



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

**Πειραματική μελέτη του πεδίου ροής σε διατάξεις
εμποδίων επίπεδης επιφάνειας**

**Experimental flow study over obstacle configurations of
a flat plate**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μαργαρίτα Χατζηπολυδώρου

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Μαθιουλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα
Φεβρουάριος 2013

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πειραματικά το πεδίο ταχυτήτων γύρω από τα στοιχεία επιφανειακής τραχύτητας τεσσάρων διαφορετικών διατάξεων με τη χρήση της μεθόδου PIV – Particle Image Velocimetry. Οι δύο διατάξεις της επιφανειακής τραχύτητας αποτελούμενες από συνεχείς μπάρες ορθογωνικής διατομής με λόγο μήκους κοιλότητας προς ύψος εμποδίου $w/k = 4$ και 6 αντίστοιχα, και οι άλλες δύο από σπασμένες μπάρες ορθογωνικής διατομής με λόγο μήκους κοιλότητας προς ύψος εμποδίου $w/k = 4$ και $w/k = 6$ αντίστοιχα, τοποθετούνται στο κάτω τοίχωμα αεροδυναμικής σήραγγας ορθογωνικής διατομής με λόγο πλάτους προς ύψος διατομής (aspect ratio) ίσο με 1.78 (400/225) και εκτίθενται σε πλήρως τυρβώδη ροή αέρα, μέσης ταχύτητας $U_e = 2.43$ m/s. Το πεδίο ταχυτήτων οπτικοποιείται, και συγκρίνεται με τις εργασίες των D. Cavallero και G. Tanda^[11] και A. Νταουλτζή^[21], οι οποίοι με τη βοήθεια θερμογραφίας υγρών κρυστάλλων, κατέγραψαν την κατανομή του συντελεστή συναγωγής σε θερμαινόμενη επιφάνεια με επιφανειακή τραχύτητα εκτεθειμένη σε ρεύμα αέρα. Με αυτό τον τρόπο επιχειρείται η συσχέτιση της μεταβολής του πεδίου ταχυτήτων και της μεταφοράς θερμότητας γύρω από τα στοιχεία επιφανειακής τραχύτητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεταφορά θερμότητας, όπως και το πεδίο ταχυτήτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία της επιφανειακής τραχύτητας. Οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή συναγωγής εντοπίζονται κοντά στα σημεία επανακόλλησης της ροής, ενώ οι μικρότερες, σε σημεία όπου ροή παγιδεύεται εξαιτίας της αποκόλλησης.

Abstract

The present Diploma Thesis, deals with the experimental investigation of the velocity field in the vicinity of four rib configurations by means of Particle Image Velocimetry. The four rib configurations (the two consisting of continuous ribs with pitch ratios $w/k = 4$ and 6 , and the rest of broken ribs with pitch ratios $w/k = 4$ and 6) were deployed transverse to the main direction of the fully developed turbulent flow of free stream velocity $U_e = 2.43$ m/s. The experiment was conducted in a channel of rectangular cross-section, with an aspect ratio (width to height) equal to 1.78 ($400/225$). The velocity field is compared with the experimental results of D. Cavallero and G. Tanda^[11] and A. Daoultzis^[21], who measured the local heat transfer coefficient distributions over a heated rib-roughened plate exposed to air flow, by means of liquid crystal thermography, in order to establish a correlation between the velocity field variation and heat transfer. The results showed that the heat transfers, as well as the velocity field, are strongly related to the geometry of surface roughness. The greater values of the local heat transfer coefficient are attained at the reattachment points whilst its smaller values are attained near the points where the flow is trapped in small vortices due to flow separation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1 ^ο	4
1.2 Πεδίο Ταχυτήτων	7
1.2.1 Ευστάθεια ροής – Στρωτή και Τυρβώδης Ροή	7
1.2.2 Υδροδυναμικό Οριακό στρώμα	8
1.2.3 Τυρβώδης Ροή	13
1.2.3.1 Περιγραφή Τυρβώδους Ροής κατά Reynolds	13
1.2.4 Ροή υπό κλίση πίεσης - Αποκόλληση Ροής	15
1.3 Θερμοκρασιακό Πεδίο	16
1.3.1 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας	16
1.3.2 Θερμοκρασιακό Οριακό Στρώμα	18
1.3.3 Παράμετροι Μεταφοράς Θερμότητας με Συναγωγή	19
1.3.3.1 Αριθμός Prandtl	19
1.3.3.2 Αριθμός Nusselt	19
1.4 Αλληλεπίδραση Θερμικού και Υδροδυναμικού Οριακού Στρώματος	20
1.4.1 Μεταφορά Θερμότητας με Ελεύθερη Συναγωγή	21
1.4.2 Μεταφορά Θερμότητας με Εξαναγκασμένη Συναγωγή	22
Κεφάλαιο 2 ^ο	25
2.1 Επίδραση της Επιφανειακής Τραχύτητας στο Τυρβώδες Οριακό Στρώμα	25
2.2 Επίδραση της Επιφανειακής Τραχύτητας στη Μεταφορά Θερμότητας	32
Κεφάλαιο 3 ^ο	41
3.1 Σύντομη Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας	42
3.2 Περιγραφή Κύριων Συνιστωσών της Πειραματικής Διάταξης	43
3.2.1 Αεροδυναμική σήραγγα	43
3.2.2 Συσκευή Εκπομπής Laser	46
3.2.3 Σύστημα Καταγραφής / CCD – Camera	47
3.2.4 Τροφοδοτικό Καπνού	48
3.2.5 Σωλήνας Pitot	49
3.3 Συνθήκες Περιβάλλοντος	49

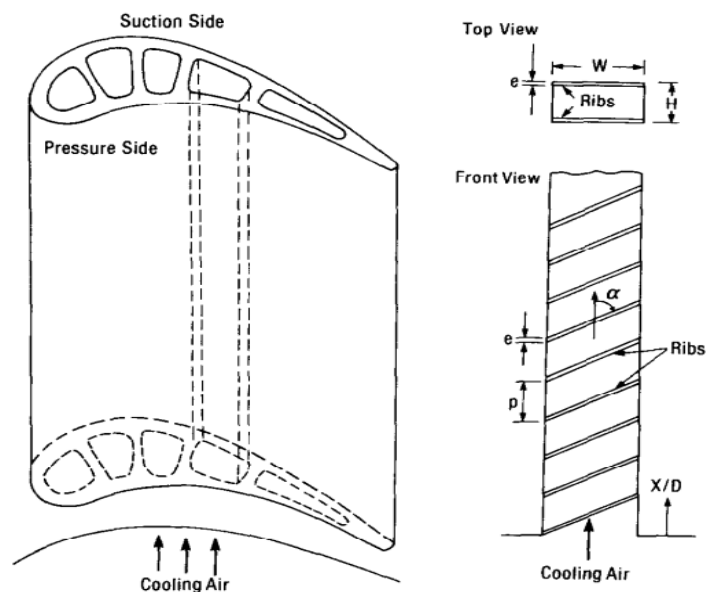
Κεφάλαιο 4°	50
4.1 Διάταξη Α	51
4.2 Διάταξη Β.....	65
4.3 Διάταξη Γ	76
4.4 Διάταξη Δ	99
Κεφάλαιο 5°	120
5.1 Διάταξη Α	120
5.1.1 Συνοπτική Παρουσίαση και Ανάλυση	120
5.1.2 Σύγκριση με Αποτελέσματα Εργασιών Διεθνούς Βιβλιογραφίας	124
5.2 Διάταξη Β.....	124
5.2.1 Συνοπτική Παρουσίαση και Ανάλυση	124
5.2.2 Σύγκριση με Αποτελέσματα Εργασιών Διεθνούς Βιβλιογραφίας	127
5.3 Σύγκριση Διάταξης Α και Διάταξης Β.....	128
5.4 Διάταξη Γ	128
5.4.1 Συνοπτική Παρουσίαση.....	128
5.5 Διάταξη Δ	132
5.5.1 Συνοπτική Παρουσίαση.....	132
5.6 Σύγκριση Διάταξης Γ και Διάταξης Δ.....	136
Κεφάλαιο 6°	137
6.1 «An experimental investigation of forced convection heat transfer in channels with rib turbulators by means of liquid crystal thermography», D.Cavallero G.Tanda ^[11]	137
6.2 «Μη Επεμβατική Μέτρηση Κατανομής του Συντελεστή Συναγωγής Θερμότητας σε Επίπεδη Επιφάνεια με Προεξοχές», Α. Νταουλτζής, Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Μαθιουλάκης ^[21]	145
Κεφάλαιο 7°	150
Παράρτημα	152
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	160

Εισαγωγή

Τυρβώδεις ροές σε τραχιές επιφάνειες συναντώνται συχνά στην πράξη. Στην ατμόσφαιρα, οι βασικές επιφάνειες είναι συνήθως τραχιές, ενώ από μηχανολογικής άποψης, οι αγωγοί δεν μπορούν να θεωρηθούν λείοι υδραυλικά, ειδικά σε μεγάλους αριθμούς Reynolds.

Σήραγγες με περιοδική τραχύτητα χρησιμοποιούνται ευρέως για προώθηση της τύρβης και ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας σε ψυκτικά μέρη, όπως ράβδους καυσίμου αεριοψυκτων πυρηνικών αντιδραστήρων, κοιλότητες πτερυγίων στροβίλων και εσωτερικές επιφάνειες σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται ως εναλλάκτες ενέργειας (Σχήμα 1).

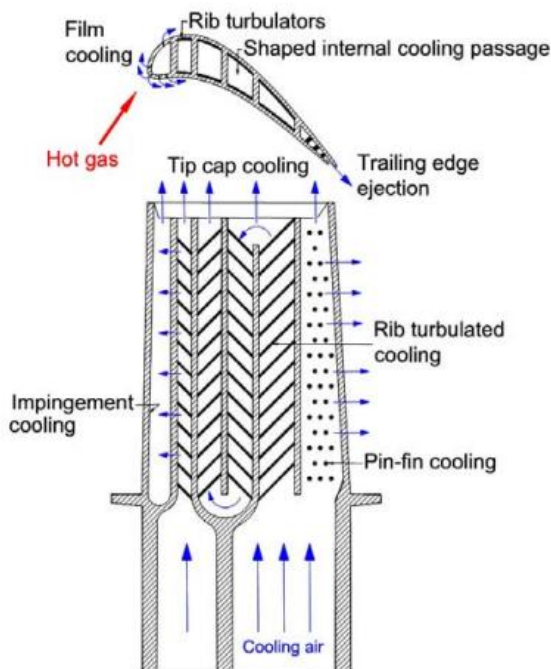
Στο Σχήμα 2, φαίνεται μια από τις τεχνικές ψύξης ενός σύγχρονου πτερυγίου αεροστροβίλου. Το πτερύγιο αποτελείται από οφιοειδείς διόδους (serpentine passages) με στοιχισμένα εμπόδια επιφανειακής τραχύτητας (rib turbulators) κατά μήκος των δύο απέναντι τοιχωμάτων τους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1 και στο Σχήμα 2, αέρας ψύξης διέρχεται από τον άξονα στο εσωτερικό της πτερύγωσης, ώστε να άγει τη θερμότητα από τα τοιχώματα του πτερυγίου. Η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας, της σήραγγας με περιοδική τραχύτητα εξαρτάται από το λόγο ύψους προς πλάτος (aspect ratio) της σήραγγας, τη διαμόρφωση της επιφανειακής τραχύτητας και τον αριθμό Reynolds της ροής του αέρα ψύξης.



Σχήμα 1 Παράδειγμα σήραγγας με περιοδική τραχύτητα για την ψύξη πτερυγίου.^[1]

Η ανάγκη για υψηλότερη ισχύ και καλύτερη απόδοση τέτοιων συστημάτων, οδηγεί τους κατασκευαστές στην αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο (TIT – Turbine Inlet Temperature), με πρόσφατες στρατιωτικές εφαρμογές να πετυχαίνουν θερμοκρασία εισόδου που φτάνει μέχρι και 2000 °K^[2]. Τόσο υψηλές θερμοκρασίες υπερβαίνουν τη θερμοκρασία τήξης και των πιο προηγμένων υλικών κατασκευής πτερυγίων, οπότε η απόδοση του συστήματος ψύξης των πτερυγίων είναι αυστηρώς συνδεδεμένη με την ασφαλή λειτουργία ολόκληρης της μηχανής.

Ο σκοπός της τοποθέτησης των εμποδίων κατά μήκος των διόδων στο εσωτερικό των πτερυγίων, είναι η ενίσχυση του ρυθμού μεταφοράς της θερμότητας, μέσω της ανάπτυξης τύρβης. Παρόλα αυτά, τα εμπόδια, δημιουργούν αποκόλληση στη ροή, με αποτέλεσμα την αρνητική επίδραση της πτώση πίεσης. Εφόσον λοιπόν, η τραχύτητα ενός τέτοιου συστήματος ψύξης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τους μηχανισμούς συναγωγής και κατ' επέκταση την απόδοσή του, η ικανότητα πρόβλεψης της επίδρασής της είναι σημαντική.



Σχήμα 2 Σχηματική Απεικόνιση του Εσωτερικού ενός Σύγχρονου Πτερυγίου Αεροστρόβιλου, με κοινές Τεχνικές Ψύξης.^[3]

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση τραχύτητας καθορισμένης γεωμετρίας, στο πεδίο ταχυτήτων τυρβώδους ροής χαμηλής ταχύτητας. Σε συνδυασμό με προηγούμενα αποτελέσματα μελέτης της επίδρασης της τραχύτητας στο θερμοκρασιακό πεδίο, επιχειρείται μια συσχέτιση για να δοθεί μια σφαιρική απόδοση του φαινομένου.

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση σε βασικές αρχές της Ρευστομηχανικής με σκοπό να δοθεί μια σαφής περιγραφή του πεδίου ταχυτήτων, του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας και της αλληλεπίδρασής τους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται, συνοπτικά, στοιχεία από εργασίες διεθνούς βιβλιογραφίας, μέσω των οποίων, μπορούν να εξαχθούν σε πρώτο στάδιο κάποια συμπεράσματα για την επίδραση της τραχύτητας στη ροή, τόσο στο τυρβώδες οριακό στρώμα, όσο και στη μεταφορά θερμότητας.

Στο 3^ο Κεφάλαιο δίνεται μια περιγραφή της πειραματικής διάταξης και κάθε παραμέτρου της, ενώ γίνεται και μια σύντομη περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Επιπλέον ανάλυση της μεθόδου PIV (Particle Image Velocimetry), που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων της ροής γύρω από στοιχεία της τραχύτητας, αλλά και λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας του πειράματος και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων, γίνεται στο Παράρτημα.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται παράθεση των πειραματικών αποτελεσμάτων και κάθε σχήμα που προκύπτει περιγράφεται, ενώ στο 5^ο Κεφάλαιο όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά, ώστε να γίνει

δυνατή η απόδοση του πεδίου ταχυτήτων. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση με αποτελέσματα εργασιών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται συσχέτιση μεταξύ του πεδίου ταχυτήτων και του θερμοκρασιακού πεδίου. Για τη σύγκριση χρησιμοποιούνται η εργασία διεθνούς βιβλιογραφίας «An experimental investigation of forced convection heat transfer in channels with rib turbulators by means of liquid crystal thermography» (DITEC, Università degli Studi di Genova) των D. Cavallero και G. Tanda, και η διπλωματική εργασία «Μη Επεμβατική Μέτρηση Κατανομής του Συντελεστή Συναγωγής Θερμότητας σε Επίπεδη Επιφάνεια με Προεξοχές» (Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Μαθιουλάκης, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011) του Α. Νταουλτζής.

Τέλος, στο 7^ο Κεφάλαιο δίνονται τα τελικά συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 1^ο

Στοιχεία Θεωρίας

Η ανάλυση της επίδρασης της τραχύτητας στη ροή γίνεται σε δύο επίπεδα. Καταρχήν, μελετάται η μορφή του πεδίου ταχυτήτων γύρω από τα στοιχεία της τραχύτητας, και στη συνέχεια γίνεται μια συσχέτιση με το θερμοκρασιακό πεδίο. Ουσιαστικά, μέσα από αυτή την πειραματική μελέτη, επιχειρείται να απαντηθεί το ερώτημα του πώς η μορφή του πεδίου ταχυτήτων επηρεάζει τη μετάδοση της θερμότητας σε αεροδυναμική σήραγγα με τραχύτητα καθορισμένης γεωμετρίας στο ένα τοίχωμα. Αυτό, καθιστά σημαντική την πλήρη κατανόηση της δομής και των μηχανισμών της ροής. Μέσα από τα στοιχεία θεωρίας που παρατίθενται, γίνεται μια επισκόπηση σε βασικές αρχές της Ρευστομηχανικής με σκοπό να δοθεί μια σαφής περιγραφή του πεδίου ταχυτήτων, του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας και της αλληλεπίδρασής τους.

1.1 Εξισώσεις Διατήρησης Μάζας, Ορμής και Ενέργειας

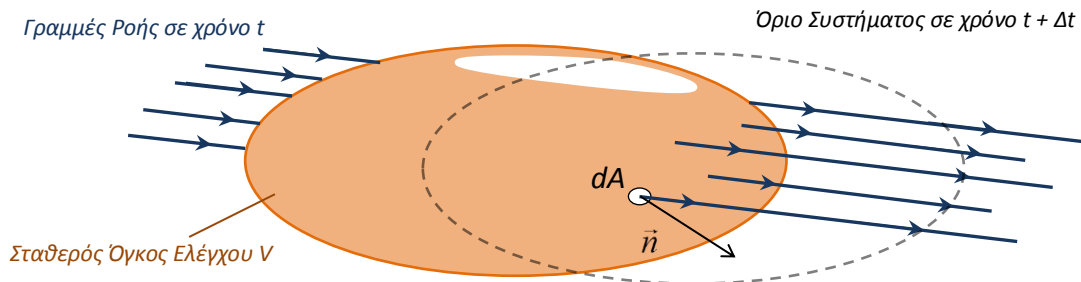
Η ανάπτυξη μιας αναλυτικής περιγραφής της ροής του ρευστού βασίζεται στην έκφραση των φυσικών νόμων που σχετίζονται με τη ροή αυτή, στην κατάλληλη μαθηματική μορφή. Οι τρεις βασικοί φυσικοί νόμοι, που εφαρμόζονται σε κάθε ροή, ανεξαρτήτως της φύσεως του ρευστού – με εξαίρεση σχετικιστικά και πυρηνικά φαινόμενα – είναι:

- Ο Νόμος Διατήρησης της Μάζας
- Ο Δεύτερος Νόμος Κίνησης του Newton
- Το Πρώτο Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Για τη διατύπωση, των νόμων αυτών, θεωρείται σύστημα. Ο όρος σύστημα χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει ένα σύνολο στοιχείων με σταθερή ιδιότητα. Οι βασικοί νόμοι δίνουν την επίδραση ενός συστήματος στο περιβάλλον του. Η επιλογή συστήματος για την εφαρμογή αυτών των νόμων, είναι σε

πολλές περιπτώσεις περίπλοκη, αφού ανάλογα με τις ιδιότητες του ρευστού και της ροής, θεωρούνται και επιπρόσθετες σχέσεις, με τις οποίες τροποποιούνται οι τρεις πιο πάνω νόμοι.

Θεωρείται ένας όγκος ελέγχου, ο οποίος βρίσκεται σε πεδίο ροής ρευστού, όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 1.1 Ροή Ρευστού μέσα σε όγκο ελέγχου

- **Νόμος Διατήρησης Μάζας:** Η μάζα δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί, ούτε να καταστραφεί. Κατ' επέκταση, ο ρυθμός εισροής της μάζας στον όγκο ελέγχου μείον το ρυθμό εκροής της μάζας από τον όγκο ελέγχου, ισούται με το ρυθμό ροής της μάζας μέσα στον όγκο ελέγχου. Η ολοκληρωματική σχέση για το ισοζύγιο μάζας στο γενικό όγκο ελέγχου, δίνεται από την *Εξίσωση Συνέχειας*:

$$(1.1) \quad \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_A \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \nabla \vec{v} \right] dV = 0$$

Όπου ρ : η πυκνότητα του ρευστού
 \vec{v} : το διάνυσμα της συνισταμένης ταχύτητας
 \vec{n} : μοναδιαίο διάνυσμα, κάθετο στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου με φορά προς τα έξω

Φυσικά αφού το ολοκλήρωμα μηδενίζεται, μπορεί να γίνει διαφορική διατύπωση της εξίσωσης:

$$(1.2) \quad \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \nabla \vec{v} = 0$$

- **Β' Νόμος Κίνησης του Newton:** Ο ρυθμός αλλαγής της ορμής ενός συστήματος είναι ίσος με τη συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο σύστημα. Άρα, ο καθαρός ρυθμός εισροής της ορμής στον όγκο ελέγχου και ο καθαρός ρυθμός εκροής της ορμής από τον όγκο ελέγχου, ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων (βαρύτητας, πίεσης και συνεκτικότητας) που επιδρούν στον όγκο ελέγχου. Έτσι προκύπτει η *Εξίσωση Διατήρησης της Ορμής*:

$$(1.3) \quad \Sigma \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{v} dV + \int_A \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \int_V \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{Βαρύτητας}} dV - \int_A \underbrace{p \vec{n}}_{\text{Πίεσης}} dA - \int_A \underbrace{(\vec{n} \cdot \vec{\tau})}_{\text{Συνεκτικότητας}} dA$$

Όπου $\vec{\tau}$: το διάνυσμα της διατμητικής τάσης

Η οποία μπορεί να γραφεί (ολοκληρωματική διατύπωση):

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} + \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g} \right] dV = 0$$

Αφού μηδενίζεται το ολοκλήρωμα, ο όρος μέσα σε αυτό είναι μηδενικός, οπότε προκύπτει η διαφορική διατύπωση:

$$(1.4) \quad \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} + \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g}$$

- **Α' Θερμοδυναμικό Αξίωμα:** Η εσωτερική ενέργεια ενός απομονωμένου συστήματος, είναι σταθερή, έτσι ο ρυθμός μεταβολής της ολικής ενέργειας ενός κλειστού συστήματος, ισούται με το ρυθμό παραλαβής θερμότητας, μείον το ρυθμό παραγωγής έργου του συστήματος. Στη μαθηματική του διατύπωση, το αξίωμα παίρνει την πιο κάτω μορφή, γνωστή και ως *Εξίσωση Διατήρησης της Ενέργειας*:

$$(1.5) \quad \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V e \rho dV + \int_A e \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA$$

Όπου e : η ανηγμένη ολική ενέργεια (ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας)

dQ/dt : ο ρυθμός παραλαβής θερμότητας του συστήματος

dW/dt : ο ρυθμός παραγωγής έργου του συστήματος

Ο ρυθμός παραλαβής θερμότητας dQ/dt ισούται με το ρυθμό παραγωγής μέσα στο σύστημα (π.χ. από κάποια χημική αντίδραση) συν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από τα όρια του συστήματος:

$$(1.6) \quad \frac{dQ}{dt} = \int_V q' dV - \int_A (\vec{q} \cdot \vec{n}) dA$$

Όπου q : ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας

q' : ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου

Και αντίστοιχα ο ρυθμός παραγωγής έργου dW/dt προέρχεται από το έργο πίεσης (W_p) και το έργο των δυνάμεων συνεκτικότητας (W_τ) που ασκούνται στην επιφάνεια του συστήματος, καθώς και από το έργο που το σύστημα ανταλλάσσει με το περιβάλλον (W_s), μέσω στρεφόμενης ατράκτου – που φυσικά στη δική μας περίπτωση είναι μηδέν:

$$(1.7) \quad \frac{dW}{dt} = \frac{dW_p}{dt} + \frac{dW_\tau}{dt} + \frac{dW_s}{dt} = \int_A p(\vec{v} \cdot \vec{n}) dA + \int_A \vec{v} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{\tau}) dA$$

Από τις σχέσεις (1.5), (1.6) και (1.7) προκύπτει η τελική μορφή της *Εξίσωσης Διατήρησης της Ενέργειας*:

$$(1.8) \quad \int_V \left[q' - \nabla \cdot \vec{q} - p \nabla \cdot \vec{v} - \vec{v} \cdot \nabla \cdot \vec{\tau} - \frac{\partial(e\rho)}{\partial t} - e\rho \nabla \cdot \vec{v} \right] dV = 0$$

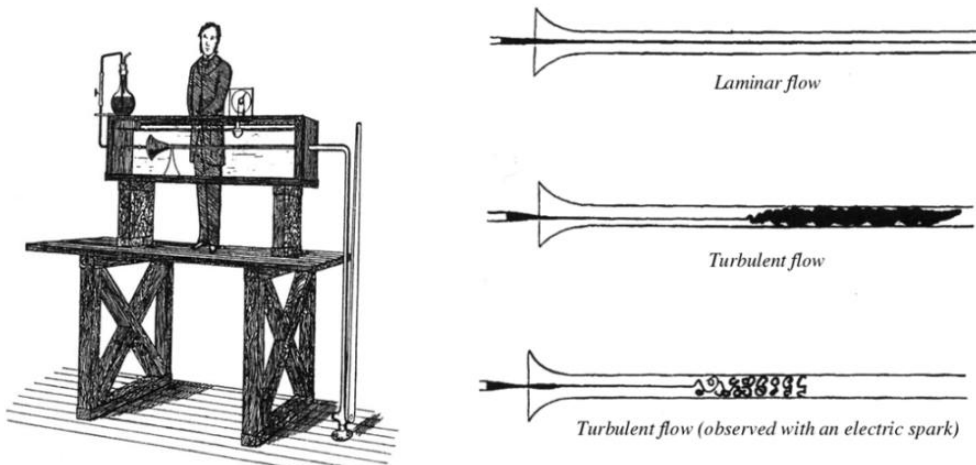
1.2 Πεδίο Ταχυτήτων

1.2.1 Ευστάθεια ροής – Στρωτή και Τυρβώδης Ροή

Η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί από τις κινήσεις των μορίων της, ως στρωτή ή τυρβώδης. Στη στρωτή ροή, οι γραμμές ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους, χωρίς να παρατηρούνται δίνες ή μεγάλες διακυμάνσεις. Αντίθετα, στην τυρβώδη ροή - που προκύπτει από υδροδυναμική αστάθεια της στρωτής - η κίνηση του ρευστού είναι ακανόνιστη με μεγάλες διακυμάνσεις κάθετες στην κατεύθυνση της κίνησης.

Η μετάβαση της στρωτής ροής σε τυρβώδη μελετήθηκε για πρώτη φορά από τον Osbourne Reynolds και τα αποτελέσματα της ερευνάς του δημοσιεύθηκαν το 1883.

Ο Reynolds, στα πειράματά του σε σωλήνες κυκλικής διατομής (εσωτερικής διαμέτρου d), παρατήρησε ότι σε αυτή τη μετάβαση παίζουν ρόλο η γεωμετρία του αγωγού, η ταχύτητα (u) και τα χαρακτηριστικά του ρευστού – πυκνότητα (ρ) και συνεκτικότητα (μ).



Το πείραμα του Reynolds: Μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή

Έτσι ορίζεται ο αδιάστατος αριθμός Reynolds για αγωγό κυκλικής διατομής:

$$Re_D = \frac{ud}{\nu} = \frac{\rho ud}{\mu}$$

Ο αριθμός Reynolds εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας του ρευστού. Κατ' επέκταση, μεγάλος αριθμός Reynolds σημαίνει ότι οι δυνάμεις αδράνειας είναι ισχυρές σε σχέση με τις δυνάμεις συνεκτικότητας, οπότε η υδροδυναμική αστάθεια του ρευστού δεν μπορεί να υπερνικηθεί από τη συνεκτικότητα και να συγκρατήσει το ρευστό σε στρωτή ροή.

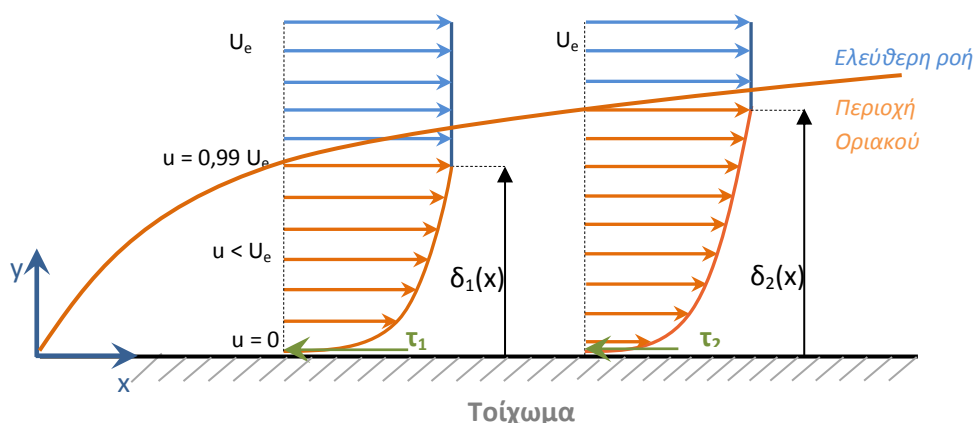
Η εμφάνιση της υδροδυναμικής αστάθειας που προκαλεί τη μετάβαση σε τύρβη, προϋποθέτει ότι ο αριθμός Reynolds της ροής υπερβαίνει κάποια κρίσιμη τιμή που εξαρτάται από την συγκεκριμένη ροή. Η υδροδυναμική αστάθεια έχει σαν πρώτη συνέπεια την εμφάνιση μη μόνιμων ροϊκών δομών, και στη συνέχεια με περαιτέρω αύξηση του αριθμού Reynolds επιφέρει κάποιες δευτερογενείς αστάθειες που αυξάνουν την περιπλοκότητά της. Τελικά για αρκετά μεγάλο αριθμό Reynolds η ροή γίνεται τυρβώδης. Κατά συνέπεια, οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από υψηλό αριθμό Reynolds.

Τυπικά, η ροή σε αγωγούς κυκλικής διατομής, παύει να είναι στρωτή για $Re > 2\ 300$. Σε ένα διάστημα όπου $2\ 300 < Re < 4\ 000$, η ροή θεωρείται μεταβατική (δεν είναι πλήρως τυρβώδης) και για $Re > 4\ 000$ η ροή θεωρείται πλήρως τυρβώδης, χωρίς όμως αυτό - όπως προαναφέρθηκε - να είναι απόλυτο. Σε λείους ευθύγραμμους σωλήνες η ροή μπορεί να διατηρηθεί στρωτή μέχρι και για $Re = 10\ 000$.

1.2.2 Υδροδυναμικό Οριακό στρώμα

Με τον όρο (υδροδυναμικό) οριακό στρώμα αναφερόμαστε στο στρώμα του ρευστού, που βρίσκεται κοντά στην περιοχή στερεού σώματος, όπου η επίδραση της συνεκτικότητας είναι σημαντική. Αυτός ο διαχωρισμός του πεδίου ροής σε δύο περιοχές: την περιοχή μέσα στο οριακό στρώμα και την περιοχή έξω από αυτό (όπου η επίδραση της συνεκτικότητας είναι αμελητέα) έγινε από τον Ludwig Prandtl το 1904. Στην περιοχή του οριακού στρώματος, αναπτύσσονται δυνάμεις ρευστοδυναμικής φύσεως ανάμεσα στο ρευστό και το στερεό τοίχωμα, με αποτέλεσμα το ρευστό να επιβραδύνεται σε ένα εύρος επιρροής από την επιφάνεια του στερεού τοιχώματος.

Κοντά στο στερεό εμπόδιο η ταχύτητα είναι μηδενική (Συνθήκη Μη-Ολίσθησης) και όσο απομακρυνόμαστε από το στερεό αυτή αυξάνεται. Το εύρος επιρροής φτάνει μέχρι και το σημείο όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι στο 99% της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος (U_e) και καλείται πάχος οριακού στρώματος (δ). Όσο το ρευστό προχωράει κατά μήκος του τοιχώματος, το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνει και λόγω της επιβράδυνσης που προκαλεί η συνεκτικότητα, η κλίση της ταχύτητας μειώνεται. Το προφίλ της ταχύτητας εντός του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται σε επίπεδη πλάκα, έχει την πιο κάτω μορφή:



Σχήμα 1.2 Προφίλ ταχύτητας Υδροδυναμικού Οριακού Στρώματος κατά μήκος επίπεδης πλάκας

Μεγέθη που χαρακτηρίζουν το οριακό στρώμα είναι:

- **Πάχος Οριακού Στρώματος (δ):** η απόσταση από το τοίχωμα όπου η ταχύτητα έχει γίνει ίση με το 99% της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος (U_e).
- **Πάχος μετατόπισης οριακού στρώματος (δ_1):** το πάχος του στρώματος του ρευστού που κινείται με την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος και μεταφέρει παροχή μάζας ίση με την απώλεια παροχής που προκαλεί το οριακό στρώμα.
- **Πάχος ορμής οριακού στρώματος (δ_2):** το πάχος του στρώματος του ρευστού που κινείται με την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος και μεταφέρει ορμή ίση με την απώλεια ορμής του οριακού στρώματος.
- **Διατμητική τάση στο τοίχωμα (τ_w):** είναι ανάλογη της κλίσης της ταχύτητας στο εκάστοτε σημείο και δίνεται από τον τύπο:

$$(1.9) \quad \tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

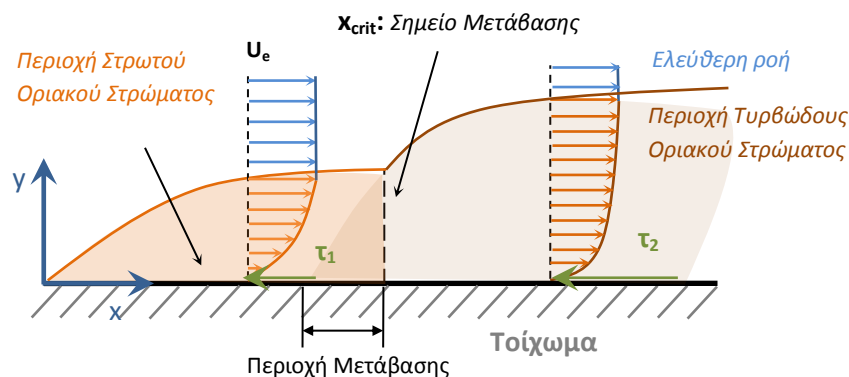
- Τοπικός συντελεστής τριβής (c_f): εξαρτάται από τον τοπικό αριθμό Reynolds (Re_x) και το ύψος της επιφανειακής τραχύτητας και δίνεται από τον τύπο:

$$(1.10) \quad c_f = \frac{\tau_w}{\rho U_e^2 / 2}$$

Η ροή κοντά στο μέτωπο προσβολής είναι στρωτή. Καθώς όμως κινείται κατά μήκος του στερεού τοιχώματος, αυξανόμενου του x , αυξάνει και ο τοπικός αριθμός Reynolds (Re_x), όπου:

$$(1.11) \quad Re_x = \frac{ux}{\nu} = \frac{\rho ux}{\mu}$$

Όταν η ροή φτάσει σε ένα x_{crit} (κρίσιμο σημείο - $Re_{x_{crit}}$) γίνεται υδροδυναμικά ασταθής, οι διαταραχές αυξάνονται καθώς διαδίδονται κατάντι και το οριακό στρώμα μεταβαίνει σε τυρβώδες. Ο κρίσιμος τοπικός αριθμός Reynolds για επίπεδη πλάκα, μπορεί να πάρει τιμές από 10^5 έως 3×10^6 ($Re_{x_{crit}} = 5 \times 10^5$ – τυπική τιμή για μετάβαση, 3×10^6 – τυπική τιμή για τυρβώδη ροή).



Σχήμα 1.3 Απεικόνιση της μεταβολή του Πάχους του Οριακού Στρώματος κατά τη μετάβαση από στρωτή ροή σε τυρβώδη

Η μετάβαση γίνεται αντιληπτή από την απότομη αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος (δ) και την αύξηση των διατμητικών τάσεων στο τοίχωμα (η κλίση της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη στο τυρβώδες οριακό στρώμα) (Σχήμα 1.3).

Αν και η βασική παράμετρος για τη μετάβαση είναι ο αριθμός Reynolds, υπάρχουν και επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν, όπως η κλίση πίεσης, η τραχύτητα, η αναρρόφηση (suction), η καμπυλότητα της επιφάνειας, η θερμοκρασία στα τοιχώματα, κ.α.

Στην περίπτωση επίπεδης πλάκας, ο λόγος της ταχύτητας εντός της περιοχής του οριακού στρώματος προς τη μέση ταχύτητα της ροής (u/U_e) είναι συνάρτηση του λόγου $y/\delta(x)$ και ανεξάρτητος της επιφανειακής τραχύτητας ή του αριθμού Reynolds. Αντίθετα, στο τυρβώδες οριακό στρώμα, η επιφανειακή τραχύτητα έχει σημαντική επίδραση στη ροή. Αύξηση του τοπικού συντελεστή τριβής (c_f), προκαλεί μεγαλύτερη επιβράδυνση στη ροή και μικρότερη κλίση της ταχύτητας κοντά στο τοίχωμα. Εφόσον λοιπόν στην τυρβώδη ροή, η συνεκτικότητα παίζει σημαντικό ρόλο κοντά στο τοίχωμα, προκαλώντας έντονη χωρική μεταβολή, εισάγονται ως σχετικοί παράμετροι κλίμακας: η κινηματική συνεκτικότητα (ν) και η ταχύτητα τριβής (u_τ), που βοηθούν στο να γίνει πιο εμφανής η προαναφερθείσα χωρική μεταβολή. Η ταχύτητα τριβής δίνεται από τον τύπο:

$$(1.12) \quad u_\tau = \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} = \left(\frac{c_f}{2} \right)^{1/2}$$

Όπου τ : η διατμητική τάση – ισούται με το άθροισμα της αντίστασης μορφής και της αντίστασης τριβής.

Τα μεγέθη που κανονικοποιούνται σε αυτό το μέγεθος (ν/u_τ) συμβολίζονται με ένα δείκτη $^+$. Η προσέγγιση του λεπτού στρώματος στην εξίσωση ορμής δείχνει ότι η τάξη μεγέθους των τάσεων Reynolds είναι u_τ^2 κατά μήκος του οριακού στρώματος και το u_τ συμπεριφέρεται σαν μια καθολική κλίμακα της ταχύτητας (μέσα στο οριακό στρώμα βλέπουμε τα μεγέθη με βάση αυτή την ταχύτητα).

Η εγκάρσια απόσταση y , αδιαστατοποιείται με το μήκος ν/u_τ (όπου το ν η κινηματική συνεκτικότητα):

$$(1.13) \quad y^+ = \frac{y}{(\nu/u_\tau)} = \frac{u_\tau y}{\nu}$$

Το ίδιο γίνεται για το πάχος οριακού στρώματος, όπου το δ^+ ορίζει την κλίμακα διαχωρισμού ανάμεσα στην εξωτερική περιοχή και τα εσωτερικά μήκη του οριακού στρώματος:

$$(1.14) \quad \delta^+ = \frac{u_\tau \delta}{\nu}$$

Και το ύψος της τραχύτητας k :

$$(1.15) \quad k^+ = \frac{u_\tau k}{\nu}$$

Το τυρβώδες οριακό στρώμα, σύμφωνα με το «Νόμο του Τοιχώματος» (Law of the wall), αποτελείται από δύο υποπεριοχές: την εσωτερική και την εξωτερική. Η εσωτερική περιοχή αποτελείται από τρία

στρώματα: το συνεκτικό υπόστρωμα (viscous sub-layer) ή στρωτό οριακό υπόστρωμα (laminar sub-layer), το μεταβατικό υπόστρωμα (buffer layer) και το λογαριθμικό υπόστρωμα (logarithmic layer):

Εσωτερική Περιοχή (inner-region) Τυρβώδους Οριακού Στρώματος:

- **Συνεκτικό Υπόστρωμα:** έχει πάχος 0.1% δ (μέχρι και για $y^+ \approx 5$). Σε αυτή την περιοχή, η ροή θεωρείται στρωτή. Η διατμητική τάση λόγω συνεκτικότητας παίρνει μεγάλες τιμές και δε μεταβάλλεται κατά την κατεύθυνση y . Η ταχύτητα μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση από την επιφάνεια και η διατμητική τάση Reynolds θεωρείται αμελητέα ($\overline{u'v'} \approx 0$). Λόγω του ότι η ροή είναι στρωτή - και όπως αναφέρθηκε πιο πριν σε στρωτό οριακό στρώμα η κατανομή της ταχύτητας είναι ανεξάρτητη της επιφανειακής τραχύτητας - εάν οι προεξοχές της επιφανειακής τραχύτητας δεν υπερβαίνουν σε ύψος το συνεκτικό υπόστρωμα, τότε δεν επηρεάζεται και η ροή. Έτσι, για μέσο ύψος τραχύτητας k και αδιαστατοποιημένο ως προς v/u_τ ύψος k^+ , μια επιφάνεια θεωρείται υδραυλικά λεία όταν $k^+ < 5$. Ισχύει ότι:

$$(1.16) \quad u^+ = y^+$$

- **Μεταβατικό Υπόστρωμα:** υφίσταται για 0.1% δ έως 1% δ ($5 < y^+ < 30$). Σε αυτή την περιοχή η διατμητική τάση λόγω συνεκτικότητας, ελαττώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα ενώ η διατμητική τάση Reynolds αυξάνει. Όπως φανερώνει η ονομασία, πρόκειται για μια μεταβατική περιοχή ανάμεσα στο συνεκτικό και το λογαριθμικό υπόστρωμα.
- **Λογαριθμικό Υπόστρωμα:** υφίσταται για 1% δ έως 10-15% δ ($y^+ > 30$). Σε αυτή την περιοχή, Εδώ, το y^+ είναι πολύ μεγάλο για να υπάρχει σημαντικός επηρεασμός από τη συνεκτικότητα και το y/δ είναι πολύ μικρό για να υπάρχει σημαντικός επηρεασμός από το δ . Αντίθετα, η περιοχή χαρακτηρίζεται από τη λογαριθμική σχέση ανάμεσα στην αδιάστατη ταχύτητα u^+ και την αδιάστατη απόσταση y^+ :

$$(1.17) \quad u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A$$

Όπου κ : η σταθερά Von Κάρμάν ($\kappa = 0.41$) και

A : μια προσθετέα παράμετρος που εξαρτάται από την επιφανειακή τραχύτητα, και μειώνεται με την αύξηση της τραχύτητας (παίρνει τιμές από 5 - 5.5).

Εξωτερική περιοχή (outer-region) Τυρβώδους Οριακού Στρώματος:

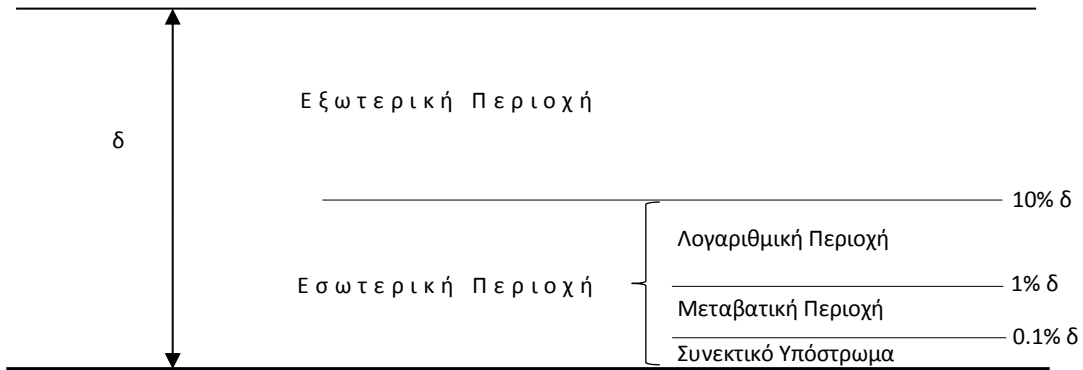
Για $y^+ \geq 50$, η επίδραση της εξωτερικής περιοχής του τυρβώδους οριακού στρώματος στο προφίλ της ταχύτητας δίνεται από τον τύπο:

$$(1.18) \quad u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A + \frac{\Pi}{\kappa} W(y/\delta)$$

Όπου Π : η κλίση της πίεσης και

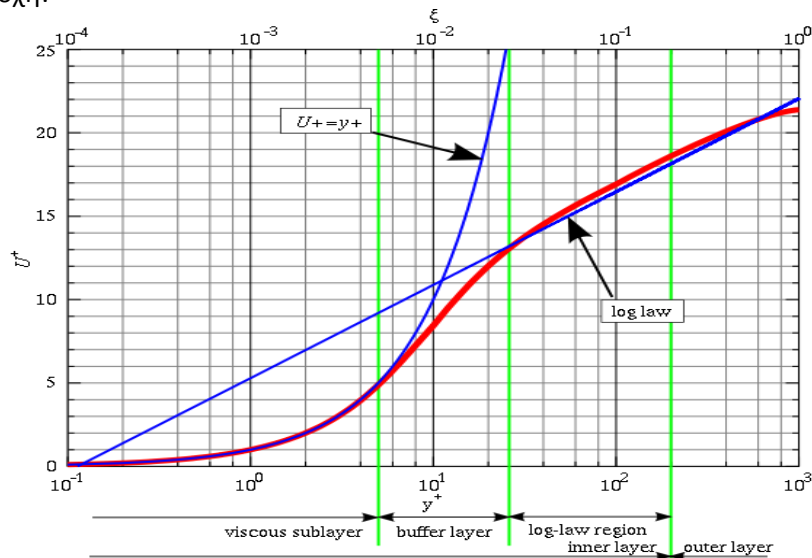
W : συνάρτηση που αντιπροσωπεύει την επίδραση της δυναμικής της εξωτερικής περιοχής (“wake”)

Είναι φανερό από τις πιο πάνω σχέσεις, ότι η κλίση της πίεσης επηρεάζει μόνο την εξωτερική περιοχή.



Σχήμα 1.4 Υποπεριοχές Τυρβώδους Οριακού Στρώματος

Το πιο κάτω διάγραμμα δείχνει το διαχωρισμό ανάμεσα στα διάφορα υποστρώματα της εσωτερικής περιοχής. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας u^+ εντός του οριακού στρώματος. Αρχικά, ενώ βρισκόμαστε στο συνεκτικό υπόστρωμα, η u^+ προσεγγίζει την καμπύλη $u^+ = y^+$. Στη συνέχεια, και ενώ βρισκόμαστε πλέον στη μεταβατική περιοχή, παρατηρείται μια «μετάβαση» της u^+ προς την καμπύλη όπου η σχέση της με τη y^+ είναι λογαριθμική, η οποία συνεχίζεται και στη λογαριθμική περιοχή:



Σχήμα 1.5 «Νόμος του τοιχώματος» (Law of the wall)

1.2.3 Τυρβώδης Ροή

Πολλές ροές σε πρακτικές εφαρμογές και στο περιβάλλον μπορούν να χαρακτηριστούν τυρβώδεις. Λόγω του ότι δεν υπάρχει ορισμός που καθορίζει πότε μια ροή λέγεται τυρβώδης, καταφεύγουμε σε φαινομενολογικούς ορισμούς. Τα βασικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής είναι:

- **Αταξία (Irregularity):** Λόγω των ακανόνιστων και απρόβλεπτων δομών της ροής, τα προβλήματα τύρβης θεωρούνται εξαιρετικά περίπλοκα, ειδικά σε μεγάλους Reynolds. Αυτό καθιστά δύσκολη τη μαθηματική προσομοίωση του φαινομένου αφού πραγματοποιείται σε μεγάλο αριθμό χρονικών και χωρικών κλιμάκων. Για αυτό το λόγο, στα προβλήματα τέτοιας φύσεως χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι για την περιγραφή της ροής.
- **Διάχυση (Diffusivity):** Είναι το χαρακτηριστικό της ροής που ευθύνεται για την ενισχυμένη μίξη, καθώς και για τον αυξημένο ρυθμό μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας στη ροή.
- **Στροβιλότητα (Rotationality):** Οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από ένα μηχανισμό παραγωγής τρισδιάστατων δινών, όπου η κλίμακα του ακτινικού μήκους των δινών μειώνεται και οι μεγαλύτερης κλίμακας δομές της ροής 'σπάνε' σε μικρότερες. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι οι δομές της ροής να γίνουν τόσο μικρές ώστε η κινητική τους ενέργεια να μετατραπεί σε θερμότητα εξαιτίας της συνεκτικότητας του ρευστού.
- **Συνεκτική Καταστροφή (Dissipation):** Οι τυρβώδεις ροές είναι καταστροφικές. Ο λόγος είναι ότι η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική («καταστρέφεται») εξαιτίας των συνεκτικών, διατμητικών τάσεων.

1.2.3.1 Περιγραφή Τυρβώδους Ροής κατά Reynolds

Λόγω της περιπλοκότητας της ροής, στην ανάλυση των δομών της τύρβης ως προς το πεδίο ταχυτήτων, η ροή αναλύεται με βάση το μοντέλο του Reynolds (1895), ο οποίος προκειμένου να μελετήσει το φαινόμενο διέσπασε την ταχύτητα και τα υπόλοιπα βασικά μεγέθη σε άθροισμα της χρονικά μέσης τιμής (\bar{A}) και της διακύμανσης (A'):

- **Ταχύτητα παράλληλη με τη φορά της ροής:**

$$(1.19) \quad u = \bar{u} + u', \text{ όπου } \bar{u} \text{ η μέση ταχύτητα και } u' \text{ η διακύμανση της ταχύτητας}$$

- **Ταχύτητα κάθετη προς τη φορά της ροής:**

$$(1.20) \quad v = \bar{v} + v', \text{ όπου } \bar{v} \text{ η μέση ταχύτητα και } v' \text{ η διακύμανση της ταχύτητας}$$

- **Η πίεση:**

$$(1.21) \quad p = \bar{p} + p', \text{ όπου } \bar{p} \text{ η μέση πίεση και } p' \text{ η διακύμανση της πίεσης}$$

Για το σχηματισμό των μέσων τιμών των βασικών εξισώσεων της ροής, χρησιμοποιούνται οι κανόνες σχηματισμού μέσων τιμών:

$$A = \bar{A} + A'$$

$$\overline{AB} = \overline{AB} + \overline{A'B'}, \quad \overline{ABC} = \overline{ABC} + \overline{AB'C'} + \overline{BA'C'} + \overline{A'B'C'}$$

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}, \quad \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{A}}{\partial x}$$

Εξίσωση Διατήρησης της Μάζας (1.2): Με την παραδοχή μόνιμης (οι παράγωγοι του χρόνου μηδενίζονται), διδιάστατης ροής και ασυμπίεστου ρευστού (η πυκνότητα του ρευστού γίνεται ανεξάρτητη της πίεσης: $\nabla \cdot \vec{v} = \text{div} \vec{v} = 0$) με σταθερές ιδιότητες (ρ, μ, ν), η σχέση (1.2) παίρνει τη μορφή:

$$(1.22) \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Με εφαρμογή των κανόνων σχηματισμού μέσων τιμών και σύμφωνα με τις σχέσεις (1.19) και (1.20), προκύπτει:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0$$

Εξίσωση Διατήρησης της Ορμής (1.4): Με την παραδοχή μόνιμης (οι παράγωγοι του χρόνου μηδενίζονται), διδιάστατης ροής ασυμπίεστου ρευστού (η πυκνότητα του ρευστού γίνεται ανεξάρτητη της πίεσης: $\nabla \cdot \vec{v} = \text{div} \vec{v} = 0$) με σταθερές ιδιότητες (ρ, μ, ν), η σχέση (1.4) παίρνει τη μορφή:

$$(1.23) \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (\text{κατά } x)$$

$$(1.24) \quad \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (\text{κατά } y)$$

Με βάση τους κανόνες της μέσης τιμής και τις σχέσεις (1.19), (1.20), (1.21), (1.23), (1.24) προκύπτουν:

$$(1.25) \quad \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} \right) = \rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{yx}}{\partial y} \quad (\text{κατά } x)$$

$$(1.26) \quad \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}v}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} \right) = \rho g_y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{yy}}{\partial y} \quad (\text{κατά } y)$$

Σε αυτό το σημείο εισάγεται ο τανυστής τυρβωδών διατμητικών τάσεων ή **τάσεων Reynolds** $\bar{\tau}'$:

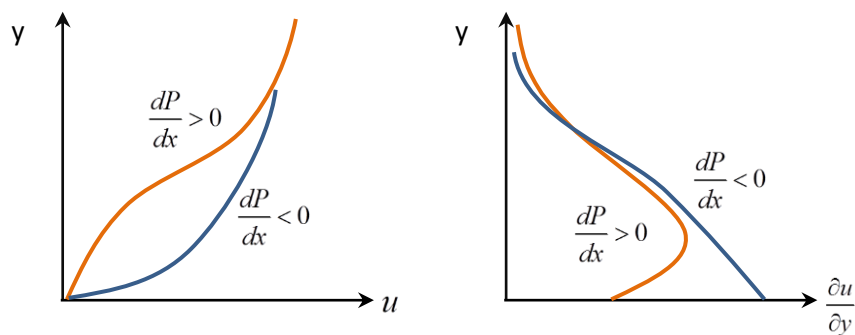
$$(1.27) \quad \vec{\tau} = \begin{pmatrix} -\rho \overline{u'^2} & -\rho \overline{u'v'} \\ -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{v'^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau'_{xx} & \tau'_{xy} \\ \tau'_{yx} & \tau'_{yy} \end{pmatrix}$$

που πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, που θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια στη μελέτη της συμπεριφοράς της δομής του ρευστού. Η επίδραση των τάσεων Reynolds έχει ως εξής: Αν κάποια διακύμανση u' της παράλληλης ροής $\bar{u}(y)$, δημιουργήσει διακύμανση της ταχύτητας κατά την κάθετη σε αυτήν ταχύτητα v' , τότε, μεταφέρεται επιπλέον ορμή κατά την κατεύθυνση x λόγω της τυρβώδους διατμητικής τάσης Reynolds $\tau'_{yx} = -\rho \overline{u'v'}$. Γνωρίζοντας λοιπόν, τις διατμητικές τάσεις Reynolds σε κάθε σημείο γνωρίζω σε ποια σημεία η ροή υφίσταται μικρότερες ή μεγαλύτερες διαταραχές στην ταχύτητα.

Λόγω της επιβολής της οριακής συνθήκης μηδενισμού της ταχύτητας (Συνθήκη μη-ολίσθησης), οι τυρβώδεις διατμητικές τάσεις μηδενίζονται επάνω σε ακίνητα στερεά όρια: $u_w' = v_w' = 0$, και κατ' επέκταση $\tau_w' = -\rho \overline{u_w'v_w'} = 0$ (η διατμητική τάση σε τοίχωμα).

1.2.4 Ροή υπό κλίση πίεσης - Αποκόλληση Ροής

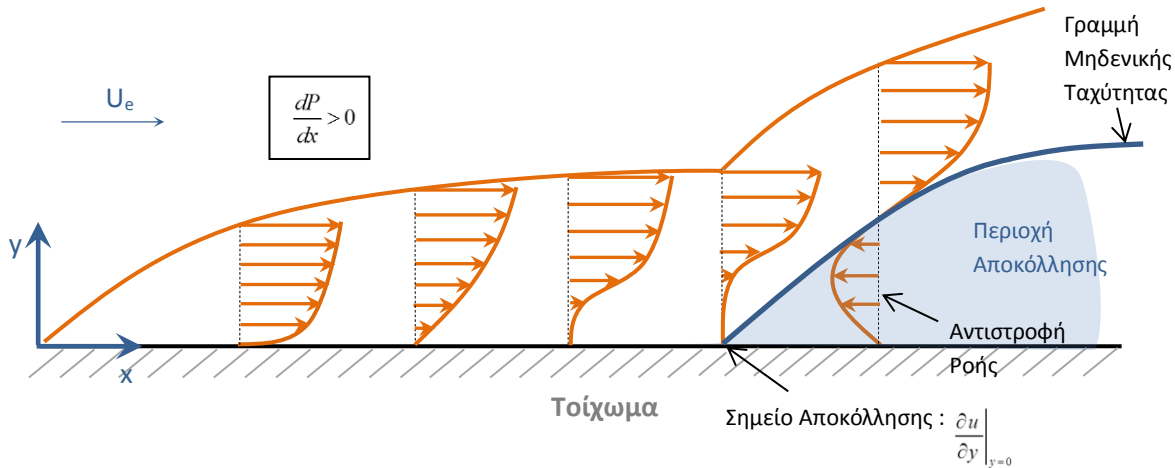
Όταν η ροή αναπτύσσεται υπό ορισμένες συνθήκες (σε καμπύλο στερεό τοίχωμα ή σε τοίχωμα με προεξοχές) δέχεται την επίδραση εξωτερικής κλίσης πίεσης. Η κλίση της πίεσης μπορεί να είναι αρνητική ή θετική. Η αρνητική κλίση πίεσης είναι «ευνοϊκή» γιατί προκαλεί δυνάμεις με κατεύθυνση παράλληλη προς το τοίχωμα που βοηθούν τα σωματίδια του ρευστού να υπερνικήσουν την τριβή στο τοίχωμα και κατά συνέπεια η ελεύθερη ροή επιταχύνεται. Η θετική κλίση πίεσης, αντίθετα, είναι «δυσμενής» γιατί προκαλεί δυνάμεις σε κατεύθυνση παράλληλη προς το τοίχωμα που αντιτίθενται στην κίνηση των σωματιδίων του ρευστού και ως αποτέλεσμα η ροή επιβραδύνεται.



Σχήμα 1.6 Κατανομή της ταχύτητας u (δεξιά) και της παραγώγου της (αριστερά) κατά μήκος του οριακού στρώματος, για θετική (πορτοκαλί) και αρνητική (μπλε) κλίση πίεσης^[4]

Φυσικά, η επιβράδυνση αυτή, προκαλεί συνεχή μείωση της συνιστώσας της ταχύτητας που είναι παράλληλη προς το τοίχωμα. Εάν αυτή μειωθεί αρκετά σε σχέση με την συνιστώσα της ταχύτητας που είναι κάθετη στο τοίχωμα, τότε προκαλείται ανοδική κίνηση (προς την ελεύθερη ροή) στα σωματίδια

που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του στερεού τοιχώματος. Το φαινόμενο αυτό λέγεται αποκόλληση του οριακού στρώματος.



Σχήμα 1.7 Προφίλ ταχύτητας σε περίπτωση άσκησης θετικής κλίσης πίεσης στη ροή

Γενικά, η αποκόλληση οριακού στρώματος συμβαίνει σε σημείο όπου η κλίση της ταχύτητας και κατά συνέπεια η διατμητική τάση στο τοίχωμα, μηδενίζονται. Δηλαδή στο σημείο αποκόλλησης, έχουμε:

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

Όπου: y : η διεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια

Ο μηδενισμός της κλίσης της ταχύτητας στο όριο συνεπάγεται ότι σε μια περιοχή κοντά στο τοίχωμα, η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού παράλληλα προς το όριο είναι αμελητέα. Τα σωματίδια αυτής της περιοχής αποκολλούνται από το στερεό τοίχωμα και προχωρούν στην κυρίως ροή, και ταυτόχρονα μια άλλη μάζα ρευστού κινείται αντίθετα προς την εξωτερική ροή και καταλαμβάνει τη θέση τους. Στην περιοχή του σημείου αποκόλλησης παρατηρείται μια αναστροφή της ροής (δίνη ή φουσαλίδα ανακυκλοφορίας).

1.3 Θερμοκρασιακό Πεδίο

1.3.1 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας

Θερμότητα είναι η ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος, ή μεταξύ δύο συστημάτων, από τη θερμότερη προς τη ψυχρότερη περιοχή, τείνοντας στην εξισορρόπηση της θερμοκρασιακής τους διαφοράς. Διακρίνονται τρεις βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας:

- **Μεταφορά με Αγωγή (Conduction):** Η αγωγή, είναι ένα φαινόμενο μοριακής φύσεως, όπου η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα υλικό λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς – με αλληλεπιδράσεις των μικροσκοπικών σωματιδίων - χωρίς να υπάρχει μακροσκοπική μετακίνηση της μάζας. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, δίνεται από το «Νόμο του Fourier»:

$$(1.28) \quad q_x = -k\nabla T$$

Όπου q_x : ο ρυθμός παροχής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας κατά τη διεύθυνση x
 k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ή ειδική θερμική αγωγιμότητα, ο οποίος αποτελεί θερμοφυσική ιδιότητα του υλικού (αλλάζει ανάλογα με το υλικό)

Η αγωγή θερμότητας μπορεί να γίνει σε πλήρως ανεπτυγμένες συνθήκες (steady state), όπου η μετάδοση θερμότητας συντελείται σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος ΔT και άρα όλες οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο χώρο του υλικού μπορεί να είναι μηδενικές ή σε μεταβατικές συνθήκες (transient state) όπου οι θερμοκρασιακές συνθήκες στα τοιχώματα ή στο εσωτερικό του υλικού είναι μεταβλητές.

- **Μεταφορά με Συναγωγή (Convection):** Η συναγωγή είναι το φαινόμενο όπου η μετακίνηση ενός ρευστού από ένα σημείο του χώρου σε άλλο, προκαλεί μετακίνηση της ενέργειάς του, επηρεάζοντας το ενεργειακό περιεχόμενο και τη θερμοκρασία του χώρου στον οποίο καταλήγει. Η συναγωγή μπορεί να διακριθεί σε *φυσική* και *εξαναγκασμένη*. Παράδειγμα *φυσικής ή ελεύθερης συναγωγής* είναι η κυκλοφορία ενός ρευστού εξαιτίας της επαφής του με στερεό όριο υψηλότερης θερμοκρασίας (λόγω της διαφοράς στην πυκνότητα που προκαλείται από τη διαστολή του ρευστού, παρατηρείται κίνηση του ρευστού εξαιτίας της παρουσίας δυνάμεων άνωσης). *Εξαναγκασμένη συναγωγή* είναι η περίπτωση όπου ρευστό που περιβάλλει επιφάνεια, εξαναγκάζεται σε κίνηση από εξωτερικά αίτια (π.χ. αντλία). Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, γνωστός και ως ο «Νόμος Ψύξης του Newton», δίνεται από τον τύπο:

$$(1.29) \quad q = h(T_s - T_\infty)$$

Όπου q : ο ρυθμός παροχής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας
 h : ο συντελεστής συναγωγής ή ειδική συναγωγιμότητα, ο οποίος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής (ταχύτητα, γεωμετρία) και τις ιδιότητες του ρευστού (αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα, ιξώδες και πυκνότητα)
 T_s, T_∞ : η θερμοκρασία της επιφάνειας και η θερμοκρασία του ρευστού αντίστοιχα

Πεδίο ροής	h (W/m ² K)
Ελεύθερη Συναγωγή – Αέρας	5 – 50
Εξαναγκασμένη Συναγωγή – Αέρας	25 – 250
Εξαναγκασμένη Συναγωγή – Νερό	250 – 15 000
Νερό στο σημείο βρασμού	2 500 – 25 000
Ατμός Συμπύκνωση	5 000 – 100 000

Πίνακας 1.1 Τυπικές τιμές του Συντελεστή Συναγωγής

- **Μεταφορά με ακτινοβολία (Radiation):** Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η ενέργεια μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ακτινοβολία εκπέμπουν και απορροφούν όλα τα στερεά και υγρά, καθώς και ορισμένα αέρια. Η ακτινοβολία που μπορεί να εκπέμψει ένα σώμα εμβαδού A δίνεται από το «Νόμο του Stefan – Boltzmann»:

$$(1.30) \quad q = \varepsilon \sigma T^4$$

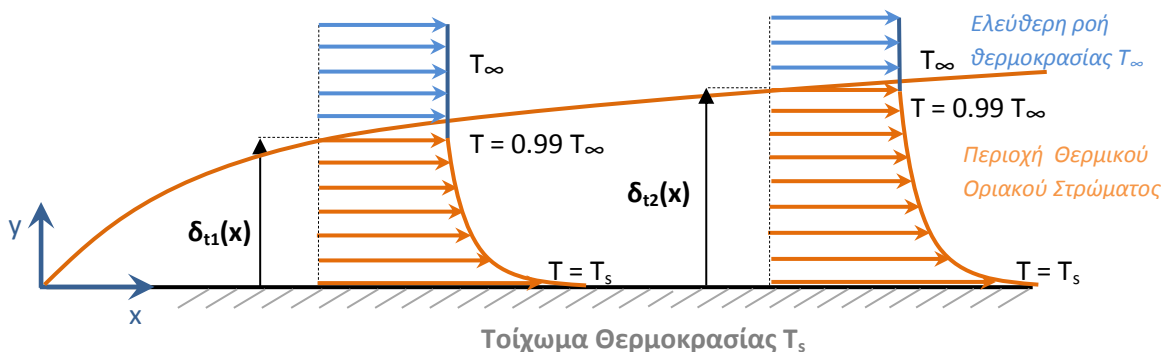
Όπου σ : η σταθερά Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5.676 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
 ε : ο συντελεστής εκπομπής, ο οποίος εκφράζει την «απόδοση» σε θερμική εκπομπή της επιφάνειας και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Όταν $\varepsilon = 1$, το σώμα εκπέμπει μέγιστη ακτινοβολία λέγεται μέλαν σώμα.

Στην πράξη, οι τρεις αυτοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας συνυπάρχουν. Παρόλα αυτά, πολλές φορές για λόγους απλούστευσης του εκάστοτε προβλήματος, εξετάζεται μόνο ο κυρίαρχος μηχανισμός.

1.3.2 Θερμοκρασιακό Οριακό Στρώμα

Σε περίπτωση ροής πάνω σε στερεό εμπόδιο - όπως προαναφέρθηκε - αναπτύσσεται το υδροδυναμικό οριακό στρώμα. Αντίστοιχα, εάν οι θερμοκρασίες στερεού (T_s) και ρευστού (T_∞) διαφέρουν (με αποτέλεσμα να γίνεται μεταφορά θερμότητας) σχηματίζεται και το θερμοκρασιακό (ή θερμικό) οριακό στρώμα. Το θερμοκρασιακό προφίλ, μέσα στο θερμικό οριακό στρώμα σε επίπεδη πλάκα θερμοκρασίας T_s , μεγαλύτερης από θερμοκρασία ρευστού T_∞ , φαίνεται στο Σχήμα 1.8.

Κοντά στο στερεό εμπόδιο η θερμοκρασία προσεγγίζει τη θερμοκρασία της επίπεδης πλάκας (T_s) και όσο απομακρυνόμαστε από αυτή, μειώνεται. Το εύρος επιρροής φτάνει μέχρι και το σημείο όπου η θερμοκρασία του ρευστού είναι στο 99% της θερμοκρασίας του ελεύθερου ρεύματος (T_∞) και καλείται πάχος θερμικού οριακού στρώματος (δ_{t1}). Όσο το ρευστό προχωράει κατά μήκος του τοιχώματος, το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνει αφού η θερμότητα μεταδίδεται σε όλο και μεγαλύτερο εύρος.



Σχήμα 1.8 Θερμοκρασιακό προφίλ Θερμικού Οριακού Στρώματος κατά μήκος επίπεδης πλάκας

Θερμότητα μεταφέρεται στο ρευστό με συναγωγή. Επομένως, στο σημείο όπου $y = 0$, ισχύουν ταυτόχρονα οι σχέσεις (1.28), (1.29), οι οποίες και ισούνται:

Οπότε στην περιοχή της πλάκας ($y = 0$), και θεωρώντας το πεδίο διδιάστατο, η τοπική ειδική συναγωγιμότητα δίνεται από τη σχέση:

$$(1.31) \quad h_x = h(x) = k \frac{[\partial T(x, y) / \partial y]_{y=0}}{T_s - T_\infty}$$

1.3.3 Παράμετροι Μεταφοράς Θερμότητας με Συναγωγή

1.3.3.1 Αριθμός Prandtl

Το υδροδυναμικό οριακό στρώμα και το θερμικό οριακό στρώμα βρίσκονται σε αλληλεπίδραση μεταξύ τους, χωρίς απαραίτητα να ταυτίζονται. Η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται και από τα δύο. Η σχέση μεταξύ πάχους θερμικού και πάχους υδροδυναμικού οριακού στρώματος, εξαρτάται από τον αριθμό Prandtl του ρευστού, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$(1.32) \quad \text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k}$$

Όπου c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του ρευστού
 k : η ειδική θερμική αγωγιμότητα του ρευστού

Είναι φανερό ότι ο αριθμός Prandtl, εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού και γι' αυτό το λόγο θεωρείται και ο ίδιος ιδιότητα του ρευστού, ενώ είναι πρωτίστως συνάρτηση της θερμοκρασίας (αλλάζει με την αλλαγή στη θερμοκρασία).

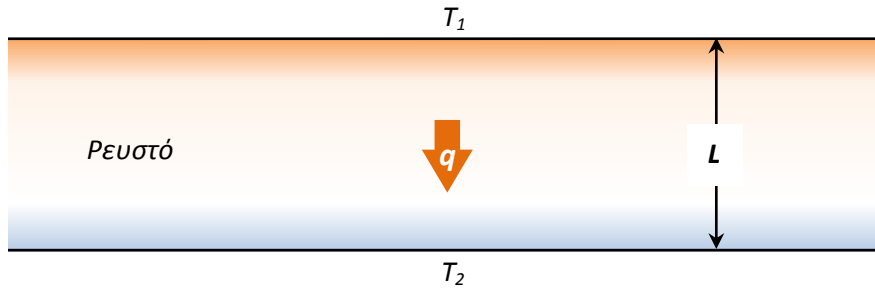
Όταν ο Prandtl είναι ίσος με τη μονάδα, τότε τα δύο πάχη ταυτίζονται ($\text{Pr} = 1 \Rightarrow \delta_t = \delta$), όταν είναι μικρότερος το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος είναι μεγαλύτερο από αυτό του υδροδυναμικού ($\text{Pr} < 1 \Rightarrow \delta_t > \delta$) και όταν είναι μεγαλύτερος, τότε το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος είναι μικρότερο από αυτό του υδροδυναμικού ($\text{Pr} > 1 \Rightarrow \delta_t < \delta$). Σύμφωνα μάλιστα με τον Pohlhausen, η σχέση μεταξύ πάχους υδροδυναμικού οριακού στρώματος, πάχους θερμικού οριακού στρώματος και αριθμού Prandtl για στρωτή ροή είναι:

$$(1.33) \quad \frac{\delta}{\delta_t} = \text{Pr}^{1/3}$$

1.3.3.2 Αριθμός Nusselt

Στην ανάλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, ο συντελεστής συναγωγής h , εκφράζεται συνήθως υπό τη μορφή του Αριθμού Nusselt. Για να γίνει αντιληπτή, η φυσική σημασία

του, εξετάζεται η μεταφορά θερμότητας σε στρώμα ρευστού πάχους L , τα άκρα του οποίου βρίσκονται σε θερμοκρασίες T_1 και T_2 (Σχήμα 1.9):



Σχήμα 1.9 Μεταφορά Θερμότητας με Συναγωγή σε Στρώμα Ρευστού

Όταν το ρευστό είναι ακίνητο, η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή:

$$q_{cond} = k \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

Όταν το ρευστό κινείται, η θερμότητα μεταφέρεται με (εξαναγκασμένη) συναγωγή:

$$q_{conv} = h(T_1 - T_2)$$

Ο Αριθμός Nusselt δίνει το λόγο του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, προς το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με αγωγή. Όσο πιο μεγάλος είναι ο Αριθμός Nusselt, τόσο πιο αποτελεσματική η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, ενώ όταν $Nu = 1$, έχουμε μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή.

$$(1.34) \quad Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{hL}{k}$$

Για επίπεδο σώμα, ορίζεται ο τοπικός αριθμός Nusselt, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$(1.35) \quad Nu_x = \frac{x \cdot h(x)}{k}$$

1.4 Αλληλεπίδραση Θερμικού και Υδροδυναμικού Οριακού Στρώματος

Από τις σχέσεις (1.11), (1.32) και (1.35) των αριθμών Reynolds, Prandtl και Nusselt, είναι φανερό ότι για δεδομένη γεωμετρία σώματος, ο αριθμός Nusselt, μπορεί να δοθεί σαν συνάρτηση των Prandtl και Reynolds ($Nu = f(Re, Pr)$). Ο ρόλος της γεωμετρίας και των συνθηκών ροής στην εύρεση αυτής της συνάρτησης, καθιστά αυτό το πρόβλημα αρκετά περίπλοκο. Αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να γίνει μαθηματική επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, εντούτοις υπάρχουν και πολλές, στις οποίες μαθηματικά μοντέλα δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμη επιτυχώς. Επίσης, ακόμα και στις περιπτώσεις όπου

είναι διαθέσιμη η αναλυτική επίλυση, είναι απαραίτητη η πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Στο παρόν χωρίο δίνονται γίνεται καταγραφή ορισμένων διαθέσιμων σχέσεων.

1.4.1 Μεταφορά Θερμότητας με Ελεύθερη Συναγωγή

Τα μαθηματικά μοντέλα που καταγράφονται, ορίζονται από κάποιες επιπλέον σχέσεις. Δίνονται:

Η θερμοκρασία του φίλμ, που είναι η μέση τιμή του αθροίσματος της θερμοκρασίας της πλάκας και της θερμοκρασίας του ρευστού και χρησιμοποιείται για να λαμβάνεται υπόψη και ο παράγοντας της θερμοκρασίας σε τέτοια προβλήματα (μιας και οι ιδιότητες του ρευστού εξαρτώνται από τη θερμοκρασία:

$$(1.36) \quad T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Ο αδιάστατος Αριθμός Grashof, που είναι μία παράμετρος για το συσχετισμό δεδομένων φυσικής συναγωγής:

$$(1.37) \quad Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2}$$

Όπου β : ο συντελεστής θερμικής διαστολής

Ο αδιάστατος Αριθμός Rayleigh, που είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με τις ανωστικές ροές:

$$(1.38) \quad Ra = Gr Pr$$

Ο αδιάστατος Αριθμός Stanton:

$$(1.39) \quad St = \frac{h}{\rho u c_p}$$

Κάθετες Πλάκες:

- Στρωτή ροή, σταθερή πυκνότητα παροχής στα τοιχώματα:

$$Nu = \frac{4}{3} f(Pr) \left(\frac{Gr}{4} \right)^{1/4} \quad : \text{Ostrach (Σύμφωνη με Sparrow \& Gregg)}$$

Όπου η συνάρτηση Prandtl ($f(Pr)$) δίνεται από τον πίνακα:

Pr	0.01	0.072	1	2	10	100	1 000
$f(Pr)$	0.081	0.505	0.567	0.716	1.169	2.191	3.966

Πίνακας 1.2 Τιμές της συνάρτησης $f(Pr)$

- Στρωτή και Τυρβώδης Ροή:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad : \text{Churchill \& Chu}$$

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670Ra^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{4/9}}, \quad Ra > 10^9$$

*Το χαρακτηριστικό μήκος L είναι το ύψος της κάθετης επιφάνειας της πλάκας.

Κάθετοι κύλινδροι:

Ισχύουν οι σχέσεις Churchill & Chu, όταν το πάχος του οριακού στρώματος είναι μικρό σε σχέση με τη διάμετρο (D) του κυλίνδρου (με αυτό τον τρόπο η καμπυλότητα (curvature) του θεωρείται αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο). Η μαθηματική σχέση για το κριτήριο δίνεται:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr^{1/4}}$$

*Το μήκος L είναι το ύψος του κυλίνδρου.

Επίπεδες Πλάκες:

- Η θερμαινόμενη πλάκα βρίσκεται από κάτω:

$$Nu = 0.54Ra^{1/4}, \quad 10^5 < Ra < 2 \times 10^7 \quad : \text{McAdams}$$

$$Nu = 0.14Ra^{1/3}, \quad 2 \times 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10}$$

- Η θερμαινόμενη πλάκα βρίσκεται από πάνω:

$$Nu = 0.27Ra^{1/4}, \quad 3 \times 10^5 < Ra < 10^{10} \quad : \text{McAdams}$$

*Το μήκος L είναι ο λόγος του εμβαδού της πλάκας προς την περίμετρο.

1.4.2 Μεταφορά Θερμότητας με Εξαναγκασμένη Συναγωγή

Το υδροδυναμικό και το θερμικό οριακό στρώμα παίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μεταφορά θερμότητας σε εξαναγκασμένη ροή ρευστού περί

επιφάνειας διαφορετικής θερμοκρασίας (από αυτή του ρευστού) αποτελεί εξαναγκασμένη συναγωγή, φαινόμενο απαραίτητο για την ταυτόχρονη ανάπτυξη υδροδυναμικού και θερμικού οριακού στρώματος.

Αγωγός Κυκλικής Διατομής

- Στρωτή ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής (D):

$$Nu_D = 1.86 \left(\text{Re Pr} \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad : \text{Seider \& Tate}$$

Εδώ για την αξιολόγηση χρησιμοποιείται η θερμοκρασία του ρευστού και όχι η θερμοκρασία του φιλμ.

- Τυρβώδης ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής (D):

$$Nu_D = 0.023 \text{Re}_D^{0.8} \text{Pr}^n, \text{Re}_D > 10^4 \quad : \text{Dittus \& Boelter}$$

$$0.7 < \text{Pr} < 100$$

$$L / D > 60$$

Όπου $n = 0.4$ όταν το ρευστό θερμαίνεται και $n = 0.3$ όταν το ρευστό ψύχεται. Στην αξιολόγηση χρησιμοποιείται η θερμοκρασία του ρευστού και όχι η θερμοκρασία του φιλμ.

$$St = 0.023 \text{Re}_D^{-0.2} \text{Pr}^{-2/3} \quad \text{Re}_D > 10^4 \quad : \text{Colburn}$$

$$0.7 < \text{Pr} < 100$$

$$L / D > 60$$

Στην αξιολόγηση χρησιμοποιείται η θερμοκρασία του ρευστού και ενώ για τον Αριθμό Stanton η θερμοκρασία του φιλμ.

Παράλληλες Πλάκες:

- Στρωτή ροή ($\text{Re}_x \leq 2 \times 10^5$):

$$Nu = 0.664 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$$

- Τυρβώδης ροή ($\text{Re}_x > 3 \times 10^6$):

$$Nu = 0.360 \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3}$$

* Οι πιο πάνω σχέσεις για τη μεταφορά θερμότητας με ελεύθερη και εξαναγκασμένη συναγωγή, λήφθηκαν από τους J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson, «Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer», John Wiley & Sons, Inc., Oregon, 1983^[4], ενώ για τα υπόλοιπα στοιχεία θεωρίας, χρησιμοποιήθηκαν τα συγγράμματα που παραθέτονται στη βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 2^ο

Διεθνής Βιβλιογραφία

Σε αυτό το κεφάλαιο δίνονται, συνοπτικά, στοιχεία από εργασίες διεθνούς βιβλιογραφίας. Μέσω αυτών, μπορούν να εξαχθούν σε πρώτο στάδιο κάποια συμπεράσματα για την επίδραση της τραχύτητας στη ροή, τόσο στο τυρβώδες οριακό στρώμα, όσο και στη μεταφορά θερμότητας.

2.1 Επίδραση της Επιφανειακής Τραχύτητας στο Τυρβώδες Οριακό Στρώμα

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το προφίλ της ταχύτητας εντός της εξωτερικής περιοχής του τυρβώδους οριακού στρώματος, δίνεται από τη σχέση (1.18). Υπενθυμίζεται ότι το A , είναι μια προσθετέα παράμετρος που εξαρτάται από την επιφανειακή τραχύτητα, και μειώνεται με την αύξηση της τραχύτητας (παίρνει τιμές από 5 - 5.5). Κατ' επέκταση, μπορεί να γραφεί:

$$(2.1) \quad A = 5.5 - \Delta U^+$$

Όπου ΔU^+ : η Συνάρτηση της Τραχύτητας

Στην άμεση γειτνίαση της τραχύτητας, η κατανομή της μέσης ταχύτητας, μπορεί να δοθεί από τη σχέση^{[5] [6] [7]}:

$$(2.2) \quad u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{k}\right) + C + \frac{\Pi}{\kappa} W(y/\delta)$$

Όπου C : μια σταθερά που αφορά την οριακή κατάσταση στο τοίχωμα, και για επιφανειακή τραχύτητα αποτελούμενη από άμμο, ισούται με 8.5.

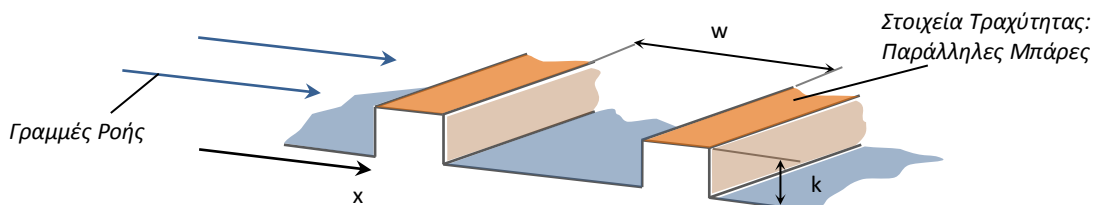
Με συνδυασμό των εξισώσεων (2.1), (2.2) και (1.18), προκύπτει η σχέση που δίνει τη **Συνάρτηση της Τραχύτητας**:

$$(2.3) \quad \Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(k^+) + B - C$$

Όπως φαίνεται και από τη σχέση (2.3), σύμφωνα με την κλασική θεωρία της τυρβώδους ροής, η επιφανειακή τραχύτητα, επηρεάζει την κατανομή της μέσης ταχύτητας (μείωση σε σχέση με το λείο τοίχωμα). Η Συνάρτηση της Τραχύτητας εξαρτάται από την πυκνότητα, το ύψος και τη φύση της επιφανειακής τραχύτητας.

Λόγω των πολλών διαφορετικών τύπων τραχύτητας, που μπορούν να συναντηθούν στη μηχανολογία, η ανάγκη για κατηγοριοποίηση της τραχύτητας, οδήγησε σε μια διάκριση της τραχύτητας σε d-τύπο και k-τύπο. Θεωρώντας τραχύτητα αποτελούμενη από παράλληλα εμπόδια (Σχήμα 2.1), κάθετα βαλμένα στην κατεύθυνση της ροής, η διάκριση, αυτή, γίνεται με βάση τη διάχυση των δινών που δημιουργούνται ανάμεσα στα εμπόδια^{[5] [7]}:

- **Τραχύτητα d-τύπου**: τα στοιχεία της τραχύτητας είναι κατανεμημένα το ένα πολύ κοντά στο άλλο και μέσα στα αυλάκια που βρίσκονται ανάμεσά τους, σχηματίζονται σταθερές δίνες ανακυκλοφορίας, χωρίς να υπάρχει διάχυση στη ροή πάνω από την κορυφή των στοιχείων της τραχύτητας. Οπότε, ουσιαστικά, η εξωτερική ροή διαχωρίζεται από την τραχύτητα.



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

k (Roughness Height): το ύψος τραχύτητας

w (Cavity Length): το μήκος της κοιλότητας (cavity) ανάμεσα στα δύο στοιχεία της τραχύτητας

x: η απόσταση του εξεταζόμενου στοιχείου από την είσοδο της αεροδυναμικής σήραγγας

D_h (Υδραυλική διάμετρος): = 4 x (Εμβαδόν) / (Περίμετρος), όπου η περίμετρος και το εμβαδόν είναι αυτά της διατομής της αεροδυναμικής σήραγγας στο σημείο που γίνεται το πείραμα

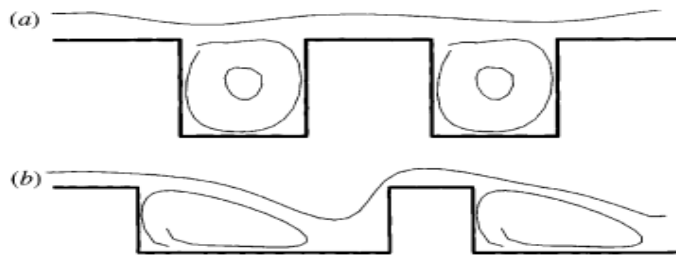
Σχήμα 2.1 Σχηματική Απεικόνιση Τραχύτητας και Χαρακτηριστικών Μεγεθών της: Παράλληλες μπάρες κάθετες στη φορά της ροής

Το γράμμα d, δηλώνει τη χαρακτηριστική κλίμακα μεγέθους που προσδιορίζει τη Συνάρτηση της Τραχύτητας, τα προφίλ ταχύτητας και τον παράγοντα τριβής, και αντιστοιχεί στο πάχος του οριακού στρώματος, τη διάμετρο του αγωγού, ή το ύψος της τραχύτητας (δηλ. σε αυτή την περίπτωση δεν

ισχύει η σχέση (2.3), όπου η συνάρτηση της τραχύτητας και κατ' επέκταση το προφίλ της ταχύτητας εξαρτώνται από το ύψος της τραχύτητας k).

- **Τραχύτητα k -τύπου:** δίνες ανακυκλοφορίας, διαχέονται στη ροή πάνω από τις κορυφές των στοιχείων της τραχύτητας, και σε μεγαλύτερο ύψος από τα στοιχεία, διαχέονται στην κύρια ροή. Σε αυτή την περίπτωση, το k είναι το ύψος της τραχύτητας (άρα ισχύει η σχέση (2.3)).

Ο διαχωρισμός των δύο, υπολογίζεται να γίνεται όταν $w/k = 3 - 4$, όπου w , το πλάτος της κοιλότητας ανάμεσα στα στοιχεία της τραχύτητας (Σχήμα 2.1) και k το ύψος της τραχύτητας, παρόλο που πολλοί είναι και αυτοί που κατατάσσουν το $w/k = 3$, ως γεωμετρία k -τύπου.

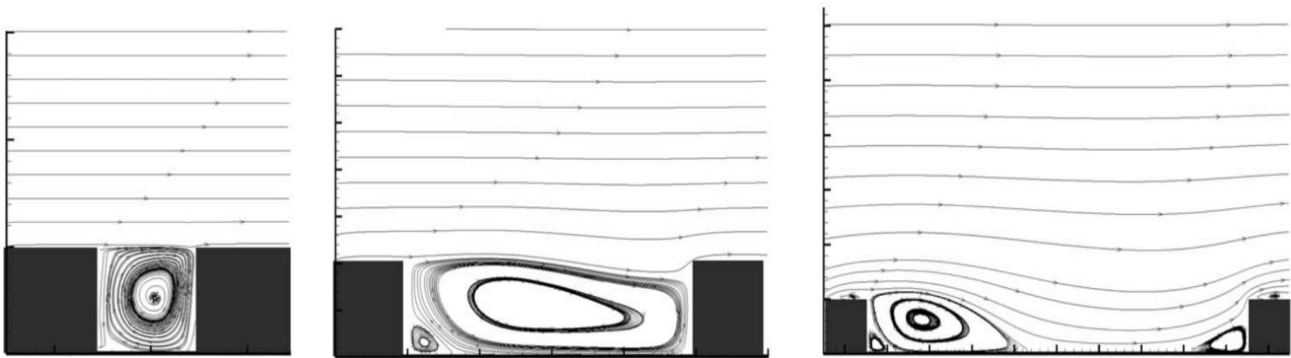


Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση γεωμετρίας (a) d -τύπου και (b) k -τύπου τραχύτητας (η ροή έχει κατεύθυνση από τα αριστερά στα δεξιά)^[5]

Οι **Jie Cui, Virendra C. Patel και Ching-Long Lin (2003)**^[8], ανέλυσαν τη χρονικά μέση και στιγμιαία ροή, ανάμεσα σε στοιχεία τραχύτητας γεωμετρίας d -τύπου, ενδιάμεση και k -τύπου, με προσομοίωση μεγάλων δινών (LES – Large-Eddy Simulation). Στην ανάλυσή τους, έγιναν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικούς λόγους πλάτους κοιλότητας προς ύψος εμποδίων (pitch ratios): $w/k = 1, 4$ και 9 . Ο Reynolds είναι σταθερός και ίσος με $10\ 000$, ενώ υπολογίζεται με βάση τη μέση ταχύτητα ροής (U_e – bulk velocity), ενώ η απόσταση που χρησιμοποιείται είναι το μισό του ύψους της αεροδυναμικής σήραγγας ($H/2$), οπότε: $Re = U_e H / (2\nu) = 10\ 000$. Μερικές ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις για τη ροϊκή δομή, παρουσιάζονται πιο κάτω:

Στο Σχήμα 2.3, φαίνονται οι μέσες γραμμές ροής για d -τύπου ($w/k = 1$), ενδιάμεση ($w/k = 4$) και k -τύπου ($w/k = 9$) τραχύτητα. Στην τραχύτητα d -τύπου, οι γραμμές ροής πάνω από τα εμπόδια είναι σχεδόν παράλληλες. Στην ενδιάμεση τραχύτητα, μια δίνη σχηματίζεται ανάμεσα στα εμπόδια, ίδιου μεγέθους με την κοιλότητα. Αυτή η δίνη εμποδίζει τη ροή να επανακολληθεί με το κάτω τοίχωμα μέσα στην κοιλότητα. Ταυτόχρονα, μια άλλη μικρότερη δίνη με φορά ανακυκλοφορίας αντίθετη από αυτήν της προαναφερθείσας κύριας δίνης, σχηματίζεται στην κάτω γωνία του πρώτου εμποδίου. Οι γραμμές ροής πάνω από την κοιλότητα, εξακολουθούν να είναι σχεδόν παράλληλες με εξαίρεση αυτές που βρίσκονται κοντά στο τοίχωμα.

Στην k -τύπου τραχύτητα, η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας φαίνεται κατάντι του πρώτου εμποδίου, συνοδευόμενη από μία δευτερεύουσα αντίθετης φοράς στην κατάντι γωνία του πρώτου εμποδίου.



Σχήμα 2.3 Μέσες Γραμμές Ροής για d-τύπου (αριστερά), ενδιάμεση (κέντρο) και k-τύπου τραχύτητα (δεξιά)^[8]

Η κύρια ζώνη επανακολλάται στο τοίχωμα μέσα στην κοιλότητα, περίπου τέσσερα ύψη εμποδίου ($4k$) κατάντι του πρώτου εμποδίου και ξαναποκολλάται ανάντι του επόμενου εμποδίου, σχηματίζοντας μια μικρή δίνη. Τέλος, μπορεί να φανεί μια μικρή ζώνη αποκόλλησης πάνω στην κορυφή των εμποδίων.

Στο Σχήμα 2.4, φαίνεται η κατανομή της έντασης της τύρβης (U_{rms}, V_{rms}), προς την μέση ταχύτητα της ροής U_e για κάθε μια από τις τρεις γεωμετρίες της τραχύτητας, όπου $U_{rms} = \sqrt{\langle (\bar{u} - \langle \bar{u} \rangle)^2 \rangle}$ και

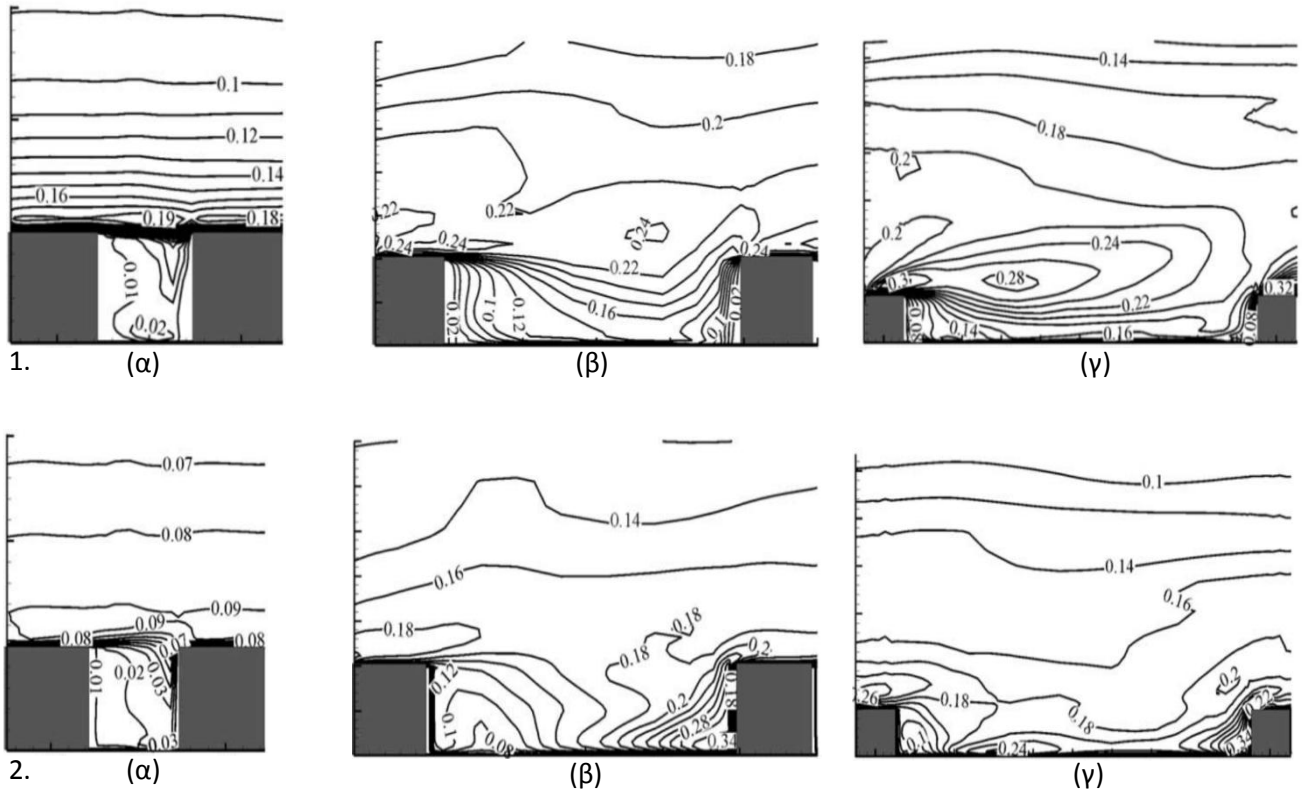
$$\text{αντίστοιχα, } V_{rms} = \sqrt{\langle (\bar{v} - \langle \bar{v} \rangle)^2 \rangle}.$$

Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 2.4, φαίνονται οι ισοϋψείς της έντασης της τύρβης παράλληλης στην κατεύθυνση της ροής. Στην τραχύτητα d-τύπου, η U_{rms} μέσα στην κοιλότητα είναι αμελητέα, φτάνοντας τη μέγιστη τιμή της λίγο πάνω από το εμπόδιο, ενώ οι ισοϋψείς είναι σχεδόν παράλληλες. Στην ενδιάμεση και k-τύπου τραχύτητα, οι κατανομές της U_{rms} είναι παρόμοιες, με τις μέγιστες τιμές να εντοπίζονται στις κορυφές των εμποδίων, λόγω της επιτάχυνσης και της μεγάλης διατμητικής τάσης.

Μερικά τοπικά μέγιστα της U_{rms} , εντοπίζονται στην κορυφή της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, κατάντι του πρώτου εμποδίου και σχετίζονται με το διατμητικό στρώμα που προέρχεται από την άκρη του εμποδίου και περνάει πάνω από την κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας.

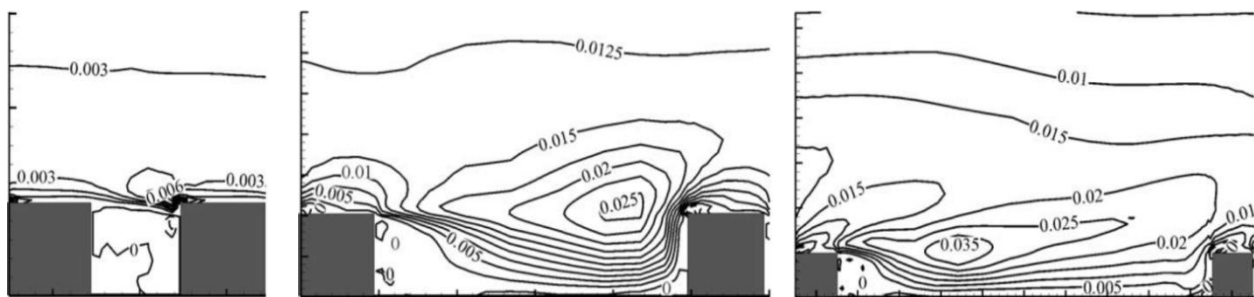
Οι ισοϋψείς με τις μεγαλύτερες τιμές της U_{rms} , βρίσκονται πιο κοντά στο κάτω τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας, ενώ για k-τύπου τραχύτητα, οι τιμές της U_{rms} είναι μεγαλύτερες. Στη δεύτερη γραμμή του ίδιου σχήματος, φαίνονται οι ισοϋψείς της έντασης της τύρβης κάθετης στην κατεύθυνση της ροής (παράλληλης με το ύψος της αεροδυναμικής σήραγγας).

Για d-τύπου τραχύτητα, η μέγιστη τιμή της V_{rms} , εντοπίζεται στην άνω γωνιά μπροστά από το πρώτο εμπόδιο και σχετίζεται με την κίνηση της ροής μέσα και έξω από την κοιλότητα. Στην ενδιάμεση και k-τύπου τραχύτητα, η μέγιστη V_{rms} , βρίσκεται κατάντι του πρώτου εμποδίου και πάνω από την κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, μέσα στην κοιλότητα.



Σχήμα 2.4 1. Ισοϋψείς Μέσης U_{rms}/U_e για (α) d-τύπου, (β) ενδιάμεση και (γ) k-τύπου τραχύτητα, 2. Ισοϋψείς Μέσης V_{rms}/U_e για (α) d-τύπου, (β) ενδιάμεση και (γ) k-τύπου τραχύτητα ^[8]

Στο Σχήμα 2.5, φαίνεται ότι για τραχύτητα d-τύπου, η διατμητική τάση Reynolds στην κοιλότητα είναι σχεδόν μηδενική, ενώ πάνω από τα στοιχεία της τραχύτητας, γίνεται μέγιστη λόγω της κίνησης της ροής μέσα και έξω από την κοιλότητα. Για ενδιάμεση και k-τύπου τραχύτητα, η μέγιστη τιμή βρίσκεται κατάντι του εμποδίου (γύρω στα 3 ύψη εμποδίου (3k) μακριά από το πρώτο εμπόδιο) πάνω από την κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας.



Σχήμα 2.5 Υσοϋψείς μέσης διατμητικής τάσης Reynolds $-\overline{u'v'}$ (κανονικοποιημένης ως προς U_e) για d-τύπου (αριστερά), ενδιάμεση (κέντρο) και k-τύπου τραχύτητα (δεξιά) ^[8]

Σύμφωνα με τους **J. Cui, V. C. Patel και C. L. Lin (2003)^[8]**, η ροή επηρεάζεται αρκετά από τα στοιχεία της τραχύτητας, και όχι μόνο εξαιτίας του ύψους τους. Αυτό δείχνει ότι η συμβατική κατηγοριοποίηση σε k- και d-τύπου τραχύτητα είναι υπεραπλουστευμένη. Στη μελέτη της ροής μέσα στο στρώμα της τραχύτητας, πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο η γενικές κλίμακες μήκους και χρόνου της τραχύτητας όσο και της αεροδυναμικής σήραγγας, ούτως ώστε να γίνει σωστή περιγραφή του φαινομένου.

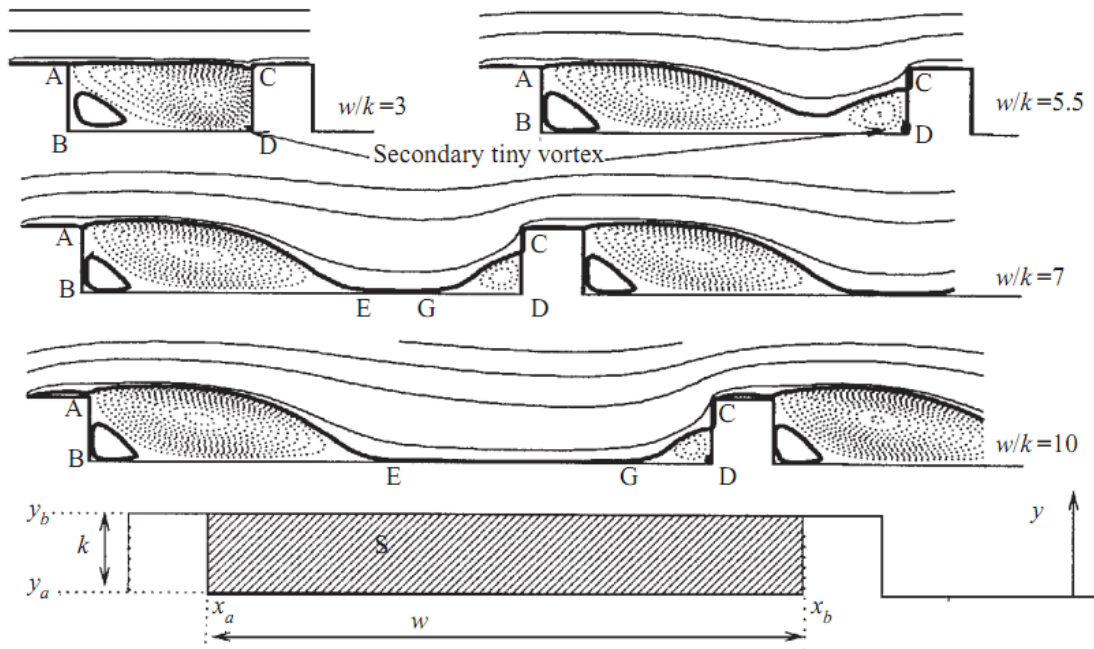
Οι **S. Leonardi, P. Orlandi, R. J. Smalley, L. Djenidi και R. A. Antonia (2003)^[9]**, ανέλυσαν την πλήρως τυρβώδη ροή, σε αεροδυναμική σήραγγα με τραχύτητα αποτελούμενη από παράλληλες μπάρες κάθετες στη φορά (Σχήμα 2.1) της ροής στο κάτω τοίχωμα, με τη μέθοδο των Άμεσων Αριθμητικών Προσομοιώσεων (DNS – Direct Numerical Simulations). Η ανάλυσή τους, έγινε σε ένα μεγάλο εύρος λόγων πλάτους κοιλότητας προς ύψος εμποδίων (pitch ratios): $w/k = 0.33, 0.6, 1, 2.07, 3, 4, 5.5, 7, 8, 9, 10$ και 19 . Ο Reynolds υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα της ροής στη μέση του ύψους της αεροδυναμικής σήραγγας (U_c), ενώ η απόσταση που χρησιμοποιείται είναι το μισό του ύψους της αεροδυναμικής σήραγγας ($H/2$), οπότε: $Re = U_c H / (2\nu)$. Ο Reynolds λαμβάνει μικρές τιμές ($4\ 200 - 10\ 400$).

Στο Σχήμα 2.6 φαίνονται οι μέσες γραμμές ροής για διαφορετικές τιμές του λόγου w/k . Για $w/k \leq 4$, η κύρια ζώνη αποκόλλησης καλύπτει όλη την απόσταση από το πρώτο εμπόδιο μέχρι το επόμενο, ενώ ταυτόχρονα σχηματίζονται και δύο δευτερεύουσες δίνες αντίθετης φοράς στις γωνίες (D) και (B). Για $w/k = 7$, η ροή επανακολλάται στο τοίχωμα της κοιλότητας, 4.8 ύψη εμποδίου ($4.8k$) κατάντι του πρώτου εμποδίου στο σημείο E, και ξαναποκολλάται στο σημείο G, καθώς οι γραμμές ροής πλησιάζουν το επόμενο εμπόδιο και αρχίζουν να κλίνουν προς τα πάνω. Όσο, μεγαλώνει ο λόγος w/k , μεγαλώνει και η απόσταση του σημείου E (σημείο που γίνεται η επανακόλληση) από το πρώτο εμπόδιο, άρα μεγαλώνει και η ζώνη ανακυκλοφορίας.

Υπολογίζοντας την κατανομή της πίεσης, γύρω από τα στοιχεία της τραχύτητας, ο Leonardi και συνεργάτες, προσδιόρισαν την αντίσταση τριβής (C_f) και αντίσταση μορφής (P_d) (μεγέθη τα οποία μαζί δίνουν τη διατμητική τάση) για διαφορετικούς λόγους w/k , και σε συνδυασμό με τις μέσες γραμμές ροής, κατέληξαν ότι, όταν $w/k > 7$, τα στοιχεία της τραχύτητας θεωρούνται απομονωμένα το ένα από το άλλο μιας και το μέγεθος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας δεν εξαρτάται πλέον από το λόγο w/k .

Η ελάχιστη αντίσταση τριβής και η μέγιστη αντίσταση μορφής εντοπίζονται όταν $w/k = 7$, καθώς λαμβάνει χώρα η επανακόλληση, ανάντι του επόμενου εμποδίου. Για $w/k \leq 2$, η συνολική αντίσταση οφείλεται κυρίως στην αντίσταση τριβής, ενώ για $5 < w/k < 19$, οφείλεται κυρίως στην αντίσταση μορφής.

Οι **S. Leonardi, P. Orlandi και R. A. Antonia (2007)^[10]**, στη μελέτη τους για τις ιδιότητες της k- και d-τύπου συμπεριφοράς, με τη μέθοδο των Άμεσων Αριθμητικών Προσομοιώσεων (DNS – Direct Numerical Simulations), προτείνουν ένα διαφορετικό τύπο για την κατηγοριοποίηση σε k- και d-τύπου τραχύτητα. Σύμφωνα με τον **S. Leonardi και συνεργάτες^[10]**, η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στα δύο



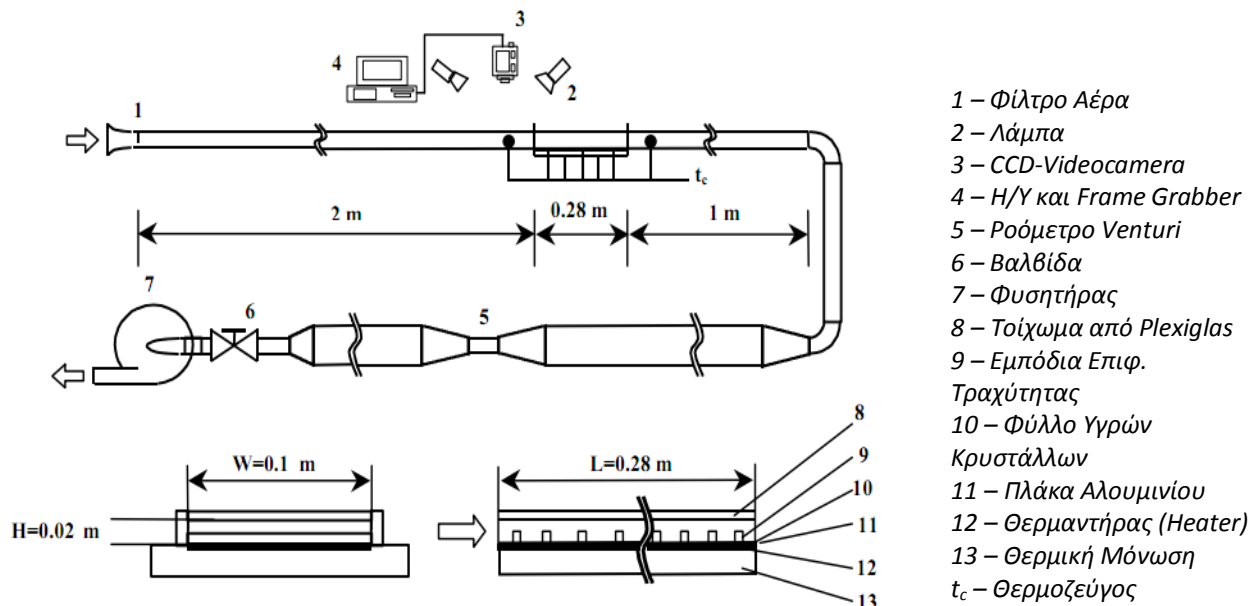
Σχήμα 2.6 Μέσες Γραμμές Ροής για διαφορετικές τιμές του λόγου w/k (pitch ratios). Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν δεξιόστροφη φορά και οι χοντρές αριστερόστροφη.^[9]

είδη τραχύτητας σχετίζεται με το μέγεθος της αντίστασης τριβής και της αντίστασης μορφής, όπου για d-τύπου τραχύτητα η αντίσταση τριβής είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση μορφής και για k-τύπου τραχύτητα το αντίθετο. Επιπρόσθετα σε αυτή την εργασία επιβεβαιώνεται ότι για k-τύπου τραχύτητα, η σχέση (2.3) ισχύει, ενώ για d-τύπου τραχύτητα, η Συνάρτηση της Τραχύτητας δεν εξαρτάται από το ανηγμένο ύψος εμποδίου k^+ .

Οι **P. Å. Krogstad και R. A. Antonia (1999)**^[7], εντοπίζουν την αδυναμία της σχέσης (2.3), συγκρίνοντας διαφορετικούς τύπους τραχύτητας (υφασμένο πλέγμα ανοξείδωτου χάλυβα, πλευρικές ράβδοι στην αεροδυναμική σήραγγα, κλπ) με την ίδια μετατόπιση του προφίλ της ταχύτητας (ίδιο ΔU). Παρόλο που η μετατόπιση του προφίλ της μέσης ταχύτητας είναι σχεδόν η ίδια για τα διάφορα είδη τραχύτητας, είναι φανερό ότι η γεωμετρία της επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο στα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής (τα οποία για κάθε τραχύτητα διαφοροποιούνται). Οπότε, σύμφωνα με τον **Krogstad και συνεργάτες**^[7], το να χαρακτηριστεί η τραχύτητα μόνο σύμφωνα με την επίδρασή της στο προφίλ της μέσης ταχύτητας είναι ανεπαρκές. Γι' αυτό το λόγο μόνο μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη γεωμετρία της τραχύτητας, μπορούν να αναπαράγουν αξιόπιστα τα χαρακτηριστικά της ροής.

2.2 Επίδραση της Επιφανειακής Τραχύτητας στη Μεταφορά Θερμότητας

Οι **D. Cavallero και G. Tanda^[11]**, μελέτησαν τη μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή, σε αεροδυναμικές σήραγγες με επιφανειακή τραχύτητα, με τη βοήθεια θερμοχρωματικών υγρών κρυστάλλων. Στο Σχήμα 2.7, φαίνεται η πειραματική εγκατάσταση. Οι υγροί κρύσταλλοι, είναι τοποθετημένοι κάτω από τα εμπόδια, τα οποία είναι εκτεθειμένα σε ρεύμα αέρα ψύξης. Κάτω από το φύλλο υγρών κρυστάλλων, τοποθετείται θερμαντήρας και πλάκα αλουμινίου, που θερμαίνει την διάταξη. Η μορφή των χρωμάτων των υγρών κρυστάλλων παρατηρείται μέσω της CCD-Videocamera, ψηφιοποιείται και μετατρέπεται σε χρήσιμη πληροφορία. Μέσω προηγούμενων πειραμάτων, η πληροφορία αυτή βαθμονομείται, και έτσι προκύπτει η κατανομή του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας.

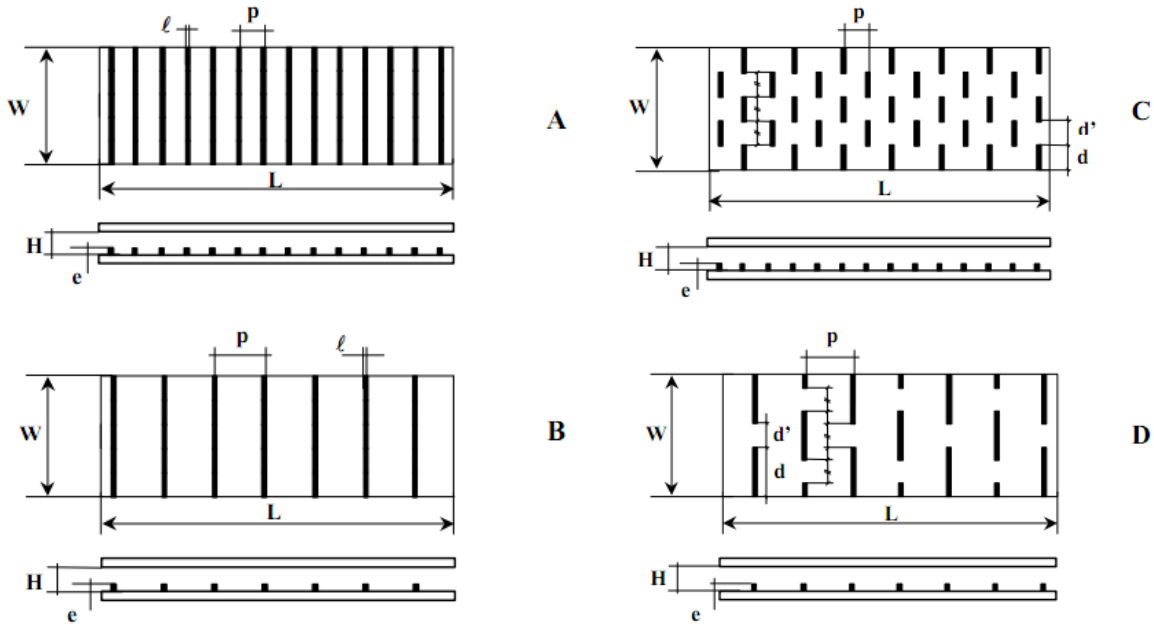


Σχήμα 2.7 Σχηματική Απεικόνιση Πειραματικής Εγκατάστασης^[11]

Ο αριθμός Reynolds, υπολογίζεται με βάση την υδραυλική διάμετρο ($2WH/(W+H)$) της αεροδυναμικής σήραγγας ορθογωνικής διατομής ($W \times H$), και οι τιμές του κυμαίνονται από 8000 – 35 000. Για τις ανάγκες του πειράματος, χρησιμοποιούνται τέσσερις διατάξεις (Σχήμα 2.8), των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Οι **D. Cavallero και G. Tanda^[11]**, παρατήρησαν ότι στα συνεχή εμπόδια (continuous ribs – Διατάξεις A και B) με το χαμηλότερο λόγο p/e ($p/e = 4$ - απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών εμποδίων προς το ύψος του εμποδίου), ο τοπικός συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας (h), έδειξε προοδευτική αύξηση στην κοιλότητα ανάμεσα στα εμπόδια, όσο η ροή προχωρούσε κατάντι. Σε μεγαλύτερους λόγους p/e ($p/e =$

8), ο τοπικός συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας έφτασε σε μια μέγιστη τιμή - πιθανότατα στο σημείο επανακόλλησης της ροής - ακολουθούμενη από μία μικρή μείωση, και μετά μια επιπλέον αύξηση κοντά στο επόμενο εμπόδιο.

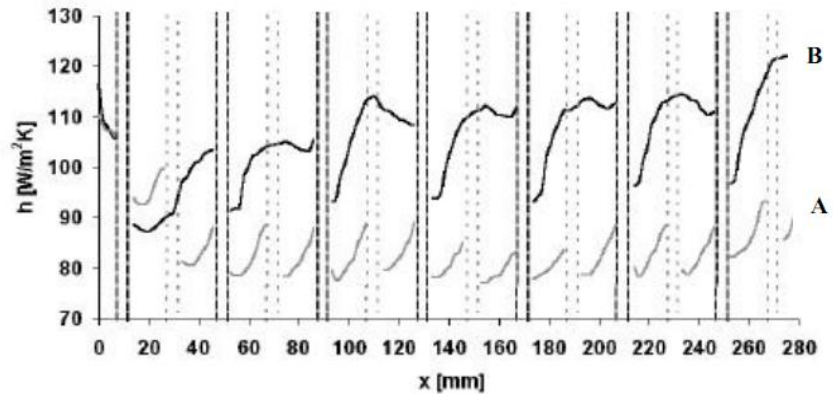


Σχήμα 2.8 Σχηματική Απεικόνιση των Διατάξεων της Επιφανειακής Τραχύτητας^[11]

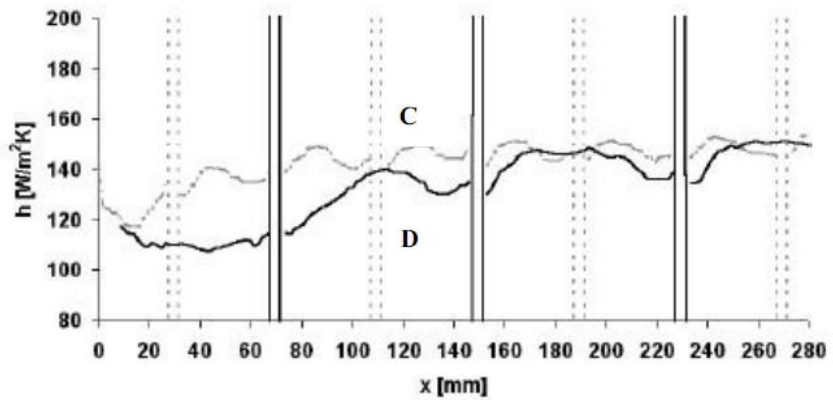
Διάταξη Τραχύτητας	L (mm)	W (mm)	H (mm)	ℓ (mm)	p (mm)	e (mm)	d (mm)	d' (mm)	p/e	p/ℓ
A	280	100	20	3	20	5	-	-	4	6.66
B	280	100	20	3	40	5	-	-	8	13.33
C	280	100	20	3	20	5	20	20	4	6.66
D	280	100	20	3	40	5	40	20	8	13.33

Πίνακας 2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των Διατάξεων της Επιφανειακής Τραχύτητας^[11]

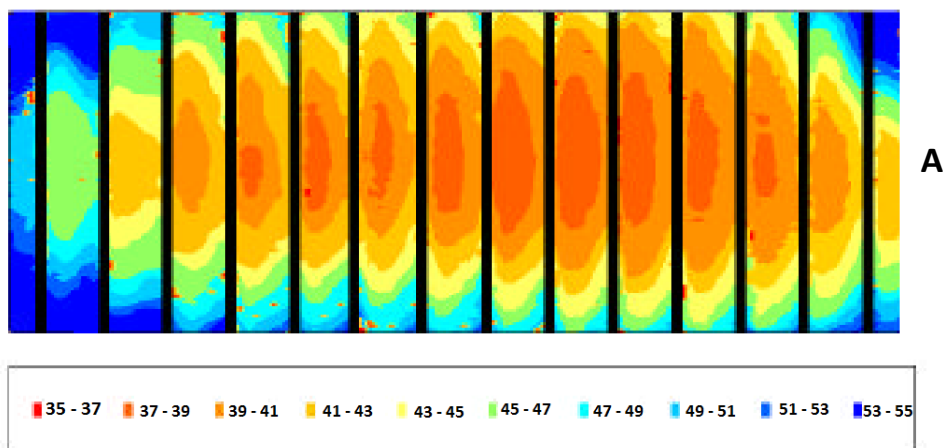
Μεγάλη ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί από τα σπασμένα εμπόδια (broken ribs – Διατάξεις C και D), ειδικά στην περίπτωση μικρότερου λόγου p/e. Οι μέσοι συντελεστές θερμικής συναγωγιμότητας, βρέθηκαν να είναι διπλάσιοι για συνεχή εμπόδια (Διατάξεις A και B), από τους αντίστοιχους για λείο τοίχωμα και τριπλάσιοι για σπασμένα εμπόδια (Διατάξεις C και D), από τους αντίστοιχους για λείο τοίχωμα.



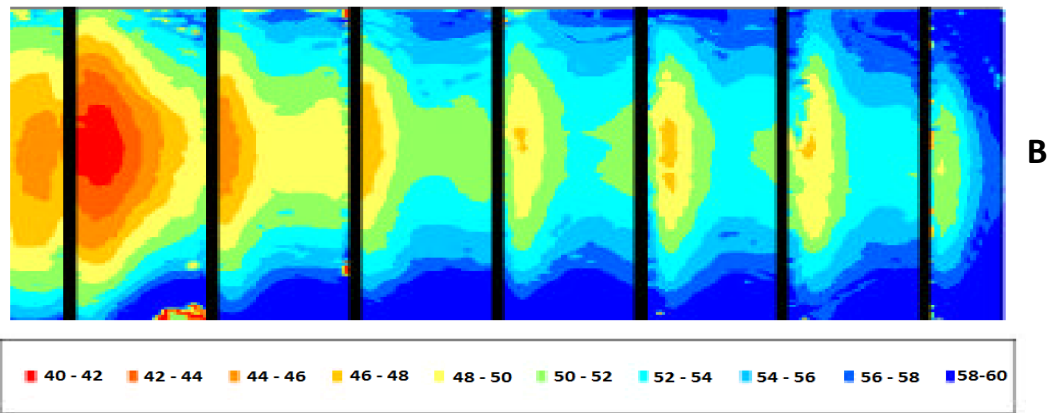
Σχήμα 2.9 Κατανομή του τοπικού Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας στο μέσο ($W/2$ από το άκρο κάθε διάταξης) των Διατάξεων A και B για $Re = 28\ 500$ ^[11]



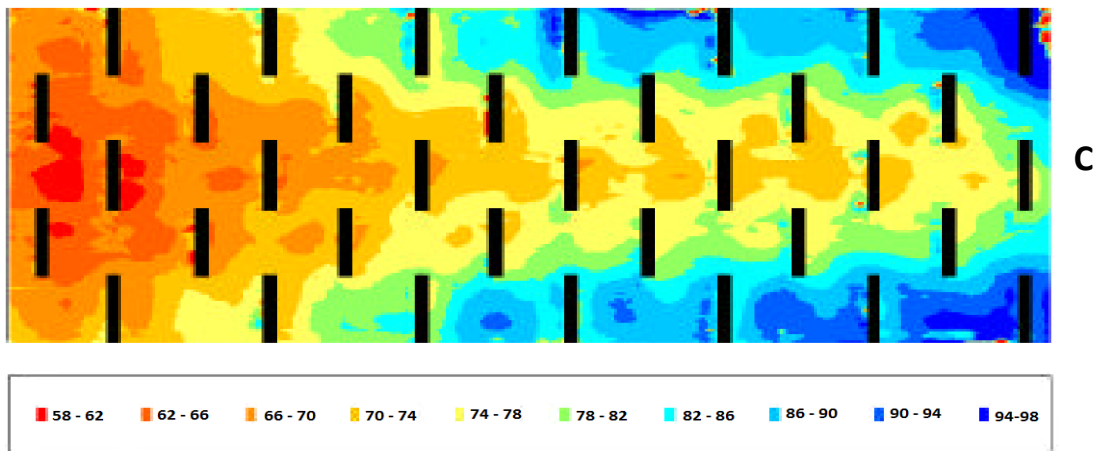
Σχήμα 2.9 Κατανομή του τοπικού Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας στο μέσο των ($W/2$ από το άκρο κάθε διάταξης) Διατάξεων C και D για $Re = 28\ 500$ ^[11]



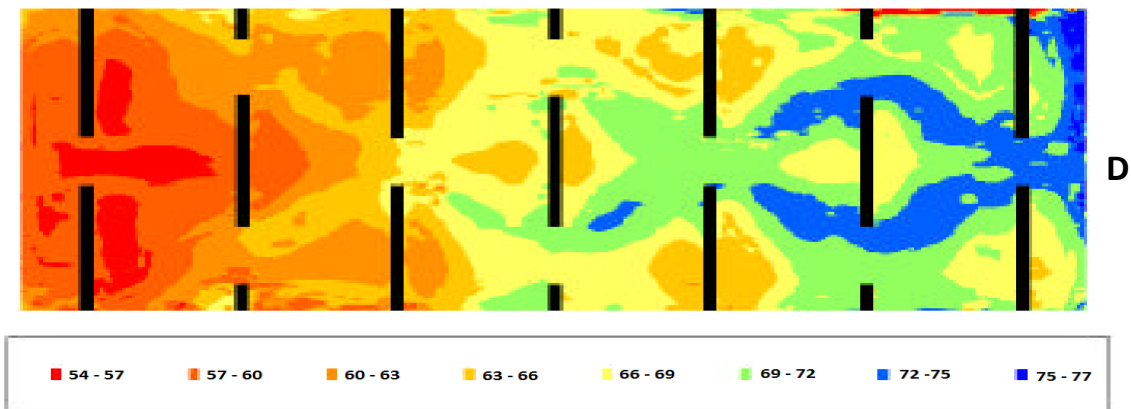
Σχήμα 2.10 Χάρτης της κατανομής του τοπικού Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας της Διάταξης A για $Re = 8\ 800$ ^[11]



Σχήμα 2.11 Χάρτης της κατανομής του τοπικού Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας της Διάταξης A για $Re = 8\ 800^{[1]}$

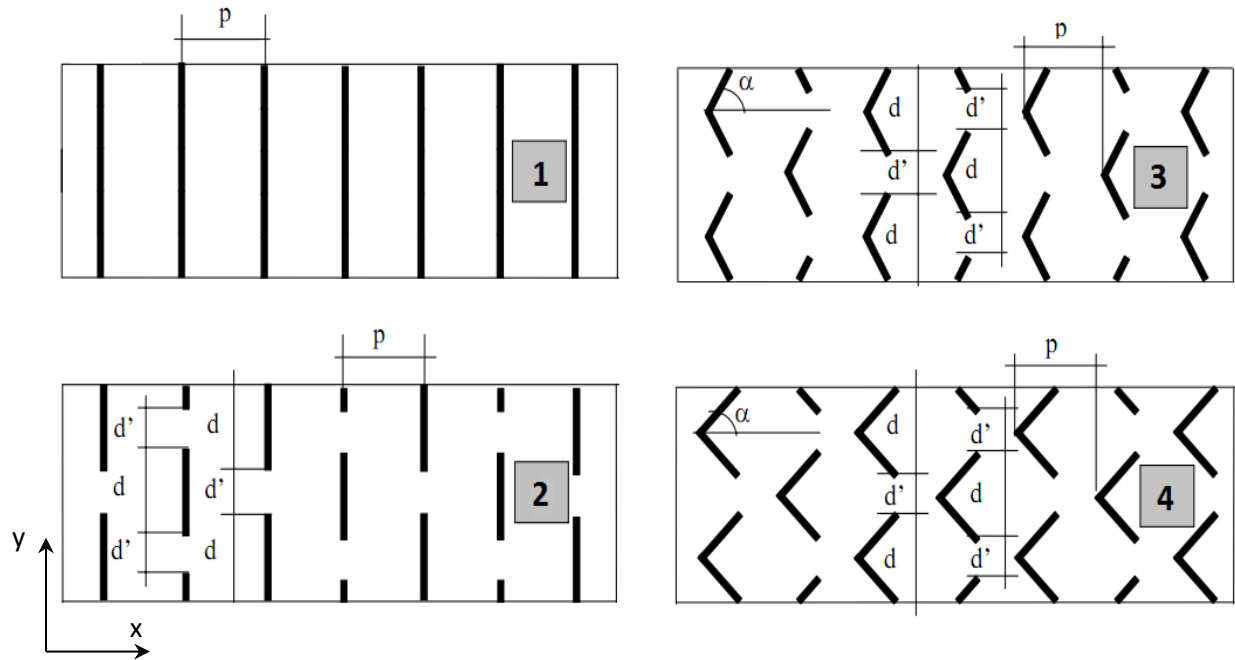


Σχήμα 2.12 Χάρτης της κατανομής του τοπικού Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας της Διάταξης C για $Re = 8\ 800^{[1]}$



Σχήμα 2.12 Χάρτης της κατανομής του τοπικού Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας της Διάταξης D για $Re = 8\ 800^{[1]}$

Οι **G. Tanda και D. Cavallero**^[12], σε παρόμοιο πείραμα (και πάλι μέσω της Θερμογραφίας Υγρών Κρυστάλλων) εξέτασαν τη μεταφορά θερμότητας σε αεροδυναμική σήραγγα ορθογωνικής διατομής, με λόγο πλάτους προς ύψος ίσο με πέντε και σε πλήρως ανεπτυγμένες συνθήκες τύρβης. Με σταθερή ροή θερμότητας, γίνονται μετρήσεις του συντελεστή συναγωγής για οκτώ διαφορετικές διατάξεις επιφανειακής τραχύτητας (Σχήμα 2.13 / Πίνακας 2.2). Τελικά, για να γίνει σύγκριση της συνολικής απόδοσης κάθε διάταξης, και αξιολόγηση του βαθμού ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με τη λεία επιφάνεια, υπολογίζονται οι μέσες τιμές για κάθε κοιλότητα.



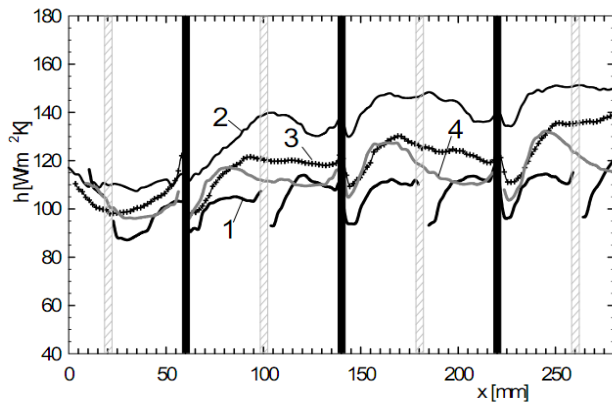
Σχήμα 2.13 Σχηματική Απεικόνιση των Διατάξεων της Επιφανειακής Τραχύτητας^[12]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, σε αυτό το πείραμα εκτός από συνεχή και σπασμένα εμπόδια, η μελέτη γίνεται και σε εμπόδια V-σχήματος, σε δύο διαφορετικές κλίσεις. Ο αριθμός Reynolds, ο οποίος υπολογίστηκε με βάση την υδραυλική διάμετρο της αεροδυναμικής σήραγγας, κυμαίνεται από 8 900 έως 36 000.

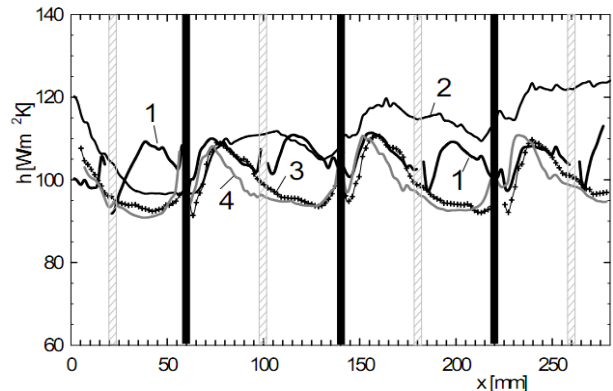
Στα Σχήματα 2.14 και 2.15, φαίνεται ότι για $x/D_{ch} > 3$, ο συντελεστής συναγωγής δείχνει περιοδικότητα. Η μέγιστη τιμή του εντοπίζεται 4 ύψη εμποδίου κατάντι του πρώτου εμποδίου κάθε κοιλότητας, πιθανώς στο σημείο επανακόλλησης της ροής. Κατάντι του σημείου επανακόλλησης, ο συντελεστής συναγωγής μειώνεται, ενώ στη συνέχεια, η αποκόλληση της ροής στη γωνία του δεύτερου εμποδίου κάθε κοιλότητας, προκαλεί μια επιπλέον αύξηση στο συντελεστή συναγωγής. Για λόγο $p/e = 13.3$ (Σχήμα 2.15), η μείωση στο συντελεστή συναγωγής που παρατηρείται μετά τη μέγιστη τιμή του (στο σημείο επανακόλλησης) οφείλεται στην αύξηση του θερμικού οριακού στρώματος κατάντι του σημείου αυτού. Στα Σχήματα 2.14 και 2.15, φαίνεται ότι τα σπασμένα εμπόδια (Διάταξη 2), προκαλούν μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης αφού σε αυτά παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές στην κατανομή του συντελεστή συναγωγής.

Διάταξη Τραχύτητας	e (mm)	l (mm)	α (deg)	d (mm)	d' (mm)	e/D_{ch}	ρ/e	e/H
1-I	5	3	90	-	-	0.15	8	0.25
1-II	3	3	90	-	-	0.09	13.3	0.15
2-I	5	3	90	40	20	0.15	8	0.25
2-II	3	3	90	40	20	0.09	13.3	0.15
3-I	5	3	60	40	20	0.15	8	0.25
3-II	3	3	60	40	20	0.09	13.3	0.15
4-I	5	3	45	40	20	0.15	8	0.25
4-II	3	3	45	40	20	0.09	13.3	0.15

Πίνακας 2.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των Διατάξεων της Επιφανειακής Τραχύτητας^[12]



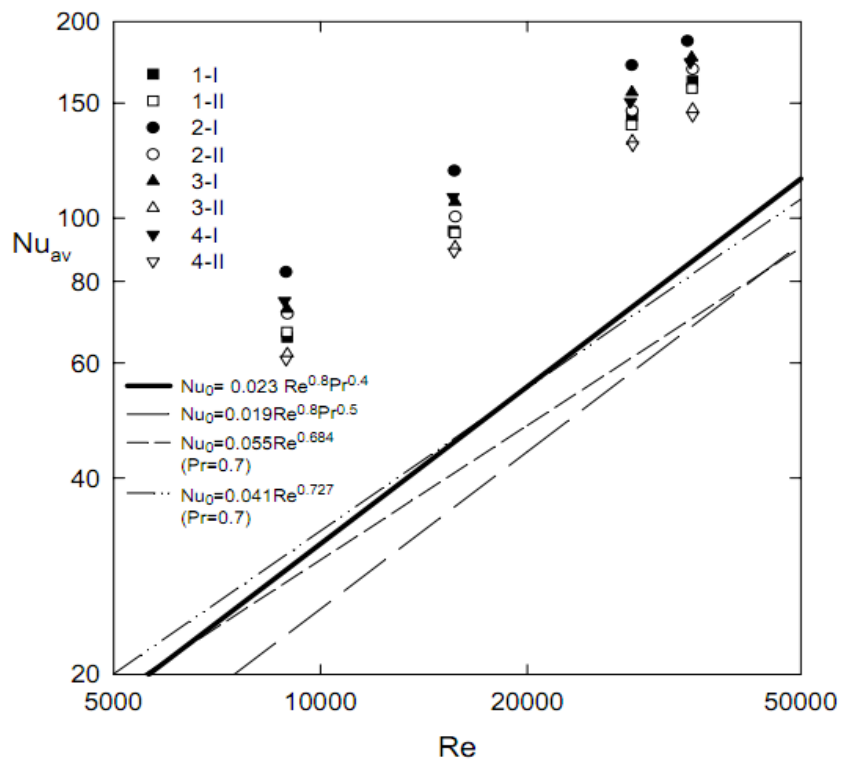
Σχήμα 2.14 Κατανομή του Συντελεστή Συναγωγής στη Γραμμή Συμμετρίας των διατάξεων 1-I, 2-I, 3-I, 4-I για $Re = 28\,500$ ^[12]



Σχήμα 2.15 Κατανομή του Συντελεστή Συναγωγής στη Γραμμή Συμμετρίας των διατάξεων 1-II, 2-II, 3-II, 4-II για $Re = 28\,500$ ^[12]

Στο Σχήμα 2.16, δίνεται ο μέσος αριθμός Nusselt σε κάθε διάταξη, ενώ παραθέτονται και κάποιες σχέσεις που ισχύουν για ασύμμετρα θερμαινόμενη τετραγωνική σήραγγα και λείους σωλήνες. Οι τιμές του αριθμού Nusselt, δείχνουν ότι υπάρχει σχέση με τον αριθμό Reynolds (όταν αυτός έχει εκθέτη ίσο με 0.61 – 0.67). Σημειώνεται ότι το χαρακτηριστικό μήκος που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο αριθμός Nusselt, είναι η υδραυλική διάμετρος.

Τελικά οι **G. Tanda και D. Cavallero**^[12], κατέληξαν ότι τα χαρακτηριστικά της κατανομής του συντελεστή συναγωγής h , εξαρτώνται πολύ από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης της τραχύτητας.

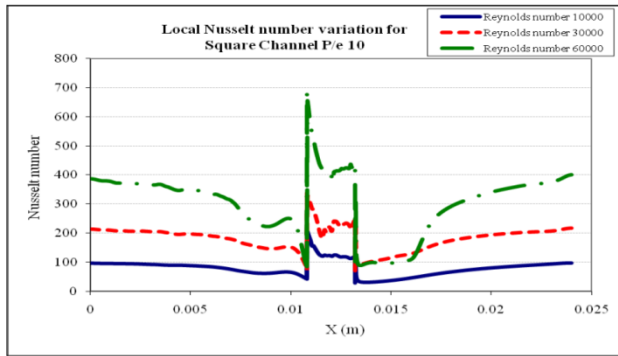


Σχήμα 2.16 Μέσος Αριθμός Nusselt για κάθε Διάταξη Επιφανειακής Τραχύτητας^[12]

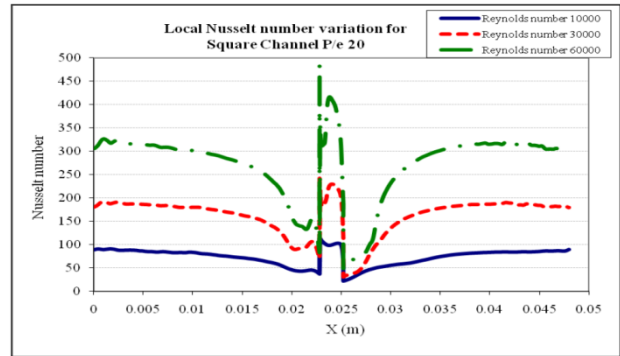
Σε επιφάνεια με τραχύτητα η μεταφορά θερμότητας ενισχύεται 1.5 – 3.5 φορές σε σχέση με τη λεία επιφάνεια. Οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή συναγωγής σε οποιοδήποτε λόγο p/e , παρατηρούνται για σπασμένα εμπόδια (Διάταξη 2).

Ο **Aravind Rohan Sampath (2009)**^[13], μελέτησε την επίδραση των εμποδίων της τραχύτητας στη θερμική απόδοση μιας αεροδυναμικής σήραγγας, σε τρεις διαφορετικές αεροδυναμικές σήραγγες (διαφορετικός λόγος πλάτους προς ύψος W/H – aspect ratio), τρεις διαφορετικούς Reynolds ($Re = 10\ 000$, $30\ 000$ και $60\ 000$) και δύο διαφορετικούς λόγους απόστασης δύο διαδοχικών εμποδίων προς ύψος εμποδίου ($p/e = 10$ και 20). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για την ίδια αεροδυναμική σήραγγα και τον ίδιο λόγο p/e , μεγαλύτερος αριθμός Reynolds (δηλαδή μεγαλύτερη ταχύτητα στη ροή), δίνει μεγαλύτερο αριθμό Nusselt.

Στα Σχήματα 2.17 και 2.18, φαίνεται η κατανομή του τοπικού αριθμού Nusselt στην ίδια σήραγγα για τους δύο διαφορετικούς λόγους p/e . Η περιοχή όπου παρατηρείται μια αύξηση στο Nusselt, αποτελεί την περιοχή όπου βρίσκεται το εμπόδιο. Στα Σχήματα φαίνεται ότι όσο ο Reynolds μεγαλώνει, η κατανομή του αριθμού Nusselt, διατηρώντας τη μορφή της, μετατοπίζεται προς τα πάνω (ο Nusselt παίρνει μεγαλύτερες τιμές). Ο τοπικός Αριθμός Nusselt, μεγαλώνει όταν μειώνεται η αποκόλληση της ροής, στο σημείο όπου η ροή επανακολλάται, ενώ μεγαλώνει και πάλι καθώς η ροή φτάνει στο επόμενο εμπόδιο.



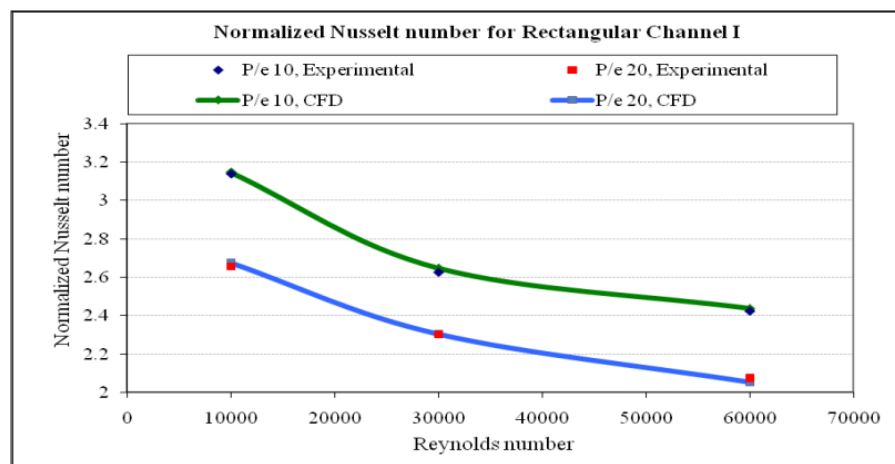
Σχήμα 2.17 Τοπικός Αριθμός Nusselt για Σήραγγα Τετραγωνικής Διατομής ($W/H = 1$), και λόγο $\rho/e = 10$ σε διαφορετικούς Αριθμούς Reynolds^[13]



Σχήμα 2.18 Τοπικός Αριθμός Nusselt για Σήραγγα Τετραγωνικής Διατομής ($W/H = 1$), και λόγο $\rho/e = 20$ σε διαφορετικούς Αριθμούς Reynolds^[13]

Το εμπόδιο ενισχύει την τυρβώδη ροή, προκαλώντας αύξηση της μεταφοράς της θερμότητας. Στα Σχήματα φαίνεται επίσης ότι ο Αριθμός Nusselt, λαμβάνει μικρότερες τιμές για λόγο $\rho/e = 20$ απ' ότι για $\rho/e = 10$, αφού φαίνεται ότι για $\rho/e = 20$, η ροή επανακολλάται πιο γρήγορα.

Στο Σχήμα 2.19, μπορεί μέσω της κατανομής του κανονικοποιημένου αριθμού Nusselt συναρτήσει του Reynolds για λόγους $\rho/e = 10$ και $\rho/e = 20$ να γίνει μια σημαντική παρατήρηση. Ο αριθμός Nusselt, κανονικοποιείται ως προς τον αριθμό Nusselt για εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας σε πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή σε λείο αγωγό κυκλικής διατομής, που προκύπτει με υπολογισμό από τη σχέση των Dittus και Boelter (Κεφάλαιο 1^ο).



Σχήμα 2.19 Κατανομή Κανονικοποιημένου Αριθμού Nusselt συναρτήσει του Αριθμού Reynolds για Αεροδυναμική Σήραγγα Τετραγωνικής Διατομής ($W/H = 1$), και λόγους $\rho/e = 10$ και $\rho/e = 20$ ^[13]

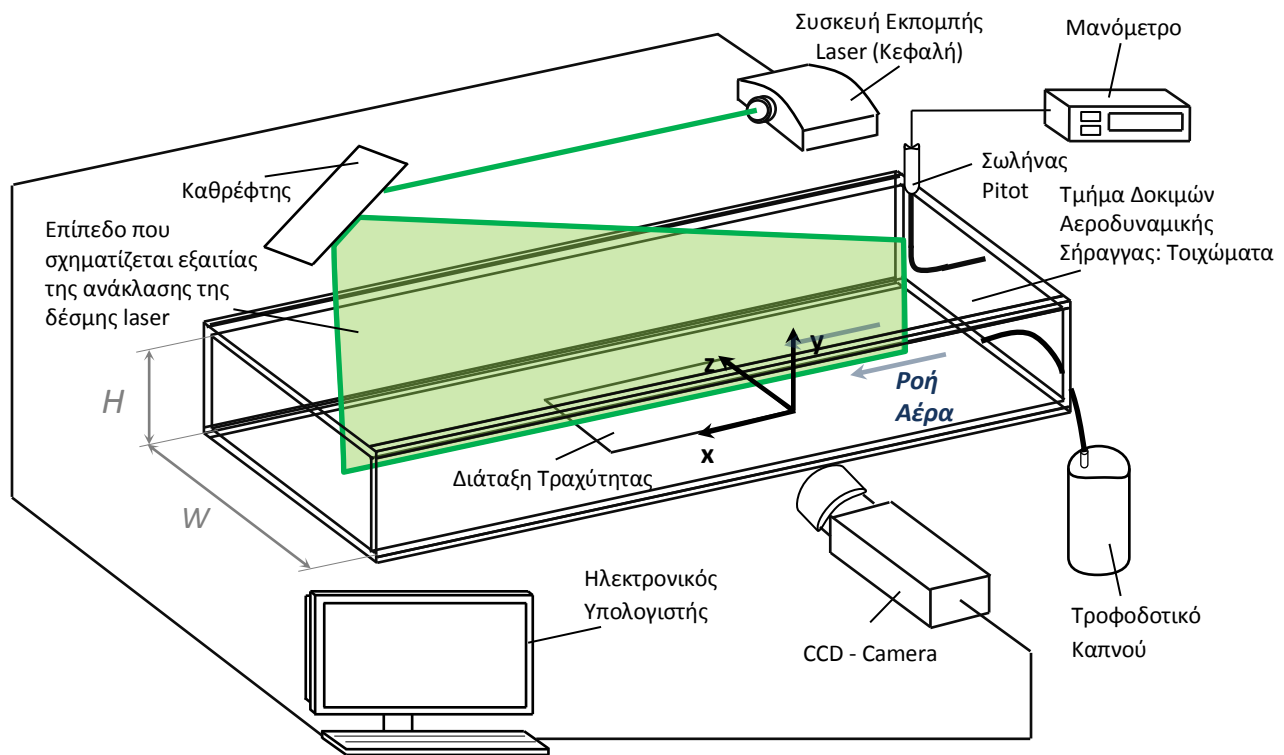
Υπενθυμίζεται ότι η σχέση δίνεται από τον τύπο $Nu_D = 0.023Re_DPr^n$ και ισχύει για $Re_D > 10^4$, $0.7 < Pr < 100$ και $L/D = 60$ (όπου D : η διάμετρος κυκλικού αγωγού), όπου $n = 0.4$ στην περίπτωση που το ρευστό

θερμαίνεται. Ουσιαστικά, ο αριθμός Nusselt που υπολογίζεται για κάθε διάταξη, διαιρείται με τον αντίστοιχο για το λείο τοίχωμα. Από το Σχήμα 2.19, φαίνεται ότι οι τιμές του κανονικοποιημένου αριθμού Nusselt, μειώνονται με την απόσταση. Το ίδιο (μείωση του κανονικοποιημένου αριθμού Nusselt) παρατηρείται και με την αύξηση του λόγου p/e . Αυτό, ουσιαστικά, είναι ένδειξη ότι με την αύξηση της απόστασης των εμποδίων και την αύξηση του Reynolds η θερμική απόδοση του συστήματος πέφτει (αφού αυτό φαίνεται όταν τα αποτελέσματα συγκριθούν με την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν στοιχεία τραχύτητας).

Κεφάλαιο 3^ο

Πειραματική Διάταξη

Στο πείραμα καταγράφηκε το πεδίο ταχυτήτων ροής γύρω από τα στοιχεία επιφανειακής τραχύτητας, με τη μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry) και έγινε σε υποηχητική αεροδυναμική σήραγγα ανοικτού κυκλώματος (ατμοσφαιρικός αέρας ως εργαζόμενο μέσο) και ορθογωνικής διατομής (400 × 225). Στο σημείο καταγραφής του πειράματος, έχουμε τοιχώματα από πlexiglas, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη οπτική πρόσβαση. Η πειραματική διάταξη έχει την πιο κάτω μορφή:



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα της Πειραματικής Διάταξης

3.1 Σύντομη Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

Η εξεταζόμενη διάταξη της τραχύτητας (Σχήμα 3.2) τοποθετείται στο κέντρο του πλάτους (W) της αεροδυναμικής σήραγγας. Τίθεται σε λειτουργία ο φυσητήρας της σήραγγας, δημιουργώντας ρεύμα αέρα ψύξης.

Αρχικά καταγράφονται οι συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν. Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος γίνεται με χρήση Θερμομέτρου, ενώ η ταχύτητα του αέρα με τη βοήθεια του Σωλήνα Pitot (μέσω του προσδιορισμού της δυναμικής πίεσης).

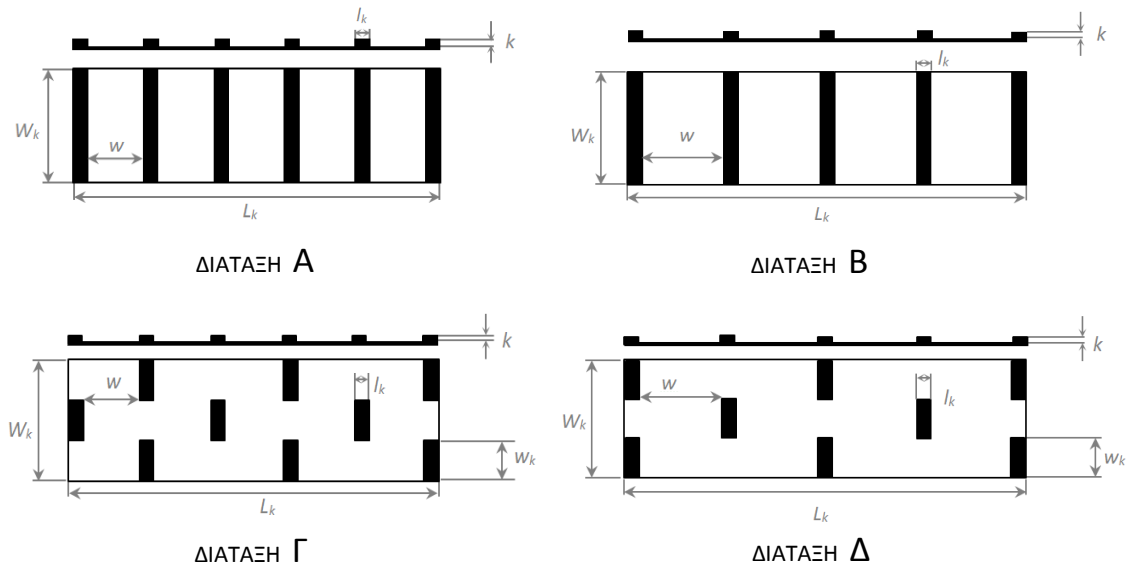
Στη συνέχεια, με την ενεργοποίηση του Τροφοδοτικού Καπνού (Oil-based aerosol), διαχέονται σταγονίδια λαδιού με διάμετρο γύρω στο 1 μm μέσα στη ροή, τα οποία χρησιμεύουν ως «ιχνηλάτες» της ροής. Το Τροφοδοτικό Καπνού συνδέεται με την αεροδυναμική σήραγγα μέσω ενός σωλήνα που περνά από τη λεπτή σχισμή στην είσοδο του τμήματος δοκιμών, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η ροή.

Με τη βοήθεια καθρέφτη, η δέσμη laser σχηματίζει το επίπεδο στο χώρο (Σχήμα 3.1), στο οποίο εξετάζεται το πεδίο ροής. Ακολούθως γίνεται η τοποθέτηση της CCD – Camera μπροστά από το στοιχείο της τραχύτητας που εξετάζουμε, με ανάλογη προσαρμογή στην εστίαση (focus) και το ύψος.

Το laser παρέχει παλμικό φωτισμό και ταυτόχρονα η CCD – Camera καταγράφει 200 ζεύγη εικόνων με χρονική διαφορά περίπου 200 ms (Συχνότητα: 4.83 Hz) μεταξύ τους (το ένα ζεύγος από το επόμενο). Η πρώτη εικόνα κάθε ζεύγους που καταγράφεται, έχει χρονική διαφορά 120 μs από τη δεύτερη. Κάθε καταγραφόμενη εικόνα έχει μέγεθος 1 376 × 1 040 pixels.

Με το laser να φωτίζει το επίπεδο που εξετάζεται, το φως σκεδάζεται από τα σταγονίδια του spray λαδιού (καπνού), και η CCD – Camera καταγράφει τη θέση του σωματιδίου σε μια χρονική στιγμή t και σε μια χρονική στιγμή (t + Δt), όπου φυσικά Δt = 120 μs. Μέσω της καταγραφής των δύο θέσεων, και με γνωστή τη χρονική διαφορά τους, μπορεί να προκύψει ένα διάνυσμα της ταχύτητας. Σε κάθε σημείο καταγράφονται 200 ζεύγη θέσης. Κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να βρεθεί ένα μέσο πεδίο ταχυτήτων.

*Πιο λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου PIV, γίνεται στο Παράρτημα, όπου αναλύεται πλήρως η πειραματική διαδικασία.



Σχήμα 3.2 Σχηματική Απεικόνιση Διατάξεων Επιφανειακής Τραχύτητας

	Μήκος Διάταξης L_k (mm)	Πλάτος Διάταξης W_k (mm)	Πλάτος Εμποδίου l_k (mm)	Μήκος Εμποδίου w_k (mm)	Ύψος Εμποδίου k (mm)	Μήκος κοιλότητας w (mm)	Pitch Ratio w/k
Διάταξη Α	148	80	8	80	5	20	4
Διάταξη Β	160	80	8	80	5	30	6
Διάταξη Γ	148	80	8	30	5	20	4
Διάταξη Δ	160	80	8	30	5	30	6

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη της Διάταξης της Επιφανειακής Τραχύτητας

Σημειώνεται ότι τα στοιχεία της επιφανειακής τραχύτητας είναι κατασκευασμένα από ξύλο. Τα εμπόδια κολλήθηκαν σε γυαλιστερό μαύρο χαρτόνι ώστε η επιφάνεια κάτω από αυτά να μπορεί να θεωρηθεί λεία, και ταυτόχρονα λόγω του χρώματός της να μην ανακλά σε μεγάλο βαθμό του φως του laser επηρεάζοντας τα αποτελέσματα.

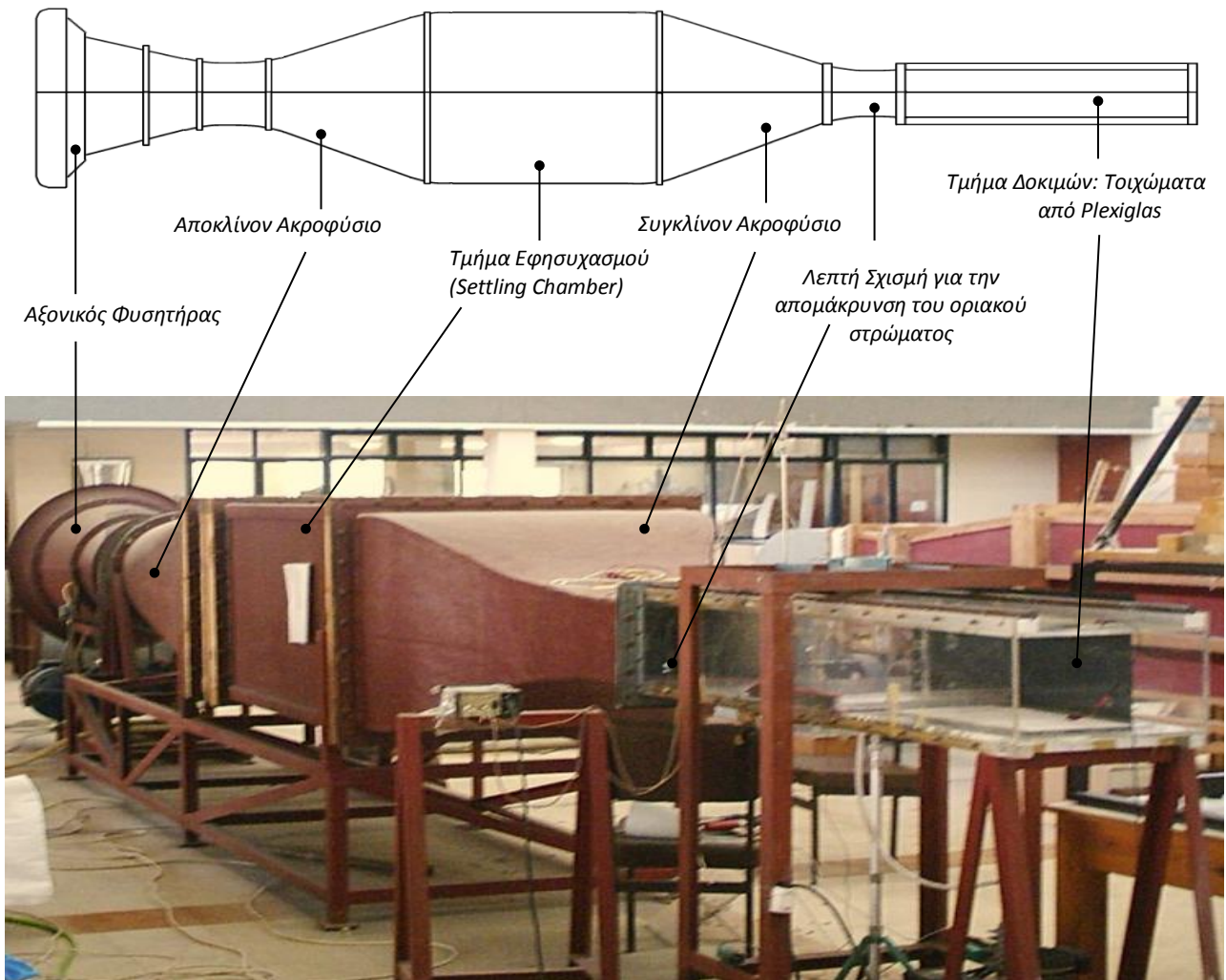
3.2 Περιγραφή Κύριων Συνιστωσών της Πειραματικής Διάταξης

3.2.1 Αεροδυναμική σήραγγα

Η σήραγγα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι αεροδυναμική σήραγγα ανοικτού κυκλώματος (ο αέρας αναρροφάται από το περιβάλλον και απελευθερώνεται στο περιβάλλον),

χαμηλής ταχύτητας (υποηχητική) και συνεχούς λειτουργίας. Η ρύθμιση της ταχύτητας της ροής γίνεται μέσω της ρύθμισης των στροφών του αξονικού φυσητήρα με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή με χειροστρόφαλο. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης σήραγγας που χρησιμοποιείται στο πείραμα δίνονται στον Πίνακα 3.2.

Η αεροδυναμική σήραγγα αποτελείται από τον αξονικό φυσητήρα, το αποκλίνον ακροφύσιο, το τμήμα εφηρευασμού, το συγκλίνον ακροφύσιο και το τμήμα δοκιμών (Σχήμα 3.3). Η μορφή αυτή της σήραγγας, βοηθά στην επίτευξη ομαλής, ομοιόμορφης ροής, αλλά και στην καταστολή της εμφάνισης δινών. Για τον ίδιο σκοπό, στο συγκλίνον και αποκλίνον τμήμα, είναι τοποθετημένα πλέγματα. Τέλος, για την απομάκρυνση του ήδη υπάρχοντος οριακού στρώματος που δημιουργείται στη ροή, ώστε να δημιουργηθεί καινούριο όταν η ροή φτάσει στο τμήμα δοκιμών, η σήραγγα φέρει μια λεπτή σχισμή ανάμεσα στο συγκλίνον τμήμα και το τμήμα δοκιμών^[14].



Σχήμα 3.3 Σχηματική Απεικόνιση Αεροδυναμικής Σήραγγας και των επιμέρους τμημάτων της (πάνω) και η Διάταξη της Αεροδυναμικής Σήραγγας του ΕΜΠ^[14] (κάτω)

Στο τμήμα δοκιμών του πειράματος, τα τοιχώματα της σήραγγας φέρουν τοιχώματα από (διάφανο) Plexiglas για να γίνει εφικτή η καταγραφή. Αυτό το τμήμα είναι ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 400 mm × 225 mm και έχει μήκος 1500 mm. Οι διατάξεις τοποθετούνται σε απόσταση περίπου 840 – 850 mm από την είσοδο του τμήματος.

Χαρακτηριστικά Αεροδυναμικής Σήραγγας	
Κατασκευάστρια Εταιρεία	Neovent
Τύπος	VM 60.10.2 8°
Ονομαστική ισχύς κινητήρα	7.5 HP
Στροφές	έως 2 910 rpm
Ωφέλιμη Ολική Πίεση	70 kPa/m ²
Ταχύτητα Ρεύματος Αέρα	2 – 20 m/s

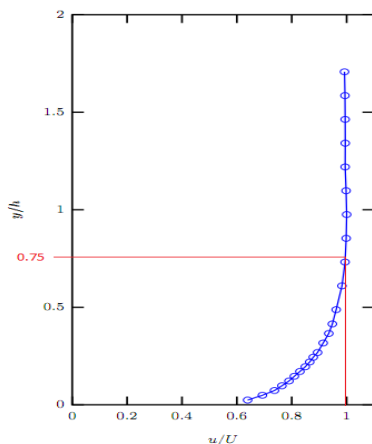
Πίνακας 3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Αεροδυναμικής Σήραγγας του Τομέα Ρευστών του ΕΜΠ που χρησιμοποιείται στο πείραμα^[14]

Οι **Π. Καπίρης και Δ. Μαθιουλάκης**^[15] μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της ροής στο συγκεκριμένο τμήμα της αεροδυναμικής σήραγγας. Σε μετρήσεις που έγιναν σε απόσταση 1004 mm από την είσοδο του τμήματος και για ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος $U_e = 2.56 \text{ m/s}$, τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος βρέθηκαν να είναι:

Πάχος Οριακού Στρώματος: $\delta = 30.75 \text{ mm}$

Πάχος Μετατόπισης: $\delta_1 = 3.649 \text{ mm}$

Πάχος Ορμής: $\delta_2 = 2.583 \text{ mm}$



Σχήμα 3.4 Προφίλ Ταχύτητας στη Σήραγγα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Από τα πιο πάνω προκύπτει ο παράγοντας σχηματισμού οριακού στρώματος, που ορίζεται ως ο λόγος του πάχους μετατόπισης προς το πάχος ορμής, και είναι ίσος με 1.41. Αυτό είναι χαρακτηριστικό του τυρβώδους οριακού στρώματος, οπότε στην αεροδυναμική σήραγγα η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης.

Στο Σχήμα 3.3, φαίνεται το Προφίλ της Ταχύτητας κατά την κατεύθυνση της ροής ($h = 41 \text{ mm}$), όπου το y , η κάθετη κατεύθυνση, u η ταχύτητα κατά την κατεύθυνση της ροής και U , η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος. Από το σχήμα φαίνεται ότι όταν $u/U = 1$, $y/h = 0.75$. Οπότε σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1 (Σχήμα 1.2), το πάχος οριακού στρώματος, αντιστοιχεί σε απόσταση $\delta = 0.75h = 30.75 \text{ mm}$.

3.2.2 Συσκευή Εκπομπής Laser



Σχήμα 3.5 Σύστημα PIV Solo Laser II-30
διπλής κεφαλής: Τροφοδοτικό (αριστερά),
Κεφαλή (δεξιά)^[17]

Η Συσκευή Εκπομπής Laser που χρησιμοποιήθηκε, είναι το σύστημα PIV Laser II-30 (Σχήμα 3.5) της σειράς Solo, που κατασκευάζεται από την εταιρεία New Wave Research^[16]. Η Συσκευή είναι τύπου Nd:YAG διπλής κεφαλής και παρέχει μια υψηλά σταθερή δέσμη πράσινου φωτός για εφαρμογές PIV (Particle Image Velocimetry). Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά, οι λειτουργικές απαιτήσεις καθώς και οι ονομαστικές διαστάσεις της, όπως αυτά δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία^[17].

Χαρακτηριστικά Συσκευής Solo II-30 PIV Nd:YAG Laser System	
Ενέργεια	30 mJ
Ενεργειακή Σταθερότητα	± 4 %
Διάμετρος Δέσμης Laser	3 mm
Πλάτος Έντασης	3 – 5 ns
Απόκλιση	< 4 mrad
Σταθερότητα Εστίασης Ακτίνας	> 3 urad
Περιοδική Απόκλιση	± 1 ns
Λειτουργικές Απαιτήσεις	
Θερμοκρασία	10 – 30 °C
Σχετική Υγρασία	20 – 80 %
Τάση	95 – 240 V
Ισχύς	900 W
Ονομαστικές Διαστάσεις Τροφοδοτικού / Κεφαλής	
Μήκος	461 mm / 350 mm
Πλάτος	194 mm / 178 mm
Υψος	363 mm / 81 mm
Βάρος	22 kg / 4.5 kg

Πίνακας 3.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά, Λειτουργικές Απαιτήσεις και Ονομαστικές Διαστάσεις της Συσκευής Εκπομπής Laser που χρησιμοποιείται στο πείραμα^[17]

3.2.3 Σύστημα Καταγραφής / CCD – Camera

Το καταγραφικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα, είναι η κάμερα POWER VIEW™ 1.4MP, μοντέλο 630066, της εταιρείας TSI^[16]. Η συγκεκριμένη κάμερα (Σχήμα 3.6) παρέχει τη δυνατότητα μεταβλητού χρόνου έκθεσης, μικρούς χρόνους εναλλαγής καρέ (frame straddling times) και είναι σχεδιασμένη για εφαρμογές PIV, microPIV και PLIF. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της, όπως αυτά δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία, δίνονται στον Πίνακα 3.4^[18].

Για την επεξεργασία των καταγραφόμενων πληροφοριών, χρησιμοποιείται το λογισμικό πακέτο της TSI, Insight 3G, ενώ ένας συγχρονιστής παρέχει καθυστέρηση παλμών, ώστε να υπάρχει μια χρονική ακολουθία στην καταγραφή των ζευγών – εικόνων του πεδίου ροής σε καλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων.

Η λογισμική πλατφόρμα Insight 3G, δίνει τη δυνατότητα έκθεσης της έντασης κάθε pixel, μέσω ενός προγράμματος ψευδοχρωματικής έκθεσης, ώστε τα pixels με μικρή ένταση να μπορούν να εντοπιστούν.



Σχήμα 3.6 CCD-Camera: POWER VIEW™ 1.4MP, Model 630066, TSI®

Χαρακτηριστικά Κάμερας POWER VIEW™ 1.4MP, No. 630066, TSI®	
Αριθμός Pixels	1 376 (H) × 1 040 (V)
Μέγεθος Pixel	6.45 μm × 6.45 μm
Θερμοκρασία CCD	-12 °C (η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή με ένα σύστημα ψύξης δύο σταδίων: ψύκτης Peltier για περιβάλλον χαμηλού θορύβου & σύστημα ψύξης πεπιεσμένου αέρα)
Δυναμικό Εύρος	12-bit
Ρυθμός Καρέ (Frame Rate)	10 fps (frames per second)
Φασματικό Εύρος	270 – 1 100 nm
Κβαντική Απόδοση	62 % στα 500 nm
Ενεργοποιούμενος Χρόνος Έκθεσης	500 ns – 1 000 s
Ελάχιστος Χρόνος Εναλλαγής Καρέ PIV	200 ns
Βάση Φακού	f-mount
Μήκος Καλωδίου Μεταφοράς Δεδομένων	5 m (Ομοαξονικό)
Interface K	PCI Board Υψηλής Ταχύτητας

Πίνακας 3.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κάμερας POWER VIEW™ 1.4MP, No. 630066, TSI®^[18]

3.2.4 Τροφοδοτικό Καπνού

Το τροφοδοτικό καπνού που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα είναι το μοντέλο 9307, Oil Droplet Generator της εταιρείας TSI^[16], και είναι κατάλληλο για την τροφοδοσία ροών μικρών και μεγάλων ταχυτήτων κατά τη διάρκεια μετρήσεων PIV (Particle Image Velocimetry) ή και LDV (Laser Doppler Velocimetry) είτε σε αεροδυναμικές σήραγγες, είτε σε περιοχές μεγάλης ροής. Πρόκειται για ψεκαστήρα που μέσω ενός ακροφυσίου Laskin, τροφοδοτεί τη ροή με σταγονίδια λαδιού. Για τη λειτουργία τους χρησιμοποιείται ελαιόλαδο. Πεπιεσμένος αέρας ψεκάζει το λάδι στο ρεζερβουάρ της γεννήτριας, για τη δημιουργία των σταγονιδίων. Μια εσωτερική πλάκα εμποδίζει την είσοδο των μεγάλων σταγονιδίων στο ρεύμα^[19].



Σχήμα 3.7 Oil Droplet Generator, TSI 9307

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά, καθώς και οι ονομαστικές διαστάσεις του Τροφοδοτικού Καπνού, όπως αυτά δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία, δίνονται στον Πίνακα 3.5^[19].

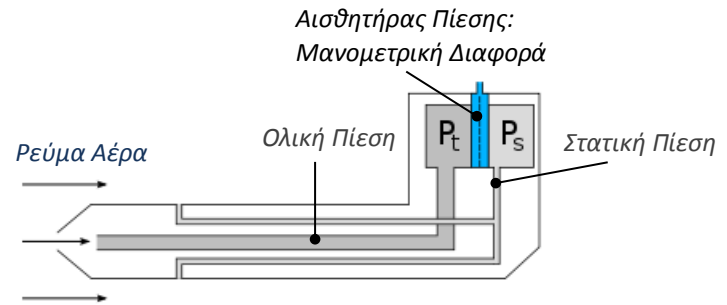
Τεχνικά Χαρακτηριστικά Oil Droplet Generator, TSI 9307	
Πίεση Αέρα Παροχής	170 kPa (Ελάχιστη) 2 720 kPa (Μέγιστη)
Θερμοκρασία Αέρα Παροχής	20 °C (Κανονική Λειτουργία) 65 °C (Μέγιστη)
Εσωτερική Πίεση Αέρα	170 kPa (Κανονική Λειτουργία) 550 kPa (Μέγιστη)
Μέγιστη Οπισθέλκουσα Πίεση	120 kPa
Ρυθμός Ροής Αερολύματος	30 l/min (Κανονική Λειτουργία)
Μέσο Μέγεθος Σταγονιδίου	1 μm (για ελαιόλαδο)
Ονομαστικές Διαστάσεις	
Ύψος	395 mm
Διάμετρος	150 mm
Διάμετρος Σωλήνα Εξόδου Αερολύματος	15.9 mm (Εξωτερική) 9.5 mm (Εσωτερική)
Βάρος	3.9 kg

Πίνακας 3.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Τροφοδοτικού Καπνού που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος της παρούσας εργασίας: Oil Droplet Generator, TSI 9307^[19]

3.2.5 Σωλήνας Pitot

Ο Σωλήνας Pitot, χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της ελεύθερης ταχύτητας ρεύματος U_e , μέσω της μέτρησης της διαφοράς της ολικής και της στατικής πίεσης (δυναμικής πίεσης), οπότε αποτελεί όργανο μέτρησης πίεσης. Ο σωλήνας Pitot, πήρε το όνομά του από το Γάλλο μηχανικό Henri Pitot, ο οποίος και το εφηύρε στις αρχές του 18^{ου} αιώνα.

Αποτελείται από ένα σωλήνα ο οποίος (Σχήμα 3.8) είναι στραμμένος μπροστά από το ρεύμα αέρα, και ένα που είναι κάθετος στην πορεία της ροής. Από τους δύο αυτούς σωλήνες προκύπτουν η ολική και στατική πίεση αντίστοιχα. Μέσω ενός αισθητήρα πίεσης, μπορεί να βρεθεί η μανομετρική τους διαφορά, που όπως προαναφέρθηκε, είναι η δυναμική πίεση. Η δυναμική πίεση καταγράφεται στο ηλεκτρονικό μανόμετρο με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο σωλήνας Pitot.



Σχήμα 3.8 Διάταξη Σωλήνα Pitot

Η δυναμική πίεση που καταγράφηκε ήταν ίση με 3.4 Pa. Η μέση ταχύτητα της ροής U_e , μπορεί να βρεθεί με εφαρμογή της εξίσωσης του Bernoulli:

$$(3.1) \quad U_e = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{ολικό} - p_{στατικό})}{\rho}}$$

Όπου $p_{ολικό}$: η ολική πίεση
 $p_{στατικό}$: η στατική πίεση
 ρ : η πυκνότητα της ροής

3.3 Συνθήκες Περιβάλλοντος

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος που καταγράφηκε ήταν ίση με 34 °C ή 307 °K. Οι ιδιότητες του ξηρού αέρα που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία δίνονται στον Πίνακα 3.5.

Δυναμική Συνεκτικότητα μ (kg/ms)	Κινηματική Συνεκτικότητα ν (m ² /s)	Θερμική Αγωγιμότητα k (W/mK)	Αδιάστατος Αριθμός Prandtl Pr	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)
1.878×10^{-5}	1.635×10^{-5}	2.678×10^{-2}	0.705	1.152

Πίνακας 3.5 Ιδιότητες ξηρού αέρα σε θερμοκρασία 34 °C και ατμοσφαιρική πίεση^[20]

Τελικά, από τη Σχέση 3.1, η μέση ταχύτητα της ροής U_e προκύπτει ίση με 2.43 m/s.

Κεφάλαιο 4^ο

Παράθεση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Η CCD – Camera, που είναι το όργανο καταγραφής των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς και το μηχάνημα Laser, που είναι το όργανο που ουσιαστικά «καθορίζει» την καταγραφή, ελέγχονται μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή, οπότε οι εικόνες του πεδίου ταχυτήτων καταγράφονται αυτόματα στο πρόγραμμα Insight 3G.

Οι εικόνες του πεδίου ταχυτήτων λαμβάνονται σε κάθε κοιλότητα ανάμεσα στα στοιχεία της τραχύτητας ξεχωριστά, ενώ στην κάθε περίπτωση λαμβάνονται 200 εικόνες. Κάθε εικόνα, όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από ένα ζεύγος σημείων, που αποτελούν την αρχή και το πέρας της τροχιάς ενός σταγονιδίου – «ιχνηλάτη» του spray λαδιού (που σκεδάζει το φως από το laser καθιστώντας εφικτό τον εντοπισμό του από τη CCD – Camera) σε χρόνο 120 μ s. Με αυτό τον τρόπο, σε κάθε σημείο μιας εικόνας, μπορεί να σχεδιαστεί ένα διάνυσμα ταχύτητας, και με το συνδυασμό των 200 αυτών εικόνων να βρεθεί ένα χρονικά μέσο πεδίο ταχυτήτων.

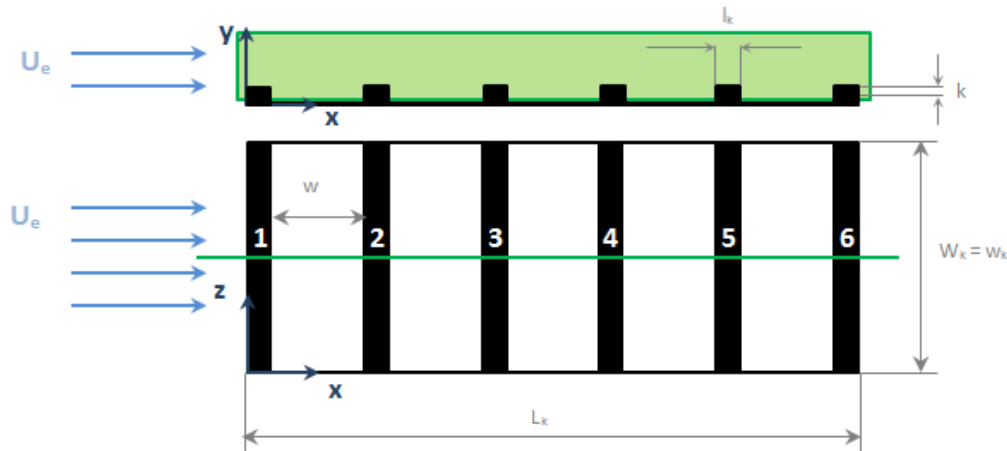
Σε αυτή τη φάση, το βασικό πρόβλημα που προκύπτει, είναι ότι εξαιτίας της ψηφιοποίησης, τα αποτελέσματα καταγράφονται στον υπολογιστή με μονάδες pixels και όχι με τις σωστές μονάδες μέτρησής τους (mm για αποστάσεις, m/s για την ταχύτητα κ.ο.κ.). Κάτι τέτοιο φυσικά, δημιουργεί την ανάγκη επεξεργασίας τους. Εύκολα μπορεί να βρεθεί μια κλίμακα για την κάθε εικόνα, αφού τα στοιχεία της τραχύτητας είναι ορατά και οι διαστάσεις τους τυποποιημένες. Στη συνέχεια, γίνεται εξαγωγή ενός αρχείου *.vec για την κάθε χρονικά μέση εικόνα το οποίο στη συνέχεια σώζεται ως αρχείο *.dat. Ακολούθως, γίνεται επεξεργασία μέσω προγραμμάτων Fortran, όπου προκύπτει ένα αρχείο με τις σωστές μονάδες μέτρησης σε αποστάσεις και ταχύτητα. Η οπτικοποίηση του πεδίου ταχύτητας επιτυγχάνεται μέσω του προγράμματος Surfer.

Πιο κάτω δίνονται αναλυτικά για κάθε κοιλότητα, η μορφή των γραμμών ροής, οι ισοϋψείς της ταχύτητας προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος U_e και η σχηματική απεικόνιση των διανυσμάτων της ταχύτητας σε κάθε σημείο του πεδίου. Οι γραμμές ροής βρίσκονται μέσω του

προγράμματος Tecplot και βοηθούν στην καλύτερη απεικόνιση των δομών της ροής. Τα διανύσματα της ταχύτητας βρίσκονται μέσω του Προγράμματος 1 / Παράρτημα και ακολούθως οπτικοποιούνται μέσω του προγράμματος Surfer. Στη σχηματική απεικόνιση γίνεται επιπλέον επεξεργασία ούτως ώστε να φανούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά της ροής όπως οι συντεταγμένες των σημείων αποκόλλησης και τα μεγέθη των ζωνών ανακυκλοφορίας. Τέλος, οι Ισοϋψείς της ταχύτητας βρίσκονται μέσω του Προγράμματος 2 / Παράρτημα και ακολούθως οπτικοποιούνται μέσω του προγράμματος Surfer. Οι ισοϋψείς της ταχύτητας είναι ένας πολύ καλός τρόπος να φανεί ξεκάθαρα το μέγεθος της ταχύτητας σε κάθε σημείο της κοιλότητας.

4.1 Διάταξη A

Το πεδίο ροής της ταχύτητας, καταγράφεται στο επίπεδο xy , που βρίσκεται στο κέντρο του πλάτους της διάταξης (Σχήμα 4.1), και αφού η διάταξη είναι τοποθετημένη στη μέση της αεροδυναμικής σήραγγας, το επίπεδο συμπίπτει και με το κέντρο του πλάτους της αεροδυναμικής σήραγγας ($span$).



Σχήμα 4.1 Σχηματική Απεικόνιση Επιπέδου Καταγραφής Πεδίου Ταχυτήτων της Διάταξης A

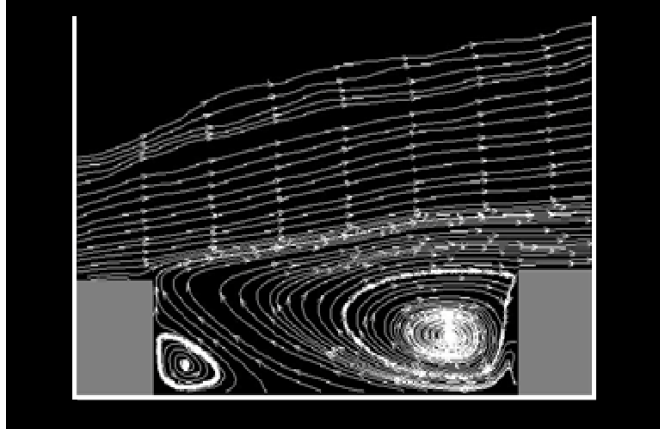
Το πεδίο ταχυτήτων καταγράφηκε σε κάθε κοιλότητα ανάμεσα στα στοιχεία της επιφανειακής τραχύτητας ξεχωριστά. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ο τρόπος που γίνεται η τοποθέτηση των αξόνων, καθώς και η κατεύθυνση της ροής ως προς αυτούς.

Υπενθυμίζεται ότι τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας της Διάταξης A είναι:

	Μήκος Διάταξης L_k (mm)	Πλάτος Διάταξης W_k (mm)	Πλάτος Εμποδίου l_k (mm)	Μήκος Εμποδίου w_k (mm)	Ύψος Εμποδίου k (mm)	Μήκος κοιλότητας w (mm)	Pitch Ratio w/k
Διάταξη A	148	80	8	80	5	20	4

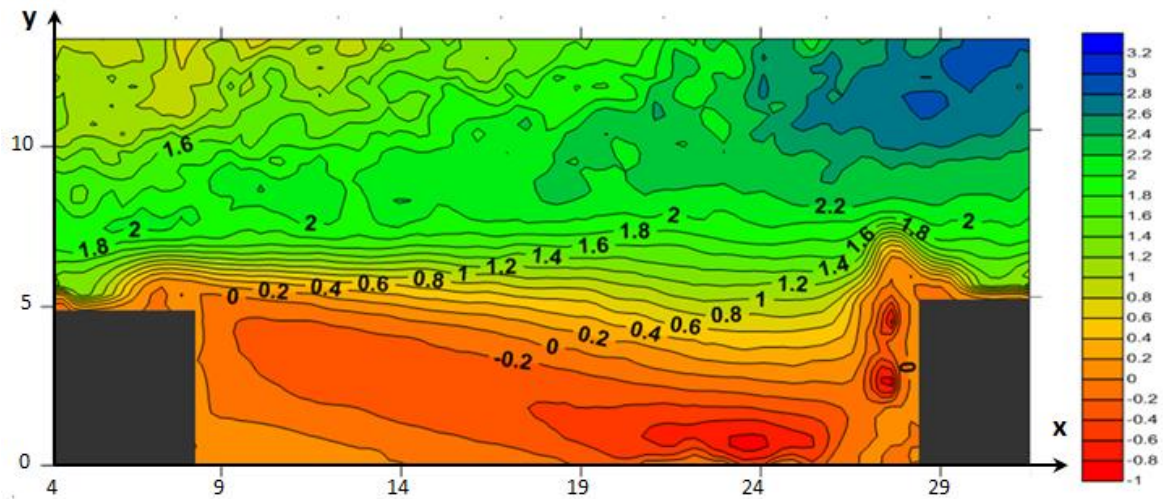
Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη της Διάταξης A της Επιφανειακής Τραχύτητας

Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο

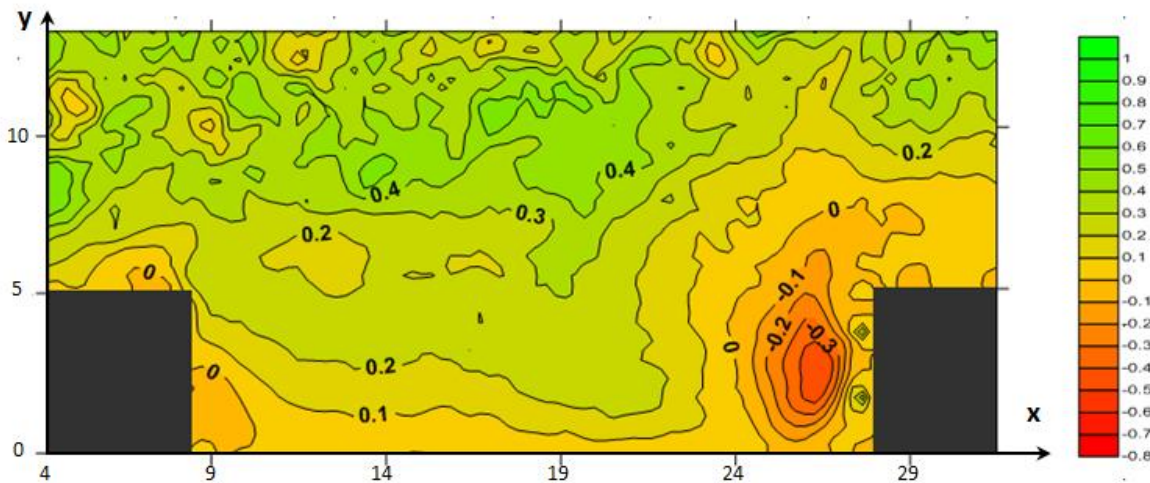


Στο Σχήμα 4.2, φαίνεται ότι ανάμεσα στο 1^ο και το 2^ο εμπόδιο, δημιουργείται μια μεγάλη φουσαλίδα ανακυκλοφορίας, που καλύπτει όλο το μήκος της κοιλότητας, και έχει φορά δεξιόστροφη. Αυτή η δίνη, εμποδίζει τη ροή να επανακολληθεί στο κάτω τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας. Στην κάτω κατάντι γωνία του 1^{ου} εμποδίου, σχηματίζεται μια μικρότερη δίνη αντίθετης φοράς (αριστερόστροφη). Η ροή πάνω από τα εμπόδια δείχνει να έχει ανοδική πορεία.

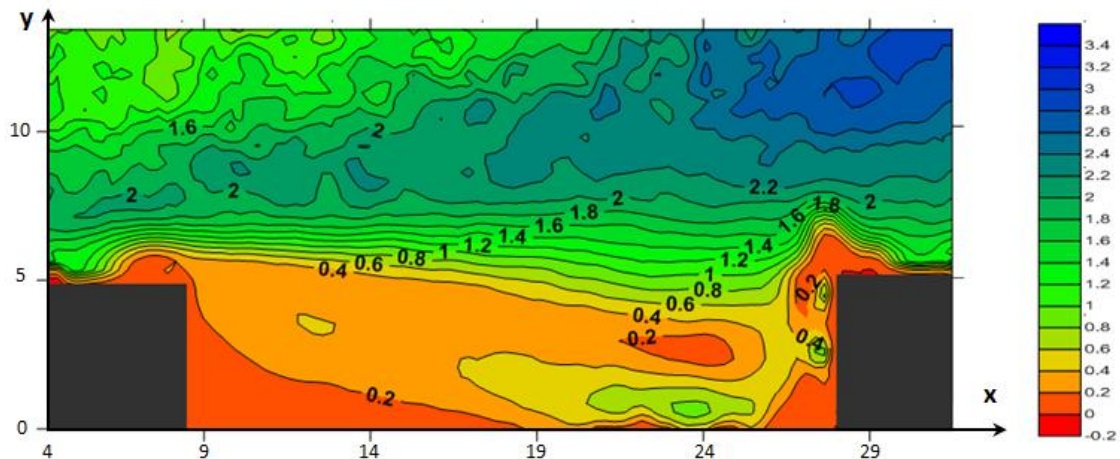
Σχήμα 4.2 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 1^ο και το 2^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.3 Ισοϋψείς Λόγου Ταχυτήτων U/U_e ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο (U – παράλληλη στη ροή)



Σχήμα 4.4 Ισοϋψείς Λόγου Ταχυτήτων V/U_e ανάμεσα στο 1^ο και το 2^ο εμπόδιο (V – κάθετη στη ροή)



Σχήμα 4.5 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2} / U_e$ ανάμεσα στο 1^ο και το 2^ο εμπόδιο $((U^2 + V^2)^{1/2} - \text{Μέτρο ταχύτητας})$

Στο Σχήμα 4.3, η μέγιστη τιμή της ταχύτητας U , παρουσιάζεται πάνω από το δεύτερο εμπόδιο, σε απόσταση 13 mm από το τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας. Όπως αναφέρθηκε στο 1^ο Κεφάλαιο, η αποκόλληση είναι αποτέλεσμα επίδρασης πίεσης θετικής κλίσεως στη ροή, η οποία επιβραδύνει τη ροή. Ως αποτέλεσμα η συνιστώσα της ταχύτητας που είναι παράλληλη με το τοίχωμα μειώνεται σε σχέση με την κάθετη. Όταν η παράλληλη συνιστώσα γίνει μικρή σε σχέση με την κάθετη, τότε η ροή παρασύρεται σε καθοδική (ή ανοδική) πορεία, δημιουργώντας μια ζώνη ανακυκλοφορίας. Στο σχήμα φαίνεται πως επηρεάζει η ζώνη ανακυκλοφορίας την κατανομή της ταχύτητας U . Συγκεκριμένα, η ταχύτητα στο πάνω μέρος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, λαμβάνει θετικές τιμές, οι οποίες σταδιακά μειώνονται. Τα σημεία, όπου η ταχύτητα, λόγω της ανακυκλοφορίας, γίνεται πλήρως κάθετη (δεν υπάρχει συνιστώσα της με κατεύθυνση παράλληλη προς την κατεύθυνση της ροής), είτε όταν η ροή κινείται προς τα πάνω, είτε όταν κινείται προς τα κάτω, απαρτίζουν την ισοϋψή $U = 0$. Κάτω από αυτή την ισοϋψή, η ταχύτητα κινείται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής, γι' αυτό και οι ισοϋψείς λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, δείχνει να επηρεάζει τη ροή μέχρι και 7 - 8 mm από το κάτω τοίχωμα. Η μέγιστη θετική τιμή ($2U_e$) και η μέγιστη αρνητική ($-U_e$) της ταχύτητας στη ζώνη ανακυκλοφορίας, εμφανίζονται στα ακρότατα σημεία, πάνω και κάτω της φυσαλίδας.

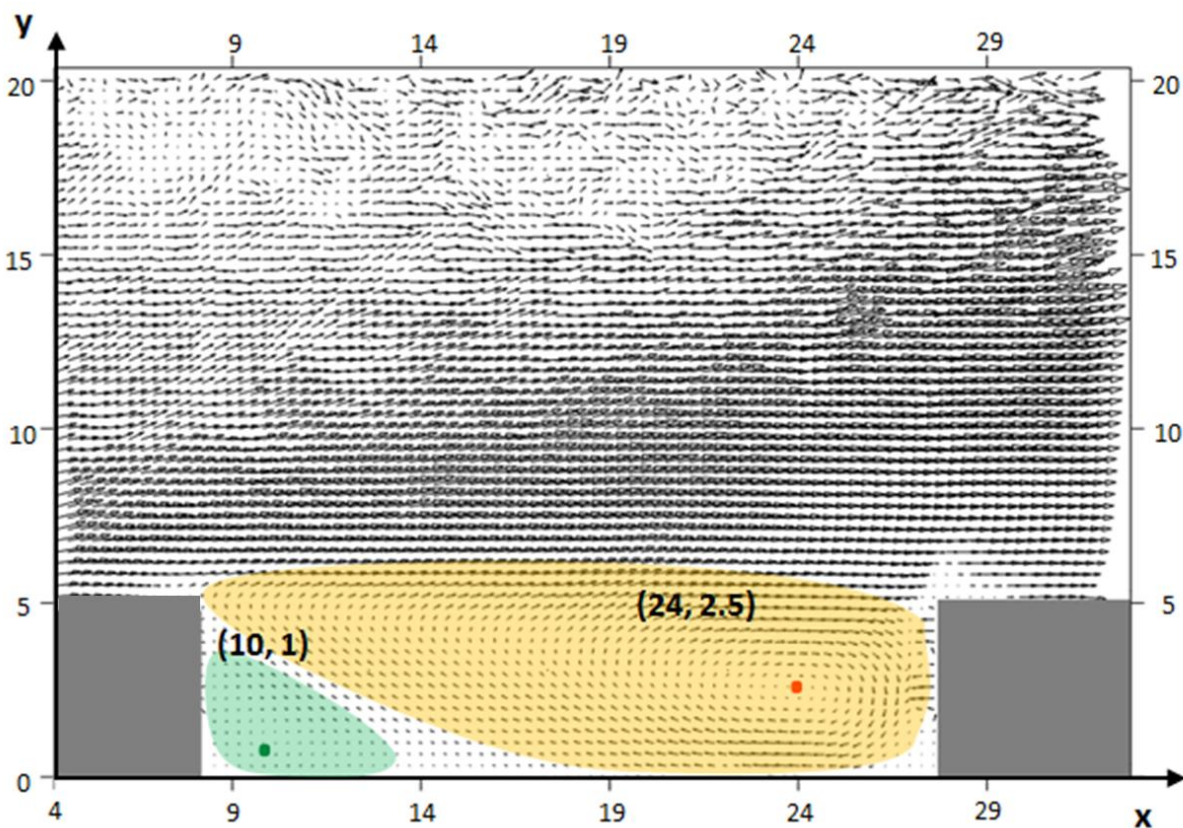
Στο Σχήμα 4.4, γενικά, μπορεί να φανεί ότι η κάθετη ταχύτητα παίρνει μικρές τιμές σε σχέση με την παράλληλη. Η μέγιστη τιμή της ($0.86 U_e$) παρουσιάζεται πάνω από το 2^ο εμπόδιο εξαιτίας της ανοδικής πορείας της ροής. Ανάντι του 2^{ου} εμποδίου φαίνεται να υπάρχει μια περιοχή όπου η ταχύτητα V παίρνει σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές, στο σημείο όπου η ροή οδηγείται προς τα κάτω, εξαιτίας της μεγάλης ζώνης ανακυκλοφορίας, και αντίστοιχα, κατάντι του πρώτου, φαίνεται να παρουσιάζει σχετικά μεγάλες θετικές τιμές στο σημείο όπου η ροή οδηγείται προς τα πάνω.

Τα κέντρα των δινών της μεγάλης και της δευτερεύουσας ζώνης ανακυκλοφορίας (Σχήμα 4.6) φαίνεται να βρίσκονται στα σημεία όπου συμπίπτουν οι ισοϋψείς $U = 0$ και $V = 0$. Με γνώμονα αυτό, μπορούν να εντοπιστούν και άλλα σημεία ανακυκλοφορίας που λόγω του μικρού τους μεγέθους δεν είναι ορατά στο Σχήμα 4.2 και 4.6. Αυτά μπορούν να εντοπιστούν στην κορυφή του 1^{ου} και του 2^{ου} εμποδίου, όπως

και στην κάτω ανάντι γωνία του 2^{ου} εμποδίου. Παρόλα αυτά ο μηδενισμός της ταχύτητας στα σημεία αυτά θα μπορούσε να αποδοθεί και στην παρουσία των στερεών εμποδίων, και την ανάκλαση που μπορεί να προκαλέσουν στο φως του laser.

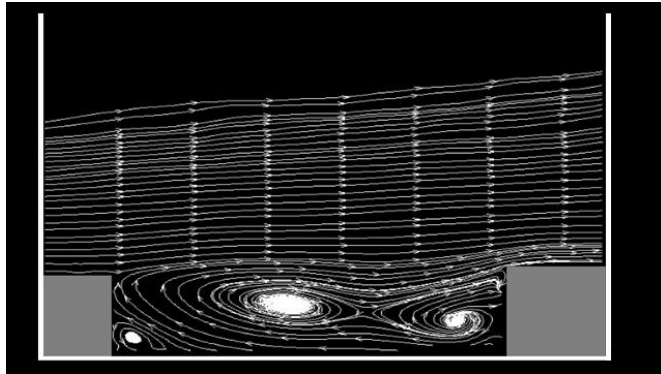
Στο Σχήμα 4.5, η ταχύτητα γίνεται ελάχιστη γύρω από τα σημεία που απαρτίζουν την ισοϋψή $U = 0$.

Στο Σχήμα 4.6, τονίζονται οι δύο περιοχές ανακυκλοφορίας που είναι ορατές και στο Σχήμα 4.2, και τα κέντρα των δινών καταγράφονται. Οι ζώνες ανακυκλοφορίας, που έχουν φορά δεξιόστροφη σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα και οι ζώνες με αριστερόστροφη φορά σημειώνονται με μπλε χρώμα. Στην κορυφή των εμποδίων, μπορούν να φανούν κάποιες κινήσεις της ροής (κατάντι γωνία της κορυφής του 1^{ου} εμποδίου και ανάντι γωνία της κορυφής του 2^{ου} εμποδίου), που δείχνουν επιβράδυνση. Στα ίδια σημεία οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.3) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση. Όπως προαναφέρθηκε, σε αυτά τα σημεία, είναι πιθανόν να γίνεται αποκόλληση της ροής. Παρόλα αυτά η εικόνα της ροής στα σημεία αυτά δεν είναι σαφής. Στην περίπτωση της ανάντι γωνίας της κορυφής του 2^{ου} εμποδίου, η ροή συνεχίζοντας την πορεία της φαίνεται να επιταχύνεται, αφού μετά την απομάκρυνση των ισοϋψών της ταχύτητας U (Σχήμα 4.3), παρατηρείται συγκέντρωσή τους.



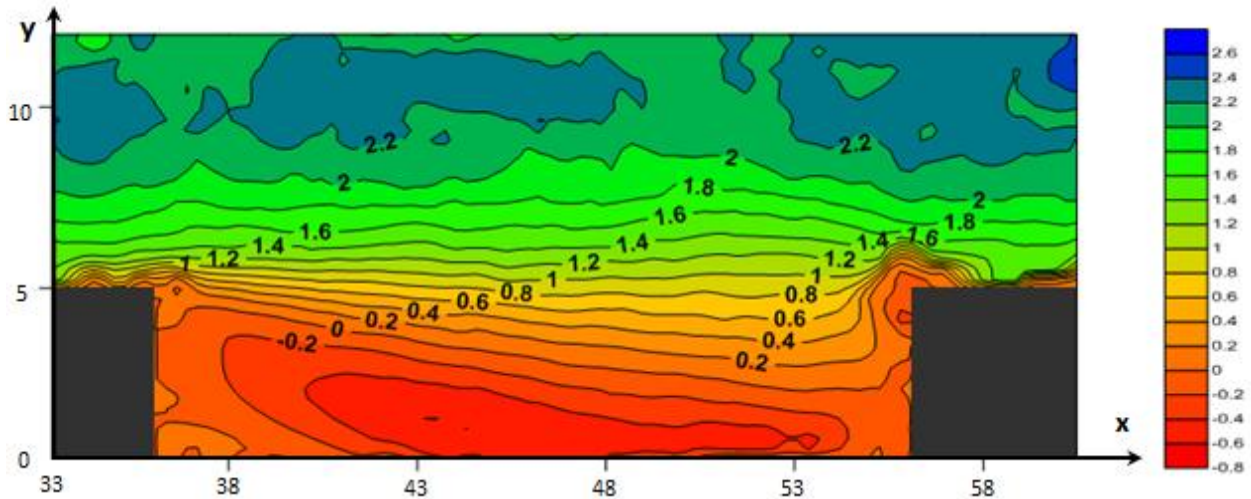
Σχήμα 4.6 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο της Διάταξης A

Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο

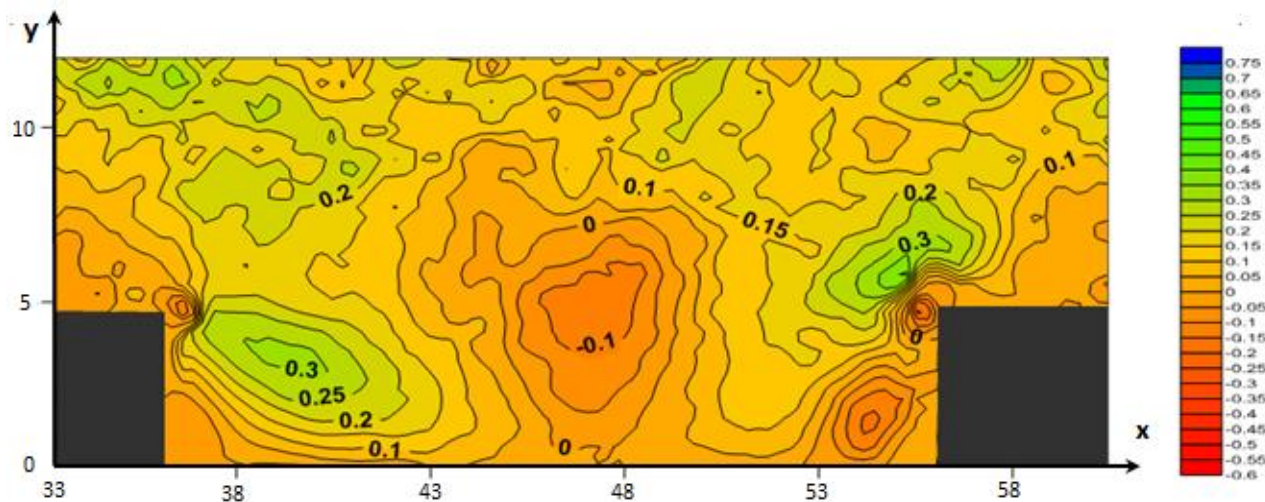


Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο, δημιουργούνται τρεις φυσαλίδες ανακυκλοφορίας. Η πρώτη φυσαλίδα, που βρίσκεται στην κάτω κατάντι γωνία του 2^{ου} εμποδίου, έχει αριστερόστροφη φορά. Στη συνέχεια φαίνεται να σχηματίζεται μια μεγάλη ζώνη ανακυκλοφορίας που μοιάζει να προκύπτει από επαλληλία δύο φυσαλίδων ανακυκλοφορίας, ίδιας φοράς. Η ροή πάνω από τα εμπόδια έχει ανοδική πορεία.

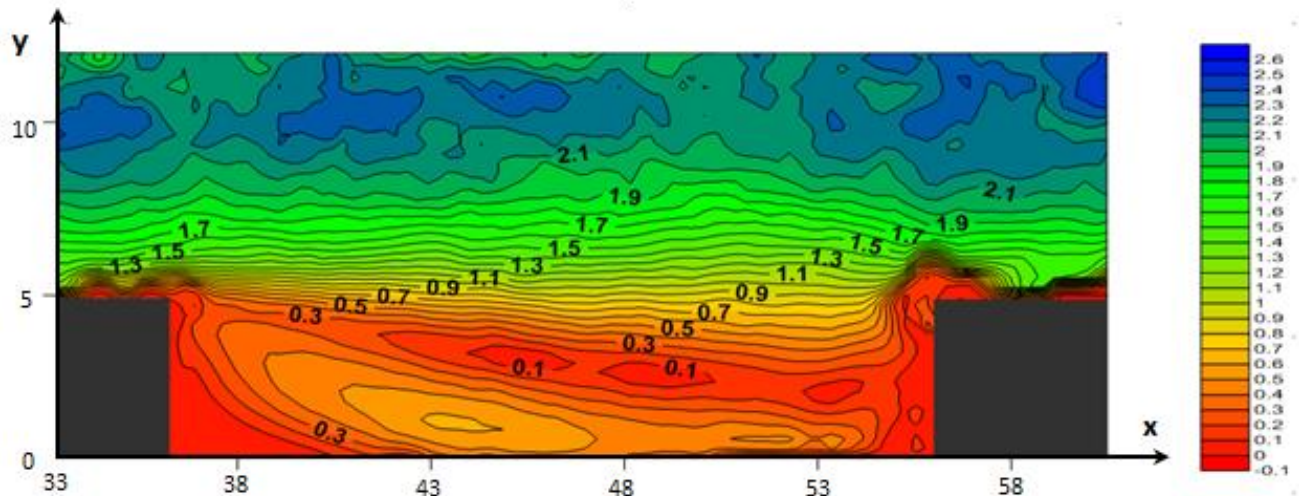
Σχήμα 4.7 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 2^ο και το 3^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.8 Ισοϋψείς Λόγου Ταχύτητας U/U_e ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο (U – παράλληλη ταχύτητα)



Σχήμα 4.9 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα στο 2^ο και το 3^ο εμπόδιο (V – κάθετη ταχύτητα)



Σχήμα 4.10 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2} / U_e$ στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο Ταχύτητας)

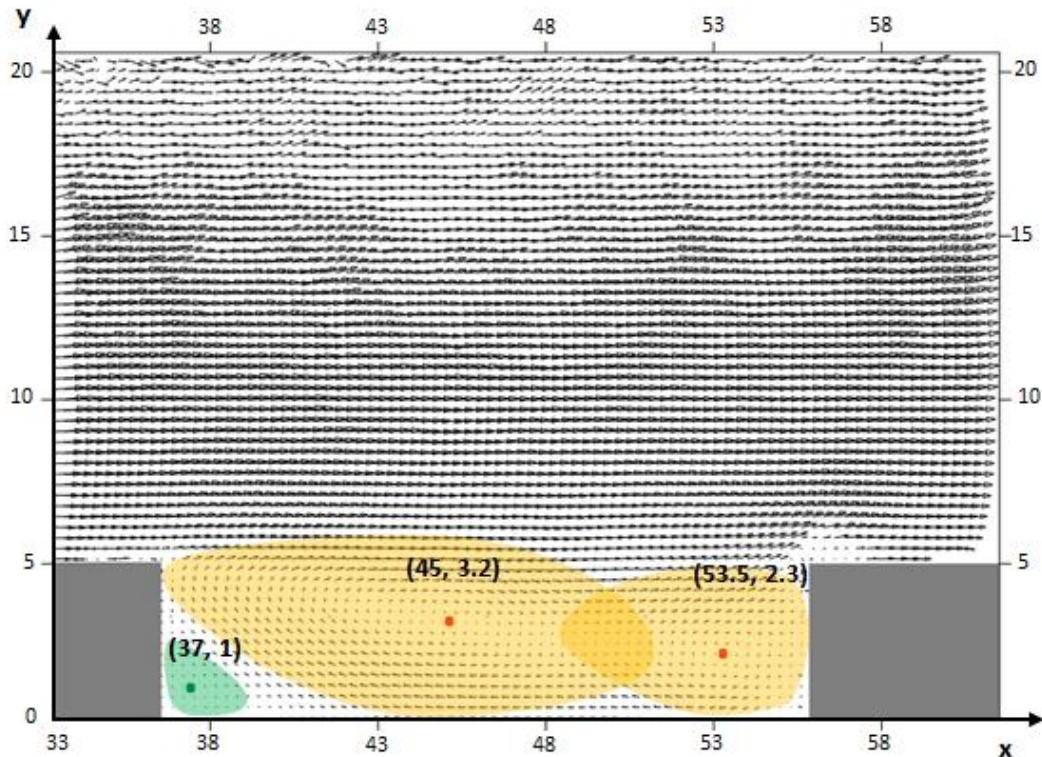
Στο Σχήμα 4.8, η ταχύτητα, όπως και πριν, λαμβάνει θετικές τιμές στο πάνω μέρος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, που σταδιακά μειώνονται, λόγω της κλίσης της ταχύτητα. Τα σημεία, όπου η ταχύτητα, λόγω της ανακυκλοφορίας, γίνεται πλήρως κάθετη απαρτίζουν την ισοϋψή $U = 0$, και κάτω από αυτή, η ταχύτητα κινείται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής και οι ισοϋψείς λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Παρόλο που σε αυτή την κοιλότητα υπάρχουν δύο μεγάλες φυσαλίδες αποκόλλησης δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στη μορφή των ισοϋψών της ταχύτητας U , λόγω του τρόπου με τον οποίο ενώνονται. Η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, δείχνει να επηρεάζει τη ροή μέχρι και 8 - 9 mm από το κάτω τοίχωμα. Η μέγιστη θετική τιμή ($2U_e$) και η μέγιστη αρνητική ($-0.57U_e$) της ταχύτητας U στη ζώνη ανακυκλοφορίας, εμφανίζονται στα ακραία σημεία, στο πάνω και κάτω μέρος της φυσαλίδας. Στην κορυφή του 3^{ου} εμποδίου, φαίνεται συγκέντρωση των ισοϋψών, δείχνοντας ότι σε χαμηλότερο ύψος αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες, κάτι που αποτελεί ένδειξη επιτάχυνσης.

Στο Σχήμα 4.9, η ταχύτητα V , παίρνει τις μεγαλύτερες θετικές τιμές στη γειτνίαση των εμποδίων, στην άμεση περιοχή κατάντι του 2^{ου} εμποδίου ($0.30U_e$) όπου η ροή κινείται ανοδικά λόγω της ανακυκλοφορίας και στην άνω ανάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου ($0.38U_e$) όπου η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Οι μεγαλύτερες αρνητικές τιμές στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζονται σε μια περιοχή περίπου στη μέση της κοιλότητας ($-0.15U_e$), όπου η ροή αρχίζει να κινείται καθοδικά εξαιτίας της πρώτης φυσαλίδας, προτού σημειώσει πάλι ανοδική πορεία εξαιτίας της δεύτερης, και στην κάτω ανάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου ($-0.16U_e$), όπου η ροή κινείται καθοδικά εξαιτίας της δεύτερης φυσαλίδας.

Στο Σχήμα 4.10, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη γύρω από τα σημεία όπου η ταχύτητα U γίνεται ελάχιστη κατά απόλυτη τιμή (Σχήμα 4.11), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Το μέγιστο του μέτρου της ταχύτητας εντοπίζεται πάνω από το 3^ο εμπόδιο.

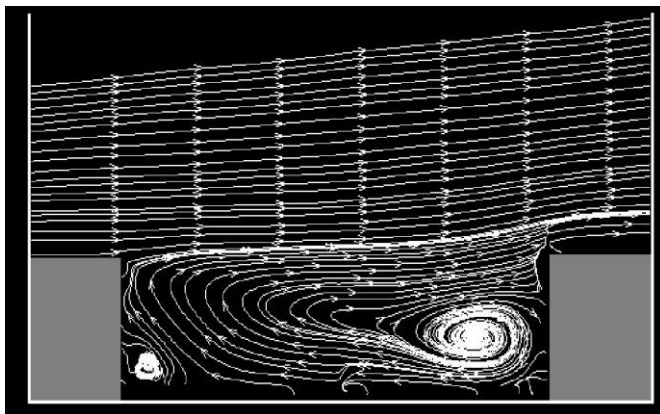
Στο Σχήμα 4.11, τονίζονται οι περιοχές ανακυκλοφορίας που είναι ορατές και τα κέντρα τους καταγράφονται. Στην ανάντι γωνία της κορυφής του 3^{ου} εμποδίου, μπορούν να φανούν κάποιες κινήσεις της ροής που δείχνουν επιβράδυνση. Στα ίδια σημεία οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.8)

φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση. Είναι πιθανόν, σε αυτό το σημείο, να γίνεται αποκόλληση της ροής, αν και η εικόνα της ροής δεν είναι αρκετά σαφής, ώστε να μπορεί να εξαχθεί αυτό το συμπέρασμα. Η ροή συνεχίζοντας την πορεία της φαίνεται να επιταχύνεται, αφού μετά την απομάκρυνση των ισουψών της ταχύτητας U (Σχήμα 4.8), παρατηρείται συγκέντρωσή τους.



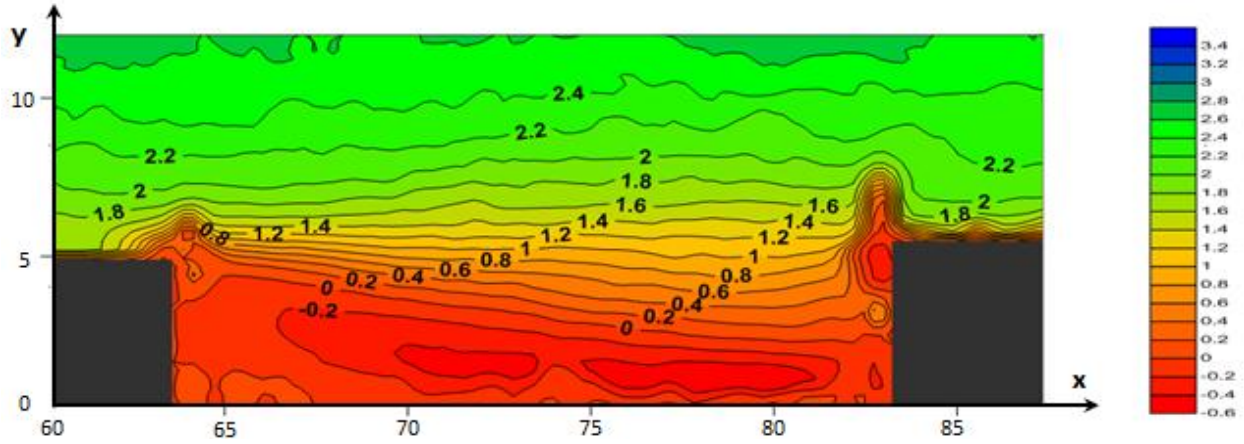
Σχήμα 4.11 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο της Διάταξης A

Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο

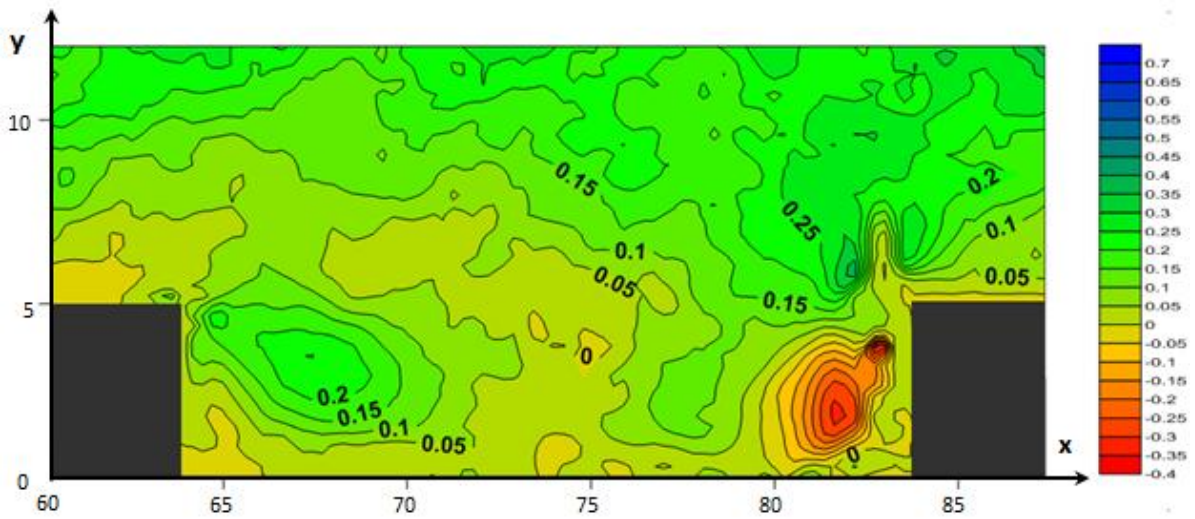


Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12 ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο, δημιουργείται μια μεγάλη φυσαλίδα ανακυκλοφορίας, που καλύπτει όλο το μήκος της κοιλότητας και εμποδίζει τη ροή να επανακολληθεί στο κάτω τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας. Η κύρια αυτή ζώνη ανακυκλοφορίας, έχει φορά δεξιόστροφη. Στην κάτω κατάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου, σχηματίζεται μια μικρότερη δίνη αριστερόστροφης φοράς. Η ροή πάνω από τα εμπόδια έχει ανοδική πορεία.

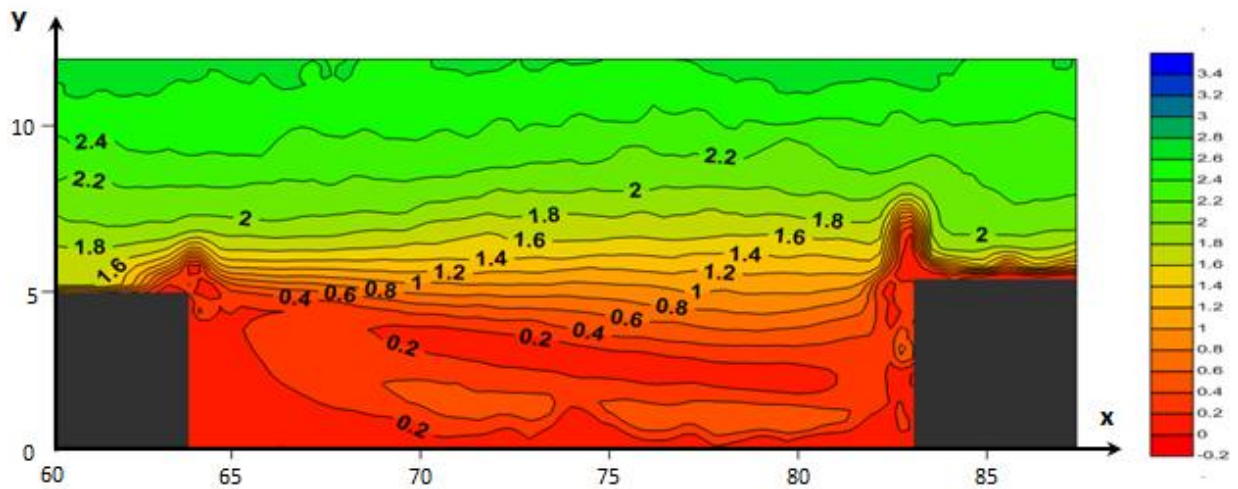
Σχήμα 4.12 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.13 Ισοΰψεις Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 3° και 4° εμπόδιο (U – παράλληλη ταχύτητα)



Σχήμα 4.14 Ισοΰψεις Ταχύτητας V/U_e στο 3° και 4° εμπόδιο (V – κάθετη στην κατεύθυνση της ροής)



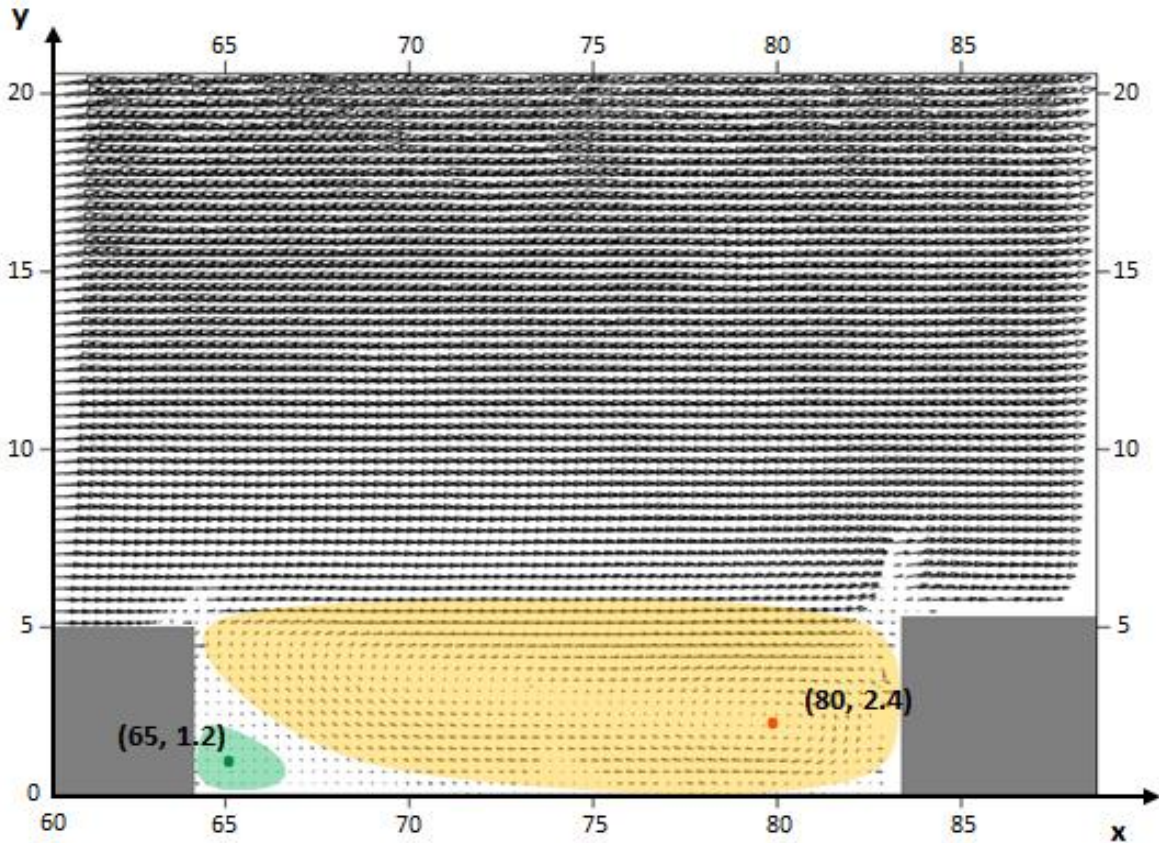
Σχήμα 4.15 Ισοΰψεις Ταχύτητας $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 3° και 4° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο Ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.13, η μέγιστη τιμή της ταχύτητας U στη γειτνίαση του εμποδίου, εμφανίζεται πάνω από το 3ο εμπόδιο. Η ταχύτητα, λαμβάνει θετικές τιμές στο πάνω μέρος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, που σταδιακά μειώνονται, λόγω της κλίσης της ταχύτητα, μέχρι η ταχύτητα, λόγω της ανακυκλοφορίας, να γίνει πλήρως κάθετη, οπότε η συνιστώσα U μηδενίζεται (ισοϋψής $U = 0$). Στο κάτω μέρος της ζώνης ανακυκλοφορίας, λόγω της «αναστροφής» της ροής, η ταχύτητα κινείται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής και οι ισοϋψείς λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, δείχνει να επηρεάζει τη ροή μέχρι και 10 - 11 mm από το κάτω τοίχωμα. Η μέγιστη θετική τιμή ($2.4U_e$) και η μέγιστη αρνητική ($-0.57U_e$) της ταχύτητας U στη ζώνη ανακυκλοφορίας, εμφανίζονται στα ακραία σημεία, στο πάνω και κάτω μέρος της φυσαλίδας. Στην κορυφή του 2^{ου} εμποδίου, οι ισοϋψείς φαίνεται να συγκεντρώνονται, δείχνοντας ότι σε χαμηλότερο ύψος αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες, κάτι που αποτελεί ένδειξη επιτάχυνσης.

Στο Σχήμα 4.14, η μέγιστη τιμή της V παρουσιάζεται πάνω και ανάντι του 4^{ου} εμποδίου. Η ταχύτητα V , παίρνει τις μεγαλύτερες θετικές τιμές στη γειτνίαση των εμποδίων, στην άμεση περιοχή κατάντι του 3^{ου} εμποδίου ($0.25U_e$) όπου η ροή κινείται ανοδικά λόγω της ανακυκλοφορίας και στην άνω ανάντι γωνία του 4^{ου} εμποδίου ($0.37U_e$) όπου η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Οι μεγαλύτερες αρνητικές τιμές στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζονται στην άμεση ανάντι περιοχή του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή κινείται προς τα κάτω λόγω της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας.

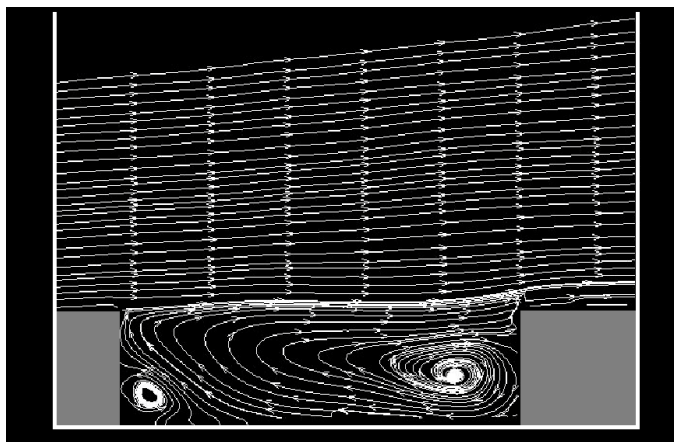
Στο Σχήμα 4.15, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Είναι εμφανές ότι λόγω των μικρών τιμών της ταχύτητας V , η μορφή του Σχήματος 4.15 έχει μεγάλη ομοιότητα με το Σχήμα 4.13, μιας και η ταχύτητα U είναι αυτή που «συνεισφέρει» πιο πολύ.

Στο Σχήμα 4.16, τονίζονται οι περιοχές ανακυκλοφορίας που είναι ορατές και στο Σχήμα 4.12, και τα κέντρα τους καταγράφονται. Στην κορυφή των εμποδίων, μπορούν να φανούν κάποιες κινήσεις της ροής (κατάντι γωνία της κορυφής του 3^{ου} εμποδίου και ανάντι γωνία της κορυφής του 4^{ου} εμποδίου), που δείχνουν επιβράδυνση. Στα ίδια σημεία οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.13) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση. Στην περίπτωση της ανάντι γωνίας της κορυφής του 4^{ου} εμποδίου, η ροή συνεχίζοντας την πορεία της φαίνεται να επιταχύνεται, αφού μετά την απομάκρυνση των ισοϋψών της ταχύτητας U (Σχήμα 4.13), παρατηρείται συγκέντρωσή τους.



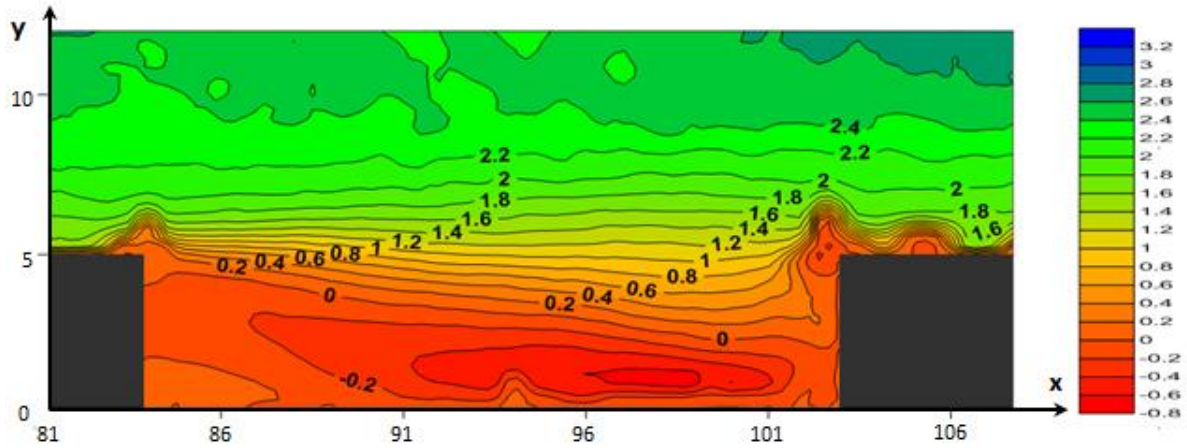
Σχήμα 4.16 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο της Διάταξης Α

Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο

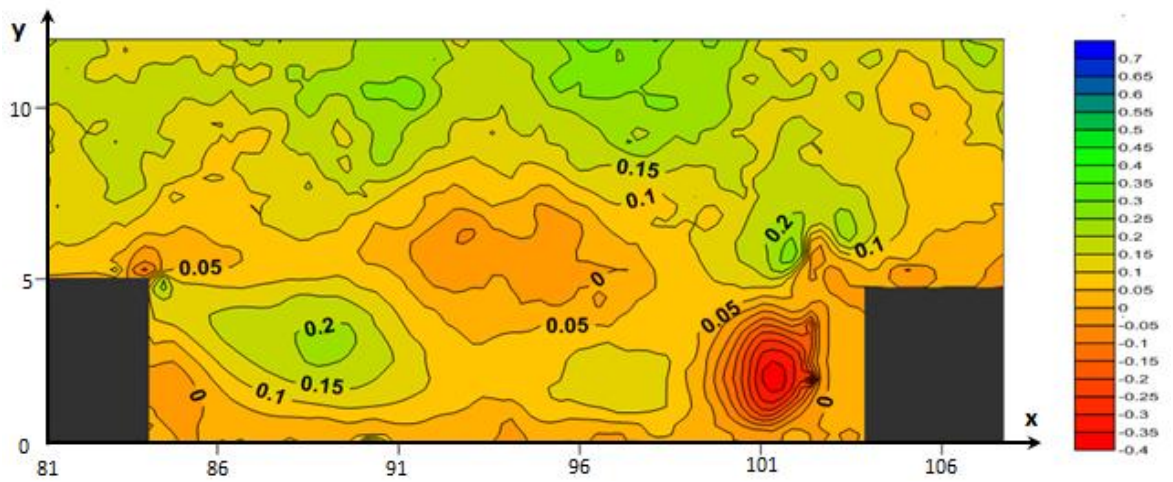


Σχήμα 4.17 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 4^ο και το 5^ο εμπόδιο

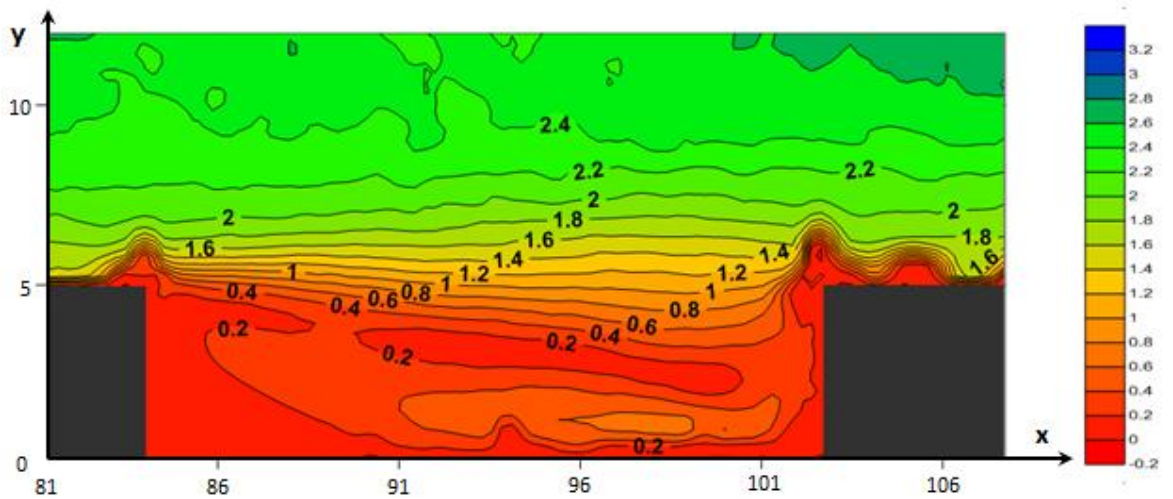
Στο Σχήμα 4.17, φαίνεται ότι ανάμεσα στο 4^ο και το 5^ο εμπόδιο, δημιουργείται μια μεγάλη δεξιόστροφη φουσαλίδα ανακυκλοφορίας, που καλύπτει όλο το μήκος της κοιλότητας και αποτρέπει τη ροή από το να επανακολληθεί στο κάτω τοίχωμα. Εξαιτίας της, η ροή δεν μπορεί να επανακολληθεί στο κάτω τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας. Στην κάτω κατάντι γωνία του 4^{ου} εμποδίου, σχηματίζεται μια μικρότερη δίνη αριστερόστροφης φοράς. Η ροή πάνω από τα εμπόδια έχει ανοδική πορεία.



Σχήμα 4.18 Ισοΰψείς Λόγου Ταχύτητας U/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (U – παράλληλη ταχύτητα)



Σχήμα 4.19 Ισοΰψείς Λόγου Ταχύτητας V/U_e στο 4° και 5° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



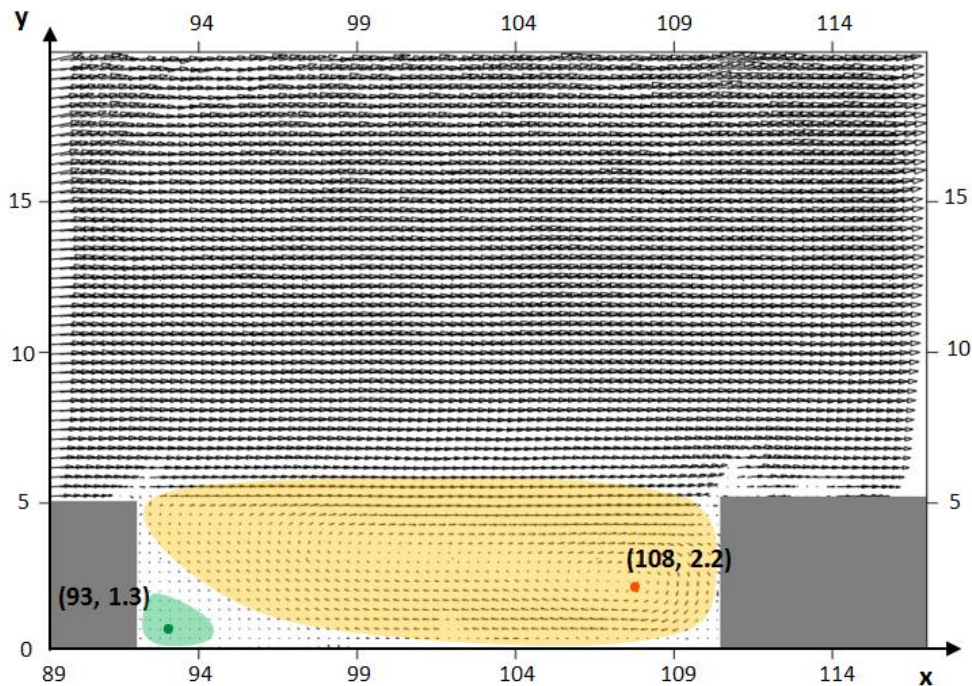
Σχήμα 4.20 Ισοΰψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 4° και 5° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο Ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.18, η μέγιστη τιμή της ταχύτητας U στη γειτνίαση του εμποδίου, εμφανίζεται πάνω από το 5^ο εμπόδιο, 8 – 9 mm από το τοίχωμα της κοιλότητας. Η ταχύτητα, κατανέμεται όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, με αυτό το φαινόμενο να συμβαίνει μέχρι και 7 - 8 mm από το κάτω τοίχωμα. Η μέγιστη θετική τιμή ($2.2U_e$) και η μέγιστη αρνητική ($-0.69U_e$) της ταχύτητας U στη ζώνη ανακυκλοφορίας, εμφανίζονται στα ακραία σημεία, στο πάνω και κάτω μέρος της φυσαλίδας.

Στο Σχήμα 4.19, η μέγιστη τιμή της V ($-0.37U_e$) στη γειτνίαση των εμποδίων, παρουσιάζεται αμέσως ανάντι του 5^{ου} εμποδίου και είναι αρνητική, λόγω της πορείας της ροής στη ζώνη ανακυκλοφορίας. Μεγάλες (θετικές) τιμές της V παρουσιάζονται στην άμεση κατάντι περιοχή του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή κινείται ανοδικά εξαιτίας της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας, και στην άμεση ανάντι περιοχή της κορυφής του 5^{ου} εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος.

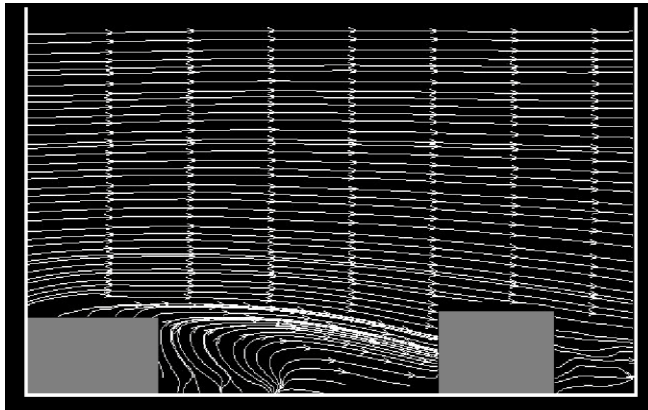
Στο Σχήμα 4.20, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισούψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.21, τονίζονται οι περιοχές ανακυκλοφορίας που είναι ορατές και στο Σχήμα 4.17 και τα κέντρα τους καταγράφονται. Στην κορυφή των εμποδίων, μπορούν να φανούν κινήσεις της ροής, που δείχνουν επιβράδυνση. Στα ίδια σημεία οι ισούψεις της ταχύτητας U (Σχήμα 4.18) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση. Στην περίπτωση της ανάντι γωνίας της κορυφής του 4^{ου} εμποδίου, αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται δύο φορές, ενώ η ροή συνεχίζοντας την πορεία της φαίνεται να επιταχύνεται, αφού μετά την απομάκρυνση των ισούψων της ταχύτητας U (Σχήμα 4.13), παρατηρείται συγκέντρωσή τους.



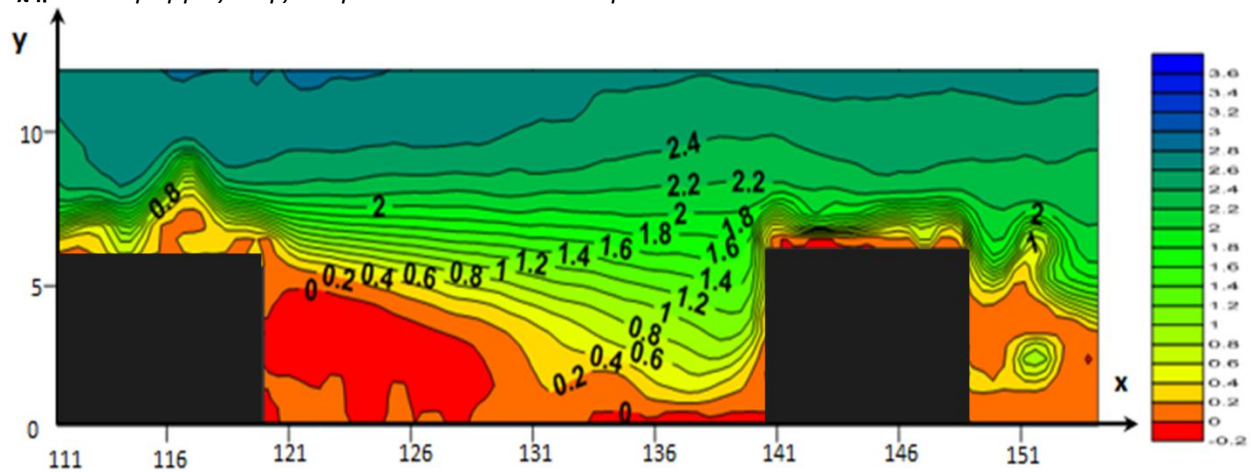
Σχήμα 4.21 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο της Διάταξης A

Περιοχή ανάμεσα στο 5^ο και 6^ο εμπόδιο

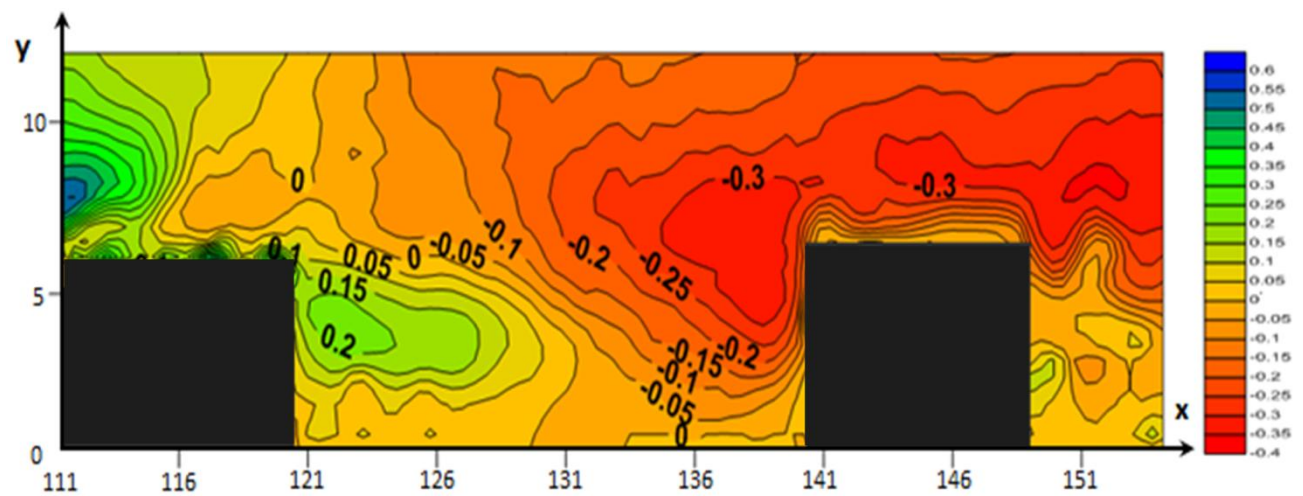


Στο Σχήμα 4.22 η δομή της ροής μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση της ροής μέσα στην κοιλότητα, κοντά στο εξεταζόμενο επίπεδο. Η εκβολή των γραμμών ροής από ένα σημείο δείχνει ότι το πεδίο είναι τρισδιάστατο και η κίνηση της ροής δεν μπορεί να καταγραφεί πλήρως στο συγκεκριμένο επίπεδο. Η ροή φαίνεται να έχει καθοδική πορεία.

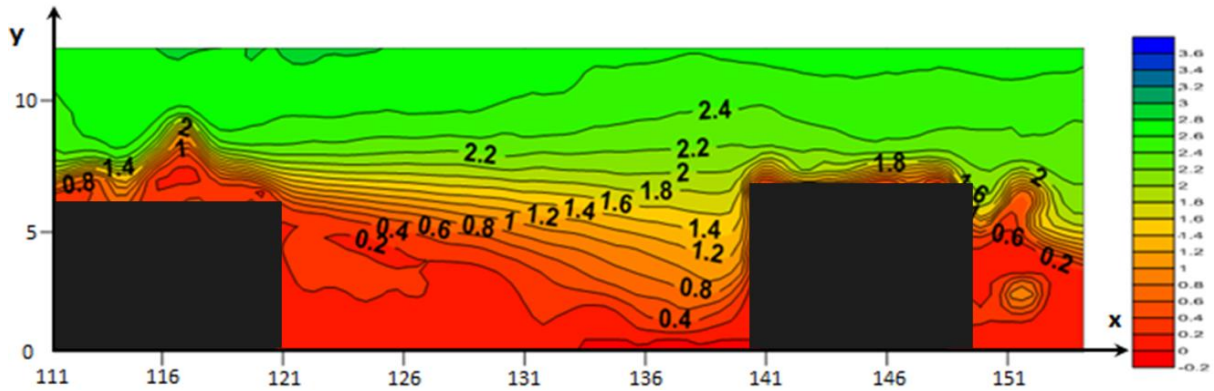
Σχήμα 4.22 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 5^ο και το 6^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.23 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 5^ο και 6^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.24 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 5^ο και 6^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



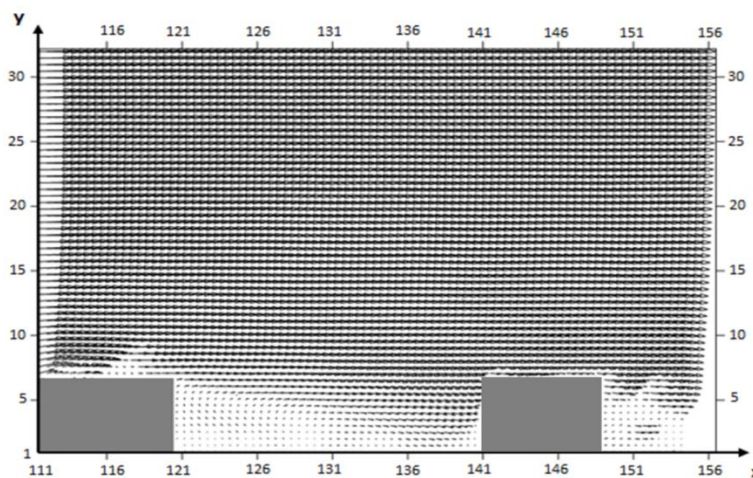
Σχήμα 4.25 Ισοϋψείς Λόγου $(V^2 + U^2)^{1/2}/U_e$ στο 5^ο και 6^ο εμπόδιο ($(V^2 + U^2)^{1/2}/U_e$ – Μέτρο Ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.23, η ταχύτητα U μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από το κάτω τοίχωμα της κοιλότητας. Στη ροή δε σχηματίζεται φυσαλίδα ανακυκλοφορίας στο εξεταζόμενο επίπεδο, παρόλο που οι γραμμές φαίνονται να «καμπυλώνουν». Τα σημεία όπου η ταχύτητα γίνεται πλήρως κάθετη, απαρτίζουν την ισοϋψή καμπύλη $U = 0$.

Στο Σχήμα 4.24, η μέγιστη τιμή της V στη γειτνίαση των εμποδίων, παρουσιάζεται σε δύο περιοχές στην ανάντι και κατάντι κορυφή του 5^{ου} εμποδίου. Μεγάλες αρνητικές τιμές της V παρουσιάζονται σε δύο περιοχές ανάντι ($-0.36U_e$) και κατάντι ($-0.32U_e$) της κορυφής του 6^{ου} εμποδίου.

Στο Σχήμα 4.25, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

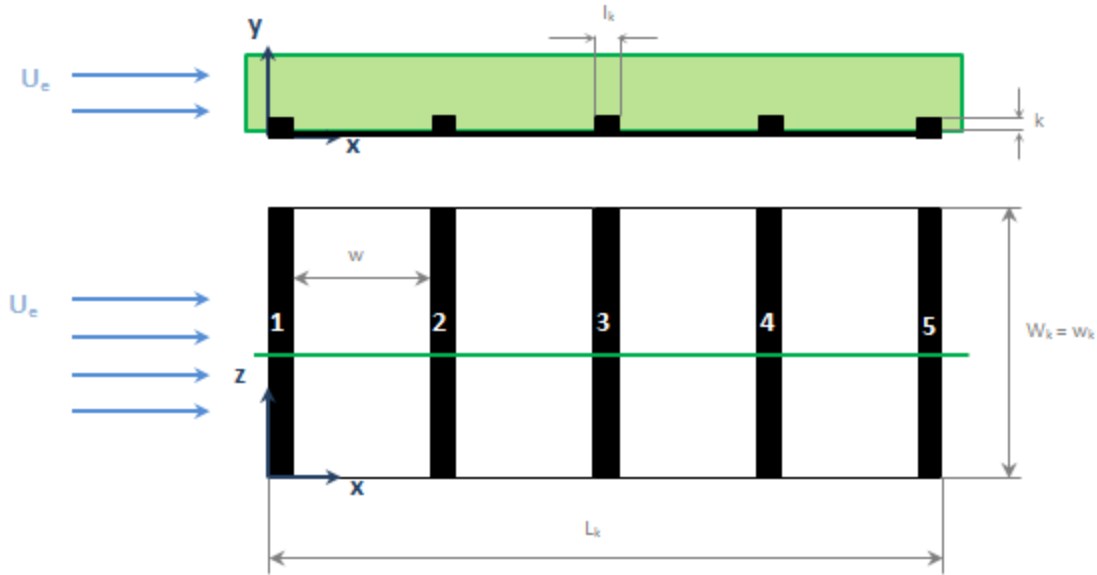
Στο Σχήμα 4.26, στην κορυφή του 5^{ου} εμποδίου, φαίνονται κινήσεις της ροής που δείχνουν επιβράδυνση (στα ίδια σημεία οι ισοϋψείς της ταχύτητας U απομακρύνονται από το εμπόδιο, δείχνοντας επιβράδυνση). Στην περίπτωση της πάνω ανάντι πλευράς του 6^{ου} εμποδίου, η ροή φαίνεται να επιταχύνεται ελαφρώς (μετά την απομάκρυνση των ισοϋψών της ταχύτητας U (Σχήμα 4.23), παρατηρείται συγκέντρωσή τους).



Σχήμα 4.26 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 5^ο και 6^ο εμπόδιο της Διάταξης Α

4.2 Διάταξη Β

Το πεδίο ροής της ταχύτητας, καταγράφεται στο επίπεδο xy , που βρίσκεται στο κέντρο του πλάτους της διάταξης (Σχήμα 4.27), και αφού η διάταξη είναι τοποθετημένη στη μέση της αεροδυναμικής σήραγγας, το επίπεδο συμπίπτει και με το κέντρο του πλάτους της αεροδυναμικής σήραγγας ($span$).



Σχήμα 4.27 Σχηματική Απεικόνιση Επιπέδου Καταγραφής Πεδίου Ταχυτήτων της Διάταξης Β

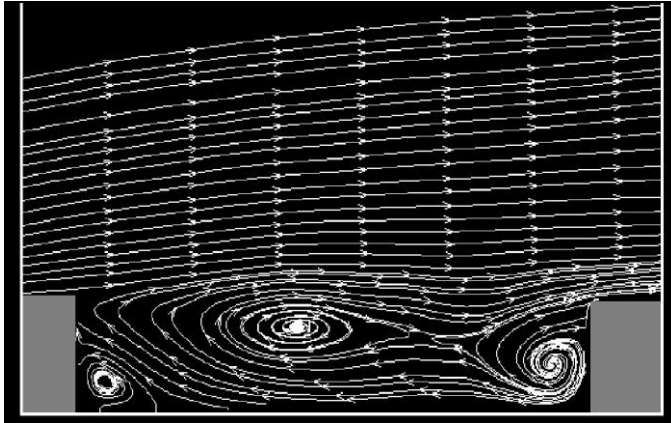
Το πεδίο ταχυτήτων καταγράφηκε σε κάθε κοιλότητα ανάμεσα στα στοιχεία της επιφανειακής τραχύτητας ξεχωριστά. Στο Σχήμα 4.27 φαίνεται ο τρόπος που γίνεται η τοποθέτηση των αξόνων, καθώς και η κατεύθυνση της ροής ως προς αυτούς.

Υπενθυμίζεται ότι τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας της Διάταξης Β είναι:

	Μήκος Διάταξης L_k (mm)	Πλάτος Διάταξης W_k (mm)	Πλάτος Εμποδίου l_k (mm)	Μήκος Εμποδίου w_k (mm)	Ύψος Εμποδίου k (mm)	Μήκος κοιλότητας w (mm)	Pitch Ratio w/k
Διάταξη Β	160	80	8	80	5	30	6

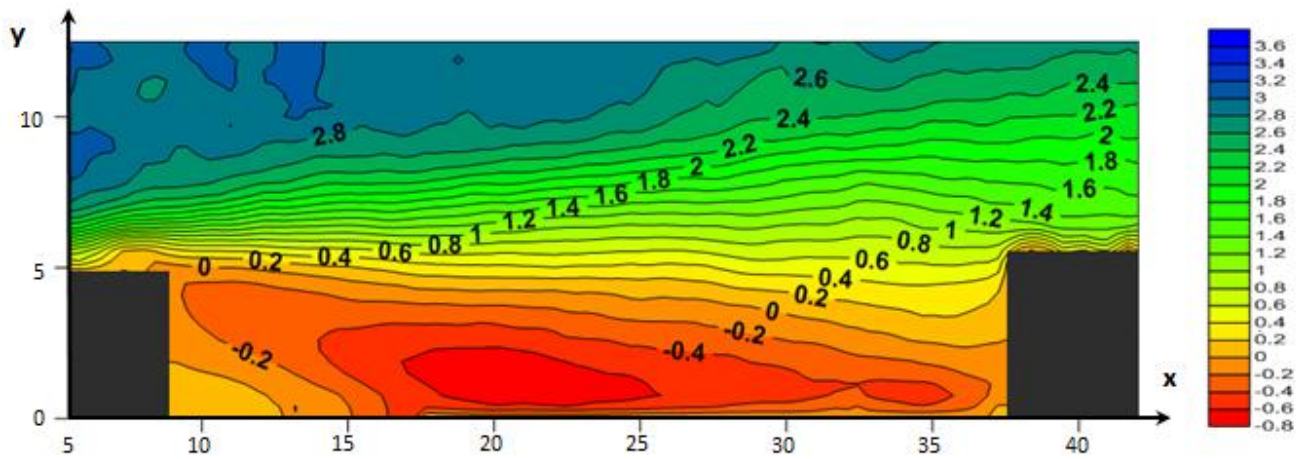
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά Μεγέθη της Διάταξης Β της Επιφανειακής Τραχύτητας

Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο

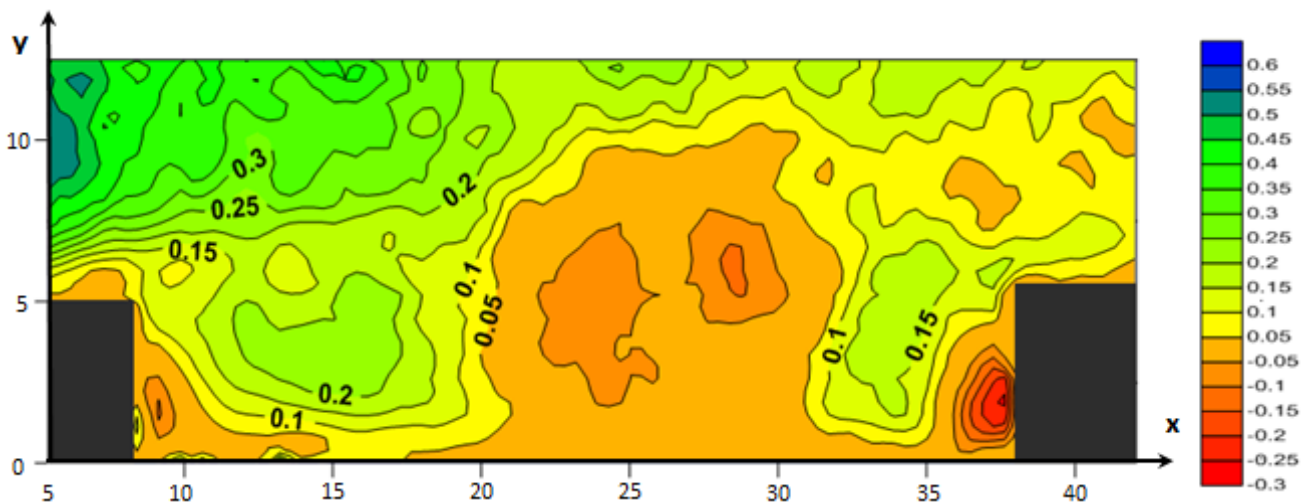


Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28, ανάμεσα στο 1^ο και το 2^ο εμπόδιο, δημιουργούνται τρεις φουσαλίδες ανακυκλοφορίας. Η πρώτη φουσαλίδα, που βρίσκεται στην κάτω κατάντι γωνία του 1^{ου} εμποδίου, έχει αριστερόστροφη φορά. Στη συνέχεια φαίνεται να σχηματίζεται μια μεγάλη ζώνη ανακυκλοφορίας που μοιάζει να προκύπτει από επαλληλία δύο φουσαλίδων ανακυκλοφορίας, ίδιας (δεξιόστροφης) φοράς. Η ροή πάνω από τα εμπόδια έχει ανοδική πορεία.

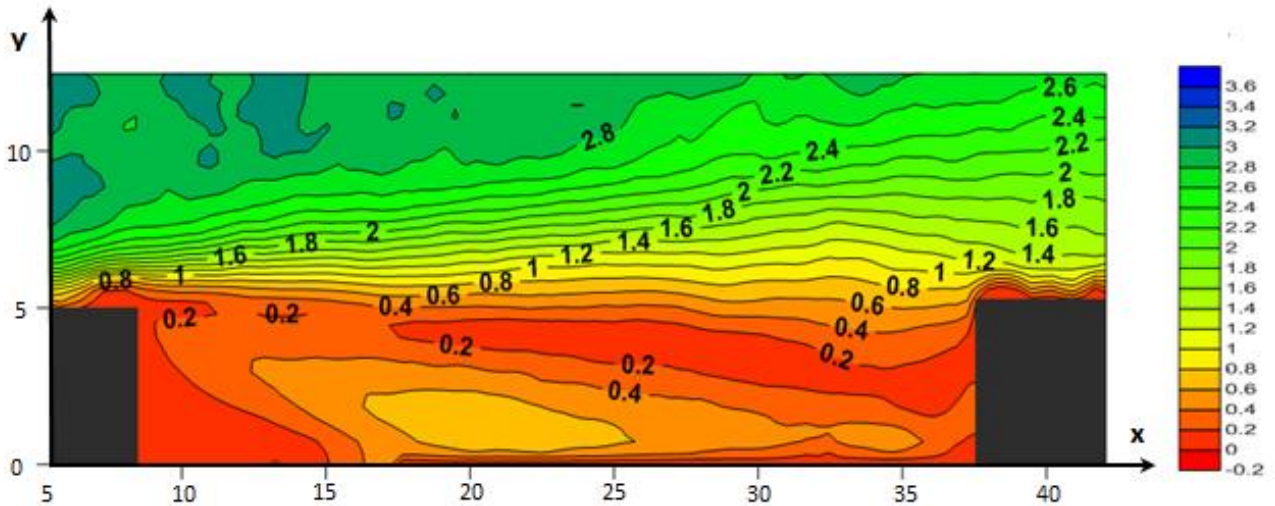
Σχήμα 4.28 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 1^ο και το 2^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.29 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.30 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.31 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 1^o και 2^o εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2} - \text{Μέτρο Ταχύτητας}$)

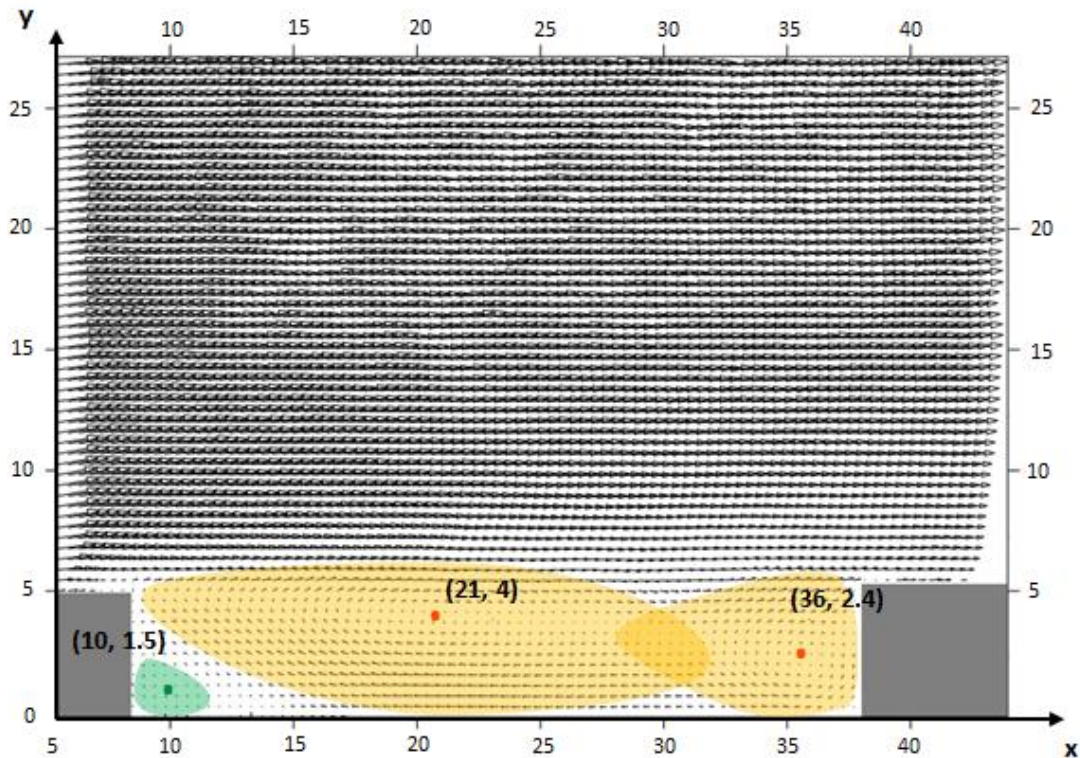
Στο Σχήμα 4.29, η μέγιστη τιμή της ταχύτητας U στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζεται πάνω από το 1^o εμπόδιο, σε μια απόσταση 9 mm περίπου από το τοίχωμα της κοιλότητας. Η ταχύτητα, όπως και πριν, λαμβάνει θετικές τιμές στο πάνω μέρος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, που σταδιακά μειώνονται, λόγω της κλίσης της ταχύτητα. Τα σημεία, όπου η ταχύτητα, λόγω της ανακυκλοφορίας, γίνεται πλήρως κάθετη απαρτίζουν την ισοϋψή $U = 0$, και κάτω από αυτή, η ταχύτητα κινείται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής και οι ισοϋψείς λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Σε αυτή την κοιλότητα υπάρχουν δύο μεγάλες φουσαλίδες αποκόλλησης, όμως λόγω του τρόπου με τον οποίο ενώνονται, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στη μορφή των ισοϋψών της ταχύτητας U . Η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, δείχνει να επηρεάζει τη ροή μέχρι και 10 - 11 mm από το κάτω τοίχωμα. Η μέγιστη θετική τιμή ($2.6U_e$) και η μέγιστη αρνητική ($-0.73U_e$) της ταχύτητας U στη ζώνη ανακυκλοφορίας, εμφανίζονται στα ακραία σημεία, στο πάνω και κάτω μέρος της φουσαλίδας.

Στο Σχήμα 4.30, η μέγιστη τιμή της V στη γειτνίαση των εμποδίων, παρουσιάζεται πάνω από την κορυφή του 1^{ou} εμποδίου, ενώ μεγάλες σχετικά (θετικές) τιμές της V παρουσιάζονται στην άμεση περιοχή κατάντι περιοχή του 1^{ou} εμποδίου ($0.24U_e$), όπου η ροή λόγω της δίνης κινείται ανοδικά και στην άμεση περιοχή ανάντι του 2^{ou} εμποδίου ($0.18U_e$), όπου η ροή προσκρούει σε αυτό και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Τέλος, λόγω της πορείας στην οποία «εξαναγκάζεται» η ροή εξαιτίας της ζώνης ανακυκλοφορίας, παρουσιάζονται σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές της V , στην άμεση ανάντι περιοχή του 2^{ou} εμποδίου ($-0.25U_e$), περίπου 1.5 mm από το κάτω τοίχωμα.

Στο Σχήμα 4.31, η ταχύτητα, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

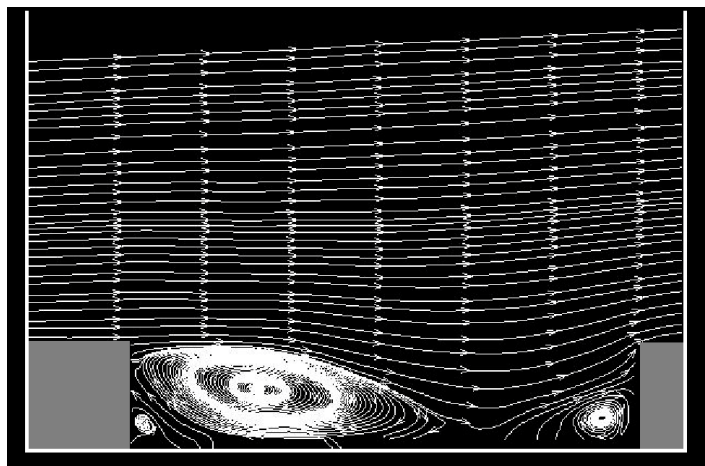
Στο Σχήμα 4.32, τονίζονται οι περιοχές ανακυκλοφορίας που είναι ορατές και στο Σχήμα 4.28 και τα κέντρα τους καταγράφονται.

Στις κορυφές των εμποδίων, μπορούν να φανούν κάποιες κινήσεις της ροής, που δείχνουν επιβράδυνση. Στα ίδια σημεία οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.29) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση.



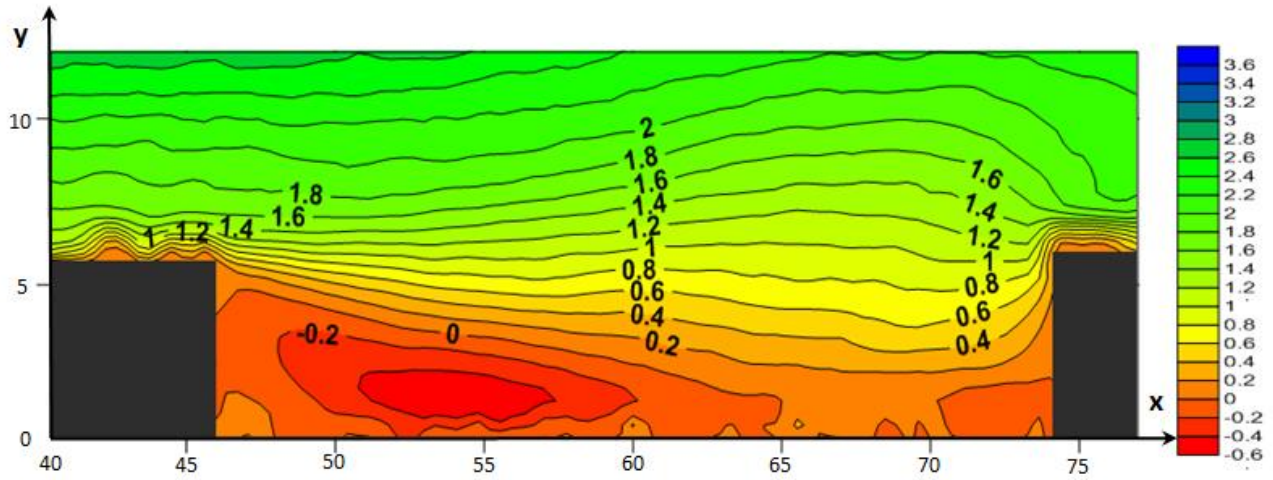
Σχήμα 4.32 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο της Διάταξης B

Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο

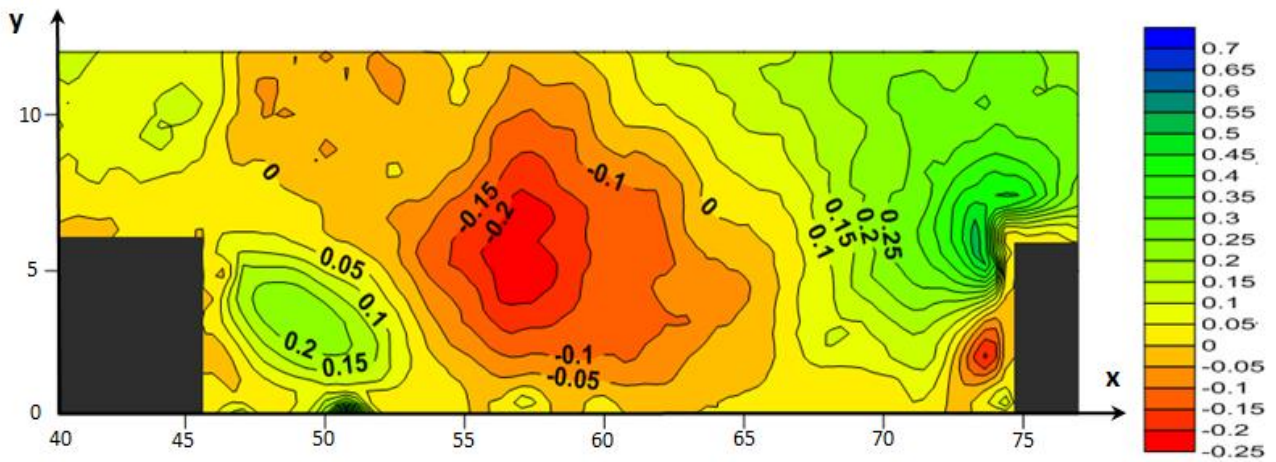


Σχήμα 4.33 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 2^ο και το 3^ο εμπόδιο

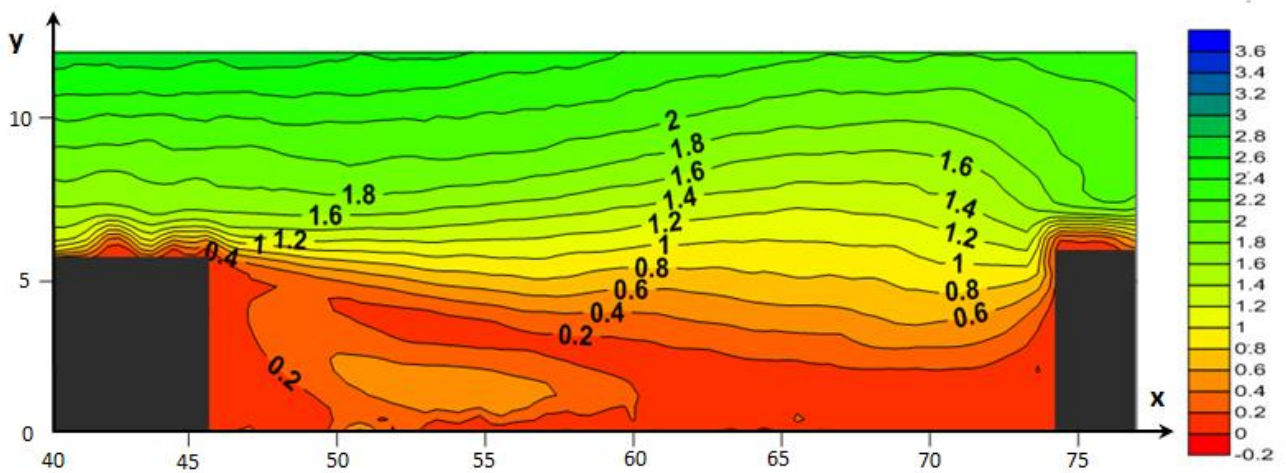
Στο Σχήμα 4.33, φαίνεται ότι ανάμεσα στο 2^ο και το 3^ο εμπόδιο, δημιουργείται μία κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας δεξιόστροφης φοράς. Η ροή, μετά την κύρια ζώνη, φαίνεται να επανακολλάται στο τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας. Μία δευτερεύουσα φυσαλίδα ανακυκλοφορίας, βρίσκεται στην κάτω κατάντι γωνία του 2^{ου} εμποδίου, και έχει αριστερόστροφη φορά, και μία δεύτερη σχηματίζεται στην κάτω ανάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου με δεξιόστροφη φορά. Η ροή πάνω από τα εμπόδια έχει ελαφρώς ανοδική πορεία με εξαίρεση μια περιοχή στο σημείο επανακόλλησης.



Σχήμα 4.34 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.35 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



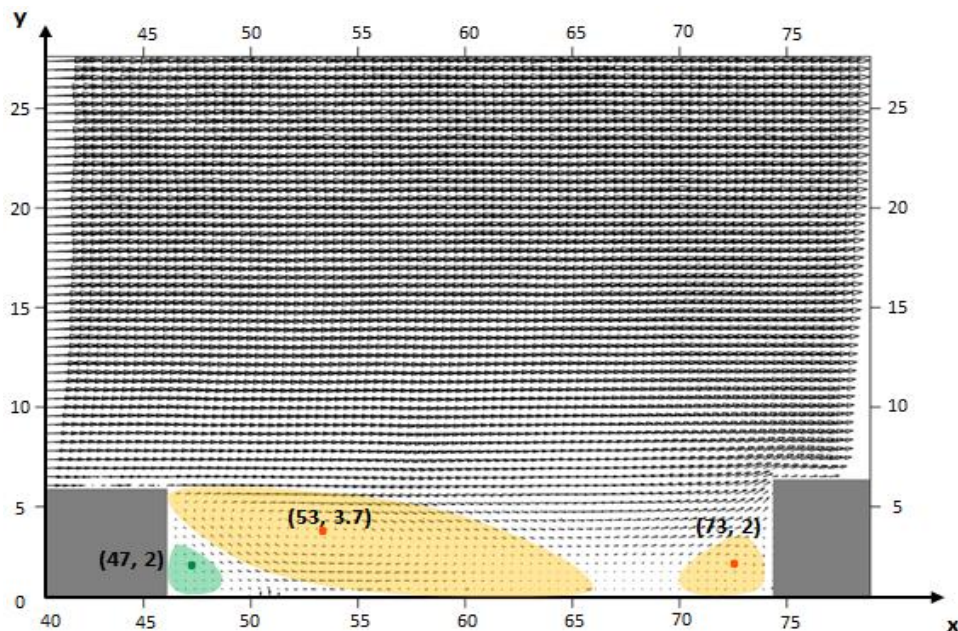
Σχήμα 4.36 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 2° και 3° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο Ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.34, η ταχύτητα παίρνει και πάλι αρνητική κοντά στο τοίχωμα της κοιλότητας λόγω της «αναστροφής» της ροής εξαιτίας της ζώνης ανακυκλοφορίας με τη μέγιστη αρνητική τιμή να εμφανίζεται σε μια περιοχή κατάντι του 2^{ου} εμποδίου, λίγο πριν το μέσο της κοιλότητας (-0.53U_e). Η ροή φαίνεται να επηρεάζεται από τα εμπόδια μέχρι και μια απόσταση 16 – 17 mm από το κάτω τοίχωμα (2.8U_e).

Στο Σχήμα 4.35, η μέγιστη τιμή της V στη γειτνίαση των εμποδίων, παρουσιάζεται πάνω από την ανάντι κορυφή του 3^{ου} εμποδίου, όπου η ροή επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα (0.52U_e), ενώ μεγάλες θετικές τιμές της V παρουσιάζονται και στην άμεση περιοχή κατάντι του 2^{ου} εμποδίου (0.24U_e), όπου η ζώνη ανακυκλοφορίας «σπρώχνει τη ροή» προς τα πάνω. Αντίστοιχα, περίπου στη μέση της κοιλότητας, διακρίνεται μια αρκετά μεγάλη περιοχή με μεγάλες αρνητικές τιμές της V (-0.24U_e), λόγω της καθοδικής πλέον πορείας της ροής στη ζώνη ανακυκλοφορίας. Τέλος, λόγω της μικρής ζώνης ανακυκλοφορίας στην κάτω ανάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου, παρουσιάζονται σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές της V (-0.2U_e), στην περιοχή, περίπου 2 mm από το κάτω τοίχωμα.

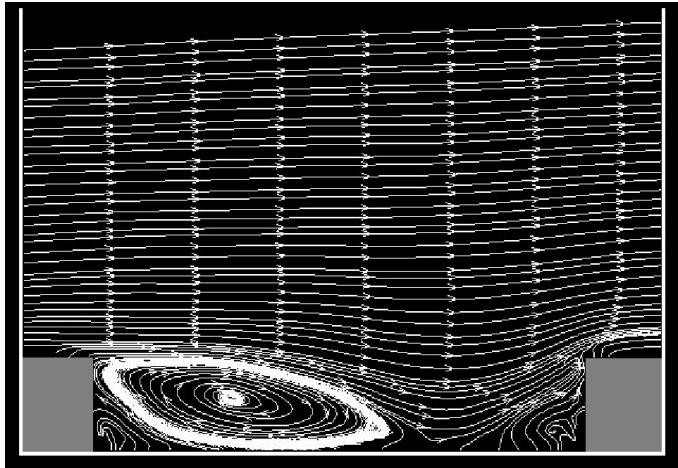
Στο Σχήμα 4.36, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισουΐση καμπύλη U = 0, και μεγαλώνει σταδιακά απομακρυνόμενη από αυτά.

Στο Σχήμα 4.37, τονίζονται οι περιοχές ανακυκλοφορίας (Σχήμα 4.33) και τα κέντρα τους καταγράφονται. Το σημείο επανακόλλησης της ροής εντοπίζεται σε απόσταση περίπου, 4k κατάντι του 2^{ου} εμποδίου (x = 66). Στην κορυφή των εμποδίων, φαίνονται κάποιες κινήσεις της ροής, που δείχνουν επιβράδυνση. Στα ίδια σημεία οι ισουΐσες της ταχύτητας U (Σχήμα 4.34) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση. Στην περίπτωση του 4^{ου} εμποδίου, η ροή φαίνεται να επιταχύνεται έντονα, αφού παρατηρείται έντονη συγκέντρωσή των ισουΐσών της ταχύτητας U (Σχήμα 4.34).



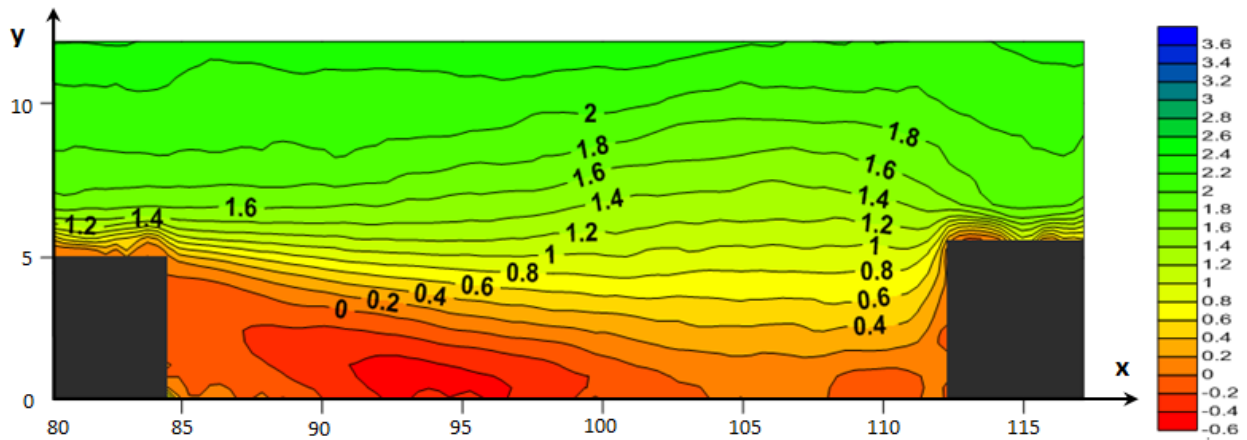
Σχήμα 4.37 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο της Διάταξης Β

Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο

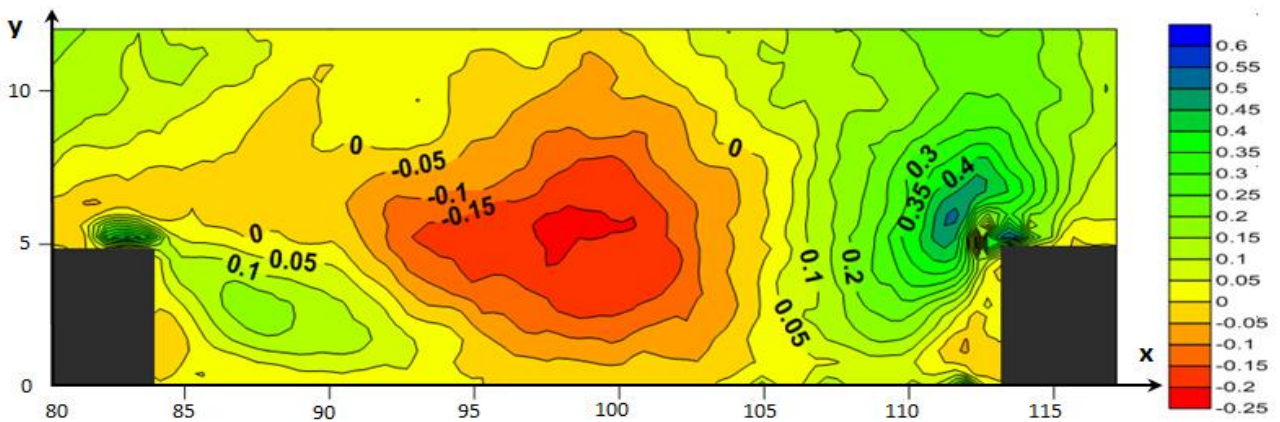


Στο Σχήμα 4.38, φαίνεται ότι ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο, δημιουργείται μία κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας. Η ροή, επανακολλάται στο τοίχωμα της σήραγγας. Από τις δομές της ροής, φαίνεται ότι ίσως σχηματίζονται δύο δευτερεύουσες φυσαλίδες ανακυκλοφορίας, στην κάτω κατάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου και στην κάτω ανάντι γωνία του 4^{ου}, χωρίς όμως να διακρίνονται καλά. Η ροή πάνω από τα εμπόδια έχει ελαφρώς ανοδική πορεία με εξαίρεση μια περιοχή στο σημείο επανακόλλησης.

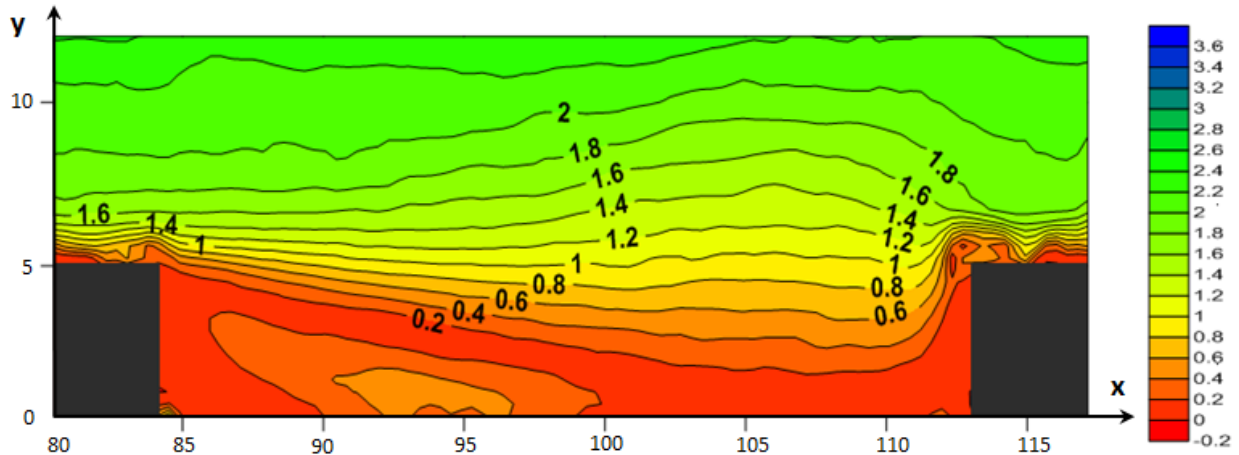
Σχήμα 4.38 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.39 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.40 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.41 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο $((U^2 + V^2)^{1/2} - \text{Μέτρο ταχύτητας})$

Στο Σχήμα 4.39, η ταχύτητα, λαμβάνει θετικές τιμές στο πάνω μέρος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, που σταδιακά μειώνονται, λόγω της κλίσης της ταχύτητα, μέχρι που η ταχύτητα, λόγω της ανακυκλοφορίας, γίνεται πλήρως κάθετη, οπότε η συνιστώσα U μηδενίζεται (ισοϋψής $U = 0$). Στο κάτω μέρος της ζώνης ανακυκλοφορίας, λόγω της «αναστροφής» της ροής, η ταχύτητα κινείται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής και οι ισοϋψείς λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, δείχνει να επηρεάζει τη ροή μέχρι και 18 - 19 mm από το κάτω τοίχωμα. Η μέγιστη θετική τιμή ($3U_e$) και η μέγιστη αρνητική ($-0.5U_e$) της ταχύτητας U στη ζώνη ανακυκλοφορίας, εμφανίζονται στα ακραία σημεία, στο πάνω και κάτω μέρος της φυσαλίδας.

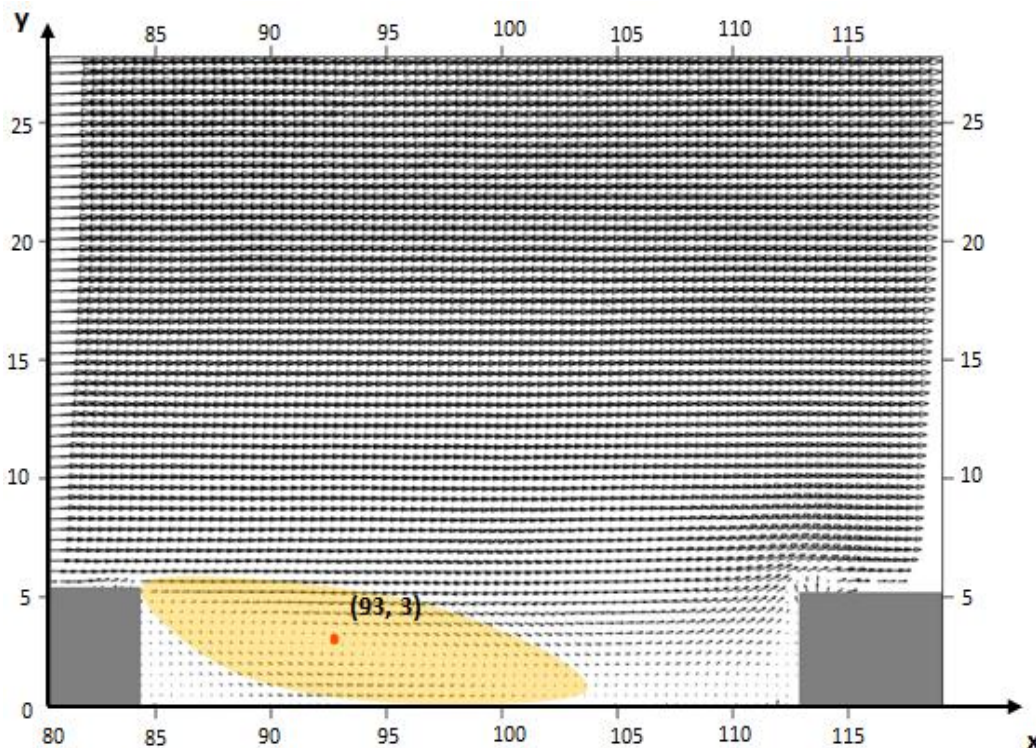
Στο Σχήμα 4.40, η μέγιστη τιμή της V στη γειτνίαση των εμποδίων, παρουσιάζεται πάνω από την ανάντι κορυφή του 4^{ου} εμποδίου ($0.51U_e$), όπου η ροή συναντά το 4^ο εμπόδιο και επιταχύνεται, ενώ μεγάλες θετικές τιμές της V παρουσιάζονται και στην άμεση περιοχή κατάντι περιοχή του 3^{ου} εμποδίου ($0.18U_e$), όπου η ζώνη ανακυκλοφορίας «σπρώχνει τη ροή» (επιταχύνει) προς τα πάνω. Αντίστοιχα, περίπου στη μέση της κοιλότητας, διακρίνεται μια αρκετά μεγάλη περιοχή με μεγάλες αρνητικές τιμές της V ($-0.22U_e$), λόγω της καθοδικής πλέον πορείας της ροής στη ζώνη ανακυκλοφορίας.

Στο Σχήμα 4.41, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.42, τονίζονται οι περιοχές ανακυκλοφορίας που είναι ορατές και στο Σχήμα 4.38 και τα κέντρα τους καταγράφονται. Το σημείο επανακόλλησης της ροής εντοπίζεται σε απόσταση 4k (4 ύψη εμποδίου) κατάντι του 3^{ου} εμποδίου ($x = 104$).

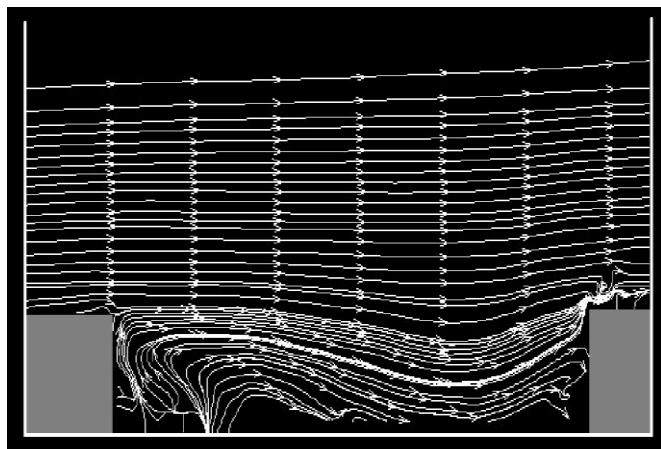
Στην κορυφή των εμποδίων, μπορούν να φανούν κάποιες κινήσεις της ροής όπου η ροή φαίνεται να έχει ανοδική πορεία. Σε αυτά τα σημεία, οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.39) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση και ταυτόχρονα οι ισοϋψείς της ταχύτητας V (Σχήμα 4.40) παίρνουν μεγαλύτερες τιμές. Στην περίπτωση της ανάντι γωνίας της

κορυφής του 4^{ου} εμποδίου, η ροή φαίνεται να επιταχύνεται, αφού παρατηρείται έντονη συγκέντρωση των ισοϋψών της ταχύτητας U, πάνω από την κορυφή του 4^{ου} εμποδίου (Σχήμα 4.39 και 4.41).



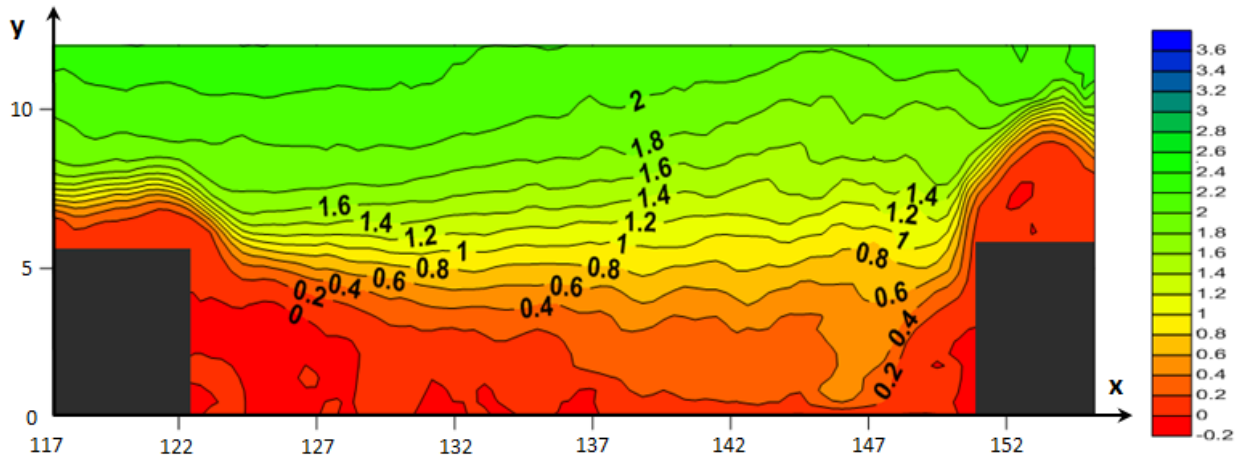
Σχήμα 4.42 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο της Διάταξης B

Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο

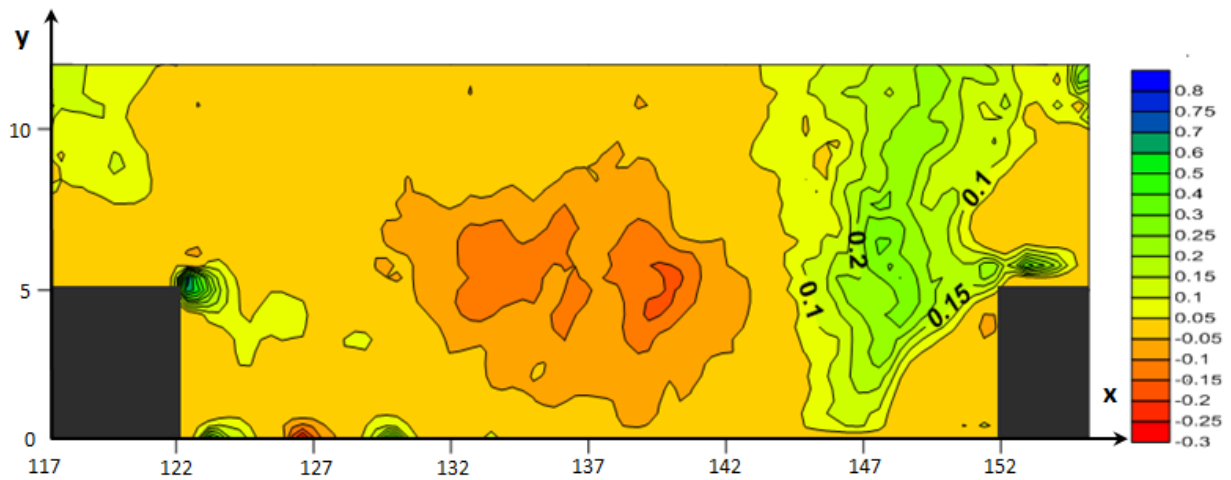


Στο Σχήμα 4.43, στην κοιλότητα ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο δε φαίνεται να υπάρχει αποκόλληση. Η δομή της ροής σε αυτό το σημείο μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση της ροής μέσα στην κοιλότητα, κοντά στο εξεταζόμενο επίπεδο στα 3 σημεία που εντοπίζεται αποκόλληση στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις. Οι γραμμές ροής φαίνεται να εκβάλλουν από ένα σημείο.

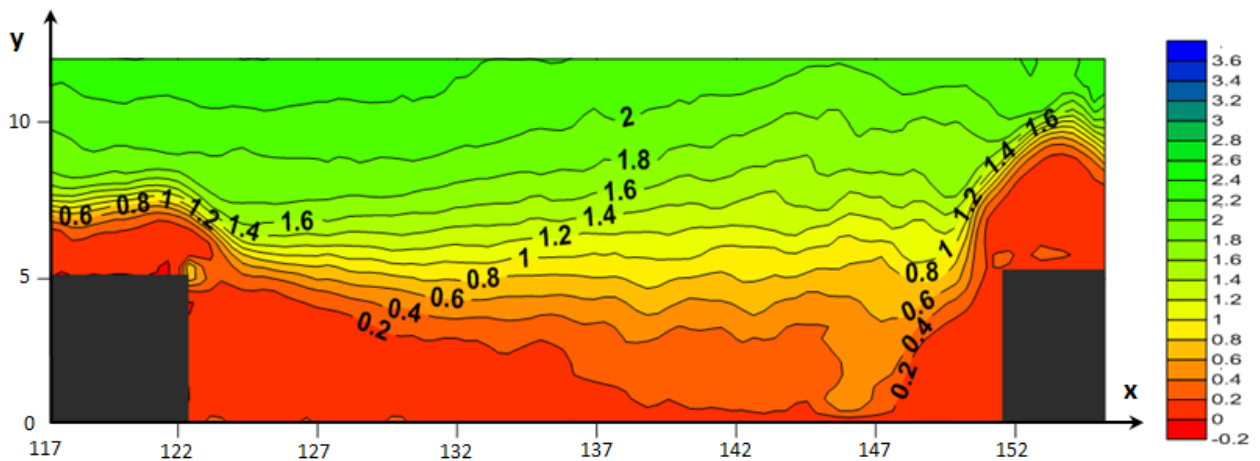
Σχήμα 4.43 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 4^ο και το 5^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.44 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.45 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



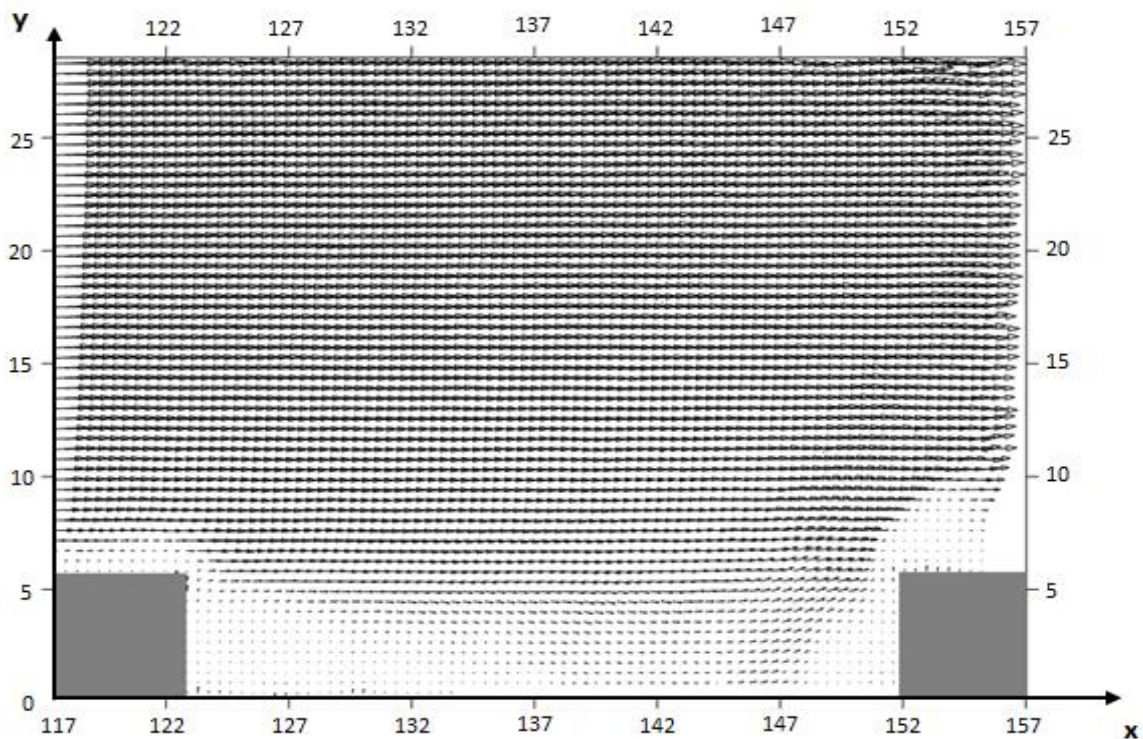
Σχήμα 4.46 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.44, η ταχύτητα φαίνεται να μεγαλώνει σταδιακά. Σε αυτή την περίπτωση, η ταχύτητα U , δε φαίνεται να κατανέμεται τόσο ομαλά όσο στις προηγούμενες περιπτώσεις. Η ταχύτητα παίρνει πολύ μικρές αρνητικές τιμές (σχεδόν μηδενικές) σε μια περιοχή μπροστά από το 4^ο εμπόδιο. Στη ροή δε σχηματίζεται φυσαλίδα ανακυκλοφορίας στο εξεταζόμενο επίπεδο, παρόλο που οι γραμμές φαίνονται να «καμπυλώνουν». Τα σημεία όπου η ταχύτητα γίνεται πλήρως κάθετη, απαρτίζουν την ισοϋψή καμπύλη $U = 0$.

Στο Σχήμα 4.45, η μέγιστη τιμή της V στη γειτνίαση των εμποδίων, παρουσιάζεται πάνω από την κατάντι κορυφή του 4^{ου} εμποδίου, ενώ μεγάλες θετικές τιμές της V παρουσιάζονται και στην άμεση περιοχή γύρω από το 5^ο εμπόδιο. Αντίστοιχα, περίπου στη μέση της κοιλότητας, διακρίνεται μια αρκετά μεγάλη περιοχή με σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές της V .

Στο Σχήμα 4.46, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Οι ισοϋψείς φαίνεται να κατανέμονται ομαλά.

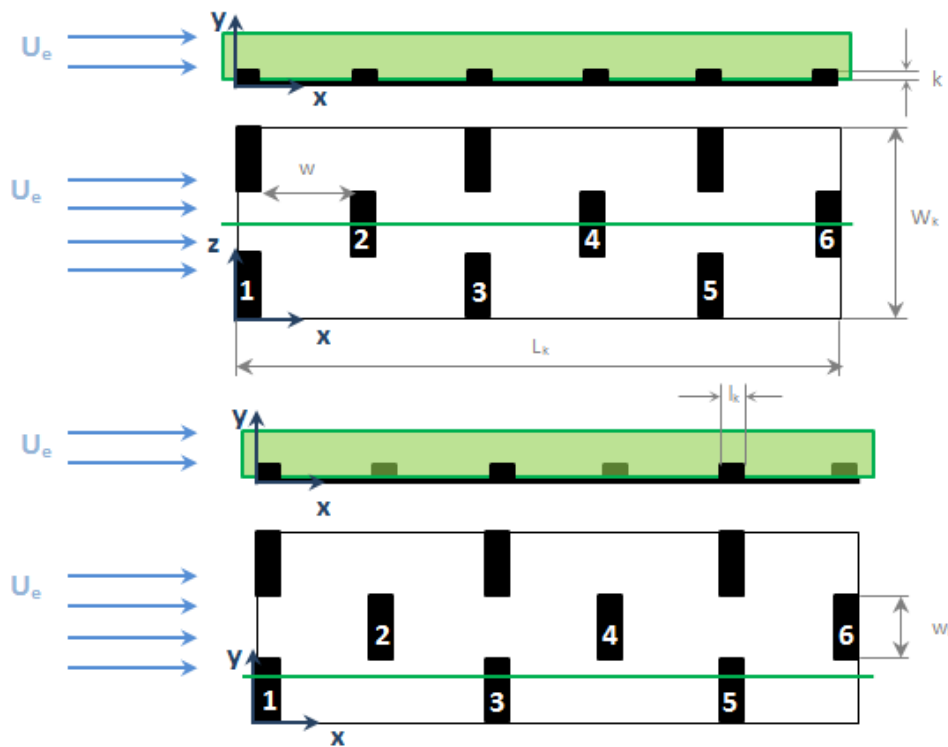
Στο Σχήμα 4.47, φαίνεται ότι γενικά στις περιοχές γύρω από τα εμπόδια, αλλά και κοντά στο τοίχωμα, τα διανύσματα της ταχύτητας είναι πολύ μικρά, δηλαδή παρατηρείται επιβράδυνση. Σε αυτά τα σημεία, οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.44) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση και ταυτόχρονα οι ισοϋψείς της ταχύτητας V (Σχήμα 4.40) παίρνουν μεγαλύτερες τιμές.



Σχήμα 4.47 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο της Διάταξης Β

4.3 Διάταξη Γ

Το πεδίο ροής της ταχύτητας, καταγράφεται σε δύο επίπεδα xy . Το πρώτο βρίσκεται στο κέντρο του πλάτους της διάταξης (Σχήμα 4.48), και αφού η διάταξη είναι τοποθετημένη στη μέση της αεροδυναμικής σήραγγας, το επίπεδο συμπίπτει και με το κέντρο του πλάτους ($span$) της αεροδυναμικής σήραγγας. Το δεύτερο βρίσκεται σε απόσταση $W_k/4$ από το ένα άκρο της διάταξης (Σχήμα 4.48), που για σκοπούς διευκόλυνσης, είναι αυτό που βρίσκεται πιο κοντά στην πλευρά της αεροδυναμικής σήραγγας όπου τοποθετείται η CCD – Camera δηλαδή 198 mm από αυτό το άκρο, αφού η διάταξη είναι τοποθετημένη στη μέση της αεροδυναμικής σήραγγας.



Σχήμα 4.48 Σχηματική Απεικόνιση Επιπέδου xy σε $W_k/2$ (πάνω) και $W_k/4$ (κάτω) Καταγραφής Πεδίου Ταχυτήτων της Διάταξης Γ

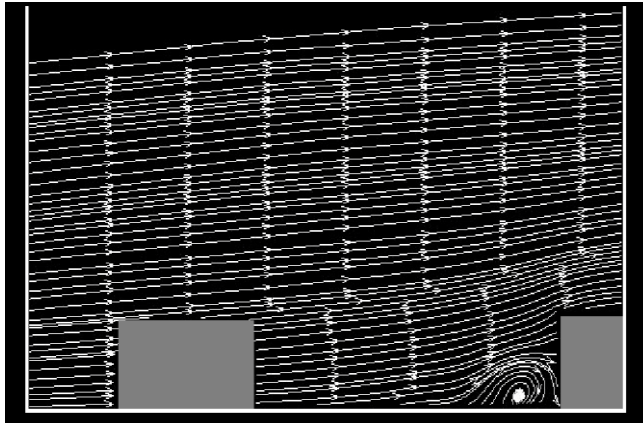
Το πεδίο ταχυτήτων καταγράφηκε σε κάθε κοιλότητα ανάμεσα στα στοιχεία της επιφανειακής τραχύτητας ξεχωριστά. Στο Σχήμα 4.48 φαίνεται ο τρόπος που γίνεται η τοποθέτηση των αξόνων, καθώς και η κατεύθυνση της ροής ως προς αυτούς.

	Μήκος Διάταξης L_k (mm)	Πλάτος Διάταξης W_k (mm)	Πλάτος Εμποδίου l_k (mm)	Μήκος Εμποδίου w_k (mm)	Ύψος Εμποδίου k (mm)	Μήκος κοιλότητας w (mm)	Pitch Ratio w/k
Διάταξη Γ	148	80	8	30	5	20	4

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη της Διάταξης Γ της Επιφανειακής Τραχύτητας

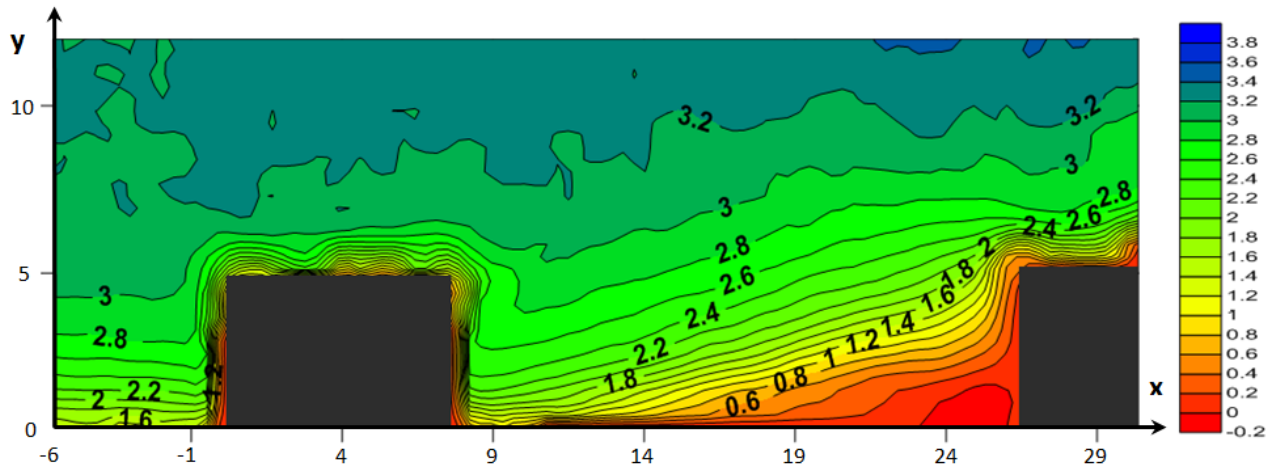
Επίπεδο $xy: W_h/2$:

Περιοχή ανάμεσα στο 1° και 2° εμπόδιο

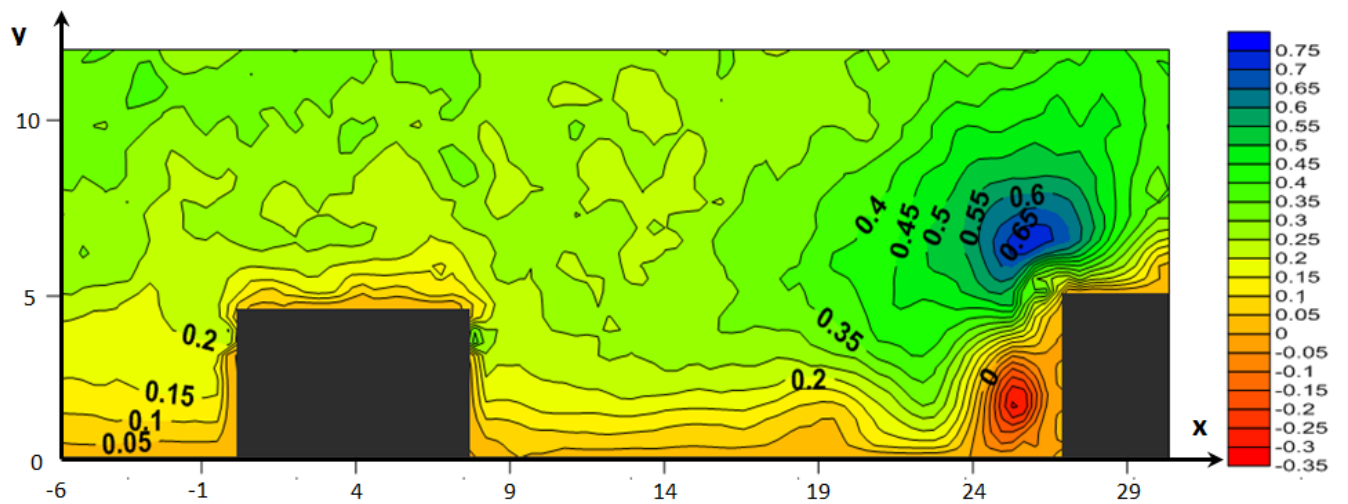


Στο επίπεδο xy στη μέση της διάταξης, η ρή περνά πίσω από το 1° εμπόδιο και «χτυπάει» στο 2° . Στο Σχήμα 4.49, ρή φαίνεται να παρουσιάζει ανοδική πορεία, εξαιτίας της παρουσίας του δεύτερου εμποδίου, στο οποίο προσκρούει και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Στην κάτω ανάντι γωνία του 2° εμποδίου, σχηματίζεται μια μικρή ζώνη ανακυκλοφορίας με δεξιόστροφη φορά.

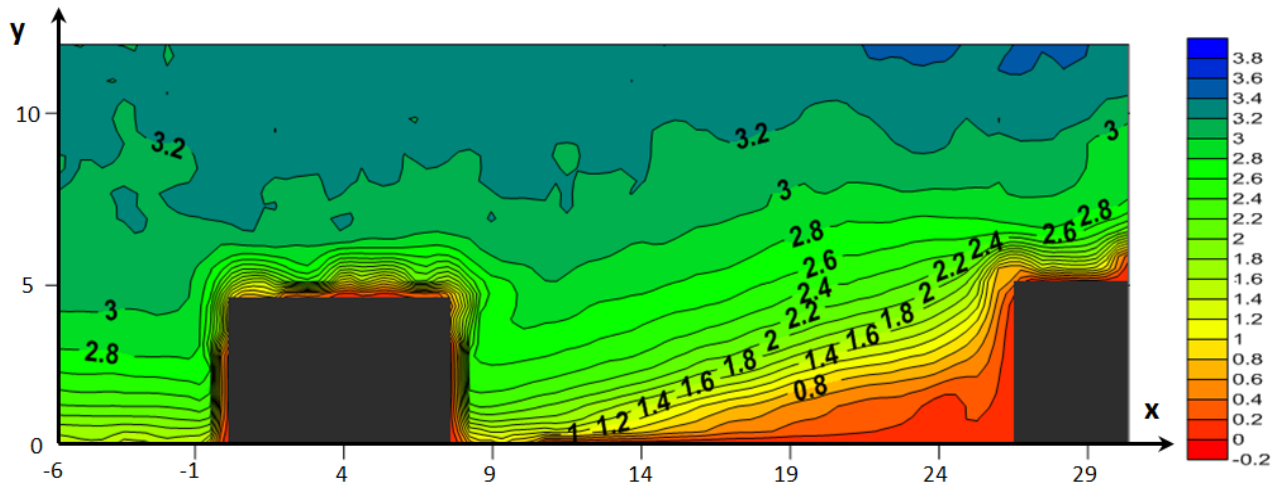
Σχήμα 4.49 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 1° και το 2° εμπόδιο



Σχήμα 4.50 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.51 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



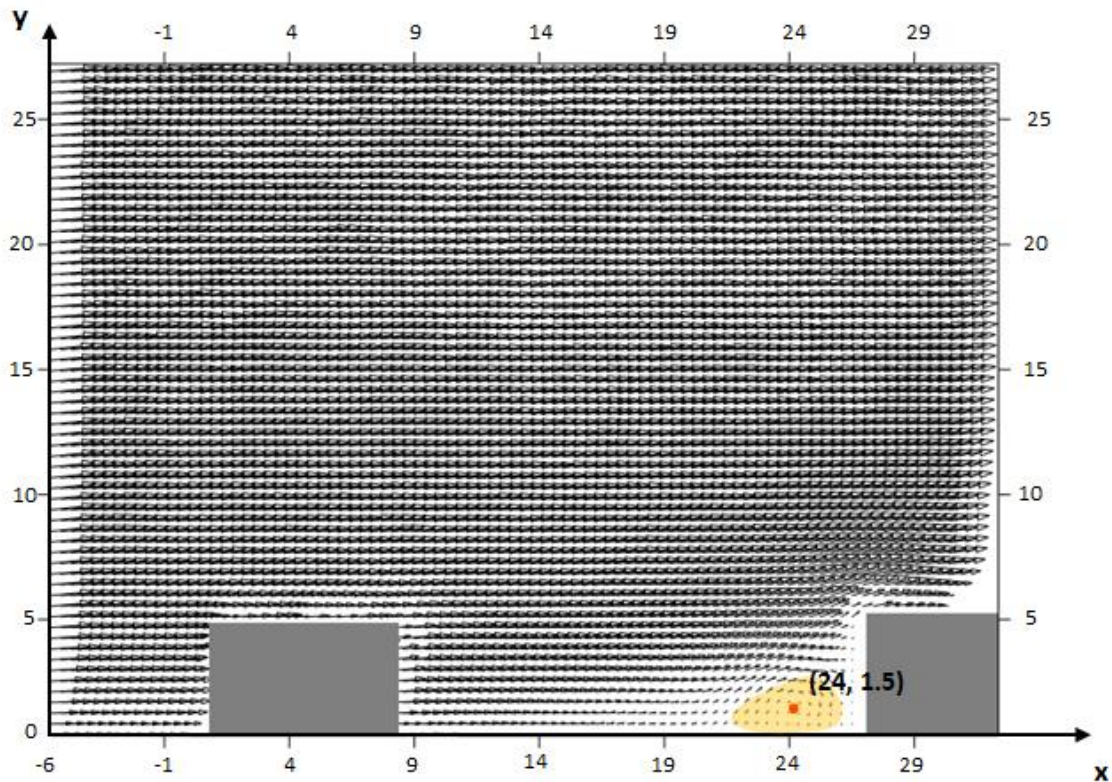
Σχήμα 4.52 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο Ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.50, η ταχύτητα φαίνεται να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U εμφανίζεται πάνω από την κορυφή του 2^{ου} εμποδίου. Αν αγνοηθεί η παρουσία του 1^{ου} εμποδίου και η επηρεαζόμενη ζώνη γύρω του, φαίνεται ότι η ροή έχει παίρνει μεγάλες τιμές σε πιο χαμηλό ύψος σε σχέση με προηγούμενες περιπτώσεις, κάτι που δείχνει επιτάχυνσή της, καθώς αυτή περνάει ανάμεσα στο 1^ο εμπόδιο και το απέναντί του. Στη συνέχεια παρατηρείται επιβράδυνση καθώς η ροή πλησιάζει το 2^ο εμπόδιο. Η ροή, διατηρεί πιο υψηλή ταχύτητα στην άμεση περιοχή των εμποδίων ($3U_e$), ενώ στην κάτω ανάντι γωνία του 2^{ου} εμποδίου, όπου σχηματίζεται μια μικρή φυσαλίδα ανακυκλοφορίας, η ταχύτητα U , φτάνει σε στην ελάχιστη τιμή $U = 0$ και λόγω της αναστροφής, παίρνει αρνητικές τιμές που όμως είναι πολύ μικρές ($-0.1U_e$).

Στο Σχήμα 4.51, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια μεγάλη περιοχή στην ανάντι κορυφή του 2^{ου} εμποδίου, όπου η ροή «χτυπάει» στο 2^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Σχετικά μεγάλες (αρνητικές) τιμές της V , εμφανίζονται στην άμεση ανάντι περιοχή του 2^{ου} εμποδίου ($-0.22U_e$), περίπου 2 mm από το τοίχωμα, όπου εξαιτίας της ζώνης ανακυκλοφορίας σε αυτή την περιοχή, η ροή κινείται προς τα κάτω.

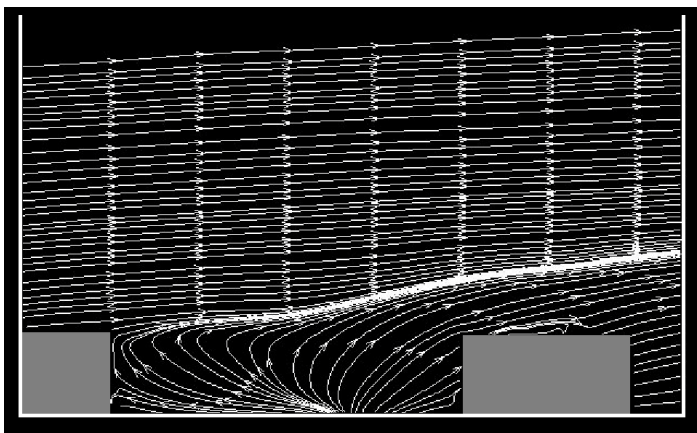
Στο Σχήμα 4.52, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (στο κάτω τοίχωμα κοντά στο 2^ο εμπόδιο), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.53, φαίνεται η περιοχή ανακυκλοφορίας ανάντι του 2^{ου} εμποδίου και το κέντρο της καταγράφεται.



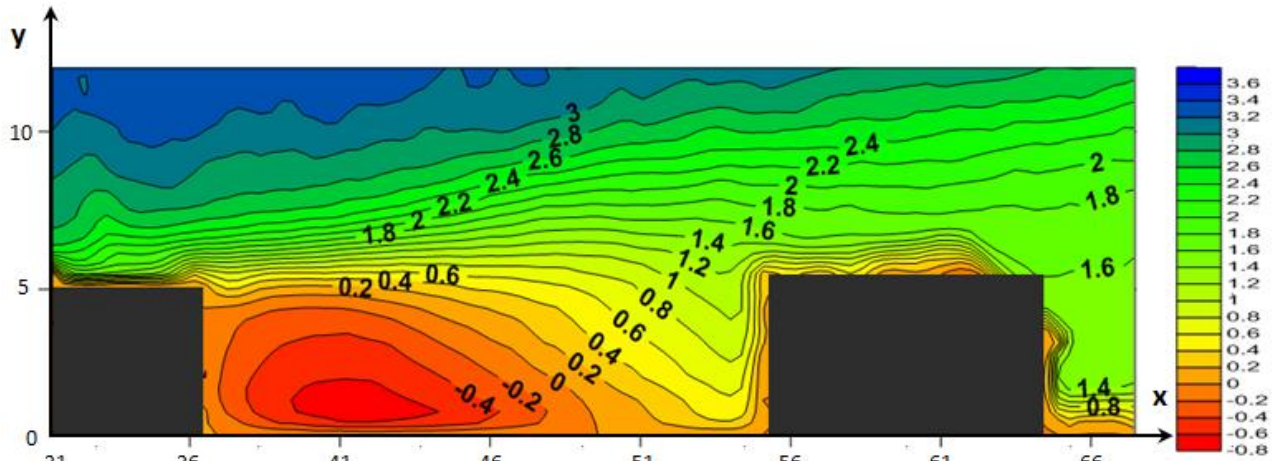
Σχήμα 4.53 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 1° και 2° εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_c/2$

Περιοχή ανάμεσα στο 2° και 3° εμπόδιο

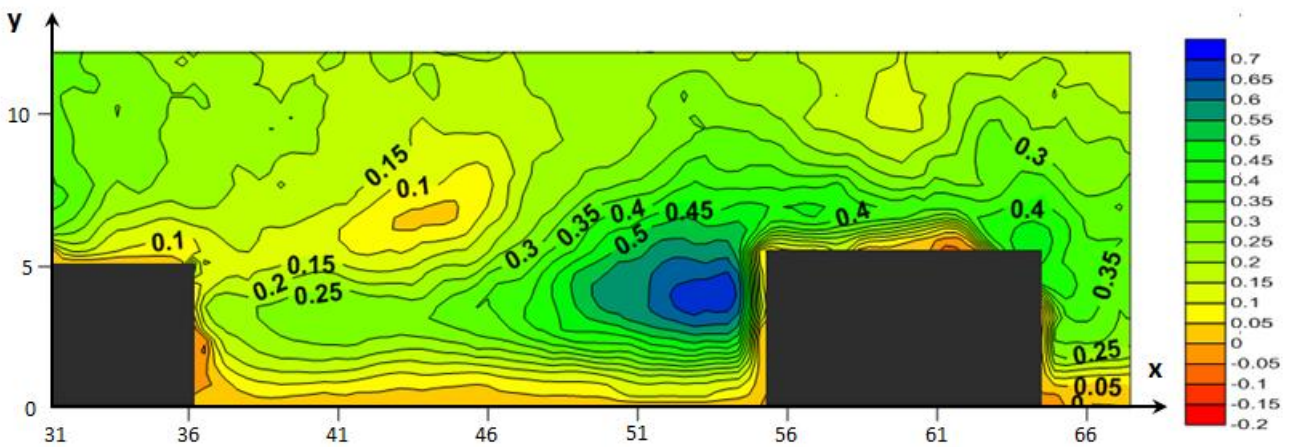


Στο επίπεδο xy που μελετάται, η ροή «χτυπάει» στο 2° εμπόδιο και περνά πίσω από το 3° εμπόδιο. Στο Σχήμα 4.54 δε φαίνεται να υπάρχει αποκόλληση. Η δομή της ροής σε αυτό το σημείο μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση της ροής μέσα στην κοιλότητα, κοντά στο εξεταζόμενο επίπεδο, αφού οι γραμμές ροής φαίνεται να εκβάλλουν από ένα σημείο. Η ροή φαίνεται να έχει ανοδική πορεία.

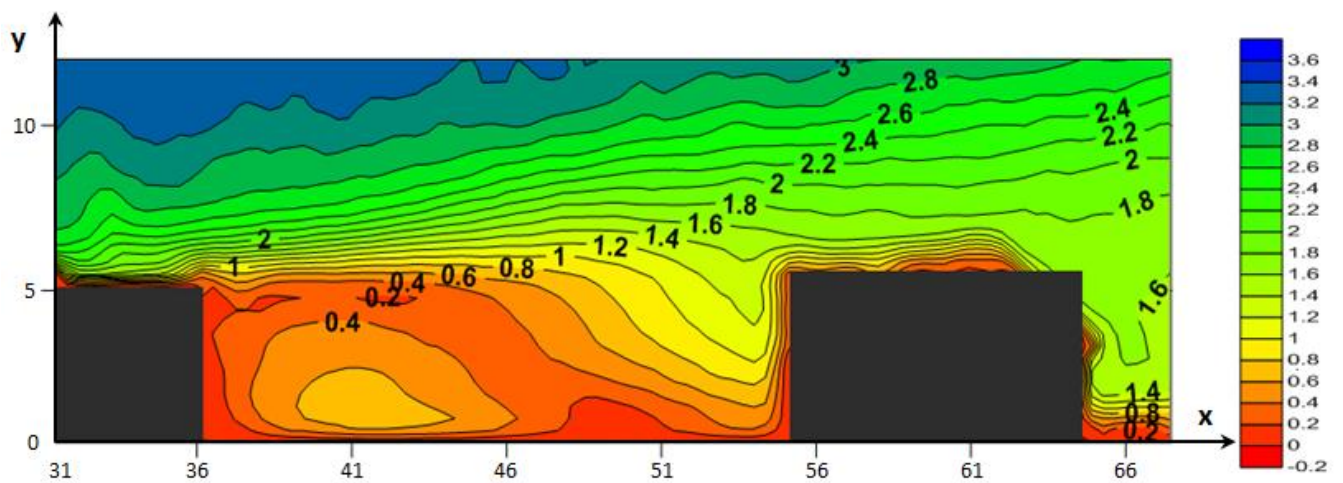
Σχήμα 4.54 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 2° και το 3° εμπόδιο



Σχήμα 4.55 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.56 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



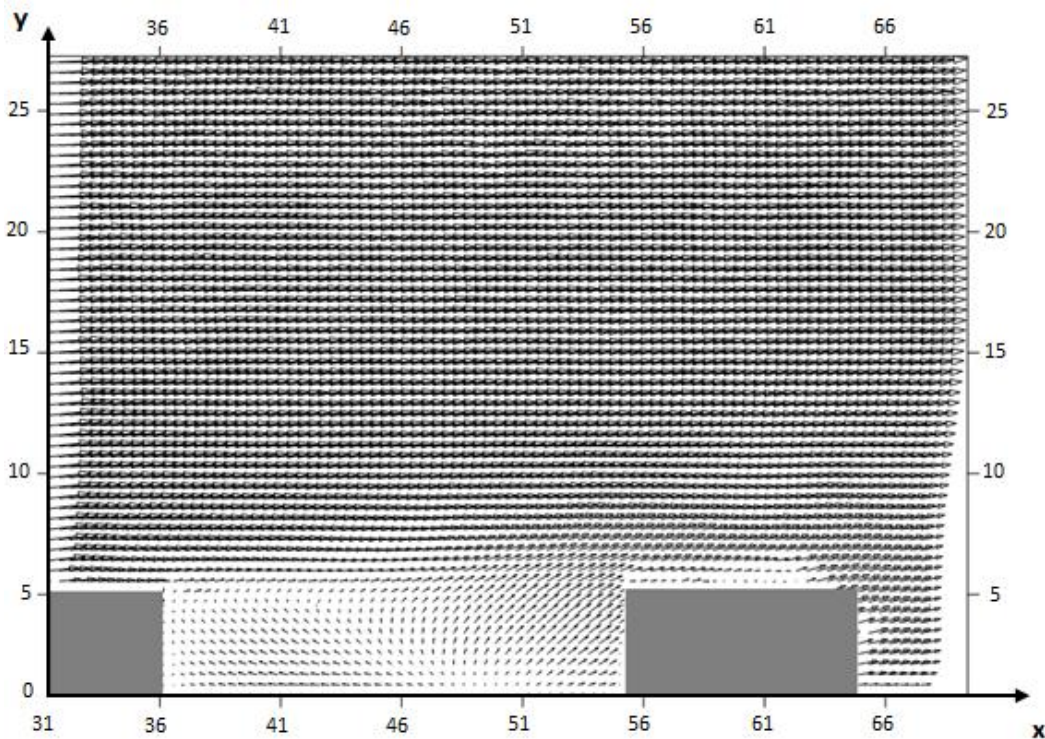
Σχήμα 4.57 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο Ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.55, η ταχύτητα φαίνεται να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U εμφανίζεται πάνω από την κορυφή του 2^{ου} εμποδίου. Η ροή περνώντας ανάμεσα στο 3^ο εμπόδιο, και το απέναντι του (βλέπε Σχήμα 4.48), φαίνεται να επιταχύνεται μέχρι το ύψος του εμποδίου, εφόσον οι ισοϋψείς της U κατάντι του 3^{ου} εμποδίου, μέχρι και για $\gamma = 5$, φαίνεται να παίρνουν μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες στην ανάντι πλευρά του ίδιου εμποδίου. Η ροή, διατηρεί πιο υψηλή ταχύτητα στην άμεση περιοχή των εμποδίων ($3U_e$), που φαίνεται να εκτείνεται μέχρι και 12 - 13 mm πάνω από το κάτω τοίχωμα.

Στο Σχήμα 4.56, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια μεγάλη περιοχή στην ανάντι κορυφή του 3^{ου} εμποδίου, όπου σημειώνονται μεγάλες ταχύτητες V ($0.68U_e$) η ροή δεν μπορεί να περάσει εξ ολοκλήρου ανάμεσα στα εμπόδια και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα.

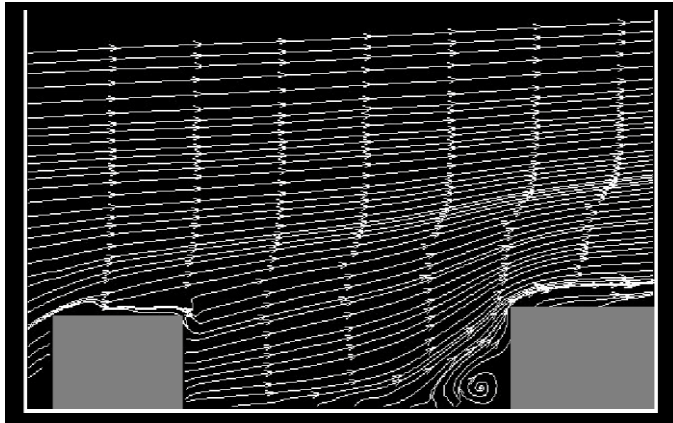
Στο Σχήμα 4.57, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (στο κάτω τοίχωμα κοντά στο 2^ο εμπόδιο), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Η μορφή των ισοϋψών καμπύλων δείχνει επιτάχυνση όταν η ροή περνάει ανάμεσα στο 3^ο εμπόδιο και το απέναντί του.

Στο Σχήμα 4.58, φαίνεται και πάλι αυτό το φαινόμενο, καθότι σε αυτή την περιοχή τα διανύσματα της ταχύτητας έχουν μεγαλύτερο μήκος.



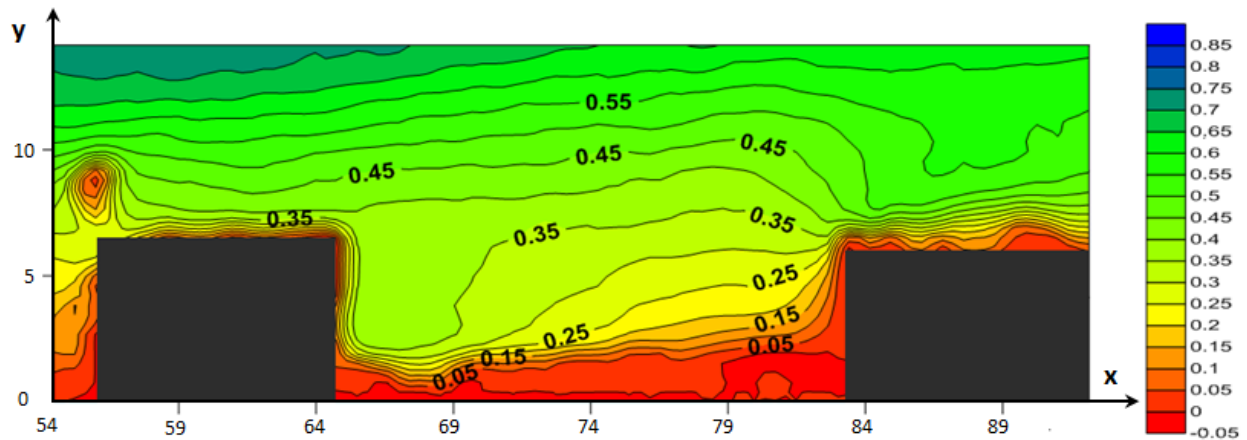
Σχήμα 4.58 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_e/2$

Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο

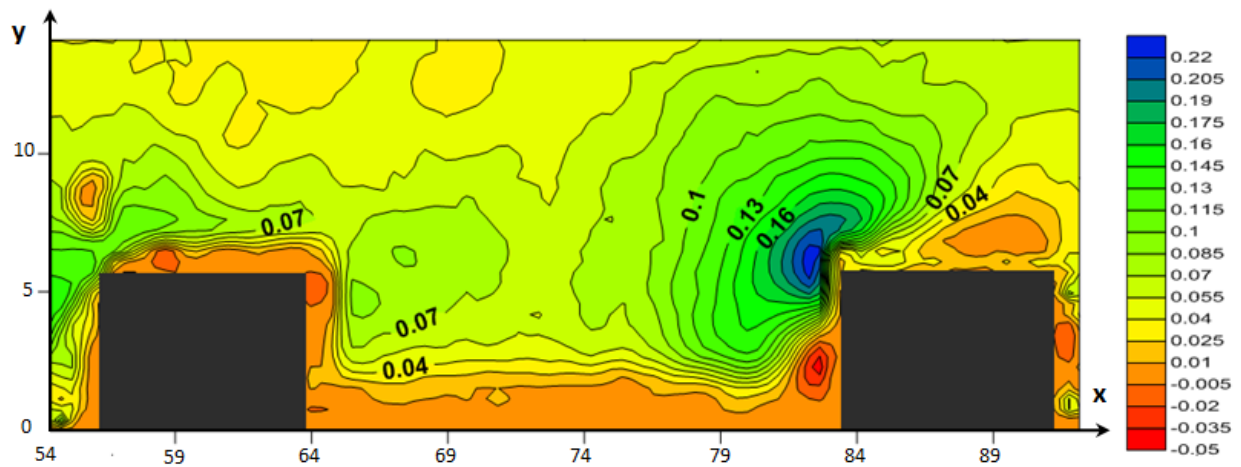


Στο Σχήμα 4.59, φαίνεται ότι στο εξεταζόμενο επίπεδο, η ροή περνά πίσω από το 3^ο εμπόδιο και «χτυπάει» στο 4^ο. Η ροή φαίνεται να παρουσιάζει ανοδική πορεία, εξαιτίας της παρουσίας του 4^{ου} εμποδίου, στο οποίο προσκρούει και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Στην κάτω ανάντι γωνία του 4^{ου} εμποδίου, σχηματίζεται μια μικρή φυσαλίδα ανακυκλοφορίας με δεξιόστροφη φορά.

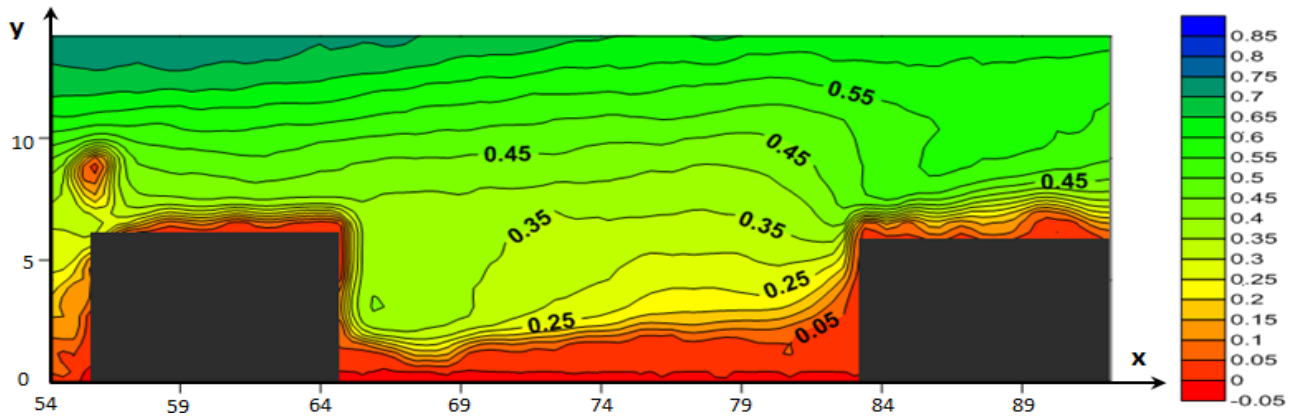
Σχήμα 4.59 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.60 Ισοψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.61 Ισοψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



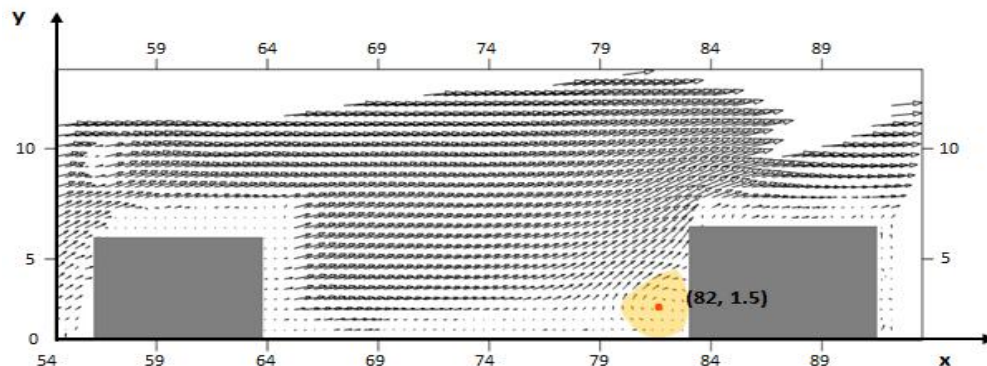
Σχήμα 4.62 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο Ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.60, η ταχύτητα φαίνεται να μεγαλώνει σταδιακά. Οι τιμές της U είναι εμφανώς πιο μικρές από αυτές της προηγούμενης περίπτωσης. Στην κάτω ανάντι γωνία του 4^{ου} εμποδίου, η ταχύτητα U γίνεται ίση με 0, ενώ παίρνει και αρνητικές τιμές εξαιτίας της μικρής ζώνης ανακυκλοφορίας που σχηματίζεται στην περιοχή. Η συγκέντρωση των ισοψών στην κορυφή του 4^{ου} εμποδίου δείχνει επιτάχυνση στο σημείο αυτό.

Στο Σχήμα 4.61, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια μεγάλη περιοχή στην ανάντι κορυφή του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή «χτυπάει» στο 4^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές της V , εμφανίζονται στην άμεση ανάντι περιοχή του 4^{ου} εμποδίου, περίπου 2 mm από το τοίχωμα, όπου εξαιτίας της ζώνης ανακυκλοφορίας σε αυτή την περιοχή, η ροή κινείται προς τα κάτω.

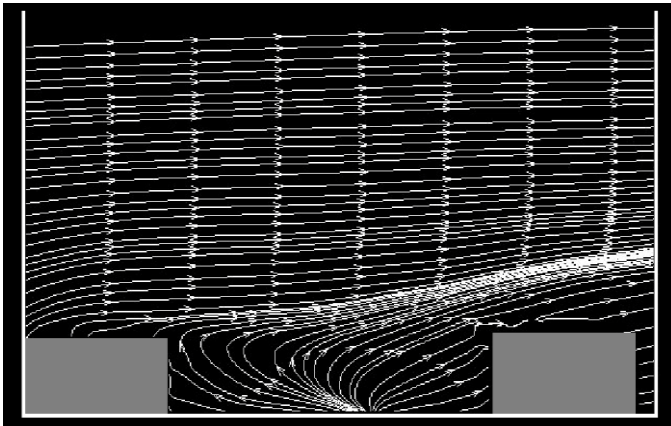
Στο Σχήμα 4.62, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.63, φαίνεται ότι η λήψη της συγκεκριμένης περιοχής δεν είναι καλή, γι' αυτό και οι ανεξήγητα μικρές τιμές των ταχυτήτων στις ισοϋψείς. Η ζώνη ανακυκλοφορίας και το κέντρο της καταγράφονται.



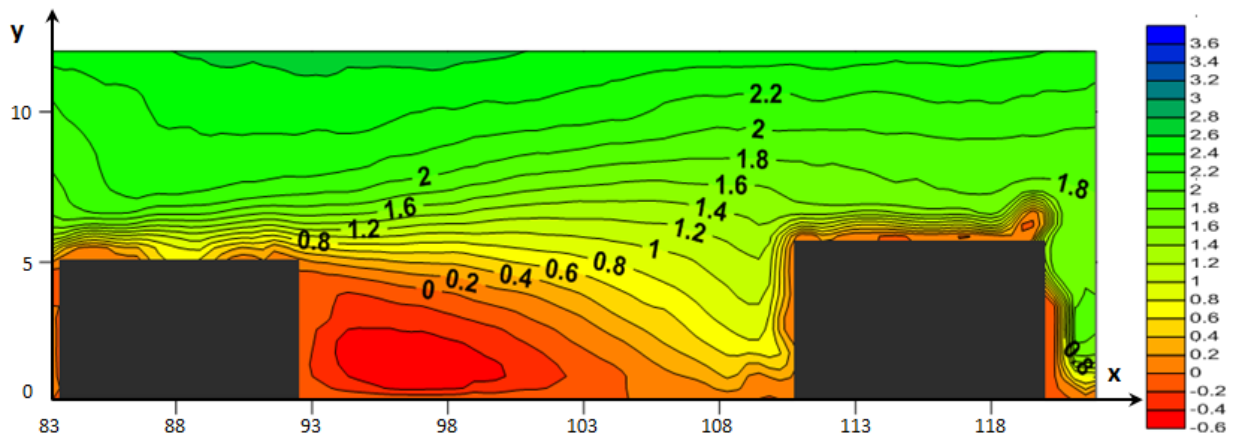
Σχήμα 4.63 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_x/2$

Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο

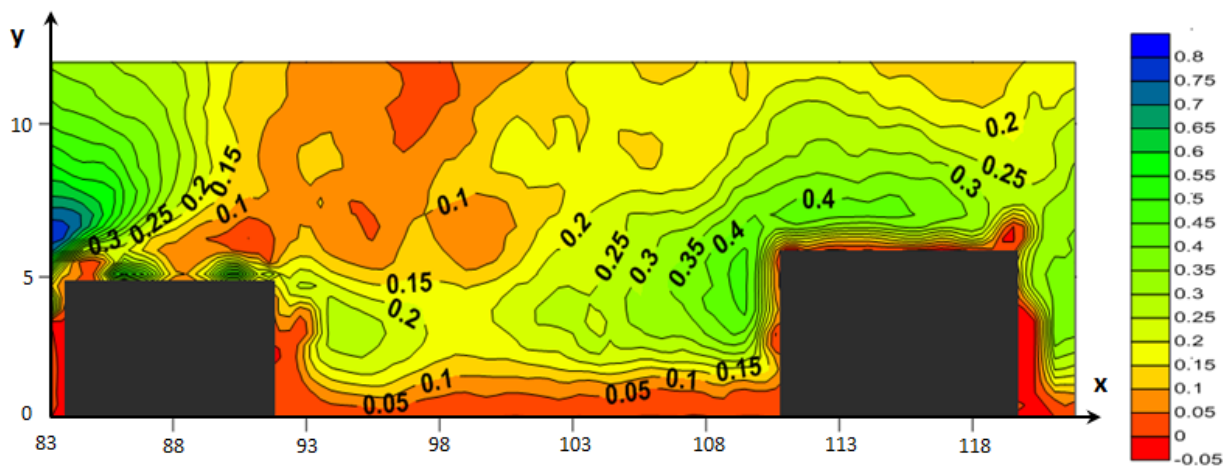


Στο Σχήμα 4.64, φαίνεται ότι το επίπεδο χ που εξετάζεται, η ροή «χτυπάει» στο 4^ο εμπόδιο και περνά πίσω από το 5^ο. Στο σχήμα δε φαίνεται να υπάρχει αποκόλληση. Η δομή της ροής σε αυτό το σημείο μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση της ροής μέσα στην κοιλότητα, κοντά στο εξεταζόμενο επίπεδο. Η ροή φαίνεται να έχει ανοδική πορεία με εντονότερη κλίση.

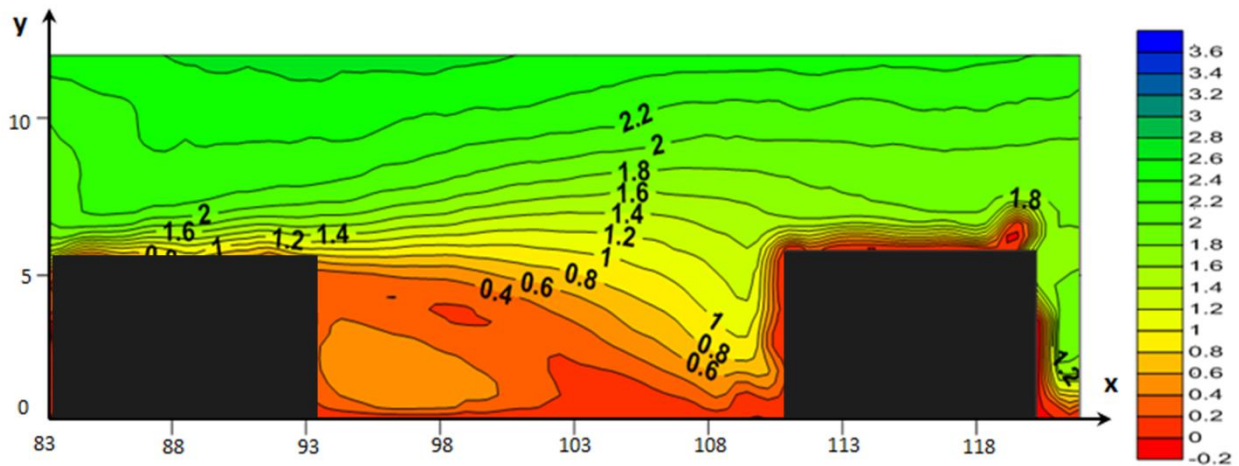
Σχήμα 4.64 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 4^ο και το 5^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.65 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.66 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.67 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

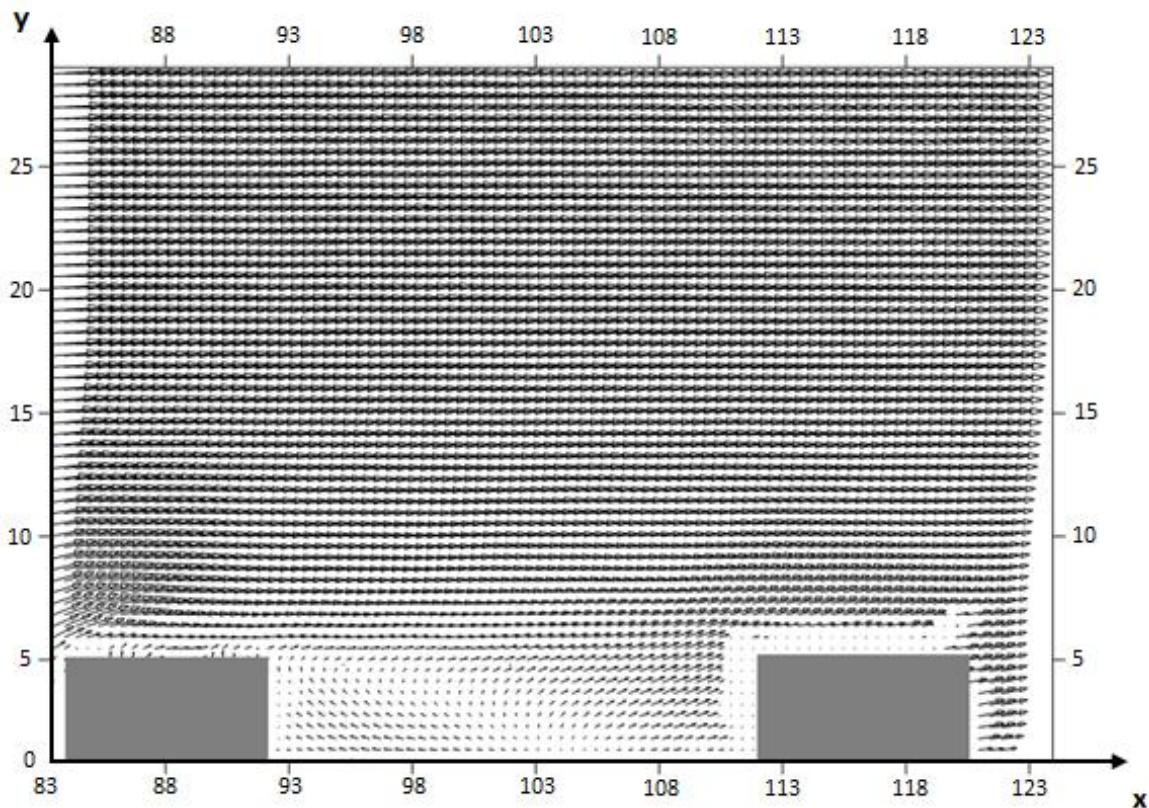
Στο Σχήμα 4.65, η ταχύτητα φαίνεται να μεγαλώνει σταδιακά. Η ροή περνώντας ανάμεσα στο 5^ο εμπόδιο, και το απέναντι του (βλέπε Σχήμα 4.48), φαίνεται να επιταχύνεται μέχρι το ύψος του εμποδίου, εφόσον οι ισοϋψείς της U ανάντι του 5^{ου} εμποδίου φαίνεται συγκεντρώνονται στο κάτω τοίχωμα και να διατηρούν αυτή την εικόνα και κατόντι, όπως και στην περίπτωση της περιοχής ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο. Η ταχύτητα U, φαίνεται να μηδενίζεται στην κατόντι πλευρά της κορυφής του 5^{ου} εμποδίου.

Στο Σχήμα 4.66, η μέγιστη τιμή της V, παρουσιάζεται σε μια μεγάλη περιοχή στην ανάντι κορυφή του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή – όπως φάνηκε στην προηγούμενη περίπτωση, προσκρούει στο 4^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Μεγάλες τιμές, παρουσιάζονται επίσης στην ανάντι κορυφή του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή δεν μπορεί να περάσει εξ ολοκλήρου ανάμεσα στα εμπόδια και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα.

Στο Σχήμα 4.67, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Η μορφή των ισοϋψών καμπύλων δείχνει επιτάχυνση όταν η ροή περνάει ανάμεσα στο 5^ο εμπόδιο και το απέναντί του.

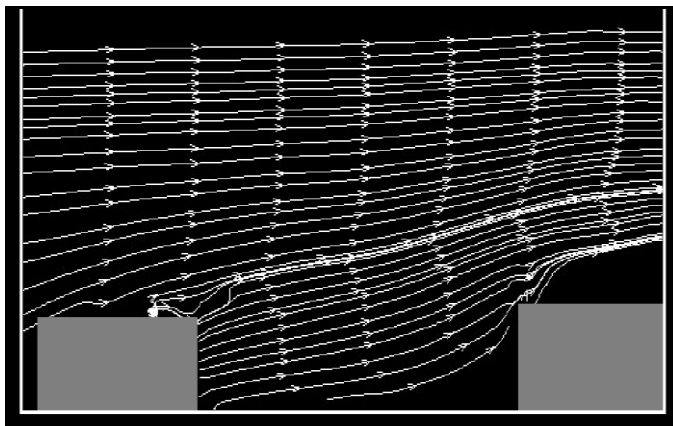
Στο Σχήμα 4.68, φαίνεται και πάλι αυτό το φαινόμενο, καθότι σε αυτή την περιοχή τα διανύσματα – αν και δεν φαίνονται καλά – της ταχύτητας έχουν μεγαλύτερο μήκος. Στην κατόντι γωνία της κορυφής του 5^{ου} εμποδίου, φαίνεται ο σχηματισμός μιας μικρής δίνης.

Στην κορυφή του 4^{ου} εμποδίου, μπορούν να φανούν κάποιες κινήσεις της ροής όπου φαίνεται να έχει ανοδική πορεία. Σε αυτά τα σημεία, οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.65) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση και ταυτόχρονα οι ισοϋψείς της ταχύτητας V (Σχήμα 4.66) παίρνουν μεγαλύτερες τιμές. Στην περίπτωση της ανάντι γωνίας της κορυφής του 4^{ου} εμποδίου, η ροή φαίνεται να επιταχύνεται, αφού παρατηρείται έντονη συγκέντρωση των ισοϋψών της ταχύτητας U, πάνω από την κορυφή του 4^{ου} εμποδίου (Σχήμα 4.65 και 4.67).



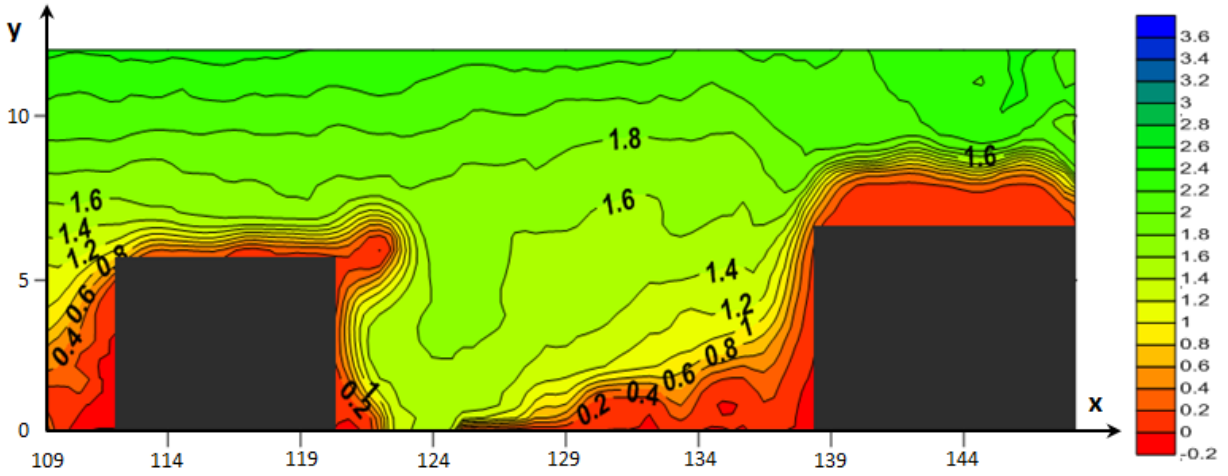
Σχήμα 4.68 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για $W_1/2$ επίπεδο

Περιοχή ανάμεσα στο 5^ο και 6^ο εμπόδιο

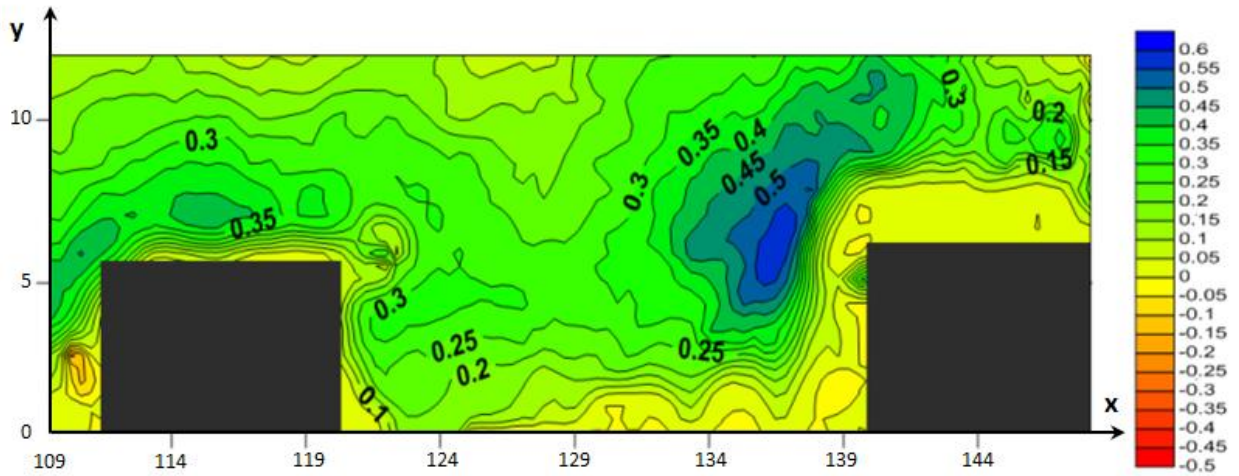


Στο Σχήμα 4.69, η ροή στο εξεταζόμενο επίπεδο, φαίνεται να περνά πίσω από το 5^ο εμπόδιο και «χτυπάει» στο 6^ο. Η ροή φαίνεται να παρουσιάζει ανοδική πορεία, εξαιτίας της παρουσίας του 6^{ου} εμποδίου. Οι γραμμές ροής, δε φαίνονται ξεκάθαρα στην κάτω ανάντι γωνία του 6^{ου} εμποδίου, όπου η ροή θα αναμενόταν να αποκολλάται. Στην κατάντι πλευρά της κορυφής του 5^{ου} εμποδίου φαίνεται να σχηματίζεται μια μικρή δίνη.

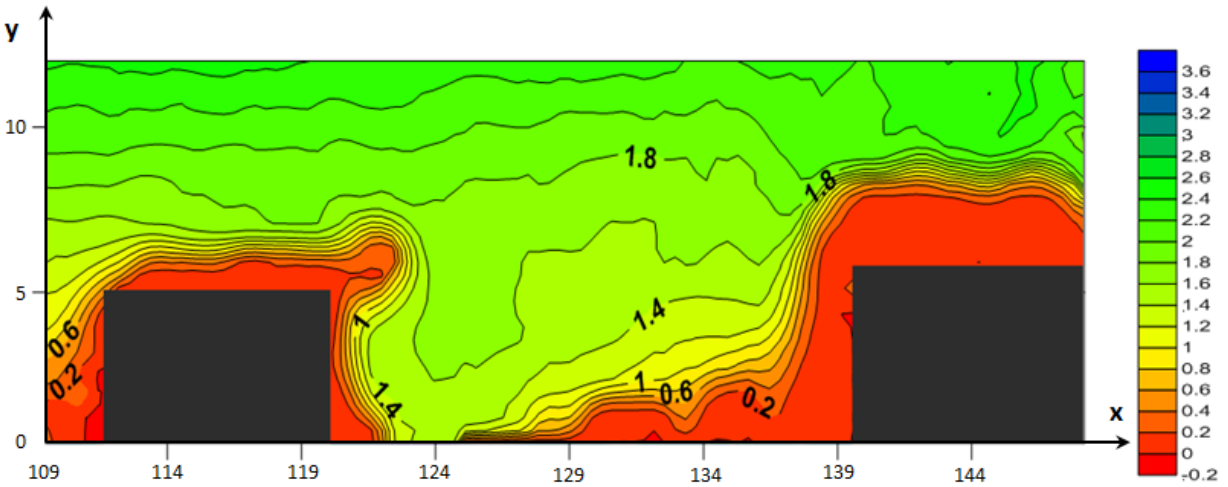
Σχήμα 4.69 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 5^ο και το 6^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.70 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 5° και 6° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.71 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 5° και 6° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



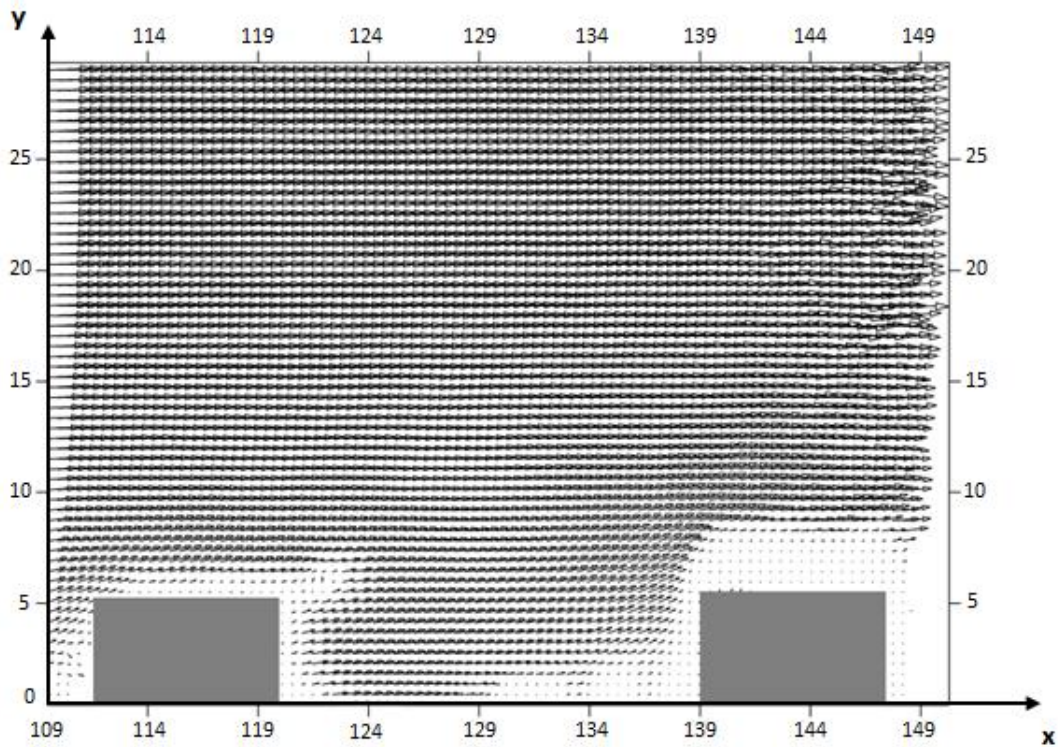
Σχήμα 4.72 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 5° και 6° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.70, η ταχύτητα φαίνεται να μεγαλώνει σταδιακά. Η συγκέντρωση των ισοϋψών στην κορυφή του 6^{ου} εμποδίου δείχνει επιτάχυνση της ροής στο σημείο αυτό. Η μεγάλες περιοχές γύρω από τα εμπόδια, όπου οι τιμές της ταχύτητας είναι πολύ μικρές, εμφανίζονται λόγω της κακής λήψης της συγκεκριμένης περιοχής, κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στο Σχήμα 4.71, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια μεγάλη περιοχή στην ανάντι κορυφή του 6^{ου} εμποδίου, όπου η ροή «χτυπάει» στο 6^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Λόγω της κακής λήψης, η δομή της ροής στην κάτω ανάντι γωνία του 6^{ου} εμποδίου, όπου θα αναμενόταν αποκόλληση, είναι ασαφής.

Στο Σχήμα 4.72, η ταχύτητα, όπως και πριν, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Η μορφή των ισοϋψών καμπύλων δείχνει επιτάχυνση στην κορυφή του 6^{ου} εμποδίου.

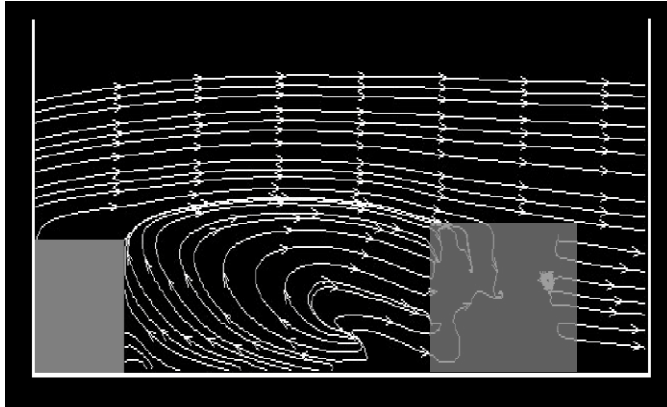
Στο Σχήμα 4.73, φαίνεται και πάλι αυτό το φαινόμενο, καθότι πάνω από το 6^ο εμπόδιο, τα διανύσματα της ταχύτητας φαίνονται μεγαλύτερα. Στην κορυφή των εμποδίων, μπορεί να φανεί επιβράδυνση. Σε αυτά τα σημεία, οι ισοϋψείς της ταχύτητας U (Σχήμα 4.70) φαίνεται να απομακρύνονται από την κορυφή του εμποδίου, δείχνοντας επιβράδυνση και ενώ το ίδιο παρατηρείται και με τις ισοϋψείς της ταχύτητας V (Σχήμα 4.71).



Σχήμα 4.73 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 5^ο και 6^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_v/2$

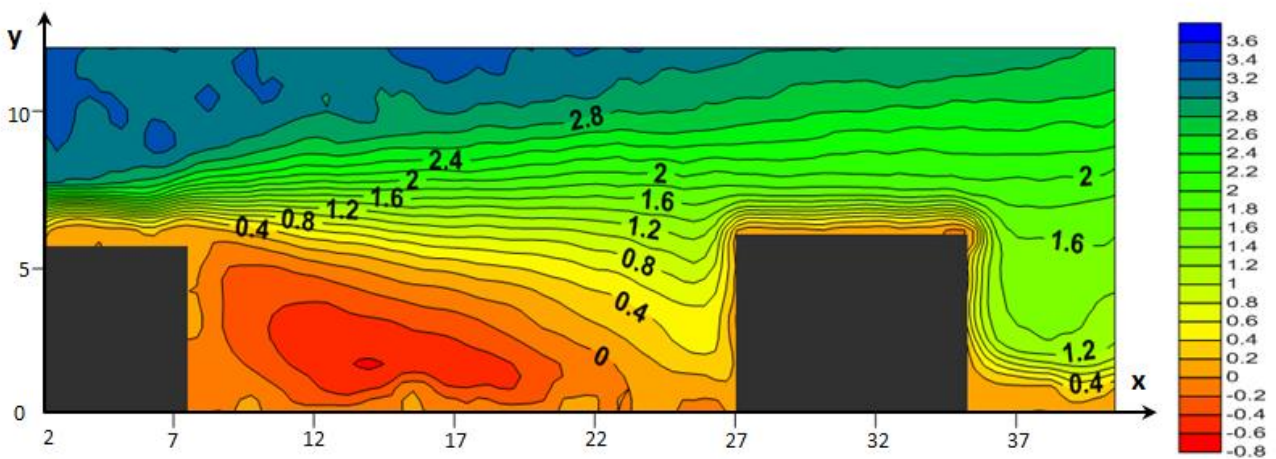
Επίπεδο $xy: W_y/4$:

Περιοχή ανάμεσα στο 1° και 2° εμπόδιο

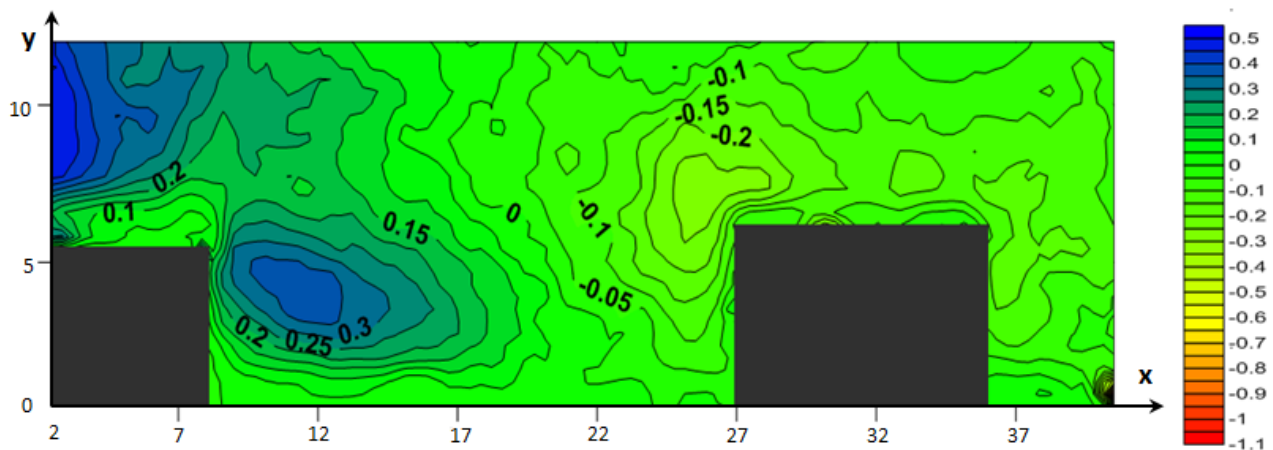


Στο επίπεδο που μελετάται, η ροή προσκρούει στο 1° εμπόδιο και (Σχήμα 4.48), περνάει μπροστά από το 2° εμπόδιο. Στο Σχήμα 4.74, η μορφή του πεδίου μπορεί να αποτελέσει ένδειξη αποκόλλησης λίγο πριν η ροή φτάσει στο 2° εμπόδιο, όταν αυτή αλλάζει κατεύθυνση εξαιτίας του. Εξαιτίας της παρουσίας του 2° εμποδίου πίσω από τη ροή, δε λαμβάνεται η εικόνα της σε αυτή την περιοχή.

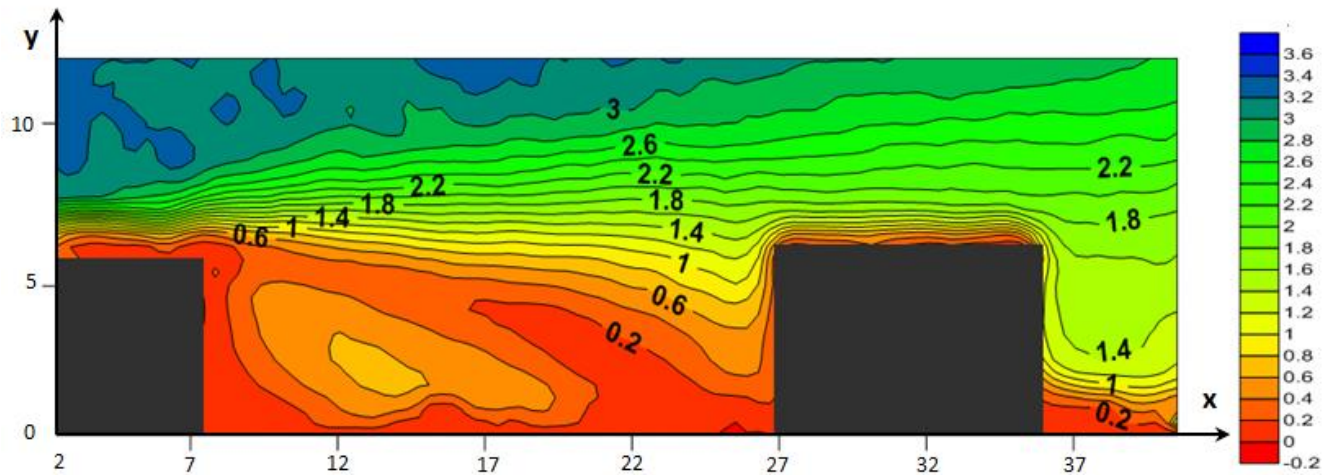
Σχήμα 4.74 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 1° και το 2° εμπόδιο



Σχήμα 4.75 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα στο 1° και 2° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.76 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



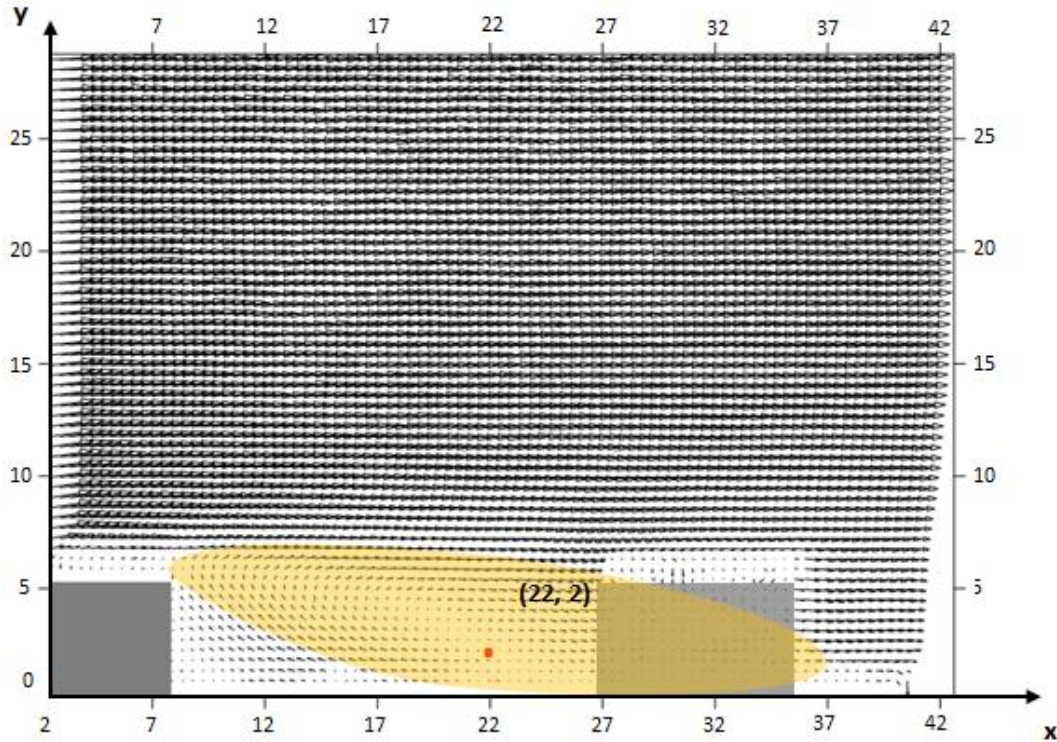
Σχήμα 4.77 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.75, η ταχύτητα φαίνεται και πάλι, να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U , στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζεται πάνω από το 1^ο εμπόδιο, σε μια απόσταση περίπου 10 mm από το κάτω τοίχωμα, ενώ η σταδιακή απομάκρυνση της κάθε καμπύλης από τις παράπλευρές της, μπορεί να αποτελέσει ένδειξη επιβράδυνσης. Η εμφάνιση των ισοϋψών κατόντι του 2^{ου} εμποδίου δείχνει επιτάχυνση της ροής σε ένα ύψος ίσο με αυτό του εμποδίου μιας και σε πιο χαμηλό ύψος παρατηρούνται υψηλότερες ταχύτητες.

Στο Σχήμα 4.76, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια μεγάλη περιοχή στην κατόντι και ανάντι πλευρά της κορυφής του 1^{ου} εμποδίου, όπου η ροή «χτυπάει» στο 1^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 2^{ου} εμποδίου, εμφανίζονται σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές της V , λόγω της καθοδικής κίνησης της ροής στο σημείο αυτό (Σχήμα 4.74).

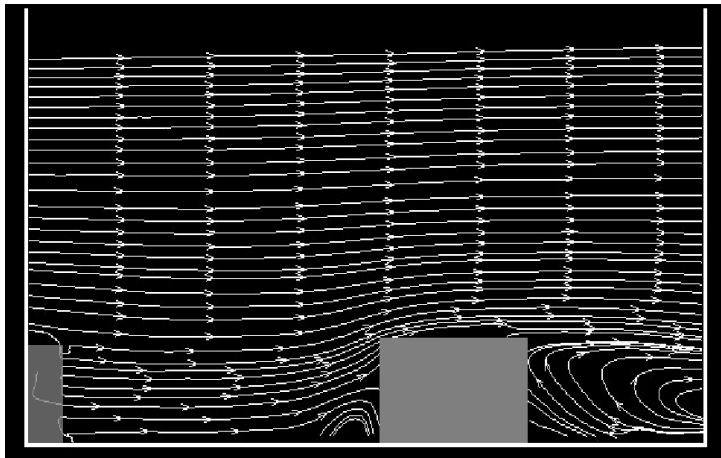
Στο Σχήμα 4.77, η ταχύτητα, και πάλι, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.78, τονίζεται η περιοχή με την κίνηση της ροής, και σημειώνεται το σημείο «εκβολής» των γραμμών ροής.



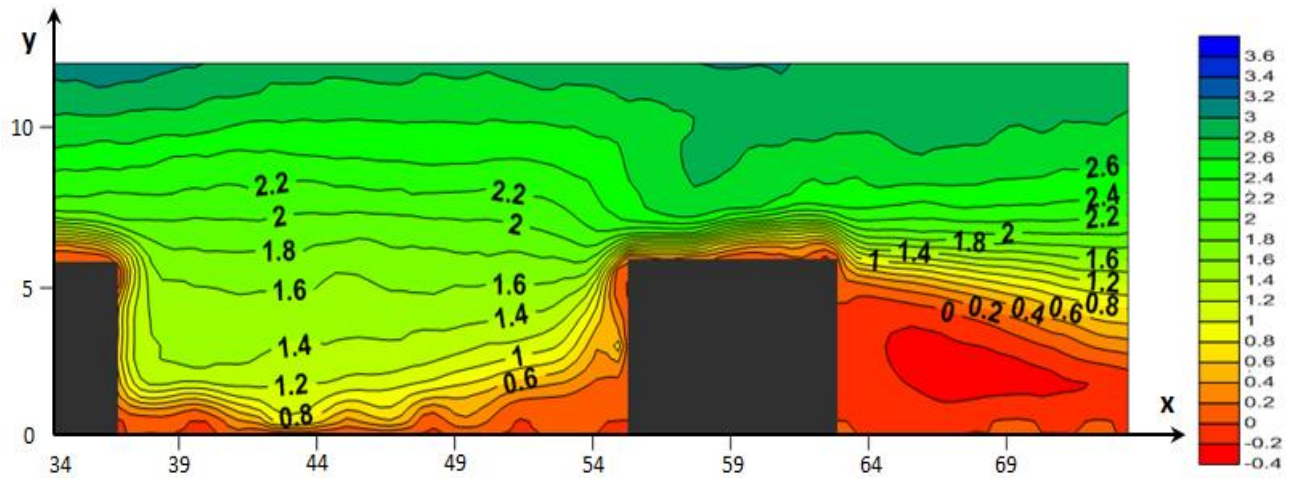
Σχήμα 4.78 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_x/4$

Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο

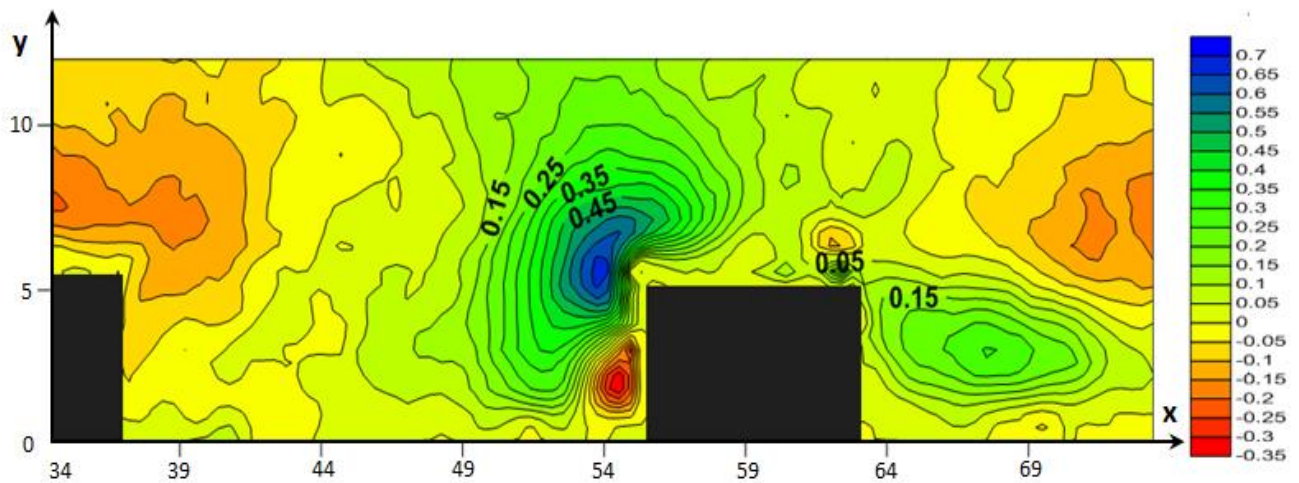


Στο επίπεδο xy που μελετάται, η ροή περνά μπροστά από το 2^ο εμπόδιο και «χτυπάει» στο 3^ο εμπόδιο. Στο Σχήμα 4.79 δε φαίνεται να υπάρχει αποκόλληση. Η δομή της ροής σε αυτό το σημείο μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση της ροής μέσα στην κοιλότητα, κοντά στο εξεταζόμενο επίπεδο, όταν η ροή χτυπάει στο 3^ο εμπόδιο και αλλάζει κατεύθυνση. Η ροή φαίνεται να έχει ανοδική πορεία.

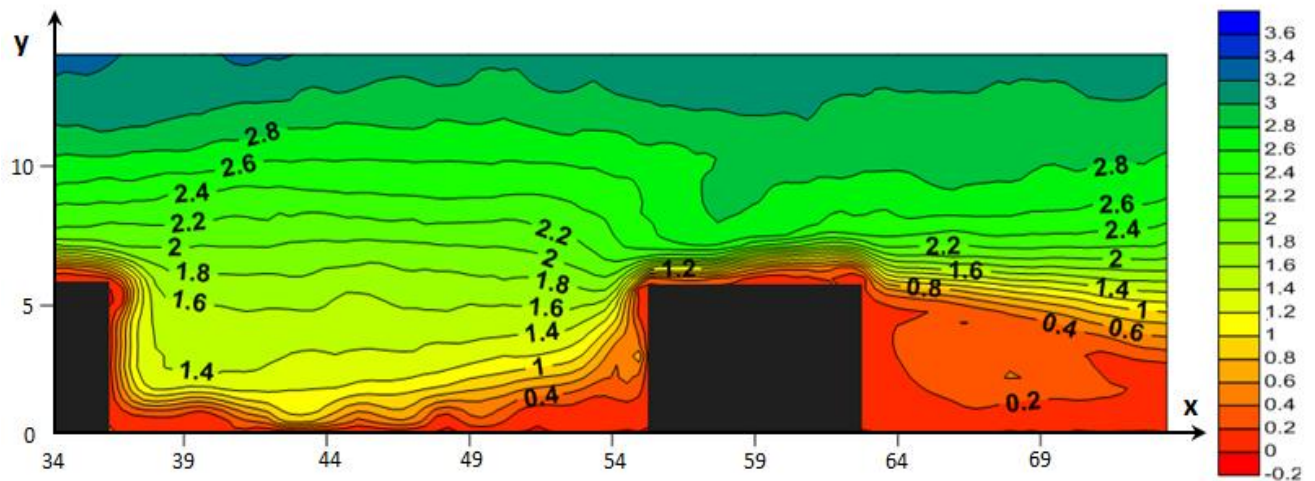
Σχήμα 4.79 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 2^ο και το 3^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.80 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.81 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



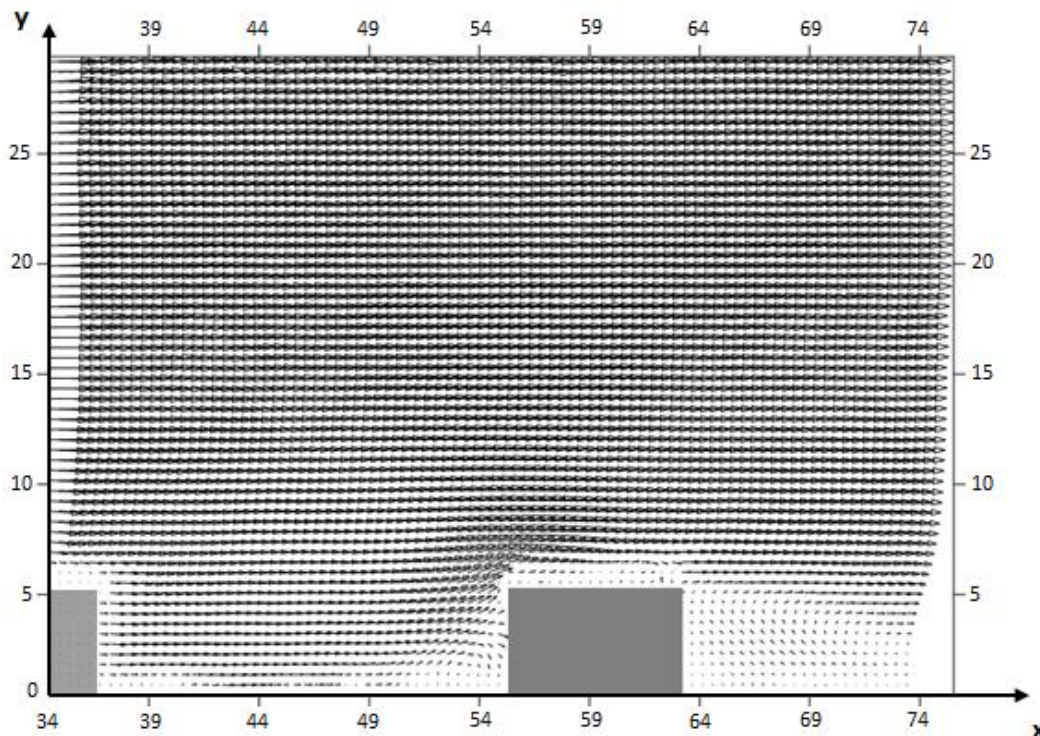
Σχήμα 4.82 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 2° και 3° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.80, η ταχύτητα φαίνεται και πάλι, να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U , στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζεται πάνω από το 2^ο εμπόδιο, σε μια απόσταση περίπου 11 mm από το κάτω τοίχωμα. Η συγκέντρωση των καμπύλων στην κορυφή του 3^{ου} εμποδίου, είναι ένδειξη επιτάχυνσης σε αυτή την περιοχή, όταν η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα.

Στο Σχήμα 4.81, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια περιοχή στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 3^{ου} εμποδίου, όπου η ροή «χτυπάει» στο 3^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Μεγάλες σχετικά αρνητικές τιμές της V , εντοπίζονται στην άμεση ανάντι περιοχή του 3^{ου} εμποδίου, όπου η ροή χτυπάει στο εμπόδιο και αλλάζει πορεία (Σχήμα 4.79).

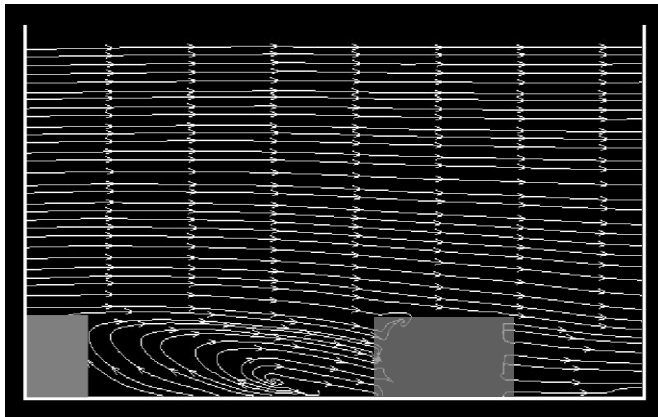
Στο Σχήμα 4.82, η ταχύτητα, και πάλι, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.83, μπορεί να φανεί η επιτάχυνση της ροής όταν αυτή προσκρούει στο εμπόδιο, στην αύξηση του μήκους των διανυσμάτων της ταχύτητας στο σημείο αυτό.



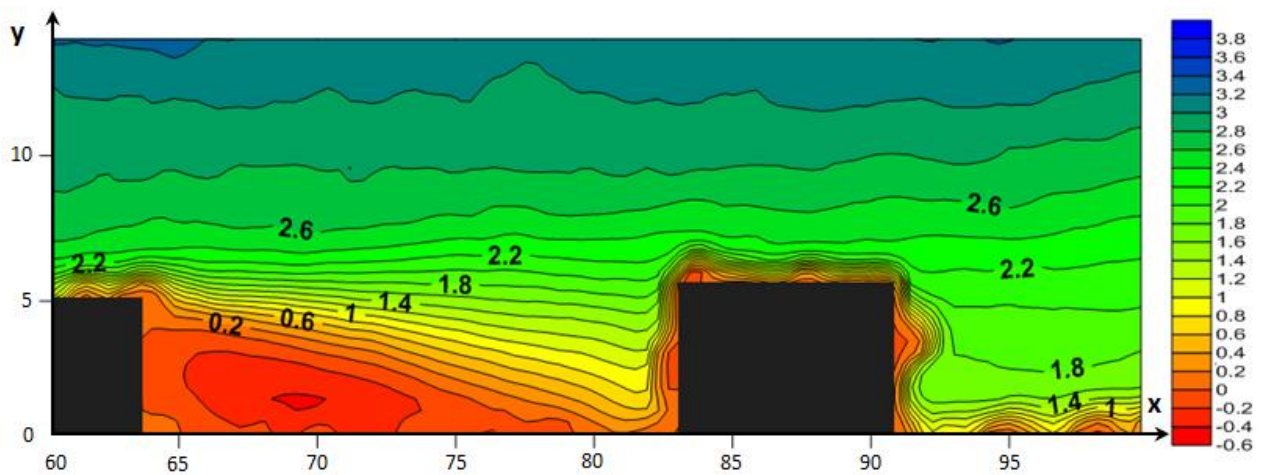
Σχήμα 4.83 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_c/4$

Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο

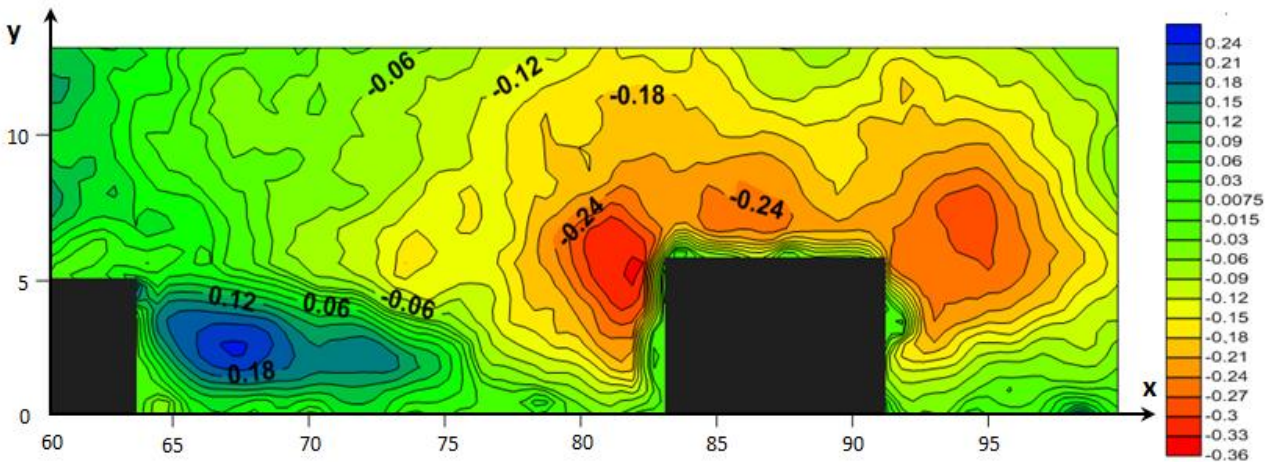


Στο επίπεδο που μελετάται, η ροή περνά μπροστά από το 4^ο εμπόδιο. Στο Σχήμα 4.84, η μορφή του πεδίου μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση λίγο πριν η ροή φτάσει στο 4^ο εμπόδιο, όταν κινείται γύρω από αυτό. Εξαιτίας της παρουσίας του 4^{ου} εμποδίου πίσω από τη ροή, δεν μπορεί να ληφθεί η εικόνα της ροϊκής δομής σε αυτή την περιοχή.

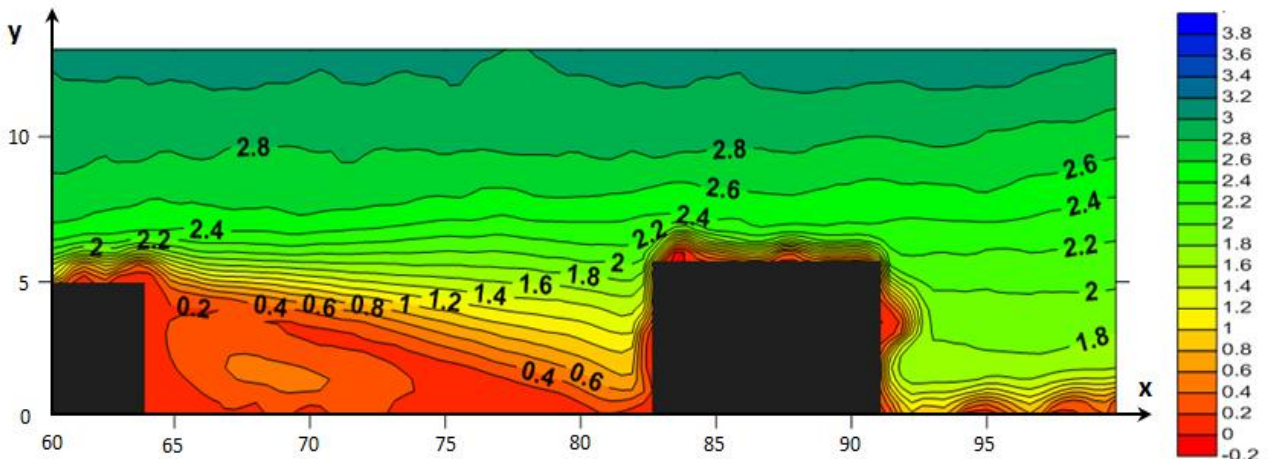
Σχήμα 4.84 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.85 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.86 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



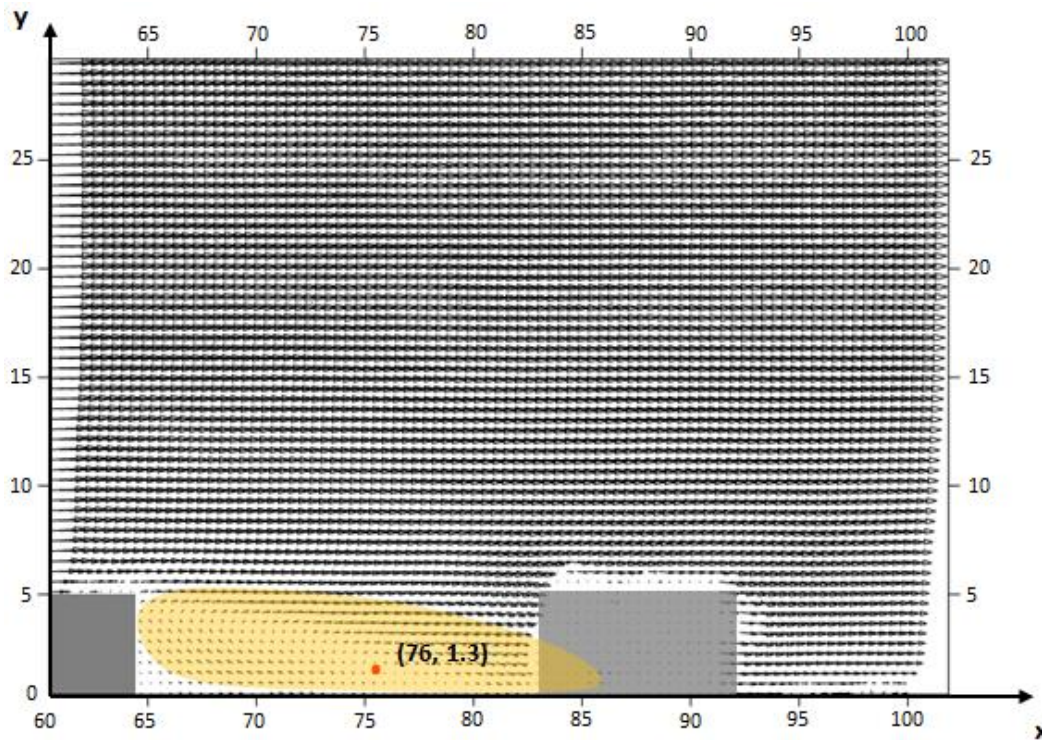
Σχήμα 4.87 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.85, η ταχύτητα φαίνεται και πάλι, να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U, στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζεται πάνω από το 3^ο εμπόδιο, σε μια απόσταση περίπου 13 mm από το κάτω τοίχωμα, ενώ η σταδιακή απομάκρυνση της κάθε καμπύλης από τις παράπλευρές της και ταυτόχρονα το τοίχωμα, μπορεί να αποτελέσει ένδειξη επιβράδυνσης. Η εμφάνιση των ισοϋψών κατάντι του 4^{ου} εμποδίου δείχνει επιτάχυνση της ροής σε ένα ύψος ίσο με αυτό του εμποδίου μιας και σε πιο χαμηλό ύψος παρατηρούνται υψηλότερες ταχύτητες.

Στο Σχήμα 4.86, η μέγιστες τιμές της V, στη γειτνίαση των εμποδίων, είναι αρνητικές και παρουσιάζονται σε μια περιοχή στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή περνώντας γύρω από το εμπόδιο, σημειώνει καθοδική πορεία (Σχήμα 4.84), ενώ εκτείνονται και σε μια περιοχή γύρω από την κατάντι πλευρά της κορυφής του εμποδίου. Στην κατάντι πλευρά της κορυφής του 3^{ου} εμποδίου, εμφανίζονται σχετικά μεγάλες θετικές τιμές της V, λόγω της ανοδικής κίνησης της ροής στο σημείο αυτό (Σχήμα 4.84).

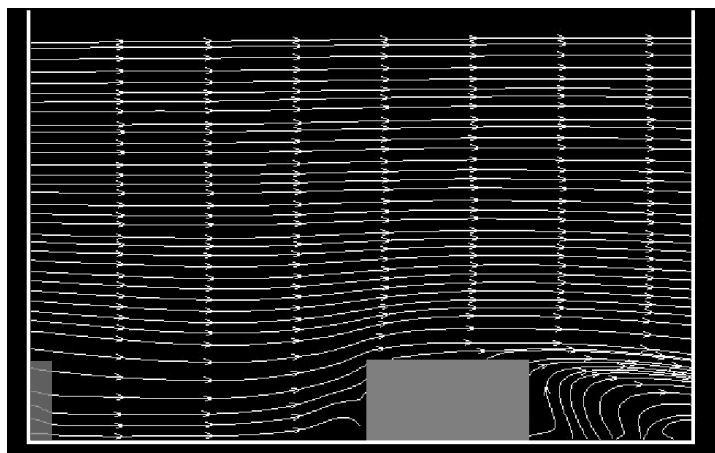
Στο Σχήμα 4.87, η ταχύτητα, και πάλι, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.88, τονίζεται η περιοχή της κίνησης της ροής, και σημειώνεται το σημείο «εκβολής» των γραμμών ροής.



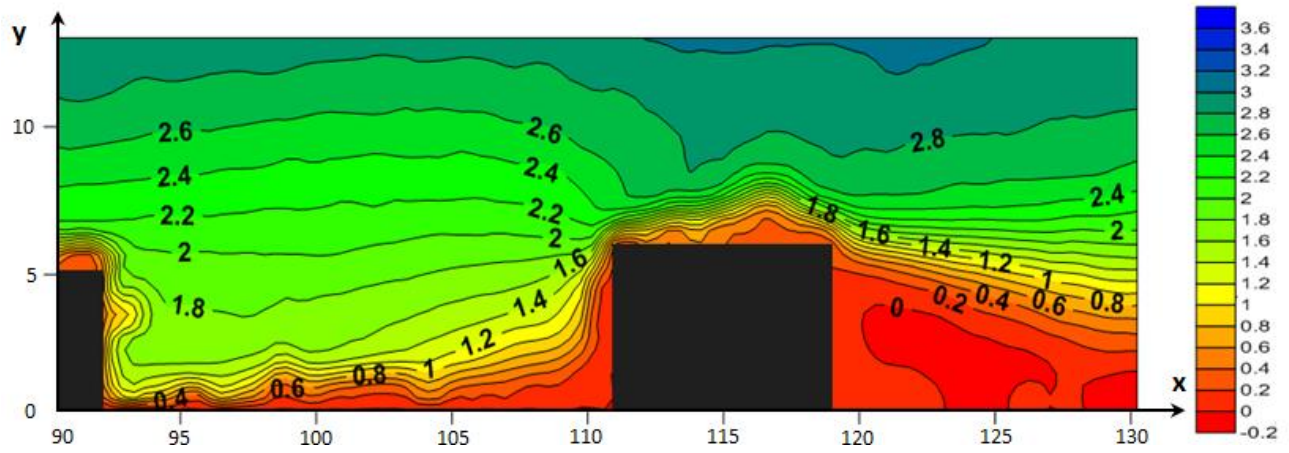
Σχήμα 4.88 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_x/4$

Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο

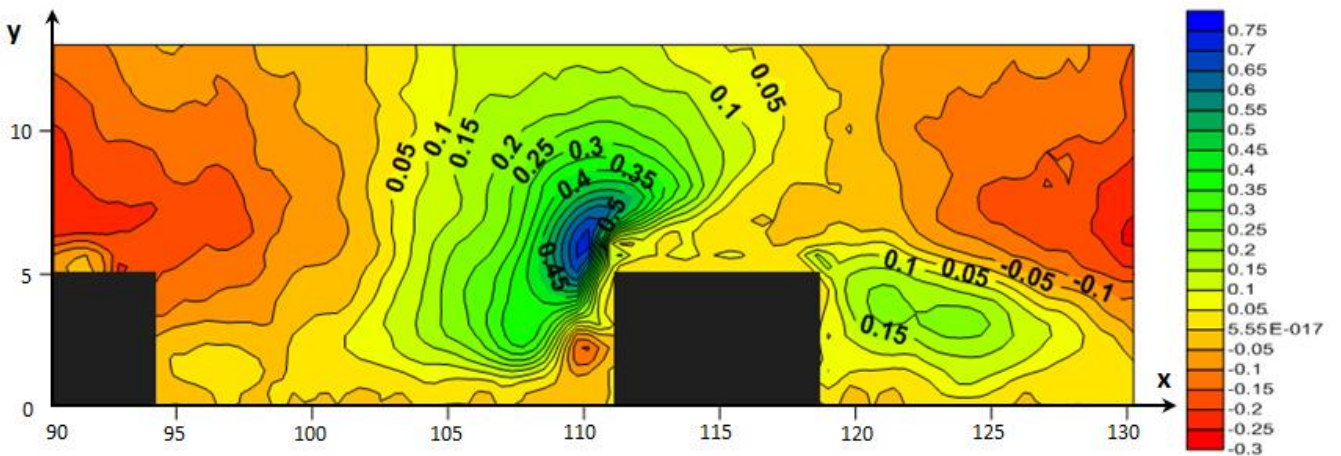


Σχήμα 4.89 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 4^ο και το 5^ο εμπόδιο

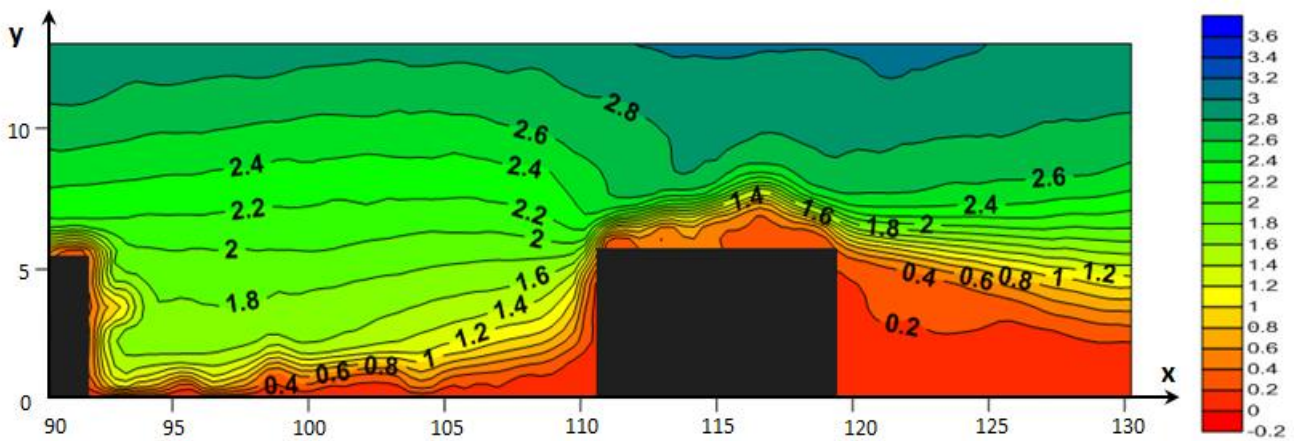
Στο επίπεδο που μελετάται, η ροή περνά μπροστά από το 4^ο εμπόδιο και «χτυπάει» στο 5^ο. Στο Σχήμα 4.89, η μορφή του πεδίου δείχνει ότι μπορεί να γίνεται αποκόλληση στην κάτω ανάντι γωνία του 5^{ου} εμποδίου σε παράλληλο επίπεδο (κατά μήκος του άξονα z), όταν η ροή προσκρούει σε αυτό και αλλάζει κατεύθυνση. Κατάντι του 5^{ου} εμποδίου, η ροή δείχνει να έχει καθοδική πορεία.



Σχήμα 4.90 Ισοΰψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.91 Ισοΰψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



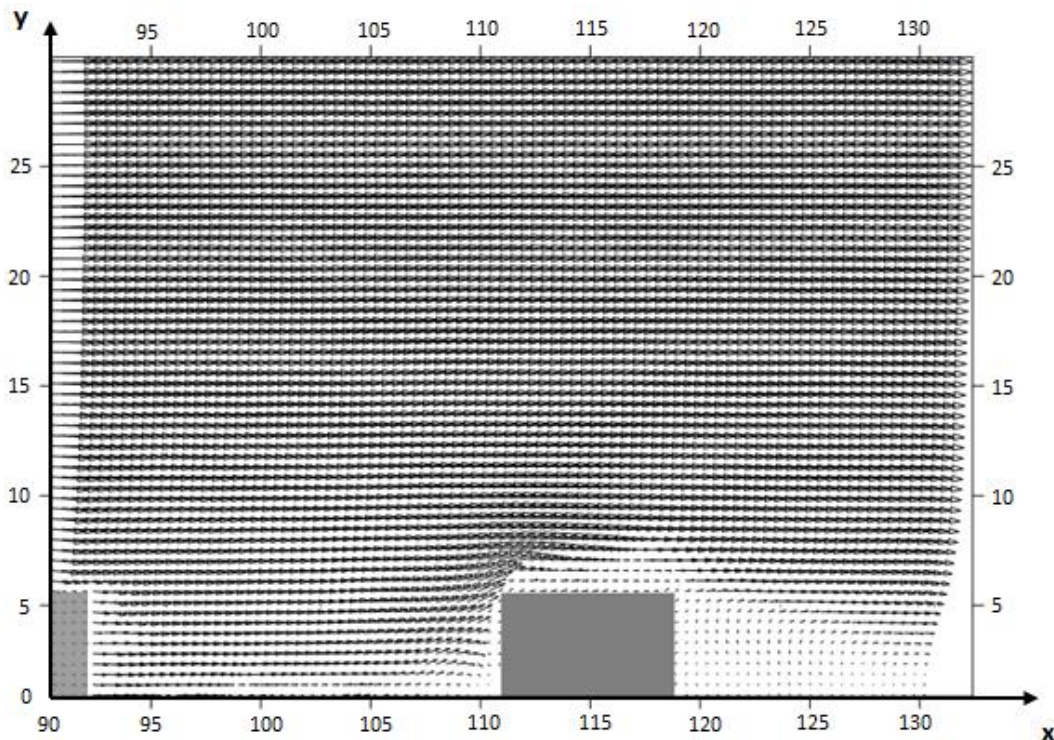
Σχήμα 4.92 Ισοΰψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ στο 4° και 5° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.90, η ταχύτητα φαίνεται και πάλι, να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U , στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζεται πάνω από το 5^ο εμπόδιο, σε μια απόσταση περίπου 13 mm από το κάτω τοίχωμα. Η συγκέντρωση των καμπύλων στην κορυφή του 5^{ου} εμποδίου, είναι ένδειξη επιτάχυνσης σε αυτή την περιοχή, όταν η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα.

Στο Σχήμα 4.91, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια περιοχή στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 5^{ου} εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο 5^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Μεγάλες σχετικά αρνητικές τιμές της V , εντοπίζονται σε μια περιοχή πάνω από το 4^ο εμπόδιο, όπου η ροή σημειώνει καθοδική πορεία (Σχήμα 4.79), καθώς και σε μία περιοχή κατάντι του 5^{ου}.

Στο Σχήμα 4.92, η ταχύτητα, και πάλι, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

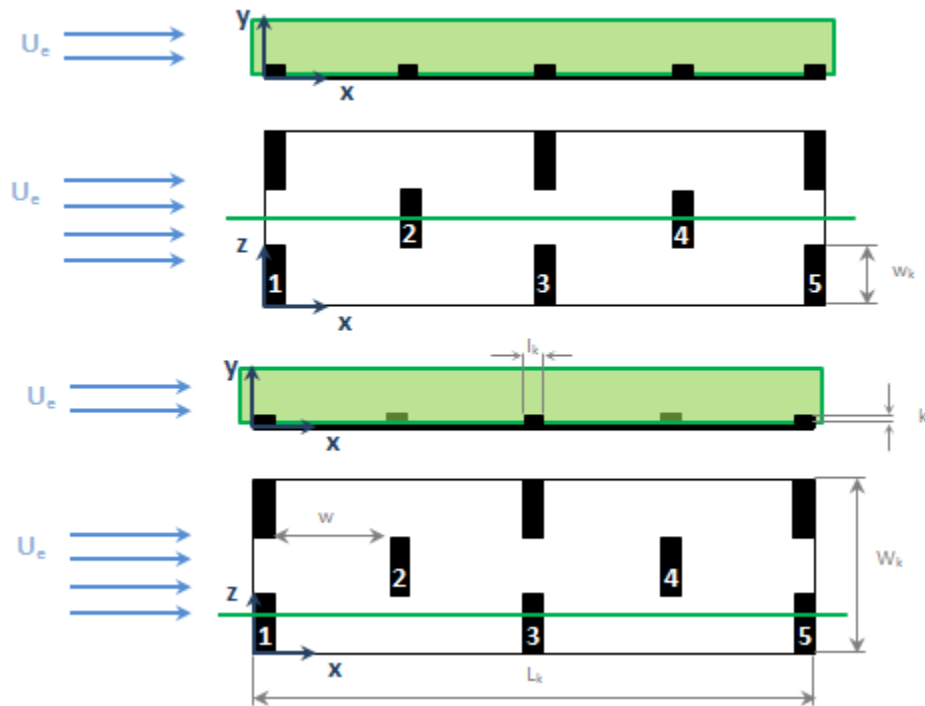
Στο Σχήμα 4.93, μπορεί να φανεί η επιτάχυνση της ροής όταν αυτή προσκρούει στο εμπόδιο, στην αύξηση του μήκους των διανυσμάτων της ταχύτητας στο σημείο αυτό.



Σχήμα 4.93 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο της Διάταξης Γ και για xy επίπεδο $W_f/4$

4.4 Διάταξη Δ

Το πεδίο ροής της ταχύτητας, καταγράφεται σε δύο επίπεδα xy . Το πρώτο βρίσκεται στο κέντρο του πλάτους της διάταξης (Σχήμα 4.94), και αφού η διάταξη είναι τοποθετημένη στη μέση της αεροδυναμικής σήραγγας, το επίπεδο συμπίπτει και με το κέντρο του πλάτους της αεροδυναμικής σήραγγας (span). Το δεύτερο βρίσκεται σε απόσταση $W_k/4$ από το ένα άκρο της διάταξης (Σχήμα 4.94), που για σκοπούς διευκόλυνσης, είναι αυτό που βρίσκεται πιο κοντά στην πλευρά της αεροδυναμικής σήραγγας όπου τοποθετείται η CCD – Camera δηλαδή 198 mm από αυτό το άκρο, αφού η διάταξη είναι τοποθετημένη στη μέση της αεροδυναμικής σήραγγας.



Σχήμα 4.94 Σχηματική Απεικόνιση Επιπέδων xy σε $W_k/2$ (πάνω) και $W_k/4$ (κάτω) Καταγραφής Πεδίου Ταχυτήτων της Διάταξης Δ

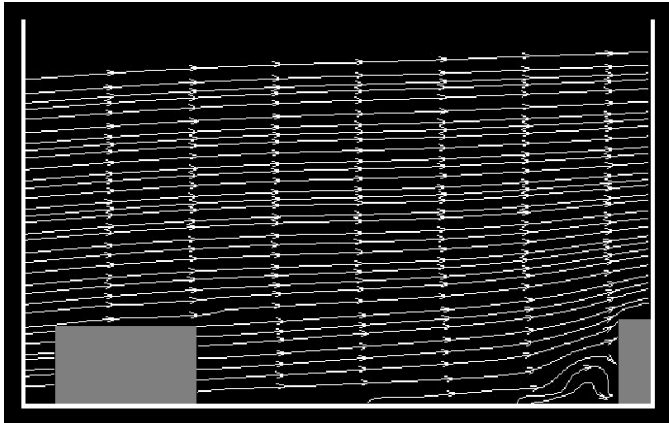
Το πεδίο ταχυτήτων καταγράφηκε σε κάθε κοιλότητα ανάμεσα στα στοιχεία της επιφανειακής τραχύτητας ξεχωριστά. Στο Σχήμα 4.94 φαίνεται ο τρόπος που γίνεται η τοποθέτηση των αξόνων, καθώς και η κατεύθυνση της ροής ως προς αυτούς.

	Μήκος Διάταξης L_k (mm)	Πλάτος Διάταξης W_k (mm)	Πλάτος Εμποδίου l_k (mm)	Μήκος Εμποδίου w_k (mm)	Ύψος Εμποδίου k (mm)	Μήκος κοιλότητας w (mm)	Pitch Ratio w/k
Διάταξη Δ	160	80	8	30	5	30	6

Πίνακας 4.4 Χαρακτηριστικά Μεγέθη της Διάταξης Δ της Επιφανειακής Τραχύτητας

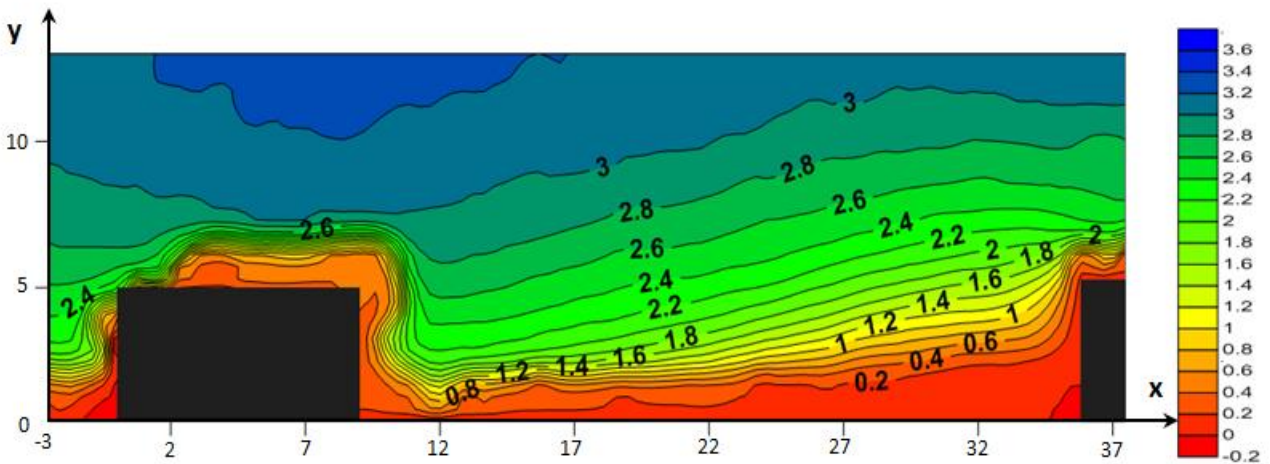
Επίπεδο $xy: W_k/2$:

Περιοχή ανάμεσα στο 1° και 2° εμπόδιο

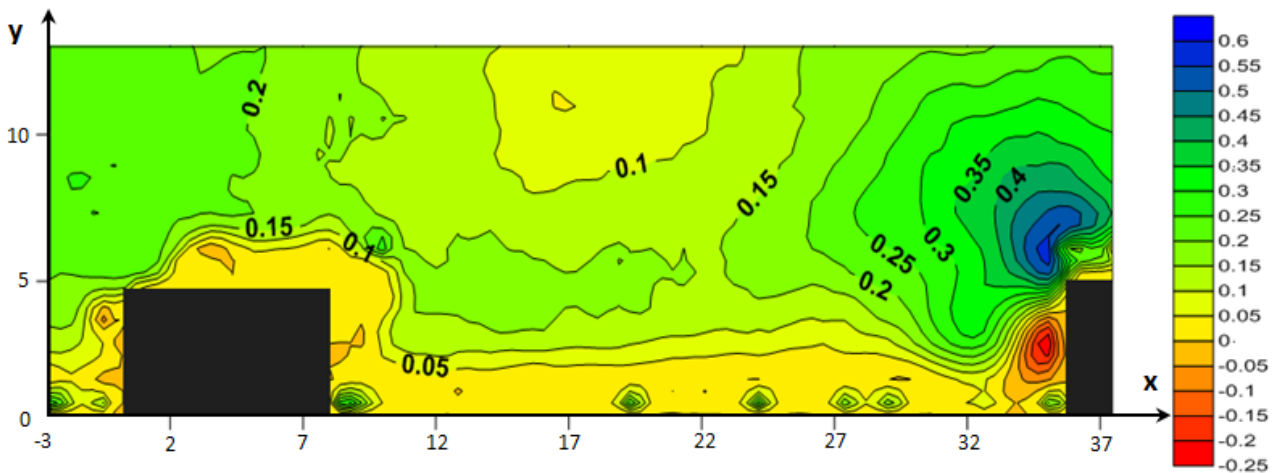


Στο εξεταζόμενο επίπεδο, η ροή περνά πίσω από το 1° εμπόδιο και προσκρούει στο 2° . Στο Σχήμα 4.95, η μορφή του πεδίου δείχνει ότι μπορεί να γίνεται αποκόλληση στην κάτω ανάντι γωνία του $2^{\text{ου}}$ εμποδίου σε παράλληλο επίπεδο (κατά μήκος του άξονα z), εκεί όπου η ροή «χτυπώντας» στο 2° εμπόδιο, αλλάζει κατεύθυνση.

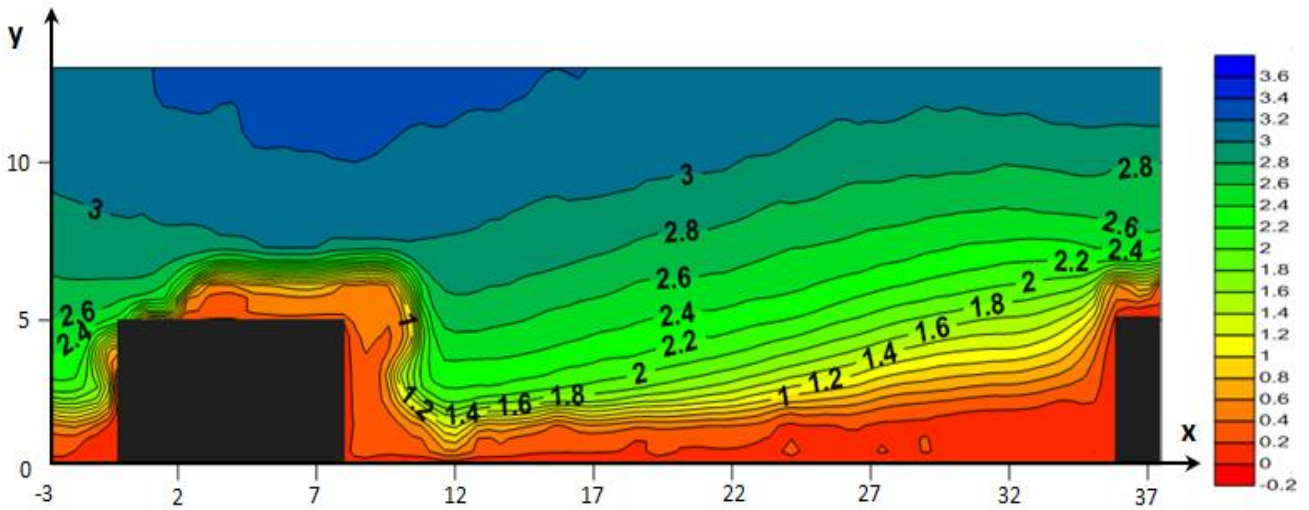
Σχήμα 4.95 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 1° και το 2° εμπόδιο



Σχήμα 4.96 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.97 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



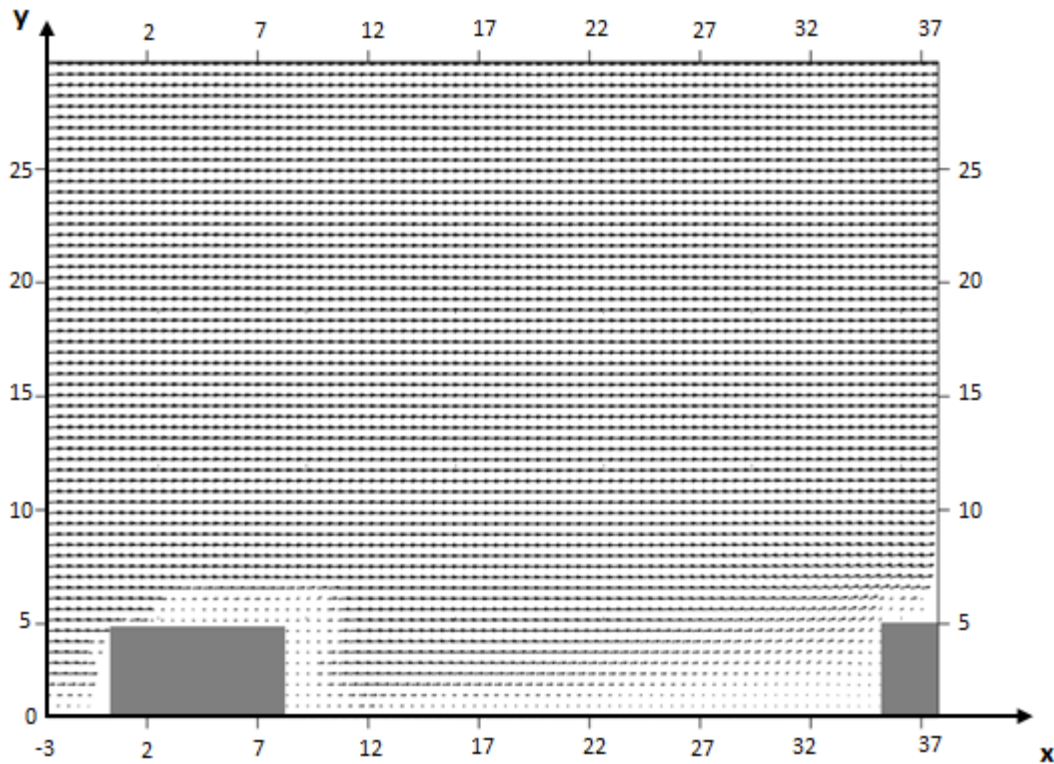
Σχήμα 4.98 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 1^o και 2^o εμπόδιο $((U^2 + V^2)^{1/2} - \text{Μέτρο Ταχύτητας})$

Στο Σχήμα 4.96, η ταχύτητα φαίνεται και πάλι, να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U , στη γεινίαση των εμποδίων, εμφανίζεται πάνω από το 1^o εμπόδιο, σε μια απόσταση περίπου 11 mm από το κάτω τοίχωμα. Η συγκέντρωση των ισοϋψών πάνω από την κορυφή του 2^{ou} εμποδίου δείχνει επιτάχυνση στην περιοχή αυτή.

Στο Σχήμα 4.97, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια περιοχή στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 2^{ou} εμποδίου, όπου η ροή «χτυπάει» στο 2^o εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Μεγάλες σχετικά αρνητικές τιμές της V , εντοπίζονται στην άμεση ανάντι περιοχή του 2^{ou} εμποδίου, όπου η ροή χτυπάει στο εμπόδιο και αλλάζει πορεία σημειώνοντας καθοδικότητα (Σχήμα 4.95).

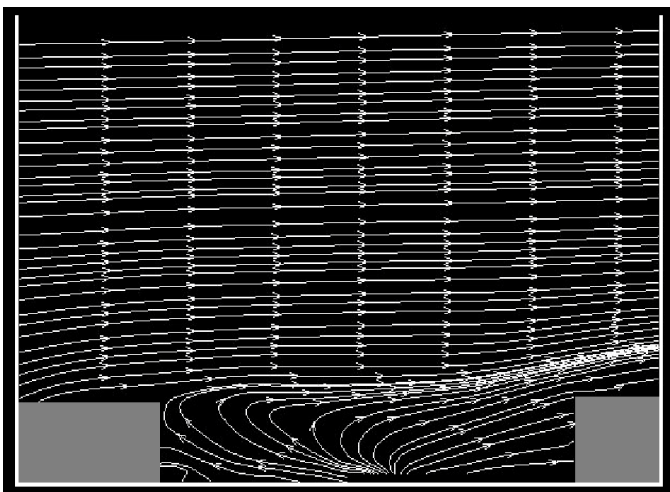
Στο Σχήμα 4.98, η ταχύτητα, και πάλι, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0 - 0.2$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.99, μπορεί φαίνεται η κίνηση της ροής καθώς περνά από το 2^o εμπόδιο, ενώ γίνεται αντιληπτό ότι γύρω οι περιοχές γύρω από τα εμπόδια, τα διανύσματα φαίνονται πολύ μικρά. Σε αυτή την περίπτωση, και εξαιτίας της προοπτικής που έχουν οι περιοχές, αυτού του είδους το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται σε κακή γωνία λήψης.



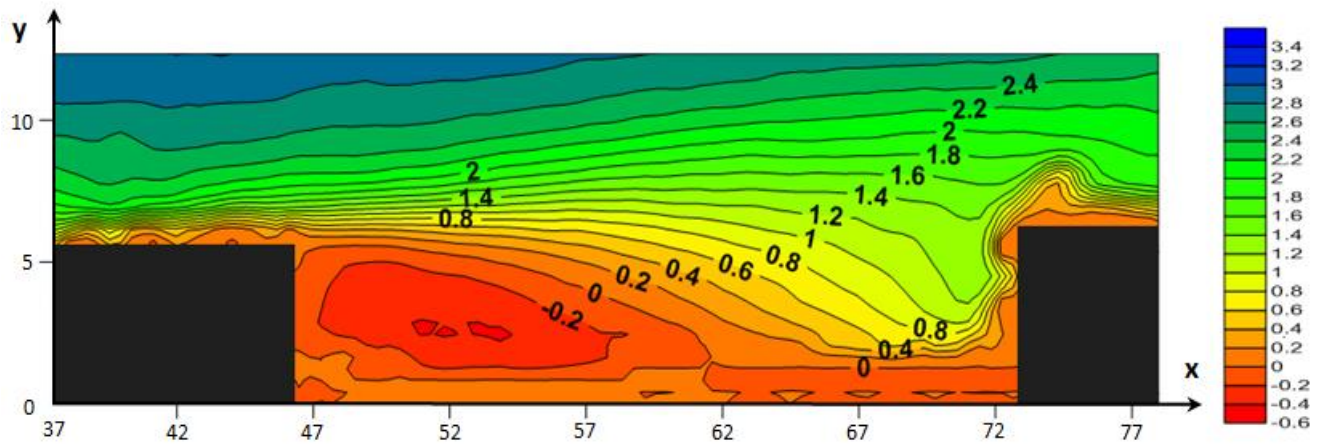
Σχήμα 4.99 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_x/2$

Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο

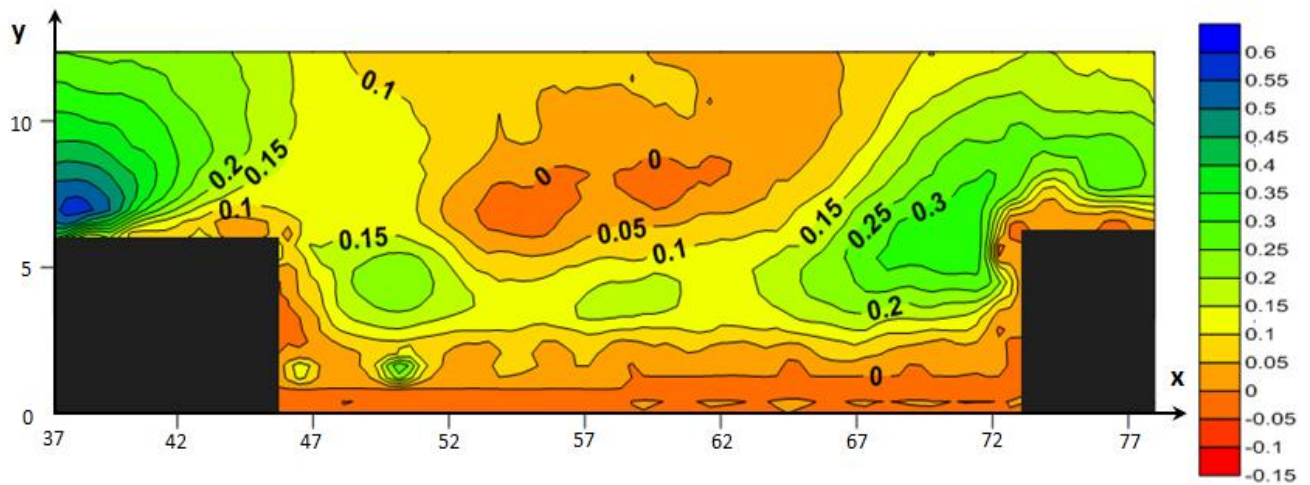


Σχήμα 4.100 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 2^ο και το 3^ο εμπόδιο

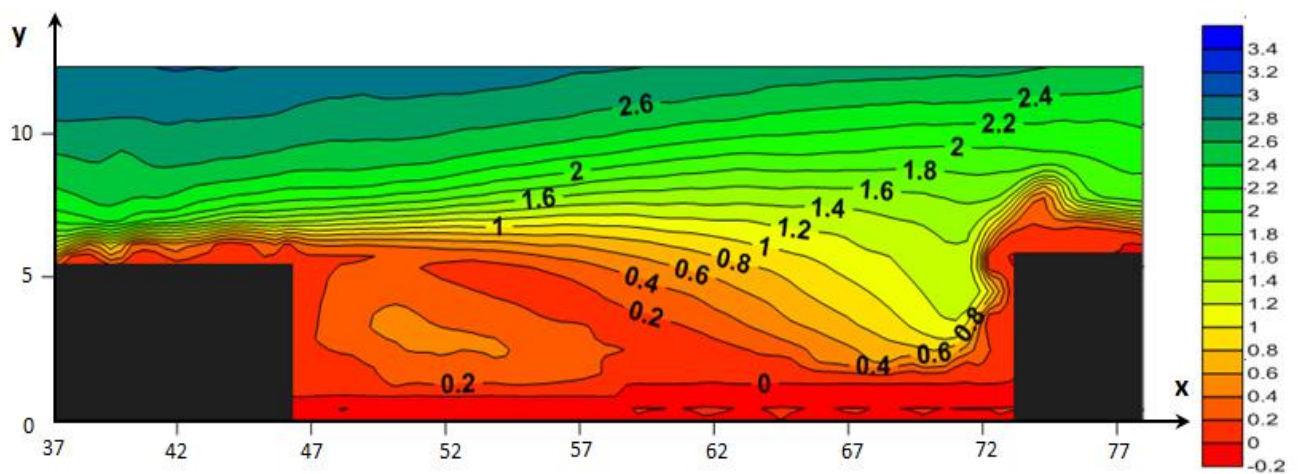
Στο επίπεδο xy που εξετάζεται, η ροή προσκρούει στο 2^ο εμπόδιο και ακολούθως περνάει πίσω από το 3^ο εμπόδιο. Στο Σχήμα 4.100 δε φαίνεται να υπάρχει ανακυκλοφορία. Παρόλα αυτά, η δομή της ροής στο μέσο της κοιλότητας, που οφείλεται στην κίνηση της ροής γύρω από το 2^ο εμπόδιο, μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση της ροής μέσα στην κοιλότητα, κοντά στο εξεταζόμενο επίπεδο. Η ροή φαίνεται να έχει ανοδική πορεία.



Σχήμα 4.101 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 2^o και 3^o εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.102 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 2^o και 3^o εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



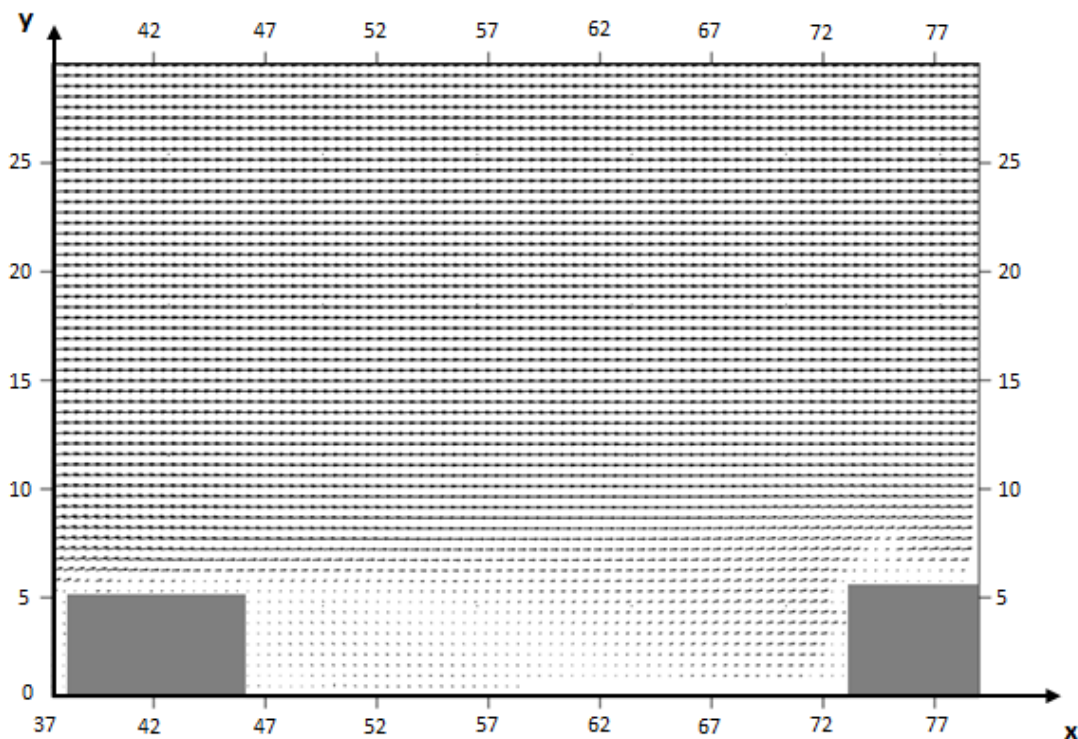
Σχήμα 4.103 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 2^o και 3^o εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.101, η ταχύτητα φαίνεται και πάλι, να μεγαλώνει σταδιακά. Η μέγιστη τιμή της U , στη γειτνίαση των εμποδίων, εμφανίζεται πάνω από το 2^ο εμπόδιο, σε μια απόσταση περίπου 12 mm από το κάτω τοίχωμα. Οι αρνητικές τιμές στην κατάντι πλευρά του 2^{ου} εμποδίου, δείχνει την αναστροφή της ροής στην περιοχή αυτή. Στην περιοχή γύρω από την κορυφή του 3^{ου} εμποδίου, η μορφή των ισοϋψών δείχνει επιβράδυνση καθώς η ροή περνάει ανάμεσα στα δύο εμπόδια (το 3^ο και το απέναντι από αυτό) μέχρι λίγο πιο πάνω από το ύψος των εμποδίων, ενώ στη συνέχεια, η συγκέντρωση των ισοϋψών δείχνει επιτάχυνση στην περιοχή αυτή.

Στο Σχήμα 4.102, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια περιοχή στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 2^{ου} εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο 2^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Μεγάλες σχετικά τιμές της V , εντοπίζονται σε μια περιοχή ανάντι της κορυφής του 3^{ου} εμποδίου, όπου η ροή σημειώνει ανοδική πορεία λόγω του ότι δεν μπορεί να περάσει εξ ολοκλήρου ανάμεσα στα εμπόδια και ένα μέρος της επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα (Σχήμα 4.94).

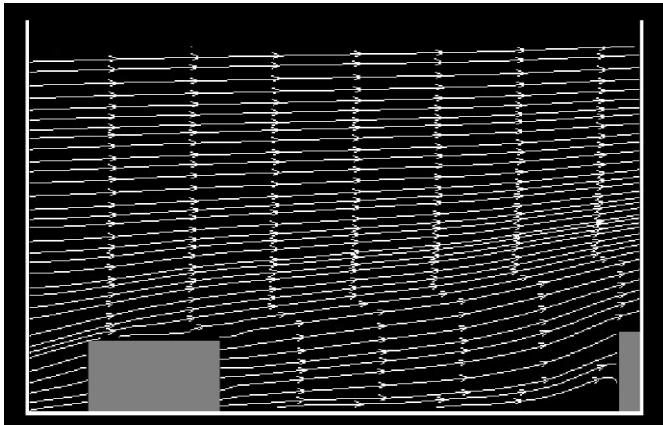
Στο Σχήμα 4.103, η ταχύτητα, και πάλι, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

Στο Σχήμα 4.104, μπορεί να φανεί η ίδια κίνηση της ροής με τη μορφή διανυσμάτων.



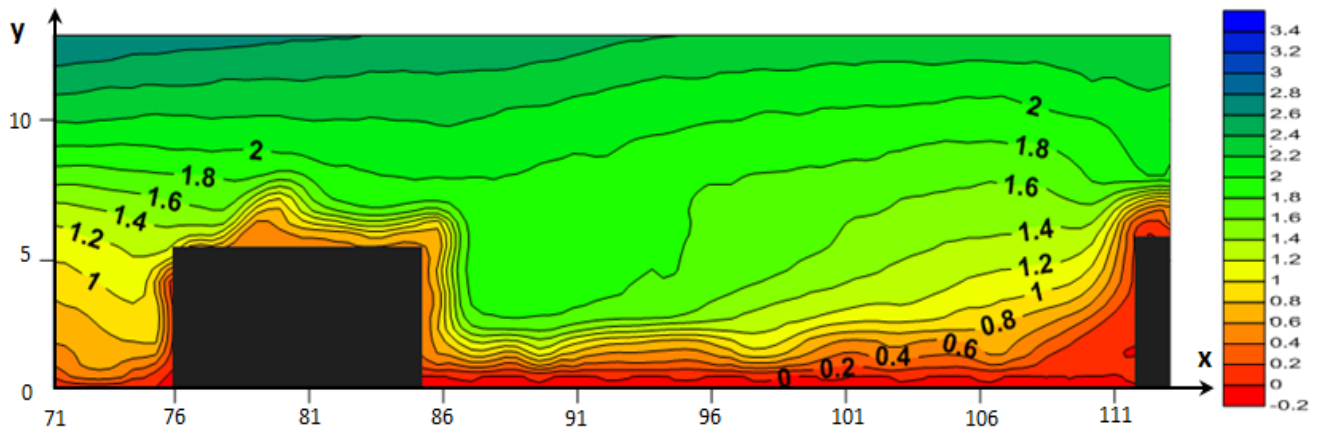
Σχήμα 4.104 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_x/2$

Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο

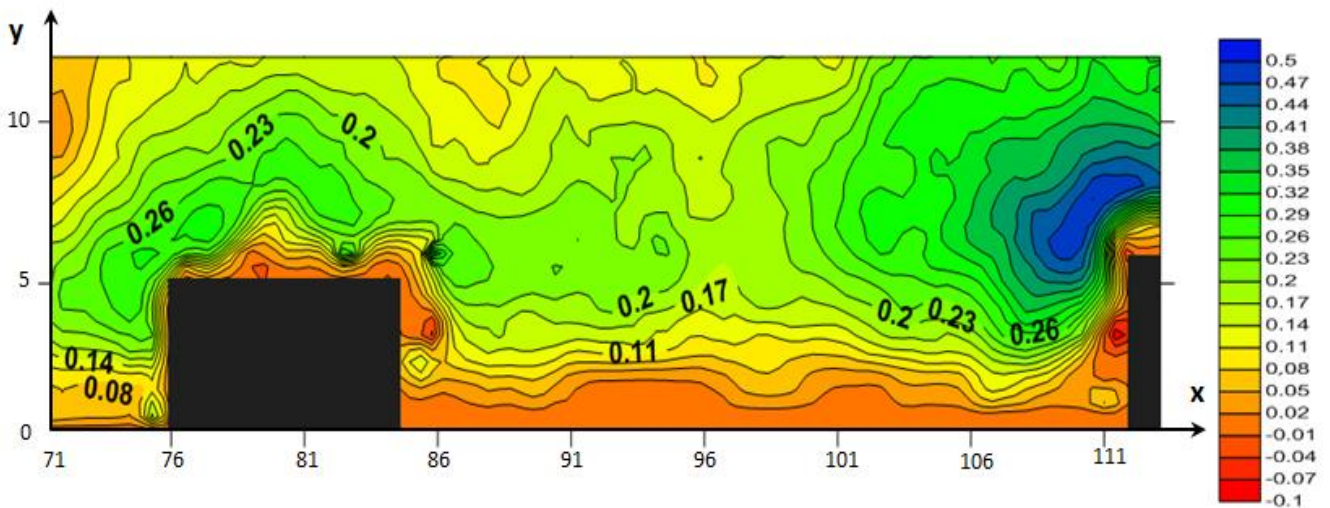


Στο εξεταζόμενο επίπεδο, η ροή περνά μπροστά από το 3^ο εμπόδιο και το απέναντί του (Σχήμα 4.94) και «χτυπάει» στο 4^ο. Στο Σχήμα 4.105, η μορφή του πεδίου δείχνει ότι μπορεί να γίνεται αποκόλληση στην κάτω ανάντι γωνία του 4^{ου} εμποδίου σε παράλληλο επίπεδο (κατά μήκος του άξονα z). Αυτή η μορφή των γραμμών ροής στην κάτω ανάντι γωνία του 4^{ου} εμποδίου, οφείλεται στην κίνηση της ροής γύρω από το εμπόδιο.

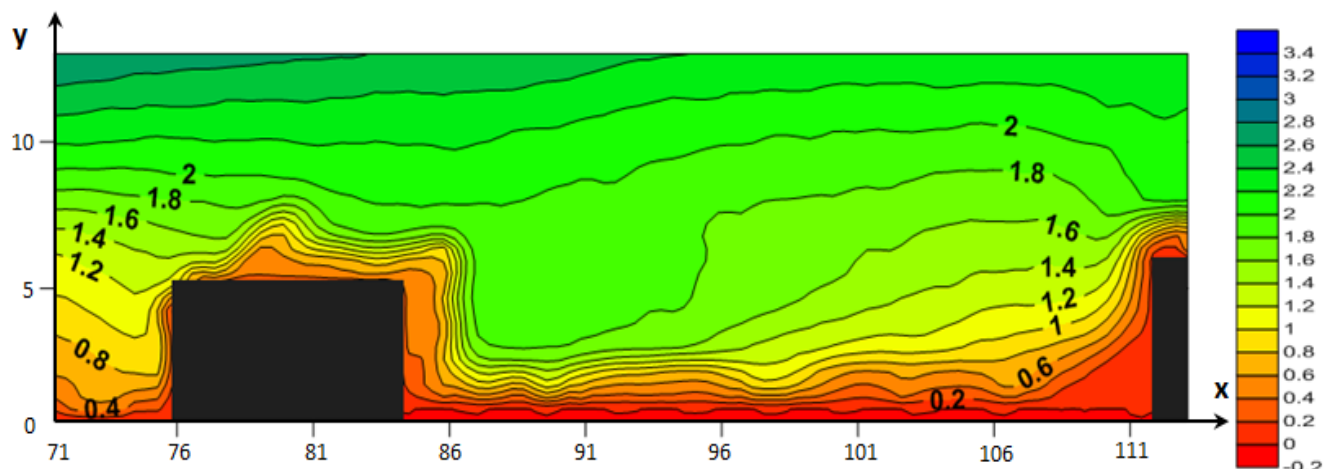
Σχήμα 4.105 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.106 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.107 Ισοϋψείς Λόγου V ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



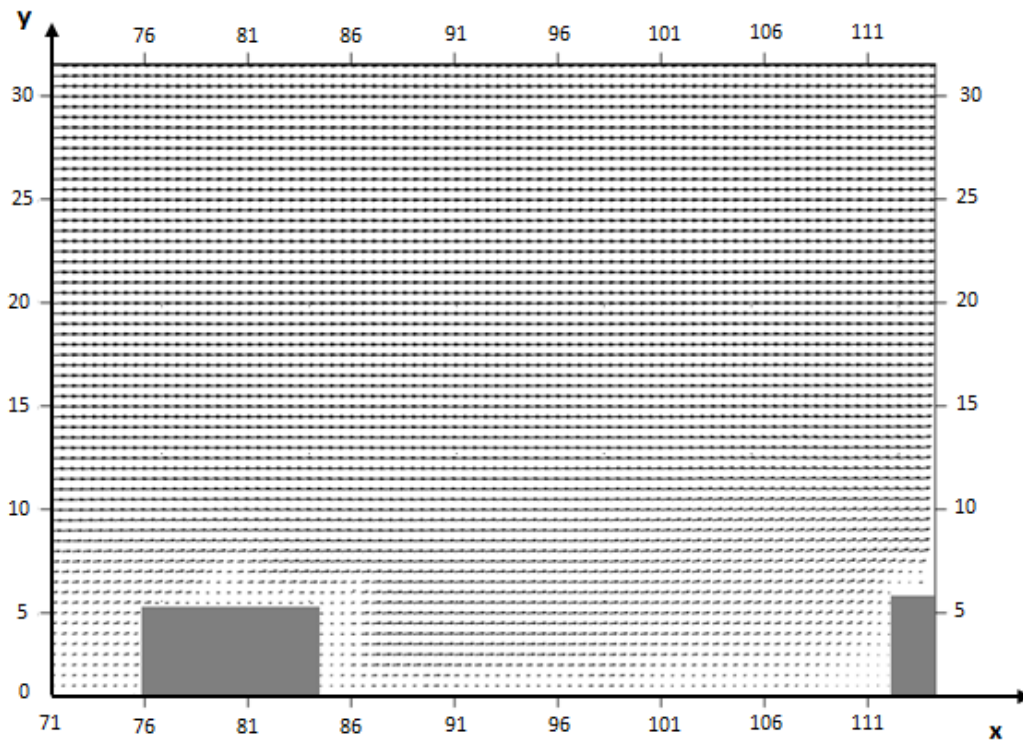
Σχήμα 4.108 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο $((U^2 + V^2)^{1/2} - \text{Μέτρο ταχύτητας})$

Στο Σχήμα 4.106, η όψη των ισοϋψών είναι ένδειξη επιτάχυνσης της ροής σε μια περιοχή κατάντι του 3^{ου} εμποδίου, καθώς αυτή περνάει ανάμεσα στο 3^ο εμπόδιο και το απέναντί του. Ο λόγος είναι ότι σε αυτή την περιοχή, μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται σε μικρότερη απόσταση από το τοίχωμα. Στη συνέχεια η ροή, καθώς προχωράει προς το 4^ο εμπόδιο φαίνεται να επιβραδύνεται και πάλι εξαιτίας της παρουσίας του, ενώ στην κορυφή του, και πάλι η παρατήρηση μεγαλύτερων ταχυτήτων σε πιο μικρό ύψος δείχνει επιτάχυνση της ροής. Η ταχύτητα είναι μηδενική κοντά στο τοίχωμα, όπως είναι αναμενόμενο και από τη συνθήκη μη-ολίσθησης, και αυξάνεται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα. Η συγκέντρωση των ισοϋψών καμπύλων στην κορυφή του 4^{ου} εμποδίου είναι ένδειξη επιτάχυνσης στην περιοχή αυτή.

Στο Σχήμα 4.107, η ταχύτητα V φαίνεται να παίρνει αρκετά μεγάλες τιμές σε μια περιοχή πάνω από την κορυφή του 3^{ου}, όπου η ροή εξαιτίας της επίδρασης αυτού και του απέναντί του, επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Οι μέγιστες τιμές της V , εντοπίζονται στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς την ελεύθερη ροή.

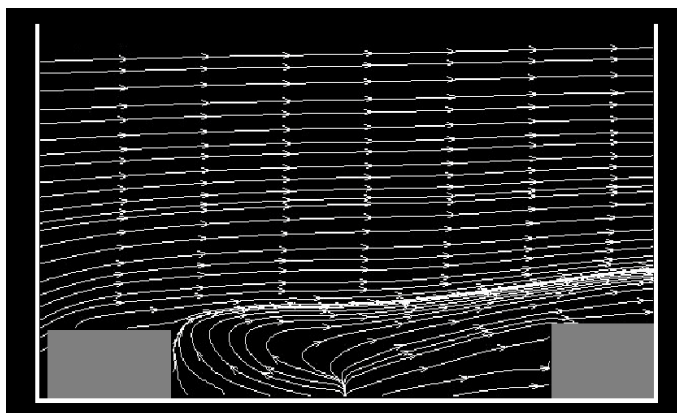
Στο Σχήμα 4.108, οι ισοϋψείς του μέτρου της ταχύτητας επηρεάζονται πιο πολύ από την ταχύτητα U που είναι και η μεγαλύτερη, γι' αυτό και η ομοιότητα με το Σχήμα 4.106. Η ταχύτητα, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις γίνεται ελάχιστη στα σημεία που η U λαμβάνει τις μικρότερες (κατά απόλυτη τιμή) τιμές, και αυξάνεται σταδιακά απομακρυνόμενη από αυτά.

Στο Σχήμα 4.109 φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας υπό τη μορφή διανυσμάτων. Η επιτάχυνση φαίνεται στην αύξηση του μήκους των διανυσμάτων και αντίστοιχα η επιβράδυνση στη μείωση του μήκους τους.



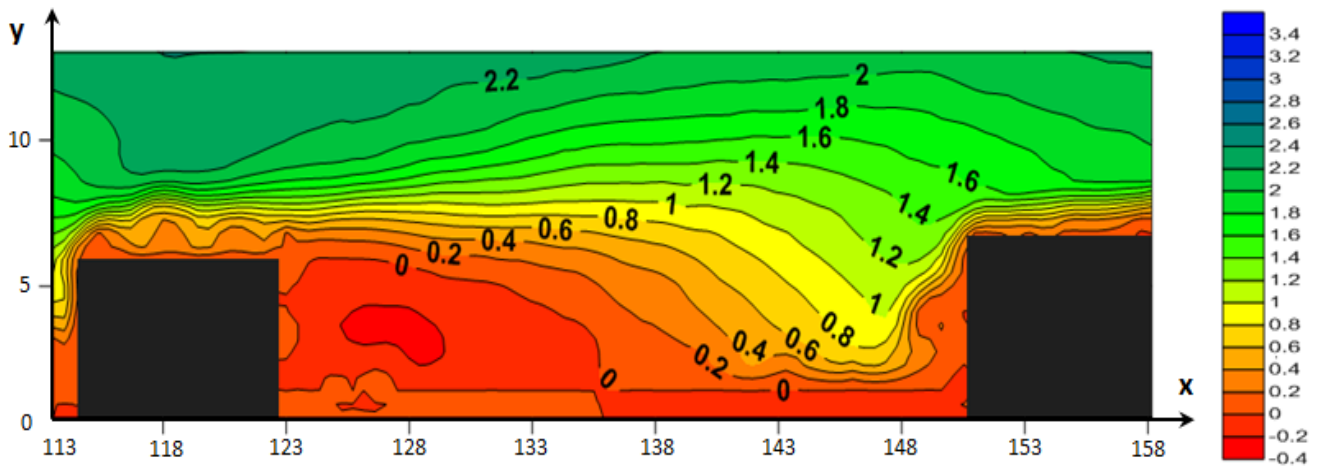
Σχήμα 4.109 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_x/2$

Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο

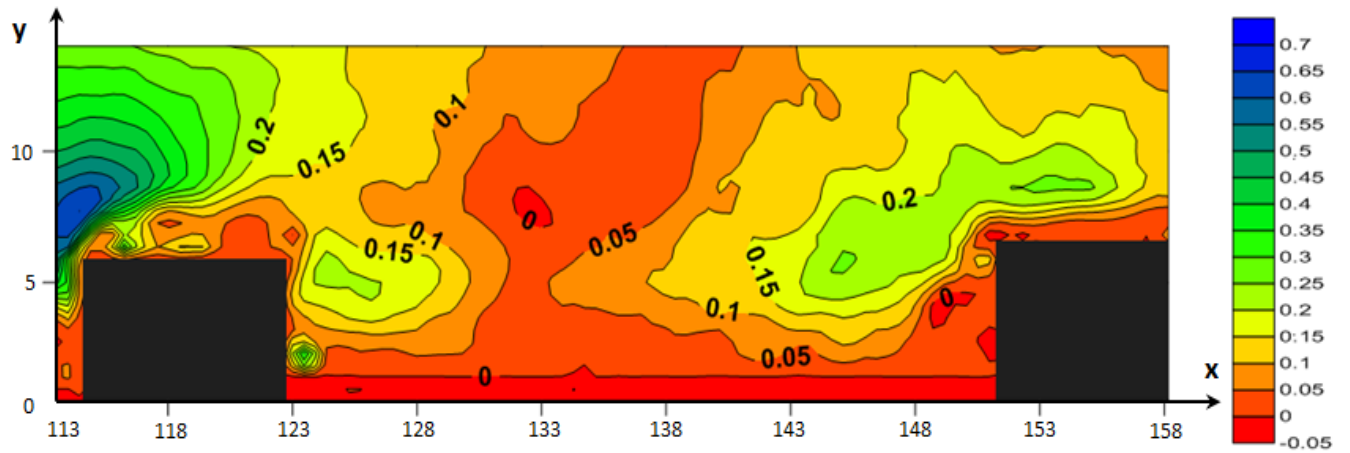


Σχήμα 4.110 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 4^ο και το 5^ο εμπόδιο

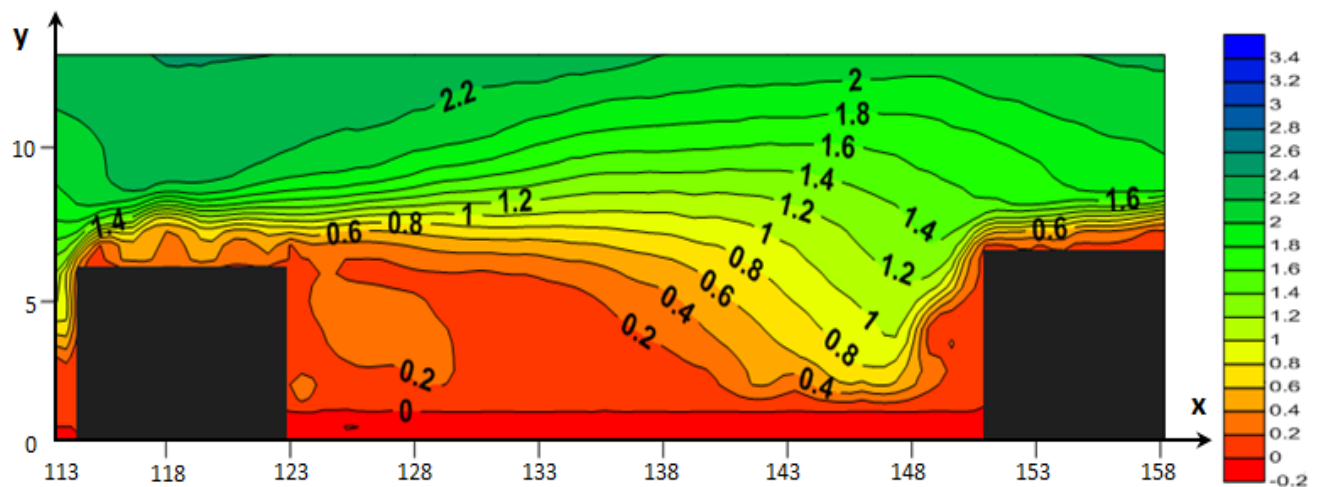
Στο επίπεδο xy που εξετάζεται, η ροή προχωρώντας πάνω και γύρω από το 4^ο εμπόδιο, συνεχίζει περνώντας πίσω από το 5^ο εμπόδιο (ανάμεσα σε αυτό και το απέναντί του). Παρόλο που το Σχήμα 4.110 δε φαίνεται να υπάρχει ανακυκλοφορία, η δομή της ροής περίπου στο κέντρο της κοιλότητας, μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ότι γίνεται αποκόλληση της ροής μέσα στην κοιλότητα, κοντά στο εξεταζόμενο επίπεδο. Η ροή φαίνεται να έχει ανοδική πορεία.



Σχήμα 4.111 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.112 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



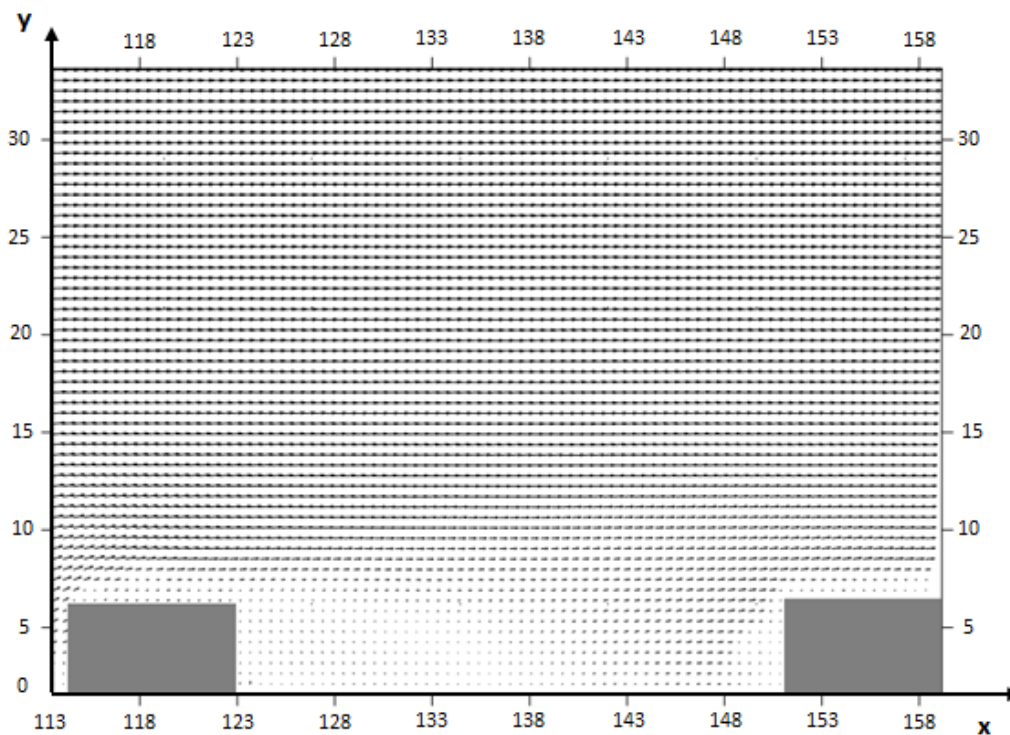
Σχήμα 4.113 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.111, φαίνεται ότι στην άμεση περιοχή κατάντι του 4^{ου} εμποδίου, η ταχύτητα U , μειώνεται σημαντικά. Το εμπόδιο δημιουργεί επιβράδυνση στη ροή, που όμως δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δημιουργηθεί αποκόλληση στο μελετούμενο επίπεδο. Η ταχύτητα συνεχίζει να μεγαλώνει σταδιακά καθώς απομακρύνεται από το τοίχωμα και το 4^ο εμπόδιο. Στην κορυφή του 5^{ου} εμποδίου, μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται σε μικρότερο ύψος, κάτι που δείχνει επιτάχυνση στη συγκεκριμένη περιοχή. Στην περιοχή γύρω από την κορυφή του 5^{ου} εμποδίου, η μορφή των ισοϋψών δείχνει επιβράδυνση καθώς η ροή περνάει ανάμεσα στα δύο εμπόδια (το 5^ο και το απέναντι από αυτό) μέχρι λίγο πιο πάνω από το ύψος των εμποδίων, ενώ στη συνέχεια, η συγκέντρωση των ισοϋψών δείχνει επιτάχυνση στην περιοχή αυτή.

Στο Σχήμα 4.112, η μέγιστη τιμή της V , παρουσιάζεται σε μια περιοχή στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 4^{ου} εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο 4^ο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελεύθερου ρεύματος. Μεγάλες σχετικά τιμές της V , εντοπίζονται σε μια περιοχή ανάντι της κορυφής του 5^{ου} εμποδίου, όπου η ροή σημειώνει ανοδική πορεία λόγω του ότι δεν μπορεί να περάσει εξ ολοκλήρου ανάμεσα στα εμπόδια και ένα μέρος της επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα (Σχήμα 4.94).

Στο Σχήμα 4.113, η ταχύτητα, και πάλι, γίνεται ελάχιστη περίπου γύρω από τα σημεία που ανήκουν στην ισοϋψή καμπύλη $U = 0$ (κατά μήκος του κάτω τοιχώματος), και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

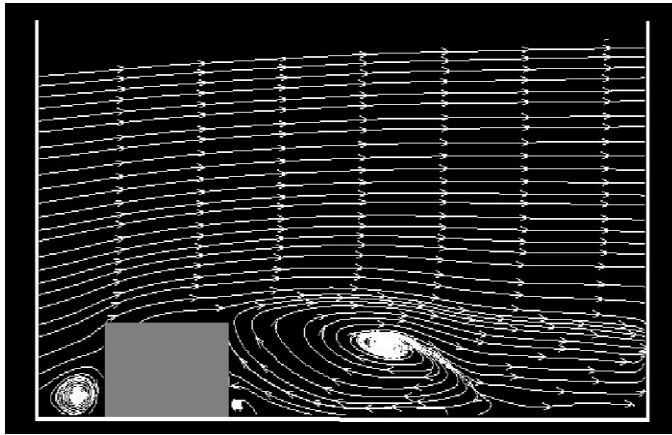
Στο Σχήμα 4.114, μπορεί να φανεί η ίδια κίνηση της ροής με τη μορφή διανυσμάτων.



Σχήμα 4.114 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_k/2$

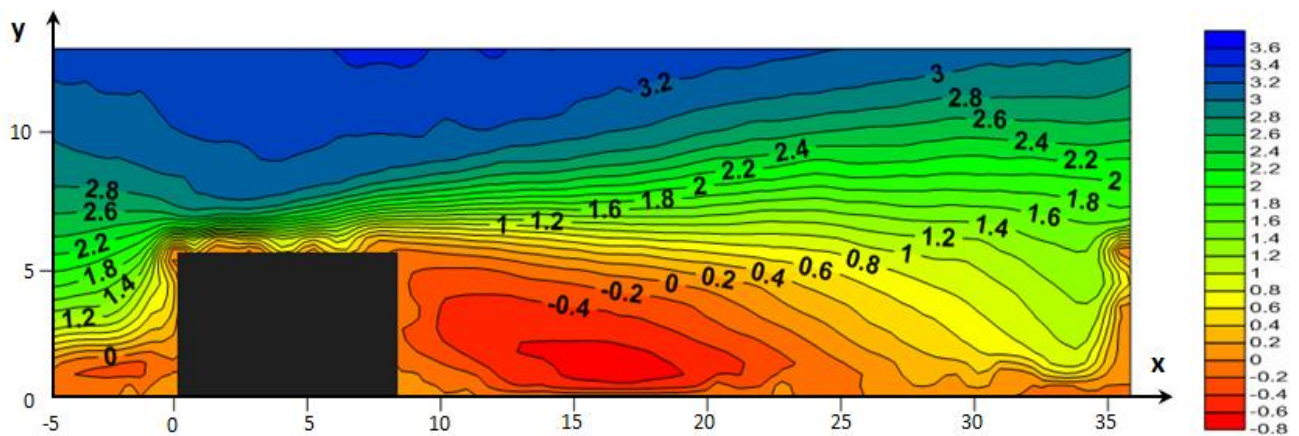
Επίπεδο $xy: W_x/4$:

Περιοχή ανάμεσα στο 1° και 2° εμπόδιο

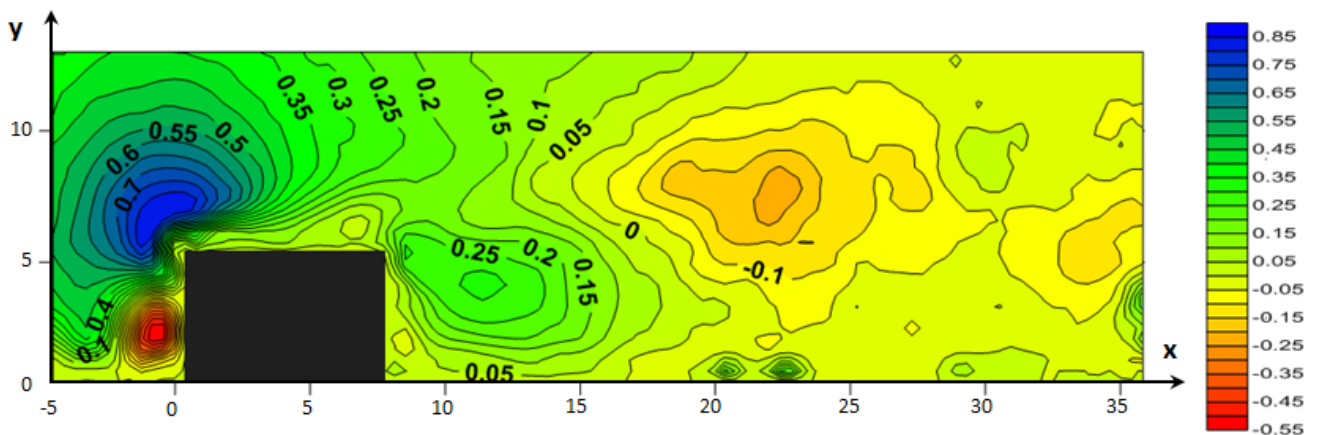


Στο Σχήμα 4.115, φαίνεται μόνο το 1° εμπόδιο, όπου στο εξεταζόμενο επίπεδο, η ροή προσκρούει σε αυτό. Στην κάτω ανάντι γωνία του σχηματίζεται μια φουσαλίδα αποκόλλησης με φορά δεξιόστροφη, και αντίστοιχα στην κάτω κατάντι γωνία του σχηματίζεται μια μικρότερη φουσαλίδα με αριστερόστροφη φορά. Κατάντι του εμποδίου φαίνεται να σχηματίζεται μια μεγάλη φουσαλίδα ανακυκλοφορίας. Η ροή φαίνεται να έχει ανοδική πορεία.

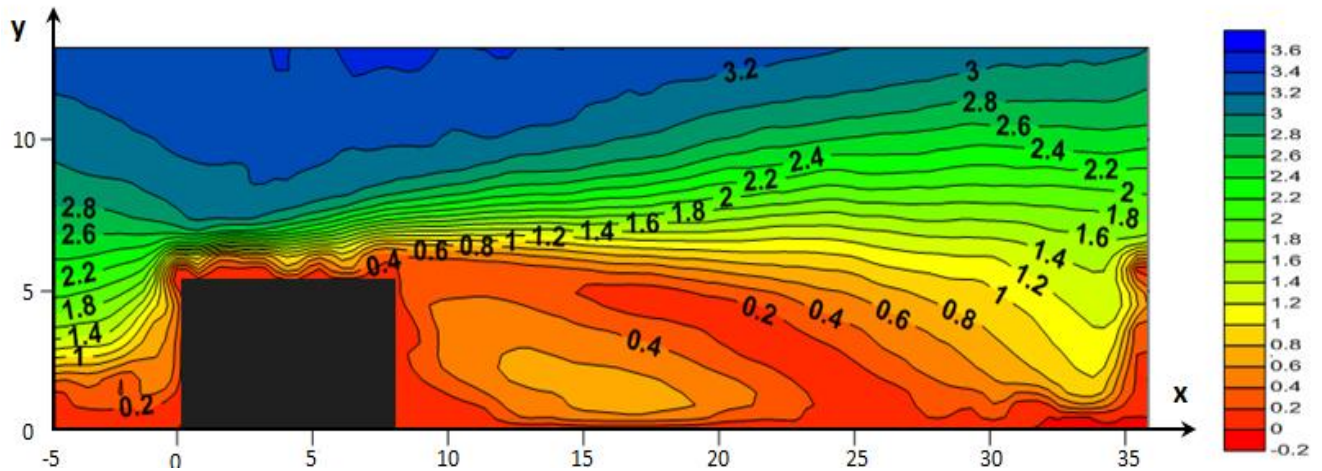
Σχήμα 4.115 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 1° και το 2° εμπόδιο



Σχήμα 4.116 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.117 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)

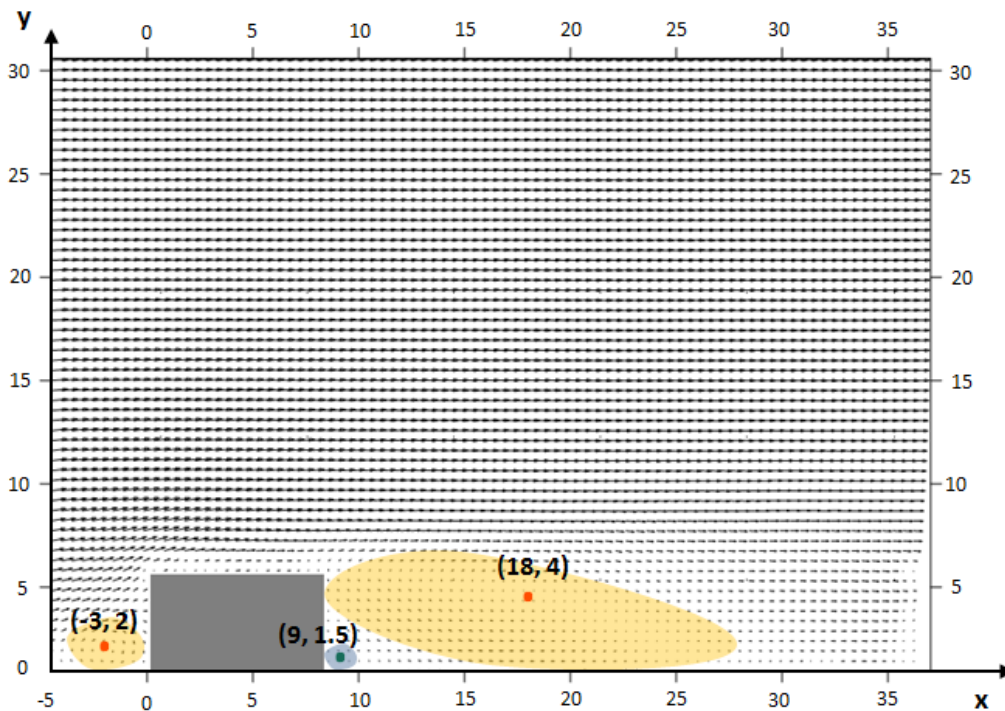


Σχήμα 4.118 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 1° και 2° εμπόδιο $((U^2 + V^2)^{1/2} - \text{Μέτρο ταχύτητας})$

Στο Σχήμα 4.116, φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας U καθώς η ροή προσκρούει στο 1° εμπόδιο. Καταρχήν, μπορεί να παρατηρηθεί η επιβράδυνση της ροής καθώς αυτή πλησιάζει το 1° εμπόδιο, που προκαλεί μια μικρή δίνη στην κάτω ανάντι γωνία του $1^{\text{ου}}$ εμποδίου με φορά δεξιόστροφη (Σχήμα 4.115). Στην κορυφή του εμποδίου φαίνεται ότι υπάρχει μια μικρή επιτάχυνση της ροής, καθώς αυτή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται στη ροή ελευθέρου ρεύματος. Τέλος, οι ισοϋψείς της U , ανάντι του εμποδίου δείχνουν επιβράδυνση που (σύμφωνα με το Σχήμα 4.115) οδηγεί σε αποκόλληση της ροής και δημιουργία μιας μεγάλης δίνης ανακυκλοφορίας. Στην περιοχή γύρω από την κορυφή του $1^{\text{ου}}$ εμποδίου, η μορφή των ισοϋψών δείχνει επιβράδυνση καθώς η ροή περνάει μπροστά από αυτό μέχρι λίγο πιο πάνω από το ύψος του, ενώ στη συνέχεια, η συγκέντρωση των ισοϋψών δείχνει επιτάχυνση στην περιοχή αυτή.

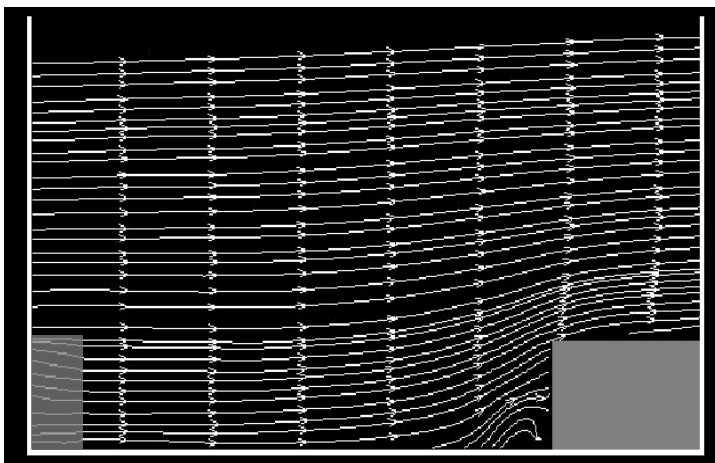
Στο Σχήμα 4.117, η ταχύτητα V φαίνεται να παίρνει τις μέγιστες θετικές τιμές της στην περιοχή ανάντι της κορυφής του $1^{\text{ου}}$ εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς τη ροή ελευθέρου ρεύματος. Μεγάλες – σχετικά – θετικές τιμές της, παρατηρούνται στην περιοχή κατάντι του εμποδίου, όπου λόγω της ανακυκλοφορίας, η ροή κινείται ανοδικά. Οι μέγιστες αρνητικές τιμές της V , παρουσιάζονται στην κάτω ανάντι γωνία του εμποδίου, όπου λόγω της δίνης η ροή κινείται καθοδικά. Μεγάλες – σχετικά – αρνητικές τιμές της V , παρουσιάζονται σε μια περιοχή κατάντι του εμποδίου, όπου λόγω της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, η ροή κινείται καθοδικά.

Στο Σχήμα 4.118, και πάλι είναι εμφανές ότι η μορφή των ισοϋψών του μέτρου της ταχύτητας, εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα U , γι'αυτό και η ομοιότητα ανάμεσα στα Σχήματα 4.116 και 4.118. Το μέτρο γίνεται ελάχιστο στα σημεία που η U γίνεται (κατά απόλυτη τιμή) ελάχιστη, και μεγαλώνει απομακρυνόμενο από αυτά. Το Σχήμα 4.118, φαίνεται να διαφοροποιείται από το Σχήμα 4.116, στα σημεία όπου το μέτρο της κάθετης ταχύτητας V γίνεται συγκρίσιμο με αυτό της παράλληλης ταχύτητας U . Στο Σχήμα 4.119, σημειώνονται οι ζώνες ανακυκλοφορίας, και τα κέντρα τους καταγράφονται. Η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, φαίνεται να επανακολλάται στο τοίχωμα, σε απόσταση 3.8 k από το 1° εμπόδιο ($x = 27$).



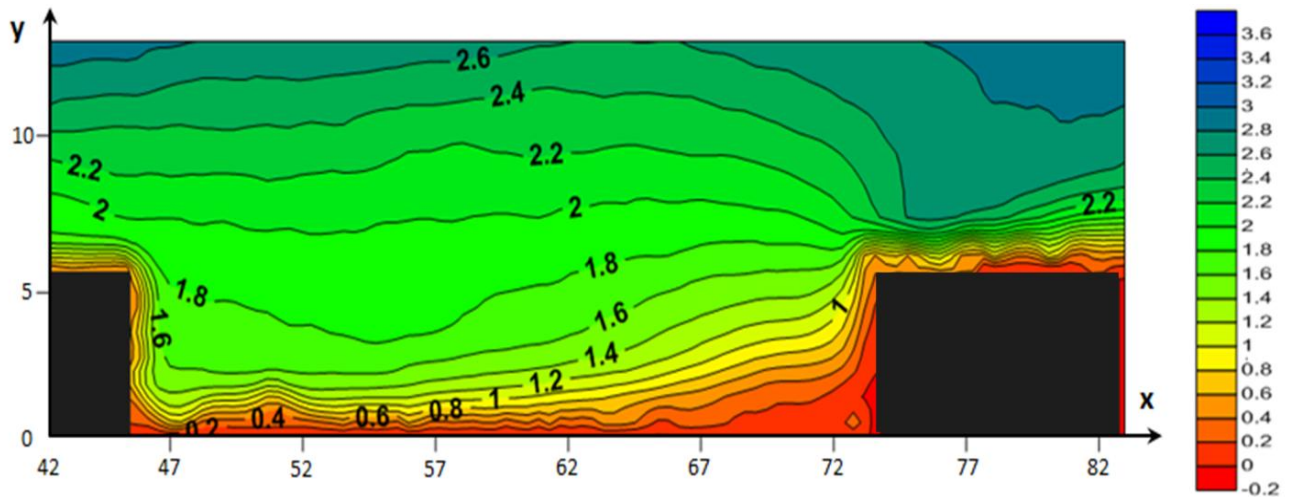
Σχήμα 4.119 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_1/4$

Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο

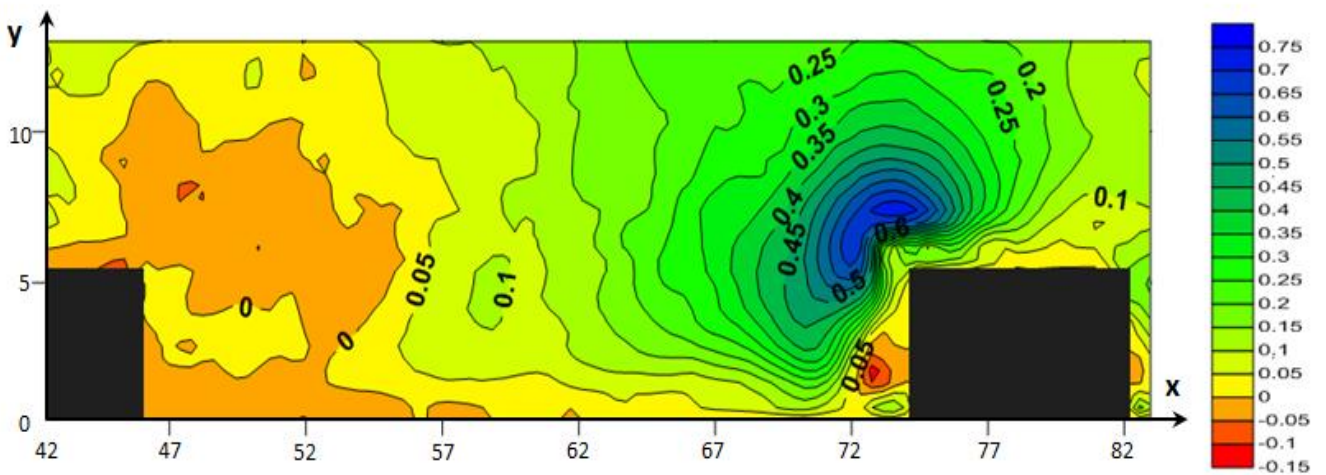


Σχήμα 4.120 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 2^ο και το 3^ο εμπόδιο

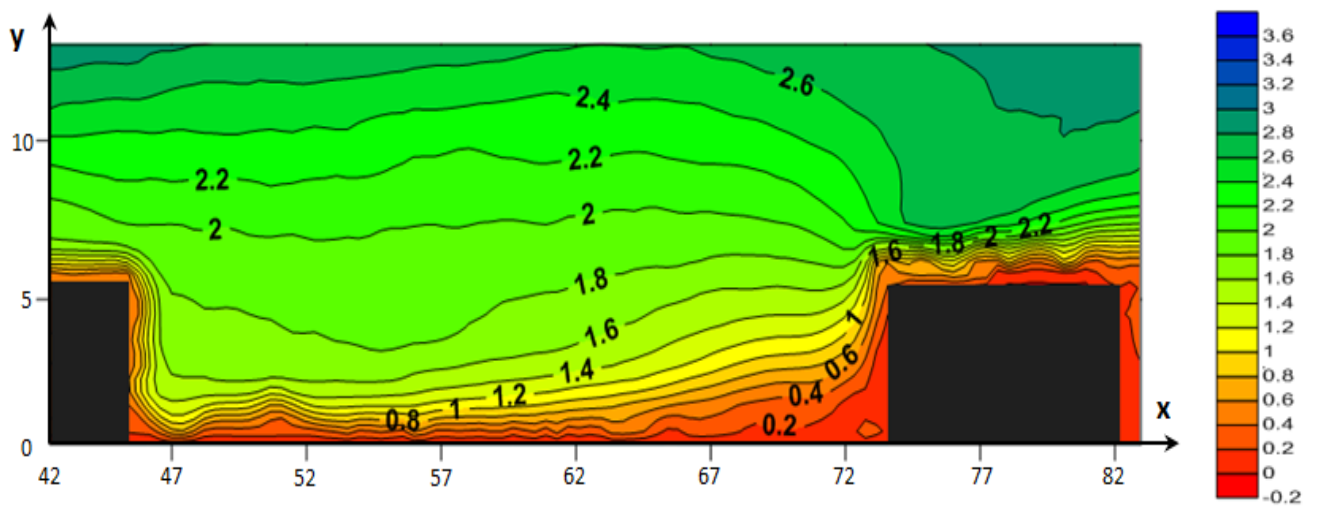
Στο επίπεδο που εξετάζεται, η ροή περνά μπροστά από το 2^ο εμπόδιο και «χτυπάει» στο 3^ο. Στο Σχήμα 4.120, οι γραμμές ροής, φαίνεται να «καμπυλώνουν» αρκετά στην κάτω ανάντι πλευρά του 3^{ου} εμποδίου, λόγω επιβράδυνσης. Παρόλα αυτά δε φαίνεται να υπάρχει αποκόλληση και κατ' επέκταση, στο μελετούμενο επίπεδο δεν παρατηρείται ανακυκλοφορία. Η ροή φαίνεται να παρουσιάζει ανοδική πορεία λόγω της παρουσίας του 3^{ου} εμποδίου.



Σχήμα 4.121 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.122 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



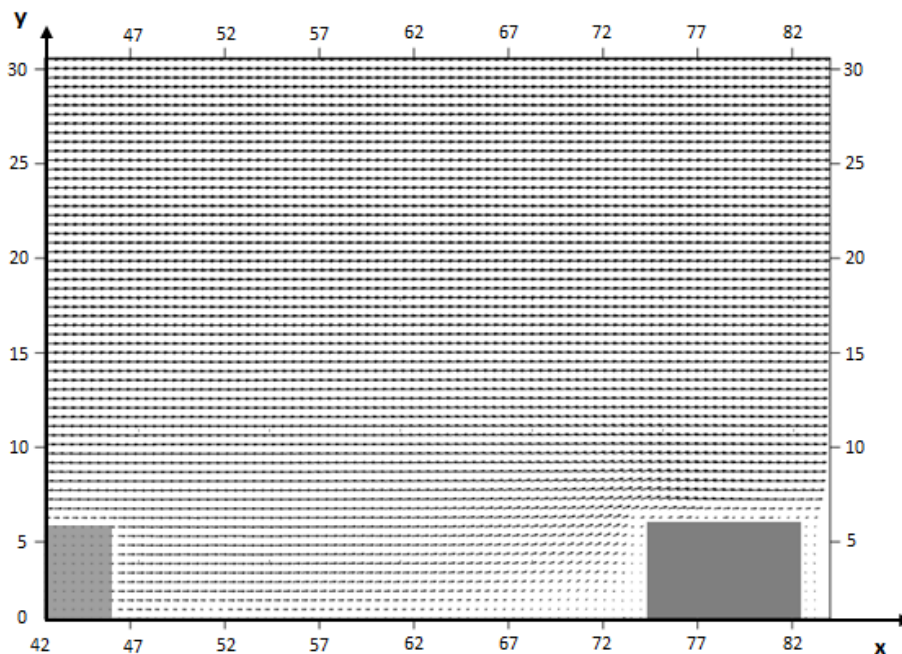
Σχήμα 4.123 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.121, η όψη των ισοϋψών είναι ένδειξη επιτάχυνσης της ροής σε μια περιοχή κατάντι του 2^{ου} εμποδίου, καθώς αυτή περνάει ανάμεσα στο 2^ο εμπόδιο και το απέναντί του. Ο λόγος είναι ότι σε αυτή την περιοχή, μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται σε μικρότερη απόσταση από το τοίχωμα. Στη συνέχεια η ροή, καθώς προχωράει προς το 3^ο εμπόδιο φαίνεται να επιβραδύνεται και πάλι εξαιτίας της παρουσίας του, ενώ στην κορυφή του, και πάλι η παρατήρηση μεγαλύτερων ταχυτήτων σε πιο μικρό ύψος δείχνει επιτάχυνση της ροής. Η ταχύτητα είναι μηδενική κοντά στο τοίχωμα, όπως είναι αναμενόμενο και από τη συνθήκη μη-ολίσθησης, και αυξάνεται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα. Στην κορυφή του 3^{ου} εμποδίου, η έντονη συγκέντρωση των ισοϋψών δείχνει επιτάχυνση της ροής στο σημείο αυτό.

Στο Σχήμα 4.122, οι μέγιστες τιμές της V , εντοπίζονται στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 3^{ου} εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς την ελεύθερη ροή. Αρνητικές τιμές της V παρατηρούνται στην ανάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου όπου η ροή παρουσιάζει μια μικρή καθοδικότητα.

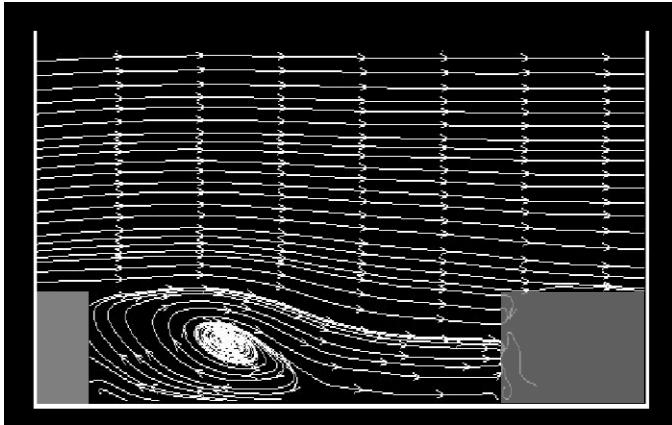
Στο Σχήμα 4.123, οι ισοϋψείς του μέτρου της ταχύτητας, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις γίνονται ελάχιστες στα σημεία που η U λαμβάνει τις μικρότερες (κατά απόλυτη τιμή) τιμές, και αυξάνεται σταδιακά απομακρυνόμενη από αυτά.

Στο Σχήμα 4.124 φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας υπό τη μορφή διανυσμάτων. Η επιτάχυνση φαίνεται στην αύξηση του μήκους των διανυσμάτων και αντίστοιχα η επιβράδυνση στη μείωση του μήκους τους.



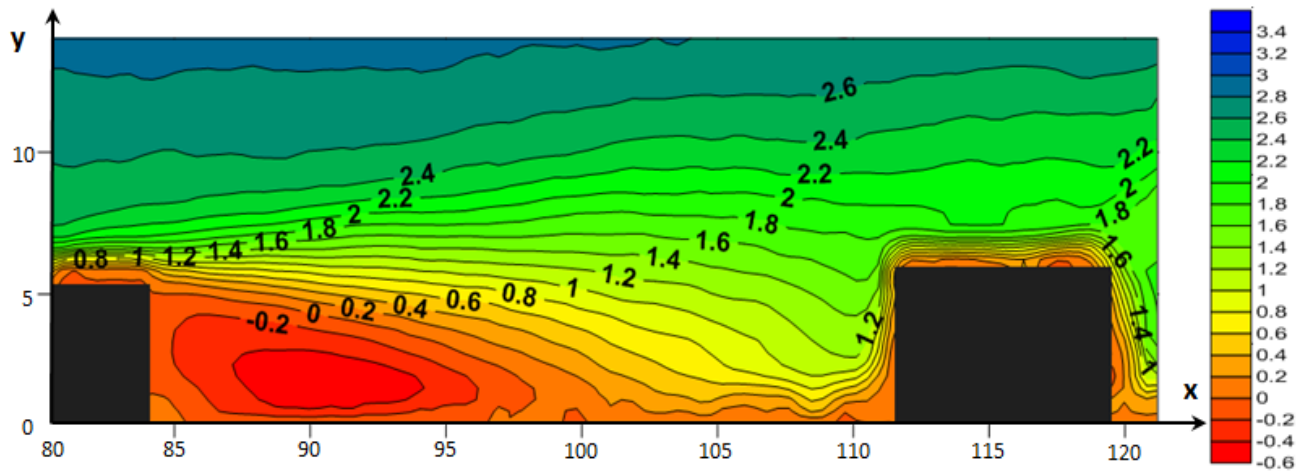
Σχήμα 4.124 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 2^ο και 3^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_x/4$

Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο

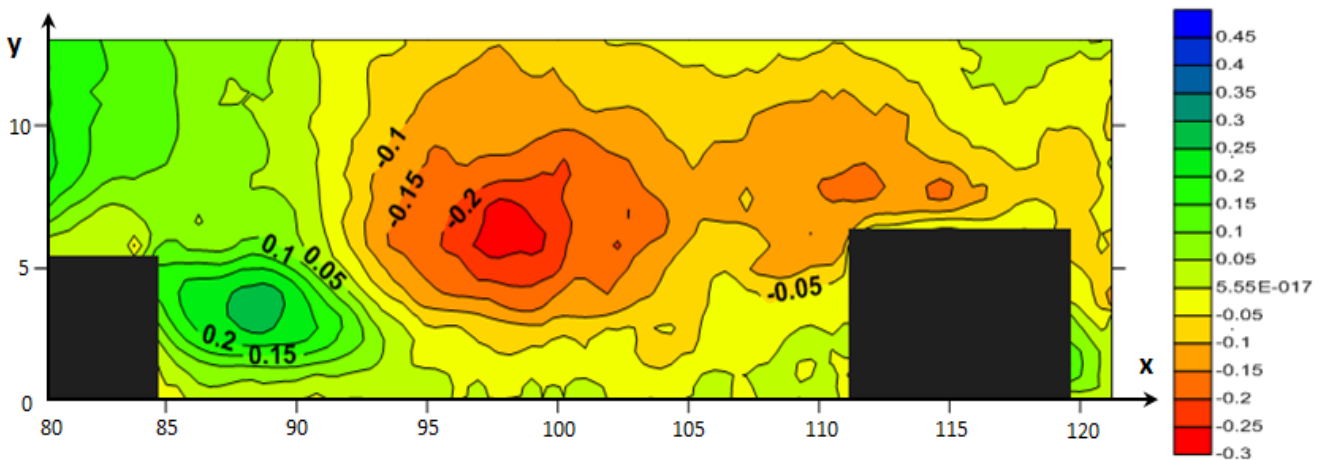


Στο εξεταζόμενο επίπεδο, η ροή περνά μπροστά από το 4^ο εμπόδιο. Στο Σχήμα 4.125, φαίνεται ότι γίνεται αποκόλληση λίγο πριν η ροή φτάσει στο 4^ο εμπόδιο, και επανακολλάται στο τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας. Η ροή έχει καθοδικότητα πάνω από την περιοχή που παρατηρείται η αποκόλληση. Εξαιτίας της παρουσίας του 4^{ου} εμποδίου πίσω από τη ροή, δεν μπορεί να ληφθεί η εικόνα της ροϊκής δομής σε αυτή την περιοχή.

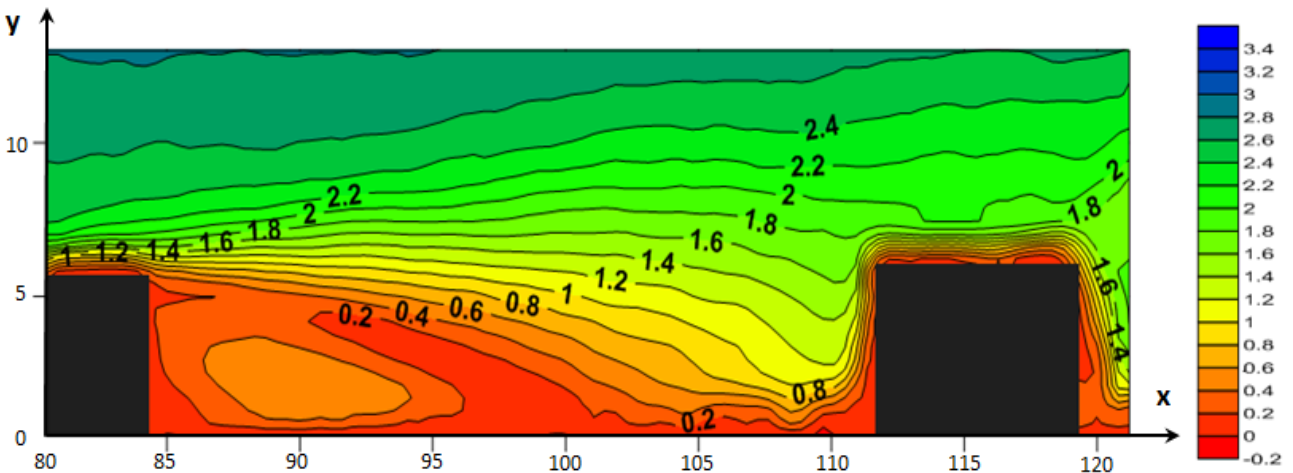
Σχήμα 4.125 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 3^ο και το 4^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.126 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.127 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



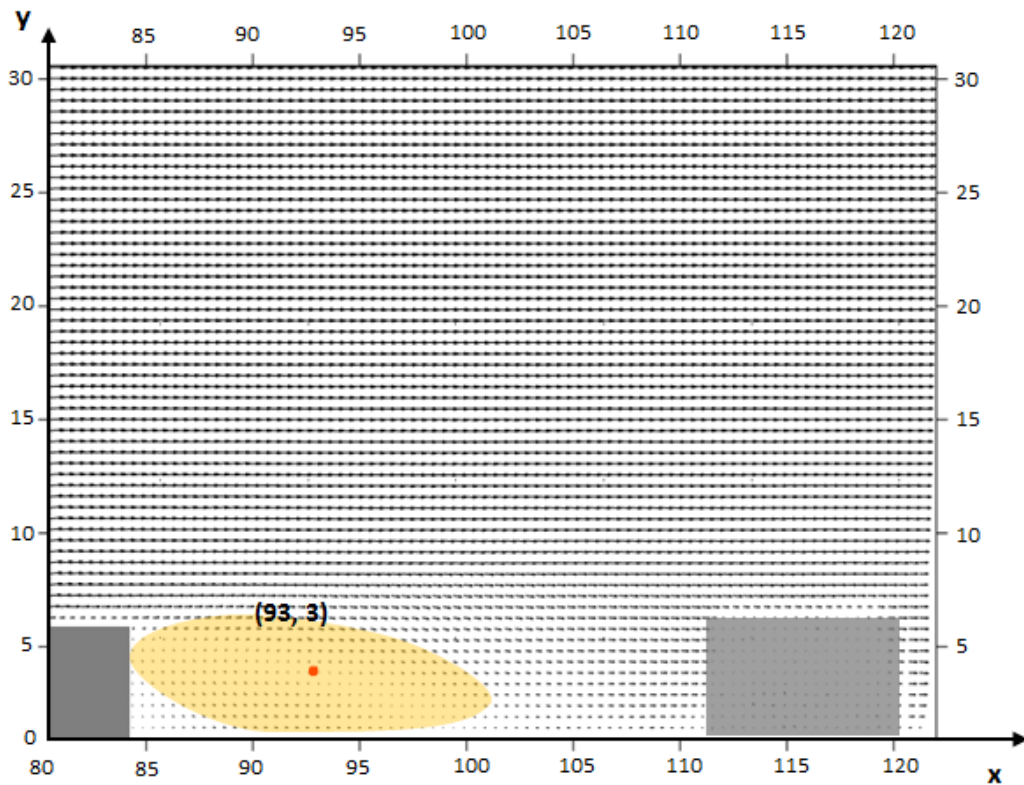
Σχήμα 4.128 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο $((U^2 + V^2)^{1/2} - \text{Μέτρο Ταχύτητας})$

Στο Σχήμα 4.126, φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας U καθώς η ροή προσκρούοντας στο 3^ο εμπόδιο προχωράει ανάμεσα στο 4^ο εμπόδιο και το απέναντί του. Οι ισοϋψείς της U , ανάντι του εμποδίου δείχνουν επιβράδυνση που (σύμφωνα με το Σχήμα 4.125) οδηγεί σε αποκόλληση της ροής και δημιουργία μιας μεγάλης δίνης ανακυκλοφορίας. Στην περιοχή γύρω από την κορυφή του 4^{ου} εμποδίου, η μορφή των ισοϋψών δείχνει επιβράδυνση καθώς η ροή περνάει μπροστά από το εμπόδιο μέχρι και λίγο πιο πάνω από το ύψος των εμποδίων, ενώ στη συνέχεια, η ελαφρά συγκέντρωση των ισοϋψών δείχνει επιτάχυνση στην περιοχή αυτή.

Στο Σχήμα 4.127, η ταχύτητα V φαίνεται να παίρνει τις μέγιστες θετικές τιμές της, στην περιοχή κατάντι του 3^{ου} εμποδίου, όπου λόγω της ανακυκλοφορίας, η ροή κινείται ανοδικά. Οι μέγιστες αρνητικές τιμές της V , παρουσιάζονται σε μια μεγάλη περιοχή κατάντι του 3^{ου} εμποδίου, όπου λόγω της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, η ροή κινείται καθοδικά.

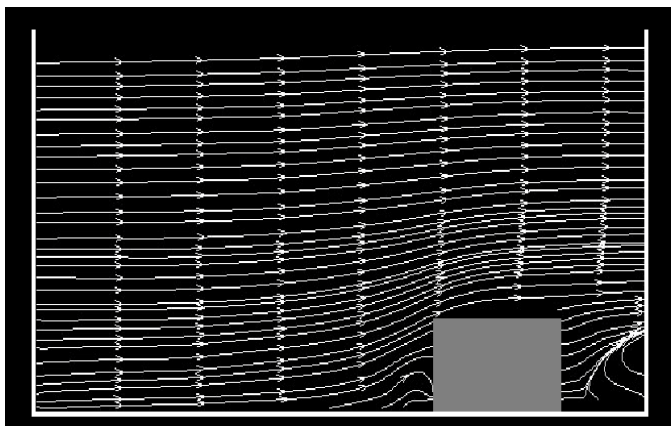
Στο Σχήμα 4.128, και πάλι φαίνεται ότι η μορφή των ισοϋψών του μέτρου της ταχύτητας, εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα U , γι' αυτό και η ομοιότητα ανάμεσα στα Σχήματα 4.126 και 4.128. Το μέτρο γίνεται ελάχιστο στα σημεία που η U γίνεται (κατά απόλυτη τιμή) ελάχιστη, και μεγαλώνει απομακρυνόμενο από αυτά. Οι διαφορές από το Σχήμα 4.126, παρουσιάζονται στα σημεία όπου η V γίνεται συγκρίσιμη με τη U .

Στο Σχήμα 4.129, σημειώνονται οι ζώνες ανακυκλοφορίας, και τα κέντρα καταγράφονται. Η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας, φαίνεται να επανακολλάται στο τοίχωμα, σε απόσταση 3.6 κ από το 3^ο εμπόδιο ($x = 102$).



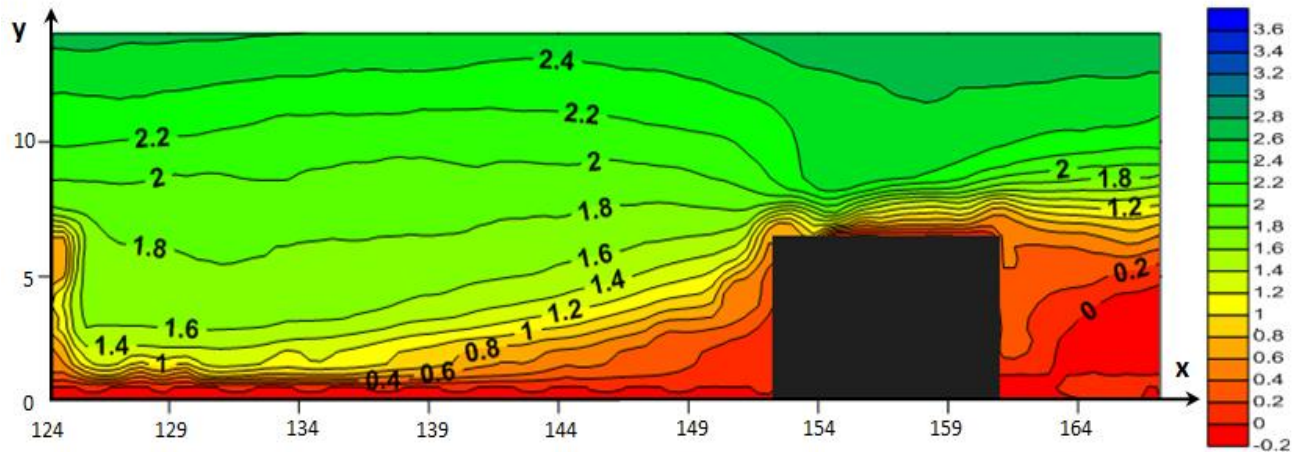
Σχήμα 4.129 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_x/4$

Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο

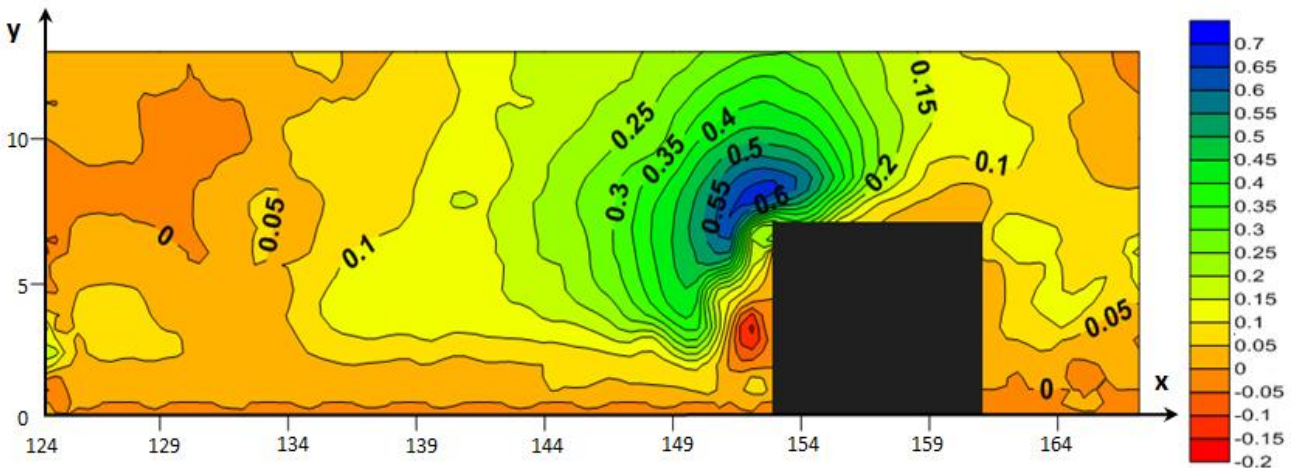


Στο εξεταζόμενο επίπεδο, η ροή περνά μπροστά από το 4^ο εμπόδιο και «χτυπάει» στο 5^ο. Στο Σχήμα 4.130 φαίνεται μόνο το 5^ο εμπόδιο. Η μορφή της ροής, δείχνει επιβράδυνση στην κάτω ανάντι γωνία του 5^{ου} εμποδίου, όπου οι γραμμές ροές «καμπυλώνουν», χωρίς όμως την εμφάνιση αποκόλλησης.

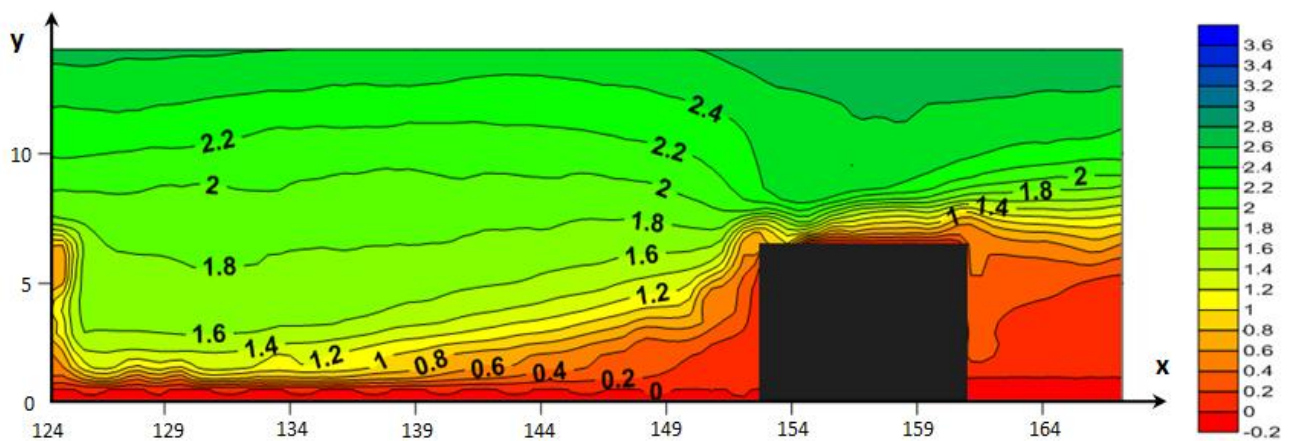
Σχήμα 4.130 Γραμμές Ροής ανάμεσα στο 4^ο και το 5^ο εμπόδιο



Σχήμα 4.131 Ισοϋψείς Λόγου U/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (U – παράλληλη συνιστώσα ταχύτητας)



Σχήμα 4.132 Ισοϋψείς Λόγου V/U_e ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο (V – κάθετη συνιστώσα ταχύτητας)



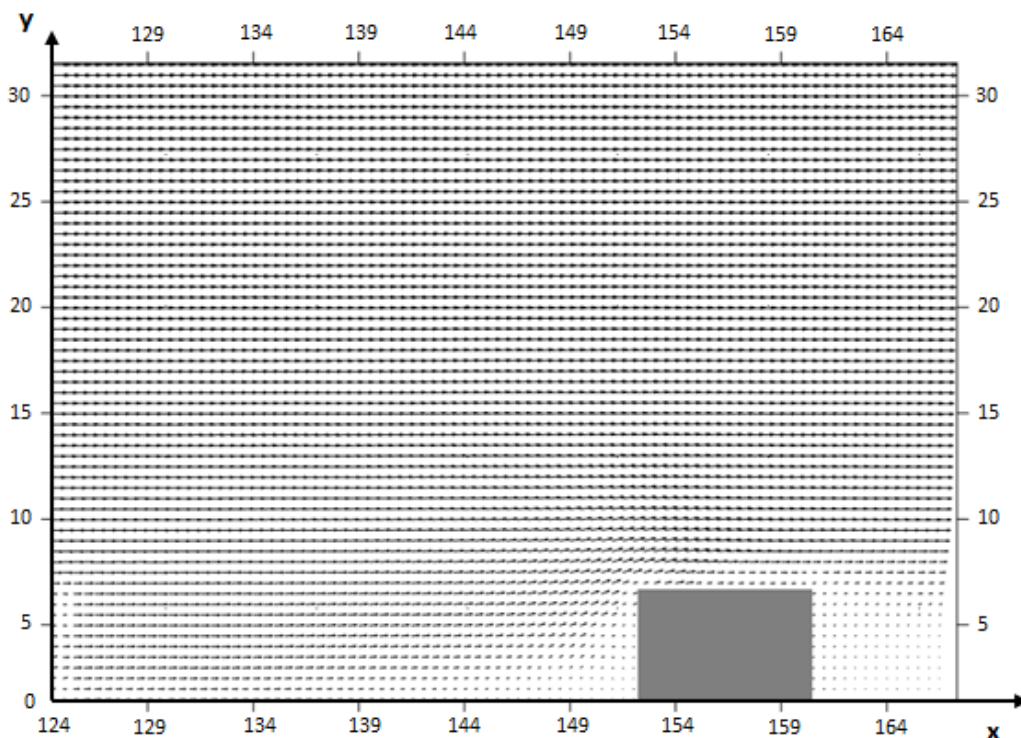
Σχήμα 4.133 Ισοϋψείς Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ ανάμεσα σε 4° και 5° εμπόδιο ($(U^2 + V^2)^{1/2}$ – Μέτρο ταχύτητας)

Στο Σχήμα 4.131, η όψη των ισοϋψών είναι ένδειξη επιτάχυνσης της ροής σε μια περιοχή ανάντι του 5^{ου} εμποδίου, καθώς αυτή περνάει ανάμεσα στο 4^ο εμπόδιο και το απέναντί του, επειδή σε αυτή την περιοχή, μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται σε μικρότερη απόσταση από το τοίχωμα. Στη συνέχεια η ροή, καθώς προχωράει προς το 5^ο εμπόδιο φαίνεται να επιβραδύνεται και πάλι εξαιτίας της παρουσίας του, ενώ στην κορυφή του, και πάλι η παρατήρηση μεγαλύτερων ταχυτήτων σε πιο μικρό ύψος δείχνει επιτάχυνση της ροής. Η ταχύτητα είναι μηδενική κοντά στο τοίχωμα, όπως είναι αναμενόμενο και αυξάνεται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα. Στην κορυφή του 5^{ου} εμποδίου, η έντονη συγκέντρωση των ισοϋψών δείχνει επιτάχυνση της ροής στο σημείο αυτό.

Στο Σχήμα 4.132, οι μέγιστες τιμές της V , εντοπίζονται στην ανάντι πλευρά της κορυφής του 5^{ου} εμποδίου, όπου η ροή προσκρούει στο εμπόδιο και επιταχύνεται προς την ελεύθερη ροή. Αρνητικές τιμές της V παρατηρούνται στην ανάντι γωνία του 5^{ου} εμποδίου όπου η ροή παρουσιάζει μια μικρή καθοδικότητα.

Στο Σχήμα 4.133, οι ισοϋψείς του μέτρου της ταχύτητας, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις γίνονται ελάχιστες στα σημεία που η U λαμβάνει τις μικρότερες (κατά απόλυτη τιμή) τιμές, και αυξάνεται σταδιακά απομακρυνόμενη από αυτά.

Στο Σχήμα 4.134 φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας υπό τη μορφή διανυσμάτων.



Σχήμα 4.134 Διανύσματα Ταχύτητας στην Περιοχή ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο της Διάταξης Δ και για xy επίπεδο $W_x/4$

Κεφάλαιο 5^ο

Συνοπτική Παρουσίαση και Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα συνοπτικά για κάθε διάταξη. Ακολούθως, γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης τους με αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι διατάξεις με κοινά χαρακτηριστικά συγκρίνονται μεταξύ τους (η διάταξη Α, συγκρίνεται με τη διάταξη Β, και η διάταξη Γ συγκρίνεται με τη διάταξη Δ).

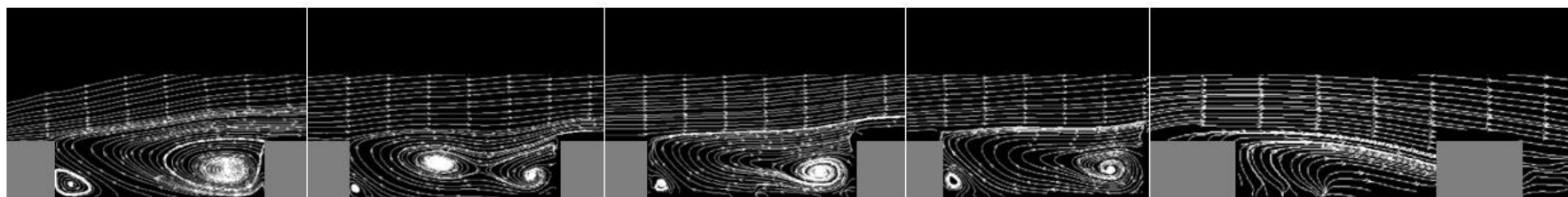
Υπενθυμίζεται ότι από μετρήσεις που έγιναν, στην αεροδυναμική σήραγγα, η ροή βρέθηκε πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης και για ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος $U_e = 2.56 \text{ m/s}$, το πάχος οριακού στρώματος είναι $\delta = 30.75 \text{ mm}$ (Κεφάλαιο 3^ο)^[15]. Στη δική μας περίπτωση η ταχύτητα ελεύθερου ρεύματος $U_e = 2.43 \text{ m/s}$, που είναι ελάχιστα πιο μικρή από την πιο πάνω. Αν θεωρηθεί το πάχος οριακού στρώματος περίπου ίσο με 30 mm, τότε τα εμπόδια ύψους 5 mm, βρίσκονται σε ύψος $0.167 \delta = 16.7 \% \delta$. Οπότε σύμφωνα με τα στοιχεία θεωρίας τυρβώδους οριακού στρώματος (Κεφάλαιο 1^ο), η κορυφή των εμποδίων της τραχύτητας βρίσκεται στην εξωτερική περιοχή του οριακού στρώματος.

5.1 Διάταξη Α

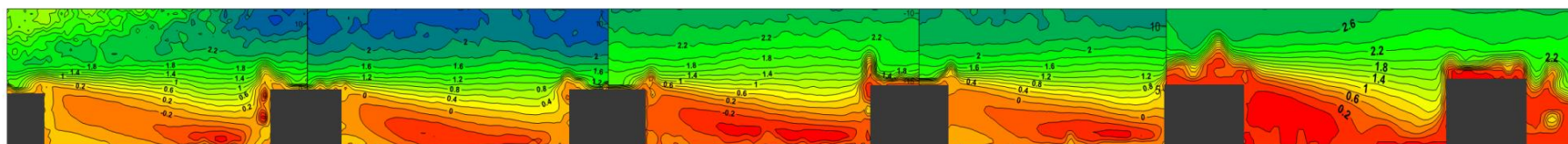
5.1.1 Συνοπτική Παρουσίαση και Ανάλυση

Στο Σχήμα 5.1, φαίνεται να υπάρχει συνοχή στη ροϊκή δομή μεταξύ 1^{ης} (περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο), 3^{ης} (περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο) και 4^{ης} κοιλότητας (περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο), όπου όλο το μήκος της κοιλότητας καταλαμβάνεται από μία μεγάλη δίνη, η οποία εμποδίζει τη ροή να επανακολληθεί στο τοίχωμα της κοιλότητας και στην κάτω ανάντι γωνία του πρώτου

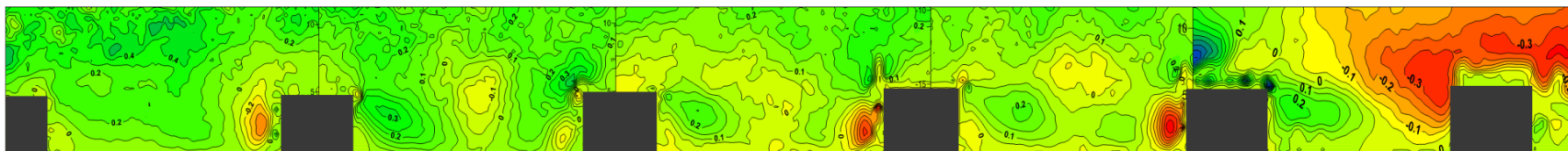
ΔΙΑΤΑΞΗ Α



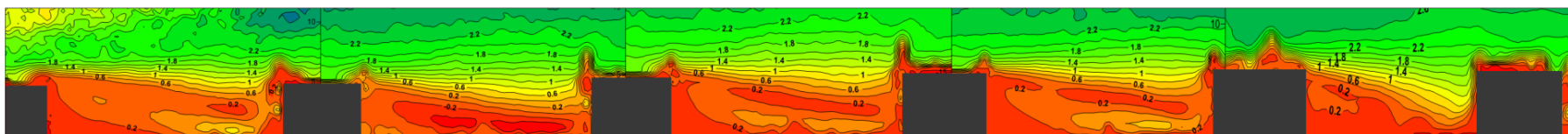
Σχήμα 5.1 Συνοπτική εικόνα Γραμμών Ροής κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Α



Σχήμα 5.2 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου U/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Α



Σχήμα 5.3 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου V/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Α



Σχήμα 5.4 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Α

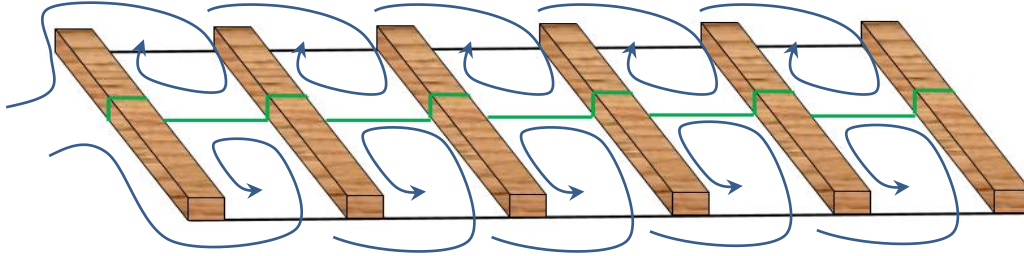
εμποδίου (1^ο, 3^ο και 4^ο αντίστοιχα), σχηματίζεται μια μικρή φυσαλίδα ανακυκλοφορίας, αντίθετης φοράς με την κύρια. Σύμφωνα με τα Σχήματα 4.6, 4.11, 4.16 και 4.21, όπου γίνεται σχηματική απεικόνιση των διανυσμάτων της ταχύτητας, τα κέντρα των μεγάλων φυσαλίδων ανακυκλοφορίας, βρίσκονται στα σημεία:

- **Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($x = 8$ έως $x = 28$):** Το κέντρο εντοπίζεται στις συντεταγμένες (24, 2.5), που αντιστοιχεί σε απόσταση 3.8 k (3.8 ύψη εμποδίου) κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.5 k από το κάτω τοίχωμα.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο ($x = 36$ έως $x = 56$):** Το κέντρο της πρώτης μεγάλης φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (45, 3.5), που αντιστοιχεί σε απόσταση 1.8 k κατάντι του 2^{ου} εμποδίου και 0.7 k από το κάτω τοίχωμα και το σημείο αποκόλλησης της δεύτερης μεγάλης φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (53.5, 2.3), που αντιστοιχεί σε απόσταση 3.5 k κατάντι του 2^{ου} εμποδίου και 0.46 k από το κάτω τοίχωμα.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο ($x = 64$ έως $x = 84$):** Το κέντρο της μεγάλης φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (80, 2.4), που αντιστοιχεί σε απόσταση 3.2 k κατάντι του 3^{ου} εμποδίου και 0.48 k από το κάτω τοίχωμα.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο ($x = 92$ έως $x = 112$):** Το κέντρο της μεγάλης φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (108, 2.2), που αντιστοιχεί σε απόσταση 3.2 k κατάντι του 4^{ου} εμποδίου και 0.48 k από το κάτω τοίχωμα.

Αντίστοιχα, σύμφωνα με τα Σχήματα 4.6, 4.11, 4.16 και 4.21, τα κέντρα των μικρών φυσαλίδων ανακυκλοφορίας, κατάντι των πρώτων εμποδίων που εμφανίζονται, βρίσκονται στα σημεία:

- **Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($x = 8$ έως $x = 28$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (10, 1), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.4 k (0.4 ύψη εμποδίου) κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.2 k από το κάτω τοίχωμα. Αυτή η δευτερεύουσα φυσαλίδα αποτελεί και τη μεγαλύτερη που εμφανίζεται στο συγκεκριμένο σημείο.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο ($x = 36$ έως $x = 56$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (37, 1), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.2 k κατάντι του 2^{ου} εμποδίου και 0.2 k από το κάτω τοίχωμα. Το μέγεθός της είναι πολύ μειωμένο σε σχέση με τη φυσαλίδα στην 1^η κοιλότητα.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο ($x = 64$ έως $x = 84$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (65, 1.2), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.2 k κατάντι του 3^{ου} εμποδίου και 0.24 k από το κάτω τοίχωμα.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο ($x = 92$ έως $x = 112$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (93, 1.3), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.2 k κατάντι του 4^{ου} εμποδίου και 0.26 k από το κάτω τοίχωμα.

Η ροή στην τελευταία κοιλότητα, φαίνεται να διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες. Η κίνηση μπορεί να αποδοθεί μόνο θεωρώντας το πεδίο τρισδιάστατο. Η ροή δεν κινείται μόνο σε σχέση με τον άξονα x και y, αλλά και σε σχέση με τον άξονα z. Άρα, παρά το γεγονός, ότι η μέθοδος που ακολουθείται επιτρέπει μελέτη του επιπέδου xy μόνο, εντούτοις και η παρουσία της τρίτης συνιστώσας επηρεάζει τη ροή (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 Τρισδιάστατη κίνηση της ροής γύρω από τα στοιχεία της τραχύτητας και σε σχέση με το εξεταζόμενο επίπεδο

Στο Σχήμα 5.2, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της παράλληλης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας U . Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε αναλυτικά η κάθε περίπτωση. Μέχρι και σε ένα ορισμένο ύψος η μορφή των ισοϋψών διαφοροποιείται από τη μορφή των ισοϋψών της υπόλοιπης ροής. Συγκρίνοντας την κάθε περίπτωση, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές όσον αφορά την κατανομή της U , ενώ οι διαφορές που μπορούν να εντοπιστούν σχετίζονται με το μέγεθος της ζώνης επηρεασμού κάθε αποκόλλησης και την απόστασή τους από τα στερεά εμπόδια και το τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα Σχήματα 4.3, 4.8, 4.13, 4.18 και 4.23, φαίνεται η κατανομή της U , ξεχωριστά σε κάθε κοιλότητα. Στη δεξιά πλευρά κάθε σχήματος, φαίνεται το εύρος των ταχυτήτων που εντοπίζονται σε κάθε περίπτωση με την ανάλογη αντιστοιχία στη χρωματική διαφορά από τιμή σε τιμή. Η αντιστοιχία γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα Surfer, θεωρώντας τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ταχύτητας στην κάθε περίπτωση (κάθε εικόνα κοιλότητας), και χωρίζοντας το εύρος τιμών μεταξύ τους σε ίσα μέρη. Βλέποντας, λοιπόν, συνολικά αυτό το εύρος ταχυτήτων για κάθε περίπτωση, μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο προχωράμε κατάντι προς μεγαλύτερες τιμές του x , η αρνητικές τιμές της U αυξάνονται. Συγκεκριμένα στην **1^η κοιλότητα** οι τιμές της U , κυμαίνονται από $-1U_e$ έως $3.2U_e$, στη **2^η** από $-0.8U_e$ έως $2.6U_e$, στην **3^η** από $-0.6U_e$ έως $3.4U_e$, στην **4^η** από $-0.8U_e$ έως $3.2U_e$ και στην **5^η** από $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να αποτελέσει ένδειξη, μείωσης της έντασης των κύριων ζωνών ανακυκλοφορίας, όσο η ροή προχωράει κατάντι, αφού αυτές αποτελούν τον κύριο λόγο παρουσίας μεγάλων αρνητικών τιμών στην παράλληλη ταχύτητα U .

Μια επιπλέον σημαντική παρατήρηση, αποτελούν οι κινήσεις της ροής στις κορυφές των εμποδίων, όπου φαίνεται να υπάρχει επιβράδυνση και ίσως ο σχηματισμός πολύ μικρών δινών.

Στο Σχήμα 5.3, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της κάθετης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας V . Αναλυτικός σχολιασμός της κάθε περίπτωσης έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μεγάλες θετικές τιμές της V , εντοπίζονται σταθερά στο ανάντι άκρο κάθε φυσαλίδας, όπου η ροή λόγω της ανακυκλοφορίας εξαναγκάζεται σε ανοδική πορεία αλλά και στην ανάντι περιοχή της κορυφής των εμποδίων, όπου η ροή προσκρούει σε αυτά και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Οι μεγάλες αρνητικές τιμές της, εντοπίζονται στο κατάντι άκρο κάθε φυσαλίδας, όπου και πάλι λόγω της ανακυκλοφορίας η ροή εξαναγκάζεται σε καθοδική πορεία. Εάν και πάλι εξεταστούν τα εύρη τιμών των ταχυτήτων V σε κάθε κοιλότητα (**1^η κοιλότητα**: $-0.8U_e$ έως U_e , **2^η κοιλότητα**: $-0.6U_e$ έως

$0.75U_e$, **3^η κοιλότητα:** $-0.4U_e$ έως $0.7U_e$, **4^η κοιλότητα:** $-0.4U_e$ έως $0.7U_e$, **5^η κοιλότητα:** $-0.4U_e$ έως $0.6U_e$), φαίνεται ότι μειώνονται όσο η ροή προχωράει κατάντι.

Στο Σχήμα 5.4, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων του μέτρου της ταχύτητας $(U^2 + V^2)^{1/2}$. Όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, λόγω των μικρών τιμών της κάθετης ταχύτητας V σε σχέση με την παράλληλη ταχύτητα U , η κατανομή των ισοϋψών του μέτρου της ταχύτητας μοιάζει με αυτή των ισοϋψών της παράλληλης ταχύτητας U . Οπότε, το μέτρο της ταχύτητας γίνεται ελάχιστο γύρω στα σημεία όπου η U μηδενίζεται, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά.

5.1.2 Σύγκριση με Αποτελέσματα Εργασιών Διεθνούς Βιβλιογραφίας

Η Διάταξη Α, χαρακτηρίζεται από λόγο μήκους κοιλότητας προς ύψος εμποδίου (pitch ratio) ίσο με 4 ($w/k = 4$). Σύμφωνα με τους *Jie Cui, Virendra C. Patel και Ching-Long Lin (2003)*^[8], αυτός ο λόγος αντιστοιχεί σε τραχύτητα ενδιάμεσου τύπου (Σχήμα 2.3). Στην τραχύτητα αυτού του τύπου, μια δίνη ίδιου μεγέθους με την κοιλότητα, που εμποδίζει τη ροή να επανακολληθεί με το κάτω τοίχωμα μέσα στην κοιλότητα, σχηματίζεται ανάμεσα στα εμπόδια. Ταυτόχρονα, μια άλλη μικρότερη δίνη με φορά ανακυκλοφορίας αντίθετη από αυτήν της προαναφερθείσας κύριας δίνης, σχηματίζεται στην κάτω γωνία του πρώτου εμποδίου. Αυτή ακριβώς, η ροϊκή δομή παρατηρείται μεταξύ 1^{ης} (περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο), 3^{ης} (περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο) και 4^{ης} κοιλότητας (περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο).

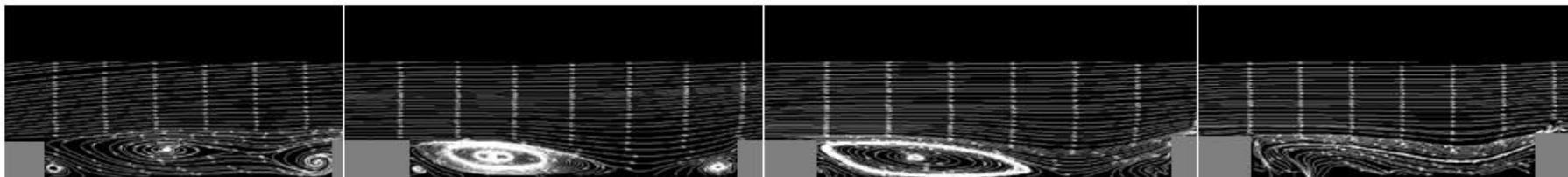
5.2 Διάταξη Β

5.2.1 Συνοπτική Παρουσίαση και Ανάλυση

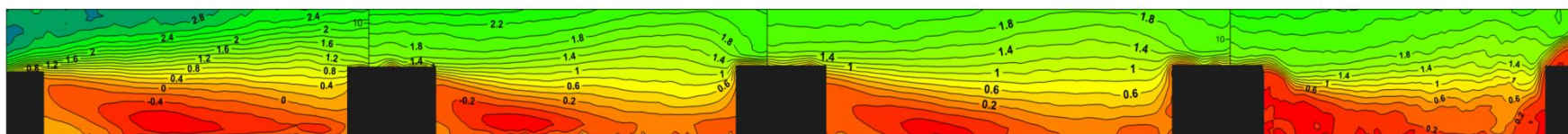
Στο Σχήμα 5.6, φαίνεται να υπάρχει συνοχή στη ροϊκή δομή μεταξύ 2^{ης} (περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο) και 3^{ης} (περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο) όπου ένα μέρος της κοιλότητας καταλαμβάνεται από μία μεγάλη δίνη ανακυκλοφορίας, η οποία επανακολλάται στο κάτω τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας ανάντι του 3^{ου} και 4^{ου} εμποδίου αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα Σχήματα 4.32, 4.37 και 4.42, όπου γίνεται σχηματική απεικόνιση των διανυσμάτων της ταχύτητας, τα κέντρα των μεγάλων φυσαλίδων ανακυκλοφορίας, βρίσκονται στα σημεία:

- **Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($x = 8$ έως $x = 38$):** Το κέντρο της πρώτης μεγάλης φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (21, 4), που αντιστοιχεί σε απόσταση 2.6 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.8 k από το κάτω τοίχωμα και το κέντρο της δεύτερης μεγάλης φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (36, 2.4), που αντιστοιχεί σε απόσταση 5.6 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.48 k από το κάτω τοίχωμα.

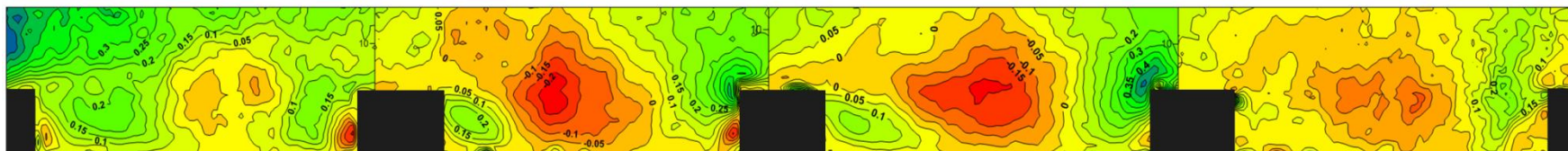
ΔΙΑΤΑΞΗ Β



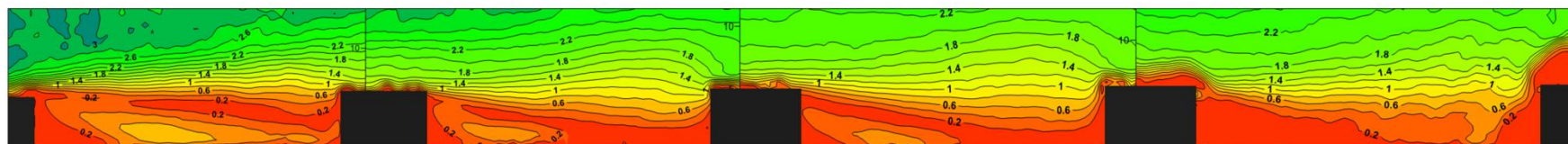
Σχήμα 5.6 Συνοπτική εικόνα Γραμμών Ροής κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Β



Σχήμα 5.7 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου U/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Β



Σχήμα 5.8 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου V/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Β



Σχήμα 5.9 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Β

- **Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο ($x = 46$ έως $x = 76$):** Το κέντρο της φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (53, 3.7), που αντιστοιχεί σε απόσταση 1.4 k κατάντι του 2^{ου} εμποδίου και 0.74 k από το κάτω τοίχωμα, ενώ η επανακόλληση γίνεται στο σημείο $x = 66$, που αντιστοιχεί σε 4 ύψη εμποδίου (4k) κατάντι του 2^{ου} εμποδίου.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο ($x = 84$ έως $x = 114$):** Το κέντρο της μεγάλης φυσαλίδας εντοπίζεται στις συντεταγμένες (93, 3), που αντιστοιχεί σε απόσταση 1.8 k κατάντι του 3^{ου} εμποδίου και 0.6 k από το κάτω τοίχωμα, ενώ η επανακόλληση γίνεται στο σημείο $x = 104$, που αντιστοιχεί σε 4 ύψη εμποδίου (4k) κατάντι του 3^{ου} εμποδίου.

Αντίστοιχα, σύμφωνα με τα Σχήματα 4.32, 4.37 και 4.42, τα κέντρα των δευτερεύουσων φυσαλίδων ανακυκλοφορίας, βρίσκονται στα σημεία:

- **Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($x = 8$ έως $x = 38$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας, στην κατάντι γωνία του 1^{ου} εμποδίου εντοπίζεται στις συντεταγμένες (10, 1.5), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.4 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.3 k από το κάτω τοίχωμα.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο ($x = 46$ έως $x = 76$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας, στην κατάντι γωνία του 2^{ου} εμποδίου εντοπίζεται στις συντεταγμένες (47, 2), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.2 k κατάντι του 2^{ου} εμποδίου και 0.4 k από το κάτω τοίχωμα, ενώ το σημείο αποκόλλησης της μικρής φυσαλίδας, στην ανάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου εντοπίζεται στις συντεταγμένες (73, 2), που αντιστοιχεί σε απόσταση 5.4 k ανάντι του 3^{ου} εμποδίου και 0.4 k από το κάτω τοίχωμα.

Και πάλι μπορεί να φανεί ότι στην τελευταία κοιλότητα, οι γραμμές ροής φαίνεται να εκβάλλουν από ένα σημείο, κάτι που όπως προαναφέρθηκε οφείλεται στο ότι το πεδίο ροής είναι τρισδιάστατο (Σχήμα 5.5).

Στο Σχήμα 5.7, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της παράλληλης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας U , όπου αναλυτικός σχολιασμός της κάθε περίπτωσης έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μέχρι και ένα ορισμένο ύψος η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων διαφοροποιείται από την υπόλοιπη ροή. Συγκρίνοντας την κάθε περίπτωση, θα μπορούσε να ειπωθεί και πάλι ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές όσον αφορά την κατανομή της U , ενώ οι διαφορές που μπορούν να εντοπιστούν σχετίζονται με τη μορφή των φυσαλίδων ανακυκλοφορίας, το μέγεθος της ζώνη επηρεασμού κάθε αποκόλλησης και την απόστασή τους από τα στερεά εμπόδια και το τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα Σχήματα 4.29, 4.34, 4.39, 4.44 και 4.49, φαίνεται η κατανομή της U , ξεχωριστά σε κάθε κοιλότητα και στη δεξιά πλευρά κάθε σχήματος, φαίνεται το εύρος των ταχυτήτων που εντοπίζονται σε κάθε περίπτωση με την ανάλογη αντιστοιχία στη χρωματική διαφορά από τιμή σε τιμή. Βλέποντας συνολικά αυτό το εύρος ταχυτήτων για κάθε περίπτωση, μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο προχωράμε κατάντι προς μεγαλύτερες τιμές του x , οι αρνητικές τιμές της U μειώνονται (κατά απόλυτη τιμή). Συγκεκριμένα στην **1^η κοιλότητα** οι τιμές της U , κυμαίνονται από $-0.8U_e$ έως $3.6U_e$, στη **2^η** από $-0.6U_e$ έως $3.6U_e$, στην **3^η** από $-0.6U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **4^η** από $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να αποτελέσει ένδειξη, μείωσης της έντασης των κύριων ζωνών ανακυκλοφορίας,

όσο η ροή προχωράει κατάντι, αφού αυτές αποτελούν τον κύριο λόγο παρουσίας μεγάλων αρνητικών τιμών στην παράλληλη ταχύτητα U .

Στο Σχήμα 5.8, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της κάθετης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας V , όπου στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε αναλυτικά η κάθε περίπτωση. Οι μεγάλες θετικές τιμές της V , εντοπίζονται σταθερά στο ανάντι άκρο κάθε φυσαλίδας, όπου η ροή λόγω της ανακυκλοφορίας εξαναγκάζεται σε ανοδική πορεία και στην ανάντι περιοχή της κορυφής των εμποδίων, όπου η ροή προσκρούει σε αυτά και επιταχύνεται προς το ελεύθερο ρεύμα. Οι μεγάλες αρνητικές τιμές της, εντοπίζονται στο κατάντι άκρο κάθε φυσαλίδας, όπου και πάλι λόγω της ανακυκλοφορίας η ροή εξαναγκάζεται σε καθοδική πορεία.

Στο Σχήμα 5.9, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων του μέτρου της ταχύτητας $(U^2 + V^2)^{1/2}$. Όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, λόγω των μικρών τιμών της κάθετης ταχύτητας V σε σχέση με την παράλληλη ταχύτητα U , η κατανομή των ισοϋψών του μέτρου της ταχύτητας μοιάζει με αυτή των ισοϋψών της παράλληλης ταχύτητας U . Οπότε, το μέτρο της ταχύτητας γίνεται ελάχιστο γύρω από τα σημεία όπου η U γίνεται κατά απόλυτη τιμή ελάχιστη, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Σημεία όπου φαίνεται αισθητά η διαφορά σε σχέση με το Σχήμα 5.6, είναι σημεία όπου η κάθετη ταχύτητα V , γίνεται συγκρίσιμη με τη U και επηρεάζει εξίσου την τιμή του μέτρου της ταχύτητας.

5.2.2 Σύγκριση με Αποτελέσματα Εργασιών Διεθνούς Βιβλιογραφίας

Η Διάταξη B, χαρακτηρίζεται από λόγο μήκους κοιλότητας προς ύψος εμποδίου (pitch ratio) ίσο με 6 ($w/k = 6$). Σύμφωνα με τους **J. Cui, Virendra C. Patel και Ching-Long Lin (2003)^[8]**, και το Σχήμα 2.3, η περίπτωση του λόγου μήκους κοιλότητας προς ύψος εμποδίου, αντιστοιχεί σε k -τύπου τραχύτητα. Στην τραχύτητα αυτού του τύπου, η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας σχηματίζεται κατάντι του πρώτου εμποδίου, συνοδευόμενη από μία δευτερεύουσα αντίθετης φοράς στην κατάντι γωνιά του πρώτου εμποδίου. Η κύρια ζώνη επανακολλάται στο τοίχωμα μέσα στην κοιλότητα, περίπου τέσσερα ύψη εμποδίου ($4k$) κατάντι του πρώτου εμποδίου και ξαναποκολλάται ανάντι του επόμενου εμποδίου, σχηματίζοντας μια μικρή δίνη. Αυτή ακριβώς, η ροϊκή δομή παρατηρείται μεταξύ 2^{ns} (περιοχή ανάμεσα σε 2° και 3° εμπόδιο) και 3^{ns} κοιλότητας (περιοχή ανάμεσα σε 3° και 4° εμπόδιο).

Επίσης, σύμφωνα με τους **S. Leonardi, P. Orlandi, R. J. Smalley, L. Djenidi και R. A. Antonia (2003)^[9]**, όταν για το λόγο μήκους κοιλότητας προς ύψος εμποδίου ισχύει ότι $w/k > 7$, τα στοιχεία της τραχύτητας θεωρούνται απομονωμένα το ένα από το άλλο, εφόσον το μέγεθος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας δεν εξαρτάται πλέον από το λόγο w/k . Στο Σχήμα 2.6, φαίνεται η ροϊκή δομή για $w/k = 5.5$ και $w/k = 7$, και είναι εμφανές ότι στην περίπτωση της 2^{ns} και 3^{ns} κοιλότητας, η δομή της ροής όταν γίνεται η επανακόλληση της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας στο κάτω τοίχωμα της ροής και αμέσως μετά η αποκόλληση ανάντι του επόμενου εμποδίου, η ροή κάνει μια ενδιάμεση κίνηση σε σχέση με τις δύο πιο πάνω περιπτώσεις, όπως θα αναμενότανε. Παρόλα αυτά, και εδώ τα στοιχεία της τραχύτητας φαίνονται απομονωμένα (κάτι που θα αναμενότανε για $w/k > 7$).

5.3 Σύγκριση Διάταξης A και Διάταξης B

Συγκρίνοντας το πεδίο ταχυτήτων των δύο διατάξεων, μπορούν να εξαχθούν κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις. Η πρώτη, που είναι και αναμενόμενη, αφορά το μέγεθος των δινών ανακυκλοφορίας μέσα στις κοιλότητες. Στη Διάταξη A, το μήκος της κοιλότητας είναι μικρότερο από αυτό της Διάταξης B, κατά 10 mm. Ως αποτέλεσμα, η κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας στη Διάταξη A, κατανέμεται σε όλο το μήκος της κοιλότητας (που αντιστοιχεί σε 4 ύψη εμποδίων – 4k) και δεν επανακολλάται στο κάτω τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας σε αντίθεση με τη Διάταξη B, όπου το μήκος της κοιλότητας είναι ίσο με 6 ύψη εμποδίου (6k), και οι κύριες ζώνες ανακυκλοφορίας επανακολλούνται στο κάτω τοίχωμα. Σε αυτό το σημείο μπορεί να παρατηρηθεί ότι η επανακόλληση λάμβανε χώρα 4 ύψη εμποδίου από το πρώτο εμπόδιο (4k), απόσταση που ισούται με το μήκος κοιλότητας της Διάταξης A και κατ' επέκταση με το μήκος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας στη Διάταξη A. Η ίδια παρατήρηση, γίνεται και από τους *Jie Cui, Virendra C. Patel και Ching-Long Lin (2003)*^[8], κατά τη σύγκριση ενδιάμεσης και k-τύπου τραχύτητας, που είναι η περίπτωση της Διάταξης A και B αντίστοιχα.

Και στις δύο περιπτώσεις, η ροή δε σχηματίζεται πλήρως από την πρώτη κοιλότητα. Σε άλλες πειραματικές μελέτες πεδίου ταχυτήτων γύρω από στοιχεία επιφανειακής τραχύτητας οι μετρήσεις λαμβάνονται σε κάποια απόσταση από την αρχή της διάταξης ώστε να είναι διασφαλισμένη η περιοδικότητα της ροής:

- *L. Casarsa & T. Arts (2002)*^[22]: η μέτρηση λαμβάνεται ανάμεσα στο 4^ο και 5^ο εμπόδιο
- *L. Wang, M. Salewski, B. Sundén (2010)*^[23]: η μέτρηση γίνεται γύρω από το 7^ο εμπόδιο

Στην τελευταία κοιλότητα, η ροή φαίνεται να διαφοροποιείται: Οι γραμμές ροής φαίνεται να εκβάλλουν από ένα σημείο. Αυτή η κίνηση της ροής δείχνει ότι παρόλο που η μελέτη του πεδίου ροής περιορίζεται σε δύο διαστάσεις, το πεδίο είναι τρισδιάστατο και η τρίτη συνιστώσα της ταχύτητας επηρεάζει το μελετούμενο επίπεδο (η ροή κινείται και γύρω από τα εμπόδια - Σχήμα 5.5).

Τέλος και στις δύο περιπτώσεις, η ένταση των κύριων δινών που σχηματίζονται μειώνεται όσο προχωράμε κατάντι (υπενθυμίζεται ότι για την Διάταξη A, οι μέγιστες αρνητικές τιμές της ταχύτητας U , είναι στην **1^η κοιλότητα** - U_e , στη **2^η** $-0.8U_e$, στη **3^η** $-0.6U_e$, στη **4^η** $-0.8U_e$ και στη **5^η** $-0.2U_e$, ενώ για τη Διάταξη B στην **1^η κοιλότητα** $-0.8U_e$, στη **2^η** $-0.6U_e$, στη **3^η** $-0.6U_e$ και στη **4^η** $-0.2U_e$.

5.4 Διάταξη Γ

5.4.1 Συνοπτική Παρουσίαση

Στο Σχήμα 5.10, είναι εύκολο να εντοπιστεί η ομοιότητα στη ροϊκή δομή, ανάμεσα στην 1^η (Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο), την 3^η (Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο) και την 5^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 5^ο και 6^ο εμπόδιο), όπου η ροή περνώντας ανάμεσα στο πρώτο εμπόδιο και το απέναντί του, προσκρούει στο επόμενο, σχηματίζοντας μια μικρή δίνη ανακυκλοφορίας, ανάντι του επόμενου εμποδίου. Ταυτόχρονα μπορεί να φανεί και η ομοιότητα στη ροϊκή δομή, ανάμεσα στη 2^η

(Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο) και την 4^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο), όπου οι γραμμές δείχνουν να «καμπυλώνουν» αρκετά, χωρίς όμως την εμφάνιση ανακυκλοφορίας. Σύμφωνα με τα Σχήματα 4.53 και 4.63, τα κέντρα των μικρών δινών στο ανάντι μέρος του 2^{ου} και 4^{ου} εμποδίου αντίστοιχα, βρίσκονται στα σημεία του χγ επιπέδου $z = W_k/2$:

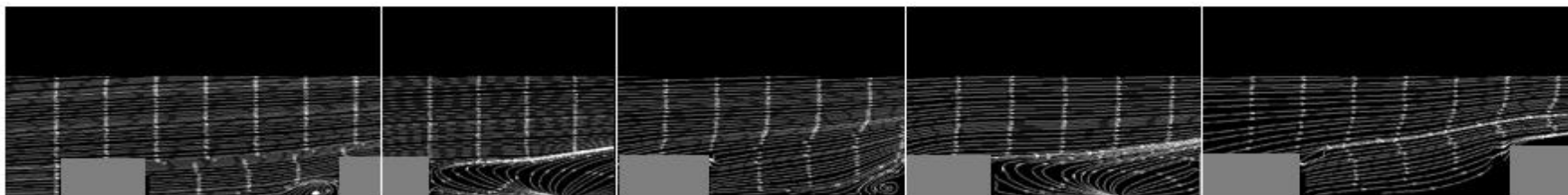
- **Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($x = 8$ έως $x = 28$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας, στην ανάντι γωνία του 2^{ου} εμποδίου εντοπίζεται στις συντεταγμένες (24, 1.5), που αντιστοιχεί σε απόσταση 3.2 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.3 k από το κάτω τοίχωμα.
- **Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο ($x = 64$ έως $x = 84$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας, στην ανάντι γωνία του 3^{ου} εμποδίου εντοπίζεται στις συντεταγμένες (82, 1.5), που αντιστοιχεί σε απόσταση 3.6 k κατάντι του 3^{ου} εμποδίου και 0.3 k από το κάτω τοίχωμα.

Στο Σχήμα 5.14, ομοιότητα στη ροϊκή δομή εντοπίζεται ανάμεσα στην 1^η (Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο), την 3^η (Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο) και την 5^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 5^ο και 6^ο εμπόδιο), όπου οι γραμμές δείχνουν να εκβάλλουν από ένα σημείο εξαιτίας του τρισδιάστατου επιπέδου, χωρίς όμως την εμφάνιση ανακυκλοφορίας. Κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί να φανεί η ομοιότητα στη ροϊκή δομή, ανάμεσα στη 2^η (Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο) και την 4^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο), όπου η ροή, περνά μπροστά από το πρώτο εμπόδιο και προσκρούει στο επόμενο. Οι γραμμές στην κάτω ανάντι γωνία του 3^{ου} και 5^{ου} εμποδίου, φαίνονται να «καμπυλώνουν» όμως όχι αρκετά ώστε να υπάρχει ανακυκλοφορία.

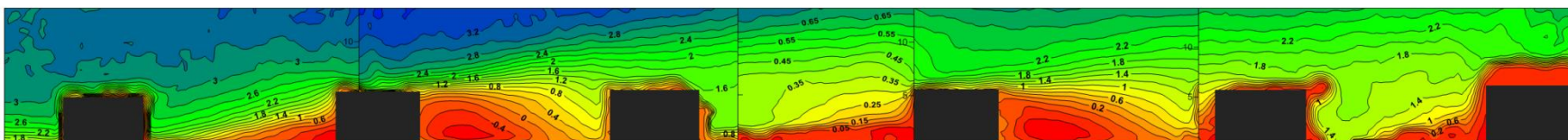
Στα Σχήματα 5.11 και 5.15, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της παράλληλης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας U , για τα χγ επίπεδα $z = W_k/2$ και $z = W_k/4$ αντίστοιχα. Και πάλι μπορεί να φανεί η ομοιότητα ανάμεσα σε 1^η, 3^η και 5^η κοιλότητα και 2^η με 4^η κοιλότητα σε κάθε επίπεδο. Η ροή φαίνεται να επιβραδύνεται όταν προσεγγίζει ένα εμπόδιο, ενώ όταν προσκρούει σε αυτό επιταχύνεται (μορφή ισοϋψών στην κορυφή των εμποδίων) προς το ελεύθερο ρεύμα. Στη συνέχεια προχωρώντας κατάντι του εμποδίου, η ροή φαίνεται να έχει και πάλι έντονη επιβράδυνση και ακολούθως έντονη επιτάχυνση (συγκέντρωση των ισοϋψών της ταχύτητας σε χαμηλότερο ύψος), που φαίνεται έντονα καθώς η ροή περνά ανάμεσα στα δύο εμπόδια (ή μπροστά) και συνεχίζει για να προσκρούσει στο επόμενο εμπόδιο.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα Σχήματα 4.50, 4.55, 4.60, 4.65, 4.70, 4.75, 4.80, 4.85 και 4.90, φαίνεται η κατανομή της U , ξεχωριστά σε κάθε κοιλότητα και στη δεξιά πλευρά κάθε σχήματος, φαίνεται το εύρος των ταχυτήτων που εντοπίζονται σε κάθε περίπτωση με την ανάλογη αντιστοιχία στη χρωματική διαφορά από τιμή σε τιμή. Επιλέγοντας τις κοιλότητες σε κάθε επίπεδο, όπου η ροή φαίνεται να κάνει την ίδια κίνηση, καταγράφονται τα εύρη ταχυτήτων: για $W_k/2$ στη **2^η κοιλότητα** οι τιμές της U , κυμαίνονται από $-0.8U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **4^η** από $-0.6U_e$ έως $3.6U_e$, ενώ στην **1^η κοιλότητα** από $-0.2U_e$ έως $3.8U_e$ και στην **5^η** από $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$ (στην 3^η κοιλότητα παρουσιάζεται λάθος στις τιμές), για $W_k/4$ στη **1^η κοιλότητα** οι τιμές της U , κυμαίνονται από $-0.8U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **3^η** από $-0.6U_e$ έως $3.8U_e$, ενώ στην **2^η κοιλότητα** από $-0.4U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **4^η** από $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να αποτελέσει ένδειξη, μείωσης της έντασης των κύριων ζωνών ανακυκλοφορίας, όσο η ροή προχωράει

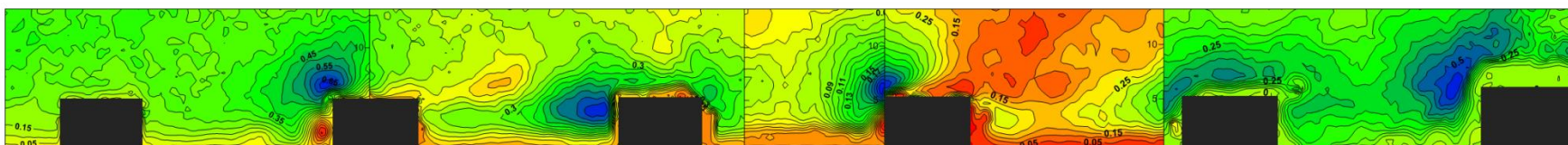
ΔΙΑΤΑΞΗ Γ – Επίπεδο Συμμετρίας ($W_k/2$)



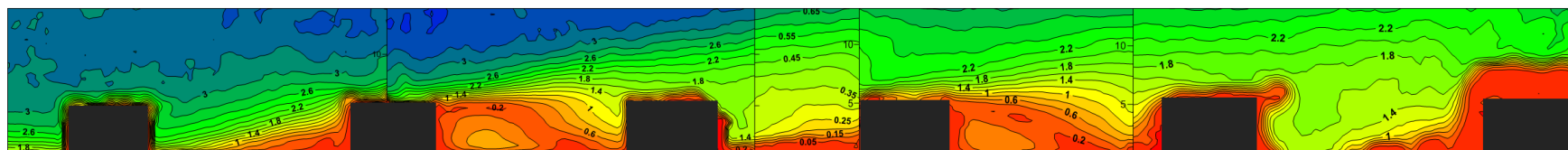
Σχήμα 5.10 Συνοπτική εικόνα Γραμμών Ροής κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας ($W_k/2$) της Διάταξης Γ



Σχήμα 5.11 Συνοπτική εικόνα Ισοϋψών Λόγου U/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας ($W_k/2$) της Διάταξης Γ

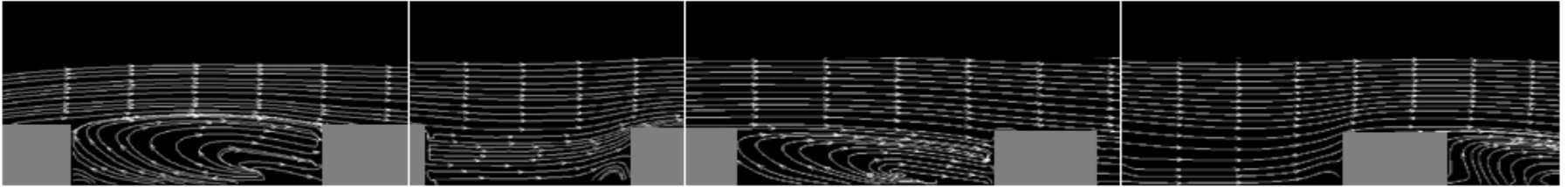


Σχήμα 5.12 Συνοπτική εικόνα Ισοϋψών Λόγου V/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας ($W_k/2$) της Διάταξης Γ

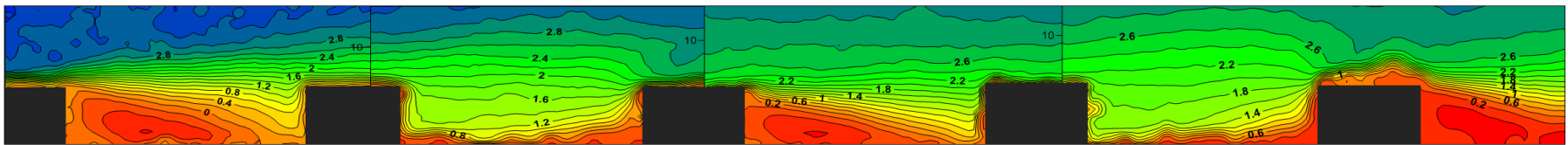


Σχήμα 5.13 Συνοπτική εικόνα Ισοϋψών Λόγου Ταχύτητας $(U^2 + V^2)^{1/2} / U_e$ κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Γ

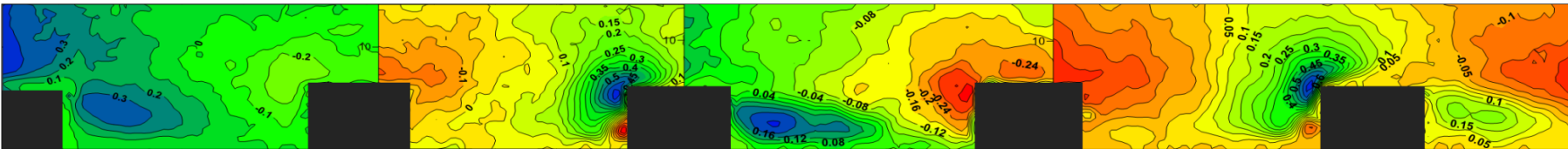
ΔΙΑΤΑΞΗ Γ – Επίπεδο $W_k/4$



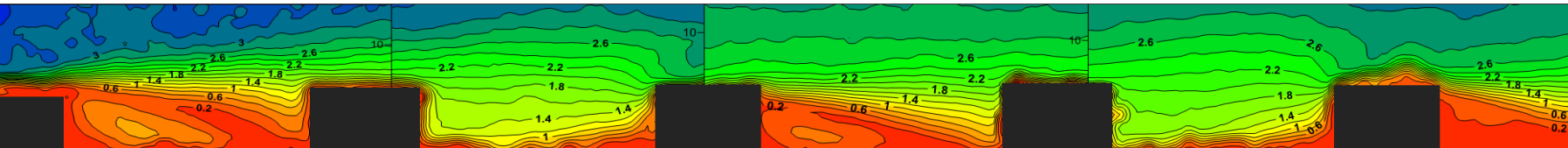
Σχήμα 5.14 Συνοπτική εικόνα Γραμμών Ροής κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Γ



Σχήμα 5.15 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου U/U_e κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Γ



Σχήμα 5.16 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου V/U_e κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Γ



Σχήμα 5.17 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Γ

κατάντι, αφού αυτές αποτελούν τον κύριο λόγο παρουσίασης μεγάλων αρνητικών τιμών στην παράλληλη ταχύτητα U . Παρόλα αυτά λόγω της εναλλαγής των κινήσεων της ροής, δε φαίνεται η μείωση αυτή στην ένταση των κύριων ζωνών ανακυκλοφορίας να είναι μεγάλη.

Στα Σχήματα 5.12 και 5.16, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της κάθετης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας V , για τα xy επίπεδα $z = W_k/2$ και $z = W_k/4$ αντίστοιχα. Οι μεγάλες θετικές τιμές της V , εντοπίζονται στις περιοχές ανάντι της κορυφής των εμποδίων, όπου η ροή προσκρούει σε αυτά και επιταχύνεται προς τη ροή. Οι μεγάλες αρνητικές τιμές της, εντοπίζονται σε σημεία όπου η ροή ακολουθεί καθοδική πορεία. Μπορεί σε αυτό το σημείο να παρατηρηθεί ότι στη Διάταξη Γ, οι παρατηρούμενες τιμές της V , είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις τιμές της V στις Διατάξεις Α και Β.

Στα Σχήματα 5.13 και 5.17, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων του μέτρου της ταχύτητας $(U^2 + V^2)^{1/2}$. Όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, λόγω των μικρών τιμών της κάθετης ταχύτητας V σε σχέση με την παράλληλη ταχύτητα U , η κατανομή των ισοϋψών του μέτρου της ταχύτητας μοιάζει με αυτή των ισοϋψών της παράλληλης ταχύτητας U . Οπότε, το μέτρο της ταχύτητας γίνεται ελάχιστο γύρω στα σημεία όπου η U γίνεται κατά απόλυτη τιμή ελάχιστη, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Σημεία όπου φαίνεται αισθητά η διαφορά σε σχέση με τα Σχήματα 5.10 και 5.14, είναι σημεία όπου η κάθετη ταχύτητα V , γίνεται συγκρίσιμη με τη U και επηρεάζει εξίσου την τιμή του μέτρου της ταχύτητας.

5.5 Διάταξη Δ

5.5.1 Συνοπτική Παρουσίαση

Στο Σχήμα 5.18, και πάλι μπορεί να εντοπιστεί η ομοιότητα στη ροϊκή δομή, ανάμεσα στην 1^η (Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο) και την 3^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο), όπου η ροή περνώντας ανάμεσα στο πρώτο εμπόδιο και το απέναντί του, προσκρούει στο επόμενο, όπου η επιβράδυνση προκαλεί κλίση στις γραμμές ροής, χωρίς όμως την ένδειξη ανακυκλοφορίας. Ταυτόχρονα μπορεί να φανεί και η ομοιότητα στη ροϊκή δομή, ανάμεσα στη 2^η (Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο) και την 4^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο), όπου οι γραμμές δείχνουν να «καμπυλώνουν» αρκετά, χωρίς όμως την εμφάνιση αποκόλλησης.

Στο Σχήμα 5.22, ομοιότητα στη ροϊκή δομή εντοπίζεται ανάμεσα στην 1^η (Περιοχή ανάμεσα σε 1^ο και 2^ο εμπόδιο), την 3^η (Περιοχή ανάμεσα σε 3^ο και 4^ο εμπόδιο) και την 5^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 5^ο και 6^ο εμπόδιο), όπου οι γραμμές δείχνουν να «καμπυλώνουν» σε μεγάλο βαθμό, χωρίς όμως την εμφάνιση ανακυκλοφορίας. Κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί να φανεί η ομοιότητα στη ροϊκή δομή, ανάμεσα στη 2^η (Περιοχή ανάμεσα σε 2^ο και 3^ο εμπόδιο) και την 4^η κοιλότητα (Περιοχή ανάμεσα σε 4^ο και 5^ο εμπόδιο), όπου η ροή, περνά μπροστά από το πρώτο εμπόδιο και προσκρούει στο επόμενο. Οι γραμμές στην κάτω ανάντι γωνία του 3^{ου} και 5^{ου} εμποδίου, φαίνονται να «καμπυλώνουν» όμως όχι αρκετά ώστε η ροή να αποκολλάται. Σύμφωνα με τα Σχήματα 4.119 και 4.129, τα κέντρα των μικρών δινών ανάντι και κατάντι του 1^{ου} εμποδίου καθώς και της ζώνης ανακυκλοφορίας στην 1^η (Περιοχή

ανάμεσα στο 1^ο και το 2^ο εμπόδιο) και 3^η κοιλότητα (περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο), βρίσκονται στα σημεία του xy επιπέδου $z = W_k/4$:

- **Περιοχή γύρω από το 1^ο εμπόδιο ($x = 0$ έως $x = 8$):** Το κέντρο της μικρής φυσαλίδας, στην ανάντι γωνία του 1^{ου} εμποδίου εντοπίζεται στις συντεταγμένες (-3, 2), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.6 k ανάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.4 k από το τοίχωμα. Το κέντρο της μικρής μικρής φυσαλίδας, στην κατάντι γωνία του 1^{ου} εμποδίου εντοπίζεται στις συντεταγμένες (9, 1.5), που αντιστοιχεί σε απόσταση 0.2 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.3 k από το τοίχωμα.
- **Περιοχή ανάμεσα στο 1^ο και 2^ο εμπόδιο ($x = 8$ έως $x = 38$):** Το κέντρο της κύριας φυσαλίδας ανακυκλοφορίας, εντοπίζεται στις συντεταγμένες (18, 4), που αντιστοιχεί σε απόσταση 2 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου και 0.8 k από το τοίχωμα. Το σημείο επανακόλλησης εντοπίζεται σε απόσταση 3.8 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου ($x = 27$).
- **Περιοχή ανάμεσα στο 3^ο και 4^ο εμπόδιο ($x = 84$ έως $x = 114$):** Το κέντρο της κύριας φυσαλίδας ανακυκλοφορίας, εντοπίζεται στις συντεταγμένες (93, 3), που αντιστοιχεί σε απόσταση 1.8 k κατάντι του 3^{ου} εμποδίου και 0.6 k από το τοίχωμα. Το σημείο επανακόλλησης εντοπίζεται σε απόσταση 3.2 k κατάντι του 1^{ου} εμποδίου ($x = 100$).

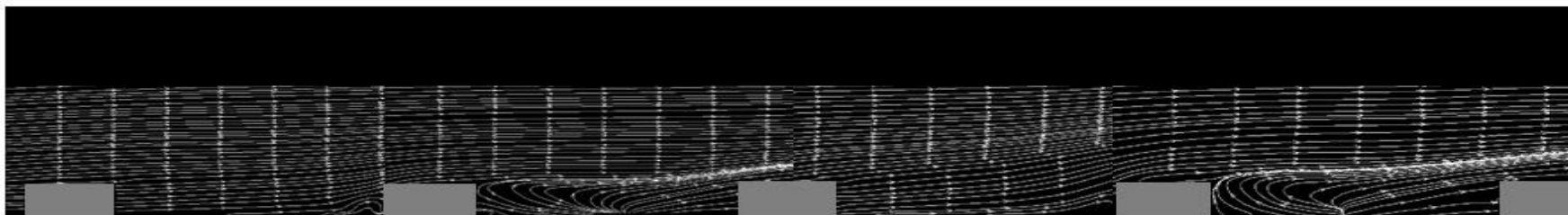
Στα Σχήματα 5.19 και 5.23, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της παράλληλης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας U , για τα xy επίπεδα $z = W_k/2$ και $z = W_k/4$ αντίστοιχα.

Και πάλι μπορεί να φανεί η ομοιότητα ανάμεσα σε 1^η, 3^η και 5^η κοιλότητα και 2^η με 4^η κοιλότητα σε κάθε επίπεδο.

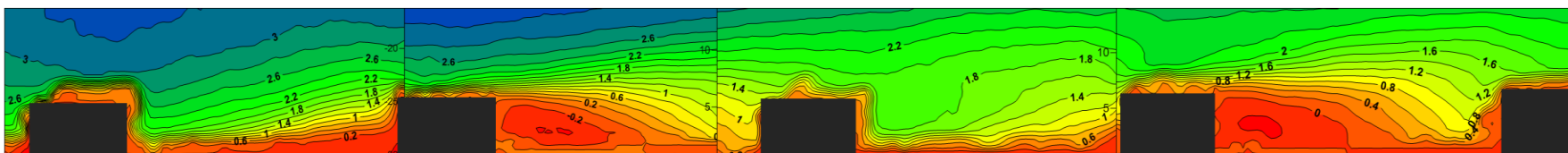
Στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα Σχήματα 4.96, 4.101, 4.106, 4.111, 4.116, 4.121, 4.126 και 4.131 φαίνεται η κατανομή της U , ξεχωριστά σε κάθε κοιλότητα και στη δεξιά πλευρά κάθε σχήματος, φαίνεται το εύρος των ταχυτήτων που εντοπίζονται σε κάθε περίπτωση με την ανάλογη αντιστοιχία στη χρωματική διαφορά από τιμή σε τιμή. Επιλέγοντας τις κοιλότητες σε κάθε επίπεδο, όπου η ροή φαίνεται να κάνει την ίδια κίνηση, καταγράφονται τα εύρη ταχυτήτων: για $W_k/2$ στη **2^η κοιλότητα** οι τιμές της U , κυμαίνονται από $-0.6U_e$ έως $3.4U_e$ και στην **4^η** από $-0.4U_e$ έως $3.4U_e$, ενώ στην **1^η** κοιλότητα από $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **3^η** από $-0.2U_e$ έως $3.4U_e$, για $W_k/4$ στη **1^η κοιλότητα** οι τιμές της U , κυμαίνονται από $-0.8U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **3^η** από $-0.6U_e$ έως $3.4U_e$, ενώ στην **2^η κοιλότητα** από $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **4^η** από $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να αποτελέσει ένδειξη, μείωσης της έντασης των κύριων ζωνών ανακυκλοφορίας, όσο η ροή προχωράει κατάντι, αφού αυτές αποτελούν τον κύριο λόγο παρουσίας μεγάλων αρνητικών τιμών στην παράλληλη ταχύτητα U . Παρόλα αυτά λόγω της εναλλαγής των κινήσεων της ροής, δε φαίνεται να παρατηρείται μεγάλη μείωση στην ένταση των κύριων ζωνών ανακυκλοφορίας.

Στα Σχήματα 5.20 και 5.24, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων της κάθετης στην κατεύθυνση της ροής συνιστώσας της ταχύτητας V , για τα xy επίπεδα $z = W_k/2$ και $z = W_k/4$ αντίστοιχα. Οι μεγάλες θετικές τιμές της V , εντοπίζονται στις περιοχές ανάντι της κορυφής των εμποδίων, όπου η ροή προσκρούει σε αυτά και επιταχύνεται προς τη ροή. Οι μεγάλες αρνητικές τιμές της, εντοπίζονται σε

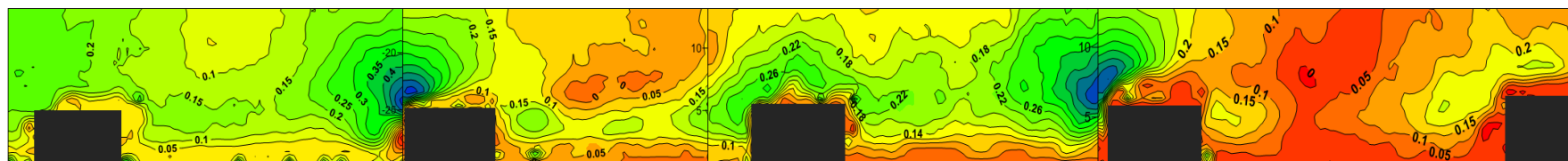
ΔΙΑΤΑΞΗ Δ – Επίπεδο $W_k/2$



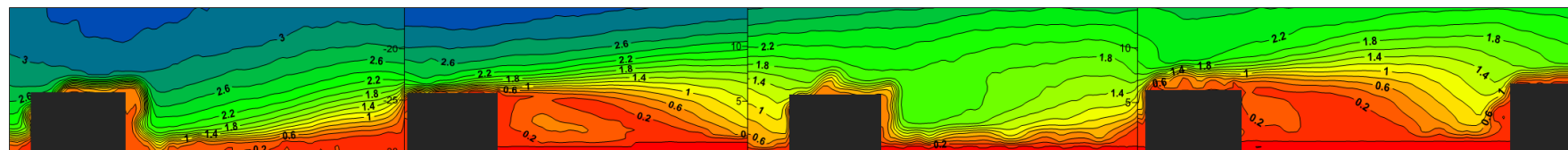
Σχήμα 5.18 Συνοπτική εικόνα Γραμμών Ροής κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας $W_k/2$ της Διάταξης Δ



Σχήμα 5.19 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου U/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας ($W_k/2$) της Διάταξης Δ

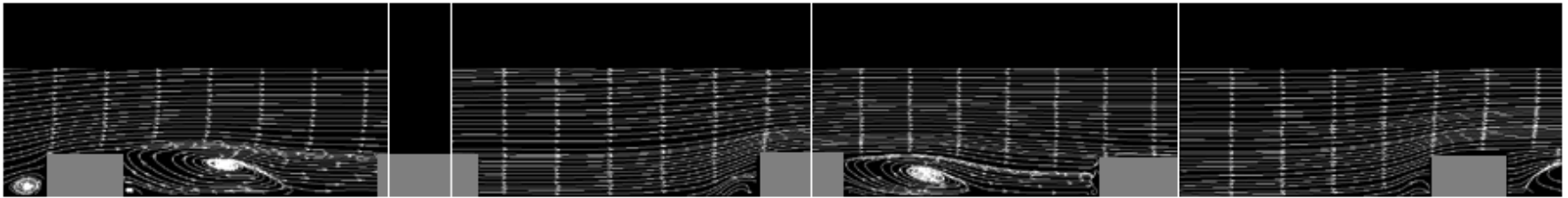


Σχήμα 5.20 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου V/U_e κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας ($W_k/2$) της Διάταξης Δ

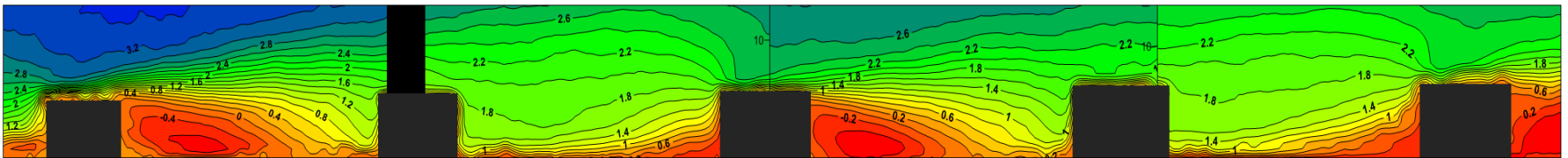


Σχήμα 5.21 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ κατά μήκος του Επιπέδου Συμμετρίας της Διάταξης Δ

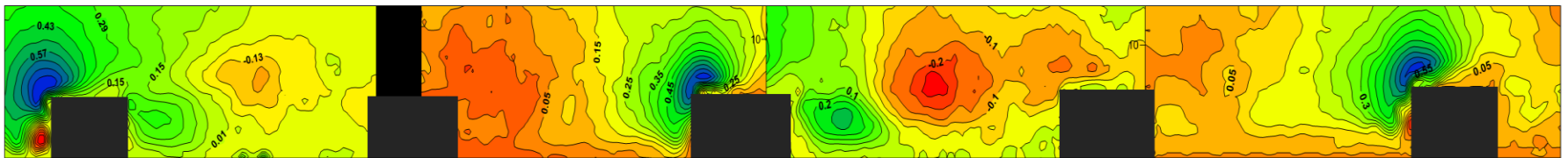
ΔΙΑΤΑΞΗ Δ – Επίπεδο $W_k/4$



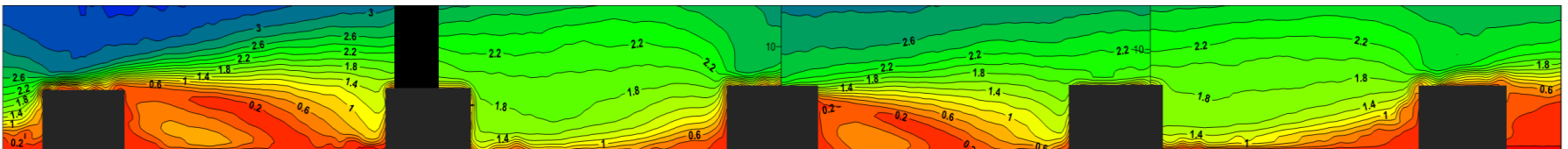
Σχήμα 5.22 Συνοπτική εικόνα Γραμμών Ροής κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Δ



Σχήμα 5.23 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου U/U_e κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Δ



Σχήμα 5.24 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου V/U_e κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Δ



Σχήμα 5.25 Συνοπτική εικόνα Ισοψών Λόγου $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_e$ κατά μήκος του Επιπέδου $W_k/4$ της Διάταξης Δ

σημεία όπου η ροή ακολουθεί καθοδική πορεία. Μπορεί σε αυτό το σημείο να παρατηρηθεί ότι στη Διάταξη Δ, όπως και στη Διάταξη Γ, οι παρατηρούμενες τιμές της V , είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις τιμές της V στις Διατάξεις Α και Β.

Στα Σχήματα 5.21 και 5.25, φαίνεται η κατανομή των ισοϋψών καμπύλων του μέτρου της ταχύτητας $(U^2 + V^2)^{1/2}$. Όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, λόγω των μικρών τιμών της κάθετης ταχύτητας V σε σχέση με την παράλληλη ταχύτητα U , η κατανομή των ισοϋψών του μέτρου της ταχύτητας μοιάζει με αυτή των ισοϋψών της παράλληλης ταχύτητας U . Οπότε, το μέτρο της ταχύτητας γίνεται ελάχιστο γύρω στα σημεία όπου η U γίνεται κατά απόλυτη τιμή ελάχιστη, και μεγαλώνει σταδιακά όσο απομακρύνεται από αυτά. Σημεία όπου φαίνεται αισθητά η διαφορά σε σχέση με τα Σχήματα 5.19 και 5.23, είναι σημεία όπου η κάθετη ταχύτητα V , γίνεται συγκρίσιμη με τη U και επηρεάζει εξίσου την τιμή του μέτρου της ταχύτητας.

5.6 Σύγκριση Διάταξης Γ και Διάταξης Δ

Συγκρίνοντας το πεδίο ταχυτήτων των Διατάξεων Γ και Δ, μπορούν να εξαχθούν κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις.

Μια πρώτη παρατήρηση είναι η ομοιομορφία που παρατηρείται ως προς τις δομές της ροής. Και στις δύο διατάξεις μικρές ζώνες ανακυκλοφορίας παρατηρούνται όταν η ροή προσκρούει σε ένα εμπόδιο, ενώ στην περιοχή μπροστά από τα εμπόδια όπου προσκρούει η ροή, οι γραμμές ροής εκβάλλουν από ένα σημείο χωρίς όμως την εμφάνιση ανακυκλοφορίας στο μελετούμενο επίπεδο. Αυτές οι δομές στη ροή, μπορούν να κατανοηθούν πλήρως μόνο αν το πεδίο θεωρηθεί τρισδιάστατο. Λόγω της περιπλοκότητας της δομής της ροής, καθώς αυτή περνά πάνω και ανάμεσα στα εμπόδια ή προσκρούει σε αυτά, το πεδίο δεν μπορεί να αποδοθεί πλήρως.

Μια δεύτερη παρατήρηση, μπορεί να γίνει ως προς την ένταση της παράλληλης ταχύτητας U . Υπενθυμίζεται ότι για τη Διάταξη Γ, το εύρος της ταχύτητας U , για επίπεδο $W_k/2$ είναι στην **1^η κοιλότητα** $-0.2U_e$ έως $3.8 U_e$, στη **2^η** $-0.8U_e$ έως $3.6U_e$, στην **4^η** $-0.6U_e$ έως $3.6U_e$ και στην **5^η** $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$ (στην **3^η** κοιλότητα παρουσιάζεται λάθος στις τιμές), και για επίπεδο $W_k/4$, είναι στην **1^η κοιλότητα** $-0.8U_e$ m/s έως $3.6U_e$, στη **2^η** $-0.4U_e$ έως $3.6U_e$, στην **3^η** $-0.6U_e$ έως $3.8U_e$ και στην **4^η** $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$. Για τη Διάταξη Δ, οι μέγιστες αρνητικές τιμές της ταχύτητας U , για επίπεδο $W_k/2$ είναι στην **1^η κοιλότητα** $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$, στη **2^η** $-0.6U_e$ έως $3.4U_e$, στην **3^η** $-0.2U_e$ έως $3.4U_e$ και στην **4^η** $-0.4U_e$ έως $3.4U_e$, και για επίπεδο $W_k/4$, είναι στην **1^η κοιλότητα** $-0.8U_e$ έως $3.6U_e$, στη **2^η** $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$, στην **3^η** $-0.6U_e$ έως $3.4U_e$ και στην **4^η** $-0.2U_e$ έως $3.6U_e$. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η παράλληλη συνιστώσα της ταχύτητας στη γειτνίαση των εμποδίων, είναι περίπου ίδια.

Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση αποτελεί και το ότι η τιμή της κάθετης ταχύτητας V στις δύο αυτές διατάξεις, παίρνει αισθητά μεγαλύτερες τιμές απ' ό,τι στις Διατάξεις Α και Β.

Κεφάλαιο 6^ο

Συσχέτιση Μεταβολής του Πεδίου Ταχυτήτων και Μεταφοράς Θερμότητας

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, όπου αναλύεται η μορφή του πεδίου ταχυτήτων γύρω από τα στοιχεία επιφανειακής τραχύτητας, συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας (συγκεκριμένα με τα αποτελέσματα των *D. Cavallero και G. Tanda*^[11], αλλά και με τη Διπλωματική Εργασία του Α. Νταουλτζή^[21]), όπου μελετήθηκε η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας στη μεταφορά θερμότητας.

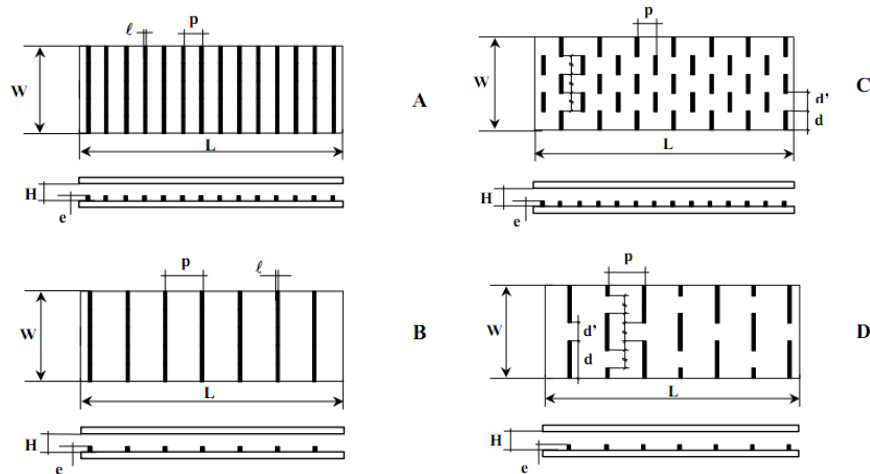
6.1 «An experimental investigation of forced convection heat transfer in channels with rib turbulators by means of liquid crystal thermography», D.Cavallero G.Tanda^[11]

Η μελέτη των *D. Cavallero και G. Tanda*^[11], στη μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή, σε αεροδυναμικές σήραγγες με επιφανειακή τραχύτητα, με τη βοήθεια θερμοχρωματικών υγρών κρυστάλλων, παρουσιάστηκε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2^ο. Υπενθυμίζεται ότι για τις ανάγκες του πειράματος, χρησιμοποιούνται τέσσερις διατάξεις του Σχήματος 2.8, των οποίων τα χαρακτηριστικά δίνονται κάτω στον Πίνακα 2.1.

Στην πιο πάνω περίπτωση θεωρούνται δύο λόγοι της απόστασης δύο διαδοχικών εμποδίων p προς το ύψος εμποδίου e (ή στη δική μας περίπτωση k). Για την καλύτερη σύγκρισή τους θεωρείται ο λόγος του μήκους κοιλότητας προς το ύψος εμποδίου w/k , όπου για τις Διατάξεις Α και Β ισούται με 3.4 ($w/k =$

3.4), που σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αντιστοιχεί σε ενδιάμεση τραχύτητα και για τις Διατάξεις B και D ισούται με 7.4 ($w/k = 7.4$), που σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αντιστοιχεί σε k-τύπου τραχύτητα.

Στην ενδιάμεση τραχύτητα και στην περίπτωση συνεχών εγκάρσιων προς την κατεύθυνση της ροής εμποδίων (Διάταξη A), σχηματίζεται μία κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας ανάμεσα στα στοιχεία της

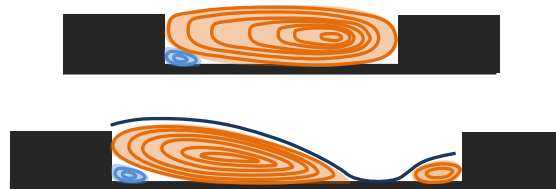


Σχήμα 2.8 Σχηματική Απεικόνιση των Διατάξεων της Επιφανειακής Τραχύτητας^[11]

Διάταξη Τραχύτητας	L (mm)	W (mm)	H (mm)	ℓ (mm)	p (mm)	e (mm)	d (mm)	d' (mm)	p/e	p/ℓ
A	280	100	20	3	20	5	-	-	4	6.66
B	280	100	20	3	40	5	-	-	8	13.33
C	280	100	20	3	20	5	20	20	4	6.66
D	280	100	20	3	40	5	40	20	8	13.33

Πίνακας 2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των Διατάξεων της Επιφανειακής Τραχύτητας^[11]

επιφανειακής τραχύτητας η οποία εκτείνεται σε όλο το μήκος της κοιλότητας και εμποδίζει τη ροή να επανακολληθεί στο κάτω τοίχωμα, ενώ στην περίπτωση k-τύπου τραχύτητας και στην περίπτωση συνεχών εγκάρσιων προς την κατεύθυνση της ροής εμποδίων (Διάταξη B), σχηματίζεται μία κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας ανάμεσα στα στοιχεία της επιφανειακής τραχύτητας η οποία επανακολλάται στο τοίχωμα της αεροδυναμικής σήραγγας (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 Τυπική μορφή των Γραμμών Ροής ανάμεσα στα Στοιχεία της Τραχύτητας για Ενδιάμεση (πάνω) και k-τύπου (κάτω) Επιφανειακή Τραχύτητα (με πορτοκαλί χρώμα σημειώνονται οι δεξιόστροφες και με μπλε οι αριστερόστροφες ζώνες ανακυκλοφορίας)

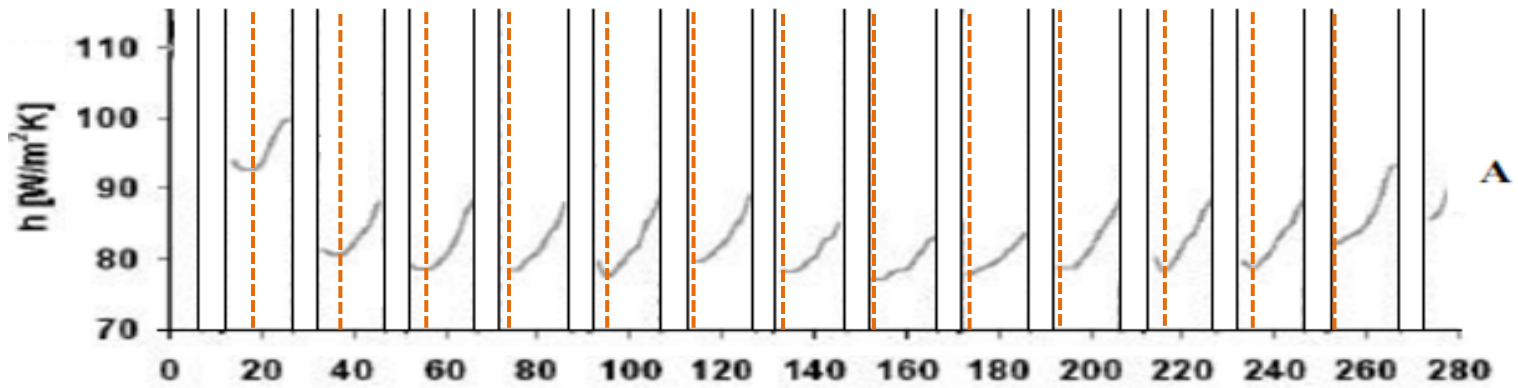
Ο αριθμός Reynolds, υπολογίστηκε με βάση την υδραυλική διάμετρο ($2WH/(W+H)$) της σήραγγας ορθογωνικής διατομής ($W \times H$), και οι τιμές του κυμαίνονται από 8000 – 35 000, όπου για θερμοκρασία 20 °C, αντιστοιχούν σε τιμές ταχύτητας που κυμαίνονται από 3.62 m/s – 15.9 m/s. Τα αποτελέσματα παρατίθενται πιο κάτω και ταυτόχρονα γίνεται ανάλυσή τους σε σχέση με το πεδίο ταχυτήτων.

Οι **D. Cavallero και G. Tanda^[11]**, παρατήρησαν ότι στα συνεχή εμπόδια (continuous ribs – Διατάξεις A και B) με το χαμηλότερο λόγο p/e ($p/e = 4$ - απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών εμποδίων προς το ύψος του εμποδίου), ο τοπικός συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας (h), έδειξε προοδευτική αύξηση στην κοιλότητα ανάμεσα στα εμπόδια, όσο η ροή προχωρούσε κατάντι. Σε μεγαλύτερους λόγους p/e ($p/e = 8$), ο τοπικός συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας έφτασε σε μια μέγιστη τιμή - πιθανότατα στο σημείο επανακόλλησης της ροής - ακολουθούμενη από μία μικρή μείωση, και μετά μια επιπλέον αύξηση κοντά στο επόμενο εμπόδιο. Και στις δύο περιπτώσεις μπορεί να φανεί ότι η κατανομή του συντελεστή συναγωγής σε κάποιο σημείο γίνεται περιοδική.

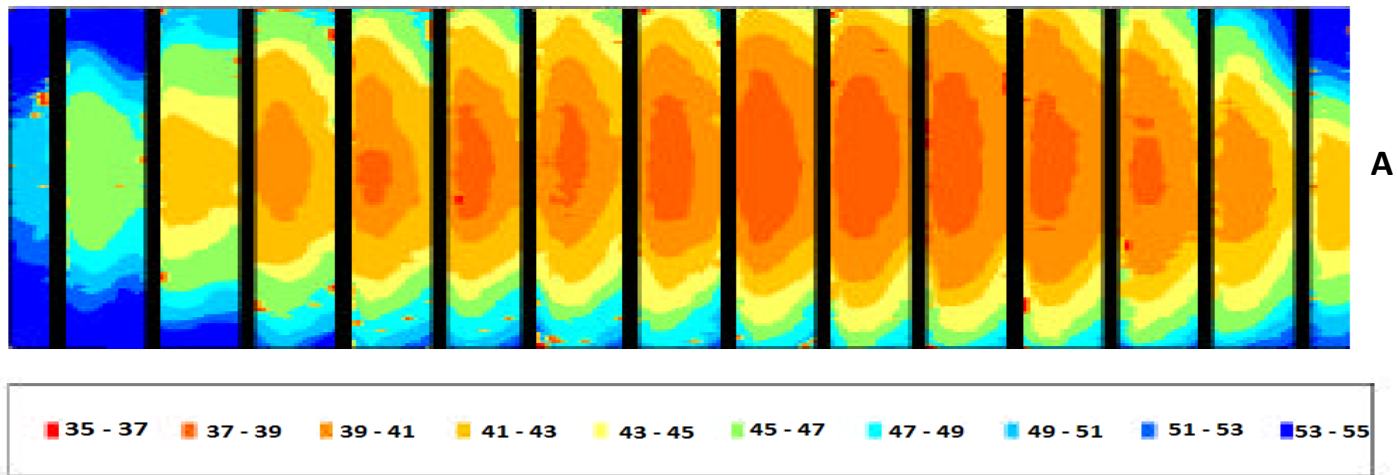
Από το Σχήμα 6.2, εντοπίζονται τα σημεία ελαχίστου του συντελεστή συναγωγής της Διάταξης A, για $Re = 28\ 500$. Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή συναγωγής, εντοπίζονται σταθερά ακριβώς ανάντι του δεύτερου εμποδίου που συναντάται από τη ροή διασχίζοντας μια κοιλότητα. Οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή συναγωγής για τη συγκεκριμένη διάταξη, παρατηρούνται στην 1^η κοιλότητα. Στη συνέχεια, όσο η ροή προχωράει κατάντι, από κοιλότητα σε κοιλότητα, οι τιμές αυτές μειώνονται, ενώ τελικά, στις τελευταίες κοιλότητες, φαίνεται να υπάρχει και πάλι μια αύξηση. Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται ότι τα ελάχιστα του συντελεστή συναγωγής παρουσιάζονται επίσης σε μια περιοχή που εφάπτεται του πρώτου εμποδίου ενώ τα μέγιστα εντοπίζονται ανάντι του δεύτερου εμποδίου.

Από το Σχήμα 6.4, εντοπίζονται τα σημεία μεγίστου του συντελεστή συναγωγής της Διάταξης B, για $Re = 28\ 500$. Τα σημεία του μεγίστου δε φαίνεται να αποκλίνουν πολύ σε θέση από κοιλότητα σε κοιλότητα, και εντοπίζονται σταθερά γύρω στα 4.5 k (ύψη εμποδίου) κατάντι του πρώτου εμποδίου. Οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή συναγωγής, εντοπίζονται σταθερά ακριβώς κατάντι του πρώτου εμποδίου που συναντάται από τη ροή διασχίζοντας μια κοιλότητα. Οι μικρότερες τιμές του συντελεστή συναγωγής για τη συγκεκριμένη διάταξη, παρατηρούνται στην 1^η κοιλότητα (με μία μεγάλη μείωση να παρουσιάζεται όταν από την 1^η κοιλότητα η ροή συνεχίζει στη 2^η). Στη συνέχεια, όσο η ροή προχωράει κατάντι, από κοιλότητα σε κοιλότητα, οι τιμές αυτές αυξάνονται, και φτάνουν σε μία μέγιστη τιμή, στην τελευταία κοιλότητα. Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται ότι τα ελάχιστα του συντελεστή συναγωγής παρουσιάζονται σε μια περιοχή που εφάπτεται του πρώτου εμποδίου ενώ τα μέγιστα εντοπίζονται περίπου στη μέση κάθε κοιλότητας (εάν θεωρηθεί μία νοητή γραμμή που περνά από τη γραμμή συμμετρίας). Η 1^η κοιλότητα φαίνεται να διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες.

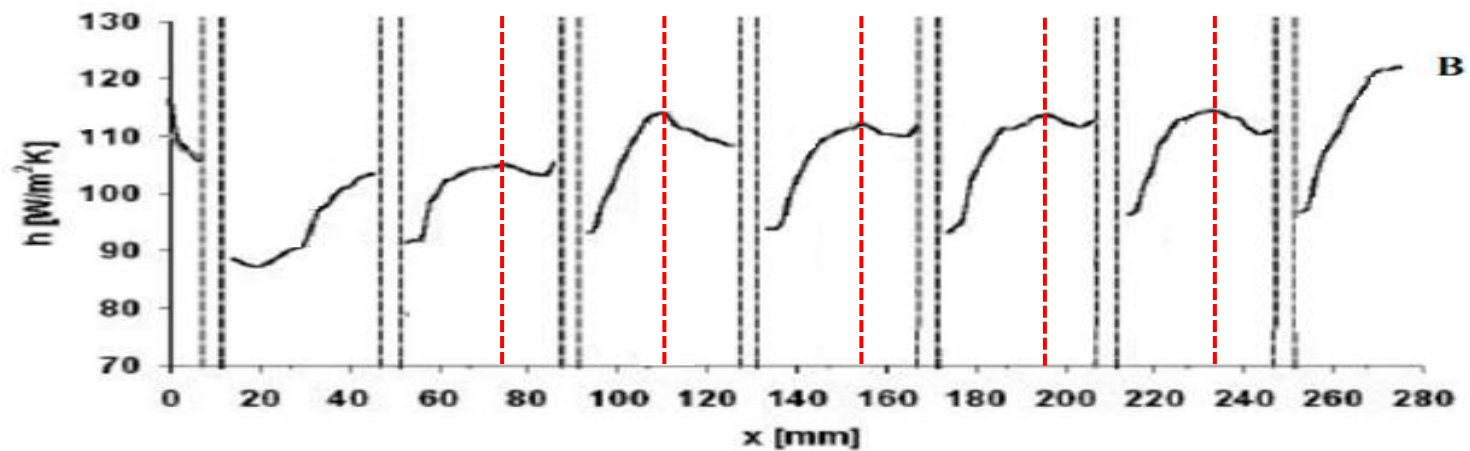
Από τα Σχήματα 6.3 και 6.5, φαίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή συναγωγής εξαρτώνται από τις ροϊκές δομές στο εκάστοτε σημείο, λόγω της μορφής του χάρτη κατανομής του, γύρω από τα σημεία όπου αναμένεται να υπάρχει ζώνη ανακυκλοφορίας. Γενικά φαίνεται ότι στη Διάταξη B, όχι μόνο, ο συντελεστής συναγωγής παίρνει πιο μεγάλες τιμές, αλλά όσο προχωράει η ροή από κοιλότητα σε κοιλότητα αυξάνεται αντί να μειώνεται, σε αντίθεση με τη Διάταξη A. Ουσιαστικά, στη Διάταξη B, η θερμότητα μεταδίδεται καλύτερα απ' ό,τι στη Διάταξη A. Τέλος, και στα τέσσερα τελευταία σχήματα φαίνεται ότι η ροή δε σχηματίζεται πλήρως από τις πρώτες κοιλότητες.



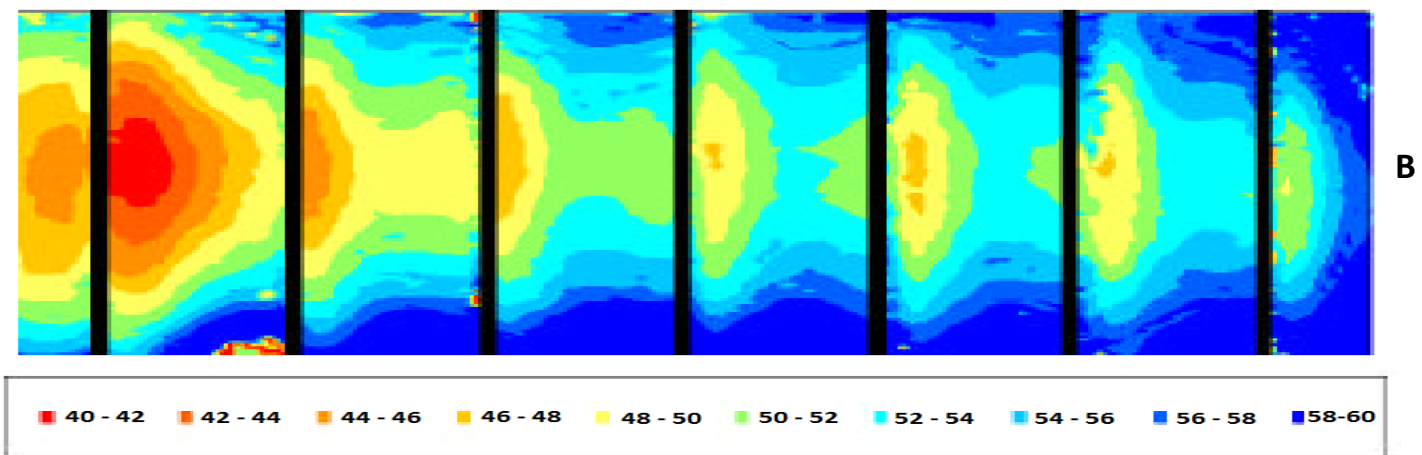
Σχήμα 6.2 Κατανομή του τοπικού Συντελεστή Συναγωγής στο μέσο ($W/2$ από το άκρο κάθε διάταξης) της Διάταξης A για $Re = 28\,500^{[11]}$. Εντοπίζονται τα σημεία παρουσίασης ελαχίστου.



Σχήμα 6.3 Χάρτης της κατανομής του τοπικού Συντελεστή Συναγωγής της Διάταξης A για $Re = 8\,800^{[11]}$



Σχήμα 6.4 Κατανομή του τοπικού Συντελεστή Συναγωγής ($W/(m^2K)$) στο μέσο ($W/2$ από το άκρο κάθε διάταξης) της Διάταξης B για $Re = 28\,500^{[1]}$
Εντοπίζονται τα σημεία παρουσίασης μεγίστου.



Σχήμα 6.5 Χάρτης Κατανομής του Τοπικού Συντελεστή Συναγωγής ($W/(m^2K)$) της Διάταξης B για $Re = 8\,800^{[1]}$

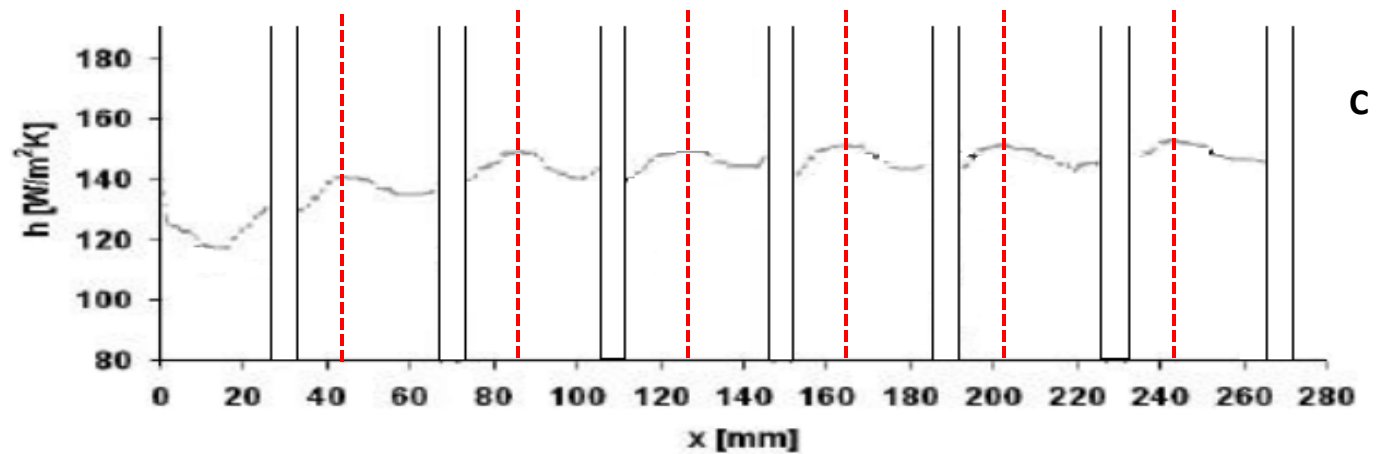
Στα σημεία όπου η ροή παγιδευείται σε μικρές ζώνες ανακυκλοφορίας, αναμένεται η θερμοκρασία να είναι μεγαλύτερη και κατ' επέκταση ο συντελεστής συναγωγής να μειώνεται. Αυτά τα σημεία, θα μπορούσαν να ανήκουν στις περιοχές κατάντι των πρώτων εμποδίων κάθε κοιλότητας, όπου εξαιτίας της ζώνης ανακυκλοφορίας, δημιουργείται μια δευτερεύουσα φουσαλίδα που παγιδευεί εκεί τη ροή. Αυτό είναι όντως φανερό και στη Διάταξη A, και στη Διάταξη B, όπου στα σημεία αυτά παρουσιάζονται οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή συναγωγής σε κάθε κοιλότητα.

Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή συναγωγής, σύμφωνα και με τη διεθνή βιβλιογραφία, αναμένεται στα σημεία όπου η ροή επανακολλάται στο τοίχωμα, μετά την κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας. Στη Διάταξη A, η ροή επανακολλάται πάντα στο κατάντι εμπόδιο. Η μέγιστη τιμή στο σημείο αυτό παρουσιάζεται λόγω της ενίσχυσης της τύρβης που προκαλεί το επόμενο εμπόδιο. Η Διάταξη B, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί παράδειγμα κ-τύπου τραχύτητας, οπότε και η επανακόλληση της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας, γίνεται εντός της κοιλότητας. Σύμφωνα με τους **S. Leonardj, P. Orlandj, R. J. Smalley, L. Djenidi και R. A. Antonia^[9]**, όταν ο λόγος w/k μεγαλώνει, τότε το σημείο επανακόλλησης μετατοπίζεται κατάντι και άρα το μέγεθος της κύριας ζώνης ανακυκλοφορίας μεγαλώνει. Εφόσον στην περίπτωση της δικής μας Διάταξης B, ο λόγος w/k είναι μικρότερος απ' ό τι στην περίπτωση των **D. Cavallero και G. Tanda^[11]**, τότε σημείο όπου εμφανίζεται το μέγιστο του συντελεστή συναγωγής (4.5k κατάντι του πρώτου εμποδίου $> 4k$), μπορεί να είναι το σημείο στο οποίο εμφανίζεται επανακόλληση. Μετά το σημείο επανακόλλησης, παρουσιάζεται μια μείωση στο συντελεστή συναγωγής, λόγω της αύξησης του θερμικού οριακού στρώματος, ενώ στη συνέχεια, λόγω της φουσαλίδας αποκόλλησης ανάντι του επόμενου εμποδίου, παρουσιάζεται και πάλι μια αύξηση στο συντελεστή συναγωγής.

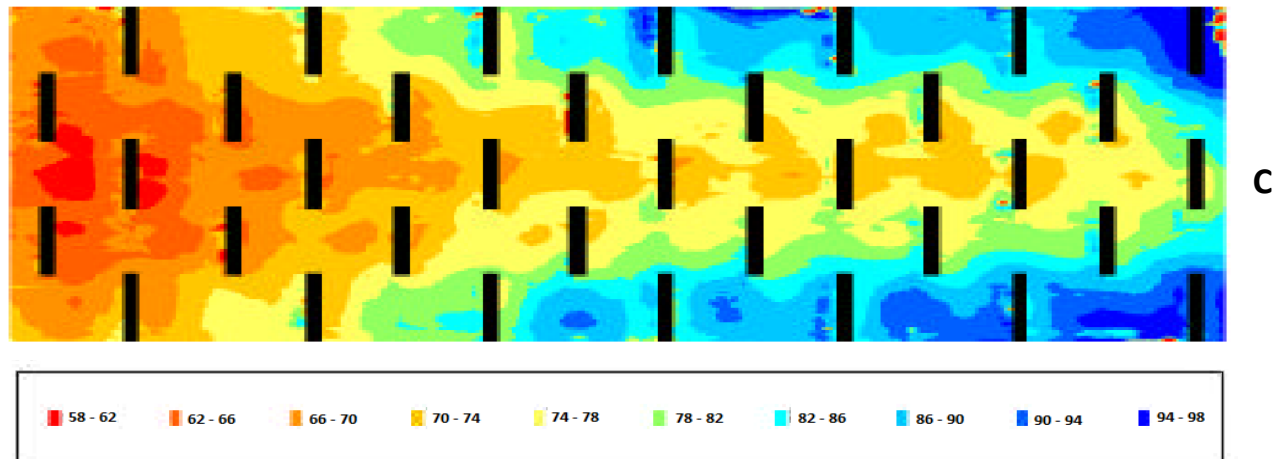
Στο Σχήμα 6.6, εντοπίζονται τα σημεία μεγίστου του συντελεστή συναγωγής της Διάταξης C, για $Re = 28500$. Τα σημεία του μεγίστου δε φαίνεται να αποκλίνουν πολύ σε θέση από κοιλότητα σε κοιλότητα, και εντοπίζονται σταθερά γύρω στα $1.5 k - 2 k$ (ύψη εμποδίου) κατάντι του πρώτου εμποδίου κάθε κοιλότητας, με την απόσταση από εμπόδιο σε εμπόδιο ισούται με $7.4 k$. Στα αντίστοιχα σημεία στη Διάταξη Γ της δικής μας περίπτωσης, η ροή φαίνεται να αρχίζει να επιταχύνεται εξαιτίας της ύπαρξης των εμποδίων δεξιά και αριστερά της γραμμής συμμετρίας. Οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή συναγωγής, εντοπίζονται σταθερά ακριβώς κατάντι του πρώτου εμποδίου που συναντάται από τη ροή διασχίζοντας μια κοιλότητα. Οι μικρότερες τιμές του συντελεστή συναγωγής για τη συγκεκριμένη διάταξη, παρατηρούνται στην 1^{η} κοιλότητα, όπου διαφοροποιείται και η κατανομή. Στη συνέχεια, όσο η ροή προχωράει κατάντι, από κοιλότητα σε κοιλότητα, οι τιμές του συντελεστή συναγωγής δείχνουν περιοδικότητα, δηλαδή η κατανομή δεν αλλάζει πολύ από κοιλότητα σε κοιλότητα.

Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται ότι τα ελάχιστα του συντελεστή συναγωγής για τη Διάταξη D, παρουσιάζονται σε μια περιοχή που εφάπτεται του πρώτου εμποδίου κάθε κοιλότητας, ενώ τα μέγιστα εντοπίζονται περίπου $9 k$ κατάντι του πρώτου εμποδίου κάθε κοιλότητας, δεδομένου ότι η απόσταση ενός εμποδίου από το επόμενο είναι 14.8 , οπότε το σημείο αυτό εντοπίζεται εκεί όπου η ροή έχει έντονη επιτάχυνση περνώντας ανάμεσα στα απέναντι εμπόδια. Η 1^{η} κοιλότητα διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες.

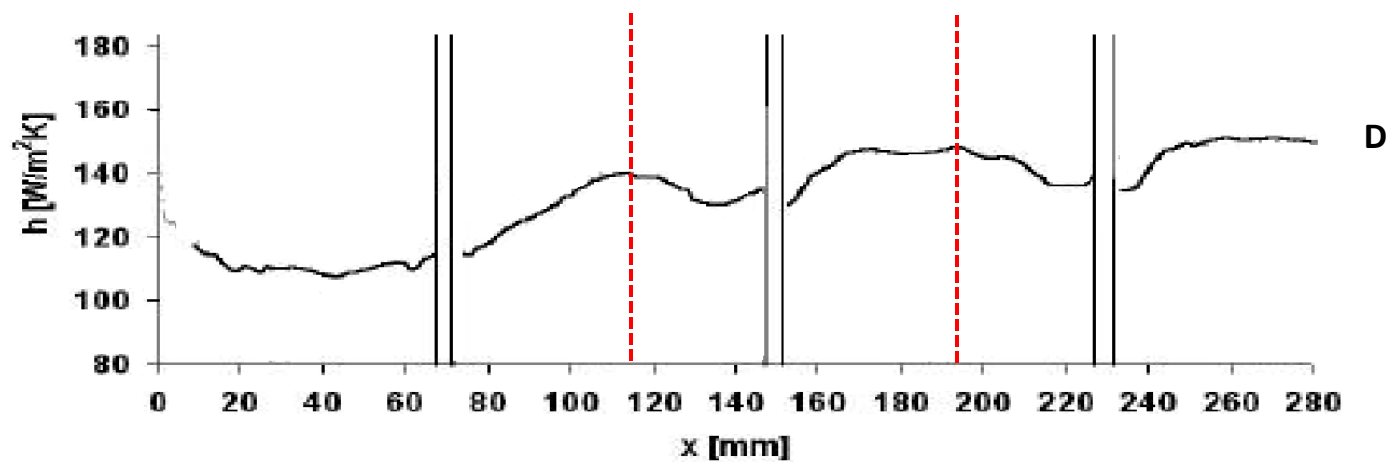
Από τα Σχήματα 6.7 και 6.9, φαίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή συναγωγής εξαρτώνται από τις ροϊκές δομές στο εκάστοτε σημείο, λόγω της μορφής του χάρτη κατανομής του. Γενικά φαίνεται ότι στις Διατάξεις C και D, ο συντελεστής συναγωγής παίρνει πιο μεγάλες τιμές απ' ό τι στις Διατάξεις A και B.



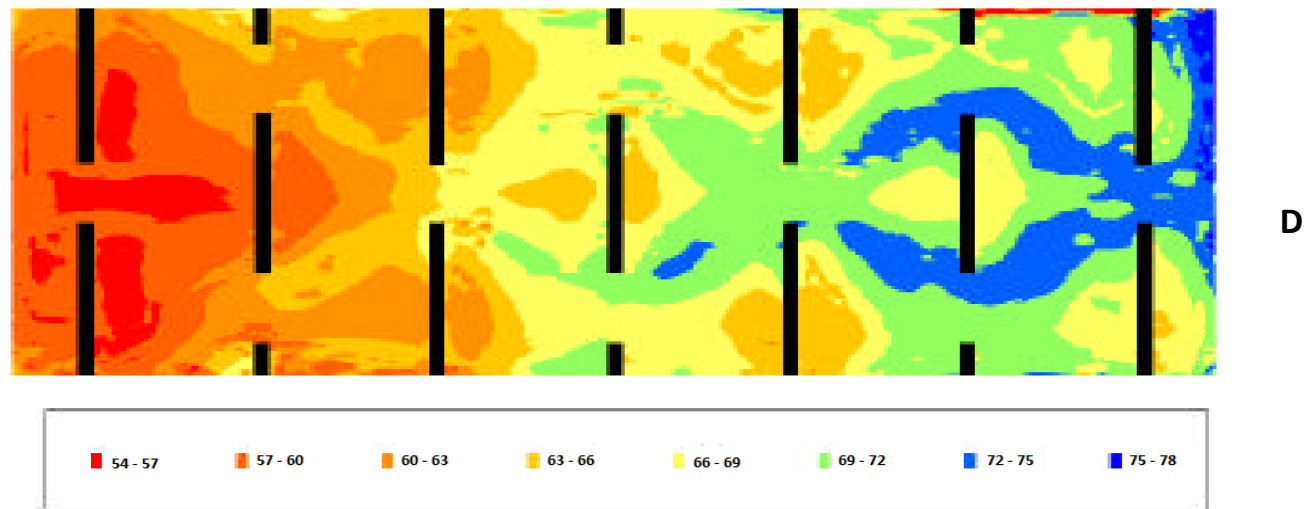
Σχήμα 6.6 Κατανομή του τοπικού Συντελεστή Συναγωγής στο μέσο ($W/2$ από το άκρο κάθε διάταξης) της Διάταξης C για $Re = 28\,500^{[11]}$. Εντοπίζονται τα σημεία παρουσίας μεγίστου.



Σχήμα 6.7 Χάρτης Κατανομής του Τοπικού Συντελεστή Συναγωγής ($W/(m^2K)$) της Διάταξης C για $Re = 8\,800^{[11]}$



Σχήμα 6.8 Κατανομή του τοπικού Συντελεστή Συναγωγής στο μέσο ($W/2$ από το άκρο κάθε διάταξης) της Διάταξης D για $Re = 28\,500^{[11]}$. Εντοπίζονται τα σημεία παρουσίασης μεγίστου.



Σχήμα 6.9 Χάρτης Κατανομής του Τοπικού Συντελεστή Συναγωγής ($W/(m^2K)$) της Διάταξης D για $Re = 8\,800^{[11]}$

Ουσιαστικά, στις Διατάξεις C και D, η θερμότητα μεταδίδεται καλύτερα απ' ότι στις Διατάξεις A και B. Γενικά από τα Σχήματα 6.7 και 6.9, φαίνεται ότι η δομή της ροής γύρω από τα εμπόδια της επιφανειακής τραχύτητας είναι πιο περίπλοκη για τις Διατάξεις με τα σπασμένα εμπόδια.

6.2 «Μη Επεμβατική Μέτρηση Κατανομής του Συντελεστή Συναγωγής Θερμότητας σε Επίπεδη Επιφάνεια με Προεξοχές», Α. Νταουλτζής, Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Μαθιουλάκης^[21]

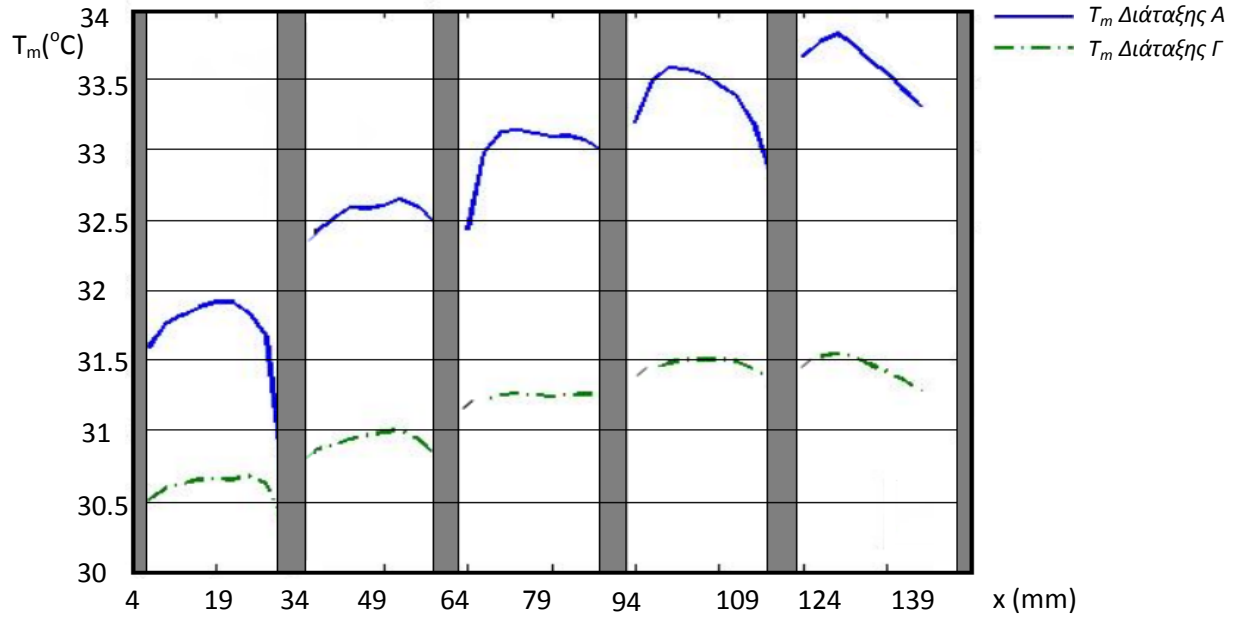
Στην ανωτέρω διπλωματική εργασία, πραγματοποιούνται πειράματα μετρήσεων της κατανομής της θερμοκρασίας σε θερμαινόμενη πλάκα, εκτεθειμένη σε ρεύμα αέρα ψύξης, υπό την επίδραση επιφανειακής τραχύτητας. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα φύλλο υγρών κρυστάλλων, ενώ για την (ελεγχόμενη) παροχή θερμότητας, κάτω από το φύλλο των υγρών κρυστάλλων, τοποθετήθηκε φύλλο αλουμινίου σε επίπεδη θερμική αντίσταση, μονωμένη στην έδρασή της για τον περιορισμό των απωλειών θερμότητας. Πάνω στο φύλλο υγρών κρυστάλλων, διαμορφώνονται οι τέσσερις διατάξεις της επιφανειακής τραχύτητας (Σχήμα 3.2). Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η ίδια σήραγγα με τη δική μας περίπτωση, ενώ οι διατάξεις εκτέθηκαν σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες ρεύματος αέρα: $U_e = 2.64 \text{ m/s}$, 2.88 m/s και 3.22 m/s . Για την καταγραφή της «αντίδρασης» των υγρών κρυστάλλων στις μεταβολές της θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκε CCD – Camera, μέσω της οποίας τα αποτελέσματα μεταφέρθηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για να γίνει επεξεργασία και μετατροπή της οπτικής πληροφορίας σε πειραματικό δεδομένο (αρχεία κατανομής θερμοκρασίας). Η θερμοκρασιακή κατανομή μελετήθηκε σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες ρεύματος αέρα και τέσσερις διαφορετικές τιμές της ροής θερμότητας για την κάθε διάταξη ξεχωριστά.

Γνωρίζοντας την ισχύ που παρέχεται από την θερμική αντίσταση, καθώς και τις διαστάσεις της ($200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$), μπορεί να βρεθεί η θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (q) που μεταφέρεται από την θερμική αντίσταση, διαιρώντας την ισχύ που παρέχεται με το εμβαδόν της. Οι απώλειες θερμότητας στα τοιχώματα και στο περιβάλλον, θεωρούνται αμελητέες, οπότε όλη η θερμότητα που παράγεται από την πλάκα θεωρείται ότι μεταδίδεται στη ροή. Έτσι σύμφωνα με τη σχέση (1.29), όπου T_∞ , η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και $T_s = T(t)$, η θερμοκρασία σε κάθε σημείο της πλάκας που έχει βρεθεί στα αρχεία θερμοκρασιακής κατανομής, μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο της θερμικής αντίστασης, η τιμή του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας (h).

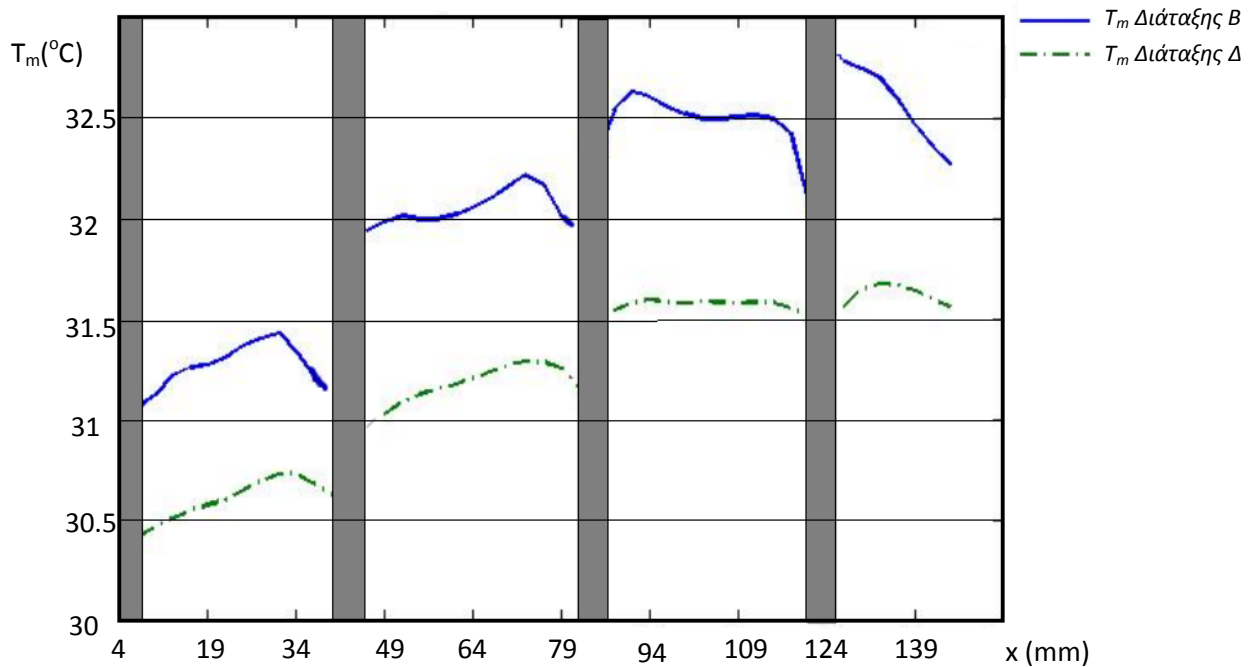
Ακολουθως, με γνωστό το συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας (h) και εύρεση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (k) αφού η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι γνωστή, μπορεί με τη βοήθεια της σχέσης (1.34), να βρεθεί ο Αριθμός Nusselt, για κάθε σημείο της πλάκας. Το χαρακτηριστικό μέγεθος L (Σχέση 1.34), θέτεται ίσο με το ύψος των εμποδίων της διάταξης ($L = k = 5 \text{ mm}$).

Τέλος, για τη σύγκριση της επίδρασης κάθε διάταξης ξεχωριστά, υπολογίζονται οι μέσες τιμές τους.

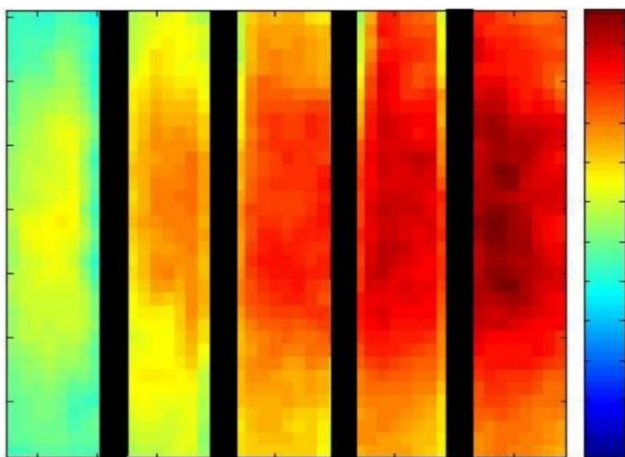
Παράθεση Συγκριτικών Διαγραμμάτων Μέσων Θερμοκρασιών, Μέσων Συντελεστών Συναγωγιμότητας και Αριθμών Nusselt:



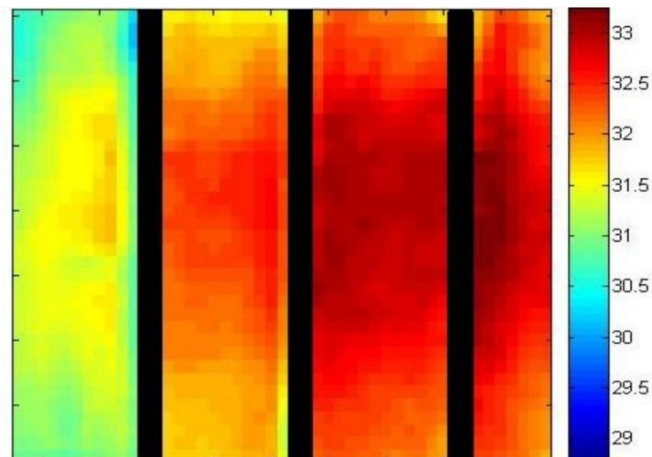
Σχήμα 6.10 Κατανομή Μέσων Θερμοκρασιών (T_m) στις Διατάξεις Α και Γ για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 \text{ m/s}^{[21]}$



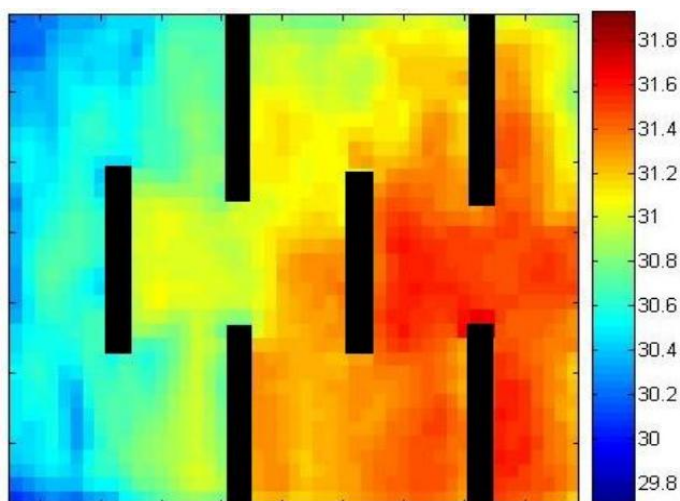
Σχήμα 6.11 Κατανομή Μέσων Θερμοκρασιών (T_m) στις Διατάξεις Β και Δ για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 \text{ m/s}^{[21]}$



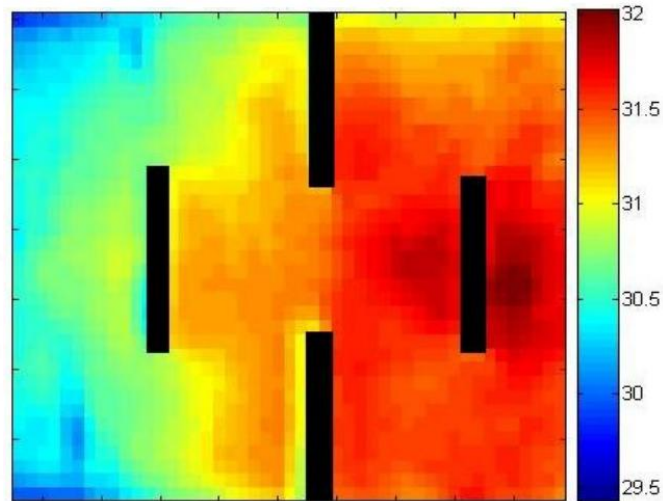
Σχήμα 6.12 Διάταξη Α: Κατανομή Θερμοκρασίας για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.88 \text{ m/s}^{[21]}$



Σχήμα 6.13 Διάταξη Β: Κατανομή Θερμοκρασίας για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.88 \text{ m/s}^{[21]}$

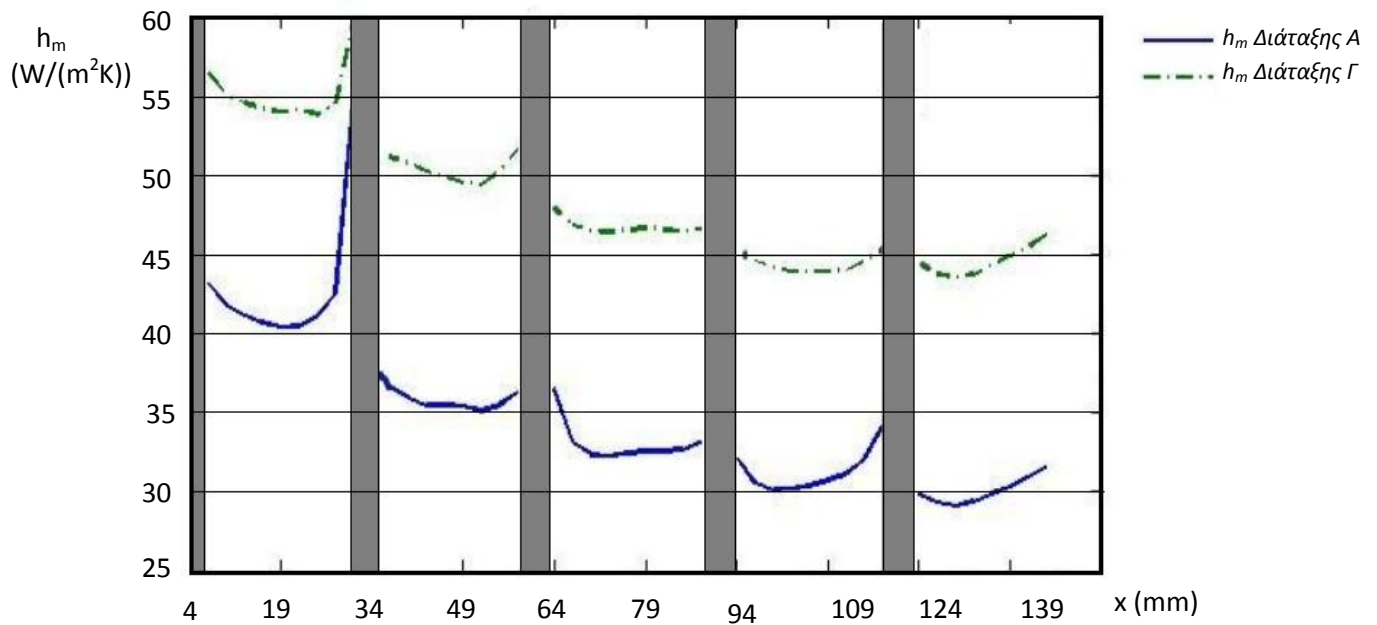


Σχήμα 6.14 Διάταξη Γ: Κατανομή Θερμοκρασίας για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.88 \text{ m/s}^{[21]}$

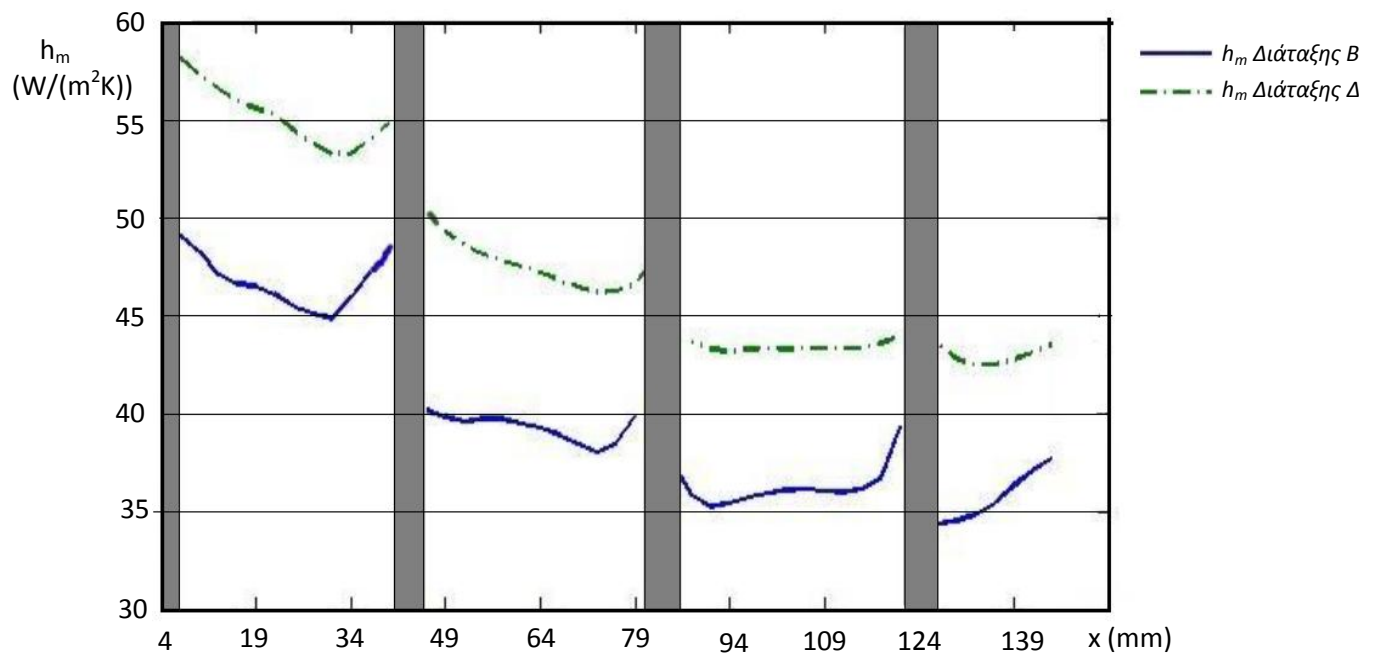


Σχήμα 6.15 Διάταξη Δ: Κατανομή Θερμοκρασίας για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.88 \text{ m/s}^{[21]}$

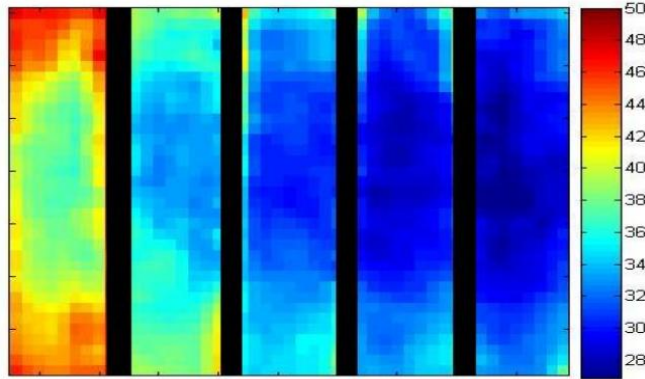
Στα Σχήματα 6.12, 6.13, 6.14 και 6.15, φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας (σε $^{\circ}\text{C}$) για τις Διατάξεις Α, Β, Γ και Δ αντίστοιχα για ταχύτητα ελευθέρου ρεύματος $U_e = 2.88 \text{ m/s}$, και ροή θερμότητας 198 W/m^2 . Η θερμοκρασία φαίνεται να παίρνει μικρότερες τιμές για τις Διατάξεις Γ και Δ, σε σχέση με τις Διατάξεις Α και Β. Είναι φανερό ότι η θερμοκρασία επηρεάζεται από τις δομές της ροής λόγω της παρουσίας των εμποδίων. Στα Σχήματα 6.12 και 6.13, φαίνεται ότι αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες στη μέση της Διάταξης, που μειώνονται όσο προχωράμε προς τα άκρα.



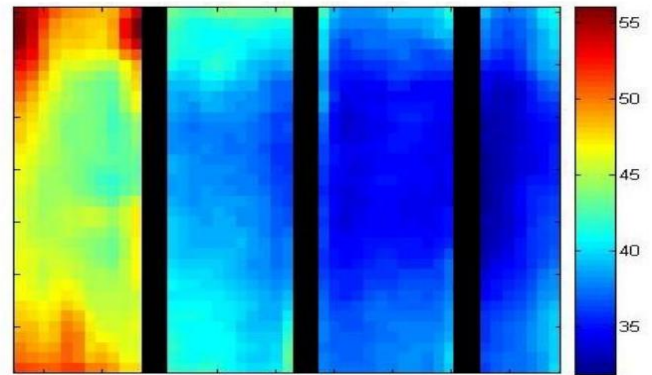
Σχήμα 6.16 Κατανομή Μέσου Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας (h_m) στις Διατάξεις A και Γ για ροή θερμότητας $198 W/m^2$ και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 m/s$ ^[21]



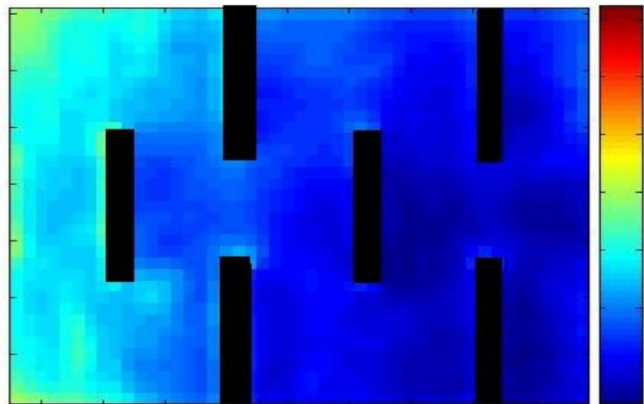
Σχήμα 6.17 Κατανομή Μέσου Συντελεστή Θερμικής Συναγωγιμότητας (h_m) στις Διατάξεις B και Δ για ροή θερμότητας $198 W/m^2$ και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 m/s$ ^[21]



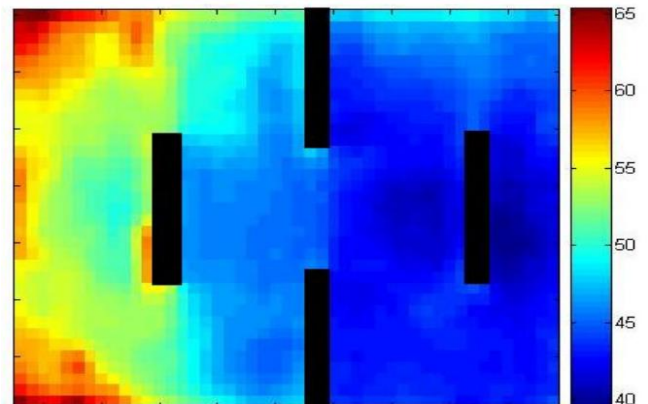
Σχήμα 6.18 Διάταξη Α: Κατανομή Συντελεστή Συναγωγής για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 \text{ m/s}$ ^[21]



Σχήμα 6.19 Διάταξη Β: Κατανομή Συντελεστή Συναγωγής για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 \text{ m/s}$ ^[21]



Σχήμα 6.20 Διάταξη Γ: Κατανομή Συντελεστή Συναγωγής για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 \text{ m/s}$ ^[21]



Σχήμα 6.21 Διάταξη Δ: Κατανομή Συντελεστή Συναγωγής για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 \text{ m/s}$ ^[21]

Στα Σχήματα 6.18, 6.19, 6.20 και 6.21 φαίνεται η κατανομή του συντελεστή συναγωγής (σε $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) στις Διατάξεις Α, Β, Γ και Δ αντίστοιχα, για ροή θερμότητας 198 W/m^2 και ταχύτητα ρεύματος αέρα $U_e = 2.64 \text{ m/s}$. Στα Σχήματα 6.18 και 6.19, ο συντελεστής συναγωγής φαίνεται να γίνεται ελάχιστος στη μέση της Διατάξης και να αυξάνεται όσο απομακρύνεται από αυτή, παρουσιάζει δηλαδή «αντίστροφη» κατανομή από αυτή της θερμοκρασίας όπως αναμένεται (μεγαλύτερη θερμοκρασία σημαίνει κακή μεταφορά θερμότητας, και άρα χαμηλότερος συντελεστής συναγωγής). Επιπλέον φαίνεται ότι ο συντελεστής συναγωγής παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση των Διατάξεων Γ και Δ, κάτι που βρίσκει σύμφωνους και τους **D. Cavallero και G. Tanda**^[11]. Οι μικρότερες τιμές του συντελεστή συναγωγής του **A. Νταουλτζή**^[21], σε σχέση με τους **D. Cavallero και G. Tanda**^[11], οφείλεται στις μικρότερες ταχύτητες ροής στο πείραμα του, κάτι που παρατηρήθηκε και από τον ίδιο (με την αύξηση της ταχύτητας, αυξάνεται και ο συντελεστής συναγωγής^{[13][21]}). Η κατανομή του συντελεστή συναγωγής, δε φαίνεται να αποκλίνει από την προηγούμενη περίπτωση^[13]. Ουσιαστικά, μειώνεται στα σημεία όπου παρουσιάζεται αποκόλληση και αυξάνεται στα σημεία όπου γίνεται επανακόλληση.

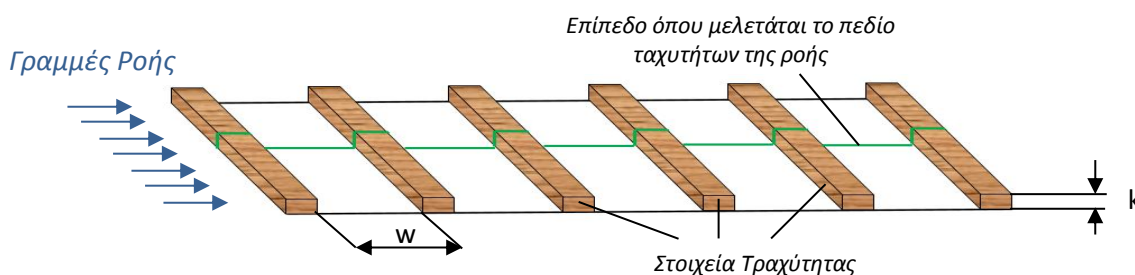
Κεφάλαιο 7^ο

Συμπεράσματα

Πεδίο Ταχυτήτων

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συμφωνούν με την κατηγοριοποίηση της επιφανειακής τραχύτητας της βιβλιογραφίας, που βασίζεται στη μορφή των ροϊκών δομών σε διαφορετικούς λόγους μήκους κοιλότητας προς ύψος εμποδίου (w/k), για διατάξεις τραχύτητας αποτελούμενες από παράλληλες μπάρες εγκάρσια τοποθετημένες στην κατεύθυνση της ροής (Σχήμα 7.1).

Η Διάταξη Α, με λόγο $w/k = 4$, που σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία αντιστοιχεί σε ενδιάμεσου τύπου τραχύτητα, παρουσιάζει τις ιδιότητες που περιγράφονται: μια ζώνη ανακυκλοφορίας ανάμεσα στα στοιχεία της τραχύτητας που καταλαμβάνει όλο το μήκος της κοιλότητας και εμποδίζει τη ροή να επανακολληθεί στο κάτω τοίχωμα και μια δευτερεύουσα ζώνη ανακυκλοφορίας στην κάτω κατάντι γωνία κάθε εμποδίου.



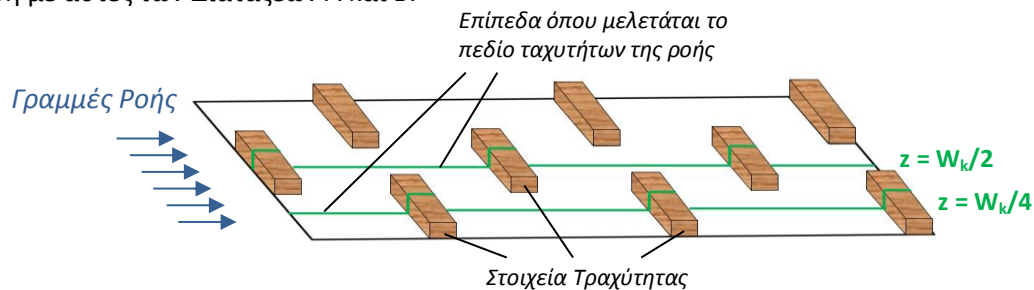
Σχήμα 7.1 Διάταξη Επιφανειακής Τραχύτητας αποτελούμενη από παράλληλες μπάρες εγκάρσια τοποθετημένες στην κατεύθυνση της ροής

Η Διάταξη Β, με λόγο $w/k = 6$, που αντιστοιχεί σε k -τύπου τραχύτητα, επίσης παρουσιάζει τις ιδιότητες που περιγράφονται: μια κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας σχηματίζεται μετά από κάθε στοιχείο τραχύτητας και επανακολλάται στο κάτω τοίχωμα, ενώ δύο δευτερεύουσες ζώνες ανακυκλοφορίας σχηματίζονται στην ανάντι και κατάντι γωνία κάθε εμποδίου. Η ροή (στη Διάταξη Β), επανακολλάται στο τοίχωμα σε απόσταση $4k$ (4 ύψη εμποδίου), κατάντι κάθε εμποδίου, απόσταση που ισούται με το μήκος της

κοιλότητας της Διατάξης A, και άρα με το μήκος της ζώνης ανακυκλοφορίας που σχηματίζεται εκεί (Διάταξη A).

Στις Διατάξεις A και B, η ροή δείχνει να έχει περιοδικότητα, η οποία όμως εμφανίζεται μετά την 1^η κοιλότητα.

Στις Διατάξεις Γ και Δ, η δομή της ροής είναι πιο περίπλοκη, λόγω της διαμόρφωσης των στοιχείων της τραχύτητας (Σχήμα 7.2). Παρόλα αυτά, η ροή παρουσιάζει περιοδικότητα και στα δύο μελετούμενα επίπεδα. Επιπρόσθετα, στις Διατάξεις Γ και Δ, οι τιμές της κάθετης ταχύτητας V , είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των Διατάξεων A και B.



Σχήμα 7.2 Διάταξη Επιφανειακής Τραχύτητας αποτελούμενη από σπασμένα εμπόδια εγκάρσια τοποθετημένα στην κατεύθυνση της ροής

Η παρουσία των στοιχείων της τραχύτητας, επηρεάζει σε αρκετό βαθμό το πεδίο ροής, ενισχύοντας την τύρβη.

Μεταφορά Θερμότητας και Πεδίο Ταχυτήτων

Η μεταφορά θερμότητας επηρεάζεται αρκετά από τη γεωμετρία της τραχύτητας, αφού σύμφωνα και με τη διεθνή βιβλιογραφία, ενισχυμένη τύρβη ισοδυναμεί με καλύτερη μεταφορά θερμότητας.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με την εργασία των **D. Cavallero και G. Tanda^[12]** και τη διπλωματική εργασία του **A. Νταουλτζή^[21]**, φαίνεται ότι οι μικρότερες τιμές της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή συναγωγής, εμφανίζονται στα σημεία όπου υπάρχει επανακόλληση της ροής στο κάτω τοίχωμα (Διάταξη B). Με λίγα λόγια, καλύτερη μεταφορά θερμότητας, παρουσιάζεται στα σημεία επανακόλλησης.

Οι μεγαλύτερες τιμές της θερμοκρασίας, φαίνεται να παρουσιάζονται στα σημεία, όπου η ροή παγιδεύεται σε κάποια σημεία λόγω των ζωνών ανακυκλοφορίας. Αυτό είναι εμφανές στην κατάντι και ανάντι πλευρά κάθε στοιχείου της τραχύτητας (Διάταξη B), όπου σχηματίζονται μικρές δίνες. Σε αυτά τα σημεία αντιστοιχούν οι μικρότερες τιμές του συντελεστή συναγωγής.

Οι Διατάξεις Γ και Δ, παρουσιάζουν αυξημένη μεταφορά θερμότητας (μεγαλύτερους συντελεστές συναγωγής) σε σχέση με τις Διατάξεις A και B, κάτι που δείχνει τη μεγάλη επίδραση που έχει η γεωμετρία και η διαμόρφωση της τραχύτητας στη μεταφορά θερμότητας και κατ' επέκταση στο πεδίο ταχυτήτων.

Παράρτημα

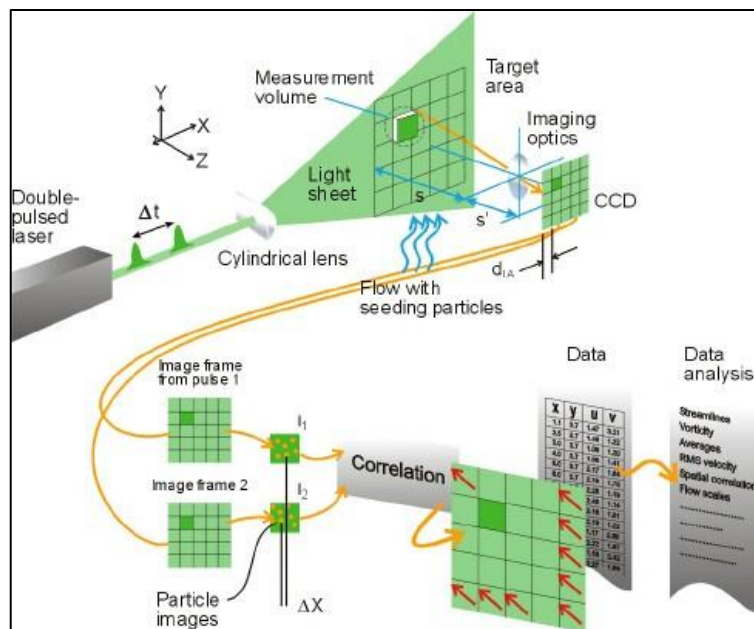
Αναλυτική Επισκόπηση Επεξεργασίας Δεδομένων

A1 – Particle Image Velocimetry (PIV)

Όπως αναφέρεται στο 3^ο Κεφάλαιο, η οπτικοποίηση του πεδίου ταχυτήτων γίνεται μέσω της μεθόδου Particle Image Velocimetry. Πρόκειται για μια μη παρεμβατική τεχνική που παρέχει μετρήσεις στιγμιαίων διανυσμάτων της ταχύτητας σε μια ορισμένη διατομή της ροής και χρησιμοποιείται ευρύτατα τόσο στην εκπαίδευση, όσο και στην έρευνα.

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να καταγράψει μεγάλο εύρος ταχυτήτων, από μηδενικές μέχρι και υπερηχητικές, ενώ είναι δυνατή η τρισδιάστατη καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων της ροής, μέσω στερεοσκοπικής διάταξης. Τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντινά με τις υπολογιστικές μεθόδους της δυναμικής των ρευστών (πχ Προσομοίωση Μεγάλων Δινών – Large Eddy Simulations LES).

Στη ροή διαχέονται σωματίδια – «ιχνηλάτες», αρκετά μικρά σε μέγεθος ώστε να μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι ακολουθούν τη δυναμική του ρευστού. Στην παρούσα εργασία, για τις ανάγκες του πειράματος, αυτό το ρόλο παίζουν σταγονίδια λαδιού με διάμετρο 1 μm, που διαχέονται στη ροή μέσω του Τροφοδοτικού Καπνού TSI 9307 Oil Droplet Generator (Κεφάλαιο 3^ο).



Σχήμα A1 Σχηματική Απεικόνιση των σταδίων ανάλυσης της μεθόδου Particle Image Velocimetry^[24]

Το ρευστό μαζί με τα συμπαρασυρόμενα σταγονίδια φωτίζεται, έτσι ώστε τα σταγονίδια να είναι ορατά. Η κίνηση αυτών των σωματιδίων, χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η ταχύτητα και κατεύθυνση της εξεταζόμενης ροής. Δύο συνιστώσες της ταχύτητας μετρώνται και με τη βοήθεια σύγχρονων μέσων καταγραφής και κατάλληλου λογισμικού, μπορούν να εξαχθούν χάρτες πραγματικής ταχύτητας.

Η τυπική διάταξη PIV αποτελείται από μία κάμερα (ψηφιακή με CCD chip), μια Συσκευή Εκπομπής Laser, ένα συγχρονιστή ο οποίος ελέγχει τη λειτουργία της κάμερας και του laser, ενώ στο υπό μελέτη ρευστό έχουν διαχυθεί τα τροχιοδεικτικά σωματίδια. Στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιείται η Συσκευή Εκπομπής Laser PIV Solo Laser II-30 της New Wave Research και η CCD-Camera TSI POWER VIEW™ 1.4MP, Model 630066 (Κεφάλαιο 3^ο).

Η ροή φωτίζεται παλμικά στην εξεταζόμενη διατομή με ένα λεπτό στρώμα φωτός, με γνωστή τη χρονική απόσταση Δt μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών. Η ψηφιακή κάμερα καταγράφει κάθε παλμό του φωτός σε ξεχωριστές εικόνες (Σχήμα A1). Με την καταγραφή μιας ακολουθίας δύο παλμών, οι εικόνες χωρίζονται σε δύο υποτμήματα, που ονομάζονται περιοχές διεύρυνσης ή εξέτασης (Interrogation Areas - IA). Τα δύο αυτά υποτμήματα I_1 και I_2 από κάθε εικόνα, ετεροσυσχετίζονται (cross-correlated) από pixel σε pixel. Αυτή η συσχέτιση παράγει ένα peak, εντοπίζοντας τη μετατόπιση $\Delta \vec{x}$ ενός κοινού (στα δύο υποτμήματα) σταγονιδίου (Σχήμα A1)^[24]. Με γνωστή τη μετατόπιση $\Delta \vec{x}$ και το χρόνο Δt , προκύπτει το μέγεθος και η φορά ενός διανύσματος ταχύτητας με χρήση της σχέσης:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$$

Με την επανάληψη της συσχέτισης, προκύπτει ένας χάρτης των διανυσμάτων της ταχύτητας.

Στο πείραμα για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ο χρόνος Δt είναι ίσος με 120 μs , ενώ η χρονική απόσταση μεταξύ ενός ζεύγους παλμών ισούται με 200 ms, ενώ κάθε καταγραφόμενη εικόνα έχει μέγεθος 1 376 × 1 040 pixels (Κεφάλαιο 3^ο). Για τις ανάγκες του πειράματος λήφθηκαν 200 ζεύγη εικόνων σε κάθε κοιλότητα ανάμεσα στα στοιχεία της τραχύτητας ξεχωριστά.

A2 – Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Μέσω του προγράμματος Insight 3G, οι εικόνες επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να προκύψει ο χάρτης των διανυσμάτων του μέσου πεδίου ταχυτήτων για κάθε κοιλότητα. Τα αρχεία που προκύπτουν αποθηκεύονται ως αρχεία *.vec.

Το βασικό πρόβλημα που προκύπτει στην παρούσα φάση, αφορά τις μονάδες μέτρησης. Οι εικόνες που καταγράφονται στην πλατφόρμα λογισμικού Insight 3G, παρέχουν τις αποστάσεις σε pixels και το χάρτη των διανυσμάτων της ταχύτητας σε pixels/s. Κατ' επέκταση το πεδίο θα προκύψει στις σωστές μονάδες με την κατάλληλη βαθμονόμηση.

Οι εικόνες μπορούν να φανούν μέσω του Insight 3G και οι αποστάσεις μπορούν να βρεθούν σε pixels. Εφόσον κάθε διάταξη έχει τυποποιημένες διαστάσεις, μπορεί να γίνει μια αντιστοιχία pixel και

απόστασης ώστε να βρεθεί μια κλίμακα που θα καταστήσει δυνατή τη μετατροπή. Φυσικά για κάθε εικόνα η κλίμακα είναι διαφορετική.

Τα αρχεία *.vec, αποθηκεύονται ως αρχεία *.dat και ακολούθως γίνεται επεξεργασία τους μέσω του Προγράμματος Fortran. Οι κώδικες και η επεξήγησή τους δίνονται:

Πρόγραμμα 1 : Σχεδίαση Διανυσμάτων

```

DIMENSION X(6000),Y(6000),U(6000),V(6000),XX(6000)

C*****DRAWING VECTORS *****
CHARACTER*20 INPUT
CHARACTER*20 OUTPUT
WRITE(*,*) 'GIVE INPUT FILE'
READ(*,2) INPUT
OPEN(1,FILE=INPUT)
WRITE(*,*) 'GIVE OUTPUT FILE'
READ(*,2) OUTPUT
OPEN(3,FILE=OUTPUT)
WRITE(*,*) 'GIVE SCALX'
READ(*,*) SCALX
2  FORMAT(A20)
DT=120./1000000.
SCALY=SCALX
SCALU=SCALX*DT*1000.
SCALV=SCALU
NP=85*63
DO 10 I=1,NP
  READ(1,*) X(I),Y(I),U(I),V(I),AA
  X(I)=X(I)/SCALX
  Y(I)=Y(I)/SCALY
  U(I)=-U(I)/SCALU
  V(I)=V(I)/SCALV
C  WRITE(*,*) X(I),Y(I),U(I),V(I)
  IF(ABS(U(I)).GT.10.) THEN
    U(I)=0.
    V(I)=0.
  ENDIF
10 CONTINUE
K=0
DO 20 I=NP,1,-1
  K=K+1
  XX(I)=X(K)

```

: Το Πρόγραμμα ζητάει το όνομα του αρχείου που περιέχει τα προς επεξεργασία δεδομένα

*: διαβάζει το όνομα του αρχείο *.dat που δίνεται και το ανοίγει*

*: ζητάει το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα (αρχείο *.bln)*

: και το δημιουργεί.

: Ζητάει την κλίμακα SCALX για τη συγκεκριμένη κοιλότητα σε mm

: και τη διαβάζει.

: Μορφοποίηση INPUT και OUTPUT αρχείων

: $\Delta t = 120 \mu s$

: Ορίζεται η κλίμακα της ταχύτητας – Πολλαπλασιασμός με 1000 για μετατροπή των χιλιοστών

: Αριθμός σημείων (Πλήθος) διανυσμάτων

: Διαβάζει τα X(I),Y(I),U(I),V(I),AA από το INPUT αρχείο

: Υπολογισμός τα μεγέθη στη σωστή κλίμακα

: Αντιστροφή της ροής¹

: Απόρριψη πολύ μεγάλων τιμών

: Αντιστροφή του Πεδίου¹

20 CONTINUE

C*****DRAW VECTORS *****

C WRITE(*,*) 'GIVE ARROW SCALE, EDGE FRACTION, ANGLE'

C READ(*,*) FRV,FRA,TTT

TTT=15.

FRV=0.3

FRA=0.4

: Γωνία τόξου TTT διανύσματος της ταχύτητας
: Μήκος FRV του Διανύσματος της Ταχύτητας
: Ποσοστό FRA του μήκους του διανύσματος που
καλύπτει το τόξο

TTT=TTT*ACOS(-1.)/180.

TTT=TAN(TTT)

DO 50 I=1,NP

X1=U(I)*FRV+XX(I)

Y1=V(I)*FRV+Y(I)

X2=X1+(X1-XX(I))*FRA

Y2=Y1+(Y1-Y(I))*FRA

WRITE(3,*) '6 0'

WRITE(3,*) XX(I),Y(I)

DX=X2-X1

DY=Y2-Y1

X3=X1-DY*TTT

Y3=Y1+DX*TTT

X4=X1+DY*TTT

Y4=Y1-DX*TTT

: Εύρεση τεσσάρων σημείων που αποτελούν το τόξο
κάθε διανύσματος

WRITE(3,*) X1,Y1

WRITE(3,*) X3,Y3

WRITE(3,*) X2,Y2

WRITE(3,*) X4,Y4

WRITE(3,*) X1,Y1

: Αποθήκευση Σημείων του τόξου στο OUTPUT *.bln
αρχείο

50 CONTINUE

STOP

END

Πρόγραμμα 2 : Σχεδίαση Ισοϋψών

DIMENSION X(6000),Y(6000),U(6000),V(6000),XX(6000)

C*****DRAWING VECTORS *****

CHARACTER*20 INPUT

CHARACTER*20 OUTPUT

WRITE(*,*) 'GIVE INPUT FILE'

: Το Πρόγραμμα ζητάει το όνομα του αρχείου που
περιέχει τα προς επεξεργασία δεδομένα

READ(*,2) INPUT

: διαβάζει το όνομα του αρχείο *.dat που δίνεται
: και το ανοίγει

OPEN(1,FILE=INPUT)

WRITE(*,*) 'GIVE OUTPUT FILE'

: ζητάει το όνομα του αρχείου στο οποίο θα
αποθηκευτούν τα αποτελέσματα (αρχείο *.dat)

READ(*,2) OUTPUT

<pre> OPEN(3,FILE=OUTPUT) 2 FORMAT(A20) WRITE(*,*) 'GIVE SCALX' READ(*,*) SCALX SCALY=SCALX NP=85*63 DO 10 I=1,NP READ(1,*) X(I),Y(I),U(I),V(I),AA U(I)=-U(I) WRITE(*,*) X(I),Y(I),U(I),V(I) X(I)=X(I)/SCALX Y(I)=Y(I)/SCALY IF(ABS(U(I)).GT.10.) THEN U(I)=0. V(I)=0. ENDIF 10 CONTINUE K=0 DO 20 I=NP,1,-1 K=K+1 XX(I)=X(K) 20 CONTINUE UINF=2.4 DO 30 I=1,NP UU=U(I)/UINF VV=V(I)/UINF UMAG=SQRT(UU**2+VV**2) WRITE(3,40) XX(I),Y(I),UU,VV,UMAG 30 CONTINUE 40 FORMAT(7F8.3) STOP END </pre>	<p><i>: και το δημιουργεί.</i></p> <p><i>: Μορφοποίηση INPUT και OUTPUT αρχείων</i></p> <p><i>: Ζητάει την κλίμακα SCALX για τη συγκεκριμένη κοιλότητα σε mm</i></p> <p><i>: και τη διαβάζει.</i></p> <p><i>: Αριθμός σημείων (Πλήθος) διανυσμάτων</i></p> <p><i>: Διαβάζει τα X(I),Y(I),U(I),V(I),AA από το INPUT αρχείο</i></p> <p><i>: και τα καταχωρεί</i></p> <p><i>: Υπολογίζει τα μεγέθη στη σωστή κλίμακα</i></p> <p><i>: Απόρριψη πολύ μεγάλων τιμών</i></p> <p><i>: Αντιστροφή του Πεδίου¹</i></p> <p><i>: Ταχύτητα Ελεύθερου Ρεύματος Αέρα</i></p> <p><i>: Αποθήκευση Σημείων Ισοϋψών Συνιστώσα U, V και Μέτρου Ταχύτητας στο OUTPUT *.dat αρχείο</i></p>
---	---

Τα OUTPUT αρχεία *.dat από το Πρόγραμμα 2, μετατρέπονται σε αρχεία *.grd, μέσω του προγράμματος Surfer 8. Τα αρχεία που προκύπτουν από την ανωτέρω επεξεργασία, οπτικοποιούνται μέσω του προγράμματος Surfer 8.

¹ Κατά την καταγραφή του πειράματος, η φορά της ροής ήταν από δεξιά στα αριστερά. Μέσω του προγράμματος, τόσο η ταχύτητα, όσο και όλο το πεδίο αντιστρέφονται.

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ (NOMENCLATURE)

Λατινικοί Χαρακτήρες

A :	Εμβαδόν Επιφάνειας – m^2
c_f :	Τοπικός Συντελεστής τριβής
c_p :	Ειδική Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση – J/kgK
e :	Ανηγμένη ολική ενέργεια (Ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας) – J/kg ή Ύψος Εμποδίου Επιφανειακής Τραχύτητας – mm
g :	Επιτάχυνση της βαρύτητας – m/s^2
Gr :	Αριθμός Grashof
Gr_x :	Τοπικός Αριθμός Grashof
h_m :	Συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας – W/m^2K
h_x :	Τοπική Ειδική Συναγωγιμότητα – W/m^2K
H :	Ύψος Τμήματος Πειράματος Αεροδυναμικής Σήραγγας – mm
k :	Ύψος Επιφανειακής Τραχύτητας – mm
k^+ :	Κανονικοποιημένο ύψος τραχύτητα ως προς u/u_τ
k :	Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Ρευστού – W/mK
L_k :	Συνολικό Μήκος Διάταξης προς Επιφανειακής Τραχύτητας – mm
l_k :	Πλάτος Εμποδίου στη Διάταξη προς Επιφανειακής Τραχύτητας – mm
\vec{n} :	Μοναδιαίο, κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα με φορά προς τα έξω
Nu :	Αριθμός Nusselt
Nu_m :	Μέσος Αριθμός Nusselt
Nu_x :	Τοπικός Αριθμός Nusselt
p :	Πίεση – Pa ή Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών εμποδίων της επιφανειακής τραχύτητας – mm

Pr :	Αριθμός Prandtl
q :	Ρυθμός Μεταφοράς Θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας – W/m^2
Q :	Θερμότητα – J
q_x :	Ρυθμός Μεταφοράς Θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας κατά την κατεύθυνση x – W/m^2
q' :	Ρυθμός Μεταφοράς Θερμότητας ανά μονάδα όγκου – W/m^3
Re :	Αριθμός Reynolds
Re _D :	Αριθμός Reynolds αγωγού κυκλικής διατομής
Re _x :	Τοπικός αριθμός Reynolds
St :	Αριθμός Stanton
t :	Χρόνος – s
T :	Θερμοκρασία – °C ή °K
T _m :	Μέση Θερμοκρασία – °C ή °K
T _s :	Θερμοκρασία Στερεού Σώματος – °C ή °K
T _∞ :	Θερμοκρασία Ρευστού – °C ή °K
u ή U :	Ταχύτητα παράλληλη στη διεύθυνση της ροής – m/s
u _τ :	Ταχύτητα τριβής – m/s
U _e :	Μέση ταχύτητα Ελεύθερου Ρεύματος – m/s
v ή V :	Ταχύτητα κάθετη στην διεύθυνση της ροής – m/s
V :	Όγκος – m ³
W :	Πλάτος Τμήματος Πειράματος Αεροδυναμικής Σήραγγας – mm ή Έργο - J
w :	Πλάτος Κοιλότητας Διάταξης της Επιφανειακής Τραχύτητας (Περιοχή ανάμεσα σε δύο διαδοχικά εμπόδια) – mm
W _k :	Συνολικό Πλάτος Διάταξης της Επιφανειακής Τραχύτητας – mm
w _k :	Μήκος Εμποδίου στη Διάταξη Επιφανειακής Τραχύτητας – mm

W_p : Έργο Πίεσης – J

W_τ : Έργο Δυνάμεων Συνεκτικότητας – J

Ελληνικοί Χαρακτήρες

β : Συντελεστής Θερμικής Διαστολής – $1/^\circ\text{K}$

δ : Πάχος Υδροδυναμικού Οριακού Στρώματος – m

δ_1 : Πάχος Μετατόπισης Υδροδυναμικού Οριακού Στρώματος – m

δ_2 : Πάχος Ορμής Υδροδυναμικού Οριακού Στρώματος – m

δ_t : Πάχος Θερμικού Οριακού Στρώματος – m

ε : Συντελεστής Εκπομπής

μ : Δυναμική Συνεκτικότητα Ρευστού Μέσου – Pa

ν : Κινηματική Συνεκτικότητα – m^2/s

ρ : Πυκνότητα Ρευστού – kg/m^3

σ : Σταθερά Stefan – Boltzmann – $\sigma = 5.676 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$

τ : Διατμητική τάση – N/m^2

τ_w : Διατμητική τάση στο τοίχωμα – N/m^2

u : Συνισταμένη της ταχύτητας – m/s

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γ. Σ. Τριανταφύλλου, «Τυρβώδεις Ροές», Σημειώσεις για το μάθημα «Ειδικά Θέματα Μηχανικής Ρευστών» του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών 'Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη', Ναυπηγών Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα, Σεπτέμβριος 2002

Δ. Μαθιουλάκης, «Μηχανική Ρευστών II (Σημειώσεις)», Σημειώσεις για το προπτυχιακό μάθημα «Ρευστά II», Μηχανολόγων Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα, 2006

Δ. Κ. Ασημακόπουλος, Β. Ι. Λυγερού, Γ. Α. Αραμπατζής, «Μεταφορά Θερμότητας», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2009

Σ. Τσαγγάρης, «Μηχανική των Ρευστών», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2005

Ξ. Κακάτσιος, «Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2006

J. Jiménez, Turbulent Flows over rough walls, Annual Rev. Fluid Mechanics 2004. 36: 173-96, 2004

J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson, «Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer», John Wiley & Sons, Inc., Oregon, 1983

L. Casarsa, T. Arts (2002), Aerodynamic Performance investigation of a Rib Roughened Cooling Channel Flow with high blockage ratio, 11th international symposium on application of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal

L. Wang, M. Salewski, B. Sundén (2010), Turbulent flow in a ribbed channel: Flow structures in the vicinity of a rib, Experimental Thermal and Fluid Science 34 (2010) 165-176

www.scholarpedia.org

www.engineeringtoolbox.com

en.wikipedia.org

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] J. C. Han, J. S. Park (1988), Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No.1, pp. 183-195, 1988

[2] L. Casarsa, T. Arts (2002), Aerodynamic Performance investigation of a Rib Roughened Cooling Channel Flow with high blockage ratio, 11th international symposium on application of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal

[3] J. C. Han, L. M. Wright, Enhanced Internal Cooling of Turbine Blades and Vanes, pp. 321-351, Turbine Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University

- [4] J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson, «Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer», John Wiley & Sons, Inc., Oregon, 1983
- [5] J. Jiménez, Turbulent Flows over rough walls, *Annual Rev. Fluid Mechanics* 2004. 36: 173-96, 2004
- [6] Δ. Μαθιουλάκης, «Μηχανική Ρευστών II (Σημειώσεις)», Σημειώσεις για το προπτυχιακό μάθημα «Ρευστά II», Μηχανολόγων Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα, 2006
- [7] P. Å. Krogstad, R. A. Antonia (1999), Surface roughness effects in turbulent boundary layers, *Experiments in Fluids* 27 (1999) 450-460
- [8] J. Cui, V. C. Patel, C. L. Lin (2003), Large-eddy simulation of turbulent flow in a channel with rib roughness, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 24 (2003) 372-388
- [9] S. Leonardi, P. Orlandi, R. J. Smalley, L. Djenidi, R.A. Antonia (2003), Direct numerical simulations of turbulent channel flow with transverse square bars on one wall, *J. Fluid Mech.* 491 (2003) 229-238
- [10] S. Leonardi, P. Orlandi, R. A. Antonia (2007), Properties of d- and k- type in a turbulent channel flow, *Physics of Fluid* 19, 125101 (2007)
- [11] D. Cavallero, G. Tanda, An experimental investigation of forced convection heat transfer in channels with rib turbulators by means of liquid crystal thermography, DITEC, Università degli Studi di Genova
- [12] G. Tanda, D. Cavallero, Heat transfer Coefficient Distributions in rib-roughened channels from liquid crystals thermography measurements, DITEC, University of Genoa
- [13] Aravind Rohan Sampath (2009), Effect of rib turbulators on heat transfer performance in stationary ribbed channels, Thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree Master of Science in Mechanical Engineering at the Cleveland State University, December 2009
- [14] Κ. Χατζηγιάννης, Δ. Μαθιουλάκης, Έλεγχος ροής μέσω Παλλόμενων Δέσμων Αέρα σε Απότομη Διεύρυνση με χρήση των τεχνικών PIV και Ανεμομετρίας Θερμού Νήματος, Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009
- [15] Π. Καπίρης, Δ. Μαθιουλάκης, Experimental Study of a periodically perturbed flow over a backward facing step, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα
- [16] Ζ. Γ. Καπελλάκης, Δ. Μαθιουλάκης, Στατιστική Ανάλυση Ροής Τυρβώδους Φύλλου Διάτμησης στην Περιοχή της Αποκόλλησης και Επανακόλλησης υπό Συνθήκες Διέγερσης, Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα, Απρίλιος 2011
- [17] New Wave Research Solo PIV, Nd:YAG Laser Systems, Specifications
- [18] TSI®, POWER VIEW™ 1.4MP Camera, Model 630066, Specifications
- [19] TSI, Oil Droplet Generator, TSI 9307, Specifications

[20] Ξ. Κακάτσιος, «Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης», Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, 2006

[21] Α. Νταουλτζής, Δ. Μαθιουλάκης, «Μη Επεμβατική Μέτρηση Κατανομής του Συντελεστή Συναγωγής Θερμότητας σε Επίπεδη Επιφάνεια με Προεξοχές», Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε. Μ. Π., Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011

[22] L. Casarsa, T. Arts (2002), Aerodynamic Performance investigation of a Rib Roughened Cooling Channel Flow with high blockage ratio, 11th international symposium on application of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal

[23] L. Wang, M. Salewski, B. Sundén (2010), Turbulent flow in a ribbed channel: Flow structures in the vicinity of a rib, Experimental Thermal and Fluid Science 34 (2010) 165-176

[24] Dantec Dynamics, Measurement Principles of PIV