

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ SAVONIUS ΜΕ ΔΙΑΣΧΙΣΤΑ ΣΚΑΦΙΔΙΑ

Βασίλειος Κ. Χασιώτης⁽¹⁾, Νικόλαος Σ. Τάχος⁽²⁾, Ανδρόνικος Ε. Φιλίος⁽¹⁾

⁽¹⁾ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Σχολή Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτ. Αττικής,
Πανεπιστημιούπολη 2, Πέτρου Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω.

Email: vchasiotis@uniwa.gr, aefilios@uniwa.gr

⁽²⁾ Τμήμα Βιοϊατρικής Έρευνας, Ινστιτούτο Μοριακής Βιολογίας και Βιοτεχνολογίας,
45110 Ιωάννινα. Email: ntachos@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας υπολογιστικής μελέτης είναι η πρόλεξη των επιδόσεων ενός ανεμοκινητήρα Savonius με το στροφείο του να απαρτίζεται από δύο σκαφίδια με το καθένα από αυτά να διαμορφώνεται από τρία πτερύγια κυκλικού τόξου η ακτινική απόσταση των οποίων καθορίζεται από το λόγο διακένου που κυμαίνεται από 0.05 έως 0.15, ενώ η γωνιακή επικάλυψη τους κυμαίνεται από 0 έως 20 deg. Με καθορισμένη τη διάμετρο του δρομέα και παραμέτρους το πλάτος της σχισμής και τη γωνία επικάλυψης των πτερυγίων, σχεδιάζονται εννέα δρομείς η λειτουργία των οποίων προσομοιώνεται προκειμένου να διερευνηθούν οι επιδόσεις τους καθώς επίσης η επίδραση σ' αυτές του πλάτους της σχισμής και της γωνιακής επικάλυψης των πτερυγίων του κάθε σκαφιδίου. Ο εμπορικός κώδικας Fluent[®] χρησιμοποιείται για την επίλυση των χρονικά μη μόνιμων εξισώσεων Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) σε συνδυασμό με το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras. Αρχικά, για λόγους ελέγχου της υπολογιστικής μεθοδολογίας, επιλέγεται ο δρομέας ενός πειραματικού τυπικού α/κ Savonius για τον οποίο διατίθενται πειραματικές μετρήσεις προκειμένου να συγκριθούν άμεσα τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια γίνεται η πρόβλεψη των επιδόσεων των δρομέων με διάσχιστα σκαφίδια. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αναδεικνύουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά αυτοεκκίνησης των δρομέων με διάσχιστα σκαφίδια αλλά και χαμηλότερο βαθμό απόδοσης συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα μεγέθη του τυπικού α/κ Savonius. Οι διατάξεις με μικρές τιμές διακένου μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων παρουσιάζουν καλύτερο βαθμό απόδοσης ενώ η γωνιακή επικάλυψη των πτερυγίων δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του δρομέα.

Λέξεις Κλειδιά: Ανεμοκινητήρας κατακορύφου άξονα, Savonius, Διάσχιστα πτερύγια, Υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια στη διεθνή βιβλιογραφία καταγράφεται μια κινητικότητα σχετικά με τους ανεμοκινητήρες (α/κ) κατακόρυφου άξονα και ιδιαίτερα αυτούς με δρομέα Savonius ή τύπου “S”. Αρκετοί ερευνητές με πειραματικές και υπολογιστικές εργασίες εστιάζουν σε τροποποιήσεις της γεωμετρίας του κλασσικού δρομέα Savonius στοχεύοντας στη βελτίωση των επιδόσεων του, όπως αυτές εκφράζεται από τους συντελεστές ισχύος και ροπής. Αναμφίβολα, η βελτίωση της απόδοσης των δρομέων Savonius θα οδηγούσε σε αύξηση της διείσδυσης αυτού του τύπου α/κ στην αγορά των ανεμοκινητήρων καθώς έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους α/κ οριζόντιου άξονα, όπως απλούστερη και φθηνότερη κατασκευή, μεγαλύτερη αρχική ροπή στις χαμηλότερες ταχύτητες του ανέμου, χαμηλότερα επίπεδα θορύβου, λιγότερη φθορά των περιστρεφόμενων εξαρτημάτων, περισσότερες επιλογές διαμόρφωσης δρομέα, μικρότερη εδαφική κάλυψη και απουσία κατευθυντηρίου μηχανισμού (Altan and Atılgan, 2012). Ως εκ τούτου, οι α/κ Savonius θα μπορούσαν να διευρύνουν το

φάσμα εφαρμογών τους, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αγροτικές περιοχές ή καλύπτοντας μερικά φορτία σε απομακρυσμένες περιοχές και στην αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού κόστους (Abraham et al., 2012). Επιπρόσθετα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε αστικά συγκροτήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση της αιολικής, σε αντίθεση με τους *a/k* οριζοντίου άξονα που τοποθετούνται σε περιοχές χωρίς εδαφικά εμπόδια (Alaimo et al., 2013). Ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας για *a/k* Savonius επικεντρώνεται σε τροποποιήσεις του δρομέα του κλασικού ή τυπικού τύπου, προκειμένου να επιτευχθούν σχεδιασμοί με βελτιωμένα χαρακτηριστικά και απόδοση. Οι συνήθεις τροποποιήσεις ή παραλλαγές αφορούν τον αριθμό των πτερυγίων ή σκαφιδίων, την αναλογία της διαμέτρου προς το ύψος του δρομέα, το διαχωριστικό διάκενο των πτερυγίων, τη γεωμετρία της κατατομής των πτερυγίων, την επικάλυψη των πτερυγίων του δρομέα στον άξονα περιστροφής, τα άκρα των πτερυγίων του δρομέα, την κατακόρυφη στοίβαξη σκαφιδίων και την διάνοιξη οπών ή σχισμών με σκοπό την μείωση της αντίστασης στο επιστρεφόμενο πτερύγιο του δρομέα (Akwa, Vielmo and Petry, 2012; Bhutta et al., 2012; Roy and Saha, 2013).

Η αποδελτίωση της βιβλιογραφίας ανέδειξε πως υπάρχει περιορισμένο ερευνητικό έργο στην κατηγορία των διάσχιστων σκαφιδίων και γεωμετριών παρόμοιου τύπου με αυτόν που μελέτησαν οι Alaimo et al. (2013, 2012) και στις οποίες επιλύεται το πεδίο ροής σε δίπτερο *a/k* Savonius διαμέτρου 1 m, στο κάθε πτερύγιο του οποίου υπήρχε μια διαμήκης σχισμή η θέση της οποίας προσδιορίστηκε με κριτήριο το βέλτιστο συντελεστή ισχύος, για ταχύτητα ανέμου 7 m/s και αριθμό Reynolds (Re) 4.3×10^5 . Τα αποτελέσματα των περισσότερων περιπτώσεων που παρουσιάζονται στις προαναφερόμενες εργασίες, συγκρινόμενα με τον τυπικό δρομέα Savonius, εμφανίζουν τον ίδιο ή χαμηλότερο συντελεστή ισχύος σε μεγαλύτερες αδιάστατες ταχύτητες ακροπτερυγίου, ενώ όταν η θέση της διαμήκου σχισμής είναι πλησιέστερα προς το κέντρο του δρομέα, αυτός παρουσιάζει καλύτερο συντελεστή στατικής ροπής. Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν επίσης ότι η γωνία της σχισμής δεν έχει κάποια επίδραση στους συντελεστές ροπής και ισχύος.

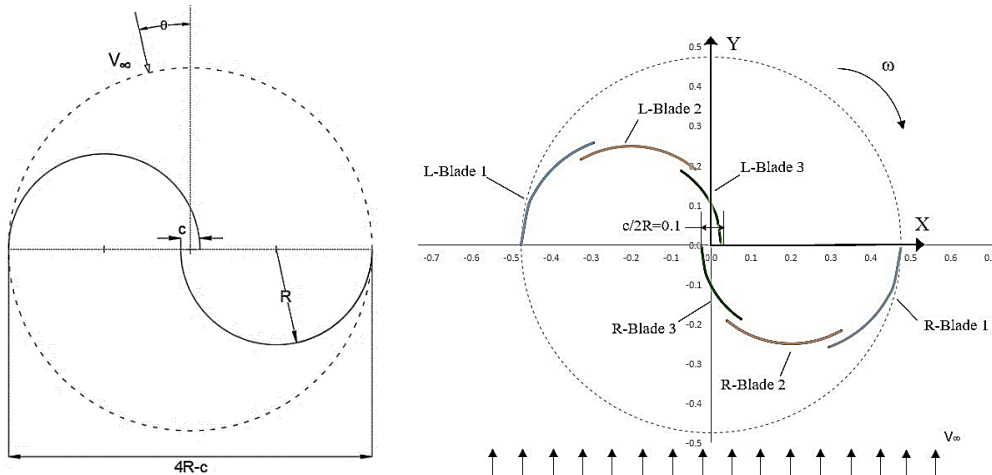
Οι Rahai & Hefazi (2005, 2008) διερεύνησαν την επίδραση μιας διαμήκου σχισμής στα πτερύγια ενός δρομέα τύπου “S” με πτερύγια βελτιστοποιημένης κατατομής. Αρχικά, από τις πειραματικές μετρήσεις σε μοντέλο του δρομέα και για υψηλή αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου ($\lambda=1.6$) επιβεβαιώνεται μέγιστος συντελεστής ισχύος, περίπου 0.4. Στη συνέχεια, η διάνοιξη σχισμής στο σημείο που παρατηρήθηκε η αποκόλληση της ροής κατά την προσήνεμη πλευρά του πτερυγίου, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ροπής και τελικώς η υιοθέτηση της σχισμής στα πτερύγια του δρομέα απορρίφθηκε λόγω της επιδείνωσης των επιδόσεων, χωρίς να διερευνηθεί περαιτέρω η θέση, οι διαστάσεις ή άλλες παράμετροι που σχετίζονται με την σχισμή.

Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται ένα πειραματικό μοντέλο τυπικού δίπτερου δρομέα Savonius (Blackwell, Sheldahl and Feltz, 1977) που συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία λόγω των διαθέσιμων γι’ αυτόν πειραματικών μετρήσεων που θεωρούνται και ως μετρήσεις αναφοράς. Τα κλειστά σκαφίδια του εν λόγω δρομέα αντικαθίστανται με διάσχιστα που διαμορφώνονται από διάταξη πτερυγίων προκειμένου να μελετηθεί κατά πόσο μπορούν να αξιοποιηθούν οι ασκούμενες ανωστικές δυνάμεις, πέραν των δυνάμεων αντίστασης που αποτελούν τον κύριο μηχανισμό λειτουργίας ενός τυπικού *a/k* Savonius. Έτσι, ο στόχος της τρέχουσας έρευνας είναι η υπολογιστική, συγκριτική μελέτη των επιδόσεων μιας οικογένειας δρομέων Savonius με διάσχιστα σκαφίδια προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση τόσο της γωνιακής επικάλυψης των πτερυγίων όσο και το διάκενο μεταξύ των πτερυγίων που συγκροτούν το κάθε σκαφίδιο του δρομέα. Στις υπολογιστικές προσομοιώσεις οι χρονικά μη μόνιμες εξισώσεις Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) επιλύονται με το εμπορικό λογισμικό Fluent® (2006a). Αρχικά, για λόγους, ελέγχου και επικύρωσης των υπολογιστικών αποτελεσμάτων επιλύεται ο τυπικός δρομέας Savonius και στη συνέχεια γίνεται πρόλεξη των επιδόσεων εννέα σε σύνολο δρομέων με διάσχιστα σκαφίδια.

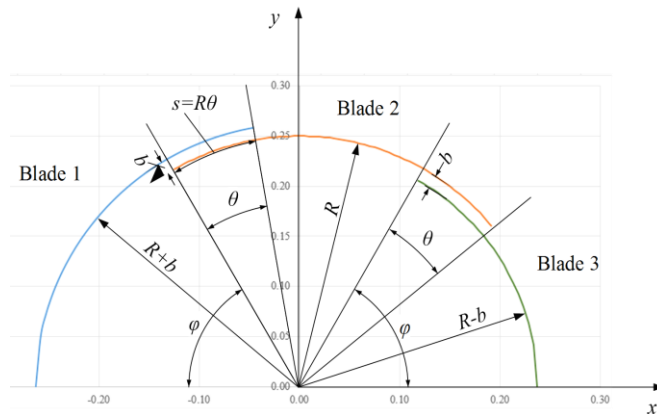
2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΡΟΜΕΑ ΜΕ ΔΙΑΣΧΙΣΤΑ ΣΚΑΦΙΔΙΑ

Η γεωμετρία του θεωρούμενου δρομέα Savonius με διάσχιστα σκαφίδια εξάγεται από την γεωμετρία του κλασικού δίπτερου δρομέα (βλ. Σχήμα 1, αριστερά) ο οποίος αναφέρεται ως διαμόρφωση (configuration) No. 11 στην εργασία των Blackwell et al. (1977) και ο οποίος έχει διάμετρο $D=0.95m$, ακτίνα εκάστου σκαφιδίου $R=0.25m$ και διάκενο μεταξύ των σκαφιδίων $c=0.05m$. Στον τροποποιημένο

δρομέα, τα δύο ημικυκλικά σκαφίδια αντικαθίστανται με δύο διάσχιστα με κάθε ένα από τα οποία μορφοποιείται από τρία περυγία κυκλικού τόξου κατά τρόπο που να διαμορφώνονται οι σχισμές από το διάκενο μεταξύ δύο διαδοχικών περυγίων. Οι σχισμές αυτές επιλέγονται σε σταθερές γωνιακές θέσεις ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων (x,y) του κάθε σκαφιδίου (Σχήμα 2) και ειδικότερα βρίσκονται σε γωνίες 60 deg και 120 deg, αντίστοιχα. Με αναφορά τη διεύθυνση του ανέμου και τη θέση του δρομέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 (δεξιά), τα περυγία του κάθε σκαφιδίου χαρακτηρίζονται από τη θέση του σκαφιδίου (L ή R) και έναν ακέραιο αριθμό αυξανόμενο από το 1 έως το 3 από την πλέον απομακρυσμένο έως το εγγύτερο περυγίο ως προς την αρχή του συστήματος συντεταγμένων (x,y).



Σχήμα 1: Κλασικός δρομέας α/κ Savonius (αριστερά) και δρομέας με διάσχιστα σκαφίδια συγκροτούμενα από τρία περυγία ανά σκαφίδιο (δεξιά).



Γωνία επικάλυψης των περυγίων	Λόγος διακένου ή αδιάστατη ακτινική απόσταση περυγίων (b/R)		
θ [deg]	0.05	0.10	0.15
0	M00-05	M00-10	M00-15
10	M10-05	M10-10	M10-15
20	M20-05	M20-10	M20-15

Σχήμα 2: Γεωμετρία διάσχιστου σκαφιδίου και πίνακας περιπτώσεων μελέτης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, τα κέντρα των τριών περυγίων του κάθε σκαφιδίου συμπίπτουν με το κέντρο του αρχικού ημικυκλικού κλειστού σκαφιδίου, ωστόσο η ακτίνα του πρώτου και του τρίτου περυγίου διαφέρουν καθώς προστίθεται (στο πρώτο) ή αφαιρείται (στο τρίτο) η απόσταση του διακένου (b) μεταξύ των δύο διαδοχικών περυγίων. Ο λόγος διακένου (b/R) καθορίζει την αδιάστατη ακτινική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών περυγίων. Μια επιπρόσθετη σχεδιαστική παράμετρος είναι η γωνία επικάλυψης (θ) μεταξύ δύο διαδοχικών περυγίων και από την οποία προσδιορίζεται το μήκος επικάλυψης ($s=R\theta$) δύο διαδοχικών περυγίων σε κάθε σκαφίδιο.

Οι μέσες γραμμές καμπυλότητας των περυγίων στο σύστημα συντεταγμένων του δρομέα (X,Y) εξάγονται από τις εξισώσεις που διατυπώνονται στο σύστημα συντεταγμένων του αριστερού σκαφιδίου (x,y) και αυτές είναι:

$$\text{Left blade } i: \quad X_{Li} = x_i - \left[(R-b) - \frac{c}{2} \right], \quad Y_{Li} = y_i$$

$$\text{Right blade } i: \quad X_{Ri} = -X_{Li}, \quad Y_{Ri} = -Y_{Li}$$

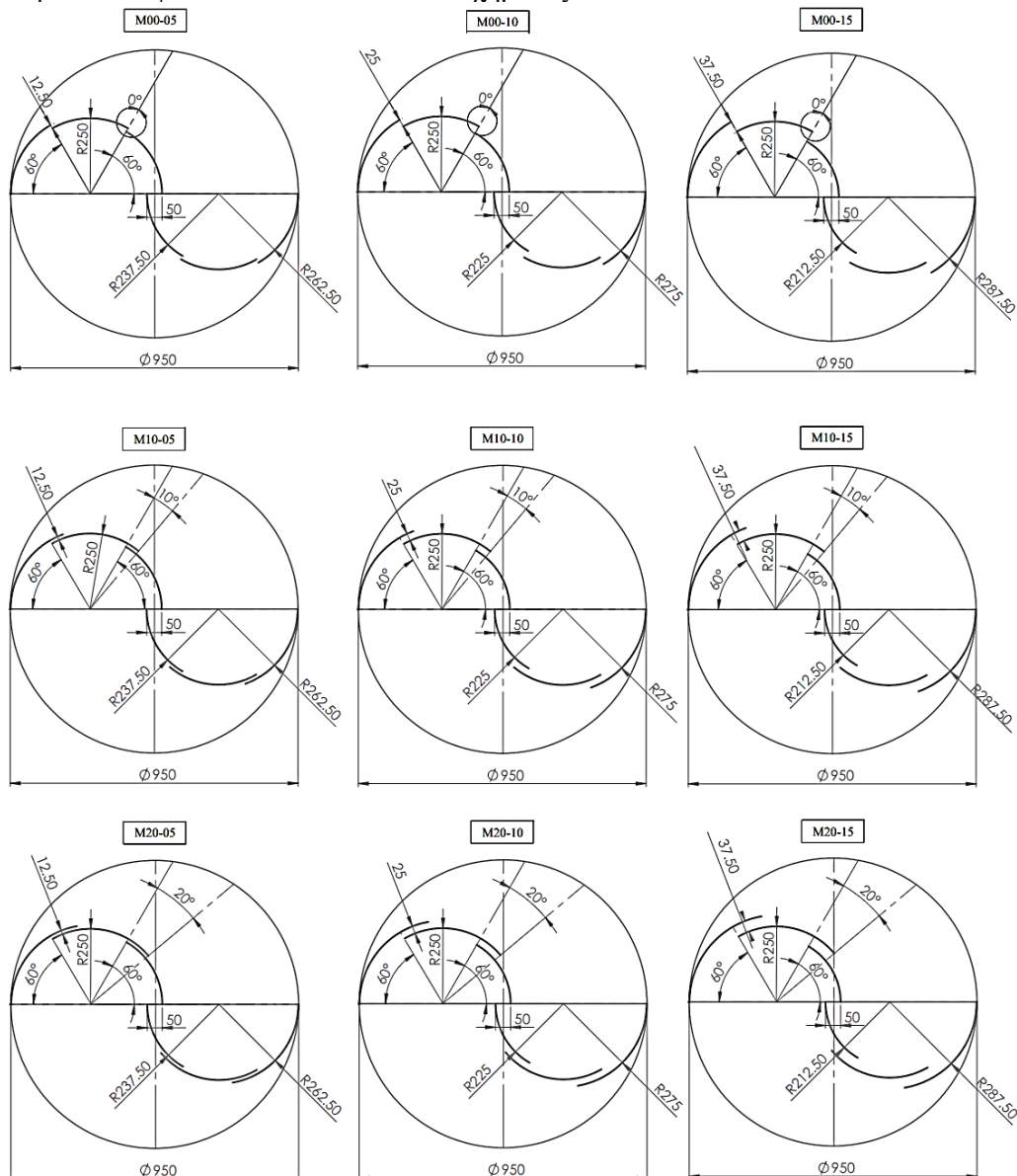
$$\text{Blade 1:} \quad y_1 = \sqrt{(R+b)^2 - x_1^2}; \quad x_1 \in [-(R+b), -(R+b)\cos(\varphi + \theta)]$$

$$\text{Blade 2:} \quad y_2 = \sqrt{R^2 - x_2^2}; \quad x_2 \in [-R\cos\varphi, R\cos(\varphi - \theta)]$$

$$\text{Blade 3:} \quad y_3 = \sqrt{(R-b)^2 - x_3^2}; \quad x_3 \in [R\cos\varphi, (R-b)]$$

όπου $R=0.25\text{m}$, $\varphi=60\text{ deg}$, $\theta=(0, 10\text{ και }20\text{ deg})$ και $b=(12.5, 25.0\text{ και }37.5\text{ mm})$.

Από το συνδυασμό των τριών τιμών του πλάτους της σχισμής των περυγίων με τις τρεις τιμές των γωνιών επικάλυψης τους, σχεδιάζονται εννέα δρομείς Savonius (Σχήμα 3) οι οποίοι κωδικοποιούνται κατά τον τρόπο που φαίνεται στον πίνακα του σχήματος 2.

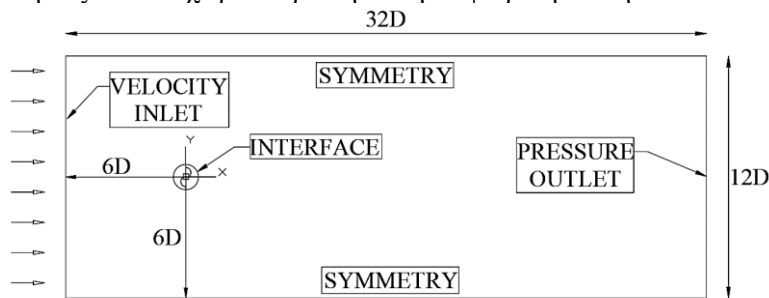


Σχήμα 3: Οι εννέα επιλεγμένες δρομείς Savonius με διάσχιστα σκαφίδια.

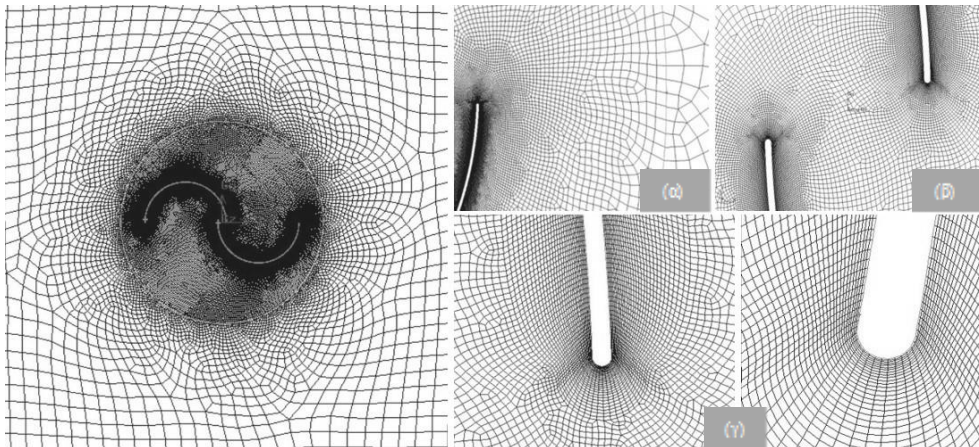
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

3.1 Υπολογιστικό χωρίο, οριακές συνθήκες και κατασκευή πλέγματος

Το υπολογιστικό χωρίο έχει ορθογώνιο σχήμα οι διαστάσεις του οποίου ορίζονται συναρτήσει της διαμέτρου D του δρομέα. Με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων στον άξονα περιστροφής τα όρια του χωρίου εκτείνονται $6D$ ανάντη και $26D$ κατόντη με την τελευταία επιλογή να αιτιολογείται από την αναγκαιότητα ανάπτυξης του απορευμάτος του δρομέα (Σχήμα 4). Σε διεύθυνση εγκάρσια προς τη διεύθυνση του ανέμου το χωρίο εκτείνεται εκατέρωθεν του άξονα περιστροφής κατά μήκος ίσο με $6D$. Τα πλευρικά όρια του υπολογιστικού χωρίου παράλληλα με την ροή, ορίστηκαν ως συμμετρίες ώστε να αντιμετωπίζονται από τον επιλυτή ως μέρος μεγαλύτερου χωρίου και να μην εφαρμόζονται συναρτήσεις τοιχώματος. Η περίμετρος του στροφείου ορίστηκε ως όριο διαπαφής, ώστε να επιτρέπεται η διασύνδεση των ιδιοτήτων της ροής ανάμεσα στο σταθερό και στο περιστρεφόμενο πλέγμα. Επιπλέον ως οριακές συνθήκες και για λόγους σύγκρισης με τα δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα (Blackwell, Sheldahl and Feltz, 1977), στην είσοδο του ορίστηκε ομοιόμορφη κατατομή ταχύτητας $V_\infty=7$ m/s ($Re=4.3 \times 10^5$) και στην έξοδο του χωρίου ορίστηκε ατμοσφαιρική πίεση.



Σχήμα 4: Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου για τις προσομοιώσεις των δρομέων α/κ Savonius



Σχήμα 5: Υπολογιστικό πλέγμα τυπικού δρομέα Savonius με λεπτομέρειες, (α) στο σύνορο της διαπαφής, (β) ανάμεσα στο κεντρικό διάκενο των σκαφιδίων και (γ) στο άκρο του σκαφιδίου.

Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου για τον κάθε δρομέα σχεδιάστηκε με στόχο να ανταποκρίνεται σε ένα ελάχιστο επίπεδο ποιότητας ικανοποιώντας αντίστοιχους δείκτες. Οι διακριτοποιήσεις των χωρίων που κατασκευάστηκαν με το τον επεξεργαστή υπολογιστικού πλέγματος Gambit® (Fluent Inc., 2006b) περιέχουν κατά μέσο όρο 325,000 στοιχεία, με το 87% των στοιχείων να είναι συγκεντρωμένο στο περιστρεφόμενο πλέγμα του χωρίου. Επιλέχθηκαν μη-δομημένα πλέγματα λόγω της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται καλύτερα σε πιο σύνθετα σχήματα, όπως επίσης και της ευκολίας και της ταχύτητας παραγωγής τους κατά τρόπο αυτοματοποιημένο. Τα πλέγματα συγκροτούνται κατά κύριο λόγο από τετράπλευρους όγκους ελέγχου, με μέρος αυτών να μετατρέπονται σε καμπυλόγραμμα τετράπλευρα. Οι δείκτες ποιότητας (aspect ratio, skewness, orthogonality) ελέγχθηκαν που όπου απαιτήθηκε έγιναν παρεμβάσεις προκειμένου αυτοί να είναι εντός των αποδεκτών ορίων (Katz and Sankaran, 2012). Επίσης, αυτόματες τροποποιήσεις των πλεγμάτων έγιναν και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης κάθε δρομέα κατά την περιστροφή του, ώστε να διασφαλίζεται πως αδιάστατη απόσταση από τα τοιχώματα των πτερυγίων, y^+ , είναι μικρότερη της μονάδας, όπως συνίσταται για το επιλεγμένο μοντέλο τύρβης (Spalart and Allmaras, 1992). Η διερεύνηση χωρικής

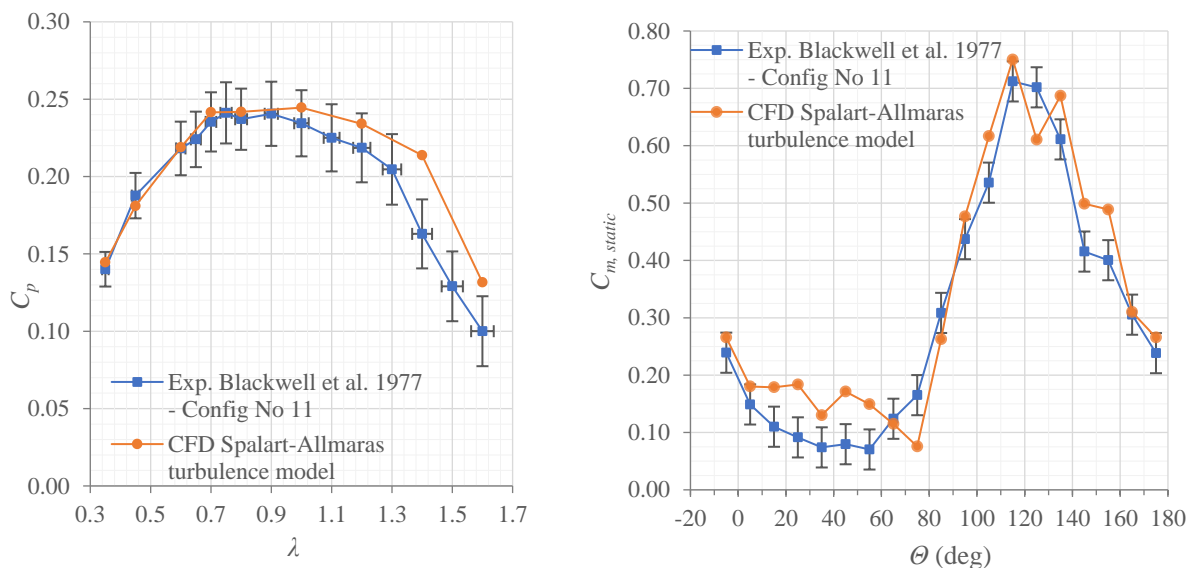
ανεξαρτησίας της λύσης που πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση ελέγχου και επικύρωσης του τυπικού α/κ Savonius (Blackwell, Sheldahl and Feltz, 1977), επέφερε αλλαγές μικρότερες του 2% στα αποτελέσματα του συντελεστή ισχύος, σε πυκνότερα πλέγματα. Το πλέγμα της παραπάνω περίπτωσης με λεπτομέρειες στα σημεία των άκρων, εμφανίζεται στο Σχήμα 5.

3.2 Παράμετροι αριθμητικής επίλυσης

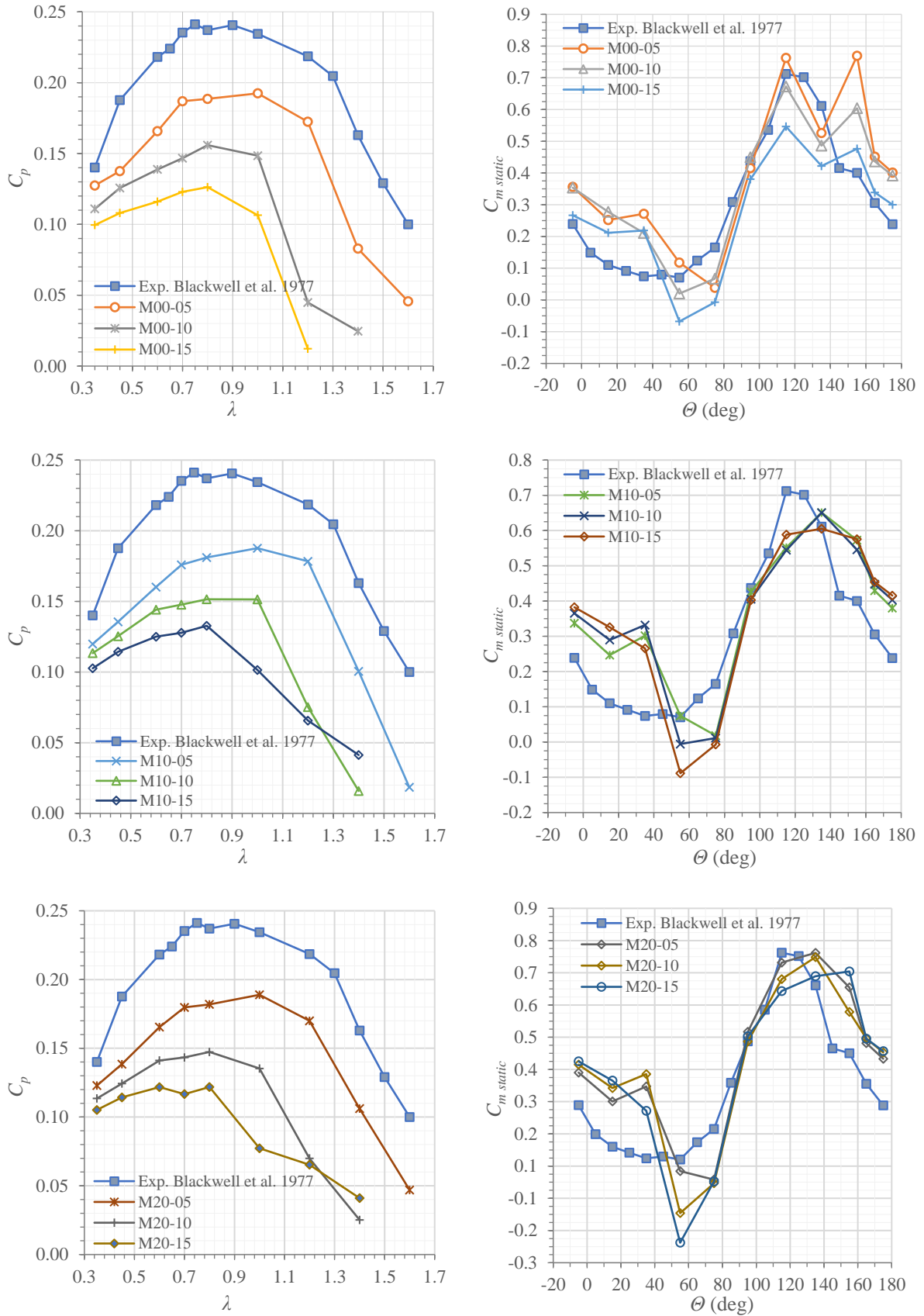
Σε όλες τις αριθμητικές επιλύσεις, το συνεκτικό-τυρβώδες πεδίο ροής θεωρείται μη μόνιμο και ασυμπίεστο. Η ροή περιγράφεται από τις χρονικά μη μόνιμες εξισώσεις Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) που επιλύονται με τον εμπορικό κώδικα Fluent[®] (2006a) και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) για τη σύζευξη πίεσης και ταχύτητας στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε 2^{ης} τάξης σχήμα ανάντη διαφορών για τη βελτίωση της αριθμητικής ακρίβειας και το μοντέλο Sliding Mesh Model (SMM) καθώς υπάρχει περιστροφή του πλέγματος του δρομέα. Ως μοντέλο τύρβης επιλέχτηκε το μοντέλο Spalart-Allmaras, καθώς αυτό εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε προσομοιώσεις α/κ κατακορύφου άξονα (Rogowski and Maroński, 2015; Xiaojing et al., 2014; Lee, 2013; Świrzydczuk, Doerffer and Szymaniak, 2011). Προσθέτως, στις προαναφερόμενες οριακές συνθήκες, τα καμπύλα τοιχώματα της γεωμετρίας ορίστηκαν ως τοιχώματα και εφαρμόζεται η συνθήκη προσκόλλησης. Το πλέγμα του δρομέα ρυθμίστηκε να περιστρέφεται σε διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες σε κάθε περίπτωση, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή αδιάστατη ταχύτητα ακροπερυγίου (λ). Τέλος, για την ολοκλήρωση της κάθε επίλυσης, ορίστηκε μέγιστη τιμή επαναλήψεων σε συνδυασμό με κριτήριο σύγκλισης την τιμή των 10^{-5} υπολοίπων (residuals). Στις προσομοιώσεις μόνιμης κατάστασης (steady), για τον υπολογισμό του συντελεστή στατικής ροπής, ορίστηκαν οι 3×10^3 επαναλήψεις ως μέγιστη τιμή ενώ στις μεταβατικές μη μόνιμες (unsteady) προσομοιώσεις οι μέγιστες επαναλήψεις ορίστηκαν έως 50 ανά χρονικό βήμα με την ίδια τάξη μεγέθους τα υπόλοιπα.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

Η σύγκριση των υπολογιστικών τιμών των συντελεστών ισχύος και στατικής ροπής με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις για τον τυπικό δρομέα Savonius με την κωδική ονομασία Config. No.11 στην εργασία των Blackwell et al. (1977), δίδεται στο Σχήμα 6. Η επιλογή του μοντέλου τύρβης Spalart-Allmaras επιβεβαιώνεται για την πρόλεξη του συντελεστή ισχύος σε χαμηλές αδιάστατες ταχύτητες ακροπερυγίου, έως $\lambda=1.2$ ενώ για μεγαλύτερες τιμές του λ , ο συντελεστής ισχύος υπερεκτιμάται. Καλή συμφωνία μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών παρατηρείται και για τον συντελεστή στατικής ροπής, παρά την υπερεκτίμηση ορισμένων σημείων, κυρίως στο εύρος 0 deg έως 55 deg της αζιμουθιακής γωνίας (Θ), και των αζιμουθιακών γωνιών 75 deg και 125 deg όπου παρατηρείται υποεκτίμηση. Τα αποτελέσματα κριθήκαν ικανοποιητικά και διατηρήθηκαν οι ίδιες παράμετροι για την προσομοίωση των διαμορφωμένων γεωμετριών με διάσχιστα σκαφίδια.



Σχήμα 6: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και υπολογισμών για το συντελεστή ισχύος (αριστερά) και το συντελεστή στατικής ροπής (δεξιά) του τυπικού δρομέα Savonius



Σχήμα 7: Συντελεστές ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας στο ακροπτερίγιο και αζιμουθιακή μεταβολή του συντελεστή στατικής ροπής για τους εννέα μελετηθέντες δρομείς με διάσχιστα σκαφίδια και συγκρίσεις με πειραματικές ενός πειραματικού τυπικού δίπτερου δρομέα Savonius.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα του συντελεστή ισχύος (C_p) με την αδιάστατη ταχύτητα του ακροπτερυγίου (λ) και την αζιμουθιακή μεταβολή του συντελεστή στατικής ροπής ($C_{m, static}$) για τις υπό μελέτη διατάξεις, ομαδοποιημένες κατά την ίδια γωνία επικάλυψης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.

Οι καμπύλες $C_p - \lambda$, υποδεικνύουν πως όλοι οι δρομείς με διάσχιστα σκαφίδια, έχουν μικρότερο συντελεστή ισχύος από τον αντίστοιχο τυπικό δρομέα Savonius. Από τις μελετώμενες διατάξεις, η διάταξη M00-05 που φέρει αδιάστατη ακτινική απόσταση πτερυγίων $b/R=0.05$, χωρίς επικάλυψη πτερυγίων ($\theta=0$ deg), παρουσιάζει την μέγιστη απόδοση με συντελεστή ισχύος $C_p=0.19$ στο εύρος $\lambda=0.8$ έως 1 και για $Re = 4.32 \times 10^5$. Αντίστοιχα ο τυπικός δρομέας Savonius παρουσιάζει στο ίδιο εύρος αδιάστατων ταχυτήτων ακροπτερυγίου, συντελεστή ισχύος $C_p \approx 0.24$, δηλαδή εμφανίζει κατά 26% καλύτερη απόδοση από την καλύτερη τροποποιημένη γεωμετρία με διάσχιστα σκαφίδια. Οι δύο παράγοντες που διερευνήθηκαν για την επιρροή τους στην απόδοση του δρομέα, είναι ο λόγος διακένου διαδοχικών πτερυγίων και η γωνία επικάλυψης των πτερυγίων. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν πως ο λόγος διακένου των διαδοχικών πτερυγίων είναι σημαντικός παράγοντας του οποίου η αύξηση επιφέρει επιδείνωση του συντελεστή ισχύος, τουλάχιστον για την περίπτωση της παρούσας εργασίας με δύο σχισμές σε σταθερά σημεία στις 60 deg και 120 deg του σκαφιδίου. Η γωνία επικάλυψης των πτερυγίων δεν παρατηρήθηκε να επηρεάζει σημαντικά τον συντελεστή ισχύος.

Παρά την επιδείνωση του συντελεστή ισχύος, οι δρομείς με διάσχιστα σκαφίδια εμφανίζουν βελτιωμένες τιμές του συντελεστή στατικής ροπής σε σχέση με τον κλασικό δρομέα Savonius, σε μικρές τιμές γωνιακής πρόσπτωσης της ροής. Για γωνίες από 0 deg έως 55 deg και από 145 deg έως 165 deg, οι περισσότερες διατάξεις εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή στατικής ροπής, με βελτίωση από 25% έως 190% σε σχέση με την κάθε αντίστοιχη πειραματική τιμή του πρότυπου στροφείου. Ο δρομέας M00-05 πλεονεκτεί πάλι καθώς δεν εμφανίζει αρνητικές τιμές στο συντελεστή στατικής ροπής, με το μέσο συντελεστή στατικής ροπής στο εύρος 0 deg έως 180 deg να είναι $\bar{C}_{m,static} = 0.396$, κατ' αντιστοιχία με τον τυπικό α/κ Savonius, ο οποίος εμφανίζει $\bar{C}_{m,static} = 0.303$. Η λιγότερο αποδοτική διάταξη, με κριτήριο το συντελεστή στατικής ροπής, είναι η M00-15 με μέσο συντελεστή στατικής ροπής $\bar{C}_{m,static} = 0.280$ και η M20-15 η οποία εμφανίζει $\bar{C}_{m,static} = 0.356$, έχοντας ως τοπικό ελάχιστο $\bar{C}_{m,static\ min} = -0.188$, στην αζιμουθιακή γωνία $\theta=55$ deg.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντικατάσταση των κλειστών σκαφιδίων του στροφείου ενός κλασικού α/κ Savonius με διάσχιστα, δεν επιφέρει βελτιώσεις στην απόδοση του όπως αυτή εκφράζεται από το συντελεστή ισχύος. Ωστόσο στοχευμένες τροποποιήσεις στις σχισμές μπορούν να συνδεθούν με τη βελτίωση του συντελεστή στατικής ροπής που επιτρέπει καλύτερα χαρακτηριστικά αυτοεκκίνησης του α/κ σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Τα συμπεράσματα της εργασίας είναι σε συμφωνία με τις εργασίες των Alaimo et al. (2013) και Rahai & Hefazi (2005) στις οποίες διερευνώνται οι επιδόσεις κλασικών δρομέων Savonius με τη διάνοιξη σχισμών και οπών στα πτερύγια τους. Συμπερασματικά, η υιοθέτηση διάσχιστων σκαφιδίων στο δρομέα ενός α/κ Savonius μπορεί να επιφέρει βελτιώσεις στην ικανότητα αυτοεκκίνησης με αντάλλαγμα τη μικρή επιδείνωση του συντελεστή ισχύος.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abraham, J., Plourde, B., Mowry, G., Minkowycz, W. and Sparrow, E., 2012. Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(4), p.042703.
- Akwa, J.V., Vielmo, H.A. and Petry, A.P., 2012. A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp.3054–3064.
- Alaimo, A., Esposito, A., Milazzo, A., Orlando, C. and Trentacosti, F., 2013. Slotted blades savonius wind turbine analysis by CFD. *Energies*, 6(12), pp.6335–6351.
- Alaimo, A., Milazzo, A., Trentacosti, F. and Esposito, A., 2012. On the Effect of Slotted Blades on Savonius Wind Generator Performances by CFD Analysis. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publ, pp.747–753.

- Altan, B.D. and Atılğan, M., 2012. A study on increasing the performance of Savonius wind rotors. *Journal of mechanical science and technology*, 26(5), pp.1493–1499.
- Bhutta, M.M.A., Hayat, N., Farooq, A.U., Ali, Z., Jamil, S.R. and Hussain, Z., 2012. Vertical axis wind turbine—A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), pp.1926–1939.
- Blackwell, B.F., Sheldahl, R.F. and Feltz, L.V., 1977. *Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors*. Sandia Laboratories.
- Fluent Inc., 2006a. *FLUENT 6.3.26 User's Guide*.
- Fluent Inc., 2006b. *GAMBIT 2.4.6 User's Guide*.
- Katz, A. and Sankaran, V., 2012. High aspect ratio grid effects on the accuracy of Navier–Stokes solutions on unstructured meshes. *Computers & Fluids*, 65, pp.66–79.
- Lee, Y., 2013. Wind turbine simulation for time - dependent angular velocity, torque and power. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 1(5), pp.321–328.
- Rahai, H.R. and Hefazi, H., 2005. *Development of optimum design configuration and performance for vertical axis wind turbine: Feasibility Analysis and Final EISG Report*. California Energy Commission Publications, CEC-500-2005-084.
- Rahai, H.R. and Hefazi, H., 2008. *Vertical axis wind turbine with optimized blade profile*. [online] US7393177 B2. Available at: <<http://www.google.com/patents/US7393177>> [Accessed 9 Oct. 2018].
- Rogowski, K. and Maroński, R., 2015. CFD computation of the Savonius rotor. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53(1), pp.37–45.
- Roy, S. and Saha, U.K., 2013. Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp.73–83.
- Spalart, Pr. and Allmaras, S., 1992. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In: *30th aerospace sciences meeting and exhibit*. p.439.
- Świrydczuk, J., Doerffer, P. and Szymaniak, M., 2011. Unsteady flow through the gap of Savonius turbine rotor. *Task Quarterly*, 15(1), pp.59–70.
- Xiaojing, S., Yajun, C., Guoqing, W. and Diangui, H., 2014. Research on the aerodynamic characteristics of a hybrid lift/drag-based vertical axis wind turbine. 9th Annual Green Energy Conference. Tianjin China.

COMPUTATIONAL PERFORMANCE ANALYSIS OF A TWO - SLOTTED BUCKET SAVONIUS ROTOR

Abstract

The objective of the current computational study is to predict the performance output of a modified two-bucket Savonius rotor. Each bucket consists of three arc-type blades of different radius which is determined by the slot gap ratio, in the range of 0.05 to 0.15 and the slot overlap angle, in the range of 0 to 20 deg. Nine configurations are designed with a fixed rotor diameter and a variable slot gap and slot overlap angle, aiming to resolve the performance output and investigate the effect of the two previous parameters on the power and the static torque coefficients. The commercial CFD package Fluent[®] is used to solve the unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations, along with Spalart-Allmaras turbulence model. Initially, a standard Savonius rotor, was used to validate the computational procedure using experimental results available in literature. Next, the same validated model is used to resolve the designed slotted blade configurations. The results of selected slotted blade configurations indicate improved self-starting characteristics, but a lower power coefficient compared with the non-modified Savonius rotor. Lower values of slot gap ratio have improved output performance while the slot blade overlap angle parameter, does not greatly affect the overall performance of slotted blade rotor.

Keywords: VAWT performance, Savonius rotor, Slotted buckets, CFD