



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

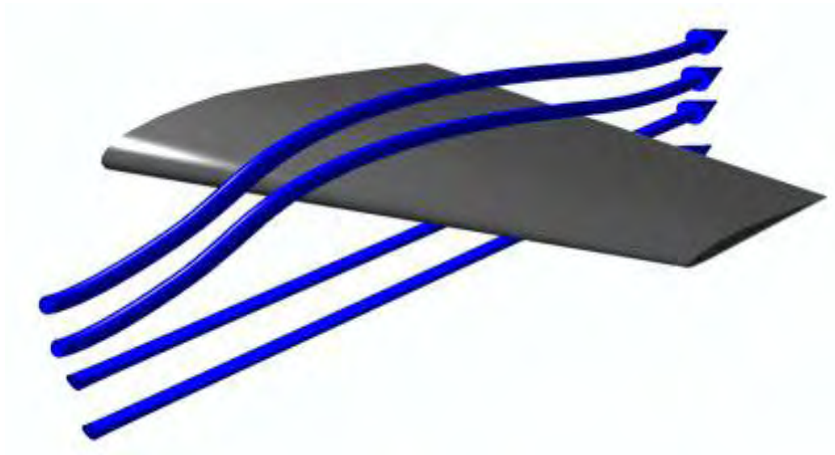
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***Πειραματική Μελέτη της Επίδρασης της Επιφανειακής  
Τραχύτητας και της Τύρβης Αέρα στη Ροή γύρω από  
Αεροτομή NACA 4418***



**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ι. ΤΣΑΝΗΣ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελεί την ολοκλήρωση πειραματικών μετρήσεων και μελέτης ενός έτους. Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της μεταπτυχιακής μου, ομότιμο καθηγητή Νικόλαο Βλάχο, για τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλα τα κρίσιμα σημεία αυτής της εργασίας, την καθοδήγησή του και την πολύτιμη συνεισφορά του στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον Μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Ευάγγελο Παπαλό για τη συμβολή και στον Ηλεκτροτεχνικό του Τμήματος Αναστάσιο Δαφερέρα για την επίλυση σημαντικού τεχνικού προβλήματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, χωρίς τη βοήθεια των οποίων θα ήταν αδύνατη η πραγματοποίησή τους.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Παναγιώτη Καψάλη για την πολύτιμη βοήθειά του και τις συμβουλές του επάνω στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής CAFFA για την προσομοίωση της ροής γύρω από την αεροτομή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ιωάννη και Ελένη Τσάνη, καθώς και την κοπέλα μου Βέρα Τζαβάρα για όλη την συμπαράστασή τους καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου και στην συγγραφή της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Βόλος – Οκτώβριος 2011

Κωνσταντίνος Ι. Τσάνης

## Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	2
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	9
SUMMARY.....	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11
1.1 Αντικείμενο και στόχοι της Μεταπτυχιακής Εργασίας .....	11
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	11
1.3 Συμβολή και Πρωτοτυπία της Μεταπτυχιακής Εργασίας .....	19
1.4 Δομή της Μεταπτυχιακής Εργασίας .....	20
2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ .....	21
2.1 Οι εξισώσεις της ροής σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων .....	21
2.1.1 Εξίσωση της Συνέχειας .....	21
2.1.2 Εξίσωση της Ορμής (Navier-Stokes).....	22
2.1.3 Το πρόβλημα του κλεισίματος .....	24
2.2 Οι εξισώσεις της ροής σε καμπυλόγραμμα συντεταγμένες.....	24
2.3 Επίδραση Τύρβης Αέρα .....	26
2.4 Χαρακτηριστικά αεροτομών .....	28
2.5 Επίδραση της Επιφανειακής Τραχύτητας της Αεροτομής.....	30
2.6 Δυνάμεις Άντωσης και Οπισθέλκουσας .....	32
2.7 Συντελεστής Πίεσης $C_p$ .....	33
2.8 Εφαρμογές αεροτομών .....	34
2.9 Αεροδυναμικός Κώδικας Προσομοίωσης CAFFA .....	35
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	37
3.1 Αεροτομή NASA 4418 .....	37
3.2 Αεροσήραγγα και Διάταξη Ροής.....	40
3.3 Σύστημα Μέτρησης Σωλήνα Pitot-Static και Μικρομανόμετρο .....	41
3.3.1 Ηλεκτρονικό Διαφορικό Μικρομανόμετρο .....	42
3.3.2 Οπές πίεσης.....	42
3.3.3 Σωλήνας Στατικής Πίεσης .....	43

3.3.4 Σωλήνας Pitot.....	43
3.3.5 Σωλήνας Pitot-Static (Prandtl).....	43
3.4 Πλέγματα .....	46
3.5 Επιφανειακές Τραχύτητες .....	47
3.6 Μεθοδολογία Μετρήσεων .....	47
3.7 Εκτίμηση Ακρίβειας Μετρήσεων.....	49
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	50
4.1 Στοιχεία της Παραμετρικής Μελέτης.....	50
4.2 Επίδραση Ταχύτητας Αέρα σε Λεία Αεροτομή .....	51
4.3 Επίδραση Επιφανειακής Τραχύτητας.....	56
4.5.1 Πλέγματα 2cm x 2cm .....	66
4.5.1 Πλέγματα 4cm x 4cm .....	68
4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τραχύτητες 0, 100μm και 200μm .....	63
4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων με και χωρίς πλέγματα.....	71
4.8.1 Λεία αεροτομή .....	71
4.8.2 Αεροτομή με επιφανειακή τραχύτητα 100μm.....	75
4.8.3 Αεροτομή με επιφανειακή τραχύτητα 200μm.....	77
4.9 Υπολογισμοί με υπολογιστικό κώδικα CAFFA και σύγκριση αυτών με πειραματικές τιμές .....	80
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	82
5.1 Γενικά Συμπεράσματα.....	82
5.2 Προτάσεις Βελτίωσης .....	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Πίνακες Κατανομής Συντελεστών Πίεσης.....	86

## ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

C	μήκος χορδής αεροτομής
$C_L$	συντελεστής άντωσης
$C_D$	συντελεστής οπισθέλκουσας
$C_p$	συντελεστής πίεσης
$F_D$	δύναμη οπισθέλκουσας
$F_L$	δύναμη άντωσης
$F_p$	δύναμη πίεσης στην επιφάνεια της αεροτομής
$F_T$	δύναμη τριβής στην επιφάνεια της αεροτομής
K, te	κινητική ενέργεια τύρβης
P, p	πίεση αέρα
R	τραχύτητα επιφανείας
Re	αριθμός Reynolds
$\alpha$	γωνία πρόσπτωσης αέρα
V, u	ταχύτητα αέρα
$\bar{\tau}_x$	άνυσμα της ιξώδους τάσης
$\rho$	πυκνότητα αέρα
Ma	αριθμός Mach
$\mu$	συντελεστής δυναμικού ιξώδους αέρα
$\nu$	συντελεστής κινηματικού ιξώδους αέρα

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράμετροι υπολογισμού τραχύτητας .....	31
Πίνακας 2: Συντεταγμένες των σημείων της αεροτομής NACA 4418 .....	38
Πίνακας 3: Μεγέθη Πλεγμάτων.....	46
Πίνακας 4: Διαθέσιμες τραχύτητες και αντιστοίχιση προτύπων .....	47
Πίνακας 5: Παραμετρική μελέτη .....	50

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων κατανομών συντελεστή πίεσης (Hoffman et al., 1996) .....	15
Σχήμα 2 Συγκριτικά αποτελέσματα περίπτωσης λείας αεροτομής και αεροτομής με τραχύτητα (Hoffman et al., 1996) .....	15
Σχήμα 3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιφανειακές τραχύτητες για γωνίες πρόσπτωσης $0^\circ$ και $13^\circ$ (Reuss et al., 1995) .....	17
Σχήμα 4 Διάφορες μορφές κατανομών πίεσης $C_p$ σε δύο διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και για διαφορετικούς αριθμούς $Re$ (Freudenreich et al., 2004) .....	19
Σχήμα 5 Διάφορες μορφές κατανομών πίεσης $C_p$ σε δύο διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και για διαφορετικούς αριθμούς $Re$ (Freudenreich et al., 2004) .....	19
Σχήμα 7: Τυπική μορφή αεροτομής.....	28
Σχήμα 8: Χαρακτηριστικά τραχύτητας σε κατεργασμένη επιφάνεια .....	30
Σχήμα 9: Ανεμοκινητήρες και η τυπική διάταξή τους.....	34
Σχήμα 10 Η αεροτομή μέσα στο τμήμα δοκιμών της αεροσήραγγας .....	37
Σχήμα 11 Θέσεις των οπών στατικής πίεσης στο μέσον της αεροτομής .....	37
Σχήμα 12 Σχηματική παράσταση αεροτομής στο δισδιάστατο επίπεδο $x-y$ .....	38
Σχήμα 13: Πλάγια όψη υποηχητικής αεροσήραγγας (διαστάσεις σε μέτρα) .....	40
Σχήμα 14: Ο ανεμιστήρας της αεροσήραγγας του ΕΡ&Σ-ΠΘ .....	40
Σχήμα 15: Κατανομή των οπών πίεσης στην επιφάνεια της αεροτομής .....	41
Σχήμα 16: Κλίση της επιφάνειας της πτέρυγας στις θέσεις των οπών στατικής πίεσης .....	41
Σχήμα 17: Ηλεκτρονικό Μικρομανόμετρο .....	42
Σχήμα 18: Τυπική οπή πίεσης και συνήθη κατασκευαστικά σφάλματα που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων .....	42
Σχήμα 19: Σωλήνας στατικής πίεσης .....	43
Σχήμα 20: Σωλήνας Pitot.....	43
Σχήμα 21: Τομή σωλήνα Pitot-Static.....	44
Σχήμα 22: Κατανομή της στατικής πίεσης μεταξύ της κεφαλής του σωλήνα Prandtl και του κάθετου στελέχους του σωλήνα Pitot-Static .....	45
Σχήμα 23: Σφάλμα στη μέτρηση στατικής και πίεσης ηρεμίας .....	45
Σχήμα 24 Γεωμετρία πλεγμάτων .....	46
Σχήμα 25 Πτώση πίεσης σε σχέση με την ταχύτητα.....	46
Σχήμα 26 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για $\alpha = 0^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	51
Σχήμα 27 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για $\alpha = 6^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	51
Σχήμα 28 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για $\alpha = 12^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	52
Σχήμα 29 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για $\alpha = 18^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	52

Σχήμα 30 Σύγκριση κατανομών πίεσης για λεία αεροτομή, $V = 5\text{m/s}$ .....	53
Σχήμα 31 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και $\alpha = 0^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	53
Σχήμα 32 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και $\alpha = 6^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	54
Σχήμα 33 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και $\alpha = 12^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	54
Σχήμα 34 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και $\alpha = 18^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	55
Σχήμα 35 Σύγκριση κατανομών πίεσης για λεία αεροτομή, $V = 10\text{m/s}$ .....	55
Σχήμα 36 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ και $\alpha = 0^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	56
Σχήμα 37 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ και $\alpha = 6^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	56
Σχήμα 38 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ και $\alpha = 12^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	57
Σχήμα 39 Σύγκριση συντελεστών πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	57
Σχήμα 40 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ , $\alpha = 0^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	58
Σχήμα 41 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ , $\alpha = 6^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	58
Σχήμα 42 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ , $\alpha = 12^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	58
Σχήμα 43 Σύγκριση συντελεστών πίεσης για τραχύτητα $100\mu\text{m}$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	59
Σχήμα 44 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $\alpha = 0^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	59
Σχήμα 45 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $\alpha = 6^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	60
Σχήμα 46 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $\alpha = 12^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	60
Σχήμα 47 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $\alpha = 18^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	60
Σχήμα 48 Σύγκριση συντελεστών πίεσης σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης .....	61
για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ και ταχύτητα $5\text{m/s}$ .....	61
Σχήμα 49 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $\alpha = 0^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	61
Σχήμα 50 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $\alpha = 6^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	62
Σχήμα 51 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $\alpha = 12^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	62
Σχήμα 52 Σύγκριση συντελεστών πίεσης για τραχύτητα $200\mu\text{m}$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	63
Σχήμα 53 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 0^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ ) .....	63
Σχήμα 54 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 6^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ ) .....	64
Σχήμα 55 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 12^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ ) .....	64
Σχήμα 56 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 6^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ ) .....	65
Σχήμα 57 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 12^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ ) .....	66
Σχήμα 58 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ , $\alpha = 0^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	66
Σχήμα 59 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ , $\alpha = 6^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	67
Σχήμα 60 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ , $\alpha = 12^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	67
Σχήμα 61 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ , $\alpha = 0^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	67
Σχήμα 62 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ , $\alpha = 6^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	68
Σχήμα 63 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ , $\alpha = 0^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	68
Σχήμα 64 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ , $\alpha = 6^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	69
Σχήμα 65 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ , $\alpha = 12^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	69
Σχήμα 66 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ , $\alpha = 18^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ .....	69

Σχήμα 67 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm, $\alpha=0^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	70
Σχήμα 68 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm, $\alpha=6^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	70
Σχήμα 69 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm, $\alpha=12^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	71
Σχήμα 70 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm, $\alpha=18^\circ$ , $V = 10\text{m/s}$ .....	71
Σχήμα 71 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha = 0^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ ) .....	72
Σχήμα 72 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha = 6^\circ$ , $V = 5\text{m/s}$ ) .....	72
Σχήμα 73 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=12^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	73
Σχήμα 74 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=18^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	73
Σχήμα 75 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ , $V=10\text{m/s}$ ) .....	74
Σχήμα Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ , $V=10\text{m/s}$ ) .....	74
Σχήμα 77 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	75
Σχήμα 78 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	75
Σχήμα 79 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=12^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	76
Σχήμα 80: Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ , $V=10\text{m/s}$ ) .....	76
Σχήμα 81 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ , $V=10\text{m/s}$ ) .....	77
Σχήμα 82 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	77
Σχήμα 83 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	78
Σχήμα 84 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=12^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	78
Σχήμα 85 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=18^\circ$ , $V=5\text{m/s}$ ) .....	79
Σχήμα 86 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ , $V=10\text{m/s}$ ) .....	79
Σχήμα 87 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ , $V=10\text{m/s}$ ) .....	80



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η τυρβώδης ροής γύρω από αεροτομή NACA 4418 με διαφορετικές τραχύτητες επιφανείας και εντάσεις τύρβης του προσπίπτοντος αέρα. Έγινε πειραματική και υπολογιστική μελέτη δύο παραγόντων που επηρεάζουν την ροή γύρω από την αεροτομή, της τραχύτητας της επιφανείας της αεροτομής και της τύρβης του αέρα. Σκοπός ήταν ο καθορισμός του είδους της επίδρασης στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής σε δύο διαφορετικούς αριθμούς Reynolds.

Υπολογίσθηκαν πειραματικά και αριθμητικά οι συντελεστές πίεσης και άντωσης της αεροτομής για αριθμούς Reynolds 104.175 και 208.333, για επιφανειακές τραχύτητες 100μm και 200μm, καθώς και για διαφορετική ένταση εισερχόμενης τύρβης με την χρήση πλεγμάτων με τετραγωνικές οπές διαστάσεων 2cmx2cm και 4cmx4cm.

Μελετήθηκαν διάφοροι δυνατοί συνδυασμοί και συγκρίθηκαν μεταξύ τους με στόχο την εξαγωγή ποιοτικών καθώς και ποσοτικών συμπερασμάτων. Επίσης, έγιναν αριθμητικές προσομοιώσεις με τον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Caffe για περιπτώσεις λείας αεροτομής καθώς και επιφανειακής τραχύτητας, ώστε να επιβεβαιωθούν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η πειραματική μελέτη έδειξε ότι με την αύξηση της τραχύτητας της αεροτομής αυξάνεται ο συντελεστής άντωσης. Επίσης με την αύξηση της εισερχόμενης τύρβης αυξάνεται ο συντελεστής άντωσης της αεροτομής. Ακόμη, η αύξηση της εισερχόμενης τύρβης και της επιφανειακής τραχύτητας επιφέρει, εν γένει, μεγαλύτερη σταθεροποίηση της ροής γύρω από την αεροτομή. Τέλος, με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης από 0° έως 18° προκαλείται αύξηση του συντελεστή άντωσης καθώς και σταθεροποίηση της ροής γύρω από την αεροτομή.

Η αριθμητική προσομοίωση για τις ίδιες συνθήκες ροής, έδωσε σε μεγάλο ποσοστό μέγιστους συντελεστές άντωσης ίδιους με αυτούς που εξήχθησαν από τις πειραματικές μετρήσεις.

Ο στόχος της Μεταπτυχιακής εργασίας - πειραματική και δευτερευόντως υπολογιστική παραμετρική μελέτη της επίδρασης της τύρβης του προσπίπτοντος αέρα και της τραχύτητας της επιφανείας της αεροτομής - καλύφθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό.

## **SUMMARY**

In this thesis the turbulent flow around an airfoil NACA 4418 with various surface roughness and turbulence intensities of the incoming air is studied. An experimental and computational study has been carried out of two factors that effect the flow around an airfoil, surface roughness of the airfoil and turbulence intensity of the air. The objective was to determine the kind of effect on the dynamic characteristics of the NACA 4418 airfoil for two different Reynolds numbers.

The pressure and lift coefficients of the airfoil were calculated experimentally and computationally for Reynolds numbers 104.175 and 208.333, for surface roughnesses of 100 $\mu$ m and 200 $\mu$ m, and for different incoming turbulence intensities with the use of grids with square holes of dimensions 4cmx4cm and 2cmx2cm.

Various possible combinations were experimentally studied and compared to each other with the aim to derive qualitative and quantitative conclusions. Numerical simulations were also performed with the computational fluid dynamics code Caffa for the cases of smooth airfoil as well as with surface roughness of 100 $\mu$ m and 200 $\mu$ m, in order to validate the experimental results.

The experimental study showed that with the increase of the surface roughness of the airfoil, the lift coefficient is increased. Also, the increase of the incoming turbulence causes an increase of the lift coefficient of the airfoil. In addition, the increase of the incoming turbulence and the surface roughness produces, in general, an better stability of the flow around the airfoil. Finally, the increase of the angle of attack from 0 to 18° results in an increase of the lift coefficient as well as a stabilization of the flow around the airfoil.

The numerical simulation for the same flow conditions, produced to a large degree maximum lift coefficients identical to those derived from the experimental measurements.

The objective of this thesis - experimental and secondarily numerical parametric study of the effect of the incoming air turbulence and of the airfoil surface roughness, was fulfilled to a satisfactory degree.

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Αντικείμενο και στόχοι της Μεταπτυχιακής Εργασίας**

Στην ζωή μας περικλειόμαστε από ροές ρευστών, μονίμων ή μη, υποηχητικών και υπερηχητικών. Στις ελεγχόμενες ροές εκμεταλλευόμαστε την χρήση αεροτομών, οι οποίες αξιοποιούν την ροή και αντλούν την ενέργειά της ή παράγουν εξαναγκασμένη ροή καταναλίσκοντας ενέργεια. Έτσι, τίθεται η απαίτηση της βελτιστοποίησης της απόδοσης αυτών των διατάξεων με την μελέτη των φυσικών παραγόντων που την διέπουν.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την μελέτη της τυρβώδους ροής γύρω από αεροτομή NACA 4418 με διαφορετικές τραχύτητες επιφανείας και διαφορετικών εντάσεων τύρβης της προσπίπτουσας ροής. Στην προκειμένη εργασία έγινε πειραματική και υπολογιστική μελέτη δύο παραγόντων που επηρεάζουν την επίδραση της αεροτομής στην ροή, της τραχύτητας της επιφανείας της αεροτομής και των πλεγμάτων παραγωγής της τύρβης στην ροή γύρω από την πτέρυγα. Σκοπός μας ήταν ο καθορισμός του είδους της επίδρασης που επιφέρουν στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής NACA 4418 κάτω από ταχύτητες ροών με διαφορετικούς αριθμούς Reynolds. Υπολογίσθηκαν πειραματικά και υπολογιστικά οι συντελεστές άντωσης και οι συντελεστές πίεσης γύρω από την πτέρυγα.

Για την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η υποηχητική αεροσήραγγα του εργαστηρίου Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, η οποία είναι ανοιχτού κυκλώματος αναρρόφησης με θάλαμο δοκιμών διαστάσεων 500x700x3000mm. Για το υπολογιστικό μέρος χρησιμοποιήθηκε ο αεροδυναμικός κώδικας CAFFA, ο οποίος έχει τροποποιηθεί και εμπλουτιστεί στο Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών.

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στην ανάλυση, μελέτη και εν τέλει σύγκριση του πειράματος με το υπολογιστικό αεροδυναμικό μοντέλο του κώδικα CAFFA.

### **1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

Στην ενότητα αυτή γίνεται παρουσίαση της έρευνας και της αντίστοιχης βιβλιογραφίας, που αναφέρεται στη μελέτη της επίδρασης της τραχύτητας και της τύρβης στην ροή γύρω από αεροτομές.

Οι αδερφοί Wright που πραγματοποίησαν την πρώτη πτήση στην Ιστορία τον Δεκέμβριο του 1903 (McCormick, 1995), ήταν πολύ σίγουροι για τα αποτελέσματα της έρευνας τους. Κατασκεύασαν την δική τους αεροσήραγγα και δοκίμασαν εκατοντάδες διαφορετικές αεροτομές και σχήματα πτερύγων. Τα αποτελέσματά τους, τα οποία δημοσίευσαν εκείνη την περίοδο, κατέδειξαν ότι ήταν ενήμεροι για το ζήτημα των αεροτομών μαζί με τις σχετικές βασικές έννοιες όπως ενέργεια, έργο, στατική και δυναμική. Οι αεροτομές των αδερφών Wright βασίζονταν σε πειραματική δουλειά και μόνο, χωρίς την χρησιμοποίηση καμίας αναλυτικής ή θεωρητικής μεθόδου. Σήμερα, αποτελέσματα από πρώιμα πειράματα, τα οποία διεξήχθησαν με ένα λογικό τρόπο, παρόμοιο με αυτόν των αδερφών Wright, μπορούν να εξηγηθούν εφαρμόζοντας καθιερωμένες αρχές της Αεροδυναμικής, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί με το πέρασμα των χρόνων από ταυτόχρονα ανάλυση και πειραματική δουλειά. Σε αυτό το κεφάλαιο, η εξέλιξη της σχεδίασης αεροτομής και οι θεωρητικές αρχές πρόκειται να ανασκοπηθούν, μαζί με μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στη πειραματική αεροδυναμική.

Η εξέλιξη της σχεδίασης αεροτομών θα παρουσιαστεί, με αναφορά στις διάφορες οικογένειες αεροτομών, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί, με παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε μιας από αυτές. Οι πρώτες αεροτομές που σχεδιάστηκαν για την πτήση ενός αεροπλάνου ήταν αυτές των αδερφών Wright, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Το 1932, η National Advisory Committee of Aeronautics (NACA) δοκίμασε μια σειρά από σχήματα αεροτομών γνωστά ως αεροτομές 4-ψηφίων NACA. Οι δοκιμές διεξήχθησαν προτού επισημανθεί η προτίμηση μιας στρογγυλεμένης άκρης στο μπροστινό μέρος και μια αιχμηρή άκρη στην ουρά της αεροτομής, το οποίο ελήφθη υπόψη στην σχεδίαση αυτής της οικογένειας αεροτομών (Abbott, 1958). Η κατανομή πάχους και η γραμμή camber των αεροτομών NACA 4 ψηφίων δίνονται ως συνάρτηση της  $x$ - συνιστώσας από την αρχή της αεροτομής.

Οι αεροτομές NACA 5 ψηφίων αναπτύχθηκαν γύρω στο 1935. Οι δοκιμές των αεροτομών NACA 4 ψηφίων κατέδειξαν ότι η μέγιστη συνιστώσα άντωσης θα μπορούσε να αυξηθεί όσο η θέση του μέγιστου camber μετατίθεται είτε προς τα εμπρός είτε προς τα πίσω της θέσης του μέσου της χορδής. Η προς τα πίσω θέση δεν είναι επιθυμητή εξαιτίας της μεγάλης συνιστώσας της ορμής. Η μέση γραμμή που χρησιμοποιήθηκε στις 4 ψηφίων NACA αεροτομές δεν ήταν κατάλληλη για ακραίες μπροστινές θέσεις του μέγιστου camber. Επομένως, μια καινούργια σειρά μέσων γραμμών αναπτύχθηκε και το αποτέλεσμα ήταν οι

αεροτομές NACA 5 ψηφίων. Η κατανομή πάχους ήταν η ίδια με αυτή των αεροτομών NACA 4 ψηφίων. Οι μέσες γραμμές καθορίζονταν έτσι ώστε να παράγουν σχήματα τα οποία να έχουν προοδευτικά μειούμενων καμπυλοτήτων πίσω από την αρχή της αεροτομής. Η καμπυλότητα μειώνεται στο μηδέν σε ένα σημείο ελαφρώς πίσω της θέσης του μεγίστου camber ώστε να παραμείνει μηδέν έως την ουρά (Abbott, 1958).

Υπάρχουν δύο θεωρίες της μη μόνιμης ροής γύρω από αεροτομές για ασυμπίεστη ροή, οι οποίες παρουσιάστηκαν από τον Theodorsen (1935) και τους Von Karman και Sears (1938). Ενώ παράγουν πανομοιότυπα αποτελέσματα, οι εξισώσεις τους παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Η προσέγγιση του Theodorsen απαιτεί τα «circulatory» και «non-circulatory» δυναμικά ταχυτήτων να καθοριστούν και έπειτα να χρησιμοποιηθούν στην μη μόνιμη κατανομή πίεσης, ώστε να καθορίσουμε την παραγόμενη κατανομή πίεσης. Παρά το γεγονός ότι η μη μόνιμη κατανομή πίεσης προτείνεται σε αυτή τη μέθοδο, ο Theodorsen δεν παρουσίασε κανένα αποτέλεσμα για αυτή. Ο von Karman και ο Sears σχημάτισαν το πρόβλημα στο πλαίσιο της θεωρίας της μόνιμης ροής γύρω από αεροτομή. Επίσης, δεν συζήτησαν την κατανομή πίεσης για την μη μόνιμη περίπτωση, παρά το γεγονός ότι στη διατριβή του Sears, το πρόβλημα λύνεται για ταλαντούμενη πτέρυγα.

Ανεξάρτητα από τον Theodorsen και τους von Karman και Sears, Ρώσοι και Γερμανοί ερευνητές ανέπτυξαν ανάλογες προσεγγίσεις για την μη μόνιμη θεωρία αεροτομών. Μια εκπληκτική συζήτηση της παγκόσμιας εξέλιξης της μη μόνιμης θεωρίας, δίνεται στο άρθρο του Neskarov (1947). Συζητήσεις αυτών των εναλλακτικών μεθόδων δίνονται από τον Sedov (1965) και τον Garrick (1952, 1957). Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι μέθοδοι ισχύουν για ασυμπίεστη ροή, φαινόμενα συμπίεσότητας περιπλέκουν σημαντικά την θεωρία Miles (1960). Εισαγωγές στην θεωρία της μη μόνιμης θεωρίας αεροτομών σε συμπίεστη ροή μπορούν να βρεθούν, για παράδειγμα, στις εργασίες των Bisplinghoff et al. (1955), Dowell (1995), Lomax (1960), Fung (1969) και Garrick (1957).

Όσον αφορά την τραχύτητα των επιφανειών αεροτομών, έχουν γίνει ορισμένες μελέτες του φαινομένου της επίδρασης της τραχύτητας στα χαρακτηριστικά των αεροτομών. Η National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) παρήγαγε έναν περιορισμένο αριθμό αναφορών έρευνας των φαινομένων της επιφανειακής τραχύτητας κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αλλά περισσότερο επικεντρωμένες στις δοκιμές που χρησιμοποιούν μόνο τυπικές τραχύτητες.

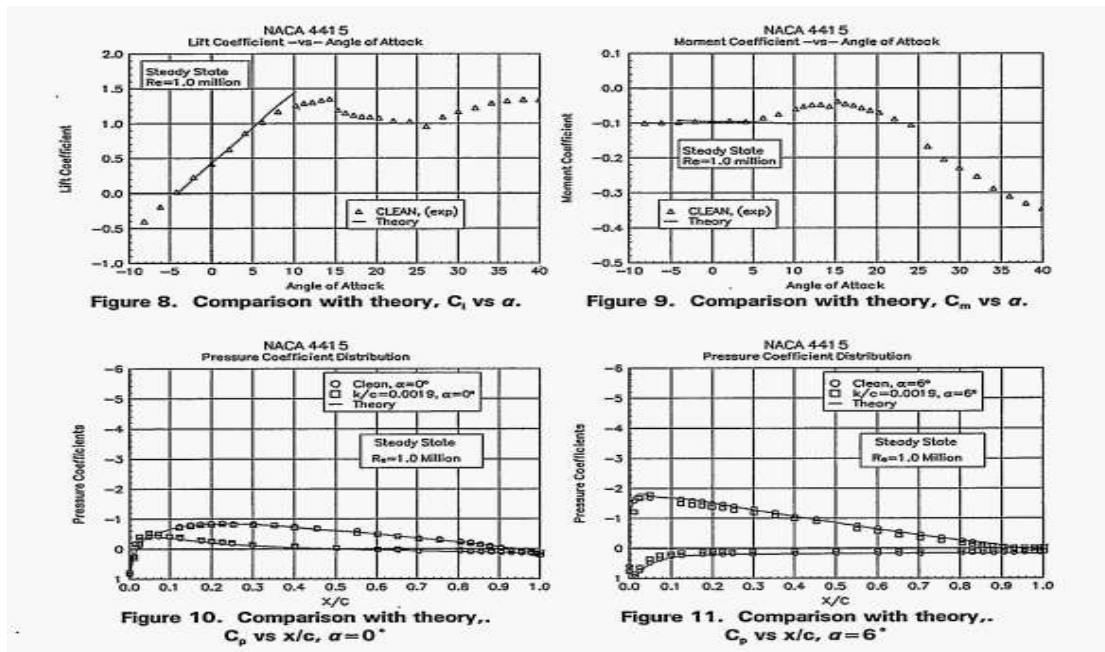
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται υπολογιστικές και πειραματικές εργασίες, με στόχο την ανάδειξη της χρησιμότητας της παρούσης μελέτης μας. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση αυτών των μελετών:

Ένα μοντέλο αεροτομής NACA 4415 εξετάστηκε από τον Hoffman et al. (1996) κάτω από μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής. Οι δοκιμές καθόρισαν τις βασικές συνθήκες για μόνιμης κατάστασης γωνίες πρόσπτωσης από  $-10^\circ$  έως  $+40^\circ$  και εξετάστηκε η ασταθής συμπεριφορά ταλαντώνοντας το μοντέλο γύρω από τον άξονα ταλάντωσης του για τρεις γωνίες, τρεις συχνότητες, και δύο πλάτη. Για όλες τις περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι αριθμοί Reynolds 0.75, 1, 1.25 και  $1.5 \times 10^6$ . Επιπρόσθετα, αυτά επαναλήφθηκαν μετά την εφαρμογή επιφανειακής τραχύτητας για να καθορισθούν οι επιδράσεις στην απόδοση της αεροτομής. Τα αποτελέσματα της μόνιμης κατάστασης της NACA 4415 σε  $Re=1.25 \times 10^6$  έδειξαν μια συνιστώσα μέγιστης άντωσης της τάξης του 1.3 σε γωνία πρόσπτωσης  $12.3^\circ$ . Η εφαρμογή της επιφανειακής τραχύτητας μείωσε την συνιστώσα της μέγιστης άντωσης κατά 20% και αύξησε την 0.0090 ελάχιστη συνιστώσα οπισθέλκουσας κατά 62%.

Δεδομένα ελήφθησαν επίσης για δύο εύρη ταλαντώσεων  $\pm 5.5^\circ$  και  $\pm 10^\circ$ . Το μεγαλύτερο πλάτος συνεχώς έδινε μια υψηλότερη μέγιστη συνιστώσα άντωσης από το μικρότερο, και οι δύο, μη μόνιμης κατάστασης, μέγιστες συνιστώσες άντωσης ήταν μεγαλύτερες από τις τιμές της μόνιμης κατάστασης. Η απώλεια στήριξης καθυστέρησε με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, και εξαιτίας αυτού πραγματοποιήθηκε μια αύξηση της μέγιστης συνιστώσας πίεσης. Παρουσιάστηκε μια συμπεριφορά υστέρησης για όλες της περιπτώσεις μη μόνιμης ροής. Οι επαναλήψεις της υστέρησης ήταν μεγαλύτερες για τις υψηλότερες μειούμενες συχνότητες και για τις μεγαλύτερου εύρους ταλαντώσεις. Όπως και στην περίπτωση της μόνιμης κατάστασης, η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας στην μη μόνιμη περίπτωση ήταν η μείωση της συνιστώσας άντωσης σε υψηλές γωνίες πρόσπτωσης. Επιπρόσθετα, με την επιφανειακή τραχύτητα, η συμπεριφορά υστέρησης επέμεινε σε χαμηλότερες γωνίες πρόσπτωσης από την «καθαρή» περίπτωση.

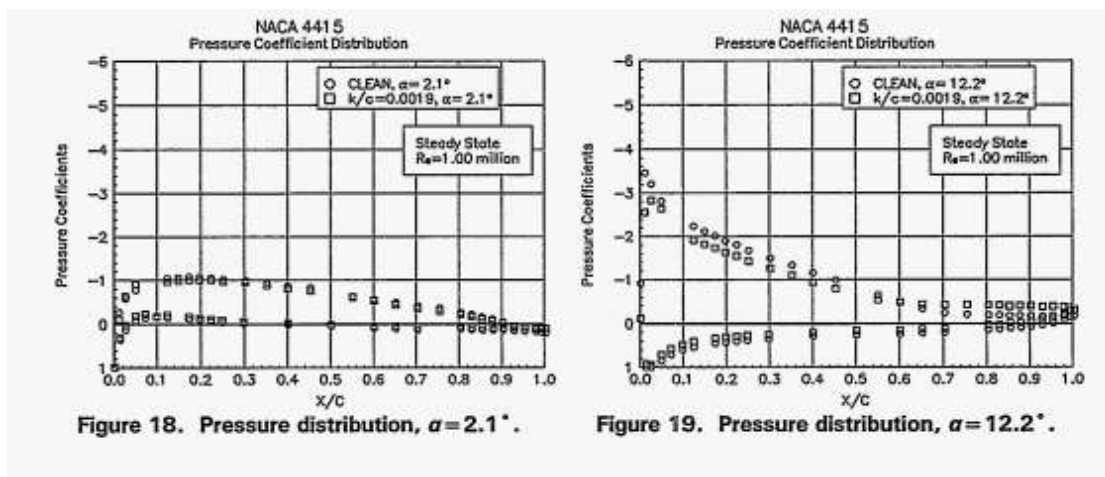
Γενικά, η μέγιστη συνιστώσα άντωσης στη μη μόνιμη κατάσταση ήταν 10% έως 55% υψηλότερη από την μέγιστη συνιστώσα της μόνιμης κατάστασης, και η απόκλιση στο  $\frac{1}{4}$  της χορδής στο μέτρο της συνιστώσας της ορμής ήταν από -30% έως 45% σε σχέση με τις τιμές της μόνιμης κατάστασης σε υψηλές γωνίες πρόσπτωσης. Αυτά τα ευρήματα καταδεικνύουν την σημαντικότητα της θεώρησης της συμπεριφοράς της μη μόνιμης ροής, που συμβαίνει στην λειτουργία της αεροσήραγγας ώστε να ληφθούν ακριβείς εκτιμήσεις φορτίων.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται διαγράμματα (Σχήμα 1) στη μόνιμη κατάσταση και για ορισμένες γωνίες πρόσπτωσης:



Σχήμα 1 Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων κατανομών συντελεστή πίεσης (Hoffman et al., 1996)

Δίνονται τα συγκριτικά διαγράμματα των περιπτώσεων με επιφανειακή τραχύτητα και χωρίς τραχύτητα (Σχήμα 2).



Σχήμα 2 Συγκριτικά αποτελέσματα περίπτωσης λείας αεροτομής και αεροτομής με τραχύτητα (Hoffman et al., 1996)

Οι Broeren et al. (2003) παρουσίασαν αποτελέσματα από μια πειραματική μελέτη σχεδιασμένη να αξιολογήσει την επίδραση στην απόδοση των προσθηκών σχηματισμών πάγου σε αεροτομές με διαφορετικές γεωμετρίες. Οι προστιθέμενοι σχηματισμοί πάγου προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας συνδυασμούς από ποικίλων μεγεθών τραχύτητες

επιφανείας. Αυτές οι προσομοιώσεις ελέγχονται σε τρεις διαφορετικές αεροτομές: NACA 23012, NACA 3415 και NLF 0414 σε αριθμό Reynolds  $1.8 \times 10^6$  και αριθμό Mach 0.18. Αποτελέσματα από την αεροτομή NACA 23012 ταιριάζουν με αυτά προηγούμενης μελέτης, επικυρώνοντας την μέθοδο της προσομοίωσης με σχηματισμούς πάγου. Αυτό επίσης έδειξε ότι μια απλή γεωμετρική(βασισμένη στη χορδή) συσχέτιση του πάγου είναι κατάλληλη. Το φαινόμενο της προσομοίωσης πάγου, σε όρους μέγιστης απόδοσης άντωσης ,είναι πιο σοβαρό για την αεροτομή NACA 23012. Οι συνιστώσες μέγιστης άντωσης βρέθηκαν μεταξύ 0.65 και 0.80 για την περίπτωση με πάγο συγκρινόμενη με μια «καθαρή» τιμή 1,47 για την αεροτομή NACA 23012 γι αυτόν τον αριθμό Reynolds. Σε αντίθεση ,οι συνιστώσες της μέγιστης άντωσης για την αεροτομή NLF 0414 με τις ίδιες προσομοιώσεις πάγου βρέθηκαν σε ένα εύρος 0.90 και 1.05, συγκρινόμενες με μια «καθαρή» τιμή 1.34. Τα αποτελέσματα για την αεροτομή NACA 3415 με τα σχήματα προσομοιωμένου πάγου βρέθηκαν μεταξύ των δύο προαναφερθέντων αεροτομών.

Ο Lewis (1984) πραγματοποίησε δοκιμές σε αεροσήραγγα σε τμήμα αεροτομής NACA 0015 για να εξεταστεί ο συνδυασμός των φαινομένων της κλίμακας και της επιφανειακής τραχύτητας. Χρησιμοποιήθηκαν αριθμοί Reynolds 110.000 και 220.000 για να καθορισθούν αυτές οι επιδράσεις. Οι επιδράσεις της τραχύτητας λήφθηκαν για τιμές 0.111, 0.282 και 0.564 τοις εκατό του μήκους χορδής της αεροτομής. Βρέθηκαν όλοι οι συνδυασμοί αποτελεσμάτων του αριθμού Reynolds και τραχύτητας σε ένα μοναδικό σετ συνιστωσών άντωσης και οπισθέλκουσας για μια δοσμένη γωνία πρόσπτωσης.

Οι Reuss et al. (1995) έλεγξαν ένα μοντέλο -18 ιντσών συνεχούς χορδής- της αεροτομής NACA 4415 υπό συνθήκες δισδιάστατης μόνιμης ροής. Ο σκοπός αυτών των δοκιμών ήταν να καταγραφεί η άντωση του τμήματος και τα χαρακτηριστικά της ορμής κάτω από διάφορα μοντέλα και συνθήκες ροής αέρα. Τα δεδομένα της επιφανειακής πίεσης λήφθηκαν μεταξύ  $-60^\circ$  και  $230^\circ$  γεωμετρικών γωνιών πρόσπτωσης, σε αριθμό Reynolds 1 εκατομμύριο. Επίσης , περιπτώσεις με ή χωρίς τραχύτητα επιφάνειας στην κορυφή συζητήθηκαν. Η τραχύτητα κορυφής χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθούν οι συνθήκες της αεροτομής που συναντώνται στην περιοχή της αεροσήραγγας. Επιπρόσθετα, τα δεδομένα της επιφανειακής πίεσης λήφθηκαν για αριθμούς Reynolds από 1.5 έως 2 εκατομμύρια, με ή χωρίς επιφανειακή τραχύτητα κορυφής, όμως η γωνία πρόσπτωσης περιορίστηκε στο εύρος από  $-20^\circ$  έως  $40^\circ$ .



Εν γένει, τα αποτελέσματα έδειξαν την ευαισθησία της κλίσης της καμπύλης άντωσης με τον αριθμό Reynolds και την τραχύτητα. Η συνιστώσα της ορμής κατέδειξε μικρή ευαισθησία στην τραχύτητα για γωνία πρόσπτωσης άνω των  $50^\circ$ , αλλά το αναμενόμενο φαινόμενο decambering ενός παχύτερου οριακού στρώματος με τραχύτητα παρουσιάστηκε σε χαμηλότερες γωνίες. Επίσης, έγιναν δοκιμές με γεννήτριες δινών οι οποίες εντοπίστηκαν στο 30% της χορδής στην άνω επιφάνεια μόνο, σε αριθμούς Reynolds 1 και  $1.5 \times 10^6$ , με ή χωρίς τραχύτητα επιφανείας. Σε γενικές γραμμές, με εφαρμοσμένη την επιφανειακή τραχύτητα, οι γεννήτριες δινών αποκατέστησαν την κεντρική γραμμή της μέγιστης άντωσης αλλά με ένα πιο απότομο σπάσιμο (πτώση πίεσης) και σε μια χαμηλότερη γωνία πρόσπτωσης από την κεντρική γραμμή. Παρουσιάστηκαν οι κατανομές συντελεστών πίεσης για συγκεκριμένες γωνίες και τραχύτητες. Ενδεικτικά έχουμε:

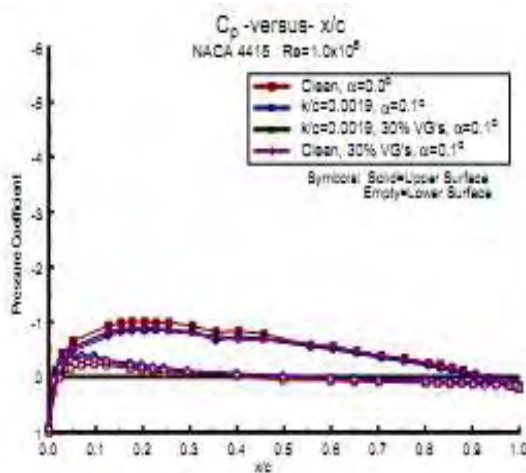


Figure 17.  $C_p$  vs  $x/c$ ,  $\alpha=0^\circ$

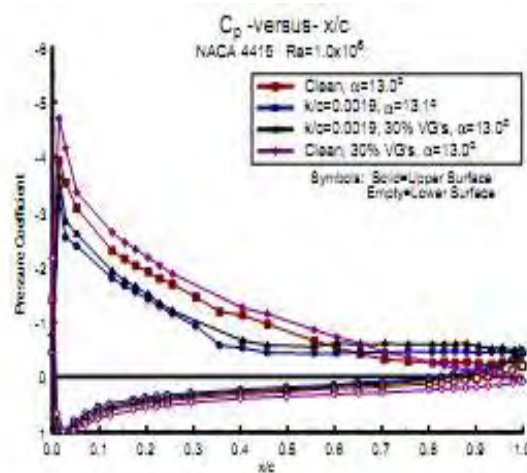


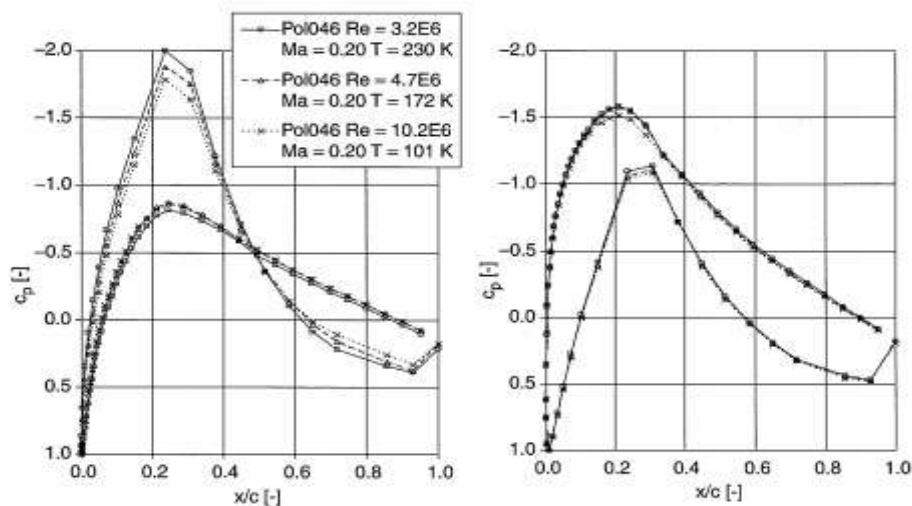
Figure 18.  $C_p$  vs  $x/c$ ,  $\alpha=13^\circ$

### Σχήμα 3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιφανειακές τραχύτητες για γωνίες πρόσπτωσης $0^\circ$ και $13^\circ$ (Reuss et al., 1995)

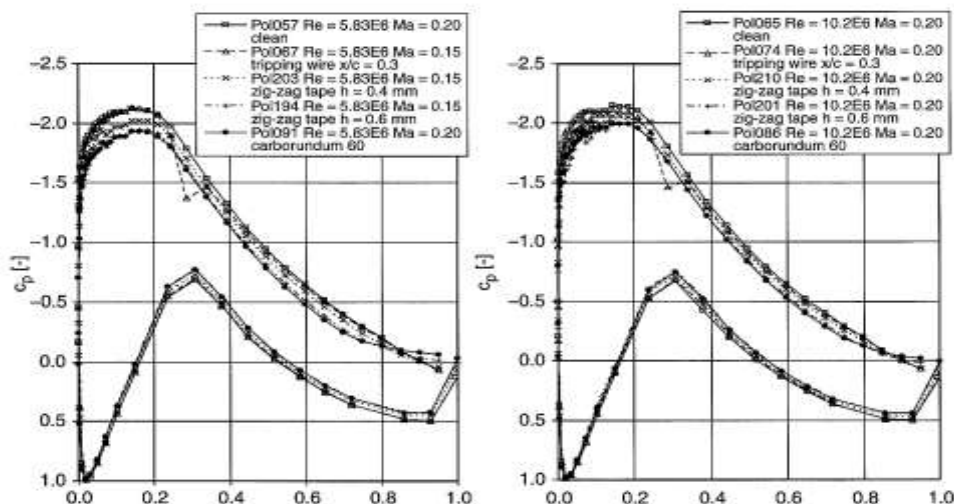
Ο George (1992) ανέπτυξε μια νέα θεωρία για την εξασθένηση (decay) της ομογενούς ιστροπικής τύρβης, στην οποία προτείνονται λύσεις για την φασματική ενέργεια που ισχύουν για όλες τις κλίμακες. Η προσέγγιση αυτή διαφέρει από τις κλασσικές προσεγγίσεις στο ότι η τύρβη δεν αποτελείται από ενός μεγέθους κυρίαρχες δίνες. Αποδεικνύεται ότι ο ρυθμός εξασθένησης της τύρβης μεταβάλλεται σύμφωνα με τον νόμο δυνάμεων και ότι εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες με αποτέλεσμα οι σταθερές του ρυθμού εξασθένησης να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις περιπτώσεις παρά μόνο στο όριο του άπειρου αριθμού Reynolds. Ένα άλλο αποτέλεσμα της θεωρίας είναι ότι η ασυμμετρία κατανομής (skewness) αυξάνει κατά την εξασθένηση μέχρι να προσεγγίσει μια οριακή τιμή.

Οι Mohamed & LaRue (1990) μελέτησαν την επίδραση των αρχικών συνθηκών στον εκθέτη εξασθένησης της τύρβης. Η μελέτη καλύπτει αριθμούς Reynolds από 6000 ως 68000, μεγέθη πλεγμάτων 2.54 και 5.08cm και λόγους ανοικτής προς συνολική επιφάνεια των πλεγμάτων 0.34 και 0.44. Αποδεικνύεται ότι η χρήση δεδομένων από τη μη ομογενή περιοχή της ροής έχουν σημαντική επίδραση στην τιμή των παραμέτρων του νόμου εξασθένησης. Αναπτύσσονται κριτήρια για την αναγνώριση της σχεδόν ομογενούς και ιστροπικής περιοχής της ροής. Αυτά τα κριτήρια περιλαμβάνουν χαμηλές τιμές για την ασυμμετρία (skewness) της ταχύτητας, σταθερότητα της ασυμμετρίας της παραγώγου της ταχύτητας κ.α. Τα αποτελέσματα, βασιζόμενα στα παραπάνω κριτήρια, δείχνουν ότι ο εκθέτης εξασθένησης είναι ανεξάρτητος από τις αρχικές συνθήκες, όπως Reynolds, μέγεθος του πλέγματος, μορφή των ράβδων που αποτελούν το πλέγμα, την τραχύτητα του πλέγματος κ.α. Αντίθετα, ο συντελεστής εξασθένησης εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες.

Οι Freudenreich et al. (2004) εξέτασαν πειραματικά και αριθμητικά με ένα βελτιωμένο Navier-Stokes solver, τις επιδράσεις ενός αυξανόμενου αριθμού Reynolds(Re) σε καθαρές και σε τραχειές αεροτομές εξετάστηκαν. Με την ψύξη μιας κρυογενικής αεροσήραγγας στην Κολωνία (ΚΚΚ) της German-Dutch WindTunnel (DNW) κάτω από 100 K, επιτεύχθηκαν τιμές Re έως και  $10 \times 10^6$ , βασισμένη σε ένα μοντέλο χορδής 500mm. Σε αυτή την περίπτωση της καθαρής επιφάνειας δεν έδειξε καμία δραστική απώλεια στην μέγιστη άντωση, η αναλογία της άντωσης με την οπισθέλκουσα μειώνεται από το 95% σε 85% περίπου, κυρίως εξαιτίας μιας αύξησης της οπισθέλκουσας. Σε αντίθεση με αυτό, η περίπτωση της τραχείας επιφάνειας, συμπεριλαμβανομένης της ταινίας zig-zag για διόρθωση της μεταφοράς και της τραχύτητας, κατανεμημένης με ανθρακοκορούνδιο γύρω από την μύτη, έδειξε αυξημένη απόδοση για αυξημένο αριθμό Reynolds. Παράλληλα, αριθμητικές προσομοιώσεις διεξήχθησαν με ένα κώδικα οριακού στρώματος ευστάθειας συνδυασμένο με έναν Navier-Stokes solver. Οι τάσεις συμπεριφοράς των ιδιοτήτων βασισμένων στο οριακό στρώμα προβλέφθηκαν καλά, σε αντίθεση με το σχέδιο διαχωρισμού, το οποίο ευθύνεται για την μέγιστη άντωση.



Σχήμα 4 Διάφορες μορφές κατανομών πίεσης  $C_p$  σε δύο διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και για διαφορετικούς αριθμούς  $Re$  (Freudenreich et al., 2004)



Σχήμα 5 Διάφορες μορφές κατανομών πίεσης  $C_p$  σε δύο διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και για διαφορετικούς αριθμούς  $Re$  (Freudenreich et al., 2004)

### 1.3 Συμβολή και Πρωτοτυπία της Μεταπτυχιακής Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι μια πειραματική μελέτη και καταγραφή των συνθηκών που μπορεί να επικρατούν και των δυνάμεων που ενεργούν γύρω από την αεροτομή NACA 4418. Πρώτο και κύριο μέλημα μας ήταν η δημιουργία διαφόρων συνθηκών και καταστάσεων που μπορεί να υπάρξουν σε μια ροή γύρω από την αεροτομή και η λεπτομερής καταγραφή των αλλαγών στις συνθήκες αυτές και οι αντίστοιχες επιδράσεις των δυνάμεων που επενεργούν.

Εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές τραχύτητες και δύο διαφορετικές δομές πλεγμάτων ανάντη της αεροτομής και εκτελέστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί επιφανειακών

τραχυτήτων – πλεγμάτων εισερχόμενης τύρβης. Με την βοήθεια διαγραμμάτων, συγκρίναμε τα αποτελέσματα από τις διαφορετικές περιπτώσεις. Έμφαση δόθηκε στην επαναληψιμότητα και την κατά το δυνατόν ορθότητα των μετρήσεων που εκτελέστηκαν.

Γενικά, έγινε συγκερασμός δύο διαφορετικών παραγόντων και αποκομίσαμε την αλληλεπίδραση αυτών των δύο παραγόντων σε σχέση με την απλή περίπτωση. Εξήχθησαν ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα τα οποία συγκρίθηκαν μεταξύ τους και αποκομίσαμε κάποια συμπεράσματα όσον αφορά την συμπεριφορά μιας ροής γύρω από μια συγκεκριμένη αεροτομή.

#### **1.4 Δομή της Μεταπτυχιακής Εργασίας**

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από την μελέτη ροών γύρω από αεροτομές. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσης μελέτης και επεξηγούνται οι βασικές έννοιες γύρω από τις αεροτομές, τις εφαρμογές αυτών και τις ροές γύρω από αυτές, την τραχύτητα επιφανειών και την τύρβη. Επίσης, γίνεται μνεία στον υπολογιστικό κώδικα Cafft. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και αναφέρονται θεωρητικά στοιχεία για το κάθε μέρος αυτής για την κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης, τα οποία συγκρίνονται για τις διαφορετικές περιπτώσεις μεταξύ τους αλλά και με αντίστοιχα αποτελέσματα του κώδικα Cafft. Παρουσιάζεται, ειδικότερα, η τυρβώδης ροή γύρω από λεία αεροτομή με την παρεμβολή και 2 πλεγμάτων καθώς και γύρω από αεροτομές με συγκεκριμένη τραχύτητα. Επιχειρείται μια απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών και ακολουθεί μια γενική σύγκριση με τον υπολογιστικό κώδικα και γίνεται μια συζήτηση και σχολιασμός αυτών των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τις συγκρίσεις και προτείνονται τρόποι για βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων καθώς και για την διευκόλυνση της λήψης των αποτελεσμάτων από την πειραματική διάταξη.

## 2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ

### 2.1 Εξισώσεις Ροής σε Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων

Ένα μεγάλο μέρος προβλημάτων της αεροδυναμικής επιλύεται στην πράξη με χρήση των θεωριών που έχουν βασιστεί στη θεώρηση της μη συνεκτικής, ασυμπίεστης ή συμπιεστής ροής. Υπάρχουν όμως φαινόμενα στην αεροδυναμική που είναι εγγενώς συνεκτικά, όπως η αποκόλληση της ροής, και δεν μπορούμε να τα μελετήσουμε με τις μη συνεκτικές μεθόδους.

Η θεωρία του συνεκτικού ρευστού καταλήγει στις εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής (Εξισώσεις Navier-Stokes) καθώς και στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας. Αυτές παρουσιάζονται πιο κάτω για στρωτή και τυρβώδη ροή. Επιλέχθηκε η διαφορική μορφή για μη μόνιμη, ασυμπίεστη ροή, χωρίς την επίδραση της βαρύτητας, γιατί με βάση αυτή τη μορφή λύνονται αριθμητικά τα διάφορα πεδία ροής στην εργασία αυτή.

#### 2.1.1 Εξίσωση της Συνέχειας

Η διαφορική εξίσωση της συνέχειας :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (2.1)$$

ισχύει για στιγμιαίες ιδιότητες της στρωτής και της τυρβώδους ροής. Για ασυμπίεστη ροή, η Εξίσωση 2.10 απλοποιείται σε :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.2)$$

Αντικαθιστώντας την ταχύτητα  $\vec{u}$  με το άθροισμα της μέσης χρονικής τιμής  $\vec{U}$  και της διακύμανσης  $\vec{u}'$ , η Εξίσωση 2.11 λαμβάνει τη μορφή :

$$\nabla \cdot \vec{U} + \nabla \cdot \vec{u}' = 0 \quad (2.3)$$

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ορίζοντας σαν  $u$ ,  $v$  και  $w$  τις συνιστώσες της ταχύτητας στις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$ , αντίστοιχα, η Εξίσωση 2.12 γράφεται :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

Λαμβάνοντας τη μέση χρονική τιμή της Εξίσωσης 2.3 και έχοντας υπόψη τον επιμερισμό του Reynolds, Εξισώσεις 2.2 έως 2.8, προκύπτει ότι :

$$\overline{\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

ή σε ανυσματικό συμβολισμό :

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (2.6)$$

Επίσης, από το συνδυασμό των Εξισώσεων 2.4 και 2.5 προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

ή σε ανυσματικό συμβολισμό :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.8)$$

### 2.1.2 Εξίσωση της Ορμής (Navier-Stokes)

Η διαφορική εξίσωση της ορμής :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} \quad (2.9)$$

ισχύει τόσο για στρωτή όσο και για τυρβώδη ροή, αλλά για τις στιγμιαίες ιδιότητες.

Χρειάζεται κατά συνέπεια μετατροπή της Εξίσωσης 2.9 ώστε να εφαρμόζεται για μέσες τιμές. Η συνιστώσα στην  $x$  – κατεύθυνση της εξίσωσης της ορμής είναι :

$$\rho \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.10)$$

την οποία με χρήση της εξίσωσης της συνέχειας μπορούμε να γράψουμε ως εξής :

$$\rho \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{u}\tilde{v}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{u}\tilde{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.11)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 2.10 τα μεγέθη  $\tilde{u}$ ,  $\tilde{v}$ ,  $\tilde{w}$  και  $\tilde{p}$  με το άθροισμα της μέσης τιμής και της διακύμανσης για κάθε μέγεθος, έχουμε:

$$\tilde{u} = U + u \quad (2.12)$$

$$\tilde{v} = V + v \quad (2.13)$$

$$\tilde{w} = W + w \quad (2.14)$$

$$\tilde{p} = P + p \quad (2.15)$$

και λαμβάνοντας τις μέσες χρονικές τιμές κάθε όρου της εξίσωσης προκύπτει η εξίσωση της ορμής για μέσες χρονικές τιμές.

Υπενθυμίζεται ότι η πυκνότητα  $\rho$ , το ιξώδες  $\mu$  και η συνιστώσα  $g_x$  της επιτάχυνσης της βαρύτητας θεωρούνται σταθερά μεγέθη. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τον επιμερισμό του Reynolds για κάθε όρο προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (U + u) = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.16\alpha)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (U + u)^2 = \frac{\partial U^2}{\partial x} + 2 \frac{\partial U \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial u^2}{\partial x} = \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial u^2}{\partial x} \quad (2.16\beta)$$

$$\frac{\partial \tilde{u} \cdot \tilde{v}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (U + u)(V + v) = \frac{\partial U \cdot V}{\partial y} + \frac{\partial U \cdot v}{\partial y} + \frac{\partial u \cdot V}{\partial y} + \frac{\partial u \cdot v}{\partial y} = \frac{\partial U \cdot V}{\partial y} + \frac{\partial u \cdot v}{\partial y} \quad (2.16\gamma)$$

$$\frac{\partial \tilde{u} \cdot \tilde{w}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (U + u)(W + w) = \frac{\partial U \cdot W}{\partial z} + \frac{\partial U \cdot w}{\partial z} + \frac{\partial u \cdot W}{\partial z} + \frac{\partial u \cdot w}{\partial z} = \frac{\partial U \cdot W}{\partial z} + \frac{\partial u \cdot w}{\partial z} \quad (2.16\delta)$$

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (P + p) = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.16\epsilon)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (2.16\sigma\tau)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις 2.16α ως 2.16στ στην Εξίσωση 2.11 προκύπτει :

$$\rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \left[ \frac{\partial}{\partial x} (-\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho uw) \right] \quad (2.17)$$

Η Εξίσωση 2.11 αποτελεί τη  $x$ -συνιστώσα της εξίσωσης της ορμής για μέσες χρονικές τιμές. Παρατηρούμε ότι οι όροι της Εξίσωσης 2.11 που περιέχουν τις μέσες τιμές των στοιχείων ταχύτητας και πίεσης είναι ίδιοι με τους αντίστοιχους όρους της Εξίσωσης 2.11. Οι επιπρόσθετοι όροι οφείλονται στην τυρβώδη ροή και περιγράφουν την επίδραση των διακυμάνσεων στη μέση ροή. Οι όροι αυτοί παριστάνουν τις κλίσεις των τυρβωδών τάσεων  $\bar{\tau}_{xx}^{(t)}$ ,  $\bar{\tau}_{xy}^{(t)}$  και  $\bar{\tau}_{xz}^{(t)}$  στις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$  αντίστοιχα. Έτσι το άθροισμα αυτών των όρων μπορεί να γραφεί ως :

$$\frac{\partial}{\partial x} (-\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho uw) = \frac{\partial \bar{\tau}_{xx}^{(t)}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}^{(t)}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xz}^{(t)}}{\partial z} = \nabla \cdot \bar{\tau}_x^{(t)} \quad (2.18)$$

όπου  $\bar{\tau}_x^{(t)}$  είναι η τυρβώδης τάσης που ασκείται στην επιφάνεια κάθετη στον άξονα  $x$  :

$$\bar{\tau}_x^{(t)} = \vec{i} \cdot \tau_{xx}^{(t)} + \vec{j} \cdot \tau_{xy}^{(t)} + \vec{k} \cdot \tau_{xz}^{(t)} \quad (2.19)$$

Με όμοιο τρόπο, οι όροι της μορφής  $\mu \nabla^2 U$  του δεύτερου μέλους της Εξίσωσης 2.11, παριστάνουν τις κλίσεις των ιξωδών τάσεων  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  που υπολογίζονται από το νόμο ιξώδους του Newton, θέτοντας αντί της στιγμιαίας, τη μέση χρονική ταχύτητα.

$$\mu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \frac{\partial \bar{\tau}_{xx}^{(l)}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}^{(l)}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xz}^{(l)}}{\partial z} = \nabla \cdot \bar{\tau}_x^{(l)} \quad (2.20)$$

όπου  $\bar{\tau}_x$  είναι η ιξώδης τάσης που ασκείται πάνω στην επιφάνεια την κάθετη στον άξονα x :

$$\bar{\tau}_x = \vec{i} \cdot \tau_{xx} + \vec{j} \cdot \tau_{xy} + \vec{k} \cdot \tau_{xz} \quad (2.21)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις 2.18 και 2.20 στην Εξίσωση 2.17 προκύπτει ότι :

$$\rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla U \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \nabla \cdot \bar{\tau}_x + \nabla \cdot \bar{\tau}_x^{(t)} \quad (2.22)$$

Αντίστοιχα, για τις y και z συνιστώσες της εξίσωσης της ορμής προκύπτει ότι :

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla V \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \nabla \cdot \bar{\tau}_y + \nabla \cdot \bar{\tau}_y^{(t)} \quad (2.23)$$

$$\rho \left( \frac{\partial W}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla W \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \nabla \cdot \bar{\tau}_z + \nabla \cdot \bar{\tau}_z^{(t)} \quad (2.24)$$

### 2.1.3 Το πρόβλημα του κλεισίματος

Η στιγμιαία εξίσωση της συνέχειας, Εξίσωση 2.1, καθώς και η εξίσωση της ορμής, Εξίσωση 2.8, σχηματίζουν ένα κλειστό σύστημα τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους  $\tilde{u}$ ,  $\tilde{v}$ ,  $\tilde{w}$  και  $\tilde{p}$ . Λαμβάνοντας τις μέσες τιμές των εξισώσεων δίνουμε έμφαση στις μέσες τιμές των διαφόρων μεγεθών. Παρόλα αυτά, σαν αποτέλεσμα έχουμε έξι επιπρόσθετους αγνώστους, τις τάσεις Reynolds. Η πολυπλοκότητα της τύρβης συνήθως αποκλείει τον σχηματισμό απλών εξισώσεων για τους επιπρόσθετους αυτούς όρους. Ο κύριος σκοπός της μοντελοποίησης της τύρβης είναι η παραγωγή υπολογιστικών διαδικασιών που να δίνουν επαρκή ακρίβεια και γενικότητα για την πρόβλεψη αυτών των τάσεων.

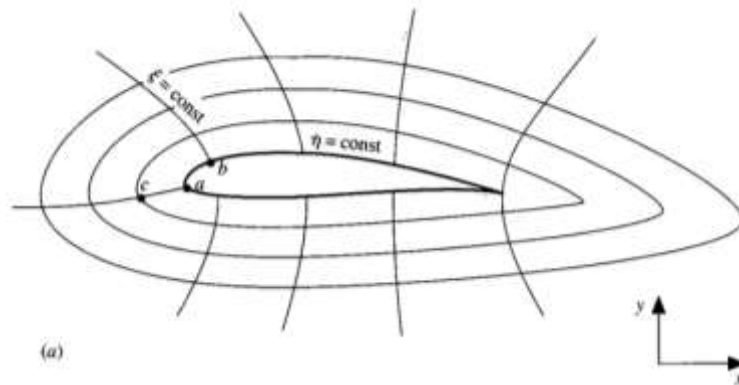
## 2.2 Εξισώσεις Ροής σε Καμπυλόγραμμες Συντεταγμένες

Η χρήση του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων δεν ενδείκνυται για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων στα πρακτικά προβλήματα της αεροδυναμικής. Το



καρτεσιανό πλέγμα δεν μπορεί να πιάσει την επιφάνεια της αεροτομής και συνεπώς δεν μπορούμε να λύσουμε με ακρίβεια. Με ένα καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί επακριβώς η γεωμετρία του φυσικού χωρίου επίλυσης και να έχουμε πολλά σημεία επίλυσης σε περιοχές όπου τα φαινόμενα είναι έντονα και οι αποκλίσεις των μεγεθών μεγάλες.

Για να λυθούν οι εξισώσεις της ροής του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων στο καμπυλόγραμμο, πρέπει να γίνουν κάποιοι μετασχηματισμοί. Στο δισδιάστατο (2D) καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων, θεωρούμε δύο οικογένειες καμπυλών:  $\xi=\xi(x,y)$  και  $\eta=\eta(x,y)$ . Κάθε σημείο  $(x,y)$  του αριθμητικού πλέγματος, προκύπτει από την τομή ενός μέλους της οικογένειας  $\xi$  και ενός μέλους της οικογένειας  $\eta$ . Ο χρόνος έχει την ίδια έννοια και στο φυσικό χωρίο  $x,y$  και στο υπολογιστικό  $\xi,\eta$ . Με το μετασχηματισμό, ο τυχαίος μορφής χώρος του επιπέδου  $x,y$  μετασχηματίζεται σε μοναδιαίο τετραγωνικό χώρο στο επίπεδο  $\xi,\eta$ . Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η αντιστοιχία των συστημάτων συντεταγμένων.



Σχήμα 6 Η αεροτομή σε δισδιάστατο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων

Ο μετασχηματισμός των εξισώσεων στο σύστημα συντεταγμένων  $(\xi, \eta)$  γίνεται με εφαρμογή του κανόνα της αλυσίδας για την παραγωγή. Για παράδειγμα: το  $\theta p / \theta x$  γράφεται

$$\frac{\theta p}{\theta x} = \frac{\theta p}{\theta \xi} \frac{\theta \xi}{\theta x} + \frac{\theta p}{\theta \eta} \frac{\theta \eta}{\theta x}. \text{ Έτσι γράφονται οι παράγωγοι όλων των μεγεθών.}$$

Τα μεγέθη  $\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \xi_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y}$  είναι οι  $\frac{\partial U_l}{\partial t} + \frac{\partial F_l}{\partial \xi} + \frac{\partial G_l}{\partial \eta} = 0$  μετρικές του

μετασχηματισμού και το:

$$J \equiv \frac{\partial(x,y)}{\partial(\xi,\eta)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{vmatrix} \quad (2.25)$$

Είναι η ιακωβιανή ορίζουσα του μετασχηματισμού.

Από την αριθμητική επίλυση (πεπερασμένες διαφορές) στο υπολογιστικό πεδίο  $(\xi, \eta)$  υπολογίζονται τα  $x_\xi, x_\eta, y_\xi, y_\eta$  ενώ οι μετρικές υπολογίζονται από την ιακωβιανή ως εξής:

$$\xi_x = \frac{y_\eta}{J}, \xi_y = -\frac{x_\eta}{J}, \eta_x = -\frac{y_\xi}{J}, \eta_y = \frac{x_\xi}{J}$$

Μετά από αρκετές πράξεις η εξίσωση μετασχηματίζεται στην παρακάτω, η οποία λύνεται στο υπολογιστικό πεδίο:

$$\frac{\partial U_l}{\partial t} + \frac{\partial F_l}{\partial \xi} + \frac{\partial G_l}{\partial \eta} = 0 \quad (2.26)$$

$$\text{Όπου } -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_i \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k$$

$$U_l = JU \quad F_l = JF \frac{\partial \xi}{\partial x} + JG \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad G_l = JF \frac{\partial \eta}{\partial x} + JG \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

### 2.3 Επίδραση Τύρβης Αέρα

Τα οριακά στρώματα που αναπτύσσονται στις πτέρυγες και στις ατράκτους αεροσκαφών εμφανίζουν κατά μεγάλο ποσοστό τυρβώδη ροή. Η τυρβώδης συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση τυχαίων διαταραχών. Οι διαταραχές αυτές, οι οποίες χαρακτηρίζουν την τυρβώδη συμπεριφορά, υπερτίθενται στη βασική ροή και οδηγούν σε ένα πολύπλοκο ροϊκό φαινόμενο, το οποίο φαίνεται ότι είναι απρόσιτο σε κάθε ακριβή μαθηματική διατύπωση. Το αποτέλεσμα των διαταραχών μοιάζει να είναι ισοδύναμο με το πεδίο ροής που θα είχαμε αν η συνεκτικότητα αυξάνονταν κατά μερικές τάξεις μεγέθους. Στο εσωτερικό της ροής, οι διαφορές ταχυτήτων ή θερμοκρασιών εξομαλύνονται και κοντά στα στερεά τοιχώματα παρατηρείται αυξημένη συναλλαγή θερμότητας σε σχέση με τη στρωτή ροή. Η ίδια αύξηση παρατηρείται και στον συντελεστή διάτμησης, ενώ η κινητική ενέργεια μέσα στα τυρβώδη οριακά στρώματα είναι επίσης αυξημένη. Κατά συνέπεια, ένα τυρβώδες οριακό στρώμα αποκολλάται σε μεγαλύτερες κλίσεις πίεσης σε σχέση με ένα στρωτό οριακό στρώμα.

Οι τυρβώδεις ροές είναι, με την ακριβή έννοια του όρου, μη προβλέψιμες. Έχει αποδειχθεί ότι έστω κι αν μπορούσαμε να λύσουμε με ακρίβεια τις εξισώσεις Navier-

Stokes, ένα μικρό λάθος ή η εισαγωγή μιας μικρής διαταραχής, σε τυχαίο σημείο της ροής, θα επιδρούσε εντός κάποιου χρονικού διαστήματος, στο σύνολο του πεδίου ροής. Αυτό δείχνει ότι η προσπάθεια πρόγνωσης του πεδίου ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου είναι μάταιη. Έτσι ενδιαφερόμαστε, αντί των στιγμιαίων μεγεθών του πεδίου ροής, για τα μέσα χρονικά μεγέθη αυτής, τα οποία δεν είναι ευαίσθητα στη λεπτομερή συμπεριφορά της τύρβης.

Η διαδικασία για να πάρουμε τις χρονικά μέσες εξισώσεις Navier- Stokes συνίσταται στην θεώρηση ότι το μέγεθος της ροής  $f$  γράφεται ως εξής:  $f = \bar{f} + f'$ , δηλαδή ισούται με το άθροισμα της μέσης τιμής του μεγέθους  $f$  και της διαταραχής  $f'$ . Έχοντας μη μόνιμη, ασυμπίεστη ροή ξεκινάμε με την εξίσωση της συνέχειας για να εξάγουμε τις νέα χρονικά μέση εξίσωση:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v} + v')}{\partial y} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (2.27)$$

Με τον ίδιο τρόπο αλλά και με περισσότερες πράξεις καταλήγουμε και στις χρονικά μέσες εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστο ρευστό.

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u} \bar{u} + \rho \overline{u' u'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{u} \bar{v} + \rho \overline{u' v'}) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\tau}_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (2.28)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{v} \bar{u} + \rho \overline{v' u'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v} \bar{v} + \rho \overline{v' v'}) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\tau}_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (2.29)$$

Οι όροι  $\overline{\rho u_i u_j}$  λέγονται τάσεις Reynolds και είναι οι όροι που πρέπει να μοντελοποιηθούν για να μπορούν να λυθούν οι εξισώσεις της ροής. Οι όροι που περιέχουν τις τάσεις Reynolds, και εμφανίζονται κατά την παραγωγή των μέσων χρονικά εξισώσεων Navier-Stokes, συνοψίζουν τους ρυθμούς μεταφοράς ορμής μέσω της τύρβης, σε πλήρη αναλογία με τους συνεκτικούς όρους της εξίσωσης που εκφράζουν τους ρυθμούς μεταφοράς από τη μοριακή κίνηση. Αυτό που μπορεί να γίνει κατά το πρότυπο των στρωτών ροών όπου ο τανυστής των τάσεων συνδέεται με τον τανυστή των παραμορφώσεων μέσω ενός συντελεστή συνεκτικότητας  $\mu$ . Έτσι, στις τυρβώδεις ροές, είναι βολικό να εισαχθεί μια νέα ποσότητα που θα λέγεται τυρβώδης συνεκτικότητα (eddy viscosity) και θα εκφράζει το λόγο μιας δεδομένης τάσης Reynolds προς εκείνο το ρυθμό

παραμόρφωσης, ο οποίος θα προκαλούσε τον ίδιο «τύπο» τάσης στην περίπτωση της στρωτής ροής.

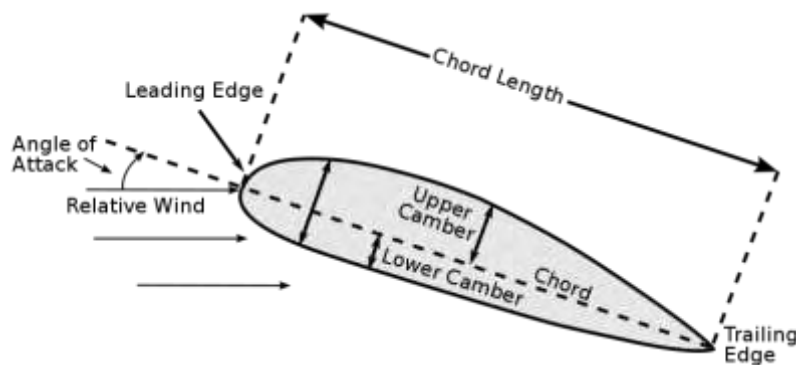
Ο Boussinesq πρότεινε την παραπάνω έννοια και η μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds γίνεται ως εξής:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (2.30)$$

Όπου  $k = 0.5(\overline{u'u'} + \overline{v'v'})$  η τυρβώδης κινητική ενέργεια.

## 2.4 Χαρακτηριστικά Αεροτομών

Η αεροτομή ετυμολογικά προέρχεται από τις λέξεις αέρας και τομή. Ανάλογα με την χρήση της, απαιτείται ειδικός σχεδιασμός της μορφής της. Αποτελεί ουσιαστικά την κάθετη τομή μιας πτέρυγας ή ενός πτερυγίου και διαγράφεται από τις θέσεις των σημείων της επιφάνειας της. Τα βασικά της χαρακτηριστικά φαίνονται στο Σχήμα 7:



Σχήμα 7: Τυπική μορφή αεροτομής

Τα σημαντικότερα μεγέθη που αφορούν μια αεροτομή και θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία είναι:

- Χορδή ονομάζεται η ευθεία γραμμή που ενώνει τα άκρα της γραμμής camber.
- Γραμμή camber είναι η γραμμή εκείνη από το χείλος εκφυγής (Χ.Ε.) της και διέρχεται από σημεία τα οποία είναι κέντρα κύκλων που εφάπτονται εσωτερικά στην επάνω και κάτω πλευρά της αεροτομής.
- Πάχος αεροτομής είναι η διάμετρος του μεγαλύτερου κύκλου που αναφέρθηκε στην περιγραφή της γραμμής camber
- Ροπή πρόνευσης είναι η ροπή που αναπτύσσεται, λόγω της παραγόμενης αεροδύναμης, στην αεροτομή ως προς τον εγκάρσιο σε αυτή άξονα

- Αεροδυναμικό κέντρο ονομάζεται το σημείο της αεροτομής στο οποίο η ροπή πρόνευσης είναι ανεξάρτητη από την άντωση και την γωνία προσβολής.
- Κέντρο πίεσης ονομάζεται το σημείο της αεροτομής όπου η ροπή πρόνευσης είναι μηδενική.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η αεροτομή NACA 4418, η οποία ανήκει σε μια ομάδα αεροτομών που αναπτύχθηκαν από την National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). Το σχήμα τους προσδιορίζεται από μια σειρά ψηφίων που ακολουθούν την λέξη NACA. Τα ψηφία αυτά σημαίνουν κάποιες ιδιότητες της αεροτομής:

- Το πρώτο ψηφίο δείχνει την τιμή της μέγιστης αδιάστατης (διαιρούμενη με το μήκος της χορδής της αεροτομής) απόστασης της γραμμής camber από την χορδή.
- Το δεύτερο ψηφίο δείχνει την αδιάστατη απόσταση σε δέκατα του ποσοστού της χορδής από το Χ.Π., όπου παρουσιάζεται η μέγιστη απόκλιση της γραμμής camber.
- Τα δύο τελευταία ψηφία δείχνουν την μέγιστη τιμή του πάχους της αεροτομής.

Οι συντεταγμένες των σημείων κάθε κυρτής αεροτομής προκύπτουν από την κατανομή του πάχους κάθετα κατά μήκος της μέσης γραμμής. Η τετμημένη, η τεταγμένη, και η τοπική κλίση της μέσης γραμμής συμβολίζονται με  $x_c, y_c, \tan\theta$  αντίστοιχα. Αν  $(x_u, y_u)$  είναι οι συντεταγμένες ενός τυχαίου σημείου στη ράχη της αεροτομής και  $y_t$  είναι η κάθετη απόσταση από το σημείο στην μέση γραμμή.

$$x_u = x - y_t \sin\theta \quad \text{και} \quad y_u = y_c + y_t \cos\theta$$

Ομοίως για τις συντεταγμένες της κάτω επιφάνειας

$$x_l = x + y_t \sin\theta \quad \text{και} \quad y_l = y_c - y_t \cos\theta$$

Η κατανομή του πάχους δίνεται από την εξίσωση:

$$\pm y_t = \frac{t}{0,20} (0,2969\sqrt{x} - 0,126x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4) \quad (2.31)$$

Όπου  $t$  είναι το μέγιστο πάχος της αεροτομής αδιαστατοποιημένο με την χορδή

Η ακτίνα του κύκλου στο χείλος προσβολής δίνεται από  $r_t = 1,019t^2$

Η μέση γραμμή δίνεται αναλυτικά σαν δύο παραβολικά τόξα εφαπτόμενα σε σημείο του οποίου η απόσταση από τη χορδή είναι ίση με την μέγιστη απόσταση της μέσης γραμμής από τη χορδή και περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$y_c = \frac{m}{p^2} (2px - x^2) \quad (2.32)$$

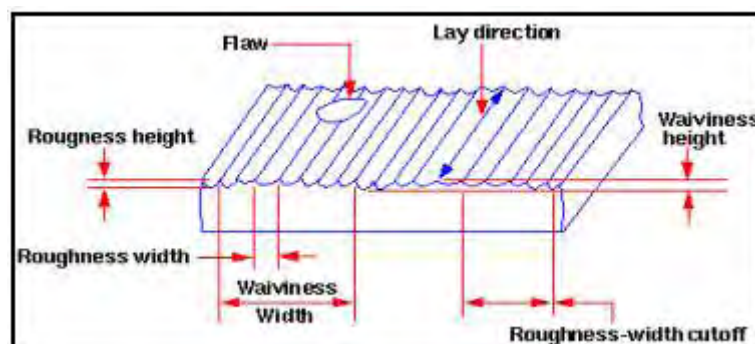
$$y_c = \frac{m}{(1-p)^2} [(1-2p) + 2px - x^2] \text{ για το υπόλοιπο τμήμα} \quad (2.33)$$

Όπου  $m$  είναι η μέγιστη απόσταση της μέσης γραμμής από τη χορδή αδιαστατοποιημένη με την χορδή και  $p$  είναι προβολή στη χορδή του σημείου με τη μέγιστη τεταγμένη.

## 2.5 Επίδραση Επιφανειακής Τραχύτητας της Αεροτομής

Η ποιότητα της επιφάνειας των στερεών σωμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια της μηχανουργικής κατεργασίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της, ενώ είναι συνδεδεμένη με τις τελικές διαστάσεις του σώματος. Κάθε εργαλείο κοπής αφήνει το δικό του ίχνος, το οποίο το χαρακτηρίζει, επάνω στην επιφάνεια που δημιουργήσε. Αυτό το τελικό ίχνος είναι που ονομάζεται τραχύτητα επιφάνειας και ποσοτικοποιείται μέσω ενός μέτρου των αποκλίσεων της πραγματικής επιφάνειας από την ιδανική. Όσο πιο μεγάλες είναι αυτές οι αποκλίσεις, τόσο πιο τραχεία είναι η επιφάνεια.

Η τραχύτητα παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο το σώμα θα αντιδράσει με το περιβάλλον του, δηλαδή με την ροή του ρευστού. Επίσης στην αεροναυτική η τραχύτητα της επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο αφού οι πτέρυγες του αεροσκάφους είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με συγκεκριμένες τραχύτητες και οποιαδήποτε αλλαγή λόγω καιρικών φαινομένων (π.χ. πάγου) επιδρά σημαντικά στην συμπεριφορά των πτερύγων του αεροσκάφους. Παρακάτω δίνεται μια χαρακτηριστική εικόνα σε κοντινή απόσταση από μια κατεργασμένη επιφάνεια η οποία έχει την μορφή της εικόνας:



Σχήμα 8: Χαρακτηριστικά τραχύτητας σε κατεργασμένη επιφάνεια

Παραθέτουμε τις επεξηγήσεις των εννοιών που παρουσιάζονται στην εικόνα:

- Lay direction: διεύθυνση κοπής.
- Roughness height: ύψος τραχύτητας  $R_t$ .
- Roughness width: πλάτος τραχύτητας, απόσταση μεταξύ γειτονικών κορυφών.

- Waviness-width cutoff: το μεγαλύτερο πλάτος αντιπροσωπευτικού δείγματος αποκλίσεων της επιφάνειας, που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ύψους της τραχύτητας.
- Waviness-width: πλάτος περιοχής μεταξύ διαδοχικών cutoff περιοχών που οφείλεται σε μετατοπίσεις ή ταλαντώσεις του εργαλείου κοπής.
- Waviness-height: υψομετρική διαφορά δύο waviness cutoff περιοχών.

Η τιμή της τραχύτητας ορίζεται από διάφορα μεγέθη, αλλά το πιο διαδεδομένο είναι το  $R_a$  (μέση τιμή της απόκλισης της πραγματικής επιφάνειας από την ιδανική).

Με δεδομένο ότι οι παραπάνω παράμετροι μειώνουν το σύνολο των πληροφοριών ενός προφίλ σε έναν αριθμό, χρειάζεται προσοχή κατά την εφαρμογή τους. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι σχέσεις υπολογισμού των παραμέτρων της τραχύτητας.

Στην πειραματική μας μελέτη και τον κώδικα CAFFA χρησιμοποιήθηκαν τιμές τραχύτητας 0, 100, 200  $\mu\text{m}$  με χρήση γυαλόχαρτου (sandpaper) καθορισμένης τραχύτητας. Σημειώνουμε εδώ ότι όπως και στην πειραματική μελέτη, έτσι και στο υπολογιστικό κώδικα η τραχύτητα 0  $\mu\text{m}$  είναι μόνο μια παραδοχή, αφού στην πραγματικότητα πάντα υπάρχει μια τραχύτητα επιφανείας. Επίσης, και στον κώδικα CAFFA δεν ορίζεται μηδενική τραχύτητα.

**Πίνακας 1: Παράμετροι υπολογισμού τραχύτητας**

Parameter	Description	Formula
$R_a$	arithmetic average of absolute values	$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i $
$R_g$	root mean squared	$R_g = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$
$R_v$	maximum valley depth	$R_v = \min y_i$
$R_p$	maximum peak height	$R_p = \max y_i$
$R_t$	Maximum Height of the Profile	$R_t = R_p - R_v$
$R_{sk}$	skewness	$R_{sk} = \frac{1}{nR_g^3} \sum_{i=1}^n y_i^3$

## 2.6 Δυνάμεις Άντωσης και Οπισθέλκουσας

Κάθε σώμα που είναι βυθισμένο σε κινούμενο ρευστό υφίσταται την επίδραση δυνάμεων πίεσης και ιξώδους. Οι δυνάμεις αυτές ενεργούν στην επιφάνεια του σώματος και προέρχονται από τη δυναμική δράση του ρευστού. Η συνισταμένη των δυνάμεων πίεσης και ιξώδους που ενεργεί παράλληλα στη διεύθυνση της κύριας ροής ονομάζεται οπισθέλκουσα δύναμη,  $F_D$ . Η άλλη συνισταμένη που ενεργεί κάθετα στη διεύθυνση της κύριας ροής ονομάζεται δύναμη άντωσης,  $F_L$ .

Για την εξαγωγή των εξισώσεων υπολογισμού των δυνάμεων  $F_D$  και  $F_L$ , θεωρούμε δισδιάστατη πτέρυγα που είναι βυθισμένη σε ρευστό που κινείται με ομοιόμορφη ταχύτητα  $U_{\text{άπειρο}}$ . Το ρευστό καθώς κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του πτερυγίου, επιταχύνεται στη ράχη της πτέρυγας, ιδιαίτερα κοντά στο χείλος προσβολής και επιβραδύνεται στην κοιλιά αυτής. Η διαφορά αυτήν στην ταχύτητα, από την εξίσωση του Bernoulli σημαίνει υπερπίεση στην κοιλιά και υποπίεση στην ράχη σε σχέση πάντα με την πίεση της αδιατάρακτης ελεύθερης ροής.

Οι δυνάμεις άντωσης και οπισθέλκουσας δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} F_D &= \iint_A p \cos \theta dA + \iint_A t_w \sin \theta dA \\ F_L &= \iint_A p \sin \theta dA + \iint_A t_w \cos \theta dA \end{aligned} \quad (2.34 \text{ \& } 2.35)$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, για τον υπολογισμό της οπισθέλκουσας και άντωσης απαιτείται η μέτρηση τόσο της κατανομής της πίεσης στην επιφάνεια της αεροτομής, αλλά και η μέτρηση των διατμητικών τάσεων,  $t_w$ . Οι διατμητικές τάσεις εξαρτώνται από το σχήμα και τον προσανατολισμό της πτέρυγας. Στην περίπτωση μηδενικής γωνίας προσβολής  $\alpha=0^\circ$ , η διατμητική τάση συνεισφέρει κυρίως στην οπισθέλκουσα δύναμη  $F_D$ , ενώ η συνεισφορά της στην δύναμη άντωσης  $F_L$  είναι μικρή έως αμελητέα.

Οι αδιάστατοι συντελεστές άντωσης  $c_L$  και οπισθέλκουσας  $c_D$ , ανά μονάδα ανοίγματος της πτέρυγας, δίνονται από τις σχέσεις:

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 c} \quad (2.36) \quad \text{και} \quad c_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 H} \quad (2.37)$$



όπου  $c$  το μήκος της χορδής της πτέρυγας και  $H$  η μετωπική επιφάνεια της πτέρυγας ανά μονάδα μήκους.

Μετά την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την ροή, γίνεται ο υπολογισμός της συνολικής δύναμης οπισθελκούσης και άντωσης, οι οποίες ασκούνται στην αεροτομή.

Ο αδιάστατος συντελεστής άντωσης  $C_L$  ανά μονάδα ανοίγματος υπολογίζεται από την κατανομή πίεσης στην επιφάνεια της πτέρυγας ως ακολούθως:

$$F_l = \iint p \cos \theta dA = \int_0^c p dx = \int_0^c (p_l - p_u) dx \quad (2.38)$$

$$F_l = \int_0^c (p_l - p_u) - (p_u - p_\infty) dx \quad (2.39)$$

$$C_L = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c} \Rightarrow$$

$$C_L = \int_0^c \frac{(p_l - p_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c} - \frac{(p_u - p_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c} \frac{dx}{c} \Rightarrow$$

$$C_L = \int_0^c (Cp_l - Cp_u) \frac{dx}{c} \quad (2.40)$$

## 2.7 Συντελεστής Πίεσης

Ο συντελεστής πίεσης είναι ένας αδιάστατος αριθμός που περιγράφει τη σχετική πίεση καθ' όλη την έκταση του πεδίου ροής. Ο συντελεστής πίεσης χρησιμοποιείται τόσο στην αεροδυναμική, όσο και στην υδροδυναμική. Κάθε σημείο της ροής ενός ρευστού έχει τον δικό του μοναδικό συντελεστή πίεσης. Ο συντελεστής πίεσης υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$Cp = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (2.41)$$

Όπου  $p$  είναι η πίεση στο σημείο υπολογισμού του συντελεστή πίεσης,  $p_\infty$  είναι η πίεση σε σημείο όπου δεν επηρεάζεται από την αεροτομή,  $\rho_\infty$  η πυκνότητα του ρευστού μακριά από την αεροτομή και  $V_\infty$  η ταχύτητα του ρευστού μακριά από την αεροτομή.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Bernoulli, ο συντελεστής πίεσης μπορεί να απλοποιηθεί περεταίρω για μια ασυμπίεστη, χωρίς απώλειες και μόνιμη ροή. Η σχέση που θα υπολογίζει τον συντελεστή πίεσης σε αυτή την περίπτωση θα είναι:

$$C_p = 1 - \left( \frac{V}{V_\infty} \right)^2 \quad (2.42)$$

Η παραπάνω σχέση είναι ωστόσο σωστή και για συμπιεστά ρευστά, όταν όμως η μεταβολές της ταχύτητας και πίεσης είναι αρκετά μικρές και η μεταβολή της πυκνότητας μπορεί να αγνοηθεί. Αυτό ισχύει όταν ο αριθμός Mach είναι μικρότερος του 0.3.

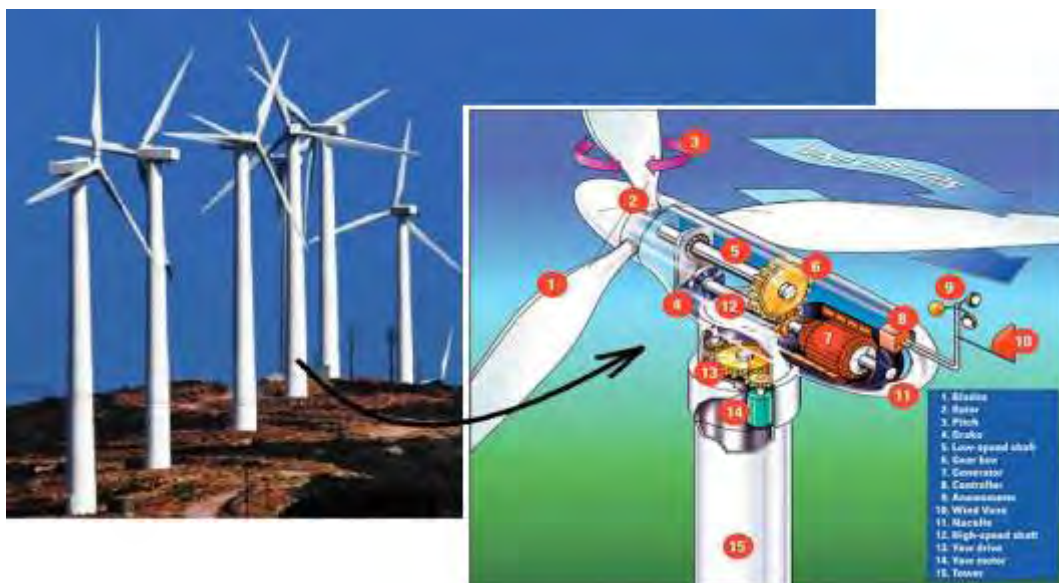
Για συμπιεστές ροές, δηλ. συμπίεσιμα ρευστά όπως ο αέρας σε υψηλές ταχύτητες, ο συντελεστής πίεσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_p = \frac{2}{\gamma M_\infty^2} \left( \frac{p}{p_\infty} - 1 \right) \quad (2.43)$$

Όπου  $M_\infty$  ο αριθμός Mach σε σημείο της ροής που δεν επηρεάζεται από την αεροτομή.

## 2.8 Εφαρμογές Αεροτομών

Οι εφαρμογές των αεροτομών είναι ποικίλες. Μπορεί να αποτελέσουν την γενέτειρα μιας πτέρυγας ή ενός περυγίου. Επίσης υπάρχει περίπτωση να χρησιμοποιηθούν συνδυασμοί δύο ειδών αεροτομών π.χ. στην κατασκευή πτέρυγας αεροσκάφους. Γνώμονας είναι η αποδοτικότερη μετατροπή της κινητικής ενέργειας της προσπίπτουσας ροής σε έργο μιας δύναμης επί της πτέρυγας, και το αντίστροφο.



Σχήμα 9: Ανεμοκινητήρες και η τυπική διάταξή τους

Διάφορες εφαρμογές αεροτομών είναι:

- Στην αεροπορική βιομηχανία, όπου οι αεροτομές έχουν εφαρμογή στις πτέρυγες καθώς και σε όλες τις επιφάνειες με τις οποίες επιτυγχάνεται ο έλεγχος κίνησης των αεροσκαφών.
- Σε βιομηχανικές μονάδες παραγωγής μεγάλης ισχύος, όπου μετατρέπεται η κινητική ενέργεια καυσαερίων σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση διαφόρων στροβίλων
- Σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλ. ανεμοκινητήρες, όπου τα πτερύγια του ανεμοκινητήρα κατάλληλα διαμορφωμένα εκμεταλλεύονται την κίνηση του αέρα, ώστε να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.
- Στην ναυτιλιακή βιομηχανία για κατασκευή θαλασσίων κινητήρων
- Σε πολλές άλλες ενεργειακές εφαρμογές

Με την έρευνα για βελτιστοποίηση της ροής γύρω από αεροτομές ανοίγουμε το δρόμο για τις τεχνολογικές εξελίξεις του μέλλοντος.

## **2.9 Κώδικας Υπολογιστικής Αεροδυναμικής CAFFA**

Ο υπολογιστικός κώδικας CAFFA που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία λύνει δισδιάστατα πεδία ροής, χρησιμοποιεί δομημένο πλέγμα, collocated αποθήκευση και καμπυλόγραμμο μη-ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, και είναι διαθέσιμος στο Διαδίκτυο. Ο κώδικας τροποποιήθηκε κατάλληλα στο εργαστήριο P&Σ του ΠΘ. Ο CAFFA διακρίνει τις εξισώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων και με τα σχήματα διακριτοποίησης: Απλή ανάντη παρεμβολή, Μέθοδος κεντρικής διαφοράς, Μίξη των δύο μεθόδων, Υβριδική ανάντη παρεμβολή, Παρεμβολή Quick και Παρεμβολή με σχήματα TVD.

Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο SIMPLEC, και επιλύει το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων με τη μέθοδο SIP. Μπορεί να επιλύσει ιξώδη, ασυμπίεστη ροή, και περιέχει τα ακόλουθα μοντέλα προσομοίωσης τύρβης:

- Standard k-ε, high Re με εξισώσεις απόσβεσης
- K-ε, low Re με ολοκλήρωση ως τον τοίχο
- RNG μοντέλο και τροποποιήσεις του
- k-ω, high Re με εξισώσεις απόσβεσης
- k-ω, high Re με ολοκλήρωση ως τον τοίχο
- k-ω, low Re με ολοκλήρωση ως τον τοίχο

Διαθέτει τη δυνατότητα υπολογισμού μη-μόνιμων ροών καθώς και χρησιμοποίησης των αποτελεσμάτων μιας προηγούμενης προσομοίωσης, ως αρχικών τιμών του πεδίου μιας νέας προσομοίωσης. Ο κώδικας χρησιμοποιεί ως είσοδο τα αρχεία που προκύπτουν από την γεννήτρια πλέγματος Rizzsim, καθώς και ένα επιπλέον αρχείο στο οποίο ορίζονται: Οι μεταβλητές που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα διαχειριστεί τα αρχεία εισόδου και εξόδου καθώς και τα σημεία του πλέγματος που θα χρησιμοποιήσει ως σημεία ελέγχου.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τη μελέτη του προβλήματος που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, διαμορφώθηκε μια πειραματική διάταξη τα κύρια μέρη της οποίας είναι α) η πτέρυγα, β) η αεροσήραγγα του Εργ. Ρ&Σ, γ) οι συνδυασμοί των πλεγμάτων, δ) οι συνδυασμοί των επιφανειών διαφορετικών τραχυτήτων, και ε) το σύστημα μικρομανόμετρου-σωλήνα Pitot-οπών στατικής πίεσης. Στη συνέχεια, θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σε κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία και περιγραφή των αρχών λειτουργίας τους.

#### 3.1 Αεροτομή NACA 4418

Η αεροτομή που χρησιμοποιήθηκε, Σχήματα 10 και 11, είναι τύπου NACA 4418 ανοίγματος 490mm, μήκους 220mm και μέγιστου πάχους 40mm. Το μήκος της χορδής επελέγη έτσι ώστε σε μια μέγιστη γωνία προσβολής  $18^\circ$  το εμπόδιο που δημιουργεί στη ροή να είναι μικρότερο του 10% της διατομής του τμήματος δοκιμών της αεροσήραγγας.



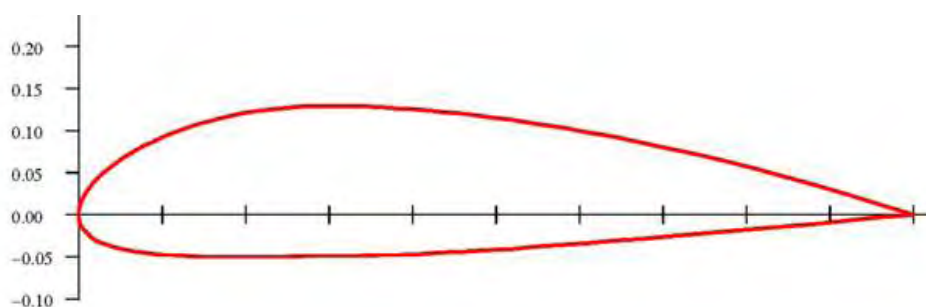
Σχήμα 10 Η αεροτομή μέσα στο τμήμα δοκιμών της αεροσήραγγας



Σχήμα 11 Θέσεις των οπών στατικής πίεσης στο μέσον της αεροτομής

Η πτέρυγα είναι κατασκευασμένη (Παπαδόπουλος, 2002) από ξύλο Balsa και στο μέσο του ανοίγματος όπου βρίσκονται οι οπές πίεσης από εποξική ρητίνη για τη στήριξη των σωλήνων που οδηγούν στις οπές στατικής πίεσης. Η επιφάνεια της αεροτομής καλύπτεται από λεπτό φύλλο πλαστικού που καθιστά την επιφάνεια σχετικά λεία. Για πιο στερεή κατασκευή, στο  $\frac{1}{4}$  της χορδής και καθ' όλο το μήκος της πτέρυγας υπάρχει σωλήνας αλουμινίου τετραγωνικής διατομής που καθιστά την πτέρυγα στιβαρή και χρησιμεύει για την στήριξη στα πλαϊνά τοιχώματα της αεροσήραγγας και για την οδήγηση των σωλήνων πίεσης από το εσωτερικό του μοντέλου στο μανόμετρο. Το Σχήμα 12 δείχνει την αεροτομή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η οποία έχει τα εξής κύρια χαρακτηριστικά:

- Πάχος 18%                      Γωνία χείλους εκφυγής  $21,5^\circ$                       Γωνία stall  $2.0^\circ$
- Camber 4%                      Ακτίνα χείλους προσβολής 3,6%                      Γωνία μέγιστου L/D  $6,5^\circ$
- Μέγιστο  $C_L$  1,797                      Κατώτερη επιπεδότητα 27,8%                      Μέγιστο L/D 44,447
- Γωνία μέγιστου  $C_L$  15                      Γωνία μηδενικής άντωσης  $-4.0^\circ$                       Μέγιστο L/D  $C_L$  1.209



Σχήμα 12 Σχηματική παράσταση αεροτομής στο δισδιάστατο επίπεδο x-y

Ο Πίνακας 2 περιέχει τις συντεταγμένες των σημείων της αεροτομής NACA 4418.

Πίνακας 2: Συντεταγμένες των σημείων της αεροτομής NACA 4418

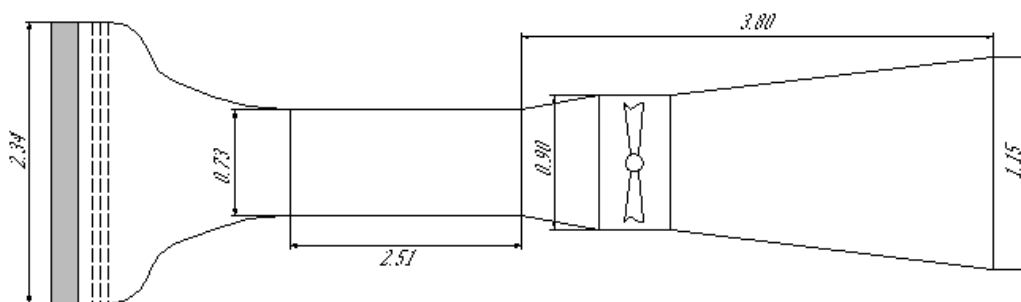
X	Y	X	Y	X	Y
1	0	0,204113594	0,117780286	0,23292429	-0,05509669
0,987159557	-0,00098638	0,21707571	0,11978419	0,220886406	-0,055358411
0,974338574	-0,001969376	0,230061702	0,121556048	0,208820687	-0,055533931
0,961536621	-0,002949878	0,243067958	0,123105137	0,196722763	-0,055611465
0,948753288	-0,003928724	0,256091169	0,124439788	0,184587773	-0,055577531
0,935988181	-0,00490669	0,269128282	0,125567544	0,17241026	-0,05541652
0,923240919	-0,005884497	0,282176477	0,126495273	0,160184031	-0,05511012
0,910511137	-0,006862806	0,295233133	0,127229269	0,147901962	-0,05463651
0,897798485	-0,007842221	0,30829581	0,127775324	0,135555731	-0,053969223
0,885102623	-0,008823283	0,321362232	0,128138798	0,123135425	-0,053075468
0,872423226	-0,009806478	0,33443027	0,128324667	0,110628956	-0,051913592
0,859759979	-0,010792228	0,347497928	0,12833757	0,098021137	-0,050429045

0,847112579	-0,011780894	0,360563332	0,128181843	0,085292167	-0,048547618
0,834480731	-0,012772777	0,373624722	0,127861551	0,072414908	-0,046163299
0,821864152	-0,013768114	0,386680441	0,127380517	0,059349668	-0,043114358
0,809262564	-0,01476708	0,39972893	0,126742339	0,046032532	-0,039129699
0,796675699	-0,015769787	0,41261943	0,125972452	0,032343997	-0,033682138
0,784103295	-0,01677628	0,425354863	0,125097759	0,017987536	-0,025412263
0,771545096	-0,017786541	0,438085263	0,124121551	0,007012464	0,030334138
0,75900085	-0,018800485	0,450810098	0,123046609	0,017656003	0,043369638
0,74647031	-0,019817961	0,46352887	0,121875551	0,02896747	0,053426574
0,733953233	-0,020838749	0,476241103	0,120610843	0,040650334	0,061864359
0,721449377	-0,021862559	0,488946349	0,11925481	0,052585092	0,069210174
0,708958502	-0,022889035	0,501644182	0,117809642	0,064707839	0,075735119
0,696480369	-0,023917746	0,514334197	0,116277402	0,076978861	0,081600919
0,68401474	-0,02494819	0,527016009	0,114660034	0,653309548	0,094154905
0,671561373	-0,025979793	0,539689252	0,112959363	0,665879975	0,091699403
0,659120025	-0,027011903	0,552353574	0,111177108	0,678438627	0,089174237
0,646690452	-0,028043794	0,565008643	0,109314879	0,69098526	0,086580135
0,634272403	-0,02907466	0,577654136	0,107374186	0,703519631	0,083917746
0,621865623	-0,030103617	0,590289747	0,105356442	0,716041498	0,081187646
0,609469851	-0,031129698	0,60291518	0,103262963	0,728550623	0,078390337
0,59708482	-0,032151852	0,615530149	0,101094976	0,741046767	0,075526249
0,584710253	-0,033168942	0,628134377	0,098853617	0,75352969	0,072595739
0,572345864	-0,034179742	0,640727597	0,096539938	0,76599915	0,069599096
0,559991357	-0,035182935	0,449189902	-0,043602165	0,778454904	0,066536541
0,547646426	-0,036177108	0,436914737	-0,044434051	0,790896705	0,063408224
0,535310748	-0,037160752	0,424645137	-0,045236647	0,803324301	0,060214231
0,522983991	-0,038132256	0,41238057	-0,046007174	0,815737436	0,05695458
0,510665803	-0,039089902	0,40027107	-0,046742339	0,828135848	0,053629225
0,498355818	-0,040031864	0,388319559	-0,047458642	0,840519269	0,050238054
0,486053651	-0,040956199	0,376375278	-0,048174051	0,852887421	0,046780894
0,473758897	-0,041860843	0,364436668	-0,048884968	0,865240021	0,043257505
0,46147113	-0,042743607	0,352502072	-0,04958757	0,877576774	0,039667589
0,089371044	0,086913592	0,34056973	-0,050277792	0,889897377	0,036010783
0,101864575	0,091747343	0,328637768	-0,050951298	0,902201515	0,032286665
0,114444269	0,096156723	0,31670419	-0,051603449	0,914488863	0,028494751
0,127098038	0,100183385	0,304766867	-0,052229269	0,926759081	0,024634497
0,139815969	0,10386012	0,292823523	-0,052823398	0,939011819	0,020705301
0,15258974	0,107213395	0,280871718	-0,053380044	0,951246712	0,016706502
0,165412227	0,110265031	0,268908831	-0,053892913	0,963463379	0,012637378
0,178277237	0,11303334	0,256932042	-0,054355137	0,975661426	0,008497153
0,191179313	0,115533931	0,244938298	-0,054759173	0,987840443	0,004284991

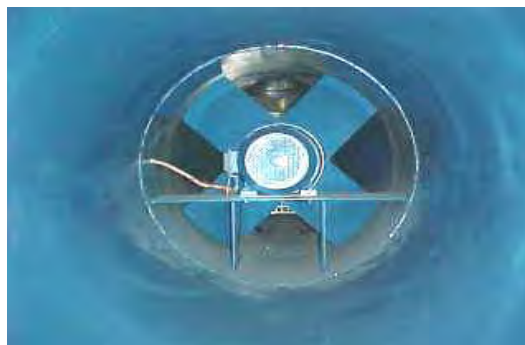
### 3.2 Αεροσήραγγα και Διάταξη Ροής

Η αεροσήραγγα αυτή είναι ανοικτού κυκλώματος τύπου αναρρόφησης της οποίας ο θάλαμος δοκιμών έχει διαστάσεις 2.51mx0.52mx0.73m. Οι διαστάσεις του συλλέκτη καθώς και του διαχυτή φαίνονται στο Σχήμα 13. Ανάμεσα στο τμήμα μετρήσεων και το διαχυτή είναι τοποθετημένος ο κινητήρας της αεροσήραγγας, ισχύος 7.5kW, με την πτερωτή. Αναλυτικότερα, ο αέρας εισέρχεται στον θάλαμο μέσω κατάλληλα διαμορφωμένης εισόδου, όπου έχουν τοποθετηθεί πλέγμα κυψελίδων (Honeycomb) διαστάσεων 8x70mm και τρεις σειρές από πλέγματα συρμάτινα, με σκοπό την επίτευξη της ομοιομορφίας και την ελάττωση της έντασης της τύρβης του αέρα στο θάλαμο δοκιμών.

Τα τοιχώματα και η βάση του θαλάμου δοκιμών είναι κατασκευασμένα από plexiglass πάχους 20mm που επιτρέπει την οπτικοποίηση (visualization) της ροής και τον έλεγχο της σταθερότητας της αεροτομής. Το πάνω τοίχωμα του τμήματος δοκιμών είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να επιτρέπει την εισαγωγή σωλήνα Pitot για την διεξαγωγή των μετρήσεων των διαφορών πίεσης επάνω στην πτέρυγα και της ταχύτητας της ροής. Ο αέρας, αφού περάσει από τον θάλαμο δοκιμών εισέρχεται στον διαχύτη, όπου βρίσκεται τοποθετημένος ο ανεμιστήρας και εξέρχεται στη συνέχεια στο περιβάλλον. Η ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα και συνεπώς η ταχύτητα ροής του αέρα στον θάλαμο δοκιμών ελέγχεται μέσω του αριθμού των στροφών του ηλεκτροκινητήρα (inverter).



Σχήμα 13: Πλάγια όψη υποηχητικής αεροσήραγγας (διαστάσεις σε μέτρα)

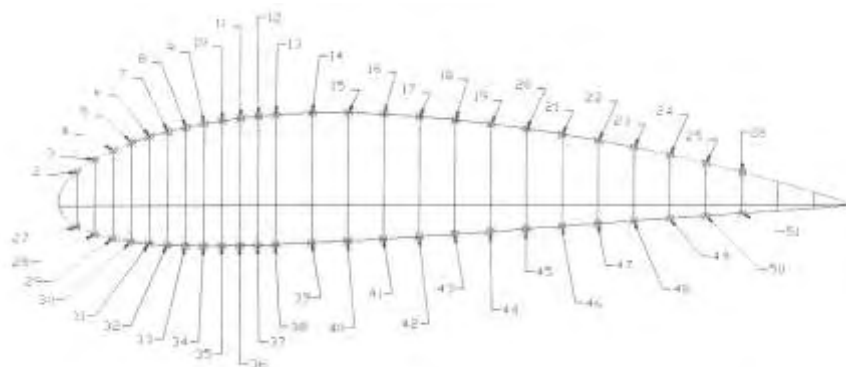


Σχήμα 14: Ο ανεμιστήρας της αεροσήραγγας του ΕΡ&Σ-ΠΘ



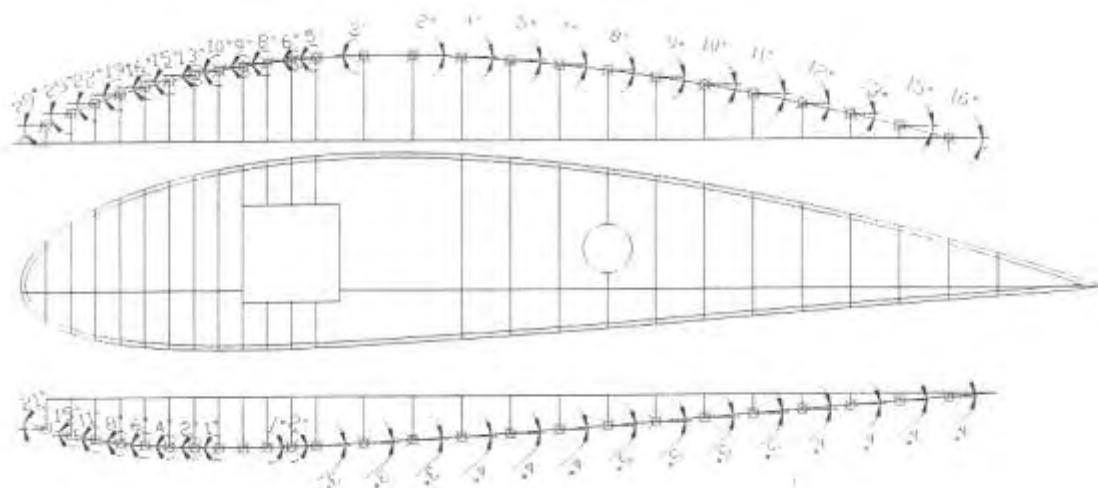
### 3.3 Σύστημα Σωλήνα Pitot-Static και Μικρομανόμετρο

Για την μέτρηση της κατανομής της στατικής πίεσης στην επιφάνεια της πτέρυγας με τη βοήθεια των οπών στατικής πίεσης και του σωλήνα Pitot χρησιμοποιήσαμε Μικρομανόμετρο διαφορικών πιέσεων, ώστε να μετρήσουμε την διαφορά της στατικής πίεσης μεταξύ της οπής και ενός σημείου μακριά από την πτέρυγα. Χρησιμοποιήθηκαν 50 μικρές οπές διαμέτρου 1mm, κατανεμημένες στην πάνω και κάτω πλευρά της πτέρυγας όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 15.



Σχήμα 15: Κατανομή των οπών πίεσης στην επιφάνεια της αεροτομής

Η κατανομή αυτή των οπών επάνω στην πτέρυγα περιλαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό οπών στην περιοχή του χείλους προσβολής απ' αυτόν στο χείλος εκφυγής. Συγκεκριμένα στην επιφάνεια της αεροτομής που αντιστοιχεί στο πρώτο  $\frac{1}{4}$  της χορδής οι προβολές των οπών στη χορδή έχουν βήμα 5mm (οπές 2 έως 13 και 27 έως 38) ενώ στο υπόλοιπο τμήμα της επιφάνειας (13 έως 26 και 38 έως 51) το βήμα γίνεται 10mm.



Σχήμα 16: Κλίση της επιφάνειας της πτέρυγας στις θέσεις των οπών στατικής πίεσης

### 3.3.1 Ηλεκτρονικό Διαφορικό Μικρομανόμετρο

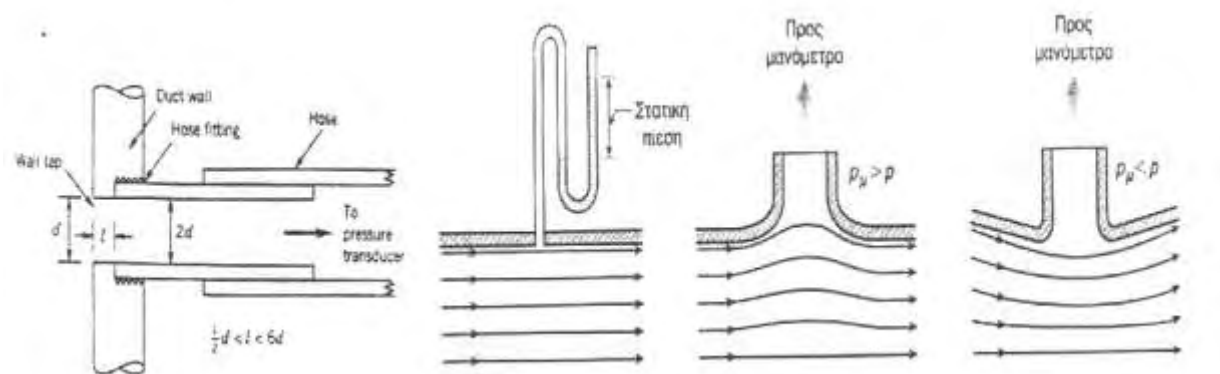
Το διαφορικό μικρομανόμετρο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Fumess Controls Limited, και εικονίζεται στην επόμενη φωτογραφία (Σχήμα 17).



Σχήμα 17: Ηλεκτρονικό Μικρομανόμετρο

### 3.3.2 Οπές πίεσης

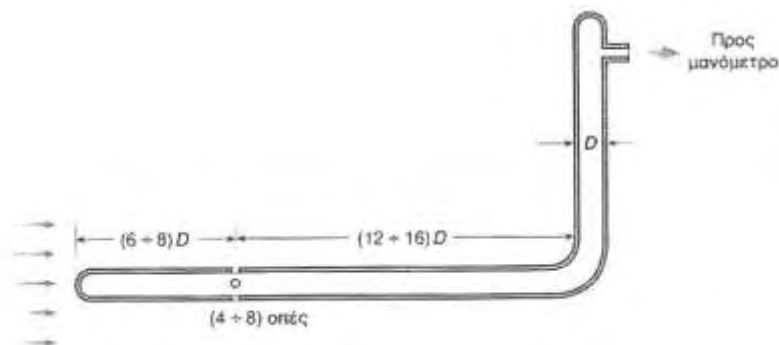
Η στατική πίεση ενός κινούμενου ρευστού δε μεταβάλλεται στη διεύθυνση κάθετα σε παράλληλες ροϊκές γραμμές. Η ιδιότητα αυτή της στατικής πίεσης δίνει τη δυνατότητα να μετρήσουμε τη στατική πίεση ενός κινούμενου ρευστού με τη λήψη μέτρησης πάνω στο τοίχωμα του αγωγού ή της προς μελέτη επιφάνειας. Για το σκοπό αυτό ανοίγεται στην εξωτερική επιφάνεια μια μικρή οπή διαμέτρου 1mm για σχεδόν επίπεδες επιφάνειες και 1-10% της διαμέτρου για την περίπτωση αγωγών. Η ακρίβεια της πειραματικής μέτρησης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατασκευή της ίδιας της οπής, η οποία πρέπει να είναι κάθετη στην επιφάνεια που εκτίθεται στη ροή και να έχει οξεία χείλη για να μην διαταράσσει τη ροή. Μία τυπική μορφή των οπών πίεσης και μερικές από τις επιδράσεις στις μετρήσεις από λανθασμένες κατασκευές παρουσιάζονται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18: Τυπική οπή πίεσης και συνήθη κατασκευαστικά σφάλματα που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων

### 3.3.3 Σωλήνας Στατικής Πίεσης

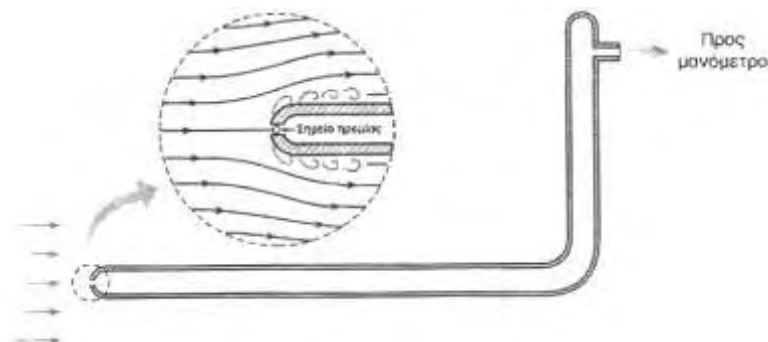
Εφαρμόζοντας την τεχνική της οπής σε τοίχωμα είναι δυνατόν να μετρηθεί η στατική πίεση και στο πεδίο ροής. Η μέτρηση αυτή επιτυγχάνεται με το σωλήνα στατικής πίεσης. Πρόκειται για ένα σωλήνα διαμέτρου 1-20mm που τοποθετείται με τον άξονα του παράλληλο προς την τοπική διεύθυνση ροής. Στα πλευρικά τοιχώματα του σωλήνα βρίσκονται 4-8 οπές διαμέτρου  $d=D/10$ . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 19 οι οπές βρίσκονται σε απόσταση  $6D$  έως  $8D$  από την αρχή του σωλήνα και σε απόσταση  $12D$  έως  $16D$  από το κάθετο στέλεχος.



Σχήμα 19: Σωλήνας στατικής πίεσης

### 3.3.4 Σωλήνας Pitot

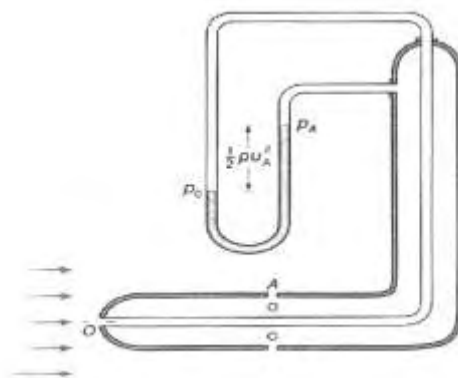
Πρόκειται για σωλήνα, Σχήμα 20, όπου στο μπροστινό άκρο του έχει μια μικρή οπή. Με την τοποθέτηση του σωλήνα Pitot παράλληλα στη ροή είναι δυνατή η μέτρηση της ολικής πίεσης (ανακοπής).



Σχήμα 20: Σωλήνας Pitot

### 3.3.5 Σωλήνας Pitot-Static (Prandtl)

Ο σωλήνας Pitot-Static είναι ουσιαστικά ο συνδυασμός των σωλήνων στατικής πίεσης και Pitot όπως φαίνεται και στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21: Τομή σωλήνα Pitot-Static

Αποτελείται από δύο ομοαξονικούς σωλήνες όπου ο εσωτερικός είναι συνδεδεμένος με την οπή στο μπροστινό τμήμα του οριζώντιου στελέχους για την μέτρηση της ολικής πίεσης, ενώ οι οπές στην περιφέρεια του εξωτερικού σωλήνα είναι συνδεδεμένες μέσω του σωλήνα αυτού για τη μέτρηση της στατικής πίεσης. Τοποθετώντας το οριζόντιο στέλεχος του σωλήνα παράλληλα προς τις ροικές γραμμές μιας μόνιμης, ασυμπίεστης ροής και εφαρμόζοντας την εξίσωση του Bernoulli μεταξύ των σημείων O (στο άκρο του σωλήνα) και A (στην είσοδο μιας πλευρικής οπής) και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $U_O=0$  και  $p_A=p$  προκύπτει η σχέση:

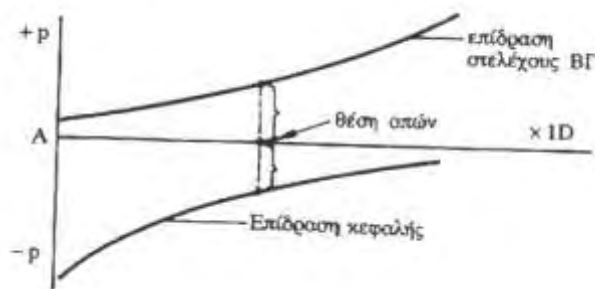
$$p_o = p + \rho g(Z_A - Z_o) + \rho \frac{U_A^2}{2}$$

όπου αν αγνοήσουμε την υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων (O, A) γίνεται:

$$p_o - p = \rho \frac{U_A^2}{2}$$

και αντιπροσωπεύει τη δυναμική πίεση στο σημείο A. Η ταχύτητα στο σημείο A είναι χωρίς σημαντικό σφάλμα ίση με την ταχύτητα της αδιατάραχης ροής:  $U_A = U = \sqrt{2 \frac{p_o - p}{\rho}}$ .

Η θέση των οπών στατικής πίεσης παίζει σημαντικό ρόλο στη μέτρηση επειδή η ροή επιταχύνεται στο μπροστινό μέρος του σωλήνα και επιβραδύνεται λόγω της ύπαρξης του κάθετου στελέχους. Εκτίμηση της θέσης τοποθέτησης των οπών δίνεται στο Σχήμα 22 όπου παρουσιάζονται οι επιδράσεις στη στατική πίεση συναρτήσει της θέσης των οπών στο οριζόντιο στέλεχος του σωλήνα Prandtl.

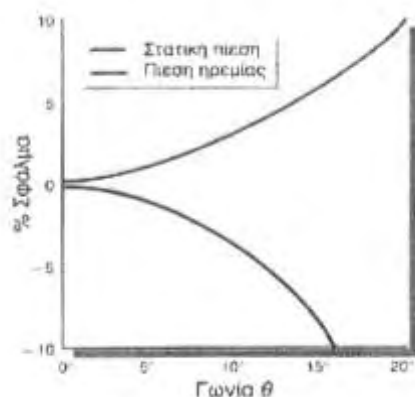


**Σχήμα 22: Κατανομή της στατικής πίεσης μεταξύ της κεφαλής του σωλήνα Prandtl και του κάθετου στελέχους του σωλήνα Pitot-Static**

Η θέση των οπών στατικής πίεσης παίζει σημαντικό ρόλο στη μέτρηση επειδή η ροή επιταχύνεται στο μπροστινό μέρος του σωλήνα και επιβραδύνεται λόγω της ύπαρξης του κάθετου στελέχους. Για την ακρίβεια των μετρήσεων με σωλήνα Pitot-Static πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

α) Λόγω του σωλήνα προκαλείται πύκνωση των ροικών γραμμών, και η μετρούμενη ταχύτητα  $U$  είναι κατά ελάχιστον μεγαλύτερη από την πραγματική ταχύτητα του ρευστού.

β) Το μεγαλύτερο σφάλμα στην μέτρηση της ολικής και στατικής πίεσης οφείλεται στην μη ευθυγράμμιση του σωλήνα με την τοπική διεύθυνση των ροικών γραμμών. Το σφάλμα της μέτρησης σε συνάρτηση με την γωνία  $\theta$  που σχηματίζει ο σωλήνας με τις ροικές γραμμές παριστάνεται στο Σχήμα 23.

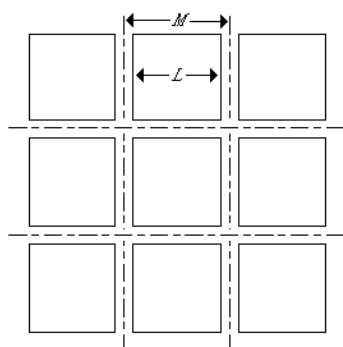


**Σχήμα 23: Σφάλμα στη μέτρηση στατικής και πίεσης ηρεμίας**

γ) Οι θέσεις λήψης της μέτρησης της ολικής και στατικής πίεσης δεν συμπίπτουν, με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρό έως αμελητέο σφάλμα στις μετρήσεις. Το σφάλμα αυτό γίνεται μεγάλο μόνο σε περιπτώσεις στις οποίες η μεταβολή της ταχύτητας είναι αισθητή για αποστάσεις της τάξης του  $6D$  έως  $8D$  (όπου  $D$  η διάμετρος του σωλήνα).

### 3.4 Πλέγματα

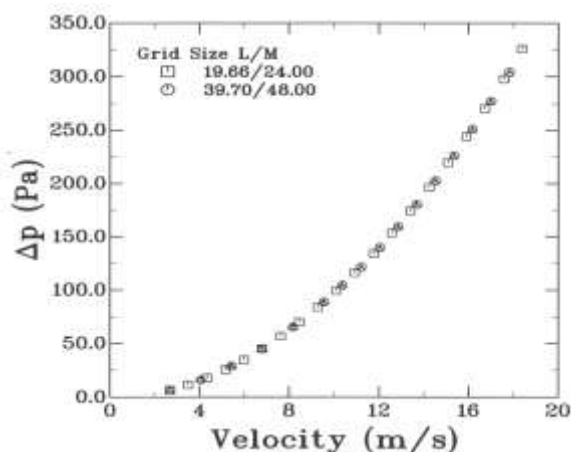
Στην παρούσα μελέτη εξετάζουμε την επίδραση της τύρβης διαφορετικών μεγεθών δινών στην ροή γύρω από την αεροτομή. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πλέγματα (Σχήμα 24 και Πίνακας 3) τα οποία καταλαμβάνουν όλη τη διατομή του τμήματος μετρήσεων της αεροσήραγγας. Οι μετρήσεις της πτώσης πίεσης που πραγματοποιήθηκαν στο πανεπιστήμιο Erlangen-Nuerenberg από τους Papadopoulos et al. (1994) δίδονται στο Σχήμα 25.



Σχήμα 24 Γεωμετρία πλεγμάτων

Πίνακας 3 Μεγέθη Πλεγμάτων

$a/a$	$L$	$M$
1	39.70	48.00
2	19.66	24.00



Σχήμα 25 Πτώση πίεσης σε σχέση με την ταχύτητα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πλέγματα με οπές διαστάσεων 2cmX2cm και 4cmX4cm που ήταν παρεμφερείς με αυτές (1,966cmx2,4cm και 3.97cmx4.8cm) της μελέτης των Papadopoulos et al. (1994). Παρατηρήθηκε διαφορά στη μέση ταχύτητα μεταξύ των περιοχών κατάντη των δύο πλεγμάτων για την ίδια συχνότητα του inverter της φτερωτής της αεροσήραγγας. Η μέση ταχύτητα στο πλέγμα διαστάσεων 3.97/4.8 είναι 4.8m/s και στο πλέγμα 1.966/2.4 είναι 4.7m/s, διαφορά περίπου 4% και 6%, αντίστοιχα. Στο πείραμα μας εντοπίσαμε σχεδόν ίδιες μέσες ταχύτητες για τα αντίστοιχα πλέγματα.

Επομένως, για την απρόσκοπτη σύγκριση των αποτελεσμάτων (δηλ. ίδια ταχύτητα αέρα), αυξήσουμε τις στροφές της πτερωτής της αεροσήραγγας, μέσω του inverter της.

### 3.5 Επιφανειακές Τραχύτητες

Κατόπιν έρευνας για την κατάλληλη και ενδεδειγμένη λύση χρησιμοποιήθηκε λεπτό γυαλόχαρτο (το λεγόμενο ντουκόχαρτο) με συγκεκριμένες επιφανειακές τραχύτητες 100μm και 201μm ώστε να μετρήσουμε τις διαφορές που επιφέρει στην συμπεριφορά της πτέρυγας. Οι επιφανειακές τραχύτητες κολλήθηκαν επάνω στην επιφάνεια της αεροτομής με ταινία διπλής όψευς, προσεκτικά και αρκετά κοντά στις οπές στατικής πίεσης. Ο Πίνακας 4 είναι ενδεικτικός για τις διαθέσιμες τραχύτητες στην αγορά και δείχνει τις αντίστοιχες ονομαστικές τραχύτητες των προτύπων ISO/FEPA με τα μεγέθη κόκκου των επιφανειών. Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία της βιβλιογραφίας, καταλήξαμε στην χρησιμοποίηση των φύλλων τραχύτητας (sandpapers) P80 και P150 (201μm και 100μm αντίστοιχα).

### 3.6 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν την στατική πίεση στην επιφάνεια της αεροτομής και την πίεση και ταχύτητα στην ελεύθερη ροή ανάντη της αεροτομής. Οι μετρήσεις αφορούν την αεροτομή με τραχύτητες (100μm, 200μm) και πλέγματα ανάντη της αεροτομής. Σκοπός της παρούσης πειραματικής μελέτης είναι να εξεταστεί η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας και των πλεγμάτων στην αεροτομή. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν για διάφορες γωνίες (0°, 6°, 12°, 18°), ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα της επίδρασης των διαφορετικών τραχυτήτων και πλεγμάτων.

**Πίνακας 4: Διαθέσιμες τραχύτητες και αντιστοίχιση προτύπων**

	ISO/FEPA Grit designation	CAMI Grit designation	Average particle diameter (μm)
	MACROGRITS		
Extra Coarse (Very fast removal of material, hardwood flooring initial sanding)	P12		1815
	P16		1324
	P20		1000
	P24		764
		24	708
	P30		642
		30	632
		36	530
	P36		538

Coarse (Rapid removal of material)	P40	40	425
		50	348
	P50		336
Medium (sanding bare wood in preparation for finishing, for gentle removal of varnish, also used for skateboard grip tape)		60	265
	P60		269
	P80←		201←
		80	190
Fine (sanding bare wood in preparation for finishing, not suitable for removing varnish or paint from wood, use for cleaning plaster and water stain from wood)	P100		162
		100	140
	P120		125
		120	115
Very Fine (sanding of bare wood)	P150←		100←
		150	92
	P180	180	82
	P220	220	68
<b>MICROGRITS</b>			
Very Fine (sanding finishes between coats)	P240		58.5
		240	53.0
	P280		52.2
	P320		46.2
	P360		40.5
Extra fine, start polishing of wood		320	36.0
	P400		35.0
	P500		30.2
		360	28.0
	P600		25.8
Super fine (final sanding of finishes, final sanding of wood)		400	23.0
	P800		21.8
		500	20.0
	P1000		18.3
		600	16.0
	P1200		15.3
Ultra fine (final sanding and polishing of thick finishes)	P1500	800	12.6
	P2000	1000	10.3
	P2500		8.4

Πριν την έναρξη των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε μια γενική οπτική επιθεώρηση της πειραματικής διάταξης για να εξασφαλιστεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων μας. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων επάνω στην πτέρυγα μέσα στην αεροσήραγγα εφαρμόστηκαν σε όλες τις περιπτώσεις τα εξής με τη σειρά που αναφέρονται, αφού πραγματοποιήθηκε κατ'αρχήν η βαθμονόμηση της αεροσήραγγας:



- Δόθηκαν οι απαραίτητες κλίσεις ( $0^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $18^\circ$ ) στην αεροτομή που τοποθετήθηκε στην αεροσήραγγα.
- Βάσει των δεδομένων, ρυθμίστηκε η ταχύτητα του αέρα στα 5 m/sec και 10 m/sec.
- Μετρήθηκε η ταχύτητα και η διαφορά πίεσης μακριά από την αεροτομή, σε σημείο που η ροή δεν επηρεαζόταν από αυτή.
- Πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των κατανομών των πίεσης στην επιφάνεια της αεροτομής.
- Συνδέονταν τα σωληνάκια που αντιστοιχούσαν σε κάθε οπή, και λαμβάνονταν οι μετρήσεις της πίεσης, χρησιμοποιώντας το ηλεκτρονικό μικρομανόμετρο.
- Αφού μετρήθηκαν οι κατανομές πίεσης στην περίπτωση της λείας πτέρυγας χωρίς την παρουσία πλέγματος, εφαρμόστηκαν τα πλέγματα και κατόπιν οι επιφανειακές τραχύτητες και λήφθηκαν κατανομές για όλες τις περιπτώσεις συνδυαστικά.

### **3.7 Εκτίμηση Ακρίβειας των Μετρήσεων**

Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την ακρίβεια των οργάνων μέτρησης. Αυτά τα όργανα είναι τα εξής: σωλήνας Pitot, διαφορικό μικρομανόμετρο, σωλήνες σύνδεσης μικρομανόμετρου μεταξύ σωλήνα Pitot και οπών στατικής πίεσης. Επίσης, σημαντικός παράγοντας σφαλμάτων είναι ο ανθρώπινος παράγοντας, ο οποίος κατά την διάρκεια των μετρήσεων υπεισέρχεται και επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων μας. Στην αρχή των πειραμάτων έγιναν αρκετές μετρήσεις για να διαπιστωθούν τυχόν λάθη στην ροή ή στην συνδεσμολογία των οργάνων μέτρησης και να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητά τους.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 Στοιχεία της Παραμετρικής Μελέτης

Στον Πίνακα 5 δίνονται οι συνδυασμοί μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για την ροή γύρω από την αεροτομή NACA 4418 στην υποηχητική αεροσήραγγα του εργαστηρίου Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών.

Πίνακας 5: Τιμές της παραμετρικής μελέτης

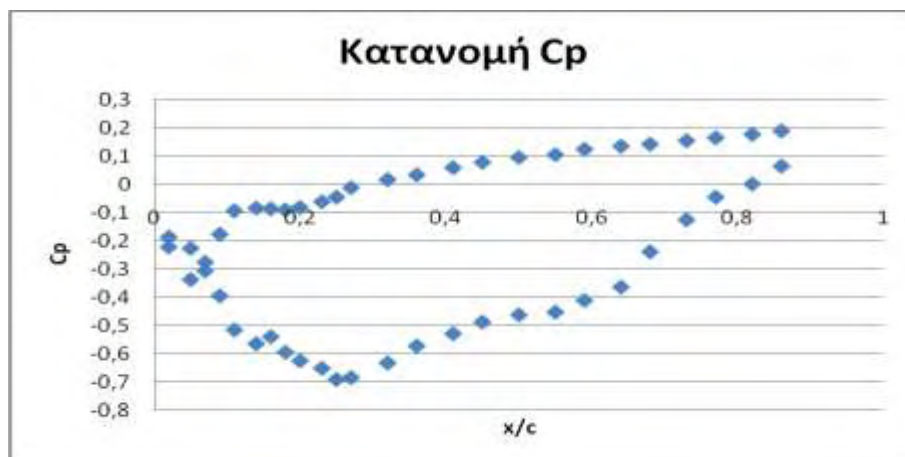
Επιφανειακή Τραχύτητα ( $\mu\text{m}$ )	Πλέγμα (Μέγεθος οπών)	Γωνία Πρόσπτωσης (μοίρες)	Ταχύτητα Αέρα (m/s)	Επιφανειακή Τραχύτητα ( $\mu\text{m}$ )	Πλέγμα (Μέγεθος οπών)	Γωνία Πρόσπτωσης (μοίρες)	Ταχύτητα Αέρα (m/s)
0	Χωρίς	0	5	100	2cmx2cm	6	10
0	Χωρίς	0	10	100	2cmx2cm	12	5
0	Χωρίς	6	5	100	2cmx2cm	0	5
0	Χωρίς	6	10	100	2cmx2cm	0	10
0	Χωρίς	12	5	100	2cmx2cm	6	5
0	Χωρίς	12	10	100	2cmx2cm	6	10
0	Χωρίς	18	5	100	2cmx2cm	12	5
0	Χωρίς	18	10	100	2cmx2cm	12	10
0	2cmx2cm	0	5	100	2cmx2cm	18	5
0	2cmx2cm	0	10	200	Χωρίς	0	5
0	2cmx2cm	6	5	200	Χωρίς	0	10
0	2cmx2cm	6	10	200	Χωρίς	6	5
0	2cmx2cm	0	5	200	Χωρίς	6	10
0	2cmx2cm	0	10	200	Χωρίς	12	5
0	2cmx2cm	6	5	200	Χωρίς	12	10
0	2cmx2cm	6	10	200	Χωρίς	18	5
0	2cmx2cm	12	5	200	2cmx2cm	0	5
0	2cmx2cm	12	10	200	2cmx2cm	0	10
0	2cmx2cm	18	5	200	2cmx2cm	6	5
0	2cmx2cm	18	10	200	2cmx2cm	6	10
100	Χωρίς	0	5	200	2cmx2cm	12	5
100	Χωρίς	0	10	200	2cmx2cm	18	5
100	Χωρίς	6	5	200	4cmx4cm	0	5
100	Χωρίς	6	10	200	4cmx4cm	0	10
100	Χωρίς	12	5	200	4cmx4cm	6	5
100	Χωρίς	12	10	200	4cmx4cm	6	10
100	2cmx2cm	0	5	200	4cmx4cm	12	5
100	2cmx2cm	0	10	200	4cmx4cm	12	10
100	2cmx2cm	6	5	200	4cmx4cm	18	5

## 4.2 Επίδραση Ταχύτητας Αέρα σε Λεία Αεροτομή

Στα Σχήματα 26 έως 33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ροής γύρω από την πτέρυγα NACA 4418 για τις διάφορες γωνίες και ταχύτητες πρόσπτωσης στην περίπτωση της λείας αεροτομής.

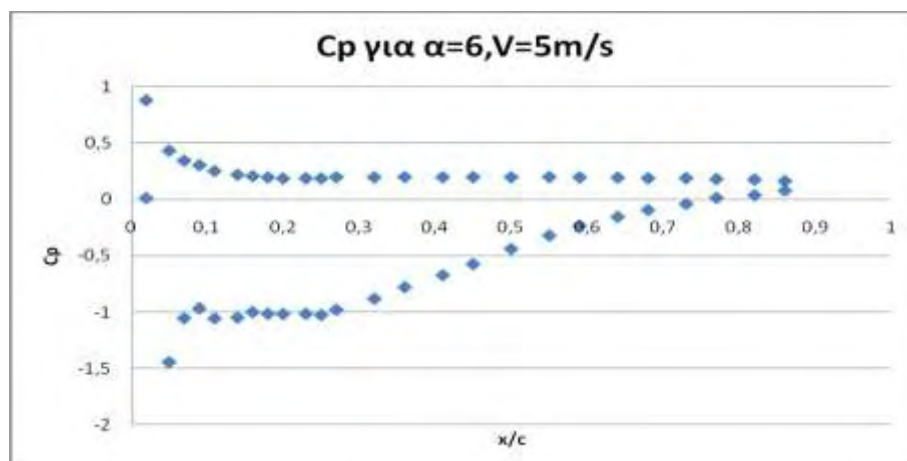
### 4.2.1 Ταχύτητα Αέρα 5m/s

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 26.



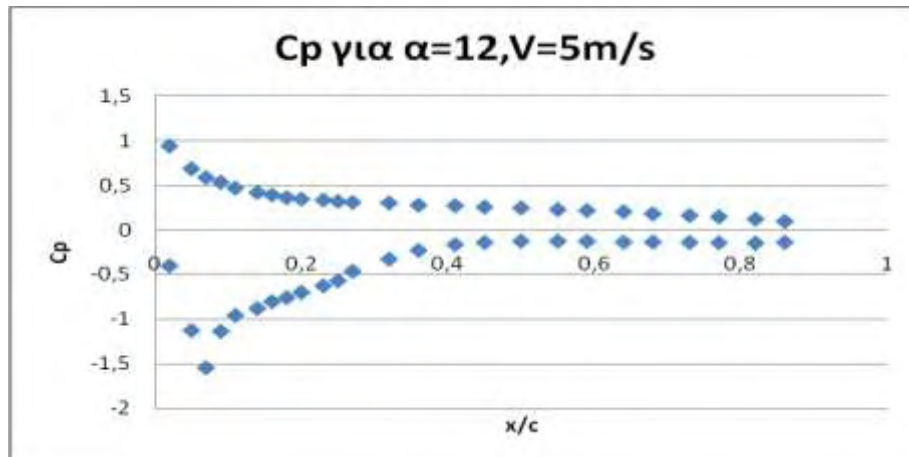
Σχήμα 26 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 27:



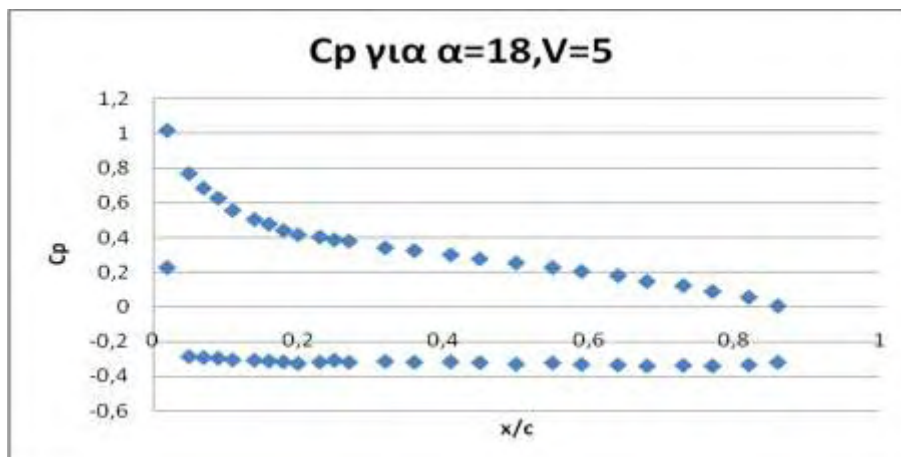
Σχήμα 27 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $5\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 28:



Σχήμα 28 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

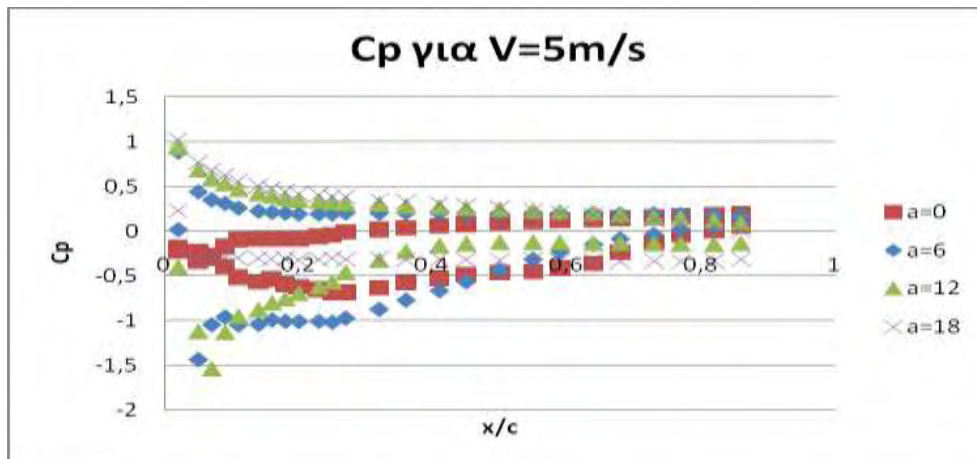
Για γωνία πρόσπτωσης  $18^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $5\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 29:



Σχήμα 29 Κατανομή συντελεστή πίεσης γύρω από λεία αεροτομή για  $\alpha = 18^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

### Σύγκριση συντελεστών πίεσης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

Στο συγκριτικό διάγραμμα του Σχήματος 30 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων των διαφορετικών γωνιών πρόσπτωσης. Εδώ παρατηρούμε ένα άνοιγμα της κατανομής πιέσεων, καθώς και μια μετατόπιση των τιμών στατικής πίεσης προς τα άνω στις θετικές τιμές ως προς τον άξονα  $y$  καθώς αυξάνουμε την γωνία πρόσπτωσης. Επίσης, παρατηρείται μια αλλαγή της μορφής των κατανομών από τις  $0^\circ$  σε σύγκριση με τις περιπτώσεις των γωνιών πρόσπτωσης  $6^\circ$ ,  $12^\circ$  και  $18^\circ$ .

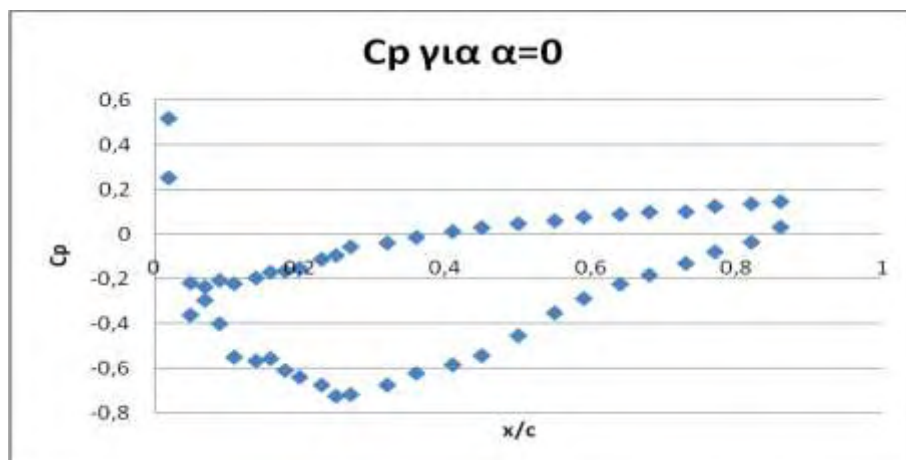


Σχήμα 30 Σύγκριση κατανομών πίεσης για λεία αεροτομή,  $V = 5 \text{ m/s}$

#### 4.2.2. Ταχύτητα Αέρα $10 \text{ m/s}$

Έγιναν μετρήσεις για ταχύτητα αέρα  $10 \text{ m/s}$ , ώστε να έχουμε τυρβώδες οριακό στρώμα στην επιφάνεια της αεροτομής και παρουσιάζονται παρακάτω. Επειδή ακόμη και με τη μέγιστη ταχύτητα της διαθέσιμης αεροσήραγγας ( $18 \text{ m/s}$ ) δεν είναι εφικτή η δημιουργία τυρβώδους οριακού στρώματος, αυτό επιτεύχθηκε εξαναγκάζοντας τη ροή με  $Re_c = 2,08 \cdot 10^5$  να γίνει τυρβώδης με την χρήση ενός σύρματος (tripping) διαμέτρου  $1 \text{ mm}$  τοποθετημένου σε απόσταση από το χείλος προσβολής με προβολή στη χορδή  $x/c = 1.27\%$ . Έτσι, η τυρβώδης ροή καθυστερεί ή εμποδίζει την αποκόλληση της ροής από την αεροτομή. Επομένως στη μηδενική γωνία προσβολής, η περιοχή ανακυκλοφορίας στη ράχη της αεροτομής δεν υφίσταται πλέον (Παπαδόπουλος, 2002).

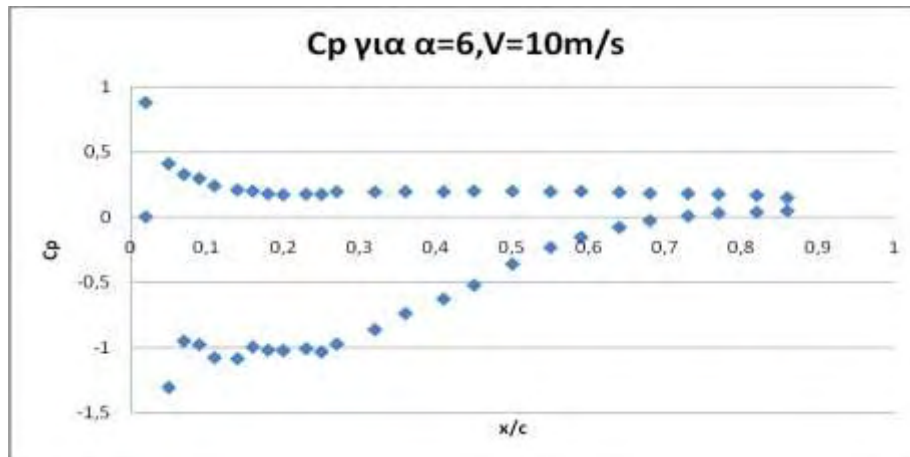
Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10 \text{ m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 31:



Σχήμα 31 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 10 \text{ m/s}$

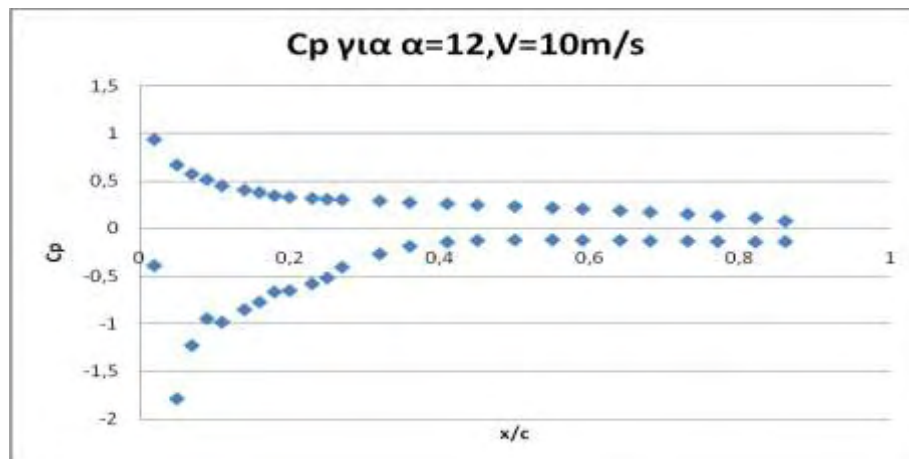
Εδώ παρατηρούμε μια μεγάλη απόκλιση στη μέτρηση δύο οπών στο  $x/c=0,02$  (οπή 2 και οπή 27). Αυτό βλέπουμε ότι επαναλαμβάνεται σε όλες τις σειρές μετρήσεων για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$ , επομένως το πιο πιθανό είναι μια αστοχία είτε στην κατασκευή αυτών των οπών, που είναι και το πιο πιθανό, είτε σε μια κατασκευαστική αστοχία στα σωληνάκια στατικής πίεσης.

Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 32:



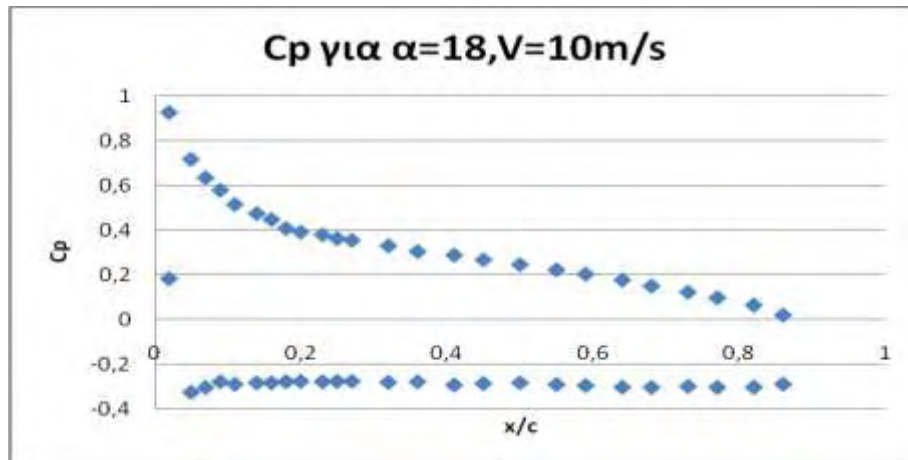
Σχήμα 32 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 33:



Σχήμα 33 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

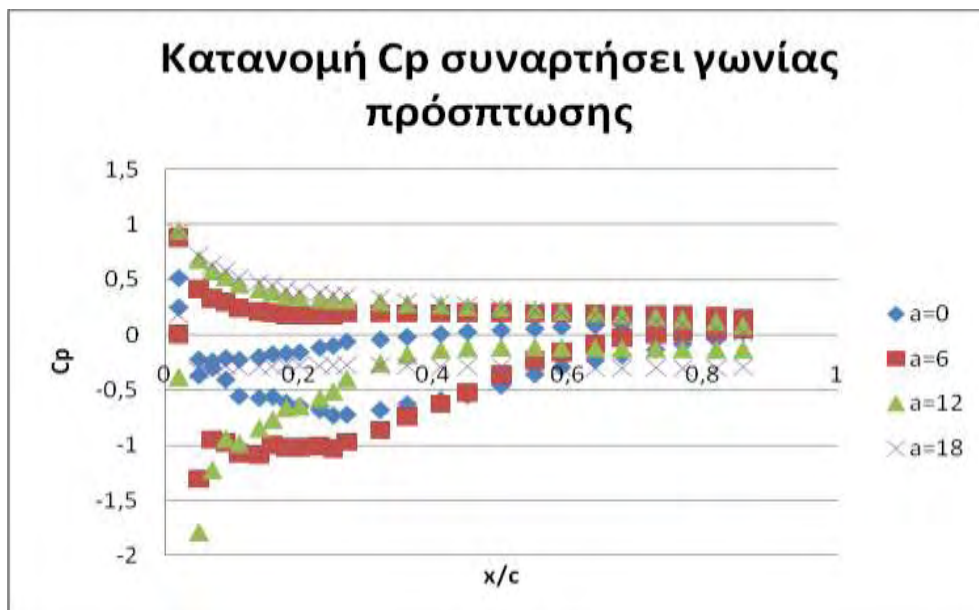
Για γωνία πρόσπτωσης  $18^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 34:



Σχήμα 34 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή και  $\alpha = 18^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

#### Σύγκριση συντελεστών πίεσης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των κατανομών πίεσης συναρτήσει των διαφορετικών γωνιών. Κι εδώ, όπως και παραπάνω παρατηρούμε ένα άνοιγμα της κατανομής πιέσεων, το οποίο και προφανώς μεταφράζεται σε αύξηση του συντελεστή άντωσης, καθώς και μια μετατόπιση των τιμών στατικής πίεσης προς τα άνω στις θετικές τιμές ως προς τον άξονα  $\gamma$  καθώς αυξάνουμε την γωνία πρόσπτωσης. Επίσης, παρατηρείται μια αλλαγή της μορφής των κατανομών από τις  $0^\circ$  σε σύγκριση με τις περιπτώσεις των γωνιών πρόσπτωσης  $6^\circ$ ,  $12^\circ$  και  $18^\circ$ .



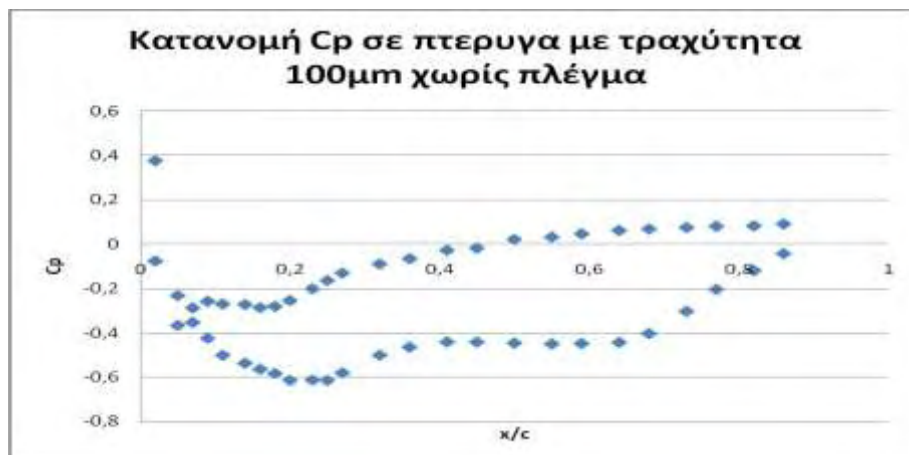
Σχήμα 35 Σύγκριση κατανομών πίεσης για λεία αεροτομή,  $V = 10\text{m/s}$



### 4.3 Επίδραση Επιφανειακής Τραχύτητας 100 $\mu\text{m}$

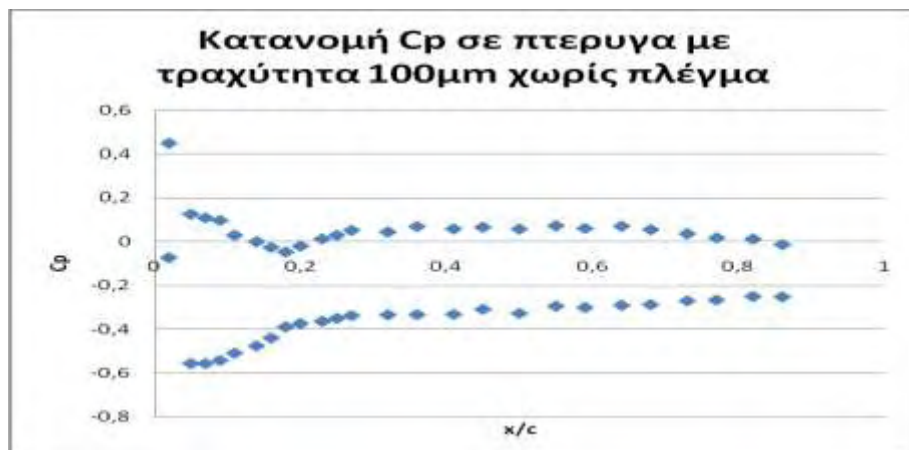
#### 4.3.1 Ταχύτητα Αέρα 5 m/s

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με εφαρμοσμένη τραχύτητα 100 $\mu\text{m}$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 36:



Σχήμα 36 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100 $\mu\text{m}$  και  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

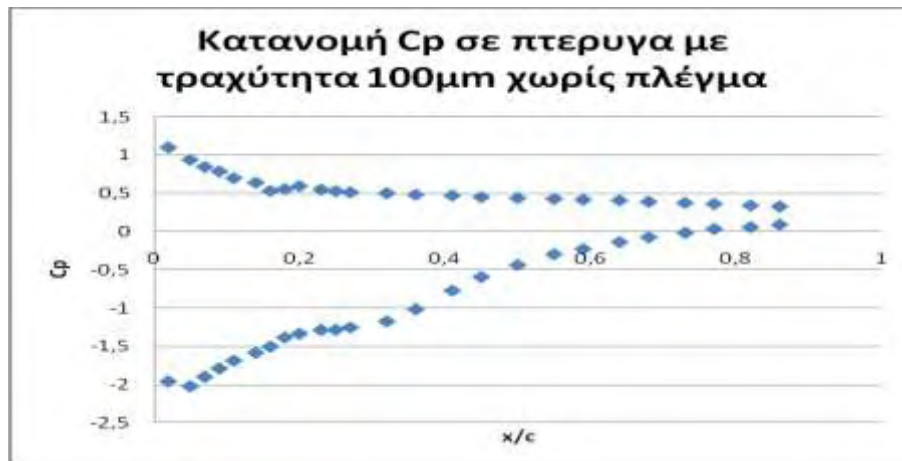
Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με εφαρμοσμένη τραχύτητα 100 $\mu\text{m}$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 37:



Σχήμα 37 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100 $\mu\text{m}$  και  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με εφαρμοσμένη τραχύτητα 100 $\mu\text{m}$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 38:

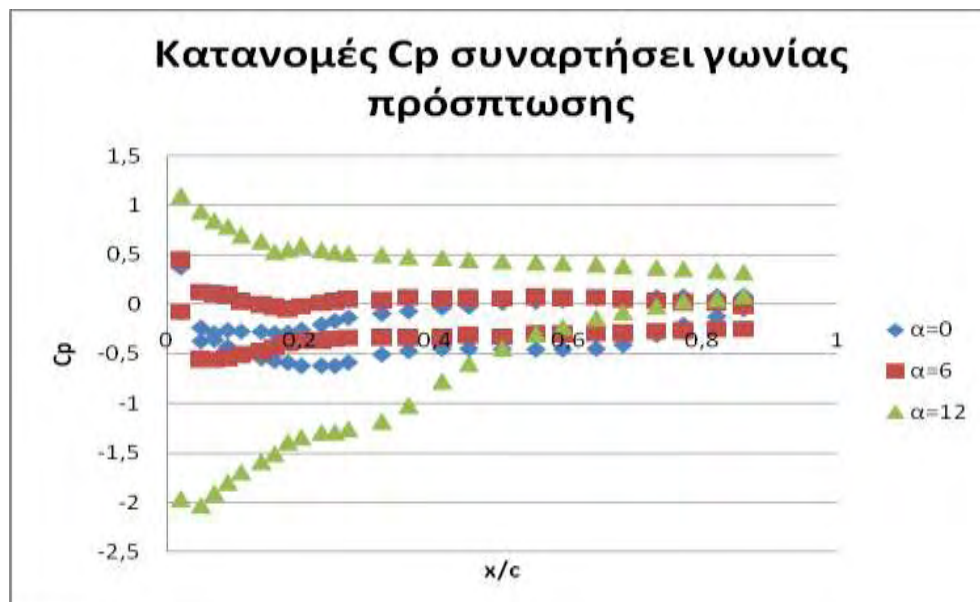




Σχήμα 38 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm και  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

#### Σύγκριση συντελεστών πίεσης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

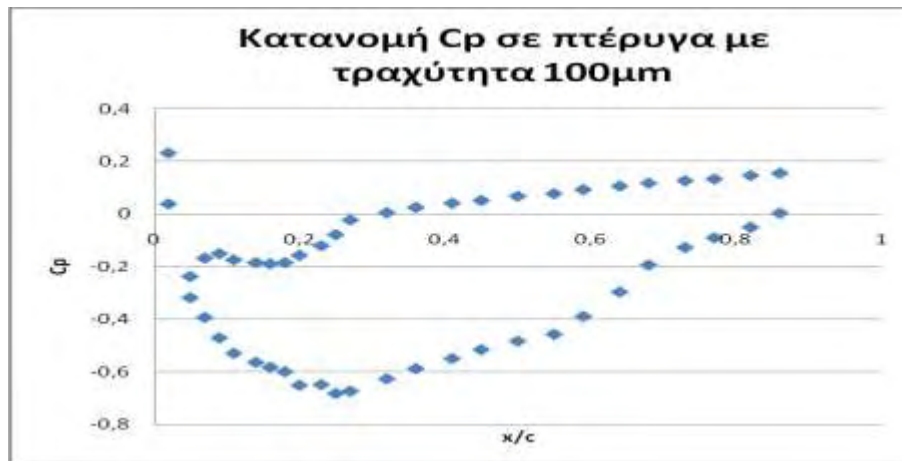
Στο Σχήμα 39 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των κατανομών συντελεστών πίεσης συναρτήσει των διαφορετικών γωνιών. Όπως παρατηρούμε, έχουμε μια αύξηση του συντελεστή άντωσης αφού οι τιμές των συντελεστών πίεσης γύρω από την αεροτομή αυξάνουν κατά απόλυτη τιμή. Ειδικά για την περίπτωση των  $12^\circ$ , βλέπουμε μια μεγάλη αύξηση των τιμών της στατικής πίεσης, συγκριτικά με την περίπτωση της γωνίας πρόσπτωσης  $6^\circ$ .



Σχήμα 39 Σύγκριση συντελεστών πίεσης για τραχύτητα 100μm,  $V = 5\text{m/s}$

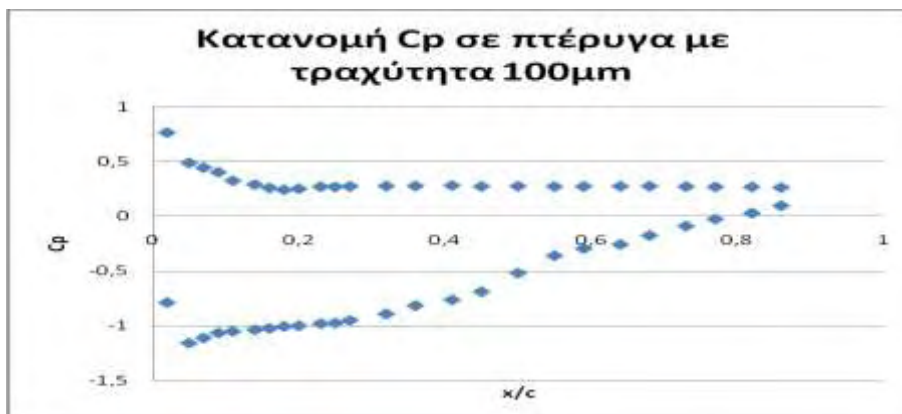
#### **4.3.2 Ταχύτητα Αέρα 10m/s**

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα 10m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα 100μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 40:



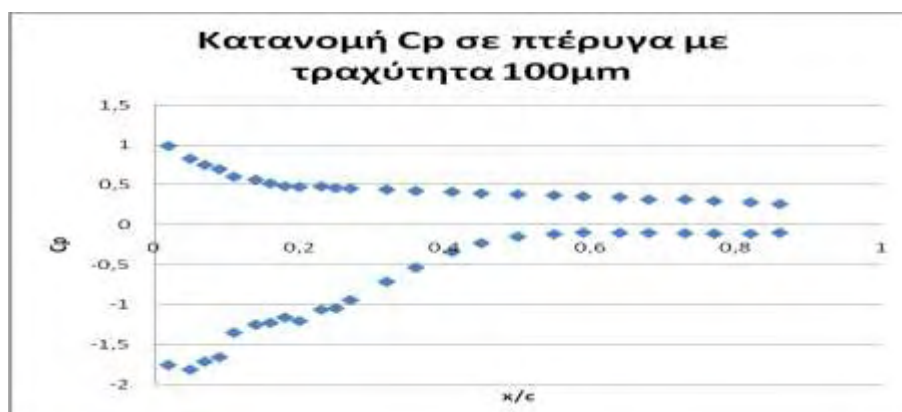
Σχήμα 40 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα 10m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα 100μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 41:



Σχήμα 41 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

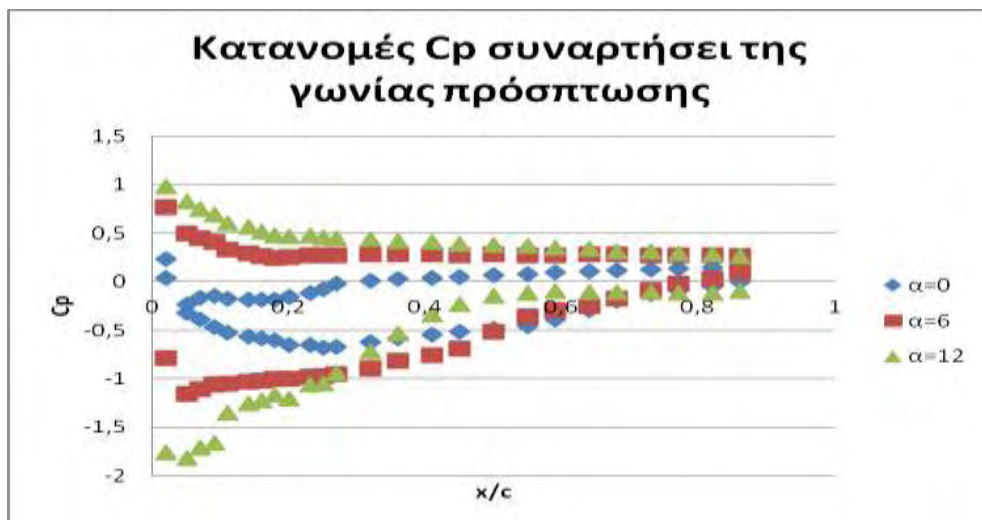
Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα 10m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα 100μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 42:



Σχήμα 42 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

### Σύγκριση συντελεστών πίεσης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

Στο Σχήμα 43 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των κατανομών πίεσης συναρτήσει των διαφορετικών γωνιών. Όπως παρατηρούμε, έχουμε μια αύξηση του συντελεστή άντωσης αφού οι τιμές των συντελεστών πίεσης γύρω από την αεροτομή αυξάνουν κατά απόλυτη τιμή. Εδώ, σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση της ταχύτητας 5m/s, παρατηρούμε μια μικρότερη διαφορά μεταξύ των τιμών του συντελεστή πίεσης για τις περιπτώσεις των γωνιών  $6^\circ$  και  $12^\circ$ .

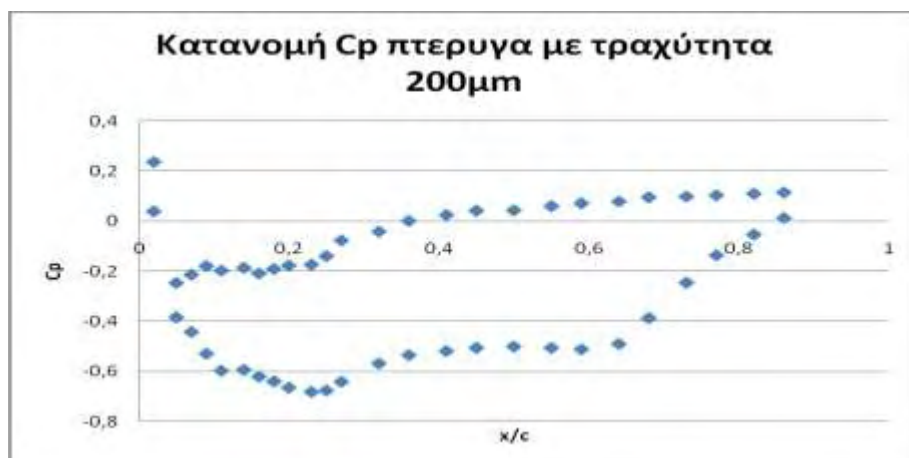


Σχήμα 43 Σύγκριση συντελεστών πίεσης για τραχύτητα 100μm,  $V = 10\text{m/s}$

## **4.4 Επίδραση Επιφανειακής Τραχύτητας 200μm**

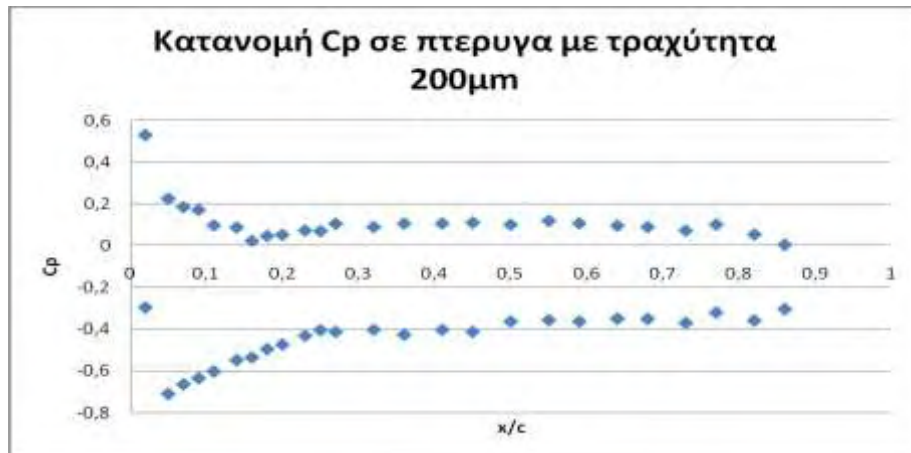
### **4.4.1 Ταχύτητα Αέρα 5 m/s**

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα 200μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 44:



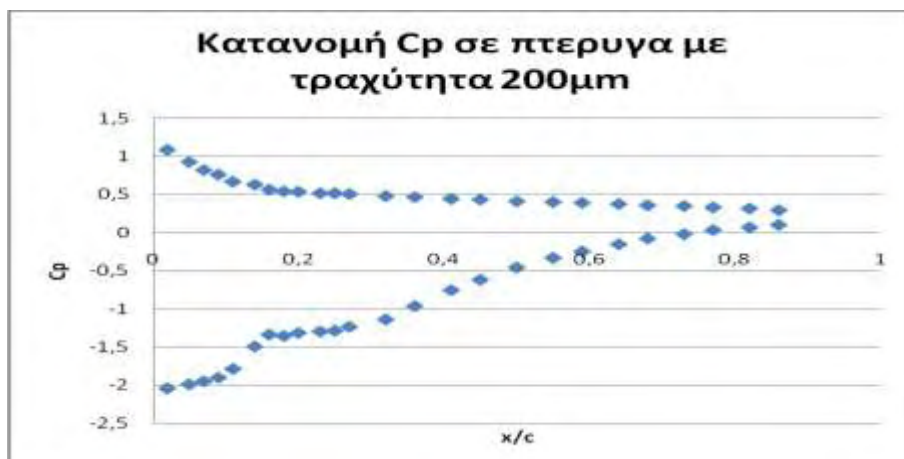
Σχήμα 44 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα 200μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 45:



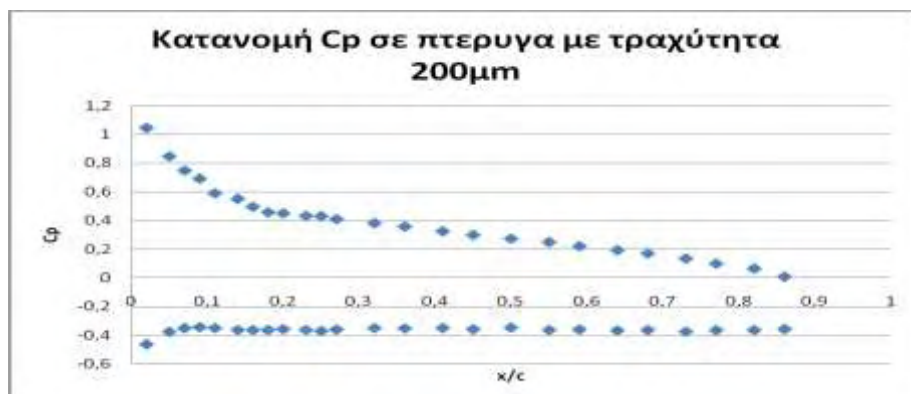
Σχήμα 45 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα 200μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 46:



Σχήμα 46 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $18^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα 200μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 47:



Σχήμα 47 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm,  $\alpha = 18^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

### Σύγκριση κατανομών πίεσης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

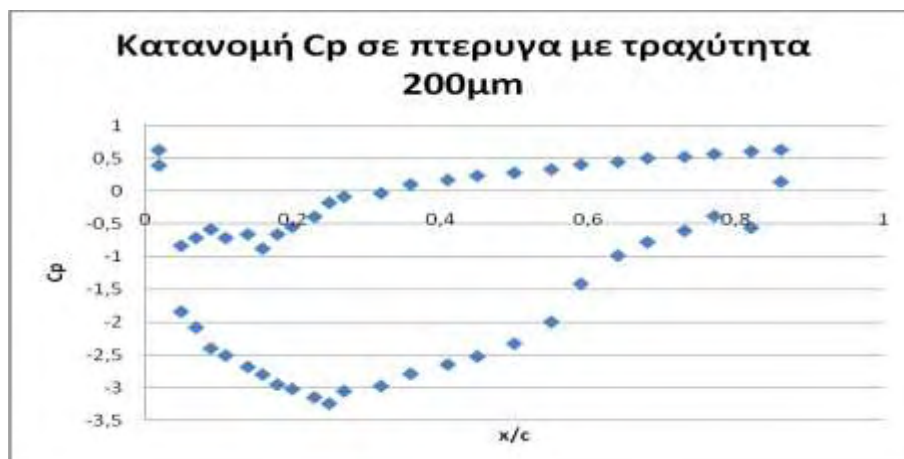
Στο Σχήμα 48 παρατηρούμε ότι από την γωνία των  $0^\circ$  μέχρι την γωνία των  $12^\circ$  παρατηρήθηκε ένα άνοιγμα της κατανομής των συντελεστών πίεσης και κατά συνέπεια μια αύξηση, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, του συντελεστή άντωσης. Το φαινόμενο αυτό, όμως έπαψε να έχει ισχύ για την περίπτωση της γωνία πρόσπτωσης  $18^\circ$  όπου παρατηρήσαμε μια μετατόπιση των τιμών προς τα άνω με ταυτόχρονη μείωση του ανοίγματος του εύρους της κατανομής συντελεστή πίεσης.



Σχήμα 48 Σύγκριση συντελεστών πίεσης σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης για τραχύτητα  $200\mu\text{m}$  και ταχύτητα  $5\text{m/s}$

#### 4.4.2 Ταχύτητα Αέρα $10\text{m/s}$

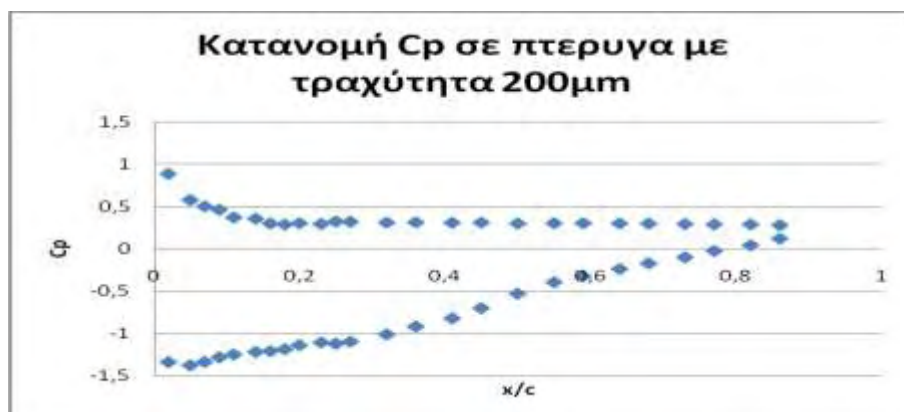
Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα  $200\mu\text{m}$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 49:



Σχήμα 49 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα  $200\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

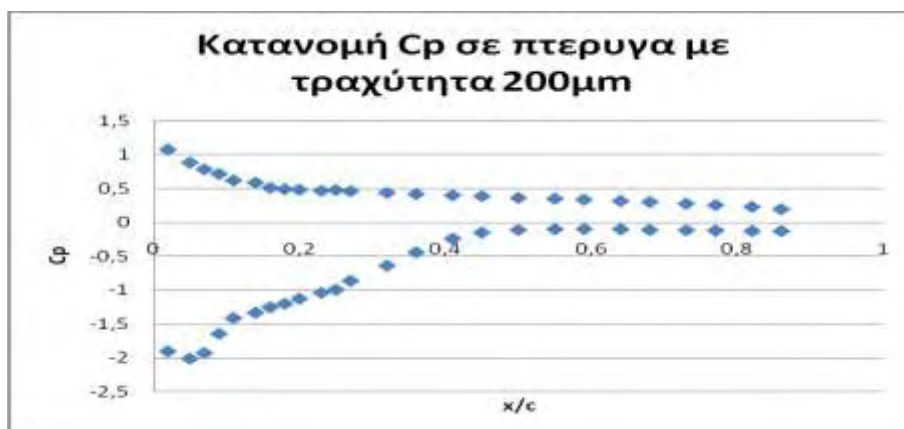


Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα  $200\mu\text{m}$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 50:



Σχήμα 50 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα  $200\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

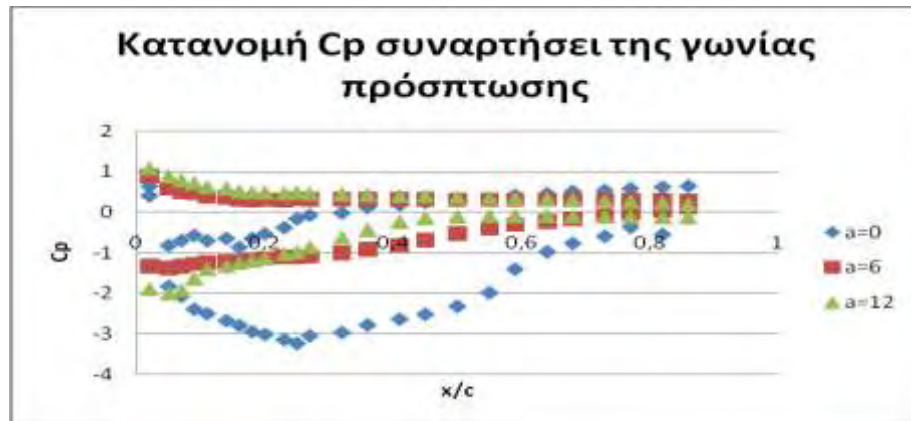
Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης με επιφανειακή τραχύτητα  $200\mu\text{m}$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 51:



Σχήμα 51 Κατανομή συντελεστή πίεσης για τραχύτητα  $200\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

### Σύγκριση συντελεστών πίεσης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

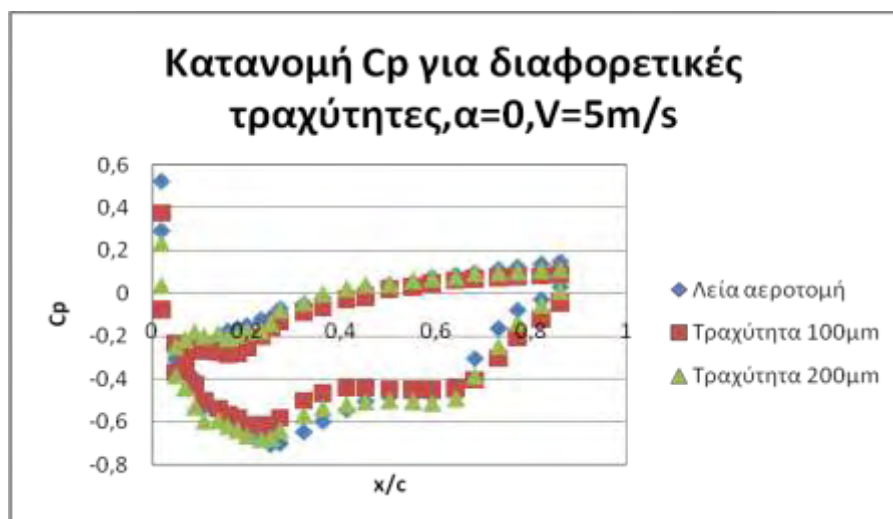
Στο Σχήμα 52 παρατηρούμε ότι με αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης μειώνεται το εύρος των τιμών στατικής πίεσης και παρατηρείται μια μορφοποίηση και σταθεροποίηση της ροής.



Σχήμα 52 Σύγκριση συντελεστών πίεσης για τραχύτητα 200μm,  $V = 10\text{m/s}$

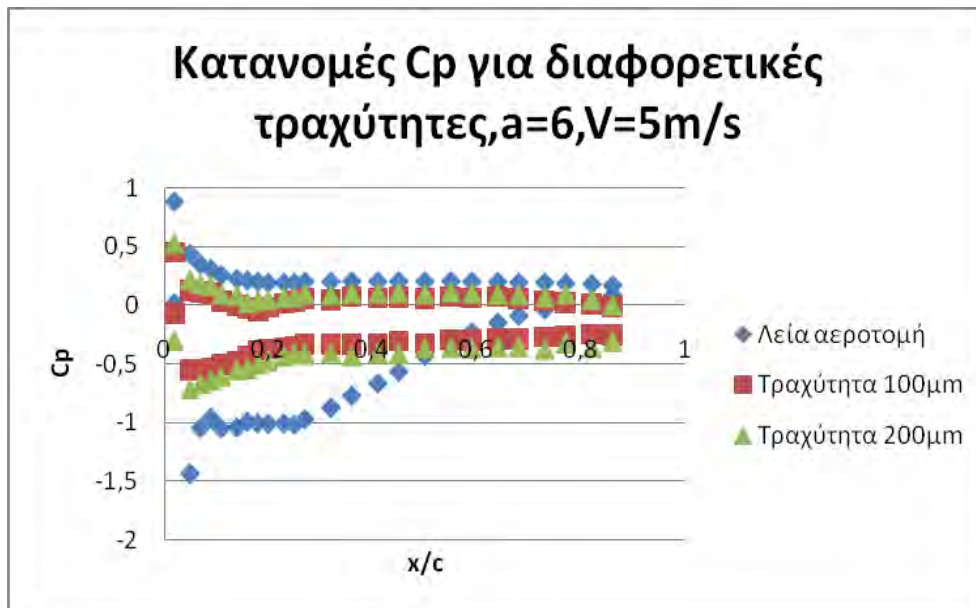
### **4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τραχύτητες 0, 100μm και 200μm**

Για την περίπτωση της γωνίας πρόσπτωσης  $0^\circ$  και για ταχύτητα αέρα 5 m/s, συγκρίνουμε στο Σχήμα 53 τις περιπτώσεις της λείας αεροτομής, της αεροτομής με τραχύτητα 100μm και 200μm.



Σχήμα 53 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$ )

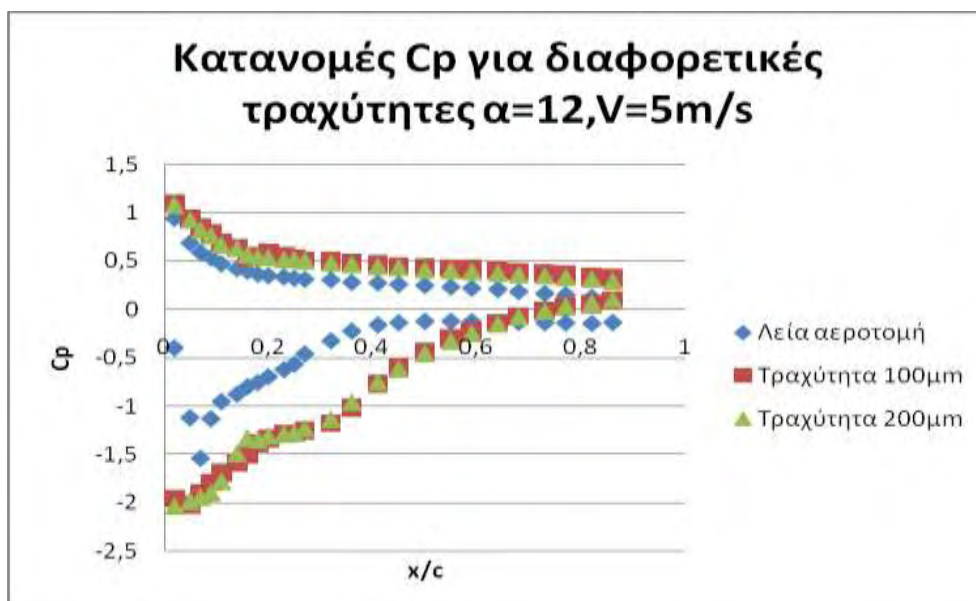
Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε μια επίδραση της τραχύτητας επάνω στην αεροτομή και ειδικά σε μερικά τμήματα της αεροτομής αυτή η επίδραση είναι πιο εμφανής. Βλέπουμε εδώ ότι με την εφαρμογή της τραχύτητας. Αντίστοιχα για την περίπτωση της γωνίας πρόσπτωσης  $6^\circ$ , έχουμε τα εξής αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 54.



Σχήμα 54 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$ )

Σε αυτή την γωνία πρόσπτωσης παρατηρούμε μια ελάττωση των συντελεστών πίεσης γύρω από την αεροτομή, καθώς αυξάνουμε την επιφανειακή τραχύτητα από 0μm σε 100μm και μια αντίστοιχη «ελαφρά» αύξηση των συντελεστών πίεσης από 100μm σε 200μm. Επομένως έχουμε μια ελάττωση του συντελεστή άντωσης με την αύξηση της τραχύτητας.

Για την περίπτωση της γωνίας πρόσπτωσης  $12^\circ$ , προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 55.



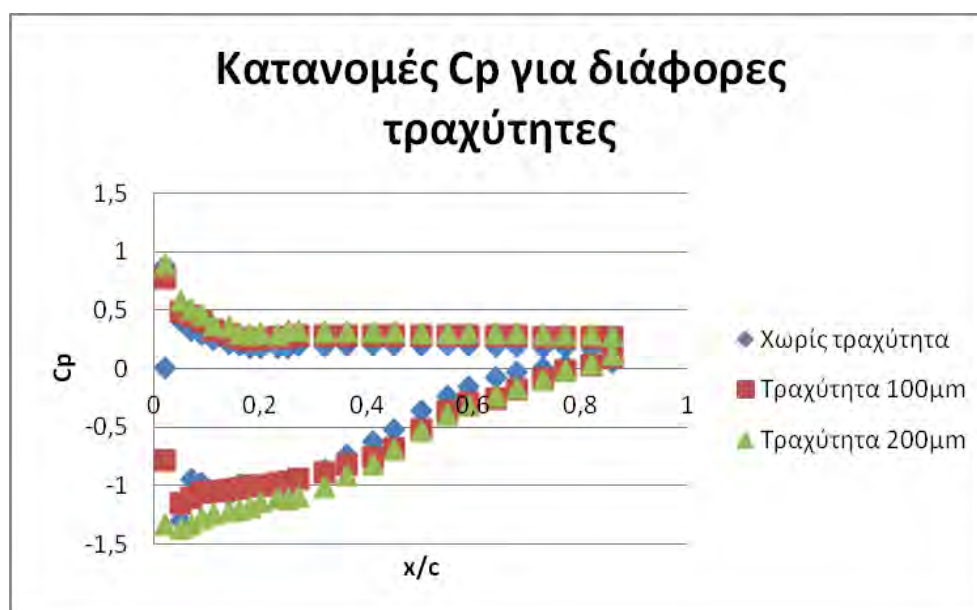
Σχήμα 55 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$ )

Βλέπουμε εδώ, σε αντίθεση με την περίπτωση των  $6^\circ$ , μια αύξηση της συνιστώσας πίεσης αντίστοιχα γύρω από τον άξονα  $x/c$ , γεγονός που σημαίνει αύξηση της συνιστώσας



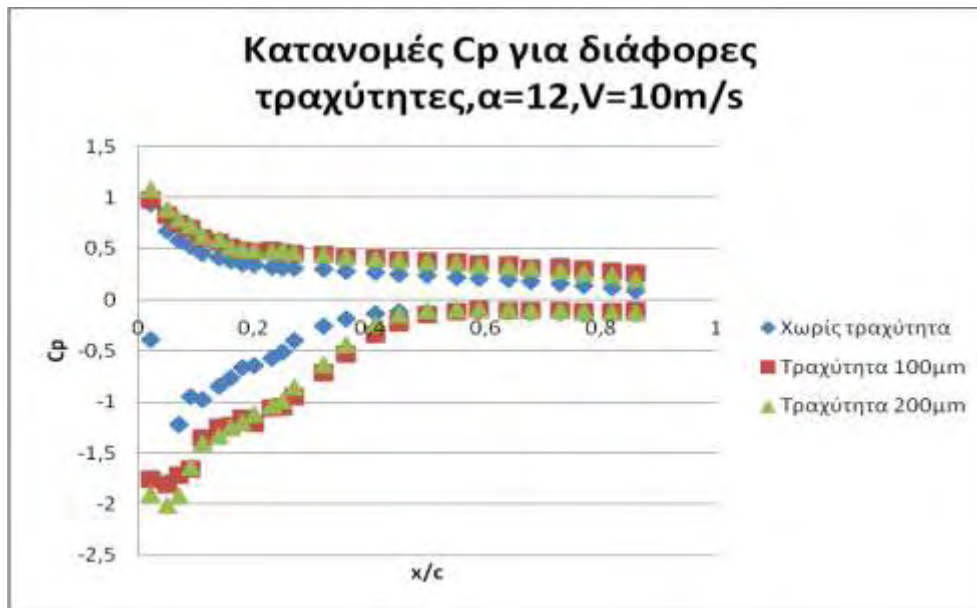
άντωσης με την αύξηση της τραχύτητας. Επίσης, αυτό που εξάγεται είναι ότι παρά τον διπλασιασμό της επιφανειακής τραχύτητας από 100μm σε 200 μm δεν προέκυψε αντίστοιχη αύξηση των συνιστωσών πίεσης και άντωσης. Βλέπουμε εδώ ότι η επίδραση της τραχύτητας στον συντελεστή άντωσης δεν είναι γραμμική. Εδώ να παρατηρήσουμε ότι έχουμε αναντιστοιχία των δύο περιπτώσεων (περιπτώσεις 6° και 12°), φαινόμενο άξιο αναφοράς και ίσως ενδεδειγμένης έρευνας για την κατανόηση του.

Για ταχύτητα αέρα 10 m/s, και για γωνία πρόσπτωσης 6°, συγκρίνουμε τις περιπτώσεις της λείας αεροτομής, της αεροτομής με εφαρμοσμένη επιφανειακή τραχύτητα 100μm και της αεροτομής με επιφανειακή τραχύτητα 200μm στο Σχήμα 56.



Σχήμα 56 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$ )

Στο Σχήμα 57 για γωνία πρόσπτωσης 12° και ταχύτητα αέρα 10 m/s παρατηρούμε, όπως και στα προηγούμενα, ένα «άνοιγμα» της κατανομής πίεσης με την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας. Πάντως η εξάρτηση αυτή δεν παρουσιάζει γραμμικότητα.

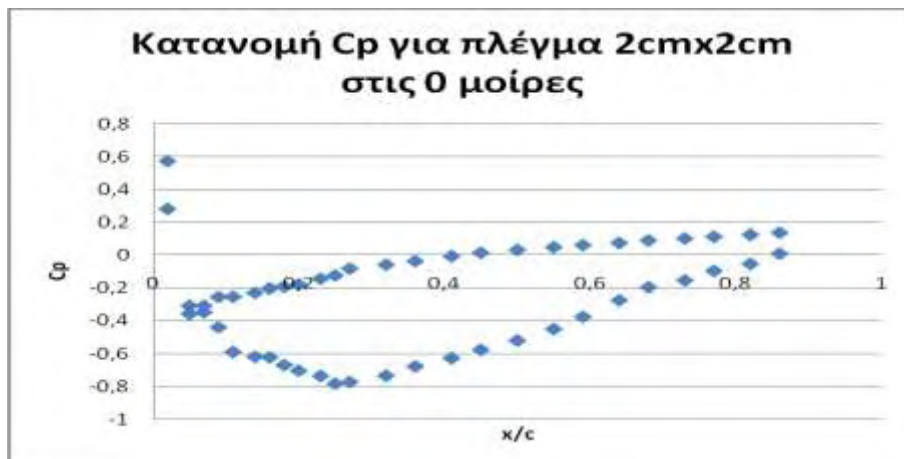


Σχήμα 57 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τραχύτητες ( $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$ )

## 4.6 Επίδραση της Τύρβης Αέρα με Πλέγμα $2\text{cm} \times 2\text{cm}$

### 4.6.1 Λεία αεροτομή με ταχύτητα αέρα $5\text{ m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $5\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 58.

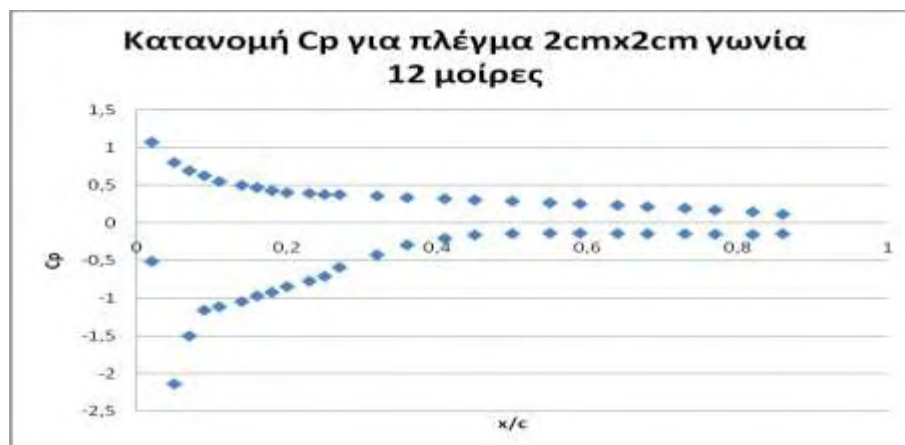


Σχήμα 58 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $5\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 59.



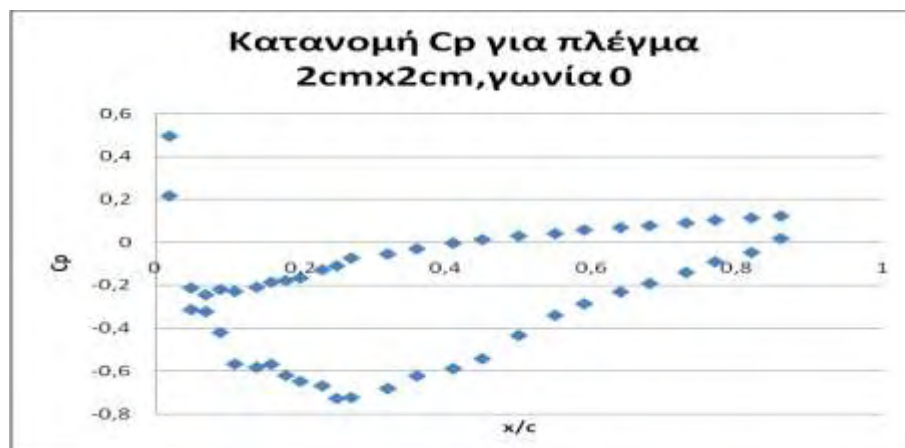
**Σχήμα 59** Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 2cmx2cm,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$   
Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 60**.



**Σχήμα 60** Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 2cmx2cm,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

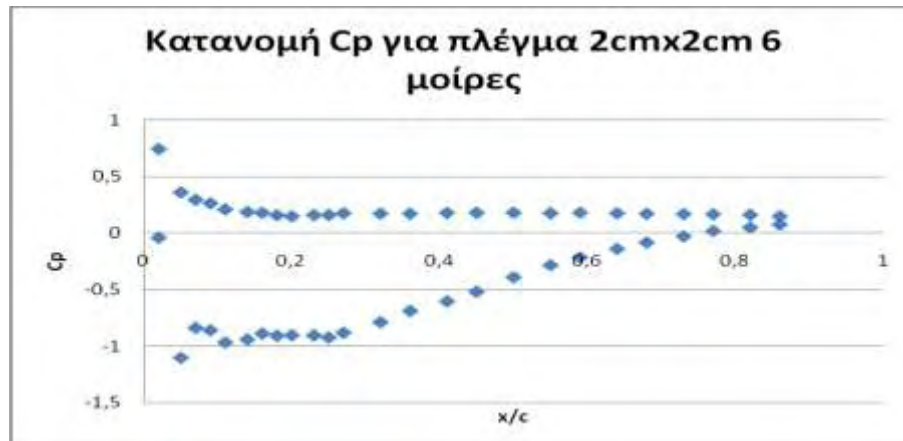
#### 4.6.2 Λεία αεροτομή με ταχύτητα αέρα 10 m/s

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα 10m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 61**:



**Σχήμα 61** Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 2cmx2cm,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 62:

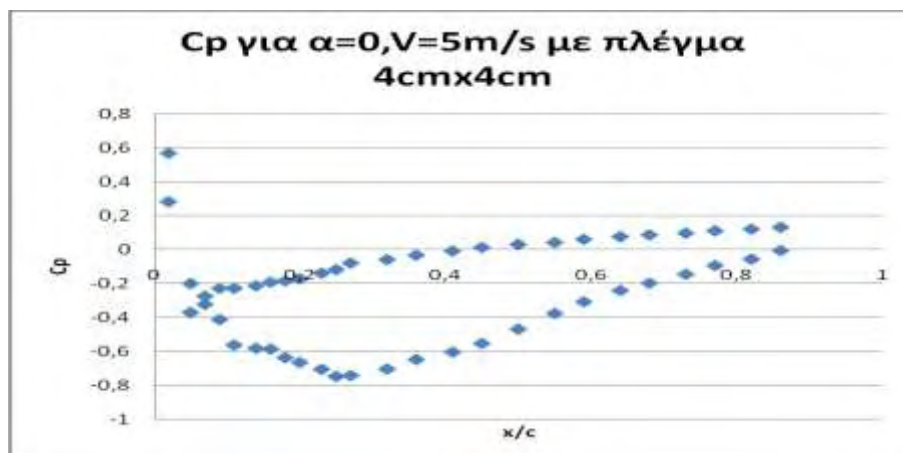


Σχήμα 62 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

## 4.7 Επίδραση της Τύρβης Αέρα με Πλέγμα $4\text{cm} \times 4\text{cm}$

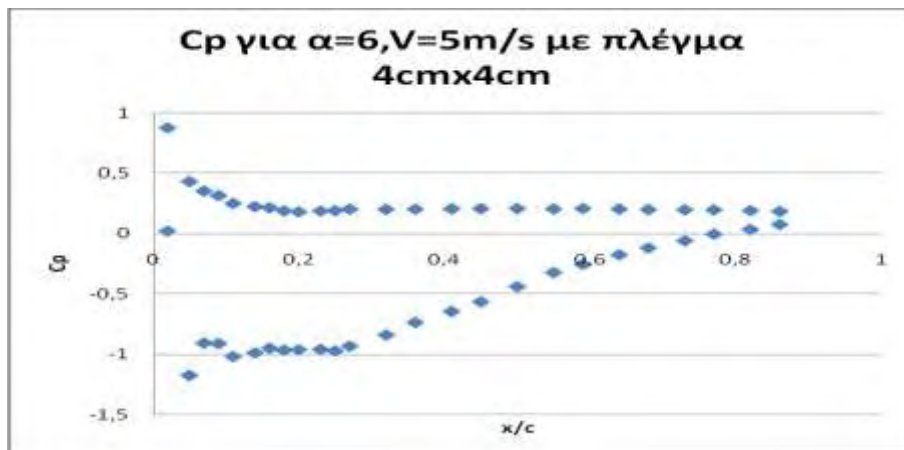
### 4.7.1 Λεία αεροτομή με ταχύτητα αέρα $5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $5\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 63:



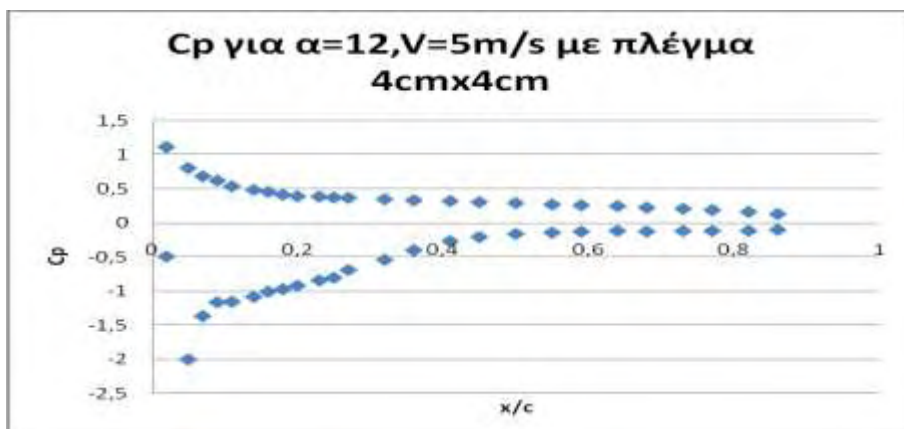
Σχήμα 63 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 64.



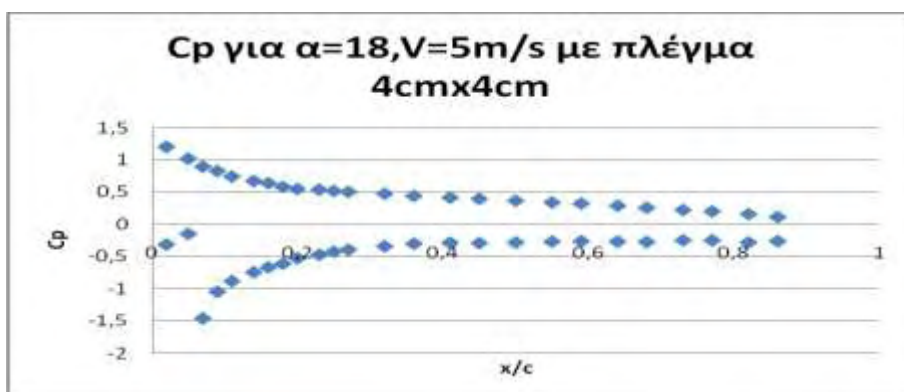
Σχήμα 64 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 5 \text{ m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 65.



Σχήμα 65 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $V = 5 \text{ m/s}$

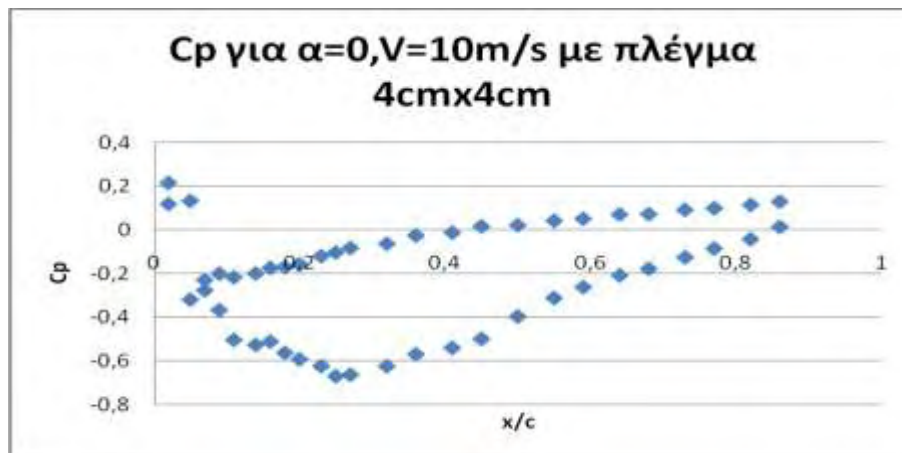
Για γωνία πρόσπτωσης  $18^\circ$  και ταχύτητα αέρα 5m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 66:



Σχήμα 66 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm,  $\alpha = 18^\circ$ ,  $V = 5 \text{ m/s}$

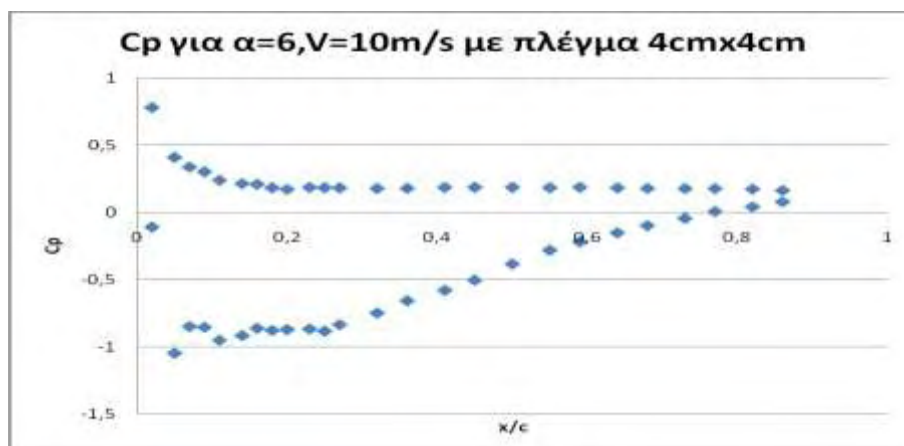
#### 4.7.2 Λεία αεροτομή με ταχύτητα αέρα 10 m/s

Για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητα αέρα 10m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$  που παρουσιάζεται στο Σχήμα 67:



Σχήμα 67 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm,  $\alpha=0^\circ$   $V = 10 \text{ m/s}$

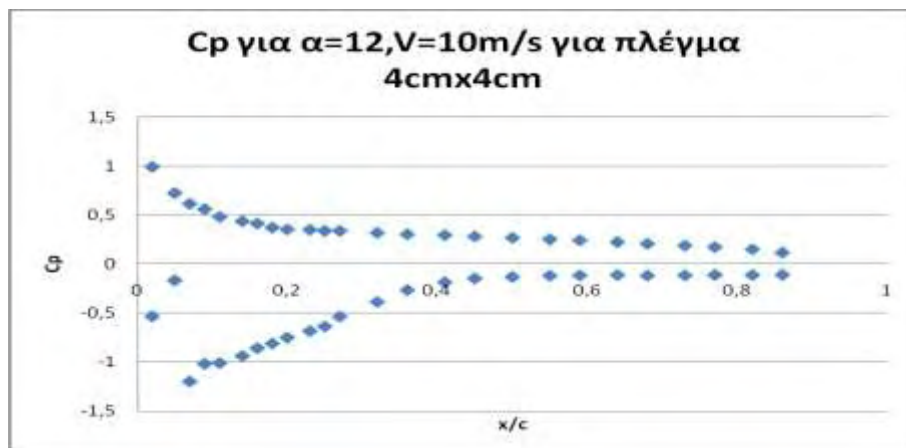
Για γωνία πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητα αέρα 10m/s έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 68:



Σχήμα 68 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα 4cmx4cm,  $\alpha=6^\circ$ ,  $V = 10 \text{ m/s}$

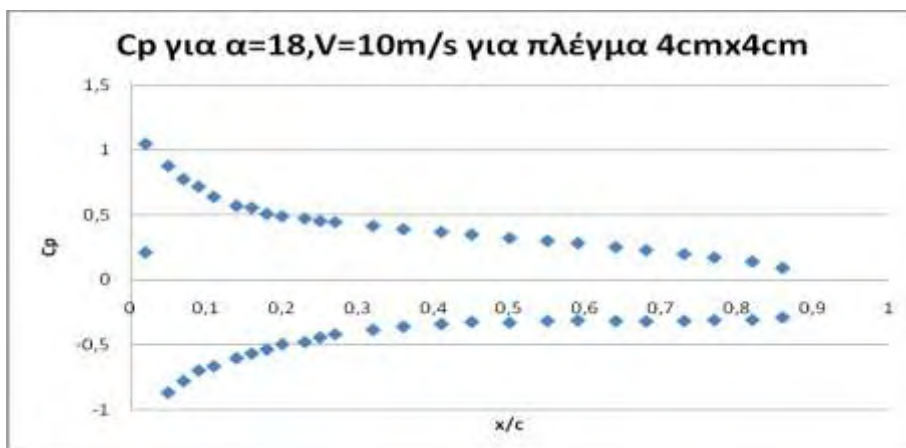


Για γωνία πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 69:



Σχήμα 69 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ ,  $\alpha=12^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

Για γωνία πρόσπτωσης  $18^\circ$  και ταχύτητα αέρα  $10\text{m/s}$  έχουμε την κατανομή συντελεστή πίεσης  $C_p$ , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 70:

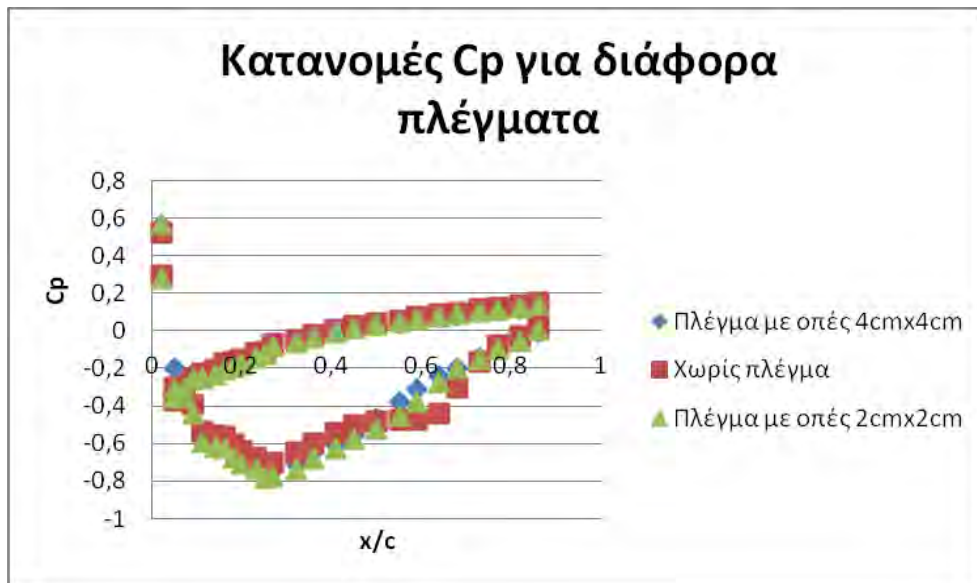


Σχήμα 70 Κατανομή συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με πλέγμα  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ ,  $\alpha=18^\circ$ ,  $V = 10\text{m/s}$

## 4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων με και χωρίς πλέγματα

### 4.8.1 Λεία αεροτομή

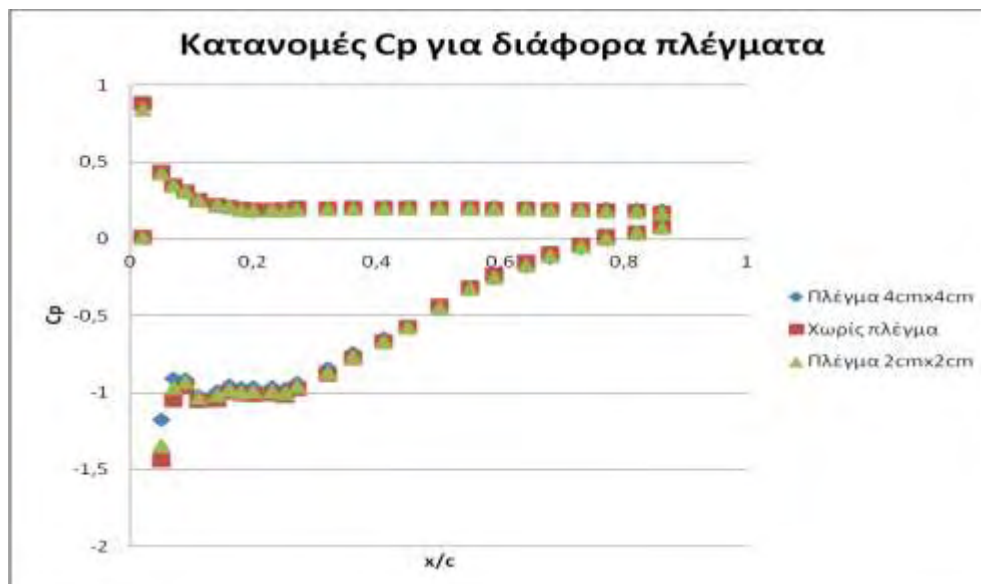
Για την περίπτωση της γωνίας πρόσπτωσης  $0^\circ$  και ταχύτητας αέρα  $5\text{m/s}$ , έχουμε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 71.



Σχήμα 71 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$ )

Παρατηρούμε ότι, με εξαίρεση ένα «σπάσιμο» σε τμήμα της αεροτομής που παρατηρείται μόνο στην περίπτωση χωρίς πλέγμα ανάντη της αεροτομής, οι κατανομές συντελεστών πίεσης ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό.

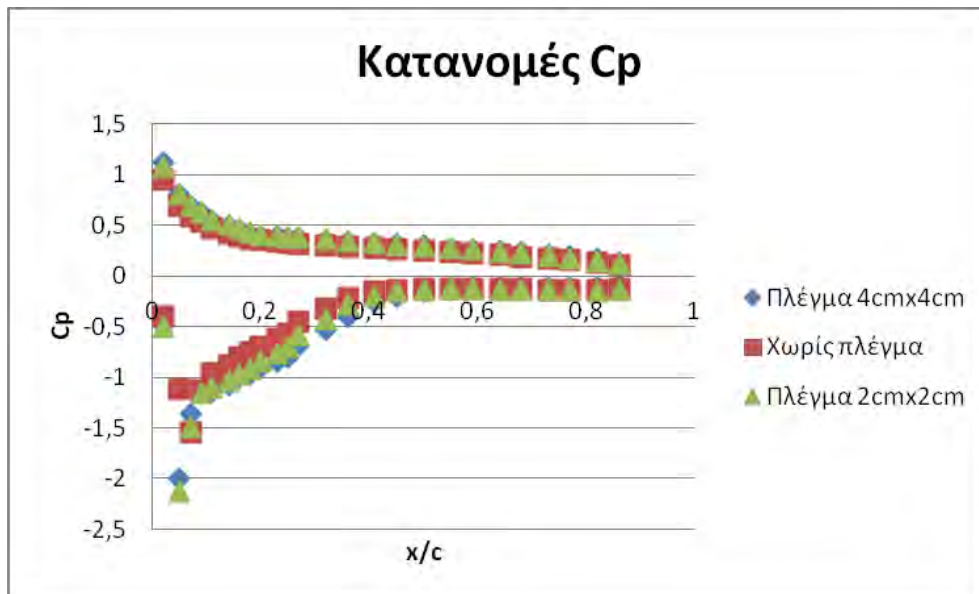
Το Σχήμα 72 για την περίπτωση της γωνίας πρόσπτωσης  $6^\circ$  και ταχύτητας αέρα  $5\text{m/s}$  δείχνει ότι οι διαφορές είναι αμελητέες.



Σχήμα 72 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 5\text{m/s}$ )

Για την περίπτωση γωνίας πρόσπτωσης  $12^\circ$  και ταχύτητας αέρα  $5\text{m/s}$  η σύγκριση των περιπτώσεων διαφορετικών πλεγμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 73.

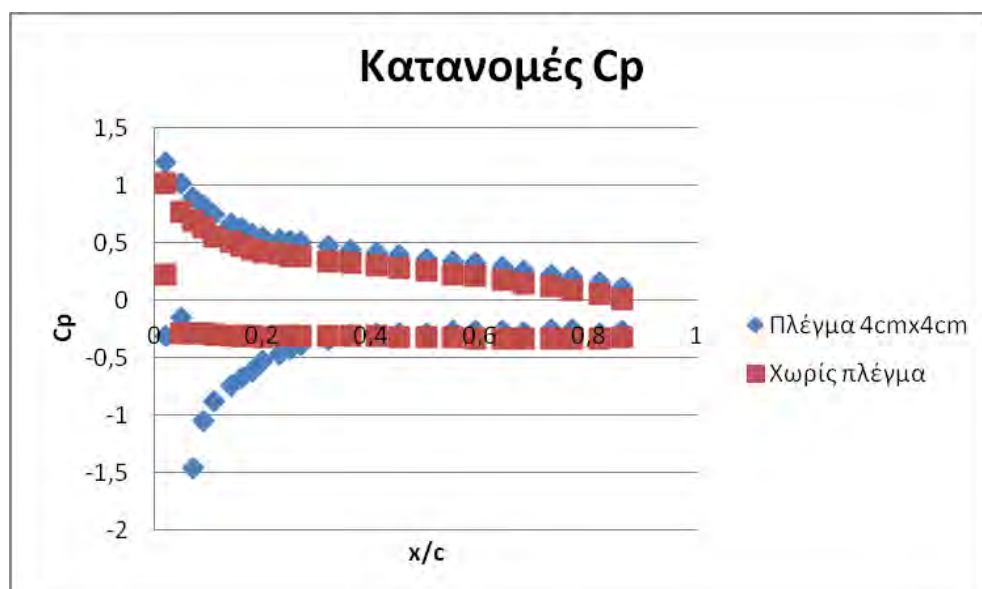




**Σχήμα 73 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=12^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )**

Στο παραπάνω σχήμα έχουμε μια μικρή απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων για το κάτω μέρος της αεροτομής. Εν γένει, έχουμε μια μικρή αύξηση των συντελεστών πίεσης, πράγμα που δείχνει ότι με την χρησιμοποίηση των πλεγμάτων και την δημιουργία τύρβης πετυχαίνουμε μια σταθεροποίηση της ροής επάνω στην αεροτομή, και μια μικρή αύξηση του συντελεστή άντωσης.

Για την περίπτωση των  $18^\circ$  και για ταχύτητα ροής  $5\text{ m/s}$ , έχουμε τις κατανομές συντελεστών πίεσης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 74.



**Σχήμα 74 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=18^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )**

Εδώ παρατηρούμε άνοιγμα της καμπύλης και αύξηση των συντελεστών πίεσης για την περίπτωση του πλέγματος με οπές  $4\text{cm}\times 4\text{cm}$  σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς πλέγμα.

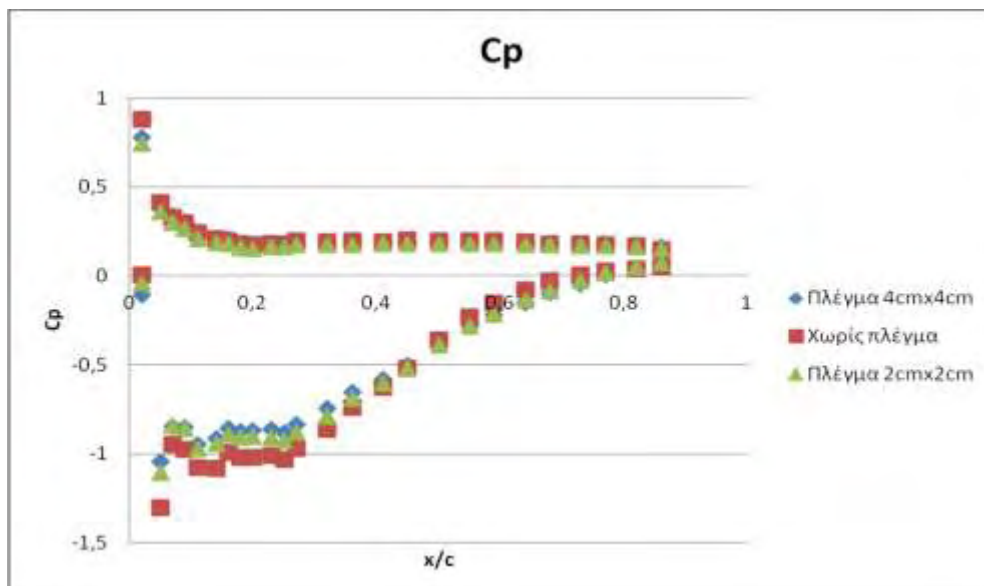
Παρατηρούμε μια διακύμανση στις τιμές που λαμβάναμε με το μικρομανόμετρο στην περίπτωση των πλεγμάτων, πράγμα που δεν επέτρεψε να λάβουμε αξιόπιστες μετρήσεις για την περίπτωση του πλέγματος με οπές 2cmx2cm.

Επίσης για την περίπτωση της ταχύτητας αέρα 10 m/s και γωνίας πρόσπτωσης 0°, έχουμε τις κατανομές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 75.



Σχήμα 75 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ ,  $V=10\text{m/s}$ )

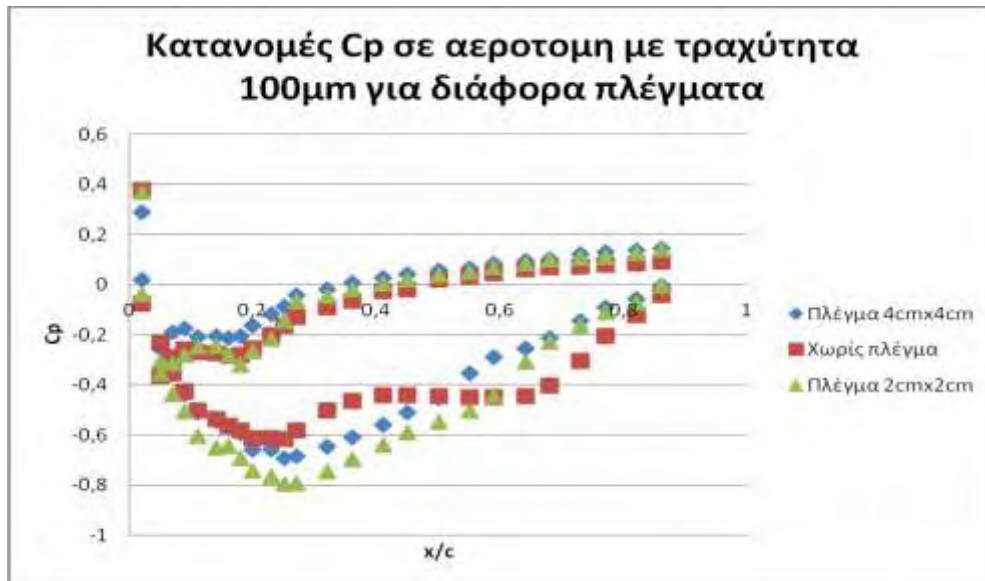
Για γωνία πρόσπτωσης 6° και ταχύτητα αέρα 10m/s έχουμε τα συγκριτικά αποτελέσματα στο Σχήμα 76:



Σχήμα Σύγκριση συντελεστή πίεσης για λεία αεροτομή με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ ,  $V=10\text{m/s}$ )

#### 4.8.2 Αεροτομή με επιφανειακή τραχύτητα 100μm

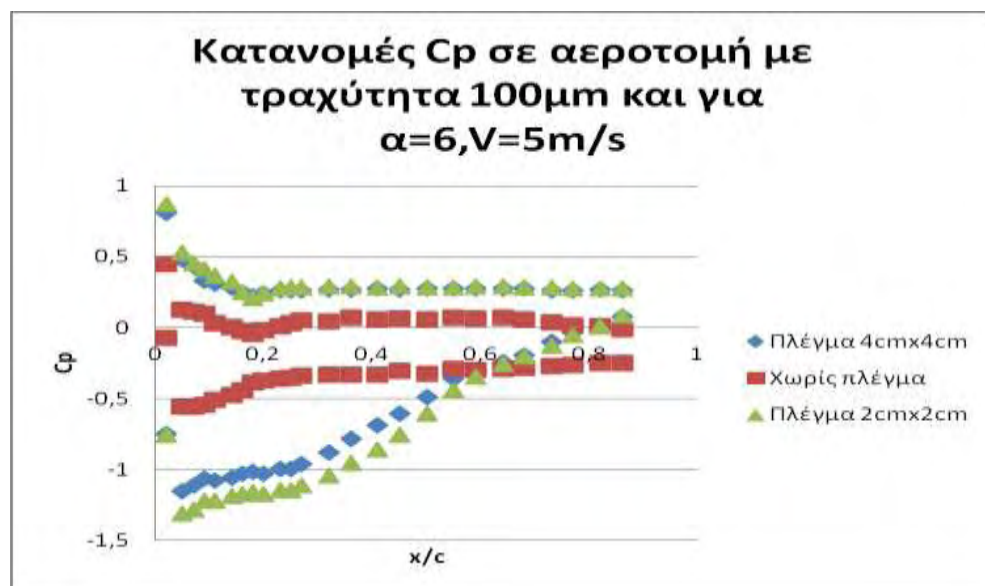
Για αεροτομή με ανάντη διάφορα πλέγματα, με επιφανειακή τραχύτητα 100μm και για γωνία πρόσπτωσης 0°, προκύπτουν τα συγκριτικά αποτελέσματα του Σχήματος 77.



Σχήμα 77 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )

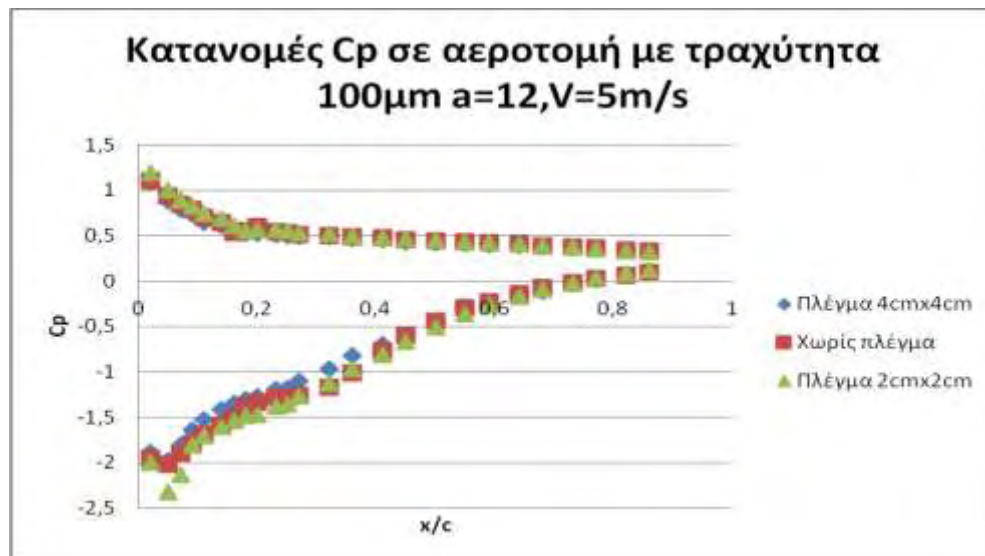
Παρατηρούμε ότι αλλάζει η μορφή της κατανομής για την περίπτωση της ροής χωρίς πλέγμα σε σχέση με τα πλέγματα. Επίσης παρατηρούμε ότι η κατανομή «ανοίγει» με τη χρήση των πλεγμάτων, πράγμα που καταδεικνύει την σταθεροποίηση της ροής με την χρήση όλο και πιο μικρού (σε διαστάσεις οπών) πλέγματος.

Ακολουθούν και για τις υπόλοιπες γωνίες τα συγκριτικά αποτελέσματα, τα οποία δίνουν την ίδια εικόνα με αυτή που περιγράψαμε παραπάνω.

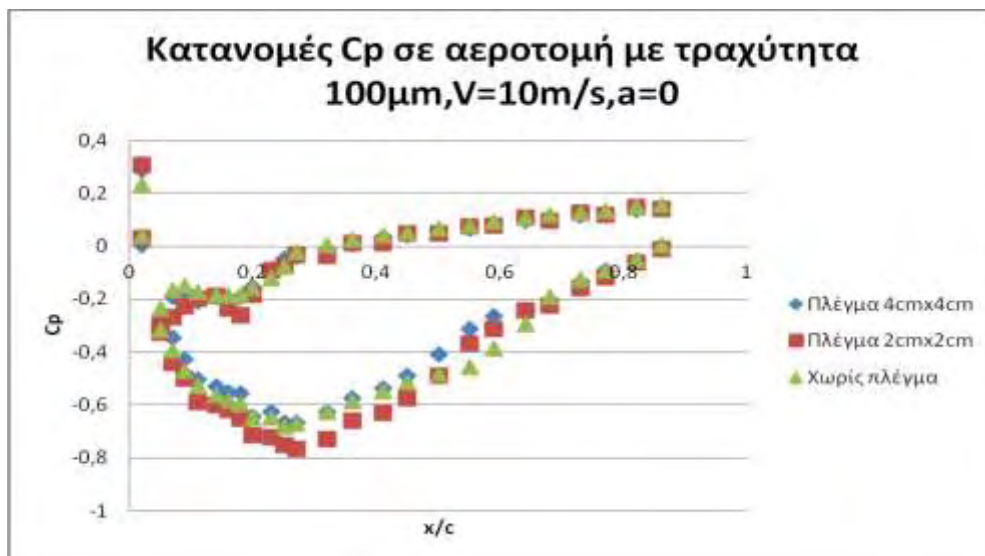


Σχήμα 78 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )

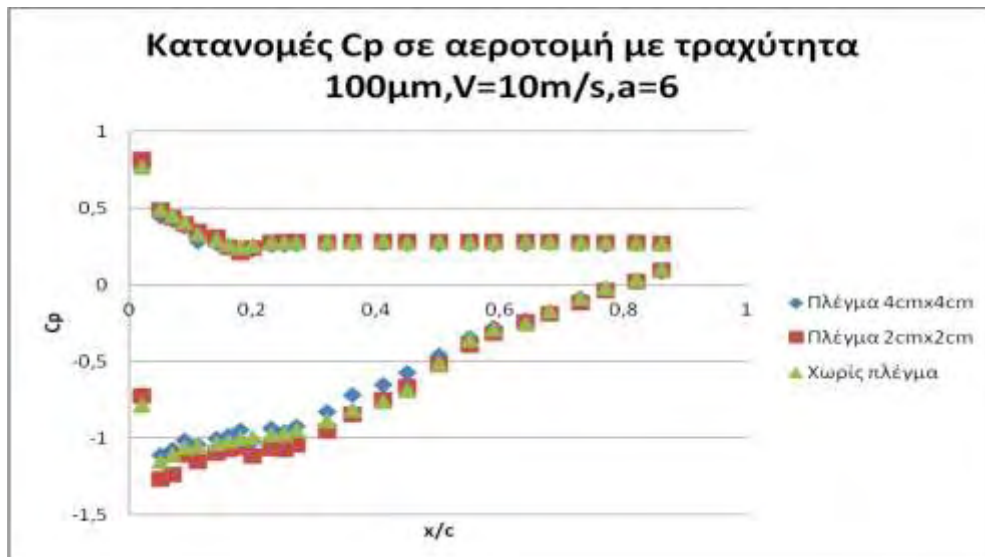
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται καθαρά ότι με την αύξηση της εισερχόμενης τύρβης αυξάνεται ο συντελεστής άντωσης καθώς με το άνοιγμα της καμπύλης του συντελεστή πίεσης είναι ευνόητο ότι η άντωση γύρω από την πτέρυγα αυξάνει.



Σχήμα 79 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=12^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )



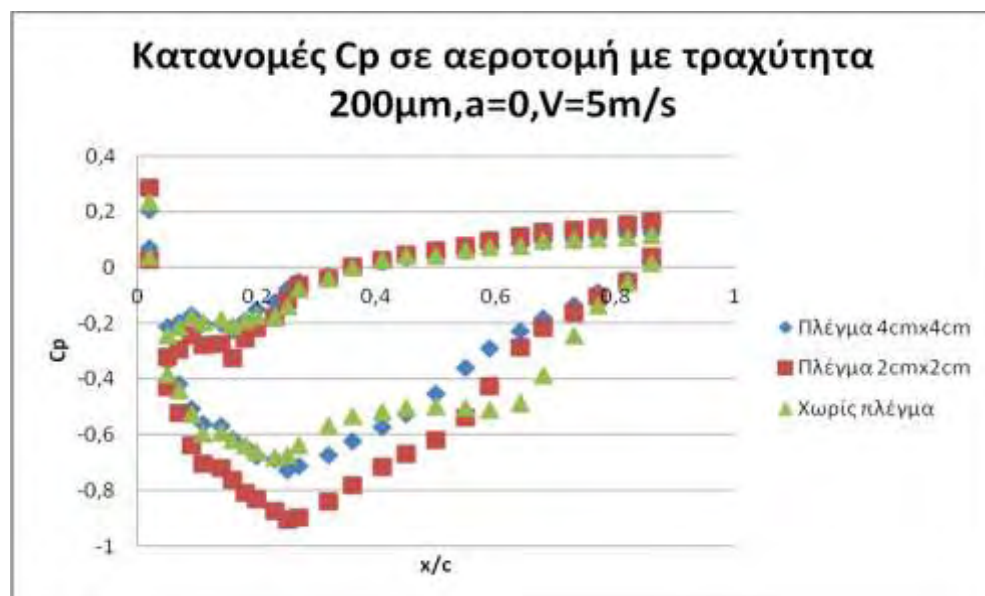
Σχήμα 80: Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ ,  $V=10\text{m/s}$ )



Σχήμα 81 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 100μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ ,  $V=10\text{m/s}$ )

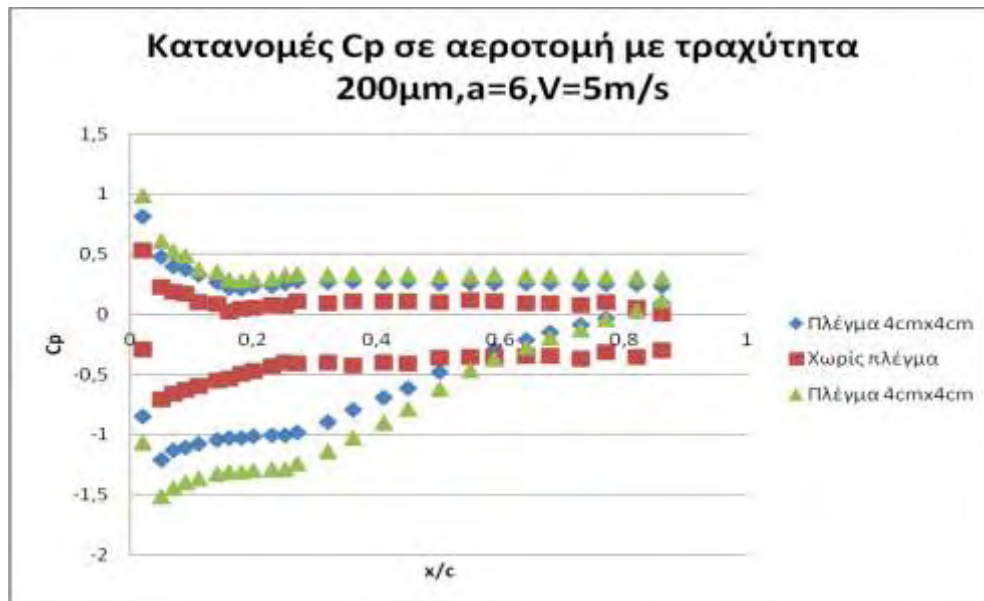
#### 4.8.3 Αεροτομή με επιφανειακή τραχύτητα 200μm

Για αεροτομή με επιφανειακή τραχύτητα 200μm και για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$ , προκύπτουν τα συγκριτικά αποτελέσματα του Σχήματος 82.



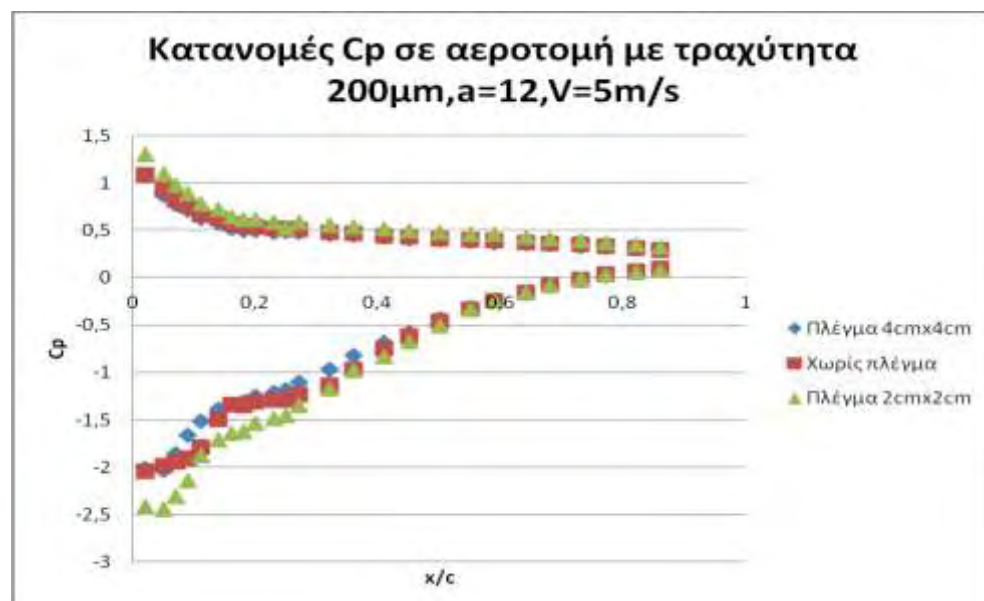
Σχήμα 82 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=0^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )



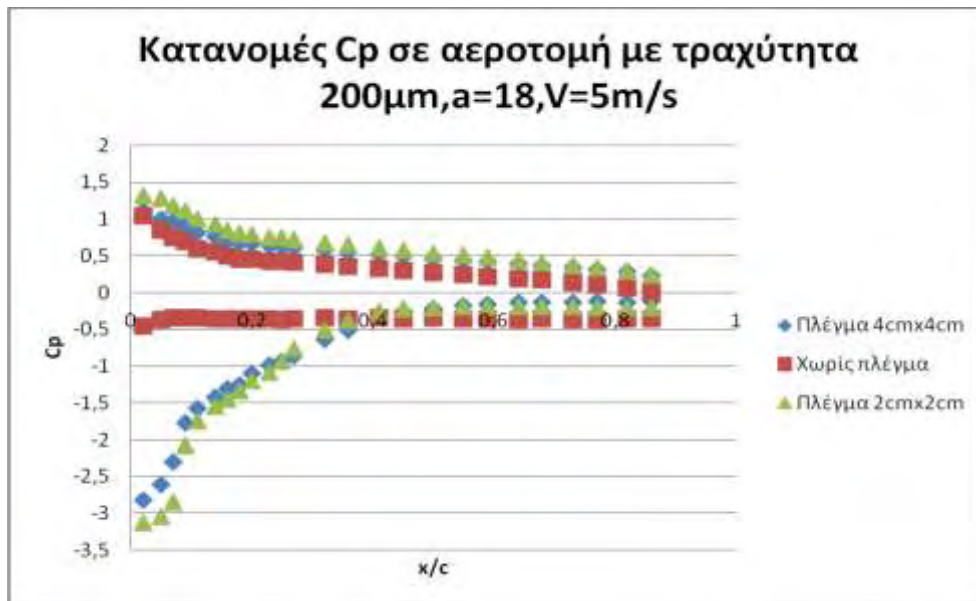


Σχήμα 83 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )

Όπως και στο Σχήμα 77, έτσι και στο Σχήμα 83 παρατηρούμε μια αλλαγή στην μορφή της καμπύλης όταν συγκρίνουμε την απλή περίπτωση χωρίς πλέγμα με τις περιπτώσεις όπου εφαρμόστηκαν τα πλέγματα.

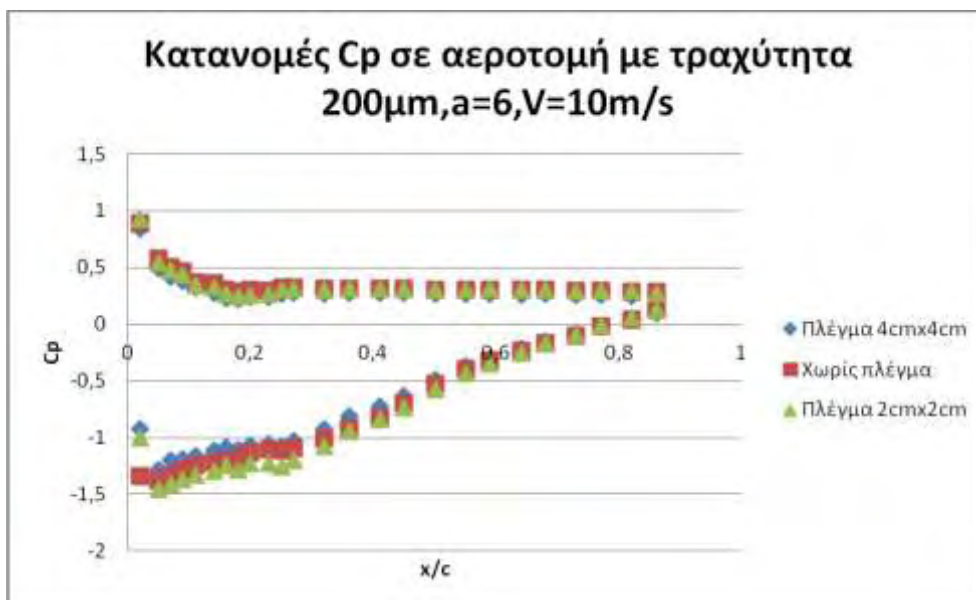


Σχήμα 84 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=12^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )

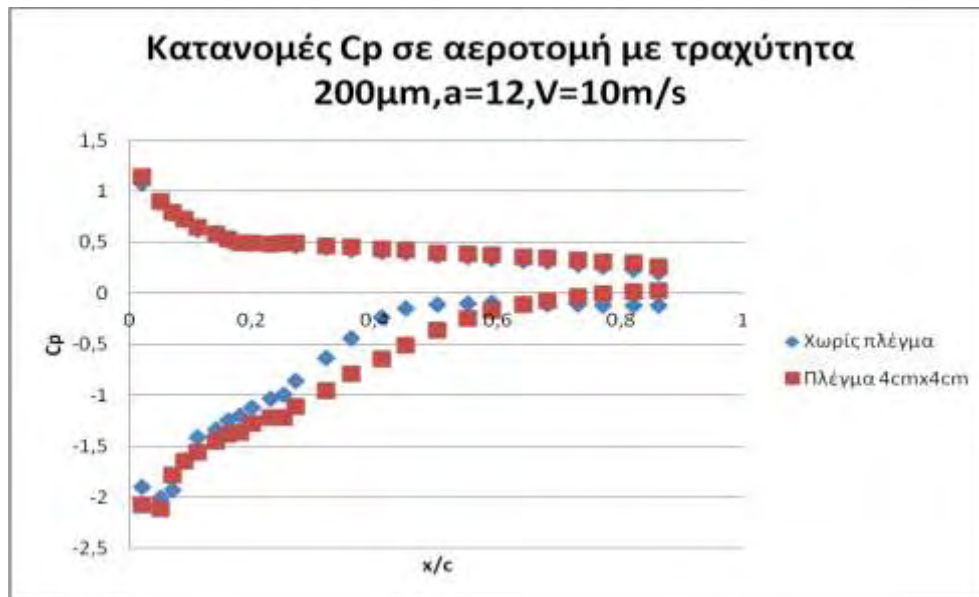


Σχήμα 85 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=18^\circ$ ,  $V=5\text{m/s}$ )

Στο Σχήμα 85 βλέπουμε μια μεγάλη διαφοροποίηση στις τιμές του συντελεστή πίεσης για το μπροστινό μισό τμήμα της αεροτομής και μια πιο «ανοιχτή» κατανομή πίεσης γύρω από αυτό το τμήμα για τις περιπτώσεις των αεροτομών με την εισαγωγή διαφορετικών διαστάσεων πλεγμάτων ανάντη της αεροτομής σε σύγκριση με την «απλή» περίπτωση χωρίς εισαγωγή κάποιου πλέγματος.



Σχήμα 86 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ ,  $V=10\text{m/s}$ )



Σχήμα 87 Σύγκριση συντελεστή πίεσης για τραχύτητα 200μm με και χωρίς πλέγμα ( $\alpha=6^\circ$ ,  $V=10\text{m/s}$ )

#### 4.9 Σύγκριση μετρήσεων με αποτελέσματα του κώδικα CAFFA

Για να επιβεβαιωθούν τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήσαμε τον κώδικα CAFFA, για τον οποίο δόθηκαν κάποια στοιχεία παραπάνω. Εισάγαμε την εξίσωση μορφής της αεροτομής στο υπολογιστικό κώδικα, με όλες τις συντεταγμένες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.1 και εξάγαμε μεταξύ άλλων τον συντελεστή μέγιστης άντωσης που συγκρίθηκε με αυτόν από τις πειραματικές μετρήσεις στατικής πίεσης γύρω από την πτέρυγα, σύμφωνα με την εξίσωση 2.41. Συγκεκριμένα, έχουμε για τις παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

##### Περίπτωση 1η

Συνθήκες:  $Re = 208.333$ ,  $\alpha = 0^\circ$ , Επιφανειακή τραχύτητα =  $20\mu\text{m}$

Συντελεστής μέγιστης άντωσης από CAFFA:  $C_L = 0,3064741$

Συντελεστής μέγιστης άντωσης από πείραμα:  $C_L = 0,258839$

**Απόκλιση τιμών  $C_L = 15,54\%$**

##### Περίπτωση 2η

Συνθήκες:  $Re = 208.333$ ,  $\alpha = 0^\circ$ , Επιφανειακή τραχύτητα =  $100\mu\text{m}$

Συντελεστής μέγιστης άντωσης από CAFFA:  $C_L = 0,2990732$

Συντελεστής μέγιστης άντωσης από πείραμα:  $C_L = 0,293825$

**Απόκλιση τιμών  $C_L = 0,17\%$**



### **Περίπτωση 3η**

Συνθήκες:  $Re=208.333$ ,  $\alpha = 0^\circ$ , Επιφανειακή τραχύτητα =  $200\mu m$

Συντελεστής μέγιστης άντωσης από CAFFA:  $C_L = 0,4990230$

Συντελεστής μέγιστης άντωσης από πείραμα:  $C_L = 0,463396$

**Απόκλιση τιμών  $C_L = 7,14\%$**

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις του πειράματος από την αριθμητική προσομοίωση ότι είναι σχετικά μικρές, αφού κυμαίνονται μεταξύ 0%-15%. Εδώ να παρατηρήσουμε ότι για την πρώτη περίπτωση κάναμε την παραδοχή της λείας αεροτομής για τις πειραματικές μετρήσεις και ότι στην αριθμητική προσομοίωση περιοριζόμαστε από τον κώδικα Caffa στον ορισμό της τραχύτητας σε  $20\mu m$ , σαν κατώτερη δυνατή επιφανειακή τραχύτητα.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Συνδυάζοντας όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις που αναφέρονται στην παραμετρική μελέτη με στόχο να εξάγουμε συνολικά συνδυαστικά συμπεράσματα για την επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας και της εισερχόμενης τύρβης στη ροή γύρω από την πτέρυγα NACA 4418, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Με την αύξηση της τραχύτητας έχουμε αύξηση του συντελεστή άντωσης. Η αύξηση αυτή δεν παρουσιάζει γραμμικότητα, καθώς από την περίπτωση της επιφανειακής τραχύτητας 100μm έως την τραχύτητα 200μm η αύξηση του συντελεστή άντωσης είναι αισθητά μικρότερη από την μετάβαση από την περίπτωση της λείας αεροτομής στην περίπτωση της επιφανειακής τραχύτητας των 100μm.
- Με την αύξηση της εισερχόμενης τύρβης αυξάνεται ο συντελεστής άντωσης της αεροτομής. Και σε αυτή την επίδραση όμως, όπως και στην περίπτωση της εισαγωγής τραχύτητας, δεν υπάρχει γραμμικότητα και αντιστοιχία μεταξύ των δύο πλεγμάτων και αυτής χωρίς πλέγμα.
- Με την αύξηση της τύρβης μέσω πλεγμάτων ανάντη της ροής, έχουμε γενικώς καθυστέρηση της ανακυκλοφορίας της ροής γύρω από την αεροτομή.
- Επίσης, με την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας έχουμε γενικά καθυστέρηση της ανακυκλοφορίας της ροής γύρω από την αεροτομή.
- Γενικά, με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης από 0° έως και 18° παρατηρείται αύξηση του συντελεστή άντωσης καθώς και σταθεροποίησης της ροής επάνω στην αεροτομή.
- Από την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος, για τις ίδιες συνθήκες, συμπεραίνεται ότι σε μεγάλο ποσοστό οι συντελεστές μέγιστης άντωσης είναι όμοιοι με αυτούς που εξήχθησαν από τις πειραματικές μετρήσεις.

## 5.2 Προτάσεις Βελτίωσης

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων παρουσιάστηκαν δυνατότητες και ευκαιρίες υπολογισμού διαφόρων μεγεθών. Όμως εξαιτίας διαφόρων αδυναμιών των μετρητικών διατάξεων και γενικά του εργαστηριακού εξοπλισμού, περιοριστήκαμε σε αυτά που είχαμε στη διάθεσή μας στον χρόνο και στην χρονική συγκυρία διεξαγωγής των μετρήσεών μας. Μερικές προτάσεις που θα βελτίωναν την ποιότητα, εγκυρότητα, και ταχύτητα των μετρήσεων καθώς και για την συνολική εικόνα των διαφόρων ροϊκών συνθηκών γύρω από την πτέρυγα είναι οι εξής:

- Χρησιμοποίηση μηχανισμού Digital Pressure Measurement (Scanivalve), με τον οποίο θα επιταχύνουμε την λήψη των αποτελεσμάτων συντομότερα, καθώς επιτρέπει την λήψη πίεσης σε περισσότερα του ενός σημεία. Στην δική μας περίπτωση θα μετρούσε ταυτόχρονα σε περισσότερες οπές πίεσης, επιταχύνοντας αισθητά το χρόνο εκτέλεσης του πειράματος.
- Χρησιμοποίηση σταθεροποιητή τάσης στην παροχή ρεύματος στον inverter του ανεμιστήρα της υποηχητικής αεροσήραγγας του εργαστηρίου Ρ&Σ, ώστε να διασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση η σταθερή ταχύτητα προσπίπτουσας ροής στην αεροτομή και να μην υπάρχει ανάγκη συνεχούς βαθμονόμησής της.
- Χρήση ενός Laser με σύστημα κυλινδρικών φακών για οπτικοποίηση της ροής σε διάφορες τομές στην περιοχή γύρω από την αεροτομή.
- Χρήση του ανεμομέτρου θερμού σύρματος για λήψη μετρήσεων ταχύτητας σε διάφορα σημεία γύρω από την αεροτομή και όχι μόνο επάνω στην αεροτομή.
- Εναλλακτικά, χρήση του ανεμομέτρου Laser Doppler για λήψη μετρήσεων ταχύτητας σε διάφορα σημεία γύρω από την αεροτομή και όχι μόνο επάνω στην αεροτομή.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Π. Καψάλης, “Επίδραση της τύρβης του αέρα και της επιφανειακής τραχύτητας στην ροή γύρω από αεροτομή NACA0012”, Εργαστήριο Ρ&Σ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2010
2. Ν. Κούβακας, “Στρώμα Ανάμιξης Τυρβωδών Ροών κατάντη πλεγμάτων με Μηδενική Κλίση της Μέσης Ταχύτητας”, Εργαστήριο Ρ&Σ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 1999
3. Θ. Παπαδόπουλος, “Επίδραση της διαμόρφωσης του χείλους προσβολής αεροτομής στην ένταση του Ίχνους Radar”, Εργαστήριο Ρ&Σ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2002
4. I.H. Abbott and A.E. von Doenhoff, “Theory of Wing Sections”, Dover, New York, 1959
5. I.H. Abbott, A.E. von Doenhoff, Albert E. Stivers, S. Louis, “Summary of airfoil data”. NACA Report 824, 1945
6. A.P. Broeren and M.B. Bragg, “Effect of Airfoil Geometry on Performance with Simulated Intercycle Ice Accretions” Univ. of Illinois, Urbana, AIAA Journal, Vol 728, 2003
7. K. Freudenreich, K. Kaiser, A.P. Schaffarczyk, H. Winkler, B. Stahl, “Reynolds Number and Roughness Effects on Thick Airfoils for Wind Turbines”, Wind Engng., Vol. 28, No.5, 2004
8. W.K. George, “The decay of homogeneous isotropic turbulence”, Physics of Fluids, A 4, pp. 1492-1509, 1992
9. M.J. Hoffman, R. Reuss Ramsay, G.M. Gregorek, “Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the NACA 4415 Airfoil”, Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 1996
10. C.O. Johnston, “Review, Extension, and Application of Unsteady Thin Airfoil Theory”, (CIMSS), Blacksburg, VA, 24060, 2004,
11. T. von Karman, W.R. Sears, “Airfoil Theory for Non-Uniform motion”, J. Aeronautics, AIAA Journal. Vol. 41, no. 7A, pp. 5-16., 2003
12. M.F. Kerho, M.B. Bragg, “Airfoil Boundary Layer Development and Transition with Large Leading-Edge Roughness”, AIAA J., Vol.35(1), pp.75-84, 1997
13. K.W. Lewis, “The Cumulative Effects of Roughness and Reynolds Number on NACA 0015 Airfoil Section Characteristics”, Texas Tech. University, 1984
14. M. Lorenz, A. Schulz and H.J. Bauer, “Experimental Study of Surface Roughness Effects on a Turbine Airfoil in a Linear Cascade-Part II: Aerodynamic Losses”, J. Turbomach., Vol. 134, Issue 4 (10 pages), 2011

15. B.W. McCormick, "Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics", J. Wiley, New York, 1979
16. M.S. Mohamed and J.C. LaRue, "The decay power law in grid-generated turbulence", J. of Fluid Mechanics, vol. 219, pp. 195-214, 1990
17. D. Oster, I. Wygnanski, B. Dziomba, H. Fiedler, "The effect of initial conditions on the two-dimensional, turbulent mixing layer". In: Fielder H, editor. Structure and mechanics of turbulence, Lecture Notes in Physics, Springer, Vol.75, p.48-64, 1978.
18. Papadopoulos G., Lekakis I., Durst F. Reynolds number effects on the pressure distribution of fully developed, suddenly expanding pipe flow, Internal Report, Univ. Erlangen-Nuerenberg, Germany, 1994.
19. R. L. Reuss, M. J. Hoffmann, G. M. Gregorek, "Effects of Surface Roughness and Vortex Generators on the NACA 4415 Airfoil", Ohio State Univ., 1995
20. A. Santhanakrishnan, J.D. Jacob, "Effect of Regular Surface Perturbations on Flow over an Airfoil", Dept. Mechanical Eng, Univ. Kentucky, Lexington, 2004
21. D.A. Spera, "Models of lift and drag coefficients of stalled and unstalled airfoils in wind turbines and wind channels", NASA/CR—2008-215434
22. T. Theodorsen, "General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter", Report National Advisory Committee for Aeronautics, No. 496, pp. 413-433, 1935
23. Th. Theodorsen and I. Naiman, "Pressure Distributions for Representative Airfoils and Related Profiles", Langley Memorial Aeronautical Laboratory, Langley-Field, Va., Washington, Technical Note No. 106, 1946
24. Q. Zhang, P.M. Ligrani, "Aerodynamic Losses of a Cambered Turbine Vane: Influences of Surface Roughness and Freestream Turbulence Intensity", J. Turbomach., Vol. 128, Issue 3, 536(11 pages), 2006
25. Q. Zhang, R. Trindade, S. Sreekanth, "Influence of Surface Roughness on the Aerodynamic Losses of a Turbine Vane", J. Fluids Engng., Vol. 128, Issue 3,(11 pages), 2006

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ– ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι. Αεροτομή χωρίς επιφανειακή τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα

#### Ι.1 Ταχύτητα Αέρα - $V=5,023 \text{ m/s}$

Πίνακας (Ι.1.1) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0$ - $V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 14,96 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 17,72 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa}$ $T_{\text{atm}} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	7,94	0,524497	27	0,02	4,44	0,293295
3	0,05	-4,62	-0,30519	28	0,05	-5,6	-0,36992
4	0,07	-4,77	-0,31509	29	0,07	-4,49	-0,2966
5	0,09	-5,99	-0,39568	30	0,09	-3,87	-0,25564
6	0,11	-8,08	-0,53374	31	0,11	-3,47	-0,22922
7	0,14	-8,4	-0,55488	32	0,14	-3,1	-0,20478
8	0,16	-8,56	-0,56545	33	0,16	-2,64	-0,17439
9	0,18	-9,14	-0,60377	34	0,18	-2,47	-0,16316
10	0,2	-9,72	-0,64208	35	0,2	-2,26	-0,14929
11	0,23	-10,16	-0,67114	36	0,23	-1,83	-0,12089
12	0,25	-10,7	-0,70682	37	0,25	-1,72	-0,11362
13	0,27	-10,58	-0,69889	38	0,27	-1,06	-0,07002
14	0,32	-9,78	-0,64604	39	0,32	-0,72	-0,04756
15	0,36	-9,04	-0,59716	40	0,36	-0,32	-0,02114
16	0,41	-8,22	-0,54299	41	0,41	0,06	0,003963
17	0,45	-7,6	-0,50204	42	0,45	0,37	0,024441
18	0,5	-7,3	-0,48222	43	0,5	0,65	0,042937
19	0,55	-7,22	-0,47694	44	0,55	0,82	0,054167
20	0,59	-7,21	-0,47627	45	0,59	1,15	0,075966
21	0,64	-6,71	-0,44325	46	0,64	1,31	0,086535
22	0,68	-4,6	-0,30386	47	0,68	1,49	0,098426
23	0,73	-2,46	-0,1625	48	0,73	1,72	0,113619
24	0,77	-1,17	-0,07729	49	0,77	1,87	0,123528
25	0,82	-0,43	-0,0284	50	0,82	2,09	0,13806
26	0,86	0,46	0,030386	51	0,86	2,25	0,148629

Πίνακας (Ι.1.2) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6$ - $V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 14,96 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 17,72 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa}$ $T_{\text{atm}} = 26^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	0,19	0,012551	27	0,02	13,32	0,879886
3	0,05	-21,82	-1,44138	28	0,05	6,58	0,434659
4	0,07	-15,91	-1,05098	29	0,07	5,22	0,34482

5	0,09	-14,6	-0,96444	30	0,09	4,62	0,305186
6	0,11	-15,95	-1,05362	31	0,11	3,83	0,253
7	0,14	-15,84	-1,04635	32	0,14	3,33	0,219972
8	0,16	-15,08	-0,99615	33	0,16	3,14	0,207421
9	0,18	-15,32	-1,012	34	0,18	2,97	0,196191
10	0,2	-15,36	-1,01464	35	0,2	2,84	0,187603
11	0,23	-15,32	-1,012	36	0,23	2,84	0,187603
12	0,25	-15,49	-1,02323	37	0,25	2,85	0,188264
13	0,27	-14,8	-0,97765	38	0,27	3,01	0,198833
14	0,32	-13,3	-0,87857	39	0,32	2,99	0,197512
15	0,36	-11,75	-0,77618	40	0,36	3,02	0,199494
16	0,41	-10,15	-0,67048	41	0,41	3	0,198173
17	0,45	-8,66	-0,57206	42	0,45	3,02	0,199494
18	0,5	-6,62	-0,4373	43	0,5	3	0,198173
19	0,55	-4,83	-0,31906	44	0,55	3,04	0,200815
20	0,59	-3,53	-0,23318	45	0,59	2,98	0,196851
21	0,64	-2,31	-0,15259	46	0,64	2,95	0,19487
22	0,68	-1,4	-0,09248	47	0,68	2,86	0,188925
23	0,73	-0,58	-0,03831	48	0,73	2,87	0,189585
24	0,77	0,23	0,015193	49	0,77	2,76	0,182319
25	0,82	0,6	0,039635	50	0,82	2,69	0,177695
26	0,86	1,2	0,079269	51	0,86	2,49	0,164483

Πίνακας (I.1.3) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$

$\alpha = 12 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 15,09 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 17,70 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 26^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-6,04	-0,39899	27	0,02	14,28	0,943302
3	0,05	-16,98	-1,12166	28	0,05	10,42	0,68832
4	0,07	-23,34	-1,54178	29	0,07	8,94	0,590554
5	0,09	-17,14	-1,13223	30	0,09	8,11	0,535727
6	0,11	-14,45	-0,95453	31	0,11	7,14	0,471651
7	0,14	-13,29	-0,8779	32	0,14	6,4	0,422768
8	0,16	-12,12	-0,80062	33	0,16	5,99	0,395685
9	0,18	-11,44	-0,7557	34	0,18	5,52	0,364638
10	0,2	-10,54	-0,69625	35	0,2	5,29	0,349444
11	0,23	-9,43	-0,62292	36	0,23	5,11	0,337554
12	0,25	-8,57	-0,56611	37	0,25	4,9	0,323682
13	0,27	-6,97	-0,46042	38	0,27	4,73	0,312452
14	0,32	-4,91	-0,32434	39	0,32	4,63	0,305846
15	0,36	-3,4	-0,2246	40	0,36	4,25	0,280745
16	0,41	-2,44	-0,16118	41	0,41	4,15	0,274139
17	0,45	-2,08	-0,1374	42	0,45	3,93	0,259606
18	0,5	-1,86	-0,12287	43	0,5	3,77	0,249037

19	0,55	-1,86	-0,12287	44	0,55	3,5	0,231201
20	0,59	-1,89	-0,12485	45	0,59	3,34	0,220632
21	0,64	-2,02	-0,13344	46	0,64	3,14	0,207421
22	0,68	-2	-0,13212	47	0,68	2,79	0,184301
23	0,73	-2,08	-0,1374	48	0,73	2,49	0,164483
24	0,77	-2,12	-0,14004	49	0,77	2,28	0,150611
25	0,82	-2,2	-0,14533	50	0,82	1,89	0,124849
26	0,86	-2,05	-0,13542	51	0,86	1,5	0,099086

Πίνακας (I.1.4) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 18^\circ$

$\alpha = 18^\circ - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 59,80 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 18,83 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 31^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	3,44	0,227238	27	0,02	15,4	1,017286
3	0,05	-4,31	-0,28471	28	0,05	11,64	0,76891
4	0,07	-4,4	-0,29065	29	0,07	10,37	0,685017
5	0,09	-4,46	-0,29462	30	0,09	9,5	0,627547
6	0,11	-4,6	-0,30386	31	0,11	8,43	0,556865
7	0,14	-4,64	-0,30651	32	0,14	7,64	0,50468
8	0,16	-4,71	-0,31113	33	0,16	7,23	0,477596
9	0,18	-4,77	-0,31509	34	0,18	6,68	0,441264
10	0,2	-4,93	-0,32566	35	0,2	6,31	0,416823
11	0,23	-4,79	-0,31642	36	0,23	6,12	0,404272
12	0,25	-4,64	-0,30651	37	0,25	5,86	0,387097
13	0,27	-4,81	-0,31774	38	0,27	5,75	0,379831
14	0,32	-4,74	-0,31311	39	0,32	5,17	0,341517
15	0,36	-4,8	-0,31708	40	0,36	4,93	0,325664
16	0,41	-4,77	-0,31509	41	0,41	4,56	0,301222
17	0,45	-4,84	-0,31972	42	0,45	4,21	0,278102
18	0,5	-4,98	-0,32897	43	0,5	3,84	0,253661
19	0,55	-4,87	-0,3217	44	0,55	3,45	0,227899
20	0,59	-5	-0,33029	45	0,59	3,11	0,205439
21	0,64	-5,05	-0,33359	46	0,64	2,74	0,180998
22	0,68	-5,13	-0,33888	47	0,68	2,24	0,147969
23	0,73	-5,08	-0,33557	48	0,73	1,87	0,123528
24	0,77	-5,13	-0,33888	49	0,77	1,36	0,089838
25	0,82	-5,03	-0,33227	50	0,82	0,86	0,056809
26	0,86	-4,82	-0,3184	51	0,86	0,11	0,007266

## I.2 Ταχύτητα Αέρα - $V=10,125 \text{ m/s}$

Πίνακας (I.2.1) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0^\circ$

$\alpha = 0^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 59,57 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 67,15 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 31^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$



2	2	0,02	31,96	27	0,02	15,55	0,252807
3	3	0,05	-13,46	28	0,05	-22,32	-0,36287
4	4	0,07	-18,22	29	0,07	-14,52	-0,23606
5	5	0,09	-24,71	30	0,09	-12,75	-0,20729
6	6	0,11	-33,92	31	0,11	-13,65	-0,22192
7	7	0,14	-34,97	32	0,14	-12,08	-0,19639
8	8	0,16	-34,32	33	0,16	-10,48	-0,17038
9	9	0,18	-37,62	34	0,18	-10,11	-0,16437
10	10	0,2	-39,48	35	0,2	-9,43	-0,15331
11	11	0,23	-41,63	36	0,23	-6,94	-0,11283
12	12	0,25	-44,7	37	0,25	-5,84	-0,09494
13	13	0,27	-44,23	38	0,27	-3,48	-0,05658
14	14	0,32	-41,65	39	0,32	-2,42	-0,03934
15	15	0,36	-38,4	40	0,36	-0,86	-0,01398
16	16	0,41	-36,07	41	0,41	0,75	0,012193
17	17	0,45	-33,52	42	0,45	1,86	0,030239
18	18	0,5	-28	43	0,5	2,9	0,047147
19	19	0,55	-21,72	44	0,55	3,68	0,059828
20	20	0,59	-17,75	45	0,59	4,74	0,077061
21	21	0,64	-13,79	46	0,64	5,47	0,08893
22	22	0,68	-11,24	47	0,68	6,09	0,099009
23	23	0,73	-8,02	48	0,73	6,21	0,10096
24	24	0,77	-4,88	49	0,77	7,72	0,125509
25	25	0,82	-2,21	50	0,82	8,38	0,136239
26	26	0,86	1,96	51	0,86	8,99	0,146157

Πίνακας (1.2.2) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 71,08 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 67,15 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 27^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	0,2	0,003252	27	0,02	54,03	0,878403
3	0,05	-80,26	-1,30484	28	0,05	25,18	0,409368
4	0,07	-58,39	-0,94929	29	0,07	20,19	0,328243
5	0,09	-60,03	-0,97595	30	0,09	18,25	0,296703
6	0,11	-66,2	-1,07626	31	0,11	14,76	0,239963
7	0,14	-66,7	-1,08439	32	0,14	12,8	0,208098
8	0,16	-61,19	-0,99481	33	0,16	12,28	0,199644
9	0,18	-62,71	-1,01952	34	0,18	11,04	0,179485
10	0,2	-62,82	-1,02131	35	0,2	10,57	0,171844
11	0,23	-61,98	-1,00765	36	0,23	10,92	0,177534
12	0,25	-63,5	-1,03236	37	0,25	10,84	0,176233
13	0,27	-59,77	-0,97172	38	0,27	12,01	0,195255
14	0,32	-53,01	-0,86182	39	0,32	11,9	0,193466
15	0,36	-45,38	-0,73777	40	0,36	12,01	0,195255

16	0,41	-38,58	-0,62722	41	0,41	11,95	0,194279
17	0,45	-32,1	-0,52187	42	0,45	12,37	0,201108
18	0,5	-22,1	-0,35929	43	0,5	12,27	0,199482
19	0,55	-14,3	-0,23248	44	0,55	12	0,195092
20	0,59	-9,5	-0,15445	45	0,59	12,2	0,198344
21	0,64	-4,8	-0,07804	46	0,64	11,77	0,191353
22	0,68	-1,6	-0,02601	47	0,68	11,23	0,182574
23	0,73	0,5	0,008129	48	0,73	11,13	0,180948
24	0,77	1,83	0,029752	49	0,77	10,84	0,176233
25	0,82	2,34	0,038043	50	0,82	10,33	0,167942
26	0,86	3	0,048773	51	0,86	9,12	0,14827

*Πίνακας (Ι.2.3) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=10,125\text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$*

$\alpha = 12^\circ - V = 10,125\text{m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 61,12\text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 68,50\text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3\text{ kPa } T_{\text{atm}} = 28^\circ\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-23,7	-0,38531	27	0,02	57,88	0,940995
3	0,05	-109,85	-1,78591	28	0,05	41,43	0,673556
4	0,07	-75,37	-1,22534	29	0,07	35,61	0,578936
5	0,09	-58	-0,94295	30	0,09	31,98	0,519921
6	0,11	-60,38	-0,98164	31	0,11	27,87	0,453102
7	0,14	-52,2	-0,84865	32	0,14	25,25	0,410507
8	0,16	-47,3	-0,76899	33	0,16	23,56	0,383031
9	0,18	-40,78	-0,66299	34	0,18	21,54	0,350191
10	0,2	-39,88	-0,64836	35	0,2	20,56	0,334258
11	0,23	-35,43	-0,57601	36	0,23	19,83	0,32239
12	0,25	-31,64	-0,51439	37	0,25	19,2	0,312148
13	0,27	-24,7	-0,40156	38	0,27	18,93	0,307758
14	0,32	-16,16	-0,26272	39	0,32	18,15	0,295077
15	0,36	-11,25	-0,1829	40	0,36	17,07	0,277519
16	0,41	-8,5	-0,13819	41	0,41	16,31	0,265163
17	0,45	-7,42	-0,12063	42	0,45	15,52	0,252319
18	0,5	-7,17	-0,11657	43	0,5	14,64	0,238012
19	0,55	-7,07	-0,11494	44	0,55	13,67	0,222243
20	0,59	-7,38	-0,11998	45	0,59	12,94	0,210374
21	0,64	-7,43	-0,12079	46	0,64	11,86	0,192816
22	0,68	-7,75	-0,126	47	0,68	10,84	0,176233
23	0,73	-7,85	-0,12762	48	0,73	9,66	0,157049
24	0,77	-8,12	-0,13201	49	0,77	8,37	0,136077
25	0,82	-8,42	-0,13689	50	0,82	7,06	0,114779
26	0,86	-8,25	-0,13413	51	0,86	5,1	0,082914

Πίνακας (Ι.2.4) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα - Χωρίς πλέγμα -  $V=10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 18^\circ$

$\alpha = 18^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 59,80 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 66,35 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 31^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	11,24	0,182736	27	0,02	56,93	0,92555
3	0,05	-20	-0,32515	28	0,05	44,06	0,716314
4	0,07	-18,71	-0,30418	29	0,07	38,97	0,633562
5	0,09	-17,12	-0,27833	30	0,09	35,57	0,578286
6	0,11	-17,83	-0,28987	31	0,11	31,6	0,513743
7	0,14	-17,45	-0,2837	32	0,14	29,14	0,473749
8	0,16	-17,41	-0,28305	33	0,16	27,48	0,446761
9	0,18	-17,12	-0,27833	34	0,18	25,04	0,407092
10	0,2	-17,03	-0,27687	35	0,2	24,02	0,39051
11	0,23	-17,12	-0,27833	36	0,23	23,3	0,378804
12	0,25	-17,03	-0,27687	37	0,25	22,25	0,361733
13	0,27	-17	-0,27638	38	0,27	21,8	0,354418
14	0,32	-17,29	-0,2811	39	0,32	20,28	0,329706
15	0,36	-17,15	-0,27882	40	0,36	18,7	0,304019
16	0,41	-18,03	-0,29313	41	0,41	17,68	0,287436
17	0,45	-17,62	-0,28646	42	0,45	16,42	0,266951
18	0,5	-17,43	-0,28337	43	0,5	15,1	0,245491
19	0,55	-17,9	-0,29101	44	0,55	13,66	0,22208
20	0,59	-18,17	-0,2954	45	0,59	12,46	0,202571
21	0,64	-18,63	-0,30288	46	0,64	10,83	0,176071
22	0,68	-18,68	-0,30369	47	0,68	9,21	0,149733
23	0,73	-18,4	-0,29914	48	0,73	7,5	0,121933
24	0,77	-18,66	-0,30337	49	0,77	5,96	0,096896
25	0,82	-18,65	-0,30321	50	0,82	3,96	0,06438
26	0,86	-17,78	-0,28906	51	0,86	1,2	0,019509

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ. Αεροτομή με επιφανειακή τραχύτητα 100μm - Χωρίς πλέγμα

### ΙΙ.1 Ταχύτητα Αέρα - $V=5,023 \text{ m/s}$

Πίνακας (ΙΙ.1.1) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 14,96 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 17,72 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	5,68	0,375207	27	0,02	-1,16	-0,07663
3	0,05	-3,53	-0,23318	28	0,05	-5,56	-0,36728
4	0,07	-5,36	-0,35407	29	0,07	-4,37	-0,28867
5	0,09	-6,44	-0,42541	30	0,09	-3,92	-0,25895
6	0,11	-7,6	-0,50204	31	0,11	-4,1	-0,27084
7	0,14	-8,14	-0,53771	32	0,14	-4,13	-0,27282
8	0,16	-8,55	-0,56479	33	0,16	-4,34	-0,28669
9	0,18	-8,84	-0,58395	34	0,18	-4,26	-0,28141
10	0,2	-9,31	-0,615	35	0,2	-3,86	-0,25498
11	0,23	-9,29	-0,61367	36	0,23	-3,06	-0,20214
12	0,25	-9,32	-0,61566	37	0,25	-2,49	-0,16448
13	0,27	-8,8	-0,58131	38	0,27	-1,98	-0,13079
14	0,32	-7,59	-0,50138	39	0,32	-1,37	-0,0905
15	0,36	-7,05	-0,46571	40	0,36	-1	-0,06606
16	0,41	-6,69	-0,44192	41	0,41	-0,43	-0,0284
17	0,45	-6,7	-0,44259	42	0,45	-0,28	-0,0185
18	0,5	-6,77	-0,44721	43	0,5	0,31	0,020478
19	0,55	-6,83	-0,45117	44	0,55	0,47	0,031047
20	0,59	-6,8	-0,44919	45	0,59	0,69	0,04558
21	0,64	-6,72	-0,44391	46	0,64	0,92	0,060773
22	0,68	-6,12	-0,40427	47	0,68	1,02	0,067379
23	0,73	-4,6	-0,30386	48	0,73	1,12	0,073984
24	0,77	-3,1	-0,20478	49	0,77	1,21	0,07993
25	0,82	-1,82	-0,12022	50	0,82	1,24	0,081911
26	0,86	-0,66	-0,0436	51	0,86	1,36	0,089838

Πίνακας (ΙΙ.1.2) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^{\circ}$

$\alpha = 6 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 18,41 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-1,1	-0,07266	27	0,02	6,8	0,449191
3	0,05	-8,41	-0,55554	28	0,05	1,9	0,125509
4	0,07	-8,42	-0,5562	29	0,07	1,65	0,108995
5	0,09	-8,2	-0,54167	30	0,09	1,47	0,097105
6	0,11	-7,7	-0,50864	31	0,11	0,45	0,029726
7	0,14	-7,2	-0,47561	32	0,14	0	0

8	0,16	-6,65	-0,43928	33	0,16	-0,39	-0,02576
9	0,18	-5,88	-0,38842	34	0,18	-0,71	-0,0469
10	0,2	-5,65	-0,37323	35	0,2	-0,3	-0,01982
11	0,23	-5,5	-0,36332	36	0,23	0,19	0,012551
12	0,25	-5,3	-0,3501	37	0,25	0,44	0,029065
13	0,27	-5,1	-0,33689	38	0,27	0,79	0,052185
14	0,32	-5,06	-0,33425	39	0,32	0,67	0,044259
15	0,36	-5,04	-0,33293	40	0,36	1,05	0,06936
16	0,41	-5,02	-0,33161	41	0,41	0,89	0,058791
17	0,45	-4,67	-0,30849	42	0,45	1	0,066058
18	0,5	-4,95	-0,32698	43	0,5	0,87	0,05747
19	0,55	-4,45	-0,29396	44	0,55	1,1	0,072663
20	0,59	-4,54	-0,2999	45	0,59	0,92	0,060773
21	0,64	-4,39	-0,28999	46	0,64	1,07	0,070682
22	0,68	-4,35	-0,28735	47	0,68	0,84	0,055488
23	0,73	-4,09	-0,27018	48	0,73	0,55	0,036332
24	0,77	-4,03	-0,26621	49	0,77	0,27	0,017836
25	0,82	-3,78	-0,2497	50	0,82	0,18	0,01189
26	0,86	-3,81	-0,25168	51	0,86	-0,2	-0,01321

*Πίνακας (II.1.3) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023\text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$*

$\alpha = 12^\circ - V = 5,023\text{m/s}$		$P_o - P_\infty = 15,11\text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 18,41\text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3\text{ kPa}$ $T_{atm} = 32^\circ\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-29,65	-1,95861	27	0,02	16,63	1,098537
3	0,05	-30,64	-2,024	28	0,05	14,2	0,938017
4	0,07	-28,77	-1,90048	29	0,07	12,77	0,843555
5	0,09	-27,11	-1,79082	30	0,09	11,89	0,785424
6	0,11	-25,56	-1,68843	31	0,11	10,56	0,697568
7	0,14	-23,97	-1,5834	32	0,14	9,66	0,638116
8	0,16	-22,78	-1,50479	33	0,16	8,03	0,530442
9	0,18	-20,97	-1,38523	34	0,18	8,36	0,552241
10	0,2	-20,23	-1,33634	35	0,2	8,98	0,593197
11	0,23	-19,49	-1,28746	36	0,23	8,29	0,547617
12	0,25	-19,46	-1,28548	37	0,25	7,98	0,527139
13	0,27	-19	-1,25509	38	0,27	7,73	0,510625
14	0,32	-17,8	-1,17582	39	0,32	7,56	0,499395
15	0,36	-15,39	-1,01663	40	0,36	7,28	0,480899
16	0,41	-11,7	-0,77287	41	0,41	7,12	0,47033
17	0,45	-9	-0,59452	42	0,45	6,8	0,449191
18	0,5	-6,64	-0,43862	43	0,5	6,6	0,43598
19	0,55	-4,51	-0,29792	44	0,55	6,45	0,426071
20	0,59	-3,46	-0,22856	45	0,59	6,31	0,416823
21	0,64	-2,1	-0,13872	46	0,64	6,15	0,406254

22	0,68	-1,14	-0,07531	47	0,68	5,88	0,388418
23	0,73	-0,27	-0,01784	48	0,73	5,66	0,373886
24	0,77	0,49	0,032368	49	0,77	5,45	0,360014
25	0,82	0,85	0,056149	50	0,82	5,14	0,339536
26	0,86	1,35	0,089178	51	0,86	4,92	0,325003

## II.2 Ταχύτητα Αέρα - $V=10,125 \text{ m/s}$

Πίνακας (II.2.1) Αεροτομή με τραχύτητα  $100\mu\text{m}$  – Χωρίς πλέγμα –  $V = 10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 61,8 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 125,1 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	14,25	0,231672001	27	0,02	2,38	0,038693289
3	0,05	-19,52	-0,31735	28	0,05	-14,57	-0,23687446
4	0,07	-24,14	-0,3924605	29	0,07	-10,29	-0,16729157
5	0,09	-28,92	-0,47017223	30	0,09	-9,24	-0,150221
6	0,11	-32,51	-0,52853732	31	0,11	-10,68	-0,17363207
7	0,14	-34,62	-0,56284103	32	0,14	-11,34	-0,18436214
8	0,16	-35,75	-0,58121221	33	0,16	-11,61	-0,18875171
9	0,18	-36,82	-0,59860794	34	0,18	-11,34	-0,18436214
10	0,2	-39,98	-0,64998222	35	0,2	-9,64	-0,15672408
11	0,23	-39,82	-0,64738099	36	0,23	-7,39	-0,12014429
12	0,25	-41,9	-0,68119697	37	0,25	-4,8	-0,07803688
13	0,27	-41,35	-0,67225525	38	0,27	-1,4	-0,02276076
14	0,32	-38,51	-0,62608342	39	0,32	0,32	0,005202459
15	0,36	-36,09	-0,58673983	40	0,36	1,56	0,025361988
16	0,41	-33,72	-0,54820911	41	0,41	2,56	0,041619672
17	0,45	-31,66	-0,51471828	42	0,45	3,17	0,051536859
18	0,5	-29,67	-0,48236549	43	0,5	4,17	0,067794544
19	0,55	-28,09	-0,45667835	44	0,55	4,77	0,077549154
20	0,59	-23,89	-0,38839608	45	0,59	5,72	0,092993954
21	0,64	-18,19	-0,29572728	46	0,64	6,55	0,106487832
22	0,68	-11,86	-0,19281614	47	0,68	7,22	0,117380481
23	0,73	-7,8	-0,12680994	48	0,73	7,76	0,12615963
24	0,77	-5,56	-0,09039272	49	0,77	8,19	0,133150434
25	0,82	-3,1	-0,05039882	50	0,82	9,01	0,146481736
26	0,86	0,21	0,003414114	51	0,86	9,56	0,155423462

Πίνακας (II.2.2) Αεροτομή με τραχύτητα  $100\mu\text{m}$  – Χωρίς πλέγμα –  $V = 10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6 - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 61,8 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 125,1 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-48,36	-0,78622	27	0,02	47,22	0,767688
3	0,05	-71,13	-1,15641	28	0,05	30,2	0,490982
4	0,07	-68,24	-1,10942	29	0,07	27,52	0,447411

5	0,09	-65,42	-1,06358	30	0,09	24,93	0,405304
6	0,11	-64,53	-1,04911	31	0,11	20,17	0,327917
7	0,14	-63,65	-1,0348	32	0,14	17,97	0,292151
8	0,16	-62,87	-1,02212	33	0,16	16,13	0,262236
9	0,18	-61,76	-1,00407	34	0,18	15,06	0,244841
10	0,2	-61,41	-0,99838	35	0,2	15,62	0,253945
11	0,23	-60,18	-0,97839	36	0,23	16,77	0,272641
12	0,25	-59,85	-0,97302	37	0,25	16,71	0,271666
13	0,27	-58,42	-0,94977	38	0,27	16,96	0,27573
14	0,32	-54,72	-0,88962	39	0,32	17,14	0,278657
15	0,36	-50,09	-0,81435	40	0,36	17,2	0,279632
16	0,41	-46,85	-0,76167	41	0,41	17,44	0,283534
17	0,45	-42,25	-0,68689	42	0,45	16,96	0,27573
18	0,5	-31,76	-0,51634	43	0,5	17,11	0,278169
19	0,55	-22	-0,35767	44	0,55	16,87	0,274267
20	0,59	-18	-0,29264	45	0,59	16,91	0,274917
21	0,64	-15,7	-0,25525	46	0,64	17,04	0,277031
22	0,68	-10,64	-0,17298	47	0,68	17,07	0,277519
23	0,73	-5,33	-0,08665	48	0,73	16,84	0,273779
24	0,77	-1,44	-0,02341	49	0,77	16,67	0,271016
25	0,82	1,95	0,031702	50	0,82	16,66	0,270853
26	0,86	6,1	0,099172	51	0,86	16,31	0,265163

*Πίνακας (II.2.3) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Χωρίς πλέγμα –  $V = 10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$*

$\alpha = 12^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 61,8 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 125,1 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-108	-1,75583	27	0,02	60,4	0,981964
3	0,05	-111,52	-1,81306	28	0,05	50,69	0,824102
4	0,07	-105,4	-1,71356	29	0,07	45,85	0,745415
5	0,09	-102	-1,65828	30	0,09	42,64	0,693228
6	0,11	-83,1	-1,35101	31	0,11	36,8	0,598283
7	0,14	-77	-1,25184	32	0,14	34,47	0,560402
8	0,16	-75,57	-1,22859	33	0,16	31,6	0,513743
9	0,18	-71,5	-1,16242	34	0,18	29,47	0,479114
10	0,2	-74,2	-1,20632	35	0,2	28,9	0,469847
11	0,23	-65,4	-1,06325	36	0,23	29,32	0,476675
12	0,25	-64,3	-1,04537	37	0,25	28,2	0,458467
13	0,27	-58	-0,94295	38	0,27	27,7	0,450338
14	0,32	-44	-0,71534	39	0,32	26,92	0,437657
15	0,36	-33	-0,5365	40	0,36	25,9	0,421074
16	0,41	-21	-0,34141	41	0,41	25,17	0,409206
17	0,45	-14,3	-0,23248	42	0,45	24	0,390184
18	0,5	-9,3	-0,1512	43	0,5	23,26	0,378154

19	0,55	-7,4	-0,12031	44	0,55	22,45	0,364985
20	0,59	-6,15	-0,09998	45	0,59	21,57	0,350678
21	0,64	-6,4	-0,10405	46	0,64	21,1	0,343037
22	0,68	-6,45	-0,10486	47	0,68	19,22	0,312473
23	0,73	-6,7	-0,10893	48	0,73	19,33	0,314261
24	0,77	-7	-0,1138	49	0,77	18,07	0,293776
25	0,82	-7,1	-0,11543	50	0,82	17,07	0,277519
26	0,86	-6,3	-0,10242	51	0,86	15,8	0,256871



### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - Αεροτομή με επιφανειακή τραχύτητα 200μm - Χωρίς πλέγμα

#### ΙΙΙ.1 Ταχύτητα Αέρα - $V=5,023 \text{ m/s}$

Πίνακας (ΙΙΙ.1.1) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Χωρίς πλέγμα –  $V = 5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 18,41 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	3,58	0,236486	27	0,02	0,236486	0,039635
3	0,05	-5,8	-0,38313	28	0,05	-0,38313	-0,24573
4	0,07	-6,69	-0,44192	29	0,07	-0,44192	-0,21271
5	0,09	-8	-0,52846	30	0,09	-0,52846	-0,17836
6	0,11	-9,02	-0,59584	31	0,11	-0,59584	-0,19685
7	0,14	-8,97	-0,59254	32	0,14	-0,59254	-0,18562
8	0,16	-9,38	-0,61962	33	0,16	-0,61962	-0,20808
9	0,18	-9,66	-0,63812	34	0,18	-0,63812	-0,19025
10	0,2	-10,04	-0,66322	35	0,2	-0,66322	-0,17637
11	0,23	-10,3	-0,68039	36	0,23	-0,68039	-0,17307
12	0,25	-10,21	-0,67445	37	0,25	-0,67445	-0,13872
13	0,27	-9,69	-0,6401	38	0,27	-0,6401	-0,07663
14	0,32	-8,59	-0,56743	39	0,32	-0,56743	-0,04096
15	0,36	-8,08	-0,53374	40	0,36	-0,53374	0,001321
16	0,41	-7,84	-0,51789	41	0,41	-0,51789	0,025102
17	0,45	-7,64	-0,50468	42	0,45	-0,50468	0,042277
18	0,5	-7,56	-0,49939	43	0,5	-0,49939	0,043598
19	0,55	-7,64	-0,50468	44	0,55	-0,50468	0,060773
20	0,59	-7,73	-0,51062	45	0,59	-0,51062	0,072003
21	0,64	-7,41	-0,48949	46	0,64	-0,48949	0,078608
22	0,68	-5,84	-0,38578	47	0,68	-0,38578	0,095783
23	0,73	-3,71	-0,24507	48	0,73	-0,24507	0,099086
24	0,77	-2,05	-0,13542	49	0,77	-0,13542	0,10371
25	0,82	-0,8	-0,05285	50	0,82	-0,05285	0,109656
26	0,86	0,2	0,013212	51	0,86	0,013212	0,11494

Πίνακας (ΙΙΙ.1.2) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 18,41 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-4,48	0,236486	27	0,02	8,01	0,529121
3	0,05	-10,74	-0,38313	28	0,05	3,4	0,224596
4	0,07	-10,05	-0,44192	29	0,07	2,8	0,184961
5	0,09	-9,6	-0,52846	30	0,09	2,59	0,171089
6	0,11	-9,12	-0,59584	31	0,11	1,46	0,096444
7	0,14	-8,3	-0,59254	32	0,14	1,32	0,087196

8	0,16	-8,11	-0,61962	33	0,16	0,35	0,02312
9	0,18	-7,5	-0,63812	34	0,18	0,7	0,04624
10	0,2	-7,17	-0,66322	35	0,2	0,78	0,051525
11	0,23	-6,53	-0,68039	36	0,23	1,1	0,072663
12	0,25	-6,12	-0,67445	37	0,25	1,05	0,06936
13	0,27	-6,25	-0,6401	38	0,27	1,58	0,104371
14	0,32	-6,1	-0,56743	39	0,32	1,35	0,089178
15	0,36	-6,46	-0,53374	40	0,36	1,6	0,105692
16	0,41	-6,1	-0,51789	41	0,41	1,6	0,105692
17	0,45	-6,25	-0,50468	42	0,45	1,66	0,109656
18	0,5	-5,5	-0,49939	43	0,5	1,52	0,100407
19	0,55	-5,4	-0,50468	44	0,55	1,79	0,118243
20	0,59	-5,5	-0,51062	45	0,59	1,61	0,106353
21	0,64	-5,3	-0,48949	46	0,64	1,44	0,095123
22	0,68	-5,31	-0,38578	47	0,68	1,35	0,089178
23	0,73	-5,6	-0,24507	48	0,73	1,09	0,072003
24	0,77	-4,85	-0,13542	49	0,77	1,52	0,100407
25	0,82	-5,42	-0,05285	50	0,82	0,8	0,052846
26	0,86	-4,6	0,013212	51	0,86	0,06	0,003963

Πίνακας (III.1.3) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$

$\alpha = 12^\circ - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 18,41 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-30,9	-2,04118	27	0,02	16,4	1,083344
3	0,05	-30,1	-1,98833	28	0,05	14	0,924806
4	0,07	-29,5	-1,9487	29	0,07	12,4	0,819113
5	0,09	-28,8	-1,90246	30	0,09	11,5	0,759662
6	0,11	-27,02	-1,78487	31	0,11	10,1	0,667181
7	0,14	-22,6	-1,4929	32	0,14	9,5	0,627547
8	0,16	-20,22	-1,33568	33	0,16	8,5	0,561489
9	0,18	-20,5	-1,35418	34	0,18	8,2	0,541672
10	0,2	-19,9	-1,31455	35	0,2	8,1	0,535066
11	0,23	-19,6	-1,29473	36	0,23	7,8	0,515249
12	0,25	-19,49	-1,28746	37	0,25	7,8	0,515249
13	0,27	-18,69	-1,23462	38	0,27	7,64	0,50468
14	0,32	-17,25	-1,13949	39	0,32	7,25	0,478917
15	0,36	-14,59	-0,96378	40	0,36	7,05	0,465706
16	0,41	-11,43	-0,75504	41	0,41	6,71	0,443246
17	0,45	-9,35	-0,61764	42	0,45	6,56	0,433337
18	0,5	-6,92	-0,45712	43	0,5	6,19	0,408896
19	0,55	-5,01	-0,33095	44	0,55	6,06	0,400309
20	0,59	-3,76	-0,24838	45	0,59	5,9	0,389739
21	0,64	-2,32	-0,15325	46	0,64	5,66	0,373886

22	0,68	-1,2	-0,07927	47	0,68	5,41	0,357371
23	0,73	-0,3	-0,01982	48	0,73	5,26	0,347463
24	0,77	0,51	0,033689	49	0,77	4,99	0,329627
25	0,82	1,01	0,066718	50	0,82	4,77	0,315094
26	0,86	1,53	0,101068	51	0,86	4,42	0,291974

*Πίνακας (III.1.4) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Χωρίς πλέγμα -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 18^\circ$*

$\alpha = 18^\circ - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 18,41 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-7	-0,4624	27	0,02	15,8	1,043709
3	0,05	-5,7	-0,37653	28	0,05	12,8	0,845537
4	0,07	-5,3	-0,3501	29	0,07	11,3	0,74645
5	0,09	-5,2	-0,3435	30	0,09	10,44	0,689641
6	0,11	-5,3	-0,3501	31	0,11	8,9	0,587912
7	0,14	-5,5	-0,36332	32	0,14	8,32	0,549599
8	0,16	-5,51	-0,36398	33	0,16	7,48	0,49411
9	0,18	-5,5	-0,36332	34	0,18	6,9	0,455797
10	0,2	-5,41	-0,35737	35	0,2	6,8	0,449191
11	0,23	-5,5	-0,36332	36	0,23	6,53	0,431356
12	0,25	-5,6	-0,36992	37	0,25	6,5	0,429374
13	0,27	-5,45	-0,36001	38	0,27	6,18	0,408236
14	0,32	-5,3	-0,3501	39	0,32	5,76	0,380491
15	0,36	-5,33	-0,35209	40	0,36	5,41	0,357371
16	0,41	-5,29	-0,34944	41	0,41	4,9	0,323682
17	0,45	-5,42	-0,35803	42	0,45	4,5	0,297259
18	0,5	-5,25	-0,3468	43	0,5	4,12	0,272157
19	0,55	-5,51	-0,36398	44	0,55	3,76	0,248376
20	0,59	-5,45	-0,36001	45	0,59	3,34	0,220632
21	0,64	-5,55	-0,36662	46	0,64	2,91	0,192227
22	0,68	-5,51	-0,36398	47	0,68	2,56	0,169107
23	0,73	-5,68	-0,37521	48	0,73	2,04	0,134757
24	0,77	-5,53	-0,3653	49	0,77	1,49	0,098426
25	0,82	-5,51	-0,36398	50	0,82	0,97	0,064076
26	0,86	-5,4	-0,35671	51	0,86	0,11	0,007266

### III.2 Ταχύτητα Αέρα - $V=10,125 \text{ m/s}$

*Πίνακας (III.2.1) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Χωρίς πλέγμα -  $V = 10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0^\circ$*

$\alpha = 0^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 60,4 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 128,5 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	9,56	0,63151	27	0,02	6	0,396345
3	0,05	-27,84	-1,83904	28	0,05	-12,58	-0,831
4	0,07	-31,52	-2,08213	29	0,07	-10,77	-0,71144

5	0,09	-36,34	-2,40053	30	0,09	-8,8	-0,58131
6	0,11	-45,86	-2,51	31	0,11	-10,79	-0,71276
7	0,14	-40,6	-2,68194	32	0,14	-9,94	-0,65661
8	0,16	-42,39	-2,80018	33	0,16	-13,24	-0,8746
9	0,18	-44,69	-2,95211	34	0,18	-9,95	-0,65727
10	0,2	-39,78	-3,02	35	0,2	-8,22	-0,54299
11	0,23	-47,66	-3,1483	36	0,23	-5,88	-0,38842
12	0,25	-49,12	-3,24475	37	0,25	-2,64	-0,17439
13	0,27	-46,23	-3,05384	38	0,27	-1,26	-0,08323
14	0,32	-45,04	-2,97523	39	0,32	-0,43	-0,0284
15	0,36	-42,21	-2,78829	40	0,36	1,6	0,105692
16	0,41	-40,06	-2,64627	41	0,41	2,63	0,173731
17	0,45	-38,23	-2,52538	42	0,45	3,6	0,237807
18	0,5	-35,25	-2,32853	43	0,5	4,28	0,282726
19	0,55	-30,21	-1,9956	44	0,55	5,08	0,335572
20	0,59	-21,4	-1,41363	45	0,59	6,18	0,408236
21	0,64	-14,87	-0,98228	46	0,64	6,8	0,449191
22	0,68	-11,77	-0,7775	47	0,68	7,66	0,506001
23	0,73	-9,13	-0,60311	48	0,73	7,98	0,527139
24	0,77	-5,71	-0,37719	49	0,77	8,62	0,569416
25	0,82	-8,41	-0,55554	50	0,82	9,25	0,611032
26	0,86	2,22	0,146648	51	0,86	9,6	0,634152

*Πίνακας (III.2.2) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Χωρίς πλέγμα –  $V = 10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$*

$\alpha = 6^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 60,4 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 128,5 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-82,27	-1,33752	27	0,02	54,58	0,887344
3	0,05	-84,47	-1,37329	28	0,05	35,68	0,580074
4	0,07	-82,03	-1,33362	29	0,07	30,99	0,503826
5	0,09	-78,72	-1,2798	30	0,09	28,56	0,464319
6	0,11	-76,61	-1,2455	31	0,11	22,89	0,372138
7	0,14	-74,86	-1,21705	32	0,14	22	0,357669
8	0,16	-74,1	-1,20469	33	0,16	18,57	0,301905
9	0,18	-72,8	-1,18356	34	0,18	17,8	0,289387
10	0,2	-69,8	-1,13479	35	0,2	18,72	0,304344
11	0,23	-67,9	-1,1039	36	0,23	18,2	0,29589
12	0,25	-68,75	-1,11772	37	0,25	20,02	0,325479
13	0,27	-67,28	-1,09382	38	0,27	19,79	0,32174
14	0,32	-62,09	-1,00944	39	0,32	19,2	0,312148
15	0,36	-56,28	-0,91498	40	0,36	19,42	0,315724
16	0,41	-50,4	-0,81939	41	0,41	19,12	0,310847
17	0,45	-42,98	-0,69876	42	0,45	19,24	0,312798
18	0,5	-32,48	-0,52805	43	0,5	18,53	0,301255

19	0,55	-24,16	-0,39279	44	0,55	18,69	0,303856
20	0,59	-19,64	-0,3193	45	0,59	18,76	0,304994
21	0,64	-14,54	-0,23639	46	0,64	18,52	0,301092
22	0,68	-10,41	-0,16924	47	0,68	18,48	0,300442
23	0,73	-6,02	-0,09787	48	0,73	18,1	0,294264
24	0,77	-1,32	-0,02146	49	0,77	17,91	0,291175
25	0,82	2,72	0,044221	50	0,82	17,82	0,289712
26	0,86	7,51	0,122095	51	0,86	17,31	0,281421

*Πίνακας (III.2.3) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Χωρίς πλέγμα –  $V = 10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$*

$\alpha = 12^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 60,4 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 128,5 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 32^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-116,78	-1,89857	27	0,02	66,41	1,079673
3	0,05	-123,53	-2,00831	28	0,05	54,56	0,887019
4	0,07	-118,32	-1,92361	29	0,07	48,49	0,788335
5	0,09	-100,88	-1,64008	30	0,09	44,35	0,721028
6	0,11	-86,62	-1,40824	31	0,11	38,37	0,623807
7	0,14	-81,81	-1,33004	32	0,14	36,29	0,589991
8	0,16	-76,87	-1,24973	33	0,16	31,65	0,514556
9	0,18	-73,6	-1,19657	34	0,18	30,35	0,493421
10	0,2	-69,06	-1,12276	35	0,2	29,9	0,486105
11	0,23	-63,62	-1,03431	36	0,23	28,96	0,470823
12	0,25	-60,9	-0,99009	37	0,25	29,68	0,482528
13	0,27	-52,78	-0,85808	38	0,27	28,58	0,464645
14	0,32	-39,02	-0,63437	39	0,32	27,27	0,443347
15	0,36	-26,95	-0,43814	40	0,36	26,01	0,422862
16	0,41	-14,46	-0,23509	41	0,41	24,87	0,404329
17	0,45	-8,95	-0,14551	42	0,45	24,13	0,392298
18	0,5	-6,61	-0,10746	43	0,5	22,55	0,366611
19	0,55	-5,98	-0,09722	44	0,55	21,81	0,35458
20	0,59	-5,78	-0,09397	45	0,59	20,96	0,340761
21	0,64	-5,95	-0,09673	46	0,64	19,72	0,320602
22	0,68	-6,54	-0,10633	47	0,68	18,73	0,304506
23	0,73	-6,86	-0,11153	48	0,73	17,31	0,281421
24	0,77	-7,18	-0,11673	49	0,77	15,93	0,258985
25	0,82	-7,54	-0,12258	50	0,82	14,48	0,235411
26	0,86	-7,61	-0,12372	51	0,86	12,25	0,199157

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV – ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ - ΠΛΕΓΜΑ 2cmx2cm**

**IV.1 Ταχύτητα Αέρα -  $V=5,023 \text{ m/s}$**

Πίνακας (IV.1.1) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 2cmx2cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 31,88 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	8,64	0,570737	27	0,02	4,23	0,279423
3	0,05	-4,7	-0,31047	28	0,05	-5,44	-0,35935
4	0,07	-5,29	-0,34944	29	0,07	-4,7	-0,31047
5	0,09	-6,68	-0,44126	30	0,09	-3,88	-0,2563
6	0,11	-8,96	-0,59188	31	0,11	-3,86	-0,25498
7	0,14	-9,39	-0,62028	32	0,14	-3,5	-0,2312
8	0,16	-9,44	-0,62358	33	0,16	-3,1	-0,20478
9	0,18	-10,16	-0,67114	34	0,18	-2,92	-0,19289
10	0,2	-10,68	-0,70549	35	0,2	-2,73	-0,18034
11	0,23	-11,16	-0,7372	36	0,23	-2,2	-0,14533
12	0,25	-11,87	-0,7841	37	0,25	-1,9	-0,12551
13	0,27	-11,72	-0,77419	38	0,27	-1,27	-0,08389
14	0,32	-11,14	-0,73588	39	0,32	-0,91	-0,06011
15	0,36	-10,27	-0,67841	40	0,36	-0,57	-0,03765
16	0,41	-9,53	-0,62953	41	0,41	-0,12	-0,00793
17	0,45	-8,75	-0,578	42	0,45	0,18	0,01189
18	0,5	-7,9	-0,52185	43	0,5	0,46	0,030386
19	0,55	-6,84	-0,45183	44	0,55	0,7	0,04624
20	0,59	-5,71	-0,37719	45	0,59	0,9	0,059452
21	0,64	-4,18	-0,27612	46	0,64	1,1	0,072663
22	0,68	-2,98	-0,19685	47	0,68	1,33	0,087857
23	0,73	-2,34	-0,15457	48	0,73	1,51	0,099747
24	0,77	-1,48	-0,09777	49	0,77	1,67	0,110316
25	0,82	-0,83	-0,05483	50	0,82	1,86	0,122867
26	0,86	0,11	0,007266	51	0,86	2,04	0,134757

Πίνακας (IV.1.2) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 2cmx2cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^{\circ}$

$\alpha = 6 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 31,88 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	0,12	0,007927	27	0,02	12,74	0,841573
3	0,05	-20,35	-1,34427	28	0,05	6,38	0,421447
4	0,07	-14,65	-0,96774	29	0,07	5,26	0,347463
5	0,09	-14,11	-0,93207	30	0,09	4,62	0,305186
6	0,11	-15,66	-1,03446	31	0,11	3,77	0,249037
7	0,14	-15,36	-1,01464	32	0,14	3,34	0,220632

8	0,16	-14,83	-0,97963	33	0,16	3,17	0,209402
9	0,18	-15,1	-0,99747	34	0,18	2,87	0,189585
10	0,2	-15,05	-0,99417	35	0,2	2,76	0,182319
11	0,23	-15,02	-0,99218	36	0,23	2,84	0,187603
12	0,25	-15,22	-1,0054	37	0,25	2,82	0,186282
13	0,27	-14,56	-0,9618	38	0,27	2,87	0,189585
14	0,32	-13,16	-0,86932	39	0,32	2,92	0,192888
15	0,36	-11,64	-0,76891	40	0,36	2,94	0,194209
16	0,41	-10,16	-0,67114	41	0,41	3,02	0,199494
17	0,45	-8,69	-0,57404	42	0,45	3,01	0,198833
18	0,5	-6,74	-0,44523	43	0,5	3,01	0,198833
19	0,55	-4,94	-0,32632	44	0,55	2,98	0,196851
20	0,59	-3,76	-0,24838	45	0,59	2,95	0,19487
21	0,64	-2,63	-0,17373	46	0,64	2,94	0,194209
22	0,68	-1,68	-0,11098	47	0,68	2,88	0,190246
23	0,73	-0,76	-0,0502	48	0,73	2,77	0,182979
24	0,77	-0,02	-0,00132	49	0,77	2,72	0,179677
25	0,82	0,57	0,037653	50	0,82	2,7	0,178355
26	0,86	1,12	0,073984	51	0,86	2,53	0,167126

Πίνακας (IV.1.3) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 2cmx2cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$

$\alpha = 12^\circ - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 31,88 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 31^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-7,7	-0,50864	27	0,02	16,26	1,074096
3	0,05	-32,3	-2,13366	28	0,05	12,17	0,80392
4	0,07	-22,68	-1,49818	29	0,07	10,5	0,693604
5	0,09	-17,5	-1,15601	30	0,09	9,52	0,628868
6	0,11	-16,8	-1,10977	31	0,11	8,34	0,55092
7	0,14	-15,77	-1,04173	32	0,14	7,6	0,502037
8	0,16	-14,65	-0,96774	33	0,16	7,12	0,47033
9	0,18	-13,9	-0,9182	34	0,18	6,5	0,429374
10	0,2	-12,77	-0,84355	35	0,2	6,11	0,403612
11	0,23	-11,67	-0,77089	36	0,23	5,98	0,395024
12	0,25	-10,7	-0,70682	37	0,25	5,73	0,37851
13	0,27	-8,9	-0,58791	38	0,27	5,72	0,377849
14	0,32	-6,4	-0,42277	39	0,32	5,43	0,358692
15	0,36	-4,4	-0,29065	40	0,36	5,1	0,336893
16	0,41	-3,05	-0,20148	41	0,41	4,86	0,32104
17	0,45	-2,4	-0,15854	42	0,45	4,62	0,305186
18	0,5	-2,14	-0,14136	43	0,5	4,39	0,289993
19	0,55	-2,05	-0,13542	44	0,55	4,07	0,268854
20	0,59	-2,05	-0,13542	45	0,59	3,86	0,254982
21	0,64	-2,11	-0,13938	46	0,64	3,57	0,235825

22	0,68	-2,15	-0,14202	47	0,68	3,27	0,216008
23	0,73	-2,16	-0,14268	48	0,73	2,98	0,196851
24	0,77	-0,02	-0,14797	49	0,77	2,61	0,17241
25	0,82	0,57	-0,15259	50	0,82	2,24	0,147969
26	0,86	1,12	-0,14268	51	0,86	1,76	0,116261

#### IV.2 Ταχύτητα Αέρα - $V=10,125 \text{ m/s}$

Πίνακας (IV.2.1) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$  –  $V=10,125 \text{ m/s}$  –  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 60,7 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 125,1 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	30,52	0,496185	27	0,02	13,4	0,217853
3	0,05	-13,04	-0,212	28	0,05	-19,3	-0,31377
4	0,07	-19,85	-0,32272	29	0,07	-15,03	-0,24435
5	0,09	-25,87	-0,42059	30	0,09	-13,49	-0,21932
6	0,11	-34,9	-0,56739	31	0,11	-14,02	-0,22793
7	0,14	-35,83	-0,58251	32	0,14	-12,84	-0,20875
8	0,16	-34,98	-0,56869	33	0,16	-11,4	-0,18534
9	0,18	-38,18	-0,62072	34	0,18	-10,9	-0,17721
10	0,2	-39,88	-0,64836	35	0,2	-10,17	-0,16534
11	0,23	-41,18	-0,66949	36	0,23	-7,83	-0,1273
12	0,25	-44,78	-0,72802	37	0,25	-6,73	-0,10941
13	0,27	-44,52	-0,72379	38	0,27	-4,48	-0,07283
14	0,32	-41,92	-0,68152	39	0,32	-3,32	-0,05398
15	0,36	-38,32	-0,62299	40	0,36	-1,83	-0,02975
16	0,41	-36,2	-0,58853	41	0,41	-0,2	-0,00325
17	0,45	-33,36	-0,54236	42	0,45	0,83	0,013494
18	0,5	-26,69	-0,43392	43	0,5	1,86	0,030239
19	0,55	-20,92	-0,34011	44	0,55	2,54	0,041295
20	0,59	-17,59	-0,28597	45	0,59	3,6	0,058528
21	0,64	-14,18	-0,23053	46	0,64	4,28	0,069583
22	0,68	-11,79	-0,19168	47	0,68	4,84	0,078687
23	0,73	-8,57	-0,13933	48	0,73	5,6	0,091043
24	0,77	-5,53	-0,0899	49	0,77	6,44	0,104699
25	0,82	-2,85	-0,04633	50	0,82	7,05	0,114617
26	0,86	1,14	0,018534	51	0,86	7,58	0,123233

Πίνακας (IV.2.2) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$  –  $V=10,125 \text{ m/s}$  –  $\alpha = 6^{\circ}$

$\alpha = 6 - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 60,7 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 125,1 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-2,44	-0,03967	27	0,02	45,9	0,746228
3	0,05	-67,9	-1,1039	28	0,05	22,22	0,361246
4	0,07	-51,57	-0,83841	29	0,07	18,23	0,296378



5	0,09	-52,89	-0,85987	30	0,09	16,35	0,265813
6	0,11	-59,57	-0,96847	31	0,11	12,96	0,2107
7	0,14	-57,92	-0,94165	32	0,14	11,59	0,188427
8	0,16	-54,69	-0,88913	33	0,16	11,17	0,181598
9	0,18	-55,88	-0,90848	34	0,18	9,8	0,159325
10	0,2	-55,62	-0,90425	35	0,2	9,25	0,150384
11	0,23	-55,72	-0,90588	36	0,23	9,92	0,161276
12	0,25	-56,86	-0,92441	37	0,25	9,92	0,161276
13	0,27	-54,24	-0,88182	38	0,27	10,86	0,176558
14	0,32	-48,5	-0,7885	39	0,32	10,67	0,173469
15	0,36	-42,32	-0,68803	40	0,36	10,64	0,172982
16	0,41	-37,15	-0,60397	41	0,41	11,12	0,180785
17	0,45	-31,9	-0,51862	42	0,45	11,15	0,181273
18	0,5	-24	-0,39018	43	0,5	11,21	0,182249
19	0,55	-17,4	-0,28288	44	0,55	10,93	0,177696
20	0,59	-13,25	-0,21541	45	0,59	11,16	0,181436
21	0,64	-8,51	-0,13835	46	0,64	10,91	0,177371
22	0,68	-5,07	-0,08243	47	0,68	10,6	0,172331
23	0,73	-1,67	-0,02715	48	0,73	10,43	0,169568
24	0,77	1,19	0,019347	49	0,77	10,4	0,16908
25	0,82	3,08	0,050074	50	0,82	10	0,162577
26	0,86	4,67	0,075923	51	0,86	9,21	0,149733

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V – ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ - ΠΛΕΓΜΑ 4cmx4cm**

**V.1 Ταχύτητα Αέρα -  $V=5,023 \text{ m/s}$**

Πίνακας (V.1.1) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 14,96 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 33,5 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	8,56	0,565453	27	0,02	4,24	0,280084
3	0,05	-3,06	-0,20214	28	0,05	-5,63	-0,3719
4	0,07	-4,91	-0,32434	29	0,07	-4,18	-0,27612
5	0,09	-6,27	-0,41418	30	0,09	-3,49	-0,23054
6	0,11	-8,55	-0,56479	31	0,11	-3,48	-0,22988
7	0,14	-8,83	-0,58329	32	0,14	-3,26	-0,21535
8	0,16	-8,9	-0,58791	33	0,16	-2,94	-0,19421
9	0,18	-9,66	-0,63812	34	0,18	-2,83	-0,18694
10	0,2	-10,1	-0,66718	35	0,2	-2,63	-0,17373
11	0,23	-10,7	-0,70682	36	0,23	-2,13	-0,1407
12	0,25	-11,34	-0,74909	37	0,25	-1,82	-0,12022
13	0,27	-11,26	-0,74381	38	0,27	-1,23	-0,08125
14	0,32	-10,68	-0,70549	39	0,32	-0,92	-0,06077
15	0,36	-9,83	-0,64935	40	0,36	-0,53	-0,03501
16	0,41	-9,17	-0,60575	41	0,41	-0,15	-0,00991
17	0,45	-8,4	-0,55488	42	0,45	0,16	0,010569
18	0,5	-7,13	-0,47099	43	0,5	0,44	0,029065
19	0,55	-5,73	-0,37851	44	0,55	0,6	0,039635
20	0,59	-4,69	-0,30981	45	0,59	0,89	0,058791
21	0,64	-3,68	-0,24309	46	0,64	1,12	0,073984
22	0,68	-3,03	-0,20015	47	0,68	1,28	0,084554
23	0,73	-2,23	-0,14731	48	0,73	1,43	0,094462
24	0,77	-1,46	-0,09644	49	0,77	1,64	0,108334
25	0,82	-0,88	-0,05813	50	0,82	1,8	0,118904
26	0,86	-0,11	-0,00727	51	0,86	1,96	0,129473

Πίνακας (V.1.2) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^{\circ}$

$\alpha = 6 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 14,96 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 33,5 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	0,29	0,019157	27	0,02	13,25	0,875262
3	0,05	-17,84	-1,17847	28	0,05	6,5	0,429374
4	0,07	-13,79	-0,91093	29	0,07	5,31	0,350766
5	0,09	-13,85	-0,9149	30	0,09	4,76	0,314434
6	0,11	-15,48	-1,02257	31	0,11	3,76	0,248376
7	0,14	-15,02	-0,99218	32	0,14	3,37	0,222614

8	0,16	-14,43	-0,95321	33	0,16	3,22	0,212705
9	0,18	-14,67	-0,96906	34	0,18	2,82	0,186282
10	0,2	-14,62	-0,96576	35	0,2	2,71	0,179016
11	0,23	-14,58	-0,96312	36	0,23	2,82	0,186282
12	0,25	-14,77	-0,97567	37	0,25	2,85	0,188264
13	0,27	-14,17	-0,93604	38	0,27	3,05	0,201475
14	0,32	-12,77	-0,84355	39	0,32	3,02	0,199494
15	0,36	-11,2	-0,73984	40	0,36	3,05	0,201475
16	0,41	-9,82	-0,64869	41	0,41	3,09	0,204118
17	0,45	-8,59	-0,56743	42	0,45	3,1	0,204778
18	0,5	-6,68	-0,44126	43	0,5	3,13	0,20676
19	0,55	-4,92	-0,325	44	0,55	3,07	0,202797
20	0,59	-3,89	-0,25696	45	0,59	3,12	0,2061
21	0,64	-2,7	-0,17836	46	0,64	3,06	0,202136
22	0,68	-1,82	-0,12022	47	0,68	2,99	0,197512
23	0,73	-0,93	-0,06143	48	0,73	2,96	0,19553
24	0,77	-0,1	-0,00661	49	0,77	2,96	0,19553
25	0,82	0,5	0,033029	50	0,82	2,87	0,189585
26	0,86	1,11	0,073324	51	0,86	2,76	0,182319

*Πίνακας (V.1.3) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$*

$\alpha = 12^\circ - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 14,96 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 33,5 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-7,39	-0,48817	27	0,02	16,9	1,116372
3	0,05	-30,2	-1,99494	28	0,05	12,25	0,809205
4	0,07	-20,6	-1,36079	29	0,07	10,45	0,690301
5	0,09	-17,53	-1,15799	30	0,09	9,47	0,625565
6	0,11	-17,4	-1,1494	31	0,11	8,2	0,541672
7	0,14	-16,33	-1,07872	32	0,14	7,42	0,490147
8	0,16	-15,2	-1,00407	33	0,16	6,96	0,45976
9	0,18	-14,65	-0,96774	34	0,18	6,31	0,416823
10	0,2	-13,85	-0,9149	35	0,2	5,98	0,395024
11	0,23	-12,7	-0,83893	36	0,23	5,91	0,3904
12	0,25	-12,1	-0,7993	37	0,25	5,71	0,377189
13	0,27	-10,38	-0,68568	38	0,27	5,64	0,372565
14	0,32	-8,1	-0,53507	39	0,32	5,34	0,352747
15	0,36	-5,99	-0,39568	40	0,36	5,08	0,335572
16	0,41	-4	-0,26423	41	0,41	4,92	0,325003
17	0,45	-3,05	-0,20148	42	0,45	4,68	0,309149
18	0,5	-2,36	-0,1559	43	0,5	4,47	0,295277
19	0,55	-2,08	-0,1374	44	0,55	4,17	0,27546
20	0,59	-1,84	-0,12155	45	0,59	3,99	0,26357
21	0,64	-1,69	-0,11164	46	0,64	3,8	0,251019

22	0,68	-1,84	-0,12155	47	0,68	3,46	0,228559
23	0,73	-1,7	-0,1123	48	0,73	3,22	0,212705
24	0,77	-1,7	-0,1123	49	0,77	2,93	0,193549
25	0,82	-1,67	-0,11032	50	0,82	2,53	0,167126
26	0,86	-1,45	-0,09578	51	0,86	2,04	0,134757

Πίνακας (V.1.4) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm – V=5,023 m/s -  $\alpha = 18^\circ$

$\alpha = 18^\circ - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 14,96 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 33,5 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-4,8	-0,31708	27	0,02	18,15	1,198944
3	0,05	-2,3	-0,15193	28	0,05	15,38	1,015965
4	0,07	-22,19	-1,46582	29	0,07	13,53	0,893759
5	0,09	-15,9	-1,05031	30	0,09	12,5	0,825719
6	0,11	-13,4	-0,88517	31	0,11	11,2	0,739844
7	0,14	-11,3	-0,74645	32	0,14	10,14	0,669823
8	0,16	-10,15	-0,67048	33	0,16	9,65	0,637455
9	0,18	-9,3	-0,61434	34	0,18	8,77	0,579325
10	0,2	-8	-0,52846	35	0,2	8,28	0,546956
11	0,23	-7,2	-0,47561	36	0,23	8,1	0,535066
12	0,25	-6,5	-0,42937	37	0,25	7,8	0,515249
13	0,27	-6	-0,39635	38	0,27	7,59	0,501377
14	0,32	-5,2	-0,3435	39	0,32	7,15	0,472311
15	0,36	-4,6	-0,30386	40	0,36	6,63	0,437961
16	0,41	-4,4	-0,29065	41	0,41	6,26	0,41352
17	0,45	-4,46	-0,29462	42	0,45	5,96	0,393703
18	0,5	-4,3	-0,28405	43	0,5	5,49	0,362656
19	0,55	-4,1	-0,27084	44	0,55	5,1	0,336893
20	0,59	-4	-0,26423	45	0,59	4,84	0,319718
21	0,64	-4,1	-0,27084	46	0,64	4,33	0,286029
22	0,68	-4,2	-0,27744	47	0,68	3,87	0,255643
23	0,73	-3,8	-0,25102	48	0,73	3,34	0,220632
24	0,77	-3,8	-0,25102	49	0,77	2,98	0,196851
25	0,82	-4,3	-0,28405	50	0,82	2,37	0,156556
26	0,86	-4	-0,26423	51	0,86	1,67	0,110316

## V.2 Ταχύτητα Αέρα - V=10,125 m/s

Πίνακας (V.2.1) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm – V=10,125 m/s -  $\alpha = 0^\circ$

$\alpha = 0^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_\infty = 61 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 111,84 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	7,17	0,116568	27	0,02	13,13	0,213463
3	0,05	8,05	0,130874	28	0,05	-19,77	-0,32141
4	0,07	-17,15	-0,27882	29	0,07	-14,24	-0,23151

5	0,09	-22,74	-0,3697	30	0,09	-12,47	-0,20273
6	0,11	-31,14	-0,50626	31	0,11	-13,48	-0,21915
7	0,14	-32,55	-0,52919	32	0,14	-12,43	-0,20208
8	0,16	-31,6	-0,51374	33	0,16	-10,85	-0,1764
9	0,18	-34,78	-0,56544	34	0,18	-10,57	-0,17184
10	0,2	-36,59	-0,59487	35	0,2	-9,82	-0,15965
11	0,23	-38,48	-0,6256	36	0,23	-7,51	-0,1221
12	0,25	-41,39	-0,67291	37	0,25	-6,46	-0,10502
13	0,27	-40,95	-0,66575	38	0,27	-5,24	-0,08519
14	0,32	-38,54	-0,62657	39	0,32	-4,04	-0,06568
15	0,36	-35,19	-0,57211	40	0,36	-1,69	-0,02748
16	0,41	-33,37	-0,54252	41	0,41	-0,92	-0,01496
17	0,45	-30,84	-0,50139	42	0,45	0,86	0,013982
18	0,5	-24,53	-0,3988	43	0,5	1,2	0,019509
19	0,55	-19,32	-0,3141	44	0,55	2,48	0,040319
20	0,59	-16,29	-0,26484	45	0,59	3,01	0,048936
21	0,64	-12,95	-0,21054	46	0,64	4,22	0,068607
22	0,68	-11,07	-0,17997	47	0,68	4,32	0,070233
23	0,73	-7,85	-0,12762	48	0,73	5,52	0,089742
24	0,77	-5,37	-0,0873	49	0,77	5,96	0,096896
25	0,82	-2,76	-0,04487	50	0,82	6,94	0,112828
26	0,86	0,74	0,012031	51	0,86	7,82	0,127135

Πίνακας (V.2.2) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm –  $V=10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 61 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 111,84 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-6,7	-0,10893	27	0,02	47,85	0,77793
3	0,05	-64,3	-1,04537	28	0,05	25,13	0,408556
4	0,07	-52,04	-0,84605	29	0,07	20,69	0,336371
5	0,09	-52,4	-0,8519	30	0,09	18,57	0,301905
6	0,11	-58,33	-0,94831	31	0,11	14,67	0,2385
7	0,14	-56,19	-0,91352	32	0,14	13,12	0,213301
8	0,16	-52,86	-0,85938	33	0,16	12,81	0,208261
9	0,18	-53,89	-0,87613	34	0,18	11,21	0,182249
10	0,2	-53,5	-0,86979	35	0,2	10,53	0,171193
11	0,23	-53,22	-0,86523	36	0,23	11,38	0,185012
12	0,25	-54,18	-0,88084	37	0,25	11,28	0,183387
13	0,27	-51,26	-0,83337	38	0,27	11,22	0,182411
14	0,32	-45,95	-0,74704	39	0,32	10,93	0,177696
15	0,36	-40,34	-0,65583	40	0,36	10,96	0,178184
16	0,41	-35,6	-0,57877	41	0,41	11,39	0,185175
17	0,45	-30,95	-0,50318	42	0,45	11,46	0,186313
18	0,5	-23,54	-0,38271	43	0,5	11,47	0,186476

19	0,55	-17,29	-0,2811	44	0,55	11,24	0,182736
20	0,59	-13,46	-0,21883	45	0,59	11,45	0,18615
21	0,64	-9,35	-0,15201	46	0,64	11,2	0,182086
22	0,68	-6,07	-0,09868	47	0,68	10,96	0,178184
23	0,73	-2,72	-0,04422	48	0,73	10,84	0,176233
24	0,77	0,34	0,005528	49	0,77	10,86	0,176558
25	0,82	2,53	0,041132	50	0,82	10,64	0,172982
26	0,86	4,78	0,077712	51	0,86	10,02	0,162902

Πίνακας (V.2.3) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm – V=10,125 m/s -  $\alpha = 12^\circ$

$\alpha = 12 - V = 10,125\text{m/s}$		Po-P <sub>∞</sub> = 61 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =111,84 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-33	-0,5365	27	0,02	60,7	0,986841
3	0,05	-10,44	-0,16973	28	0,05	44,27	0,719728
4	0,07	-73,8	-1,19982	29	0,07	37,6	0,611289
5	0,09	-62,8	-1,02098	30	0,09	34,23	0,556501
6	0,11	-62,3	-1,01285	31	0,11	29,41	0,478138
7	0,14	-57,8	-0,93969	32	0,14	26,6	0,432454
8	0,16	-52,9	-0,86003	33	0,16	25,2	0,409694
9	0,18	-50	-0,81288	34	0,18	22,71	0,369212
10	0,2	-46,3	-0,75273	35	0,2	21,5	0,34954
11	0,23	-42,2	-0,68607	36	0,23	21,3	0,346289
12	0,25	-39,4	-0,64055	37	0,25	20,6	0,334908
13	0,27	-33,1	-0,53813	38	0,27	20,63	0,335396
14	0,32	-24	-0,39018	39	0,32	19,38	0,315074
15	0,36	-16,5	-0,26825	40	0,36	18,4	0,299141
16	0,41	-11,6	-0,18859	41	0,41	17,89	0,29085
17	0,45	-9,2	-0,14957	42	0,45	17,12	0,278332
18	0,5	-8,26	-0,13429	43	0,5	16,21	0,263537
19	0,55	-7,5	-0,12193	44	0,55	15,27	0,248255
20	0,59	-7,3	-0,11868	45	0,59	14,68	0,238663
21	0,64	-7,1	-0,11543	46	0,64	13,51	0,219641
22	0,68	-7,4	-0,12031	47	0,68	12,5	0,203221
23	0,73	-7,3	-0,11868	48	0,73	11,41	0,1855
24	0,77	-7	-0,1138	49	0,77	10,42	0,169405
25	0,82	-7,1	-0,11543	50	0,82	9,1	0,147945
26	0,86	-6,95	-0,11299	51	0,86	7	0,113804

Πίνακας (V.2.4) Αεροτομή χωρίς τραχύτητα – Πλέγμα 4cmx4cm – V=10,125 m/s -  $\alpha = 18^\circ$

$\alpha = 18 - V = 10,125\text{m/s}$		Po-P <sub>∞</sub> = 61 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =111,84 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	13	0,21135	27	0,02	64,5	1,048621

3	0,05	-53,5	-0,86979	28	0,05	54	0,877915
4	0,07	-48	-0,78037	29	0,07	47,7	0,775492
5	0,09	-43	-0,69908	30	0,09	44,2	0,71859
6	0,11	-41	-0,66657	31	0,11	39,4	0,640553
7	0,14	-37,2	-0,60479	32	0,14	35,1	0,570645
8	0,16	-35	-0,56902	33	0,16	34,2	0,556013
9	0,18	-33	-0,5365	34	0,18	31,3	0,508866
10	0,2	-30,5	-0,49586	35	0,2	30,1	0,489356
11	0,23	-29,5	-0,4796	36	0,23	29,1	0,473099
12	0,25	-27,3	-0,44383	37	0,25	27,9	0,453589
13	0,27	-25,8	-0,41945	38	0,27	27,35	0,444648
14	0,32	-23,7	-0,38531	39	0,32	25,6	0,416197
15	0,36	-22,2	-0,36092	40	0,36	24	0,390184
16	0,41	-21	-0,34141	41	0,41	22,7	0,369049
17	0,45	-20	-0,32515	42	0,45	21,45	0,348727
18	0,5	-20,3	-0,33003	43	0,5	19,78	0,321577
19	0,55	-19,5	-0,31702	44	0,55	18,5	0,300767
20	0,59	-19,3	-0,31377	45	0,59	17,4	0,282884
21	0,64	-19,5	-0,31702	46	0,64	15,5	0,251994
22	0,68	-19,7	-0,32028	47	0,68	14,1	0,229233
23	0,73	-19,5	-0,31702	48	0,73	12,2	0,198344
24	0,77	-19,1	-0,31052	49	0,77	10,57	0,171844
25	0,82	-19	-0,3089	50	0,82	8,7	0,141442
26	0,86	-17,8	-0,28939	51	0,86	5,7	0,092669

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI - ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ 100μm - ΠΛΕΓΜΑ 2cmx2cm**

**VI.1 - Ταχύτητα Αέρα -  $V=5,023$  m/s**

*Πίνακας (VI.1.1) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 2cmx2cm -  $V=5,023$  m/s -  $\alpha = 0$*

$\alpha = 0 - V = 5,125$ m/s		$P_o - P_{\infty} = 15,11$ Pa		$P_o - P_{atm} = 31,88$ Pa		$P_{atm} = 101,3$ kPa $T_{atm} = 31$ °C	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	5,62	0,371243	27	0,02	-0,6	-0,03963
3	0,05	-4,61	-0,30453	28	0,05	-5,36	-0,35407
4	0,07	-6,62	-0,4373	29	0,07	-4,72	-0,31179
5	0,09	-7,68	-0,50732	30	0,09	-4,24	-0,28008
6	0,11	-9,16	-0,60509	31	0,11	-3,74	-0,24706
7	0,14	-9,85	-0,65067	32	0,14	-3,71	-0,24507
8	0,16	-9,72	-0,64208	33	0,16	-4,26	-0,28141
9	0,18	-10,48	-0,69228	34	0,18	-4,86	-0,32104
10	0,2	-11,25	-0,74315	35	0,2	-4,05	-0,26753
11	0,23	-11,6	-0,76627	36	0,23	-3,27	-0,21601
12	0,25	-12,03	-0,79467	37	0,25	-2,22	-0,14665
13	0,27	-11,97	-0,79071	38	0,27	-0,98	-0,06474
14	0,32	-11,33	-0,74843	39	0,32	-0,7	-0,04624
15	0,36	-10,55	-0,69691	40	0,36	-0,27	-0,01784
16	0,41	-9,68	-0,63944	41	0,41	0,03	0,001982
17	0,45	-8,93	-0,58989	42	0,45	0,29	0,019157
18	0,5	-8,33	-0,55026	43	0,5	0,57	0,037653
19	0,55	-7,59	-0,50138	44	0,55	0,77	0,050864
20	0,59	-6,69	-0,44192	45	0,59	1,06	0,070021
21	0,64	-4,67	-0,30849	46	0,64	1,28	0,084554
22	0,68	-3,46	-0,22856	47	0,68	1,47	0,097105
23	0,73	-2,49	-0,16448	48	0,73	1,62	0,107013
24	0,77	-1,67	-0,11032	49	0,77	1,68	0,110977
25	0,82	-1,09	-0,072	50	0,82	1,93	0,127491
26	0,86	-0,08	-0,00528	51	0,86	2,16	0,142684

*Πίνακας (VI.1.2) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 2cmx2cm -  $V=5,023$  m/s -  $\alpha = 6^\circ$*

$\alpha = 6 - V = 5,023$ m/s		$P_o - P_{\infty} = 15,11$ Pa		$P_o - P_{atm} = 31,88$ Pa		$P_{atm} = 101,3$ kPa $T_{atm} = 31$ °C	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-11,46	-0,75702	27	0,02	13,2	0,87196
3	0,05	-19,83	-1,30992	28	0,05	7,97	0,526479
4	0,07	-19,46	-1,28548	29	0,07	6,86	0,453155
5	0,09	-18,54	-1,22471	30	0,09	6,25	0,41286
6	0,11	-18,47	-1,22008	31	0,11	5,54	0,365959
7	0,14	-18	-1,18904	32	0,14	4,86	0,32104



8	0,16	-17,77	-1,17384	33	0,16	3,81	0,251679
9	0,18	-17,56	-1,15997	34	0,18	3,15	0,208081
10	0,2	-17,73	-1,1712	35	0,2	3,7	0,244413
11	0,23	-17,4	-1,1494	36	0,23	4,19	0,276781
12	0,25	-17,33	-1,14478	37	0,25	4,29	0,283387
13	0,27	-16,88	-1,11505	38	0,27	4,29	0,283387
14	0,32	-15,76	-1,04107	39	0,32	4,34	0,28669
15	0,36	-14,42	-0,95255	40	0,36	4,34	0,28669
16	0,41	-13,01	-0,85941	41	0,41	4,31	0,284708
17	0,45	-11,45	-0,75636	42	0,45	4,38	0,289332
18	0,5	-9,2	-0,60773	43	0,5	4,32	0,285369
19	0,55	-6,65	-0,43928	44	0,55	4,3	0,284047
20	0,59	-5,21	-0,34416	45	0,59	4,38	0,289332
21	0,64	-3,91	-0,25828	46	0,64	4,36	0,288011
22	0,68	-3,07	-0,2028	47	0,68	4,31	0,284708
23	0,73	-1,95	-0,12881	48	0,73	4,26	0,281405
24	0,77	-0,82	-0,05417	49	0,77	4,18	0,276121
25	0,82	0,13	0,008587	50	0,82	4,18	0,276121
26	0,86	1,28	0,084554	51	0,86	4,15	0,274139

*Πίνακας (VI.1.3) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 2cmx2cm - V=5,023 m/s - α = 12°*

α = 12 - V = 5,023m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 15,11 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =31,88 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =31 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-30,22	-1,99626	27	0,02	18,02	1,190357
3	0,05	-35,13	-2,3206	28	0,05	15,17	1,002093
4	0,07	-32,25	-2,13036	29	0,07	13,52	0,893098
5	0,09	-27,45	-1,81328	30	0,09	12,5	0,825719
6	0,11	-25,87	-1,70891	31	0,11	11,27	0,744468
7	0,14	-24,26	-1,60256	32	0,14	10,4	0,686998
8	0,16	-23,34	-1,54178	33	0,16	9,2	0,607729
9	0,18	-22,53	-1,48828	34	0,18	8,43	0,556865
10	0,2	-22,27	-1,4711	35	0,2	8,54	0,564131
11	0,23	-21	-1,38721	36	0,23	8,63	0,570077
12	0,25	-20,58	-1,35946	37	0,25	8,42	0,556204
13	0,27	-19,27	-1,27293	38	0,27	8,04	0,531103
14	0,32	-17,08	-1,12826	39	0,32	7,79	0,514588
15	0,36	-14,63	-0,96642	40	0,36	7,46	0,492789
16	0,41	-12,26	-0,80987	41	0,41	7,22	0,476935
17	0,45	-10,17	-0,67181	42	0,45	7,04	0,465045
18	0,5	-7,76	-0,51261	43	0,5	6,79	0,448531
19	0,55	-5,5	-0,36332	44	0,55	6,49	0,428713
20	0,59	-4,06	-0,26819	45	0,59	6,37	0,420787
21	0,64	-2,6	-0,17175	46	0,64	6,13	0,404933

22	0,68	-1,37	-0,0905	47	0,68	5,91	0,3904
23	0,73	-0,41	-0,02708	48	0,73	5,6	0,369922
24	0,77	0,58	0,038313	49	0,77	5,32	0,351426
25	0,82	1,2	0,079269	50	0,82	5,04	0,33293
26	0,86	1,69	0,111637	51	0,86	4,82	0,318397

## VI.2 Ταχύτητα Αέρα - $V=10,125 \text{ m/s}$

Πίνακας (VI.2.1) Αεροτομή με τραχύτητα  $100\mu\text{m}$  – Πλέγμα  $2\text{cm}\times 2\text{cm}$  -  $V=10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 10,125\text{m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 60,7 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 125,1 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 30^\circ\text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	18,75	0,304832	27	0,02	1,86	0,030239
3	0,05	-20,15	-0,32759	28	0,05	-18,3	-0,29752
4	0,07	-27,14	-0,44123	29	0,07	-16,54	-0,2689
5	0,09	-30,81	-0,5009	30	0,09	-14,1	-0,22923
6	0,11	-36,25	-0,58934	31	0,11	-12,3	-0,19997
7	0,14	-36,98	-0,60121	32	0,14	-11,45	-0,18615
8	0,16	-38,08	-0,61909	33	0,16	-14,52	-0,23606
9	0,18	-40,04	-0,65096	34	0,18	-16,12	-0,26207
10	0,2	-44,05	-0,71615	35	0,2	-11,3	-0,18371
11	0,23	-44,5	-0,72347	36	0,23	-5,76	-0,09364
12	0,25	-46,31	-0,75289	37	0,25	-4,66	-0,07576
13	0,27	-47,22	-0,76769	38	0,27	-2,12	-0,03447
14	0,32	-44,81	-0,72851	39	0,32	-2,25	-0,03658
15	0,36	-40,49	-0,65827	40	0,36	0,66	0,01073
16	0,41	-38,66	-0,62852	41	0,41	0,69	0,011218
17	0,45	-35,46	-0,5765	42	0,45	3	0,048773
18	0,5	-30,05	-0,48854	43	0,5	2,86	0,046497
19	0,55	-22,68	-0,36872	44	0,55	4,57	0,074298
20	0,59	-19,17	-0,31166	45	0,59	4,65	0,075598
21	0,64	-14,94	-0,24289	46	0,64	6,52	0,106
22	0,68	-13,84	-0,22501	47	0,68	5,98	0,097221
23	0,73	-9,73	-0,15819	48	0,73	7,74	0,125834
24	0,77	-7,34	-0,11933	49	0,77	7,19	0,116893
25	0,82	-3,86	-0,06275	50	0,82	9,13	0,148433
26	0,86	-0,69	-0,01122	51	0,86	8,51	0,138353

Πίνακας (VI.2.2) Αεροτομή με τραχύτητα  $100\mu\text{m}$  – Πλέγμα  $2\text{cm}\times 2\text{cm}$  -  $V=10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6 - V = 10,125\text{m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 60,7 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 125,1 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 30^\circ\text{C}$	
Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	$x/C$	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-44,62	-0,72542	27	0,02	50,15	0,815323
3	0,05	-78,11	-1,26989	28	0,05	29,83	0,484967
4	0,07	-76,05	-1,2364	29	0,07	26,7	0,43408

5	0,09	-68,4	-1,11203	30	0,09	24,25	0,394249
6	0,11	-71,11	-1,15608	31	0,11	21,25	0,345476
7	0,14	-67,46	-1,09674	32	0,14	19,04	0,309546
8	0,16	-66,15	-1,07545	33	0,16	15	0,243865
9	0,18	-65,41	-1,06342	34	0,18	12,83	0,208586
10	0,2	-68,68	-1,11658	35	0,2	14,62	0,237687
11	0,23	-65,65	-1,06732	36	0,23	16,96	0,27573
12	0,25	-66,2	-1,07626	37	0,25	17,19	0,27947
13	0,27	-64,24	-1,04439	38	0,27	17,4	0,282884
14	0,32	-58,65	-0,95351	39	0,32	17,03	0,276868
15	0,36	-51,88	-0,84345	40	0,36	17,3	0,281258
16	0,41	-46,2	-0,75111	41	0,41	17,21	0,279795
17	0,45	-41	-0,66657	42	0,45	17,3	0,281258
18	0,5	-31,9	-0,51862	43	0,5	17,2	0,279632
19	0,55	-24,2	-0,39344	44	0,55	17,05	0,277194
20	0,59	-19,53	-0,31751	45	0,59	17,37	0,282396
21	0,64	-14,98	-0,24354	46	0,64	17,34	0,281908
22	0,68	-11,63	-0,18908	47	0,68	17,24	0,280282
23	0,73	-7,1	-0,11543	48	0,73	17	0,276381
24	0,77	-2,56	-0,04162	49	0,77	16,93	0,275243
25	0,82	1,17	0,019021	50	0,82	16,88	0,27443
26	0,86	5,88	0,095595	51	0,86	16,59	0,269715

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VII - ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ 100mm ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑ 4cmx4cm**

**VII.1 Ταχύτητα Αέρα -  $V=5,023 \text{ m/s}$**

Πίνακας (VII.1.1) Αεροτομή με τραχύτητα 100 $\mu\text{m}$  – Πλέγμα 4cmx4cm -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,2 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 30,6 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	4,4	0,290653	27	0,02	0,29	0,019157
3	0,05	-3,89	-0,25696	28	0,05	-3,88	-0,2563
4	0,07	-5,44	-0,35935	29	0,07	-2,91	-0,19223
5	0,09	-6,64	-0,43862	30	0,09	-2,67	-0,17637
6	0,11	-7,72	-0,50996	31	0,11	-3,15	-0,20808
7	0,14	-8,26	-0,54564	32	0,14	-3,09	-0,20412
8	0,16	-8,67	-0,57272	33	0,16	-3,22	-0,21271
9	0,18	-9,02	-0,59584	34	0,18	-3,14	-0,20742
10	0,2	-9,95	-0,65727	35	0,2	-2,5	-0,16514
11	0,23	-9,95	-0,65727	36	0,23	-1,78	-0,11758
12	0,25	-10,51	-0,69426	37	0,25	-1,32	-0,0872
13	0,27	-10,4	-0,687	38	0,27	-0,63	-0,04162
14	0,32	-9,78	-0,64604	39	0,32	-0,29	-0,01916
15	0,36	-9,2	-0,60773	40	0,36	0,1	0,006606
16	0,41	-8,46	-0,55885	41	0,41	0,41	0,027084
17	0,45	-7,72	-0,50996	42	0,45	0,62	0,040956
18	0,5	-6,84	-0,45183	43	0,5	0,87	0,05747
19	0,55	-5,38	-0,35539	44	0,55	1	0,066058
20	0,59	-4,39	-0,28999	45	0,59	1,27	0,083893
21	0,64	-3,88	-0,2563	46	0,64	1,46	0,096444
22	0,68	-3,23	-0,21337	47	0,68	1,58	0,104371
23	0,73	-2,19	-0,14467	48	0,73	1,82	0,120225
24	0,77	-1,41	-0,09314	49	0,77	1,94	0,128152
25	0,82	-0,88	-0,05813	50	0,82	2,07	0,136739
26	0,86	-0,05	-0,0033	51	0,86	2,2	0,145327

Πίνακας (VII.1.2) Αεροτομή με τραχύτητα 100 $\mu\text{m}$  – Πλέγμα 4cmx4cm -  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,2 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 30,6 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-11,35	-0,74975	27	0,02	12,29	0,811847
3	0,05	-17,45	-1,1527	28	0,05	7,34	0,484862
4	0,07	-16,81	-1,11043	29	0,07	6,6	0,43598
5	0,09	-16,15	-1,06683	30	0,09	5,05	0,333591
6	0,11	-16,29	-1,07608	31	0,11	4,75	0,313773
7	0,14	-16	-1,05692	32	0,14	4,24	0,280084

8	0,16	-15,64	-1,03314	33	0,16	3,78	0,249697
9	0,18	-15,35	-1,01398	34	0,18	3,38	0,223274
10	0,2	-15,62	-1,03182	35	0,2	3,64	0,240449
11	0,23	-15,05	-0,99417	36	0,23	3,98	0,262909
12	0,25	-15,12	-0,99879	37	0,25	3,94	0,260267
13	0,27	-14,58	-0,96312	38	0,27	4,02	0,265551
14	0,32	-13,35	-0,88187	39	0,32	4,1	0,270836
15	0,36	-11,85	-0,78278	40	0,36	4,07	0,268854
16	0,41	-10,4	-0,687	41	0,41	4,18	0,276121
17	0,45	-9,15	-0,60443	42	0,45	4,08	0,269515
18	0,5	-7,4	-0,48883	43	0,5	4,16	0,274799
19	0,55	-5,5	-0,36332	44	0,55	4,13	0,272818
20	0,59	-4,6	-0,30386	45	0,59	4,15	0,274139
21	0,64	-3,7	-0,24441	46	0,64	4,2	0,277442
22	0,68	-2,96	-0,19553	47	0,68	4,16	0,274799
23	0,73	-1,47	-0,0971	48	0,73	3,97	0,262248
24	0,77	-0,52	-0,03435	49	0,77	4	0,26423
25	0,82	0,25	0,016514	50	0,82	4,03	0,266212
26	0,86	1,16	0,076627	51	0,86	3,93	0,259606

*Πίνακας (VII.1.3) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 4cmx4cm - V=5,023 m/s - α = 12°*

α = 12 - V = 5,023m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 15,2 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =30,6 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-28,59	-1,88859	27	0,02	16,36	1,080701
3	0,05	-30	-1,98173	28	0,05	13,23	0,873941
4	0,07	-27,45	-1,81328	29	0,07	11,99	0,79203
5	0,09	-24,9	-1,64483	30	0,09	11,05	0,729936
6	0,11	-23,1	-1,52593	31	0,11	9,65	0,637455
7	0,14	-21,45	-1,41693	32	0,14	9,16	0,605087
8	0,16	-20,45	-1,35088	33	0,16	8,38	0,553562
9	0,18	-19,7	-1,30133	34	0,18	7,8	0,515249
10	0,2	-19,32	-1,27623	35	0,2	7,8	0,515249
11	0,23	-17,98	-1,18771	36	0,23	7,77	0,513267
12	0,25	-17,82	-1,17715	37	0,25	7,58	0,500716
13	0,27	-16,7	-1,10316	38	0,27	7,43	0,490808
14	0,32	-14,63	-0,96642	39	0,32	7,3	0,48222
15	0,36	-12,55	-0,82902	40	0,36	7,09	0,468348
16	0,41	-10,66	-0,70417	41	0,41	6,81	0,449852
17	0,45	-8,98	-0,5932	42	0,45	6,58	0,434659
18	0,5	-6,99	-0,46174	43	0,5	6,42	0,424089
19	0,55	-4,91	-0,32434	44	0,55	6,2	0,409557
20	0,59	-3,8	-0,25102	45	0,59	6,02	0,397666
21	0,64	-2,7	-0,17836	46	0,64	5,9	0,389739

22	0,68	-1,71	-0,11296	47	0,68	5,74	0,37917
23	0,73	-0,63	-0,04162	48	0,73	5,52	0,364638
24	0,77	0,24	0,015854	49	0,77	5,27	0,348123
25	0,82	0,89	0,058791	50	0,82	5,14	0,339536
26	0,86	1,45	0,095783	51	0,86	4,91	0,324343

Πίνακας (VII.1.4) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 4cmx4cm - V=5,023 m/s - α = 18°

α =18 - V = 5,023m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 15,05 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =30,03 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-41,8	-2,76121	27	0,02	16,36	1,076738
3	0,05	-39,1	-2,58285	28	0,05	13,23	1,058902
4	0,07	-35,5	-2,34504	29	0,07	11,99	0,97567
5	0,09	-28,45	-1,87934	30	0,09	11,05	0,9182
6	0,11	-25	-1,65144	31	0,11	9,65	0,838931
7	0,14	-23,2	-1,53253	32	0,14	9,16	0,793351
8	0,16	-21,5	-1,42024	33	0,16	8,38	0,74579
9	0,18	-19,5	-1,28812	34	0,18	7,8	0,692283
10	0,2	-19,35	-1,27821	35	0,2	7,8	0,683696
11	0,23	-17	-1,12298	36	0,23	7,77	0,66586
12	0,25	-16,1	-1,06353	37	0,25	7,58	0,645382
13	0,27	-14,7	-0,97105	38	0,27	7,43	0,63085
14	0,32	-11,9	-0,78608	39	0,32	7,3	0,601784
15	0,36	-9,9	-0,65397	40	0,36	7,09	0,576022
16	0,41	-6,5	-0,42937	41	0,41	6,81	0,552241
17	0,45	-4,75	-0,31377	42	0,45	6,58	0,525157
18	0,5	-3,75	-0,24772	43	0,5	6,42	0,500056
19	0,55	-2,85	-0,18826	44	0,55	6,2	0,476275
20	0,59	-2,3	-0,15193	45	0,59	6,02	0,457118
21	0,64	-2,05	-0,13542	46	0,64	5,9	0,435319
22	0,68	-1,54	-0,10173	47	0,68	5,74	0,41352
23	0,73	-1,46	-0,09644	48	0,73	5,52	0,385115
24	0,77	-1,3	-0,08587	49	0,77	5,27	0,360014
25	0,82	-1,5	-0,09909	50	0,82	5,14	0,336893
26	0,86	-1,45	-0,09578	51	0,86	4,91	0,307168

## VII.2 Ταχύτητα Αέρα - V=10,125 m/s

Πίνακας (VII.2.1) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 4cmx4cm - V=10,125 m/s - α = 0

α =0 - V = 10,125m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 61,1 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =116,25 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	17,78	0,289062	27	0,02	0,23	0,003739
3	0,05	-16,59	-0,26971	28	0,05	-16,82	-0,27345
4	0,07	-21,32	-0,34661	29	0,07	-11,72	-0,19054

5	0,09	-26,18	-0,42563	30	0,09	-10,39	-0,16892
6	0,11	-31,15	-0,50643	31	0,11	-12,93	-0,21021
7	0,14	-32,6	-0,53	32	0,14	-11,73	-0,1907
8	0,16	-33,93	-0,55162	33	0,16	-12,21	-0,19851
9	0,18	-34,19	-0,55585	34	0,18	-11,7	-0,19021
10	0,2	-39,75	-0,64624	35	0,2	-9,58	-0,15575
11	0,23	-38,5	-0,62592	36	0,23	-5,45	-0,0886
12	0,25	-41,08	-0,66787	37	0,25	-3	-0,04877
13	0,27	-41	-0,66657	38	0,27	-2,59	-0,04211
14	0,32	-38,55	-0,62673	39	0,32	-0,93	-0,01512
15	0,36	-35,33	-0,57438	40	0,36	0,55	0,008942
16	0,41	-33,02	-0,53683	41	0,41	2	0,032515
17	0,45	-30,2	-0,49098	42	0,45	2,53	0,041132
18	0,5	-25,05	-0,40725	43	0,5	3,47	0,056414
19	0,55	-19,36	-0,31475	44	0,55	4,12	0,066982
20	0,59	-16,41	-0,26679	45	0,59	5,07	0,082426
21	0,64	-14,74	-0,23964	46	0,64	5,82	0,09462
22	0,68	-13,57	-0,22062	47	0,68	6,6	0,107301
23	0,73	-8,42	-0,13689	48	0,73	7,14	0,11608
24	0,77	-5,57	-0,09056	49	0,77	7,67	0,124696
25	0,82	-3,47	-0,05641	50	0,82	8,41	0,136727
26	0,86	-0,02	-0,00033	51	0,86	9,06	0,147295

Πίνακας (VII.2.2) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 4cmx4cm - V=10,125 m/s - α = 6°

α =6 - V = 10,125m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 61,1 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =116,25 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	χ/C	ΔP	Cp	Οπή	χ/C	ΔP	Cp
2	0,02	-44,42	-0,72217	27	0,02	46,89	0,762323
3	0,05	-68,5	-1,11365	28	0,05	27,38	0,445135
4	0,07	-66,15	-1,07545	29	0,07	25,65	0,41701
5	0,09	-62,54	-1,01676	30	0,09	22,97	0,373439
6	0,11	-64,36	-1,04634	31	0,11	17,26	0,280608
7	0,14	-61,69	-1,00294	32	0,14	16,45	0,267439
8	0,16	-60,45	-0,98278	33	0,16	14,46	0,235086
9	0,18	-58,52	-0,9514	34	0,18	13,45	0,218666
10	0,2	-62,87	-1,02212	35	0,2	14,03	0,228095
11	0,23	-57,65	-0,93726	36	0,23	15,87	0,258009
12	0,25	-59,2	-0,96245	37	0,25	15,57	0,253132
13	0,27	-56,7	-0,92181	38	0,27	16,1	0,261749
14	0,32	-50,92	-0,82784	39	0,32	16,25	0,264187
15	0,36	-44,14	-0,71761	40	0,36	16,4	0,266626
16	0,41	-40,17	-0,65307	41	0,41	16,65	0,27069
17	0,45	-35,4	-0,57552	42	0,45	16,27	0,264513
18	0,5	-28,3	-0,46009	43	0,5	16,29	0,264838

19	0,55	-21,15	-0,34385	44	0,55	16,09	0,261586
20	0,59	-17,17	-0,27914	45	0,59	16,23	0,263862
21	0,64	-14,29	-0,23232	46	0,64	16,2	0,263374
22	0,68	-11,55	-0,18778	47	0,68	16,33	0,265488
23	0,73	-5,52	-0,08974	48	0,73	16,18	0,263049
24	0,77	-1,65	-0,02683	49	0,77	15,9	0,258497
25	0,82	1,47	0,023899	50	0,82	15,98	0,259798
26	0,86	5,17	0,084052	51	0,86	16,05	0,260936

*Πίνακας (VII.2.3) Αεροτομή με τραχύτητα 100μm – Πλέγμα 4cmx4cm - V=10,125 m/s - α = 12°*

α =12 - V = 10,125m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 61,1 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =116,25 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-114,89	-1,86785	27	0,02	63,5	1,032363
3	0,05	-120,5	-1,95905	28	0,05	51,67	0,840035
4	0,07	-107,05	-1,74039	29	0,07	47,29	0,768826
5	0,09	-93,5	-1,52009	30	0,09	43,59	0,708672
6	0,11	-91,9	-1,49408	31	0,11	37,82	0,614866
7	0,14	-84,8	-1,37865	32	0,14	35,96	0,584626
8	0,16	-81,3	-1,32175	33	0,16	33,24	0,540405
9	0,18	-76,35	-1,24127	34	0,18	31,1	0,505614
10	0,2	-79,45	-1,29167	35	0,2	30,86	0,501712
11	0,23	-71,07	-1,15543	36	0,23	31,05	0,504801
12	0,25	-71,43	-1,16129	37	0,25	29,75	0,483666
13	0,27	-66,32	-1,07821	38	0,27	29,4	0,477976
14	0,32	-57,66	-0,93742	39	0,32	28,48	0,463019
15	0,36	-49,29	-0,80134	40	0,36	27,75	0,451151
16	0,41	-41,78	-0,67925	41	0,41	27,2	0,442209
17	0,45	-35,27	-0,57341	42	0,45	26,1	0,424326
18	0,5	-26,75	-0,43489	43	0,5	25,71	0,417985
19	0,55	-18,94	-0,30792	44	0,55	24,44	0,397338
20	0,59	-13,71	-0,22289	45	0,59	23,93	0,389046
21	0,64	-10,04	-0,16323	46	0,64	23,34	0,379454
22	0,68	-5,59	-0,09088	47	0,68	22,71	0,369212
23	0,73	-1,22	-0,01983	48	0,73	22,085	0,359051
24	0,77	2,03	0,033003	49	0,77	21,1	0,343037
25	0,82	4,06	0,066006	50	0,82	20,54	0,333933
26	0,86	6,04	0,098196	51	0,86	19,63	0,319138



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VIII - ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ 200μm - ΠΛΕΓΜΑ 2cmx2cm**

**VIII.1 Ταχύτητα Αέρα -  $V=5,023$  m/s**

Πίνακας (VIII.1.1) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 2cmx2cm –  $V = 5,023$  m/s -  $\alpha = 0$

$\alpha = 0 - V = 5,023$ m/s		$P_o - P_{\infty} = 15,11$ Pa		$P_o - P_{atm} = 35,9$ Pa		$P_{atm} = 101,3$ kPa $T_{atm} = 30$ °C	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	4,32	0,285369	27	0,02	0,39	0,025762
3	0,05	-6,52	-0,4307	28	0,05	-4,88	-0,32236
4	0,07	-7,92	-0,52318	29	0,07	-4,47	-0,29528
5	0,09	-9,66	-0,63812	30	0,09	-3,7	-0,24441
6	0,11	-10,67	-0,70483	31	0,11	-4,21	-0,2781
7	0,14	-10,89	-0,71937	32	0,14	-4,18	-0,27612
8	0,16	-11,54	-0,7623	33	0,16	-4,9	-0,32368
9	0,18	-12,26	-0,80987	34	0,18	-3,88	-0,2563
10	0,2	-12,58	-0,831	35	0,2	-3,29	-0,21733
11	0,23	-13,22	-0,87328	36	0,23	-2,68	-0,17703
12	0,25	-13,72	-0,90631	37	0,25	-1,75	-0,1156
13	0,27	-13,61	-0,89904	38	0,27	-0,97	-0,06408
14	0,32	-12,74	-0,84157	39	0,32	-0,62	-0,04096
15	0,36	-11,82	-0,7808	40	0,36	0,06	0,003963
16	0,41	-10,83	-0,7154	41	0,41	0,4	0,026423
17	0,45	-10,14	-0,66982	42	0,45	0,72	0,047561
18	0,5	-9,4	-0,62094	43	0,5	0,91	0,060112
19	0,55	-8,13	-0,53705	44	0,55	1,18	0,077948
20	0,59	-6,44	-0,42541	45	0,59	1,48	0,097765
21	0,64	-4,36	-0,28801	46	0,64	1,69	0,111637
22	0,68	-3,27	-0,21601	47	0,68	1,9	0,125509
23	0,73	-2,46	-0,1625	48	0,73	2,02	0,133436
24	0,77	-1,56	-0,10305	49	0,77	2,15	0,142024
25	0,82	-0,78	-0,05152	50	0,82	2,31	0,152593
26	0,86	0,57	0,037653	51	0,86	2,53	0,167126

Πίνακας (VIII.1.2) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 2cmx2cm –  $V = 5,023$  m/s -  $\alpha = 6^\circ$

$\alpha = 6 - V = 5,023$ m/s		$P_o - P_{\infty} = 15,11$ Pa		$P_o - P_{atm} = 35,9$ Pa		$P_{atm} = 101,3$ kPa $T_{atm} = 30$ °C	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-16,14	-1,06617	27	0,02	14,89	0,983597
3	0,05	-22,96	-1,51668	28	0,05	9,26	0,611693
4	0,07	-21,84	-1,4427	29	0,07	7,96	0,525818
5	0,09	-21,23	-1,4024	30	0,09	7,36	0,486183
6	0,11	-20,73	-1,36937	31	0,11	5,64	0,372565
7	0,14	-20,11	-1,32842	32	0,14	5,3	0,350105

8	0,16	-19,89	-1,31388	33	0,16	4,34	0,28669
9	0,18	-19,86	-1,3119	34	0,18	4,26	0,281405
10	0,2	-19,59	-1,29407	35	0,2	4,51	0,29792
11	0,23	-19,55	-1,29142	36	0,23	4,48	0,295938
12	0,25	-19,56	-1,29209	37	0,25	4,95	0,326985
13	0,27	-18,86	-1,24585	38	0,27	5,06	0,334251
14	0,32	-17,28	-1,14147	39	0,32	4,9	0,323682
15	0,36	-15,63	-1,03248	40	0,36	5,01	0,330948
16	0,41	-13,67	-0,90301	41	0,41	5	0,330288
17	0,45	-11,96	-0,79005	42	0,45	4,98	0,328967
18	0,5	-9,4	-0,62094	43	0,5	4,87	0,3217
19	0,55	-7,01	-0,46306	44	0,55	4,84	0,319718
20	0,59	-5,57	-0,36794	45	0,59	4,93	0,325664
21	0,64	-4,19	-0,27678	46	0,64	4,85	0,320379
22	0,68	-3,07	-0,2028	47	0,68	4,84	0,319718
23	0,73	-1,9	-0,12551	48	0,73	4,8	0,317076
24	0,77	-0,64	-0,04228	49	0,77	4,75	0,313773
25	0,82	0,42	0,027744	50	0,82	4,7	0,31047
26	0,86	1,74	0,11494	51	0,86	4,59	0,303204

*Πίνακας (VIII.1.3) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 2cmx2cm – V = 5,023 m/s – α = 12°*

α = 12 - V = 5,023m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 15,11 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =35,9 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-36,6	-2,41771	27	0,02	19,69	1,300673
3	0,05	-37,02	-2,44545	28	0,05	16,51	1,09061
4	0,07	-34,97	-2,31003	29	0,07	14,75	0,974349
5	0,09	-32,4	-2,14026	30	0,09	13,46	0,889134
6	0,11	-28,42	-1,87736	31	0,11	11,78	0,778158
7	0,14	-25,9	-1,71089	32	0,14	10,94	0,722669
8	0,16	-24,88	-1,64351	33	0,16	9,76	0,644722
9	0,18	-24,54	-1,62105	34	0,18	9,27	0,612353
10	0,2	-23,22	-1,53386	35	0,2	9,32	0,615656
11	0,23	-22,49	-1,48563	36	0,23	8,87	0,58593
12	0,25	-22,05	-1,45657	37	0,25	8,05	0,531763
13	0,27	-20,5	-1,35418	38	0,27	8,87	0,58593
14	0,32	-17,84	-1,17847	39	0,32	8,46	0,558847
15	0,36	-14,85	-0,98095	40	0,36	8,16	0,53903
16	0,41	-12,59	-0,83166	41	0,41	7,81	0,515909
17	0,45	-10,25	-0,67709	42	0,45	7,54	0,498074
18	0,5	-7,7	-0,50864	43	0,5	7,22	0,476935
19	0,55	-5,1	-0,33689	44	0,55	6,99	0,461742
20	0,59	-3,75	-0,24772	45	0,59	6,88	0,454476
21	0,64	-2,32	-0,15325	46	0,64	6,51	0,430035

22	0,68	-1,21	-0,07993	47	0,68	6,22	0,410878
23	0,73	-0,21	-0,01387	48	0,73	5,93	0,391721
24	0,77	0,44	0,029065	49	0,77	5,59	0,369262
25	0,82	0,82	0,054167	50	0,82	5,31	0,350766
26	0,86	1,16	0,076627	51	0,86	4,87	0,3217

Πίνακας (VIII.1.4) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 2cmx2cm – V = 5,023 m/s - α = 18°

α =18 - V = 5,023m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 15,11 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =35,9 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-47,4	-3,13113	27	0,02	19,91	1,315206
3	0,05	-46,05	-3,04195	28	0,05	19,29	1,27425
4	0,07	-43,1	-2,84708	29	0,07	17,82	1,177145
5	0,09	-31,45	-2,07751	30	0,09	16,73	1,105143
6	0,11	-26,35	-1,74062	31	0,11	15,09	0,996808
7	0,14	-23,4	-1,54575	32	0,14	14,09	0,930751
8	0,16	-21,9	-1,44666	33	0,16	12,84	0,848179
9	0,18	-20,3	-1,34097	34	0,18	12,13	0,801278
10	0,2	-18,2	-1,20225	35	0,2	12,01	0,793351
11	0,23	-16,33	-1,07872	36	0,23	11,39	0,752395
12	0,25	-14	-0,92481	37	0,25	11,32	0,747771
13	0,27	-11,6	-0,76627	38	0,27	10,85	0,716724
14	0,32	-7,8	-0,51525	39	0,32	10,21	0,674447
15	0,36	-5,86	-0,3871	40	0,36	9,74	0,6434
16	0,41	-3,98	-0,26291	41	0,41	9,16	0,605087
17	0,45	-3,26	-0,21535	42	0,45	8,74	0,577343
18	0,5	-3	-0,19817	43	0,5	8,1	0,535066
19	0,55	-2,96	-0,19553	44	0,55	7,74	0,511285
20	0,59	-2,86	-0,18892	45	0,59	7,23	0,477596
21	0,64	-2,86	-0,18892	46	0,64	6,74	0,445228
22	0,68	-2,92	-0,19289	47	0,68	6,29	0,415502
23	0,73	-2,93	-0,19355	48	0,73	5,68	0,375207
24	0,77	-3,06	-0,20214	49	0,77	5,12	0,338215
25	0,82	-3,06	-0,20214	50	0,82	4,55	0,300562
26	0,86	-3,06	-0,20214	51	0,86	3,63	0,239789

#### VIII.2 Ταχύτητα Αέρα - V=10,125 m/s

Πίνακας (VIII.2.1) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 2cmx2cm – V =10,125 m/s - α = 0

α =0 - V = 10,125m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 61,2 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =135,1 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	17,72	0,288086	27	0,02	-0,85	-0,01382
3	0,05	-27,02	-0,43928	28	0,05	-22,32	-0,36287
4	0,07	-31,86	-0,51797	29	0,07	-18,84	-0,30629

5	0,09	-39,26	-0,63828	30	0,09	-16,06	-0,2611
6	0,11	-43,35	-0,70477	31	0,11	-16,38	-0,2663
7	0,14	-44,62	-0,72542	32	0,14	-15,86	-0,25785
8	0,16	-46,18	-0,75078	33	0,16	-17,82	-0,28971
9	0,18	-50,22	-0,81646	34	0,18	-15,47	-0,25151
10	0,2	-51,1	-0,83077	35	0,2	-12,19	-0,19818
11	0,23	-53,18	-0,86458	36	0,23	-9,74	-0,15835
12	0,25	-56,39	-0,91677	37	0,25	-5,75	-0,09348
13	0,27	-56,44	-0,91758	38	0,27	-2,94	-0,0478
14	0,32	-52,85	-0,85922	39	0,32	-1,74	-0,02829
15	0,36	-48,01	-0,78053	40	0,36	0,52	0,008454
16	0,41	-45,03	-0,73208	41	0,41	1,82	0,029589
17	0,45	-41,22	-0,67014	42	0,45	3,09	0,050236
18	0,5	-32,81	-0,53341	43	0,5	3,63	0,059015
19	0,55	-25,66	-0,41717	44	0,55	4,84	0,078687
20	0,59	-21,77	-0,35393	45	0,59	6,07	0,098684
21	0,64	-17,93	-0,2915	46	0,64	6,7	0,108926
22	0,68	-14,5	-0,23574	47	0,68	7,63	0,124046
23	0,73	-11,32	-0,18404	48	0,73	8,21	0,133476
24	0,77	-7,03	-0,11429	49	0,77	8,88	0,144368
25	0,82	-3,52	-0,05723	50	0,82	9,64	0,156724
26	0,86	2,1	0,034141	51	0,86	8,74	0,142092

*Πίνακας (VIII.2.2) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 2cmx2cm – V=10,125 m/s - α = 6°*

α =6 - V = 10,125m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 61,2 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =135,1 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	χ/C	ΔP	Cp	Οπή	χ/C	ΔP	Cp
2	0,02	-61,76	-1,00407	27	0,02	57,34	0,932216
3	0,05	-89,15	-1,44937	28	0,05	33,43	0,543494
4	0,07	-86,87	-1,41231	29	0,07	29,23	0,475212
5	0,09	-83,9	-1,36402	30	0,09	26,81	0,435869
6	0,11	-82,13	-1,33524	31	0,11	21,27	0,345801
7	0,14	-79,23	-1,2881	32	0,14	19,65	0,319463
8	0,16	-76,78	-1,24827	33	0,16	16,1	0,261749
9	0,18	-78,86	-1,28208	34	0,18	15,2	0,247117
10	0,2	-75,7	-1,23071	35	0,2	16,08	0,261424
11	0,23	-75,2	-1,22258	36	0,23	16,57	0,26939
12	0,25	-77,28	-1,25639	37	0,25	18,84	0,306295
13	0,27	-73,67	-1,1977	38	0,27	19,44	0,316049
14	0,32	-66,05	-1,07382	39	0,32	18,9	0,30727
15	0,36	-57,81	-0,93986	40	0,36	19,36	0,314749
16	0,41	-51,75	-0,84134	41	0,41	19,22	0,312473
17	0,45	-45,09	-0,73306	42	0,45	19,33	0,314261
18	0,5	-35,11	-0,57081	43	0,5	18,63	0,302881

19	0,55	-26,6	-0,43245	44	0,55	18,83	0,306132
20	0,59	-21,32	-0,34661	45	0,59	19,1	0,310522
21	0,64	-15,57	-0,25313	46	0,64	18,65	0,303206
22	0,68	-10,59	-0,17217	47	0,68	18,74	0,304669
23	0,73	-5,72	-0,09299	48	0,73	18,32	0,297841
24	0,77	-0,7	-0,01138	49	0,77	18,07	0,293776
25	0,82	3,31	0,053813	50	0,82	17,91	0,291175
26	0,86	7,54	0,122583	51	0,86	17,1	0,278006

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΧ - ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ 200mm - ΠΛΕΓΜΑ 4cmx4cm**

**ΙΧ.1 Ταχύτητα Αέρα -  $V=5,023 \text{ m/s}$**

*Πίνακας (ΙΧ.1.1) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 4cmx4cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 0$*

$\alpha = 0 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 29,85 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	3,11	0,205439	27	0,02	1,02	0,067379
3	0,05	-5,09	-0,33623	28	0,05	-3,23	-0,21337
4	0,07	-6,34	-0,4188	29	0,07	-3,01	-0,19883
5	0,09	-7,7	-0,50864	30	0,09	-2,6	-0,17175
6	0,11	-8,5	-0,56149	31	0,11	-3,05	-0,20148
7	0,14	-8,6	-0,56809	32	0,14	-3,04	-0,20081
8	0,16	-9,3	-0,61434	33	0,16	-3,4	-0,2246
9	0,18	-9,73	-0,64274	34	0,18	-2,9	-0,19157
10	0,2	-10,23	-0,67577	35	0,2	-2,31	-0,15259
11	0,23	-10,45	-0,6903	36	0,23	-1,87	-0,12353
12	0,25	-11	-0,72663	37	0,25	-1,18	-0,07795
13	0,27	-10,76	-0,71078	38	0,27	-0,78	-0,05152
14	0,32	-10,18	-0,67247	39	0,32	-0,47	-0,03105
15	0,36	-9,41	-0,6216	40	0,36	0,04	0,002642
16	0,41	-8,66	-0,57206	41	0,41	0,27	0,017836
17	0,45	-7,95	-0,52516	42	0,45	0,5	0,033029
18	0,5	-6,84	-0,45183	43	0,5	0,64	0,042277
19	0,55	-5,45	-0,36001	44	0,55	0,87	0,05747
20	0,59	-4,42	-0,29197	45	0,59	1,09	0,072003
21	0,64	-3,49	-0,23054	46	0,64	1,25	0,082572
22	0,68	-2,78	-0,18364	47	0,68	1,39	0,09182
23	0,73	-2,08	-0,1374	48	0,73	1,48	0,097765
24	0,77	-1,33	-0,08786	49	0,77	1,61	0,106353
25	0,82	-0,67	-0,04426	50	0,82	1,75	0,115601
26	0,86	0,31	0,020478	51	0,86	1,84	0,121546

*Πίνακας (ΙΧ.1.2) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 4cmx4cm –  $V=5,023 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 6^\circ$*

$\alpha = 6 - V = 5,023 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 15,11 \text{ Pa}$		$P_o - P_{atm} = 29,85 \text{ Pa}$		$P_{atm} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{atm} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-12,85	-0,84884	27	0,02	12,28	0,811187
3	0,05	-18,38	-1,21414	28	0,05	7,23	0,477596
4	0,07	-17,19	-1,13553	29	0,07	6,07	0,400969
5	0,09	-16,8	-1,10977	30	0,09	5,67	0,374546
6	0,11	-16,33	-1,07872	31	0,11	4,95	0,326985
7	0,14	-15,83	-1,04569	32	0,14	4,01	0,264891

8	0,16	-15,55	-1,02719	33	0,16	3,26	0,215348
9	0,18	-15,62	-1,03182	34	0,18	3,18	0,210063
10	0,2	-15,32	-1,012	35	0,2	3,47	0,22922
11	0,23	-15,3	-1,01068	36	0,23	3,47	0,22922
12	0,25	-15,25	-1,00738	37	0,25	3,86	0,254982
13	0,27	-14,93	-0,98624	38	0,27	4,17	0,27546
14	0,32	-13,53	-0,89376	39	0,32	4,05	0,267533
15	0,36	-12,05	-0,79599	40	0,36	4,1	0,270836
16	0,41	-10,53	-0,69559	41	0,41	4,05	0,267533
17	0,45	-9,25	-0,61103	42	0,45	4,07	0,268854
18	0,5	-7,26	-0,47958	43	0,5	3,92	0,258946
19	0,55	-5,46	-0,36067	44	0,55	3,89	0,256964
20	0,59	-4,41	-0,29131	45	0,59	3,9	0,257624
21	0,64	-3,26	-0,21535	46	0,64	3,89	0,256964
22	0,68	-2,35	-0,15524	47	0,68	3,91	0,258285
23	0,73	-1,39	-0,09182	48	0,73	3,79	0,250358
24	0,77	-0,47	-0,03105	49	0,77	3,74	0,247055
25	0,82	0,34	0,02246	50	0,82	3,72	0,245734
26	0,86	1,34	0,088517	51	0,86	3,51	0,231862

*Πίνακας (ΙΧ.1.3) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 4cmx4cm – V=5,023 m/s - α = 12°*

α =12 - V = 5,023m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 15,11 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =29,85 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-30,43	-2,01013	27	0,02	16,39	1,082683
3	0,05	-30,77	-2,03259	28	0,05	13,15	0,868657
4	0,07	-28,2	-1,86282	29	0,07	11,63	0,768249
5	0,09	-25,2	-1,66465	30	0,09	10,78	0,7121
6	0,11	-22,98	-1,518	31	0,11	9,41	0,621601
7	0,14	-21,08	-1,39249	32	0,14	8,68	0,573379
8	0,16	-20,29	-1,34031	33	0,16	7,87	0,519873
9	0,18	-19,9	-1,31455	34	0,18	7,53	0,497413
10	0,2	-18,91	-1,24915	35	0,2	7,56	0,499395
11	0,23	-18,3	-1,20885	36	0,23	7,3	0,48222
12	0,25	-17,94	-1,18507	37	0,25	7,43	0,490808
13	0,27	-16,77	-1,10778	38	0,27	7,27	0,480238
14	0,32	-14,61	-0,9651	39	0,32	6,91	0,456458
15	0,36	-12,48	-0,8244	40	0,36	6,73	0,444567
16	0,41	-10,43	-0,68898	41	0,41	6,46	0,426732
17	0,45	-8,77	-0,57932	42	0,45	6,23	0,411538
18	0,5	-6,56	-0,43334	43	0,5	5,98	0,395024
19	0,55	-4,69	-0,30981	44	0,55	5,77	0,381152
20	0,59	-3,55	-0,2345	45	0,59	5,58	0,368601
21	0,64	-2,36	-0,1559	46	0,64	5,42	0,358032

22	0,68	-1,32	-0,0872	47	0,68	5,27	0,348123
23	0,73	-0,5	-0,03303	48	0,73	4,97	0,328306
24	0,77	0,27	0,017836	49	0,77	4,8	0,317076
25	0,82	0,81	0,053507	50	0,82	4,58	0,302544
26	0,86	1,27	0,083893	51	0,86	4,21	0,278102

Πίνακας (ΙΧ.1.4) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 4cmx4cm – V=5,023 m/s - α = 18°

α =18 - V = 5,023m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 15,11 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =29,85 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	-42,75	-2,82396	27	0,02	16,8	1,109767
3	0,05	-39,5	-2,60927	28	0,05	15,2	1,004075
4	0,07	-34,9	-2,30541	29	0,07	14,65	0,967743
5	0,09	-26,7	-1,76374	30	0,09	13,74	0,907631
6	0,11	-23,8	-1,57217	31	0,11	12,4	0,819113
7	0,14	-21,5	-1,42024	32	0,14	11,52	0,760983
8	0,16	-19,9	-1,31455	33	0,16	10,75	0,710119
9	0,18	-19	-1,25509	34	0,18	10,15	0,670484
10	0,2	-16,7	-1,10316	35	0,2	10,09	0,666521
11	0,23	-14,9	-0,98426	36	0,23	9,69	0,640098
12	0,25	-14,2	-0,93802	37	0,25	9,61	0,634813
13	0,27	-13	-0,85875	38	0,27	9,27	0,612353
14	0,32	-9,6	-0,63415	39	0,32	8,73	0,576682
15	0,36	-7,8	-0,51525	40	0,36	8,32	0,549599
16	0,41	-5	-0,33029	41	0,41	7,9	0,521855
17	0,45	-3,9	-0,25762	42	0,45	7,57	0,500056
18	0,5	-3,2	-0,21138	43	0,5	7,04	0,465045
19	0,55	-2,67	-0,17637	44	0,55	6,68	0,441264
20	0,59	-2,4	-0,15854	45	0,59	6,38	0,421447
21	0,64	-2,12	-0,14004	46	0,64	5,98	0,395024
22	0,68	-1,98	-0,13079	47	0,68	5,54	0,365959
23	0,73	-2,1	-0,13872	48	0,73	5,24	0,346142
24	0,77	-1,86	-0,12287	49	0,77	4,76	0,314434
25	0,82	-2,1	-0,13872	50	0,82	4,29	0,283387
26	0,86	-1,84	-0,12155	51	0,86	3,53	0,233183

## ΙΧ.2 Ταχύτητα Αέρα - V=10,125 m/s

Πίνακας (ΙΧ.2.1) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 4cmx4cm – V=10,125 m/s - α = 0

α =0 - V = 10,125m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 60,4 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =128,5 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	x/C	ΔP	Cp	Οπή	x/C	ΔP	Cp
2	0,02	14,1	0,229233	27	0,02	2,75	0,044709
3	0,05	-22,9	-0,3723	28	0,05	-16,25	-0,26419
4	0,07	-27,18	-0,44188	29	0,07	-14,34	-0,23314



5	0,09	-34,03	-0,55325	30	0,09	-12,1	-0,19672
6	0,11	-37,25	-0,6056	31	0,11	-11,9	-0,19347
7	0,14	-38,45	-0,62511	32	0,14	-12,62	-0,20517
8	0,16	-39,55	-0,64299	33	0,16	-14,15	-0,23005
9	0,18	-43,36	-0,70493	34	0,18	-12,52	-0,20355
10	0,2	-43,6	-0,70884	35	0,2	-9,35	-0,15201
11	0,23	-45,4	-0,7381	36	0,23	-7,8	-0,12681
12	0,25	-48,22	-0,78395	37	0,25	-4,36	-0,07088
13	0,27	-47,24	-0,76801	38	0,27	-3,52	-0,05723
14	0,32	-44,9	-0,72997	39	0,32	-2,54	-0,04129
15	0,36	-40,11	-0,6521	40	0,36	-0,59	-0,00959
16	0,41	-38,01	-0,61795	41	0,41	0,68	0,011055
17	0,45	-34,58	-0,56219	42	0,45	1,78	0,028939
18	0,5	-28,01	-0,45538	43	0,5	2,26	0,036742
19	0,55	-21,98	-0,35734	44	0,55	3,29	0,053488
20	0,59	-18,78	-0,30532	45	0,59	4,51	0,073322
21	0,64	-15,3	-0,24874	46	0,64	4,92	0,079988
22	0,68	-12,65	-0,20566	47	0,68	5,83	0,094782
23	0,73	-9,57	-0,15559	48	0,73	6,18	0,100472
24	0,77	-6,33	-0,10291	49	0,77	6,97	0,113316
25	0,82	-3,04	-0,04942	50	0,82	7,66	0,124534
26	0,86	1,41	0,022923	51	0,86	7,99	0,129899

*Πίνακας (ΙΧ.2.2) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 4cmx4cm – V =10,125 m/s - α = 6°*

α =6 - V = 10,125m/s		Po-P <sub>∞</sub> = 60,4 Pa		Po-P <sub>atm</sub> =128,5 Pa		P <sub>atm</sub> =101,3 kPa T <sub>atm</sub> =30 °C	
Οπή	χ/C	ΔP	Cp	Οπή	χ/C	ΔP	Cp
2	0,02	-57,1	-0,92831	27	0,02	52,1	0,847025
3	0,05	-78,8	-1,28111	28	0,05	30,05	0,488543
4	0,07	-73,86	-1,20079	29	0,07	25,41	0,413108
5	0,09	-72,85	-1,18437	30	0,09	23,5	0,382056
6	0,11	-71,15	-1,15673	31	0,11	19,66	0,319626
7	0,14	-68,2	-1,10877	32	0,14	16,9	0,274755
8	0,16	-66,47	-1,08065	33	0,16	14,12	0,229559
9	0,18	-68,12	-1,10747	34	0,18	13,25	0,215414
10	0,2	-65,43	-1,06374	35	0,2	14,43	0,234598
11	0,23	-64,85	-1,05431	36	0,23	14,53	0,236224
12	0,25	-66,27	-1,0774	37	0,25	16,61	0,27004
13	0,27	-63,39	-1,03057	38	0,27	16,93	0,275243
14	0,32	-56,95	-0,92588	39	0,32	16,38	0,266301
15	0,36	-49,8	-0,80963	40	0,36	16,85	0,273942
16	0,41	-44,57	-0,7246	41	0,41	16,73	0,271991
17	0,45	-38,85	-0,63161	42	0,45	16,77	0,272641
18	0,5	-30,11	-0,48952	43	0,5	16,13	0,262236

19	0,55	-22,75	-0,36986	44	0,55	16,13	0,262236
20	0,59	-18,51	-0,30093	45	0,59	16,41	0,266789
21	0,64	-13,31	-0,21639	46	0,64	16,03	0,260611
22	0,68	-9,43	-0,15331	47	0,68	16,13	0,262236
23	0,73	-5,12	-0,08324	48	0,73	15,89	0,258335
24	0,77	-1,23	-0,02	49	0,77	15,61	0,253782
25	0,82	2,41	0,039181	50	0,82	15,51	0,252157
26	0,86	5,92	0,096245	51	0,86	14,85	0,241427

Πίνακας (ΙΧ.2.3) Αεροτομή με τραχύτητα 200μm – Πλέγμα 4cmx4cm –  $V=10,125 \text{ m/s}$  -  $\alpha = 12^\circ$

$\alpha = 12^\circ - V = 10,125 \text{ m/s}$		$P_o - P_{\infty} = 60,4 \text{ Pa}$		$P_o - P_{\text{atm}} = 128,5 \text{ Pa}$		$P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ kPa} \quad T_{\text{atm}} = 30^\circ \text{C}$	
Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$	Οπή	x/C	$\Delta P$	$C_p$
2	0,02	-127,75	-2,07692	27	0,02	70,7	1,149418
3	0,05	-129,78	-2,10992	28	0,05	55,19	0,897262
4	0,07	-109,7	-1,78347	29	0,07	48,68	0,791424
5	0,09	-101,3	-1,6469	30	0,09	44,56	0,724442
6	0,11	-95,75	-1,55667	31	0,11	39,7	0,64543
7	0,14	-89,2	-1,45019	32	0,14	35,88	0,583326
8	0,16	-84,9	-1,38028	33	0,16	32,67	0,531139
9	0,18	-83,9	-1,36402	34	0,18	30,33	0,493096
10	0,2	-78,5	-1,27623	35	0,2	30,52	0,496185
11	0,23	-75,2	-1,22258	36	0,23	29,45	0,478789
12	0,25	-74,7	-1,21445	37	0,25	30,54	0,49651
13	0,27	-68,13	-1,10764	38	0,27	30,24	0,491632
14	0,32	-58,85	-0,95676	39	0,32	28,56	0,464319
15	0,36	-48,89	-0,79484	40	0,36	27,82	0,452289
16	0,41	-39,91	-0,64884	41	0,41	26,87	0,436844
17	0,45	-31,12	-0,50594	42	0,45	25,95	0,421887
18	0,5	-22,17	-0,36043	43	0,5	24,41	0,39685
19	0,55	-15,31	-0,24891	44	0,55	23,72	0,385632
20	0,59	-10,62	-0,17266	45	0,59	23,21	0,377341
21	0,64	-6,45	-0,10486	46	0,64	22,15	0,360108
22	0,68	-4,21	-0,06844	47	0,68	21,36	0,347264
23	0,73	-1,68	-0,02731	48	0,73	20,07	0,326292
24	0,77	-0,31	-0,00504	49	0,77	18,85	0,306457
25	0,82	1,01	0,01642	50	0,82	18,09	0,294102
26	0,86	1,75	0,028451	51	0,86	16,26	0,26435