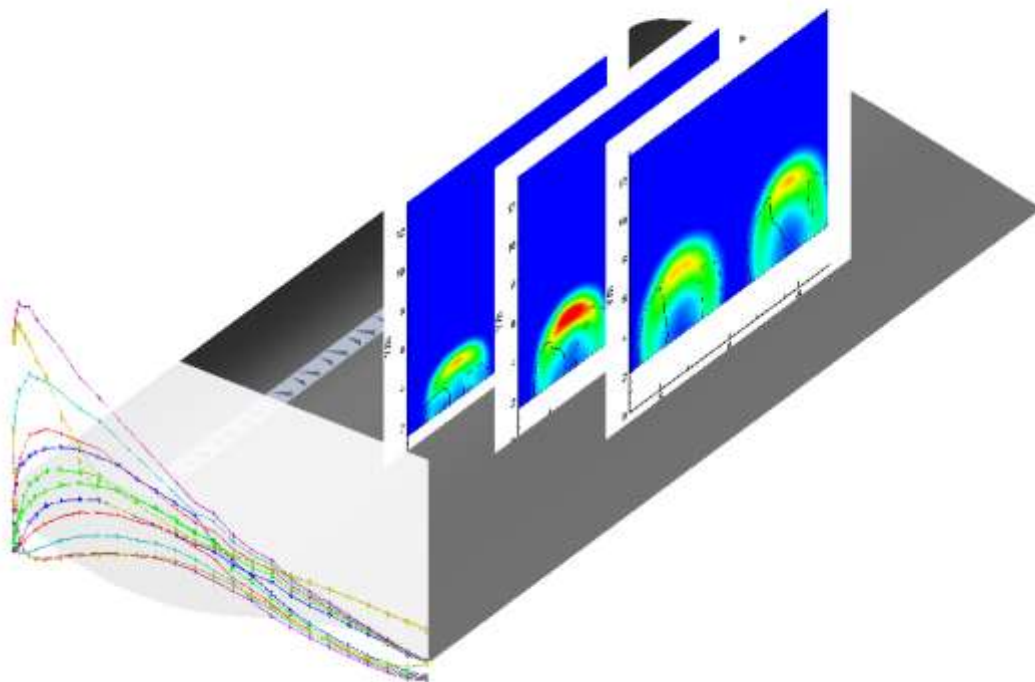




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧ.
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
Ηρώων Πολυτεχνείου 9
15773, Ζωγράφου,
Αθήνα, Ελλάδα

Διπλωματική Εργασία

Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς ταινιών αποκόλλησης και στροβιλογεννητριών



Δημήτρης Τουλούπης

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Επιβλέπων

Βασίλειος Ριζιώτης, Λέκτορας ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων

Σπυρίδων Βουτσινάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Ευχαριστίες.....	6
Κατάλογος Συμβόλων.....	7
Συντομογραφίες.....	8
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	9
Κατάλογος Σχημάτων.....	11
Κατάλογος Εικόνων.....	12
Κατάλογος Πινάκων.....	13
1. Εισαγωγή.....	14
i. Προηγούμενη έρευνα.....	15
Λωρίδες αποκόλλησης	15
Στροβιλογεννήτριες	15
2. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	16
i. Αεροσήραγγα και πτέρυγες.....	16
NACA 63-418 και διαμορφώσεις.....	16
FFA W3-241 και διαμορφώσεις.....	20
ii. Μετρήσεις Πιέσεων.....	22
iii. Οπτικοποίηση της ροής (Flow visualization / Flow-viz).....	23
iv. Stereo PIV (Stereoscopic Particle Image Velocimetry)	24
Μετρητικός εξοπλισμός	24
Χρονική διαφορά παλμών laser	24
Δονήσεις καμερών	24
Βαθμονόμηση της διάταξης	25
Επεξεργασία	25
3. Μετρήσεις Πιέσεων.....	28
i. NACA 63-418.....	28
Σύγκριση ροής με ελεύθερη και εξαναγκασμένη μετάβαση	28
Αστάθεια της ροής σε μεγάλες γωνίες προσβολής	31
Σύγκριση ροής με και χωρίς λωρίδα αποκόλλησης	37
Σύγκριση απλής και οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης.....	46
ii. FFA W3-241.....	56
Σύγκριση ροής με ελεύθερη μετάβαση με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$ ($h=4\text{mm}$).....	56
Σύγκριση ροής με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$ ($h=4\text{mm}$) και με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1.6$ ($h=6\text{mm}$).	65

Σύγκριση μετρήσεων Εργαστηρίου Αεροδυναμικής ΕΜΠ με Riso Campus	71
4. Μετρήσεις με στερεοσκοπικό PIV (Stereo PIV).....	73
i. Μέση ροή	74
ii. Τυρβώδη χαρακτηριστικά	80
5. Σύνοψη-Συμπεράσματα	90
6. Πηγές	91
Παράρτημα.....	93
i. Υπολογισμός αεροδυναμικών συντελεστών.....	94
ii. Διορθώσεις των αεροδυναμικών συντελεστών	98

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την επίδραση των συσκευών ακμής προσβολής (leading edge devices) και πιο συγκεκριμένα δύο λωρίδων αποκόλλησης, μίας απλής (simple stall strip) και μίας οδοντωτής (serrated stall strip), καθώς και των στροβιλογεννητριών (vortex generators) τύπου βάνας (vane) τριγωνικού προφίλ, με δύο διαφορετικά ύψη 4mm και 6mm, στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά πτερύγων. Επίσης, μελετήθηκε το πεδίο ροής που διαμορφώνεται πίσω από τις στροβιλογεννήτριες ύψους 6mm.

Πιο συγκεκριμένα, για να μελετηθούν τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν 2 πτέρυγες, μία με προφίλ NACA 63-418 και μία με προφίλ FFA W3-241. Και στις δύο έγιναν μετρήσεις πιέσεων στην επιφάνεια τους (οπές μέτρησης στατικής πίεσης-pressure taps), αλλά και μετρήσεις ολικών πιέσεων στον ομόρροο (σωλήνες μικρής διαμέτρου-rake tubes) για να προσδιοριστούν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, αρχικά των λείων πτερύγων (clean wing) και στη συνέχεια με εγκατεστημένη μια ταινία εξαναγκασμένης μετάβασης (zig-zag tape) και των δύο λωρίδων αποκόλλησης στην NACA αλλά και των δύο διαφορετικών στροβιλογεννητριών, τοποθετημένων στο 30% της χορδής της FFA. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις έγιναν και πειράματα οπτικοποίησης της ροής σε συγκεκριμένες γωνίες πρόσπτωσης (flow visualization) για την αποτύπωση της ροής στην επιφάνεια της πτέρυγας. Όλα τα παραπάνω πειράματα διεξήχθησαν σε αριθμό Reynolds $Re = 1.5 \cdot 10^6$ και έγιναν μετρήσεις σε γωνίες πρόσπτωσης από -6° μέχρι και 20° για όλες τις περιπτώσεις.

Από τις μετρήσεις πιέσεων προκύπτει ότι στην πτέρυγα NACA η εξαναγκασμένη μετάβαση μειώνει το μέγιστο συντελεστή άνωσης κατά 0.08, αυξάνοντας την αντίσταση και εισάγοντας αστάθεια σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 11° . Η απλή λωρίδα αποκόλλησης μειώνει περαιτέρω τον μέγιστο συντελεστή άνωσης κατά 0.16, αλλά μειώνει και την αντίσταση στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, περιορίζοντας παράλληλα την αστάθεια. Η οδοντωτή λωρίδα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την απλή, με μόνη διαφορά ότι αυξάνει την αντίσταση στην περιοχή της αποκόλλησης, αλλά μειώνει την περαιτέρω αστάθεια. Στην πτέρυγα με προφίλ FFA οι στροβιλογεννήτριες επεκτείνουν τη γραμμική περιοχή του συντελεστή άνωσης κατά 6° , αυξάνοντας έτσι το μέγιστο συντελεστή άνωσης κατά 0.4. Ο συντελεστής αντίστασης της γραμμικής περιοχής αυξάνεται σταθερά κατά 0.0035 για την περίπτωση των στροβιλογεννητριών με $h/\delta=1$ και κατά 0.006 για την περίπτωση των στροβιλογεννητριών με $h/\delta=1.6$.

Για να μελετηθεί το πεδίο ροής των στροβιλογεννητριών με $h/\delta=1.6$, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του στερεοσκοπικού PIV (Stereo Particle Image Velocimetry). Τα πειράματα έγιναν σε αριθμό Reynolds $Re = 0.87 \cdot 10^6$ και η πτέρυγα ήταν τοποθετημένη σε γωνία πρόσπτωσης 14° , αφού εκεί έχουμε μέγιστο λόγο άνωσης προς αντίσταση. Έγιναν μετρήσεις σε πέντε επίπεδα κατάντι της θέσης των στροβιλογεννητριών για να αποτυπωθεί η εξέλιξη των στροβίλων, παίρνοντας 2000 στιγμιότυπα για κάθε επίπεδο.

Από την ανάλυση των στιγμιότυπων και στα πέντε επίπεδα μέτρησης παρατηρήθηκε ότι οι στρόβιλοι διεισδύουν στο επιφανειακό οριακό στρώμα και το ανασηκώνουν στην περιφέρειά τους, αποτρέποντας, έτσι, την αποκόλλησή του. Επίσης, οι στρόβιλοι κάθε ζεύγους απομακρύνονται μεταξύ τους αλλά και από την επιφάνεια της πτέρυγας, λόγω της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης, ενώ, λόγω του φαινομένου της διάχυσης, αυξάνουν σε μέγεθος και μειώνονται σε ένταση καθώς απομακρύνονται από το σημείο εκπομπής τους.

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στους καθηγητές μου, Κύριο Σπύρο Βουτσινά και Κύριο Βασίλη Ριζιώτη, όχι μόνο για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσαν και την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη που μου παρείχαν, αλλά και για την πολύτιμη ευκαιρία που μου έδωσαν να πραγματοποιήσω μια βαθύτατη επιθυμία μου· να εργαστώ και να αποκτήσω εμπειρία σε ένα από τα καλύτερα εργαστήρια που διαθέτει το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, το εργαστήριο αεροδυναμικής.

Τίποτα όμως δεν θα είχα καταφέρει αν δεν είχα στο πλάι μου τον άνθρωπο, ο οποίος με την μεταδοτικότητά του και την υπομονή του μου μετέδωσε απλόχερα μέρος των γνώσεων του και της πολυετούς εμπειρίας του. Ο λόγος για τον Μαρίνο Μανωλέσο, του οποίου η βοήθεια, οι υποδείξεις και οι συμβουλές ήταν καθοριστικές για την πραγμάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το θεωρώ τιμή μου που εργάστηκα και έμαθα δίπλα του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Σωτήρη του οποίου τα «μαγικά» χέρια έκαναν όλες τις τεχνικές δυσκολίες που αντιμετώπισα να φαίνονται απλές.

Τέλος, σημαντική ήταν και η συμβολή του συμφοιτητή και πολύ στενού μου φίλου, Βάσου Σανούδου, ο οποίος, πάντα με προθυμία, με βοηθούσε σε θέματα εργαστηριακά και όχι μόνο.

Κατάλογος Συμβόλων

Ελληνικά κεφαλαία σύμβολα

Δx	Απόσταση από την ακμή εκφυγής των στροβιλογεννητριών
Ω	Στροβιλότητα

Ελληνικά πεζά σύμβολα

α	Γωνία πρόσπτωσης
α_{corr}	Διορθωμένη γωνία πρόσπτωσης
δ	Ύψος οριακού στρώματος
σ	Συντελεστής
ω	Αδιάστατη στροβιλότητα
$\omega_{0.5}$	Αδιάστατη στροβιλότητα που οριοθετεί τους στροβίλους
ω_{max}	Μέγιστη στροβιλότητα
ω_x	Αδιάστατη στροβιλότητα κατά τον άξονα x

Λατινικά κεφαλαία σύμβολα

A	Επιφάνεια διατομής αεροσήραγγας
$A_{0.5}$	Επιφάνεια στροβίλων στο επίπεδο Y-Z
C_d	Συντελεστής αντίστασης
C_{d0}	Συντελεστής αντίστασης που υπολογίζεται από τον ομόρρου
$C_{d,corr}$	Διορθωμένος συντελεστής αντίστασης
C_{dp}	Συντελεστής αντίστασης λόγω πιέσεων
C_l	Συντελεστής άνωσης
$C_{l,corr}$	Διορθωμένος συντελεστής άνωσης
C_m	Συντελεστής ροπής
$C_{m,corr}$	Διορθωμένος συντελεστής ροπής
C_p	Συντελεστής πίεσης
$C_{p,panel}$	Συντελεστής πίεσης σε στοιχείο πάνελ πτέρυγας
$R_{0.5}$	Ισοδύναμη ακτίνα στροβίλου
Re	Αριθμός Reynolds
$U_i(y)$	Μέση τιμή της ταχύτητας κατά τον άξονα z
U_{inf}	Ταχύτητα ελεύθερης ροής
U_{res}	Ελάχιστη υπολογίσιμη ταχύτητα με τη μέθοδο PIV
$V_i(z, y)$	Πεδίο ταχυτήτων στροβίλου στο επίπεδο Y-Z
V_m	Όγκος μοντέλου πτέρυγας

Λατινικά πεζά σύμβολα

c	Χορδή πτέρυγας
ds	Μήκος στοιχείου πάνελ πτέρυγας
dz	Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σωλήνων στο rake
e	Συνολικός συντελεστής διόρθωσης λόγω στερεής παρεμπόδισης και ομόρρου
e_{sb}	Συντελεστής διόρθωσης στερεής παρεμπόδισης (solid blockage)
e_{wb}	Συντελεστής διόρθωσης παρεμπόδισης ομόρρου (wake blockage)
h	Ύψος στροβιλογεννητριών

k_1	Συντελεστής
n_x	Οριζόντια συνιστώσα κάθετου διανύσματος σε στοιχείο πάνελ πτέρυγας
n_y	Κατακόρυφη συνιστώσα κάθετου διανύσματος σε στοιχείο πάνελ πτέρυγας
$p_{st,\infty}$	Στατική πίεση ελεύθερης ροής
$p_{st,rake}$	Στατική πίεση ομόρρου
$p_{st,rake,left}$	Στατική πίεση ομόρρου μετρούμενη από τον αριστερό σωλήνα Pitot
$p_{st,rake,right}$	Στατική πίεση ομόρρου μετρούμενη από τον δεξιό σωλήνα Pitot
$p_{st,rake,wall}$	Στατική πίεση ομόρρου μετρούμενη από σωλήνα Pitot στο τοίχωμα της σήραγγας
$p_{tot,rake}$	Ολική πίεση ομόρρου
q_{norm}	Κανονικοποιημένη δυναμική πίεση ομόρρου
q_{rake}	Δυναμική πίεση ομόρρου
$u_{i,PIV}(z, y)$	Μέση χρονικά τιμή της ταχύτητας σε κάθε σημείο του επιπέδου Y-Z
x	Κύρια διεύθυνση της ροής
$x_{panel,rot}$	Οριζόντια συντεταγμένη κέντρου ενός στοιχείου πάνελ, μετά από στροφή
x_{rot}	Οριζόντια συντεταγμένη οπής μέτρησης πίεσης, μετά από στροφή
y	Κατακόρυφη διεύθυνση
$y_{panel,rot}$	Κατακόρυφη συντεταγμένη κέντρου ενός στοιχείου πάνελ, μετά από στροφή
y_{rot}	Κατακόρυφη συντεταγμένη οπής μέτρησης πίεσης, μετά από στροφή
z	Διεύθυνση παράλληλη στο εκπέτασμα της πτέρυγας

Συντομογραφίες

A.Λ.A	Απλή Λωρίδα Αποκόλλησης (Simple Stall Strip)
Ελ.Μ.	Ελεύθερη Μετάβαση
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Εξ.Μ.	Εξαναγκασμένη Μετάβαση
Ο.Λ.Α.	Οδοντωτή Λωρίδα Αποκόλλησης (Serrated Stall Strip)
VGs	Vortex Generators
PIV	Particle Image Velocimetry

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.i.1-Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ NACA Ελ.Μ. και Εξ.Μ. $tape$ σε $Re=1.5e6$	29
Διάγραμμα 3.i.2- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ NACA Ελ.Μ. και Εξ.Μ. σε $Re=1.5e6$	30
Διάγραμμα 3.i.3- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ NACA Ελ.Μ. και Εξ.Μ. σε $Re=1.5e6$	30
Διάγραμμα 3.i.4-Οπές μέτρησης πίεσης που επηρεάζονται από τις μεταβολές της ροής.....	31
Διάγραμμα 3.i.5-Χρονοσειρά πιέσεων για τις οπές 31 ως 40 σε γωνία πρόσπτωσης 15 μοίρες και $Re=1.5e6$	32
Διάγραμμα 3.i.6-Χρονοσειρά πιέσεων για τις οπές 31 ως 40 σε γωνία πρόσπτωσης 18° και $Re=1.5e6$	32
Διάγραμμα 3.i.7-Μεταβολή κατανομής πιέσεων στην πτέρυγα $\alpha=18^\circ$, $Re=1.5e6$	33
Διάγραμμα 3.i.8-Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 12° ως 20° NACA Εξ.Μ.....	34
Διάγραμμα 3.i.9-Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ NACA Ελ.Μ.....	34
Διάγραμμα 3.i.10-Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ NACA Ελ.Μ.....	35
Διάγραμμα 3.i.11-Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Ελ.Μ. και Εξ.Μ. $\alpha=10^\circ$, $Re=1.5e6$	35
Διάγραμμα 3.i.12- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Ελ.Μ. και Εξ.Μ. $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$	36
Διάγραμμα 3.i.13- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$	37
Διάγραμμα 3.i.14- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$	38
Διάγραμμα 3.i.15- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$	38
Διάγραμμα 3.i.16- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 12 ως 20 μοίρες NACA Α.Λ.Α.....	39
Διάγραμμα 3.i.17- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ NACA Α.Λ.Α.....	39
Διάγραμμα 3.i.18- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=9^\circ$, $Re=1.5e6$	41
Διάγραμμα 3.i.19- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=9^\circ$, $Re=1.5e6$	41
Διάγραμμα 3.i.20-Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=6^\circ$, $Re=1.5e6$	42
Διάγραμμα 3.i.21- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=11^\circ$, $Re=1.5e6$	44
Διάγραμμα 3.i.22- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$	45
Διάγραμμα 3.i.23- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$	46
Διάγραμμα 3.i.24- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$	47
Διάγραμμα 3.i.25- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$	47
Διάγραμμα 3.i.26- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 15 ως 20° NACA Ο.Λ.Α.....	48
Διάγραμμα 3.i.27- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ NACA Ο.Λ.Α.....	49
Διάγραμμα 3.i.28- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α και Ο.Λ.Α $\alpha=9^\circ$, $Re=1.5e6$	50
Διάγραμμα 3.i.29- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α και Ο.Λ.Α. $\alpha=11^\circ$, $Re=1.5e6$	50
Διάγραμμα 3.i.30- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α $\alpha=6^\circ$, $Re=1.5e6$	51
Διάγραμμα 3.i.31- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. $\alpha=9^\circ$, $Re=1.5e6$	53
Διάγραμμα 3.i.32- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. $\alpha=11^\circ$, $Re=1.5e6$	54
Διάγραμμα 3.i.33- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$	55
Διάγραμμα 3.ii.1- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$	57
Διάγραμμα 3.ii.4-Υστέρηση συντελεστή άνωσης για FFA VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$	57
Διάγραμμα 3.ii.5- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$	58

Διάγραμμα 3.ii.6- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$	58
Διάγραμμα 3.ii.5- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 18 ως 20° FFA VGs $h/\delta=1$	59
Διάγραμμα 3.ii.6- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ FFA Ελ.Μ.....	60
Διάγραμμα 3.ii.7- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ FFA VGs $h/\delta=1$	60
Διάγραμμα 3.ii.8 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$	61
Διάγραμμα 3.ii.9 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=18^\circ$, $Re=1.5e6$	61
Διάγραμμα 3.ii.10- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$	63
Διάγραμμα 3.ii.11- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=20^\circ$, $Re=1.5e6$	64
Διάγραμμα 3.ii.12- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$	65
Διάγραμμα 3.ii.13 - Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$	66
Διάγραμμα 3.ii.14- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$	66
Διάγραμμα 3.ii.15- Υστέρηση συντελεστή άνωσης για FFA VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$	67
Διάγραμμα 3.ii.16- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 19 και 20° FFA VGs $h/\delta=1.6$	67
Διάγραμμα 3.ii.17- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ FFA VGs $h/\delta=1.6$	68
Διάγραμμα 3.ii.18 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$	69
Διάγραμμα 3.ii.19 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ $\alpha=18^\circ$, $Re=1.5e6$	70
Διάγραμμα 3.ii.20- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ FFA Clean ΕΜΠ και FFA Clean Riso σε $Re=1.5e6$ και $Re=1.6e6$ αντίστοιχα.....	72
Διάγραμμα 3.ii.21- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ FFA Clean ΕΜΠ και FFA Clean Riso σε $Re=1.5e6$ και $Re=1.6e6$ αντίστοιχα.....	72
Διάγραμμα 4.i.1-(Αριστερή στήλη) Κατανομή της ταχύτητας u και το διανυσματικό πεδίο των στροβίλων (ένα στα τέσσερα διανύσματα παρουσιάζονται για λόγους ευκρίνειας). Η λευκή καμπύλη οριοθετεί το οριακό στρώμα. (Δεξιά στήλη) Κατανομή στροβιλότητας ω_x σε όλα τα επίπεδα μέτρησης. Σε όλα τα διαγράμματα παρουσιάζονται και οι ισοψείς καμπύλες $\omega_x = \omega_{0.5}$ οι οποίες ορίζουν τα όρια των στροβίλων. Η θέση του κάθε επιπέδου μέτρησης και η απόστασή του από τα VGs δίνεται στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος.....	76
Διάγραμμα 4.i.2- Αδιάστατες θέσεις των τεσσάρων στροβίλων για τα 5 επίπεδα μέτρησης.....	78
Διάγραμμα 4.i.3-Αδιάστατο μέγεθος των τεσσάρων στροβίλων για τα 5 επίπεδα μέτρησης.....	79
Διάγραμμα 4.i.4-Μέγιστη αδιάστατη στροβιλότητα για τους τέσσερις στροβίλους για τα 5 επίπεδα μέτρησης.....	79
Διάγραμμα 4.i.5- Κυκλοφορία για τους τέσσερις στροβίλους για τα πέντε επίπεδα μέτρησης.....	80
Διάγραμμα 3.ii.1-(Αριστερή στήλη) Οριζόντιες και κατακόρυφες θέσεις για τις οποίες αποτυπώνονται οι κατανομές ταχυτήτων. (Δεξιά στήλη) Κατανομές ταχυτήτων στις θέσεις $i1, i2, j1, j2, j3$	81

Διάγραμμα 4.ii.2-Ορθές τάσεις Reynolds και οι ισοΰψεις της στροβιλικότητας $\omega_x = \omega_{0.5}$. (Αριστερή στήλη) Ισοΰψη διαγράμματα $\overline{u'u'}/U_{inf}^2$. (Μεσαία στήλη) Ισοΰψη διαγράμματα $\overline{v'v'}/U_{inf}^2$. (Δεξιά στήλη) Ισοΰψη διαγράμματα $\overline{w'w'}/U_{inf}^2$. Η θέση του κάθε επιπέδου μέτρησης και η απόστασή του από τα VGs δίνεται στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος.....	84
Διάγραμμα 4.ii.3-Διατμητικές τάσεις Reynolds και οι ισοΰψεις της στροβιλικότητας $\omega_x = \omega_{0.5}$. (Αριστερή στήλη) Ισοΰψη διαγράμματα $-\overline{u'v'}/U_{inf}^2$. (Μεσαία στήλη) Ισοΰψη διαγράμματα $-\overline{u'w'}/U_{inf}^2$. (Δεξιά στήλη) Ισοΰψη διαγράμματα $-\overline{v'w'}/U_{inf}^2$. Η θέση του κάθε επιπέδου μέτρησης και η απόστασή του από τα VGs δίνεται στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος.....	87
Διάγραμμα 7.i.1-Κατανομή δυναμικών πιέσεων στον ομόρρου της NACA 63-418 για γωνία πρόσπτωσης 8°	96
Διάγραμμα 7.i.2 - Κατανομή κανονικοποιημένων δυναμικών πιέσεων στον ομόρρου της NACA 63-418 για γωνία πρόσπτωσης 8°	97
Διάγραμμα 7.ii.1-Σύγκριση αδιόρθωτων και διορθωμένων αεροδυναμικών συντελεστών NACA Clean.....	99

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1-Πτερύγιο ανεμογεννήτριας.....	14
Σχήμα 2.i.1 -Διαστάσεις NACA 63-418 και των φραγμών (fences).....	17
Σχήμα 2.i.2 -Διαστάσεις της ταινίας εξαναγκασμένης μετάβασης.....	17
Σχήμα 2.i.3 -Διαστάσεις λωρίδας αποκόλλησης.....	18
Σχήμα 2.i.4 -Διαστάσεις οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης.....	19
Σχήμα 2.i.5 -Διαστάσεις FFA W3-241 και φραγμών (fences).....	20
Σχήμα 2.i.6-Διαστάσεις στροβιλογεννητριών με $h=4mm$	21
Σχήμα 2.i.7-Διαστάσεις στροβιλογεννητριών με $h=6mm$	21
Σχήμα 2.ii.1 -Διάταξη μέτρησης πίεσης στην επιφάνεια της πτέρυγας.....	22
Σχήμα 2.iv.1 –Πλάγια όψη της πειραματικής διάταξης. Διακρίνονται τα 5 επίπεδα μέτρησης A ($x/c=0.6$), B ($x/c=0.66$), C ($x/c=0.72$), D ($x/c=0.78$), E ($x/c=0.84$) και η περιεχόμενη γωνία μεταξύ των καμερών που αναφέρεται στον πίνακα 1.d.1.....	27
Σχήμα 2.iv.2 – Κάτοψη της πειραματικής διάταξης. Διακρίνονται τα 5 επίπεδα μέτρησης A ($x/c=0.6$), B ($x/c=0.66$), C ($x/c=0.72$), D ($x/c=0.78$), E ($x/c=0.84$), η θέση των στροβιλογεννητριών και των καμερών.....	27
Σχήμα 7.i.1 - Συντεταγμένες οπών πίεσης, κέντρων των πάνελ και κάθετα διανύσματα σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης NACA 63A-418.....	94
Σχήμα 7.i.2 - Συντεταγμένες οπών πίεσης, κέντρων των πάνελ και κάθετα διανύσματα σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης FFA W3-241.....	94

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.ι.1 -Γενική άποψη του πειραματικού τμήματος.....	16
Εικόνα 2.ι.2 -Λωρίδα αποκόλλησης τοποθετημένη στην πτέρυγα.....	18
Εικόνα 2.ι.3 -Οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης τοποθετημένη στην πτέρυγα.....	19
Εικόνα 2.ι.4 -Η πτέρυγα FFA W3-241 με εγκατεστημένες τις στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$ (αριστερά) και $h/\delta=1.6$ (δεξιά).....	21
Εικόνα 2.ι.5-Wake Rake.....	22
Εικόνα 2.ιιι.1 -Χρώμα αγιογραφίας σε μορφή σκόνης που χρησιμοποιείται για τα πειράματα Flow-Viz.....	23
Εικόνα 2.ιιι.2-Τελικό αποτέλεσμα πειράματος Flow-Viz.....	23
Εικόνα 2.ιv.1 -Ο στόχος βαθμονόμησης όπως φωτογραφίζεται από τις κάμερες A (αριστερά) και B (δεξιά). Γίνονται ορατά τα δύο διαφορετικά επίπεδα με υψομετρική διαφορά 1mm.....	25
Εικόνα 2.ιv.2-Τελικό αποτέλεσμα επεξεργασίας φωτογραφιών από την A κάμερα (αριστερά) και την B κάμερα (δεξιά). Διακρίνονται τα νόθα διανύσματα με κίτρινο χρώμα και εντοπίζονται κυρίως εκεί που έχουμε αντανακλάσεις.....	26
Εικόνα 3.ι.1 -Φυσαλίδα αποκόλλησης.....	39
Εικόνα 3.ι.2-Flow-viz NACA Εξ.Μ. 6°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	42
Εικόνα 3.ι.3- Flow-viz NACA Α.Λ.Α. 6°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	42
Εικόνα 3.ι.4- Flow-viz NACA Εξ.Μ. 11°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	44
Εικόνα 3.ι.5- Flow-viz NACA Α.Λ.Α. 11°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	44
Εικόνα 3.ι.6- Flow-viz NACA Εξ.Μ. 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	45
Εικόνα 3.ι.7- Flow-viz NACA Α.Λ.Α. 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	45
Εικόνα 3.ι.8- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 6°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	51
Εικόνα 3.ι.9- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 6°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	51
Εικόνα 3.ι.10- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 9°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	53
Εικόνα 3.1.11- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 9°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	53
Εικόνα 3.ι.12- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 11°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	54
Εικόνα 3.ι.13- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 11°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	54
Εικόνα 3.ι.14- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	55
Εικόνα 3.ι.15- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	55

Εικόνα 3.ii.1 - Flow-viz FFA Ελ.Μ. 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	63
Εικόνα 3.ii.2 - Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	63
Εικόνα 3.ii.3 - Flow-viz FFA Ελ.Μ. 20°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	64
Εικόνα 3.ii.4 - Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 20°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	64
Εικόνα 3.ii.5 - Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	69
Εικόνα 3.ii.6 Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1.6$ 14°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	69
Εικόνα 3.ii.7- Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 18°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	70
Εικόνα 3.ii.8- Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1.6$ 18°, οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής.....	70

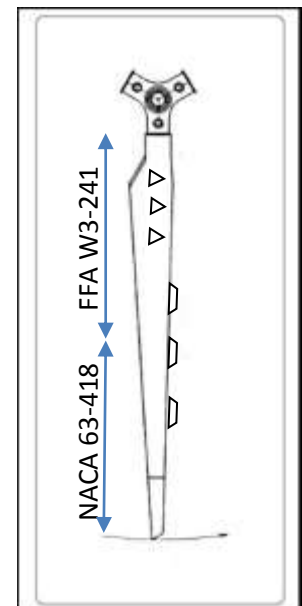
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.iv.1-Λεπτομερή στοιχεία πειραμάτων PIV.....	27
Πίνακας 4.ii.1-Αδιάστατες συντεταγμένες θέσεων για τα πέντε επίπεδα μέτρησης.....	82

1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει πειραματικά τη συμπεριφορά διατάξεων ελέγχου της ροής. Συγκεκριμένα εξετάζονται διατάξεις που τοποθετούνται στην ακμή προσβολής πτερύγων (leading edge devices), ή στην επιφάνεια υποπίεσης. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι λωρίδες αποκόλλησης (stall strips), ενώ στη δεύτερη οι στροβιλογεννήτριες (vortex generators). Και στις δύο περιπτώσεις εξετάζεται η επίδραση των διατάξεων στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας πτέρυγας, ενώ για την περίπτωση των στροβιλογεννητριών μελετάται και το πεδίο ροής πίσω από αυτές. Δοκιμάζεται επιπλέον η εφαρμογή μιας νέας οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης. Οι διατάξεις αυτές (stall strips, vortex generators) βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών, ιδιαίτερα σε ανεμογεννήτριες του εμπορίου και σε πτέρυγες αεροσκαφών.

Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση που έχουν οι λωρίδες αποκόλλησης στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας πτέρυγας με προφίλ NACA 63-418 και των στροβιλογεννητριών σε μία πτέρυγα με προφίλ FFA W3-241. Τα δύο αυτά προφίλ χρησιμοποιούνται στα πτερυγία ανεμογεννήτριας του εμπορίου, η οποία είναι εγκατεστημένη στην Ελλάδα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, με την FFA να χρησιμοποιείται από τη ρίζα του πτερυγίου μέχρι το 60% του μήκους του, και την NACA στο υπόλοιπο 40%. Για την FFA ο αριθμός Reynolds στο 50% του πτερυγίου για ονομαστική ταχύτητα ανέμου 15 m/s και για μέγιστη ταχύτητα ανέμου 25 m/s είναι $3.3 \cdot 10^6$ και $3.6 \cdot 10^6$ αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές για την NACA στο 64% του μήκους του πτερυγίου είναι $3.0 \cdot 10^6$ και $3.6 \cdot 10^6$.



Σχήμα 1.1-Πτερύγιο ανεμογεννήτριας

i. Προηγούμενη έρευνα

Λωρίδες αποκόλλησης

Περιορισμένη είναι η έρευνα που έχει γίνει στο παρελθόν σχετικά με την επίδραση των συσκευών ακμής προσβολής και πιο συγκεκριμένα των λωρίδων αποκόλλησης στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας πτέρυγας. Αρχικά, έχει διερευνηθεί από τους Sangill και Ole [1] η επίδραση των λωρίδων αποκόλλησης και της θέσης τους σε πτερύγια ανεμογεννήτριας, αφενός υπολογιστικά και αφετέρου με μετρήσεις σε ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος (Danwin 180 kW).

Πιο σημαντικές θεωρούνται οι δημοσιεύσεις του Riso Campus οι οποίες αφορούν στην υπολογιστική αλλά και πειραματική μελέτη λωρίδων αποκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα έγιναν υπολογισμοί σε πτέρυγα με προφίλ NACA 63-415 [2] για να μελετηθεί η επίδραση της θέσης αλλά και του μεγέθους απλών λωρίδων αποκόλλησης με οξεία και με στρόγγυλη ακμή. Τα υπολογιστικά και τα πειραματικά αποτελέσματα δεν βρίσκονταν πάντα σε συμφωνία, ενώ παρατηρήθηκε και αστάθεια σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, η οποία όμως αναφέρεται σαν διακύμανση στην κατακόρυφης δύναμης που αναπτύσσεται. Επίσης δοκιμάστηκαν πειραματικά λωρίδες αποκόλλησης σε διάφορες θέσεις για μια πτέρυγα με προφίλ Riso-B1-18 [3], παρόλο που, όπως αναφέρεται, η πτέρυγα αυτή δεν προορίζεται για χρήση με εγκατεστημένη κάποια λωρίδα αποκόλλησης.

Στροβιλογεννήτριες

Η έρευνα που έχει γίνει πάνω στις στροβιλογεννήτριες είναι σαφώς περισσότερη, με την αρχή να γίνεται όταν για πρώτη φορά εφαρμόστηκαν στροβιλογεννήτριες σε πτέρυγα (McCurdy 1984). Ο μηχανισμός με τον οποίον αυτές λειτουργούν έχει περιγραφεί από πληθώρα ερευνητών [4,5,6,7,8] ενώ πολλές μελέτες ασχολήθηκαν στο παρελθόν με τη βελτιστοποίησή τους [9,10,11,12,13,14]. Γενικά οι στροβιλογεννήτριες τύπου βάνας (vane type vortex generators) θεωρούνται οι πιο αποδοτικές σε σχέση με άλλου τύπου παθητικών συσκευών ελέγχου ροής. Επίσης προτιμώνται στροβιλογεννήτριες χαμηλού προφίλ (το ύψος τους είναι μικρότερο του τοπικού ύψους του οριακού στρώματος), αφού επάγουν μικρότερη αντίσταση[4]. Πιο συγκεκριμένα έχει βρεθεί ότι οι στροβιλογεννήτριες τριγωνικού προφίλ είναι πιο αποδοτικές από αυτές με ορθογωνικό, όπως πιο αποδοτικές είναι οι στροβιλογεννήτριες που παράγουν αντίθετα στρεφόμενους στροβίλους (counter rotating)[14].

2. Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας και Εξοπλισμού

i. Αεροσήραγγα και πτέρυγες

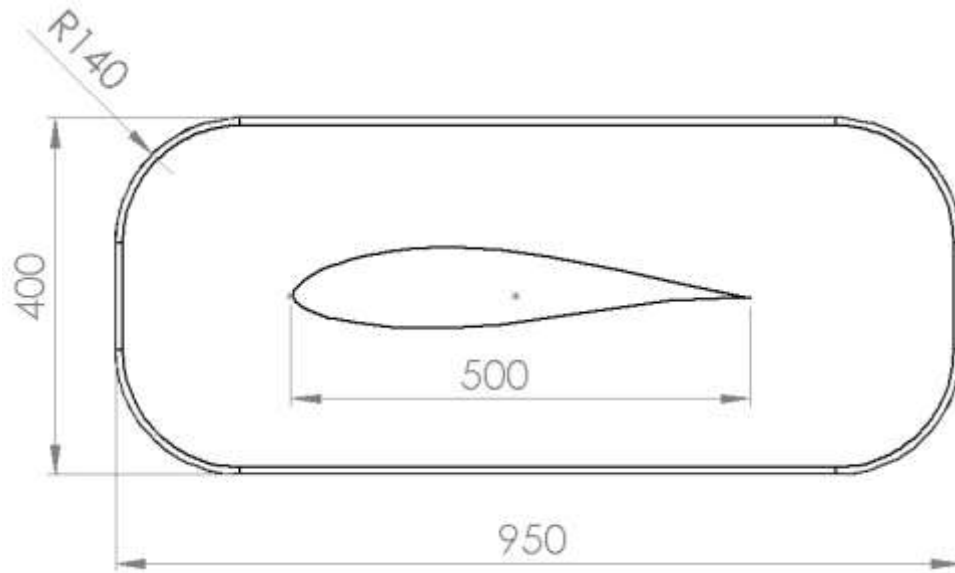
Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής είναι κλειστού τύπου και τα επίπεδα τύρβης της ελεύθερης ροής στο πειραματικό τμήμα, οκταγωνικής διατομής διαστάσεων 1.4x1.8m (ύψος x πλάτος) και μήκους 3.75m, είναι 0.2%



Εικόνα 2.i.1 -Γενική άποψη του πειραματικού τμήματος

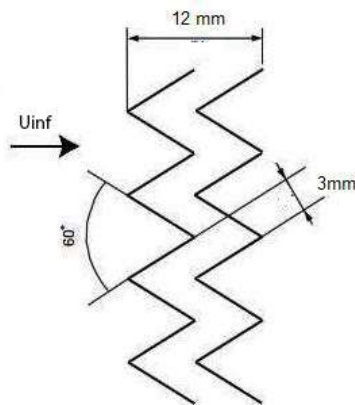
NACA 63-418 και διαμορφώσεις

Το μοντέλο της πτέρυγας με προφίλ NACA 63-418 έχει χορδή μήκους 0.5m και μέγιστο πάχος που ανέρχεται στο 18% σε σχέση με το μήκος της χορδής, δηλαδή 0.09m, ενώ το εκπέτασμα της πτέρυγας είναι 1m. Το μοντέλο περιορίζεται στα δύο άκρα του από δύο πάνελ κατασκευασμένα από plexiglass, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.i.1, που σκοπό έχουν να περιορίσουν την επίδραση του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται στα τοιχώματα της αεροσήραγγας.



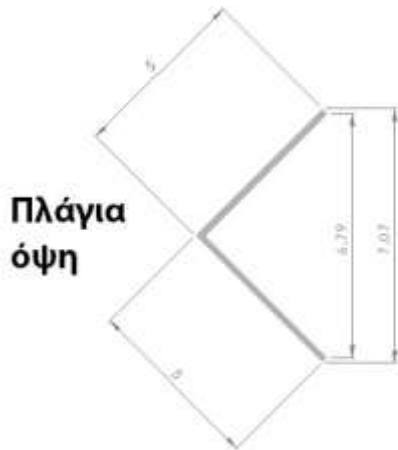
Σχήμα 2.i.1 -Διαστάσεις NACA 63-418 και των φραγμών (fences)

Για να εξαναγκάσουμε τη ροή να μεταβεί από στρωτή σε τυρβώδη στο 1% στις χορδής σε αριθμό Reynolds $Re = 1.5 \cdot 10^6$, θα χρειαζόταν τραχύτητα ύψους 0.88mm, όπως υπολογίζεται στη μέθοδο των Braslow A. και Knox E. [15]. Παρόλα αυτά, οι ταινίες εξαναγκασμένης μετάβασης (zig-zag tapes) είναι πιο αποτελεσματικές για αυτό το σκοπό κατά τους Timmer W.A. και Van Rooij [16], και σύμφωνα με την προσέγγισή τους ταινία πάχους 0.88mm θα ήταν αρκετή. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ταινία πάχους 0.1mm, οι διαστάσεις της οποίας φαίνονται στο σχήμα 2.i.3.



Σχήμα 2.i.2 -Διαστάσεις της ταινίας εξαναγκασμένης μετάβασης

Η λωρίδα αποκόλλησης (stall strip) τοποθετείται κατά μήκος της πτέρυγας σε όλο το εκπέτασμα πάνω στην ακμή προσβολής. Σκοπός της λωρίδας είναι μειώσει την αστάθεια σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, κάνοντας λιγότερο αρνητική την κλίση dCl/da μετά τη γωνία μέγιστης άνωσης. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μια λωρίδα με προφίλ Γ και διαστάσεις 5x5mm και πάχος 1mm, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.i.3. Στην εικόνα 2.i.2 φαίνεται η λωρίδα αποκόλλησης τοποθετημένη στην ακμή προσβολής της πτέρυγας.

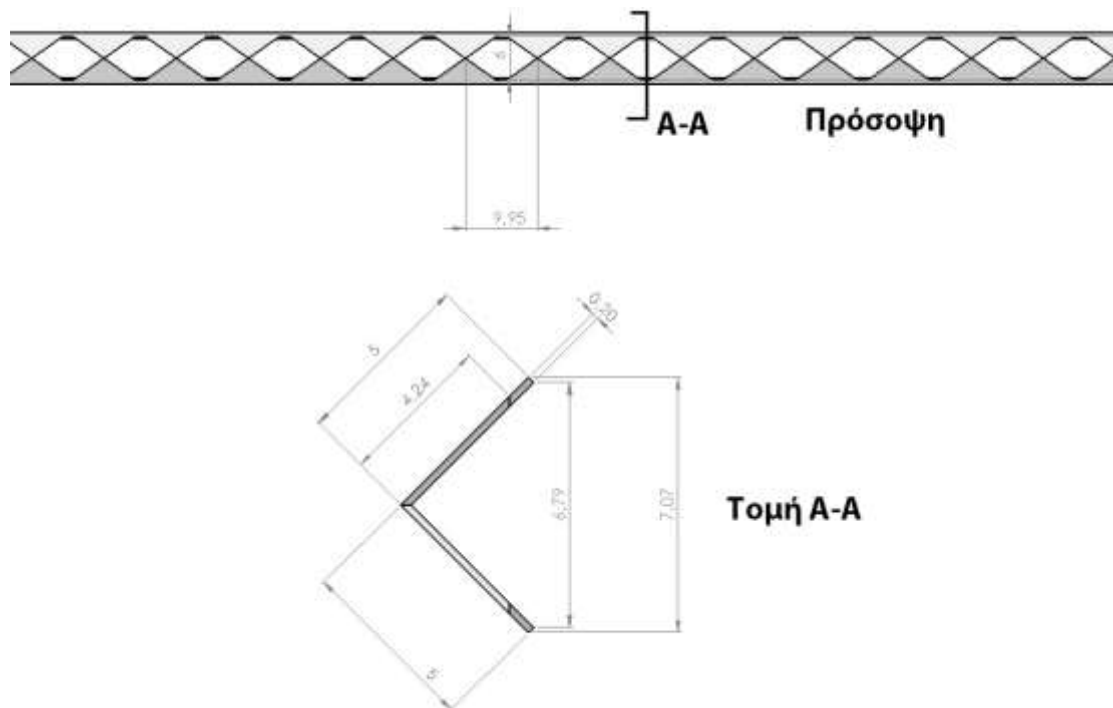


Σχήμα 2.i.3 -Διαστάσεις λωρίδας αποκόλλησης



Εικόνα 2.i.2 -Λωρίδα αποκόλλησης τοποθετημένη στην πτέρυγα

Υπολογιστικές προσομοιώσεις που έγιναν στο εργαστήριο έδειξαν ότι η οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης (serrated stall strip) μπορεί να έχει αντίστοιχα αποτελέσματα με την απλή χωρίς έντονη μείωση του μέγιστου συντελεστή άνωσης. Οι διαστάσεις της φαίνονται στο σχήμα 2.i.4. Στην εικόνα 2.i.3 φαίνεται η οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης τοποθετημένη στην πτέρυγα.



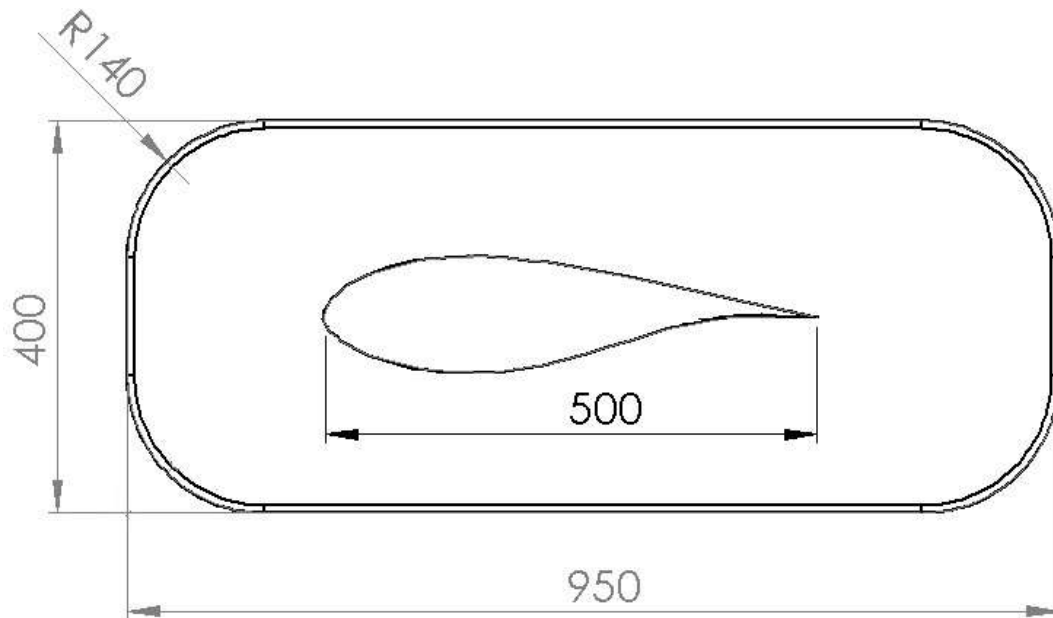
Σχήμα 2.ι.4 -Διαστάσεις οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης



Εικόνα 2.ι.3 -Οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης τοποθετημένη στην πτέρυγα

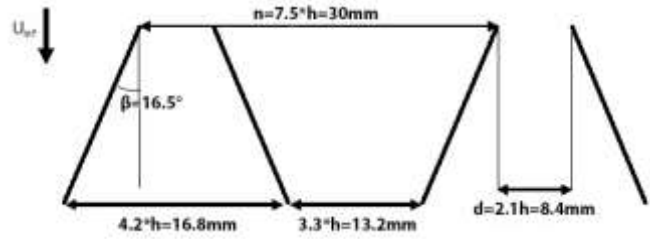
FFA W3-241 και διαμορφώσεις

Το μοντέλο της πτέρυγας με προφίλ FFA W3-241 έχει χορδή μήκους 0.5m και μέγιστο πάχος 24.1% της χορδής, δηλαδή 0.1205m και το εκπέτασμά της είναι 1m. Όπως και το προηγούμενο μοντέλο, έτσι κι αυτό περιορίζεται μεταξύ των δύο πάνελ.

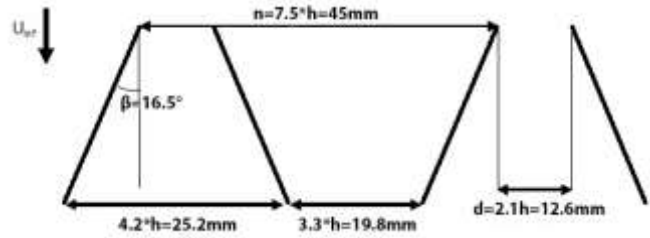
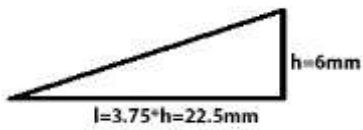


Σχήμα 2.i.5 -Διαστάσεις FFA W3-241 και φραγμών (fences)

Στην πτέρυγα, για τις ανάγκες των πειραμάτων, τοποθετούνται στο 30% της χορδής δύο διαφορετικές αλουμιένιες λωρίδες με στροβιλογεννήτριες κατασκευασμένες στο χέρι. Η λειτουργία των στροβιλογεννητριών, όπως αυτή αναλύεται εκτενέστερα στο αντίστοιχο κεφάλαιο, βασίζεται στην ανατροφοδότηση του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται στο στερεό όριο της πτέρυγας με ρευστό υψηλότερης ενέργειας από το εξωτερικό του, με σκοπό την καθυστέρηση της αποκόλλησης του. Τα ζεύγη των στροβιλογεννητριών είναι common flow down, δηλαδή δημιουργούν ένα ζεύγος στροβίλων οι οποίοι επάγουν κατώρευμα στο μεταξύ τους. Οι πρώτες στροβιλογεννήτριες έχουν ύψος $h=4\text{mm}$, και τις ανάλογες διαστάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.i.6, ενώ οι δεύτερες έχουν ύψος $h=6\text{mm}$ και διαστάσεις που φαίνονται στο σχήμα 2.i.7. Στην εικόνα 2.i.4 φαίνεται η πτέρυγα με εγκατεστημένες τις στροβιλογεννήτριες.



Σχήμα 2.i.6-Διαστάσεις στροβιλογεννητριών με $h=4\text{mm}$



Σχήμα 2.i.7-Διαστάσεις στροβιλογεννητριών με $h=6\text{mm}$



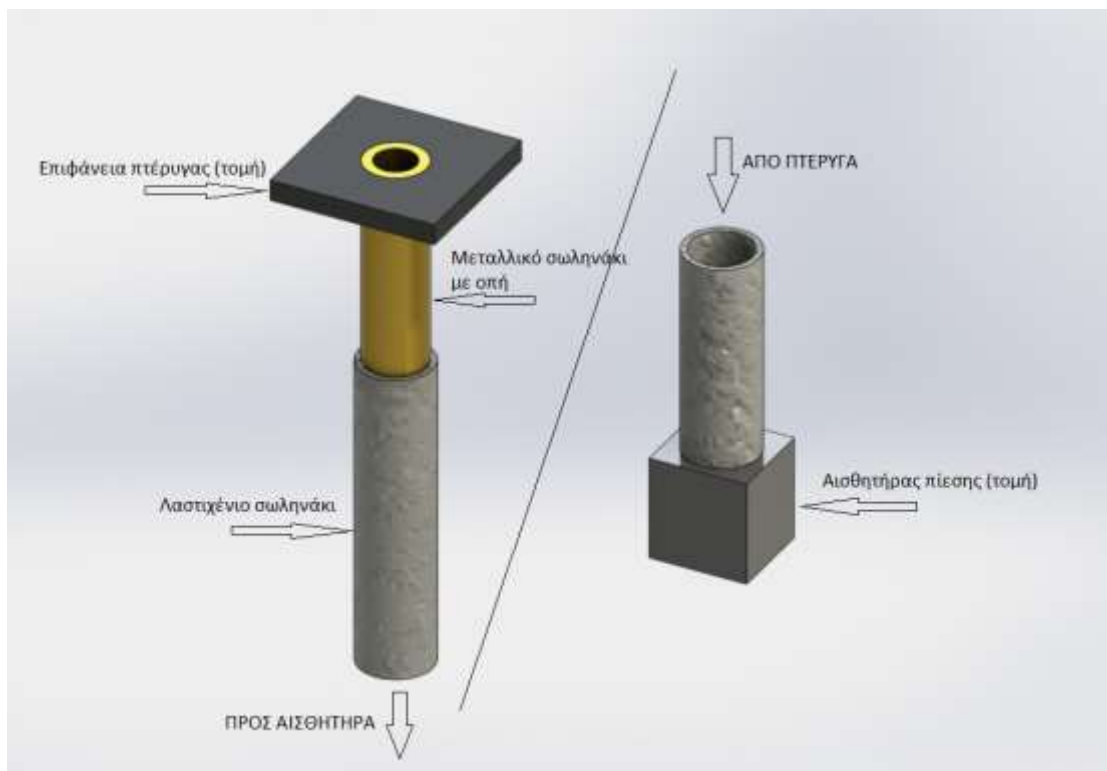
Εικόνα 2.i.4 -Η πτέρυγα FFA W3-241 με εγκατεστημένες τις στροβιλογεννήτριες $h/d=1$ (αριστερά) και $h/d=1.6$ (δεξιά)

ii. Μετρήσεις Πίεσεων

Για τον προσδιορισμό των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της πτέρυγας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την κατανομή των στατικών πιέσεων γύρω από αυτή, καθώς και τις δυναμικές πιέσεις στον ομόρρου της. Για την μέτρηση των πιέσεων στην πτέρυγα χρησιμοποιούνται μικρές οπές (pressure taps) ειδικά τοποθετημένες στην επιφάνειά της και οι οποίες συνδέονται με σωληνάκια εσωτερικής διαμέτρου 1mm με τους αισθητήρες πίεσης (pressure transducers, εταιρεία Pressure Systems, μοντέλο ESP-32HD), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.ii.1. Κάθε πτέρυγα έχει ενσωματωμένες 60 οπές πίεσης, κατανομημένες και στις δύο πλευρές της. Για τη μέτρηση των δυναμικών πιέσεων στον ομόρρου της πτέρυγας χρησιμοποιείται μια διάταξη που θυμίζει «τσουγκράνα» (wake rake) και η οποία αποτελείται από σωλήνες pitot εσωτερικής διαμέτρου 1mm τοποθετημένους παράλληλα στην επερχόμενη ροή. Η διάταξη του ομόρρου έχει πλάτος 39.1cm και αποτελείται από 45 σωλήνες ολικής πίεσης (εκ των οποίων χρησιμοποιούνται οι 44) και τρεις σωλήνες στατικής πίεσης, τοποθετημένους σε διαφορετικό επίπεδο από τους σωλήνες ολικής πίεσης. Η διάταξη αυτή ήταν τοποθετημένη περίπου 1.8 c κατάντι της πτέρυγας και μπορούσε να μετακινηθεί οριζόντια και κατακόρυφα.



Εικόνα 2.i.5-Wake Rake



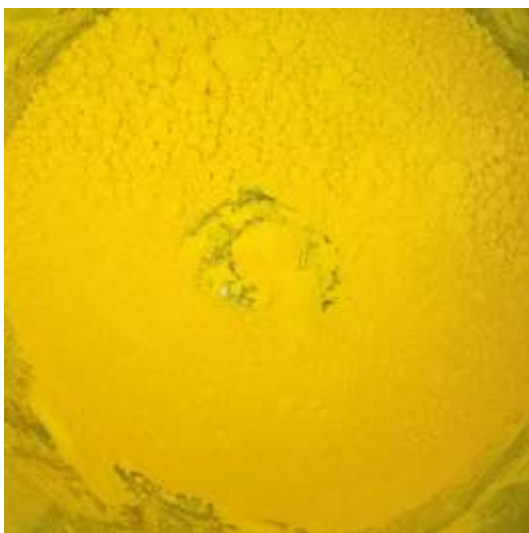
Σχήμα 2.ii.1 -Διάταξη μέτρησης πίεσης στην επιφάνεια της πτέρυγας

Όταν η ροή αναπτυχθεί πλήρως γύρω από την πτέρυγα, μέσα στα σωληνάκια της πτέρυγας επικρατεί η τοπική στατική πίεση, ενώ στα σωληνάκια του ομόρρου η τοπική ολική πίεση, οι οποίες έτσι φτάνουν μέχρι τους αισθητήρες πίεσης. Συνολικά, λοιπόν στους αισθητήρες φτάνουν οι 60 στατικές πιέσεις, οι 44 ολικές πιέσεις του ομόρρου, καθώς επίσης η ολική και στατική πίεση της ελεύθερης ροής μετρούμενες από ένα σωλήνα Pitot, αλλά και τρεις ακόμα στατικές πιέσεις από τον ομόρρου, η χρησιμότητα των οποίων αναλύεται στη συνέχεια. Όλες αυτές οι πιέσεις έπειτα μεταφέρονται **παράλληλα** στον καταγραφέα των δεδομένων (Data Acquisition, εταιρεία Chell, μοντέλο ScanDAQ 8000, τύπος CSD 8000) , με τη μορφή διαφορών της μετρούμενης πίεσης μείον τη στατική πίεση της ελεύθερης ροής.

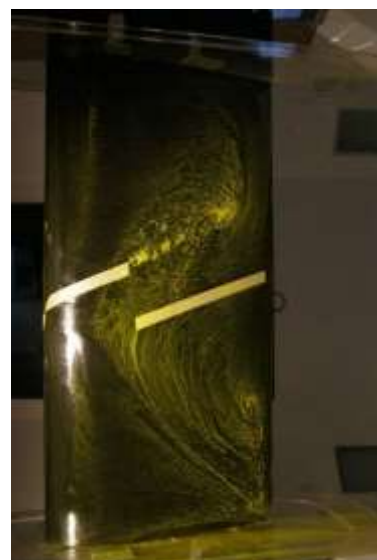
iii. Οπτικοποίηση της ροής (Flow visualization / Flow-viz)

Η οπτικοποίηση της ροής έχει σκοπό την αποτύπωση της ροής του αέρα στην επιφάνεια της πτέρυγας. Η εικόνες που προκύπτουν είναι σημαντική αφού βοηθά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις των πιέσεων.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων οπτικοποίησης χρησιμοποιείται ένα διάλυμα μπογιάς (φωσφορίζουσας ή μη) σε φωτιστικό πετρέλαιο. Στο διάλυμα αυτό προστίθεται μικρή ποσότητα ολεϊκού οξέος για την αύξηση της συνεκτικότητας του διαλύματος και καλύτερο τελικό αποτέλεσμα. Στα πειράματα που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε μπογιά αγιογραφίας σε μορφή σκόνης, χρώματος κίτρινου της όχρας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.iii.1. Αφού κατασκευαστεί το διάλυμα με αναλογίες στις οποίες καταλήγουμε μετά από δοκιμές, απλώνεται μια λεπτή στρώση στην επιφάνεια της πτέρυγας με τη βοήθεια ενός πινέλου και αμέσως τίθεται σε λειτουργία η αεροσήραγγα, ώστε να μην εξατμιστεί το πετρέλαιο. Μετά την πάροδο ορισμένου χρονικού διαστήματος αφότου η ροή διαμορφωθεί πλήρως γύρω απ' την πτέρυγα το διάλυμα στεγνώνει στην επιφάνεια, αποτυπώνοντας έτσι τη ροή, όπως φαίνεται ενδεικτικά και στην εικόνα 2.iii.2.



Εικόνα 2.iii.1 -Χρώμα αγιογραφίας σε μορφή σκόνης που χρησιμοποιείται για τα πειράματα Flow-Viz



Εικόνα 2.iii.2-Τελικό αποτέλεσμα πειράματος Flow-Viz

iv. Stereo PIV (Stereoscopic Particle Image Velocimetry)

Η μέθοδος PIV χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς των στροβίλων που δημιουργούνται από τις στροβιλογεννήτριες. Πιο συγκεκριμένα σκοπός είναι να προσδιοριστεί το πεδίο ταχυτήτων που επάγουν, αλλά και την τύρβη στο εσωτερικό τους.

Μετρητικός εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα 200mJ TSI Nd:YAG PIV laser με διπλές κοιλότητες, το οποίο εξέπεμπε ένα φύλλο laser πάχους 1.8mm, κάθετα στην επιφάνεια της πτέρυγας. Στη ροή του αέρα εισήχθη ένας μεγάλος αριθμός σταγονιδίων λαδιού με μέση διάμετρο 1μm, με τη χρήση ενός σταγονοποιητή (TSI model 9307), τα οποία αντανακλούν το laser και φωτογραφίζονται από δύο κάμερες 12-bit TSI Powerview Plus™ με αισθητήρες CCD 4MP και φακούς Sigma 150mm f/2.8. Για την ρύθμιση των πειραμάτων καθώς και τη λήψη των φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό TSI Insight 3G, ενώ για την επεξεργασία τους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό TSI Insight 4G, λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας και καλύτερης αξιοπιστίας.

Χρονική διαφορά παλμών laser

Η μέθοδος PIV βασίζεται στη λήψη δύο φωτογραφιών από κάθε κάμερα, με πολύ μικρή χρονική διαφορά, και η σύγκριση αυτών ανά περιοχές (interrogation areas) έτσι ώστε να προσδιοριστεί η κίνηση των σωματιδίων αρχικά στο επίπεδο της φωτογράφισης και στη συνέχεια στο χώρο, συνδυάζοντας τις φωτογραφίες από τις 2 κάμερες. Είναι πολύ σημαντικό, για να περιορίσουμε σφάλματα που οφείλονται σε επιτάχυνση της ροής αλλά και φαινόμενα καμπυλότητας, το χρονικό αυτό διάστημα μεταξύ των δύο παλμών του laser, και κατά συνέπεια των διαδοχικών φωτογραφιών, να είναι μικρό [17]. Βασιζόμενοι σε παρόμοια πειράματα που έχουν διεξαχθεί στην αεροσήραγγα [18] επιλέχθηκε χρονικό διάστημα 12 μsec. Με αυτό το χρονικό διάστημα, μπορούμε να υπολογίσουμε την ελάχιστη ταχύτητα (minimum resolved velocity) την οποία είναι δυνατόν να μετρήσουμε με αξιοπιστία, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ελάχιστη μετατόπιση που μπορούμε να ανιχνεύσουμε είναι 0.1 pixels [19].

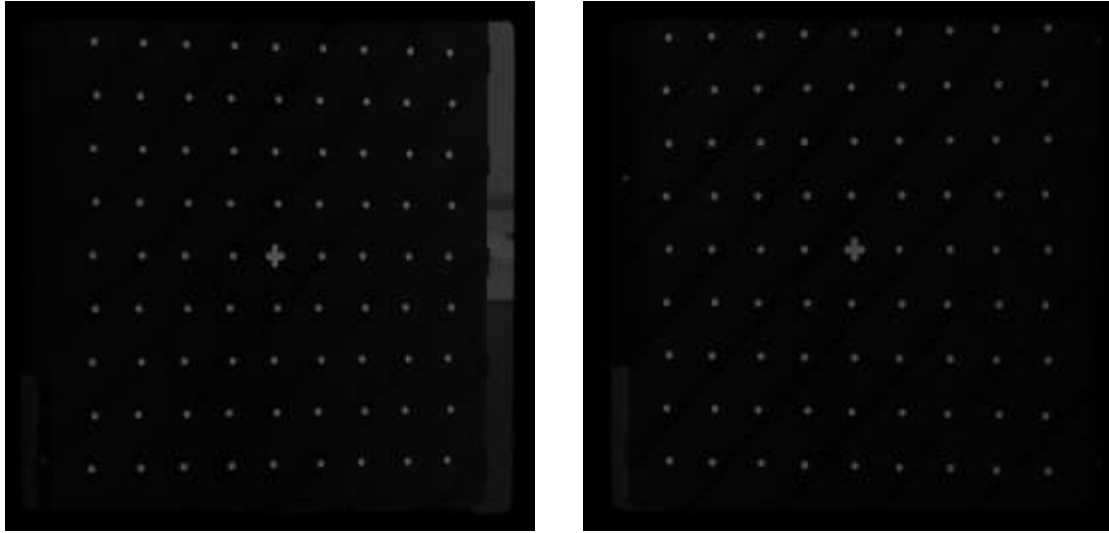
Από τη σχέση $U_{res} = \frac{[Minimum\ resolution]*[Magnification\ factor]}{[pulse\ separation\ time]}$ προκύπτει η ελάχιστη αυτή ταχύτητα. Επίσης βασιζόμενοι σε προηγούμενα πειράματα [18] επιλέγουμε για κάθε επίπεδο να παίρνουμε 2000 φωτογραφίες. Για το πλήθος των φωτογραφιών το σφάλμα για τις τάσεις Reynolds είναι 8.4%

Δονήσεις καμερών

Λόγω μεγάλης ομοιότητας της πειραματικής διάταξης με προηγούμενα πειράματα PIV στο εργαστήριο [18], η ανάλυση των δονήσεων των καμερών λόγω της επερχόμενης ροής παραλείπεται.

Βαθμονόμηση της διάταξης

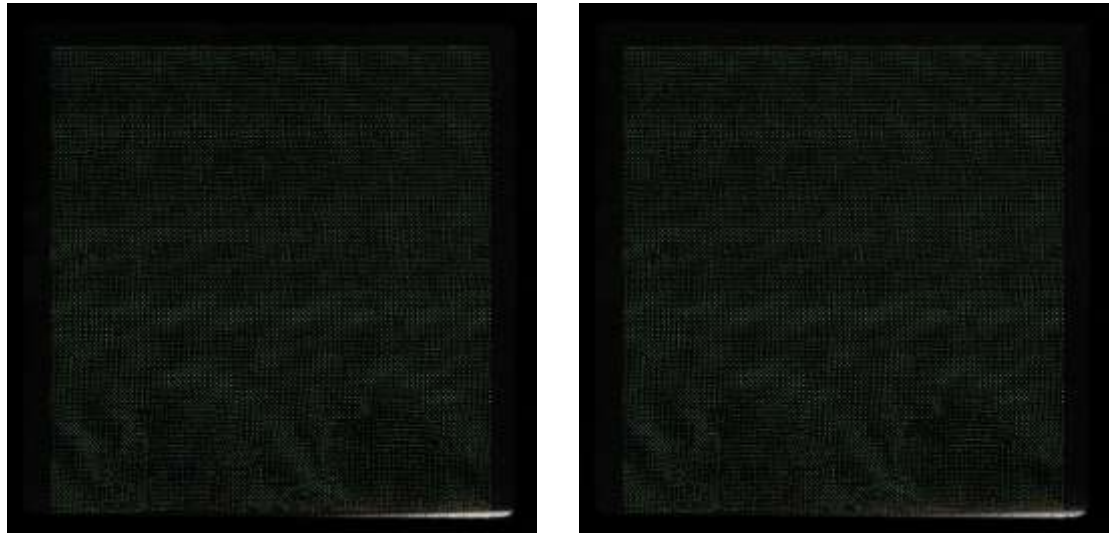
Η βαθμονόμηση (calibration) του PIV γίνεται με τη βοήθεια ενός στόχου δύο επιπέδων, ο οποίος, αφού τοποθετηθεί κάθετα στην επιφάνεια της πτέρυγας χρησιμοποιώντας την κατοπτρική σχισμή που διαθέτει, φωτογραφίζεται από τις κάμερες (Εικόνα 2.iv.1). Το λογισμικό επεξεργάζεται αυτές τις εικόνες και χρησιμοποιεί δεύτερης τάξης πολυώνυμα για να δημιουργήσει την χωρική βαθμονόμηση που είναι απαραίτητη για την επεξεργασία των εικόνων.



Εικόνα 2.iv.1 -Ο στόχος βαθμονόμησης όπως φωτογραφίζεται από τις κάμερες A (αριστερά) και B (δεξιά). Γίνονται ορατά τα δύο διαφορετικά επίπεδα με υψομετρική διαφορά 1mm

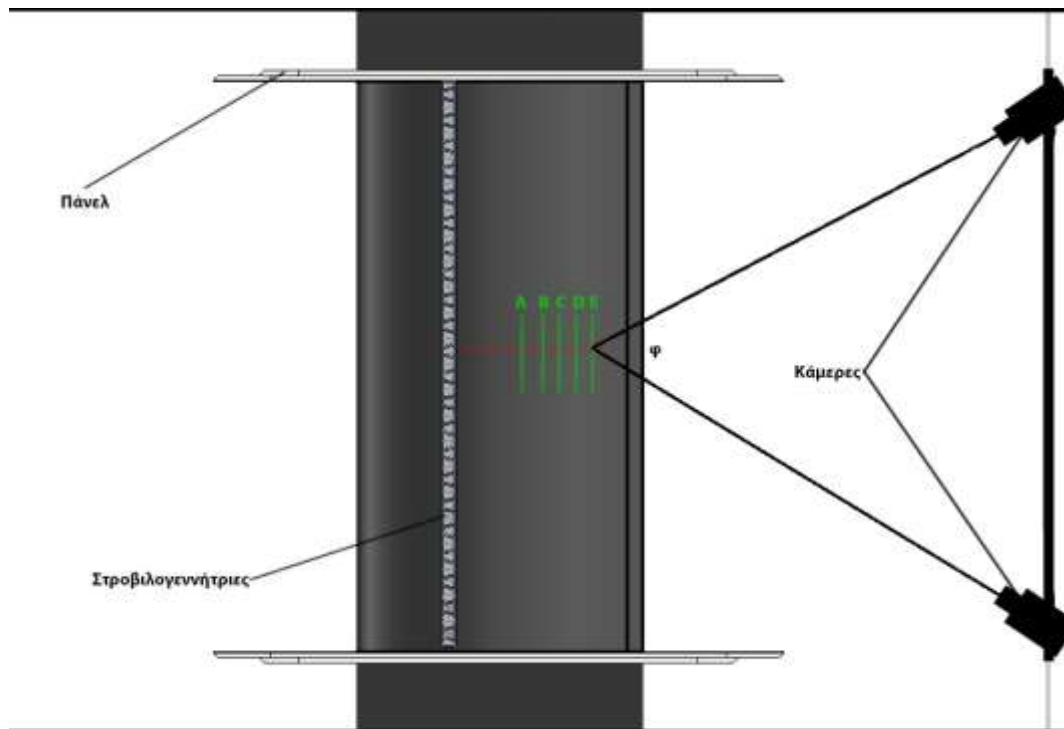
Επεξεργασία

Η επεξεργασία των εικόνων απαιτεί αρχικά την αφαίρεση των αντανακλάσεων καθώς και των αντικειμένων του παρασκηνίου, ώστε τα σωματίδια να εντοπίζονται με μεγαλύτερη αξιοπιστία. Για να γίνει αυτό, αφαιρείται από όλες τις φωτογραφίες, μια εικόνα η οποία περιέχει τα λιγότερο φωτεινά pixel (minimum intensity) από 40 διαφορετικές φωτογραφίες. Κατά την επεξεργασία, τα interrogation areas ήταν 20x20 pixels, η αλληλεπικάλυψή τους (overlap) ρυθμίστηκε στο 50% και χρησιμοποιήθηκε εκτιμητής κορυφής Gauss (Gauss peak estimator) για τον εντοπισμό των σωματιδίων. Η αναλογία θορύβου ρυθμίστηκε στο 1.5 ενώ τα νόθα διανύσματα (spurious vectors) αντικαθίσταντο χρησιμοποιώντας μια μέση τιμή στην γειτονιά 3x3 interrogation areas. Να σημειωθεί εδώ ότι σε όλα τα τελικά αποτελέσματα τα νόθα διανύσματα ήταν κάτω από το 2% των συνολικών. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 2.iv.2

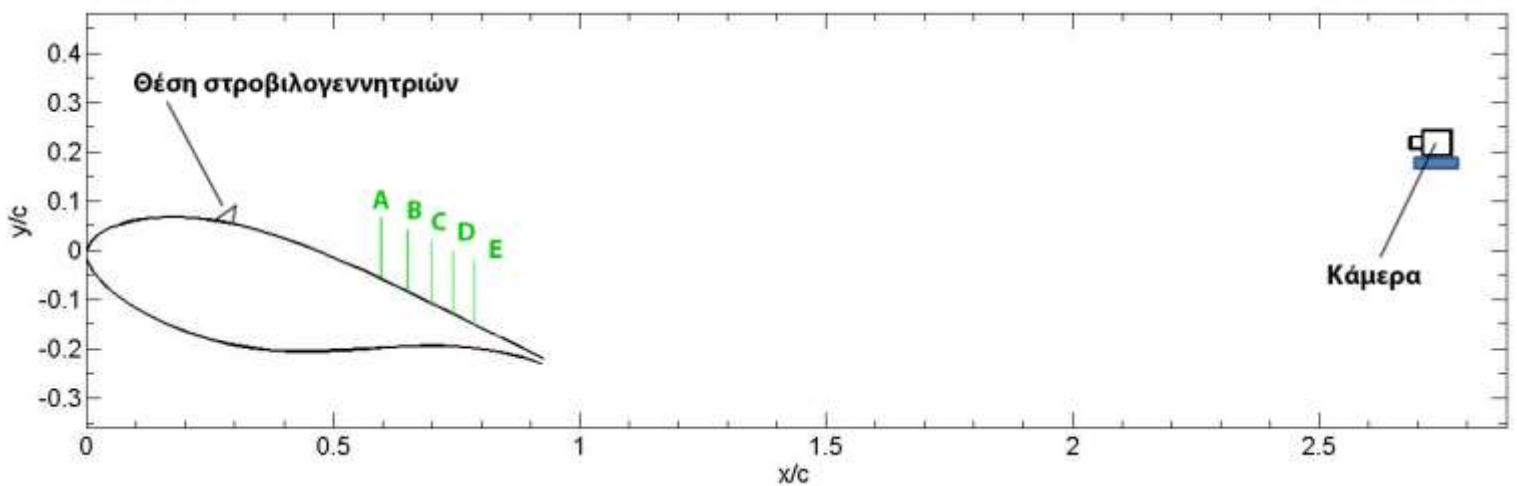


Εικόνα 2.iv.2-Τελικό αποτέλεσμα επεξεργασίας φωτογραφιών από την Α κάμερα (αριστερά) και την Β κάμερα (δεξιά). Διακρίνονται τα νόθα διανύσματα με κίτρινο χρώμα και εντοπίζονται κυρίως εκεί που έχουμε αντανάκλασεις

Συνολικά, έγιναν μετρήσεις σε 5 διαφορετικά επίπεδα κάθετα στην επιφάνεια της πτέρυγας, μεταβάλλοντας κάθε φορά την απόσταση από τις στροβιλογεννήτριες. Η πτέρυγα ήταν σε όλες τις μετρήσεις τοποθετημένη σε γωνία 14 μοιρών, διότι εκεί έχουμε τη μέγιστη τιμή άνωσης προς αντίσταση, ενώ σε όλα τα επίπεδα διατηρήθηκε αριθμός Reynolds $Re = 0.87 \cdot 10^6$. Η πειραματική διάταξη, καθώς και τα επίπεδα μέτρησης φαίνονται στα Σχήματα 2.iv.1 και 2.iv.2, ενώ πιο αναλυτικά στοιχεία για τις μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.iv.1



Σχήμα 2.iv.1 –Πλάγια όψη της πειραματικής διάταξης. Διακρίνονται τα 5 επίπεδα μέτρησης A ($x/c=0.6$), B ($x/c=0.66$), C ($x/c=0.72$), D ($x/c=0.78$), E ($x/c=0.84$) και η περιεχόμενη γωνία μεταξύ των καμερών που αναφέρεται στον πίνακα 1.d.1



Σχήμα 2.iv.2 – Κάτοψη της πειραματικής διάταξης. Διακρίνονται τα 5 επίπεδα μέτρησης A ($x/c=0.6$), B ($x/c=0.66$), C ($x/c=0.72$), D ($x/c=0.78$), E ($x/c=0.84$), η θέση των στροβιλογεννητριών και των καμερών

	Επίπεδο A	Επίπεδο B	Επίπεδο C	Επίπεδο D	Επίπεδο E
Αδιάστατη θέση ως προς τη χορδή (x/c)	0.60c	0.66c	0.72c	0.78c	0.84c
Αδιάστατη απόσταση από τα VGs ($\Delta x/h$)	21.4	26.4	31.4	36.4	41.4
Φακοί	150mm	150mm	150mm	150mm	150mm
Περιεχόμενη γωνία μεταξύ καμερών (ϕ)	61.5°	63°	64°	66°	66°
Μέγεθος interrogation area [μx]	20x20	20x20	20x20	20x20	20x20
Minimum resolved velocity [m/s]	0.43	0.42	0.417	0.4	0.396
Πλήθος στιγμιότυπων	2000	2000	2000	2000	2000

Πίνακας 2.iv.2-Λεπτομερή στοιχεία πειραμάτων PIV

3. Μετρήσεις Πιέσεων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις πίεσης, διαδικασία η οποία περιεγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η παρουσίαση γίνεται εκτελώντας συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών διαμορφώσεων των πτερύγων.

Πιο συγκεκριμένα στην παράγραφο (i) που αφορά την πτέρυγα με προφίλ NACA 63-418, γίνονται τρεις συγκρίσεις:

- Ροή με ελεύθερη και εξαναγκασμένη μετάβαση
- Ροή με και χωρίς λωρίδα αποκόλλησης στο χείλος πρόσπτωσης της πτέρυγας
- Ροή με απλή και με οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης

Η παράγραφος (ii) αφορά την πτέρυγα με προφίλ FFA W3-241 και περιλαμβάνει δύο συγκρίσεις:

- Ροή με και χωρίς στροβιλογεννήτριες με $h/\delta=1$ ($h=4\text{mm}$)
- Ροή με στροβιλογεννήτριες με $h/\delta=1$ ($h=4\text{mm}$) και με στροβιλογεννήτριες με $h/\delta=1.6$ ($h=6\text{mm}$)

i. NACA 63-418

Σύγκριση ροής με ελεύθερη και εξαναγκασμένη μετάβαση

Στο διάγραμμα 3.i.1 συγκρίνονται οι συντελεστές άνωσης για την ροή με ελεύθερη και εξαναγκασμένη μετάβαση. Βλέπουμε πως η κλίση της καμπύλης της ροής με ελεύθερη μετάβαση στην γραμμική περιοχή συμπίπτει με τη θεωρητική κλίση $2\pi \text{ rad}^{-1}$, αλλά από τις 5° και έπειτα απομακρύνεται από την ευθεία, γεγονός που σημαίνει ότι αρχίζει η αποκόλληση. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή άνωσης εμφανίζεται στις 10° και ισούται με 1.18.

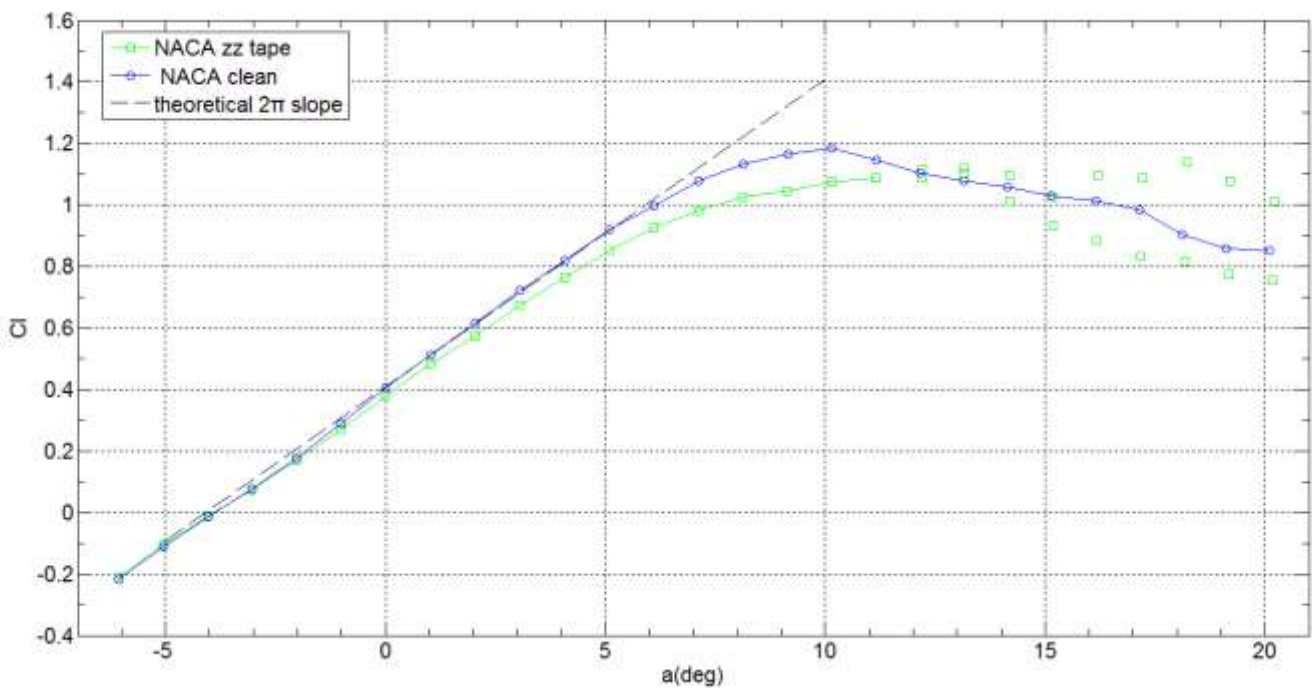
Η καμπύλη της ροής με εξαναγκασμένη μετάβαση αρχικά ακολουθεί και αυτή την ευθεία με κλίση $2\pi \text{ rad}^{-1}$, αλλά για μικρότερο εύρος γωνιών, αφού η αποκόλληση φαίνεται να αρχίζει στις 2° . Ο συντελεστής άνωσης μεγιστοποιείται στις 14° , με τιμή 1.12. Συνολικά, λοιπόν, ο συντελεστής άνωσης μειώνεται και η γωνία μέγιστης άνωσης αυξάνει.

Στην περιοχή μετά την αποκόλληση η ροή ήταν εξαιρετικά ασταθής για την περίπτωση της ροής με εξαναγκασμένη μετάβαση. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η ροή εναλλάσσονταν τυχαία μεταξύ δύο διακριτών καταστάσεων (bifurcation). Στα διαγράμματα των αεροδυναμικών συντελεστών, στην περιοχή μετά την αποκόλληση, σημειώνονται δύο τιμές που αντιστοιχούν σε αυτές τις διακριτές καταστάσεις. Η αστάθεια της ροής αναλύεται εκτενέστερα στη συνέχεια της παραγράφου.

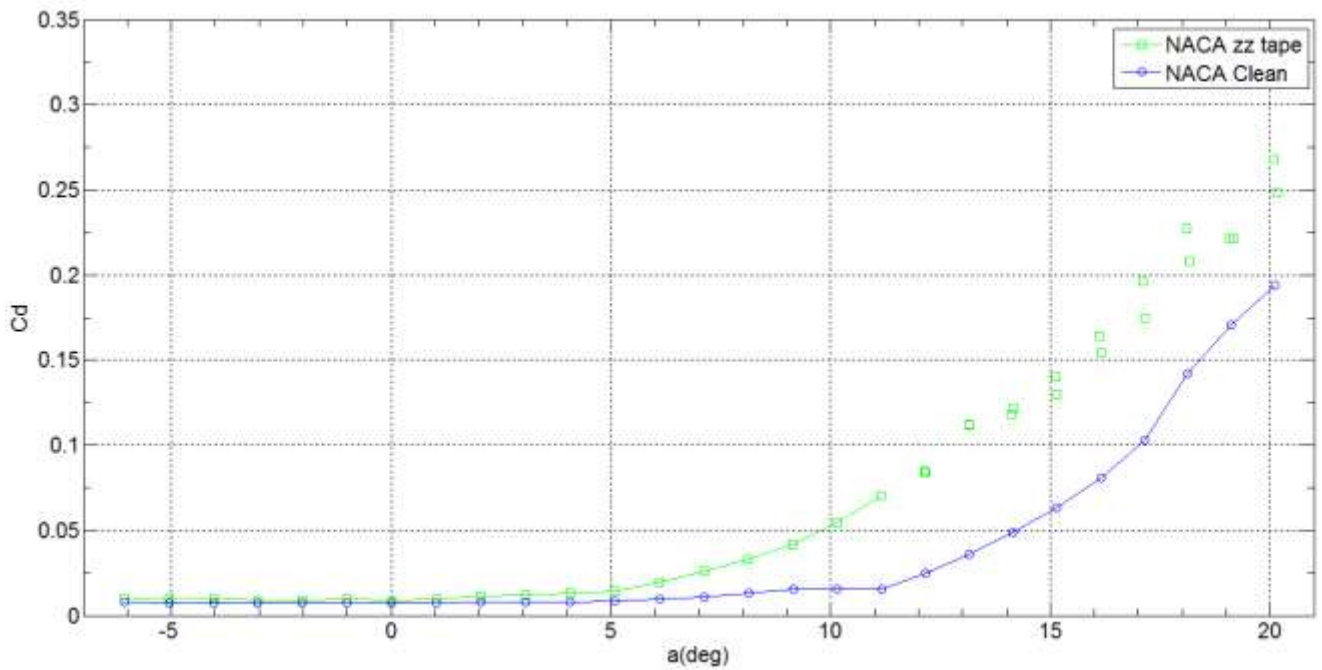
Στο διάγραμμα 3.i.2 παρουσιάζονται οι συντελεστές αντίστασης για τις δύο διαμορφώσεις. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί στη ροή με ελεύθερη μετάβαση διατηρείται σε

χαμηλά επίπεδα μέχρι να αρχίσει η αποκόλληση από τις 5° και μετά, ενώ ο ρυθμός ανόδου του συντελεστή αυξάνει σημαντικά μετά τη γωνία μέγιστης άνωσης. Στα ίδια επίπεδα κινείται αρχικά και ο συντελεστής αντίστασης της ροής με εξαναγκασμένη μετάβαση, όμως η αύξηση του αρχίζει σε μικρότερη γωνία, λόγω της ταχύτερης αποκόλλησης. Επίσης, στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης η αντίσταση είναι σημαντικά μεγαλύτερη, λόγω της εντονότερης αποκόλλησης της ροής. Στη γραμμική περιοχή ($-6^\circ < \alpha < 2^\circ$) η αύξηση του συντελεστή αντίστασης λόγω της εξαναγκασμένης μετάβασης είναι σταθερή και ίση με 0.002.

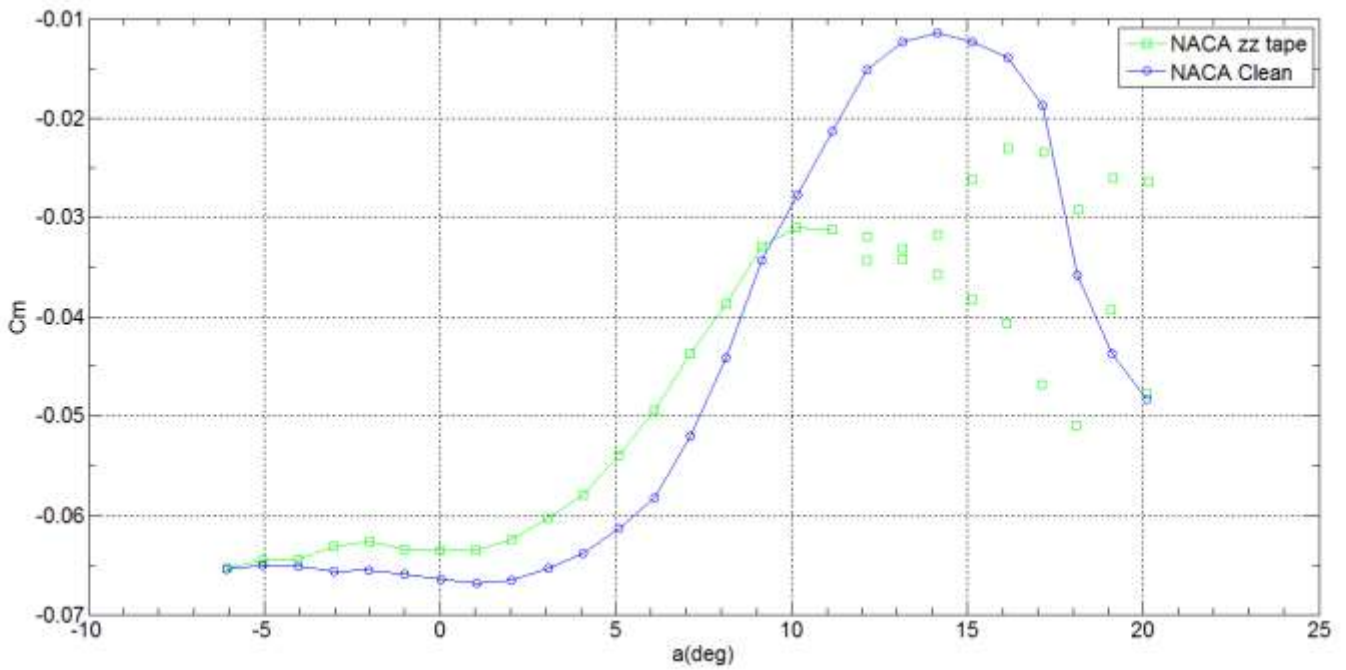
Στο διάγραμμα 3.i.3 φαίνονται οι δύο συντελεστές ροπής. Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά μέχρι τις 9°, με αυξητική τάση. Μετά τις 9° η καμπύλη που αντιστοιχεί στην ελεύθερη μετάβαση συνεχίζει την ανοδική πορεία μέχρι και τις 14°, ενώ η άλλη καμπύλη παρουσιάζει μεγάλη αστάθεια.



Διάγραμμα 3.i.1-Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ NACA Ελ.Μ. και Εξ.Μ. tape σε $Re=1.5e6$



Διάγραμμα 3.i.2- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ NACA ΕΛ.Μ. και ΕΞ.Μ. σε $Re=1.5e6$

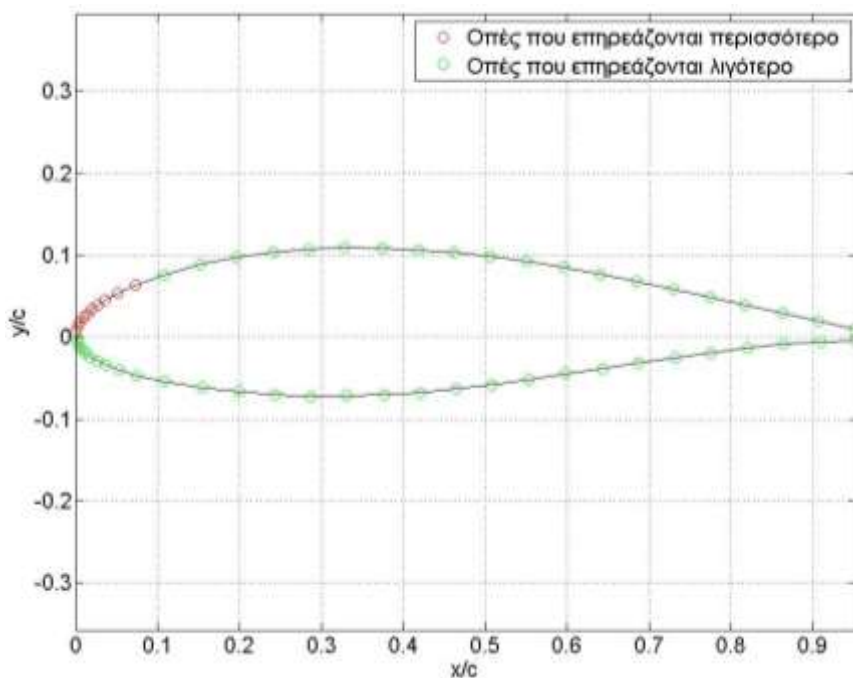


Διάγραμμα 3.i.3- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ NACA ΕΛ.Μ. και ΕΞ.Μ. σε $Re=1.5e6$

Αστάθεια της ροής σε μεγάλες γωνίες προσβολής

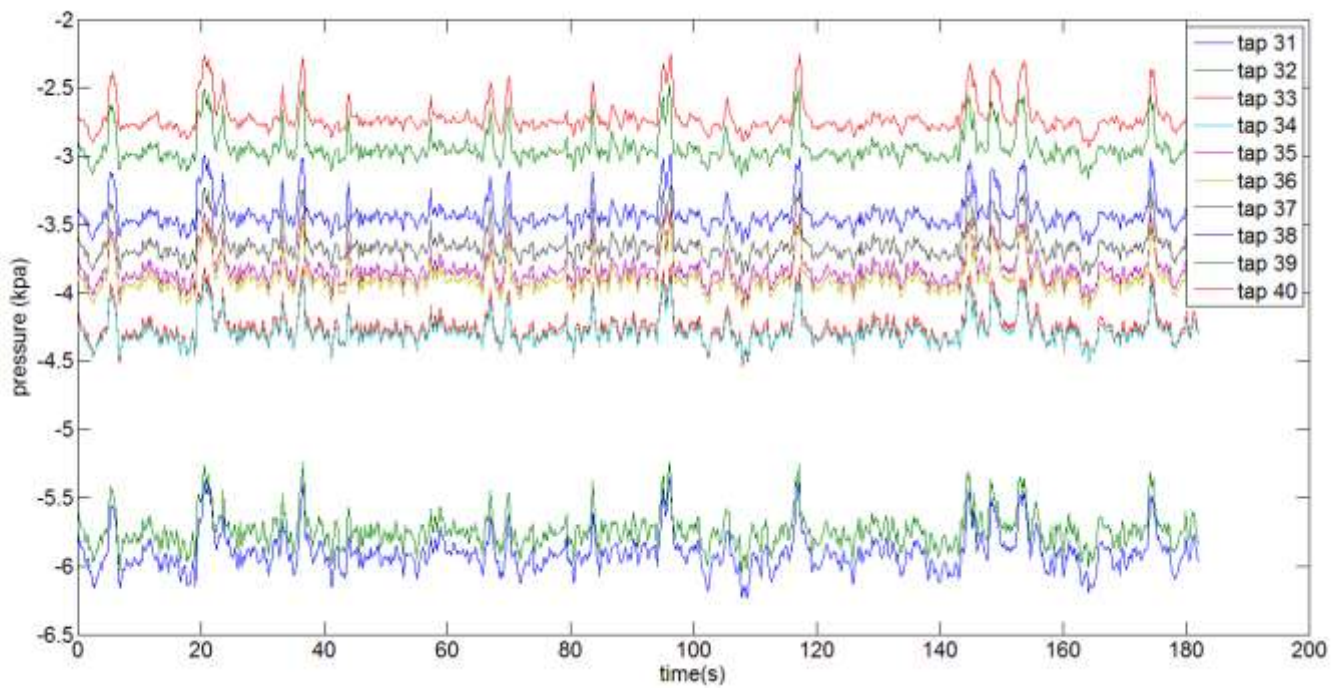
Όπως αποτυπώνεται και στο διάγραμμα, για τη ροή με εξαναγκασμένη μετάβαση, μετά τις 12° , η ροή εναλλάσσεται μεταξύ δύο καταστάσεων. Αυτό είναι προφανές από τις χρονοσειρές των πιέσεων, όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται και στα διαγράμματα 3.i.5 και 3.i.6. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτές τις γωνίες έχουμε ασταθή φόρτιση του πτερυγίου, λόγω της μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη, το οποίο είναι ανεπιθύμητο.

Στα διαγράμματα 3.i.6 και 3.i.7 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της πίεσης σε χρονικό διάστημα τριών λεπτών, για γωνίες πρόσπτωσης 15 και 18 μοίρες αντίστοιχα. Ο λόγος που παρουσιάζονται μόνο οι οπές 31 ως 40 είναι διότι αυτές βρίσκονται στη περιοχή της μέγιστης υποπίεσης (suction peak) ως και 20% της χορδής προς τα πίσω, η οποία επηρεάζεται πιο πολύ από τις μεταβολές της ροής, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3.i.5.

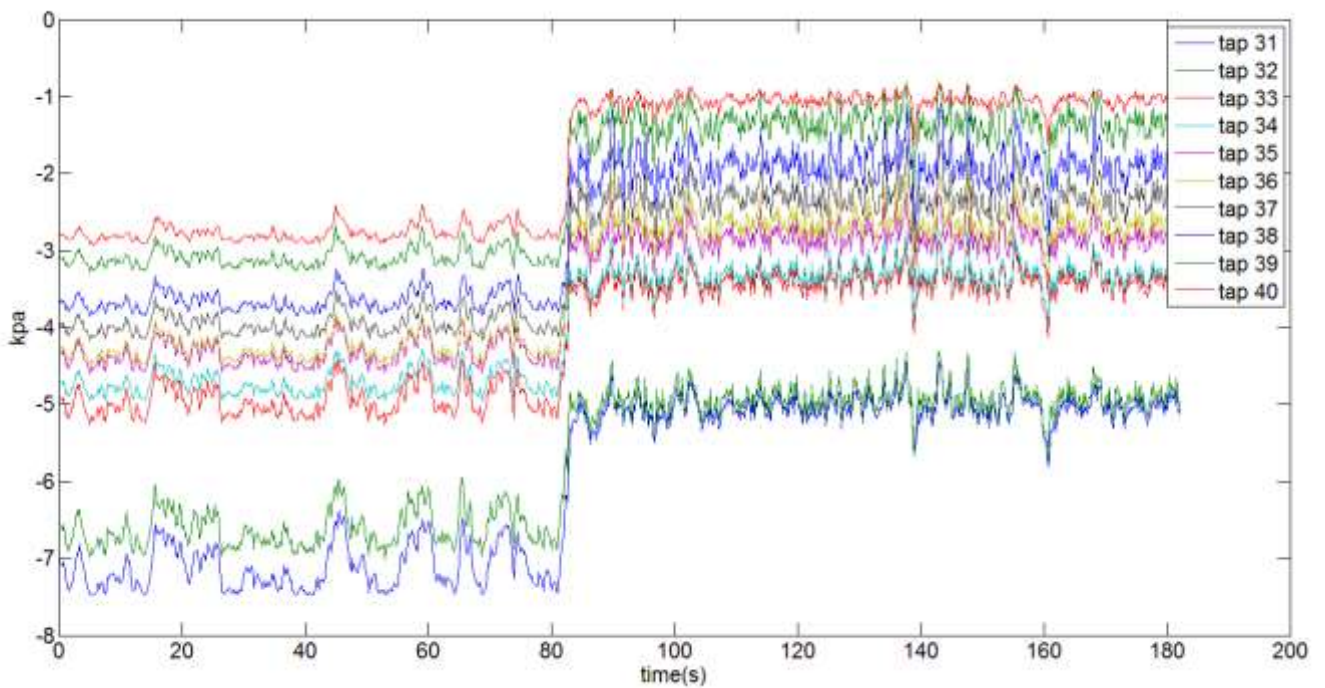


Διάγραμμα 3.i.4-Οπές μέτρησης πίεσης που επηρεάζονται από τις μεταβολές της ροής

Στο διάγραμμα 3.i.5 παρατηρούμε μικρή διάρκεια στις μεταβολές της ροής, καθώς και έντονη τυχαιότητα αυτών, σε αντίθεση με το διάγραμμα 3.i.6, στο οποίο έχουμε δύο σαφώς διαχωρισμένες και σημαντικής χρονικής διάρκειας καταστάσεις.

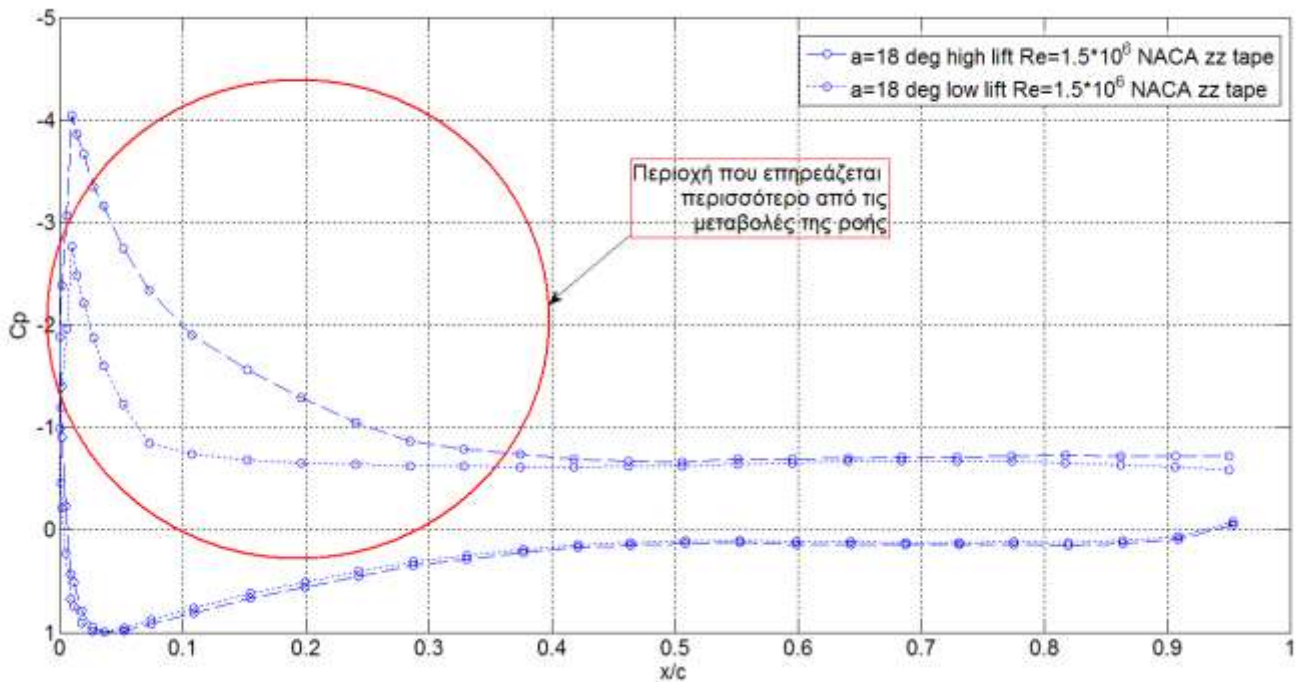


Διάγραμμα 3.ι.5-Χρονοσειρά πιέσεων για τις σπές 31 ως 40 σε γωνία πρόσπτωσης 15 μοίρες και $Re=1.5e6$



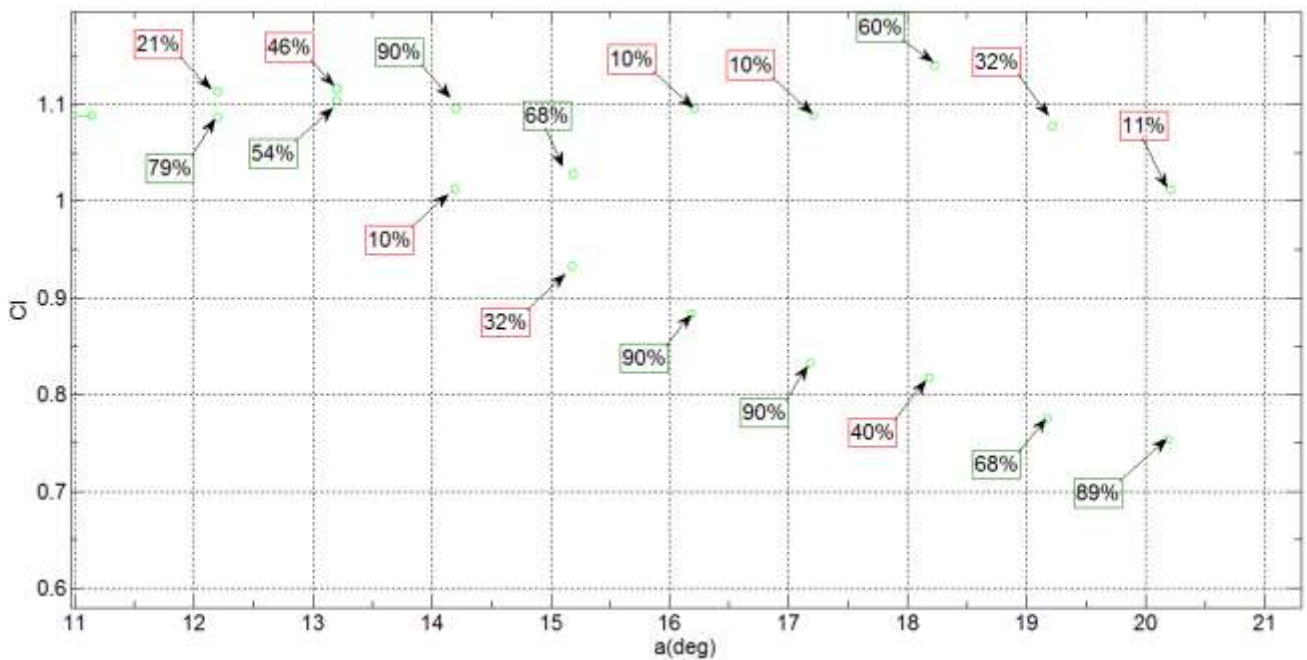
Διάγραμμα 3.ι.6-Χρονοσειρά πιέσεων για τις σπές 31 ως 40 σε γωνία πρόσπτωσης 18° και $Re=1.5e6$

Οι μεταβολές αυτές της ροής οφείλονται στη μετακίνηση των stall cells που σχηματίζονται στην επιφάνεια της πτέρυγας, με αποτέλεσμα στην περιοχή των οπών μέτρησης να επικρατούν διαφορετικές ταχύτητες, ενώ η κατανομή της πίεσης που αντιστοιχεί στις δύο καταστάσεις για 18° γωνία πρόσπτωσης δίνεται στο διάγραμμα 3.i.7



Διάγραμμα 3.i.7-Μεταβολή κατανομής πιέσεων στην πτέρυγα $\alpha=18^\circ$, $Re=1.5e6$

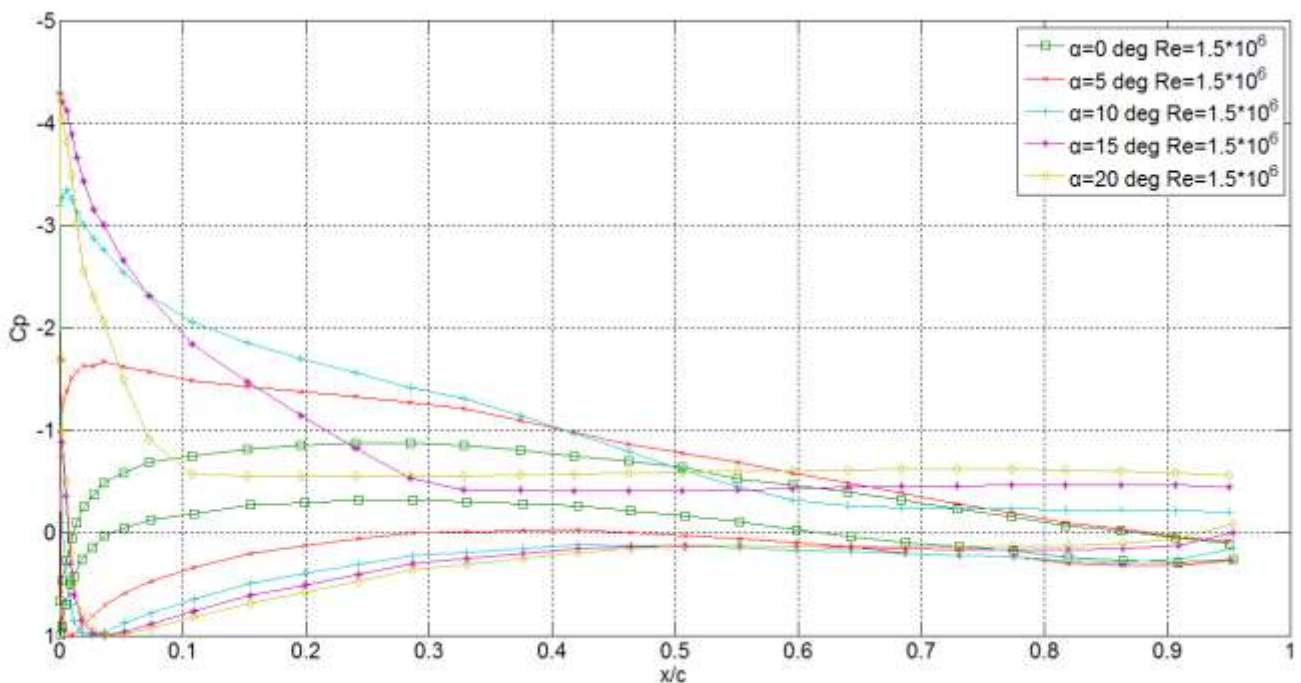
Στο διάγραμμα 3.i.8 φαίνεται η ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο καταστάσεων για την περίπτωση της ροής με εξαναγκασμένη μετάβαση. Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι υπάρχουν μη αμελητέες διαφορές στη χρονική διάρκεια των δύο καταστάσεων από γωνία σε γωνία, γεγονός που υποδεικνύει έντονα την τυχαιότητα της μετάβασης από μια κατάσταση στην άλλη, τουλάχιστον για το χρονικό διάστημα των τριών λεπτών στο οποίο διενεργήθηκαν οι μετρήσεις.



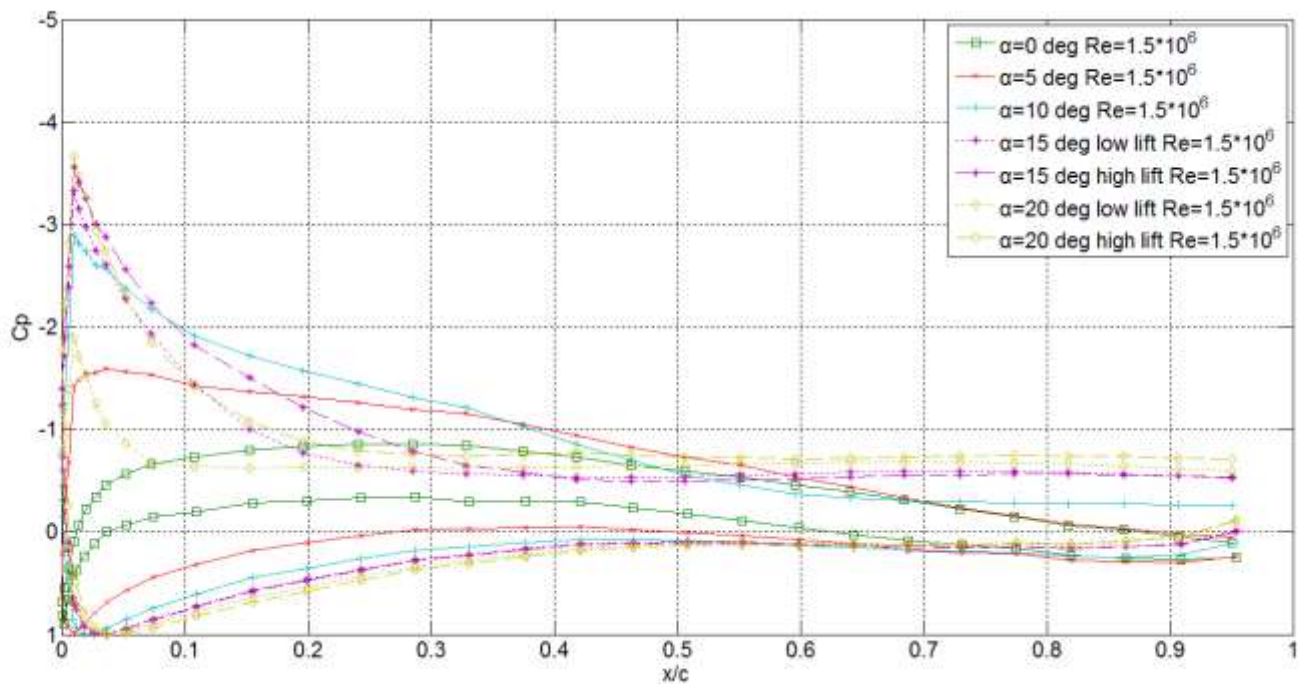
Διάγραμμα 3.i.8-Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 12° ως 20° NACA ΕΞ.Μ.

Στα διαγράμματα 3.i.9 και 3.i.10 παρουσιάζονται οι κατανομές της πίεσης για γωνίες πρόσπτωσης από 0° μέχρι 20° για ροή με ελεύθερη μετάβαση και με εξαναγκασμένη μετάβαση αντίστοιχα.

Και στα δύο αυτά διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε την εξέλιξη της κατανομής των πιέσεων όσο μεγαλώνει η γωνία πρόσπτωσης. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε και τον σχηματισμό, αλλά και την εξέλιξη της αποκόλλησης από την ακμή εκφυγής προς τα εμπρός. Στις 20° η αποκολλημένη περιοχή ξεκινά από το 10% της χορδής.



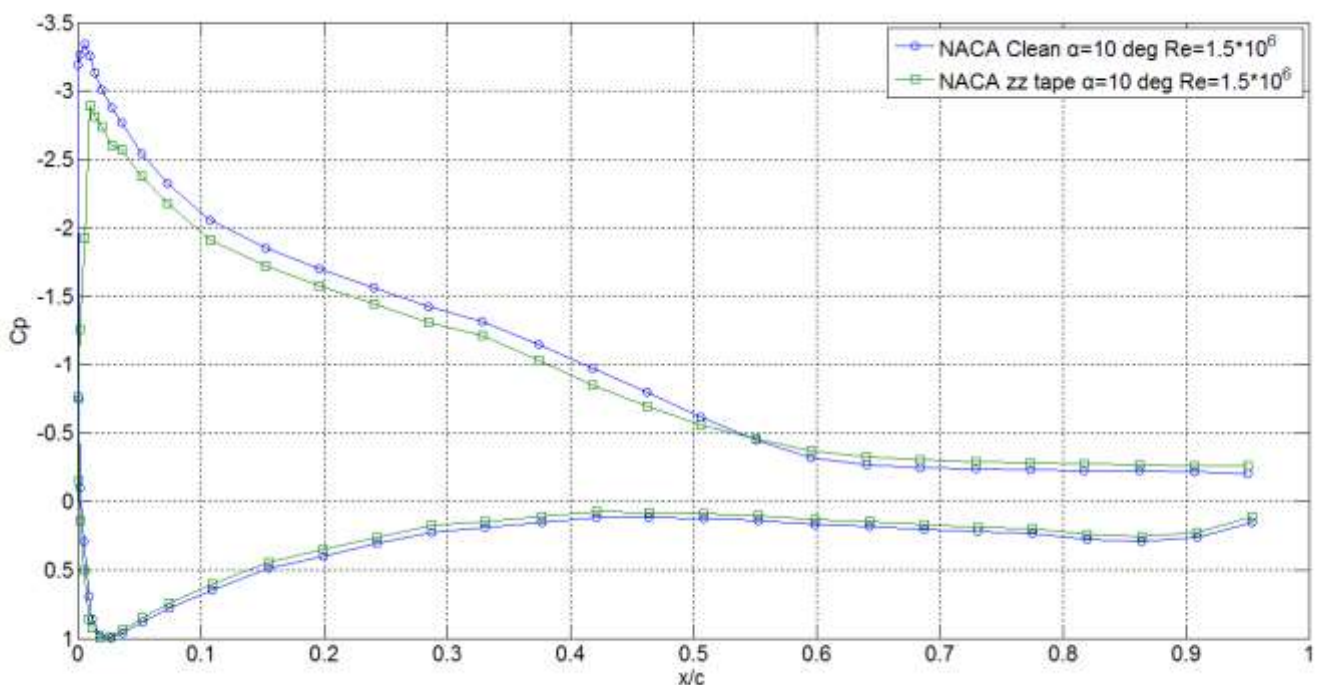
Διάγραμμα 3.i.9-Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° Re=1.5e6 NACA ΕΛ.Μ.



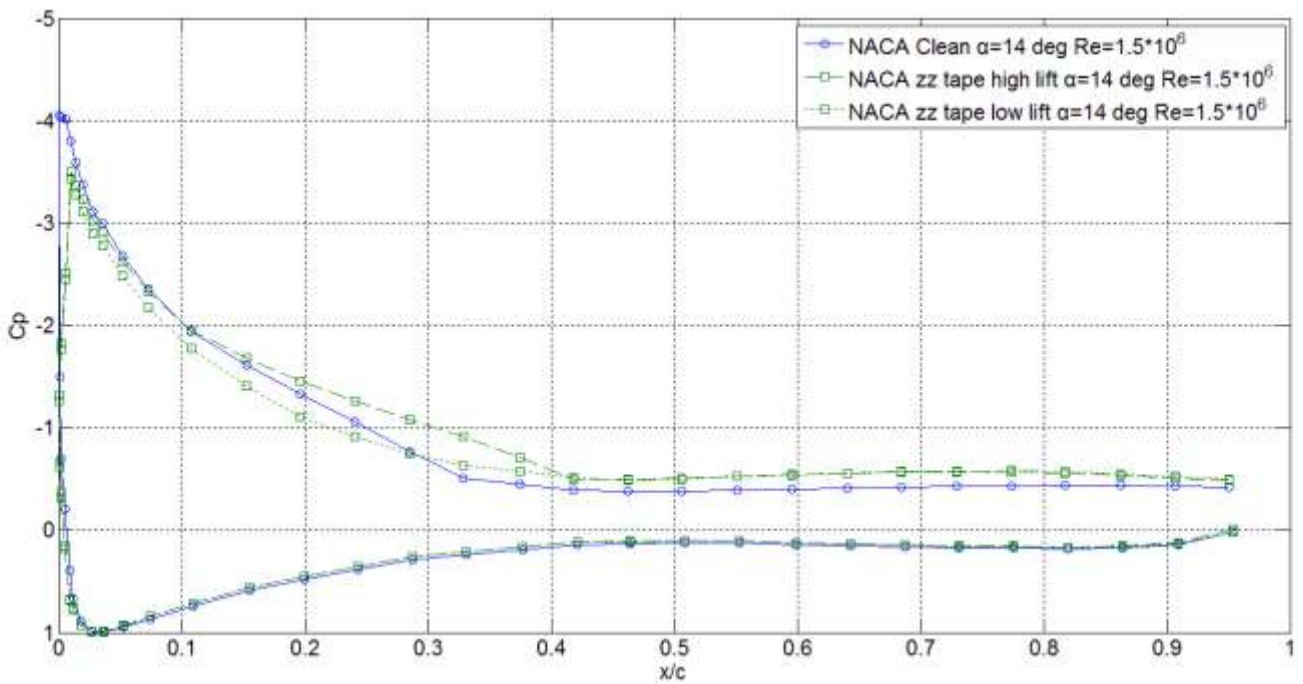
Διάγραμμα 3.i.10-Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° Re=1.5e6 NACA ΕΛ.Μ.

Στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε την αύξηση της μέγιστης τιμής υποπίεσης με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, με τις τιμές της υποπίεσης να φτάνουν στο $C_p = -4$.

Για να έχουμε μια πιο πλήρη εικόνα σχετικά με τις κατανομές των πιέσεων παραθέτουμε τα διαγράμματα 3.i.11 και 3.i.12 στα οποία γίνεται σύγκριση των κατανομών πίεσης μεταξύ της ελεύθερης και εξαναγκασμένης μετάβασης, ενδεικτικά για δύο γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές του συντελεστή άνωσης.



Διάγραμμα 3.i.11-Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA ΕΛ.Μ. και Εξ.Μ. $\alpha=10^\circ$, $Re=1.5e6$



Διάγραμμα 3.ι.12- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Ελ.Μ. και Εξ.Μ. $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$

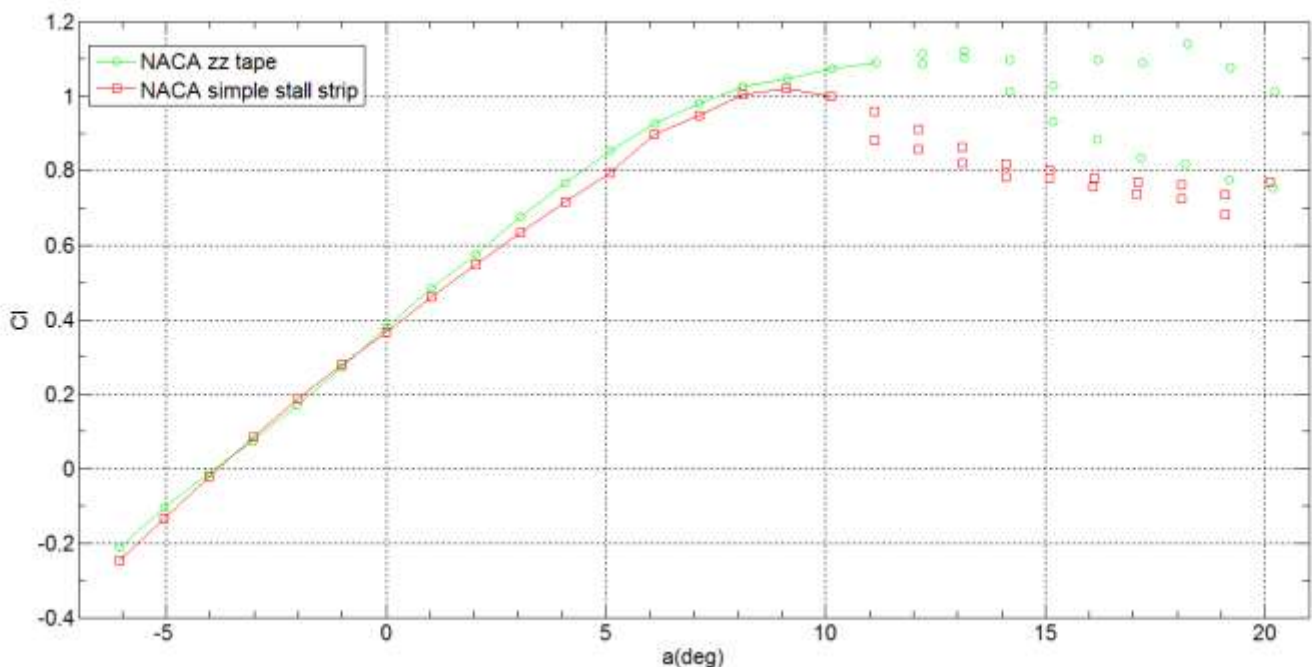
Και στα δύο διαγράμματα παρατηρούμε παρόμοια μορφή στην κατανομή των πιέσεων, με μόνη διαφορά το σημείο μέγιστης υποπίεσης και τα γειτονικά τους καθώς και στο σημείο αποκόλλησης, τα οποία, στην περίπτωση της εξαναγκασμένης μετάβασης είναι χαμηλότερα, λόγω της τυρβώδους ροής.

Σύγκριση ροής με και χωρίς λωρίδα αποκόλλησης

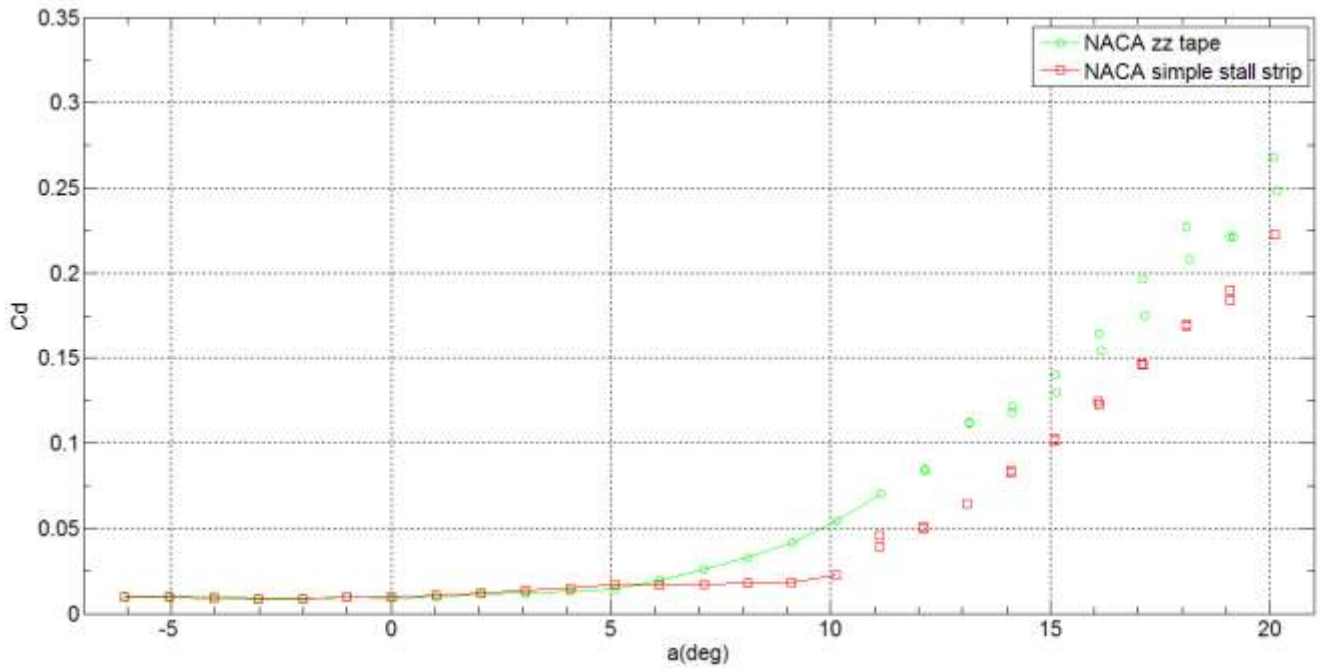
Στο διάγραμμα 3.i.13 παρουσιάζεται η σύγκριση των συντελεστών άνωσης για την πτέρυγα με και χωρίς λωρίδα αποκόλλησης. Στη γραμμική περιοχή οι δύο καμπύλες βρίσκονται κοντά, όμως στη διαμόρφωση με τη λωρίδα αποκόλλησης η ροή αποκολλάται πιο νωρίς, με αποτέλεσμα οι δύο καμπύλες να χωρίζουν περίπου στη 1° . Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή είναι 1.0 για γωνία πρόσπτωσης 9° , ενώ μετά την απώλεια στήριξης δεν παρατηρείται μεγάλη αστάθεια στις τιμές, σε αντίθεση με τη ροή με εξαναγκασμένη μετάβαση. Συνολικά η λωρίδα αποκόλλησης λειτούργησε όπως ήταν αναμενόμενο, με τη γωνία μέγιστης άνωσης καθώς και τη μέγιστη τιμή του συντελεστή άνωσης να μειώνονται και την ασταθή λειτουργία σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης να περιορίζεται σημαντικά.

Στο διάγραμμα 3.i.14 παρουσιάζονται οι δύο καμπύλες που αφορούν το συντελεστή αντίστασης. Παρατηρούμε ότι στην κοινή γραμμική περιοχή η αντίσταση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, ενώ, παρόλο που η αποκόλληση ξεκινά νωρίτερα για τη διαμόρφωση με λωρίδα αποκόλλησης, η αντίσταση παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.

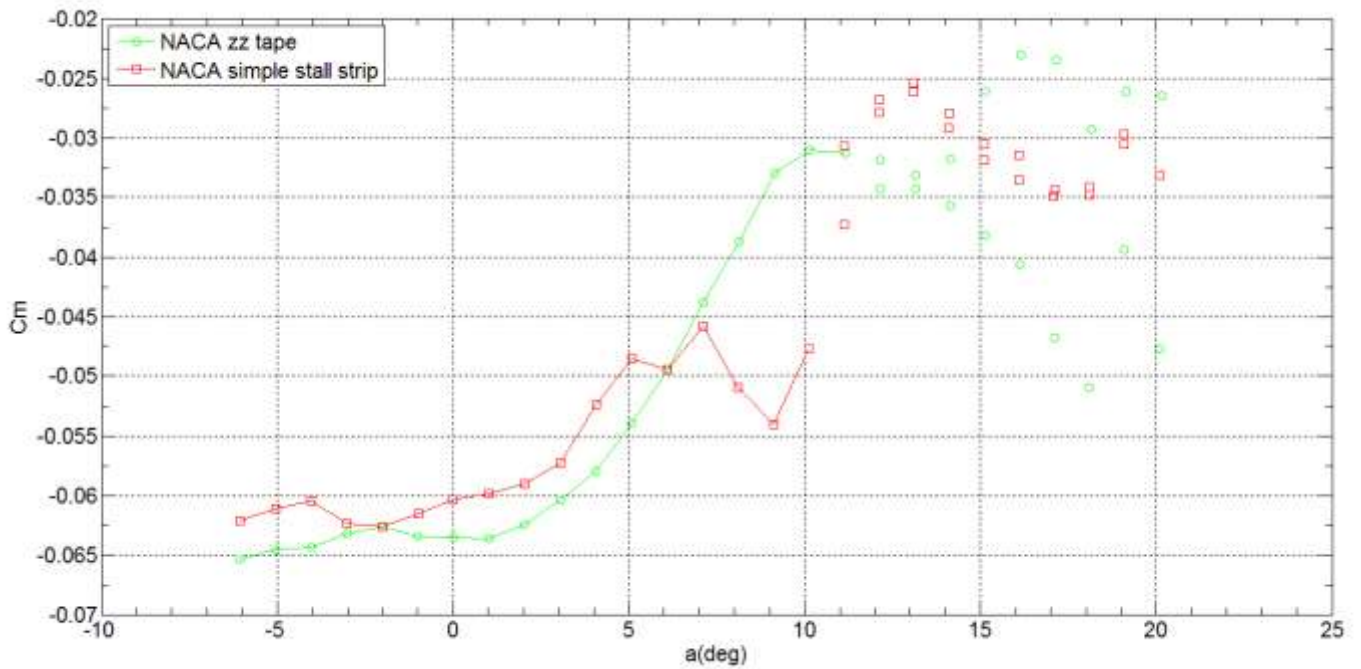
Οι συντελεστές ροπής, όπως φαίνονται στο διάγραμμα 3.i.15 παρουσιάζουν αρχικά παρόμοια συμπεριφορά, ενώ στη συνέχεια ο συντελεστής του stall strip παρουσιάζει ένα «άλμα» στις 7° μέχρι τις 9° . Μετά το «άλμα» επανέρχεται στα ίδια επίπεδα με τη ροή με εξαναγκασμένη μετάβαση, παρουσιάζοντας όμως μικρότερη αστάθεια.



Διάγραμμα 3.i.13- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$



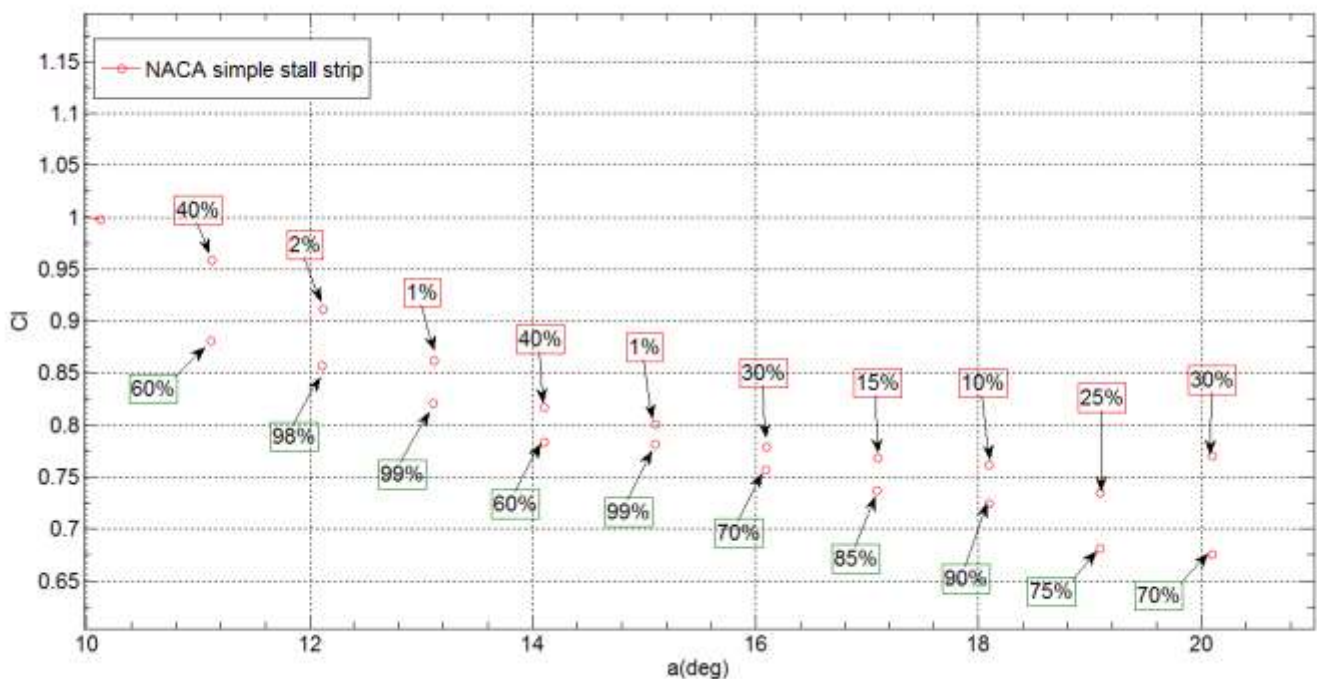
Διάγραμμα 3.ι.14- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$



Διάγραμμα 3.ι.15- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$

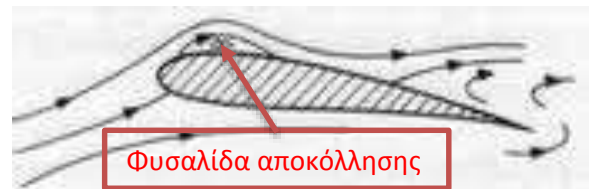
Συνολικά, από τη ροή με εξαναγκασμένη μετάβαση σε αυτήν με λωρίδα αποκόλλησης, ο συντελεστής άνωσης μειώνεται ελαφρώς, η γωνία μέγιστης άνωσης, αλλά και η αντίσταση καθώς και η αστάθεια στις μεγάλες γωνίες μειώνονται.

Στο διάγραμμα 3.i.16 βλέπουμε την ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων της ροής. Παρατηρούμε ότι συνολικά, οι καταστάσεις χαμηλής άνωσης εμφανίζονται συχνότερα σε σχέση με τις υψηλής άνωσης και ότι η διαφορά του συντελεστή άνωσης μεταξύ των καταστάσεων είναι μικρότερη.



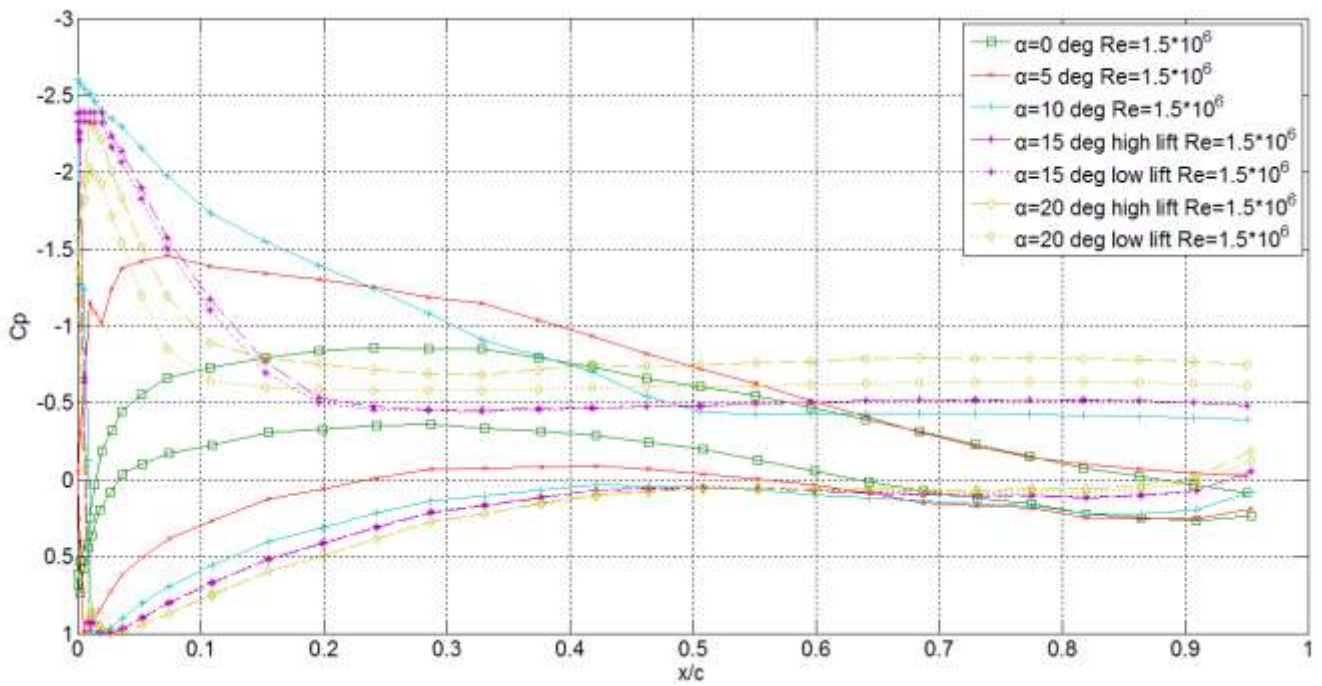
Διάγραμμα 3.i.16- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 12 ως 20 μοίρες NACA A.Λ.Α.

Η κατανομή των πιέσεων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.i.18, εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο, όπως και στις δύο προηγούμενες διαμορφώσεις. Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε είναι στην κατανομή των πιέσεων για τις 15 μοίρες η γραμμική περιοχή που αναπτύσσεται από την ακμή προσβολής ως το 3% περίπου της χορδής στην πλευρά των υποπιέσεων. Οι σταθερές πιέσεις στην περιοχή αυτή υποδεικνύουν

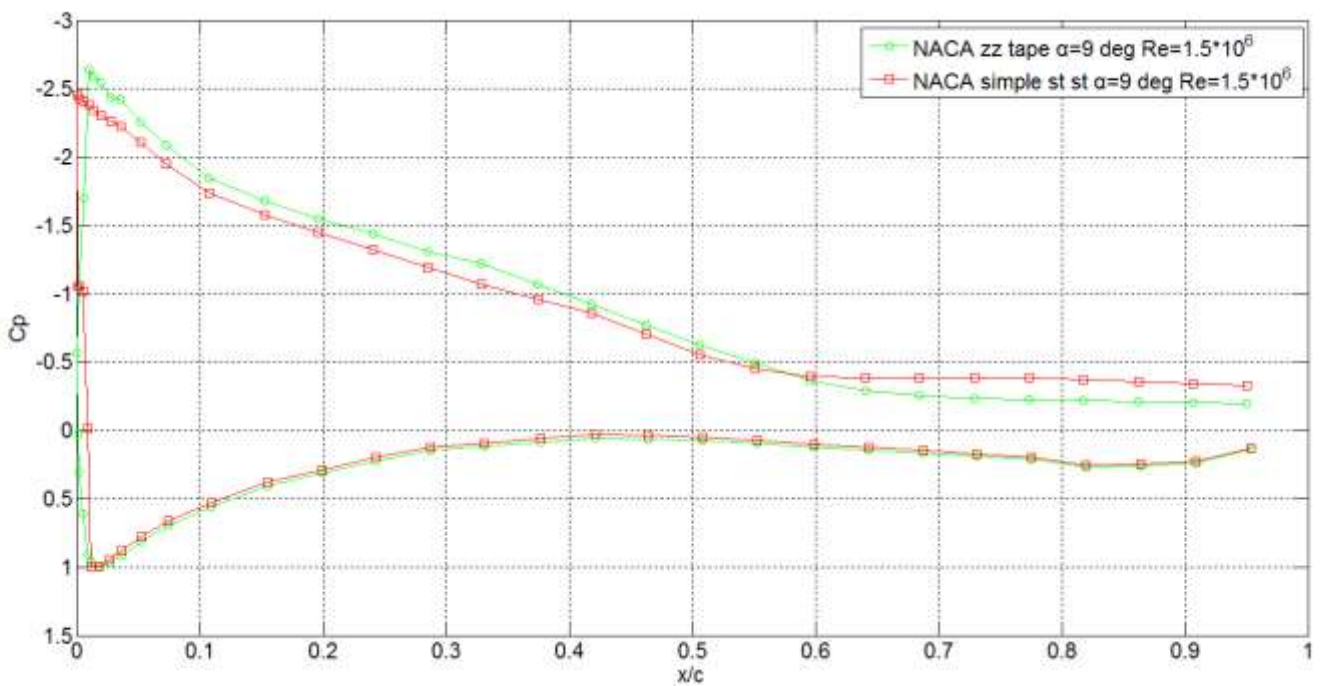


Εικόνα 3.i.1 - Φυσαλίδα αποκόλλησης

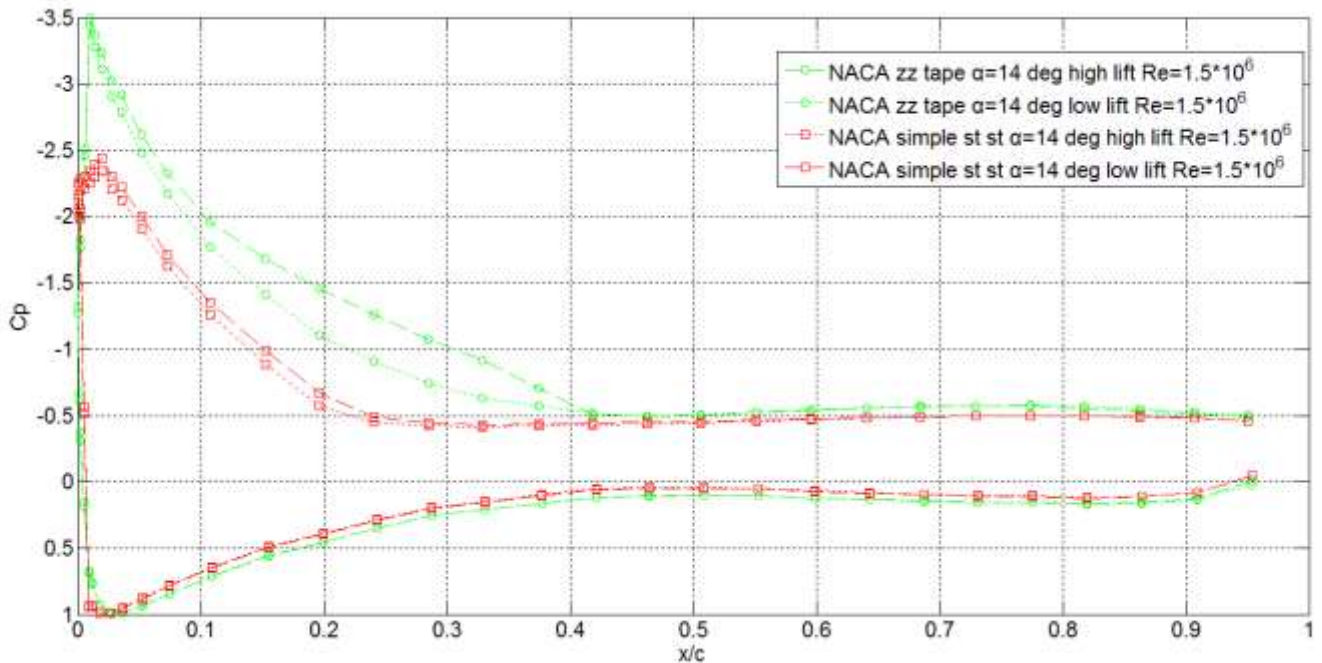
αποκόλληση, η οποία, στη συγκεκριμένη περίπτωση ενδεχομένως να οφείλεται στη δημιουργία φυσαλίδας αποκόλλησης (separation bubble, Εικόνα 3.i.1), λόγω της παρουσίας της λωρίδας αποκόλλησης, σε συνδυασμό με τη μεγάλη γωνία πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 3.ι.17- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° $Re=1.5e6$ NACA Α.Λ.Α.



Διάγραμμα 3.ι.18- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=9^\circ$, $Re=1.5e6$



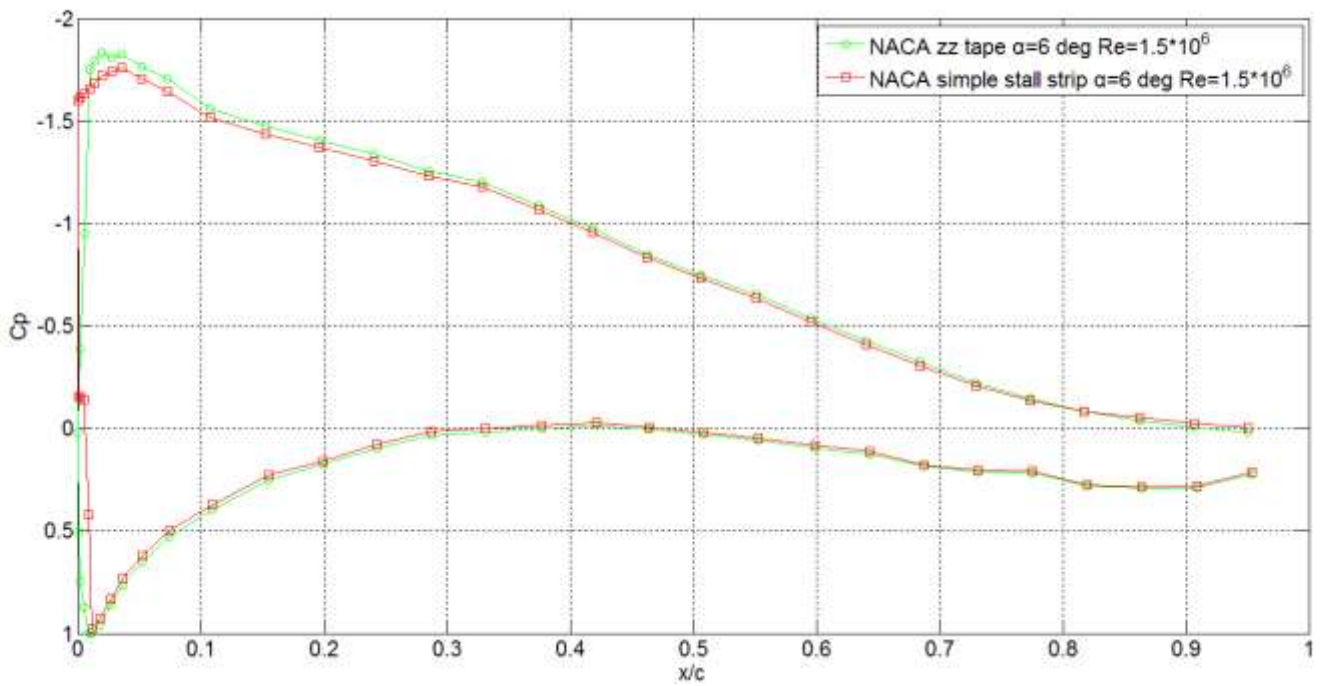
Διάγραμμα 3.i.19- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=9^\circ$, $Re=1.5e6$

Στα διαγράμματα 3.i.18 και 3.i.19 συγκρίνονται οι κατανομές πίεσης των δύο διαμορφώσεων για τις γωνίες μέγιστης άνωσης.

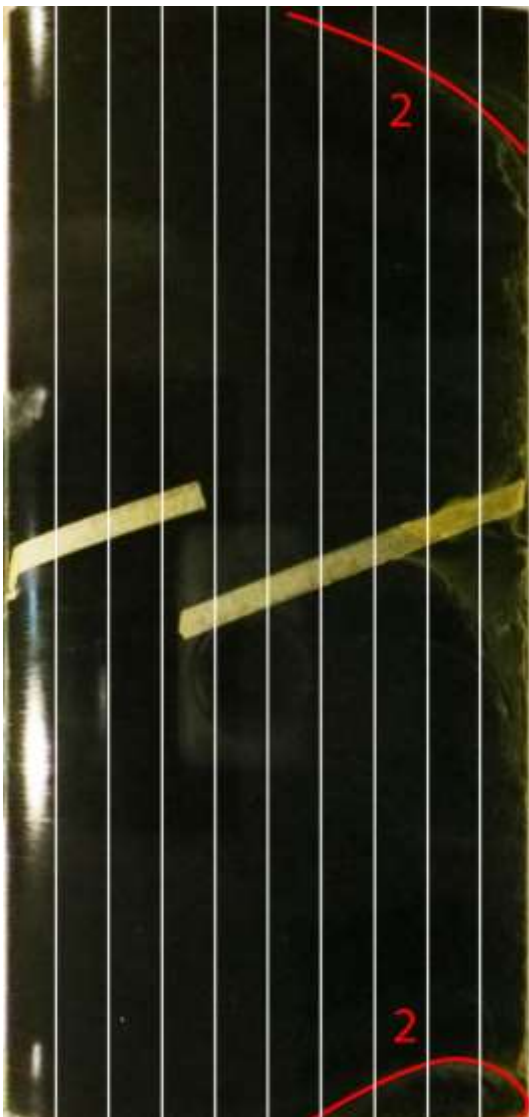
Στο πρώτο διάγραμμα δεν παρατηρούμε μεγάλες διαφορές μεταξύ των κατανομών, μόνο ότι στην περίπτωση της λωρίδας αποκόλλησης η περιοχή πλησίον της μέγιστης υποπίεσης είναι χαμηλότερα, ενώ η αποκόλληση είναι 5% της χορδής πιο μπροστά.

Στο δεύτερο διάγραμμα οι πλευρές πίεσης σχεδόν ταυτίζονται, ενώ και στην πλευρά υποπίεσης, από το 45% ως και το 95% της χορδής έχουμε μεγάλη ομοιότητα λόγω του φαινομένου της αποκόλλησης. Η έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διαγραμμάτων εντοπίζεται στην πλευρά υποπίεσης μέχρι το 45% της χορδής, όπου λόγω της εντονότερης αποκόλλησης στην περίπτωση του stall strip (ανέρχεται στο 30%), έχουμε και μικρότερες υποπίεσεις, οι οποίες οδηγούν σε χαμηλότερη άνωση.

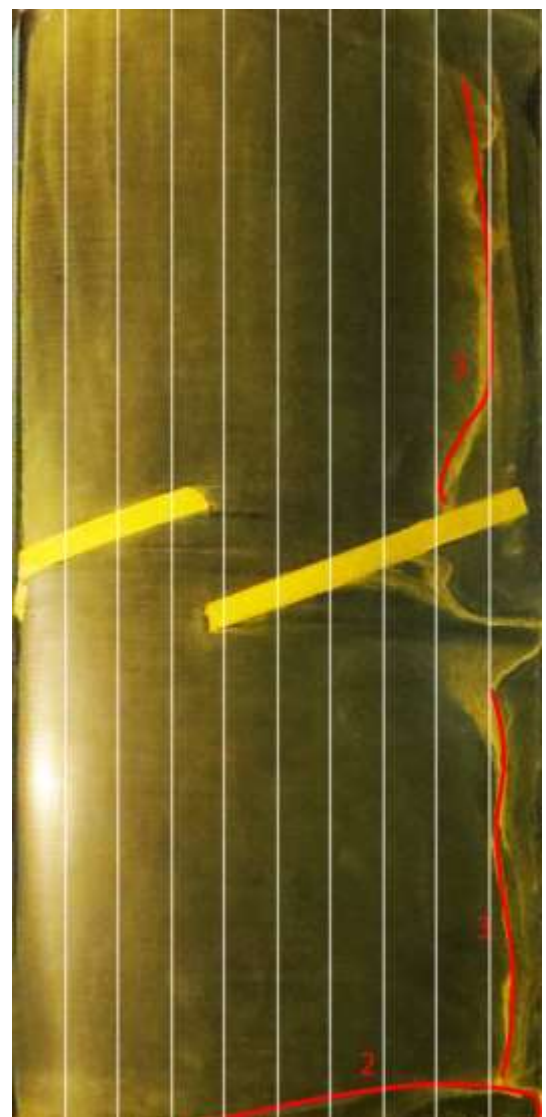
Στο σημείο αυτό θα παραθέσουμε και τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης της ροής (flow visualization/flow-viz) παράλληλα με τις αντίστοιχες κατανομές πίεσης για τις δύο διαμορφώσεις. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για γωνία 6° , ως μία κοντά στη γραμμική περιοχή, και για γωνίες 11° και 14° , ως γωνίες στις οποίες έχουμε τις μέγιστες τιμές του συντελεστή άνωσης για τη ροή με λωρίδα αποκόλλησης και τη ροή με εξαναγκασμένη μετάβαση αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3.i.20-Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=6^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.i.2-Flow-viz NACA Εξ.Μ. 6° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



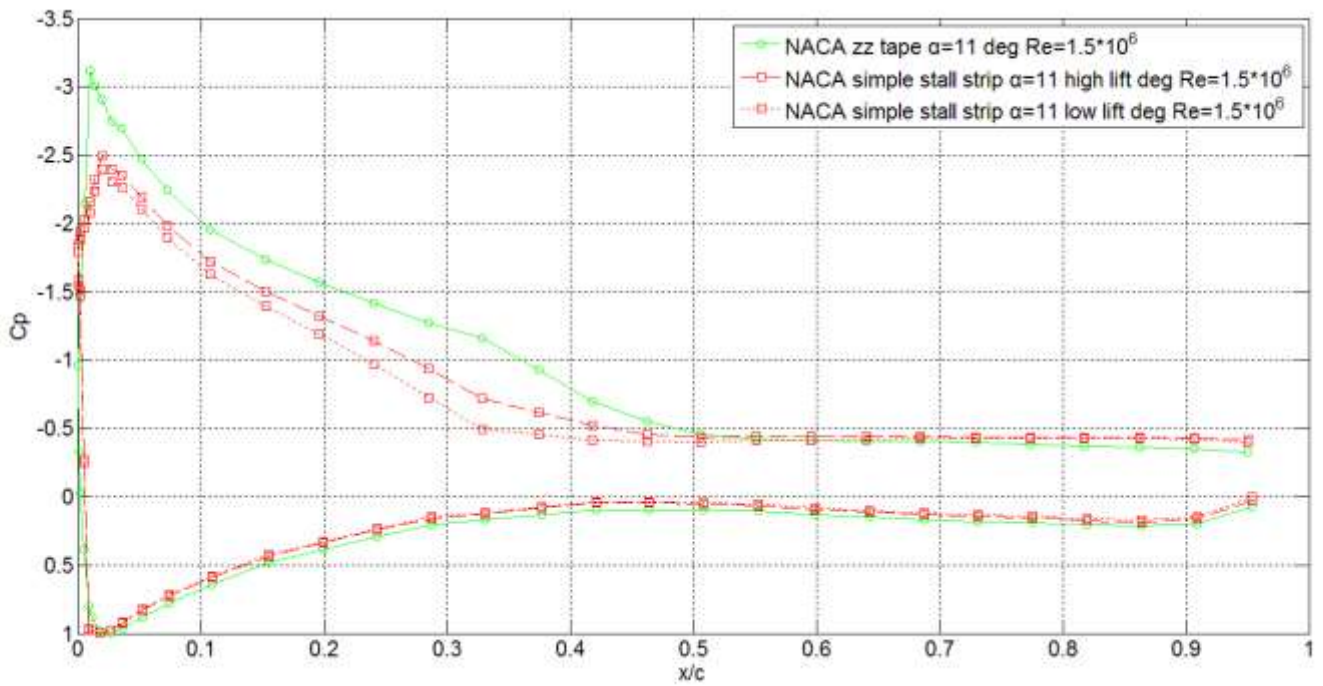
Εικόνα 3.i.3- Flow-viz NACA Α.Λ.Α. 6° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής

Στο διάγραμμα 3.i.20 συγκρίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία πρόσπτωσης 6 μοίρες. Οι εικόνες 3.i.2 και 3.i.3 αποτυπώνουν τη ροή για τη συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Στην εικόνα 3.i.2 της εξαναγκασμένης μετάβασης παρατηρούμε αποκόλληση της ροής μόνο στην ένωση με το πάνελ (καμπύλη 2, corner flow), ενώ στην εικόνα 3.i.3 παρατηρούμε και αποκόλληση στο ακροπερύγιο κατά το εκπέτασμα της πτέρυγας η οποία ανέρχεται στο 90% της χορδής. Στην περιοχή των οπών πίεσης η αποκόλληση γίνεται στο 80%, αλλά αυτό οφείλεται στις χαρτοταινίες που καλύπτουν τις οπές.

Στο διάγραμμα 3.i.21 φαίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία 11 μοιρών. Στην εικόνα 3.i.4 που αντιστοιχεί στην εξαναγκασμένη μετάβαση βλέπουμε αποκόλληση στην περιοχή του πάνελ (2) και αποκόλληση στο χείλος εκφυγής που φτάνει στο 50% της χορδής, γεγονός που συμφωνεί με το διάγραμμα κατανομής των πιέσεων. Στην εικόνα 3.i.5 εμφανίζονται δύο Stall Cells εκατέρωθεν της περιοχής μέτρησης, με αποτέλεσμα η αποκόλληση να μην ξεπερνά το ~65%, τη στιγμή που σύμφωνα με την κατανομή των πιέσεων η αποκόλληση είναι περίπου στο 40%. Εκτιμάται ότι αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σχηματίστηκε ένα stall cell στο κέντρο της πτέρυγας.

Στο διάγραμμα 3.i.22 φαίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία 14°. Στην εικόνα 3.i.6 βλέπουμε τη ροή πάνω στην πτέρυγα για την εξαναγκασμένη μετάβαση. Και εδώ παρατηρούμε μια περιοχή ανακυκλοφορίας κοντά στο πάνελ (2) ενώ η αποκόλληση ξεκινά από το χείλος εκφυγής και φτάνει μέχρι το 40% της χορδής, συμφωνώντας με την κατανομή πιέσεων. Στην εικόνα 3.i.7 η αποκόλληση ανέρχεται στο 30% της χορδής στην περιοχή των μετρήσεων.

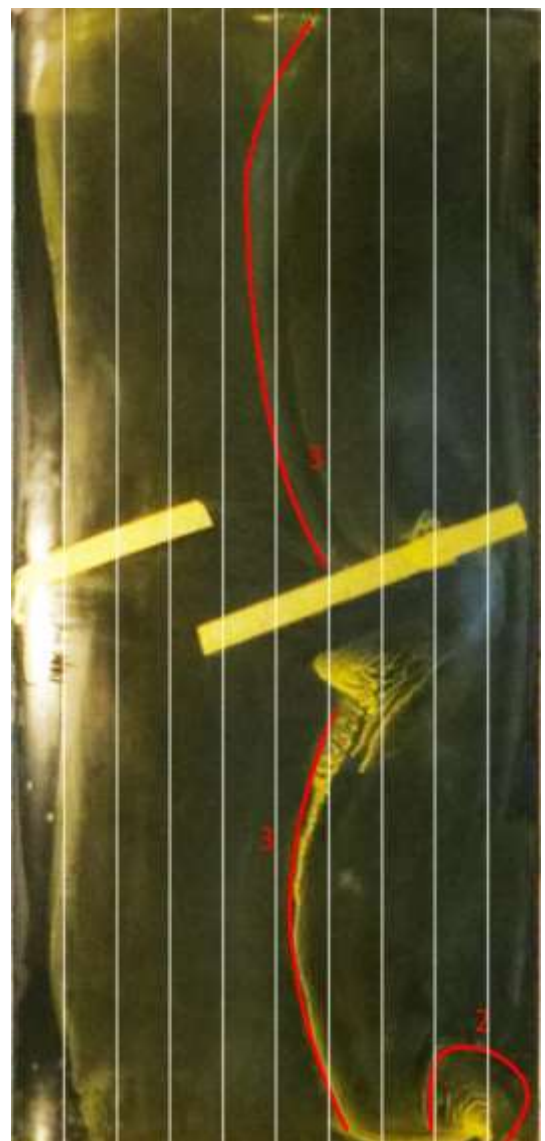
Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι λόγω των stall cells που σχηματίζονται (4), και τα οποία είναι ασταθή, οι εικόνες από την οπτικοποίηση της ροής δεν παραμένουν πάντα αμετάβλητες στην πάροδο του χρόνου.



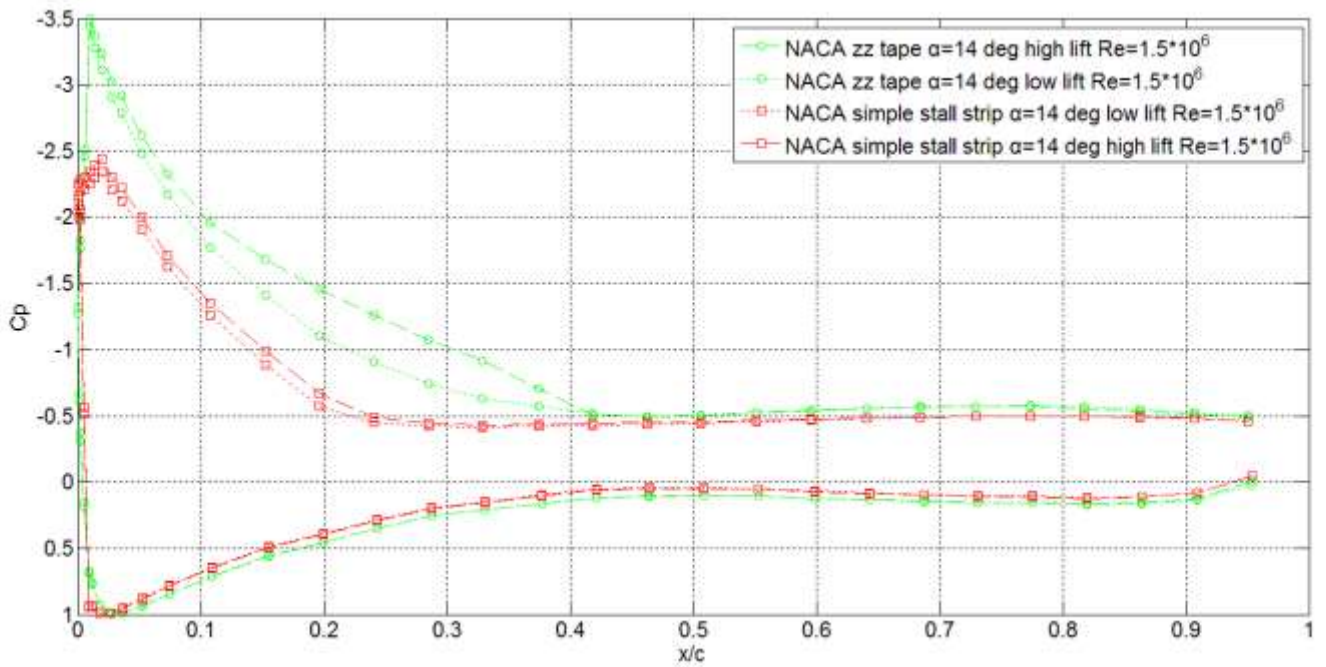
Διάγραμμα 3.ι.21- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=11^\circ$, $Re=1.5e6$



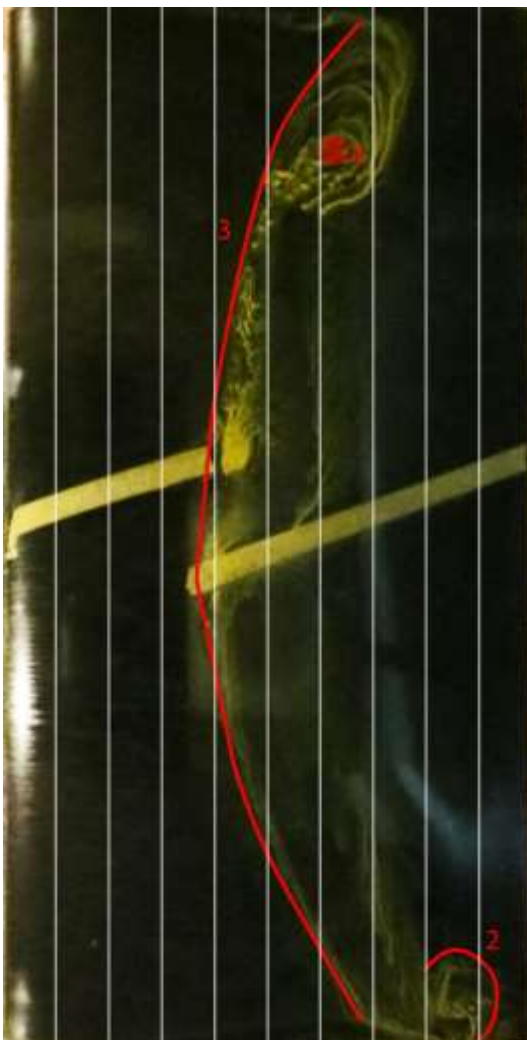
Εικόνα 3.ι.4- Flow-viz NACA Εξ.Μ. 11° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Εικόνα 3.ι.5- Flow-viz NACA Α.Λ.Α. 11° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Διάγραμμα 3.i.22- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ Εξ.Μ. και Α.Λ.Α. $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.i.6- Flow-viz NACA Εξ.Μ. 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



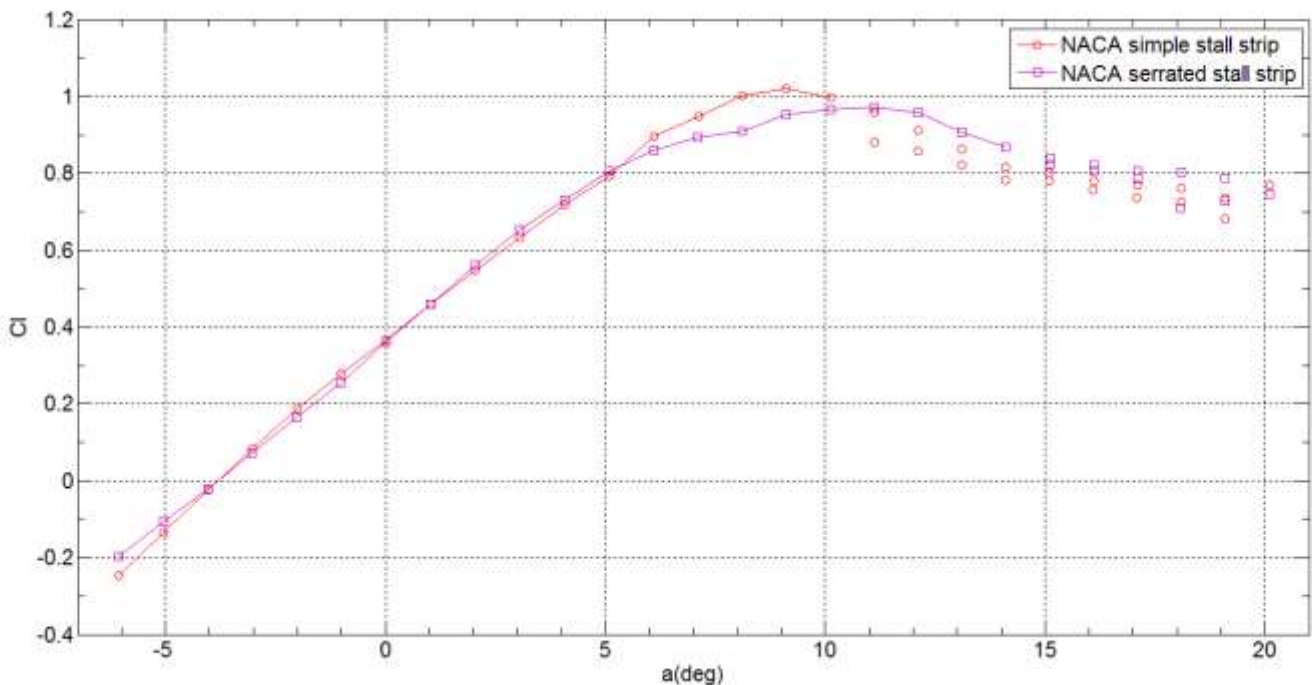
Εικόνα 3.i.7- Flow-viz NACA Α.Λ.Α. 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής

Σύγκριση απλής και οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης

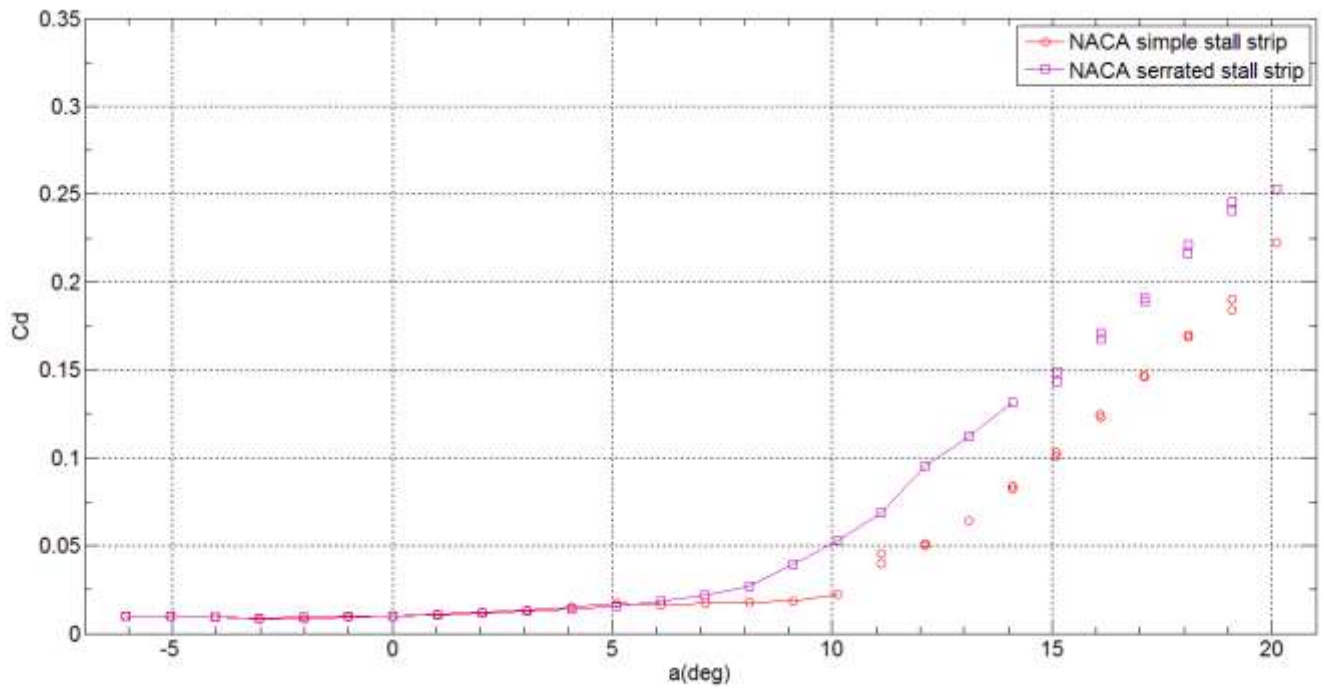
Στο διάγραμμα 3.i.23 γίνεται η σύγκριση των συντελεστών άνωσης για την πτέρυγα με simple stall strip και για την πτέρυγα με serrated stall strip. Οι δύο καμπύλες είναι πολύ κοντά στη γραμμική περιοχή, όμως η κλίση της καμπύλης που αντιστοιχεί στην οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης μειώνεται από τις 5° και φτάνει σε μέγιστη τιμή 0.97 στις 11°, δηλαδή μειώνεται κατά 5% σε σχέση με το μέγιστο συντελεστή άνωσης για την απλή λωρίδα αποκόλλησης. Μετά την απώλεια στήριξης η αστάθεια λόγω φαινομένων αποκόλλησης εμφανίζεται μετά τις 14° σε σχέση με τις 10° για την απλή λωρίδα αποκόλλησης, ενώ και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή άνωσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερες.

Στο διάγραμμα 3.i.24 παρουσιάζονται οι συντελεστές αντίστασης για τις δύο διαμορφώσεις. Οι δύο καμπύλες ταυτίζονται μέχρι τις 5 μοίρες, ενώ στη συνέχεια η αντίσταση του serrated stall strip αυξάνει σημαντικά έναντι της αντίστασης του simple stall strip.

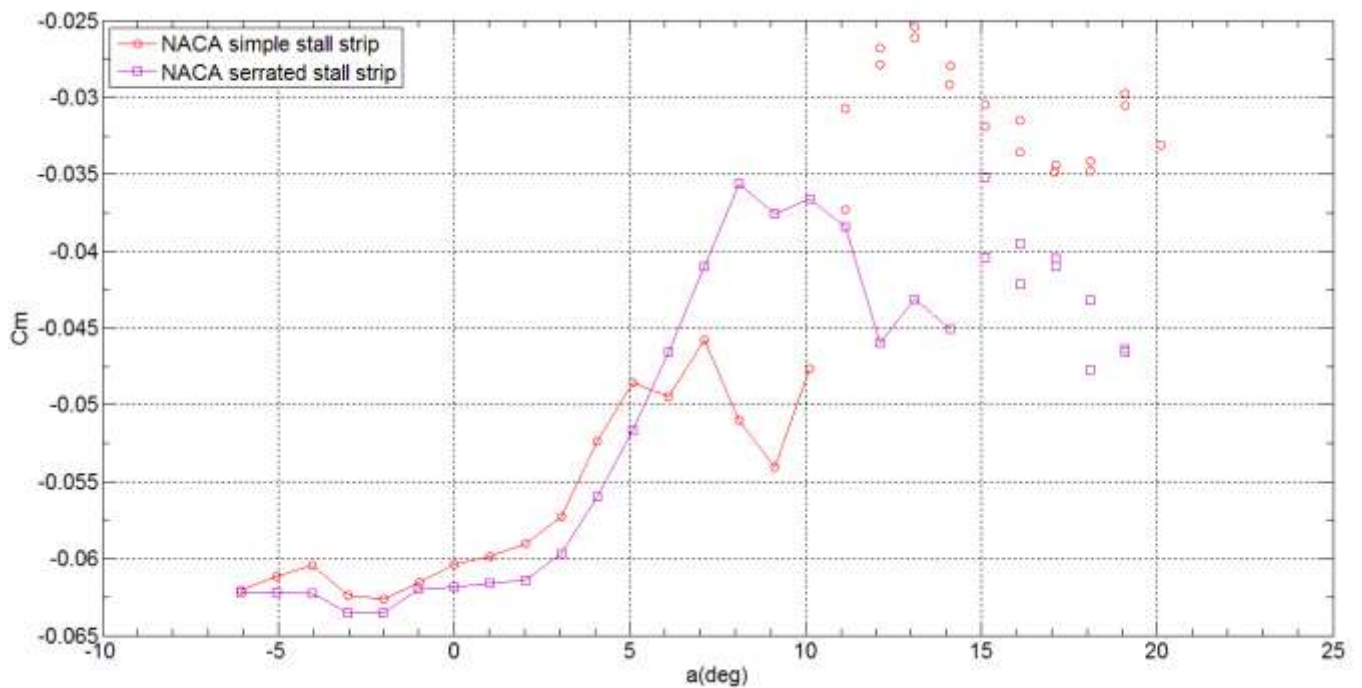
Οι δύο καμπύλες των συντελεστών ροπής των δύο διαμορφώσεων, όπως αυτές φαίνονται στο διάγραμμα 3.i.25 παρουσιάζουν και εδώ μέχρι τις 5 μοίρες παρόμοια συμπεριφορά, αλλά μετά η καμπύλη που αντιστοιχεί στο serrated stall strip παραμένει σε πιο αρνητικά επίπεδα.



Διάγραμμα 3.i.23- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ NACA A.Λ.Α. και O.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$



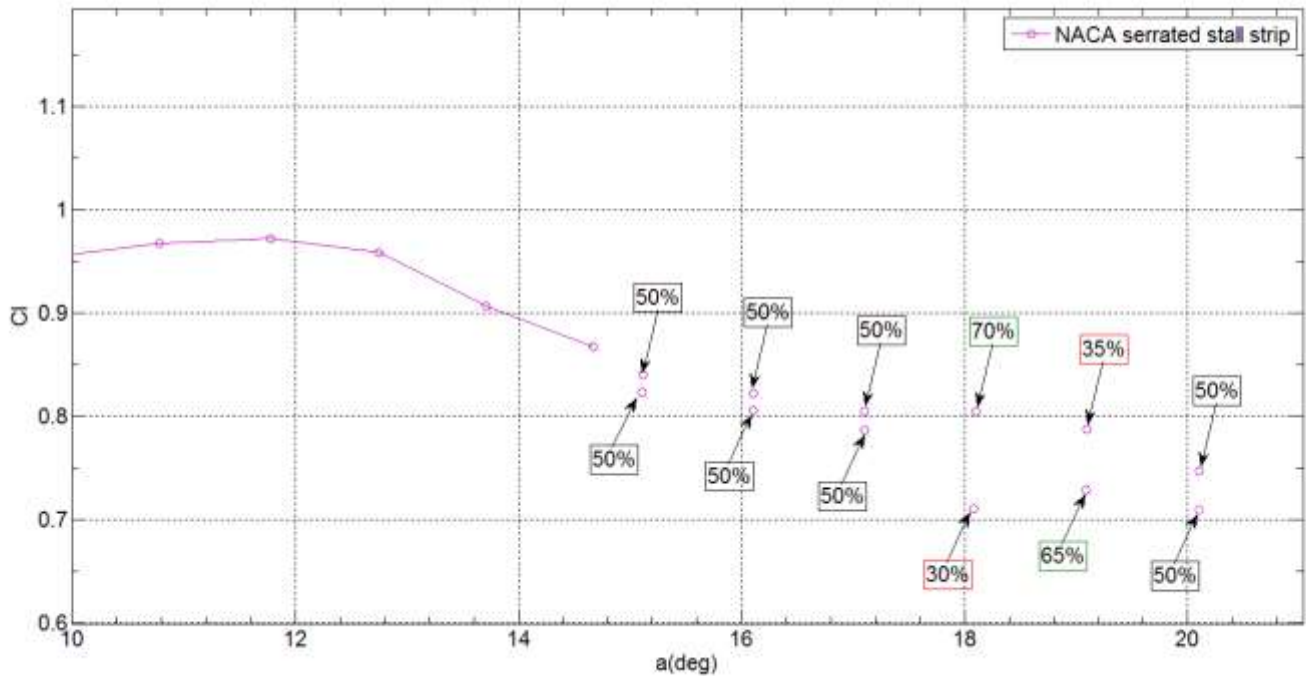
Διάγραμμα 3.i.24- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$



Διάγραμμα 3.i.25- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. σε $Re=1.5e6$

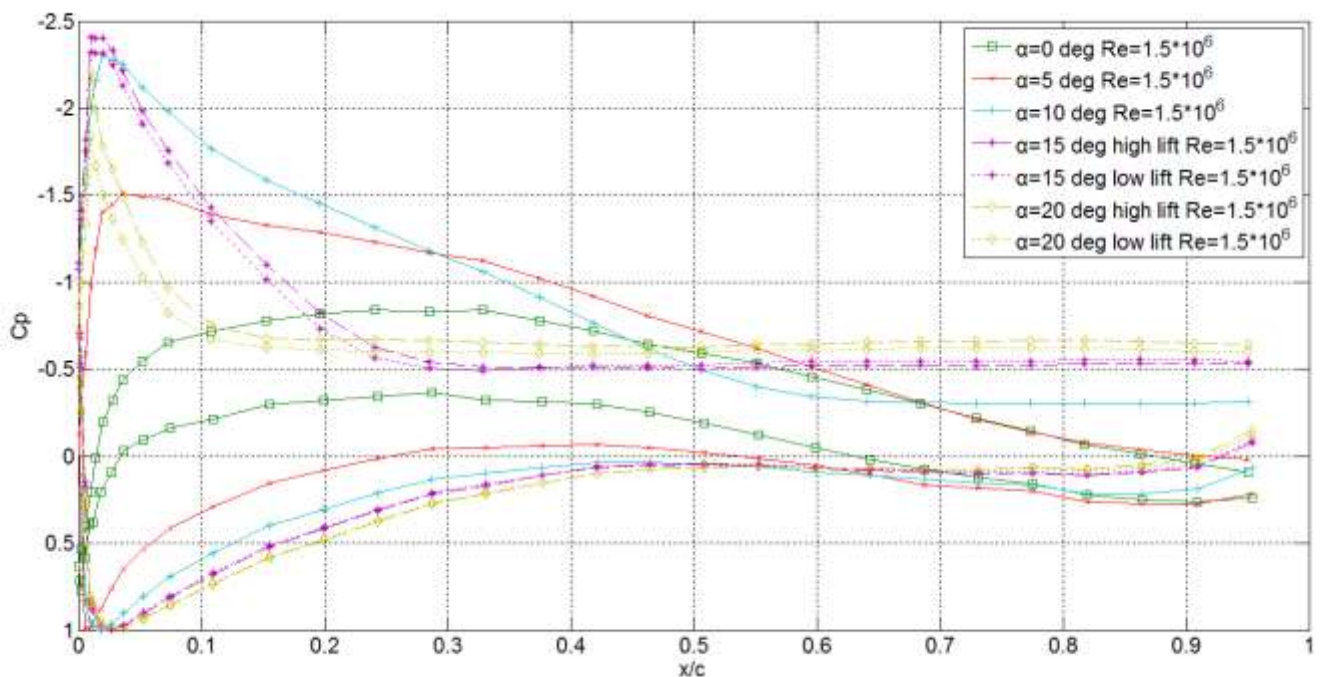
Η δοκιμή της οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης έδειξε θετικά στοιχεία (μείωση της αστάθειας με μικρή αύξηση του συντελεστή αντίστασης και μείωση του συντελεστή άνωσης) και είναι πιθανό με βελτιστοποίηση της γεωμετρίας να προκύψουν αποτελέσματα συνολικά καλύτερα από την απλή λωρίδα αποκόλλησης.

Στο διάγραμμα 3.i.26 φαίνονται οι ποσοστιαίες χρονικές διάρκειες των δύο διακριτών καταστάσεων για την περίπτωση της οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης.



Διάγραμμα 3.i.26- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 15 ως 20° NACA Ο.Λ.Α.

Στο διάγραμμα 3.i.27 οι κατανομές των πιέσεων εξελίσσονται με παρόμοιο τρόπο όπως και στις προηγούμενες διαμορφώσεις. Και εδώ, όπως και στην περίπτωση της απλής λωρίδας αποκόλλησης παρατηρούμε μια γραμμική περιοχή γύρω από τη μέγιστη υποπίεση, το οποίο θα μπορούσε να σημαίνει σχηματισμός φυσαλίδας αποκόλλησης.



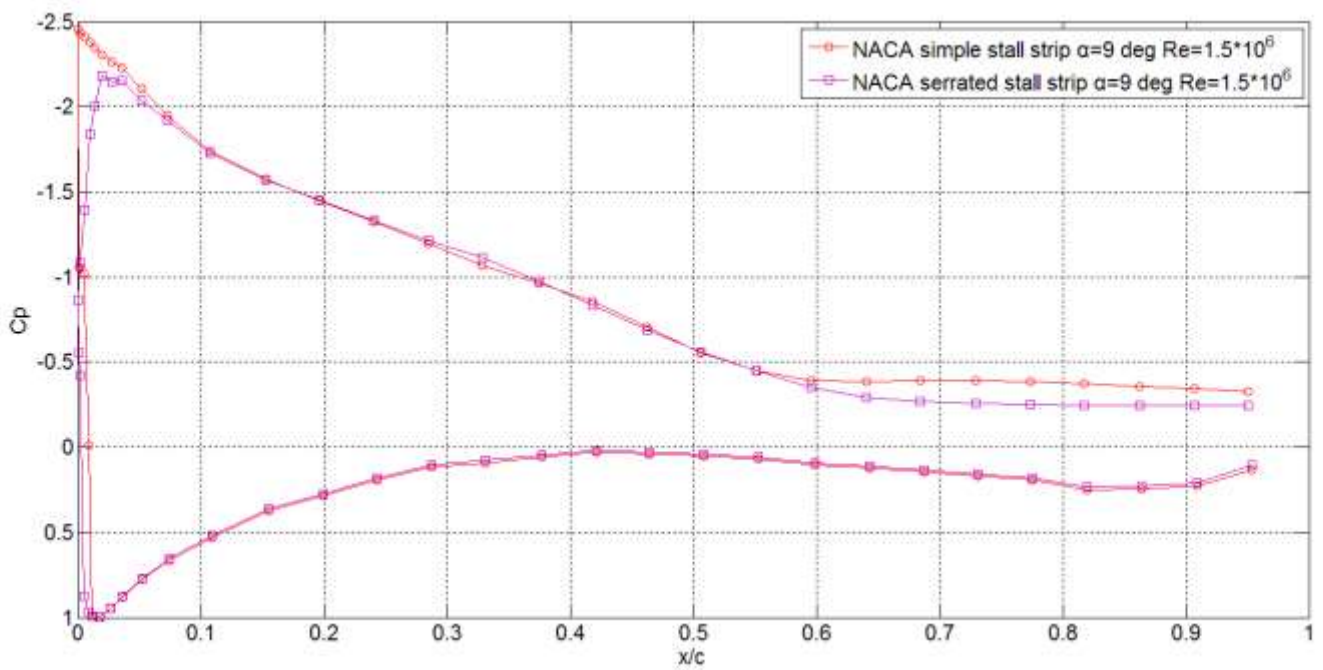
Διάγραμμα 3.i.27- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° Re=1.5e6 NACA O.L.A.

Στα διαγράμματα 3.i.28 και 3.i.29 συγκρίνονται οι κατανομές πίεσης των δύο διαμορφώσεων για τις γωνίες μέγιστης άνωσης ($\alpha=9^\circ$ για την απλή λωρίδα αποκόλλησης και $\alpha=11^\circ$ για την οδοντωτή).

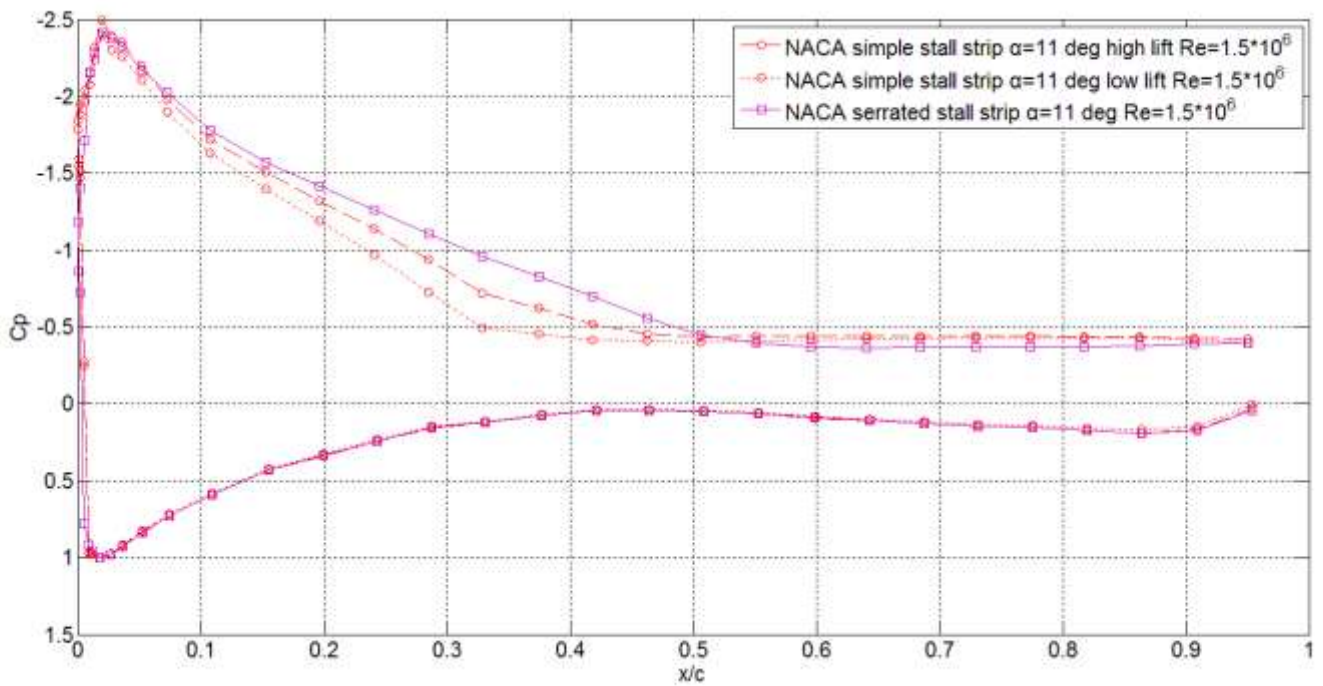
Στο πρώτο διάγραμμα που αντιστοιχεί σε γωνία πρόσπτωσης 9° , παρατηρούμε παρόμοια κατανομή των πιέσεων, με μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση της απλής λωρίδας αποκόλλησης η μέγιστη υποπίεση αλλά και οι πιέσεις στην αποκόλληση είναι μικρότερες.

Στο δεύτερο διάγραμμα που αντιστοιχεί σε γωνία 11 μοιρών παρατηρούμε εντονότερη αποκόλληση στην περίπτωση της απλής λωρίδας αποκόλλησης, η οποία φτάνει στο 40% της χορδής σε αντιπαραβολή με την οδοντωτή στο οποίο φτάνει στο 55%.

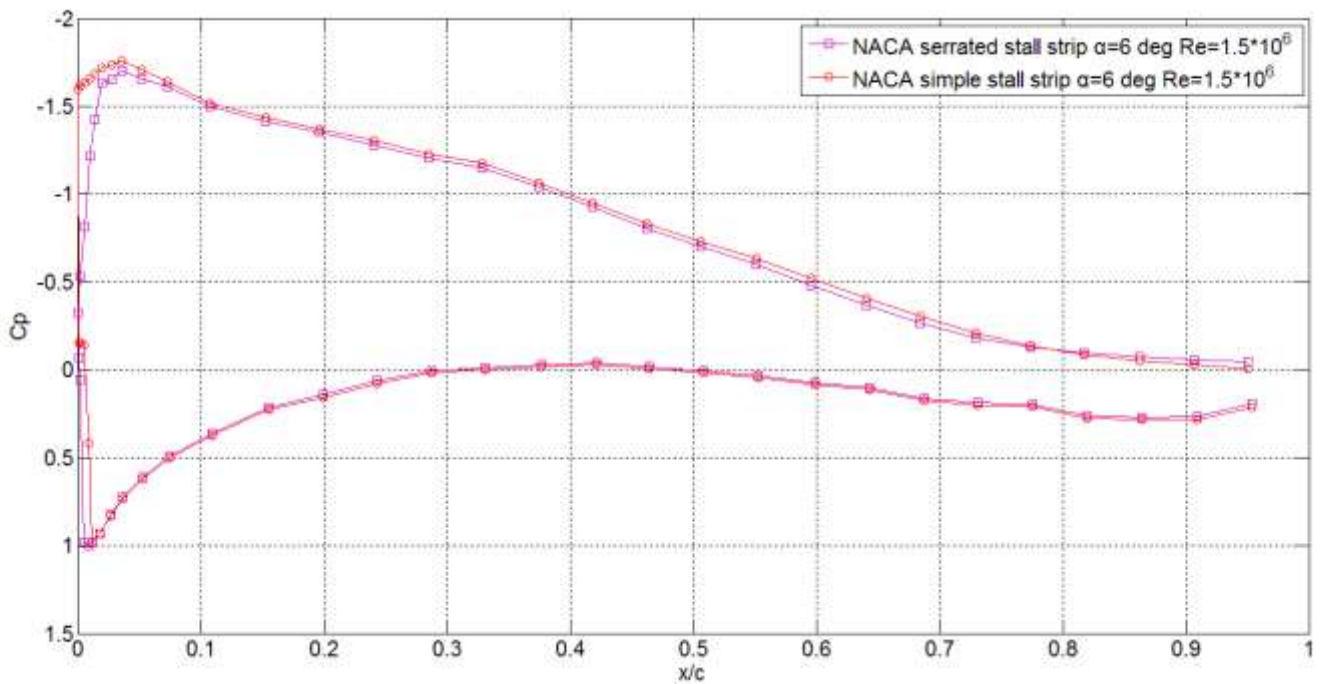
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης της ροής και η σύγκριση αυτών για τις δύο διαμορφώσεις για γωνίες πρόσπτωσης 6, 9, 11 και 14 μοίρες, οι οποίες αντιστοιχούν σε μη αποκολλημένη ροή, στη γωνία μέγιστης άνωσης για τη διαμόρφωση με απλή λωρίδα αποκόλλησης, στη γωνία μέγιστης άνωσης για την οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης και σε έντονα αποκολλημένη ροή, αντίστοιχα.



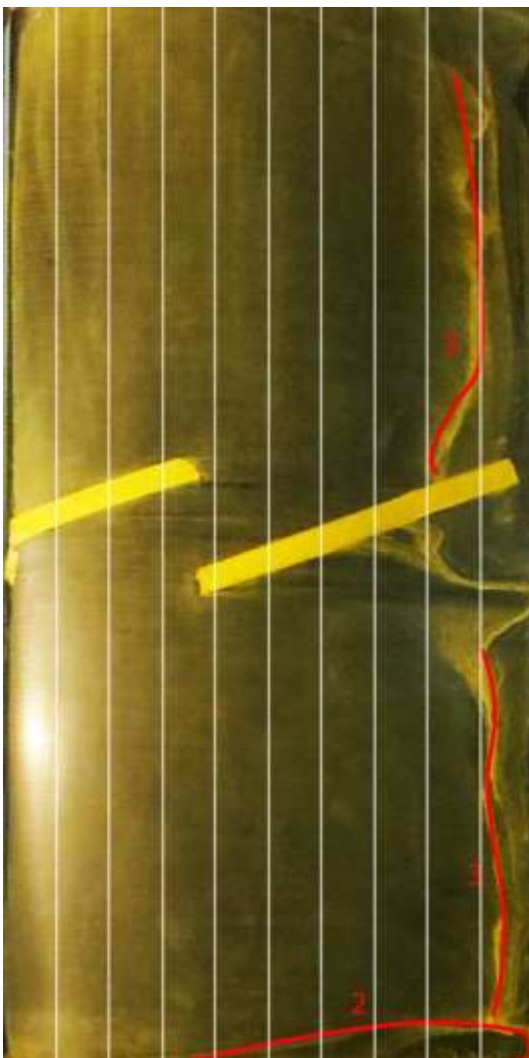
Διάγραμμα 3.i.28- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α και Ο.Λ.Α $\alpha = 9^\circ$, $Re = 1.5e6$



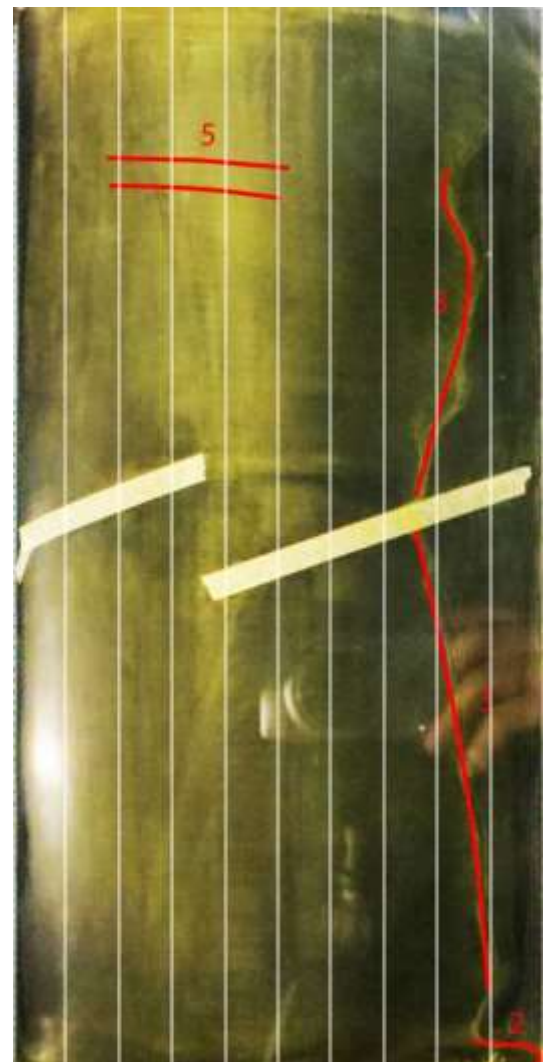
Διάγραμμα 3.i.29- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α και Ο.Λ.Α. $\alpha = 11^\circ$, $Re = 1.5e6$



Διάγραμμα 3.i.30- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. $\alpha=6^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.i.8- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 6° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



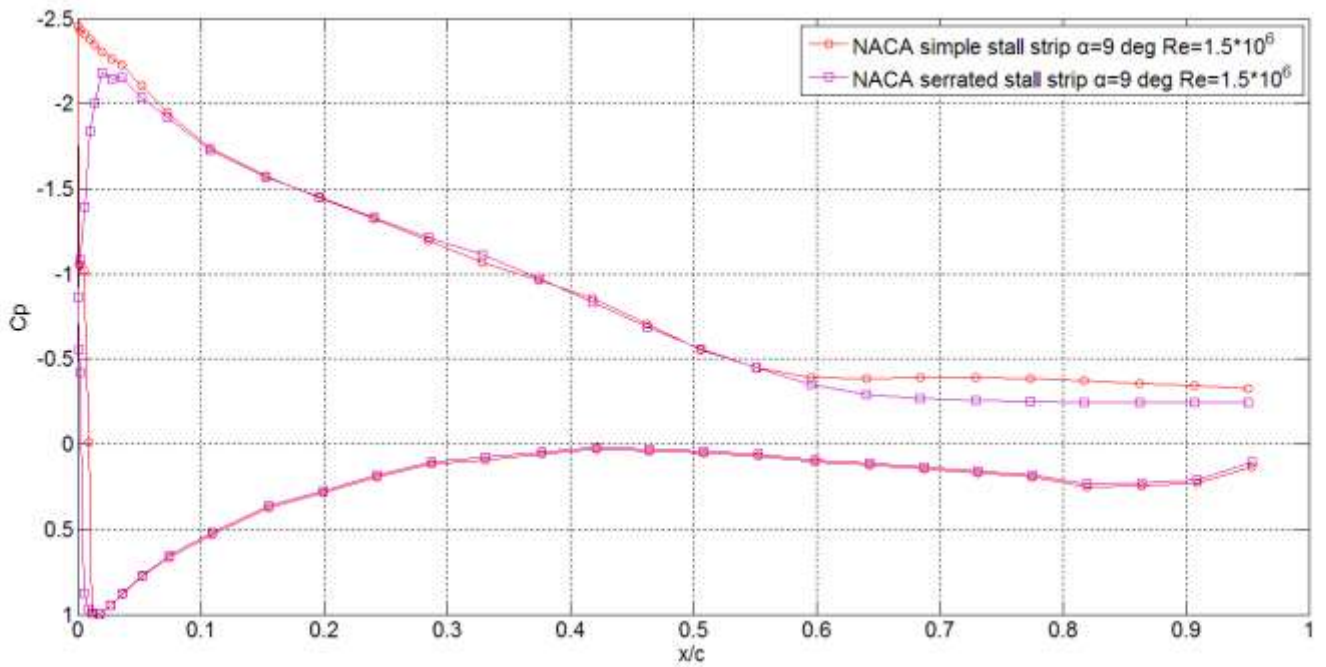
Εικόνα 3.i.9- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 6° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής

Στο διάγραμμα 3.i.30 συγκρίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία πρόσπτωσης 6° . Οι εικόνες 3.i.8 και 3.i.9 αποτυπώνουν τη ροή για τη συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Και στις δύο εικόνες παρατηρούμε αποκόλληση στην περιοχή του πάνελ (2) αλλά και αποκόλληση στο ακροπτερύγιο κατά το εκπέτασμα της πτέρυγας, η οποία φτάνει στο 90% της χορδής. Στην εικόνα 3.i.8 παρατηρούμε επίσης το αποτύπωμα των στροβίλων που σχηματίζονται λόγω του της οδοντωτής λωρίδας αποκόλλησης (5).

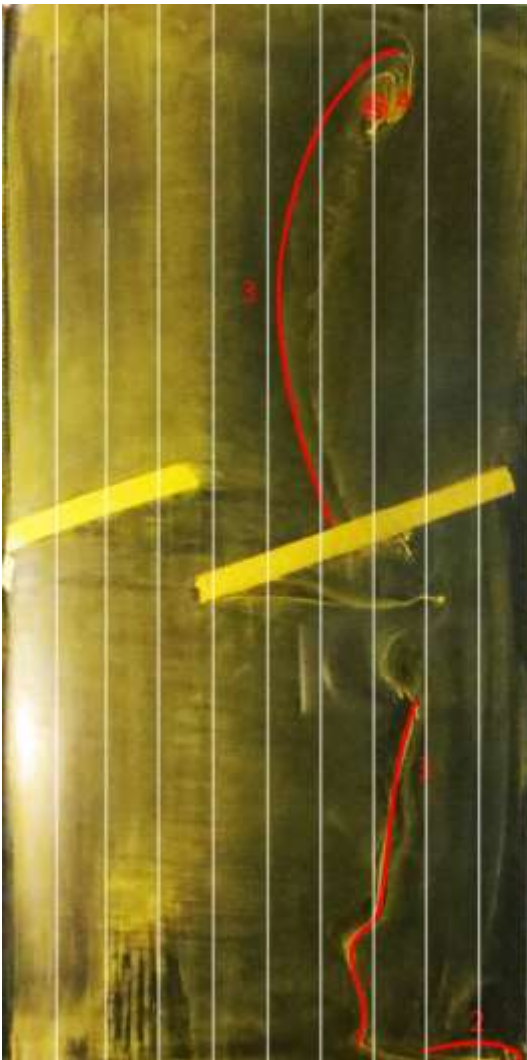
Στο διάγραμμα 3.i.31 φαίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία 9° . Στην εικόνα 3.i.10 που αντιστοιχεί στη διαμόρφωση με απλή λωρίδα αποκόλλησης βλέπουμε αποκόλληση στην περιοχή του πάνελ (2) και αποκόλληση από το χείλος εκφυγής μέχρι το 60% στο σημείο της μέτρησης, γεγονός που συμφωνεί με το διάγραμμα κατανομής των πιέσεων. Στην εικόνα 3.i.11 έχουμε παρόμοια εικόνα, μόνο που η αποκόλληση φτάνει ως το 65% της χορδής στην περιοχή των μετρήσεων. Ακόμη παρατηρούμε και εδώ τους στροβίλους που δημιουργούνται από την οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης (5). Και στις δύο εικόνες σχηματίζεται stall cell (4).

Στο διάγραμμα 3.i.32 φαίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία 11° . Στην εικόνα 3.i.12 βλέπουμε τη ροή πάνω στην πτέρυγα για την απλή λωρίδα αποκόλλησης. Και εδώ παρατηρούμε την αποκόλληση στην επαφή με το πάνελ (2), την αποκόλληση κατά το εκπέτασμα της πτέρυγας (3) που ανέρχεται στο 60% της χορδής, το οποίο δεν συμφωνεί με την κατανομή των πιέσεων, στην οποία η αποκόλληση φαίνεται να συμβαίνει στο 50%, λόγω διαφορετικής θέσης του stall cell (4), πιθανόν λόγω της χαρτοταινίας. Στην εικόνα 3.i.12 παρατηρούμε την αποκόλληση να συμβαίνει στο 65% της χορδής, γεγονός που συμφωνεί με την κατανομή των πιέσεων.

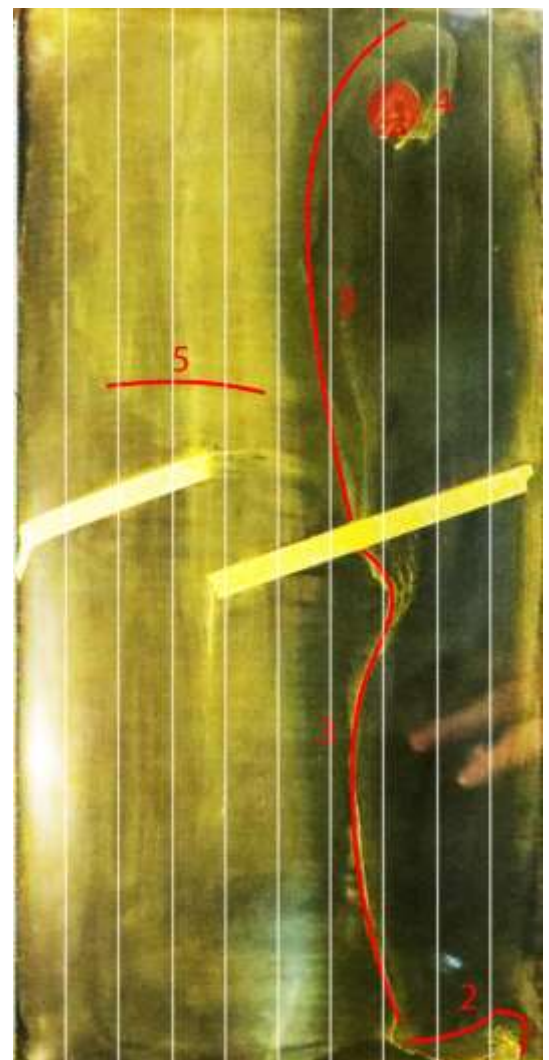
Στο διάγραμμα 3.i.33 παρουσιάζονται οι κατανομές των πιέσεων για γωνία πρόσπτωσης 14° . Στην εικόνα 3.i.14 παρατηρούμε την αποκόλληση στο πάνελ (2) αλλά και αποκόλληση κατά το εκπέτασμα η οποία φτάνει στο 30% της χορδής και συμφωνεί περίπου με την κατανομή των πιέσεων. Η εικόνα 3.i.15 είναι παρόμοια, με την αποκόλληση να φτάνει στο 35% της χορδής και να εντοπίζονται και εδώ τα ίχνη των στροβίλων από τις οδοντώσεις (5). Και στις δύο εικόνες παρατηρούμε ακόμα την μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη (1) και τα stall cells που σχηματίζονται (4).



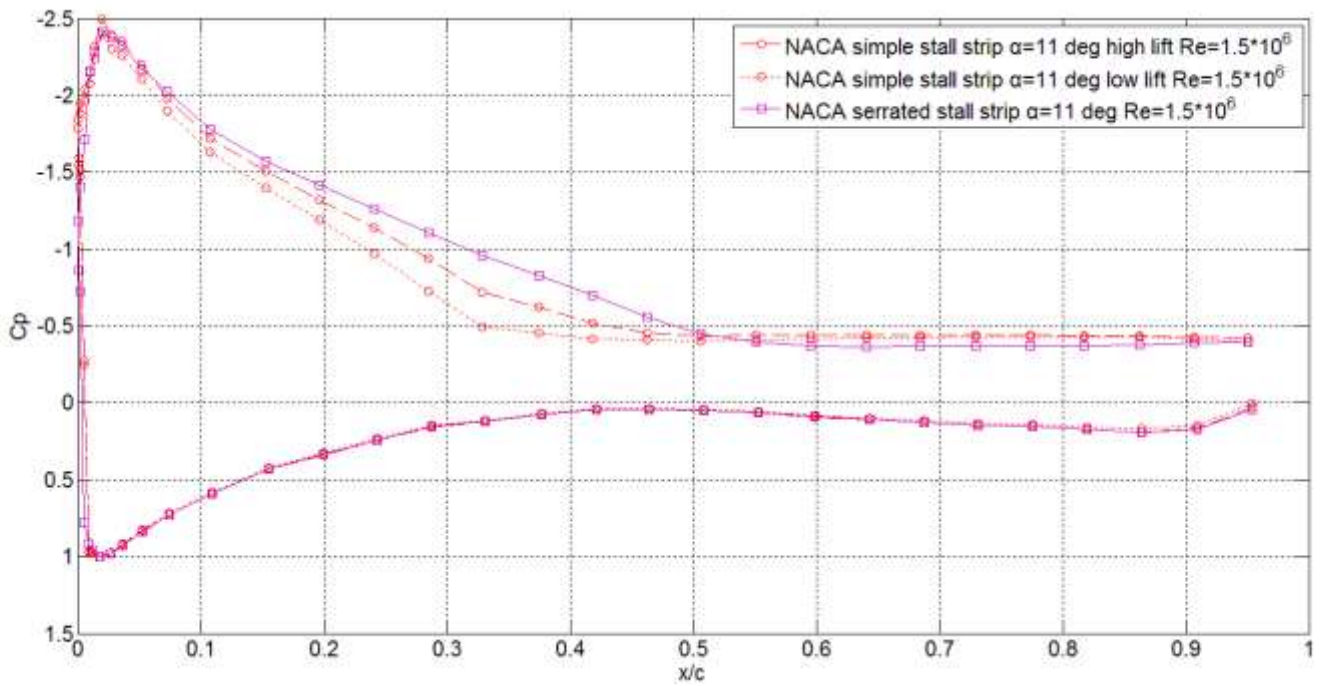
Διάγραμμα 3.ι.31- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. $\alpha=9^\circ$, $Re=1.5e6$



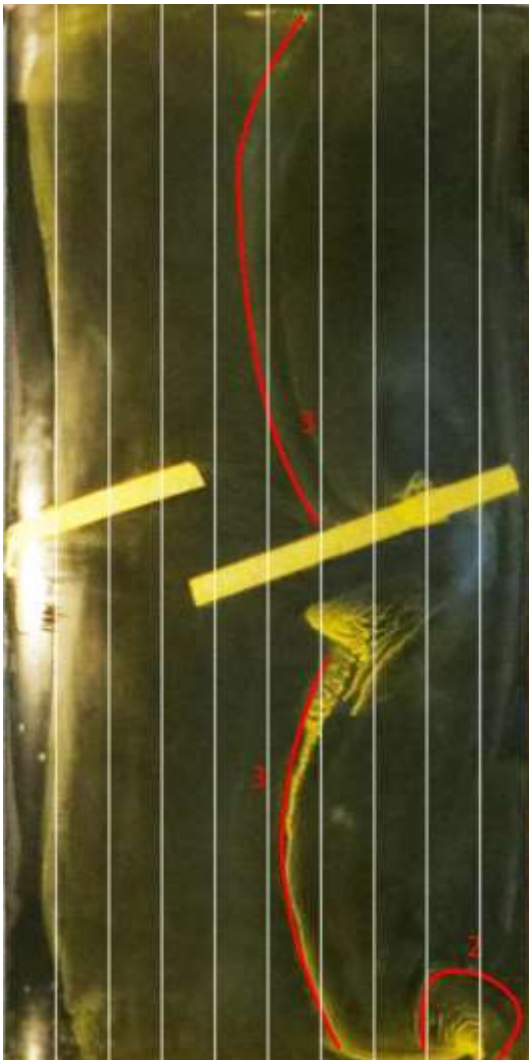
Εικόνα 3.ι.10- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 9° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



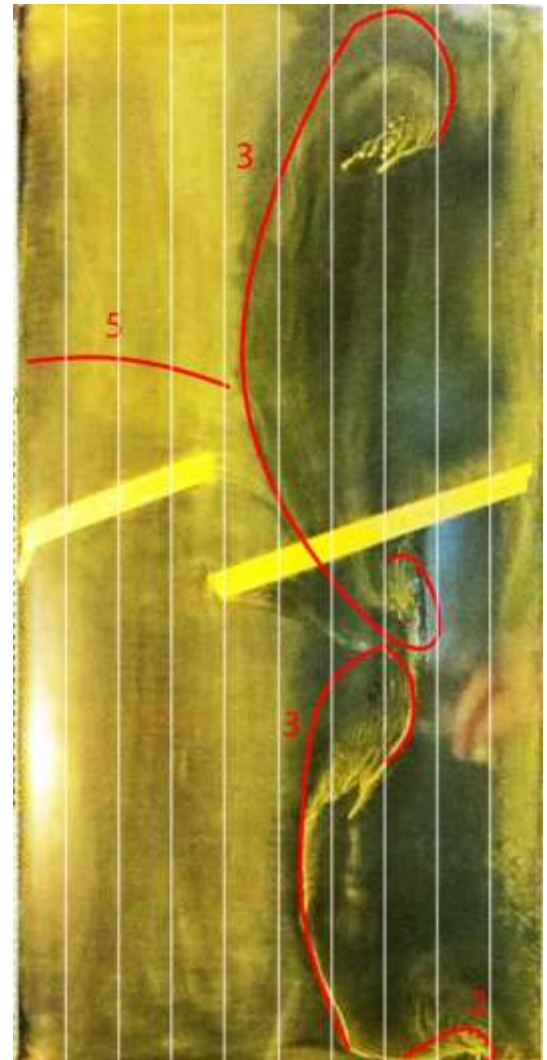
Εικόνα 3.1.11- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 9° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



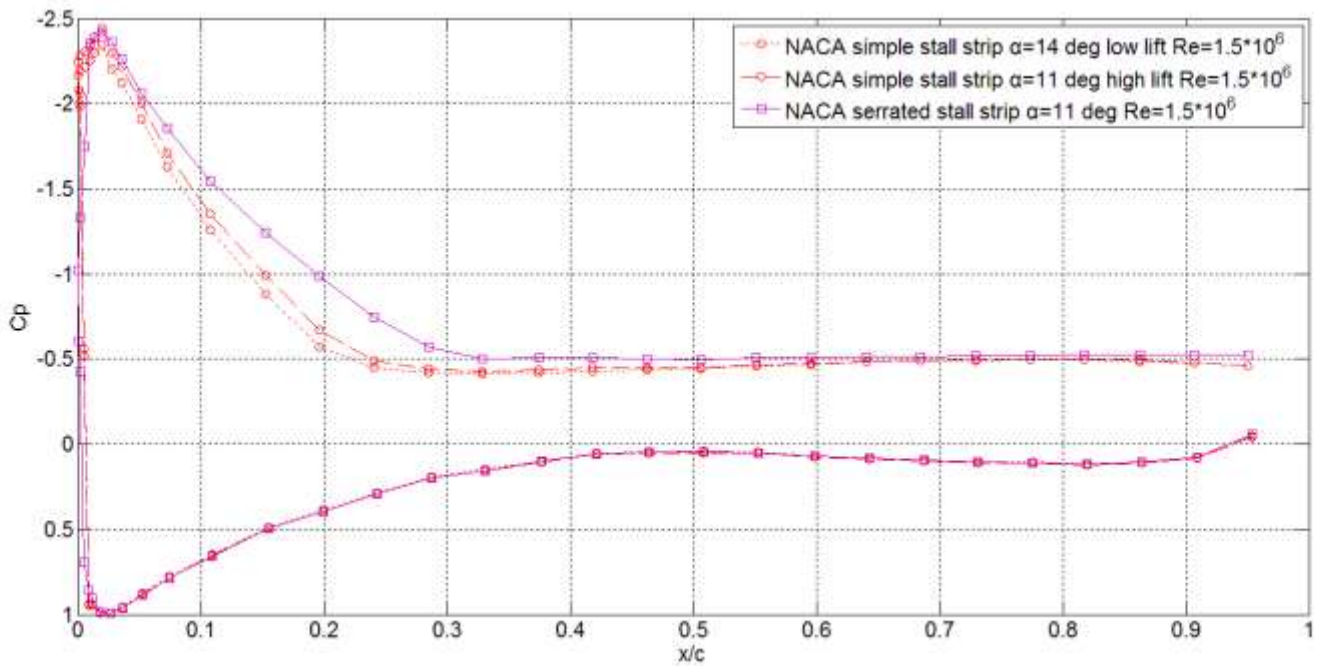
Διάγραμμα 3.ι.32- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. $\alpha=11^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.ι.12- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 11° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



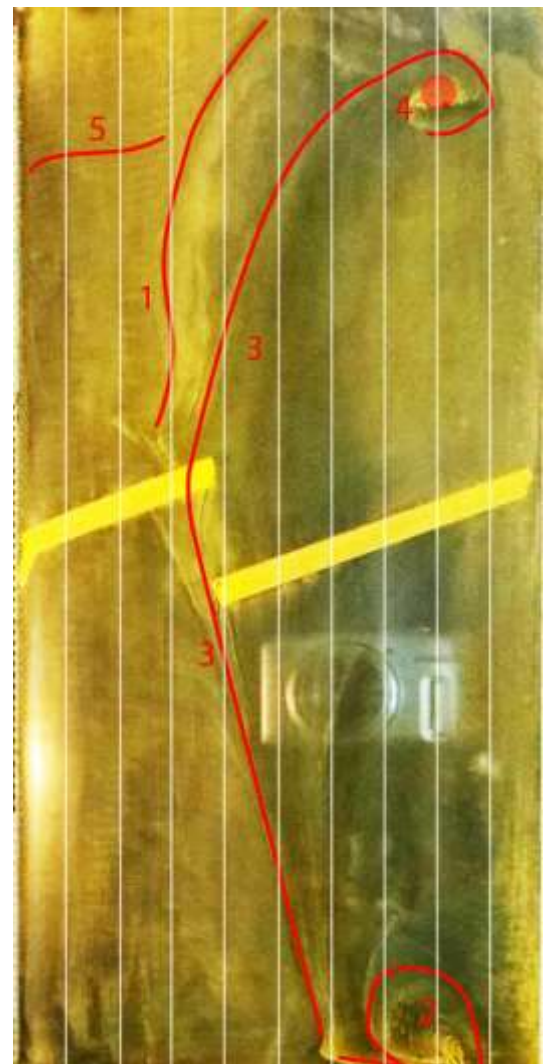
Εικόνα 3.ι.13- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 11° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Διάγραμμα 3.ι.33- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ NACA Α.Λ.Α. και Ο.Λ.Α. $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.ι.14- Flow-viz NACA Α.Λ.Α 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Εικόνα 3.ι.15- Flow-viz NACA Ο.Λ.Α 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής

ii. FFA W3-241

Σύγκριση ροής με ελεύθερη μετάβαση με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$ ($h=4\text{mm}$)

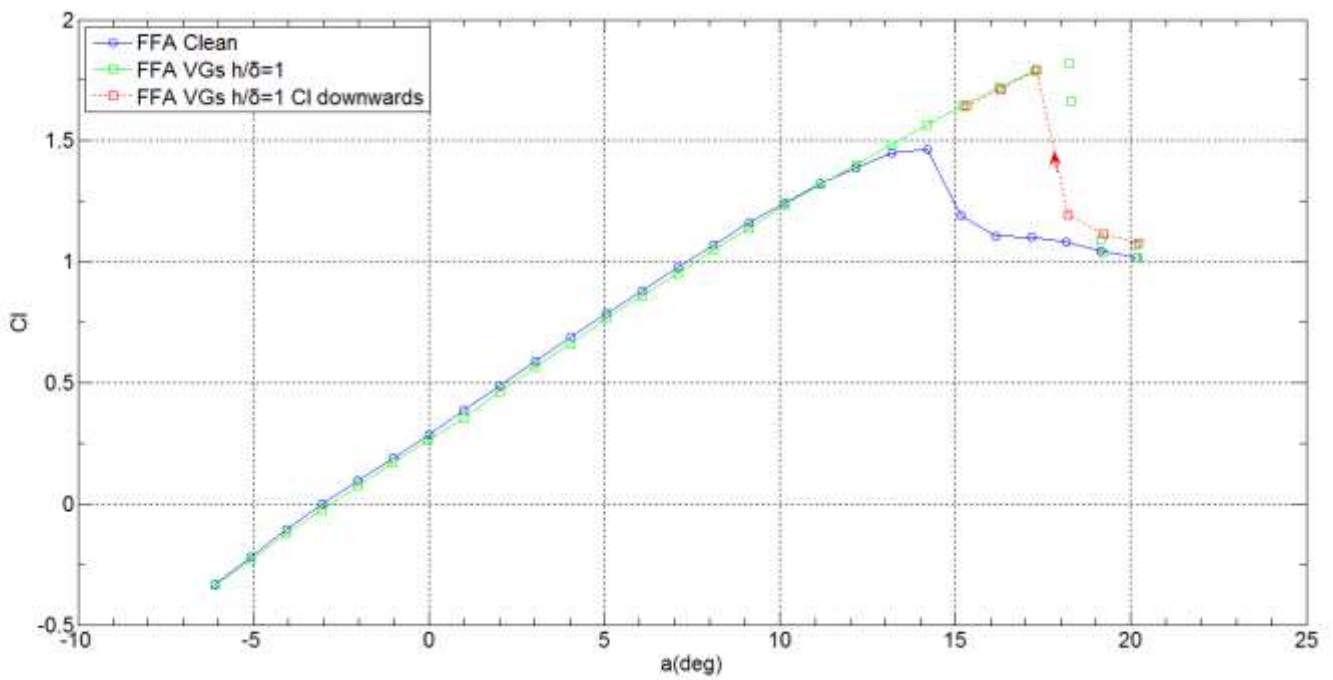
Στο διάγραμμα 3.ii.1 συγκρίνονται οι συντελεστές άνωσης για την ελεύθερη διαμόρφωση της πτέρυγας και αυτή με τοποθετημένες στροβιλογεννήτριες με $h/\delta=1$.

Παρατηρούμε ότι στην γραμμική περιοχή της ελεύθερης διαμόρφωσης, μέχρι τις 11° , οι δύο διαμορφώσεις παρουσιάζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά. Μετά τις 11° η καμπύλη της ελεύθερης διαμόρφωσης παύει να έχει γραμμική συμπεριφορά, γεγονός που οφείλεται στην έναρξη αποκόλλησης. Αντιθέτως, για την διαμόρφωση με τις στροβιλογεννήτριες, η γραμμική συμπεριφορά συνεχίζεται μέχρι και τις 18° , αφού οι στροβιλογεννήτριες αποτρέπουν την αποκόλληση της ροής. Έτσι, λοιπόν, από τις 12° μέχρι και τις 18° παρατηρούμε σημαντική διαφορά στον συντελεστή άνωσης των δύο διαμορφώσεων με τον μέγιστο συντελεστή άνωσης να αυξάνεται κατά 26%, ενώ από τις 19° και μετά οι δύο συντελεστές έχουν παραπλήσιες τιμές, αφού στην περιοχή αυτή οι στροβιλογεννήτριες δεν λειτουργούν.

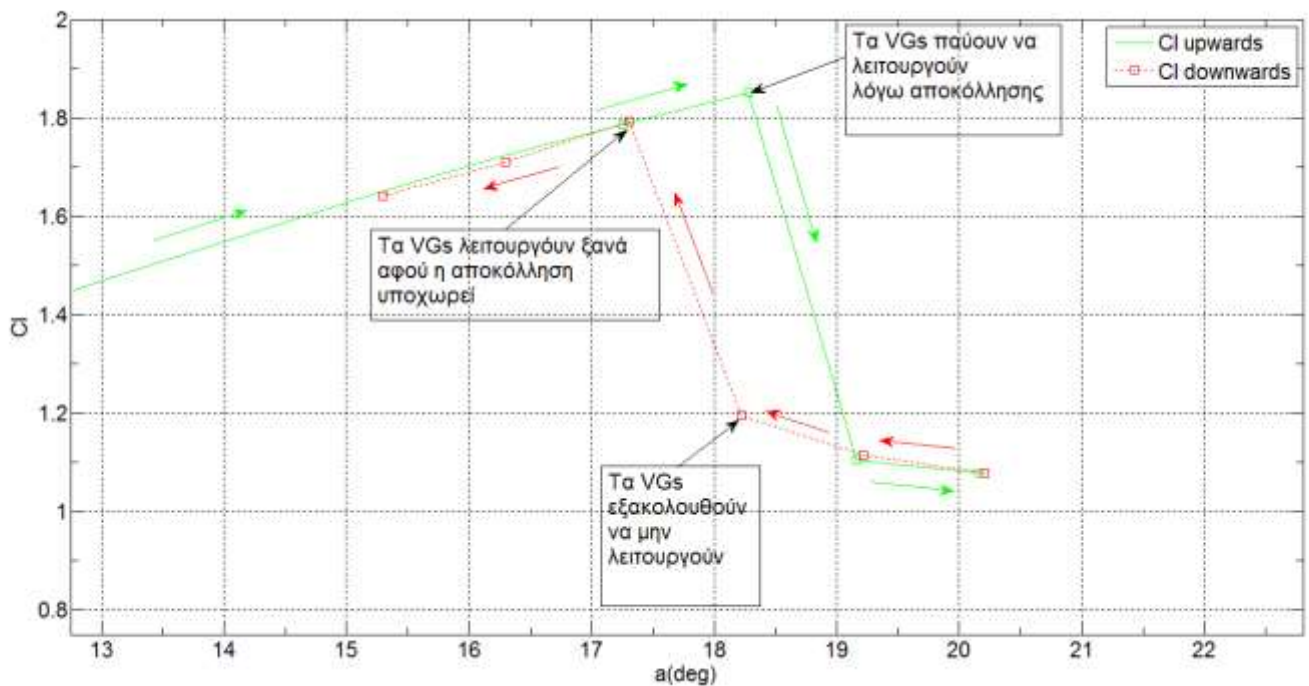
Πιο αναλυτικά, η επίδραση των στροβιλογεννητριών γίνεται εμφανής στο διάγραμμα 3.ii.2, στο οποίο παρουσιάζεται η συμπεριφορά του συντελεστή άνωσης για τις στροβιλογεννήτριες με $h/\delta=1$ για αύξουσα και για φθίνουσα γωνία πρόσπτωσης. Κινούμενοι από μικρότερες σε μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης, ο συντελεστής παρουσιάζει αυξητική τάση μέχρι και τις 18° , οπότε και οι στροβιλογεννήτριες παύουν να λειτουργούν, αφού η αποκόλληση φτάνει μπροστά από το 30% της χορδής στο οποίο αυτές είναι τοποθετημένες. Κινούμενοι τώρα από μεγαλύτερες σε μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης, ο συντελεστής άνωσης παρουσιάζει στις 18° μία υστέρηση, αφού η αποκόλληση δεν έχει υποχωρήσει πίσω από τη θέση των στροβιλογεννητριών. Παρόλα αυτά, στις 17° ο συντελεστής άνωσης επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα, αφού η αποκόλληση υποχωρεί.

Στο διάγραμμα 3.ii.3 παρουσιάζονται οι συντελεστές αντίστασης για τις δύο διαμορφώσεις. Στην γραμμική περιοχή της ελεύθερης διαμόρφωσης οι δύο συντελεστές παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά, με τον συντελεστή της διαμόρφωσης με τις στροβιλογεννήτριες να είναι σταθερά κατά 38% μεγαλύτερος. Από το σημείο που αποκολλάται η ροή, ο συντελεστής αντίστασης αυξάνεται κατακόρυφα και στις δύο περιπτώσεις, αφού πλέον παίζει σημαντικότερο ρόλο η αντίσταση λόγω πίεσης.

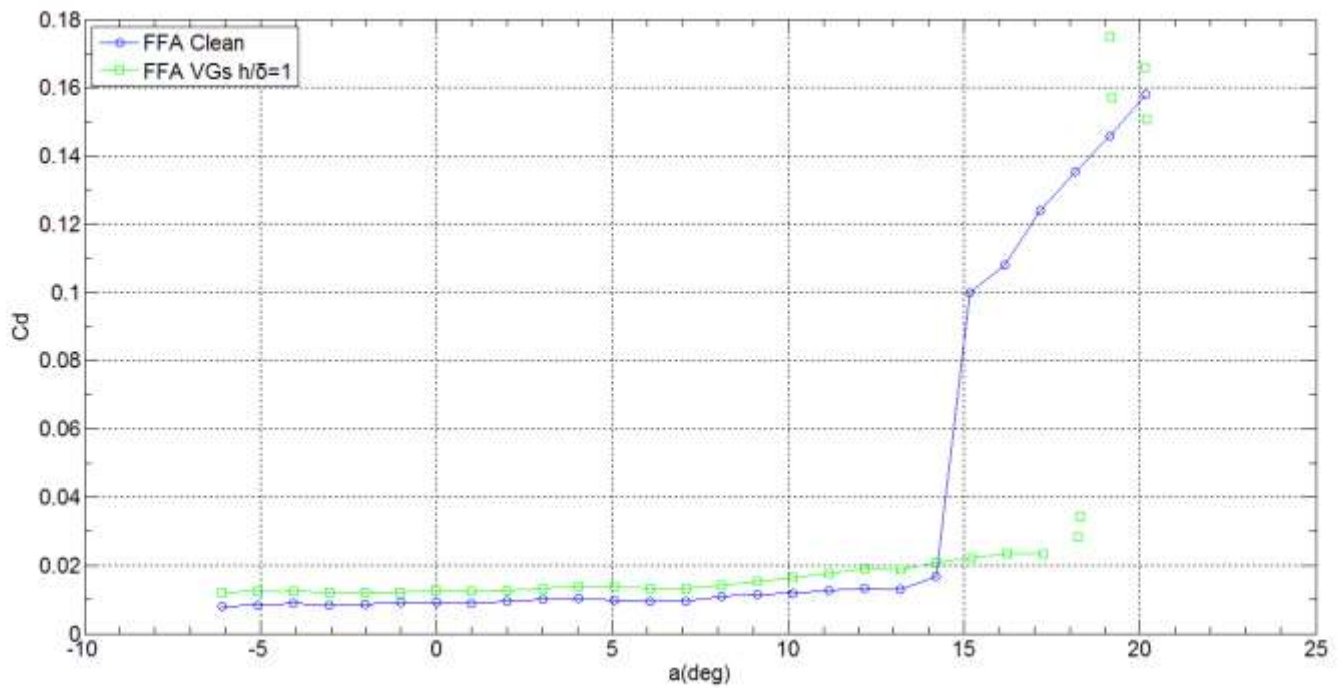
Στο διάγραμμα 3.ii.4 φαίνονται οι δύο συντελεστές ροπής. Και πάλι εδώ οι δύο συντελεστές ακολουθούν ίδια συμπεριφορά στη γραμμική περιοχή, ενώ στο σημείο της αποκόλλησης παρουσιάζουν ένα «άλμα» και ακολουθούν έπειτα σχεδόν γραμμική αυξητική τάση.



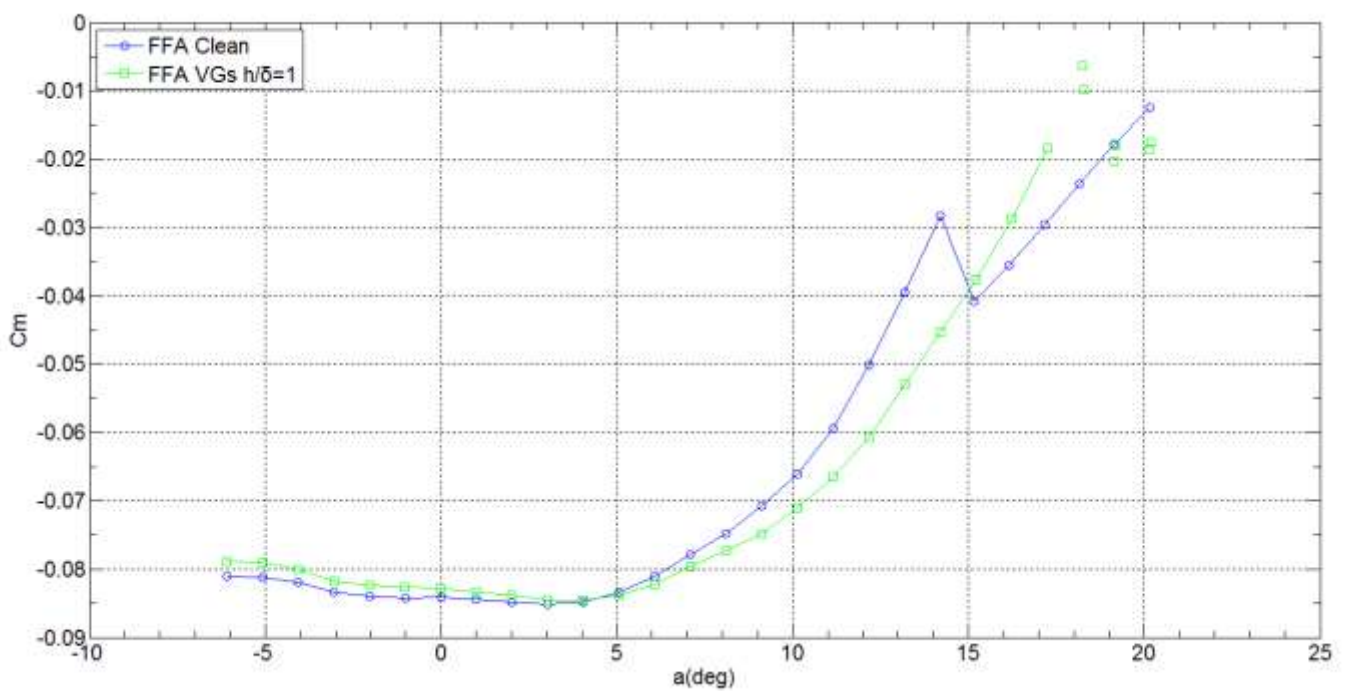
Διάγραμμα 3.ii.1- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ FFA Ελ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$



Διάγραμμα 3.ii.5-Υστέρηση συντελεστή άνωσης για FFA VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$



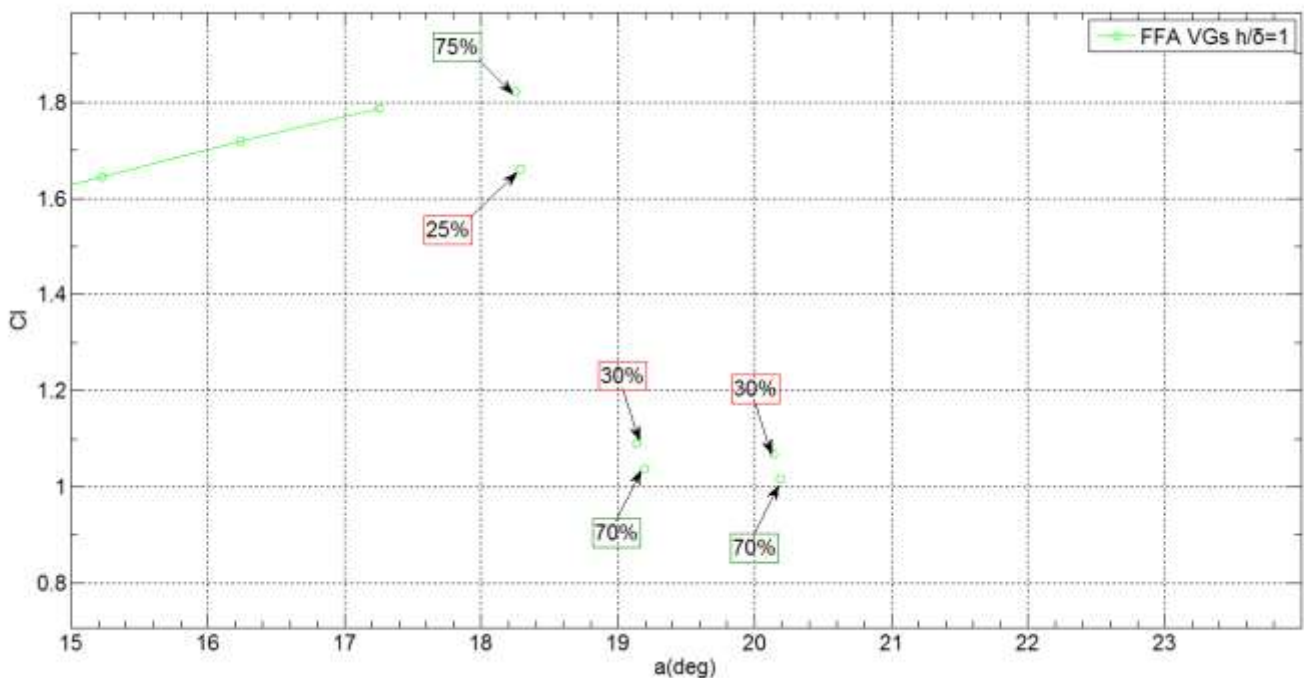
Διάγραμμα 3.ii.6- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ FFA ΕΛ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$



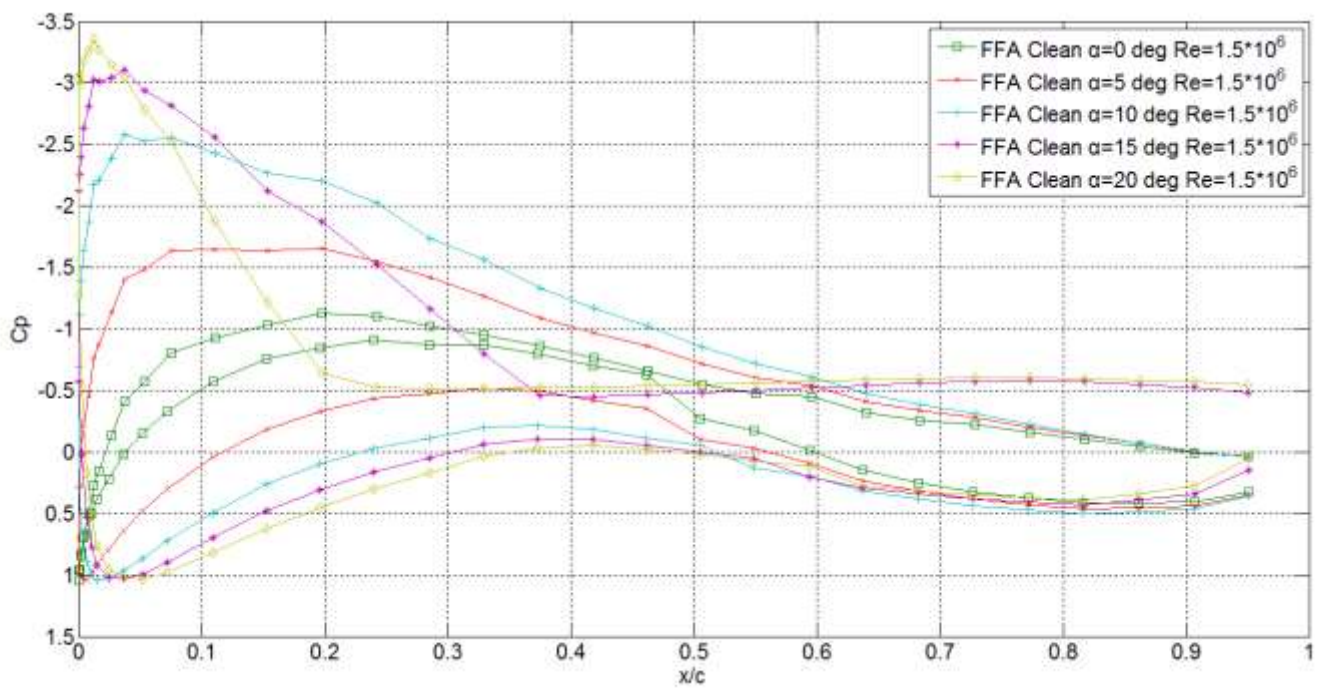
Διάγραμμα 3.ii.7- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ FFA ΕΛ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ σε $Re=1.5e6$

Συνολικά, λοιπόν, η επίδραση των στροβιλογεννητριών είναι καταλυτική, αφού αυξάνουν σημαντικά τον συντελεστή άνωσης στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, καθυστερώντας την αποκόλληση. Ωστόσο προκαλούν αύξηση του συντελεστή αντίστασης κατά 0.0035 στη γραμμική περιοχή.

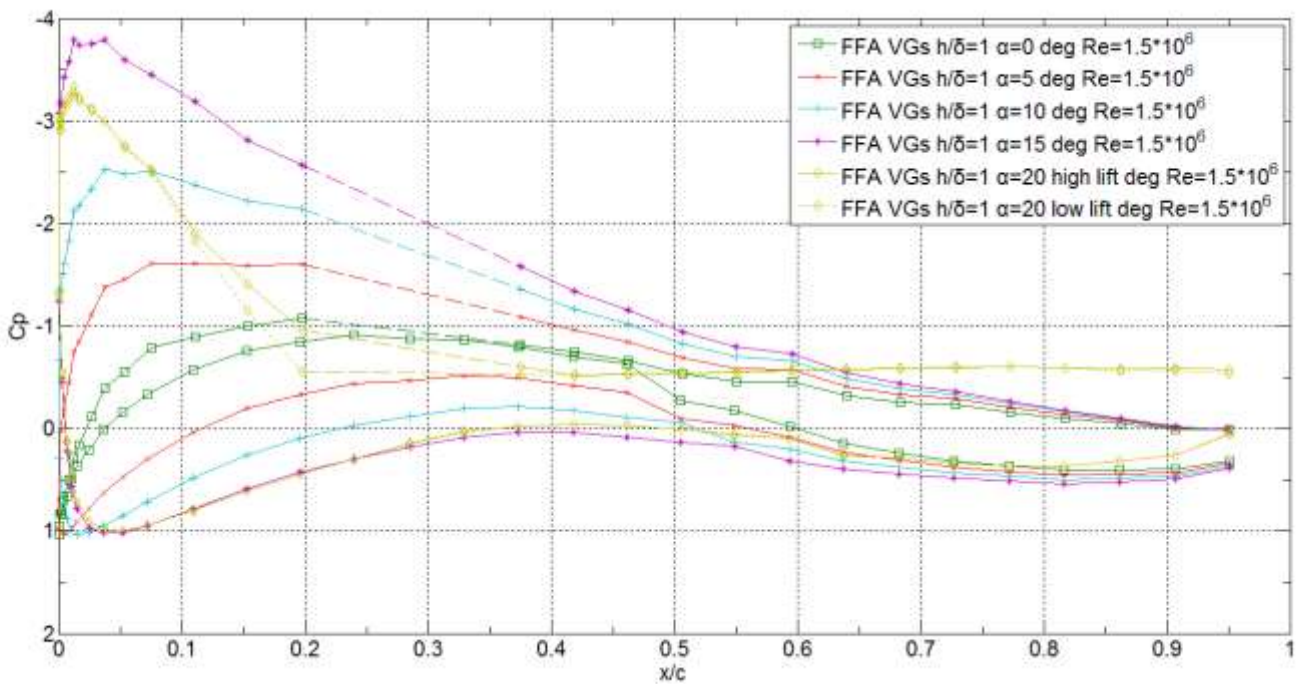
Στο διάγραμμα 3.ii.5 φαίνεται η ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο καταστάσεων για την περίπτωση της διαμόρφωσης με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$, ενώ στα διαγράμματα 3.ii.6 και 3.ii.7 φαίνονται οι κατανομές των πιέσεων για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης για την ελεύθερη διαμόρφωση και αυτή με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$. Να σημειωθεί ότι στο τελευταίο οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν ότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις έχουν προκύψει με γραμμική παρεμβολή, αφού οι οπές μέτρησης της πίεσης καλύπτονταν από τη λωρίδα των στροβιλογεννητριών. Παρατηρούμε ότι, λόγω των στροβιλογεννητριών, η αποκόλληση καθυστερεί σημαντικά να εμφανιστεί στο δεύτερο διάγραμμα, και η μέγιστη υποπίεση παίρνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές.



Διάγραμμα 3.ii.5- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 18 ως 20° FFA VGs $h/\delta=1$

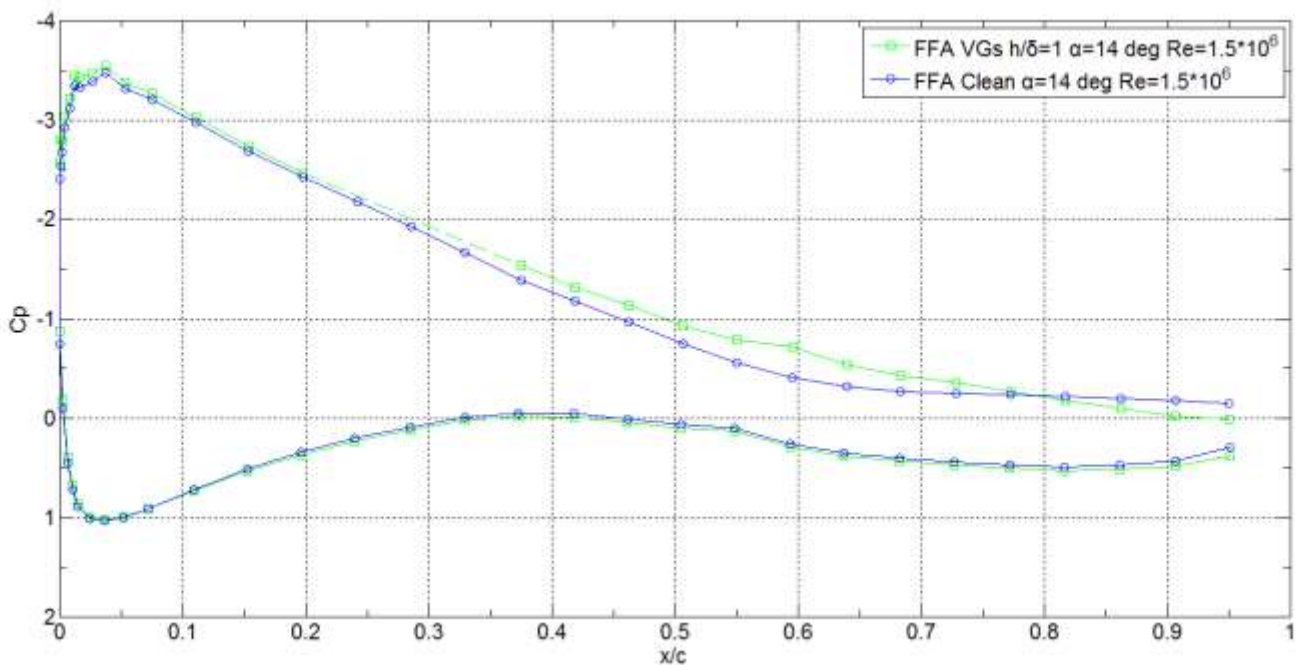


Διάγραμμα 3.ii.6- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° Re=1.5e6 FFA ΕΛ.Μ.

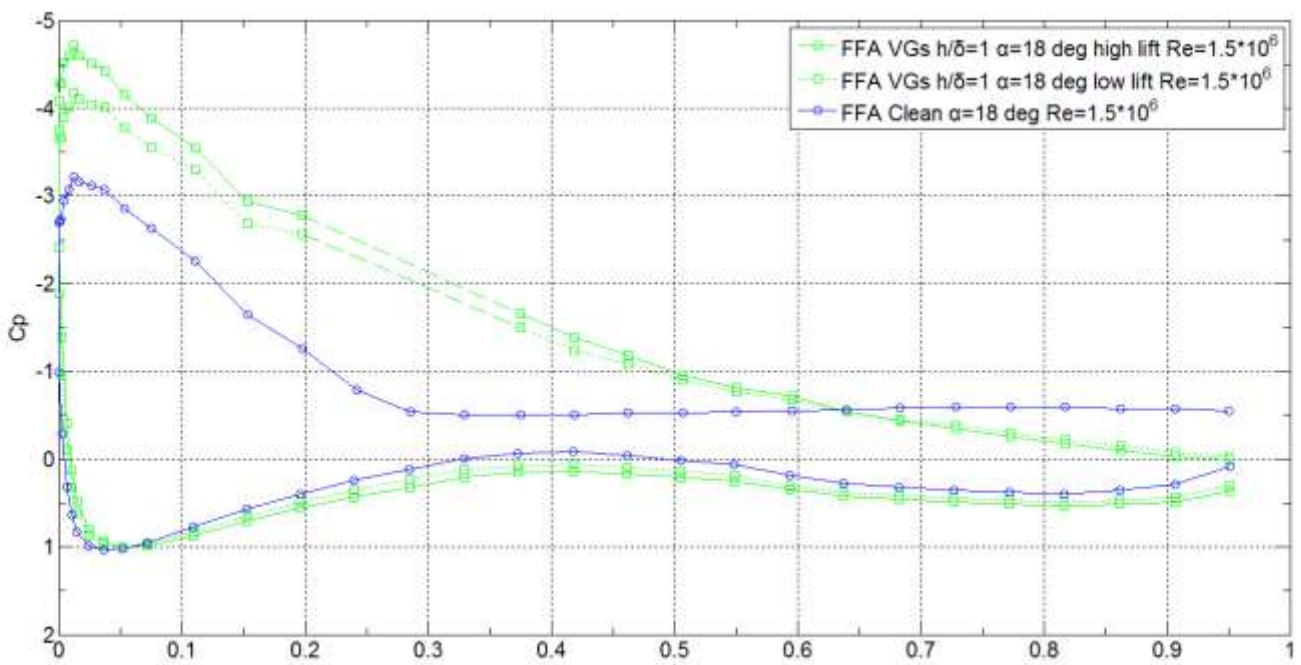


Διάγραμμα 3.ii.7- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° Re=1.5e6 FFA VGs h/delta=1

Για να έχουμε μια πιο πλήρη εικόνα σχετικά με τις κατανομές των πιέσεων παραθέτουμε τα διαγράμματα 3.ii.8 και 3.ii.9 στα οποία γίνεται σύγκριση των κατανομών πίεσης μεταξύ ελεύθερης μετάβασης και στροβιλογεννητριών $h/\delta=1$, ενδεικτικά για δύο γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές του συντελεστή άνωσης. Στο διάγραμμα 3.ii.8 που αντιστοιχεί σε γωνία πρόσπτωσης 14° δεν παρατηρούμε μεγάλες διαφορές στην κατανομή, μόνο ότι στην ελεύθερη διαμόρφωση έχει αρχίσει η αποκόλληση. Αντιθέτως, στο διάγραμμα 3.ii.9, οι διαφορές, κυρίως στην πλευρά υποπίεσης, είναι σημαντικές, αφού στην ελεύθερη διαμόρφωση έχουμε έντονη αποκόλληση, ενώ στην περίπτωση των στροβιλογεννητριών $h/\delta=1$ δεν έχουμε καθόλου αποκόλληση και κατά συνέπεια μεγαλύτερο υποπίεση και φυσικά μεγαλύτερο συντελεστή άνωσης.



Διάγραμμα 3.ii.8 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA ΕΛ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$

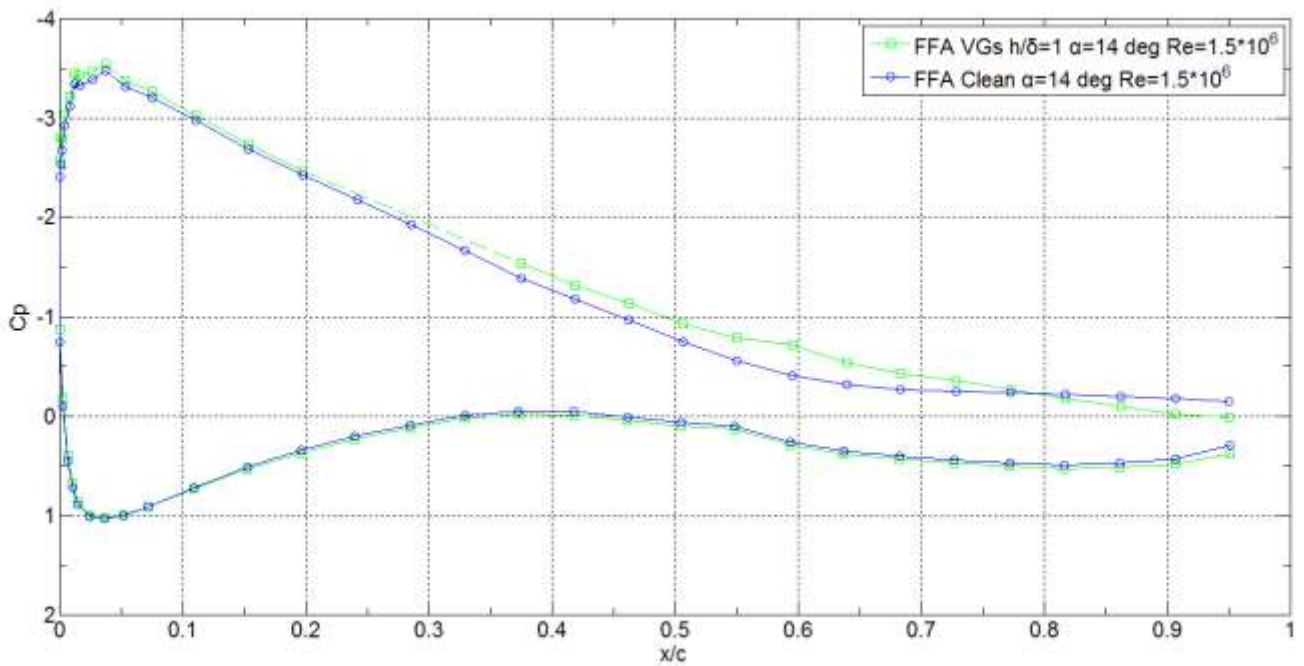


Διάγραμμα 3.ii.9 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA ΕΛ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=18^\circ$, $Re=1.5e6$

Στο σημείο αυτό θα παραθέσουμε και τα αποτελέσματα flow viz για τις δύο διαμορφώσεις. Τα αποτελέσματα αφορούν τις γωνίες πρόσπτωσης 14° και 20° . Οι 14° είναι η γωνία που έχουμε μέγιστο συντελεστή άνωσης της ελεύθερης διαμόρφωσης αλλά και μέγιστο λόγο άνωσης προς αντίσταση για την διαμόρφωση με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$. Οι 20° έχουν ενδιαφέρον λόγω των έντονων φαινομένων αποκόλλησης.

Στο διάγραμμα 3.ii.10 συγκρίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία πρόσπτωσης 14° . Οι εικόνες 3.ii.1 και 3.ii.2 αποτυπώνουν τη ροή για τη συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Η εικόνα 3.ii.1 δεν συμφωνεί με το διάγραμμα 3.ii.10, αφού στην πρώτη η αποκόλληση (3) φαίνεται να συμβαίνει στο 30% της χορδής στην περιοχή των μετρήσεων, ενώ στο δεύτερο η αποκόλληση συμβαίνει στο 65% της χορδής. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται σε σχηματισμό stall cell στο πείραμα flow viz το οποίο δεν είχε εμφανιστεί κατά την μέτρηση των πιέσεων, πιθανόν λόγω της μπογιάς ή των χαρτοταινιών που τοποθετήθηκαν στο πείραμα. Επίσης παρατηρούμε μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή (1) στο 15-20% της χορδής. Αντιθέτως, η εικόνα 3.ii.2 συμφωνεί με το διάγραμμα, αφού δεν παρατηρείται αποκόλληση. Αυτό που μπορούμε να δούμε στην εικόνα είναι η αποκόλληση λόγω της παρουσίας του πάνελ (2) αλλά και τα ίχνη των ζευγών των στροβίλων (5), για τα οποία ανάμεσα στους στροβίλους έχουμε κίτρινο χρώμα (συγκέντρωση μπογιάς), ενώ κάτω από τους στροβίλους έχουμε μαύρο χρώμα (το λάδι φεύγει από την επιφάνεια λόγω αυξημένης τριβής).

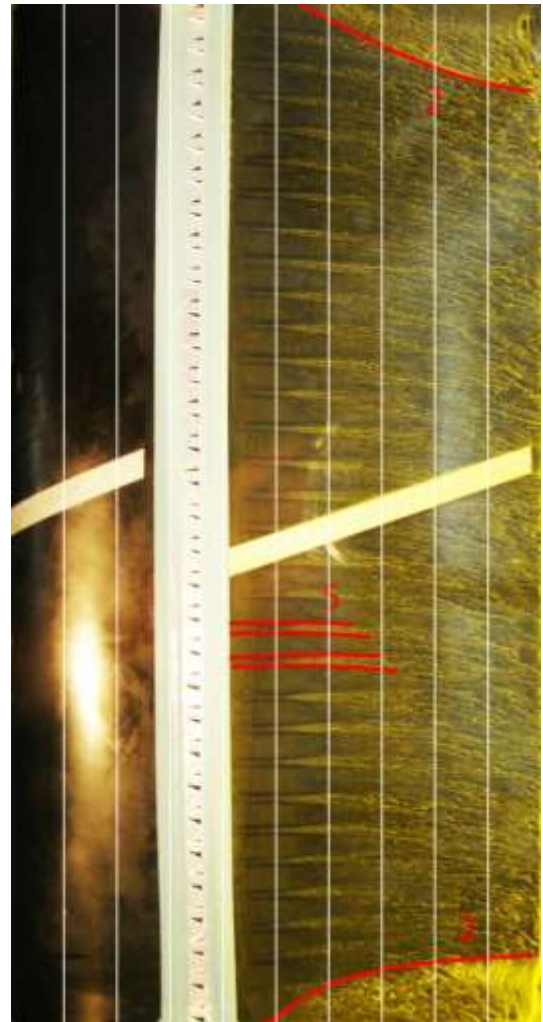
Στο διάγραμμα 3.ii.11 φαίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία 20° μοιρών. Στην εικόνα 3.ii.3 που αντιστοιχεί στην ελεύθερη μετάβαση βλέπουμε αποκόλληση κατά το εκπέτασμα της πτέρυγας (3) που ανέρχεται σχεδόν στο 20% στο σημείο της μέτρησης, γεγονός που συμφωνεί με το διάγραμμα κατανομής των πιέσεων. Επίσης παρατηρούμε μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή στο 10% της χορδής. Η εικόνα 3.ii.4 δεν συμφωνεί με το διάγραμμα κατανομής των πιέσεων, αφού στην περιοχή των μετρήσεων δεν παρουσιάζεται αποκόλληση, ενώ στο διάγραμμα η αποκόλληση ανέρχεται στο 20% της χορδής. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι μετά την πάροδο ενός μικρού χρονικού διαστήματος στο πείραμα της οπτικοποίησης, η εικόνα πάνω στην πτέρυγα άρχισε να μεταβάλλεται, όπως δείχνουν τα βέλη (6), και ενώ αρχικά είχαμε δύο stall cells στα άκρα, μετά είχαμε ένα στο κέντρο. Αυτή η μεταβολή δεν ήταν δυνατόν να αποτυπωθεί, αφού το μείγμα είχε πλέον στεγνώσει πάνω στην πτέρυγα.



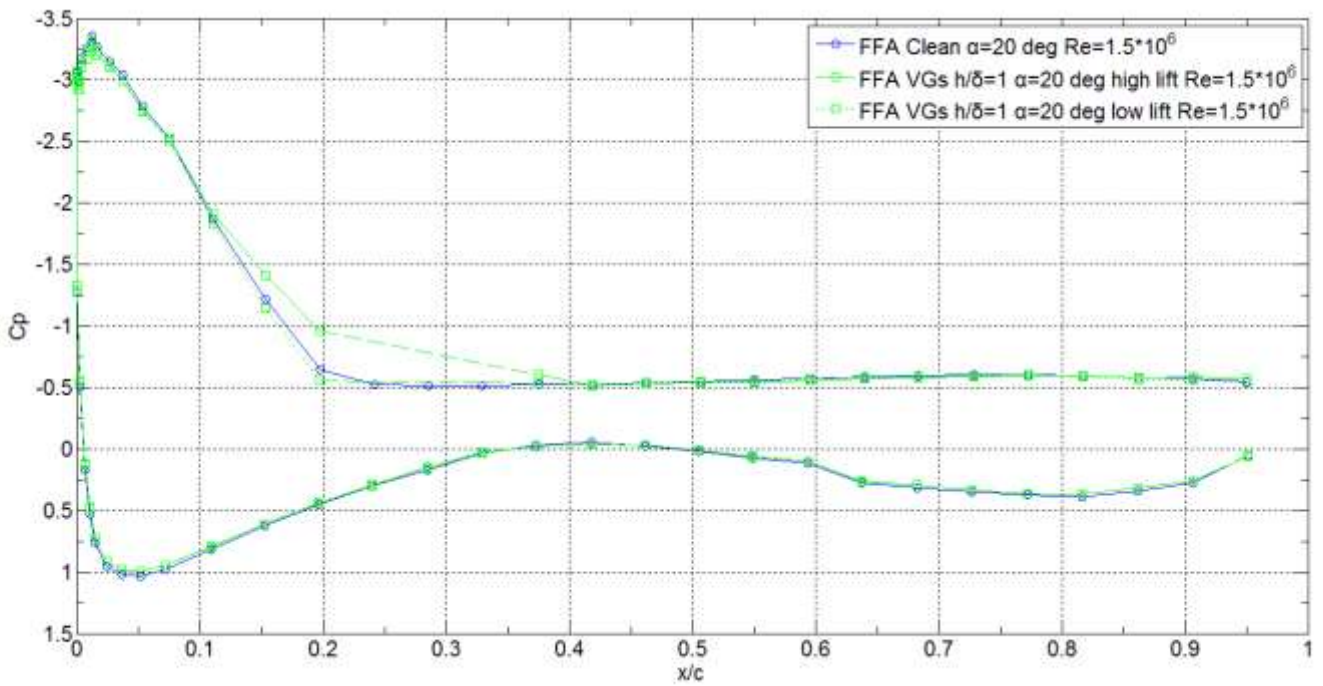
Διάγραμμα 3.ii.10- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA ΕΛ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.ii.1 - Flow-viz FFA ΕΛ.Μ. 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



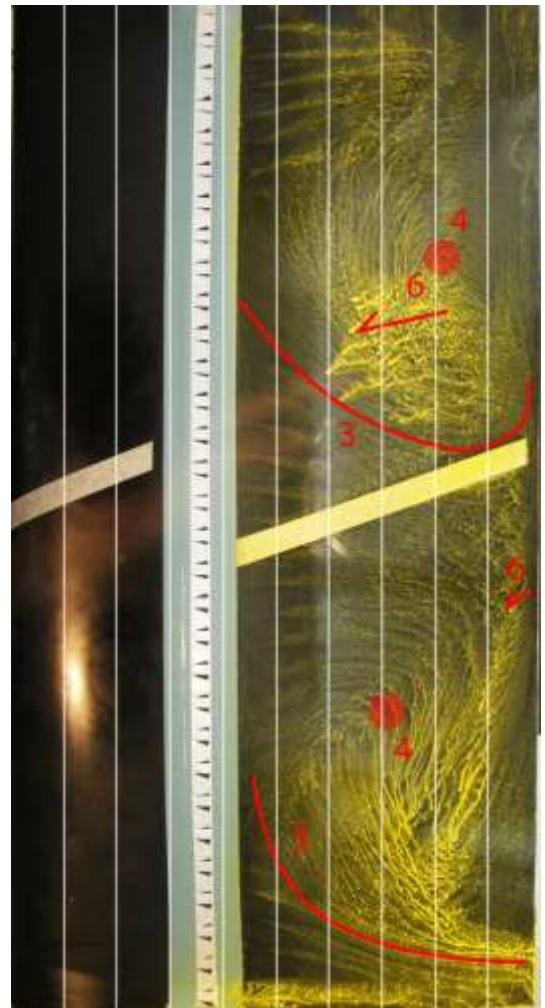
Εικόνα 3.ii.2 - Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Διάγραμμα 3.ii.11- Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA ΕΛ.Μ. και VGs $h/\delta=1$ $\alpha=20^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.ii.3 - Flow-viz FFA ΕΛ.Μ. 20° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Εικόνα 3.ii.4 - Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 20° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής

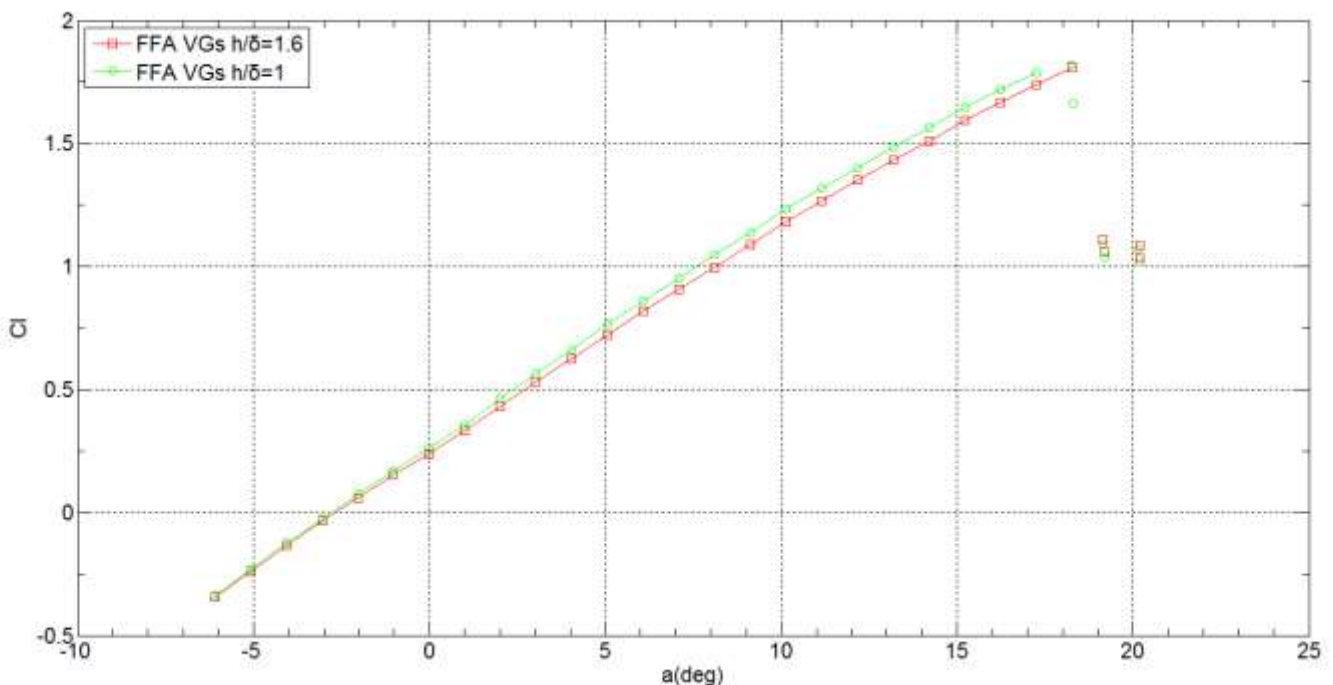
Σύγκριση ροής με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$ ($h=4\text{mm}$) και με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1.6$ ($h=6\text{mm}$)

Στο διάγραμμα 3.ii.12 συγκρίνονται οι συντελεστές άνωσης για τη διαμόρφωση της πτέρυγας με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1$ και αυτή με στροβιλογεννήτριες ύψους $h/\delta=1.6$.

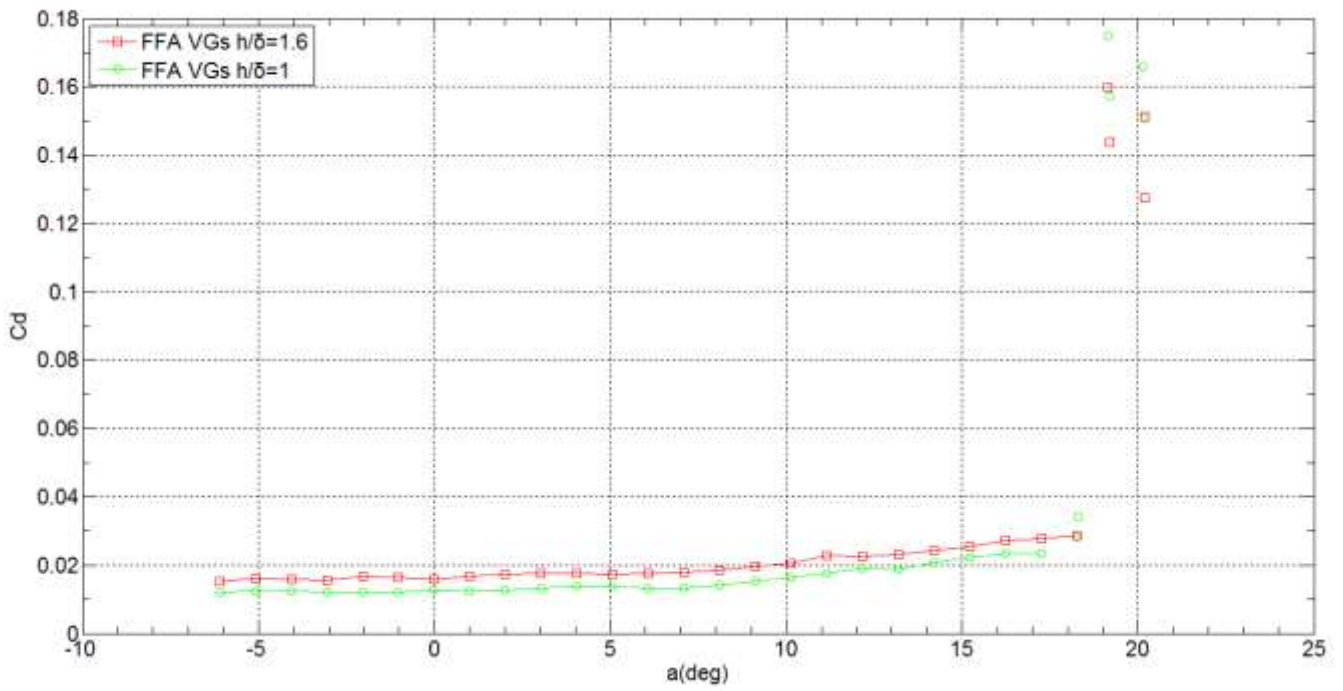
Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά, έχοντας πολύ μικρή απόκλιση σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, με την καμπύλη που αντιστοιχεί στη διαμόρφωση με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1.6$ να είναι λίγο χαμηλότερα. Οι τιμές του συντελεστή άνωσης μετά την αποκόλληση είναι ίδιες για τις δύο περιπτώσεις.

Στο διάγραμμα 3.ii.13 παρουσιάζονται οι συντελεστές αντίστασης για τις δύο περιπτώσεις. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στη ροή με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1.6$ έχει στη γραμμική περιοχή μια σταθερή αύξηση ~ 0.004 , λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των στροβιλογεννητριών και των ισχυρότερων στροβίλων που επάγουν.

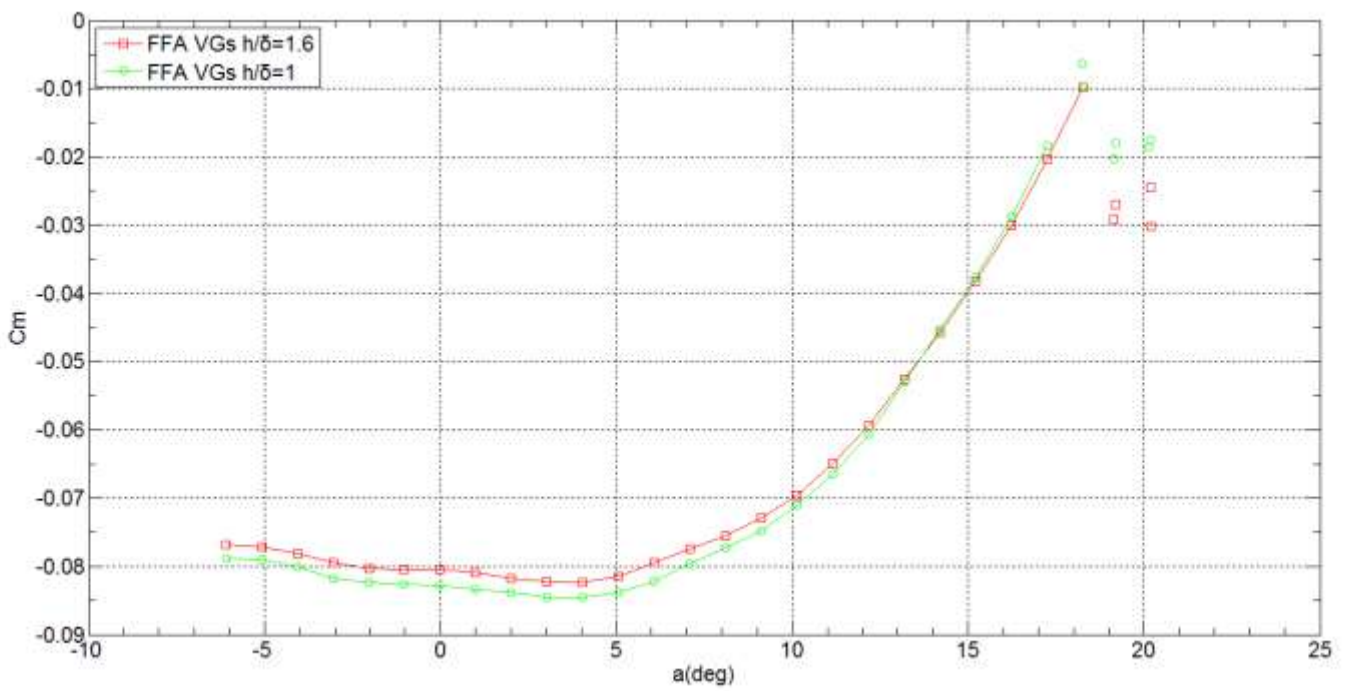
Πανομοιότυπη συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι συντελεστές της ροπής, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3.ii.14, με τον συντελεστή της διαμόρφωσης με στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1.6$ να είναι ελαφρώς μεγαλύτερος στις μικρές γωνίες πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 3.ii.12- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$

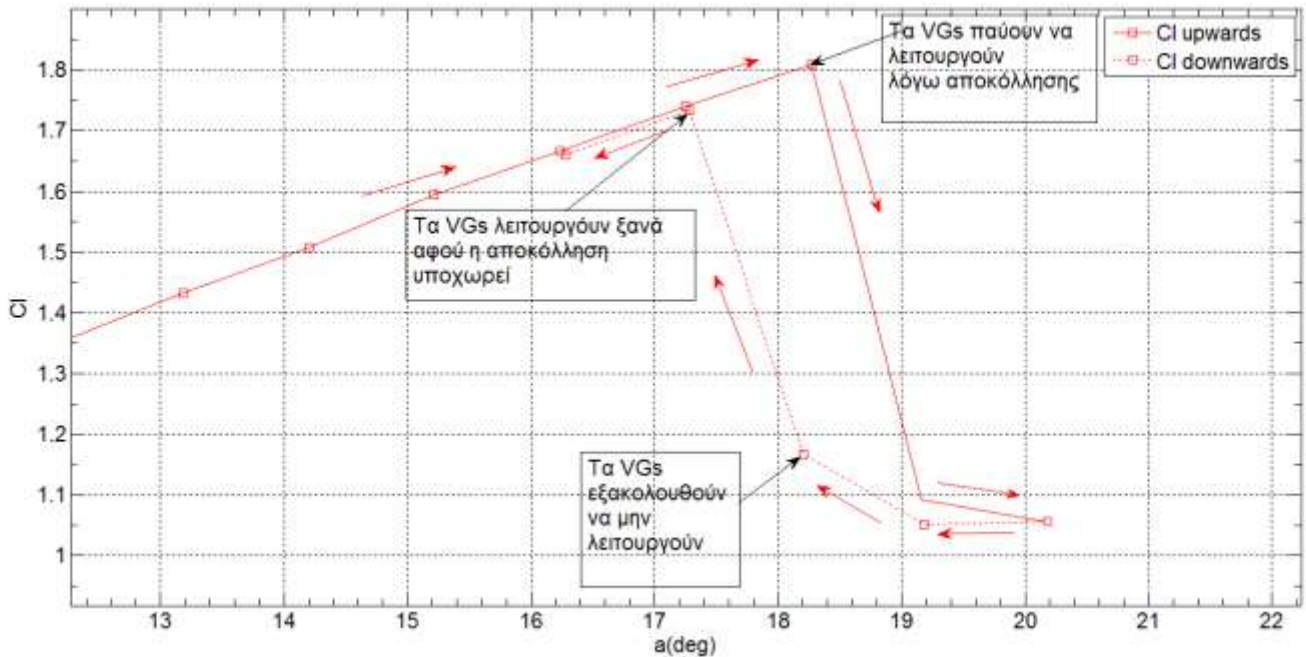


Διάγραμμα 3.ii.13 - Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$

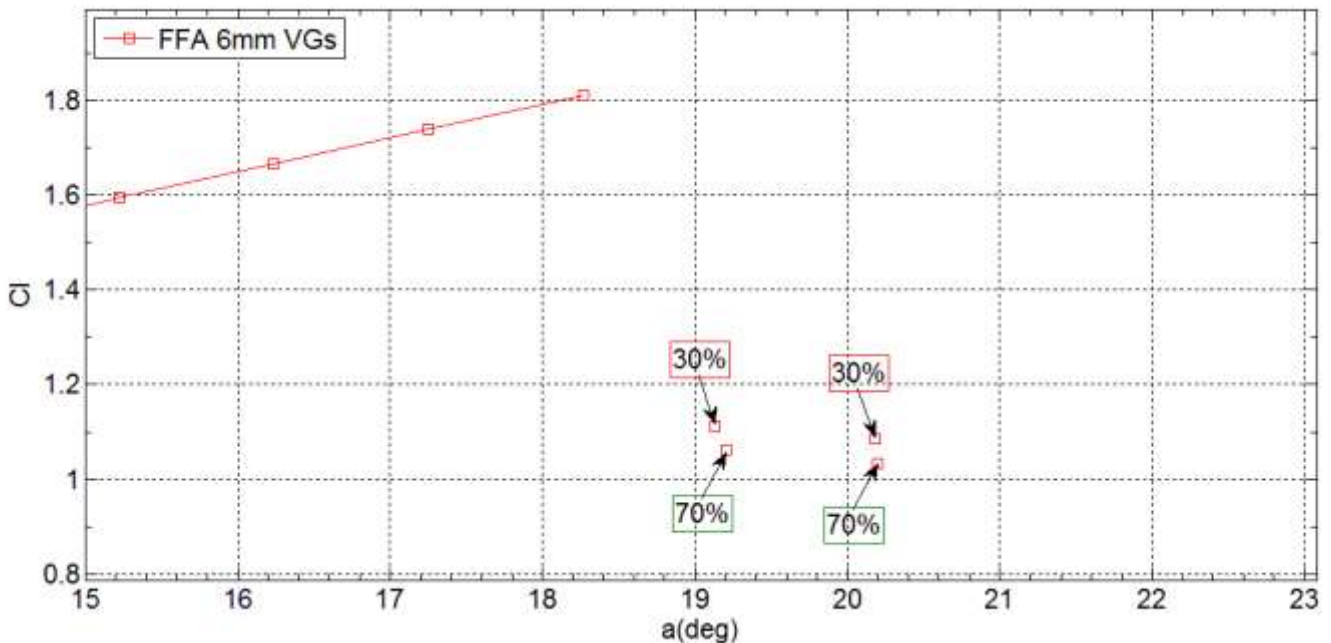


Διάγραμμα 3.ii.14- Σύγκριση συντελεστή ροπής μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$

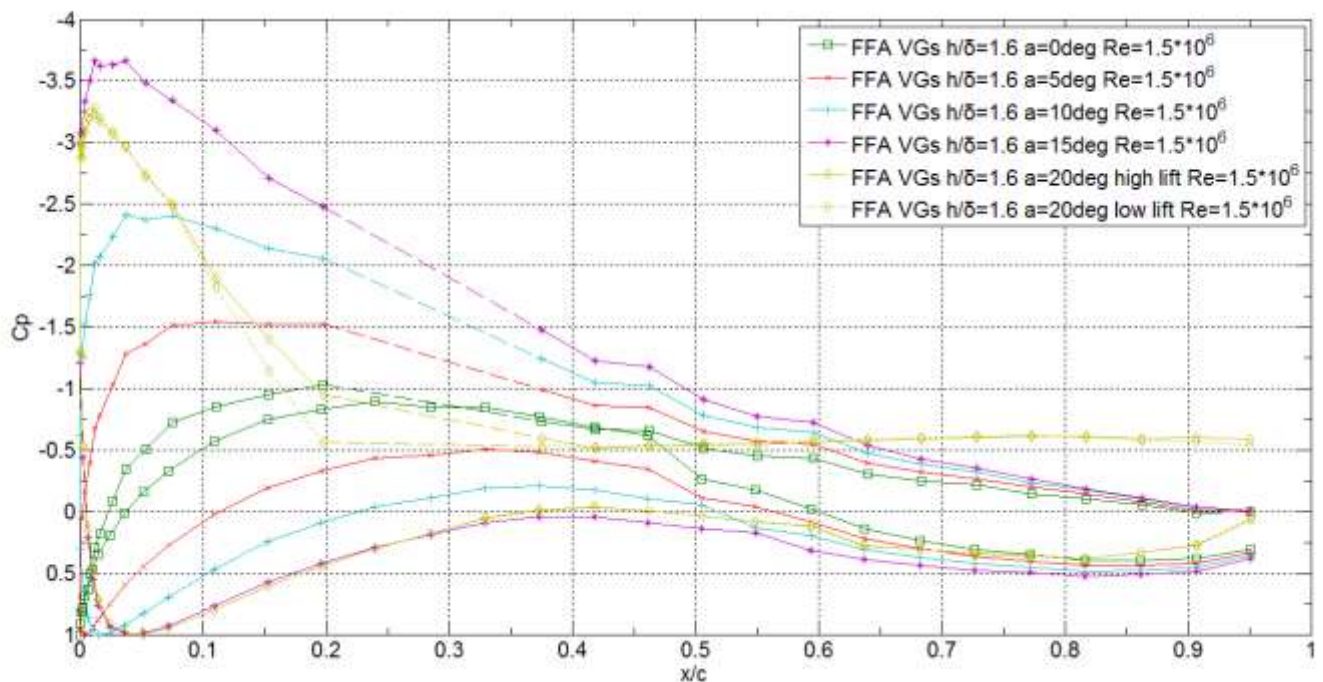
Στο διάγραμμα 3.ii.15 παρουσιάζεται η υστέρηση της πτέρυγας με εγκατεστημένες τις στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1.6$, ενώ στο διάγραμμα 3.ii.16 βλέπουμε την ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο καταστάσεων για την ίδια διαμόρφωση. Επίσης στο διάγραμμα 3.ii.17 φαίνονται οι κατανομές των πιέσεων για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 3.ii.15- Υστέρηση συντελεστή άνωσης για FFA VGs $h/\delta=1.6$ σε $Re=1.5e6$



Διάγραμμα 3.ii.16- Ποσοστιαία χρονική διάρκεια των δύο πιθανών καταστάσεων για γωνίες 19 και 20° FFA VGs $h/\delta=1.6$

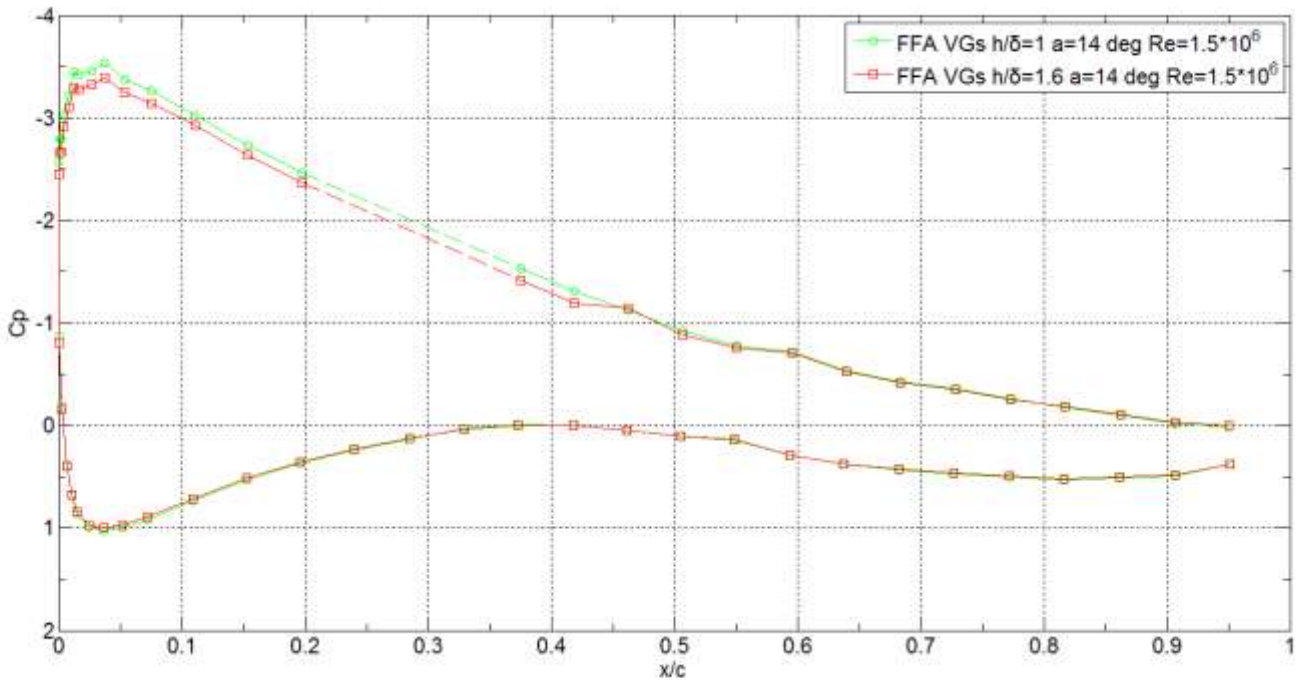


Διάγραμμα 3.ii.17- Κατανομή πιέσεων για γωνίες πρόσπτωσης 0,5,10,15,20° Re=1.5e6 FFA VGs h/δ=1.6

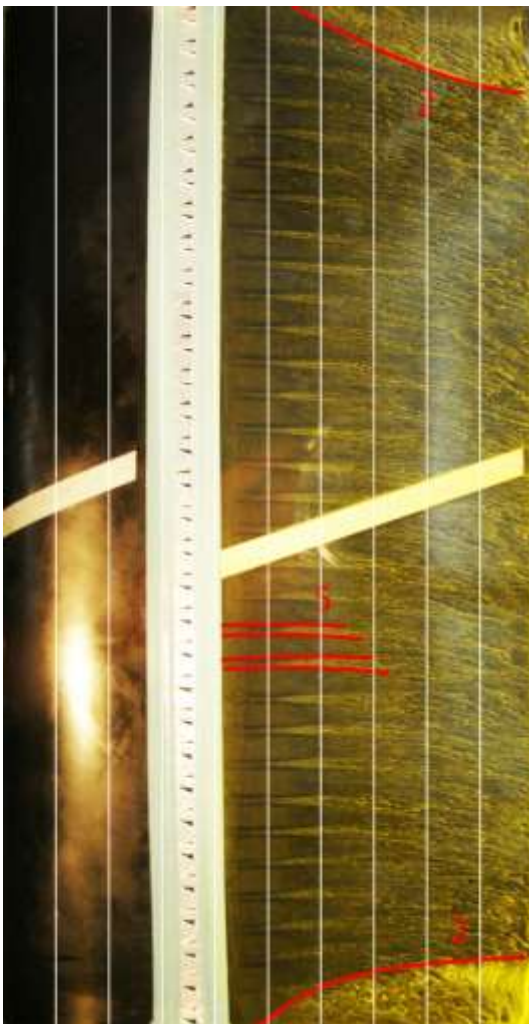
Στο σημείο αυτό θα παραθέσουμε και τα αποτελέσματα flow viz για τις δύο διαμορφώσεις. Τα αποτελέσματα αφορούν τις γωνίες πρόσπτωσης 14 και 18°. Οι 14° είναι η γωνία που έχουμε μέγιστο λόγο άνωσης προς αντίσταση για τις δύο διαμορφώσεις, ενώ στις 18° έχουμε μέγιστο συντελεστή άνωσης.

Στο διάγραμμα 3.ii.18 συγκρίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία πρόσπτωσης 14°. Οι εικόνες 3.ii.5 και 3.ii.6 αποτυπώνουν τη ροή για τη συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Στο διάγραμμα παρατηρούμε παρόμοια κατανομή των πιέσεων για τις δύο περιπτώσεις, με μόνη διαφορά την περιοχή επιτάχυνσης της ροής, στην οποία η υποπίεση είναι λίγο μικρότερη για την περίπτωση των στροβιλογεννητριών με h/δ=1.6. Οι εικόνες 3.ii.5 και 3.ii.6 συμφωνούν με το διάγραμμα 3.ii.19, αφού δεν παρατηρείται αποκόλληση της ροής σε καμία περίπτωση. Επίσης μπορούμε να δούμε την αποκόλληση λόγω του πάνελ (2) αλλά και τα ίχνη των ζευγών των στροβίλων (5).

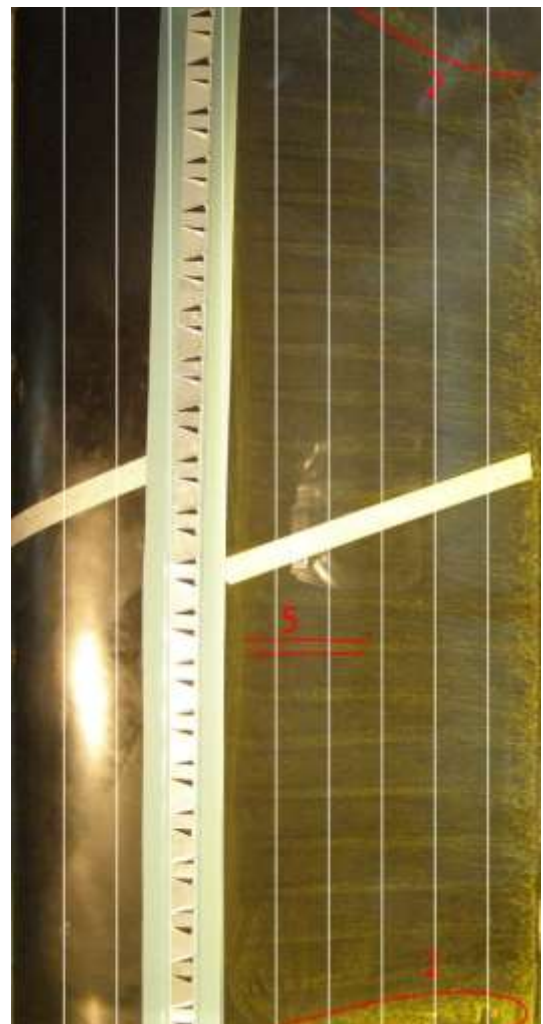
Στο διάγραμμα 3.ii.19 φαίνονται οι κατανομές πίεσης για γωνία 18°, στο οποίο βλέπουμε την κατανομή της πίεσης για την διαμόρφωση με στροβιλογεννήτριες h/δ=1.6 να ταυτίζεται με την κατανομή της πίεσης για την κατάσταση υψηλής άνωσης της διαμόρφωσης με στροβιλογεννήτριες h/δ=1. Οι εικόνες 3.ii.7 και 3.ii.8 συμφωνούν αμφότερες με το αντίστοιχο διάγραμμα αφού δεν παρατηρείται αποκόλληση στην περιοχή της μέτρησης. Παρόλα αυτά και στις δύο παρατηρείται ο σχηματισμός μισού stall cell στο κάτω μισό της πτέρυγας.



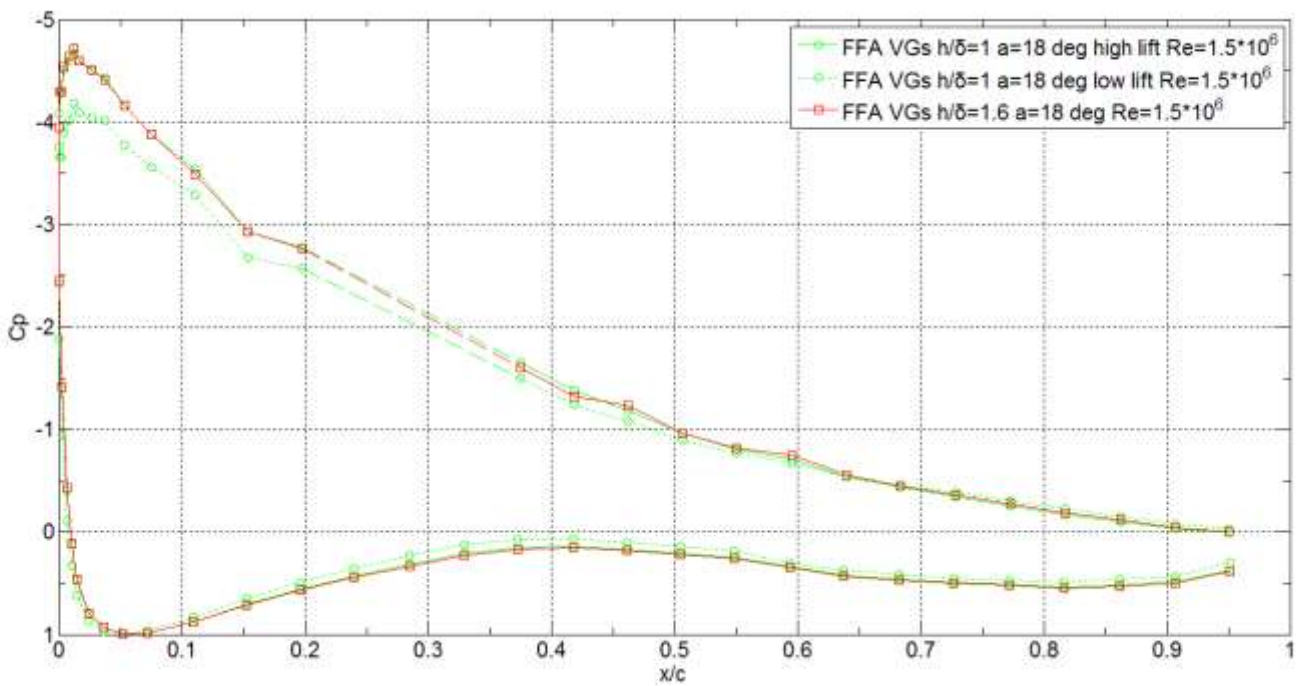
Διάγραμμα 3.ii.18 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ $\alpha=14^\circ$, $Re=1.5e6$



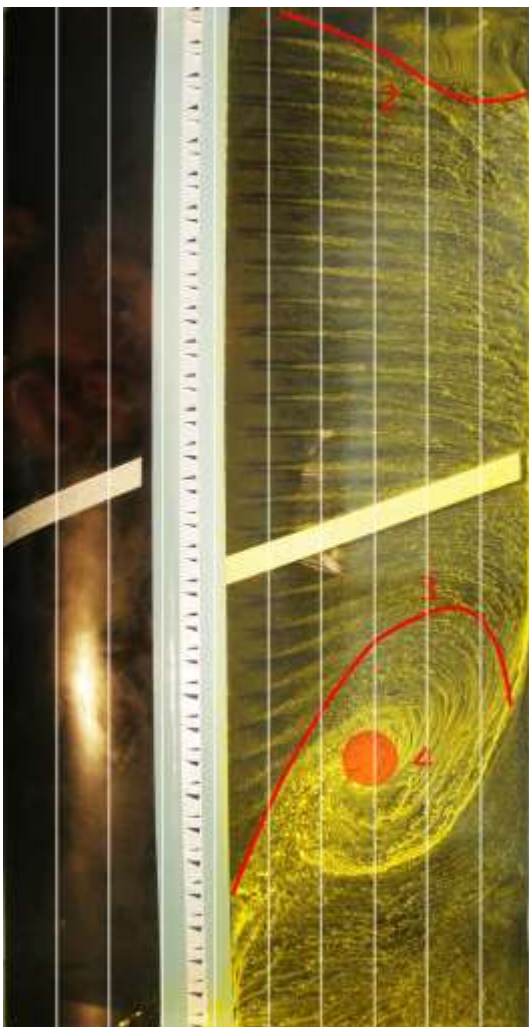
Εικόνα 3.ii.5 - Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



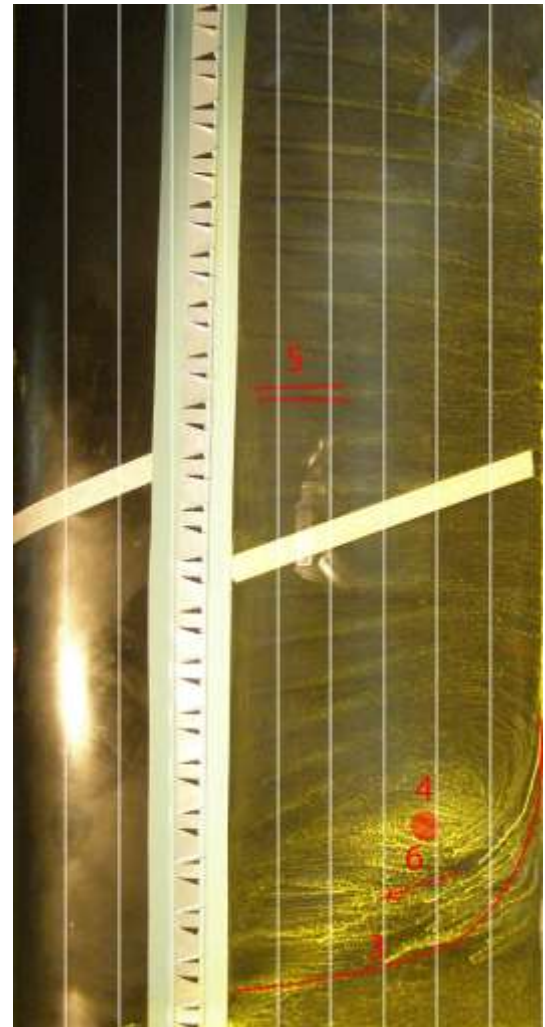
Εικόνα 3.ii.6 Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1.6$ 14° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Διάγραμμα 3.ii.19 - Σύγκριση κατανομών πίεσης μεταξύ FFA VGs $h/\delta=1$ και VGs $h/\delta=1.6$ $\alpha=18^\circ$, $Re=1.5e6$



Εικόνα 3.ii.7- Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1$ 18° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής



Εικόνα 3.ii.8- Flow-viz FFA VGs $h/\delta=1.6$ 18° , οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στις ανά 10% ποσοστιαίες θέσεις της χορδής

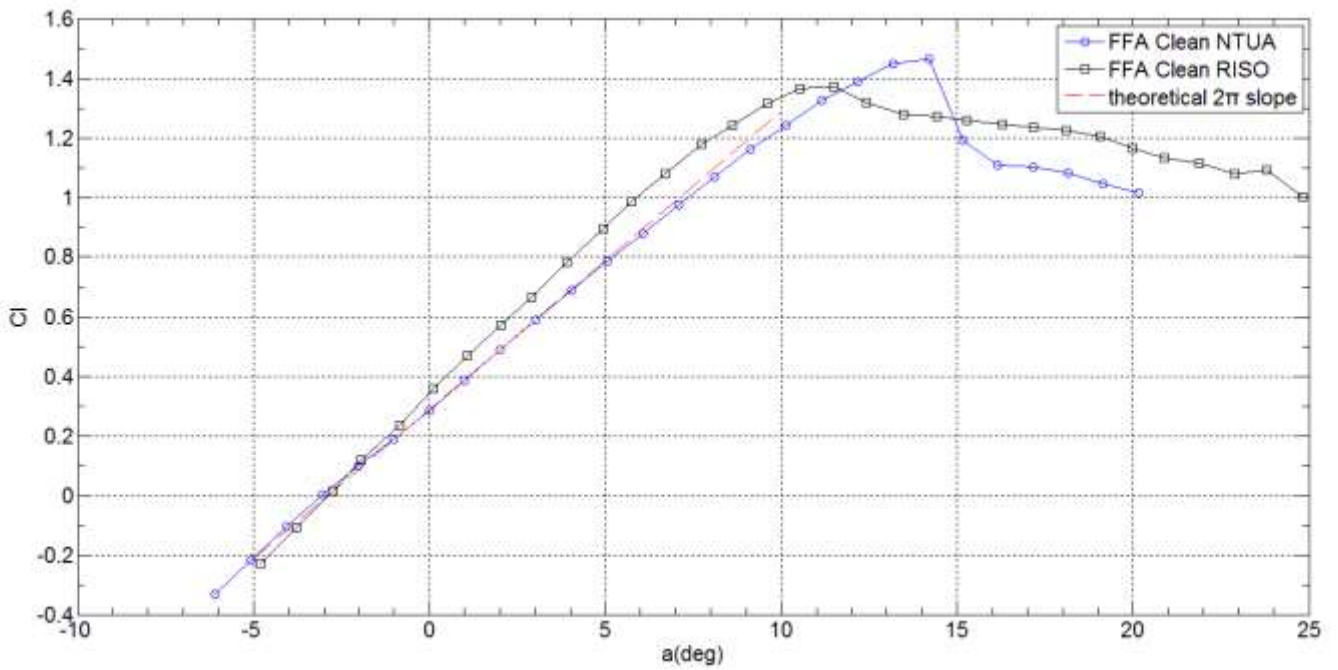
Σύγκριση μετρήσεων Εργαστηρίου Αεροδυναμικής ΕΜΠ με Riso Campus

Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στο εργαστήριο αεροδυναμικής του ΕΜΠ για την ελεύθερη διαμόρφωση της πτέρυγας με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα από το Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας (DTU, Riso Campus) [20].

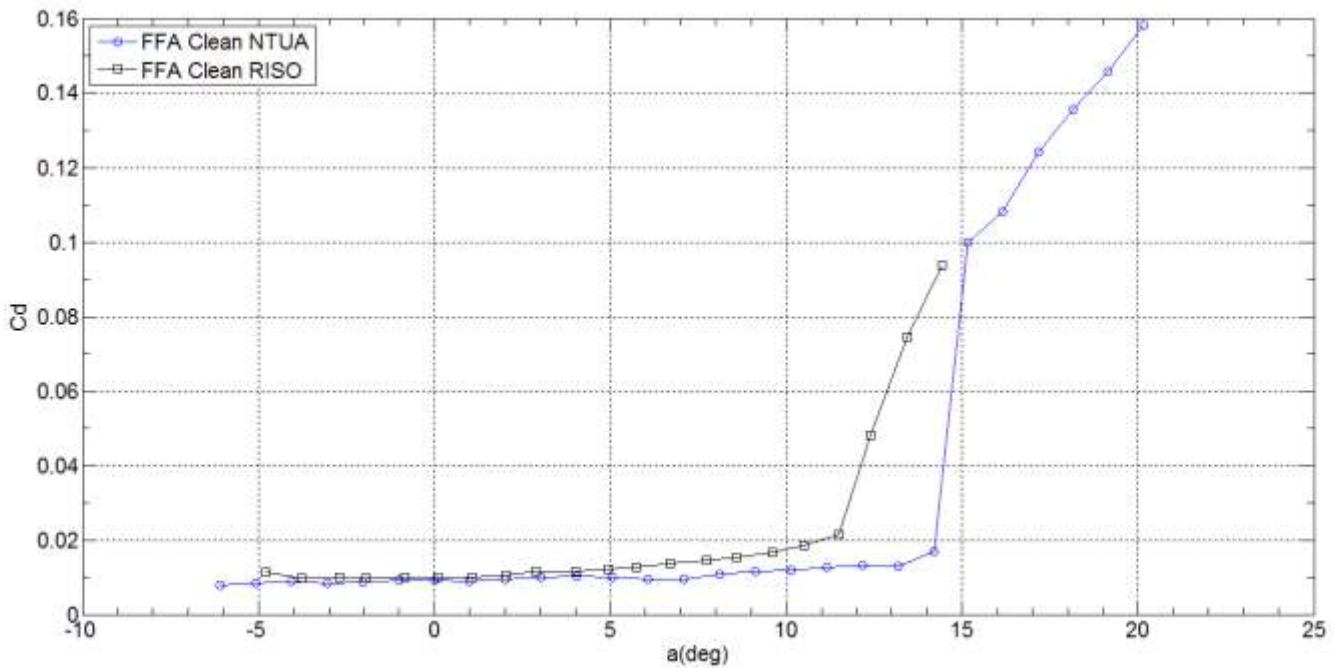
Στα διαγράμματα 3.ii.20 και 3.ii.21 συγκρίνονται οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από τα δύο πειράματα, μετά και από τις διορθώσεις. Σημειώνεται ότι το πείραμα του ΕΜΠ έγινε σε αριθμό Reynolds $Re = 1.5 \cdot 10^6$, ενώ το πείραμα του Riso Campus σε $Re = 1.6 \cdot 10^6$.

Στο διάγραμμα 3.ii.20 παρατηρούμε ότι η κλίση της γραμμικής περιοχής της Riso πτέρυγας είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή της ΕΜΠ πτέρυγας αλλά και από τη θεωρητική κλίση. Η γωνία μέγιστης άνωσης για την Riso είναι 11.5° και η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή άνωσης 1.373, ενώ για την ΕΜΠ είναι 1.466 στις 14.2° . Η αποκόλληση συμβαίνει νωρίτερα στην περίπτωση της Riso πτέρυγας, ενώ παρατηρούμε εντονότερη πτώση του συντελεστή άνωσης μετά την αποκόλληση στην περίπτωση της πτέρυγας ΕΜΠ. Οι αποκλίσεις αυτές ενδεχομένως να οφείλονται σε μικρές διαφορές στο πειραματικό μοντέλο, καθώς και σε φαινόμενα τρισδιάστατης αποκόλλησης.

Στο διάγραμμα 3.ii.21 που αφορά τον συντελεστή αντίστασης των δύο πτερύγων, έχουμε μικρές διαφορές στις μικρές γωνίες πρόσπτωσης, με την αντίσταση της Riso να είναι ελαφρώς υψηλότερη. Η διαφορά μεταξύ των δύο συντελεστών μεγαλώνει μετά τις 6° , αφού η ήπια αποκόλληση της ροής ξεκινά νωρίτερα στην περίπτωση της Riso. Η διαφορά αυτή αυξάνει ραγδαία μετά τις 11.5° όπου η ροή αποκολλάται έντονα στην Riso, ενώ στην ΕΜΠ δεν έχει αποκολληθεί ακόμα. Όταν η ροή αποκολλάται και στην ΕΜΠ, δηλαδή μετά τις 14° , η διαφορά σχεδόν εξαλείφεται.



Διάγραμμα 3.ii.20- Σύγκριση συντελεστή άνωσης μεταξύ FFA Clean EMΠ και FFA Clean Riso σε $Re=1.5e6$ και $Re=1.6e6$ αντίστοιχα



Διάγραμμα 3.ii.21- Σύγκριση συντελεστή αντίστασης μεταξύ FFA Clean EMΠ και FFA Clean Riso σε $Re=1.5e6$ και $Re=1.6e6$ αντίστοιχα

4. Μετρήσεις με στερεοσκοπικό PIV (Stereo PIV)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων PIV. Στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς και των χαρακτηριστικών των στροβίλων που παράγονται από τις στροβιλογεννήτριες, στις πέντε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της χορδής. Η ανάλυση βασίστηκε σε ορισμένες σχέσεις και παραδοχές, οι οποίες παρατίθενται στη συνέχεια.

Το κέντρο του κάθε στροβίλου θεωρήθηκε το σημείο όπου εντοπίζεται μέγιστη τιμή στροβιλότητας ω_{max} . Η πορεία που ακολουθεί ο στροβίλος αποτυπώνεται με βάση αυτό το κέντρο. Η κυκλοφορία του στροβίλου, η οποία αποτελεί μέτρο της ισχύος του, υπολογίζεται ως το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της ταχύτητας πάνω στο όριο του στροβίλου, δηλαδή $\oint_C \vec{v} \cdot d\vec{l}$. Στην προκειμένη περίπτωση, το όριο του στροβίλου καθορίζεται ως η καμπύλη γύρω από το κέντρο του στροβίλου, πάνω στην οποία τα στοιχεία του ρευστού έχουν στροβιλότητα μισή από τη μέγιστη, δηλαδή $\omega_{0.5} = \frac{\omega_{max}}{2}$. Προκύπτει, συνεπώς, μια επιφάνεια που περικλείεται από το όριο αυτό με εμβαδόν $A_{0.5}$, πάνω στην οποία τα στοιχεία του ρευστού έχουν στροβιλότητα $\omega_{0.5} \leq \omega \leq \omega_{max}$. Επειδή ο στροβίλος δεν είναι κυκλικός, χρησιμοποιείται αυτό το εμβαδόν για να καθοριστεί η ακτίνα του, ακολουθώντας τη σχέση

$$R_{0.5} = \sqrt{A_{0.5}/\pi}$$

Σύμφωνα με τον Stillfried et al [21] το πεδίο ταχυτήτων των στροβίλων μπορεί να προκύψει αν από τη μέση χρονικά τιμή του πεδίου ταχυτήτων αφαιρεθεί η μέση ροή, υπολογισμένη για κάθε y κατά το πλάτος των τεσσάρων στροβίλων. Δηλαδή,

$$V_i(z, y) = u_{i,PIV}(z, y) - U_i(y), \text{ όπου}$$

$u_{i,PIV}(z, y) = \overline{u_i(z, y, t)}$ η μέση χρονικά τιμή της ταχύτητας σε κάθε σημείο του επιπέδου YZ

και $U_i(y) = \langle u_{i,PIV}(z, y) \rangle$ η μέση τιμή της ταχύτητας κατά z

i. Μέση ροή

Στο διάγραμμα 4.i.1 παρουσιάζεται η κατανομή της αδιάστατης ταχύτητας κατά τον άξονα x (παράλληλα της ροής) $U = u_{x,PIV}/U_{inf}$ και της αδιάστατης στροβιλότητας $\omega_x = \Omega/(U_{inf}/c)$ σε όλα τα επίπεδα μέτρησης.

Στην πρώτη στήλη του διαγράμματος παρουσιάζονται ακόμη η ισοϋψής της αδιάστατης ταχύτητας, η οποία σηματοδοτεί την έναρξη του οριακού στρώματος που σχηματίζεται στην επιφάνεια στην πτέρυγας (δηλαδή $\frac{\partial U}{\partial y} = 0$ στο $\frac{z}{h} = 7.3$), καθώς και οι ισοϋψείς της αδιάστατης στροβιλότητας $\omega_{0.5}$, οι οποίες ορίζουν το μέγεθος των στροβίλων. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα διανυσματικά πεδία ταχυτήτων των στροβίλων $V_i(z, y)$ με λευκά διανύσματα. Οι ισοϋψείς αδιάστατης στροβιλότητας $\omega_{0.5}$ παρουσιάζονται και στη δεύτερη στήλη του διαγράμματος, συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες τιμές.

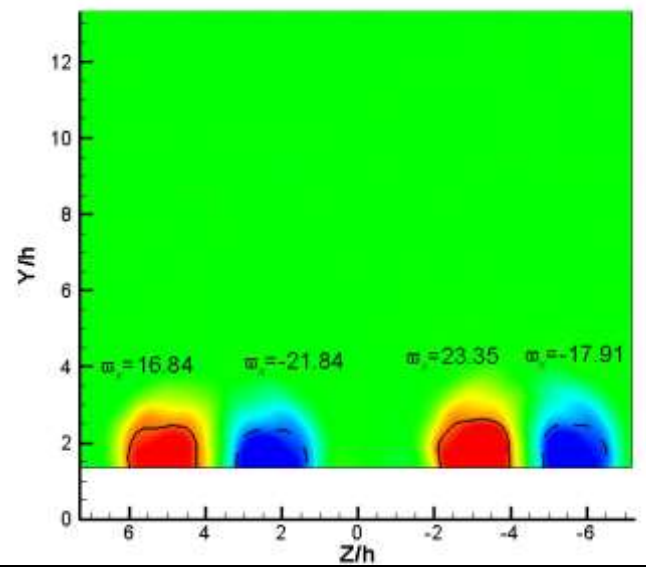
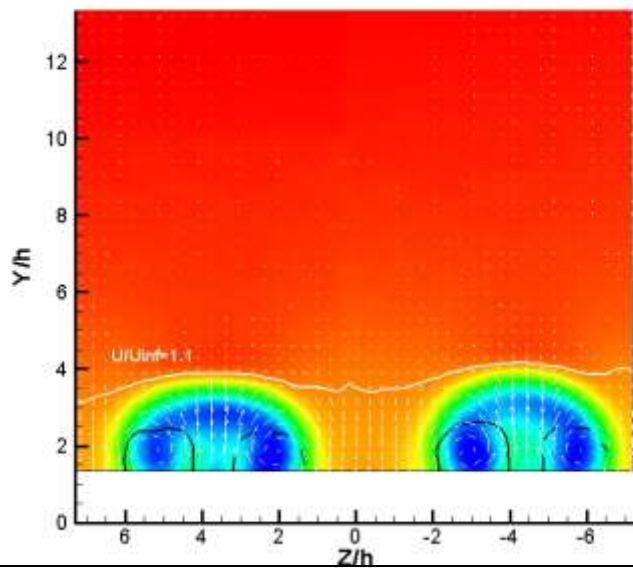
Στην πρώτη στήλη του εν λόγω διαγράμματος μπορούμε να παρατηρήσουμε πώς διαμορφώνεται η παράλληλη στη ροή ταχύτητα προχωρώντας προς την ακμή εκφυγής. Είναι φανερό ότι στο εσωτερικό των τεσσάρων στροβίλων έχουμε τη μικρότερη ταχύτητα, ενώ αυτή αυξάνει προς την εξωτερική περιοχή. Πάνω από την λευκή ισοϋψή καμπύλη, η οποία οριοθετεί το οριακό στρώμα, η ταχύτητα παραμένει πρακτικά σταθερή στο εκάστοτε επίπεδο, μειούμενη όμως όσο πλησιάζουμε προς την ακμή εκφυγής, αφού η ροή επιβραδύνει. Επίσης, όσο πλησιάζουμε προς την ακμή εκφυγής, οι περιοχές χαμηλής ταχύτητας μεγαλώνουν, γεγονός που οφείλεται στο φαινόμενο της διάχυσης των στροβίλων. Η λειτουργία των στροβιλογεννητριών γίνεται κατανοητή από το διανυσματικό πεδίο της ταχύτητας των στροβίλων. Το κάθε ζεύγος στροβίλων αποβάλλει ρευστό χαμηλής ενέργειας από το οριακό στρώμα, λόγω του κοινού ανωρεύματος (common upwash) που επάγουν στο ενδιάμεσό τους, ενώ παράλληλα, μεταξύ των διαδοχικών ζευγών δημιουργείται κατώρευμα, το οποίο τροφοδοτεί με ρευστό υψηλής ενέργειας το οριακό στρώμα. Σαν αποτέλεσμα το οριακό στρώμα παραμένει προσκολλημένο. Σημειώνεται εδώ ότι, αρχικά, όταν τα ζεύγη των στροβίλων εκπέμπονται από τις στροβιλογεννήτριες επάγουν ανάμεσά τους κατώρευμα. Παρόλα αυτά, λόγω της επίδρασης των κατοπτρικών στροβίλων, οι στρόβιλοι που αποτελούν ζεύγος απομακρύνονται μεταξύ τους και πλησιάζουν τους στροβίλους από τα γειτονικά ζεύγη, με αποτέλεσμα να σχηματίζουν τελικά ζεύγη κοινού ανωρεύματος.

Στα διαγράμματα της αδιάστατης στροβιλότητας, στην δεύτερη στήλη, μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα τα όρια των στροβίλων και πώς αυτά διαμορφώνονται καθώς πλησιάζουμε στην ακμή εκφυγής. Οι στρόβιλοι, ανά δύο, ξεκινούν συγκεντρωμένοι γύρω από το σημείο μέγιστης στροβιλότητας, έχοντας σχεδόν κυκλικό σχήμα και κοντά μεταξύ τους.

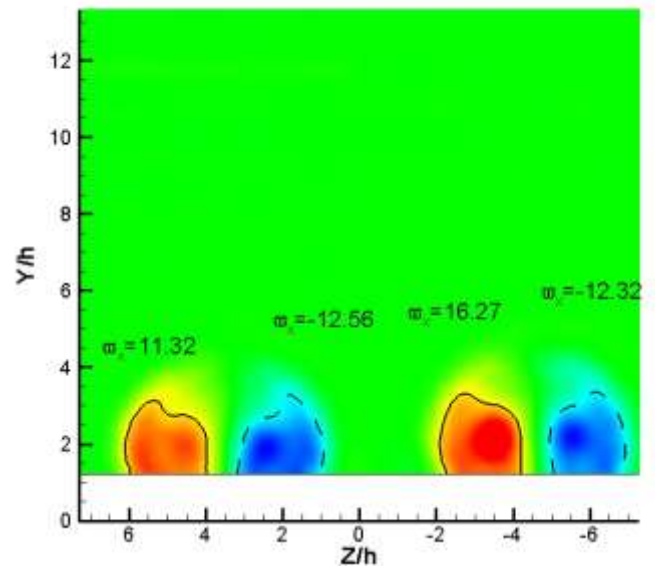
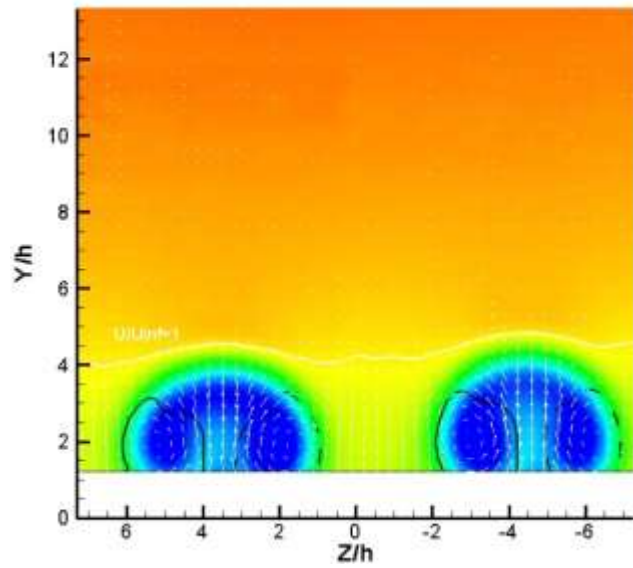
Προχωρώντας προς τα πίσω, οι στρόβιλοι αυξάνουν σε μέγεθος, λόγω του φαινομένου της διάχυσης, ενώ παράλληλα μειώνεται η μέγιστη στροβιλότητά τους. Επίσης απομακρύνονται μεταξύ τους, ενώ το σχήμα τους τείνει σταδιακά σε ελλειπτικό, με την μεγάλη διάσταση στον άξονα y .

Η αρίθμηση των στροβίλων που χρησιμοποιείται παρακάτω γίνεται από τα θετικά του άξονα Z προς τα αρνητικά. Έτσι λοιπόν έχουμε τέσσερις στροβίλους, με αρίθμηση από 1 ως 4.

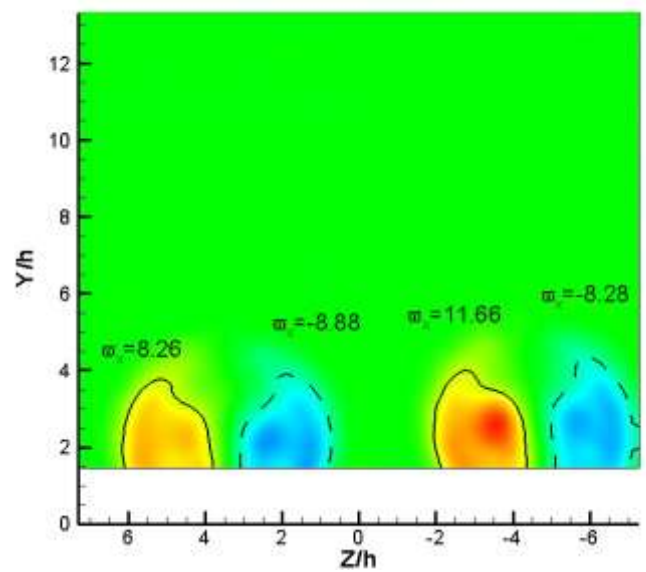
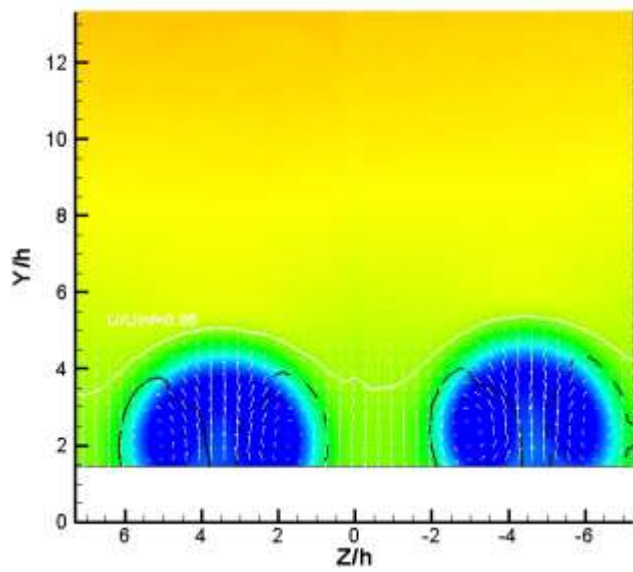
Επίπεδο Α, $\chi/c=0.6$, $\Delta x/h=21.4$



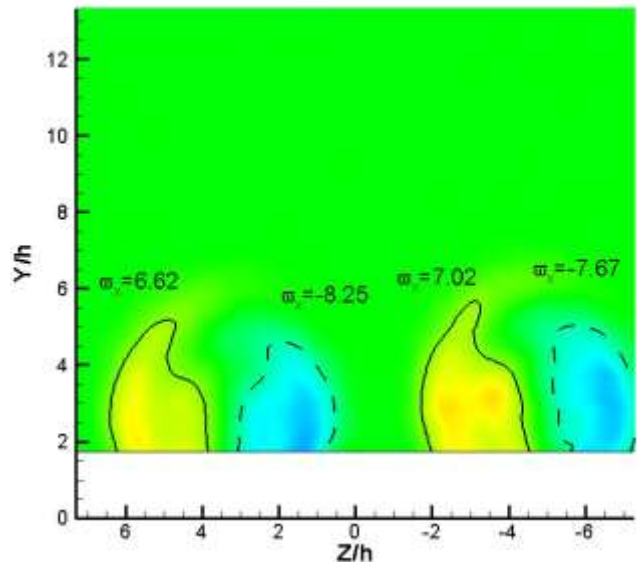
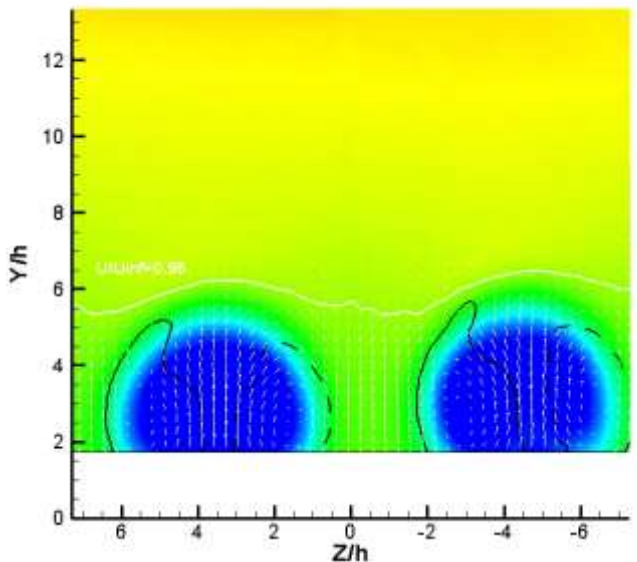
Επίπεδο Β, $\chi/c=0.66$, $\Delta x/h=26.4$



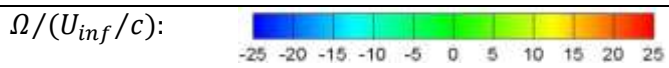
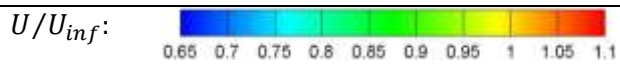
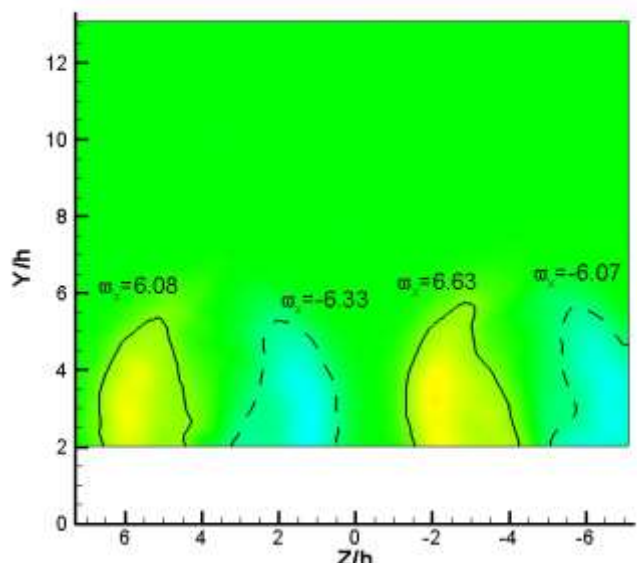
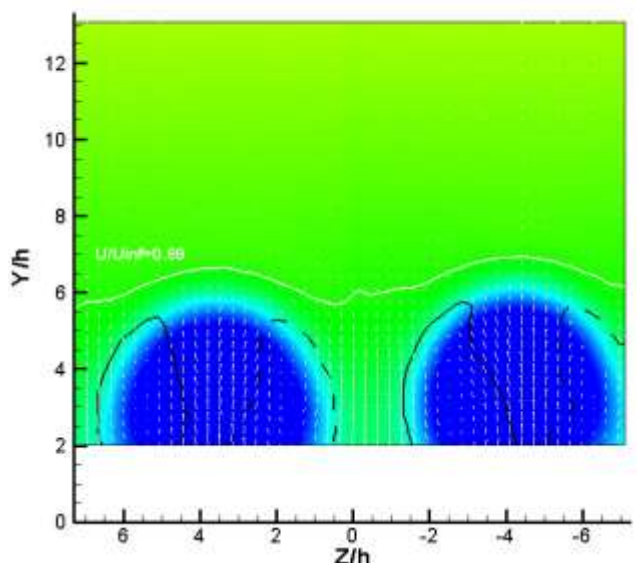
Επίπεδο C, $\chi/c=0.72$, $\Delta x/h=31.4$



Επίπεδο D, $\chi/c=0.78$, $\Delta x/h=36.4$



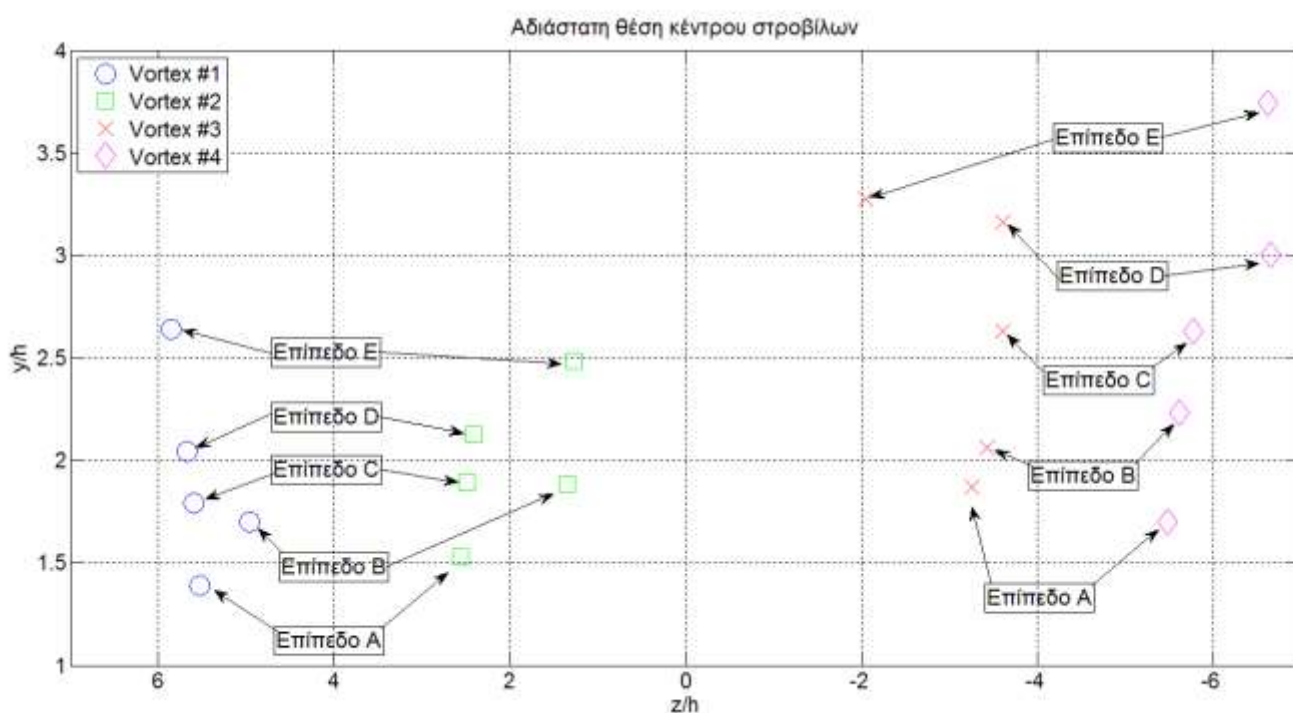
Επίπεδο E, $\chi/c=0.84$, $\Delta x/h=41.4$



Διάγραμμα 4.i.1-(Αριστερή στήλη) Κατανομή της ταχύτητας u και το διανυσματικό πεδίο των στροβίλων (ένα στα τέσσερα διανύσματα παρουσιάζονται για λόγους ευκρίνειας). Η λευκή καμπύλη οριοθετεί το οριακό στρώμα. (Δεξιά στήλη) Κατανομή στροβιλότητας ω_x σε όλα τα επίπεδα μέτρησης. Σε όλα τα διαγράμματα παρουσιάζονται και οι ισοϋψείς καμπύλες $\omega_x = \omega_{0.5}$ οι οποίες ορίζουν τα όρια των στροβίλων. Η θέση του κάθε επιπέδου μέτρησης και η απόστασή του από τα VGs δίνεται στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος.

Πορεία των στροβίλων

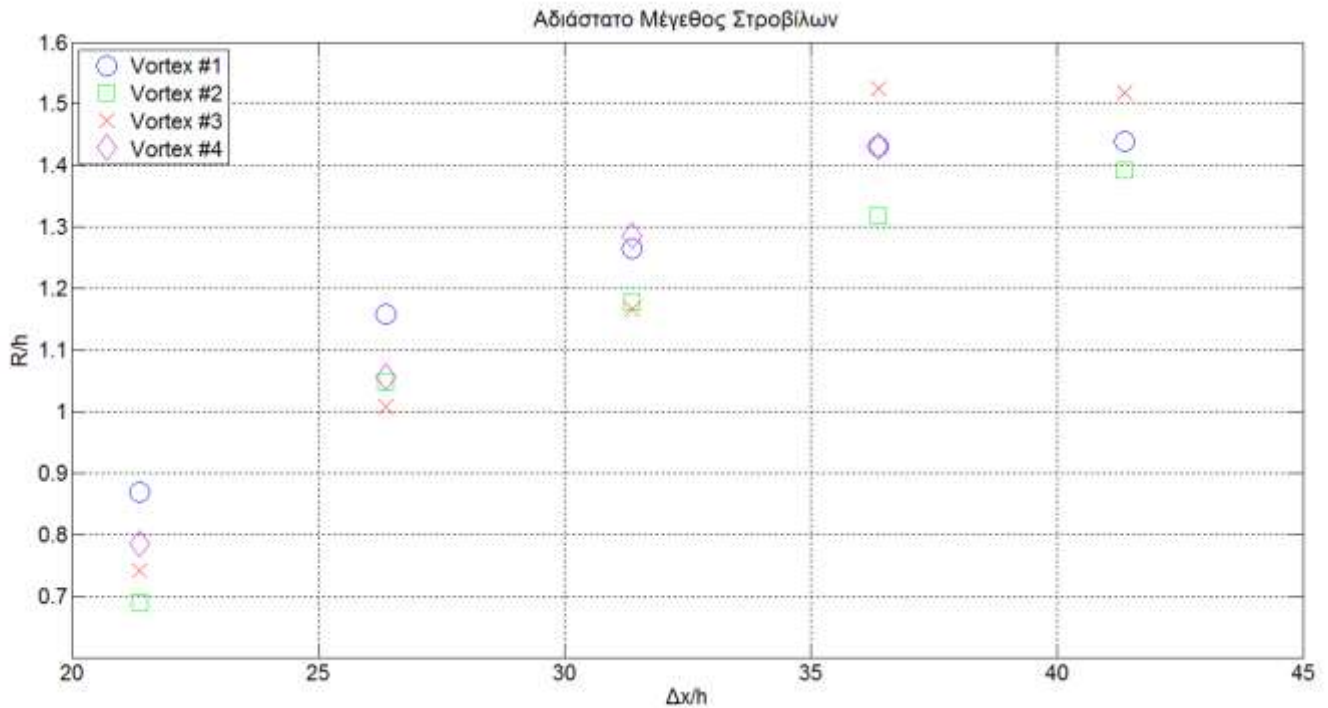
Στο διάγραμμα 4.i.2 μπορούμε να παρατηρήσουμε τη θέση των στροβίλων. Όλοι οι στρόβιλοι απομακρύνονται από την επιφάνεια της πτέρυγας λόγω της αλληλεπίδρασης τους. Το δεξιό ζεύγος (στρόβιλοι 3 και 4) απομακρύνονται ταχύτερα από την επιφάνεια αφού είναι ισχυρότεροι, λόγω ατελειών στην κατασκευή των στροβιλογεννητριών. Η απόσταση των στροβίλων του αριστερά ζεύγους παραμένει πρακτικά σταθερή για τα πρώτα 4 επίπεδα, ενώ του δεξιού ζεύγους για τα πρώτα 3. Στη συνέχεια οι στρόβιλοι των ζευγών απομακρύνονται μεταξύ τους. Παρόλο που μέρος του στρόβιλου 4 είναι εκτός του τελευταίου επιπέδου μέτρησης (Ε), το κέντρο του είναι μέσα στο επίπεδο μέτρησης, γι' αυτό αποτυπώνεται και στο διάγραμμα 4.i.2.



Διάγραμμα 4.i.2- Αδιάστατες θέσεις των τεσσάρων στροβίλων για τα 5 επίπεδα μέτρησης

Μέγεθος των στροβίλων

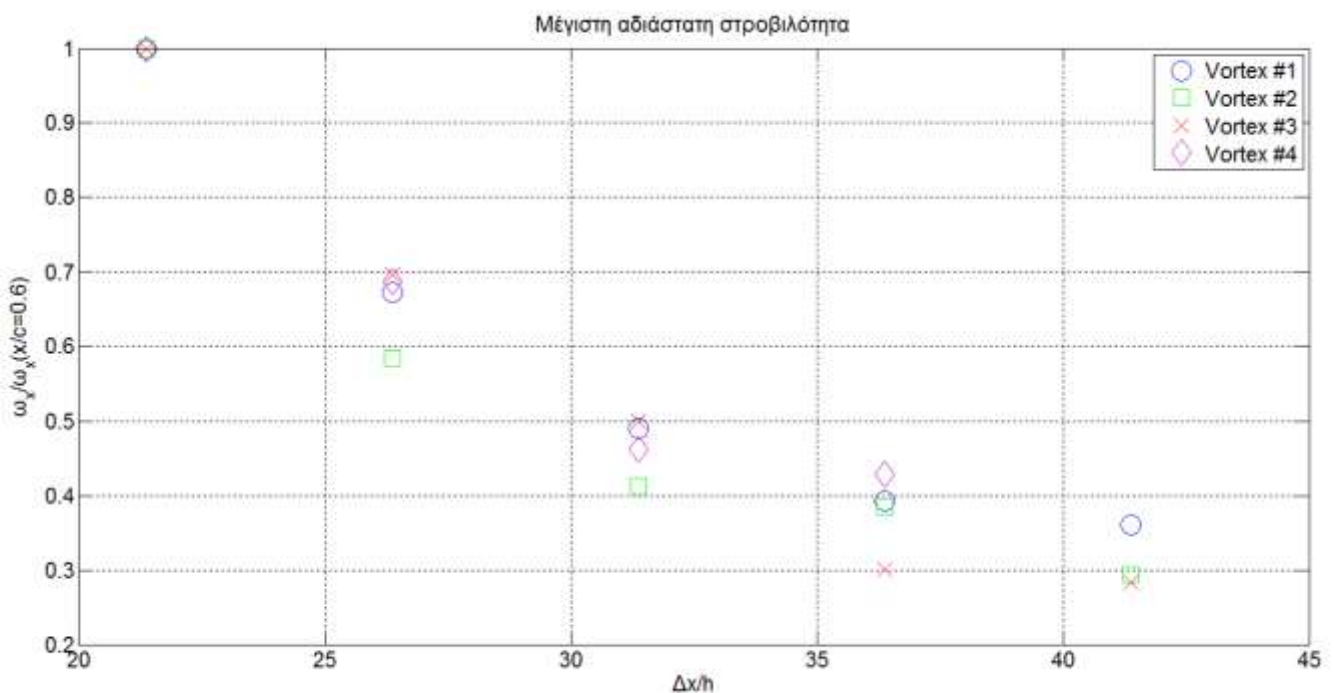
Στο διάγραμμα 4.i.3 παρουσιάζεται το μέγεθος των στροβίλων σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκπομπής τους. Παρατηρούμε ότι το μέγεθος των στροβίλων αυξάνεται όσο πλησιάζουμε στην ακμή εκφυγής, με τον ρυθμό αύξησης όμως να μειώνεται. Να σημειωθεί ότι στο τελευταίο επίπεδο, δηλαδή στο Ε ($x/c=0.84$) ο στρόβιλος 4 δεν παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, αφού ένα τμήμα του ήταν εκτός του επιπέδου μέτρησης και ανάλυσης.



Διάγραμμα 4.i.3-Αδιάστατο μέγεθος των τεσσάρων στροβίλων για τα 5 επίπεδα μέτρησης

Ένταση των στροβίλων

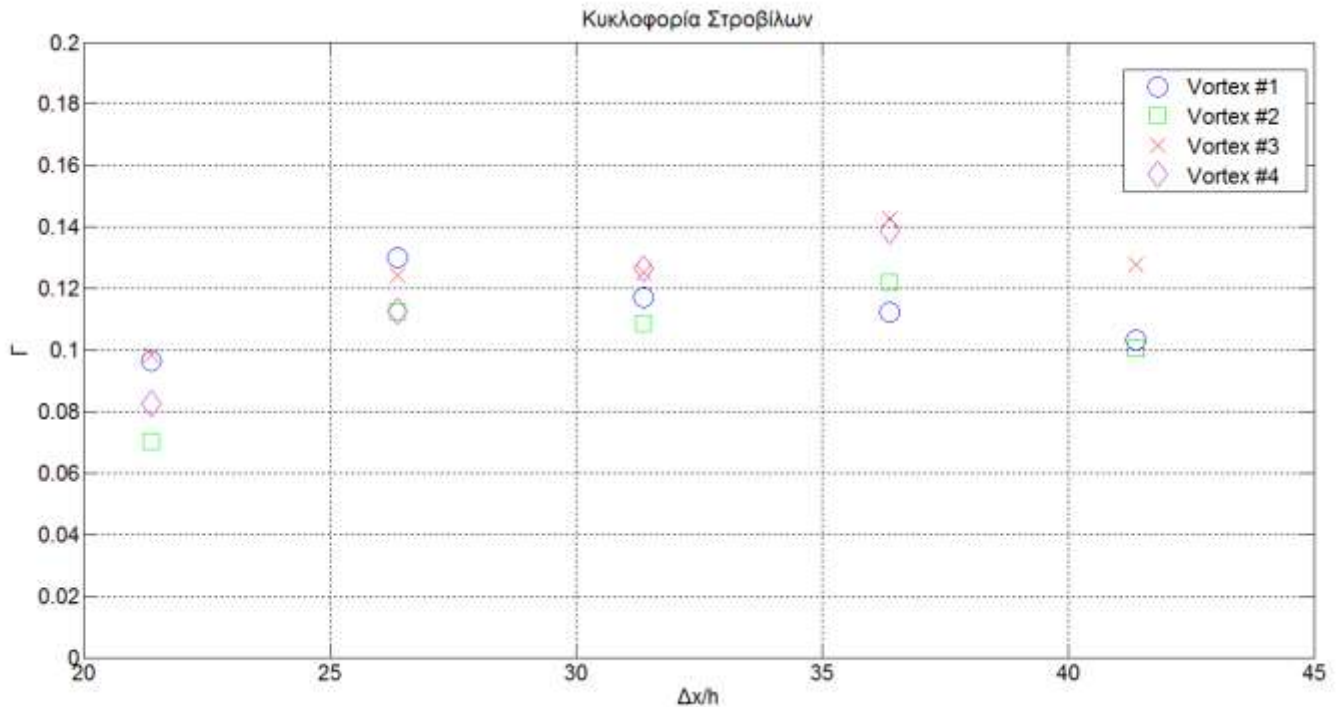
Στο διάγραμμα 4.i.4 παρουσιάζεται η μέγιστη αδιάστατη στροβιλότητα των τεσσάρων στροβίλων σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο εκπομπής τους. Η τιμή της στροβιλότητας για τον κάθε στρόβιλο έχει κανονικοποιηθεί με την μέγιστη τιμή της στροβιλότητας στο πρώτο επίπεδο μέτρησης. Παρατηρείται ότι η στροβιλότητα μειώνεται εκθετικά, όπως αναμενόταν.



Διάγραμμα 4.i.4-Μέγιστη αδιάστατη στροβιλότητα για τους τέσσερις στροβίλους για τα 5 επίπεδα μέτρησης

Κυκλοφορία των στροβίλων

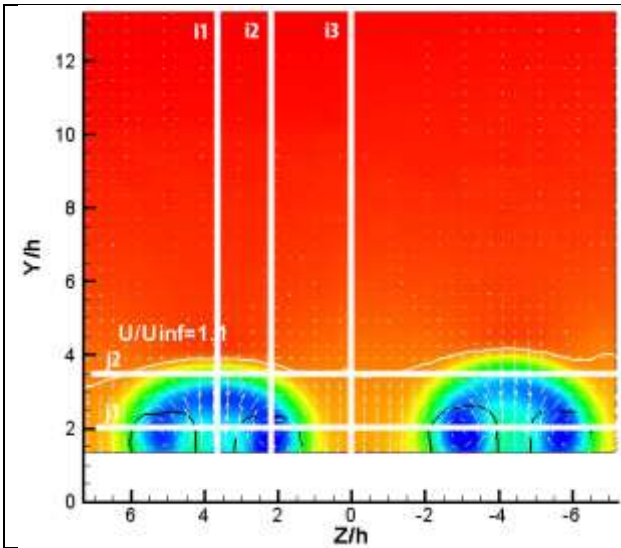
Στο διάγραμμα 4.i.5 παρουσιάζεται η κυκλοφορία των τεσσάρων στροβίλων σε συνάρτηση με τη θέση εκπομπής τους. Παρατηρούμε ότι η κυκλοφορία των στροβίλων παραμένει σχεδόν σταθερή. Να σημειωθεί ότι η ακρίβεια του υπολογισμού δεν είναι μεγάλη, γι' αυτό και παρατηρούνται διακυμάνσεις.



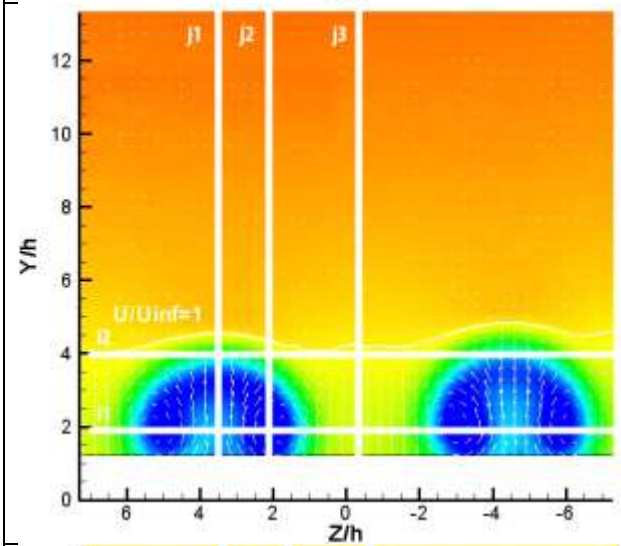
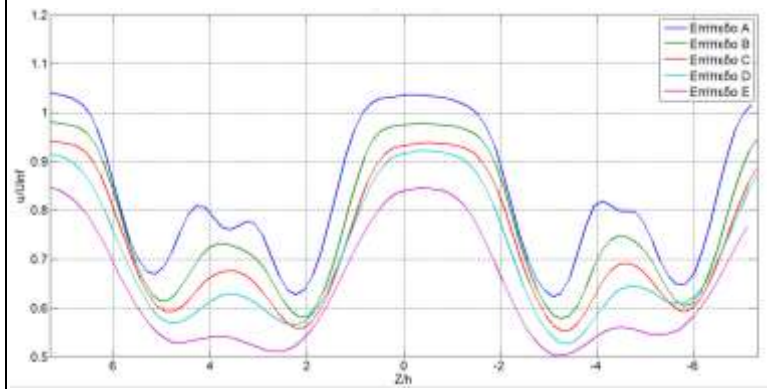
Διάγραμμα 4.i.5- Κυκλοφορία για τους τέσσερις στροβίλους για τα πέντε επίπεδα μέτρησης

ii. Τυρβώδη χαρακτηριστικά

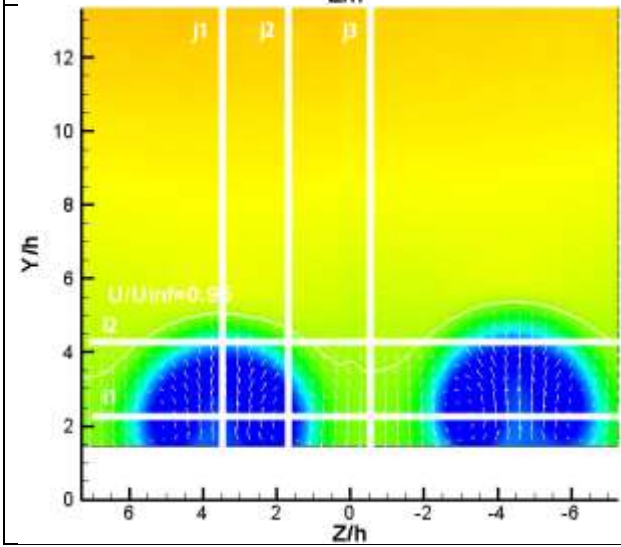
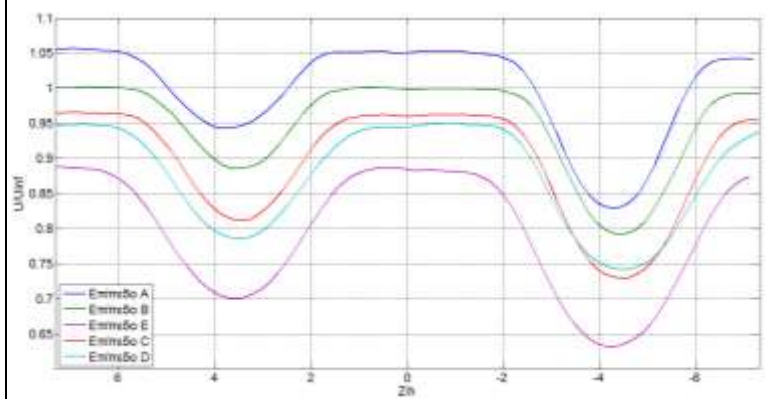
Για να μπορέσουμε να εξηγήσουμε τις τάσεις Reynolds που αναπτύσσονται και οι οποίες παρουσιάζονται στα διαγράμματα 4.ii.2 και 4.ii.3, πρέπει πρώτα να παρατηρήσουμε τις οριζόντιες και κατακόρυφες κατανομές ταχυτήτων σε συγκεκριμένες θέσεις, όπως φαίνονται στην δεξιά στήλη του διαγράμματος 4.ii.1. Στην αριστερή στήλη του ίδιου διαγράμματος φαίνονται οι θέσεις για τις οποίες αποτυπώνονται οι κατανομές, για κάθε επίπεδο μέτρησης. Στον Πίνακα 4.ii.1 φαίνονται αναλυτικά οι αδιάστατες συντεταγμένες των θέσεων αυτών.



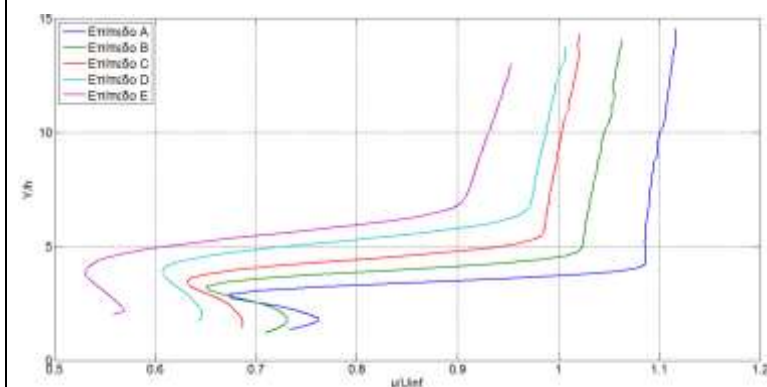
Οριζόντια κατανομή ταχύτητας u στη θέση $i1$

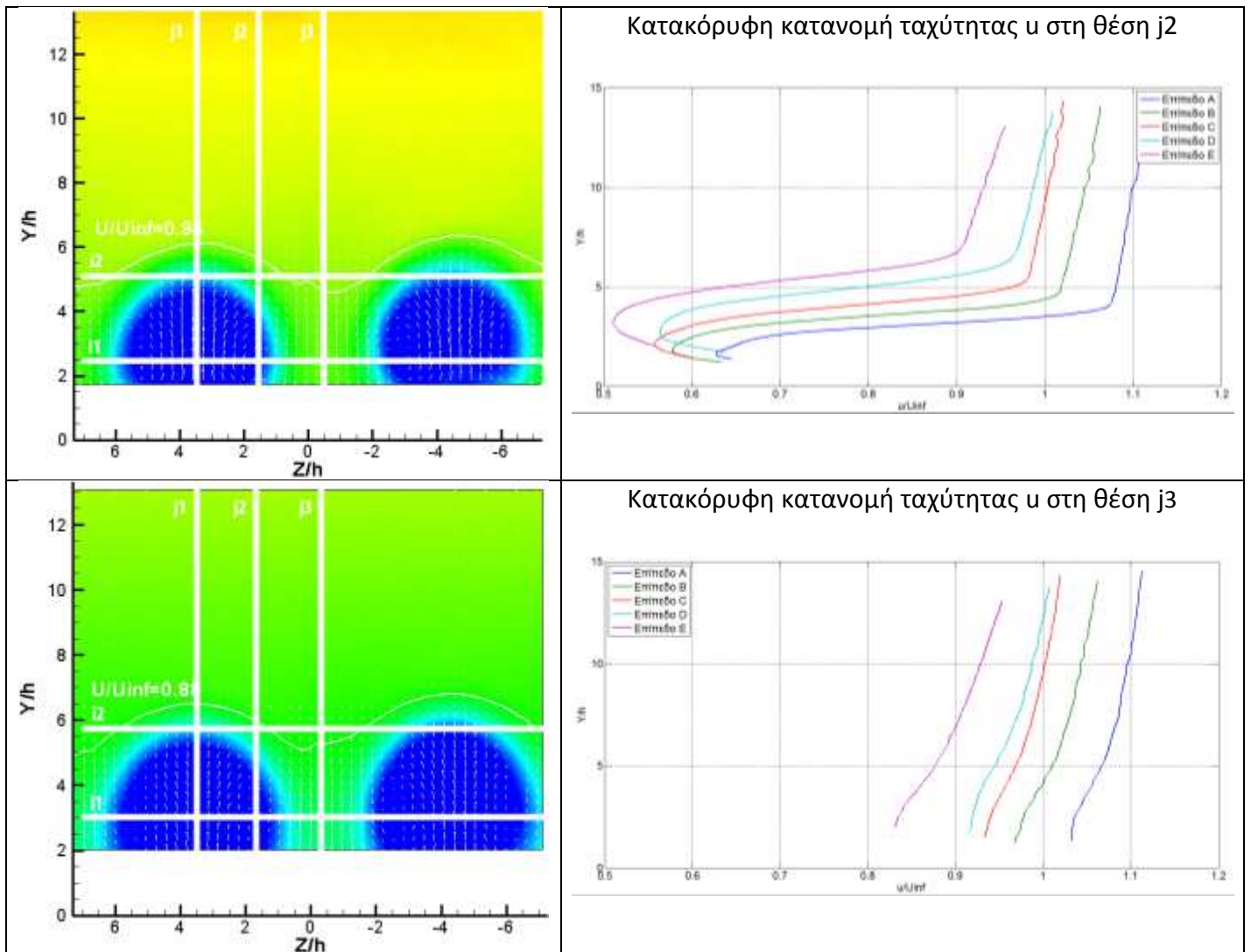


Οριζόντια κατανομή ταχύτητας u στη θέση $i2$



Κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας u στη θέση $j1$





Διάγραμμα 4.ii.1-(Αριστερή στήλη) Οριζόντιες και κατακόρυφες θέσεις για τις οποίες αποτυπώνονται οι κατανομές ταχυτήτων. (Δεξιά στήλη) Κατανομές ταχυτήτων στις θέσεις i_1, i_2, j_1, j_2, j_3

	A	B	C	D	E
i1	2.1	1.9	2.3	2.5	3
i2	3.5	4	4.3	5.1	5.7
j1	3.6	3.5	3.5	3.5	3.6
j2	2.2	2.2	1.6	1.6	1.7
j3	0	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4

Πίνακας 4.ii.1-Αδιάστατες συντεταγμένες θέσεων για τα πέντε επίπεδα μέτρησης

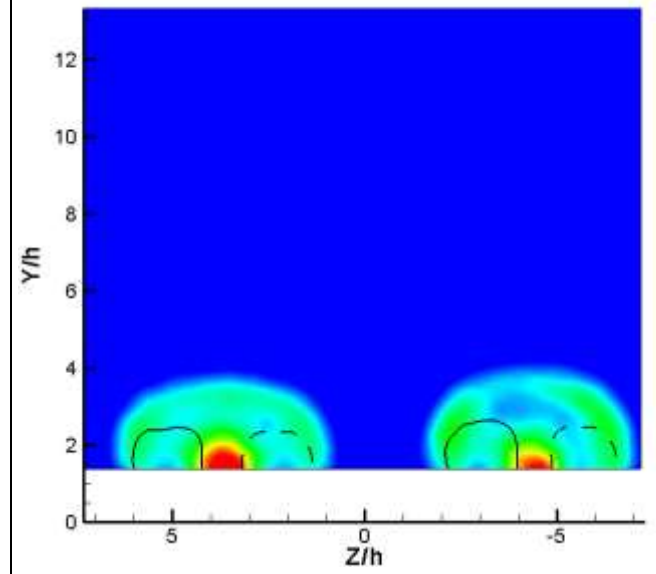
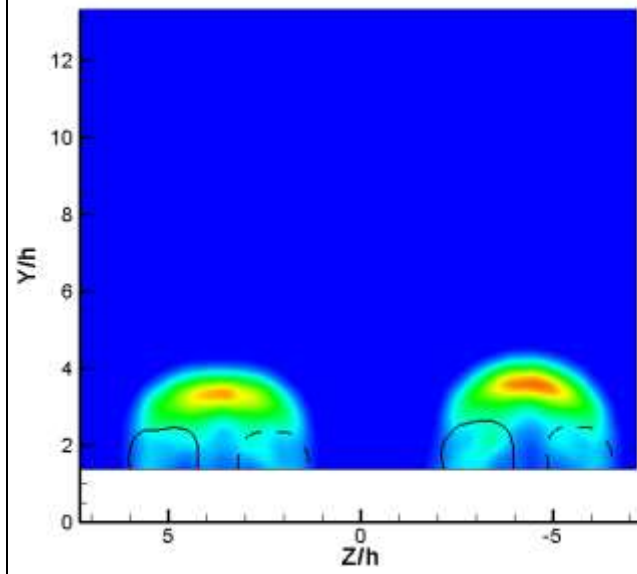
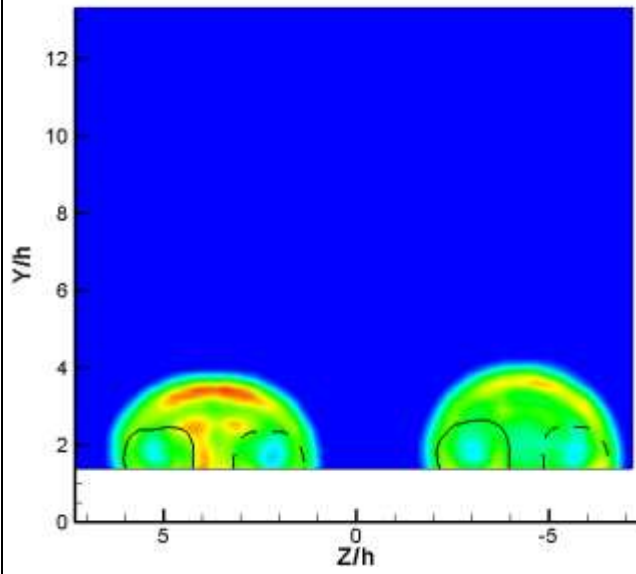
Σε γενικές γραμμές ισχύει ότι εκεί που έχουμε μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα, εμφανίζονται και μεγάλες ορθές και διατμητικές τάσεις μεταξύ των στοιχείων του ρευστού.

Έτσι λοιπόν, παρατηρώντας την οριζόντια κατανομή των ταχυτήτων στη θέση $j1$ που διέρχεται από το κέντρο των στροβίλων, έχουμε μεγάλη μεταβολή στην ταχύτητα έξω από τα ζεύγη των στροβίλων, αλλά και ανάμεσα στους δύο στροβίλους. Επίσης μεγάλη μεταβολή στην ταχύτητα παρατηρούμε και στις κατακόρυφες θέσεις $i1$ και $i2$. Οι παραπάνω μεταβολές θα μπορούσαν να εξηγήσουν τις ορθές τάσεις $u'u'$ και $w'w'$, καθώς και τις διατμητικές τάσεις $-u'v'$ και $-u'w'$, οι οποίες παίρνουν μεγάλες τιμές (θετικές ή αρνητικές) περιφερειακά του ζεύγους των δύο στροβίλων. Αυτό το στρώμα διάτμησης που αναπτύσσεται περιφερειακά του ζεύγους είναι το οριακό στρώμα στην επιφάνεια της πτέρυγας το οποίο με την επίδραση των στροβίλων ανασηκώνεται. Ένα μέρος του προφίλ του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της πτέρυγας μπορούμε να δούμε στην κατακόρυφη κατανομή των ταχυτήτων στη θέση $i3$, για τα πέντε διαφορετικά επίπεδα μέτρησης, αφού εκεί η επίδραση των στροβίλων είναι μικρότερη, ειδικά για το Επίπεδο A στο οποίο οι στροβίλοι είναι συγκεντρωμένοι.

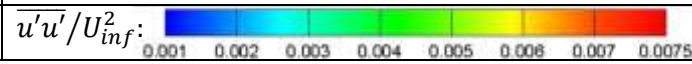
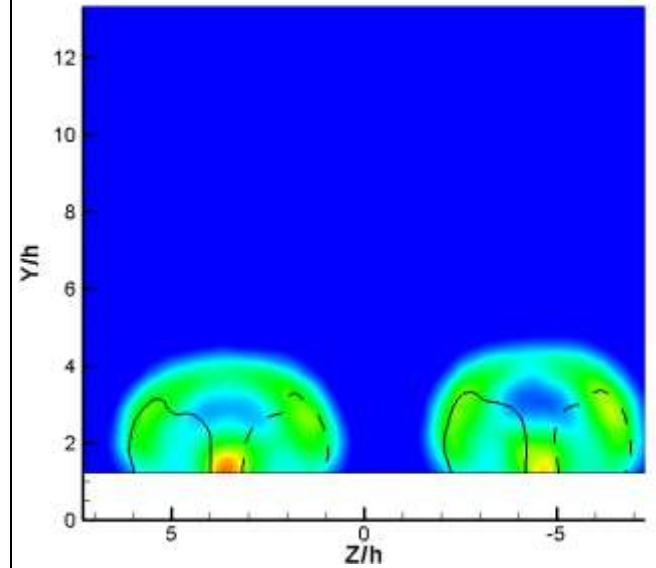
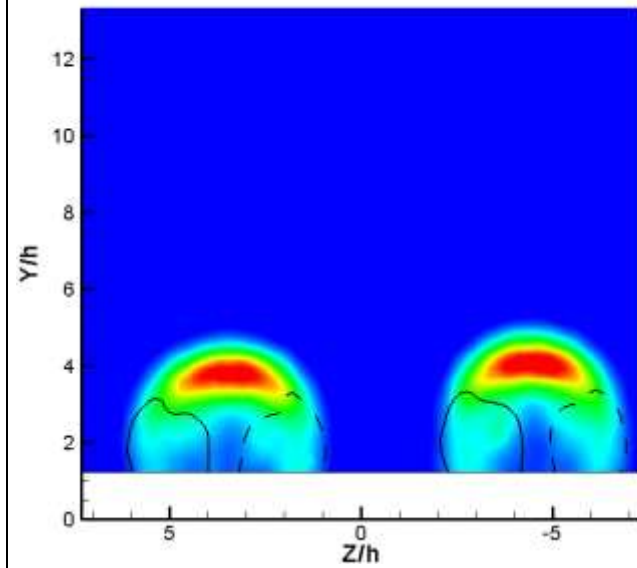
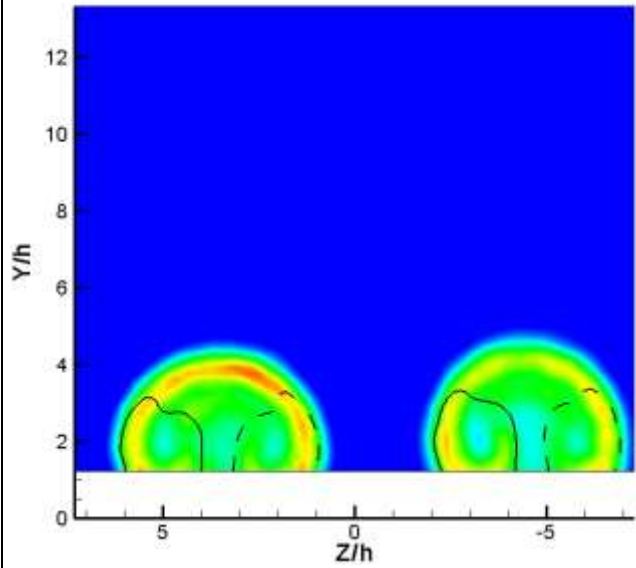
Οι ορθές τάσεις $v'v'$ παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους πάνω από το ζεύγος των στροβίλων, αφού εκεί έχουμε τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην κατακόρυφη ταχύτητα v , λόγω της διαρκούς μετακίνησης των στροβίλων κατά τον άξονα Z. Επίσης, οι διατμητικές τάσεις $-v'w'$ έχουν τις μέγιστες κατ' απόλυτο τιμές στα σημεία όπου οι στροβίλοι αλλάζουν κατεύθυνση στα στοιχεία του ρευστού στο επίπεδο Y-Z.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι οριζόντια κατανομή της ταχύτητας στη θέση $j1$ εξομαλύνεται καθώς πλησιάζουμε στο τελευταίο επίπεδο, λόγω της διάχυσης της ροής.

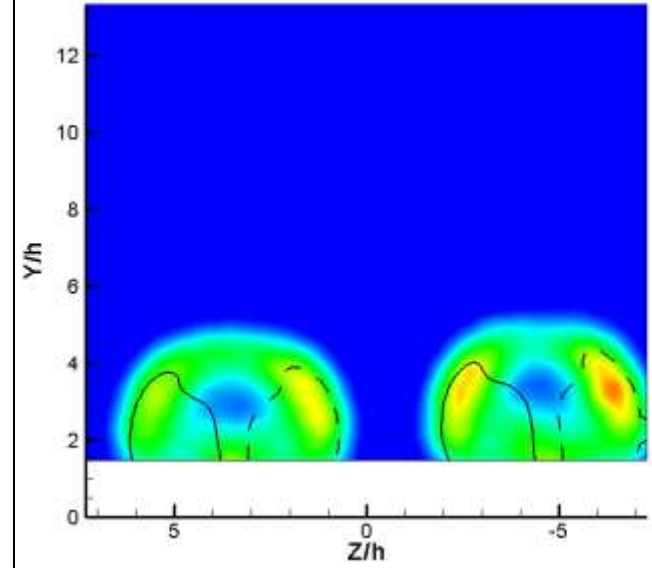
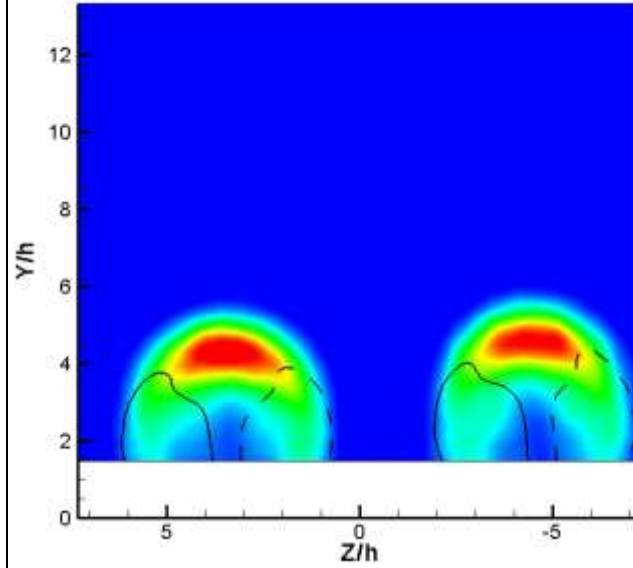
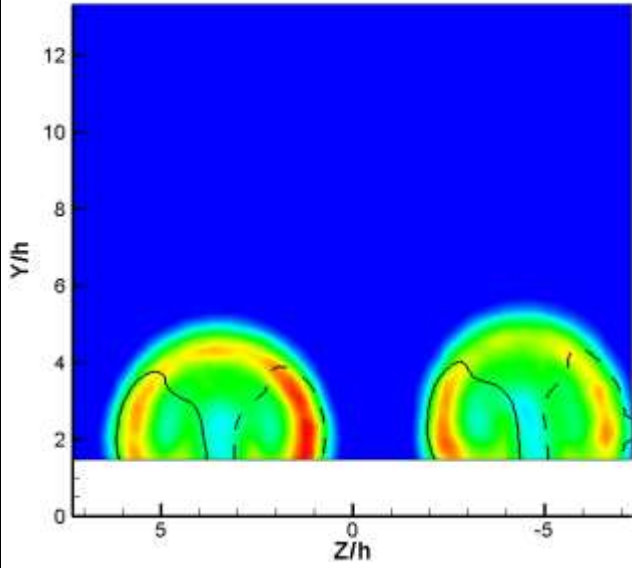
Επίπεδο Α, $\chi/c=0.6$, $\Delta\chi/h=21.4$



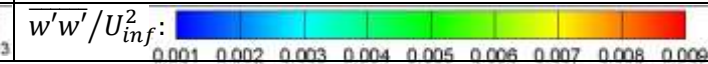
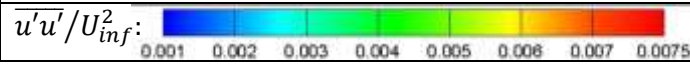
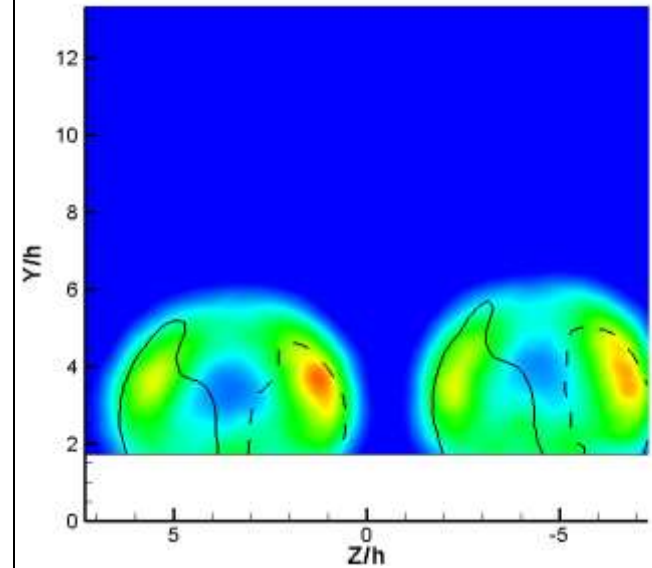
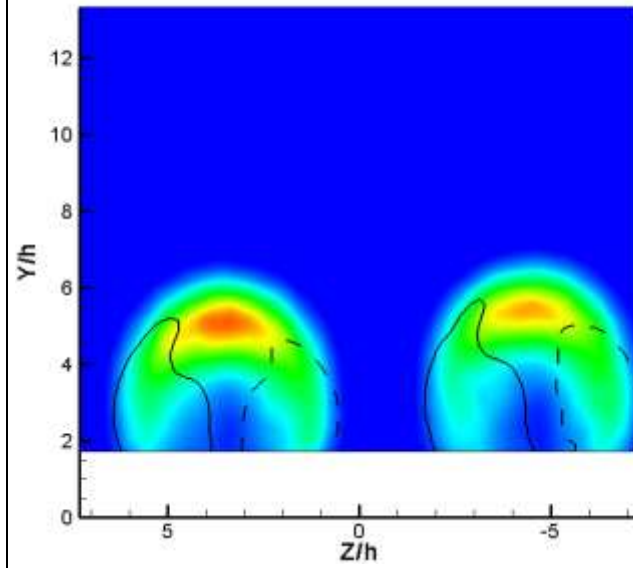
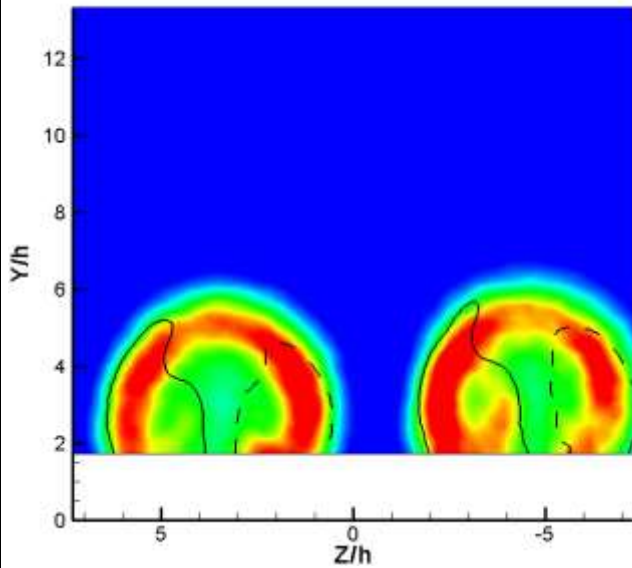
Επίπεδο Β, $\chi/c=0.66$, $\Delta\chi/h=26.4$



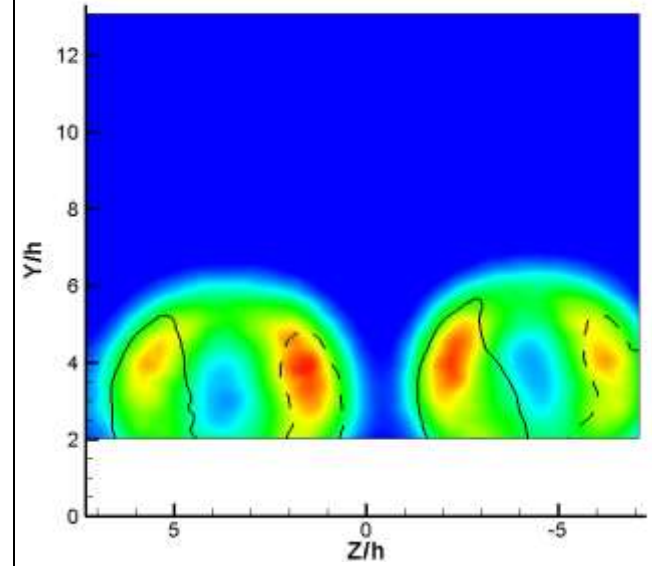
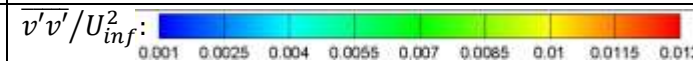
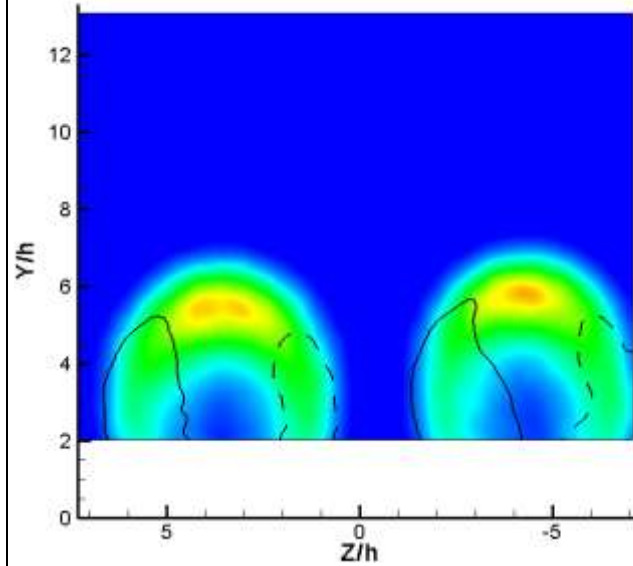
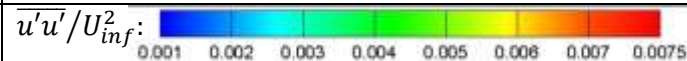
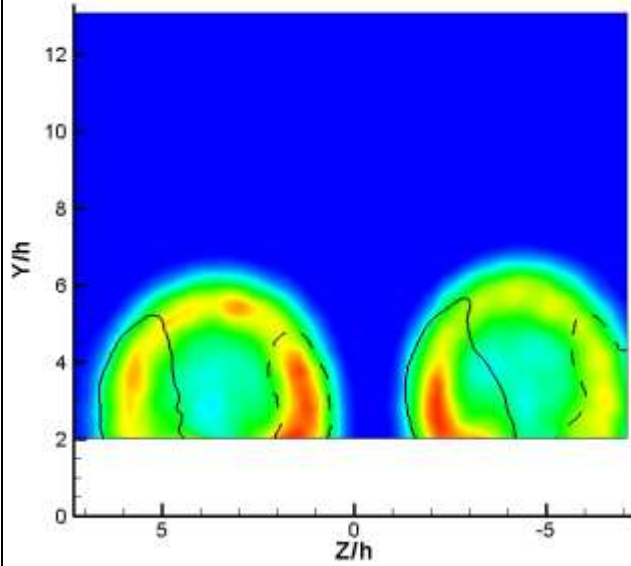
Επίπεδο C, $\chi/c=0.72$, $\Delta x/h=31.4$



Επίπεδο D, $\chi/c=0.78$, $\Delta x/h=36.4$

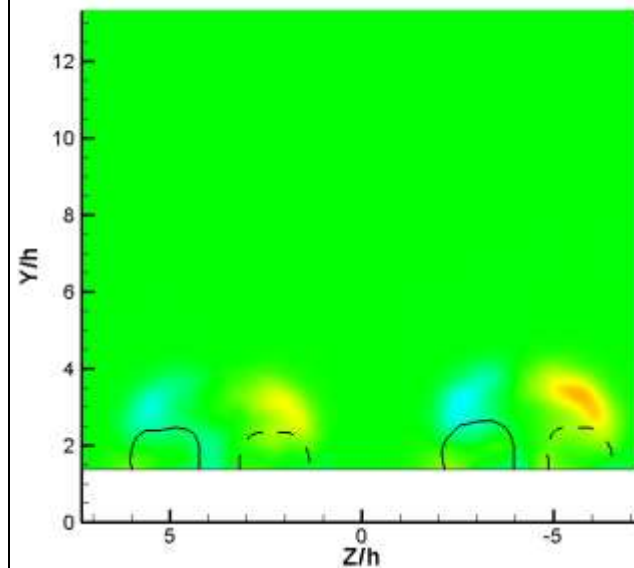
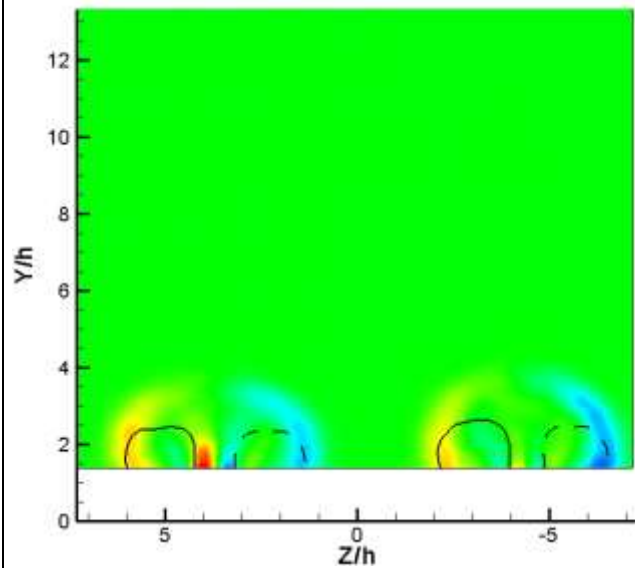
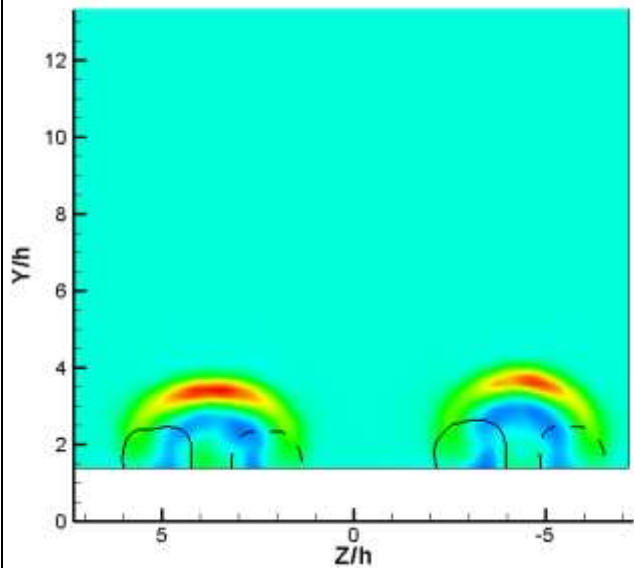


Επίπεδο E, $\chi/c=0.84$, $\Delta x/h=41.4$

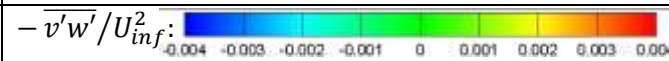
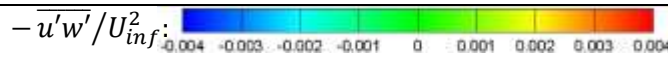
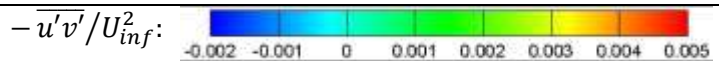
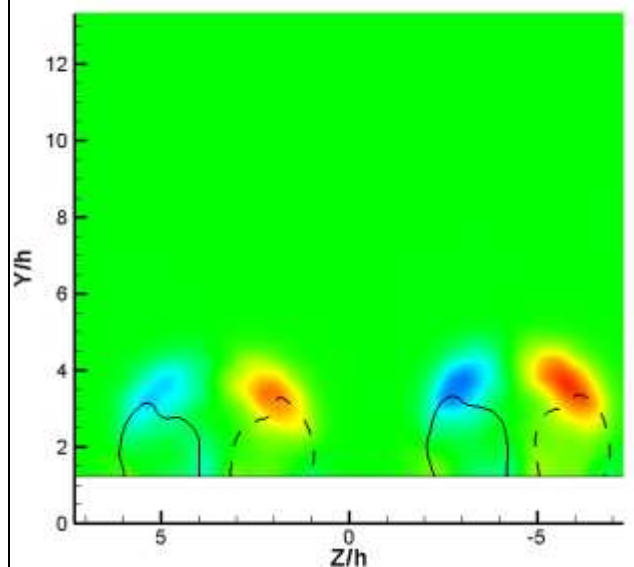
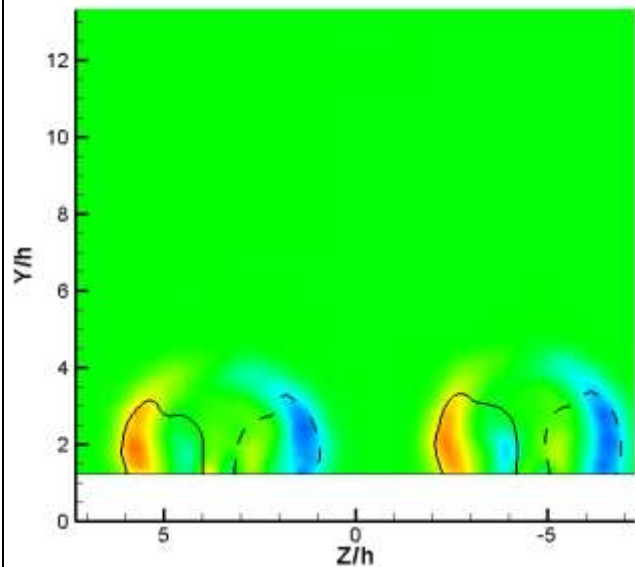
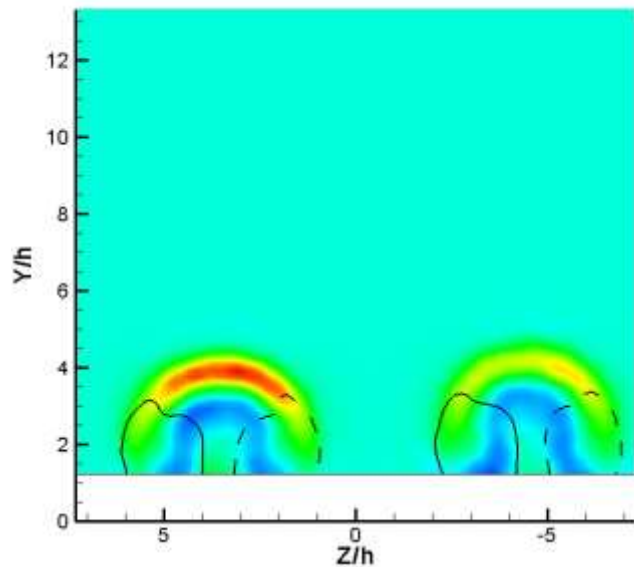


Διάγραμμα 4.ii.2-Ορθές τάσεις Reynolds και οι ισοψείς της στροβιλότητας $\omega_x = \omega_{0.5}$. (Αριστερή στήλη) Ισοψή διαγράμματα $\overline{u'u'}/U_{inf}^2$. (Μεσαία στήλη) Ισοψή διαγράμματα $\overline{v'v'}/U_{inf}^2$. (Δεξιά στήλη) Ισοψή διαγράμματα $\overline{w'w'}/U_{inf}^2$. Η θέση του κάθε επιπέδου μέτρησης και η απόστασή του από τα VGs δίνεται στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος

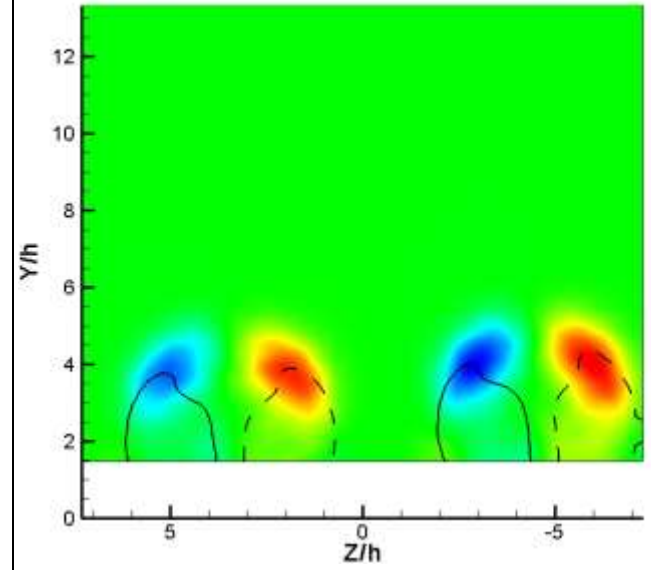
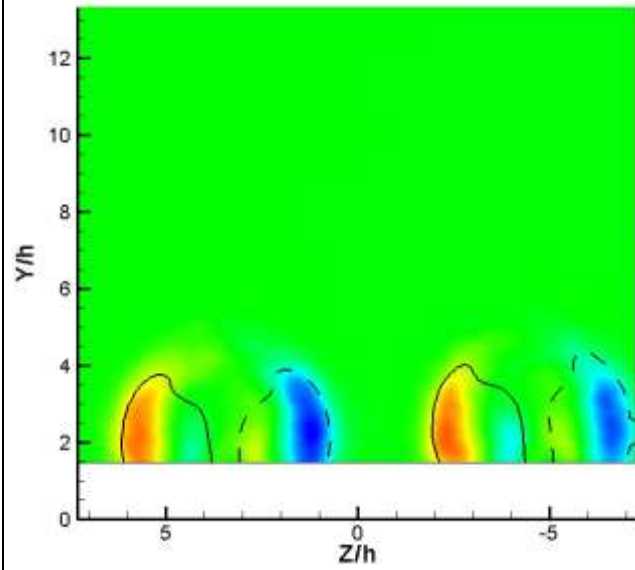
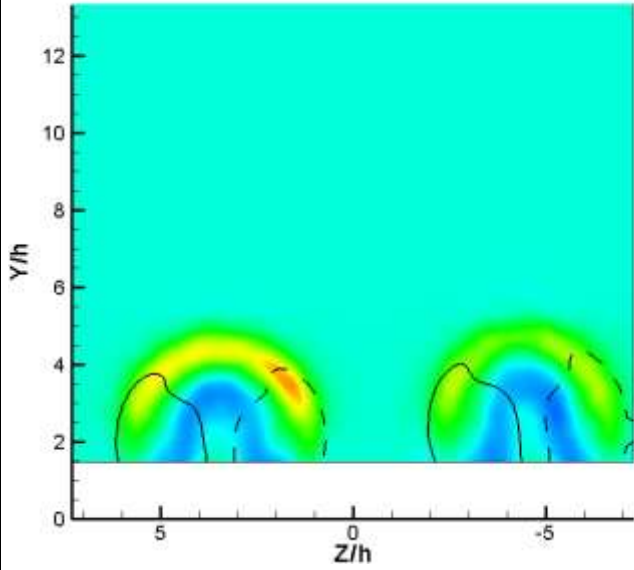
Επίπεδο Α, $\chi/c=0.6$, $\Delta x/h=21.4$



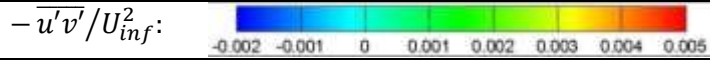
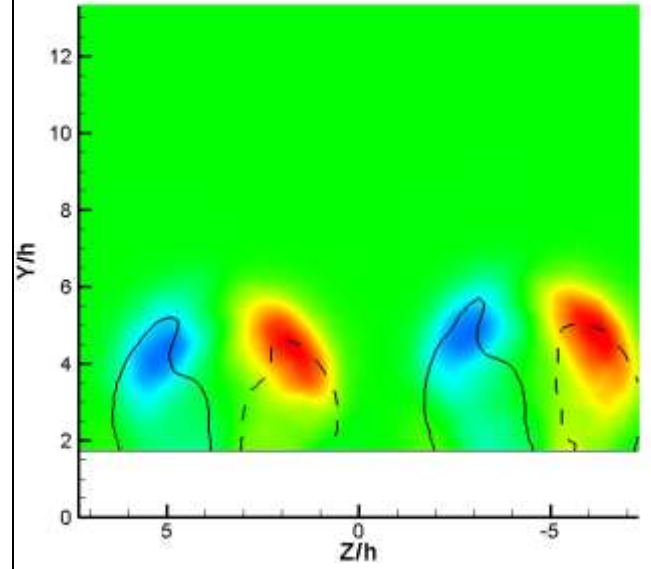
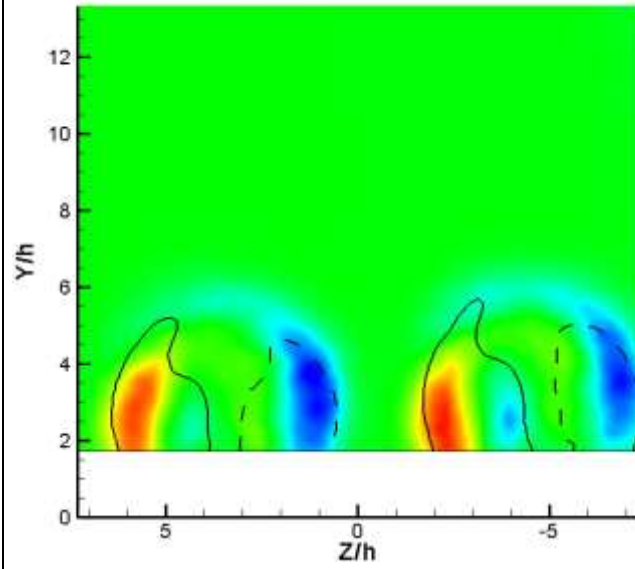
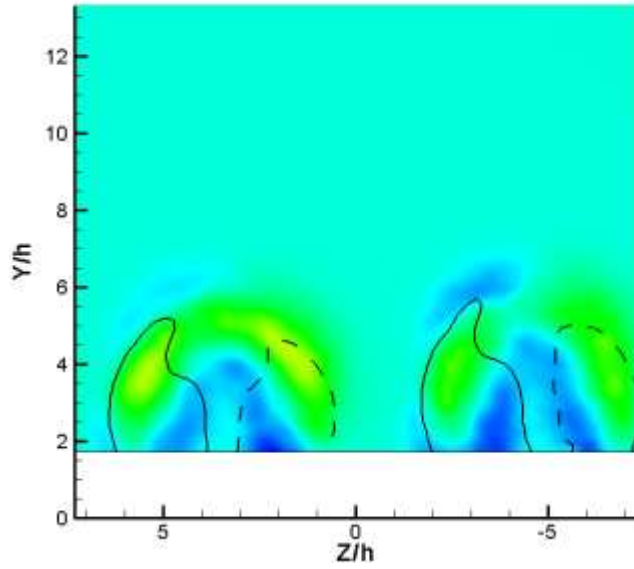
Επίπεδο Β, $\chi/c=0.66$, $\Delta x/h=26.4$



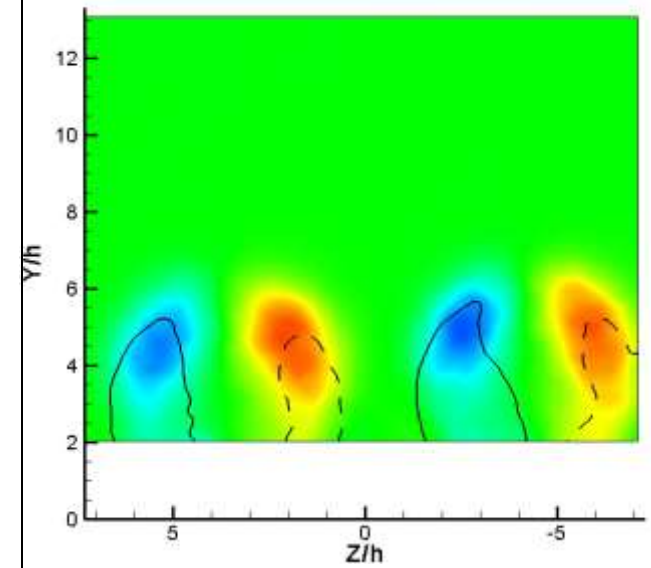
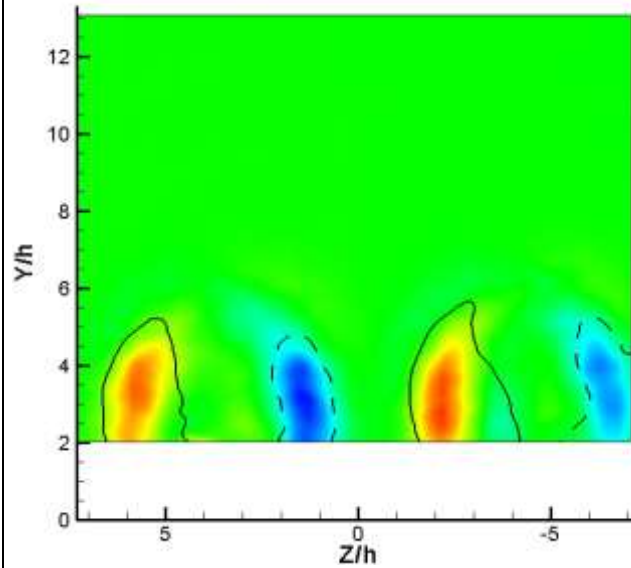
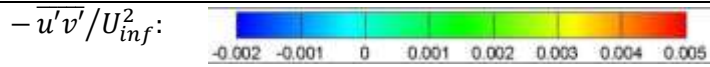
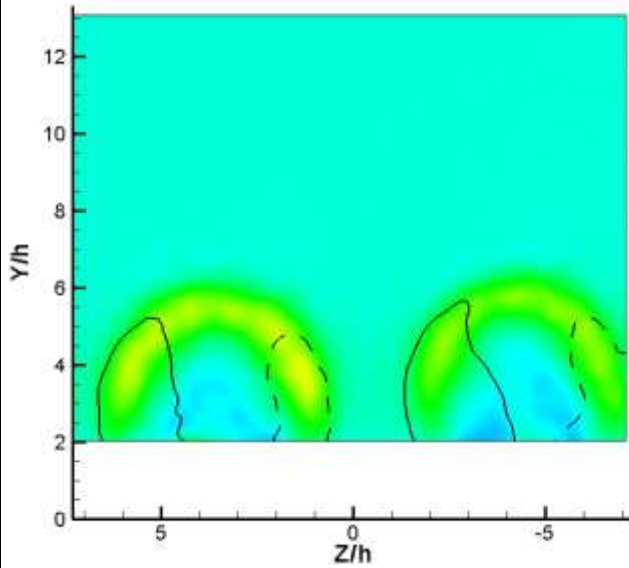
Επίπεδο C, $\chi/c=0.72$, $\Delta x/h=31.4$



Επίπεδο D, $\chi/c=0.78$, $\Delta x/h=36.4$



Επίπεδο E, $\chi/c=0.84$, $\Delta x/h=41.4$



Διάγραμμα 4.ii.3-Διαμητικές τάσεις Reynolds και οι ισοψείς της στροβιλότητας $\omega_x = \omega_{0.5}$. (Αριστερή στήλη) Ισοψή διαγράμματα $-\overline{u'v'}/U_{inf}^2$. (Μεσαία στήλη) Ισοψή διαγράμματα $-\overline{u'w'}/U_{inf}^2$. (Δεξιά στήλη) Ισοψή διαγράμματα $-\overline{v'w'}/U_{inf}^2$. Η θέση του κάθε επιπέδου μέτρησης και η απόστασή του από τα VGs δίνεται στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος

5. Σύνοψη-Συμπεράσματα

Συνολικά έγιναν μετρήσεις πιέσεων σε 2 πτέρυγες, μία με προφίλ NACA 63-418 και μία με FFA W3-241. Για την NACA έγιναν μετρήσεις για ελεύθερη και εξαναγκασμένη μετάβαση, αλλά και με εγκατεστημένες την απλή λωρίδα αποκόλλησης (simple stall strip) και την οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης (serrated stall strip). Για την FFA έγιναν μετρήσεις για ελεύθερη μετάβαση και με εγκατεστημένες τις στροβιλογεννήτριες (vortex generators) με $h/\delta=1$ ($h=4\text{mm}$) και με $h/\delta=1.6$ ($h=6\text{mm}$). Επίσης, για την FFA με εγκατεστημένες τις στροβιλογεννήτριες $h/\delta=1.6$ έγιναν και μετρήσεις με στερεοσκοπικό PIV για να μελετηθεί αναλυτικότερα η συμπεριφορά των στροβίλων. Τέλος, για να έχουμε μια εικόνα της ροής γύρω από τις πτέρυγες και κατά πόσον αυτή συμφωνεί με τις μετρούμενες πιέσεις, έγιναν πειράματα οπτικοποίησης της ροής (Flow-Viz).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Όσον αφορά τη NACA, η **εξαναγκασμένη μετάβαση**, μειώνει την μέγιστη άνωση της πτέρυγας, εισάγοντας και αστάθεια στην περιοχή της αποκόλλησης (μετά τις 11 μοίρες), αυξάνοντας παράλληλα την αντίσταση. Η αστάθεια αυτή προκαλεί φορτία κόπωσης στα πτερύγια και είναι ανεπιθύμητη. Η εγκατάσταση της **απλής λωρίδας αποκόλλησης** προκαλεί περεταίρω μείωση του συντελεστή άνωσης στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (μετά τις 9 μοίρες), αλλά μειώνει την αστάθεια που παρατηρείται στην αποκολλημένη ροή, καθώς και την αντίσταση. Τέλος η **οδοντωτή λωρίδα αποκόλλησης** δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές από την απλή, παρά μόνο ότι βελτιώνει σημαντικά την αστάθεια στην περιοχή της αποκόλλησης και αυξάνει την αντίσταση.
- Όσον αφορά την FFA, η επίδραση των **στροβιλογεννητριών** στην απόδοση της πτέρυγας είναι καταλυτική, αφού καθυστερεί σημαντικά την αποκόλληση του οριακού στρώματος της πτέρυγας, αυξάνοντας την άνωση στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, μειώνοντας, παράλληλα, την αντίσταση. Οι διαφορές μεταξύ των δύο στροβιλογεννητριών είναι αμελητέες, με μόνη εξαίρεση την αύξηση της αντίστασης σε αυτές με ύψος $h=6\text{mm}$.
- Η **οπτικοποίηση της ροής** τις περισσότερες φορές βρισκόταν σε συμφωνία με την μετρούμενη κατανομή των πιέσεων πάνω στις πτέρυγες, και όταν αυτό δεν συνέβαινε, οφείλονταν σε αποτύπωση διαφορετικής κατάστασης της ροής, λόγω αστάθειάς της.
- Τα **πειράματα PIV** έριξαν φως στην λειτουργία των στροβιλογεννητριών, αφού αποτυπώθηκε σαφώς ότι οι στρόβιλοι εισχωρούν στο επιφανειακό οριακό στρώμα και το ανασηκώνουν, μεταφέροντας το ως στρώμα διάτμησης στην περιφέρειά τους, αποτρέποντας, έτσι, την αποκόλλησή του. Οι στρόβιλοι κάθε ζεύγους απομακρύνονται μεταξύ τους αλλά και από την επιφάνεια της πτέρυγας, λόγω της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης, ενώ, λόγω του φαινομένου της διάχυσης, αυξάνουν σε μέγεθος και μειώνονται σε ένταση καθώς απομακρύνονται από το σημείο εκπομπής τους. Περιοχές με έντονες διατμητικές τάσεις Reynolds υποδηλώνουν την ύπαρξη στρωμάτων διάτμησης της ροής, ενώ η ύπαρξη ισχυρών τάσεων $\overline{v'v'}$ ανάμεσα στους στροβίλους οφείλεται στην έντονη κινητικότητα που αυτοί παρουσιάζουν.

6. Πηγές

- [1] Sangill, Ole, Use of stall strips on wind turbine blades. Appendix, 1997
- [2] Frederik Zahle, Niels N. Sørensen, Jeppe Johansen, CFD Study of a NACA 63-415 Airfoil Fitted with Stall Strips, Risø-R 1370
- [3] Peter Fuglsang, Christian Bak, Mac Gaunaa, Ioannis Antoniou, Wind Tunnel Tests of Riso-B1-18 and Riso-B1-24
- [4] Rao, D. M., & Kariya, T. T. (1988). Boundary-layer submerged vortex generators for separation control - An exploratory study. Paper presented at the 1st National Fluid Dynamics Congress
- [5] Pauley, W. R., & Eaton, J. K. (1988). Experimental study of the development of longitudinal vortex pairs embedded in a turbulent boundary layer. *AIAA Journal*, 26(7), 816-823. doi: 10.2514/3.9974
- [6] Lin, J. C., Selby, G. V., & Howard, F. G. (1991). Exploratory study of vortex-generating devices for turbulent flow separation control. *AIAA Paper*(91-0042)
- [7] Lin, J. C. (1999). Control of turbulent boundary-layer separation using micro-vortex generators. *AIAA Paper*(99-993404)
- [8] Lu, F. K., Li, Q., Shih, Y., Pierce, A. J., & Liu, C. (2011). Review of Micro Vortex Generators in High-Speed Flow. Paper presented at the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting
- [9] Taylor, H. D. (1950). Summary report on vortex generators Technical Report No. R-05280-9: United Aircraft Corporation. Research Dept.
- [10] Schubauer, G. B., & Spangenberg, W. G. (1959). Forced mixing in boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 8(01). doi: 10.1017/s0022112060000372
- [11] Pearcey, H. H. (1961). Shock induced separation and its prevention by design and boundary layer control. In G. V. Lachmann (Ed.), *Boundary Layer and Flow Control* (Vol. 2, pp. 1166-1344): Pergamon Press
- [12] Lin, J. C. (2002). Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(4-5), 389-420. doi: 10.1016/s0376-0421(02)00010-6
- [13] Wendt, B. (2004). Parametric Study of Vortices Shed from Airfoil Vortex Generators. *AIAA Journal*, 42(11), 2185-2195

- [14] Godard, G., & Stanislas, M. (2006). Control of a decelerating boundary layer. Part 1: Optimization of passive vortex generators. *Aerospace Science and Technology*, 10(3), 181-191. doi: 10.1016/j.ast.2005.11.007
- [15] Braslow, A., & Knox, E. (1958). Simplified Method for Determination of Critical Height of Distributed Roughness Particles for Boundary-Layer Transition at Mach Numbers from 0 to 5. Washington: NACA
- [16] Timmer, W. A., & Van Rooij, R. P. J. O. M. (2003). Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125(4), 488-496. doi: 10.1115/1.1626129
- [17] Ramasamy, M., & Leishman, J. G. (2006). *Benchmarking PIV with LDV for Rotor Wake Vortex Flows*. Paper presented at the 24 th AIAA Applied Aerodynamics Conference.
- [18] M. Manolesos, Experimental and computational study of three-dimensional separation and its control using passive vortex generators, 2013
- [19] Westerweel, J. (2000). Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 29(1), S003-S012
- [20] Fuglsang, P., Antoniou, I., Dahl, K. S., & Aagaard Madsen, H. (1998). Wind tunnel tests of the FFA-W3-241, FFA-W3-301 and NACA 63-430 airfoils, Risø-R 1041
- [21] F.V. Stillfried, S. Wallin, A.V. Johansson, Evaluation of a Vortex Generator Model in Adverse Pressure Gradient Boundary Layers, *AIAA Journal*, 49 (2011) 982-993
- [22] J.B. Barlow, W.H. Rae, A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*, John Wiley & Sons, New York, 1999

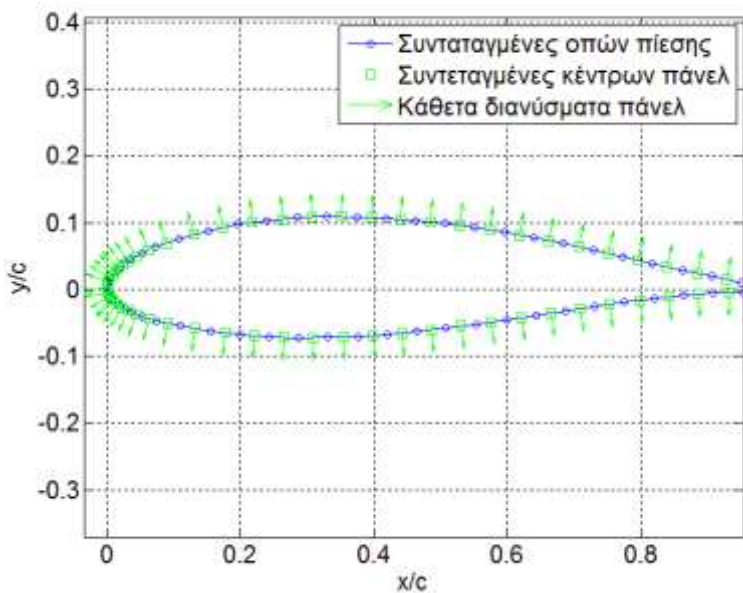
Παράρτημα

i. Υπολογισμός αεροδυναμικών συντελεστών

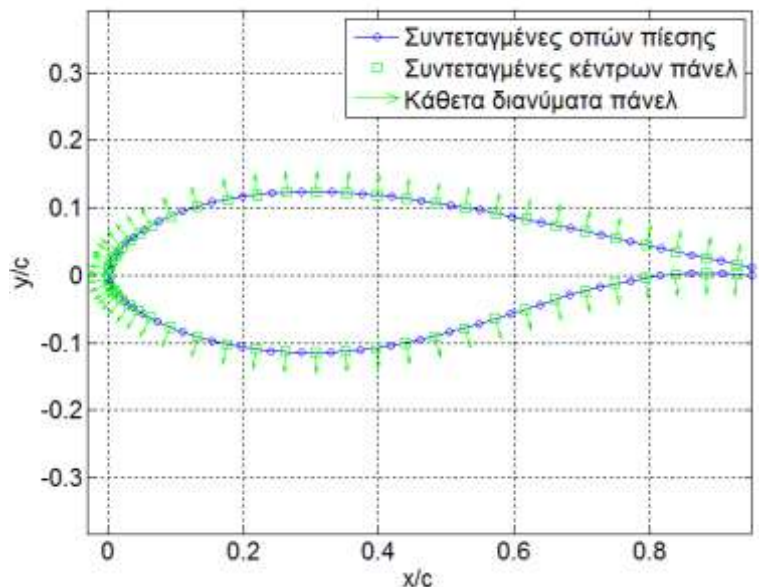
Για τον υπολογισμό της κατανομής των πιέσεων πάνω στην πτέρυγα χρησιμοποιούνται οι 60 διαφορικές στατικές πιέσεις, αφού αφαιρεθεί πρώτα το offset των αισθητήρων πίεσης. Από τις συντεταγμένες του προφίλ της πτέρυγας για μηδενική γωνία πρόσπτωσης, και με τη βοήθεια του μητρώου στροφής

$$\begin{bmatrix} x_{rot} \\ y_{rot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

παράγονται οι νέες συντεταγμένες για την εκάστοτε γωνία πρόσπτωσης. Στη συνέχεια από τις νέες αυτές συντεταγμένες προσδιορίζονται τα κέντρα των πάνελ (ημιάθροισμα διαδοχικών συντεταγμένων), πάνω στα οποία θεωρούμε ομοιόμορφη κατανομή πίεσης, καθώς και τα κάθετα διανύσματα σε κάθε πάνελ, όπως φαίνεται στα σχήματα 7.i.1 και 7.i.2.



Σχήμα 7.i.1 - Συντεταγμένες οπών πίεσης, κέντρων των πάνελ και κάθετα διανύσματα σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης NACA 63A-418



Σχήμα 7.i.2 - Συντεταγμένες οπών πίεσης, κέντρων των πάνελ και κάθετα διανύσματα σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης FFA W3-241

Υπολογίζουμε τον συντελεστή πίεσης σε κάθε οπή πίεσης διαιρώντας την εκάστοτε διαφορική πίεση με τη δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής, δηλαδή

$$Cp_i = \frac{p_{st,i} - p_{st,\infty}}{q_\infty}, i = 1 \dots 60$$

και έπειτα τον συντελεστή που αντιστοιχεί σε κάθε πάνελ

$$Cp_{panel,i} = \frac{Cp_{i+1} + Cp_i}{2}, i = 1 \dots 59$$

Έχοντας τους συντελεστές πίεσης και τα κάθετα διανύσματα σε κάθε πάνελ, υπολογίζουμε τον συντελεστή άνωσης

$$C_l = \sum_{i=1}^{59} Cp_{panel,i} \cdot n_{y,i} \cdot ds_i$$

και τον συντελεστή αντίστασης μορφής

$$C_{dp} = \sum_{i=1}^{59} Cp_{panel,i} \cdot n_{x,i} \cdot ds_i$$

Ο υπολογισμός του συντελεστή ροπής (θετικός όταν τείνει να αυξήσει τη γωνία πρόσπτωσης) γίνεται ως προς το σημείο αναφοράς $(x_{ref}, y_{ref}) = (0.25, 0)$ σύμφωνα με τη σχέση

$$C_m = \sum_{i=1}^{59} [-Cp_{panel,i} \cdot n_{y,i} \cdot ds_i \cdot (x_{panel,rot,i} - x_{ref}) + Cp_{panel,i} \cdot n_{x,i} \cdot ds_i \cdot (y_{panel,rot,i} - y_{ref})]$$

Για τις γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες δεν συμβαίνει αποκόλληση της ροής, ο συνολικός συντελεστής αντίστασης (λόγω πιέσεων και λόγω συνεκτικότητας) υπολογίζεται με τη βοήθεια του rake στον ομόρρου.

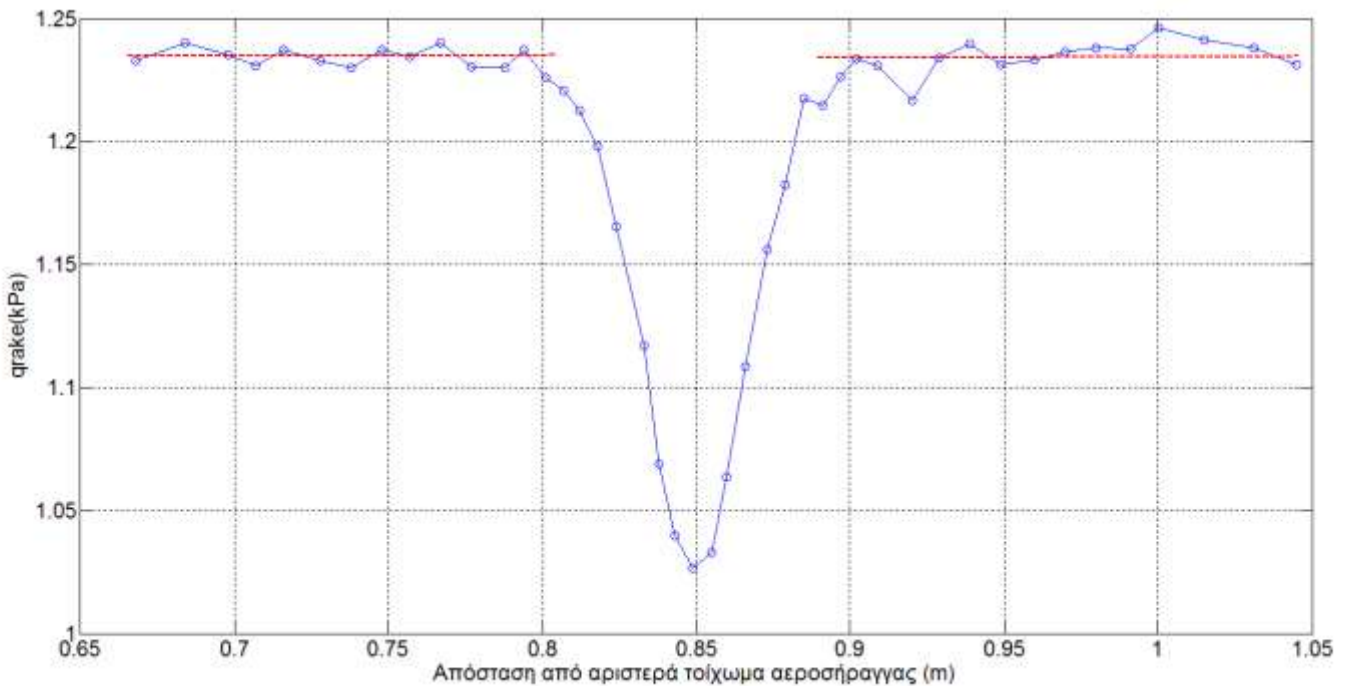
Αρχικά υπολογίζουμε μία μέση τιμή των διαφορικών στατικών πιέσεων στον ομόρρου, λαμβάνοντας υπόψη και τη στατική πίεση κοντά στο τοίχωμα της αεροσήραγγας, δηλαδή

$$p_{st,rake} - p_{st,\infty} = \frac{(p_{st,rake,left} - p_{st,\infty}) + (p_{st,rake,right} - p_{st,\infty})}{2} - [(p_{st,rake,right} - p_{st,\infty}) - (p_{st,rake,wall} - p_{st,\infty})]$$

Στη συνέχεια αφαιρούμε αυτήν την τιμή από κάθε διαφορική ολική πίεση του ομόρρου για να προκύψουν οι δυναμικές πιέσεις, δηλαδή

$$(p_{tot,rake,i} - p_{st,\infty}) - (p_{st,rake} - p_{st,\infty}) = p_{tot,rake,i} - p_{st,rake} = q_{rake,i}, i = 1 \dots 44$$

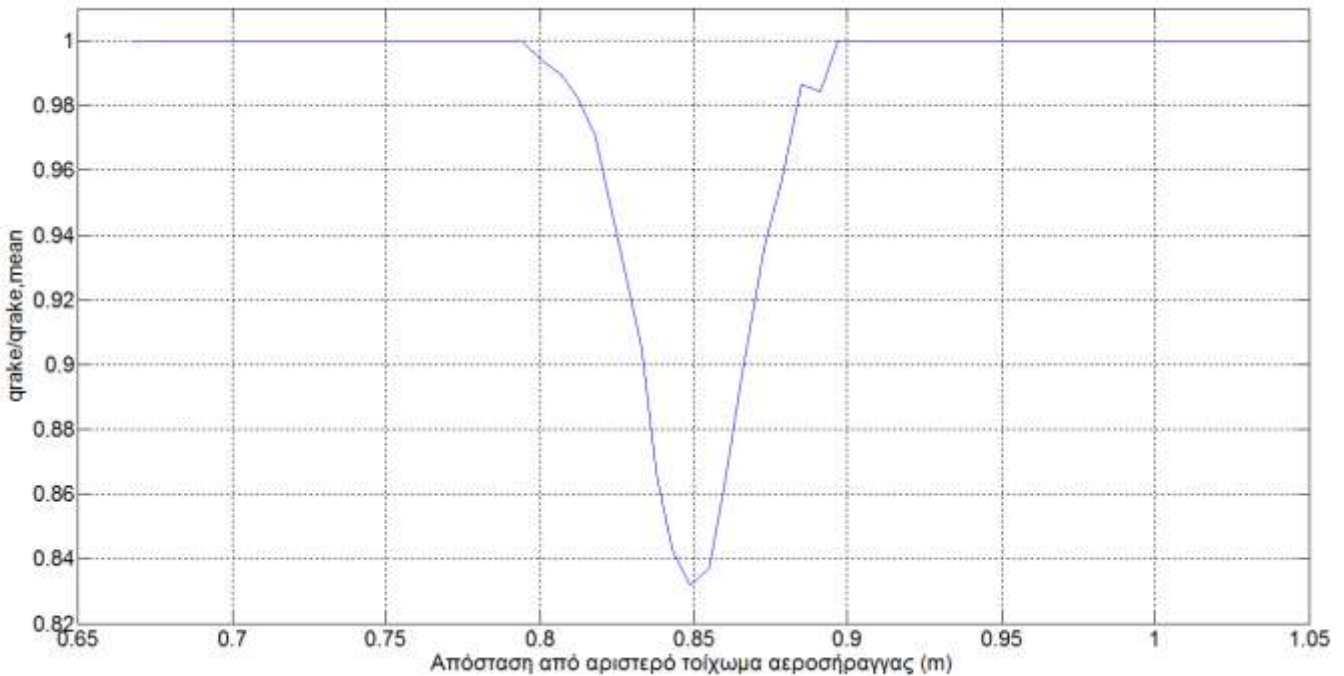
Προκύπτει λοιπόν μία κατανομή δυναμικών πιέσεων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.i.1:



Διάγραμμα 7.i.1-Κατανομή δυναμικών πιέσεων στον ομόρρου της NACA 63-418 για γωνία πρόσπτωσης 8°

Παρατηρούμε μια περιοχή με μειωμένη δυναμική πίεση, η οποία δημιουργείται από την παρουσία της πτέρυγας μέσα στη ροή (solid blockage), και η οποία μεγαλώνει με την απομάκρυνσή μας από τη μηδενική γωνία πρόσπτωσης είτε προς τα θετικά, είτε προς τα αρνητικά, αφού προβάλλεται μεγαλύτερη επιφάνεια στην παράλληλη ροή.

Σύμφωνα με τους Jewel B. Barlow, William H. Rae και Alan Pope [22], για να υπολογίσουμε τον συντελεστή αντίστασης πρέπει να κανονικοποιήσουμε τις δυναμικές πιέσεις με τη μέση τιμή των δυναμικών πιέσεων που βρίσκονται έξω από το solid blockage (κόκκινη γραμμή στο διάγραμμα 2.ii.1). Οι κανονικοποιημένες δυναμικές πιέσεις φαίνονται στο διάγραμμα 7.i.2.



Διάγραμμα 7.i.2 - Κατανομή κανονικοποιημένων δυναμικών πιέσεων στον ομόρρου της NACA 63-418 για γωνία πρόσπτωσης 8°

Στη συνέχεια, ο συντελεστής αντίστασης υπολογίζεται από τη σχέση

$$C_{d0} = \frac{1}{c} \int_{z_{left}}^{z_{right}} 2 \cdot (\sqrt{q_{norm}} - q_{norm}) \cdot dz,$$

η οποία στην περίπτωση μας γίνεται

$$C_{d0} = \sum_{i=1}^{44} 2 \cdot (\sqrt{q_{norm,i}} - q_{norm,i}) \cdot dz_i/c$$

Για τις γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες έχουμε αποκόλληση της ροής, ο συνολικός συντελεστής αντίστασης ισούται πρακτικά με τον συντελεστή αντίστασης μορφής, αφού αυτός είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον συντελεστή αντίστασης λόγω συνεκτικότητας, δηλαδή $C_d = C_{dp}$.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης στην γραμμική περιοχή της πτέρυγας FFA με εγκατεστημένες τις στροβιλογεννήτριες αφαιρέθηκε από την αντίσταση της γραμμικής περιοχής η αντίσταση της αλουμινένιας λωρίδας πάνω στην οποία ήταν κομμένες οι στροβιλογεννήτριες.

ii. Διορθώσεις των αεροδυναμικών συντελεστών

Σύμφωνα πάλι με τους Jewel B. Barlow, William H. Rae και Alan Pope [22], οι αεροδυναμικοί συντελεστές που υπολογίζονται με ολοκλήρωση της κατανομής της πίεσης πάνω στην πτέρυγα, πρέπει να διορθωθούν για να απαλειφθεί η επίδραση της αεροσήραγγας.

Έχοντας ολοκληρώσει την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού των αεροδυναμικών συντελεστών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης της εκάστοτε διαμόρφωσης, έχουν προκύψει τα πολικά διαγράμματα $C_l(a)$, $C_d(a)$ και $C_m(a)$.

Η διαδικασία της διόρθωσης είναι η εξής:

- Υπολογίζουμε τον συντελεστή $\sigma = \frac{(\pi \cdot \frac{c}{h})^2}{48}$, όπου c η χορδή και h η απόσταση του αεροδυναμικού κέντρου της πτέρυγας από το τοίχωμα της αεροσήραγγας (εδώ $h=1.8m$)
- Υπολογίζουμε το συντελεστή solid blockage $e_{sb} = \frac{k_1 \cdot V_m}{A^{3/2}}$, όπου $k_1=0.52$ συντελεστής,
 $V_m = l \times w \times h = \begin{cases} 0.5 \times 0.18 \cdot 0.5 \times 1, NACA 63 - 418 \\ 0.5 \times 0.248 \cdot 0.5 \times 1, FFA W3 - 241 \end{cases}$ ο όγκος του μοντέλου της πτέρυγας και A η επιφάνεια της διατομής του test section της αεροσήραγγας
- Για κάθε γωνία πρόσπτωσης υπολογίζουμε τον συντελεστή wake blockage $e_{wb,i} = \frac{c \cdot C_{d,i}}{2h}$, άρα και τον συνολικό συντελεστή $e_i = e_{sb} + e_{wb,i}$
- Τα διορθωμένα μεγέθη προκύπτουν από τις σχέσεις:

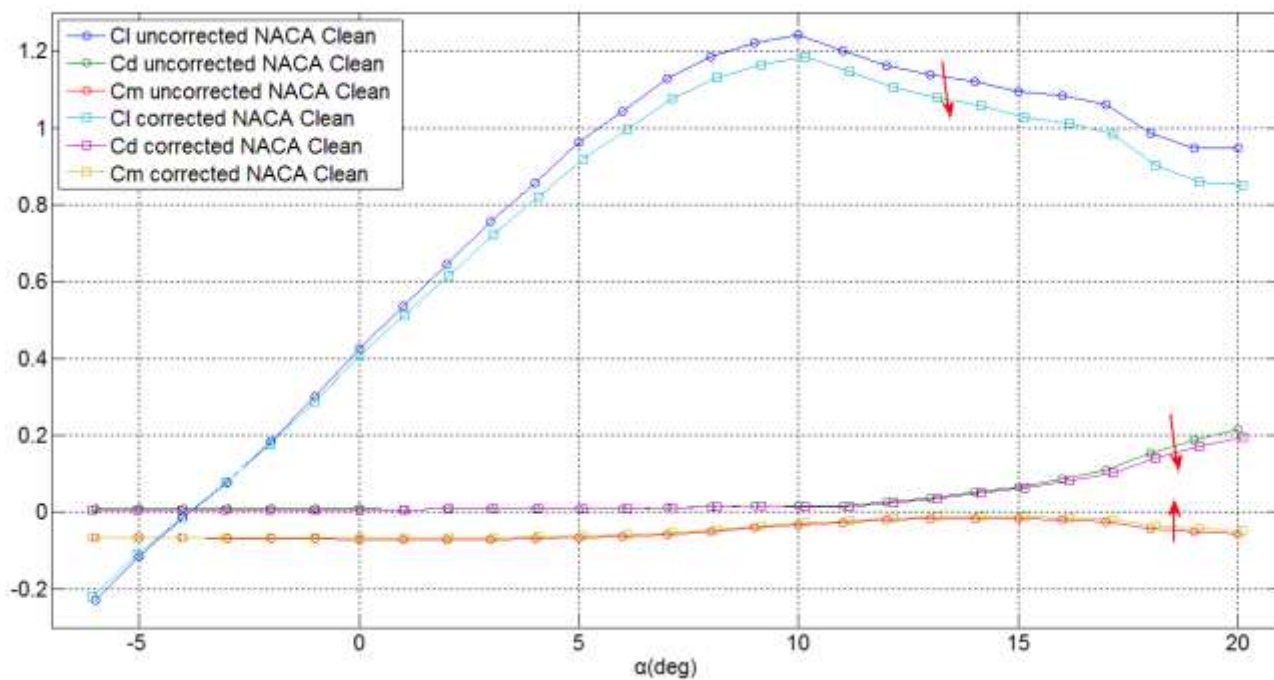
$$\text{Γωνία πρόσπτωσης: } a_{corr,i} = a_i + \frac{57.3 \cdot \sigma \cdot (C_{l,i} + 4C_{m,i})}{2\pi}$$

$$\text{Συντελεστής άνωσης: } C_{l,corr,i} = C_{l,i} \cdot (1 - \sigma - 2e_i)$$

$$\text{Συντελεστής αντίστασης: } C_{d,corr,i} = C_{d,i} \cdot (1 - 3e_{sb} - 2e_{wb,i})$$

$$\text{Συντελεστής ροπής: } C_{m,corr,i} = C_{m,i} \cdot (1 - 2e_1) + 0.25 \cdot \sigma \cdot C_{l,corr,i}$$

Τελικά, προκύπτουν τα διορθωμένα πολικά διαγράμματα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.ii.1. Παρατηρούμε πως οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης μειώνονται, ενώ ο συντελεστής ροπής αυξάνεται ελαφρώς.



Διάγραμμα 7.ii.1-Σύγκριση αδιόρθωτων και διορθωμένων αεροδυναμικών συντελεστών NACA Clean