

Μελέτη Αισθητήρων Ανίχνευσης σε Πεδία με Πολλαπλά Ροϊκά Φαινόμενα

Ελένη Μ. Λυμπεροπούλου, Ιωάννης Καλλιντέρης, Νικόλαος Τυροβολάς,
Αλέξανδρος Π. Κουτσούκος

Εργαστήριο Αεροδυναμικού Σχεδιασμού Αεροχημάτων,
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504 Ρίο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια μέθοδος ανίχνευσης ροϊκών φαινομένων με σκοπό την αυτόματη βελτίωση των υπολογιστικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση πολύπλοκων πεδίων ροής. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για τη βελτίωση της απεικόνισης του ροϊκού πεδίου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανίχνευση πολλαπλών ροϊκών φαινομένων διαφορετικής έντασης. Για την επισήμανση / απεικόνιση των αδύναμων φαινομένων χρησιμοποιούνται ειδικά διαμορφωμένοι αισθητήρες οι οποίοι συνδυάζουν κατάλληλα δύο ροϊκά μεγέθη του πεδίου. Η μέθοδος κατασκευής των σύνθετων αισθητήρων βασίζεται στον προσδιορισμό κάποιων επιθυμητών χαρακτηριστικών τους. Τέλος, οι αισθητήρες αξιολογούνται βάσει της ικανότητάς τους να ανιχνεύουν τα αδύναμα φαινόμενα με την εφαρμογή τους σε αναλυτικά πεδία ροής.

Λέξεις Κλειδιά: Ανίχνευση ροϊκών φαινομένων, βελτίωση υπολογιστικού πλέγματος, απεικόνιση ροϊκών φαινομένων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία βελτίωσης (τοπική πυκνωση /αραίωση) των υπολογιστικών πλεγμάτων (βλ. Kallinderis, 2000, South Jr. et al., 1995) αφορά στην αύξηση ή στην μείωση της πυκνότητας των πλεγματικών γραμμών σε περιοχές άμεσου ενδιαφέροντος. Εφαρμόζεται με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας και της ποιότητας των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών μεθόδων και τη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Η ανίχνευση ροϊκών φαινομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέθοδος προσδιορισμού των περιοχών που θα εφαρμοστεί η αυτόματη βελτίωση του πλέγματος, όπως για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε από τους Kasmai et al. (2011) για τις περιοχές που εμφανίζονται στρόβιλοι ακροπτερυγίων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μέθοδος γραφικής απεικόνισης πολύπλοκων τρισδιάστατων ροών (π.χ. Globus et al., 1991) έπειτα από ανάλυση δεδομένων που έχουν προκύψει από πειραματική διαδικασία ή προσομοίωση.

Αρκετές μέθοδοι ανίχνευσης ροϊκών φαινομένων που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν επικεντρώνονται στην ανίχνευση στροβίλων. Μια ανασκόπηση των επικρατέστερων μεθόδων παρουσιάζεται από τους Jiang et al. 2005. Μέθοδοι ανίχνευσης κρουστικών κυμάτων έχουν επίσης μελετηθεί διεξοδικά (βλ. Lovely et al., 1999, Kanamori et al., 2011). Επιπλέον, η ανίχνευση περιοχών ιξώδους ροής (βλ. Haimes et al., 1999, Kallinderis et al., 1989) και περιοχών αποκόλλησης οριακών στρωμάτων (βλ. Kenwright et al. 1999) έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης. Με την εφαρμογή αισθητήρων ανιχνεύονται οι περιοχές εκείνες όπου εμφανίζονται μεταβολές ορισμένων μεταβλητών. Χρησιμοποιούνται είτε μεταβλητές κάποιου ροϊκού μεγέθους (π.χ. Kallinderis et al., 2017, Dannenhoffer III et al., 1985), είτε προσεγγίσεις του υπολογιστικού σφάλματος (π.χ. Habashi et al., 2000).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια μέθοδος κατασκευής σύνθετων αισθητήρων ανίχνευσης πολλαπλών ροϊκών φαινομένων. Τυπικοί αισθητήρες χωρικών μεταβολών των μεγεθών του πεδίου συνδυάζονται κατάλληλα με σκοπό την επισήμανση των πιο αδύναμων φαινομένων του πεδίου ροής. Εξετάζεται η καταλληλότητα των σύνθετων αισθητήρων να ανιχνεύουν ένα μεγάλο εύρος ροϊκών φαινομένων (π.χ. οριακά στρώματα, σημεία ανακοπής, απορρεύματα, στροβίλους, κρουστικά κύματα). Τέλος, παρουσιάζεται μια μέθοδος για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των αισθητήρων που βασίζεται στη χρήση αναλυτικών πεδίων ροής.

2. ΣΥΝΘΕΤΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΡΟΪΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των αδύναμων ροϊκών φαινομένων έχουν πολυωνμική μορφή και συνδυάζουν δύο τυπικούς αισθητήρες μεταβολής μεγεθών της ροής. Οι επιμέρους αισθητήρες λειτουργούν διακριτά για την ανίχνευση διαφορετικών φαινομένων.

2.1 Μέθοδος κατασκευής των σύνθετων αισθητήρων

Οι σύνθετοι αισθητήρες διαμορφώνονται ως πολυωνμικές συναρτήσεις μέχρι και 3^{ου} βαθμού βάσει της παρακάτω γενικής εξίσωσης:

$$f(s_1, s_2) = C_1 \cdot s_1^3 + C_2 \cdot s_2^3 + C_3 (s_1^2 \cdot s_2) + C_4 (s_2^2 \cdot s_1) + C_5 \cdot s_1^2 + C_6 \cdot s_2^2 + C_7 \cdot (s_1 \cdot s_2) + C_8 \cdot s_1 + C_9 \cdot s_2 + C_{10}, \quad (1)$$

όπου s_1, s_2 είναι οι εμπλεκόμενοι απλοί αισθητήρες μεταβολής ενός ροϊκού μεγέθους, και C_i για $i=1,2,\dots,10$ είναι σταθερές που προκύπτουν με βάση τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του συνδυαστικού αισθητήρα.

Ο σύνθετος αισθητήρας δεν δύναται να ανιχνεύσει κάποιο ροϊκό φαινόμενο στις περιοχές όπου οι απλοί αισθητήρες που εμπεριέχει έχουν μηδενική τιμή και άρα ισχύει ότι $f(0,0) = 0$. Αυτή η συνθήκη υπαγορεύει ότι $C_{10} = 0$ και συνεπώς απαλείφεται ένας άγνωστος όρος από την Εξ.(1). Επιπλέον, ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα $f(s_1, s_2) = f(s_2, s_1)$ καθώς δεν έχει σημασία με ποια σειρά θα εφαρμοστούν οι απλοί αισθητήρες. Αυτό συνεπάγεται ότι $C_1 = C_2 = A$, $C_3 = C_4 = B$, $C_5 = C_6 = C$, $C_7 = D$, και $C_8 = C_9 = E$ και συνεπώς η Εξ.(1) παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$f(s_1, s_2) = A(s_1^3 + s_2^3) + B(s_1^2 \cdot s_2 + s_2^2 \cdot s_1) + C(s_1^2 + s_2^2) + D(s_1 \cdot s_2) + E(s_1 + s_2), \quad (2)$$

όπου οι συντελεστές A, B, C, D , και E είναι άγνωστες σταθερές.

Η ιδιότητα της αντιμετάθεσης συνεπάγεται ότι υπάρχει συμμετρία ως προς τον διαγώνιο άξονα $s_2 = s_1$ των απλών αισθητήρων. Για την κατασκευή ενός αισθητήρα που είναι συμμετρικός και ως προς τον δεύτερο διαγώνιο άξονα ($s_2 = 1 - s_1$) αρκεί η χρήση μιας πολυωνμικής συνάρτησης 2^{ου} βαθμού της μορφής:

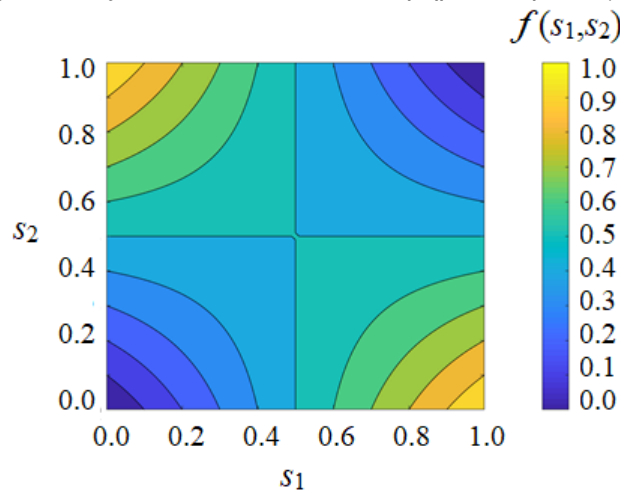
$$f(s_1, s_2) = C(s_1^2 + s_2^2) + D(s_1 \cdot s_2) + E(s_1 + s_2), \quad (3)$$

Οι σταθερές C, D και E πρέπει να προσδιοριστούν σε αυτή την περίπτωση βάσει κάποιων επιθυμητών χαρακτηριστικών του σύνθετου αισθητήρα. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στην ανίχνευση των αδύναμων ροϊκών φαινομένων και συνεπώς μια συνθήκη που εφαρμόζεται πάντα είναι η $f(1,1) = 0$. Δηλαδή, ο αισθητήρας που κατασκευάζεται λειτουργεί ως «διακόπτης» και δεν ανιχνεύει τα ισχυρά ροϊκά φαινόμενα για τα οποία και οι δύο απλοί αισθητήρες έχουν ταυτόχρονα υψηλές τιμές.

Μια άλλη οριακή συνθήκη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η $f(s_1, 0) = s_1$. Λόγω συμμετρίας ισχύει επίσης ότι $f(0, s_2) = s_2$. Δηλαδή, στην περίπτωση που ο ένας αισθητήρας έχει μηδενική τιμή ο δεύτερος λειτουργεί γραμμικά, σαν τυπικός αισθητήρας ενός ροϊκού μεγέθους. Τέλος, απαιτείται ο ορίσμος μια χαρακτηριστικής τιμής της συνάρτησης $f(s_1, s_2)$. Για παράδειγμα, μπορεί να εφαρμοστεί ότι $f(0.5, 0.5) = 0.5$ ώστε ο σύνθετος αισθητήρας να μην ενισχύει την περιοχή όπου και οι δύο απλοί αισθητήρες παίρνουν μεσαίες τιμές. Ενδεικτικά, για τις προαναφερθείσες οριακές συνθήκες ισχύει ότι $C = 0$, $D = -2$ και $E = 1$. Συνεπώς, ο αισθητήρας παίρνει την ακόλουθη μορφή:

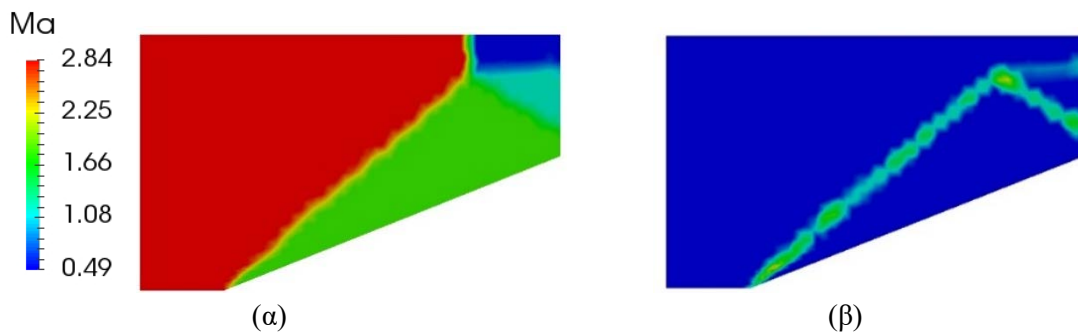
$$f(s_1, s_2) = s_1(1 - s_2) + s_2(1 - s_1), \tag{4}$$

Οι τιμές του σύνθετου αυτού αισθητήρα συναρτήσει των τιμών των απλών αισθητήρων s_1, s_2 φαίνονται στο Σχήμα 1. Παρατηρείται πως ο αισθητήρας λειτουργεί ως φίλτρο και «σβήνει» τα ισχυρά φαινόμενα για τα οποία οι απλοί αισθητήρες έχουν υψηλές τιμές ενώ ταυτόχρονα ενισχύει τα φαινόμενα για τα οποία μόνο ένας εκ των δύο απλών αισθητήρων παίρνει τιμές από 0.5 – 1.



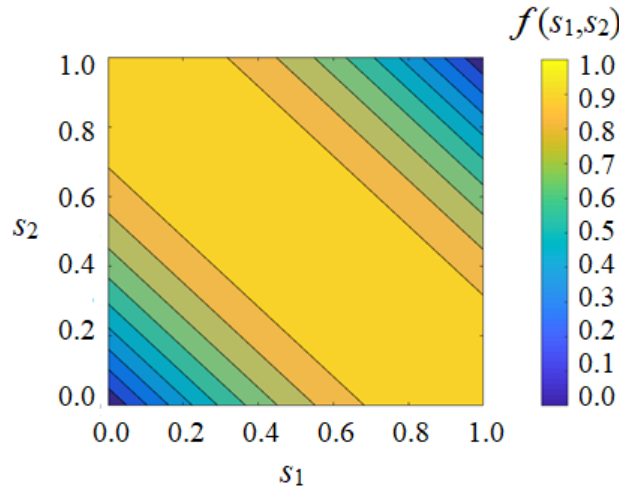
Σχήμα 1. Κατανομή τιμών αισθητήρα ανίχνευσης αδύναμων ροϊκών φαινομένων συναρτήσει των τιμών των απλών αισθητήρων s_1, s_2 . Ο αισθητήρας είναι 2^ο βαθμού και λειτουργεί γραμμικά ως προς τους αισθητήρες εισόδου.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής του αισθητήρα ταχύτητας-πίεσης (δUP) που διαμορφώνεται βάσει της Εξ.(4) φαίνεται στο Σχήμα 2. Απεικονίζονται το αναλυτικό πεδίο του αριθμού Mach στην περίπτωση υπερηχητικής ροής σε αγωγό και η κατανομή του αισθητήρα. Ο αισθητήρας-φίλτρο 2^ο βαθμού ανιχνεύει επαρκώς τα πιο αδύναμα ροϊκά φαινόμενα, δηλαδή τα πλάγια κρουστικά κύματα που δημιουργούνται και την γραμμή διολίσθησης (“slip line”), ενώ «αγνοεί» το ισχυρό κάθετο κρουστικό κύμα (“Mach stem”) για το οποίο οι απλοί αισθητήρες δU και δP παίρνουν τιμές κοντά στη μονάδα.



Σχήμα 2. Ανίχνευση πλάγιων κρουστικών κυμάτων και γραμμής διολίσθησης: (α) αναλυτικό πεδίο αριθμού Mach, (β) κατανομή του αισθητήρα δUP . Περίπτωση υπερηχητικής ροής ($Ma_\infty = 2.84$) σε αγωγό με γωνία κλίσης 20° , σε υβριδικό πλέγμα αποτελούμενο από πρίσματα και τετράεδρα.

Με τον ορισμό διαφορετικών οριακών συνθηκών μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω «ενίσχυση» των αδύναμων ροϊκών φαινομένων. Για παράδειγμα, θέτοντας $f(0.5, 0.5) = 1$ μπορεί να διευρυνθεί η περιοχή όπου ο αισθητήρας-φίλτρο 2^{ου} βαθμού παίρνει υψηλές τιμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Σε αυτήν την περίπτωση, ο συνδυαστικός αισθητήρας δεν λειτουργεί γραμμικά ως προς τους αισθητήρες εισόδου, δηλαδή $f(s_1, 0) \neq s_1$.



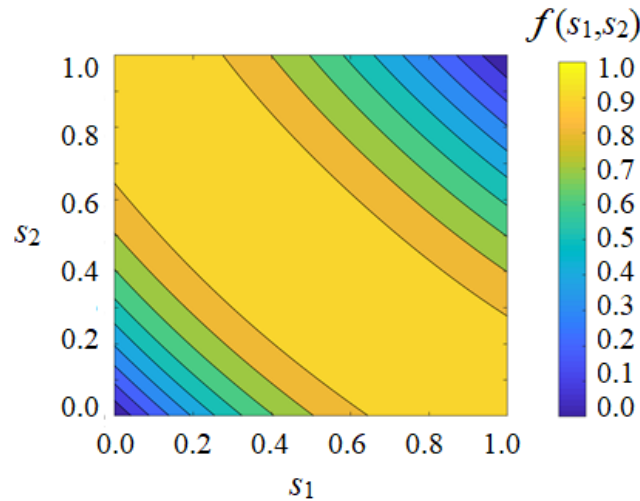
Σχήμα 3. Διεύρυνση της περιοχής ανίχνευσης του σύνθετου αισθητήρα 2^{ου} βαθμού $f(s_1, s_2)$. Ο σύνθετος αισθητήρας είναι μη-γραμμικός ως προς τους αισθητήρες εισόδου s_1, s_2 .

Τέλος, σύνθετοι αισθητήρες που βασίζονται σε πολυωνυμικές εξισώσεις 3^{ου} βαθμού κατασκευάζονται για να επιτευχθεί ασυμμετρία των τιμών ως προς τον ένα διαγώνιο άξονα ($s_2 = 1 - s_1$). Με αυτόν τον τρόπο δίνεται περισσότερη έμφαση στα αδύναμα ροϊκά φαινόμενα που δεν ανιχνεύουν επαρκώς οι απλοί αισθητήρες.

Για την κατασκευή αισθητήρων 3^{ου} βαθμού εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες $f(0, 0) = f(1, 1) = 0$, και απαιτούνται τρεις επιπλέον οριακές συνθήκες για τον προσδιορισμό των αγνώστων A, B , και C στην Εξ.(2). Η μια συνθήκη αφορά στον προσδιορισμό της τιμής της συνάρτησης $f(s_1, s_2)$ και οι άλλες στον προσδιορισμό των τιμών δύο παραγώγων της. Για τον σύνθετο αισθητήρα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4, ορίζεται ότι $f(0.45, 0.45) = 1$, και προσδιορίζονται δύο τοπικά ακρότατα του αισθητήρα ως εξής:

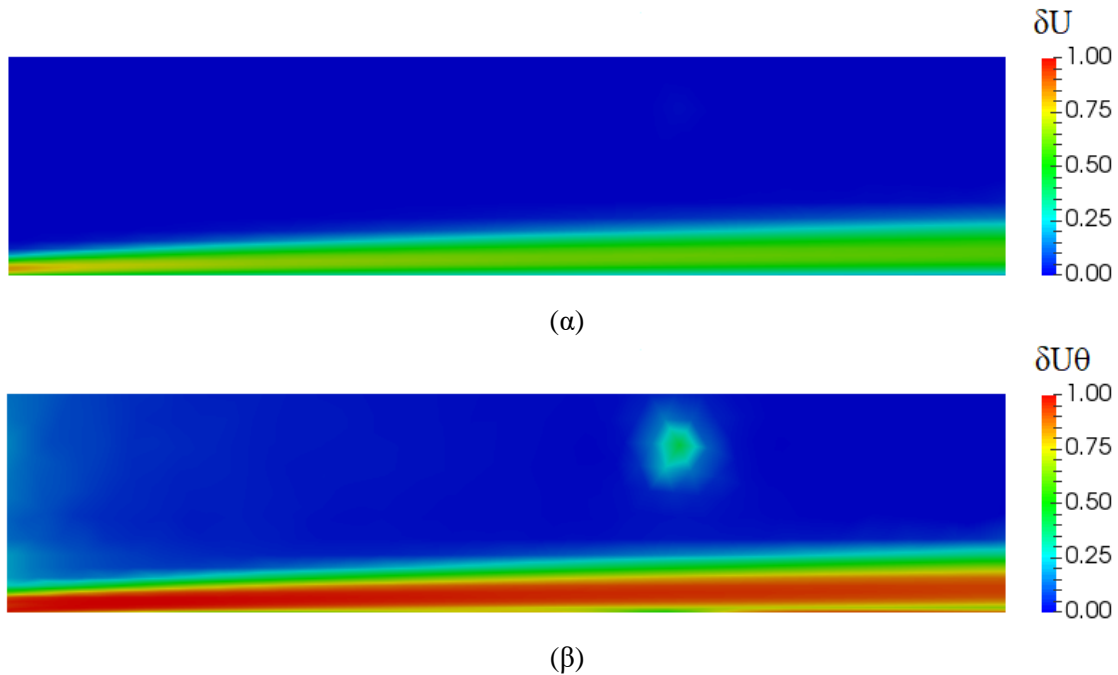
$$\left. \frac{\partial f}{\partial s_1} \right|_{(0.45, 0.45)} = 0, \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial f}{\partial s_2} \right|_{(1, 0)} = 0 \quad (5)$$

Οι οριακές συνθήκες πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα έτσι ώστε ο αισθητήρας που κατασκευάζεται να παίρνει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός και μικρότερες της μονάδας.



Σχήμα 4. Διεύρυνση της περιοχής ανίχνευσης με τη χρήση σύνθετου αισθητήρα 3^{ου} βαθμού $f(s_1, s_2)$. Ο μη-συμμετρικός αισθητήρας ενισχύει τις περιοχές για τις οποίες οι απλοί αισθητήρες s_1, s_2 παίρνουν μικρές τιμές.

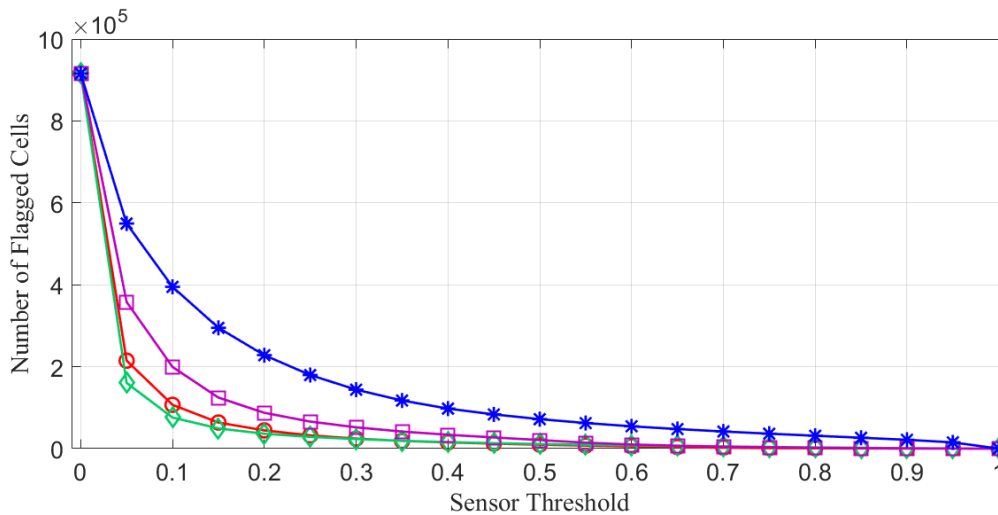
Η περιοχή ανίχνευσης του αισθητήρα 3^{ου} βαθμού παρουσιάζεται ενδεικτικά για το αναλυτικό πεδίο ασυμπίεστης ροής πάνω από επίπεδη πλάκα. Ένας ελεύθερος στρόβιλος έχει τοποθετηθεί επιτούτου σε απόσταση $x/L = 0.7$ και $y/H = 0.75$, όπου L , και H είναι το μήκος και το ύψος του υπολογιστικού χωρίου, αντίστοιχα. Ο στρόβιλος είναι αδύναμος και δεν αλληλεπιδρά με το οριακό στρώμα. Για την ανίχνευσή του εφαρμόζονται οι αισθητήρες μεταβολής της ταχύτητας (μέτρο δU , και διεύθυνση $\delta\theta$) που φαίνονται στο Σχήμα 5. Τα πεδία τιμών του απλού αισθητήρα δU και του σύνθετου αισθητήρα 3^{ου} βαθμού $\delta U\theta$ απεικονίζονται στο Σχήμα 5(α) και (β), αντίστοιχα. Ενώ ο απλός αισθητήρας ανιχνεύει μόνο το οριακό στρώμα, ο αισθητήρας 3^{ου} βαθμού ανιχνεύει ικανοποιητικά τον στρόβιλο.



Σχήμα 5. Ανίχνευση οριακού στρώματος και αδύναμου στροβίλου με τη χρήση: (α) απλού αισθητήρα δU , και (β) σύνθετου αισθητήρα 3^{ου} βαθμού $\delta U\theta$. Περίπτωση υπέρθεσης ασυμπίεστης ροής πάνω από επίπεδη πλάκα ($Re = 10^4$) και ελεύθερου στροβίλου, σε υβριδικό πλέγμα αποτελούμενο από πρίσματα και τετράεδρα

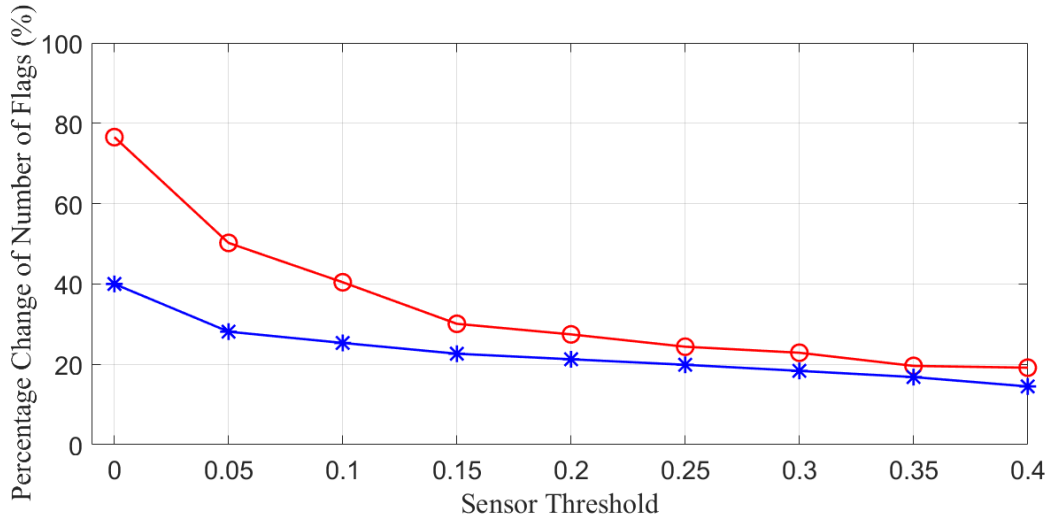
2.2 Μελέτη κατανομών των σύνθετων αισθητήρων

Για την ανίχνευση των ροϊκών φαινομένων πρέπει να προσδιοριστεί ένα κατώφλι ανίχνευσης (“*detection threshold*”), δηλαδή μια κρίσιμη τιμή του αισθητήρα πάνω από την οποία η περιοχή που επισημαίνεται θεωρείται ότι απαρτίζει το ροϊκό φαινόμενο. Κάθε αισθητήρας κανονικοποιείται με τη μέγιστη τιμή του και αποτυπώνεται σε μια κατανομή. Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται ενδεικτικά οι κατανομές απλών αισθητήρων μεταβολής της ταχύτητας (μέτρο δU , και διεύθυνση $\delta\theta$) και των σύνθετων αισθητήρων 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού $\delta U\theta$, για την περίπτωση συμπιεστής ροής ($Ma_\infty = 0.34$) γύρω από πτέρυγα σε υψηλή γωνία προσβολής ($\alpha = 40^\circ$). Η ποιοτική μελέτη τους δείχνει ότι οι κατανομές των σύνθετων αισθητήρων έχουν παρόμοιο σχήμα με τις αντίστοιχες κατανομές των απλών αισθητήρων, ενώ μπορούν να επισημάνουν αρκετά μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων του υπολογιστικού πλέγματος (“*Number of Flagged Cells*”) όταν το κατώφλι ανίχνευσης παίρνει τιμές από 0.05 μέχρι 0.3.



Σχήμα 6. Κατανομές αισθητήρων για την ανίχνευση πολλαπλών ροϊκών φαινομένων: $\delta\theta$ (◇), δU (○), $\delta U\theta$ 2^{ου} βαθμού (□), και $\delta U\theta$ 3^{ου} βαθμού (*). Περίπτωση συμπιεστής ροής ($Ma_\infty = 0.34$) γύρω από πτέρυγα σε υψηλή γωνία προσβολής ($\alpha = 40^\circ$).

Η μείωση των υπολογιστικών κελιών που επισημαίνονται από τους αισθητήρες με βάση τον υπολογισμό κατωφλιού ανίχνευσης φαίνεται ενδεικτικά για τον απλό αισθητήρα ταχύτητας δU και τον σύνθετο αισθητήρα 3^{ου} βαθμού $\delta U\theta$ στο Σχήμα 7. Παρατηρείται ότι ο σύνθετος αισθητήρας δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις μεταβολές του “*threshold*” καθώς η καμπύλη (μπλέ χρώμα) παίρνει τιμές κοντά στο 20% για ένα μεγάλο εύρος κρίσιμων τιμών του αισθητήρα (από 0.05 μέχρι και 0.4). Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία ανίχνευσης δεν εξαρτάται σημαντικά από το χρησιμοποιούμενο κατώφλι ανίχνευσης. Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες φαίνεται επίσης πως με τη μείωση του κατωφλιού ανίχνευσης, ο σύνθετος αισθητήρας αυξάνει σταδιακά και με σχετικά σταθερό ρυθμό την περιοχή επισημάνσης των ροϊκών φαινομένων.

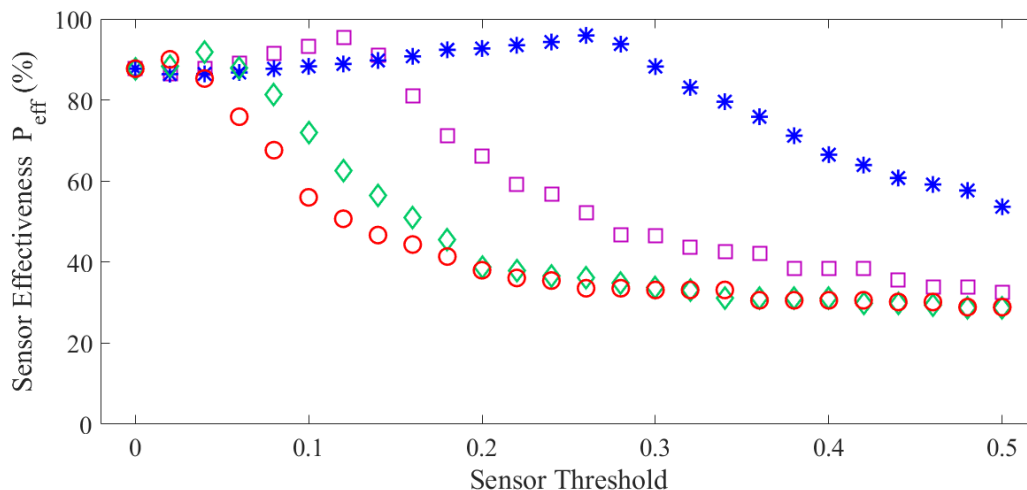


Σχήμα 7. Ευαισθησία των αισθητήρων δU (○), και $\delta U\theta$ 3^{ου} βαθμού (*), σε μεταβολές του κατωφλιού ανίχνευσης. Περίπτωση συμπιεστή ροής ($Ma_\infty = 0.34$) γύρω από πτέρυγα σε υψηλή γωνία προσβολής ($\alpha = 40^\circ$).

2.3 Αξιολόγηση των σύνθετων αισθητήρων

Για την αξιολόγηση των σύνθετων αισθητήρων χρησιμοποιούνται αναλυτικά πεδία ροής όπου η περιοχή των ροϊκών φαινομένων μπορεί να προσδιοριστεί με αναλυτικά κριτήρια. Η αποτελεσματικότητα των αισθητήρων υπολογίζεται συγκρίνοντας την περιοχή που επισημαίνουν με την αντίστοιχη περιοχή που προκύπτει από τα αναλυτικά κριτήρια.

Ενδεικτικά, για την περίπτωση αναλυτικού πεδίου ροής που περιλαμβάνει έναν ισχυρό και έναν αδύναμο στρόβιλο, η μεταβολή της αποτελεσματικότητας των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων συναρτήσει του κατωφλιού ανίχνευσης απεικονίζεται στο Σχήμα 8. Περιλαμβάνονται οι σύνθετοι αισθητήρες $\delta U\theta$ 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού, καθώς και οι απλοί αισθητήρες δU , $\delta\theta$ για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 8. Αποτελεσματικότητα των αισθητήρων ανίχνευσης: $\delta\theta$ (◇), δU (○), $\delta U\theta$ 2^{ου} βαθμού (□), και $\delta U\theta$ 3^{ου} βαθμού (*). Περίπτωση αναλυτικού πεδίου ελεύθερων στρόβιλων διαφορετικής έντασης σε δύο διαστάσεις.

Ο καταλληλότερος αισθητήρας για την ανίχνευση των δύο στρόβιλων, είναι ο σύνθετος αισθητήρας μεταβολής της ταχύτητας $\delta U\theta$ 3^{ου} βαθμού στον οποίο αντιστοιχούν ποσοστά αποτελεσματικότητας κοντά στο 90% για μεγάλο εύρος τιμών του κατωφλιού ανίχνευσης (0.1 – 0.3). Ο γραμμικός

αισθητήρας 2^{ου} βαθμού που εξετάστηκε παρουσιάζει επίσης μεγαλύτερο «πλατώ» υψηλών τιμών αποτελεσματικότητας συγκριτικά με τους απλούς αισθητήρες.

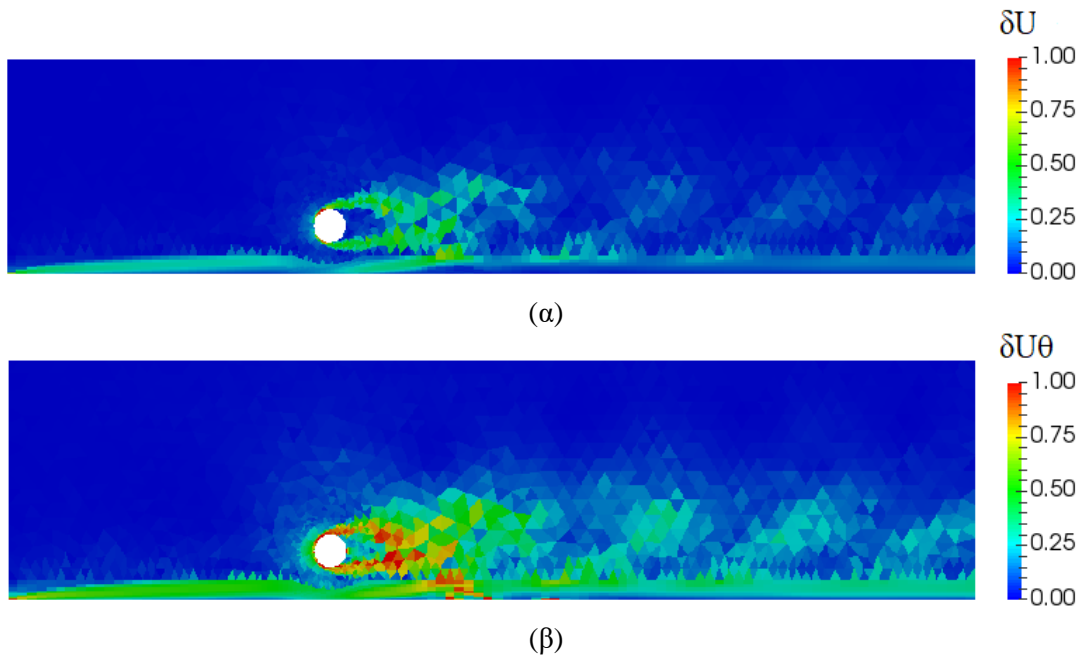
3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η μέθοδος ανίχνευσης ροϊκών φαινομένων εφαρμόζεται σε πεδία ροής μεγαλύτερης πολυπλοκότητας που έχουν επιλυθεί υπολογιστικά. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία με εκείνα που προέκυψαν τόσο από την ποιοτική μελέτη των κατανομών των σύνθετων αισθητήρων όσο και από την αξιολόγησή τους με εφαρμογή σε αναλυτικά πεδία ροής.

3.1 Ανίχνευση πολλαπλών φαινομένων σε πεδίο ασυμπίεστης ροής

Οι αισθητήρες εφαρμόζονται σε πεδίο ασυμπίεστης ροής ($Re = 200$) γύρω από κύλινδρο τοποθετημένο πάνω από επίπεδη πλάκα. Ο λόγος του ύψους του κατώτατου σημείου της περιφέρειας του κυλίνδρου προς την διάμετρό του είναι $H/D = 1$. Τα ροϊκά φαινόμενα που καλούνται να ανιχνεύσουν οι αισθητήρες είναι οι δίνες που δημιουργούνται κατάντι του κυλίνδρου, τα σημεία ανακοπής της ροής, και το οριακό στρώμα. Οι κατανομές των πεδίων τιμών του απλού αισθητήρα μεταβολής της ταχύτητας δU και του σύνθετου αισθητήρα 3^{ου} βαθμού $\delta U\theta$ απεικονίζονται στο Σχήμα 9(α) και (β), αντίστοιχα.

Ο απλός αισθητήρας μεταβολής της ταχύτητας δεν ανιχνεύει ικανοποιητικά τους στροβίλους, και την περιοχή του οριακού στρώματος μετά την αποκόλλησή του. Αντιθέτως, ο σύνθετος αισθητήρας $\delta U\theta$ ανιχνεύει το οριακό στρώμα κατά μήκος ολόκληρης της επίπεδης πλάκας, και «ενισχύει» σημαντικά την περιοχή ανίχνευσης των στροβίλων στο απόρρευμα του κυλίνδρου.

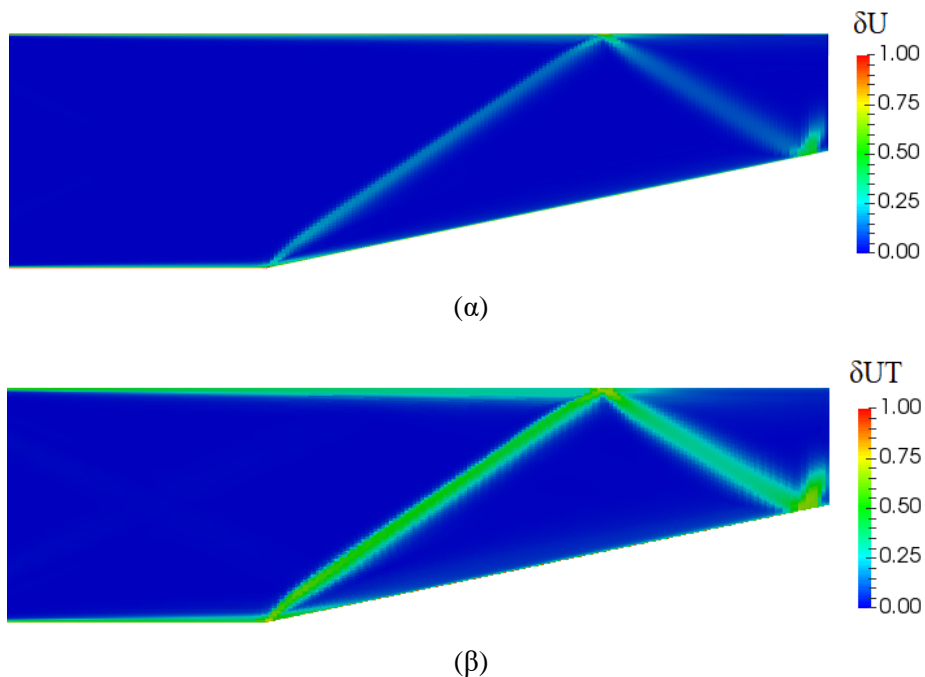


Σχήμα 9. Ανίχνευση στροβίλων και οριακού στρώματος. Πεδίο τιμών αισθητήρων (α) δU , και (β) $\delta U\theta$ 3^{ου} βαθμού. Περίπτωση ασυμπίεστης ροής ($Re = 200$) γύρω από κύλινδρο τοποθετημένο πάνω από επίπεδη πλάκα.

3.2 Ανίχνευση πολλαπλών φαινομένων σε πεδίο συμπιεστής ροής

Για την περίπτωση υπερηχητικής ροής ($Ma_\infty = 2.47$) σε αγωγό με γωνία κλίσης περίπου 10° , εφαρμόζεται ένας απλός αισθητήρας ταχύτητας δU και ο σύνθετος αισθητήρας ταχύτητας-θερμοκρασίας δUT $3^{\text{ου}}$ βαθμού. Οι κατανομές τους απεικονίζονται στο Σχήμα 10(α) και (β), αντίστοιχα.

Ο απλός αισθητήρας ταχύτητας ανιχνεύει επαρκώς το προσπίπτον κρουστικό κύμα και τις περιοχές αλληλεπίδρασης των κρουστικών κυμάτων και του οριακού στρώματος. Οι τιμές του αισθητήρα στην περιοχή του ανακλώμενου κρουστικού κύματος είναι αρκετά μικρές, και το οριακό στρώμα που είναι και το πιο αδύναμο ροϊκό φαινόμενο δεν ανιχνεύεται επαρκώς. Αντιθέτως, ο σύνθετος αισθητήρας ανιχνεύει αρκετά καλά όλα τα προαναφερθέντα ροϊκά φαινόμενα όπως φαίνεται στο Σχήμα 10(β).



Σχήμα 10. Ανίχνευση πλάγιων κρουστικών κυμάτων και οριακού στρώματος. Πεδίο τιμών αισθητήρων (α) ταχύτητας δU , και (β) ταχύτητας-θερμοκρασίας δUT $3^{\text{ου}}$ βαθμού. Περίπτωση υπερηχητικής ροής ($Ma_\infty = 2.47$) σε αγωγό με γωνία κλίσης 10° , σε εξαεδρικό πλέγμα.

4. ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα εργασία προτάθηκαν και αξιολογήθηκαν ειδικοί αισθητήρες που συνδυάζουν δύο τυπικούς αισθητήρες χωρικών μεταβολών ενός ροϊκού μεγέθους. Οι σύνθετοι αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των αδύναμων φαινομένων σε πεδία ροής με πολλαπλά ροϊκά φαινόμενα διαφορετικής έντασης. Παρουσιάστηκε μια μέθοδος κατασκευής των σύνθετων αισθητήρων που βασίζεται στον προσδιορισμό κάποιων επιθυμητών χαρακτηριστικών τους. Οι σύνθετοι αισθητήρες χρησιμοποιούν διακριτά τους εμπλεκόμενους απλούς αισθητήρες για την ανίχνευση διαφορετικών φαινομένων του πεδίου ροής. Στις περιπτώσεις όπου εφαρμόστηκαν οι αισθητήρες παρατηρήθηκε πως είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση ενός μεγάλου εύρους ροϊκών φαινομένων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Dannenhover III J.F. and Baron J.R., “Grid adaptation for the 2-D Euler Equations”, in Proc. 23rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NA, AIAA Pap. 85-0484, 1985.
- Globus A., Levit C. and Lasinski T., “A tool for visualizing the topology of three-dimensional vector fields”, in Proc. IEEE Visualization 91 (VIS91), San Diego, CA, p.33-40, 1991.
- Habashi W.G., Dompierre J., Bourgault Y., Ait-Ali-Yahia D., Fortin M. and Vallet M.G. (2000), “Anisotropic mesh adaptation: towards user-independent, mesh-independent and solver-independent CFD. Part I: general principles”, *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 32, p.725-744.
- Haines R. and Kenwright D., “On the velocity gradient tensor and fluid feature extraction”, in Proc. 14th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Norfolk, VA, AIAA Pap. 99-3288, 1999.
- Herczynski A., Weidman P.D. and Burde G.I. (2004), “Two-Fluid Jets and Wakes”, *Phys. Fluids* 16, p.1037-1048.
- Kallinderis Y. (2000), “Special issue: Adaptive methods for compressible CFD – Preface”, *Comput. Methods in Appl. Mech. Engrg.* 189, p.1053.
- Kallinderis Y. and Baron J.R. (1989), “Adaptation methods for a new Navier-Stokes algorithm”, *AIAA J.* 27, p.37-43.
- Kallinderis Y., Lyμπεροπούλου E.M. and Antonellis P. (2017), Flow feature detection for grid adaptation and flow visualization, *J. Comput. Phys.* 341, p. 182-207.
- Kanamori M. and Suzuki K. (2011), “Shock wave detection in two-dimensional flow based on the theory of characteristics from CFD data”, *J. Comput. Phys.* 230, p.3085-3092.
- Kasmai N., Thompson D., Luke E., Jankun-Kelly M. and Machiraju R. (2011), “Feature-based adaptive mesh refinement for wingtip vortices”, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 66 p.1274-1294.
- Kenwright D., Henze C. and Levit C. (1999), “Feature extraction of separation and attachment lines”, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 5, p.135-144.
- Lovely D. and Haines R., “Shock detection from computational fluid dynamics results”, in Proc. 14th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Norfolk, VA, AIAA Pap. 99-3285, 1999.
- South Jr. J.C., Thomas J.L., and Van Rosendale J. (1995), “ICASE/LaRC Workshop on adaptive grid methods”, NASA CP 3316.