

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Α/Γ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥΣ ΔΡΟΜΕΙΣ»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Θεοχάρη Κουτρογιάννη

Επιβλέπων

Δρ. Βασίλειος Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση και αξιολόγηση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών Ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν πολλαπλούς δρομείς. Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί από το ακόλουθο υπολογιστικό εργαλείο: από έναν επιλυτή που βασίζεται στη στροβιλή αναπαράσταση του ομόρρου στον οποίο τα πτερύγια περιστρέφονται και εισάγονται με την πραγματική τους γεωμετρία.

Για τις ανάγκες της εργασίας, θα μοντελοποιηθούν και προσομοιωθούν ανεμογγενήτριες πολλαπλών δρομέων Multi Rotor System (MRS) με διαφορετικό αριθμό δρομέων και εγκατεστημένη ισχύ και θα ακολουθήσει η ενεργειακή ανάλυση αυτών καθώς και το πώς η ανάδραση των αποτελεσμάτων επιδρά στην σχεδίαση του μοντέλου.

Τέλος θα εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τη σκοπιμότητα και τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MRS, καθώς και τη δυνατότητα αυτής για αναβάθμιση ισχύος (up-scaling). Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με εκείνα των παραδοσιακών μοντέλων μονού δρομέα για on και off shore εγκαταστάσεις αντίστοιχης εγκατεστημένης ισχύος.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the analysis and evaluation of the aerodynamic characteristics of Wind turbines that utilize multiple rotors. The analysis is based on the following computational tools; a Vortex solver in which the blades are rotating and represented in their true geometry (GENUVP).

For this thesis, MRS (=Multi Rotor System) Wind turbines with different number of rotors and power outputs are going to be modelled and simulated followed by an energy analysis of the results and their feedback on the MRS design will be discussed.

Finally, conclusions will be drawn on the feasibility and the conclusions of the MRS technology and its capability for further power up-scaling. The results are going to be compared with those from conventional single rotor wind turbines for on and off shore wind parks of similar power output.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστίσω τον επιβλέποντα μου κ. Βασίλη Ριζιώτη για την αγαστή συνεργασία και τη στήριξη του καθόλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Οι χρονικές και επαγγελματικές συνθήκες ήταν τέτοιες όπου χωρίς τη βοήθεια του δεν θα είχε ολοκληρωθεί. Παραμένω ειλικρινά βαθύτατα ευγνώμων για τη βοήθειά του.

Επίσης χρωστώ ένα μεγάλο ευχαριστώ στη σύζυγό μου Ουρανία για τη στήριξή της και την υπομονή της όλο αυτό το διάστημα, καθώς και την ανοχή της στο πιεστικό χρονοδιάγραμμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ Α/Γ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΟΜΕΩΝ6					
	1.1 Εισαγωγή	6				
	1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα MRS	7				
	1.3 Ιστορική Αναδρομή	8				
2.	ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Α/Γ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΟΜΕΩΝ13					
	2.1 Εισαγωγή	13				
	2.2 Υπολογιστικό Μοντέλο	13				
	2.2.1 Επιλυτής Ροής Vortex – GENUVP	14				
	2.2.2 Υπολογισμοί Αεροδυναμικών Δυνάμεων	18				
	2.3 Σύνοψη	21				
3.	Α/Γ ΑΝΑΦΟΡΑΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ	23				
	3.1 Μοντελοποίηση Α/Γ DTU 10MW	23				
	3.2 Αποτελέσματα Α/Γ DTU 10 MW	27				
	3.3 Ανάλυση πεδίου ροής Α/Γ DTU 10 MW	44				
	3.4 Μοντελοποίηση Α/Γ NREL 444kW	52				
	3.5 Αποτελέσματα Α/Γ NREL 444kW	56				
	3.6 Ανάλυση πεδίου ροής Α/Γ NREL 444kW	70				
	3.7 Συμπεράσματα	76				
4.	ВІВЛІОГРАФІА	77				

Περιστροφική Ταχύτητα Δρομέα	Ω
Ακτίνα πτερυγίου	R
Ταχύτητα Ανέμου	U
Ταχύτητα Ακροπτερυγίου	$\lambda = \Omega R/U$
Βέλτιστη Ταχύτητα Ακροπτερυγίου	λ _{opt}
Γωνία βήματος πτερυγίου	β
Επιφάνεια Κάλυψης Δρομέα	$A=\pi R^2$
Μέση Απόδοση Ισχύος	Р
Μέση Ώση Δρομέα	Т
Συντελεστής Ισχύος	$C_p = \frac{\overline{P}}{\frac{\overline{\rho}}{2}U^3A}$
Συντελεστής Ώσης	$C_T = \frac{\overline{T}}{\frac{\rho}{2}U^2A}$
Μέγιστος Συντελεστής Ισχύος	C _{pmax}
Επιφάνεια Κάλυψης Α/Γ Χ Δρομέων	A _{eff} = X*A
Συντελεστής Ισχύος Α/Γ Χ Δρομέων	$C_p = \frac{\overline{P}}{\frac{\rho}{2} U^3 A_{eff}}$
Συντελεστής Ώσης Α/Γ Χ Δρομέων	$C_T = \frac{\overline{T}}{\frac{\rho}{2}U^2 A_{eff}}$

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ Α/Γ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΟΜΕΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εγκατεστημένη ισχύς των Ανεμογεννητριών σταδιακά αυξάνεται συνεχώς. Η πρόοδος έχει επικεντρωθεί κυρίως στις χερσαίες Ανεμογεννήτριες που έχουν βελτιωθεί σημαντικά ως προς τα αεροδυναμικά τους χαρακτηριστικά, αλλά και όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ, με σταθεροποίηση σε νούμερα άνω των 5 MW. Η εξέλιξη αυτή βασίζεται στην αναβάθμιση ισχύος του παραδοσιακού μοντέλου ανεμογεννήτριας μονού οριζοντίου άξονα με τρεις (3) πτέρυγες. Η τάση αυτή αναμένεται να διατηρηθεί και τα επόμενα χρόνια για χερσαίες, αλλά και υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, παρόλο που τα προβλήματα που προκύπτουν, όπως θα συζητηθεί παρακάτω είναι σημαντικά για Α/Γ με μήκος πτερυγίων άνω των 100μ, ενώ δεν έχουν εύκολη και ξεκάθαρη λύση.

Το ενεργειακό όφελος από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών με όλο και μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ περιορίζεται κατάτι από την αυξημένη μάζα της κατασκευής και το συνεπαγόμενο κόστος. Συνυπολογίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ανάγκη για καλύτερης ποιότητας αιολικό δυναμικό, υπάρχει μια στροφή στην εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων, των οποίων οι διατάξεις στήριξης αποτελούν κριτήριο βιωσιμότητάς τους. Συγκεκριμένα, το κόστος αυτών μπορεί να ανέλθει και στο 40% του συνολικού κόστους του εξοπλισμού και αντίστοιχα να επηρεάσει την αποδοτικότητα του πάρκου.

Τα τελευταία 10 χρόνια μεγάλο μέρος της έρευνας και ανάπτυξης επικεντρώθηκε στην αναβάθμιση των πτερυγίων ενός δρομέα μιας ανεμογεννήτριας αναφοράς 5MW και η εξέλιξή του σε έναν δρομέα ανεμογεννήτριας αναφοράς 10MW και στη συνέχεια σε 20MW, φτάνοντας σε διάμετρο δρομέα της τάξης των 150μ και 250μ αντίστοιχα. Τα νέα υπολογιστικά εργαλεία σχεδίασης που αναπτύχθηκαν σχετικά με την αεροελαστική, αεροδυναμική συμπεριφορά και τη μηχανική αντοχή δρομέων πολλαπλών MW, συνέβαλαν στο να αντιμετωπιστεί τελικά η πρόκληση της μη γραμμικής συμπεριφοράς που εισάγει η χρήση εξελιγμένων πολύστρωτων πλακών από ινώδη σύνθετα πολυμερή υλικά στην κατασκευή των πτερυγίων των σύγχρονων ανεμογεννητριών.



Εικόνα 1.1 – Η εξέλιζη των δρομέων ανεμογεννητριών 1985-Σήμερα

Ένας εναλλακτικός τρόπος να αυξηθεί η ισχύς μιας ανεμογεννήτριας είναι η χρήση πολλαπλών δρομέων, μιας αρχής σχεδιασμού που δεν είναι πρόσφατη, αλλά χρονολογείται από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Η ανεμογεννήτρια πολλαπλών δρομέων φέρει, όπως μαρτυρά και το όνομά τη,ς πολλαπλούς δρομείς στον πύργο συμβατικής ανεμογεννήτριας. Η δυσκολία στην κατασκευή πολύ μεγάλων πτερυγίων για συμβατικούς δρομείς αποτέλεσε το αρχικό ερέθισμα για την ανάπτυξη των παραπάνω.

1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ MRS

Η διαφορετικότητα των αρχών σχεδιασμού των ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων σε σχέση με τις συμβατικού τύπου απαντά σε συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών.

Συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα των Α/Γ Πολλαπλών δρομέων είναι:

- Μειωμένη μάζα πτερυγίων και κόστους λόγω του ότι η μάζα των συμβατικών
 Α/Γ με ένα δρομέα αυξάνεται με τη διάμετρο ταχύτερα από τα κέρδη σε ισχύ.
- Χρήση πτερύγων που ήδη βρίσκονται στην παραγωγή και υπάρχει πολύ καλή γνώση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών τους.
- Μειωμένο βάρος κελύφους δρομέα που οδηγεί σε μειωμένο βάρος πύργου και μειωμένο κόστος, καθώς και μειωμένο βάρος της διάταξης μετάδοσης κίνησης – γεννήτριας.

- Μεγαλύτερη μέση ισχύς λόγω της δυνατότητας λειτουργίας σε διαφορετικές στροφές για κάθε δρομέα. Αυξημένη παραγωγή ενέργειας λόγω της αλληλεπίδρασης του ομόρρου και της κοντινής απόστασης των δρομέων.
- Ευκολότερη εγκατάσταση μικρότερων δρομέων πτερύγων.
- Ευκολότερη επισκευή και συντήρηση των μερών της ανεμογεννήτριας.
- Ευκολότερη μεταφορά των μικρότερων πτερύγων αλλά και των λοιπών εξοπλισμών. Γενικά η εγκατάσταση ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων μπορεί να ευνοήσει περιοχές εγκατάστασης όπου οι υποδομές αποτελούν περιοριστικό παράγοντα.
- Μπορεί να διατηρηθεί η λειτουργία της ανεμογεννήτριας και στην περίπτωση απώλειας δρομέων.

Τα μειονεκτήματα των Α/Γ Πολλαπλών δρομέων είναι:

- Περίπλοκη κατασκευή του πύργου, αλλά και της συνολικής εγκατάστασης.
- Αυξημένη μάζα του πύργου λόγω των στηρίξεων που απαιτούνται και της τοποθέτησης των πολλαπλών δρομέων.
- Δυναμικά φαινόμενα της κατασκευής.

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων έχει ιστορία τουλάχιστον 100 ετών, ενώ αυτή η φιλοσοφία σχεδίασης έχει εφαρμοστεί σε μοντέρνα καινοτόμα συστήματα, αλλά δεν συμπεριλαμβάνεται στις συμβατικές λύσεις, όσον αφορά την κατασκευή ανεμογεννητριών λόγω της περιπλοκότητας και βιωσιμότητας του μοντέλου ειδικά από την περίοδο όπου οι συμβατικού τύπου ανεμογεννήτριες είναι τεχνικά εφικτές.

Η πρώτη εμφάνιση της φιλοσοφίας πολλαπλών δρομέων πραγματοποιείται στη Δανία στα τέλη του 1800. Στην περιοχή χρησιμοποιείτο η αιολική ενέργεια για εφαρμογές αποξήρανσης και αποθήκευσης, ενώ οι αντλίες αρχικά τροφοδοτούνταν από ατμομηχανές. Το 1873, ο ατμός αντικαταστάθηκε από 3 ανεμόμυλους, δύο εκ των οποίων ήταν με διπλούς δρομείς. Οι συγκεκριμένοι αποτελούνταν από 6 πτέρυγες κατασκευασμένες από πανί τοποθετημένες σε ανεμόμυλους.



Εικόνα 1.2 – Ανεμόμυλοι στην Δανία 2 δρομέων – 1873

Όταν τέθηκε το ερώτημα της παραγωγής αιολικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα η λύση των ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων ξεχώρισε λόγω του ότι εκείνη την εποχή όπου το μοναδικό πρακτικό υλικό κατασκευής των πτερύγων ήταν το ατσάλι, το εξωφρενικό βάρος των απαιτούμενων πτερυγίων για συμβατικού τύπου ανεμογεννήτριες τις καθιστούσε μη βιώσιμες. Η λύση των ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων δεν περιορίστηκε μόνο σε χερσαίες εγκαταστάσεις, αλλά και σε υπεράκτιες ενώ τις βάσεις έβαλε ο Γερμανός Hermann Honnef το 1930.



Εικόνα 1.3 – Πρωτότυπα Honnef για μεγάλης κλίμακας αιολική παραγωγή – 1930

Η ανεμογεννήτρια με δύο δρομείς προτάθηκε από τον Percy H. Thomas (US, 1950s) ως μια έξυπνη σχεδίαση για να βελτιωθεί η απόδοση και το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης. Ο πύργος ύψους 145μ υποστήριζε μια ανεμογεννήτρια ισχύος 7,500kW και αποτελούνταν από στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους που χρησιμοποιούνταν όχι μόνο στην εγκατάτασταση των στοιχείων της Α/Γ, αλλά και ως τρόπο υποβοήθησης στην ανέγερση του πύργου. Το σχέδιο πατενταρίστηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1945.



Εικόνα 1.4 – Ανεμογεννήτρια Πολλαπλών δρομέων, Percy Thomas – 1945

Ο William Heronemus (1970) αποτελεί κεντρική προσωπικότητα στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες, θερμός υποστηρικτής της ανανεώσιμης ενέργειας και υπέρμαχος της πρωτοποριακής εφαρμογής ανεμογεννητριών σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις, αλλά και στην παραγωγή υδρογόνου. Θεωρούσε ότι η ανάγκη για μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας ευνοούσε την φιλοσοφία των ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων με πλεονεκτήματα, όπως η προτυποποίηση των πτερύγων και των λοιπών στοιχείων της εγκατάστασης και η δυνατότητα ανάπτυξης κλίμακας χωρίς να πιέζεται η δυνατότητα αναβάθμισης των μεμονωμένων πτερύγων.

Ο Henk Lagerweij κατασκεύασε και δοκίμασε διάφορες διατάξεις πολλαπλών δρομέων όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5, κυρίως της διάταξης «δέντρου» που υφίσταται προβλήματα κραδασμών, ειδικά στην περίπτωση μεγάλων εγκαταστάσεων, χαρακτηρίζοντας τη ως χαμηλής απόδοσης αντοχής/βάρους.



Εικόνα 1.5 – Πρότυπη Α/Γ 34 δρομέων 100kW σε 7 επίπεδα – 1976

To 1995, σε έρευνα σε καινοτόμα σχέδια ανεμογεννητριών για το UK DTI, ο Peter Jamieson [1] αναγνώρισε το πλεονέκτημα αναβάθμισης της ισχύος, όπως σχετίζεται με τον λόγο επιφάνειας σάρωσης/όγκο, εξοικονομώντας παράλληλα μεγάλο μέρος του κόστους σε υλικά, αλλά και σε κόστος του δρομέα και του κελύφους. Για να στηρίξει την πρότασή του, ανέπτυξε μια περίπτωση βασισμένη σε δεδομένα της αγοράς για να επιβεβαιώσει τα τυχόν αυξημένα κέρδη. Έτσι αποδείχθηκε ότι η σχεδίαση αναμογεννητριών με πολλαπλούς δρομείς μπορεί να καταστήσει βιώσιμη την αναβάθμιση της εγκατεστημένης ισχύος, αλλά ήταν και πιθανόν οικονομικά συμφέρουσα.

Τα παραπάνω αποτελούν μια σύντομη αναφορά στα σημαντικά γεγονότα που ανέπτυξαν τη φιλοσοφία σχεδίασης ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων. Σχεδιάστηκαν διάφορα συστήματα που δημοσιεύτηκαν και στη συνέχεια πατενταρίστηκαν. Εργαστηριακές δοκιμές κατά τη δεκαετία του 1980 σε δύο δρομείς

τοποθετημένους στο 5% της διαμέτρου επιβεβαίωσαν ότι δεν επηρεάζεται η απόδοση από αυτήν την τοπολογία, γεγονός που επιβεβαιώθηκε εκ νέου από τις δοκιμές σε αεροσήραγγα 7 συμβατικών δρομέων διαμέτρου 1μ [2]. Το πιο πρόσφατο παράδειγμα αναφέρεται σε διάταξη 45 δρομέων τοποθετημένων σε απόσταση 5% και 2.5% της διαμέτρου, όπου όχι μόνο δεν παρατηρείται απώλεια απόδοσης, αλλά αντίθετα προκύπτουν κέρδη στην απόδοση. Όπου κέρδη στην απόδοση εννοείται ότι ν δρομείς σε διάταξη πολλαπλών δρομέων θα παράγουν κάτι παραπάνω από ν*P, όπου P είναι η απόδοση ενός δρομέα απομονωμένου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Α/Γ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΟΜΕΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας για την αεροδυναμική ανάλυση δρομέων Α/Γ. Πρόκειται για τη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας, η οποία εφαρμόζεται από τον υπολογιστικό κώδικα GENUVP που αναπτύχθηκε στον τομέα Ρευστών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ στο πλαίσιο διπλωματικών εργασιών και διδακτορικών διατριβών (Μπελέσης (1999), Κατώπης (1995)) [3]. Τα αποτελέσματα του κώδικα έχουν αξιολογηθεί εκτενώς σε σχέση με πραγματικές μετρήσεις δρομέων Α/Γ, τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, όσο και ως προς τη μεταβατική λειτουργία, στο πλαίσιο των παραπάνω διατριβών, καθώς και άλλων σχετικών δημοσιεύσεων (Βουτσινάς, Μπελέσης και Ράδος (1994), Βουτσινάς, Ριζιώτης και Χαβιαρόπουλος (1997), Chassapoyiannis et al (1994), Βουτσίνας (1995)).

Η αεροδυναμική απόδοση πολλαπλών δρομέων εχει αναλυθεί και μελετηθεί τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πειραματικό υπόβαθρο, κυρίως σε μικρές συστάδες των 2 και 7 δρομέων.

2.2 Υπολογιστικά μοντέλα

Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν τα αποτελέσματα από ένα υπολογιστικό εργαλείο που βασίζεται στη στροβιλή αναπαράσταση του ομόρρου, στον οποίον τα πτερύγια είναι περιστρεφόμενα και αναπαριστούνται από την πραγματική τους γεωμετρία (GENUVP).

Ο συγκεκριμένος επιλυτής εξ ορισμού τρέχει σε μη σταθερή ροή και γι' αυτό μπορεί να αποδώσει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος αλλά καταστέλλει τα φαινόμενα συνεκτικότητας και ως εκ τούτου οι πληροφορίες ροής που υπολογίζει εξειδινανικεύονται. Εισάγωντας εκ των υστέρων συνεκτικές διορθώσεις, είναι δυνατός ο υπολογισμός ρεαλιστικών προβλέψεων φόρτισης των πτερυγίων, αλλά οι διορθώσεις αυτές δεν θα έχουν καμία επίδραση στην ανάπτυξη του πεδίου ροής. Η παραπάνω αρχιτεκτονική του συστήματος καθιστά το υπολογιστικό κόστος του επιλυτή Vortex διαχειρίσιμο, αλλά όχι μικρό. Η μέθοδος Vortex ακολουθεί τον ομόρρου των πτερύγων ξεχωριστά χρησιμοποιώντας σημεία στροβιλότητας, με τον αριθμό τους να αυξάνεται στον χρόνο. Συνήθως 10 πλήρεις περιστροφές απαιτούνται, ώστε να συγκλίνει σε σταθερή ροή, ενώ για τις αεροελαστικές προσομοιώσεις ο αριθμός των περιστροφών θα πρέπει να αντικατοπτρίζει περί τα 10 λεπτά. Το υπολογιστικό κόστος είναι υψηλό και απαιτεί ικανή υπολογιστική ισχύ.

2.2.1 Επιλύτης ροής Vortex - GENUVP

Το υπολογιστικό εργαλείο GENUVP [7] [8] [9], υλοποιώντας την μεθοδολογία ελεύθερου ομόρρου, είναι ένας επιλυτής ασυμπίεστης μη συνεκτικής ροής όπου η επίδραση των στερεών ορίων αναπαριστάται μέσω επιφανειών και διπολικών κατανομών ενώ η στροβιλότητα του ομόρρου προσεγγίζεται από ένα πλήθος ελευθέρως κινουμένων στοιχείων στροβιλότητας [4], η ένταση και η θέση των οποίων προσδιορίζεται από την επίλυση των δυναμικών και κινηματικών εξισώσεων για την ελεύθερη στροβιλότητα.

Βασιζόμενοι στο θεώρημα του Helmhotz, η ταχύτητα ροής αναλύεται σε ένα τμήμα προερχόμενο από δυναμικό, το οποίο αναπαρίσταται, μέσω της δεύτερης ταυτότητας του Green, από διανομές ιδιομόρφων σημείων πάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων, και σε ένα στροβιλό τμήμα το οποίο εκφράζει την ταχύτητα που επάγει ο ομόρρους ως εξής:

$$\vec{u}(\vec{x};t) = \overrightarrow{U_{\infty}}(\vec{x};t) + \nabla\varphi(\vec{x};t) + \overrightarrow{u_{\omega}}(\vec{x};t), \vec{x} \in D$$
(1)

όπου $\overrightarrow{U_{\infty}}(.;t)$ η ταχύτητα του πεδίου σε σταθερή κατασταση, $\varphi(.;t)$ είναι ένα δυναμικό διαταραχής και $\overrightarrow{u_{\omega}}(\vec{x};t)$ είναι μια επιπλέον επαγόμενη ταχύτητα που αναπαριστά τη συνεισφορά του στροβιλού τμήματος της ροής.

Στο πλαίσιο μιας δυναμικής-μη συνεκτικής θεώρησης της ροής το δυναμικό της ταχύτητας είναι δυνατό να αναπαρασταθεί από μια επιφανειακή διανομή ιδιομορφιών. Στην περίπτωση λεπτών πτερύγων λαμβάνεται μια διανομή διπόλων τόσο στην επιφάνεια των σωμάτων, όσο και στον ομόρρου τους. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται ένα "πήδημα" δυναμικού μεταξύ πάνω και κάτω πλευράς των ενεργών επιφανειών, το οποίο επιβάλλεται από τη διπολική διανομή.

Στην παρούσα εργασία, τα πτερύγια θα μοντελοποιηθούν ως λεπτές ανωστικές επιφάνειες, όπου οι διπολικές κατανομές μ ορίζονται πάνω στις επιφάνειες και στον ομόρρου. Με τον συντελεστή N_B καθορίζουμε τον αριθμό των πτερύγων, οι οποίες περιγράφονται από τις μέσες επιφάνειες S_k και τον ομόρρου S_{Wk} με τον προσανατολισμό τους να δίνεται από το διάνυσμα \vec{v} . Τότε,

$$\varphi(\vec{x_{0}};t) = -\sum_{k=1}^{N_{B}} \left\{ \int_{S_{k}} \frac{\mu_{k}(\vec{x};t)\vec{v}(\vec{x};t) \cdot (\vec{x_{0}}-\vec{x})}{4\pi |\vec{x_{0}}-\vec{x}|^{3}} dS(\vec{x}) \int_{S_{W_{k}}} \frac{\mu_{W_{k}}(\vec{x};t)\vec{v}_{W}(\vec{x};t) \cdot (\vec{x_{0}}-\vec{x})}{4\pi |\vec{x_{0}}-\vec{x}|^{3}} dS_{W}(\vec{x}) \right\}$$

$$(2)$$

όπου, $\mu_k(\cdot; t)$ είναι η κατανομή διπόλων πάνω στην k λεπτή ανωστική επιφάνεια (1ος όρος) και $\mu_{Wk}(\cdot; t)$ είναι η κατανομή διπόλων των σημείων στροβιλότητας για το k ανωστικό σώμα (2^{ος} όρος).

Για τον προσδιορισμό του δυναμικού και επομένως και της ταχύτητας σε οποιοδήποτε σημείο του πεδίου απαιτείται να γνωρίζουμε τις άγνωστες διανομές $\mu_k(\cdot; t)$ και $\mu_{Wk}(\cdot; t)$ καθώς και τη γεωμετρία των ελεύθερα εξελισσόμενων ομόρρων S_{Wk} . Για τον προσδιορισμό των παραπάνω αγνώστων χρησιμοποιούνται δύο ειδών συνθήκες:

- α) κινηματικές συνθήκες, όπως τη συνθήκη μη εισχώρησης του ρευστού σε όλες
 τις στερεές επιφάνειες και τη συνθήκη υλικής κίνησης όλων των ελεύθερων
 φύλλων στροβιλότητας.
- b) δυναμικές συνθήκες, όπως τη συνθήκη μηδενικής ασυνέχειας της πίεσης κατά μήκος των ελεύθερων φύλλων στροβιλότητας.

Για να υπολογιστούν τα άγνωστα πεδία, οι ακόλουθες συνθήκες εφαρμόζονται:

1. Η οριακή συνθήκη μη εισχώρησης:

$$\vec{v}(\vec{x}_{0};t) \cdot \nabla \varphi(\vec{x}_{0};t) = \frac{\partial \varphi}{\partial \nu}(\vec{x}_{0};t) = \vec{v}(\vec{x}_{0};t) \cdot \left(\overrightarrow{U_{Bk}} - \overrightarrow{U_{\infty}} - \overrightarrow{U_{\omega}}\right),$$
$$\vec{x}_{0} \in S_{k}, k = 1, N_{B}$$
(3)

όπου $\overrightarrow{U_B}(\cdot; t)$ χαρακτηρίζεται η κατανομή της ταχύτητας στο σώμα των πτερυγίων και περιλαμβάνει και τον όρο της ταχύτητας του άκαμπτου σώματος καθώς και τον όρο της ελαστικής μετακίνησης.

2. Η εξέλιξη του ομόρρου σε Langrange μορφή:

$$\frac{d\overrightarrow{x_W}}{dx} = \overrightarrow{U_{\infty}}(\vec{x}_W; t) + \nabla\varphi(\overrightarrow{x_W}; t) + \overrightarrow{U_{\omega}}(\vec{x}_W; t)$$
(4)

 Η δυναμική συνθήκη ομόρρου, που απαιτεί μηδενικές αλλαγές πίεσης στο S_{wk}. Κάνοντας χρήση του θεωρήματος του Κέλβιν, η δυναμική συνθήκη ομόρρου ισοδυναμεί με τη διατήρηση της μάζας μ_W:

$$\frac{d\mu_W}{dt} = 0$$
(5)

Οπότε η ένταση των επιφανειακών κατανομών $\mu_k(\cdot; t)$ καθορίζεται από την εξίσωση (3), η ένταση του ομόρρου από την εξίσωση (5) και τη γεωμετρία ομόρρου από την εξίσωση (4).

Τα θεωρητικά όπως και τα πειραματικά αποτελέσματα και οι υπολογιστικές αποδείξεις υποδηλώνουν ότι στην πορεία του χρόνου, τα σημεία στροβιλότητας τείνουν να χάσουν την ομαλότητά τους, με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί της ροής να γίνουν

μονοδιάσταστοι. Για να υπερκεραστεί το παραπάνω, θεωρείται ότι ο ομόρρους κουβαλά στροβιλότητα που στην περίπτωση ενός πεδίου vortex που περιγράφεται από σταθερά μέρη, η διπολική κατανομή $S_W^e(t)$ καθορίζεται σε κάθε πάνελ ως:

$$\vec{\omega}_{S_W}(\vec{x},t) = \forall \times \vec{u}_{\mu}(\vec{x},t) = \delta_{\theta S_W}(\vec{x} - \vec{x}_{\theta S_W})\vec{t}(\vec{x}_{\theta S_W},t)\mu_W(\vec{x}_{\theta S_W},t)$$
(6)

όπου $\delta_{\theta S_W}$ είναι οι συνθήκες Dirac οριζόμενες στο όριο του $S_W^e(t)$ και $\vec{\tau}(\cdot,t)$ το εφαπτομενικό τμήμα του ανύσματος $\vartheta S_W(t)$ (βλέπε εικόνα 2.1). Στην υπολογιστική υλοποίηση που εφαρμόζεται στο GENUVP, ο ομόρρους κάθε πτερυγίου αναλύεται στον κοντινό S_{Wk}^{Δ} και μακρινό όρο S_{Wk}^* . Η μακρινή συνιστώσα είναι εκείνη που μετασχηματίζεται σε στροβιλότητα, ενώ η κοντινή που παράγεται στο τωρινό χρονικό βήμα διατηρεί τον επιφανειακό της χαρακτήρα.



Εικόνα 2.1 – Η εφαρμογή του πλέγματος στα σώματα και τον ομόρρου

Η στροβιλότητα του μακρινού ομόρρου στον GENUVP προσεγγίζεται από τα ελευθέρως κινούμενα σημεία στροβιλότητας οριζόμενα από την ένταση $\vec{\Omega}_{j}(t)$ και τη θέση $\vec{Z}_{i}(t)$,

$$\vec{\omega}_{W}(\vec{x},t) = \sum_{j \in J(t)} \vec{\Omega}_{j}(t) \zeta_{\varepsilon} \left(\vec{x} - \vec{Z}_{j}(t) \right)$$
(7)

όπου J(t) είναι ο δείκτης των σημείων στροβιλότητας και η $\zeta_{\varepsilon}(r)$ συνάρτηση αποκοπής:

$$\zeta_{\varepsilon}(r_j) = \frac{1}{\varepsilon^3} exp\left(-\left(\frac{r_j}{\varepsilon}\right)^3\right), r_j = \left|\vec{x} - \overline{Z_j}(t)\right|$$

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (7), το $\vec{u}_{\omega}(\vec{x}_0, t)$ μετασχηματίζεται σε:

$$\vec{u}_{\omega}(\vec{x}_{0},t) = \sum_{j \in J(t)} \frac{\vec{\Omega}_{j}(t) \times \left(\vec{x} - \vec{Z}_{j}(t)\right)}{4\pi \left|\vec{x} - \vec{Z}_{j}(t)\right|^{3}} \left(1 - exp\left(-\left(\frac{\left|\vec{x} - \vec{Z}_{j}(t)\right|}{\varepsilon}\right)^{3}\right)\right)$$
(9)

ενώ η στροβιλότητα του ομόρρου καθορίζεται από:

$$\frac{d\overline{Z_{j}}(t)}{dt} = \vec{u}(\vec{Z}_{j}, t), j \in J(t), \qquad \frac{d\overline{\Omega_{j}}(t)}{dt} = \left(\overline{\Omega_{j}}(t) \cdot \nabla\right) \vec{u}(\vec{Z}_{j}, t)$$
(10)

Με τον παραπάνω υπολογισμό το δυναμικό μέρος θα ενσωματώνει και τις συνεισφορές από τις στερεές επιφάνειες και τον κοντινό ομόρρου. Αντί να προσδιοριστεί η γεωμετρία του κάθε φύλλου στροβιλότητας καθώς και τη διανομή διπόλων που αυτό μεταφέρει, παρακολουθούμε την εξέλιξη των ελεύθερων στοιχείων στροβιλότητας στο χώρο και το χρόνο βασιζόμενοι στις παραπάνω κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις (10).

Η στροβιλότητα εκλύεται συνεχώς κατά μήκος της ακμής εκφυγής. Το μέγεθος της στροβιλότητας που προβάλλεται στον κοντινό ομόρρου καθορίζεται από τη συνθήκη Kutta που απαιτεί πεπερασμένη ταχύτητα στην ακμή εκφυγής, η οποία ικανοποιείται ορίζοντας την ένταση του διπόλου του κοντινού ομόρρου ίση με εκείνη του πτερυγίου κατά μήκος της ακμής εκφυγής. Όταν ικανοποιηθούν η συνθήκη Kutta και η οριακή συνθήκη επιφάνειας, ο ομόρρους άγεται στη νέα του θέση. Στις νέες τους θέσεις τα πάνελ δινοσωλήνων κοντινού ομόρρου μετατρέπονται σε σημεία στροβιλότητας (6) (εικονα 2.2).



Εικόνα 2.2 – (α) Τα τρία στάδια ανά χρονικό βήμα, (β) Το υβριδικό σχήμα για την αναπαράσταση του ομόρρου

Τα φορτία υπολογίζονται από την ολοκλήρωση της κατανομής της επιφανειακής πίεσης που δίνεται από τον επιλυτή. Για τον υπολογισμό ρεαλιστικών προβλέψεων των φορτίων χρειάζεται να γίνουν συνεκτικές διορθώσεις μιας και οι παραπάνω υπολογισμοί δεν περιλαμβάνουν φαινόμενα συνεκτικότητας. Ο κώδικας GENUVP εισάγει συνεκτικές διορθώσεις τη γωνία πρόσπτωσης και τη σχετική ταχύτητα, όπως υπολογίζονται από τον επιλυτή ροής και τα τμηματικά σταθερά δεδομένα C_L - C_D .

2.2.2 Υπολογισμοί αεροδυναμικών δυνάμεων

Ο υπολογισμός των μη μόνιμων φορτίων πάνω σε κάθε ανωστική επιφάνεια του δρομέα πραγματοποιείται είτε με απευθείας υπολογισμό μέσω της εξίσωσης Bernoulli, όπου δεν συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις λόγω συνεκτικότητας, είτε μέσω ενός σχήματος όμοιου με αυτό που ακολουθείται στη μέθοδο των στοιχείων πτερύγωσης.

Σχετικά με τη χρήση της εξίσωσης Bernoulli, κάνουμε χρήση αυτής για το άνωθεν και κάτωθεν μέρος της πλευράς του πτερυγίου στο τυχαίο σημείο $\vec{x} \in S_k$ και παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για το «πήδημα» της πίεσης κατά μήκος της επιφάνειας του πτερυγίου:

$$\frac{\vartheta[\varphi]}{\vartheta t}(\vec{x};t) + \vec{U}_m(\vec{x};t) \cdot [\vec{u}](\vec{x};t) = -\frac{[p]}{\rho}$$
(11)

όπου $-[\varphi] = \mu$ η κατανομή διπόλων πάνω στην πτέρυγα, $\vec{U}_m(\cdot;t)$ η μέση ταχύτητα μεταξύ άνωθεν και κάτωθεν πλευράς, $[\vec{u}](\cdot;t) = \nabla[\varphi](\cdot;t)$ η τοπική ασυνέχεια της ταχύτητας και [p] το «πήδημα» της πίεσης. Για τον υπολογισμό του $[\vec{u}](\cdot;t) = \nabla\mu(\cdot;t)$ χρησιμοποιείται ένα μηδενικής τάξης σχήμα διαφορών, λόγω της τμηματικά σταθερής διανομής του μ.

Στο διακριτό πρόβλημα η εξίσωση (11) λαμβάνεται σε κάθε σημείο ελέγχου (στο κέντρο κάθε τμήματος) του σώματος k. Θεωρώντας ότι το υπολογιζόμενο «πήδημα» της πίεσης σε κάθε σημείου ελέγχου του σώματος k είναι:

$$[p]_{k}^{e}$$
, $e = 1$, E_{k} , $k = 1$, N_{B}

Τότε η δύναμη πάνω σε κάθε τμήμα e είναι:

$$\vec{F}_k^e(t) = \vec{v}_k^e \cdot [p]_k^e \cdot S_k^e$$
(13)

Η διανομή της δύναμης κατά μήκος του πτερυγίου προκύπτει από την ολοκλήρωση των δυνάμεων σε κάθε στοιχείο (strip) του πτερυγίου και δίνεται από την σχέση:

$$\vec{F}_{strip}(t) = \sum_{e} \vec{v}_{k}^{e} \cdot [p]_{k}^{e} \cdot S_{k}^{e}$$

$$F_{n \, strip} = \left(\sum_{e} \vec{v}_{k}^{e} \cdot [p]_{k}^{e} \cdot S_{k}^{e}\right) \cdot \vec{e}_{n}$$

$$F_{t \, strip} = \left(\sum_{e} \vec{v}_{k}^{e} \cdot [p]_{k}^{e} \cdot S_{k}^{e}\right) \cdot \vec{e}_{t}$$
(14)

όπου \vec{e}_n και \vec{e}_t είναι τα μοναδιαία κάθετα και παράλληλα στο επίπεδο του δρομέα διανύσματα αντίστοιχα. Στη δεύτερη των εξισώσεων (14) η άθροιση γίνεται πάνω στο πλήθος των τμημάτων που απαρτίζουν το κάθε στοιχείο του πτερυγίου.

Αντίστοιχα η ροπή στρέψης του κάθε στοιχείου του πτερυγίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$M_{strip} = \left(\sum_{e} \left(\overrightarrow{r_0}^e \times \overrightarrow{v_k}^e \right) \cdot [p]_k^e \cdot S_e^k \right) \cdot \vec{e}_p$$
(15)

Σελ.19

(12)

όπου το $\overrightarrow{r_0}^e$ είναι το διάνυσμα θέσης του εκάστοτε σημείου ελέγχου ως προς τον διαμήκη άξονα του πτερυγίου, γύρω από τον οποίο υπολογίζεται η ροπή στρέψης και \overrightarrow{e}_p το μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος αυτού του άξονα.

Λόγω του ιδιόμορφου χαρακτήρα της ροής (απειρισμός της ταχύτητας) στην ακμή πρόσπτωσης της πτέρυγας, μια επιπλέον δύναμη «αναρρόφησης» (suction force) προστίθεται στη δύναμη που υπολογίζεται από την πρώτη εξίσωση (14). Η δύναμη αυτή υπολογίζεται με τη βοήθεια του θεωρήματος Joukowski:

$$\delta \vec{F}_{suction} = \rho \vec{V}_{LE} \times \vec{\Gamma}_{LE} \cdot b_{strip}$$
(16)

η οποία αναπαριστά την επαγόμενη αντίσταση του πτερυγίου. Στην παραπάνω εξίσωση το \vec{V}_{LE} είναι το διάνυσμα της ταχύτητας υπολογισμένο κατά μήκος της ακμής πρόσπτωσης του πτερυγίου και $\vec{\Gamma}_{LE}$ είναι το διάνυσμα του στροβίλου που διέρχεται από την ακμή πρόσπτωσης ενώ b_{strip} είναι το εύρος κάθε strip (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 – Υπολογισμός δύναμης αναρρόφησης

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα φορτία που υπολογίζονται με τις παραπάνω εξισώσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τις επιδράσεις λόγω συνεκτικότητας, όπως και την επίδραση της αποκόλλησης της ροής που ισχυροποιείται, καθώς οι γωνίες πρόσπτωσης αυξάνουν.

Η δεύτερη μεθοδολογία που λαμβάνει υπόψη τις παραπάνω επιδράσεις στηρίζεται στη χρήση ενός a-posteriori σχήματος, ανάλογου αυτού που ακολουθείται στη μέθοδο στοιχείων πτερύγωσης. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στον προσδιορισμό της φαινόμενης γωνίας πρόσπτωσης και της ταχύτητας σε κάθε στοιχείο του πτερυγίου

μέσω των οποίων υπολογίζονται τελικές οι αεροδυναμικές δυνάμεις. Ακολουθούν τα βήματα υπολογισμού και οι εξισώσεις της μεθόδου.

Αρχικά υπολογίζεται το διάνυσμα της συνολικής δύναμης, χωρίς τις συνεκτικές διορθώσεις, από τις εξισώσεις (14) και (16) και βάσει του θεωρήματος Joukowski καθορίζεται η κατεύθυνση του διανύσματος της φαινόμενης ταχύτητας σε κάθε strip του πτερυγίου ως η κάθετη στο διάνυσμα της δύναμης. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται η γωνία πρόσπτωσης της επερχόμενης ροής σε κάθε strip του πτερυγίου και με χρήση των γνωστών καμπυλών C_D, C_L, C_M υπολογίζονται τα αεροδυναμικά φορτία και η ροπή στρέψης από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_{n \, strip} = \frac{\rho}{2} C_n(\alpha) \cdot W^2 \cdot c \cdot b_{strip} = \frac{\rho}{2} \cdot (C_L(\alpha) \cdot \cos \varphi + C_D(\alpha) \cdot \sin \varphi) \cdot W^2 \cdot c \cdot b_{strip}$$

$$F_{t \, strip} = \frac{\rho}{2} C_t(\alpha) \cdot W^2 \cdot c \cdot b_{strip} = \frac{\rho}{2} \cdot (C_L(\alpha) \cdot \sin \varphi - C_D(\alpha) \cdot \cos \varphi) \cdot W^2 \cdot c \cdot b_{strip}$$

$$M_{strip} = \frac{\rho}{2} C_m(\alpha) \cdot W^2 \cdot c \cdot b_{strip}$$
(17)

Σημειώνεται ότι στις εξισώσεις (17) εκτός από την κατεύθυνση της φαινόμενης ταχύτητας απαραίτητη είναι και η γνώση του μέτρου της ταχύτητας W. Ο υπολογισμός του μέτρου της ταχύτητας W λαμβάνεται ως η μέση τιμή των μέσων ταχυτήτων \vec{U}_m κατά μήκος του εκάστοτε strip, τιμή που είναι όσο το δυνατόν πιστή με τα πειραματικά δεδομένα.

2.3 Σύνοψη

Για τη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας που βρίσκει εφαρμογή στο υπολογιστικό πακέτο GENUVP καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Είναι μέθοδος μη συνεκτική που μπορεί όμως να δεχθεί συνεκτικές και συμπιεστές διορθώσεις. Η δυνατότητα αυτή είναι κρίσιμη μιας και περιπτώσεις όπου τα συνεκτικά φαινόμενα είναι ισχυρά, όπως η ροή που αποκολλάται γύρω από το πτερύγιο στην περίπτωση των δρομέων σταθερής γωνίας βήματος, το απαιτούν για την ορθότητα των υπολογισμών.
- Είναι τρισδιάστατη μέθοδος, οπότε συμπεριλαμβάνει τον τρισδιάστατο χαρακτήρα του προβλήματος επίλυσης της ροής, εκτός από αυτόν που σχετίζεται άμεσα με τα συνεκτικά φαινόμενα (ακτινική ροή λόγω της κλίσης πίεσης κατά μήκος του πτερυγίου).
- Είναι μέθοδος μη μόνιμη, οπότε μπορεί να προβλέπει με ακρίβεια ροές γύρω από δρομείς, όταν το πεδίο ανέμου λειτουργίας αυτών είναι χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενο ή παρουσιάζει ασυμμετρία σε σχέση με τον άξονα του δρομέα.
- Είναι μέθοδος με σημαντικό υπολογιστικό κόστος, αλλά σε επίπεδο που να επιτρέπει αεροελαστικούς υπολογισμούς με στοχαστικό άνεμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° Α/Γ ΑΝΑΦΟΡΑΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ

3.1 Μοντελοποίηση Α/Γ DTU 10 MW

Για την αρχική μοντελοποίηση, η ανεμογεννήτρια που θα μελετηθεί είναι η DTU 10MW [1]. Πρόκειται για μια τρίπτερη ελεγχόμενου βήματος μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτρια με διάμετρο δρομέα 178m και ύψος πύργου 90m. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής συνοψίζονται στον πίνακα 3.1 με τα γεωμετρικά και αεροδυναμικά στοιχεία να είναι γνωστά [5] [6].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η καμπύλη ισχύος, τα διαγράμματα pitch – ταχύτητας ανέμου, ταχύτητας περιστροφής – ταχύτητας ανέμου όπως λογίζονται για τους υπολογισμούς του κώδικα, ενώ από το διάγραμμα Cp-λ αξιολογείται το εύρος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ.

IEC Class	IA			
Timuc	Μεταβλητής ταχύτητας – μεταβλητού			
ΕΛεγχύς	βήματος			
Ονομαστική Ισχύς (MW)	10			
Διάμετρος Δρομέα (m)	178			
Ύψος πύργου (m)	90			
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)	11.5			
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	0.5			
(RPM)	7.5			
Δεδομένα Αεροτομών	FFA w3 series			

Πίνακας 3.1 – Δεδομένα Ανεμογεννήτριας DTU 10MW

U(m/s)	λ	Power (kW)	Thrust (kN)	pitch (deg)	Ω (r/s)
4	14,01	188	302,5	0,00	0,628
5	11,2	738	409,6	0,00	0,628
6	9,34	1503	521	0,00	0,628
7	8	2495	634,1	0,00	0,628
8	7,51	3740	790,4	0,00	0,674
9	7,51	5326	1000,1	0,00	0,758
10	7,51	7306	1234,5	0,00	0,842
11	7,51	9724	1493,5	0,00	0,926
12	7,47	10634	1250,8	4,62	1,005

13	6,9	10645	1079,3	7,2	1,005
14	6,4	10643	971,6	9,15	1,005
15	5,98	10654	894,7	10,8	1,005
16	5,6	10644	833,1	12,3	1,005
17	5,27	10654	784,6	13,68	1,005
18	4,98	10652	744	14,98	1,005
19	4,72	10647	709,7	16,22	1,005
20	4,48	10635	680,1	17,4	1,005
21	4,27	10658	656,4	18,53	1,005
22	4,07	10659	635	19,63	1,005
23	3,9	10650	615,9	20,7	1,005
24	3,73	10641	599,2	21,74	1,005
25	3,59	10642	585,1	22,75	1,005

Πίνακας 3.2 – Δεδομένα Καμπύλης Ισχύος – pitch – ταχύτητας περιστροφής

Ανεμογεννήτριας DTU 10MW



Εικόνα 3.2 – Καμπύλης Ισχύος Α/Γ DTU 10MW



Εικόνα 3.3 – Ταχύτητα Δρομέα Α/Γ DTU 10MW



Εικόνα 3.4 – Γωνία pitch Α/Γ DTU 10MW

Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 3.2, η καμπύλη ισχύος της Ανεμογεννήτριας υπολογίζεται για όλο το εύρος λειτουργίας αυτής, ήτοι για ταχύτητες 4 – 25 m/s, ενώ η ταχύτητα ανέμου για την οποία επιτυγχάνεται για πρώτη φορά η ονομαστική ισχύς είναι

11.5 m/s. Στην εικόνα 2.4, γίνεται αντιληπτό ότι η γωνία pitch διατηρεί την ελάχιστη τιμή της, β=0, μέχρι την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Στην εικόνα 2.3, παρατηρείται ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα έχει ένα παράθυρο λειτουργίας 0.62 - 1.0 rad/s, ήτοι 6.0 - 9.6 RPM. Ό έλεγχος της μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής πραγματοποιείται στο πεδίο των ταχυτήτων ανέμου 7 – 11.5 m/s με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δρομέα – μέγιστος συντελεστής ισχύος C_p – γεγονός που αναδεικνύεται επίσης στο διάγραμμα της καμπύλης ισχύος, όπου για μεγάλο μέρος των μερικών φορτίων η απόδοση είναι μέγιστη μέσω της παρακολούθησης του μέγιστου C_p. Για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής τα πτερύγια αυξάνουν τη γωνία pitch ούτως, ώστε να διατηρήσουν σταθερή παραγωγή ισχύος. Η προβλεπόμενη μέγιστη παραγόμενη ισχύ είναι κατάτι μεγαλύτερη της δοθείσας – 10 MW – μιας και στον υπολογισμό δεν έχουν υπεισέλθει οι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες του συστήματος. Η ηλεκτρομηχανική απόδοση των συστημάτων μετάδοσης ισχύος των σύγχρονων ανεμογεννητριών ανέρχεται στα 94-95%, γεγονός που δικαιολογεί το αεροδυναμικό αποτέλεσμα των 10.6MW.

Στην εικόνα 2.5 και 2.6, παρουσιάζονται οι αδιάστατες καμπύλες του συντελεστή ισχύος C_p και ώσης C_T συναρτήσει της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ. Παρατηρούμε ότι η γωνία pitch των 0° είναι η βέλτιστη για την περιοχή των μερικών φορτίων, όπου στόχος είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Συγκεκριμένα για ταχύτητες ανέμου 7 – 11.5 m/s ο δρομέας λειτουργεί με μέγιστο C_p με $\beta = 0^\circ$, ενώ από εκεί και πάνω, μέσω της αύξησης του pitch, διατηρείται η σταθερή παραγωγή μέγιστης ισχύος. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι γενικότερη αύξηση της παραγόμενης ισχύος θα πρέπει να εστιαστεί στην περίπτωση για γωνία $\beta = 0^\circ$ γύρω από το $\lambda_{opt} = 7.5$ και για συντελεστή ισχύος $C_p = 0.478$.



Εικόνα 3.5 – Διάγραμμα $C_p - \lambda$ για την $A/\Gamma DTU 10MW$



Εικόνα 3.6 – Διάγραμμα C_T – λ για την Α/Γ DTU 10MW

Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι η αεροδυναμική μοντελοποίηση του πτερυγίου ξεκινά από R = 5.38m λόγω του ότι η ρίζα του είναι πολύ κοντά στο κυλιδρικό προφίλ και συνεπώς υποβάλλεται σε έντονα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής, γεγονός που είναι εκτός των δυνατοτήτων του υπολογιστικού κώδικα. Η απόρριψη του μέρους της ρίζας του πτερυγίου έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά της στροβιλότητας αυτού πιο μακριά από το κέντρο του δρομέα και συνεπάγεται μείωση στην απόδοση των τομών του πτερυγίου που βρίσκονται πλησιέστερα σε αυτό. Παρόλα αυτά , το φαινόμενο είναι τοπικό και δεν επηρεάζει τη συνολική απόδοση του δρομέα όπως έχει επιβεβαιωθεί στο [1], αλλά θα προκαλέσει κοντά στο κέντρο επιτάχυνση της ροής.

3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Α/Γ DTU 10 MW

Τα σενάρια για τα οποία θα εξαχθούν αποτελέσματα είναι η περίπτωση της Α/Γ με δύο δρομείς (2_MRS_10MW) και τέσσερεις δρομείς (4_MRS_10MW), ενώ θα εξεταστούν και δύο διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των δρομέων, ήτοι 1.05 και 1.025 της διαμέτρου του δρομέα. Οι συνθήκες μοντελοποίησης είναι οι ονομαστικές, με λ =7.5 και ταχύτητα ανέμου $U_{ref} = 11 \, m/sec$, ενώ τα χρονικά βήματα είναι $\Delta T = 900$, που αντιστοιχούν σε συνολική χρονική διάρκεια μοντελοποίησης 67.90 sec, ήτοι περίπου 10 περιστροφές.

Παρακάτω ακολουθούν οι απεικονίσεις της διάταξης και της γεωμετρίας των δρομέων, καθώς και των αντίστοιχων ομόρρων. Παρατηρείται ότι η διανομή των σημείων στροβιλότητας αποτυπώνει την τάση για ανάμιξη του ομόρρων καθώς την περιστροφή αυτών γύρω από την αμοιβαία αλληλεπίδραση του ομόρρου κάθε δρομέα.

Αρχικά, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του σεναρίου αναφοράς για την περίπτωση του μονού δρομέα βάσει του οποίου θα εξαχθούν συμπεράσματα ως προς απόδοση των πολλαπλών δρομέων. Η γεωμετρία του δρομέα αποτυπώνεται στην εικόνα 3.10, από την πλευρά του εισερχόμενου πεδίο ταχυτήτων για γωνία αζιμουθίου 0°, ενώ η φορά περιστροφής είναι δεξιόστροφη.

Η αποτύπωση του ομόρρου με σημεία στροβιλότητας από τον υπολογιστικό κώδικα παρουσιάζεται παρακάτω για κάθε σενάριο αριθμού δρομέων – μονός, διπλός, τετραπλός – με κατάλληλο χρωματικό κώδικα. Παρατηρούμε ότι η αποτύπωση του ομόρρου κατάντι της Α/Γ υποδεικνύει την αναμενόμενη επέκταση του καθώς και το ελικοειδές σχήμα του, καθώς και τη στροβιλότητα που παράγεται από τα πτερύγια.

Ακολουθούν τα διαγράμματα της μέσης ισχύος και της ώσης για κάθε σενάριο αριθμού δρομέων, με την συνολική επιφάνεια σάρωσης των δρομέων να αθροίζεται κατά περίπτωση – 1A, 2A, 4A. Όπως είναι αναμενόμενο και ο συντελεστής ισχύος C_p όσο και ο συντελεστής ώσης C_T για τις περιπτώσεις των πολλαπλών δρομέων παρουσιάζουν αύξηση. Συγκεκριμένα για την περίπτωση μονού δρομέα, το $C_p = 0.497$ ενώ το $C_T = 0,827$, που συνάδουν με τις γνωστές καμπύλες της ανεμογγενήτριας. Για την περίπτωση των δύο δρομέων με την απόσταση μεταξύ τους στα 1.05D, ο συντελεστής ισχύος και ώσης εμφανίζει αύξηση 1,6% και 0,7% αντίστοιχα, ενώ για την περίπτωση των τεσσάρων δρομέων 3,6% και 2,4% αντίστοιχα.

Για την περίπτωση των δύο δρομέων με την απόσταση μεταξύ τους στα 1.025D, ο συντελεστής ισχύος και ώσης εμφανίζει αύξηση 1,8% και 0,7% αντίστοιχα, ενώ για την περίπτωση των τεσσάρων δρομέων 3,8% και 2,4% αντίστοιχα.

Συμπεραίνουμε από τα παραπάνω, ότι η αλληλεπίδραση των πολλαπλών δρομέων καθώς και το γεγονός ότι μικρότεροι δρομείς ανταποκρίνονται ταχύτερα στις αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει τη συνολική απόδοση σε σχέση με εκείνη των μονών για λειτουργία με τη βέλτιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου και για την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Ειδικότερα για την περίπτωση της απόστασης 1.025D μεταξύ των δρομέων, οι επιδόσεις είναι κατάντι μεγαλύτερες λόγω της επιτάχυνσης της ροής στα μεταξύ τους διάκενα.

A/Γ	ρ	U	R (m)	$A(m^2)$	Ct	Ср	% diff
	(kg/m^3)	(m/sec)					Ср
1R_DTU	1.230	11	89	24871.94	0.827	0.497	-
2R_DTU_1.05	1.225	11	89	49743.88	0.833	0.505	+1.6%
4R_DTU_1.05	1.225	11	89	99487.76	0.839	0.515	+3.6%
2R_DTU_1.025	1.225	11	89	49743.88	0.833	0.506	+1.8%
4R_DTU_1.025	1.225	11	89	99487.76	0.839	0.516	+3.8%

Πίνακας 3.3 – Αποτελέσματα Απόδοσης Α/Γ DTU 10MW



Εικόνα 3.7 – Γεωμετρία δρομέα για την Α/Γ DTU 10MW



Εικόνα 3.8 – Γεωμετρία πτερυγίου για την Α/Γ DTU 10MW



Εικόνα 3.9 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ DTU 10MW μονού δρομέα



Εικόνα 3.10 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ DTU 10MW μονού δρομέα



Εικόνα 3.11 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ DTU 10MW μονού δρομέα



Εικόνα 3.12 – Αποτύπωση ομόρρου (δ) για την Α/Γ DTU 10MW μονού δρομέα



Εικόνα 3.13 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ DTU 10MW διπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.14 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ DTU 10MW διπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.15 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ DTU 10MW διπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.16 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ DTU 10MW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.17 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ DTU 10MW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.18 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ DTU 10MW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.19 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ DTU 10MW διπλού δρομέα με απόσταση 1.025R



Εικόνα 3.20 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ DTU 10MW διπλού δρομέα με απόσταση 1.025R



Εικόνα 3.21 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ DTU 10MW διπλού δρομέα με απόσταση 1.025R



Εικόνα 3.22 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ DTU 10MW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.025R


Εικόνα 3.23 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ DTU 10MW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.025R



Εικόνα 3.24 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ DTU 10MW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.025R

Παρακάτω παρατίθονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των σεναρίων αναφορικά με την παραγόμενη ώση του δρομέα στην εξέλιξη του χρόνου και της εφαπτομενικής δύναμης για κάθε δρομέα. Παρατηρείται ότι στο σύνολο των χρονικών βημάτων, η παραγόμενη ροπή καθώς και η εφαπτομενική δύναμη συγκλίνουν προς μια σταθερή τιμή λόγω του ότι το πεδίο ταχυτήτων ανάντι της ανεμογεννήτριας είναι καθαρά συμμετρικό χωρίς τυχούσες ασυμμετρίες να συμμετέχουν στο τελικό αποτέλεσμα.

Παράλληλα παρατίθονται και τα αποτελέσματα για την περίπτωση που οι δρομείς περιστρέφονται οι μεν δεξιόστροφα και οι δε αριστερόστροφα (Εικόνα 3.24).



Εικόνα 3.25 – Διαγράμματα Ώσης & Εφαπτομενικής Δύναμης στην εξέλιζη του χρόνου για την περίπτωση του μονού δρομέα



Εικόνα 3.26 – Διαγράμματα Εφαπτομενικής Δύναμης στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση των δύο δρομέων (1.05D), (α) με την ίδια φορά περιστροφής – (β) διαφορετική φορά περιστροφής



Εικόνα 3.27 – Διαγράμματα Εφαπτομενικής Δύναμης στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση των δύο δρομέων (1.05D), (α) με την ίδια φορά περιστροφής – (β) διαφορετική φορά περιστροφής



Εικόνα 3.28 – Διαγράμματα Ώσης & Εφαπτομενικής Δύναμης στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση του διπλού δρομέα (απόσταση 1.025D)



Εικόνα 3.29 – Διαγράμματα Ώσης & Εφαπτομενικής Δύναμης στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση του τετραπλού δρομέα (απόσταση 1.05D)



Εικόνα 3.30 – Διαγράμματα Ώσης & Εφαπτομενικής Δύναμης στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση του τετραπλού δρομέα (απόσταση 1.025D)

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ DTU 10MW

Στη συνέχεια εξετάζουμε τα αποτελέσματα του πεδίου ροής αξονικών ταχυτήτων που υπολογίζει ο κώδικας για κάθε σενάριο λειτουργίας. Συγκεριμένα στην εικόνα 3.31 απεικονίζεται το πεδίο ταχυτήτων του μονού δρομέα στο ύψος του πύργου (z =130m), ενώ στην εικόνα 3.32 απεικονίζεται το πεδίο του δρομέα με x=0.



Εικόνα 3.31 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση μονού δρομέα στο ύψους του πύργου z=130m



Εικόνα 3.32 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση μονού δρομέα για x=0m



Εικόνα 3.33– Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση μονού δρομέα στο ύψους του πύργου y=80m



Εικόνα 3.34– Διαγράμμα πεδίου αξονικών ταχυτήτων για την περίπτωση μονού δρομέα για απόσταση 0.1D και 1D



Εικόνα 3.35– Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.05D) στο ύψους του πύργου z=130m



Εικόνα 3.36 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα στο ύψους του πύργου y=0m



Εικόνα 3.37 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.05D) για απόσταση 0.1D και 1D

Στα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι η ροή επιταχύνεται στα διάκενα μεταξύ των δρομέων, στις περιοχές όπου παρουσιάζεται ανάμιξη των ομόρρων των πολλαπλών δρομέων, φαινόμενο που οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης τους. Για την περίπτωση της απόστασης των δρομέων στο 1.025D, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά στο πεδίο ταχυτήτων σε σχέση με την απόσταση 1.05D, παρόλα αυτά όπως αναφέρθηκε ήδη υπάρχει μια περαιτέρω μικρή αύξηση της απόδοσης.

Επίσης, αναμένεται το πεδίο ροής να αρχίζει να αποκαθίσταται νωρίτερα για την περίπτωση των δύο δρομέων σε σχέση με την περίπτωση του μονού δρομέα, έχοντας κατά νου την αναλογία διαμέτρων των δύο συστημάτων. Στην περίπτωση που οι δρομείς πλησιάζουν μεταξύ τους – 1.025D – η αποκατάσταση του πεδίου ροής θα καθυστερεί κατάντι.

Ο ομόρρους για την περίπτωση των ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων θα επηρεάζει το πεδίο ταχυτήτων σε μεγαλύτερη απόσταση που με συνέπεια σε ένα αιολικό πάρκο, η επόμενη ανεμογεννήτρια πολλαπλών δρομέων θα τοποθετηθεί σε μεγαλύτερη απόσταση από μία μονού δρομέα. Με δεδομένο ότι ο αριθμός ανεμογεννητριών μονού δρομέα σε ένα αιολικό πάρκο ισούται με τον αριθμό των αντίστοιχων δρομέων ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων, για την ίδια έκταση πάρκου περισσότερες σειρές ανεμογεννητριών θα μπορούν να τοποθετηθούν και παράλληλα να αυξηθεί η παραγόμενη ενέργεια [11]. Η σύγκριση αφορά καθαρά ενεργειακά μεγέθη και όχι τυχόν αυξημένα κόστη κατασκευής και εγκατάστασης.



Εικόνα 3.38–Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.025D) στο ύψους του πύργου z=130m



Εικόνα 3.39– Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.025D) στο ύψος (α) y=0m & (β) y=182m



Εικόνα 3.40-Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.025D) στο(a) x=0m, x=0.1D & (β) x=1D

Στις εικόνες 3.36 & 3.39, παρουσιάζονται οι υπολογισμοί του πεδίου ροής της ταχύτητας ως προς τη διάσταση y και αφορούν τα κέντρα των δύο δρομέων. Λόγω των χαρακτηριστικών του επιλυτή όπως περιγράφησαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι προβλέψεις αυτές αναφέρονται σε μέσες τιμές του πεδίου ταχυτήτων. Στην έλλειψη συνεκτικότητας στον επιλυτή οφείλεται η διατήρηση του ελλείμματος ταχύτητας μακριά από τους δρομείς.

Στις εικόνες 3.37 & 3.40 αποτυπώνεται το πεδίο ταχυτήτων στη θέση του δρομέα x=0 και κατάντι στις θέσεις x=0.1D & x=1D. Όπως παρατηρείται υπάρχει μιας επιτάχυνση της ροής από $1.025 - 1.045 \text{ U}_{ref}$, γεγονός που επιβεβαιώνει την αύξηση της ισχύος ενώ

και γύρω από την περιοχή του κέντρου του πύργου προβλέπονται υψηλές αξονικές ταχύτητες.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις των τεσσάρων δρομέων με αποστάσεις μεταξύ των 1.05D.



(β)

Εικόνα 3.40– Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση τετραπλού δρομέα (1.05D) στο(a) x=0.1D, x=1D & (β) x=0





Εικόνα 3.41–Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση τετραπλού δρομέα (1.05D) στο ύψος (α) y=0m & (β) y=85m & (γ) y=187m





(γ)

Εικόνα 3.42– Διαγράμμα πεδίου αξονικών ταχυτήτων για την περίπτωση τετραπλού δρομέα (1.05D) στο ύψους του πύργου (α) z=130m & (β) z=223.5m & (γ) z=317m

3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ Α/Γ NREL 444 kW

Για τη δεύτερη μοντελοποίηση, η ανεμογεννήτρια που θα μελετηθεί είναι η NREL – RWT Multi-Rotor blade 444kW [3]. Πρόκειται για μια τρίπτερη ελεγχόμενου βήματος μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτρια με διάμετρο δρομέα 40.55m και ύψος πύργου 227.06m. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής συνοψίζονται στον πίνακα 3.4 με τα γεωμετρικά και αεροδυναμικά στοιχεία να είναι γνωστά.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η καμπύλη ισχύος, τα διαγράμματα pitch – ταχύτητας ανέμου, ταχύτητας περιστροφής – ταχύτητας ανέμου όπως λογίζονται για τους υπολογισμούς του κώδικα, ενώ από το διάγραμμα Cp-λ αξιολογείται το εύρος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ.

IEC Class	IA		
T) envoc	Μεταβλητής ταχύτητας – μεταβλητού		
Ελεγχύς	βήματος		
Ονομαστική Ισχύς (kW)	444		
Διάμετρος Δρομέα (m)	40.55		
Ύψος πύργου (m)	227.06		
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)	11		
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	16.65		
(RPM)	40.03		
Δεδομένα Αεροτομών	NACA634xx series		

Πίνακας 3.4 – Δεδομένα Ανεμογεννήτριας NREL – RWT Multi-Rotor 444kW

U(m/s)	TSR	Power (kW)	Thrust (kN)	pitch (deg)	Ω (r/s)	
4	8,99	23,54	10,48	1,00	1,7755	
5	9,00	45,97	16,37	1,00	2,2194	
6	9,00	79,43	23,58	1,00	2,6633	
7	8,99	126,14	32,09	1,00	3,1071	
8	8,99	188,29	41,92	1,00	3,5510	
9	8,99	268,09	53,5	1,00	3,9949	
10	9,00	367,75	65,49	1,00	4,4388	
11	9,00	489,47	79,25	1,00	4,8827	
12	8,25	489,49	55,33	6,32	4,8827	
13	7,62	489,44	48,68	8,34	4,8827	

Πίνακας 3.5 – Δεδομένα Καμπύλης Ισχύος – pitch – ταχύτητας περιστροφής

Ανεμογεννήτριας NREL 444kW



Εικόνα 3.43 – Καμπύλης Ισχύος Α/Γ NREL 444kW



Εικόνα 3.44 – Ταχύτητα Δρομέα Α/Γ NREL 444kW



Εικόνα 3.45 – Γωνία pitch Α/Γ NREL 444kW

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 3.43, η καμπύλη ισγύος της ανεμογεννήτριας υπολογίζεται για όλο το εύρος λειτουργίας αυτής, ήτοι για ταχύτητες 4 – 13 m/s, ενώ η ταχύτητα ανέμου για την οποία επιτυγχάνεται για πρώτη φορά η ονομαστική ισχύς είναι 11 m/s. Στην εικόνα 3.45, γίνεται αντιληπτό ότι η γωνία pitch διατηρεί την ελάχιστη τιμή της, $\beta=1^{\circ}$, μέχρι την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Στην εικόνα 3.44 παρατηρείται ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα έχει ένα παράθυρο λειτουργίας 1.78 - 4.88 rad/s, ήτοι 16.96 - 46.65 RPM. Ο έλεγχος της μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής πραγματοποιείται στο πεδίο των ταχυτήτων ανέμου 4 – 11 m/s, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δρομέα – μέγιστος συντελεστής ισχύος C_p – γεγονός που αναδεικνύεται επίσης στο διάγραμμα της καμπύλης ισχύος όπου για μεγάλο μέρος των μερικών φορτίων η απόδοση είναι μέγιστη μέσω της παρακολούθησης του μέγιστου Cp . Για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής τα πτερύγια αυξάνουν τη γωνία pitch ούτως, ώστε να διατηρήσουν σταθερή παραγωγή ισχύος. Η προβλεπόμενη μέγιστη παραγόμενη ισχύ είναι κατάτι μεγαλύτερη της δοθείσας - 444 kW - μιας και στον υπολογισμό δεν έχουν υπεισέλθει οι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες του συστήματος. Η ηλεκτρομηγανική απόδοση των συστημάτων μετάδοσης ισχύος των σύγχρονων ανεμογεννητριών ανέρχεται στα 94-95%, γεγονός που δικαιολογεί το αεροδυναμικό αποτέλεσμα των 489.49kW.

Στην εικόνα 3.46 και 3.47, παρουσιάζονται οι αδιάστατες καμπύλες του συντελεστή ισχύος C_p και ώσης C_T συναρτήσει της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ. Παρατηρούμε ότι η γωνία pitch των 1° είναι η βέλτιστη για την περιοχή των μερικών φορτίων, όπου στόχος είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Συγκεκριμένα για ταχύτητες ανέμου 4 – 11 m/s ο δρομέας λειτουργεί με μέγιστο C_p με $\beta = 1^\circ$, ενώ

από εκεί και πάνω, μέσω της αύξησης του pitch, διατηρείται η σταθερή παραγωγή μέγιστης ισχύος. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι γενικότερη αύξηση της παραγόμενης ισχύος θα πρέπει να εστιαστεί στην περίπτωση για γωνία $\beta = 1^{\circ}$ γύρω από το $\lambda_{opt} = 9.0$ και για συντελεστή ισχύος $C_p = 0.468$.





Εικόνα 3.47 – Διάγραμμα $C_T - \lambda$ για την A/Γ NREL 444kW

Σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι, όπως και στην περίπτωση της A/Γ DTU 10MW, η αεροδυναμική μοντελοποίηση του πτερυγίου ξεκινά από R = 3.57m λόγω του ότι η ρίζα του είναι πολύ κοντά στο κυλιδρικό προφίλ και συνεπώς υποβάλλεται σε έντονα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής, γεγονός που είναι εκτός των δυνατοτήτων του υπολογιστικού κώδικα. Παρόλα αυτά, το φαινόμενο είναι τοπικό και δεν επηρεάζει την συνολική απόδοση του δρομέα.

3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Α/Γ NREL 444 kW

Τα σενάρια για τα οποία θα εξαχθούν αποτελέσματα είναι η περίπτωση της Α/Γ με δύο δρομείς (2_MRS_444kW), τέσσερις δρομείς (4_MRS_444kW) και με επτά δρομείς (7_MRS_444kW), ενώ θα εξεταστούν για απόσταση δρομέων 1.05D της διαμέτρου του. Οι συνθήκες μοντελοποίησης είναι οι ονομαστικές, με λ =9 και ταχύτητα ανέμου $U_{ref} = 11 \, m/sec$, ενώ τα χρονικά βήματα είναι $\Delta T = 900$, που αντιστοιχούν σε συνολική χρονική διάρκεια μοντελοποίησης 67.90 sec, ήτοι περίπου 53 περιστροφές.

Παρακάτω ακολουθούν οι απεικονίσεις της διάταξης και της γεωμετρίας των δρομέων, καθώς και των αντίστοιχων ομόρρων. Παρατηρείται ότι η διανομή των σημείων

στροβιλότητας αποτυπώνει την τάση για ανάμιξη του ομόρρων, καθώς την περιστροφή αυτών γύρω από την αμοιβαία αλληλεπίδραση του ομόρρου κάθε δρομέα.

Αρχικά, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του σεναρίου αναφοράς για την περίπτωση του μονού δρομέα βάσει του οποίου θα εξαχθούν συμπεράσματα ως προς απόδοση των πολλαπλών δρομέων. Η γεωμετρία του δρομέα αποτυπώνεται στην εικόνα 3.10, από την πλευρά του εισερχόμενου πεδίο ταχυτήτων για γωνία αζιμουθίου 0°, ενώ η φορά περιστροφής είναι δεξιόστροφη.

Η αποτύπωση του ομόρρου με σημεία στροβιλότητας από τον υπολογιστικό κώδικα παρουσιάζεται παρακάτω για κάθε σενάριο αριθμού δρομέων – μονός, διπλός, τετραπλός, επταπλός – με κατάλληλο χρωματικό κώδικα. Παρατηρείται ότι η αποτύπωση του ομόρρου κατάντι της Α/Γ υποδεικνύει την αναμενόμενη επέκταση του, καθώς και το ελικοειδές σχήμα του, καθώς και τη στροβιλότητα που παράγεται από τα πτερύγια.

Ακολουθούν τα διαγράμματα της μέσης ισχύος και της ώσης για κάθε σενάριο αριθμού δρομέων, με τη συνολική επιφάνεια σάρωσης των δρομέων να αθροίζεται κατά περίπτωση – 1A, 2A, 4A, 7A. Όπως είναι αναμενόμενο και ο συντελεστής ισχύος C_p , όσο και ο συντελεστής ώσης C_T για τις περιπτώσεις των πολλαπλών δρομέων παρουσιάζουν αύξηση. Συγκεκριμένα για την περίπτωση μονού δρομέα, το $C_p = 0.424$, ενώ το $C_T = 0.493$. Για την περίπτωση των δύο δρομέων με την απόσταση μεταξύ τους στα 1.05D, ο συντελεστής ισχύος εμφανίζει αύξηση 0.2% και διατήρηση του συντελεστή ώσης, για την περίπτωση των τεσσάρων δρομέων 0.5% και σταθερή τιμή του συντελεστή ώσης ενώ για την περίπτωση των επταπλών δρομέων ο συντελεστής ισχύος εμφανίζει αύξηση 0.5% και διατήρηση σταθερής τιμής του συντελεστή ώσης.

Συμπεραίνουμε από τα παραπάνω, ότι τα συμπεράσματα, όπως και στην περίπτωση της DTU 10MW είναι παρόμοια, δηλαδή η αλληλεπίδραση των πολλαπλών δρομέων καθώς και το γεγονός ότι μικρότεροι δρομείς ανταποκρίνονται ταχύτερα στις αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει τη συνολική απόδοση σε σχέση με εκείνη των μονών για λειτουργία με τη βέλτιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου και για την ονομαστική ταχύτητα ανέμου.

A/Γ	ρ	U	R (m)	$A(m^2)$	Ct	Ср	% diff
	(kg/m^3)	(m/sec)					Ср
1R_NREL	1.225	11	21	1384.74	0.493	0.424	-
2R_NREL_1.05	1.225	11	21	2769.48	0.493	0.425	+0.2%
4R_NREL_1.05	1.225	11	21	5537.60	0.493	0.426	+0.5%
7R_NREL_1.05	1.225	11	21	9690.8	0.494	0.426	+0.5%

Πίνακας 3.6 – Αποτελέσματα Απόδοσης Α/Γ NREL 444kW



Εικόνα 3.48 – Αποτύπωση ομόρρου (a) για την Α/Γ NREL 444kW μονού δρομέα



Εικόνα 3.49 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ NREL 444kW μονού δρομέα



Εικόνα 3.50 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ NREL 444kW μονού δρομέα



Εικόνα 3.51 – Γεωμετρία δρομέα για την Α/Γ NREL 444kW

'refine.inp' → 'bodygrd.inp' →



Εικόνα 3.52 – Γεωμετρία πτερυγίου για την Α/Γ NREL 444kW



Εικόνα 3.53 – Αποτύπωση ομόρρου (a) για την Α/Γ NREL 444kW διπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.54 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ NREL 444kW διπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.55 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ NREL 444kW διπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.56 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ NREL 444kW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.57 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ NREL 444kW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.58 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ NREL 444kW τετραπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.59 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ NREL 444kW επταπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.60 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ NREL 444kW επταπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.61 – Αποτύπωση ομόρρου (γ) για την Α/Γ NREL 444kW επταπλού δρομέα με απόσταση 1.05R



Εικόνα 3.62 – Αποτύπωση ομόρρου (α) για την Α/Γ NREL 444kW διπλού δρομέα με απόσταση 1.025R



Εικόνα 3.63 – Αποτύπωση ομόρρου (β) για την Α/Γ NREL 444kW διπλού δρομέα με απόσταση 1.025R

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των σεναρίων αναφορικά με την παραγόμενη ώση του δρομέα στην εξέλιξη του χρόνου και της εφαπτομενικής δύναμης για κάθε δρομέα. Παρατηρείται ότι στο σύνολο των χρονικών βημάτων, η παραγόμενη ροπή καθώς και η εφαπτομενική δύναμη συγκλίνουν προς μια σταθερή τιμή λόγω του ότι το πεδίο ταχυτήτων ανάντι της ανεμογεννήτριας είναι καθαρά συμμετρικό χωρίς τυχούσες ασυμμετρίες να συμμετέχουν στο τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 3.64 – Διαγράμματα Ώσης (β) & Εφαπτομενικής Δύναμης(α) στην εξέλιζη του χρόνου για την περίπτωση του μονού δρομέα



Εικόνα 3.65 – Διαγράμματα Ώσης & Εφαπτομενικής Δύναμης στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση του διπλού δρομέα



Εικόνα 3.66 – Διαγράμματα Ώσης (β) & Εφαπτομενικής Δύναμης (α) στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση του τετραπλού δρομέα



Εικόνα 3.67 – Διαγράμματα Ώσης (β) & Εφαπτομενικής Δύναμης (α) στην εξέλιξη του χρόνου για την περίπτωση του επταπλού δρομέα

3.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ NREL 444KW

Στη συνέχεια εξετάζονται τα αποτελέσματα του πεδίου ροής αξονικών ταχυτήτων που υπολογίζει ο κώδικας για κάθε σενάριο λειτουργίας. Συγκεριμένα στην εικόνα 3.68 απεικονίζεται το πεδίο ταχυτήτων του μονού δρομέα στο ύψος του πύργου (z =30m), ενώ στην εικόνα 3.69 απεικονίζεται το πεδίο του δρομέα με x=0, x=0.1D και x=1D.



Εικόνα 3.68 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση μονού δρομέα στο ύψους του πύργου z=30m



(α)



Εικόνα 3.69-Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση μονού δρομέα στο (a) x=0.1D, x=1D & (β) x=0



Εικόνα 3.70 – Διαγράμμα πεδίου αξονικών ταχυτήτων για την περίπτωση μονού δρομέα για y=0



Εικόνα 3.71 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.05D) στο ύψους του πύργου z=227m



(α)



Εικόνα 3.72– Διαγράμμα πεδίου αξονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.05D) στο (a) x=0.1D & (β) x=1D & (γ) x=0



(α)


Εικόνα 3.73 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση διπλού δρομέα (1.05D) για (α) y=0 & (β) y=22m & (γ) y=44.1m

Στις εικόνες 3.71 – 3.73 παρουσιάζεται το πεδίο αξονικών ταχυτήτων για την περίπτωση της ανεμογεννήτριας με δύο δρομείς και απόσταση μεταξύ τους ίση με 1.05D, ήτοι 44.1m. Τα αποτελέσματα αποτυπώνουν το πεδίο κατάντι της ανεμογεννήτριας σε απόσταση 0.1D και 1D, καθώς και κατά τον άξονα y στους δύο πύργους, 0m και 44.1m, και στο μεταξύ τους διάκενο, 22m. Όπως παρατηρείται στην εικόνα 3.71, το πεδίο των δύο δρομέων τείνει να ενωθεί, ενώ στο διάκενο επιταχύνεται η ροή, όπως και στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας DTU 10MW. Η επιτάχυνση αυτή αιτιολογεί την αύξηση στην απόδοση για την περίπτωση των πολλαπλών δρομέων, όπως και παραπάνω.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για την περίπτωση των τεσσάρων δρομέων με απόσταση μεταξύ τους ίσης με 1.05D, ήτοι 44.1 m. Στην εικόνα 3.75 απεικονίζεται το πεδίο αξονικών ταχυτήτων κατάντι της ανεμογγενήτριας και για αποστάσεις 0.1D και 1D ενώ στην εικόνα 3.74 το αντίστοιχο πεδίο στο κάθετο άξονα z, τέμνοντας το κέντρο κάθε

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Α/Γ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥΣ ΔΡΟΜΕΙΣ

ζεύγους δρομέων και την ενδιάμεση απόστασή τους, z=227.06m & z=271.06m αντίστοιχα. Στην εικόνα 3.75 απεικονίζεται το πεδίο στον εφαπτομενικό άξονα y στο κέντρο των δύο πύργων και στην ενδιάμεση απόστασή τους, 0m & 44.1m & 22m αντίστοιχα. Για τα αποτελέσματα, οι διαπιστώσεις που έγιναν για την περίπτωση των δύο δρομέων επαληθεύονται και στην περίπτωση των τεσσάρων δρομέων.



Εικόνα 3.74 – Διαγράμμα πεδίου αξονικών ταχυτήτων για την περίπτωση τετραπλού δρομέα (1.05D) στο ύψους του πύργου (α) z=227m και (β) z=249m



(α)



Εικόνα 3.75– Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση τετραπλού δρομέα (1.05D) στο (a) x=0.1D, x=0 & (γ) x=1D



(β)



(%)

Εικόνα 3.73 – Διαγράμμα πεδίου αζονικών ταχυτήτων για την περίπτωση τετραπλού δρομέα (1.05D) για (α) y=0 & (β) y=22m & (γ) y=44.1m

3.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αεροδυναμική ανάλυση δύο διαφορετικών αποδόσεων ανεμογεννητριών για μονούς και πολλαπλούς δρομείς χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό εργαλείο GENUVP που βασίζεται στη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας. Όλα τα υπολογιστικά σενάρια κατέδειξαν αύξηση στην απόδοση των ανεμογεννητριών πολλαπλών δρομέων σε σχέση με τη χρήση αντίστοιχου αριθμού ανεμογεννητριών μονού δρομέα – με μεγαλύτερη αύξηση 3.8% για την περίπτωση της DTU 10 MW τεσσάρων (4) δρομέων με απόσταση μεταξύ τους στα 1.025D. Αντίστοιχα μικρές αυξήσεις στην ώση παρατηρήθηκαν για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια.

Ο υπολογισμός του πεδίου των αξονικών ταχυτήτων κατέδειξε ότι η αύξηση που παρατηρήθηκε στα χαρακτηριστικά απόδοσης των ανεμογεννητριών οφείλεται στην επιτάχυνση της ροής, καθώς διέρχεται από τα διάκενα που δημιουργούνται ανάμεσα στου πολλαπλούς δρομείς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Jamieson P, The Prospects and Cost Benefits of Advanced Horizontal Axis Wind Turbine Design. Garrad Hassan Report, No 317/GR/02, February 1995
- [2] Smulders PT, Orbons S, Moes C. Aerodynamic Interaction between Two Wind Rotors set next to each other in One Plane. EWEC, October 1984 Hamburg
- [3] Katz Joseph, Plotkin Allen. Low-Speed Aerodynamics. Cambridge : s.n., 2010.
- [4] Voutsinas, S.G., 2006 "Vortex Methods in Aeronautics: How to make things work", Int. Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol 20, No 1.
- [5] C. Bak, F. Zahle, R. Bitche, T. Kim, A. Yde, L. C. Henriksen, A. Natarajan, M. H. Hansen (2013) 'Description of the DTU 10MW Reference Wind Turbine', DTU Wind Energy Report-I-0092
- [6] INNWIND: INNovative WIND conversion systems (10-20MW) for offshore applications, EUproject. Διαθέσιμο στο : <u>http://innwind.eu</u>.
- [7] Voutsinas SG. Vortex Methods in Aeronautics: How to make things work. Int.
 Journal of Computational Fluid Dynamics. 2006;20:3-18, doi: 10.1080/10618560600566059.
- [8] Pirrung, G. R., Riziotis, V. A., H. A. Madsen, H. A, Hansen, M. H., Kim, T., "Comparison of a Coupled Near and Far Wake Model With a Free Wake Vortex Code" Wind Energ. Sci., 2, 15-33, 2017.
- [9] Prospathopoulos, J.M., Riziotis, V.A., Schwarz, E., Barlas, T., Aparicio-Sanchez, M., Papadakis, G., Manolas, D., Pirrung, G., Lutz, T., (2020)
 "Simulation of oscillating trailing edge flaps on wind turbine blades using ranging fidelity tools," J Wind Energy https://doi.org/10.1002/we.2578
- [10] Riziotis, V.A., Αεροδυναμικά Πρότυπα Ανάλυσης Δρομέων ΑΓΟΑ
- [11] Laan V. M., Andersen S., Garcia N., Angelou N., Pirrung G., Ott S., Sjoholm M., Sorensen K., Neto J., Kelly M., Mikkelsen T., Larsen G., "Power curve and wake analyses of the Vestas multi – rotor demonstrator", Wind Energy Sci., 4, 251-271, 2019