

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ NACA 0012 ΣΕ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΑΕΡΑ – ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΡΙΠΤΕΡΥΓΟΥ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

Δήμητρα Χρ. Δουβή<sup>1</sup>, Διονύσιος Π. Μάργαρης<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Υποψήφια Διδάκτωρ, Εργαστήριο Μηχανικής των Ρευστών και Εφαρμογών Αυτής, Τμήμα  
Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα,  
dimdouvi@gmail.com

<sup>2</sup>Καθηγητής, Εργαστήριο Μηχανικής των Ρευστών και Εφαρμογών Αυτής, Τμήμα  
Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα,  
margaris@upatras.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται υπολογιστικά η αεροδυναμική συμπεριφορά της αεροτομής τύπου NACA 0012, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή πτερυγίων ανεμοκινητήρα, σε μονοφασική ροή αέρα και σε διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου, με διάφορες περιεκτικότητες στερεών σωματιδίων στον αέρα, με απώτερο στόχο την εκτίμηση της αεροδυναμικής απόδοσης ενός τριπτέρυγου ανεμοκινητήρα σε συνθήκες διφασικής ροής. Με την επίλυση αριθμητικών μεθόδων διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες είναι γνωστές ως μέθοδοι CFD (Computational Fluid Dynamics), επιτεύχθηκε η μελέτη του ροϊκού πεδίου γύρω από την αεροτομή. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μελέτη για τη μονοφασική ροή αέρα γύρω από την αεροτομή με το Realizable k-ε μοντέλο τύρβης για διάφορες γωνίες προσβολής και για αριθμό Reynolds  $Re=1.76 \times 10^6$ . Υπολογίστηκαν οι αεροδυναμικοί συντελεστές, οι οποίοι συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας για τον έλεγχο της εγκυρότητάς τους, και οι κατανομές της πίεσης και της ταχύτητας γύρω από την αεροτομή. Έπειτα, μελετήθηκε αντίστοιχα η διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου γύρω από την αεροτομή με τη βοήθεια του μοντέλου διακριτής διφασικής ροής, και τα μεγέθη που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της μονοφασικής ροής, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση των σωματιδίων άμμου στην αεροδυναμική απόδοση της αεροτομής και κατ' επέκταση ενός ανεμοκινητήρα, η οποία φάνηκε να είναι μειωμένη.

**Λέξεις Κλειδιά:** μέθοδοι CFD, αεροτομή τύπου NACA 0012, διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων, αεροδυναμικοί συντελεστές, αεροδυναμική απόδοση

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μέσα στα επόμενα χρόνια, οι περιβαλλοντικές συνέπειες από την αλόγιστη χρήση ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη των ολοένα και αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας θα είναι τρομακτικές. Για αυτόν τον λόγο επιτάσσεται η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, και ένας κατάλληλος τρόπος για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέσα στις οποίες κατατάσσεται η αιολική ενέργεια, η οποία καθίσταται εκμεταλλεύσιμη με τη βοήθεια των ανεμοκινητήρων.

Οι ανεμοκινητήρες λειτουργούν σε ανοικτό περιβάλλον και είναι εκτεθειμένοι σε διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες, καθώς και σε άμμο ή σκόνη. Μέχρι σήμερα έχει πραγματοποιηθεί πλήθος ερευνών σχετικά με την επίδραση της διφασικής ροής, όπως είναι η διφασική ροή αέρα – σωματιδίων, στην αεροδυναμική συμπεριφορά αεροτομών με τη βοήθεια της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD).

Από μία πρόσφατη υπολογιστική έρευνα προέκυψε ότι στην περίπτωση που το χείλος προσβολής μιας αεροτομής σε πτερύγιο ανεμοκινητήρα διαβρωθεί λόγω μόλυνσης του αέρα, η ετήσια παραγωγή ενέργειας των ανεμοκινητήρων μπορεί να μειωθεί κατά 2% -3,7%, ανάλογα με τη σοβαρότητα της κατάστασης (Han et al., 2018).

Στη συνέχεια, άλλες εργασίες ασχολήθηκαν με την τραχύτητα και την μεταβολή της γεωμετρίας μιας αεροτομής που υπόκειται σε διάβρωση εξαιτίας της παρουσίας άμμου (Kamura et al., 2001), προτάθηκαν νέες μέθοδοι πρόβλεψης των αεροδυναμικών επιδράσεων της τραχύτητας σε αεροτομή, επεκτείνοντας ήδη υπάρχοντα μοντέλα τύρβης (Knorr et al., 2009) και αναπτύχθηκαν νέα υπολογιστικά μοντέλα για την πρόβλεψη της μειωμένης απόδοσης ανεμοκινητήρων όταν αυτοί λειτουργούν σε σκονισμένο περιβάλλον (Salem et al., 2013).

Επίσης, έχει διεξαχθεί μελέτη σχετικά με αεροτομή που λειτουργεί σε σκονισμένο περιβάλλον συγκρίνοντας την ευαισθησία διαφόρων τμημάτων της αεροτομής σε τέτοιες συνθήκες, και βρέθηκε ότι τα τμήματα με λιγότερο ευαίσθητη επιφάνεια λειτουργούν καλύτερα (Diab et al., 2015). Αργότερα, αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο για τη διάβρωση μιας αεροτομής που υποβάλλεται σε αμμοβολή, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ισχύος που παράγεται από ανεμοκινητήρα με διαβρωμένα πτερύγια (El-Din et al., 2016).

Σε άλλη μία ενδιαφέρουσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το SST Transition μοντέλο τύρβης σε συνδυασμό με το Discrete Phase Model (DPM) για διάφορες ροές αέρα – σωματιδίων άμμου, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση των σωματιδίων άμμου στην απόδοση ενός πτερυγίου ανεμοκινητήρα (Zidane et al., 2017).

Σε προηγούμενες εργασίες μελετήθηκε η αεροδυναμική συμπεριφορά της αεροτομής NREL S809 σε διάφορους αριθμούς Reynolds και σε διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου (Douvi et al., 2016) (Douvi et al., 2017), ενώ ομοίως πιο πρόσφατα μελετήθηκε η αεροτομή NACA 0012 σε αριθμούς Reynolds  $Re=1.76 \times 10^6$  και  $Re=3 \times 10^6$  σε διφασική ροή υψηλής περιεκτικότητας σωματιδίων άμμου στον αέρα (Douvi et al., 2018).

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην υπολογιστική μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της αεροτομής NACA 0012 σε αριθμό Reynolds  $Re=1.76 \times 10^6$  και σε διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου, στην οποία περιέχονται 5% και 10% σωματίδια άμμου στον αέρα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με αντίστοιχα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να ελεγχθεί η εγκυρότητά τους και να βρεθεί ο αντίκτυπος της ύπαρξης σωματιδίων άμμου στον αέρα στην αεροδυναμική συμπεριφορά της αεροτομής.

## 2. ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ

### 2.1 Διφασική Ροή Αέρα – Στερεών Σωματιδίων Άμμου

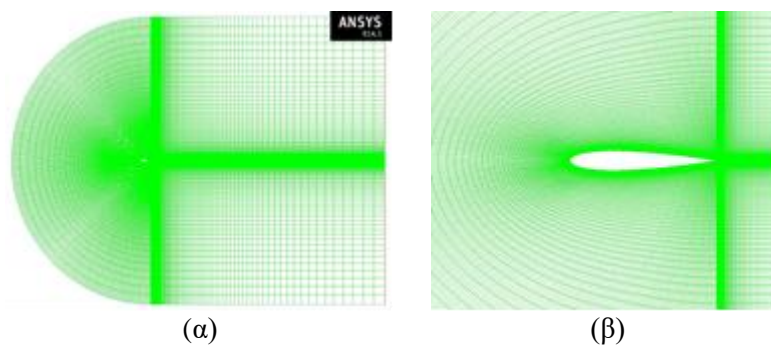
Η διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου, με τον αέρα να περιέχει σωματίδια μικρής διαμέτρου σε διάφορες περιεκτικότητες, αποτελεί μία περίπτωση χωριστής διφασικής ροής. Η υπολογιστική επίλυση της χωριστής διφασικής ροής αέρα – στερεών σωματιδίων μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσέγγιση Euler – Lagrange. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το ρευστό μέσο, που είναι ο αέρας, συμπεριφέρεται σαν ένα συνεχές μέσο, ενώ παράλληλα παρακολουθούνται οι τροχιές των διασκορπισμένων μέσα στο ροϊκό πεδίο σωματιδίων. Το ρευστό και η διασκορπισμένη φάση, η οποία θεωρείται ότι καταλαμβάνει ένα μικρό μέρος του όγκου, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας ορμή, μάζα και ενέργεια.

## 2.2 Διφασική Ροή Γύρω από Αεροτομή

Η ύπαρξη των σωματιδίων άμμου μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στην αεροδυναμική συμπεριφορά μιας αεροτομής, μιας και έχει επίδραση σε χαρακτηριστικά, όπως το οριακό στρώμα, ο συντελεστής επιφανειακής τριβής και η βαθμίδα πίεσης, τα οποία συντελούν στην μείωση της άνωσης και την ταυτόχρονη αύξηση της αντίστασης εξαιτίας της μεταβολής της ορμής, η οποία προκαλείται από την ανάκλαση των σωματιδίων όταν αυτά προσκρούουν πάνω στην αεροτομή.

## 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

Για την επίτευξη της υπολογιστικής επίλυσης του ροϊκού πεδίου γύρω από την αεροτομή με το υπολογιστικό πακέτο ANSYS Fluent 16.0 (2015), το οποίο προσομοιώνει με επαρκή ακρίβεια περιπτώσεις μονοφασικών και πολυφασικών ροών, κρίθηκε αρχικά αναγκαία η κατασκευή ενός κατάλληλου δομημένου πλέγματος τύπου C που πυκνώνει κοντά στην αεροτομή και αποτελείται από 80000 κελιά. Το πλέγμα και η λεπτομέρεια του πλέγματος γύρω από την αεροτομή NACA 0012 φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Πλέγμα (α) και λεπτομέρεια του πλέγματος (β) γύρω από την αεροτομή NACA 0012.

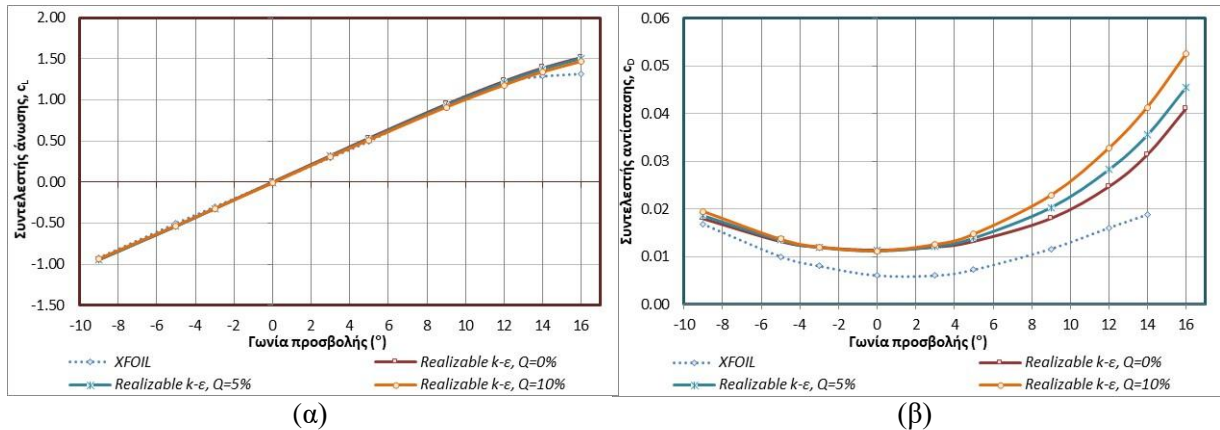
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μελέτη για την ασυμπίεστη μονοφασική ροή αέρα γύρω από την αεροτομή με το Realizable k-ε (Shih et al., 1995) μοντέλο τύρβης για διάφορες γωνίες προσβολής και για αριθμό Reynolds  $Re=1.76 \times 10^6$ . Υπολογίστηκαν οι αεροδυναμικοί συντελεστές, οι οποίοι συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας για τον έλεγχο της εγκυρότητάς τους, και οι κατανομές της πίεσης και της ταχύτητας γύρω από την αεροτομή.

Έπειτα, μελετήθηκε αντίστοιχα η διακριτή διφασική ροή αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου γύρω από την αεροτομή με τη βοήθεια του Λαγκραντζιανού ασυνεχούς μοντέλου διακριτής διφασικής ροής (Discrete Phase Model – DPM). Η συγκεκριμένη διφασική ροή μπορεί να θεωρηθεί ως ασυμπίεστη αραϊή πνευματική μεταφορά με τον αέρα να είναι ρευστό – φορέας και τα σωματίδια άμμου η μεταφερόμενη ύλη. Τα μεγέθη που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της μονοφασικής ροής, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση των σωματιδίων άμμου στην αεροδυναμική απόδοση της αεροτομής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σφαιρικά σωματίδια άμμου διαμέτρου 0.5 mm και πυκνότητας  $\rho_{\text{σωμ.άμμου}}=2196.06 \text{ kg/m}^3$  εισάγονται στο ροϊκό πεδίο από μία κατάλληλη επιφάνεια εισαγωγής, λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης τους, η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια προσεγγιστικής μεθόδου. Οι περιεκτικότητες των σωματιδίων άμμου στον αέρα επιλέχθηκαν να είναι ίσες με  $Q = 5\%$  και  $Q = 10\%$ .

## 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

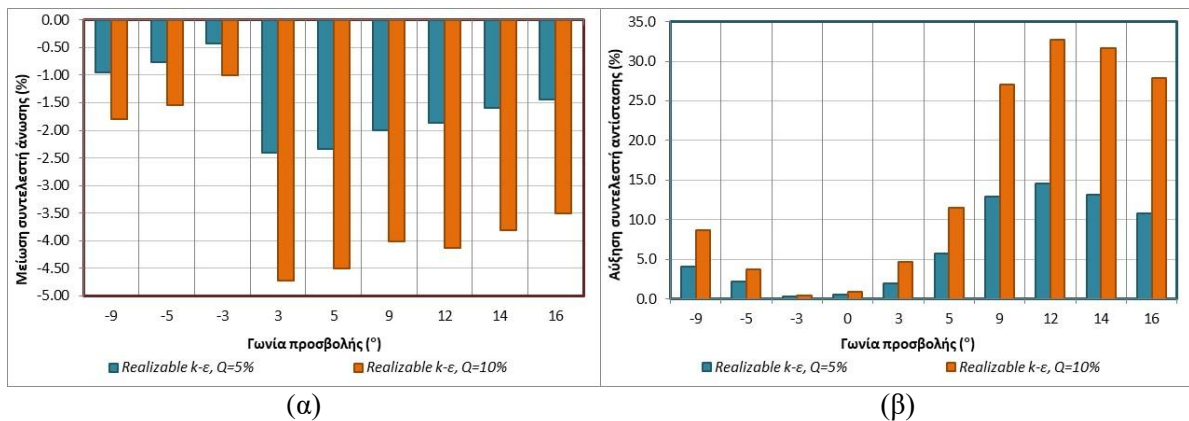
Από τη μελέτη του ροϊκού πεδίου γύρω από την αεροτομή NACA 0012 με τη βοήθεια του ANSYS Fluent 16.0 (2015) υπολογίστηκαν ο συντελεστής άνωσης  $c_L$  και ο συντελεστής αντίστασης  $c_D$  της αεροτομής για διάφορες τιμές της γωνίας προσβολής. Για τον έλεγχο της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων κρίθηκε αναγκαία η σύγκρισή τους με αντίστοιχα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας (XFOIL, 1989).



Σχήμα 2. Συγκριτικό διάγραμμα για τον συντελεστή άνωσης (α), συντελεστή αντίστασης (β) της αεροτομής συναρτήσει της γωνίας προσβολής σε μονοφασική ροή και σε διφασική ροή.

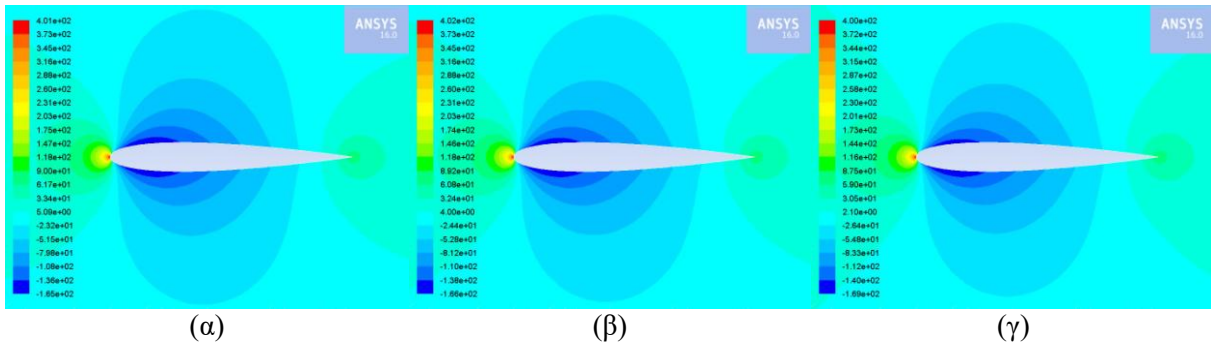
Τα συγκριτικά αποτελέσματα για τους αεροδυναμικούς συντελεστές σε συνθήκες μονοφασικής ροής αέρα και διφασικής ροής αέρα – στερεών σωματιδίων φαίνονται στο Σχήμα 2. Όσον αφορά τον συντελεστή άνωσης, παρατηρείται ότι σε διφασική ροή παρουσιάζει μειωμένες τιμές συγκριτικά με τις αντίστοιχες της μονοφασικής ροής, ενώ υπάρχει μια μικρή απόκλιση στα υπολογιστικά δεδομένα με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας για υψηλές γωνίες προσβολής, στις οποίες σημειώνεται απώλεια στήριξης. Ακόμη, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα στερεών σωματιδίων στον αέρα, οι τιμές του συντελεστή άνωσης μειώνονται περισσότερο.

Σχετικά με τις τιμές του συντελεστή αντίστασης, οι τιμές που προέκυψαν υπολογιστικά είναι εμφανώς μεγαλύτερες αυτών της βιβλιογραφίας λόγω της αδυναμίας του μοντέλου τύρβης Realizable k-ε να υπολογίσει τη μετάβαση του οριακού στρώματος από στρωτό σε τυρβώδες. Επίσης, οι τιμές που αφορούν τη διφασική ροή είναι σημαντικά μεγαλύτερες των αντίστοιχων της μονοφασικής ροής λόγω της επίδρασης των σωματιδίων, και παρατηρείται ότι με την αύξηση των σωματιδίων άμμου στον αέρα, ο συντελεστής αντίστασης αυξάνεται.



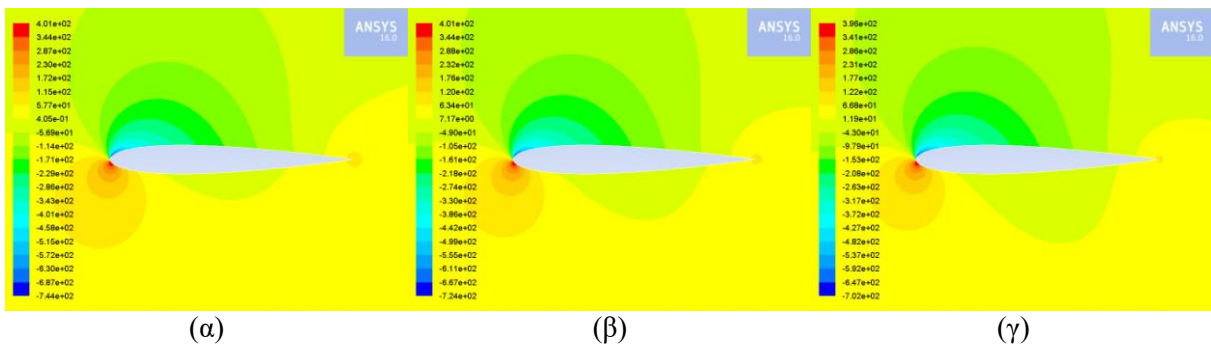
Σχήμα 3. Ποσοστιαία μείωση συντελεστή άνωσης (α) και αύξηση συντελεστή αντίστασης (β) της αεροτομής για διάφορες γωνίες προσβολής και για διάφορες περιεκτικότητες στερεών σωματιδίων άμμου στον αέρα

Μια πιο ακριβής εικόνα της ποσοστιαίας μείωσης του συντελεστή άνωσης, καθώς και της ποσοστιαίας αύξησης του συντελεστή αντίστασης της αεροτομής σε συνθήκες διφασικής ροής συγκριτικά με τη μονοφασική ροή φαίνεται στο Σχήμα 3. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής άνωσης παρουσιάζει μέγιστη υποβάθμιση στις 3 μοίρες, η οποία είναι ίση με -2.4% για περιεκτικότητα στερεών σωματιδίων στον αέρα 5% και ίση με -4.7 για περιεκτικότητα 10%. Αντίστοιχα, η μέγιστη αύξηση του συντελεστή αντίστασης εμφανίζεται στις 12 μοίρες και ισούται με 14.6% για περιεκτικότητα 5% και με 32.7% για περιεκτικότητα 10%.



Σχήμα 4. Κατανομή στατικής πίεσης γύρω από την αεροτομή για μονοφασική ροή αέρα (α), διφασική ροή με  $Q=5\%$  (β), διφασική ροή με  $Q=10\%$  (γ), για  $Re=1.76 \times 10^6$  και για γωνία προσβολής  $0^\circ$ .

Ακολουθως, στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η κατανομή της στατικής πίεσης γύρω από την αεροτομή NACA 0012 για συνθήκες μονοφασικής ροής αέρα και για συνθήκες διφασικής ροής αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου για διάφορες περιεκτικότητες σωματιδίων στον αέρα και για γωνία προσβολής  $0^\circ$ . Παρατηρείται ότι και στις τρεις περιπτώσεις η πίεση λαμβάνει υψηλότερες τιμές στην κάτω επιφάνεια της αεροτομής ωθώντας την κίνησή της προς τα πάνω. Επιπρόσθετα, με την αύξηση των σωματιδίων στον αέρα, η πίεση στην κάτω επιφάνεια της αεροτομής μειώνεται γεγονός που δικαιολογεί και την μείωση της αεροδυναμικής άνωσης.

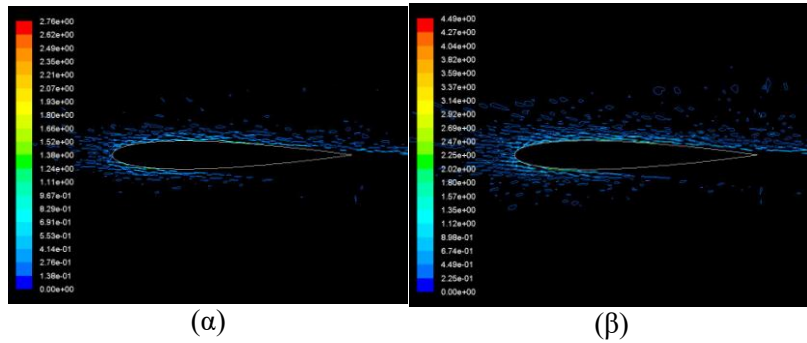


Σχήμα 5. Κατανομή στατικής πίεσης γύρω από την αεροτομή για μονοφασική ροή αέρα (α), διφασική ροή με  $Q=5\%$  (β), διφασική ροή με  $Q=10\%$  (γ), για  $Re=1.76 \times 10^6$  και για γωνία προσβολής  $5^\circ$ .

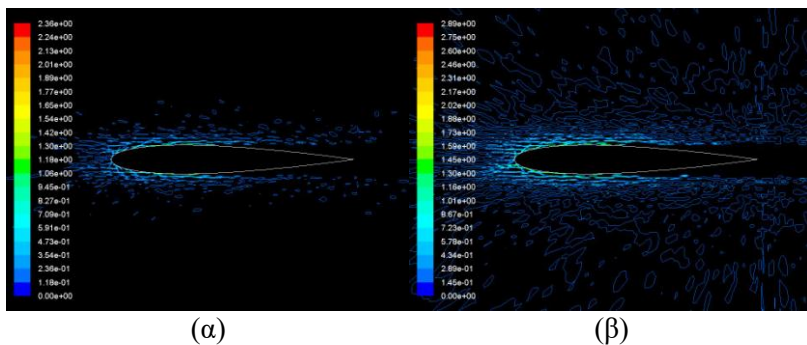
Ομοίως, στο Σχήμα 5 δίνεται η κατανομή της στατικής πίεσης για συνθήκες μονοφασικής για συνθήκες διφασικής ροής για διάφορες περιεκτικότητες σωματιδίων στον αέρα και για γωνία προσβολής  $5^\circ$ , όπου φαίνεται και σε αυτήν τη γωνία ότι οι τιμές της πίεσης στην κάτω επιφάνεια της αεροτομής μειώνονται με την αύξηση των σωματιδίων στον αέρα.

Επιπλέον, από μία σύγκριση μεταξύ των Σχημάτων 4 και 5, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι με την αύξηση της γωνίας προσβολής το σημείο ανακοπής, στο οποίο η ταχύτητα μηδενίζεται και επομένως η στατική πίεση γίνεται ίση με την ολική, μεταφέρεται από το χείλος προσβολής προς την κάτω επιφάνεια της αεροτομής. Ακόμη, η στατική πίεση στην κάτω επιφάνεια της αεροτομής είναι μεγαλύτερη από αυτήν της άπειρης ροής, γεγονός που εξηγεί την ώθηση της αεροτομής προς τα πάνω.

Επιπρόσθετα, στα Σχήματα 6 και 7 παρουσιάζεται η συγκέντρωση των σωματιδίων άμμου γύρω από την αεροτομή για γωνίες προσβολής  $0^\circ$  και  $5^\circ$  αντίστοιχα, και για τις δύο διαφορετικές περιεκτικότητες στερεών σωματιδίων άμμου στον αέρα. Γενικά, και στα δύο Σχήματα είναι εμφανής η αύξηση της περιεκτικότητας των σωματιδίων στον αέρα. Ακόμη, για γωνία προσβολής  $0^\circ$  τα σωματίδια συγκεντρώνονται κυρίως στην άνω επιφάνεια της αεροτομής και στην περιοχή που καταλαμβάνεται από το χείλος προσβολής έως το μέσο περίπου της κάτω επιφάνειας της αεροτομής. Με την αύξηση της γωνίας προσβολής τα σωματίδια φαίνονται να συγκεντρώνονται σε μικρότερη περιοχή, και πιο συγκεκριμένα στις περιοχές από το χείλος προσβολής μέχρι το μέσον περίπου της άνω και της κάτω επιφάνειας της αεροτομής.

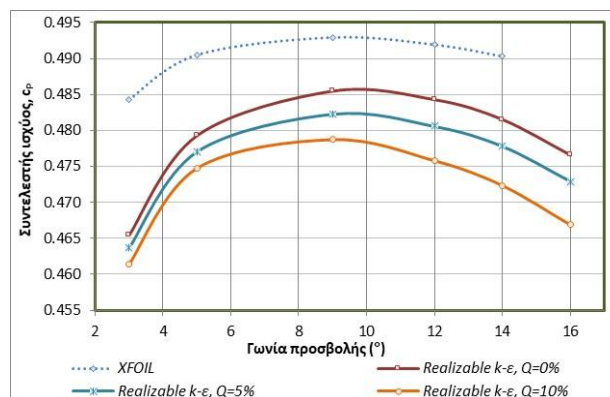


Σχήμα 6. Κατανομή συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων γύρω από την αεροτομή για (α)  $Q=5\%$  και (β)  $Q=10\%$  για  $Re=1.76 \times 10^6$  και για γωνία προσβολής  $0^\circ$ .



Σχήμα 7. Κατανομή συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων γύρω από την αεροτομή για (α)  $Q=5\%$  και (β)  $Q=10\%$  για  $Re=1.76 \times 10^6$  και για γωνία προσβολής  $5^\circ$ .

Τέλος, από την αεροδυναμική απόδοση  $D/L$  της αεροτομής του περυγίου, τον αριθμό περυγίων και τον αριθμό ταχυστροφίας και με τη βοήθεια του τύπου του Wilson (1976) εκτιμήθηκε ο συντελεστής ισχύος ενός τριπτέρυγου ανεμοκινητήρα με περυγίο κατασκευασμένο από την αεροτομή NACA 0012, για συνθήκες μονοφασικής ροής και διφασικής ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές ότι η ύπαρξη στερεών σωματιδίων στον αέρα έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση ενός τέτοιου ανεμοκινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της περιεκτικότητας στερεών σωματιδίων στον αέρα παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση του ανεμοκινητήρα.



Σχήμα 8. Μεταβολή συντελεστή ισχύος τριπτέρυγου ανεμοκινητήρα συναρτήσει της γωνίας προσβολής σε μονοφασική και σε διφασική ροή.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε το ροϊκό πεδίο γύρω από την αεροτομή NACA 0012 σε συνθήκες μονοφασικής ροής αέρα και διφασικής ροής αέρα – στερεών σωματιδίων άμμου με

περιεκτικότητες στερεών σωματιδίων στον αέρα ίσες με  $Q = 5\%$  και  $Q = 10\%$ , και για αριθμό Reynolds  $Re = 1.76 \times 10^6$  με το μοντέλο τύρβης Realizable k-ε.

Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι η αεροδυναμική απόδοση της αεροτομής NACA 0012 είναι μειωμένη σε συνθήκες διφασικής ροής, εφόσον με την αύξηση της περιεκτικότητας στερεών σωματιδίων στον αέρα οι τιμές του συντελεστή άνωσης μειώνονται και ταυτόχρονα οι τιμές του συντελεστή αντίστασης αυξάνονται συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές τους σε μονοφασική ροή αέρα.

Επιπλέον, με την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων η στατική πίεση στην κάτω επιφάνεια της αεροτομής φάνηκε να μειώνεται με την αύξηση των στερεών σωματιδίων στον αέρα, και παράλληλα τα σωματίδια άμμου φαίνονται να συγκεντρώνονται στον χώρο από το χείλος προσβολής έως το μέσον της αεροτομής.

Επιπρόσθετα, με την εκτίμηση του συντελεστή ισχύος τριπτέρυγου ανεμοκινητήρα με πτερύγιο κατασκευασμένο από την αεροτομή, επιβεβαιώνεται η μειωμένη αεροδυναμική απόδοση ενός τέτοιου ανεμοκινητήρα σε συνθήκες διφασικής ροής αέρα – στερεών σωματιδίων· η απόδοση μειώνεται περισσότερο με την αύξηση της περιεκτικότητας των σωματιδίων στον αέρα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ANSYS® Academic Research, Release 16

Diab A., Alaa M., El-Din A.H., Salem H. and Ghoneim Z., “Performance Degradation of Wind Turbine Airfoils due to Dust Contamination: A Comparative Numerical Study”, in Proc. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, GT 2015, Montreal, Quebec, Canada, 15-19 June 2015, Vol. 9.

Douvi D. and Margaris D., "Numerical simulation of NACA 0012 airfoil in air phase flow and in high concentration air-sand particles two-phase flow", in Proc. 8<sup>th</sup> International Conference from “Scientific Computing to Computational Engineering”, Athens, Greece, July 2018.

Douvi D.C., Margaris D.P. and Davaris A.E. (2017), “Aerodynamic Performance of a NREL S809 Airfoil in an Air-Sand Particle Two-Phase Flow”, J. Computation, Vol. 5, n. 1, DOI:10.3390/computation5010013.

Douvi D., Margaris D., Davaris A., "Aerodynamic Performance of a NREL S809 Airfoil in an Air - Sand Particles Two Phase Flow", in Proc. 7<sup>th</sup> International Conference "Scientific Computing to Computational Engineering", Athens, Greece, July 2016.

Drela M., XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils, In: Mueller T.J. (eds) Low Reynolds Number Aerodynamics, Lecture Notes in Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 1989, Vol 54, pp. 1-12.

El-Din A.H. and Diab A., “A Preliminary Study of the Blade Erosion for a Wind Turbine Operating in a Dusty Environment”, in Proc. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT 2016, Seoul, South Korea, June 2016, Vol. 9.

Han W., Kim J. and Kim B. (2018), “Effects of Contamination and Erosion at the Leading Edge of Blade Tip Airfoils on the Annual Energy Production of Wind Turbines”, J. Renewable Energy, Vol. 115, Pp. 817-823.

Kamura K., Toda K. and Yamamoto M. (2001), “Numerical Simulation of Performance Change of Airfoil due to Sand Erosion”, J. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, Vol. 67, n. 662, pp. 2397-2404.

Knopp T., Eisfeld B. and Calvo J.B. (2009), “A new extension for k- $\omega$  turbulence models to account for wall roughness”, J. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 30, n. 1, pp. 54-65.

Salem H., Diab A. and Ghoneim Z. “CFD Simulation and Analysis of Performance Degradation of Wind Turbine Blades in Dusty Environments”, in Proc. 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013, Madrid, Spain, October 2013.

Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., and Zhu J. (1995), “A New k- $\epsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation”, J. Computers Fluids, Vol. 24, n. 3, pp. 227–238.

Wilson R.E., Lissaman P.B.S., Walker S.N., «Aerodynamic performance of wind turbines», Oregon State University, Corvallis, USA, 1976.

Zidane I.F., Saqr K.M., Swadener G., Ma X. and Shehadeh M.F. (2017), “Computational Fluid Dynamics Study of Dusty Air Flow Over NACA 63415 Airfoil for Wind Turbine Applications”, J. Jurnal Teknologi, Vol. 79, n. 7-3, pp. 1-6.



## **COMPUTATIONAL STUDY OF THE AERODYNAMIC BEHAVIOR OF NACA 0012 AIRFOIL IN AIR – SAND PARTICLES TWO PHASE FLOW AND ESTIMATION OF A THREE-BLADED WIND TURBINE POWER COEFFICIENT**

### **ABSTRACT**

This paper focuses on the aerodynamic behavior of NACA 0012 airfoil, manufacturing wind turbine blades, in one phase air flow, as well as in air – sand particles two-phase flow consisted of different concentrations of sand particles in the air, in order to estimate the aerodynamic efficiency of a three-bladed wind turbine operating in such conditions. The study of the flow field around the airfoil was achieved by solving numerical methods of differential equations, known as CFD methods (Computational Fluid Dynamics). First of all, one phase flow over the airfoil was studied using the Realizable k-ε turbulence model for various angles of attack and for a Reynolds number of  $Re=1.76 \times 10^6$ . The aerodynamic coefficients, the pressure distribution and the velocity vectors around the airfoil were calculated, and the computed aerodynamic coefficient values were compared with corresponding data from the international literature in order to be validated. Then, a corresponding study of two-phase flow over the airfoil was conducted by the help of the Discrete Phase Model (DPM), and the obtained computational results were compared with one-phase flow results, in order to find the impact of sand particles on the aerodynamic efficiency of the airfoil and thus a wind turbine, which was found to be reduced.

**Keywords:** CFD methods, NACA 0012 airfoil, air – sand particles two-phase flow, aerodynamic coefficients, aerodynamic performance