



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Διπλωματική Εργασία:

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ
ΚΥΜΑΤΩΝ (BUFFET) ΣΕ ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ

του

Ιωσήφ Κ. Μουλίνου

Επιβλέπων:

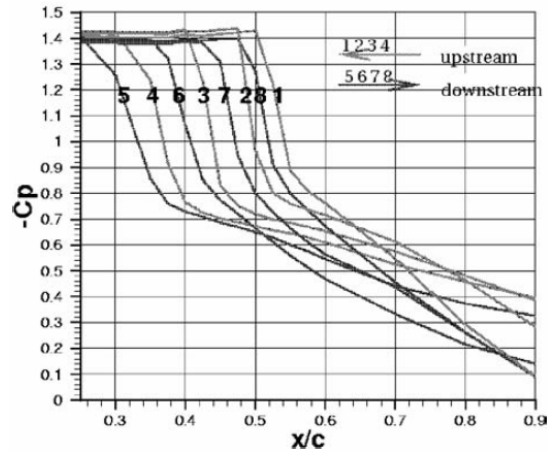
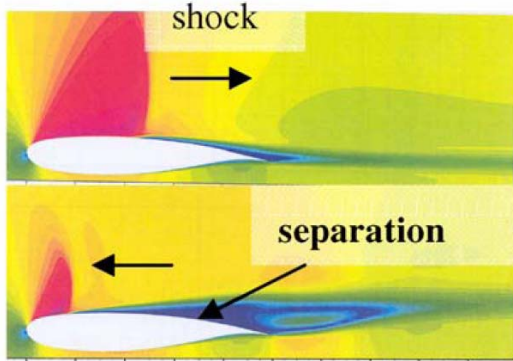
Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου

Οκτώβριος 2007

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αριθμητική μοντελοποίηση του φαινομένου της ταλάντωσης κύματος (transonic buffet) που εμφανίζεται, υπό προϋποθέσεις, στην πλευρά υποπίεσης μιας αεροτομής. Αν και αποτέλεσμα του buffet μπορεί να είναι η δόνηση της αεροτομής (buffeting), εντούτοις εδώ η αεροτομή θεωρείται ότι έχει αμετάβλητο σχήμα και θέση. Για την ανάλυση, χρησιμοποιείται ο επιλύτης των εξισώσεων Navier - Stokes του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχάνων του Ε.Μ.Π. με μη-δομημένα πλέγματα τριγωνικών στοιχείων και το μοντέλο τύρβης των Spalart – Allmaras, στο οποίο γίνεται παρέμβαση ώστε να ενεργοποιείται δεδομένη θέση μετάβασης της στρωτής σε τυρβώδη ροή (transition trip). Η μελέτη πραγματοποιείται για τη ροή γύρω από τη μεμονωμένη αεροτομή OAT15A, όπου το σχετικό φαινόμενο μελετήθηκε στην ONERA και υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά και υπολογιστικά στοιχεία για συγκρίσεις. Τη σχετική βιβλιογραφική επισκόπηση διαδέχεται η δημιουργία μη-δομημένου πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε σε όλη τη σειρά των υπολογισμών, αφού αποδείχθηκε ότι είναι επαρκές και δίνει αριθμητικές λύσεις που δεν εξαρτώνται από αυτό. Πραγματοποιούνται και σχολιάζονται μια σειρά υπολογισμών ώστε να φανούν τα όρια χρήσης χρονικά μόνιμου και μη-μόνιμου κώδικα ροής, να φανεί η σημασία του να συγκεκριμενοποιείται η θέση της μετάβασης πάνω στην αεροτομή αλλά και ο ρόλος της γωνίας πρόσπτωσης στο μελετώμενο φαινόμενο. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται σε πολυεπεξεργαστικό σύστημα. Ακολουθούν συγκρίσεις με πειράματα ή υπολογισμούς άλλων και συμπεράσματα.

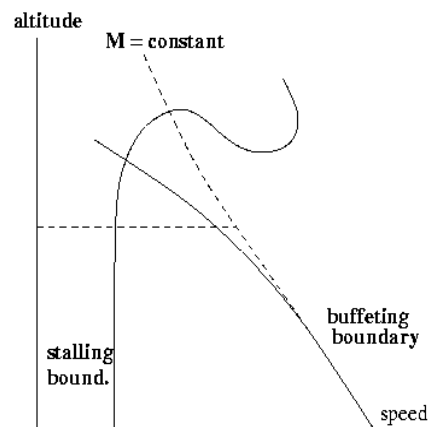
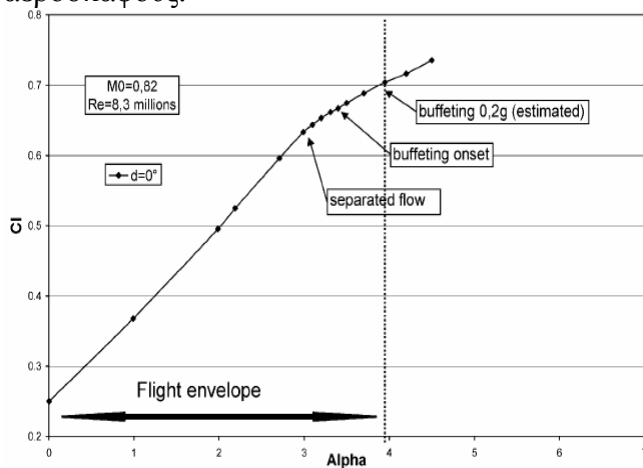
Το αεροδυναμικό φαινόμενο διηγητικό buffet

Οι διηγητικές ροές συχνά εμφανίζουν κύμα κρούσης το οποίο προκαλείται από ξαφνική ανάκτηση πίεσης από τη ροή. Αυτά τα κύματα αλληλεπιδρούν με το οριακό στρώμα. Μια σύνθετη τοπική αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα με αποτέλεσμα την επιδείνωση της διανομής ταχύτητας μέχρι να εμφανισθεί αποκόλληση. Όταν η ένταση του κύματος είναι αρκετά μεγάλη, ως αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού Mach ή της γωνίας πρόσπτωσης της αδιατάρακτης ροής, συμβαίνει διάχυση της αποκόλλησης μέχρι την ακμή εκφυγής και αυξάνεται το μέγεθός της. Τότε αναπτύσσονται αστάθειες σε μεγάλη κλίμακα. Το μέγεθος της αποκόλλησης μεταβάλλεται καθώς η θέση του κύματος αλλάζει, μεταβαίνοντας ανάντι και κατόντι. Οι συχνότητες και τα πλάτη των μεταβολών εξαρτώνται από το σχήμα της αεροτομής και τις αεροδυναμικές συνθήκες της ροής. Τα επίπεδα πίεσης και, συνεπώς, η άνωση ποικίλουν σε μεγάλο εύρος. Ο όρος buffet χρησιμοποιείται για να περιγράψει αυτές τις αεροδυναμικές αστάθειες. Οι αστάθειες της ροής που οδηγούν σε buffet είναι αυτοσυντηρούμενες. Το buffet δεν είναι αποτέλεσμα ανάντι διαταραχών της ροής.



Τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται σε αεροσκάφη, πυραύλους, βαθμίδες στροβιλομηχανών κ.λ.π.

Το buffet που εμφανίζεται στο πεδίο ροής προκαλεί δονήσεις στη κατασκευή, buffeting. Οι συνέπειες για την αεροδυναμική συμπεριφορά της κατασκευής μπορεί να είναι πολύ σημαντικές. Η εμφάνιση του φαινομένου γίνεται σε υψηλές τιμές του συντελεστή άνωσης, όταν ο αριθμός Mach ή η γωνία πρόσπτωσης έχουν μεγάλες τιμές. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι επιδόσεις ενός αεροσκάφους.



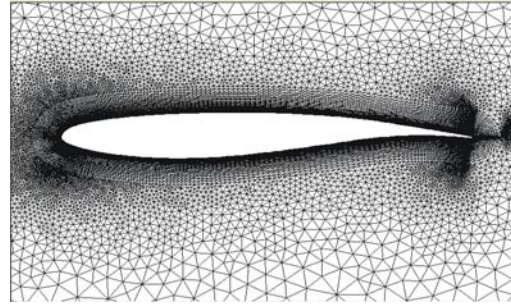
Για παράδειγμα, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα η πτέρυγα επηρεάζεται από την αστάθεια του κύματος, της οποίας η εμφάνιση θέτει ένα άνω όριο στη ταχύτητα. Αυτό το όριο είναι συνάρτηση του ύψους της πτήσεως και ονομάζεται όριο του buffeting (buffeting boundary). Επιπλέον μπορεί να συντελέσει στη κόπωση της κατασκευής, να επηρεάσει την ευελιξία της και να μειώσει την άνεση των επιβατών.

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε από κώδικα του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ. Πρόκειται για μη δομημένο πλέγμα αποτελούμενο από 36800 κόμβους και 73170 τριγωνικά στοιχεία. Για το στρωτό

οριακό υπόστρωμα το $y^+ = \frac{y u_\tau \rho}{\mu}$ κυμαίνεται στο διάστημα [0.16, 1.1].

Τα πρώτα πλέγματα που κατασκευάστηκαν εμφάνιζαν κοντά στο τοίχωμα $y^+ \sim 11$. Τα πλέγματα αυτά δεν είχαν τη δυνατότητα να «αντιληφθούν» το φαινόμενο και έτσι δημιουργήθηκαν πυκνότερα, ώσπου να καταλήξουμε σε αυτό το οποίο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα και ανεξάρτητα από αυτό.



Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση

Το μοντέλο τύρβης με το οποίο έγιναν οι υπολογισμοί είναι το μοντέλο των Spalart – Allmaras.

Το μοντέλο τύρβης Spalart – Allmaras είναι μοντέλο μιας διαφορικής εξίσωσης. Αντίθετα όμως με τα περισσότερα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι τοπικό, η εξίσωση δηλαδή για ένα σημείο δεν εξαρτάται από τη λύση σε άλλα σημεία. Αυτή η ιδιότητα κάνει το μοντέλο συμβατό με οποιαδήποτε δομής πλέγματα και με επιλύτες Navier – Stokes δύο και τριών διαστάσεων. Είναι αριθμητικά αξιόπιστο και ευσταθές κοντά στα τοιχώματα και εξασφαλίζει γρήγορη σύγκλιση.

Η βασική, διαστατή μορφή του μοντέλου Spalart - Allmaras είναι η εξής:

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = c_{b1} \cdot (1 - f_{t2}) \cdot \tilde{S} \cdot \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \cdot \left[\nabla[(\nu + \tilde{\nu})\nabla\tilde{\nu}] + c_{b2}(\nabla\tilde{\nu})^2 \right] - \left(c_{w1} \cdot f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right) \cdot \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2$$

η οποία επιλύεται ως προς την μεταβλητή $\tilde{\nu}$.

Η κινηματική τυρβώδης συνεκτικότητα ν_t , δίνεται από τη σχέση:

$$\nu_t = \tilde{\nu} \cdot f_{\nu 1}$$

όπου $f_{\nu 1}$, είναι μια συνάρτηση «απόσβεσης».

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης μας επιτρέπει να καθορίσουμε τα στρωτά τμήματα της ροής. Η πείρα από όλα τα μοντέλα τύρβης διδάσκει ότι δεν μπορούμε να εμπιστευτούμε κανένα μοντέλο για να καθορίσει μόνο του το σημείο μετάβασης. Το μοντέλο Spalart - Allmaras παρέχει έναν εύχρηστο τρόπο και για μη δομημένα πλέγματα, για μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή και αντίστροφα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε παρέμβαση στον κώδικα του μοντέλου του ΕΘΣ ώστε να συμπεριληφθεί και αυτός ο όρος με σκοπό να διερευνηθεί η σημασία του στη προσομοίωση του buffet.

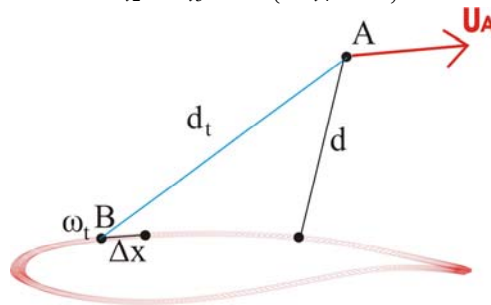
$$f_{t1} = c_{t1} \cdot g_t \cdot \exp \left\{ -c_{t2} \cdot \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} (d^2 + g_t^2 d_t^2) \right\}$$

με ω_t : την στροβιλότητα στο σημείο της μετάβασης

$g_t \equiv \min(0.1, \Delta U / \omega_t \Delta x)$, όπου Δx είναι η απόσταση πάνω στο τοίχωμα των σημείων του πλέγματος, στη θέση της μετάβασης.

ΔU : το μέτρο της διαφορά της ταχύτητας στο σημείο μετάβασης από τη ταχύτητα στο σημείο του πεδίου το οποίο εξετάζουμε.
 d_t : την απόσταση του υπόψη σημείου από το σημείο μετάβασης.

$$f_{t2} = c_{t3} \cdot \exp\{-c_{t4} \cdot \chi^2\}$$



Για συμπιεστό ρευστό η εξίσωση μεταφοράς του μοντέλου γράφεται με μεταβλητή τη δυναμική συνεκτικότητα $\tilde{\mu}$ και κατόπιν αδιαστοτοποίησης έρχεται στη μορφή:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\mu})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \tilde{\mu})}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \tilde{\mu}) \frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial x_j} \right] +$$

$$c_{b1} (1 - f_{t2}) \tilde{S} \rho \tilde{\mu} - \frac{1}{\text{Re}} \left(c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right) \left(\frac{\tilde{\mu}}{d} \right)^2 + \rho^2 f_{t1} \Delta U^2 \text{Re}$$

Συνθήκες υπολογισμών

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στην αεροτομή OAT15A για τις ίδιες συνθήκες ροής με αυτές για τις οποίες έγιναν τα πειράματα της ONERA και για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις και υπολογιστικά αποτελέσματα στη βιβλιογραφία. Οι συνθήκες αυτές είναι οι εξής:

Mach	0.73
Reynolds	$13.04 \cdot 10^6$
a (γωνία πρόσπτωσης)	$2.5^\circ, 3^\circ, 3.5^\circ, 4.5^\circ$

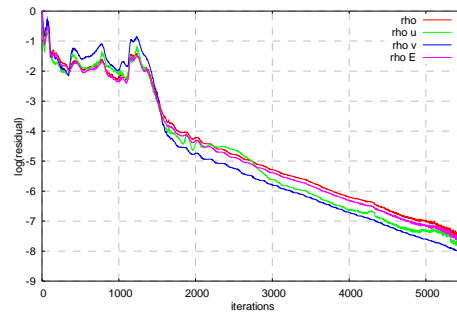
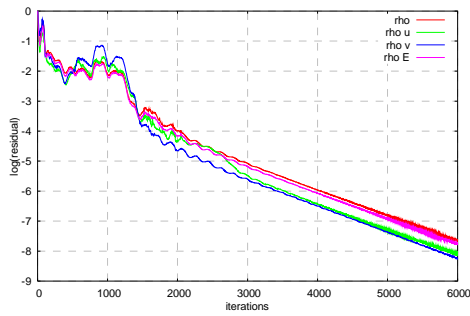
Ο αριθμός Reynolds στα πειράματα ήταν $3 \cdot 10^6$ όμως το πειραματικό μοντέλο της αεροτομής είχε μήκος χορδής 0.23m. Αναλογικά για υπολογισμό με μοναδιαία χορδή ο Reynolds προέκυψε $13.04 \cdot 10^6$.

Στα αποτελέσματα που ακολουθούν, όπου δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό, έχει ληφθεί υπόψη στον κώδικα επίλυσης η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή στο 7% της αεροτομής.

Παρακάτω στα αποτελέσματα εμφανίζονται εκτός από τα υπολογιστικά της παρούσας εργασίας (Itt) και τα αποτελέσματα του Deck ο οποίος χρησιμοποιεί επίσης τις μόνιμες και μη μόνιμες μέσες εξισώσεις Navier – Stokes (RANS, URANS). Φυσικά μαζί με αυτά εμφανίζονται και τα πειραματικά αποτελέσματα (experimental).

Υπολογισμοί για γωνία πρόσπτωσης 2.5° και 3° , μόνιμη ροή

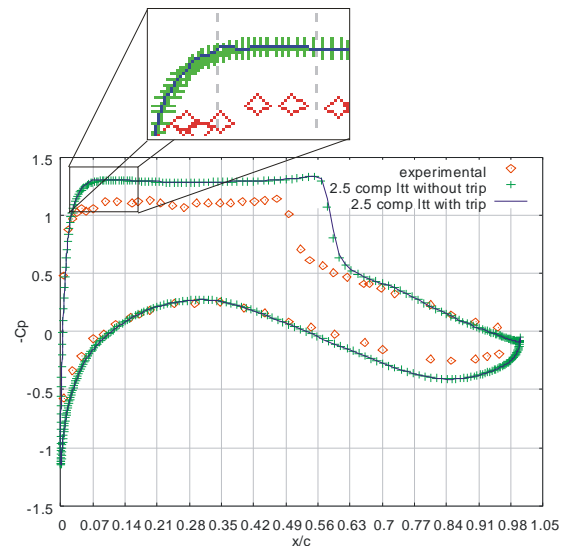
Αρχικά εμφανίζονται τα υπόλοιπα των εξισώσεων που επιλύονται για γωνίες πρόσπτωσης 2.5° και 3° . Για αυτές τιμές αναφέρεται στη βιβλιογραφία μόνιμη ροή συνεπώς χρησιμοποιείται κώδικας επίλυσης μόνιμης ροής.



Η συνεχής μείωση των υπολοίπων των εξισώσεων που εμφανίζεται αποτελεί ένδειξη του ότι η ροή είναι μόνιμη. Ορθά λοιπόν επελέχθη κώδικας επίλυσης μόνιμης ροής, ο οποίος και συγκλίνει.

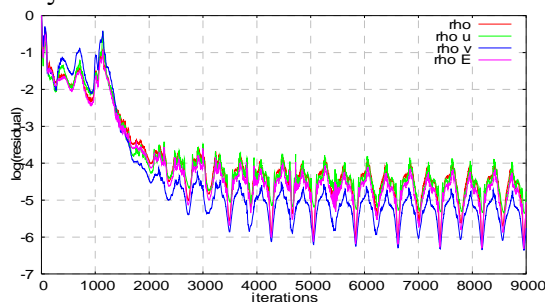
Η κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p γύρω από την αεροτομή για γωνία πρόσπτωσης 2.5° δίνεται στο επόμενο σχήμα. Εμφανίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα (experimental) και τα αποτελέσματα του μόνιμου κώδικα ροής του ΕΘΣ (comp ltt). Επιπλέον γίνεται και υπολογισμός χωρίς τον όρο μετάβασης στο μοντέλο τύρβης.

Παρατηρείται καλή πρόβλεψη στην πλευρά υπερπίεσης με αρνητική απόκλιση στην πλευρά υποπίεσης. Η μεγαλύτερη αστοχία είναι στη πρόβλεψη της θέσης του κύματος. Ο υπολογισμός αφήνοντας το μοντέλο τύρβης να επιλέξει το σημείο μετάβασης από τη στρωτή στη τυρβώδη ροή και ο υπολογισμός καθορίζοντας, μέσω του όρου μετάβασης του μοντέλου, μετάβαση στο 7% της χορδής δεν παρουσιάζουν αισθητές διαφορές. Διακρίνεται μονάχα η επίδραση του όρου μετάβασης τοπικά, ως μια ανωμαλία στη θέση $x/c=7\%$ όπου και επιβάλλεται η μετάβαση.



Υπολογισμοί για γωνίες πρόσπτωσης 3.5° και 4.5° , εμφάνιση buffet

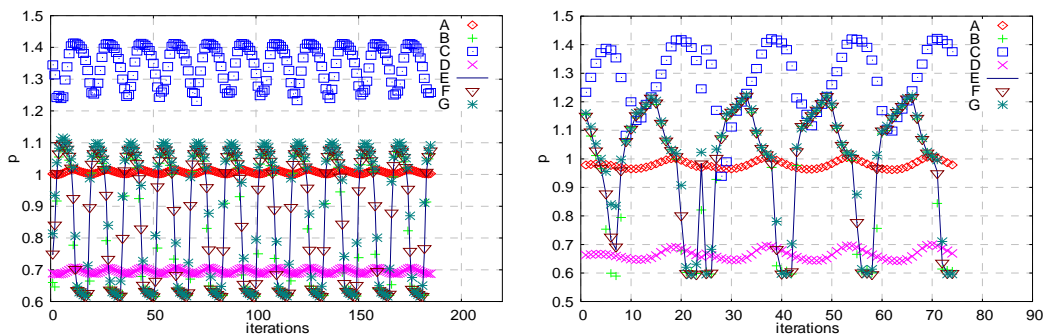
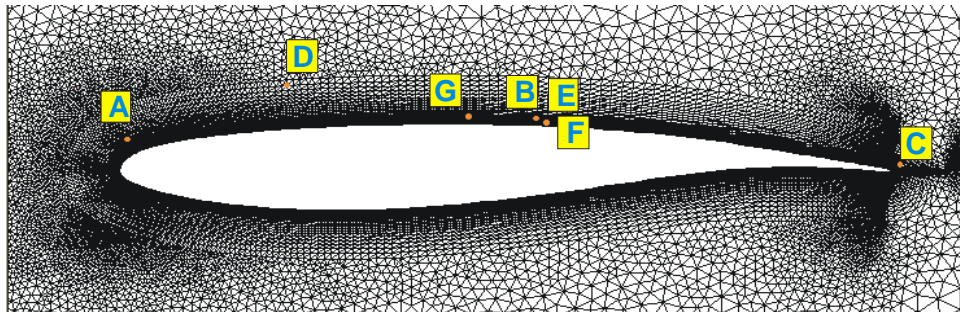
Προχωρώντας με τον κώδικα επίλυσης μόνιμης ροής, στις 3.5° παρατηρούμε ότι οι εξισώσεις δεν συγκλίνουν αλλά εμφανίζουν ταλαντωτική συμπεριφορά στα υπόλοιπά τους.



Το γεγονός αυτό αποτελεί ισχυρή ένδειξη εμφάνισης buffet. Για να επιβεβαιώσουμε αυτό το συμπέρασμα προχωρούμε σε υπολογισμό σε αυτές τις συνθήκες ροής με χρήση κώδικα επίλυσης μη μόνιμης ροής (με μόνιμες πάντα συνθήκες της επ' άπειρον ροής).

Για να ελέγξουμε αν πράγματι ο συλλογισμός είναι ορθός τυπώνουμε την αδιάστατη πίεση σε επιλεγμένες θέσεις του πεδίου ροής. Τα διαγράμματα της πίεσης

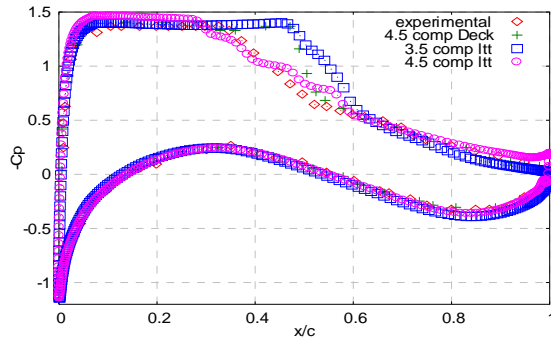
καταδεικνύουν ότι η ροή έχει γίνει μη μόνιμη και μάλιστα περιοδική για όλη τη πλευρά υποπίεσης. Εμφανίζεται buffet και για τις 3.5° και για τις 4.5°.



Έπειτα τυπώνονται μεγέθη της ροής και συγκρίνονται με πειραματικά και υπολογιστικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία.

Συγκεκριμένα, εμφανίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ONERA για το πείραμα του οποίου έγινε περιγραφή παραπάνω, δηλαδή για γωνία πρόσπτωσης 3.5°. Ωστόσο, στην βιβλιογραφία προτείνεται να γίνονται υπολογισμοί στις 4.5° για να αναπαραστήσουν το φαινόμενο στις 3.5°. Αυτό χρειάζεται πιθανώς διότι η αύξηση της γωνίας λαμβάνει υπόψη τα «φαινόμενα τοίχου» (endwall effects) που εμφανίζονται στην αεροδυναμική σήραγγα. Αντισταθμίζει δηλαδή την επίδραση των τοιχωμάτων που στην πραγματική ροή δεν υπάρχουν. Λόγω αυτών στη παρούσα εργασία έγιναν υπολογισμοί και στις δύο γωνίες πρόσπτωσης ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Στο επόμενο σχήμα εμφανίζεται η χρονικά μέση τιμή της κατανομή του C_p γύρω από την αεροτομή για τις 3.5° όπου η ροή έχει γίνει μη μόνιμη. Η μέση αυτή τιμή προκύπτει αθροίζοντας για κάθε θέση στην αεροτομή τη τιμή του C_p για n πραγματικά χρονικά βήματα, και διαιρώντας με τον αριθμό του δείγματος, δηλαδή το n . Το C_p δηλαδή στη θέση i είναι: $Cp_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Cp_{ij}$. Όπου ελήφθη $n=16$, δύο δηλαδή περίοδοι (σώζονταν αποτελέσματα κάθε δύο πραγματικά χρονικά βήματα.).

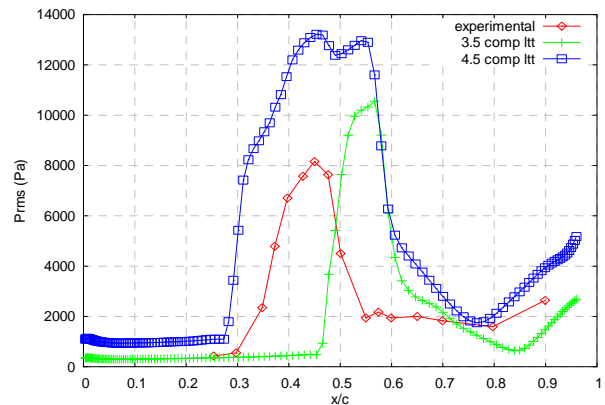


Η σύμπτωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά είναι ικανοποιητική με εξαίρεση και εδώ τη θέση του κύματος κρούσης.

Η τυπική απόκλιση της πίεσης υπολογίζεται για κάθε θέση της αεροτομής

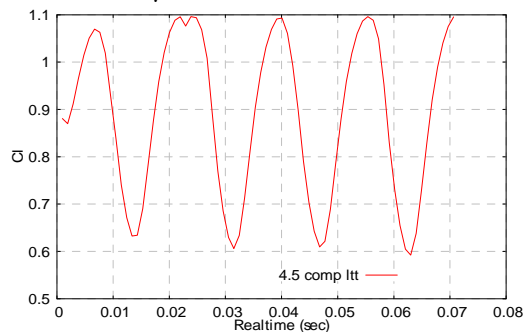
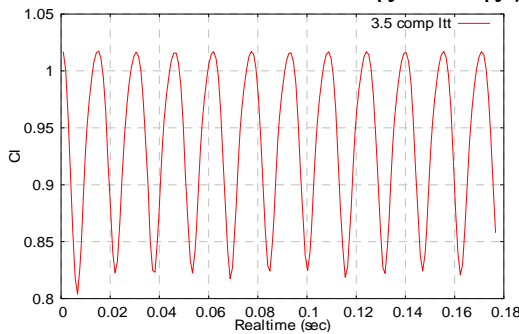
ί από τη σχέση: $S p_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - \bar{p}_i)^2}$ όπου

\bar{p} είναι η μέση πίεση που υπολογίζεται όπως και το μέσο C_p . Το n ελήφθη και εδώ ίσο με 16.



Όπως αναμενόταν, η τυπική απόκλιση της πίεσης εμφανίζει μέγιστο στη περιοχή στην οποία ταλαντώνεται το κύμα κρούσης και η ταχύτητα μεταβάλλεται από υπερηχητική σε υποηχητική. Παρατηρούμε και εδώ ότι η θέση του κύματος προκύπτει από τους υπολογισμούς κατάντι της θέσης που προκύπτει πειραματικά.

Έπειτα τυπώνεται ο συντελεστής άνωσης για 3.5° και για 4.5° .

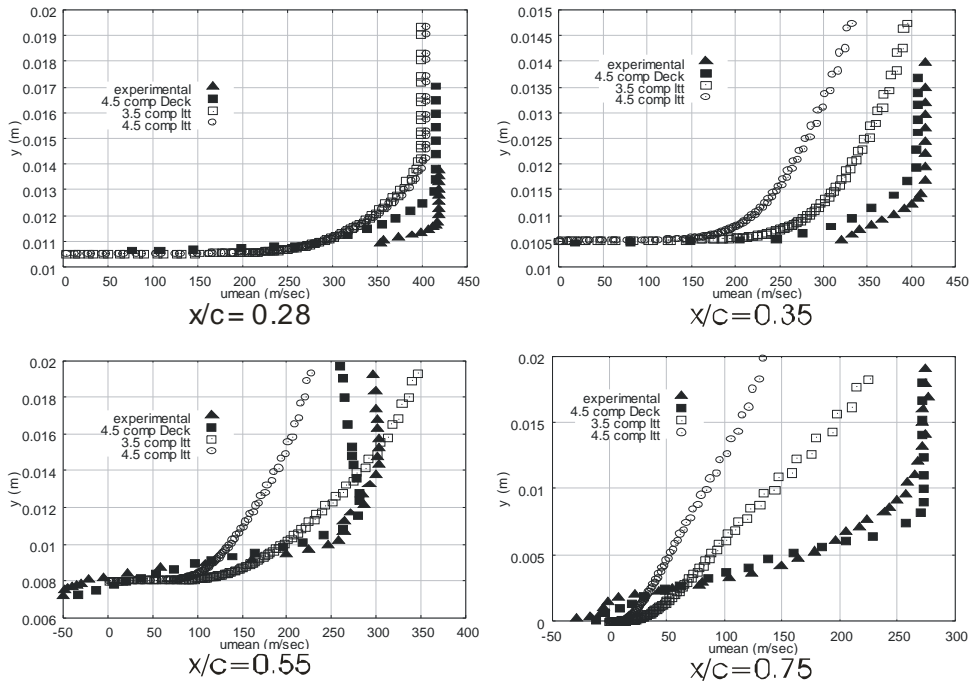


Από τα διαγράμματα του συντελεστή άνωσης μπορούμε να προσδιορίσουμε τη περίοδο και τη συχνότητα του φαινομένου.

Η περίοδος του φαινομένου προκύπτει και για τις δύο γωνίες 0.0153 sec και συνεπώς ή συχνότητα 65,35 Hz. Η συχνότητα αυτή είναι πολύ κοντά στη πειραματική τιμή των 69 Hz.

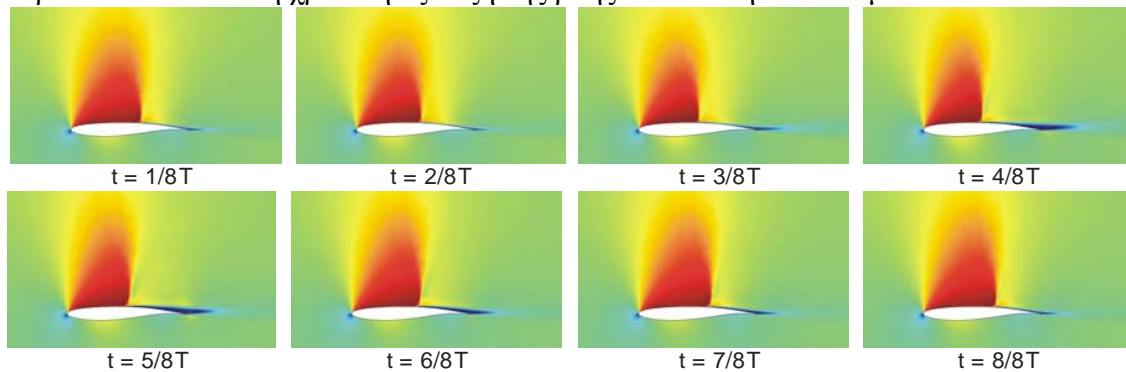
Κατόπιν εμφανίζονται οι κατανομές ταχυτήτων (μέσες τιμές) σε επιλεγμένες θέσεις της αεροτομής για 3.5° . Οι κατανομές αυτές εξάγονται ως εξής:

Αφού ληφθούν οι μέσες τιμές των ταχυτήτων για κάθε κόμβο του πλέγματος σε χρόνο δύο περιόδων, χρησιμοποιείται λογισμικό του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών το οποίο για δεδομένη θέση στην αεροτομή, κάνοντας κατάλληλες παρεμβολές στα στοιχεία του πλέγματος, υπολογίζει τη μέση χρονικά κατανομή της ταχύτητας στη θέση αυτή.

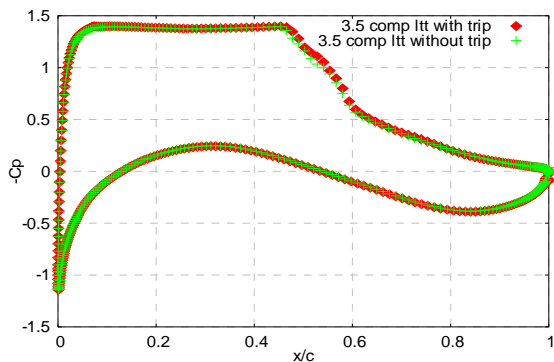


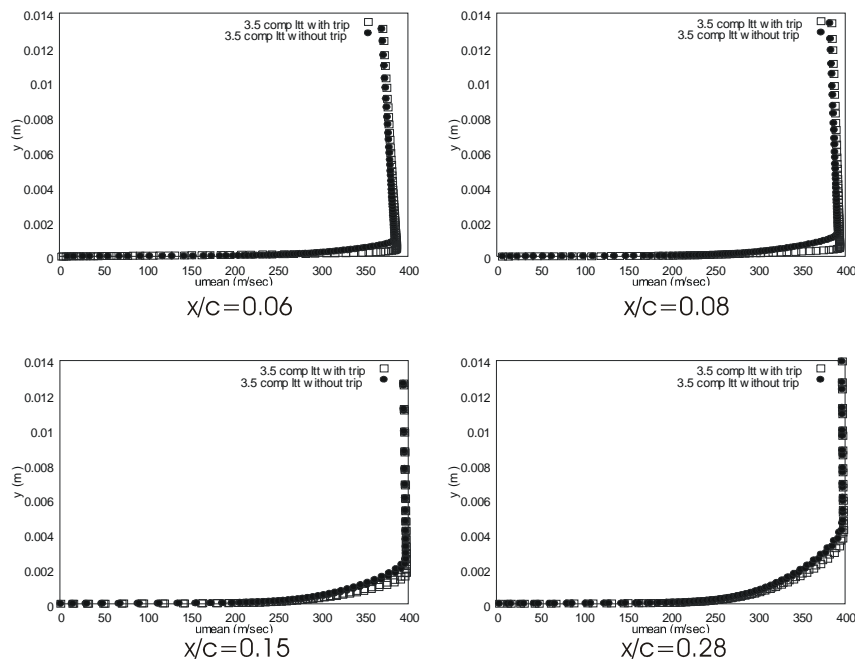
Για τις θέσεις πριν το κύμα κρούσης παρατηρείται ικανοποιητική πρόβλεψη της μορφής της τάσης της ροής. Σε θέσεις όμως που ταλαντώνεται το κύμα κρούσης και κατόπιν όπου εμφανίζεται έντονη αποκόλληση, η πρόλεξη δεν είναι τόσο καλή, γεγονός που εν γένει ήταν αναμενόμενο για ένα «απλό» μοντέλο τύρβης όπως το Spalart – Allmaras.

Η χρονική εξέλιξη του φαινομένου απεικονίζεται με χρήση λογισμικού του ΕΘΣ. Διακρίνονται τα στιγμιότυπα της ροής για οκτώ χρονικές στιγμές εντός μιας περιόδου. Ποιοτικά η χρονική εξέλιξη της ροής είναι αυτή που αναμενόταν.



Για να φανεί η σημασία του όρου μετάβασης και σε συνθήκες buffet τυπώνουμε τον την μέση χρονικά κατανομή του συντελεστή πίεσης και τη μέση χρονικά κατανομή της ταχύτητας για διάφορες θέσεις στην αεροτομή.





Παρατηρείται σύμπτωση των τιμών για των συντελεστή πίεσης με εξαίρεση τη θέση του κύματος και τη θέση μετάβασης όπου υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις. Στις χρονικά σταθμισμένες κατανομές ταχύτητας εμφανίζονται ελαφρώς μεγαλύτερες ταχύτητες στα αποτελέσματα στα οποία έχει ληφθεί υπόψη ο όρος μετάβασης από εκείνα στα οποία δεν έχει ληφθεί.

Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία σκοπός ήταν η αριθμητική προσομοίωση του buffet. Αρχικά έγινε μια βιβλιογραφική επισκόπηση για την γνωριμία με το buffet από όπου και διαπιστώθηκε ότι ακόμα δεν έχει αποσαφηνισθεί η φυσική του φαινομένου, οι αιτίες που το προκαλούν και οι παράγοντες που το επηρεάζουν. Συνεπώς οι διαθέσιμοι τρόποι προσέγγισης είναι οι πειραματικές και αριθμητικές προσομοιώσεις. Επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς η αεροτομή OAT15A. Ακολούθως, με σκοπό την αναπαράσταση του πειράματος και την αξιολόγηση της σημασίας του στη προσομοίωση του buffet, προγραμματίστηκε ο όρος μετάβασης (trip term) του μοντέλου Spalart – Allmaras που επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό από τον χρήστη του σημείου στο οποίο θα γίνει η μετάβαση από τη στρωτή στη τυρβώδη ροή. Ο όρος αυτός προστέθηκε στον υπάρχοντα κώδικα του Spalart – Allmaras του ΕΘΣ. Έπειτα δημιουργήθηκαν τα πρώτα πλέγματα γύρω από το περίγραμμα της αεροτομής. Έγιναν υπολογισμοί για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης αλλά και εκεί που η βιβλιογραφία προέβλεπε buffet η ροή προέκυπτε μόνιμη. Το πλέγμα αυτά κρίθηκαν ακατάλληλα καθώς φαινόταν να μην μπορούν να «αντιληφθούν το φαινόμενο». Σαν συνέπεια κατασκευάστηκαν πυκνότερα και αφού ελέγχθηκε ένα που έδωσε λύσεις ανεξάρτητες από αυτό, χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς. Οι υπολογισμοί ξεκίνησαν με μόνιμο κώδικα επίλυσης. Για γωνία πρόσπτωσης 2.5° η ροή προέκυψε μόνιμη όπως επίσης και για 3°. Στις 3.5° και στις 4.5° όμως διαπιστώθηκε μη μόνιμη ροή, έτσι χρησιμοποιήθηκε μη μόνιμος κώδικας ροής. Ο μη μόνιμος κώδικας αποκάλυψε ότι πράγματι στις 3.5° η ροή εμφανίζει buffet. Για τις γωνίες 2.5°, 3.5° πριν και μετά την εμφάνιση του buffet δηλαδή γίνονται και υπολογισμοί του πεδίου ροής χωρίς τη χρήση του όρου μετάβασης για να διαπιστωθεί η επίδρασή του στη συγκεκριμένη ροή.

Από τα παραπάνω διαπιστώθηκε ότι πράγματι μεταξύ των 3° και των 3.5° (για $M=0.73$ και $T=300\text{ K}$) εμφανίζεται στη μέχρι τότε μόνιμη ροή, buffet. Άρα ο κώδικας επίλυσης μόνιμης ροής μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστο εργαλείο για την πρόβλεψη της έναρξης του buffet σε μια αεροτομή. Το πλέγμα όμως που απαιτείται για να γίνει η αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου είναι «αρκετά» πυκνό. Τέλος η επίδραση του όρου μετάβασης του μοντέλου Spalart – Allmaras είναι μικρή για τη συγκεκριμένη ροή. Τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά είτε η γωνία πρόσπτωσης είναι τέτοια που η ροή να προκύπτει μόνιμη είτε η γωνία πρόσπτωσης είναι τέτοια που η ροή να εμφανίζει buffet.

Χρόνοι Υπολογισμού

Τέλος αναφέρονται ορισμένα υπολογιστικά στοιχεία τα οποία δεν προηγήθηκαν σχετικά με τους χρόνους υπολογισμού. Με πλέγμα 36800 κόμβων και 73170 τριγωνικών στοιχείων και μοντέλο τύρβης, το μοντέλο των Spalart-Allmaras, για την πρόβλεξη του πεδίου ροής με χρήση μόνιμου κώδικα ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος σε 1 CPU 3000MHz -1G ram ήταν περίπου 3 ώρες (για 6000 επαναλήψεις) ενώ σε 4 περίπου 1 ώρα για τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων.

Για την πρόβλεξη του μη μόνιμου πεδίου ροής πρακτικά αναπόφευκτη ήταν η χρήση παράλληλων υπολογιστών. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε η συστοιχία βέλος του ΕΘΣ. Ένας τυπικός υπολογισμός για 10 περίπου περιόδους (με 16 βήματα στην περίοδο, περίπου 2000 επαναλήψεις ανά χρονικό βήμα) που απαιτείται ώστε να «σταθεροποιηθεί» το buffet χρειάστηκε 40 ώρες σε 8 CPU.

Βιβλιογραφία και βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] D. Caruana, A. Mignosi, M. Corrège, A. Le Pourhiet, A.M. Rodde, Buffet and buffeting control in transonic flow, *Aerospace Science and Technology* 9 (2005) 605–616
- [2] Q. Xiao, H. M. Tsai and F. Liu, A Numerical study of transonic buffet on a supercritical airfoil, *AIAA Paper* 2004-1056
- [3] Sebastien Deck, Numerical Simulation of Transonic Buffet over a Supercritical Airfoil, *ONERA, 92322 Cedex, France*
- [4] Spalart, P. R., and Allmaras, S. R., “A One Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows,” *AIAA Paper* 92-0439, Jan. 1992.
- [5] Kourta A., Petit G., Rosenblum J.P., Courty J.C., Prédiction du tremblement en écoulement transsonique, *C. R. Mecanique* 333 (2005) 810–817
- [6] P. Molton, D. Soulevant, L. Jacquin, Mesures conditionnelles par vélocimétrie laser a franges de l' écoulement instantionnaire autour du profil transsonique OAT15A. 9o Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser
- [7] Jones RT. *Wing Theory*, Princeton Univ. Press, 1978.
- [8] Mylène Thiery, Eric Coustols, Numerical prediction of shock induced oscillations over a 2D airfoil: Influence of turbulence modelling and test section walls, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 27 (2006) 661–670
- [9] Κουμπογιάννης Δημήτριος. Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes με χρήση μη δομημένων πλεγμάτων σε περιβάλλον παράλληλης επεξεργασίας. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, Μάρτιος 1998.