

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την προετοιμασία και την διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργάστηκαν και συντέλεσαν πολλοί άνθρωποι.

Για το λόγο αυτό θα ήθελα αρχικά να ευχαριστίσω τον καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Γεώργιο Τζαμπίρα, για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής αυτής, την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφερε.

Επίσης θέλω να ευχαριστίσω τον κύριο Δημήτρη Λιαροκάπη, ο οποίος ήταν ο συντονιστής για την προετοιμασία, την διεξαγωγή και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η παρουσία του ήταν καθοριστικής σημασίας για την διπλωματική αυτή και έπαιξε σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδιά της.

Ευχαριστώ επίσης το προσωπικό του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής και ιδιαίτερα τον κύριο Γιάννη Τραχανά, τον κύριο Γιώργο Μυλωνά, τον κύριο Φώτη Κασάπη και τον κύριο Διονύση Συνετό για την πολύτιμη βοήθεια τους κατά την διεξαγωγή και προετοιμασία των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΣΩΛΗΝΕΣ ΡΙΤΟΤ	5
ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	6
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΡΙΤΟΤ	11
Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΟΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΡΙΤΟΤ	12
Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΟΡΥΦΗΣ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΡΙΤΟΤ	13
ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΡΙΤΟΤ	13
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	14
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	14
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	16
ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΡΟΗ.....	18
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	18
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	19
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	20
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	21
Πειραματική δεξαμενή.....	21
ΦΟΡΕΙΟ	22
ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ	22
ΓΕΡΑΝΟΙ.....	22
BULK CARRIER HURON	23
ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΡΙΤΟΤ	26
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	27
DATA ACQUISITION SYSTEM	29
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	30
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	30
ΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	32
ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	33
Βαθμονόμηση.....	33
Λογισμικό μείωσης δεδομένων.....	55
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	59
Επίπεδο καθρέφτη.....	59
Επίπεδο προπέλας	62
Επίπεδο νομέα 40 πόντους μπροστά από τον καθρέφτη.....	65
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ροή του νερού γύρω από ένα κινούμενο πλοίο είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αντίσταση του, και την απόδοση της προωστήριας εγκατάστασης. Συνεπώς η μελέτη αυτού του φαινομένου είναι σημαντική για τον σχεδιασμό της μορφής της γάστρας και των παρελκομένων της. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν περιοχές κοντά στην επιφάνεια της γάστρας, όπου η ροή μεταβάλλεται έντονα, περιοχές στον ομόρου πλοίου όπου παρατηρούνται δίνες και περιοχές όπου η γεωμετρία της γάστρας πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένη με την φορά της ροής.

Στην παρούσα διπλωματική θα παρουσιαστεί η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματά μετρήσεων πεδίου ροής με σωλήνα Pitot 5-οπών, που διεξήχθησαν στο εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πειραματική αυτή μέθοδος είναι καλά εδραιωμένη και ιδιαίτερα αξιόπιστη για την ακρίβειά της. Χρησιμοποιείται όχι μόνο για απλές ροϊκές μετρήσεις αλλά και σαν εργαλείο αναφοράς για την επιβεβαίωση τόσο αριθμητικών όσο και καινοτόμων πειραματικών μεθόδων. Θα αναλυθούν επίσης οι προϋποθέσεις για ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις, όπως και οι περιορισμοί της μεθόδου.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία πειραματικών μεθόδων για την μέτρηση της ταχύτητας ενός ρευστού γύρω από σώμα που κινείται μέσα σε ρευστό. Μερικές από αυτές μετράνε μόνο σε 2 διαστάσεις αλλά οι περισσότερες έχουν εφαρμογή και στις 3. Μπορούμε να τις χωρίσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες τις παρεμβατικές και τις μη-παρεμβατικές. Οι μη παρεμβατικές εκπέμπουν ακτινοβολία (φως, υπέρηχους, κτλ) και αναλύουν τη ανάκλασή της. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να προσφέρει ευελιξία και ευκολία αλλά η πολυπλοκότητα της ανάλυσης είναι σημαντική. Αντίθετα, οι παρεμβατικές μέθοδοι, που βασίζονται κυρίως στην ιδέα του σωλήνα Pitot, έχουν μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία όσο διατηρούν την διαταραχή της ροής εξαιτίας του ιδίου του οργάνου σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετρήσεις του πεδίου ροής σε πειραματικές δεξαμενές διεξάγονται συχνά, για να μετρηθούν τα διανύσματα των ταχυτήτων του νερού πίσω από τα μοντέλα των πλοίων. Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι μέθοδοι υπολογισμού του πεδίου ροής, σε αέρα και νερό, χρησιμοποιούν τη μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry), όπως και μετρήσεις με σωλήνα Pitot. Ο σωλήνας Pitot πολλαπλών οπών, χρησιμοποιείται για μετρήσεις των δυναυσμάτων της ταχύτητας όπως και για σαν εργαλείο αναφοράς για αναλυτικούς υπολογισμούς πεδίου ροής όπου η διεύθυνση του ρευστού δεν μπορεί να υπολογιστεί πριν το πείραμα. Κύριος περιορισμός του σωλήνα Pitot είναι η παρεμβατική φύση του οργάνου και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά την προετοιμασία του πειράματος. Χαρακτηριστικό του σωλήνα Pitot επίσης είναι η σημειακή μέτρηση. Λόγω αυτού, χρησιμοποιήθηκε ένας μηχανισμός μετακίνησης σε 3 διαστάσεις με ακρίβεια δέκατου του χιλιοστού. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σωλήνα επιλέχθηκαν με προσοχή έτσι ώστε να διασφαλίσουμε την μικρότερη διαταραχή της ροής και τη μέγιστη ακρίβεια.

Το εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δημιούργησε μια διάταξη για την καταγραφή της ροής πίσω από μοντέλα πλοίων σε πειραματικές δεξαμενές, χρησιμοποιώντας σωλήνα Pitot 5-οπών. Σε ένα μοντέλο μεγάλου εκτοπίσματος τύπου bulk-carrier μετρήθηκαν οι ταχύτητες του νερού σε τρία επίπεδα, στην περιοχή της προπέλας, στο επίπεδο όπου υπάρχει σημαντική αλλαγή στη μορφή της γάστρας και στην περιοχή κάτω από τον καθρέφτη. Το μοντέλο εξετάστηκε στην ταχύτητα υπηρεσίας που αντιστοιχεί σε αριθμό Froude nr 0.17. Για την καταγραφή της διαφοράς πίεσης κατά την κίνηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν διαφορικοί αισθητήρες πίεσης. Με την κατάλληλη βαθμονόμηση αυτές οι διαφορές στην πίεση μεταφράστηκαν στη ταχύτητα και τη γωνία του ρευστού. Η παραπάνω διάταξη, η γεωμετρία του σωλήνα Pitot, η διαδικασία της βαθμονόμησης και της μετακίνησης του, καθώς και η εφαρμογή των μεθόδων για μετρήσεις μέσα σε νερό, είναι ζητήματα μεγάλου ενδιαφέροντος και θα παρουσιαστούν λεπτομερώς παρακάτω.

ΣΩΛΗΝΕΣ ΡΙΤΟΤ



Εικόνα 1: Σωλήνας Pitot 5 οπών

Για τη μέτρηση της ταχύτητας των ρευστών χρησιμοποιούνται ως πρότυπα όργανα, οι σωλήνες ολικής πίεσης (σωλήνες Pitot) και οι σωλήνες στατικής πίεσης – ή συνδυασμός των δύο σε ένα σωλήνα, τον σωλήνα Prandtl. Ο σωλήνας Pitot εφευρέθηκε από τον γάλλο Henri Pitot στις αρχές του 18ου αιώνα και τροποποιήθηκε τον 19ο αιώνα σε μια πιο σύγχρονη μορφή από τον επίσης γάλλο Henry Darcy. Χρησιμοποιείται ευρέως στα αεροσκάφη για την μέτρηση της ταχύτητας τους και σε βιομηχανικές εφαρμογές για την μέτρηση της ταχύτητας αέρα ή αερίων. Ο σωλήνας Pitot πρέπει να σημειωθεί ότι μετράει σημειακά μέσα στη ροή και όχι τοπικά.

ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η βασική μορφή του σωλήνα Pitot είναι ένας σωλήνας ο οποίος τοποθετείται σε ένα ρευστό παράλληλα με τη ροή του. Καθώς λοιπόν ο σωλήνας γεμίζει με αυτό το ρευστό μπορούμε να μετρήσουμε την ολική πίεση του. Με την μέτρηση αυτή δεν μπορούμε αμέσως να υπολογίσουμε την ταχύτητα. Όμως από την εξίσωση του Bernulli ξέρουμε ότι σε σταθερή κατάσταση, σε ένα κλειστό σύστημα όπου υπάρχει ροή κάποιου ρευστού, η ενέργεια διατηρείται σταθερή. Υπάρχουν διάφορες μορφές της εξίσωσης Bernulli, οι οποίες εξαρτώνται από τις παραδοχές που κάνουμε σε κάθε περίπτωση. Κάνοντας την παραδοχή ότι το ρευστό μας είναι ασυμπίεστο καταλήγουμε στην απλουστευμένη μορφή της και στον παρακάτω τύπο:

$$p_t = p_s + \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$

Δηλαδή ότι η συνολική πίεση ισούται με την στατική πίεση μαζί με τη δυναμική. Αν τώρα λύσουμε ως προς την ταχύτητα παίρνουμε

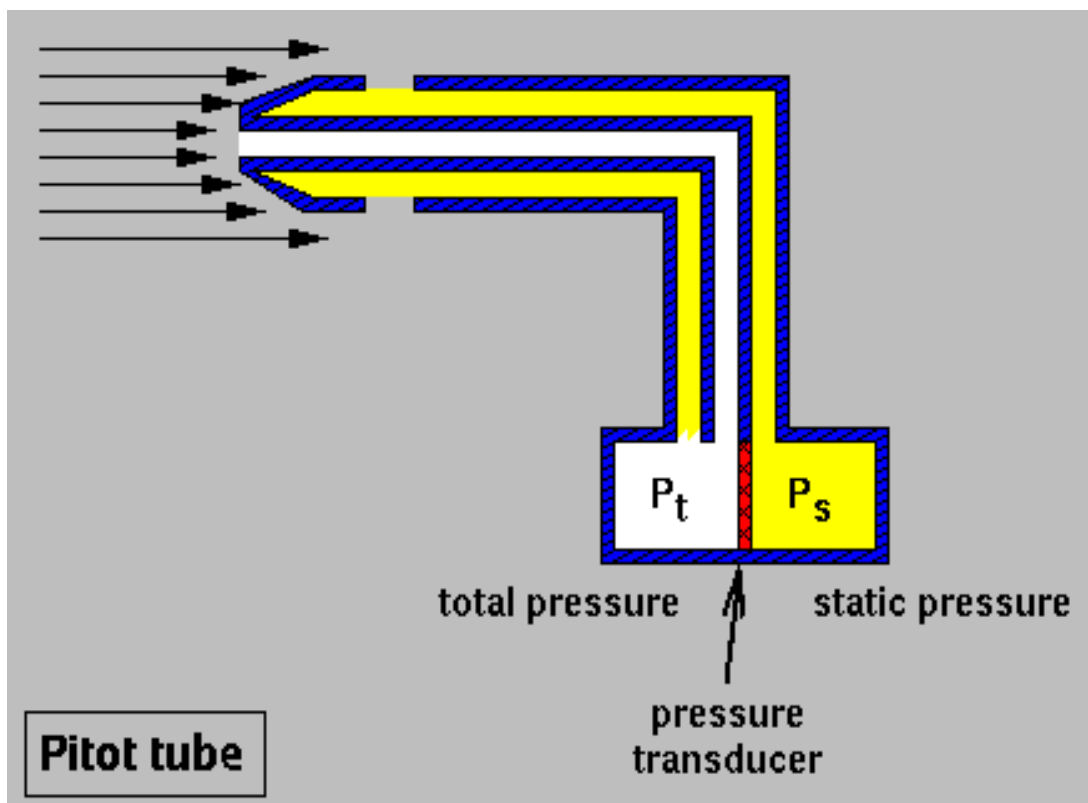
$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$

Όπου V η ταχύτητα του ρευστού

P_t η ολική πίεση

ρ η πυκνότητα του ρευστού

και P_s η στατική πίεση



Εικόνα 2: Απεικόνιση λειτουργίας σωλήνα Pitot

Τα υγρά στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ασυμπίεστα ενώ τα αέρια υπό κάποιες προϋποθέσεις μπορούν να προσεγγιστούν από τις παραπάνω εξισώσεις.

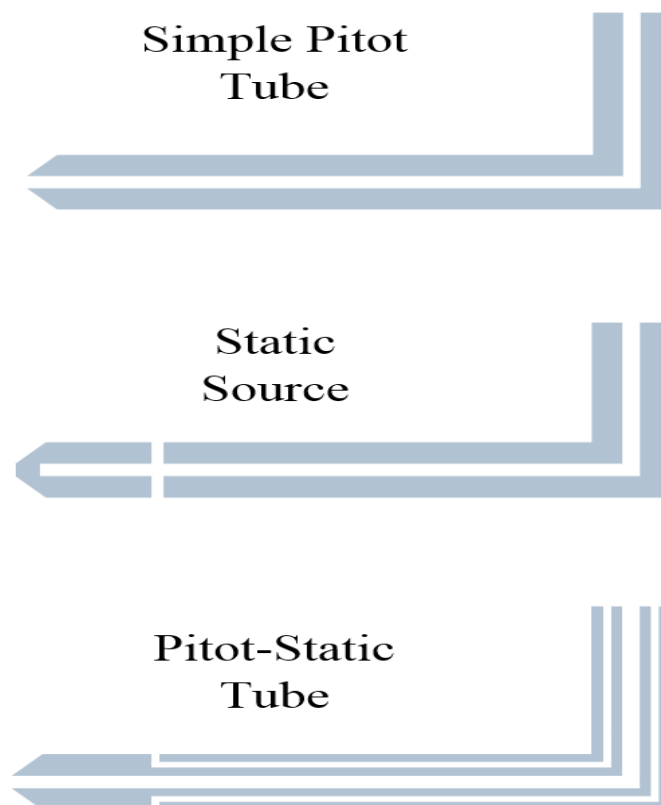
Η στατική πίεση συνήθως μετράται χρησιμοποιώντας τις οπές για την στατική πίεση που βρίσκονται περιφερειακά του σωλήνα. Η δυναμική πίεση τότε υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα διάφραγμα σε ένα κλειστό δοχείο. Αν από τη μία πλευρά του διαφράγματος έχουμε την στατική πίεση και από την άλλη την συνολική, τότε η παραμόρφωση του διαφράγματος είναι αναλογική με τη δυναμική πίεση.

Όταν ένα σώμα βρίσκεται μέσα σε μια ροή κάποιου ρευστού, η πίεση στην επιφάνεια του παίρνει τη μέγιστη τιμή στο σημείο ανακοπής και τις χαμηλότερες τιμές στα σημεία που η κλίση του σώματος γίνεται σχεδόν παράλληλη με τη ροή. Υπάρχει όμως και η περίπτωση της αποκόλλησης της ροής όπου η κατεύθυνσή της πλέον δεν ακολουθεί τη γεωμετρία του σώματος και αλλάζει την τοπική πίεση. Αυτή η αρχή χρησιμοποιείται στους σωλήνες Pitot αφού συνδέει την κατεύθυνση και την ταχύτητα της ροής με την πίεση.

Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε με ακρίβεια, θα πρέπει η διαταραχή στο σημείο της μέτρησης που προκαλείται από τον σωλήνα να είναι μικρής έκτασης και τέτοιας ποιότητας ώστε να μην επηρεάζει τις μετρήσεις. Η διάμετρος και το μήκος του σωλήνα, η διάμετρος και η θέση των οπών, η διαμόρφωση του άκρου του σωλήνα και γενικότερα η συνολική γεωμετρία και ευθυγράμμιση, έχουν άμεση σχέση με το εύρος ταχυτήτων και διευθύνσεων του ρευστού στην υπό μελέτη περιοχή. Πολύ σημαντικός παράγοντας είναι και η ένταση μεταβολής των χαρακτηριστικών της ροής.

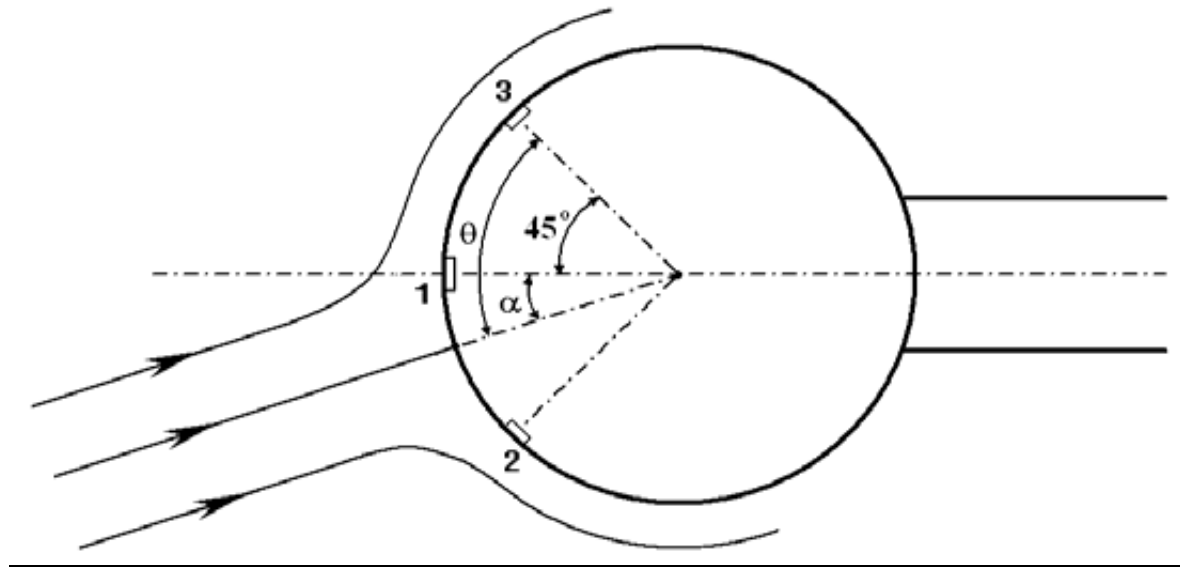
Θεωρητικά ο σωλήνας Prandtl λειτουργεί σωστά με την προϋπόθεση ότι είναι απολύτως ευθυγραμμισμένος με τη ροή, η οποία στο σημείο της μέτρησης θα πρέπει να είναι στρωτή και σχετικά ομοιόμορφη. Για την καλύτερη μελέτη όμως των χαρακτηριστικών της ροής και για τη μέτρηση της πίεσης και του διανύσματος της ταχύτητας ενός πεδίου ροής χρησιμοποιούνται οι σωλήνες Pitot 5 ή 7 οπών. Τα Multi-hole probes είναι όργανα σχεδιασμένα για να προσδιορίζουν την ταχύτητα του ρευστού και την πίεση μέσω μέτρησης των πιέσεων στο άκρο του probe. Τα όργανα αυτά δεν είναι πρότυπα και χρειάζονται εκτενή βαθμονόμηση και μελέτη της συμπεριφοράς τους. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται σε πολλαπλές γωνίες της ροής με σταθερή ταχύτητα. Σε πειράματα που γίνονται στο νερό το probe συνήθως βαθμονομείται στον αέρα σε αντίστοιχο αριθμό Re. Σε ένα άγνωστο πείραμα, οι μετρούμενες πιέσεις συγκρίνονται με τον χάρτη βαθμονόμησης μέσω προγράμματος του Y/H, και υπολογίζουν την ολική και στατική πίεση όπως και την γωνία της ροής. Χρησιμοποιώντας την θερμοκρασία του νερού και μια πίεση αναφοράς υπολογίζουμε το διάνυσμα της ταχύτητας.

Το μειονέκτημα του σωλήνα Pitot είναι ότι δίνει μέτρηση για ένα μόνο σημείο του πεδίου ροής, που είναι τοποθετημένο το άκρο του σωλήνα. Για να γίνει δυνατή η κάλυψη όλου του πεδίου απαιτείται η συνεχής μετακίνηση του σωλήνα. Αυτό προϋποθέτει ανάλογο σύστημα στήριξης και μετακίνησης του σωλήνα. Επίσης, πολύ κρίσιμη παράμετρος είναι η σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση του σωλήνα στη ροή. Αντίθετα μικρές κακοτεχνίες στην κατασκευή του σωλήνα, δεν επηρεάζουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων γιατί λαμβάνονται υπ' όψιν στη διαδικασία της βαθμονόμησης. Γενικά όταν μετράμε περιοχές με μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα της ροής, όπως κοντά σε στερεά όρια, η γεωμετρία των σωλήνων γίνεται κρίσιμη και οι μετρήσεις δύσκολες και λιγότερο ακριβείς.



Εικόνα 3: *Είδη σωλήνων Pitot*

Παρακάτω θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα για να γίνει πιο κατανοητή η αρχή λειτουργίας των σωλήνων Pitot. Ας υποθέσουμε ένα κυλινδρικό σώμα με 3 οπές, 1 στον οριζόντιο άξονα και 2 στις +45 και -45 μοίρες όπως το παρακάτω σχήμα. Σε αυτή τη περίπτωση αν η ροή ήταν τελείως οριζόντια θα είχαμε στην οπή 1 το σημείο ανακοπής και στις οπές 2 και 3 θα είχαμε την ίδια πίεση. Αν όμως η ροή σχηματίζει γωνία α με τον οριζόντιο άξονα τότε από τις πιέσεις στις οπές 1,2,3 θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα και γωνία της ροής, καθώς και την στατική και δυναμική πίεση.



Εικόνα 4: Probe με κυλινδρική κορυφή

Αναλυτικά για ασυμπίεστη ροή έχουμε:

$$p_{\infty} + \frac{\rho}{2} * V_{\infty}^2 = p + \frac{\rho}{2} * V^2 \quad (1)$$

Όπου p_{∞} και V_{∞} η πίεση και η ταχύτητα μακριά από το σώμα, ενώ p και V πάνω στο σώμα αντίστοιχα.

Σε ένα κυκλικό κύλινδρο η ταχύτητα σε κάθε σημείο που αντιστοιχεί σε γωνία θ από το σημείο ανακοπής, δίνεται από τον τύπο:

$$V(\theta) = 2V_{\infty} \sin(\theta) \quad (2)$$

Αν τώρα αντικαταστήσουμε τον παραπάνω τύπο για την ταχύτητα στην εξίσωση (1), και την εφαρμόσουμε για τις 3 οπές παίρνουμε:

$$P_{\infty} + \frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 = P(45^{\circ} + \alpha) + 2\rho * V_{\infty}^2 \sin^2(45^{\circ} + \alpha) \quad (3)$$

$$P_{\infty} + \frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 = P(\alpha) + 2\rho * V_{\infty}^2 \sin^2(\alpha) \quad (4)$$

$$P_{\infty} + \frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 = P(45^{\circ} - \alpha) + 2\rho * V_{\infty}^2 \sin^2(45^{\circ} - \alpha) \quad (5)$$

Λύνοντας λοιπόν το παράνω σύστημα εξισώσεων (3,4,5) γνωρίζοντας βέβαια τις τιμές των πιέσεων στις οπές 1,2,3 μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα της ροής, την γωνία της και την τιμή της στατικής πίεσης.

Το ζητούμενο είναι λοιπόν η κατασκευή ενός σωλήνα Pitot του οποίου το σχήμα θα σχετίζεται με μεταβλητές μέσω των οποίων θα μπορούμε να υπολογίσουμε την τοπική πίεση και θα δημιουργεί όσον δυνατόν λιγότερες παρεμβολές στη ροή. Οι οπές θα τοποθετηθούν σε συγκεκριμένα σημεία, έτσι ώστε να παίρνουμε τις πληροφορίες που θέλουμε για την κατεύθυνση και ταχύτητα της ροής. Έτσι για κάθε σχήμα που θα έχει η κορυφή του probe μας, θα καταλήγουμε σε εξισώσεις παρόμοιες με τις (3,4,5) για την συσχέτιση των πιέσεων με τα στοιχεία της ροής. Μικρές κακοτεχνίες στην κατασκευή είναι αναπόφευκτες και η απίδρασή τους εξαλείφεται κατά την βαθμονόμηση.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ PITOT

Οι περισσότερες παραδοχές που έχουν γίνει για την απλούστευση της εξίσωσης Bernulli δεν ισχύουν σε αρκετές περιπτώσεις. Πολλές φορές η επίδραση τους δεν είναι σημαντική, πρέπει όμως να σημειωθούν οι πιθανές αιτίες που μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλμα.

- Απόκλιση από το επίπεδο της ροής

Μία από τις παραδοχές που έχουμε κάνει για να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση του Bernulli είναι ότι οι 2 πιέσεις που μετράμε βρίσκονται στην ίδια γραμμή ροής. Αυτό σημαίνει ότι υποθέτουμε ότι η στατική πίεση που μετράει το όργανο είναι αντιπροσωπευτική της στατικής πίεσης ακριβώς στο σημείο ανακοπής. Αυτό γενικά ισχύει λόγω της πολύ μικρής απόστασης μεταξύ των οπών αλλά πρέπει να δοθεί προσοχή σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν περίπλοκες καταστάσεις ροής, λόγω π.χ. κάποιου εμποδίου κτλ., διότι μπορεί να κάνει τη ροή ασταθή και μη στρωτή.

- Συνεκτικότητα

Η απλουστευμένη μορφή της εξίσωσης Bernulli που έχουμε χρησιμοποιήσει, προϋποθέτει ότι δεν έχουμε απώλεια ενέργειας κατά μήκος της γραμμής ροής λόγω συνεκτικότητας. Στον αέρα αυτές οι απώλειες είναι αμελητέες αλλά υπό κάποιες προϋποθέσεις μπορεί να γίνουν σημαντικές.

- Συμπιεστότητα

Σε ταχύτητες χαμηλότερες από περίπου 0,3 Mach η συμπιεστότητα δεν παίζει ρόλο στις μετρήσεις. Σε μεγαλύτερες όμως ταχύτητες, αν και πιο σπάνιες σε κανονικές συνθήκες, πρέπει να γίνουν διορθώσεις στην βαθμονόμηση.

- Απόκλιση από την παραδοχή του τέλειου ρευστού

Σε πραγματικές συνθήκες δεν μπορούμε να έχουμε ένα τέλειο ρευστό. Πάντα θα υπάρχουν και άλλα στοιχεία ανεμειγμένα μαζί του. Για παράδειγμα, στον αέρα υπάρχει πάντα αρκετός ατμός και σκόνη, και στο νερό συναντάμε φυσαλίδες αέρα.

- Αποκλίσεις θερμοκρασίας

Η εξίσωση του Bernulli ισχύει για σταθερές συνθήκες που σημαίνει και σταθερή θερμοκρασία. Γι αυτό το λόγο πρέπει ο σωλήνας Pitot να βρίσκεται αρκετή ώρα στο μέσον όπου θα χρησιμοποιηθεί, διαφορετικά μπορεί να προκύψει σφάλμα.

- Μη σταθερή ροή

Για την αποφυγή σφαλμάτων η ροή πρέπει να είναι σταθερή χωρίς πολλές μεταβολές. Αυτό σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι δυνατόν και πρέπει να ληφθεί υπ'όψιν το ενδεχόμενο σφάλματος στη μέτρηση.

Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΟΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ PITOT

Ο αριθμός των οπών στους σωλήνες Pitot σχετίζεται κυρίως με το εύρος των γωνιών που αναμένουμε και επιθυμούμε να μετρήσουμε καθώς και με την ακρίβεια αυτών των μετρήσεων. Όσο περισσότερες οπές έχει το όργανό μας, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια και εύρος έχουμε. Για παράδειγμα, οι σωλήνες 5 οπών έχουν εύρος περίπου 55 μοίρες, ενώ οι 7 οπών 65 μοίρες.

Ο στατικός σωλήνας Pitot αν και θεωρείται πολλαπλών οπών, αφού έχει μία οπή στην άκρη του και 6 ή 8 περιμετρικά του, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση γωνιών. Οι περιμετρικές οπές είναι για τον υπολογισμό της στατικής πίεσης και βρίσκονται 6 έως 10 διαμέτρους από το άκρο του σωλήνα. Η μέση πίεση των περιμετρικών οπών ισούται με την στατική πίεση και για αυτό το λόγο μέσα στο σωλήνα επικοινωνούν, κάνοντας έτσι δυνατή τη χρήση ενός και μόνο αισθητήρα για την μέτρησή της. Έχει παρατηρηθεί ότι για μικρές γωνίες της τάξης των 5 μοιρών, η οπή στην άκρη του σωλήνα παρουσιάζει πολύ μικρό σφάλμα. Έτσι λοιπόν ακόμα και να μην έχουμε απόλυτη ευθυγράμμιση με τη ροή, αυτό το είδος του σωλήνα Pitot μπορεί να μας δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει η γωνία μόνο κατά το ένα επίπεδο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε των σωλήνα Pitot τριών οπών. Μία τέτοια περίπτωση μπορεί να είναι κάποιο όχημα που κινείται σε μια επίπεδη επιφάνεια ή σε κάποιο εργαστήριο όταν κάποια ροή περιορίζεται σε 2 διαστάσεις.

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι σωλήνων Pitot πολλαπλών οπών είναι οι 5 ή 7 οπών. Συνήθως το σχήμα της κορυφής τους είναι ημισφαιρικό, κωνικό ή πολύπλευρο. Αν και μετράνε σε 3 διαστάσεις, η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια. Στο σημείο ανακοπής έχουμε την υψηλότερη πίεση και όσο απομακρυνόμαστε από αυτό η τιμή της μειώνεται. Για την περίπτωση των ημισφαιρικών σχημάτων μπορούμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα με βάση το πιο πάνω παράδειγμα. Υπάρχει βέβαια μεγαλύτερη πολυπλοκότητα αφού τώρα εκτός από την ταχύτητα και το pitch της ροής, ψάχνουμε και την εγκάρσια γωνία, το yaw.



Εικόνα 5: Είδη κορυφών σε σωλήνες Pitot 7 οπών

Πέρα από το ημισφαιρικό σχήμα είναι πολύ δύσκολη η αναλυτική λύση του προβλήματος και έτσι αρκούμαστε στην καλή βαθμονόμηση, η οποία όπως προαναφέρθηκε θα γινόταν κυρίως για λόγους απαλειφής των επιδράσεων μικρών κακοτεχνιών κατά την κατασκευή των probes.

Τέλος έχουν κατασκευαστεί και όργανα τα οποία μπορούν να μετρήσουν μέχρι και 150 μοίρες. Αυτά έχουν συνήθως 12 ή 18 οπές και η κορυφή τους είναι μια σφαίρα. Ο περιορισμός στην γωνία σε αυτή τη περίπτωση είναι λόγω του κυλινδρικού σώματος που είναι ενωμένο με την κορυφή, το οποίο σε μεγαλύτερες γωνίες δημιουργεί παρεμβολές στη ροή

Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΟΡΥΦΗΣ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΡΙΤΟΤ

Το βασικό ζητούμενο που έχει σχέση με το σχήμα της κορυφής του οργάνου, είναι η πίεση που καταγράφει κάθε σπή να αλλάζει ομαλά όσο αλλάζει η γωνία της ροής. Θέλουμε όσο δυνατόν λιγότερες ανωμαλίες στην καμπύλη $\Delta P/\Delta\alpha$, όπου α η γωνία πρόσπτωσης για κάποιον άξονα, για την αποφυγή σφαλμάτων.

Μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν 2 κατηγορίες στο είδος της κορυφής. Η μία είναι με τα ομαλά σχήματα χωρίς γωνίες, που είναι κυρίως τα ημισφαιρικά και τα κωνικά, και τα πολύπλευρα. Η διαφορά τους σχετίζονται με το φαινόμενο της αποκόλλησης και τις προϋποθέσεις για να συμβεί. Στην πρώτη κατηγορία η αποκόλληση συμβαίνει σταδιακά και δεν έχουμε απότομες μεταβολές το οποίο είναι θετικό χαρακτηριστικό. Στις μεγαλύτερες όμως ταχύτητες όταν αυξάνει και ο αριθμός Reynolds, όπου έχουμε τυρβώδη ροή, το σημείο αποκόλλησης έρχεται πιο κοντά στο σημείο ανακοπής και έχουμε απότομες αλλαγές στο χάρτη βαθμονόμησης. Αντίθετα όταν έχουμε πολύπλευρα σχήματα το φαινόμενο αυτό έχει μικρότερη επίδραση, αφού η αποκόλληση συμβαίνει πάντοτε στις γωνίες μεταξύ των πλευρών. Αυτό σημαίνει ότι άσχετα με τον αριθμό Reynolds η αποκόλληση έχει ληφθεί υπ' όψιν στη βαθμονόμηση. Όμως είναι πιο επιρρεπή σε σφάλματα όταν έχουμε πιο ασταθή ροή και δεν εντοπίζουν δυναμικά φαινόμενα.

ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΡΙΤΟΤ

Υπάρχουν 6 σημαντικά στοιχεία στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος. Αυτά είναι τα εξής:

1. *Γεωμετρία του probe*
2. *Η βαθμονόμηση του probe σε διάφορες ταχύτητες*
3. *Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα μετρήσεως των πιέσεων ανάλογα με τις μετρούμενες ταχύτητες*
4. *Το data acquisition για την καταγραφή της μέτρησης όπως και για τη μετατροπή των μετρήσεων σε πιέσεις.*
5. *Το κατάλληλο πρόγραμμα για την μετατροπή των πιέσεων σε ταχύτητες και την εύρεση του διανύσματος της ροής μέσω της βαθμονόμησης.*
6. *Κατάλληλο σύστημα μετακίνησης του probe στην περιοχή του ενδιαφέροντος.*

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Οι σωλήνες Pitot πολλαπλών οπών από την Aeroprobe κατασκευάζονται συνήθως από στερεό ορείχαλκο ή ανοξείδωτο χάλυβα. Η άκρη του οργάνου είναι κατεργασμένη έτσι ώστε να σχηματίζει ένα κώνο με ημι-γωνία 30 μοίρες, ή ένα ημισφαίριο. Οι σωλήνες που συνδέουν τις οπές στην άκρη του οργάνου με τους αισθητήρες, είναι συγκολλημένες στην άκρη και μετά βρίσκονται μέσα σε ένα μεγαλύτερο σωλήνα, το κυρίως σώμα και άξονά του Pitot-tube. Ανάμεσα στους σωλήνες αυτούς βρίσκεται epoxy (εποξειδική πάστα) για την αποφυγή μετατοπίσεων. Η βάση του οργάνου συνήθως είναι ενιαία και αναπόσπαστη με τον άξονα του οργάνου το οποίο είναι σημαντικό στη διαδικασία της βαθμονόμησης, και στην περίπτωση των ευθειών σωλήνων Pitot είναι και η αναφορά για τον άξονα περιστροφής.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Κάθε σωλήνας Pitot πρέπει να βαθμονομείται ξεχωριστά διότι η κατασκευή δύο πανομοιότυπων δεν είναι εφικτή. Κατά τη διαδικασία αυτή τοποθετούμε το probe σε ροή με προκαθορισμένες μεταβλητές, καταγράφουμε τις μετρήσεις τους και φτιάχνουμε μαθηματικούς τύπους που συνδέουν τις μεταβλητές αυτές με τις τιμές που μας δίνει ο σωλήνας Pitot. Τα δεδομένα που συνθέτουν τον χάρτη βαθμονόμησης είναι διακριτά, το οποίο σημαίνει ότι οι μετρήσεις μας θα χρειάζονται ειδικές μεθόδους για την σωστή παρεμβολή τους. Πιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές αυτές είναι οι γωνίες κατά τον κατακόρυφο και τον εγκάρσιο άξονα, ο αριθμός Mach και ο αριθμός Reynolds.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad \text{και} \quad M = \frac{v}{v_{sound}}$$

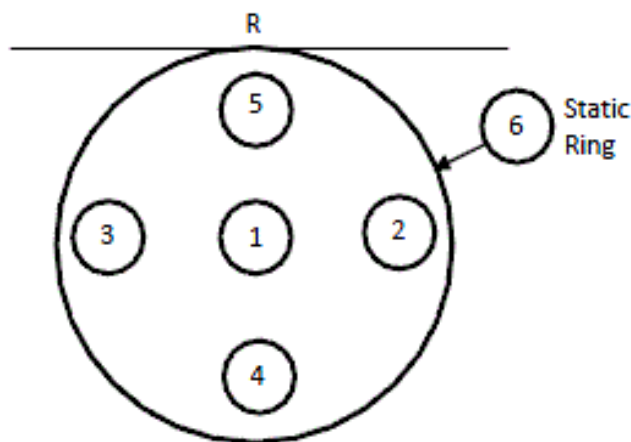
Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού,
 v η ταχύτητα του,
 L η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση,
 μ το δυναμικό ιξώδες και
 ν το κινηματικό ιξώδες

Συνεπώς πρέπει να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία και την πίεση της ροής. Η ιδανική περίπτωση θα ήταν λοιπόν κάποιο σύστημα στο οποίο θα μπορούσαμε να μεταβάλουμε αυτές τις μεταβλητές χωρίς καμία εξάρτηση μεταξύ τους. Σε κανονικές συνθήκες όμως με την αύξηση του αριθμού Mach αυξάνεται και ο αριθμός Reynolds, εκτός και αν διαθέτουμε κάποια εγκατάσταση στην οποία η πίεση και η θερμοκρασία μπορούν να αλλάξουν ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Τέτοιες εγκαταστάσεις

υπάρχουν αλλά δεν είναι συμφέρουσες όσο αναφορά το κόστος. Για το λόγο αυτό επειδή ο αριθμός Mach έχει μεγαλύτερη επίδραση στις μετρήσεις και στο χάρτη βαθμονόμησης, του δίνουμε διάφορες τιμές με την αύξηση ή τη μείωση της ταχύτητας της ροής μέσα σε αεροσήραγγες.

Για την βαθμονόμηση το όργανο τοποθετείται σε ένα αεροθάλαμο, σε μια βάση μετακίνησης με δύο βαθμούς ελευθερίας. Η άκρη του σωλήνα παραμένει στο ίδιο σημείο καθ' όλη τη διαδικασία ενώ ένα κατάλληλο σύστημα τον προσανατολίζει σε διάφορες προκαθορισμένες γωνίες. Σε κάθε μία από αυτές τις γωνίες καταγράφεται η πίεση από κάθε μία οπή καθώς και η συνολική. Συνήθως αυτές οι πιέσεις είναι διαφορετικές με αναφορά την τοπική στατική πίεση. Με τα δεδομένα αυτά δημιουργείται ο χάρτης βαθμονόμησης του οργάνου. Η βαθμονόμηση γίνεται για διάφορες γωνίες ροής για κάθε μία ταχύτητα.

Μετά την καταγραφή των δεδομένων της βαθμονόμησης χρειάζονται και κάποιοι μαθηματικοί τύποι έτσι ώστε κατά τη χρήση του οργάνου να μπορεί να γίνει η σύνδεση μεταξύ των πιέσεων που μετράει το όργανο και των στοιχείων της ροής (ταχύτητα, γωνία, στατική και δυναμική πίεση). Παρακάτω θα παρουσιαστούν τέτοιοι τύποι για σωλήνα 5 οπών. Το διάνυσμα της ταχύτητας μπορεί να υπολογιστεί μέσω τεσσάρων μεταβλητών, των δύο γωνιών, α για pitch και β για yaw, του συντελεστή ολικής πίεσης A_t και του συντελεστή στατικής πίεσης A_s .



Εικόνα 6: Αρίθμηση των οπών

Κάνουμε την παραδοχή ότι η αρίθμηση των οπών είναι όπως η παραπάνω εικόνα. Με τις πιέσεις που μετράει η κάθε οπή υπολογίζουμε κάποιους συντελεστές οι οποίοι χρειάζονται για τον υπολογισμό των στοιχείων που ψάχνουμε. Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής ψευδο-δυναμικής πίεσης

$$q = p_1 - \frac{p_2 + p_3 + p_4 + p_5}{4}$$

Έπειτα υπολογίζονται οι συντελεστές β_α και β_β για το pitch και yaw αντίστοιχα και οι συντελεστές A_t και A_s .

$$\beta_{\alpha} = \frac{p_2 + p_5 - p_4 - p_3}{2q}$$

$$\beta_{\beta} = \frac{p_2 + p_4 - p_5 - p_3}{2q}$$

$$A_s = \frac{q}{p_t - p_s}$$

$$A_t = \frac{p_1 - p_t}{q}$$

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι οι συντελεστές για το pitch και yaw δεν είναι η τιμή της αντίστοιχης γωνίας. Αλλά μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης αποκτάνε μια μονοσήμαντη σχέση μεταξύ τους όπου για κάθε συνδυασμό β_{α} και β_{β} αντιστοιχεί ένα ζευγάρι τιμών για τις 2 γωνίες α και β . Οι παραπάνω συντελεστές υπολογίζονται για κάθε γωνία και ταχύτητα που βαθμονομήθηκε το probe και συνθέτουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα που τους συνδέουν με τις ζητούμενες τιμές.

Βαθμονομήσεις σε περισσότερες ταχύτητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρεμβολή δεδομένων ανάμεσα σε χάρτες βαθμονόμησης, για διαφορετικούς αριθμούς Mach και Reynolds. Η προτεινόμενη διαφορά αριθμού Mach στις πολλαπλές βαθμονομήσεις είναι 0,1-0,15. Αν το όργανο θα χρησιμοποιηθεί σε χαμηλές ταχύτητες ροής (για αέρα χαμηλότερα από 17 m/s), μπορεί να χρειαστούν επιπρόσθετες βαθμονομήσεις λόγω της επίδρασης του αριθμού Reynolds.

Για υπερηχητικές ροές χρειάζεται επιπλέον βαθμονόμηση διότι υπάρχουν μεγάλες αλλαγές στις συνθήκες της ροής.

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η διαδικασία μείωσης δεδομένων βασίζεται στην αρχή η οποία λέει, ότι σε ένα πλατύ αντικείμενο παρατηρούμε την υψηλότερη πίεση στο σημείο ανακοπής και την χαμηλότερη στο σημείο αποκόλλησης της ροής. Έτσι, εάν η γωνία της ροής με τον σωλήνα είναι μικρή (κάτω από 20°), η κεντρική οπή παρουσιάζει την υψηλότερη πίεση. Στις μεγαλύτερες όμως γωνίες, η περιφερειακή οπή που βρίσκεται στην μεριά που συναντά την ροή έχει την μεγαλύτερη πίεση ενώ στην αντίθετη πλευρά έχουμε αποκόλληση. Στις περιοχές αποκόλλησης τα δεδομένα που παίρνουμε από τις αντίστοιχες οπές δεν μας είναι χρήσιμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Όσο αναφορά την βαθμονόμηση και την μείωση δεδομένων είναι χρήσιμο να σκεφτούμε τον αριθμό των ανεξάρτητων δεδομένων που είναι διαθέσιμα και συνεπώς τον αριθμό των διαφορετικών στοιχείων που μπορούμε να υπολογίσουμε.

Κατά τη χρήση του σωλήνα Pitot μετά από την καταγραφή των πιέσεων πρώτα υπολογίζονται οι συντελεστές β_α και β_β . Έπειτα εντοπίζονται οι κοντινότερες τιμές τους σύμφωνα με τις τιμές της βαθμονόμησης. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα σημεία στο χάρτη βαθμονόμησης, με τιμές στους συντελεστές μακριά από της μέτρησής μας, δεν έχουν επίδραση στους υπολογισμούς. Έτσι επιλέγονται τα κοντινότερα σημεία στο χάρτη βαθμονόμησης και με τη χρήση της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων μπορούν να υπολογιστούν τα ζητούμενα μεγέθη της ροής. Τα μεγέθη α, β (οι γωνίες της ροής), καθώς και A_t, A_s , είναι συνάρτηση των β_α και β_β , οπότε μπορούν να υπολογιστούν μέσω της εξίσωσης $f(\beta_\alpha, \beta_\beta) = a_0 + a_1\beta_\alpha + a_2\beta_\beta$, όπου f κάθε ένα από τα μεγέθη, και a_0, a_1, a_2 οι τρεις πολυωνυμικοί συντελεστές που βρίσκονται με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Πιο αναλυτικά αν σ η απόσταση από το κοντινότερο σημείο στο χάρτη βαθμονόμησης με την ζητούμενη τιμή, ψάχνουμε τα a_0, a_1, a_2 που ελαχιστοποιούν το άθροισμα.

$$S = \sum_{i=1}^n s_i^2$$
, με n τον αριθμό των σημείων από τον χάρτη βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται.

Στο στάδιο αυτό αφού υπολογιστούν τα α, β, A_t, A_s μπορούν να βρεθούν και οι υπόλοιπες τιμές:

$$p_t = p_1 - A_t \cdot q$$

$$p_s = p_t - q/A_s$$

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$

Σε πειράματα στον αέρα, για υψηλές υποηχητικές ταχύτητες η διαδικασία είναι διαφορετική. Αρχικά υπολογίζεται ο αριθμός Mach για αδιαβατικό, τέλειο αέριο.

$$M = \sqrt{5 \cdot \left(\left(\frac{p_t}{p_s} \right)^{\frac{2}{7}} - 1 \right)}$$

Η θερμοκρασία T είναι

$$T = \frac{T_t}{1 + M^2/5}, \quad \text{όπου } T_t \text{ η μετρούμενη θερμοκρασία.}$$

Τότε το μέτρο της ταχύτητας V είναι:
$$V = M \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$$

ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΡΟΗ

Λόγω του μεγέθους του οργάνου αναμένεται μια παρεμβολή στην ροή. Ιδανικά το όργανο πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές της βαθμονόμησης. Αυτό σημαίνει ότι δεν πρέπει να τοποθετείται κοντά σε κάποιο άλλο σώμα σε απόσταση μικρότερη από 4 έως 5 διαμέτρους του σωλήνα Pitot (Aerogrobe). Στην ουσία, με κατάλληλο διαμορφωμένο σωλήνα, δίνεται η δυνατότητα να πλησιάσουμε μέχρι και μία διάμετρο από την επιφάνεια αναλόγως το οριακό στρώμα. Οι μετρήσεις μέσα σε οριακά στρώματα δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες. Επίσης υπάρχουν υδροδυναμικά φαινόμενα, εξαιρετικά ευαίσθητα σε εξωτερικές παρεμβολές, που μπορεί να επηρεαστούν από την παρουσία του οργάνου. Τα κυριότερα από αυτά είναι :

- Η τοποθέτηση του οργάνου κοντά στο κέντρο μιας δίνης μπορεί να προκαλέσει μεγάλες αλλαγές στη ροή.
- Η τοποθέτηση του οργάνου κοντά σε οριακά στρώματα, ιδιαίτερα όταν έχουμε μέτριες τιμές αριθμού Reynolds.
- Η τοποθέτηση του οργάνου πάνω από κάποιο τοίχωμα όπου έχουμε ανάποδη κλίση στην πίεση μπορεί να προκαλέσει αποκόλληση.

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Ένας ακόμα περιορισμός στην χρήση του σωλήνα Pitot σε νερό είναι η σχετικά χαμηλή συχνότητα απόκρισης που κυμαίνεται στα 20-50 Hz. Οι μεταβολές της πίεσης με μεγαλύτερη συχνότητα εξασθενούν και αλλάζουν φάση μέσα στο σωλήνα, οπότε συνεπώς δεν μπορούν να καταγραφούν σωστά, εκτός αν γνωρίζουμε τις ακουστικές ιδιότητες των σωληνώσεων του συστήματος μας. Επίσης δεν είναι δυνατό να μετρήσουμε μεγέθη που σχετίζονται με την τυρβώδη ροή όπως για παράδειγμα το επίπεδο τύρβης. Μπορούμε όμως να μετρήσουμε μεταβατικά φαινόμενα που εξελίσσονται τουλάχιστον σε 50 milliseconds, αρκεί το μήκος της σωληνώσεως μεταξύ του οργάνου και του αισθητήρα να μην είναι μεγαλύτερη από 25 cm.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι σε ασυμπίεστο υγρό, όπως το νερό (στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ο σωλήνας Pitot στα πειράματα της παρούσας εργασίας), η εξασθένιση και αλλαγή φάσης του σήματος πίεσης είναι ασήμαντη, διότι ακόμα και οι απότομες αλλαγές πίεσης προκαλούν μηδαμινή ή και καθόλου σχετική κίνηση μεταξύ του ρευστού και των τοιχωμάτων των σωληνώσεων, οπότε δεν έχουμε απώλειες τριβής.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Σε κάθε πειραματική διαδικασία είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε το αναμενόμενο σφάλμα, τους λόγους που μπορεί να προέκυψε αλλά και την ακρίβεια που θέλουμε να μετρήσουμε. Με τον όρο σφάλμα εννοούμε την διαφορά της τιμής ενός μεγέθους που υπολογίζουμε ή μετράμε με την πραγματική του. Υπάρχουν πολλοί λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλμα. Για παράδειγμα, σφάλμα μπορεί να προκαλέσει η λάθος τοποθέτηση του οργάνου, κάποια μικρή αναταραχή κατά τη μέτρηση, οι αισθητήρες πίεσης κ.α. Για την αποφυγή αυτών χρειάζεται προσεχτική προετοιμασία και διεξαγωγή των μετρήσεων. Το αναμενόμενο σφάλμα σε κάποια διαδικασία λέγεται και αβεβαιότητα.

Σφάλμα μπορεί να προκληθεί και από την διαδικασία μείωσης δεδομένων και παρεμβολής στο χάρτη βαθμονόμησης, το οποίο μάλιστα υπάρχουν μέθοδοι για να υπολογιστεί. Όταν μετριέται κάποιο μέγεθος R , μέσω κάποιου αριθμού μεταβλητών, το σφάλμα κάθε μιας από αυτές συντελεί στο συνολικό σφάλμα του R . Η αβεβαιότητα λοιπόν μπορεί να εκφραστεί με τον παρακάτω τύπο:

$$\delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \right) \cdot \delta X_1^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \right) \cdot \delta X_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \right) \cdot \delta X_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Όπου n ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών X . Στην περίπτωση των σωλήνων Pitot οι μεταβλητές αυτές είναι τα φυσικά μεγέθη α, β, ρ_t και ρ_s , τα οποία εξαρτώνται από τις μετρούμενες πιέσεις στις οπές. Μια από τις μεγαλύτερες αιτίες σφάλματος στη διαδικασία μείωσης δεδομένων, είναι η παρεμβολή των τιμών για τα α, β, A_t, A_s , στις καμπύλες του χάρτη βαθμονόμησης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων, η οποία προσεγγίζει πολύ καλά τις πραγματικές τιμές, ιδιαίτερα εάν τα σημεία στο χάρτη βαθμονόμησης είναι πυκνά.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται μέτρηση του πεδίου ροής στον ομόρου ενός πρότυπου μοντέλου ενός bulk carrier, με τη χρήση ενός σωλήνα Pitot 5 οπών. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι υπολογίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας του νερού σε ένα μεγάλο αριθμό σημείων έτσι ώστε να έχουμε μια συνολική εικόνα της ροής στον ομόρου. Οι μετρήσεις έγιναν σε 3 επίπεδα: κάτω από τον καθρέφτη του μοντέλου, στο επίπεδο της έλικας που βρίσκεται 20,1 πόντους από το καθρέφτη και 40 πόντους περίπου μπροστά από τον καθρέφτη, στο σημείο που έχει τελειώσει το παράλληλο τμήμα και υπάρχουν έντονες καμπυλότητες στην γάστρα. Για να αποκτήσουμε μια καλή εικόνα των συνθηκών της ροής και να εντοπίσουμε μεταβολές σε αυτή, τα σημεία μέτρησης σε κάθε επίπεδο έπρεπε να είναι σχετικά κοντά μεταξύ τους. Αυτό μεταφράζεται σε πολλές μετρήσεις συνολικά (περίπου 300 ανά επίπεδο) και σε πολλές ώρες πειραμάτων.



Εικόνα 7: Πειραματική διάταξη

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Πειραματική δεξαμενή

Το ονομαστικό μήκος της δεξαμενής είναι 100 μέτρα εκ των οποίων τα 90 περίπου μέτρα είναι διαθέσιμα για την εκπόνηση πειραμάτων. Το πλάτος της είναι 4.56 μέτρα και το βάθος της μπορεί να φτάσει έως και τα 3.5 μέτρα. Στο ένα άκρο της δεξαμενής είναι εγκατεστημένος ένας μηχανισμός παραγωγής κυμάτων (κυματιστήρας), ενώ στο άλλο άκρο είναι εγκατεστημένη μία ειδική ξύλινη διάταξη απόσβεσης κυμάτων (αποσβεστήρας).

Στα πλευρικά τοιχώματα της πειραματικής δεξαμενής μπορούν να τοποθετηθούν ειδικές διατάξεις απόσβεσης κυματισμών, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πειράματος.

Στο άνω μέρος των πλευρικών τοιχωμάτων της δεξαμενής, έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος ράγες, κατάλληλες να κινείται το φορείο στο οποίο αναρτώνται τα πρότυπα. Περί το μέσο της δεξαμενής, έχουν τοποθετηθεί παράθυρα παρατηρήσεων τα οποία καλύπτουν 18 μέτρα. Η δεξαμενή γεμίζει με νερό που προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης το οποίο αντλείται από γεώτρηση. Βασική απαίτηση είναι η αποφυγή δημιουργίας μικροβιολογικού φόρτου στο νερό. Για το λόγο αυτό, ο χώρος στον οποίο είναι εγκατεστημένη η πειραματική δεξαμενή είναι πλήρως απομονωμένος από το ηλιακό φως ενώ, παράλληλα, διατίθεται ειδικό φίλτρο μέσω του οποίου γίνεται ανακύκλωση του νερού της δεξαμενής. Τέλος, ανάλογα με τις ανάγκες του εργαστηρίου, η δεξαμενή αδειάζει κάθε τρία χρόνια περίπου οπότε και πραγματοποιείται καθαρισμός της. Στη συνέχεια γεμίζει και πάλι με νερό έτσι, ώστε να ανταποκρίνεται στο λειτουργικό της ρόλο.



Εικόνα 8: Πειραματική δεξαμενή

ΦΟΡΕΙΟ

Το φορείο είναι αναπόσπαστο κομμάτι της πειραματικής δεξαμενής και φέρει το μετρητικό εξοπλισμό, βασικό μέρος του οποίου είναι τα δυναμόμετρα πάνω στα οποία δένονται τα πρότυπα.

Το βάρος του φορείου είναι 5.5 τόνοι και κινείται πάνω σε σιδηροτροχιές κατά μήκος της δεξαμενής με ταχύτητα έως και 5.5 m/s. Η κίνησή του είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και μπορεί να δουλέψει χωρίς οδηγό, εάν και αυτό για λόγους ασφαλείας απαγορεύεται. Η ταχύτητά του μετριέται με έναν αισθητήρα φωτεινών παλμών, οι οποίοι δημιουργούνται από ένα ειδικό σύστημα που φωτίζει ένα βαθμονομημένο τροχό σε επαφή με τις σιδηροτροχιές. Η ακρίβεια μέτρησης της ταχύτητας είναι της τάξεως του 0.1 mm/s.

Τέλος, στο πίσω μέρος του φορείου ακολουθεί ένας μηχανισμός βίαιης απόσβεσης υψηλών κυματισμών που δημιουργεί το πρότυπο (σιδερώστρα). Η απόσβεση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση της σιδερώστρας εφαπτομενικά της επιφάνειας του νερού κατά την επιστροφή του φορείου στη θέση εκκίνησης.

ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ

Η κίνηση του μοντέλου στην επιθυμητή ταχύτητα γινόταν εφικτή με την πρόσδεσή του με το δυναμόμετρο **R-47**. Το βάρος του δυναμομέτρου αυτού είναι 7,36 kg και η συνδεσή του με το μοντέλο γινόταν μέσω ειδικής πλάκας βιδωμένης στο λίγο πρύμνηθεν του κέντρου βάρους του. Αυτό έγινε γιατί δεν υπήρχε αρκετός χώρος στην διάταξη έτσι ώστε να δεθεί ακριβώς στο κέντρο βάρους. Από στοιχεία του μοντέλου όμως υπολογίσθηκε ότι η επίδραση αυτού του φαινομένου είχε αμελητέες επιδράσεις στα πειραματικά μας αποτελέσματα. Το δυναμόμετρο γενικά χρησιμοποιείται και για την καταγραφή και μέτρηση κινήσεων heave και pitch που στην περίπτωση των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής δεν χρειαζόταν.

ΓΕΡΑΝΟΙ

Το εργαστήριο έχει στη διάθεσή του δύο γερανούς που βοηθούν στην εγκατάσταση του βαρέως εξοπλισμού και την τοποθέτηση των δυναμομέτρων και των προτύπων. Ο ένας βρίσκεται πλησίον του αποσβεστήρα ενώ ο δεύτερος, ο οποίος έχει και μεγαλύτερη ανυψωτική ικανότητα, βρίσκεται περίπου στο μέσον της δεξαμενής πλησιέστερα στον κυματιστήρα.

BULK CARRIER HURON

Για τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο "Huron". Το είδος του είναι Bulk carrier. Το μήκος του μοντέλου αυτού ήταν 5.11m και η κλίμακα 1/35. Για το μοντέλο αυτό, έγιναν δοκιμές στο βύθισμα 0,207 m.

Χαρακτηριστικά Πλοίου

Σύμβολο

Χαρακτηριστικά Πλοίου	Σύμβολο	
Μήκος ισάλου	L_{WL} [m]	179.878
Πλάτος ισάλου	B_{WL} [m]	23.700
Μέσο βύθισμα	T_M [m]	7.250
Διαγωγή (+: by Bow)	t [m]	0
Διάμηκες Κέντρο Άντωσης	LCB [m]	3.940
Βρεχόμενη Επιφάνεια	WS [m ²]	5720.9
Εκτόπισμα	Δ [tn]	25996

Χαρακτηριστικά Προτύπου

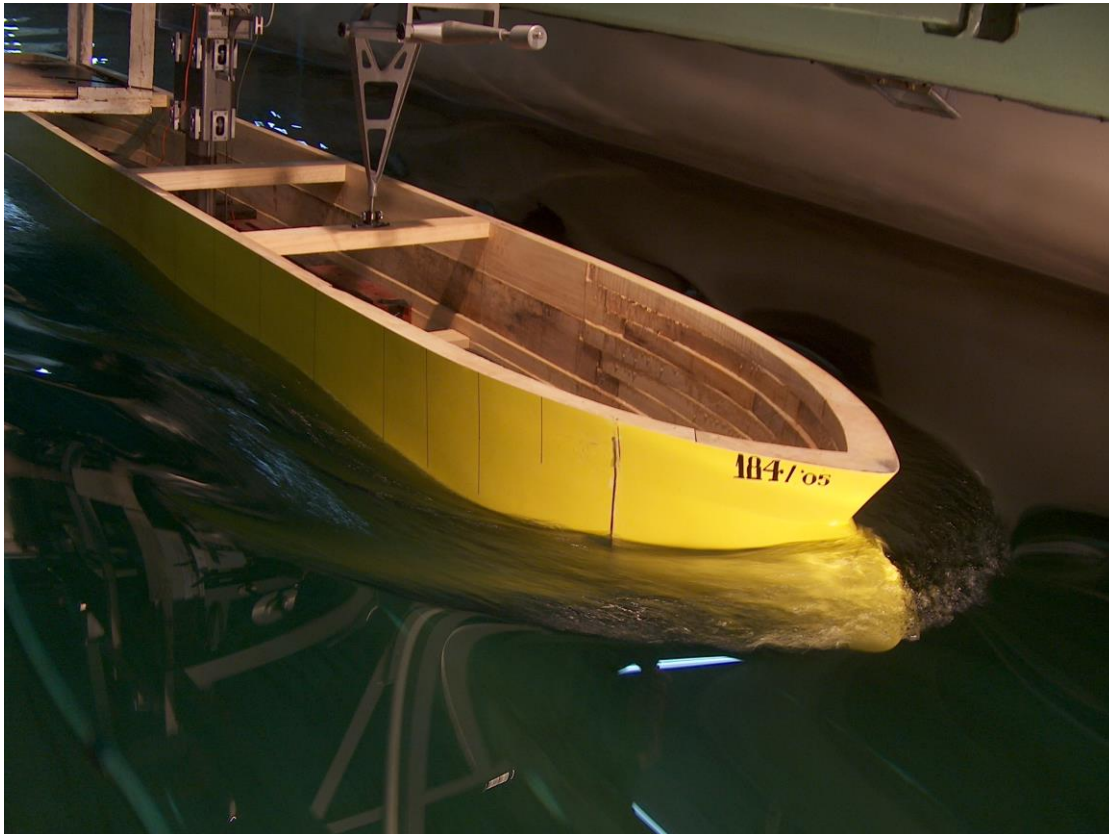
Σύμβολο

Χαρακτηριστικά Προτύπου	Σύμβολο	
Μήκος ισάλου	L_{WL} [m]	5.139
Πλάτος ισάλου	B_{WL} [m]	0.677
Μέσο βύθισμα	T_M [m]	0.207
Διαγωγή (+: by Bow)	t [m]	0
Διάμηκες Κέντρο Άντωσης	LCB [m]	0.113
Βρεχόμενη Επιφάνεια	WS [m ²]	4.670
Εκτόπισμα	Δ [kg]	591.5

Σημειώνεται, ότι η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης, LCB, αναφέρεται ως προς το μέσο νομέα, με τις θέσεις προς πλώρα να λαμβάνονται θετικές. Το βύθισμα του σκάφους αναφέρεται στη βασική γραμμή αναφοράς (Base Line), όπως ορίζεται στα σχέδια γραμμών (Lines Plan) και γενικής διάταξης (General Arrangement Plan) που προσκόμισε το Ναυπηγικό Γραφείο.

Η ταχύτητα δοκιμών είναι 1,217 m/s που αντιστοιχεί σε αριθμό Froude περίπου 0,17.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών αντίστασης για το μοντέλο αυτό και η προβλεπόμενη ισχύς ρυμούλκησης.



Εικόνα 9: *bulk carrier Huron*

Ship Name : HURON

Test Condition : C1

Model Number : 184-05

Model Scale = 1: 35

Date : 20-04-05

Trip Wires :YES

Ship Data

LWL : 179.88 Metres

Lbulb : 179.97 Metres

BWL : 23.70 Metres

T : 7.25 Metres

Model Data

LWL : 5.139 Metres

Lbulb : 5.142 Metres

BWL : 0.677 Metres

T : 0.207 Metres

Wetted Surf.:5720.90 m²

S. W. Temp. : 15.00 Degrees

Dcf*1000 : 0.4000

Wetted Sur.: 4.670 m²

F. W. Temp.: 17.00 Degrees

VM	RM	RNM	CTM	CFM	CR	FN	1+K	FN ⁴ /CFM
m/s	Kp	*10 ⁻⁶	*10 ³	*10 ³	*10 ³			

0.516	0.305	2.453	4.817	3.892	0.925	0.073	1.238	0.007
0.598	0.388	2.843	4.563	3.781	0.782	0.084	1.207	0.013
0.698	0.555	3.318	4.790	3.669	1.121	0.098	1.305	0.025
0.774	0.667	3.680	4.682	3.598	1.084	0.109	1.301	0.039
0.859	0.802	4.084	4.571	3.527	1.043	0.121	1.296	0.061
0.945	0.992	4.493	4.671	3.465	1.206	0.133	1.348	0.091
1.025	1.154	4.873	4.619	3.413	1.206	0.144	1.353	0.127
1.117	1.357	5.311	4.574	3.359	1.215	0.157	1.362	0.182
1.203	1.617	5.719	4.699	3.314	1.385	0.169	1.418	0.249
1.289	1.976	6.128	5.001	3.272	1.729	0.182	1.528	0.332
1.380	2.453	6.561	5.417	3.232	2.184	0.194	1.676	0.441
1.461	3.036	6.946	5.981	3.199	2.782	0.206	1.870	0.560

VM	FN	VS	RNS	CFS	CTS	RS	EHP	Vkn	RS/DISPL
m/s		m/s	*10 ⁻⁸	*10 ³	*10 ³	Kp	PS	Knots	Kp/Ton

0.516	0.073	3.05	4.623	1.688	3.013	8403	342.0	5.93	0.323
0.598	0.084	3.54	5.358	1.656	2.838	10629	501.4	6.88	0.409
0.698	0.098	4.13	6.254	1.624	3.145	16046	883.5	8.03	0.617
0.774	0.109	4.58	6.935	1.603	3.087	19368	1182.5	8.90	0.745
0.859	0.121	5.08	7.697	1.582	3.025	23375	1583.9	9.88	0.899
0.945	0.133	5.59	8.467	1.563	3.169	29640	2209.4	10.87	1.140
1.025	0.144	6.06	9.184	1.547	3.153	34693	2805.1	11.79	1.335
1.117	0.157	6.61	10.008	1.530	3.145	41095	3620.9	12.85	1.581
1.203	0.169	7.12	10.779	1.516	3.301	50036	4748.1	13.83	1.925
1.289	0.182	7.63	11.549	1.504	3.632	63206	6426.7	14.82	2.431
1.380	0.194	8.16	12.365	1.491	4.075	81283	8848.1	15.87	3.127
1.461	0.206	8.64	13.090	1.481	4.663	104232	12012.3	16.80	4.010

Displacement in S.W. = 25995.90 Tonnes

Above WL Transv. Area = 0.00 m²

Rudders Area = 0.00 m²

Stabilizing Fins Area = 0.00 m²

Bilge Keels Area = 0.00 m²

V-Brackets Area = 0.00 m²

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ PITOT

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι πολύ σημαντική η ακριβής και γρήγορη μετακίνηση του Probe στα σημεία που είναι επιθυμητή η κάθε μία από τις μετρήσεις. Ο αριθμός των μετρήσεων ήταν πολύ μεγάλος και η αποτελεσματικότητα του συστήματος αυτού ήταν καθοριστικής σημασίας. Για το λόγο αυτό το εργαστήριο προμηθεύτηκε από την εταιρεία Aeroprobe ένα σύστημα μετακίνησης ακριβείας. Αυτό περιλαμβάνει τρεις ειδικές τραβέρσες για την κίνηση του probe στο χώρο μέσω βηματικών κινητήρων και ατέρμονα κοχλία μικρού βήματος για ακρίβεια κινήσεων. Πιο αναλυτικά 200 περιστροφές του κινητήρα αντιστοιχούν σε μετακίνηση 1mm.



Εικόνα 10: Σύστημα μετακίνησης σε 3 άξονες

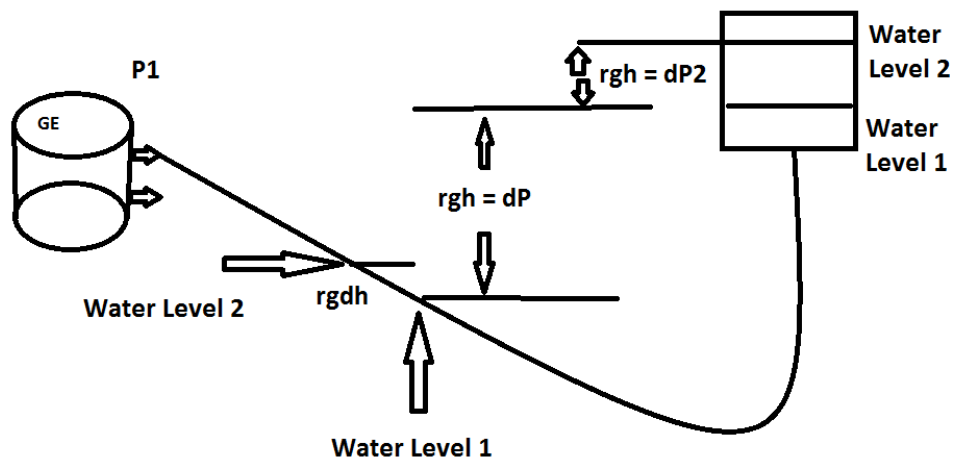
Οι βηματικοί κινητήρες με την βοήθεια της μονάδας ελέγχου μέσω Υ/Η και κατάλληλου προγράμματος (software), ελέγχουν την κίνηση αυτών. Μέσω των περιστροφών του κινητήρα γίνονται γνωστή η θέση του σωλήνα Pitot στον εκάστοτε άξονα. Οι πληροφορίες αυτές απεικονίζονται στην οθόνη του Υ/Η. Για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος στα άκρα των διαδρομών έχουν τοποθετηθεί όριο-διακόπτες οι οποίοι διακόπτουν την παροχή ρεύματος στον αντίστοιχο βηματικό κινητήρα. Μετά από στατικές δοκιμές του συστήματος παρατηρήσαμε ότι η ταχύτητα μετακίνησης είναι μέσα στα όρια που ενδείκνυται για πειράματα μέσα σε δεξαμενή νερού. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να προγραμματίσουμε εκ των προτέρων τις κινήσεις του συστήματος έτσι ώστε να σαρώσει την περιοχή ενδιαφέροντος. Το σύστημα θα τοποθετηθεί στο πίσω μέρος του φορείου. Η ακρίβεια στην τοποθέτηση πρέπει να είναι μικρότερη του 1mm. Για να επιτευχθεί η προαναφερθείσα ακρίβεια θα κατασκευαστεί μηχανισμός με ατέρμονες κοχλίες μικρού βήματος για τις αναγκαίες μικρορυθμίσεις του συστήματος. Επίσης το probe τοποθετείται στο σημείο

ενδιαφέροντος μέσω μιας μεταλλικής προεκτάσεως.

Μετά από δοκιμές με ταχύτητα φορείου 1,2 και 3 m/s παρατηρήσαμε ότι προκαλεί μεγάλη αναταραχή. Για την μείωση του φαινομένου αυτού θα κατασκευαστεί υδροτομή γύρω από την προέκταση.

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η κατάλληλη επιλογή αισθητήρων πίεσης είναι πολύ σημαντική και συνεισφέρει στην ακρίβεια των μετρήσεων. Η ιδανική κατάσταση σε πειραματικές δεξαμενές είναι να υπάρχει χαμηλή στατική πίεση, έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ ατμοσφαιρικής και στατικής πίεσης να είναι μεγαλύτερη από τις αναμενόμενες μεταβολές κατά τις μετρήσεις. Συνεπώς, η ατμοσφαιρική πίεση δεν πρέπει να είναι η πίεση αναφοράς. Οι αισθητήρες πρέπει να βρίσκονται κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, το οποίο δεν είναι πάντα εύκολο, διαφορετικά η πίεση αναφοράς πρέπει να παίρνει τιμές ανάμεσα στην τοπική περιβαλλοντική πίεση και στην υδροστατική πίεση που μετράει ο σωλήνας Pitot. Φυσικά οι διαφορές στις πιέσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν το εύρος των αισθητήρων.



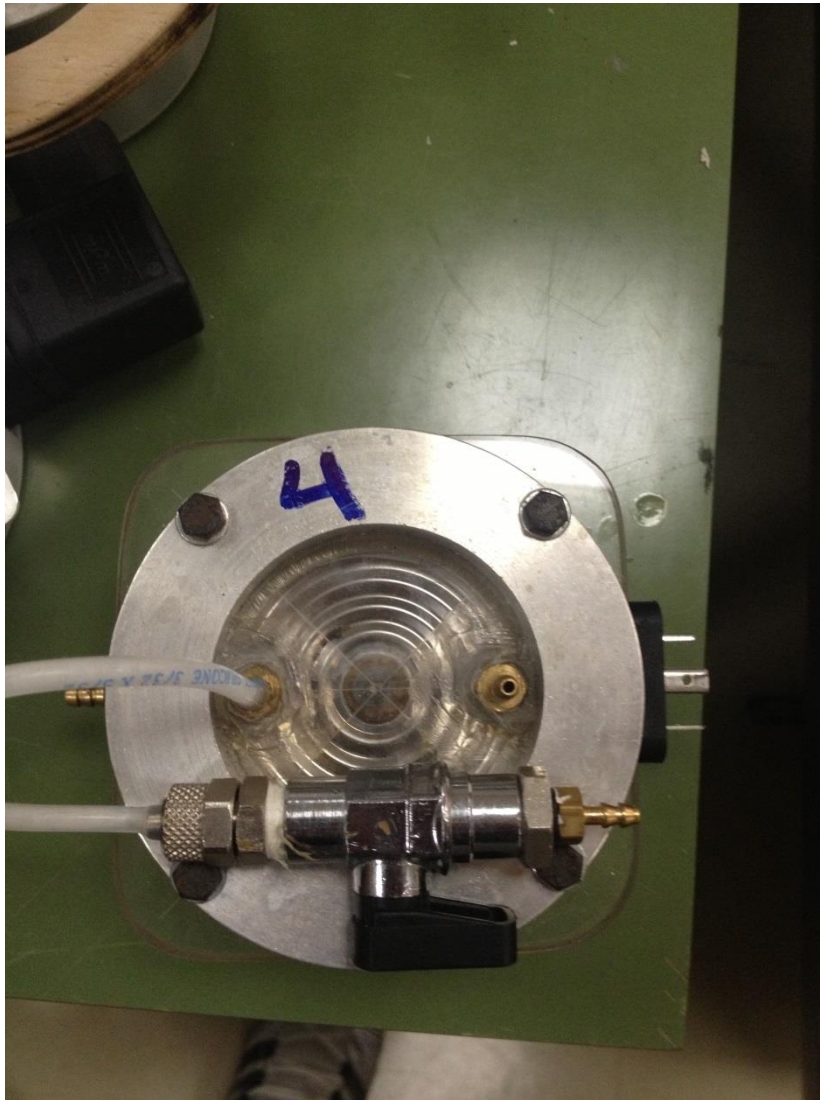
$P1 = P0 + rgh$ but if we calculate only the $dP2$ then we include rgh in the calibration, so $dP2$ is the correct reading

Εικόνα 11: σχηματική λειτουργία διαφορικών αισθητήρων πίεσης

Στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες με εύρος 250 mbar (3.57 psi) και ακρίβεια 1%. Κατά τη διεξαγωγή διαφόρων μετρήσεων με ταχύτητες από 1 έως 5 m/s, καταγράφηκε ελάχιστη διαφορά πίεσης 0.02 psi στις πλάινές οπές του σωλήνα Pitot. Τελικά επιλέχθηκαν οι αισθητήρες LP 1000 series από την εταιρεία General Electric, με μικρότερο εύρος, το οποίο είναι 70 mbar (1 psi) και απόκριση 2 ms, για την βελτίωση της ακρίβειας στο 0,25%. Η δυναμική απόκριση είναι επίσης σημαντική στις μετρήσεις σε πειραματικές δεξαμενές. Συνήθως χρειάζονται αρκετές μετρήσεις

(σε διάφορα σημεία) και ο χρόνος καταγραφής δεδομένων σε κάθε μία είναι περιορισμένος.

Για την καλύτερη χρήση των αισθητήρων έγινε μια μετατροπή στα καπάκια τους. Το ζητούμενο ήταν να γίνει δυνατή η παρατήρηση φυσαλίδων αέρα μέσα σε αυτούς. Έτσι αφαιρέσαμε τα αλουμινένια καπάκια και τα αντικαταστήσαμε με νέα, τα οποία φτιάχτηκαν στο εργαστήριο και ήταν από plexyglass.



Εικόνα 12: Μπροστά όψη αισθητήρα πίεσης

Ένας παράγοντας που δεν πρέπει να παραληφθεί κατά την διαδικασία επιλογής αισθητήρων είναι η αντοχή τους να αντέξουν προσωρινές υπερπιέσεις, που πιθανόν να συμβούν κατά την προετοιμασία και εγκατάσταση του συστήματος στην πειραματική δεξαμενή.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε ειδική βάση που φτιάχτηκε στο ξυλουργείο του εργαστηρίου πίσω από το σύστημα μετακίνησης του Probe και περίπου 20 πόντους πάνω από την επιφάνεια του νερού.

DATA ACQUISITION SYSTEM

Για την καταγραφή των πιέσεων από τους αισθητήρες χρησιμοποιήθηκε το σύστημα καταγραφής Spider 8 από την HBM. Το spider8 δέχεται μέχρι 8 διαφορετικά κανάλια και με τις ανάλογες κάρτες μπορεί να δεχθεί σήματα τάσης όπως και ρεύματος. Ο ρυθμός καταγραφής που καθορίστηκε ήταν στα 40Hz και η λήψη των δεδομένων γινόταν μέσω του προγράμματος Catman σε Η/Υ.



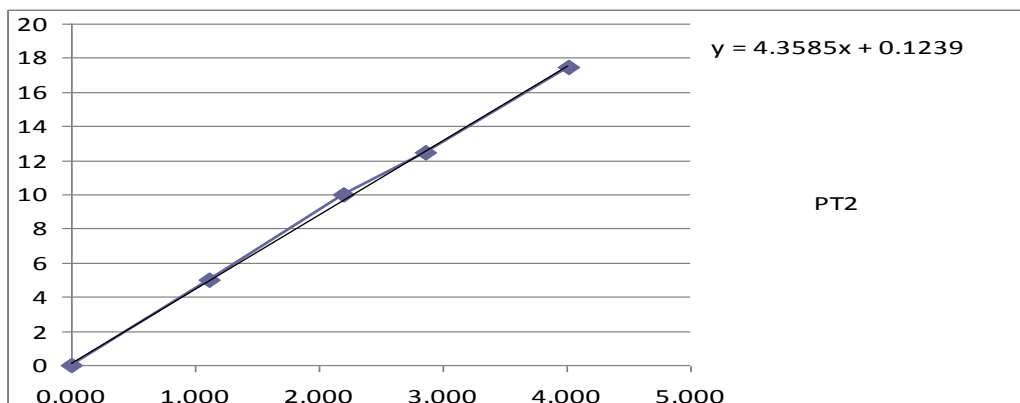
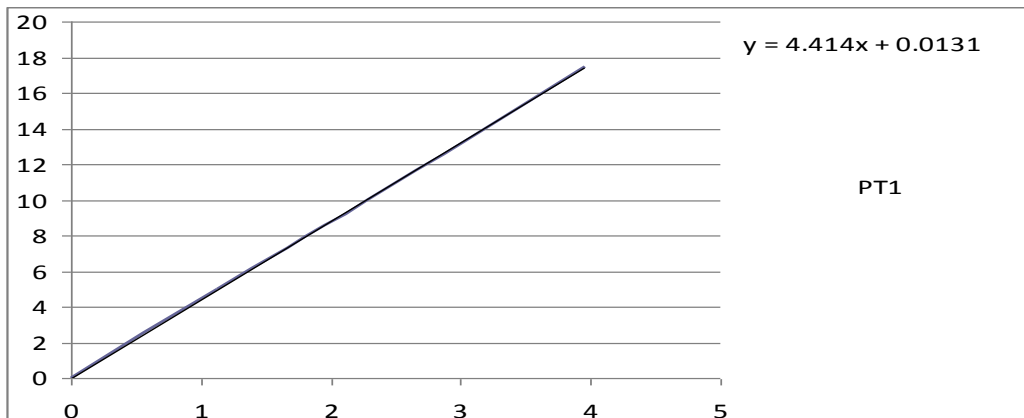
Εικόνα 13: data acquisition system (spider)

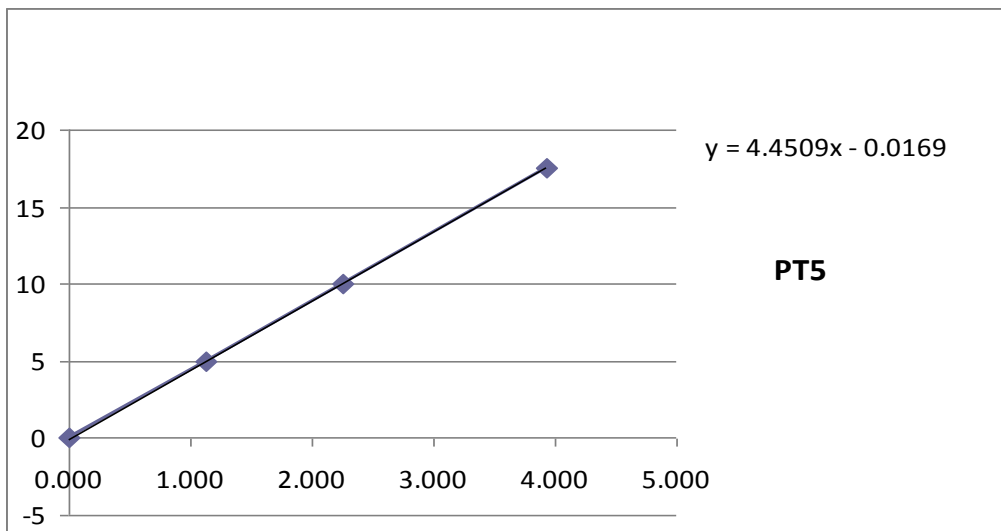
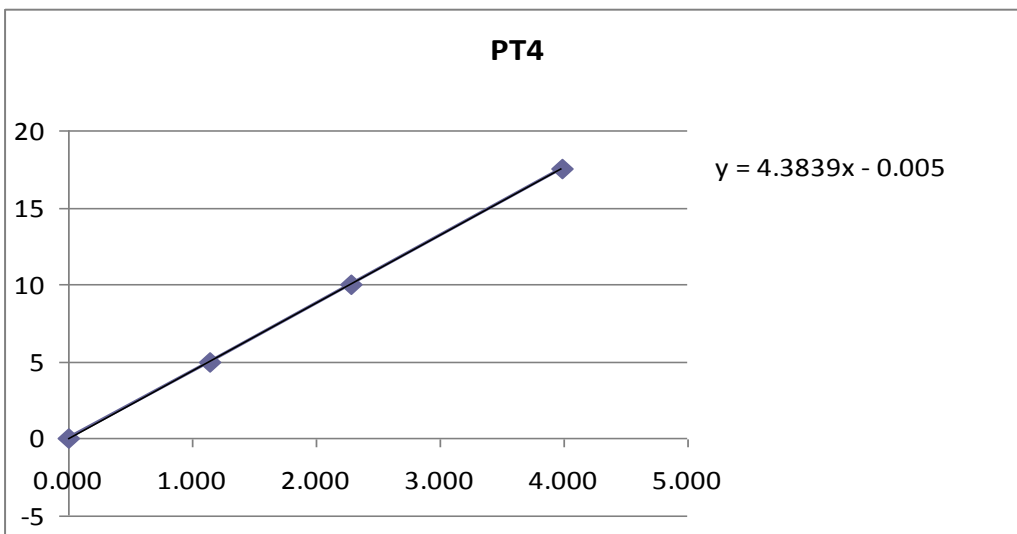
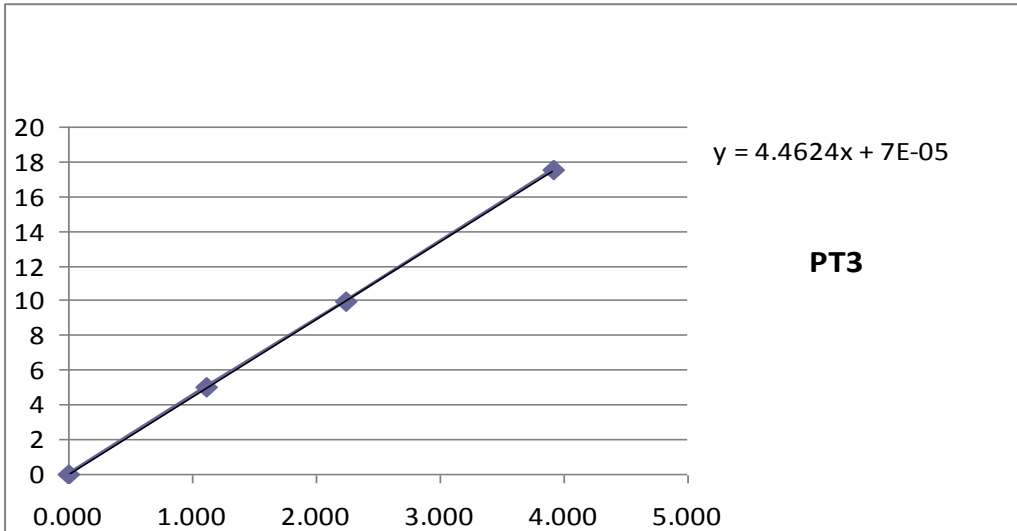
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Πριν από κάθε πείραμα, κάθε αισθητήρας πρέπει να βαθμονομηθεί. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα δοχείο γεμάτο νερό καθώς και σωλήνες σιλικόνης των οποίων το ένα άκρο ήταν στον αισθητήρα και το άλλο στο σωλήνα Pitot που ήταν μέσα στο δοχείο. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε κατάλληλη βάση, η οποία μπορούσε να κάνει κάθετες κινήσεις με ακρίβεια 0,1 mm. Μετρώντας λοιπόν τις κάθετες μετατοπίσεις μεταξύ των οργάνων και της επιφάνειας του νερού μπορούσε να υπολογιστεί η πίεση από τη στήλη ύδατος. Η διαδικασία αυτή έγινε πάνω από μια φορά για να διασφαλίσουμε την επαναληψιμότητα και την γραμμικότητα στην απόκριση των αισθητήρων.

Κατά τη βαθμονόμηση αλλά και την πειραματική διαδικασία όλες οι σωληνώσεις αλλά και ο σωλήνας Pitot ήταν γεμάτοι νερό. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες βαλβίδες για να αποφύγουμε τυχόν φυσαλίδες αέρα στην διάταξη, οι οποίες είναι ικανές να επιφέρουν λάθος στη μέτρηση. Η διαδικασία της εξαέρωσης γινόταν ανά τακτά διαστήματα κατά τα πειράματα και απαιτούσε αρκετή ώρα και προσοχή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της βαθμονόμησης και οι συναρτήσεις μεταφοράς των αισθητήρων από mA σε mBar.





ΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Από τα υδροστατικά στοιχεία, είχαμε δεδομένο το απαιτούμενο εκτόπισμα του μοντέλου. Με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής ζυγαριάς του εργαστηρίου μετρήθηκε το βάρος του άφορτου σκάφους, και στη συνέχεια, υπολογίστηκε από τη διαφορά του εκτοπίσματος, αλλά και του βάρους του δυναμόμετρου τον ακριβή αριθμό των κιλών που απαιτούνταν να προστεθούν κάθε φορά για να επιτευχθεί το αντίστοιχο εκτόπισμα.

Τα πρόσθετα βάρη τοποθετούνταν αρχικά συμμετρικά ως προς το κέντρο βάρους του προτύπου προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη εγκάρσια κλίση του.

Πιο συγκεκριμένα, για το μοντέλο *lightship* είχαμε 110,4 kg και θέλαμε εκτόπισμα 583,9 kg. Οπότε προστέθηκαν τα αντίστοιχα βάρη.

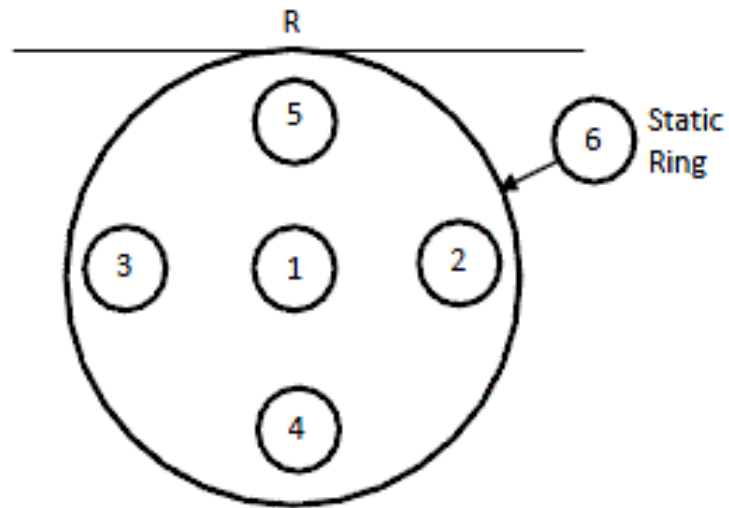
ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για την ανάλυση των τιμών που μετρήσαμε κατά την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα που μας παρέιχε η εταιρεία Aeroprobe μαζί με τον σωλήνα Pitot. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η βαθμονόμηση της εταιρείας για το probe του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, καθώς και το λογισμικό μείωσης δεδομένων.

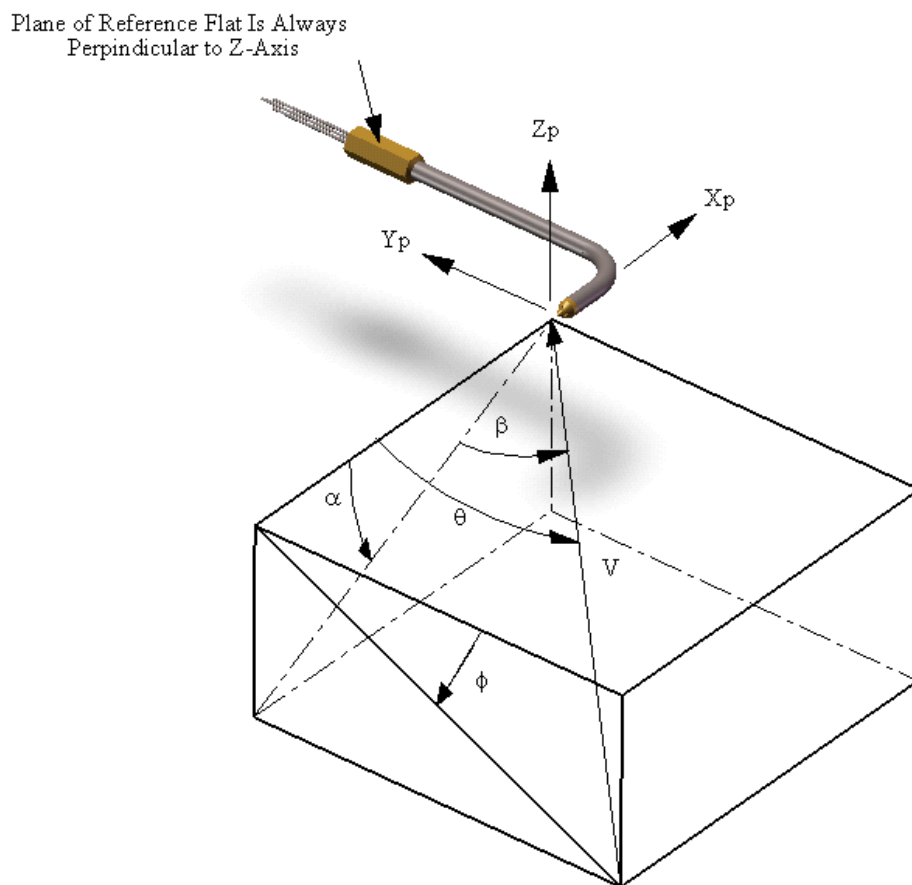
Βαθμονόμηση

- Αρχικά παρατίθεται ο πίνακας με τους συμβολισμούς των τιμών, η αρίθμηση των οπών για τη βαθμονόμηση και το σύστημα συντεταγμένων.

$P_n, n = 1-6$	Μετρούμενες πιέσεις στις οπές
P_6	Μετρούμενη στατική πίεση
T_o	Μετρούμενη Θερμοκρασία
P_o	Ολική πίεση
$P_s = P_o - (P_{t, Measured})$	Στατική πίεση
$P_{t, Measured}$	Μετρούμενη ολική πίεση με αναφορά την P_s
$M = \left\{ \frac{2}{(\gamma-1)} \left[\left(\frac{P_o}{P_s} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} - 1 \right] \right\}^{0.5}$	Αριθμός Mach
$T = T_o / (1 + 0.5(\gamma-1)M^2)$	Θερμοκρασία
$a = (\gamma RT)^{0.5}$	Ταχύτητα του ήχου , $R = 287.04 \text{ J/kg/K}$
$V = aM$	Ταχύτητα
$q = 0.5\gamma P_s M^2$	Δυναμική πίεση
$Q_{bar} = P_1 - P_6$	Συντελεστής δυναμικής πίεσης
$C_q = Q_{bar} / P_t$	το P_t καθορίζεται κατά τη βαθμονόμηση
$C_{\beta} = (P_2 - P_3) / Q_{bar}$	Συντελεστής για το Yaw
$C_{\alpha} = (P_4 - P_5) / Q_{bar}$	Συντελεστής για το Pitch
$C_t = Q_{bar} / P_{t, Measured}$	Συντελεστής ολικής πίεσης
$C_s = P_6 / Q_{bar}$	Συντελεστής στατικής πίεσης



Εικόνα 14: Αρίθμηση των οπών



Εικόνα 15: Καθορισμός συστήματος των 3 αξόνων

- Η διαδικασία της βαθμονόμησης ξεκινάει με τα μη επεξεργασμένα δεδομένα (raw data) που έχουν ληφθεί σε μετρήσεις με γνωστές συνθήκες ροής. Τα παρακάτω raw data είναι για αριθμό Mach 0,045, θερμοκρασία 23°C και είναι αναφορικά με την τοπική στατική πίεση.

Theta[deg]	Phi[deg]	P1[Torr]	P2[Torr]	P3[Torr]	P4[Torr]	P5[Torr]	P6[Torr]	Pt[Torr]	Po[Abs,Torr]
-19,8	-180	0,83874	0,98423	0,03421	0,53359	0,45327	-0,07113	1,01385	708,11385
-18,9	-180	0,8561	0,97888	0,06844	0,54767	0,46948	-0,06364	1,01493	708,11493
-18	-180	0,87247	0,97452	0,10303	0,56079	0,48409	-0,05682	1,01285	708,11285
-17,1	-180	0,88807	0,96744	0,13348	0,57484	0,49772	-0,05103	1,01194	708,11194
-16,2	-180	0,90601	0,9643	0,16787	0,59031	0,51361	-0,04354	1,01645	708,11645
-15,3	-180	0,91745	0,95343	0,1979	0,60065	0,52591	-0,03642	1,01276	708,11276
-14,4	-180	0,926	0,94501	0,2066	0,60158	0,52585	-0,02934	1,01269	708,11269
-13,5	-180	0,93195	0,93108	0,23285	0,60996	0,53326	-0,02381	1,00992	708,10992
-12,6	-180	0,94518	0,92069	0,2617	0,62102	0,54646	-0,01739	1,01157	708,11157
-11,7	-180	0,95757	0,9114	0,2911	0,63262	0,55609	-0,01239	1,01528	708,11528
-10,8	-180	0,95859	0,89197	0,31621	0,63674	0,56244	-0,00656	1,00869	708,10869
-9,9	-180	0,96719	0,87873	0,34573	0,6434	0,57044	-0,00112	1,01064	708,11064
-9	-180	0,975	0,86644	0,37512	0,65385	0,57943	0,00402	1,01274	708,11274
-8,1	-180	0,98318	0,85026	0,40382	0,65956	0,58688	0,00618	1,0122	708,1122
-7,2	-180	0,9845	0,83265	0,43191	0,66563	0,59237	0,0113	1,01117	708,11117
-6,3	-180	0,98911	0,8155	0,45911	0,67165	0,59981	0,01527	1,01415	708,11415
-5,4	-180	0,9896	0,79411	0,48639	0,67416	0,60366	0,01741	1,01102	708,11102
-4,5	-180	0,99049	0,77577	0,51253	0,67825	0,60772	0,01814	1,01061	708,11061
-3,6	-180	0,99294	0,75501	0,54082	0,6832	0,61205	0,02044	1,01284	708,11284
-2,7	-180	0,99412	0,73411	0,56645	0,6859	0,61666	0,02153	1,01284	708,11284
-1,8	-180	0,99477	0,71207	0,59493	0,68779	0,61885	0,02162	1,01306	708,11306
-0,9	-180	0,9942	0,68654	0,61987	0,68745	0,61869	0,02359	1,01168	708,11168
0	-180	0,99162	0,66332	0,63941	0,68536	0,61969	0,02424	1,01052	708,11052
0,9	-180	0,99675	0,64197	0,66718	0,68904	0,62254	0,02446	1,01597	708,11597
1,8	-180	0,99108	0,61877	0,68555	0,6835	0,61915	0,02156	1,01064	708,11064
2,7	-180	0,99365	0,59504	0,71196	0,68524	0,62274	0,02264	1,01508	708,11508
3,6	-180	0,9912	0,56796	0,73188	0,68126	0,61702	0,02103	1,01049	708,11049
4,5	-180	0,99199	0,54088	0,75683	0,67967	0,61474	0,01762	1,01297	708,11297
5,4	-180	0,98963	0,51325	0,77516	0,67329	0,61186	0,01688	1,00971	708,10971
6,3	-180	0,98986	0,48714	0,79804	0,67039	0,60797	0,0127	1,01275	708,11275
7,2	-180	0,9831	0,45775	0,81326	0,66268	0,60159	0,0099	1,00913	708,10913
8,1	-180	0,98385	0,4328	0,83462	0,65983	0,60044	0,00492	1,01158	708,11158
9	-180	0,98018	0,40475	0,85272	0,65302	0,59486	-0,00035	1,01366	708,11366
9,9	-180	0,9757	0,37583	0,87081	0,64556	0,58797	-0,00354	1,01364	708,11364
10,8	-180	0,96989	0,34727	0,88724	0,63963	0,58173	-0,0096	1,01603	708,11603
11,7	-180	0,96135	0,3189	0,89929	0,62889	0,5734	-0,01428	1,01424	708,11424

12,6	-180	0,95218	0,28994	0,91411	0,62003	0,56372	-0,02065	1,01232	708,11232
13,5	-180	0,94288	0,26174	0,92626	0,61192	0,55604	-0,02704	1,01393	708,11393
14,4	-180	0,93178	0,23397	0,93715	0,60041	0,54682	-0,0333	1,01153	708,11153
15,3	-180	0,91915	0,20551	0,94441	0,58669	0,53503	-0,04252	1,00911	708,10911
16,2	-180	0,90842	0,19532	0,95283	0,58363	0,53268	-0,04426	1,01026	708,11026
17,1	-180	0,89908	0,16698	0,96361	0,57288	0,52359	-0,05188	1,01237	708,11237
18	-180	0,8835	0,13478	0,97188	0,55794	0,50897	-0,06129	1,01359	708,11359
18,9	-180	0,86923	0,10086	0,97781	0,54501	0,49569	-0,07074	1,01315	708,11315
19,8	-180	0,85052	0,06536	0,98256	0,52739	0,48007	-0,0801	1,01122	708,11122
-19,8	-90	0,84303	0,47824	0,51004	0,99086	0,03761	-0,07371	1,01413	708,11413
-18,9	-90	0,8584	0,49513	0,52235	0,98407	0,07155	-0,06576	1,0114	708,1114
-18	-90	0,87318	0,50749	0,53659	0,97515	0,10479	-0,05867	1,00812	708,10812
-17,1	-90	0,88705	0,52085	0,55094	0,96895	0,13797	-0,04936	1,00965	708,10965
-16,2	-90	0,90375	0,53746	0,56487	0,9638	0,17062	-0,04223	1,01173	708,11173
-15,3	-90	0,91132	0,5466	0,57457	0,94936	0,19973	-0,03459	1,00468	708,10468
-14,4	-90	0,92218	0,54895	0,57639	0,94264	0,20579	-0,02989	1,00756	708,10756
-13,5	-90	0,93759	0,56044	0,58806	0,93659	0,2358	-0,02397	1,01199	708,11199
-12,6	-90	0,9402	0,56755	0,5957	0,91867	0,26174	-0,01768	1,00666	708,10666
-11,7	-90	0,95243	0,57734	0,60442	0,90601	0,29056	-0,01013	1,00664	708,10664
-10,8	-90	0,96289	0,58845	0,61372	0,89524	0,32071	-0,00685	1,01031	708,11031
-9,9	-90	0,96681	0,59608	0,61958	0,87825	0,3487	-0,00141	1,00696	708,10696
-9	-90	0,97705	0,60478	0,62992	0,86538	0,37845	0,0031	1,01016	708,11016
-8,1	-90	0,97798	0,60942	0,63328	0,8461	0,40558	0,00708	1,00796	708,10796
-7,2	-90	0,98355	0,61723	0,63943	0,82925	0,43429	0,0109	1,00809	708,10809
-6,3	-90	0,98752	0,62371	0,64695	0,81239	0,46279	0,01506	1,01066	708,11066
-5,4	-90	0,98647	0,62649	0,64756	0,79155	0,48798	0,01663	1,00809	708,10809
-4,5	-90	0,98973	0,63181	0,65314	0,77069	0,51517	0,01881	1,00893	708,10893
-3,6	-90	0,98509	0,63311	0,65212	0,74657	0,54007	0,01932	1,00594	708,10594
-2,7	-90	0,98244	0,63278	0,652	0,72173	0,56435	0,01924	1,00216	708,10216
-1,8	-90	0,98771	0,63843	0,65826	0,70224	0,59188	0,02223	1,00505	708,10505
-0,9	-90	0,98798	0,64036	0,6598	0,67934	0,61822	0,02133	1,00574	708,10574
0	-90	0,98958	0,64153	0,65986	0,65639	0,63999	0,02226	1,0085	708,1085
0,9	-90	0,98954	0,63993	0,65709	0,63135	0,66351	0,02108	1,00665	708,10665
1,8	-90	0,98776	0,63925	0,65818	0,60978	0,68564	0,02106	1,0068	708,1068
2,7	-90	0,99249	0,64046	0,65914	0,58564	0,71095	0,02115	1,00967	708,10967
3,6	-90	0,98728	0,6368	0,65646	0,55982	0,73179	0,01993	1,00822	708,10822
4,5	-90	0,98775	0,63454	0,65305	0,53125	0,75439	0,0183	1,00712	708,10712
5,4	-90	0,99118	0,63126	0,64985	0,5067	0,77735	0,01596	1,01067	708,11067
6,3	-90	0,98591	0,62757	0,64374	0,47768	0,7954	0,01379	1,00725	708,10725
7,2	-90	0,984	0,622	0,63856	0,45026	0,81446	0,00958	1,00916	708,10916
8,1	-90	0,98083	0,61808	0,63446	0,42207	0,83218	0,00731	1,00831	708,10831
9	-90	0,97045	0,60563	0,62545	0,39312	0,84545	0,00384	1,00356	708,10356
9,9	-90	0,97132	0,60479	0,62148	0,36548	0,86619	0,00017	1,00931	708,10931
10,8	-90	0,9638	0,5955	0,61242	0,33679	0,87974	-0,00314	1,00626	708,10626

11,7	-90	0,95574	0,58773	0,60475	0,30855	0,894	-0,00943	1,00804	708,10804
12,6	-90	0,94635	0,57943	0,59403	0,28001	0,90758	-0,01321	1,00588	708,10588
13,5	-90	0,93573	0,56843	0,58555	0,25121	0,91812	-0,01755	1,00514	708,10514
14,4	-90	0,92564	0,56032	0,57445	0,22376	0,92984	-0,02319	1,00705	708,10705
15,3	-90	0,91726	0,55082	0,56715	0,19611	0,94419	-0,0294	1,01071	708,11071
16,2	-90	0,90762	0,5494	0,56395	0,1882	0,95026	-0,02811	1,00871	708,10871
17,1	-90	0,89479	0,53508	0,55102	0,15611	0,95705	-0,03645	1,00905	708,10905
18	-90	0,88027	0,5215	0,53513	0,12228	0,9656	-0,04431	1,00822	708,10822
18,9	-90	0,86374	0,50765	0,52155	0,09035	0,97235	-0,05129	1,00931	708,10931
19,8	-90	0,84829	0,4922	0,50676	0,05569	0,97851	-0,05648	1,01181	708,11181
-19,8	0	0,84501	0,06381	0,97505	0,48382	0,51151	-0,08914	1,00456	708,10456
-18,9	0	0,86271	0,09757	0,97088	0,499	0,52523	-0,08038	1,00499	708,10499
-18	0	0,87987	0,13215	0,96608	0,51453	0,54143	-0,07091	1,00567	708,10567
-17,1	0	0,89354	0,16414	0,95812	0,52906	0,55524	-0,06141	1,0048	708,1048
-16,2	0	0,90699	0,19603	0,94803	0,54123	0,56612	-0,05124	1,00431	708,10431
-15,3	0	0,91783	0,20246	0,94235	0,54305	0,56877	-0,04657	1,00699	708,10699
-14,4	0	0,92766	0,23101	0,93068	0,55264	0,57948	-0,03932	1,00553	708,10553
-13,5	0	0,93687	0,26005	0,91842	0,56201	0,58913	-0,03188	1,00579	708,10579
-12,6	0	0,94618	0,28935	0,90636	0,57065	0,59683	-0,02457	1,00492	708,10492
-11,7	0	0,95475	0,31751	0,89227	0,58157	0,6057	-0,01743	1,00447	708,10447
-10,8	0	0,96219	0,346	0,87655	0,58895	0,61376	-0,01327	1,00431	708,10431
-9,9	0	0,97154	0,37598	0,86425	0,59781	0,62433	-0,00638	1,00849	708,10849
-9	0	0,97605	0,40394	0,84784	0,60515	0,63086	-0,00034	1,00691	708,10691
-8,1	0	0,97537	0,42966	0,82427	0,60679	0,63328	0,00315	1,00147	708,10147
-7,2	0	0,98339	0,45803	0,81204	0,6167	0,64037	0,00626	1,00706	708,10706
-6,3	0	0,98708	0,4871	0,7919	0,62267	0,64683	0,01155	1,00749	708,10749
-5,4	0	0,98666	0,51282	0,77153	0,62299	0,64784	0,01537	1,00505	708,10505
-4,5	0	0,9854	0,53846	0,74801	0,62619	0,65126	0,018	1,00153	708,10153
-3,6	0	0,98858	0,56872	0,7304	0,63129	0,65728	0,01849	1,0078	708,1078
-2,7	0	0,98661	0,59101	0,70354	0,63175	0,65478	0,02076	1,00439	708,10439
-1,8	0	0,98817	0,61751	0,68194	0,63594	0,65665	0,02163	1,00609	708,10609
-0,9	0	0,99004	0,63952	0,65985	0,63465	0,65958	0,02151	1,00761	708,10761
0	0	0,99163	0,66479	0,63621	0,63731	0,65977	0,02185	1,00887	708,10887
0,9	0	0,98993	0,68713	0,61291	0,63592	0,65616	0,022	1,00652	708,10652
1,8	0	0,98663	0,70946	0,58899	0,63295	0,65504	0,02284	1,00357	708,10357
2,7	0	0,99053	0,73353	0,56314	0,63196	0,6563	0,02076	1,00805	708,10805
3,6	0	0,98877	0,75491	0,5369	0,62886	0,65109	0,01904	1,00574	708,10574
4,5	0	0,98941	0,77553	0,51014	0,62574	0,64689	0,01729	1,0068	708,1068
5,4	0	0,98237	0,79286	0,48026	0,61936	0,64075	0,01402	1,00329	708,10329
6,3	0	0,98233	0,81293	0,45349	0,61715	0,63745	0,01208	1,00576	708,10576
7,2	0	0,98068	0,83228	0,42795	0,61101	0,63208	0,00818	1,007	708,107
8,1	0	0,97449	0,84713	0,3991	0,60369	0,62373	0,0044	1,00362	708,10362
9	0	0,97474	0,86836	0,37205	0,60031	0,62001	0,00129	1,00966	708,10966
9,9	0	0,96487	0,87933	0,34389	0,59181	0,61123	-0,00182	1,00431	708,10431

10,8	0	0,96035	0,897	0,31589	0,58574	0,60503	-0,00786	1,00764	708,10764
11,7	0	0,95575	0,91201	0,28724	0,57849	0,59762	-0,0137	1,01222	708,11222
12,6	0	0,9446	0,92424	0,26021	0,56901	0,58811	-0,01903	1,00943	708,10943
13,5	0	0,93562	0,93644	0,2322	0,5602	0,57787	-0,02238	1,01214	708,11214
14,4	0	0,92178	0,94457	0,20233	0,54781	0,56669	-0,03	1,0094	708,1094
15,3	0	0,91223	0,94925	0,19586	0,547	0,56256	-0,03314	1,00655	708,10655
16,2	0	0,89914	0,96118	0,16715	0,53468	0,55178	-0,04036	1,00786	708,10786
17,1	0	0,88675	0,96904	0,13427	0,52247	0,53774	-0,04693	1,00911	708,10911
18	0	0,87086	0,97472	0,10223	0,50861	0,52387	-0,0544	1,01096	708,11096
18,9	0	0,85316	0,97789	0,06724	0,49305	0,50669	-0,06103	1,00955	708,10955
19,8	0	0,83476	0,98049	0,03308	0,47647	0,49029	-0,06877	1,00898	708,10898
-19,8	90	0,84446	0,53185	0,46156	0,05485	0,96701	-0,06353	1,00253	708,10253
-18,9	90	0,86407	0,55015	0,47723	0,08952	0,96588	-0,05837	1,00559	708,10559
-18	90	0,8777	0,56372	0,49204	0,12286	0,95709	-0,05069	1,00595	708,10595
-17,1	90	0,8917	0,57719	0,50409	0,15502	0,9507	-0,04462	1,00405	708,10405
-16,2	90	0,90866	0,59261	0,51932	0,18761	0,94366	-0,0356	1,0073	708,1073
-15,3	90	0,92133	0,60189	0,52781	0,21136	0,93602	-0,03041	1,00793	708,10793
-14,4	90	0,92858	0,60695	0,53054	0,22391	0,9279	-0,02605	1,00887	708,10887
-13,5	90	0,93657	0,61478	0,53966	0,25041	0,9113	-0,01964	1,00546	708,10546
-12,6	90	0,9486	0,62659	0,5503	0,28156	0,90216	-0,01517	1,00682	708,10682
-11,7	90	0,9563	0,63441	0,55781	0,30943	0,88795	-0,00984	1,007	708,107
-10,8	90	0,96339	0,64191	0,56678	0,33966	0,87244	-0,00488	1,00534	708,10534
-9,9	90	0,97043	0,6487	0,57462	0,36739	0,858	-0,00107	1,00759	708,10759
-9	90	0,9765	0,65829	0,58175	0,39754	0,8443	0,00449	1,00854	708,10854
-8,1	90	0,98158	0,66378	0,58727	0,42468	0,82566	0,00846	1,00643	708,10643
-7,2	90	0,98307	0,67003	0,5927	0,452	0,80656	0,0124	1,00693	708,10693
-6,3	90	0,98606	0,67397	0,59689	0,48015	0,78772	0,01439	1,00613	708,10613
-5,4	90	0,98597	0,67933	0,59927	0,50663	0,7667	0,0155	1,00691	708,10691
-4,5	90	0,98988	0,68299	0,60623	0,53403	0,74829	0,01801	1,00784	708,10784
-3,6	90	0,98863	0,68423	0,60654	0,56012	0,72441	0,01907	1,0068	708,1068
-2,7	90	0,99024	0,68674	0,61077	0,58636	0,7021	0,01808	1,00745	708,10745
-1,8	90	0,99122	0,689	0,61287	0,61305	0,67954	0,0191	1,00815	708,10815
-0,9	90	0,9922	0,68999	0,61796	0,63707	0,65687	0,02228	1,00949	708,10949
0	90	0,99426	0,68965	0,61832	0,66083	0,63474	0,02222	1,01111	708,11111
0,9	90	0,98486	0,68228	0,61271	0,67914	0,60338	0,02177	1,00188	708,10188
1,8	90	0,99092	0,68652	0,61155	0,70457	0,58754	0,02215	1,00716	708,10716
2,7	90	0,99263	0,68589	0,61082	0,73003	0,56162	0,02131	1,00863	708,10863
3,6	90	0,98573	0,67846	0,60451	0,74731	0,53101	0,01979	1,00321	708,10321
4,5	90	0,98416	0,67485	0,60119	0,76836	0,50439	0,01801	1,00389	708,10389
5,4	90	0,98791	0,67485	0,60029	0,79151	0,48064	0,0162	1,00852	708,10852
6,3	90	0,98526	0,66861	0,596	0,81171	0,45201	0,01283	1,00749	708,10749
7,2	90	0,98504	0,66602	0,59236	0,83138	0,42629	0,01002	1,01068	708,11068
8,1	90	0,97974	0,65809	0,5874	0,84771	0,39836	0,00599	1,0095	708,1095
9	90	0,97386	0,65062	0,5811	0,86435	0,36998	0,00275	1,00881	708,10881

9,9	90	0,96669	0,64369	0,57286	0,87885	0,34221	-0,00022	1,00742	708,10742
10,8	90	0,96144	0,6342	0,56618	0,89539	0,31248	-0,00494	1,00833	708,10833
11,7	90	0,95068	0,62418	0,55515	0,9059	0,28413	-0,01094	1,0049	708,1049
12,6	90	0,9458	0,61848	0,55014	0,92262	0,25626	-0,01383	1,00947	708,10947
13,5	90	0,93228	0,60475	0,5403	0,93175	0,2265	-0,01976	1,00674	708,10674
14,4	90	0,92554	0,59757	0,53085	0,94691	0,19911	-0,02674	1,01102	708,11102
15,3	90	0,91514	0,59432	0,52886	0,95362	0,19259	-0,02654	1,00775	708,10775
16,2	90	0,90213	0,57986	0,51814	0,95884	0,16224	-0,03429	1,00732	708,10732
17,1	90	0,88799	0,56754	0,5062	0,96981	0,13148	-0,04327	1,0086	708,1086
18	90	0,87237	0,5523	0,49129	0,97514	0,0974	-0,04976	1,00918	708,10918
18,9	90	0,85977	0,53933	0,47854	0,98524	0,06357	-0,0577	1,01197	708,11197
19,8	90	0,83802	0,5209	0,45961	0,98563	0,02987	-0,06347	1,00796	708,10796

➤ Ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή για το Pitch, Ca. Γίνεται ο υπολογισμός του για τις ίδιες γωνίες 2 φορές, μία για φ ίση με 90° και μία για -90°.

- Για φ=90°

Alpha (Deg.)	P1 [Torr]	P2 [Torr]	P3 [Torr]	P4 [Torr]	P5 [Torr]	Static Chamber [Torr]	α (Deg.)	Qbar [Torr]	Ca @ Mach=0.045
-6,3	0,98606	0,67397	0,59689	0,48015	0,78772	0,01439	-6,3	0,972	-0,317
-5,4	0,98597	0,67933	0,59927	0,50663	0,7667	0,0155	-5,4	0,970	-0,268
-4,5	0,98988	0,68299	0,60623	0,53403	0,74829	0,01801	-4,5	0,972	-0,220
-3,6	0,98863	0,68423	0,60654	0,56012	0,72441	0,01907	-3,6	0,970	-0,169
-2,7	0,99024	0,68674	0,61077	0,58636	0,7021	0,01808	-2,7	0,972	-0,119
-1,8	0,99122	0,689	0,61287	0,61305	0,67954	0,0191	-1,8	0,972	-0,068
-0,9	0,9922	0,68999	0,61796	0,63707	0,65687	0,02228	-0,9	0,970	-0,020
0	0,99426	0,68965	0,61832	0,66083	0,63474	0,02222	0,0	0,972	0,027
0,9	0,98486	0,68228	0,61271	0,67914	0,60338	0,02177	0,9	0,963	0,079
1,8	0,99092	0,68652	0,61155	0,70457	0,58754	0,02215	1,8	0,969	0,121
2,7	0,99263	0,68589	0,61082	0,73003	0,56162	0,02131	2,7	0,971	0,173
3,6	0,98573	0,67846	0,60451	0,74731	0,53101	0,01979	3,6	0,966	0,224
4,5	0,98416	0,67485	0,60119	0,76836	0,50439	0,01801	4,5	0,966	0,273
5,4	0,98791	0,67485	0,60029	0,79151	0,48064	0,0162	5,4	0,972	0,320
6,3	0,98526	0,66861	0,596	0,81171	0,45201	0,01283	6,3	0,972	0,370

- Για $\varphi = -90^\circ$

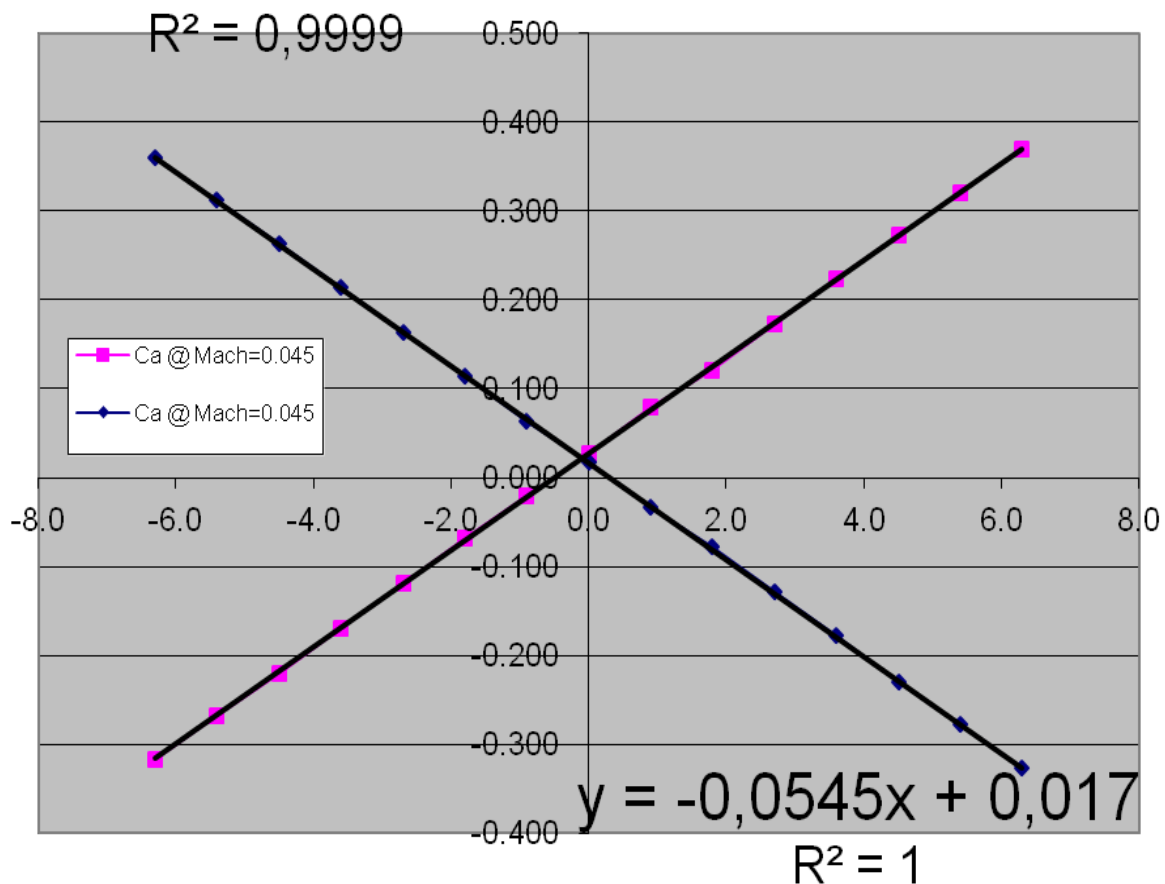
Alpha (Deg.)	P1 [Torr]	P2 [Torr]	P3 [Torr]	P4 [Torr]	P5 [Torr]	Static Chamber [Torr]	α (Deg.)	Qbar [Torr]	Ca @ Mach=0.045
-6,3	0,98752	0,62371	0,64695	0,81239	0,46279	0,01506	-6,3	0,972	0,360
-5,4	0,98647	0,62649	0,64756	0,79155	0,48798	0,01663	-5,4	0,970	0,313
-4,5	0,98973	0,63181	0,65314	0,77069	0,51517	0,01881	-4,5	0,971	0,263
-3,6	0,98509	0,63311	0,65212	0,74657	0,54007	0,01932	-3,6	0,966	0,214
-2,7	0,98244	0,63278	0,652	0,72173	0,56435	0,01924	-2,7	0,963	0,163
-1,8	0,98771	0,63843	0,65826	0,70224	0,59188	0,02223	-1,8	0,965	0,114
-0,9	0,98798	0,64036	0,6598	0,67934	0,61822	0,02133	-0,9	0,967	0,063
0	0,98958	0,64153	0,65986	0,65639	0,63999	0,02226	0,0	0,967	0,017
0,9	0,98954	0,63993	0,65709	0,63135	0,66351	0,02108	0,9	0,968	-0,033
1,8	0,98776	0,63925	0,65818	0,60978	0,68564	0,02106	1,8	0,967	-0,078
2,7	0,99249	0,64046	0,65914	0,58564	0,71095	0,02115	2,7	0,971	-0,129
3,6	0,98728	0,6368	0,65646	0,55982	0,73179	0,01993	3,6	0,967	-0,178
4,5	0,98775	0,63454	0,65305	0,53125	0,75439	0,0183	4,5	0,969	-0,230
5,4	0,99118	0,63126	0,64985	0,5067	0,77735	0,01596	5,4	0,975	-0,278
6,3	0,98591	0,62757	0,64374	0,47768	0,7954	0,01379	6,3	0,972	-0,327

Όπου ο συντελεστής Qbar ισούται με την πίεση της οπής 1 μείον την στατική πίεση, $Qbar = P1 - P6$

Και το Ca για γωνίες α διάφορες του μηδενός, ισούται με την διαφορά των οπών 4,5 προς το Qbar, $Ca = \frac{P4 - P5}{Qbar}$

Έτσι δημιουργείται το παρακάτω διάγραμμα για το Ca και υπολογίζεται ο συντελεστής Pitch offset= $\frac{-0,0545 - 0,0545}{0,017 - 0,027} = -0,0917$.

$$y = 0,0545x + 0,027 \text{ Ca}$$



Διάγραμμα 1: *Pitch* συναρτήσει γωνίας α

- Έπειτα υπολογίζονται οι συντελεστές στατικής πίεσης και ολικής πίεσης με την παρακάτω μέθοδο.

Για γωνία β ίση με μηδέν και αφερώντας τον συντελεστή *Pitch* offset από τις γωνίες α στον πίνακα των raw data, έχουμε:

Alpha (Deg.)	Beta (Deg.)	P1 [Torr]	P2[Torr]	P3[Torr]	P4 [Torr]	P5 [Torr]	Static Chamber [Torr]	Pt[Torr] w.r.t Static	Po [Abs,Torr]
-19,7083	0	0,8445	0,5319	0,4616	0,0549	0,9670	-0,0635	1,0025	708,1025
-18,8083	0	0,8641	0,5502	0,4772	0,0895	0,9659	-0,0584	1,0056	708,1056
-17,9083	0	0,8777	0,5637	0,4920	0,1229	0,9571	-0,0507	1,0060	708,1060
-17,0083	0	0,8917	0,5772	0,5041	0,1550	0,9507	-0,0446	1,0041	708,1041
-16,1083	0	0,9087	0,5926	0,5193	0,1876	0,9437	-0,0356	1,0073	708,1073
-15,2083	0	0,9213	0,6019	0,5278	0,2114	0,9360	-0,0304	1,0079	708,1079
-14,3083	0	0,9286	0,6070	0,5305	0,2239	0,9279	-0,0261	1,0089	708,1089
-13,4083	0	0,9366	0,6148	0,5397	0,2504	0,9113	-0,0196	1,0055	708,1055
-12,5083	0	0,9486	0,6266	0,5503	0,2816	0,9022	-0,0152	1,0068	708,1068
-11,6083	0	0,9563	0,6344	0,5578	0,3094	0,8880	-0,0098	1,0070	708,1070
-10,7083	0	0,9634	0,6419	0,5668	0,3397	0,8724	-0,0049	1,0053	708,1053
-9,8083	0	0,9704	0,6487	0,5746	0,3674	0,8580	-0,0011	1,0076	708,1076
-8,9083	0	0,9765	0,6583	0,5818	0,3975	0,8443	0,0045	1,0085	708,1085
-8,0083	0	0,9816	0,6638	0,5873	0,4247	0,8257	0,0085	1,0064	708,1064
-7,1083	0	0,9831	0,6700	0,5927	0,4520	0,8066	0,0124	1,0069	708,1069
-6,2083	0	0,9861	0,6740	0,5969	0,4802	0,7877	0,0144	1,0061	708,1061
-5,3083	0	0,9860	0,6793	0,5993	0,5066	0,7667	0,0155	1,0069	708,1069
-4,4083	0	0,9899	0,6830	0,6062	0,5340	0,7483	0,0180	1,0078	708,1078
-3,5083	0	0,9886	0,6842	0,6065	0,5601	0,7244	0,0191	1,0068	708,1068
-2,6083	0	0,9902	0,6867	0,6108	0,5864	0,7021	0,0181	1,0075	708,1075
-1,7083	0	0,9912	0,6890	0,6129	0,6131	0,6795	0,0191	1,0082	708,1082
-0,8083	0	0,9922	0,6900	0,6180	0,6371	0,6569	0,0223	1,0095	708,1095
0,0917	0	0,9943	0,6897	0,6183	0,6608	0,6347	0,0222	1,0111	708,1111
0,9917	0	0,9849	0,6823	0,6127	0,6791	0,6034	0,0218	1,0019	708,1019
1,8917	0	0,9909	0,6865	0,6116	0,7046	0,5875	0,0222	1,0072	708,1072
2,7917	0	0,9926	0,6859	0,6108	0,7300	0,5616	0,0213	1,0086	708,1086
3,6917	0	0,9857	0,6785	0,6045	0,7473	0,5310	0,0198	1,0032	708,1032
4,5917	0	0,9842	0,6749	0,6012	0,7684	0,5044	0,0180	1,0039	708,1039
5,4917	0	0,9879	0,6749	0,6003	0,7915	0,4806	0,0162	1,0085	708,1085
6,3917	0	0,9853	0,6686	0,5960	0,8117	0,4520	0,0128	1,0075	708,1075
7,2917	0	0,9850	0,6660	0,5924	0,8314	0,4263	0,0100	1,0107	708,1107
8,1917	0	0,9797	0,6581	0,5874	0,8477	0,3984	0,0060	1,0095	708,1095
9,0917	0	0,9739	0,6506	0,5811	0,8644	0,3700	0,0028	1,0088	708,1088
9,9917	0	0,9667	0,6437	0,5729	0,8789	0,3422	-0,0002	1,0074	708,1074
10,8917	0	0,9614	0,6342	0,5662	0,8954	0,3125	-0,0049	1,0083	708,1083
11,7917	0	0,9507	0,6242	0,5552	0,9059	0,2841	-0,0109	1,0049	708,1049
12,6917	0	0,9458	0,6185	0,5501	0,9226	0,2563	-0,0138	1,0095	708,1095
13,5917	0	0,9323	0,6048	0,5403	0,9318	0,2265	-0,0198	1,0067	708,1067
14,4917	0	0,9255	0,5976	0,5309	0,9469	0,1991	-0,0267	1,0110	708,1110
15,3917	0	0,9151	0,5943	0,5289	0,9536	0,1926	-0,0265	1,0078	708,1078
16,2917	0	0,9021	0,5799	0,5181	0,9588	0,1622	-0,0343	1,0073	708,1073
17,1917	0	0,8880	0,5675	0,5062	0,9698	0,1315	-0,0433	1,0086	708,1086
18,0917	0	0,8724	0,5523	0,4913	0,9751	0,0974	-0,0498	1,0092	708,1092
18,9917	0	0,8598	0,5393	0,4785	0,9852	0,0636	-0,0577	1,0120	708,1120
19,8917	0	0,8380	0,5209	0,4596	0,9856	0,0299	-0,0635	1,0080	708,1080

Η μετρούμενη θερμοκρασία και ο αριθμός Mach είναι 296,15°K και 0,045 αντίστοιχα. Η θερμοκρασία χρειάζεται διόρθωση για τον αντίστοιχο αριθμό

Mach με τον τύπο $T = \frac{5 \cdot T_0}{5 + M^2}$.

Η ταχύτητα V ισούται με $V = M \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$, και η απόλυτη στατική πίεση με $P_s = P_0 - P_t$.

Η δυναμική πίεση είναι $q = 0.5 \cdot \gamma \cdot P_s \cdot M^2$.

Με την χρήση των παραπάνω δεδομένων υπολογίζονται οι συντελεστές για το pitch, για τη στατική πίεση, για την ολική πίεση και για τη δυναμική πίεση.

- $Q_{bar} = P_6(\text{static chamber}) - P_1$

- $C_a = \frac{P_4 - P_5}{Q_{bar}}$

- $C_s = \frac{P_6}{Q_{bar}}$

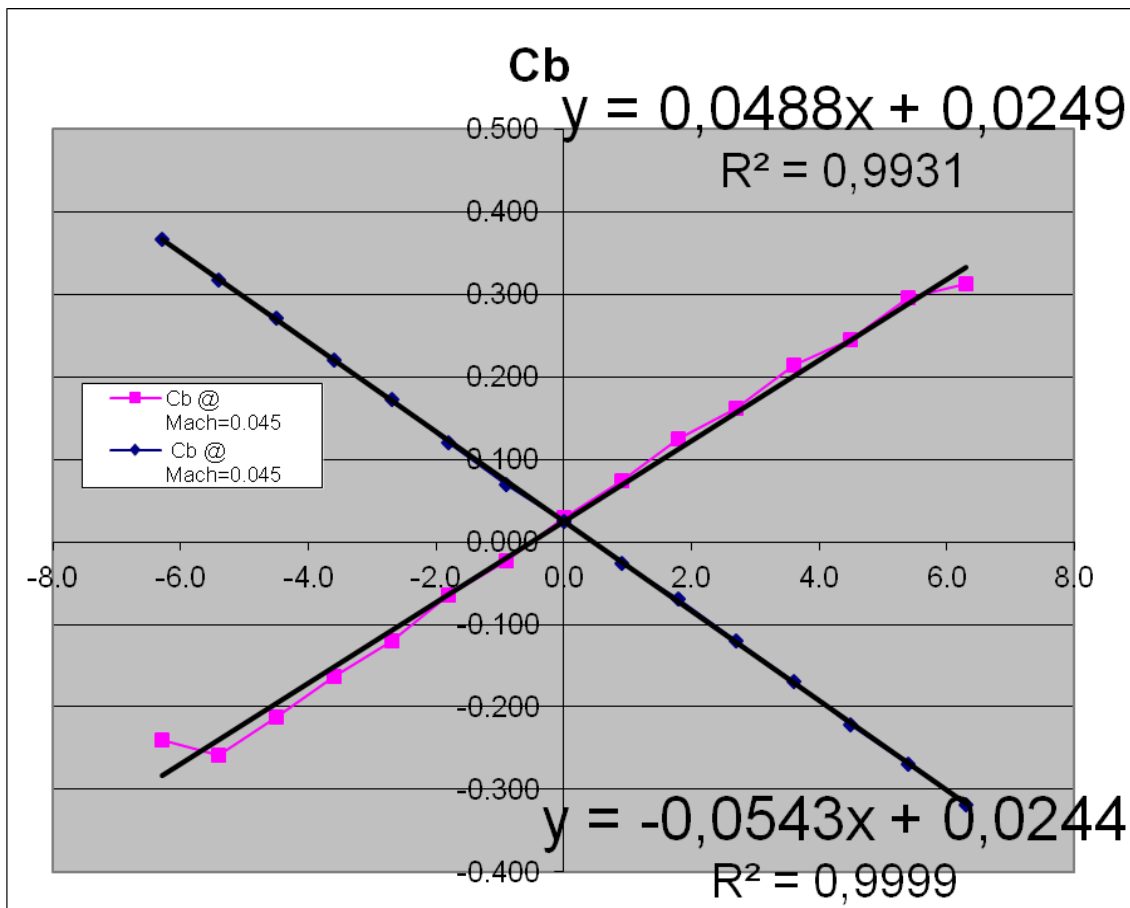
- $C_t = \frac{P_1 - P_6}{P_t}$

- $C_q = \frac{P_1 - P_6}{P_t}$

Έτσι παίρνουμε τον πίνακα με τους συντελεστές και τις αντίστοιχες γωνίες.

a (Deg.) @ Mach=0.045	Qbar [Torr]	Ca @ Mach=0.045	Cs @ Mach=0.045	Ct @ Mach=0.045	Cq @ Mach=0.045
-19,708	0,908	-1,005	-0,070	0,906	0,906
-18,808	0,922	-0,950	-0,063	0,917	0,917
-17,908	0,928	-0,899	-0,055	0,923	0,923
-17,008	0,936	-0,850	-0,048	0,933	0,933
-16,108	0,944	-0,801	-0,038	0,937	0,937
-15,208	0,952	-0,761	-0,032	0,944	0,944
-14,308	0,955	-0,737	-0,027	0,946	0,946
-13,408	0,956	-0,691	-0,021	0,951	0,951
-12,508	0,964	-0,644	-0,016	0,957	0,957
-11,608	0,966	-0,599	-0,010	0,959	0,959
-10,708	0,968	-0,550	-0,005	0,963	0,963
-9,808	0,972	-0,505	-0,001	0,964	0,964
-8,908	0,972	-0,460	0,005	0,964	0,964
-8,008	0,973	-0,412	0,009	0,967	0,967
-7,108	0,971	-0,365	0,013	0,964	0,964
-6,208	0,972	-0,317	0,015	0,966	0,966
-5,308	0,970	-0,268	0,016	0,964	0,964
-4,408	0,972	-0,220	0,019	0,964	0,964
-3,508	0,970	-0,169	0,020	0,963	0,963
-2,608	0,972	-0,119	0,019	0,965	0,965
-1,708	0,972	-0,068	0,020	0,964	0,964
-0,808	0,970	-0,020	0,023	0,961	0,961
0,092	0,972	0,027	0,023	0,961	0,961
0,992	0,963	0,079	0,023	0,961	0,961
1,892	0,969	0,121	0,023	0,962	0,962
2,792	0,971	0,173	0,022	0,963	0,963
3,692	0,966	0,224	0,020	0,963	0,963
4,592	0,966	0,273	0,019	0,962	0,962
5,492	0,972	0,320	0,017	0,964	0,964
6,392	0,972	0,370	0,013	0,965	0,965
7,292	0,975	0,415	0,010	0,965	0,965
8,192	0,974	0,461	0,006	0,965	0,965
9,092	0,971	0,509	0,003	0,963	0,963
9,992	0,967	0,555	0,000	0,960	0,960
10,892	0,966	0,603	-0,005	0,958	0,958
11,792	0,962	0,647	-0,011	0,957	0,957
12,692	0,960	0,694	-0,014	0,951	0,951
13,592	0,952	0,741	-0,021	0,946	0,946
14,492	0,952	0,785	-0,028	0,942	0,942
15,392	0,942	0,808	-0,028	0,934	0,934
16,292	0,936	0,851	-0,037	0,930	0,930
17,192	0,931	0,900	-0,046	0,923	0,923
18,092	0,922	0,952	-0,054	0,914	0,914
18,992	0,917	1,005	-0,063	0,907	0,907
19,892	0,901	1,060	-0,070	0,894	0,894

- Έπειτα επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για το γ_{aw} από την οποία παίρνουμε:

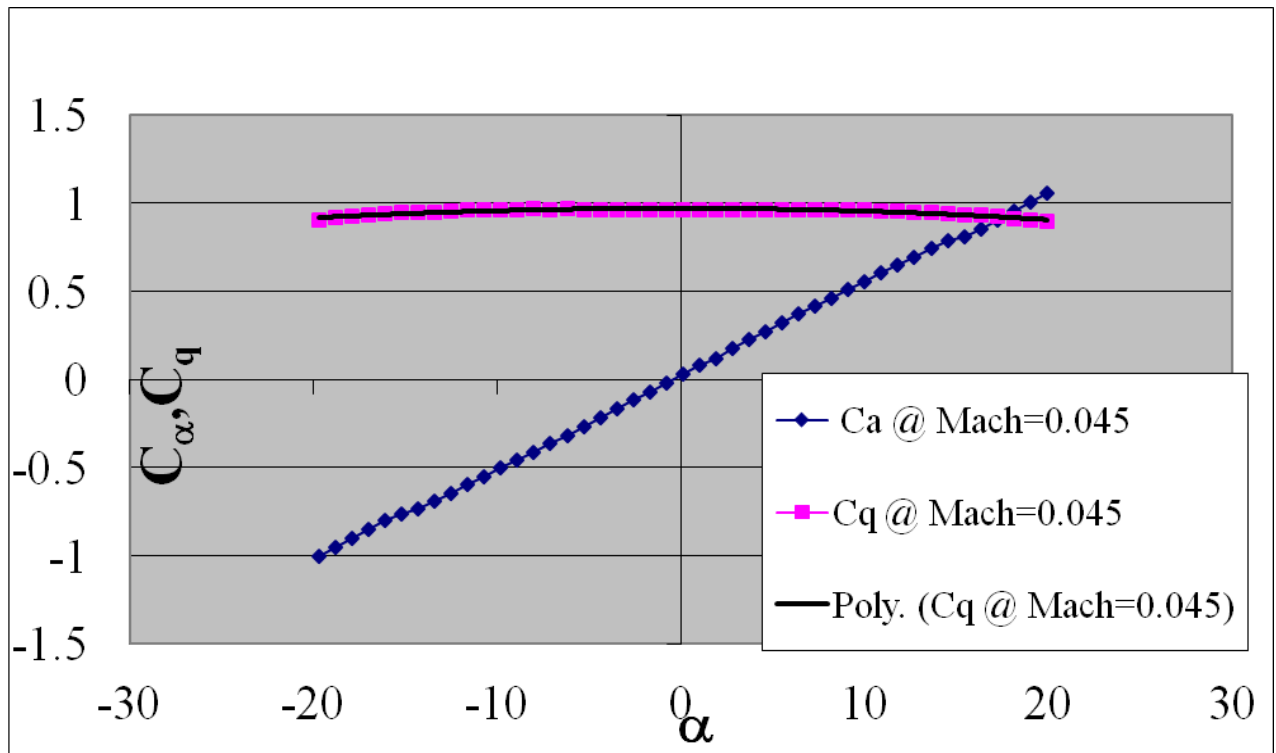


Διάγραμμα 2: γ_{aw} συναρτήσεϊ της γωνίας β

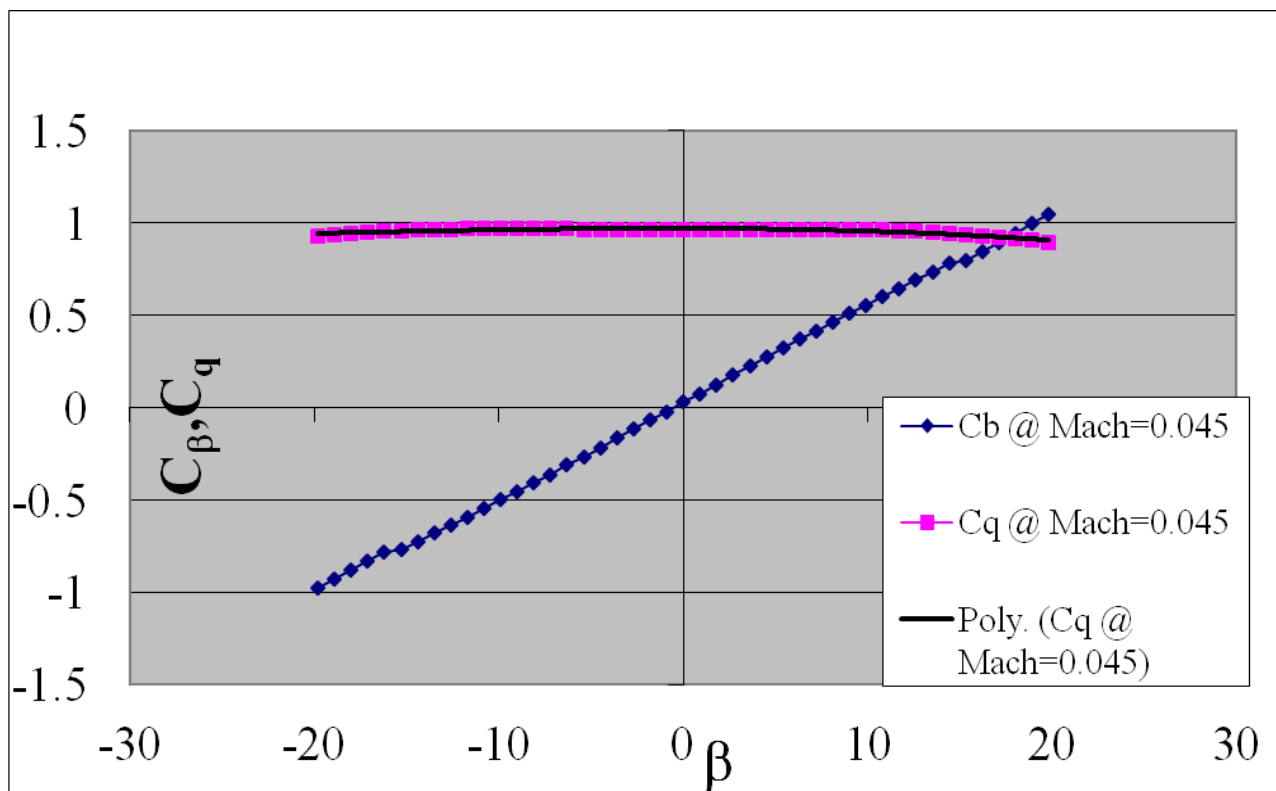
Όπου $C_b = \frac{P_2 - P_3}{Q_{bar}}$ και ο συντελεστής γ_{aw} offset= -0,0041.

b (Deg.) @ Mach=0.045	Qbar [Torr]	Cb Mach=0.045 @	Cs Mach=0.045 @	Ct Mach=0.045 @	Cq Mach=0.045 @
-19,796	0,934	-0,975	-0,095	0,930	0,930
-18,896	0,943	-0,926	-0,085	0,938	0,938
-17,996	0,951	-0,877	-0,075	0,945	0,945
-17,096	0,955	-0,831	-0,064	0,950	0,950
-16,196	0,958	-0,785	-0,053	0,954	0,954
-15,296	0,964	-0,767	-0,048	0,958	0,958
-14,396	0,967	-0,724	-0,041	0,962	0,962
-13,496	0,969	-0,680	-0,033	0,963	0,963
-12,596	0,971	-0,636	-0,025	0,966	0,966
-11,696	0,972	-0,591	-0,018	0,968	0,968
-10,796	0,975	-0,544	-0,014	0,971	0,971
-9,896	0,978	-0,499	-0,007	0,970	0,970
-8,996	0,976	-0,455	0,000	0,970	0,970
-8,096	0,972	-0,406	0,003	0,971	0,971
-7,196	0,977	-0,362	0,006	0,970	0,970
-6,296	0,976	-0,312	0,012	0,968	0,968
-5,396	0,971	-0,266	0,016	0,966	0,966
-4,496	0,967	-0,217	0,019	0,966	0,966
-3,596	0,970	-0,167	0,019	0,963	0,963
-2,696	0,966	-0,117	0,021	0,962	0,962
-1,796	0,967	-0,067	0,022	0,961	0,961
-0,896	0,969	-0,021	0,022	0,961	0,961
0,004	0,970	0,029	0,023	0,961	0,961
0,904	0,968	0,077	0,023	0,962	0,962
1,804	0,964	0,125	0,024	0,960	0,960
2,704	0,970	0,176	0,021	0,962	0,962
3,604	0,970	0,225	0,020	0,964	0,964
4,504	0,972	0,273	0,018	0,966	0,966
5,404	0,968	0,323	0,014	0,965	0,965
6,304	0,970	0,370	0,012	0,965	0,965
7,204	0,973	0,416	0,008	0,966	0,966
8,104	0,970	0,462	0,005	0,967	0,967
9,004	0,973	0,510	0,001	0,964	0,964
9,904	0,967	0,554	-0,002	0,963	0,963
10,804	0,968	0,600	-0,008	0,961	0,961
11,704	0,969	0,644	-0,014	0,958	0,958
12,604	0,964	0,689	-0,020	0,955	0,955
13,504	0,958	0,735	-0,023	0,947	0,947
14,404	0,952	0,780	-0,032	0,943	0,943
15,304	0,945	0,797	-0,035	0,939	0,939
16,204	0,940	0,845	-0,043	0,932	0,932
17,104	0,934	0,894	-0,050	0,925	0,925
18,004	0,925	0,943	-0,059	0,915	0,915
18,904	0,914	0,996	-0,067	0,906	0,906
19,804	0,904	1,049	-0,076	0,895	0,895

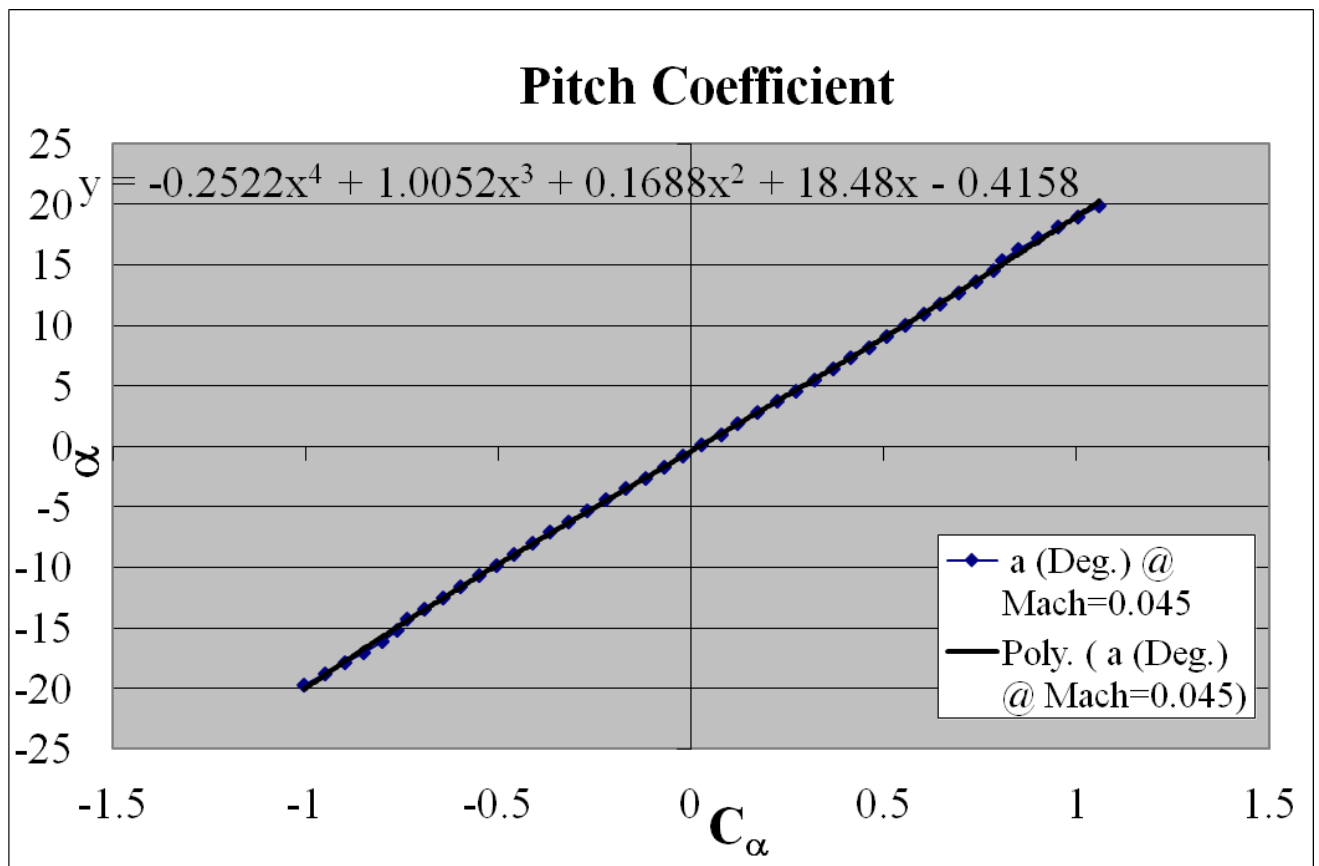
- Παρακάτω υπολογίζονται οι πολυωνυμικοί συντελεστές για τις γωνίες α, β και για τον συντελεστή C_q που θα χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία μείωσης δεδομένων.



Διάγραμμα 3: Συντελεστές C_a, C_q συναρτήσει της γωνίας α



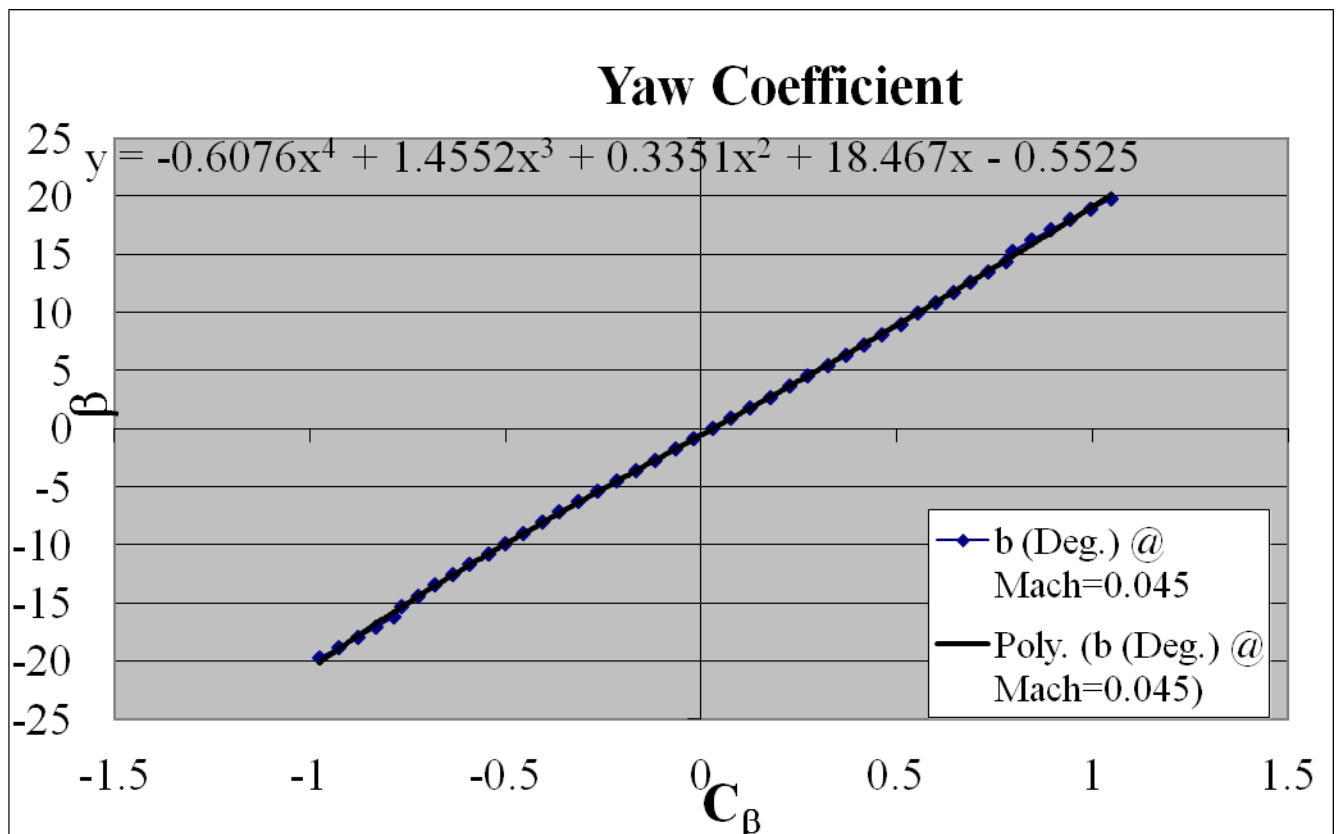
Διάγραμμα 4: Συντελεστές C_b, C_q συναρτήσει της γωνίας β



Διάγραμμα 5: Συντελεστής C_α συναρτήσει της γωνίας α

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε τους πολυωνυμικούς συντελεστές για το pitch:

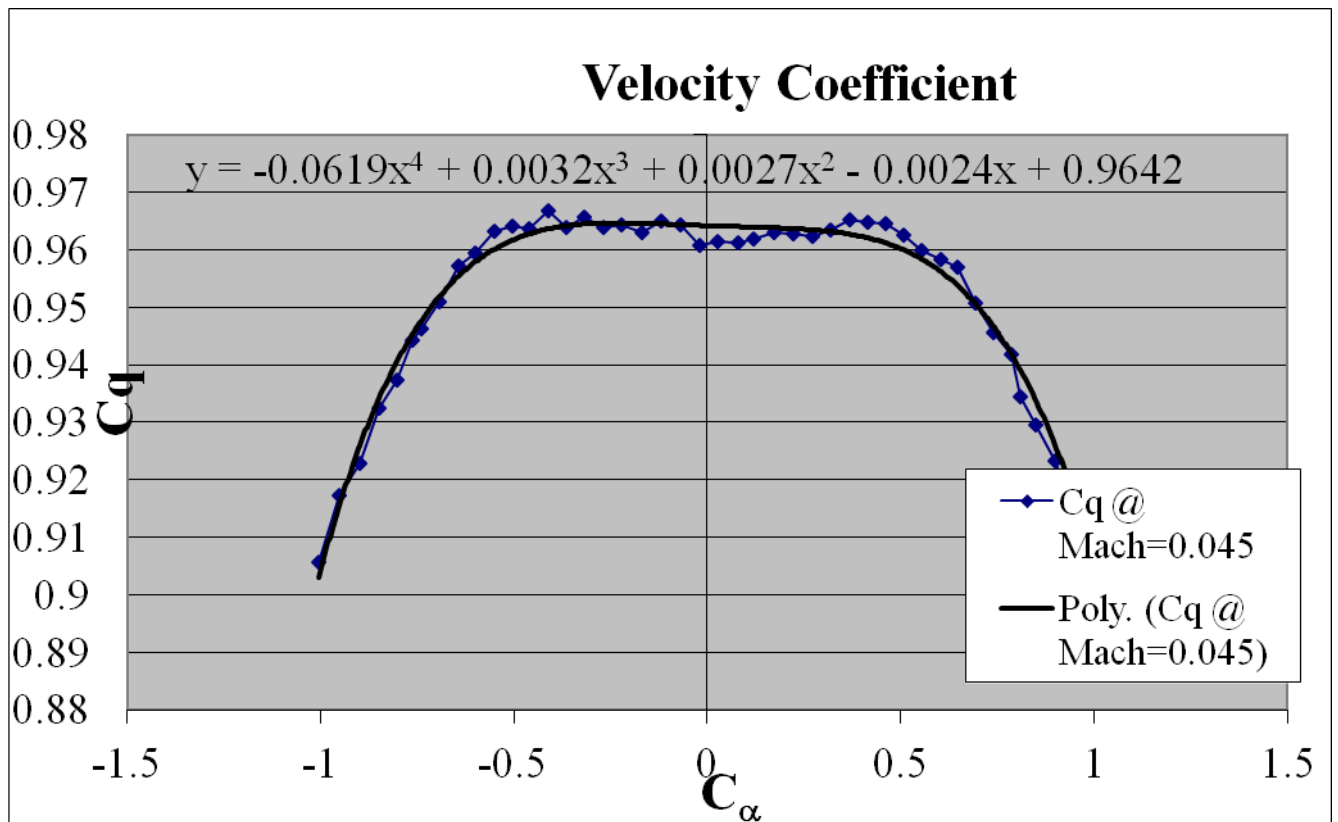
	-0,41581
x	18,4796
x ²	0,168808
x ³	1,005198
x ⁴	-0,25217



Διάγραμμα 6: Συντελεστής C_b συναρτήσει της γωνίας β

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε τους πολυωνυμικούς συντελεστές για το yaw:

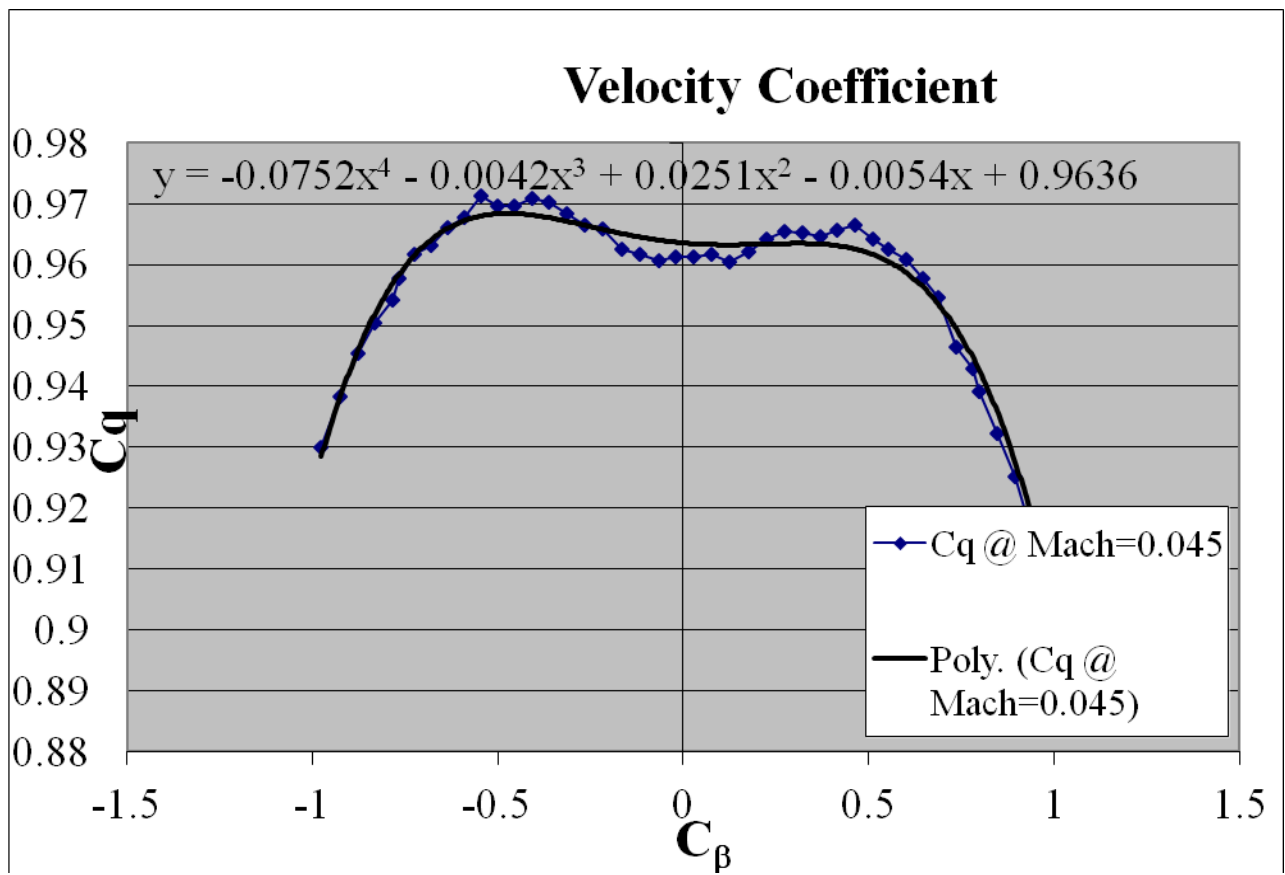
	-0,55248
x	18,46669
x ²	0,335071
x ³	1,455152
x ⁴	-0,60759



Διάγραμμα 7: συντελεστής C_q συναρτήσει του συντελεστή C_a

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε τους πολυωνυμικούς συντελεστές για το συντελεστή δυναμικής πίεσης C_q , σε σχέση με το C_a

	0,964186
x	-0,00238
x ²	0,002748
x ³	0,003163
x ⁴	-0,06191

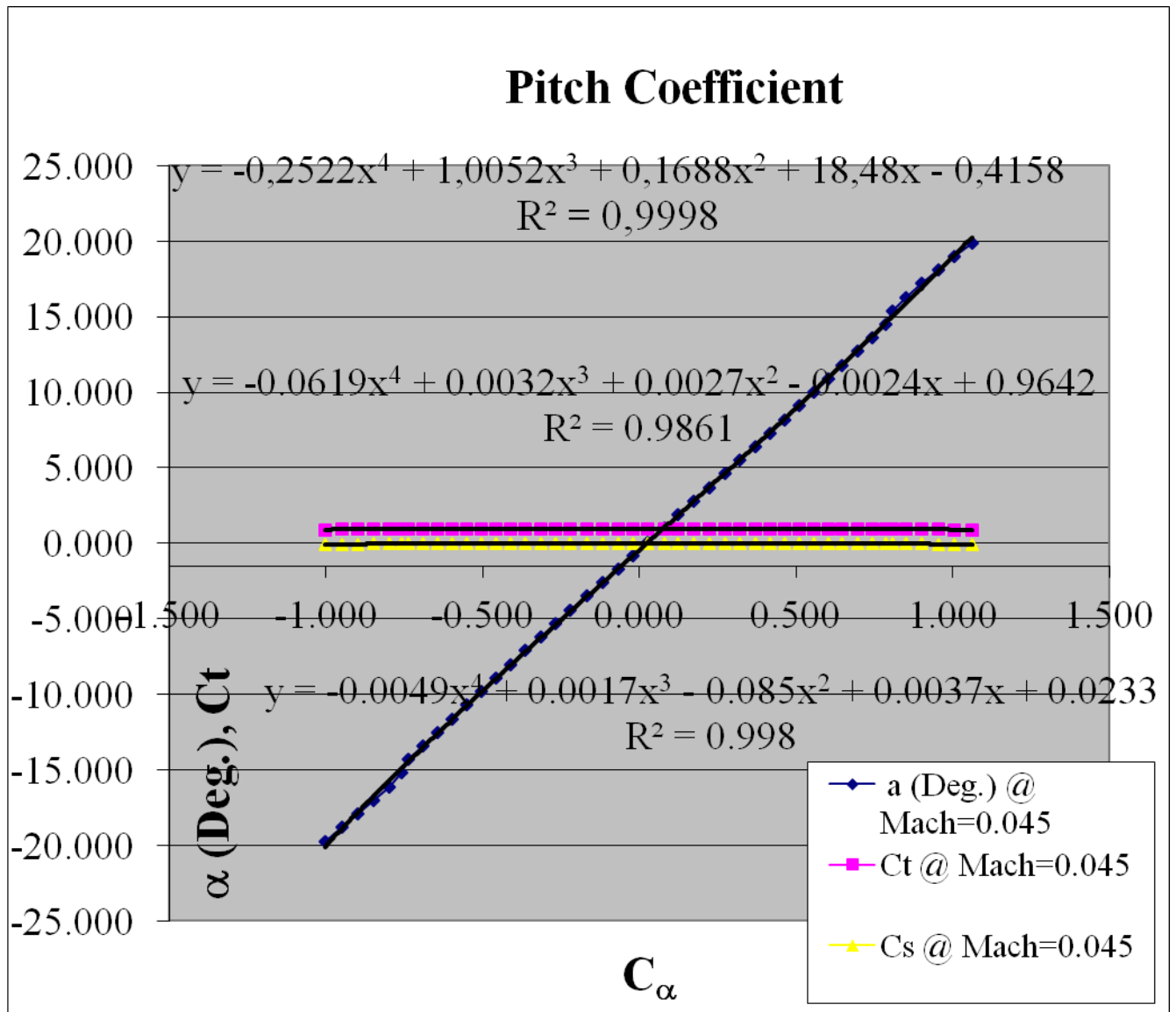


Διάγραμμα 8: συντελεστής C_q συναρτήσει του συντελεστή C_b

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε τους πολυωνυμικούς συντελεστές για το συντελεστή δυναμικής πίεσης C_q , σε σχέση με το C_b

	0,963555
x	-0,00539
x ²	0,025146
x ³	-0,00422
x ⁴	-0,07522

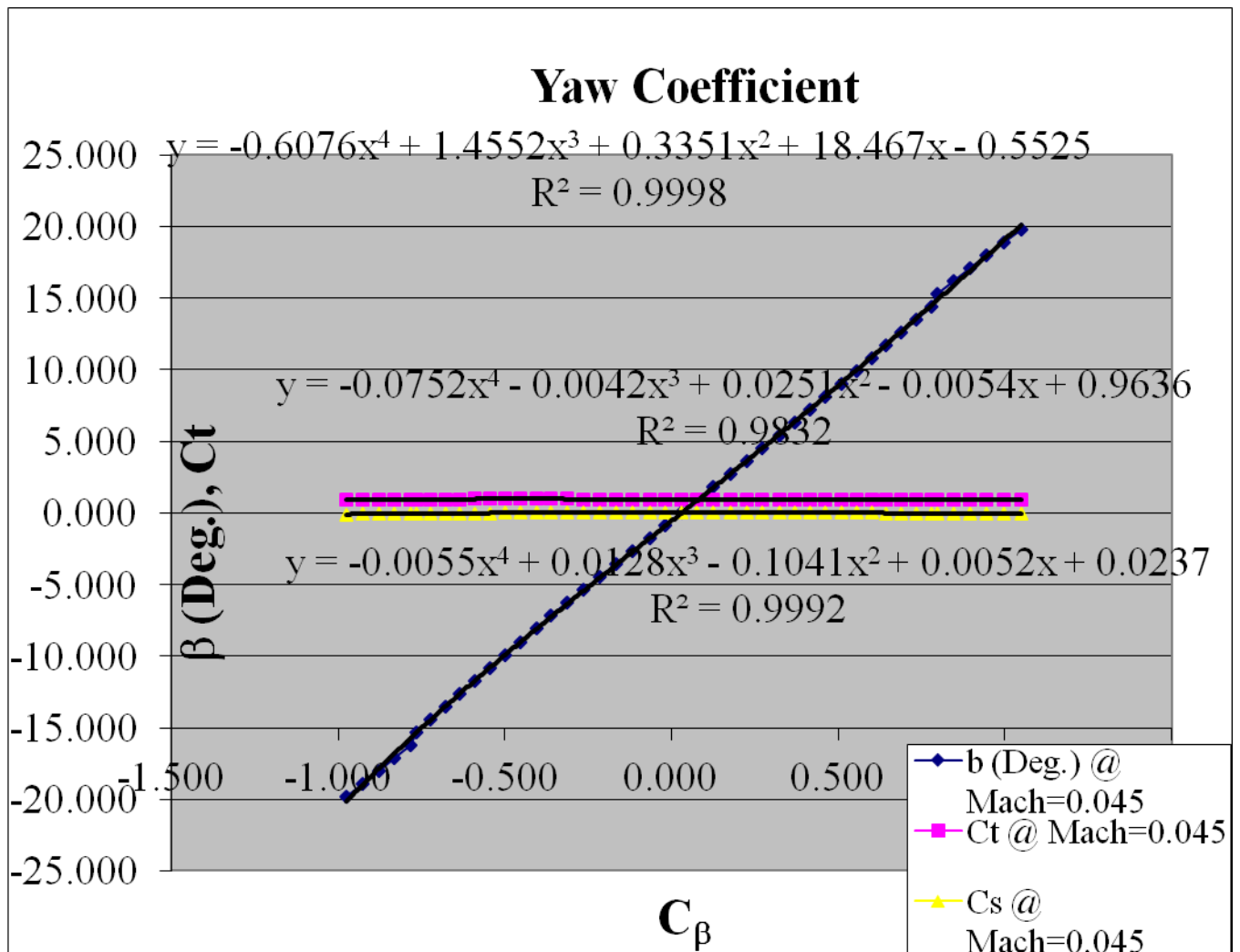
- Υπολογισμός πολυωνυμικών συντελεστών για C_a , C_β , C_s , C_t .



Διάγραμμα 9: γωνία α , συντελεστές C_t και C_s συναρτήσει του συντελεστή C_a

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε τους πολυωνυμικούς συντελεστές ως προς το pitch:

	C_α Coefficients			C_t Coefficients			C_s Coefficients
	-0,415814			0,9641863			0,0233084
x	18,479602		x	-0,002378		x	0,0037213
x ²	0,1688081		x ²	0,0027479		x ²	-0,085021
x ³	1,0051982		x ³	0,0031631		x ³	0,0017482
x ⁴	-0,252165		x ⁴	-0,061909		x ⁴	-0,004885



Διάγραμμα 10: γωνία β , συντελεστές C_t και C_s συναρτήσει του συντελεστή C_β

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε τους πολυωνυμικούς συντελεστές ως προς το yaw:

	C_β Coefficients			C_t Coefficients			C_s Coefficients
	-0,552484			0,963555			0,0236847
x	18,46669		x	-0,005389		x	0,0052051
x ²	0,3350714		x ²	0,0251462		x ²	-0,104146
x ³	1,4551518		x ³	-0,004219		x ³	0,0127781
x ⁴	-0,607593		x ⁴	-0,075224		x ⁴	-0,005538

- Στο τέλος της βαθμονόμησης γίνεται η επαλήθευση της διαδικασίας και η εύρεση του σφάλματος. Για την επαλήθευση χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις raw data και χρησιμοποιώντας τους πολυωνυμικούς συντελεστές υπολογίζονται οι γωνίες α,β και η ταχύτητα της ροής. Έτσι με βάση τις πραγματικές τους τιμές που είναι γνωστές υπολογίζεται και το σφάλμα.

Με βάση τα στοιχεία από την εταιρεία Aeorgrobe παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα, ο οποίος παρουσιάζει τα σφάλματα για τις γωνίες α,β και για την ταχύτητα που υπολογίζεται.

Mach=0.045						
	Μέση τιμή σφάλματος για γωνία beta	Τυπική απόκλιση σφάλματος για beta	Σφάλμα beta	Μέση τιμή σφάλματος για ταχύτητα	Τυπική απόκλιση σφάλματος για ταχύτητα	Σφάλμα ταχύτητας
Main(-10° έως 10°)	0,005	0,113	0,118	0,015	0,218	0,234
Extended	-0,006	0,436	0,442	-0,018	0,239	0,257
	Μέση τιμή σφάλματος για γωνία alpha	Τυπική απόκλιση σφάλματος για alpha	Σφάλμα alpha	Μέση τιμή σφάλματος για ταχύτητα	Τυπική απόκλιση σφάλματος για ταχύτητα	Σφάλμα ταχύτητας
Main(-10° έως 10°)	0,002	0,123	0,125	0,011	0,226	0,237
Extended	-0,002	0,447	0,449	-0,013	0,279	0,291

Λογισμικό μείωσης δεδομένων

Για την διεξαγωγή αποτελεσμάτων μετά από μετρήσεις με τον σωλήνα Pitot 5 οπών του Εργαστηρίου Ναυτικής και θαλάσσιας Υδροδυναμικής, υπάρχουν 3 διαφορετικοί τρόποι, ανάλογα με την διαδικασία μέτρησης, τους οποίους παρέιχε η εταιρεία Aerogrobe μαζί με τον σωλήνα Pitot. Παρακάτω θα γίνει η παρουσίασή τους αναλυτικά.

- I. Η πρώτος τρόπος χρησιμοποιείται όταν μετράμε ξεχωριστά την πίεση σε κάθε οπή, έχουμε συμπιεστή ροή και γνωρίζουμε τη θερμοκρασία. Αρχικά έχουμε τις μετρήσεις P1, P2, P3, P4, P5, P6(static). Επίσης έχουμε τους πολυωνυμικούς συντελεστές από τη βαθμονόμηση.

	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
α (Deg.)	-0,41581	18,47960	0,16881	1,00520	-0,25217	0	0
β (Deg.)	-0,55248	18,46669	0,33507	1,45515	-0,60759	0	0
Ct - α	0,96419	-0,00238	0,00275	0,00316	-0,06191	0,00000	0,00000
Ct - β	0,96355	-0,00539	0,02515	-0,00422	-0,07522	0,00000	0,00000
Cs - α	0,02331	0,00372	-0,08502	0,00175	-0,00488	0	0
Cs - β	0,02368	0,00521	-0,10415	0,01278	-0,00554	0	0

Τα βήματα για την εύρεση των γωνιών α,β και της ταχύτητας της ροής είναι τα παρακάτω:

- Αρχικά από τις πιέσεις P1, P2, P3, P4, P5 αφαιρείται η στατική πίεση. Έτσι τώρα οι P1, P2, P3, P4, P5 θα είναι οι διαφορές αυτές.
- Το Qbar που στην γενική περίπτωση είναι P1-P6, τώρα προφανώς ισούται με το P1.
- Υπολογισμός συντελεστή Cb.
$$C_b = \frac{P_2 - P_3}{P_1}$$
- Υπολογισμός συντελεστή Ca.
$$C_a = \frac{P_4 - P_5}{P_1}$$
- Υπολογισμός γωνίας β με την χρήση των πολυωνυμικών συντελεστών που αντιστοιχούν σε αυτή.
$$\beta = C_0 + C_1 \cdot C_b + C_2 \cdot C_b^2 + C_3 \cdot C_b^3 + C_4 \cdot C_b^4$$
- Υπολογισμός γωνίας α με την χρήση των πολυωνυμικών συντελεστών που αντιστοιχούν σε αυτή.
$$\alpha = C_0 + C_1 \cdot C_a + C_2 \cdot C_a^2 + C_3 \cdot C_a^3 + C_4 \cdot C_a^4$$

- Υπολογισμός συντελεστή Ct. Για γωνία α μεγαλύτερη από την β χρησιμοποιούνται οι συντελεστές Ct-α, ενώ στην αντίθετη περίπτωση οι συντελεστές Ct-β. Για α>β: $C_t = C_0 + C_1 \cdot C_\alpha + C_2 \cdot C_\alpha^2 + C_3 \cdot C_\alpha^3 + C_4 \cdot C_\alpha^4$

Για β>α: $C_t = C_0 + C_1 \cdot C_\beta + C_2 \cdot C_\beta^2 + C_3 \cdot C_\beta^3 + C_4 \cdot C_\beta^4$

- Υπολογισμός συντελεστή Cs. Για γωνία α μεγαλύτερη από την β χρησιμοποιούνται οι συντελεστές Cs-α, ενώ στην αντίθετη περίπτωση οι συντελεστές Cs-β. Για α>β: $C_s = C_0 + C_1 \cdot C_\alpha + C_2 \cdot C_\alpha^2 + C_3 \cdot C_\alpha^3 + C_4 \cdot C_\alpha^4$

Για β>α: $C_s = C_0 + C_1 \cdot C_\beta + C_2 \cdot C_\beta^2 + C_3 \cdot C_\beta^3 + C_4 \cdot C_\beta^4$

- Υπολογισμός στατικής πίεσης Ps. $P_s = P_6 - C_s \cdot Q_{bar}$.

- Υπολογισμός ολικής πίεσης Pt. $P_t = \frac{Q_{bar}}{C_t} + P_s$

- Υπολογισμός αριθμού Mach και διόρθωση για την θερμοκρασία T.

$$M = \left\{ \frac{2}{(\gamma-1)} \left[\left(\frac{P_o}{P_s} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} - 1 \right] \right\}^{0.5}, \quad T = T_o / (1 + 0.5(\gamma-1)M^2)$$

- Υπολογισμός μέτρου ταχύτητας της ροής Vmag. $V_{mag} = M \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$

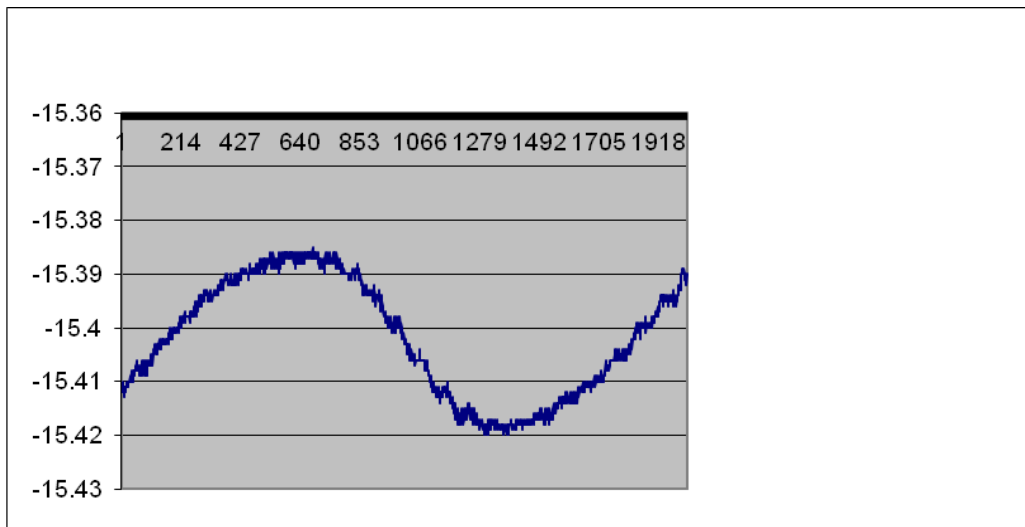
II. Ο δεύτερος τρόπος μείωσης δεδομένων αντιστοιχεί πάλι σε συμπιεστή ροή όπως ο πρώτος με τη μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται διαφορικοί αισθητήρες πίεσης, οπότε έχουμε τις διαφορές P1-P6, P2-P3, P4-P5. Πρέπει όμως με κάποιο τρόπο να είναι γνωστή και η στατική πίεση. Τα βήματα για την εύρεση των επιθυμητών στοιχείων ροής είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά της προηγούμενης μεθόδου.

III. Ο τρίτος τρόπος είναι για ασυμπίεστη ροή και χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής. Χρησιμοποιεί διαφορετικούς πολυωνυμικούς συντελεστές οι οποίοι είναι:

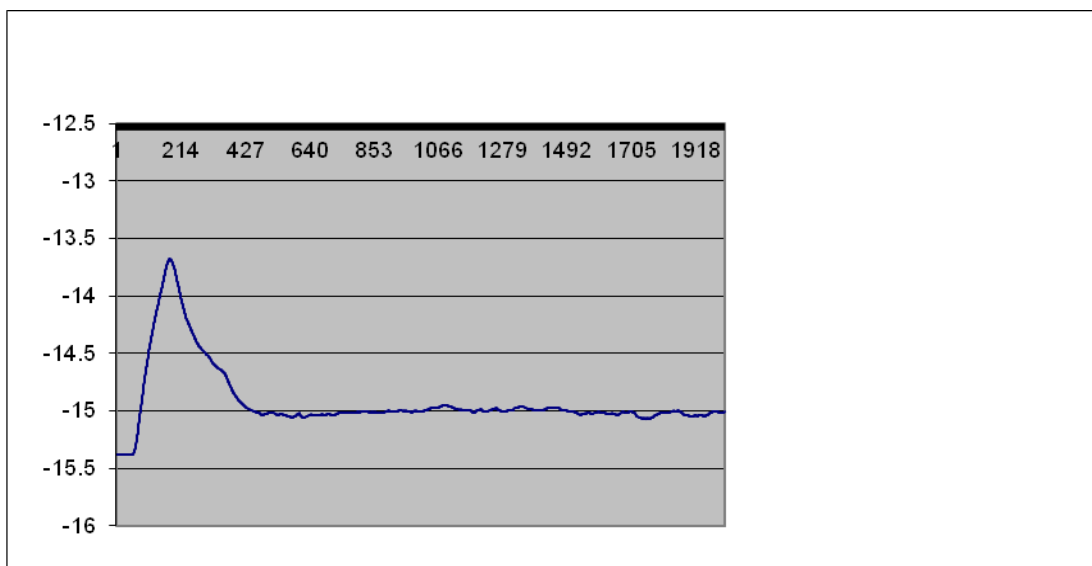
		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
β (Deg.)		-0,55248	18,46669	0,33507	1,45515	-0,60759	0	0
α (Deg.)		-0,41581	18,47960	0,16881	1,00520	-0,25217	0	0
Cq (from β)		0,96355	-0,00539	0,02515	-0,00422	-0,07522	0,00000	0,00000
Cq (from α)		0,96419	-0,00238	0,00275	0,00316	-0,06191	0,00000	0,00000

Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία που έγινε ήταν η εξής:

Πριν από κάθε μέτρηση παίρναμε μια μέτρηση αναφοράς με ακίνητο μοντέλο έτσι ώστε να έχουμε την πίεση αναφοράς για κάθε οπή. Η χρονική διάρκεια της μέτρησης ήταν περίπου 40 δευτερόλεπτα και για κάθε οπή παίρναμε ένα διάγραμμα με την παρακάτω μορφή.



Η ημητονοειδής μορφή του οφείλεται στην ανάκλαση του κυματισμού στο τέλος της δεξαμενής που προκαλείται κατά την εκκίνηση του μοντέλου. Επειδή όμως η περίοδος του είναι σχεδόν ίδια με την διάρκεια της μέτρησης παρατηρήθηκε ότι δεν επηρεάζει τις μετρήσεις αφού για πίεση αναφοράς χρησιμοποιούταν η μέση τιμή της μέτρησης. Έπειτα γινόταν η μέτρηση στο εκάστοτε σημείο πίσω από το μοντέλο και παίρναμε την μέτρηση των πιέσεων για κάθε οπή. Η διάρκεια αυτής ήταν πάλι 40 δευτερόλεπτα. Είχε την παρακάτω μορφή και χρησιμοποιούσαμε το μέσο όρο των τιμών, μετά όμως από το σημείο όπου έχει σταθεροποιηθεί η πίεση.



Έτσι αφαιρώντας από τη μέση τιμή της μέτρησης την πίεση αναφοράς είχαμε για κάθε οπή την μεταβολή της πίεσης. Με την βαθμονόμηση των αισθητήρων και τις εξισώσεις μεταφοράς του, που συνέδεαν Ampere με Torr είχαμε τα απαραίτητα

στοιχεία για να ακολουθήσουμε την διαδικασία διεξαγωγής αποτελεσμάτων της Aerogrobe για ασυμπίεστα ρευστά.

Τα βήματα για την εύρεση της ταχύτητας και γωνίας της ροής είναι:

- Υπολογισμός Q_{bar} . $Q_{bar}=P1-P6$

- Υπολογισμός συντελεστή C_b . $C_b = \frac{P2 - P3}{Q_{bar}}$

- Υπολογισμός συντελεστή C_a . $C_a = \frac{P4 - P5}{Q_{bar}}$

- Υπολογισμός γωνίας β με την χρήση των πολυωνυμικών συντελεστών που αντιστοιχούν σε αυτή. $\beta = C_0 + C_1 \cdot C_b + C_2 \cdot C_b^2 + C_3 \cdot C_b^3 + C_4 \cdot C_b^4$

- Υπολογισμός γωνίας α με την χρήση των πολυωνυμικών συντελεστών που αντιστοιχούν σε αυτή. $\alpha = C_0 + C_1 \cdot C_a + C_2 \cdot C_a^2 + C_3 \cdot C_a^3 + C_4 \cdot C_a^4$

- Υπολογισμός συντελεστή δυναμικής πίεσης C_q . Για γωνία α μεγαλύτερη από την β χρησιμοποιούνται οι συντελεστές C_q (from α), ενώ στην αντίθετη περίπτωση οι συντελεστές C_q (from β). Για $\alpha > \beta$ $C_q = C_0 + C_1 \cdot C_a + C_2 \cdot C_a^2 + C_3 \cdot C_a^3 + C_4 \cdot C_a^4$

Για $\beta > \alpha$: $C_q = C_0 + C_1 \cdot C_b + C_2 \cdot C_b^2 + C_3 \cdot C_b^3 + C_4 \cdot C_b^4$

- Υπολογισμός δυναμικής πίεσης Q . $Q = \frac{Q_{bar}}{C_q}$

- Υπολογισμός μέτρου ταχύτητας V_{mag} . Πρέπει να είναι γνωστή η πυκνότητα του ρευστού ρ . $V_{mag} = \sqrt{2 \cdot Q \cdot 133,3226} \cdot \rho$

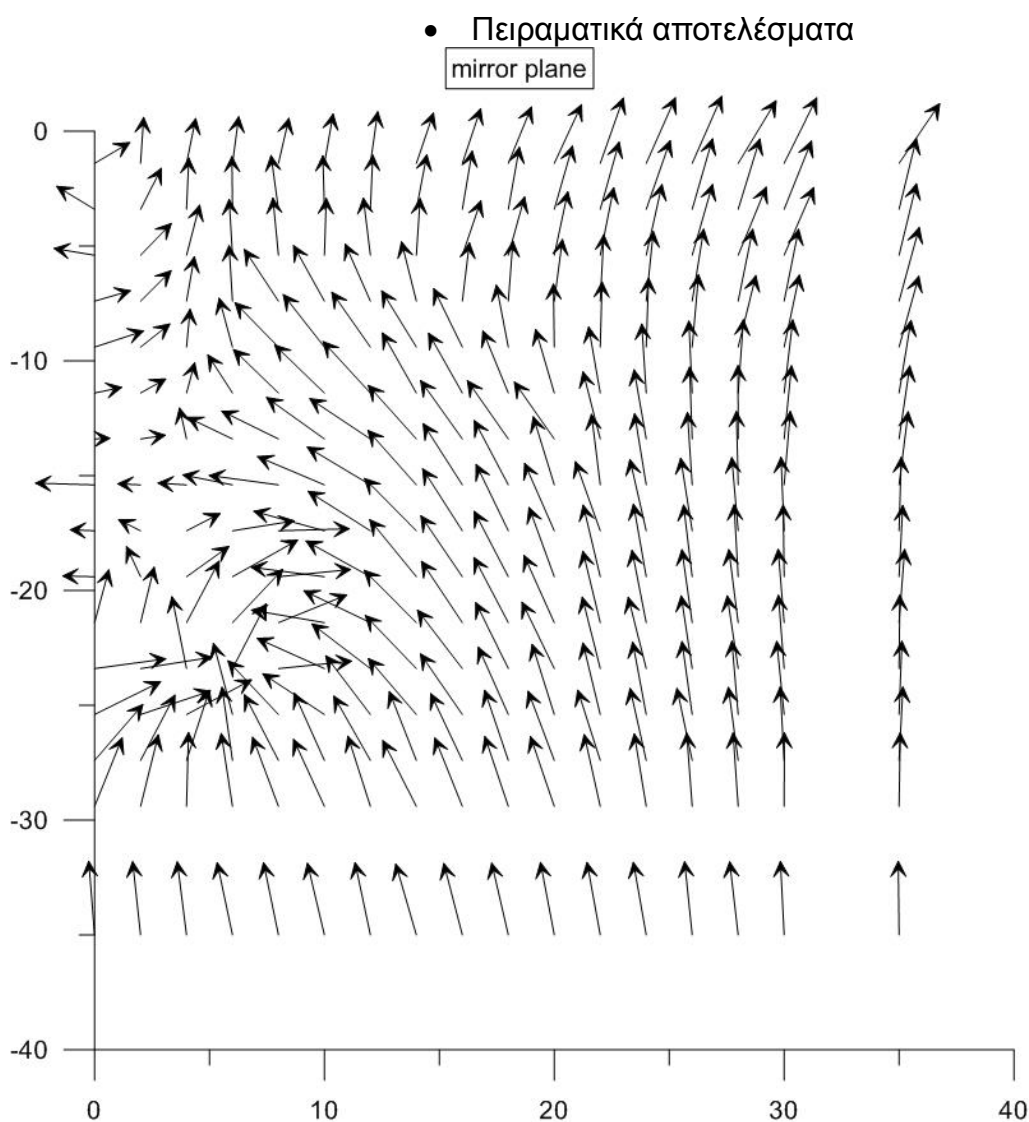
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Επίπεδο καθρέφτη

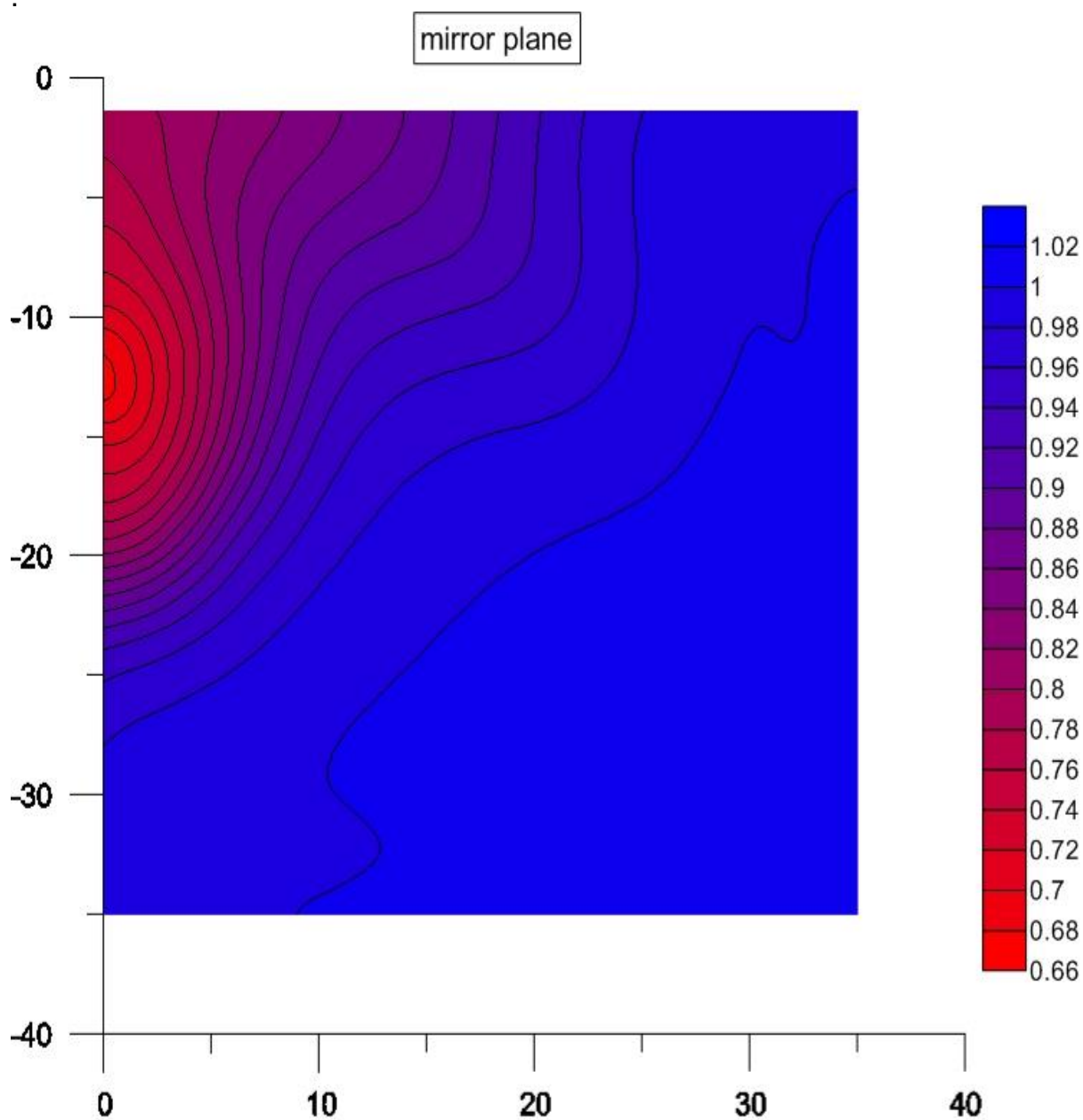
Στο επίπεδο του καθρέφτη, μετρήθηκε από 0 έως 35 εκαστά κατά το πλάτος του μοντέλου και κατά το βύθισμα από 1,4 έως 35. Και στους 2 αυτούς άξονες ξεπεράσαμε αρκετά τις διαστάσεις του μοντέλου, έτσι ώστε να έχουμε μια συνολική εικόνα των φαινομένων της ροής και των μεγεθών τους. Η απόσταση των σημείων μεταξύ τους ήταν 2 εκατοστά και ο αριθμός των μετρήσεων ήταν 272.

Έγινε επίσης σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αναλυτικές μεθόδους.

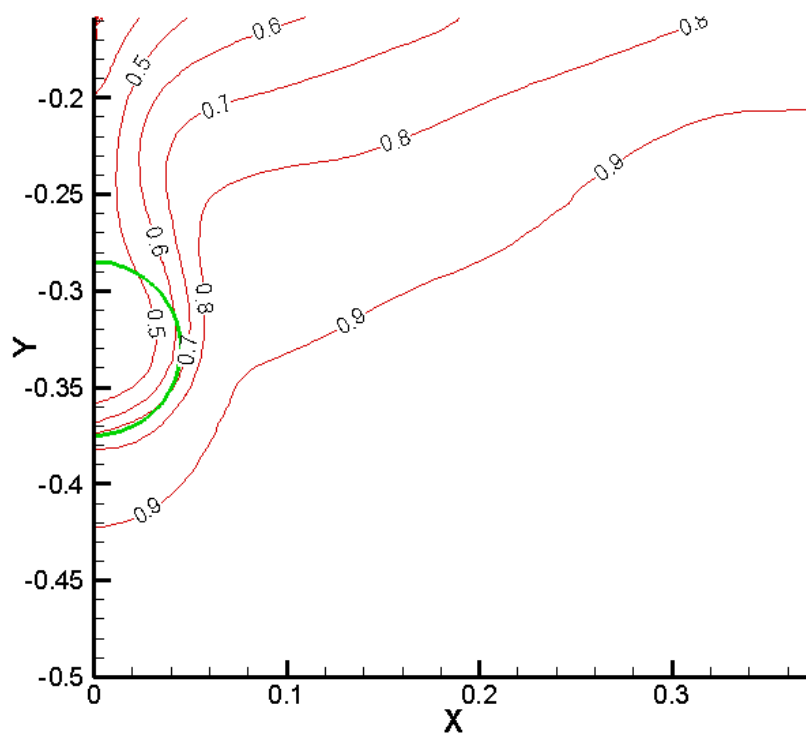
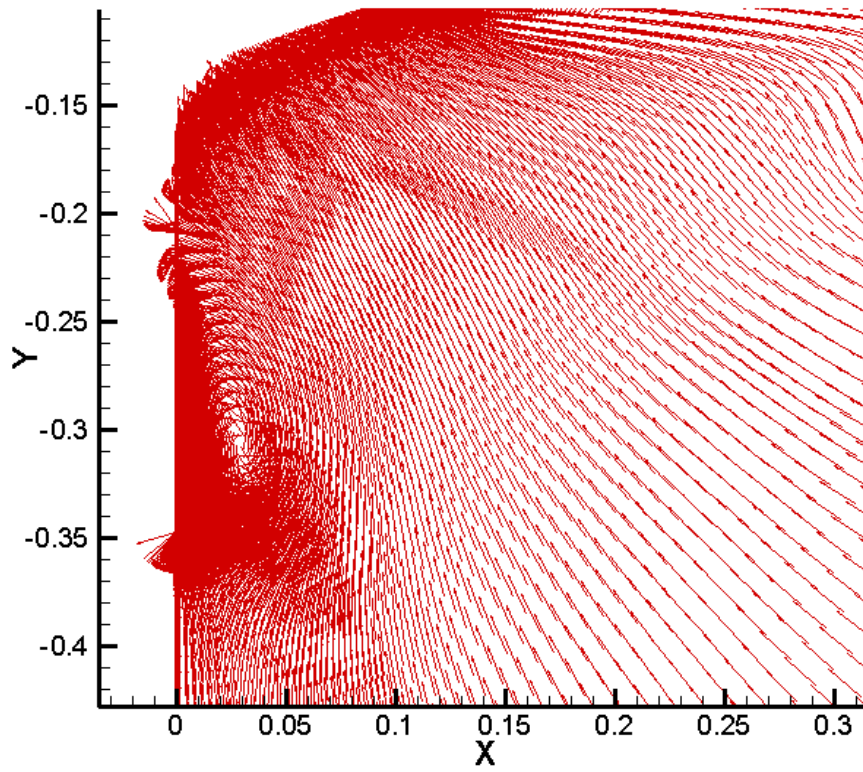
Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα όπου φαίνονται τα διανύσματα των εγκάρσιων ταχυτήτων.



Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα όπου φαίνεται ο λόγος των αξονικών ταχυτήτων προς την ταχύτητα του μοντέλου και η περιοχές που αυτός ο λόγος παραμένει σταθερός.



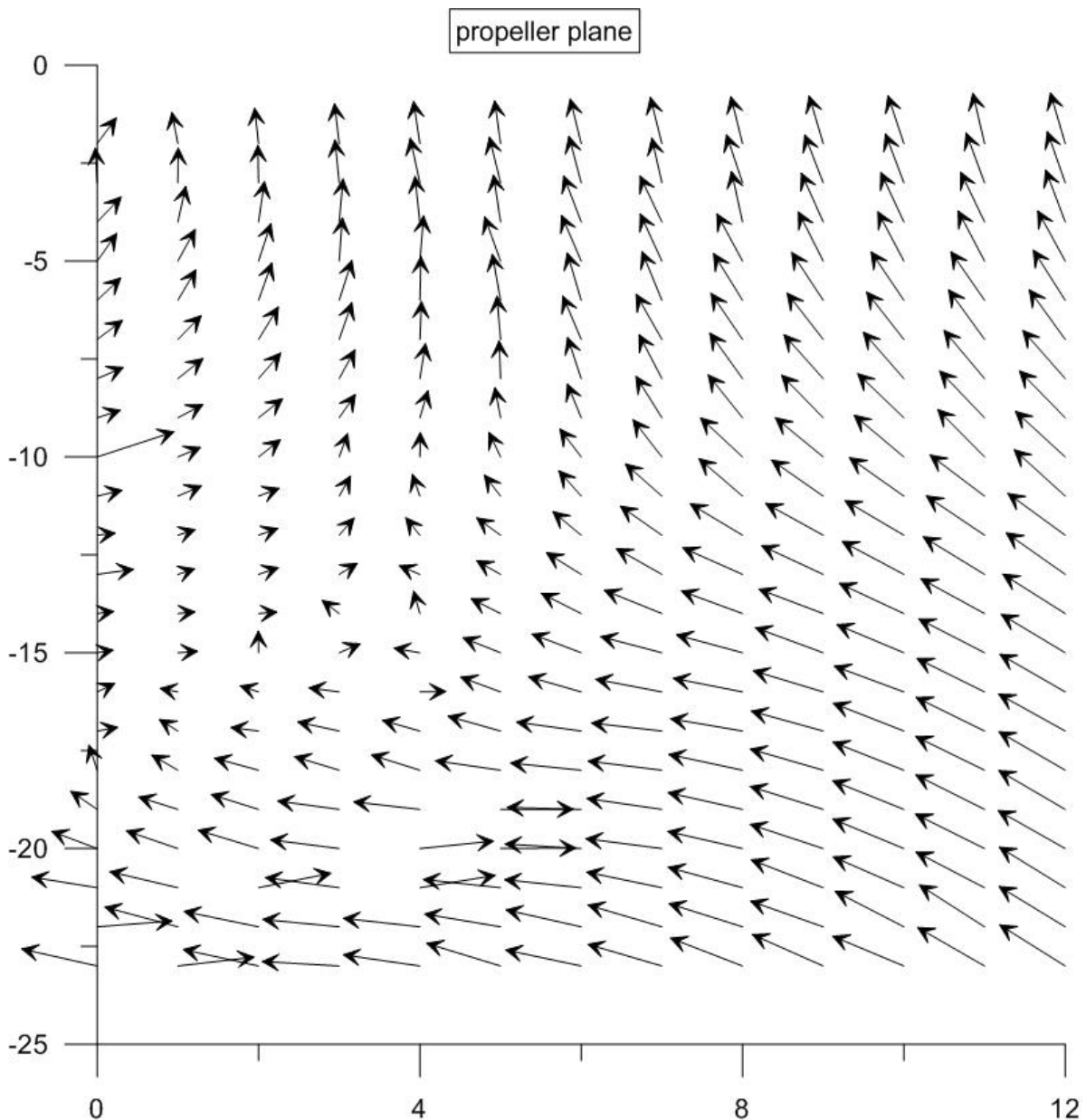
- Αποτελέσματα αναλυτικών μεθόδων



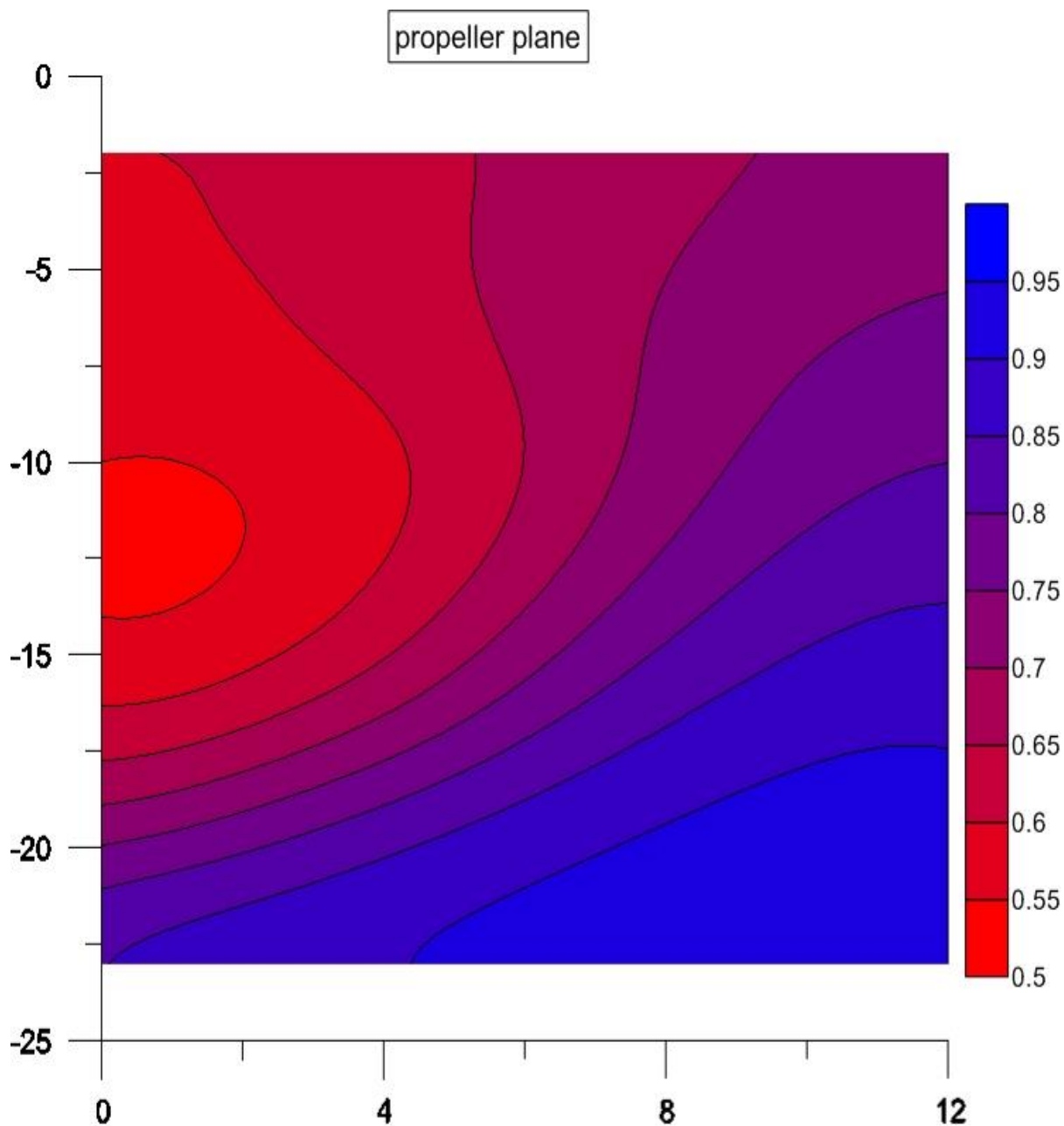
Επίπεδο προπέλας

Στο επίπεδο της προπέλας μετρήθηκε από 0 έως 12 εκατοστά κατά το πλάτος και από 4 έως 26 εκατοστά κατά το βύθισμα. Η απόστασή του από τον καθρέφτη του μοντέλου ήταν 20 εκατοστά και η προπέλα βρίσκεται σε βύθισμα 0,123m. Η διάμετρος της είναι 0,1585 m. Στο επίπεδο αυτό θέλαμε να μελετήσουμε τη ροή που συναντάει η προπέλα οπότε μετρήσαμε σε μικρότερη περιοχή αλλά πιο πυκνή. Η ισαπόσταση των σημείων μεταξύ τους ήταν 1 εκατοστό και ο αριθμός των μετρήσεων 286.

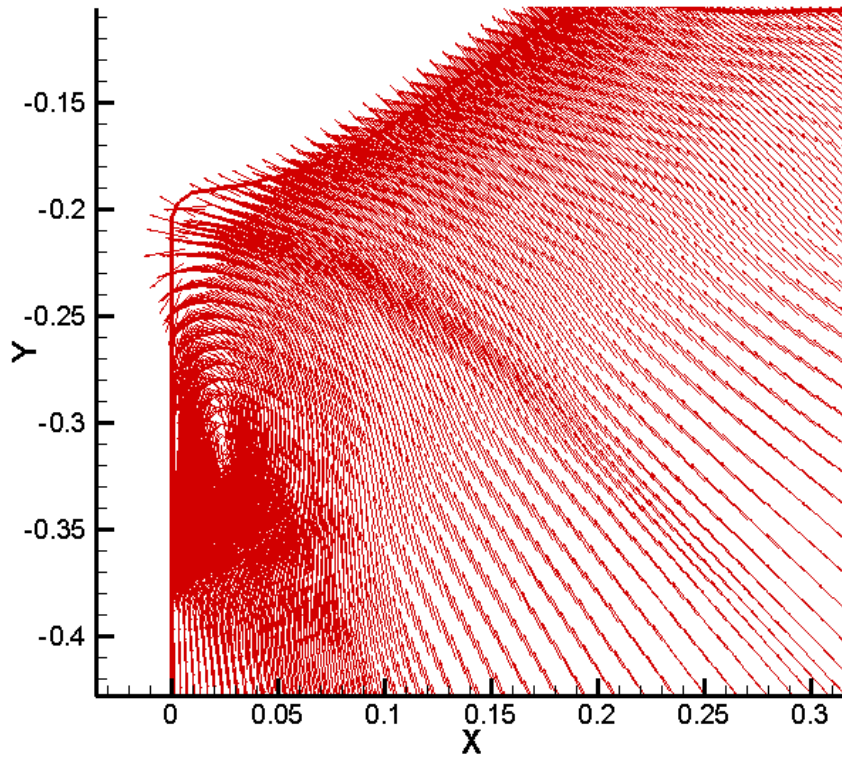
Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα όπου φαίνονται τα διανύσματα των εγκάρσιων ταχυτήτων.

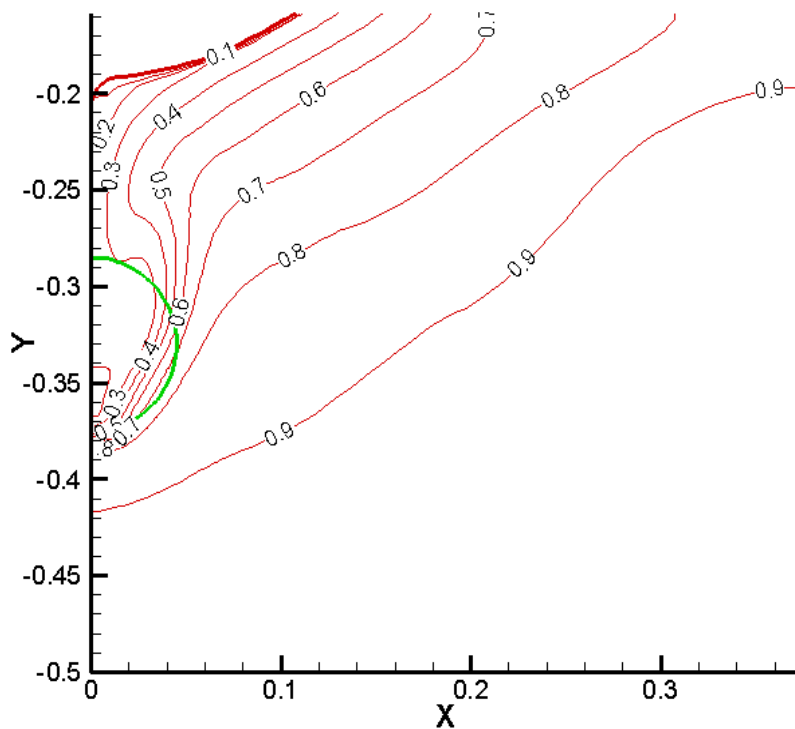


Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα όπου φαίνεται ο λόγος των αξονικών ταχυτήτων προς την ταχύτητα του μοντέλου και η περιοχές που αυτός ο λόγος παραμένει σταθερός.



- Αποτελέσματα αναλυτικών μεθόδων

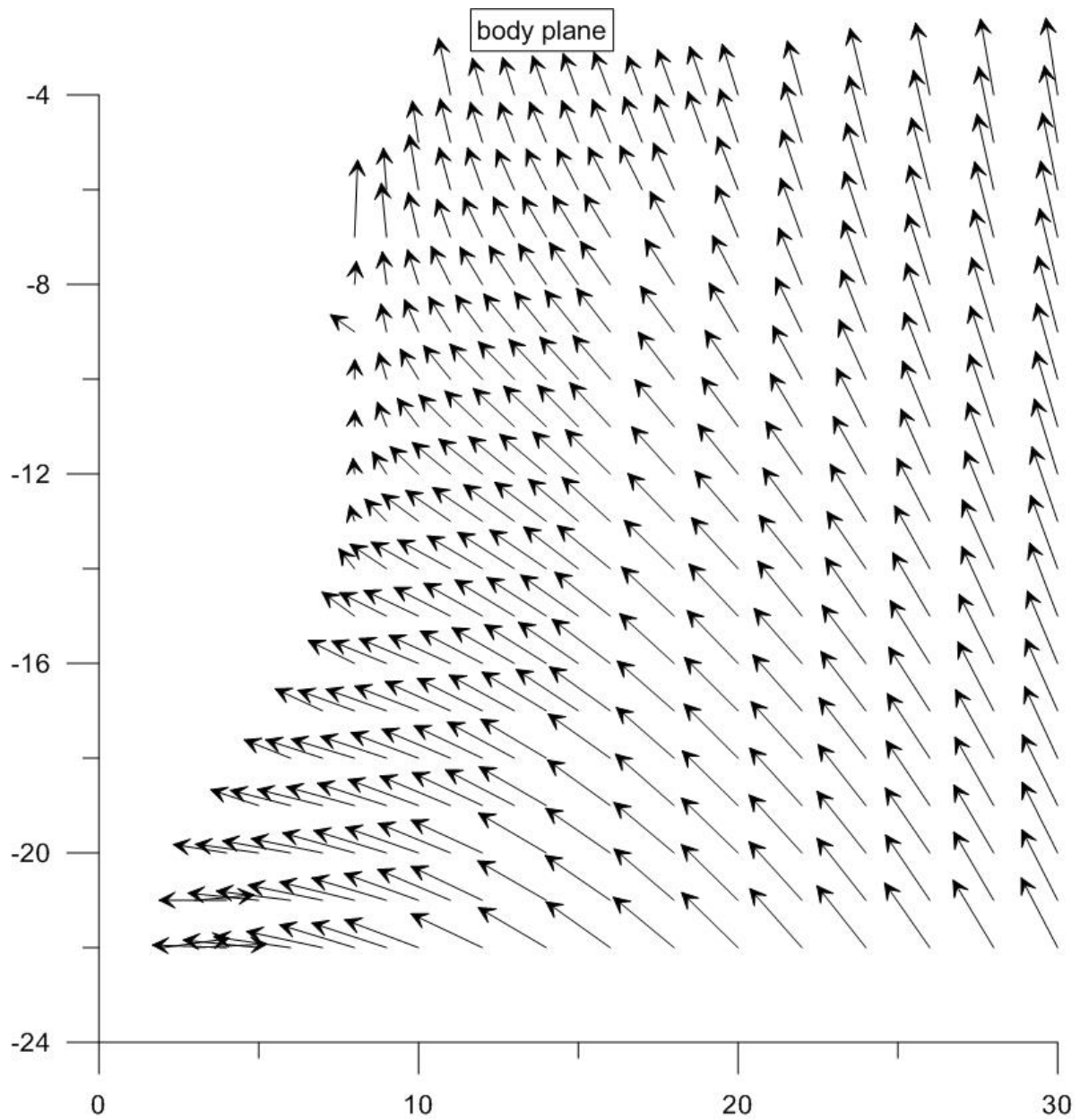




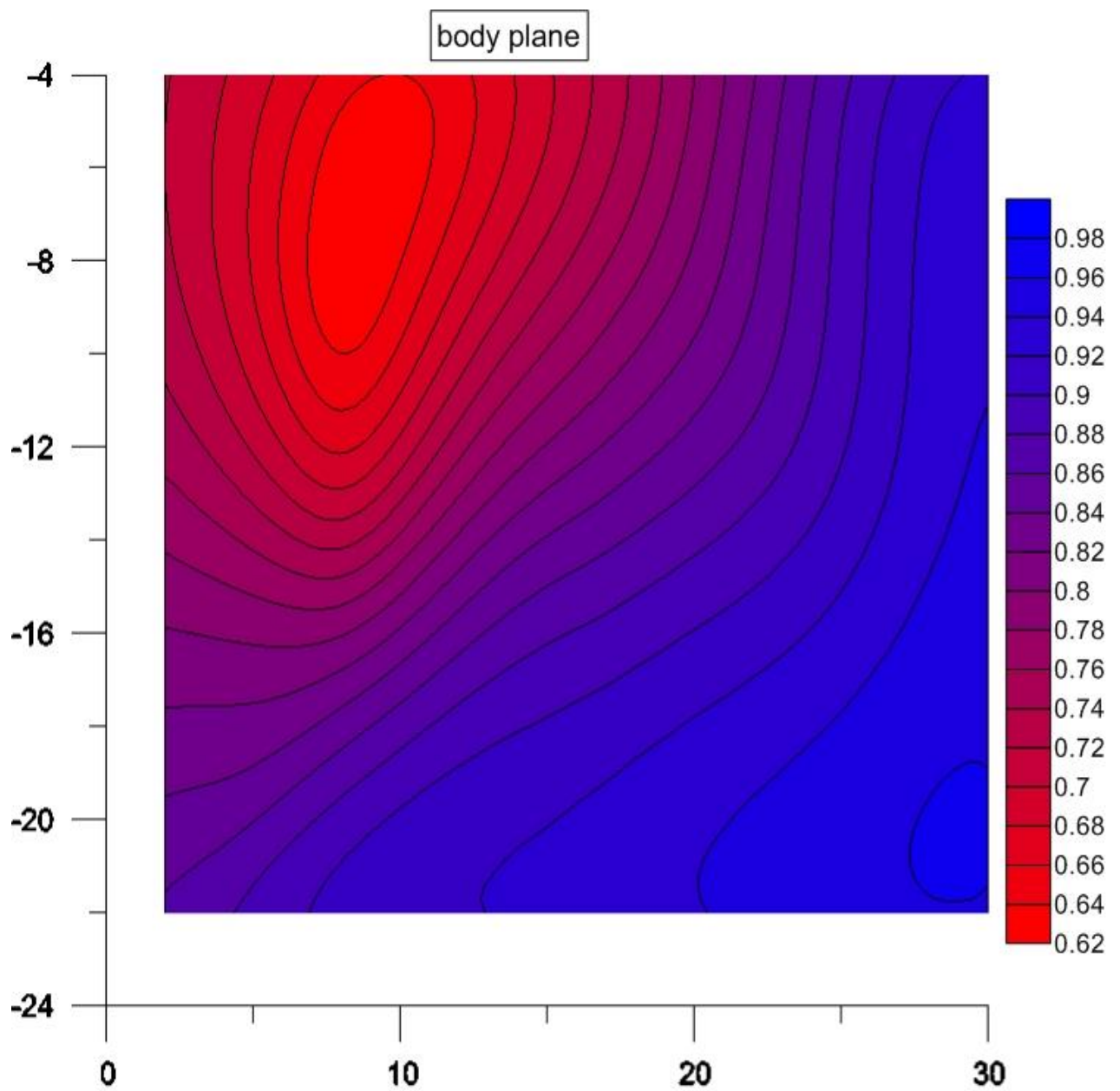
Επίπεδο νομέα 40 πόντους μπροστά από τον καθρέφτη

Στο επίπεδο αυτό μετρήσαμε δίπλα ακριβώς στο σώμα του μοντέλου στο σημείο που τελειώνει το παράλληλο τμήμα και υπάρχει έντονη αλλαγή στην μορφή της γάστρας. Οι μετρήσεις σε κάθε βύθισμα του σωλήνα Pitot ξεκινούσαν όσο πιο κοντά στο μοντέλο ήταν δυνατό και τελείωναν στους 30 πόντους. Το μέγιστο βάθος που μετρήσαμε ήταν 22 εκατοστά. Η ισαπόσταση των σημείων μεταξύ τους ήταν 1 εκατοστό και ο αριθμός των μετρήσεων 315.

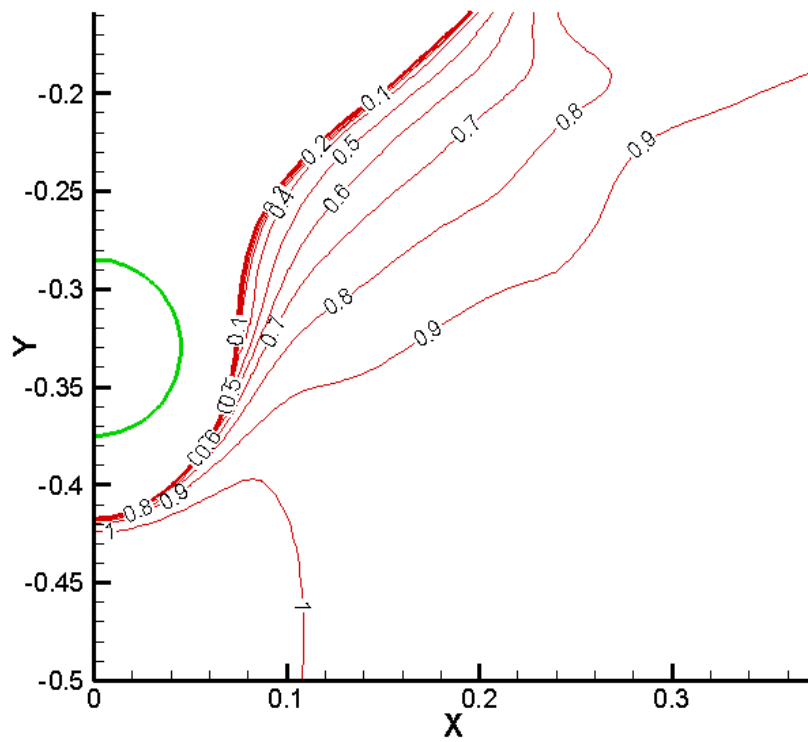
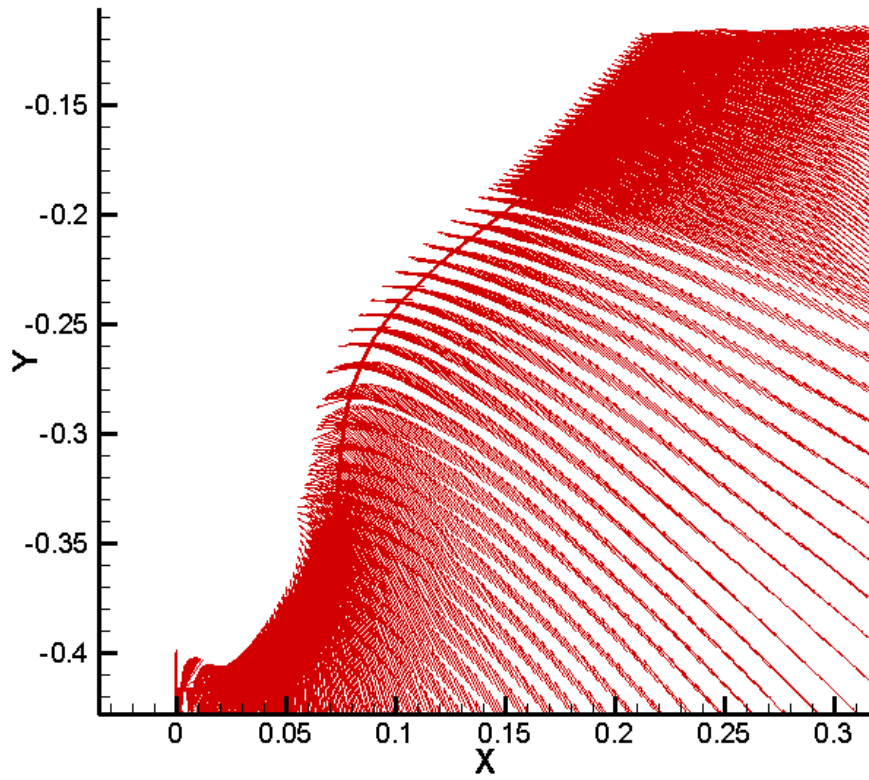
Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα όπου φαίνονται τα διανύσματα των εγκάρσιων ταχυτήτων.



Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα όπου φαίνεται ο λόγος των αξονικών ταχυτήτων προς την ταχύτητα του μοντέλου και η περιοχές που αυτός ο λόγος παραμένει σταθερός



- Αποτελέσματα αναλυτικών μεθόδων



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται ότι η μέθοδος μετρήσεων με σωλήνα Pitot σε νερό, μπορεί να είναι αρκετά αξιόπιστη. Φυσικά όμως πρέπει να γίνει προσεχτικός σχεδιασμός και εκτέλεση των πειραμάτων για να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα.

Από τα διαγράμματα των εγκάρσιων και των αξονικών ταχυτήτων του νερού, που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, φαίνεται να υπάρχει συνέπεια στις τιμές και στην μορφή τους ανάμεσα στις 2 μεθόδους. Πρέπει να αναφερθεί εδώ, ότι για τη μέθοδο CFD χρησιμοποιήθηκαν λίγο διαφορετικά στοιχεία για το μοντέλο (βαρύτερο εκτόπισμα και λίγο μεγαλύτερη ταχύτητα), παρόλα αυτά όμως τα χαρακτηριστικά της ροής είναι παρεμφερή.

Οι αξονικές ταχύτητες στις μετρήσεις ήταν της τάξης του 1 m/s, όμως οι αναμενόμενες ταχύτητες των δινών κυμαίνονται σε μερικά εκατοστά ανά δευτερόλεπτο. Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια που χρειαζόταν ήταν της τάξης του 0,1 mBar στους αισθητήρες. Κατά την βαθμονόμηση των αισθητήρων η ακρίβεια αυτή υπήρχε αλλά κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις στις μετρήσεις. Αυτές οφείλονται σε κραδασμούς του φορείου, σε μεταβολές της ταχύτητας του φορείου, σε κραδασμούς της βάσης των αισθητήρων, στα σωληνάκια σύνδεσης κτλ. Έτσι είναι αρκετά δύσκολο να δοθεί μία συγκεκριμένη τιμή αναμενόμενου σφάλματος. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η καταγραφή μεγάλης χρονικής ιστορίας σε κάθε μέτρηση, που είχε σαν αποτέλεσμα την απαλοιφή των επιδράσεων των παραπάνω φαινόμενων.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι αν και τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, η προετοιμασία και διεξαγωγή των μετρήσεων ήταν αρκετά χρονοβόρα. Τα πειράματα διήρκεσαν περίπου 2 μήνες και ο αριθμός των μετρήσεων ήταν περίπου 1000 για αυτά τα τρία επίπεδα που παρουσιάστηκαν. Συνεπώς για την αποτελεσματικότερη και πιο πρακτική χρήση του σωλήνα Pitot πρέπει να γίνει βελτιστοποίηση της διαδικασίας των μετρήσεων για οικονομία σε χρόνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Aeroprobe corporation**, «Multi-hole probe User's manual for 5-hole, 7-hole probes», 2006
- [2] **R A Robinson, D Butterfield, D Curtis, T Thompson**, «Problems with pitots, Issues with flow measurement in stacks», 2004
- [3] **A J Pisasale, N A Ahmed**, «Development of a functional relationship between port pressures and flow properties for the calibration and application of multi-hole probes to highly three dimensional flows»
- [4] **D Telionis, Yihong Yang**, «Recent developments in Multi-Hole probe (MHP) technology», 2009
- [5] **D Liarokapis, G Grigoropoulos, S Perissakis**, «Introducing a seven-hole pitot arrangement for measuring wake flows in the towing tank
- [6] **G Zilliac**, «Modelling, calibration, and error analysis of seven-hole pressure probe»
- [7] **Aeroprobe Corporation**, <http://www.aeroprobe.com>