



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Βέλτιστος Σχεδιασμός Συνιστωσών Ανεμογεννητριών

Υπό

Γεωργίου Ε. Τερζάκη

Επιβλέπων

Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής

Χανιά, Ιούλιος 2018

Copyright © Γεώργιος Τερζάκης, 2018.
All rights reserved.



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Βέλτιστος Σχεδιασμός Συνιστωσών Ανεμογεννητριών

Γεώργιος Ε. Τερζάκης

Εγκρίνεται από:

Ιωάννης Κ. Νικολός

Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής
και Διοίκησης

Ανάργυρος Ι. Δελής

Αναπληρωτής Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής
και Διοίκησης

Φώτιος Δ. Κανέλλος

Επίκουρος Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής
και Διοίκησης

Ημερομηνία Παρουσίασης: 09/07/2018

*“Στην μνήμη του παππού μου,
Γιώργου.”*

Χανιά, Ιούλιος 2018

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο, σε συνδυασμό με την εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων και την επιτακτική ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, έχουν προωθήσει την ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας με μικρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, όπως τα συστήματα ανεμογεννητριών για την εκμετάλλευση της αιολικής ισχύος. Όμως, παράγοντες όπως χαμηλές ταχύτητες και το σχετικά αραιό ενεργειακό περιεχόμενο του ανέμου, τείνουν γενικά να αυξάνουν το κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Ένα σύστημα, για την αποδοτική παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο, είναι η ανεμογεννήτρια υποβοηθούμενη από διαχύτη (Diffuser Augmented Wind Turbine), η οποία βασίζεται στην προσαρμογή ενός στατικού διαχύτη γύρω από τον δρομέα, με σκοπό την αύξηση της παροχής του αέρα που διέρχεται από τον στρόβιλο. Αυτό το φαινόμενο της προσδίδει την ικανότητα απορρόφησης μεγαλύτερου ποσοστού ενέργειας από τον άνεμο, σε σύγκριση με μία συμβατική ανεμογεννήτρια, με την ίδια διάμετρο ρότορα. Δύο από τα σημαντικότερα συστατικά μέρη ενός τέτοιου συστήματος είναι τα πτερύγια και ο διαχύτης, ο βέλτιστος σχεδιασμός των οποίων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση της εγκατάστασης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται η εφαρμογή μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων και ενός αξονοσυμμετρικού διαχύτη για μια ανεμογεννήτρια υποβοηθούμενη από διαχύτη, μέσω της χρήσης μιας παράλληλης και ασύγχρονης έκδοσης ενός Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου. Η ασύγχρονη προσέγγιση επιτρέπει την εξάλειψη του ορίου συγχρονισμού στο τέλος κάθε γενιάς, και έτσι, την επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ενώ επιπλέον επιταχύνεται επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης δύο Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), ενός Multi-Layer Perceptron και ενός Radial Basis Function network, τα οποία λειτουργούν ως υποκατάστατα μοντέλα (surrogate models). Η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας σχεδίασης πτερυγίου υλοποιείται μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου, βασισμένο στην θεωρία Blade Element Momentum, κατάλληλα τροποποιημένο για την αεροδυναμική ανάλυση δρομέων ανεμογεννητριών υποβοηθούμενων από διαχύτη. Από την άλλη, η αριθμητική προσομοίωση της τυρβώδους και ασυμπίεστης ροής γύρω από κάθε υποψήφιο διαχύτη επιτυγχάνεται μέσω ενός κώδικα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, που βασίζεται στις εξισώσεις Navier – Stokes, εκφρασμένες για 2D αξονοσυμμετρικά συστήματα αναφοράς. Η διακριτοποίηση του πεδίου ροής υλοποιείται μέσω 2D μη-δομημένων υπολογιστικών πλεγμάτων, η παραμετροποίηση των οποίων πραγματοποιείται μέσω της χρήσης της τεχνικής Free-Form Deformation (FFD). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας σε συγκεκριμένη σχεδίαση επιδεικνύει την εφαρμοσιμότητα και την αποτελεσματικότητά της.

Ευχαριστίες

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Κ. Νικολό για την καθοδήγηση και την συνεχή υποστήριξη που μου έδωσε για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Στάυρο Ν. Λελούδα για την αδιάκοπη προθυμία του να μου μεταφέρει όλες τις απαραίτητες γνώσεις για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να δώσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και κυρίως στους γονείς μου για την ενθάρρυνση και την υποστήριξη που μου έδωσαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη | V |
| Ευχαριστίες | VI |
| Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Αιολική Ενέργεια | 1 |
| 1.2 Εισαγωγή στις Ανεμογεννήτριες | 3 |
| 1.2.1 Αριθμός Πτερυγίων | 4 |
| 1.2.2 Επιλογή Κατάλληλης Τοποθεσίας | 4 |
| 1.3 Ανεμογεννήτρια Υποβοηθούμενη από Διαχύτη | 4 |
| 1.3.1 Βασικές Αρχές Λειτουργίας των DAWTs | 5 |
| 1.3.2 Πλεονεκτήματα των DAWTs | 9 |
| 1.3.3 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή | 9 |
| 1.4 Βέλτιστος Σχεδιασμός Πτερυγίων | 15 |
| 1.5 Σκοπός και Δομή Εργασίας | 15 |
| Κεφάλαιο 2 – The Blade Element Momentum Theory | 17 |
| 2.1 Περιγραφή Μοντέλου BEM | 17 |
| 2.2 Μονοδιάστατη Θεωρία της Ορμής | 19 |
| 2.3 Η Επίδραση του Διαχύτη στην 1Δ Θεωρία Ορμής | 21 |
| 2.4 Η Επίδραση του Διαχύτη στην BEM Θεωρία | 24 |
| 2.4 Το Μοντέλο Διόρθωσης του Prandtl | 27 |
| 2.5 Το Μοντέλο Διόρθωσης του Glauert | 28 |
| Κεφάλαιο 3 – Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος | 30 |
| 3.1 Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους | 31 |
| 3.2 Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος | 31 |
| 3.3 Υποκατάστατα Μοντέλα (Surrogate models) | 34 |
| 3.4 Δ.Ε. Αλγόριθμος Υποβοηθούμενος με Υποκατάστατα Μοντέλα | 35 |
| 3.4.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (TND) | 35 |
| 3.4.2 Χρήση Υποκατάστατων Μοντέλων | 35 |
| 3.5 Παράλληλη Υλοποίηση | 36 |
| 3.6 Ασύγχρονος Παράλληλος Δ.Ε. Αλγόριθμος | 37 |
| Κεφάλαιο 4 – Σχεδιασμός Διαχύτη | 39 |
| 4.1 Αρχική Γεωμετρία | 39 |
| 4.2 Προσομοίωση Ροής | 41 |
| 4.3 Παραμετροποίηση Υπολογιστικού Πλέγματος | 42 |
| 4.4 Παράμετροι της Διαδικασίας Βελτιστοποίησης | 44 |
| 4.5 Αντικειμενική Συνάρτηση και Περιορισμοί | 45 |
| 4.6 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Διαχύτη | 46 |
| Κεφάλαιο 5 – Σχεδιασμός Πτερυγίων | 49 |

| | |
|---|----|
| 5.1 Γεωμετρία Αεροτομής Πτερυγίου..... | 49 |
| 5.2 Παραμετροποίηση, Αντικειμενική Συνάρτηση και Περιορισμοί..... | 50 |
| 5.3 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης..... | 51 |
| Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα | 55 |
| Βιβλιογραφία..... | 57 |
| Ελληνική βιβλιογραφία | 57 |
| Διεθνής βιβλιογραφία..... | 57 |
| Διαδικτυακή Βιβλιογραφία..... | 62 |

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Αιολική Ενέργεια

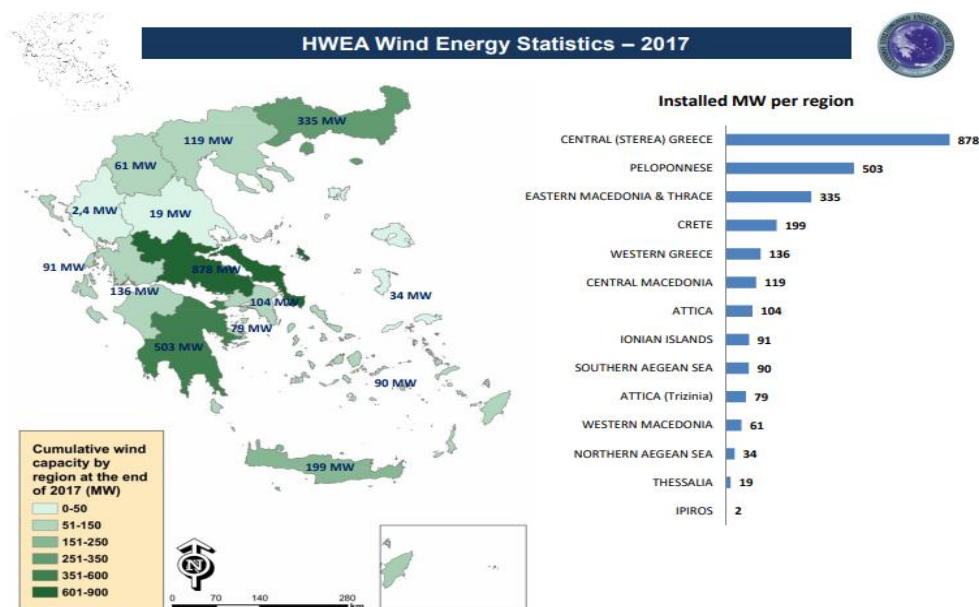
Τις τελευταίες δεκαετίες, η αύξηση του πληθυσμού, η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων και η οικονομική άνθηση σε πολλές χώρες του πλανήτη έχουν οδηγήσει σε ραγδαία κλιμακώση των ενεργειακών απαιτήσεων σε παγκόσμιο επίπεδο. Μέχρι πρότινος, η κάλυψη των συγκεκριμένων ενεργειακών αναγκών γίνονταν, σχεδόν αποκλειστικά, μέσω της εκμετάλλευσης των ορυκτών καυσίμων, δηλαδή αποθεμάτων άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα οποία σχηματίστηκαν στο υπέδαφος της γης από την αποικοδόμηση ζωικής και φυτικής ύλης σε διάστημα πολλών γεωλογικών αιώνων. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, καθώς και η ζωτικής σημασίας ανάγκη για τη δραστική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, έχουν καταστήσει απαραίτητη την αναθεώρηση των παραδοσιακών αυτών ενεργειακών πρακτικών και έχουν προωθήσει την ανάπτυξη και εφαρμογή εναλλακτικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, με σημαντικά χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα στο περιβάλλον.

Σε αυτό το πλαίσιο, η αιολική ενέργεια αξιοποιείται ολοένα και περισσότερο στις μέρες μας καθώς είναι ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον. Η εκμετάλλευσή της άρχισε με συστηματικό τρόπο στις αρχές της δεκαετίας του '80, ως συνέπεια της πρώτης πετρελαϊκής κρίσης, ενώ σήμερα θεωρείται ως μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες βιομηχανίες και ο σημαντικότερος προμηθευτής ανανεώσιμης ενέργειας [Hjo15]. Η αιολική ενέργεια (wind power) δημιουργείται από τη διαρκή κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα, εξαιτίας μιας σειράς παραμέτρων, όπως [Bat13]:

- *Η ηλιακή ακτινοβολία*
- *Η ανομοιογένεια του ανάγλυφου του εδάφους*
- *Η περιστροφική κίνηση της γης γύρω από τον άξονά της.*

Η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί μετακίνηση μεγάλων αερίων μαζών από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργεί δηλαδή τους ανέμους. Ο άνεμος είναι δυνατό να περιστρέφει ανεμογεννήτριες, να προωθεί ιστιοφόρα πλοία ή να κινεί αντικείμενα, μπορεί δηλαδή η ενέργεια του να καταστεί εκμεταλλεύσιμη. Η πηγή αυτής της ενέργειας είναι πρακτικά ανεξάντλητη. Εάν υποθετικά υπήρχε η δυνατότητα με τη σημερινή τεχνολογία να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τον άνεμο θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια της ανθρωπότητας στο ίδιο χρονικό διάστημα [Zor14].

Οι ταχύτητες του ανέμου διαφέρουν βάση του ανάγλυφου μιας περιοχής και ποικίλλουν σημαντικά με την εποχή και την ημέρα. Η καταλληλότητα μίας περιοχής, για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, κρίνεται βάση της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου (μετρούμενη σε ύψος 10 m από το έδαφος), η οποία και θα πρέπει γενικά να είναι μεγαλύτερη από 4 m/s για την αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο παρακάτω Σχήμα 1.1, απεικονίζεται η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα ανά περιφέρεια, η οποία στο τέλος του 2017 έφτασε τα 2.652 MW [HWEA].

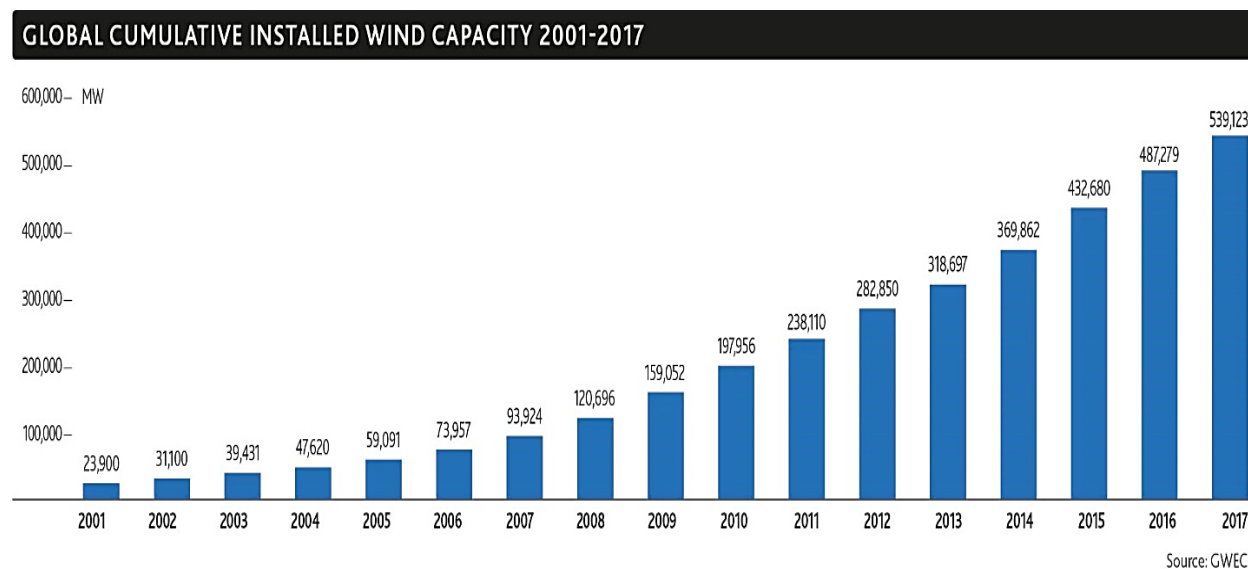


Σχήμα 1.1: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα ανά περιφέρεια [HWEA].

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η Δανία έθεσε νέο ρεκόρ αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο τέλος του 2017, καλύπτοντας το 43,6% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο και ξεπέρασε έτσι το προηγούμενο εθνικό ρεκόρ του 42%, το οποίο είχε σημειωθεί στα τέλη του 2015 [DWIA]. Ήδη, η Κίνα παράγει περισσότερη ενέργεια από αιολικά πάρκα παρά από πυρηνικά εργοστάσια, ενώ στοχεύει, ως το 2020, να παράγει 200 GW μόνο από την αιολική ενέργεια - ηλεκτρική ισχύς η οποία είναι ικανή για να ικανοποιήσει τις ετήσιες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας μιας χώρας όπως η Βραζιλία. Επιπλέον, σύμφωνα με μετρήσεις που διεξήχθησαν στα τέλη του 2016, η χρήση της αιολικής ενέργειας είχε, μέχρι τότε, συμβάλει στην αποφυγή περίπου 637 εκατομμυρίων τόνων εκπομπών CO₂ (διοξειδίου του άνθρακα), ενώ ο συγκεκριμένος τομέας είχε επίσης δημιουργήσει πάνω από 1.155.000 νέες θέσεις εργασίας [GWEC].

Συνεπώς, βάση των παραπάνω στοιχείων, είναι φανερό ότι στις μέρες μας η βιομηχανία παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο έχει αποκτήσει ένα σημαντικό μερίδιο στην παγκόσμια αγορά ενέργειας, το οποίο αυξάνεται συνεχώς και με ταχύτατους ρυθμούς. Το γεγονός αυτό

αναπαρίσταται στο παρακάτω Σχήμα 1.2, όπου παρουσιάζεται η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά έτος, για το διάστημα 2001 – 2017, η οποία την τελευταία δεκαετία έχει σχεδόν εξαπλασιαστεί.



Σχήμα 1.2: Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά έτος [GWEC].

1.2 Εισαγωγή στις Ανεμογεννήτριες

Η συνεχόμενη αύξηση της παγκόσμιας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανάπτυξη και εγκατάσταση αποδοτικών συστημάτων ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια και στην συνέχεια την διοχετεύουν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Κατά βάση, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ισχύος μεγάλης κλίμακας εγκαθίστανται σε αιολικά πάρκα, τα οποία βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές και μπορεί να είναι είτε επίγεια (onshore) είτε υπεράκτια (offshore). Ωστόσο, η πλειοψηφία των αιολικών πάρκων είναι επίγεια, λόγω του μεγάλου κόστους κατασκευής ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

Τα κύρια συστατικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι ο δρομέας (rotor), τα πτερύγια, το σύστημα μετάδοσης κίνησης (κύριος άξονας, έδρανα στήριξης, κιβώτιο ταχυτήτων), η ηλεκτρική γεννήτρια, ο πύργος στήριξης στον οποίο είναι τοποθετημένος ο δρομέας, το σύστημα πέδησης – δισκόφρενο (η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να σταματά να λειτουργεί σε μεγάλες ταχύτητες του ανέμου) και το σύστημα ελέγχου, που συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας [Ανδ08]. Επιπλέον, με κριτήριο τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής του δρομέα/ρότορα, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines - HAWTs), εάν ο άξονας περιστροφής του ρότορα είναι παράλληλος προς το έδαφος, είτε ως κατακορύφου

άξονα (Vertical Axis Wind Turbines - VAWTs), εάν ο άξονας περιστροφής του ρότορα είναι κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου.

1.2.1 Αριθμός Πτερυγίων

Ο αριθμός των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την αεροδυναμική τους απόδοση, το κόστος κατασκευής τους και τα επιτρεπόμενα επίπεδα θορύβου [Στρ13]. Οι ανεμογεννήτριες με πολλά ή φαρδιά πτερύγια, δηλαδή συστήματα με έναν πολύ συμπαγή δρομέα, υπόκεινται σε πολύ μεγάλες δυνάμεις όταν οι ταχύτητες του ανέμου είναι πολύ υψηλές, ενώ από την άλλη η απόδοση τους αυξάνεται με φθίνοντα ρυθμό. Για παράδειγμα, μία ανεμογεννήτρια δύο πτερυγίων έχει 6% μεγαλύτερη απόδοση από μία ανεμογεννήτρια ενός πτερυγίου, ενώ μόλις 3% λιγότερη από μία ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων [Στρ13]. Η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των πτερυγίων, οδηγεί σε ελάχιστη αύξηση της απόδοσης και ταυτόχρονα σε μείωση της αντοχής, λόγω της απαραίτητης μείωσης του πάχους τους. Ακόμα, η αύξηση του αριθμού των πτερυγίων προκαλεί αύξηση του κόστους κατασκευής, λόγω υλικών και κόστους κατεργασίας.

1.2.2 Επιλογή Κατάλληλης Τοποθεσίας

Άλλοι δύο εξίσου σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του στροβίλου είναι η ταχύτητα και η πυκνότητα του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται ως επί των πλείστον σε αιολικά πάρκα, τα οποία είναι τοποθετημένα σε απομακρυσμένες περιοχές, για λόγους αισθητικής και ηχορύπανσης, αλλά κυρίως για να μην υπάρχει παρεμπόδιση του ανέμου από κτήρια και εγκαταστάσεις. Αν και σε μεγάλα υψόμετρα ο άνεμος επηρεάζεται ελάχιστα από την επιφάνεια της γης, δεν συμβαίνει το ίδιο στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι ταχύτητες του ανέμου επηρεάζονται σημαντικά από την τριβή στην επιφάνεια της γης. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας της γης, τόσο πιο έντονη είναι η επιβράδυνση του ανέμου. Για παράδειγμα, τα δάση και οι μεγάλες πόλεις επιβραδύνουν σημαντικά τον άνεμο, ενώ κοντά στους αεροδιαδρόμους, λόγω των επίπεδων και ομαλών επιφανειών, η επιβράδυνση αυτή είναι ελάχιστη. Από την άλλη, οι επιφάνειες των υδάτων έχουν ακόμα μικρότερη επίδραση στην ομαλή ροή του ανέμου. Η βέλτιστη επιλογή τοποθεσίας εξαρτάται επίσης και από την πυκνότητα του αέρα, η οποία στην επιφάνεια της θάλασσας είναι $1,23 \text{ kg/m}^3$. Ωστόσο, με την αύξηση του υψομέτρου, η πυκνότητα του αέρα μειώνεται [DWIA].

1.3 Ανεμογεννήτρια Υποβοηθούμενη από Διαχύτη

Η αιολική ενέργεια είναι πρακτικά ανεξάντλητη, ωστόσο οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου που επικρατούν σε πολλές περιοχές, η απρόβλεπτη φύση του ανέμου και το σχετικά μικρό ενεργειακό του περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, είναι παράγοντες οι οποίοι

τείνουν να αυξάνουν το κόστος παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η ανάπτυξη καινοτόμων συσκευών εκμετάλλευσης του ανέμου, οι οποίες να είναι ικανές να παράγουν ενέργεια σε περιοχές όπου οι συμβατικές ανεμογεννήτριες δεν είναι εφικτό να εγκατασταθούν ή να λειτουργήσουν με αποδοτικό τρόπο, κυρίως λόγω μεγέθους και μικρών ταχυτήτων αέρα αντίστοιχα [Sho16].

Ένα τέτοιο σύστημα για την αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο είναι η ανεμογεννήτρια υποβοηθούμενη από διαχύτη (Diffuser Augmented Wind Turbine - DAWT), η οποία προορίζεται κυρίως για άμεση παραγωγή, μικρής κλίμακας, ενέργειας σε περιοχές όπου επικρατούν σχετικά μικρές ταχύτητες ανέμων, όπως ένα αστικό περιβάλλον. Η συγκεκριμένη διάταξη βασίζεται στην προσαρμογή ενός στατικού διαχύτη (diffuser ή shroud) γύρω από το δρομέα της ανεμογεννήτριας, με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας και της παροχής του αέρα που διέρχεται μέσα από τον στρόβιλο. Με αυτόν τον τρόπο, μία DAWT είναι ικανή να επιτύχει συντελεστές ισχύος μεγαλύτερους από το όριο του Betz [Bet13] (μέγιστος θεωρητικός συντελεστής ισχύος για μία συμβατική ανεμογεννήτρια χωρίς διαχύτη), και να απορροφήσει μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας από τον άνεμο, συγκριτικά με μία συμβατική ανεμογεννήτρια με την ίδια διάμετρο ρότορα [Lil56, Igr76, Gil78, Han00]. Δύο ενδεικτικές διατάξεις DAWTs παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3.

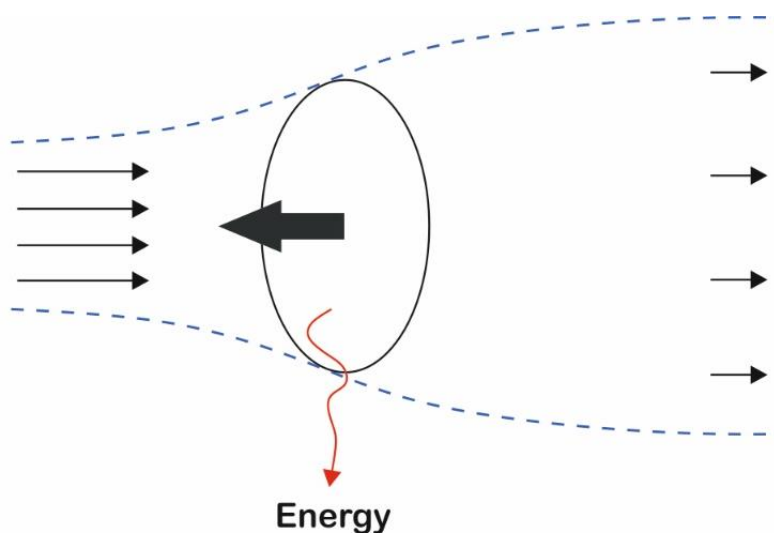


Σχήμα 1.3: Συστήματα ανεμογεννητριών υποβοηθούμενων από διαχύτη: Donqui Urban Windmills DAWT [Dor11] (αριστερά) και FloDesign-Ogin Prototype [FloD] (δεξιά).

1.3.1 Βασικές Αρχές Λειτουργίας των DAWTs

Η βασική αρχή για την εξαγωγή ενέργειας από τον άνεμο, προϋποθέτει την άσκηση μίας δύναμης στην κύρια ροή με κατεύθυνση αντίθετη από την κατεύθυνση της ροής (Σχήμα 1.4). Σε μία ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, η συγκεκριμένη δύναμη ασκείται στην κύρια ροή

λόγω των περιστρεφόμενων πτερυγίων, τα οποία δημιουργούν μια πτώση πίεσης μεταξύ των θέσεων ακριβώς πριν και μετά από το δρομέα. Έτσι, η εξαγόμενη ισχύς από το σύστημα προκύπτει σαν το γινόμενο της πτώσης πίεσης και της παροχής του αέρα που διέρχεται από τον δρομέα. Συνεπώς, φαντάζει λογικό πως η αύξηση της δύναμης που ασκείται στη ροή του ανέμου, η οποία συνεπάγεται αύξηση της πτώσης πίεσης, θα οδηγούσε σε αύξηση της ισχύος που εξάγεται από τον άνεμο. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, διότι η αύξηση της δύναμης οδηγεί επίσης και σε πτώση της παροχής του αέρα [Han00]. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται της ύπαρξης μιας μέγιστης θεωρητικής τιμής του συντελεστή ισχύος (δηλαδή του λόγου μεταξύ της εξαγόμενης και της διαθέσιμης ισχύος) μιας συμβατικής ανεμογεννήτριας, η οποία είναι γνωστή ως το όριο του Betz [Bet13] και είναι ίση με **16/27**.



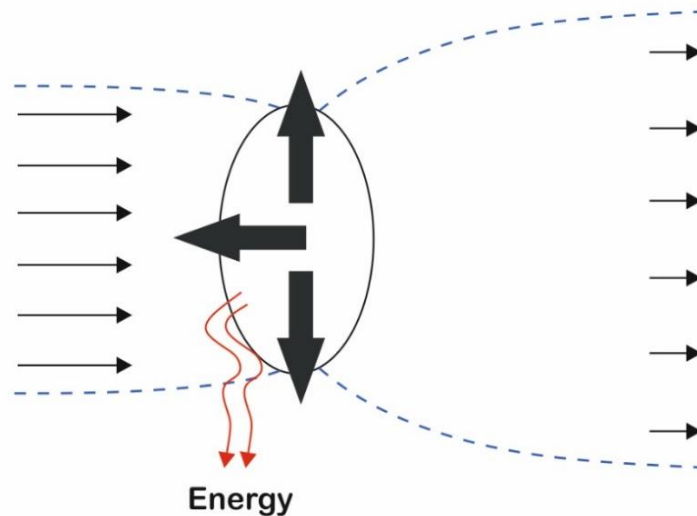
Σχήμα 1.4: Συμβατική διαδικασία εξαγωγής ενέργειας [Hol81].

Ωστόσο, εάν ήταν δυνατόν να αυξηθεί η παροχή του αέρα που διέρχεται από το δρομέα, το όριο του Betz θα μπορούσε να ξεπεραστεί. Σύμφωνα με τους Dick [Dic86] και van Holten [Hol81] υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές ή μηχανισμοί για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Η πρώτη τεχνική προϋποθέτει την άσκηση δύναμης στην κύρια ροή του αέρα κάθετα προς την διεύθυνσή της (Σχήμα 1.5), ενώ σύμφωνα με την δεύτερη, η αύξηση στην παροχή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της κατάλληλης μίξης του απορρεύματος του δρομέα και της εξωτερικής αδιατάρακτης ροής, κατάντη του δρομέα, σε υποατμοσφαιρική πίεση (Σχήμα 1.6).

Μηχανισμός Άσκησης Δύναμης

Θεωρητικά όταν μία συμβατική ανεμογεννήτρια λειτουργεί στο όριο του Betz, η θεωρία της Ορμής (Momentum Theory) υποδεικνύει ότι η ταχύτητα του ανέμου στο δρομέα θα έχει επιβραδυνθεί κατά 2/3 σε σχέση με την ταχύτητα της επ' άπειρον ροής. Αυτή η επιβράδυνση

της ροής, οδηγεί στην αύξηση της πίεσης πριν από το δρομέα, γεγονός το οποίο, με την σειρά του, προκαλεί την εκτροπή ενός ποσοστού της κύριας ροής, προς τα πλάγια και γύρω από το δρομέα. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας (Εξίσωση Συνέχειας) και δεδομένης της ασυμπίεστης φύσης της ροής, προκύπτει ότι μια συμβατική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, όταν λειτουργεί στο όριο του Betz, μπορεί να συλλέξει την ενέργεια που περιέχεται σε ένα σωλήνα ροής, ο οποίος έχει εμβαδόν εγκάρσιας διατομής ίσο με τα $2/3$ του εμβαδού της επιφάνειας που σαρώνεται από το δρομέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.5: Εξαγωγή ενέργειας υποβοηθούμενη από διαχύτη [Hol81].

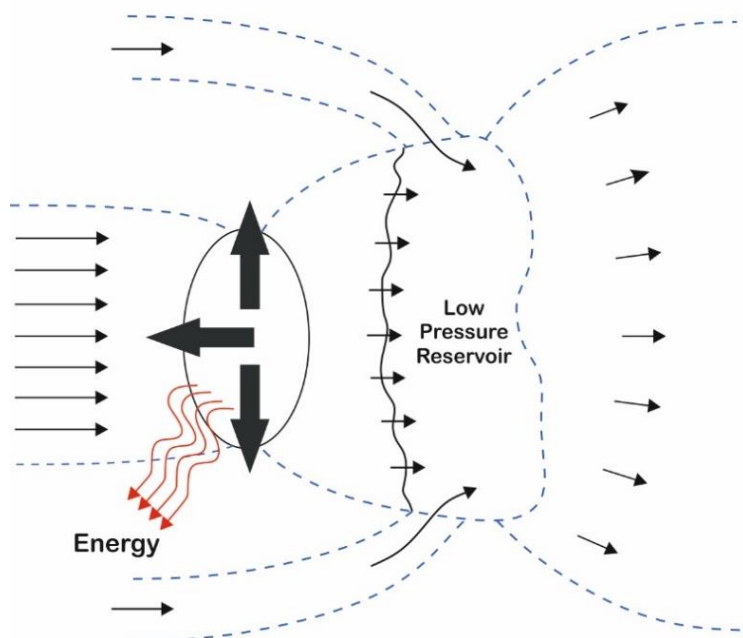
Ένας μηχανισμός για την αύξηση του εμβαδού διατομής του εν λόγω σωλήνα ροής, υποδεικνύει την άσκηση μιας δύναμης κάθετα στην διεύθυνση της κύριας ροής [Han08, Bus07]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της τοποθέτησης ενός δακτυλιοειδούς πτερυγίου γύρω από το δρομέα, με την μεριά της υποπίεσης (suction side) προς την πλήμνη. Αυτό προφανώς έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση μιας δύναμης στην κύρια ροή, κάθετα προς τη διεύθυνση της. Όμως σύμφωνα με τον 3^ο νόμο του Νεύτωνα, είναι αναμενόμενο ότι και η κύρια ροή θα ασκήσει μια δύναμη αντίδρασης στη δακτυλιοειδή διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Ωστόσο, αυτή η δύναμη αντίδρασης μπορεί να ασκηθεί από την ροή, μόνο εάν αυξηθεί η παροχή αέρα που διέρχεται μέσα από την δακτυλιοειδή διάταξη (shroud). Έτσι, αυτή η δύναμη που ασκεί η ροή στο διαχύτη, έχει τελικά ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση του εμβαδού διατομής του σωλήνα ροής που διέρχεται από το δρομέα.

Μηχανισμός Μίξης

Ο δεύτερος μηχανισμός, για την αύξηση της ισχύος που εξάγεται από τον άνεμο, κάνει χρήση φαινομένων μίξης. Όταν ένας δρομέας εξάγει ενέργεια από την ροή, θα προκαλέσει, όπως και κάθε άλλο αντικείμενο μέσα σε μια ροή, ένα απόρρευμα. Το απόρρευμα πίσω από

το δρομέα έχει χαμηλότερη πίεση και ταχύτητα σε σχέση με την επ' άπειρον ροή. Αν και μία περιοχή χαμηλής πίεσης κατάντη του δρομέα είναι γενικά επιθυμητή, οι χαμηλές ταχύτητες στην περιοχή του απορρεύματος δεν είναι. Όπως σημειώθηκε από τον van Bussel [Bus07] και τον Igra [Igr81], η αύξηση στην ισχύ που επιτυγχάνεται από μια ανεμογεννήτρια υποβοηθούμενη από διαχύτη, είναι απόρροια της υποατμοσφαιρικής πίεσης στην έξοδο του διαχύτη. Έτσι, ιδανικά είναι επιθυμητή η διατήρηση μίας κατάστασης όπου η πίεση κατάντη του δρομέα θα είναι χαμηλή, αλλά η παροχή μάζας θα παραμένει υψηλή.

Η υψηλή παροχή μάζας μπορεί να επιτευχθεί είτε με την επέκταση του απορρεύματος [Lil56, Wil74], κάτι το οποίο στην πραγματικότητα συμβαίνει σε μία συμβατική ανεμογεννήτρια, είτε μέσω της αύξησης της ταχύτητας της ροής κατάντη του δρομέα. Η λογική πίσω από την συγκεκριμένη τεχνική μίξης είναι η αποκατάσταση του ελλείματος ορμής κατάντη του δρομέα, αναμειγνύοντας το απόρρευμα με την επ' άπειρον ροή. Έτσι η αδιατάρακτη ροή θα παράσχει επιπλέον ορμή στο απόρρευμα του δρομέα, για να ανακτήσει το έλλειμα ταχύτητας που προκλήθηκε από την διαδικασία εξαγωγής ενέργειας. Από μια άλλη οπτική, η συγκεκριμένη μίξη των δύο ροών οδηγεί σε μεγαλύτερη επέκταση του απορρεύματος, και συνεπώς μεγαλύτερου όγκου απορρεύματος. Όμως, ο μεγαλύτερος όγκος απορρεύματος για την ίδια παροχή μάζας διαμέσω του διαχύτη θα προκαλέσει χαμηλότερη πίεση στην έξοδο του διαχύτη και συνεπώς αυξημένη ικανότητα αναρρόφησης.



Σχήμα 1.6: Εξαγωγή ενέργειας υποβοηθούμενη από διαχύτη, σε συνδυασμό με την μίξη του απορρεύματος και της επ' άπειρον ροής [Hol81].

1.3.2 Πλεονεκτήματα των DAWTs

Η μέγιστη θεωρητική ισχύς του ανέμου, η οποία μπορεί να καταστεί εκμεταλλεύσιμη από ένα σύστημα ανεμογεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), A είναι το εμβαδόν του ρότορα (m^2) και V η ταχύτητα του ανέμου (m/s). Συνεπώς, είναι φανερό ότι η εξαγόμενη ισχύς είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του ανέμου που προσεγγίζει τα πτερύγια και έτσι, μια μικρή αύξηση της ταχύτητας αυτής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Για παράδειγμα, διπλασιάζοντας την ταχύτητα του αέρα η παραγόμενη ενέργεια θα αυξηθεί κατά 8 φορές. Αν και μια συμβατική ανεμογεννήτρια εκμεταλλεύεται την υπάρχουσα ταχύτητα αέρα για να παράγει ηλεκτρισμό, μία DAWT, λόγω της παρουσίας του διαχύτη πετυχαίνει μεγαλύτερη ταχύτητα εισερχόμενου αέρα, κάτι το οποίο αυξάνει σημαντικά την παραγόμενη ισχύ. Παρακάτω αναλύονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα των DAWTs σε σύγκριση με μια συμβατική ανεμογεννήτρια χωρίς διαχύτη [Phi03]:

- Μπορούν να έχουν πτερύγια μικρότερου μήκους και ρότορες μικρότερης διαμέτρου αφού μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ, μέσω της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου.
- Η παραγωγή ενέργειας μπορεί να ξεκινήσει από χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου (cut-in speeds), και έτσι να παράγουν ενέργεια για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
- Χαμηλότερα επίπεδα στροβιλισμού στο επίπεδο του ρότορα.
- Αυξημένες στροφές του ρότορα λόγω μικρότερου μήκους πτερυγίων, με αποτέλεσμα τη μείωση των σχέσεων του κιβωτίου ταχυτήτων.
- Μειωμένες απώλειες στα ακροπτερύγια (tip-loss), λόγω της παρουσίας του διαχύτη.

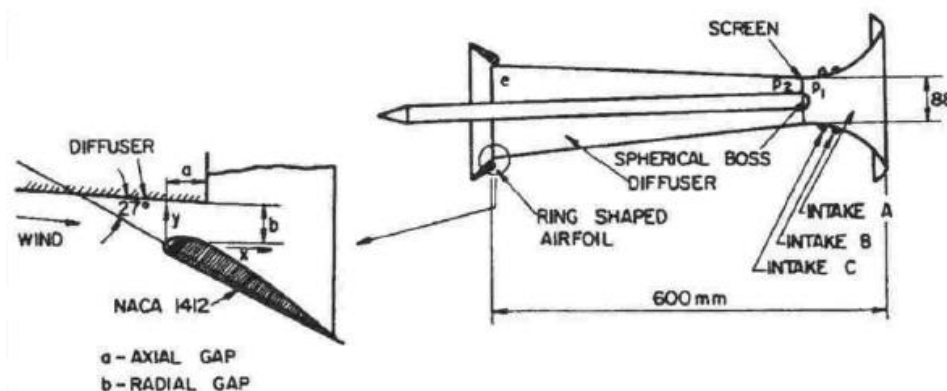
1.3.3 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Αν και μία ανεμογεννήτρια υποβοηθούμενη από διαχύτη έχει την ικανότητα να πετύχει έναν συντελεστή ισχύος μεγαλύτερο από μία συμβατική ανεμογεννήτρια, η συγκεκριμένη ιδέα είχε εγκαταληφθεί για μεγάλο διάστημα, λόγω των αποθαρρυντικών συμπερασμάτων μιας έρευνας που διεξήγαγε ο Alexander Betz την δεκαετία του 1920, η οποία συνέστησε ότι το ενδεχόμενο κέρδος παραγωγής ενέργειας ήταν μικρότερο από το κόστος κατασκευής του διαχύτη την εποχή εκείνη.

Ωστόσο, στην δεκαετία του 1950 το ερευνητικό ενδιαφέρον για την συγκεκριμένη ιδέα επανήλθε στο προσκήνιο, καθώς οι Lilley και Rainbird [Lil56] εφάρμοσαν τη μονοδιάστατη (1Δ) θεωρία ορμής, για να διεξαγάγουν μια θεωρητική έρευνα σχετικά με τις δυνατότητες των DAWTs. Σύμφωνα με τα συμπεράσματά τους, μια DAWT ήταν ικανή να επιτύχει έναν συντελεστή ισχύος τουλάχιστον 1,65 φορές μεγαλύτερο από το όριο του Betz [Bet13], λόγω των μειωμένων απωλειών των ακροπτερυγίων (tip loss) και της αυξημένης παροχής μάζας που διέρχεται από τον δρομέα, τα οποία οφείλονται κυρίως στην μικρή απόσταση των ακροπτερυγίων από το εσωτερικό τοίχωμα του διαχύτη και στην ελεγχόμενη διάχυση του απορρεύματος του ρότορα (wake) αντίστοιχα.

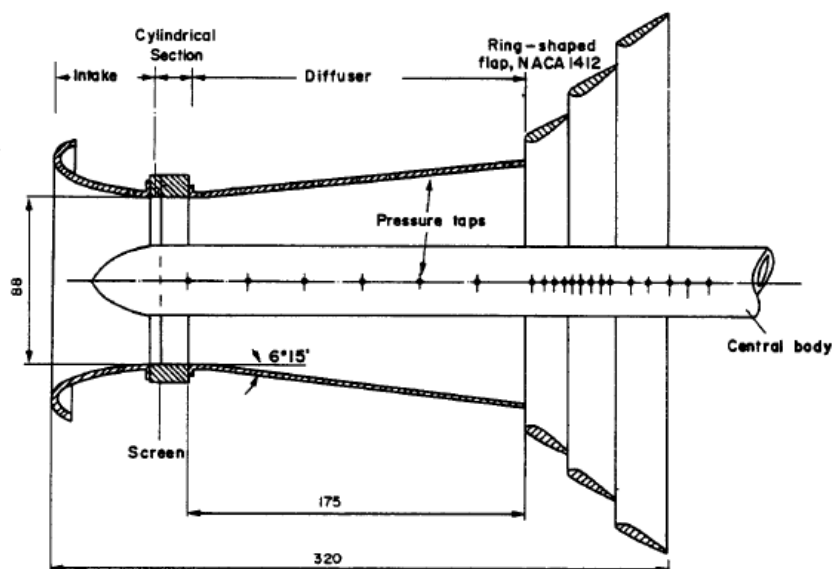
Στην συνέχεια, αυτά τα ενθαρρυντικά συμπεράσματα ήταν το έναυσμα για την έναρξη μιας περιόδου σημαντικών πειραματικών και θεωρητικών ερευνών, οι οποίες διεξήχθησαν σχεδόν ταυτόχρονα στο Ben-Gurion University of the Negev και στην Grumman Aerospace Corporation, στοχεύοντας στην επίτευξη ενός εμπορικά βιώσιμου σχεδιασμού.

Ο Kogan μαζί με τους συνεργάτες του [Kog62, Kog63a, Kog63b] ήταν αυτοί που πρώτοι διενήργησαν μια σειρά πειραματικών ερευνών, για την εξέταση της απόδοσης ενός διαχύτη πρώτης γενιάς με ευθεία τοιχώματα, ο οποίος είχε σχεδιαστεί με βάση την 1Δ θεωρία ορμής, ενώ διέθετε επίσης μια εισαγωγή σε σχήμα καμπάνας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος σχεδιασμός χαρακτηρίστηκε ως εμπορικά μη βιώσιμος, εξαιτίας του μεγάλου λόγου μήκους – διαμέτρου (length-to-diameter ratio) του διαχύτη, παρά της ικανότητας του να φτάνει σε συντελεστές ισχύος περίπου 3,5 φορές πάνω από το όριο Betz. Τελικά, ανεξαρτήτως της εμπορικής αποτυχίας του συγκεκριμένου σχεδιασμού, μέσω της έρευνας του Kogan [Kog62, Kog63a, Kog63b] εξήχθησαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα και συμβουλές σχεδιασμού, όπως η τοποθέτηση ενός δακτυλιοειδούς πτερυγίου (flap/ring shaped airfoil) στην έξοδο του διαχύτη για την αποφυγή φαινομένων αποκόλλησης της ροής (Σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7: Διάταξη της 1^{ης} γενιάς διαχύτη όπως σχεδιάστηκε από τους Kogan και Seginer [Kog63a, Kog63b] και παρουσιάζεται από τον Igra [Igr77].

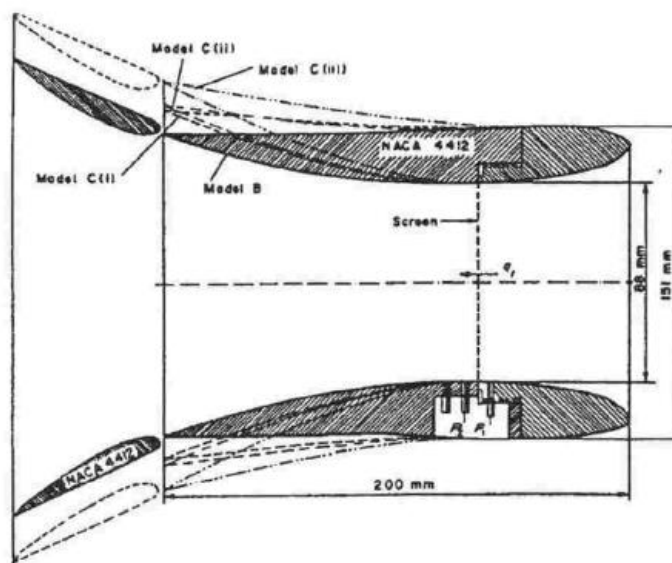
Αργότερα, οι δυσμενείς επιπτώσεις ενός μεγάλου λόγου μήκους – διαμέτρου στο κόστος παραγωγής ενέργειας, ώθησαν τον Igra [Igr76, Igr77, Igr81] να διερευνήσει τη μείωση του μεγέθους του διαχύτη, διατηρώντας ταυτόχρονα υψηλές τιμές του συντελεστή ισχύος. Ως εκ τούτου, αρχικά εξέτασε την επίδοση ενός διαχύτη δεύτερης γενιάς (Σχήμα 1.8), ο οποίος προέκυψε μέσω της σύμπτυξης του διαχύτη πρώτης γενιάς του Kogan [Kog62, Kog63a, Kog63b] στο μισό και της ενσωμάτωσης τριών διαδοχικών δακτυλιοειδών πτερύγιων στην έξοδο του διαχύτη, με σκοπό την αύξηση του εμβαδού της διατομής εξόδου, την μείωση της πίεσης στην έξοδο, την αποφυγή φαινομένων αποκόλλησης της ροής και τελικά την αύξηση της ικανότητας αναρρόφησης του συγκεκριμένου σχεδιασμού. Με αυτήν την προσέγγιση επιτεύχθηκε ένας συντελεστής ισχύος περίπου 2,8 φορές μεγαλύτερος από το όριο Betz, και συνεπώς σημειώθηκε αξιοσημείωτη πρόοδος στην προσπάθεια για την μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψιν τη σημαντική μείωση του λόγου μήκους – διαμέτρου του διαχύτη.



Σχήμα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση του διαχύτη 2^{ης} γενιάς του Igra [Igr81].

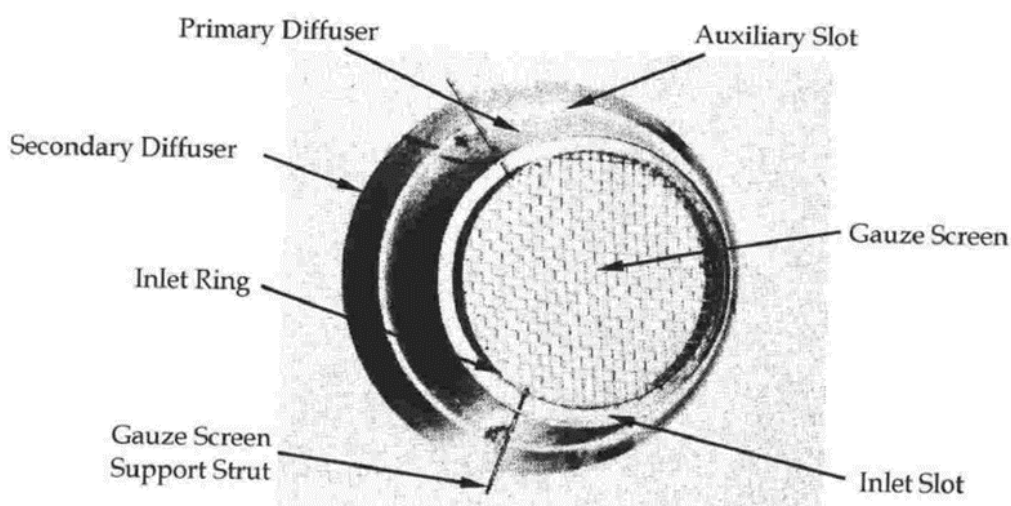
Επιπλέον, ο Igra [Igr76, Igr77, Igr81] πρότεινε και μία γεωμετρία διαχύτη τρίτης γενιάς, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9, με ακόμα μικρότερη αναλογία μήκους – διαμέτρου, βασιζόμενος στην ιδέα της αντικατάστασης του διαχύτη με ευθεία τοιχώματα από έναν διαχύτη που είχε τη μορφή ενός δακτυλιοειδούς πτερυγίου. Έτσι, κατάφερε να επιτύχει έναν ακόμα μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος, ενώ βελτίωσε περεταίρω την απόδοση του εν λόγω σχεδιασμού, μέσω της εισαγωγής της εξωτερικής ροής στο εσωτερικό τοίχωμα του

διαχύτη, για την πρόσδοση ενέργειας στο εσωτερικό οριακό στρώμα (Boundary Layer Control).



Σχήμα 1.9: Σχηματική διάταξη του διαχύτη 3^{ης} γενιάς του Igra [Igr81].

Η εισαγωγή της εξωτερικής ροής υψηλής ενέργειας στο εσωτερικό οριακό στρώμα του διαχύτη αποτέλεσε την βάση για την ανάπτυξη της «Baseline» διάταξης [Oma77, Gil78, Gil79, Gil83] από την Grumman Aerospace Corporation, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1.10.

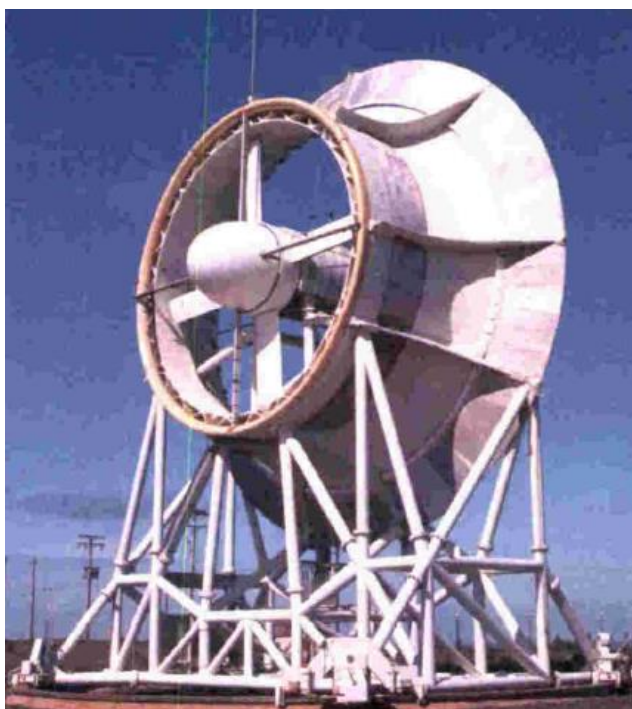


Σχήμα 1.10: Η Baseline γεωμετρία διαχύτη [Oma77].

Η συγκεκριμένη γεωμετρία διαχύτη διέθετε δύο οπές για τον έλεγχο του εσωτερικού οριακού στρώματος και σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα κριτήρια υψηλής υποατμοσφαιρικής

πίεσης στην έξοδο, μέγιστης επιτάχυνσης στο εσωτερικό του διαχύτη και μικρότερου δυνατού κόστος κατασκευής. Τελικά, σύμφωνα με τα πειράματα που εκτελέστηκαν σε αεροδυναμική σήραγγα, η Baseline γεωμετρία είχε την δυνατότητα να φτάσει σε έναν συντελεστή απόδοσης 1,89 φορές μεγαλύτερο από το όριο Betz και έτσι θεωρήθηκε ως μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με τον τελευταίο σχεδιασμό που πρότεινε ο Igra [Igr81].

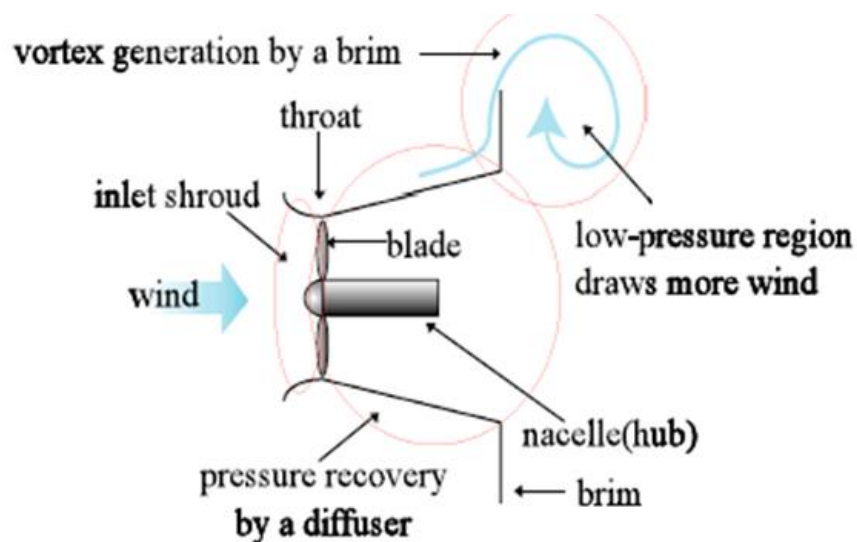
Επιπλέον, η έρευνα που διεξήχθη στην Grumman Aerospace Corporation [For83] έδειξε ότι η μέγιστη απόδοση του Baseline διαχύτη θα μπορούσε να αυξηθεί περαιτέρω, μέσω της ενσωμάτωσης μιας φλάντζας εξόδου (exit flange). Αυτή η προσέγγιση προτάθηκε αρχικά από τον Loeffler [Loe81] ως εναλλακτική της τοποθέτησης ενός δακτυλιοειδούς πτερυγίου, με στόχο την μείωση της πίεσης στην έξοδο του διαχύτη, και συνεπώς την επίτευξη επιπλέον ισχύος για το ίδιο μήκος διαχύτη. Τελικά, η προσέγγιση αυτή οδήγησε στη DAWT 45, μια νέα σχεδίαση η οποία, σε σύγκριση με την Baseline σχεδίαση, ήταν ικανή να επιτύχει αύξηση της εξαγόμενης ισχύος κατά 10%, λόγω μείωσης της πίεσης στην έξοδο κατά 25%. Στη συνέχεια, αυτά τα υποσχόμενα αποτελέσματα ώθησαν την Vortec Energy Limited να κατασκευάσει ένα πρωτότυπο πλήρους κλίμακας του DAWT 45, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.11, και να γίνει η πρώτη ιδιωτική εταιρεία που επιχείρησε να εμπορευματοποιήσει την ιδέα μιας ανεμογεννήτριας υποβοηθούμενης με διαχύτη.



Σχήμα 1.11: Το πλήρους κλίμακας πρωτότυπο της Vortec Energy Limited [Phi03].

Ωστόσο το συγκεκριμένο πρωτότυπο, απέτυχε να εκπληρώσει τις προσδοκίες, ως προς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας, λόγω των μεγάλων δομών υποστήριξης που απαιτούνταν για να αντέξουν τα αναμενόμενα φορτία [Shi12] και των εντόνων φαινομένων αποκόλλησης της ροής, παρά το ερευνητικό πρόγραμμα του Phillips [Phi03] σχετικά με την ανάλυση, προσομοίωση και την βελτιστοποίηση του αρχικού πρωτοτύπου.

Παρά την αποτυχία της Vortec Energy Limited, η έρευνα για την βελτίωση των DAWTs βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, υποστηριζόμενη σημαντικά από το πεδίο της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics – CFD), το οποίο έχει μειώσει σημαντικά την ανάγκη για ακριβή πειράματα σε αεροδυναμικές σήραγγες. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν πραγματοποιηθεί τόσο αριθμητικές αλλά και πειραματικές μελέτες, σχετικά με την ιδέα ενός flanged ή brimmed διαχύτη [Abe04], αποδεικνύοντας ότι μια τέτοια διαμόρφωση, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1.12, είναι ικανή να αυξήσει την παροχή μάζας που διέρχεται από τον στρόβιλο από 1,6 έως 2,6 φορές, σε σύγκριση με μια συμβατική ανεμογεννήτρια χωρίς διαχύτη, λόγω της περιοχής χαμηλής πίεσεως και των ισχυρών στροβιλισμών στην έξοδο του διαχύτη. Επίσης, οι Abe και Ohya [Abe04] έδειξαν ότι η απόδοση ενός flanged διαχύτη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την φόρτιση του ρότορα και την γωνία εισαγωγής, καθώς ο τελευταίος αυτός παράγοντας έχει σημαντική επίδραση στο φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής μέσα στον διαχύτη. Επομένως οι Abe και Ohya [Tos08, Man14] κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα με τους Kogan et al. [Kog62, Kog63a, Kog63b], καθώς ανέφεραν ότι μικρή τιμή για τον συντελεστή φόρτισης (loading coefficient), η αποφυγή φαινομένων αποκόλλησης της ροής και η διατήρηση ανάκτησης της υψηλής πίεσης, τείνουν να αυξήσουν την εξαγόμενη ισχύς.



Σχήμα 1.13: Η ροή γύρω από έναν flanged ή brimmed διαχύτη [Ohy10].

1.4 Βέλτιστος Σχεδιασμός Πτερυγίων

Σκοπός των ανεμογεννητριών είναι η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου. Συνεπώς, κάθε εξάρτημά τους θα πρέπει να είναι βέλτιστα σχεδιασμένο, έτσι ώστε να επιτυγχάνει αυτόν το σκοπό. Ένα από τα σημαντικότερα μέρη ενός τέτοιου συστήματος είναι τα πτερύγια του δρομέα, η σχεδίαση των οποίων διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στην ικανότητα παραγωγής ισχύος. Ως επί το πλείστον, ο σχεδιασμός των πτερυγίων βασίζεται στις αεροδυναμικές απαιτήσεις, ωστόσο παράγοντες που αφορούν τη δομική ακεραιότητα και το κατασκευαστικό κόστος θα πρέπει να ληφθούν επίσης υπόψιν. Έτσι, πολλά πτερύγια κατασκευάζονται με μεγαλύτερο πάχος από το βέλτιστο αεροδυναμικό στις περιοχές κοντά στην ρίζα τους, όπου οι καταπονήσεις λόγω κάμψης είναι μεγαλύτερες [Βαι13]. Επιπλέον, η επιλογή των υλικών και η διαδικασία κατασκευής παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς η αεροδυναμική απόδοση μειώνεται όσο το πάχος των πτερυγίων αυξάνεται. Για το λόγο αυτό η προκαταρκτική σχεδίαση γίνεται επαναληπτικά, μέχρι να βρεθεί η «χρυσή τομή» μεταξύ αεροδυναμικής απόδοσης και αντοχής [Στρ13].

1.5 Σκοπός και Δομή Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εφαρμόζεται μία διαδικασία βελτιστοποίησης για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό της γεωμετρίας του διαχύτη και των πτερυγίων, συστημάτων ανεμογεννητριών υποβοηθούμενων από διαχύτη (DAWTs).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά το περιεχόμενο των υπολοίπων κεφαλαίων της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση του μαθηματικού υπόβαθρου του υπολογιστικού μοντέλου Blade Element Momentum (BEM) [Lel17], που χρησιμοποιείται για την αεροδυναμική ανάλυση και αξιολόγηση κάθε υποψήφιας σχεδίασης πτερυγίου.
- Στο **Κεφάλαιο 3** πραγματοποιείται η περιγραφή των βασικών σημείων του Διαφορικού Εξελικτικού (ΔΕ) αλγόριθμου βελτιστοποίησης.
- Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η εφαρμογή και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας ενός αξονοσυμμετρικού διαχύτη.
- Στο **Κεφάλαιο 5**, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός πτερυγίων για την γεωμετρία διαχύτη που προέκυψε, μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης των κατανομών της χορδής και της γωνίας twist.
- Τέλος στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας.

“Intentionally Blank”

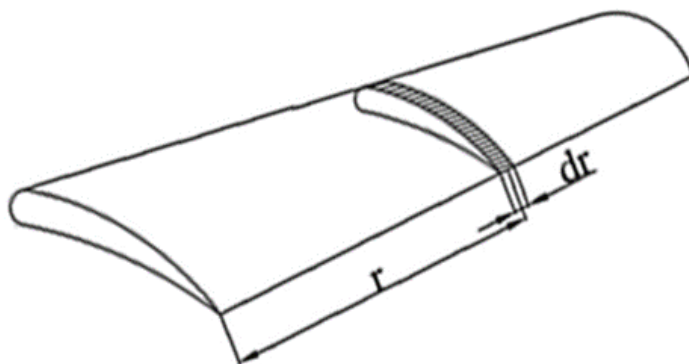
Κεφάλαιο 2 – The Blade Element Momentum Theory

2.1 Περιγραφή Μοντέλου BEM

Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης μίας ανεμογεννήτριας, ο αεροδυναμικός σχεδιασμός των πτερυγίων και εν γένει του ρότορα είναι ένα από τα πιο σημαντικά στάδια, καθώς έχει τεράστια επίδραση στη συνολική απόδοση του συστήματος και στην ικανότητα εξαγωγής ισχύος από τον άνεμο. Ως εκ τούτου, αρκετά μαθηματικά μοντέλα έχουν προταθεί κατά την πάροδο των τελευταίων ετών, με σκοπό την αεροδυναμική ανάλυση και την αξιολόγηση της επίδοσης δρομέων ανεμογεννητριών, όπως η θεωρία Blade Element Momentum (BEM) [Liu12] και οι μέθοδοι Acceleration Potential [Bus91] και Vortex Wake [Boo16].

Μεταξύ των παραπάνω, η θεωρία BEM είναι μία μεθοδολογία χαμηλής πιστότητας, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στις μέρες μας για την αξιολόγηση της απόδοσης του δρομέα, σε εφαρμογές σχεδιασμού πτερυγίων ανεμογεννητριών, λόγω της ικανότητας της να παράσχει αξιοσημείωτα ακριβή αποτελέσματα για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας, σε μικρό χρονικό διάστημα [Ref12, Liu12].

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στον συνδυασμό της θεωρίας Blade Element και της μονοδιάστατης (1Δ) θεωρίας ορμής, με σκοπό την εκτίμηση των τοπικών συνθηκών ροής στα πτερύγια και συνεπώς, των δυνάμεων και ροπών που ασκούνται σε αυτά. Σύμφωνα με την θεωρία Blade Element, κάθε πτερύγιο χωρίζεται ακτινικά σε ένα πεπερασμένο αριθμό N στοιχειωδών τμημάτων (elements) μήκους dr , όπου το κάθε ένα βρίσκεται σε μία ακτινική θέση r όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Επιπλέον, η θεωρία βασίζεται στην υπόθεση ότι κάθε στοιχειώδες τμήμα ενεργεί ανεξάρτητα από αυτά που βρίσκονται γύρω του, και συμπεριφέρεται αεροδυναμικά σαν μία δισδιάστατη (2Δ) αεροτομή.

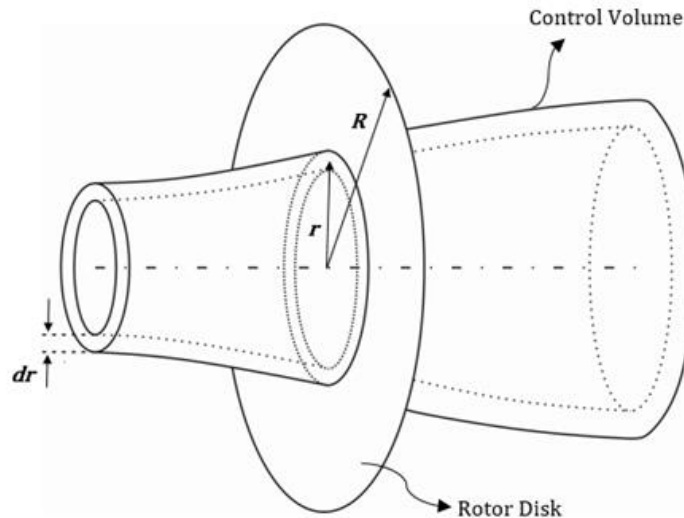


Σχήμα 2.1: Ένα στοιχειώδες τμήμα πτερυγίου – blade element [Hu11].

Από την άλλη, η θεωρία της ορμής (Momentum ή Actuator Disk Theory) χρησιμοποιεί μία διαφορετική προσέγγιση για τον υπολογισμό των δυνάμεων και ροπών που ασκούνται

στα πτερύγια, μέσω της εφαρμογής της αρχής διατήρησης της ορμής σε έναν όγκο ελέγχου όπως αυτός που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.

Αρχικά, ο σωλήνας ροής που διέρχεται από τον δίσκο του δρομέα, διακριτοποιείται σε N στοιχειώδεις δακτυλιοειδείς σωλήνες ροής, ομοίως με τη διακριτοποίηση του πτερυγίου, όπως αυτός που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2. Έπειτα, για κάθε δακτυλιοειδή σωλήνα ροής, θεωρείται ότι η απώλεια της πίεσης ή της ορμής προκαλείται από το έργο που παράγει η ροή καθώς περνά από το επίπεδο του δρομέα. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός μεταβολής της αξονικής ορμής για ένα στοιχειώδη σωλήνα ροής πρέπει να ισούται με την αξονική δύναμη που ασκείται στο αντίστοιχο στοιχειώδες τμήμα του πτερυγίου, ενώ ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ορμής, για τον προαναφερθέντα δακτυλιοειδή σωλήνα ροής, πρέπει να είναι ίσος με την εφαπτομενική δύναμη που ασκείται στο αντίστοιχο τμήμα του πτερυγίου [Man09, Jam11, Hau06, Han08, Liu12, Mor05].



Σχήμα 2.2: Ένας στοιχειώδης δακτυλιοειδής σωλήνας ροής [Han08].

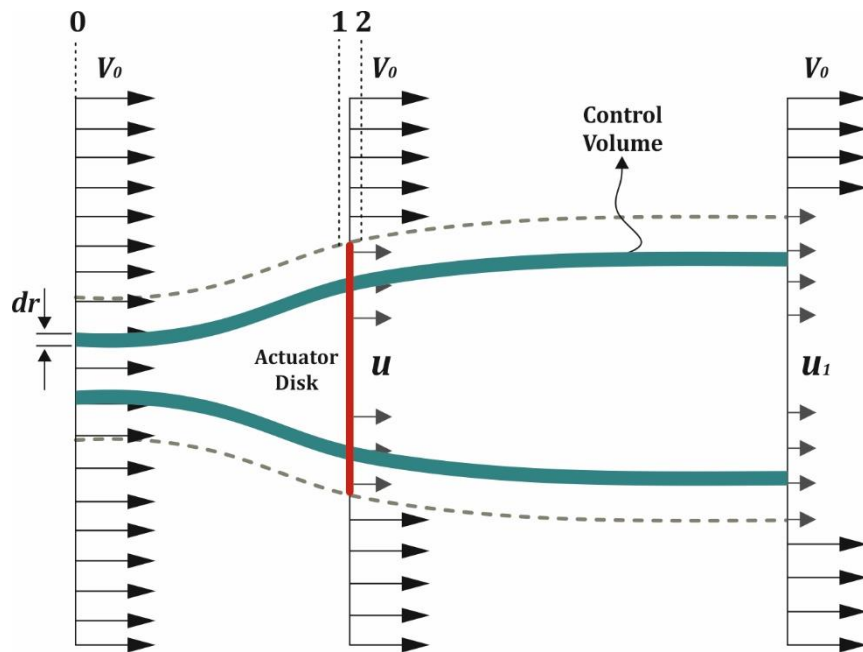
Ωστόσο, η κλασική θεωρία BEM δεν έχει την ικανότητα μοντελοποίησης της επίδρασης του διαχύτη στον υπολογισμό των τοπικών ταχυτήτων και συνθηκών ροής στο επίπεδο του δρομέα. Για τον λόγο αυτό, έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες με στόχο την τροποποίηση της κλασικής 1Δ θεωρίας ορμής, και κατ' επέκταση του κλασικού μοντέλου BEM, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί και για την αεροδυναμική προσομοίωση δρομέων ανεμογεννητριών υποβοηθούμενων από διαχύτη [Fle81, Phi03, Tav14, Kes16]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται χρήση ενός τέτοιου υπολογιστικού κώδικα BEM [Lel17], για την ανάλυση δρομέων DAWTs, ο οποίος βασίζεται στην τροποποίηση που προτάθηκε από τον Rio Vaz [Tav14]. Το μαθηματικό υπόβαθρο του κώδικα [Lel17] παρουσιάζεται στη συνέχεια του Κεφαλαίου 2.

2.2 Μονοδιάστατη Θεωρία της Ορμής

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των βασικών εξισώσεων που συνθέτουν την κλασική 1Δ θεωρία της ορμής. Υπενθυμίζεται ότι η εγκυρότητα της θεωρίας έγκειται στις ακόλουθες παραδοχές [Han08]:

- Η πραγματική γεωμετρία του ρότορα αντικαθίσταται από έναν ιδανικό δίσκο αμελητέου πάχους (*actuator disk*).
- Η ταχύτητα και η φόρτιση θεωρούνται ομοιόμορφα κατανεμημένες στο επίπεδο του δίσκου.
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν φαινόμενα συνεκτικότητας και η ροή θεωρείται ασυμπίεστη.

Αρχικά εξετάζεται ένας στοιχειώδης όγκος ελέγχου, με τη μορφή ενός δακτυλιοειδούς σωλήνα ροής, όπως αυτός που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Ο όγκος ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της κλασικής μονοδιάστατης θεωρίας της ορμής μιας ανεμογεννήτρια χωρίς διαχύτη [Lel17].

Η στοιχειώδης δύναμη dT που ασκείται στον εξεταζόμενο σωλήνα ροής από τον δίσκο προκύπτει από την εφαρμογή της ολοκληρωτικής εξίσωσης της ορμής ως [Han08]:

$$dT = (V_0 - u_1)d\dot{m} = 2\pi r \rho u (V_0 - u_1) dr \quad (2.1)$$

όπου V_0 είναι η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής ανάντη του δρομέα, u είναι η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας στο επίπεδο του δίσκου και u_1 είναι η αξονική συνιστώσα της

ταχύτητας κατάντη του δρομέα. Η στοιχειώδης ροπή dM που ασκείται στον όγκο ελέγχου που εξετάζεται, μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της εφαρμογής της ολοκληρωτικής εξίσωσης της ροπής της ορμής, υπό την προϋπόθεση ότι η περιστροφική ταχύτητα πριν τον δρομέα είναι ίση με μηδέν και θέτοντας ως C_θ την περιστροφική ταχύτητα κατάντη του δρομέα [Han08].

$$dM = rC_\theta d\dot{m} = 2\pi r^2 \rho u C_\theta dr \quad (2.2)$$

Η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα u και η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας στο απόρρευμα u_1 μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις του αξονικού επαγωγικού συντελεστή α_α και της ταχύτητας αδιατάρακτης ροής V_0 ως εξής [Han08]:

$$u = (1 - \alpha_\alpha)V_0 \quad (2.3)$$

$$u_1 = (1 - 2\alpha_\alpha)V_0 \quad (2.4)$$

όπου ο αξονικός επαγωγικός συντελεστής (*axial induction factor*) α_α και ο εφαπτομενικός επαγωγικός συντελεστής (*tangential induction factor*) α_t ορίζονται μέσω των Εξ. (2.5) και Εξ. (2.6) αντίστοιχα:

$$\alpha_\alpha = (V_0 - u)/V_0 \quad (2.5)$$

$$\alpha_t = C_\theta/2\omega r \quad (2.6)$$

Επομένως, κάνοντας χρήση των Εξισώσεων (2.3), (2.4), (2.5) και (2.6), οι εκφράσεις που παρέχουν την στοιχειώδη δύναμη και ροπή που ασκούνται στον εξεταζόμενο όγκο ελέγχου, για την περίπτωση μιας ιδανικής ανεμογεννήτριας, μπορούν να τροποποιηθούν ως εξής:

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 \alpha_\alpha (1 - \alpha_\alpha) dr \quad (2.7)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1 - \alpha_\alpha) \alpha_t dr \quad (2.8)$$

Στην συνέχεια, μέσω της ολοκλήρωσης των στοιχειωδών ποσοτήτων dT και dM από το 0 έως το R , όπου R είναι η ακτίνα του δρομέα και υποθέτοντας ότι ο αξονικός επαγωγικός συντελεστής είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος στο επίπεδο του δίσκου, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της συνολικής αξονικής δύναμης T και ροπής M , οι οποίες ασκούνται στον εξεταζόμενο όγκο ελέγχου που διέρχεται από τον δίσκο. Έτσι, ορίζοντας ως A την επιφάνεια του δρομέα, οι εξισώσεις που ορίζουν τους συντελεστές φόρτισης και ισχύος για μια ιδανική ανεμογεννήτρια χωρίς την παρουσία διαχύτη, υπολογίζονται ως εξής:

$$C_T = T/(0.5\rho A V_0^2) = 4\alpha_\alpha(1 - \alpha_\alpha) \quad (2.9)$$

$$C_p = Tu/(0.5\rho AV_0^3) = 4\alpha_a(1 - \alpha_a)^2 \quad (2.10)$$

Συμπερασματικά, το πιο σημαντικό αποτέλεσμα της κλασικής μονοδιάστατης θεωρίας της ορμής είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της μέγιστης θεωρητικής ισχύος μιας ιδανικής ανεμογεννήτριας, μέσω της παραγωγή του συντελεστή ισχύος C_p ως προς τον αξονικό επαγωγικό συντελεστή α_a . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το γνωστό όριο του Betz, το οποίο υποδηλώνει ότι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αντλήσει μια ανεμογεννήτρια, χωρίς διαχύτη, από τον άνεμο είναι ίση με το 59.3% της συνολικής ενέργειας που περιέχεται στον δακτυλιοειδή σωλήνα ροής που διέρχεται μέσω του δρομέα [Bet13].

2.3 Η Επίδραση του Διαχύτη στην 1Δ Θεωρία Ορμής

Θεωρώντας τις ίδιες παραδοχές, όπως για την εφαρμογή της κλασικής 1Δ θεωρίας της ορμής, και τον στοιχειώδη όγκο ελέγχου που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4, ο Rio Vaz [Tav14] πρότεινε μια παρόμοια διατύπωση για να περιγράψει την τροποποιημένη 1Δ θεωρία ορμής, η οποία περιέχει την επίδραση του διαχύτη. Σύμφωνα με τον Phillips [Phi03], ο συντελεστής ισχύος μιας DAWT δίνεται ως εξής:

$$C_p^d = \varepsilon \left[1 - \left(\frac{V_4}{V_0} \right)^2 - (1 - n_d)(1 - \beta^2)\varepsilon^2 \right] \quad (2.11)$$

όπου $\varepsilon = V_1/V_0$ είναι ο λόγος της ταχύτητας στο επίπεδο του δίσκου προς την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής, $\beta = A/A_3$ είναι ο λόγος του εμβαδού διατομής για την αξονική θέση τοποθέτησης του δρομέα προς το εμβαδόν της διατομής εξόδου του διαχύτη και n_d είναι ο συντελεστής απόδοσης του διαχύτη, ο οποίος ορίζεται ως:

$$n_d = (p_3 - p_2)/[0.5\rho(V_2^2 - V_3^2)] \quad (2.12)$$

Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής της αρχής διατήρησης της ενέργειας μεταξύ των θέσεων 3 και 4, όπως αυτές συμβολίζονται στο Σχήμα 2.2, η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας $V_4 = u_1$ κατάντη του δρομέα, μπορεί να εκφραστεί ως [Tav14]:

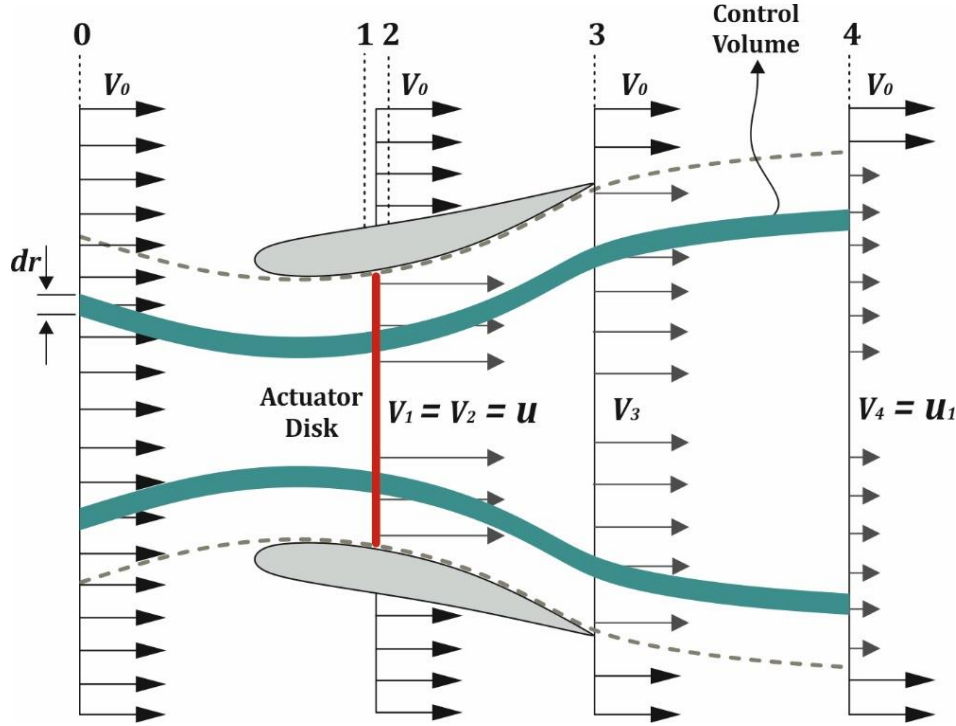
$$\left(\frac{V_4}{V_0} \right)^2 = \beta^2 \varepsilon^2 + cp_3 \quad (2.13)$$

όπου cp_3 είναι ο συντελεστής πίεσης στην έξοδο του διαχύτη [Phi13], η οποία θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε ολόκληρη τη διατομή εξόδου του διαχύτη,

$$cp_3 = (p_3 - p_0)/(0.5\rho V_0^2) \quad (2.14)$$

Συνεπώς, εισάγοντας την Εξ. (2.13) στην Εξ. (2.11), η έκφραση που παρέχει τον συντελεστή ισχύος για την περίπτωση μιας DAWT μπορεί να αναδιατυπωθεί ως εξής [Tav14]:

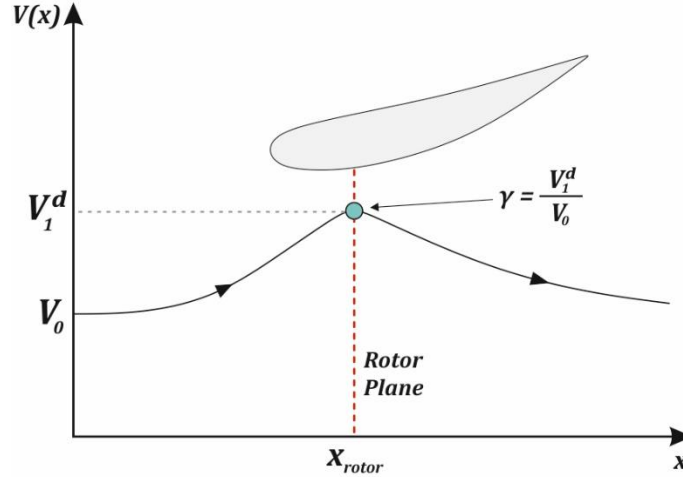
$$C_p^d = \varepsilon(1 - cp_3) + \varepsilon^3[n_d(1 - \beta^2) - 1] \quad (2.15)$$



Σχήμα 2.4: Ο όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται για την διατύπωση της τροποποιημένης 1Δ θεωρίας της ορμής [Lel17].

Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 1.3, η αύξηση στην εξαγόμενη ισχύς, που επιτυγχάνεται από μια DAWT, αποδίδεται στην υψηλή υποατμοσφαιρική πίεση που δημιουργείται στην έξοδο του διαχύτη, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας και παροχής μάζας στο επίπεδο του δρομέα [Lel17]. Μια αντιπροσωπευτική κατανομή της ταχύτητας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας για έναν διαχύτη χωρίς την παρουσία ρότορα (unloaded diffuser), απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5. Η επιτάχυνση της ταχύτητας γ (velocity speed-up) για την περίπτωση ενός άδειου διαχύτη, ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της αξονικής ταχύτητας της ροής στο επίπεδο του δρομέα V_1^d (ύπαρξη μόνο του διαχύτη χωρίς τα πτερύγια) και της ταχύτητας της αδιατάρακτης ροής V_0 [Tav14].

$$\gamma = V_1^d / V_0 \quad (2.16)$$



Σχήμα 2.5: Η διανομή της αξονικής ταχύτητας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας για έναν άδειο διαχύτη [Tav14].

Ως εκ τούτου, η ταχύτητα του αέρα που φτάνει στον ρότορα δίνεται ως [Tav14]:

$$V_1 = V_2 = u = (1 - a_a^d)V_1^d = \gamma(1 - a_a^d)V_0 \quad (2.17)$$

ενώ η επιτάχυνση της ταχύτητας ε για την περίπτωση μιας DAWT, μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του γ ως εξής:

$$\varepsilon = V_1/V_0 = \gamma(1 - a_a^d) \quad (2.18)$$

όπου a_a^d είναι ο αξονικός επαγωγικός συντελεστής για μια DAWT. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν την Εξ. (2.18), η οποία σχετίζει τα ε και γ , οι Εξ. (2.14) και (2.15) μπορούν να αναδιατυπωθούν ως εξής:

$$cp_3 = (1 - \beta^2\gamma^2)(1 - a_a^d)^2 + a_a^d(3a_a^d - 2) \quad (2.19)$$

$$C_p^d = \gamma(1 - a_a^d)^2[4a_a^d + \gamma^2(1 - a_a^d)(1 - \beta^2)(n_d - 1)] \quad (2.20)$$

Συνεπώς, εάν θεωρηθεί ότι οι απώλειες κατά μήκος του διαχύτη είναι μηδέν ($n_d = 1$), οι συντελεστές φόρτισης και ισχύος μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του αξονικού επαγωγικού συντελεστή και της επιτάχυνσης γ [Tav14] ως εξής:

$$C_T^d = 4a_a^d(1 - a_a^d) \quad (2.21)$$

$$C_P^d = \gamma 4a_a^d(1 - a_a^d)^2 \quad (2.22)$$

Προφανώς, παρατηρώντας την Εξ. (2.22), προκύπτει το συμπέρασμα ότι εάν ο λόγος γ είναι ίσος με τη μονάδα (μηδενική επιτάχυνση της ταχύτητας), η Εξ. (2.22) καταλήγει να είναι πανομοιότυπη με αυτή που εξήχθη χρησιμοποιώντας την κλασσική 1Δ θεωρία ορμής για μία συμβατική ανεμογεννήτρια, χωρίς της παρουσία διαχύτη (Εξ. (2.10)). Ωστόσο, για την περίπτωση μιας DAWT δεν μπορεί να οριστεί ο μέγιστος θεωρητικός συντελεστής ισχύος, διότι η παραγωγή του C_p^d ως προς τον συντελεστή a_a^d έχει ως αποτέλεσμα μια τιμή για τον μέγιστο συντελεστή ισχύος ίση με $\gamma 16/27$. Έτσι, ο μέγιστος συντελεστής ισχύος είναι συνάρτηση του λόγου γ , ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία του διαχύτη [Han00, Bus07]. Επιπροσθέτως, όπως σχολίασε και ο van Bussel [Bus07], η εξίσωση που παρέχει τον συντελεστή φόρτισης (loading ή thrust coefficient) για μία DAWT (Εξίσωση 2.21) είναι παρόμοια με εκείνη που προκύπτει από την εφαρμογή της κλασσικής 1Δ θεωρίας ορμής για μία συμβατική ανεμογεννήτρια (Εξίσωση 2.9). Όμως η απόκριση ενός συστήματος DAWT είναι διαφορετική, λόγω της σημαντικής επίδρασης του διαχύτη στον αξονικό συντελεστή επαγωγής [Lel17].

Τελικά, οι εξισώσεις για την στοιχειώδη δύναμη dT_d και ροπή dM_d που ασκούνται στον εξεταζόμενο όγκο ελέγχου, σύμφωνα με την τροποποιημένη 1Δ θεωρία ορμής, προκύπτουν ως εξής:

$$dT_d = 4\rho\pi r dr a_a^d (1 - a_a^d) V_0^2 \quad (2.23)$$

$$dM_d = 2\rho a_t^d V_1 2\omega r^2 dA = 2\pi r^2 \rho V_1 C_\theta^d dr \quad (2.24)$$

όπου C_θ^d είναι η περιστροφική ταχύτητα της ροής κατάντη του δίσκου και $a_t^d = C_\theta^d / (2\omega r)$ είναι ο εφαπτομενικός επαγωγικός συντελεστής.

2.4 Η Επίδραση του Διαχύτη στην BEM Θεωρία

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του Κεφαλαίου 2, η μέθοδος BEM βασίζεται στον συνδυασμό της θεωρίας Blade Element και της 1Δ θεωρίας της Ορμής (1D Momentum Theory), προκειμένου να εκτιμηθούν οι επαγόμενες αξονικές και εφαπτομενικές ταχύτητες στο επίπεδο του δρομέα, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν τις συνθήκες ροής πάνω στα πτερύγια και επομένως τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά. Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η τροποποίηση της κλασσικής θεωρίας BEM, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της τροποποιημένης 1Δ θεωρίας της ορμής, η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, με σκοπό την μοντελοποίηση της επίδρασης του διαχύτη.

Σύμφωνα με την θεωρία BEM, κάθε πτερύγιο χωρίζεται σε N στοιχειώδη τμήματα κατά μήκος της ακτίνας, μήκους dr . Θεωρείται ότι κάθε στοιχειώδες τμήμα ενεργεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα και λειτουργεί αεροδυναμικά ως μία 2Δ αεροτομή. Η σχετική ταχύτητα της ροής V_{rel} που παρατηρείται από ένα στοιχειώδες τμήμα (αεροτομή) του πτερυγίου, είναι

έναν συνδυασμός της επαγόμενης αξονικής ταχύτητας $\gamma(1 - a_a^d) V_0$ και της επαγόμενης εφαπτομενικής ταχύτητας $(1 + a_t^d)\omega r$ στο επίπεδο του δρομέα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Το θ συμβολίζει την γωνία twist, δηλαδή τη γωνία ανάμεσα στην χορδή c της αεροτομής και του επιπέδου περιστροφής του δρομέα, ενώ φ είναι η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο περιστροφής του δρομέα και της κατεύθυνσης της σχετικής ταχύτητας V_{rel} . Επομένως η τοπική γωνία προσβολής α (angle of attack) για κάθε στοιχειώδες τμήμα του πτερυγίου, δίνεται από την σχέση:

$$\alpha = \varphi - \theta \quad (2.25)$$

Επιπλέον, σύμφωνα με το Σχήμα 2.6, η έκφραση που συνδέει την τοπική γωνία φ με τους αξονικούς και εφαπτομενικούς επαγωγικούς συντελεστές μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\gamma \frac{(1 - a_a^d) V_0}{(1 + a_t^d) \omega r} \right). \quad (2.26)$$

Στην παρούσα ανάλυση το ενδιαφέρον έγκειται μόνο στις δυνάμεις που ασκούνται κάθετα και εφαπτομενικά στο επίπεδο του δρομέα. Έτσι, με την προβολή των δυνάμεων άνωσης (lift) και οπισθέλκουσας (drag) σε αυτές τις κατευθύνσεις, η αξονική δύναμη F_n και η εφαπτομενική δύναμη F_t που ασκούνται στο εξεταζόμενο τμήμα, μπορούν να εκφραστούν όπως φαίνεται παρακάτω:

$$F_n = L \cos(\varphi) + D \sin(\varphi) \quad (2.27)$$

$$F_t = L \sin(\varphi) - D \cos(\varphi) \quad (2.28)$$

Επιπλέον, οι παραπάνω δυνάμεις F_n και F_t μπορούν να εκφραστούν σε αδιάστατη μορφή, μέσω των αντιστοίχων αδιάστατων συντελεστών C_n και C_t .

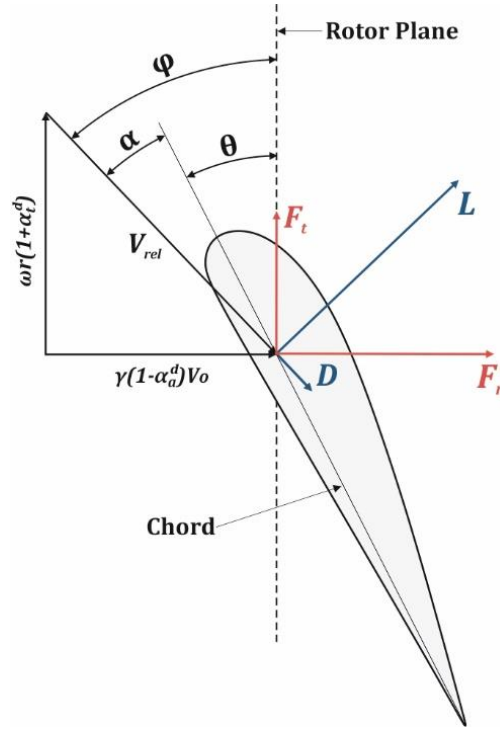
$$C_n = F_n / (0.5 \rho V_{rel}^2 c) \quad (2.29)$$

$$C_t = F_t / (0.5 \rho V_{rel}^2 c) \quad (2.30)$$

Συνεπώς, η στοιχειώδης (κάθετη προς το επίπεδο του δρομέα) δύναμη dT_d και ροπή dM_d που ασκούνται στο εξεταζόμενο τμήμα του πτερυγίου, θεωρώντας ότι οι δυνάμεις F_n και F_t είναι δυνάμεις ανά μήκος και ορίζοντας ως B τον αριθμό των πτερυγίων, υπολογίζονται αντίστοιχα ως εξής:

$$dT_d = B F_n dr \quad (2.31)$$

$$dM_d = r B F_t dr \quad (2.32)$$



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση των ταχυτήτων στο επίπεδο του δρομέα και των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα στοιχειώδες τμήμα του πτερυγίου (2D αεροτομή) [Lel17].

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψιν την Εξ. (2.33) και Εξ. (2.34), οι οποίες συνδέουν την ταχύτητα της επ' άπειρον ροής V_0 , τη σχετική ταχύτητα V_{rel} , τη γωνία φ , τους επαγωγικούς συντελεστές και την επιτάχυνση της ταχύτητας γ ,

$$V_{rel} \sin(\varphi) = \gamma V_0 (1 - a_a^d) \quad (2.33)$$

$$V_{rel} \cos(\varphi) = \omega r (1 + a_t^d) \quad (2.34)$$

οι Εξ. (2.31) και Εξ. (2.32) μπορούν να αναδιατυπωθούν ως εξής:

$$dT_d = \frac{1}{2} \rho B \frac{\gamma^2 V_0^2 (1 - a_a^d)^2}{\sin^2(\varphi)} c C_n dr \quad (2.35)$$

$$dM_d = \frac{1}{2} \rho B \frac{\gamma V_0 (1 - a_a^d) \omega r (1 + a_t^d)}{\sin(\varphi) \cos(\varphi)} c C_t r d \quad (2.36)$$

Άρα, εξισώνοντας την Εξ. (2.23) και την Εξ. (2.35) ως προς dT_d , όπως επίσης την Εξ. (2.24) και την Εξ. (2.36) ως προς dM_d , λαμβάνοντας υπόψιν τον ορισμό του βαθμού πληρότητας

του δρομέα (rotor solidity) $\sigma = Bc/(2\pi r)$, ο αξονικός και εφαπτομενικός επαγωγικός συντελεστής της ταχύτητας, για την περίπτωση μίας DAWT, εκφράζονται αντίστοιχα ως:

$$a_a^d = 1/[(4 \sin^2(\varphi))/(\gamma^2 \sigma C_n) + 1] \quad (2.37)$$

$$a_t^d = 1/[(4 \sin(\varphi) \cos(\varphi))/(\sigma C_t) - 1] \quad (2.38)$$

Παρατηρώντας τις εκφράσεις, που παρέχουν τους αξονικούς και εφαπτομενικούς επαγωγικούς συντελεστές, είναι προφανές ότι η παρουσία του διαχύτη ενσωματώνεται στο μοντέλο BEM, χρησιμοποιώντας μόνο το λόγο επιτάχυνσης της ταχύτητας γ , υπολογισμένο στο επίπεδο του δρομέα, ενώ ο υπολογισμός των επαγωγικών συντελεστών για κάθε τμήμα του πτερυγίου μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας την τυπική επαναληπτική διαδικασία [Han08]. Τέλος, ο συγκεκριμένος κώδικας BEM [Lel17] ενισχύεται περαιτέρω με την προσθήκη του μοντέλου διόρθωσης που προτάθηκε από τον Prandtl για την μοντελοποίηση των απωλειών στο ακροπτερύγιο και την πλήμνη (tip and hub losses correction model), καθώς και με το εμπειρικό μοντέλο διόρθωσης του Glauert όπως διατυπώθηκε από τον Buhl [Buh05], ειδικά προσαρμοσμένο για την ανάλυση ενός δρομέα μιας DAWT [Lel17].

2.4 Το Μοντέλο Διόρθωσης του Prandtl

Ένας από τους περιορισμούς της θεωρίας BEM είναι ότι δεν περιέχει την επίδραση των δινών ή στροβίλων (vortices) που δημιουργούνται από τα ακροπτερύγια και κατευθύνονται προς το απόρρευμα του δρομέα. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες δίνες στην άκρη των πτερυγίων δημιουργούν πολλαπλές ελικοειδείς δομές στο απόρρευμα και παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανομή της ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα. Συγκεκριμένα, η επίδραση αυτή είναι πιο έντονη κοντά στα άκρα των πτερυγίων, μια περιοχή που έχει επίσης τη μεγαλύτερη επιρροή στην ισχύ που παράγεται από τον στρόβιλο.

Ο Prandtl [Gla35] απλοποίησε τη δομή του απορρεύματος κατάντη του δρομέα και πρότεινε μια θεωρία για την μοντελοποίηση των εισαγόμενων απωλειών λόγω των δινών που εκλύονται από τις περιοχές των ακροπτερυγίων και της πλήμνης, η οποία μπορεί να εκφραστεί μέσω ενός συντελεστή διόρθωσης F που ορίζεται ως εξής:

$$F = F_{tip} F_{hub} \quad (2.39)$$

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f_{tip}} \quad (2.40)$$

$$F_{hub} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f_{hub}} \quad (2.41)$$

όπου

$$f_{tip} = \frac{B}{2} \frac{R - r}{r \sin \varphi} \quad (2.42)$$

$$f_{hub} = \frac{B}{2} \frac{r - R_{hub}}{r \sin \varphi} \quad (2.43)$$

Ο συντελεστής F χρησιμοποιείται για να προσαρμόσει το κομμάτι της ορμής της κλασικής θεωρίας BEM, αντικαθιστώντας τις Εξ. (2.31) και Εξ. (2.32) με τις παρακάτω:

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a_a^d (1 - a_a^d) F dr \quad (2.44)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1 - a_a^d) a_t^d F dr \quad (2.45)$$

Άρα, οι εκφράσεις για τον αξονικό και εφαπτομενικό επαγωγικό συντελεστή ταχύτητας, συμπεριλαμβανομένου του μοντέλου του Prandtl, αναδιατυπώνονται ως εξής:

$$a_a^d = 1 / [(4F \sin^2(\varphi)) / (\gamma^2 \sigma C_n) + 1] \quad (2.46)$$

$$a_t^d = 1 / [(4F \sin(\varphi) \cos(\varphi)) / (\sigma C_t) - 1] \quad (2.47)$$

2.5 Το Μοντέλο Διόρθωσης του Glauert

Επιπλέον, ο συγκεκριμένος BEM κώδικας [Lel17], που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, παρέχει την δυνατότητα για την ανάλυση της λεγόμενης “εμπειρικής περιοχής λειτουργίας” του ρότορα, κάνοντας χρήση του μοντέλου διόρθωσης του Glauert [Gla26], εμπλουτισμένο με την τροποποίηση του Buhl [Buh05]. Για το σκοπό αυτό εισάγονται αρχικά οι παρακάτω αδιάστατες παράμετροι:

$$k_a = \gamma^2 \sigma C_n / (4F \sin^2 \varphi), \quad (2.48)$$

$$k_t = \sigma C_t / (4F \sin \varphi \cos \varphi), \quad (2.49)$$

όπου F είναι ο συντελεστής απωλειών του Prandtl [Lel17] όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Σύμφωνα με το μοντέλο διόρθωσης του Glauert, πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές εκφράσεις για την εκτίμηση του αξονικού επαγωγικού συντελεστή της ταχύτητας, ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας του δρομέα.

Συγκεκριμένα, εάν $\varphi > 0$ και $k_a \leq 2/3$ τότε η λύση εμπίπτει στην περιοχή όπου η 1Δ θεωρία ορμής είναι έγκυρη και έτσι:

$$a_a^d = k_a / (1 + k_a) \quad (2.50)$$

Εάν $\varphi > 0$ και $k_a > 2/3$ τότε η λύση εμπίπτει στην “εμπειρική περιοχή λειτουργίας”, και η εξίσωση για τον υπολογισμό του αξονικού επαγωγικού συντελεστή γίνεται:

$$a_a^d = (\gamma_1 - \sqrt{\gamma_2})/\gamma_3 \quad (2.51)$$

όπου

$$\gamma_1 = 2Fk_a - (10/9 - F) \quad (2.52)$$

$$\gamma_2 = 2Fk_a - (4/3 - F) \quad (2.53)$$

$$\gamma_3 = 2Fk_a - (25/9 - 2F) \quad (2.54)$$

Σε διαφορετική περίπτωση, εάν $\varphi < 0$ και $k_a > 1$ τότε η λύση εμπίπτει στην λεγόμενη “propeller brake” περιοχή λειτουργίας, και ο υπολογισμός του αξονικού συντελεστή γίνεται:

$$a_a^d = k_a/(1 - k_a) \quad (2.55)$$

Τελικά, εάν $\varphi < 0$ και $k_a \leq 1$ τότε η τιμή του φ δεν μπορεί να αποτελεί λύση των εξισώσεων BEM. Ο εφαπτομενικός επαγωγικός συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$a_t^d = k_t/(1 - k_t) \quad (2.56)$$

“Intentionally Blank”

Κεφάλαιο 3 – Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος

3.1 Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (ΕΑ) είναι ένας γενικός όρος που υποδεικνύει οποιονδήποτε μεθευρετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης, ο οποίος βασίζεται σε μεθόδους αναζήτησης και πληθυσμούς. Πιο συγκεκριμένα, οι ΕΑ προσομοιώνουν τη διαδικασία της φυσικής επιλογής, μέσω της διαχείρισης ενός πεπερασμένου πληθυσμού ατόμων, τα οποία εξελίσσονται βάση καθορισμένων διαδικασιών ή μηχανισμών, εμπνευσμένων από την βιολογική εξέλιξη, όπως η αναπαραγωγή, η μετάλλαξη και η επιλογή. Κάθε άτομο αναπαρίσταται από το αντίστοιχο χρωμόσωμα, δηλαδή από ένα διάνυσμα που περιέχει το σύνολο των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης και η αξία του ορίζεται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ή συνάρτησης κόστους [Yü10].

Οι ΕΑ είναι μια κατηγορία μεθόδων αναζήτησης με αξιοσημείωτη ισορροπία μεταξύ της εκμετάλλευσης των καλύτερων λύσεων καθώς και της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης, ενώ συνδυάζουν στοιχεία κατευθυνόμενης και στοχαστικής αναζήτησης, με αποτέλεσμα να θεωρούνται πιο αποτελεσματικοί, σε σύγκριση με μεθόδους κατευθυνόμενης αναζήτησης. Ακόμα, μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζεται λαμβάνοντας υπόψιν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, ενώ σε αντίθεση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης, ως απόρροια της χρήσης ενός πληθυσμού ατόμων, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν αρκετές διαφορετικές λύσεις, εκτός από την βέλτιστη, η ποιότητα των οποίων είναι συγκρίσιμη με εκείνη της βέλτιστης [Nik11].

3.2 Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος

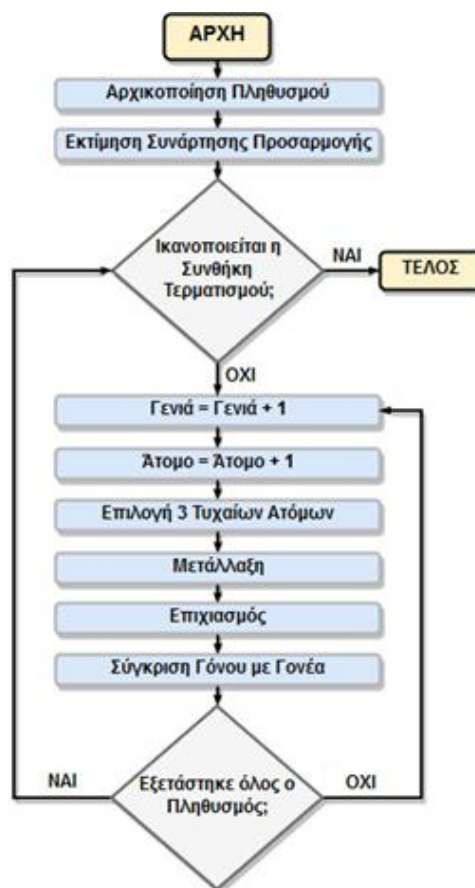
Ο Διαφορικός Εξελικτικός (ΔΕ) αλγόριθμος προτάθηκε από τους R. Storn και K. Price το 1995 [Sto95] και είναι στην πραγματικότητα ένας τύπος Εξελικτικής Στρατηγικής με ειδικά χαρακτηριστικά, για την αντιμετώπιση προβλημάτων συνεχούς βελτιστοποίησης, τα οποία συναντιούνται συχνά κατά το σχεδιασμό μηχανολογικών διατάξεων. Η ειδοποιός διαφορά του, συγκριτικά με άλλους ΕΑ, έγκειται στη διαδικασία της διαφορικής μετάλλαξης, η οποία βασίζεται σε μια τριάδα τυχαία επιλεγμένων και διαφορετικών ατόμων [Nti06]. Για κάθε άτομο του τρέχοντος πληθυσμού, επιλέγεται μια τυχαία τριάδα ατόμων από τον ίδιο πληθυσμό και έτσι παράγεται ένα νέο διάνυσμα μεταβλητών σχεδίασης, προσθέτοντας μια σταθμισμένη διαφορά μεταξύ των δύο ατόμων της τριάδας στο τρίτο (δότης).

Με αυτόν τον τρόπο παράγεται ένα τροποποιημένο άτομο, το οποίο μαζί με το άτομο του τρέχοντος πληθυσμού υπόκειται σε επιχιασμό, δημιουργώντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, μία νέα υποψήφια λύση (trial vector). Ο πληθυσμός της επόμενης γενιάς επιλέγεται ανάμεσα στον υπάρχοντα πληθυσμό και τις αντίστοιχες υποψήφιες λύσεις (trial vectors), που έχουν

προέλθει από τη διαδικασία της μετάλλαξης και του επιχιασμού. Εάν η υποψήφια λύση έχει καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης από το αντίστοιχο άτομο του τρέχοντος πληθυσμού τότε το τελευταίο αντικαθίσταται από το πρώτο στον επόμενο πληθυσμό.

Η βασική διαφορά του τελεστή επιλογής του ΔΕ αλγορίθμου από τους υπόλοιπους ΕΑ εντοπίζεται στο γεγονός ότι κάθε υποψήφια (trial) λύση δε συγκρίνεται με όλα τα άτομα του τρέχοντος πληθυσμού, παρά μόνο με το αντίστοιχό του (γονέας). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι πολύ σημαντικό για την παραλληλοποίηση του αλγορίθμου και επιτρέπει εύκολη εφαρμογή ασύγχρονης υλοποίησης. Εάν κάθε άτομο ανατεθεί σε έναν επεξεργαστή τότε αυτός μπορεί να προχωρήσει στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης ενός νέου ατόμου, κάθε φορά που ολοκληρώνει τον υπολογισμό για τον πρόγονό του. Ακόμα, η επικοινωνία μεταξύ των επεξεργαστών απαιτείται μόνο για την εφαρμογή του τελεστή μετάλλαξης, ο οποίος δεν προϋποθέτει την ύπαρξη γενιάς με την στενή έννοια, καθώς μπορεί στον τρέχων πληθυσμό να υπάρχουν άτομα που ανήκουν σε διαφορετικές γενιές [Ντι06].

Η διαδικασία βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας ένα ΔΕ αλγόριθμο παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 3.1 μέσω ενός διαγράμματος ροής.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής ενός ΔΕ αλγορίθμου [Αμο05].

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των βασικών στοιχείων που συνθέτουν τον ΔΕ αλγόριθμο. Δεδομένης μιας αντικειμενικής συνάρτησης

$$f(\mathbf{X}): R^n \rightarrow R \quad (3.1)$$

όπου $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ το διάνυσμα που περιέχει τις τιμές των n μεταβλητών σχεδίασης του εξεταζόμενου προβλήματος, ως στόχος ορίζεται η εύρεση των τιμών για τις μεταβλητές σχεδίασης, οι οποίες οδηγούν σε ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης κάθε μεταβλητή σχεδίασης μπορεί να πάρει τιμές ανάμεσα σε κάποια προκαθορισμένα από το χρήστη άνω και κάτω όρια:

$$x_j^{(L)} \leq x_j \leq x_j^{(U)} \quad , \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

Τα N_p άτομα του αρχικού πληθυσμού δημιουργούνται τυχαία, μέσα στο χώρο που ορίζεται από τα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδίασης, ως εξής:

$$x_{k,i}^0 = r (x_i^U - x_i^L) + x_i^L \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, N_p \quad (3.3)$$

όπου r είναι μια τυχαία τιμή στο διάστημα $[0, 1]$, ενώ οι δείκτες U και L συμβολίζουν τα άνω και κάτω όρια αντίστοιχα.

Ο τελεστής της μετάλλαξης του ΔΕ αλγορίθμου (διαφορική μετάλλαξη) βασίζεται στην επιλογή μιας τριάδας τυχαία επιλεγμένων και διαφορετικών μελών στον τρέχων πληθυσμό, για κάθε άτομο του πληθυσμού. Ένα νέο άτομο δημιουργείται προσθέτοντας το διάνυσμα της σταθμισμένης διαφοράς μεταξύ δύο ατόμων της τριάδας στο τρίτο. Το μεταλλαγμένο διάνυσμα και το αρχικό μέλος του πληθυσμού υπόκεινται σε διαδικασία διασταύρωσης που παράγει την τελική υποψήφια (trial) λύση ως εξής [Nti06, Lei15, Nik11, Nik13]:

$$x'_{k,i}^{G+1} = \begin{cases} x_{C_k,i}^G + F(x_{A_k,i}^G - x_{B_k,i}^G) & \text{εάν } (r \leq Cr \text{ or } i = i^*) \\ x_{k,i}^G & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου G είναι η τρέχουσα γενιά, $x_{C_k,i}^G$ είναι οι τιμές των μεταβλητών του δότη και

$$\begin{aligned} k &= 1, 2, \dots, N_p \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \\ A_k &\in [1, \dots, N_p], \quad B_k \in [1, \dots, N_p], \quad C_k \in [1, \dots, N_p] \\ A_k &\neq B_k \neq C_k \neq k \\ Cr &\in [0, 1], \quad F \in [0, 1], \quad r \in [0, 1] \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ο τυχαίος αριθμός r γεννάται για κάθε παράμετρο του χρωμοσώματος σε κάθε γενιά. Οι F και Cr είναι παράμετροι ελέγχου, οι οποίες παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, επηρεάζοντας την ταχύτητα σύγκλισης και την ευρωστία του αλγορίθμου [Nti06]. Οι τιμές τους εξαρτώνται από την αντικειμενική συνάρτηση, τα χαρακτηριστικά του προβλήματος και το μέγεθος του πληθυσμού. Οι βέλτιστες τιμές αυτών των παραμέτρων λαμβάνονται μέσω διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος. Το Cr ελέγχει το ποσοστό των παραμετρικών τιμών που αντιγράφονται από το μεταλλαγμένο διάνυσμα [Γκο13]. Στην συγκεκριμένη εργασία οι τιμές για τα Cr και F ορίστηκαν ίσες με 0,6 και 0,45 αντίστοιχα. Το σχήμα επιλογής του ΔΕ αλγορίθμου για πρόβλημα ελαχιστοποίησης περιγράφεται ως ακολούθως:

$$\mathbf{X}_i^{(G+1)} = \begin{cases} \mathbf{X}_i'^{(G+1)} & \text{εαν } f(\mathbf{X}_i'^{(G+1)}) \leq f(\mathbf{X}_i^{(G)}) \\ \mathbf{X}_i^{(G)} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.6)$$

Όπως προαναφέρθηκε, γίνεται επιλογή μεταξύ του υποψήφιου και τρέχοντος ατόμου, βάση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Έτσι διασφαλίζεται ότι όλα τα άτομα της επόμενης γενιάς είναι εξίσου καλά ή καλύτερα από τα αντίστοιχα τους στον υπάρχοντα πληθυσμό [Nti06].

3.3 Υποκατάστατα Μοντέλα (Surrogate models)

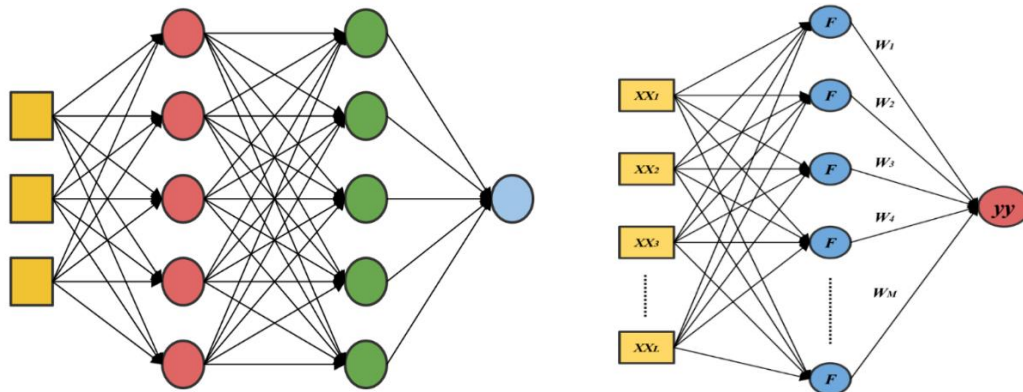
Κατά κανόνα, η εφαρμογή μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού μηχανολογικών διατάξεων, απαιτεί τη διενέργεια προσομοιώσεων για την εκτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης και των αντίστοιχων περιορισμών συναρτήσει των μεταβλητών σχεδίασης. Για παράδειγμα, κατά την διαδικασία αεροδυναμικής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας μιας πτέρυγας ενός αεροπλάνου είναι αναγκαία η προσομοίωση της ροής γύρω από κάθε υποψήφια λύση, για τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου εξετάζονται πραγματικά προβλήματα, ακόμα και μία μόνο προσομοίωση μπορεί να διαρκέσει από αρκετά λεπτά έως μερικές μέρες, ανάλογα με το πρόβλημα και την ακρίβεια του υπολογιστικού μοντέλου που επιλέγεται. Συνεπώς, ένα τόσο μεγάλο υπολογιστικό κόστος μπορεί να καταστήσει αδύνατη την εφαρμογή διαδικασιών βελτιστοποίησης, όπου συνήθως απαιτούνται χιλιάδες ή ακόμα και εκατομμύρια προσομοιώσεις. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος, είναι η χρήση προσεγγιστικών ή υποκατάστατων μοντέλων (surrogate models ή meta-models), τα οποία μιμούνται την συμπεριφορά του πραγματικού μοντέλου, με ικανοποιητική ακρίβεια, αλλά σε πολύ μικρότερο χρόνο [Tor98, Gia02, Lei15].

3.4 Δ.Ε. Αλγόριθμος Υποβοηθούμενος με Υποκατάστατα Μοντέλα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δύο τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) επιλέγονται για να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατα μοντέλα, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των χρονοβόρων αξιολογήσεων που απαιτούνται ανά γενιά, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση ενός Multi-Layer Perceptron (MLP) ΤΝΔ και ενός Radial Basis Function (RBF) ΤΝΔ [Nik13], η αρχιτεκτονική των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Η πολλαπλότητα των υποκατάστατων μοντέλων είναι ένα κρίσιμο γεγονός, δεδομένου του ότι η αποτελεσματικότητα κάθε μοντέλου ποικίλει, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επομένως, σε κάθε γενιά, επιλέγεται να ενεργεί το μοντέλο με την καλύτερη απόδοση (μικρότερο σφάλμα) μεταξύ των δύο [Lel15, Nik11, Nik13].

3.4.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι μοντέλα εμπνευσμένα από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούνται με σκοπό την εκτίμηση ή την προσέγγιση συναρτήσεων. Τα ΤΝΔ παρουσιάζονται ως συστήματα διασυνδεδεμένων “νευρώνων” που ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους. Οι συνδέσεις έχουν βάρη που μπορούν να συντονιστούν με βάση την εμπειρία, καθιστώντας τα νευρωνικά δίκτυα προσαρμόσιμα στις εισόδους και ικανά να μαθαίνουν [Ost16].



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του MLP (αριστερά) και του RBF (δεξιά) ΤΝΔ, που χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατα μοντέλα [Nik13].

3.4.2 Χρήση Υποκατάστατων Μοντέλων

Σε κάθε γενιά του Δ.Ε. αλγορίθμου, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αξιολόγησης κάθε υποψήφιο (trial) χρωμόσωμα πρέπει να αξιολογηθεί και στην συνέχεια να συγκριθεί με το αντίστοιχο του τρέχοντος πληθυσμού (γονέας) για να επιλεγεί το καλύτερο προσαρμοσμένο μεταξύ τους. Η ιδέα της εισαγωγής ενός υποκατάστατου μοντέλου έγκειται στην αντικατάσταση των γενικά χρονοβόρων αξιολογήσεων των trial ατόμων κάνοντας

χρήση του πραγματικού μοντέλου προσομοίωσης, με γρήγορες προσεγγίσεις μέσω των ΤΝΔ, χωρίς να επηρεάζεται η ευρωστία του αλγορίθμου [Nik11].

Κατά την φάση της αξιολόγησης, κάθε trial χρωμόσωμα αξιολογείται αρχικά, μέσω της χρήσης ενός υποκατάστατου μοντέλου. Στη συνέχεια, εάν το συγκεκριμένο χρωμόσωμα έχει προ-αξιολογηθεί ως χειρότερο από το αντίστοιχο άτομο του τρέχοντος πληθυσμού, τότε δεν πραγματοποιείται περαιτέρω ακριβής αξιολόγηση, το trial χρωμόσωμα εγκαταλείπεται και το άτομο του τρέχοντος πληθυσμού (γονέας) μεταφέρεται στην επόμενη γενιά [Nik11, Nik13].

Διαφορετικά, πραγματοποιείται ακριβής επαναξιολόγηση, ακολουθούμενη από νέα σύγκριση μεταξύ των δύο ατόμων. Εάν το trial άτομο συνεχίζει να είναι καλύτερο, τότε αυτό περνάει στην επόμενη γενιά. Διαφορετικά, το trial άτομο εγκαταλείπεται και το άτομο του τρέχοντος πληθυσμού (γονέας) θα περάσει στην επόμενη γενιά [Lel15, Nik11, Nik13].

3.5 Παράλληλη Υλοποίηση

Παρά τη σημαντική συμβολή των ΕΑ στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, τείνουν να είναι υπερβολικά χρονοβόροι, δεδομένου ότι απαιτούν σημαντικό αριθμό αξιολογήσεων. Έτσι, η επιτάχυνση μέσω παράλληλης επεξεργασίας φαίνεται υποχρεωτική. Η ιδέα πίσω από την αναπτυχθείσα στρατηγική παραλληλισμού είναι να καταστεί δυνατή η συνεργασία του Δ.Ε. αλγόριθμου με διαφορετικά λογισμικά προσομοίωσης, στην μορφή εκτελέσιμων αρχείων (.exe). Η απαιτούμενη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του Δ.Ε. αλγόριθμου και του λογισμικού προσομοίωσης επιτυγχάνεται με κατάλληλα αρχεία κειμένου (.txt), ενώ η επικοινωνία μεταξύ των επεξεργαστών και η παράλληλη υλοποίηση επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας το MPI (Message Passing Interface). Η προτεινόμενη στρατηγική φαίνεται να είναι αρκετά αποτελεσματική, ανεξάρτητα από τη χρήση αρχείων κειμένου, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο υπολογιστικός χρόνος της μεταφοράς δεδομένων είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον αντίστοιχο χρόνο αξιολόγησης [Str17, Lel18].

Τα μέλη του πληθυσμού διανέμονται εκ των προτέρων μεταξύ των διαθέσιμων επεξεργαστών και κάθε επεξεργαστής είναι υπεύθυνος για την αξιολόγηση ενός ατόμου. Στη συνέχεια αποδίδεται μια μοναδική κατάταξη σε κάθε επεξεργαστή, ενώ ένας από αυτούς ορίζεται ως ο κύριος κόμβος, που επιβλέπει τη διαδικασία και εκτελεί την προεπεξεργασία που απαιτείται πριν από την έναρξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης, η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός φακέλου εργασίας για κάθε επεξεργαστή. Επιπλέον, ο κύριος κόμβος διανέμει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τον ΔΕ αλγόριθμο σε όλους τους άλλους επεξεργαστές, δηλαδή τον αριθμό των μεταβλητών σχεδίασης, τα άνω και κάτω όρια τους και τους παραμέτρους ελέγχου του ΔΕ αλγόριθμου [Str17, Lel18a].

3.6 Ασύγχρονος Παράλληλος ΔΕ Αλγόριθμος

Σε μια σύγχρονη έκδοση ενός ΔΕ αλγορίθμου οι επεξεργαστές ασχολούνται πάντα με τα άτομα της ίδιας γενιάς και υπάρχει κάποια μορφή επικοινωνίας για να συγχρονιστεί η διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι οι ταχύτεροι επεξεργαστές πρέπει να περιμένουν τους αργότερους για να περάσουν στην επόμενη γενιά [Nti06]. Ωστόσο, σε μια ασύγχρονη υλοποίηση η γενιά δεν είναι αυστηρά καθορισμένη (την κάθε στιγμή) και ο υπάρχων πληθυσμός μπορεί να περιλαμβάνει άτομα που ανήκουν σε διαφορετικές γενιές [Nti06]. Πιο συγκεκριμένα, κάθε trial άτομο (απόγονος) μπορεί να αντικαταστήσει τον γονέα (αν είναι καλύτερα προσαρμοσμένος) και να γίνει μέλος του τρέχοντος πληθυσμού, αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αξιολόγησής του, χωρίς να περιμένει την ολοκλήρωση των αξιολογήσεων των υπόλοιπων ατόμων του πληθυσμού. Έτσι τα άτομα εξελίσσονται ανεξάρτητα, χωρίς αυστηρό έλεγχο ή πλήρη συντονισμό μεταξύ των γενεών. Συνεπώς, με την ασύγχρονη εφαρμογή υπάρχει το σαφές πλεονέκτημα ότι οι βελτιωμένες λύσεις μπορούν να συμβάλλουν άμεσα στην εξέλιξη χωρίς χρονικές υστερήσεις [Nti06]. Επίσης μπορεί να επιταχυνθεί η σύγκλιση, ώστε να γίνει ταχύτερη από την σύγχρονη εφαρμογή.

“Intentionally Blank”

Κεφάλαιο 4 – Σχεδιασμός Διαχύτη

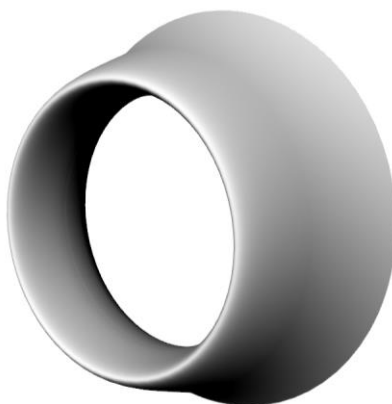
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία αεροδυναμικής βελτιστοποίησης του σχήματος ενός **αξονοσυμμετρικού** διαχύτη, ο οποίος αποτελεί ένα από τα κύρια συστατικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας υποβοηθούμενης από διαχύτη (DAWT). Ο βέλτιστος σχεδιασμός του έχει καθοριστικό ρόλο στην ικανότητα εξαγωγής ισχύος, καθώς ο μέγιστος θεωρητικός συντελεστής ισχύος μιας τέτοιας διάταξης, όπως προκύπτει από την Εξ. (2.22), είναι άμεση συνάρτηση της ικανότητας του διαχύτη να επιταχύνει τη ροή του αέρα στο εσωτερικό του, η οποία εκφράζεται από το λόγο γ , δηλαδή το λόγο της ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα προς την ταχύτητα της επ' άπειρον ροής (Κεφάλαιο 2).

4.1 Αρχική Γεωμετρία

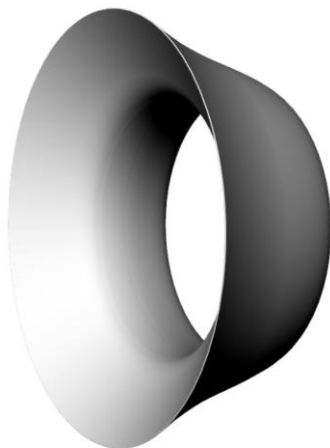
Το πρόβλημα ανάγεται στην βελτίωση μιας υπάρχουσας γεωμετρίας διαχύτη, η οποία παρουσιάζεται μέσω των Σχημάτων 4.1 - 4.4. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αρχικού διαχύτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

| Παράμετρος | Τιμή |
|----------------------------|----------------------|
| Μήκος Διαχύτη | 3,66 m |
| Εμβαδόν Διατομής Εξόδου | 65,61 m ² |
| Εμβαδόν Διατομής Δρομέα | 23,78 m ² |
| Εμβαδόν Διατομής Εισόδου | 30,44 m ² |
| Χορδή Αεροδυναμικού Προφίλ | 3.94 m |

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αρχικού διαχύτη.



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της περιοχής εισόδου της αρχικής γεωμετρίας του διαχύτη.



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση της περιοχής εξόδου της αρχικής γεωμετρίας του διαχύτη.



Σχήμα 4.3: Πλάγια όψη (σε τομή) της αρχικής γεωμετρίας του διαχύτη.



Σχήμα 4.4: Προοπτική προβολή της αρχικής γεωμετρίας του διαχύτη.

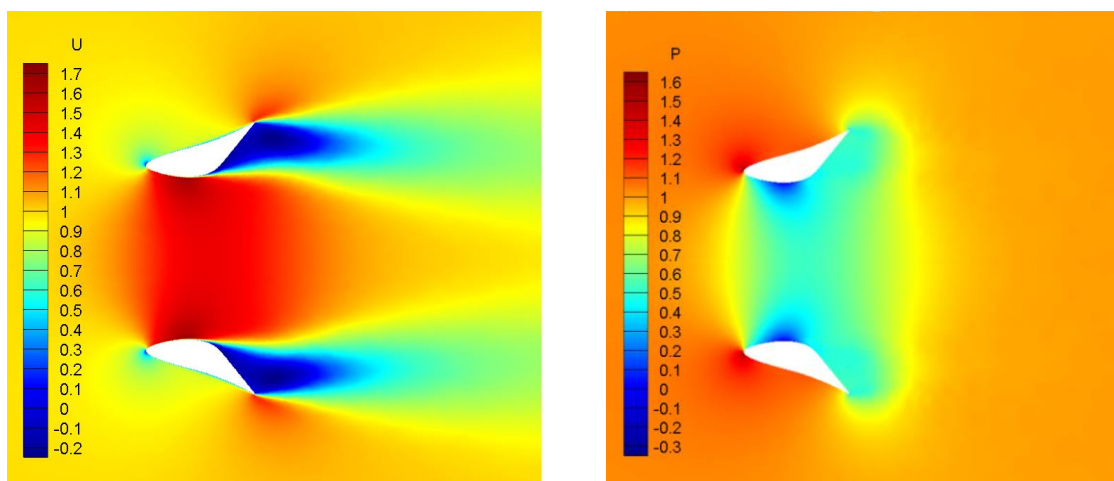
4.2 Προσομοίωση Ροής

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας γεωμετρίας, το οποίο και απαιτεί την προσομοίωση του πεδίου ροής γύρω από τον εκάστοτε σχεδιασμό διαχύτη, με τελικό σκοπό τον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στην παρούσα εφαρμογή η προσομοίωση της τυρβώδους ασυμπίεστης ροής γύρω από κάθε γεωμετρία διαχύτη επιτυγχάνεται μέσω ενός κώδικα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics – CFD), η ανάπτυξη του οποίου, καθώς και η επικύρωση της ακρίβειάς του, παρουσιάζονται στην εργασία των Leloudas et al. [Lel18b]. Ο συγκεκριμένος υπολογιστικός κώδικας βασίζεται στις εξισώσεις Navier - Stokes, τροποποιημένες μέσω της μεθόδου της τεχνητής συμπίεστότητας (*artificial compressibility*) και διατυπωμένες για 2D αξονοσυμμετρικά συστήματα αναφοράς σε αδιάστατη μορφή. Επιπλέον, η διακριτοποίηση του πεδίου ροής πραγματοποιείται μέσω 2D μη-δομημένων υπολογιστικών πλεγμάτων, τα οποία αποτελούνται τόσο από τριγωνικά αλλά και τετράπλευρα στοιχεία, σε συνδυασμό με ένα κεντροκομβικό σχήμα πεπερασμένων όγκων [Lel18b].

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η ικανότητα του κώδικα να επιλύει χρονοβόρα 3D προβλήματα ροής τα οποία παρουσιάζουν αξονική συμμετρία, αντιμετωπίζοντάς τα ως 2D προβλήματα, είναι μία ιδιαιτέρως σημαντική ιδιότητα, καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση ενός κώδικα υψηλής πιστότητας στην παρούσα διαδικασία βελτιστοποίησης. Κάτι τέτοιο θα ήταν πρακτικά αδύνατο για την περίπτωση ενός αντίστοιχου 3D CFD κώδικα, λόγω των υψηλών απαιτήσεων τόσο σε υπολογιστικό κόστος αλλά και πόρους.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το αδιάστατο πεδίο της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας (αριστερά) και πίεσης (δεξιά) για την αρχική γεωμετρία του διαχύτη.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση της αδιάστατης αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας (αριστερά) και πίεσης (δεξιά) για την αρχική γεωμετρία του διαχύτη.

4.3 Παραμετροποίηση Υπολογιστικού Πλέγματος

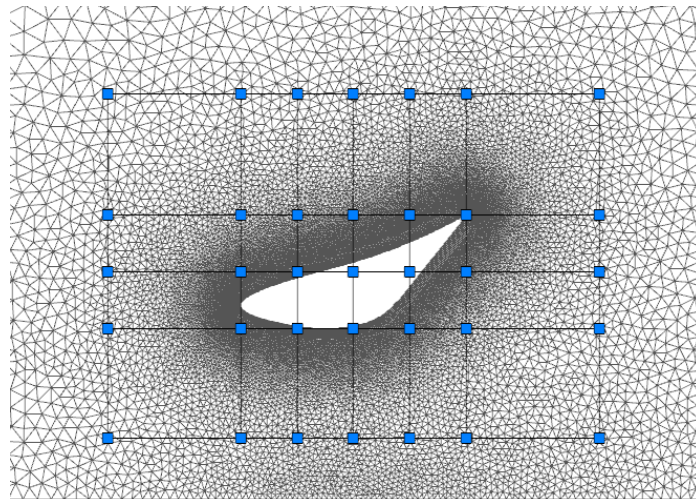
Η επιλογή της τεχνικής παραμετροποίησης της γεωμετρίας είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια κατά την ανάπτυξη μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, με τεράστια επίδραση τόσο στην επιτυχία της όσο και στο υπολογιστικό κόστος [Mor08]. Ειδικότερα, εάν η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας σχεδίασης πραγματοποιείται μέσω ενός λογισμικού CFD, το οποίο απαιτεί τη χρήση ενός υπολογιστικού πλέγματος (grid/mesh), η μέθοδος παραμετροποίησης μπορεί να εφαρμοστεί είτε για την παραμετροποίηση της εξεταζόμενης γεωμετρίας, από την οποία πρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο υπολογιστικό πλέγμα, είτε για την παραμετροποίηση αλλά και την παραμόρφωση του ίδιου του υπολογιστικού πλέγματος, διατηρώντας ταυτόχρονα την αρχική τοπολογία. Ωστόσο, είναι προφανές ότι η πρώτη από τις δύο παραπάνω τεχνικές, προϋποθέτει την διαθεσιμότητα ενός λογισμικού για την αυτόματη δημιουργία πλεγμάτων. Συνεπώς για την αποφυγή της χρήσης ενός λογισμικού αυτόματης δημιουργίας πλέγματος, στην παρούσα διαδικασία βελτιστοποίησης ακολουθείται η προσέγγιση παραμετροποίησης και παραμόρφωσης του αρχικού υπολογιστικού πλέγματος, μια τεχνική η οποία είναι γενικά γνωστή ως mesh morphing [Mor08].

Συγκεκριμένα, η παραμετροποίηση του υπολογιστικού πλέγματος επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής της Ελεύθερης Παραμόρφωσης (Free Form Deformation - FFD), η οποία είναι μια πολύ ευέλικτη τεχνική για τον χειρισμό οποιουδήποτε σχήματος αυθαίρετης γεωμετρίας [Sed86]. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, λόγω της φύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης που εξετάζεται, γίνεται χρήση μιας ειδικά προσαρμοσμένης έκδοσης της τεχνικής FFD για την παραμετροποίηση 2D υπολογιστικών πλεγμάτων, η οποία αναπτύχθηκε στην εργασία των Leloudas et al. [Lel18b].

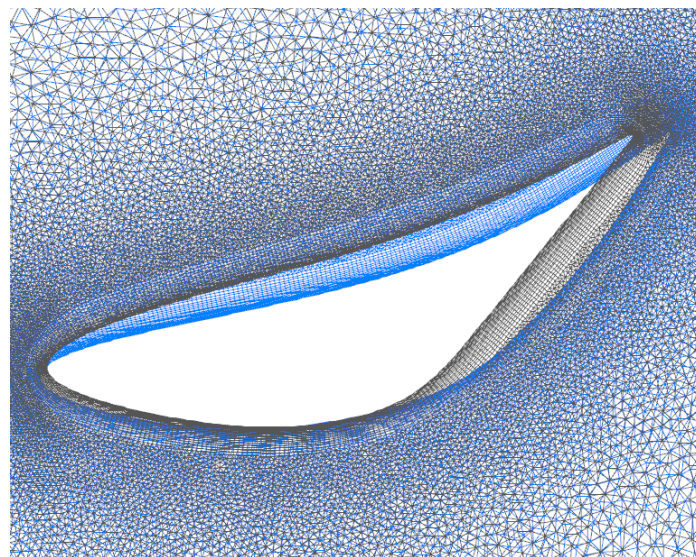
Η τεχνική FFD βασίζεται στην έμμεση παραμόρφωση της εξεταζόμενης γεωμετρίας, μέσω της ενσωμάτωσής της εντός ενός παραμετρικού πλέγματος ελέγχου (lattice). Έπειτα, μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του παραμετρικού πλέγματος ελέγχου, κάθε αντικείμενο που βρίσκεται εντός του ακολουθεί την ίδια παραμόρφωση. Για την κατασκευή του πλέγματος ελέγχου του FFD επιλέγεται μία επίπεδη επιφάνεια B-Spline, κυρίως λόγω των ευεργετικών χαρακτηριστικών που παρέχουν, όπως η ιδιότητά τους να επιτυγχάνουν εξαιρετικά ομαλές παραμορφώσεις [Pie97]. Μετά από την κατασκευή του παραμετρικού FFD πλέγματος, ένας αλγόριθμος αναζήτησης τύπου quadtree χρησιμοποιείται, με σκοπό την αντιστοίχιση ενός μοναδικού ζεύγους παραμετρικών συντεταγμένων, που παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από την κίνηση των σημείων ελέγχου, σε κάθε οντότητα (τους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος στην περίπτωση μας) που βρίσκεται εντός του FFD lattice [Lel15, Lel18b].

Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι μόνο το τμήμα του υπολογιστικού πλέγματος που περικλείεται εντός του αρχικού FFD πλέγματος ελέγχου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5, υφίσταται παραμόρφωση, ενώ το τμήμα του υπολογιστικού πλέγματος εκτός των σημείων του FFD πλέγματος παραμένει σταθερό. Βάση των παραπάνω, τα σημεία ελέγχου του FFD,

που βρίσκονται στην ακραία δεξιά, αριστερή, πάνω και κάτω σειρά του πλέγματος ελέγχου FFD τίθενται σταθερά, ορίζοντας έτσι μια σταθερή περιοχή εντός της οποίας περιορίζεται η παραμόρφωση του υπολογιστικού πλέγματος. Αυτό πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν κατά τον ορισμό των άνω και κάτω ορίων των συντεταγμένων x και y των σημείων ελέγχου του FFD πλέγματος, οι οποίες στην συγκεκριμένη εφαρμογή παίζουν το ρόλο των μεταβλητών σχεδίασης, προκειμένου να προκύψουν παραμορφωμένα πλέγματα αποδεκτής ποιότητας, χωρίς επικαλυπτόμενες ακμές [Lel18b]. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το αρχικό πλέγμα FFD, καθώς και το αρχικό 2D υπολογιστικό πλέγμα, γύρω από το αξονοσυμμετρικό προφίλ του αρχικού διαχύτη, ενώ στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται ένα ενδεικτικό παραμορφωμένο πλέγμα.



Σχήμα 4.5 : Ένα 2D υβριδικό υπολογιστικό πλέγμα μερικώς ενσωματωμένο μέσα σε ένα FFD πλέγμα ελέγχου .



Σχήμα 4.6: Συγκριτική απεικόνιση του αρχικού (γκρι) και ενός παραμορφωμένου (μπλε) υπολογιστικού πλέγματος, το οποίο προέκυψε από την μετακίνηση των σημείων ελέγχου του FFD.

Τέλος, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα άνω και κάτω όρια για όλες τις μεταβλητές σχεδίασης, οι οποίες προκύπτουν ως το σύνολο των x και y συντεταγμένων των σημείων ελέγχου του FFD πλέγματος που επιτρέπεται να μετακινηθούν, δηλαδή όλων των σημείων, εκτός αυτών που βρίσκονται στην ακραία δεξιά, αριστερή, πάνω και κάτω σειρά του FFD πλέγματος ελέγχου. Επισημαίνεται ότι οι τιμές που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, καθώς και το υπολογιστικό πλέγμα, έχουν αδιαστατοποιηθεί κατάλληλα με βάση το μήκος της χορδής του αεροδυναμικού προφίλ του αρχικού διαχύτη.

| No. | Μεταβλητή Σχεδίασης | Κάτω Όριο | Άνω Όριο | No. | Μεταβλητή Σχεδίασης | Κάτω Όριο | Άνω Όριο |
|-----|---------------------|-----------|-----------|-----|---------------------|-----------|----------|
| 1 | CPx_{11} | -0.354927 | -0.354927 | 16 | CPy_{11} | 0.600000 | 0.800000 |
| 2 | CPx_{12} | -0.354927 | -0.354927 | 17 | CPy_{12} | 0.850000 | 1.100000 |
| 3 | CPx_{13} | -0.354927 | -0.354927 | 18 | CPy_{13} | 1.000000 | 1.300000 |
| 4 | CPx_{21} | -0.400000 | 0.000000 | 19 | CPy_{21} | 0.630000 | 0.750000 |
| 5 | CPx_{22} | -0.400000 | 0.200000 | 20 | CPy_{22} | 0.750000 | 1.050000 |
| 6 | CPx_{23} | -0.350000 | 0.350000 | 21 | CPy_{23} | 0.800000 | 1.350000 |
| 7 | CPx_{31} | -0.100000 | 0.300000 | 22 | CPy_{31} | 0.650000 | 0.800000 |
| 8 | CPx_{32} | -0.200000 | 0.500000 | 23 | CPy_{32} | 0.750000 | 1.100000 |
| 9 | CPx_{33} | -0.350000 | 0.450000 | 24 | CPy_{33} | 0.900000 | 1.400000 |
| 10 | CPx_{41} | 0.100000 | 0.550000 | 25 | CPy_{41} | 0.660000 | 1.040000 |
| 11 | CPx_{42} | 0.000000 | 0.700000 | 26 | CPy_{42} | 0.800000 | 1.050000 |
| 12 | CPx_{43} | 0.250000 | 0.500000 | 27 | CPy_{43} | 1.040000 | 1.200000 |
| 13 | CPx_{51} | 0.574875 | 0.574875 | 28 | CPy_{51} | 0.550000 | 0.950000 |
| 14 | CPx_{52} | 0.574875 | 0.574875 | 29 | CPy_{52} | 0.750000 | 1.070000 |
| 15 | CPx_{53} | 0.574875 | 0.574875 | 30 | CPy_{53} | 1.100000 | 1.200000 |

Πίνακας 4.2: Άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδίασης.

4.4 Παράμετροι της Διαδικασίας Βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση του διαχύτη διενεργήθηκε για ταχύτητα ανέμου της επ' άπειρον ροής ίση με 6 m/s και αριθμό Reynolds ίσο με $1,65 \cdot 10^6$, ενώ η προσομοίωση της ασυμπίεστης ροής επετεύχθη ορίζοντας την τιμή της παραμέτρου τεχνητής συμπίεστότητας ίση με 10 και την τιμή του αριθμού CFL ίση με 1. Το αρχικό 2D υβριδικό πλέγμα, το οποίο κατασκευάστηκε γύρω από την αρχική γεωμετρία της αεροτομής, αποτελείται από 25.950 κόμβους, 36.610 τριγωνικά στοιχεία και 7.296 τετράπλευρα στοιχεία. Επίσης, επισημαίνεται ότι η λύση του πεδίου ροής γύρω από την αρχική γεωμετρία διαχύτη τέθηκε ως αρχική συνθήκη για την προσομοίωση του πεδίου ροής γύρω από κάθε υποψήφια γεωμετρία. Αυτό έγινε με σκοπό την μείωση του χρόνου σύγκλισης των προσομοιώσεων για κάθε υποψήφιο σχεδιασμό.

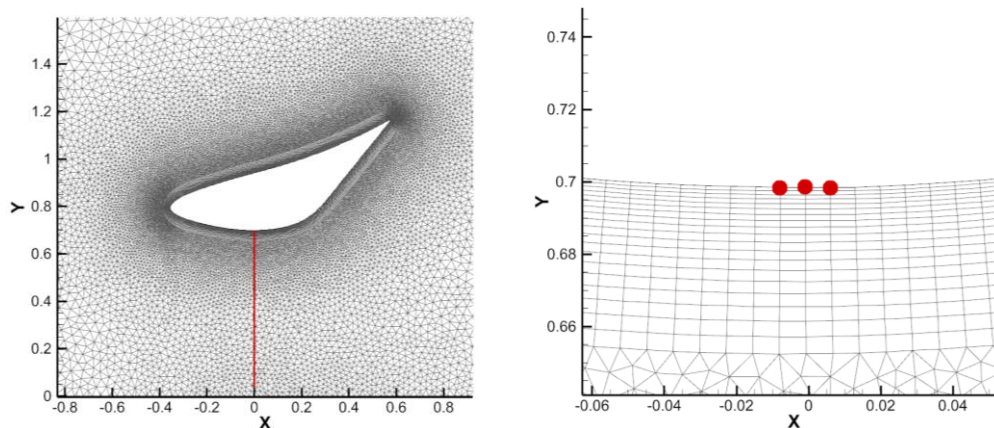
Η παραμετροποίηση της γεωμετρίας επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας το 2D FFD πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, ενώ οι βαθμοί των συναρτήσεων B-Spline τέθηκαν οι μέγιστοι δυνατοί (6 για την x διεύθυνση και 4 για την y διεύθυνση), με σκοπό την όσο το δυνατόν ομαλότερη παραμόρφωση πλέγματος. Τα σημεία ελέγχου του FFD πλέγματος επιτρέπονται να κινούνται και στις δύο διευθύνσεις, εκτός από τα σημεία που αντιστοιχούν στα χείλη προσβολής και εκφυγής, στα οποία δεν επιτρέπεται η κίνηση κατά την x διεύθυνση. Αυτός ο περιορισμός σκοπεύει στην διατήρηση του μήκους του διαχύτη. Συνεπώς, ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης είναι ίσος με 24.

4.5 Αντικειμενική Συνάρτηση και Περιορισμοί

Όσον αφορά το κριτήριο βελτιστοποίησης, ορίζεται ως η μεγιστοποίηση της κατανομής του λόγου επιτάχυνσης της ταχύτητας $\gamma(r)$ στο επίπεδο του δρομέα, ένα μέγεθος το οποίο είναι καθοριστικό για την ικανότητα εξαγωγής ενέργειας. Δεδομένης της ιδιαιτερότητας του συγκεκριμένου ΔΕ αλγόριθμου να επιλύει μόνο προβλήματα ελαχιστοποίησης η συνάρτηση κόστους ορίζεται ως εξής:

$$f_{cost} = 3 - 2\pi \int_0^R \gamma(r) dr \quad (4.1)$$

Στην παρούσα εφαρμογή, εκτός από τους ρητούς περιορισμούς που επιβλήθηκαν στις μεταβλητές σχεδίασης και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, επιβάλλεται ένας περιορισμός ακόμα σχετικά με την διατήρηση της εσωτερικής ακτίνας του διαχύτη, στην αξονική θέση τοποθέτησης του δρομέα ($x = 0$). Η ικανοποίηση του συγκεκριμένου περιορισμού ισότητας υλοποιείται μέσω της εφαρμογής μιας συνάρτησης τιμωρίας, η οποία στην ουσία επιβάλλει την διατήρηση της y συντεταγμένης (ακτινική διεύθυνση) για 3 σημεία της καμπύλης του αεροδυναμικού προφίλ του διαχύτη που βρίσκονται γύρω από την θέση $x = 0$ (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Η αξονική θέση τοποθέτησης του δρομέα (αριστερά) και τα 3 σημεία γύρω από αυτή τη θέση, με την βοήθεια των οποίων υλοποιείται ο περιορισμός σταθερής εσωτερικής ακτίνας.

Η μαθηματική διατύπωση της συνάρτησης τιμωρίας γίνεται ως εξής:

$$f_{pen} = \sum_{i=1}^3 |y_{init,i} - y_{can,i}| \quad (4.2)$$

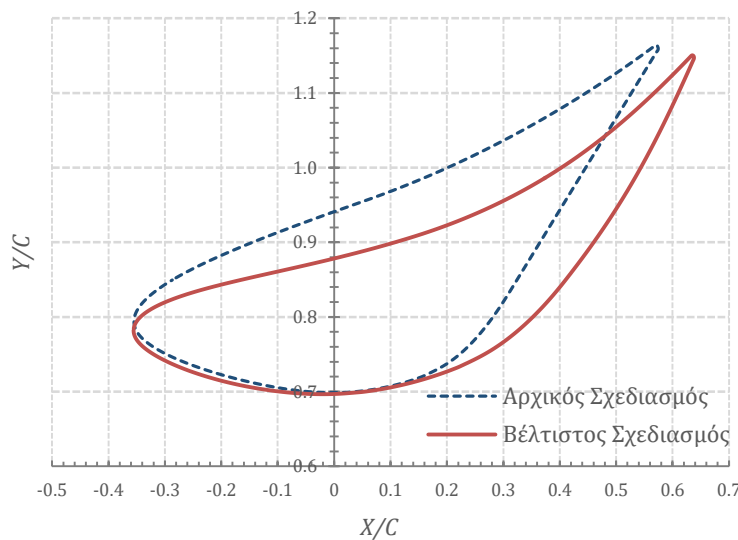
όπου $y_{init,i}$ η συντεταγμένη του $i^{οστου}$ εκ των 3ων σημείων στο αρχικό πλέγμα και $y_{can,i}$ η αντίστοιχη συντεταγμένη για μία υποψήφια λύση (παραμορφωμένο πλέγμα). Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$f_{cost} = 3 - 2\pi \int_0^R \gamma(r)dr + 10f_{pen} \quad (4.3)$$

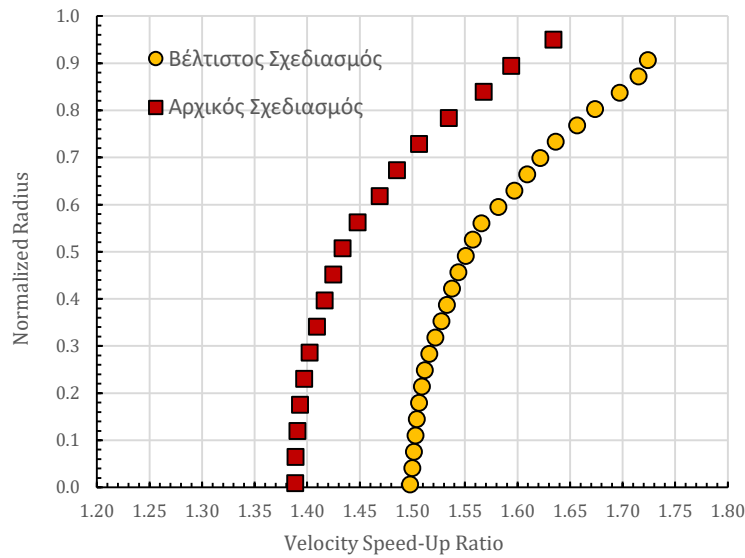
4.6 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Διαχύτη

Η διαδικασία βελτιστοποίησης του διαχύτη διενεργήθη σε ένα υπολογιστικό σύστημα *DELL™ R815 PowerEdge™*, με τέσσερεις *AMD Opteron™ 6380* επεξεργαστές 16 πυρήνων στα 2.50 GHz (64 πυρήνες συνολικά). Το μέγεθος του πληθυσμού του ΔΕ αλγορίθμου βελτιστοποίησης ορίστηκε στα 60 άτομα, ενώ ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για 175 γενιές. Ο συνολικός χρόνος που διήρκεσε η υπολογιστική διαδικασία ανέρχεται σε περίπου 260 ώρες.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το αεροδυναμικό προφίλ της βέλτιστης γεωμετρίας του διαχύτη σε σύγκριση με την αρχική γεωμετρία, ενώ στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται η κατανομή της επιτάχυνσης της ταχύτητας στην θέση $x = 0$ (επίπεδο δρομέα) για τις δύο γεωμετρίες, συναρτήσει της κανονικοποιημένης ακτίνας. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.11 παρέχεται μια 3D απεικόνιση της βέλτιστης γεωμετρίας.

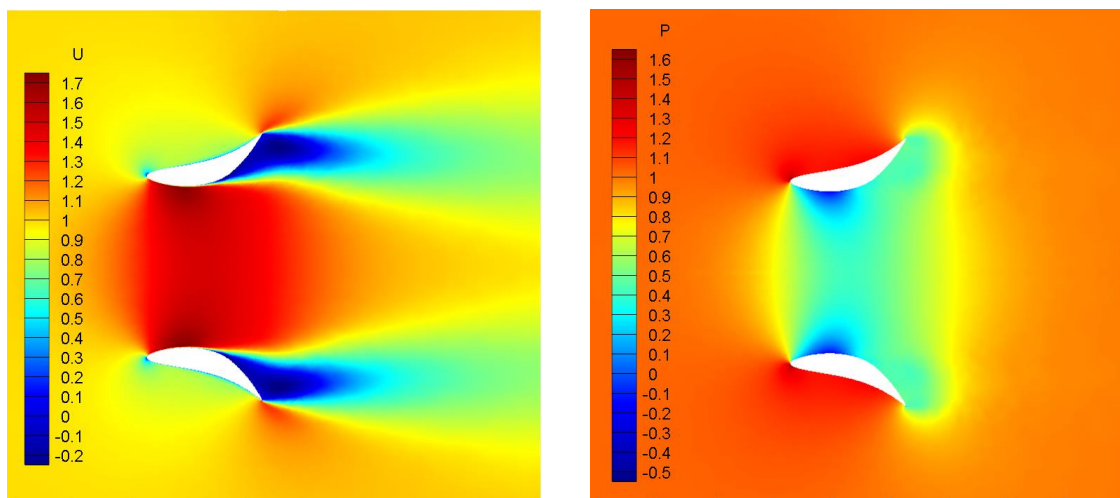


Σχήμα 4.8: Το αεροδυναμικό προφίλ της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας διαχύτη σε σύγκριση με αυτό της αρχικής γεωμετρίας.



Σχήμα 4.9: Η κατανομή της επιτάχυνσης της ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα ($x = 0$) για τον βέλτιστο και τον αρχικό σχεδιασμό.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9, η επιτάχυνση της ταχύτητας γ στο επίπεδο του δρομέα βελτιώθηκε για κάθε μία από τις εξεταζόμενες ακτινικές θέσεις. Συγκεκριμένα, η βέλτιστη γεωμετρία κατάφερε να επιτύχει μια αύξηση της μέσης τιμής της κατανομής της επιτάχυνσης περίπου κατά 7,5%. Αν και η συγκεκριμένη αύξηση μπορεί να θεωρηθεί μικρή, πρέπει να ληφθεί υπόψη η σχετικά υψηλή απόδοση της αρχικής γεωμετρίας. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.10, παρουσιάζεται το αδιάστατο πεδίο της αξονικής ταχύτητας και πίεσης για την βελτιστοποιημένη γεωμετρία.



Σχήμα 4.10: Απεικόνιση της αδιάστατης αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας (αριστερά) και πίεσης (δεξιά) για την βελτιστοποιημένη γεωμετρία του διαχύτη.



Σχήμα 4.11: Προοπτική προβολή της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας του διαχύτη.

Αναφορικά με τον περιορισμό που τέθηκε, σχετικά με την διατήρηση της εσωτερικής ακτίνας του διαχύτη στην αξονική θέση τοποθέτησης του δρομέα, παρατηρήθηκε ότι η ικανοποίηση του συντελέστηκε με επιτυχία, καθώς η εσωτερική ακτίνα του βέλτιστου σχεδιασμού στο επίπεδο του δρομέα διαφέρει από αυτήν του αρχικού διαχύτη μόνο κατά 0,2%, ένα ποσοστό που είναι πρακτικά αμελητέο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη γεωμετρία διαχύτη που προέκυψε έχει μειωμένο όγκο συγκριτικά με τον αρχικό σχεδιασμό κατά **15%**, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, καθώς επιτρέπει την εξοικονόμηση υλικών και συνεπώς τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους.

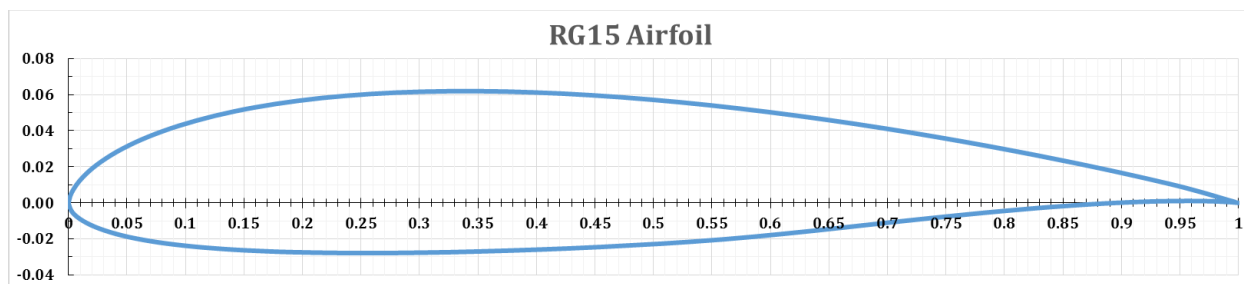
Κεφάλαιο 5 – Σχεδιασμός Πτερυγίων

Σε αυτό το κεφάλαιο εφαρμόζεται μία μεθοδολογία για τον σχεδιασμό νέων πτερυγίων για την γεωμετρία διαχύτη που προέκυψε από το προηγούμενο κεφάλαιο, κάνοντας χρήση του ΔΕ αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 και του υπολογιστικού μοντέλου BEM που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Ο σχεδιασμός θα πραγματοποιηθεί θεωρώντας ένα δρομέα τριών πτερυγίων.

5.1 Γεωμετρία Αεροτομής Πτερυγίου

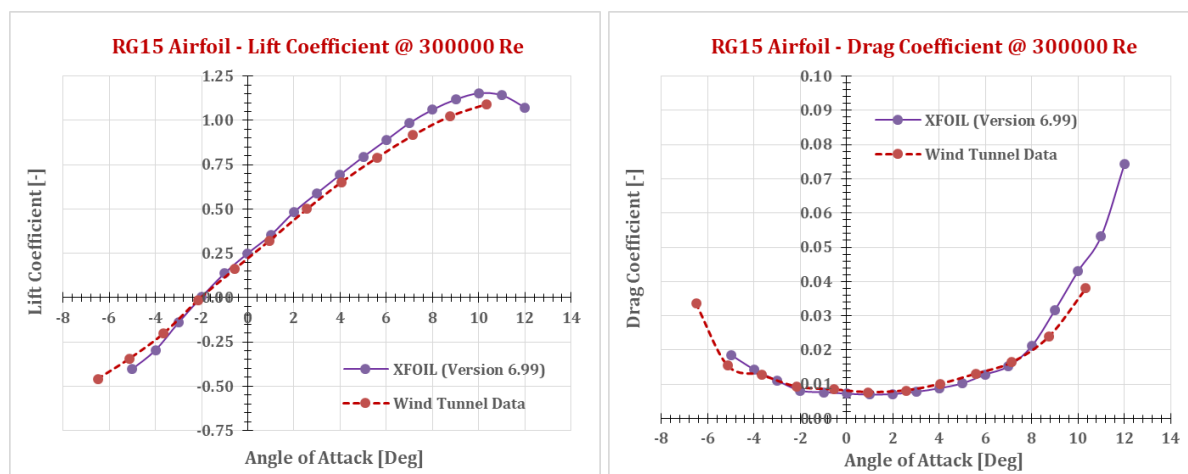
Ο σχεδιασμός του νέου πτερυγίου προκύπτει μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης των κατανομών της χορδής και της γωνίας twist, χρησιμοποιώντας την αεροτομή *RG15* για κάθε μια από τις εξεταζόμενες ακτινικές θέσεις κατά μήκος του πτερυγίου (Σχήμα 5.4).

Η συγκεκριμένη αεροτομή σχεδιάστηκε από τον Rolf Girsberger και πρόκειται για μια αεροτομή κατάλληλη για πτερύγια μικρών ανεμογεννητριών που λειτουργούν σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds, με μέγιστο πάχος ίσο με το 8,92% της χορδής, το οποίο βρίσκεται στο 30,2% της χορδής από το χείλος προσβολής, και μέγιστη τιμή camber ίση με 1,8%, η οποία βρίσκεται στο 39,7% της χορδής από το χείλος προσβολής. Η αεροτομή *RG15* απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 σε αδιάστατη μορφή.



Σχήμα 5.1: Η γεωμετρία της *RG15* αεροτομής.

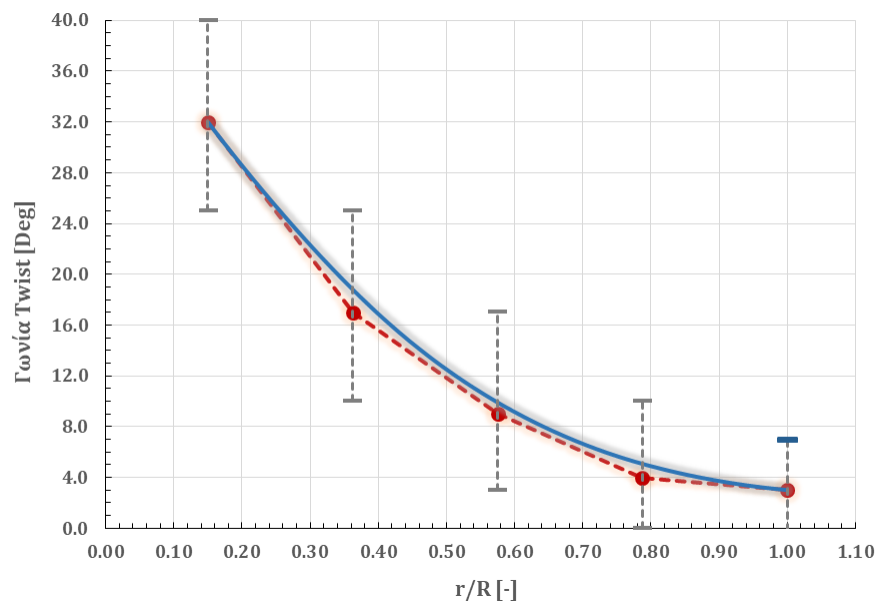
Οι συντελεστές άνωσης C_L και οπισθέλκουσας C_D για την αεροτομή *RG15*, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την ανάλυση BEM, υπολογίστηκαν με το λογισμικό XFOIL [Dre89] για έναν αριθμό Reynolds ίσο με 300.000, ο οποίος και είναι προσεγγιστικά ο αριθμός Reynolds όπου λειτουργούν τα πτερύγια του δρομέα στην συγκεκριμένη εφαρμογή, ενώ η προεκβολή των εν λόγω αεροδυναμικών συντελεστών σε ολόκληρο το εύρος γωνιών προσβολής (360°) πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου που προτάθηκε από τον Montgomerie [Mon04]. Οι αεροδυναμικοί συντελεστές C_L και C_D για την αεροτομή *RG15* και αριθμό Reynolds ίσο με 300.000, ως συνάρτηση της γωνίας προσβολής (angle of attack), παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Οι συντελεστές C_L και C_D για την αεροτομή RG15 σε αριθμό Reynolds 300.000, όπως προέκυψαν από το XFOIL και πειραματικές μετρήσεις.

5.2 Παραμετροποίηση, Αντικειμενική Συνάρτηση και Περιορισμοί

Η παραμετροποίηση των κατανομών χορδής και γωνίας twist για κάθε ένα υποψήφιο σχεδιασμό πτερυγίου πραγματοποιείται μέσω δύο καμπυλών B-Spline $4^{ου}$ βαθμού, με πέντε σημεία ελέγχου, επιτρέποντας την κίνηση κάθε σημείου ελέγχου μόνο κατά την y διεύθυνση. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται μια ενδεικτική καμπύλη B-Spline για μια τυχαία κατανομή της γωνίας twist, ενώ η αναπαράσταση της κατανομής χορδής πραγματοποιείται με αντίστοιχο τρόπο. Ο βαθμός των καμπυλών B-Spline που αναπαριστούν τις κατανομές της χορδής και της γωνίας twist ορίστηκε ως ο μέγιστος δυνατός, με σκοπό την επίτευξη όσο το δυνατόν πιο ομαλών κατανομών.



Σχήμα 5.3: Αναπαράσταση της κατανομής της γωνίας twist από μια καμπύλη B-Spline $4^{ου}$ βαθμού με 5 σημεία ελέγχου.

Συνεπώς, οι μεταβλητές σχεδίασης προκύπτουν ως οι y συντεταγμένες των σημείων ελέγχου των 2 καμπυλών B-Spline (10 μεταβλητές σχεδίασης). Τα άνω και κάτω όρια (ρητοί περιορισμοί) των μεταβλητών σχεδίασης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

| x Συντεταγμένη | Χορδή [m] | | Γωνία Twist [Deg] | |
|---------------------|-----------|----------|-------------------|----------|
| | Κάτω Όριο | Άνω Όριο | Κάτω Όριο | Άνω Όριο |
| 0,1500 | 0,40 | 0,70 | 25,0 | 40,0 |
| 0,3625 | 0,20 | 0,45 | 10,0 | 25,0 |
| 0,5750 | 0,10 | 0,30 | 3,0 | 17,0 |
| 0,7875 | 0,10 | 0,25 | 0,0 | 10,0 |
| 1,0000 | 0,07 | 0,20 | -3,0 | 7,0 |

Πίνακας 5.1: Τα άνω και κάτω όρια των 10 μεταβλητών σχεδίασης.

Το κριτήριο βελτιστοποίησης ορίζεται ως η μεγιστοποίηση του αδιάστατου συντελεστή ισχύος του ρότορα C_p για ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας, που αντιστοιχούν σε τιμές του αδιάστατου λόγου TSR (Tip-Speed Ratio) μεταξύ του 3 και του 9. Συνεπώς, δεδομένου του ότι ο ΔΕ αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι σχεδιασμένος για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης, η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως εξής:

$$f_{cost} = 10 - \sum_{i=3}^9 C_{P,i} \quad (5.1)$$

όπου $C_{P,i}$ είναι ο συντελεστής ισχύος που αντιστοιχεί σε i TSR. Για λόγους πληρότητας της εργασίας, ο ορισμός του TSR δίνεται από την παρακάτω Εξ. (5.2)

$$TSR = \frac{\omega R}{V_o} \quad (5.2)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε rad/s .

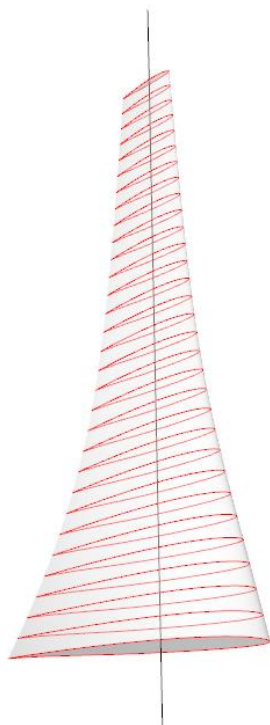
Στην παρούσα διαδικασία βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται μόνο ρητοί περιορισμοί, οι οποίοι σχηματίζονται από τα αποδεκτά άνω και κάτω όρια των υπό εξέταση μεταβλητών σχεδίασης, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Η θέσπιση των συγκεκριμένων τιμών για τα όρια των μεταβλητών σχεδίασης πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να μην περιορίζουν ή να μεγεθύνουν αναποτελεσματικά τον χώρο αναζήτησης και συγχρόνως να μην επιτρέπουν την δημιουργία ανεπιθύμητων κατανομών χορδής και γωνίας twist.

5.3 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Η διαδικασία βελτιστοποίησης του πτερυγίου διενεργήθη σε ένα υπολογιστικό σύστημα *DELL™ R815 PowerEdge™*, με τέσσερις *AMD Opteron™ 6380* επεξεργαστές 16 πυρήνων

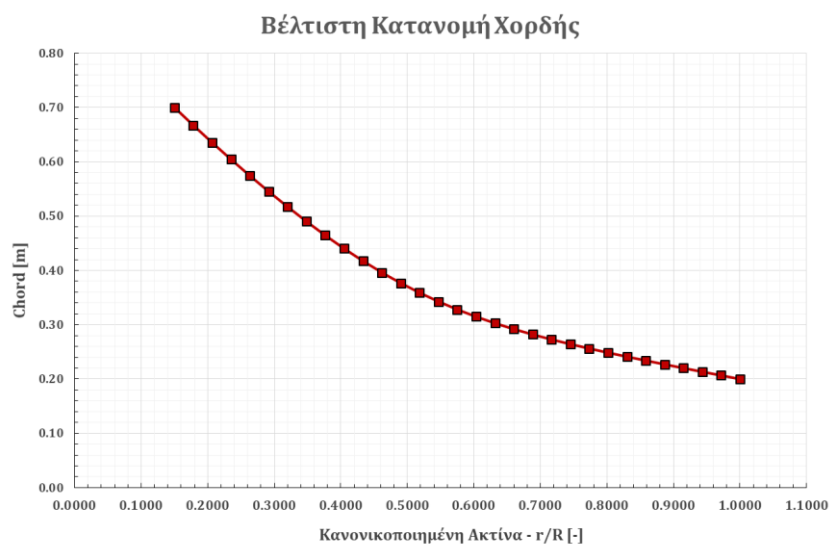
στα 2.50 GHz (64 πυρήνες συνολικά). Το μέγεθος του πληθυσμού του ΔΕ αλγορίθμου βελτιστοποίησης ορίστηκε στα 60 άτομα, ενώ ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για 2000 γενιές. Ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος βελτιστοποίησης ανέρχεται σε περίπου 29 λεπτά.

Επιπλέον, κατά την ανάλυση BEM του ρότορα, κάθε υποψήφιος σχεδιασμός πτερυγίου χωρίστηκε σε 31 στοιχειώδεις τμήματα (blade elements), οι χαρακτηριστικές αεροτομές των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4, ενώ έγινε χρήση του μοντέλου Prandtl για την μοντελοποίηση των απωλειών στο ακροπτερύγιο (tip loss) αλλά και στην πλήμνη (hub loss). Ωστόσο, η χρήση ενός τέτοιου μοντέλου διόρθωσης για την μοντελοποίηση των απωλειών του ακροπτερυγίου είναι πιθανόν να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της συνολικής απόδοσης του ρότορα, για ένα σύστημα ανεμογεννήτριας υποβοηθούμενης από διαχύτη, λόγω των μειωμένων απωλειών ακροπτερυγίου συγκριτικά με μία συμβατική ανεμογεννήτρια, ως απόρροια της παρουσίας του διαχύτη.

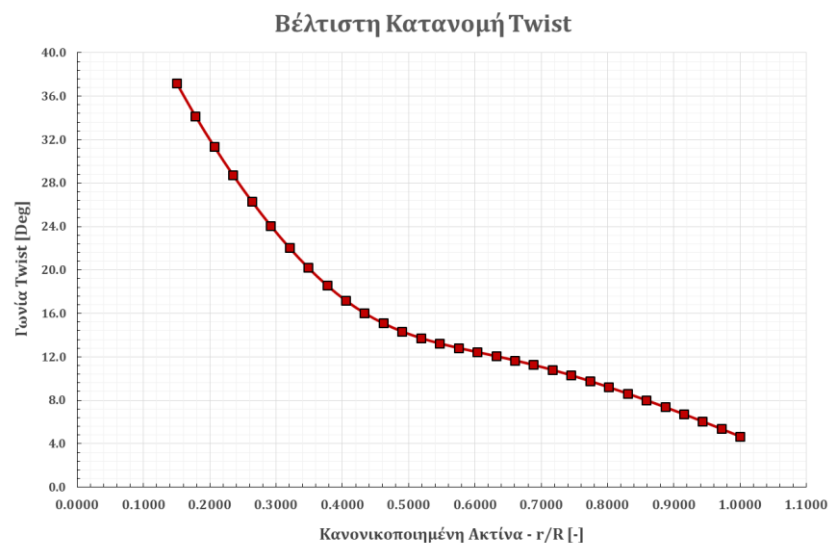


Σχήμα 5.4: Οι χαρακτηριστικές αεροτομές για τα 31 blade elements στα οποία διακριτοποιήθηκε κάθε υποψήφια γεωμετρία, στοιβαγμένες σε ευθεία γραμμή που περνά από το κέντρο βάρους τους (stacking curve).

Οι κατανομές χορδής και γωνίας twist της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας πτερυγίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5 και Σχήμα 5.6 αντίστοιχα, ενώ στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται η αδιάστατη καμπύλη ισχύος του ρότορα των 3 πτερυγίων, δηλαδή η καμπύλη του αδιάστατου συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση του TSR.



Σχήμα 5.5: Η κατανομή της χορδής της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας πτερυγίου ως συνάρτηση της αδιάστατης ακτίνας.

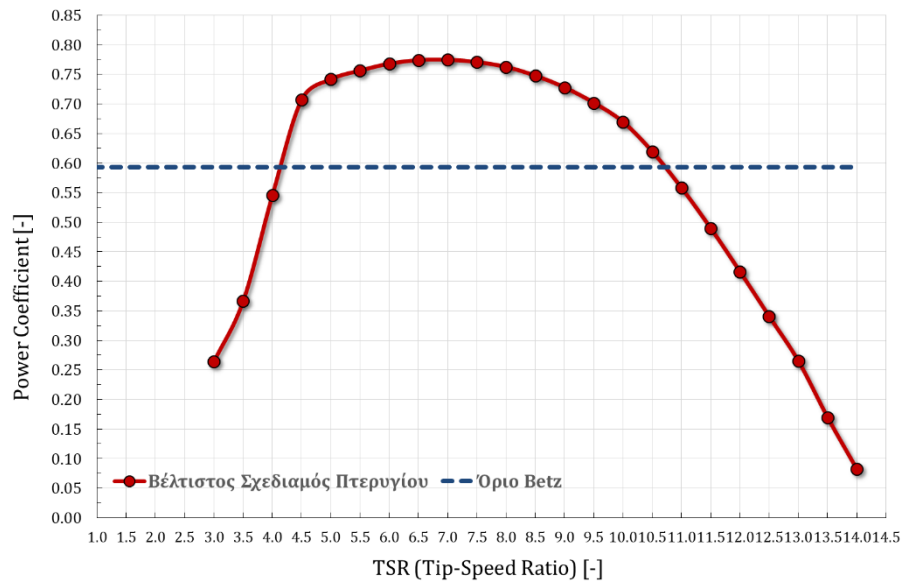


Σχήμα 5.6: Η κατανομή της γωνίας twist της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας πτερυγίου ως συνάρτηση της αδιάστατης ακτίνας.

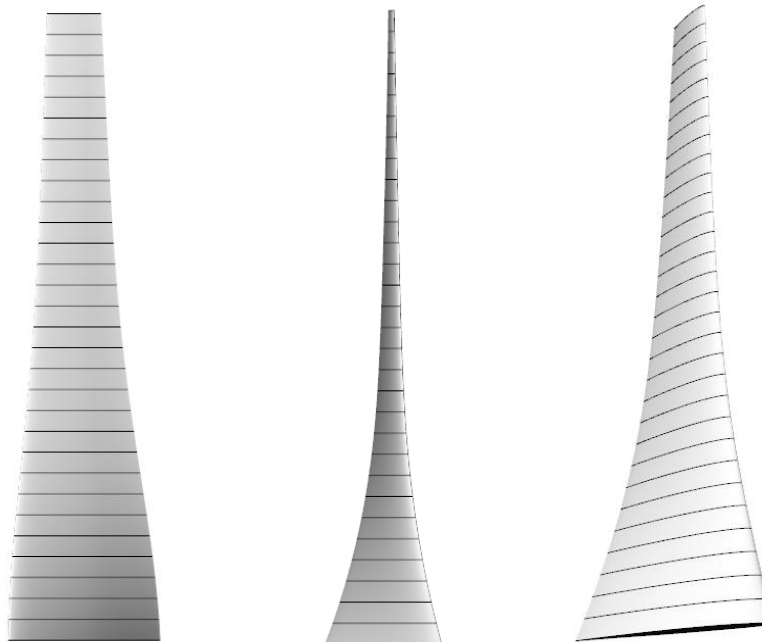
Παρατηρώντας τις βέλτιστες κατανομές χορδής και γωνίας twist (Σχήμα 5.5 και Σχήμα 5.6), καθώς και την 3D απεικόνιση του τελικού πτερυγίου (Σχήμα 5.8), είναι εμφανές ότι η γεωμετρία του πτερυγίου είναι αρκετά ομαλή και όχι ιδιαίτερα περίπλοκη. Αυτό το γεγονός καθιστά τον σχεδιασμό που προέκυψε αρκετά ελκυστικό, κυρίως από κατασκευαστικής άποψης, καθώς απλούστερες γεωμετρίες είναι ευκολότερο να κατασκευαστούν.

Τέλος, παρατηρώντας την καμπύλη του συντελεστή ισχύος, προκύπτει ότι ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του συστήματος που σχεδιάστηκε είναι ίσος με **0,774**

για τιμή του TSR ίση με 7 (το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί σε αυτό το σημείο). Επιπλέον, η μορφή της συγκεκριμένης καμπύλης είναι αρκετά ελκυστική, καθώς η μεταβολή του TSR σε περιοχές γύρω από το βέλτιστο οδηγεί σε πολύ μικρή πτώση του συντελεστή ισχύος.



Σχήμα 5.7: Ο συντελεστής ισχύος του ρότορα με το βελτιστοποιημένο πτερύγιο.



Σχήμα 5.8: 3D απεικονίσεις του βελτιστοποιημένου πτερυγίου σε διαφορετικές όψεις.

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε και εφαρμόστηκε μία διαδικασία βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό ενός αξονοσυμμετρικού διαχύτη και στην συνέχεια των αντίστοιχων πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας υποβοηθούμενης από διαχύτη (DAWT), μέσω της χρήσης ενός παράλληλου και ασύγχρονου Διαφορικού Εξελικτικού (ΔΕ) αλγορίθμου, σε συνδυασμό με δύο Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, τα οποία λειτουργούν ως υποκατάστατα μοντέλα, για την μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου.

Αρχικά η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τον σχεδιασμό ενός βελτιωμένου αξονοσυμμετρικού διαχύτη, βάση μιας ήδη υπάρχουσας γεωμετρίας, θέτοντας ως κριτήριο βελτιστοποίησης την μεγιστοποίηση της ικανότητας επιτάχυνσης της ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα, ενώ επιπλέον εφαρμόστηκε ένας γεωμετρικός περιορισμός σχετικά με την διατήρηση της εσωτερικής ακτίνας του διαχύτη στην αξονική θέση τοποθέτησης του δρομέα. Η προσομοίωση της ασυμπίεστης και τυρβώδους ροής γύρω από κάθε υποψήφια σχεδίαση επιτεύχθη μέσω της χρήσης ενός 2Δ αξονοσυμμετρικού κώδικα [Lel18] Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD), ο οποίος επιλύει τις εξισώσεις Navier – Stokes σε αδιάστατη μορφή και για 2Δ αξονοσυμμετρικά συστήματα αναφοράς. Η διακριτοποίηση του πεδίου ροής έγινε με την βοήθεια 2Δ υβριδικών μη-δομημένων υπολογιστικών πλεγμάτων, η παραμετροποίηση και η παραμόρφωση (mesh morphing) των οποίων επιτεύχθη μέσω μιας μεθοδολογίας βασισμένη στην τεχνική της Ελεύθερης Παραμόρφωσης (FFD). Η γεωμετρία διαχύτη που προέκυψε, από την συγκεκριμένη εφαρμογή βελτιστοποίησης, κατάφερε να αυξήσει την μέση επιτάχυνση της ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα κατά 7,5% συγκριτικά με την αρχική γεωμετρία διαχύτη, να ικανοποιήσει τον περιορισμό της διατήρησης της εσωτερικής ακτίνας και να επιτύχει μια μείωση του όγκου κατά 15%, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, καθώς επιτρέπει την εξοικονόμηση υλικών και συνεπώς μείωση του κατασκευαστικού κόστους.

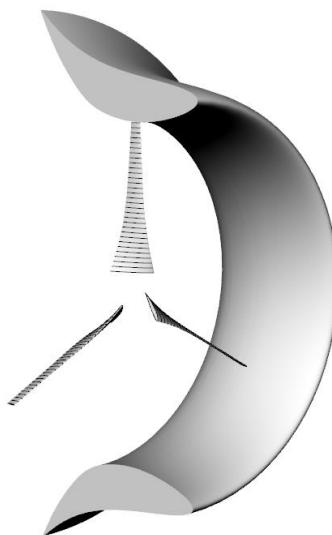
Στην συνέχεια, για την βέλτιστη γεωμετρία διαχύτη, πραγματοποιήθηκε ο αεροδυναμικός σχεδιασμός πτερυγίων για ένα δρομέα 3 πτερυγίων, βάση της αεροτομής RG15 και μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης των κατανομών της χορδής και της γωνίας twist. Σε αυτή τη διαδικασία βελτιστοποίησης η αξιολόγηση κάθε υποψήφιου σχεδιασμού πτερυγίου υλοποιήθηκε μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου BEM [Lel17], το οποίο είναι κατάλληλα τροποποιημένο για την μοντελοποίηση της επίδρασης του διαχύτη στον υπολογισμό των τοπικών συνθηκών ροής στο επίπεδο του δρομέα και συνεπώς για την αεροδυναμική ανάλυση ανεμογεννητριών υποβοηθούμενων από διαχύτη. Επιπλέον, η παραμετροποίηση των κατανομών της χορδής και της γωνίας twist ως συνάρτηση της ακτίνας του δρομέα (πτερυγίου) έγινε μέσω 2 καμπυλών B-Spline 4^{ου} βαθμού με 5 σημεία

ελέγχου. Οι βέλτιστες κατανομές χορδής και γωνίας twist προέκυψαν αρκετά ομαλές και όχι ιδιαίτερα περίπλοκες, γεγονός που καθιστά τον σχεδιασμό αρκετά ελκυστικό, κυρίως από κατασκευαστικής άποψης, καθώς απλούστερες γεωμετρίες είναι ευκολότερο να κατασκευαστούν. Τέλος, παρατηρώντας την καμπύλη του συντελεστή ισχύος προκύπτει ότι ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του συστήματος που σχεδιάστηκε είναι ίσος με **0,774** (1.3 φορές πάνω από το όριο του Betz) για τιμή του TSR ίση με 7 (το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί σε αυτό το σημείο).

Το ολοκληρωμένο σύστημα πτερυγίων – διαχύτη που σχεδιάστηκε στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται σε 3D απεικόνιση στο Σχήμα 6.1 και Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.1: 3D απεικόνιση του συστήματος διαχύτη – πτερυγίων που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 6.2: 3D απεικόνιση του συστήματος διαχύτη – πτερυγίων που σχεδιάστηκε σε τομή.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

[Αμο05] Αμοιραλής, Ε. Ι., 2005, *Παραμετροποίηση Επιφανειών με Χρήση της Τεχνικής Ελεύθερης Παραμόρφωσης (FFD) και Εφαρμογή σε Προβλήματα Βέλτιστης Αεροδυναμικής Σχεδίασης*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

[Ανδ08] Ανδρίτσος, Ν., 2008, *Ενέργεια και Περιβάλλον*, Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

[Βαι13] Βαϊνάς, Δ., 2013, *3D Μοντελοποίηση και Ταχεία Προτυποποίηση Ανεμογεννήτριας*, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας.

[Βατ13] Βάταλης, Α., 2013, *Αιολική Ενέργεια - Μελέτη του Αιολικού Δυναμικού Τεσσάρων Περιοχών του Νομού Θεσσαλονίκης*, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

[Γκο13] Γκουντή, Α., 2013, *Εξελικτικοί Αλγόριθμοι: Ο Αλγόριθμος της Διαφορικής Εξέλιξης*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μαθηματικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

[Ντι06] Ντιπτένη, Μ. Σ., 2006, *Επιτάχυνση Εξελικτικών Αλγορίθμων με Χρήση Παράλληλης Επεξεργασίας*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

[Στρ13] Στροφύλας, Γ., 2013, *Ανάπτυξη Μεθοδολογίας και του Αντίστοιχου Λογισμικού για την Παραμετρική Σχεδίαση Πτερυγίων Ανεμογεννητριών*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.

[Ζορ14] Ζορμπάς, Κ. και Καρνάς, Μ., 2014, *Διερεύνηση Σκοπιμότητας Εφαρμογής Ανεμογεννητριών Κατακόρυφου Άξονα σε Αστικό Περιβάλλον*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Διεθνής βιβλιογραφία

[Abe04] Abe, K. and Ohya, Y., 2004, "An Investigation of Flow Fields around Flanged Diffusers Using CFD", *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, No. 3-4, pp. 315-330.

[Boo16] Boorsma, K., Hartvelt, M. and Orsi, L.M., 2016, "Application of the Lifting Line Vortex Wake Method to Dynamic Load Case Simulations", *Journal of Physics - Conference Series*, Vol. 753.

- [Bet13] Betz, A., 2013, “The Maximum of the Theoretically Possible Exploitation of Wind by Means of a Wind Motor”, *Wind Engineering*, Vol. 37, No. 4, pp. 441-446.
- [Buh05] Buhl, M. L., 2005, *A New Empirical Relationship between Thrust Coefficient and Induction Factor for the Turbulent Windmill State*, Technical Report NREL/TP-500-36834, National Renewable Energy Laboratory.
- [Bus07] van Bussel, D. G. J. W., 2007, “The Science of Making More Torque from Wind: Diffuser Experiments and Theory Revisited”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 75.
- [Bus91] van Bussel, D. G. J. W., 1991, “The Use of Asymptotic Acceleration Method for Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Aerodynamics”, *Proceedings of the EWEC'91 European Wind Energy Conference*, , pp. 18-21.
- [Bet13] Betz, A., 2013, “The Maximum of the Theoretically Possible Exploitation of Wind by Means of a Wind Motor”, *Wind Engineering*, Vol. 37, No. 4, pp. 441-446.
- [Dic86] Dick, E., 1986, “Power Limits for Wind Energy Concentrator Systems”, *Wind Engineering*, Vol. 10, No. 2, p. 98-115.
- [Dor11] van Dorst, F. A., 2011, *An Improved Rotor Design for Diffuser Augmented Wind Turbine*, Master Thesis, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology.
- [Dre89] Drela, M., 1989, “XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils”, *Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics*, University of Notre Dame.
- [Fle81] Fletcher, C. A. J., 1981, “Computational Analysis of Diffuser-Augmented Wind Turbines,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 21, No. 3, pp. 175–183.
- [For83] Foreman, K. M. and Gilbert, B. L., 1983, *A Free Jet Wind Tunnel Investigation of DAWT Models*, Grumman Research Department, Report RE-668, SERI/TR 01311-1, New York.
- [Gia02] Giannakoglou, K. C., 2002, “Design of Optimal Aerodynamic Shapes Using Stochastic Optimization Methods and Computational Intelligence”, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, No. 1, pp. 43–76.
- [Gil78] Gilbert, B. L., Oman, R. A. and Foreman, K. M., 1978, “Fluid Dynamics of Diffuser-Augmented Wind Turbines”, *Journal of Energy*, Vol. 2, No. 6, pp. 368-374.
- [Gil79] Gilbert, B. L. and Foreman, K. M., 1979, “Experimental Demonstration of the Diffuser-Augmented Wind Turbine Concept”, *Journal of Energy*, Vol. 3, pp. 235-240.
- [Gil83] Gilbert, B. L. and Foreman, K. M., 1983, “Experiments With a Diffuser-Augmented Model Wind Turbine”, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 105, pp. 46–53.

- [Gla26] Glauert, H., 1926, *The Analysis of Experimental Results in the Windmill Brake and Vortex Ring States of an Airscrew*, H.M. Stationery Office.
- [Gla35] Glauert, H., 1935, "Airplane Propellers", *Aerodynamic Theory*, Springer Berlin Heidelberg, Chapter XI, pp. 169–360.
- [Han00] Hansen, M. O. L., Sørensen, N. N. and Flay, R. G. J., 2000, "Effect of Placing a Diffuser Around a Wind Turbine", *Wind Energy*, Vol. 3, No. 4, pp. 207–213.
- [Han08] Hansen, M. O. L., 2008, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Earthscan.
- [Hau06] Hau, E., 2006, *Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [Hjo15] Hjort, S. and Larsen, H., 2015, "Rotor Design for Diffuser Augmented Wind Turbines", *Energies*, Vol. 8, No. 10, pp. 10736–10774.
- [Hol81] van Holten, T., 1981, "Concentrator Systems for Wind Energy with Emphasis on Tipvanes", *Wind Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 29-45.
- [Hu11] Hu, Y. and Rao, S. S., 2011, "Robust Design of Horizontal Axis Wind Turbines Using Taguchi Method", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 133, No. 11.
- [Igr76] Igra, O., 1976, "Shrouds for Aerogenerators", *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 10, pp. 1481-1483.
- [Igr77] Igra, O., 1977, "Compact Shrouds for Wind Turbines", *Energy Conversion*, Vol. 16, pp. 149-157.
- [Igr81] Igra, O., 1981, "Research and Development for Shrouded Wind Turbines", *Energy Conversion and Management*, Vol. 21, pp. 13–48.
- [Jam11] Jamieson, P., 2011, *Innovation in Wind Turbine Design*, John Wiley & Sons Ltd.
- [Kes16] Kesby, J. E., Bradney, D. R. and Clausen, P. D., 2016, "Determining Diffuser Augmented Wind Turbine Performance Using a Combined CFD/BEM Method", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 753.
- [Kog62] Kogan, A. and Nissim, E., 1962, "Shrouded Aerogenerator Design Study, Two-Dimensional Shroud Performance", *Bulletin of the Research Council of Israel*, pp. 67-88.
- [Kog63a] Kogan, A. and Seginer, A., 1963, "Shrouded Aerogenerator Design Study II, Axisymmetrical Shroud Performance", *Fifth Israel Annual Conference on Aviation and Astronautics*, Israel.

- [Kog63b] Kogan, A. and Seginer, A., 1963, Shrouded Aerogenerator, *Design Study II, Axisymmetric Shroud Performance*, Department of Aeronautical Engineering, Technion.
- [Lel15] Leloudas, S. N., 2015, *On the Optimal Design of Airfoils, Diploma Thesis*, School of Production Engineering and Management, Technical University of Crete.
- [Lel17] Leloudas, S.N., Lygidakis, G.N. and Nikolos, I.K., 2017, "Assessment of a Modified Blade Element Momentum Methodology for Diffuser Augmented Wind Turbines", *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Tampa, Florida, USA, Vol. 7, V007T09A079.
- [Lel18a] Leloudas, S. N., Strofylas, G.A. and Nikolos, I.N., 2018, "Aerodynamic Shape Optimization of Diffuser Augmented Wind Turbine Blades Using Asynchronous Parallel Differential Evolution", *9th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Chania*, 4-6 June 2018.
- [Lel18b] Leloudas, S. N., Strofylas, G.A. and Nikolos, I.N., (In Press), "Aerodynamic Shape Optimization of Diffuser Augmented Wind Turbine Shrouds Using Asynchronous Differential Evolution", *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- [Lil56] Lilley, G. M. and Rainbird, W. J., 1956, *A Preliminary Report on the Design and Performance of Ducted Windmills*, The College of Aeronautics, Cranfield University, Report No. 102.
- [Liu12] Liu, S. and Janajreh, I., 2012, "Development and Application of an Improved Blade Element Momentum Method Model on Horizontal Axis Wind Turbines", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–10.
- [Loe81] Loeffler, J. A. L., 1981, "Flow Field Analysis and Performance of Wind Turbines Employing Slotted Diffusers", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 103, No. 1, pp. 17-22.
- [Man09] Manwell, J. F., McGowan, J. G. and Rogers, A. L., 2009, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons Ltd.
- [Man14] Mansour, K. and Meskinkhoda, P., 2014, "Computational Analysis of Flow Fields around Flanged Diffusers", *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 124, pp. 109-120.
- [Mon04] Montgomerie, B., 2004, *Methods for Root Effects, Tip Effects and Extending the Angle of Attack Range to +-100deg, with Application to Aerodynamics for Blades on Wind Turbines and Propellers*, FOI Swedish Defence Research Agency, Scientific Report Number: FOI-R-1035-SE.
- [Mor08] Morris, A. M., Allen, C. B. and Rendall, T. C. S., 2008, "CFD-Based Optimization of Aerofoils Using Radial Basis Functions for Domain Element Parameterization and Mesh

Deformation”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 58, No. 8, pp. 827-860.

[Mor05] Moriarty, P. J. and Hansen, A. C., 2005, *AeroDyn Theory Manual*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Report Number: NREL/TP-500-36881.

[Nik11] Nikolos, I. K., 2011, “Surrogate Modeling in Evolutionary Based Engineering Design Optimization”, Tsompanakis, Y. and Topping, B.H.V. (Eds.), *Computational Science, Engineering & Technology Series*, Saxe-Coburg Publications, Stirlingshire, UK, pp. 173–203.

[Nik13] Nikolos, I.K., 2013, “On the Use of Multiple Surrogates within a Differential Evolution Procedure for High-lift Airfoil Design”, *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, Vol. 5, No. 4, pp. 319–341.

[Nti06] Ntipteni, M. S., Valakos, I. M. and Nikolos, I. K., 2006, “An Asynchronous Parallel Differential Evolution Algorithm”, *Proceedings of the ERCOFTAC Conference on Design Optimisation: Methods and Application*.

[Ohy10] Ohya, Y., and Karasudani, T., 2010, “A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology”, *Energies*, Vol. 3, 2010, pp. 634–649.

[Oma77] Oman, R. A., Foreman, K. M. and Gilbert, B. L., 1977, *Investigation of Diffuser-Augmented Wind Turbines*, Parts 1 and II, ERDA Report COO-26162, Grumman Aerospace Corporation.

[Ost16] Ostad-Ali-Askari, K., Hayannejad, M. and Ghorbanizadeh-Kharazi, H., 2016 “Artificial Neural Network for Modeling Nitrate Pollution of Groundwater in Marginal Area of Zayandeh-rood River, Isfahan, Iran”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 134-140.

[Phi03] Phillips, D. G., 2003, *An Investigation on Diffuser Augmented wind Turbine Design*, PhD Thesis, University of Auckland.

[Pie97] Piegl, L. and Tiller, W., 1997, *The NURBS Book*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[Ref12] Refan, M. and Hangan, H., 2012, “Aerodynamic Performance of a Small Horizontal Axis Wind Turbine”, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 134, No.2.

[Sed86] Sederberg, T. W. and Parry, S. R., 1986, “Free-form Deformation of Solid Geometric Models”, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 20, pp. 151-160.

[Shi12] Shives, M. and Crawford, C., 2012, “Developing an Empirical Model for Ducted Tidal Turbine Performance Using Numerical Simulation Results”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 226, No. 1, pp. 112-125.

- [Sho16] Shonhiwa, C. and Makaka, G. 2016, “Concentrator Augmented Wind Turbines: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 1415–1418.
- [Sto95] Storn, R. and Price, K.V., 1995, “Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces”, *Journal of Global Optimization*, Vol. 23, No. 1.
- [Str17] Strofylas, G. A., Porfyri, K. N., Nikolos, I. K., Delis, A. I., Papageorgiou, M., 2017, “Calibrating a Traffic Flow Model with Parallel Differential Evolution”, *Civil-Comp Proceedings*, Vol. 111.
- [Tav14] Tavares Dias do Rio Vaz, D. A., Amarante Mesquita, A. L., Pinheiro Vaz, J. R., Cavalcante Blanco, C. J. and Pinho, J. T., 2014, “An Extension of the Blade Element Momentum Method Applied to Diffuser Augmented Wind Turbines”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 1116–1123.
- [Tor98] Torczon, V. and Trosset, M. W., 1998, “Using Approximations to Accelerate Engineering Design Optimization”, *Proceedings Of The 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Multidisciplinary Analysis & Optimization Symposium*, Saint Louis, Missouri, Paper 98-4800.
- [Tos08] Toshimitsu, K., Nishikawa, K., Haruki, W., Oono, S., Takao, M. and Ohya, Y., 2008, “PIV Measurements of Flows around the Wind Turbines with a Flanged-Diffuser Shroud”, *Journal of Thermal Science*, Vol. 17, No. 4, pp 375–380.
- [Wil74] Wilson, R. E. and Lissaman, P. B. S., 1974, *Applied Aerodynamics of Wind Power Machines*, Department of Mechanical Engineering, Oregon State University.
- [Yu10] Yu, X., and Gen, M., 2010, *Introduction to Evolutionary Algorithms*, Springer London.

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

- [DWIA] Danish Wind Industry Association, <http://www.windpower.org>
- [GWEC] Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net>
- [HWEA] Hellenic Wind Energy Association, <http://eletaen.gr>
- [FloD] Wind-Works, www.wind-works.org