

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΕΥΤΕΡΕΟΥΣΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΩΝ ΣΤΟΝ ΟΜΟΡΡΟΥ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΜΕ ΠΑΧΥ ΧΕΙΛΟΣ ΕΚΦΥΓΗΣ

Κωνσταντίνος Κελλάρης⁽¹⁾, Γεώργιος Παπαδάκης⁽²⁾, Μαρίνος Μανωλέσος⁽³⁾

^(1,3)Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών - ⁽²⁾Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 9 Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου

⁽¹⁾ Υποψήφιος Διδάκτορας - kkellaris@mail.ntua.gr

⁽²⁾ Επίκουρος Καθηγητής - papis@fluid.mech.ntua.gr

⁽³⁾ Επίκουρος Καθηγητής - marinos@fluid.mech.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αεροτομές με παχύ χείλος εκφυγής (flatback-FB) χρησιμοποιούνται στην περιοχή κοντά στη ρίζα των πτερυγίων των σύγχρονων μεγάλων ανεμογεννητριών. Πρόσφατα, μια ζώνη χαμηλής αεροδυναμικής αντίστασης παρατηρήθηκε σε μια περιοχή μεγάλων γωνιών προσφυγής πριν την απώλεια άντωσης και είναι το αντικείμενο αυτής της μελέτης. Έμφαση δίνεται σε δύο γωνίες προσβολής – μια εντός (12°) και μια εκτός (0°) της ζώνης χαμηλής αντίστασης. Κάνοντας χρήση τεχνικών για την ανάλυση της ροής στο πεδίο της συχνότητας, διερευνούμε τις τρισδιάστατες συνεκτικές δομές στον ομόρρου της αεροτομής. Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις με τη μέθοδο DES (Detached Eddy Simulation) για τη διερεύνηση της περιοχής χαμηλής αεροδυναμικής αντίστασης και των τρισδιάστατων συνεκτικών δομών. Επιπρόσθετα, οι δομές της ροής που εμφανίζουν συνοχή διερευνώνται μέσω της μεθόδου mPOD (multiscale Proper Orthogonal Decomposition), η οποία εγγυάται πως οι χωρικές χαρακτηριστικές μορφές (modes) των δεδομένων έχουν καθαρό φασματικό περιεχόμενο. Η πρωτεύουσα αστάθεια (Kármán vortex street) κυριαρχεί και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο, η δευτερεύουσα αστάθεια μπορεί να διακριθεί μόνο για την περίπτωση των 12° και ταυτοποιήθηκε ως αστάθεια τύπου S'.

Λέξεις Κλειδιά: Υπολογιστική Ρευστομηχανική, DES, Ομόρρους μη Αεροδυναμικών Σωμάτων, Δευτερεύουσες Αστάθειες

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, καθώς το μήκος των πτερυγίων των ανεμογεννητριών αυξάνονται, στοχεύοντας στη μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας, η χρήση αεροτομών με παχύ χείλος εκφυγής (flatback-FB) γίνεται πιο διαδεδομένη. Οι FB αεροτομές τοποθετούνται κοντά στη ρίζα των πτερυγίων και παρέχουν μια πληθώρα αεροδυναμικών, δομικών και αεροελαστικών πλεονεκτημάτων, όπως η αυξημένη αεροδυναμική άντωση, η έλλειψη ευαισθησίας στην επιφανειακή τραχύτητα και η αυξημένη στιβαρότητα σε πτερύγιση. Μελέτες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε ένα από τα πρώτα πτερύγια ανεμογεννητριών που βρίσκονται στην βιβλιογραφία και το οποίο ενσωμάτωσε FB αεροτομές (SNL100-03), έδειξαν πως πτερύγια με FB αεροτομές μπορούν να είναι μέχρι και 16% ελαφρύτερα σε σχέση με πτερύγια με συμβατικές αεροτομές δίχως κάποια σημαντική μείωση στην απόδοσή τους (Griffith & Richards, 2014).

Ωστόσο, οι FB αεροτομές έχουν αυξημένη αεροδυναμική αντίσταση σε σχέση με τις συμβατικές αεροτομές (Baker et al., 2006). Κατά συνέπεια, έχουν προταθεί διάφορες συσκευές παθητικού ελέγχου της ροής με σκοπό την μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης (Manolesos & Voutsinas, 2016; Papadakis & Manolesos, 2020). Επίσης, σχετικά πρόσφατα (Manolesos & Papadakis, 2021), παρουσιάστηκε πιο εκτεταμένα μια περιοχή, όπου καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής, η αεροδυναμική αντίσταση μειώνεται. Αυτή η περιοχή έχει παρατηρηθεί σε πειραματικές (Barone et al.,

2009; Manolesos & Voutsinas, 2016) καθώς και υπολογιστικές (Barone et al., 2009; Manolesos & Papadakis, 2021) μελέτες. Επιπλέον, το παχύ χείλος εκφυγής οδηγεί στην έκλυση δινών που δημιουργούν σύνθετες τρισδιάστατες δομές, όπως προέκυψαν από πρόσφατες τρισδιάστατες υπολογιστικές μελέτες υψηλής πιστότητας (Manolesos & Papadakis, 2021).

Ακόμη στις αεροτομές με παχύ χείλος εκφυγής, έχει παρατηρηθεί η εμφάνιση δευτερευουσών ασταθειών, δηλαδή ζεύγη στροβίλων στον ομόρρου με αντίθετες φορές περιστροφής κατά τη διεύθυνση της ροής που ενώνουν τους πρωτεύοντες στροβίλους (von Karman vortex street). Αυτή η συμπεριφορά έχει λάβει ελάχιστη προσοχή μέχρι τώρα σε αντίθεση με τις δευτερεύουσες αστάθειες στον ομόρρου μακρόστενων συμμετρικών σωμάτων με παχύ χείλος εκφυγής (Gibeau et al., 2018; Gibeau & Ghaemi, 2020; Naghib-Lahouti et al., 2012, 2014; Ryan et al., 2005).

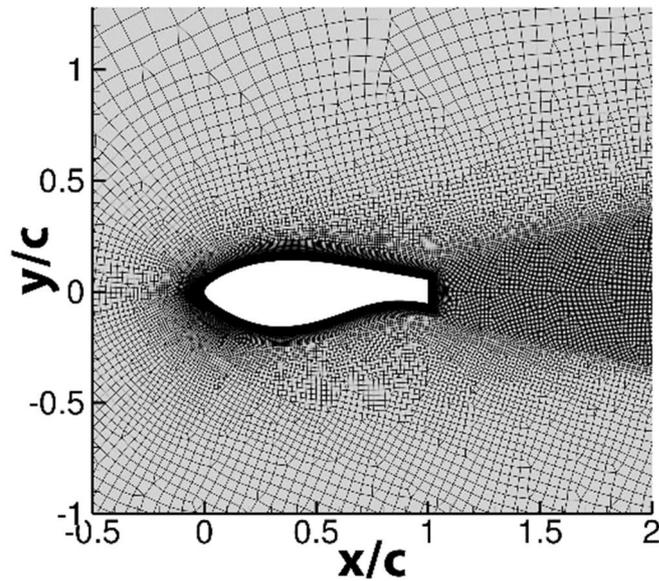
Αυτή η εργασία αποτελεί τη συνέχεια της (Manolesos & Papadakis, 2021). Γίνεται χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων υψηλής πιστότητας για τη μελέτη της ροής γύρω από μια αεροτομή με παχύ χείλος εκφυγής με στόχο τη διερεύνηση των δευτερευουσών ασταθειών που εμφανίζονται στον ομόρρου και την επιπλέον διερεύνηση της ζώνης χαμηλής αντίστασης κάνοντας χρήση σύγχρονων τεχνικών ιδιομορφικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας μπορούν μελλοντικά να αποτελέσουν τη βάση μιας μεθοδολογίας παθητικού ελέγχου της ροής.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Στην παρούσα ανάλυση γίνεται χρήση της αεροτομής L30FB10, η οποία είναι μια αεροτομή με μέγιστο πάχος 30% της χορδής και χείλος εκφυγής με πάχος 10.6% της χορδής, και έχει μελετηθεί πειραματικά (Manolesos & Voutsinas, 2016) και υπολογιστικά (Manolesos & Papadakis, 2021; Papadakis & Manolesos, 2020). Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις υψηλής πιστότητας με τον in-house επιλύτη MaPFlow (Papadakis, 2015) για την αριθμητική επίλυση των τρισδιάστατων μη-μόνιμων εξισώσεων Navier-Stokes. Στο MaPFlow, η χωρική διακριτοποίηση γίνεται μέσω του σχήματος των πεπερασμένων όγκων, ενώ οι εξισώσεις για ασυμπίεστο ρευστό ολοκληρώνονται στο χρόνο με έμμεσο τρόπο μέσα από τη χρήση αριθμητικής συμπίεστότητας (Ntouras & Papadakis, 2020). Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνουν στο MaPFlow ακρίβεια δεύτερης τάξης στο χώρο και στο χρόνο.

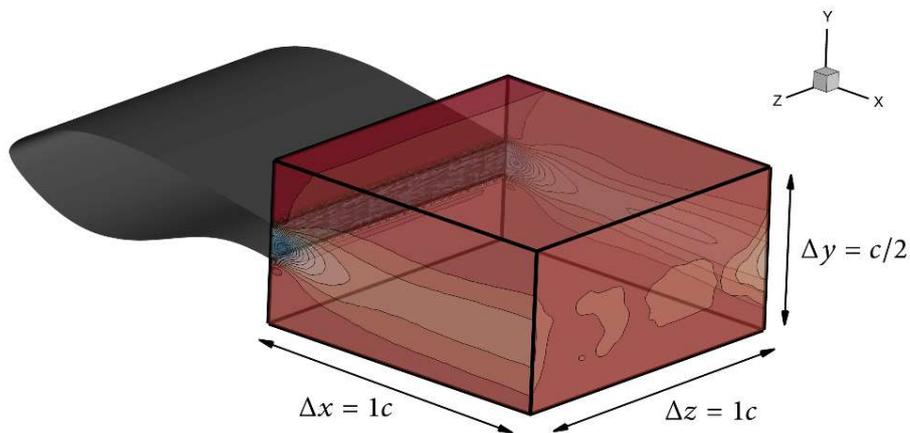
Έγινε χρήση πλέγματος τύπου O με ακτίνα 50 μήκη χορδών το οποίο περιέχει περίπου 10 εκατομμύρια κελιά ακολουθώντας προηγούμενες υπολογιστικές μελέτες (Manolesos & Papadakis, 2021; Papadakis & Manolesos, 2020). Το πλέγμα εκτείνεται μία χορδή κατά τη διεύθυνση του εκπετάσματος, αποτελείται κυρίως από τετραεδρικά κελιά, ενώ πραγματοποιήθηκε πυκνώση γύρω από το στερεό σώμα με 100 στρώματα όπου τα κελιά είναι εξαεδρικά και η αδιάστατη απόσταση από τον τοίχο είναι $y^+=0.1$. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για υψηλό αριθμό Reynolds, πιο συγκεκριμένα για $Re=1.5e6$, κάνοντας χρήση της μεθόδου IDDES (Spalart et al., 2006). για την μοντελοποίηση της τύρβης, η οποία αποτελεί μια υβριδική προσέγγιση και σμίγει το RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) μοντέλο των Spalart Almaras με το μοντέλο LES (Large Eddy Simulation) του Smagorinsky. Πιο συγκεκριμένα, η RANS εκδοχή του μοντέλου χρησιμοποιείται κοντά στην αεροτομή, ενώ η LES εκδοχή χρησιμοποιείται μακριά από αυτή. Η ενεργοποίηση κάθε εκδοχής του μοντέλου βασίζεται στη σύγκριση της απόστασης ενός κελιού από τον τοίχο με τις χαρακτηριστικές διαστάσεις του κελιού. Για την εξασφάλιση της ενεργοποίησης του μοντέλου εκτός του οριακού στρώματος, πρώτα δημιουργήθηκε το δισδιάστατο πλέγμα και στη συνέχεια εξήχθη κατά το εκπέτασμα με απόσταση 1/80 της χορδής. Τα στρώματα καθώς και η εκλέπτυνση του πλέγματος στον ομόρρου φαίνονται στο Σχήμα 1. Κάθε προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για 80 χιλιάδες βήματα. Από αυτά, τα πρώτα 10 χιλιάδες αφορούν τις επαναλήψεις στον ψευδοχρόνο (μόνιμη κατάσταση) και έπειτα πραγματοποιήθηκαν 70 χιλιάδες βήματα για τη μη μόνιμη κατάσταση. Η σύγκλιση σε κάθε χρονικό βήμα της μη-μόνιμης κατάστασης επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής διπλών βημάτων (dual stepping).



Σχήμα 1. Λεπτομέρεια του υπολογιστικού πλέγματος γύρω από την αεροτομή L30FB10.

2.2 Ανάλυση βασισμένη στα δεδομένα

Για την εξαγωγή των τρισδιάστατων συνεκτικών δομών στον ομόρρου, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ιδιομορφών με τη μέθοδο mPOD (multiscale Proper Orthogonal Decomposition) (Mendez et al., 2019). Σε κάθε χρονικό βήμα, η ταχύτητα των κελιών του πλέγματος παρεμβάλλεται σε ένα μικρότερο Καρτεσιανό πλέγμα μήκους μιας χορδής κατά τη διεύθυνση της ροής, βάθους μιας χορδής κατά το εκπέτασμα και ύψους μισής χορδής στον άξονα y , ενώ συνολικά γίνεται χρήση 500 χιλιάδων σημείων. Στο Σχήμα 2, φαίνονται τα σύνορα του καρτεσιανού πλέγματος. Έπειτα το σύνολο των δεδομένων οργανώνεται σε ένα μητρώο του οποίου κάθε στήλη αναπαριστά ένα χρονικό βήμα και κάθε γραμμή αναπαριστά τη μεταβολή στο χρόνο της ταχύτητας για ένα σημείο. Η βασική διαφορά της μεθόδου mPOD από την μέθοδο POD – κανονικός ορθοκανονικός διαχωρισμός – που αποτελεί την κλασική μεθοδολογία ιδιομορφικής ανάλυσης, είναι πως η μέθοδος mPOD απαιτεί την χρήση ζωνοπερατών φίλτρων στον πίνακα χρονικής αυτοσυσχέτισης των δεδομένων και κατόπιν πραγματοποιεί το διαχωρισμό με τη μέθοδο POD. Έτσι, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός ιδιομορφών οι οποίες αφενός διατηρούν τη βέλτιστη συμπεριφορά του POD ως προς την ενέργεια του συνόλου των δεδομένων, αφετέρου περιέχουν σχετικά καθαρό περιεχόμενο στο πεδίο της συχνότητας. Για λόγους οπτικοποίησης χρησιμοποιούμε ισοσταθμικές επιφάνειες του κριτήριο Q (Hunt et al., 1988) των χωρικών συνιστωσών κάθε ιδιομορφής, οι οποίες χρωματίζονται με τη στροβιλότητα είτε ως προς το x -άξονα (διεύθυνση παράλληλη στη ροή) είτε ως προς τον z -άξονα (διεύθυνση παράλληλη στο εκπέτασμα)

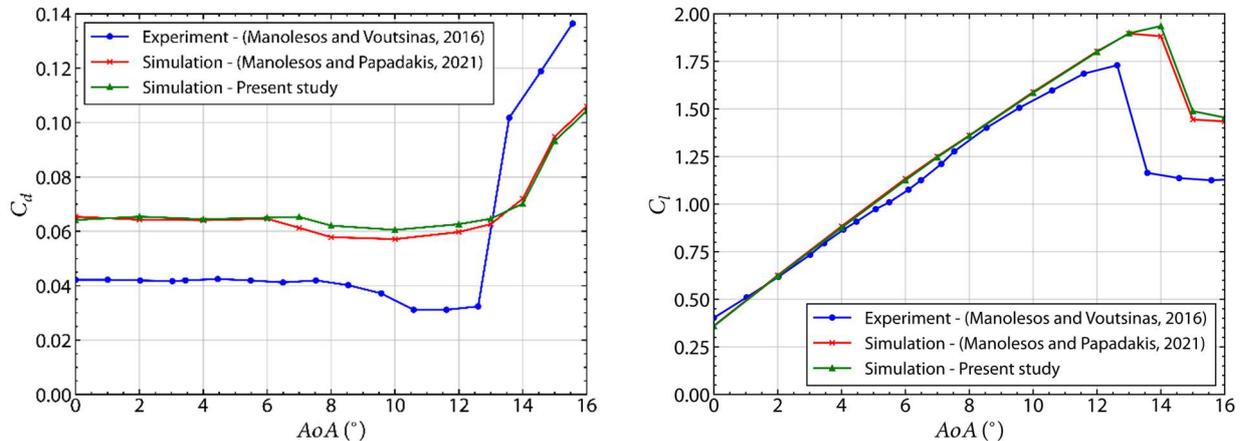


Σχήμα 2 Τα σύνορα του καρτεσιανού πλέγματος δειγματοληψίας για την ανάλυση mPOD.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Βασικά στοιχεία απόδοσης

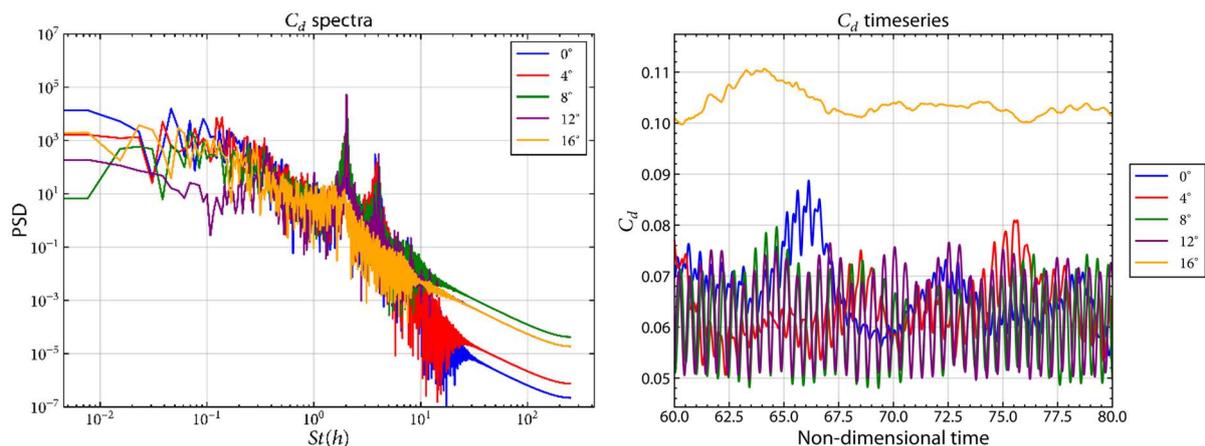
Αρχικά, στο Σχήμα 3, παρουσιάζονται τα πολικά διαγράμματα της αεροτομής. Είναι χαρακτηριστική η εμφάνιση της ζώνης χαμηλής αντίστασης και στις προσομοιώσεις αλλά και στο πείραμα. Παρατηρούμε πως υπάρχει μια διαφορά μεταξύ της πρόβλεψης της γωνίας απώλειας στήριξης μεταξύ προσομοιώσεων και πειράματος. Έτσι, επιλέγουμε να μελετήσουμε διεξοδικά την ροή στον ομόρρου της αεροτομής για τις 0° και 12° .



Σχήμα 3. Πολικά διαγράμματα της αεροτομής. Μεταβολή του συντελεστή άντωσης (αριστερά) και αντίστασης (δεξιά) συναρτήσει της γωνίας προσβολής.

3.2 Δυναμική συμπεριφορά

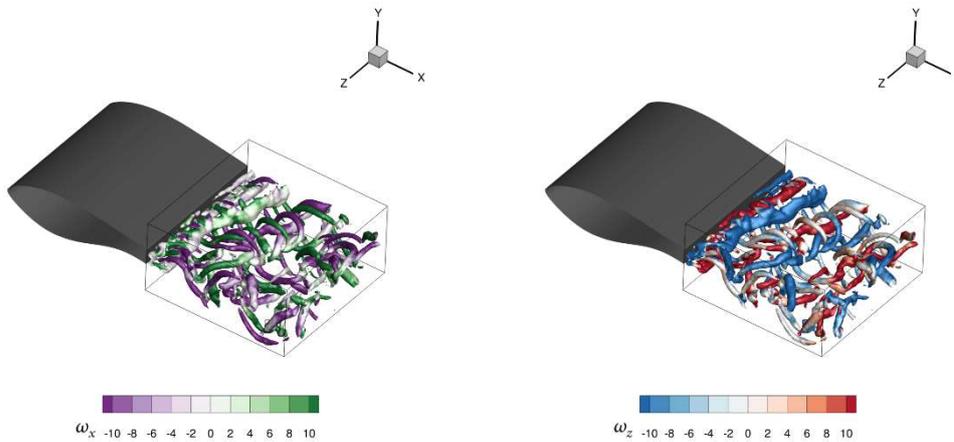
Έπειτα, στο Σχήμα 4 παρατίθεται η δυναμική συμπεριφορά του συντελεστή αντίστασης. Παρατηρούμε πως η κυρίαρχη συχνότητα (έκλυσης δινών) δεν μεταβάλλεται σημαντικά με τη μεταβολή της γωνίας. Ωστόσο, η συμπεριφορά και στο πεδίο του χρόνου αλλά και στο πεδίο της συχνότητας δείχνει πως η ένταση της έκλυσης δινών πέφτει (χαμηλότερη πυκνότητα φασματικής ισχύος στο πεδίο της συχνότητας και μικρότερη παρουσία έντονων αυξομειώσεων στο πεδίο του χρόνου). Εν τέλει, συμπεραίνουμε πως οι δύο γωνίες που επιλέχθηκαν είναι επαρκείς για την μελέτη των διαφορετικών καταστάσεων της ροής πριν την απώλεια στήριξης.



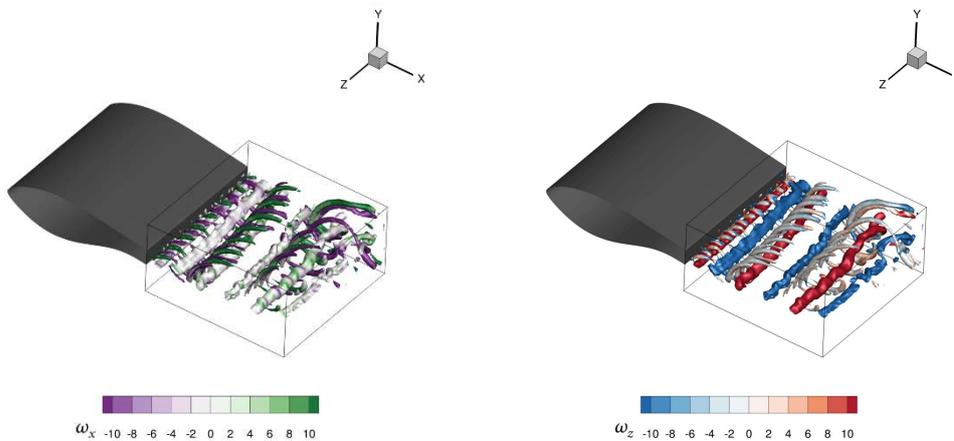
Σχήμα 4 Συμπεριφορά του συντελεστή αντίστασης στο πεδίο της συχνότητας (αριστερά- πυκνότητα φασματικής ισχύος και αριθμός Strouhal) και του χρόνου (δεξιά – χρονοσειρές του συντελεστή) για διαφορετικές γωνίες προσβολής.

Κατόπιν, στο Σχήμα 5 και στο Σχήμα 6 φαίνεται ένα στιγμιότυπο της ροής στον ομόρρου για τις δύο γωνίες (0° και 12° αντίστοιχα). Χρησιμοποιούμε ισοσταθμικές επιφάνειες Q χρωματισμένες με τη στροβιλότητα ως προς τους άξονες x και z. Και στις δύο περιπτώσεις είναι εμφανείς οι δευτερεύουσες

αστάθειες όπως και οι – πρωταρχικοί – στρόβιλοι von Kármán vortex, ενώ παρατηρούνται στρεβλώσεις μεγάλης κλίμακας η οποίες είναι εντονότερες στις 0° . Στις 12° , οπτικά μπορούν να ταυτοποιηθούν 7 διακριτά ζεύγη στρόβιλων που αντιστοιχούν στις δευτερεύουσες αστάθειες οδηγώντας στην εκτίμηση του μήκους κύματος κατά τη διεύθυνση του εκπετάσματος ίση με 1.4 πάχη χείλους εκφυγής. Ακόμη, είναι εμφανές πως οι δομές του ομόρρου στην περίπτωση των 12° είναι πολύ πιο οργανωμένες.



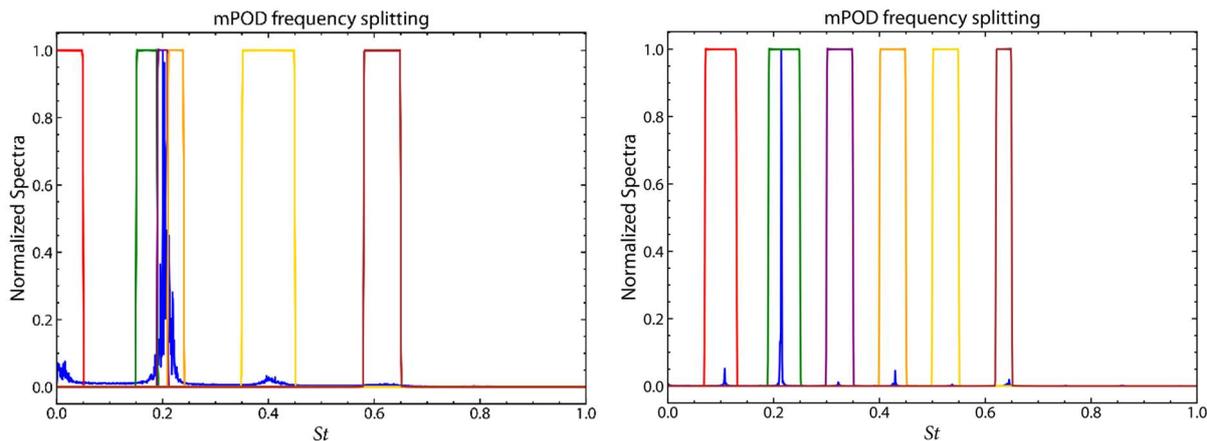
Σχήμα 5. Στιγμαϊκές ισοεπιφάνειες του κριτηρίου Q χρωματισμένες με την αδιάστατη στροβιλότητα ως προς τον άξονα x (ω_x) (αριστερά) και (δεξιά) τη στροβιλότητα ως προς τον άξονα z (ω_z) για την περίπτωση των 0° . Η ροή έρχεται από τα αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 6. Στιγμαϊκές ισοεπιφάνειες του κριτηρίου Q χρωματισμένες με την αδιάστατη στροβιλότητα ως προς τον άξονα x (ω_x) (αριστερά) και (δεξιά) τη στροβιλότητα ως προς τον άξονα z (ω_z) για την περίπτωση των 12° .

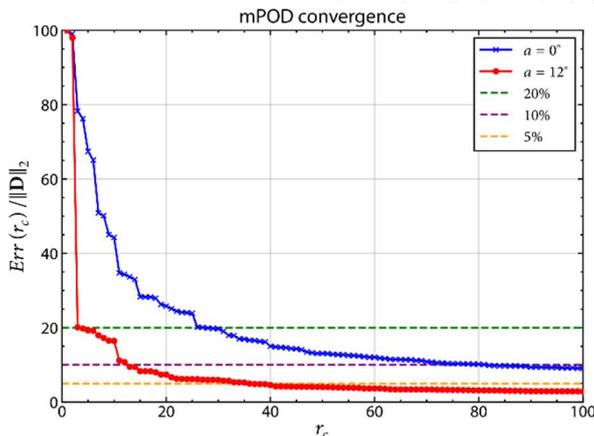
3.3 Τρισδιάστατη ανάλυση του ομόρρου

Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου mPOD. Για κάθε περίπτωση έγινε χρήση των 65 χιλιάδων τελευταίων χρονικών βημάτων (όλα αντιστοιχούν σε μη-μόνιμη κατάσταση). Στο Σχήμα 7, φαίνεται το φάσμα του πίνακα χρονικής συσχέτισης των δεδομένων για τις δύο γωνίες καθώς και τα ζωνοπερατά φίλτρα που επιλέχθηκαν. Για τις 0° , διακρίνεται μια πολύ αργή διαταραχή η οποία αντιστοιχεί σε αριθμό Strouhal, $St=0.01$, ενώ εμφανίζονται δύο κορυφές εκατέρωθεν της τιμής $St=0.2$ που αντιστοιχεί στην πρωτεύουσα αστάθεια, και κατά συνέπεια χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά ζωνοπερατά φίλτρα. Επίσης, εμφανίζονται και λαμβάνονται υπόψιν δύο σχετικά ανίσχυρες αρμονικές της πρωτεύουσας αστάθειας περίπου για $St=0.4$ και $St=0.6$. Για τις 12° , εμφανίζεται (πιο καθαρά) η πρωτεύουσα αστάθεια για $St=0.21$ καθώς και οι πρώτες δύο αρμονικές της για $St=0.43$ και $St=0.64$. Επιπλέον, εμφανίζεται έντονα και μια υπο-αρμονική συχνότητα της πρωτεύουσας για $St=0.1$, η οποία όπως θα συζητηθεί παρακάτω αντιστοιχεί στις δευτερεύουσες αστάθειες.



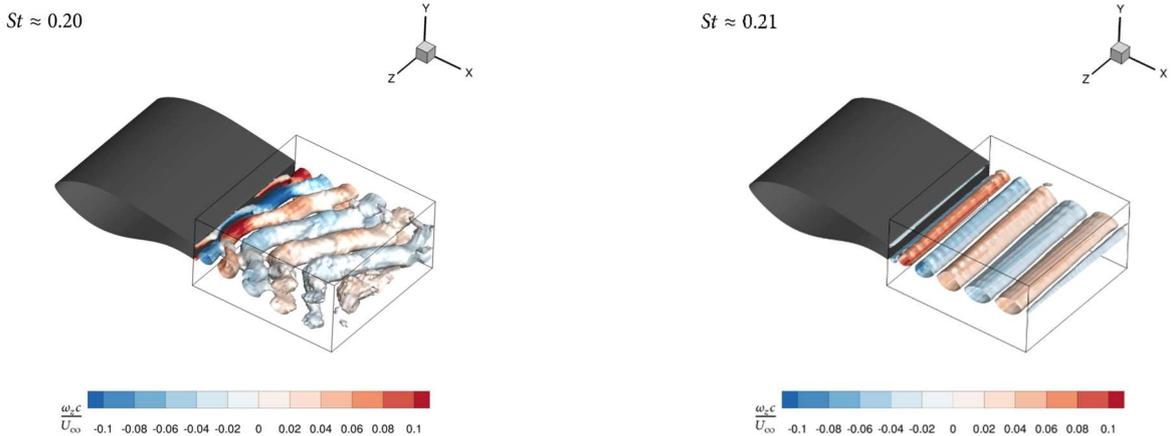
Σχήμα 7. Φάσμα του πίνακα χρονικής συσχέτισης των δεδομένων και χρησιμοποιούμενα φίλτρα για την ανάλυση mPOD για τις 0° (αριστερά) και 12° (δεξιά).

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η σύγκλιση της μεθόδου για τις δύο γωνίες και τις πρώτες 100 ιδιομορφές. Για τις 12° παρατηρείται ταχύτερη σύγκλιση, κάτι το οποίο σημαίνει πως οι δομές του ομόρρου είναι πιο οργανωμένες καθώς μπορούν να ανακατασκευαστούν με λιγότερες ιδιομορφές.



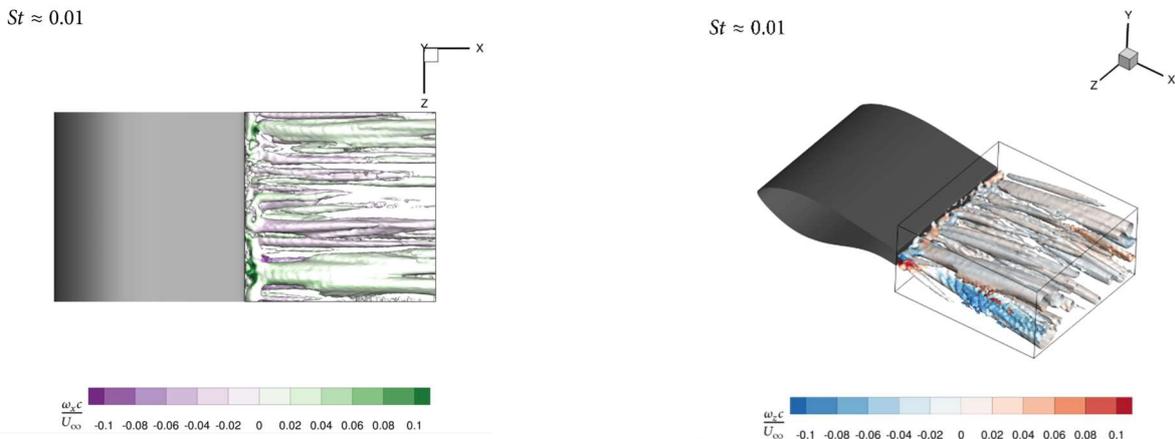
Σχήμα 8. Σύγκλιση της μεθόδου mPOD.

Κατόπιν, για χάρη συντομίας, θα παρουσιαστούν οι χωρικές συνιστώσες των πρώτων (πιο σημαντικών) ιδιομορφών για τις δύο περιπτώσεις καθώς και των πρώτων ιδιομορφών που εμφανίζουν συμπεριφορά που αντιστοιχεί στις δευτερεύουσες αστάθειες και για τις δύο περιπτώσεις. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τη μεταβαλλόμενη συνιστώσα του πεδίου ταχύτητας και κατά συνέπεια η αρίθμηση των ιδιομορφών ξεκινάει από τον αριθμό 1, καθώς ο αριθμός 0 αντιστοιχεί στη μέση ροή. Επομένως, στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές ιδιομορφές για τις δύο γωνίες. Παρατηρούμε πως και για τις δύο γωνίες αυτή η ιδιομορφή αντιστοιχεί στην πρωτεύουσα αστάθεια – τους στροβίλους Κάρμάν. Ωστόσο στις 0° παρατηρείται έντονη παραμόρφωση του στροβίλου κάτι το οποίο αποτελεί ένδειξη λοξής έκλυσης δινών (oblique shedding). Αντιθέτως, οι δομές στον ομόρρο είναι πολύ πιο οργανωμένες για την περίπτωση των 12° , όπου η πρωτεύουσα αστάθεια είναι ευδιάκριτη. Επίσης, σημειώνεται πως ο αριθμός Strouhal που υπολογίστηκε μέσω των χρονικών συνιστωσών των ιδιομορφών είναι πολύ κοντά σε αυτόν που υπολογίστηκε από τις χρονοσειρές της άντωσης (0.201 και 0.216 για τις 0° και 12° αντίστοιχα).



Σχήμα 9 Ισοσταθμικές επιφάνειες κριτηρίου Q για τις χωρικές συνιστώσες των πρώτων ιδιομορφών, χρωματισμένες με την αδιάστατη στροβιλότητα κατά τον άξονα z για την περίπτωση των 0° (αριστερά) και 12° (δεξιά).

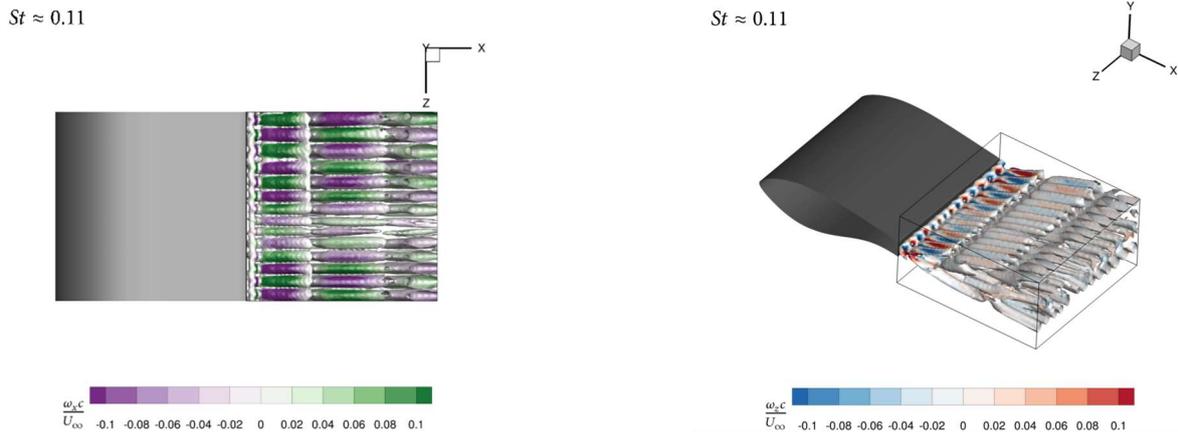
Στο Σχήμα 10, παρουσιάζεται η πρώτη ιδιομορφή για τις 0° που παρουσιάζει συμπεριφορά σχετική με τις δευτερεύουσες αστάθειες (η ενδέκατη ιδιομορφή συνολικά), καθώς όπως φαίνεται στο δεξί σκέλος του σχήματος δεν υπάρχει έντονη στροβιλότητα ως προς τον άξονα z, ενώ διακρίνονται ζεύγη με στροβίλους ως προς τον άξονα x για το αριστερό σκέλος του σχήματος. Σημειώνεται πως ο αριθμός Strouhal που αντιστοιχεί σε αυτή την ιδιομορφή είναι περίπου 0.01. Αν και τα ζεύγη των στροβίλων με διεύθυνση περιστροφής παράλληλη στον άξονα x είναι δυσδιάκριτα, εποπτικά μπορούν να προσδιοριστούν σε 10 ζεύγη, κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε μήκος κύματος περίπου ίσο με ένας ύψος του πάχους εκφυγής ($lz=1.0h$). Ενώ η φορά περιστροφής δεν μεταβάλλεται κατά μήκος του άξονα x.



Σχήμα 10. Ισοσταθμικές επιφάνειες κριτηρίου Q για την χωρική συνιστώσα της πρώτης χωρικής ιδιομορφής που παρουσιάζει συμπεριφορά κατά το εκπέτασμα της αεροτομής, χρωματισμένες με την αδιάστατη στροβιλότητα κατά τον άξονα x (αριστερά) και z (δεξιά) για την περίπτωση των 0°.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 11, φαίνεται η πρώτη ιδιομορφή που εμφανίζει συμπεριφορά σχετική με τις δευτερεύουσες αστάθειες (έβδομη συνολικά) για την περίπτωση των 12°. Αφενός η συμπεριφορά είναι πολύ πιο ξεκάθαρη με τα ζεύγη στροβίλων να είναι ευδιάκριτα και εποπτικά μπορούν να προσδιοριστούν ως 7 ζεύγη στροβίλων παράλληλα με τον άξονα x, κάτι που οδηγεί στην εκτίμηση του μήκους κύματος ίσο με 1.4 ύψη του πάχους του χείλους εκφυγής ($lz=1.4h$). Επίσης, σημειώνεται πως η χαρακτηριστική συχνότητα αυτών των ιδιομορφών αντιστοιχεί σε αριθμό Strouhal, $St=0.11$ που αποτελεί υπο-αρμονική συχνότητα της πρωτεύουσας. Αυτή η συμπεριφορά εμφανίζεται καθώς οι δευτερεύουσες αστάθειες είναι ζεύγη στροβίλων τα οποία ενώνουν δύο διαδοχικούς στροβίλους της πρωτεύουσας αστάθειας. Επομένως, για την ολοκλήρωση ενός πλήρους κύκλου τις δευτερεύουσας αστάθειας απαιτείται η έλευση δύο περιόδων της πρωτεύουσας αστάθειας. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί

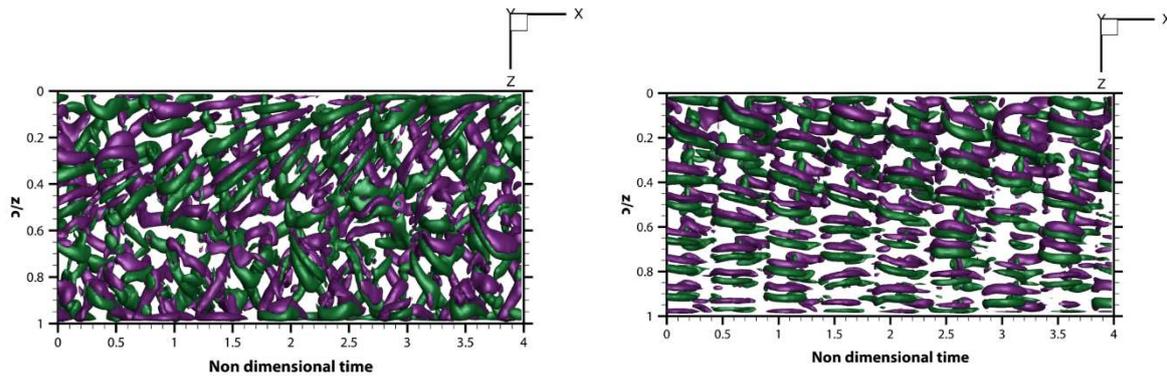
παρατηρώντας πως στο δεξί σκέλος του Σχήματος 9 υπάρχουν 3 πλήρη ζεύγη πρωτεύοντων στροβίλων κατά τη διεύθυνση της ροής, και παρατηρώντας πως τείνει να εκλυθεί στρόβιλος όμοιας στροβιλότητας με αυτόν που εξέρχεται το πεδίου, συμπεραίνουμε πως έχουν ολοκληρωθεί 3 πλήρεις κύκλοι, ενώ στο Σχήμα 11, κατά μήκος της ροής παρατηρούμε δύο αλλαγές προσήμου της στροβιλότητας και κατά συνέπεια έχει ολοκληρωθεί περίπου 1.5 κύκλος της δευτερεύουσας αστάθειας. Ακόμη, είναι σημαντική η παρατήρηση πως η στροβιλότητα κατά τον άξονα x των στροβίλων της δευτερεύουσας αστάθειας μεταβάλλεται κατά τη διεύθυνση της ροής.



Σχήμα 11. Ισοσταθμικές επιφάνειες κριτηρίου Q για την χωρική συνιστώσα της πρώτης χωρικής ιδιομορφής που παρουσιάζει συμπεριφορά κατά το εκπέτασμα της αεροτομής, χρωματισμένες με την αδιάστατη στροβιλότητα κατά τον άξονα x (αριστερά) και z (δεξιά) για την περίπτωση των 12° .

Αν και υπάρχει πολύ εκτεταμένη βιβλιογραφία σχετικά με την κατηγοριοποίηση των δευτερεύουσων ασταθειών στον ομόρρου κυλίνδρων ή τετραγωνικών κυλίνδρων, ελάχιστες μελέτες έχουν ασχοληθεί με τον χαρακτηρισμό των ασταθειών γύρω από επιμήκη σώματα με αμβλύ χείλος εκφυγής μη αμελητέου πάχους (με άλλα λόγια όχι επίπεδη πλάκα). Η μελέτη των (Ryan et al., 2005) αποτελεί μια βάση για τον χαρακτηρισμό αυτών των ασταθειών. Με βάση την παραπάνω μελέτη και λαμβάνοντας υπόψιν την εκτίμηση του μήκους κύματος κατά το εκπέτασμα, προκύπτουν δύο πιθανοί χαρακτηρισμοί για την αστάθεια που παρατηρούμε στις 12° . Ο ένας χαρακτηρισμός είναι τύπου B' που αντιστοιχεί στην αστάθεια τύπου B για τη ροή γύρω από κύλινδρο ενώ ο άλλος είναι τύπου S' , όπου η αστάθεια έχει παρόμοια δομή με την αστάθεια τύπου B για τη ροή γύρω από κύλινδρο με τη διαφορά πως είναι υπο-αρμονική της πρωτεύουσας αστάθειας, καθώς υπάρχει αλλαγή της φοράς περιστροφής των ζευγών στροβίλων κατά τη διεύθυνση της ροής.

Με βάση τα παραπάνω, καταλήγουμε στον χαρακτηρισμό των δευτερευουσών ασταθειών ως τύπου S' . Για να επιβεβαιώσουμε αυτόν τον χαρακτηρισμό, οργανώνουμε τα πρώτα $2e3$ δείγματα ταχύτητας τα οποία αντιστοιχούν σε περίπου 8 κύκλους έκλυσης δινών και εξάγουμε τις τιμές της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στη φορά της ροής (σταθερού x) 0.7 μήκη χορδής κατόπιν του χείλους εκφυγής. Κατόπιν, υπολογίζεται η στροβιλότητα ως προς τον άξονα x και προκύπτουν οι ισοσταθμικές καμπύλες της στροβιλότητας ως προς το χώρο και το χρόνο και παρουσιάζονται στο Σχήμα 12, στα αριστερά για την περίπτωση των 0° και στα δεξιά για την περίπτωση των 12° . Για τις 0° , παρατηρούμε στρεβλώσεις μεγάλης κλίμακας και στις δύο κατευθύνσεις πάνω στη διεύθυνση του εκπετάσματος και δεν μπορεί να βγει κάποιο χαρακτηριστικό συμπέρασμα. Αντιθέτως, για την περίπτωση των 12° , αν και παρατηρείται στρέβλωση με φορά προς τα θετικά του άξονα z (εκπέτασμα), η φορά περιστροφής των στροβίλων μεταβάλλεται ανά ένα πλήρη κύκλο της πρωτεύουσας αστάθειας (ένας κύκλος της πρωτεύουσας αστάθειας είναι περίπου ίσος με 0.5 αδιάστατες χρονικές μονάδες). Έτσι, και με αυτό τον εποπτικό τρόπο επιβεβαιώνεται ο χαρακτηρισμός της αστάθειας ως τύπου S' σύμφωνα με τους (Ryan et al., 2005).



Σχήμα 12. Ισοσταθμικές επιφάνειες αδιάστατης στροβιλότητας (± 5) ως προς τον άξονα που είναι παράλληλος με τη ροή (x) για 8 κύκλους έκλυσης δινών στη θέση $0.7c$ κατάντη της αεροτομής για την περίπτωση των 0° (αριστερά) και 12° (δεξιά). Με μωβ χρώμα απεικονίζονται οι ισοσταθμικές επιφάνειες με αδιάστατη $\omega_x = -5$ και με πράσινο χρώμα οι ισοσταθμικές επιφάνειες με αδιάστατη $\omega_x = 5$. Ο οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος ενώ ο κατακόρυφος άξονας είναι παράλληλος στο εκπέτασμα. Ένας κύκλος της πρωτεύουσας αστάθειας είναι περίπου ίσος με 0.5 αδιάστατες χρονικές μονάδες.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοπτικά, ερευνήθηκαν οι τρισδιάστατες συνεκτικές δομές ροής για τη ροή γύρω από μια αεροτομή με επίπεδο χείλος εκφυγής για δύο γωνίες προσβολής - μία εντός (12°) και μία εκτός (0°) της ζώνης χαμηλής αντίστασης. Συγκεκριμένα, η πρωταρχική αστάθεια (von Kármán) κυριαρχεί στον ομόρρου για τις πιο σημαντικές ιδιομορφές και των δύο περιπτώσεων, με τις δομές στον ομόρρου των 12° να είναι πιο οργανωμένες. Οι πρώτες ιδιομορφές που επιδεικνύουν συμπεριφορά σχετικά με τις δευτερεύουσες αστάθειες για τις περιπτώσεις των 0° και 12° είναι η 11η και 7η ιδιομορφή αντίστοιχα. Ωστόσο, η συμπεριφορά που αναγνωρίζεται σε αυτές τις μορφές διαφέρει σημαντικά για τις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση των 12° , η αστάθεια αντιστοιχεί στον τύπο S' που περιγράφεται για τη ροή γύρω από επιμήκη σώματα με αμβλύ χείλος εκφυγής (Ryan et al., 2005), ενώ η αστάθεια στην περίπτωση των 0° δεν μπορεί να χαρακτηριστεί με ένα υπάρχον πλαίσιο. Οι νέα γνώση σχετικά με τη συμπεριφορά και την οργάνωση της ροής στον ομόρρου σε συνδυασμό με την ύπαρξη της ζώνης χαμηλής αντίστασης, ενδέχεται να οδηγήσουν στη διατύπωση μιας νέας στρατηγικής παθητικού ελέγχου της ροής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα έχει χρηματοδοτηθεί από τη Ευρωπαϊκή Ένωση υπό το πλαίσιο Horizon Research and Innovation Programme HORIZON-WIDERA-2021-ACCESS-03-01. Grant Agreement Number: 101079125. Ακόμη, η παρούσα έρευνα υποστηρίχθηκε από υπολογιστικούς πόρους που δόθηκαν από το Εθνικό Δίκτυο Υποδομών Τεχνολογίας και Έρευνας (ΕΔΥΤΕ) στην Εθνική Υπερ-Υπολογιστική Υποδομή – ARIS – στα πλαίσια του έργου “HPC4FAIR” με ID pr014018_thin.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baker, J. P., Mayda, E. A., & Van Dam, C. P. (2006). Experimental Analysis of Thick Blunt Trailing-Edge Wind Turbine Airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering*, 128(4), 422–431. <https://doi.org/10.1115/1.2346701>
- Barone, M. F., Berg, D. E., Devenport, W. J., & Burdisso, R. A. (2009). *Aerodynamic and Aeroacoustic Tests of a Flatback Version of the DU97-W-300 Airfoil* (SAND--2009-4185, 1504612; p. SAND--2009-4185, 1504612). <https://doi.org/10.2172/1504612>
- Gibeau, B., & Ghaemi, S. (2020). The mode B structure of streamwise vortices in the wake of a two-dimensional blunt trailing edge. *Journal of Fluid Mechanics*, 884, A12. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.931>

- Gibeau, B., Koch, C. R., & Ghaemi, S. (2018). Secondary instabilities in the wake of an elongated two-dimensional body with a blunt trailing edge. *Journal of Fluid Mechanics*, 846, 578–604. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.285>
- Griffith, D., & Richards, P. (2014). *The SNL100-03 Blade: Design Studies with Flatback Airfoils for the Sandia 100-meter Blade*. (SAND2014-18129, 1159116, 537751; pp. SAND2014-18129, 1159116, 537751). Sandia National Lab, Albuquerque, NM (United States). <https://www.osti.gov/servlets/purl/1159116/>
- Hunt, J. C. R., Wray, A. A., & Moin, P. (1988, December). Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19890015184>
- Manolesos, M., & Papadakis, G. (2021). Investigation of the three-dimensional flow past a flatback wind turbine airfoil at high angles of attack. *Physics of Fluids*, 33(8), 085106. <https://doi.org/10.1063/5.0055822>
- Manolesos, M., & Voutsinas, S. G. (2016). Experimental study of drag-reduction devices on a flatback airfoil. *AIAA Journal*, 54(11), 3382–3396. <https://doi.org/10.2514/1.j054901>
- Naghib-Lahouti, A., Doddipatla, L. S., & Hangan, H. (2012). Secondary wake instabilities of a blunt trailing edge profiled body as a basis for flow control. *Experiments in Fluids*, 52(6), 1547–1566. <https://doi.org/10.1007/s00348-012-1273-9>
- Naghib-Lahouti, A., Lavoie, P., & Hangan, H. (2014). Wake instabilities of a blunt trailing edge profiled body at intermediate Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, 55(7). <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1779-4>
- Ntouras, D., & Papadakis, G. (2020). A coupled artificial compressibility method for free surface flows. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 590. <https://doi.org/10.3390/jmse8080590>
- Papadakis, G. (2015). *Development of a hybrid compressible vortex particle method and application to external problems including helicopter flows* [PhD, National Technical University of Athens]. <https://doi.org/10.26240/HEAL.NTUA.1582>
- Papadakis, G., & Manolesos, M. (2020). The flow past a flatback airfoil with flow control devices: Benchmarking numerical simulations against wind tunnel data. *Wind Energy Science*, 5(3), 911–927. <https://doi.org/10.5194/wes-5-911-2020>
- Ryan, K., Thompson, M. C., & Hourigan, K. (2005). Three-dimensional transition in the wake of bluff elongated cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 538(1), 1. <https://doi.org/10.1017/s0022112005005082>

STUDY OF THE SECONDARY INSTABILITES ON THE WAKE OF FLATBACK AIRFOILS

Flatback airfoils, i.e. airfoils with blunt trailing edge, are utilised at the root region of large wind turbine blades. Recently, a low-drag pocket has been identified at a high angle of attack regime, before stall and is the focus of the present study. Two angles of attack – one inside (12°) and one outside (0°) of the low drag pocket - are examined. We use data-driven modal analysis techniques to investigate the threedimensional coherent structures in the wake of the airfoil. Results of Detached Eddy Simulations demonstrate the drag reduction and the different three-dimensional wake coherent structures. The coherent structures are extracted via the multiscale Proper Orthogonal Decomposition method, ensuring the spatial modes of the dataset have relatively pure spectral content. The primary instability (Kármán vortex street) dominates in both cases. However, the secondary instability is distinguishable only for the 12° case and is identified as a Mode S' instability.