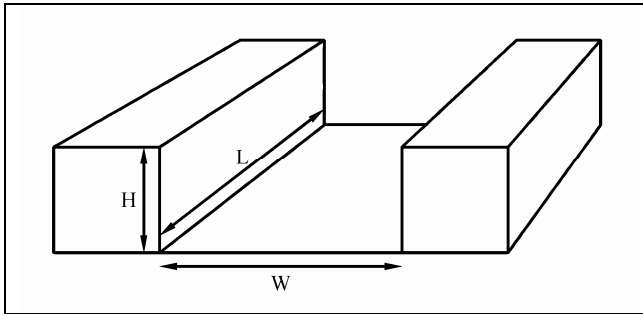
Figure 1: Street canyon [from: LHTEE, Aristotle University of Thessaloniki].

Ο όρος με την πάροδο του χρόνου απέκτησε ευρύτερη έννοια, συμπεριλαμβάνοντας και δρόμους χωρίς ψηλά κτί-

ρια ή περιοχή μεταξύ δύο κτιρίων που απέχουν πολύ ή δρόμους όπου τα κτίρια δεν είναι συνεχόμενα, αλλά υπάρχουν και ανοίγματα δεξιά και αριστερά κατά μήκος της οδού.

Καθώς τέτοιοι σχηματισμοί αποτελούν συνήθη τμήματα των πόλεων, είναι λογικό να συγκεντρώνουν το επιστημονικό ενδιαφέρον. Πράγματι, η ροή και τα θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά στις οδικές χαράδρες είναι πολύ σημαντικά για την ασφάλεια και την άνεση των κατοίκων όσον αφορά στην προστασία από τον άνεμο, το κρύο ή τη ζέστη, τη βροχή, τα έντονα καιρικά φαινόμενα [53, 49]. Επίσης, στις οδικές χαράδρες με υψηλή κυκλοφορία αυτοκινήτων συγκεντρώνονται πολλοί ρύποι, οι οποίοι λόγω του χαμηλού αερισμού παγιδεύονται μεταξύ των κτιρίων και είναι άμεσα επικίνδυνοι για την υγεία των ανθρώπων που ζουν, περπατούν, εργάζονται ή οδηγούν σε αυτές, αλλά και έμμεσα επικίνδυνοι για ολόκληρη την πόλη, αφού αυτή αποτελείται από αλληλουχία οδικών χαραδρών. Τέλος, στην εποχή μας υπάρχουν αυξημένες ανησυχίες και για την περίπτωση διαρροής επιβλαβών υλικών λόγω ατυχήματος [11,60].

Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας οδικής χαράδρας είναι το ύψος της ( $H$ ), το πλάτος ( $W$ ) και το μήκος ( $L$ ), όπως φαίνονται και στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδικής χαράδρας.  
Figure 2: Geometry of the street canyon.

Η μελέτη μιας τέτοιας χαράδρας μπορεί να είναι είτε δισδιάστατη (2Δ), δηλαδή θεωρώντας ότι το μήκος της  $L$  είναι πολύ μεγάλο και ότι η εικόνα της ροής σε επίπεδα κάθετα με τον άξονα του δρόμου είναι ίδια, ή τρισδιάστατη (3Δ), οπότε λαμβάνεται υπόψη και το μήκος και εξετάζεται η πλήρης ροή γύρω από τα κτίρια.

Η δισδιάστατη μελέτη είναι πιο διαδεδομένη. Σ' αυτήν μπορεί να μελετηθεί μόνο μία κατεύθυνση του ελεύθερου ανέμου, αυτή που είναι κάθετη στον άξονα του δρόμου. Αυτή όμως είναι και η περίπτωση που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού έχει την πιο χαρακτηριστική ροή και είναι από τις δυσμενέστερες όσον αφορά στην παγίδευση των ρύπων. Επίσης, η δισδιάστατη ροή σε χαράδρα είναι πιο πρωτογενής και προσελκύει τους επιστήμονες που θέλουν να λύσουν βασικές ροές. Τέλος, η έρευνα για τα φαινόμενα που διέπουν τη ροή αυτή δεν έχει τελειώσει, ώστε να προχωρήσει κανείς αβίαστα σε τρεις διαστάσεις.

Η τρισδιάστατη μελέτη γίνεται για να εξεταστούν φαινόμενα που οφείλονται στο πεπερασμένο μήκος και δε

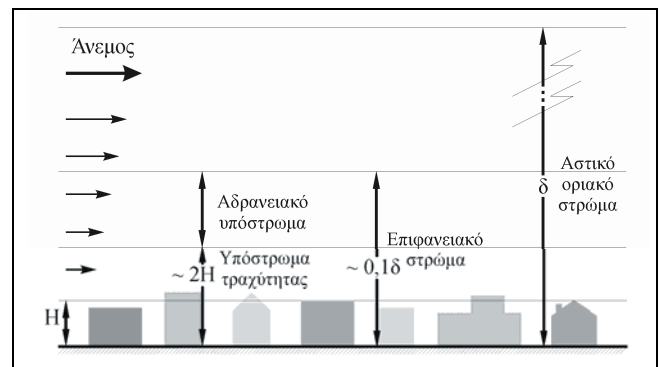
μπορούν να αγνοηθούν σε κάποιες περιπτώσεις, ή για προσομοίωση πραγματικών τμημάτων πόλεων.

Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις που μελετάται οδική χαράδρα, θεωρείται ότι ο άνεμος είναι κάθετος σ' αυτήν, εκτός κι αν αναφέρεται διαφορετικά. Το κύριο χαρακτηριστικό που παίζει ρόλο για τη μελέτη είναι ο λόγος επιμήκους  $H/W$ . Η κανονική οδική χαράδρα έχει λόγο επιμήκους 1, ενώ μεγαλύτεροι λόγοι χαρακτηρίζουν τις βαθιές χαράδρες και μικρότεροι τις φαρδιές. Στην περίπτωση των τριών διαστάσεων, ανάλογα με τον λόγο  $L/H$  οι χαράδρες μπορεί να είναι κοντές ( $L/H < 3$ ), μεσαίες ( $L/H = 5$ ) ή μακριές ( $L/H > 7$ ). Τέλος, ανάλογα αν τα εκατέρωθεν κτίρια έχουν ίδιο ή όχι ύψος, υπάρχουν οι συμμετρικές και οι μη συμμετρικές χαράδρες [73]. Οι μη συμμετρικές χαράδρες κατατάσσονται περαιτέρω σε χαράδρες αύξησης αναβαθμού (step-up), όταν το κατάντι της ροής κτίριο είναι πιο ψηλό και σε μείωση αναβαθμού (step-down), όταν είναι πιο χαμηλό.

### 3. Η ΡΟΗ ΣΤΗΝ ΟΔΙΚΗ ΧΑΡΑΔΡΑ

#### 3.1 Το αστικό οριακό στρώμα

Όπως γύρω από ένα περιρρέσιμο στερεό σώμα η ταχύτητα του ρευστού πέφτει σχηματίζοντας το οριακό στρώμα, έτσι και όταν έχουμε ροή του ανέμου πάνω από μια πόλη, δημιουργείται το «αστικό οριακό στρώμα», το οποίο έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Πολλές μετρήσεις και παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι μπορούμε να χωρίσουμε το αστικό οριακό στρώμα σε κάποιες υποπεριοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3 [11, 10, 62].



Σχήμα 3: Το αστικό οριακό στρώμα και τα υποστρώματά του.  
Figure 3: The urban boundary layer structure.

Μέχρι ένα μέσο ύψος κτιρίων  $H$ , βρισκόμαστε στο υπόστρωμα της οδικής χαράδρας (Urban Canopy Layer). Η άμεση επίδραση των κτιρίων στη διαμόρφωση της ροής του αστικού οριακού στρώματος έχει παρατηρηθεί ότι συνεχίζεται και στο υπόστρωμα τραχύτητας που φτάνει μέχρι κι ένα ύψος 1,5 ως 5 φορές το μέσο ύψος κτιρίων [62]. Πιο πάνω υπάρχει το αδρηναικό υπόστρωμα, όπου ισχύει το λογαριθ-

μικό προφίλ ταχύτητας [10, 34] στην περίπτωση που έχουμε ουδέτερη κατάσταση ευστάθειας ατμόσφαιρας. Συνολικά στο επιφανειακό (ή εσωτερικό) οριακό στρώμα οι παράγοντες που επιδρούν στη ροή σχετίζονται κυρίως με την τραχύτητα [10, 34] και δεν επηρεάζονται άμεσα από το συνολικό πάχος του αστικού οριακού στρώματος  $\delta$  που είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Το γεγονός αυτό ευκολύνει τη μελέτη των οδικών χαραδρών με αριθμητική μοντελοποίηση και με φυσική μοντελοποίηση σε αεροσήραγγα, καθώς δε χρειάζεται η ακριβής γνώση της τιμής του πάχους του οριακού στρώματος, αρκεί να έχουν μοντελοποιηθεί σωστά τα κτίρια και να είναι σωστές οι οριακές συνθήκες. Το τελευταίο απαιτεί τη χρησιμοποίηση αεροσηράγγων με ειδικό εξοπλισμό [8, 66], ώστε να μπορεί ν' αναπαραχθεί σύντομα ένα τυπικό προφίλ αστικού οριακού στρώματος και όσον αφορά στις ταχύτητες και όσον αφορά στις τυρβώδεις τάσεις.

Η χρήση μοντελοποίησης είτε αριθμητικής είτε φυσικής, έχει βοηθήσει πολύ στην κατανόηση διαφόρων φαινομένων, που συμβαίνουν στις οδικές χαράδρες. Όσον αφορά στη φυσική μοντελοποίηση σε αεροσήραγγα, παρέχει το σημαντικό πλεονέκτημα του καλύτερου ελέγχου των παραμέτρων που επιδρούν στη ροή και τις συγκεντρώσεις ρύπων σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου που παρουσιάζουν τυχαίες και απροσδιόριστες διακυμάνσεις των οριακών συνθηκών [65]. Επίσης, ένα πείραμα μπορεί να επαναληφθεί με τις ίδιες συνθήκες και να προσδιοριστούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά της διασποράς των ρύπων. Οι λόγοι αυτοί κάνουν τα πειράματα σε αεροσήραγγα καταλληλότερα για επικύρωση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής μοντελοποίησης [65]. Η τελευταία παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξέτασης πολλαπλών σεναρίων, στα οποία μπορούν να μεταβληθούν όλοι οι εμπλεκόμενοι παράγοντες που επιδρούν στη ροή και τη διασπορά των ρύπων με ένα πολύ μικρό πρόσθετο κόστος.

Να σημειωθεί ότι οι μοντελοποιήσεις αφορούν κυρίως ουδέτερη κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας, αγνοώντας τυχόν ανωστικές δυνάμεις που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές. Αυτό δεν είναι πάντα ακριβές, καθώς η θέρμανση ή όχι του εδάφους από την ύπαρξη ή όχι του ήλιου δημιουργεί καταστάσεις ευστάθειας, όπου ο αέρας έχει περιορισμένες κατακόρυφες μετακινήσεις, ή αστάθειας, όπου ευνοείται ο αερισμός και υπάρχει μεγαλύτερη κατακόρυφη μεταφορά.

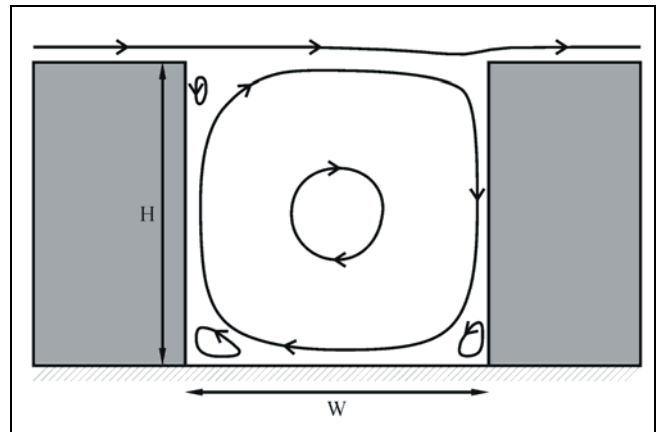
### 3.2 Βασικά χαρακτηριστικά της ροής για κανονική οδική χαράδρα

Τα κύρια χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη ροή μέσα στη χαράδρα είναι η ταχύτητα του ελεύθερου ανέμου πάνω από τα κτίρια και η γεωμετρία των κτιρίων.

Ήδη, οι πρώτες μελέτες που έγιναν κυρίως τη δεκαετία του 1970 και αφορούσαν είτε πειράματα πεδίου είτε μετρήσεις σε αεροσήραγγα είτε αριθμητική προσομοίωση, έδειχναν με σαφήνεια τον σχηματισμό του χαρακτηριστικού

βρόχου ανακυκλοφορίας, σχήμα 4, που παρατηρείται κυρίως για άνεμο κάθετο με τον άξονα του δρόμου και ταχύτητες μεγαλύτερες από 2 m/s.

Το κέντρο του (δεξιόστροφου στο σχήμα) βρόχου ανακυκλοφορίας είναι περίπου στο γεωμετρικό κέντρο για κανονική χαράδρα με  $H/W=1$  και ελαφρά μετατοπισμένο προς την ελεύθερη ροή για μη κανονική. Επίσης για λόγους  $H/W$  μικρότερους του 1 το κέντρο μεταφέρεται αρχικά προς τα δεξιά. Αν εξακολουθήσει να μικραίνει ο λόγος, ο βρόχος μπορεί να μη φτάνει ως το επόμενο κτίριο, όπως θα δούμε και παρακάτω, οπότε το κέντρο του μεταφέρεται κοντά στο ανάντη της ροής κτίριο. Κοντά στο όριο της χαράδρας παρατηρούμε αριστερά (στο ανάντη κτίριο) θετική κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας, που σημαίνει έξοδος αέρα από τη χαράδρα και δεξιά αρνητική.



Σχήμα 4: Βρόχος ανακυκλοφορίας για  $H/W=1$ .  
Figure 4: Recirculation vortex for  $H/W=1$ .

Για ταχύτητες του ανέμου πολύ μικρές όπως έχουν παρατηρήσει στην πολύ σημαντική εργασία τους οι DePaul and Sheih [20] και άλλοι ερευνητές [24, 78], ο στρόβιλος μπορεί να είναι ασταθής ή να μην υπάρχει καθόλου. Αυτό συνάγεται και από τις μετρήσεις των Nakamura and Oke [49], αν και αυτοί δε μπόρεσαν να προσδιορίσουν κάποια τιμή ταχύτητας ανέμου κάτω από την οποία να συμβαίνει με σαφήνεια αυτό το φαινόμενο. Από την άλλη μεριά έχουν παρατηρηθεί στρόβιλοι ακόμη και για ταχύτητες μόλις 0,5 m/s [13]. Εν πάση περιπτώσει, στη φύση οι ροές δεν είναι εξιδανικευμένες και παρουσιάζουν μεγάλη αστάθεια.

Στις περισσότερες περιπτώσεις στις γωνίες των κτιρίων με τον δρόμο υπάρχουν από ένας μικρός ασταθής αντιπεριστρεφόμενος στρόβιλος [73].

Μια τυπική ταχύτητα μέσα στη χαράδρα είναι τα  $2/3$  της ταχύτητας στις στέγες:  $U_{0,06H} = 2/3 U_{1,2H}$  [49]. Για μεγαλύτερους λόγους επιμήκους ο παράγοντας  $2/3$  αναμένεται να είναι μικρότερος. Πράγματι, για  $H/W=1,2$ , η προσομοίωση με LES (Large Eddy Simulation) των Walton and Cheng [77] κατέληξε σ' έναν παράγοντα 0,44. Για μικρότερους του 1 λόγους επιμήκους ο παράγοντας  $2/3$  αναμένεται να είναι μεγαλύτερος.

Να σημειωθεί ότι μια βασική παράμετρος για τις μελέτες των ροών σε οδικές χαράδρες θεωρείται πολύ συχνά ότι είναι η τιμή της ταχύτητας στη μέση στο επίπεδο των στεγών  $U_H$ .

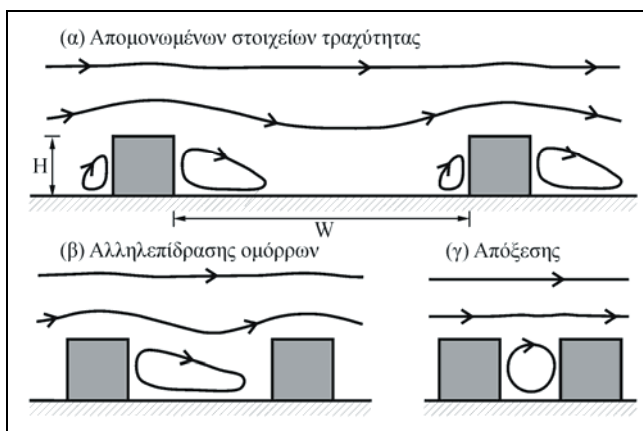
Αυτή χρησιμοποιείται για αδιαστατοποιήσεις, αν και αυτό είναι επικίνδυνο, καθώς εκεί οι κλίσεις της ταχύτητας είναι πολύ μεγάλες και μπορεί να γίνουν λάθη.

Ο βρόχος ανακυκλοφορίας παρατηρείται και όταν η γωνία του ανέμου με την οδό δεν είναι  $90^\circ$  αλλά μικρότερη, αφού πάλι υπάρχει μια κάθετη στον άξονα του δρόμου συνιστώσα της ταχύτητας, η οποία είναι υπεύθυνη για τον στρόβιλο. Πράγματι, ο βρόχος σχηματίζεται για γωνίες περίπου από  $30^\circ$  ως  $90^\circ$  [73].

Αν η γωνία είναι πιο μικρή, μιλάμε για (σχεδόν) παράλληλο άνεμο, οπότε ο αερισμός της χαράδρας αλλάζει. Το ενδιαφέρον, κυρίως, εστιάζεται σε δισδιάστατες ροές με γωνία ανέμου  $90^\circ$ .

### 3.3 Κατάταξη των ροών με βάση τον λόγο H/W

Οι ροές με ταχύτητα ελεύθερης ροής πάνω από  $1,5 \text{ m/s}$  ώστε να σχηματίζεται ανακυκλοφορία, μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με την απόσταση των εκατέρωθεν κτιρίων σε τρεις κατηγορίες [53], σχήμα 5.



Σχήμα 5: Είδη ροών ανάλογα με τον λόγο επιμήκους.  
Figure 5: Flow regimes for various aspect ratios.

Η κατηγορία (γ) είναι αυτή για την οποία έχουμε μιλήσει λίγο παραπάνω με το χαρακτηριστικό βρόχο ανακυκλοφορίας.

Αν τα κτίρια απομακρυνθούν λίγο, περνάμε στην κατηγορία (β), όπου ο βρόχος που οφείλεται στον όμορο του πρώτου κτιρίου δε φτάνει μέχρι τον δεύτερο και αλληλεπιδρά με τη ροή που διαμορφώνεται μπροστά από αυτό.

Τέλος, αν απομακρυνθούν κι άλλο τα κτίρια φτάνουμε στη ροή (α), όπου τα κτίρια είναι τόσο μακριά που το καθένα έχει το δικό του διαμορφωμένο όμορο.

Η μετάβαση από τη ροή (γ) στη (β) δεν επηρεάζεται πολύ από τρισδιάστατα φαινόμενα και συμβαίνει περίπου για λόγο  $H/W=0,7$  [53].

Αντίθετα από (β) σε (α) ο λόγος μετάβασης μικραίνει όσο μεγαλώνει το μήκος του φαραγγιού [67]. Βάσει αριθμητικής προσομοίωσης των Sini et al. [67], για άπειρο μήκος (δισδιάστατη περίπτωση) η μετάβαση από τύπου (β) σε (α) γίνεται για λόγο μικρότερο του  $H/W=0,2$ .

Οι ροές απόξεσης (skimming flows) μπορούν να καταταχθούν περαιτέρω.

Για λόγους  $H/W$  μεγαλύτερους του 1,3 τα πειράματα και οι αριθμητικές μελέτες έχουν δείξει ότι το κέντρο του βρόχου ανακυκλοφορίας μεταφέρεται προς τα πάνω, ενώ κοντά στο επίπεδο του δρόμου ο αέρας είναι σχεδόν σταθερός [73] με πολύ χαμηλές ταχύτητες, παρέχοντας καλύτερη προστασία στους ανθρώπους, αλλά οξύνοντας τα προβλήματα ρύπανσης.

Γενικά για βαθιές χαράδρες κοντά στο επίπεδο του δρόμου η συμπεριφορά είναι ασταθής και τα φαινόμενα είναι δύσκολα προσδιορίσιμα.

Πάντως έχει επανειλημμένα παρατηρηθεί ότι για λόγους  $H/W>2$ , μπορεί να σχηματιστεί δεύτερος ασθενής αντιστρεφόμενος βρόχος στο βάθος της χαράδρας [54, 67, 28, 41, 12, 15, 6, 69, 40].

Ακόμη και οι DePaul and Sheih [20] αναφέρουν παρατήρηση δεύτερου βρόχου για υψηλές ταχύτητες ελεύθερου ανέμου, παρόλο που ο λόγος  $H/W$  σ' αυτούς ήταν μόλις 1,4. Υπάρχει επίσης περίπτωση [44] να μην παρατηρηθεί σαφής δεύτερος βρόχος.

Για ακόμη πιο ψηλά κτίρια  $H/W>3$  έχουν παρατηρηθεί τρεις βρόχοι, όπου ο τρίτος είναι ακόμη πιο μικρός, ασθενής και ασαφής από τον δεύτερο [67, 28, 12]. Αυτή η αλυσίδα βρόχων προκαλεί πολύ χαμηλές ταχύτητες κοντά στο επίπεδο του δρόμου, χαμηλή ένταση τύρβης και μειωμένη συναγωγή [67].

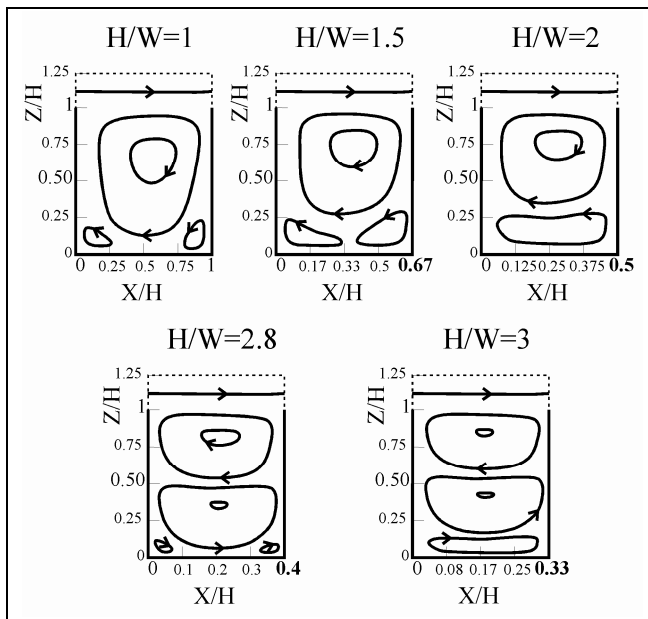
Συγκεκριμένα η ταχύτητα λίγα μέτρα πάνω από το επίπεδο του δρόμου έχει μια τυπική τιμή  $0,001U_H$ .

Μια εικόνα για τον μηχανισμό με τον οποίο δημιουργείται η αλυσίδα βρόχων μπορούμε να πάρουμε από το σχήμα 6. Αρχίζοντας από λόγο  $H/W=1$  παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο μικροί βρόχοι στις γωνίες των κτιρίων, κάτω δεξιά και κάτω αριστερά από τον κύριο βρόχο. Αυτοί, όσο βαθιάει το κανάλι, μεγαλώνουν, μέχρι που να ενωθούν και να φτιάξουν τον δεύτερο βρόχο για περίπου  $H/W=2$ .

Περαιτέρω βάθυνση προκαλεί πάλι την ανάπτυξη των δύο γωνιακών βρόχων, που τελικά ενώνονται και φτιάχνουν τον τρίτο βρόχο για περίπου  $H/W=3$ .

Περισσότεροι βρόχοι δεν έχουν αναφερθεί και δεν έχουν πρακτική σημασία. Άλλωστε οι βρόχοι στο κάτω μέρος της χαράδρας είναι τόσο ασταθείς και οι ταχύτητες τόσο μικρές, που στην πράξη ισοδυναμούν με λιμνάζουσα ροή.

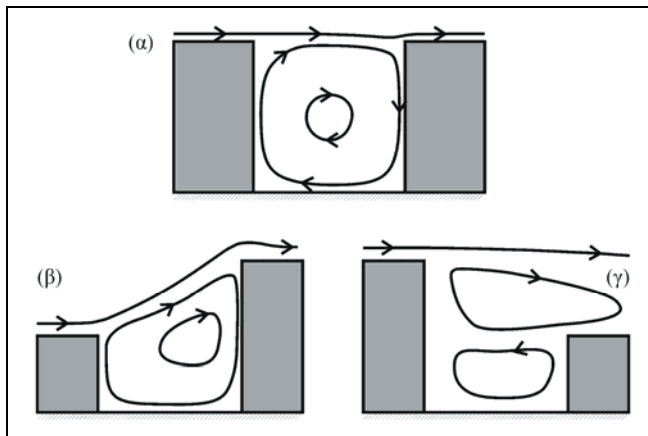
Στο σχήμα 6, που έχει βασιστεί σε αριθμητική μελέτη των Jeong and Andrews, [28], φαίνονται τα διάφορα είδη ροών απόξεσης ανάλογα με τον αριθμό των βρόχων και η μετάβαση από το ένα είδος στο άλλο.



Σχήμα 6: Γραμμές ροής για διάφορους λόγους H/W.  
Figure 6: Streamlines for various aspect ratios H/W.

### 3.4 Η ροή σε ασύμμετρες χαράδρες

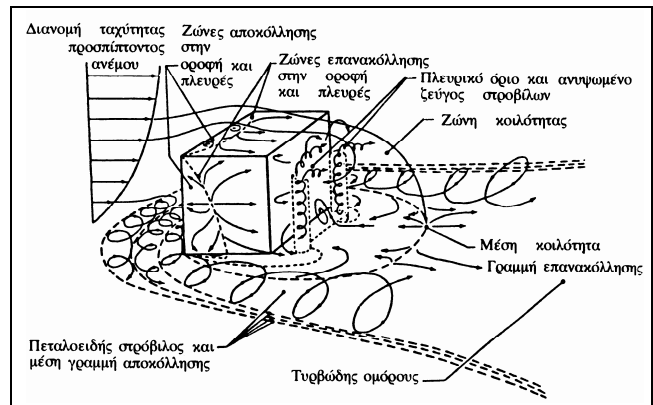
Έχει παρατηρηθεί, αλλά και διερευνηθεί αριθμητικά ότι η ροή σε μη συμμετρικές χαράδρες έχει συνήθως μεγαλύτερο αερισμό, ιδίως στην περίπτωση αύξησης αναβαθμού, όπου, επίσης παρατηρείται ισχυρότερος στρόβιλος [21]. Επίσης, στις ασύμμετρες χαράδρες η μορφή της ροής μεταβάλλεται σε σχέση με τη συμμετρική χαράδρα, ιδίως στην περίπτωση μείωσης αναβαθμού (step-down) [4], όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Σύγκριση ροής συμμετρικών και ασύμμετρων οδικών χαράδρων. (α) Συμμετρική χαράδρα, (β) Αύξηση αναβαθμού, (γ) Μείωση αναβαθμού.  
Figure 7: Flow in symmetric and asymmetric street canyons. (α) Symmetric canyon, (β) Step-up, (γ) Step-down.

### 3.5 Τρισδιάστατα φαινόμενα της ροής

Η τρισδιάστατη ροή γύρω από κτίρια είναι πολύ περίπλοκη (σχήμα 8).



Σχήμα 8: Τρισδιάστατη ροή γύρω από κτίριο [82].  
Figure 8: Three dimensional flow around a building [82].

Αναμένουμε λοιπόν και σε τρισδιάστατη ροή μεταξύ κτιρίων παρόμοιους σχηματισμούς. Πράγματι, τρισδιάστατη προσομοίωση που έκαναν οι Hunter et al. [27] έδειξε τον σχηματισμό δύο δινών εκατέρωθεν του ανάντι κτιρίου, παρόμοιων με το ζεύγος στρόβιλων που φαίνεται στο σχήμα 8.

Οι δίνες αυτές είναι που πολλές φορές παγιδεύουν τα φύλλα ή άλλα σκουπίδια κοντά στις γωνίες των κτιρίων, αποτελώντας μια ενόχληση για τους πεζούς. Επίσης στην ύπαρξη των δινών αυτών αποδίδουν οι Hoydysh and Dabberdt [25] τις αυξημένες συγκεντρώσεις στο κεντρικό τμήμα της οδικής χαράδρας που μετρήσανε. Μια τυπική έκτασή τους είναι 1,5H [27]. Αν ο άνεμος δεν είναι τελείως κάθετος αλλά έχει και μια παράλληλη συνιστώσα, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σπειροειδής ροή μπροστά από το κατάντι κτίριο, όπως αυτή μπροστά από το κτίριο του σχήματος 8 [73].

Σε πραγματικές οδικές χαράδρες που βρίσκονται μέσα σε πόλεις, παρατηρούνται, επίσης, αξιόλογα τρισδιάστατα φαινόμενα. Πράγματι, από πειραματικές και αριθμητικές μελέτες που έχουν γίνει [60, 16, 35, 50, 17, 74, 39, 44, 9], έχει φανεί η μεγάλη επίδραση που έχουν στη ροή τυχόν ανοίγματα ή παράπλευροι δρόμοι, παρόλο που μακριά απ' αυτά, στο κέντρο της χαράδρας, η ροή μπορεί να είναι εν μέρει έτσι που την περιγράφουν οι εξιδανικευμένες δισδιάστατες και τρισδιάστατες μελέτες. Όλα τα γνωστά φαινόμενα παρατηρούνται και στις πραγματικές πόλεις, αλλά περιπλέκονται τόσο πολύ μεταξύ τους που για να έχει κανείς μια πραγματική εικόνα της ροής πρέπει να χρησιμοποιήσει μοντελοποίηση ή μετρήσεις. Αξίζει εδώ να αναφερθούν άλλα δύο πειράματα πεδίου που έχουν γίνει στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος TRAPOS (<http://www2.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/trapos/main.htm>) και συγκεκριμένα το πείραμα της Νάντης 1999 [46, 48] και

η άσκηση του δρόμου Podbielskistrasse [43, 5]. Τέλος αξιολογικά πρόσφατα πειράματα πεδίου στην Αμερική είναι το Joint URBAN 2003 στην Οκλαχόμα, φυσική μοντελοποίηση του οποίου έχει γίνει από την ομάδα της Kastner-Klein [32] και το Mock Urban Setting Trial (MUST) [81].

Δεδομένης της επίδρασης που έχουν οι παράπλευροι δρόμοι στη διαμόρφωση της ροής σε πραγματικές οδικές χαράδρες, έχουν γίνει και μελέτες ειδικά για τη ροή και διασπορά ρύπων σε διασταυρώσεις δρόμων [64, 3, 61]. Οι Ahmad et al. [2], παρέχουν μια ανασκόπηση τέτοιων προ-σπαθειών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δρόμων που δεν περιορίζεται μόνο στη διασταύρωση, ειδικά αν ο άνεμος είναι πλάγιος ή αν κάποιος δρόμος είναι ελαφρά μετατοπισμένος.

### 3.6 Επίδραση της κυκλοφορίας των αυτοκινήτων

Έχει διαπιστωθεί ότι τα αυτοκίνητα που κινούνται στον δρόμο αλλάζουν την τύρβη και επηρεάζουν τη ροή και τη διασπορά ρύπων, σε βαθμό που συχνά είναι σημαντικός [20, 21, 29, 44, 1, 72, 31, 60]. Ιδίως για χαμηλές τιμές του ανέμου της ελεύθερης ροής, οι DePaul and Sheih [20] παρατήρησαν επίδραση της οχηματογενούς τύρβης μέχρι τα 7 μέτρα ύψος. Οι Longley et al. [44] αναφέρουν ότι οι διακυμάνσεις ταχυτήτων που μέτρησαν σε δρόμο με κίνηση σε σχέση με δεδομένα δρόμου χωρίς κυκλοφορία μπορούσαν να δικαιολογηθούν μόνο εξαιτίας των οχημάτων. Μάλιστα διαπίστωσαν ότι η επίδραση ήταν σημαντική μέχρι τουλάχιστον 3 μέτρα ύψος. Οι Ahmad et al. [1] μέτρησαν πειραματικά σε αεροσήραγγα την επίδραση στην αδιάστατη συγκέντρωση και διαπίστωσαν μη αμελητέες διαφορές.

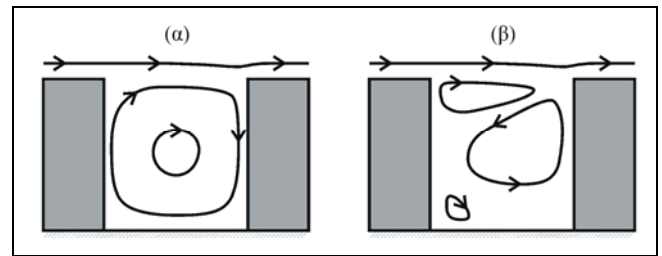
Η επίδραση των οχημάτων στην τύρβη μέσα στην οδική χαράδρα έχει διαπιστωθεί, αλλά είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί, τόσο αριθμητικά όσο και φυσικά (σε αεροσήραγγα). Άλλωστε εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα δεδομένα της στιγμής που γίνεται το πείραμα και του συγκεκριμένου δρόμου που μας ενδιαφέρει. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ροή μέσα στη χαράδρα επηρεάζεται κυρίως από τον άνεμο και τη γεωμετρία, ενώ τα υπόλοιπα δεδομένα παίζουν δευτερεύουσας σημασίας ρόλο [73], μας κάνει προς το παρόν να περιοριζόμαστε συνήθως μόνο στην ποιοτική περιγραφή της επίδρασης της κυκλοφορίας, ότι δηλαδή η οχηματογενής τύρβη επηρεάζει τη ροή κοντά στον δρόμο και βοηθάει στη μείωση των συγκεντρώσεων ρύπων.

Στην τύρβη των οχημάτων αποδίδουν και οι Stocker et al. [68] κάποιες μη γραμμικότητες που διαπίστωσαν μεταξύ των εκπομπών και των συγκεντρώσεων που προκαλούσαν αυτές.

Τέλος, να σημειωθεί ότι και άλλα στοιχεία τραχύτητας της χαράδρας που μπορεί να μην κινούνται, όπως σταθμευμένα οχήματα, δέντρα, μπαλκόνια, περίπτερα κτλ μπορεί, επίσης, να επηρεάζουν (λιγότερο) τη ροή [70, 55, 59, 23].

### 3.7 Θερμικά φαινόμενα

Η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας και άλλα θερμικά φαινόμενα όπως η διαφορετική θέρμανση των εκατέρωθεν κτιρίων από τον ήλιο ή ο πιο ζεστός δρόμος, είναι δυνατόν να επηρεάσουν μερικές φορές σημαντικά τη μορφή της ροής μέσα στην οδική χαράδρα [67, 46, 37, 49, 71, 36, 12], όπως φαίνεται και στο σχήμα 9, το οποίο έχει βασιστεί σε μια μελέτη των Louka et al. [46].



Σχήμα 9: Ροή σε χαράδρα χωρίς (α) και με (β) θερμικές επιδράσεις στην προσήνεμη μεριά.

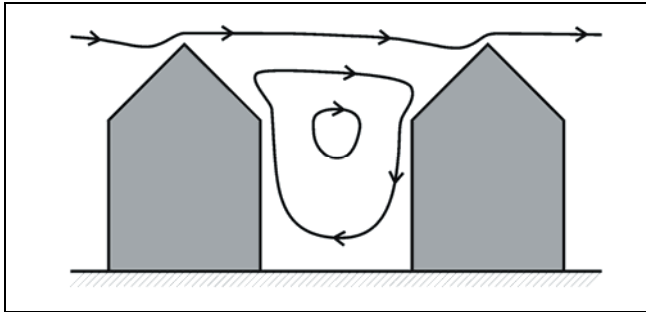
Figure 9: Street canyon flow with (β) and without (α) heating the downwind side.

Παρατηρούμε στο σχήμα ότι καθώς θερμαίνεται από τον ήλιο η προσήνεμη πλευρά, έχει δημιουργηθεί ακριβώς μπροστά της ένα ανοδικό ρεύμα από τον αέρα που ζεσταίνεται λόγω φυσικής συναγωγής. Το αποτέλεσμα είναι ο δεξιόστροφος βρόχος που σε άλλες περιπτώσεις θα κυριαρχούσε στη χαράδρα να περιοριστεί σε ένα μικρό πάνω τμήμα, ενώ πλέον ο αριστερόστροφος βρόχος που δημιουργείται λόγω του ανοδικού θερμού ρεύματος να είναι μεγαλύτερος και να καταλαμβάνει την κεντρική περιοχή.

Οι Nakamura and Oke [49] μέτρησαν σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας μόνο πολύ κοντά (σε απόσταση μικρότερη από μισό μέτρο) στις άμεσα θερμαινόμενες επιφάνειες, ενώ όλη η υπόλοιπη χαράδρα είχε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία, μένοντας τις περισσότερες φορές σε ασταθή ή ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια και της μέρας και της νύχτας. Επίσης, οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ του αέρα μέσα στην οδική χαράδρα και του εξωτερικού αέρα ήταν πολύ μικρές, πράγμα που επιβεβαιώθηκε και με νεότερα πειράματα [51]. Οι Uehara et al. [71] διαπίστωσαν ότι η κεντρική δίνη μεταξύ των κτιρίων είναι πιο αδύνατη, όταν η ατμόσφαιρα είναι σε κατάσταση ευστάθειας. Στο πείραμα της Νάντης 1999 [46], διαπιστώθηκε η ύπαρξη ροής προς τα πάνω πολύ κοντά στον θερμαινόμενο τοίχο, που πιστεύεται ότι έπαιζε τον δικό του ρόλο στη μεταφορά των ρύπων. Οι Ca et al. [12] αναφέρουν θερμικές επιδράσεις μη αμελητέες μόνο για ασθενείς ανέμους ή μεγάλο λόγο επιμήκους. Τέλος, οι Sini et al. [67] διαπιστώνουν ότι η διαφορετική θέρμανση των διαφόρων τμημάτων της χαράδρας μπορεί ν' αλλάξει σημαντικά τη ροή και να επηρεάσει τη θέση κι ακόμη και τον αριθμό των στροβίλων που υπάρχουν σ' αυτή.

### 3.8 Η ροή για κτίρια με κεκλιμένες στέγες

Από μελέτες που έχουν γίνει [33, 76, 30, 45, 57, 79], έχει διαπιστωθεί ότι η μορφή που έχουν οι στέγες των σπιτιών επιδρά σημαντικά στην τελική διαμόρφωση της ροής μέσα στη χαράδρα και στην ευκολία απαγωγής των ρύπων απ' αυτή. Μια ενδεικτική εικόνα της ροής μέσα στην οδική χαράδρα για κεκλιμένες στέγες φαίνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Διαμόρφωση πεδίου ροής μέσα σε οδική χαράδρα με κτίρια που έχουν κεκλιμένες στέγες.

Figure 10: Flow field in a street canyon with slanted roofs.

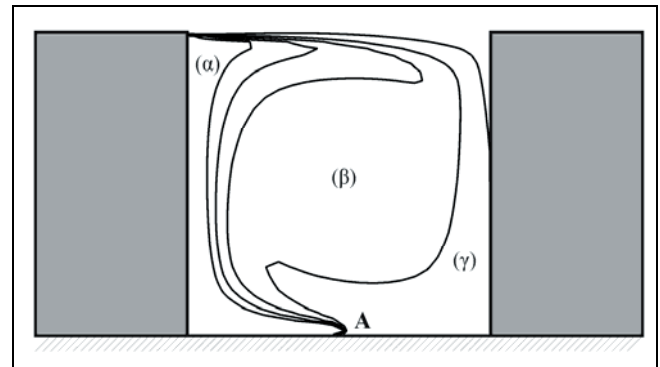
Ο κύριος βρόχος ανακυκλοφορίας έχει αλλάξει σχήμα για να προσαρμοστεί στη συγκεκριμένη γεωμετρία και το κέντρο του έχει μεταφερθεί προς τα πάνω. Είναι γνωστό ότι η χρήση κεκλιμένων στεγών δημιουργεί μεγάλη επιβράδυνση στη ροή ακριβώς πάνω από την οδική χαράδρα και επιδρά στο πεδίο ταχυτήτων πολύ περισσότερο απ' ό τι η πυκνότητα των κτιρίων [57]. Για περισσότερες σχηματικές αναπαραστάσεις της ροής για διάφορους συνδυασμούς κεκλιμένων στεγών ο αναγνώστης παραπέμπεται στην εργασία των Xie et al. [79], κάποια στοιχεία από την οποία θ' αναφερθούν και παρακάτω στο κεφάλαιο για τη διασπορά των ρύπων.

## 4. Η ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΟΔΙΚΗ ΧΑΡΑΔΡΑ

Η διασπορά των ρύπων εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: τις εκπομπές και τη ροή. Με δεδομένες τις εκπομπές σε ένα κανάλι το δύσκολο είναι να προσδιορίσουμε τη ροή, συνέπεια της οποίας θα είναι οι συγκεντρώσεις ρύπων σε διάφορα σημεία. Μάλιστα ως πρώτη αρκετά ικανοποιητική ωστόσο, προσέγγιση, ο ρύπος μπορεί να θεωρηθεί αδρανής [75] και ανωστικά ουδέτερος [63]. Οπότε μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο συγκεντρώσεων για έναν ρύπο και θα είναι το ίδιο και για τους άλλους, αλλάζοντας μόνο το μέγεθος του ανάλογα με αυτό της εκπομπής του ρύπου για τον οποίο ενδιαφερόμαστε.

Έτσι, όπως είναι λογικό και αναμενόμενο από τη μορφή της ροής που έχουμε δει ως τώρα, στην υπήνεμη πλευρά μαζεύονται περισσότεροι ρύποι εξαιτίας του στροβίλου που

στο επίπεδο του δρόμου κατευθύνεται προς τα 'κει (σχήμα 4) μεταφέροντας και τα καυσαέρια των αυτοκινήτων. Μετά η ροή ανεβαίνει προς τα πάνω, οπότε η ρύπανση πάει εκεί, διαρκώς μειούμενη, όμως, καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή (σκιασμένη περιοχή στο σχήμα 1). Στην προσήνεμη πλευρά οι συγκεντρώσεις θα είναι λογικά χαμηλότερες, σε γενικές γραμμές περίπου οι μισές [25]. Επίσης, περιμένουμε ότι μόνο λίγοι ρύποι θα διαφεύγουν του στροβίλου προς τα έξω. Όλα αυτά έχουν διαπιστωθεί, ήδη, με τα πρώτα πειράματα, που έγιναν κυρίως τη δεκαετία του 1970. Ήδη από τότε το πιο μεγάλο ενδιαφέρον που αποτελούσε τον κινητήριο μοχλό όλων αυτών των μελετών, ήταν η διασπορά των ρύπων και, κυρίως, του CO. Μια τυπική εικόνα που παρουσιάζουν οι γραμμές των ισοσυγκεντρώσεων για οδική χαράδρα με  $H/W=1$  φαίνεται στο σχήμα 11, στο οποίο ο άνεμος θεωρείται ότι έρχεται από τ' αριστερά.



Σχήμα 11: Τυπική κατανομή συγκεντρώσεων σε οδική χαράδρα.

Figure 11: Concentration contours in a street canyon.

Με το σημείο A συμβολίζεται η θέση της πηγής των ρύπων. Σε γενικές γραμμές οι συγκεντρώσεις της περιοχής (α) είναι περίπου διπλάσιες αυτών της περιοχής (γ). Επίσης, κοντά στους τοίχους των κτιρίων οι συγκεντρώσεις πέφτουν εκθετικά με το ύψος και μάλιστα οι Dabbert και Hoydysh [19] προσδιορίζουν μια τέτοια εκθετική σχέση. Στην ίδια εργασία έχουν διερευνηθεί πολλές κατευθύνσεις ανέμου και διαπιστώθηκε ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις υπάρχουν για κατευθύνσεις ανέμου κάθετες ή παράλληλες, δηλαδή όταν ο άνεμος σχηματίζει γωνία  $90^\circ$  ή  $0^\circ$  με τον άξονα του δρόμου [19]. Το γεγονός ότι σε παράλληλες διευθύνσεις ανέμου έχουμε σε μακριές οδικές χαράδρες πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις στο επίπεδο του δρόμου, αναφέρεται και έχει παρατηρηθεί και σε άλλες εργασίες [73, 39] και δείχνει ότι η συσσώρευση των ρύπων κατά μήκος του δρόμου μπορεί να υπερσχύει του αυξημένου αερισμού της χαράδρας, όταν ο άνεμος είναι παράλληλος.

Τέλος, οι μελέτες που αφορούν ασύμμετρες χαράδρες έδειξαν ότι στην περίπτωση αύξησης αναβαθμού (step-up) οι συγκεντρώσεις είναι λιγότερες [63]. Στην περίπτωση μείωσης αναβαθμού μπορεί να παρατηρηθούν υψηλότερες συγκεντρώσεις στην προσήνεμη πλευρά [4], αν το ύψος του κατάντι της ροής κτιρίου είναι κάτω από κάποιο όριο,

γιατί τότε δημιουργούνται δύο αντιπεριστροφόμενοι στρόβιλοι [80].

Γενικά στις συγκεντρώσεις παίζουν ρόλο, κυρίως, οι εκπομπές και δευτερευόντως ο άνεμος. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά από τη μελέτη των Jicha et al. [29], όπου διπλασιασμός της κυκλοφορίας αυτοκινήτων προκαλεί πολύ μεγαλύτερη αύξηση στις τελικές συγκεντρώσεις από υποδιπλασιασμό της ταχύτητας της ελεύθερης ροής. Οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν ότι βρήκαν επίδραση ανάλογα και με το αν υπάρχει μία ή δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Η σπουδαιότητα των εκπομπών και της θέσης τους αναφέρεται και σε άλλες εργασίες [42, 33]. Αντίθετα, η κατεύθυνση προς την οποία εκπέμπονται οι ρύποι δε φαίνεται να παίζει ρόλο [76].

Πειράματα που έκαναν οι Qin and Kot [56] δείχνουν, επίσης, ότι όταν ο άνεμος είναι πολύ χαμηλός, οξύνεται η ρύπανση στη χαράδρα. Επίσης έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις αύξησης των συγκεντρώσεων με το ύψος κοντά στο δρόμο, πράγμα που μάλλον οφείλεται στην τύρβη που προκαλούν τα οχήματα, που βοηθά τη διασπορά των ρύπων χαμηλά. Γενικά η κυκλοφορία των οχημάτων επηρεάζει σημαντικά τη ροή και τη διάχυση (§3.6). Ένας άλλος βασικός παράγοντας που επηρεάζει είναι ο λόγος επιμήκους. Με την αύξησή του παραμένουν περισσότεροι ρύποι στη χαράδρα και σε γενικές γραμμές αυξάνει η συγκέντρωσή τους [18, 36]. Επίσης, σε βαθιές χαράδρες, που μπορεί να σχηματιστούν περισσότεροι από ένας στρόβιλοι, δημιουργείται πολύ μεγαλύτερη παγίδευση των ρύπων, οι οποίοι δε μπορούν να διαφύγουν από τους κατώτερους στρόβιλους. Η τυρβώδης διάχυση τότε κοντά στον δρόμο είναι, επίσης, χαμηλή και έχει μια στρωματοποιημένη δομή, πράγμα που επίσης μειώνει την κατακόρυφη διασπορά του ρυπαντή και επιτείνει το φαινόμενο [28]. Όπως αναφέρουν οι Vardoulakis et al. [73], γενικά οποιοδήποτε σημείο έχει στρόβιλους, έστω και μικρούς όπως στις γωνίες των κτιρίων με τον δρόμο, είναι πιθανό να παγιδευτούν ρύποι. Τέλος οι Qin and Kot [56] δε μπόρεσαν να βρουν ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου μεταξύ των οροφών των κτιρίων και στις συγκεντρώσεις ανάμεσά τους.

Το τελευταίο φαινόμενο το διερεύνησαν διεξοδικά οι Baik and Kim [7]. Συγκεκριμένα εστίασαν τη μελέτη τους στην περιοχή ανάμεσα στις δύο οροφές των κτιρίων, δηλαδή στο πάνω όριο της οδικής χαράδρας και διαπίστωσαν ότι σε όλη αυτή τη γραμμή η τυρβώδης μεταφορά των ρύπων είναι προς τα πάνω, ενώ η λόγω συναγωγής μεταφορά είναι πολύ μικρότερη και είναι άλλοτε προς τα πάνω και άλλοτε προς τα κάτω. Μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις η τελική συνεισφορά της δια συναγωγής μεταφοράς του ρύπου είναι αρνητική, δηλαδή επαναφέρει ένα μικρό ποσοστό των ρύπων πίσω στη χαράδρα. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια έχει μεγάλες τιμές στην κορυφή της χαράδρας, ειδικά στην προσήνεμη μεριά. Απ' όλη την εργασία συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι ρύποι φεύγουν από τη χαράδρα εξαιτίας της τυρβώδους διάχυσης.

Να σημειωθεί ότι σύμφωνα με πειράματα οπτικοποίησης της ροής και ακριβείς αριθμητικές προσομοιώσεις με μοντέ-

λα τύρβης μεγάλων δινών (LES), έχει φανεί ότι ο στρόβιλος μέσα στη χαράδρα δεν είναι σταθερός, αλλά αυξομειώνεται και οι ρύποι φεύγουν κατά σπαστά διαστήματα από τη χαράδρα με τυχαίο τρόπο [54, 77, 12, 13]. Ο ασταθής χαρακτήρας της ροής φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στην πειραματική μελέτη με κανάλι νερού των Caton et al. [13].

Ένας άλλος παράγοντας που αναμένεται να επηρεάζει τη διασπορά των ρύπων και την απομάκρυνσή τους από τη χαράδρα είναι και η κατάσταση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις όπως το βράδυ που το έδαφος έχει ψυχθεί λόγω ακτινοβολίας και έχει αποκτήσει χαμηλότερη θερμοκρασία από το υπερκείμενο στρώμα της ατμόσφαιρας, υπάρχει μια θετική θερμοβαθμίδα όπως λέγεται, δηλαδή αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος. Αυτό αποδεικνύεται ότι αντίκειται στις κατακόρυφες μετακινήσεις αερίων μαζών, λόγω δυνάμεων άνωσης που αναπτύσσονται εξαιτίας της διαφοράς πυκνοτήτων ενός τμήματος ρευστού (που μπορεί για κάποιο τυχαίο λόγο να τείνει να μετακινηθεί) και του περιβάλλοντος αέρα. Πρόκειται για τη λεγόμενη ευσταθή κατάσταση της ατμόσφαιρας, στην οποία οι κατακόρυφες διαταραχές ταχύτητας του αέρα εξασθενούν. Το αποτέλεσμα είναι να μην ευνοείται η διασπορά των ρύπων και η απαγωγή τους προς μεγαλύτερα ύψη, καθώς παγιδεύονται στο κατακόρυφο επίπεδο που παρήχθησαν, δηλαδή εντός της οδικής χαράδρας. Πράγματι, πειραματικές μετρήσεις σε αεροσήραγγα [58] έχουν επιβεβαιώσει αυτό το φαινόμενο. Το αντίθετο αναμένεται να συμβαίνει σε περιπτώσεις ασταθούς κατάστασης της ατμόσφαιρας, όπου κάθε κατακόρυφη μετακίνηση του ρευστού ενισχύεται.

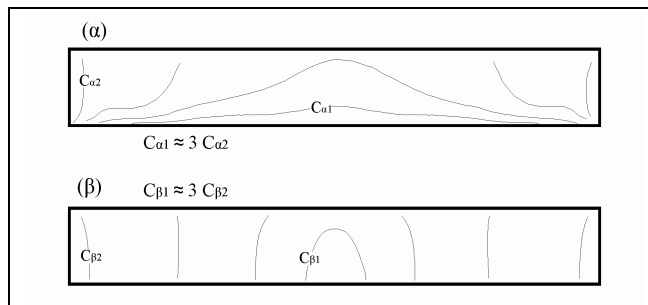
Επιδράσεις στη διασπορά ρύπων λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών μπορεί να έχουμε και λόγω διαφορετικής θέρμανσης των τοιχωμάτων της χαράδρας ή του δρόμου, η οποία μπορεί να οφείλεται στον ήλιο ή σε άλλους παράγοντες. Πράγματι, από μελέτες που έχουν γίνει [67, 36] έχει φανεί ότι θέρμανση του δρόμου ή της υπήνεμης πλευράς, προκαλεί γενικά αύξηση της έντασης του κυρίου βρόχου και καλύτερη διασπορά ρύπων. Στην περίπτωση της προσήνεμης πλευράς, όμως, μπορεί το ανωστικό θερμικό ρεύμα να υπερισχύσει του καθοδικού μηχανικού ρεύματος και να δημιουργηθεί κάτω από τον κύριο βρόχο αντιπεριστροφόμενος βρόχος, όπως είδαμε και στο σχήμα 9, ο οποίος παγιδεύει τους ρύπους. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να έχουμε σημαντικά αυξημένες συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με τους Kim και Baik [36] αυτό συμβαίνει μόνο μέχρι ένα λόγο επιμήκους H/W γύρω στο 1,5 με 2, καθώς μετά παρουσιάζονται έτσι κι αλλιώς αντιπεριστροφόμενοι στρόβιλοι και τότε κάθε είδους θέρμανση, ακόμη και στην προσήνεμη πλευρά, ευνοεί τον αερισμό της χαράδρας.

Για τη διευκόλυνση του αερισμού της οδικής χαράδρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τεχνικές όπως η αλλαγή του σχήματος της οροφής των κτιρίων. Πράγματι, σε περίπτωση ευσταθούς κατάστασης της ατμόσφαιρας η χρήση κεκλιμένων στεγών βοηθάει εν μέρει να ξεπεραστεί η παγίδευση των ρύπων λόγω ευστάθειας [57]. Γενικότερα οι οδικές χαράδρες με κεκλιμένες στέγες έχουν απασχολήσει



αρκετούς μελετητές [54, 30, 79, 33] και έχει φανεί ότι η μορφή των στεγών μπορεί να είναι συγκρίσιμης σημασίας με τον λόγο επιμήκους όσον αφορά στην επίδρασή της στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μέσα στη χαράδρα [30]. Ο λόγος είναι ότι η αλλαγή της γεωμετρίας επιφέρει σοβαρές και μερικές φορές απρόβλεπτες μεταβολές στη ροή, οι οποίες επιδρούν άμεσα στη διασπορά των ρύπων. Για παράδειγμα, αν προσθέσουμε στο ανάντι της ροής κτίριο του σχήματος 4 μια τριγωνική στέγη, υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθεί μέσα στη χαράδρα δεύτερος αντιπεριστρεφόμενος στρόβιλος κοντά στον δρόμο, που παγιδεύει τους ρύπους [79]. Πάντως σε μια κανονική οδική χαράδρα με λόγο επιμήκους 1, η αντικατάσταση των κτιρίων με άλλα με κεκλιμένες στέγες ίσου συνολικού ύψους, θα έχει ευνοϊκά αποτελέσματα στην απαγωγή των ρύπων έξω από τη χαράδρα [79].

Όσον αφορά στη διασπορά ρύπων στις τρισδιάστατες οδικές χαράδρες, το κύριο φαινόμενο που παρατηρείται είναι ο υψηλότερος αερισμός στα άκρα της χαράδρας.



Σχήμα 12: Ισοσυγκεντρώσεις για υπήνεμη (α) και προσήνεμη (β) πλευρά τρισδιάστατης οδικής χαράδρας.

Figure 12: Concentration contours at leeward (α) and windward (β) side of a three-dimensional street canyon.

Έτσι, αν στις προσόψεις των κτιρίων της προσήνεμης και της υπήνεμης πλευράς απεικονίσουμε τις γραμμές ίσων συγκεντρώσεων, θα δούμε ότι οι υψηλότερες τιμές είναι στο κεντρικό τμήμα της χαράδρας, όπως φαίνεται στο σχήμα 12, που έχει βασιστεί, κυρίως, σε μια τρισδιάστατη μελέτη των Crowther and Hassan [18], που αποτελεί συνέχεια παλαιότερης δισδιάστατης μελέτης τους [24].

Κλείνοντας αυτή την παράγραφο, αξίζει ν' αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιεύσεις που παρέχουν συμβουλές για τον πολεοδομικό σχεδιασμό, ώστε να ελαχιστοποιείται η παγίδευση ρύπων στις οδικές χαράδρες [14, 15].

## 5. ΚΛΕΙΣΙΜΟ

Επιχειρήθηκε να παρουσιαστούν με απλό και κατανοητό, αλλά συνάμα πλήρη και δομημένο τρόπο οι κύριες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στις οδικές χαράδρες, με αποκλειστική βάση τις διεθνείς επιστημονικές εργασίες στο θέμα. Ο αναγνώστης που θέλει ν' ασχοληθεί περαιτέρω

παραπέμπεται στη βιβλιογραφία, με την πρόταση ν' αρχίσει τη μελέτη από το διάβασμα κατά σειρά των εργασιών Hunter et al. [27], Sini et al. [67], DePaul and Sheih [20], Hassan and Crowther [24], Jeong and Andrews [28], Chan et al., [15], Assimakopoulos et al. [4], Vardoulakis et al. [73].

## 6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο ξεκίνημα της εργασίας αυτής ιδιαίτερα σημαντική ήταν η βοήθεια από το προσωπικό της μονάδας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής του τμήματος Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ και, κυρίως, από τον επιστημονικό συνεργάτη κ. Μιχάλη Χριστόλη. Επίσης, ευχαριστώ τον καθηγητή του ΑΠΘ Νικόλαο Μουσιόπουλο και τον καθηγητή του ΕΜΠ Γεώργιο Μπεργελέ για την άδεια να χρησιμοποιηθούν τα σχήματα 1 και 8, αντίστοιχα.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmad, K., Khare, M., Chaudhry, K.K., "Model vehicle movement system in wind tunnels for exhaust dispersion studies under various urban street configurations", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, Vol. 90, pp. 1051–1064.
- Ahmad, K., Khare, M., Chaudhry, K.K., "Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, Vol. 93, pp. 697–717.
- Andronopoulos, S., Grigoriadis, D., Robins, A., Venetsanos, A., Rafailidis, S., Bartzis, J.G., "Three-dimensional modelling of concentration fluctuations in complicated geometry", *Environmental Fluid Mechanics*, 2002, Vol. 1, No. 4, pp. 415–440.
- Assimakopoulos, V.D., ApSimon, H.M., Moussiopoulos, N., "A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations", *Atmospheric Environment*, 2003, Vol. 37, pp. 4037–4049.
- Baechlin, W., Mueller, W.J., Lohmeyer, A., "Comparison of concentration predictions, done by different modellers for the same street canyon (Podbi-Exercise)", *Seventh International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2001, Belgirate, Italy.
- Baik, J.-J., Kim, J.-J., "A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons", *Journal of Applied Meteorology*, 1999, Vol. 38, pp. 1576–1589.
- Baik, J.-J., Kim, J.-J., "On the escape of pollutants from urban street canyons", *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36, pp. 527–536.
- Barbosa, P.H.A., Cataldi, M., Freire, A.P.S., "Wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer flows", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 2002, Vol. XXIV, pp. 177–185.
- Barmpas, F., Moussiopoulos, N., Ossanlis, I., Colville, R., "Numerical study of the wind flow and the dispersion of traffic emitted pollution with RANS CFD in the Sir John Cass

- primary school area in central London”, *Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality*, 2007, Limassol, Cyprus.
10. Bottema, M., “Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion”, *Atmospheric Environment*, 1997, Vol. 31, No. 18, pp. 3059–3075.
  11. Britter, R.E., Hanna, S.R., “Flow and dispersion in urban area”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, Vol. 35, pp. 469–496.
  12. Ca, V.T., Asaeda, T., Ito, M., Armfield, S., “Characteristics of wind field in a street canyon”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, Vol. 57, pp. 63–80.
  13. Caton, F., Britter, R.E., Dalziel, S., “Dispersion mechanisms in a street canyon”, *Atmospheric Environment*, 2003, Vol. 37, pp. 693–702.
  14. Chan, A.T., Au, W.T.W., So, E.S.P., “Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: multiple canopies and canyons”, *Atmospheric Environment*, 2003, Vol. 37, pp. 2761–2772.
  15. Chan, T.L., Dong, G., Leung, C.W., Cheung, C.S., Hung, W.T., “Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon”, *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36, pp. 861–872.
  16. Chang, C.-H., Meroney, R.N., “Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, Vol. 89, pp. 1325–1334.
  17. Chang, C.-H., Meroney, R.N., “Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, Vol. 91, pp. 1141–1154.
  18. Crowther, J.M., Hassan, A.A., “Three-dimensional numerical simulation of air pollutant dispersion in street canyons”, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 2002, Vol. 2, pp. 279–295.
  19. Dabberdt, W.F., Hoydysh, W.G., “Street canyon dispersion: sensitivity to block shape and entrainment”, *Atmospheric Environment*, 1991, Vol. 25A, No. 7, pp. 1143–1153.
  20. DePaul, F.T., Sheih, C.M., “Measurements of wind velocities in a street canyon”, *Atmospheric Environment*, 1986, Vol. 20, No. 3, pp. 455–459.
  21. Eskridge, R.E., Rao, S.T., “Turbulent diffusion behind vehicles: experimentally determined turbulence mixing parameters”, *Atmospheric Environment*, 1986, Vol. 20, pp. 851–860.
  22. Fenger, J., Urban air quality, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, pp. 4877–4900.
  23. Gromke, C., Ruck, B., “Trees in urban street canyons and their impact on the dispersion of automobile exhausts”, *Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality*, 2007, Limassol, Cyprus.
  24. Hassan, A.A., Crowther, J.M., “Modelling of fluid flow and pollutant dispersion in a street canyon”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, Vol. 52, pp. 281–297.
  25. Hoydysh, W.G., Dabberdt, W.F., “Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons”, *Atmospheric Environment*, 1988, Vol. 22, No. 12, pp. 2677–2689.
  26. Huang, H., Akutsu, Y., Arai, M., Tamura, M., “A two dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis”, *Atmospheric Environment*, 2000, Vol. 34, pp. 689–698.
  27. Hunter, L.J., Johnson, G.T., Watson, I.D., “An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon”, *Atmospheric Environment*, 1992, Vol. 26B, pp. 425–432.
  28. Jeong, S.J., Andrews, M.J., “Application of the k-ε turbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon”, *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36, pp. 1137–1145.
  29. Jicha, M., Pospisil, J., Katolicky, J., “Dispersion of pollutants in street canyon under traffic induced flow and turbulence”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, Vol. 65, pp. 343–351.
  30. Kastner-Klein, P., Berkowicz, R., Britter, R., “The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons”, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2004, Vol. 87, pp. 121–131.
  31. Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., Rotach, M.W., “A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, Vol. 89, pp. 849–861.
  32. Kastner-Klein, P., Leidl, B., Pascheke, F., Schatzmann, M., “Wind-tunnel simulation of the Joint Urban 2003 tracer experiment”, *AMS Symposium on Urban Zone*, 2003, Seattle, WA.
  33. Kastner-Klein, P., Plate, E.J., “Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons”, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, pp. 3973–3979.
  34. Kastner-Klein, P., Rotach, M., “Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer”, *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, vol. 111, pp. 55–84.
  35. Ketzler, M., Louka, P., Sahm, P., Guilloteau, E., Sini, J.-F., Moussiopoulos, N., “Intercomparison of numerical urban dispersion models—Part II: street canyon in Hannover, Germany”, *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2002, Vol. 2, pp. 603–613.
  36. Kim, J.-J., Baik, J.-J., “A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons”, *Journal of Applied Meteorology*, 1999, Vol. 38, pp. 1249–1261.
  37. Kim, J.-J., Baik, J.-J., “Urban street-canyon flows with bottom heating”, *Atmospheric Environment*, 2001, Vol. 35, pp. 3395–3404.
  38. Klein, P., Leidl, B., Schatzmann, M., “Driving physical mechanisms of flow and dispersion in urban canopies”, *International Journal of Climatology*, 2007, Vol. 27, pp. 1887–1907.
  39. Koutsourakis, N., Neofytou, P., Venetsanos, A.G., Bartzis, J.G., “Parametric study of the dispersion aspects in a street-canyon area”, *International Journal of Environment and Pollution*, 2005, Vol. 25, pp. 155–163.
  40. Kovar-Panskus, A., Louka, P., Sini, J.-F., Savory, E., Czech, M., Abdelqari, A., Mestayer, P.G., Toy, N., “Influence of geometry on the mean flow within urban street canyons – a comparison of wind tunnel experiments and numerical simulations”, *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2002, Vol. 2, pp. 365–380.
  41. Lee, I.Y., Park, H.M., “Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons”, *Atmospheric Environment*, 1994, Vol. 28, pp. 2343–2349.
  42. Leidl, B. M., Meroney, R. N., “Car exhaust dispersion in a street canyon. Numerical critique of a wind tunnel experiment”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, Vol. 67&68, pp. 293–304.
  43. Lohmeyer, A., Mueller, W.J., Baechlin, W., “A comparison

- of street canyon concentration predictions by different modellers: final results now available from the Podbiexercise”, *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36, 157–158.
44. Longley, I.D., Gallagher, M.W., Dorsey, J.R., Flynn, M., Barlow, J.F., “Short-term measurements of airflow and turbulence in two street canyons in Manchester”, *Atmospheric Environment*, 2004, Vol. 38, pp. 69–79.
  45. Louka, P., Belcher, S. E., Harrison, R.G., “Modified street canyon flow”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, Vol. 74–76, pp. 485–493.
  46. Louka, P., Vachon, G., Sini, J.-F., Mestayer, P.G., Rosant, J.-M., “Thermal effects on the airflow in a street-canyon – Nantes ’99 experimental results and model simulations”, *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2002, Vol. 2, pp. 351–364.
  47. Mayer, H., “Air pollution in cities”, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, pp. 4029–4037.
  48. Mestayer, P.G., Vachon, G., Rosant, J.-M., “The Nantes ’99 data base for model validation of air quality in streets”, *Proceedings of the 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2002, Sofia, Bulgaria, pp. 297–300.
  49. Nakamura, Y., Oke, T.R., “Wind, temperature and stability conditions in an east–west oriented urban canyon”, *Atmospheric Environment*, 1988, Vol. 22, pp. 2691–2700.
  50. Neofytou, P., Venetsanos, A.G., Rafailidis, S., Bartzis, J.G., “Numerical investigation of the pollution dispersion in an urban street canyon”, *Fourth International Conference on Urban Air Quality – Measurement, Modelling and Management*, 2003, Charles University Prague, Czech Republic.
  51. Niachou, K., Livada, I., Santamouris, M., “Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions—Part I: Air and surface temperatures”, *Building and Environment*, 2008, Vol. 43, pp. 1383–1392.
  52. Nicholson, S.E., “A pollution model for street-level air”, *Atmospheric Environment*, 1975, Vol. 9, pp. 19–31.
  53. Oke, T.R., “Street design and urban canopy layer climate”, *Energy and Buildings*, 1988, Vol. 11, pp. 103–113.
  54. Pavageau, M., Rafailidis, S., Schatzmann, M., “A Comprehensive Experimental Databank for the Verification of Urban Car Emission Dispersion Models”, *International Journal of Environment and Pollution*, 1997, Vol. 8, pp. 738–46.
  55. Pavageau, M., Schatzmann, M., “Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon”, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, pp. 3961–3971.
  56. Qin, Y., Kot, S.C., “Dispersion of vehicular emission in street canyons, Guangzhou city, South China (P.R.C.)”, *Atmospheric Environment*, 1993, Vol. 27B, pp. 283–291.
  57. Rafailidis, S., “Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town”, *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, Vol. 85, pp. 255–271.
  58. Rafailidis, S., “Influence of stable atmospheric thermal stratification on urban street-canyon re-aeration”, *International Journal of Environment and Pollution*, 2001, Vol. 16, pp. 393–403.
  59. Rafailidis, S., “Near-field geometry effects on urban street canyon measurements for model validation”, *International Journal of Environment and Pollution*, 2000, Vol. 14, pp. 538–546.
  60. Riain, C.M.N., Fisher, B., Martin, C.J., Littler, J., “Flow field and pollution dispersion in a central London street”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, Vol. 52, pp. 299–314.
  61. Robins, A., Savory, E., Scaperdas, A., Grigoriadis, D., “Spatial variability and source-receptor relations at a street intersection”, *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2002, Vol. 2, pp. 381–393.
  62. Rotach, M., “On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion”, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, pp. 4001–4008.
  63. Sagrado, A.P. G., van Beeck, J., Rambaud, P., Olivari, D., “Numerical and experimental modelling of pollutant dispersion in a street canyon”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, Vol. 90, pp. 321–339.
  64. Scaperdas, A., Colvile, R., “Assessing the representativeness of monitoring data from an urban intersection site in central London, UK”, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, pp. 661–674.
  65. Schatzmann, M., Rafailidis, S., Pavageau, M., “Some remarks on the validation of small-scale dispersion models with field and laboratory data”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, Vol. 67&68, pp. 885–893.
  66. Shuyang, C., Nishi, A., Hirano, K., Ozono, S., Miyagi, H., Kikugawa, H., Matsuda, Y., Wakasugi, Y., “An actively controlled wind tunnel and its application to the reproduction of the atmospheric boundary layer”, *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, Vol. 101, pp. 61–76.
  67. Sini, J.-F., Anquetin, S., Mestayer, P.G., “Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons”, *Atmospheric Environment* 1996, Vol. 30, pp. 2659–2677.
  68. Stocker, J.R., Carruthers, D.J., Ellis, K., Rogers, L., “The non-linear relationship between road traffic emissions and pollutant concentrations” *Proceedings of the 10th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2005, Crete, pp. 432–436.
  69. Theodoridis, G., Moussiopoulos, N., “Influence of building density and roof shape on the wind and dispersion characteristics in an urban area: a numerical study”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, Vol. 65, pp. 407–415.
  70. Theurer, W., “Typical building arrangements for urban air pollution modelling”, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, pp. 4057–4066.
  71. Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S., Wakamatsu, S., “Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyon”, *Atmospheric Environment*, 2000, Vol. 34, pp. 1553–1562.
  72. Vachon, G., Louka, P., Rosant, J.-M., Mestayer, P.G., Sini, J.-F., “Measurements of traffic-induced turbulence within a street canyon during the Nantes ’99 experiment”, *Proceedings of the Third International Conference on Urban Air Quality*, 2000, Loutraki, Greece.
  73. Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., “Modelling air quality in street canyons: a review”, *Atmospheric Environment*, 2003, Vol. 37, pp. 155–182.
  74. Venetsanos, A.G., Huld, T., Adams, P., Bartzis, J.G., “Source, dispersion and combustion modeling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, *Journal of Hazardous Materials*, 2003, Vol. A105, pp. 1–25.
  75. Venetsanos, A.G., Vlachogiannis, D., Papadopoulos, A., Andronopoulos, S., Bartzis, J.G., “Studies of pollutant dispersion from moving vehicles”, *Water Air and Soil Pollution: Focus*, 2002, Vol. 2, pp. 325–337.

76. Vlachogiannis, D., Rafailidis, S., Bartzis, J. G., Andronopoulos, S., Venetsanos, A. G., “Modelling of flow and pollution dispersion in a two dimensional urban street canyon”, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 2002, Vol. 2, pp. 405–417.
77. Walton, A., Cheng, A.Y.S., “Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon – Part II: idealised canyon simulation”, *Atmospheric Environment*, 2002, Vol. 36, pp. 3615–3627.
78. Xie, S., Zhang, Y., Qi, L., Tang, X., “Spatial distribution of traffic-related pollutant concentrations in street canyons”, *Atmospheric Environment*, 2003, Vol. 37, pp. 3213–3224.
79. Xie, X., Huang, Z., Wang, J.S., “Impact of building configuration on air quality in street canyon”, *Atmospheric Environment*, 2005, Vol. 39, pp. 4519–4530.
80. Xie, X., Zhen, H., Jiasong, W., “The impact of urban street layout on local atmospheric environment”, *Building and Environment*, 2006, Vol. 41, pp. 1352–1363.
81. Yee, E., Biltoft, C. A., “Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles”, *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, Vol. 111, pp. 363–415.
82. Μπεργελές, Γ., “Υπολογιστική ρευστομηχανική”, Εκδόσεις Συμμεών.

---

**Νεκτάριος Κουτσοράκης**

M.Sc. Μηχανολόγος Μηχανικός, υπότροφος του Ι.Κ.Υ., υποψήφιος διδάκτωρ

Επιστημονικός συνεργάτης Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών, Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας και Ακτινοπροστασίας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος, Πατριάρχου Γρηγορίου και Νεαπόλεως, 15310, Αγία Παρασκευή Αττικής.

Extended summary

# Flow and Pollutant Dispersion in Street Canyons: A Review

**N. KOUTSOURAKIS**

Mechanical Engineer

## Abstract

*A street-canyon is the urban area between two successive rows of buildings, that includes a pollution-emitting street. A perpendicular to the street axis ambient wind above this geometry causes the formation of a big recirculation vortex, which in turn results in the pollution trapping inside the canyon.*

*This article provides all the main characteristics of the fluid flow and pollutant dispersion of the street-canyon in a single work. A systematic review of a big part of the existing literature upon the subject is attempted and most of the main relevant papers are referenced. The main intend of this work is to provide a valuable preliminary assistance to every one that is interested in the physical phenomena that are talking place inside the urban street-canyons.*

## 1. INTRODUCTION

While during 1950 to 2000 the earth's population doubled, the cars' number decupled [22]. This, along with the increasing peoples' gathering in cities [38,11], makes the examination of the street-canyons pollution a critical issue. Note that in spite of the use of the modern catalytic technology, transportation is still the main pollution source in cities [22, 47, 26].

This article is an attempt to fill the literature gap in providing in a single essay all the main physical characteristics of the street-canyon flow and pollutant dispersion. The most relevant article is the extended review of Vardoulakis et al. [73], with hundreds of references, which focuses on the modelling part.

## 2. GENERAL CHARACTERISTICS OF STREET-CANYONS

A street, or urban, canyon is a formulation of two long parallel buildings side-by-side, along with the street between them [52], figure 1. The main geometrical characteristics of a street canyon, are the height  $H$ , the width  $W$  and the length  $L$ , figure 2.

Submitted: Sep. 11, 2007 Accepted: Dec. 3, 2007

Since a city is practically formed of street-canyons, they have attracted the scientific interest in examining not only the pollution trapping, but also the sheltering and other effects [53, 49].

Two-dimensional street-canyon studies with perpendicular wind are more frequent, by being more basic and simple. Three-dimensional studies are necessary in cases of non-infinite length, or when a canyon in a real city is examined.

The main characteristic of street-canyon studies is the aspect ratio  $H/W$ , with the canyons being wide, regular or deep, depending on whether the aspect ratio is less, equal or more than one respectively.

If the buildings do not have the same height, the canyon is called asymmetric: step-up if the upwind building is shorter and step-down if it is higher. Regarding three-dimensional canyons, they can be called short ( $L/H < 3$ ), medium ( $L/H = 5$ ) or long ( $L/H > 7$ ).

## 3. STREET-CANYON FLOW

### 3.1. The urban boundary layer

The boundary layer above a town, can be divided into sub layers [11, 10, 62], as seen in figure 3. The lower 10% of the boundary layer forms the surface layer, which includes the roughness sub layer, at about 2-5 times the buildings' height [62] and the inertial sub layer, where the log-law applies [10, 34].

Since the region examined in street canyon flows does not usually go beyond the inertial sub layer, no accurate knowledge of the boundary layer height is required for physical or numerical modelling.

Modelling has proven to be a powerful tool for street canyon studies. Wind tunnel experiments avoid the random variability of wind that is present in field trials and are more appropriate for validating the numerical codes [65]. The computer simulations on the other hand offer an easy way to examine multiple scenarios.

### 3.2. Basic characteristics of regular street-canyon flow

The basic characteristics that affect the flow inside the canyon are the free stream velocity and the geometry. Early 1970s studies already revealed the main recirculation vortex, forming in almost all cases, figure 4. Its centre is in the middle of the street canyon if it is regular and towards the top of the canyon if it is non-regular. The vortex is formed even in the case of non-perpendicular wind, if its angle with the street axis is more than 30 degrees [73].

A typical flow speed inside a regular canyon is supposed to be about 2/3 of that of the velocity above the roofs:  $U_{0,06H} = 2/3 U_{1,2H}$  [49]. Deeper canyons are expected to have lower values; for example Large Eddy Simulation of a canyon with  $H/W=1.2$ , ended up in the following correlation:  $U_{0,06H} = 0.44 U_{1,2H}$ . It is very common in street canyon studies, to use the  $U_H$  velocity in the middle of the top of the canyon as a non-dimensionalization parameter, in spite of its difficult determination due to the high velocity gradients on top of the canyon.

For very low free wind speeds, less than 2 m/s, the vortex might be unstable or absent [20, 24, 78, 49]. In almost all cases, two small contra-rotating corner vortices are also formed where the street meets the buildings [73].

### 3.3. Flow categories based on aspect ratio H/W

When the flow speed is high enough for a recirculation to be formed, three patterns can be distinguished, based on the aspect ratio  $H/W$ , figure 5.

For deep or close to normal canyons, the usual main recirculation vortex is formed, taking up all the canyon width (skimming flow). When the aspect ratio drops to about 0.7 [53], the two buildings' vortices interfere with each other (wake interference flow). If the buildings get further apart, at about  $H/W=0.2$  [67] for the 2-D case, we drop to the isolated roughness flow case. In three-dimensional canyons, the above-mentioned values of transition can change a bit, especially the one between wake interference and isolated roughness flow [67].

Skimming flows can be further classified. For aspect ratios more than 1.3, vortex centre is transferred upwards and at street level flow velocities drop [73]. For  $H/W$  more than 2, a second unstable vortex is usually formed at the bottom of the canyon [54, 67, 28, 41, 12, 15, 6, 69, 40]. For  $H/W$  more than 3, three vortices can be noticed [67, 28, 12] causing very low speeds (at the order of  $0,001 U_H$ ), low turbulence and low pollutant convection. Vortex-chain formulation mechanism can be seen in figure 6. Corner vortices get bigger as the aspect ratio increases, until they merge together, forming a big vortex at the bottom of the canyon.

### 3.4. Asymmetric canyons

It is a fact that asymmetric canyons trap in general less pollutants, especially the step-up ones, where the vortex is usually stronger [21]. Fluid flow patterns change [4], especially in the step-down case.

For example in figure 7 the main vortex is replaced from two contra-rotating vortices. When this happens, the pollution is trapped in the close-to-the-street vortex and concentration might be higher.

### 3.5. Three-dimensional phenomena

Figure 8 presents the very complicated flow around a building, which gives an idea about the phenomena that can be expected in the case of three-dimensional street canyons. Indeed, 3-D simulation performed from Hunter et al. [27] revealed two vertical-axis corner vortices like those of figure 8, extending till about  $1.5H$  downwind.

In real street canyons inside cities, more interesting three-dimensional effects take place [60, 16, 35, 50, 17, 74, 39, 44, 9, 46, 48, 43, 5, 32, 64, 3, 61] with influences from cross-roads, roof shapes, side roads, openings and other 3-D geometrical parameters, like stopped cars, trees, balconies [70, 55, 59, 23].

### 3.6. Vehicles' impact on the flow

Fluid flow and pollutant dispersion is highly influenced from the vehicles' motion along the street, due to the change of the turbulent characteristics [20, 21, 29, 44, 1, 72, 31, 60], especially when the free wind speed is low [20]. Due to the complexity of the vehicles' induced turbulence, so far only qualitative information can be safely given for a specific case.

### 3.7. Thermal effects

The atmospheric stability, different solar radiation along the canyon walls, the warmer street, are some of the thermal parameters that can change the flow patterns inside the urban canyon [67, 46, 37, 49, 71, 36, 12]. In figure 9 for example, the hotter downwind wall causes an upstreet, which creates a big vortex taking up most of the canyon space. In some cases significant changes are mentioned, like the increase of the number of the in-canyon vortices [67], while in some other studies [49, 71, 46, 12] the alterations are less obvious and are mainly limited close to the walls.

### 3.8. Flow field for buildings with slanted roofs

A modification of the roofs' shape changes the geometry of the street canyon, and consequently the flow field [33, 76, 30, 45, 57, 79]. In figure 10, the adding of triangular roofs has caused an upward shift of the main vortex, which is now different in shape. In other cases, more severe changes can occur, like the formation of two counter-rotating vortices when only the upwind building slanted roof is added [79].

## 4. POLLUTANT DISPERSION INSIDE THE STREET-CANYON

Given the emissions inside a street-canyon, the concentration will depend only on the flow. The pollutant in most cases can be approximated as passive [75, 63], being carried away from the flow.

The recirculation vortex, along with the emissions at the street level, traps the pollution and results in high concentration at the leeward side, dropping exponentially towards the canyon top [19]. Windward side experiences less average pollution, about half of that of the opposite side [25]. Figure 11 presents typical concentration iso-lines.

In step-up asymmetric canyons concentration levels are lower [63], while in step-down, higher concentration at the windward side can be noticed [4], (§3.8).

Also, in the case of parallel-to-the-street-axis wind, concentration values near the street level can be higher than other cases, due to the gathering of the pollutant along the street axis [39, 73].

In general, the emissions strength and place is more important regarding the final concentration values, compared to the flow field [29, 42, 33], while the direction of the emission is of minor importance [76].

In low-wind situations, the in-canyon pollution increases [56]. On the contrary, vehicle-induced turbulence enhances the dispersion, especially near the street level [1].

As the aspect ratio increases, there is higher average in-canyon concentration [18]. Also in deep canyons with more than one vortices, pollution trapping is very severe at the lower parts of the street. In general, all vortices trap the pollutants and this is also true for the small corner vortices, especially that of the leeward side [73].

Street-canyon flow is in fact intermittent [54, 77, 12, 13]. Puffs of fluid quit the canyon at regular or irregular time spaces and the main vortex is unstable. In fact, it is clear now that the pollution leaves the canyon because of the turbulent diffusion [7].

In three-dimensional canyons, lower concentration levels near the buildings' edges can be noticed [18], figure 12. Also, roof shape influences the dispersion and in the slanted roofs case, the ventilation of the canyon seems to be better [54], for the same overall height of the buildings. In other cases though, when two vortices are formed (§3.8), the pollution is trapped in the canyon.

Finally, thermal effects have their own role in the distribution of the pollution inside the canyon. Stable atmospheric conditions have been proven to prevent the pollutant from escaping from the roof level [58]. Also wall heating due to the sun can change the concentration levels inside the canyon. Higher temperature of the upwind wall strengthens the main vortex and helps the dispersion of the pollution [67,36], while heating of the downwind side can trap the pollutants in the additional counter-rotating vortex which is formed (figure 9).

## 5. CLOSURE

An attempt was made to shortly present the main physical phenomena that take place inside a street canyon, based only on published papers. This work can be an introductory note for people wishing to learn about street-canyons. For further reading, the reader is advised to start from the following papers: Hunter et al. [27], Sini et al. [67], DePaul and Sheih [20], Hassan and Crowther [24], Jeong and Andrews [28], Chan et al., [15], Assimakopoulos et al. [4] Vardoulakis et al. [73].

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank the scientific collaborator M. Christolis of the Computational Fluid Dynamics Unit of the Chemical Engineers department of National Technical University of Athens. Also prof. N. Moussiopoulos and prof. G. Bergeles for the permission to use figures 1 and 8 respectively.

---

### Nektarios Koutsourakis

M. Sc. Mechanical Engineer, scholar of Greek State Scholarships Foundation, Ph. D. candidate  
Scientific collaborator of Environmental Research Laboratory, Institute of Nuclear Technology & Radiation Protection, NCSR Demokritos, Patriarchou Gregoriou & Neapoleos Str., Aghia Paraskevi, 15310, Athens, Greece.

