

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΡΟΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ
ΒΥΘΙΣΜΕΝΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΕ ΑΣΤΑΘΗ ΡΟΗ**

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΕΥ. ΠΑΠΑΒΑΓΓΕΛΗ

Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικού Α.Π.Θ.

Πενταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ερρίκος Σταπουντζής,	Αναπλ. Καθηγητής,	T.M.M.B.
Νικόλαος Βλάχος,	Καθηγητής,	T.M.M.B.
Βασίλειος Μποντόζογλου,	Καθηγητής,	T.M.M.B.
Νικόλαος Ανδρίτσος,	Επίκουρος Καθηγητής,	T.M.M.B.
Σπυρίδων Καραμάνος,	Επίκουρος Καθηγητής,	T.M.M.B.

ΒΟΛΟΣ 2003

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΡΟΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ
ΒΥΘΙΣΜΕΝΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΕ ΑΣΤΑΘΗ ΡΟΗ**

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΕΥ. ΠΑΠΑΒΑΓΓΕΛΗ
Διπλ. Μηχανολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ.

Πενταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ερρίκος Σταπουντζής,	Αναπλ. Καθηγητής,	T.M.M.B.
Νικόλαος Βλάχος,	Καθηγητής,	T.M.M.B.
Βασίλειος Μποντόζογλου,	Καθηγητής,	T.M.M.B.
Νικόλαος Ανδρίτσος,	Επίκουρος Καθηγητής,	T.M.M.B.
Σπυρίδων Καραμάνος,	Επίκουρος Καθηγητής,	T.M.M.B.

ΒΟΛΟΣ 2003



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 2476/1
Ημερ. Εισ.: 20-10-2003
Δωρεά: Συγγραφέως
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
620.106
ΠΑΠ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072605

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΡΟΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ
ΒΥΘΙΣΜΕΝΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΕ ΑΣΤΑΘΗ ΡΟΗ**

*Αφιερώνεται
στην Οικογένειά μου*

Με ευγνωμοσύνη θα ήθελα **ΘΕΡΜΑ** να **ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΣΩ**:

Τον Μεγαλοδύναμο Θεό και την Οικογένειά μου για την βοήθεια και την συμπαράσταση - στήριξη τους σε όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα.

Τον Καθηγητή μου κ. Σταπουντζή Ερρίκο. Γνωρίζοντάς με, ως Καθηγητής μου από το Α.Π.Θ., μου έδωσε πολύτιμη βοήθεια κατευθύνοντάς με να ερευνήσω μια περιοχή της αρεσκείας και των επαγγελματικών ενδιαφερόντων μου. Το ακούραστο ενδιαφέρον του και η ακριβής επιστημονική του καθοδήγηση στην πορεία της έρευνάς μου, η συνεχής του συμπαράσταση για την αντιμετώπιση των όποιων δυσκολιών αντιμετώπισα, τα οποία μου παρείχε πάντα πρόθυμα ανεξάρτητα του τι μέρα ή τι ώρα ήταν, καθώς και η μεγάλη του κατανόηση, συνέβαλλαν τα μέγιστα στην πραγματοποίηση του Μεταπτυχιακού μου, το απόσταγμα του οποίου κρατάτε αυτή τη στιγμή στα χέρια σας.

Τον Καθηγητή κ. Βλάχο Νικόλαο (και Δ/ντή του ΕΡ&Σ). Η αεροσήραγγα όπου πραγματοποίησα τα πειράματα, μου παραχωρήθηκε ευγενικά για όσο χρονικό διάστημα χρειάστηκε, παρά του ότι την χρειαζόταν και ο ίδιος. Το ενδιαφέρον του για την πορεία των πειραμάτων και η επιστημονική του βοήθεια, που παρέχονταν πάντα πρόθυμα, στις όποιες απορίες ή προβλήματα αντιμετώπιζα ή σε τεχνικό εξοπλισμό που χρειαζόμουν και υπήρξαν πολύτιμα.

Τους συνεργάτες μου, κ. Μπολώση Θεόδωρο (προπτυχιακό τελειόφοιτο του ΤΜΜΒ) και κ. Mrówka Konrad (υποψήφιο Διδάκτορα του Τομέα Ρευστομηχανικής στο Παν/μιο Czestochowa της Πολωνίας). Χωρίς τους ανωτέρω, αυτή η έρευνα δεν θα μπορούσε να συμπεριλάβει τόσο μεγάλο πλήθος διαφορετικών (και δύσκολων να "στηθούν") πειραμάτων στον περιορισμένο χρόνο που είχαμε στην διάθεσή μας. Η συνεργασία μας υπήρξε άψογη και δημιουργική. Ως αποτέλεσμα αυτού ήταν να αντεπεξέλθουμε στις όποιες δυσκολίες υπήρχαν, εκμεταλλευόμενοι τον παρεχόμενο εξοπλισμό, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Άξιος επαίνου είναι πιστεύω ο κ. Mrówka Konrad καθώς με την ευρεσιτεχνία, την επιστημοσύνη αλλά και το φιλότιμο που τον διέκρινε υπήρξε πολύτιμος για την ομάδα μας.

Τον υποψήφιο Διδάκτορα Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Αλυντζάκη Εμμανουήλ (και συμφοιτητή στο Α.Π.Θ.), ο οποίος πάντα πρόθυμα μας παρείχε την βοήθειά του σε τεχνική υποστήριξη όπως και στην εκμάθηση προγραμμάτων Η/Υ που χρησιμοποιήσαμε για επεξεργασία των δεδομένων από τα πειράματά μας.

Τον Μεταπτυχιακό φοιτητή Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Τσιγκλιφή Κωνσταντίνο, για την βοήθειά του, ο οποίος είναι ο δημιουργός του κώδικα προγραμματισμού Η/Υ που χρησιμοποιήσαμε για την ανάλυση των μαγνητοσκοπήσεών μας.


Το Μηχανουργό του ΤΜΜΒ κ. Βέργο Θανάση, του οποίου η βοήθεια υπήρξε καθοριστική για το σωστό "στήσιμο" των μοντέλων μας μέσα στην αεροσήραγγα, χάρις τον υψηλό επαγγελματισμό και την δεξιολογία του.

Τον Ηλεκτρονικό του ΤΜΜΒ κ. Δαφερέρα Α. για την πολύτιμη βοήθειά του στην κατασκευή του μηχανήματος Μετασχηματιστή-Μετατροπέα από AC σε DC, και σε ό,τι άλλο ηλεκτρονικό εξάρτημα χρειαστήκαμε.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους υπόλοιπους Καθηγητές μου στα μαθήματα του Μετ/κού προγράμματος, οι οποίοι μου μετέδωσαν πολύτιμες γνώσεις, και τα άλλα παιδιά μαζί με το επιστημονικό προσωπικό του εργαστηρίου του ΤΜΜΒ για την όποια βοήθειά τους και την καλή μας συνεργασία.

Ολόψυχα εύχομαι σε όλους τους παραπάνω ο Θεός να δίνει υγεία, χαρά, ευτυχία και κάθε αγαθό.

Με εκτίμηση


Τριαντάφυλλος Ευ. Παπαβαγγέλης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	<u>Σελίδα</u>
Περιεχόμενα	i
Πρόλογος	vi
Συμβολισμοί – Ονοματολογία	viii
Κεφάλαιο 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	1
Κατηγορίες Ροών σε κοιλότητες	
1.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Οδικές Χαράδρες	1
1.2 Κλιματισμός – Εξαερισμός κτιρίων	2
1.3 Επιστημονικές – Βιομηχανικές – Τεχνολογικές Εφαρμογές	3
1.4 Σκοπός Διατριβής	4
Κεφάλαιο 2^ο : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κοιλότητας	7
2.3 Χαρακτηριστικά Ροής	16
2.4 Εξωγενείς Παράγοντες	28
2.5 Πειραματική Προσέγγιση – Στήσιμο Μοντέλου	28
2.6 Συσχετίσεις	31
Κεφάλαιο 3^ο : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	35
3.1 Αναλυτική Περιγραφή	35
3.1.1 Αεροσήραγγα	35
3.1.1.1 Εισαγωγή Αέρα	35
3.1.1.2 Περιοχή Μετρήσεων (test-section)	36
3.1.1.3 Διαχύτης - Ανεμιστήρας	37
3.1.2 Όργανα Μετρητικά – Επεξεργασίας - Αποθήκευσης	39
3.1.2.1 Ανεμόμετρο Θερμού Σύρματος (C.T.A.)	39
3.1.2.2 Ανεμόμετρο Ψυχρού Σύρματος (C.C.A.)	40
3.1.2.3 Μανόμετρο και σωλήνας Pitot	40
3.1.2.4 H/Y και κάρτα Analog-Digital	41
3.1.2.5 Connector Block	42
3.1.2.6 Παλμογράφος	42
3.1.3 Μηχανήματα και Συσκευές	44
3.1.3.1 Μετατροπέας Συχνότητας Ρεύματος (Inverter)	44
3.1.3.2 Μετασχηματιστής - Μετατροπέας Ηλεκτρικού Ρεύματος από AC σε DC	44
3.1.3.3 Μηχανή Παραγωγής καπνού	44
3.1.3.4 Ψηφιακή κάμερα	45

3.1.3.5 Γεννήτρια Συχνοτήτων	46
3.1.4 Μοντέλα	46
3.1.4.1 Πλάκες-Κοιλότητες και κύλινδροι	46
 Κεφάλαιο 4^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	 53
4.1 Εισαγωγικά	53
4.2 Μετρούμενα Μεγέθη και Οπτικοποίηση της ροής	53
4.2.1 Ροή σε δισδιάστατη κοιλότητα – ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ροή πριν από αυτή	53
4.2.1.1 Μέτρηση ταχυτήτων	53
4.2.1.2 Μέτρηση θερμοκρασιών	53
4.2.1.3 Οπτικοποίηση της ροής (Flow Visualization)	54
4.2.2 Ροή σε δισδιάστατη κοιλότητα – ΑΣΤΑΘΗΣ ροή πριν από αυτή	55
4.3 Μεθοδολογία	55
4.3.1 Επιλογή ταχύτητας ελεύθερης ροής	55
4.3.2 Έλεγχος της ορθότητας των μετρούμενων μεγεθών	56
4.3.3 Ο χρόνος δειγματοληψίας	56
4.3.4 Το μοντέλο και οι πλάκες	56
4.3.5 Στήριξη μέσα στο χώρο μετρήσεων	57
4.3.6 Έλεγχος Εσωτερικών διαστάσεων χώρου μετρήσεων αεροσήραγγας	58
4.3.7 Μεθοδολογία Μετρήσεων	58
4.3.7.1 Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot-wire	59
4.3.7.2 Μέθοδος μετρήσεων με το Cold – wire	61
4.3.8 Μέτρα Ασφαλείας	62
4.3.9 Μέθοδος μέτρησης Μεταβατικών Φαινομένων (Transient Effects)	63
4.3.10 Μέθοδος οπτικοποίησης της ροής με νήματα	64
4.3.11 Ατμοσφαιρικές Συνθήκες και ρυθμίσεις	64
4.3.12 Μεθοδολογία Οπτικοποίησης	66
4.3.12.1 Πρόγραμμα VirtualDub-1	66
4.3.12.2 Πρόγραμμα IRFAN VIEW 32	67
4.3.12.3 Χρήση MATLAB για την υπολογιστική μέθοδο ψηφιακής ανάλυσης εικόνας	67
4.3.12.4 Πρόγραμμα CONVGRAY	67
4.3.12.5 Πρόγραμμα GRAY	68
4.3.12.6 Πρόγραμμα FFTGRAY	68
4.3.12.7 Πρόγραμμα GRAPHFFTGRAY	70
4.4 Οριακό Στρώμα και Αδιάστατοι Αριθμοί	72
4.4.1 Πάχος οριακού στρώματος (<i>boundary layer thickness</i>)	72
4.4.2 Στρωτό Οριακό Στρώμα	72
4.4.3 Τυρβώδες Οριακό Στρώμα	73
4.4.4 Αριθμός REYNOLDS (Re)	73
4.4.5 Ένταση Τύρβης	75
4.4.6 Αριθμός Strouhal (St) - Επεξεργασία P.S.D. (Power Spectra Density Estimation)	75
4.4.7 Αριθμός Grashof (Gr)	76
4.4.8 Αριθμός Rayleigh (Ra)	77
4.4.9 Αριθμός Nusselt (Nu)	77

Κεφάλαιο 5^ο : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	85
Εισαγωγή	
Ημερολόγιο πειραμάτων	90
5.1 Μέτρηση Ταχυτήτων - RMS - P.S.D. για $U_0=5\text{m/s}$	93
Διατάξεις Μοντέλων στα πειράματα που έγιναν	95
Εποπτικές εικόνες των παρακάτω διαγραμμάτων	99
Διαγράμματα Ταχυτήτων και Συγκριτικά – RMS – P.S.D.	
5.1.1.1 στη θέση x1 – χωρίς κύλινδρο	105
5.1.1.2 στη θέση x2 – χωρίς κύλινδρο	106
5.1.1.3 στη θέση x3 – χωρίς κύλινδρο	107
5.1.1.4 στη θέση x4 – χωρίς κύλινδρο και με κύλινδρο σε διάφορες θέσεις	108
5.1.1.5 στη θέση x5 – χωρίς κύλινδρο και με κύλινδρο σε διάφορες θέσεις	110
5.1.1.6 στη θέση x6 – χωρίς κύλινδρο και με κύλινδρο σε διάφορες θέσεις	112
5.1.1.7 στη θέση x7 – χωρίς κύλινδρο και με κύλινδρο σε διάφορες θέσεις	114
5.1.1.8 στη θέση x8 – χωρίς κύλινδρο και με κύλινδρο σε διάφορες θέσεις	116
Σχολιασμός ενότητας	117
5.1.2 Συγκριτικά Διαγράμματα Ταχυτήτων– RMS – P.S.D.	
στη θέση x4 –με κύλινδρο ανάντη της κοιλότητας 5D εμπρός και 2D πάνω	
στη θέση 4D πίσω από κύλινδρο τοποθετημένο 3D πάνω από κοιλότητα	121
5.1.3 Συγκριτικά Διαγράμματα Ταχυτήτων – RMS – P.S.D.	
στη θέση 4D πίσω από κύλινδρο, με κύλινδρο σε διάφορες θέσεις	123
5.1.4 Συγκριτικά Διαγράμματα Ταχυτήτων – RMS – P.S.D.	
➤ Κύλινδρος ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε διάφορα ύψη	
πολλαπλάσια του D (z^*D)	
➤ Κύλινδρος $\varnothing 60\text{mm}$ ακριβώς πάνω από επίπεδη πλάκα στα ίδια ύψη	
όπως όταν ήταν πριν πάνω από κοιλότητα.	127
5.1.5 Συγκριτικά Διαγράμματα Ταχυτήτων – RMS – P.S.D.	
στη θέση x7 – χωρίς κύλινδρο για επίπεδη πλάκα και για διάφορες κοιλότητες	133
5.1.6 Συγκριτικά Διαγράμματα Ταχυτήτων – RMS – P.S.D.	
στη θέση x3 – χωρίς κύλινδρο για επίπεδη πλάκα και για μεγάλη κοιλότητα	136
5.1.7 Κλίμακες χρόνου, Χωρίς και Με κύλινδρο στις θέσεις x3, x4, x5, x6, x7 και x8	141
5.2 Μέτρηση Θερμοκρασιών - RMS - P.S.D. για $U_0=5\text{m/s}$	145
5.2.1 Συγκριτικά Διαγράμματα Θερμοκρασιών – RMS – P.S.D. εντός και εκτός κοιλότητας	
για $U_0=5\text{m/s}$ Χωρίς και Με τον κύλινδρο σε απόσταση 4^*D εμπρός και 2^*D	
πάνω από την κοιλότητα	
5.2.1.1 Θέση xA'	146
5.2.1.2 Θέση xA	148
5.2.1.3 Θέση xB	150
5.2.1.4 Θέση xΓ	152
5.2.1.5 Θέση xΔ	154
5.2.1.6 Θέση xE	156
5.2.1.7 Θέση xZ	158
5.2.1.8 Θέση xH	160
5.2.1.9 Θέση H'	162
Σχολιασμός ενότητας	163
5.2.2 Διαγράμματα Ισοϋψών (Contours) Θερμοκρασιών-RMS εντός και εκτός κοιλότητας	166
5.2.3 Διαγράμματα $\Delta\theta/\theta_0 \% = f(t)$ και P.S.D. πειράματος "Transient Effects"	170

5.2.4 Διαγράμματα $Gr=f(Re)$	174
5.2.5 Διαγράμματα $Ra=f(Re)$	175
5.2.6 Διαγράμματα $Nu=f(Re)$	176
5.2.7 Διαγράμματα $\Delta\Theta/\Theta_o=f(Hz)$ μεταβολής της αδιάστατης θερμοκρασίας στο σημείο xB z=9mm, συναρτήσει των Hz του Inverter	177
5.2.8 Διαγράμματα $P=f\{(\Theta_w-\Theta_o)/\Theta_o\}$ της μεταβολής της εφαρμοζόμενης Ισχύος στην αντίσταση, συναρτήσει της αδιάστατης θερμοκρασίας της	178
5.3 Οπτικοποίηση της ροής	179
5.3.1 Οπτικοποίηση με <u>καπνό</u> εντός κοιλότητας στη μέση της	
α) ταχύτητες της ελεύθερης ροής $U_o=2,5m/s$ ή $U_o=5m/s$	
5.3.1.1 Κύλινδρος $\varnothing 60mm$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 2D	180
5.3.1.2 Κύλινδρος $\varnothing 60mm$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm	185
5.3.1.3 Κύλινδρος $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D	190
β) Χωρίς και Με Κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 4D και πάνω από αυτή 2D, με ταχύτητες ελεύθερης ροής:	
5.3.1.4 $U_o=1,80m/s$	195
5.3.1.5 $U_o=2,5m/s$	200
5.3.1.6 $U_o=7,70m/s$	205
γ) Χωρίς και Με Κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 4D και πάνω από αυτή 2D, Έχοντας <u>αναμμένη αντίσταση</u> εσωτερικά της κοιλότητας, θερμαίνοντάς τη, με ταχύτητες ελεύθερης ροής:	
5.3.1.7 $U_o=1,80m/s$	210
5.3.1.8 $U_o=2,5m/s$	214
5.3.2 Οπτικοποίησης της ροής με νήματα	
5.3.2.1 Ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_o=5m/s$	219
> Χωρίς Κύλινδρο	
> Με κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D	
5.3.2.2 Ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_o=10m/s$	221
> Χωρίς Κύλινδρο	
> Με κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D	
5.3.2.3 Ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_o=10m/s$	223
> Με κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm	
> Με κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 2D	
Κεφάλαιο 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	225
6.1 Μέτρηση ταχυτήτων	225
6.2 Μέτρηση θερμοκρασιών	226
6.3 Οπτικοποίηση ροής	227
6.4 Γενικό Συμπέρασμα	227

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	229
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
Κώδικες προγραμμάτων H/Y για επεξεργασία μαγνητοσκοπήσεων	235
Υπολογισμός αριθμού Grashof	242
Υπολογισμός αριθμού Rayleigh	242
Υπολογισμός αριθμού Nusselt	243

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΔΟΜΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Το παρόν τεύχος είναι καρπός βασικής πειραματικής έρευνας στο πλαίσιο ολοκλήρωσης της Μεταπτυχιακής μου διατριβής στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το επαγγελματικό μου ενδιαφέρον και η εν γένει δραστηριότητά μου με ώθησαν να επιλέξω να μελετήσω πειραματικά πώς επιδρούν οι αστάθειες της ροής του αέρα στη μεταφορά θερμότητας μέσα σε μια ορθογωνική κοιλότητα. Και αυτό γιατί, το «μοντέλο» αυτό, βρίσκει εφαρμογή σε πολλές πτυχές της σημερινής μας ζωής, έχοντας άμεση σχέση με τον κλιματισμό-εξαερισμό, από τα τρανζίστορ των μικροεπεξεργαστών και τους δρόμους των μεγαλουπόλεων μέχρι και τον ανθρώπινο οργανισμό! Είναι ένα πολύ συνηθισμένο φαινόμενο ταυτόχρονα όμως η επίδραση των ασταθειών σε ροή γύρω και μέσα από κοιλότητες δεν έχει μελετηθεί από πολλούς σε βάθος μέχρι σήμερα.

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται αφορούν τα πειράματα που διεξήχθησαν στην Αεροσήραγγα του Εργαστηρίου Ρευστομηχανικής του Τ.Μ.Μ.Β. του Παν/μίου Θεσσαλίας μεταξύ 20-03-2003 και 01-07-2003.

Η διατριβή είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια ως εξής:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή-Σκοπός Διατριβής. Αναφορά των στοιχείων που μπορούν να μελετηθούν με κοιλότητα και παραδείγματα από τις περιβαλλοντικές, τις επιστημονικές και τις βιομηχανικές εφαρμογές. Γιατί είναι χρήσιμη η εξέταση αυτού του φαινομένου και πού αποσκοπεί.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική επισκόπηση. Παρουσίαση των πιο πρόσφατων και σημαντικών εξελίξεων στο χώρο της έρευνας (πειραματικής και θεωρητικής) για τις κοιλότητες, με έμφαση στην εξεταζόμενη περίπτωση.

Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διάταξη. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των συσκευών που την απαρτίζουν, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα που έγιναν. Επίσης, υπάρχει εκτενής περιγραφή των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν (στην περίπτωσή μας) και αναλυτικά σχέδια αυτών και της αεροσήραγγας.

Κεφάλαιο 4: Πειραματική Μεθοδολογία. Περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα και αντιμετωπίστηκαν οι διάφορες δυσκολίες. Γίνεται προσπάθεια να φωτιστούν πιθανόν αθέατες περιοχές, που ίσως όμως είχαν επίδραση στα αποτελέσματα που ελήφθησαν. Επίσης αναφέρονται οι θέσεις όπου έγιναν οι μετρήσεις, το σύστημα συντεταγμένων και βασικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των διαφόρων αποτελεσμάτων. Δίνονται και παραστατικά σχήματα που θα βοηθήσουν στην άμεση αντίληψη των σχετικών θέσεων μοντέλων – αισθητήρα κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα – Σχολιασμός. Το πιο σημαντικό κεφάλαιο ίσως, όπου απεικονίζονται τα μετρούμενα μεγέθη των πειραμάτων. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά των φαινομένων, από ένα μεγάλο πλήθος διαγραμμάτων που έγιναν έτσι ώστε να δίνεται στον αναγνώστη μια παραστατική και εύκολα αντιληπτή εικόνα του τι συμβαίνει. Επιλέχθηκε να είναι αδιαστατοποιημένα. Ταυτόχρονα υπάρχει και ο αντίστοιχος σχολιασμός τους.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα. Εδώ υπάρχουν τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε έπειτα από πολλές συζητήσεις με τον Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή και μελέτη της αντίστοιχης βιβλιογραφίας.

Στον παρακάτω πίνακα, αναφέρονται οι συμβολισμοί και η ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε στο κείμενο.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ - ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ		
1	$x'x$	Η διεύθυνση κατά μήκος της ροής του αέρα
2	$y'y$	Η διεύθυνση κατά πλάτος της ροής
3	$z'z$	Η διεύθυνση εγκάρσια (κατά τον κατακόρυφο άξονα) στη ροή αέρα
4	x	Συμβολισμός της απόστασης κατά μήκος της ροής, ξεκινώντας από μια ορισμένη θέση κάθε φορά
5	z	Συμβολισμός της κατακόρυφης απόστασης κάθετα στη ροή, ξεκινώντας από μια ορισμένη θέση κάθε φορά
6	D	Η διάμετρος του κυλίνδρου (60mm)
7	H	Ύψος κάτω επιφάνειας κυλίνδρου από επιφάνεια πλακών-κοιλότητας (mm)
8	$h \equiv z_0$	Το ύψος της κοιλότητας (εσωτερική απόσταση χεΐλους-πυθμένα) (mm)
9	W	Πλάτος ανοίγματος κοιλότητας (mm)
10	U_0	Η ταχύτητα ελεύθερης ροής (m/s)
11	$u \equiv U_m$	Η μετρούμενη ταχύτητα σε κάθε θέση (m/s)
12	u_{RMS}	Η διακύμανση της ταχύτητας ή αλλιώς τύρβη (m/s)
13	u_{RMS} / U_0	Το ποσοστό τύρβης της ταχύτητας εκφρασμένο επί τοις %.
14	ν	Το κινηματικό ιξώδες του αέρα (m ² /s)
15	g	Η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s ²)
16	λ	Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα {W/(m*K)}
17	h_a	Ο συντελεστής συναγωγής του αέρα {W/(m ² *K)}
18	c_p	Η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση {J/(kg*K)}
19	κ	η θερμοδιαχυτότητα (m ² /s)
20	Re	Ο αριθμός Reynolds (αδιάστατος) $Re = \frac{u * L}{\nu}$
21	L	Χαρακτηριστική διάσταση (m)
22	Re_x	Αριθμός Re σχετικός με την απόσταση από την ακμή προσβολής, x
23	Re_h	Αριθμός Re σχετικός με την χαρακτηριστική διάσταση κοιλότητας, h

24	St	Ο αριθμός Struhal (αδιάστατος) $St = \frac{f * D}{U_o}$
25	Gr	Ο αριθμός Grashof (αδιάστατος) $Gr = \frac{g * \alpha * L^3 * \theta}{\nu^2}$
26	Ra	Ο αριθμός Rayleigh (αδιάστατος) $Ra = Gr * Pr = \frac{g * \alpha * \theta * L^3}{\nu * \kappa}$
27	Pr	Ο αριθμός Prandtl (αδιάστατος) $Pr = \frac{\nu}{\kappa}$
28	Nu	Ο αριθμός Nusselt (αδιάστατος) $Nu = \frac{\alpha * l}{\lambda}$
29	P.S.D.	Power Spectra Density = Πυκνότητα Φάσματος Ισχύος
30	f = frequency	Η συχνότητα της διαταραχής σε Hz (sec ⁻¹)
31	pick	Το σημείο όπου μια καμπύλη παρουσιάζει μέγιστο, (η κορυφή της)
32	δ	Το πάχος του οριακού στρώματος (mm)
33	Θ	Η μετρούμενη θερμοκρασία σε κάθε θέση (°C)
34	Θ_o	Η θερμοκρασία ελεύθερης ροής όπως λαμβάνεται από το Cold-wire με την αντίσταση σβηστή (°C)
35	Θ_{RMS}	Η διακύμανση της θερμοκρασίας ή αλλιώς θερμοκρασιακή τύρβη (°C)
36	ΔΘ	Διαφορά θερμοκρασίας σε κάποιο σημείο από την θερμοκρασία αναφοράς στην ελεύθερη ροή
37	Θ_{RMS} / Θ_o	Το ποσοστό τύρβης της θερμοκρασίας εκφρασμένο επί τοις %.
38	Θ_w	Η θερμοκρασία του σύρματος της αντίστασης (°C)
39	A', A, B, Γ, ...	Γράμματα που συμβολίζουν θέσεις μέσα στην κοιλότητα κατά το πλάτος της
40	1, 2, 3, ...	Αριθμοί που συμβολίζουν θέσεις κατά μήκος των πλακών-κοιλότητας
41	Ø	Συμβολισμός διαμέτρου
42	R_θ	Η αντίσταση του Hot-wire μετά την ρύθμιση στην θερμοκρασία Θ (Ohm)
43	R_{20°}	Η αντίσταση του Hot-wire στην θερμοκρασία 20 °C (Ohm)
44	α_o	Συντελεστής θερμικής αντίστασης. Για τανγκστένιο α=0.36% / °C
45	R	Η αντίσταση του σύρματος μέσα στην κοιλότητα. (R=151,13Ohm/m)
46	Σχ. 1,2,3...	Σχήμα 1, 2,3,...
47	Δ 1, 2, 3...	Διάγραμμα 1, 2, 3,...

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Μια σημαντική ερευνητική περιοχή της Επιστήμης της Ρευστομηχανικής σήμερα είναι η ροή μέσα και έξω από κοιλότητες. Το ενδιαφέρον που παρουσιάζει αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο ότι οι κοιλότητες βρίσκονται παντού! Από τα μηχανήματα και τις συσκευές μέχρι τις χημικές διεργασίες, τις γεωμετρικές διαμορφώσεις της φύσης και του περιβάλλοντος και, φυσικά, στον ανθρώπινο και άλλους οργανισμούς. Καθώς ο οργανισμός μας αποτελείται από αιμοφόρα αγγεία και σχηματισμούς οργάνων που μπορούν να προσομοιωθούν με κοιλότητες (π.χ. καρδιά, πνεύμονες). Αν και κάποιες φορές δεν είναι άμεσα ορατές και αντιληπτές, οι κοιλότητες μπορούν να δημιουργηθούν από διάφορες γεωμετρικές διαμορφώσεις και συσχετίσεις αντικειμένων.

Η ροή μέσα σε τέτοιες γεωμετρίες είναι ακανόνιστη και πολύπλοκη. Η γνώση λοιπόν των παραγόντων που διαμορφώνουν, αλλά και των νόμων της φυσικής που διέπουν τέτοιου είδους ροές είναι πρώτιστης σημασίας για την εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας.

Ιδίως στις μέρες μας που έχουμε φτάσει σε σημείο να εξάγουμε συμπεράσματα για τον μακρόκοσμο ερευνώντας τον μικρόκοσμο, χάρη στις τρομερές δυνατότητες που μας προσφέρει η τεχνολογία σε μέσα μέτρησης, εξακρίβωσης και επεξεργασίας σημάτων, η μελέτη της ροής σε κοιλότητες έχει γίνει εφικτή δίνοντας πολύ χρήσιμα συμπεράσματα στους επιστήμονες. Διερευνώντας την ροή γύρω και μέσα στην κοιλότητα πολλές αιτίες αστοχίας υλικού μπορούν να αποφευχθούν. Ακόμη, τα χαρακτηριστικά των μηχανημάτων και των συσκευών, όπως και κάποιες χημικές διεργασίες, μπορούν να βελτιστοποιηθούν. Επίσης ο κλιματισμός των κτιρίων μπορεί να γίνει αποδοτικότερος και υγιεινότερος και οι κλιματικές συνθήκες μέσα σε μεγάλα αστικά κέντρα μπορούν να γίνουν πιο υγιεινές. Το εύρος όμως των εφαρμογών που θα έχουν οι "καρποί" μιας τέτοιας έρευνας δεν σταματά εδώ. Η Ιατρική, η Αεροδιαστημική όπως και η Ηλεκτρονική επιστήμη, έχουν πλήθος αντικειμένων που έχουν να κάνουν με φαινόμενα ροής σε κοιλότητες. Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά κάποιους ενδεικτικούς τομείς που βρίσκει εφαρμογή η ροή αυτού του είδους:

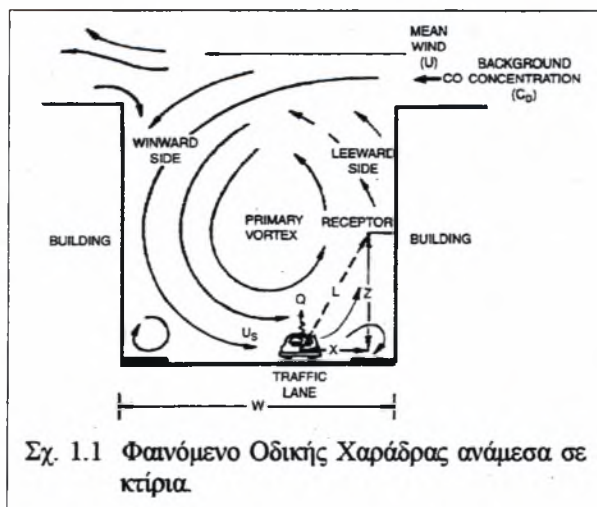
ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΟΩΝ ΣΕ ΚΟΙΛΟΤΗΤΕΣ

1.1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ & ΟΔΙΚΕΣ ΧΑΡΑΔΡΕΣ

Η παγκόσμια κοινότητα ανησυχεί από την υψηλή ρύπανση του περιβάλλοντος και προσπαθεί να το προστατέψει θεσπίζοντας αυστηρότερους κανονισμούς για τις εκπομπές ρύπων και θέτοντας υψηλά όρια στην αποδοχή κάθε νέας ρυπογόνου τεχνολογίας. Γίνεται προσπάθεια να αναζητηθούν οι βαθύτερες αιτίες που δημιουργούν την ατμοσφαιρική ρύπανση και να βρεθούν κατάλληλες μέθοδοι αντιμετώπισής της.

Το φαινόμενο της ρύπανσης των μεγάλων αστικών κέντρων οξύνεται από την ολοένα και μεγαλύτερη αστικοποίηση, με αποτέλεσμα να κτίζονται συνεχώς μεγάλες πολυκατοικίες και να δημιουργούνται πυκνοδομημένα οικοδομικά τετράγωνα.

Επιπλέον, διαχρονικά οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν μια σταδιακή αύξηση των αυτοκινήτων που εκπέμπουν καυσαέρια εκτός ορίων: Από 17,4% το 1996-97 σε 26,5% το 2001-02 (μόνο για την Ελλάδα!). Η κατάσταση αυτή προέρχεται είτε από την κακή λειτουργία τους (χαλασμένος ή ληγμένος καταλύτης), είτε από την κακή συντήρησή τους.



Όλα αυτά όμως πρέπει να γίνονται αποδοτικά για εξοικονόμηση ενέργειας. Έτσι εξοικονομούνται και χρήματα από το κόστος της ενέργειας που δεν καταναλώθηκε.

1.3 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ - ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ -ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

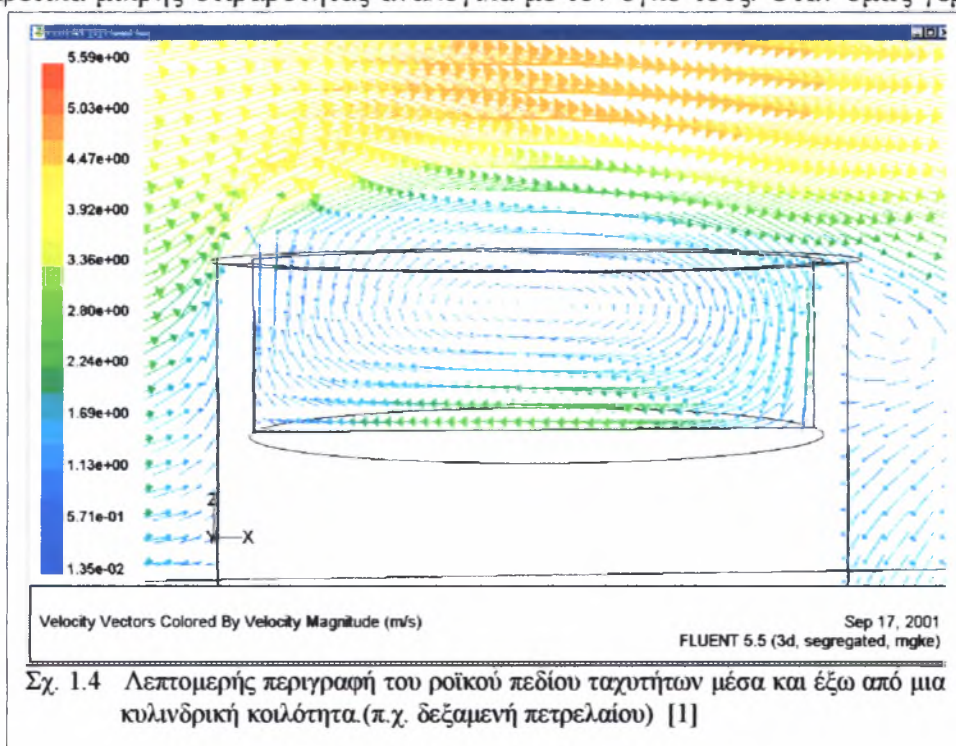
Η μεταφορά μάζας και θερμότητας με συναγωγή μέσα σε κοιλότητες μπορεί να επηρεάσει το ρυθμό διαφόρων φαινομένων επιστημονικού και μηχανολογικού ενδιαφέροντος. Παραδείγματα υπάρχουν πολλά, όπως η εμφάνιση σκουριάς μέσα σε ρωγμές μετάλλων, χημική εναπόθεση ατμών στην παραγωγή των ημιαγωγών, μεταφορά διαλυμένης ύλης μεταξύ των τριχοειδών αγγείων κατά την διαδικασία στερεοποίησης, ηλεκτροχημική απόθεση μέσα σε τρύπες και μεταφορά θερμότητας και μάζας σε τραχείες επιφάνειες.

Η αποκόλληση του οριακού στρώματος, η επανακόλληση και η ανακυκλοφορία, η καμπύλωση των ροϊκών γραμμών, η θερμική άνωση, η παραγωγή τύρβης, είναι καταστάσεις που ολοκληρώνουν τα φαινόμενα της ροής γύρω και μέσα στην κοιλότητα. Όλα τα παραπάνω έχουν βασική επίδραση στη μετάδοση θερμότητας και μάζας στην αντίσταση που παρουσιάζει η κοιλότητα στην ροή του ρευστού. Όπως καταλαβαίνει κανείς ο υπολογισμός των φαινομένων μεταφοράς μέσα σε μια κοιλότητα γίνεται μια πολύπλοκη υπόθεση! Παρόλα αυτά όμως χρειάζεται μια ολοκληρωμένη γνώση αυτών των φαινομένων που συμβαίνουν μέσα και γύρω από μια κοιλότητα για αποφυγή αστοχιών αλλά και βελτίωση διαφόρων συσκευών, κατεργασιών και άλλων εφαρμογών. Για παράδειγμα, η γνώση των τοπικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας μέσα στην κοιλότητα είναι απαραίτητη, εάν πρέπει να αποφευχθούν θερμά σημεία που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία μιας κατασκευής ή επιλεκτική διάβρωση.

Ακόμη η μελέτη της διαμόρφωσης της ροής αέρα γύρω από κοιλότητες και μέσα σε αυτές είναι ζωτικής σημασίας για κατασκευές όπως οι μεγάλες δεξαμενές πετρελαίου. Σήμερα υπάρχουν δεξαμενές πετρελαίου συνηθισμένων διαστάσεων 100m διάμετρο και 25m ύψος με μέσο πάχος τοιχώματος 25mm. Όπως γίνεται αντιληπτό οι μεγάλες δεξαμενές είναι κατασκευές εξαιρετικά μικρής στιβαρότητας αναλογικά με τον όγκο τους. Όταν όμως γεμίζονται



Σχ. 1.3 Radar αεροσκάφους F-16



Σχ. 1.4 Λεπτομερής περιγραφή του ροϊκού πεδίου ταχυτήτων μέσα και έξω από μια κυλινδρική κοιλότητα (π.χ. δεξαμενή πετρελαίου) [1]

γεμίζονται με πετρέλαιο σταθεροποιούνται κατάλληλα από την εσωτερική υδροστατική πίεση και την αδράνεια του πετρελαίου. Εξαιτίας της έμφυτης έλλειψης στιβαρότητας, οι δεξαμενές μπορούν να συνθλιβούνε όταν είναι μισοτελειωμένες ή μισογεμάτες ή άδειες, όταν υπόκεινται σε ισχυρή ανεμόπτωση. Η ολοκληρωτική καταστροφή μιας δεξαμενής παίρνει την μορφή ενός προς τα μέσα τσακίσματος σε μορφή V της προς τον άνεμο πλευράς. Μια άλλη μορφή αστοχίας είναι όταν μια οριζόντια περιμετρική ταινία από πτυχώσεις σχηματίζεται κοντά, αλλά όχι αναγκαστικά εφαιπτομενικά, στην κορυφή της δεξαμενής και χωρίς αναγκαστικά να εκτείνεται σε όλη την περίμετρό της.

Γνωρίζοντας την τρωτότητα του πάνω μέρους της δεξαμενής στο να αστοχήσει, οι κανονισμοί σχεδιασμού ενσωματώνουν μια κύρια δοκό στήριξης για τον άνεμο κοντά στο πάνω χείλος και μερικές άλλες φορές χαμηλότερα. Αυτή η δοκός έχει διατομή σχήματος 'L', με το μακρύτερο τμήμα να έχει μήκος περίπου 1 m και να είναι οριζόντιο με το άλλο άκρο να είναι συγκολλημένο στην δεξαμενή.

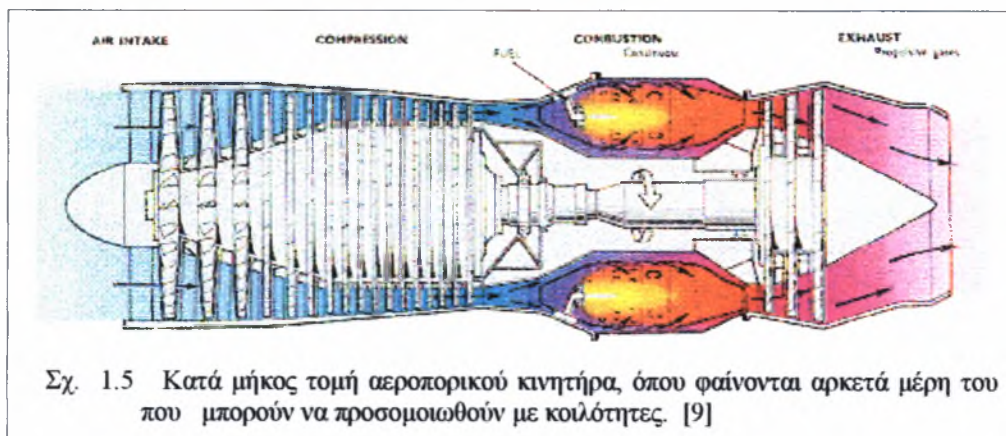
Επίσης υπάρχει μια ποικιλία εφαρμογών της ρευστομηχανικής επιστήμης και συστημάτων, τα οποία μπορούν να προσομοιωθούν (μοντελοποιηθούν) ως μια κοιλότητα ή σειρά από κοιλότητες. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν αεροσήραγγες και υδροσήραγγες με τοίχους με σχισμές, εξαρτήματα αεροσκαφών, αποσυμπιέσεις στο σκαρί υποβρυχίων και πλοίων, μηχανικές πλάκες H/Y με πολύ κοντά μεταξύ τους τις θήκες των τσιπ (chip carriers).

Κοιλότητες εξάλλου συναντώνται σε πολλές βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές είτε τυχαία είτε σχεδιασμένες επίτηδες. Συχνά κοιλότητες βρίσκονται σε θερμαινόμενες επιφάνειες τοποθετημένες σε μια εξωτερική εξαναγκασμένη ροή. Παραδείγματα αυτών είναι: περάσματα που δημιουργούνται μέσα σε τουρμπίνες και θαλάμους καύσεως, κοιλότητες που διαμορφώνονται λόγω των αποστάσεων μεταξύ των διαφόρων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, κενά-αυλάκια σε αφαιρούμενες επιφάνειες, πτερύγια απαγωγής θερμότητας σε ψύκτρες ηλεκτρονικών συσκευών (H/Y) και αερόψυκτους κινητήρες.

Η ροή σε κοιλότητες μπορεί να βρει εφαρμογή ακόμα και στο 'τύπωνμα' των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στις πλακέτες.

Ακόμη η σπουδαιότητα αυτού του φαινομένου έγκειται στο ότι είναι αντιπροσωπευτικό συσκευών λίπανσης, επίστρωσης χρωμάτων και άλλων συναφών ειδών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

Εξάλλου η στρωματοποίηση δύο υγρών διαφορετικής θερμοκρασίας είναι μεγάλης σπουδαιότητας για τον σχεδιασμό των δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας.



εύρος των εφαρμογών από τα προαναφερθέντα είναι τεράστιο. Όμως, στα πλαίσια μιας μεταπτυχιακής διατριβής δεν είναι δυνατόν να εξεταστεί όλο το φάσμα της ροής γύρω από και μέσα σε κοιλότητες. Για αυτό επιλέχθηκε να μελετηθεί κάτι γενικό που να έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών

Έτσι λοιπόν, η παρούσα διατριβή εξετάζει την επίδραση των ασταθειών της ροής στην διαμόρφωση διαστατικών μεγεθών εντός κοιλότητας που είναι βυθισμένη. Μεγέθη, όπως είναι η θερμοκρασία, η συγκέντρωση, ο χρόνος καθαρισμού της κοιλότητας (transient effect). Παρατηρείται η διαμόρφωση των γραμμών ροής μέσα και έξω από την κοιλότητα, η οποία είναι τετραγωνικής διατομής 60mm x 60mm. Η παρατήρηση και οι αντίστοιχες μετρήσεις επεκτείνονται πριν και μετά την κοιλότητα, ώστε να έχουμε μια ολοκληρωμένη άποψη του τι συμβαίνει, όχι μόνο εντός της αλλά και στην γύρω από αυτή περιοχή. Γίνεται λήψη μετρήσεων με και χωρίς την παρουσία κυλίνδρου ο οποίος εισάγει αστάθειες στην ροή (δίνες Von-Karman). Η ταχύτητα ελεύθερης ροής και η θέση του κυλίνδρου (ο οποίος έχει διάμετρο 60mm) δεν διατηρούνται σταθερά καθ' όλη την έκταση της έρευνας. Αυτό συμβαίνει γιατί επιχειρείται να παρατηρηθεί η επίδραση δινών διαφορετικής συχνότητας εκροής, αλλά και διαφορετικής θέσης εκροής ως προς την βυθισμένη κοιλότητα. Πέραν αυτών, δημιουργείται θέρμανση κατά μήκος εσωτερικά της κοιλότητας και παρατηρείται η επίδραση όλων των ανωτέρω (θέσης-συχνότητας εκροής δινών). Επίσης γίνεται έρευνα του χρόνου καθαρισμού της κοιλότητας θερμαίνοντας για συγκεκριμένο χρόνο την κοιλότητα και αφήνοντάς τη μετά να κρυώσει μέσα στο ρεύμα αέρα που δημιουργείται, υπό τις συνθήκες διαταραχών στη ροή και μή.

Όλη η παραπάνω διαδικασία δίνει μια καλή εικόνα των φαινομένων που συμβαίνουν μέσα σε μια βυθισμένη κοιλότητα της δεδομένης γεωμετρίας, χωρίς βέβαια να εξαντλεί τα περιθώρια για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο της Επιστήμης της Μηχανικής των Ρευστών.

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υστερα από μελέτη πολλών εργασιών από άλλους επιστήμονες ερευνητές, που έχουν ασχοληθεί με την περίπτωση της ροής ρευστού γύρω και μέσα σε κοιλότητες, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα πως υπάρχουν κάποιες βασικές παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η διαμόρφωση της ροής μέσα στις κοιλότητες. Ορισμένες από αυτές είναι:

- Ο λόγος του ύψους (βάθους) προς το πλάτος του ανοίγματος της κοιλότητας (aspect ratio=λόγος διατάματος)
- Το σχήμα της κοιλότητας
- Η γωνία ανεμόπτωσης
- Η ταχύτητα του ρευστού (εν προκειμένω του αέρα) έξω από την κοιλότητα αλλά και μέσα σε αυτή, συνεπώς και ο αριθμός Reynolds της ροής
- Οι δίνες που εκρέουν από κάποιο αντικείμενο που προκαλεί αστάθεια στη ροή
- Το ποσοστό τύρβης της ελεύθερης ροής έξω από την κοιλότητα
- Η ύπαρξη πηγών θερμότητας μέσα στη κοιλότητα
- Η τραχύτητα των γύρω από αυτή περιοχών
- Η διαμόρφωση των τοιχωμάτων της
- Η θέση εισόδου-εξόδου του ρευστού μέσα σε αυτή
- Η εισροή ρευστού από τα πλαϊνά ανοίγματα
- Η ευκαμπτότητά της

Όλες οι παραπάνω προαναφερθείσες παράμετροι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις (4) μεγάλες κατηγορίες:

1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Κοιλότητας
2. Χαρακτηριστικά Ροής
3. Εξωγενείς Παράγοντες
4. Πειραματική προσέγγιση – Στήσιμο Μοντέλου

2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ

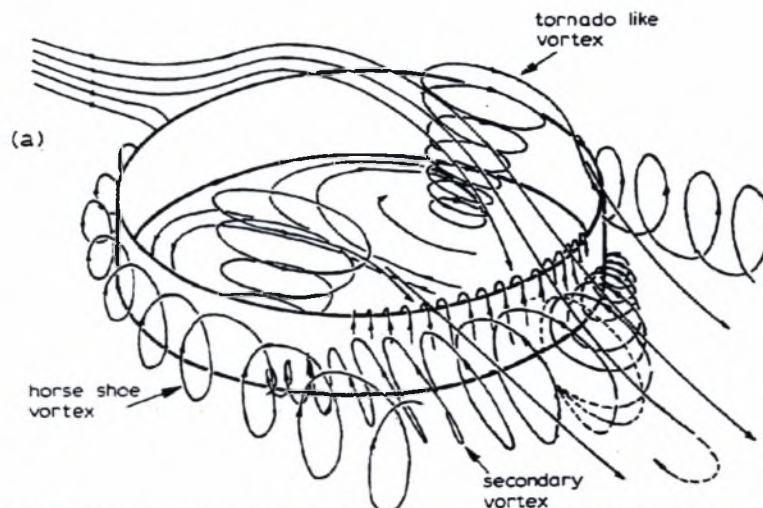
Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται οι παράγοντες του διατάματος (aspect ratio), του σχήματος, της τραχύτητας, της διαμόρφωσης των τοιχωμάτων, της ευκαμπτότητάς της και γενικά ό,τι έχει να κάνει με την κοιλότητα και τη γεωμετρική της διαμόρφωση.

Λόγω της σημαντικότητας που έχει η επίδραση του ανέμου στην αντοχή που πρέπει να έχει μια κατασκευή, έχουν γίνει αρκετές σχετικές μελέτες. Μια από αυτές είναι και του Holroyd [14]. Αυτός μελέτησε το φαινόμενο με πειράματα μέσα σε αεροσήραγγα ενός μοντέλου δεξαμενής πετρελαίου διαστάσεων (πραγματικών): διαμέτρου=100m και ύψους=20m. Το μοντέλο ήταν υπό κλίμακα 1:250. Διαπίστωσε τα εξής χρήσιμα και ενδιαφέροντα, που επαγωγικά βρίσκουν εφαρμογή και για κοιλότητες:

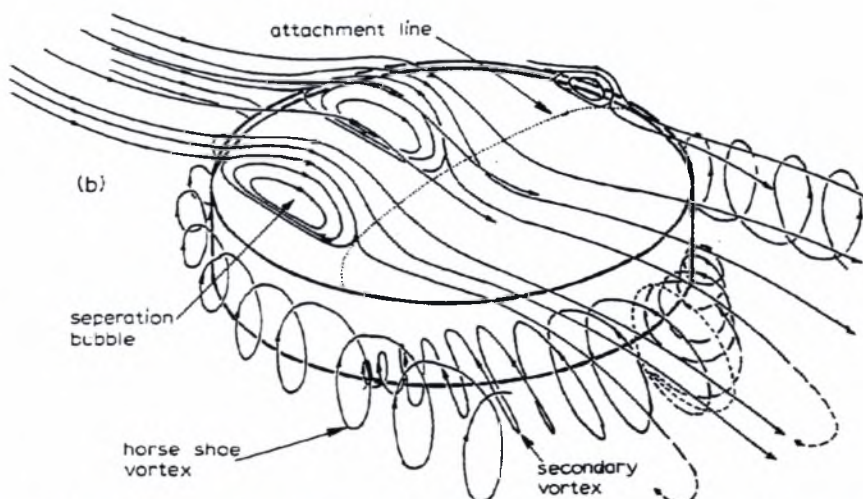
Πάνω από τις δίνες που σχηματίζονται εσωτερικά της κοιλότητας, ο υπόλοιπος από τον αρχικά προσπίπτοντα αέρα ανυψώνεται πάνω από το χείλος της δεξαμενής γύρω από το εμπρός μισό της, δημιουργώντας έτσι μια υποπίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής. Μέσα στο, κατάντη της ροής, μισό της δεξαμενής, η δημιουργημένη υποπίεση οδηγεί σε μια μερική εισροή του αέρα από την τώρα κατερχόμενη ροή αέρα πάνω από την δεξαμενή και σε μικρότερη έκταση από τον εξωτερικό αέρα που βρίσκεται χαμηλότερα από το χείλος της. Το τελευταίο βοηθείται από την δευτερογενή δίνη που δημιουργείται εξωτερικά της δεξαμενής. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ροή από έξω προς τα μέσα, πάνω στην οροφή από το κατάντη της ροής μέρος της δεξαμενής. Αυτός ο αέρας που εισέρχεται δημιουργεί ένα ρηχό, ακανόνιστο και ελικοειδές κεντρικό ρεύμα αέρα πλάτους περίπου $D/3 - D/2$ (όπου $D = \eta$



Σχ. 2.1 Φωτογραφία κατεστραμμένης δεξαμενής πετρελαίου ύστερα από ισχυρή ανεμόπτωση [14]



Σχ. 2.2 Ροϊκές γραμμές κατά την πρόσπτωση αέρα σε άδεια δεξαμενή πετρελαίου που είναι ασκεπής [14]



Σχ. 2.3 Ροϊκές γραμμές κατά την πρόσπτωση αέρα σε δεξαμενή πετρελαίου που είναι σκεπασμένη. Διακρίνεται και η γραμμή επανακόλλησης [14]

διάμετρος της δεξαμενής), το οποίο ρέει πάνω από το πάτο, απέναντι από το προς τον άνεμο τοίχωμα της δεξαμενής. Εκεί η ροή διαιρείται σε δυο ίσα μέρη και καθένα τους οδηγείται προς τα πλάγια στην περιφέρεια της δεξαμενής, ώστε να δημιουργηθούν δυο ωρολογιακά περιστρεφόμενες, ασταθείς, σαν ανεμοστρόβιλοι δίνες, κεντραρισμένες κοντά στα τέλη της εγκάρσιας διαμέτρου. Έχοντας περιστραφεί μέσω αυτών των δινών ο αέρας αρχίζει να εισρέει στο ρεύμα αέρα το οποίο ρέει πάνω από την δεξαμενή. Έτσι είναι πολύ πιθανό πως κάποιο μέρος του αέρα, που ανακυκλοφορεί μέσα στην δεξαμενή, ανακυκλοφορεί αρκετές φορές πριν βγει έξω στο κατάντη της ροής. Έτσι αλλάζει και η συγκέντρωση με τον χρόνο.

Επιπροσθέτως είναι φανερό πως η πεταλοειδής εξωτερική δίνη διατηρεί την επίδρασή της στην ροή πάνω από το χαμηλότερο τμήμα του κυλινδρικού σχήματος τοιχώματος και ότι μεταξύ αυτού και της τριών διαστάσεων ροής κοντά στο χείλος (κορυφή δεξαμενής) υπάρχει μια καθαρά περιφερειακή ροή που ακολουθεί το κυκλικό σχήμα της δεξαμενής. Επίσης η διαταραχή της ροής από την δεξαμενή αυξάνει τα επίπεδα τύρβης, όπως και η διαφορά της κατανομής πίεσης μεταξύ εξωτερικής-εσωτερικής πλευράς της δεξαμενής είναι μεταξύ 2 και 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή της προσπίπτουσας ροής αέρα. Στο εμπρός μέρος της δεξαμενής αυτό μπορεί να εξηγηθεί, ποιοτικά τουλάχιστον, λόγω του τεντώματος και της κάμψης των ροϊκών γραμμών των δινών από την προσπίπτουσα ροή. Η μέγιστη υποπίεση συμβαίνει κοντά στο χείλος της δεξαμενής σε γωνία 100° .

Έχει βρεθεί από τον Marchmann [37] πως αν η οροφή της δεξαμενής δεν είναι μέχρι πάνω αλλά χαμηλότερα, τότε η ροή είναι όπως όταν η δεξαμενή είναι άδεια με μόνη διαφορά την μετατόπιση των δυο σαν ανεμοστρόβιλων δινών στο εσωτερικό της δεξαμενής, προς την πλευρά που φυσά ο άνεμος.

Επίσης το μοτίβο των γραμμών ίσης πίεσης επηρεάζεται ισχυρά από το ύψος του κυλίνδρου σχετικά με το πάχος του οριακού στρώματος της προσπίπτουσας ροής και λιγότερο από την διάμετρό του (Purdy et al., [38]).

Εκτός από τις πειραματικές έρευνες, γίνονται και προσομοιώσεις με μαθηματικά μοντέλα.

Οι L. Cai and W.E. Stewart, JR. and C.W.Sohn [20] μελέτησαν με μαθηματική προσομοίωση τη ροή ενός ψυχρού ρευστού μέσα σε μια ορθογωνική δεξαμενή θερμότερου ρευστού μέσα από μια οριζόντια οπή που βρίσκεται στην κάτω πλευρά μιας δεξαμενής. Η ροή θεωρήθηκε δισδιάστατη και πως τα ρευστά δεν αντάλλαζαν θερμότητα με το περιβάλλον. Διαπίστωσαν πως το μέγεθος της δεξαμενής σχετικά με το μέγεθος της οπής εισόδου έχει επίδραση στην προκύπτουσα κατανομή των θερμοκρασιών. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος του μεγέθους της δεξαμενής σχετικά με το μέγεθος της οπής εισόδου, τόσο μεγαλύτερη και η αύξηση στο πάχος του βαθμού κλίσης θερμοκρασίας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση μεταξύ των δυο ρευστών. Το μέγεθος των βαθμών κλίσης θερμοκρασίας, αρχικά καθορίζεται από την αρχική ανάμειξη και στη συνέχεια αυξάνεται εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή μεταξύ των δυο ρευστών.

Όταν η δεξαμενή έχει μεγάλο μέγεθος, το εισρέον ρευστό χάνει ορμή προχωρώντας βαθύτερα. Όταν χτυπήσει για πρώτη φορά στον απέναντι τοίχο τείνει να μετακινηθεί προς τα πάνω δημιουργώντας περισσότερη ανάμειξη. Ως αποτέλεσμα η θερμοκρασιακή κατανομή κοντά στο κατακόρυφο τοίχωμα διαταράσσεται περισσότερο. Οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες είναι παχύτερες και περισσότερο διαταραγμένες κατά την οριζόντια κατεύθυνση. Επίσης το εισρέον ρευστό επιφέρει δευτερογενή ανακυκλοφορία στην περιοχή της εισόδου του.

Πειραματικά έχει βρεθεί πως η ροή μέσα σε γεωμετρίες τύπου κοιλότητας είναι ασταθής, επιδεικνύοντας συνήθως μεγάλου μεγέθους διακυμάνσεις της πίεσης και της ταχύτητας. Αν και κανείς δεν μπορεί να αρνηθεί πως τέτοιες διακυμάνσεις είναι ευεργετικές σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. για επαύξηση των ρυθμών εναλλαγής θερμότητας), στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ολέθριες, προκαλώντας δομικές ταλαντώσεις και θόρυβο, όπως επίσης και αύξηση της οπισθέλκουσας.

Τα πειράματα του Sarohia [39] για στρωτή αξισυμμετρική ροή έδειξαν ότι οι διακυμάνσεις αυτές δεν είναι αποτέλεσμα φαινομένων συντονισμού που βασίζονται στην αλληλεπίδραση των εκτροπών του αποκολλημένου οριακού στρώματος και των εσωτερικών της κοιλότητας πύσεων.

Ο μηχανισμός που διατηρεί τέτοια φαινόμενα διερευνήθηκε αργότερα από τους Rockwell and Knisely [40]. Αυτοί έδειξαν πως τέτοιες ροές κυριαρχούνται από στροβιλώδεις δομές που σχηματίζονται ανάντη της ροής, στην "γειτονιά" του ορίου αποκόλλησης της ροής και οι οποίες χτυπούν στη συνέχεια την κατάντη πλευρά της κοιλότητας. Η παρουσία και το σχήμα της πλευράς κατάντη της ροής οδηγεί σε ένα εμπλουτισμό της οργάνωσης των διατμητικών στρώματων της ροής. Επιπλέον η αλληλεπίδραση μεταξύ των στροβιλωδών δομών και της πλευράς που κτυπά η ροή βρέθηκε πως "γεννά" ένα μηχανισμό ανάδρασης, που αξιοπρόσεκτα διατηρεί διακυμάνσεις ανάλογες με αυτές.

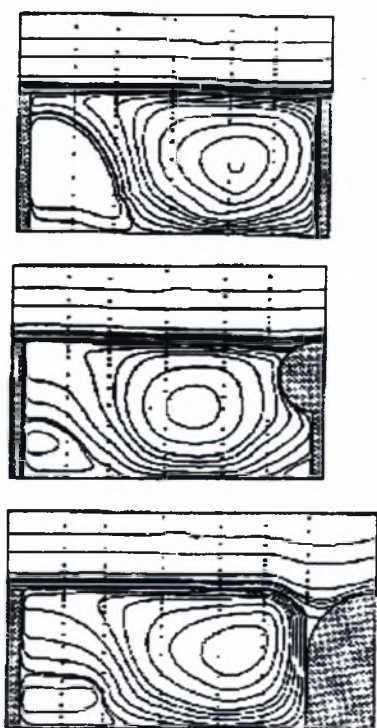
Οι J.C.F. Pereira and J.M.M. Sousa [16] έκαναν πειράματα που περιλάμβαναν οπτικοποίηση της ροής του διατμητικού στρώματος πάνω από τρεις διαφορετικές γεωμετρίες χειλών κοιλοτήτων: κοφτής ακμής, προεξέχουσα ημικυκλικής ακμής και ημικυκλικής ακμής. Το πείραμα έγινε σε μια υδροσήραγγα, όπου στο πάτωμά της ήταν στερεωμένη η κοιλότητα. Ο αριθμός Re της τυρβώδους ελεύθερης ροής ήταν $Re=20440$, η ένταση της τύρβης ήταν περίπου 4% και η ροή μέσα στην κοιλότητα χαρακτηριζόταν από έναν αριθμό Re βασισμένο στο βάθος αυτής και στην ταχύτητα της ελεύθερης ροής, ίσο με $Re=3360$. Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως η ακτίνα της προεξέχουσας ημικυκλικής ακμής ήταν $h/4$, όπου h το βάθος της κοιλότητας. Την ίδια ακτίνα είχε και η μη προεξέχουσα ημικυκλική ακμή. Όλες οι μετρήσεις έγιναν στην μέση της κοιλότητας.

Από τα πειράματα αποδείχτηκε πως ισχύει η υπόθεση της διαστάτης ροής. Παρατηρώντας τις ροϊκές γραμμές για τις τριών ειδών ακμές, διαπιστώθηκε ότι οι ημικυκλικές γεωμετρίες και ιδίως η μη προεξέχουσα ακμή, διαμορφώνουν μια πιο κάθετη κατανομή των εφαπτομενικών τους ροϊκών γραμμών συντελώντας έτσι σε μια μεγαλύτερη πρωτεύουσα δίνη από την κοφτή ακμή.

Παρατηρήθηκαν οργανωμένες ροϊκές διακυμάνσεις με ημιπεριοδική συμπεριφορά. Η ανάλυση P.S.D. για την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας έδειξε μια επικρατούσα συχνότητα των διακυμάνσεων, που αντιστοιχεί σε αριθμό Strouhal=1,1 ($St=(\text{συχνότητα} \cdot h)/\text{ταχύτητα ελεύθ. ροής}$). Άξιο αναφοράς είναι πως παρά τις τρεις διαφορετικές ακμές των κοιλοτήτων που τοποθετήθηκαν η επικρατούσα συχνότητα ήταν η ίδια. Αυτό δηλώνει πως το πεδίο ανακυκλοφορίας δεν μεταβάλλει την εσωτερική δομή του διατμητικού στρώματος σημαντικά. Αξίζει να αναφερθεί τι παρατήρησαν για κάθε περίπτωση ακμής:

Κοφτή ακμή

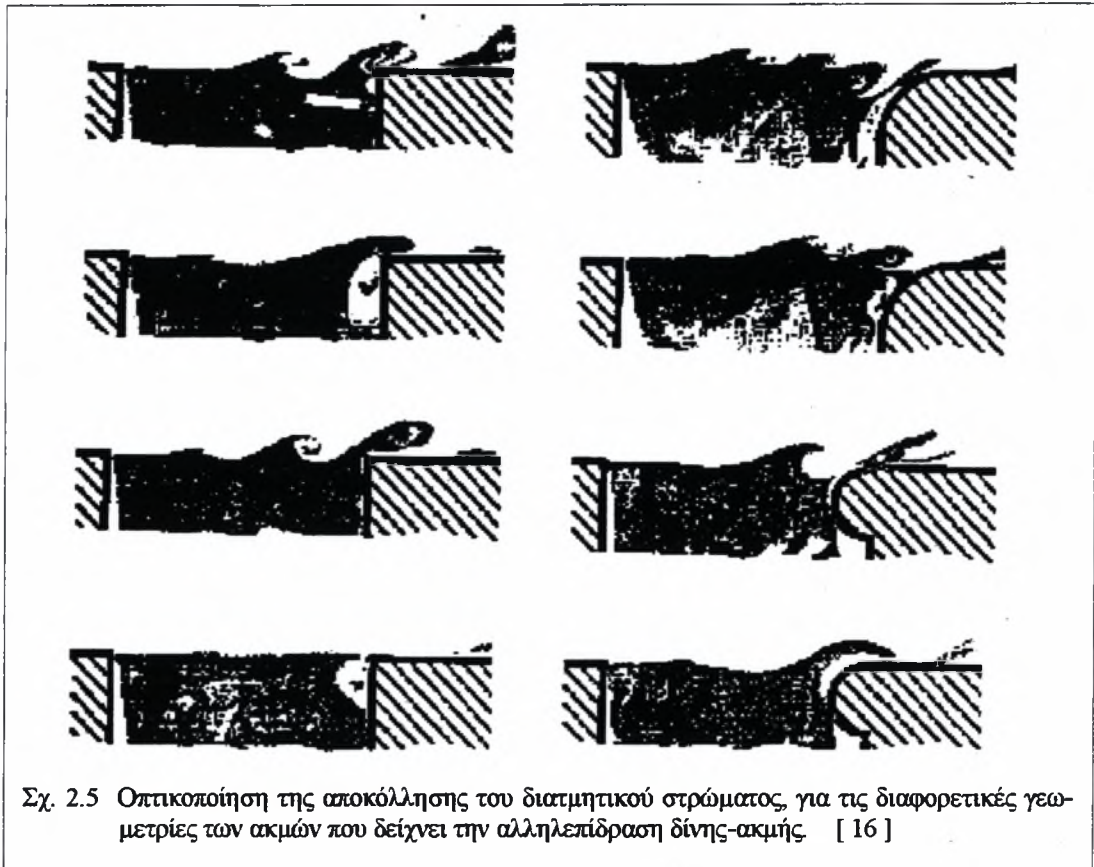
Εδώ ένα μέρος της δίνης αποκόπτεται και βγαίνει εκτός κοιλότητας. Το άλλο κομμάτι γυρνά προς τα πίσω μπαίνοντας μέσα στην κοιλότητα. Πιο σπάνια συμβαίνει ολοκληρωτική διαφυγή της δίνης προς τα έξω κατάντη της ροής διατηρώντας τη μορφή της.



Σχ. 2.4 Αδιαστατοποιημένες χρονικά Ροϊκές γραμμές ρευστού σε κοιλότητα (οι τελείες αντιπροσωπεύουν τα σημεία μέτρησης). Από πάνω προς τα κάτω: κοφτή ακμή, Ημικυκλική ακμή προεξέχουσα (στη μέση) και χωνευτή (κάτω) [16]

Χωνευτή Ημικυκλική ακμή

Αντιθέτως η προαναφερθείσα διαφυγή της δίνης είναι συχνό φαινόμενο στην περίπτωση της μη προεξέχουσας ημικυκλικής ακμής. Αυτό σχετίζεται με την μεγάλη μετατόπιση της θέσης του πυρήνα της δίνης, που επιτρέπει όλη η δομή της να διαφύγει κατάντη της ροής. Η έκχυση του ρευστού στην περιοχή ανακυκλοφορίας μεγενθύνει το μέγεθος της διακύμανσης της ροής. Στην περιοχή κοντά στη ακμή η ροή είναι λιγότερο οργανωμένη σε σχέση με τις άλλες ακμές, παρουσιάζοντας έναν ενδιαφέροντα τριών διαστάσεων χαρακτήρα.



Προεξέχουσα Ημικυκλική ακμή

Εδώ έχουμε πλήρη διαφυγή της δίνης. Αυτή η γεωμετρία προκαλεί μια αποδοτική μείωση στο μέγεθος των κατακόρυφων διακυμάνσεων της ταχύτητας.

Βασίζόμενοι στη οπτικοποίηση της ροής ισχυρίστηκαν πως αυτό είναι συνέπεια της πιο συχνής διαφυγής των δινών του αποκολλημένου οριακού στρώματος που προσκρούει στην ακμή.

Οδικές χαράδρες

Στα αστικά περιβάλλοντα και ιδίως σε εκείνες τις περιοχές που η πυκνότητα του πληθυσμού και της κυκλοφορίας είναι σχετικά υψηλή, η έκθεση του ανθρώπου σε επικίνδυνες ουσίες αναμένεται να είναι σημαντικά αυξημένη. Αυτή είναι η συνηθισμένη περίπτωση κοντά σε οδούς υψηλής κυκλοφορίας στα κέντρα των πόλεων, όπου η ρυμοτομία και το μικροκλίμα ίσως συνεισφέρει στην δημιουργία φτωχών συνθηκών διασποράς και ανανέωσης του αέρα με αποτέλεσμα να αυξάνονται έτσι οι περιοχές με υψηλή συγκέντρωση ρύπων. Υψηλής συγκέντρωσης επίπεδα σε ρυπαντές έχουν παρατηρηθεί σε οδικές χαράδρες. Μέσα σε αυτές τις οδούς οι πεζοί, οι ποδηλάτες, οι οδηγοί και οι κάτοικοι πιθανότατα εκτίθενται σε συγκεντρώσεις ρύπων που υπερβαίνουν τα όρια ρύπων που ισχύουν σήμερα.

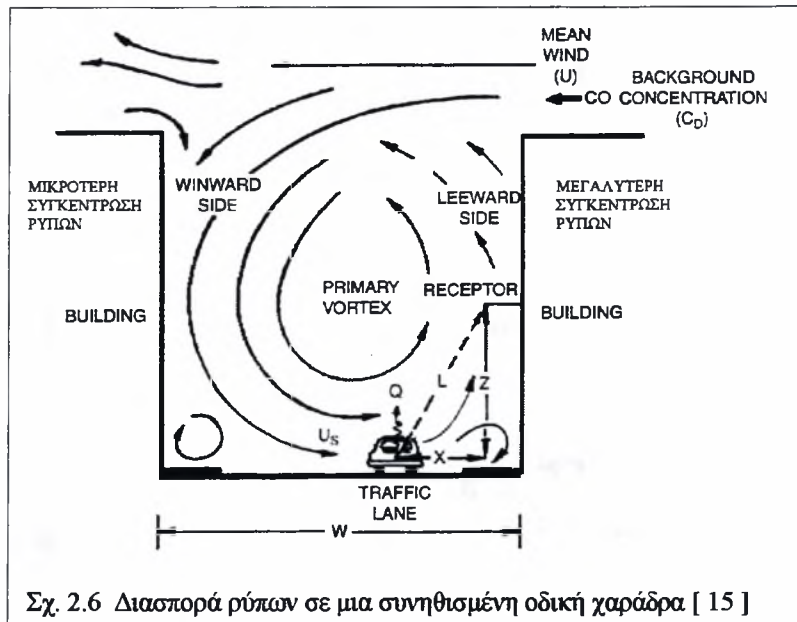
Οι συγκεντρώσεις ρυπαντών μπορεί να είναι 5 φορές μεγαλύτερες σε μια οδική χαράδρα από ό,τι σε ένα προάστιο της πόλης (Palmgren and Kemp, [41]).

Γεωμετρία οδικής χαράδρας

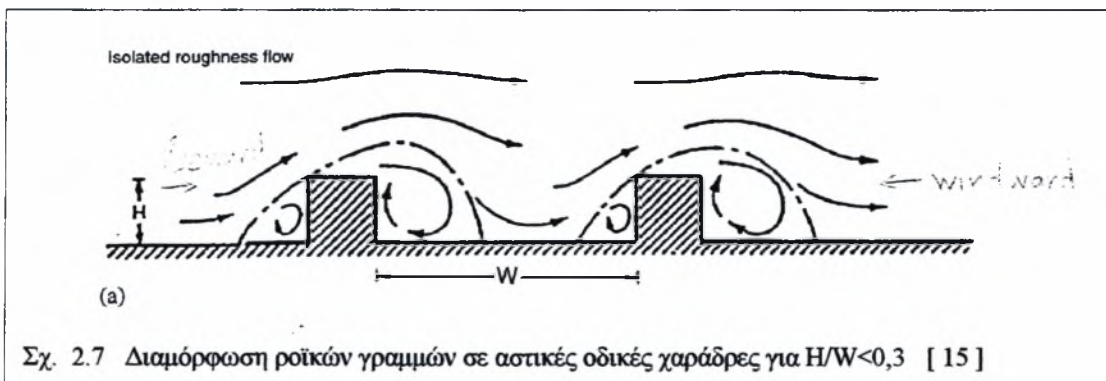
Ο όρος **οδικές χαράδρες** χρησιμοποιείται συχνά για στενούς αστικούς δρόμους που περιβάλλονται από συνεχόμενα ψηλά κτίρια και από τις δυο μεριές (Nicholson, [42]). Ο ίδιος όρος έχει χρησιμοποιηθεί για αναφορά και σε μεγαλύτερου πλάτους δρόμους. Στην πράξη αυτός ο όρος χρησιμοποιείται για αναφορά σε δρόμους που έχουν και από τις δυο πλευρές τους ψηλά κτίρια συνεχόμενα που αφήνουν και κάποια μικρά κενά μεταξύ τους. Οι διαστάσεις μιας οδικής χαράδρας είναι ο λόγος διατάματος (aspect ratio), ο οποίος ισούται με το πηλίκο του ύψους της χαράδρας (H) ως προς το πλάτος (W) της. Μια οδική χαράδρα θεωρείται συνηθισμένη αν έχει ένα λόγο διατάματος περίπου ίσο με 1 και όχι μεγάλα κενά ανάμεσα στα κτίρια. Μια "ρήχη" χαράδρα χαρακτηρίζεται από έναν λόγο διατάματος ίσο με 0,5, ενώ ο ίδιος λόγος, αν γίνει 2, αντιπροσωπεύει μια "βαθιά" χαράδρα. Το μήκος της οδικής χαράδρας (L) συνήθως εκφράζει την απόσταση μεταξύ των δυο κτιρίων-διασταυρώσεων και χωρίζει τις χαράδρες σε *Μικρές* ($L/H=3$), *Μεσαίες* ($L/H=5$) και *Μακρές* ($L/H=7$). Επίσης αν τα κτίρια γύρω από μια χαράδρα έχουν το ίδιο ύψος αυτή χαρακτηρίζεται **συμμετρική** (*symmetric* or *even*), ενώ αν όχι (έχουν σημαντικές υπομετρικές διαφορές) χαρακτηρίζεται **ασύμμετρη** (*asymmetric*).

Όταν η ελεύθερη ροή είναι κάθετη προς την χαράδρα και η ταχύτητα ανέμου είναι $>1,5-2$ m/s, η ροή μπορεί να περιγραφεί με όρους τριών περιοχών βασιζόμενες στις διαστάσεις της οδού: 1) ροή απομονωμένων εμποδίων 2) ροή με αλληλοεπικάλυψη των απόρρων και 3) ολισθαίνουσα ροή.

Για πλατιές οδούς ($H/W < 0,3$) (Σχ. 2.7) τα κτίρια έχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους και είναι σαν απομονωμένα στοιχεία τραχύτητας, καθώς ο αέρας ταξιδεύει σε αρκετή απόσταση κατάντι της ροής, πίσω από το πρώτο κτίριο πριν συναντήσει το επόμενο. Καθώς τα κτίρια έρχονται πιο κοντά μεταξύ τους ($H/W \approx 0,5$), το διαταραγμένο ρεύμα αέρος δεν έχει αρκετή απόσταση για να διευθετηθεί πριν πέσει στο επόμενο κτίριο. Το τελευταίο έχει ως συνέπεια να έχουμε μια ροή ανάμειξης των απόρρων. Στην περίπτωση των κανονικών χαρά-



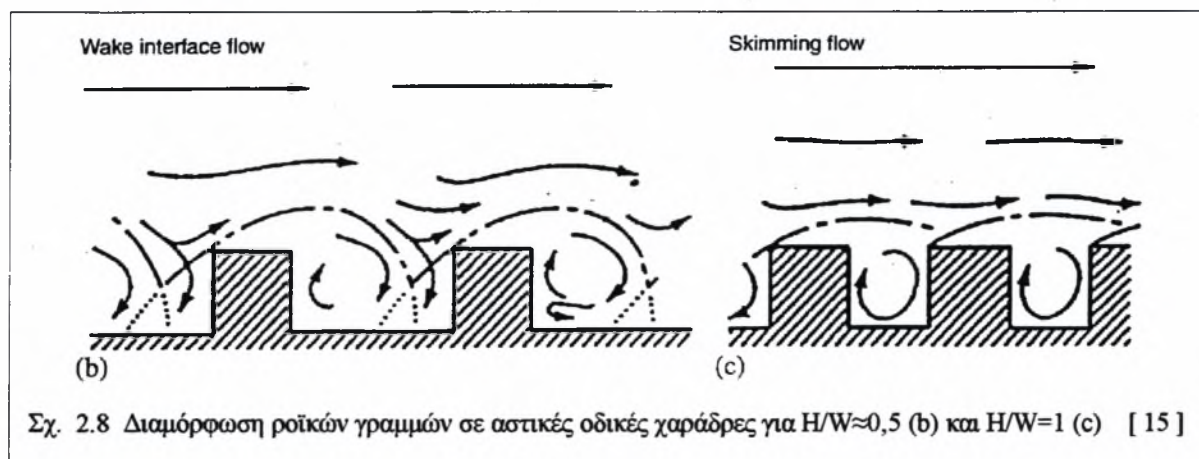
Σχ. 2.6 Διασπορά ρύπων σε μια συνηθισμένη οδική χαράδρα [15]



Σχ. 2.7 Διαμόρφωση ροϊκών γραμμών σε αστικές οδικές χαράδρες για $H/W < 0,3$ [15]

δρων ($H/W=1$) (Σχ. 2.8), ο όγκος του ατμοσφαιρικού αέρα περνά ξυστά, ουσιαστικά

“γλιστρά” πάνω από την χαράδρα παράγοντας την λεγόμενη ολισθαίνουσα ροή (skimming flow), η οποία χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό μιας μόνο δίνης μέσα στην χαράδρα.



Από μια τρισδιάστατη οπτική γωνία, μια αντανάκλαση του ανέμου στο κατάντη της ροής κτίριο θα έπρεπε ιδανικά να παρατηρούνταν στην περίπτωση της ολισθαίνουσας ροής (Nakamura and Oke, [43]; Johnson and Hunter, [45]). Για πλάγιους ανέμους, αυτή η αντανάκλαση θα εισήγε μια σπειροειδή δίνη μέσα στη χαράδρα. Άλλες πολύπλοκες μορφές ροής της χαράδρας ίσως παράγονταν από ανέμους παράλληλους στον άξονα της οδού. Επιπροσθέτως περιοχές χαμηλής πίεσεως και ανακυκλοφορίας αέρα δημιουργούνται κοντά σε διασταυρώσεις, έχοντας ως αποτέλεσμα οριζόντιες γωνιακές δίνες. Σε σχετικά χαμηλές χαράδρες οι γωνιακές δίνες μπορεί να είναι αρκετά ισχυρές ώστε να εμποδίσουν μια σταθερή δίνη κάθετα στην οδό. Αυτή η επίδραση εξασθενεί καθώς αυξάνεται το μήκος της χαράδρας (Theurer, [45]).

Σε σχετικά βαθιές χαράδρες ($H/W > 1,3$) η κύρια δίνη συνήθως μετατοπίζεται προς το πάνω μέρος της κοιλότητας με τον από κάτω της αέρα να είναι σχεδόν ακίνητος (DePaul and Sheih, [35]). Καθώς ο λόγος διατάματος (aspect ratio) αυξάνει ($H/W=2$), μια ασθενής περιστρεφόμενη δευτερογενής δίνη μπορεί να παρατηρηθεί στο επίπεδο του δρόμου (Pavageau et al., [31]). Για ακόμη μεγαλύτερους λόγους διατάματος (aspect ratios) ($H/W=3$), μια τρίτη ασθενής δίνη πιθανότατα μπορεί να δημιουργηθεί (Jeong and Andrews, [46]). Στις περισσότερες περιπτώσεις, μικρές ασθενείς δίνες καταλαμβάνουν τις γωνίες της κάτω πλευράς της χαράδρας.

Σύμφωνα με την κατεύθυνση της πνοής του ανέμου οι μη συμμετρικές χαράδρες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δυο κατηγορίες: α) *step-up* χαράδρες, όταν τα προς τον άνεμο κτίρια είναι ψηλότερα και β) *step-down*, όταν συμβαίνει το αντίθετο. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι δημιουργούμενες δίνες μπορεί να μετατοπιστούν ή να αναστραφεί η φορά περιστροφής τους, σε σχέση με ό,τι προαναφέρθηκε για τις συμμετρικές χαράδρες.

Διασπορά ρύπων.

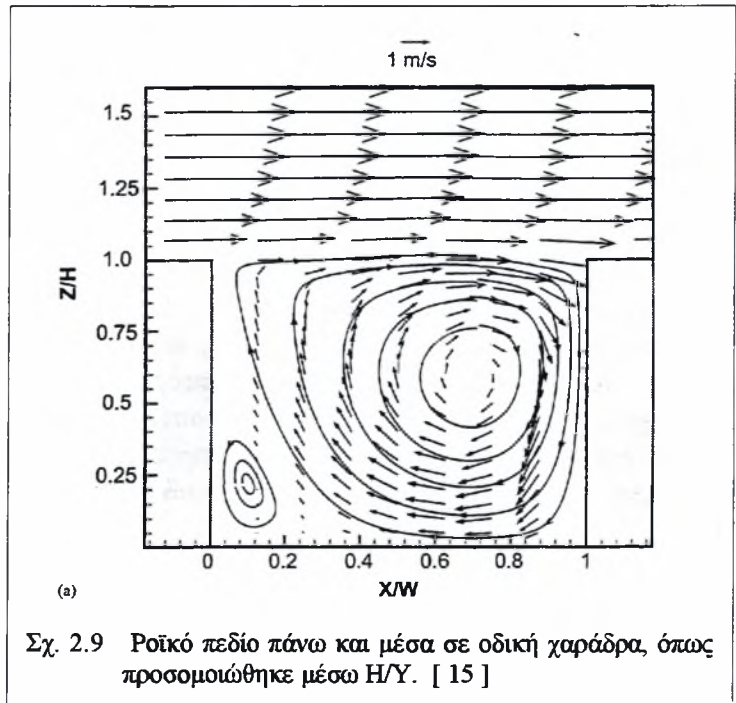
Η διασπορά των αέριων ρύπων σε μια οδική χαράδρα εξαρτάται γενικά από το ρυθμό με τον οποίο η οδός ανταλλάσσει αέρα κατακόρυφα με τα υπερκείμενα των κτιρίων ατμοσφαιρικά στρώματα και οριζόντια με τις διασταυρούμενες οδούς (Riaïn et al., [47]). Ολισθαίνουσα ροή ανέμου, μια μορφή που παρατηρείται σε συνηθισμένες οδικές χαράδρες, παρέχει τον ελάχιστο εξαερισμό και είναι σχετικά αναποτελεσματική στην απομάκρυνση των ρύπων μέσα από αυτό (Hunter et al., [30]). Επί τόπου μετρήσεις (DePaul and Sheih, [35]; Qin and Kot, [32]) έδειξαν αυξημένες συγκεντρώσεις των σχετικών με την κυκλοφορία ρυπαντών στην προς τον άνεμο πλευρά της χαράδρας και ελαττωμένες συγκεντρώσεις αναλογικά με το ύψος και για τις δυο πλευρές της οδού. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις της προς τον άνεμο πλευράς,

οφείλονται στην συσσώρευση των ρυπαντών τοπικά καθώς παρασύρονται από την μεγάλη δίνη η οποία καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της χαράδρας. Μικρότερης συγκέντρωσης σημεία μπορούν επίσης να δημιουργηθούν σε μικρές κοιλότητες όπου συμβαίνουν φαινόμενα ανακυκλοφορίας.

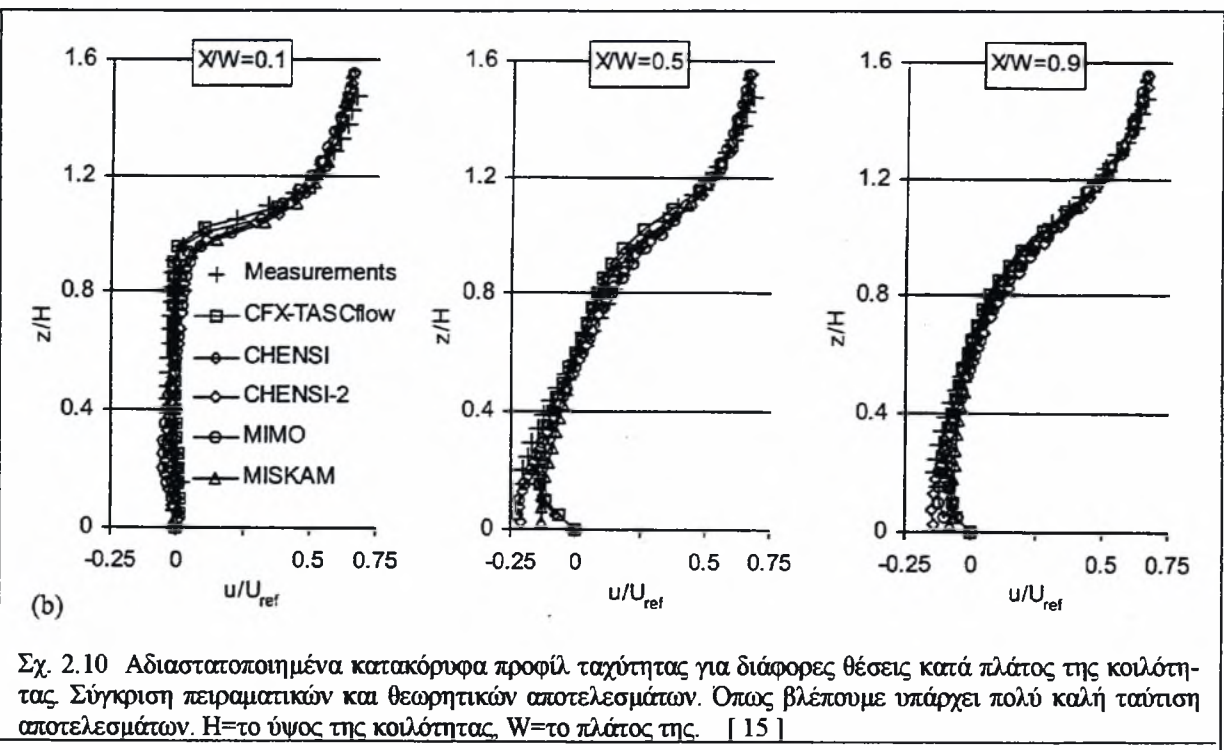
Εγκάρσια προφίλ συγκεντρώσεων που έχουν παρατηρηθεί σε πειράματα σε αεροσήραγγες (Hoydysh and Dabberdt, [48]) για κάθετα πνέοντα άνεμο, έχουν δείξει πως οι συγκεντρώσεις της προς τον άνεμο πλευράς είναι διπλάσιες από τις αντίστοιχες της άλλης πλευράς. Ακόμη οι συγκεντρώσεις είναι γενικά μικρότερες στις step up χαράδρες από ότι στις συμμετρικές και step down.

Τώρα, για το πώς επιδρά η μορφή των κτιρίων στη κατανομή των συγκεντρώσεων ρύπων, φάνηκε (Walter F. Dabberdt et al. [17], πως πηγαίνοντας από τα παραλληλόγραμμα οικοδομικά τετράγωνα στα τετραγωνισμένα, έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε ολική αύξηση της διασποράς των ρύπων με τις συγκεντρώσεις της περίπτωσης των τετραγωνισμένων να είναι μικρότερες κατά το 33% περίπου. Επίσης οι μέγιστες κατανομές συγκέντρωσης ρύπων μετατοπίζονται από την μέση (για την περίπτωση των ορθογωνίων) στα άκρα της χαράδρας για τα τετραγωνισμένα.

Σε όλες τις περιπτώσεις οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ρύπων αφορούν την προς τον άνεμο πλευρά των ορθογωνίων κτιρίων. Στην συνέχεια ακολουθούν τα τετραγωνισμένα με πλατιές οδούς, παρά του ότι η περίπτωση των ίδιων κτιρίων με στενούς δρόμους έχει μικρότερες συγκεντρώσεις στην προς τον άνεμο πλευρά.



Σχ. 2.9 Ροϊκό πεδίο πάνω και μέσα σε οδική χαράδρα, όπως προσομοιώθηκε μέσω H/Y. [15]



Σχ. 2.10 Αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ ταχύτητας για διάφορες θέσεις κατά πλάτος της κοιλότητας. Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Όπως βλέπουμε υπάρχει πολύ καλή ταύτιση αποτελεσμάτων. H=το ύψος της κοιλότητας, W=το πλάτος της. [15]

Τα ίδια ισχύουν (αναλογικά με το σχήμα και το πλάτος των δρόμων) και για τα κτίρια στο κατάντη της ροής του ανέμου, με μόνη διαφορά του ότι πλέον έχουμε μικρότερες συγκεντρώσεις από τις αντίστοιχες της του ανάντη του ανέμου πλευράς.

Εν κατακλείδι, η μέγιστη τιμή των συγκεντρώσεων συμβαίνει στο μέσο των παραλληλογράμμων οικοδομικών τετραγώνων και κοντά στα άκρα των τετραγωνισμένων. Οι τιμές της συγκέντρωσης ρύπων είναι διπλάσια στην ανάντη του ανέμου πλευρά των παραλληλογράμμων οικοδ. τετραγώνων από την κατάντη τους πλευρά για κάθετο άνεμο. Για τον ίδιας κατεύθυνσης άνεμο οι συγκεντρώσεις έχουν μέγιστο την μέση της οδού ενώ είναι ισοκατανεμημένες για παράλληλο άνεμο. Οι κατακόρυφες κατανομές συγκεντρώσεων ρύπων μέσα στην κοιλότητα είναι εκθετικές για όλες τις περιπτώσεις με τις μεγαλύτερες κλίσεις να τις παρουσιάζουν για παράλληλο ατμοσφαιρικό άνεμο. Τετραγωνισμένα οικοδομικά τετράγωνα (με εφαπτομενικούς δρόμους πλατύτερους της χαράδρας), έχουν συγκεντρώσεις μικρότερες κατά το 1/3 περίπου από ότι έχουν τα παραλληλόγραμμα οικοδομικά τετράγωνα (με την ίδια αναλογία οδών).

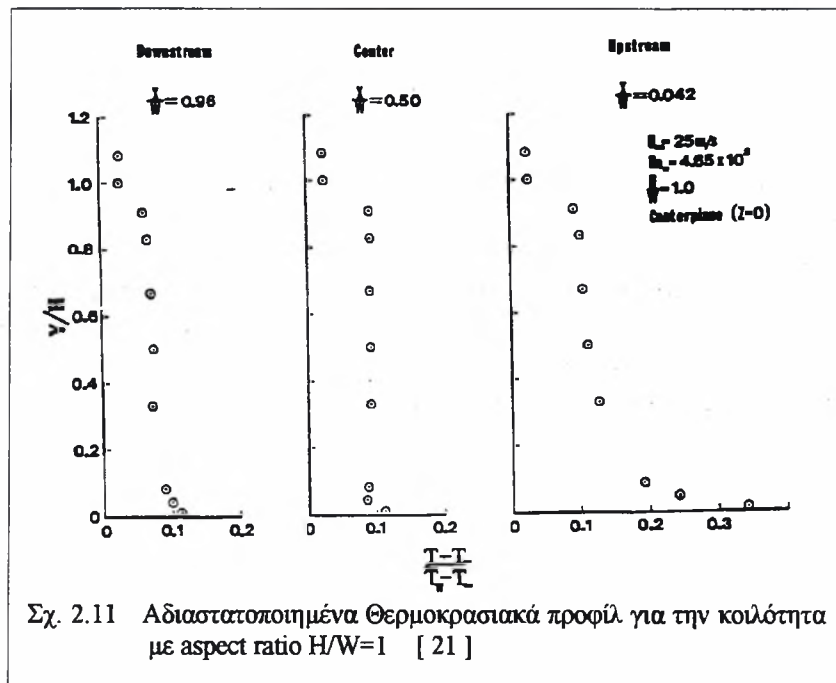
Τετραγωνισμένα οικοδομικά τετράγωνα με εφαπτομενικούς δρόμους ίδιου πλάτους με αυτό της χαράδρας έχουν συγκεντρώσεις της ανάντη πλευράς 50% μεγαλύτερες από ότι όταν οι εφαπτομενικοί δρόμοι έχουν πλάτος μεγαλύτερο από αυτό της χαράδρας (αυτό ισχύει για γωνίες πρόσπτωσης ανέμου: 20°-90°). Οι συγκεντρώσεις της κατάντη πλευράς έχουν μικρή ευαισθησία στο σχετικό πλάτος των οδών.

Μεταφορά Θερμότητας

Επίσης ο Fox [49] έδειξε πως όταν το πάχος του οριακού στρώματος της ροής, που πλησιάζει την κοιλότητα, είναι αρκετά μικρότερο από το ύψος της, τα αποτελέσματα της μεταφοράς θερμότητας θα μπορούσαν να συσχετιστούν χρησιμοποιώντας το πλάτος της σαν την χαρακτηριστική διάσταση.

Οι Haugen and Dhanak [50] συμπέραναν πως αν και η μεταφορά θερμότητας λίγο επηρεάζεται από το πάχος του οριακού στρώματος, είναι όμως πολύ ευαίσθητη στο λόγο βάθους προς πλάτος της κοιλότητας (aspect ratio).

Από την έρευνα του Yamamoto [51] αποδείχθηκε πως για aspect ratios μικρότερα του 0,30 ο μέσος αριθμός Nusselt αλλάζει σημαντικά, ενώ για μεγάλους aspect ratios είναι σχετικά σταθερός.



2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΗΣ

Βασική κατηγορία των παραμέτρων που επιδρούν καθοριστικά στην διαμόρφωση της ροής μέσα στις κοιλότητες, είναι τα χαρακτηριστικά της ροής. Με τον όρο αυτό εννοούνται οι αστάθειες της ροής, δημιουργούμενες από την ίδια λόγω της φύσης της ή από την ύπαρξη κάποιου σώματος μέσα σε αυτή, η θερμοκρασία της ροής και η σχέση της με την θερμοκρασία της κοιλότητας και άλλοι παράγοντες που αναλύονται παρακάτω.

Διαταραχές στη ροή από εκροή δινών από σώμα – αριθμός Strouhal

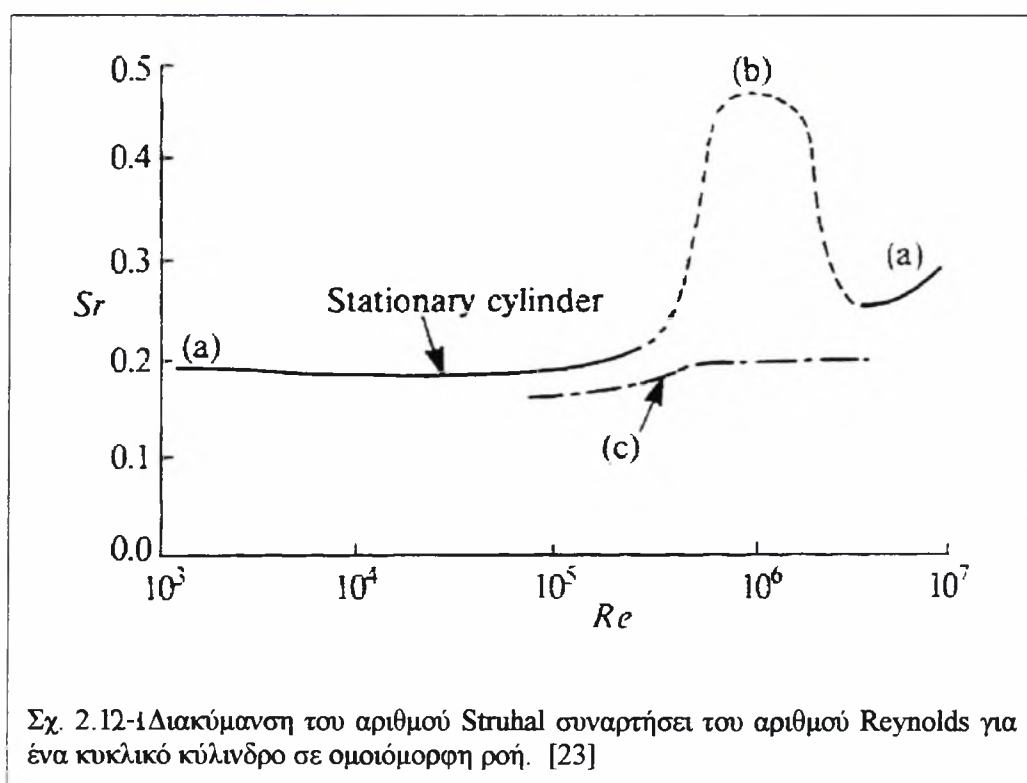
Όταν το περιεόμενο σώμα δεν είναι λεπτό, η βέβαιη αποκόλληση των οριακών στρωμάτων οδηγεί σε ελεύθερα διατμητικά στρώματα με σημαντικό πάχος και μορφές απόρρου που δεν μπορούν να περιγραφούν με τις απλοποιημένες εξισώσεις Prandtl. Η ροή στον απόρρου είναι τότε πολύπλοκη και άστατη και δύσκολα μπορεί να μελετηθεί με τις εξισώσεις Navier-Stokes, ιδίως όταν η ροή είναι τυρβώδης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο απόρρους κυλινδρικών σωμάτων σε μικρούς αριθμούς Re , όπου παρατηρείται η δημιουργία συστοιχίας δινών (Von-Karman vortex street) σε κανονικές μεταξύ τους αποστάσεις. Οι δίνες σχηματίζονται από την αναδίπλωση και αλληλεπίδραση των στροβιλών διατμητικών στρωμάτων καθώς εκφεύγουν από το σώμα και οδεύουν προς τα κάτω. Στην υποκρίσιμη περιοχή, η εκροή δινών Von-Karman είναι κανονική, ενώ στην κρίσιμη περιοχή η εκροή είναι ασθενέστατη επηρεαζόμενη από την ισχυρή τύρβη που υπάρχει στον απόρρου του σώματος. Στην υπερκρίσιμη περιοχή παρατηρήθηκε ότι η εκροή δινών Von-Karman ξαναρχίζει. Για $45 \leq Re \leq 2500$ η εκροή δινών ενός κυκλικού κυλίνδρου παρουσιάζει πολύ καλή περιοδικότητα δηλαδή δηλαδή εμφανίζεται ένας ορισμένος αριθμός δινών ανά μονάδα χρόνου. Το ίδιο φυσικά συμβαίνει και για οποιοδήποτε άλλο σώμα, αλλά σε διαφορετικό πεδίο αριθμών Re . Παρατηρήθηκε πειραματικά, αλλά και αποδεικνύεται θεωρητικά από την ανάλυση της ευστάθειας μιας διπλής συστοιχίας δινών (Lamb 1932), ότι οι μεταξύ τους αποστάσεις έχουν σταθερό λόγο, ίσο με 0,281. Η ταχύτητα με την οποία οδεύουν προς τα κάτω οι δίνες είναι μικρότερη από την ταχύτητα της ελεύθερης ροής U_0 . Αν από την μια πλευρά της συστοιχίας, εμφανίζονται f τον αριθμό δίνες ανά μονάδα χρόνου, τότε ο αδιάστατος αριθμός :

$$St = \frac{f \cdot D}{U_0}$$

Λέγεται αριθμός Strouhal και στα περισσότερα σώματα (ιδίως εκείνα που έχουν σταθερά σημεία αποκόλλησης από οξείες ακμές). Παραμένει σταθερός σε ένα ευρύ πεδίο τιμών Re , π.χ. ένα κυκλικό κύλινδρο για $10^2 \leq Re \leq 10^4$ είναι $S=0,21$. Η σημασία του αριθμού St είναι ότι μπορούμε, γνωρίζοντας την διάμετρο D του σώματος και την ταχύτητα της παράλληλης ροής U_0 , να υπολογίσουμε την συχνότητα εκροής των δινών Von-Karman και επομένως την συχνότητα του περιοδικού ροϊκού πεδίου το οποίο επάγουν γύρω από το σώμα, όπως επίσης και την συχνότητα των περιοδικών πιέσεων που ασκούνται πάνω στο σώμα.

Στο παρακάτω διάγραμμα δείχνεται η διακύμανση του αριθμού Struhal συναρτήσει του αριθμού Reynolds για ένα κυκλικό κύλινδρο σε ομοιόμορφη ροή. Διακρίνονται τρεις περιοχές:

- α) Αλληλουχία δινών Von-Karman με καλή περιοδικότητα αποκόλλησης
- β) Αλληλουχία δινών Von-Karman με τυχαία περιοδικότητα αποκόλλησης
- γ) Μοντέλο σταθεροποιημένων διακυμάνσεων.



Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται η αλληλουχία χαρακτηριστικής διαμόρφωσης της ροής γύρω από κύλινδρο για διάφορες περιοχές τιμών του αριθμού Reynolds.

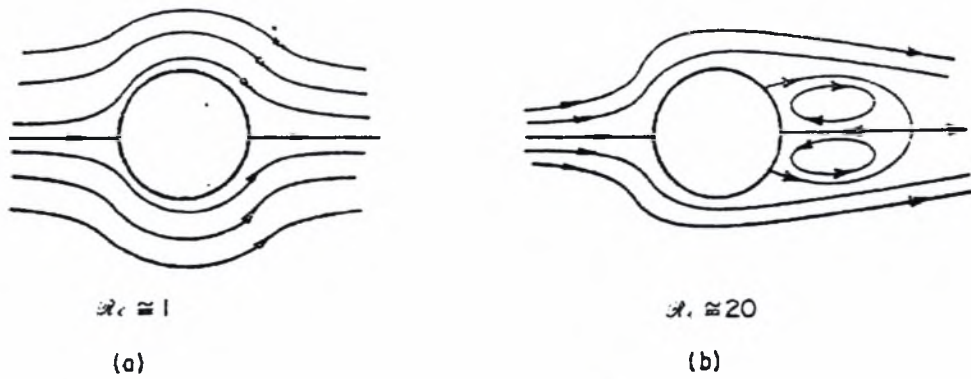


FIGURE 4.4.2. (a) Flow past circular cylinder $Re \approx 1$. (b) Flow past circular cylinder $Re \approx 20$.

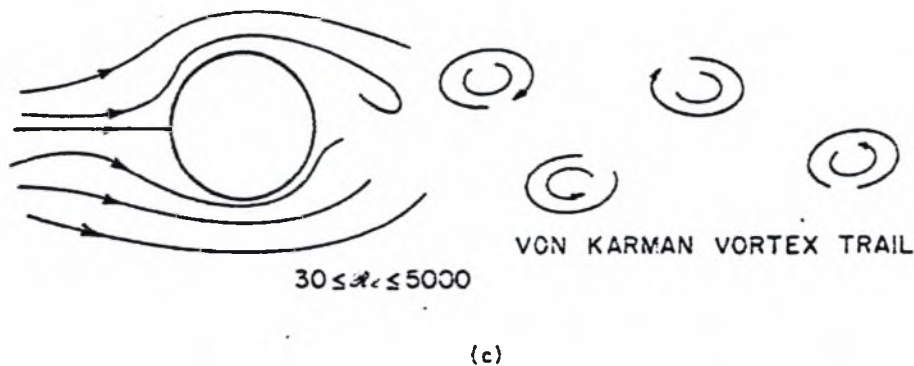


FIGURE 4.4.2c. Flow past circular cylinder $30 \leq Re \leq 5000$.

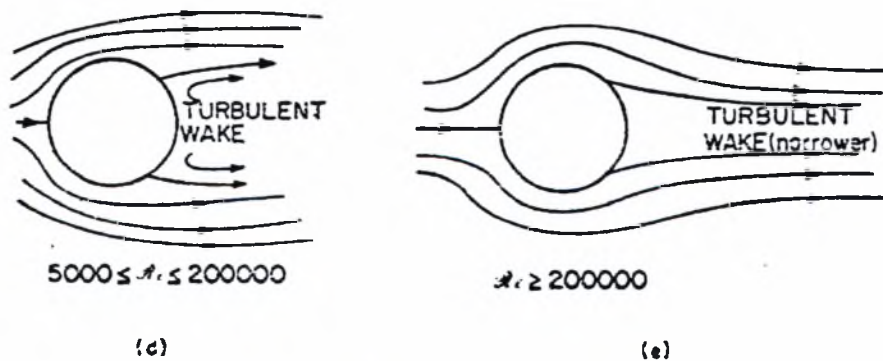


FIGURE 4.4.2. (d) Flow past circular cylinder $5000 \leq Re \leq 200,000$. (e) Flow past circular cylinder $Re \geq 200,000$.

Σχ. 2.12-2 Ροή ρευστού γύρω από κύλινδρο για διάφορους αριθμούς Re [23]

- (a) Ροή γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο $Re \approx 1$
- (b) Ροή γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο $Re \approx 20$
- (c) Ροή γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο $30 \leq Re \leq 50$
- (d) Ροή γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο $5000 \leq Re \leq 200,000$
- (e) Ροή γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο $Re \geq 200,000$

Από τους J.D. Benson and C.K. Aidun [19] που ερεύνησαν την μετάβαση στην ασταθή μη περιοδική κατάσταση μέσα σε μια κοιλότητα παρατήρησαν τα εξής:

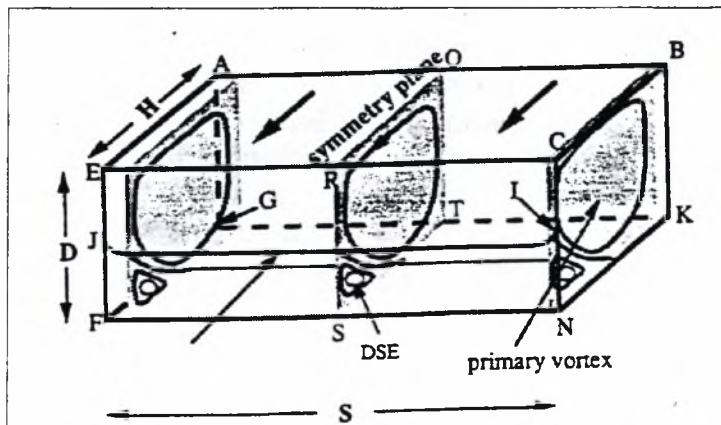
Σε αριθμό $Re=966$, αρχίζει μια κατάσταση περιοδική με τον χρόνο (Time Periodic)(TP). Ο κρίσιμος αρ. Re για την μετάβαση σε αυτή την κατάσταση είναι περίπου ίσος με 900.

Όταν ο αρ. Re γίνει 992, τότε η ροή μεταβαίνει σε μια ημιπεριοδική κατάσταση (Quasi Periodic) (QP), υποδηλώνοντας μετάβαση από έναν οριακό κύκλο (που ήταν πριν η μορφή της εσωτερικά περιστρεφόμενης δίνης) σε ένα κώνο.

Η ροή παραμένει έτσι έως τον αρ. $Re=1055$, πάνω από τον οποίο πολλές άλλες μορφές δραστηριοποιούνται μέχρι να εμφανιστεί μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων στα διαγράμματα P.S.D. Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται να είναι μια χαμηλών διαστάσεων χαοτική κατάσταση (Chaotic – U).

Τα αποτελέσματα από αυτή την μελέτη δείχνουν πως η μετάβαση στην ασταθή κατάσταση γίνεται μέσω μιας κωνικής διαταραχής.

Επίσης αν και παρατηρήθηκε μια αλληλουχία μετάβασης $Steady\ State \rightarrow TP \rightarrow QP \rightarrow U$, ίσως μπορεί να υπάρχουν και άλλες περιοδικές καταστάσεις που όμως να μην μπόρεσαν να γίνουν αντιληπτές από τους αισθητήρες.



Σχ. 2.13 Διαμόρφωση ροής μέσα σε κοιλότητα κατά την κίνηση μιας πλάκας εδραζομένης στα χείλη της σε τέλεια επαφή με αυτήν προς την κατεύθυνση των βελών (lid-driven cavity) [19]

Σχέση ταχύτητας εισόδου, αρ. Ar και θερμοκρασιακής διαφοράς

Οι L. Cai and W.E. Stewart, JR. and C.W.Sohn [20] που αναφέρθηκαν και στη προηγούμενη υποενότητα διαπίστωσαν ότι από τα διαγράμματα των ροϊκών γραμμών και των ισοθερμικών γραμμών που έγιναν φαίνεται πως για χαμηλούς αριθμούς Re (<1000) και υψηλούς αριθμούς Ar (>5) δεν υπάρχει μεγάλη ανάμειξη.

Εισάγεται ο αριθμός του Αρχιμήδη: $Ar = Gr/Re^2$ ο οποίος αντιπροσωπεύει το λόγο της θερμικής ανωστικής δύναμης προς την αδρανειακή δύναμη. Ο παραπάνω αριθμός συσχετίζεται με παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την μετάδοση θερμότητας, το σύστημα εξαιρισμού, και την τυρβώδη κινητική ενέργεια της ροής.

$$Ar = \frac{w * g * (\frac{\Delta\rho}{\rho_o})}{u_o^2}$$

Όπου: w =το πλάτος της οπής εισόδου

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81\text{ m/s}^2$)

$\Delta\rho = \rho_i - \rho_o$ = Διαφορά πυκνότητας μεταξύ αρχικής (i) και εισόδου (o) τιμής

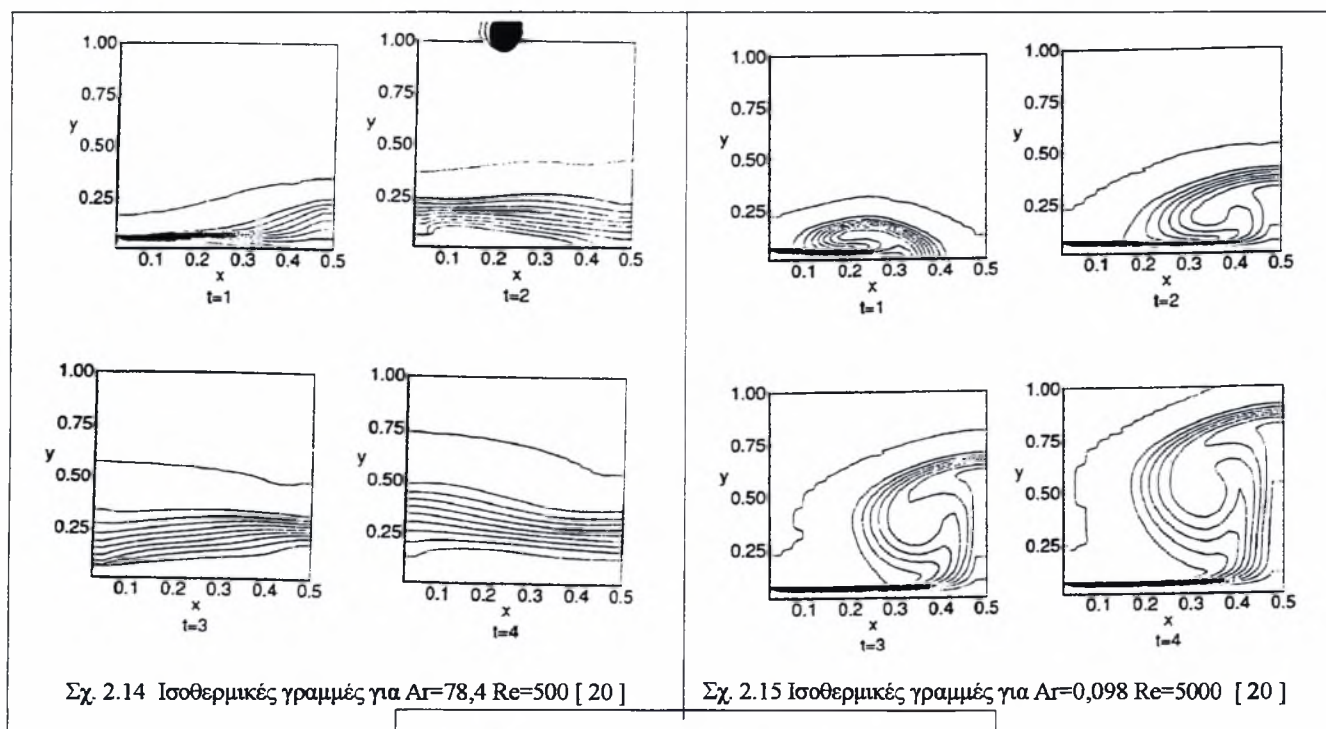
ρ_o = πυκνότητα εισόδου (o)

u_o = ταχύτητα εισόδου ψυχρού ρευστού

Η δέσμη ρευστού εισόδου προσκρούει πάνω στο απέναντι τοίχωμα, αλλάζει κατεύθυνση σχεδόν 180° , και ξαναχτυπά στο τοίχωμα πάνω από την οπή εισόδου. Μετά από δυο χτυπήματα στα τοιχώματα, η ροή αλλάζει διεύθυνση σχεδόν παράλληλα στα δυο κατακόρυφα τοιχώματα. Αυτή την κρίσιμη στιγμή, η σημαντική μορφή μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του ψυχρού και θερμού ρευστού είναι η αγωγή. Έτσι δημιουργείται μια κατακόρυφη στρωματοποίηση μεταξύ του θερμού και ψυχρού ρευστού με μηδενικές κλίσεις θερμοκρασίας στην

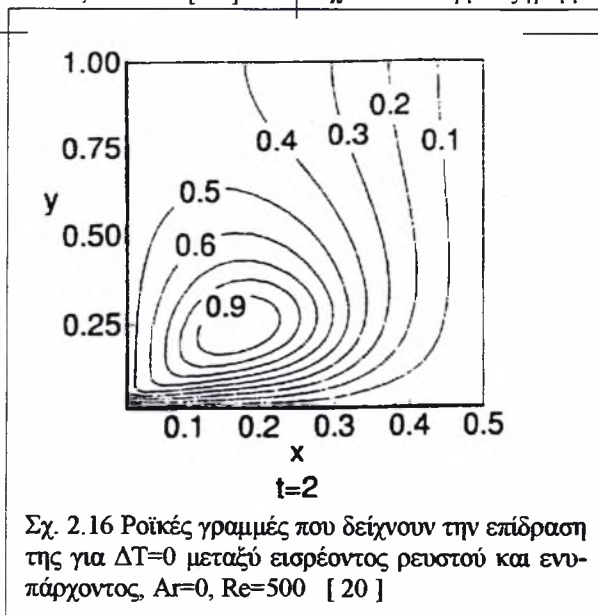
οριζόντια διεύθυνση της δεξαμενής. Η ανωστική δύναμη λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών έχει σημαντική επίδραση στο σχηματισμό των μηδενικών βαθμών κλίσης θερμοκρασίας κατά την οριζόντια διεύθυνση. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά (αριθμός Ar) μεταξύ του ρευστού εισόδου και του ρευστού που υπάρχει στη δεξαμενή, τόσο πιο εύκολα δημιουργούνται οι μηδενικοί βαθμοί κλίσης θερμοκρασίας κατά την οριζόντια διεύθυνση και οι μεγάλοι ζεστού – ψυχρού βαθμοί κλίσης θερμοκρασίας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Όταν έχουμε υψηλούς αριθμούς Re (>1000) και αριθμούς Ar μικρούς ($\sim 0,098$), τότε έχουμε μεγάλη ανάμειξη. Λόγω της αρχικά μεγάλης ταχύτητας-ορμής (μεγάλος αρ. Re) το εισρέον ρευστό, καθώς συγκρούεται με το απέναντι τοίχωμα διαχωρίζεται σε δυο ρεύματα. Το ένα πηγαίνει κατακόρυφα προς τα πάνω και το άλλο κινείται προς το κέντρο της δεξαμενής σχηματίζοντας μια έντονη δίνη. Η δίνη εισάγει επιπλέον τυρβώδη ανάμειξη και παράγει μια εξαιρετικά διαταραγμένη θερμοκρασιακή κατανομή. Έτσι προκύπτουν κατακόρυφοι βαθμοί κλίσης θερμοκρασίας με διάφορες κλίσεις (πολυδιάστατη κατανομή θερμοκρασίας).



Σχ. 2.14 Ισοθερμικές γραμμές για $Ar=78,4$ $Re=500$ [20]

Σχ. 2.15 Ισοθερμικές γραμμές για $Ar=0,098$ $Re=5000$ [20]



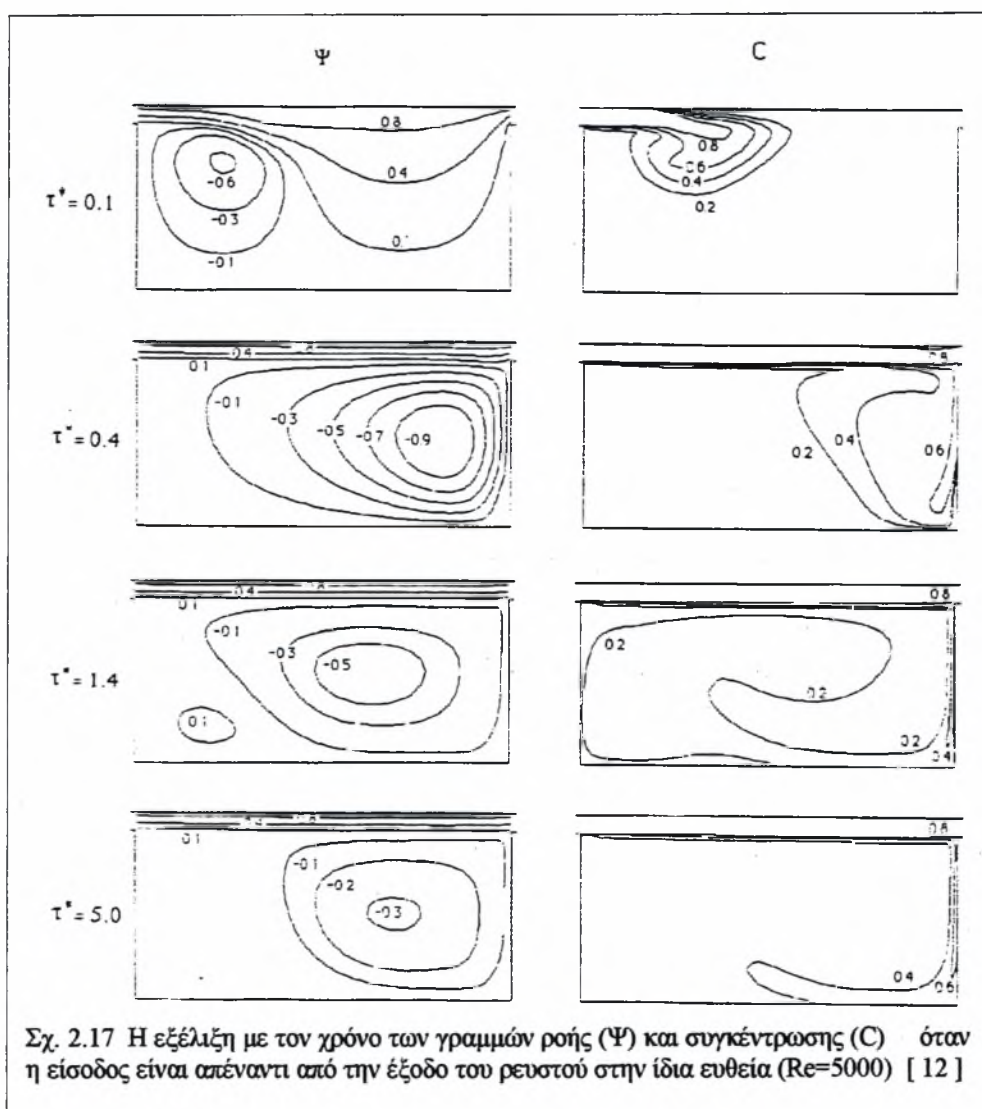
Σχ. 2.16 Ροϊκές γραμμές που δείχνουν την επίδραση της για $\Delta T=0$ μεταξύ εισρέοντος ρευστού και ενυπάρχοντος, $Ar=0$, $Re=500$ [20]

Όταν δεν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δυο ρευστών το ρευστό που εισρέει αλλάζει την κατεύθυνσή του και γίνεται παράλληλο με το απέναντι τοίχωμα, ακόμα και για χαμηλούς αριθμούς Re (<500). Όταν όμως υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά το εισρέον ρευστό τείνει να μείνει προσκολλημένο στον πάτο της κοιλότητας.

Μεταβατικά φαινόμενα (Transient Effects)

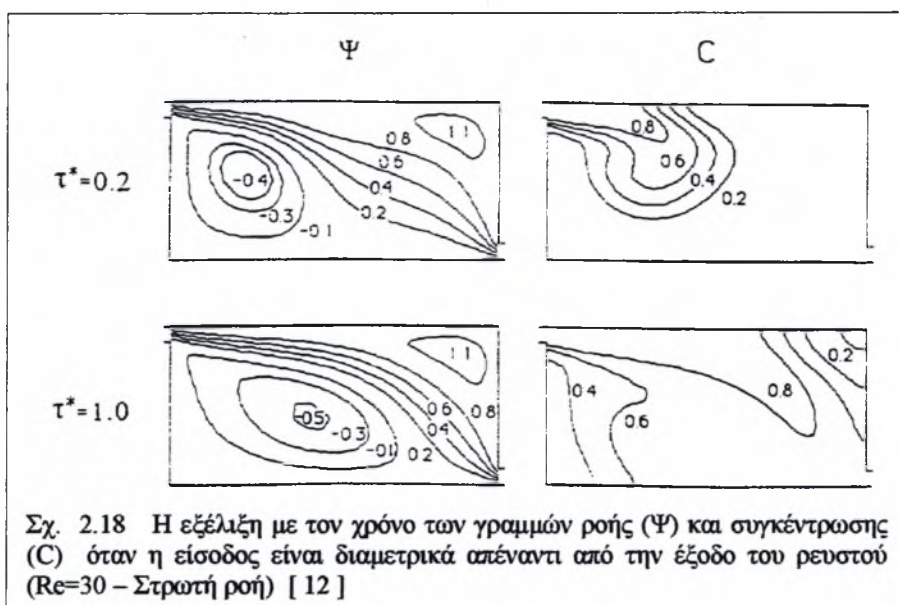
Πρωτεύοντος μηχανολογικού ενδιαφέροντος είναι ο κρίσιμος χρόνος που απαιτείται για τη απομάκρυνση ενός ρύπου μέσα από ένα κλειστό χώρο. Οι συνθήκες ροής που κυρίως ενδιαφέρουν είναι τυρβώδεις.

Τα σχετικά συμπεράσματα των J. L. Lage, A. Bejan and R. Anderson [12] αναφέρονται σε πειράματα που πραγματοποίησαν θεωρώντας μια δισδιάστατη κοιλότητα η οποία γεμίζονταν με ένα Νευτονικό ρευστό σταθερής πυκνότητας και ιξώδους. Επίσης θεωρήθηκε πως η διάχυση μάζας είναι σταθερή. Το ρευστό είχε αρχικά μια συγκέντρωση, η οποία ήταν ομοιόμορφα κατανομημένη σε όλο τον όγκο του, και παρατηρήθηκε πώς διαμορφώνονται οι ροϊκές γραμμές και οι ισοϋψείς των συγκεντρώσεων του πεδίου, όταν εισαχθεί καθαρός αέρας από μια είσοδο και βγει από μια έξοδο, για διάφορες σχετικές θέσεις και διαμορφώσεις των εισόδων-εξόδων.



Είσοδος – έξοδος = παράλληλες – απέναντι. ψηλά και οι δυο (Σχ. 2.16)

Ο ρύπος απομακρύνεται σταδιακά από το χαμηλότερο μέρος της κοιλότητας με μικρή ανακυκλοφορία και η σχετιζόμενη μεταφορά μάζας λαμβάνει χώρα κατά μήκος του οριακού στρώματος συγκέντρωσης. Σε αντίθεση με το ροϊκό πεδίο, το πεδίο συγκέντρωσης δεν φτάνει σε μια σταθερή κατάσταση μηδενικής συγκέντρωσης ρύπου, παρά μόνο μετά από την έλευση πολύ μεγάλου χρόνου. Οι μικρές τιμές του C (Συγκεντρώσεως) αντιστοιχούν σε μολυσμένο αέρα, ενώ οι τιμές του C κοντά στο 1 αντιπροσωπεύουν περιοχές που έχουν πλήρως καθαριστεί από την ροή του αέρα. Αξίζει να σημειωθεί πως η περιοχή μολυσμένου αέρα που τελευταία καθαρίζεται ταυτίζεται με την κεντρική περιοχή της αργής ωρολογιακής ανακυκλοφορίας, όπως φαίνεται και στα σχήματα.



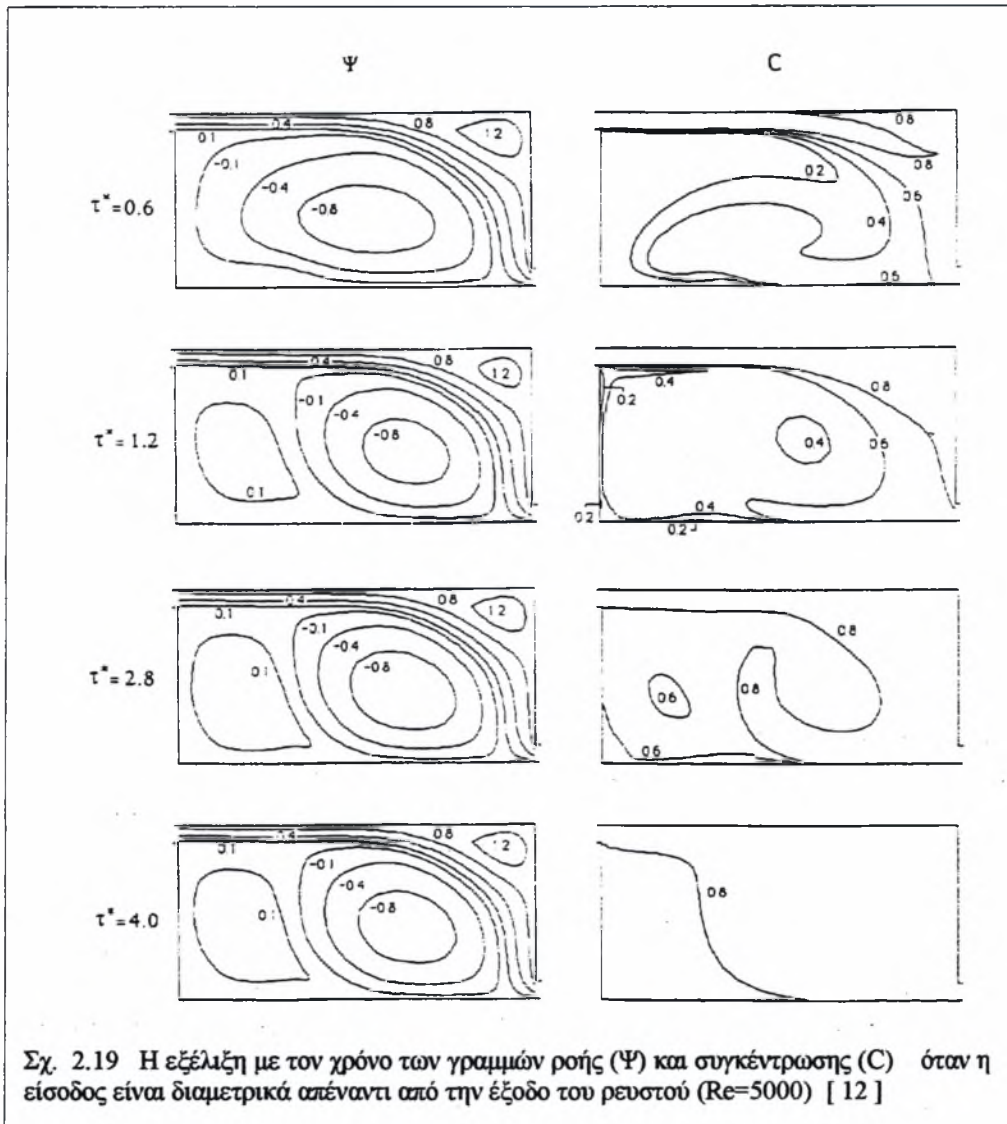
Είσοδος – έξοδος = παράλληλες και απέναντι, ψηλά η είσοδος χαμηλά η έξοδος (Σχ. 2.17-18)

Η μια δίνη ανακυκλοφορίας που δημιουργούνται στην προηγούμενη περίπτωση, τώρα αντικαθίσταται από τρεις καθαρά διαμορφωμένες δίνες. Αυτές έχουν μια σημαντική επίδραση στις τοπικές συγκεντρώσεις κατά την παροδική απομάκρυνση της ρύπανσης από την κοιλότητα. Αυτή η τμηματοποίηση του ρευστού της κοιλότητας συντελεί σε μια μεγαλύτερη απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων από την προηγούμενη περίπτωση. Επίσης σε χαμηλότερους αριθμούς Re η δέσμη του εισερχόμενου καθαρού αέρα διαλέγει ένα “μονοπάτι” κοντύτερα στο γεωμετρικό κέντρο της κοιλότητας.

Και στις δυο ανωτέρω περιπτώσεις διακρίνονται δυο στάδια μεταβολής του βαθμού απόδοσης:

α) Το αρχικό, όπου αυτός αυξάνεται απότομα και είναι ανεξάρτητο του αριθμού Re. Είναι το διάστημα που το εισερχόμενο “καθαρό” ρευστό ρέει κατευθείαν από την είσοδο στην έξοδο “γεμίζοντας” τον φανταστικό αγωγό που συνδέει τα δυο ανοίγματα. Η απομάκρυνση του ρύπου εδώ μπορεί να παρομοιαστεί με την κίνηση ενός εμβόλου.

β) Σε αυτό το στάδιο η απομάκρυνση του ρύπου ελέγχεται από την μεταφορά μάζας κατά μήκος των τυρβωδών διατμητικών στρωμάτων που δημιουργούνται μεταξύ της δέσμης ρευστού εισροής και του αέρα που την περιβάλλει.

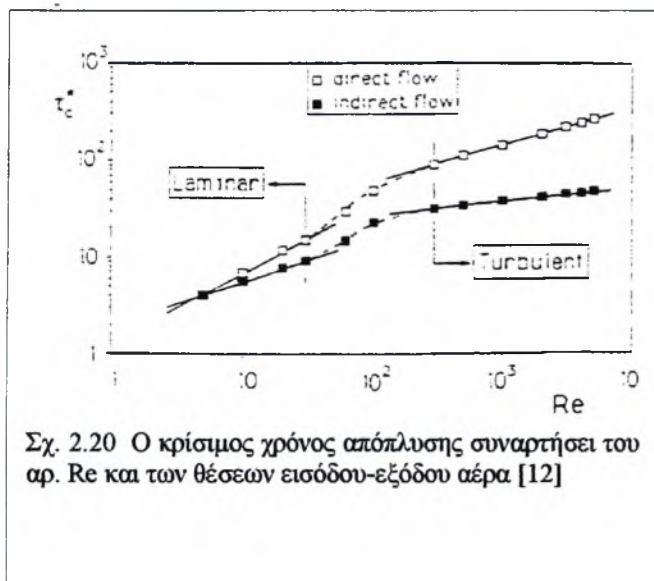


Στην περίπτωση που η είσοδος-έξοδος αέρα δεν είναι στην ίδια ευθεία, έχουμε καλύτερη απόδοση καθαριότητας. Αυτό γίνεται ακόμα μεγαλύτερο για μεγαλύτερους αριθμούς Re . Επίσης ο πραγματικός χρόνος καθαρισμού ελαττώνεται καθώς ο αριθμός Re αυξάνει.

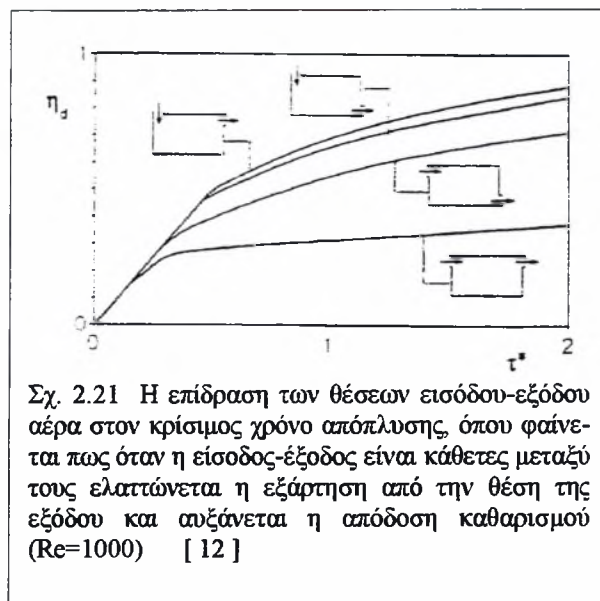
Επιπροσθέτως αν η σχετική θέση της εισόδου-εξόδου σχηματίζει ορθή γωνία η απόδοση καθαριότητας αυξάνει και η επίδραση της θέσης της εξόδου του αέρα στον βαθμό απόδοσης ελαττώνεται δραματικά.

Είναι ενδιαφέρον πως υψηλότερη απόδοση εξαερισμού επιτυγχάνεται όταν τα ανοίγματα (είσοδος-έξοδος) είναι κάθετα μεταξύ τους και στο ίδιο ύψος. Αυτό είναι ακριβώς το αντίθετο από όταν είναι παράλληλα μεταξύ τους και στο ίδιο ύψος.

Εν κατακλείδι συμπεραίνουμε πως η μεγαλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται όταν έχουμε γεωμετρική συσχέτιση των θέσεων της εισόδου – εξόδου του αέρα που να ωθεί τον εισερχόμενο αέρα να κάνει την μεγαλύτερη διαδρομή μέσα στον χώρο μας πριν βγει έξω.



Σχ. 2.20 Ο κρίσιμος χρόνος απόπλυσης συναρτήσει του αρ. Re και των θέσεων εισόδου-εξόδου αέρα [12]



Σχ. 2.21 Η επίδραση των θέσεων εισόδου-εξόδου αέρα στον κρίσιμο χρόνο απόπλυσης, όπου φαίνεται πως όταν η είσοδος-εξόδος είναι κάθετες μεταξύ τους ελαττώνεται η εξάρτηση από την θέση της εξόδου και αυξάνεται η απόδοση καθαρισμού (Re=1000) [12]

Μεταφορά Θερμότητας

Η φυσική συναγωγή που οφείλεται στην διαφορετική θέρμανση των κατακόρυφων επιφανειών έχει μελετηθεί αρκετά καλά έως σήμερα, λόγω του μεγάλου εύρους των σπουδαιών εφαρμογών που σχετίζονται με το ανωτέρω φαινόμενο. Ωστόσο, σχετικά μικρή σημασία έχει δοθεί στην περίπτωση της διαφορετικής θέρμανσης ταυτόχρονα με τις κατακόρυφες και των οριζόντιων επιφανειών μιας κλειστής κοιλότητας. Μια τέτοια κατάσταση δημιουργείται για παράδειγμα, όταν η ηλιακή ακτινοβολία, περνώντας από ένα μεγάλο παράθυρο, προσπίπτει στο δάπεδο ενός δωματίου. Εκείνο το μέρος της επιφάνειας του πατώματος που λαμβάνει την ηλιακή ακτινοβολία (λιάζεται) φτάνει σε μια θερμοκρασία σχετικά υψηλότερη από ότι η ψυχρή επιφάνεια του παράθυρου, έχοντας ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια κίνηση λόγω ανωστικών δυνάμεων που χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Rayleigh, όταν αυτός είναι σε μια περιοχή από 10^{10} έως 10^{12} . Οι November and Nansteel [52]; J.D. Nicolas and M.W. Nansteel [11], μελέτησαν αυτό το φαινόμενο συστηματικά θερμαίνοντας ένα μέρος μόνο της επιφάνειας του πατώματος μιας κοιλότητας και διατηρώντας ψυχρές τις κατακόρυφες επιφάνειές της. Η μελέτη έγινε για εύρος αριθμών Ra: $7,29 \cdot 10^{10} < Ra < 3,69 \cdot 10^{11}$ που είναι άμεσης σπουδαιότητας για περίπτωση παθητικής θέρμανσης δωματίων από τον ήλιο. Παρατήρησαν πως στην περιοχή πολύ κοντά στο πάτωμα το θερμικό οριακό στρώμα αλλάζει απότομα. Βρέθηκε πως η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή, αυξάνει μονότονα με το μήκος της θερμαινόμενης περιοχής στο πάτωμα, ενώ ο αριθμός Nusselt (ο λόγος της ολικής μεταφοράς θερμότητας προς την θερμότητα που μεταφέρεται μόνο με αγωγή), γίνεται μέγιστος όταν περίπου το 60% του πατώματος είναι θερμομονωμένο και εξασθενίζει τείνοντας να γίνει ίσος με 1 καθώς το μήκος της θερμαινόμενης περιοχής είτε πλησιάζει το 0, είτε εκτείνεται σε όλο το πάτωμα.

Οπτικοποίηση της ροής φανέρωσε πως η ροή φυσικής συναγωγής είναι στρωτή και κατά το μεγαλύτερο μέρος της σταθερή. Η ποιοτική διαμόρφωση της δομής της ροής έδειξε να είναι η ίδια για διάφορα μήκη της θερμαινόμενης περιοχής. Η δομή ροής αποτελείται από μια περιοχή κεντρικού πυρήνα περικυκλωμένη από οριακά στρώματα εφαιπόμενα στην περιφέρεια της κοιλότητας. Το περιφερειακό οριακό στρώμα δεν είναι ομοιόμορφο ως προς το πάχος και την κατανομή ταχύτητας και αυτά εξαρτώνται από την θέση του. Το στενότερο τμήμα του οριακού στρώματος και αυτό με την μεγαλύτερη ταχύτητα βρέθηκε πως είναι εφαιπτομενικό στη ψυχρή κατακόρυφη επιφάνεια. Ο κεντρικός πυρήνας παρουσιάζει μεγάλες δίνες, με

δίνες, με ταχύτητες γενικά μικρότερες συγκρινόμενες με αυτές του οριακού στρώματος. Οι δομές των δινών δεν είναι εντελώς σταθερές καθώς παρατηρήθηκαν να υπόκεινται σε μικρές αλλαγές στο μέγεθος, στο σχήμα και στην θέση τους μέσα στον πυρήνα. Η δίνη που είναι κοινότερα στην αριστερή κατακόρυφη ψυχρή επιφάνεια παρουσιάζει ωρολογιακή περιστροφική κίνηση καθώς δημιουργείται από την άνωση του οριακού στρώματος εφαπτομενικά στην κατακόρυφη επιφάνεια. Οι ανωτέρω δίνες αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είχαν προβλεφθεί από τους θεωρητικούς υπολογισμούς και φάνηκαν στο πείραμα. Επίσης παρατηρήθηκε πως το οριακό στρώμα του θερμαινόμενου πατώματος παραμένει προσκολλημένο σε αυτό, παρά την ασταθή στρωματοποίηση πυκνότητας σε αυτό ακόμα και για αριθμούς $Ra=0$. Πιθανόν η αρνητική κλίση πίεσεως που δημιουργείται κοντά στη γωνία μεταξύ θερμής-ψυχρής επιφάνειας, από το ανυψούμενο οριακό στρώμα στην κατακόρυφη ψυχρή επιφάνεια, χρησιμεύει για σταθεροποίηση του οριζόντιου οριακού στρώματος.

Παρατηρώντας τώρα την διαμόρφωση της ροής στην γωνία του δωματίου μεταξύ των ψυχρών επιφανειών (τμήμα αθέρμαστου πατώματος), είδαν μια ισχυρά κατερχόμενη ροή οριακού στρώματος εφαπτομένης στον κατακόρυφη επιφάνεια, όπως και εισροή μέσα στο οριακό στρώμα από την περιοχή του πυρήνα. Ταυτόχρονα στο κατάντη της ροής στην περιοχή της γωνιάς, παρατηρείται μια μικρή περιοχή αποκόλλησης στο πάτωμα. Το αποκολλημένο στρώμα φαίνεται να υπόκειται σε επανακόλληση σε μικρή απόσταση από την γωνία. Επίσης μια μικρή αλλά και ασθενής δίνη με ωρολογιακή φορά μπορεί να παρατηρηθεί ακριβώς από πάνω από την περιοχή ανακυκλοφορίας. Για αριθμούς Ra της τάξης του 10^6 το στρώμα ροής της κατακόρυφης επιφάνειας υπόκειται σε γρήγορη εκλέπτυνση καθώς κατευθύνεται προς την γωνία των ψυχρών επιφανειών και μετά σταδιακά λεπταίνει στην κατάντη της ροής περιοχή. Παρόμοια μορφή έχει βρεθεί και από θεωρητικούς υπολογισμούς. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί λόγω της γρήγορης επιβράδυνσης του κατακόρυφου οριακού στρώματος κοντά στην γωνία των ψυχρών επιφανειών, η οποία οδηγεί σε απόκλιση των ροϊκών γραμμών για κυμαινόμενους αριθμούς Ra και προσωρινή αποκόλληση για μεγάλους αρ. Ra ως συνέπεια των ισχυρών αρνητικών κλίσεων πίεσης.

Μια ακόμη από τις πρώτες έρευνες για την μεταφορά θερμότητας από μια κοιλότητα ευρισκόμενη μέσα σε στρωτή ροή έγινε από τον Chapman [24], ο οποίος υπέθεσε ότι η μεταφορά θερμότητας μέσα σε μια κοιλότητα εξαρτάται μονομερώς από τις ιδιότητες μεταφοράς που έχει το διατμητικό στρώμα κατά μήκος του. Οι Charwat et al. [25] εισήγαγαν ένα "Μοντέλο Ανταλλαγής Μάζας (Mass Exchange Model)" για να προβλέψουν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και απέδειξαν πως αυτός είναι ανάλογος του $(\rho_{\infty} * U_{\infty})^{0.6}$. Όπου ρ_{∞} η πυκνότητα και U_{∞} η ταχύτητα της ελεύθερης ροής. Το ίδιο αποτέλεσμα υποστηρίχθηκε και από τον Larson [26] αλλά όχι και από τους Seban and Fox (1963) [27] οι οποίοι απέδειξαν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι ανάλογος του $(\rho_{\infty} * U_{\infty})^{0.8}$.

Βρέθηκε από τον Seban [28] πως η μεταφορά θερμότητας για ρηχές κοιλότητες (μικρός λόγος βάθους προς πλάτος και ίσως με 0,21 έως 0,50), το διατμητικό στρώμα συνεισέφερε λίγο στην ολική αντίσταση για την μεταφορά θερμότητας. Απεναντίας η κύρια αντίσταση προκαλούνταν κοντά στην επιφάνεια του πατώματος της κοιλότητας όπου η διαχυτότητα των δινών είναι αρκετά μικρότερη από εκείνης της περιοχής ανάστροφης ροής.

Από τον Gooray et al. [29] βρέθηκε ότι οι υψηλότεροι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας συμβαίνουν στο κατάντη της ροής τοίχωμα της κοιλότητας.

Οδικές Χαράδρες

Σχετικά με την επίδραση που έχει η ροή του ανέμου στις οδικές χαράδρες συνεπώς επαγωγικά και στις κοιλότητες, από διάφορους ερευνητές διαπιστώθηκαν τα εξής:

Το κλίμα των οδικών χαράδρων ελέγχεται κυρίως από τις μικρομετεωρολογικές επιδράσεις της αστικής γεωμετρίας παρά τις μέσης κλίμακας δυνάμεις που ελέγχουν το κλίμα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Hunter et al. [30]).

Οι Sotiris Vardoulakis, Bernard E.A. Fisher, Koulis Pericleous and Norbert Gonzalez-Flesca [15] συμπέραναν πως μια καθαρή διάκριση θα έπρεπε να γίνει μεταξύ του ατμοσφαιρικού αέρα πάνω από τις σκεπές των κτιρίων (synoptic) και της τοπικής ροής ανέμου (local wind flow) μέσα στην οδική χαράδρα. Εξαρτώμενες από την ελεύθερη ροή του αέρα πάνω από την πόλη μπορούν να αναγνωριστούν τρεις βασικές καταστάσεις διασποράς:

- α) συνθήκες ανέμου χαμηλής εντάσεως ($<1,5\text{ m/s}$),
- β) ροή κάθετη προς την χαράδρα (με $u > 1,5\text{ m/s}$) φυσώντας υπό γωνία $>30^\circ$ ως προς τον άξονα της χαράδρας και
- γ) παράλληλη ή σχεδόν παράλληλη ροή για ανέμους με $u > 1,5\text{ m/s}$ που φυσούν από όλες τις άλλες κατευθύνσεις.

Στην περίπτωση της κάθετης ροής, η προς τον άνεμο πλευρά της χαράδρας καλείται *leeward* ή *winward* και η άλλη *downward* (ή *winward*).

Πειράματα οπτικοποίησης της ροής έχουν δείξει πως το μέγεθος της έντασης των δινών ποικίλει. Ως αποτέλεσμα οι μολυντές εκβάλλονται έξω από την χαράδρα περιοδικά (Pavageou et al., [31]). Σε σχετικά μακρές οδικές χαράδρες οι επιτόπιες μετρήσεις έχουν δείξει πως οι μέγιστες συγκεντρώσεις στο επίπεδο του δρόμου είναι πιθανότερο να συμβούν, όταν η ελεύθερη ροή του ατμοσφαιρικού αέρα πάνω από την οδική χαράδρα είναι παράλληλη στον άξονα της οδού (Vardoulakis et al., [15]). Σε αυτή την περίπτωση η συσσώρευση των εκπομπών κατά μήκος της γραμμικής πηγής (που είναι ο δρόμος με την κυκλοφορία του) εξακολουθεί τον εξαερισμό που προκαλείται από τους παράλληλους ανέμους (Soulhac et al.,; Dabberdt and Hoydysh,) [17].

Χαμηλής έντασης ατμοσφαιρικοί άνεμοι δημιουργούν μια πολύ γνωστή μετεωρολογική κατάσταση η οποία ευνοεί την αύξηση της ατμοσφαιρικής μόλυνσης στις αστικές περιοχές (Qin and Kot, [32]; Vignati et al., [33]; Jones et al., [34]). Υπάρχουν στοιχεία πως όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει ταχύτητα κάτω από περίπου $1,5\text{ m/s}$, η δίνη που δημιουργείται μέσα στη χαράδρα τείνει να εξαφανιστεί και ο αέρας "λιμνάζει" μέσα στην οδό (DePaul and Shein,[35]). Σε αυτή την περίπτωση η τεχνητή τύρβη που δημιουργείται από την κίνηση των αυτοκινήτων ταυτόχρονα με την στατικότητα του υπερκείμενου μέσα στη χαράδρα αέρα, ίσως παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην διασπορά των ρύπων που δημιουργούνται.

Τα μικρά, και ιδιαίτερα τα πολύ μικρά σωματίδια, αναμένεται να διασπαρούν σαν αεροζόλ. Τα μεγαλύτερα σωματίδια, εξάλλου, επηρεάζονται περισσότερο από την βαρύτητα και συνεπώς έχουν μικρότερο χρόνο παραμονής στον αέρα (Chan and Kwok,[36]). Για αυτόν τον λόγο, τα βαρύτερα κλάσματα του συνόλου των ρύπων δημιουργούν μεγαλύτερες κατακόρυφες συγκεντρώσεις από αυτές που συνήθως παρατηρούνται για ελαφρά σωματίδια.

Εναπόθεση ρύπων

Εξάλλου λόγω των πολύ μικρών αποστάσεων μεταξύ των πηγών (εξατμίσεις) και των αποδεκτών (κτίρια-άνθρωποι), μόνο οι πολύ γρήγορες χημικές αντιδράσεις θα έχουν μια σημαντική επιρροή στις μετρήσεις συγκέντρωσης ρύπων μέσα στις οδικές χαράδρες (Bercowicz et al., [33]). Για αυτό το λόγο οι περισσότεροι ρυπαντές που οφείλονται στην κυκλοφορία, μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά αδρανή είδη μέσα σε αυτές τις αποστάσεις των οδικών χαράδρων. Βέβαια δεν ισχύει το ίδιο και για το NO_2 , το οποίο διασπάται εξαιρετικά γρήγορα παρουσία φωτός, ή για το NO , το οποίο επίσης αντιδρά πολύ γρήγορα με το O_3 (Palmgren et al., [53]). Οι κλίμακες χρόνου για αυτές τις αντιδράσεις είναι της τάξης των δεκάδων δευτερολέπτων, έτσι είναι συγκρίσιμα με τους χρόνους εκπομπής των ρύπων μέσα στην οδική χαράδρα.

Αναμένεται πως η σχέση μεταξύ των σχετικά σταθερών χημικών ενώσεων που εκπέμπονται με τα καυσαέρια των αυτοκινήτων δεν θα ποικίλει σημαντικά μέσα στις αστικές οδούς. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο για επιδημιολογικές μελέτες, επειδή μόνο λίγοι ανιχνευτές

μπορούν να τοποθετηθούν για εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού στην ατμοσφαιρική μόλυνση τη σχετιζόμενη με την κυκλοφορία (Kingham et al., [54]).

Επίσης σημαντική συσχέτιση βρέθηκε ανάμεσα στα καυσαέρια της κυκλοφορίας (CO, NOx) και στα πολύ μικρά σωματίδια τα οποία ανιχνεύθηκαν σε μια οδική χαράδρα στην Κοπεγχάγη (Wahlin et al., [55]). Πράγμα που υποδηλώνει πως η κυκλοφορία είναι η κύρια πηγή εκπομπής καυσαερίων στον αέρα των πόλεων.

Κατακόρυφα προφίλ

Έχει εισηγηθεί από πολλούς ερευνητές πως τα προφίλ κατακόρυφης συγκέντρωσης σε μια οδική χαράδρα ικανοποιούν τον νόμο της εκθετικής μείωσης με το ύψος (Capanalli et al.,; Huang,; Dabberdt and Hoydysh,; Zoumakis,; Vardoulakis et al.,)[15], αν και πολύπλοκα μοτίβα εξαρτώμενα από την πλευρά της οδού, την απόσταση από τους τοίχους και τις διαμορφώσεις των κτιρίων, μπορούν να παρατηρηθούν.

Η οπτικοποίηση ροής που έγινε σε κοιλότητες από τους Walter F. Dabberdt et al. [17], έδειξε χρήσιμα αποτελέσματα, όπως:

Για γωνίες ανεμόπτωσης από 0° έως 60° το φαινόμενο που επικρατεί είναι μια ελλειπτική κυκλοφορία δίνης η οποία περιστρέφεται με το ζενίθ της στην κατεύθυνση της ατμοσφαιρικής ροής αέρα με μια περιφερειακή ταχύτητα ίση με το ¼ αυτής της ατμόσφαιρας. Παρατηρήθηκε (μετά από ανάλυση μαγνητοσκόπησης) πως το 90% των σωματιδίων εξέρχεται της κοιλότητας κατά την δεύτερη περιστροφή μέσα σε αυτή. Γενικά κανένα σωματίδιο δεν φάνηκε να κάνει περισσότερες από 5 περιστροφές πριν βγει. Επίσης παρατηρήθηκε ότι, καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης της ατμοσφαιρικής ροής, η αντίστοιχη γωνία μέσα στην κοιλότητα δεν αυξάνει στο ίδιο ποσό αλλά λιγότερο. Ακόμα η περιστροφική ταχύτητα της δίνης είναι σχετικά ανεπηρέαστη στις μεταβολές της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου. Επιπροσθέτως η κυκλοφορία της δίνης δεν μένει σταθερή αλλά περιοδικά καταστρέφεται. Την στιγμή εκείνη το κενό της κοιλότητας γεμίζει ή αδειάζει ολοκληρωτικά από τα σωματίδια με μια προς τα πάνω κίνηση.

2.4 ΕΞΩΓΕΝΕΙΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται όσοι παράγοντες δεν έχουν απόλυτη σχέση με την γεωμετρία ή την μορφή-χαρακτήρα της ροής. Είναι οι επιδράσεις που υφίσταται η κοιλότητα από το γειτονικό της περιβάλλον, όπως οι πλαϊνές οδοί ή ο υπερκείμενος ατμοσφαιρικός αέρας.

Η ένταση των δινών μέσα στις οδικές χαράδρες, εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του αέρα πάνω από αυτές. Εξάλλου, η τοπική ροή αέρα επηρεάζεται επίσης από την τεχνητή τύρβη που εισάγεται από τα κινούμενα οχήματα (Eskridge and Rao, [56]) ή δημιουργείται κοντά σε στοιχεία τραχύτητας μέσα στην οδό (π.χ. δέντρα, κιώσκια, μπαλκόνια, επικλινείς σκεπές, κτλ.) (Hoydysh and Dabberdt, [57]; Theurer, [45]). Επιπλέον, το σχήμα και η ένταση των δινών ίσως να επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική σταθερότητα και άλλα θερμικά φαινόμενα τα οποία προκαλούνται από την διαφορετική θέρμανση των τοίχων και της επιφάνειας του δρόμου της χαράδρας (Sini et al., [59]; Kim and Baik, [58]).

Μια σειρά πειραμάτων ρευστομηχανικής μοντελοποίησης διεξήχθη από τους Walter F. Dabberdt et al. [17], με σκοπό την εξερεύνηση της ευαισθησίας των συγκεντρώσεων στις οδικές χαράδρες στα διάφορα σχήματα των κτιρίων και των εισρεόμενων ρύπων από τις εφαπτομενικές οδούς.

Από τους παραπάνω ερευνητές αποδείχθηκε πως ο μηχανισμός που μεγιστοποιεί την συγκέντρωση μέσα στην οδό είναι οι δίνες από τους εφαπτομενικούς δρόμους που μεταφέρουν τους ρύπους προς το εσωτερικό της. Μετά την σύγκλισή τους οι ρύποι από τις αντικείμενες της οδικής χαράδρας οδούς, οδεύουν προς τα πάνω. Για την περίπτωση της παράλληλης ροής του αέρα στην οδό, η μέγιστη συγκέντρωση ρύπων είναι ανάλογη με την περίπτωση που φυσά ο αέρας κάθετα.

Είναι αρκετά φανερό πως οι εκπομπές από τις πλαϊνές οδούς συνεισφέρουν σημαντικά στην ολική συγκέντρωση ρύπων μέσα στην οικοδομική χαράδρα (το οποίο ισχύει για πλατιές και για στενές οδούς). Αυτή η συνεισφορά είναι σημαντική (>15%) για γωνίες ανεμόπτωσης μεγαλύτερες των 20° (90° αντιστοιχούν σε παράλληλη ροή). Αυτές οι συνεισφορές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν προσπαθούμε να προβλέψουμε τις επιδράσεις νέων αυτοκινητοδρόμων ή έμμεσων πηγών ρύπανσης σε ήδη υπάρχοντες μεγάλους δρόμους, όπου έστω και μικρή αύξηση των εκπομπών CO είναι αρκετή για να απορριφθεί μια ωραία ιδέα.

2.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ – ΣΤΗΣΙΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων (βλ. Holroyd)[14] φάνηκε πόσο σημαντικό είναι να έχει δημιουργηθεί σωστή μορφή της ροής του αέρα πριν προσπέσει στο υπό κλίμακα μοντέλο. Και ιδίως η τύρβη της, καθώς αυτή μπορεί σοβαρά να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Επίσης οι συχνά ξεχασμένες παράμετροι της ασυμμετρίας και της επιπεδότητας, μπορούν συχνά να κρύβουν πολύ σημαντικότερη πληροφορία για την διαμόρφωση της ροής από όση νομίζουμε. Ακόμα όταν η τραχύτητα ενός μοντέλου είναι παρούσα, είτε λόγω υλικού κατασκευής, είτε εισάγεται από εμάς, το ερώτημα, πόσο επιδρά αυτή στην κατανομή πιέσεων που δημιουργείται στην επιφάνεια του, δεν φαίνεται να έχει εκτιμηθεί ιδιαίτερα από αρκετούς ερευνητές-πειραματιστές.

Τέλος πολλά από τα πειραματικά αποτελέσματα εξήχθησαν από ένα ακλόνητο μοντέλο. Το πώς όμως οι μετρήσεις κοντά στην επιφάνεια επηρεάζονται από την κίνηση της επιφανείας του μοντέλου είναι κάτι που θα πρέπει να μας προβληματίζει.

Μελέτες οδικών χαράδρων

Πολλές μελέτες σε επίπεδο εξομοίωσης της ροής σε Η/Υ μέσω CFD (Computational Fluid Dynamics) αλλά και πειράματα σε αεροσήραγγες έχουν γίνει στο παρελθόν και γίνονται και σήμερα, με σκοπό την ανάλυση του τρόπου που συμπεριφέρεται η ροή του αέρα μέσα σε μια οδική χαράδρα αλλά και γενικότερα μέσα σε μια κοιλότητα.

Προσπαθούμε να δούμε πως διασπείρονται οι ρυπαντές και ποια είναι τα μοτίβα που ακολουθούν αυτές οι διασπορές. Εξαρτώμενες πάντα από τους αντικειμενικούς τους στόχους οι έρευνες έχουν διαφορετικές τεχνικές μοντελοποίησης και παρακολούθησης των φαινομένων. Κάποιες από αυτές είναι καθαρά πειραματικές, το οποίο σημαίνει πως βασίζονται αποκλειστικά σε πλήρη ή υπό κλίμακα μετρήσεις. Σε αντίθεση άλλες είναι καθαρά θεωρητικές οι οποίες κυρίως εστιάζονται στην μελέτη διαφορετικής έντασης ανέμων και διασποράς ρυπαντών χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα εξισώσεων. Συνήθως όμως οι μελέτες για τις οδικές χαράδρες συνδυάζουν τα δύο προαναφερθέντα πεδία. Πρόσφατα το Ευρωπαϊκό δίκτυο έρευνας TRAPOS (Optimization of Modelling Methods for Traffic Pollution in Streets), έδωσε νέα διάσταση στην έρευνα των οδικών χαράδρων σε τομείς όπως:

Η επίδραση των κινούμενων αυτοκινήτων στην διασπορά των ρυπαντών και της τύρβης στις αστικές οδούς (Kastner-Klein et al., [60], [61]; Vachon et al., [62])

Οι θερμικές επιδράσεις στην ροή και στην διασπορά μέσα στις οδικές χαράδρες, ειδικά κάτω από συνθήκες ασθενών ανέμων (Kovar-Panskus et al., [63]; Louka et al., [64]);

Η ευαισθησία της ροής του αέρα και των τυρβωδών χαρακτηριστικών της στην γεωμετρία της οδού και των κτιρίων που την περιβάλλουν (Kovar-Panskus et al., [63], Kastner-Klein and Rotach, [65]; Leitl et al., [66]; Chaveut et al., [67];)

Η διασπορά και ο μετασχηματισμός των σωματιδίων που σχετίζονται με τις εκπομπές της κυκλοφορίας (Le Bihan et al., [68]; Wahlin et al., [55]).

Η έρευνα του TRAPOS συμπεριλάμβανε εξωτερικές μετρήσεις επί τόπου και πειράματα σε αεροσήραγγες, ταυτόχρονα με μαθηματικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση προηγμένων αλγορίθμων Η/Υ όπως: MISKAM, CHENSI, MIMO, CFX-TASCflow και ενός απλούστερου παραμετρικού μοντέλου, του OSPM. Σημαντικό μέρος της ανωτέρω έρευνας ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε ερευνητή και η αξιολόγηση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν (Louka et al., [69]; Sahm et al., [70]; Ketzel et al., [71]).

Σε μια άλλη έρευνα, 24 ερευνητές από 21 διαφορετικά Πανεπιστήμια χρησιμοποίησαν μια ποικιλία μοντέλων για να προβλέψουν συγκεντρώσεις ρύπανσης για την ίδια οδική χαράδρα στο Ανόβερο της Γερμανίας. Από την μετέπειτα σύγκριση των αποτελεσμάτων, αποδείχθηκε πως υπήρχε μεγάλη ασυμφωνία στα αποτελέσματα. Κάτι που υποδηλώνει πως η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στο πείραμα είναι σημαντική, αλλά και η τήρηση κάποιων καθορισμένων κανόνων εκτέλεσης των πειραμάτων είναι αναγκαία.

Πειράματα πλήρους κλίμακας

Πολλά πειράματα έχουν γίνει και έξω από το μικροπεριβάλλον του εργαστηρίου και των αεροσηράγγων. Πιο συγκεκριμένα πολλοί ερευνητές έχουν κάνει μετρήσεις μέσα σε πραγματικές οδούς μεγαλουπόλεων όπου παρατηρούνται φαινόμενα έντονης τοπικής μόλυνσης της ατμόσφαιρας.

Όπως οι DePaul and Shein [35] που μέσω ενός αερίου-ανιχνευτή και μπαλονιών που αφέθηκαν στην οδική χαράδρα μιας πόλης του Σικάγο (Η.Π.Α.), μέτρησαν συγκεντρώσεις και μέσες ταχύτητες ανέμου. Ανάλογα οι Nakamura and Oke [43] μελέτησαν το κλίμα σε αστικές οδικές χαράδρες χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις που έγιναν στον άνεμο και στη θερμοκρασία μιας οδού στο Κιότο (Ιαπωνία). Επίσης οι Pfeffer et al. [72], παρουσίασαν μετρήσεις των εκπομπών NO₂, CO, benzene, αιθάλης και άλλων ρυπαντών, από δύο μεγάλης κυκλοφορίας οδικές χαράδρες στο Ντούσελντορφ (Düsseldorf) και στο Έσσεν (Essen) (Γερμανία), ως μια πιλοτική μελέτη που προετοίμαζε την υλοποίηση των νέων κανονισμών των Γερ-

μανικού Ομοσπονδιακού Σχεδίου για Καθαρή Ατμόσφαιρα. Επίσης έχουμε και από την Ελλάδα μας, ανάλογες ενέργειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι μετρήσεις της καθ' ύψος μεταβολής συγκέντρωσης του CO, οι οποίες έγιναν σε έναν υψηλής κυκλοφορίας δρόμο της Αθήνας από τον κ. Ζουμάκη [73]. Τα δεδομένα των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθεί μια εμπειρική έκφραση που θα συσχετίζε τις συγκεντρώσεις του CO συναρτήσει του ύψους πάνω από το έδαφος.

Μοντέλα Μειωμένης κλίμακας – Ιστορικό

Οι Leisen and Sobottka [74] έκαναν σύγκριση μεταξύ δύο παρατηρήσεων σε περιοχές δύο οδικών χαραδρών στην Κολωνία (Γερμανία) και πειραμάτων σε αεροσήραγγα με σκοπό να ερευνήσουν πώς γίνεται η διασπορά της μόλυνσης μέσα στις αστικές οδούς και να αναπτύξουν μοντέλα προσομοίωσης.

Οι Meroney et al. [75] παρουσίασαν μια μελέτη σε αεροσήραγγα της διασποράς ρύπων των εξατμίσεων των αυτοκινήτων από τις οδικές χαράδρες στο ευρύτερο αστικό περιβάλλον.

Αργότερα οι Pavageau and Schatzmann [31] διερεύνησαν την συγκέντρωση των διακυμάνσεων σε μια οδική χαράδρα υπό κλίμακα η οποία προσομοιώθηκε με το πρόγραμμα H/Y "BLASIUS". Πειραματικά δεδομένα για το ίδιο μοντέλο από πειράματα σε αεροσήραγγα χρησιμοποιήθηκαν για αξιολόγηση και επικύρωση των αποτελεσμάτων.

Η διαφορά μεταξύ των υπο κλίμακα και φυσικού μεγέθους πειραμάτων μελετήθηκε από τους Liedtke et al. [76], οι οποίοι σύγκριναν μετρήσεις περιοχών που έγιναν σε οδική χαράδρα στο Ανόβερο με αποτελέσματα μετρήσεων σε αεροσήραγγα. Μελετήθηκε η γενική επίδραση που έχει η χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου οδικής χαράδρας μέσα σε μια αεροσήραγγα, παίρνοντας μετρήσεις χρησιμοποιώντας μοντέλα διαφορετικής κλίμακας τα οποία συμπεριλάμβαναν ποικίλα επίπεδα λεπτομέρειας της πραγματικής γεωμετρίας της οδικής χαράδρας. Βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα.

Σε μια μεταγενέστερη μελέτη οι Schatzmann et al. [77] έδειξαν πως τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων σε αεροσήραγγα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συμπλήρωση και εμπλουτισμό των τιμών των πραγματικών μετρήσεων για σκοπούς αξιολόγησης των μοντέλων.

Ο Rafailidis [79] ερεύνησε την επίδραση της ατμοσφαιρικής θερμικής στρωματοποίησης στον εξαερισμό της οδικής χαράδρας στην αεροσήραγγα EnFlo του Πανεπιστημίου του Surrey (Μεγ. Βρετανία). Οι μετρήσεις έδειξαν πως σταθερές συνθήκες στρωματοποίησης έχουν ως αποτέλεσμα την παγίδευση των μολυντών μέσα στη χαράδρα. Σε ένα αριθμό άλλων ερευνών σε αεροσήραγγα (Rafailidis, [78], [80]) επισημάνθηκε η επίδραση της οικοδομικής πυκνότητας και του σχήματος των σκεπών – ταρατσών στο ροϊκό πεδίο πάνω και μέσα στην αστική καλύπτρα.

Οι Uehara et al., επίσης ερεύνησαν τις επιδράσεις της θερμικής στρωματοποίησης στην ροή του ανέμου μέσα και πάνω από τις οδικές χαράδρες χρησιμοποιώντας την αεροσήραγγα του Japanese National Institute for Environmental Studies (Ogawa et al., [81]). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δίνες του αέρα μέσα στη χαράδρα γίνονταν ασθενέστερες όταν η ατμοσφαιρικές συνθήκες ήταν σταθερές.

Οι Kastner-Klein και Plate [82] παρουσίασαν αποτελέσματα από πειράματα διασποράς ανιχνευτών που έγιναν σε αεροσήραγγα ενός ουδέτερα στρωματοποιημένου ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Η έρευνα έγινε στο Πανεπιστήμιο της Καρλσρούης (Institute of Hydrology and Water Resources). Εκεί μελετήθηκε η επιρροή της συστηματικής διαφοροποίησης των παραμέτρων (π.χ. διαμορφώσεις κτιρίων, σχήμα σκεπών, κατεύθυνση ανέμου, κτλ.).

Οι Gerdes and Olivari [83] μελέτησαν τις κατανομές της ροής του αέρα και της συγκέντρωσης των ρύπων μέσα στις οδικές χαράδρες (ακόμα και σε ασύμμετρες), κάτω από την επίδραση κάθετων ροών αέρα σε αυτές, στην αεροσήραγγα L-2B του Von Karman Institute στο Βέλγιο. Παρατηρήθηκε μια ισχυρή επίδραση του περιμετρικού τοπίου στην διασπορά

των ρύπων. Ο λόγος του ύψους των περιμετρικών κτιρίων της οδού βρέθηκε πως έχει μια σημαντική επίδραση στις κατανομές συγκέντρωσης των ρύπων, ενώ το πλάτος της οδού αποδείχθηκε πως είναι μικρότερης σπουδαιότητας.

Μοντέλα Μειωμένης κλίμακας

Η φυσική μοντελοποίηση στις αεροσήραγγες έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη στην διερεύνηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της διασποράς των ρύπων μέσα στην αστική καλύπτρα (π.χ. επίδραση της διαμόρφωσης των σκεπών, κινητά και ακίνητα εμπόδια, κτλ.). Επίσης τα πειράματα σε αεροσήραγγα αν και έχουν το πλεονέκτημα πως παρέχουν ελεγχόμενες συνθήκες διασποράς (π.χ. ταχύτητα ανέμου, σταθερότητα κτλ.), είναι σχετικά πιο ακριβά και δύσκολα να "στηθούν".

Οι πειραματικές μετρήσεις συνήθως χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση και επικύρωση των αποτελεσμάτων θεωρητικών μαθηματικών μοντέλων.

2.6 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ

Σε πολλές περιπτώσεις όμως υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας μιας κοιλότητας και της ελεύθερης ροής του ρευστού, όπως αποδεικνύεται και από την μελέτη του Y. Taniguchi [18]:

Σε μεγάλες κοιλότητες η τύρβη μπορεί να εισέρχεται σε αυτές από την εξωτερική ροή με συνέπεια στην μεταφορά της μάζας και της θερμότητας. Γι' αυτό και αυτή η έρευνα εστιάστηκε σε αυτό το φαινόμενο. Η διεξόδυση της τύρβης σε μεγάλα ανοίγματα (π.χ. όταν ανοίξουν οι διάφορες θυρίδες των αεροσκαφών κατά την πτήση) από παλιά ενδιέφερε την αεροδιαστημική βιομηχανία. Αλλά ελάχιστοι ερευνητές έχουν ασχοληθεί, όταν έχουμε κοιλότητες με άνοιγμα συγκρίσιμο με την κλίμακα της τύρβης. Όταν οι αριθμοί της εξωτερικής ροής είναι μεγάλοι, η τύρβη "γεννιέται" από την ίδια την κοιλότητα και δεν μπορεί κανείς να διακρίνει αν η τύρβη που παρατηρεί μέσα στην κοιλότητα οφείλεται στην ίδια ή στην εξωτερική ροή που διεισδύει. Γι' αυτό τον λόγο και η παρούσα έρευνα εστιάστηκε σε εξωτερική ροή με χαμηλούς αριθμούς Re της τάξης του 0,1 – 3. Οι κοιλότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαφόρων διατομών: κυλινδρικών, ορθογωνικών, τριγωνικών.

Τα αδιαστατοποιημένα διαγράμματα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης αυτής (RMS) δείχνουν ότι:

Στην περίπτωση των κυλινδρικών κοιλοτήτων η ροή μέσα τους είναι τρισδιάστατη. Μέσα στις ορθογώνιες κοιλότητες η ροή είναι σχεδόν δισδιάστατη με μια πρωτεύουσα δίνη περιστρεφόμενη με ωρολογιακή φορά (όταν ο αέρας κατευθύνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά). Για τις πλατύτερες ορθογώνιες κοιλότητες οι επιδράσεις των τοιχωμάτων τους εισάγουν μια τρίτη συνιστώσα ταχύτητας στη ροή.

Από το σύνολο των πειραμάτων φάνηκε πως σε όλες ανεξαιρέτως τις κοιλότητες η τύρβη εμφανίστηκε μέσα τους εκτός μόνο από την μικρότερη (πλάτους 2mm). Σημαντική εισροή τύρβης από την εξωτερική ροή υπήρξε σε όλες τις κοιλότητες με πλάτος από 4mm και πάνω. Τα ίδια πειράματα έγιναν με αφαίρεση του πλέγματος (grid) που "έφτιαχνε" εξωτερική ροή με τύρβη. Οι νέες μετρήσεις (σε κοιλότητες με πλάτος 4mm-6mm) και πάνω έδειξαν πως αν και οι τιμές του $r.m.s.$ της ταχύτητας μέσα στην κοιλότητα ήταν μία ή δυο τάξεις μεγέθους μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές με το πλέγμα, φάνηκε πως πάλι η τύρβη εισέρχεται μέσα στην κοιλότητα από την εξωτερική ροή παρά δημιουργείται μέσα στην κοιλότητα.

Από την Φασματοσκοπική Ανάλυση Ισχύος (P.S.D.) των φασμάτων των μετρήσεων παρουσιάζεται πως η κορυφή που αντιστοιχεί στην συχνότητα του χείλους της κοιλότητας

εμφανίζεται κάπως πιο ευρεία από τις κορυφές που αντιστοιχούν σε χαμηλότερα σημεία της κοιλότητας.

Μια απλή προσέγγιση της ικανότητας της τύρβης της εξωτερικής ροής να εισέρχεται σε μια κοιλότητα μπορεί να γίνει ως εξής: ένας λογικός μηχανισμός του ανωτέρω φαινομένου είναι η επαγωγή της τύρβης μέσα στην κοιλότητα από την μέση ταχύτητα της ροής. Από αυτό προκύπτει ότι μια δίνη με μήκος κλίμακας αρκετά μεγαλύτερο από το άνοιγμα της κοιλότητας είναι ανίκανη να διεισδύσει σε αυτή. Το μέγεθος δίνης κατά Prandtl μπορεί να δοθεί από την σχέση: (από J.T.Davies, "Turbulence Phenomena", pp. 14-22, Academic Press, New York, 1972)

$\text{Μήκος Δίνης} = \text{Διακύμανση ταχύτητας} / \text{Συχνότητα τύρβης} \rightarrow$

Δηλαδή: $\boxed{\text{Μήκος Δίνης} = U_{\text{RMS}} / f_{\text{P.S.D.}}}$

Από τα πειραματικά δεδομένα $f_{\text{P.S.D.}} = 50\text{Hz}$ και μια αντιπροσωπευτική ταχύτητα στο χείλος των κοιλοτήτων είναι: $0,1\text{m/s}$. Έτσι λοιπόν από τον παραπάνω τύπο έχουμε $\text{Μήκος Δίνης} = 0,1 / 50 = 0,002\text{m} = 2\text{mm}$. Τα πειράματα έδειξαν πως η τύρβη είχε διεισδύσει σε κάποια έκταση στην κοιλότητα πλάτους 4mm και στην κοιλότητα πλάτους 2mm σε ακόμα μικρότερη έκταση, αλλά ολοσχερώς είχε διεισδύσει σε κοιλότητες πλάτους 6mm και πάνω. Αυτά έρχονται σε συμφωνία με το θεωρητικό τύπο και την εξήγηση που δόθηκε.

Συνεπώς τα αποτελέσματα δηλώνουν πως η τύρβη της εξωτερικής ροής μπορεί να διεισδύσει στην κοιλότητα όταν το μήκος κλίμακας Prandtl της δίνης είναι μικρότερο από το πλάτος του χείλους της κοιλότητας.

Μεταφορά Θερμότητας

Από τους Maull and East [84] βρέθηκε πως για λόγους μήκους προς ύψος κοιλότητας μεγαλύτερους του 9 και για aspect ratio μεγαλύτερους του 2,5 υπάρχει δισδιάστατη ροή μέσα στην κοιλότητα.

Οι Richards et al. [21] ερεύνησαν πειραματικά την μεταφορά θερμότητας σε ροή πάνω από βαθιές τρισδιάστατες κοιλότητες και αποδείχθηκε πως με την χρήση του όρου "ταχύτητα κοιλότητας" τα δεδομένα από κοιλότητες διαφορετικών aspect ratios μπορούν να συσχετιστούν. Η ροή μέσα στις τεσσάρων διαφορετικών aspect ratios κοιλότητες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν τρισδιάστατη καθώς δεν πληρούνταν οι όροι της υπόθεσης των Maull and East.

Τα αποτελέσματα

Έγιναν διαγράμματα του μέσου αριθμού Nu_w συναρτήσει του αριθμού Re_w . Από αυτά φάνηκε πως ο Nu_w αυξάνει με την αύξηση του αριθμού Re και με την ελάττωση του aspect ratio των κοιλοτήτων. Επίσης η μετάβαση από στρωτή ροή σε τυρβώδη γινόταν για κάθε κοιλότητα στο χαμηλότερο αριθμό Re της περιοχής αρ. Re_w αυτής. Η κλίση των ευθειών που προσέγγισαν την παραπάνω γραφική παράσταση για κάθε κοιλότητα κυμαινόταν από 0,5 σε 0,8.

Παρατηρήθηκε πως οι επιδράσεις της τρισδιάστατης ροής λίγο επηρέασαν την σχέση του αριθμών Nu_w και Re_w . Η σχέση που προσεγγίζει τη γραφική παράσταση των Nu_w και Re_w βρέθηκε πως είναι:

$$Nu_w = 0.0255 * Re_w^{0.8} * (H/W)^{-0.2} * (1 + C \sqrt{1 + 2 * (H/W)})^{-0.8}$$

με ένα σφάλμα της τάξης του 8%.

Όπου:

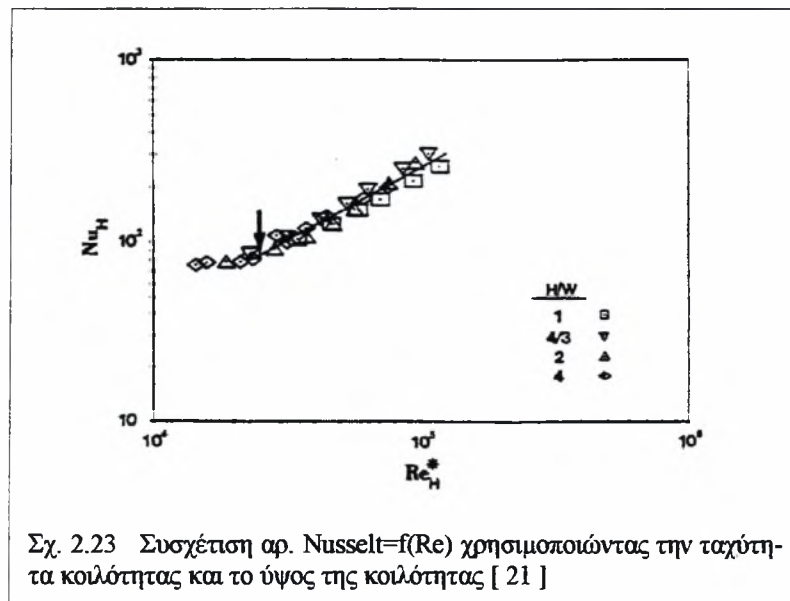
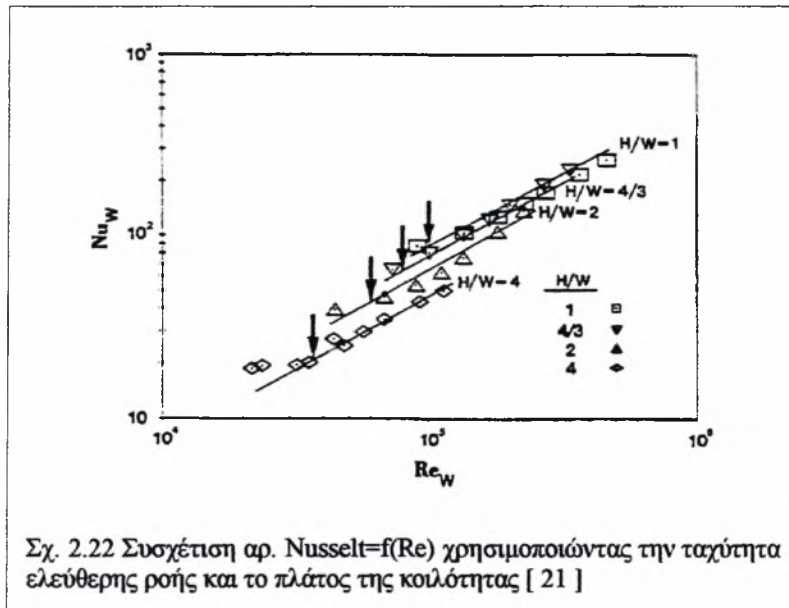
H =το βάθος της κοιλότητας

W =το πλάτος της κοιλότητας και

$$C = \sqrt{\frac{C_{BL}}{C_{ML}}}$$

με C_{BL} = ο συντελεστής τριβής για το οριακό στρώμα στις εσωτερικές επιφάνειες της κοιλότητας, κατακόρυφες και οριζόντιες.

και C_{ML} = ο συντελεστής τριβής για το στρώμα ανάμειξης στην είσοδο της κοιλότητας



3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις μας αποτελείται από τα εξής:

- Αεροσήραγγα
- Όργανα Μετρητικά – Επεξεργασίας – Αποθήκευσης
- Μηχανήματα και Συσκευές
- Μοντέλα

3.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

3.1.1 Αεροσήραγγα

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η αεροσήραγγα του Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β. του Π.Θ. Είναι αεροσήραγγα «ανοιχτού κυκλώματος» και λειτουργεί με αναρρόφηση. Ένας τετράφυλλος ανεμιστήρας τοποθετημένος στο εσωτερικό της περιοχής εξόδου, συνδεδεμένος με τριφασικό ηλεκτροκινητήρα που ρυθμίζει τις στροφές του μέσω ενός Inverter, δημιουργεί την ροή του αέρα μέσα στην αεροσήραγγα. Η ροή είναι από την εισαγωγή αέρα της αεροσήραγγας προς τον ανεμιστήρα. Στο σχέδιο της επόμενης σελίδας φαίνεται η αεροσήραγγα. Η διατομή της στο χώρο μετρήσεων είναι ορθογωνική. Τα επιμέρους τμήματά της είναι:



Σχ. 3.1 Φωτογραφία της αεροσήραγγας και ορισμένων από τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν

3.1.1.1 Εισαγωγή αέρα

Είναι μειούμενης ορθογωνικής διατομής (110cm x 240cm) η οποία στο τέλος έχει τις διαστάσεις της διατομής του χώρου μετρήσεων. Μπροστά στην εισαγωγή υπάρχει ο ευθυγραμμητής, που περιλαμβάνει περίπου 66000 κυψέλες, από φύλλο μετάλλου εσωτερικής διαμέτρου 5mm. Ο ευθυγραμμητής έχει σκοπό να εξουδετερώσει τυχόν κλίσεις ταχύτητας που μπορεί να υπάρξουν στην είσοδο του αέρα στην αεροσήραγγα και να "φτιάξει" οριζόντιες ταχύτητες.



Σχ. 3.2 Η εισαγωγή αέρα της αεροσήραγγας

3.1.1.2 Περιοχή μετρήσεων (test section)

Το τμήμα της αεροσήραγγας όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αποτελείται από τα εξής:

Σκελετός:

Τέσσερις οριζόντιοι δοκοί ορθογωνικής διατομής στις γωνίες των πλευρών σχηματίζουν τέσσερα πλαίσια. Στη μέση του μήκους από κάθε πλαίσιο υπάρχουν εγκάρσιες δοκοί ίδιας διατομής που συνδέουν τις διαμήκεις δοκούς μεταξύ τους. Το πλάτος κάθε δοκού είναι 5cm.

Πλαίσια:

Στα δύο πλαϊνά και στο κάτω πλαίσιο, που σχηματίζουν οι δοκοί, έχουν στερεωθεί τοιχώματα από plexiglass πάχους 20mm. Έτσι είναι εύκολη η οπτική παρατήρηση του πειράματος και δυνατή η μαγνητοσκόπηση της οπτικοποιημένης ροής για περαιτέρω επεξεργασία.

Στο πάνω πλαίσιο το τοίχωμα αποτελείται από 11 ξύλινες πλάκες, οι οποίες μπορούν να ολισθαίνουν στις δύο ειδικά διαμορφωμένες ράγες που βρίσκονται σε κάθε μια από τις πάνω διαμήκεις δοκούς, και να αποσπώνται αφήνοντας ελεύθερο όλο τον χώρο του πλαισίου για πρόσβαση στον χώρο μετρήσεων. Μέσω αυτού του ανοίγματος τοποθετούσαμε τα μοντέλα μας και τα παρελκόμενά τους στο χώρο μετρήσεων. Στη συνέχεια σφραγίζονταν τα καπάκια αφήνοντας ένα μικρό άνοιγμα μέσα από το οποίο διέρχονταν οι αισθητήρες μας (Hot-wire, Cold-wire, Pitot-Static). Ότι δεν μπορούσε να κλειστεί από τις πλάκες το σφραγίζαμε με κολητική ταινία προσέχοντας να μην βρίσκεται σε επαφή με τους αισθητήρες και τους μεταδίδει τις ταλαντώσεις του πλαισίου της αεροσήραγγας.

Διαστάσεις χώρου μετρήσεων (test section):

Οι εσωτερικές διαστάσεις του χώρου μετρήσεων είναι $M \times \Pi \times Y : 2500\text{mm} \times 520\text{mm} \times 735\text{mm}$.

Παρατηρήσεις:

Λόγω της ανάγκης στήριξης των μοντέλων μέσα στο χώρο μετρήσεων ήταν αναγκαίο να ανοιχτούν κάποιες οπές στα τοιχώματα από plexiglass για να περάσουν οι βίδες / πείροι συγκράτησης, αλλά και τα δύο καλώδια παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στην αντίσταση της κοιλότητας. Οι οπές που έγιναν πραγματοποιήθηκαν κατόπιν μεγάλης σκέψης και ανταλλαγής απόψεων τόσο με τη ομάδα όσο και με τους επιβλέποντες καθηγητές μας. Συνολικά υπήρξε ανάγκη για 11 οπές διαμέτρου 3mm. Για την στήριξη των διαφόρων μοντέλων έγιναν 9 καινούργιες οπές στα πλαϊνά τοιχώματα και χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον δύο υπάρχουσες στο κάτω τοίχωμα για την διέλευση των καλωδίων. Αξίζει να σημειωθεί πως στα τοιχώματα προϋπήρχαν και άλλες οπές (μικρότερες / μεγαλύτερες) οι οποίες ήταν απόρροια άλλων προγενεστέρων πειραμάτων από άλλες διπλωματικές εργασίες. Αυτές κλείστηκαν με προσοχή έτσι ώστε να μην επηρεάζουν την διαμόρφωση της ροής.



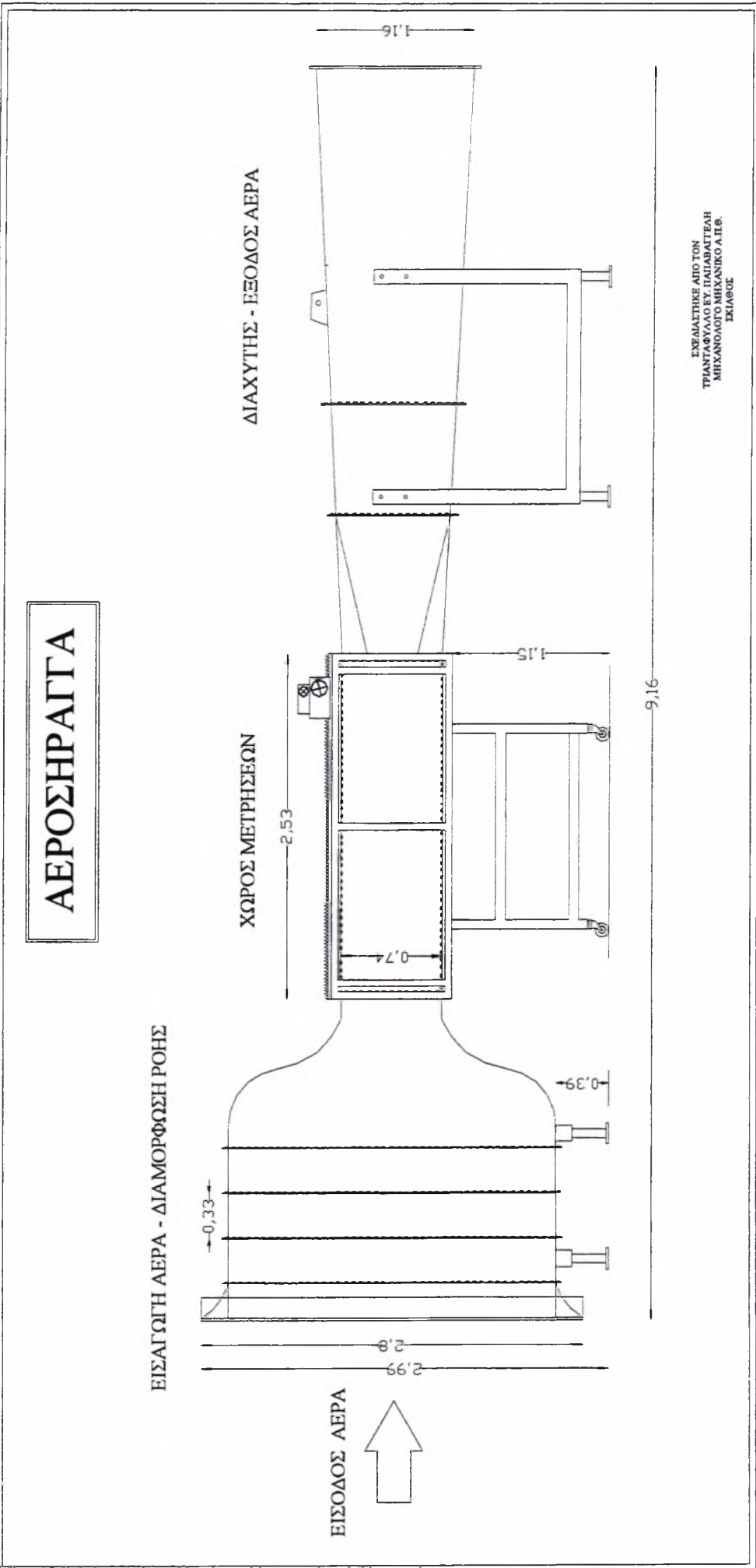
Σχ. 3.3 Η κοιλότητα στερεωμένη ανάμεσα στις δυο πλάκες, μέσα στο χώρο μετρήσεων

3.1.1.3 Διαχύτης – Ανεμιστήρας

Στον διαχύτη έχουμε αύξηση της πίεσης και μείωση της ταχύτητας. Στην συνέχεια υπάρχει ο ανεμιστήρας ο οποίος εδράζεται στον ηλεκτροκινητήρα και φέρει τέσσερα (4) μεταλλικά πτερύγια στερεωμένα στον άξονα του ρότορα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι ασύγχρονος τριφασικός, ονομαστικής ισχύος 7,5 kW, τροφοδοτούμενος από τριφασικό ρεύμα 380Volts μέσω του μετατροπέα της συχνότητας του ρεύματος (Inverter). Ο ηλεκτροκινητήρας είναι στερεωμένος στο εσωτερικό της αεροσήραγγας μέσω τριών (3) μεταλλικών ορθογωνικών ελασμάτων σχήματος αεροτομής, που βρίσκονται πίσω από τον ανεμιστήρα ώστε να μην επηρεάζουν (ίσως) την ροή του αέρα που δημιουργείται.

Στις σελίδα που ακολουθεί υπάρχει σχέδιο της αεροσήραγγας και του χώρου μετρήσεων αυτής.

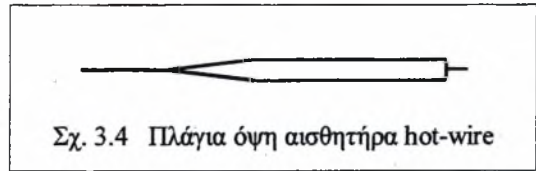
Η ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ Π.Θ.



3.1.2 Όργανα Μετρητικά – Επεξεργασίας – Αποθήκευσης

3.1.2.1 Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (hot-wire anemometer C.T.A.)

Το ανεμόμετρο (ή ηλεκτρονική συσκευή που λαμβάνουμε το σήμα) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ταχύτητας του αέρα στην αεροσήραγγα. Ο αισθητήρας του ανεμομέτρου αποτελείται από δύο ευθύγραμμες μεταλλικές ακίδες σε σχήμα V. Αυτές οι ακίδες ξεκινούν μέσα από ένα λευκό μονωτικό περίβλημα. Στο τέλος (σχεδόν) των ακίδων και κάθετα σ' αυτές υπάρχει κολλημένο ένα πάρα πολύ λεπτό σύρμα, το 'θερμό σύρμα', που έχει διάμετρο $5\ \mu\text{m}$ ($5 \cdot 10^{-6}\ \text{m}$) και αποτελείται από τανγκστένιο. Ο αισθητήρας αυτός συνδεόταν με ανεμόμετρο (ενισχυτή) DISA για σημειακές μετρήσεις στο πεδίο ροής.



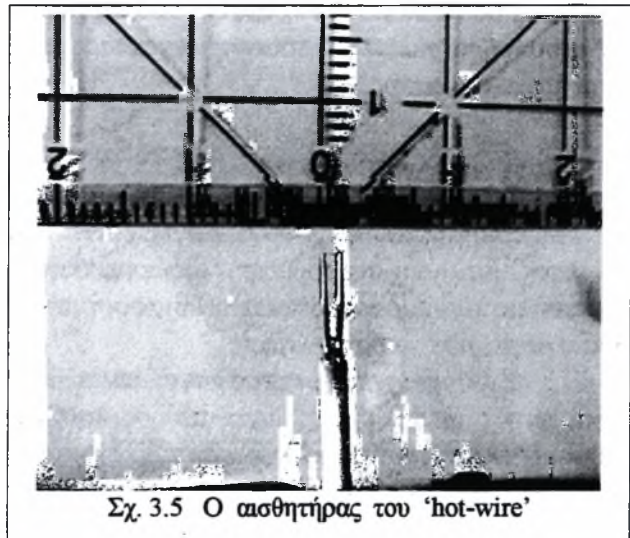
Σχ. 3.4 Πλάγια όψη αισθητήρα hot-wire

Ο τύπος του ανεμομέτρου που χρησιμοποιήθηκε είναι DISA, TYPE 55M01 MAIN UNIT & TYPE 55M10 CTA STANDARD BRIDGE. Ο αισθητήρας hot-wire ήταν της DANTEC τύπος DISA 55P11.

Η αντίσταση του σύρματος εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση) και από την συγκόλληση. Οι τιμές αντίστασης που παρουσιάστηκαν στις μετρήσεις μεταβάλλονταν από $3,65\ \Omega$ έως $4,64\ \Omega$.

Η μεταβολή της αντίστασής του είναι περίπου $0,36\% / ^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία λειτουργίας έχει οριστεί από τον κατασκευαστή μικρότερη από $300\ ^\circ\text{C}$ (συνήθως είναι $180 - 200\ ^\circ\text{C}$).

Τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος παρέχουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για την βαθμονόμησή τους με τη μορφή γραφικών παραστάσεων, έτσι ώστε η ταχύτητα του αέρα να μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από τις μέσες τιμές τάσης ή ρεύματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν μεγάλο εύρος ταχυτήτων, από πολύ μικρές (π.χ. $0,03\text{m/s}$) έως υπερηχητικές. Μπορεί να είναι σχετικά ακριβότερα από τους σωλήνες Pitot αλλά έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία και μπορούν να μετρούν ροές που είναι ασταθείς. Χάρης την πολύ μεγάλη τους ευαισθησία μπορούν και ανιχνεύουν την συχνότητα των διακυμάνσεων της ροής.



Σχ. 3.5 Ο αισθητήρας του 'hot-wire'

Αρχή λειτουργίας του hot-wire:

Το ανεμόμετρο αποτελείται από ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone (C.T.A.) στην οποία το hot-wire είναι η μια αντίσταση από τις τέσσερις. Η αρχή λειτουργίας στην οποία στηρίζεται είναι το ότι αν γύρω από ένα θερμό σώμα ρέει ένα αέριο, το θερμό σώμα θα ψυχθεί και επομένως ο ρυθμός ψύξης του σχετίζεται με την ταχύτητα του αερίου. Η συσκευή του ανεμομέτρου ρυθμίζει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στα άκρα της αντίστασης του σύρματος, έτσι ώστε να διατηρείται πάντα σταθερή η θερμοκρασία του. Για αυτό και ονομάζεται Ανεμόμετρο Σταθερής Θερμοκρασίας (Constant Temperature Anemometer). Συνεπώς όσο πιο πολύ ψυχθεί \rightarrow πιο έντονη αποβολή θερμότητας με συναγωγή \rightarrow τείνει η θερμοκρασία του σύρματος να ελαττωθεί λόγω της ψύξης. Επομένως θα προκληθεί αλλαγή της έντασης I , του ρεύματος στα άκρα της αντίστασης του hot-wire, καθώς "προσπαθεί" η γέφυρα Wheatstone να επαναφέρει το σύρμα στην θερμοκρασία λειτουργίας του ($200\ ^\circ\text{C}$) (από τον

τύπο: $P = I^2 * R$ με $R = \text{const.}$) Έτσι υπάρχει μια συσχέτιση της έντασης του ρεύματος με την ταχύτητα του αέρα.

Όταν η γέφυρα Wheatstone ηρεμεί, τότε το σύρμα έχει την αντίσταση που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή ως αντίσταση λειτουργίας (αντιστοιχεί συνήθως σε θερμοκρασία 180 - 200 °C).

Από την μεταβολή της έντασης του ρεύματος παράγεται μια διαφορά δυναμικού η οποία "διαβάζεται" από τον H/Y και αντιστοιχείται στην ταχύτητα με ένα ειδικό λογισμικό στον H/Y (LABVIEW της National Instruments), το οποίο στην δική μας περίπτωση υπολογίζει την μέση τιμή της ταχύτητας και της τύρβης από την λήψη των δεδομένων από το ανεμόμετρο, η οποία γινόταν με PC μέσω κάρτας Analog-Digital και με σταθερές δειγματοληψίας frequency=2000Hz και Number of Samples=10000 points.

Σύστημα μετακίνησης hot-wire

Το hot-wire μετακινείται στις διάφορες θέσεις του με ένα σύστημα βερνιέρων κάθετων μεταξύ τους, οι οποίοι είναι στερεωμένοι σε μια διάταξη που μπορεί να ολισθαίνει πάνω σε δυο παράλληλους προς τις πλάκες οδοντωτούς κανόνες.

Έτσι ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα να μετακινηθεί κατά τον εγκάρσιο, διαμήκη και κατακόρυφο άξονα.

Η ακρίβεια του κατακόρυφου βερνιέρου είναι 0,01mm και των οριζόντιων 1mm.

Λόγω του ότι σαρώναμε κατακόρυφα ένα προφίλ που εκτείνονταν από -10cm κάτω έως και +35 cm πάνω από την αξονική γραμμή των πλακών και ο κατακόρυφος βερνιέρος είχε εύρος μόνο 18 cm αναγκαστήκαμε να μετακινήσουμε χειροκίνητα ολόκληρο το σωλήνα του αισθητήρα με πολύ προσοχή έχοντας από πριν σημαδέψει συγκεκριμένες θέσεις ανά 10cm πάνω σε αυτόν.

3.1.2.2 Ανεμόμετρο ψυχρού σύρματος (Cold-wire anemometer C.C.A.)

Το ανεμόμετρο ψυχρού σύρματος είναι μια διάταξη όπως και η αντίστοιχη του θερμού σύρματος, με μόνη διαφορά την διαφορετική γέφυρα Wheatstone που εισάγεται τώρα στην συσκευή του ανεμομέτρου και το διαφορετικό λογισμικό H/Y που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των σημάτων λήψης.

Η μετρούμενη πλέον ποσότητα είναι θερμοκρασία σε βαθμούς °C και όχι ταχύτητα. Βέβαια το σήμα που μας δίνει πάλι ο αισθητήρας είναι μεταβολές τάσης (Volts). Απλά γίνεται βαθμονόμηση, ώστε να μετατραπούν οι τάσεις (V) σε θερμοκρασία (°C). Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στο ότι εάν εφαρμοστεί μια σταθερή ένταση ρεύματος στο σύρμα, τότε η ψύξη θα προκαλέσει αλλαγή της αντίστασής του και επομένως αλλαγή της τάσης στα άκρα του (από τον νόμο του Ohm: $U = I * R$).

Για να μην δημιουργείται σύγχυση όταν χρησιμοποιούνται το ανεμόμετρο θερμού και ψυχρού σύρματος έχουν δοθεί διαφορετικές ονομασίες στις γέφυρες Wheatstone που χρησιμοποιούνται για το καθένα. Έτσι η γέφυρα το ανεμομέτρου θερμού σύρματος ονομάζεται (CTA) και η γέφυρα το ανεμομέτρου ψυχρού σύρματος ονομάζεται (CCA) (Constant Current Anemometer), παρά που η αρχή λειτουργίας τους είναι ακριβώς η ίδια και έχει περιγραφεί παραπάνω.

Σύστημα μετακίνησης hot-wire

Χρησιμοποιήθηκε ακριβώς το ίδιο σύστημα όπως και στο Hot-wire.

3.1.2.3 Μανόμετρο και σωλήνας Pitot

Το μανόμετρο ήταν ψηφιακό με ακρίβεια 0,01 Pa και τύπου: FC016-DIGITAL MANOMETER, με εύρος από -199,9 Pa έως 199,9 Pa. Σαν είσοδοι στο μανόμετρο ήταν δυο

εύκαμπτοι σωλήνες προερχόμενοι από τον σωλήνα Pitot. Ο ένας είναι της ολικής ($p_{\text{atm}} + 1/2 \rho_{\text{αέρα}} * u^2$), άλλος της στατικής p_{atm} πίεσης. Το ηλεκτρονικό μανόμετρο μετρά αυτόματα την διαφορά ολικής και στατικής πίεσης και βρίσκει την δυναμική πίεση: $\Delta p = 1/2 \rho_{\text{αέρα}} * u^2$. Αυτή την πίεση (ή μάλλον καλύτερα την διαφορά πίεσης) χρησιμοποιήσαμε για να βρούμε την συνάρτηση βαθμονόμησης. Συμβολισμοί: u =ταχύτητα αέρα, ρ =πυκνότητα αέρα (kg/m^3 εξαρτώμενη κάθε φορά από την εκάστοτε θερμοκρασία και πίεση).

Αρχή λειτουργίας Σωλήνα Pitot-Static

Οι μετρήσεις με το σωλήνα Pitot-Static βασίζονται στην εξίσωση του Bernoulli που ισχύει κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής ενός ρευστού ιδανικού χωρίς ιξώδες:

$$p + \frac{1}{2} * \rho * u^2 + \rho * g * z = \text{constant}$$

Ο σωλήνας Pitot-Static έχει μια οπή στην άκρη του η οποία μετρά την ολική πίεση της ροής ή αλλιώς πίεση ανακοπής η οποία ισούται με το άθροισμα της στατικής πίεσης, που είναι παντού η ίδια (σε συνθήκες μη συμπίεστότητας), συν την δυναμική πίεση της ροής του ρευστού. Η στατική πίεση μετριέται με οπές που βρίσκονται περιφερειακά διαταγμένες στον σωλήνα, ώστε να πάρουμε μια μέση στατική πίεση που να μην έχει μεγάλο σφάλμα αν το άνωσμα της ταχύτητας δεν είναι ακριβώς παράλληλο στον άξονα του σωλήνα. Αυτό προκύπτει εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση κατά μήκος της ροϊκής γραμμής μέχρι την οπή του σωλήνα Pitot-Static, όπου δημιουργείται σημείο ανακοπής (stagnation point):

$$p + \frac{1}{2} * \rho * u^2 + \rho * g * z = p_o + \frac{1}{2} * \rho * u_o^2 + \rho * g * z \Rightarrow p_o = p + \frac{1}{2} * \rho * u^2$$

καθώς πάνω ακριβώς στην οπή εισόδου στον σωλήνα Pitot-Static η ταχύτητα μηδενίζεται, άρα $u_o = 0$. Επίσης ο όρος $\rho * g * z$ δεν αλλάζει καθώς κινούμαστε οριζόντια ($z=0$).

Έτσι προκύπτει η ταχύτητα του ρευστού από την σχέση:

$$u = \sqrt{2 * \frac{(p_o - p)}{\rho}} = \sqrt{2 * \frac{\Delta p}{\rho}}$$

όπου:

p_o η ολική πίεση ή αλλιώς πίεση ανακοπής

p η στατική πίεση του περιβάλλοντος (ατμοσφαιρική πίεση)

ρ η πυκνότητα του ρευστού (που εξαρτάται από την θερμοκρασία)

Συνήθως υπάρχει μια σταθερά διόρθωσης c που βρίσκεται με βαθμονόμηση, μετρώντας δηλαδή κάποια γνωστή ταχύτητα και συγκρίνοντάς τη με την ένδειξη του σωλήνα Pitot-Static.

Έτσι ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$u = c * \sqrt{2 * \frac{\Delta p}{\rho}}$$

Για ένα καλό σωλήνα Pitot-Static το σφάλμα μέτρησης είναι της τάξης του 1%.

Στην περίπτωση μέτρησης τυρβώδους ροής η Δp που μετράει το όργανο είναι λίγο μεγαλύτερη από εκείνη που αντιστοιχεί στην μέση ταχύτητα u , γιατί το όργανο μετράει την μέση τιμή της διαφοράς πίεσης επομένως την μέση τιμή της (u^2) και όχι την $(\bar{u})^2$.

3.1.2.4 Ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (analog-digital)

Ο Η/Υ που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν Pentium I στα 120MHz με 48MB μνήμη RAM. Η κάρτα A/D χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή του αναλογικού σήματος από το ανεμόμετρο σε ψηφιακό στον Η/Υ. Η είσοδος της κάρτας ήταν το βύσμα 0. Είναι τύπου: NATIONAL INSTRUMENTS Lab-PC+.

3.1.2.5 (Connector Block)

Για την μετατροπή του αναλογικού σήματος από το ανεμόμετρο σε ψηφιακό στον Η/Υ χρησιμοποιήθηκε η κάρτα A/D τύπου: NATIONAL INSTRUMENTS Lab-PC+. Η είσοδος της κάρτας ήταν το βύσμα 1. Εκεί συνδεόταν το καλώδιο από τον αισθητήρα hot-wire και μετά με άλλο καλώδιο συνδεόταν η κάρτα με τον Η/Υ.

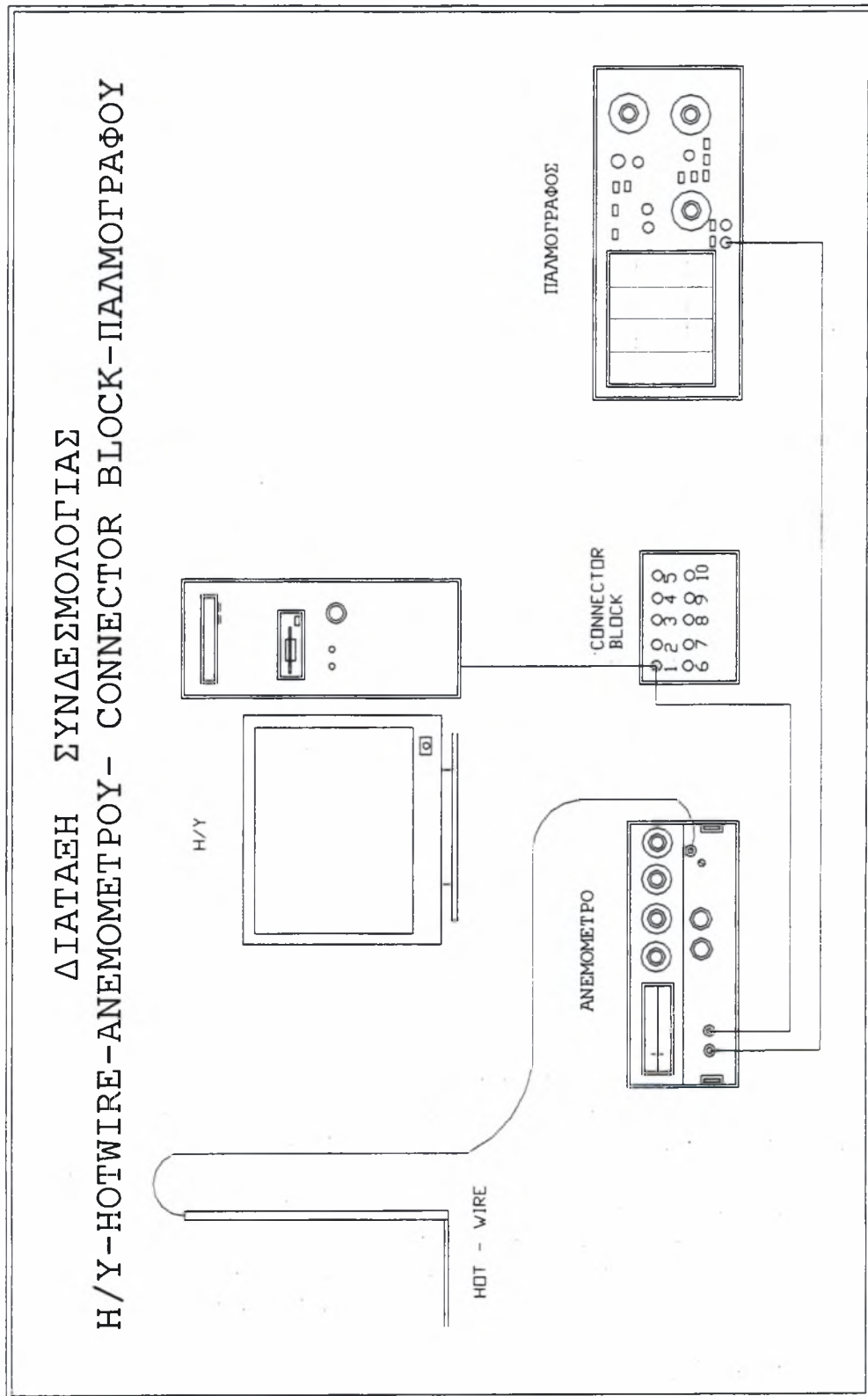
3.1.2.6 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος χρησιμοποιήθηκε επικουρικά για να έχουμε μια εποπτική εικόνα του πως συμπεριφέρεται η ροή σε κάθε σημείο (αν έχει υψηλή – χαμηλή τύρβη).

Στην επόμενη σελίδα φαίνεται σχηματικά η συνδεσμολογία των μετρητικών οργάνων μεταφοράς σήματος και επεξεργασίας της διάταξης που χρησιμοποιήσαμε.



Σχ. 3.6 Διακρίνονται ο Η/Υ, ο παλμογράφος και το ανεμόμετρο



3.1.3 Μηχανήματα και Συσκευές

3.1.3.1 Μετατροπείας της συχνότητας του ρεύματος (0-100Hz) (Inverter)

Αυτή η ηλεκτρονική διάταξη χρησιμεύει για να ελέγχουμε την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα. Είναι τύπου TOSHIBA Transistor Inverter TOSVERT VF-SXN. Τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα 400V και έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την συχνότητά του από 0 έως 100Hz. Η ισχύς του είναι: 7,5kW.

Ανάλογα με την συχνότητα που επιλέγεται, αλλάζουν και οι στροφές (r.p.m.) του ηλεκτροκινητήρα που περιστρέφει τον ανεμιστήρα. Έτσι μπορούμε να προσομοιώσουμε ταχύτητες αέρα μέσα στην αεροσήραγγα από 0m/sec => 0Hz μέχρι 18m/sec (=65km) => 60Hz.



Σχ. 3.7 Ο Inverter στερεωμένος στον διαχύτη.

3.1.3.2 Μετασχηματιστής – Μετατροπείας ηλ. ρεύματος από AC σε DC

Για να τροφοδοτηθεί η ηλεκτρική αντίσταση των 150,131 Ohm/m που τοποθετήθηκε στην μεγάλη κοιλότητα, έπρεπε να υπάρχει η δυνατότητα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτή, στο οποίο να είναι εφικτή η μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας κατά βούληση. Έτσι κατασκευάστηκε στο Π.Θ. από τον Ηλεκτρονικό κ. Α. Δαφερέρα μια συσκευή η οποία μετασχημάτιζε το ρεύμα από εναλλασσόμενο (AC) σε συνεχές (DC). Λόγω της δημιουργίας ισχυρών μαγνητικών πεδίων τοποθετήθηκε όσο το δυνατόν μακρύτερα από το ανεμόμετρο, ώστε να μην γίνεται λήψη λανθασμένου σήματος από τον Η/Υ.



Σχ. 3.8 Ο Μ/Σ – Μετατροπείας ηλ. Ρεύματος από AC σε DC

3.1.3.3 Μηχανή παραγωγής καπνού

Το ενδιαφέρον για τον κλιματισμό στα κτίρια έχει αυξηθεί ταυτόχρονα με την κατανόηση του πόσο σπουδαία είναι η εξοικονόμηση ενέργειας από τον κλιματισμό. Οι κινήσεις του αέρα γίνονται αντιληπτές όταν μπορούμε να τις δούμε, ώστε στη συνέχεια να τις μελετήσουμε και να εξάγουμε πολύτιμα συμπεράσματα που θα μας οδηγήσουν σε βελτιστοποίηση των εφαρμογών κλιματισμού και γιατί όχι και σε καινούργιες ανακαλύψεις! Η κίνηση του αέρα γίνεται ορατή προσθέτοντας σε αυτόν καπνό με ένα μηχάνημα παραγωγής καπνού.

Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση των πειραμάτων με παραγωγή καπνού έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τύπος: SMOKEGENERATOR

Εταιρεία: SP TEKNIK

Διαστάσεις: 440mm x 230mm x 210mm

Βάρος: 8kg

Τάση λειτουργίας: 230V

Είναι Φορητή συσκευή και διαθέτει και τηλεχειριστήριο για έλεγχο από απόσταση. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην ανεμομετρία Laser – Doppler δημιουργώντας σωματίδια των οποίων ανιχνεύονται οι ταχύτητες με Laser .

Η συσκευή αποτελείται από:

- Την κεντρική μονάδα – ένα μεταλλικό μαύρο κουτί με χειρολαβή στο επάνω μέρος του, όπου βρίσκεται και η κονσόλα ελέγχου
- Την αλουμινένια ράβδο εξαγωγής του καπνού η οποία φέρει και κομβίο τηλεχειρισμού
- Ένα εύκαμπτο πλαστικό σωλήνα
- Μία ευθύγραμμη αλουμινένια ράβδο προέκτασης
- Μία ευθύγραμμη αλουμινένια ράβδο απόληξης με μικρότερη διάμετρο της αρχικής
- Μία κεκαμμένη αλουμινένια ράβδο απόληξης με μικρότερη διάμετρο της αρχικής
- Ένα πλαστικό μπουκάλι με 1 lt λάδι τύπου: Ondina 15.

Κονσόλα Ελέγχου

Στην κονσόλα ελέγχου της συσκευής καπνού υπάρχουν τα εξής:

- Διακόπτης ON-OFF θερμαντικού στοιχείου
- Λυχνία Ελέγχου
- Διακόπτης ON-OFF συμπιεστή
- Διακόπτης ρύθμισης της παροχής καπνού
- Ασφάλεια 6,3A.

Τρόπος Λειτουργίας

Αρχικά από την κονσόλα ελέγχου ενεργοποιούμε το θερμαντικό στοιχείο. Ένας ανιχνευτής θερμοκρασίας συνδεδεμένος στον ελεγκτή θερμοστάτη κρατά την εσωτερικά αναπτυσσόμενη θερμοκρασία σταθερή. Όταν το θερμαντικό στοιχείο μέσα στο μηχανήμα καπνού φτάσει την τελική του θερμοκρασία, η αντλία του συμπιεστή μπορεί να ενεργοποιηθεί από ένα διακόπτη που βρίσκεται στην κονσόλα ελέγχου. Ο συμπιεστής αναλαμβάνει να αναρροφήσει αέρα από το περιβάλλον με μέγιστη παροχή 1,50 m³/h. Ο αέρας που αναρροφάται οδηγείται στο δοχείο με το λάδι όπου διαποτίζεται με τις σταγόνες λαδιού. Ως αποτέλεσμα αυτού συμπαρασύρει μικρά σταγονίδια λαδιού παραφίνης τα οποία περνούν με τον αέρα από το θερμαντικό στοιχείο (θερμαινόμενο χάλκινο πηνίο), όπου μετατρέπονται σε καπνό που αναμειγνύεται ομοιόμορφα με τον αέρα. Οι μεγάλες σταγόνες οι οποίες δεν μετατράπηκαν σε καπνό, διαχωρίζονται και οδηγούνται σε ένα δοχείο συμπύκνωσης. Ο καπνός μετά περνά μέσα από ένα παροχόμετρο για ρύθμιση της ποσότητας που θα περνά κάθε φορά. Καταλήγει εισερχόμενος στη ράβδο μέσω ενός εύκαμπτου ελαστικού σωλήνα συνδεδεμένου στο πίσω μέρος της συσκευής, απαλλαγμένος από λάδι. Ο καπνός μόλις εξέρχεται από το ακροφύσιο φτάνει στην ίδια θερμοκρασία με τον περιβάλλοντα χώρο και είναι μη τοξικός και φιλικός προς το περιβάλλον. Επίσης διατηρείται για αρκετά λεπτά.

Με την ράβδο θα κατευθύνουμε τον καπνό εκεί που θέλουμε. Αυτή φέρει τρία διαφορετικά αποσπώμενα ακροφύσια για να επιτύχουμε διαφορετικές διανομές αλλά και παροχές καπνού ανάλογα με το πείραμα που κάνουμε.

3.1.3.4 Ψηφιακή κάμερα

Για την μαγνητοσκόπηση της ροής χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή κάμερα C.C.D. Τοποθετήθηκε ακριβώς απέναντι από την κοιλότητα έτσι ώστε να φαίνεται η κατακόρυφη τομή της τελευταίας. Η διάρκεια έκθεσης της εικόνας ρυθμίστηκε σε 0,04s (δηλαδή 25 καρέ το δευτερόλεπτο) (κάποιες στιγμές ήταν και 0,002) και η εστίαση γινόταν στη θέση εξαγωγής του καπνού. Δηλαδή στο μέσο της κοιλότητας (Y=26cm) και στην πλευρά με Y=5cm. Οι μαγνητο-

μαγνητοσκοπήσεις εγγράφηκαν κατόπιν σε 4CD τα οποία και τα επεξεργαστήκαμε με ειδικό λογισμικό ανάλυσης μαγνητοσκόπησης (Video) για το οποίο θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω.

3.1.3.5 Γεννήτρια συχνοτήτων

Προτού ρυθμιστεί η τιμή της αντίστασης του hot-wire και γίνει η έναρξη των πειραμάτων, έγινε έλεγχος της ακρίβειας του ανεμομέτρου. Για αυτό χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί η γεννήτρια συχνοτήτων τύπου: HAMEG Function Generator HM 8030.

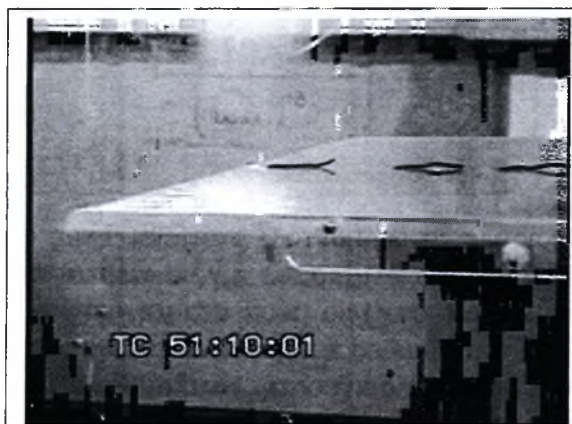
3.1.4 Μοντέλα

3.1.4.1 Πλάκες, κοιλότητες και κύλινδροι (που προσομοίωναν διάφορες περιπτώσεις)

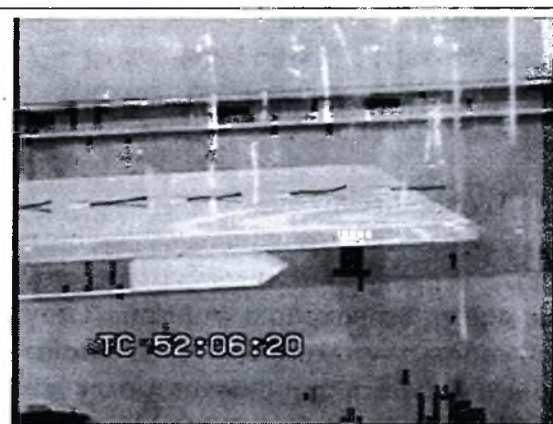
Οι πλάκες, οι κύλινδροι και τα μοντέλα των κοιλοτήτων (όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις) είχαν τα εξής χαρακτηριστικά:

Πλάκες:

Και οι δυο αποτελούνταν από plexiglass, ήταν επίπεδες με πάχος 8mm και πλάτος



Σχ. 3.9 Τμήμα της εμπρόσθιας πλάκας και του στηρίγματός της στον χώρο μετρήσεων.



Σχ. 3.10 Τμήμα της οπίσθιας πλάκας και του στηρίγματός της στον χώρο μετρήσεων.

520mm. Η εμπρός είχε μήκος 600mm και ακμή προσβολής ημικυκλική και η πίσω είχε μήκος 800mm και ακμή εκφυγής οξεία με συμμετρικές γωνίες 30°. Η εμπρός πλάκα στηρίζονταν σε δύο τεμάχια ορθογωνικής ράβδου plexiglass διατομής 8mm x 15mm με μήκος 400mm. Κάθε στηρίγμα έφερε οπές Ø 4mm στις οποίες περνούσαν οι βίδες που το στερέωναν στο πλευρικό τοίχωμα της αεροσήραγγας. Το εμπρός τους μέρος ήταν ημικυκλικό και το πίσω κοφτό κάθετα. Τα πίσω στηρίγματα ήταν όπως τα εμπρός, με μόνη διαφορά στο μήκος, που τώρα είναι 600mm και στο εμπρός μέρος, που είναι κοφτό κάθετα και στο πίσω, που είναι οξύ όπως η ακμή εκφυγής της πίσω πλάκας.

Κοιλότητες:

Οι κοιλότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τριών μεγεθών: Μεγάλη, Μεσαία, και Μικρή. Όλες είχαν το ίδιο εξωτερικό μήκος 520mm και εσωτερικό ύψος 60mm αλλά διέφεραν ως προς το εσωτερικό πλάτος. Η Μεγάλη ήταν 60mm, η Μεσαία 30mm και η Μικρή 15mm. Εσωτερικά η κάθε πλάκα σε απόσταση 30mm από τα πλευρικά της τοιχώματα



Σχ. 3.11 Η μεγάλη κοιλότητα σε βυθισμένη θέση ανάμεσα στις πλάκες στο χώρο μετρήσεων.

τοιχώματα είχε αυλάκια τέτοια ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν πλακίδια από plexiglass πάχους 6mm. Αυτό γινόταν για να μας δίνεται η ευχέρεια να τοποθετήσουμε στο χώρο των 30mm τα καλώδια και τις ιδιοσυσκευές συγκράτησης για την αντίσταση που θα είχαμε, αφήνοντας την κυρίως κοιλότητα όσο πιο “καθαρή” από εμπόδια. Επίσης επιλέχθηκε ως καταλληλότερη αντίσταση για τοποθέτηση το ψιλότερο σύρμα που μπορέσαμε να βρούμε ($R=150,131 \text{ Ohms/m}$), ώστε να διαταράσσεται η ροή όσο το δυνατόν λιγότερο από την παρουσία του.

Κύλινδροι:

Κατασκευάστηκαν έξι (6) κύλινδροι από plexiglass, αν και χρησιμοποιήθηκε μόνο ο ένας ($\varnothing 60\text{mm}$). Όλοι τους είχαν μήκος 520mm και διαμέτρους (εξωτερικές): 10, 20, 30, 40, 50 και 60mm.



Σχ. 3.12 Ο κύλινδρος 60mm πάνω από την κοιλότητα μέσα στο χώρο μετρήσεων.

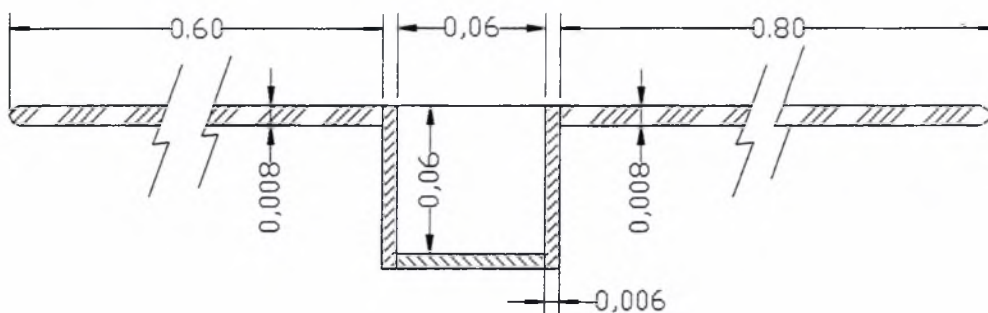
Η επιλογή των διαστάσεων των πλακών, των κοιλοτήτων και των κυλίνδρων δεν ήταν τυχαία. Έγινε με βάση του οι διαστάσεις έπρεπε να είναι αντιπροσωπευτικές των αντίστοιχων διαστάσεων των οδικών χαραδρών που υπάρχουν μέσα στις πόλεις αλλά και άλλων εφαρμογών σχετικών με κοιλότητες. Όσον αφορά τις οδικές χαράδρες, με κριτήριο του ότι υπάρχουν κανονικές, ρηχές και βαθιές (βλ Κεφ. 2^ο, “Βιβλιογραφική Επισκόπηση”) επιλέξαμε να έχουμε κοιλότητες με λόγο διατάματος $H/W=1, 2$ και 4 , προσομοιώνοντας έτσι κανονικές και βαθιές οδικές χαράδρες που είναι οι συνηθέστερες. Βέβαια τα περισσότερα πειράματα που έγιναν αφορούν μόνο την περίπτωση κανονική οδικής χαράδρας. Ακόμη η επιλογή του να γίνουν σχεδόν όλα τα πειράματα με την κοιλότητα $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ που είναι τετραγωνική, βασίστηκε στην συμμετρία που μας παρέχει το σχήμα της για την σύγκριση των αποτελεσμάτων μας.

Ο κύλινδρος που θα εισήγαγε τις διαταραχές επιλέχθηκε να έχει διάμετρο πολλαπλάσια του ύψους της κοιλότητας. Τα πειράματα έγιναν όμως μόνο με τον κύλινδρο διαμέτρου 60mm τοποθετημένου σε διάφορες θέσεις σχετικά με την κοιλότητα.

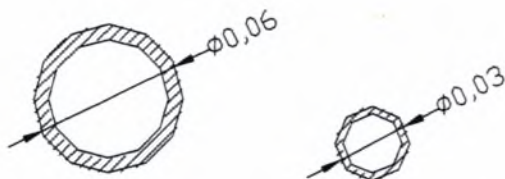
Εν κατακλείδι, οι διαστάσεις των μοντέλων μας είναι οι πιο συνηθισμένες που μπορούν να συναντηθούν σε πολλές εφαρμογές (όχι αποκλειστικά σε προσομοίωση οδικών χαραδρών), λόγω του ότι η έρευνα είναι βασική πειραματική και αποσκοπεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων που θα είναι γενικά και θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επαγωγικά και από άλλους ερευνητές.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ - ΠΛΑΚΕΣ



ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

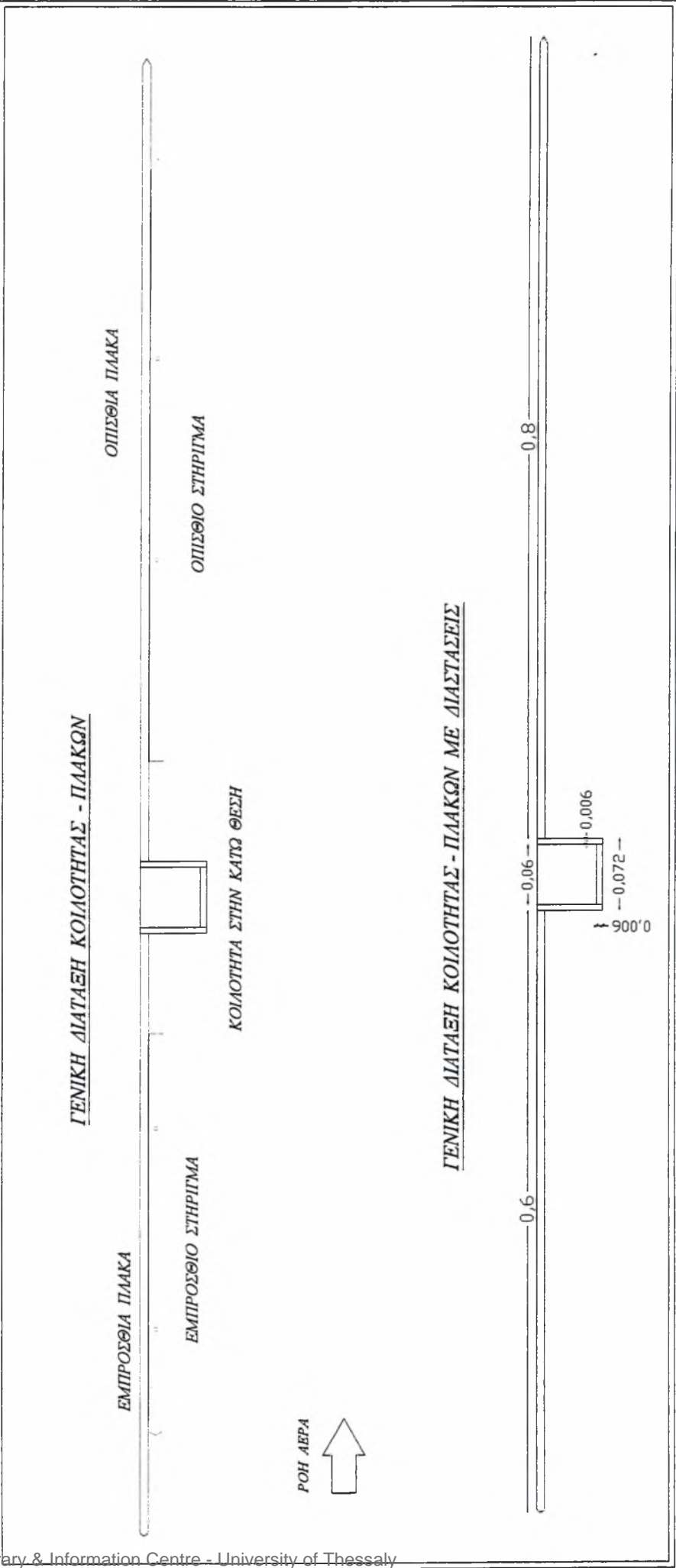


ΚΛΙΣΗ ΠΛΑΚΩΝ



Σχ. 3.13 Διαστάσεις μοντέλων (πλακών, κοιλότητας και κυλίνδρου).

ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

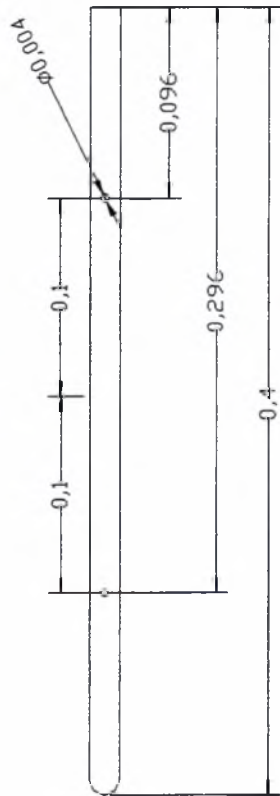


Σχ. 3.14

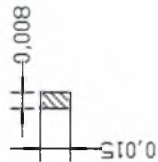
Σχ. 3.15 ΣΧΕΔΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΡΙΓΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΠΛΑΚΑΣ

ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ



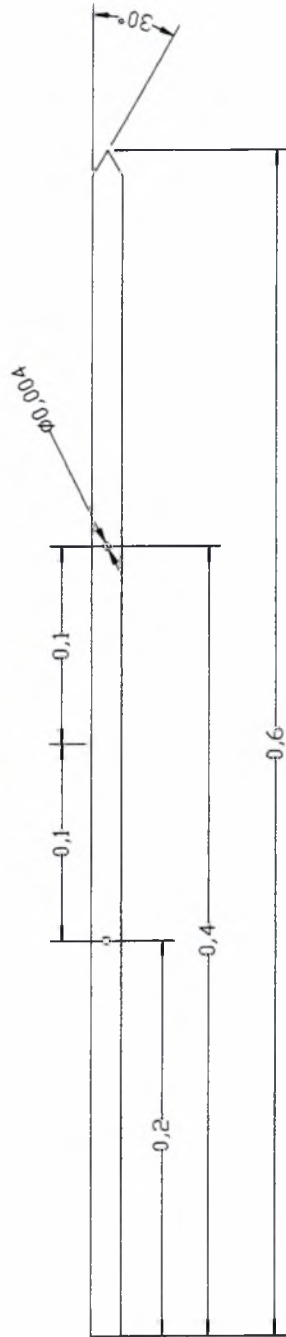
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ



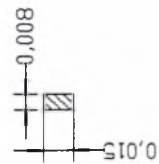
Διαστάσεις σε m.

ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΟΠΙΣΘΙΑΣ ΠΛΑΚΑΣ

ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ



ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ



ΧΩΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

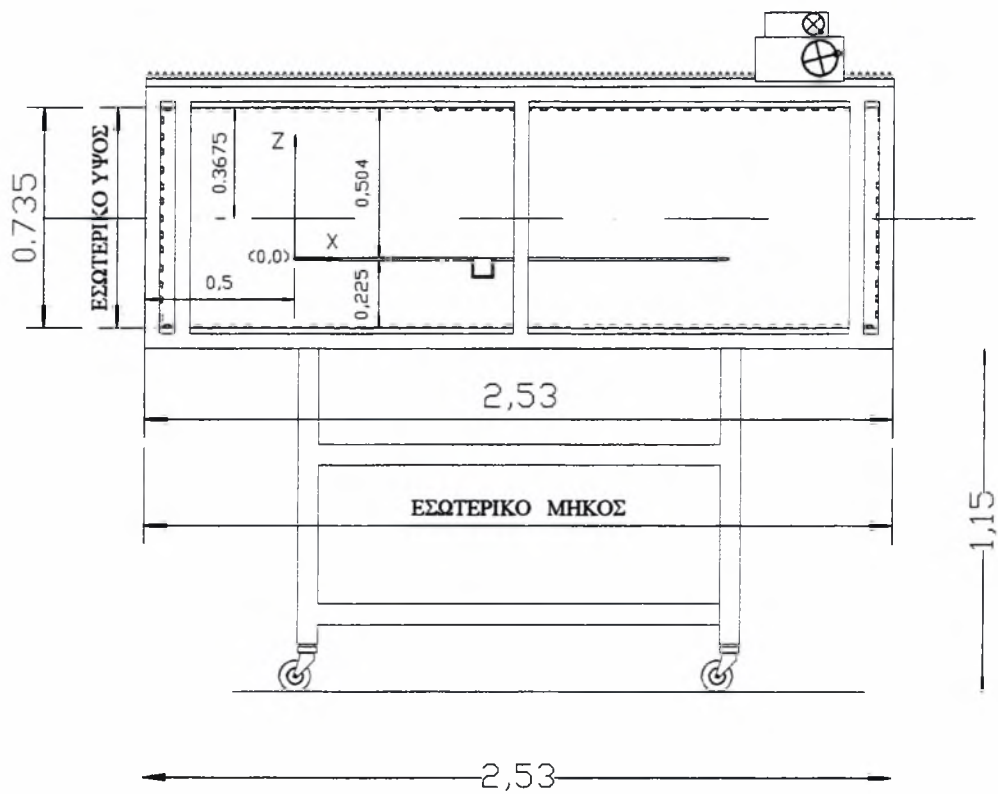
ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ - ΑΞΟΝΕΣ

ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (0,0) = Η ΑΚΜΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΠΛΑΚΑΣ

ΑΞΟΝΑΣ X = ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

ΑΞΟΝΑΣ Z = ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

ΑΞΟΝΑΣ Y = ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ



ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΤΡΑ (m)

Σχ. 3.16 Σχέδιο του χώρου μετρήσεων (test section) της αεροσήραγγας, όπου τοποθετήθηκαν τα μοντέλα και έγιναν οι μετρήσεις. Σημειώνεται και το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε.

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Οι μετρήσεις που έγιναν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Μετρήσεις Ταχυτήτων
2. Μετρήσεις Θερμοκρασιών, και
3. Οπτικοποίηση της Ροής

Οι μετρήσεις είχαν σκοπό την λήψη προφίλ ταχύτητας-θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος των πλακών και της κοιλότητας (που βρίσκεται στην κάτω θέση) αλλά και μέσα σε αυτή, όταν έχουμε μέσα στο ροϊκό πεδίο :

α) ομοιόμορφη ροή χωρίς την ύπαρξη κυλίνδρου, και
β) επίδραση ασταθειών που προκαλούνται από εκροή δινών Von Karman λόγω της παρουσίας κυλίνδρου Ø60mm σε διάφορες θέσεις ανάντη και κατόντη της κοιλότητας.

Για σύγκριση, έγιναν οι μετρήσεις στα ίδια σημεία (x, z), όπου αυτό ήταν εφικτό, ενώ το y διατηρούνταν σταθερό. Οι μετρήσεις έγιναν δηλαδή στην αξονική γραμμή της αεροσήραγγας (y=0).

Όλες οι ανωτέρω μετρήσεις (πειράματα) έγιναν χωρίς να υπάρχει διάταξη παραγωγής τύρβης πριν από το μοντέλο. Η τύρβη ήταν η ενδογενής που είχε η αεροσήραγγα του T.M.M.B.

4.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

4.2.1 Ροή σε δισδιάστατη κοιλότητα – ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ροή πριν από αυτή

4.2.1.1 Μέτρηση ταχυτήτων

Μέτρηση ταχυτήτων ανάντη της κοιλότητας, πάνω από αυτή και στο κατόντη αυτής. Χρησιμοποιήθηκε ανεμόμετρο θερμού σύρματος (C.T.A.) με hot-wire. Τα δεδομένα που αποθηκεύονταν ήταν:

- η μέση ταχύτητα $\underline{U_{mean}}$ της ροής στο συγκεκριμένο σημείο, από ένα δείγμα 10000 μετρήσεων με συχνότητα 2000Hz, δηλαδή η μέτρηση διαρκούσε 10sec.
- η μέση τυπική απόκλιση της ταχύτητας από την μέση τιμή της, $\underline{U_{RMS}}$.

$$U_{RMS} = \frac{\sqrt{\sum ((U - U_{mean})^2)}}{N (= 10000)}$$

- το αρχείο τύπου .dat όπου περιέχονταν τα δεδομένα των 10000 ταχυτήτων από το οποίο στη συνέχεια με ανάλυση P.S.D. εξάγονταν συμπεράσματα για τη συχνότητα εκροής δινών από την κοιλότητα και για την μορφή της ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης).

4.2.1.2 Μέτρηση θερμοκρασιών

Επίσης εφαρμόστηκε θέρμανση στην αντίσταση που είχαμε τοποθετήσει μέσα στη κοιλότητα κατά μήκος στην μέση του πλάτους της και χαμηλά ως προς το ύψος της. Κατόπιν μετρήθηκαν πάλι τα ίδια όπως πριν, αλλά επιπλέον τώρα μετρήθηκαν και τα θερμοκρασιακά προφίλ μέσα στην κοιλότητα. Για τις τελευταίες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ανεμόμετρο ψυχρού σύρματος (C.C.A.) με cold-wire. Τα δεδομένα που αποθηκεύονταν ήταν:

- η μέση θερμοκρασία $\underline{\Theta_{mean}}$ της ροής στο συγκεκριμένο σημείο, από ένα δείγμα 20000 μετρήσεων με συχνότητα 1000Hz, δηλαδή η μέτρηση διαρκούσε 20sec. (Για τις μετρήσεις "Transient effects" - παροδική απομάκρυνση θερμότητας από την κοιλότητα - το δείγμα ήταν 60000 μετρήσεων με συχνότητα 1000Hz, δηλαδή η μέτρηση διαρκούσε 60sec.

- η μέση τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας από την μέση τιμή της, Θ_{RMS} .

$$\Theta_{RMS} = \frac{\sqrt{\Sigma((\Theta - \Theta_{mean})^2)_{mean}}}{N(=20000)}$$

- Και το αρχείο τύπου .dat όπου περιέχονταν τα δεδομένα των 20000 (ή των 60000, ανάλογα με το πείραμα) θερμοκρασιών. Από το οποίο στη συνέχεια με ανάλυση P.S.D. εξαγόταν συμπεράσματα για τη συχνότητα εκροής δινών από την κοιλότητα και για την μορφή της ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης).

4.2.1.3 Οπτικοποίηση της ροής (Flow Visualization)

Μέσω μιας μηχανής που δημιουργούσε καπνό, εισάγονταν καπνός σε συγκεκριμένα σημεία εντός της κοιλότητας και μαγνητοσκοπούνταν τα ροϊκά φαινόμενα, που πλέον γίνονταν ορατά. Κατόπιν ακολούθησε μελέτη των μαγνητοσκοπήσεων και ανάλυσή τους καρέ-καρέ μέσω ειδικών προγραμμάτων για σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα των αντιστοίχων διαμορφώσεων της ροής χωρίς οπτικοποίηση. Τα σημεία όπου τοποθετήθηκε το ακροφύσιο που έβγαζε καπνό ήταν προσεκτικά ανοιγμένες οπές μέσα στον πάτο της κοιλότητας. Η διάμετρος των οπών ήταν όση και του σωληνίσκου διοχέτευσης του καπνού: Ø3mm. Λόγω του ότι οι διάμετροι ήταν ίδιες η στερέωση του σωληνίσκου (που ήταν από χαλκό) πραγματοποιούνταν με σύσφιξη, χωρίς να χρειάζεται ιδιοσυσκευές συγκράτησης. Αυτό όπως και το ότι δεν εξείχε από την επιφάνεια, όπου τοποθετούνταν, συνέβαλλαν στο να μην διαταραχθεί η ροή από την παρουσία του και αλλοιωθούν τα αποτελέσματά μας. Η είσοδος του σωλήνα γινόταν από το κάτω μέρος των μοντέλων, όπου οι προκαλούμενες διαταραχές δεν μας απασχολούσαν, καθώς οι μετρήσεις μας αφορούσαν το χώρο επάνω από τις πλάκες και την κοιλότητα.

Επίσης κατά την οπτικοποίηση ελέγχθηκε και η διαμόρφωση ροής μέσα στην κοιλότητα όταν υπήρχε αναμμένη αντίσταση μέσα της. Η αντίσταση, που ήταν τοποθετημένη μέσα σε αυτή, δεχόταν μια τάση, μέσω του μετασχηματιστή-μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος από εναλλασσόμενο σε συνεχές (AC → DC). Η βέλτιστη ανωτέρω τάση για το πείραμά μας βρέθηκε, κατόπιν δοκιμών, πως είναι 28V για ένταση ρεύματος 0,45mA (DC). Πάνω στην αντίσταση κάναμε επάλειψη με ειδικό λάδι παραφίνης και παρατηρούσαμε την διαμόρφωση των ινωδών φλεβών (streak lines) από τον καπνό που δημιουργούνταν κατά την εξάτμιση του λαδιού, για ένα εύρος ταχυτήτων αέρα. Οι ταχύτητες της αεροσήραγγας στο ανωτέρω πείραμα ήταν για συχνότητες Inverter: 6, 8.5, 13, 17.1, 21.35, 25.60, δηλαδή για ταχύτητες 1.80, 2.55, 4, 5, 6.5 και 7.70 m/s, αντίστοιχα (εξαρτωμένων πάντα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες των ημερών που γίνονταν τα πειράματα).

Σε αυτή την φάση έγινε το πείραμα του "Transient effects" - παροδική απομάκρυνση θερμότητας από την κοιλότητα.

Το παραπάνω πείραμα βρίσκει εφαρμογή σε χώρους όπου έχει καθοριστική σημασία ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι την τέλεια απομάκρυνση ενός ρύπου, όπως στις δεξαμενές των πλοίων που μεταφέρουν καύσιμα, σε ένα δωμάτιο μετά από συγκέντρωση σε αυτό ρύπων ή και στις οδικές χαράδρες και αλλού.

Τέλος η οπτικοποίηση της ροής περιλάμβανε την κόλληση στην επιφάνεια των πλακών νημάτων (στην κεντρική τους γραμμή, $y=0$) για να φανερωθούν οι περιοχές που έχουμε αποκόλληση και ανακυκλοφορία αέρα.

4.2.2 Ροή σε δισδιάστατη κοιλότητα – ΑΣΤΑΘΗΣ ροή πριν από αυτή

Επίσης οι ανωτέρω μετρήσεις έγιναν παρουσία κυλίνδρου $\varnothing 60\text{mm}$, ανάντη της κοιλότητας σε απόσταση x^*D οριζόντια και z^*D κατακόρυφα. Όπου x και z συγκεκριμένες τιμές που θέταμε για διάφορες αποστάσεις από την μέση της κοιλότητας (αξονική γραμμή).

Αυτό έγινε για παρατήρηση του πώς επηρεάζει η διαταραγμένη ροή πίσω από ένα κύλινδρο, όπου δημιουργείται μια αλληλουχία περιοδικά αποκολλημένων δινών Von-Karman στον άπορο του, την συμπεριφορά της κοιλότητας (ταχύτητες, θερμοκρασία, κτλ.).

4.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.3.1 Επιλογή ταχύτητας ελεύθερης ροής

Για να επιλεγεί η ιδανική ταχύτητα ελεύθερης ροής υπό την οποία θα διεξάγονταν όλο το φάσμα των πειραματικών μετρήσεων, έπρεπε καταρχήν να εξακριβωθεί τι είδους ροϊκό πεδίο δημιουργούνταν μέσα στην αεροσήραγγα πάνω από μια δεδομένη γεωμετρία των πλακών-μοντέλου.

Έπειτα από την “σάρωση” του χώρου των πλακών και του ενός από τα μοντέλα (της μικρής κοιλότητας) τοποθετημένου στην πάνω θέση με τον σωλήνα Pitot-Static για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής: 5m/s , 10m/s και 15m/s επιλέχτηκε η ταχύτητα των 5m/s , για να γίνει όλο το φάσμα των μετρήσεων με hot-wire.

Διαπιστώθηκε ότι οι δυο άλλες ταχύτητες: 10m/s και 15m/s , δεν εξυπηρετούσαν τους σκοπούς των πειραμάτων μας. Αυτό γιατί:

➤ Παρά του ότι για όλες τις ταχύτητες η ποιοτική κατανομή των προφίλ στις ίδιες θέσεις x ήταν σχεδόν ίδια, η μικρότερη ταχύτητα των 5m/s , έδινε μια πιο καλή προσέγγιση στην μοντελοποίηση της οδικής χαράδρας, δίνοντας περισσότερο “χρόνο” (σε sec) να παρατηρηθεί η ροή μέσα στην κοιλότητα καθώς το φαινόμενο εξελίσσονταν πιο αργά. Και επειδή κατά κύριο λόγο μελετήθηκε η περίπτωση διασποράς ρύπων μέσα στις λεγόμενες “οδικές χαράδρες”, που συνήθως μέσα τους δεν επικρατούν μεγάλες ταχύτητες και ο αριθμός Re της ροής του ατμοσφαιρικού στρώματος πάνω από αυτές δεν υπερβαίνει την τιμή $5 \cdot 10^5$.

➤ Υψηλές ταχύτητες είχαν ως συνέπεια την γρήγορη απομάκρυνση του δημιουργούμενου καπνού με αποτέλεσμα να μην προφταίνει να καταδείξει τις ροϊκές γραμμές μέσα στην κοιλότητα

➤ Θέλαμε η ροή να φτάσει στρωτή στην κοιλότητα και μετά να δούμε πώς διαταράσσεται.

➤ Το προφίλ ταχυτήτων για ομοιόμορφη ροή με μέση ταχύτητα 5m/s είχε την καλύτερη κατανομή από τα αντιστοιχούντα στις άλλες δυο ταχύτητες.

Παρακάτω μπορούμε να παρατηρήσουμε πώς ήταν οι κατανομές των τριών ταχυτήτων εμπρός και πάνω από το μοντέλο (πλάκες και κοιλότητα) από “αναγνωριστικές” μετρήσεις που έγιναν με Pitot-Static και μια πιο λεπτομερή με hot-wire. Οι παραπάνω μετρήσεις έγιναν με την μικρή κοιλότητα τοποθετημένη στην πάνω θέση, χωρίς αντίσταση.

Στο τέλος του κεφαλαίου υπάρχουν τέσσερα διαγράμματα, τα (Σχ. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4) με τις μετρήσεις με σωλήνα Pitot για τις ταχύτητες ελεύθερης ροής 5m/s , 10m/s και 15m/s , όπου παρουσιάζονται τα προφίλ ταχύτητας και διακύμανσης αυτής σε διάφορες θέσεις κατά μήκος των πλακών – μοντέλου και συγκριτικό αυτών. Επιπλέον, ακολουθεί διάγραμμα με τις μετρήσεις με αισθητήρα Hot-wire για την ταχύτητα ελεύθερης ροής 5m/s όπου παρουσιάζονται τα προφίλ ταχύτητας και διακύμανσης αυτής για τις ίδιες θέσεις όπως και με τις μετρήσεις με τον Pitot. (Σχ. 4.5, 4.6).

4.3.2 Έλεγχος της ορθότητας των μετρουμένων μεγεθών

Για να εξασφαλιστεί η ορθότητα των μετρήσεών μας έπρεπε να ελαχιστοποιήσουμε τους παράγοντες εισαγωγής σφαλμάτων. Όπως όλοι γνωρίζουν αυτό είναι και το πιο δύσκολο στο να "στηθεί" ένα πείραμα. Η προσοχή εστιάστηκε σε βασικούς στοιχεία της πειραματικής διάταξης αλλά και στον τρόπο διεξαγωγής των πειραμάτων. Αυτά ήταν:

4.3.3 Ο χρόνος δειγματοληψίας

Για ικανοποιητική χρονική κάλυψη των φαινομένων αποφασίστηκαν οι παρακάτω χρόνοι δειγματοληψίας καθώς εκτιμήθηκε, από τις δεδομένες παραμέτρους του πειράματος, πως η συχνότητα εκροής δινών Von-karman δεν θα υπερέβαινε τα 20 Hz .

Μέτρηση ταχυτήτων και διακύμανσής τους

Για την εύρεση της μέσης ταχύτητας Umean της ροής σε ένα συγκεκριμένο σημείο, λαμβάναμε μέσω του αισθητήρα Hot-wire ένα δείγμα 10000 μετρήσεων με συχνότητα 2000Hz, δηλαδή η μέτρηση διαρκούσε 10sec.

Μέτρηση θερμοκρασιών και διακύμανσής τους

Για την εύρεση της μέσης θερμοκρασία Θmean της ροής σε ένα συγκεκριμένο σημείο, λαμβάναμε μέσω του αισθητήρα Cold-wire ένα δείγμα 20000 μετρήσεων με συχνότητα 1000Hz, δηλαδή η μέτρηση διαρκούσε 20sec.

Οπτικοποίηση ροής

Η επεξεργασία της Οπτικοποίησης ροής μέσω των προγραμμάτων H/Y πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές P III με επεξεργαστή 0.86 GHz και 128 MB RAM & P IV με επεξεργαστή 2.4 GHz και 256 MB RAM. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των πειραμάτων με την δεδομένη ισχύ H/Y, αποφασίστηκε ο αριθμός των εικόνων που θα χρησιμοποιούνταν σε κάθε περίπτωση να κυμαινόταν μεταξύ 200 – 375. Οι παραπάνω εικόνες αντιστοιχούν σε χρόνο 8s – 15s, ο οποίος καλύπτει αρκετές περιόδους του φαινομένου και παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

4.3.4 Το μοντέλο και οι πλάκες

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε κλίνει περισσότερο προς την πλευρά της "Βασικής Έρευνας". Αυτό σημαίνει ότι δεν εξετάστηκε ένα φαινόμενο που αφορά συγκεκριμένη μοντελοποίηση, αλλά ούτε και συνθήκες. Όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο Κεφάλαιο, εξετάστηκε ένα γενικό φαινόμενο, που μπορεί να δια φωτίσει με τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν, πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας σήμερα.

Εξαιτίας αυτού του λόγου έπρεπε η όλη διάταξη να ήταν "γενική" χωρίς κάποια γεωμετρικά σφάλματα που θα εισήγαγαν κάποια ιδιαιτερότητα.

Καταρχήν δόθηκε πλήρης "διαφάνεια". Προκειμένου να γίνει οπτικοποίηση της ροής αλλά και για καλύτερη εποπτεία των όσων θα συνέβαιναν, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν διαφανή μοντέλα και πλάκες.

Η κατασκευαστική τους διαμόρφωση ήταν όσο πιο απλή γίνεται με κύριο μέλημα όμως την τήρηση ακρίβειας στις διαστάσεις, την επίτευξη της μέγιστης δυνατής επιτεδότητας, αλλά και την όσο πιο στιλπνή επιφάνεια γινόταν. Αξίζει να αναφερθεί πως η ακρίβεια της κατασκευής ήταν πολύ καλή έχοντας ανοχές της τάξεως των δεκάτων του χιλιοστού, μετά από έλεγχο που έγινε με παχύμετρο κατά την παραλαβή των μοντέλων και των πλακών. Η επιτεδότητα τόσο των πλακών όσο της κοιλότητας και του κυλίνδρου ελέγχονταν κάθε φορά με αλφάδι. Επίσης πολλές φορές γινόταν επανέλεγχος των κλίσεων, επιτεδότητας και των αποστάσεων, με οπτική παρατήρηση και μέτρηση.

4.3.5 Στήριξη μέσα στο χώρο μετρήσεων

Επίσης μεγάλο πρόβλημα (το οποίο ξεπεράστηκε ευτυχώς επιτυχώς!) ήταν η τοποθέτηση και στήριξη της όλης πειραματικής διάταξης μέσα στον χώρο μετρήσεων της αεροσήραγγας. Έπρεπε να γίνει αυτό εξασφαλίζοντας οι πλάκες να είναι οριζόντιες και επίπεδες με την κοιλότητα επίπεδη και κάθετη ως προς αυτές. Πέρα από αυτό έπρεπε να ανοιχθούν οι όσο το δυνατόν λιγότερες οπές στα τοιχώματα της αεροσήραγγας, όπως και έγινε. (βλ. σχετικά Κεφ. 3^ο)

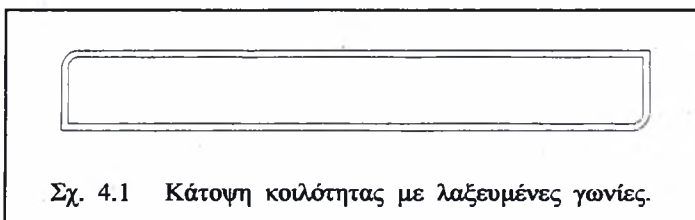
Οι κύλινδροι για να μην έχουν ιδιοσυσκευές συγκράτησης που θα προκαλούσαν διαταραχές στη ροή, (πλέον των δινών Von Karman), στηρίχθηκαν εσωτερικά του χώρου δοκιμών της αεροσήραγγας με τον εξής τρόπο:

Είχαν μήκος ακριβώς όσο και το πλάτος εσωτερικά του χώρου μετρήσεων της αεροσήραγγας (52cm). Τοποθετώντας εσωτερικά στην μία πλευρά τους ελατήριο κατάλληλα στερεωμένα μέσα σε αυτούς, πετυχαίναμε να στηρίζονται στα τοιχώματα (που σημειωτέον ήταν από plexiglass πάχους 20mm, συνεπώς εύκαμπτα) με προένταση. Έτσι εξασφαλιζόταν σίγουρη και σταθερή στήριξη στις δονήσεις των τοιχωμάτων που προκαλούσε η κίνηση του ανεμιστήρα.

Το σύνολο της διάταξης πλάκες-μοντέλο τοποθετήθηκε με μικρή αρνητική κλίση ίση με $0,389^\circ$ ως προς τον διαμήκη άξονα. Η κλίση των πλακών με την κοιλότητα ήταν ενιαία στο σύνολό τους. Η κλίση υπολογίστηκε ως εξής: Η υψομετρική διαφορά ακμής προσβολής – ακμής εκφυγής με την μεγάλη κοιλότητα τοποθετημένη ενδιάμεσα των πλακών ήταν 10mm. Το μήκος της υποτείνουσας του τριγώνου που σχηματίζεται είναι ίσο με το άθροισμα των μηκών πλακών-μοντέλου και ίσο με 1472mm. Από την τριγωνομετρία με εφαρμογή της σχέσης του αντίστροφου του ημίτονου, βρέθηκε η κλίση.

Η αρνητική κλίση δόθηκε με στόχο την αποφυγή αποκόλλησης της ροής από την ακμή προσβολής.

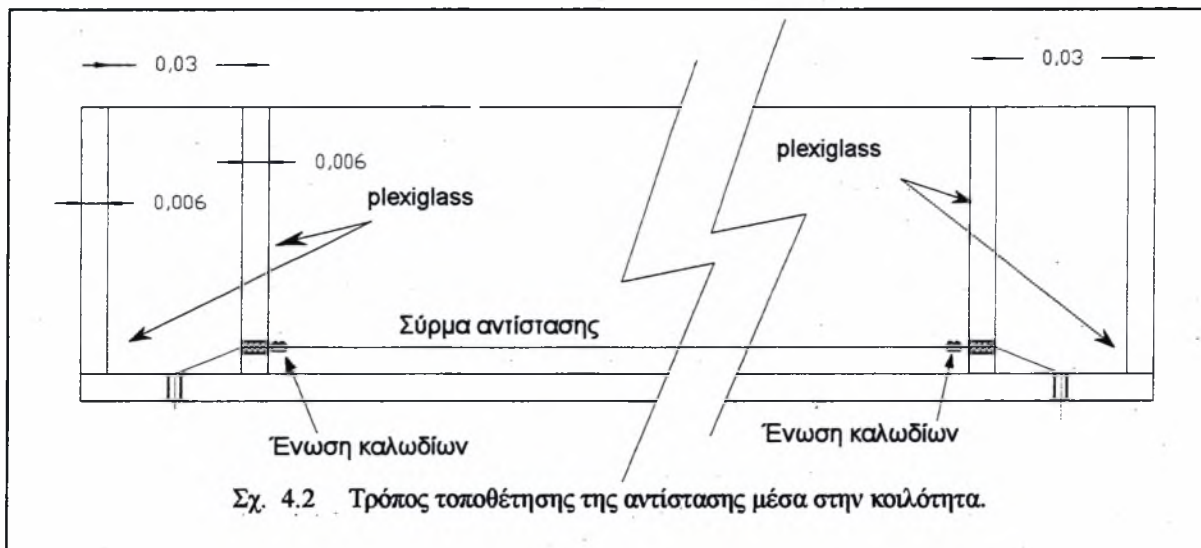
Υπήρξε μικρό πρόβλημα στην τοποθέτηση των κουτιών-μοντέλων από Plexiglas μέσα στο χώρο μετρήσεων της αεροσήραγγας καθώς “έβρισκαν” στα παλαινά τοιχώματά της. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη να λιμαριστεί με προσοχή η μια γωνία από κάθε πλευρά της μεγάλης και της μεσαίας κοιλότητας. Μόνο η μικρή κοιλότητα λόγω του μικρού πλάτους της (1,5cm) δεν χρειάστηκε να λιμαριστεί. Η μορφή που πήραν οι κοιλότητες φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Στη συνέχεια χρειάστηκε να ανοιχτούν οπές διαμέτρου 3mm για την διέλευση των καλωδίων και της αντίστασης που θα τοποθετούσαμε σε κάποια πειράματα στο εσωτερικό της μεγάλης κοιλότητας. Οι οπές αυτές ανοίχτηκαν όπως φαίνεται στο παρα-

κάτω σχήμα με ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να βρίσκεται το σύρμα της αντίστασης σε ύψος ίσο με 6mm από το πάτωμα της κοιλότητας και ακριβώς στη μέση της κοιλότητας χωρίς καμία παρέκκλιση ως προς το πλάτος ή το ύψος της κοιλότητας. Στις οπές από όπου διέρχονταν η αντίσταση τοποθετήθηκαν ειδικά μονωτικά κυλινδράκια από πορσελάνη με σκοπό να θερμομονώσουν το Plexiglas από την εκλυόμενη θερμότητα της αναμμένης αντίστασης, για να μην λιώσει. Η αντίσταση συνδεόταν με τα καλώδια παροχής ρεύματος μέσα στο εσωτερικό χώρο της κοιλότητας με τα μικρότερα “κλέμενς” που μπόρεσαν να βρεθούν στην αγορά, ώστε ο επηρεασμός της ροής αέρα μέσα στην κοιλότητα να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Όπως φάνηκε αργότερα και από την οπτικοποίηση της ροής στη μέση του πλάτους της κοιλότητας όπου διεξήχθησαν όλες οι μετρήσεις δεν έχουμε επίδραση των συνδέσεων στη ροή σε εκείνη τη περιοχή. Η αντίσταση ήταν ένα πολύ λεπτό σύρμα διαμέτρου 0,5mm ώστε να διαταράσσει όσο το δυνατόν λιγότερο την γύρω ροή με την παρουσία του. Το μέγεθος της αντίστασης

παρουσία του. Το μέγεθος της αντίστασης που παρουσίαζε κατά την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος ήταν 150,131 Ohm/m. Το σύρμα της αντίστασης είχε μήκος ίσο με $52-2*3-1,2-0,8 = 44\text{cm}$. Αυτό γιατί: 52 cm ήταν όλο το πλάτος της αεροσήραγγας (εσωτερικά), το πάχος



του plexiglass ήταν 0,6cm, τα κενά πριν το κυρίως χώρο της κοιλότητας ήταν μήκους 3cm έκαστο και περίπου 0,8cm χρειάστηκαν για τις συνδέσεις με τα καλώδια του ρεύματος. Στην περίπτωση μας δηλαδή είχαμε αντίσταση ίση με $150,131 \text{ Ohm/m} * 0,44 \text{ m} = 66 \text{ Ohm}$ περίπου. Στα πειράματα που έγιναν με αντίσταση, αυτή τροφοδοτούνταν από ένα τροφοδοτικό – μετασχηματιστή με συνεχές ρεύμα. Η τάση του ρεύματος ρυθμίστηκε στα 28Volts και έδινε ένταση 0,45A. Συνεπώς η πραγματική αντίσταση που παρουσίαζε ήταν 62,22 Ohm. Η διαφορά από την πρότερα υπολογισθείσα τιμή οφείλεται στο ότι το σύρμα της αντίστασης δεν αποτελούσε την μοναδική αντίσταση στην διέλευση του ρεύματος. Υπήρχαν και τα καλώδια και οι άλλες διατάξεις μέσα στο τροφοδοτικό – μετασχηματιστή που συνεισέφεραν σε αντίσταση.

Επειδή η αντίσταση θερμαινόμενη θα διαστέλλονταν με αποτέλεσμα λόγω του πολύ χαμηλού της ύψους από το πάτωμα της κοιλότητας να ακουμπήσει πάνω του, λιώνοντάς το, χρησιμοποιήσαμε μια διάταξη από ελατήριο και συνδετήρα καλωδίων έξω από την κοιλότητα που δημιουργούσε μια μόνιμη προένταση στο σύρμα κρατώντας το πάντα τεντωμένο.

4.3.6 Έλεγχος Εσωτερικών διαστάσεων χώρου μετρήσεων αεροσήραγγας

Το πλάτος της αεροσήραγγας είναι 52 cm και το μήκος της 250 cm. Για την μέτρηση του ύψους στο χώρο μετρήσεων μέτρησα αυτό σε τέσσερα διαφορετικά σημεία που ισαπέχον μεταξύ τους 50cm. Και οι τέσσερις μετρήσεις έδωσαν το ίδιο ύψος: 73,5cm.

Η ακμή προσβολής της εμπρός πλάκας απέχει από την αρχή του χώρου μετρήσεων 50cm.

Όλες οι παραπάνω διαστάσεις επαληθεύθηκαν ύστερα από πολλές μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία ώστε να ελεγχθεί η παραλληλότητα και επιπεδότητα του χώρου μετρήσεων.

4.3.7 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Σαν αρχή των αξόνων (0,0) ορίστηκε το σημείο ανακοπής πάνω στην ακμή προσβολής. Το σύστημα συντεταγμένων έχει τους εξής άξονες:

$x'x$ = άξονας κατά μήκος της των πλακών και της κοιλότητας

$y'y$ = άξονας κατά πλάτος της πλάκας

$z'z$ = άξονας κάθετος στην πλάκα

Επίσης επιλέχθηκε η αρχή των αξόνων (0,0) να βρίσκεται στο μέσο του πλάτους της πλάκας. Αυτό γιατί η λήψη των μετρήσεων έγινε στη μέση της πλάκας καθώς εκεί το πεδίο ροής μπορεί να θεωρηθεί με καλή ακρίβεια δισδιάστατο. Οι μετρήσεις εννοείται πως έγιναν στο ίδιο x και y για διαφορετικά z. Να ξεκαθαρισθεί εδώ πως όλες οι μετρήσεις έγιναν με το y σταθερό. Κάθε φορά που μετρούνταν προφίλ ταχύτητας, μετρούνταν ταυτόχρονα και η ένταση της τύρβης που επικρατούσε στο ίδιο σημείο.

Οι μετρήσεις έγιναν ρυθμίζοντας την συχνότητα του ρεύματος στον Inverter, έτσι ώστε να έχουμε την απαιτούμενη ταχύτητα στην ελεύθερη ροή (π.χ. $U_0=5\text{m/sec}$). Για την μέτρηση της ταχύτητας αυτό το μετρούσαμε 'μακριά' από την πλάκα ($z\approx 26\text{cm}$). Κάθε φορά που παίρναμε κάποιο προφίλ ταχύτητας ξεκινούσαμε από $z=0,5\text{cm}$.

Όσον αφορά την πίεση θεωρούμε πως αυτή είναι σταθερή κατά μήκος της πλάκας και ίση πάντα με αυτήν της ατμόσφαιρας. Έγινε προσπάθεια ώστε η πλάκα να είναι εντελώς επίπεδη και οριζόντια.

4.3.7.1 Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot-wire

Πριν πάρουμε μέτρηση με το hot-wire γινόταν μέτρηση της αντίστασης του C.T.A. (Constant Temperature Anemometer) και βαθμονόμηση (Calibration). Αυτά έχουν ως εξής :

Μέτρηση αντίστασης CTA

Η αντίσταση του hot-wire υπολογίζεται με τον τύπο:

$$R_{\theta} = R_{20^{\circ}\text{C}} * [1 + \alpha(\theta - 20^{\circ}\text{C})]$$

Όπου :

R_{θ} = η αντίσταση του hotwire στην θερμοκρασία θ .

α = συντελεστής θερμικής αντίστασης. Για τανγκστένιο $\alpha=0.36\% / ^{\circ}\text{C}$.

Η ένδειξη που παίρνουμε είναι η αντίσταση του hot-wire και του καλωδίου μαζί. Γνωρίζοντας το μήκος του καλωδίου, το οποίο στην περίπτωση μας είναι 5m, βρίσκουμε την αντίστασή του ($=1\text{ Ohm}$). Η αντίσταση του hot-wire που προκύπτει είναι για θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για να την αναγάγουμε στους 200°C χρησιμοποιούμε τη σχέση για το R_{θ} που γράψαμε προηγουμένως. Αν συμβολίσουμε με X την αντίσταση που προκύπτει αν αφαιρέσουμε το 1 Ohm του καλωδίου τότε έχουμε μετά από πράξεις : $R_{\theta} = X * 1,7$ ή $R_{\theta} = X * 1,645$. Αυτό γιατί υπάρχει κάποιο μικρό εύρος για τις τιμές του α . Τέλος αυτή την τιμή θέτουμε ως ένδειξη στο ανεμόμετρο.

Βαθμονόμηση Hot-wire

Με την βαθμονόμηση επιτυγχάνεται μετατροπή των Volts, που έχουμε σαν έξοδο στο ανεμόμετρο, σε ταχύτητα αέρα. Από την θεωρία δυο είναι οι πιθανές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή αυτή :

α) Ο νόμος του KING (1914) : $V^2 = A + B * U^{0.45}$

β) Πολυώνυμο η_ω βαθμού : $U = E_0 + E_1 * V + E_2 * V^2 + E_3 * V^3 + \dots + E_n * V^n$

Όπου :

U= ταχύτητα ροής

V= τάση που έχει σαν έξοδο το ανεμόμετρο

A , B , E_0 , E_1 , E_2 , E_3 = σταθερές παράμετροι που πρέπει να βρεθούν.

Στις δικές μας μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του KING : $V^2 = A + B * U^{0.45}$.

Συνεπώς έπρεπε να υπολογίσουμε τους συντελεστές A και B. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στο 4° Κεφάλαιο ('Πειραματική Μεθοδολογία')

Τοποθετείται το hot-wire πλάϊ-πλάϊ με τον σωλήνα Pitot (όχι πολύ κοντά για να μην αλληλεπιδρούν τα οριακά τους στρώματα) και στο ίδιο επίπεδο (ώστε να δέχονται την ίδια

Τοποθετείται το hot-wire πλάϊ-πλάϊ με τον σωλήνα Pitot (όχι πολύ κοντά για να μην αλληλεπιδρούν τα οριακά τους στρώματα) και στο ίδιο επίπεδο (ώστε να δέχονται την ίδια ταχύτητα αέρα). Επίσης και τα δύο πρέπει να είναι στην ελεύθερη ροή. Ο σωλήνας Pitot είναι συνδεδεμένος με ένα ψηφιακό μανόμετρο το οποίο είναι ακρίβειας 0,01Pa. Το hot-wire συνδέεται με τον H/Y μέσω της κάρτας A/D. Αφού μετά σφραγιστούν τα τυχόν ανοίγματα της αεροσήραγγας αρχίζει η βαθμονόμηση :

Με τον Inverter σαρώνεται ένα εύρος συχνοτήτων από 0 έως 55 Hz και ταυτόχρονα τρέχουμε το πρόγραμμα στον H/Y. Με αυτό το τρόπο επιλέγονται οι συχνότητες 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 Hz και γι'αυτές λαμβάνονται οι τιμές των αντίστοιχων πιέσεων (από το μανόμετρο) και των αντίστοιχων τάσεων (από το hot-wire και τον H/Y). Μετά σχηματίζονται τα διαγράμματα $E^2=f(u^{0,45})$ και $u=f(Hz)$ δηλαδή τετραγώνου της τάσεως συναρτήσει της ταχύτητας υψωμένης στο 0,45 και ταχύτητας συναρτήσει της συχνότητας, στο πρόγραμμα Excel[®] της Microsoft. Τα διατεταγμένα σημεία που έχουμε στο διάγραμμα τα προσεγγίζουμε με ένα πολυώνυμο 1^{ου} βαθμού με ακρίβεια συντελεστών 4 δεκαδικά.

Η συνάρτηση του πολυωνύμου προσέγγισης της $E^2=f(u^{0,45})$ αποτελεί και την συνάρτηση βαθμονόμησης του hot-wire. Αυτή η συνάρτηση όμως έχει μορφή π.χ. $y=3,4424+1,9621x$ όπου $A=3,4424$ και $B=1,9621$ ήταν οι συντελεστές που θέταμε στην συνέχεια στο πρόγραμμα Labview με το οποίο γινόταν η επεξεργασία των λήψεων στον H/Y.

Δίπλα φαίνεται το διάγραμμα της βαθμονόμησης, όπου διακρίνεται και η συνάρτηση από όπου προέκυπταν οι συντελεστές A και B.

Η συνάρτηση του πολυωνύμου προσέγγισης της $u=f(Hz)$ χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των κατάλληλων Hz του Inverter για την ταχύτητα ελεύθερης ροής που είχαμε κάθε φορά. Συνήθως ήταν 5 m/s.

Πρέπει όμως να επισημανθούν τα εξής:

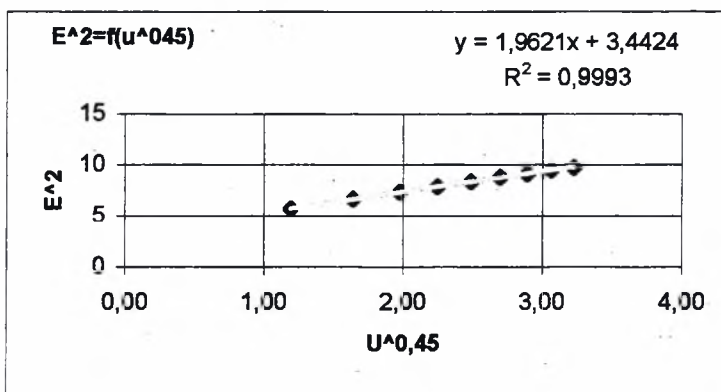
- Οι υπολογισμοί για το hot-wire (πυκνότητα ρευστών, μετάδοση θερμότητας) θεώρησαν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος 20 °C. Όμως η θερμοκρασία δεν είναι σταθερή όπως επίσης δεν είναι σταθερή η υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση.
- Το hot-wire διαβρώνεται με τον καιρό. Σε αυτό συντελεί και η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας του.
- Παρά τις προφυλάξεις που έχουν παρθεί (φίλτρο αέρα, στεγανοποίηση αεροσήραγγας) υπάρχει περίπτωση σκόνη να μπει και να επικαθίσει στο hot-wire προσδίδοντάς του άλλα χαρακτηριστικά.
- Ακόμα τα διάφορα 'ταρακουνήματα' που δέχεται το hot-wire από την λειτουργία της αεροσήραγγας ή από τις μετακινήσεις που του έκανα για τις μετρήσεις, μπορεί να του αλλάξουν τα χαρακτηριστικά.

Τα δυο τελευταία σωρευόμενα με τον χρόνο δίνουν ένα εντελώς διαφορετικό hot-wire.

Αλλαγή των χαρακτηριστικών του hot-wire έχει σαν συνέπεια την αλλαγή της αντίστασής του (που έχουμε υπολογίσει για καινούργιο hot-wire και για τους 20°C).

Τρόπος λήψεως των μετρήσεων

Η αντίσταση του ανεμομέτρου του Hot-wire ρυθμίστηκε μια φορά πριν αρχίσουν οι μετρήσεις. Λόγω όμως του ότι είναι επιρρεπής στις μεταβολές των ατμοσφαιρικών συνθηκών, αλλά και των λόγων που έχουν αναφερθεί παραπάνω για το Hot-wire, κάθε φορά που ήταν να γίνουν οι μετρήσεις, γινόταν το εξής:



της παρουσίας της πλάκας να μην επιδρούν στον αισθητήρα. Έτσι ευρισκόμενος ο αισθητήρας στην ελεύθερη ροή και ανεπηρέαστος από την παρουσία της πλάκας, έδινε την πραγματική ταχύτητα της ελεύθερης ροής. Η θέση αυτή άφηνε τον αισθητήρα ανεπηρέαστο και από την επίδραση του οριακού στρώματος των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας. Η ταχύτητα αυτή, όπως και η διακύμανσή της συμβολίζονται με U_0 (ταχύτητα αναφοράς U_0) και u_{RMS_0} αντίστοιχα. Το παραπάνω σημείο ελέγχου ήταν το ίδιο για όλες τις ταχύτητες αναφοράς που μετρούνταν κάθε φορά που επρόκειτο να παρθεί ένα νέο σετ μετρήσεων πάνω στην πλάκα και τη κοιλότητα. Η μέτρηση στο σημείο ελέγχου γινόταν κάθε φορά που είχαμε μεταβολή στην θερμοκρασία του εργαστηρίου $\Delta\theta > 1^\circ\text{C}$ και κάθε φορά που άλλαζε η γεωμετρία-διάταξη των μοντέλων μας (μετακίνηση κοιλότητων, εισαγωγή κυλίνδρου). Το τελευταίο γινόταν λόγω της διαφορετικής πτώσης πίεσης που δημιουργούνταν εμπρός από τον ανεμιστήρα από την παρουσία διαφορετικού μοντέλου, έχοντας ως αποτέλεσμα η ταχύτητα της ελεύθερης ροής να διαφοροποιείται, παρά το σταθερό αριθμό των Hz στον Inverter. Η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης θεωρήθηκε αμελητέα, καθώς επηρεάζει ελάχιστα το hot-wire συγκρινόμενη με την μεταβολή θερμοκρασίας. Εξάλλου οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων ήταν σχεδόν σταθερές χωρίς αξιοσημείωτες μεταβολές.

Στη συνέχεια παίρναμε τα προφίλ ταχυτήτων. Κατόπιν, στην επεξεργασία τους, τα διαγράμματα του κάθε προφίλ της ταχύτητας αλλά και της διακύμανσης αυτής αδιαστατοποιήθηκαν με βάση την ταχύτητα αναφοράς U_0 για την κάθε ομάδα μετρήσεων. Έτσι απαλείφθηκαν τα τυχόν λάθη λόγω της αλλαγής χαρακτηριστικών του hot-wire.

Τα σημεία που μετρούνταν σε κάθε θέση x κατά μήκος των πλακών-κοιλότητας ξεκινούσαν :

Στην ελεύθερη ροή ($x=-24\text{cm}$) εμπρός από την ακμή προσβολής της εμπρός πλάκας, από το -10cm ανεβαίνοντας μέχρι το $+28\text{ cm}$ με βήμα που κυμαινόταν από 1cm έως 2cm , ανάλογα με την θέση την οποία βρισκόμασταν ως προς την πλάκα.

Στην περιοχή πάνω από τις πλάκες ή την κοιλότητα (που ήταν τοποθετημένη στην κάτω θέση), από το $+0,5\text{cm}$ ανεβαίνοντας μέχρι το $+28\text{ cm}$ με βήμα που κυμαινόταν από $0,5\text{cm}$ έως 2cm , ανάλογα με την θέση την οποία βρισκόμασταν ως προς την πλάκα.

Οι θέσεις που έγιναν οι μετρήσεις φαίνονται πολύ παραστατικά στο Σχήμα 4.3.

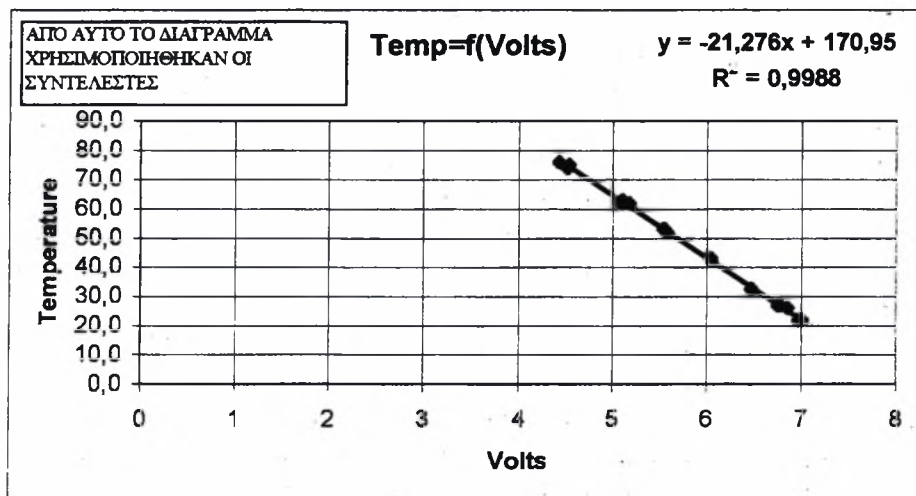
Τέλος, για την δημιουργία των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα H/Y: Microsoft Excel.

4.3.7.2 Μέθοδος μετρήσεων με το Cold – wire

Βαθμονόμηση Cold-wire

Μετρώντας την θερμοκρασία που μας δίνει ο αισθητήρας μέσα σε ροή θερμού αέρα του οποίου αυξάναμε σταδιακά την θερμοκρασία, την συγκρίναμε με θερμοζεύγος (thermocouple) που βρίσκονταν και αυτό μέσα στην ίδια ροή κοντά στον αισθητήρα (προσέχοντας πάντα να μην αλληλεπιδρούν τα οριακά τους στρώματα). Το θερμοζεύγος έδινε σήμα σε ένα ψηφιακό θερμομέτρο ακριβείας. Στη συνέχεια σχηματίζαμε το διάγραμμα $\text{Temp}(^\circ\text{C}) = f(\text{Volts})$ το οποίο προσεγγίζονταν με πολυώνυμο 1^{ου} βαθμού της μορφής $y = Ax + B$ π.χ. $y = -21,276x + 170,95$ όπου $A = -21,276$ και $B = 170,95$ είναι οι συντελεστές που θέταμε στην συνέχεια στο πρόγραμμα Labview με το οποίο γινόταν η επεξεργασία των λήψεων στον H/Y.

Παρακάτω υπάρχει το διάγραμμα της βαθμονόμησης, όπου διακρίνεται και η συνάρτηση από όπου προέκυπταν οι συντελεστές A και B.



Τρόπος λήψεως των μετρήσεων

Ο αισθητήρας μεταφερόταν στην ελεύθερη ροή σε ύψος 10cm έξω και πάνω ακριβώς από την κοιλότητα. Γινόταν μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα μέσω αυτού, έχοντας κλειστή την τροφοδοσία του ρεύματος προς την αντίσταση εσωτερικά της κοιλότητας. Η θερμοκρασία που λαμβάναμε συμβολίζεται με Θ_0 και είναι η θερμοκρασία η οποία χρησιμοποιήθηκε για την αδιαστατοποίηση του κάθε προφίλ, της θερμοκρασίας αλλά και της διακύμανσης αυτής που λαμβάναμε. Η παραπάνω διαδικασία τηρούνταν κάθε φορά πριν πάρουμε μέτρηση ενός προφίλ θερμοκρασίας σε κάποια θέση μέσα στην κοιλότητα (π.χ. x_A , x_B , κτλ.)

Ξεκινούσαμε μέτρηση με τον αισθητήρα Cold-wire τοποθετημένο στα +5mm πάνω από το πάτωμα της κοιλότητας και ανεβαίναμε μέχρι τα +100mm. Δηλαδή μετρούσαμε και 40mm εξωτερικά της κοιλότητας στην ελεύθερη ροή. Το τελευταίο γινόταν για παρατήρηση της ροής κοντά στο χείλος της κοιλότητας και πως επιδρά η ανωστική δύναμη λόγω της εκπεμπόμενης θερμότητας από το σύρμα της αντίστασης στην διαμόρφωσή της. Τα σημεία που μετρούσαμε ήταν τα: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100 mm πάνω από το πάτωμα της κοιλότητας. Μόνο στις θέσεις x_A και x_H που βρίσκονταν πολύ κοντά στα τοιχώματα της κοιλότητας μετρήθηκαν τα σημεία: 5, 15, 25, 35, 45, 55 mm πάνω από το πάτωμα της κοιλότητας, καθώς θέλαμε απλά μια εποπτική εικόνα του τι συμβαίνει πολύ κοντά στα τοιχώματα. Οι θέσεις που έγιναν οι μετρήσεις φαίνονται πολύ παραστατικά στο Σχήμα 4.4.

Ας σημειωθεί πως λόγω της στενότητας χώρου και τον πολύ λεπτών χειρισμών που έπρεπε να γίνουν κατά την μετακίνηση του αισθητήρα, στο προφίλ ακριβώς πάνω από το σύρμα της αντίστασης ξεκινήσαμε να μετράμε από το +9 με +10mm, ώστε να έχουμε ένα περιθώριο ασφαλείας 3 με 4mm πάνω από το σύρμα.

Τέλος, για την δημιουργία των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε τα προγράμματα H/Y: Microsoft Excel και Golden Software Surfer 8.

4.3.8 Μέτρα Ασφαλείας

Σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων με Hot-wire και Cold-wire ελήφθησαν τα εξής μέτρα ασφαλείας:

Ο σωλήνας συγκράτησης του αισθητήρα να μην ακουμπά πουθενά αλλού εκτός από τον βερνιέρο όπου στηρίζονταν. Αυτό γινόταν για την αποφυγή εισαγωγής σφάλματος στο σήμα λήψης από τις δονήσεις του πλαισίου της αεροσήραγγας. Ακόμα και οι κολλητικές ταινίες με τις οποίες σφραγίζαμε το άνοιγμα από όπου περνούσε ο σωλήνας του αισθητήρα, αποφεύχθηκε να ακουμπούν σε αυτόν.

Επίσης και για το καλώδιο 5m μεταφοράς του σήματος από τον αισθητήρα στον Η/Υ μέσω του ανεμομέτρου, έγινε προσπάθεια να μην αγγίζει την αεροσήραγγα στο μέτρο του δυνατού.

Έγινε προσπάθεια όσες συσκευές εξέπεμπαν ισχυρά Ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ιδίως ο Μετασχηματιστής-Μετατροπέας του ρεύματος, να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν μακρύτερα ήταν πρακτικά εφικτό από το ανεμόμετρο (C.T.A. ή C.C.A. ανάλογα πιο χρησιμοποιούνταν κάθε φορά) και από το καλώδιο λήψης δεδομένων του αισθητήρα.

Λόγω της αναγκαστικής ύπαρξης όμως των διαφόρων συσκευών που παρήγαγαν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Η/Υ, Μ/Σ, Παλμογράφος) είχαμε κάποιο «θόρυβο» στο σήμα που θα λαμβάναμε από το καλώδιο του hot-wire (ή του cold-wire). Αυτός ο θόρυβος μετρήθηκε πως έδινε μια απόκλιση στην ταχύτητα u ίση με $\pm 0,003 \text{ m/sec}$ και στο RMS της ταχύτητας ίση με $\pm 0,002 \text{ m/sec}$.

Ακόμη προσέχτηκε κατά την διάρκεια των μετρήσεων στην αεροσήραγγα να μην υπάρχει κίνηση εμπρός ή πίσω από αυτή, που θα επηρέαζε την ροή του αέρα μέσα σε αυτήν. Ομοίως αποφεύχθηκε η δημιουργία ρευμάτων αέρα από ανοιχτές πόρτες του εργαστηρίου.

Συχνές λήψεις μετρήσεων της ταχύτητας στην ελεύθερη ροή πριν ξεκινήσουμε νέα ομάδα μετρήσεων αλλά και της θερμοκρασίας ελεύθερης ροής πριν ξεκινήσουμε μέτρηση σε νέα θέση μέσα στην κοιλότητα. Έτσι αδιαστατοποιώντας αργότερα τις ταχύτητες, τις θερμοκρασίες και τις διακυμάνσεις αυτών με τα U_0 , Θ_0 να πάρουμε σωστά αποτελέσματα αλλά το κυριότερο συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Επίσης ελέγχθηκε η ακρίβεια του σωλήνα Pitot-Static που χρησιμοποιήθηκε κάνοντας το παρακάτω πείραμα: Τοποθετημένο στην ελεύθερη ροή ο υπό έλεγχο σωλήνας και ένας άλλος δίπλα-δίπλα (τόσο ώστε να μην αλληλοεπηρεάζονται από τα οριακά τους στρώματα).

Στη συνέχεια επιλέχθηκε συχνότητα ίση με 16,7 Hz στο Inverter που αντιστοιχεί στην ταχύτητα 5m/s, η οποία είναι και η ταχύτητα ελεύθερης ροής των περισσότερων πειραμάτων που διεξήχθησαν, και μετρήθηκε η ένδειξη που έδινε ο καθένας τους στο ψηφιακό μανόμετρο. Και οι δύο έδωσαν την ίδια ένδειξη 28 Pa. Συνθήκες περιβάλλοντος την ημέρα του παραπάνω πειράματος: $\theta=19,7^\circ\text{C}$ $P=1\text{bar}$

Παρακάτω παρατίθεται σε πίνακα η ακρίβεια των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν:

ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΟΡΓΑΝΩΝ	
Hot-wire	$\pm 0,00001 \text{ V}$
Cold-wire	$\pm 0,00001 \text{ V}$
Ψηφιακό Μανόμετρο	$\pm 0,01 \text{ Pa}$
Σωλήνας Pitot-Static	100% αληθής ένδειξη

4.3.9 Μέθοδος μέτρησης Μεταβατικών Φαινομένων (Transient Effects)

Το πείραμα "Transient Effects" αφορούσε την εύρεση του χρόνου καθαρισμού (απόπλυσης) της κοιλότητας από μια συγκέντρωση μεγέθους όπως η θερμοκρασία. Έτσι έχοντας την κοιλότητα 60mm x 60mm βυθισμένη, πήραμε μετρήσεις θερμοκρασίας στις θέσεις xA (ανάντη της ροής), xΔ (μέση πλάτους κοιλότητας) και xH (κατάντη της ροής). Οι μετρήσεις στις θέσεις xA και xH έγιναν στο ύψος του χείλους της κοιλότητας, ενώ για την θέση xΔ οι μετρήσεις έγιναν στα $z=60\text{mm}$ (χείλος κοιλότητας) $z=30\text{mm}$ (μέσο ύψος κοιλότητας) και $z=9\text{mm}$ (3mm πάνω από το σύρμα της αντίστασης).

Η διαδικασία ήταν ως εξής:

Αφού τοποθετούσαμε τον αισθητήρα Cold-wire στο επιθυμητό σημείο, αρχίζαμε να παίρνουμε την μέτρηση, "τρέχοντας" το πρόγραμμα Labview για το Cold-wire στον Η/Υ.

Τα δεδομένα που αποθηκεύονταν ήταν:

- η μέση θερμοκρασία Θ_{mean} της ροής στο συγκεκριμένο σημείο, από ένα δείγμα 60000 μετρήσεων με συχνότητα 1000Hz, δηλαδή η μέτρηση διαρκούσε 60sec.
- η μέση τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας από την μέση τιμή της, Θ_{RMS} .

$$\Theta_{RMS} = \frac{\sqrt{\Sigma((\Theta - \Theta_{mean})^2)_{mean}}}{N(=60000)}$$

Και το αρχείο τύπου .dat όπου περιέχονταν τα δεδομένα των 60000 θερμοκρασιών. Από το οποίο στη συνέχεια με ανάλυση P.S.D. εξάγονταν συμπεράσματα για τη συχνότητα εκροής δινών από την κοιλότητα και για την μορφή της ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης).

Η αντίσταση δεν ήταν αναμμένη συνεχώς στην διάρκεια των 60sec που διαρκούσε η κάθε μέτρηση. Από 0sec έως 10sec ήταν σβηστή, εν συνεχεία στο διάστημα από 10sec έως 40sec τροφοδοτούνταν με ρεύμα και από τα 40sec έως τα 60sec την είχαμε σβηστή.

Δηλαδή οι χρόνοι για την αντίσταση είχαν ως εξής:

- 0sec → 10sec = σβηστή
- 10sec → 40sec = αναμμένη (28Volts 0,45A)
- 40sec → 60sec = σβηστή

4.3.10 Μέθοδος οπτικοποίησης της ροής με νήματα

Κολλήθηκαν πάνω στην επιφάνεια των πλακών στην μέση ($y=0$) και κατά μήκος τους, νήματα μικρού μήκους (3-4cm). Αυτό έγινε για να φανερωθούν οι περιοχές αποκολλημένης και ανακυκλοφορούσας ροής, καθώς με το Hot-wire δεν μπορέσαμε να μετρήσουμε χαμηλότερα από το ύψος $z=0,5\text{cm}$ πάνω από την επιφάνεια των πλακών. Το πείραμα έγινε για δύο διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής, τις $U_0=5\text{m/s}$ (16,7Hz) και $U_0=10\text{m/s}$ (33,4Hz). Επίσης τοποθετήθηκε ο κύλινδρος Ø60mm στις εξής θέσεις σχετικά με την κοιλότητα 9που ήταν βυθισμένη):

- ανάντη της κοιλότητας $4*D$ και πάνω $z=2*D$
- ακριβώς πάνω από την κοιλότητα $z=2*D$
- ακριβώς πάνω από την κοιλότητα $z=12\text{mm}$

Στη συνέχεια έγινε μαγνητοσκόπηση με κάμερα C.C.D. Αργότερα μεταφέρθηκαν τα δεδομένα με CD σε H/Y, όπου και επακολούθησε μελέτη των μαγνητοσκοπήσεων και εντοπισμός των περιοχών ενδιαφέροντος.

4.3.11 Ατμοσφαιρικές Συνθήκες και ρυθμίσεις

Μια βασική παράμετρος που έπρεπε να προσεχθεί ιδιαίτερα, όπως προαναφέρθηκε εξάλλου, ήταν η αλλαγή των ατμοσφαιρικών συνθηκών του εργαστηρίου. Τέτοιες συνθήκες ήταν η θερμοκρασία και η πίεση της ατμόσφαιρας που επικρατούσε κάθε φορά που ετοιμαζόμασταν να πάρουμε μια μέτρηση. Και αυτό γιατί τα όργανα βαθμονομούνταν για συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση κάθε φορά και μια αλλαγή σε αυτές τις παραμέτρους χωρίς ταυτόχρονη επαναβαθμονόμηση των οργάνων θα έδινε λανθασμένες μετρήσεις.

Ο βασικός παράγοντας η μεταβολή του οποίου δίνει μεγάλο σφάλμα είναι η θερμοκρασία.

Για αυτό και προσέχαμε πάντα τις αλλαγές της θερμοκρασίας, ώστε αν χρειαζόταν, να βαθμονομούσαμε εκ νέου τα μετρητικά μας όργανα.

Η ατμοσφαιρική πίεση θεωρήθηκε σταθερή.

Χαρακτηριστικά, για να δειχθεί πως διαφοροποιούνται κάποιες παράμετροι των μετρήσεων παρόλο που έχουμε την ίδια ταχύτητα ελεύθερης ροής, ακολουθεί ένας πίνακας όπου φαίνονται τα Hz ρύθμισης του Inverter, για τις διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κάθε φορά.

Ταχύτητα Ελεύθερης ροής (m/s)	Θερμοκρασία (°C)	Ατμοσφαιρική Πίεση (Atm)	Πυκνότητα Αέρα (Kg/m ³)	Hz στον Inverter	Ημερομηνία
10	22,1	1	1,1956	32,9	20-03-2003
10	20	1	1,204	34,4	21-03-2003
5	21	1	1,2	17,1	21-03-2003
15	21,5	1	1,1977	51,9	28-03-2003
15	19	1	1,208	51,9	29-03-2003
15	19,7	1	1,205	51,9	29-03-2003
5	18,5	1	1,21	17,6	08-04-2003
5	21,5	1	1,198	16,7	09-04-2003
5	26	1	1,18	16,7	08-05-2003

4.3.12 Μεθοδολογία Οπτικοποίησης

Έπρεπε να καλυφθεί όλος ο χώρος μετρήσεων (test section) της αεροσήραγγας με αντιθαμβωτικό χαρτόνι μαύρου χρώματος, ώστε να δημιουργηθεί ένας σκοτεινός θάλαμος. Η κάλυψη του χώρου θα ήταν περιμετρική από όλες τις πλευρές, ώστε να μην αφήνονται περιθώρια διείσδυσης του φωτός μέσα σε αυτόν. Για τον σκοπό αυτό κολλήθηκε στα πλαϊνά τοιχώματα το μαύρο χαρτόνι. Στο επάνω μέρος, όπου υπάρχουν οι έντεκα συρταρωτές πλάκες που κλείνουν το χώρο των μετρήσεων, κόπηκε το χαρτί σε διαστάσεις ίσες με κάθε πλάκα και κολλήθηκε από την πλευρά της που είναι εσωτερική στην αεροσήραγγα κατά την τοποθέτησή της. Έτσι επιτεύχθηκε ευελιξία στο να μεταχειριζόμαστε τις πλάκες κανονικά για όλες τις θέσεις των μετρήσεών μας. Στη συνέχεια ανοίχτηκε σε ένα από τα μαύρα χαρτιά της μιας κατακόρυφης πλευράς του χώρου μετρήσεων ένα «παράθυρο» μέσα από το οποίο θα σκόπευε η ψηφιακή κάμερα με την οποία θα παρατηρούσαμε τον καπνό. Επειδή ενδιέφερε η κάμερα να εστιάζει ακριβώς εκεί που βγαίνει ο καπνός, μαγνητοσκοπώντας το φαινόμενο όχι σε όλη του την έκταση τρισδιάστατα, αλλά σε μια δισδιάστατη επιφάνεια που έτεμνε κάθετα την οπή εξόδου του καπνού, αποφασίστηκε να δημιουργηθεί μια λεπτή δέσμη φωτός η οποία εισερχόμενη από μια λεπτή σχισμή πλάτους 5 mm και μήκους 400 mm που θα βρισκόταν στην κάτω πλευρά του χώρου δοκιμών, θα «σάρωνε» μια επιφάνεια, περνώντας από το ακροφύσιο καπνού.

Για να επιτευχθεί το παραπάνω κατασκευάστηκε ένα μεταλλικό κουτί με μια σχισμή των παραπάνω διαστάσεων στο επάνω μέρος του. Μέσα σε αυτό τοποθετήθηκαν με προσοχή ώστε να έχουν τη δυνατότερη μικρότερη απόκλιση των φωτεινών δεσμών τους, δύο προβολείς. Περιμετρικά όπου υπήρχε άνοιγμα στο κουτί κλείστηκε με αντιθαμβωτικό μαύρο χαρτόνι. Το κουτί με τους προβολείς τοποθετήθηκε κάτω από το διαφανές πλέξιγκλας της αεροσήραγγας (test section). Λόγω της υπερθέρμανσης του πλέξιγκλας που θα προκαλούνταν από τους προβολείς, το κουτί τοποθετήθηκε περίπου 15 cm από αυτό και δεν ήταν συνεχώς αναμμένοι. Άναβαν μόνο κατά τη διάρκεια που γινόταν η κινηματογραφική λήψη, η οποία διαρκούσε 1-2 min. Επιλέχθηκε η διάρκεια μαγνητοσκοπήσεως για κάθε διαφορετική θέση των μοντέλων να διαρκεί αρκετά λεπτά, ώστε να υπάρχουν αρκετές περίοδοι του φαινομένου για να παρατηρηθεί η επαναληψιμότητά του.

Περιμετρικά στο κουτί με τους προβολείς, καλύπτοντας την απόσταση των 15 cm μέχρι την αεροσήραγγα, τοποθετήθηκε πάλι μαύρο χαρτόνι, ώστε να αποφευχθούν οι τυχόν ανακλάσεις της δέσμης του φωτός. Ακόμη και οι κολλητικές ταινίες αποφεύχθηκε στο μέτρο του δυνατού να είναι εμφανείς από την μέσα πλευρά της αεροσήραγγας, όπου θα γινόταν η λήψη για να μην προκαλούν αντανάκλασεις στην κάμερα. Γενικά λήφθηκε κάθε δυνατό μέτρο για περιορισμό - εκμηδενισμό των αντανάκλασεων του φωτός. Η ψηφιακή κάμερα τοποθετήθηκε απέναντι ακριβώς από την κοιλότητα σκοπεύοντας από το «παράθυρο» που ανοίχτηκε γι' αυτό το λόγο στο χαρτόνι. Οι λήψεις γίνονταν το βράδυ και σβήνονταν όλα τα φώτα του εργαστηρίου πλην των προβολέων του κουτιού κάτω από τον χώρο μετρήσεων της αεροσήραγγας. Μετά το τέλος των μαγνητοσκοπήσεων τα δεδομένα αποθηκεύονταν σε CD (Compact Disk).

4.3.12.1 Πρόγραμμα VirtualDub-1

Με το CD μεταφέρονταν τα δεδομένα στον H/Y. Η αρχική τους μορφή ήταν .MEPG (αρχεία ταινίας) και μέσω κατάλληλου προγράμματος λογισμικού H/Y (software) μετατρέπονταν σε εικόνες καρέ – καρέ τύπου .jpeg και γινόταν περαιτέρω επεξεργασία. Αυτό το πρόγραμμα ήταν το **VirtualDub-1**.

Η ανάλυση των αρχείων αυτών καθώς και των εικόνων που προέκυψαν από αυτά ήταν 384 x 288. Το 384 είναι ο αριθμός των στοιχείων εικόνας (Picture Element) κατά τον άξονα x και αντίστοιχα το 288 είναι ο αριθμός των στοιχείων εικόνας (Picture Element) κατά τον άξονα y. Ο ρυθμός δειγματοληψίας της κάμερας ήταν 25 καρέ το δευτερόλεπτο (25 fps), δηλαδή

δηλαδή ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών ήταν ίσος με 0,04 sec (1/25). Ιδανικά θα ήταν καλύτερο να υπήρχε κάμερα με πολλά frames/sec ώστε να μπορεί να εξαχθεί πληροφορία για τις πολύ γρήγορες κινήσεις των ρευστών, π.χ. λόγω δινών Von-Karman ίσων με π.χ. 18Hz.

Το πρόγραμμα **VirtualDub-1** μετατρέπει κάθε καρέ του αρχείου **.MEPG** σε μια φωτογραφία - αρχείο τύπου **.bmp** ή **.jpeg** ή οποιουδήποτε άλλου τύπου επιλεχθεί. Η αρχική μορφή των αρχείων ήταν **.bmp** και μέσω κατάλληλου προγράμματος (software) μετατρέπονταν σε μορφή αρχείων τύπου **.jpeg**. Η ανάλυση των εικόνων είναι ίδια με αυτή των αρχείων **.MEPG**.

4.3.12.2 Πρόγραμμα IRFAN VIEW 32

Επειδή τα **.MEPG** ήταν έγχρωμα (βάθος ανάλυσης 24 RGB) χρειαζόταν να γίνει η μετατροπή των έγχρωμων εικόνων (RGB) σε γκρι (**gray scale**). Για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας **IRFAN VIEW 32** με την εντολή *convert to grey scale* του οποίου έγινε μετατροπή των αρχείων των έγχρωμων εικόνων **bmp** (24 RGB) σε γκρι **.jpeg** (8 bit). Αυτό σημαίνει η τιμή του κάθε pixel της γκρι **.jpeg** εικόνας λαμβάνει μια τιμή μεταξύ 0 και 255 (συνολικά 28 διακριτές τιμές). Η τιμή 0 αντιστοιχεί στο μαύρο και η τιμή 255 στο λευκό. Ενδιάμεσες τιμές αντιστοιχούν σε διάφορα επίπεδα του γκρι. Γνωρίζοντας τις πραγματικές διαστάσεις της πειραματικής διάταξης (π.χ. διαστάσεις της κοιλότητας) βρέθηκε η αντιστοιχία μεταξύ mm (πραγματικό μήκος) και pixel η οποία έχει ενσωματωθεί στα προγράμματα. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης μεγέθους των διαστάσεων του pixel. Για πολύ μικρές κλίμακες, μικρότερες δηλαδή κάθε φορά από τις διαστάσεις των pixels δεν μπορούμε να έχουμε εικόνα του τι γίνεται. Για την εύρεση μεγεθών σε μια περιοχή που η διάσταση της είναι μεγαλύτερη του ενός pixel μπορούμε να ολοκληρώσουμε τις τιμές που προκύπτουν από τα pixels που αποτελούν την εκάστοτε περιοχή.

4.3.12.3 Χρήση MATLAB για την υπολογιστική μέθοδο ψηφιακής ανάλυσης εικόνας

Για την εξαγωγή και ανάλυση των συχνотήτων των περιοδικοτήτων της ροής (πιο συγκεκριμένα της συχνότητας απόσπασης δινών της ακολουθίας **Von Karman**) καθώς και μεγεθών όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, χρησιμοποιήθηκαν προγράμματα σε περιβάλλον **MATLAB (MATLAB 6.1)**. Το υπολογιστικό πακέτο **MATLAB 6.1** περιέχει στις βιβλιοθήκες του περίπου 100 ηλεκτρονικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται για ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.

Ο προγραμματισμός των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, αποτελεί μέρος της διπλωματικής εργασίας του κ. Κωνσταντίνου Τσικλιφή (Μετ/κού φοιτητή του T.M.M.B.).

Η μετέπειτα επεξεργασία τους για προσέγγιση των δικών μας πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε από τον κ. Εμμανουήλ Αλυγιάκη (Υποψήφιο Διδάκτορα του T.M.M.B.) καθώς ήταν απόρροια της δικής του Μεταπτυχιακής Διατριβής.

4.3.12.4 Πρόγραμμα CONVGRAY

Η χρησιμοποίηση αυτού του προγράμματος έγινε για να αφαιρεθεί ο ηλεκτρονικός θόρυβος από τις φωτογραφίες. Χρησιμοποιεί ένα φίλτρο συνέλιξης (**convolution filter**) **Gaussian 15x15**, το οποίο 'επεμβαίνει' στις **gray scale (jpg 8 bit)** εικόνες με σκοπό την ομαλοποίηση της (**smoothing**). Έτσι ομαλοποιούνται οι ροϊκές γραμμές του καπνού. Πρέπει όμως κάθε φορά μέσα από μια ομάδα εικόνων τύπου **.jpeg** που θα αναλυθεί με το **Matlab**, να

“bath” εικόνα. Αυτή η εικόνα επιλέγεται να είναι εκείνη που δεν έχει ακόμη αρχίσει να εμφανίζεται καπνός. Δηλαδή λίγο πριν την εξέλιξη του φαινομένου. Έτσι πληροφορείται το πρόγραμμα πώς είναι το ροϊκό πεδίο όταν είναι καθαρό από καπνό. Κρατώντας λοιπόν αυτή την εικόνα ως εικόνα αναφοράς, την “αφαιρεί” από τις άλλες με τον καπνό, φιλτράροντάς τη. Οι διαφορές που προκύπτουν είναι διαφορές στην φωτεινότητα του καπνού, οι οποίες εξαρτώνται χωροχρονικά. Σε κάθε θέση αλλά και για κάθε χρονική στιγμή δεν έχουμε την ίδια ένταση ή μορφή καπνού, γιατί η ροή μέσα στην κοιλότητα είναι τυρβώδης. Αυτές λοιπόν οι διαφορές μεταφράζονται στην συνέχεια σε ένταση των δινών, με την χρήση άλλων προγραμμάτων μέσα στο περιβάλλον Matlab.

4.3.12.5 Πρόγραμμα GRAY

Η εντολή `readim` ‘διαβάζει’ την εικόνα (τη φιλτραρισμένη) και δημιουργεί ένα πίνακα δύο διαστάσεων (δηλαδή η ανάλυση σε pixel) του οποίου η κάθε τιμή είναι ένας ακέραιος αριθμός μεταξύ 0-255. Ο καπνός που χρησιμοποιείται για οπτικοποίηση ‘αντικατοπτρίζει’ χωροχρονικά τις τροχιές του πραγματικού ρευστού. Έτσι γίνεται ορατός ο σχηματισμός των δινών στο πεδίο ροής. Κάθε δομικό στοιχείο της δίνης (χρωματισμένο pixel) έχει κάποια τιμή (0-255) ανάλογα με τη χωρική θέση που αντιπροσωπεύει το pixel αυτό του πεδίου ροής και ανάλογα με τη χρονική στιγμή του φαινομένου (αριθμός φωτογραφίας). Η πραγματική κίνηση του ρευστού μετατοπίζει τα μόρια του χρωματισμένου διαλύματος σε συγκεκριμένες θέσεις που παράλληλα με τη συνεχή διάχυση του καπνού με τον αέρα σε κάθε διακριτό σημείο (pixel της εικόνας) υπάρχει διαφορετική συγκέντρωση χρώματος που επιφέρει αλλαγή στην τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel (pixel intensity).

Επειδή το φαινόμενο είναι έντονα περιοδικό οι περιοδικές αυτές μεταβολές στην τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel φέρουν στο φως και τις συχνότητες του φαινομένου όπως θα εξηγηθεί και μαθηματικά παρακάτω.

Όλα τα παραπάνω ορίζονται με την έναρξη του προγράμματος **GRAY** από εμάς εισάγοντας τις συντεταγμένες της αρχής και του τέλους της περιοχής της εικόνας που θέλουμε να γίνει η ανάλυση της μαγνητοσκοπήσης. Αξίζει να σημειωθεί πως η αρχή καθώς βλέπουμε την εικόνα είναι η πάνω αριστερά γωνία (x_s, y_s) και το τέλος η κάτω δεξιά γωνία (x_e, y_e).

Επίσης για την διόρθωση των μικρομετακινήσεων και των περιστροφών της εικόνας ορίζεται το πιο φωτεινό σημείο μέσα σε μια εικόνα από μια ομάδα εικόνων, ως το σημείο αναφοράς, με συντεταγμένες (x_0, y_0) και (x_f, y_f). Οι παραπάνω συντεταγμένες που δίνονται για κάθε αλληλουχία εικόνων παραμένουν οι ίδιες και για τα παρακάτω προγράμματα που ακολουθούν.

4.3.12.6 Πρόγραμμα FFTGRAY

Τελικά οι τιμές των συχνοτήτων προκύπτουν μέσω της ανάλυσης Fourier. Πιο συγκεκριμένα για την ανάλυση ενός σήματος (στη συγκεκριμένη περίπτωση σήμα αποτελεί η τιμή της έντασης ακτινοβολίας του pixel) χρησιμοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform-DFT) ο οποίος βρίσκει τις συχνότητες του σήματος καθώς και το φάσμα ισχύος του. Βασίζεται στο μετασχηματισμό Fourier και χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα του σήματος λαμβάνουν διακριτές τιμές. Το MATLAB 6.1 έχει στη διάθεση του το γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform-FFT) ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος που έγινε γνωστός μετά από μία εργασία των Cooley και Tuckey (1965) και απαιτεί $N \log N$ αριθμητικές πράξεις για τον υπολογισμό του DFT ενώ ο παραδοσιακός τρόπος που εφαρμοζόταν μέχρι τότε απαιτούσε N^2 πράξεις. Κάθε περιοδική συνάρτηση $f(t)$ με περίοδο T , αναλύεται με σειρές Fourier στη μορφή:

$$f(t) = \alpha_o + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\alpha_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) + b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \right] \quad (1)$$

όπου:

$$\alpha_o = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$\alpha_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt$$

με $n=1,2,3,\dots\infty$

Κάθε όρος της σχέσης (1) ονομάζεται αρμονική και η συχνότητα του είναι πολλαπλάσιο της βασικής αρμονικής, η οποία προκύπτει για $n=1$. Η σχέση (1) γράφεται και στη μορφή :

$$f(t) = \alpha_o + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t - \phi_n\right) \quad \text{με } c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{και } \phi_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n}$$

όπου $n=1,2,3,\dots\infty$. Ο συντελεστής c_n ονομάζεται και πλάτος του φάσματος, ενώ η ισχύς του φάσματος ισούται με $0,5 \cdot c_n^2$.

Κάθε μη περιοδική συνάρτηση $f(t)$, μπορεί να αναπαρασταθεί με το μετασχηματισμό Fourier (αντίστροφο και ευθύ αντιστοίχως) ως εξής :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(v) e^{i2\pi v t} dv$$

$$\text{όπου } f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(v) e^{i2\pi v t} dt \quad \text{με } v = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$$

είναι ακόμα $F(v) = a(v) - ib(v)$ και το πλάτος του φάσματος ορίζεται ως :

$$c(v) = \sqrt{a(v)^2 + b(v)^2}$$

ενώ η ισχύς του φάσματος με $\frac{c(v)^2}{2}$

Έστω N η διάσταση του διανύσματος x , οι τιμές του οποίου αντιπροσωπεύουν μια σειρά δεδομένων ενός σήματος. Τότε, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) του διανύσματος x , θα είναι ένα διάνυσμα X

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-\frac{j2\pi}{N}(n-1)(k-1)} \quad \text{με} \quad 1 \leq k \leq N, \text{ ενώ ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier θα δίνεται από την σχέση:}$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) e^{\frac{j2\pi}{N}(n-1)(k-1)} \quad \text{με} \quad 1 \leq n \leq N.$$

Επίσης είναι $X(k) = a(k) - jb(k)$ και το πλάτος του φάσματος ορίζεται ως :

$$c(k) = \sqrt{a(k)^2 + b(k)^2}$$

ενώ η ισχύς του φάσματος ισούται με $\frac{c(k)^2}{2}$ με $1 \leq k \leq N$

Με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την εύρεση όλων των αρμονικών που επιδρούν στη μορφή μιας συνάρτησης, κυρίως μέσα από την ισχύ του φάσματος της συχνότητας. Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή για την εφαρμογή του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT).

Σύμφωνα με το **θεώρημα του Nyquist**, αν f_s είναι η συχνότητα της δειγματοληψίας, τότε η μέγιστη συχνότητα του αναλογικού σήματος που μπορούμε να μετρήσουμε σωστά είναι η

$$f_m < \frac{f_s}{2}.$$

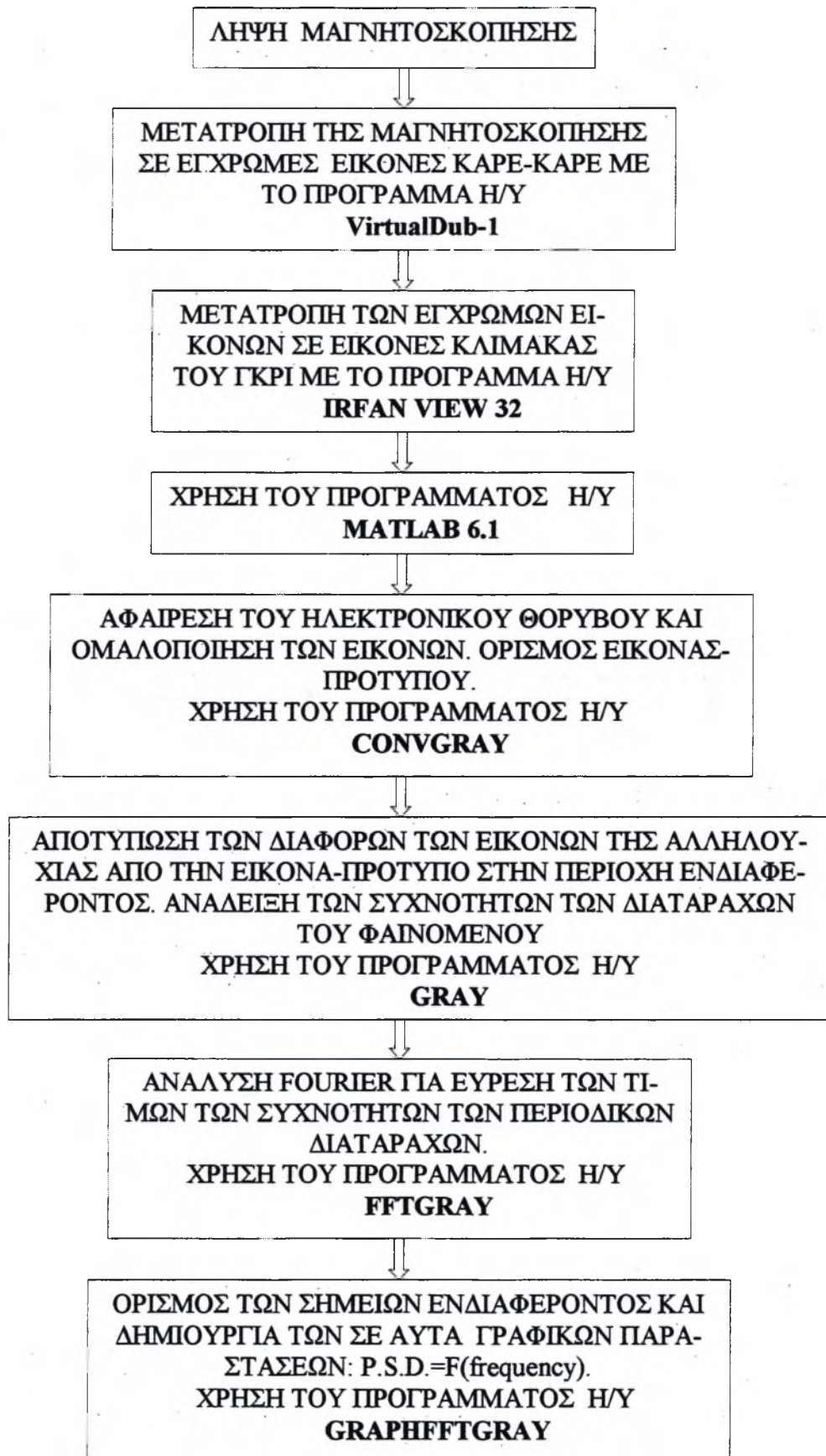
Η διαθέσιμη εντολή του προγράμματος είναι η FFT. Οι τελικές τιμές που χρησιμοποιούνται και στον τύπο του Strouhal προκύπτουν σε αυτό το στάδιο.

4.3.12.7 Πρόγραμμα GRAPHFFTGRAY

Σε αυτό το πρόγραμμα ορίζονται τα σημεία εκείνα του πεδίου ροής (leeward, x Δ, downward), στα οποία θα εμφανιστούν τα διαγράμματα συχνοτήτων μετά την ανάλυση που προηγήθηκε στο προηγούμενο πρόγραμμα. Αυτό γίνεται δίνοντας πάλι τις συντεταγμένες αρχής και τέλους της εικόνας, επιπροσθέτως όμως δίνονται και το οριζόντιο **pace x** και κατακόρυφο βήμα **pace y**, με το οποίο το πρόγραμμα θα εντοπίσει τα σημεία ενδιαφέροντος.

Παρακάτω ακολουθεί εποπτικό διάγραμμα όπου φαίνεται η σειρά με την οποία χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα ανάλυσης των Μαγνητοσκοπήσεων

Σειρά με την οποία χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα ανάλυσης των Μαγνητοσκοπήσεων.



4.4 ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ

4.4.1 ΠΑΧΟΣ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (*boundary layer thickness*)

Το πάχος του οριακού στρώματος είναι αδύνατο να οριστεί με ένα σαφή τρόπο, καθώς η επίδραση του ιξώδους ελαττώνεται ασυμπτωτικά πηγαίνοντας σε μεγαλύτερη απόσταση από την επιφάνεια του στερεού. Η παράλληλη συνιστώσα της ταχύτητας u τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή U_0 της εξωτερικής ροής. Δηλαδή η συνάρτηση u/U_0 τείνει ασυμπτωτικά στο 1.

Ορισμός:

Ονομάζουμε πάχος του οριακού στρώματος σε ένα σημείο x την τιμή του z για την οποία η ταχύτητα u είναι ίση με το 99% της ταχύτητας στην ελεύθερη ροή U_0 .

Επειδή λόγω των διαφόρων σφαλμάτων που μπορούν να υπεισέλθουν στις μετρήσεις που κάνουμε, συμφέρει να αδιαστατοποιούμε το z και το u με τα εξής αδιάστατα:

$$z : \quad \eta = z/\delta \quad \text{όπου} \quad \delta = (\nu \cdot x / U_0)^{1/2} \quad \text{έτσι ώστε} \quad \eta = z/(\nu \cdot x / U_0)^{1/2} = z \cdot (U_0 / \nu \cdot x)^{1/2} \Rightarrow \\ \Rightarrow z = \eta \cdot (\nu \cdot x / U_0)^{1/2}.$$

$$u : \quad u/U_0$$

όπου :

x = οριζόντια απόσταση από την ακμή προσβολής της πλάκας

z = κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια της πλάκας

ν = κινηματικό ιξώδες ρευστού (για αέρα $\nu = 1,513 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$)

4.4.2 ΣΤΡΩΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Ο Blasius βρήκε ότι το πάχος του οριακού στρώματος είναι ανάλογο της ποσότητας $(\nu \cdot x / U_0)^{1/2}$ και ίσο με 5. Επομένως αν ένα οριακό στρώμα είναι πράγματι στρωτό όταν διαιρεθεί με την παραπάνω ποσότητα θα πρέπει το αποτέλεσμα να ισούται με 5.

Για το στρωτό οριακό στρώμα πάνω από επίπεδη πλάκα ο L. Howarth έλυσε την διαφορική εξίσωση 3^{ου} βαθμού του Blasius που προκύπτει για αυτό:

$$f \cdot f'' + 2 \cdot f''' = 0$$

με οριακές συνθήκες : $\eta = 0 \Rightarrow f = 0, f' = 0 \quad \eta = \infty \Rightarrow f' = 1$

Το θεωρητικό πάχος του οριακού στρώματος κατά Howarth δίνεται από τον τύπο:

$$\delta = \frac{5 \cdot x}{\sqrt{Re_x}} = 5 \cdot \sqrt{\frac{\nu \cdot x}{U_0}}$$

Το πραγματικό πάχος του οριακού στρώματος το βρίσκουμε από τα διαγράμματα των προφίλ που έχουμε πάρει ως εξής:

Αφού βρούμε την U_0 παίρνοντας τον μ.ο. των σημείων που βρίσκονται στην ίδια ευθεία εκεί που το προφίλ της ταχύτητας γυρίζει προς τα πίσω, βρίσκουμε το σημείο από αυτά του προφίλ που έχει την αμέσως μεγαλύτερη ταχύτητα από το $0,99U_0$. Το z αυτού του σημείου θα είναι και το πειραματικά μετρούμενο πάχος.

4.4.3 ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Για την κατανομή της ταχύτητας στο τυρβώδες οριακό στρώμα χρησιμοποιείται ο νόμος της εις την 1/7 δύναμης κατανομής της ταχύτητας (1/7-th-power law of velocity distribution). Βέβαια, αυτός ο νόμος προέρχεται από την μελέτη τυρβωδών οριακών στρωμάτων σε σωλήνα, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πλάκες επίπεδες όπως στην δική μας περίπτωση, στην μορφή:

$$u/U_o = (z/\delta)^{1/7}$$

όπου:

y = η απόσταση από την επιφάνεια της πλάκας

u = η ταχύτητα του ρευστού στον άξονα x

δ = το πάχος του οριακού στρώματος

U_o = η ταχύτητα της ελεύθερης ροής στον άξονα x

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ο τύπος που δίνει το θεωρητικό πάχος του τυρβώδους οριακού στρώματος:

$$\delta = \frac{0,37 * x}{Re^{1/5}} = 0,37 * x * \left(\frac{U_o * x}{\nu} \right)^{-1/5}$$

(από εδώ φαίνεται πως το πάχος είναι ανάλογο του $x^{4/5}$ στα τυρβώδη οριακά στρώματα).

όπου:

x = απόσταση από την ακμή προσβολής της πλάκας

ν = κινηματικό ιξώδες του ρευστού (για αέρα $\nu = 1,523 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$)

και τα άλλα μεγέθη όπως ορίστηκαν προηγουμένως.

Παρατήρηση:

Ο παραπάνω τύπος για το πάχος του οριακού στρώματος ισχύει σε τυρβώδη οριακά στρώματα. Οπότε, αν εγώ έχω μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή, το x δεν είναι η απόσταση από την ακμή προσβολής αλλά από το σημείο (περιοχή) μετάβασης και μετά. Μπορούμε όμως να θεωρήσουμε πως η ροή είναι εξαρχής (από την ακμή προσβολής) τυρβώδης, χωρίς σημαντικό λάθος.

4.4.4 Αριθμός REYNOLDS (Re)

Πριν από όλα όμως καλό θα ήταν να αναφέρουμε τις διάφορες μορφές που παίρνει ο αριθμός Re ο οποίος είναι αδιάστατος και σαν χαρακτηριστικό μήκος μπορεί να έχει τα εξής:

Αριθμός Re σχετικός με :	Συμβολισμός :	Τύπος :
Απόσταση από την ακμή προσβολής x	Re_x	$Re_x = \frac{U_o * x}{\nu}$
Χαρακτηριστική διάσταση κοιλότητας	Re_h	$Re_h = \frac{U_o * h}{\nu}$

Όπου

x = η απόσταση από την ημικυκλική ακμή προσβολής της εμπρός πλάκας.

ν = το κινηματικό ιξώδες του αέρα που για τις συνθήκες ατμοσφαιρικές συνθήκες των πειραμάτων μας λήφθηκε ίσο με $1,51 * 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$

h = το ύψος της κοιλότητας, που ήταν κοινό για κάθε κοιλότητα και ίσο με 0,06 (m).

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες των αρ. Re_x των πειραμάτων, για κάθε θέση x των μετρήσεων πάνω στις πλάκες και για τις τρεις διαφορετικές κοιλότητες. (Βέβαια εμείς πειραματιστήκαμε μόνο με την μεγάλη κοιλότητα, αλλά παραθέτονται οι αρ. Re_x ενδεικτικά και για τις άλλες κοιλότητες):

U_o (m/s)	αρ. Re_x για την ΜΕΓΑΛΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ (ύψος=60mm x πλάτος=60mm)					
	Re_{x3} (0,3m)	Re_{x4} (0,6m)	Re_{x5} (0,63m)	Re_{x6} (0,66m)	Re_{x7} (1,06m)	Re_{x8} (1,46m)
1,80	$0,36 \times 10^5$	$0,72 \times 10^5$	$0,75 \times 10^5$	$0,79 \times 10^5$	$1,26 \times 10^5$	$1,74 \times 10^5$
2,55	$0,51 \times 10^5$	$1,01 \times 10^5$	$1,06 \times 10^5$	$1,11 \times 10^5$	$1,79 \times 10^5$	$2,47 \times 10^5$
5,00	$0,99 \times 10^5$	$1,99 \times 10^5$	$2,09 \times 10^5$	$2,19 \times 10^5$	$3,51 \times 10^5$	$4,83 \times 10^5$
7,70	$1,53 \times 10^5$	$3,06 \times 10^5$	$3,21 \times 10^5$	$3,37 \times 10^5$	$5,41 \times 10^5$	$7,45 \times 10^5$

U_o (m/s)	αρ. Re_x για την ΜΕΣΑΙΑ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ (ύψος=60mm x πλάτος=30mm)					
	Re_{x3} (0,3m)	Re_{x4} (0,6m)	Re_{x5} (0,615m)	Re_{x6} (0,63m)	Re_{x7} (1,03m)	Re_{x8} (1,43m)
1,80	$0,36 \times 10^5$	$0,72 \times 10^5$	$0,73 \times 10^5$	$0,75 \times 10^5$	$1,23 \times 10^5$	$1,70 \times 10^5$
2,55	$0,51 \times 10^5$	$1,01 \times 10^5$	$1,04 \times 10^5$	$1,06 \times 10^5$	$1,74 \times 10^5$	$2,41 \times 10^5$
5,00	$0,99 \times 10^5$	$1,99 \times 10^5$	$2,04 \times 10^5$	$2,09 \times 10^5$	$3,41 \times 10^5$	$4,74 \times 10^5$
7,70	$1,53 \times 10^5$	$3,06 \times 10^5$	$3,14 \times 10^5$	$3,21 \times 10^5$	$5,25 \times 10^5$	$7,29 \times 10^5$

U_o (m/s)	αρ. Re_x για την ΜΙΚΡΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ (ύψος=60mm x πλάτος=15mm)					
	Re_{x3} (0,3m)	Re_{x4} (0,6m)	Re_{x5} (0,6075m)	Re_{x6} (0,615m)	Re_{x7} (1,015m)	Re_{x8} (1,415m)
1,80	$0,36 \times 10^5$	$0,72 \times 10^5$	$0,72 \times 10^5$	$0,73 \times 10^5$	$1,21 \times 10^5$	$1,69 \times 10^5$
2,55	$0,51 \times 10^5$	$1,01 \times 10^5$	$1,03 \times 10^5$	$1,14 \times 10^5$	$1,71 \times 10^5$	$2,39 \times 10^5$
5,00	$0,99 \times 10^5$	$1,99 \times 10^5$	$2,01 \times 10^5$	$2,04 \times 10^5$	$3,36 \times 10^5$	$4,69 \times 10^5$
7,70	$1,53 \times 10^5$	$3,06 \times 10^5$	$3,10 \times 10^5$	$3,14 \times 10^5$	$5,18 \times 10^5$	$7,22 \times 10^5$
10	$1,99 \times 10^5$	$3,97 \times 10^5$	$4,02 \times 10^5$	$4,07 \times 10^5$	$6,72 \times 10^5$	$9,37 \times 10^5$
15	$2,98 \times 10^5$	$5,96 \times 10^5$	$6,03 \times 10^5$	$6,11 \times 10^5$	$10,08 \times 10^5$	$14,06 \times 10^5$

Επίσης στις μετρήσεις μας είχαμε αριθμό Re_h όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής U_o (Συχνότητα Inverter)	Re_h
1,80 m/s (6Hz)	7152
2,55 m/s (8,5Hz)	10132
5,00 m/s (16,7Hz)	19868
7,70 m/s (25,6Hz)	30596
10,00 m/s (34,4Hz)	39735
15,00 m/s (51,9Hz)	59603

Παρατήρηση: Τα αναγραφόμενα Hz εξαρτώνται από τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες και την κατάσταση της αεροσήραγγας, όπως και του ανεμιστήρα της.

4.4.5 ΕΝΤΑΣΗ ΤΥΡΒΗΣ

Υπάρχουν πολλά πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα που αναφέρονται στον προσδιορισμό της αρχής της μετάβασης σε επίπεδη πλάκα με ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια :

Για ένταση τύρβης (%)	$Re_{x\text{ crit}} = U_{\infty} * x / \nu$	Σημείο μετάβασης x [m]
0,5	3,5 έως $5 * 10^5$	$x = (v/U_{\infty}) * 3,5 * 10^5$ ή $5 * 10^5$
<0,1	$\approx 2,8 * 10^6$	$x \approx (v/U_{\infty}) * 2,8 * 10^6$
0,08	$2,8 * 10^6$	$x = (v/U_{\infty}) * 2,8 * 10^6$

4.4.6 Αριθμός Strouhal (St) - Επεξεργασία P.S.D. (Power Spectra Density Estimation)

Σε αυτή την επεξεργασία γίνεται ανάλυση των συχνοτήτων μιας κυματομορφής που λαβαίνουμε με το hot-wire. Από την ανάλυση Fourier, όπως γνωρίζουμε, μπορούμε να αναλύσουμε ένα τυχαίο σήμα σε πολλά άλλα, με συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας του σήματος. Κάθε ένα σήμα από αυτά έχει την δική του συχνότητα που παρουσιάζεται με κάποια ένταση. Στην δική μας περίπτωση αντιπροσωπεύει την ένταση της τύρβης που έχουμε σε κάποιο σημείο x για ορισμένο z . Κάνοντας το διάγραμμα των εντάσεων συναρτήσει των συχνοτήτων παίρνουμε το διάγραμμα PSD.

Σημειωτέον η βασική κυματομορφή στην περίπτωσή μας είναι το σήμα της ταχύτητας από το ανεμόμετρο ή την ανάλυση της οπτικοποίησης της ροής για κάποιο σημείο x για ορισμένο z . Σε κάθε διάγραμμα εκεί που εμφανίζεται κάποια κορυφή (peak), μας δείχνει μια συχνότητα που επηρεάζει αισθητά το σήμα μας.

Αυτά τα peak είναι διαταραχές στο πεδίο ροής που μπορεί να μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για την αιτιολόγηση της διαμόρφωσης του οριακού στρώματος πάνω σε κάποιο σώμα. Στην προκειμένη περίπτωση στην επίπεδη πλάκα.

Από την επίλυση της εξίσωσης του αριθμού **Strouhal** βρίσκουμε από την διάσταση D την αιτία πρόκλησης αυτών των διαταραχών στο ροϊκό μας πεδίο.

$$St = \frac{f * D}{U_o}$$

όπου:

f = η συχνότητα σε Hz

U_o = η ταχύτητα της ελεύθερης ροής

D = κάποιο χαρακτηριστικό μέγεθος αντικειμένου στο ανάντι της ροής

Στην περίπτωσή μας ήταν η διάμετρος του κυλίνδρου $D=60\text{mm}=0,06\text{m}$.

Από την περιοχή αριθμού Re που υπολογίζεται στον παρακάτω πίνακα για την χαρακτηριστική διάσταση του κυλίνδρου που εισάγει διαταραχές στη ροή μας, βλέπουμε τις χαρακτηριστικές συχνότητες που αναμένουμε να παρατηρήσουμε από την ανάλυση P.S.D. με βάση την τιμή του αρ. St που για αυτούς τους αρ. Re είναι: $St=0,195$.

Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής U_0 (m/s)						
U_0	1,8	2,55	5	7,7	10	15
U_0/D	30	43	83	128	167	250
$D=0,06$ m						
Αριθμός Reynolds =	7138	10112	19828	30535	39656	59484
Αριθμός Strouhal =	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195
f (Hz) =	5,85	8,29	16,25	25,03	32,50	48,75

4.4.7 Αριθμός Grashof (Gr)

Για ένα συγκεκριμένο ρευστό ο αριθμός Grashof χαρακτηρίζει τον τύπο της ελεύθερης (όχι εξαναγκασμένης) ροής που αναμένεται να παρατηρηθεί. Δηλαδή ποιες δυναμικές διαδικασίες είναι οι επικρατέστερες, τότε η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης, ότι πληροφορία μας δίνει δηλαδή και ο αριθμός Re για την εξαναγκασμένη ροή. Ελεύθερη ροή χαρακτηρίζεται η ροή που προκαλείται λόγω διαφοράς πυκνοτήτων και εξαναγκασμένη λόγω διαφοράς πιέσεων.

Ο αριθμός Grashof ισούται με τον λόγο των αδρανειακών προς τις ιξώδεις δυνάμεις ενός ρευστού.

$$Gr = \frac{\left| \frac{u^* \nabla u}{\nu^* \nabla^2 u} \right|}{\left| \frac{u^* \nabla u}{\nu^* \nabla^2 u} \right|} \rightarrow Gr = \frac{g^* \alpha^* L^3 \theta}{\nu^2}$$

όπου:

$$g=9,81 \text{ m/s}^2$$

$\alpha=1/T$. όπου T = η απόλυτη θερμοκρασία του αέρα σε K.

Θ = η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας κάποιου σημείου μέτρησης και θερμοκρασίας αναφοράς.

L = η διάμετρος του σύρματος της αντίστασης (0,00015m στην δική μας περίπτωση)

ν = το κινηματικό ιξώδες του αέρα (m^2/s)

Έτσι λοιπόν, όταν ο αριθμός Gr είναι μεγάλος, οι ιξώδεις δυνάμεις είναι αμελητέες συγκρινόμενες με τις αδρανειακές δυνάμεις. Στην περίπτωση που ο αριθμός Gr είναι μικρός, τα φαινόμενα των αδρανειακών δυνάμεων είναι αμελητέα.

4.4.8 Αριθμός Rayleigh (Ra)

Σε προβλήματα συναγωγής, κάποιος θέλει να γνωρίζει όχι μόνο ποιες δυναμικές διαδικασίες είναι οι σπουδαιότερες, αλλά επίσης ποιες είναι καθοριστικές για την θερμοκρασιακή κατανομή που δημιουργείται.

Απάντηση στο ερώτημα αυτό δίνει ο αριθμός Rayleigh, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την περίπτωση της συναγωγής στα οριζόντια στρώματα και ο οποίος χαρακτηρίζει την κίνηση του ρευστού λόγω ανωστικών δυνάμεων οφειλομένων σε διαφορές πυκνότητας-θερμοκρασίας.

Ο αριθμός Rayleigh ισούται με:

$$Ra = Gr * Pr = \frac{g * a * \Theta * L^3}{\nu * \kappa}$$

όπου:

$$g=9,81 \text{ m/s}^2$$

$a=1/T$. όπου T = η απόλυτη θερμοκρασία του αέρα σε K.

Θ = η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας κάποιου σημείου μέτρησης και θερμοκρασίας αναφοράς.

L = το ύψος της κοιλότητας (0,060m στην δική μας περίπτωση)

ν = το κινηματικό ιξώδες του αέρα (m^2/s)

κ = η θερμοδιαχυτότητα σε (m^2/s)

$$\text{με } \kappa = \frac{\lambda}{\rho * c_p} \text{ όπου: } \rho = \text{η πυκνότητα του αέρα (kg/m}^3\text{)}$$

λ = ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα $\{\text{W}/(\text{m}^*\text{K})\}$

c_p = η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση $\{\text{J}/(\text{kg}^*\text{K})\}$

Pr είναι ο αριθμός Prandtl που ισούται με $Pr = \frac{\nu}{\kappa}$

Ο αριθμός Pr ουσιαστικά είναι ο λόγος του πόσο γρήγορα διαχέεται η ταχύτητα (momentum) σε σχέση με του πόσο γρήγορα διαχέεται η θερμοκρασία.

4.4.9 Αριθμός Nusselt (Nu)

Ο αριθμός Nusselt ισούται με:

$$Nu = \frac{h_a * l}{\lambda}$$

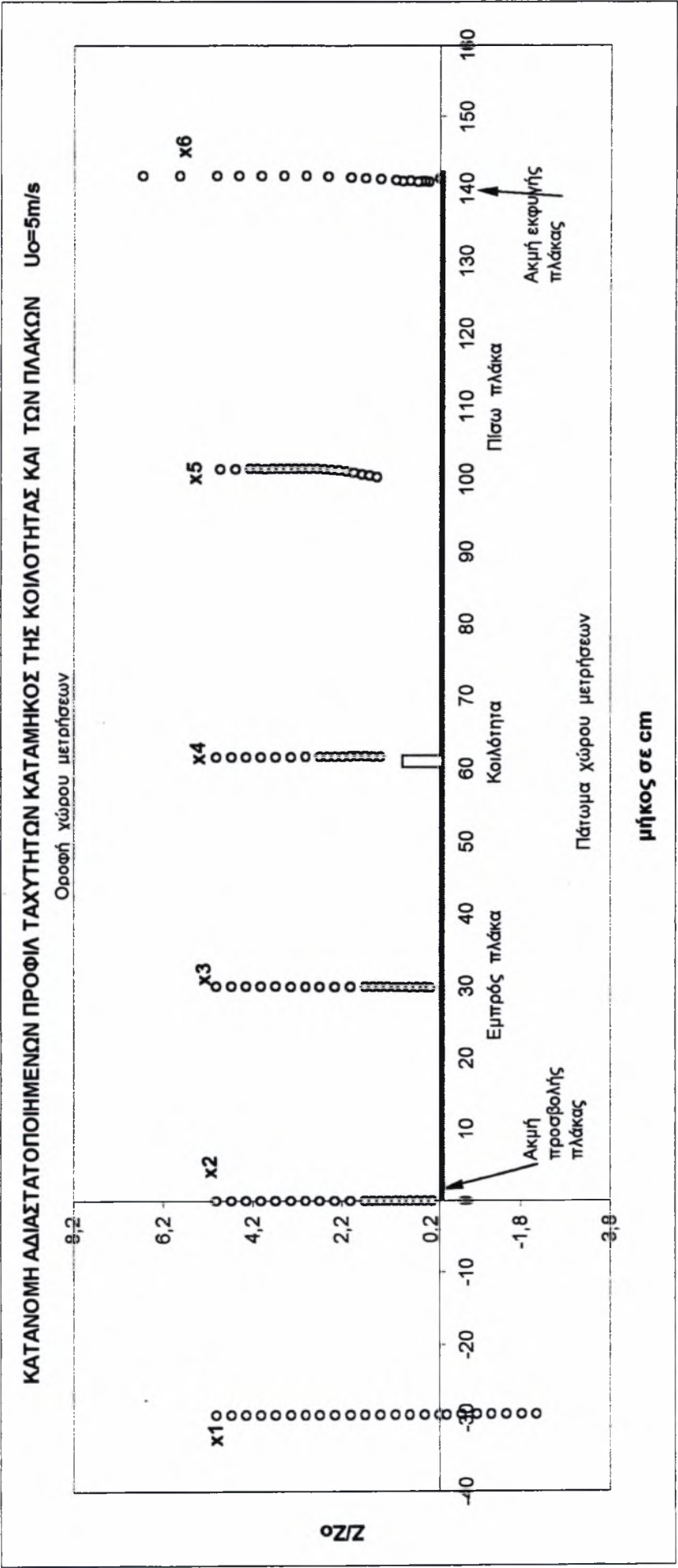
όπου:

h_a = ο συντελεστής συναγωγής του αέρα $\{\text{W}/(\text{m}^2*\text{K})\}$

l = το μήκος της επιφάνειας συναγωγής παράλληλα προς την διεύθυνση ροής (m)

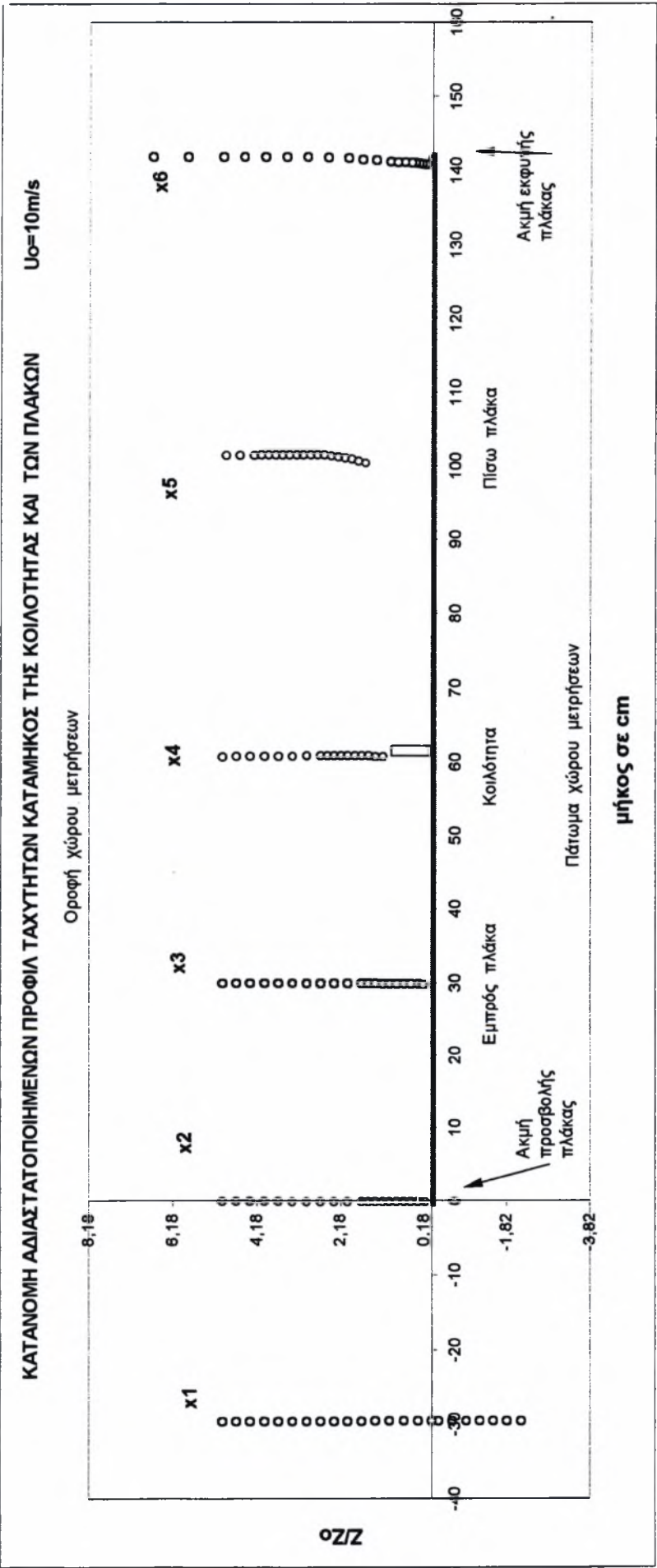
λ = ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα $\{\text{W}/(\text{m}^*\text{K})\}$

Ο αριθμός Nu ουσιαστικά είναι ο λόγος της ολικής μετάδοσης θερμότητας (με συναγωγή, αγωγή και ακτινοβολία) προς την μετάδοση θερμότητας με αγωγή και αφορά την ροή θερμότητας από τα σύνορα του συστήματός μας. Έτσι μας πληροφορεί για τον κύριο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στα όρια του συστήματός μας.



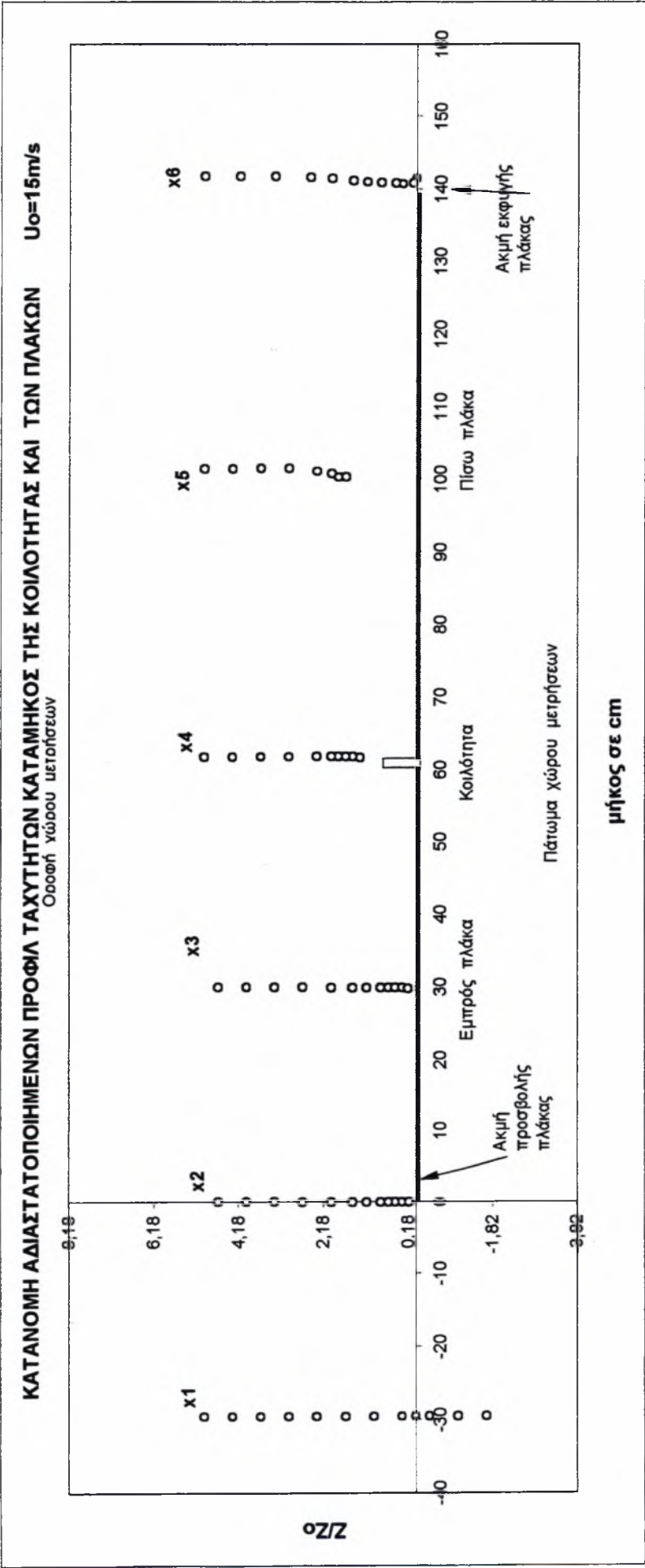
Δ. 4.1 Εποπτικό διάγραμμα της κατανομής των αδιαστατοποιημένων με την U_0 προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος της κοιλότητας και των πλακών. $U_0 = 5 \text{ m/s}$. Μετρήσεις με σωλήνα Pitot-Static.

Παρατήρηση: Ορισμένα προφίλ δεν έχουν δειχθεί μέχρι την επιφάνεια της πίσω πλάκας ή του μοντέλου. Αυτό συμβαίνει καθώς αν και μετρήθηκαν με τον σωλήνα Pitot-Static, πήραμε αρνητικές τιμές, πράγμα άτοπο. Προφανώς ο σωλήνας Pitot-Static βρέθηκε σε περιοχή ανακυκλοφορίας και μετρήσε υποπίεση.



Δ. 4.2 Εποπτικό διάγραμμα της κατανομής των αδιαστατοποιημένων με την U_0 προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος της κοιλότητας και των πλακών.
 $U_0 = 10 \text{ m/s}$. Μετρήσεις με σωλήνα Pitot-Static.

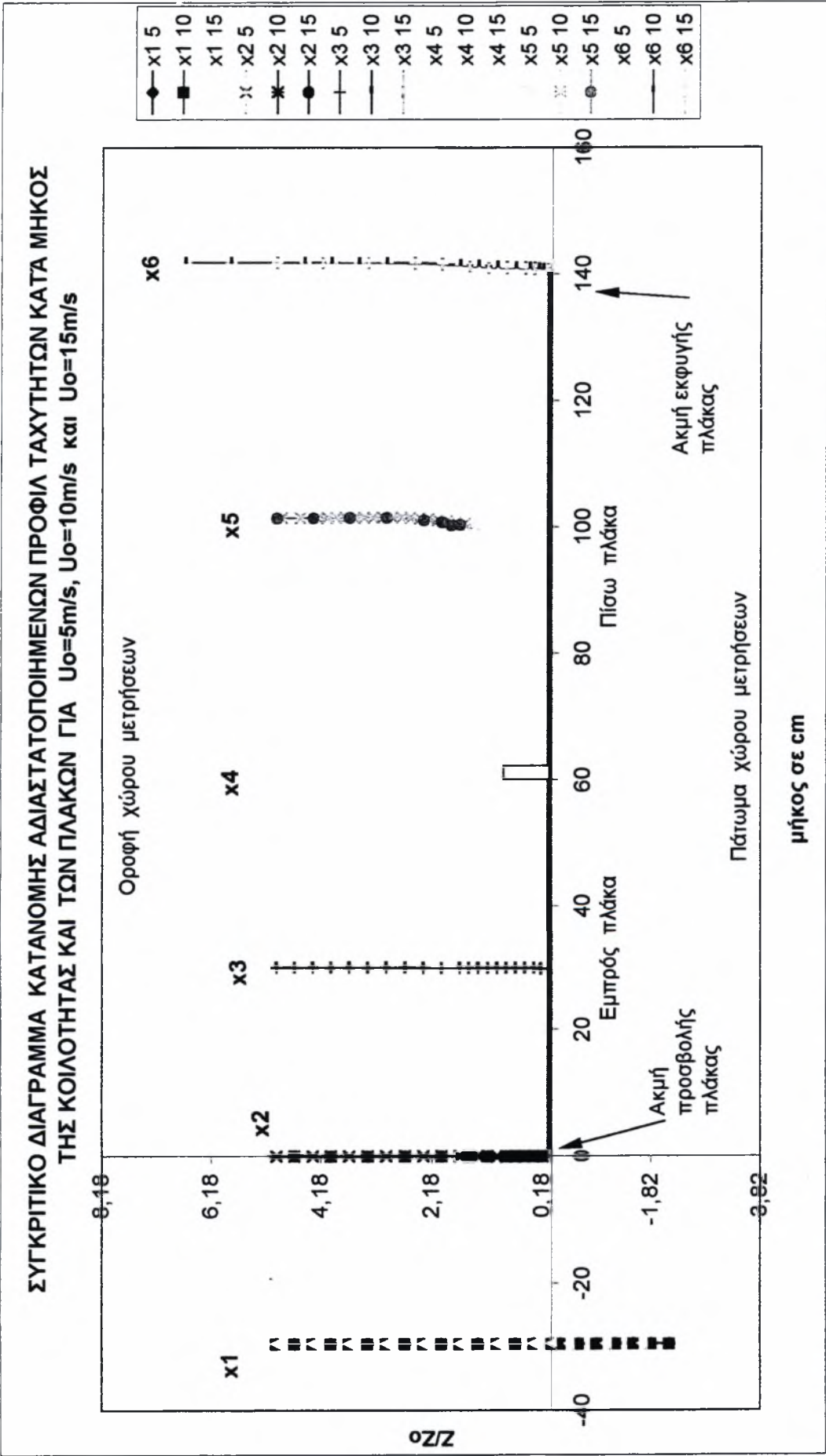
Παρατήρηση: Ορισμένα προφίλ δεν έχουν δεχθεί μέχρι την επιφάνεια της πίσω πλάκας ή του μοντέλου. Αυτό συμβαίνει καθώς αν και μετρήθηκαν με τον σωλήνα Pitot-Static, πήραμε αρνητικές τιμές, πράγμα άτοπο. Προφανώς ο σωλήνας Pitot-Static βρέθηκε σε περιοχή ανακυκλοφορίας και μέτρησε υποπίεση.



Δ. 4.3 Εποπτικό διάγραμμα της κατανομής των αδιαστατοποιημένων με την U_0 προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος της κοιλότητας και των πλακών.

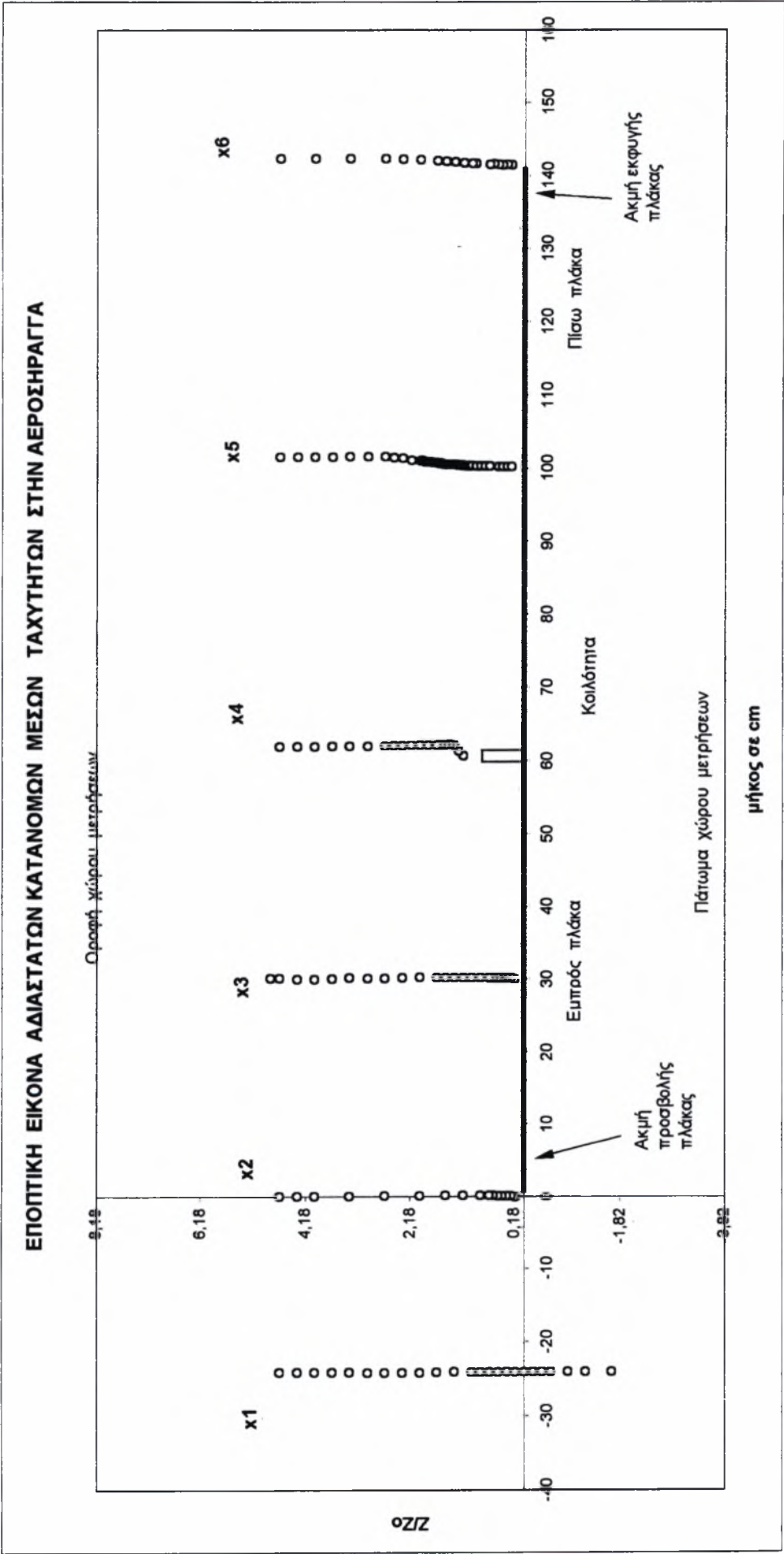
$U_0 = 15 \text{ m/s}$. Μετρήσεις με σωλήνα Pitot-Static.

Παρατήρηση: Ορισμένα προφίλ δεν έχουν δειχθεί μέχρι την επιφάνεια της πίσω πλάκας ή του μοντέλου. Αυτό συμβαίνει καθώς αν και μετρήθηκαν με τον σωλήνα Pitot-Static, πήραμε αρνητικές τιμές, πράγμα άστοχο. Προφανώς ο σωλήνας Pitot-Static βρέθηκε σε περιοχή ανακυκλοφορίας και μετρήσε υποπίεση.

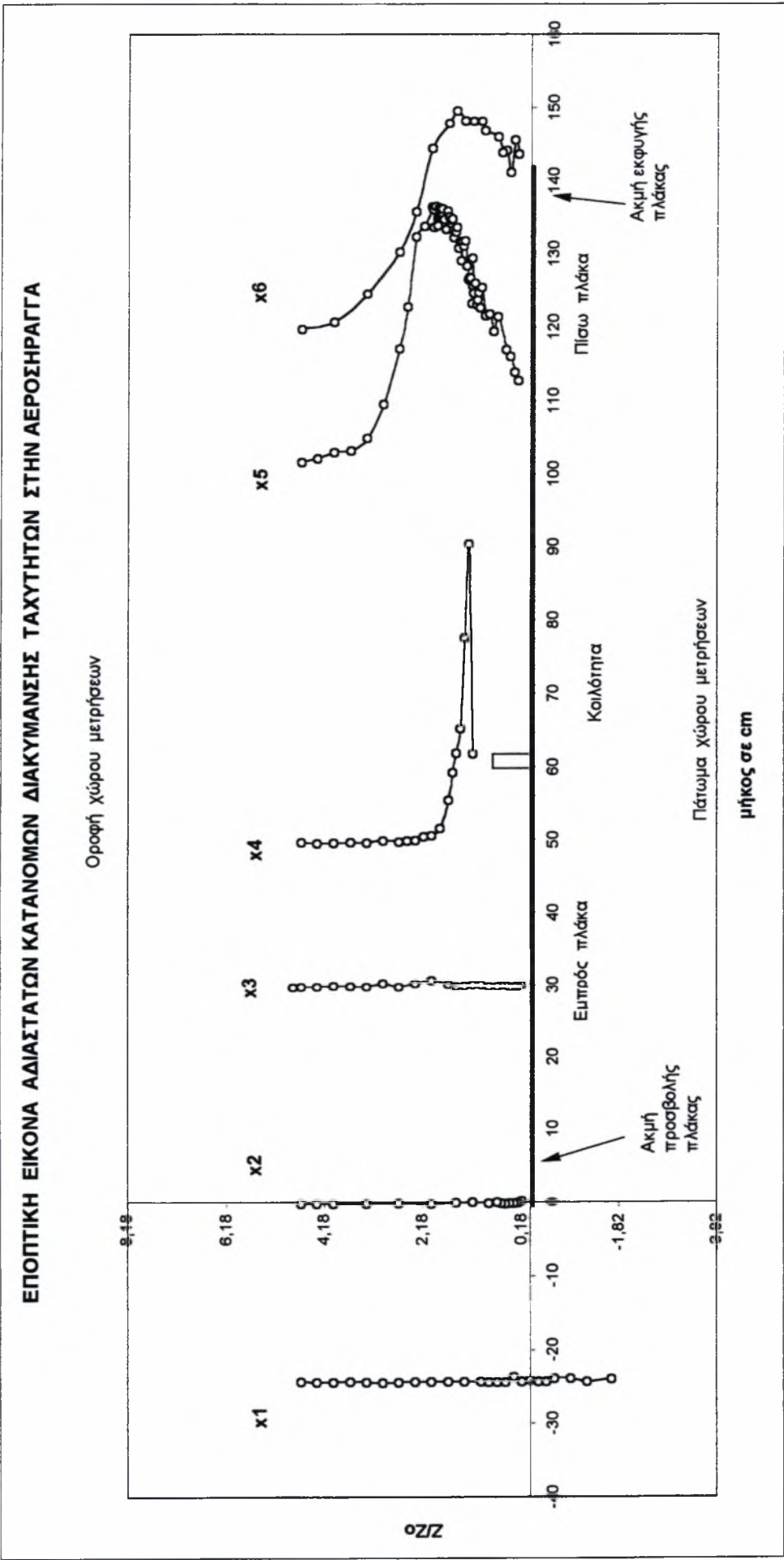


Δ. 4.4 Εποπτικό διάγραμμα της κατανομής των αδιαστατοποιημένων με την U_0 , προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος της κοιλότητας και των πλακών.

Παρατήρηση: Ορισμένα προφίλ δεν έχουν δειχθεί μέχρι την επιφάνεια της πίσω πλάκας ή του μοντέλου. Αυτό συμβαίνει καθώς αν και μετρήθηκαν με τον σωλήνα Pitot-Static, πήραμε αρνητικές τιμές, πράγμα άτοπο. Προφανώς ο σωλήνας Pitot-Static βρέθηκε σε περιοχή ανακυκλοφορίας και μέτρησης υποπίεσης.



Δ. 4.5 Εποπτικό διάγραμμα της κατανομής των αδιαστατοποιημένων με την U_0 προφύλ ταχυτήτων κατά μήκος της κοιλότητας και των πλακών.
 $U_0 = 5 \text{ m/s}$. Μετρήσεις με αισθητήρα Hot-wire.



Δ. 4.6 Εποπτικό διάγραμμα της κατανομής των αδιαστατοποιημένων με την U_0 προφίλ διακύμανσης ταχυτήτων κατά μήκος της κοιλότητας και των πλακών.
 $U_0 = 5 \text{ m/s}$. Μετρήσεις με αισθητήρα Hot-wire.

5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ



5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις σελίδες που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα με την μορφή διαγραμμάτων (αδιαστατοποιημένων και εποπτικών), φωτογραφιών και επεξηγηματικών σχημάτων. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, συνοδεύονται και από διαγράμματα P.S.D. επιλεγμένων σημείων του ροϊκού πεδίου και είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά των εκάστοτε φαινομένων.

Έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τρεις (3) μεγάλες κατηγορίες, με βάσει τα μετρούμενα μεγέθη και τον τρόπο μέτρησής τους:

1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ
2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ
3. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Πριν παρουσιαστούν τα διάφορα αποτελέσματα, υπάρχει ένα συνοπτικό ημερολόγιο των πειραμάτων όπου φαίνονται όλη η πορεία διεξαγωγής τους.

Επίσης πριν από κάθε ομάδα αποτελεσμάτων υπάρχει αναλυτικό σχέδιο όπου φαίνονται οι θέσεις των μετρήσεων.

Αναφέρεται πως όλες οι παρακάτω μετρήσεις αφορούν την περίπτωση που η κοιλότητα 60mm x 60mm, είναι βυθισμένη. Όπου έχει γίνει πείραμα με διαφορετική κοιλότητα, αυτό θα αναφέρεται ξεχωριστά.

Οι ενότητες που πρόκειται να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα είναι:

5.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Εδώ παρουσιάζονται τα εξής για ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$:

Στην αρχή αυτής της ενότητας παρουσιάζονται εποπτικές εικόνες των αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{\text{RMS}}/U_0 \%)$ στις θέσεις όπου έχουν μετρηθεί, ως προς τα μοντέλα μας και τον χώρο της αεροσήραγγας για τις περιπτώσεις χωρίς και με τον κύλινδρο σε διάφορες θέσεις. Έτσι εισαγόμαστε ομαλότερα στα λεπτομερέστερα διαγράμματα.

5.1.1) Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{\text{RMS}}/U_0 \%)$. Είναι οι μετρήσεις στις θέσεις:

- 5.1.1.1) Θέση x_1
- 5.1.1.2) Θέση x_2
- 5.1.1.3) Θέση x_3
- 5.1.1.4) Θέση x_4
- 5.1.1.5) Θέση x_5
- 5.1.1.6) Θέση x_6
- 5.1.1.7) Θέση x_7 και
- 5.1.1.8) Θέση x_8

Στις θέσεις x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 , και x_8 στα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ γίνεται **σύγκριση** του πειραματικού μας προφίλ με το θεωρητικό προφίλ ταχύτητας κατά Blasius για πλάκα σε μηδενική γωνία προσβολής. Από την σύγκριση των καμπυλών μπορούμε να δούμε τι είδους ροή έχουμε, στρωτή ή τυρβώδη.

Επίσης, στις θέσεις x_4, x_5, x_6, x_7 , και x_8 στα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{\text{RMS}}/U_0 \%)$ γίνεται **σύγκριση** των προφίλ για τις τρεις (3) παρακάτω περιπτώσεις:

- Χωρίς Κύλινδρο στη ροή
- Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ τοποθετημένο ανάντη της κοιλότητας 5D εμπρός και 2D πάνω από αυτή.

➤ Με κύλινδρο Ø60mm τοποθετημένο ανάντη της κοιλότητας 2D εμπρός και 3D πάνω από αυτή.

Ταυτόχρονα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D.

5.1.2) Συγκριτικό διάγραμμα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$ και τα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D., για τις εξής περιπτώσεις:

Κύλινδρος Ø60mm τοποθετημένος ανάντη της κοιλότητας 5D εμπρός και 2D πάνω από αυτή, θέση **x4**

Κύλινδρος Ø60mm τοποθετημένος ακριβώς πάνω από την κοιλότητα 2D, θέση **4D** πίσω από τον κύλινδρο

Ο σκοπός της παραπάνω σύγκρισης είναι να φανεί η επίδραση του υποστρώματος κάτω από τον κύλινδρο.

5.1.3) Συγκριτικό διάγραμμα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$ και τα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D., για τις εξής περιπτώσεις:

- Κύλινδρος Ø60mm ανάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D
- Κύλινδρος Ø60mm ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D
- Κύλινδρος Ø60mm ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm
- Κύλινδρος Ø60mm κατάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 2D
- Κύλινδρος Ø60mm κατάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm

Ο σκοπός της παραπάνω σύγκρισης είναι να φανεί η επίδραση της θέσεως του κυλίνδρου σε απόσταση **4D** πίσω από αυτόν.

5.1.4) Συγκριτικό διάγραμμα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$ και τα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D., για τις εξής περιπτώσεις:

- Κύλινδρος Ø60mm ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε διάφορα ύψη πολλαπλάσια του D (z^*D)
- Κύλινδρος Ø60mm ακριβώς πάνω από επίπεδη πλάκα στα ίδια ύψη όπως όταν ήταν πριν πάνω από κοιλότητα.

Τα ύψη είναι τα $H=3,66D$, $2D$, D , $0,6D$, $0,35D$, $0,3D$, $0,25D$ και 0 .

Οι αντιστοιχίες των παραπάνω υψών σε cm είναι:

$z=22\text{cm} \rightarrow 3,66D$ $z=12\text{cm} \rightarrow 2D$ $z=6\text{cm} \rightarrow D$ $z=3,6\text{cm} \rightarrow 0,6D$ $z=2,1\text{cm} \rightarrow 0,35D$
 $z=1,8\text{cm} \rightarrow 0,3D$ $z=1,5\text{cm} \rightarrow 0,25D$

Ο σκοπός της παραπάνω σύγκρισης είναι να φανεί η επίδραση της θέσεως του κυλίνδρου καθώς βρίσκεται σε διάφορα ύψη από την κοιλότητα μέχρι να ακουμπήσει πάνω της ($z=0$) και η σύγκριση του ίδιου φαινομένου για ακλόνητο στερεό τοίχωμα (επίπεδη πλάκα).

5.1.5) Διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$ και τα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D., στη θέση **x7** για διάφορες κοιλότητες τοποθετημένες στην κάτω θέση. Επίσης γίνεται και συγκριτικό των ανωτέρω μεταξύ τους. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν οι εξής:

- Flat Plate → Επίπεδη Πλάκα
- Small Cavity → Μικρή Κοιλότητα (ύψος=60mm x πλάτος=15mm)
- Medium Cavity → Μεσαία Κοιλότητα (ύψος=60mm x πλάτος=30mm)
- Big Cavity → Μεγάλη κοιλότητα (ύψος=60mm x πλάτος=60mm)

Ο σκοπός της παραπάνω σύγκρισης είναι να φανεί η επίδραση της κάθε κοιλότητας στο πάχος και την μορφή του οριακού στρώματος σε απόσταση περίπου 7D πίσω από αυτή και 18D περίπου από την ακμή προσβολής της εμπρός πλάκας. Επίσης συγκρίνεται το ίδιο για την περίπτωση επίπεδης πλάκας χωρίς να υπάρχει κοιλότητα

5.1.6) Διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$ και τα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D., στη θέση x3 για τις περιπτώσεις:

Flat Plate → Επίπεδη Πλάκα

Big Cavity → Μεγάλη κοιλότητα (ύψος=60mm x πλάτος=60mm)

Επίσης γίνεται και συγκριτικό των ανωτέρω μεταξύ τους.

Ο σκοπός της παραπάνω σύγκρισης είναι να φανεί ποιά είναι η επίδραση της κοιλότητας στην ανάπτυξη του οριακού στρώματος πριν από αυτή.

Τέλος ακολουθούν διαγράμματα των κλιμάκων χρόνου για την περίπτωση Χωρίς και Με κύλινδρο, για να φανερωθεί πόσο έντονες διαταραχές ροής είχαμε στην κάθε περίπτωση.

5.1.7) Κλίμακες χρόνου, Χωρίς και Με κύλινδρο στις θέσεις x3, x4, x5, x6, x7 και x8.

5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

Εδώ παρουσιάζονται τα εξής για ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$:

5.2.1) Συγκριτικά διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{RMS}/\Theta_0 \%)$ και τα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D., για Κοιλότητα 60mm x 60mm, βυθισμένη,

για τις εξής περιπτώσεις:

➤ Χωρίς κύλινδρο μέσα στη ροή

➤ Με κύλινδρο ανάντη της κοιλότητας 4D και πάνω από αυτή 2D

για τις θέσεις εντός της κοιλότητας

5.2.1.1) Θέση xA'

5.2.1.2) Θέση xA

5.2.1.3) Θέση xB

5.2.1.4) Θέση xΓ

5.2.1.5) Θέση xΔ

5.2.1.6) Θέση xE

5.2.1.7) Θέση xZ

5.2.1.8) Θέση xH

5.2.1.9) Θέση H'

Οι μετρήσεις ξεκινούν 5mm από το πυθμένα της κοιλότητας και εκτείνονται έως ύψος 40mm πάνω από το χείλος της.

Ο σκοπός της παραπάνω σύγκρισης είναι να φανεί ποιά είναι η επίδραση των διαταραχών της ροής στην κατανομή των θερμοκρασιών μέσα στην κοιλότητα και πάνω από το χείλος της.

5.2.2) Αδιαστατοποιημένα έγχρωμα διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{RMS}/\Theta_0 \%)$ ισοϋψών των θερμοκρασιών (Contours) για τις μετρήσεις της περίπτωσης (1). Έτσι αποκτάται μια εποπτική εικόνα των θερμοκρασιακών κατανομών μέσα στην κοιλότητα.

5.2.3) Αποτελέσματα του πειράματος "Transient Effects" (παροδική απομάκρυνση θερμότητας από την κοιλότητα)

Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $\Delta\Theta/\Theta_0 \% = f(t)$ και σύγκριση μεταξύ τους (όπου είναι σχετικό) για τις περιπτώσεις:

➤ Χωρίς κύλινδρο μέσα στη ροή

➤ Με κύλινδρο ανάντη της κοιλότητας 4D και πάνω από αυτή 2D

για τις θέσεις εντός της κοιλότητας

α) Θέση xA 60mm πάνω από τον πυθμένα

β) Θέση xΔ 9mm, 30mm και 60mm πάνω από τον πυθμένα

γ) Θέση xH 60mm πάνω από τον πυθμένα

Ο σκοπός της παραπάνω σύγκρισης αφορούσε την εύρεση του χρόνου καθαρισμού (απόπλυσης) της κοιλότητας από μια συγκέντρωση μεγέθους όπως η θερμοκρασία για κάθε περίπτωση από τις παραπάνω και να εξαχθεί το συμπέρασμα πότε είναι αποδοτικότερη η απομάκρυνση.

5.2.4) Μέτρηση της μεταβολής του αριθμού Grashof συναρτήσει του αριθμού Reynolds, $Gr=f(Re)$

5.2.5) Μέτρηση της μεταβολής του αριθμού Rayleigh συναρτήσει του αριθμού Reynolds, $Ra=f(Re)$

5.2.6) Μέτρηση της μεταβολής του αριθμού Nusselt συναρτήσει του αριθμού Reynolds, $Nu=f(Re)$

5.2.7) Μέτρηση της μεταβολής της αδιάστατης θερμοκρασίας στο σημείο xB z=9mm από το πυθμένα της κοιλότητας συναρτήσει των Hz του Inverter, $\Delta\Theta/\Theta_o=f(Hz)$

5.2.8) Μέτρηση της μεταβολής της εφαρμοζόμενης Ισχύος P (W) του Μετατροπέα-Μετασχηματιστή του ρεύματος από AC σε DC, συναρτήσει της αδιάστατης θερμοκρασίας του σύρματος της αντίστασης, $P=f\{(\Theta_w-\Theta_o)/\Theta_o\}$

5.3 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Εδώ παρουσιάζονται τα εξής:

5.3.1) Οπτικοποίηση με καπνό εντός κοιλότητας, θέση εκροής καπνού στη μέση της
Συγκριτικά διαγράμματα αντίστοιχα διαγράμματα P.S.D., για Κοιλότητα 60mm x 60mm, βυθισμένη.

για τις περιοχές εντός της κοιλότητας που δείχνονται στο ανάλογο σχήμα, για εξής περιπτώσεις:

α) Ταχύτητες ελεύθερης ροής $U_o=2,5m/s$ και $U_o=5m/s$, με θέση κυλίνδρου:

5.3.1.1) Κύλινδρος $\varnothing 60mm$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 2D

5.3.1.2) Κύλινδρος $\varnothing 60mm$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm,

5.3.1.3) Κύλινδρος $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D,

β) Χωρίς και Με Κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 4D και πάνω από αυτή 2D, με ταχύτητες ελεύθερης ροής:

5.3.1.4) $U_o=1,80m/s$

5.3.1.5) $U_o=2,5m/s$

5.3.1.6) $U_o=7,70m/s$

γ) Χωρίς και Με Κύλινδρο $\varnothing 60mm$ ανάντη της κοιλότητας 4D και πάνω από αυτή 2D, Έχοντας αναμμένη αντίσταση εσωτερικά της κοιλότητας, θερμαίνοντάς τη, με ταχύτητες ελεύθερης ροής:

5.3.1.7) $U_o=1,80m/s$

5.3.1.8) $U_o=2,5m/s$

5.3.2) Οπτικοποίησης της ροής με νήματα

Φωτογραφίες των περιοχών:

- ⇒ εμπρός πλάκας,
- ⇒ κοιλότητας
- ⇒ πίσω πλάκας,

όπου παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτα φαινόμενα, για τις περιπτώσεις:

5.3.2.1) Ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$

- Χωρίς Κύλινδρο
- Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ανάντη της κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D

5.3.2.2) Ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=10\text{m/s}$

- Χωρίς Κύλινδρο
- Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ανάντη της κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D

5.3.2.3) Ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=10\text{m/s}$

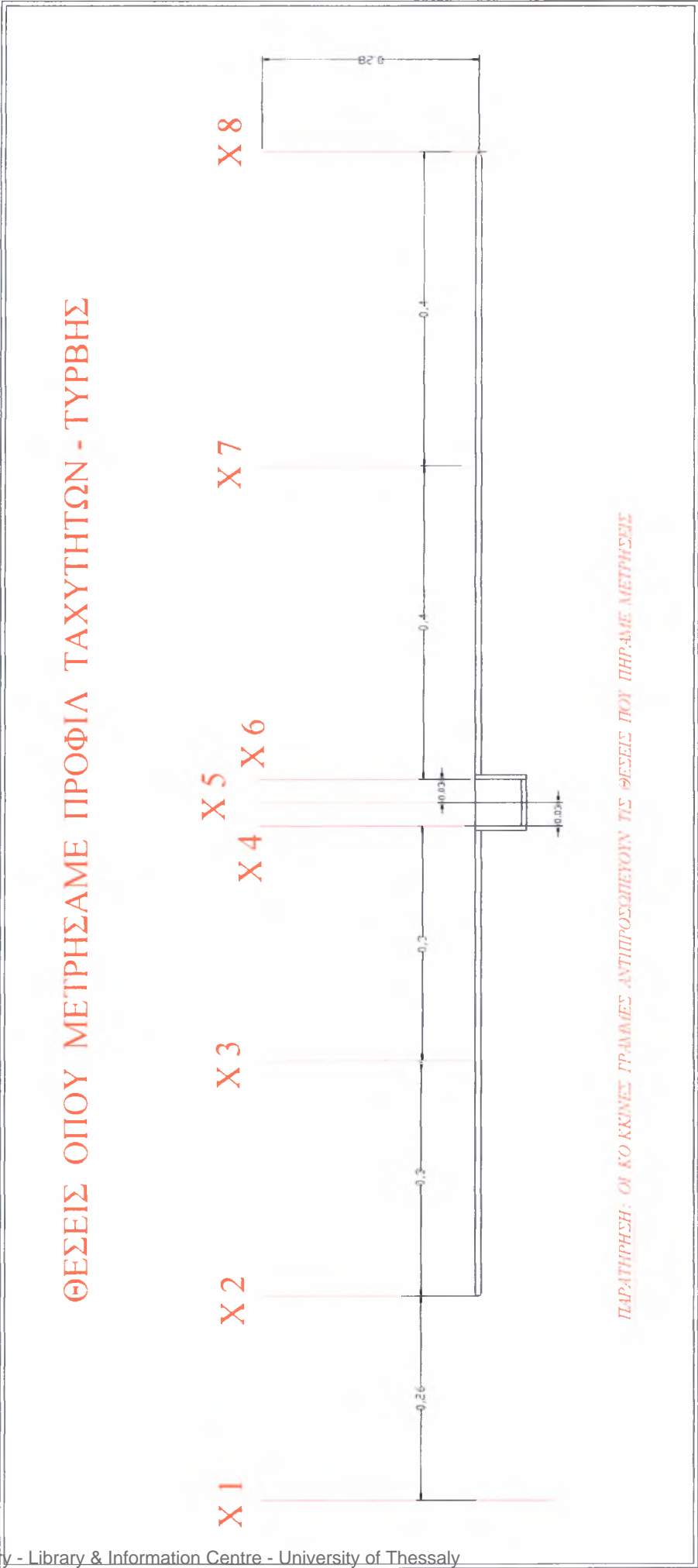
- Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm
- Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 2D

ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ					
Ενέργεια	Διαμόρφωση Μοντέλων	Θέσεις	Uo	H _z	Ημερομηνία
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ – ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ – ΜΑΡΤΙΟΣ 2003					
ΜΕΛΕΤΗ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ – ΣΤΗΣΙΜΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ					
ΜΑΡΤΙΟΣ 2003					
Σάρωση με Pitot-Static	Μικρή κοιλότητα πάνω	x1, x2, x3, x4, x5, x6	10	32,9/34,4	20/21-03-2003
- // -	- // -	- // -	5	17,1	21-03-2003
- // -	- // -	- // -	15	51,9	28/29-03-2003
ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2003					
Σάρωση με Hot - wire	Μικρή κοιλότητα πάνω	x1, x2, x3, x4, x5, x6	5	17,6	08-04-2003
Σάρωση με Hot - wire	Μικρή κοιλότητα στη μέση	x1, x2, x3, x4, x5, x6	5	16,7	09/10-04-2003
Οπτικοποίηση Ροής	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm πίσω x=-2D z=2D		2,5	8,5	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Χωρίς Κύλινδρο		2,5	8,5	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=5D z=2D		2,5	8,5	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=5D z=2D		5	17,1	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=2D z=2D		5	17,1	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=2D z=2D		2,5	8,5	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=0 z=2D		2,5	8,5	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=0 z=2D		5	17,1	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=0 z=12mm		5	17,1	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=0 z=12mm		2,5	8,5	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm πίσω x=0 z=12mm		5	17,1	20-04-2003
- // -	Μεγάλη κοιλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm πίσω x=0 z=12mm		2,5	8,5	20-04-2003

Ενέργεια	Διαμόρφωση Μοντέλων	Θέσεις	Uo	Hz	Ημερομηνία
ΜΑΪΟΣ 2003					
Οπτικοποίηση Ροής	Μεγάλη κυλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=4D z=2D		2,5 5	6 8,5 13 17,1 21,35 25,6	05-05-2003
- // -	Μεγάλη κυλότητα κάτω-Χωρίς Κύλινδρο		2,5 5	6 8,5 13 17,1 21,35 25,6	05-05-2003
- // -	Μεγάλη κυλότητα κάτω- Με αντίσταση 150,03 Ohm/m Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=4D z=2D				
- // -	Μεγάλη κυλότητα κάτω- Με αντίσταση 150,03 Ohm/m Χωρίς Κύλινδρο				
Τοποθέτηση νέου αισθητήρα hot-wire R _θ =4,45 Ohms A=3,4424 B=1,9621					
METΡΗΣΕΙΣ Hot-wire					
	Μεγάλη κυλότητα κάτω-Χωρίς Κύλινδρο	x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8	5	16,7	08-05-2003
	Μεγάλη κυλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=5D z=2D	x4, x5, x6, x7, x8	5	16,7	08-05-2003
	Μεγάλη κυλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=0 z=2D	4*D πίσω από το κύλινδρο	5	16,7	11-05-2003
	Μεγάλη κυλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=2D z=2D	x4, x5, x6, 4*D πίσω από το κύλινδρο	5	16,7	11-05-2003
Δυναμική βαθμονόμηση ανεμομέτρου με τη συνοδεία κάμερας					
	Μεγάλη κυλότητα κάτω- Κύλινδρος Ø60mm πάνω x=0 z=3,66D 3,5D 3D 2D 1,5D D 0,8D 0,6D 0,4D 0,35D 0,3D 0,25D 0,2D 0,15D 0,1D 0,05D 0	4*D πίσω από το κύλινδρο	5	16,7	16-05-2003

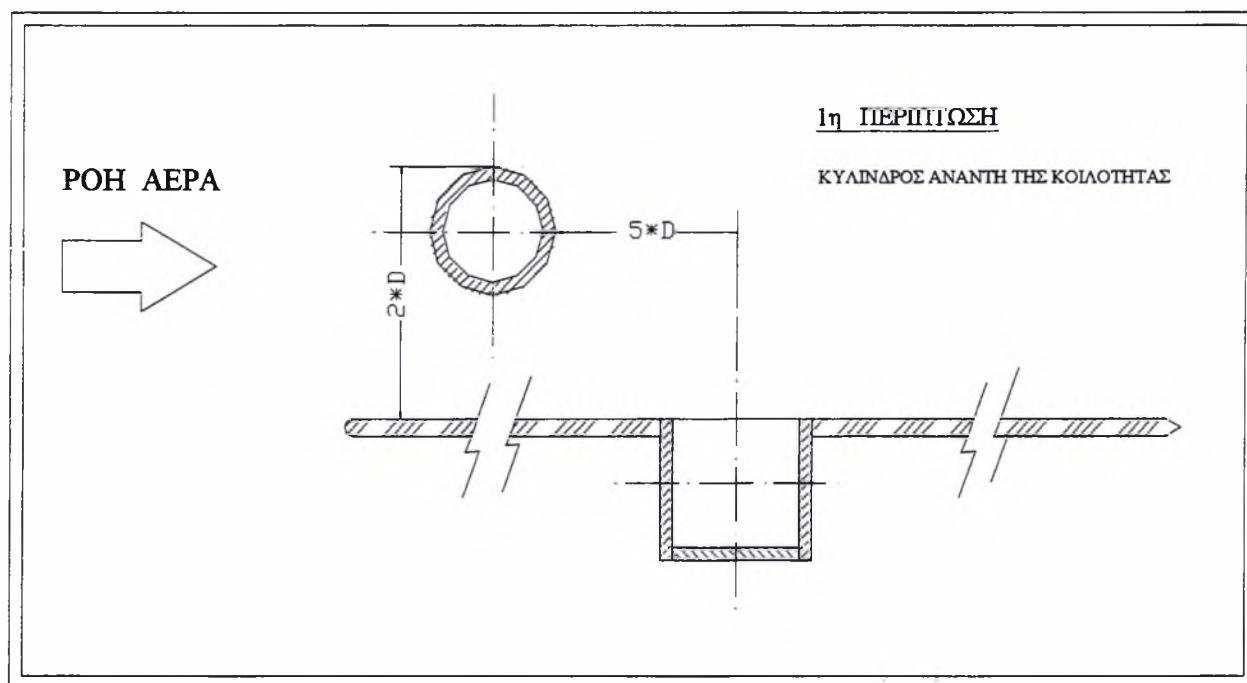
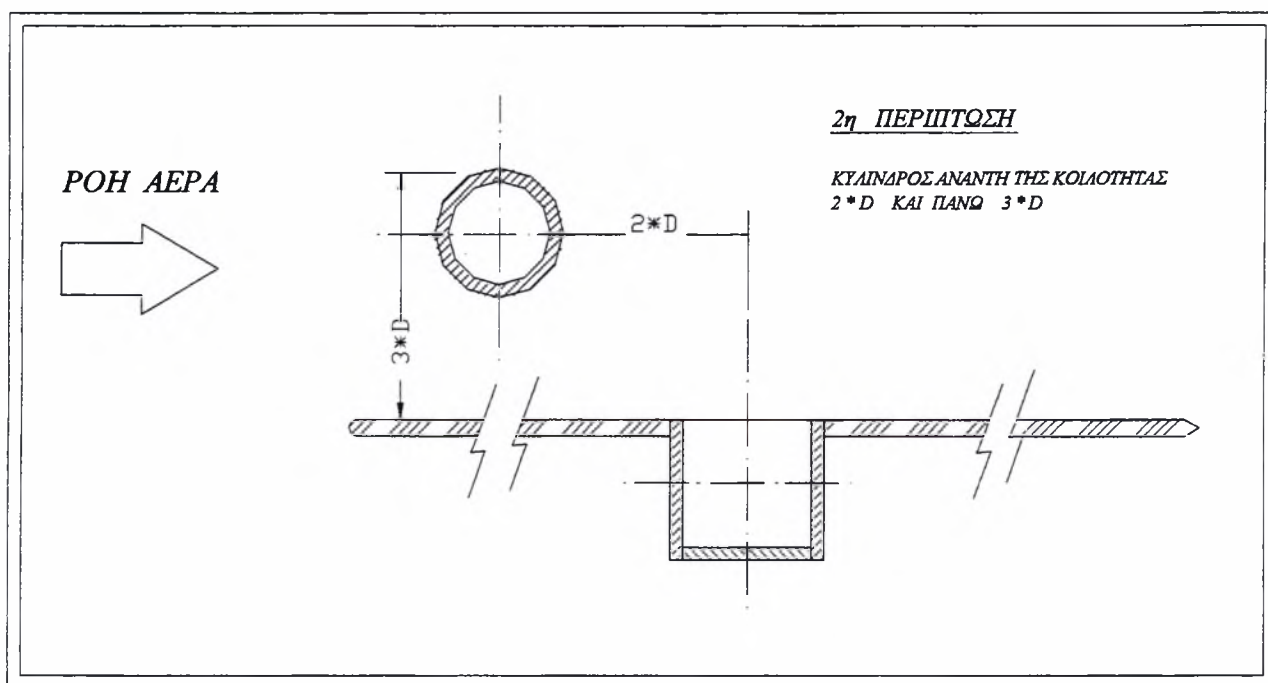
Ενέργεια	Διαμόρφωση Μοντέλων	Θέσεις	U ₀	Hz	Ημερομηνία
ΜΑΪΟΣ 2003					
	Επίπεδη πλάκα, Μικρή Κοιλότητα κάτω, Μεσαία κοιλότητα κάτω, Μεγάλη κοιλότητα κάτω	x7	5	16,7	20-05-2003
	Εύρεση Συντελεστή Διόρθωσης για κάθε κοιλότητα που είναι τοποθετημένη κάτω	Ελεόθερη Ροή	5	16,7	21-05-2003
	Επίπεδη πλάκα Μεγάλη Κοιλότητα κάτω	x3	5	16,7	21-05-2003
	Κύλινδρος Ø60mm πάνω x=0 z=3,66D 2D D 0,6D 0,35D 0,3D 0,25D 0,15D 0	4*D πίσω από το κύλινδρο	5	16,7	21-05-2003
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟ-ΚΡΑΣΙΩΝ ME Cold-wire					
	Μεγάλη κοιλότητα κάτω-Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=5D z=2D	xA', xA, xB, xΓ, xΔ, xE, xZ, xH, xH'	5	16,7	27-05-2003
	Μεγάλη κοιλότητα κάτω-Χωρίς Κύλινδρο	xA', xA, xB, xΓ, xΔ, xE, xZ, xH, xH'	5	16,7	27-05-2003
ΙΟΥΝΙΟΣ 2003					
Μεταβατικά Φαινόμενα (Transient Effects)	Αντίσταση R = 150,03 Ohms				
0-10sec Σβηστή R	Μεγάλη κοιλότητα κάτω-Χωρίς Κύλινδρο	xA, xΔ, xH	5	16,7	05-06-2003
10-40sec Αναμμένη R	Μεγάλη κοιλότητα κάτω-Κύλινδρος Ø60mm εμπρός x=5D z=2D	xA, xΔ, xH	5	16,7	05-06-2003
40-60sec Σβηστή R	Μεγάλη κοιλότητα κάτω-Χωρίς Κύλινδρο Θερμοκρασίες για διάφορα Hz	xB	5	4,2 8,5 12,5 16,7	05-06-2003
Μέτρηση θερμοκρ. αντίστασης με θερμοζεύγος	Μεγάλη κοιλότητα κάτω-Χωρίς Κύλινδρο Θερμοκρασίες για διάφορα Volts	Πάνω στο σύρμα της αντίστασης	5	16,7	08-06-2003
Μέτρηση θερμοκρ. αντίστασης με θερμοζεύγος	Μεγάλη κοιλότητα κάτω-Χωρίς Κύλινδρο Θερμοκρασίες για διάφορα Hz	Πάνω στο σύρμα της αντίστασης	2,5 5 7,5 10 12,5 15	8,4 16,7 25,1 33,4 41,8 50,1	01-07-2003

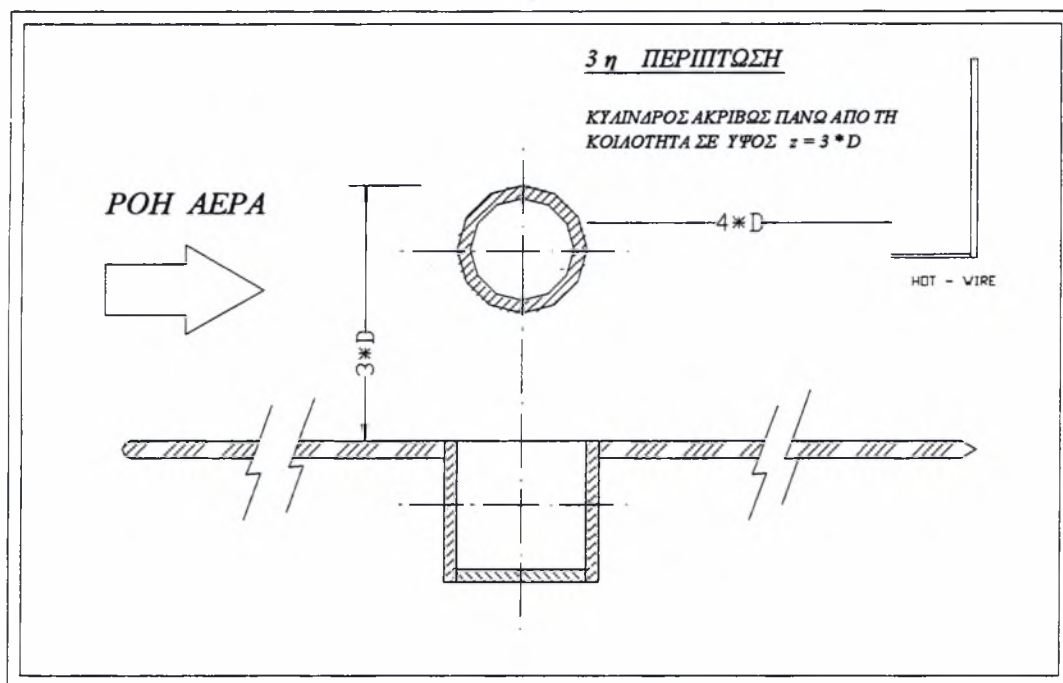
5.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ



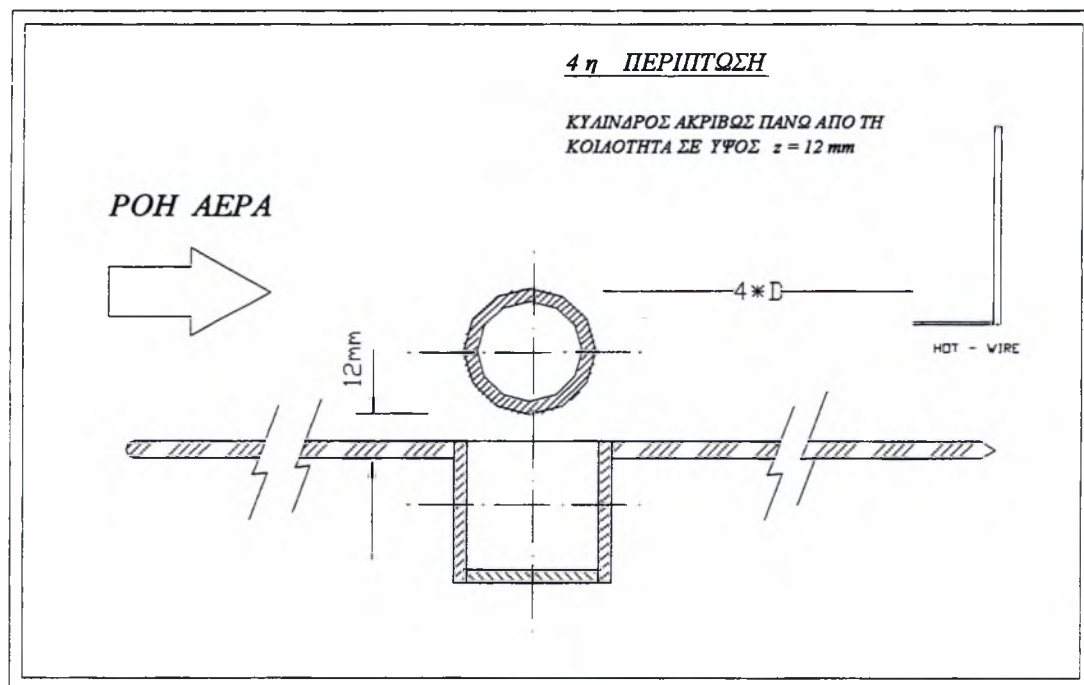
Σχ. 5.1 Διάταξη των θέσεων που έγιναν οι μετρήσεις ως προς το μοντέλο.

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΤΑ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

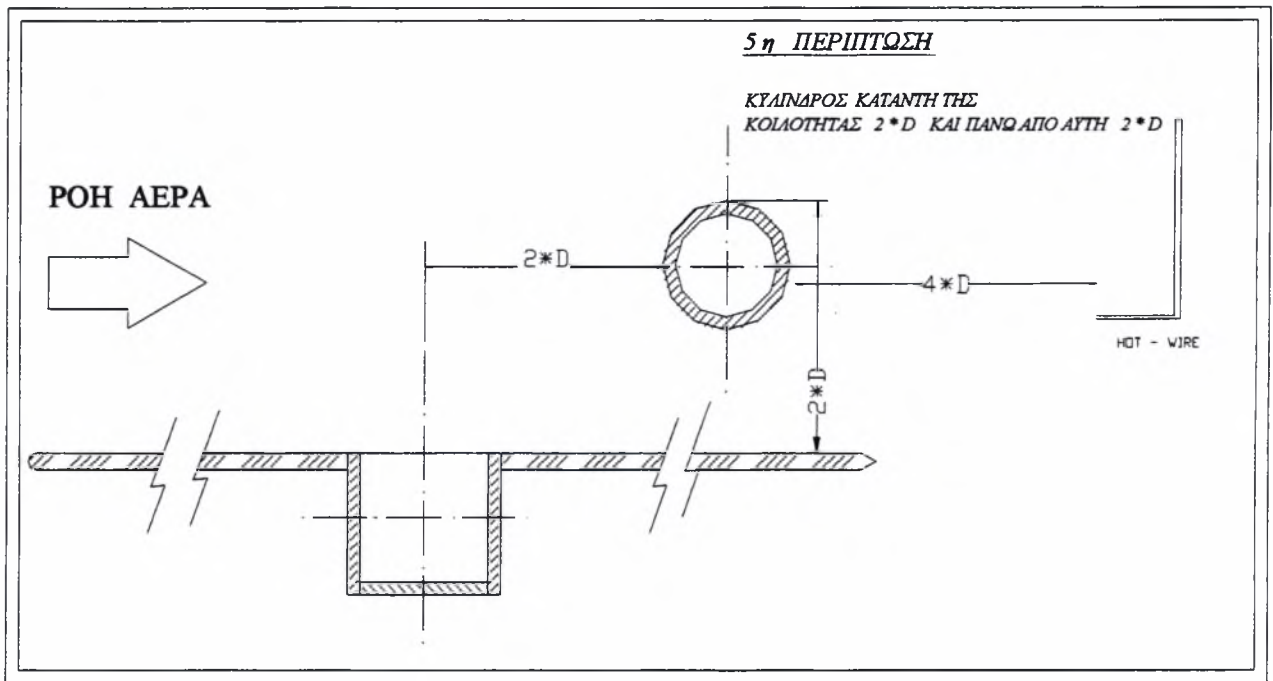
Σχ. 5.2 Διάταξη του μοντέλου με τον κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ανάντη της κοιλότητας $5D$ και πάνω $2D$.Σχ. 5.3 Διάταξη του μοντέλου με τον κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ανάντη της κοιλότητας $2D$ και πάνω $2D$.



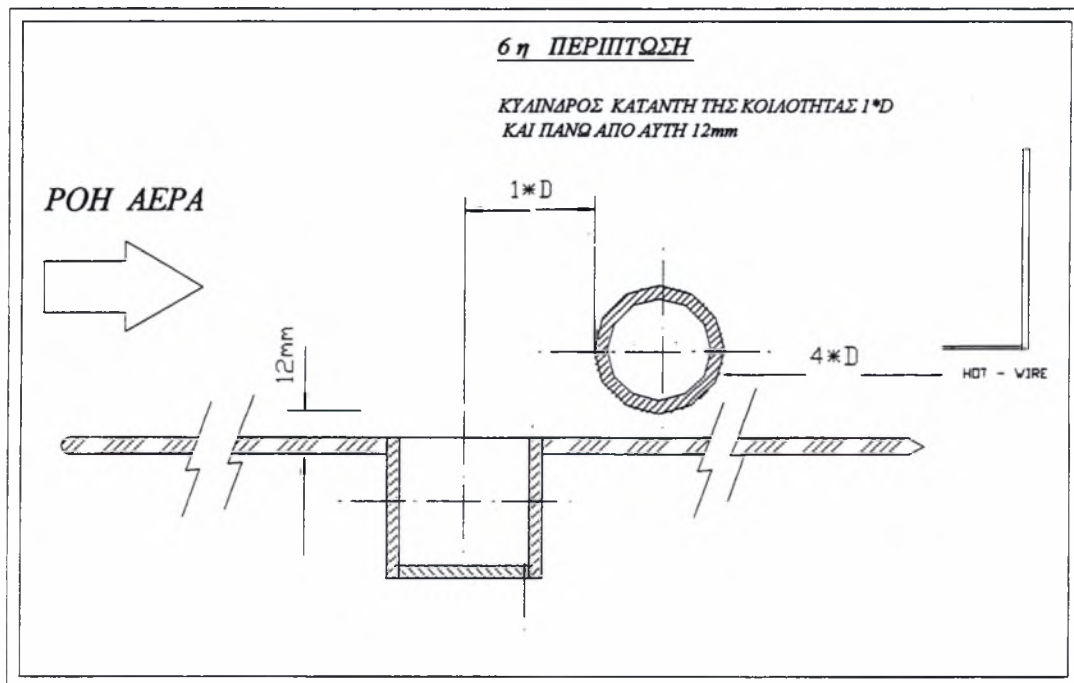
Σχ. 5.4 Ο κύλινδρος $\varnothing 60\text{mm}$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος $2D$, θέση μέτρησης προφίλ $x=4D$ πίσω από τον κύλινδρο.



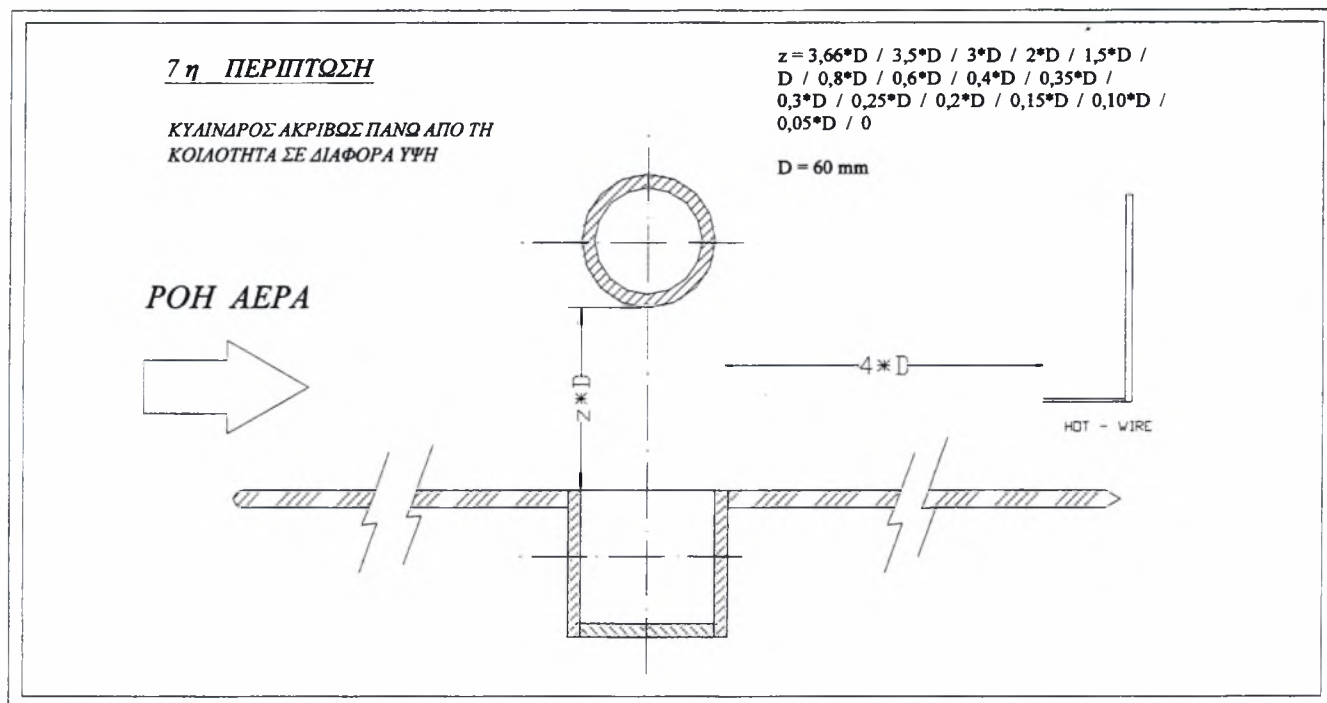
Σχ. 5.5 Διάταξη του μοντέλου με τον κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm , θέση μέτρησης προφίλ $x=4D$ πίσω από τον κύλινδρο



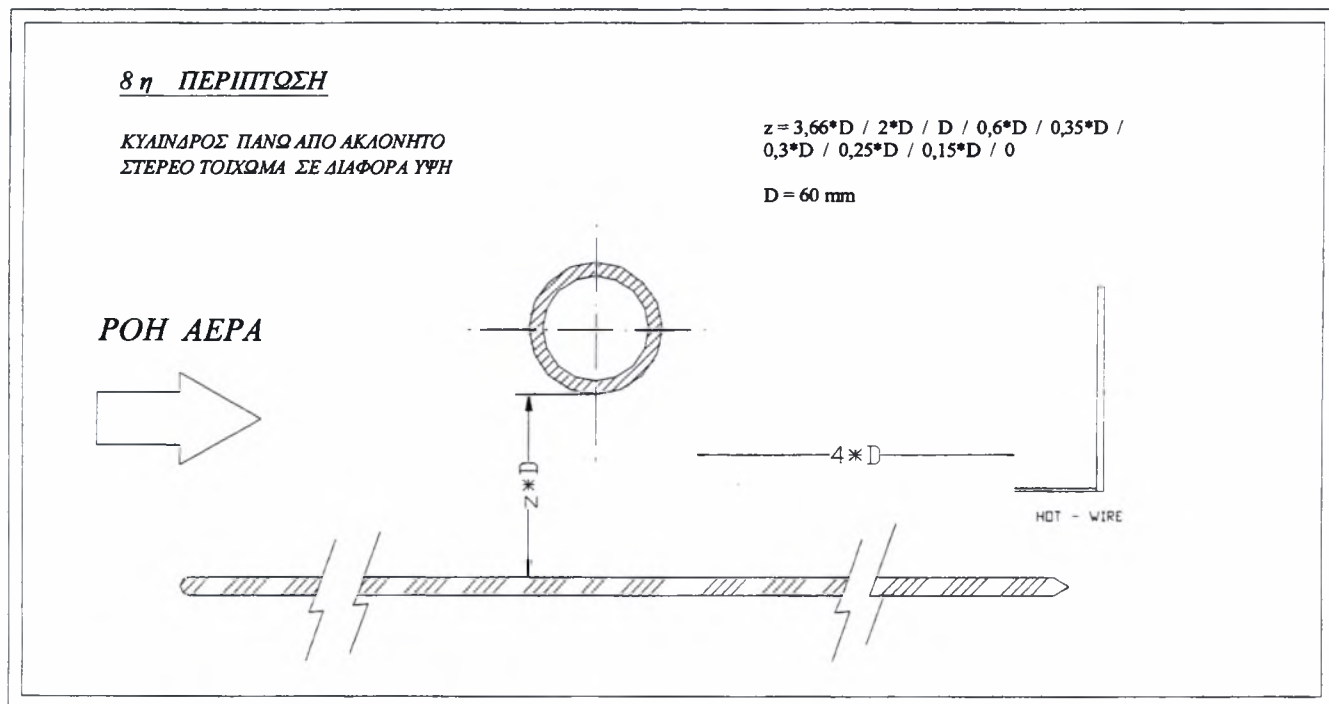
Σχ. 5.6 Διάταξη του μοντέλου με τον κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ κατάντη της κοιλότητας $2D$ και πάνω $2D$, θέση μέτρησης προφίλ $x=4D$ πίσω από τον κύλινδρο.



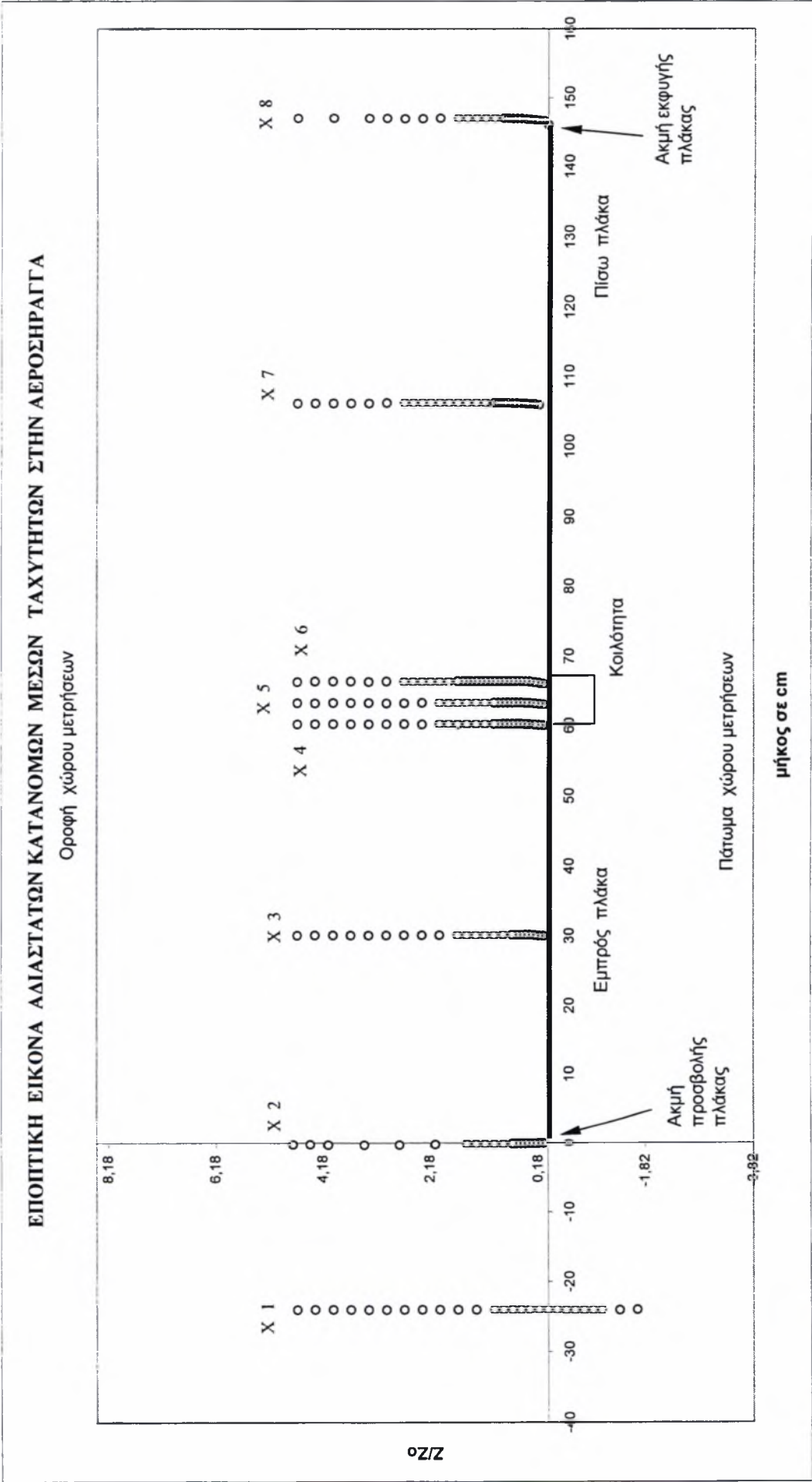
Σχ. 5.7 Διάταξη του μοντέλου με τον κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ κατάντη της κοιλότητας $1D$ και πάνω 12mm , θέση μέτρησης προφίλ $x=4D$ πίσω από τον κύλινδρο.



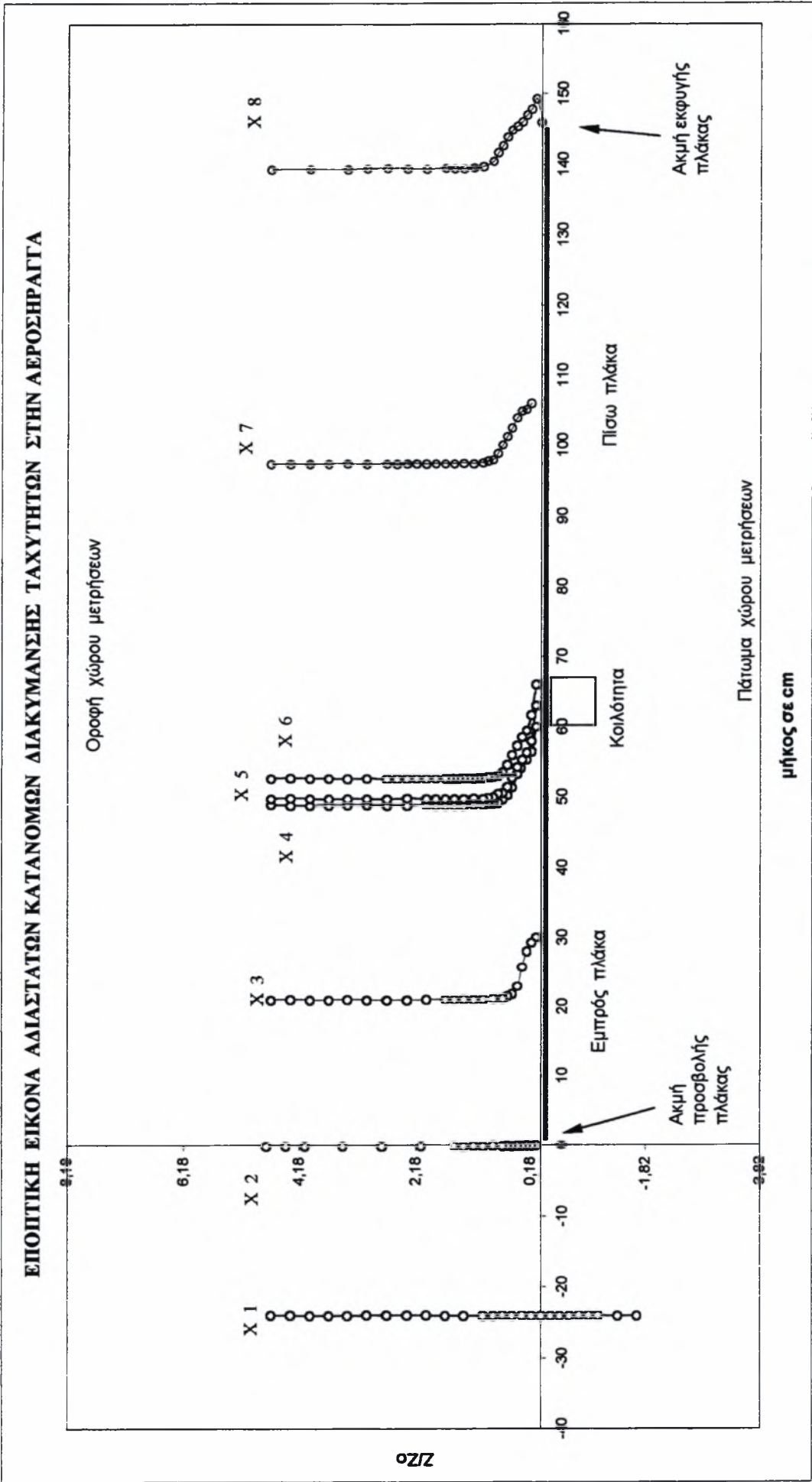
Σχ. 5.8 Ο κύλινδρος $\varnothing 60\text{mm}$ πάνω από την κοιλότητα σε διάφορα ύψη D , θέση μέτρησης προφίλ $x=4D$ πίσω από τον κύλινδρο.



Σχ. 5.9 Διάταξη του μοντέλου με τον κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ πάνω από ακλόνητο τοίχωμα σε διάφορα ύψη D , θέση μέτρησης προφίλ $x=4D$ πίσω από τον κύλινδρο.

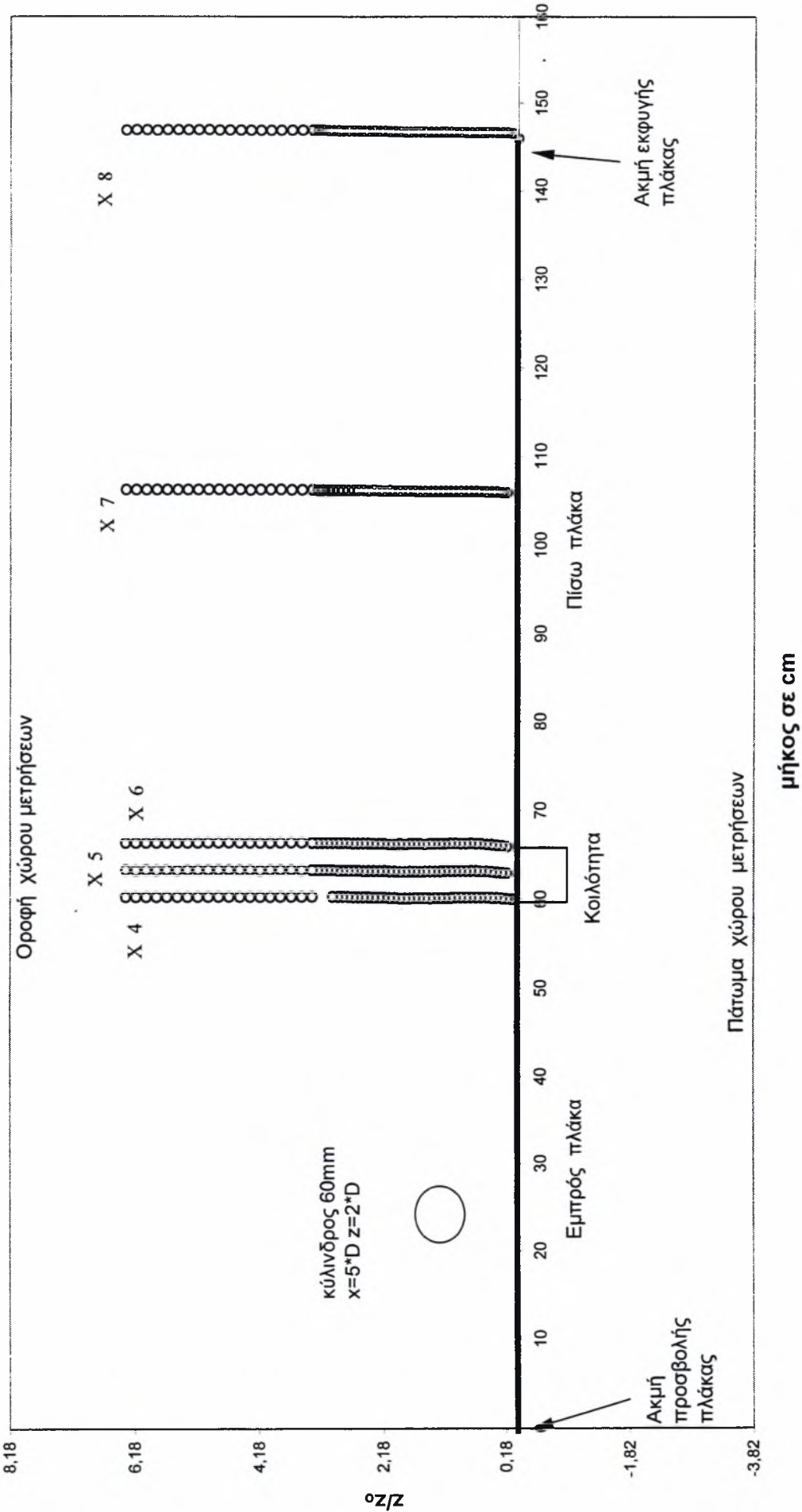


Σχ. 5.10 Εποπτικό διάγραμμα αδιαστατοποιημένων προφίλ ταχύτητας όταν η μεγάλη κοιλότητα είναι τοποθετημένη στην κατώτατη θέση χωρίς κύλινδρο και με ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$.

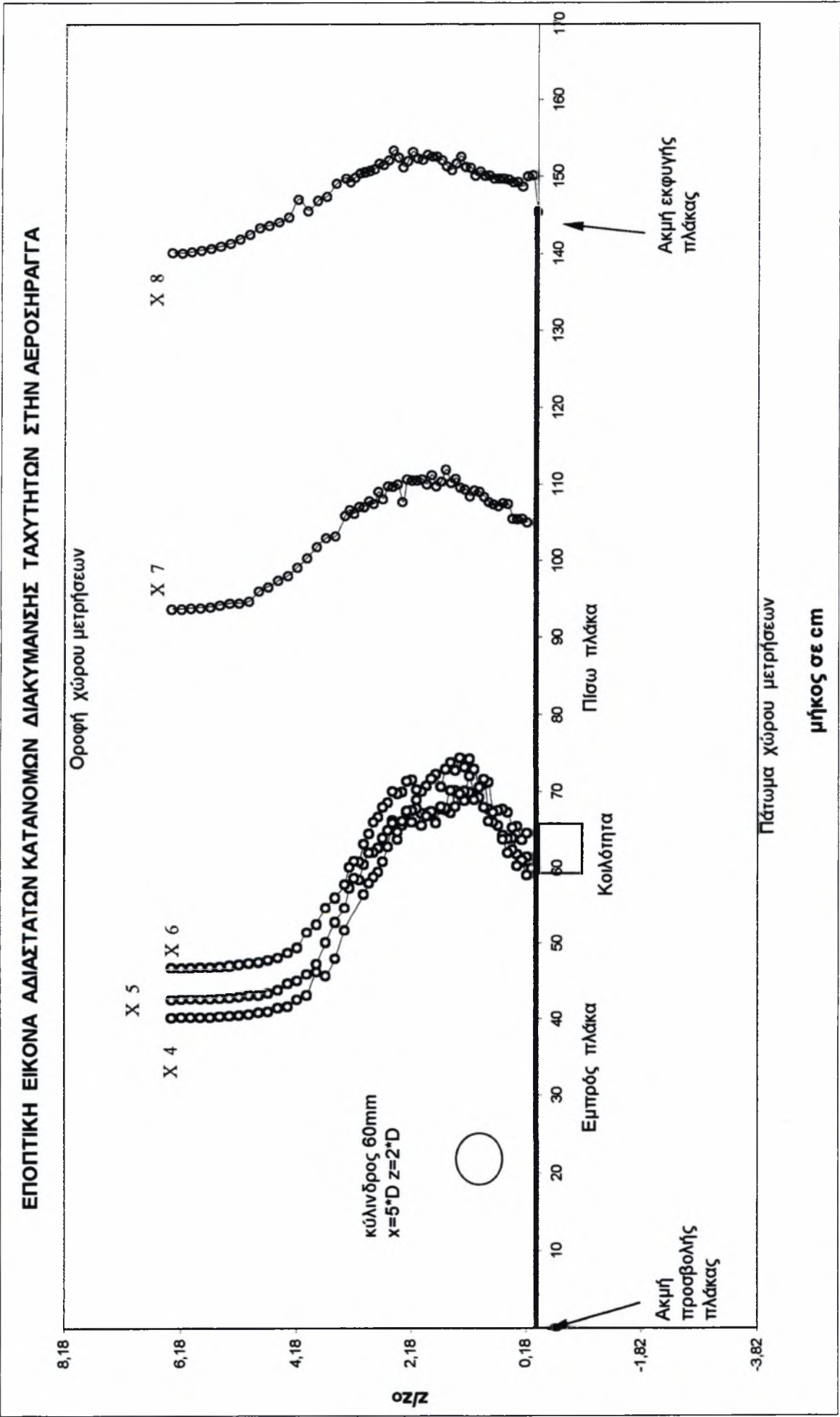


Σχ. 5.11 Εποπτικό διάγραμμα αδιαστατοποιμένων προφίλ διακυμάνσεων ταχύτητας (u_{RMS}) όταν η μεγάλη κοιλότητα είναι τοποθετημένη στην κατώτατη θέση χωρίς κύλινδρο και με ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$.

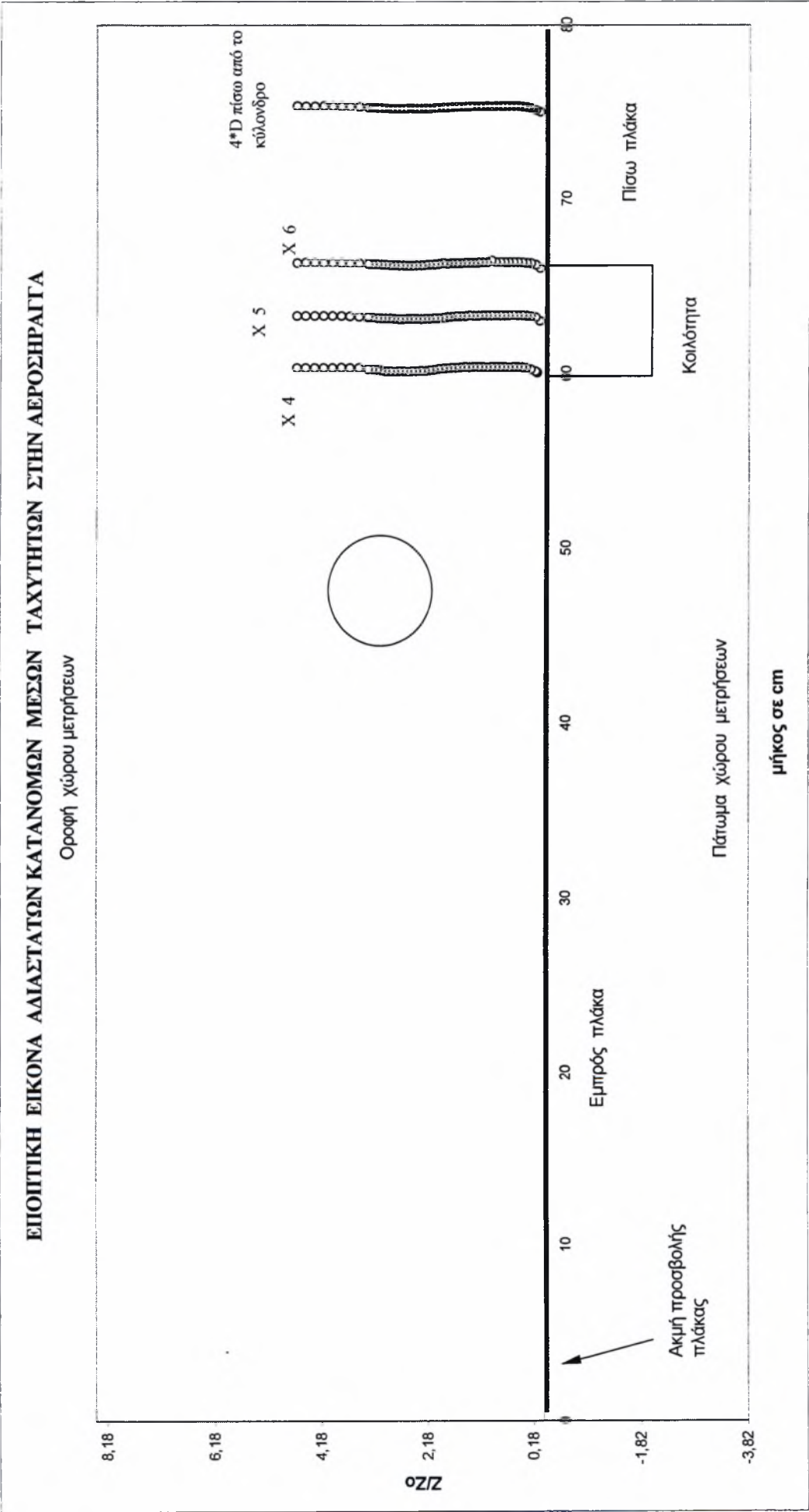
ΕΠΟΠΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΑΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΜΕΣΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ



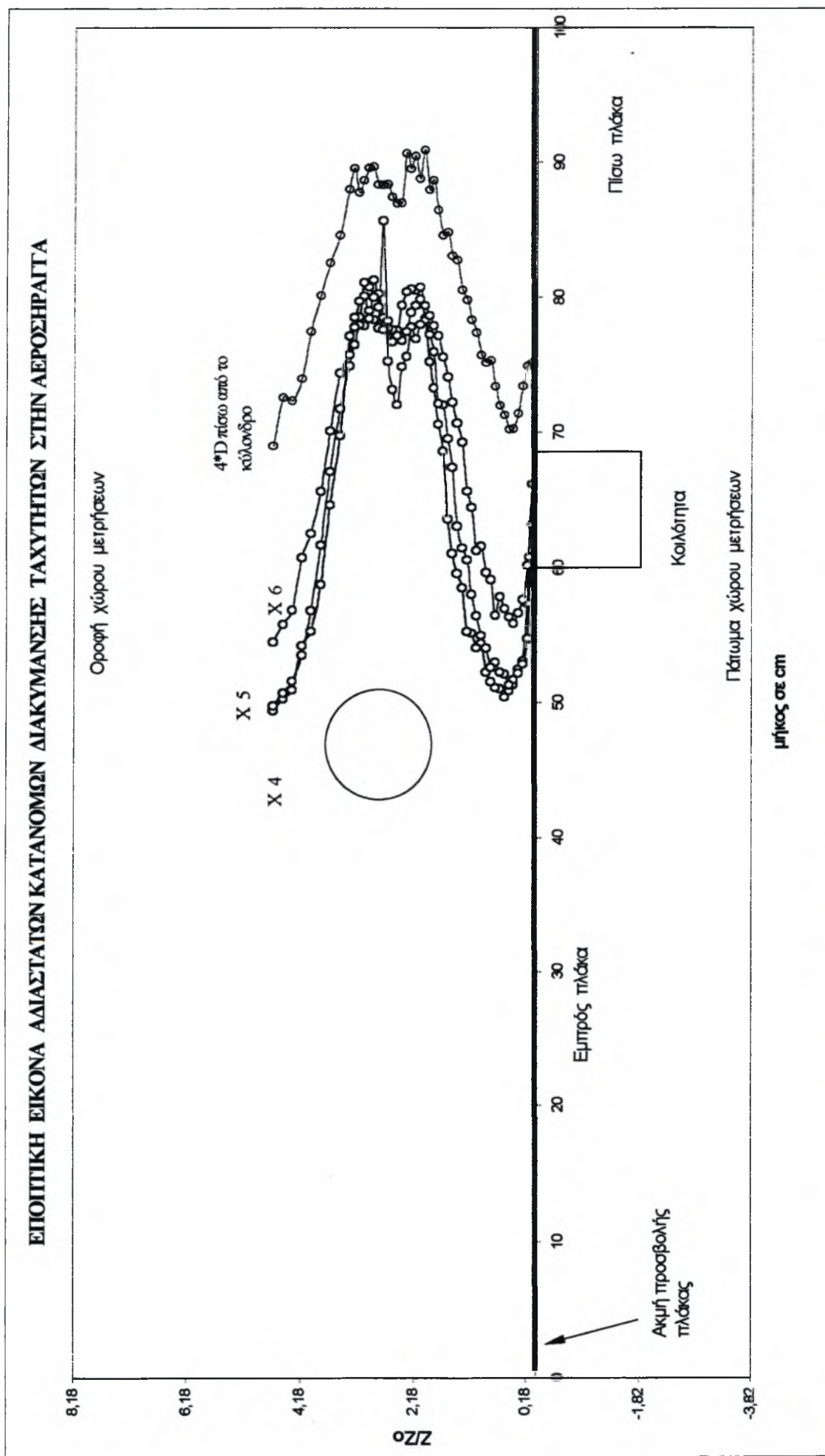
Σχ. 5.12 Εποπτικό διάγραμμα αδιαστατοποιημένων προφίλ ταχύτητας όταν η μεγάλη κοιλότητα είναι τοποθετημένη στην κατώτατη θέση με τον κύλινδρο $\varnothing 60$ ανάντη $5*D$ και ψηλά $2*D$ και με ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$.



Σχ. 5.13 Εποπτικό διάγραμμα αδιαστατοποιημένων προφίλ διακυμάνσεων (u_{RMS}) της ταχύτητας όταν η μεγάλη κοιλότητα είναι τοποθετημένη στην κατώτατη θέση με τον κύλινδρο $\varnothing 60$ ανάντη $5 \cdot D$ και ψηλά $2 \cdot D$ και με ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$.



Σχ. 5.14 Εποπτικό διάγραμμα αδιαστατοποιμένων προφίλ ταχύτητας όταν η μεγάλη κοιλότητα είναι τοποθετημένη στην κατώτατη θέση με τον κύλινδρο Ø60 ανάντη 2*D και ψηλά 2*D και με ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5\text{m/s}$.

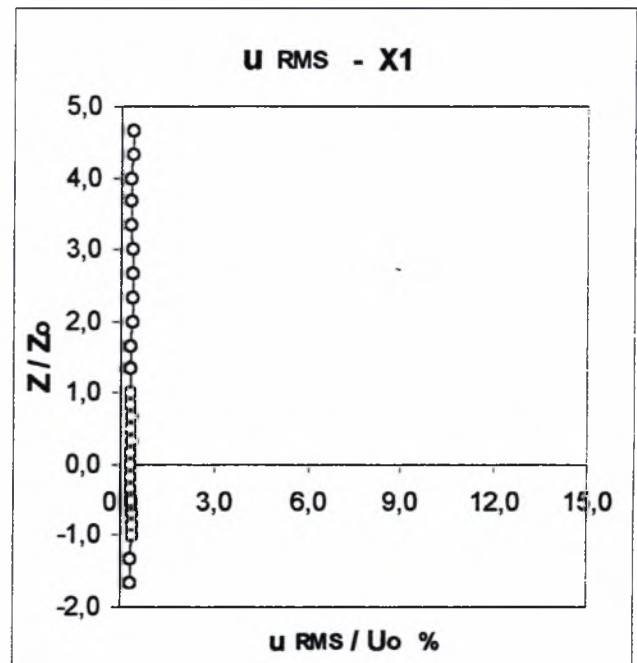
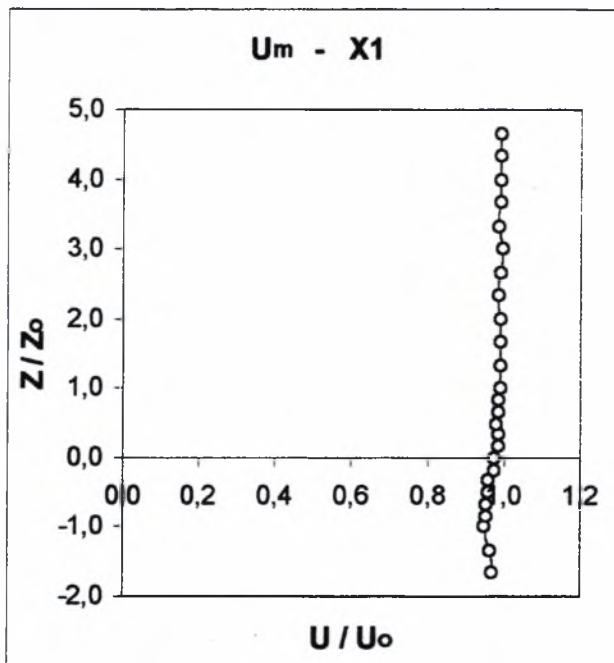


Σχ. 5.15 Εποπτικό διάγραμμα αδιαστατοποιημένων προφίλ διακυμάνσεων (u_{rms}) της ταχύτητας όταν η μεγάλη κυλότητα είναι τοποθετημένη στην κατώτατη θέση με τον κύλινδρο $\varnothing 60$ ανάντη $2^{\circ}D$ και ψηλά $2^{\circ}D$ και με ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=5m/s$.

5.1.1.1

Α. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

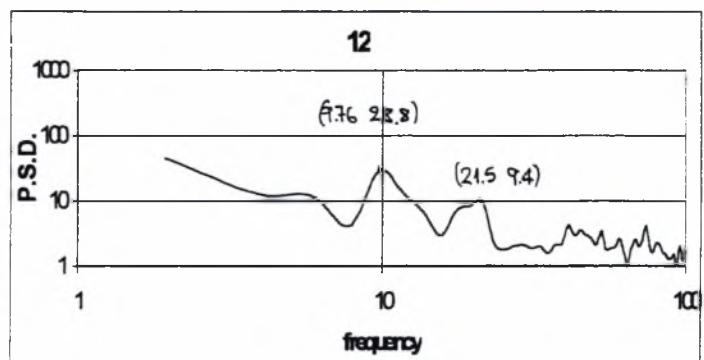
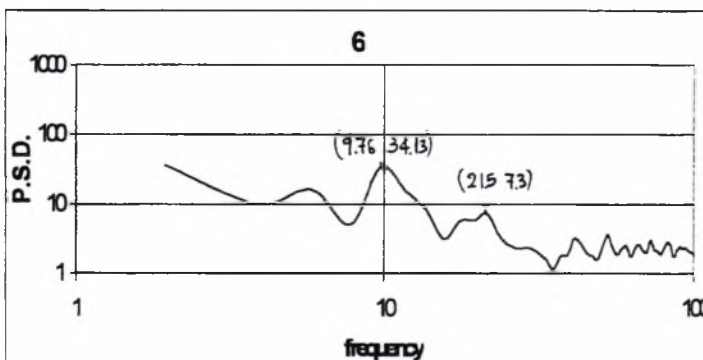
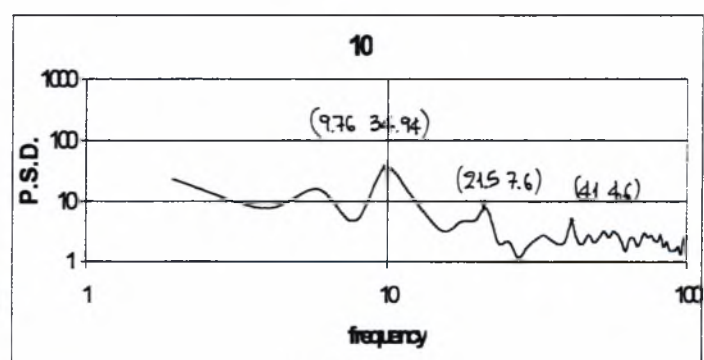
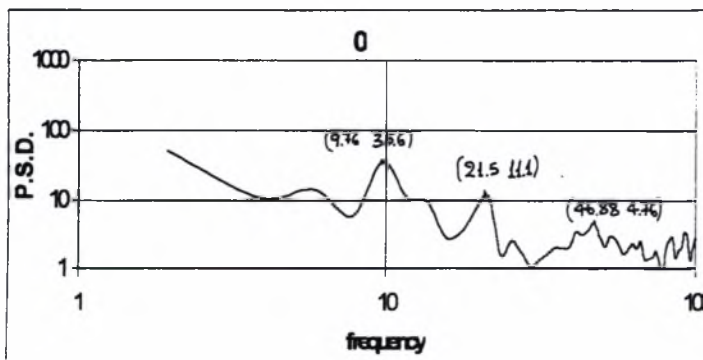
Θέση x 1 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$



Δ. 5.1 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 1.

Β. Διαγράμματα P.S.D.

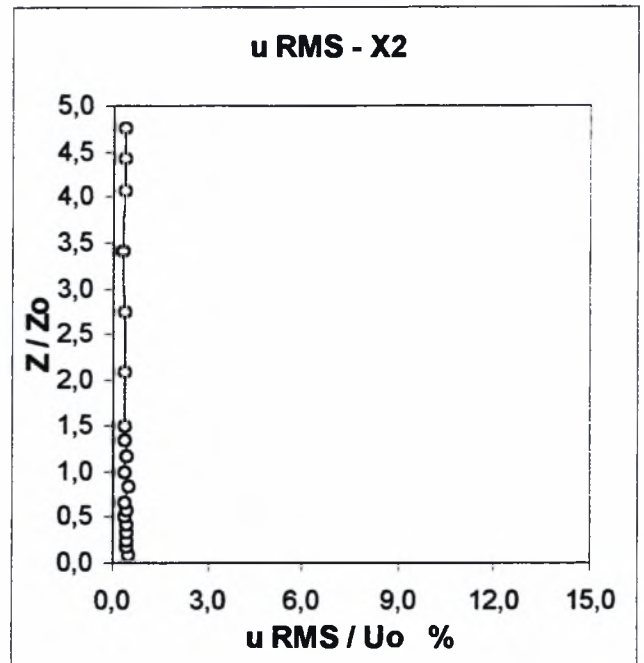
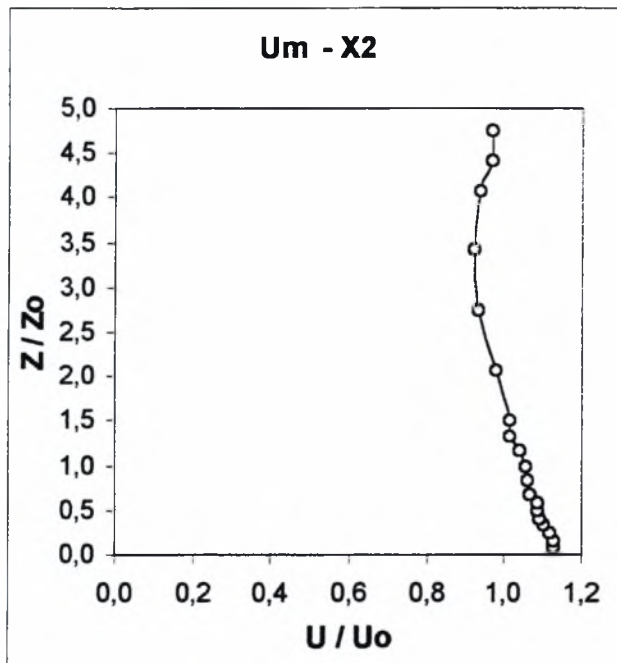
Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/ων.



5.1.1.2

A. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

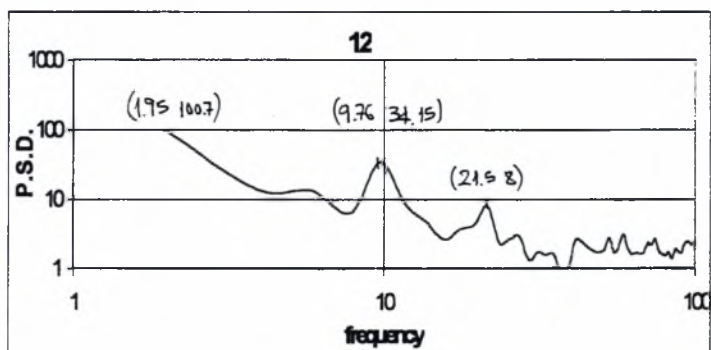
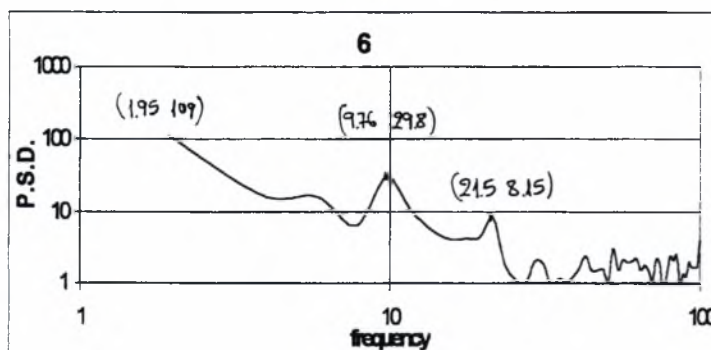
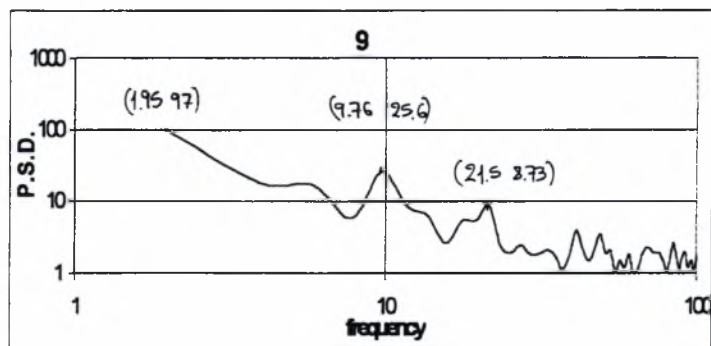
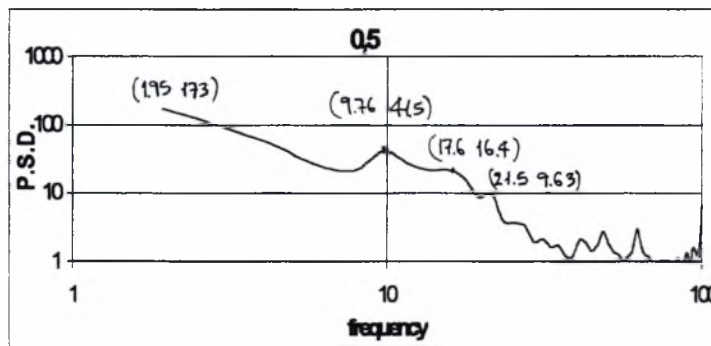
Θέση x 2 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5m/s$



Δ. 5.2 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 2.

B. Διαγράμματα P.S.D.Σχολιασμός:

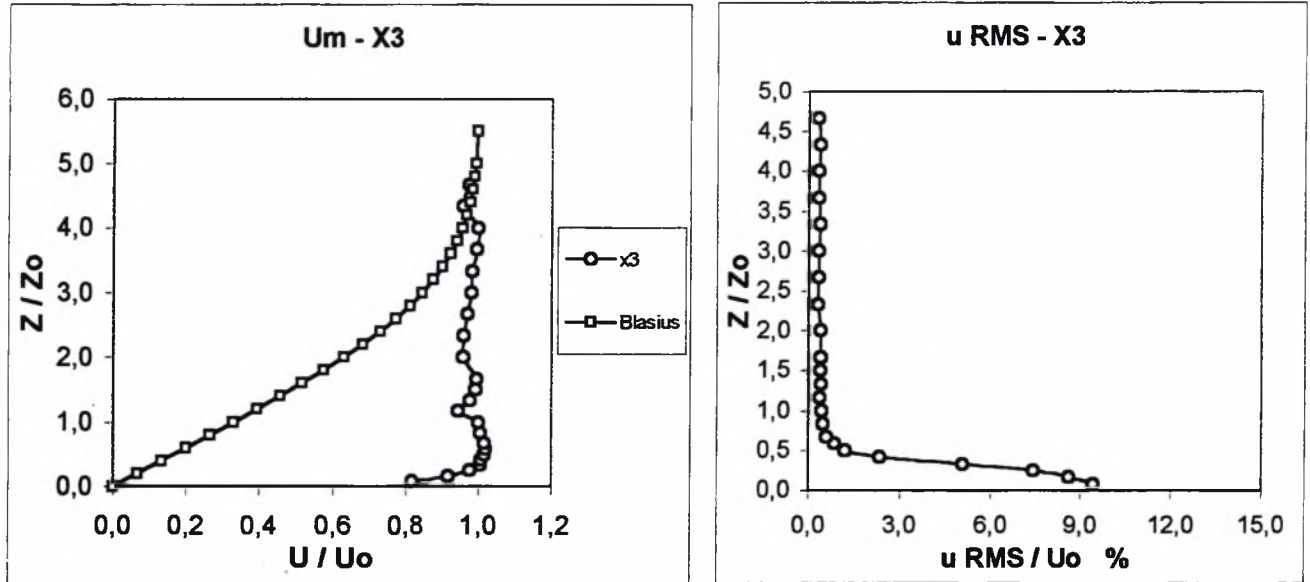
Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/νων.



5.1.1.3

Α. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$ Θέση x 3 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$

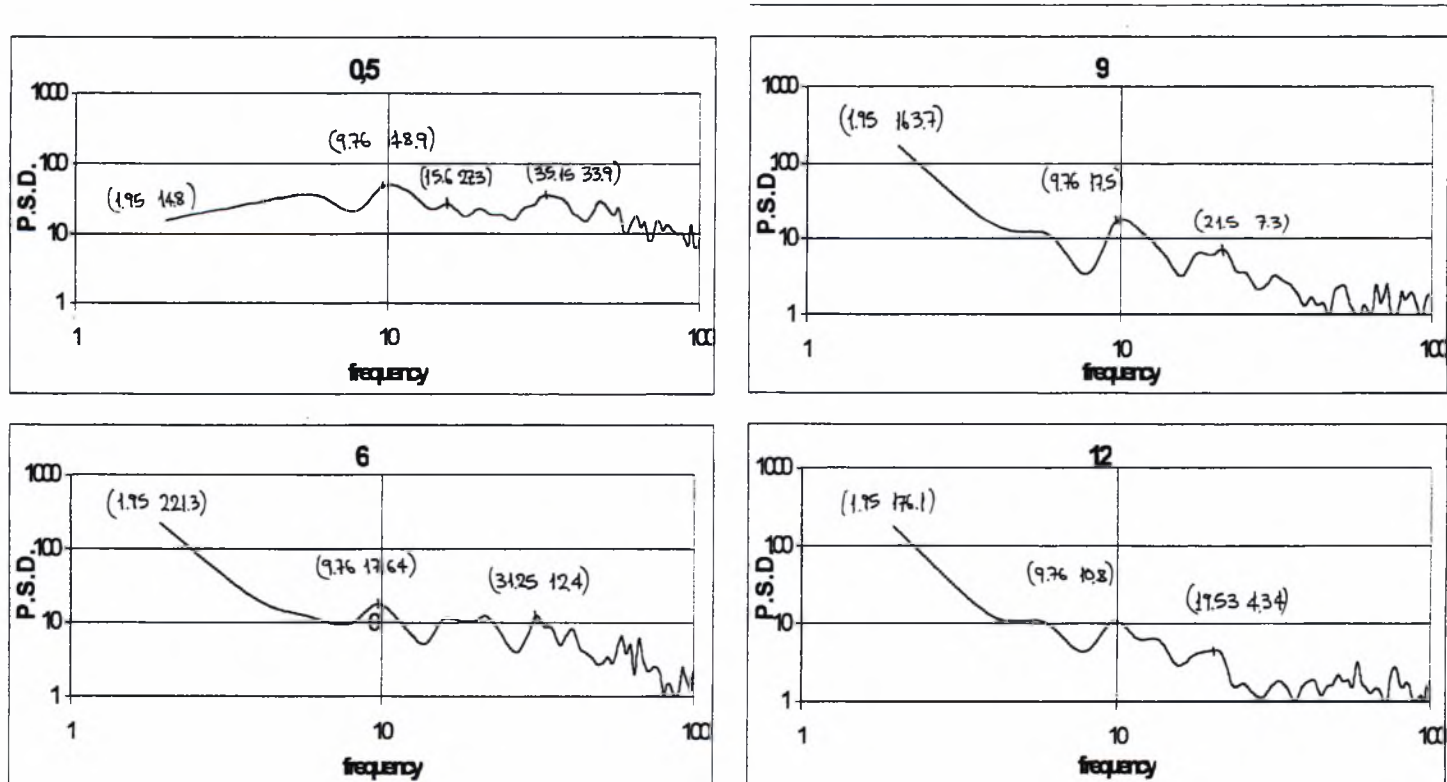
(Σύγκριση του πειραματικού μας προφίλ $z/z_0 = f(u/U_0)$ με το θεωρητικό προφίλ ταχύτητας κατά Blasius.)



Δ. 5.3 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 3.

Β. Διαγράμματα P.S.D. Σχολιασμός:

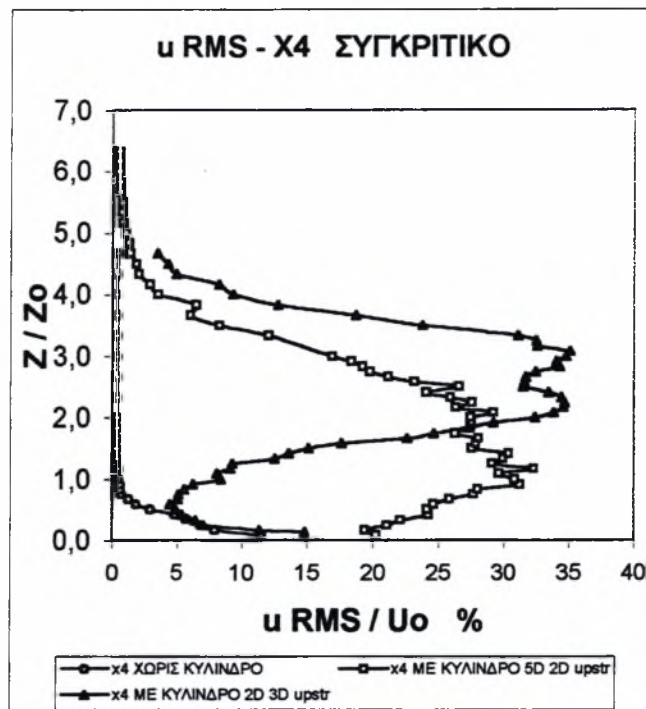
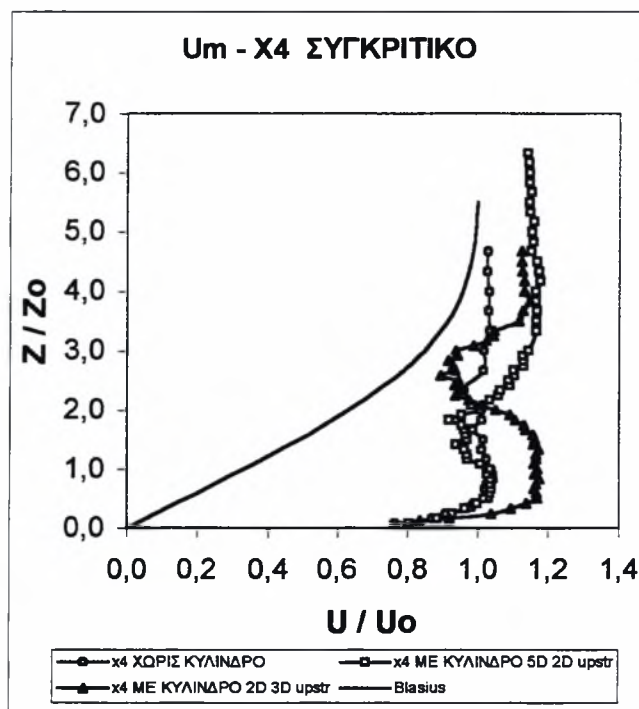
Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/νων.



5.1.1.4

A. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

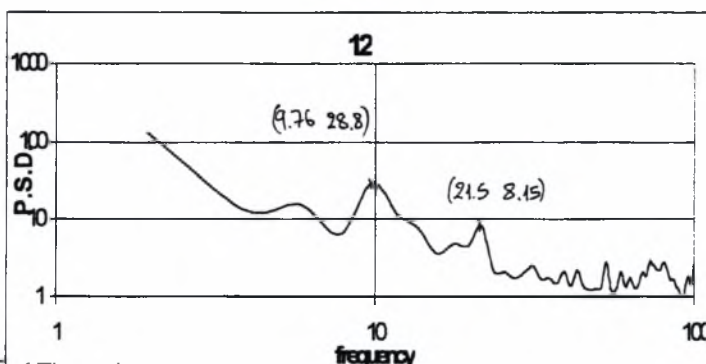
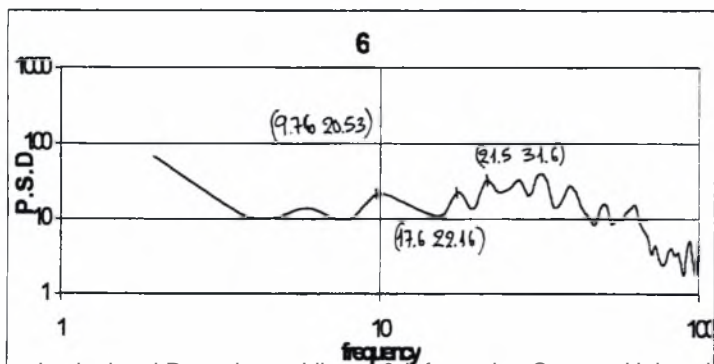
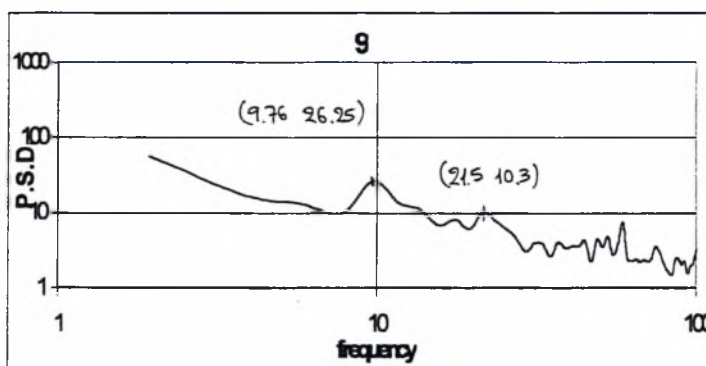
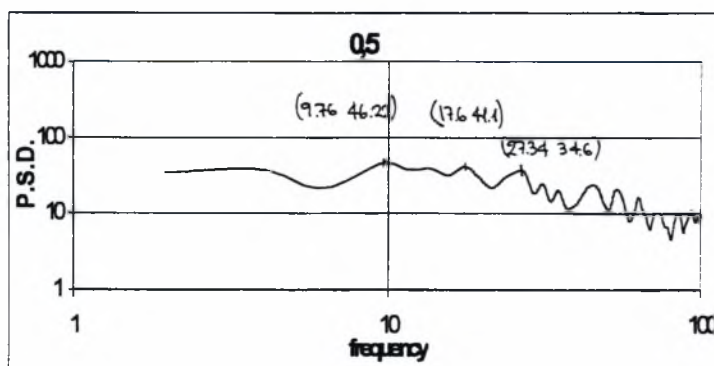
Θέση x 4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ - Χωρίς & Με κύλινδρο - $U_0=5m/s$



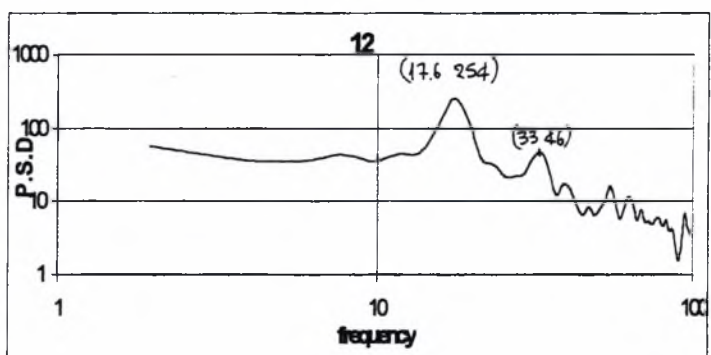
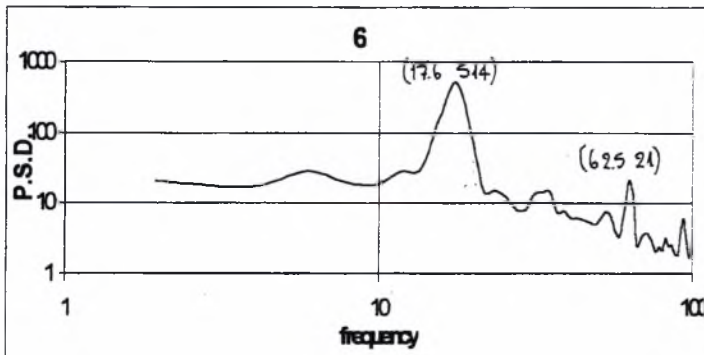
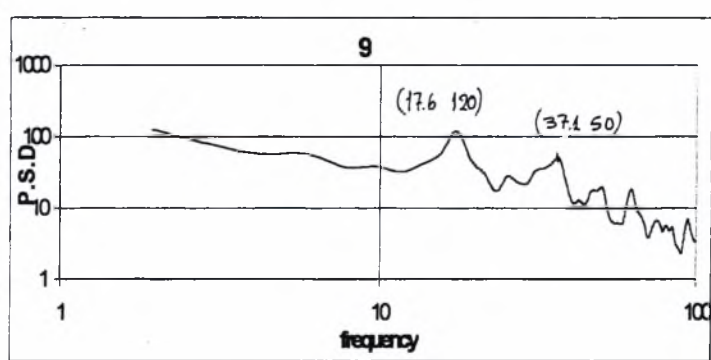
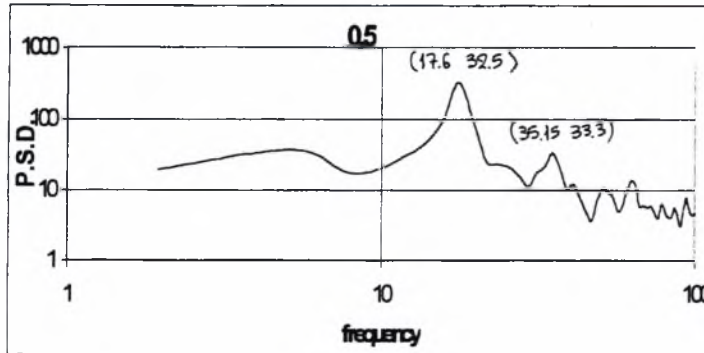
Δ. 5.4 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 4.

B. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 4 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5m/s$

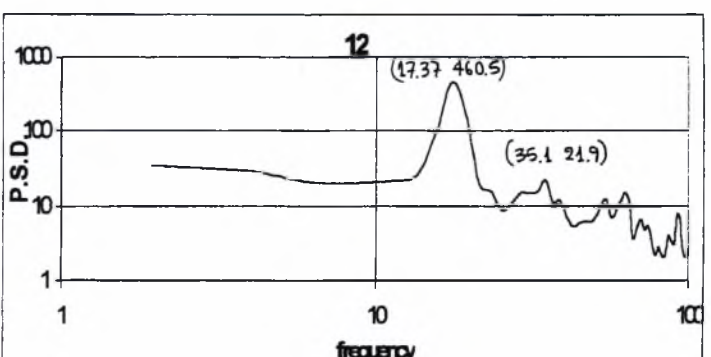
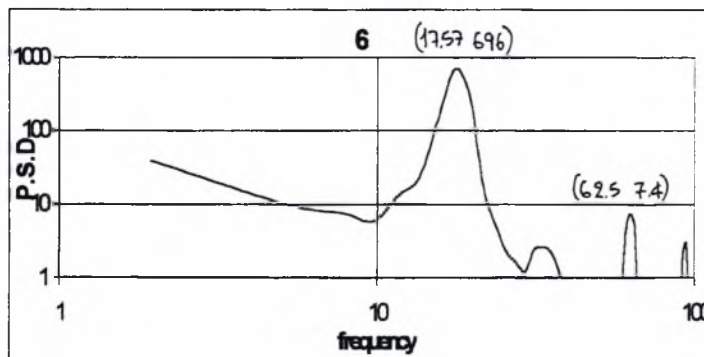
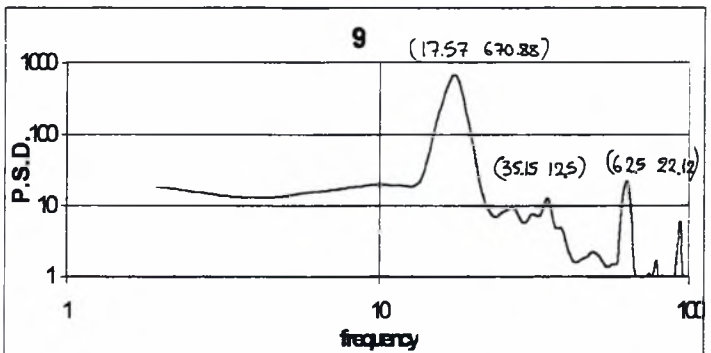
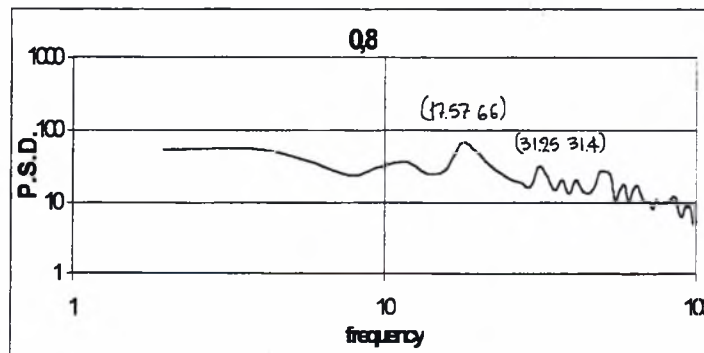
Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/νων



Γ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 4 - Με κύλινδρο 5D εμπρός και 2D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



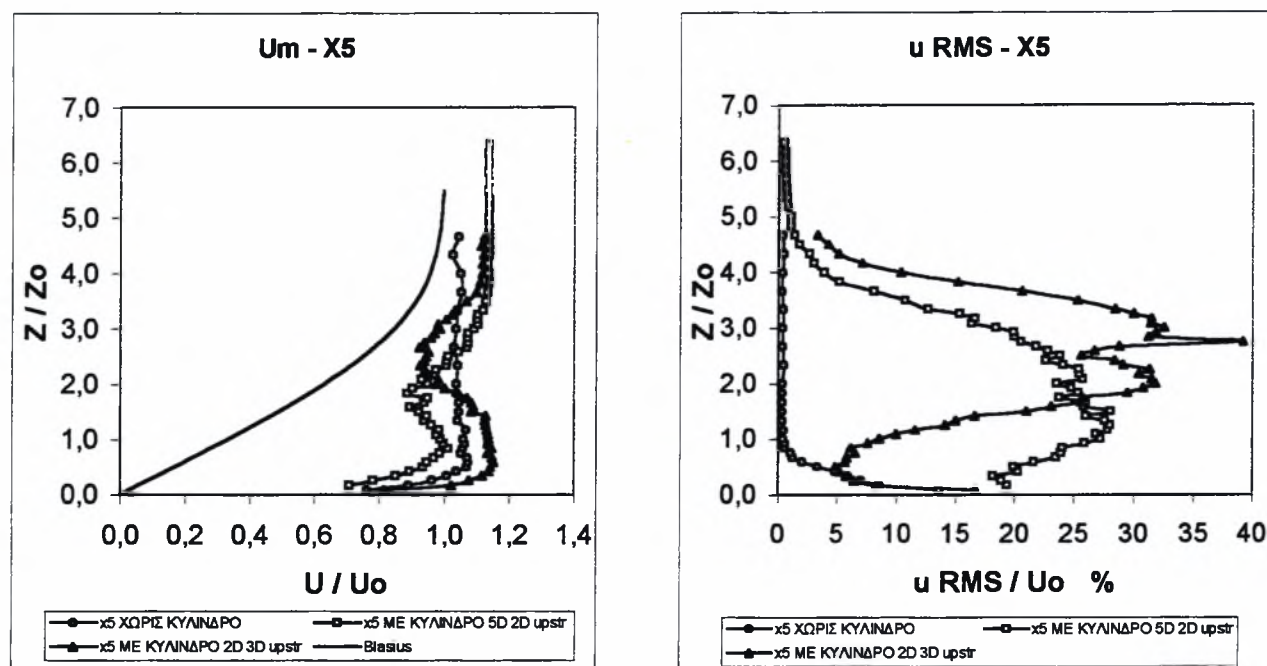
Δ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 4 - Με κύλινδρο 2D εμπρός και 3D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



5.1.1.5

A. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

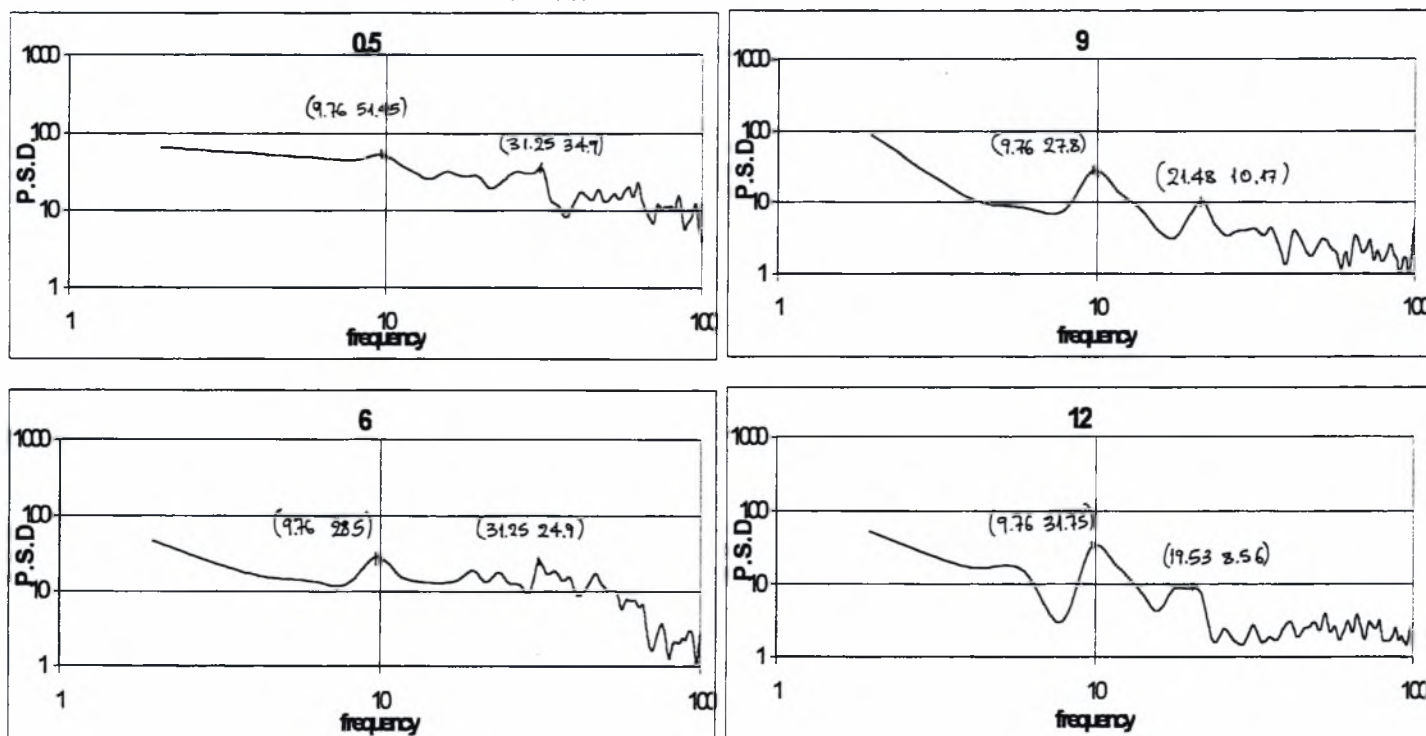
Θέση x 5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ - Χωρίς & Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$



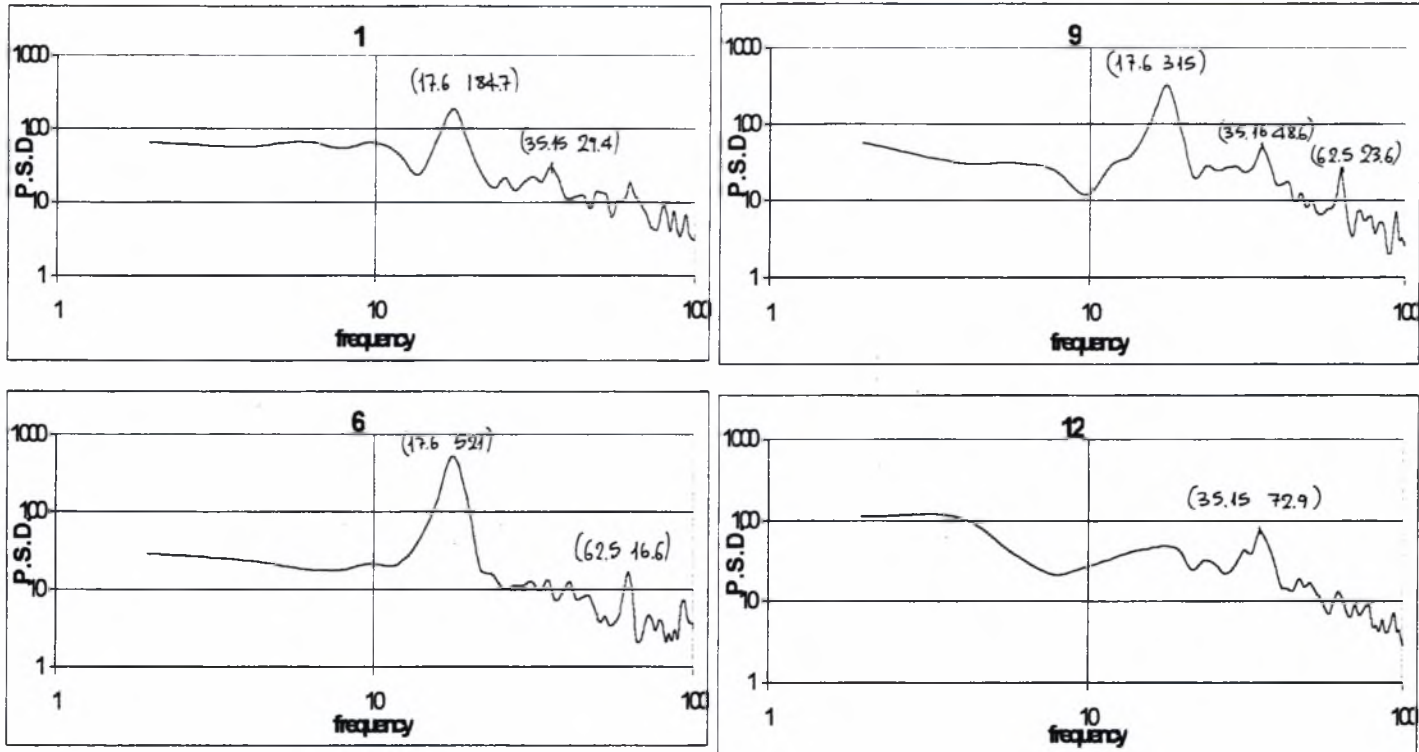
Δ. 5.5 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 5.

B. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 5 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$

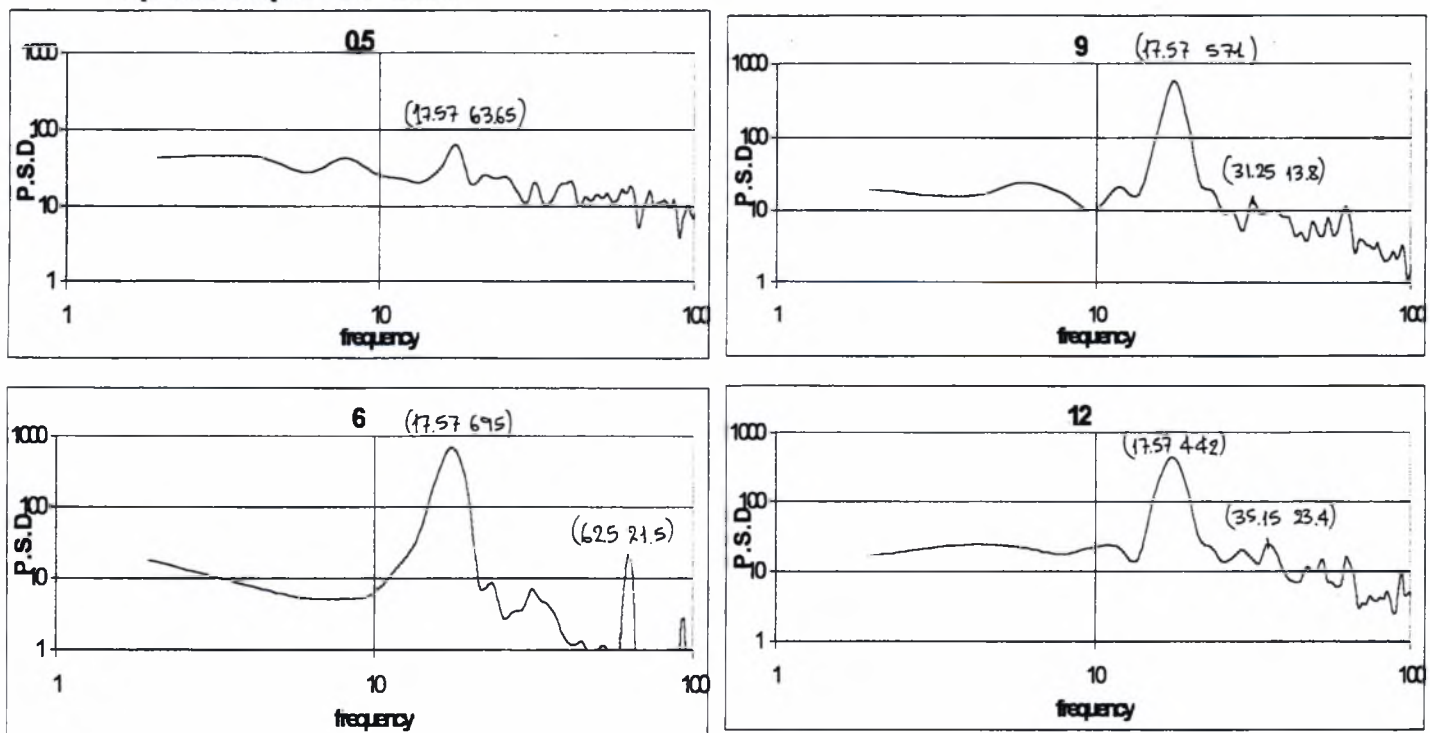
Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/ων



Γ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 5 - Με κύλινδρο 5D εμπρός και 2D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



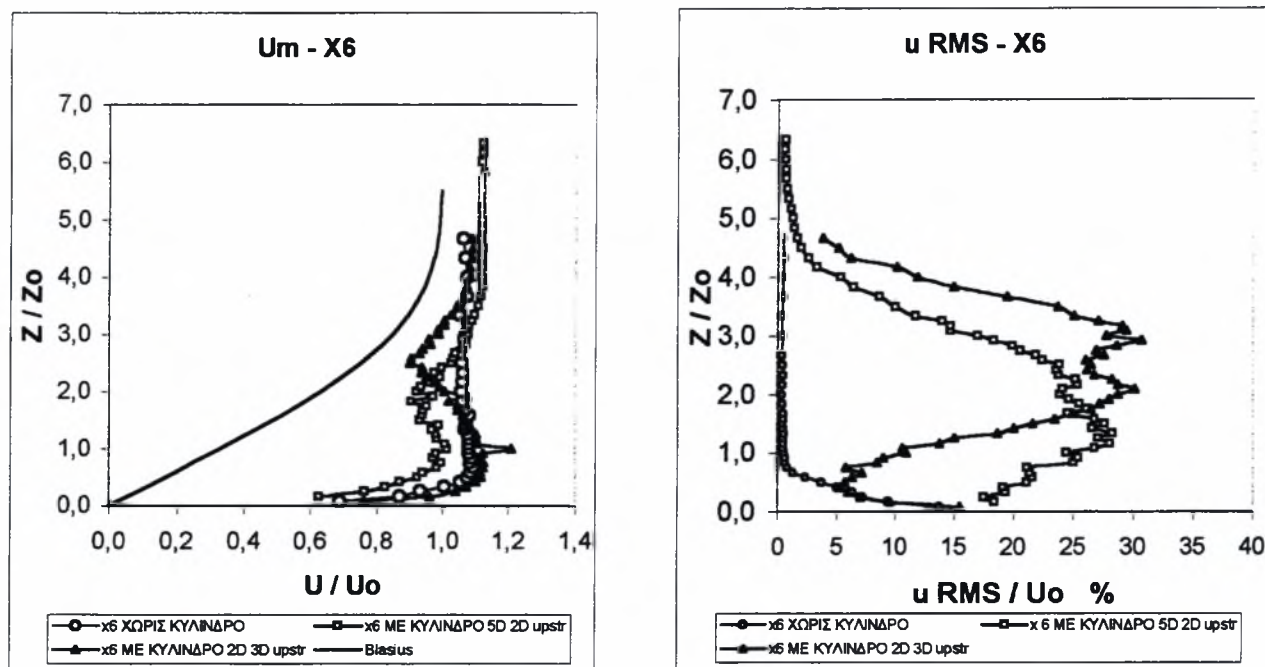
Δ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 5 - Με κύλινδρο 2D εμπρός και 3D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



5.1.1.6

A. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

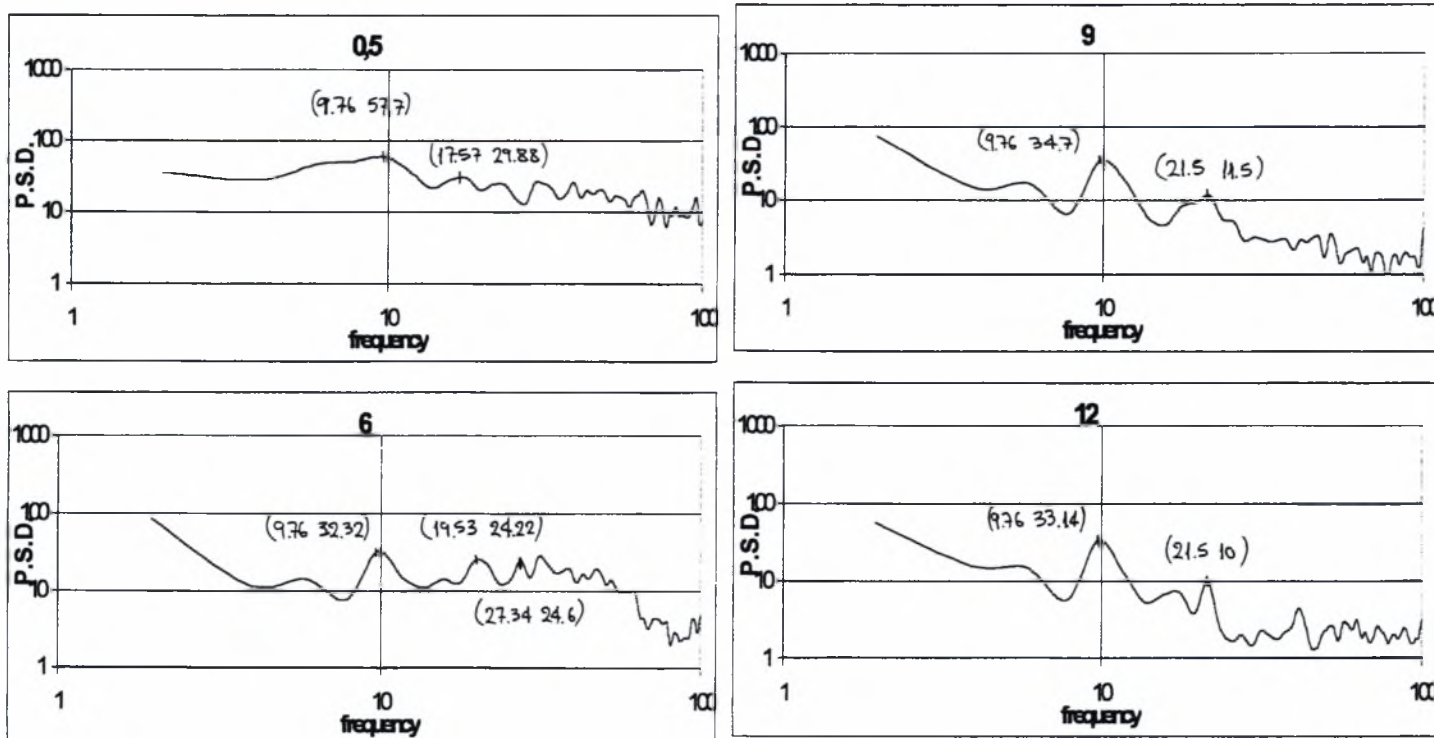
Θέση x 6 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ - Χωρίς & Με κύλινδρο - $U_0=5m/s$



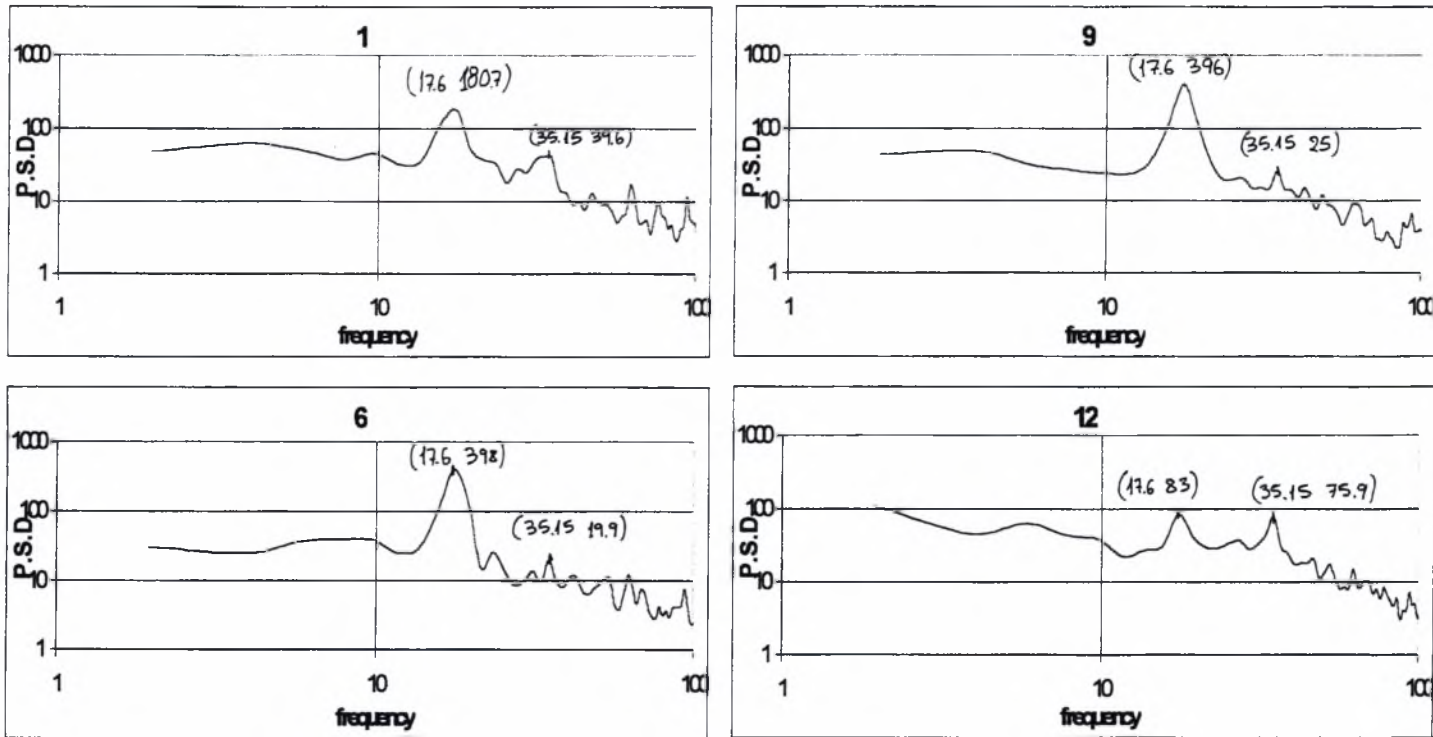
Δ. 5.6 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 6.

B. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 6 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5m/s$

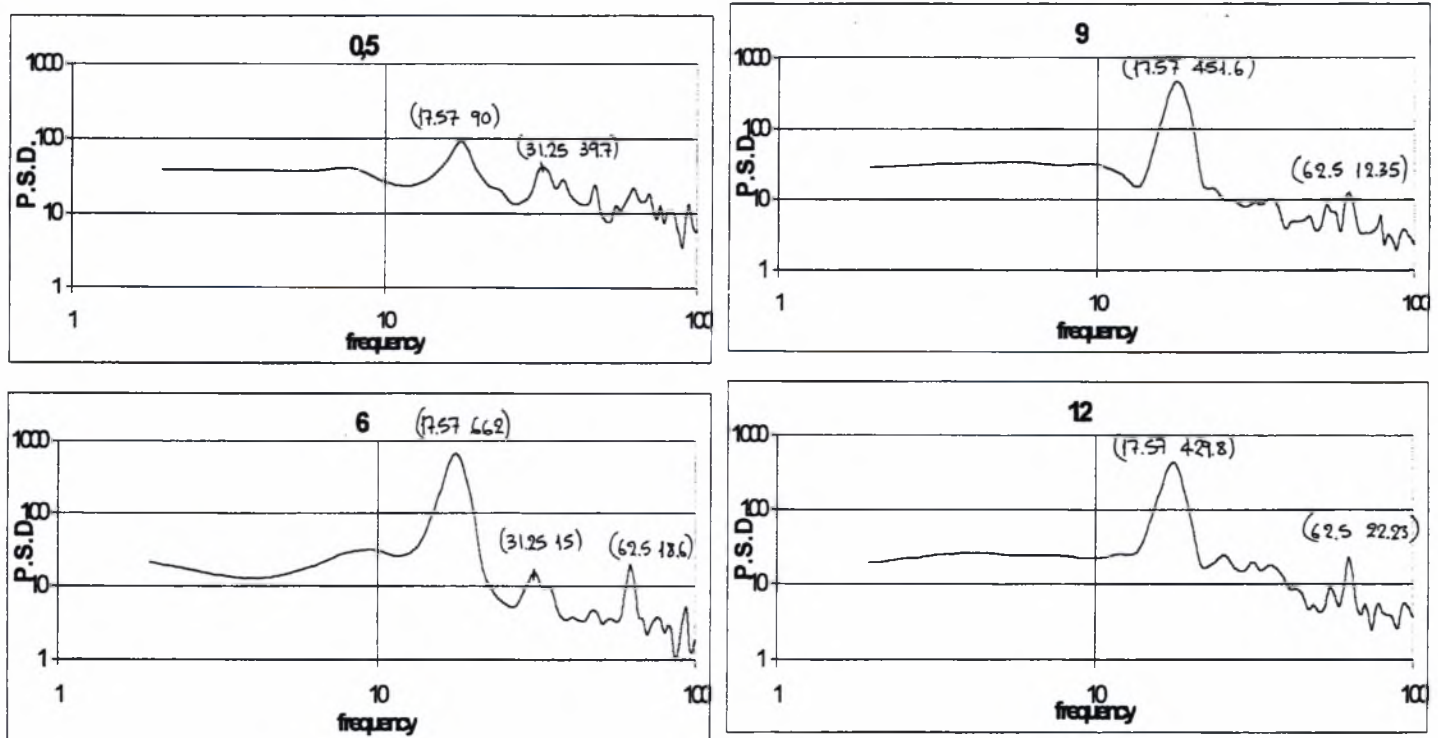
Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/νων



Γ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 6 - Με κύλινδρο 5D εμπρός και 2D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



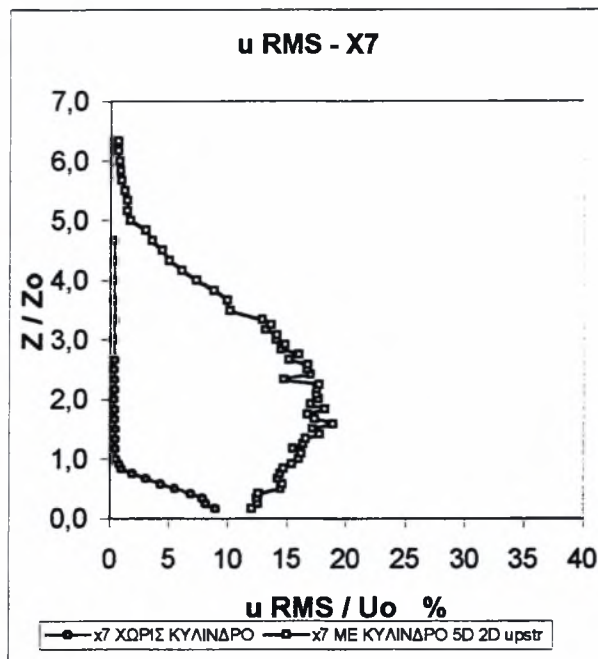
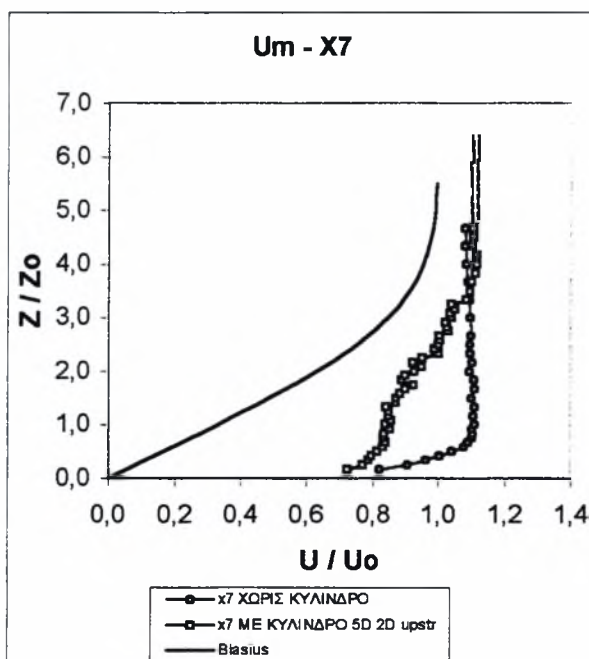
Δ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 6 - Με κύλινδρο 2D εμπρός και 3D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



5.1.1.7

A. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

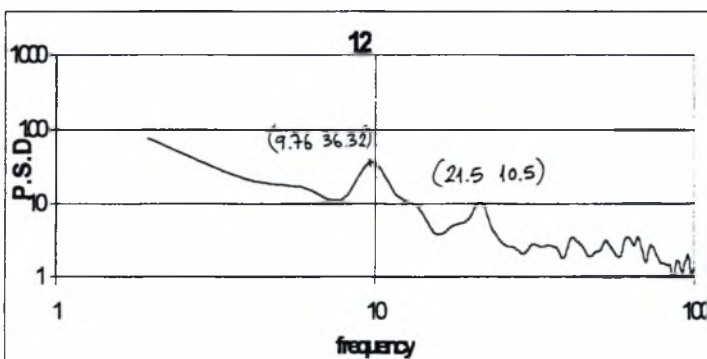
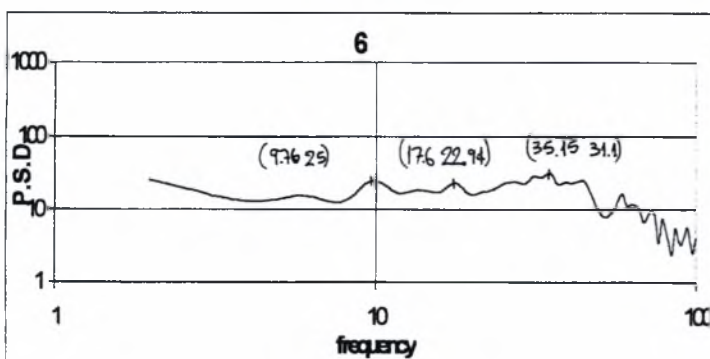
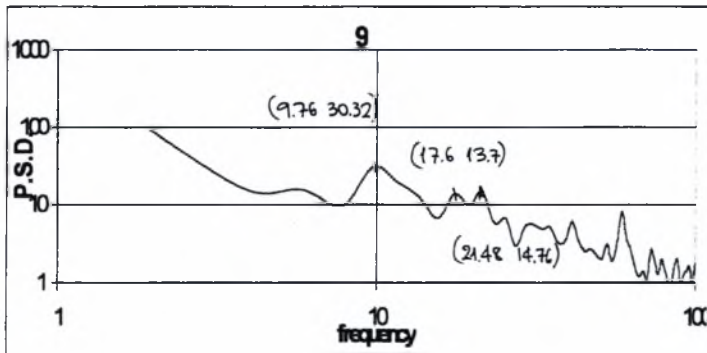
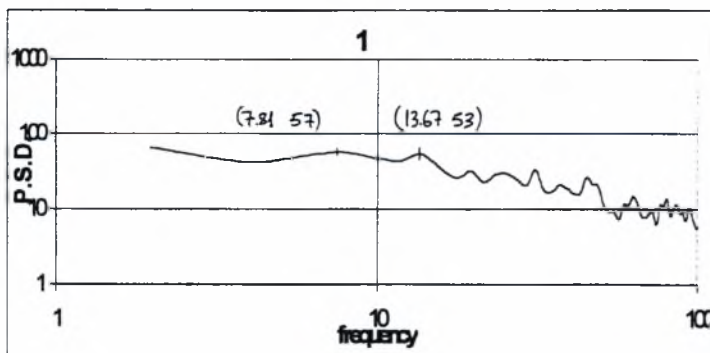
Θέση x 7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ - Χωρίς & Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$



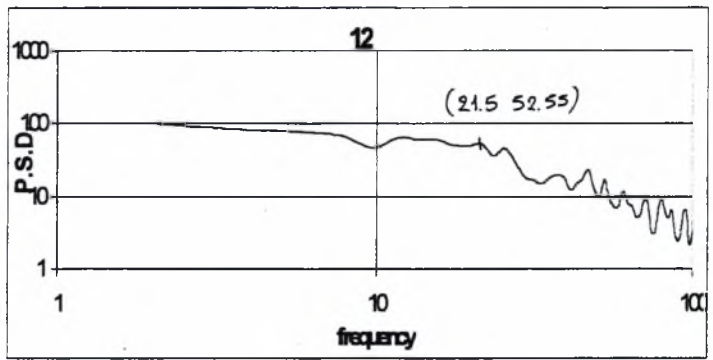
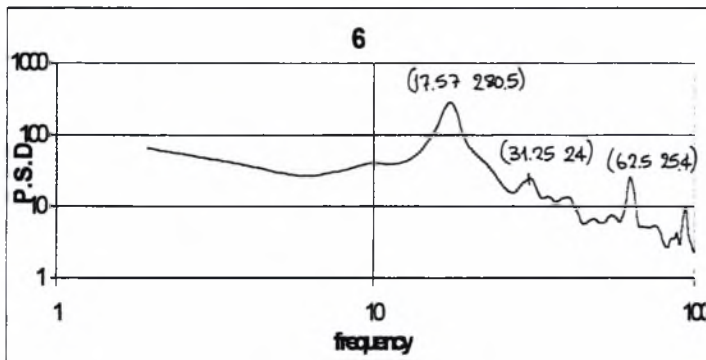
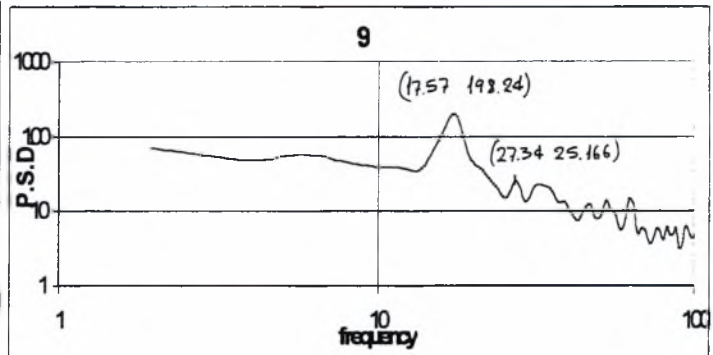
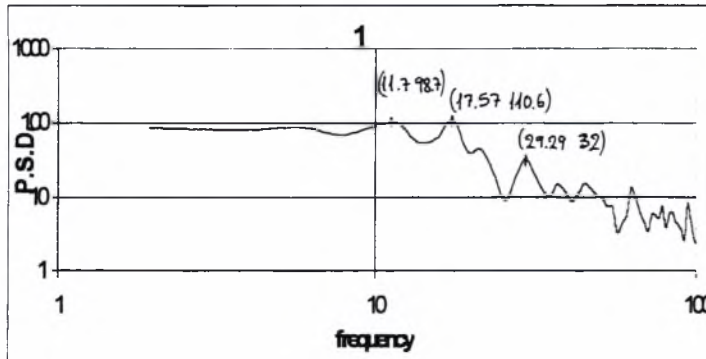
Δ. 5.7 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 7.

B. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 7 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$

Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/νων



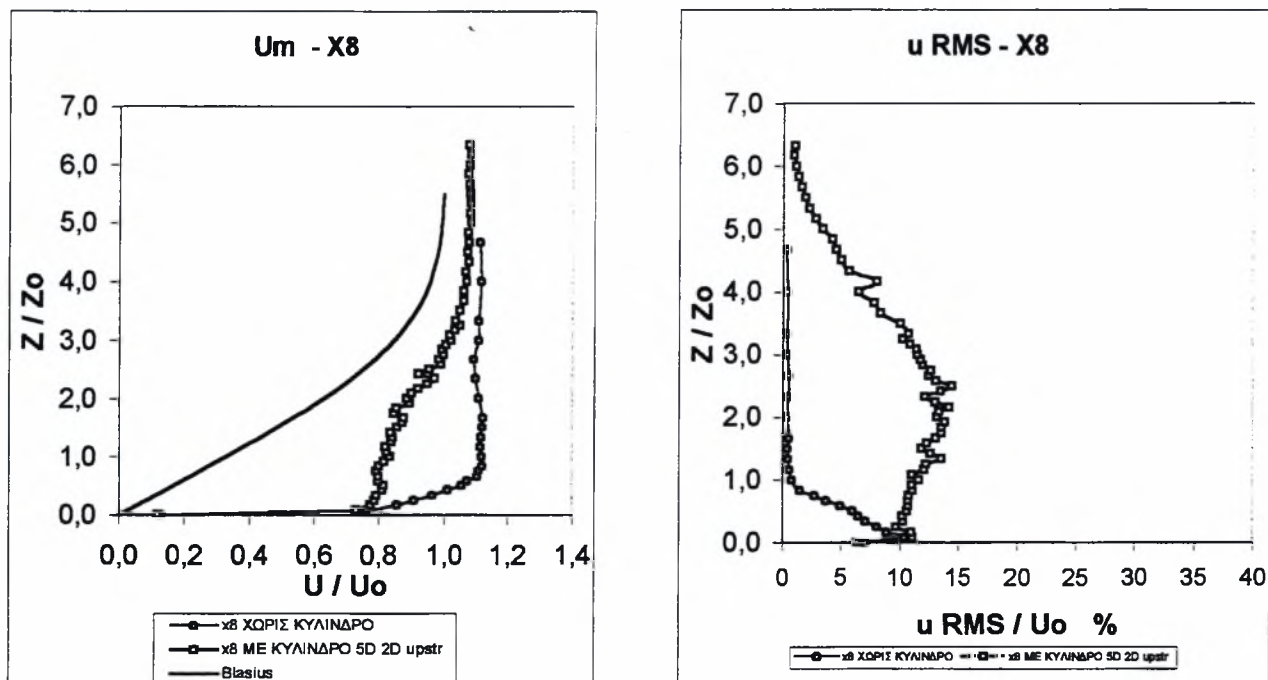
Γ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 7 - Με κύλινδρο 5D εμπρός και 2D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



5.1.1.8

Α. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

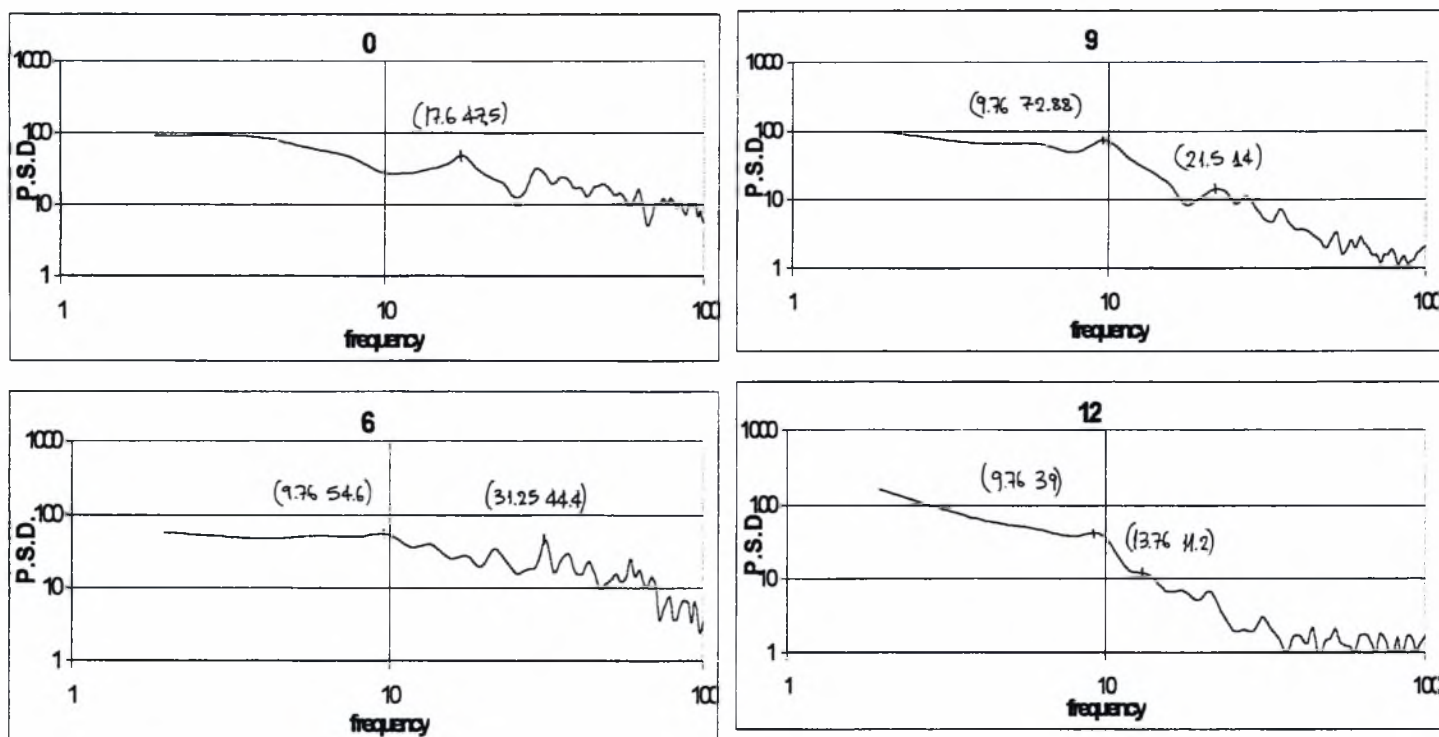
Θέση x 8 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ - Χωρίς & Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$



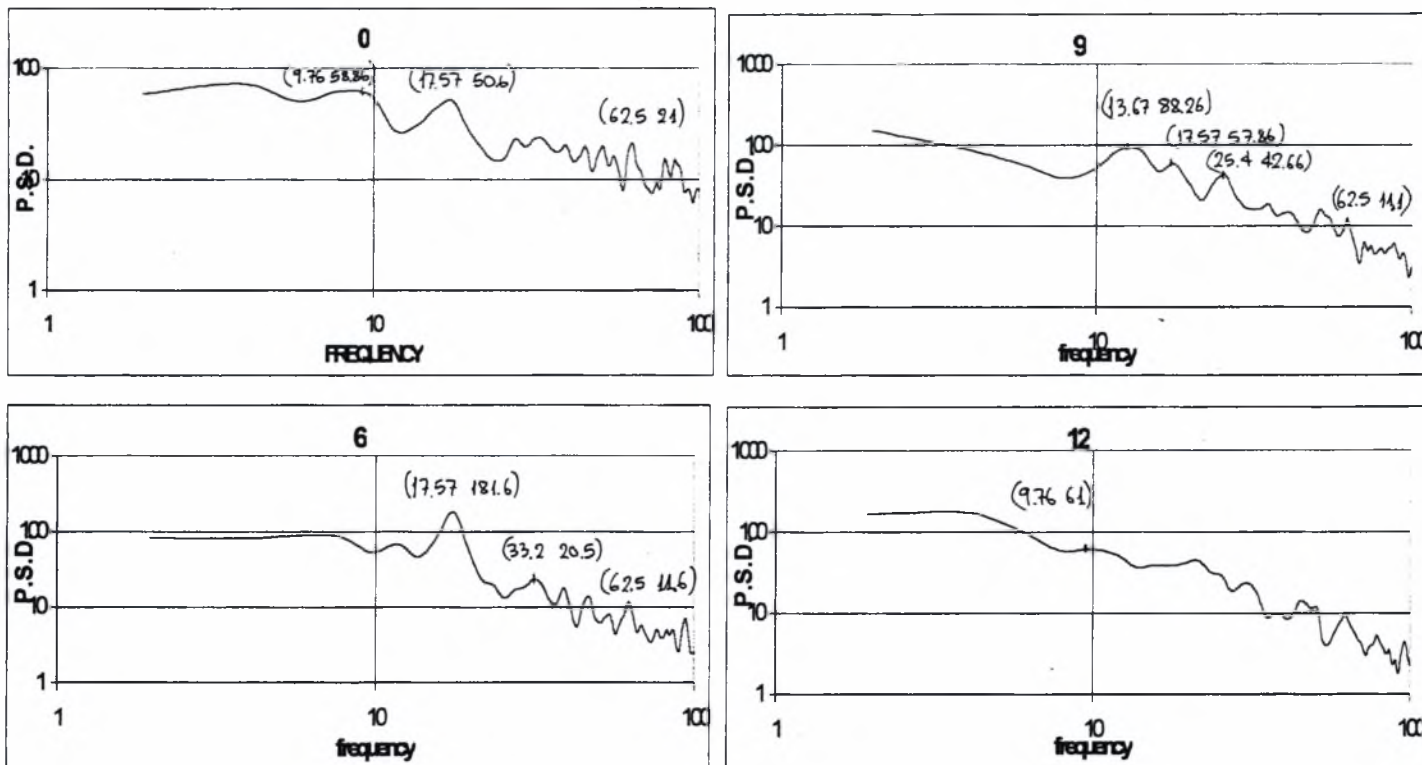
Δ. 5.8 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 8.

Β. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 8 - Χωρίς κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$

Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/ων



Γ. Διαγράμματα P.S.D. - Θέση x 8 - Με κύλινδρο 5D εμπρός και 2D πάνω από την κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$



Δ. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ

Παρακάτω επισυνάπτεται ο Πίνακας 1, όπου αναγράφονται οι αριθμοί Strouhal που αφορούν τις πλάκες, την κοιλότητα και τον κύλινδρο και η χαρακτηριστική συχνότητα των εισαγόμενων από αυτά διαταραχών που αναμένεται να παρατηρηθεί στα διαγράμματα P.S.D.

Πίνακας 1

U_0 (m/s)	D (m)	St	Hz	Αιτία διαταραχών
5	0,008	0,14	87,50	οφειλόμενο στη πλάκα
5	0,06	0,2	16,67	οφειλόμενο στη κοιλότητα
5	0,06	0,3	25,00	οφειλόμενο στη κοιλότητα
5	0,06	0,6	50,00	οφειλόμενο στη κοιλότητα
5	0,06	0,9	75,00	οφειλόμενο στη κοιλότητα
5	0,06	1	83,33	οφειλόμενο στη κοιλότητα
5	0,06	0,195	16,25	οφειλόμενο στο κύλινδρο

Θέση x1:

Η ελεύθερη ροή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη με ασήμαντες διακυμάνσεις για τα θετικά z ($z>0$). Για τα αρνητικά z ($z<0$) παρατηρείται μια ελαφρά μείωση της ταχύτητας, πιθανότατα λόγω της ύπαρξης της κοιλότητας στην κάτω θέση. Η παρουσία αυτής ως "εμποδίου" στην κάτω από τις πλάκες ροή, γίνεται αισθητή από το ρευστό όταν ακόμα αυτό

βρίσκεται 86cm εμπρός από την κοιλότητα. Έτσι αρχίζει να διαμορφώνεται η ροή για να ξεπεραστεί το "εμπόδιο" - κοιλότητα.

Η τύρβη διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (0,4-0,5 %), όχι όμως αμελητέα αφού είναι άνω του 3%, ώστε να αγνοηθεί τελείως η επίδρασή της στη ροή.

Από τα διαγράμματα P.S.D. οι χαρακτηριστικές συχνότητες των "pick" που παρατηρούνται είναι οι 9,76Hz και 21,5Hz. Η πρώτη πιθανότατα οφείλεται σε "θόρυβο" καθώς δεν αντιστοιχεί σε κάποια αναμενόμενη από τον Πίνακα 1. Εξάλλου πρέπει να σημειωθεί πως ο αισθητήρας, λόγω έλλειψης στιβαρότητας του σωλήνα όπου στηρίζονταν, έκανε ταλάντωση μικρού εύρους και συχνότητας εξαιτίας της ροής. Οπότε πιθανόν η συχνότητα 9,76Hz να είναι η αντιστοιχούσα στη ταλάντωση του Hot-wire. Η συχνότητα 21,5Hz πρέπει να είναι κάποιος θόρυβος και αυτή, καθώς παρά που φαίνεται πως αντιστοιχεί στην παρουσία της κοιλότητας, το σημείο όπου παίρνουμε μέτρηση είναι αρκετά πιο εμπρός από την κοιλότητα, συνεπώς δεν μπορούμε να μιλήσουμε για δίνες του απόρρου της κοιλότητας.

Θέση x2:

Προσπίπτοντας η ελεύθερη ροή στην ακμή προσβολής, επιταχύνεται τοπικά αυξάνοντας την ταχύτητά της περίπου 10%. Πιθανόν αυτό συμβαίνει λόγω της μικρής αρνητικής κλίσης (-0,4°) της διάταξης πλακών-κοιλότητας, η οποία συντελεί σε "συμπύεση" της ροής. Μακρύτερα από την πλάκα ($z > 1,8$), η ταχύτητα ελαττώνεται, ώστε η συνολική ορμή της να διατηρηθεί σταθερή.

Η τύρβη διατηρείται ακόμη στα ίδια επίπεδα (0,4-0,5 %).

Στα διαγράμματα P.S.D. εμφανίζονται οι ίδιες συχνότητες όπως στη Θέση x1. Η αιτιολόγηση είναι η ίδια όπως και στη Θέση x1.

Θέση x3:

Στη θέση αυτή (304mm από την ακμή προσβολής) έχω σχηματισμό οριακού στρώματος πάνω από την πλάκα. Συγκρίνοντάς το με το θεωρητικά αναμενόμενο κατά Blasius (θεωρώντας πως η κλίση των πλακών-μοντέλου είναι αμελητέα, συνεπώς είναι και αυτά σχεδόν επίπεδα), παρατηρούμε πως είναι ένα καλά αναπτυσσόμενο τυρβώδες οριακό στρώμα το πάχος του οποίου εκτιμάται σε $0,65 \cdot 60 = 39\text{mm}$. Ακόμη υπάρχει αυξημένη τύρβη (>9%).

Στα διαγράμματα P.S.D. εμφανίζονται οι ίδιες συχνότητες όπως στη Θέση x1. Η αιτιολόγηση είναι η ίδια όπως και στη Θέση x1.

Θέση x4:

Εδώ βλέπουμε τα συγκριτικά διαγράμματα των προφίλ της ταχύτητας και της τύρβης (αδιάστατων) για τις περιπτώσεις χωρίς και με κύλινδρο σε διάφορες θέσεις.

Η θέση αυτή είναι ακριβώς πάνω στο ανάντη της ροής χείλος της κοιλότητας (610mm από την ακμή προσβολής). Όπως φαίνεται όλα τα οριακά στρώματα είναι τυρβώδη. Η τύρβη είναι σε υψηλότερα από πριν ποσοστά φτάνοντας έως και 35%, ιδίως στην περίπτωση που υπάρχει κύλινδρος 2D ανάντη της κοιλότητας και 3D πάνω.

Ένα τοπικό κύρτωμα προς τα πίσω στην περίπτωση της κοιλότητας χωρίς κύλινδρο, προφανώς οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα.

Για τις περιπτώσεις με κύλινδρο, παρατηρούμε στην περιοχή που αντιστοιχεί στο ύψος της θέσης του κυλίνδρου, να δημιουργείται στο προφίλ ταχύτητας ένα χαρακτηριστικό κύρτωμα μειωμένης ταχύτητας. Αυτό είναι συνέπεια της ανακοπής της ροής σε εκείνη της περιοχή από την παρουσία του κυλίνδρου. Ενώ στα άκρα του κυρτώματος παρατηρείται αξιοσημείωτη επιτάχυνση της ροής. Πιθανόν αυτό να συμβαίνει εξαιτίας της τοπικής "συμπύεσης" του ρευστού και των δινών Von-Karman που εκρέουν από τον κύλινδρο. Αντίστοιχα υπάρχει

Το πάχος του οριακού στρώματος έχει αυξηθεί στα 48mm.

Όσον αφορά τα διαγράμματα P.S.D., στις περιπτώσεις που έχουμε παρουσία κυλίνδρου μέσα στη ροή, η κορυφή τους "pick" αντιστοιχεί συνήθως σε συχνότητα 17,6Hz η οποία λογικά αντιστοιχεί στην παρουσία των δινών Von-Karman από τον κύλινδρο.

Στην περίπτωση χωρίς κύλινδρο η κύρια συχνότητα που εμφανίζεται είναι η 9,76 η οποία όπως έχουμε προαναφέρει, είναι πιθανόν οι ταλαντώσεις του αισθητήρα.

Θέση x5:

Εδώ είμαστε στο μέσον της κοιλότητας (640mm από την ακμή προσβολής). Μέσα της ανακυκλοφορεί με ωρολογιακή φορά μια δίνη που σχεδόν καταλαμβάνει όλο το χώρο της κοιλότητας, η οποία περιοδικά εκβάλλει ρευστό έξω από την κοιλότητα.

Για τις περιπτώσεις με κύλινδρο, παρατηρούμε και πάλι στην περιοχή που αντιστοιχεί στο ύψος της θέσης του κυλίνδρου, να δημιουργείται στο προφίλ ταχύτητας ένα χαρακτηριστικό κύρτωμα μειωμένης ταχύτητας. Αντίστοιχα υπάρχει πάλι ένα διπλό κύρτωμα στα διαγράμματα της τύρβης

Όλα τα οριακά στρώματα είναι τυρβώδη. Στην περίπτωση χωρίς κύλινδρο, παρατηρούμε τοπική αύξηση στην ταχύτητα κοντά στο χείλος της κοιλότητας. Αυτή οφείλεται μάλλον στη δίνη εντός της κοιλότητας, η οποία πάνω στο χείλος "βοηθά" την υπερκείμενη ροή να κινηθεί πιο γρήγορα.

Η τύρβη, ενώ για την περίπτωση χωρίς κύλινδρο αυξάνεται, για τις περιπτώσεις με κύλινδρο μειώνεται.

Τα διαγράμματα P.S.D. δείχνουν σχεδόν τις ίδιες με προηγουμένως συχνότητες. Η κύρια συχνότητα της διαταραχής παραμένει η ίδια σε κάθε περίπτωση, με αυξομειώσεις ως προς την τιμή του μεγέθους της έντασης του φαινομένου.

Θέση x6:

Η θέση αυτή είναι ακριβώς πάνω στο κατάντη της ροής χείλος της κοιλότητας (670mm από την ακμή προσβολής).

Τα προφίλ της ταχύτητας δείχνουν πως τα οριακά μου στρώματα είναι τυρβώδη. Όμως οι κατανομές ταχύτητας παρόλο που μοιάζουν στις αντίστοιχες στη θέση x5, δείχνουν να επηρεάζονται λιγότερο από την παρουσία του κυλίνδρου, αφού το κύρτωμα στα αντίστοιχα προφίλ ταχύτητας ελαττώνεται.

Η τύρβη για την περίπτωση χωρίς κύλινδρο συνεχίζει να αυξάνει και για τις περιπτώσεις με κύλινδρο να ελαττώνεται. Πάντως παραμένει στα ίδια σχεδόν επίπεδα με προηγουμένως

Για τα διαγράμματα P.S.D. παρατηρούνται τα ίδια όπως και για την θέση x5.

Θέση x7:

Εδώ βρισκόμαστε στο μέσον της πίσω πλάκας (1076mm από την ακμή προσβολής). Η επίδραση του κυλίνδρου δείχνει να εξασθενεί περισσότερο.

Τα διαγράμματα P.S.D. μας δείχνουν το ίδιο, ότι δηλαδή η επίδραση του κυλίνδρου εξασθενεί, καθώς το "peak" της χαρακτηριστικής συχνότητας $\approx 17,6\text{Hz}$ έχει μικρότερο μέγεθος έντασης φαινομένου.

Παρατηρείται αισθητή μείωση του ποσοστού τη τύρβης για κάθε περίπτωση. Τα οριακά στρώματα είναι τυρβώδη. Επίσης η ροή κάτω από τα z που αντιστοιχούν στο ύψος της θέσης του κυλίνδρου επιβραδύνεται. Το οριακό στρώμα εκτιμάται ότι έχει πάχος περίπου 60mm!! Ακόμη η μορφή των προφίλ της ταχύτητας στην χωρίς κύλινδρο περίπτωση δείχνει μια ενιαία αύξηση της ταχύτητας. Πιθανόν η ροή έχει αρχίσει να συμπιέζεται περισσότερο, λόγω της αύξησης του πάχους του οριακού στρώματος.

αύξηση της ταχύτητας. Πιθανόν η ροή έχει αρχίσει να συμπιέζεται περισσότερο, λόγω της αύξησης του πάχους του οριακού στρώματος.

Θέση x8:

Είναι η ακμή εκφυγής της πίσω πλάκας (1476mm από την ακμή προσβολής).

Ακόμα μικρότερη η επίδραση του κυλίνδρου. Το ίδιο φαίνεται και από τα διαγράμματα P.S.D. Η ροή επιβραδύνεται ακόμη περισσότερο κάτω από τον κύλινδρο.

Γενικά συμπεράσματα ενότητας

Η παρουσία κυλίνδρου στη ροή αυξάνει το υπάρχον ποσοστό τύρβης. Δημιουργεί προφίλ ταχύτητας με χαρακτηριστικό κύρτωμα (στο ύψος του κυλίνδρου) αλλά και τα προφίλ της τύρβης έχουν ένα χαρακτηριστικό διπλό κύρτωμα στην ίδια θέση. Στα άκρα του κυρτώματος έχω αύξηση στην ταχύτητα και στην τύρβη. Όσο απομακρυνόμαστε από τον κύλινδρο η επίδρασή του ελαττώνεται.

Ένα αξιοσημείωτο φαινόμενο είναι πως όταν είμαστε στην περιοχή της κοιλότητας, η ροή στα χαμηλότερα z από τα αντίστοιχα του ύψους του κυλίνδρου έχει επιταχυνθεί (τοπικά), ενώ όταν είμαστε μακριά και πίσω από την κοιλότητα, για τα ίδια z, η ροή επιβραδύνεται.

Πιθανόν το παραπάνω να συμβαίνει λόγω των αλληλεπιδράσεων των δινών Von-Karman του κυλίνδρου και της κοιλότητας, οι οποίες συντελούν σε ελάττωση της ταχύτητας.

Όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος πάνω ακριβώς από την κοιλότητα ή λίγο πιο μπροστά από αυτή, έχουμε επιτάχυνση της ροής στα χαμηλότερα z από τα αντίστοιχα του ύψους του κυλίνδρου.

Όταν όμως ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος αρκετά πιο μπροστά από την κοιλότητα, τότε έχουμε επιβράδυνση της ροής στα χαμηλότερα z από τα αντίστοιχα του ύψους του κυλίνδρου. Και όσο πιο μακρύτερα βρισκόμαστε από τον κύλινδρο τόσο μεγαλύτερη επιβράδυνση έχουμε στη ροή.

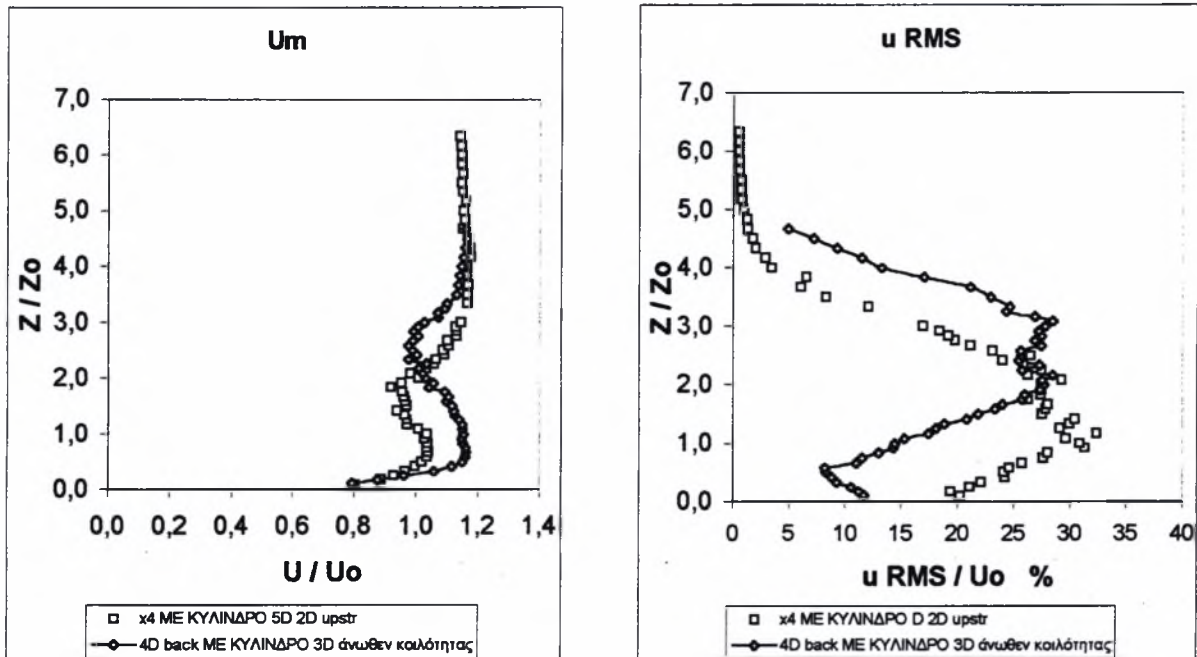
5.1.2

A. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ της επίδρασης του υποστρώματος κάτω από τον κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$

Για τις θέσεις:

- 1) x4 Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ανάντη 5D και πάνω 2D από την κοιλότητα
- 2) 4D πίσω από τον κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ που είναι ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D



Δ. 5.9 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 4.

B. Σχολιασμός

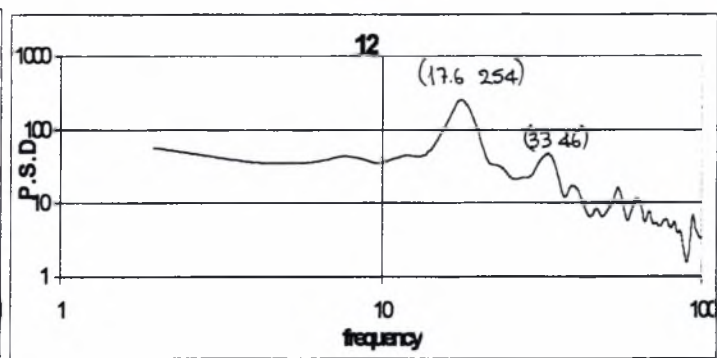
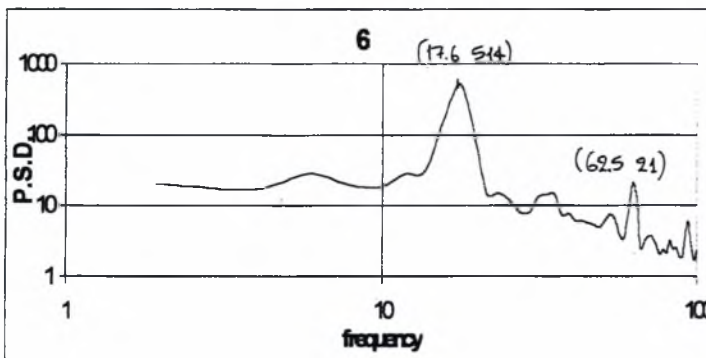
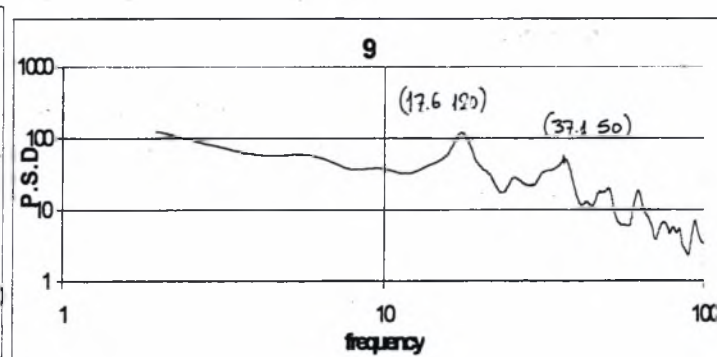
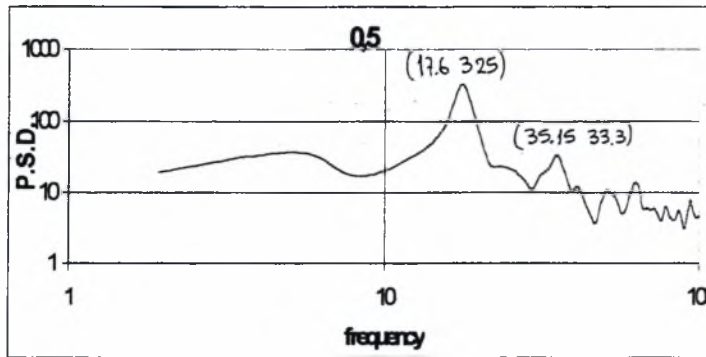
Όταν το υπόστρωμα είναι σε επίπεδο τοίχωμα δεν συμπιέζεται-επιταχύνεται η ροή στα χαμηλότερα z από τα αντίστοιχα του ύψους του κυλίνδρου τόσο όσο όταν το υπόστρωμα είναι μια ανακυκλοφορούσα ωρολογιακά περιστρεφόμενη δίνη, ίδιας φοράς με την ελεύθερη ροή.

Τα ποσοστά τύρβης είναι σχεδόν στα ίδια επίπεδα και για τις δυο περιπτώσεις. Όταν ο κύλινδρος είναι κατάντη της κοιλότητας το ποσοστό τύρβης διατηρείται υψηλό για μεγαλύτερα z .

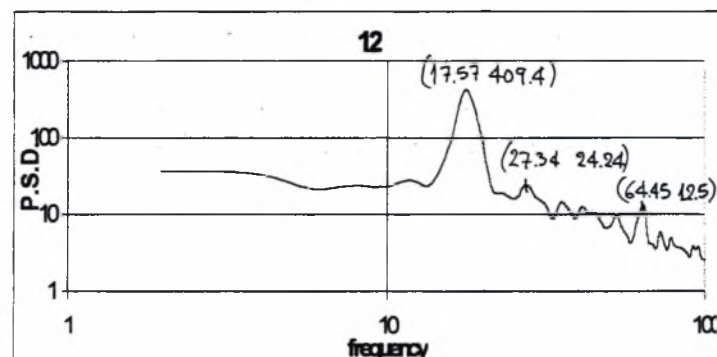
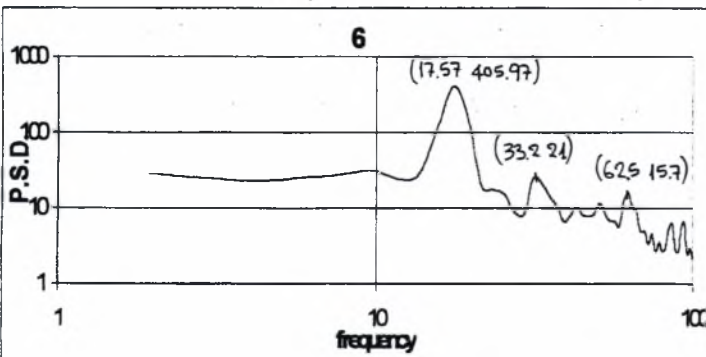
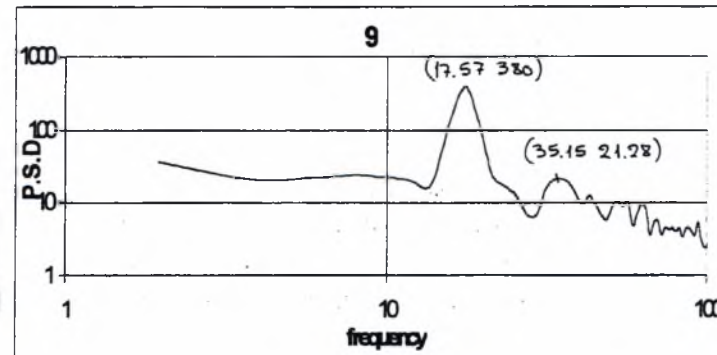
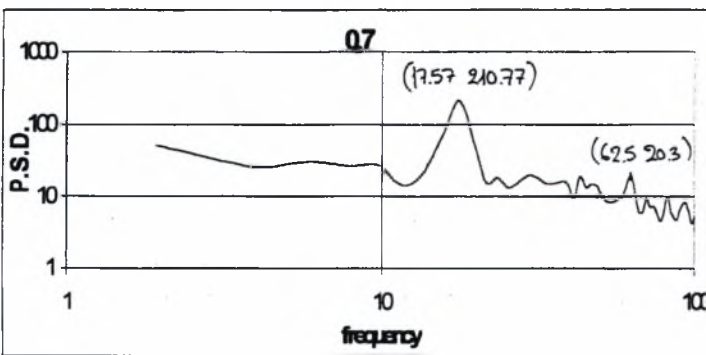
Τα διαγράμματα P.S.D. δείχνουν την χαρακτηριστική συχνότητα εκροής δινών Von-Karman από τον κύλινδρο $\approx 17,6\text{Hz}$.

Γ. Διαγράμματα P.S.D.

1) x4 Με κύλινδρο Ø60mm ανάντη 5D και πάνω 2D από την κοιλότητα



2) 4D πίσω από τον κύλινδρο Ø60mm που είναι ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D



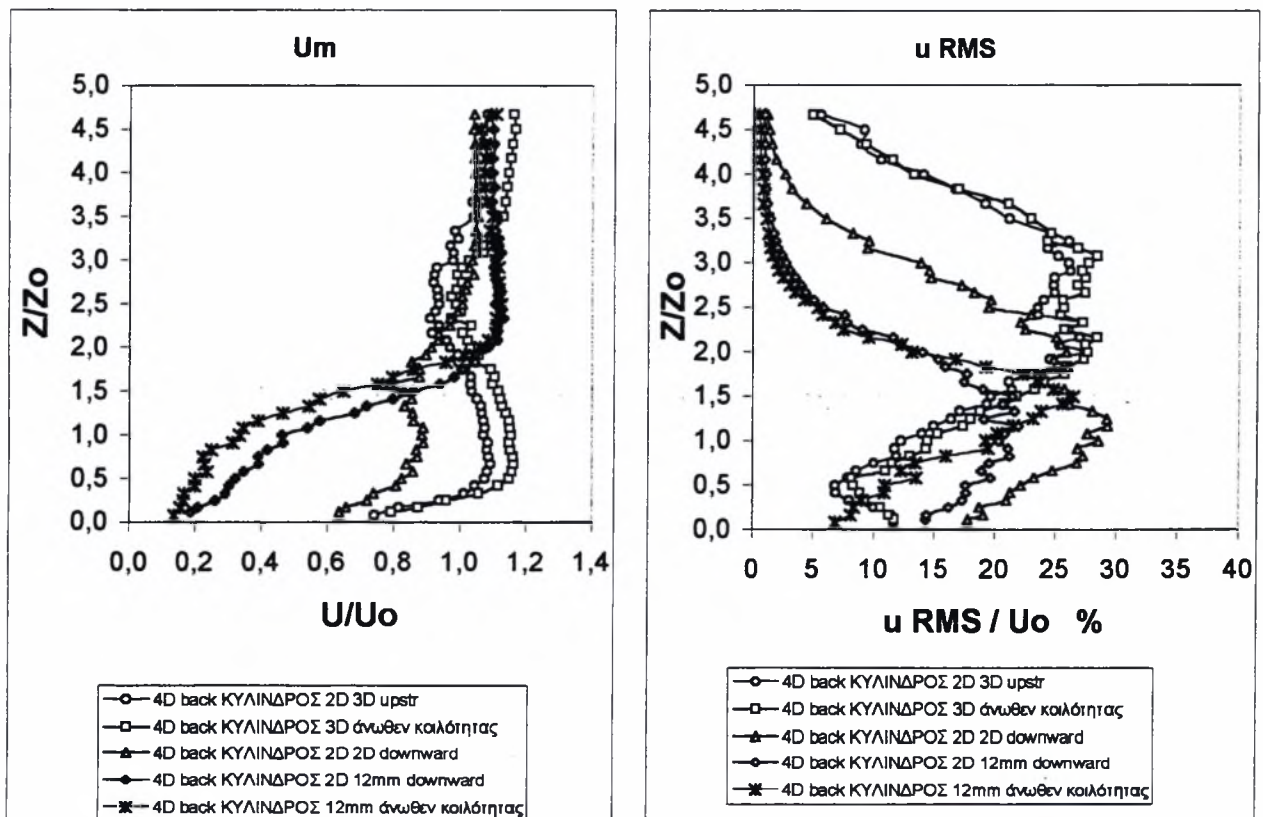
5.1.3

Α. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

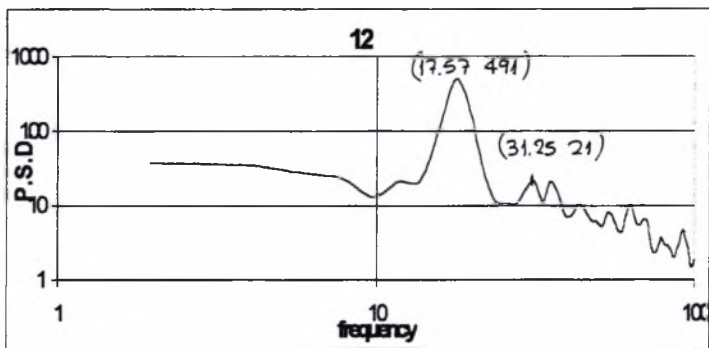
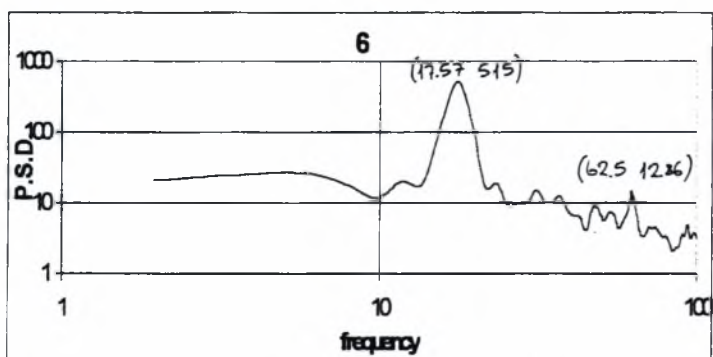
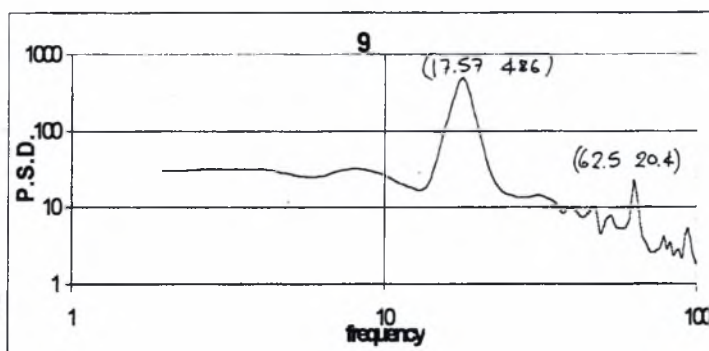
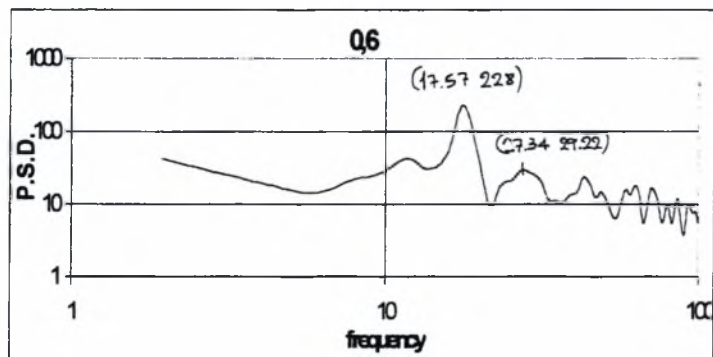
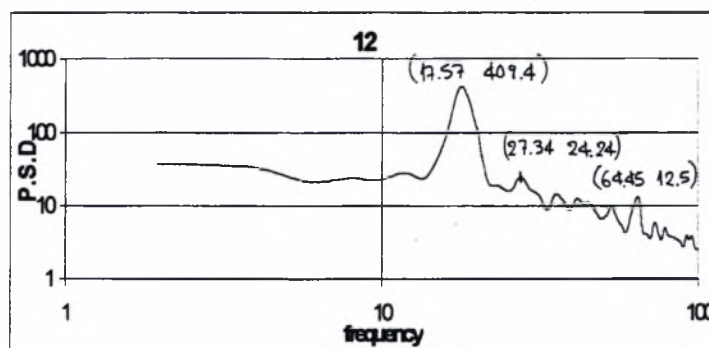
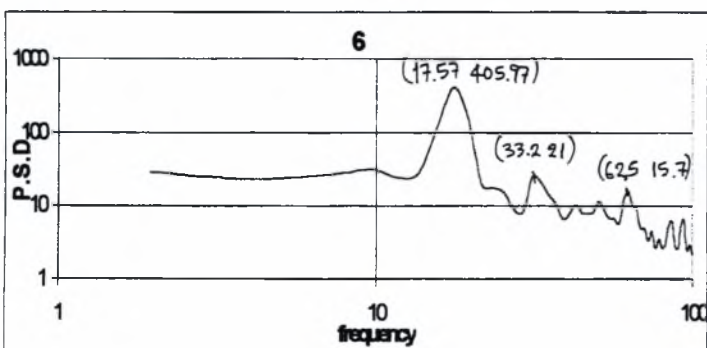
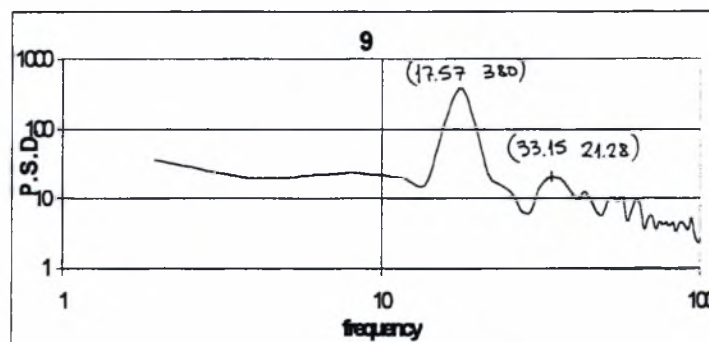
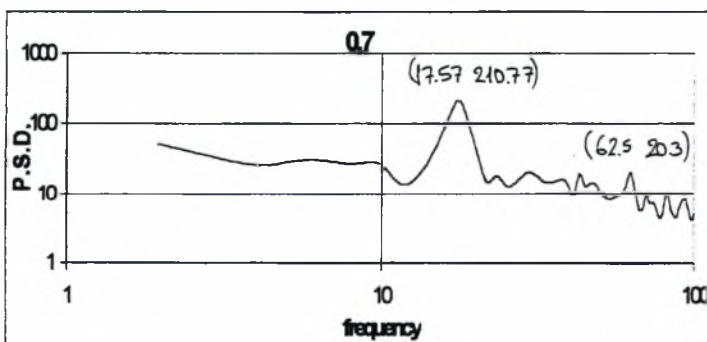
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ της επίδρασης της θέσεως του κυλίνδρου σε απόσταση 4D πίσω από αυτόν - $U_0=5\text{m/s}$

Για τις θέσεις:

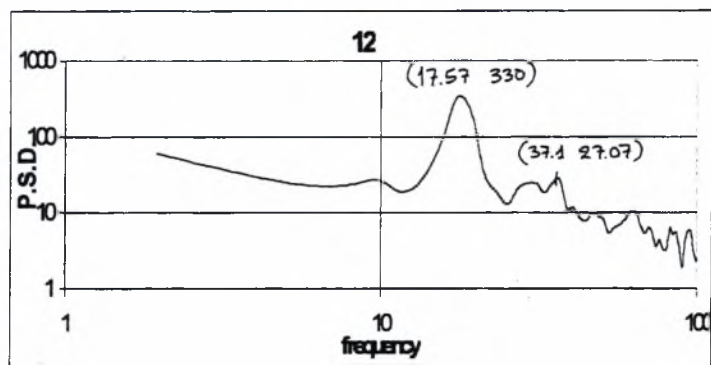
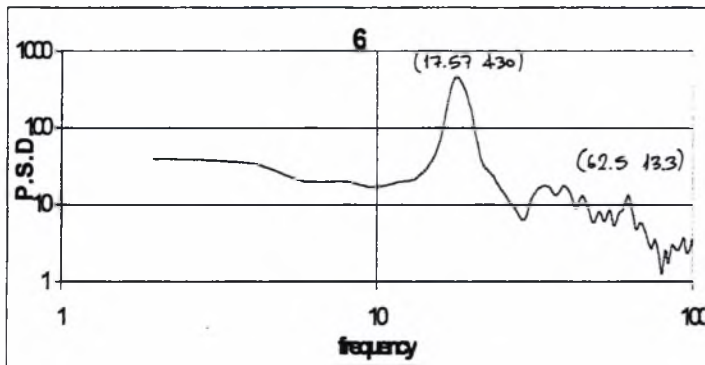
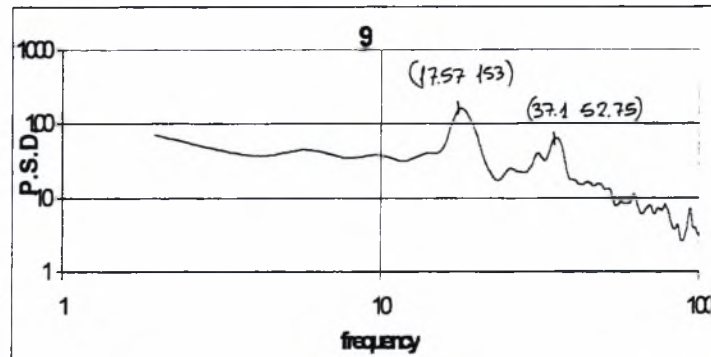
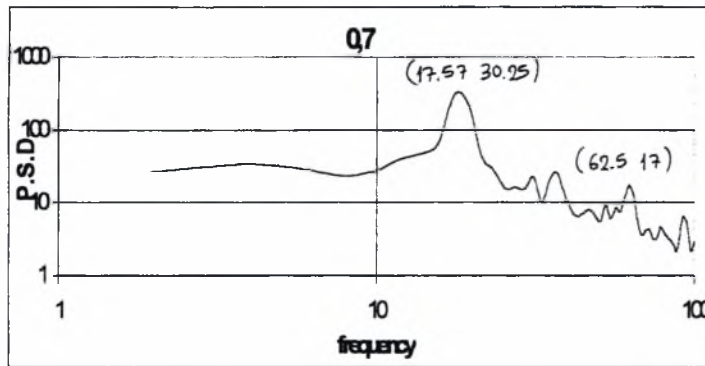
- 1) Κύλινδρος $\varnothing 66\text{mm}$ ανάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D
- 2) Κύλινδρος $\varnothing 60\text{mm}$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D
- 3) Κύλινδρος $\varnothing 60\text{mm}$ κατάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 2D
- 4) Κύλινδρος $\varnothing 60\text{mm}$ κατάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm



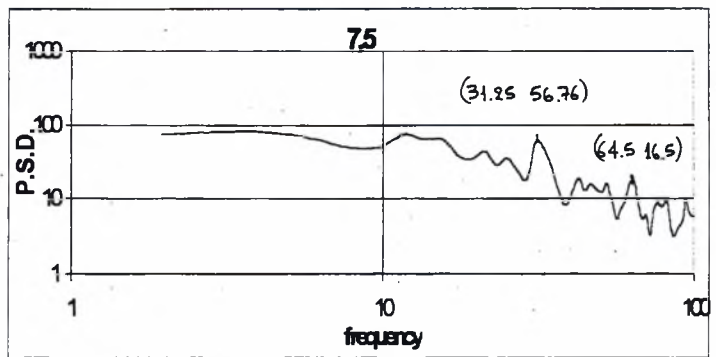
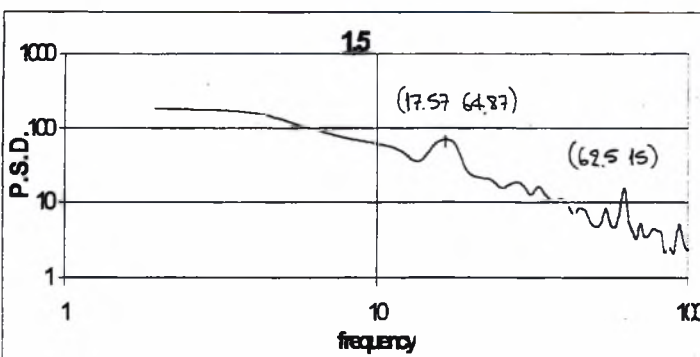
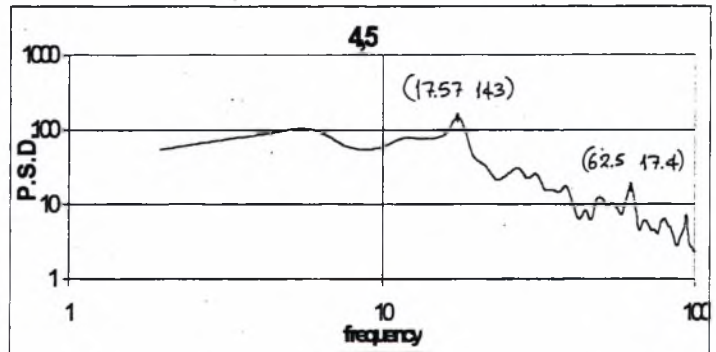
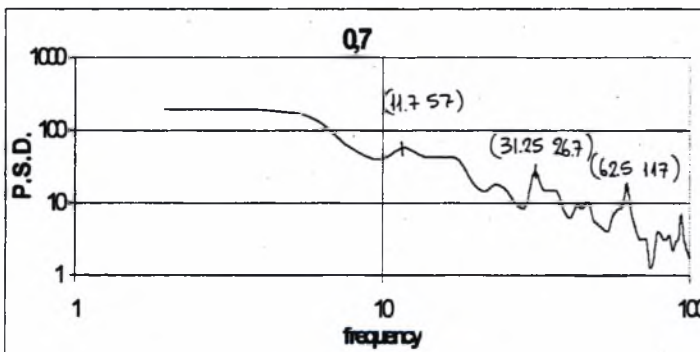
Δ. 5.10 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης ταχύτητας και διακύμανσης αυτής στη θέση x 4.

B. Διαγράμματα P.S.D.Σχολιασμός:**1) Κύλινδρος Ø60mm ανάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D****2) Κύλινδρος Ø60mm ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 3D**

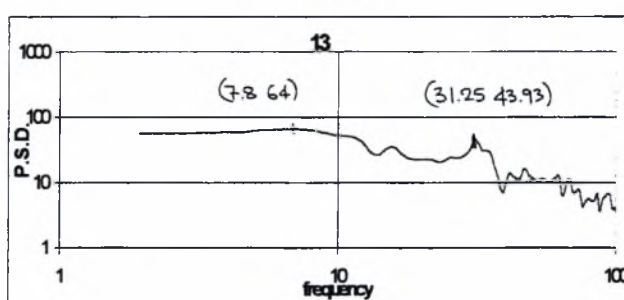
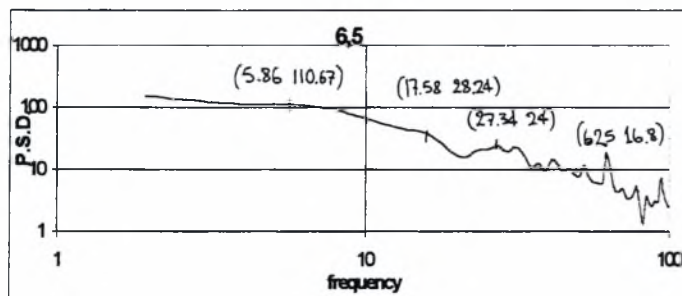
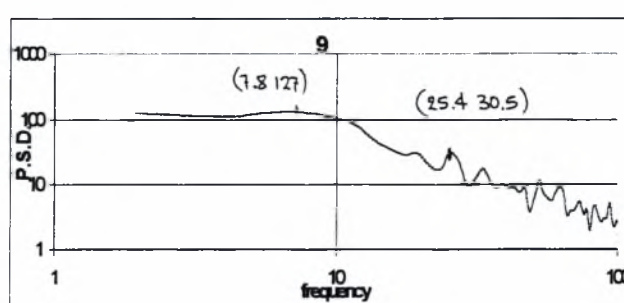
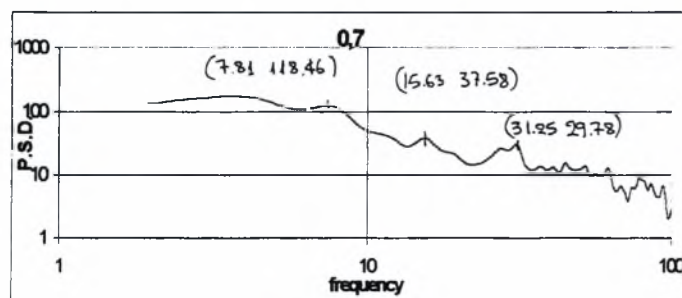
3) Κύλινδρος Ø60mm κατάντη 2D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 2D



4) Κύλινδρος Ø60mm κατάντη 1D και πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm



5) Κύλινδρος $\varnothing 60\text{mm}$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα σε ύψος 12mm



Γ. Σχολιασμός

Καταρχήν μακριά από την πλάκα όλα τα προφίλ ταχύτητας τείνουν να συμπίσουν, όπως και είναι λογικά αναμενόμενο. Όταν ο κύλινδρος είναι ακριβώς πάνω από την κοιλότητα η ροή κάτω από αυτόν επιταχύνεται περισσότερο από κάθε άλλη θέση του. Σε αυτό συντελεί η ύπαρξη εντός της κοιλότητας της ανακυκλοφορούσας δίνης που περιστρεφόμενη κατά την φορά της εξωτερικής ροής, επαυξάνει την ταχύτητα του ήδη επιταχυνμένου ρευστού λόγω “συμπίεσης” από τον κύλινδρο.

Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται το χαρακτηριστικό “κύρτωμα” στα προφίλ ταχύτητας και τύρβης, λόγω ανακοπής της ταχύτητας από την παρουσία του κυλίνδρου.

Όταν ο κύλινδρος είναι κατάντη της κοιλότητας, η ροή που αντιστοιχεί στα z κάτω από το ύψος που είναι τοποθετημένος, δεν επιταχύνεται. Αντιθέτως επιβραδύνεται. Ενώ στην περίπτωση που ο κύλινδρος είναι ακριβώς πάνω ή λίγο πιο ανάντη της κοιλότητας, τότε η ροή που αντιστοιχεί στα z κάτω από το ύψος που είναι τοποθετημένος, επιταχύνεται. Αυτό βέβαια δεν ισχύει πάντα. Από ένα ορισμένο ύψος και κάτω, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα για τα 12mm ακριβώς πάνω από την κοιλότητα, η ροή κάτω από τον κύλινδρο επιβραδύνεται. Και η επιβράδυνση όταν ο κύλινδρος είναι ακριβώς πάνω από την κοιλότητα 12mm είναι μεγαλύτερη από όταν ο κύλινδρος είναι 12mm ψηλά και κατάντη της κοιλότητας.

Το παραπάνω φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στα πειράματα της ενότητας που ακολουθεί, 5.1.4.

Γενικά όπως παρατηρήθηκε και από την προηγούμενη ενότητα (5.1.1), όταν ο κύλινδρος είναι αρκετά ανάντη της κοιλότητας η ροή δεν επιταχύνεται και όσο απομακρυνόμαστε από τον κύλινδρο η επίδρασή του στην ροή γίνεται αμελητέα.

Από τα διαγράμματα της τύρβης φαίνεται πως για τις περιπτώσεις που ο κύλινδρος είναι ανάντη και ακριβώς πάνω από την κοιλότητα, το υψηλό ποσοστό τύρβης διατηρείται για μεγαλύτερα z , από ότι στις άλλες περιπτώσεις.

Από τα διαγράμματα P.S.D. διακρίνουμε πάλι σαν κύρια συχνότητα διαταραχής την συχνότητα $\approx 17,6\text{Hz}$ που αντιστοιχεί στις δίνες που εκρέουν από τον κύλινδρο.

Για τις περιπτώσεις που ο κύλινδρος είναι 12mm πάνω από την κοιλότητα παρατηρούμε σημαντική “εξασθένιση” των P.S.D. Ιδίως όταν ο κύλινδρος είναι ακριβώς πάνω από την κοιλότητα.

5.1.4

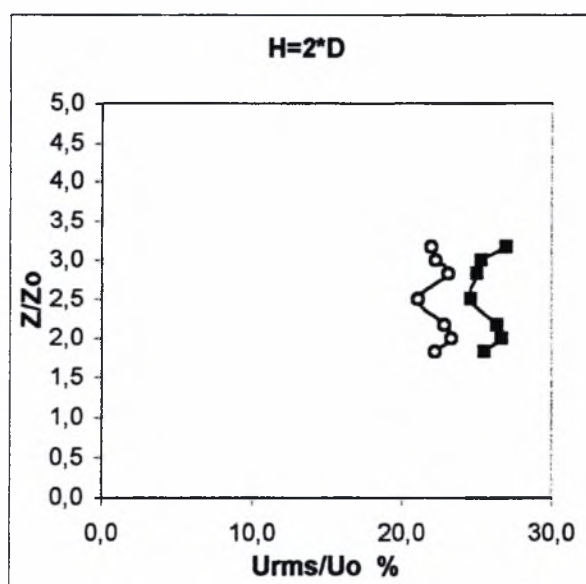
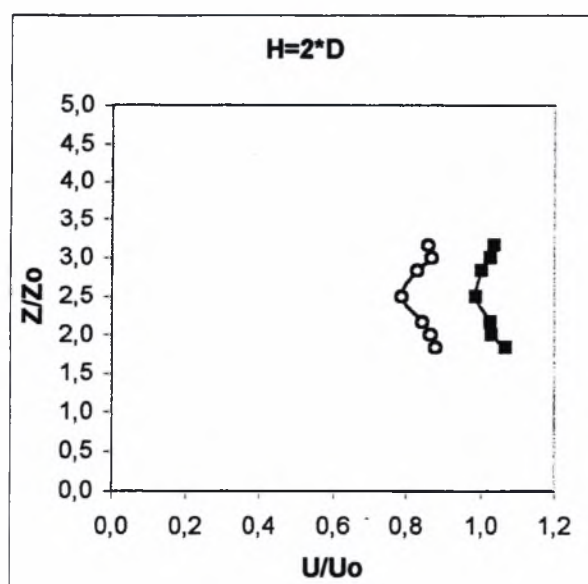
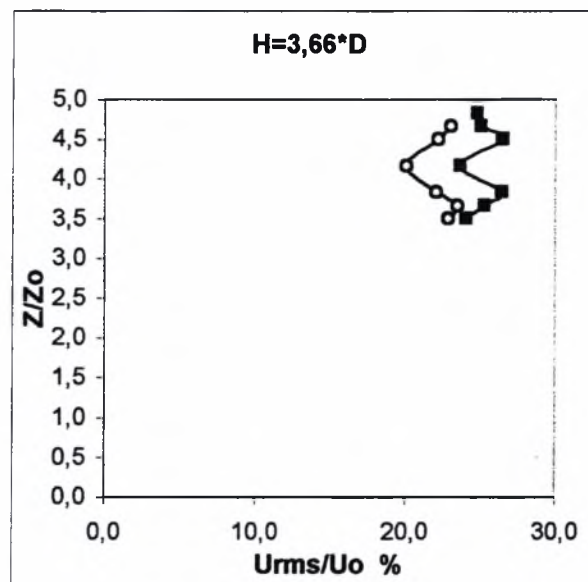
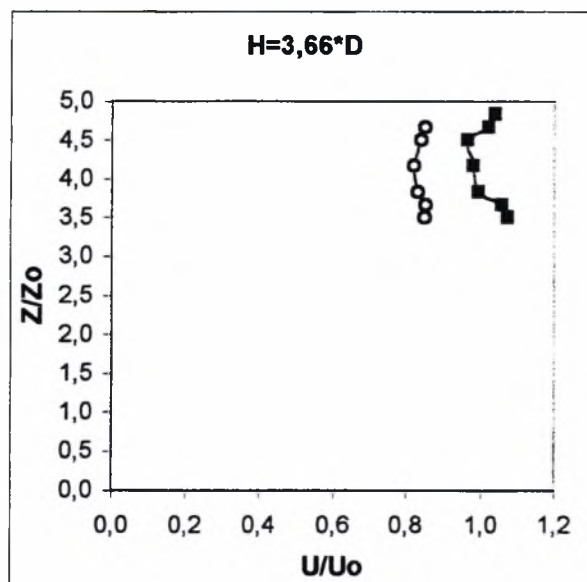
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Ø60mm ακριβώς πάνω από την ΜΕΓΑΛΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ σε ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΨΗ (z) από αυτή - $U_0=5\text{m/s}$

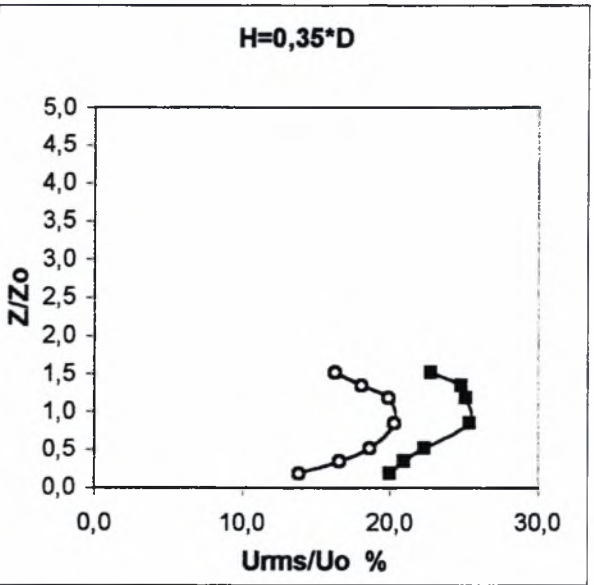
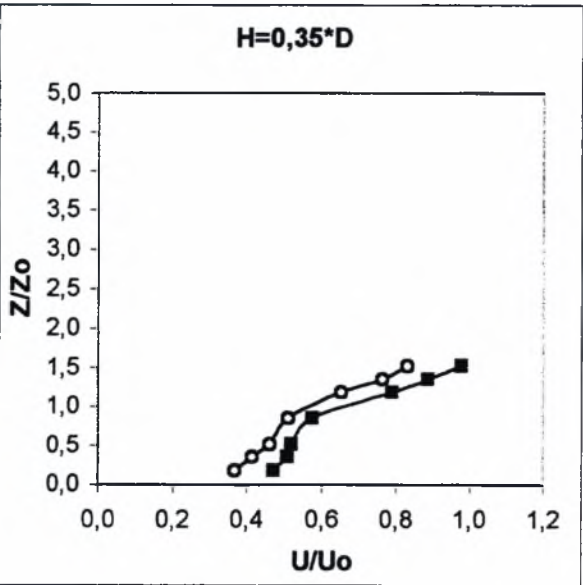
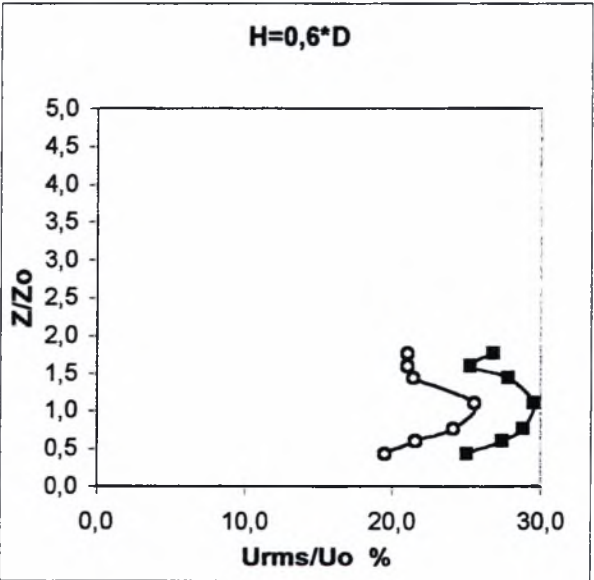
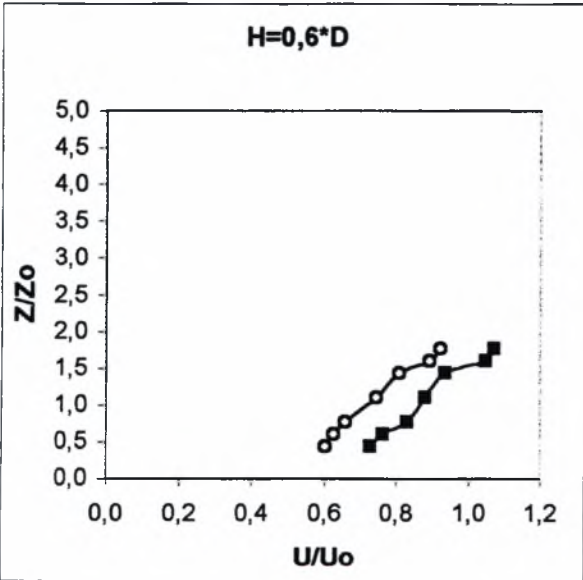
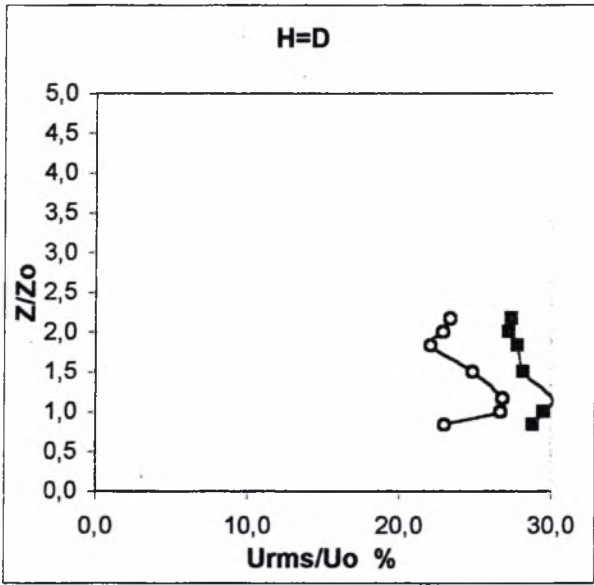
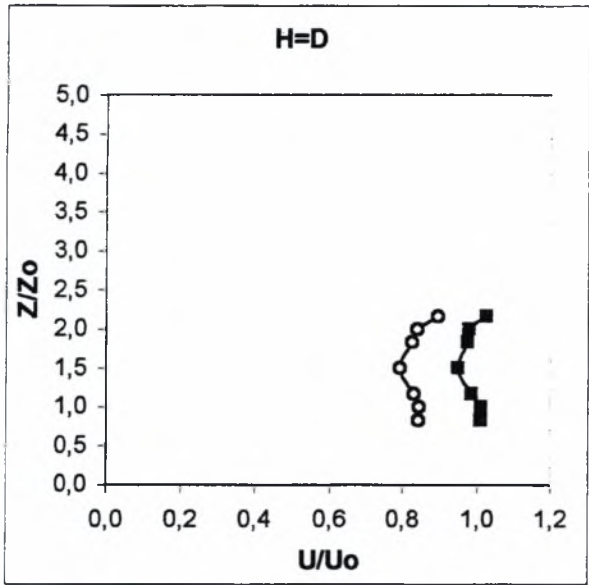
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Ø60mm ακριβώς πάνω από ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ στα ίδια ΥΨΗ (z) όπως όταν ήταν πριν πάνω από κοιλότητα - $U_0=5\text{m/s}$

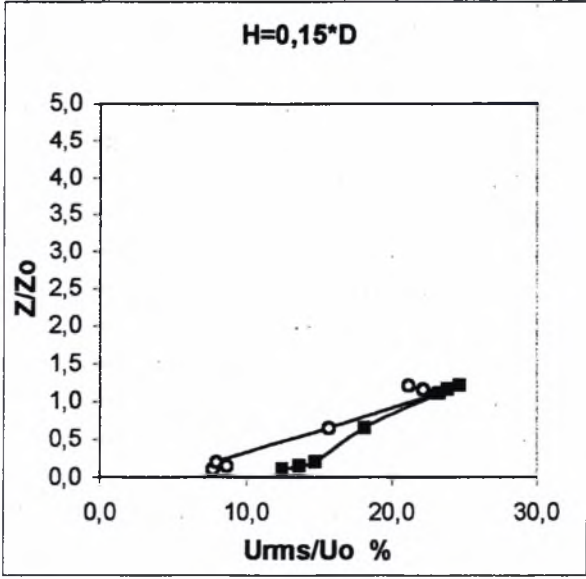
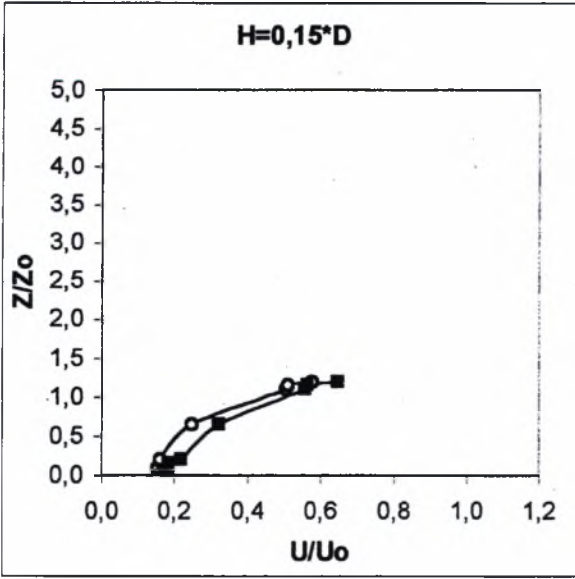
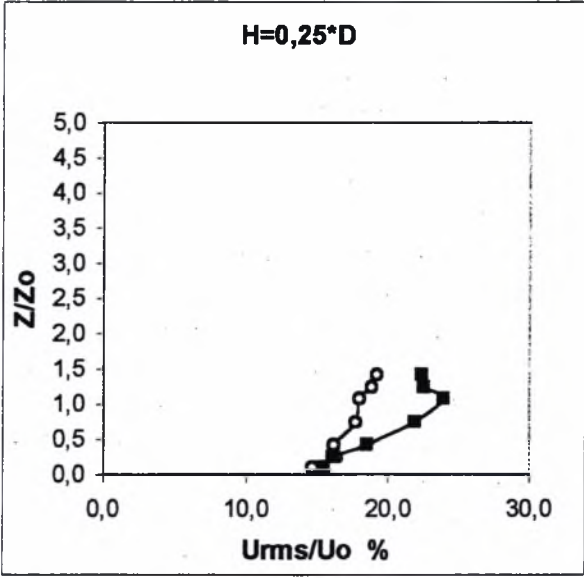
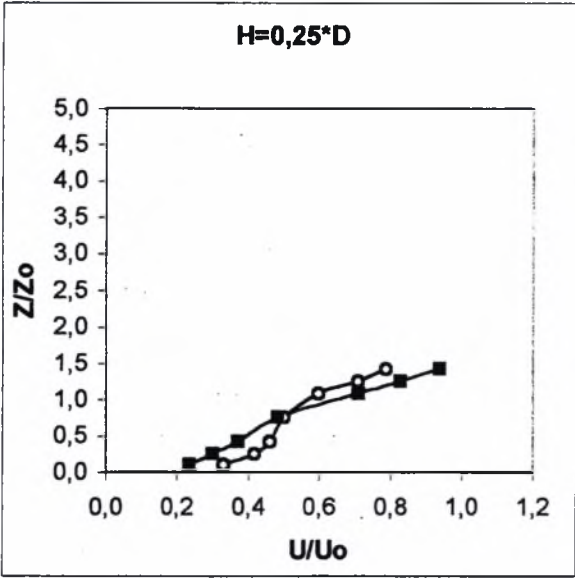
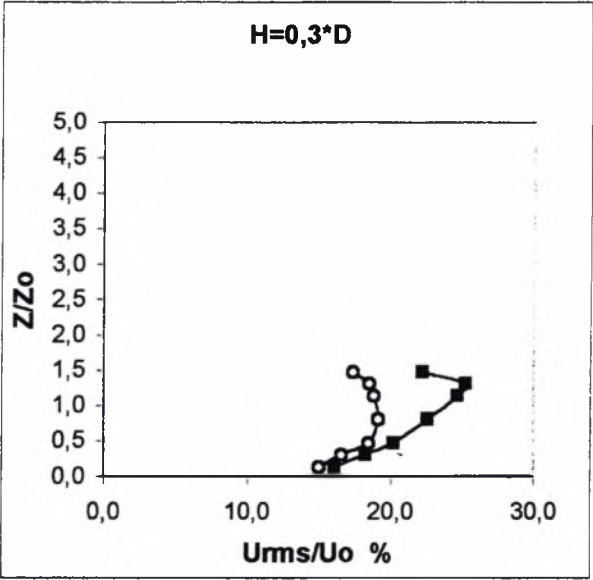
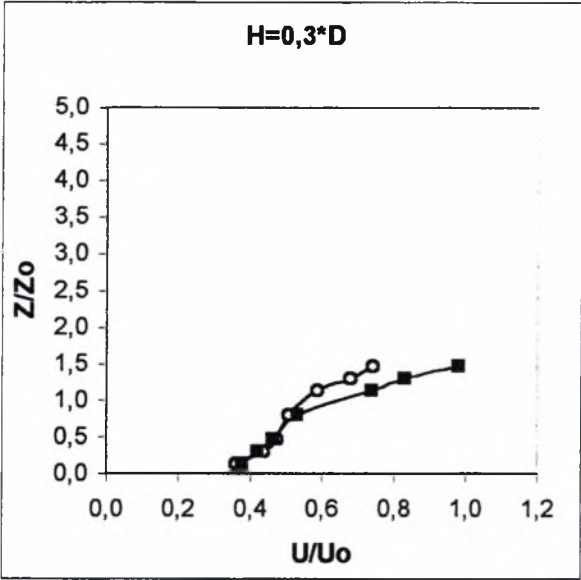
Θέση λήψης μετρήσεων: $4\cdot D$ πίσω από τον κύλινδρο (αντιστοιχεί στη θέση $x=900\text{mm}$ από την ακμή προσβολής της εμπρός πλάκας).

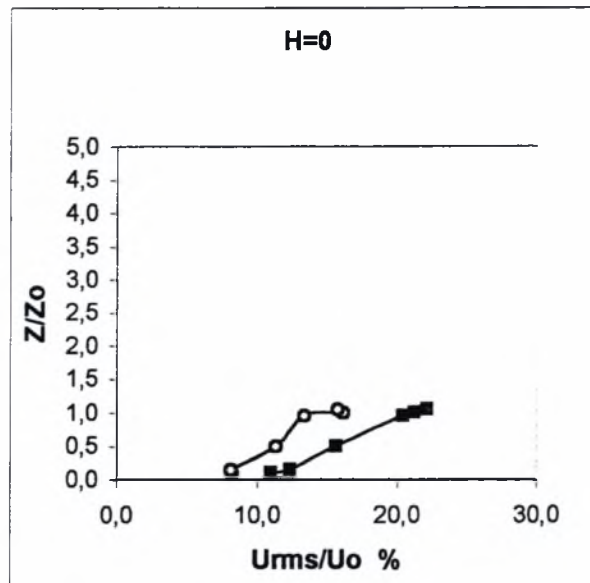
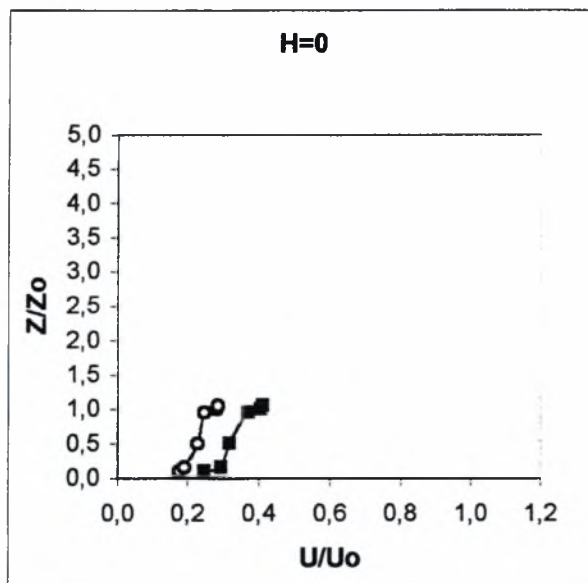
Α. Αδιαστατοποιημένα Διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{\text{RMS}}/U_0 \%)$

Με κυκλάκια είναι η περίπτωση που υπάρχει κοιλότητα και με τετράγωνα είναι η περίπτωση επίπεδης πλάκας.









B. Σχολιασμός:

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό πως όταν υπάρχει κοιλότητα κάτω από τον κύλινδρο, η ροή πίσω από αυτόν ανακόπτεται περισσότερο, από όταν υπάρχει πλάκα κάτω από αυτόν. Αυτό ισχύει για όλα τα ύψη z^*D με μόνη εξαίρεση το $z=0,25D$ όπου τοπικά συμβαίνει το αντίστροφο.

Τα επίπεδα του ποσοστού τύρβης παραμένουν υψηλά και βαίνουν μειούμενα καθώς ο κύλινδρος κατεβαίνει σε μικρότερα ύψη z . Αλλά και η ελάχιστη τιμή της τύρβης που έχουν είναι αρκετά σημαντικό ποσοστό.

Όταν ο κύλινδρος ακουμπήσει πάνω στην κοιλότητα αφήνει μια σχισμή από την οποία εισέρχεται ο αέρας περνώντας κάτω από τον κύλινδρο διαμέσου της κοιλότητας και εξέρχεται από την κατάντη της ροής πλευρά της κοιλότητας-κυλίνδρου. Αυτή η διαμόρφωση ελαττώνει περισσότερο την ταχύτητα που λαμβάνουμε σε απόσταση 4^*D πίσω από τον κύλινδρο.

Αντιθέτως όταν ο κύλινδρος ακουμπήσει πάνω στην πλάκα, τότε δεν αφήνει καμία σχισμή που να μπορεί να διέλθει ο αέρας. Έτσι το "εμπόδιο" που παρουσιάζει τώρα ο κύλινδρος στη ροή την αναγκάζει να "ανασηκωθεί" κατά το μεγαλύτερο μέρος της για να υπερπηδήσει τον κύλινδρο-εμπόδιο έχοντας ταυτόχρονα και κάποιο μέρος της "εγκλωβισμένο" στην περιοχή επαφής κυλίνδρου-πλάκας το οποίο πιθανότατα να ανακυκλοφορεί. Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα που λαμβάνουμε σε απόσταση 4^*D πίσω από τον κύλινδρο είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση που είχαμε κοιλότητα.

Από τα διαγράμματα P.S.D. παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική συχνότητα στην περίπτωση της κοιλότητας πάνω από κύλινδρο είναι μεταξύ 17,3Hz και 19,53Hz, ενώ στην περίπτωση πάνω από πλάκα είναι 17,57Hz. Η διάσταση που αντιστοιχεί σε αυτές τις συχνότητες είναι η διάμετρος του κυλίνδρου.

Και εδώ βλέπουμε πως κάτω από το $z=0,25^*D$ στα διαγράμματα P.S.D. "χάνεται" η χαρακτηριστική συχνότητα του κυλίνδρου.

Προφανώς η αλληλεπίδραση του οριακού στρώματος της πλάκας και του κυλίνδρου να καταστρέφει την δομή των δινών που εκρέουν πίσω από τον κύλινδρο. Αυτό συμβαίνει σε αυτό το ύψος z γιατί ο κύλινδρος είναι χαμηλά, οπότε έχει αλληλεπίδραση με το οριακό στρώμα που όπως είδαμε και στην ενότητα 5.1.1, έχει πάχος μεγαλύτερο των 48mm στην περιοχή πάνω από την κοιλότητα (βλ. πάχος στη θέση x4).

Γ. Διαγράμματα P.S.D.Παρατήρηση

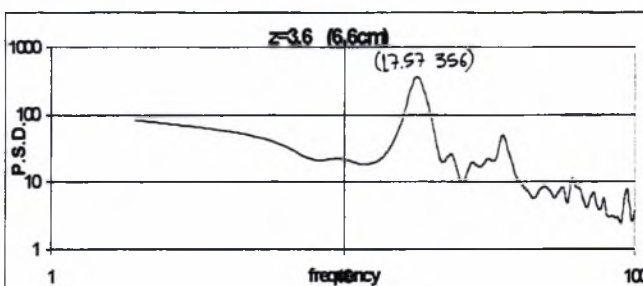
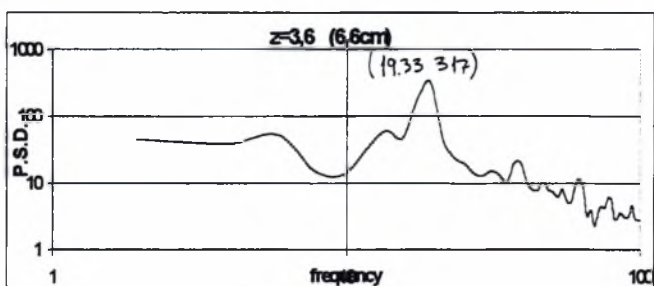
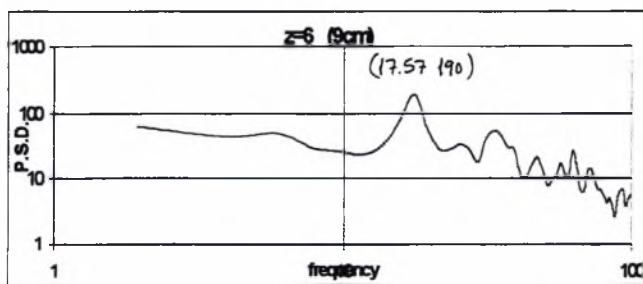
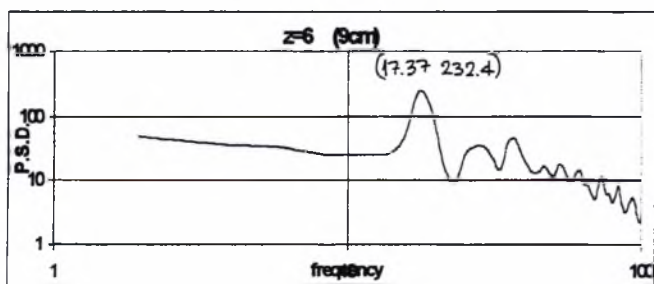
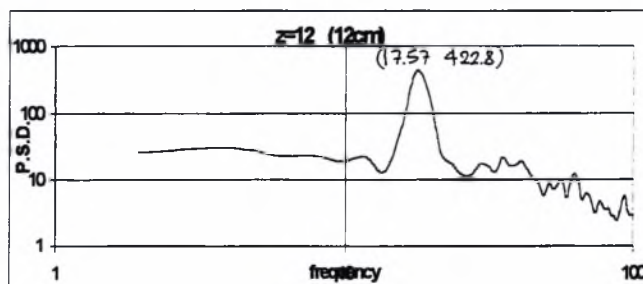
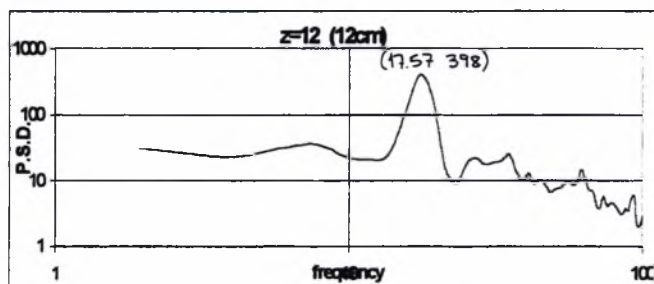
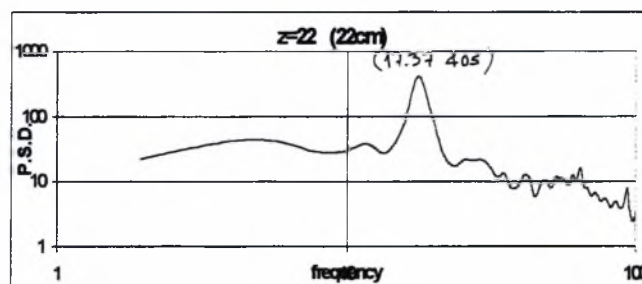
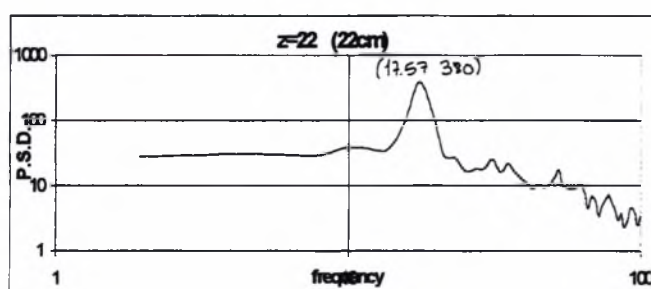
Ο συμβολισμός π.χ. $z=6$ (9cm) σημαίνει:

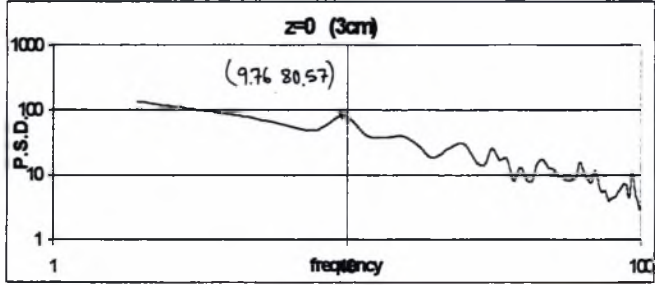
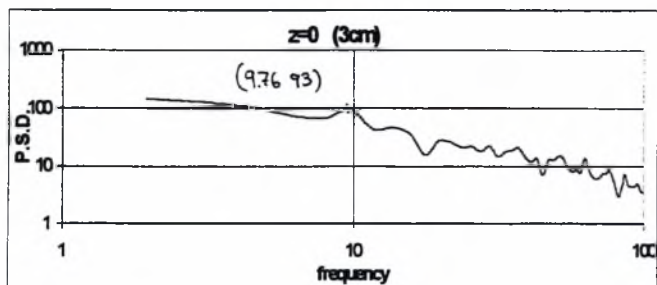
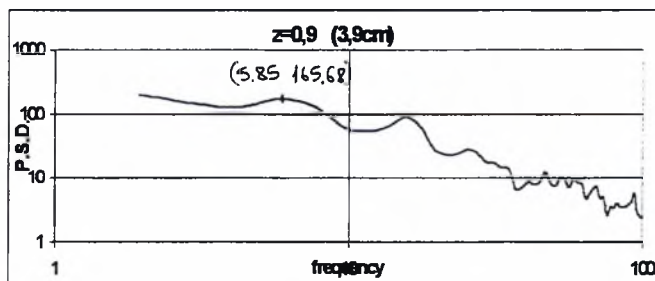
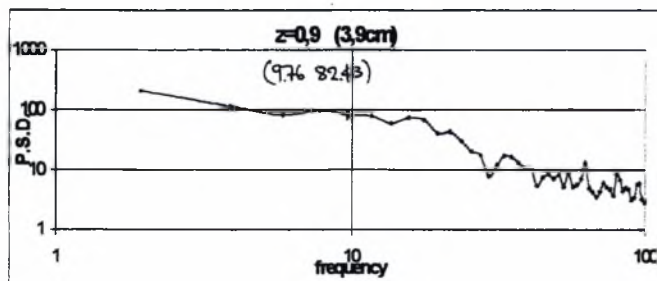
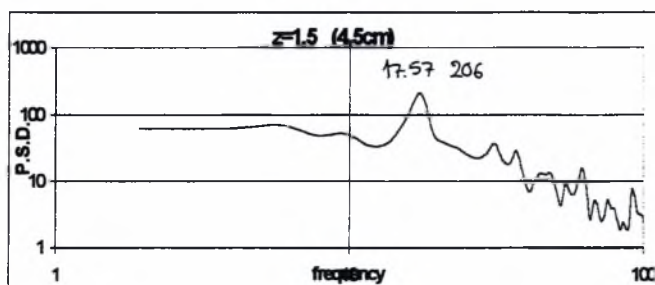
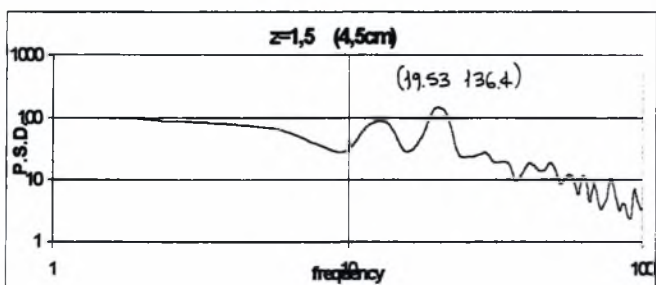
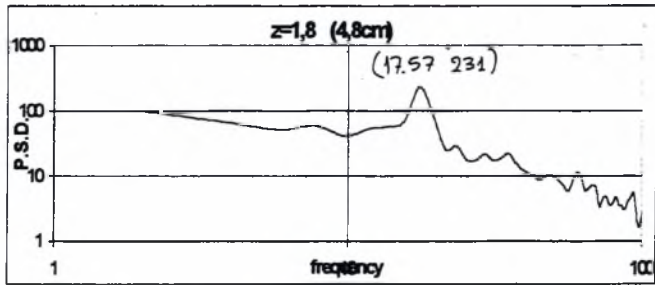
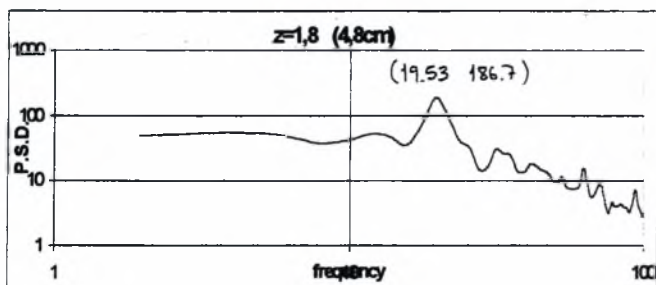
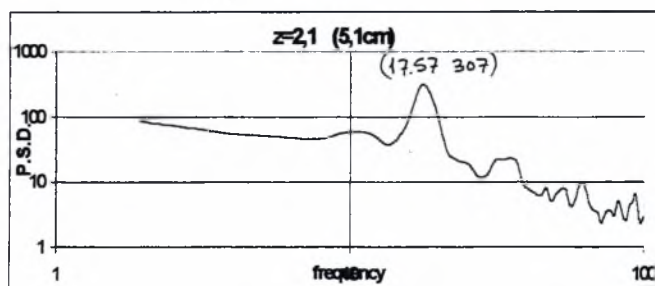
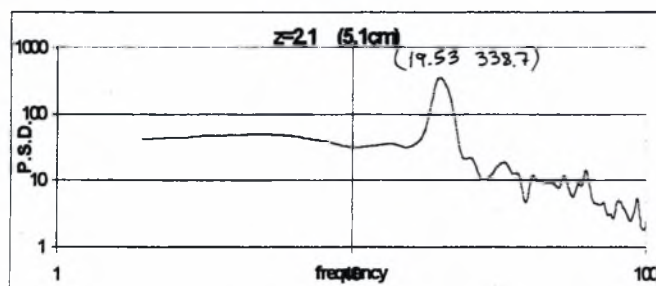
$z=6 \rightarrow$ ότι ο κύλινδρος βρίσκεται σε ύψος 6cm πάνω από το χείλος της κοιλότητας ή την πλάκα. Ο αριθμός μέσα στην παρένθεση, π.χ. (9cm) είναι το ύψος του σημείου, πάνω από το χείλος της κοιλότητας ή την πλάκα, του οποίου το P.S.D. παρουσιάζεται.

Τα παραπάνω ύψη της θέσεως του κυλίνδρου είναι ακριβώς τα αντίστοιχα με τα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$. Επιλέχθηκε όμως να παρουσιαστούν έτσι για τον ακριβή προσδιορισμό του σημείου που αναφέρονται. Ισχύει η αντιστοιχία: $z=22 \rightarrow 3,66D$ $z=12 \rightarrow 2D$ $z=6 \rightarrow D$ $z=3,6 \rightarrow 0,6D$ $z=2,1 \rightarrow 0,35D$ $z=1,8 \rightarrow 0,3D$ $z=1,5 \rightarrow 0,25D$

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Ø60mm ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΓΑΛΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΨΗ (z) ΑΠΟ ΑΥΤΗ

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Ø60mm ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΨΗ (z) ΑΠΟ ΑΥΤΗ

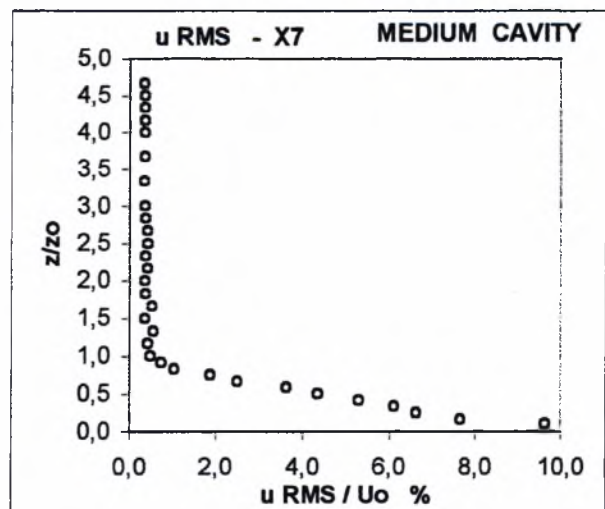
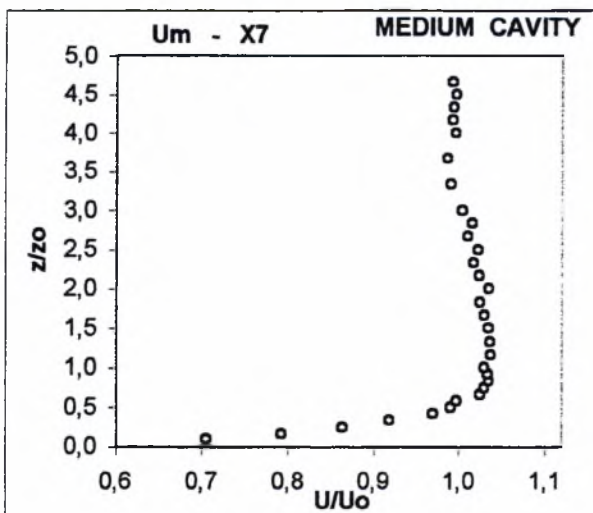
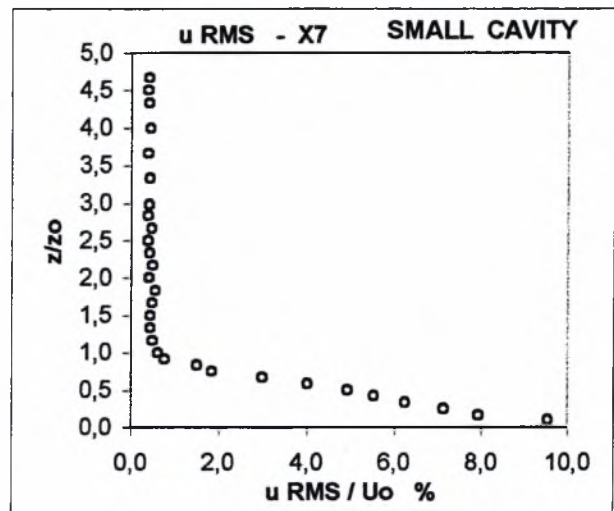
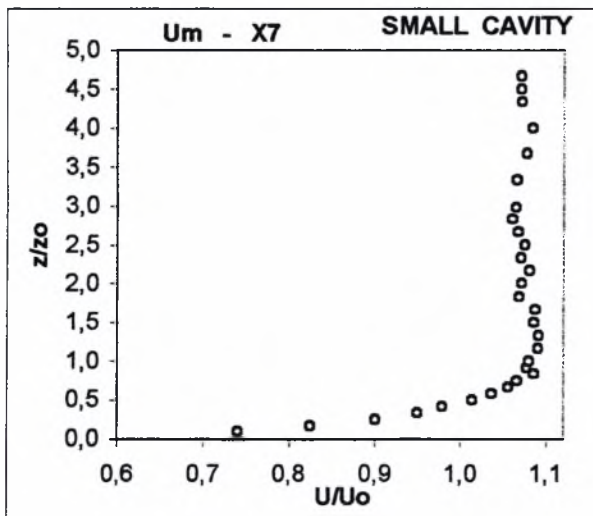
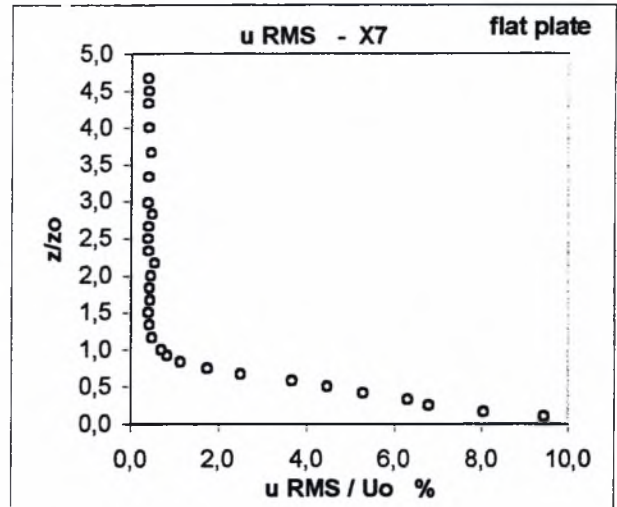
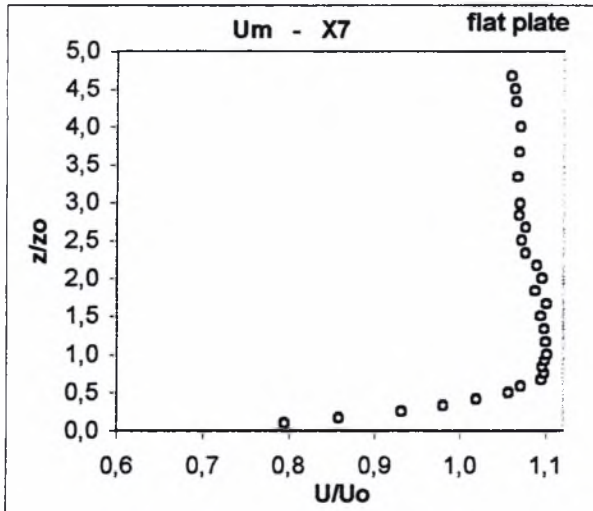


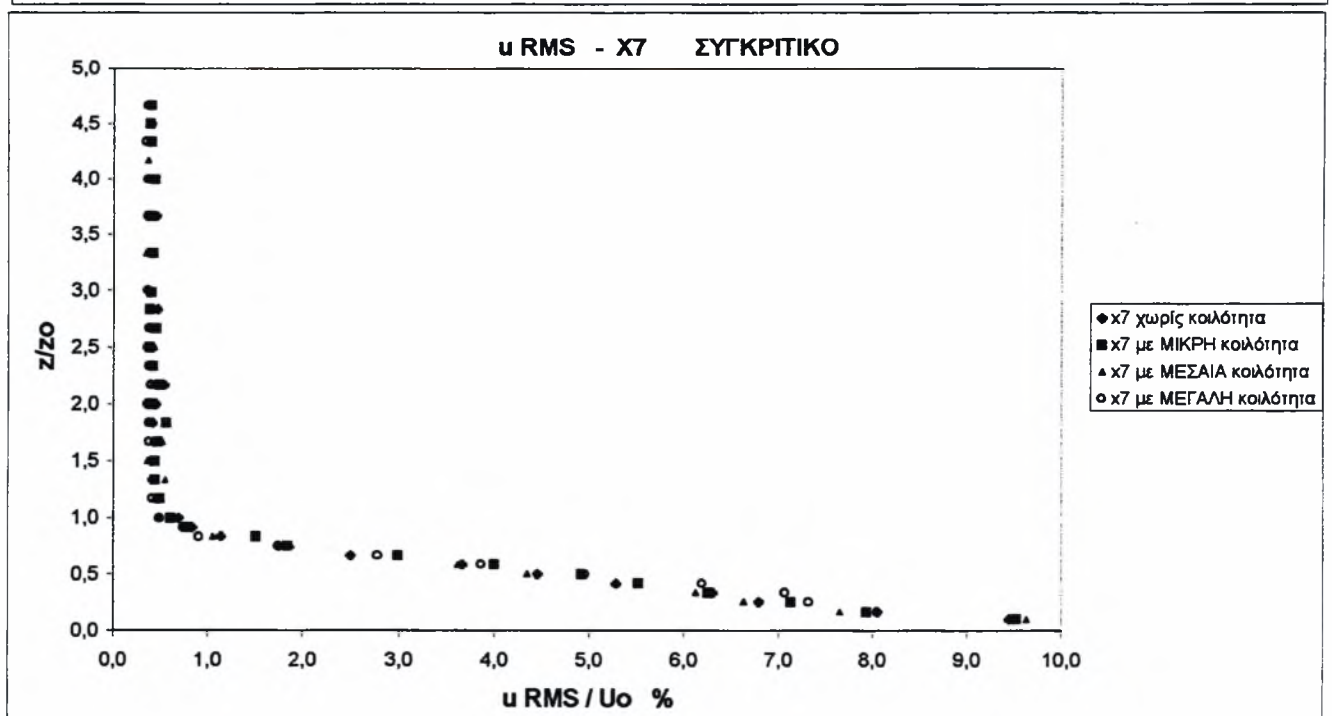
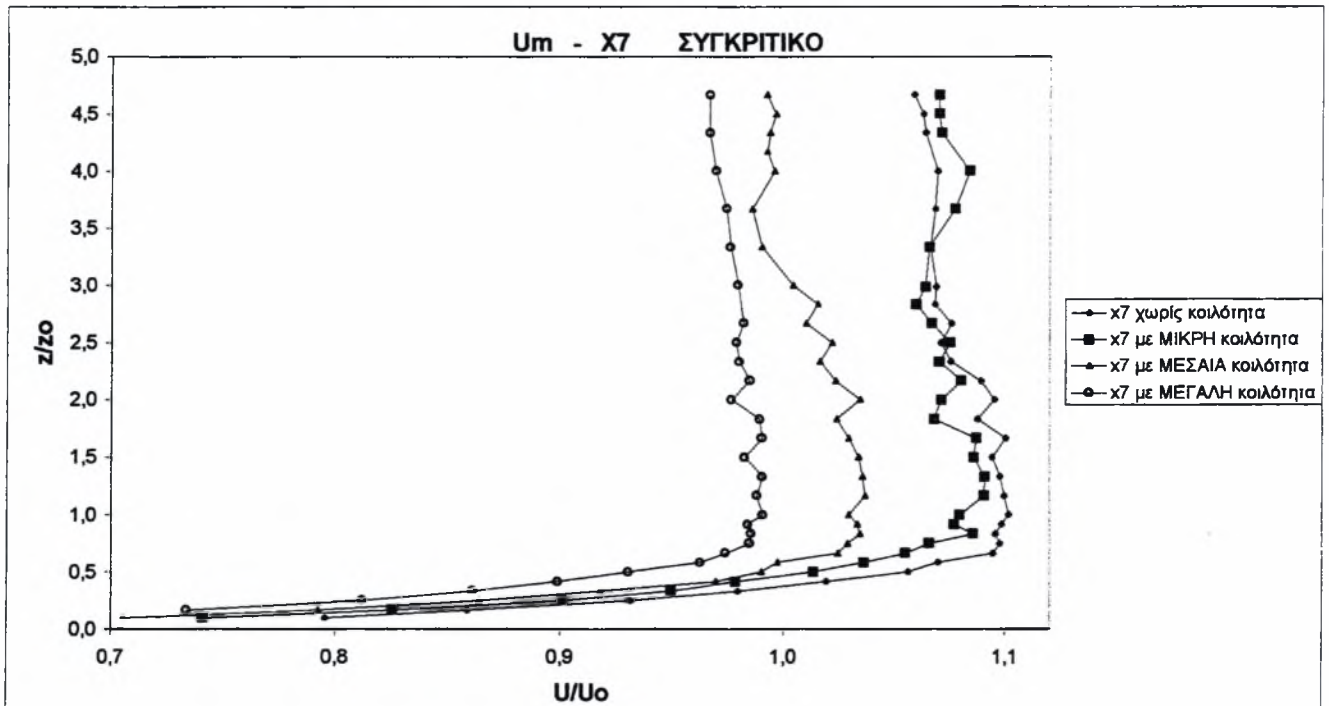
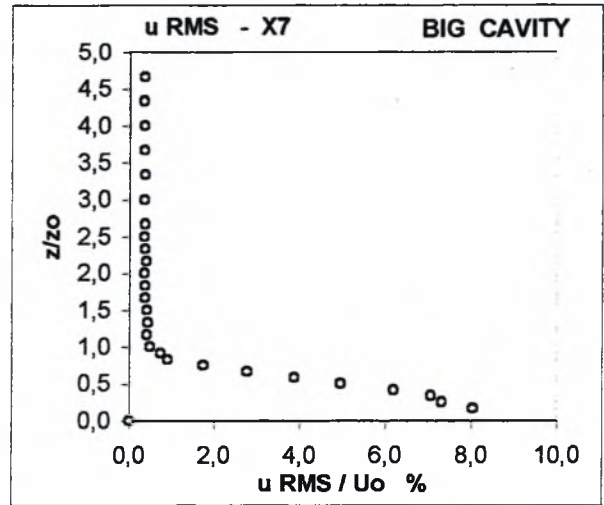
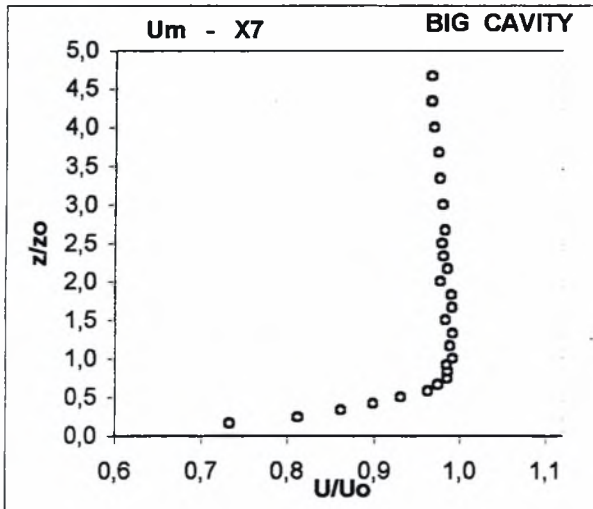


5.1.5

Α. Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

Θέση x7 για διάφορες κοιλότητες τοποθετημένες στην κάτω θέση





B. Σχολιασμός:

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των προφίλ ταχύτητας φαίνεται ξεκάθαρα πως η επίδραση της μεγάλης κοιλότητας είναι να ελαττώσει το προφίλ της ταχύτητας ομοιόμορφα, σε σχέση με την επίδραση των άλλων κοιλοτήτων.

Το προφίλ όπου η κατανομή της ταχύτητας έχει μέγιστες τιμές, είναι αυτό της περίπτωσης που δεν υπάρχει κοιλότητα, δηλαδή έχουμε επίπεδη πλάκα.

Παρατηρούμε πως η ελάττωση της ταχύτητας είναι ανάλογη του μεγέθους της κοιλότητας. Κάθε κοιλότητα ελαττώνει (‘‘κόβει’’) την ταχύτητα του προφίλ.

Η ροή στην περίπτωση της επίπεδης πλάκας και της μικρής κοιλότητας φαίνεται να επιταχύνεται. Αυτό πιθανόν συμβαίνει λόγω της μικρής αρνητικής κλίσης των πλακών-κοιλότητας που έχει ως συνέπεια την στένωση της διατομής του χώρου μετρήσεων, με αποτέλεσμα να επιταχυνθεί η ροή.

Εξάλλου η επίδραση της μικρής κοιλότητας στην ελάττωση της ταχύτητας του προφίλ είναι μικρή. Αυτό συμβαίνει λόγω του μικρού της πλάτους, που συντελεί σε ‘‘έξοστρακισμό’’ (skimming flow) του μεγαλύτερου μέρους της ροής πάνω από αυτή. Η ροή που εισέρχεται μέσα στην κοιλότητα είναι ελάχιστη. Για αυτό παρατηρείται και η ελάχιστη διαφορά του προφίλ ταχύτητας της μικρής κοιλότητας από το αντίστοιχο της επίπεδης πλάκας.

Από το διάγραμμα της τύρβης είναι αξιοσημείωτο πως για όλες τις περιπτώσεις, οι μετρήσεις συμπίπτουν, δείχνοντας μια εκτίμηση πάχους του τυρβώδους οριακού στρώματος της τάξης των 60mm (σε απόσταση $\approx 1030\text{mm}$ από την ακμή προσβολής της εμπρός πλάκας).

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι δεν έχει επίδραση η ύπαρξη αλλά ούτε και το μέγεθος της κοιλότητας στην διαμόρφωση του πάχους του οριακού στρώματος. Όμως φαίνεται λίγο παράδοξο, καθώς αναμένεται μεγαλύτερη διαταραχή στην ροή από την ύπαρξη κοιλότητας μεγαλύτερου πλάτους ανοίγματος (μικρότερου aspect ratio). Μπορεί όμως η φύση του οριακού στρώματος, που είναι τυρβώδης, να αντεπεξέρχεται στις ανωμαλίες της επιφάνειας χωρίς να μεταβάλλει το πάχος του ούτε το ποσοστό τύρβης του σημαντικά.

5.1.6

Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(u/U_0)$ και $z/z_0 = f(u_{RMS}/U_0 \%)$

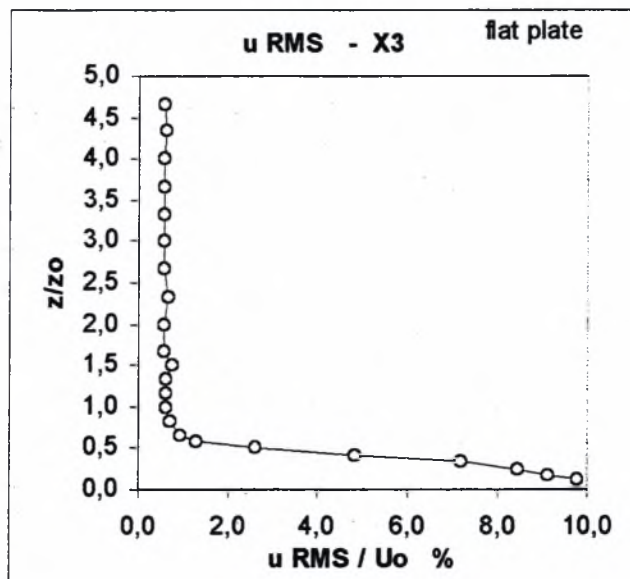
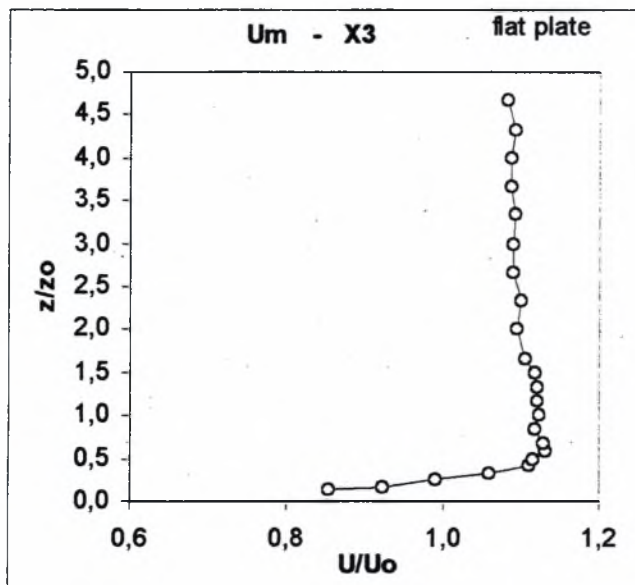
Για να ελεγχθεί η διαμόρφωση και η ανάπτυξη του πάχους του οριακού στρώματος μετρήθηκαν δυο προφίλ ταχύτητας στην θέση $x/3$ (μέση της εμπρός πλάκας) με δυο διαφορετικές διαμορφώσεις των πλακών – κοιλότητας.

α) Χωρίς κοιλότητα – Περίπτωση επίπεδης πλάκας (Flat plate)

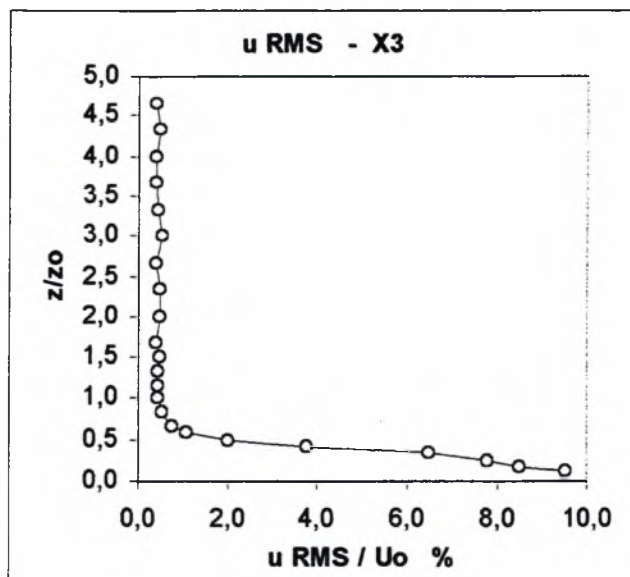
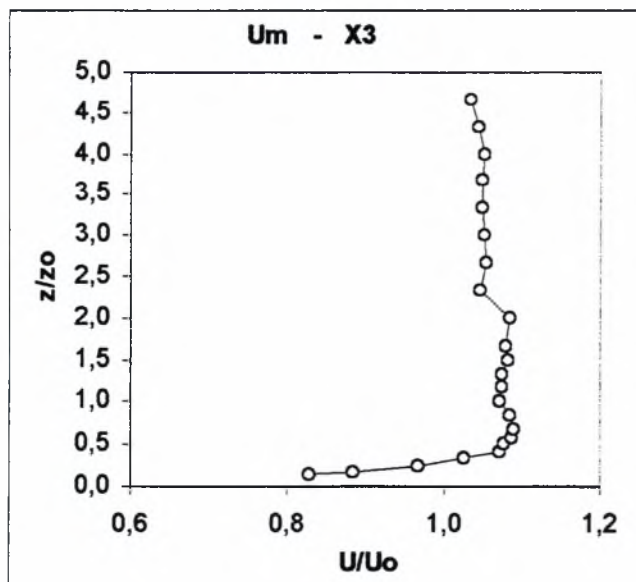
β) Με την μεγάλη κοιλότητα τοποθετημένη κάτω.

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα:

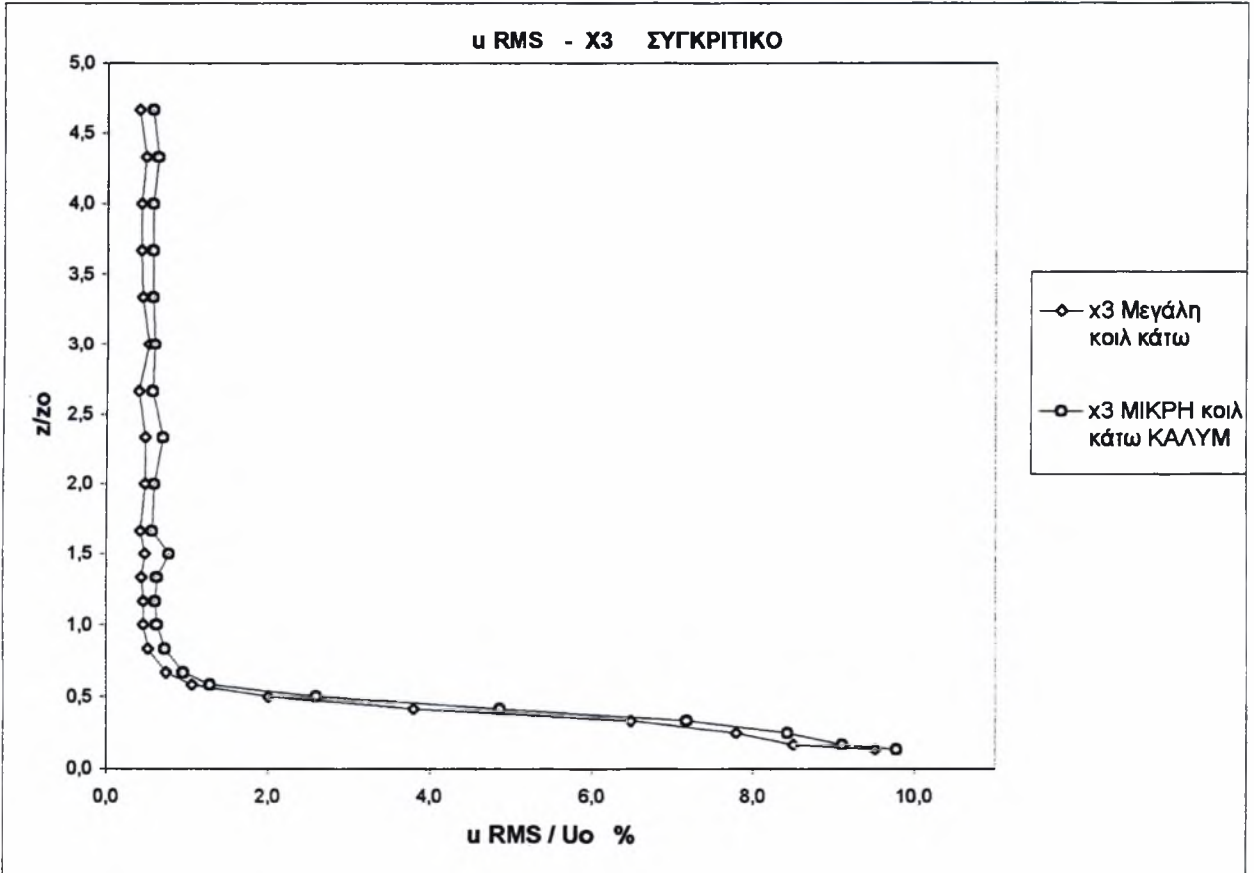
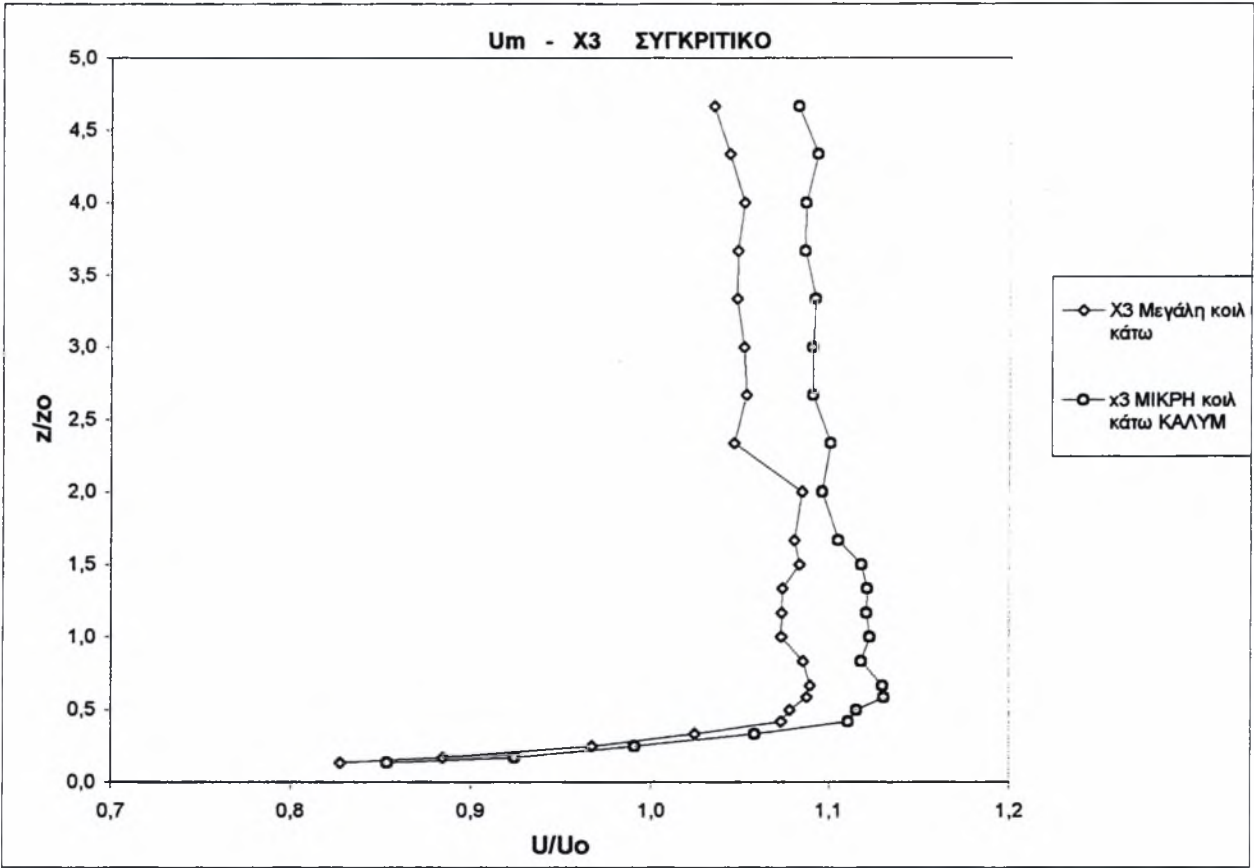
A. Χωρίς κοιλότητα – Θέση $x/3$ – $U_0=5\text{m/s}$



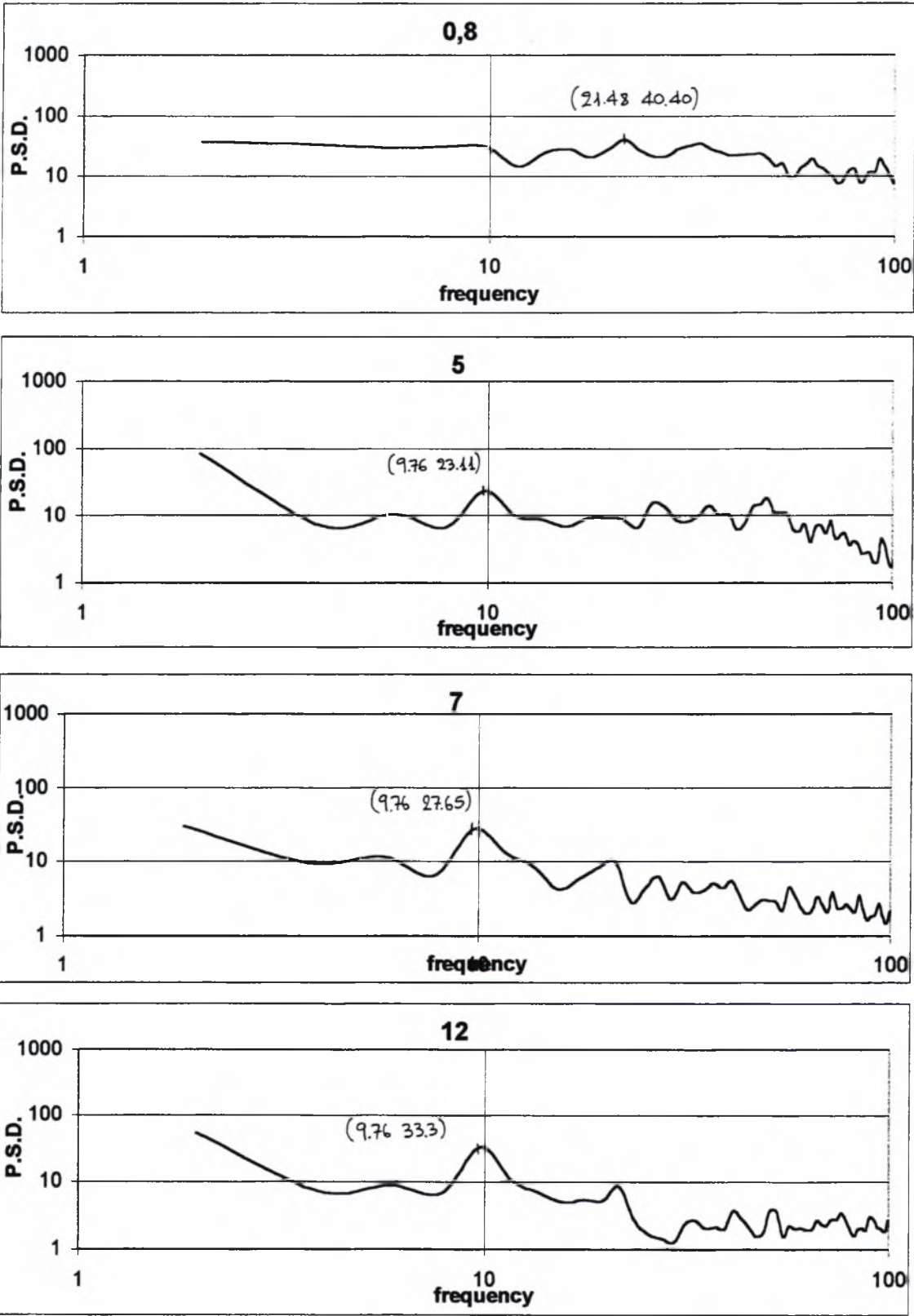
B. Με κοιλότητα – Θέση $x/3$ – $U_0=5\text{m/s}$



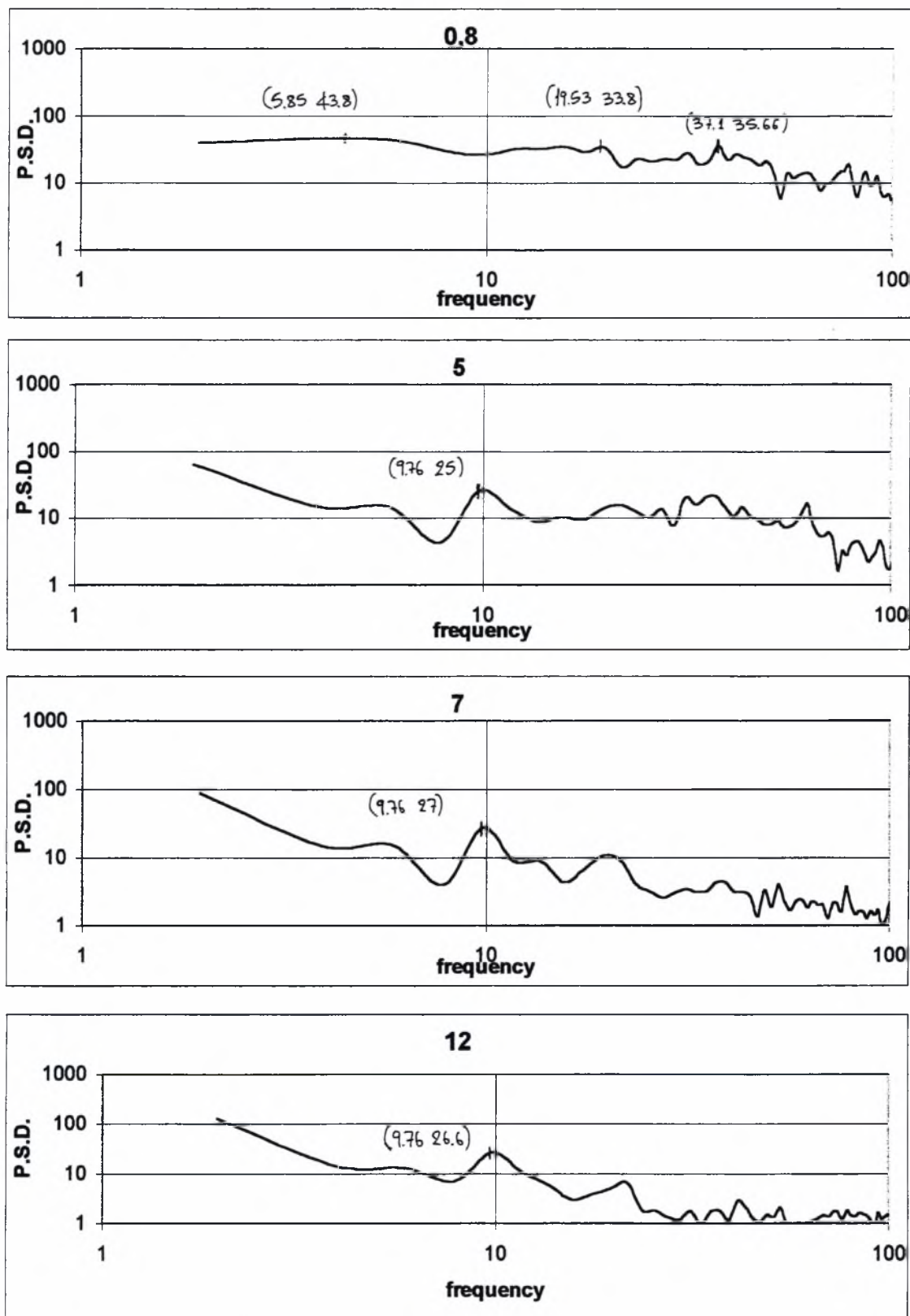
Ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα των παραπάνω:



P.S.D. για επίπεδη πλάκα



P.S.D. για κοιλότητα



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/νων

Β. Σχολιασμός:

Η θέση x3 αφορά την μέση της εμπρός πλάκας (απόσταση 304mm από την ακμή προσβολής). Από τα διαγράμματα των προφίλ ταχύτητας παρατηρούμε πως και στις δύο περιπτώσεις η ροή έχει επιταχυνθεί πιθανόν λόγω της αρνητικής κλίσης της πλάκας. Όμως πάλι παρατηρούμε πως η επίδραση της κοιλότητας είναι η μείωση του προφίλ της ταχύτητας σε σχέση με αυτό της ροής πάνω από πλάκα. Σημαίνει πως η ροή αντιλαμβάνεται με κάποιο τρόπο την παρουσία της κοιλότητας και ας μην έχει φτάσει ακόμα σε αυτή. Βέβαια η ελάττωση στο προφίλ της ταχύτητας είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη για την θέση x7 (1076mm από την ακμή προσβολής) που προκαλείται από την ίδια κοιλότητα.

Από το διάγραμμα της τύρβης βλέπουμε πως ούτε στην θέση x3 έχουμε επίδραση της ύπαρξης κοιλότητας στην διαμόρφωση του πάχους του οριακού στρώματος, το οποίο όπως φαίνεται είναι περίπου $0,65 \cdot 60 = 39\text{mm}$.

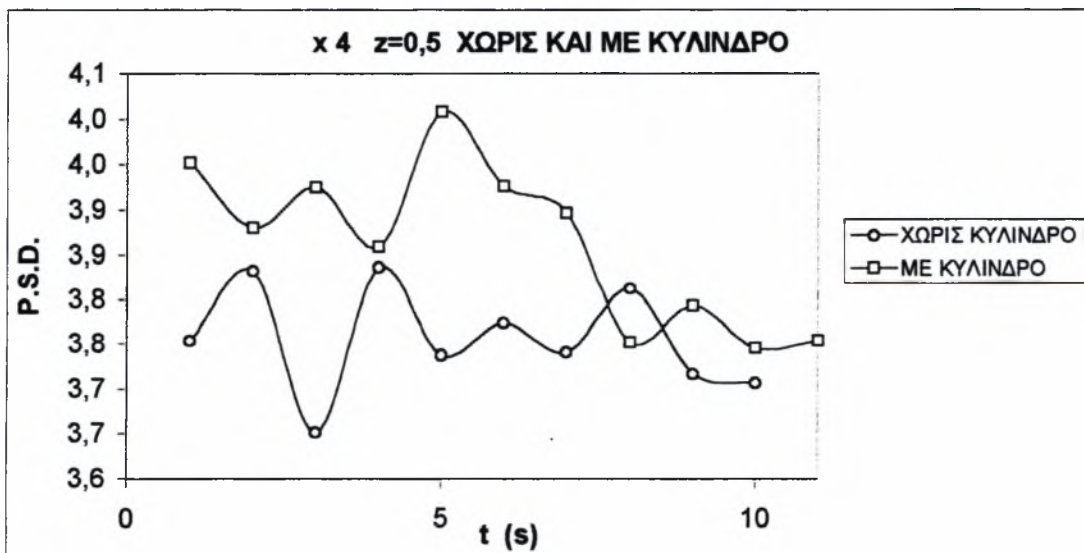
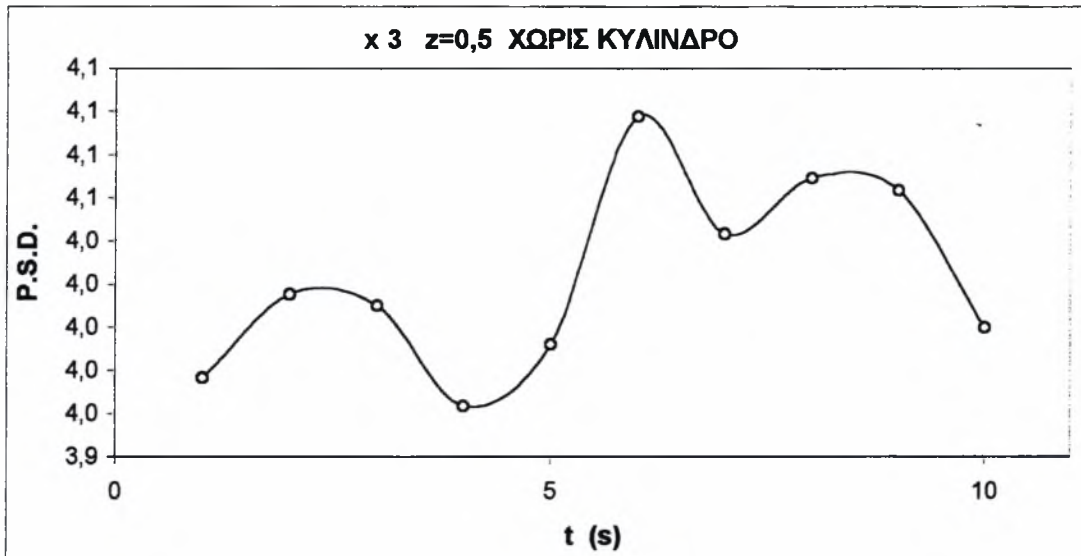
Από τα διαγράμματα P.S.D. δεν φαίνεται κάποια αξιοσημείωτη διαφορά στην μορφή τους, που σημαίνει πως και για τις δυο περιπτώσεις η κύρια διαταραχή στη ροή είναι οι δίνες Von-Karman από τον κύλινδρο.

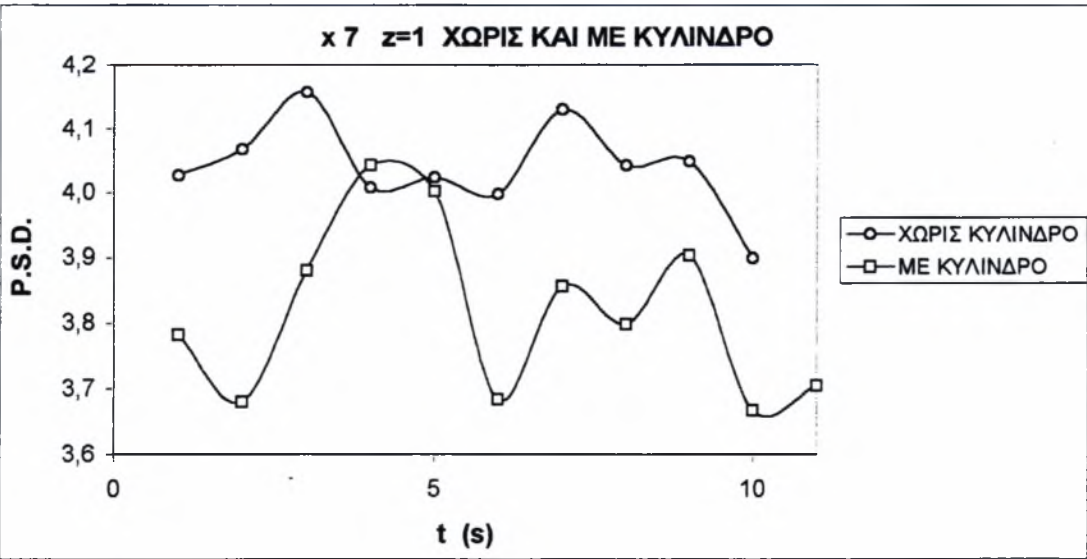
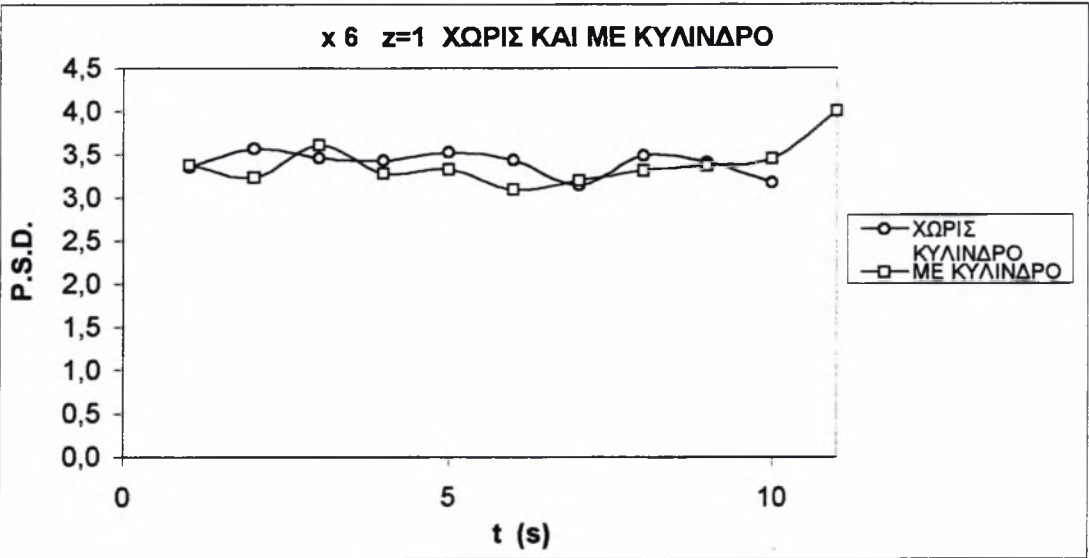
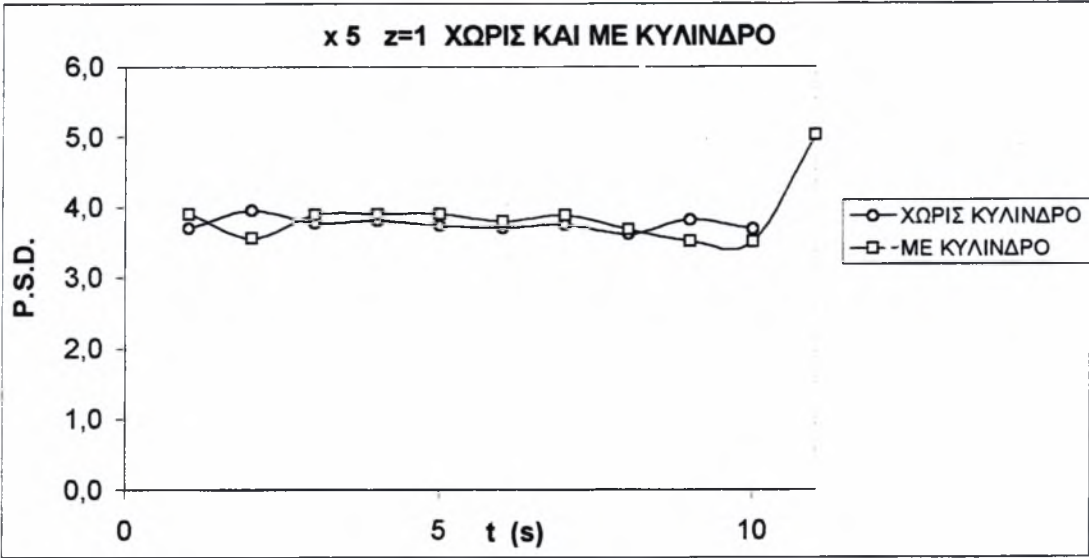
5.1.7

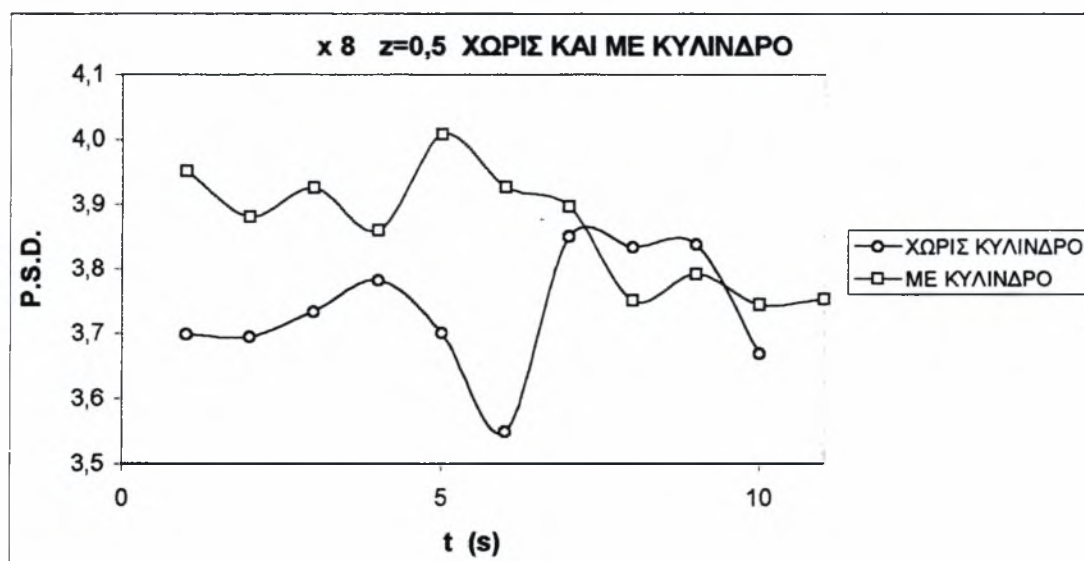
Α. Διαγράμματα Κλιμάκων χρόνου για την περίπτωση Χωρίς και Με κύλινδρο

Θέσεις x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_7 και x_8 - $U_0=5\text{m/s}$

Παρατήρηση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την θέση και απόσταση του ύψους z σε cm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από την αρχή των αξόνων συν/νων.







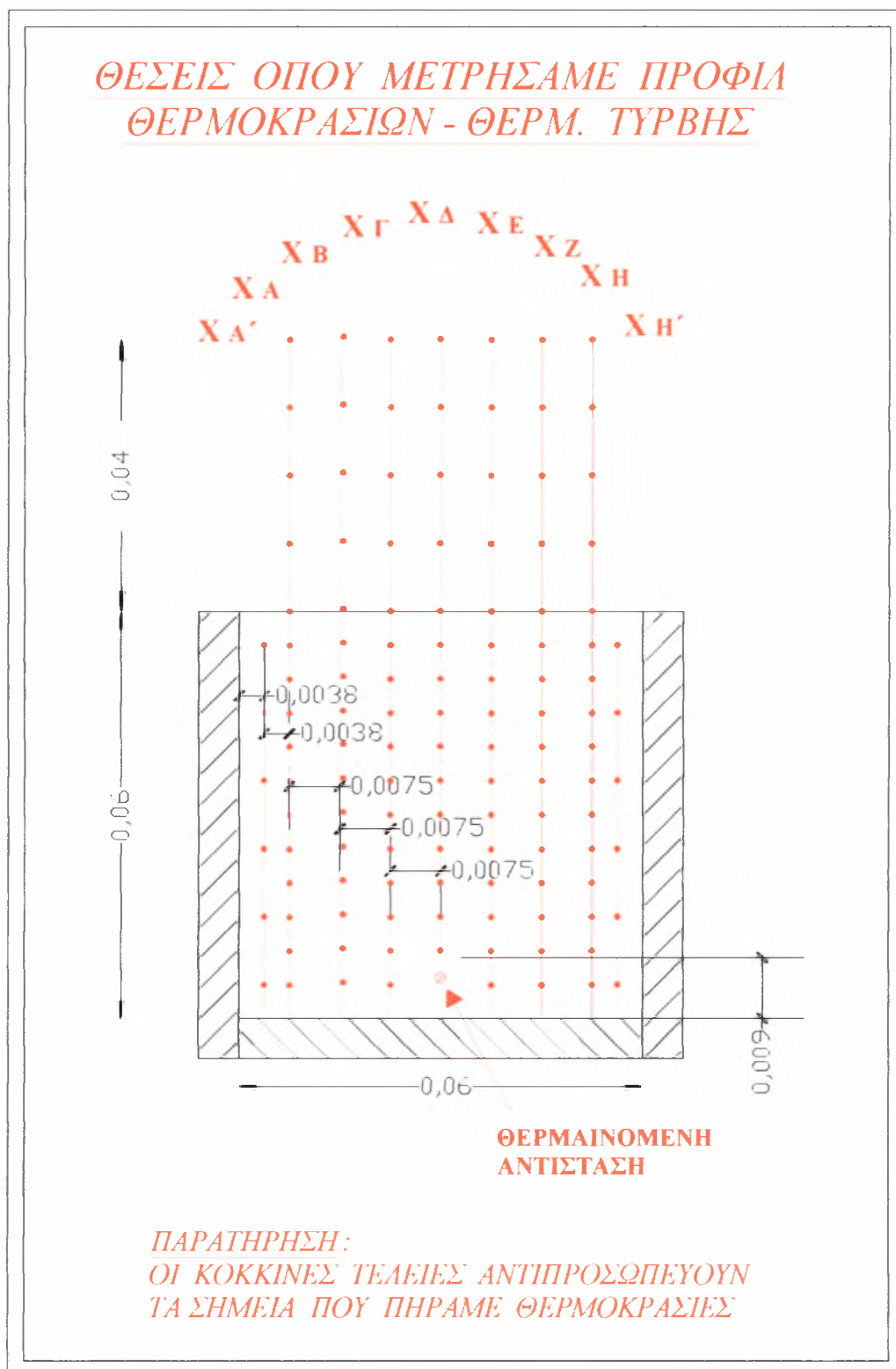
Β. Σχολιασμός:

Στα διαγράμματα των κλιμάκων χρόνου παρατηρούμε έντονες διακυμάνσεις στο λαμβανόμενο από τον αισθητήρα Hot-wire μέγεθος για όλες τις ανωτέρω θέσεις, οι οποίες διαφοροποιούνται αρκετά όταν εισάγουμε τον κύλινδρο στη ροή. Το διακυμάνσεις που αντιστοιχούν στην παρουσία του κυλίνδρου έχουν μεγάλη διαφορά στην έντασή τους συγκρινόμενες με την περίπτωση χωρίς κύλινδρο, εκτός από την περιοχή στην μέση (x5) και κατάντη (x6) της κοιλότητας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις έχουμε εντονότερες διακυμάνσεις όταν υπάρχει κύλινδρος, με μόνη εξαίρεση την θέση x7.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η φύση της ροής είναι τυρβώδης σε κάθε θέση από τις παραπάνω (x3, x4, x5, x6, x7 και x8). Πράγμα το οποίο είναι ενισχυτικό της γνώμης που έχει αναφερθεί εξαρχής, ότι δηλαδή έχουμε τυρβώδη οριακά στρώματα.

5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ



Σχ. 5.16 Θέσεις όπου μετρήθηκαν τα θερμοκρασιακά προφίλ και η τύρβη μέσα στην μεγάλη κοιλότητα και 4cm πάνω από αυτή.

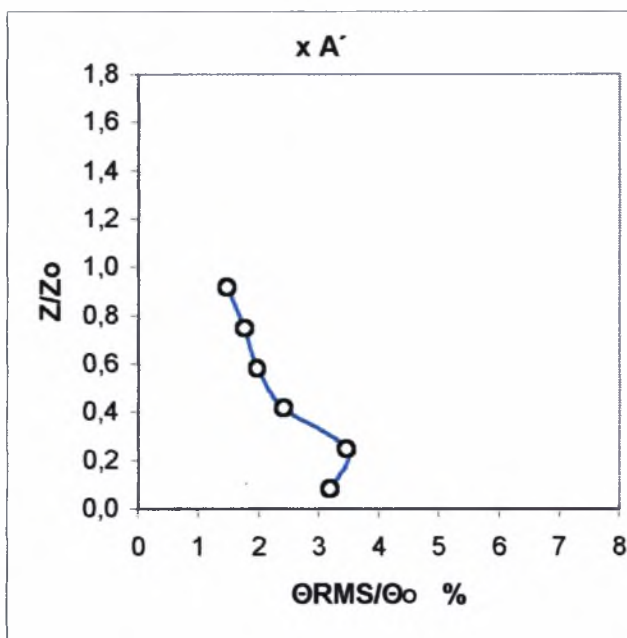
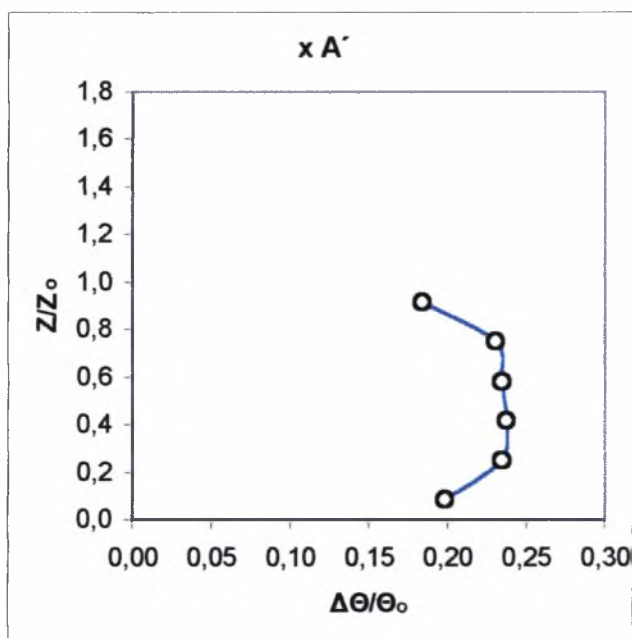
5.2.1.1

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x A' - U₀=5m/s

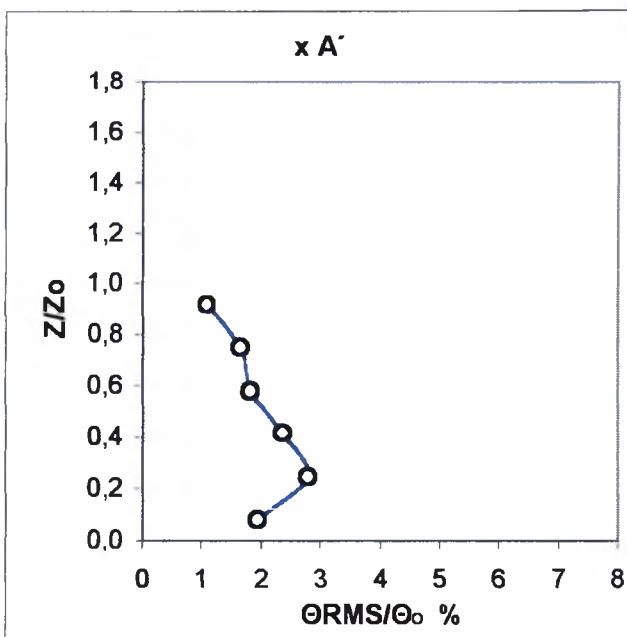
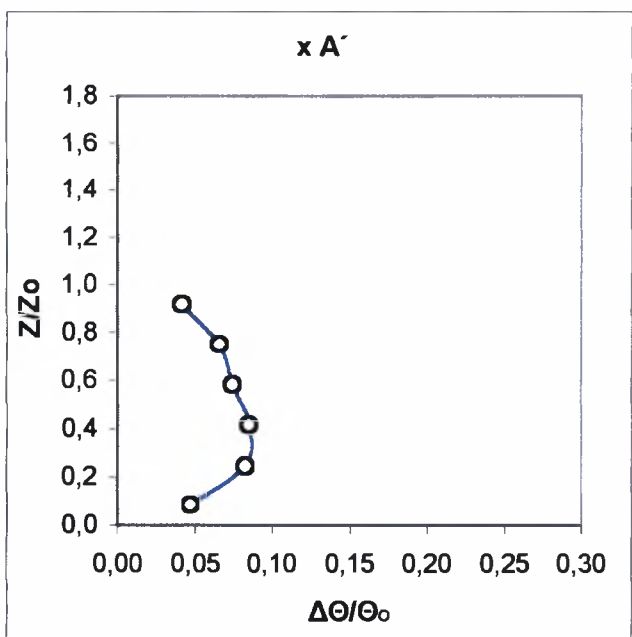
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\theta/\theta_0)$ και $z/z_0 = f(\theta_{RMS}/\theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.11 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x a'.

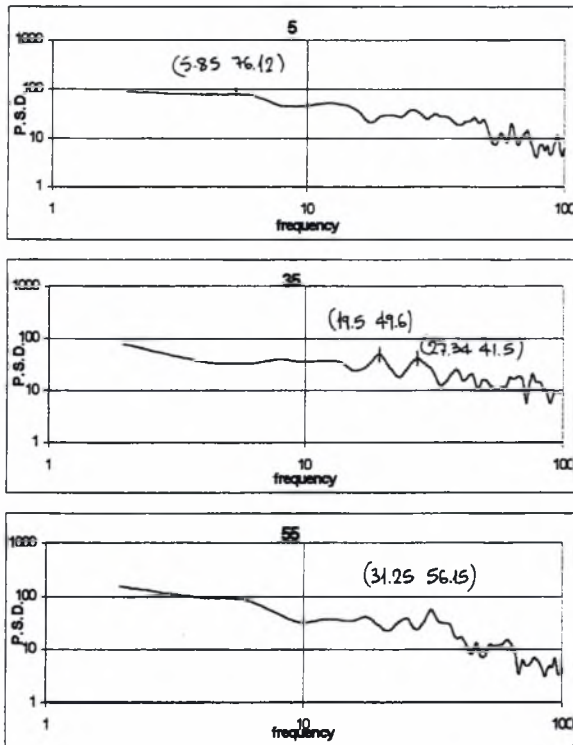
B. Με κύλινδρο



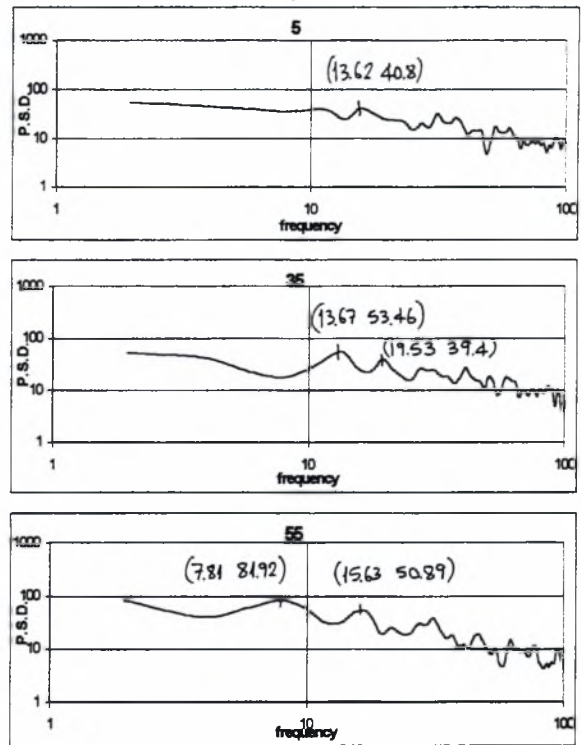
Δ. 5.12 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x A'.

θέση x A' - $U_0=5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

Α. Χωρίς κύλινδρο



Β. Με κύλινδρο



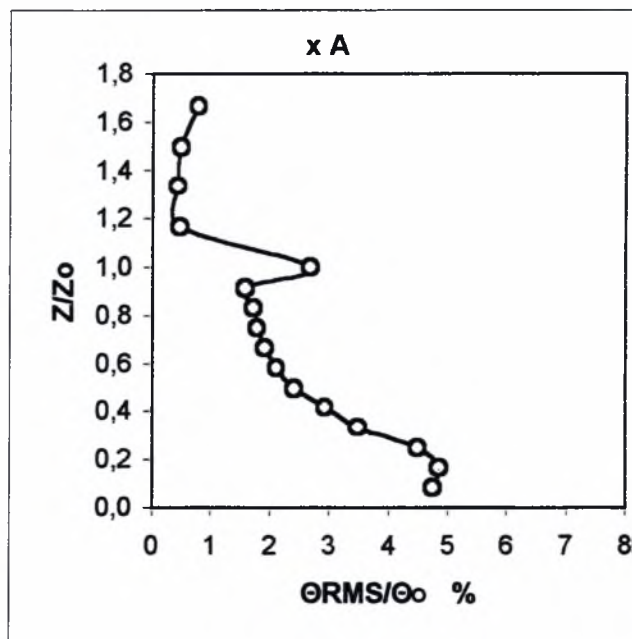
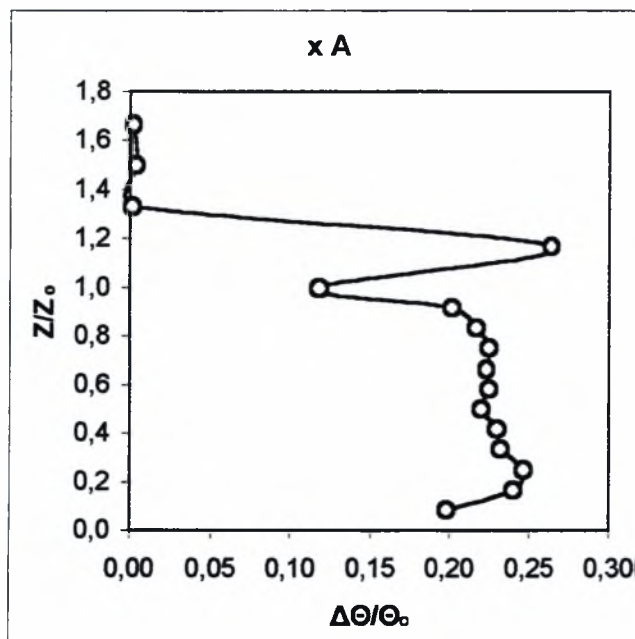
Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

5.2.1.2

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

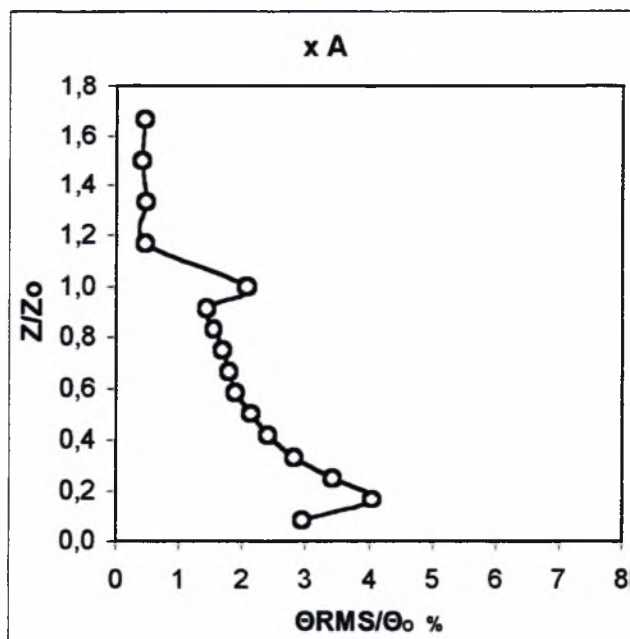
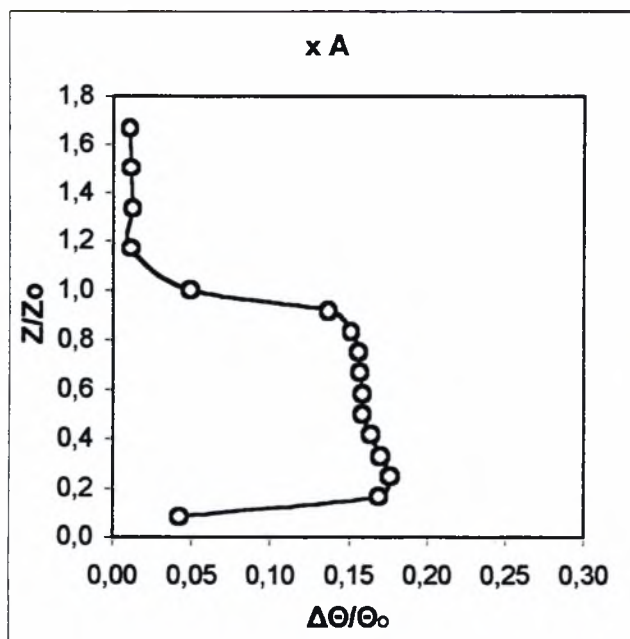
θέση x A - $U_0=5\text{m/s}$ Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\theta/\theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{\text{RMS}}/\theta_0 \%)$

Α. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.13 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσής αυτής στη θέση x a.

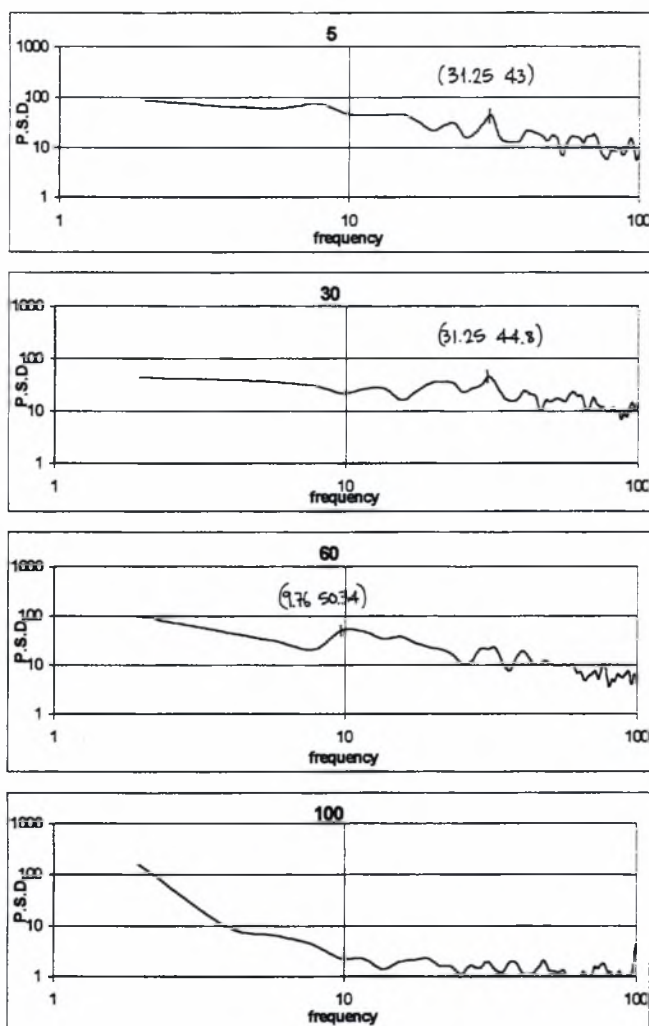
Β. Με κύλινδρο



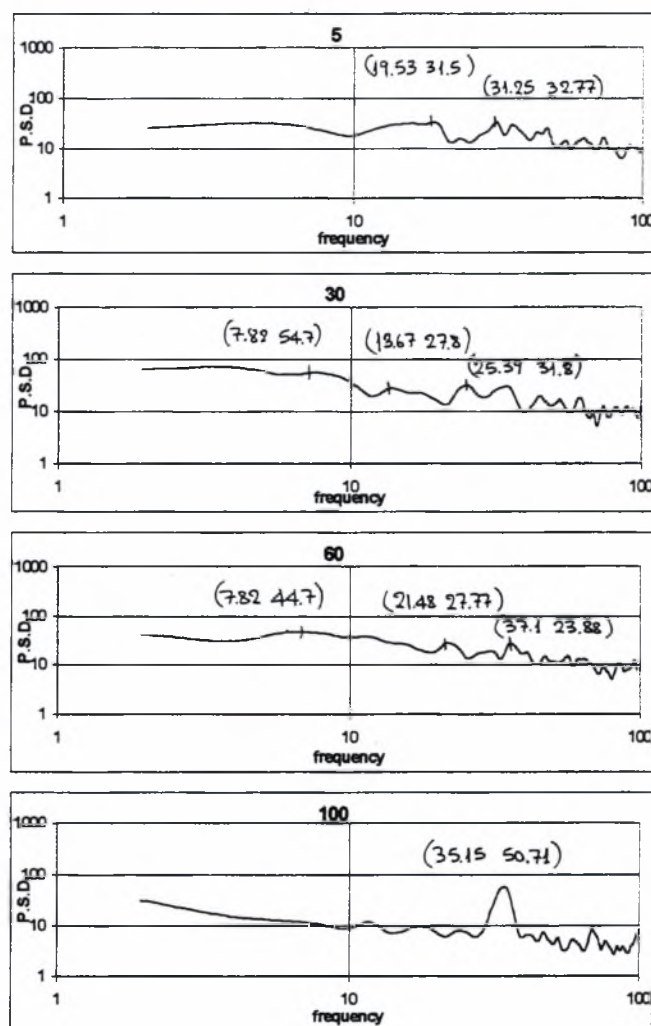
Δ. 5.14 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσής αυτής στη θέση x A.

θέση x A - $U_0=5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

Α. Χωρίς κύλινδρο



Β. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

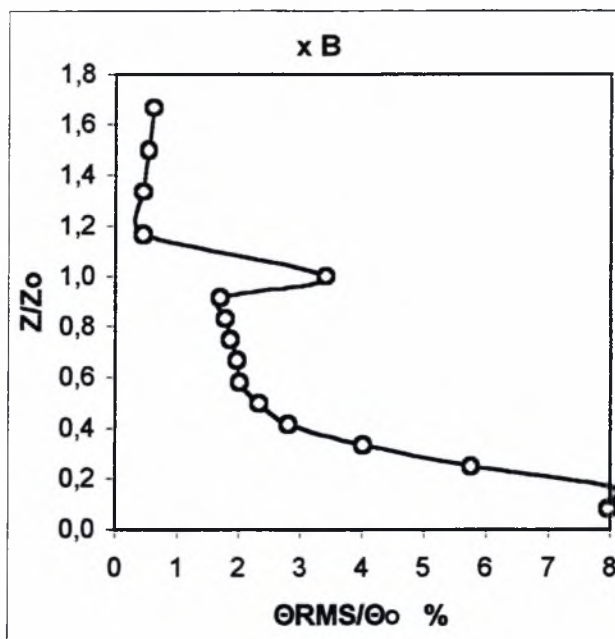
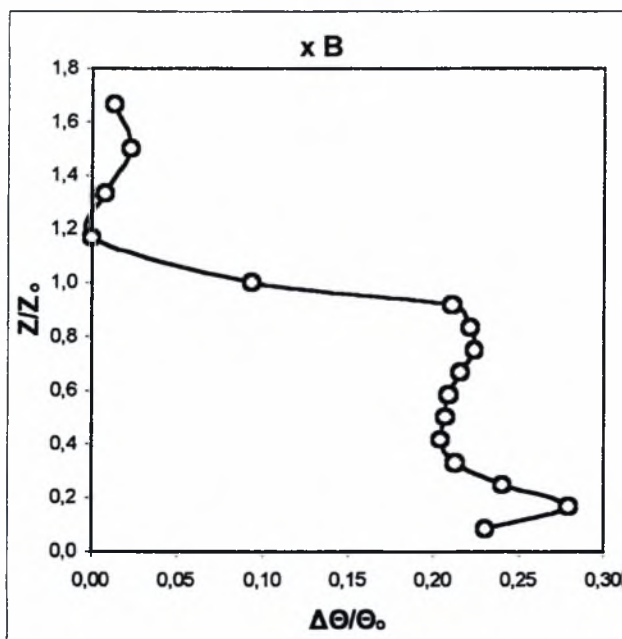
5.2.1.3

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x B - $U_0=5\text{m/s}$

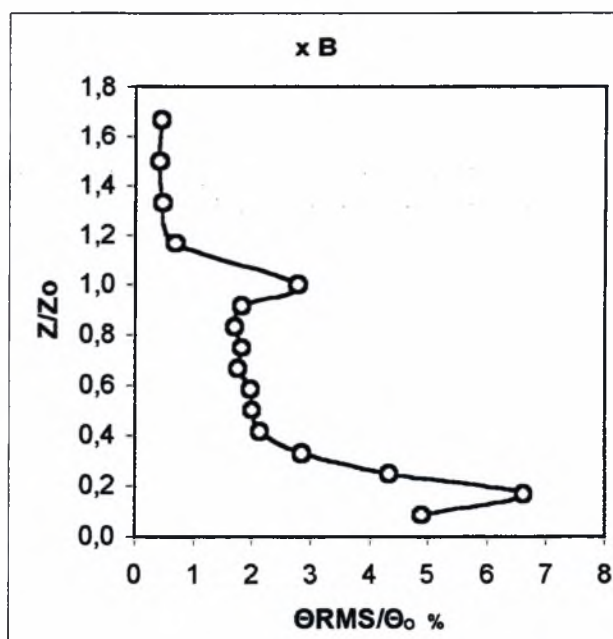
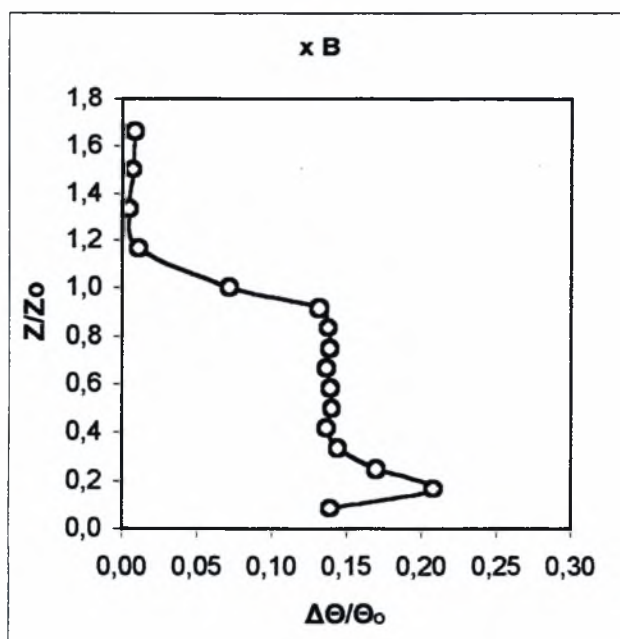
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{\text{RMS}}/\Theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.15 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x B.

B. Με κύλινδρο

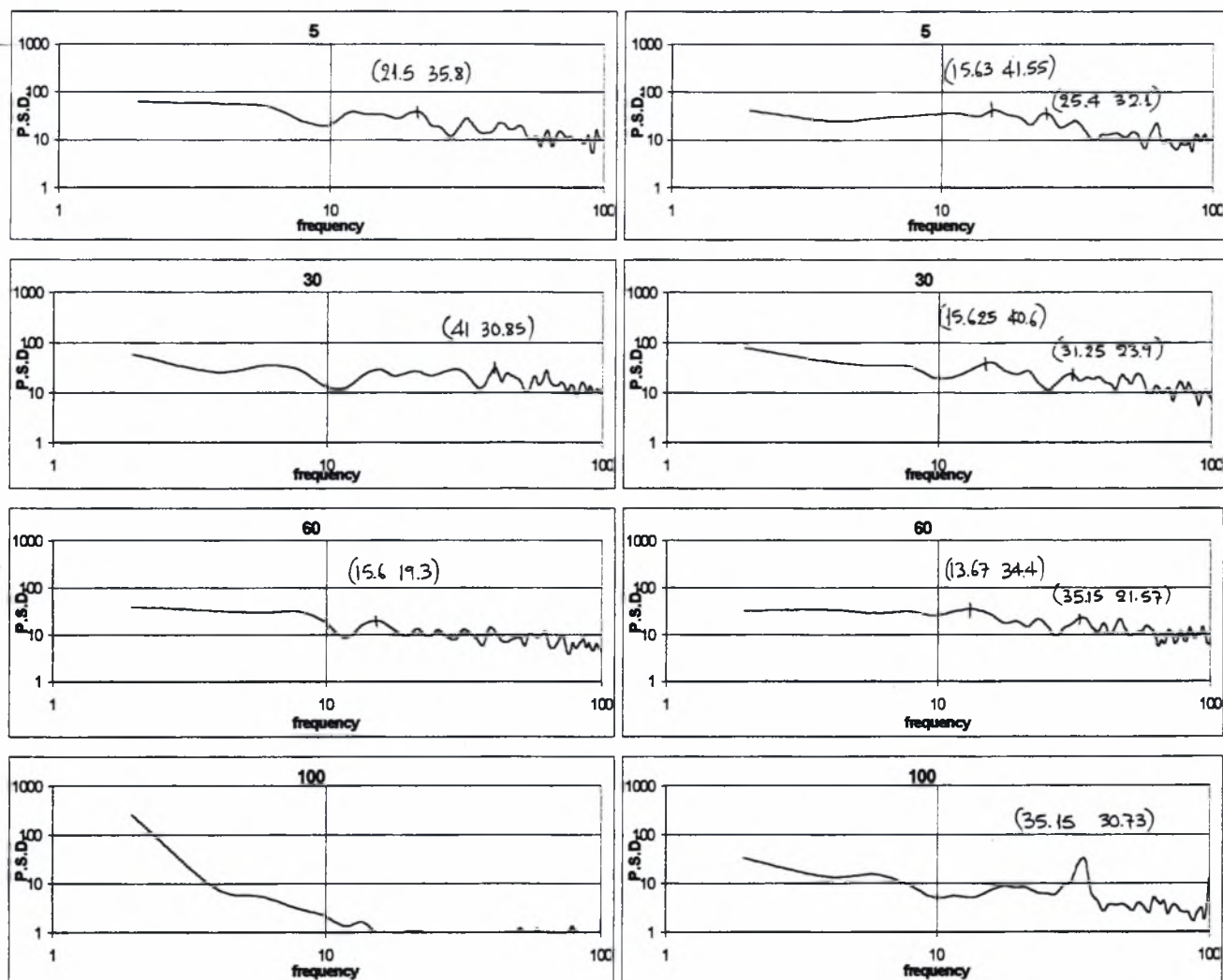


Δ. 5.16 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x B.

θέση x B - $U_0=5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

A. Χωρίς κύλινδρο

B. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

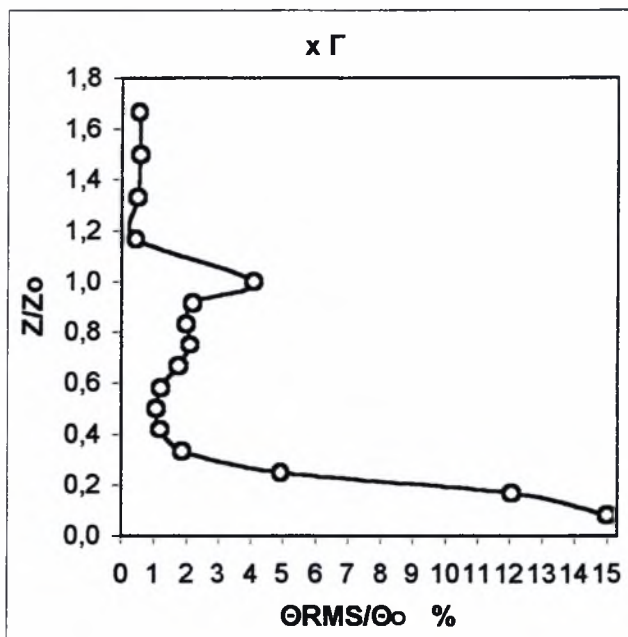
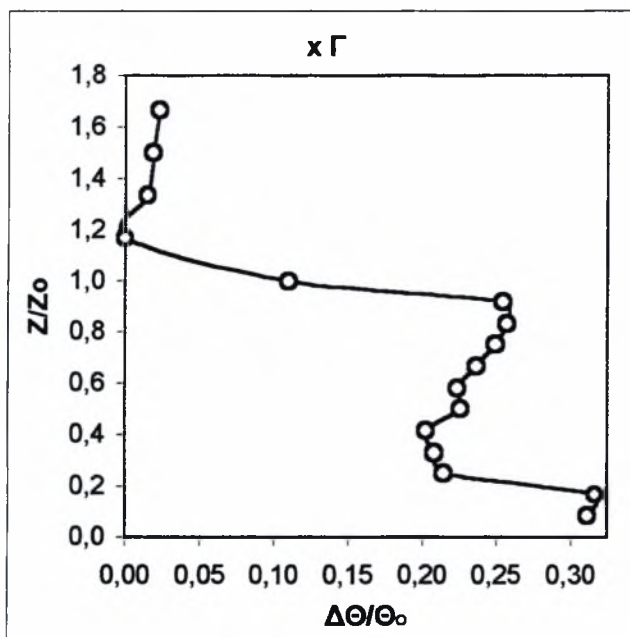
5.2.1.4

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x Γ - $U_0=5\text{m/s}$

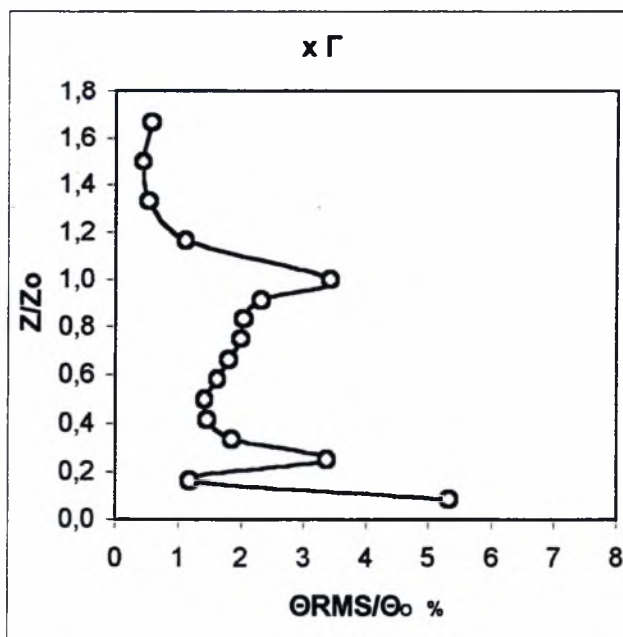
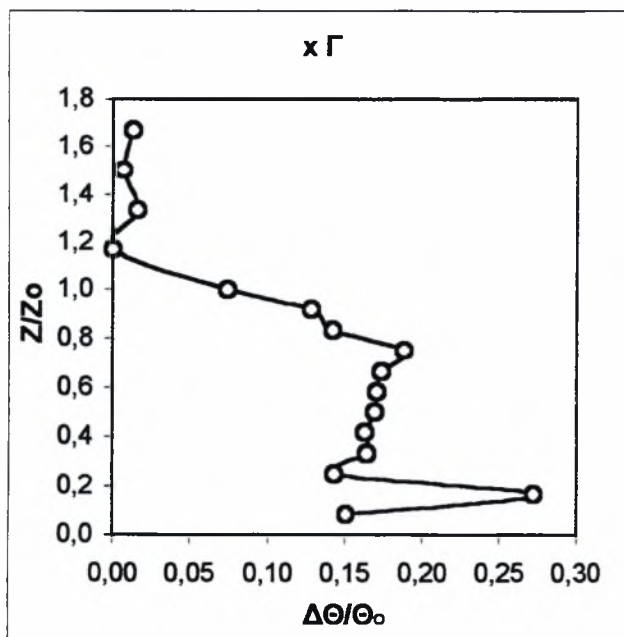
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{\text{RMS}}/\Theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.17 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x Γ.

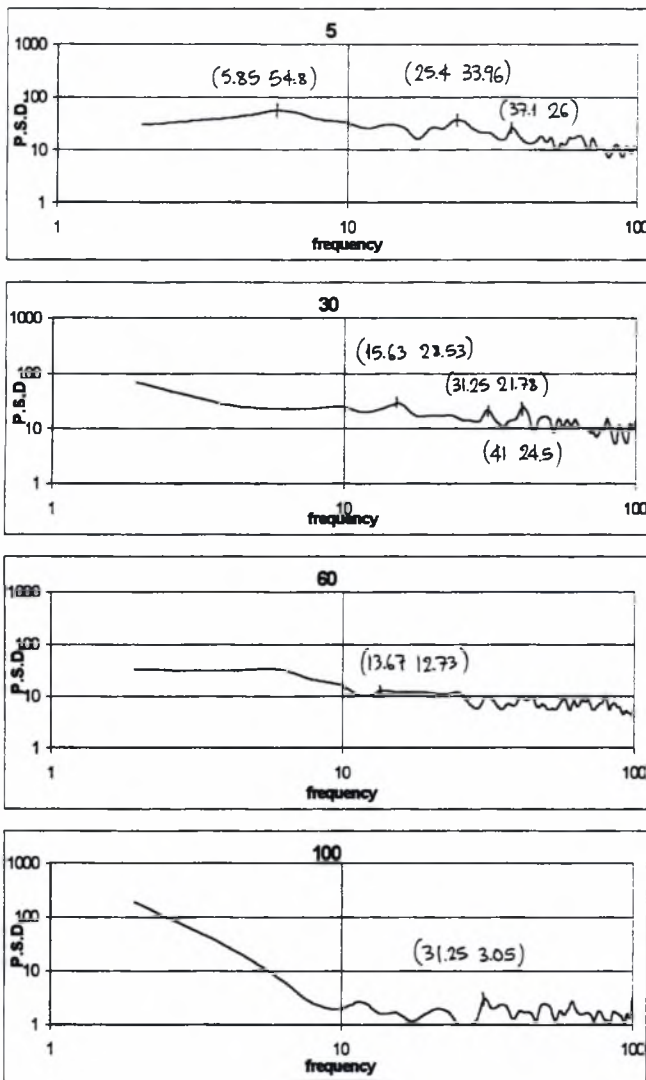
B. Με κύλινδρο



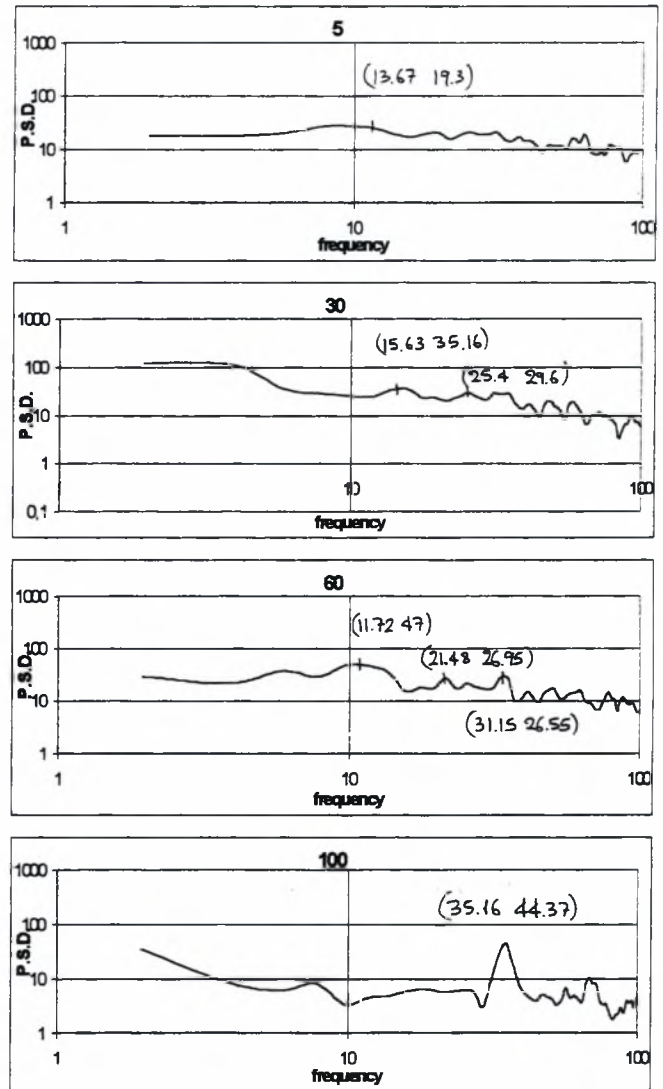
Δ. 5.18 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x Γ.

θέση x Γ - $U_0=5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

Α. Χωρίς κύλινδρο



Β. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

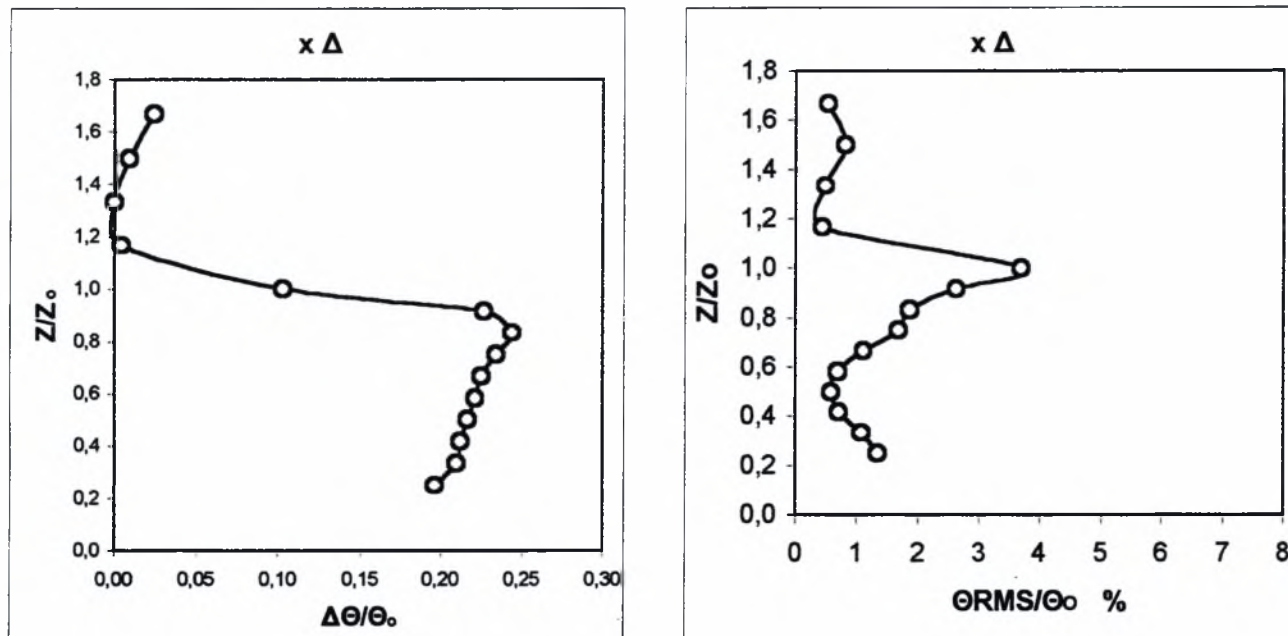
5.2.1.5

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x Δ - $U_0=5\text{m/s}$

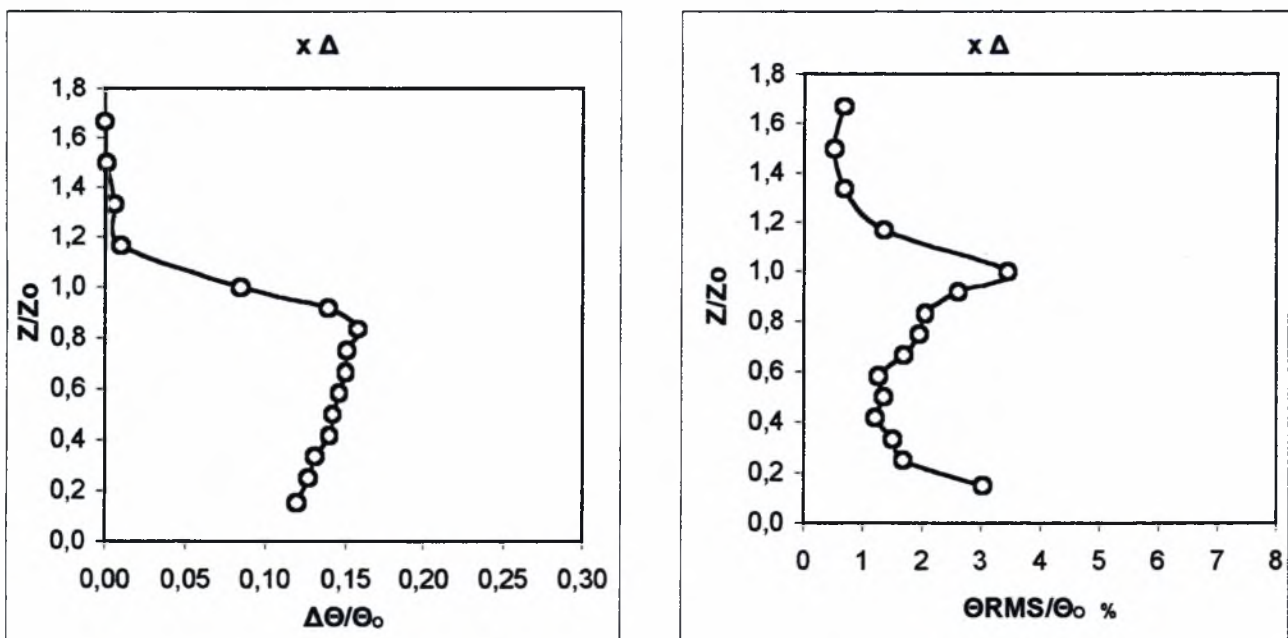
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{\text{RMS}}/\Theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.19 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x Δ.

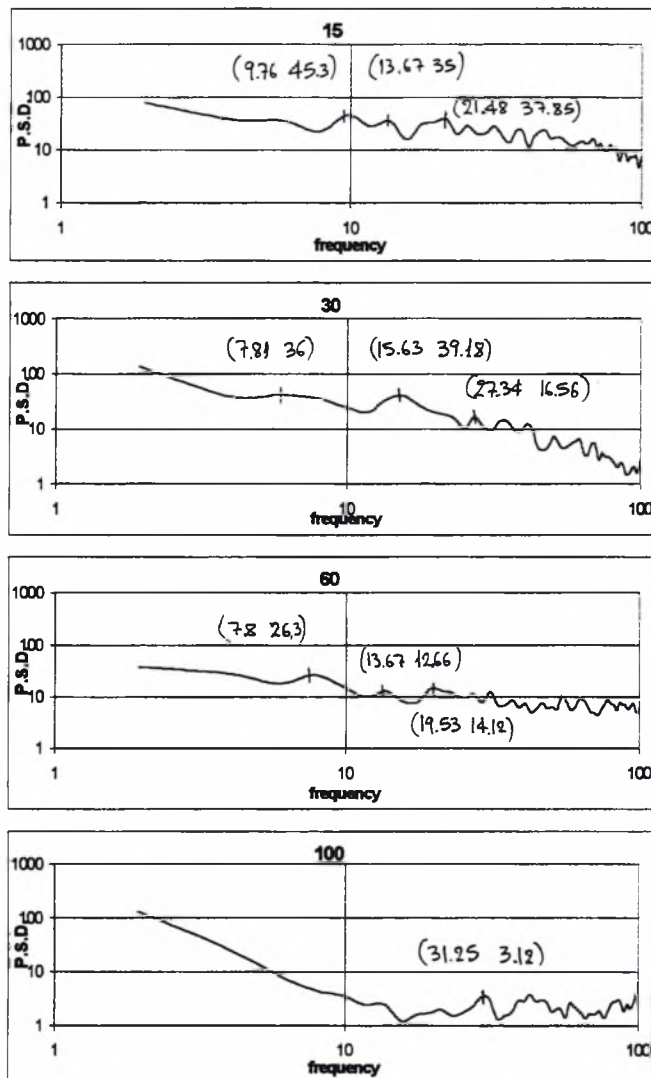
B. Με κύλινδρο



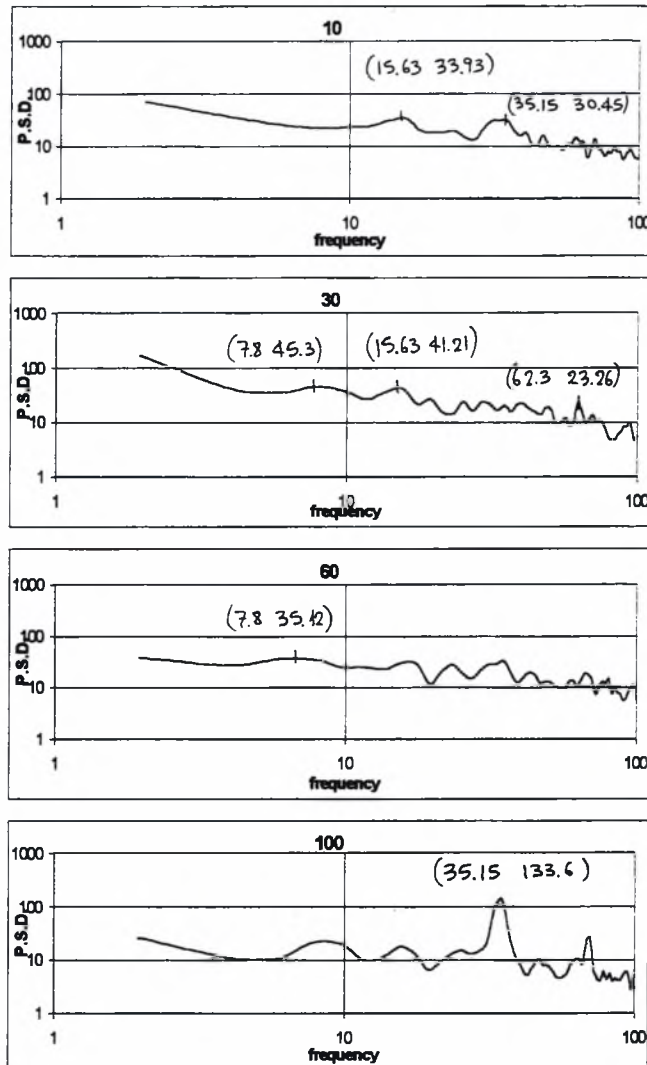
Δ. 5.20 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x Δ.

Θέση x Δ - $U_0=5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

Α. Χωρίς κύλινδρο



Β. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

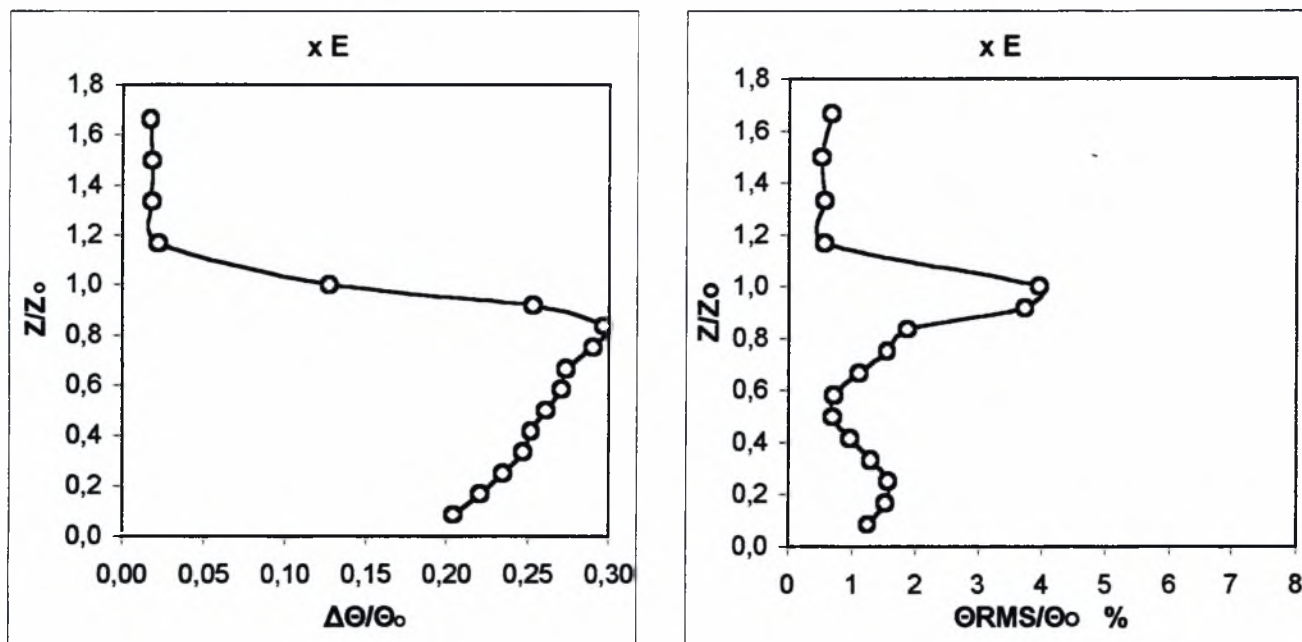
5.2.1.6

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x E - $U_0=5\text{m/s}$

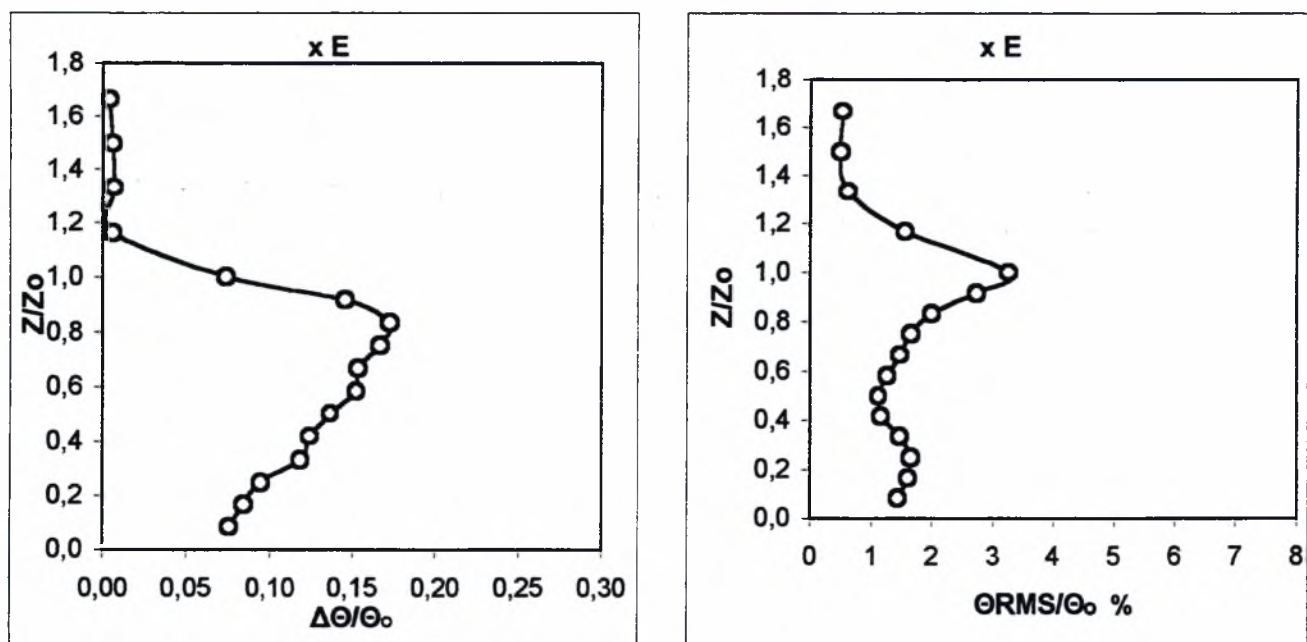
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{\text{RMS}}/\Theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.21 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x E.

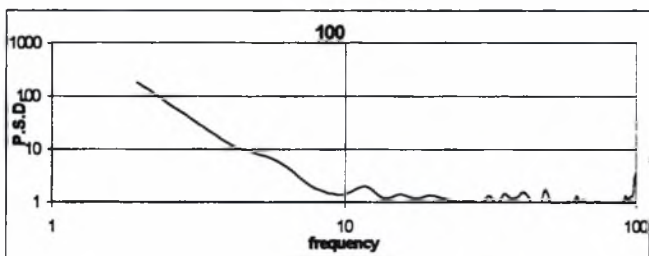
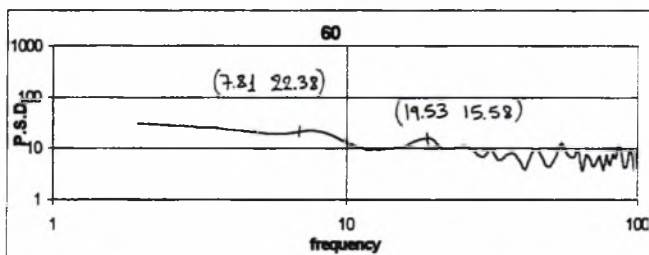
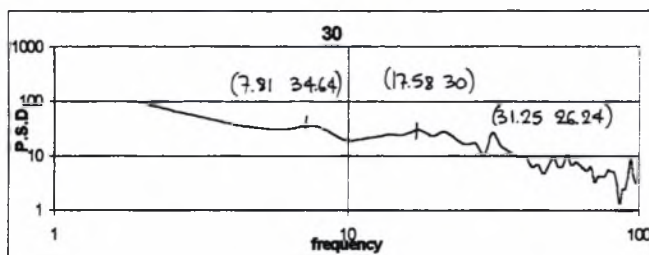
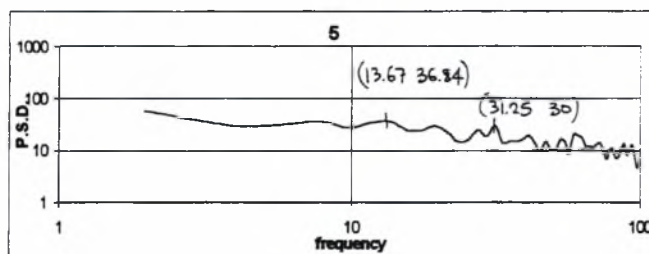
B. Με κύλινδρο



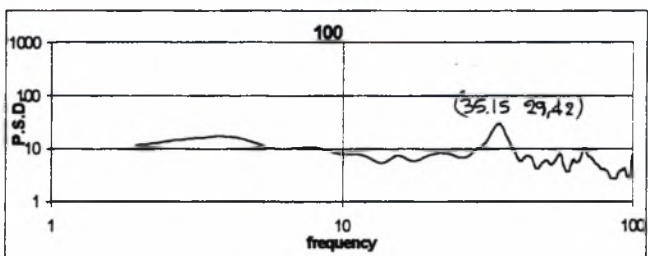
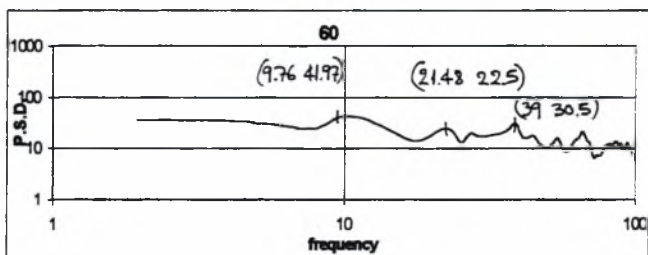
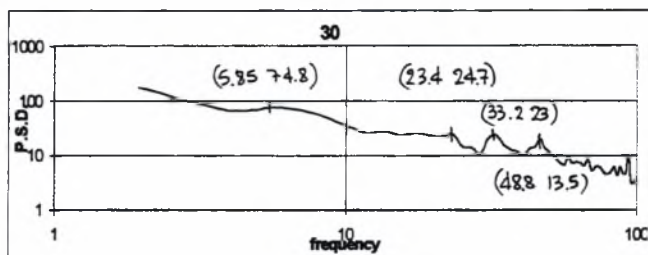
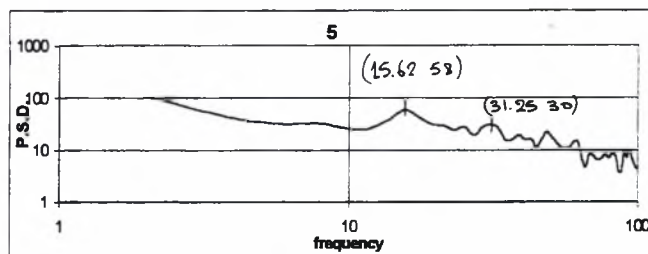
Δ. 5.22 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x E.

θέση x E - $U_0=5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

Α. Χωρίς κύλινδρο



Β. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

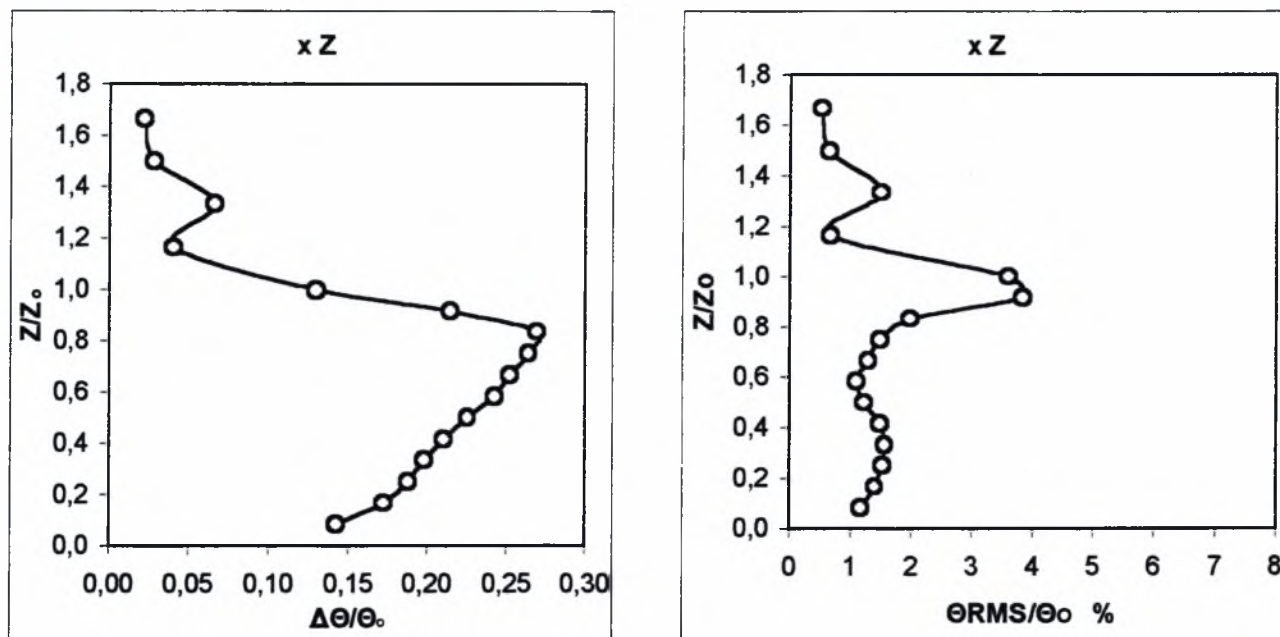
5.2.1.7

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x Z - $U_0=5\text{m/s}$

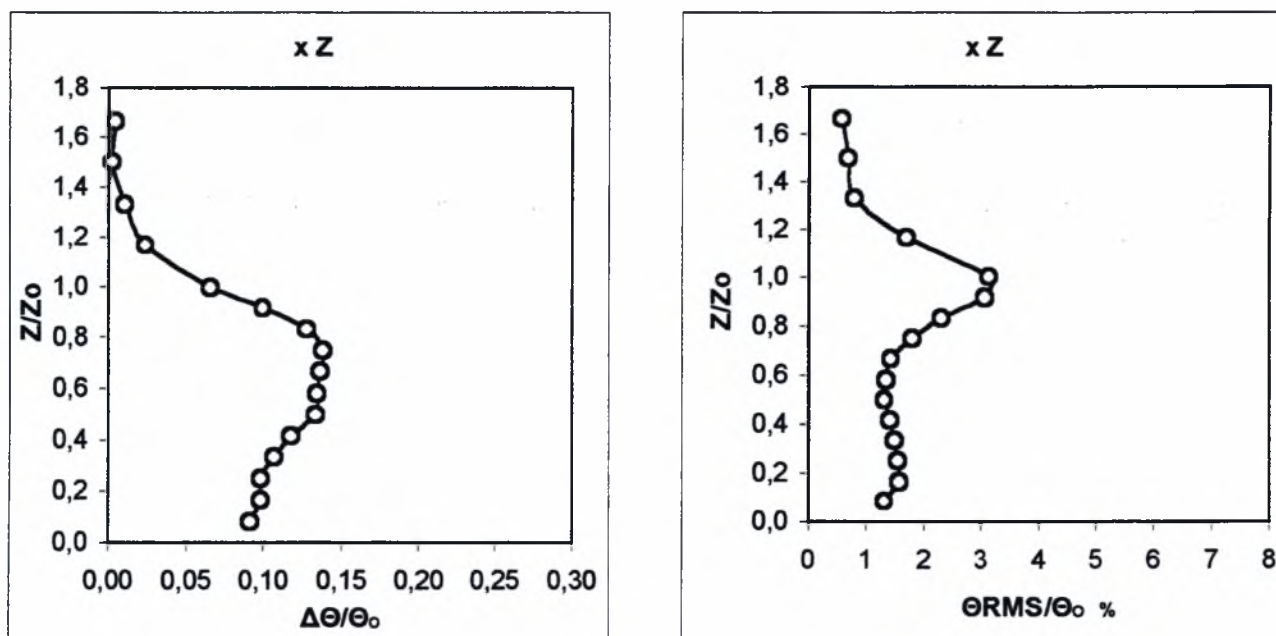
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{\text{RMS}}/\Theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.23 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x Z.

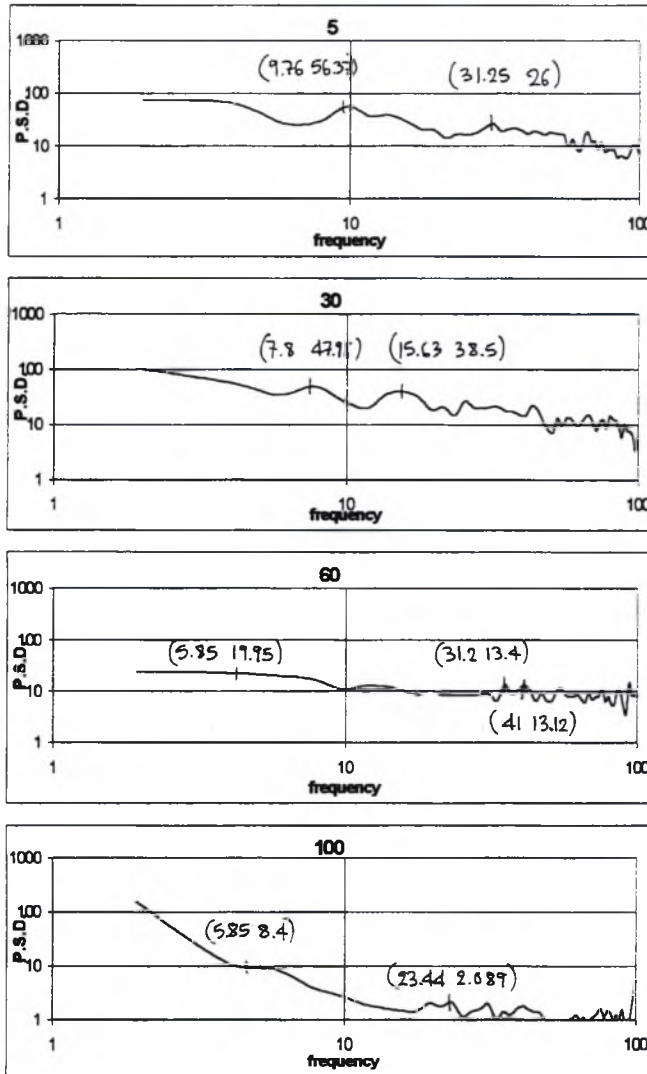
B. Με κύλινδρο



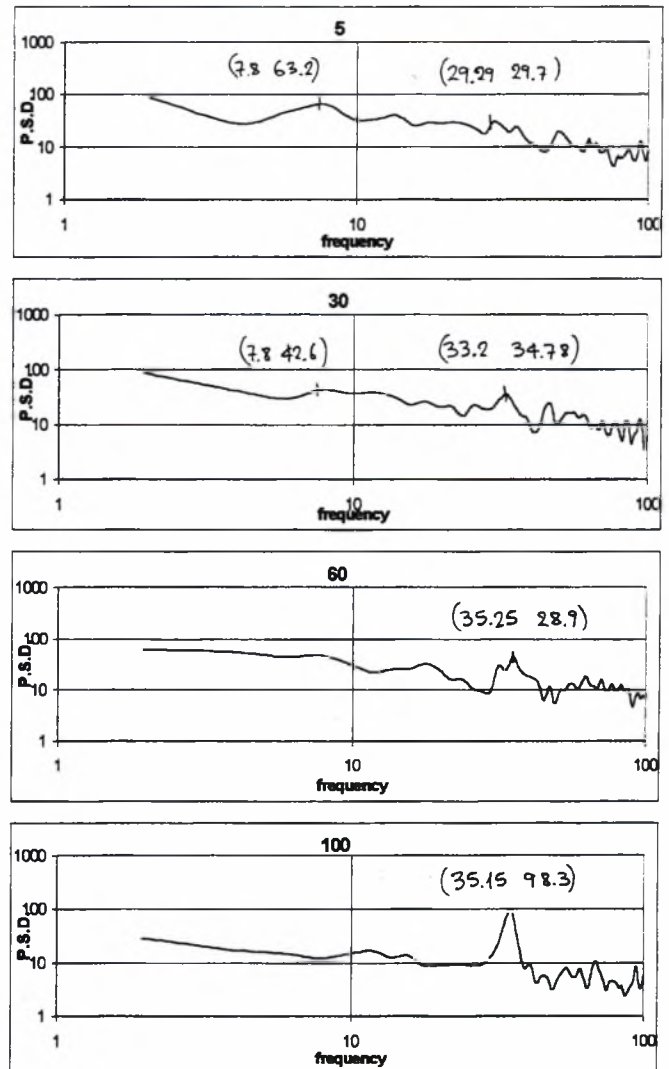
Δ. 5.24 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x Z.

θέση x Z :: $U_0=5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

A. Χωρίς κύλινδρο



B. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

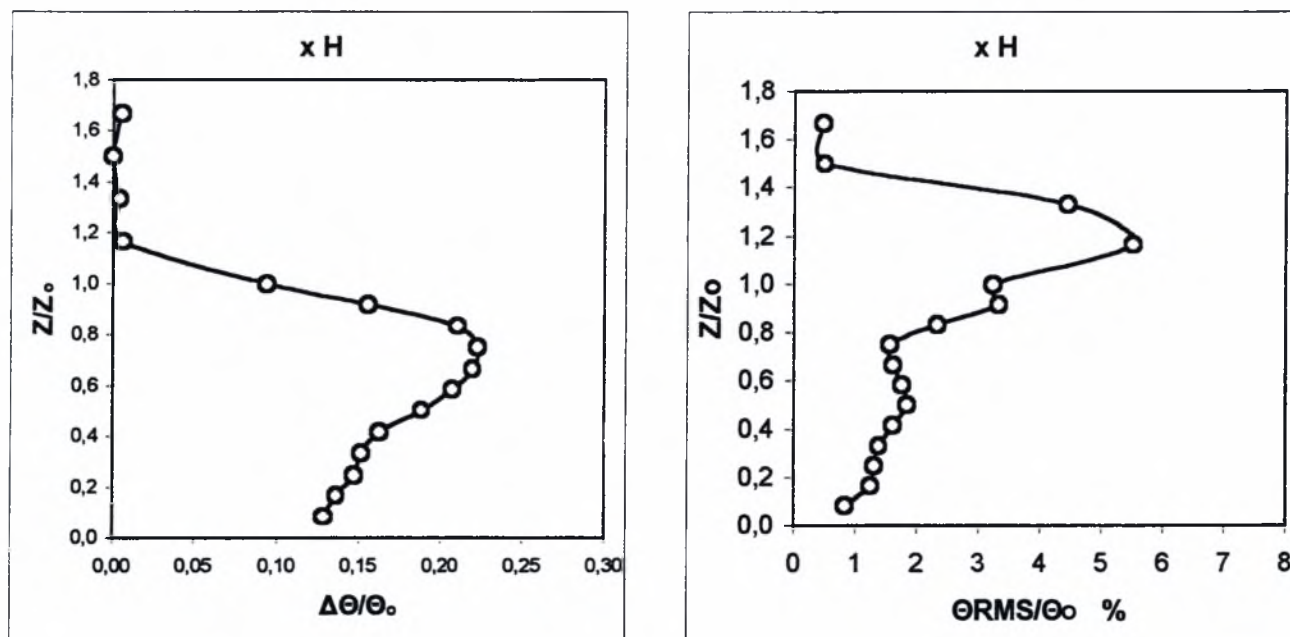
5.2.1.8

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x H - $U_0=5\text{m/s}$

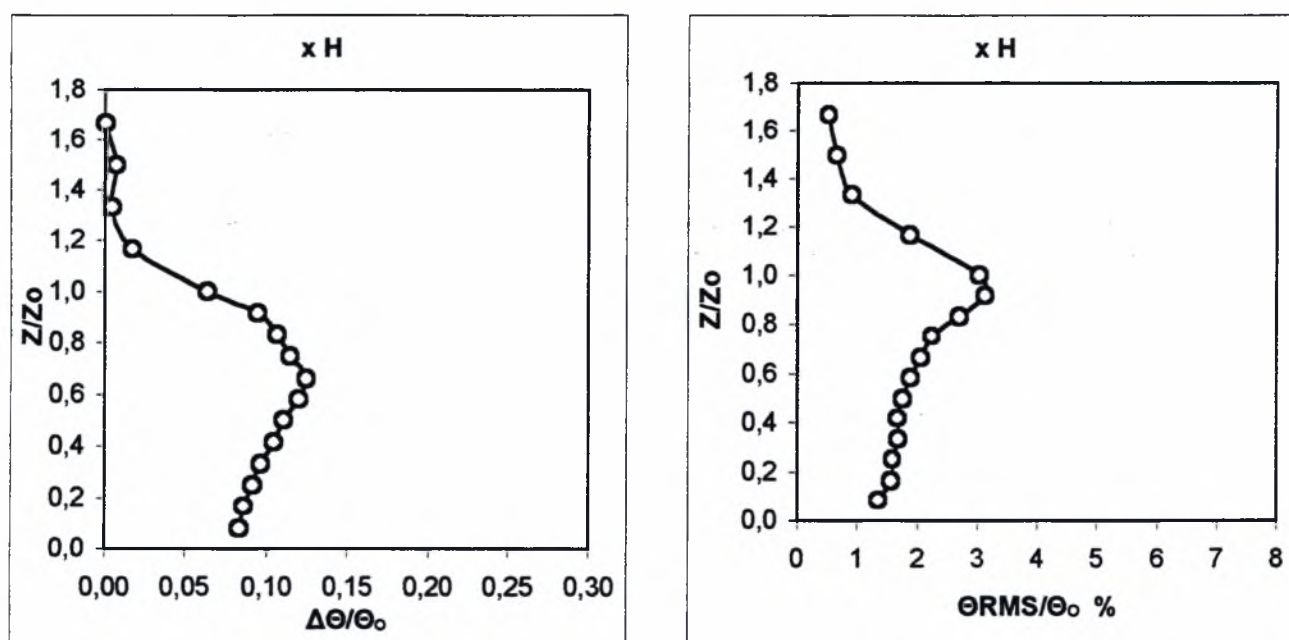
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\theta/\theta_0)$ και $z/z_0 = f(\theta_{\text{RMS}}/\theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.25 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x H.

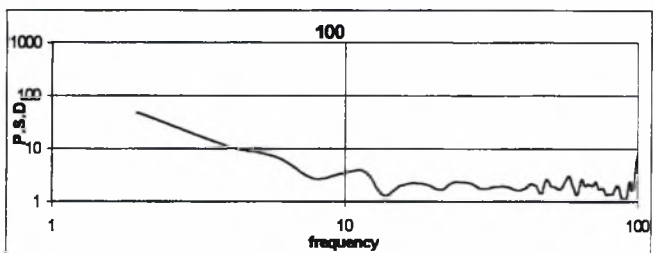
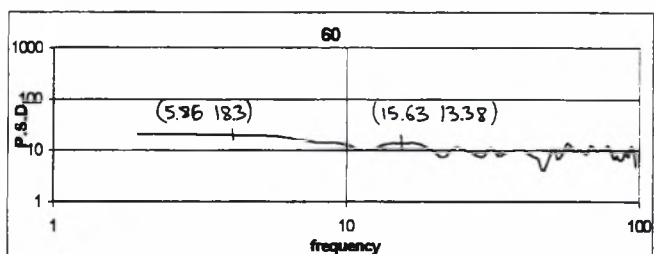
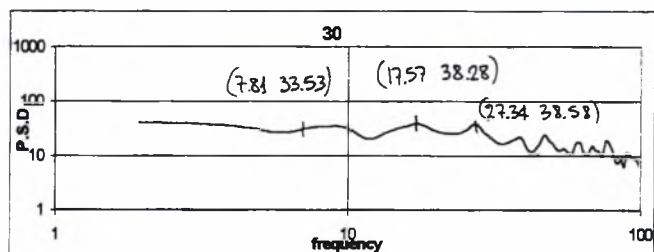
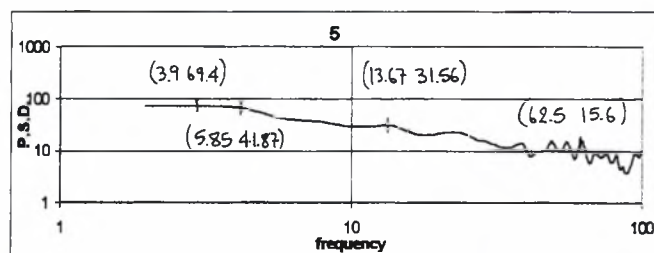
B. Με κύλινδρο



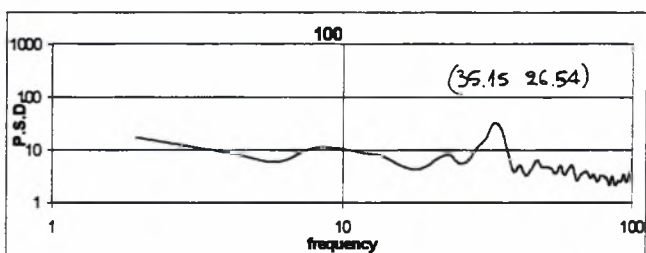
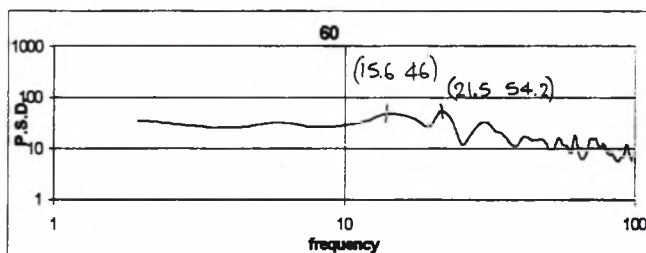
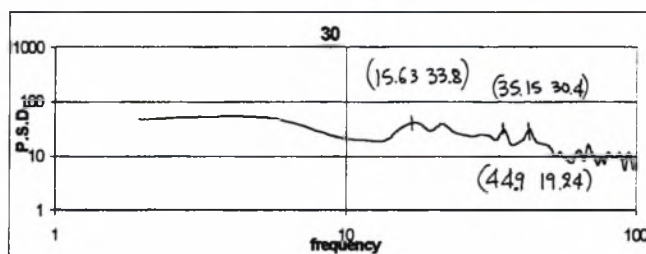
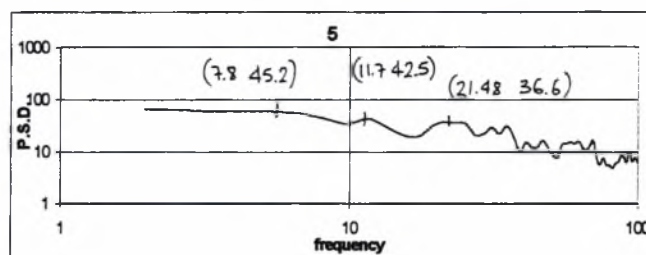
Δ. 5.26 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x H.

Θέση xH - $U_0 = 5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

A. Χωρίς κύλινδρο



B. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

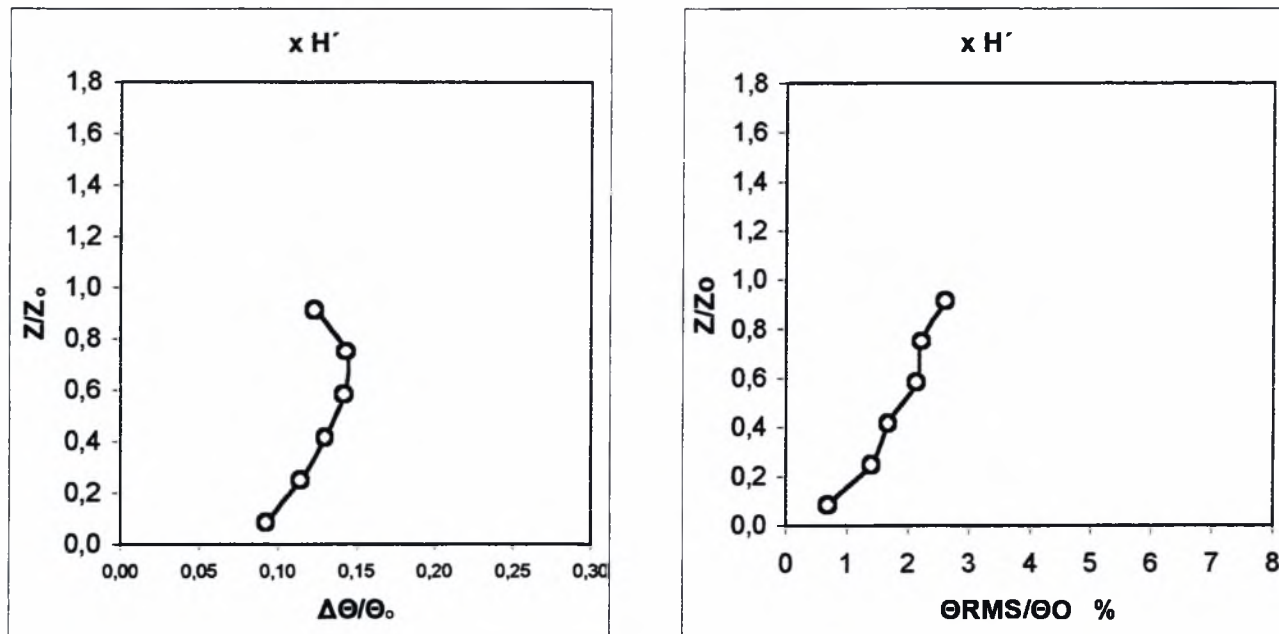
5.2.1.9

Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας

θέση x H' - U₀=5m/s

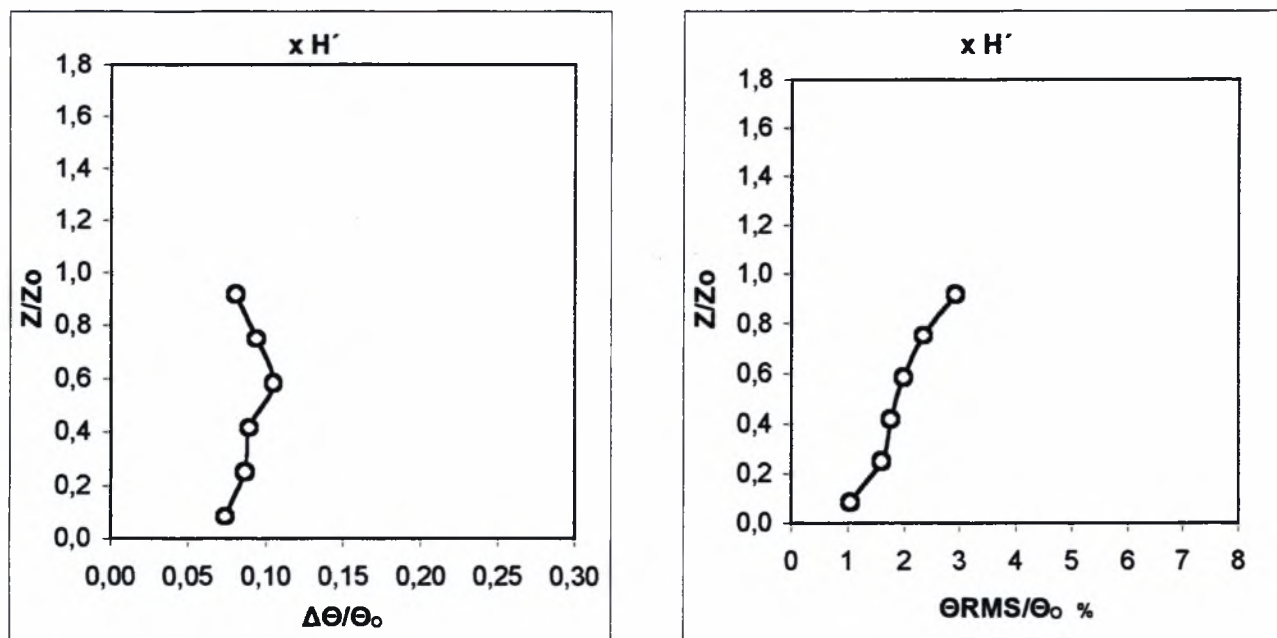
Διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{RMS}/\Theta_0 \%)$

A. Χωρίς κύλινδρο



Δ. 5.27 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x H'.

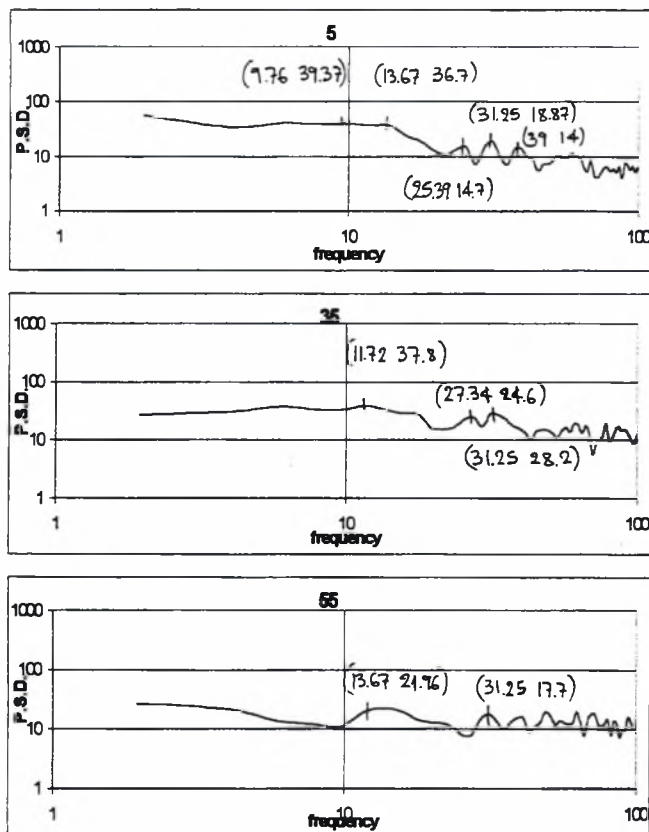
B. Με κύλινδρο



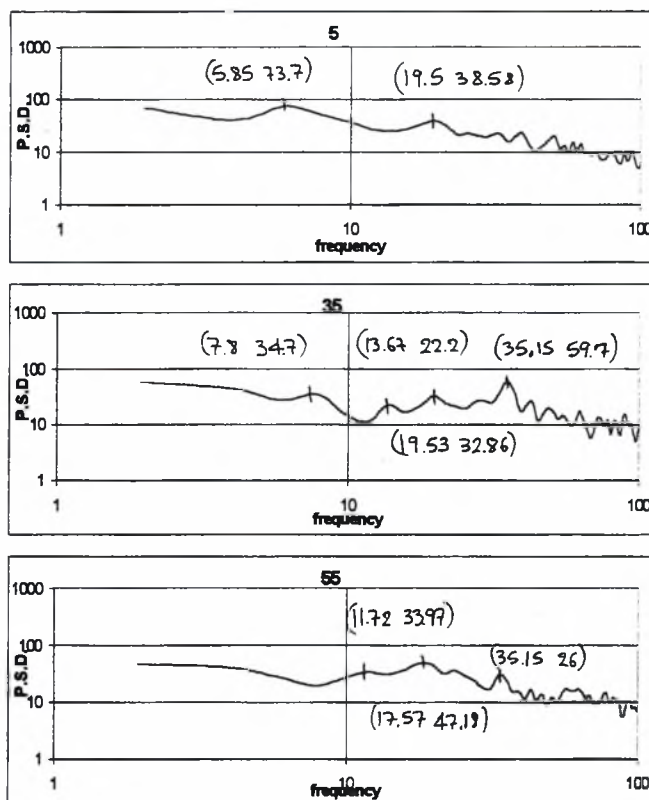
Δ. 5.28 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα προφίλ μέσης θερμοκρασίας και διακύμανσης αυτής στη θέση x H'.

Θέση $\times H' - U_0 = 5\text{m/s}$ - Διαγράμματα P.S.D.

A. Χωρίς κύλινδρο



B. Με κύλινδρο



Σημείωση: Ο τίτλος κάθε γραφήματος αφορά την απόσταση του ύψους z σε mm του σημείου που αναφέρεται το διάγραμμα από τον πυθμένα της κοιλότητας.

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ

Παρατήρηση: Τα πειράματα που αναφέρονται στις παρακάτω θέσεις, έγιναν έχοντας το σύρμα χρωμονικελίνης μέσα στην κοιλότητα όπως αναφέρεται στο 4° Κεφάλαιο, τροφοδοτώντας το με τάση 28V συνεχούς ρεύματος εντάσεως 0,45A.

Θέση $\times A'$:

Πολύ κοντά στο τοίχωμα, εσωτερικά (και ανάντη της ροής) της κοιλότητας (3,75mm απόσταση). Χωρίς τον κύλινδρο έχουμε μεγάλες τιμές $\Delta\Theta/\Theta_0$ ($\approx 0,23$), ενώ με την παρουσία του κυλίνδρου αυτή η διαφορά ελαττώνεται πάρα πολύ, ($\Delta\Theta/\Theta_0 \approx 0,07$). Δηλαδή έχουμε μια μείωση της τάξης του 70%!! Η οποία είναι και η μεγαλύτερη μείωση από κάθε άλλη θέση \times που επιτυγχάνεται στο πείραμά μας.

Το παραπάνω δείχνει ξεκάθαρα πως η παρουσία του κυλίνδρου με τις διαταραχές που δημιουργεί (δίνες Von-Karman), προκαλεί καλύτερη ανάμειξη μέσα στην κοιλότητα και εξομαλύνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές (κλίσεις θερμοκρασίας) από το περιβάλλον.

Η θερμοκρασιακή τύρβη παρόλα αυτά διατηρείται σταθερή με μια ελαφρά μείωση στην περίπτωση που υπάρχει κύλινδρος, από 3,5% σε 3% (μέγιστες τιμές).

Θέση xA:

Στην θέση αυτή παρατηρούμε πάλι το ίδιο φαινόμενο όπως προηγουμένως, ότι δηλαδή η παρουσία του κυλίνδρου με τις διαταραχές που εισάγει μέσα στην κοιλότητα εξομαλύνει το $\Delta\Theta/\Theta_0$ και από $\approx 0,25$ που ήταν χωρίς την παρουσία του, γίνεται $\approx 0,17$. Δηλαδή έχουμε μια μείωση 32%.

Η τύρβη ελαττώνεται ανεπαίσθητα με την ύπαρξη του κυλίνδρου. Αυτό δεν πρέπει να μας παραξενεύει. Καθώς τώρα δεν έχουμε τύρβη ταχυτήτων, αλλά θερμοκρασιών. Ενώ η παρουσία των δινών-διαταραχών από τον κύλινδρο αυξάνει την τύρβη της ταχύτητας, εδώ μειώνει την θερμοκρασιακή τύρβη. Αυτό γίνεται γιατί οι δίνες που αποσπώνται από τον κύλινδρο και εισέρχονται μέσα στην κοιλότητα, προκαλούν ανάμειξη συντελώντας έτσι σε μια πιο ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή από την περίπτωση που δεν υπάρχει κύλινδρος μέσα στη ροή. Έτσι έχουμε μικρότερες κλίσεις θερμοκρασίας μέσα στην κοιλότητα.

Θέση xB:

Εδώ παρατηρούνται περισσότερο έντονα τα ίδια φαινόμενα με την θέση xA. Η μέγιστη θερμοκρασία και τύρβη αυξάνονται. Πιθανότατα γιατί πλησιάζουμε περισσότερο στην πηγή θερμότητας (σύρμα χρωμονικελίνης). Επίσης ως σημειωθεί πως σε όλα τα μέχρι στιγμής διαγράμματα έχουμε πολύ μεγάλες κλίσεις θερμοκρασίας στο ύψος του χείλους της κοιλότητας, καθώς έξω από εκεί έχουμε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μειωμένη διάχυση θερμότητας.

Θέση xΓ:

Παρατηρούμε μια ομοιόμορφη αύξηση των θερμοκρασιακών προφίλ με αντίστοιχη αύξηση της τύρβης. Οι κλίσεις θερμοκρασίας στο χείλος της κοιλότητας παραμένουν μεγάλες. Τώρα είμαστε ακόμα πιο κοντά στην πηγή θερμότητας. Για αυτό και χαμηλά έχουμε την μεγαλύτερη τιμή $\Delta\Theta/\Theta_0$.

Θέση xΔ:

Εδώ δεν βλέπουμε την μέγιστη τιμή $\Delta\Theta/\Theta_0$, όπως προηγουμένως γιατί εδώ δεν μετρήσαμε πολύ χαμηλά (+5mm από τον πυθμένα της κοιλότητας) επειδή ήμασταν ακριβώς πάνω από το σύρμα χρωμονικελίνης (αντίσταση) και θα ήταν πολύ επικίνδυνη για το Cold-wire μια πολύ κοντινή προσέγγιση. Έτσι ξεκινήσαμε να μετράμε από τα +10mm (αφήνοντας ένα περιθώριο ασφαλείας 3mm από το σύρμα). Πιθανότατα αν μπορούσαμε να μετρήσουμε στα +5mm να είχαμε το μέγιστο "pick" στο προφίλ από όλες τις άλλες θέσεις x, αφού θα ήμασταν κοντινότερα στην αντίσταση-πηγή θερμότητας από κάθε άλλη θέση.

Πάλι η επίδραση του κυλίνδρου είναι η εξομάλυνση του $\Delta\Theta/\Theta_0$.

Θέση xE:

Στην χωρίς κύλινδρο περίπτωση παρατηρούμε πως έχουμε μέγιστο του $\Delta\Theta/\Theta_0$ ψηλά εντός της κοιλότητας κοντά στο χείλος της. Σε αντίθεση με τα αντίστοιχα διαγράμματα των θέσεων xA, xB που είχαν μέγιστο χαμηλά, παρατηρούμε πως όσο πλησιάζουμε στο κατάντη (downward) μέρος της κοιλότητας (xΔ, xE, xZ, κτλ.), το ελάχιστο $\Delta\Theta/\Theta_0$ είναι χαμηλά και το μέγιστο $\Delta\Theta/\Theta_0$ ψηλά εντός της κοιλότητας.

Πιθανόν η ωρολογιακά περιστρεφόμενη δίνη που σχηματίζεται εντός της κοιλότητας, απομακρύνει καλύτερα την θερμοκρασία για χαμηλά z στη θέση downward, ενώ στη θέση leeward αυτό ισχύει για z που βρίσκονται ψηλά.

Θέση xZ:

Παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα όπως και στη θέση xE. Έχουμε περίπου το ίδιο ποσοστό μείωσης του $\Delta\Theta/\Theta\%$ λόγω παρουσίας κυλίνδρου. Αρχίζει να μειώνεται το μέγιστο $\Delta\Theta/\Theta$ των προφίλ και για τις δυο περιπτώσεις (Χωρίς και Με κύλινδρο).

Η τύρβη διατηρείται σχεδόν σταθερή.

Θέση xH:

Συνεχίζεται η μείωση του $\Delta\Theta/\Theta$ των προφίλ θερμοκρασίας και τύρβης αυτής και για τις δυο περιπτώσεις.

Θέση xH':

Συνεχίζεται η μείωση του $\Delta\Theta/\Theta$ των προφίλ θερμοκρασίας και τύρβης αυτής και για τις δυο περιπτώσεις. Έχουμε φτάσει σε σημείο η επίδραση του κυλίνδρου να είναι αμελητέα. Σχεδόν έχουμε τα ίδια προφίλ $\Delta\Theta/\Theta$ και τύρβης.

Βέβαια η παρουσία του κυλίνδρου πάλι επενεργεί στην θερμοκρασιακή εξομάλυνση μειώνοντας το μέγιστο 0,15 σε 0,12, δηλαδή κατά 20%! Παρά που τα προφίλ δείχνουν ίδια, έχουμε λοιπόν μια σημαντική εξομάλυνση των θερμοκρασιών εξαιτίας του κυλίνδρου.

Όσον αφορά τα διαγράμματα P.S.D. παρατηρούμε ότι εμφανίζονται κυρίως οι παρακάτω συχνότητες:

$f = 5,85 \quad 7,81 \quad 9,76 \quad 11,72 \quad 13,67 \quad 15,63 \quad 19,53 \quad 21,48 \quad 23,40 \quad 27,34 \quad 31,25 \quad 33,20$
 $35,15 \quad 37,1 \quad 41 \quad 48,80$

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα P.S.D. από την μέτρηση των προφίλ ταχύτητας στη θέση x3 για την περίπτωση της πλάκας και της κοιλότητας, παρατηρούμε πως η συχνότητα 9,76Hz εμφανίζεται και στις δυο περιπτώσεις, πράγμα που υποδηλώνει την ταλάντωση του αισθητήρα.

Συνεπώς και σε αυτή την περίπτωση η συχνότητα 9,76Hz είναι η ταλάντωση του Cold-wire.

Οι συχνότητες 5,85 7,81 προφανώς οφείλονται σε ηλεκτρονικό "θόρυβο".

Η παρακάτω συχνότητες σε Hz

21,48 23,40 27,34 31,25 35,15 37,1 41 48,80

πρέπει να είναι συχνότητες που προκύπτουν από την κοιλότητα και οι οποίες ανάλογα με την θέση που γίνεται η μέτρηση έχουν μεγαλύτερη ένταση ή μικρότερη.

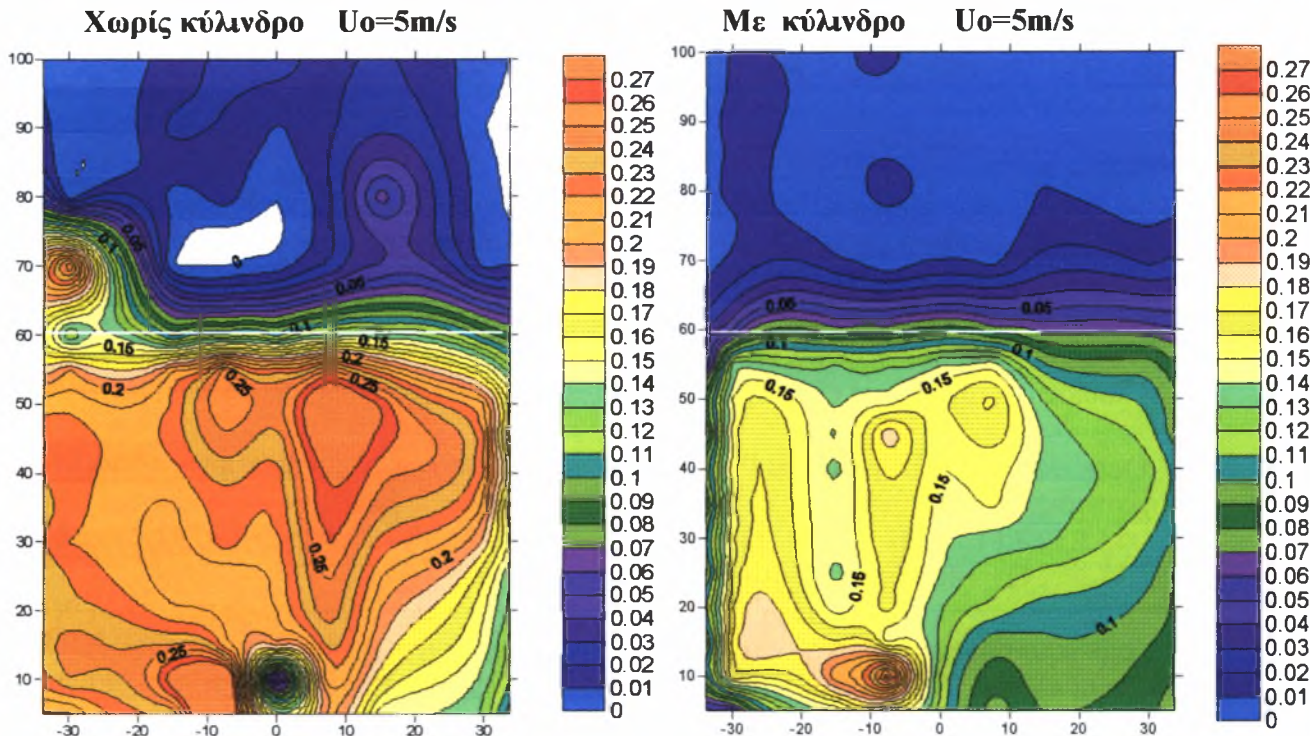
Αξιοσημείωτο είναι πάντως ότι η χαρακτηριστική συχνότητα του κυλίνδρου $\approx 16,25\text{Hz}$ που αναμενόταν να παρατηρηθεί στις περιπτώσεις με κύλινδρο, δεν εμφανίζεται. Το μόνο που παρατηρούμε είναι ορισμένες σποραδικές εμφανίσεις των συχνοτήτων 13,67 15,63 19,53, που ίσως λέγαμε πως αυτές είναι εξαιτίας του κυλίνδρου, αν δεν εμφανίζονταν ταυτόχρονα και σε ορισμένες περιπτώσεις χωρίς κύλινδρο!!

5.2.2 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$ και $z/z_0 = f(\Theta_{RMS}/\Theta_0 \%)$ ισοϋψών των θερμοκρασιών (Contours)

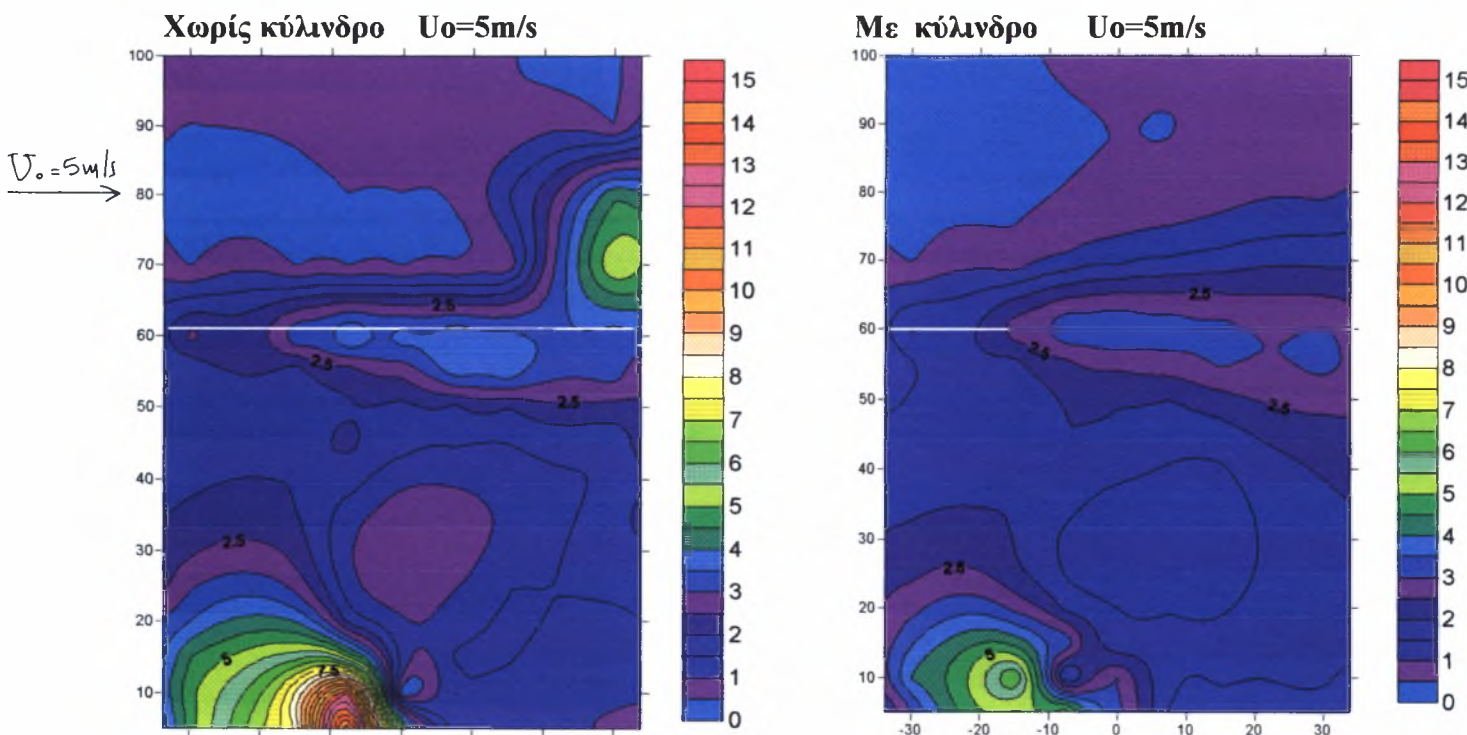
Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλάτης

A. Διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασιών $z/z_0 = f(\Delta\Theta/\Theta_0)$

Παρατήρηση: Το σύρμα της αντίστασης βρίσκεται κάτω χαμηλά στο $x=0$ $z=6$ και η οριζόντια λευκή γραμμή στο $z=60$ υποδηλώνει το χείλος της κοιλάτης.



B. Διαγράμματα ισοϋψών των αδιαστατοποιημένων διακυμάνσεων των θερμοκρασιών $z/z_0 = f(\Theta_{RMS}/\Theta_0 \%)$



Β. Μέση Αδιάστατη Χωρική Θερμοκρασία

Κοιλότητας

⇒ Χωρίς Κύλινδρο: 0,206

⇒ Με κύλινδρο: 0,124

Κοιλότητας και περιοχής πάνω από αυτή σε ύψος 40mm

⇒ Χωρίς Κύλινδρο: 0,164

⇒ Με κύλινδρο: 0,098

Γ. Μέση Αδιάστατη Διακύμανση Χωρικής Θερμοκρασίας

Κοιλότητας

⇒ Χωρίς Κύλινδρο: 2,444

⇒ Με κύλινδρο: 2,137

Κοιλότητας και περιοχής πάνω από αυτή σε ύψος 40mm

⇒ Χωρίς Κύλινδρο: 2,092

⇒ Με κύλινδρο: 1,817

Δ. Σχολιασμός:

Από τα διαγράμματα των αδιαστατοποιημένων ισοϋψών θερμοκρασίας και τύρβης αυτής, παρατηρούμε ότι:

1) Περίπτωση που δεν υπάρχει κύλινδρος στη ροή:

Παρατήρηση: Αυτό που βλέπουμε στην θέση που είναι τοποθετημένη η αντίσταση δεν πρέπει να μας παραπλανά. Λογικά εδώ πρέπει να έχουμε την μέγιστη θερμοκρασία (έντονο κόκκινο). Όμως όπως έχουμε προαναφέρει, δεν μετρήσαμε στο $z=9\text{mm}$ πάνω από τον πυθμένα της κοιλότητας. Έτσι το πρόγραμμα H/Y με το οποίο δημιουργήθηκαν οι ισοϋψείς εξέλαβε την μη ύπαρξη τιμής σε αυτή την περιοχή ως θερμοκρασία 0°C . Για αυτό τον λόγο βλέπουμε ισοϋψείς ανοιχτού χρώματος εκεί που περιμέναμε κόκκινο σκούρο.

Μέσα στην κοιλότητα

➤ Υπάρχουν έντονες θερμοκρασιακές κλίσεις, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της τύρβης.

➤ Υπάρχουν μεγάλες τιμές θερμοκρασίας

➤ Η κατάντη πλευρά (downward) της κοιλότητας παρουσιάζει μικρότερες θερμοκρασίες συγκρινόμενη με την ανάντη (leeward) πλευρά.

Χαμηλές θερμοκρασίες υπάρχουν στην περιοχή του ΧΕΙΛΟΥΣ και ιδιαίτερα στα ΧΑΜΗΛΑ z . Κάπως πιο έντονες θερμοκρασίες δημιουργούνται στην περιοχή της ΜΕΣΗΣ και κάπως μετατοπισμένες προς το χείλος. Παρατηρούμε πως κάτω χαμηλά στη γωνία της κατάντη πλευράς υπάρχουν αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες. Υπεύθυνη για αυτό είναι η ωρολογιακή φορά περιστροφής της δίνης εντός της κοιλότητας η οποία ψύχει την γωνία αυτή.

➤ Προχωρώντας προς το κέντρο της κοιλότητας, βλέπουμε τον σχηματισμό ενός κεντρικού πυρήνα υψηλής θερμοκρασίας μετατοπισμένο προς το πάνω και κατάντη μέρος της.

➤ Καθώς μετακινούμαστε σε πιο χαμηλά z πλησιάζοντας το σύρμα χρωμονικελίνης παρατηρούμε ελάττωση της θερμοκρασίας, μέχρι να φτάσουμε πολύ κοντά στο σύρμα της αντίστασης, όπου αρχίζει να αυξάνει και πάλι μέχρι να πάρει την μέγιστη τιμή της. Όμως η

περιοχή μέγιστης θερμοκρασίας δεν είναι συμμετρική ως προς το σύρμα, αλλά μετατοπισμένη προς την ανάντη πλευρά της κοιλότητας. Αυτό είναι απόρροια της ωρολογιακής φοράς περιστροφής της δίνης εντός της κοιλότητας η οποία συμπαράσχει την θερμοκρασία.

➤ Η θερμοκρασία που παρασύρεται από την δίνη, “πέφτει” πάνω στο ανάντη τοίχωμα της κοιλότητας με αποτέλεσμα να υπάρχει μια αύξηση της θερμοκρασίας του σε όλο το ύψος του, σε αντίθεση με το κατάντη τοίχωμα.

Εξω από την κοιλότητα

➤ Υπάρχουν και εδώ διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, λιγότερο έντονες, και κάπως πιο ομοιόμορφες.

➤ Μεγάλες κλίσεις θερμοκρασίας υπάρχουν στην διεπιφάνεια επαφής μεταξύ χείλους κοιλότητας και αέρα ελεύθερης ροής.

➤ Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περιοχή ακριβώς πάνω από το χείλος του ανάντη τοιχώματος της κοιλότητας όπου παρατηρούμε την ύπαρξη ενός ζεύγους πυρήνων διαφορετικής θερμοκρασιακής κατανομής. Ο πυρήνας με τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες είναι πάνω από τον πυρήνα με τις μικρότερες. Αξιοσημείωτο είναι πως παρά τη πολύ κοντινή τους απόσταση έχουν αρκετή θερμοκρασιακή διαφορά

➤ Η υπόλοιπη περιοχή πάνω από την κοιλότητα παρουσιάζει ελάχιστες θερμοκρασίες κεντρικά.

2) Περίπτωση που υπάρχει κύλινδρος στη ροή:

Μέσα στην κοιλότητα

➤ Στην περίπτωση αυτή οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις συνεχίζουν να υπάρχουν, αλλά έχει ελαττωθεί το εύρος τους με εξαίρεση την περιοχή του σύρματος της αντίστασης όπου εκεί έχουμε έντονη θερμοκρασιακή διακύμανση. Όμως αυτή η περιοχή γύρω από την αντίσταση είναι εξαιρετικά περιορισμένη συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση.

➤ Και πάλι το κατάντη τοίχωμα της κοιλότητας είναι το πιο “ψυχρό” → επιτυγχάνεται καλύτερος εξαερισμός, από κάθε άλλη περιοχή εντός της. Πάλι η κάτω χαμηλά στη γωνία της κατάντη πλευράς περιοχή έχει τις πιο χαμηλές θερμοκρασίες, η οποία έχει αυξηθεί τώρα σε έκταση φτάνοντας πολύ κοντά στην θέση της αντίστασης!

➤ Προχωρώντας προς το κέντρο της κοιλότητας τρεις κεντρικούς πυρήνες σχετικά υψηλότερων θερμοκρασιών, οι οποίοι είναι μετατοπισμένοι προς την ανάντη πλευρά της κοιλότητας. Ο μικρότερος βρίσκεται σχεδόν στο κέντρο και ψηλά, κοντά στο χείλος. Στη συνέχεια υπάρχει ένας ελλειψοειδής πυρήνας που ξεκινά από λίγο χαμηλότερο ύψος και καταλήγει πάνω από την περιοχή του σύρματος της αντίστασης. Ο τελευταίος πυρήνας είναι ο πιο πολύπλοκος, καθώς ξεκινά ως προέκταση της περιοχής της αντίστασης και εκτείνεται μέχρι ψηλά, 10mm κάτω από το χείλος, και είναι προσκολλημένος στο ανάντη τοίχωμα. Εκεί βλέπουμε τον σχηματισμό πολύ στενών περιοχών που διαφοροποιούνται θερμοκρασιακά, αλλά χωρίς μεγάλες διαφορές.

➤ Γενικά παρατηρείται μια “ψύξη” της κοιλότητας με την παρουσία του κυλίνδρου στην ελεύθερη ροή.

Εξω από την κοιλότητα

➤ Εξω από την κοιλότητα παρατηρούμε λιγότερο έντονες κλίσεις θερμοκρασίας από την προηγούμενη περίπτωση.

➤ Γενικά η θερμοκρασία είναι σχεδόν ομοιόμορφη εκτός από περιορισμένες περιοχές μικρής έκτασης με κάπως πιο ψυχρή θερμοκρασία.

Συμπέρασμα

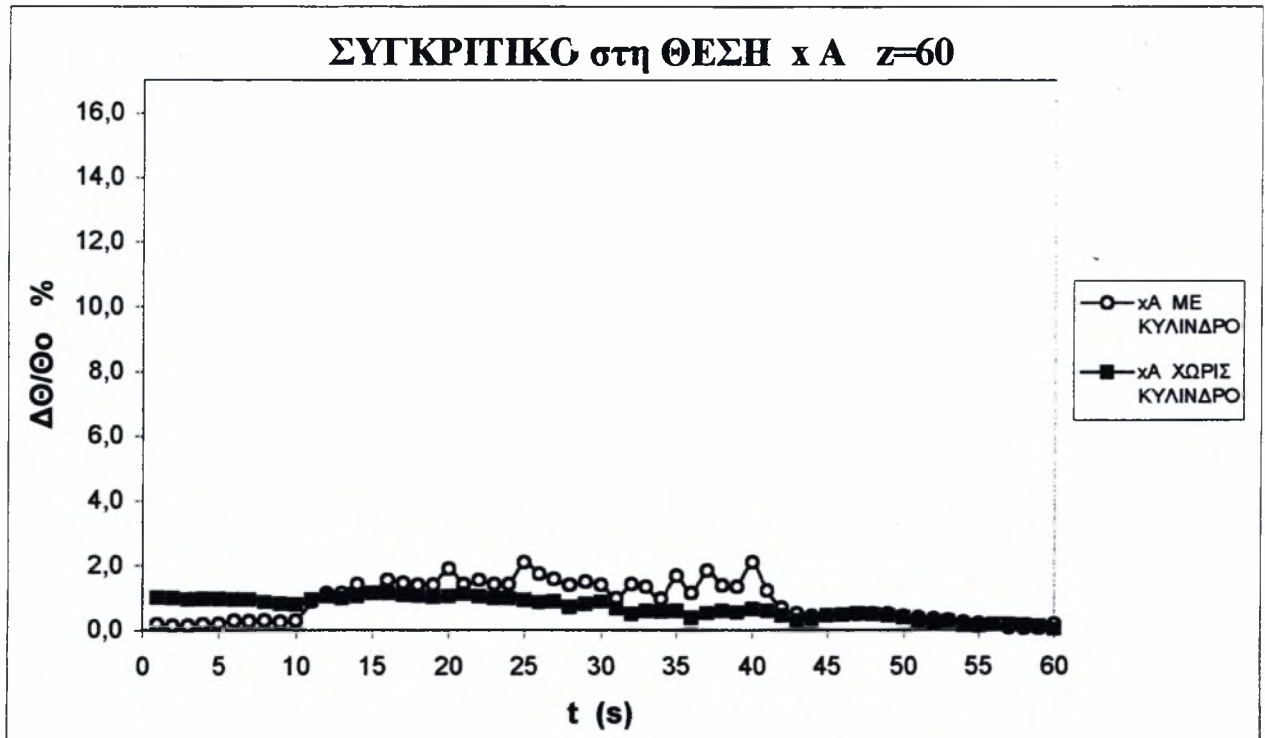
Υπεύθυνη για την διαφορά των θερμοκρασιακών κατανομών στις δυο παραπάνω περιπτώσεις, είναι η ταυτόχρονη επίδραση των διαταραχών που εισάγει ο κύλινδρος μέσα στην κοιλότητα και η ωρολογιακή φορά περιστροφής της δίνης εντός αυτής.

Ο συνδυασμός των παραπάνω προκαλεί ισχυρή ανάμειξη, η οποία ψύχει την κοιλότητα περισσότερο και πιο ομοιόμορφα σε όλο το πλάτος της. Ενώ στην περίπτωση χωρίς κύλινδρο υπήρχε μόνη της η ωρολογιακά ανακυκλοφορούσα δίνη, η οποία έψυχε μόνο τις περιοχές από τις οποίες περνούσε η τροχιά της.

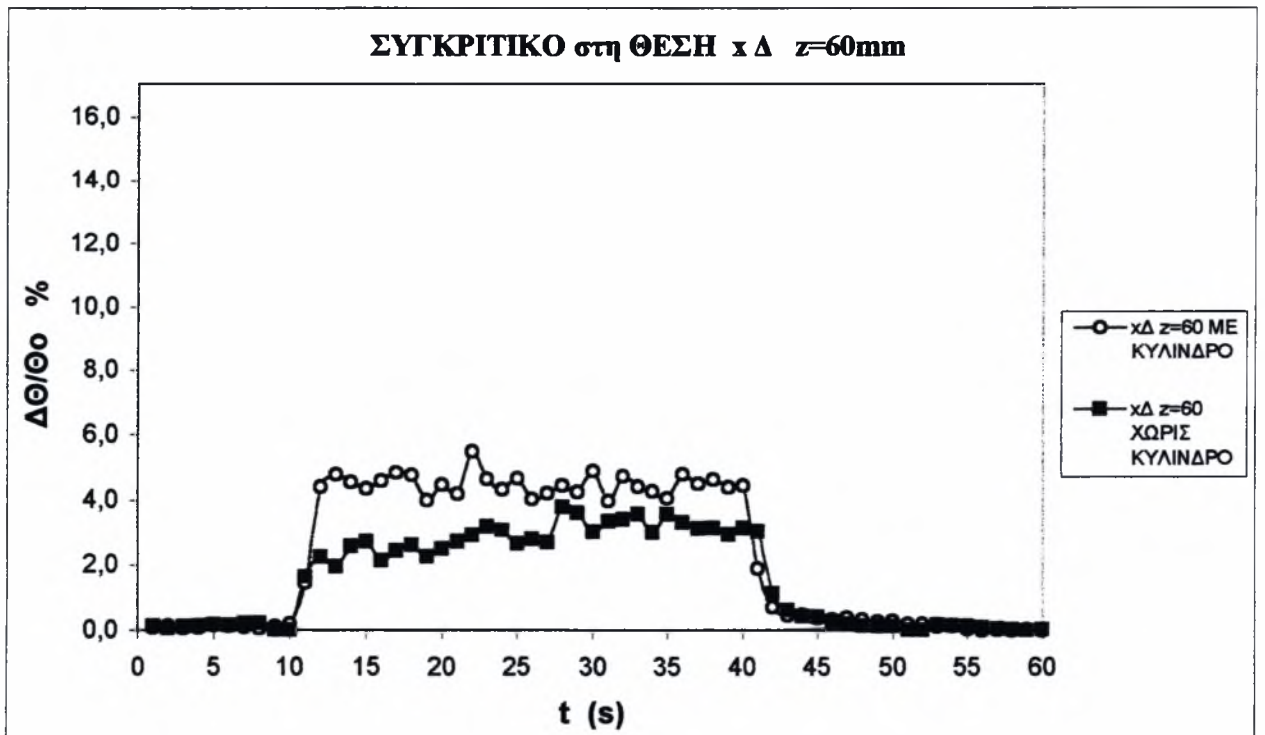
5.2.3

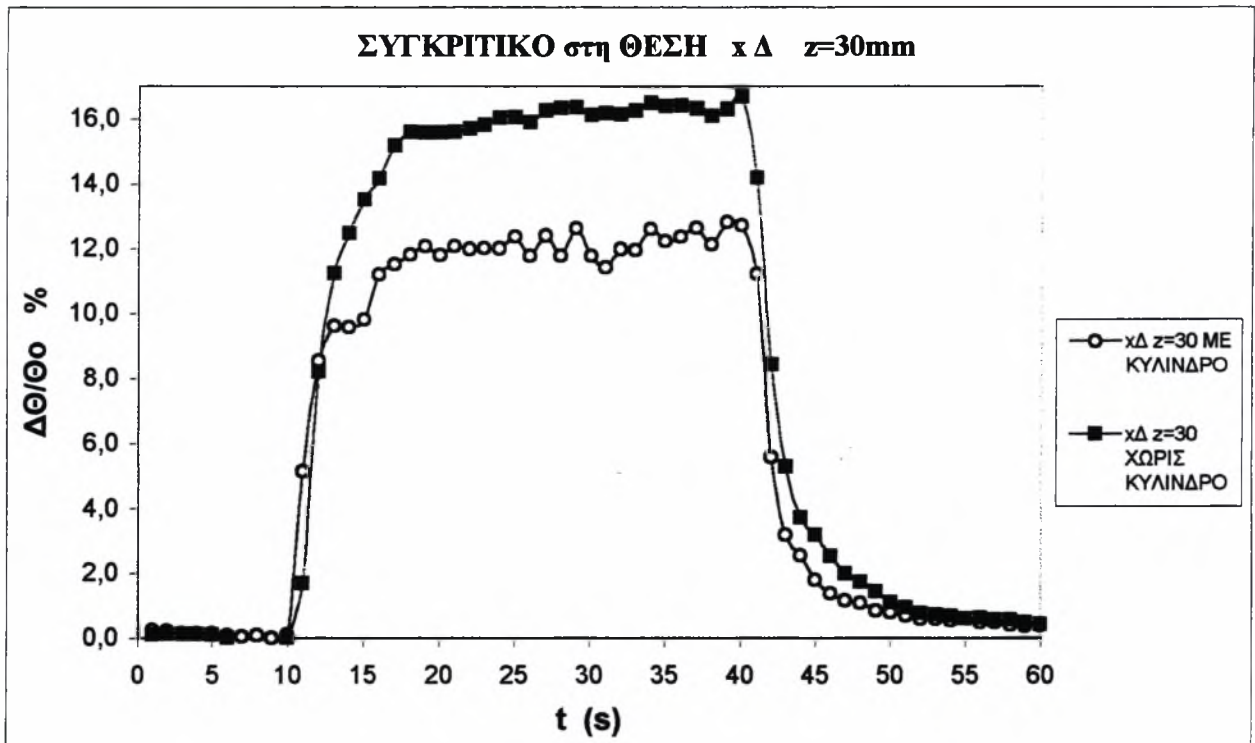
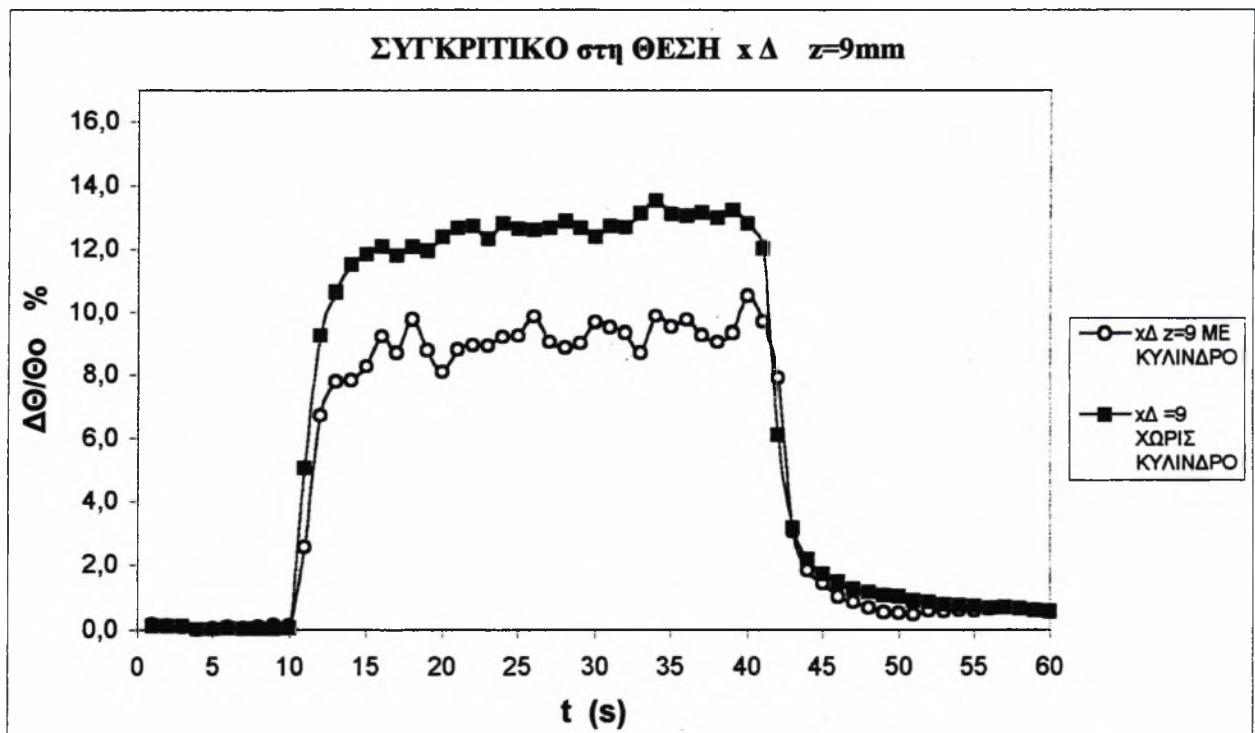
Σύγκριση των κατανομών θερμοκρασίας εντός κοιλότητας στα
ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ TRANSIENT (Παροδικής απομάκρυνσης θερμότητας)

Α. Θέση x_A - Χωρίς και Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$

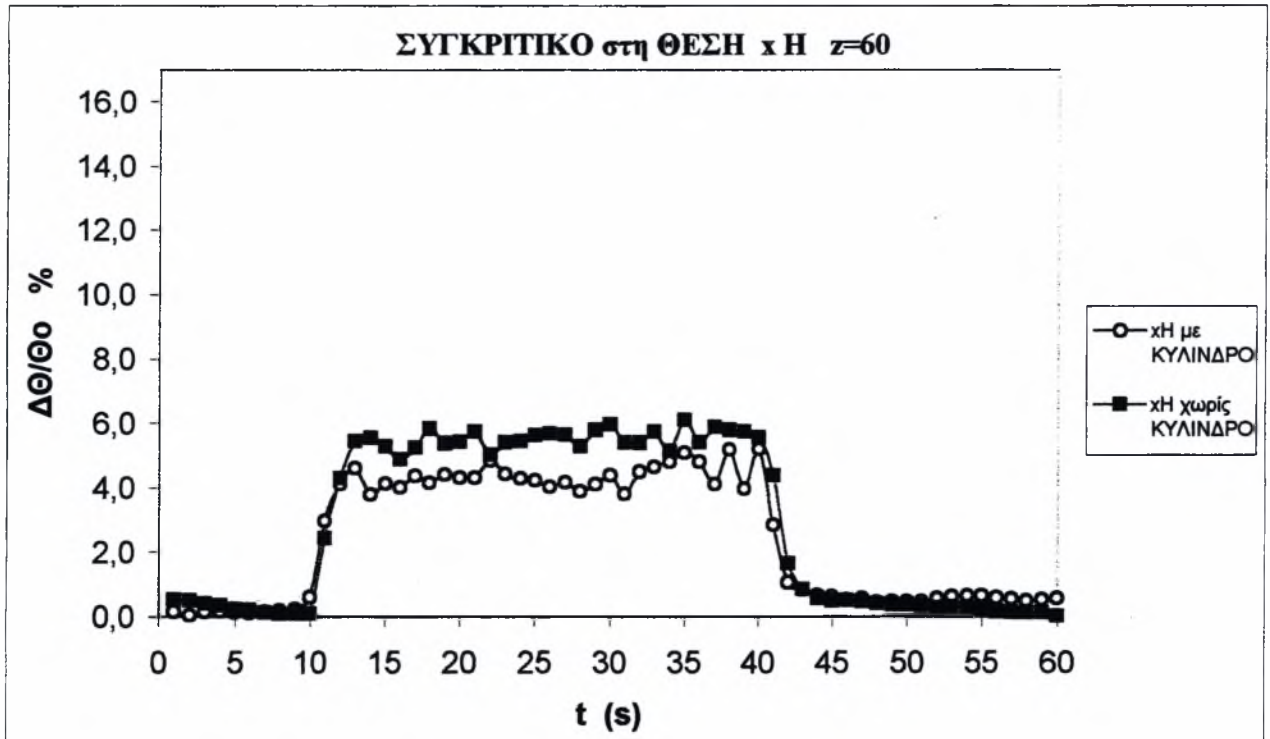


Β. Θέση x_Δ - Χωρίς και Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$



Γ. Θέση $x \Delta$ - Χωρίς και Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$ Δ. Θέση $x \Delta$ - Χωρίς και Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$ 

Ε. Θέση x H - Χωρίς και Με κύλινδρο - $U_0=5\text{m/s}$



Σχολιασμός:

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συναρτήσεις προσέγγισης των ρυθμών ανόδου και καθόδου της αδιάστατης θερμοκρασιακής διαφοράς από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($\Delta\Theta/\Theta_0$) για τις παραπάνω περιπτώσεις:

Θέση x A Με κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 0,256x - 2,1087$ $R^2 = 0,8794$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -0,4084x + 18,133$ $R^2 = 0,8592$

Θέση x A Χωρίς κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 0,057x + 0,2759$ $R^2 = 0,7942$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -0,1045x + 3,9345$ $R^2 = 0,6484$

Παρατηρούμε πως η παρουσία του κυλίνδρου αυξάνει τους ρυθμούς ανόδου και πτώσης της θερμοκρασίας, πιθανότατα λόγω της μεγαλύτερης αναμειξιμότητας που προκαλούν οι διαταραχές του μέσα στην κοιλότητα. Άρα ο "καθαρισμός" της κοιλότητας με την παρουσία του κυλίνδρου γίνεται αποδοτικότερος.

Επίσης με την παρουσία του κυλίνδρου παρατηρούμε ελαφρώς πιο μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Θέση x Δ z=60 Με κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 1,6654x - 16,448$ $R^2 = 0,9275$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -0,9362x + 40,917$ $R^2 = 0,7633$

Θέση $x \Delta z=60$ Χωρίς κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 1,1096x - 10,896$ $R^2 = 0,9321$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -0,3675x + 17,05$ $R^2 = 0,6418$

Πάλι παρατηρούμε αύξηση των ρυθμών ανόδου και καθόδου με την παρουσία του κυλίνδρου. Όμως τώρα δεν έχουμε το ίδιο ποσοστό αύξησης. Έχουμε μικρότερο.

Επίσης με την παρουσία του κυλίνδρου παρατηρούμε πιο μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Θέση $x \Delta z=30$ Με κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 3,1895x - 30,824$ $R^2 = 0,9281$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -3,4266x + 150,38$ $R^2 = 0,9528$

Θέση $x \Delta z=30$ Χωρίς κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 1,9498x - 17,061$ $R^2 = 0,8541$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -3,4855x + 156,05$ $R^2 = 0,9645$

Εδώ ενώ η παρουσία του κυλίνδρου αυξάνει τον βαθμό ανόδου, ο βαθμός καθόδου παραμένει ανεπηρέαστος και σχετικά μεγάλος και για τις δυο περιπτώσεις.

Επίσης χωρίς την παρουσία του κυλίνδρου παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Θέση $x \Delta z=9$ Με κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 2,7205x - 26,984$ $R^2 = 0,9563$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -2,8481x + 126,66$ $R^2 = 0,9448$

Θέση $x \Delta z=9$ Χωρίς κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 2,2737x - 20,368$ $R^2 = 0,8441$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -3,2456x + 143,8$ $R^2 = 0,8957$

Εδώ η παρουσία του κυλίνδρου έχει αμελητέα αύξηση στο βαθμό ανόδου. Αντιθέτως ο βαθμός καθόδου είναι αρκετά μεγαλύτερος στην περίπτωση χωρίς κύλινδρο.

Επίσης χωρίς την παρουσία του κυλίνδρου παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Θέση $x H z=60$ Με κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 1,2299x - 11,027$ $R^2 = 0,9386$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -2,0767x + 88,18$ $R^2 = 0,9937$

Θέση $x H z=60$ Χωρίς κύλινδρο

Ρυθμός ανόδου θερμοκρασίας: $y = 1,7986x - 17,623$ $R^2 = 0,9795$

Ρυθμός καθόδου θερμοκρασίας: $y = -1,6911x + 73,289$ $R^2 = 0,9571$

Εδώ ο ρυθμός ανόδου είναι μεγαλύτερος και ο βαθμός καθόδου μικρότερος χωρίς την ύπαρξη του κυλίνδρου.

Επίσης χωρίς την παρουσία του κυλίνδρου παρατηρούμε πιο μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Γενικά μπορούμε να πούμε πως η επίδραση του κυλίνδρου γίνεται περισσότερο αισθητή στην κατάντη πλευρά της κοιλότητας και στο μέσον της και ιδίως σε χαμηλά z . Και αυτό λόγω της ωρολογιακά περιστρεφόμενης δίνης που δημιουργείται μέσα στην κοιλότητα και είναι άμεσα επηρεαζόμενη από την συστοιχία δινών Von-Karman που εκρέει από τον κύλινδρο και εισέρχεται μέσα στην κοιλότητα.

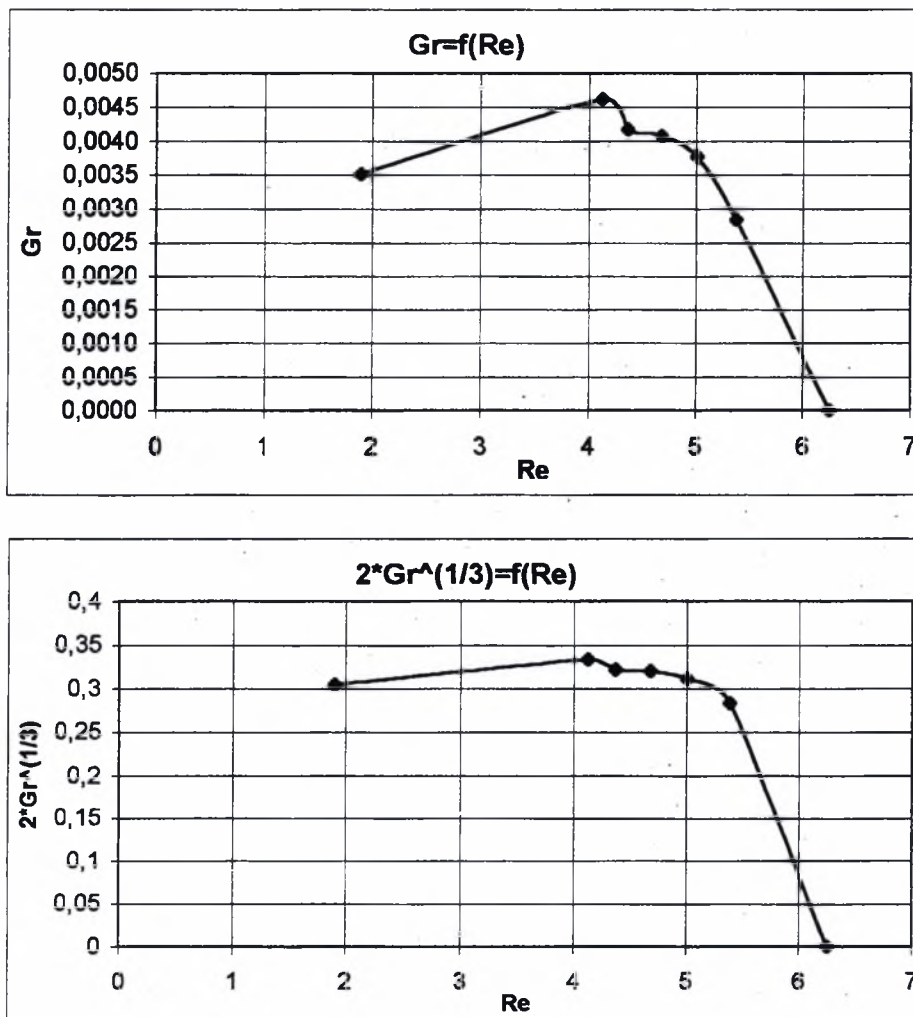
Όσον αφορά όμως τους ρυθμούς εισαγωγής-απομάκρυνσης ενός ρύπου ή θερμότητας μέσα από την κοιλότητα, η επίδραση του κυλίνδρου αυξάνει την απόδοση στο ανάντη τοίχωμα της κοιλότητας.

5.2.4

Μέτρηση της μεταβολής του αριθμού Grashof συναρτήσει του αριθμού Reynolds, $Gr=f(Re)$

$$Gr = \frac{g * \alpha * L^3 * \theta}{\nu^2}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της μεταβολής του αριθμού Grashof συναρτήσει του αριθμού Reynolds βάσει της διαμέτρου του σύρματος της αντίστασης, κοντά στη περιοχή του σύρματος της αντίστασης.



Δ 4.11 Διακύμανση του αριθμού Grashof συναρτήσει του αριθμού Reynolds του σύρματος της αντίστασης.

Αν προσεγγίσουμε την καμπύλη του διαγράμματος $\{2*Gr^{1/3}=f(Re)\}$ με πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού προκύπτει η συνάρτηση:

$$f(x) = -0,0144x^6 + 0,3964x^5 - 4,4712x^4 + 26,397x^3 - 85,499x^2 + 142,75x - 94,189$$

$$R^2 = 1 \text{ (με τέλεια προσέγγιση)}$$

Σχολιασμός:

Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω διαγράμματα (Δ 4.11) ο αριθμός Gr αρχικά αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και στη συνέχεια ελαττώνεται. Συνεπώς αρχικά οι αδρανειακές δυνάμεις παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση της ελεύθερης ροής, ενώ πηγαίνοντας σε υψηλότερες θερμοκρασίες επικρατούν οι ιξώδεις δυνάμεις.

Αλλά επειδή, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά από το πρώτο διάγραμμα, ο αριθμός Gr είναι γενικά μικρός, τα φαινόμενα των αδρανειακών δυνάμεων είναι αμελητέα, ιδίως στις χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες.

Εάν ισχύει: $Re > 2 * Gr^{1/3}$, τότε η φυσική συναγωγή είναι αμελητέα. Όπως φαίνεται όμως από το παραπάνω διάγραμμα $\{2 * Gr^{1/3} = f(Re)\}$ για κάθε σημείο μέτρησης, ο αριθμός Re (τετμημένη) είναι αρκετά μεγαλύτερος από την αντίστοιχη τεταγμένη ($2 * Gr^{1/3}$).

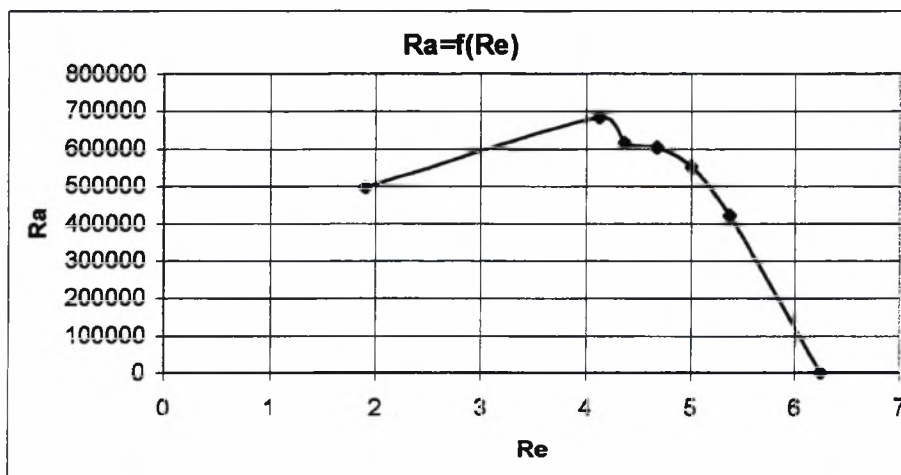
Συνεπώς η φυσική-ελεύθερη συναγωγή από το σύρμα χρωμονικελίνης της αντίστασης δεν είναι τόσο σημαντική σχετικά με την εξαναγκασμένη συναγωγή που προκαλείται από τον στροβιλισμό που δημιουργεί μέσα στην κοιλότητα η ελεύθερη ροή.

5.2.5

Μέτρηση της μεταβολής του αριθμού Rayleigh συναρτήσει του αριθμού Reynolds, $Ra=f(Re)$

$$Ra = Gr * Pr = \frac{g * a * \Theta * L^3}{\nu * \kappa}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της μεταβολής του αριθμού Rayleigh συναρτήσει του αριθμού Reynolds βάσει της διαμέτρου του σύρματος της αντίστασης, κοντά στη περιοχή του σύρματος της αντίστασης.



Διάγραμμα 4.12 Διακύμανση του αριθμού Rayleigh συναρτήσει του αριθμού Reynolds του σύρματος της αντίστασης, κοντά στη περιοχή του σύρματος της αντίστασης.

Αν προσεγγίσουμε την καμπύλη του διαγράμματος 4.12 με πολώνυμο 6^{ου} βαθμού προκύπτει η συνάρτηση:

$$f(x) = -96130x^6 + 3E+06x^5 - 3E+07x^4 + 2E+08x^3 - 6E+08x^2 + 1E+09x - 7E+08$$

$$R^2 = 1 \text{ (με τέλεια προσέγγιση)}$$

Σχολιασμός:

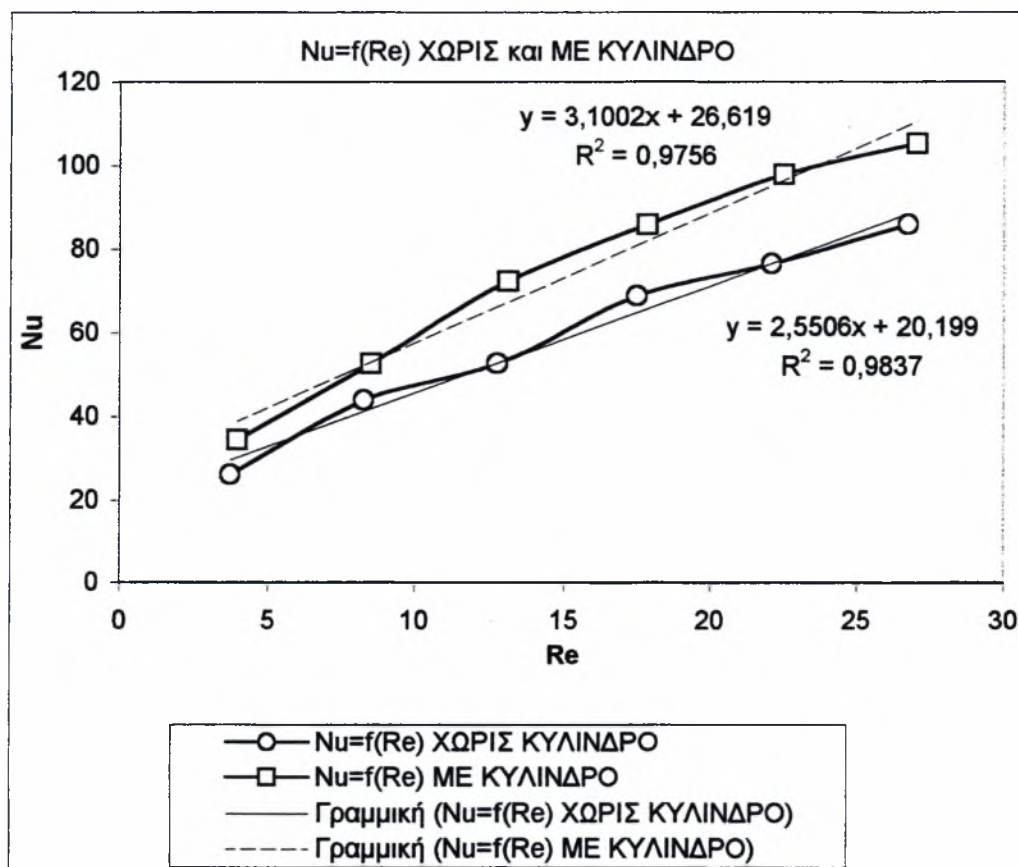
Και εδώ παρατηρούμε πως η μορφή της καμπύλης του αριθμού Ra είναι ανάλογη με του αριθμού Gr . Ο αριθμός Ra αρχικά αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και στη συνέχεια ελαττώνεται. Παρόλα αυτά δεν ξεπερνά την τιμή του 10^6 η οποία θα μας έδινε ένδειξη για τυρβώδη ροή έχουμε μέσα στην κοιλότητα. Έτσι φαίνεται πως από τις ανωστικές δυνάμεις λόγω διαφοράς πυκνότητας-θερμοκρασίας δεν παράγεται τυρβώδης ροή. Άρα αν δεν είχαμε την ελεύθερη ροή αέρα εξωτερικά της κοιλότητας, με την θέρμανση του σύρματος της αντίστασης δεν θα είχαμε τυρβώδη ροή μέσα στη κοιλότητα.

Όμως στην περίπτωση μας έχουμε τυρβώδη ροή μέσα στην κοιλότητα λόγω της εξωτερικής ροής που εφαρμόζουμε.

5.2.6

Μέτρηση της μεταβολής του αριθμού Nusselt συναρτήσει του αριθμού Reynolds, $Nu=f(Re)$

Το σύρμα της αντίστασης χρωμονικελίνης τροφοδοτούνταν με τάση (DC) 28Volts και διαρρέονταν από ρεύμα έντασης 0,45A. Συνεπώς η καταναλισκόμενη ισχύς πάνω στην αντίσταση που μετατρέπονταν σε θερμότητα, ήταν: $P=U \cdot I=28 \cdot 0,45=12,6$ Watt .



Η θερμότητα αυτή απάγονταν με συναγωγή, σύμφωνα με το τύπο: $Q=h_a \cdot (2\pi l) \cdot \Theta$ όπου:

r = η διάμετρος του σύρματος της αντίστασης χρωμονικελίνης (0,00005m)

l = το μήκος του σύρματος της αντίστασης χρωμονικελίνης (=0,44m)

Θ = η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας του σύρματος και θερμοκρασίας αναφοράς (περιβάλλοντος).

Η καταναλισκόμενη ισχύς πάνω στην αντίσταση ισούται με την θερμότητα που απάγονταν με συναγωγή, οπότε:

$$U \cdot I = h_a \cdot (2\pi l) \cdot \Theta \rightarrow h_a = (U \cdot I) / [(2\pi l) \cdot \Theta] \rightarrow h_a = 91199 / \Theta \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

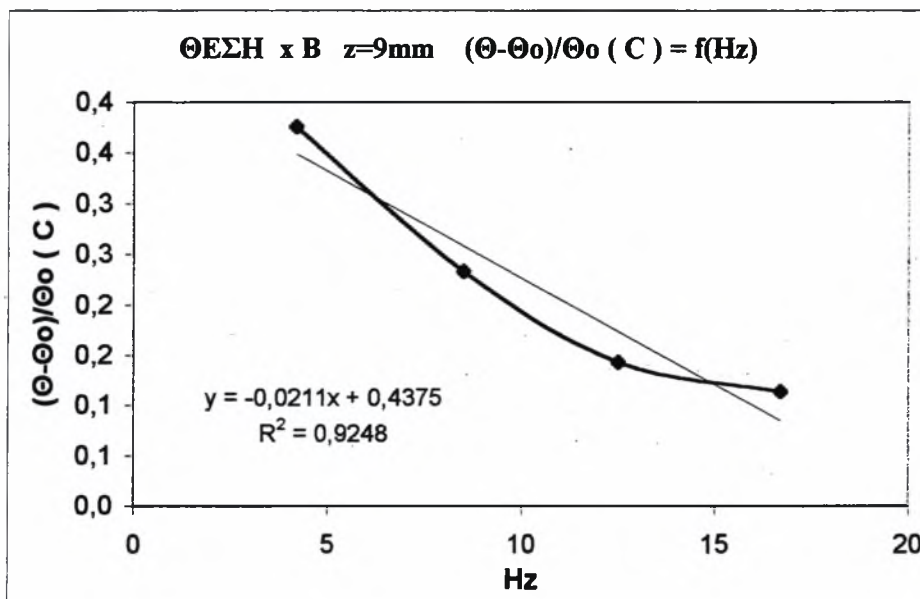
Σχολιασμός:

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η ευθεία $Nu=f(Re)$ αντιστοιχεί σε μεγαλύτερους αριθμούς Nu στην περίπτωση με κύλινδρο. Κάτι που ήταν αναμενόμενο. Καθώς ο κύλινδρος, με την συστοιχία δινών Von-Karman που εκρέει στον απόρρο του, εισάγει διαταραχές μέσα στην κοιλότητα, με αποτέλεσμα να έχουμε πιο έντονα φαινόμενα συναγωγής από την περίπτωση χωρίς κύλινδρο.

Πάντως είναι αξιοσημείωτο ότι η κλίση των ευθειών $Nu=f(Re)$ και για τις δυο περιπτώσεις είναι σχεδόν η ίδια. Πράγμα που δείχνει πως παρά του ότι έχουμε μεγαλύτερη αποβολή θερμότητας με την παρουσία του κυλίνδρου, οι ρυθμοί αποβολής θερμότητας και για τις δυο περιπτώσεις είναι ανάλογοι.

5.2.7

Μέτρηση της μεταβολής της αδιάστατης θερμοκρασίας στο σημείο xB z=9mm από το πυθμένα της κοιλότητας συναρτήσει των Hz του Inverter $\Delta\Theta/\Theta_0=f(Hz)$



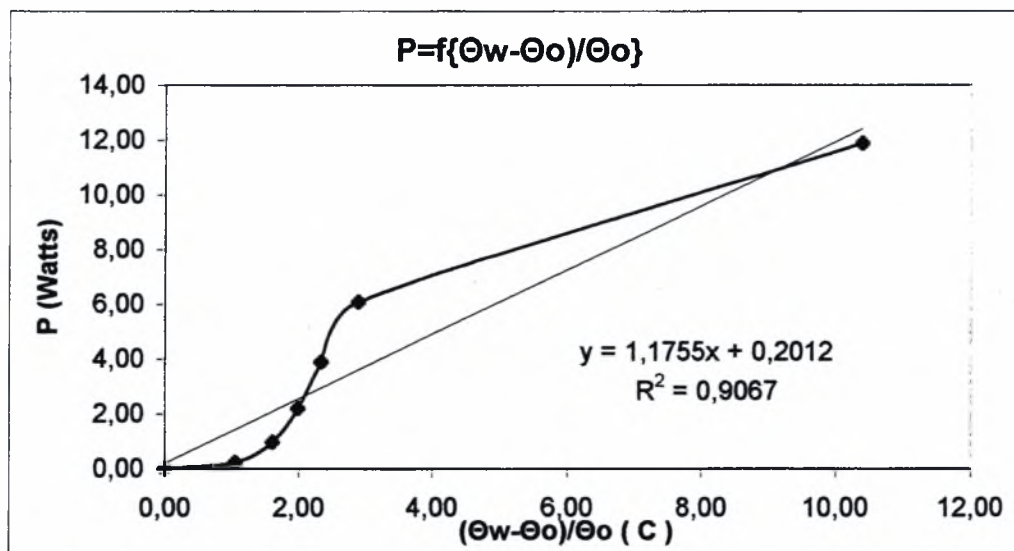
Σχολιασμός:

Στο πείραμα που αφορά το παραπάνω διάγραμμα μετρήσαμε με το Cold-wire την θερμοκρασία στο σημείο εντός της κοιλότητας στη θέση xB και με ύψος z=9mm από τον πυθμένα της. Το σημείο αυτό απέχει 14mm από το σύρμα της αντίστασης χρωμονικελίνης, η οποία κατά την διάρκεια του πειράματος τροφοδοτούνταν με DC ρεύμα τάσεως 28V και εντάσεως 0,45A.

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της συχνότητας του Inverter \rightarrow αύξηση της ταχύτητας ελεύθερης ροής U_0 , έχουμε και σχεδόν γραμμική μείωση της θερμοκρασίας με καλή προσέγγιση από την συνάρτηση: $f(x) = -0,0211x + 0,4375$ με $R^2 = 0,9248$

5.2.8

Μέτρηση της μεταβολής της εφαρμοζόμενης Ισχύος P (W) του Μετατροπέα-Μετασχηματιστή του ρεύματος από AC σε DC, συναρτήσει της αδιάστατης θερμοκρασίας του σύρματος της αντίστασης, $P=f\{(\Theta_w-\Theta_o)/\Theta_o\}$

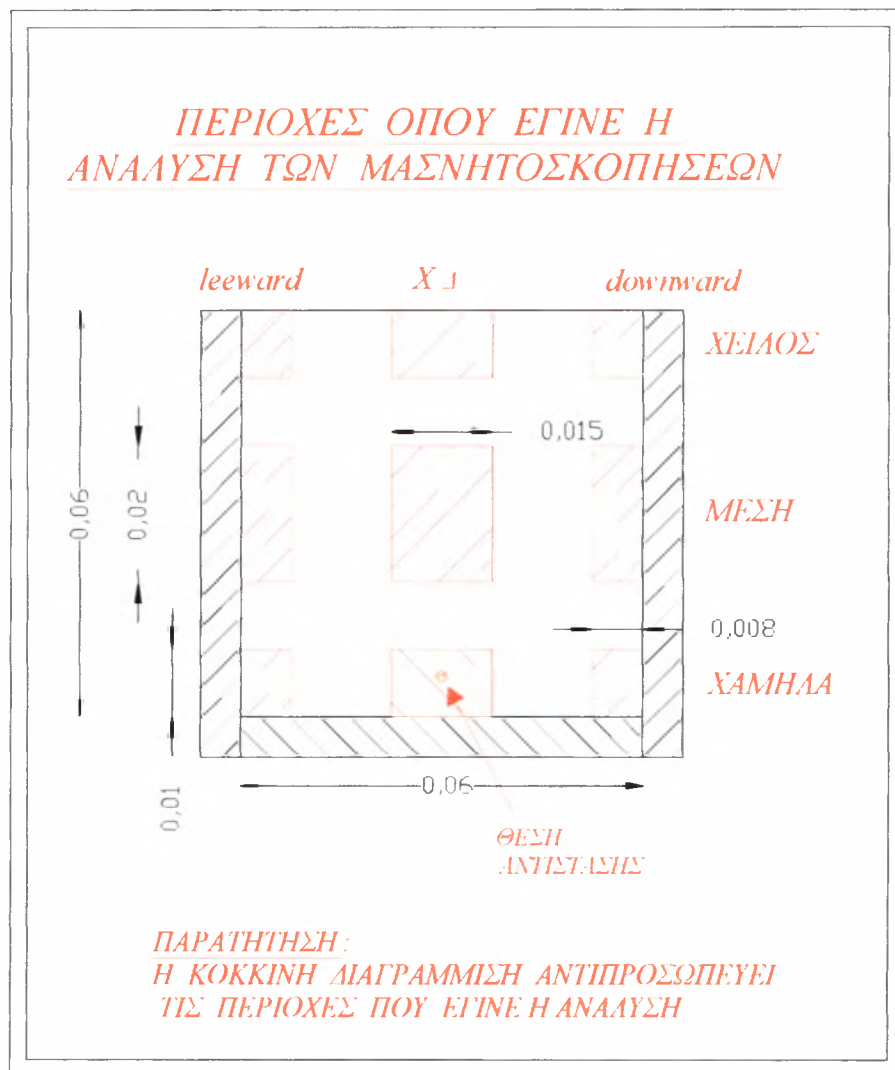


Σχολιασμός:

Στο πείραμα που αντιστοιχεί στο παραπάνω διάγραμμα η αντίσταση χρωμονικελίνης τροφοδοτούνταν με DC ρεύμα μεταβαλλόμενης τάσεως (V) και εντάσεως (A) και με θερμοστοιχείο μετρούνταν η θερμοκρασία του σύρματός της.

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της εφαρμοζόμενης Ισχύος στο σύρμα, έχουμε και σχεδόν γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας με καλή προσέγγιση από την συνάρτηση: $f(x)=1,1755x+0,2012$ με $R^2=0,9067$

5.3 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

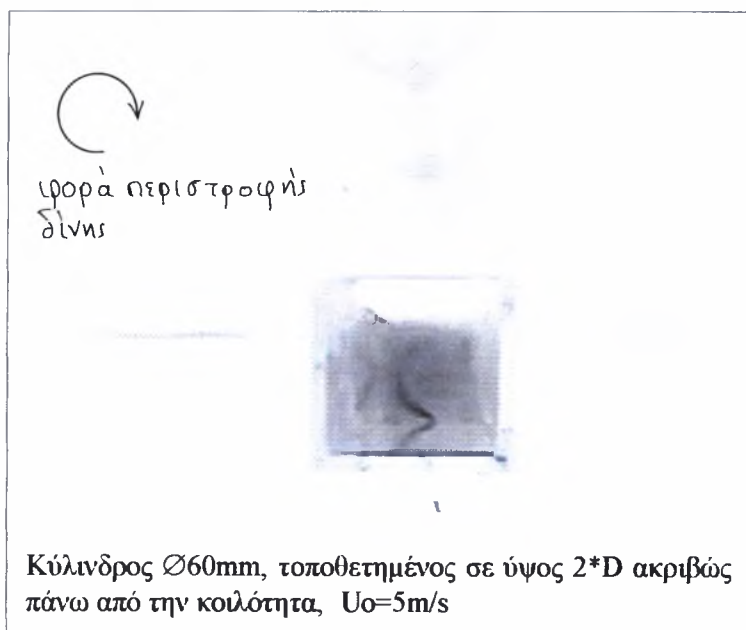
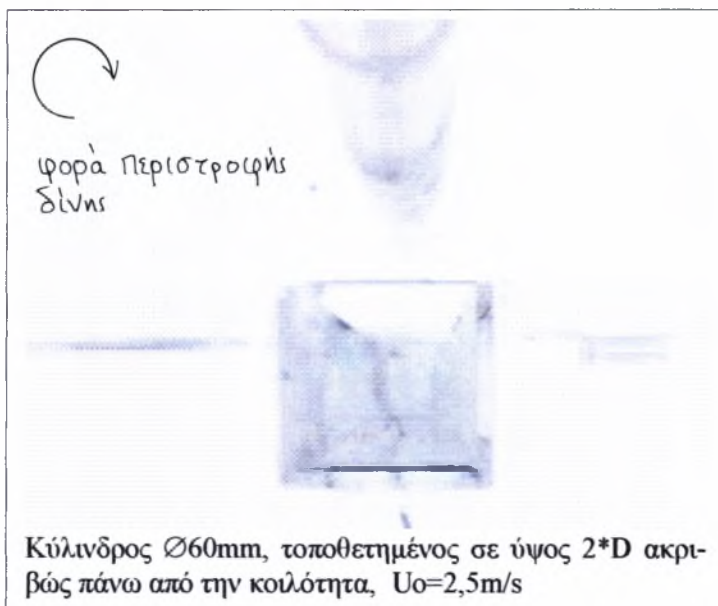


Σχ. 5.17 Θέσεις όπου αναλύθηκαν οι μαγνητοσκοπήσεις της οπτικοποίησης με καπνό, μέσα στην μεγάλη κοιλότητα.

5.3.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ σε ύψος $2*D$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα για δυο διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής: $U_0=2,5\text{m/s}$ και $U_0=5\text{m/s}$

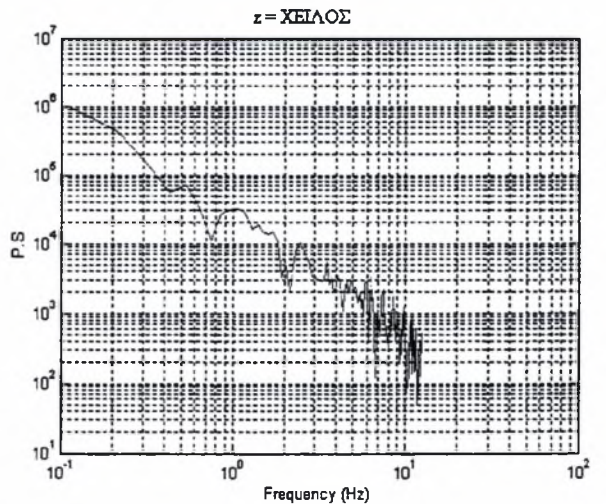
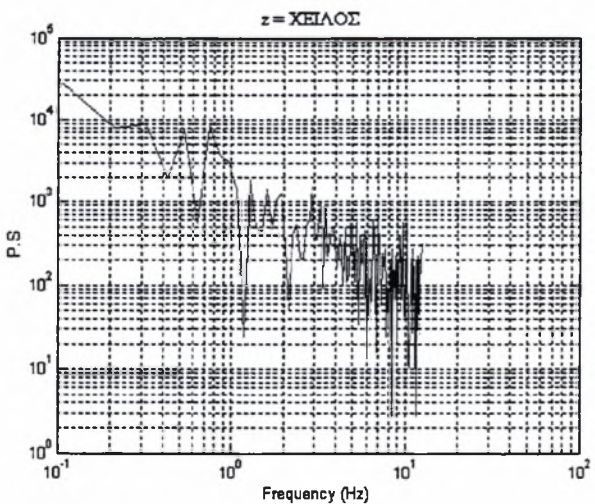
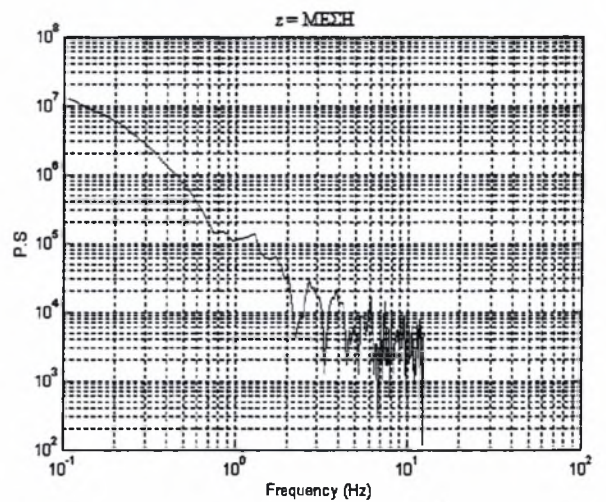
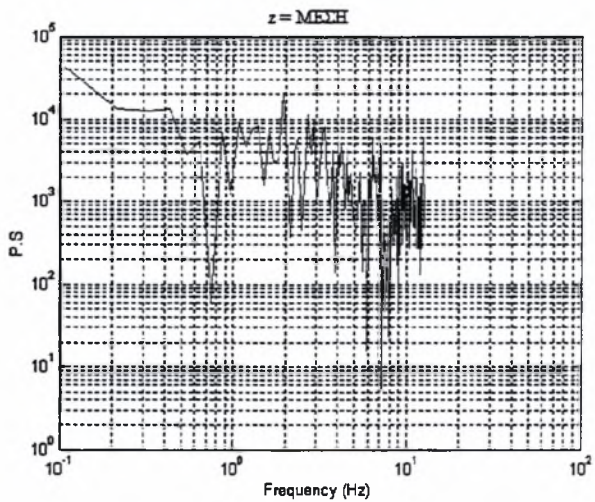
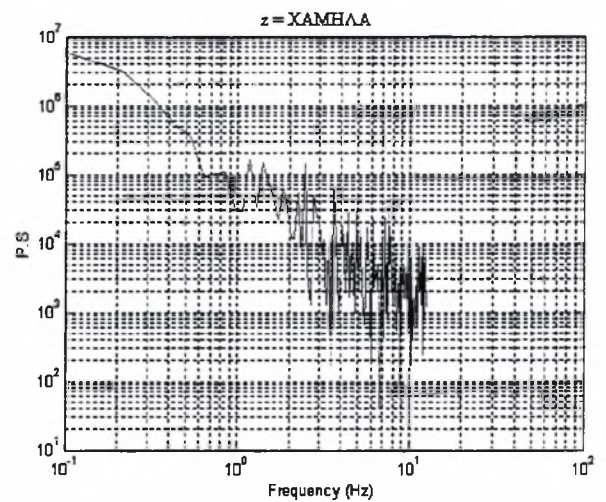
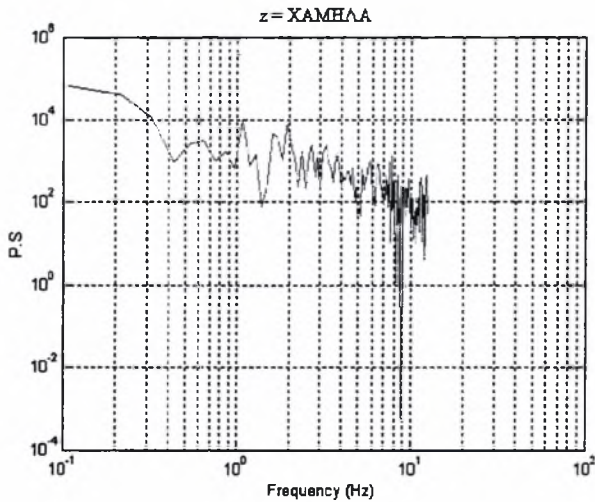
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ



**Θέση leeward - Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ σε ύψος $2 \cdot D$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D**

$U_0=2,5\text{m/s}$

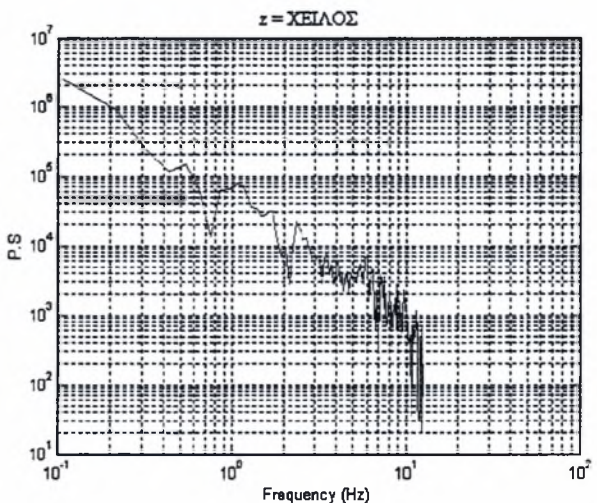
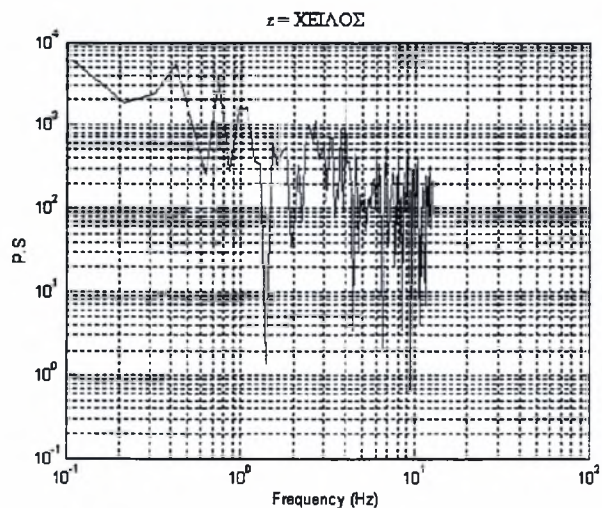
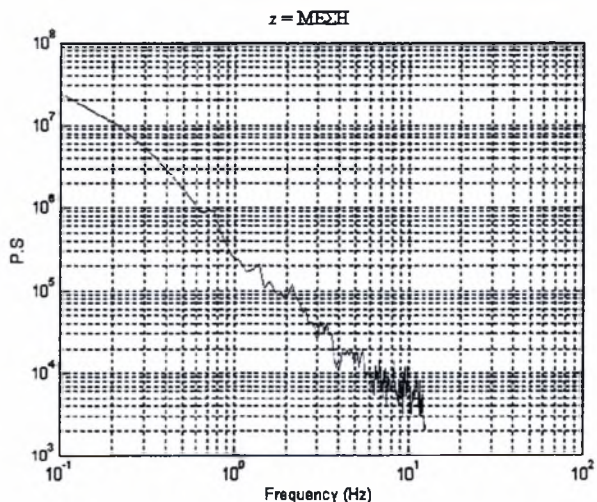
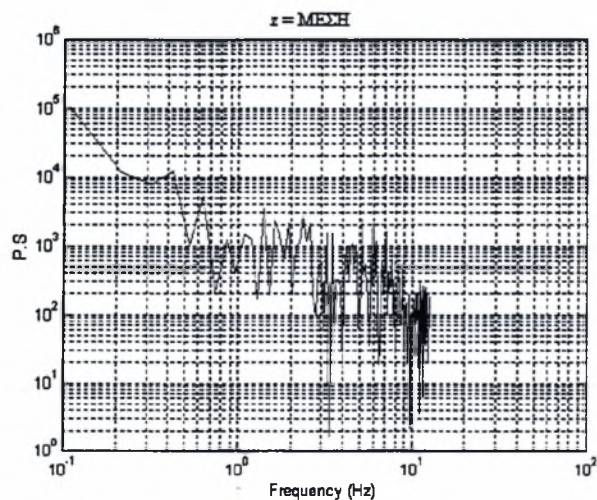
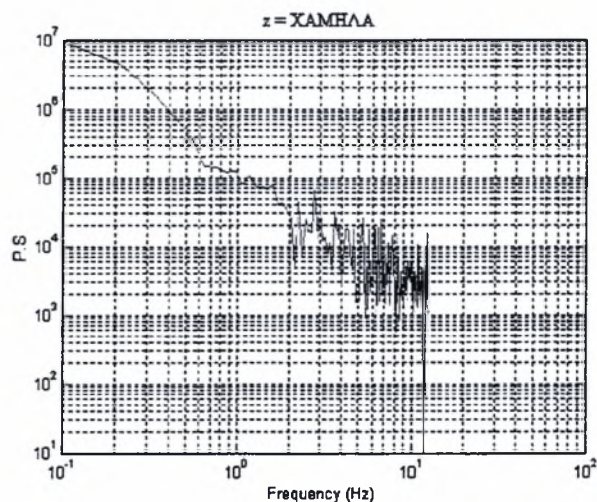
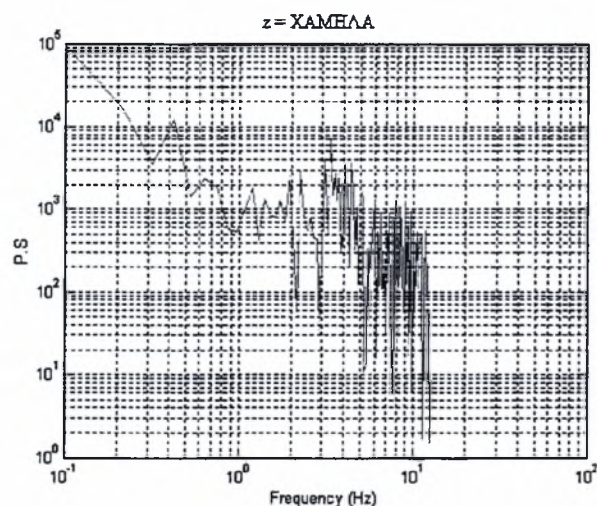
$U_0=5\text{m/s}$



Θέση x Δ - Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ σε ύψος $2 \cdot D$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D.

$U_0=2,5\text{m/s}$

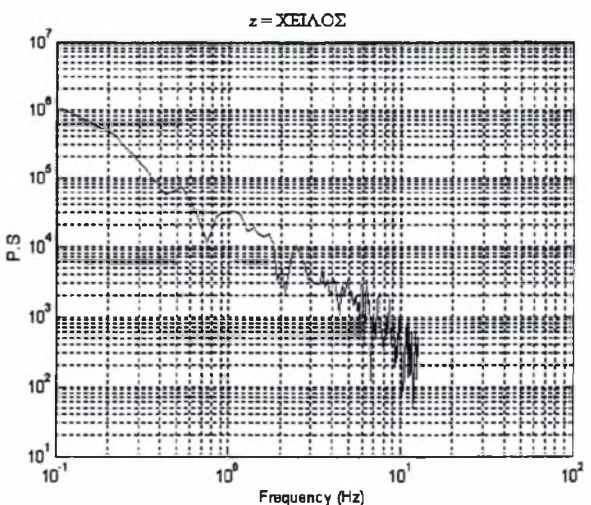
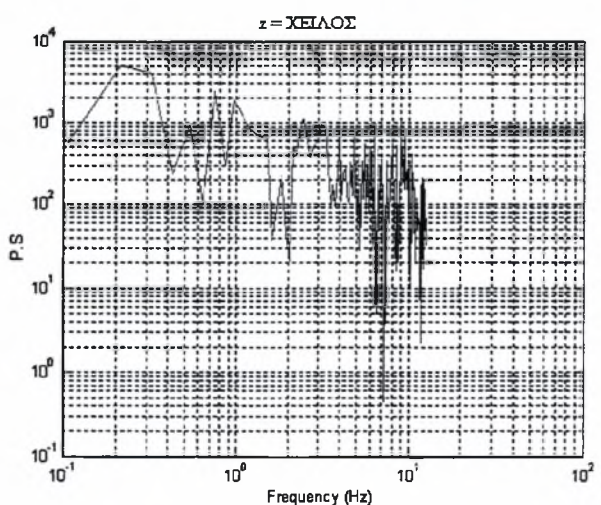
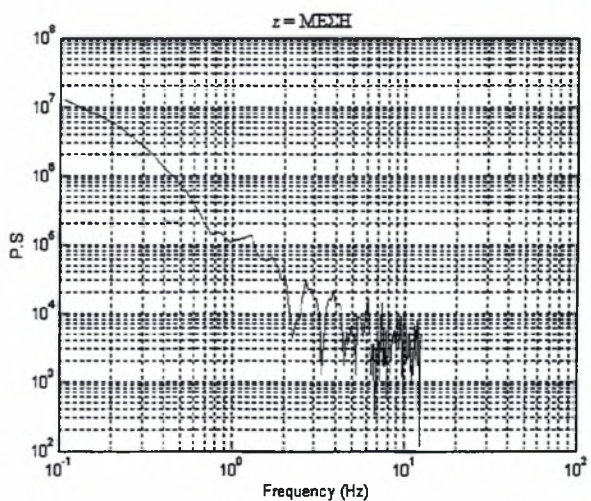
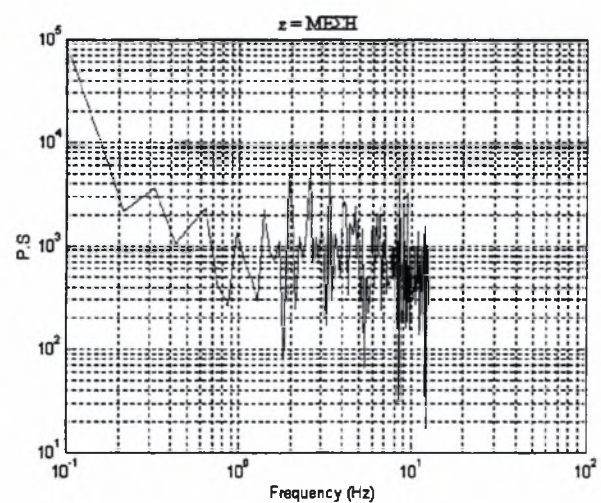
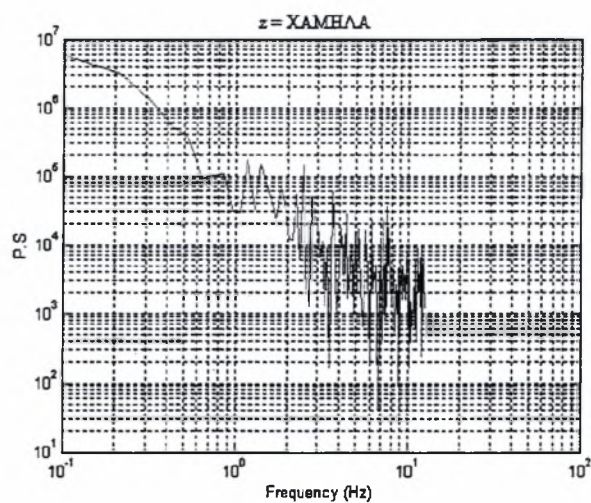
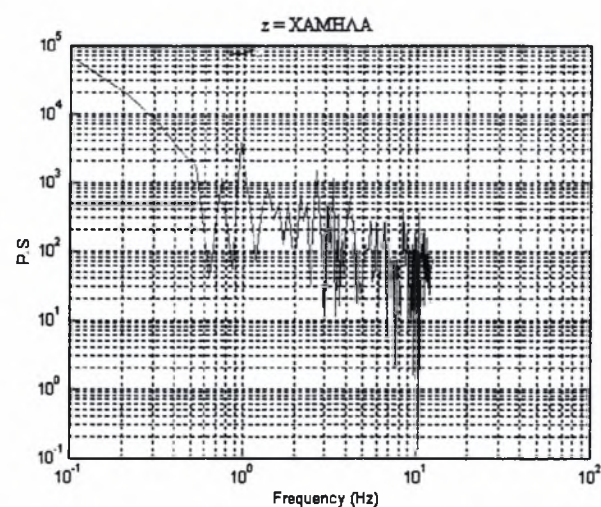
$U_0=5\text{m/s}$



Θέση downward - Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ σε ύψος $2 \cdot D$ ακριβώς πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D.

$U_0=2,5\text{m/s}$

$U_0=5\text{m/s}$



Σχολιασμός:

Παρατηρούμε πως σχεδόν σε όλες τις θέσεις η επίδραση των διαταραχών που εισάγονται από τον κύλινδρο είναι σημαντικότερη των διαταραχών λόγω της κοιλότητας. Οι διαταραχές της κοιλότητας είναι σημαντικές στη θέση "leeward" $z=MEΣH$ και $z=XEΙΛOΣ$ για την ταχύτητα 2,5m/s. Σε κάθε άλλη περίπτωση τα "peak" των P.S.D. υποδεικνύουν την επίδραση του κυλίνδρου, που γίνεται τόσο πιο έντονη όσο αυξάνεται η ταχύτητα U_0 .

Για $U_0=2,5m/s$ παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward $\rightarrow MEΣH$

xΔ $\rightarrow XAMHΛA$

Downward $\rightarrow MEΣH$

Για $U_0=5m/s$ παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward $\rightarrow XAMHΛA$

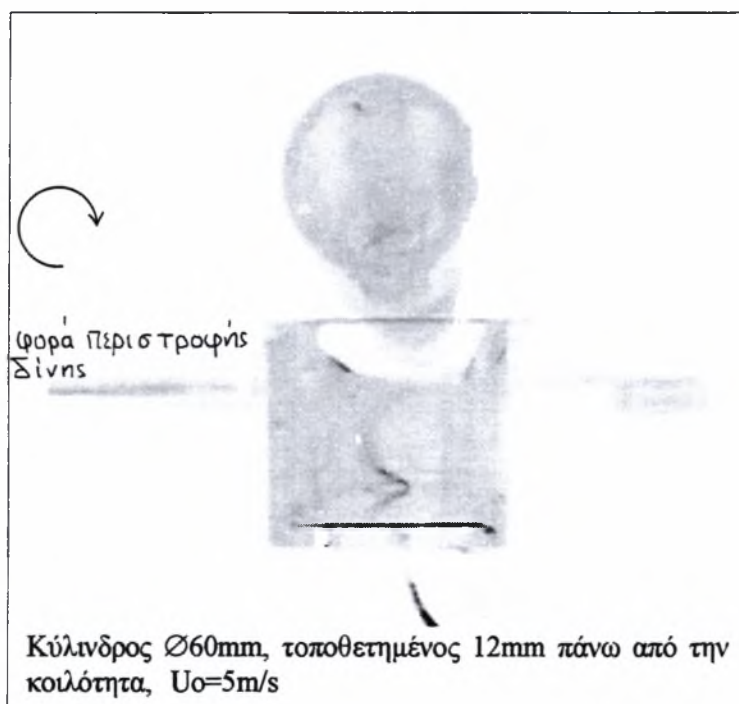
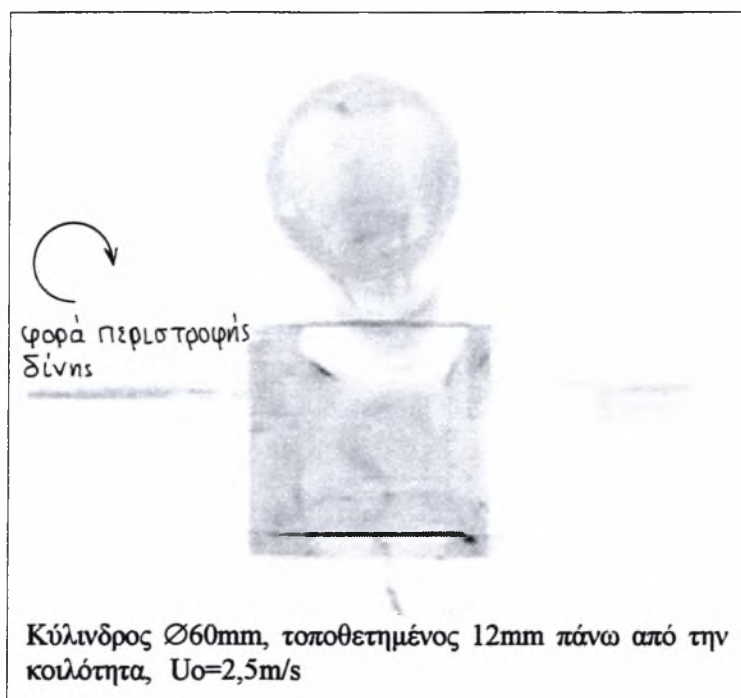
xΔ $\rightarrow XAMHΛA+MEΣH$

Downward $\rightarrow XAMHΛA+MEΣH$

5.3.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$, τοποθετημένο σε ύψος 12mm πάνω από το χείλος της κοιλότητας για δυο διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής: $U_0=2,5\text{m/s}$ και $U_0=5\text{m/s}$

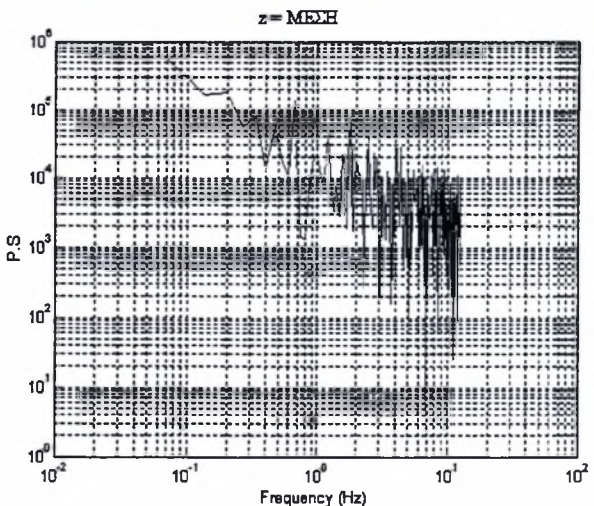
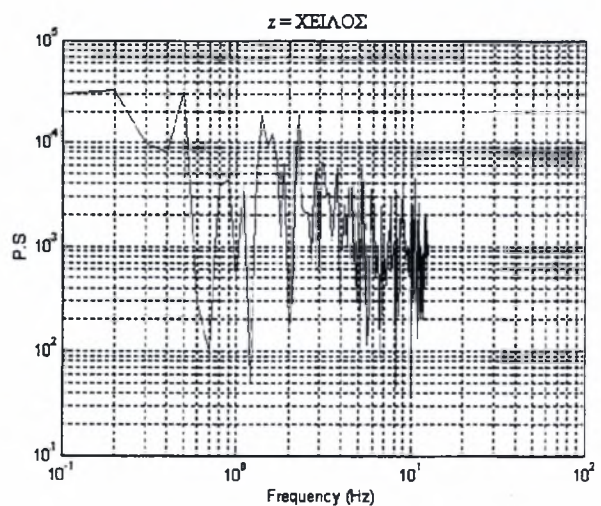
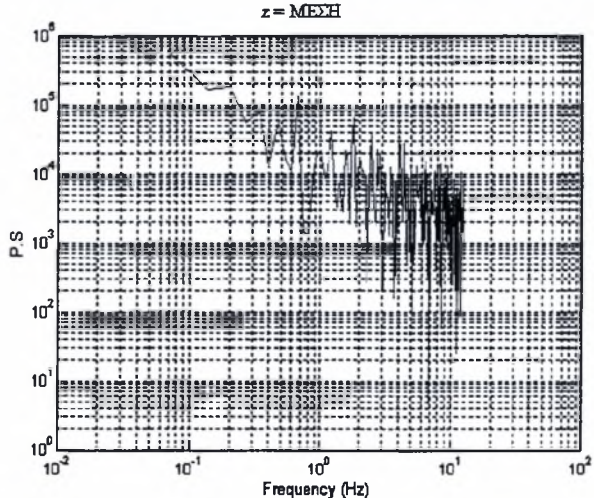
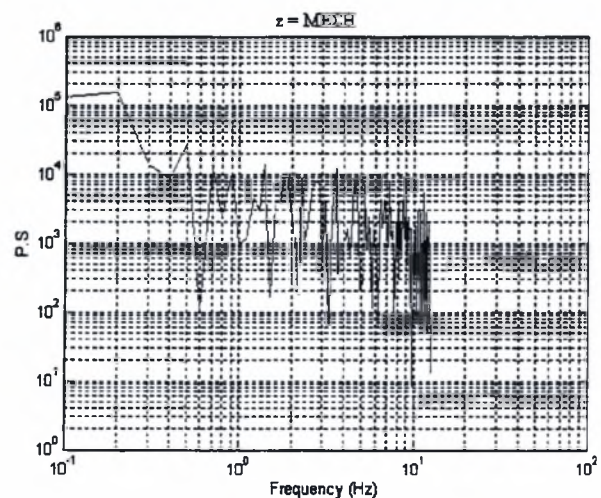
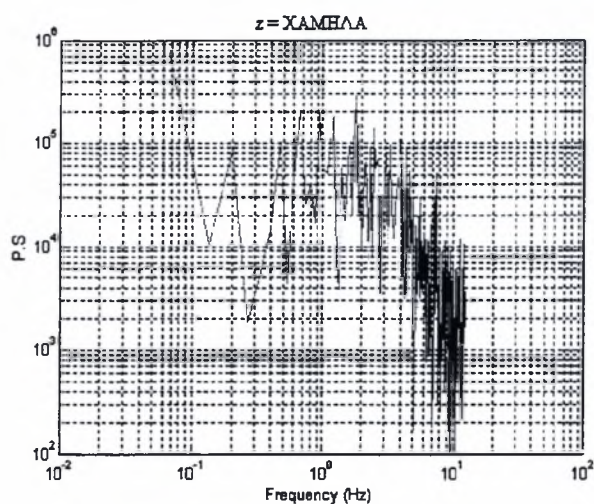
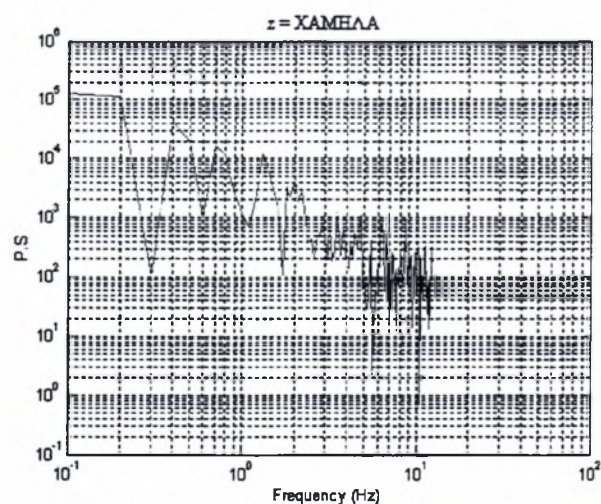
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ



Θέση leeward - Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$, 12mm πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D

$U_0=2,5\text{m/s}$

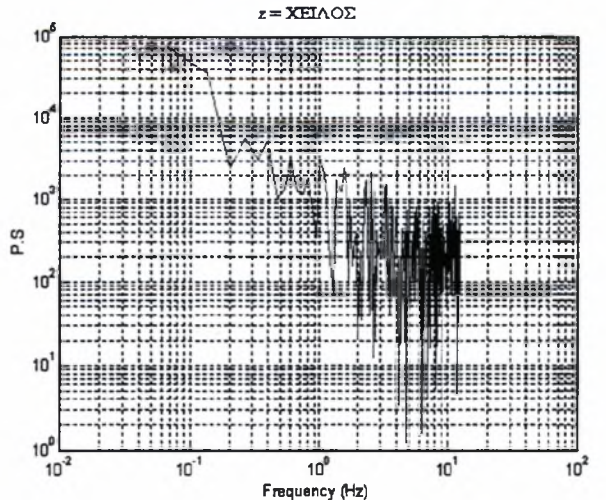
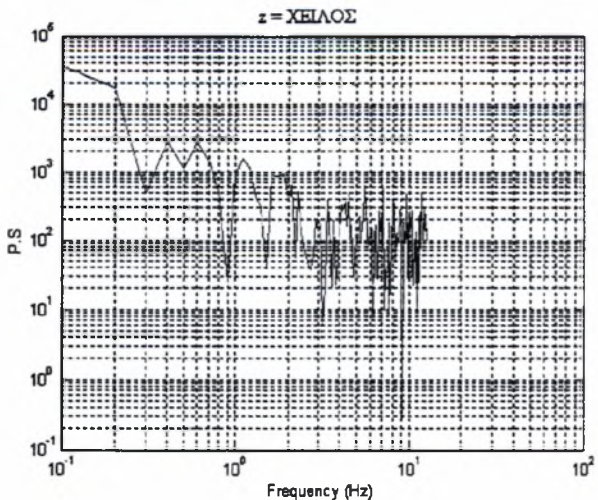
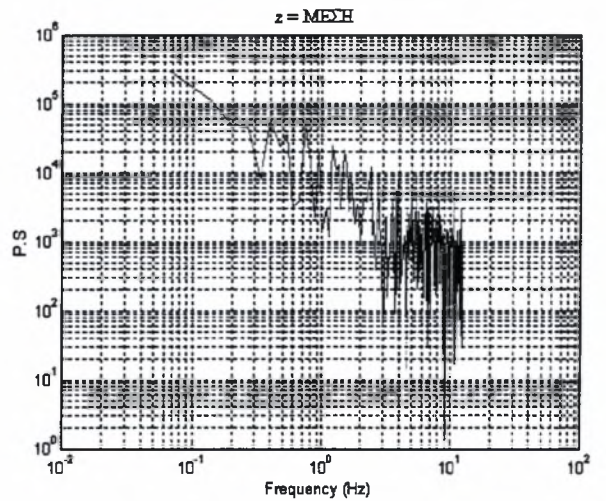
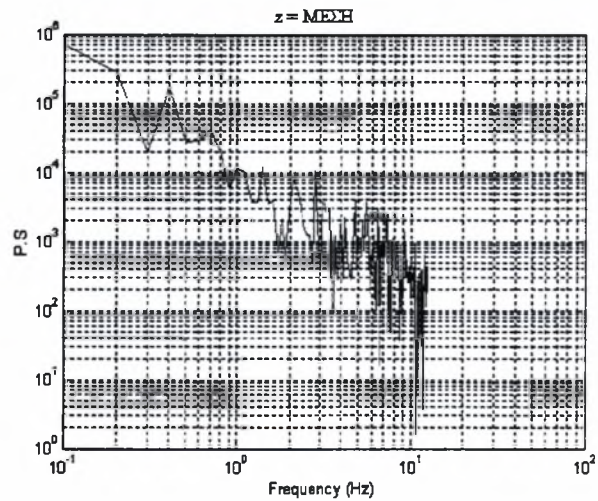
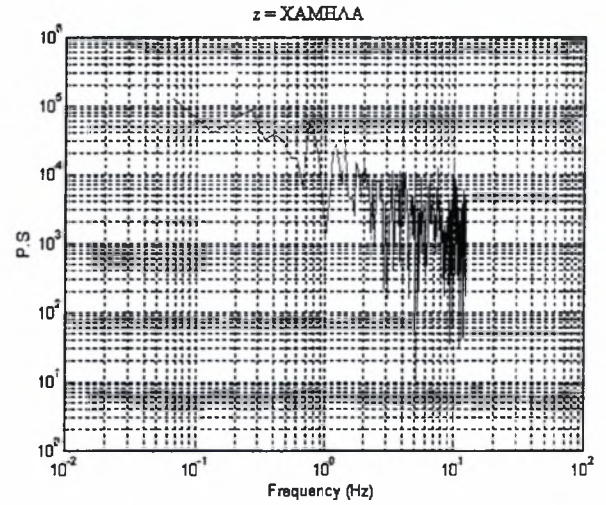
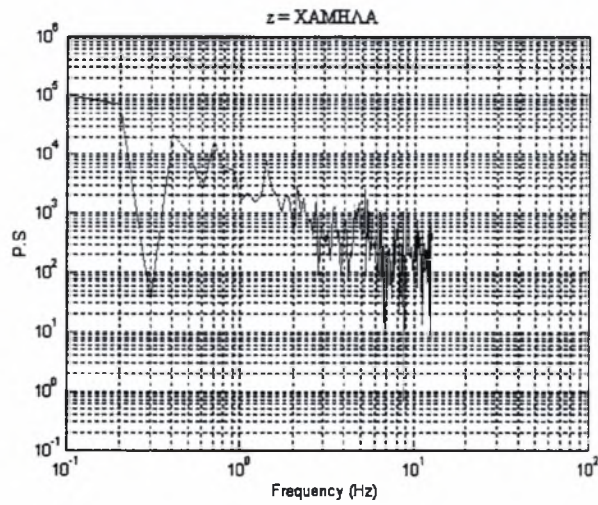
$U_0=5\text{m/s}$



Θέση x Δ - Με κύλινδρο Ø60mm, 12mm πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D.

U₀=2,5m/s

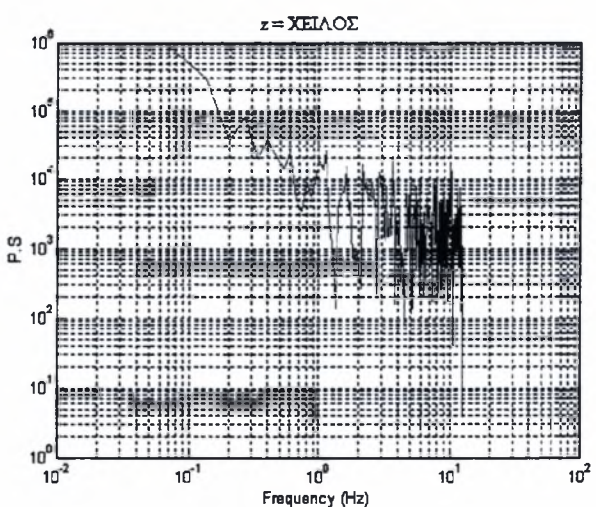
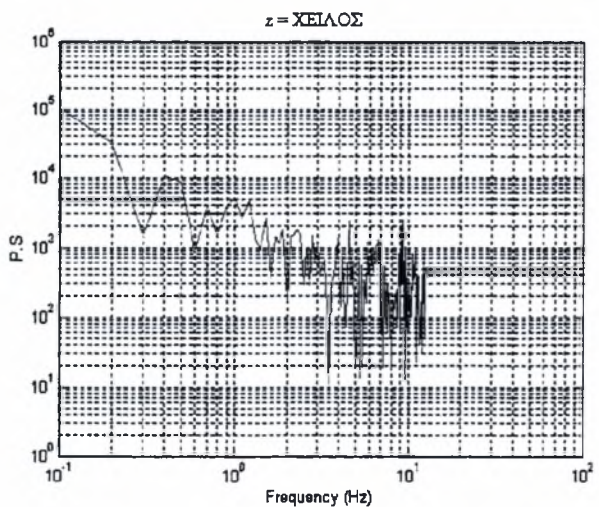
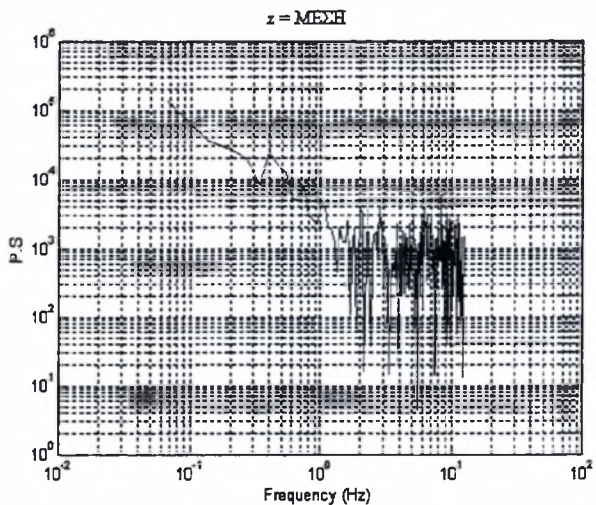
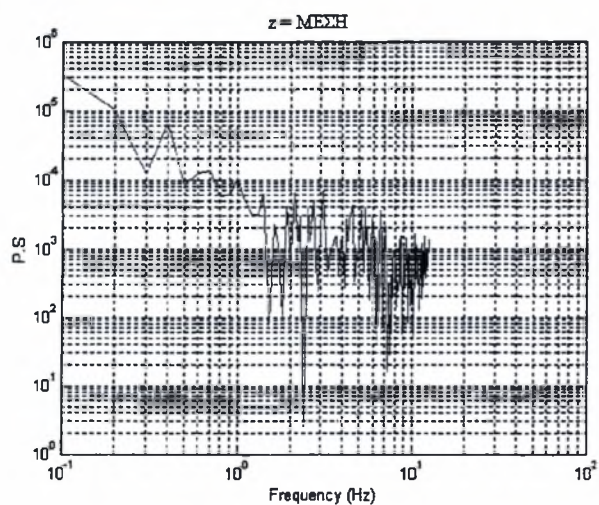
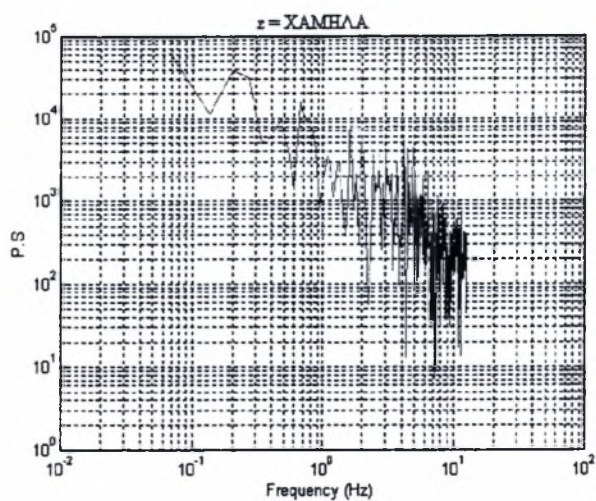
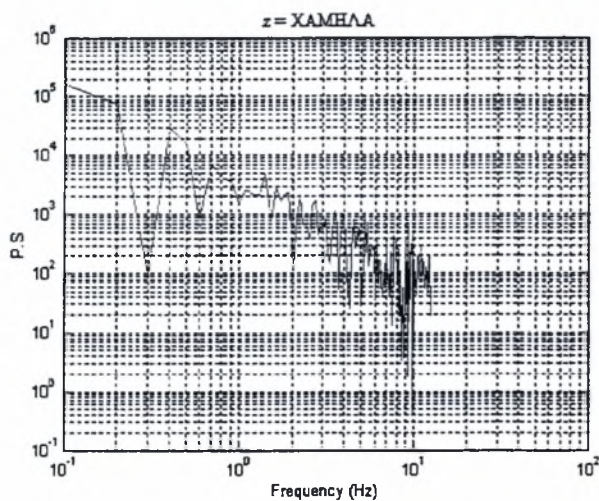
U₀=5m/s



Θέση downward - Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$, 12mm πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D.

$U_0=2,5\text{m/s}$

$U_0=5\text{m/s}$



Σχολιασμός:

Εδώ η δίνη συμπιέζεται από τον υπερκείμενο κύλινδρο. Πάλι η επίδραση του κυλίνδρου είναι η πιο έντονη συγκριτικά με την επίδραση της κοιλότητας. Μόνο στη θέση xΔ στο z=XΕΙΛΟΣ υπερισχύουν οι διαταραχές λόγω κοιλότητας. Είναι αξιοσημείωτο ότι στις θέσεις leeward και xΔ στο z=XΑΜΗΛΑ με την αύξηση της ταχύτητας έχουμε πολύ μεγάλη αύξηση (από $10^3 \rightarrow 10^4$) στην ένταση του φαινομένου των διαταραχών, ενώ γενικά σε όλες τις άλλες θέσεις έχουμε μια όχι και τόσο μεγάλη αύξηση.

Για $U_0=2,5\text{m/s}$ παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward \rightarrow ΜΕΣΗ

xΔ \rightarrow ΜΕΣΗ

Downward \rightarrow ΜΕΣΗ

Για $U_0=5\text{m/s}$ παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward \rightarrow ΧΑΜΗΛΑ

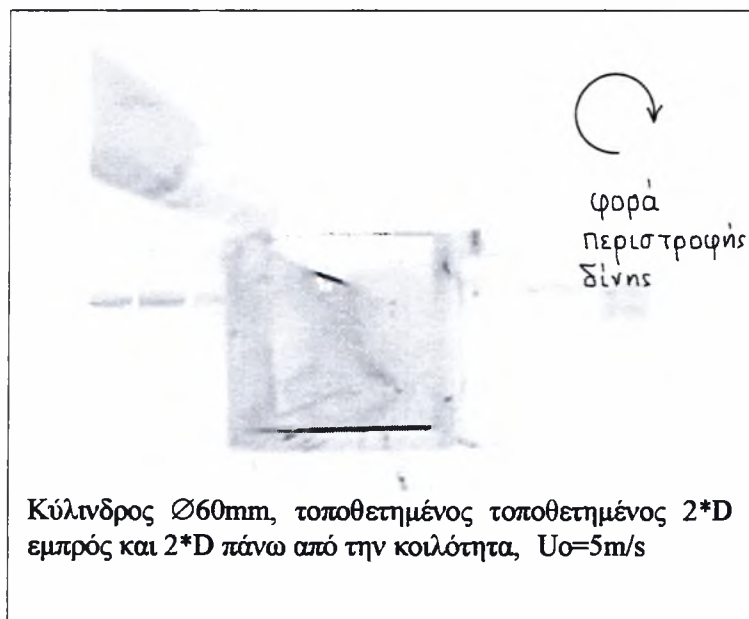
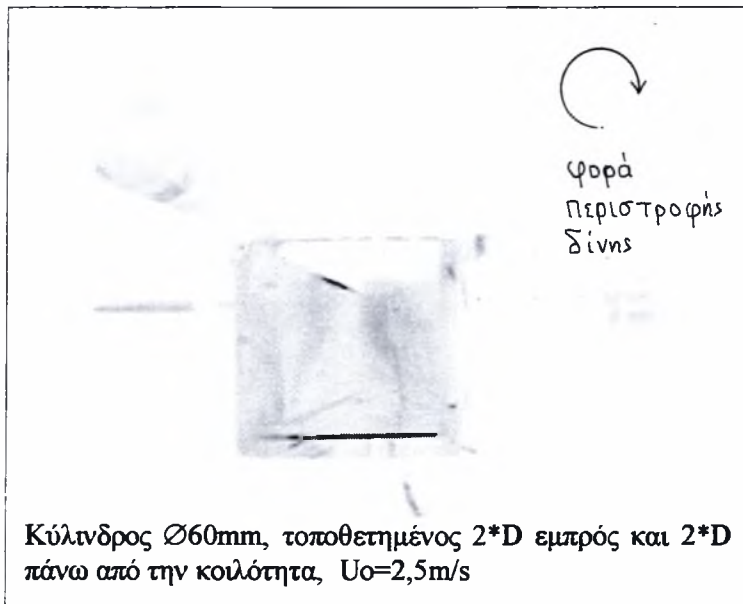
xΔ \rightarrow ΧΑΜΗΛΑ

Downward \rightarrow ΧΕΙΛΟΣ

5.3.1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ $2*D$ ανάντη και $2*D$ πάνω από την κοιλότητα για δυο διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής: $U_0=2,5\text{m/s}$ και $U_0=5\text{m/s}$

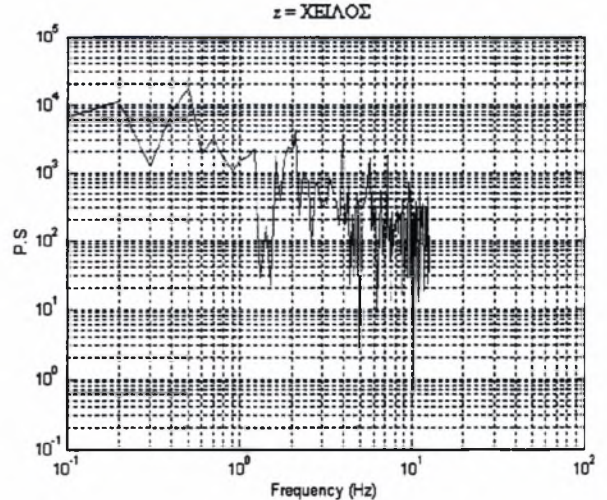
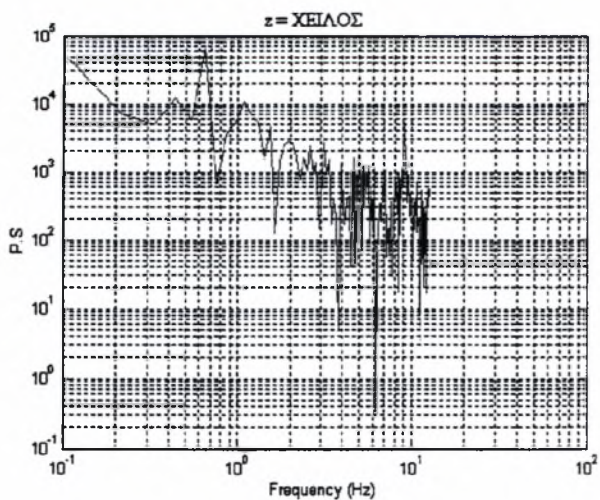
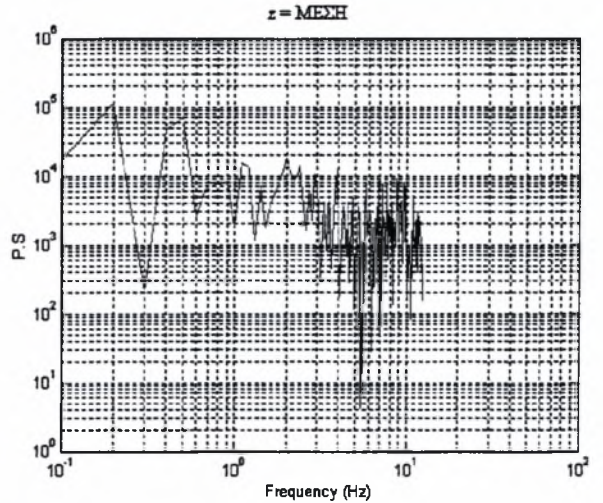
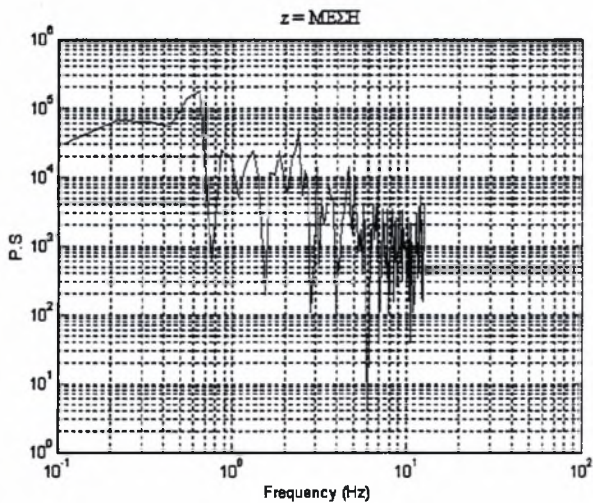
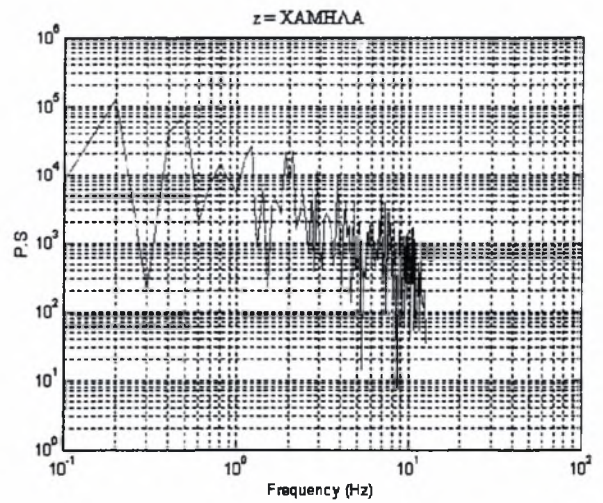
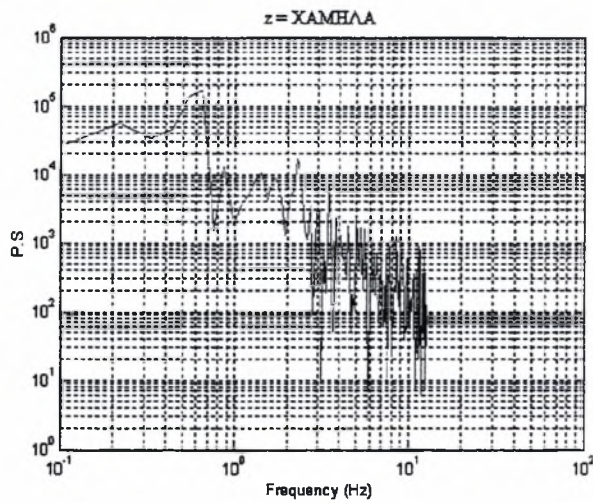
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ



**Θέση leeward - Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ 2*D ανάντη και 2*D πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D**

$U_0=2,5\text{m/s}$

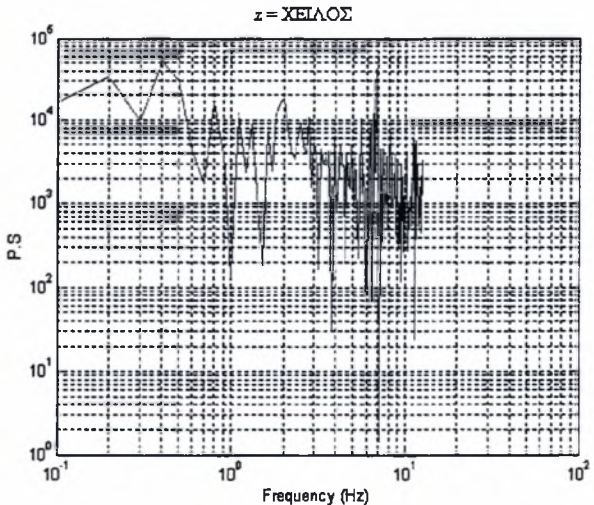
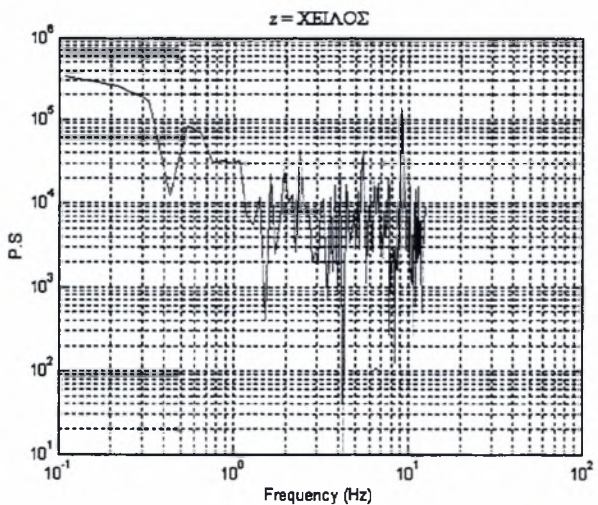
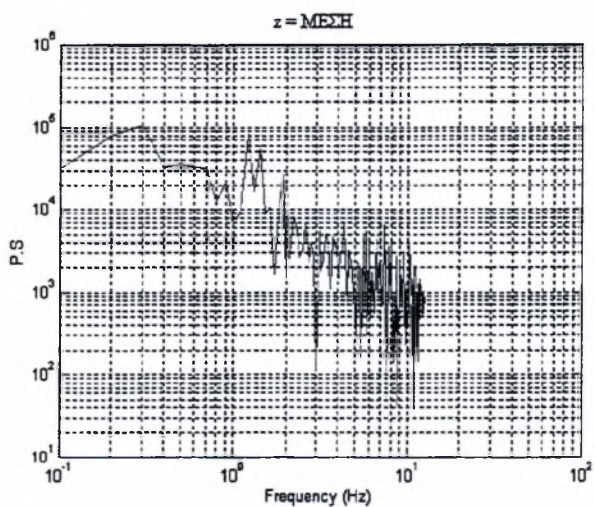
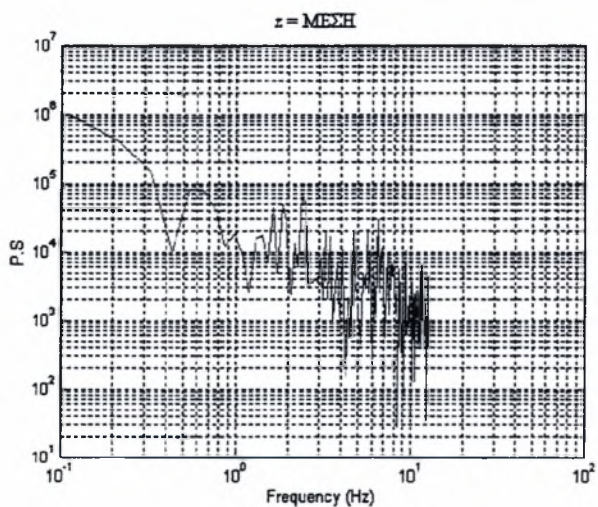
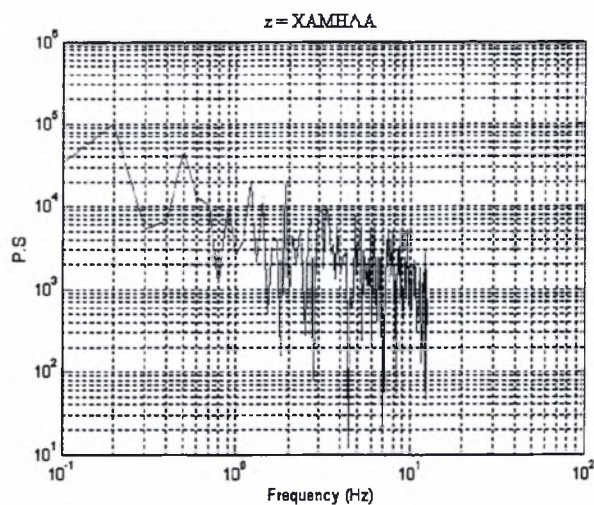
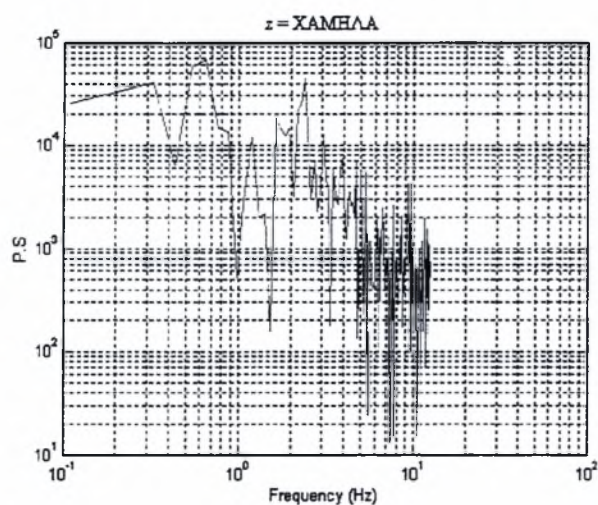
$U_0=5\text{m/s}$



Θέση x Δ - Με κύλινδρο Ø60mm 2*D ανάντη και 2*D πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D.

$U_0=2,5\text{m/s}$

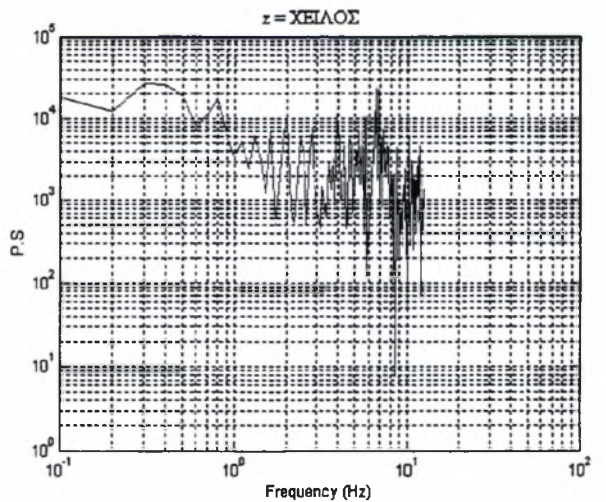
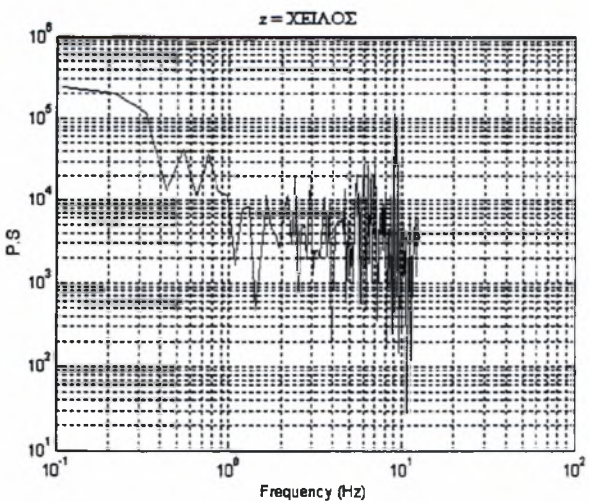
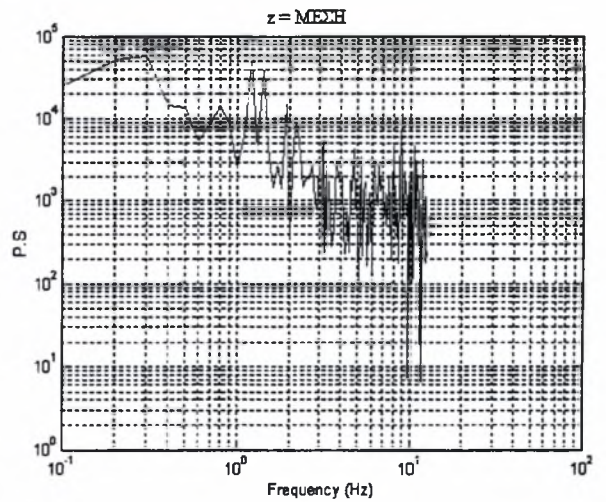
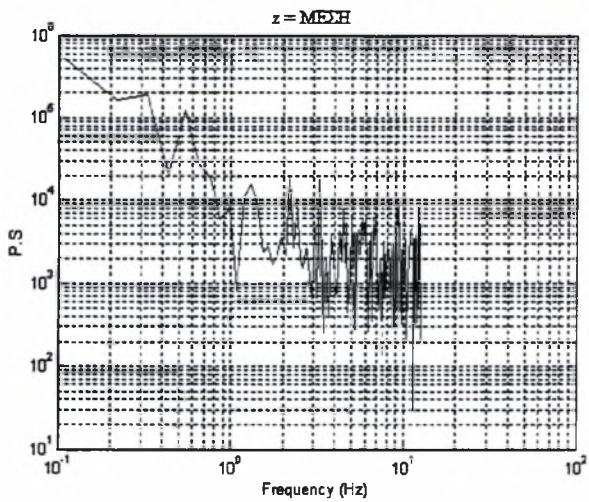
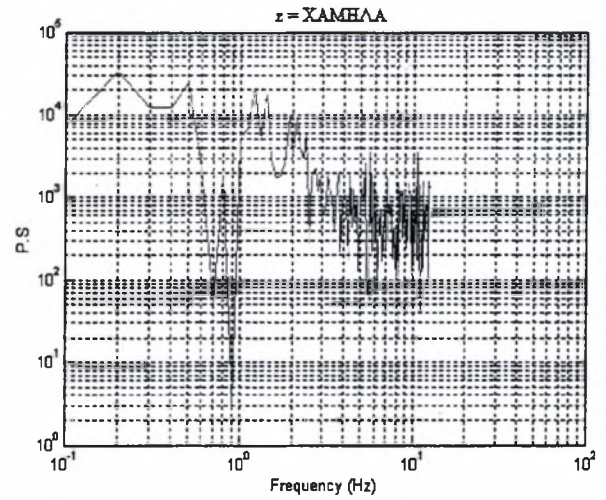
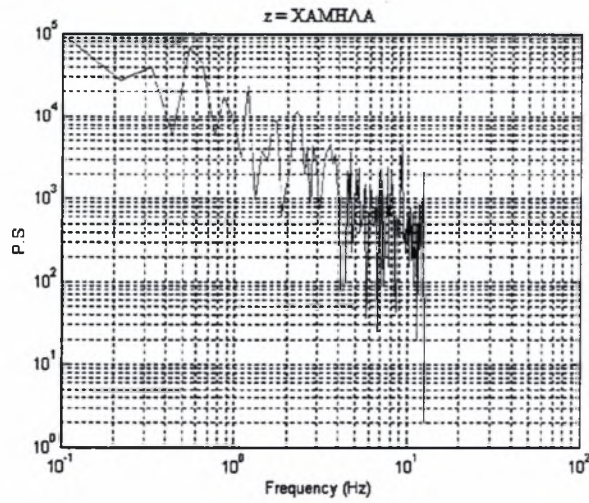
$U_0=5\text{m/s}$



Θέση downward - Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ 2*D ανάντη και 2*D πάνω από την κοιλότητα
Διαγράμματα P.S.D.

$U_0=2,5\text{m/s}$

$U_0=5\text{m/s}$



Σχολιασμός:

Πάλι παρατηρούμε πως η επίδραση των δινών Von-Karman που εκρέουν από τον κύλινδρο είναι η κύρια παράμετρος των διαταραχών μέσα στην κοιλότητα. Οι διαταραχές αυτές γίνονται εντονότερες στις θέσεις $x\Delta$ και downward όταν έχουμε την ταχύτητα $U_0=2,5\text{m/s}$. Πιθανόν αυτό να συμβαίνει επειδή τώρα ο κύλινδρος είναι ανάντη της κοιλότητας και με την μικρότερη U_0 οι δίνες εισέρχονται πιο εύκολα μέσα στην κοιλότητα.

Για $U_0=2,5\text{m/s}$ παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → ΧΕΙΛΟΣ

$x\Delta$ → ΧΕΙΛΟΣ με μεγάλο ρυθμό αύξησης

Downward → ΧΕΙΛΟΣ

Για $U_0=5\text{m/s}$ παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → ΧΑΜΗΛΑ

$x\Delta$ → ΧΕΙΛΟΣ

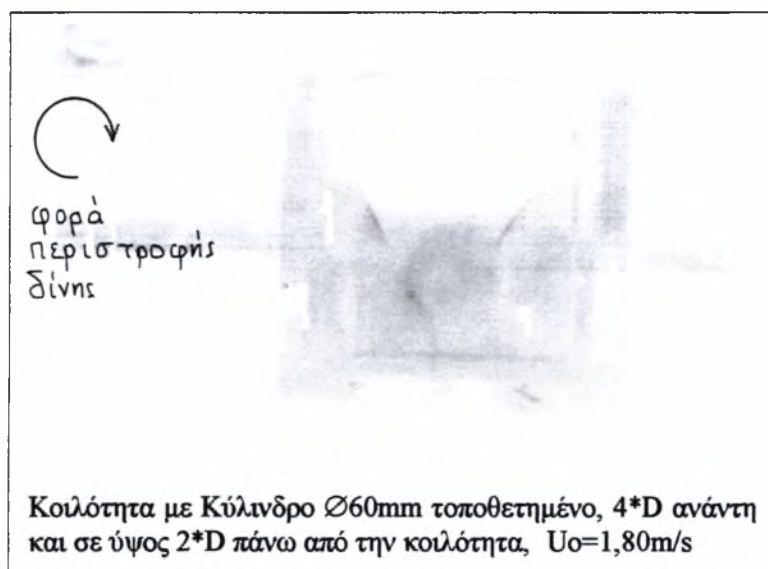
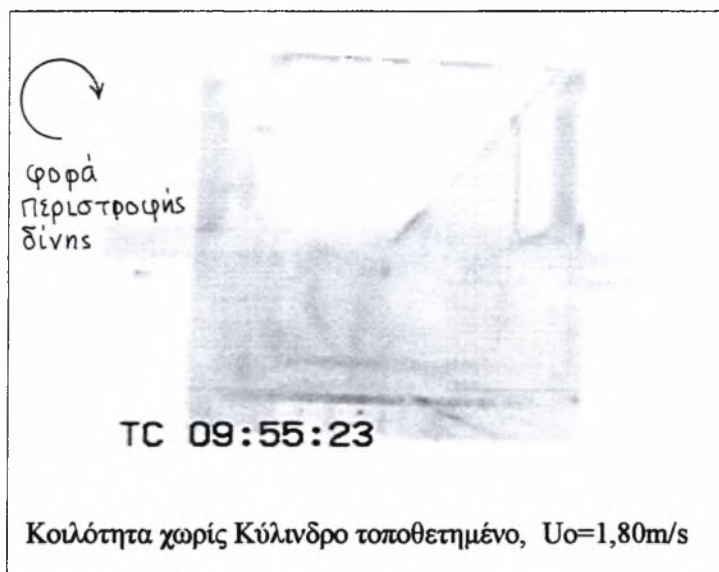
Downward → ΧΕΙΛΟΣ

5.3.1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Σταθερή ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=1,80\text{m/s}$, για δυο διαφορετικές περιπτώσεις:

- 1) χωρίς κύλινδρο
- 2) με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ $4*D$ ανάντη και σε ύψος $2*D$ πάνω, από την κοιλότητα:

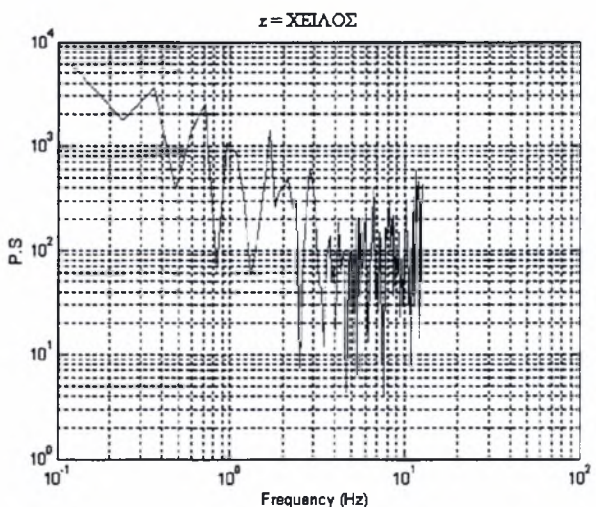
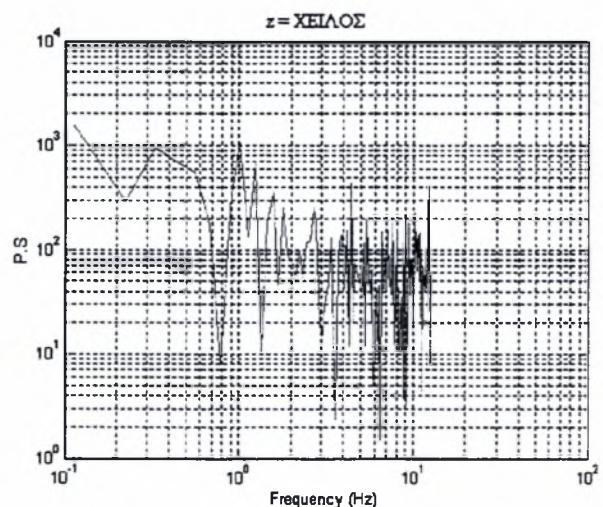
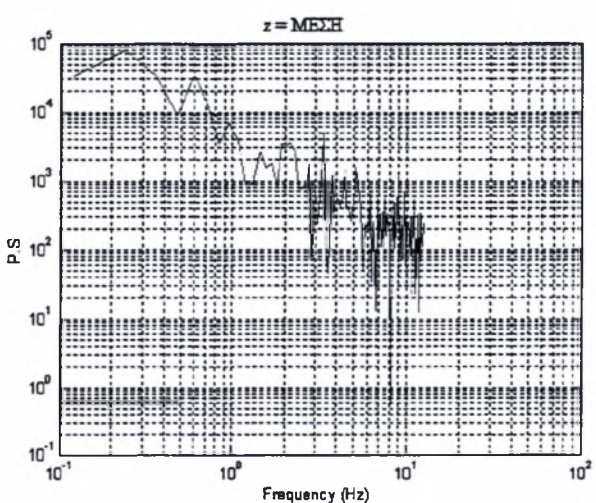
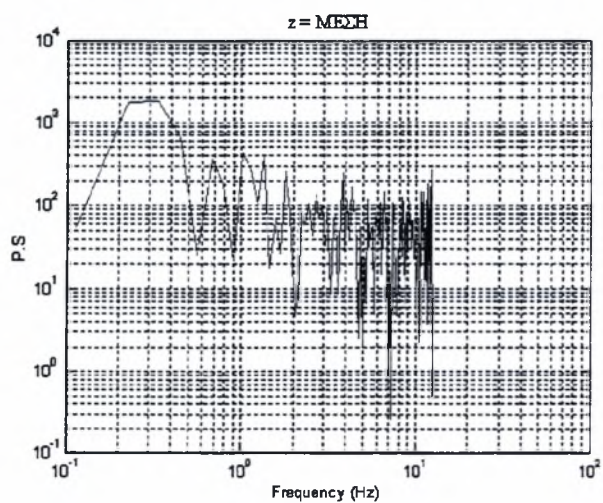
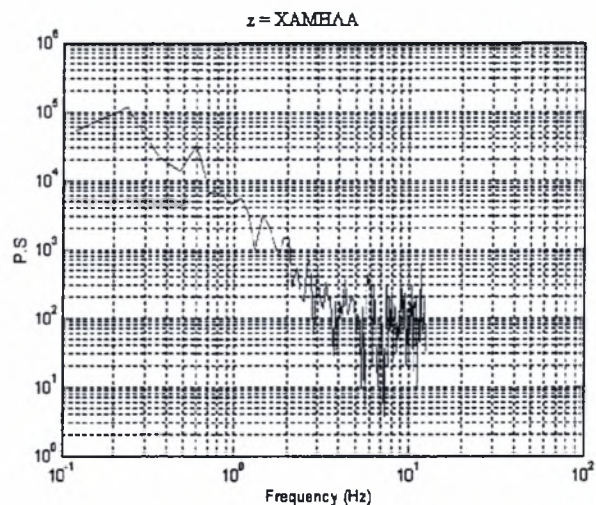
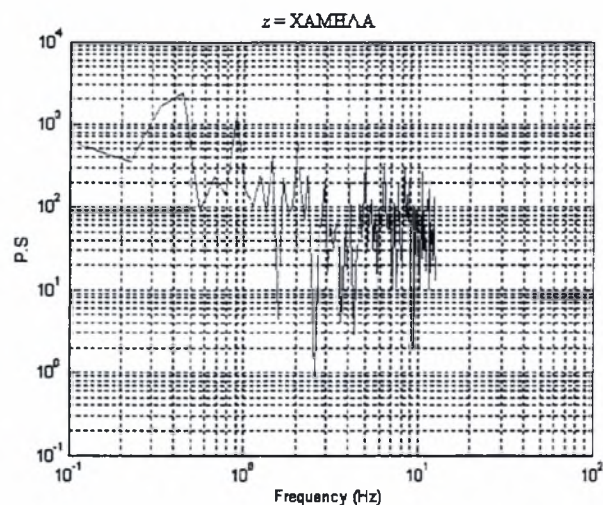
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ



Θέση leeward - $U_0=1,80\text{m/s}$
 Διαγράμματα P.S.D

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο

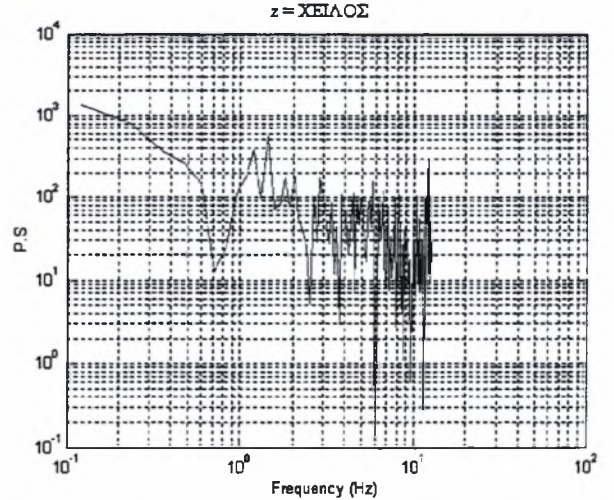
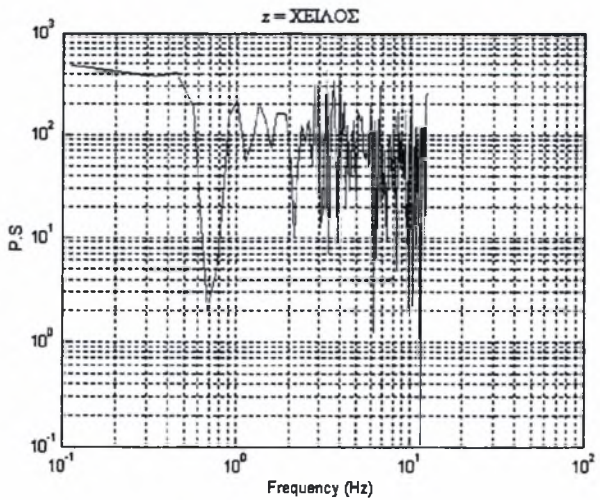
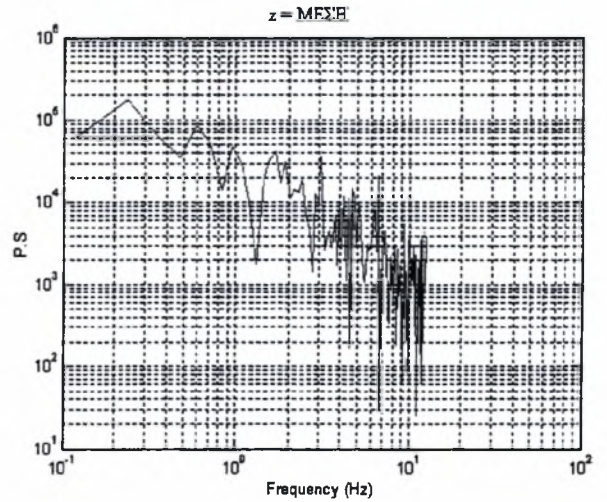
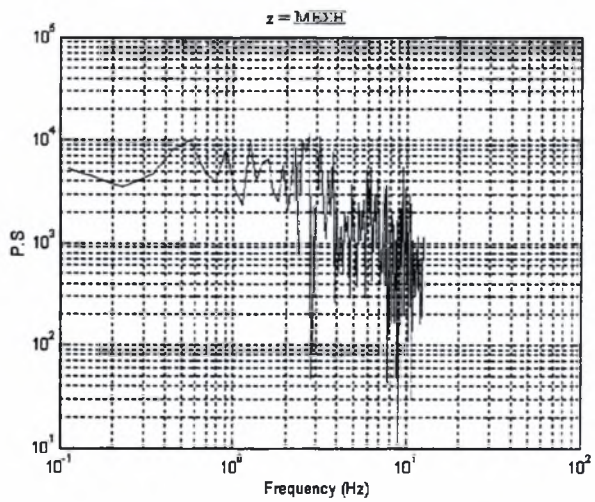
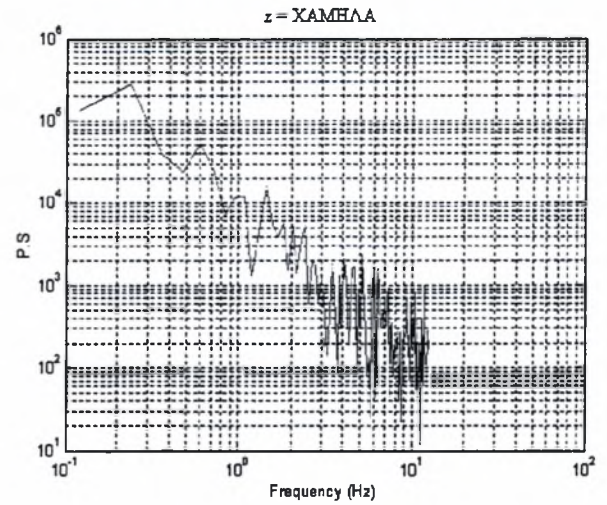
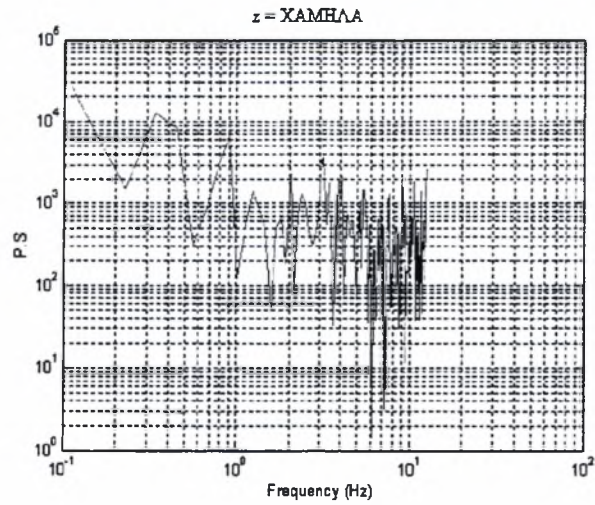


Θέση x Δ - $U_0=1,80\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο

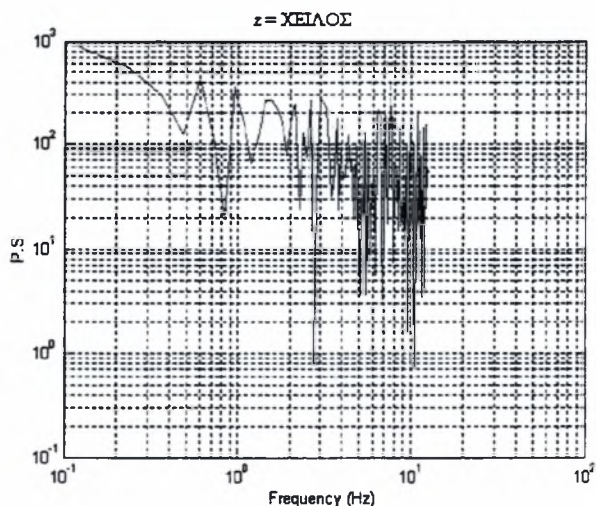
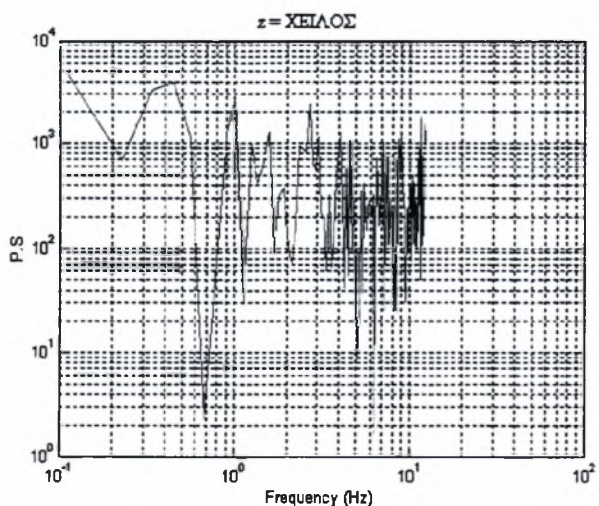
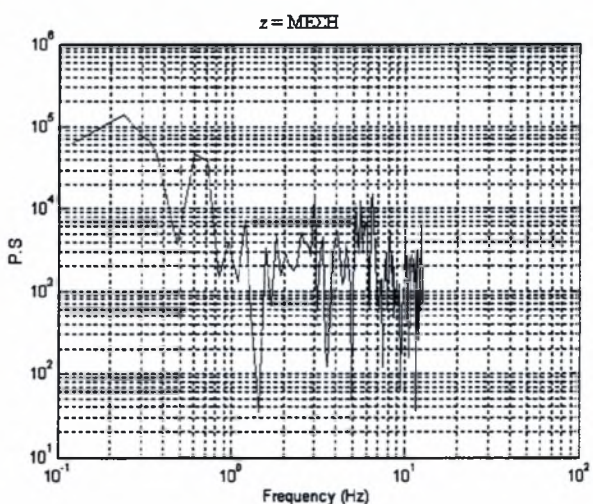
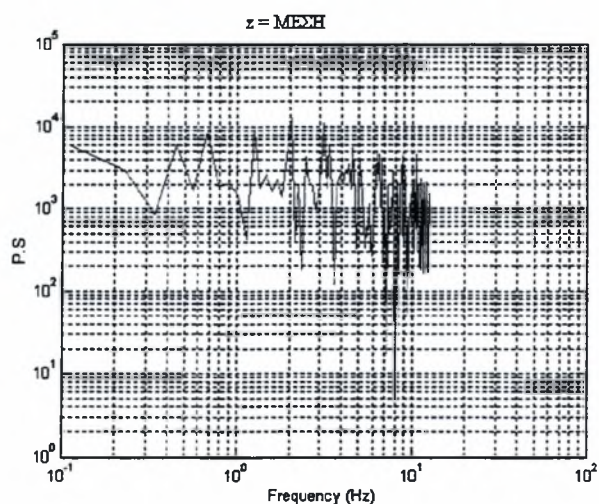
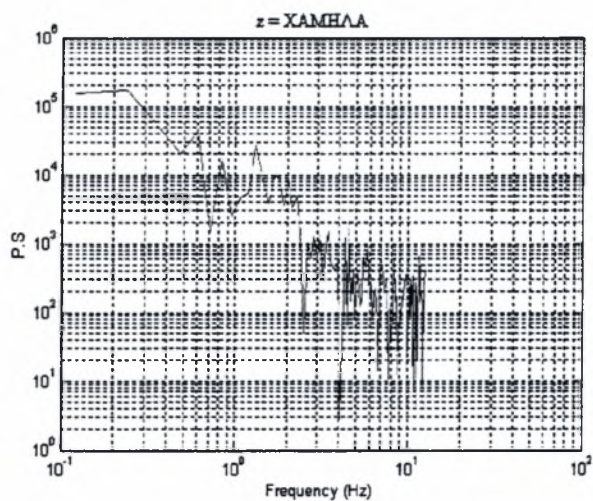
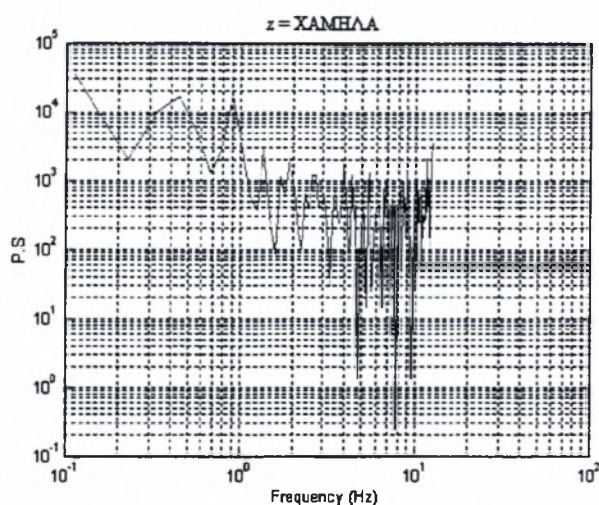


Θέση downward - $U_0=1,80\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο



Σχολιασμός:

Παρατηρούμε πως με την τοποθέτηση του κυλίνδρου σε κάθε θέση έχουμε μεγαλύτερη ένταση των διαταραχών. Ακόμη και όταν τοποθετήσουμε κύλινδρο η επίδραση της κοιλότητας στις διαταραχές υπάρχει στις θέσεις leeward για $z=XAMH\Lambda A$ και $z=XE\Gamma\Lambda O\Sigma$ και $x\Delta$ για $z=XE\Gamma\Lambda O\Sigma$. Και στις δυο περιπτώσεις βλέπουμε πως η μεγαλύτερη ένταση διαταραχών παρουσιάζεται στην θέση $x\Delta$ για $z=ME\Sigma H$ και όταν υπάρχει κύλινδρος στη θέση downward για $ME\Sigma H$.

Όταν δεν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → $XE\Gamma\Lambda O\Sigma$ με μικρό ρυθμό αύξησης

$x\Delta$ → $ME\Sigma H$

Downward → $ME\Sigma H$ με μικρό ρυθμό αύξησης

Όταν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → $ME\Sigma H$ με μικρό ρυθμό αύξησης

$x\Delta$ → $ME\Sigma H$ με μεγάλο ρυθμό αύξησης

Downward → $ME\Sigma H$ με μεγάλο ρυθμό αύξησης

Έχουμε μεγάλους ρυθμούς αύξησης της έντασης των διαταραχών στην περίπτωση που τοποθετείται κύλινδρος ίσως λόγω της μεγαλύτερης ανάμιξης που προκαλεί μέσα στην κοιλότητα με τις δίνες Von-Karman.

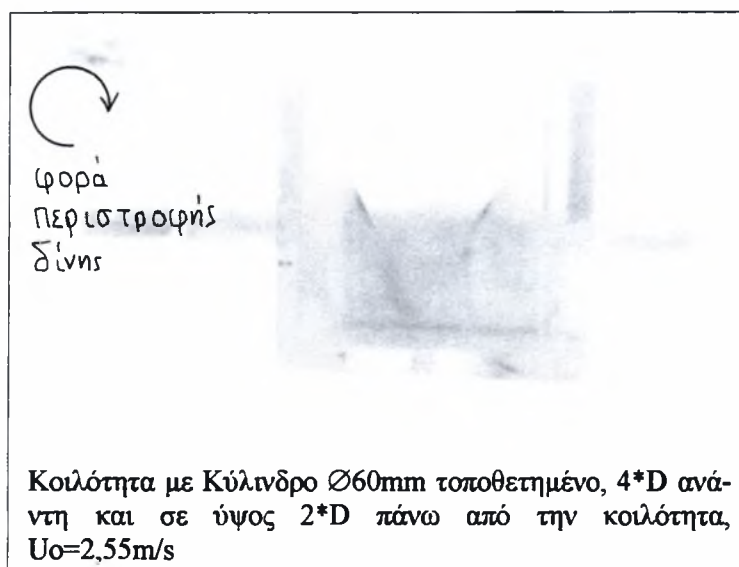
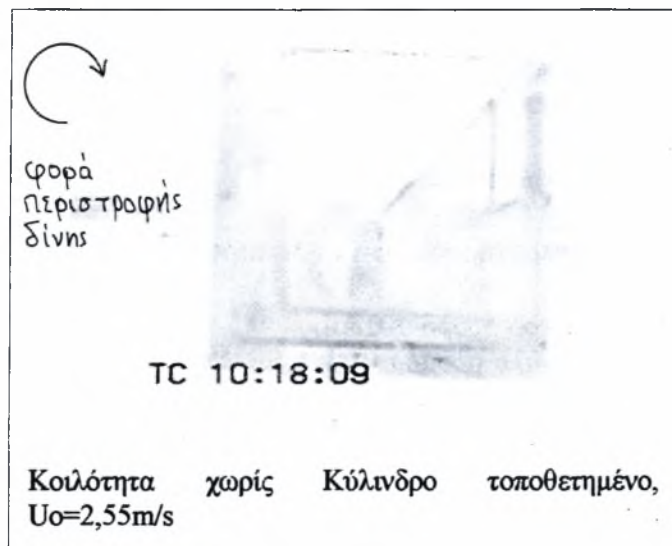
5. 3.1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Σταθερή ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=2,55\text{m/s}$, για δυο διαφορετικές περιπτώσεις:

1) χωρίς κύλινδρο

2) με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ $4*D$ ανάντη και σε ύψος $2*D$ πάνω, από την κοιλότητα:

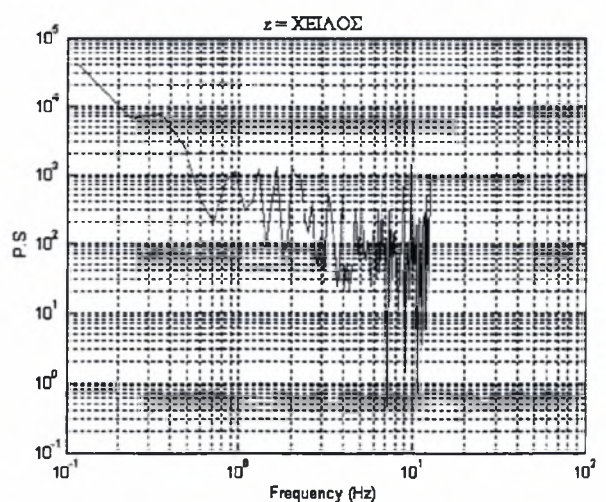
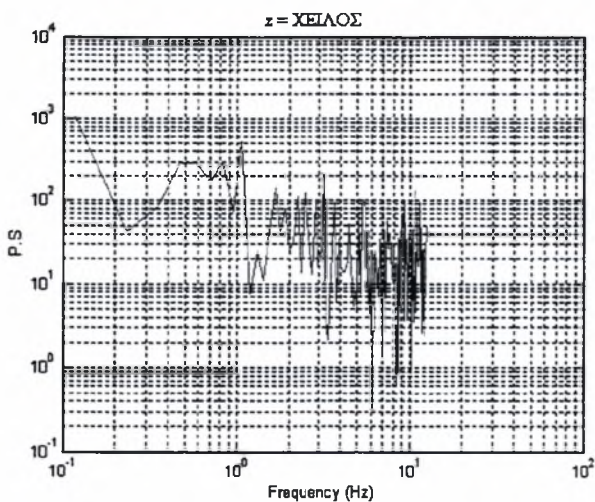
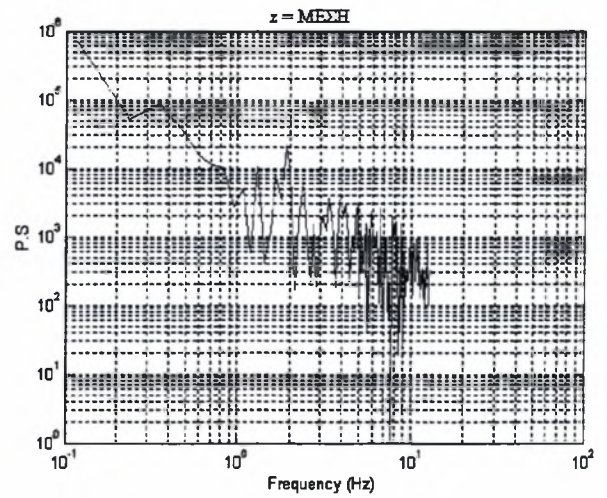
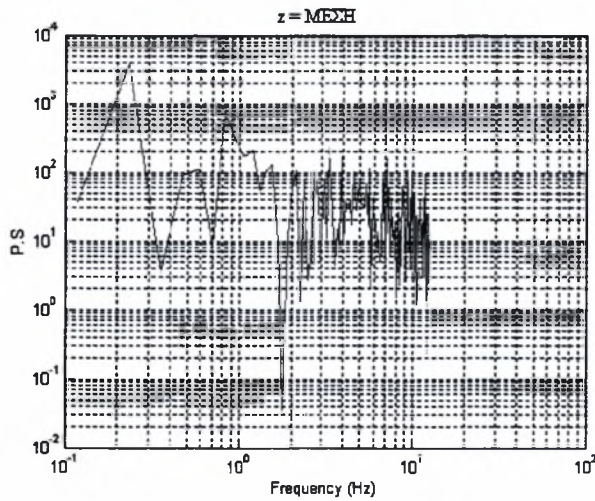
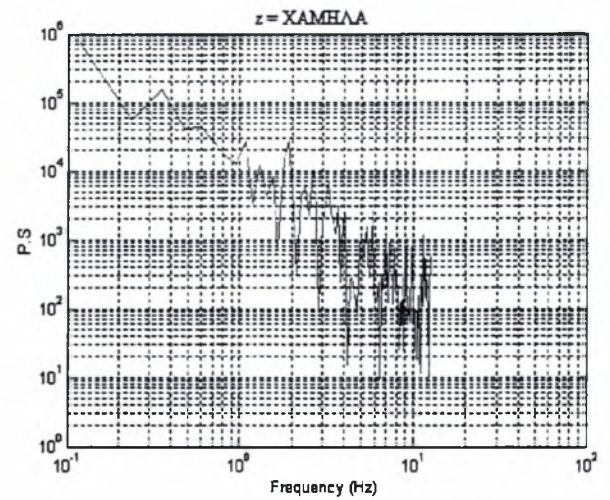
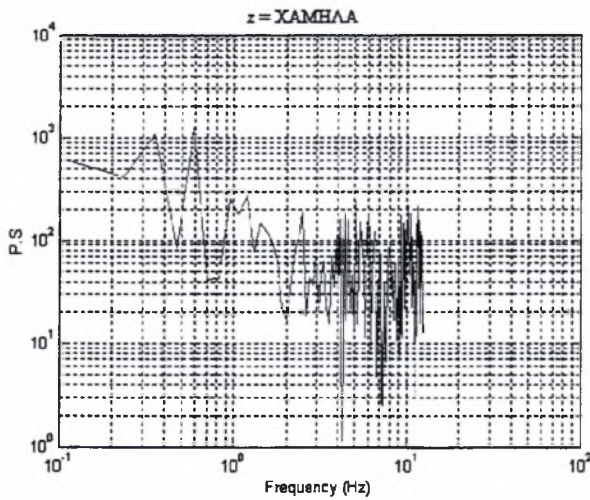
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ



Θέση leeward - $U_0=2,55\text{m/s}$
 Διαγράμματα P.S.D

Χωρίς κύλινδρο

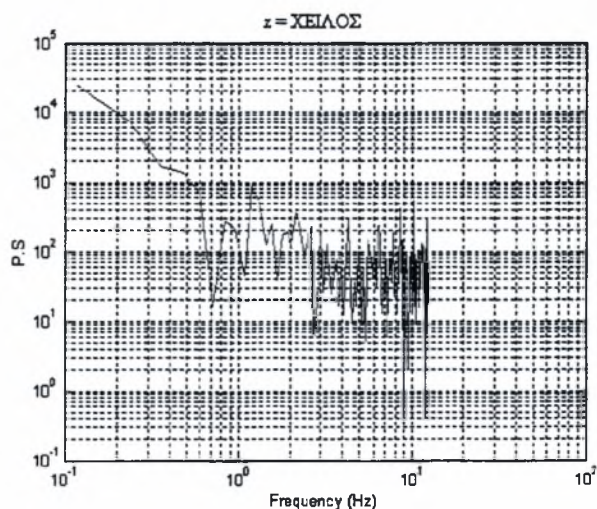
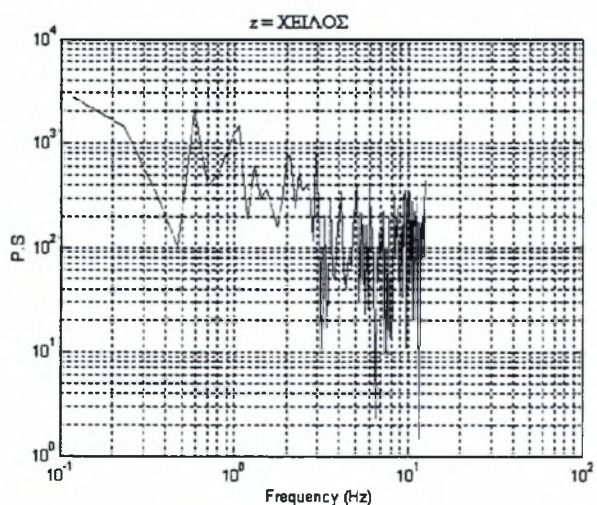
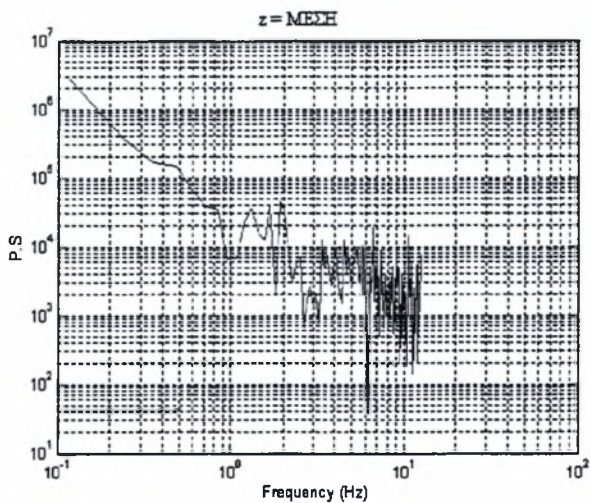
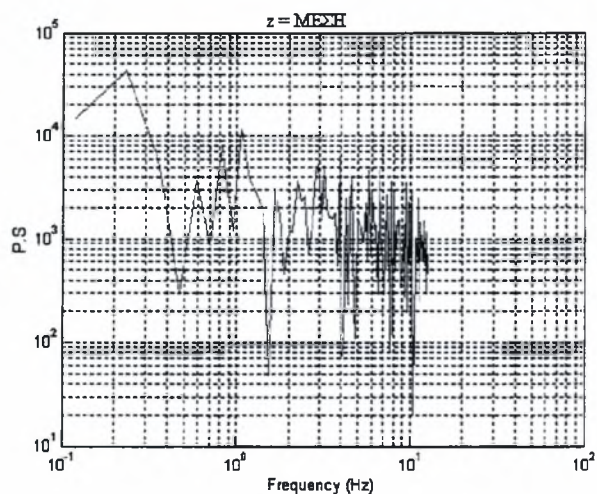
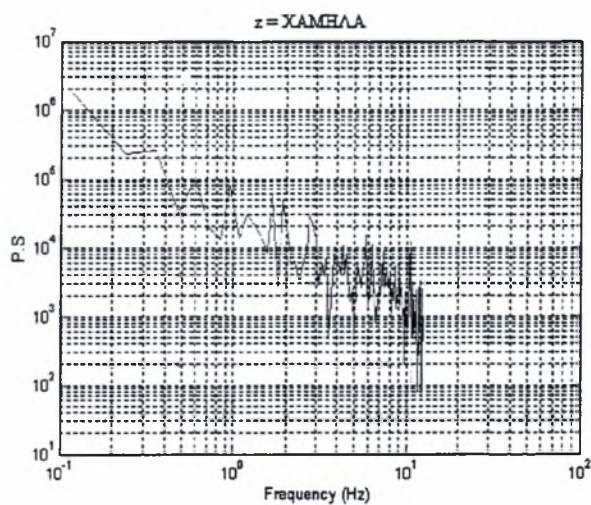
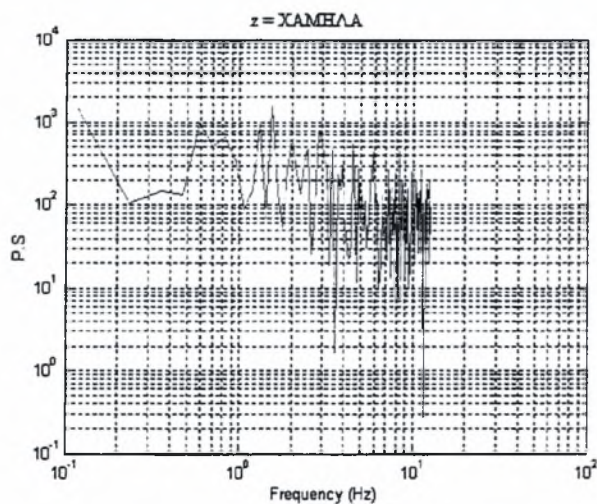
Με κύλινδρο



Θέση x Δ - $U_0=2,55\text{m/s}$
 Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

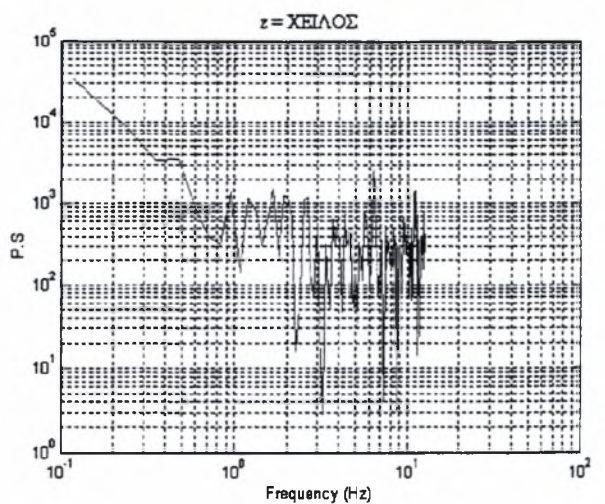
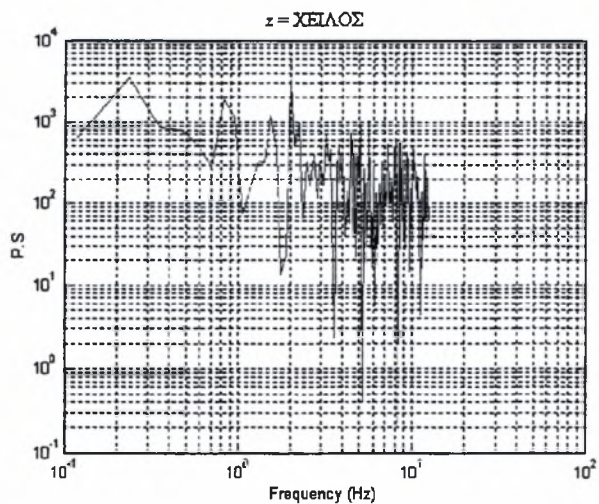
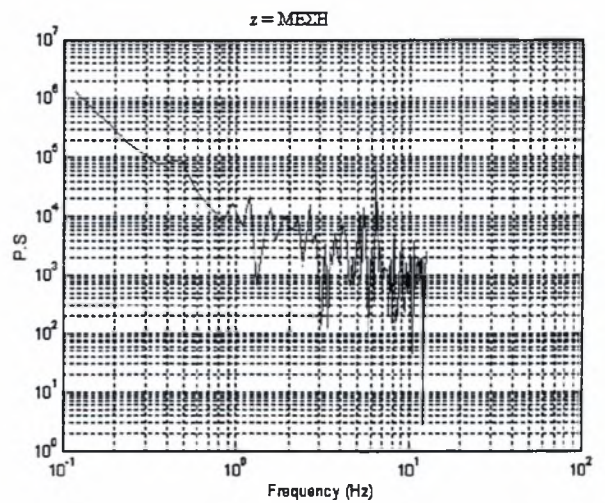
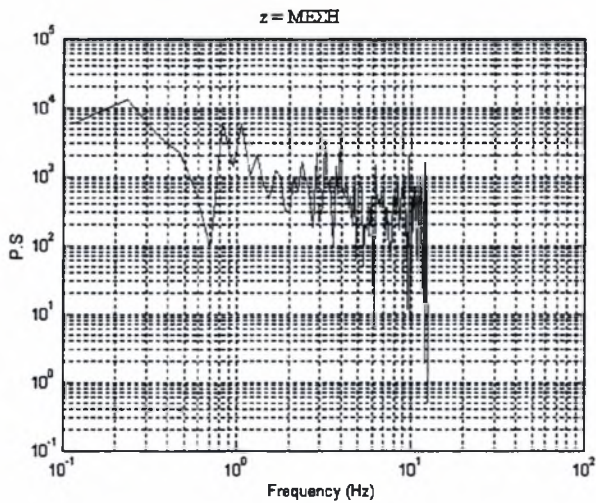
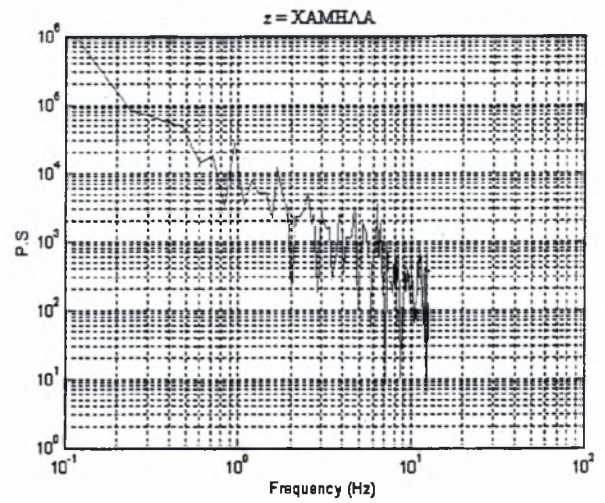
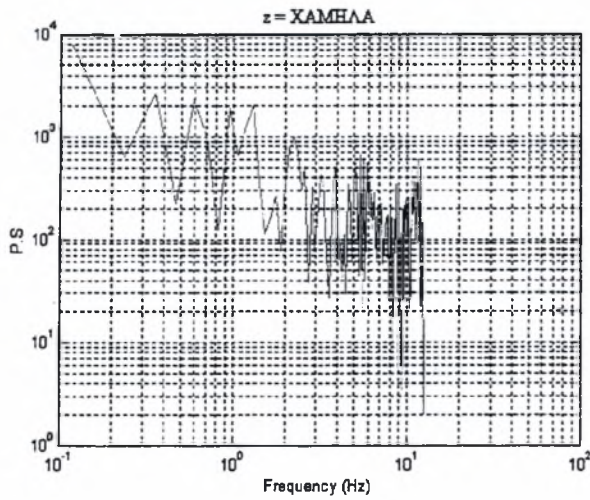
Με κύλινδρο



Θέση downward - $U_0=2,55\text{m/s}$
 Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο



Σχολιασμός:

Αυξάνοντας η ταχύτητα της ελεύθερης ροής από 1,80m/s σε 2,55m/s, παρατηρούμε ότι:

Όταν υπάρχει τοποθετημένος κύλινδρος, υπερισχύει έναντι της κοιλότητας ως αιτία εισαγωγής των διαταραχών μέσα σε αυτή. Επίσης οι διαταραχές οι οφειλόμενες στον κύλινδρο είναι πιο έντονες σε ισχύ από τις αντίστοιχες όταν ήταν η κοιλότητα χωρίς κύλινδρο. Ιδίως αυτό συμβαίνει στη θέση downward για $z=MEΣH$.

Όταν δεν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → ΧΑΜΗΛΑ με σχεδόν αμελητέα διαφοροποίηση από τα άλλα z

$x\Delta$ → ΜΕΣΗ

Downward → ΜΕΣΗ

Όταν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → ΧΑΜΗΛΑ με σχεδόν αμελητέα διαφοροποίηση από τα άλλα z

$x\Delta$ → ΧΑΜΗΛΑ

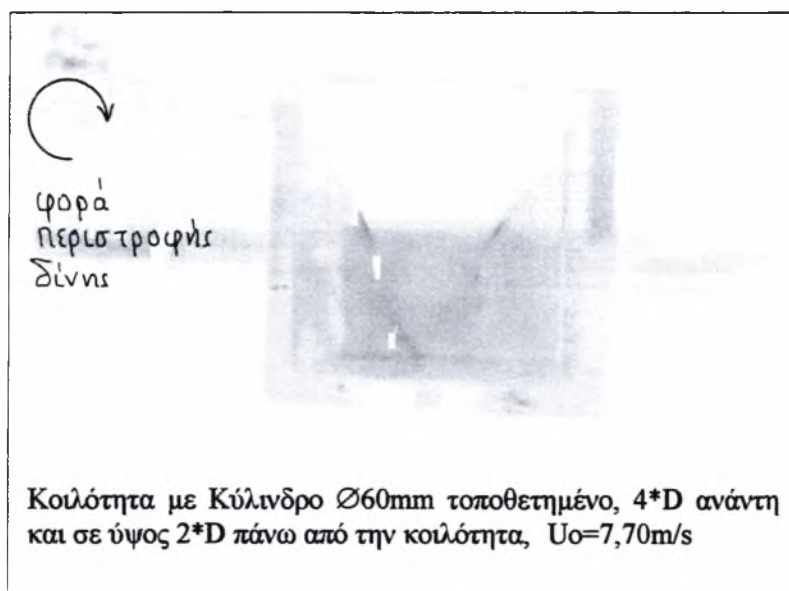
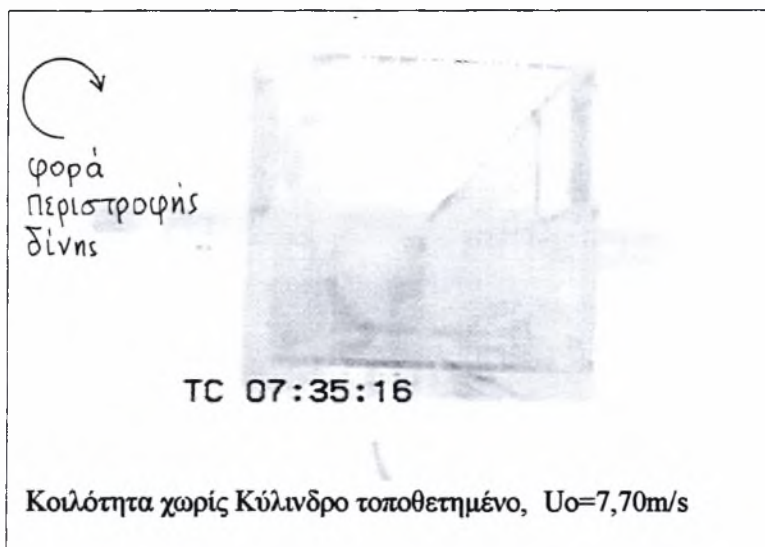
Downward → ΜΕΣΗ

5.3.1.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Σταθερή ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=7,70\text{m/s}$, για δυο διαφορετικές περιπτώσεις:

- 1) χωρίς κύλινδρο
- 2) με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ $4*D$ ανάντη και σε ύψος $2*D$ πάνω, από την κοιλότητα:

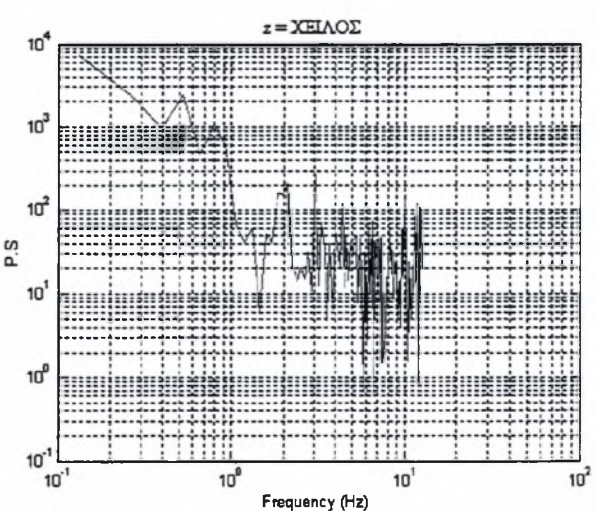
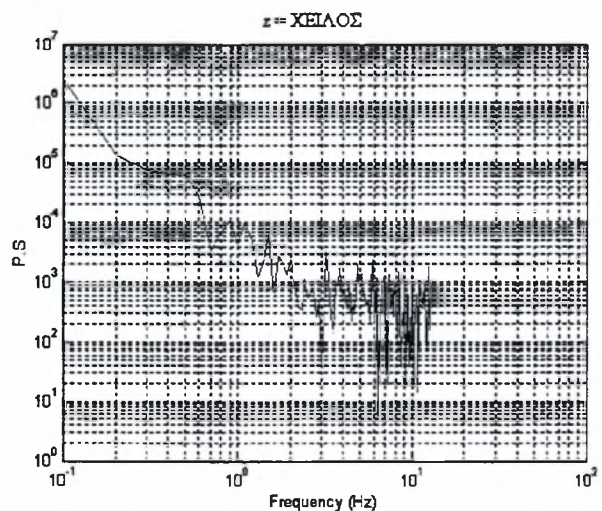
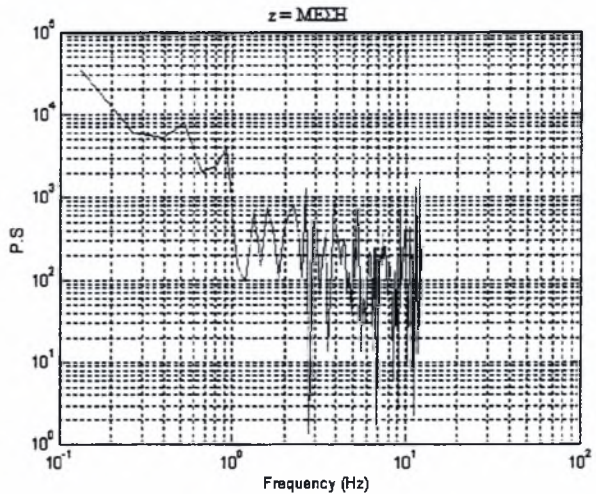
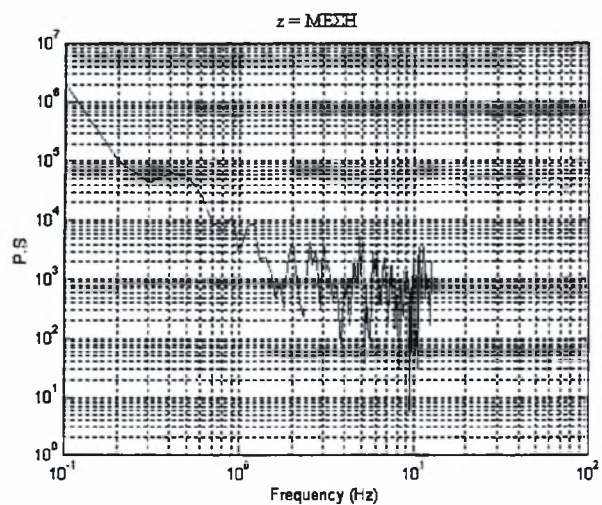
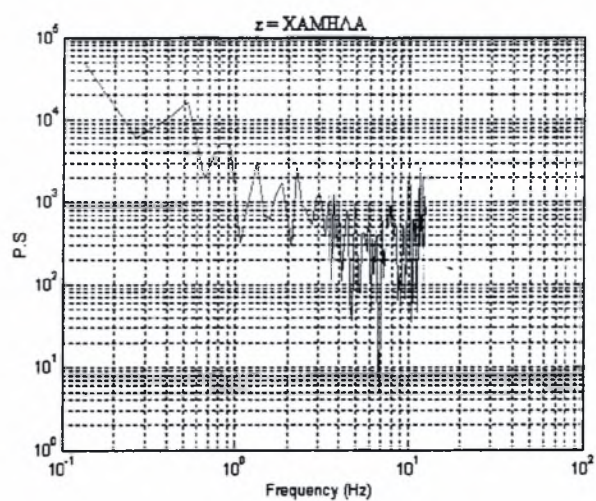
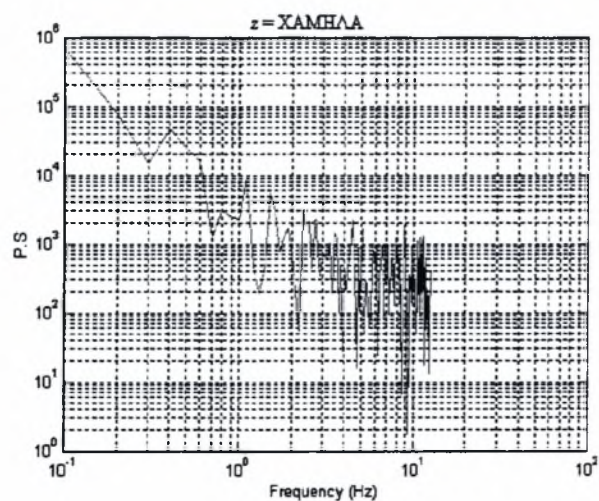
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ



Θέση leeward - $U_0=7,70\text{m/s}$
Διαγράμματα P.S.D

Χωρίς κύλινδρο

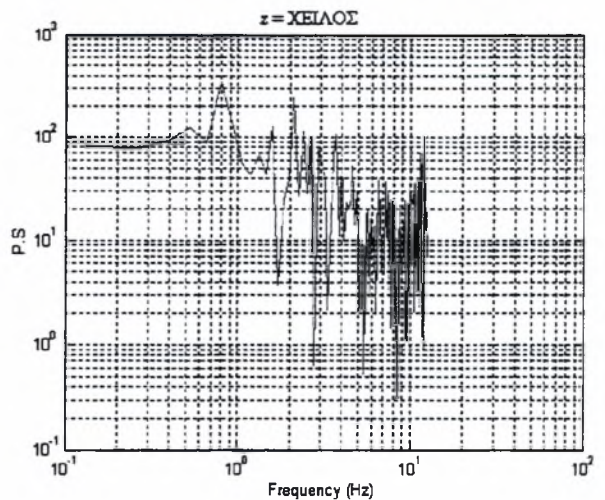
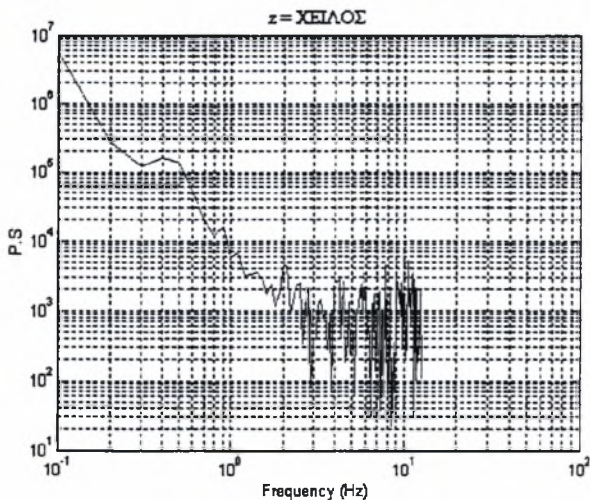
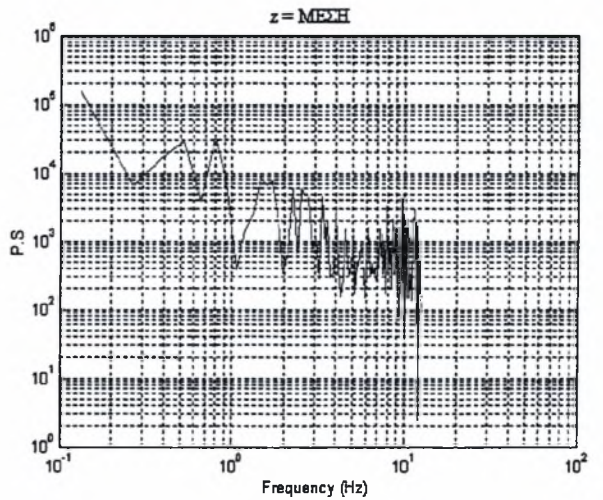
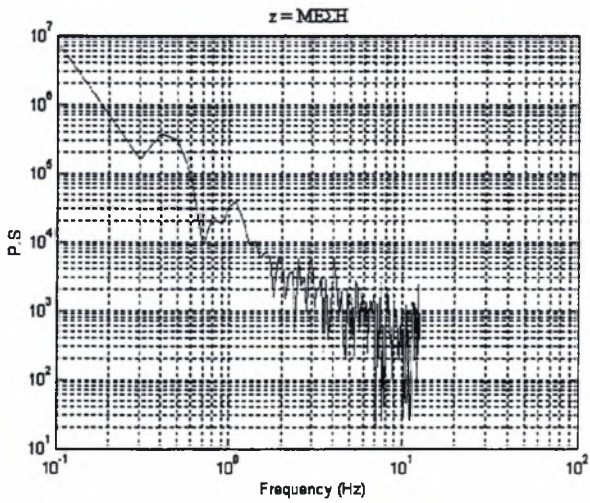
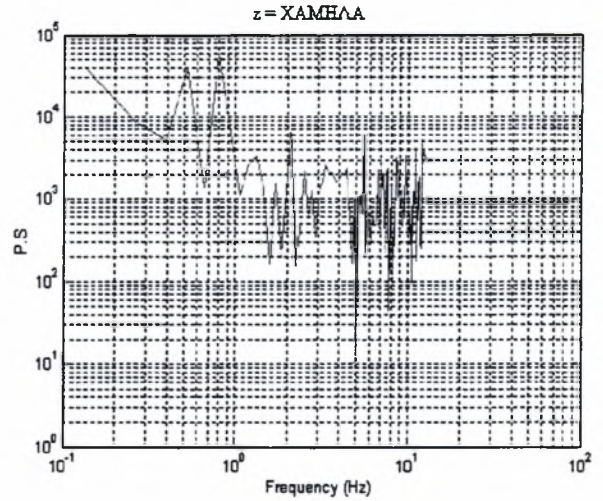
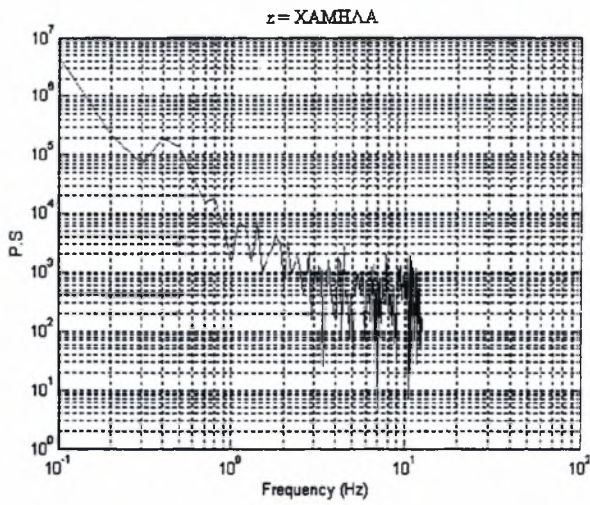
Με κύλινδρο



Θέση x Δ - $U_0=7,70\text{m/s}$
 Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο

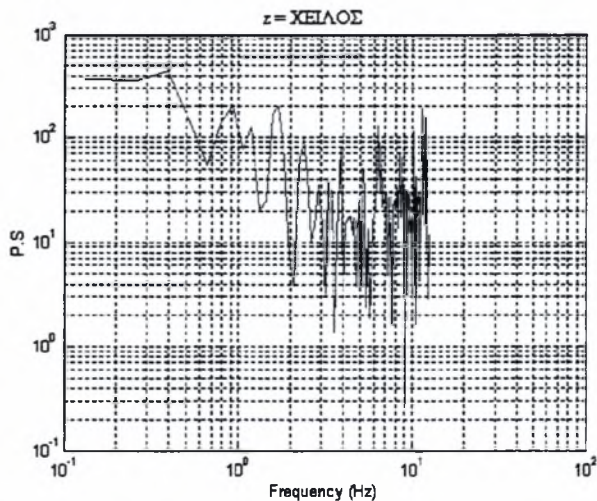
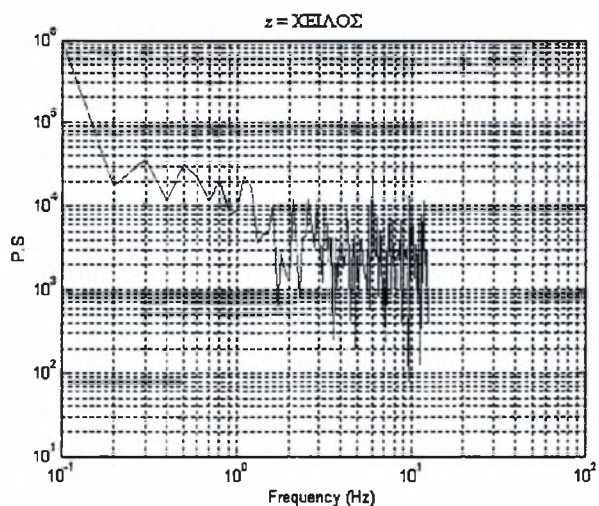
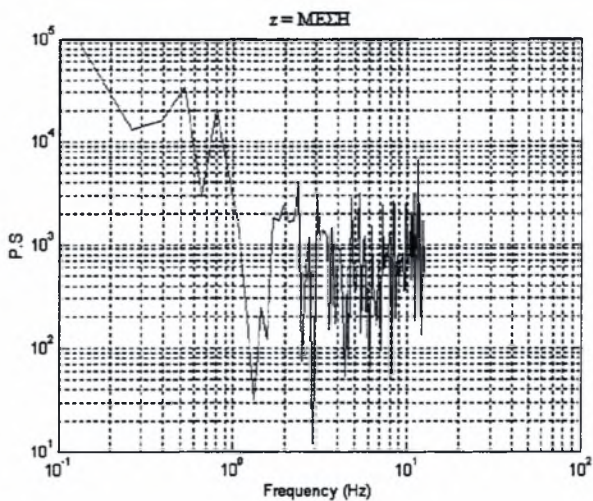
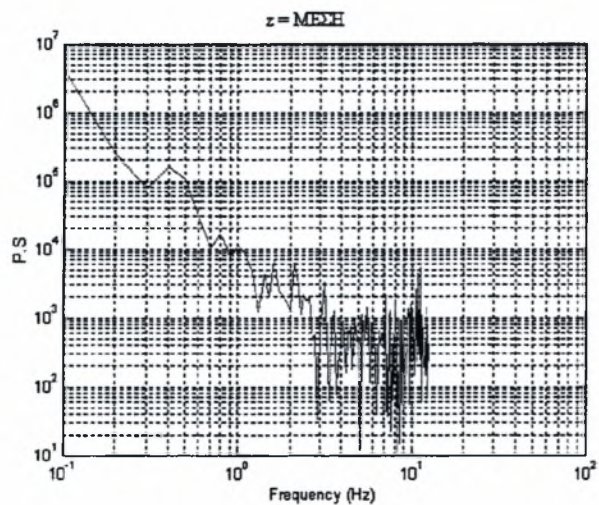
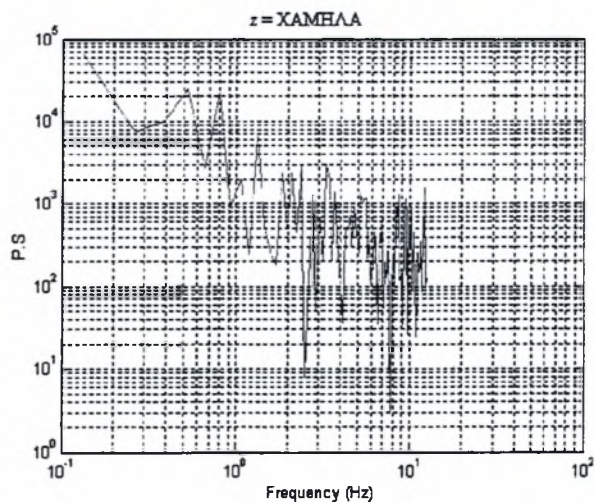
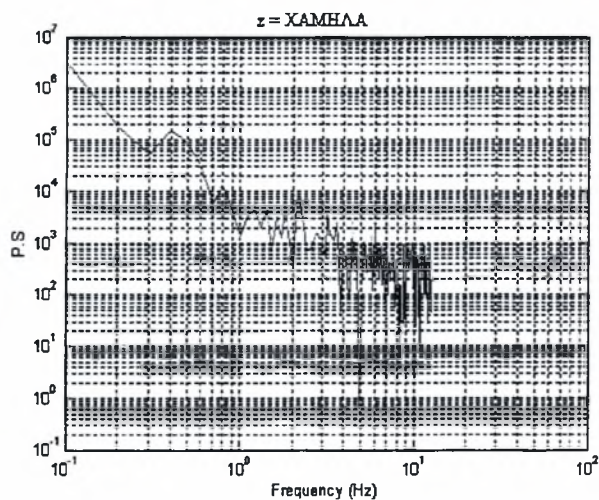


Θέση downward - $U_0=7,70\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο



Σχολιασμός:

Αυξάνοντας η ταχύτητα της ελεύθερης ροής ακόμα περισσότερο από 2,55m/s σε 7,70m/s, παρατηρούμε ότι:

Οι συχνότητες που οφείλονται στην επίδραση των δινών που δημιουργούνται από το χείλος της κοιλότητας υπερσχύουν έναντι των αντίστοιχων του κυλίνδρου και στην περίπτωση που υπάρχει κύλινδρος τοποθετημένος στη ροή. Αυτό ίσως να συμβαίνει λόγω της μεγάλης ταχύτητας U_0 , με συνέπεια μεγάλο ποσοστό των δινών να μην μπορεί να εισχωρήσει μέσα στην κοιλότητα.

Στην θέση leeward η παρουσία του κυλίνδρου μειώνει την ένταση των δινών στις θέσεις $z=MEΣH$ και $XEΙΛOΣ$.

Ενώ στις άλλες θέσεις $x\Delta$ και downward η παρουσία του κυλίνδρου αυξάνει την ένταση των δινών της κοιλότητας με μόνη εξαίρεση στις θέσεις $x\Delta$ για $z=XEΙΛOΣ$ και downward για $z=XEΙΛOΣ$ όπου έχουμε πολύ μεγάλη μείωση (από 10^4 σε 10^2).

Όταν δεν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → $MEΣH$
 $x\Delta$ → $XEΙΛOΣ$
 Downward → $XEΙΛOΣ$

Όταν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → $XAMH\Lambda\Lambda$
 $x\Delta$ → $XAMH\Lambda\Lambda$
 Downward → $MEΣH$

5.3.1.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Σταθερή ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=1,80$ m/s, και θέρμανση εσωτερικά της κοιλότητας, για δυο διαφορετικές περιπτώσεις:

1) χωρίς κύλινδρο

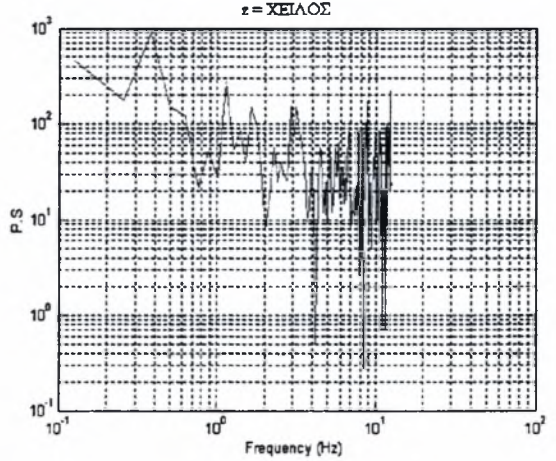
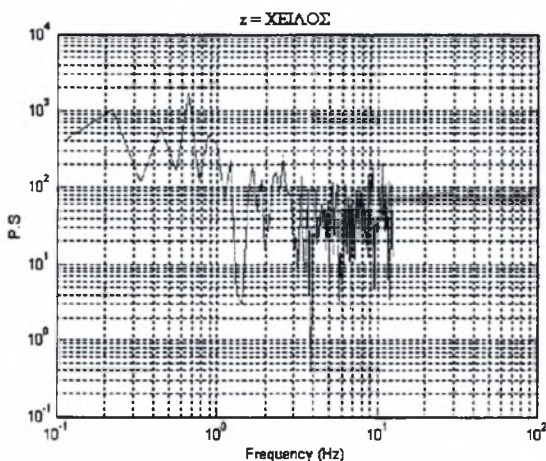
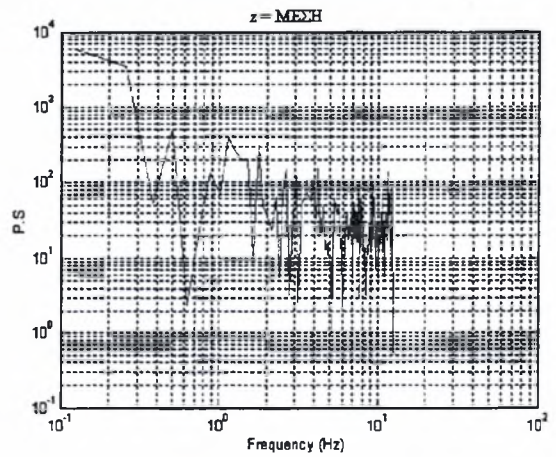
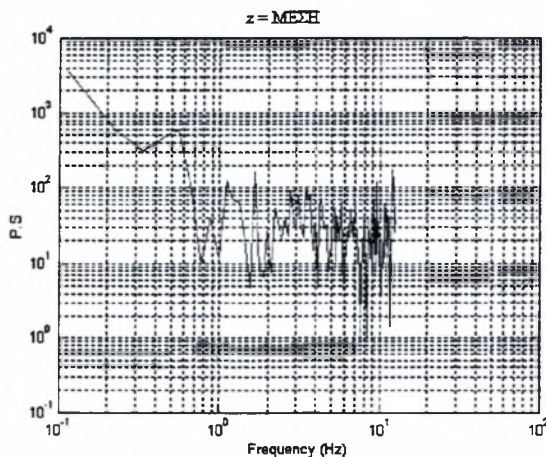
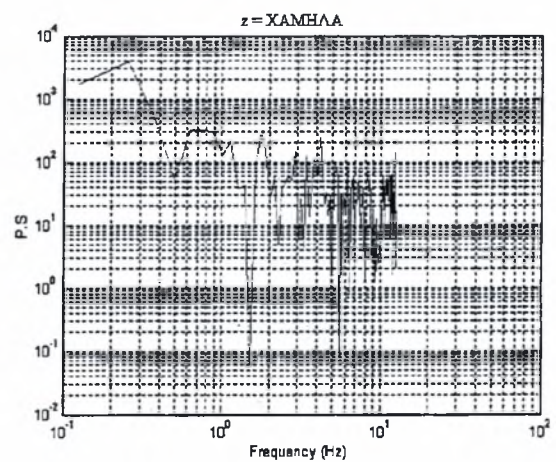
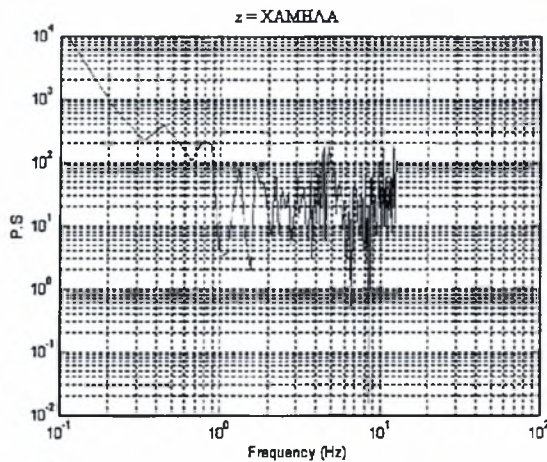
2) με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ $4*D$ ανάντη και σε ύψος $2*D$ πάνω, από την κοιλότητα:

Θέση leeward - $U_0=1,80\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο

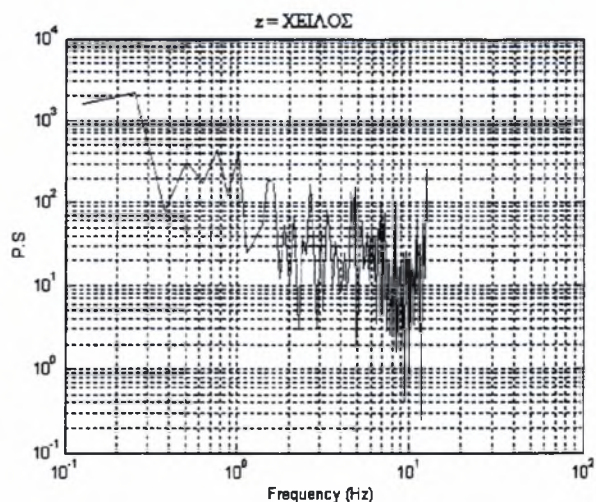
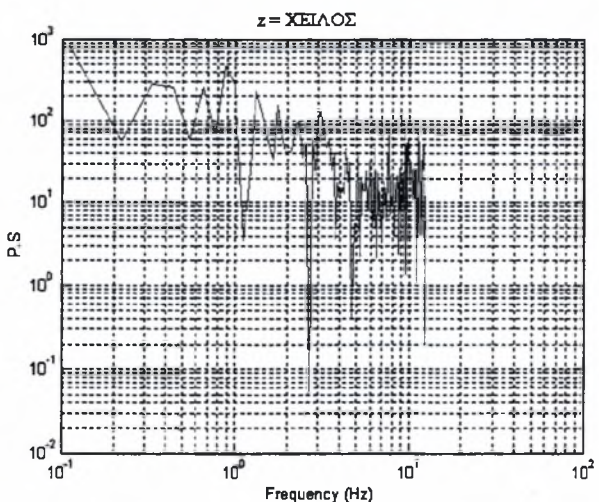
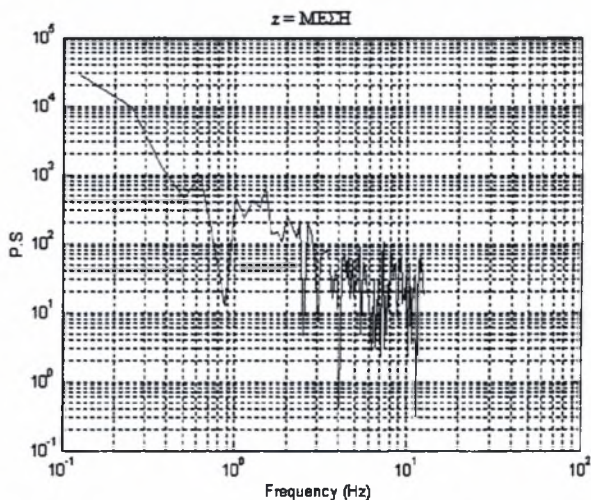
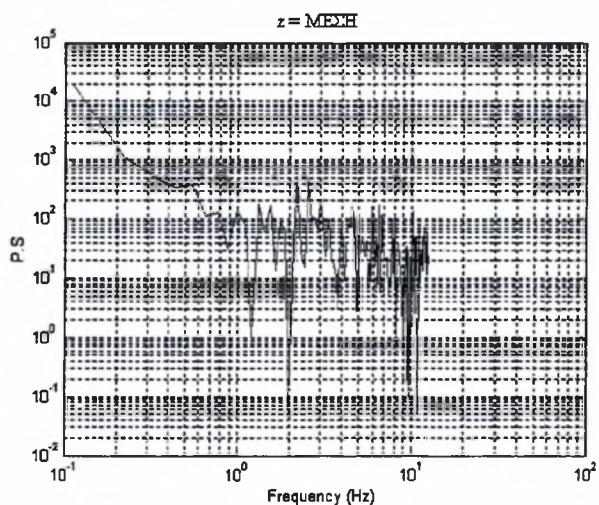
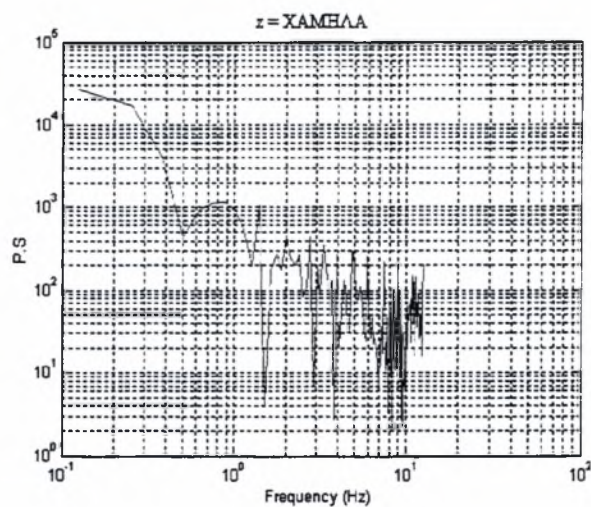
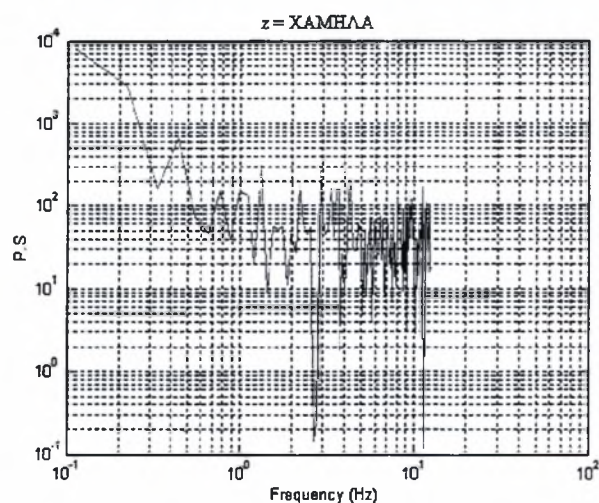


Θέση $x \Delta$ - $U_0=1,80\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο

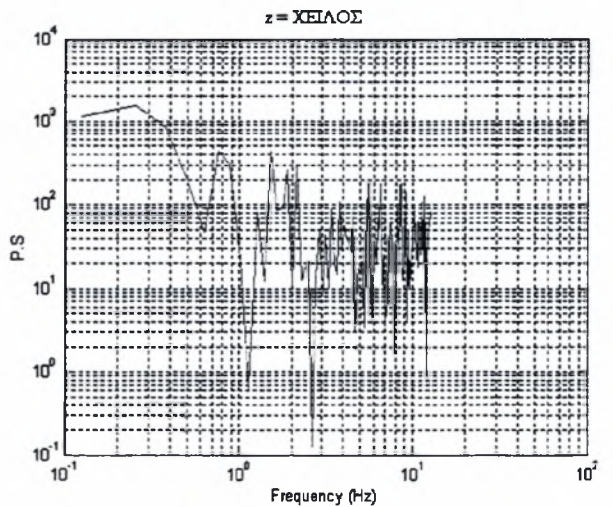
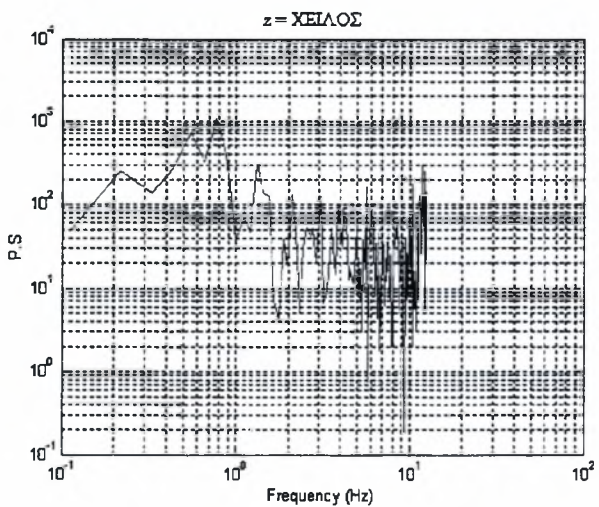
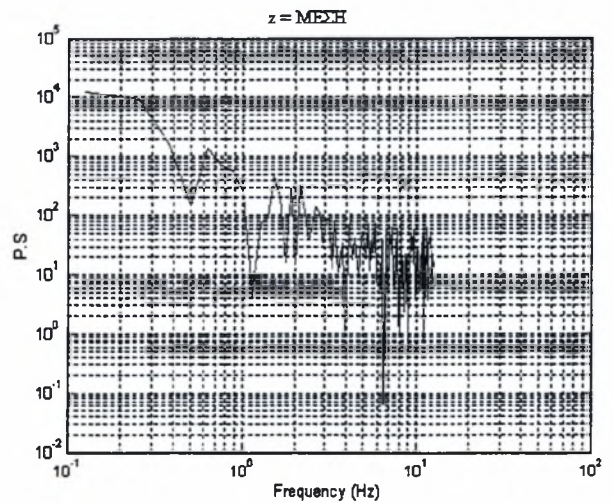
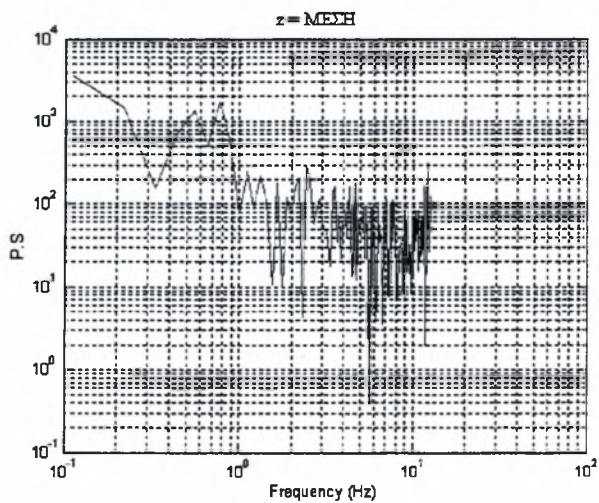
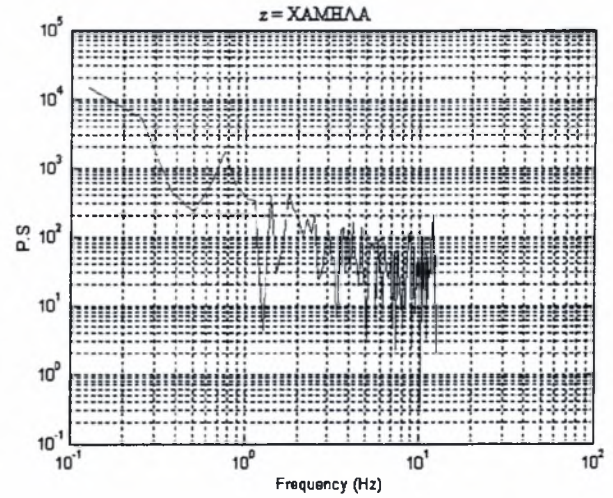
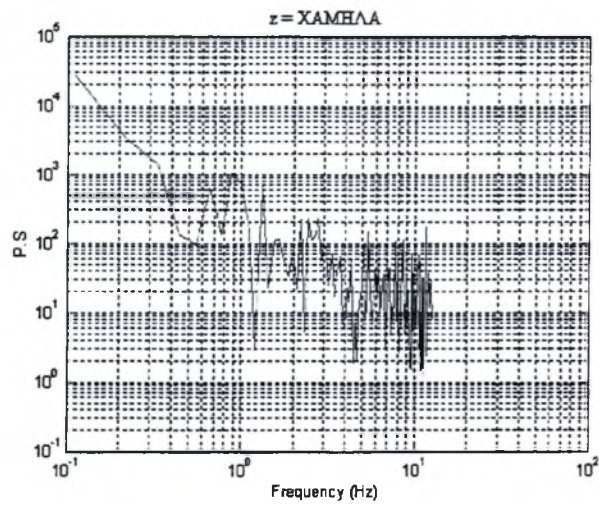


Θέση downward - $U_0=1,80\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο



Σχολιασμός:

Σε όλες τις περιπτώσεις χωρίς κύλινδρο, η κύρια πηγή εισαγωγής διαταραχών στην κοι-
λότητα είναι η ίδια η κοιλότητα.

Θέση Leeward:

Η κοιλότητα υπερισχύει στην δημιουργία των κύριων διαταραχών ακόμη και όταν είναι τοποθετημένος ο κύλινδρος. Έχουμε σχεδόν ίδιες κατανομές όπως στην περίπτωση χωρίς θέρμανση. Απλά έχουμε λίγο μικρότερη ένταση των διαταραχών στην περίπτωση με κύλινδρο και θέρμανση για τις θέσεις $z=XAMH\Lambda\Lambda$ και $ME\varSigma H$ σε αντίθεση με την περίπτωση χωρίς θέρμανση.

Θέση $x\Delta$:

Εδώ η παρουσία του κυλίνδρου ελαττώνει την ένταση των δινών στην θέση $z=ME\varSigma H$ και την αυξάνει στην θέση $z=XE\iota\Lambda O\varSigma$.

Επίσης οι συχνότητες αφορούν τον κύλινδρο ως κύρια πηγή διαταραχής μόνο για τα $z=XAMH\Lambda\Lambda$ και $z=ME\varSigma H$.

Θέση Downward:

Η κοιλότητα υπερισχύει έναντι του κυλίνδρου μόνο στη θέση $z=XE\iota\Lambda O\varSigma$. Η παρουσία του κυλίνδρου ελαττώνει το μέγεθος των διαταραχών.

Όταν δεν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → καμία διαφοροποίηση, σχεδόν ίδια ένταση σε όλα τα z

$x\Delta$ → $XAMH\Lambda\Lambda$

Downward → $ME\varSigma H+XE\iota\Lambda O\varSigma$

Όταν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → $XE\iota\Lambda O\varSigma$

$x\Delta$ → $XE\iota\Lambda O\varSigma$

Downward → $XE\iota\Lambda O\varSigma$

5. 3.1.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Σταθερή ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_0=2,55$ m/s, και θέρμανση εσωτερικά της κοιλότητας, για δυο διαφορετικές περιπτώσεις:

1) χωρίς κύλινδρο

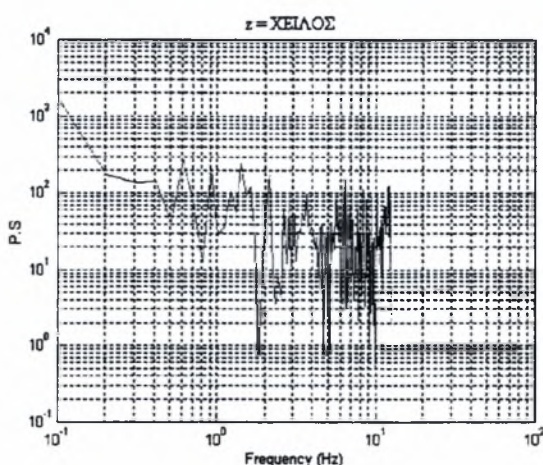
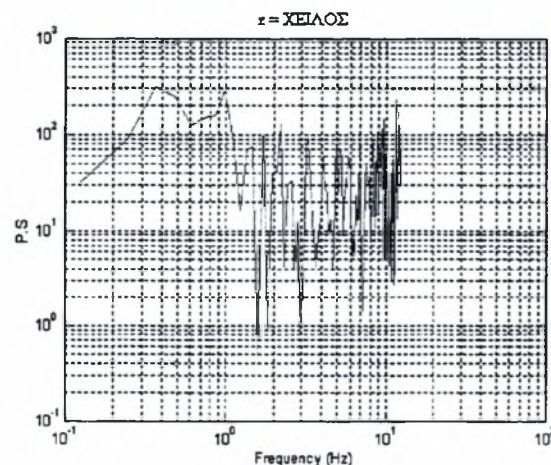
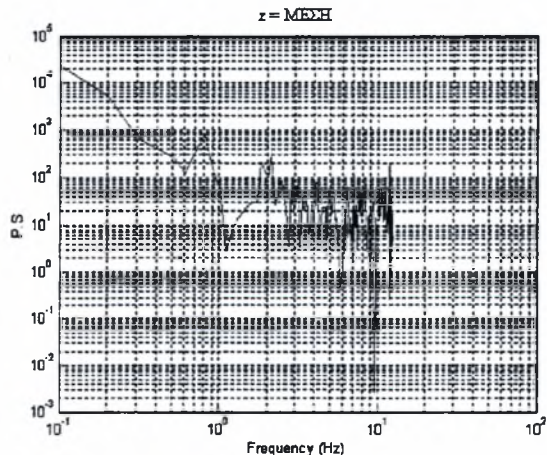
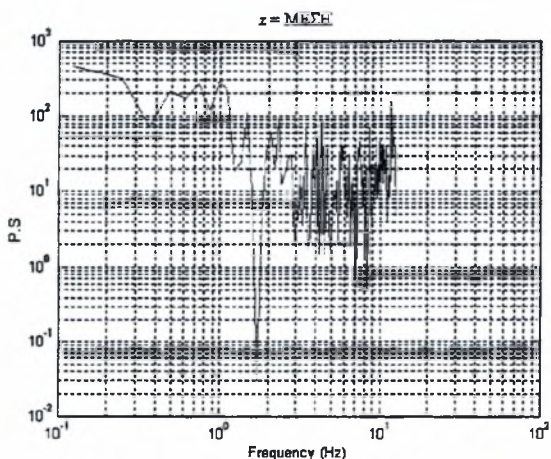
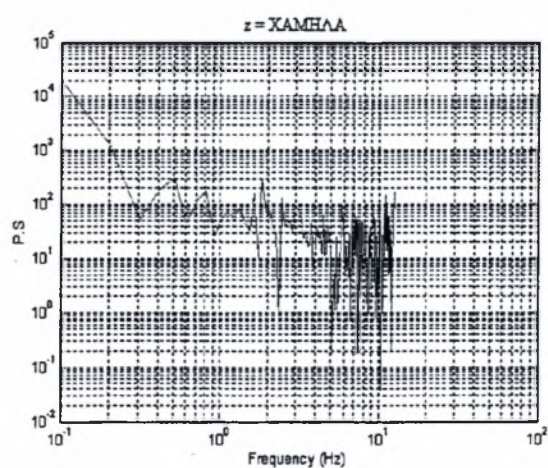
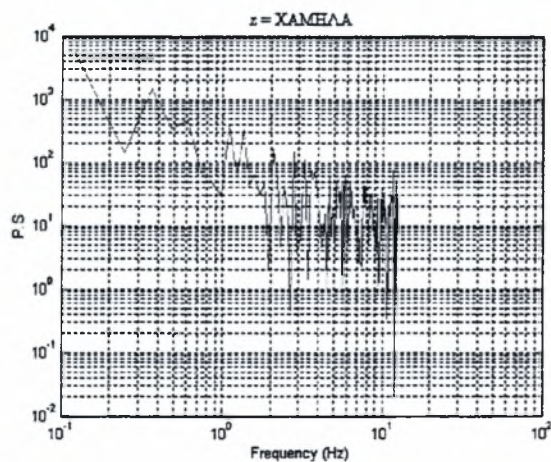
2) με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ $4*D$ ανάντη και σε ύψος $2*D$ πάνω, από την κοιλότητα:

Θέση leeward - $U_0=2,55\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο

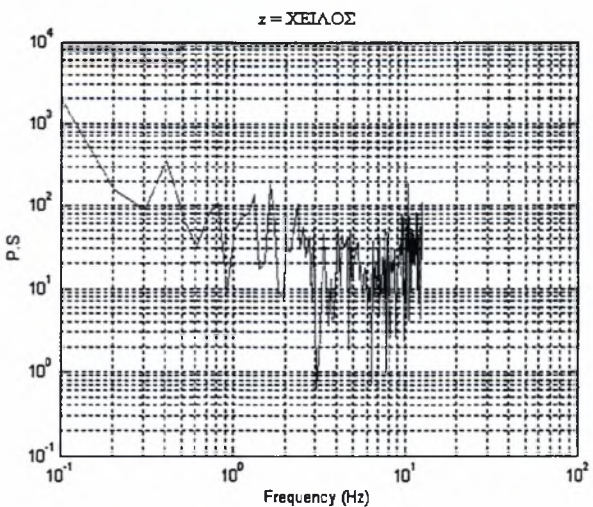
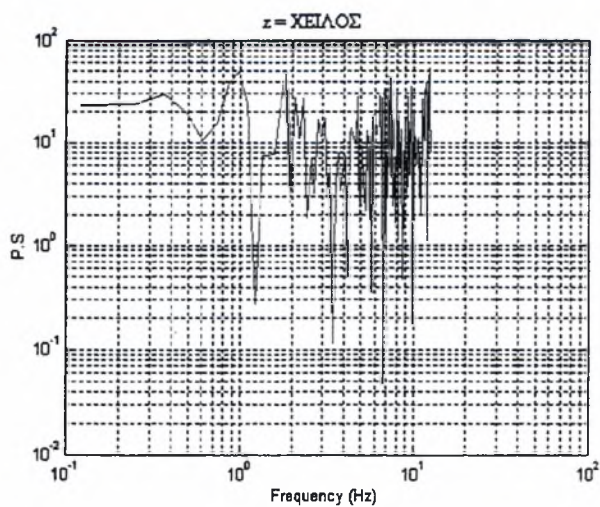
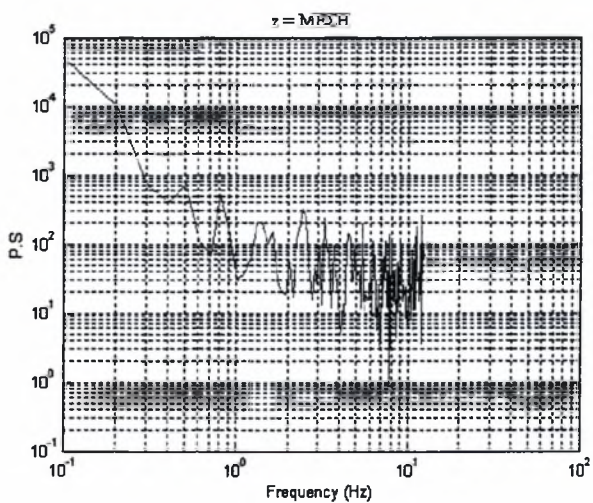
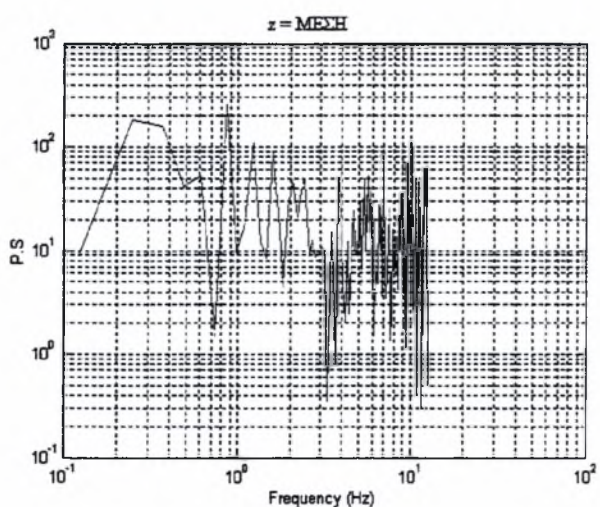
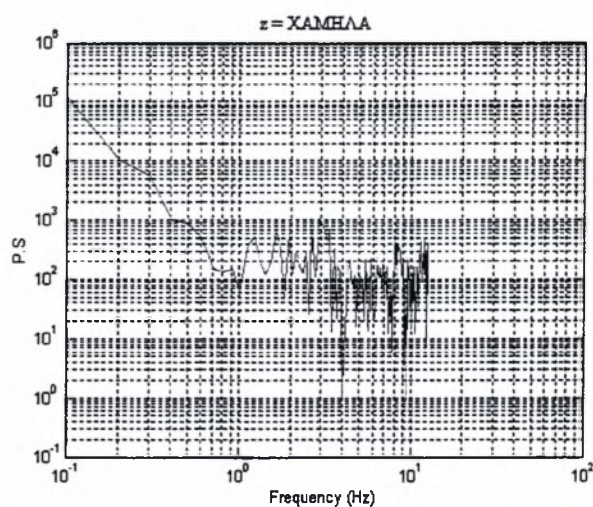
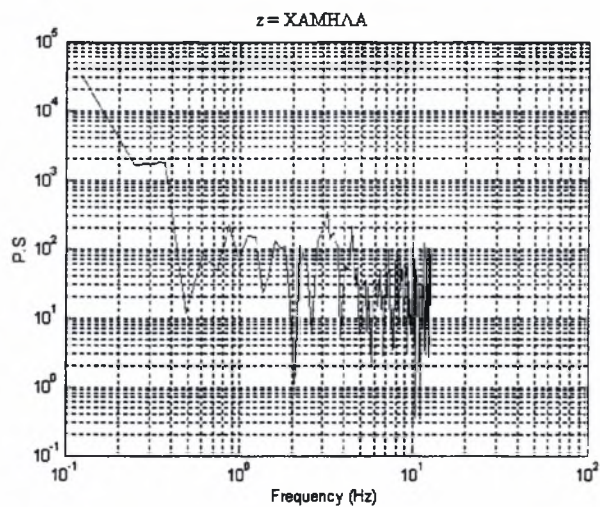


Θέση x Δ - $U_0=2,55\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο

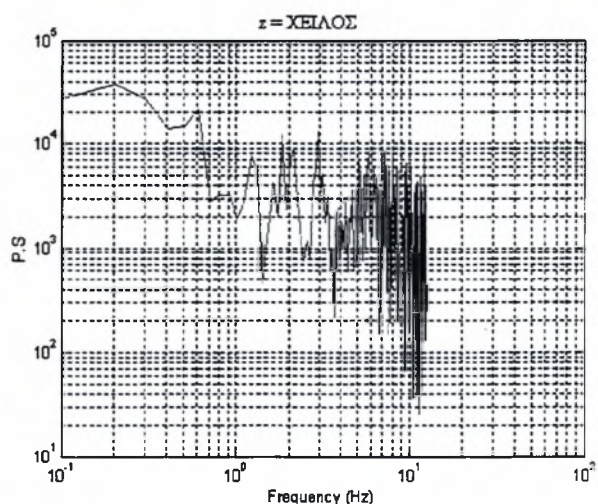
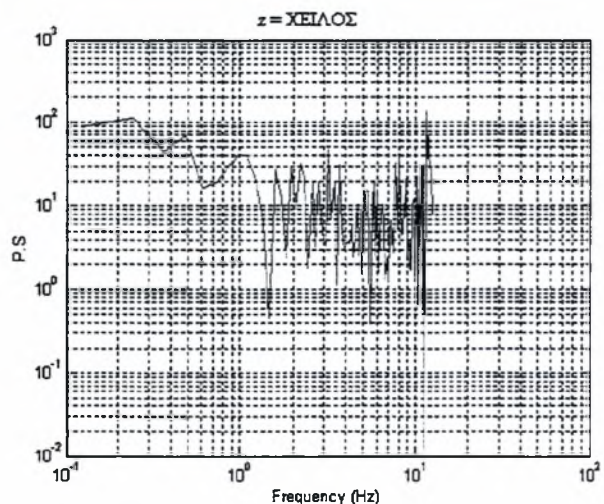
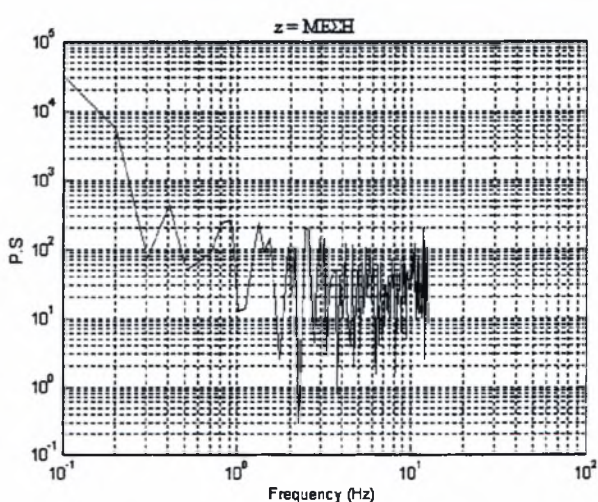
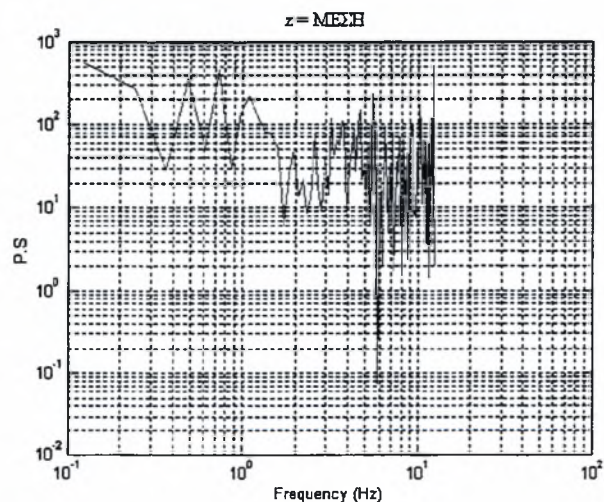
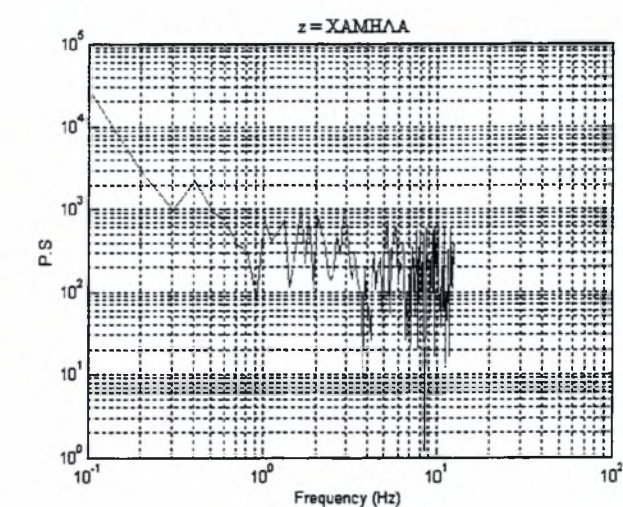
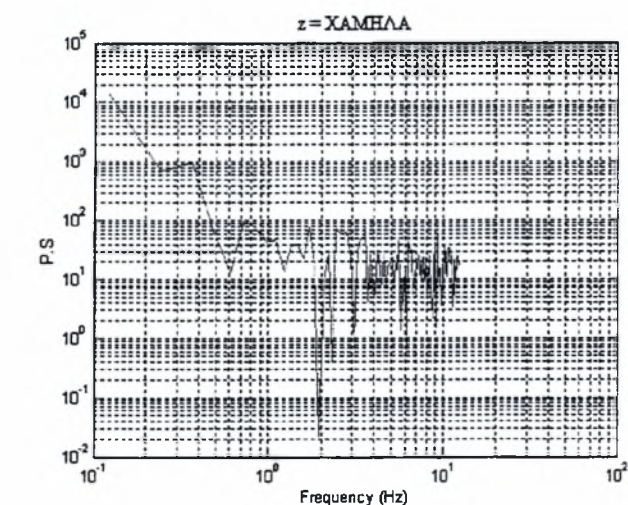


Θέση downward - $U_0=2,55\text{m/s}$

Διαγράμματα P.S.D.

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο



Σχολιασμός:

Σε όλες τις περιπτώσεις χωρίς κύλινδρο, η κύρια πηγή εισαγωγής διαταραχών στην κοιλότητα είναι η ίδια η κοιλότητα.

Παρά που στην αντίστοιχη περίπτωση χωρίς θέρμανση (που έχει προαναφερθεί) η παρουσία του κυλίνδρου ήταν αυτή που υπερίσχυε στην δημιουργία δινών μέσα στην κοιλότητα, τώρα εδώ οι διαταραχές πότε έχουν "peak" που αντιστοιχεί στο κύλινδρο και πότε στην κοιλότητα ως κύριους υπαίτιους εισαγωγής διαταραχών.

Επίσης, ενώ στην περίπτωση χωρίς θέρμανση η παρουσία του κυλίνδρου αύξανε το μέγεθος της έντασης των δινών, τώρα πότε το αυξάνει και πότε το μειώνει.

Όταν δεν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → ΧΕΙΛΟΣ
xΔ → ΧΑΜΗΛΑ
Downward → ΜΕΣΗ

Όταν υπάρχει κύλινδρος παρατηρούμε ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν μέγιστο για τις περιοχές:

Leeward → ΧΑΜΗΛΑ+ΜΕΣΗ
xΔ → ΧΑΜΗΛΑ
Downward → ΧΕΙΛΟΣ

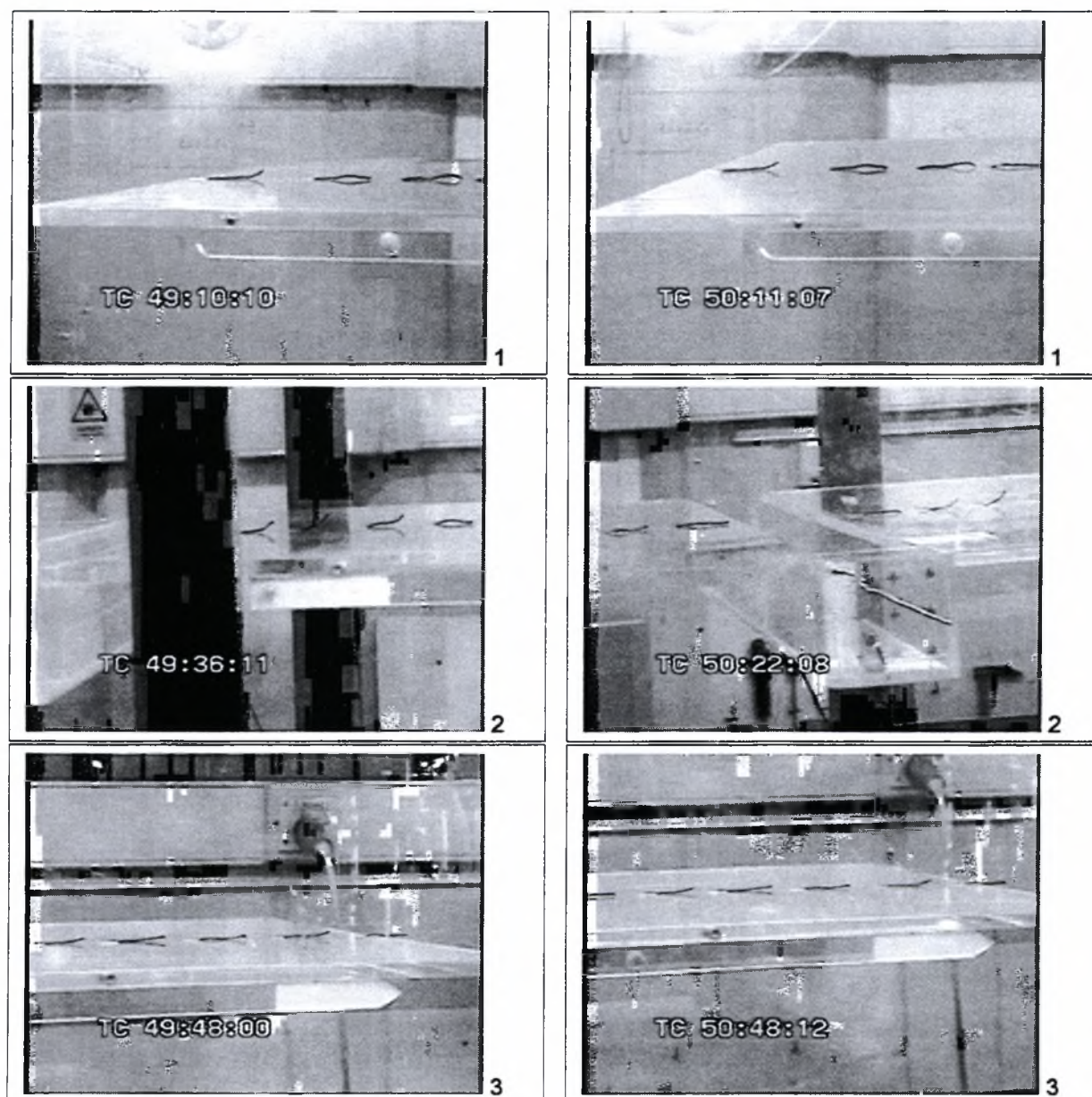
5.3.2.1 Οπτικοποίηση της ροής με νήματα $U_0=5\text{m/s}$ (16,7 Hz)

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ των περιοχών:

εμπρός πλάκας, → καρέ 1
 κοιλότητας → καρέ 2
 πίσω πλάκας, → καρέ 3

Χωρίς κύλινδρο

Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ ανάντη της
 κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D



Σχολιασμός:

Και στις δυο περιπτώσεις, η ροή μπροστά από την κοιλότητα (στο ανάντη), είναι προσκολλημένη πάνω στην εμπρός πλάκα. Τα νήματα παρουσιάζουν μια μεγάλη σταθερότητα, είναι σχεδόν ακλόνητα.

Πίσω από την κοιλότητα όμως παρατηρούμε δύο περιοχές με ανακυκλοφορία (τα νήματα ανασηκώνονται). Αυτές οι περιοχές είναι πίσω από την κοιλότητα στην θέση χδ:

Η 1^η περίπου 100mm και η 2^η περίπου 300mm.

Όταν όμως τοποθετηθεί ο κύλινδρος, η αποκόλληση που παρουσιάζεται πίσω από την κοιλότητα είναι στις ίδιες περιοχές με την διαφορά ότι η περιοχή ανακυκλοφορίας λόγω αποκολλημένης ροής έχει τώρα πιο μεγάλη έκταση και είναι πιο έντονη. Δηλαδή η ροή αποκολλάται, επανακολλάται, ξανά αποκολλάται και επανακολλάται και μένει προσκολλημένη μέχρι το τέλος που αφήνει την ακμή φυγής της πίσω πλάκας.

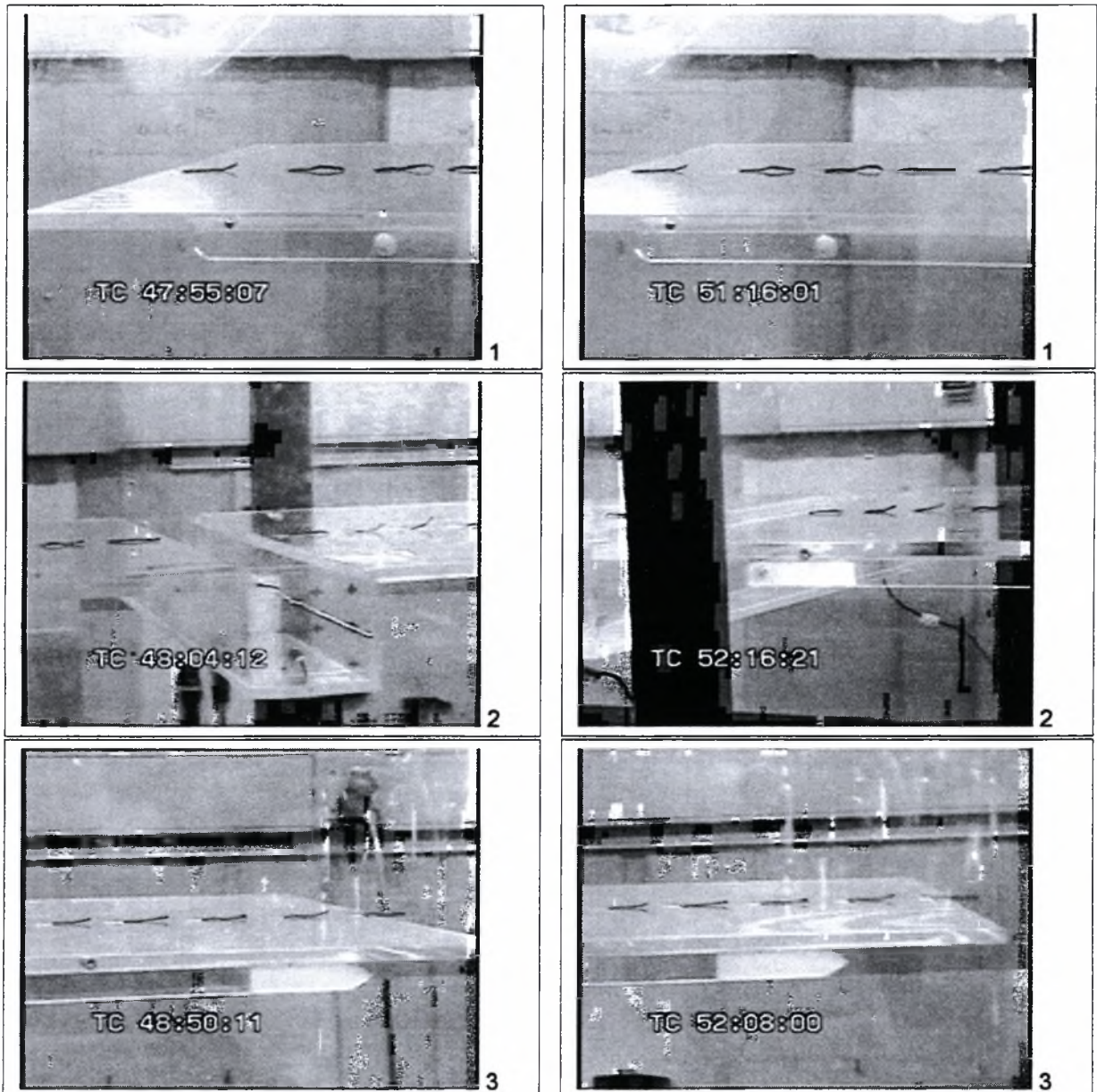
5.3.2.2 Οπτικοποίηση της ροής με νήματα $U_0=10\text{m/s}$ (33,4 Hz)

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ των περιοχών:

εμπρός πλάκας, → καρέ 1
 κοιλότητας → καρέ 2
 πίσω πλάκας, → καρέ 3

Χωρίς κύλινδρο

**Με κύλινδρο ανάντη της
κοιλότητας 2D και σε ύψος 2D**



Σχολιασμός:

Και στις δυο περιπτώσεις, η ροή μπροστά από την κοιλότητα (στο ανάντη), είναι προσκολλημένη πάνω στην εμπρός πλάκα. Τα νήματα όμως δεν παρουσιάζουν τη σταθερότητα, που παρουσίαζαν στα 5m/s (16,7Hz).

Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση που τοποθετείται κύλινδρος, το νήμα εμπρός ακριβώς από την κοιλότητα (κοντά στο $x5$), κάνει περιοδικές αναταράξεις, πράγμα που δείχνει ότι συμβαίνει μια περιοδική αστάθεια στο σημείο εκείνο. Ίσως να οφείλεται στην περιοδική εκβολή της δίνης που ανακυκλοφορεί μέσα στην κοιλότητα. Και είναι αυτό τώρα παρα-

τηρήσιμο λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας ελεύθερης ροής που κάνει τα φαινόμενα εντονότερα.

Μπορεί όμως να είναι λόγω της εκροής δινών Von-Karman από τον κύλινδρο.

Πιθανόν όμως να είναι και ένας συνδυασμός των δυο παραπάνω παραγόντων.

Πίσω από την κοιλότητα παρατηρούμε πάλι δύο περιοχές με ανακυκλοφορία. Αυτές οι περιοχές είναι πίσω από την κοιλότητα στην θέση x6:

Η 1^η περίπου 100mm και η 2^η περίπου 300mm. Παρουσιάζονται και εδώ τα ίδια φαινόμενα όπως στην περίπτωση των 5m/s (16,7Hz).

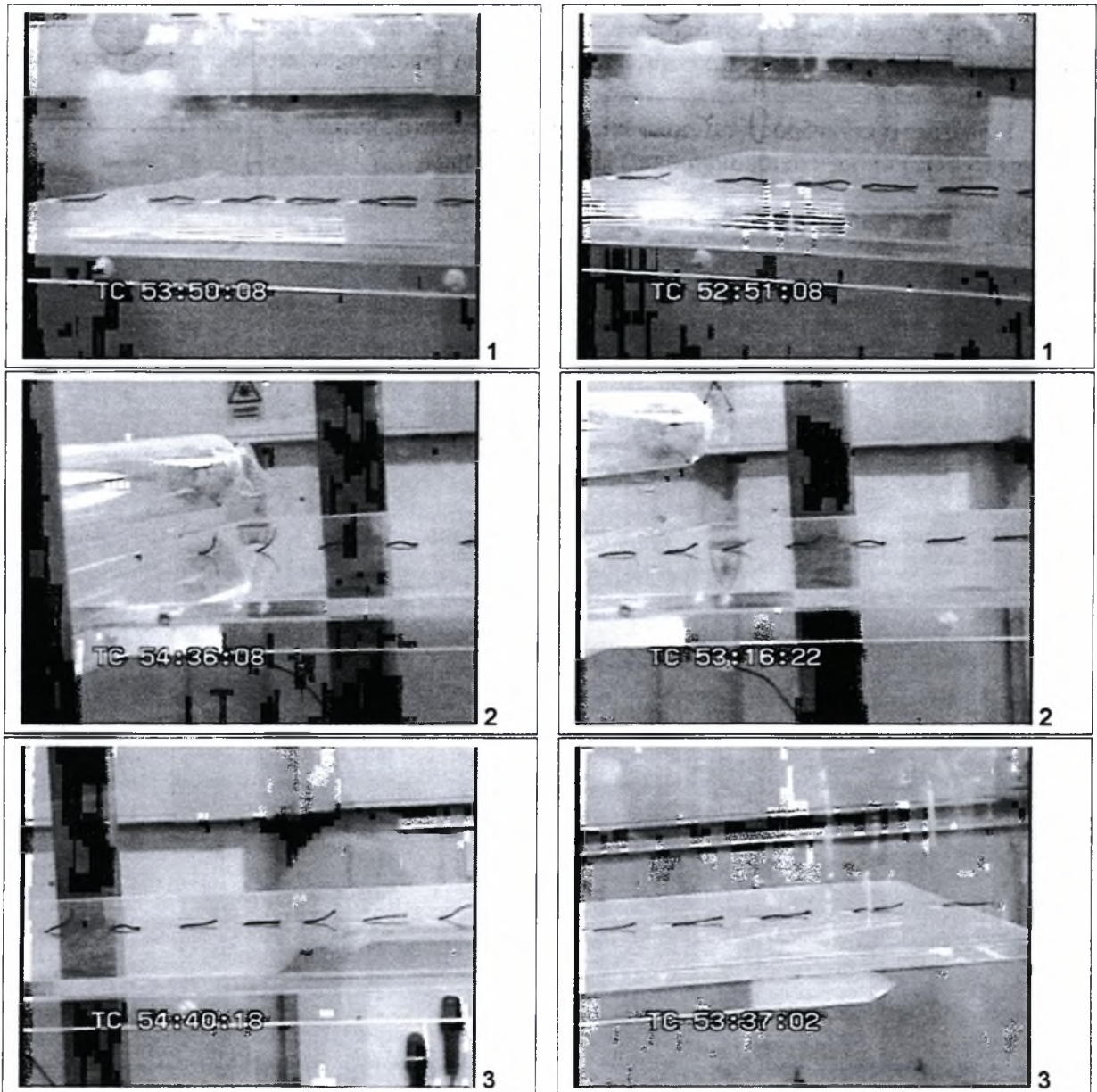
5.3.2.3 Οπτικοποίηση της ροής με νήματα $U_0=10\text{m/s}$ (33,4 Hz)

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ των περιοχών:

εμπρός πλάκας, → καρέ 1
 κοιλότητας → καρέ 2
 πίσω πλάκας, → καρέ 3

Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ σε ύψος $18\text{mm}(0,3*D)$ πάνω από την κοιλότητα

Με κύλινδρο $\varnothing 60\text{mm}$ σε ύψος $2D$ πάνω από την κοιλότητα



Σχολιασμός:

Και στις δυο περιπτώσεις, η ροή μπροστά από την κοιλότητα (στο ανάντη), είναι προσκολλημένη πάνω στην εμπρός πλάκα. Τα νήματα όμως, δεν παρουσιάζουν τη σταθερότητα, που παρουσίαζαν στα 5m/s ($16,7\text{Hz}$).

Η παρουσία του κυλίνδρου 12mm ακριβώς πάνω από την κοιλότητα, δημιουργεί πολύ έντονη αποκόλληση και περιοχές ανακυκλοφορίας του ρευστού σε απόσταση 100mm περίπου η $1^{\text{η}}$ και περίπου 300mm η $2^{\text{η}}$, πίσω από την κοιλότητα. Στην συνέχεια η ροή επανακολλάται ξανά και μένει έτσι μέχρι που εγκαταλείπει την ακμή φυγής της πίσω πλάκας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με την παρουσία του κυλίνδρου σε αυτό το χαμηλό ύψος, τα νήματα αμέσως μετά την κοιλότητα κινούνται αριστερά-δεξιά, πράγμα που σημαίνει έντονη τρισδιάστατη ροή. Επίσης όλα τα νήματα της πίσω πλάκας παρουσιάζουν μια διαταραχή, χωρίς να είναι η ροή αποκολλημένη σε όλο το μήκος της πλάκας.

Όταν ο ίδιος κύλινδρος είναι σε ύψος 2D ακριβώς πάνω από την κοιλότητα, δημιουργούνται πάλι τα ίδια φαινόμενα όπως με τον κύλινδρο στα 18mm, αλλά δεν έχουμε τις διαταραχές ούτε την ένταση που είχαμε προηγουμένως. Ούτε παρατηρείται η τρισδιάστατη ροή.

Ας σημειωθεί πως η τρισδιάστατη ροή παρουσιάστηκε μόνο στην περίπτωση με τον κύλινδρο στα 18mm, για όλο το φάσμα των πειραμάτων της οπτικοποίησης με νήματα

Επίσης κανένα νηματίδιο, από αυτά που βρίσκονταν ανάντη της κοιλότητας, δεν έδειξε να διαταράσσεται ιδιαίτερα από την παρουσία των κυλίνδρων ακριβώς πάνω από την κοιλότητα.

Ενώ όταν ο κύλινδρος ήταν τοποθετημένος ανάντη της κοιλότητας και για την ταχύτητα 10m/s (16,7Hz) υπήρξε διαταραχή όπως προαναφέρθηκε.

6ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6. Συμπεράσματα

6.1 Μέτρηση ταχυτήτων

Όπως φάνηκε έχουμε τυρβώδη οριακά στρώματα σε όλες τις περιπτώσεις, από πριν να φτάσει η ροή στην κοιλότητα. Η ροή σε μικρό ύψος z από την πλάκα δείχνει να έχει μεγαλύτερη ταχύτητα. Αυτό ίσως να οφείλεται στην συμπίεση που δέχεται λόγω της μικρής αρνητικής κλίσης των πλακών-μοντέλου. Ειδικά όμως στις περιοχές πίσω από την θέση x_0 , όπου με την οπτικοποίηση με νήματα ανιχνεύθηκε πως υπάρχει ανακυκλοφορία σε ορισμένα τμήματα της πίσω πλάκας, ίσως να είναι και ένας άλλος λόγος υπαίτιος για την τοπική αύξηση της ταχύτητας στα χαμηλά z .

Το ανεμόμετρο hot-wire δεν αντιλαμβάνεται την κατεύθυνση της ταχύτητας (μέσα σε ένα επίπεδο κάθετο στον αισθητήρα). Συνεπώς όταν μετρούμε σε περιοχές με ανακυκλοφορία όπου δηλαδή συνυπάρχουν "θετικές" και "αρνητικές" ταχύτητες, η αδυναμία του hot-wire να διακρίνει τις θετικές από τις αρνητικές τιμές, οδηγεί σε μια τεχνητή αύξηση του μεγέθους της μέσης ταχύτητας.

Η διαφορά που φαίνεται σε κάποια προφίλ πιθανόν να οφείλεται και στην ανακρίβεια του ελεγκτή του ανεμιστήρα, ο οποίος αν και διατηρούσε μια σταθερή ταχύτητα στροφών (r.p.m.), ήταν αρκετά δύσκολο να δώσει στην ελεύθερη ροή ακριβώς την ίδια ταχύτητα για διαφορετικής μορφής αντικείμενα που τοποθετούσαμε στην αεροσήραγγα. Αυτό οφειλόταν στο ότι η ροή του αέρα συναντούσε μπροστά της διαφορετικής μορφής εμπόδια (π.χ. άλλο όταν είχαμε μόνο την μεγάλη κοιλότητα κάτω μόνη της και άλλο όταν προσθέταμε και τον μεγάλο κύλινδρο μπροστά από αυτή, ή τοποθετούσαμε την μικρή κοιλότητα). Ως εκ τούτου, είχαμε και διαφορετική πτώση πίεσης η οποία έπρεπε να αντισταθμιστεί κάθε φορά από διαφορετικές στροφές του κινητήρα στον ανεμιστήρα.

Η επίδραση του κυλίνδρου στη διαμόρφωση της ροής εξαρτάται από την θέση στην οποία θα τοποθετηθεί σε σχέση με την κοιλότητα. Όπως είδαμε, ανάλογα με την θέση του μπορούμε να έχουμε αποτελέσματα που διαφέρουν ριζικά, μερικές φορές μάλιστα είναι και αντικρουόμενα.

Γενικά, φάνηκε πως όταν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος ακριβώς πάνω από την κοιλότητα ή λίγο ανάντη από αυτή και σε ύψος τέτοιο ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση του οριακού στρώματος των πλακών-κυλίνδρου και της ωρολογιακά ανακυκλοφορούσας δίνης εντός της κοιλότητας, τότε έχουμε επιτάχυνση της ταχύτητας ροής κάτω από τον κύλινδρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγαλύτερη υποπίεση πάνω από την κοιλότητα αναγκάζοντας την δίνη να εκβάλλει πιο συχνά έξω από την κοιλότητα.

Συνεπώς έχουμε καλύτερους ρυθμούς απαγωγής κάποιου μεγέθους μέσα από την κοιλότητα, όπως η θερμοκρασία ή κάποιος ρύπος.

Πάντως αν στη θέση που βρίσκεται η κοιλότητα υπήρχε ακλόνητο στερεό τοίχωμα η τοπική επιτάχυνση του ρευστού κάτω από τον κύλινδρο θα ήταν μεγαλύτερη.

Αντιθέτως, όταν ο κύλινδρος βρίσκεται κατάντη ή ανάντη αλλά πολύ μακριά της κοιλότητας, σε ύψος τέτοιο ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση του οριακού στρώματος της πλάκας και των δινών Vonk-Karman που αποκολλώνται από τον κύλινδρο, παρατηρείται επιβράδυνση της ταχύτητας ροής για τα ίδια ύψη z που στην προηγούμενη περίπτωση είχαμε επιτάχυνση.

Επίσης πάντα η ροή πίσω από τον κύλινδρο και σε απόσταση μερικά D σχηματίζει ένα χαρακτηριστικό κύρτωμα στο προφίλ της, στο ύψος της θέσης z του κυλίνδρου, η μορφή του οποίου γίνεται όλο και πιο ανεπαίσθητη όσο απομακρυνόμαστε από τον κύλινδρο.

Η κοιλότητα παρατηρήθηκε πως "κόβει" ταχύτητα από το ρευστό σχεδόν ομοιόμορφα και τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθός της, (στην περίπτωσή μας το πλάτος του ανοίγματός της).

Το πάχος του οριακού στρώματος που διαμορφώνει η ροή περνώντας πάνω από μια βυθισμένη κοιλότητα δεν εξαρτάται από το μέγεθος της κοιλότητας. Αυτό φάνηκε στην δική μας περίπτωση που η ροή ήταν τυρβώδης πριν από την κοιλότητα και με σχετικά μεγάλο πάχος οριακού στρώματος.

Διαπιστώθηκε ότι η ροή "πληροφορείται" την ύπαρξη κοιλότητας με κάποιον ανεξερεύνητο μηχανισμό, πολύ προτού φτάσει στην περιοχή κοντά στην κοιλότητα.

Η παρουσία του κυλίνδρου αυξάνει την τύρβη και γενικά τροκαλεί με την ακολουθία δινών Von-Karman που εκρέουν πίσω του, μεγάλες διαταραχές στη ροή.

6.2 Μέτρηση Θερμοκρασιών

Μόνο μια σύντομη παρατήρηση στα έγχρωμα εποπτικά διαγράμματα των ισοθερμοκρασιακών κατανομών μέσα και λίγο έξω από την κοιλότητα, είναι αρκετή για να αντιληφθούμε την επίδραση που έχει η παρουσία ή μη του κυλίνδρου στη ροή.

Παρατηρούμε σε κάθε περίπτωση, ότι το κατάντη (downward) τοίχωμα είναι το καλύτερα εξαεριζόμενο – ψυχόμενο. Κυρίως στην περιοχές κοντά στο χείλος και χαμηλά. Αξιοσημείωτο είναι πως πολύ χαμηλά παρατηρούνται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εντός κοιλότητας και για τις δυο περιπτώσεις.

Συνεπώς η θέση αυτή έχει τον καλύτερο ρυθμό καθαρισμού από τους ρύπους σε μια οδική χαράδρα, αν προσομοιώνουμε την εκπομπή ρύπων από τα οχήματα με το σύρμα της αντίστασης χρωμονικελίνης.

Αντιθέτως στην χειρότερη κατάσταση από πλευράς εξαερισμού-δροσισμού βρίσκεται το ανάντη τοίχωμα της κοιλότητας και ιδιαίτερα στο μέσο ύψος του.

Τα παραπάνω οφείλονται στην φορά περιστροφής της δίνης (ωρολογιακή) και στην επίδραση των διαταραχών που εισάγει ο κύλινδρος (δίνες Von-Karman) μέσα στην κοιλότητα. Η καλύτερη αναμειξιμότητα με τα υψηλότερα ποσοστά τύρβης της ταχύτητας, συντελούν σε μείωση της θερμοκρασίας μέσα στην κοιλότητα με εξομάλυνση των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών που παρατηρούνται στην χωρίς κύλινδρο περίπτωση.

Και στις δυο περιπτώσεις υπάρχουν κλίσεις θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια μεταξύ του χείλους της κοιλότητας και της ελεύθερης ροής.

Στην περίπτωση της παροδικής εισαγωγής – απομάκρυνσης ενός ρύπου ή θερμότητας κτλ. μέσα στην κοιλότητα, παρατηρούμε ότι η παρουσία του κυλίνδρου αυξάνει τον ρυθμό εισαγωγής-απομάκρυνσης στο ανάντη τοίχωμα της κοιλότητας.

Η επίδραση του κυλίνδρου όσον αφορά τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, γίνεται περισσότερο αισθητή στην κατάντη πλευρά της κοιλότητας στο μέσον της και ιδίως σε χαμηλά z. Και αυτό λόγω της ωρολογιακά περιστρεφόμενης δίνης που δημιουργείται μέσα στην κοιλότητα και είναι άμεσα επηρεαζόμενη από την συστοιχία δινών Von-Karman που εκρέει από τον κύλινδρο και εισέρχεται μέσα στην κοιλότητα.

Ο κυρίαρχος τρόπος μετάδοσης θερμότητας (στο συγκεκριμένο πείραμα) ήταν η εξαναγκασμένη συναγωγή.

Επίσης η ροή μέσα στη κοιλότητα είναι τυρβώδης.

Στην περίπτωση με κύλινδρο έχουμε μεγαλύτερους αριθμούς Nu. Καθώς ο κύλινδρος, με την συστοιχία δινών Von-Karman που εκρέει στον απόρρου του, εισάγει διαταραχές μέσα στην κοιλότητα, με αποτέλεσμα να έχουμε πιο έντονα φαινόμενα συναγωγής από την περίπτωση χωρίς κύλινδρο.

Ακόμη, παρά του ότι έχουμε μεγαλύτερη αποβολή θερμότητας με την παρουσία του κυλίνδρου, οι ρυθμοί αποβολής θερμότητας και για τις δυο περιπτώσεις είναι ανάλογοι.

Με την αύξηση της ταχύτητας της ελεύθερης ροής η θερμοκρασία σε κάθε σημείο εντός της κοιλότητας μειώνεται σχεδόν ανάλογα

Η αύξηση της θερμοκρασίας του σύρματος της αντίστασης είναι σχεδόν ανάλογη με την αύξηση της εφαρμοζόμενης ισχύος στα άκρα του.

6.3 Οπτικοποίηση της ροής

Από την ανάλυση της οπτικοποίησης με καπνό, προέκυψαν τα εξής:

Η ένταση των διαταραχών μέσα στην κοιλότητα επηρεάζεται από την θέση του κύλινδρου και από την ταχύτητα της ελεύθερης ροής.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι παρατηρούμενες διαταραχές. Αυτό ισχύει μέχρι ενός ορίου, καθώς σε πολύ μεγάλες ταχύτητες οι δίνες Von-Karman που εκρέουν από τον κύλινδρο δεν "προλαβαίνουν" να εισέλθουν μέσα στην κοιλότητα.

Αντιθέτως, όταν η ταχύτητα της ελεύθερης ροής είναι πολύ μικρή, οι διαταραχές από τον κύλινδρο, παρά που εισέρχονται κατά μεγάλο ποσοστό στην κοιλότητα δεν είναι τόσο έντονες όσο οι διαταραχές που οφείλονται στην ίδια την κοιλότητα.

Σε όλες τις περιπτώσεις χωρίς κύλινδρο, η κύρια πηγή εισαγωγής διαταραχών στην κοιλότητα είναι η ίδια η κοιλότητα.

Στην περίπτωση που θερμαίνεται η αντίσταση εσωτερικά της κοιλότητας, παρατηρούμε πως έχουμε μικρότερη ένταση των διαταραχών που οφείλονται στον κύλινδρο, από την ένταση των ιδίων διαταραχών στην ίδια περίπτωση αλλά χωρίς θέρμανση.

Όσο μεγαλώνει η ταχύτητα της ελεύθερης ροής, η επίδραση του κύλινδρου, ενώ στην αντίστοιχη περίπτωση χωρίς θέρμανση, αύξανε το μέγεθος των διαταραχών, τώρα πότε το αυξάνει και πότε το μειώνει.

Από την ανάλυση της οπτικοποίησης με νήματα, προέκυψαν τα εξής:

Αυξάνοντας της ταχύτητα της ελεύθερης ροής η ροή μπροστά από την κοιλότητα (στο ανάντη), είναι προσκολλημένη πάνω στην εμπρός πλάκα. Αυτό ισχύει και για την περίπτωση χωρίς και για την περίπτωση με κύλινδρο ακριβώς πάνω ή ανάντη της κοιλότητας. Τα νήματα όμως δεν παρουσιάζουν τη σταθερότητα, που παρουσίαζαν στην χαμηλή ταχύτητα.

Η αυξημένη ταχύτητα ελεύθερης ροής όταν ο κύλινδρος βρίσκεται τοποθετημένος ανάντη κάνει φανερές περιοδικές αναταράξεις του νήματος εμπρός ακριβώς από την κοιλότητα (κοντά στο x_5) πράγμα που δείχνει ότι συμβαίνει μια περιοδική αστάθεια στο σημείο εκείνο. Ίσως να οφείλεται σε συνδυασμό της εκροής δινών Von-Karman από τον κύλινδρο και της περιοδικής εκβολής της δίνης που ανακυκλοφορεί μέσα στην κοιλότητα.

Σε κάθε περίπτωση, πίσω από την κοιλότητα παρατηρούμε δύο περιοχές με ανακυκλοφορία. Αυτές οι περιοχές είναι πίσω από την κοιλότητα η 1^η περίπου 100mm και η 2^η περίπου 300mm.

Όσο χαμηλότερα είναι ο κύλινδρος πάνω από την κοιλότητα τόσο πιο έντονη αποκόλληση και περιοχές ανακυκλοφορίας του ρευστού δημιουργούνται πίσω από την κοιλότητα. Στην συνέχεια η ροή επανακολλάται ξανά και μένει έτσι μέχρι που εγκαταλείπει την ακμή φυγής της πίσω πλάκας.

6.4 Γενικό Συμπέρασμα

Εν κατακλείδι συμπεραίνουμε από όλα όσα αναφέρονται στην παρούσα διατριβή, πως η ροή μέσα σε βυθισμένη κοιλότητα είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Οι συσχετισμοί αυτών των παραμέτρων δίνουν διάφορες διαμορφώσεις ροής, πολλές φορές αντικρουόμενες μεταξύ τους. Η επιλογή του συνδυασμού των παραμέτρων πρέπει να γίνεται με γνώμονα του τι θέλουμε να πετύχουμε κάθε φορά.

Πάντως ένα είναι σίγουρο. Η ύπαρξη διαταραχών μέσα στην ροή προκαλεί καλύτερη αναμιξιμότητα μέσα στην κοιλότητα, έχοντας ως αποτέλεσμα πιο ομοιόμορφες κατανομές

συγκέντρωσης π.χ. θερμοκρασίας ή ρύπου και ελαχιστοποίηση των μέγιστων τιμών τους. Έτσι δημιουργείται μια πιο ομοιογενής κατάσταση μέσα στην κοιλότητα.

Τελειώνοντας, πιστεύω πως η έρευνα αυτού του τόσο ενδιαφέροντος φαινομένου δεν έχει εξαντληθεί σε αυτές εδώ τις σελίδες και πρέπει να συνεχιστεί, καθώς υπάρχει μεγάλο εύρος ανεξερευνήτων ακόμη περιπτώσεων, η έρευνα των οποίων θα δώσει και άλλα χρήσιμα συμπεράσματα, βοηθώντας στην εξέλιξη της Επιστήμης της Μηχανικής των Ρευστών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σταπουντζής Ερρίκος, Lydon Gearoid, 2001, "Momentum and Heat Transport inside and around a Cylindrical Cavity in Cross Flow"
2. Σταπουντζής Ερρίκος, 1995, «Σημειώσεις Μηχανικής Ρευστών II», Εκδ. Α.Π.Θ.
3. Σταπουντζής Ερρίκος, 1995, «Σημειώσεις Κλασσικής και Βιομηχανικής Αεροδυναμικής», Εκδ. Α.Π.Θ.
4. Γούλας Κ. Απόστολος, 1986, «Μηχανική Ρευστών I», Εκδ. Γιαχούδη-Γιαπούλη, Α.Π.Θ.
5. Παπαϊωάννου Θ. Άγγελος, 1996², «Μηχανική των Ρευστών I & II», Εκδ. Κοράλι, Αθήνα
6. Schlichting Hermann, 1968, "Boundary – Layer Theory", Mc Graw Hill book Company
7. Πρίνος Π., 1998, «Θεωρία και Μοντέλα Τύρβης», Α.Π.Θ.
8. Αλυγιάκης Εμμανουήλ, 2003, «Ανάπτυξη Ψηφιακής Μεθοδολογίας Διερεύνησης του Ασταθούς Απορεύματος σε διεπιφάνεια με Οπτικοποίηση της ροής», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΤΜΜΒ, Βόλος
9. Παπαβαγγέλης Τριαντάφυλλος, 1999, «Μελέτη της Μετάβασης του Οριακού Στρώματος πάνω σε Επίπεδη πλάκα με Μηδενική γωνία προσβολής για Ομοιόμορφη και Θετική κλίση ταχύτητας», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχ/κών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
10. Το 'χρηματιστήριο' των ρύπων, Εφημ. «ΕΛΕΥΘΕΡΟΤΥΠΙΑ» 22 Φεβ. 2003
11. Nicolas J. D., Nansteel M. W., 1993, "*Natural convection in a rectangular enclosure with partial heating of the lower surface: experimental results*", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 16, pp. 4067 – 4071
12. Lage J. L., Bejan A., Anderson R., 1991, "*Efficiency of transient contaminant removal from a slot ventilated enclosure*", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 10, pp. 2603 – 2615
13. Jordan S. A., Ragab S. A., September 1994, "On the unsteady and Turbulent Characteristics of the Three-Dimensional Shear-Driven Cavity Flow", Journal of Fluids Engineering, Vol. 116
14. Holroyd R. J., 1983, "*On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds, Part I, Aerodynamic aspects*", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 329-352, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam

15. Vardoulakis Sotiris, Fisher Bernard E. A., Pericleous Koulis, Gonzalez-Flesca Norbert, 2003, "*Modelling air quality in street canyons: a review*", Atmospheric Environment 37 155-182, Pergamon
16. Pereira J. C. F., Sousa J. M. M., "*Influence of Impingement Edge Geometry on Cavity Flow Oscillations*", AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, Technical Notes
17. Dabberdt Walter. F., Hoydysh Walter G., 1991, "Street Canyon Dispersion: Sensitivity to Block Shape and Entrainment", Atmospheric Environment, Vol. 25A, No. 7, pp. 1143-1153
18. Taniguch Y., Evans James W., 1993, "Some measurements of the penetration of turbulence into small cavities", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 4, pp. 961 – 965
19. Benson J. D., Aidun C. K., October 1992, "Transition to unsteady nonperiodic state in a through-flow lid-driven cavity", Phys. Fluids A 4 (10)
20. Cai L., Stewart W. E., JR., Sohn C. W., 1993, "Turbulent buoyant flows into a two dimensional storage tank", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 17, pp. 4247 – 4256
21. Richards R. F., Young M. F., Haiad J. C., 1987, "Turbulent forced convection heat transfer from a bottom heated open surface cavity", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 11, pp. 2281 – 2287
22. Xue H., Shu C., 1999, "Mixing characteristics in a ventilated room with non-isothermal ceiling air supply", Building and Environment, 34 245-251
23. Triton D.J., 1977, "Physical Fluid Dynamics.", Van Nostrand-Rheinhold
24. Chapman D.R., 1956, "A theoretical analysis of heat transfer in region of separated flow", NACA TN 3792
25. Charwat A.F., Dewey C.F., Ross J.N. and Hitz J.A., 1961, "An investigation of separated flows – Part II: flow in the cavity and heat transfer", J. Aerospace Sci. 28 (7), 513-527
26. Larson H.K., 1959, "Heat transfer in separated flows", J. Aerospace Sci. 26 (11), 731-738
27. Seban R.A. and Fox J., 1963, "Heat transfer to the air flow in a surface cavity", International Developments in Heat Transfer, ASME
28. Seban R.A., 1965, "Heat transfer and flow in a shallow rectangular cavity with subsonic turbulent air flow", Int. J. Heat Mass Transfer 8, 1353-1358
29. Gooray A.M., Watkins C.B. and Aung W., 1983, "Numerical calculation of heat transfer in turbulent recirculating flow over an open surface cavity", Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, Honolulu, Hawaii, Vol. 3, pp.79-86
30. Hunter, L.J., Johnson, G.T., Watson, I.D., 1992, "An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon", Atmospheric Environment 26B (4), 425-432

31. Pavageaou M., Rafailidis S., Schatzmann M., 1996, "A comprehensive experimental databank for the verification of urban car emission dispersion models", Fourth Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Ostende, Vol.2 pp.443-450
32. Qin Y., Kot S.C., 1996, "Dispersion of vehicular emission in street canyons", Guangzhou city, South China (P.R.C.), Atmospheric Environment 27B, 238-291
33. Vignati E., Bercowicz R., Palmgren F., Lyck E., Hummelshoj P., 1999, "Transformation of size distributions of emitted particles in streets", Science of the Total Environment 235, 37-49
34. Jones S.G., Fisher B.E.A., Gonzalez-Flesca N., Sokhi R., 2000, "The use of measurement programmes to assess concentrations next to major roads in urban areas", Environmental Monitoring and Assessment 64, 531-547
35. De Paul F.t., Sheih C.M., 1986, "Measurements of wind velocities in a street canyon", Atmospheric Environment 20(3) 455-459
36. Chan L.Y., Kwok W.S., 2000, "Vertical dispersion of suspended particulates in urban area of Hong-Hong", Atmospheric Environment 34 4403-4412
37. Marchmann J.F., 1971, "Wind effects on floating surfaces in large open top storage tanks, Proc. 3rd Int. Conf. On Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo"
38. Purdy D.M., Maher F.J. and Frederick D., 1967, "Modern studies of wind loads on flat-top cylinders, Am. Soc. Civ. Eng., J. Struct. Div., 93, 379-395"
39. Sarohia V., 1977, "Experimental Investigation of Oscillations in Flows Over Shallow Cavities", AIAA Journal, Vol 15, No 7, pp984-991
40. Rockwell D., and Knisely C., 1979, "The Organized Nature of Flow Impingement Upon a Corner", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 93, Pt 3, pp. 413-432
41. Palmgren F., Kemp K., 1999, "The Danish air quality monitoring programme. Annual Report No.296, NERI, Roskilde, Denmark
42. Nicholson S.E., 1975, "A pollution model for street-level air". Atmospheric Environment 9, 19-31
43. Nakamura Y., Oke T.R., 1988, "Wind, Temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon." Atmospheric Environment 22, 2691-2700.
44. Johnson G.T., Hunter L.J., 1999, "Some insights into typical urban canyon airflows." Atmospheric Environment 33, 3991-3999
45. Theurer W., 1999, "Typical building arrangements for urban air pollution modeling." Atmospheric Environment 33, 4057-4066

46. Jeong S.J., Andrews M.J., 2002, "Application of the k-ε turbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon." *Atmospheric Environment*
47. Riain et al., 1998, "Flow field and pollution dispersion in a central London street." *Environmental Monitoring and Assessment* 52, 299-314
48. Hoydysh W.G., Dabberdt W.F., 1988, "Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons.", *Atmospheric Environment* 22(12), 2677-2689
49. Fox J., 1965, "Heat transfer and air flow in a transverse rectangular notch.", *Int. J. Heat Mass Transfer* 7, 269-279
50. Haugen R.L. and Dhanak, 1967, "Heat transfer in turbulent boundary layer separation over a surface cavity.", *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, Series C, J. Heat Transfer* 89, 335-340
51. Yamamoto H., Seki N. and Fukusako S., 1979, "Forced Convection heat transfer on heated bottom surface of a cavity.", *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, Series C, J. Heat Transfer* 101, 475-479
52. November M. and Nansteel M.W., 1987, "Natural convection in rectangular enclosures heated from below and cooled along one side." *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30, 2433-2440
53. Palmgren et al., 1996, "Effects of reduction in NO_x on the NO₂ in urban streets." *Science of the total Environment* 189/190, 409-415
54. Kingham et al., 2000, "Spatial variations in the concentrations of traffic related pollutants in indoor and outdoor air in Huddersfield, England." *Atmospheric Environment* 34, 905-916
55. Wahlin et al., 2001, "Experimental studies of ultrafine particles in streets and the relationship to traffic." *Atmospheric Environment* 35, S63-S69
56. Eskridge R.E., Rao S.T., 1986, "Turbulent diffusion behind vehicles: experimentally determined turbulence mixing parameters.", *Atmospheric Environment* 20, 851-860
57. Hoydysh W.G., Dabberdt W.F., 1994, "Concentration fields at urban intersections: fluid modeling studies." *Atmospheric Environment* 28(11), 1849-1860
58. Kim J.-J., Baik J.-j., 2001, "Urban street-canyon flows with bottom heating." *Atmospheric Environment* 35, 3395-3404
59. Sini J.-F. et al, 1996, "Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons." *Atmospheric Environment* 30(15), 2659-2677
60. Kastner-Klein P. et al., 2000, "Modelling of vehicle-induced turbulence in air pollution studies for streets." *Journal of Environment and Pollution* 14(1-6), 496-507

61. Kastner-Klein P. et al., 2001, "A wind tunnel study of organized and turbulent air motions in urban street canyons." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, 849-861
62. Vachon et al., 2001, "Measurements of traffic-induced turbulence within a street canyon during the Nantes '99 experiment." *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
63. Kovar-Panskus et al., 2001, "Influence of geometry on the flow and turbulence characteristics within urban street canyons-intercomparison of the wind tunnel experiments and numerical solutions." *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
64. Louka et al., 2001, "Thermal effects on the air flow in a street canyon-Nantes '99 experimental results and model simulations." *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
65. Kastner-Klein P., Rotach M.W., 2001, "Parametrization of wind and turbulent shear stress profiles in the urban roughness sublayer ." *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
66. Leidl et al., 2001, "Effects of geometrical simplification and idealization on the accuracy of microscale dispersion modeling." *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
67. Chaveut et al., 2001, "High resolution flow measurements in an idealized urban street canyon." *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
68. Le Bihan et al., 2001, "Application of dispersion modeling for analysis of particle pollution sources in a street canyon. " *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
69. Louka et al., 2000, "An intercomparison of microscale models for the flow and dispersion characteristics in urban areas." *EUROTRACK-2 Symposium*, Garmisch-Partenkirchen, Germany
70. Sahm et al., 2001, "Intercomparison of numerical urban dispersion models-Part I: street canyon and single building configurations." *Third International Conference on Urban Air Quality*, Loutraki, Greece
71. Ketzel M., Moussiopoulos N. et al., 2001, " Intercomparison of numerical urban dispersion models-Part II: street canyon in Hannover,
72. Pfeffer et al., 1995, "Air pollution monitoring in street canyons in North rhine-Westphalia, Germany." *Science of the Total Environment* 169, 7-15
73. Zoumakis N.M., 1995, "A note on average vertical profiles of vehicular pollutant concentrations in urban street canyons." *Atmospheric Environment* 29, 3719-3725

74. Sobottka H., Leisen P., 1980, "Vehicle exhaust gas emissions in city streets and their distributions; comparison of measurements and model aspects." IMA Conference on Modelling of Dispersion in Transport pollution, Southendon-Sea, England
75. Meroney et al., 1996, "Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 62, 37-56
76. Liedtke et al., 1999, "Dispersion in a street canyon: comparison of wind tunnel experiments with field measurements." In: Borrel P.M., Borrel P. (Eds.), Proceedings of the EUROTRAC Symposium '98. WIT Press, Southampton, pp. 806-810
77. Schatzmann et al., 2000, "Dispersion in urban environments: comparison of field measurements with wind tunnel results." Environmental Monitoring and Assessment 65, 249-257
78. Rafailidis S., 1997, "Influence of building area density and roof shape on the wind characteristics above a town." Boundary Layer Meteorology 85, 255-271
79. Rafailidis S., 1999, "Influence of stable atmospheric thermal stratification on urban street canyon re-aeration." Sixth International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Rouan, France
80. Rafailidis S., 2000, "Near-field geometry effects on urban street canyon measurements for model validation." International Journal of Environment and Pollution 14(1-6), 538-546
81. Ogawa et al., 1981, "A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere." Atmospheric Environment 15, 807-821
82. Kastner-Klein P., Plate E.J., 1999, "Wind tunnel study of concentration fields in street canyons." Atmospheric Environment 33, 3973-3979
83. Gerdes F., Olivari D., 1999, "Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 82, 105-124
84. Maul D.J., East L.F., 1965, "Three-dimensional flow in cavities." J. Fluid Mech. 16, 620-632

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικες προγραμμάτων Η/Υ για την επεξεργασία των μαχητοσκοπίσεων

C:\Documents and Settings\Triantafylos\Desktop\Video\convgray.m

Page 1

26 Ιουνίου 2003

8:48:54 μμ

```
% This is an .m file for image processing
% This .m file calculate the mean radiation intense of each pixel for each
  Re number in flat area
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,s,n]=textread('Input_convgray.txt','%s%f%f%f','headerlines'
2);
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    first1=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'jpg'));
c = fspecial('gaussian',n(j),s(j));
convpinakas=conv2(pinakas,c,'same');
eikona=uint8(convpinakas);
imwrite(eikona,strcat('conv',first1,int2str(num),'.jpg'))
clear pinakas convpinakas c eikona
    end
clear firstV first1 num
end
toc
```

Κώδικες προγραμμάτων Η/Υ για επεξεργασία μαχητοσκοπήσεων

C:\Documents and Settings\Triantafylos\Desktop\Video\gray2.m

Page 1

26 Ιουνίου 2003

8:49:34 μμ

```
% This is an .m file for image processing
%-----
tic
clear
echo off
%-----Data Reading-----
%-----
[Name,Nimages,time,distance,x,y,xs,xe,ys,ye,xo,yo,xf,yf]...
    =textread('Input_gray2.txt','%s%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
bath=double(imread('convt1','jpg'))';
[k,m]=find(bath(xo:xf,yo:yf)==min(min(bath(xo:xf,yo:yf))));
xmin=xo+k(1)-1;
ymin=yo+m(1)-1;
clear k m
for j=1:length(Name)
    firstV=Name(j);
    first1=char(firstV);
    for num=1:Nimages(j)
        pinakas=double(imread(strcat(first1,int2str(num)),'jpg'))';
        [k,m]=find(pinakas(xo:xf,yo:yf)==min(min(pinakas(xo:xf,yo:yf))));
        xpinakasmin=xo+k(1)-1;
        ypinakasmin=yo+m(1)-1;
        dx=xpinakasmin-xmin;
        dy=ypinakasmin-ymin;
        clear k m xpinakasmin ypinakasmin
        if dx>0 & dy>0
            for k=1:384-dx
                for m=1:288-dy
                    pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m+dy);
                end
            end
            pinakasnew(384-dx+1:384,288-dy+1:288)=0;
        end
        if dx<0 & dy<0
            for k=1:384+dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k-dx,m-dy)=pinakas(k,m);
                end
            end
            pinakasnew(1:-dx,1:-dy)=0;
        end
        if dx>0 & dy<0
            for k=1:384-dx
                for m=1:288+dy
                    pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k+dx,m);
                end
            end
            pinakasnew(384-dx+1:384,1:-dy)=0;
```


C:\Documents and Settings\Triantafylos\Desktop\Video\gray2.m
26 Ιοῦνιος 2003

Page 2
8:49:34 μμ

```
end
if dx<0 & dy>0
for k=1:384+dx
for m=1:288-dy
pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m+dy);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288-dy+1:288)=0;
end
if dx>0 & dy==0
for k=1:384-dx
for m=1:288
pinakasnew(k,m)=pinakas(k+dx,m);
end
end
pinakasnew(384-dx+1:384,288)=0;
end
if dx<0 & dy==0
for k=1:384+dx
for m=1:288
pinakasnew(k-dx,m)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(1:-dx,288)=0;
end
if dx==0 & dy>0
for k=1:384
for m=1:288-dy
pinakasnew(k,m)=pinakas(k,m+dy);
end
end
pinakasnew(384,288-dy+1:288)=0;
end
if dx==0 & dy<0
for k=1:384
for m=1:288+dy
pinakasnew(k,m-dy)=pinakas(k,m);
end
end
pinakasnew(384,1:-dy)=0;
end
if dx==0 & dy==0
pinakasnew=pinakas;
end
clear pinakas
tempinakas=bath(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j))-pinakasnew(xs(j):xe(j),ys(j):ye(j));
newpinakas(:,:,num)=tempinakas;
clear pinakasnew tempinakas k m dx dy
```

```
end
%-----The Ratio Between Pixel And mm-----
analogx=x(j)/72.;
analogy=y(j)/72.;
for i=1:384
    xvector(i)=i*analogx+distance(j);
end
clear i
for i=1:288
    yvector(i)=i*analogy;
end
%-----The Vector Of Time In Sec-----
tvector=(time(j):time(j):Nimages(j)*time(j));
%-----Save-----
%-----
save(strcat('C:\Documents and Settings\Triantafylos\Desktop\video\',strcat
('gray2_',first1)), 'time', 'distance'...
, 'xvector', 'yvector', 'tvector', 'newpinakas', 'xs', 'xe', 'ys', 'ye', 'Nimages'
)
clear num first1 firstV xvector yvector tvector i analogx analogy newpinak
as
end
clear
toc
```

C:\Documents and Settings\Triantafylos\Desktop\Video\FFT_gray2.m

Page 1

26 Ιοῦνιός 2003

8:50:23 μμ

```

%This is an .m file for image processing
%This .m file calculate the FFT of h(xo,yo,t) in each xo
%-----
tic
clear
%-----Data Reading-----
%-----
%-----
[nameS,xinitial,xfinal,yinitial,yfinal,numberofphotos,timedelay]=textread(
'Input_of_FFT_gray2.txt','%s%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(nameS);
nameSV=nameS(i);
namSV=char(nameSV);
load(namSV);
f1=1;
for m=xinitial(i)-xs(1)+1:xfinal(i)-xs(1)+1
    f2=1;
    for n=yinitial(i)-ys(1)+1:yfinal(i)-ys(1)+1
        for j=1:numberofphotos(i);
newpinakaskoyo(j)=newpinakas(m,n,j);
end
fftnewpinakaskoyot=fft(newpinakaskoyo);
Powerfftnewpinakaskoyot(:,f1,f2)=(fftnewpinakaskoyot.* conj(fftnewpinakasx
oyot))/2;
clear j fftnewpinakaskoyot newpinakaskoyo
f2=f2+1;
end
f1=f1+1;
end
frequent=(0:numberofphotos(i))/(numberofphotos(i)*timedelay(i));
frequencyt=frequent';
Powerfftnewpinakaskoyot(1,:,:) = 0.;
%-----Save-----
save(strcat('C:\Documents and Settings\Triantafylos\Desktop\video\',strcat
('fft_',namSV)),...
    'Powerfftnewpinakaskoyot','frequencyt','xinitial','yinitial','xfinal','
yfinal','Nimages');
clear j newpinakas fftnewpinakaskoyot newpinakaskoyo frequencyt namSV name
SV frequent Powerfftnewpinakaskoyot m n f1 f2
end
clear
toc

```



```

tic
clear
echo off
[nameimage,xstart,xend,pacex,ystart,yend,pacey]...
=textread('Input_graphFFTgray2.txt','%s%f%f%f%f%f','headerlines',2);
for i=1:length(nameimage)
nameimageV=nameimage(i);
nameim=char(nameimageV);
load(nameim)
for x=xstart(i)-xinitial(1)+1:pacex(i):xend(i)-xinitial(1)+1
    for y=ystart(i)-yinitial(1)+1:pacey(i):yend(i)-yinitial(1)+1
        figure(y)
        for t=1:Nimages(1)
            Powerfftnewpinakaskoyotpoint(t)=Powerfftnewpinakaskoyot(t,x,y);
        end
        grid on
        plot(frequencyt(1:(fix(t/2)+1)),Powerfftnewpinakaskoyotpoint(1:(fix(t/2)+1)), 'b')
        grid on
        %legend('Blue',1);
        %axis([tvector(1) tvector(end) 0. 1.])
        xlabel('Frequency (Hz)')
        ylabel('PS')
        title(strcat('FFT-GRAPH X=',int2str(x+xinitial(1)-1), ' Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)))
        saveas(y,strcat('GRAPH_FFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1), '_Y=',int2str(y+yinitial(1)-1),'.','fig'))
        saveas(y,strcat('GRAPH_FFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1), '_Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)), 'bmp')
        close
        figure(y)
        grid on
        loglog(frequencyt(1:(fix(t/2)+1)),Powerfftnewpinakaskoyotpoint(1:(fix(t/2)+1)), 'b')
        grid on
        %legend('Blue',1);
        %axis([tvector(1) tvector(end) 0. 1.])
        xlabel('Frequency (Hz)')
        ylabel('P.S')
        title(strcat('LOGFFT-GRAPH X=',int2str(x+xinitial(1)-1), ' Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)))
        saveas(y,strcat('GRAPH_LOGFFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1), '_Y=',int2str(y+yinitial(1)-1),'.','fig'))
        saveas(y,strcat('GRAPH_LOGFFT_',nameim,'_X=',int2str(x+xinitial(1)-1), '_Y=',int2str(y+yinitial(1)-1)), 'bmp')
        close
        clear Powerfftnewpinakaskoyotpoint
    end
end
end

```

C:\Documents and Settings\Triantafylos\Desktop\Video\GraphFFTgray2.m

Page 2

26 Ιοβίου 2003

8:52:01 μμ

```
clear nameimageV nameim x y t xinitial yinitial xfinal yfinal frequencyt  
owerfftnewpinakasxoyot  
end  
clear  
toc
```

Υπολογισμός αριθμού Grashof

$$Gr = \frac{g * \alpha * L^3 * \theta}{\nu^2}$$

	Volts							
Αριθμός Gr	0	4	8	12	16	20	28	Volts
L =	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	m
L^3=	1,00E-12	1,00E-12	1,00E-12	1,00E-12	1,00E-12	1,00E-12	1,00E-12	m^3
T	28,8	59	75	86	96	112	328	C
T (K)	301,8	332	348	359	369	385	601	K
ν=	0,000016	0,0000186	0,000019965	0,00002136	0,0000229	0,00002422	0,0000526	m^2/s
ν^2=	2,56E-10	3,46E-10	3,98601E-10	4,5625E-10	5,244E-10	5,8661E-10	2,767E-09	
a=1/T=	0,0033135	0,0033135	0,003313453	0,00331345	0,0033135	0,00331345	0,0033135	
g=	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	m/s^2
ΔT	0	30,2	46,2	57,2	67,2	83,2	299,2	
Gr=	0,0000	0,0028	0,0038	0,0041	0,0042	0,0046	0,0035	
2*Gr^1/3	0	0,2836978	0,311785335	0,32004255	0,3223835	0,33346508	0,3046688	
u=(1/5)*Uo								
u=	1	1	1	1	1	1	1	m/s
L =	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	
ν=	0,000016	0,0000186	0,000019965	0,00002136	0,0000229	0,00002422	0,0000526	m^2/s
Re=	6,25	5,3763441	5,008765339	4,68164794	4,3668122	4,12881916	1,9011407	
Re^2 =	39,0625	28,905076	25,08773022	21,9178274	19,069049	17,0471476	3,6143359	

Υπολογισμός αριθμού Rayleigh

$$Ra = Gr * Pr = \frac{g * a * \Theta * L^3}{\nu * \kappa}$$

	Volts							
Αριθμός Ra	0	4	8	12	16	20	28	Volts
L =	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	m
L^3=	0,000216	0,000216	0,000216	0,000216	0,000216	0,000216	0,000216	m^3
T	28,8	59	75	86	96	112	328	C
	301,8	332	348	359	369	385	601	K
ν=	0,000016	1,86E-05	2E-05	2,14E-05	2,29E-05	2,42E-05	5,26E-05	m^2/s
a=1/T=	0,003313453	0,003313	0,003313	0,003313	0,003313	0,003313	0,003313	
g=	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	m/s^2
ΔT	0	30,2	46,2	57,2	67,2	83,2	299,2	
λ=	0,02639	0,028866	0,030015	0,030805	0,03181	0,032662	0,047775	W/(m*k)
ρ=	1,165	1,06	1,01225	0,9831	0,946	0,922	0,59	kg/m^3
Cp=	1005	1005	1005	1005	1005	1005	1005	J/(kg*k)
κ=λ/(ρ*Cp)	2,25397E-05	2,71E-05	2,95E-05	3,12E-05	3,35E-05	3,52E-05	8,06E-05	m^2/s
Ra=	0	420707,1	550670,3	603036,6	615787,5	684237,6	495676,8	
u=(1/5)*Uo								
u=	1	1	1	1	1	1	1	m/s
L =	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	
ν=	0,000016	1,86E-05	2E-05	2,14E-05	2,29E-05	2,42E-05	5,26E-05	m^2/s
Re=	6,25	5,376344	5,008765	4,681648	4,366812	4,128819	1,901141	
Re6 =	3750	3225,806	3005,259	2808,989	2620,087	2477,291	1140,684	

