



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – [epminfo@power.ece.ntua.gr](mailto:epminfo@power.ece.ntua.gr)

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Βελτιστοποίηση απόδοσης αιολικού πάρκου με εφαρμογή τεχνικών ελέγχου απόκλισης των ανεμογεννητριών»*

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή  
Μπούζου Μιχαήλ

Επιβλέπων  
Ριζιώτης Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

---

Αθήνα, Ιούλιος, 2024

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας».

Πρώτα απ' όλα, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Βασίλη Ριζιώτη, για την πολύτιμη καθοδήγησή του, την υποστήριξη και τις εποικοδομητικές συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η καθοδήγηση του κ. Ριζιώτη ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της έρευνάς μου και είμαι βαθιά ευγνώμων για την εμπιστοσύνη και την αφοσίωσή του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα, τον διδάκτορα κ. Γιάννη Σεραφείμ, για την πολύτιμη βοήθεια και τις γνώσεις του στο κομμάτι που αφορούσε την βελτιστοποίηση (optimization). Η συνεισφορά του υπήρξε ανεκτίμητη και η συνεργασία μας ήταν καθοριστική για την επίτευξη των στόχων της εργασίας.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, ο κλάδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και ειδικότερα, της αιολικής ενέργειας έχει βρεθεί στο επίκεντρο του παγκόσμιου ενεργειακού ενδιαφέροντος και συνεχίζει να καταγράφει εντυπωσιακή ανάπτυξη. Η ορθή χωροθέτηση και οργάνωση των ανεμογεννητριών των αιολικών πάρκων επιτρέπει τη μείωση του κόστους εγκατάστασης, αλλά η αλληλεπίδρασή τους με τις γειτνιάζουσες ανεμογεννήτριες μπορεί να επηρεάσει την τελική τους απόδοση. Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει, αυξάνεται το ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου που στοχεύουν στην αποτελεσματική και αποδοτικότερη εκμετάλλευση της ενέργειας που παράγεται.

Μια προσέγγιση με σημαντικό ενδιαφέρον είναι η τεχνική της ανακατεύθυνσης του ομόρρου των ανεμογεννητριών, ρυθμίζοντας τη γωνία απόκλισης τους για να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοσή τους σε διαφορετικές συνθήκες ανέμου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση και εφαρμογή ενός υπολογιστικού εργαλείου για τον υπολογισμό του ομόρρου των ανεμογεννητριών, εφαρμόζοντας μια προηγμένη μεθοδολογία που βασίζεται στο εργαλείο FLORIS. Ύστερα, γίνεται σύνδεση με έναν γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε με στόχο την βελτίωση της παραγωγής ενέργειας ενός αιολικού πάρκου, γύρω από τα αποτελέσματα του οποίου εστιάζει η μελέτη και ανάλυση που πραγματοποιείται.

Η έρευνα αρχικά επαληθεύει την ακρίβεια του μοντέλου ομόρρου και το πιστοποιεί για τρεις ανεμογεννήτριες υπό κλίμακα σε τρεις διαφορετικές διατάξεις, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με πειραματικές μετρήσεις από αεροσήραγγα.

Στη συνέχεια, διαμορφώνεται η διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία εφαρμόζεται σε μία από τις παραπάνω διατάξεις και πιστοποιεί τον βελτιστοποιητή.

Με βάση αυτά, διενεργούνται πειράματα σε πραγματικό αιολικό πάρκο 80 μηχανών για τη μελέτη της παραγόμενης ισχύος σε σχέση με τη γωνία απόκλισης.

Το μοντέλο εφαρμόζεται για τη βελτιστοποίηση των γωνιών απόκλισης αρχικά για τις ανεμογεννήτριες της πρώτης σειράς και ύστερα και για τις ανεμογεννήτριες της δεύτερης σειράς, λαμβάνοντας υπόψη την κυρίαρχη κατεύθυνση του ανέμου στην περιοχή για την απόδοση μέγιστης παραγόμενης ισχύος.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλυτικά, εξάγονται συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντικές έρευνες, συμβάλλοντας στη συνεχή βελτίωση της απόδοσης και της βιωσιμότητας των αιολικών πάρκων.

## **Abstract**

In recent years, the renewable energy sector, and wind energy in particular, has been at the centre of global energy interest and continues to record impressive growth. The proper positioning and organisation of wind turbines in wind farms allows for a reduction in installation costs, but their interaction with neighbouring wind turbines can affect their final performance. As the technology matures, there is a growing interest in incorporating advanced control algorithms aimed at efficient and more effective exploitation of the energy produced.

One approach of considerable interest is the technique of wake steering of wind turbines, adjusting their yaw angle to maximize their energy output in different wind conditions.

In this thesis, a computational tool for calculating the wake of wind turbines is used and applied, implementing an advanced methodology based on the FLORIS tool. Subsequently, a genetic optimization algorithm is integrated with the aim of improving the energy production of a wind farm, is integrated, with the study and analysis focusing on its results.

The research first verifies the accuracy of the wake model and validates it for three scaled wind turbines in three different layouts, comparing the results with experimental wind tunnel measurements.

Then, the optimization procedure is formulated which is applied to one of the above layouts and certifies the optimizer.

Based on this, experiments are carried out on a real 80-machine wind farm to study the power generated in relation to the yaw angle.

The model is applied to optimize the yaw angles initially for the first row wind turbines and then for the second row wind turbines, considering the prevailing wind direction in the region for maximum power generation performance.

Finally, the results are presented in detail, conclusions are drawn and suggestions for future research are made, contributing to the continuous improvement of the performance and sustainability of wind farms.

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iii
Περιεχόμενα .....	iv
Κεφάλαιο 1.....	1
1.1 Εισαγωγή στην Αιολική Ενέργεια.....	1
1.2 Εκτροπή Ομόρρου σε Αιολικά Πάρκα: Βελτιστοποίηση Ενεργειακής Απόδοσης.....	2
1.3 Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας .....	2
Κεφάλαιο 2.....	3
2.1 Πεδίο ροής ομόρρου ανεμογεννήτριας.....	3
2.2 Απλοποιημένο πρότυπο ομόρρου .....	4
2.3 Μέθοδοι μοντελοποίησης ομόρρου.....	5
2.3.1 Αριθμητικά Μοντέλα .....	5
2.3.2 Κινηματικά Μοντέλα (Kinematic Models).....	6
Κεφάλαιο 3.....	6
3.1 Υπολογιστικό εργαλείο FLORIS.....	6
3.1.1 Μοντέλο ομόρρου FLORIS .....	7
3.1.2 Πρότυπο Ομόρρου Jensen .....	7
3.2 Ανάλυση εφαρμοζόμενου μοντέλου αιολικού πάρκου .....	9
3.2.1 Διαστολή και Διάμετρος Ομόρρου .....	9
3.2.2 Ταχύτητα Ανέμου Ομόρρου .....	10
3.2.3 Εκτροπή του Ομόρρου.....	11
3.2.4 Ισχύς Ανεμογεννήτριας.....	11
3.2.5 Υλοποίηση Αλγορίθμου.....	12
Κεφάλαιο 4.....	12
4.1 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης (Optimizer) .....	12
4.2 Γενετικός Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης .....	13
4.3 Global Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης .....	14
Κεφάλαιο 5.....	15
5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	15
5.2 Προσδιορισμός Παραμέτρων Μοντέλου.....	16
5.3 Πιστοποίηση Μοντέλου .....	17
Κεφάλαιο 6.....	28
6.1 Διαμόρφωση και επιβεβαίωση διαδικασίας βελτιστοποίησης .....	28

6.2 Εφαρμογή βελτιστοποίησης σε πραγματικό αιολικό πάρκο .....	32
6.2.1 Εφαρμογή βελτιστοποιητή στην γωνία της Α/Γ 1 .....	35
6.2.2 Εφαρμογή βελτιστοποιητή στην γωνία της Α/Γ 8 .....	37
6.2.3 Εφαρμογή βελτιστοποιητή στην γωνία των Α/Γ 1 και Α/Γ 8.....	38
6.2.4 Εφαρμογή βελτιστοποίησης στις γωνίες όλης της πρώτης σειράς Α/Γ .....	39
6.2.5 Εφαρμογή βελτιστοποίησης στις γωνίες όλης της πρώτης και της δεύτερης σειράς Α/Γ .....	40
6.3 Συμπεράσματα και προτάσεις .....	41
Βιβλιογραφία.....	43

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## 1.1 Εισαγωγή στην Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τους ανέμους [1]. Σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με ανεμογεννήτριες που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική [2]. Η χρησιμότητα της αιολικής ενέργειας εκτείνεται σε πολλούς τομείς:

Καταρχήν, αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που δεν εξαντλείται, συμβάλλοντας στην αειφόρο παραγωγή ενέργειας περιορίζοντας την ανάγκη για ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, η αιολική ενέργεια είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων θερμοκηπίου, προστατεύοντας έτσι το περιβάλλον και συμβάλλοντας στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.[3]

Επιπλέον, η αιολική ενέργεια συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενες πηγές ενέργειας και ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια και αυτονομία. Η δημιουργία και η λειτουργία αιολικών πάρκων παρέχουν επίσης σημαντικές θέσεις εργασίας σε τοπικό επίπεδο, ενώ η συνδυασμένη χρήση αιολικής ενέργειας με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενισχύει τη σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος.[2]

Ωστόσο, η αιολική ενέργεια αντιμετωπίζει και ορισμένες προκλήσεις, όπως η μεταβλητότητα της παραγωγής της λόγω των καιρικών συνθηκών και η ανάγκη για εκτεταμένους χώρους για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Παρόλα αυτά, η συνεχής τεχνολογική πρόοδος και οι βελτιώσεις στην απόδοση των συστημάτων αιολικής ενέργειας καθιστούν την αιολική ενέργεια έναν σημαντικό πυλώνα του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος.[2]

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την Ελλάδα, η αιολική ενέργεια αποτελεί έναν σημαντικό πόρο, λόγω των φυσικών συνθηκών που την ευνοούν. Η χώρα μας διαθέτει εκτεταμένες ακτογραμμές και πλήθος νησιών δημιουργώντας ιδανικές συνθήκες για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών.[4]

Συγκεκριμένα, τα κυκλαδίτικα νησιά και η Κρήτη αποτελούν κομβικά σημεία όπου η αιολική ενέργεια έχει αξιοσημείωτη παρουσία. Οι επικλινείς επιφάνειες των ορεινών περιοχών προσφέρουν επίσης κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων.[5]

Τα τελευταία χρόνια, η Ελλάδα έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Μεγάλα αιολικά πάρκα έχουν εγκατασταθεί σε διάφορες περιοχές της χώρας, συμβάλλοντας σημαντικά στην ενεργειακή ανεξαρτησία και στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. [6]

Παράλληλα, η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών και η επένδυση σε έρευνα και ανάπτυξη ενισχύουν την ανταγωνιστικότητα του ελληνικού τομέα αιολικής ενέργειας στο παγκόσμιο πλαίσιο.[6]

Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα αντιμετωπίζει και ορισμένες προκλήσεις, όπως η διαχείριση της μεταβλητότητας της παραγωγής της και η ανάγκη για βελτιωμένη υποδομή διασύνδεσης μεταξύ των αιολικών πάρκων και του εθνικού δικτύου ενέργειας.[7]

## 1.2 Εκτροπή Ομόρρου σε Αιολικά Πάρκα: Βελτιστοποίηση Ενεργειακής Απόδοσης

Οι αλγόριθμοι ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης αιολικών πάρκων μέσω της εκτροπής του ομόρρου αποτελούν κεντρικό θέμα ερευνητικών προσπαθειών στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Η συνεχής εξέλιξη τέτοιων αλγορίθμων έχει ως στόχο την αύξηση της ισχύος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες και τη μείωση των φορτίων κόπωσης στα πτερύγια, επιτυγχάνοντας έτσι τη βιώσιμη λειτουργία των εγκαταστάσεων.[8]

Στα αιολικά πάρκα, η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανεμογεννητριών επηρεάζει την απόδοσή τους. Ο έλεγχος της γωνίας απόκλισης (yaw angle) είναι κρίσιμος για τη διατήρηση της βέλτιστης ευθυγράμμισης του ρότορα με τον άνεμο, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας από κάθε ανεμογεννήτρια ξεχωριστά. Ωστόσο, όταν οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε κάποια γωνία απόκλισης (όχι κάθετα στη ροή του ανέμου), ο ομόρρος τους εκτρέπεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της σκίασης των κατάντι ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο, βελτιώνοντας συνολικά την απόδοσή τους.[9]

Το πρόβλημα σχεδίασης που προκύπτει είναι η εύρεση της βέλτιστης γωνίας απόκλισης. Στόχος είναι η μείωση της παραγωγής των ανεμογεννητριών λόγω της απόκλισης να αντισταθμίζεται ή ακόμα και να ξεπερνιέται από τις χαμηλότερες επιδράσεις του ομόρρου στις κατάντι ανεμογεννήτριες.

Μελέτες προσομοίωσης έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της ανακατεύθυνσης του ομόρρου για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής και τη μείωση των φορτίων στις ανεμογεννήτριες. Ταυτόχρονα, η προστασία των ανεμογεννητριών από ακραίες καιρικές συνθήκες αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αξιοπιστία και τη μακροζωία των εγκαταστάσεων.[10],[11]

Η συνεχής έρευνα σε αυτό τον τομέα στοχεύει στην ανάπτυξη πιο προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου που θα ενισχύσουν την απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητα των αιολικών πάρκων στο μέλλον.[8]

Η ανακατεύθυνση του αέρα με χρήση της γωνίας απόκλισης αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για τον έλεγχο των αιολικών πάρκων σήμερα. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ενεργητική εκτροπή του ρότορα των ανεμογεννητριών, ώστε να αξιοποιείται η δυναμική της ελεύθερης ροής αέρα και να δημιουργείται μια εγκάρσια δύναμη στην κατεύθυνση της κύριας ροής του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο, ο ομόρρος ανακατευθύνεται αποτελεσματικά, ελαχιστοποιώντας τις αρνητικές επιπτώσεις στις γειτονικές ανεμογεννήτριες.[9]

## 1.3 Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας

Η εργασία εστιάζει στη βελτιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος ενός αιολικού πάρκου, μέσω του ελέγχου του ομόρρου των ανεμογεννητριών χρησιμοποιώντας την τεχνική της ρύθμισης της γωνίας απόκλισής τους. Στόχος της εκτροπής του ομόρρου είναι η μείωση της αλληλεπίδρασης των κατάντι ανεμογεννητριών και κατ' επέκταση η αύξηση της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του πάρκου.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, μελετήθηκε, διορθώθηκε-βελτιώθηκε και προγραμματίστηκε σε περιβάλλον FORTRAN ένα παραμετρικό μοντέλο ομόρρου, βασισμένο στη μεθοδολογία του εργαλείου FLORIS (FLOW Redirection and Induction in Steady-state). Το μοντέλο αυτό αφορά ανεμογεννήτριες που λειτουργούν υπό κάποια γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση της ελεύθερης αδιατάρακτης ροής του ανέμου, περιλαμβάνοντας έτσι και τη γωνία απόκλισης. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σε περιβάλλον Python για την εφαρμογή σε



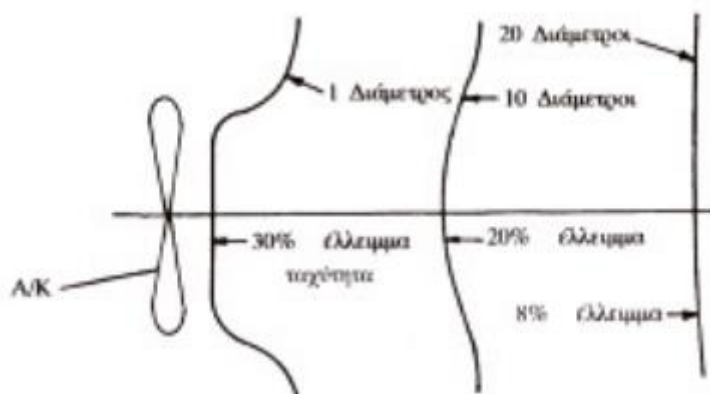
πραγματικό αιολικό πάρκο. Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκε από την αρχή ένας γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα του οποίου διασταυρώθηκαν με την χρήση ενός άλλου αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε περιβάλλον Python από υπάρχουσα βιβλιοθήκη. Το αποτέλεσμα είναι η εύρεση των βέλτιστων γωνιών εκτροπής του ομόρρου στο αιολικό πάρκο που μεγιστοποιούν την παραγόμενη ισχύ και συμβάλλουν στην μικρότερη δυνατή καταπόνηση των ανεμογεννητριών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Πεδίο ροής ομόρρου ανεμογεννήτριας

Ως ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας εννοούμε την κατάντι σε αυτή περιοχή της ροής όπου σε σχέση με την προσπίπτουσα στη μηχανή ροή του ανέμου παρατηρείται σημαντικό έλλειμμα ταχύτητας. Το έλλειμμα αυτό ταχύτητας αντιστοιχεί στην κινητική ενέργεια που απορρόφησε η μηχανή. Η μελέτη του ομόρρου είναι κλασσικό πρόβλημα ρευστομηχανικής. Ωστόσο η ακριβής πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας είναι δύσκολη, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες.[12]

Ο σπουδαιότερος παράγοντας που επηρεάζει τη φύση του ομόρρου, είναι η ώση. Αυτή είναι μια δύναμη από το δρομέα στο ρευστό, η οποία προκύπτει λόγω της εξαγωγής ισχύος από τη ροή. Η δύναμη αυτή ενεργεί στη διεύθυνση της ταχύτητας του αδιατάραχτου ρεύματος. Σημαντικοί παράγοντες είναι επίσης η επίδραση του πύργου, η επίδραση του εδάφους, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, τα επίπεδα τύρβης της ροής του ανέμου και άλλοι. Η εξέλιξη του ομόρρου, η ταχύτητα κατάντι της πρώτης ανεμογεννήτριας και η απόδοση της κατάντι ανεμογεννήτριας, εξαρτάται από την σχετική θέση ως προς την πρώτη. Ο ομόρρους μιας ανεμογεννήτριας έχει διανομή ταχυτήτων της μορφής του παρακάτω σχήματος (Εικόνα 2.1) και σταδιακά απενεργοποιείται και το προφίλ της ροής αποκαθίσταται.[12]

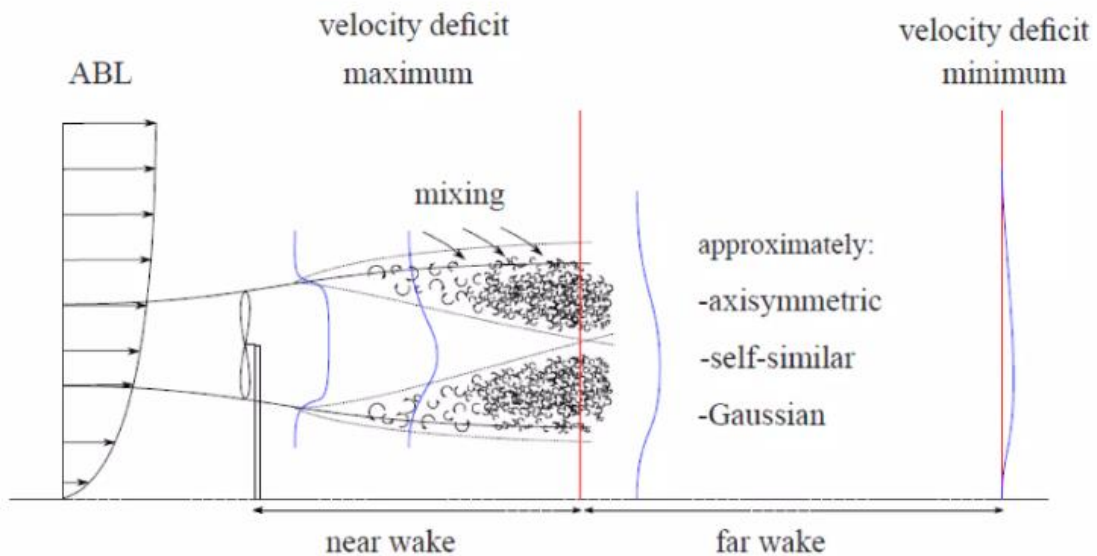


**Εικόνα 2.1:** Διανομή ταχυτήτων στον ομόρρου ανεμογεννήτριας.

Εκτός της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου, ο ομόρρους μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από αυξημένα επίπεδα τύρβης, γεγονός που οφείλεται στην ελάττωση της ταχύτητας του αέρα λόγω απορρόφησης κινητικής ενέργειας από την αιολική μηχανή, οπότε δημιουργείται μια βαθμίδα ταχύτητας μεταξύ της περιοχής του ομόρρου και της ελεύθερης ροής η οποία οδηγεί σε τυρβώδη ροή μεταξύ των δύο περιοχών (shear generated turbulence). Η επίδραση αυτή εκτιμάται

ότι στην περίπτωση στρωτής ροής του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και για ορισμένες τιμές της τραχύτητας του εδάφους σταματά σε απόσταση 6-10 φορές την διάμετρο της πτερωτής.[13]

## 2.2 Απλοποιημένο πρότυπο ομόρρου



**Εικόνα 2.2:** Κοντινός και μακρινός ομόρρους ανεμογεννήτριας.

Στα κατάντι της ανεμογεννήτριας διακρίνουμε κατ' απλοποιημένη παραδοχή δύο κύριες περιοχές [13], εκείνη του κοντινού ομόρρου κι εκείνη του μακρινού ή πλήρως ανεπτυγμένου ομόρρου (Εικόνα 2.2).

- Στην περιοχή του κοντινού ομόρρου (near wake), η οποία εκτείνεται από δύο έως τέσσερις διαμέτρους δρομέα, κυριαρχούν έντονα συνεκτικά φαινόμενα. Τα δακτυλιοειδή διατμητικά στρώματα στα όρια του ομόρρου διογκώνονται τόσο προς τον εσωτερικό πυρήνα του ομόρρου, όσο και προς την περιβάλλουσα ροή διαμορφώνοντας έτσι ένα δυναμικό πυρήνα κωνικού σχήματος. Στην περιοχή αυτή η ταχύτητα του ρευστού μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με την αρχική ταχύτητα της εσωτερικής δέσμης. Η εξέλιξη του κοντινού ομόρρου υπακούει κυρίως σε ένα συνδυασμό επιδράσεων της ατμοσφαιρικής τύρβης, της τύρβης λόγω διάτμησης και της μηχανικής τύρβης. Πιο συγκεκριμένα, ο ομόρρος τείνει καθώς εξαπλώνεται να κινείται ακτινικά προς τα έξω και για μικρές αποστάσεις κατάντι και αξονικά του ομόρρου παρατηρείται σημαντική απόκλιση στην ταχύτητα. Καθώς συνυπάρχει η τύρβη μεγάλης κλίμακας των ατμοσφαιρικών οριακών στρωμάτων με την τύρβη μικρής κλίμακας που αναπτύσσεται στα περύγια των ανεμογεννητριών, η κυκλοφορία του αέρα κατά μήκος των πτερυγίων του στροβίλου οδηγεί στο σχηματισμό δινών και στροβιλισμών με ελικοειδείς τροχιές που διαστέλλονται γρήγορα, σχηματίζοντας ένα κυλινδρικό στρώμα διάτμησης. Το διατμητικό αυτό στρώμα διαχωρίζει το εσωτερικό του ομόρρου από την εξωτερική ροή του περιβάλλοντος και διογκώνεται τόσο προς τον εσωτερικό πυρήνα του, όσο και προς την περιβάλλουσα ροή. Έτσι δημιουργείται δυναμικός πυρήνας σε σχήμα κώνου. Η κατανομή της ροής εντός αυτής της περιοχής είναι ετερογενής και πολύπλοκη.
- Στην περιοχή του μακρινού ομόρρου (far wake), η οποία εκτείνεται από τις περίπου τέσσερις διαμέτρους δρομέα και πέρα, τα δακτυλιοειδή διατμητικά στρώματα έχουν

πλήρως διεισδύσει στο χώρο του ομόρρου και έχει ολοκληρωθεί η ανάμειξη μικρής και μεγάλης κλίμακας τύρβη. Η διανομή του ελλείμματος της ταχύτητας εμφανίζει γεωμετρική ομοιότητα με τιμή στον άξονα να εξαρτάται μόνο από την ανάμειξη της ατμοσφαιρικής τύρβης και της τύρβης λόγω διάτμησης, η δε εξασθένηση του μεταπίπτει σε ένα πρόβλημα διάχυσης. Η επίδραση του ρότορα είναι αμελητέα και κατάντι του, σε ικανοποιητικά μεγάλες αποστάσεις, η ροή του άνεμου επανακτάται σταδιακά και τα αυξημένα επίπεδα τύρβης εξαφανίζονται λόγω διάχυσης, ώσπου στο τέλος του πεδίου, η ταχύτητα προσεγγίζει την ταχύτητα ελεύθερης ροής.

## 2.3 Μέθοδοι μοντελοποίησης ομόρρου

Η ροή που διαμορφώνεται στον ομόρρου μοντελοποιείται με τη χρήση προτύπων μοντέλων. Ο έλεγχος του ομόρρου, που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, συνδέεται άμεσα με αυτά.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μοντέλων ομόρρου (wake models), από εξαιρετικά εξελιγμένα αριθμητικά μοντέλα που περιγράφουν την τυρβώδη ροή έως απλούστερα μοντέλα που έχουν σχεδιαστεί για υπολογισμούς απωλειών ισχύος σε αιολικά πάρκα. Σε όλα τα μοντέλα, ωστόσο, υπάρχει ένας ορισμένος βαθμός παραμετροποίησης κατά την απόδοση των επιπτώσεων του ομόρρου.[14]

Δύο ξεχωριστοί τρόποι μοντελοποίησης των επιπτώσεων του ομόρρου σε αιολικά πάρκα έχουν αναδυθεί. Ένα αιολικό πάρκο μπορεί είτε να θεωρηθεί ως κατανεμημένα στοιχεία τραχύτητας που επηρεάζουν το ελεύθερο πεδίο ανέμου είτε ως μεμονωμένες ανεμογεννήτριες όπου ο ομόρρους καθεμιάς μοντελοποιείται ξεχωριστά. Τελικά, η μεμονωμένη μοντελοποίηση έχει γίνει η πιο κοινή προσέγγιση.

### 2.3.1 Αριθμητικά Μοντέλα

Τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται τόσο για τη μελέτη των πεδίων ροής στον μακρινό ομόρρου όσο και στην περιοχή κοντά στην τουρμπίνα, δίνοντας μια εικόνα της συμπεριφοράς της τυρβώδους ροής στον ομόρρου. Πολλά μοντέλα με κατεύθυνση τον υπολογισμό του μακρινού ομόρρου έχουν κάπως ανακριβή αποτύπωση του πεδίου ροής του κοντινού ομόρρου, αλλά εξακολουθούν να παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ωστόσο, το κύριο πεδίο χρήσης είναι για αιολικά πάρκα όπου οι τουρμπίνες συνήθως απέχουν αρκετά ώστε να μην λειτουργούν στον κοντινό ομόρρου.[14]

Πρόκειται για μοντέλα που χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους και υπολογιστικές τεχνικές για να λύσουν τις εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του αέρα και τις αλληλεπιδράσεις του με τις ανεμογεννήτριες. Αυτά τα μοντέλα είναι πιο ακριβή από τα αναλυτικά και κινηματικά μοντέλα, καθώς λαμβάνουν υπόψη τις πολύπλοκες ρευστοδυναμικές διεργασίες και τις μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις.[14],[15]

Ένα παράδειγμα τέτοιων μοντέλων είναι τα Μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD Models). Τα CFD μοντέλα είναι πιο περίπλοκα και χρησιμοποιούν τις εξισώσεις Navier-Stokes για να προβλέψουν την αεροδυναμική συμπεριφορά του ανέμου. Αυτά τα μοντέλα παρέχουν πολύ λεπτομερείς και ακριβείς προβλέψεις της ροής του αέρα και της επίδρασης του ομόρρου, αλλά απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και χρόνο για την επίλυσή τους. Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι θεμελιώδεις στη μελέτη της ροής των ρευστών και επιτρέπουν την πλήρη περιγραφή της ρευστοδυναμικής του αέρα,

συμπεριλαμβανομένων των πολύπλοκων φαινομένων όπως η αποκόλληση της ροής και η παραχώδης κίνηση (αναταράξεις).[15]

### 2.3.2 Κινηματικά Μοντέλα (Kinematic Models)

Τα κινηματικά (ή αναλυτικά) μοντέλα χρησιμοποιούν απλοποιημένη μορφή των εξισώσεων Navier-Stokes και γίνεται χρήση ημι-εμπειρικών συναρτήσεων. Βασίζονται στην κινηματική περιγραφή της ροής του αέρα και των αναταράξεων, χωρίς να ασχολούνται με την πλήρη δυναμική των ρευστών. Τα κινηματικά μοντέλα είναι υπολογιστικά αποδοτικά και απλά στη χρήση, αλλά μπορεί να μην αποδίδουν τις πιο λεπτομερείς και δυναμικές ιδιότητες της ροής του αέρα.[16]

- **Χαρακτηριστικά:**
  - Εστιάζουν στην περιγραφή της κίνησης και κατανομής της ταχύτητας του αέρα και των αναταράξεων.
  - Παραβλέπουν τις δυναμικές δυνάμεις και την πίεση που είναι κρίσιμες σε πιο σύνθετα μοντέλα.
  - Συχνά βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα και απλοποιημένες παραδοχές.
- **Παράδειγμα:** Το ίδιο το μοντέλο Jensen μπορεί να θεωρηθεί και ως κινηματικό μοντέλο, επειδή χρησιμοποιεί απλοποιημένες παραδοχές για την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στον ομόρρο.

Η μοντελοποίηση του ομόρρου των ανεμογεννητριών απαιτεί τη χρήση διαφόρων μοντέλων που κυμαίνονται από απλά αναλυτικά και εμπειρικά μοντέλα έως πιο σύνθετα και ακριβή CFD μοντέλα. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από τις απαιτήσεις της ανάλυσης, την ανάγκη για ακρίβεια και τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους.

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση ενός κινηματικού μοντέλου μακρινού ομόρρου, καθώς στο υπό μελέτη αιολικό πάρκο η απόσταση γειτονικών ανεμογεννητριών είναι περίπου 7 διάμετροι.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Υπολογιστικό εργαλείο FLORIS

Το FLORIS [17] είναι ένα προηγμένο μοντέλο που αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των ΗΠΑ (NREL) για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των αιολικών πάρκων μέσω της προσομοίωσης και ανάλυσης των αλληλεπιδράσεων των ροών αέρα μεταξύ των ανεμογεννητριών.

Το FLORIS χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό μοντέλων ροής αέρα για να προσομοιώσει τα φαινόμενα σκίασης εντός ενός αιολικού πάρκου.

Περιλαμβάνει προηγμένους αλγορίθμους για να λαμβάνει υπόψη την εκτροπή του ομόρρου, την αλληλεπίδραση των σκιάσεων πολλαπλών ανεμογεννητριών και την επίδραση του ελέγχου της γωνίας απόκλισης (yaw) στην εκτροπή του ομόρρου.

Ένας από τους κύριους στόχους του FLORIS είναι να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία των αιολικών πάρκων μέσω της ρύθμισης των γωνιών απόκλισης των ανεμογεννητριών για να εκτρέψει τον ομόρρο και να μειώνει τον αντίκτυπό του στις ανεμογεννήτριες που βρίσκονται κατάντι.

Με την εφαρμογή ενός κατάλληλου αλγορίθμου βελτιστοποίησης, το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της βέλτιστης γωνίας εκτροπής για κάθε ανεμογεννήτρια, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί τα φορτία κόπωσης στις ανεμογεννήτριες, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη λειτουργία του πάρκου.

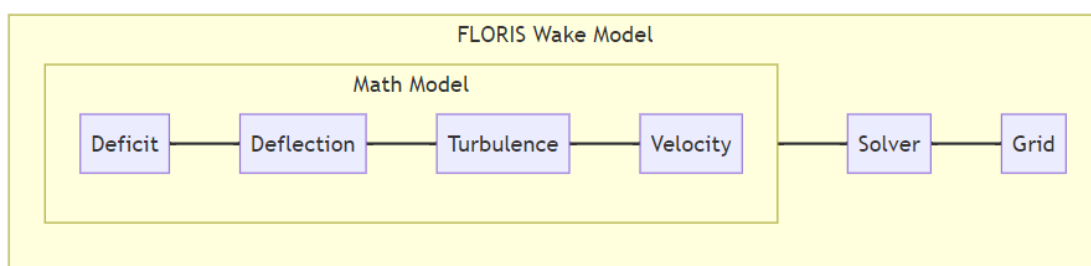
Το μοντέλο χρησιμοποιείται από ερευνητές και διαχειριστές αιολικών πάρκων για τη μελέτη διαφόρων πτυχών της απόδοσης των αιολικών πάρκων και την ανάπτυξη νέων στρατηγικών ελέγχου.

Συνοψίζοντας, το FLORIS είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υπολογισμού επιδράσεων ομόρρου που συνδυάζει πολλαπλές προσεγγίσεις μοντελοποίησης για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση της απόδοσης των αιολικών πάρκων, με έμφαση στον έλεγχο της γωνίας απόκλισης για τη μείωση των απωλειών λόγω των σκιάσεων και τη βελτίωση της συνολικής παραγωγής ενέργειας.

### 3.1.1 Μοντέλο ομόρρου FLORIS

Ένα μοντέλο ομόρρου στο FLORIS αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία που μαζί διαμορφώνουν τον ομόρρου (Εικόνα 3.1). Κατ' ελάχιστο, απαιτείται το προφίλ ελλείμματος ταχύτητας (deficit) πίσω από μια ανεμογεννήτρια. Στα περισσότερα μοντέλα, περιλαμβάνεται και ένα μοντέλο εκτροπής (deflection) του ομόρρου για να προσομοιωθεί η επίδραση της απόκλισης της γωνίας (yaw misalignment). Επίσης, είναι διαθέσιμα μοντέλα για την τύρβη (turbulence) που συνδυάζονται με τα στοιχεία του ελλείμματος και της εκτροπής. Τέλος, υπάρχουν μέθοδοι για τον συνδυασμό των ομόρρων με το υπόλοιπο ρεύμα αέρα (velocity).[18]

Υπολογιστικά, ο αλγόριθμος επίλυσης (solver) και ο τύπος πλέγματος (grid) που υποστηρίζεται από κάθε μοντέλο ομόρρου μπορούν επίσης να θεωρηθούν μέρος του μοντέλου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα παρακάτω, οι μαθηματικές διατυπώσεις μπορούν να θεωρηθούν ως τα κύρια συστατικά του μοντέλου. Αυτά συνήθως συνδέονται άμεσα μεταξύ τους και σε ορισμένες περιπτώσεις συνδυάζονται σε μια ενιαία μαθηματική διατύπωση. Ο αλγόριθμος επίλυσης και ο τύπος πλέγματος σχετίζονται με τη μαθηματική διατύπωση, αλλά είναι πιο γενικά.[18]



**Εικόνα 3.1:** Βασικά στοιχεία μοντέλου ομόρρου FLORIS.

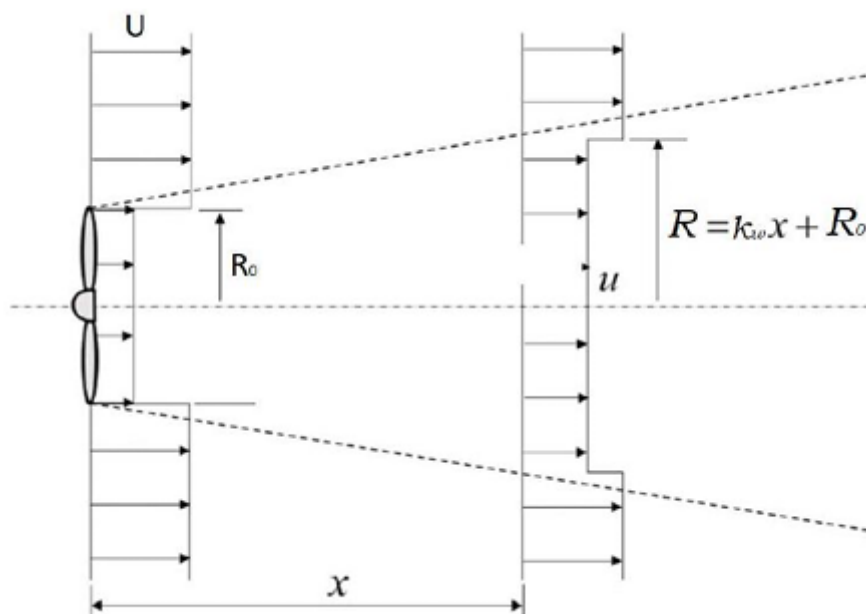
### 3.1.2 Πρότυπο Ομόρρου Jensen

Το πρότυπο του Jensen [16] είναι ένα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα ομόρρου, καθώς είναι αρκετά απλοποιημένο κι έχει χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, χαρακτηρίζει το πεδίο ροής του ανέμου πίσω από την ανεμογεννήτρια πιο κοντά στην πραγματικότητα καθιστώντας το έτσι ένα ιδανικό εργαλείο.

Το πρότυπο του Jensen προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας. Θεωρεί ότι η ακτίνα του ομόρρου έχει διάμετρο ίση με αυτή της ανεμογεννήτριας και αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει της απόστασης κατάντι του δρομέα. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας κατάντι του δρομέα, το οποίο εξαρτάται μόνο από την απόσταση από αυτόν. Έτσι, η προσομοίωση

παρέχει ακριβή αποτελέσματα σε αποστάσεις μεγαλύτερες των τεσσάρων διαμέτρων. Από την άλλη, δεν μπορεί να παράξει ακριβή πρόβλεψη της μορφής του ομόρρου στην περιοχή του κοντινού ομόρρου (near wake), το οποίο ωστόσο δεν αποτελεί σημείο προβληματισμού καθότι οι ανεμογεννήτριες ως επί το πλείστον δεν τοποθετούνται σε απόσταση μικρότερη των τεσσάρων διαμέτρων.

Τέλος, σημειώνεται ότι το πρότυπο του Jensen θεωρεί αξονοσυμμετρική ροή τόσο ανάντι όσο και κατάντι της ανεμογεννήτριας και προφίλ σταθερής ταχύτητας της επερχόμενης ροής. Η μορφή του ομόρρου σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.2).



**Εικόνα 3.2:** Αναπαράσταση ομόρρου σύμφωνα με το πρότυπο Jensen.

Η ταχύτητα της ροής  $U_T$  αμέσως μετά το δρομέα ορίζεται ως:

$$U_T(x) = U \cdot (1 - 2a) \quad (3.1)$$

όπου  $U$  είναι η ταχύτητα της ροής ανάντι της ανεμογεννήτριας και  $a$  είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής, που σε ομοαξονική ροή και για κωνικό προφίλ ομόρρου, ορίζεται ως:

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{2} \quad (3.2)$$

όπου  $C_T$  είναι ο συντελεστής ώσης της ανεμογεννήτριας. Το μοντέλο Jensen απαιτεί  $C_T < 1$ . Η σταθερή κλίση του ομόρρου ή σταθερά εξασθένισης του ομόρρου  $k_W$ , ορίζεται ως:

$$k_W = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{H_{hub}}{z_o}\right)} \quad (3.3)$$

όπου  $H_{hub}$  είναι το ύψος της πλήμνης και  $z_o$  το ύψος τραχύτητας του εδάφους στην περιοχή.

Υποθέτοντας μία γραμμική εξάπλωση του πεδίου ροής, η πορεία του ανέμου που απορρίφθηκε από τα πτερύγια, αντιπροσωπεύεται από ένα κώνο. Η ακτίνα του κώνου, δηλαδή του ομόρρου, συναρτήσει της θέσης  $x$  κατάντι του δρομέα ορίζεται ως:

$$R(x) = R_0 + k_W x \quad (3.4)$$

όπου  $R_0$  η ακτίνα του δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Τέλος, η ταχύτητα της ροής συναρτήσεται της απόστασης  $x$  κατάντι του δρομέα στην περιοχή του πλήρως ανεπτυγμένου ομόρρου, ορίζεται ως

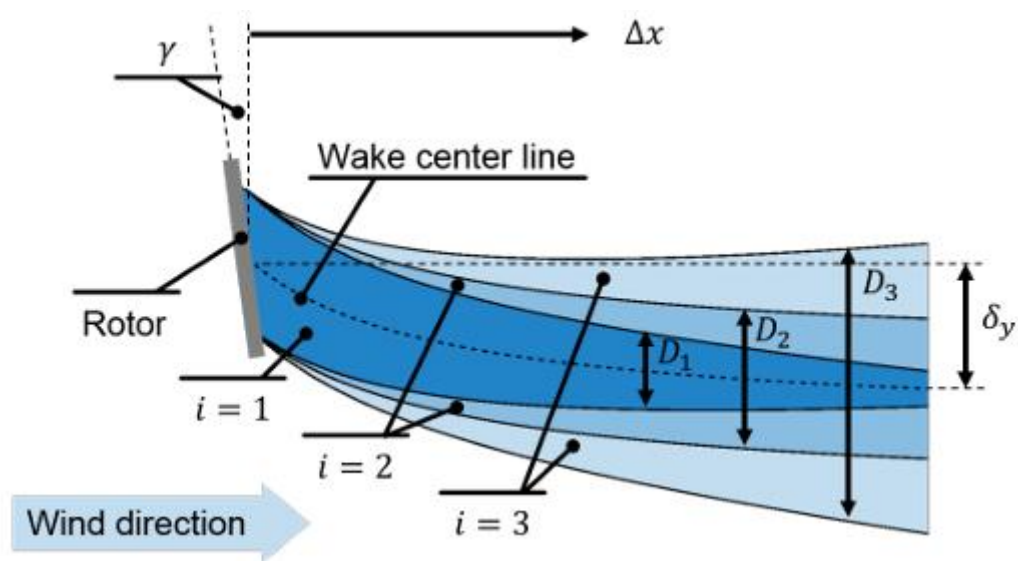
$$u(x) = U \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{(1 + k_w \frac{x}{R_0})^2} \right] \quad (3.5)$$

### 3.2 Ανάλυση εφαρμοζόμενου μοντέλου αιολικού πάρκου

Της προαναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία, το μοντέλο Jensen συνδυάζεται με το μοντέλο που δημιουργήθηκε με βάση το εργαλείο FLORIS και στην περίπτωση της μηδενικής γωνίας απόκλισης, χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαστολής κάθε ζώνης του ομόρρου, καθώς και για τον υπολογισμό του αντίστοιχου ελλείματος ταχύτητας.

Γίνεται υπόθεση ότι ο ομόρρος κάθε ανεμογεννήτριας αποτελείται από τρεις υποπεριοχές (εν αντιθέσει με τη μία ζώνη που υποθέτει το αυτόσιο μοντέλο Jensen), της φαίνεται στην Εικόνα 3.3, όπου:

- $\Delta x$ : η κατάντι απόσταση από την ανεμογεννήτρια
- $\Delta y$ : η εκτροπή της κεντρικής γραμμής του ομόρρου λόγω απόκλισης της γωνίας της ανεμογεννήτριας
- $\gamma$ : η γωνία απόκλισης της ανεμογεννήτριας



Εικόνα 3.3: Διαίρεση υποπεριοχών ομόρρου στο μοντέλο FLORIS.

Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις υποπεριοχές του ομόρρου είναι:

- $i = 1$ , ο κοντινός ομόρρος, με διάμετρο  $D_1$
- $i = 2$ , ο μακρινός ομόρρος, με διάμετρο  $D_2$
- $i = 3$ , η ζώνη μετάβασης, με διάμετρο  $D_3$

#### 3.2.1 Διαστολή και Διάμετρος Ομόρρου

Στην περίπτωση της γωνιακής εκτροπής του ομόρρου, το μοντέλο Jensen δεν δίνει ορθά και ακριβή αποτελέσματα στην περιοχή του μακρινού ομόρρου. Αυτό διότι, οι τρεις πλέον υποπεριοχές, είναι μεν ανάλογες της κατάντι απόστασης από την ανεμογεννήτρια, αλλά δεν

επεκτείνονται πλέον γραμμικά της στην περίπτωση της σταθερής, ομοιόμορφου προφίλ εισερχόμενης ταχύτητας στη μηδενική γωνία απόκλισης.

Μάλιστα, τα πειραματικά δεδομένα [19] έχουν δείξει ότι η διάμετρος ομόρρου ανεμογεννήτριας που λειτουργεί σε απόκλιση σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου μειώνεται. Λαμβάνοντας αυτό υπόψιν, η εξωτερική διάμετρος του ομόρρου ορίζεται ως:

$$D_i(\Delta\chi, \gamma) = \max(0, (D+2\cdot\Delta\chi \cdot k_{e,i}) \cdot \cos(\gamma)^{k_{e,\gamma}}) \quad (3.6)$$

όπου:

- $D$ : η διάμετρος της ανεμογεννήτριας
- $k_{e,\gamma}$ : η παράμετρος που περιγράφει την μειωμένη διαστολή του ομόρρου λόγω της εκτροπής της ανεμογεννήτριας
- $k_{e,i}$ : η παράμετρος που περιγράφει την διαστολή του ομόρρου για κάθε υποπεριοχή  $i$ . Καθώς οι ζώνες του ομόρρου μπορούν να έχουν αρνητικό συντελεστή  $k_{e,i}$ , η διάμετρος του ομόρρου περιορίζεται σε θετικές τιμές. Για τη ζώνη κοντινού ομόρρου, ο συντελεστής  $k_{e,1}$  συνήθως ορίζεται σε μια αρνητική τιμή, υποδηλώνοντας ότι η διατομή αυτής της ζώνης τείνει στο μηδέν με την απόσταση από το ρότορα.

### 3.2.2 Ταχύτητα Ανέμου Ομόρρου

Λόγω της ανάμιξης που προκαλείται από την τύρβη, η ταχύτητα του ανέμου στον ομόρρου θα επανέλθει σταδιακά στην ταχύτητα ελεύθερης ροής. Το προφίλ της ταχύτητας κατάντι της ανεμογεννήτριας ορίζεται στην αξονική διεύθυνση  $x$ , ενώ οι υπόλοιπες συνιστώσες της, αγνοούνται.

Η ταχύτητα του ανέμου σε κάθε υποπεριοχή του ομόρρου περιγράφεται από το μοντέλο Jensen με τον παρακάτω τύπο [19]:

$$U_i(\Delta\chi) = U_\infty \cdot (1 - r_i(\Delta\chi)) \quad (3.7)$$

Όπου,  $U_\infty$  είναι η ταχύτητα της ελεύθερης ροής. Κάθε μία από τις υποπεριοχές έχει ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας ανέμου και ένα μοναδικό ρυθμό εξασθένησης του ομόρρου  $r_i$  που εξαρτάται από την κατάντι απόσταση από τον ρότορα και ορίζεται ως εξής:

$$r_i(\Delta\chi) = \begin{cases} \left( \frac{D}{D+2\Delta\chi \cdot k_{r,1}} \right)^2, & \text{για } |r| \leq \frac{D_1}{2} \\ 2\alpha \cdot \begin{cases} \left( \frac{D}{D+2\Delta\chi \cdot k_{r,2}} \right)^2, & \text{για } \frac{D_1}{2} < |r| \leq \frac{D_2}{2} \\ \left( \frac{D}{D+2\Delta\chi \cdot k_{r,3}} \right)^2, & \text{για } \frac{D_2}{2} < |r| \leq \frac{D_3}{2} \end{cases} \\ 0, & \text{για } |r| > \frac{D_3}{2} \end{cases} \quad (3.8)$$

Όπου:

- $\alpha$  είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής της τουρμπίνας
- $r = y - \delta y_{yaw}(\Delta\chi, \gamma)$ , όπου  $y$  το όριο του ομόρρου
- $k_{r,i}$  η παράμετρος εξασθένησης της υποπεριοχής  $i$  του ομόρρου.  
Οι τυπικές τιμές του  $k_{r,i}$  κυμαίνονται από 0.01 έως 0.5, κι εξαρτάται από την τυρβώδη ροή του περιβάλλοντος, τα τοπογραφικά φαινόμενα και τη λειτουργία του στροβίλου. Λόγου χάριν, σε υψηλή τύρβη, οι ομόρροι των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου θα



ανακάμψουν γρηγορότερα λόγω της ανάμειξης τους. Ως εκ τούτου, η τιμή  $k_{r,i}$  θα είναι υψηλότερη. Δεν υπάρχει κανένας τυπικός κανόνας για το πως εξάγεται ο συντελεστής  $k_r$  και ποικίλλει ανάλογα με την ένταση της τύρβης. Η περιοχή επικάλυψης κάθε υποπεριοχής με το πεδίο σάρωσης κατάντι της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ταχύτητας ανέμου των κατάντι ανεμογεννητριών.

Όπως διακρίνεται στο μοντέλο, το έλλειμμα ταχύτητας μειώνεται τετραγωνικά με την απόσταση από το ρότορα της ανεμογεννήτριας.

### 3.2.3 Εκτροπή του Ομόρρου

Η τροχιά της κεντρικής γραμμής του ομόρρου συναρτήσει της γωνίας απόκλισης ορίζεται ως [19]:

$$\delta y_{yaw}(\Delta\chi, \gamma) = \frac{C_T(\gamma) \left( 15 \left( 2k_d \frac{\Delta\chi}{D} + 1 \right)^4 + C_T(\gamma)^2 \right)}{30 \frac{k_d}{D} \left( 2k_d \frac{\Delta\chi}{D} + 1 \right)^5} - \frac{C_T(\gamma) D (15 + C_T(\gamma)^2)}{30 k_d} \quad (3.9)$$

Όπου:

- $k_d$ : η παράμετρος που περιγράφει την ανάκτηση της εισερχόμενης ροής του ομόρρου
- $D$ : η διάμετρος της ανεμογεννήτριας
- $\Delta\chi$ : η κατάντι απόσταση από την ανεμογεννήτρια
- $C_T$ : ο συντελεστής ώσης της ανεμογεννήτριας που εξαρτάται από την γωνία εκτροπής  $\gamma$

Η εκτροπή του ρότορα μιας ανεμογεννήτριας, προκαλεί περιστροφή της δύναμης ώσης που ασκείται στη ροή, με αποτέλεσμα να επάγεται μια συνιστώσα πλευρικού ανέμου, η οποία αναγκάζει τη ροή να εκτραπεί προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της γωνίας απόκλισης. Ως αποτέλεσμα, ο συντελεστής ώσης της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται, σε σχέση με τον αντίστοιχο συντελεστή ώσης  $C_T$  σε συνθήκες πλήρους ευθυγράμμισης των ανεμογεννητριών και πλέον ορίζεται ως:

$$C_T(\gamma) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\gamma)^2 \cdot \sin(\gamma) \cdot C_T \quad (3.10)$$

Όπου

$$C_T = \begin{cases} 4\alpha(1 - \alpha), & \alpha \leq 0.99 \\ 0.425 + 1.39\alpha, & \alpha > 0.99 \end{cases} \quad (3.11)$$

Όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής της τουρμπίνας.

### 3.2.4 Ισχύς Ανεμογεννήτριας

Για τον υπολογισμό της ισχύος που παράγεται από την ανεμογεννήτρια, ο δίσκος του ρότορα υποδιαιρείται σε  $m$  διακριτά στοιχεία  $e$ . Η συνολική παραγόμενη ισχύς λαμβάνεται από το άθροισμα της ισχύος καθενός από τα στοιχεία  $e$  και προκύπτει από τον τύπο [19]:

$$P = \sum_{e=1}^m \frac{1}{2} \rho A_e C_P(\gamma) V_e^3 \quad (3.12)$$

Όπου:

- $\rho$ : η πυκνότητα του αέρα
- $A_e$ : το εμβαδόν του στοιχείου  $e$  του δίσκου του ρότορα
- $V_e$ : η ταχύτητα του ανέμου στο διακριτό στοιχείο  $e$  του δίσκου του ρότορα

Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα  $V_e$  υπολογίζεται με βάση το έλλειμμα ταχύτητας του ομόρρου όλων των ανάντι ανεμογεννητριών ως εξής:

$$V_e = V_\infty \cdot (1 - (\sum_{w=1}^n r_w^2)^{\frac{1}{2}}) \quad (3.13)$$

Όπου  $n$  είναι ο αριθμός των ζωνών ομόρρου που επικαλύπτουν τον ρότορα της ανεμογεννήτριας, ενώ  $r_w$  είναι ο μειωτικός συντελεστής μιας ζώνης ομόρρου που προσκρούει στο στοιχείο  $e$ .

Σε περίπτωση που  $n=0$ , κανένας ομόρρους δεν προσκρούει στο στοιχείο  $e$  κι έτσι προκύπτει  $V_e = V_\infty$

- $C_p$ : ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας ο οποίος εκφράζεται συναρτήσει της γωνίας απόκλισης  $\gamma$  σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$C_p(\gamma) = C_{p,\gamma=0} \cdot \cos(\gamma)^{k_p} \quad (3.14)$$

Όπου  $C_{p,\gamma=0}$  είναι ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας όταν είναι ευθυγραμμισμένη με τον άνεμο (δεν είναι σε απόκλιση) και  $k_p$  είναι η παράμετρος που λαμβάνει υπόψη την μείωση της παραγόμενης ισχύος λόγω απόκλισης της γωνίας  $\gamma$ .

### 3.2.5 Υλοποίηση Αλγορίθμου

Ο υλοποιημένος αλγόριθμος οργανώνεται ως εξής:

Πρώτον, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά ισχύος και ομόρρου της πρώτης ανεμογεννήτριας ανάντι.

Σε ένα δεύτερο βήμα, εξετάζεται η επόμενη ανεμογεννήτρια και γίνεται παρεμβολή της εκτροπής, ταχύτητας ανέμου και διαστολής του ομόρρου όλων των ανεμογεννητριών ανάντι στην δεδομένη θέση κατάντι.

Με βάση αυτό, η ισχύς της ανεμογεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με τις εξισώσεις (3.12) και (3.13). Τέλος, υπολογίζεται ο ομόρρους της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.6), (3.7) και (3.9), και το δεύτερο βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσει και στην τελευταία ανεμογεννήτρια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4.1 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης (Optimizer)

Επόμενο στάδιο της υλοποίησης, εφαρμογής και πιστοποίησης του εργαλείου FLORIS με το οποίο αναπαρίσταται ο ομόρρους της ανεμογεννήτριας σε απόκλιση, είναι το στήσιμο και η ανάπτυξη αλγορίθμου βελτιστοποίησης για την εφαρμογή και εύρεση της βέλτιστης γωνίας εκτροπής για παραπάνω από μία ανεμογεννήτριες. Τελικό βήμα θα είναι η εφαρμογή σε αιολικό πάρκο του εν λόγω μοντέλου.

Ένας αλγόριθμος είναι μια καθορισμένη σειρά εντολών ή κανόνων που αποσκοπούν στην επίλυση ενός προβλήματος ή στην εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας. Οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην πληροφορική και τα μαθηματικά, αλλά βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η φυσική, η οικονομία και η μηχανική. Η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα ενός αλγορίθμου κρίνονται από τον χρόνο εκτέλεσης και τους πόρους που απαιτεί για την ολοκλήρωση της εργασίας του.

Σε μια πρακτική εφαρμογή, οι αλγόριθμοι μπορεί να περιλαμβάνουν από απλές διαδικασίες, όπως η ταξινόμηση μιας λίστας αριθμών, έως πιο σύνθετες, όπως η εκπαίδευση ενός μοντέλου

μηχανικής μάθησης ή η επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Οι αλγόριθμοι είναι θεμελιώδη εργαλεία που καθορίζουν πώς εκτελούνται οι εργασίες και πώς λαμβάνονται αποφάσεις με βάση τα δεδομένα και τους καθορισμένους κανόνες.

Πιο συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι μαθηματικές μέθοδοι που αποσκοπούν στην εύρεση της βέλτιστης λύσης για ένα δεδομένο πρόβλημα, συχνά με την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους ή απόδοσης. Αυτοί οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την καλύτερη δυνατή απόφαση ή λύση από ένα σύνολο πιθανών επιλογών, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους περιορισμούς και συνθήκες.

Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να αντιμετωπίσουν τόσο γραμμικά όσο και μη γραμμικά προβλήματα, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές όπως ο γραμμικός προγραμματισμός, η στοχαστική βελτιστοποίηση και οι ευρετικοί αλγόριθμοι. Στην πληροφορική, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι κρίσιμοι για την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης και την επίλυση σύνθετων προβλημάτων με αποδοτικό τρόπο.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης παίζουν κρίσιμο ρόλο στην αποδοτική λειτουργία ανεμογεννητριών για την παραγωγή βέλτιστης ενέργειας. Σε ένα αιολικό πάρκο, οι ανεμογεννήτριες πρέπει να τοποθετούνται και να λειτουργούν με τρόπο που να μεγιστοποιεί την απόδοσή τους και να ελαχιστοποιεί τις απώλειες που προκαλούνται από το φαινόμενο του ομόρρου (wake effect).

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την καλύτερη διάταξη των ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της γωνίας περιστροφής των πτερυγίων (yaw) ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μείωση της ταχύτητας του ανέμου λόγω των ομόρρων και να μεγιστοποιηθεί η παραγόμενη ενέργεια. Μέσω αυτών των αλγορίθμων, οι διαχειριστές των αιολικών πάρκων μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση και να μειώσουν τα λειτουργικά κόστη.

## 4.2 Γενετικός Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του ΕΜΠ και προγραμματίστηκε σε περιβάλλον Python, για την εύρεση των βέλτιστων γωνιών εκτροπής του ομόρρου των ανεμογεννητριών, με στόχο την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Η ανάγκη για αποδοτική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας καθιστά κρίσιμο τον βέλτιστο προσανατολισμό του δίσκου του ρότορα ως προς τον άνεμο, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση του ομόρρου στις κατάντι ανεμογεννήτριες και να μεγιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης των γωνιών εκτροπής είναι πολυσύνθετη και απαιτεί την ανάλυση πολυάριθμων παραμέτρων, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε συνδυάζει τις παραπάνω παραμέτρους για να προσδιορίσει τις βέλτιστες γωνίες με τρόπο αποδοτικό και αξιόπιστο.

Ένας γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA) είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης και αναζήτησης που βασίζεται στις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής. Εμπνευσμένος από τη βιολογία, ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί διαδικασίες όπως η αναπαραγωγή, η μετάλλαξη, η διασταύρωση και η επιλογή για να εξελίξει λύσεις σε ένα πρόβλημα.[20]

Ο τρόπος λειτουργίας του έχει ως εξής:

1. Αρχικοποίηση: Δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός πιθανών λύσεων (χρωμοσώματα), συχνά τυχαία.

2. Αξιολόγηση: Κάθε χρωμόσωμα αξιολογείται με βάση μια συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) που μετρά πόσο καλά λύνει το πρόβλημα.

3. Εξέλιξη: Εξελίσσουν τον πληθυσμό εφαρμόζοντας γενετικές διαδικασίες (τελεστές) που επηρεάζονται από την επίδοση και πιο συγκεκριμένα:

- Διαδικασία Επιλογής: Τα καλύτερα χρωμοσώματα επιλέγονται για αναπαραγωγή με βάση την καταλληλότητά τους.
- Διαδικασία Διασταύρωσης (Crossover): Ζεύγη επιλεγμένων χρωμοσωμάτων ανταλλάσσουν τμήματα του γενετικού τους υλικού για να δημιουργήσουν νέα χρωμοσώματα.
- Διαδικασία Μετάλλαξης: Εφαρμόζονται τυχαίες αλλαγές σε ορισμένα σημεία των νέων χρωμοσωμάτων για να διατηρηθεί η ποικιλότητα του πληθυσμού.

4. Αντικατάσταση: Τα νέα χρωμοσώματα αντικαθιστούν τα παλαιά στον πληθυσμό.

5. Επανάληψη: Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για πολλές γενιές, έως ότου επιτευχθεί μια ικανοποιητική λύση.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ιδανικοί για πολύπλοκα προβλήματα όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης αποτυγχάνουν ή είναι λιγότερο αποδοτικές.

Για να διαπιστωθεί και επιβεβαιωθεί η λειτουργία του συγκεκριμένου γενετικού αλγορίθμου, εφαρμόστηκε σε διάφορες διατάξεις τριών πειραματικών ανεμογεννητριών όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

### 4.3 Global Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου διασταυρώθηκαν για την ορθότητα τους από την πραγμάτωση, σε περιβάλλον Python, αλγορίθμου με χρήση της λειτουργίας “shgo” από την υποβιβλιοθήκη optimize της βιβλιοθήκης SciPy.[21]

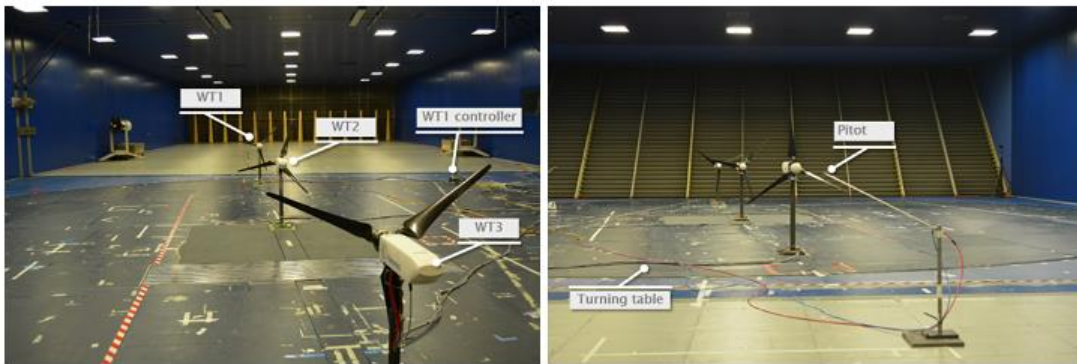
Η λειτουργία “shgo” (Simplicial Homology Global Optimization) της βιβλιοθήκης SciPy είναι ένας αλγόριθμος για την παγκόσμια (global) βελτιστοποίηση που χρησιμοποιείται για την εύρεση του ολικού ελαχίστου ή μεγίστου μιας συνάρτησης σε ένα καθορισμένο πεδίο. Ο αλγόριθμος συνδυάζει την ομολογία του απλού αριθμού (simplicial homology) με τεχνικές τοπικής βελτιστοποίησης για να προσδιορίσει με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα τα σημεία ελαχίστου ή μεγίστου.

Η “shgo” λειτουργεί αναζητώντας τα κρίσιμα σημεία της συνάρτησης μέσω της διάσπασης του χώρου αναζήτησης σε απλά γεωμετρικά σχήματα (simplices). Ο αλγόριθμος εξετάζει αυτά τα σχήματα και χρησιμοποιεί πληροφορίες από τις γειτονικές περιοχές για να καθοδηγήσει την αναζήτηση προς τις περιοχές που πιθανώς περιέχουν το ολικό ελάχιστο ή μέγιστο. Με αυτόν τον τρόπο, η “shgo” μπορεί να βρει λύσεις ακόμα και σε προβλήματα με πολλαπλά τοπικά ελάχιστα ή μέγιστα, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και αποδοτικότητα στη βελτιστοποίηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### 5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη που έλαβαν χώρα οι διάφορες δοκιμές από τις οποίες λήφθηκαν τα υπό σύγκριση πειραματικά δεδομένα αποτελείται από ένα υπό κλίμακα αιολικό πάρκο, το οποίο αποτελείται από τρία πανομοιότυπα μοντέλα ανεμογεννητριών σε κλίμακα (Εικόνα 5.1), τοποθετημένα σε απόσταση 4 διαμέτρων ( $D$ ) κατά μήκος, με διάμετρο ρότορα ίση με 1,1 m. (εφεξής «G1», Generic 1 m), τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί και σε άλλα ερευνητικά έργα. Τα μοντέλα λειτούργησαν στο τμήμα δοκιμών οριακού στρώματος της αεροσήραγγας του Politecnico di Milano, με διατομή 13,84 m. επί 3,84 m. και μήκος 36 m. Οι συνθήκες του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος προσομοιώθηκαν με τη χρήση γεννητριών τύρβης που τοποθετήθηκαν στην είσοδο της διατομής δοκιμών της σήραγγας.[19]



**Εικόνα 5.1:** Υπό κλίμακα αιολικό πάρκο πειραματικής διάταξης.

Το κάθετο προφίλ της διαμήκουσ ταχύτητας του ανέμου μετρήθηκε πριν από τις δοκιμές, προκύπτοντας ότι προσαρμόζεται καλύτερα ο εκθετικός νόμος.[19]

Ο σχεδιασμός της G1 βασίστηκε στην ανεμογεννήτρια DTU 10MW η οποία σχεδιάστηκε στο Πολυτεχνείο της Δανίας (Danmark Technical University).

Η σχεδίαση των διαστάσεων της G1 είναι τέτοια ώστε ο ρότορας της να έχει παρόμοια βέλτιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου TSR με την DTU, με σκοπό την απόκτηση ενός ρεαλιστικού ομόρρου.

Η γεννήτρια αναφοράς DTU είναι οριζόντιου άξονα με έλεγχο μέσω απώλειας στήριξης (Stall), με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τρία πτερύγια
- Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς 10 MW
- Η διάμετρος του ρότορα της είναι 178.3 m
- Το ύψος της πλήμνης είναι 119.0 m
- Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 11.4 m/s

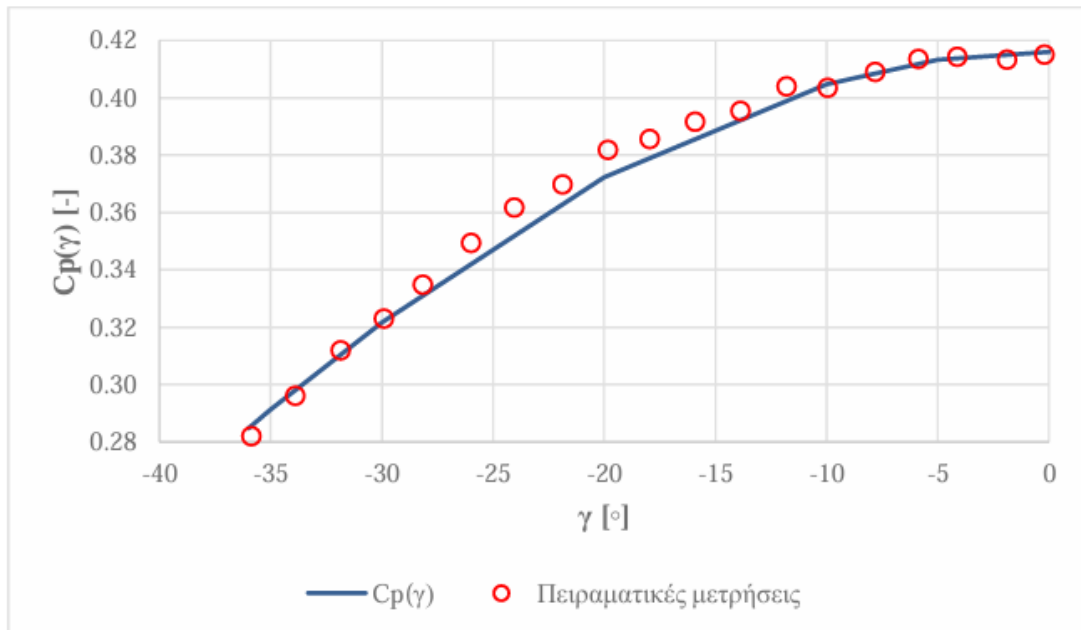
Η G1 αποτελεί μια ανεμογεννήτρια με έλεγχο μέσω απώλειας στήριξης (Stall), οριζόντιου άξονα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τρία πτερύγια
- Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς 45 W
- Η διάμετρος του ρότορα της είναι 1.1 m
- Το ύψος της πλήμνης είναι 0.825 m
- Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 6.5 m/s

- Η ταχύτητα  $cut_{in}$  είναι 5.0 m/s
- Η ταχύτητα  $cut_{out}$  είναι 10.0 m/s

Η βέλτιστη ταχύτητα ακροπερυγίου TSR της G1 είναι  $\lambda_{opt} = 7.44$  για βέλτιστη γωνία βήματος περυγίου (pitch)  $\beta = -2^\circ$ .

Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος της G1 είναι  $C_{P,max} = 0.416$  για την παραπάνω τιμή  $\lambda_{opt}$  και για  $\gamma=0^\circ$  (Εικόνα 5.2), ενώ ο συντελεστής ώσης είναι  $C_T=0.747$ . [22]



**Εικόνα 5.2:** Συντελεστής ισχύος της G1 συναρτήσει της γωνίας απόκλισης.

Η ανάλυση της παρούσας εργασίας ως προς την πιστοποίηση της διαδικασίας αναπαράστασης του ομόρρου και την πιστοποίηση του βελτιστοποιητή αφορά την εξαγωγή αποτελεσμάτων από το FLORIS για τη G1. Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται ως βάση αναφοράς και σύγκρισης σε όλες τις δοκιμές του παρόντος κεφαλαίου ελήφθησαν από την εν λόγω πειραματική διάταξη. [19]

Η ανάκτηση των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση, σε όλη την έκταση της διπλωματικής, έγινε με τη βοήθεια ενός εργαλείου εξαγωγής αριθμητικών δεδομένων από γραφήματα (GetData Graph Digitizer), καθώς οι μετρήσεις δεν ήταν διαθέσιμες.

Η μελέτη στη συνέχεια της βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται σε πραγματικό αιολικό πάρκο έγινε με την χρήση ανεμογεννητριών διαφορετικών χαρακτηριστικών που θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 6.

## 5.2 Προσδιορισμός Παραμέτρων Μοντέλου

Για την ορθή λειτουργία και χρήση του μοντέλου FLORIS είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός και η βαθμονόμηση των παραμέτρων του που σχετίζονται με την διαστολή και διάμετρο, την εκτροπή, την θέση, την ταχύτητα του ομόρρου και κατ' επέκταση την παραγόμενη ισχύ.

Στην παρούσα εργασία, οι τιμές των παραμέτρων λήφθηκαν από διπλωματική εργασία [22] που βασίστηκε στο εν λόγω πείραμα και μάλιστα προσδιόρισε μια βελτιωμένη εκδοχή τους. Οι

παράμετροι αυτές βαθμονομήθηκαν βάση των μετρήσεων του ομόρρου μίας ανεμογεννήτριας G1. Πρόκειται για ένα γενικό σύνολο τιμών που αφορά όλες τις αποστάσεις κατάντι του ρότορα και όχι την συνεχή μεταβολή τους.

Το σύνολο των παραμέτρων  $k_{e,i}$  και  $k_{r,i}$  αρχικά υπολογίστηκε για τύρβη υψηλής εντάσεως στο περιβάλλον της αεροσήραγγας ( $TI = 5\%$ ). Στη συνέχεια, βαθμονομήθηκαν οι παράμετροι  $k_{e,\gamma}$  και  $k_d$  που επηρεάζουν την εκτροπή του ομόρρου. Ο προσδιορισμός έγινε για τύρβη χαμηλής εντάσεως στο περιβάλλον της αεροσήραγγας ( $TI = 1\%$ ) και για πληρότητα επαναπροσδιορίστηκαν οι τιμές των  $k_{e,i}$  και  $k_{r,i}$ . Οι παράμετροι  $k_{e,\gamma}$  και  $k_d$  είναι ανεξάρτητοι από την ένταση της τύρβης. Γι' αυτό το λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή του ομόρρου και για την περίπτωση υψηλής τύρβης, στα πειράματα αιολικού πάρκου που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Υψηλή TI	Μέση τιμή παραμέτρου
$k_{e,1}$	-0.0315
$k_{e,2}$	-0.0074
$k_{e,3}$	0.0255
$k_{r,1}$	0.0345
$k_{r,2}$	0.0704
$k_{r,3}$	0.1366
$k_{e,\gamma}$	2.8808
$k_d$	0.1219
$k_p$	1.7870

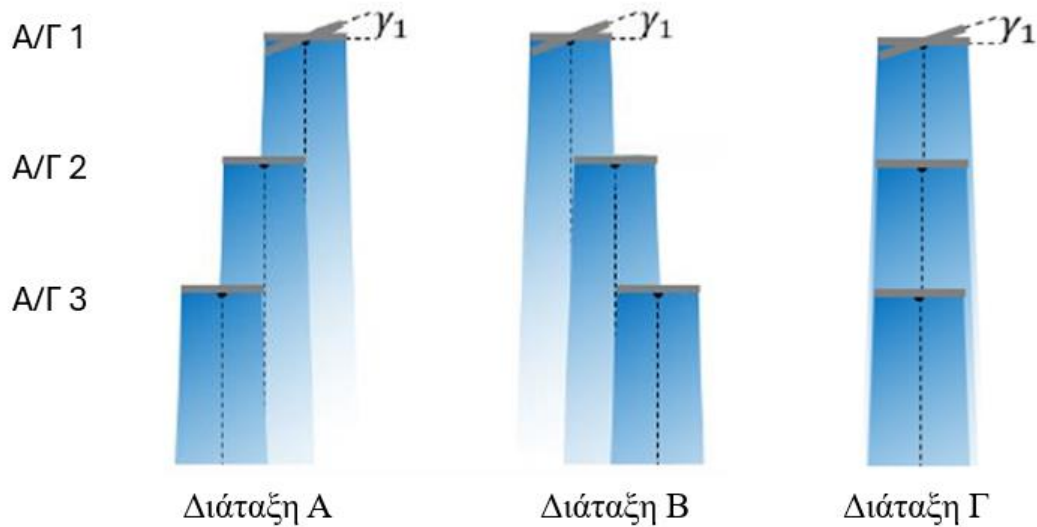
**Πίνακας 5.1:** Τιμές παραμέτρων λειτουργίας μοντέλου FLORIS.

### 5.3 Πιστοποίηση Μοντέλου

Το παρόν τμήμα της εργασίας αφορά την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση της ανεμογεννήτριας G1 με το μοντέλο και τη σύγκριση τους, με τα πειραματικά αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν στο υπό κλίμακα αιολικό πάρκο των G1, στην αεροδυναμική σήραγγα του Πολυτεχνείου του Μιλάνου (Politecnico di Milano).[14]

Στο παρόν στάδιο, τοποθετήθηκαν τρεις ανεμογεννήτριες G1 σε τρεις διαφορετικές διατάξεις, τις Α, Β και Γ. Οι ανεμογεννήτριες απέχουν κατακόρυφη απόσταση 4D η μία από την άλλη. Η οριζόντια απόστασή τους στη Διάταξη Α είναι -0.5D, στη Διάταξη Β είναι +0.5D, ενώ στη Διάταξη Γ είναι 0.0D.

Η ανάντι μηχανή είναι η Α/Γ 1, η μεσαία είναι η Α/Γ 2 και η κατάντι είναι η Α/Γ 3. Η τοποθέτησή τους φαίνεται στην Εικόνα 5.3.



**Εικόνα 5.3:** Διατάξεις υπό κλίμακα ανεμογεννητριών.

Σε κάθε μία εκ των άνω διατάξεων ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε στην ονομαστική ταχύτητα  $u_{opt} = 6.5 \text{ m/s}$  για Βόρειο άνεμο.

Για διάφορες γωνίες απόκλισης  $\gamma_1$  της A/G 1, υπολογίστηκαν οι συντελεστές ισχύος  $C_P$  των τριών ανεμογεννητριών και συγκριθήκαν με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Ο συντελεστής ισχύος της πρώτης ανεμογεννήτριας είναι  $C_{P,1}$ , της μεσαίας ανεμογεννήτριας  $C_{P,2}$ , ενώ της τρίτης ανεμογεννήτριας είναι  $C_{P,3}$ . Οι γωνίες απόκλισης των άλλων δύο ανεμογεννητριών παρέμειναν σταθερές και ίσες με  $0^\circ$ , ενώ καθ' όλη τη διάρκεια των υπολογισμών, ο συντελεστής ισχύος σε συνθήκες μηδενικής εκτροπής ήταν ίσος με  $C_{P,\gamma=0^\circ} = 0.416$ .

Να σημειωθεί ότι η σύμβαση για την γωνία εκτροπής  $\gamma_1$  κοιτάζοντας την κάτοψη των ανεμογεννητριών είναι:

- Θετική (+) η αριστερή στρέψη η οποία στρέφει τον ομόρρου προς τα αριστερά
- Αρνητική (-) η δεξιά στρέψη η οποία στρέφει τον ομόρρου προς τα δεξιά

Οι εν λόγω συντελεστές  $C_P$  υπολογίστηκαν ως εξής:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_P \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot C_P \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot u^3$$

$$\Rightarrow C_P = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot u^3} \quad (5.1)$$

Όπου:

- P: η παραγόμενη ισχύς σε Watt που λαμβάνεται από το μοντέλο
- $\rho$ : η πυκνότητα του αέρα που είναι ίση με  $1.225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
- R: η διάμετρος του ρότορα που είναι ίση με 0.55 m
- u: η ταχύτητα ελέγχου του ανέμου που είναι ίση με 6.5 m/s



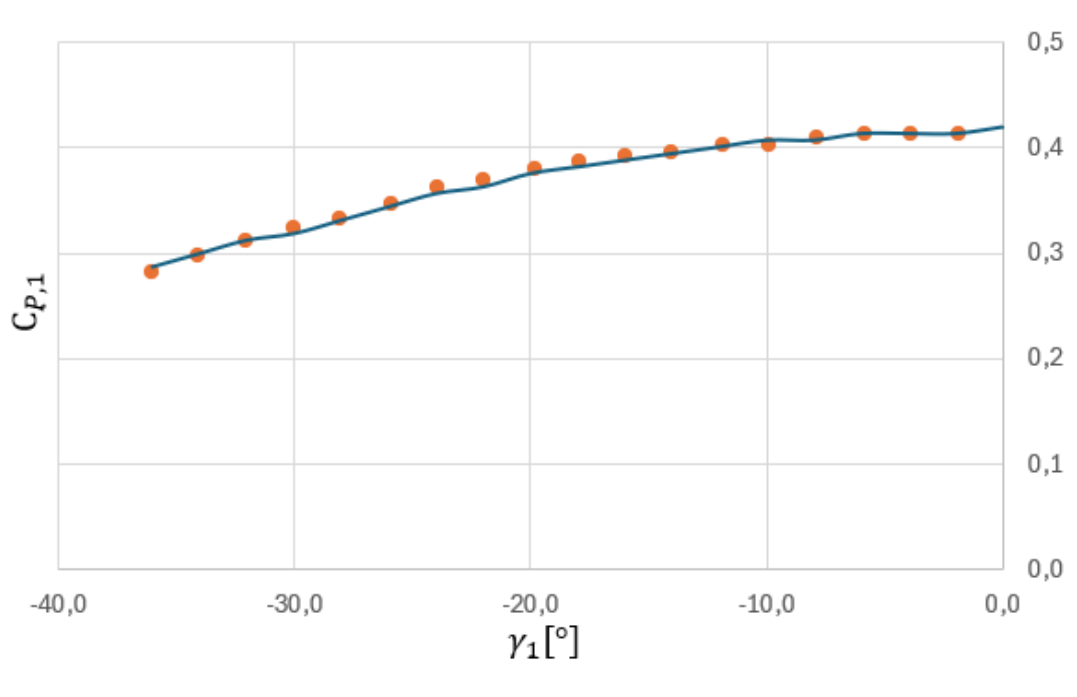
Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν, με τις πορτοκαλί κουκίδες αναπαρίστανται τα πειραματικά δεδομένα, ενώ με την συνεχή μπλε γραμμή αναπαρίστανται τα αποτελέσματα που εξάγονται από το υπολογιστικό εργαλείο FLORIS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Για την διάταξη A, για γωνίες απόκλισης της A/Γ 1 στο εύρος  $-36^\circ \leq \gamma_1 \leq 0^\circ$ , υπολογίστηκαν ανά  $2^\circ$  οι συντελεστές ισχύος  $C_p$  και λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

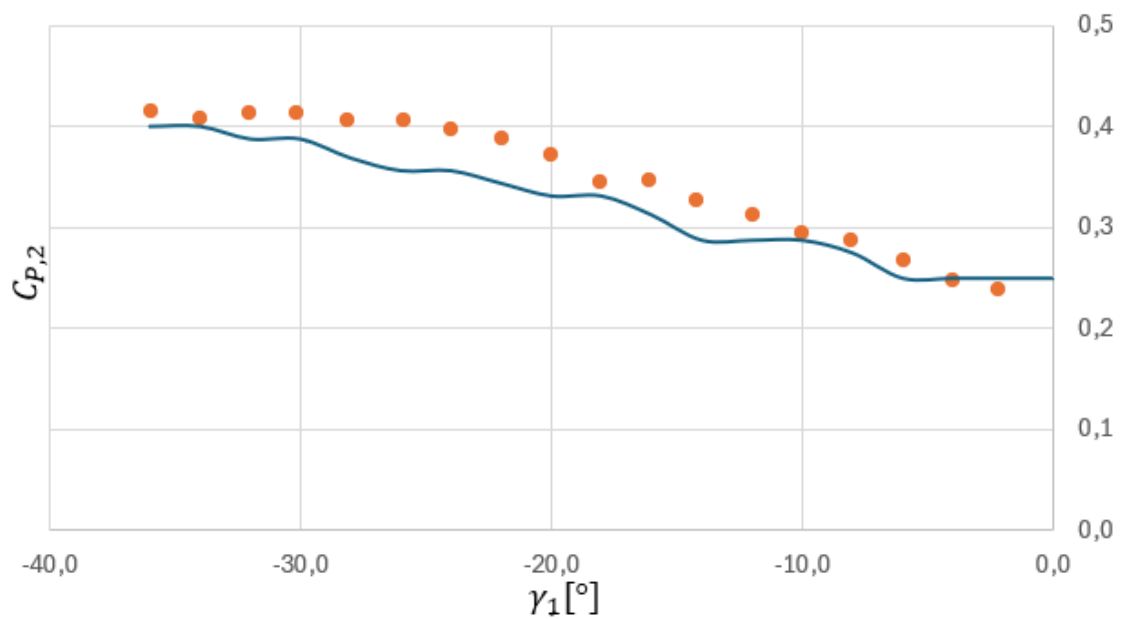
$\gamma_1 [^\circ]$	$P_1 [kW]$	$C_{P,1}$	$P_2 [kW]$	$C_{P,2}$	$P_3 [kW]$	$C_{P,3}$
0	0,067	0,419	0,040	0,250	0,041	0,256
-2	0,066	0,413	0,040	0,250	0,041	0,256
-4	0,066	0,413	0,040	0,250	0,041	0,256
-6	0,066	0,413	0,040	0,250	0,041	0,256
-8	0,065	0,407	0,044	0,275	0,041	0,256
-10	0,065	0,407	0,046	0,288	0,041	0,256
-12	0,064	0,400	0,046	0,288	0,041	0,256
-14	0,063	0,394	0,046	0,288	0,041	0,256
-16	0,062	0,388	0,050	0,313	0,040	0,250
-18	0,061	0,382	0,053	0,332	0,040	0,250
-20	0,060	0,375	0,053	0,332	0,040	0,250
-22	0,058	0,363	0,055	0,344	0,040	0,250
-24	0,057	0,357	0,057	0,357	0,040	0,250
-26	0,055	0,344	0,057	0,357	0,040	0,250
-28	0,053	0,332	0,059	0,369	0,040	0,250
-30	0,051	0,319	0,062	0,388	0,040	0,250
-32	0,050	0,313	0,062	0,388	0,040	0,250
-34	0,048	0,300	0,064	0,400	0,040	0,250
-36	0,046	0,288	0,064	0,400	0,040	0,250

**Πίνακας 5.2:** Συντελεστές ισχύος των ανεμογεννητριών συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη A.

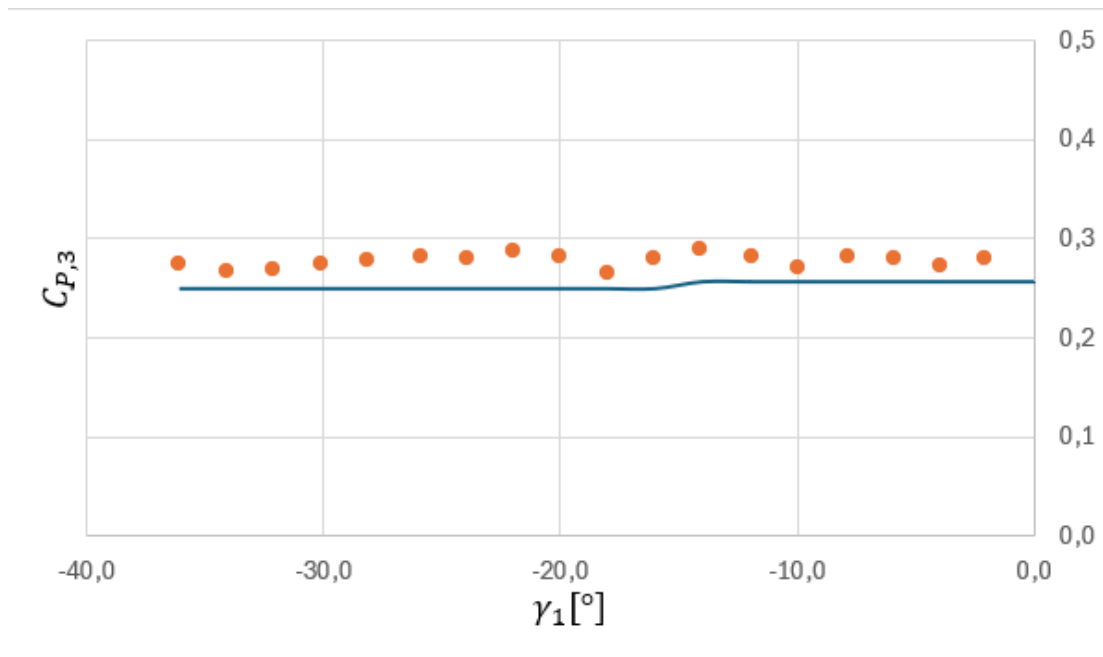
Για την Διάταξη A, στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται για κάθε A/Γ, γραφικά, ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  συναρτήσει της γωνίας εκτροπής της πρώτης ανεμογεννήτριας  $\gamma_1$ .



**Εικόνα 5.4:** Συντελεστής ισχύος  $C_{P,1}$  της A/Γ 1 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη A.



**Εικόνα 5.5:** Συντελεστής ισχύος  $C_{P,2}$  της A/Γ 2 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη A.



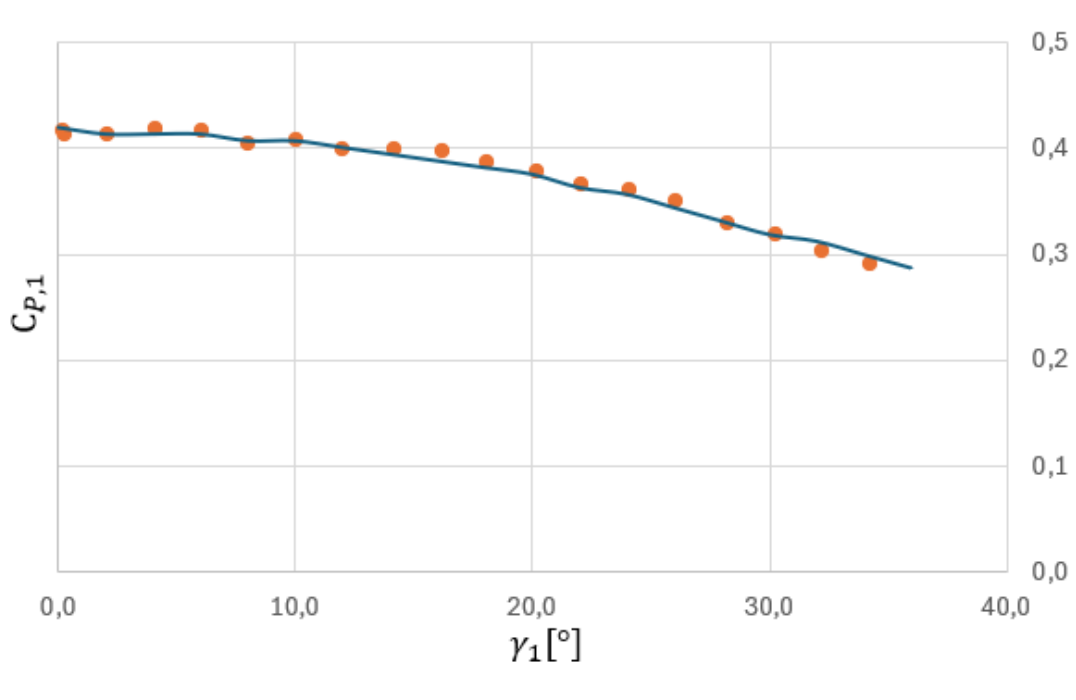
**Εικόνα 5.6:** Συντελεστής ισχύος  $C_{P,3}$  της Α/Γ 3 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη Α.

Για την διάταξη Β, για γωνίες απόκλισης της Α/Γ 1 στο εύρος  $0^\circ \leq \gamma_1 \leq 36^\circ$ , υπολογίστηκαν ανά  $2^\circ$  οι συντελεστές ισχύος  $C_P$  και λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

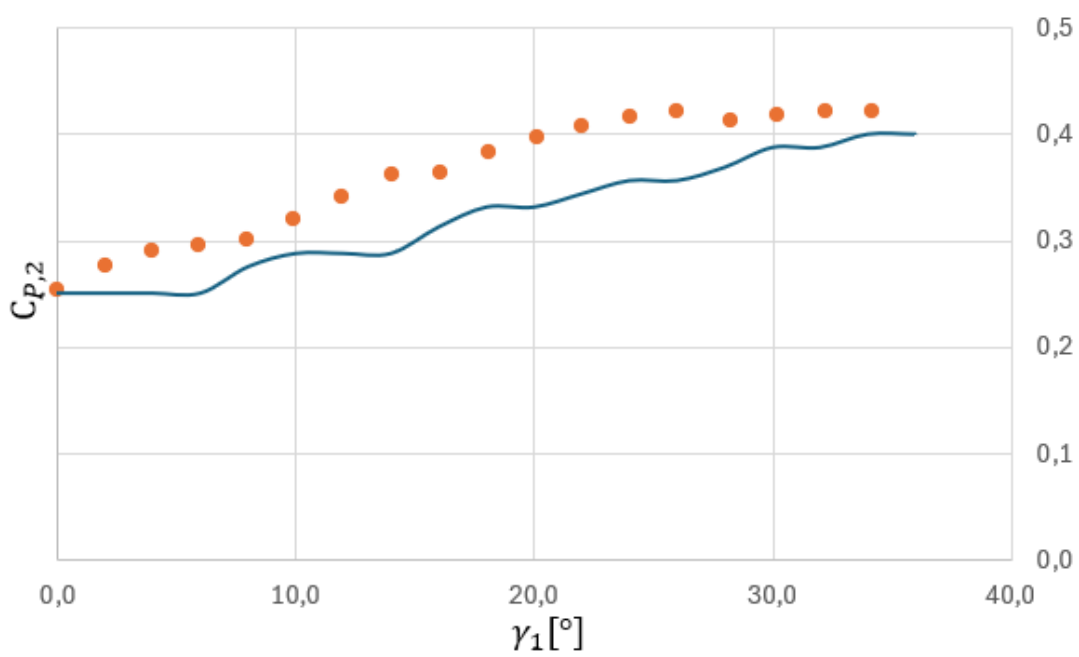
$\gamma_1 [^\circ]$	$P_1 [kW]$	$C_{P,1}$	$P_2 [kW]$	$C_{P,2}$	$P_3 [kW]$	$C_{P,3}$
0	0,067	0,419	0,040	0,250	0,041	0,256
2	0,066	0,413	0,040	0,250	0,041	0,256
4	0,066	0,413	0,040	0,250	0,041	0,256
6	0,066	0,413	0,040	0,250	0,041	0,256
8	0,065	0,407	0,044	0,275	0,041	0,256
10	0,065	0,407	0,046	0,288	0,041	0,256
12	0,064	0,400	0,046	0,288	0,041	0,256
14	0,063	0,394	0,046	0,288	0,041	0,256
16	0,062	0,388	0,050	0,313	0,040	0,250
18	0,061	0,382	0,053	0,332	0,040	0,250
20	0,060	0,375	0,053	0,332	0,040	0,250
22	0,058	0,363	0,055	0,344	0,040	0,250
24	0,057	0,357	0,057	0,357	0,040	0,250
26	0,055	0,344	0,057	0,357	0,040	0,250
28	0,053	0,332	0,059	0,369	0,040	0,250
30	0,051	0,319	0,062	0,388	0,040	0,250
32	0,050	0,313	0,062	0,388	0,040	0,250
34	0,048	0,300	0,064	0,400	0,040	0,250
36	0,046	0,288	0,064	0,400	0,040	0,250

**Πίνακας 5.3:** Συντελεστές ισχύος των ανεμογεννητριών συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη Β.

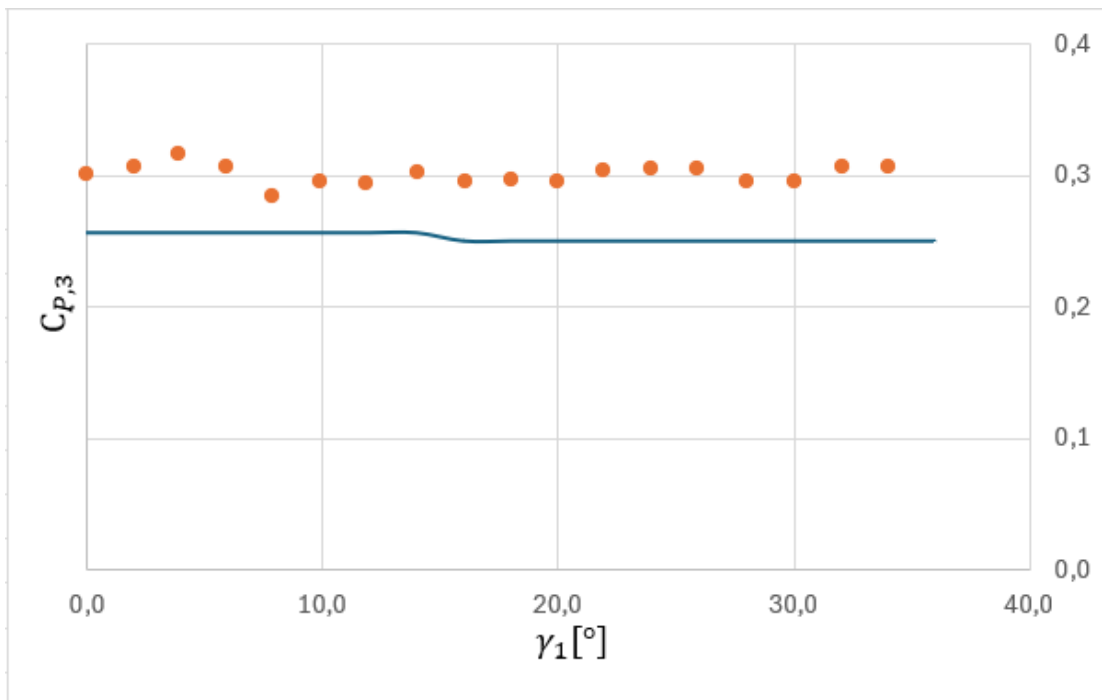
Για την Διάταξη Β, στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται για κάθε Α/Γ, γραφικά, ο συντελεστής ισχύος  $C_P$  συναρτήσει της γωνίας εκτροπής της πρώτης ανεμογεννήτριας  $\gamma_1$ .



**Εικόνα 5.7:** Συντελεστής ισχύος  $C_{p,1}$  της A/Γ 1 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη B.



**Εικόνα 5.8:** Συντελεστής ισχύος  $C_{p,2}$  της A/Γ 2 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη B.



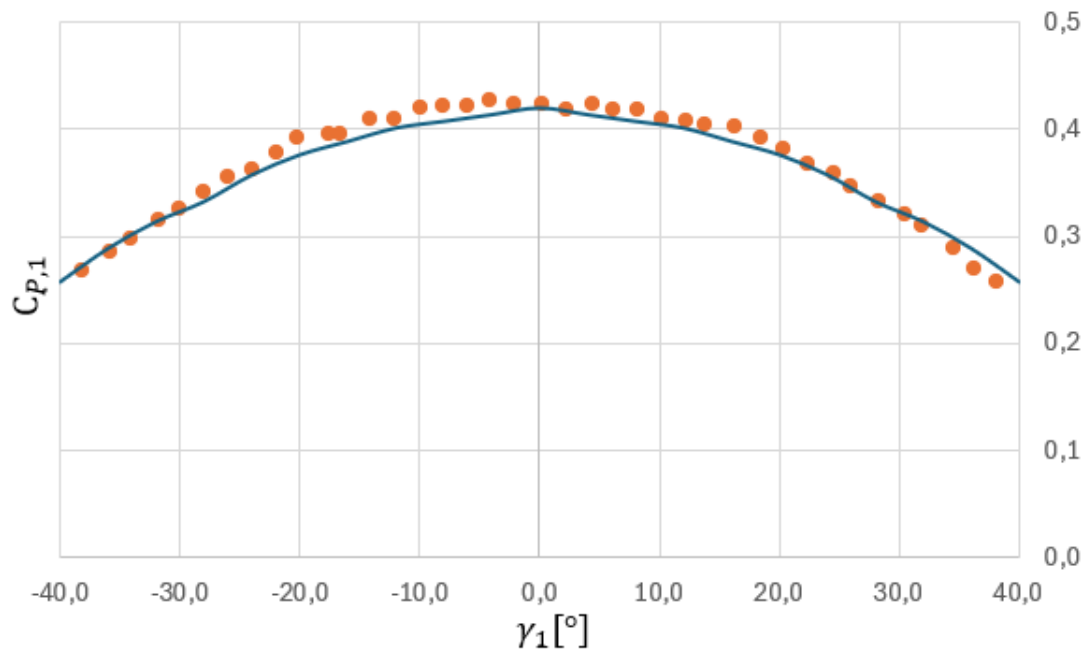
**Εικόνα 5.9:** Συντελεστής ισχύος  $C_{P,3}$  της Α/Γ 3 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη Β.

Για την διάταξη Γ, για γωνίες απόκλισης της Α/Γ 1 στο εύρος  $-40^\circ \leq \gamma_1 \leq 40^\circ$ , υπολογίστηκαν ανά  $4^\circ$  οι συντελεστές ισχύος  $C_P$  και λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

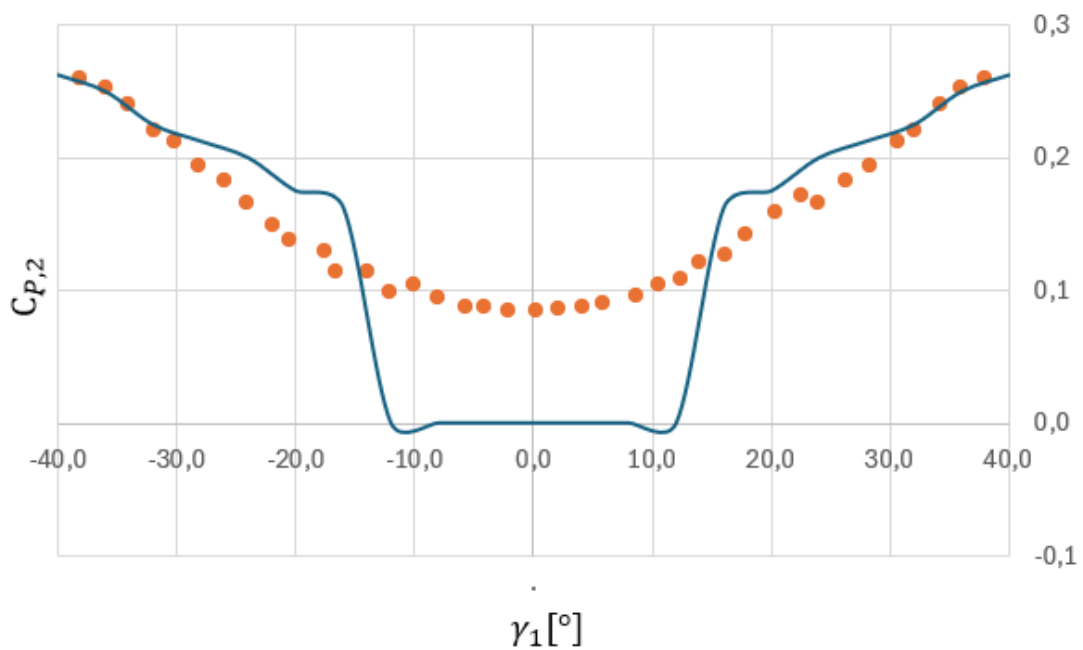
$\gamma_1 [^\circ]$	$P_1 [kW]$	$C_{P,1}$	$P_2 [kW]$	$C_{P,2}$	$P_3 [kW]$	$C_{P,3}$
-40	0,041	0,256	0,042	0,263	0,000	0,000
-36	0,046	0,288	0,040	0,250	0,000	0,000
-32	0,050	0,313	0,036	0,225	0,000	0,000
-28	0,053	0,332	0,034	0,213	0,000	0,000
-24	0,057	0,357	0,032	0,200	0,000	0,000
-20	0,060	0,375	0,028	0,175	0,000	0,000
-16	0,062	0,388	0,026	0,163	0,000	0,000
-12	0,064	0,400	0,000	0,000	0,042	0,263
-8	0,065	0,407	0,000	0,000	0,039	0,244
-4	0,066	0,413	0,000	0,000	0,039	0,244
0	0,067	0,419	0,000	0,000	0,041	0,256
4	0,066	0,413	0,000	0,000	0,039	0,244
8	0,065	0,407	0,000	0,000	0,039	0,244
12	0,064	0,400	0,000	0,000	0,042	0,263
16	0,062	0,388	0,026	0,163	0,000	0,000
20	0,060	0,375	0,028	0,175	0,000	0,000
24	0,057	0,357	0,032	0,200	0,000	0,000
28	0,053	0,332	0,034	0,213	0,000	0,000
32	0,050	0,313	0,036	0,225	0,000	0,000
36	0,046	0,288	0,040	0,250	0,000	0,000
40	0,041	0,256	0,042	0,263	0,000	0,000

**Πίνακας 5.4:** Συντελεστές ισχύος των ανεμογεννητριών συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη Γ.

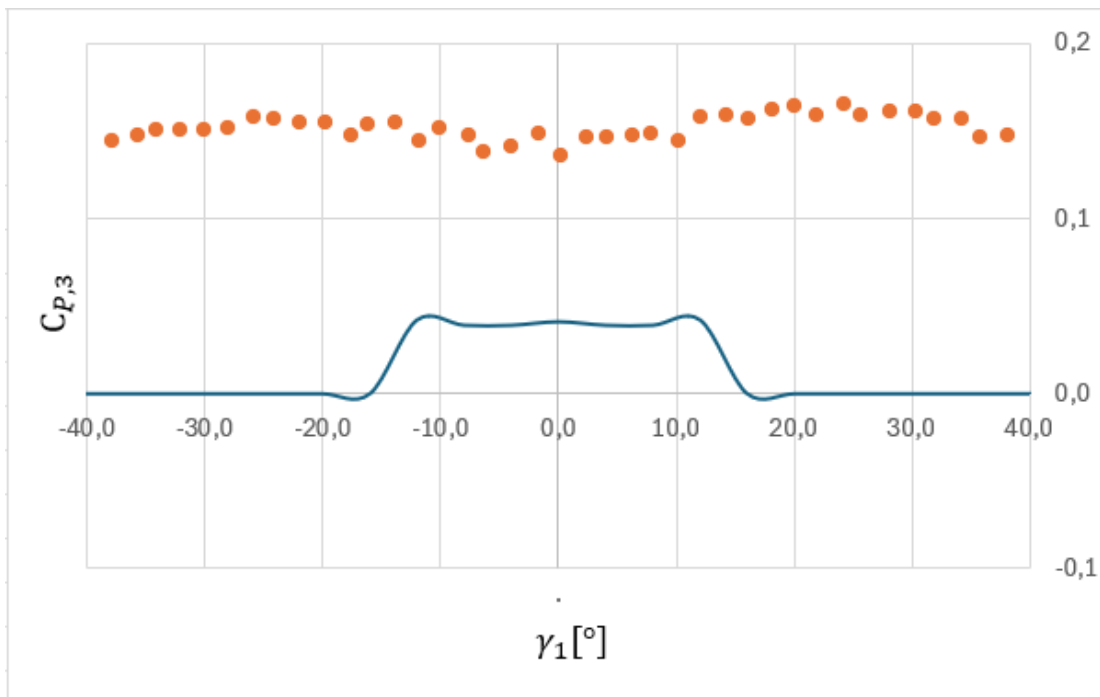
Για την Διάταξη Γ, στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται για κάθε Α/Γ, γραφικά, ο συντελεστής ισχύος  $C_P$  συναρτήσει της γωνίας εκτροπής της πρώτης ανεμογεννήτριας  $\gamma_1$ .



**Εικόνα 5.10:** Συντελεστής ισχύος  $C_{P,1}$  της Α/Γ 1 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη Γ.



**Εικόνα 5.11:** Συντελεστής ισχύος  $C_{P,2}$  της Α/Γ 2 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη Γ.



**Εικόνα 5.12:** Συντελεστής ισχύος  $C_{P,3}$  της Α/Γ 3 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$  για την διάταξη Γ.

Από την παραπάνω μελέτη και συσχέτιση διαπιστώνεται πως τα αποτελέσματα του μοντέλου επιβεβαιώνουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό τις πειραματικές μετρήσεις της αεροσήραγγας.

- Πιο συγκεκριμένα, για την διάταξη Α, μεταξύ μοντέλου και πειράματος υπάρχει σχεδόν απόλυτη ταύτιση στην καμπύλη του συντελεστή ισχύος  $C_{P,1}$ , ενώ οι συντελεστές  $C_{P,2}$  και  $C_{P,3}$  των κατάντι ανεμογεννητριών υποεκτιμώνται ελαφρώς.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_{P,1}$ , για  $\gamma_1 = 0^\circ$  έχει την μεγαλύτερη τιμή καθώς ο άνεμος της ελεύθερης ροής αντιμετωπίζει την πλήρη επιφάνεια του δρομέα της Α/Γ 1. Ενώ όσο στρίβει η Α/Γ 1 προς τα δεξιά, ο  $C_{P,1}$  ολοένα και μειώνεται ώσπου φτάνει στο ελάχιστο για  $\gamma_1 = -36^\circ$ , κι αυτό διότι η επιφάνεια πρόσκρουσης της ελεύθερης ροής ολοένα και μειώνεται.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_{P,2}$ , για  $\gamma_1 = 0^\circ$  έχει την μικρότερη τιμή καθώς μεγάλο μέρος της Α/Γ 2 βρίσκεται εντός του ομόρρου της Α/Γ 1. Ενώ όσο στρίβει η Α/Γ 1 προς τα δεξιά, ο  $C_{P,2}$  ολοένα και αυξάνεται ώσπου φτάνει στο μέγιστο για  $\gamma_1 = -36^\circ$ , κι αυτό διότι η σκιά του ομόρρου της Α/Γ 1 ολοένα και απομακρύνεται από την Α/Γ 2.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_{P,3}$  της Α/Γ 3 παρατηρείται να διατηρείται σχεδόν σταθερός για κάθε στροφή της  $\gamma_1$ . Αυτό διότι δεδομένης της ταχύτητας του ανέμου και της απόστασης της από την Α/Γ 1, δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την εκτροπή του ομόρρου της Α/Γ 1. Αντιθέτως, επηρεάζεται σημαντικά από την Α/Γ 2 καθώς βρίσκεται σταθερά εντός της σκιάς της. Έτσι η τιμή του  $C_{P,3}$  είναι σχεδόν σταθερή και εμφανώς μειωμένη λόγω της επίδρασης του ανάντι ομόρρου κυρίως της Α/Γ 2.

- Για την διάταξη Β, μεταξύ μοντέλου και πειράματος υπάρχει αντίστοιχα σχεδόν απόλυτη ταύτιση στην καμπύλη του συντελεστή ισχύος  $C_{P,1}$ , ενώ οι συντελεστές  $C_{P,2}$  και  $C_{P,3}$  των κατάντι ανεμογεννητριών υποεκτιμώνται ελαφρώς.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_{P,1}$ , για  $\gamma_1 = 0^\circ$  έχει την μεγαλύτερη τιμή καθώς ο άνεμος της ελεύθερης ροής αντιμετωπίζει την πλήρη επιφάνεια του δρομέα της Α/Γ 1. Ενώ όσο στρίβει η Α/Γ 1 προς τα

αριστερά, ο  $C_{p,1}$  ολοένα και μειώνεται ώσπου φτάνει στο ελάχιστο για  $\gamma_1 = +36^\circ$ , κι αυτό διότι η επιφάνεια πρόσκρουσης της ελεύθερης ροής ολοένα και μειώνεται.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_{p,2}$ , για  $\gamma_1 = 0^\circ$  έχει την μικρότερη τιμή καθώς μεγάλο μέρος της Α/Γ 2 βρίσκεται εντός του ομόρρου της Α/Γ 1. Ενώ όσο στρίβει η Α/Γ 1 προς τα αριστερά, ο  $C_{p,2}$  ολοένα και αυξάνεται ώσπου φτάνει στο μέγιστο για  $\gamma_1 = +36^\circ$ , κι αυτό διότι η σκιά του ομόρρου της Α/Γ 1 ολοένα και απομακρύνεται από την Α/Γ 2.

Όσον αφορά τον συντελεστή  $C_{p,3}$  η ερμηνεία είναι ίδια με εκείνη που αφορούσε την διάταξη Α.

Γενικά, όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται μια συμμετρία μεταξύ των αντίστοιχων καμπυλών των συντελεστών ισχύος των Α/Γ λόγω της συμμετρίας των διατάξεων Α και Β.

- Για την διάταξη Γ, μεταξύ μοντέλου και πειράματος υπάρχει μια πολύ ικανοποιητική ταύτιση στην καμπύλη του συντελεστή ισχύος  $C_{p,1}$ , ενώ για τους συντελεστές  $C_{p,2}$  και  $C_{p,3}$  των κατάντι ανεμογεννητριών υπάρχει μια σημαντική υποεκτίμηση.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_{p,1}$ , για  $\gamma_1 = 0^\circ$  έχει την μεγαλύτερη τιμή καθώς ο άνεμος της ελεύθερης ροής αντιμετωπίζει την πλήρη επιφάνεια του δρομέα της Α/Γ 1. Ενώ όσο στρίβει η Α/Γ 1 είτε προς τα αριστερά είτε προς τα δεξιά, προκύπτει μια συμμετρική μείωση του  $C_{p,1}$  ώσπου να φτάσει στο ελάχιστο για  $\gamma_1 = +40^\circ$  και για  $\gamma_1 = -40^\circ$ , κι αυτό διότι η επιφάνεια πρόσκρουσης της ελεύθερης ροής ολοένα και μειώνεται.

Ο συντελεστής ισχύος  $C_{p,2}$ , για  $\gamma_1 = 0^\circ$  έχει την μικρότερη τιμή καθώς όλη η Α/Γ 2 βρίσκεται εντός του ομόρρου της Α/Γ 1. Ενώ όσο στρίβει η Α/Γ 1 είτε προς τα αριστερά είτε προς τα δεξιά, προκύπτει μια συμμετρική αύξηση του  $C_{p,2}$  καθώς ολοένα και μεγαλύτερο μέρος της σκιάς του ομόρρου της Α/Γ 1 απομακρύνεται από την Α/Γ 2.

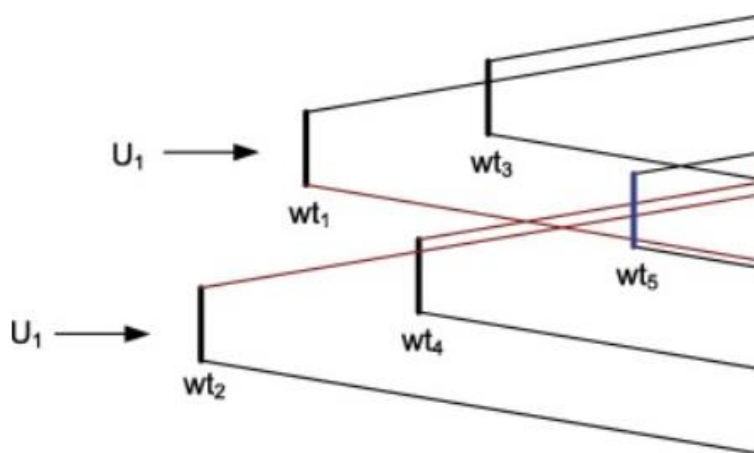
Ωστόσο στο εύρος  $|15^\circ| < \gamma_1 < |30^\circ|$  παρατηρείται μια υπερεκτίμηση του συντελεστή  $C_{p,2}$ . Αυτό, πιθανότατα μπορεί να αποδοθεί στο ότι η παράμετρος  $k_d = 0.12$  που περιγράφει την ανάκτηση της εισερχόμενης ροής του ομόρρου υπολογίστηκε σε συνθήκες χαμηλότερης τύρβης, ενώ στην παρούσα διάταξη η επικάλυψη του ομόρρου είναι πλήρης και επικρατεί μεγάλη τύρβη [19]. Ως εκ τούτου, το μοντέλο προβλέπει μια ελαφρώς ανακριβή θέση του ομόρρου στις γωνίες αυτές. Ωστόσο, καθώς δεν μπορεί να αποδοθεί με απόλυτη η σιγουριά η αιτιολογία αυτής της υπερεκτίμησης σε αυτές τις συνθήκες, θα χρειαστεί μελλοντικά περαιτέρω μελέτη και διερεύνηση και κατ' επέκταση βελτίωση του μοντέλου.

Τέλος, στο εύρος  $-12^\circ \leq \gamma_1 \leq +12^\circ$  ο υπολογιζόμενος συντελεστής  $C_{p,2}$  μηδενίζει ενώ στο αντίστοιχο διάστημα των πειραματικών μετρήσεων μειώνεται και αυξάνεται χωρίς να μηδενίσει. Εν προκειμένω, δεν πρόκειται για αστοχία του μοντέλου αλλά πρόκειται για την ταχύτητα  $u_{cut-in} = 5\text{m/s}$  που έχει οριστεί για το μοντέλο. Η ταχύτητα του ανέμου στο εύρος αυτό, που φτάνει στην Α/Γ 2 είναι μικρότερη από την  $u_{cut-in}$  κι έτσι το μοντέλο δεν αποδίδει κάποια ισχύ στα αποτελέσματα. Στα πειράματα, η  $u_{cut-in}$  έχει πιθανώς οριστεί σε χαμηλότερα επίπεδα κι έτσι οι αποδιδόμενες τιμές έχουν μια συνέχεια χωρίς να μηδενίζουν.

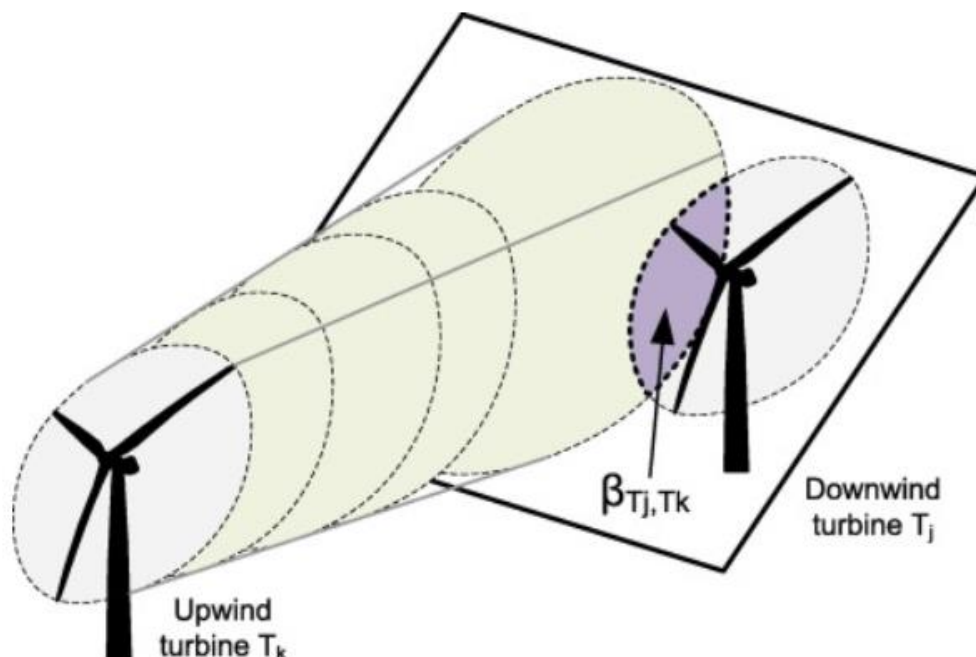
Ο συντελεστής ισχύος  $C_{p,3}$  της Α/Γ 3 προκύπτει με μια αξιοσημείωτη υποεκτίμηση σε όλο το εύρος της  $\gamma_1$ . Για το διάστημα  $\gamma_1 > |16^\circ|$  είναι μηδενικός. Αυτό συμβαίνει διότι ο ομόρρος της Α/Γ 1 έχει απομακρυνθεί από την Α/Γ 2 κι έτσι η Α/Γ 3 δέχεται την πλήρη επίδραση του ομόρρου της Α/Γ 2 οδηγώντας σε μειωμένη ταχύτητα ανέμου που είναι σε επίπεδο μικρότερο της  $u_{cut-in}$ , όπως εξηγήθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο.



Στο εύρος  $-16^\circ \leq \gamma_1 \leq +16^\circ$  το μοντέλο αποδίδει μειωμένο συντελεστή από τον αντίστοιχο πειραματικό. Η αιτιολόγηση σε αυτή την περίπτωση έχει να κάνει με την προσέγγιση ομόρρου που κάνει το μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, ο ομόρρος «βλέπει» τον δίσκο του κατάντι δρομέα σαν ένα δισδιάστο ορθογώνιο στο οποίο δεν παίζει κάποιο ρόλο το ύψος (Εικόνα 5.13). Στην πραγματικότητα, η τομή του διαστελλόμενου ομόρρου των ανάντι Α/Γ αποτελεί δίσκο ο οποίος συναντά τον δίσκο του δρομέα της Α/Γ 3, η τομή των οποίων είναι ένα κυρτό σχήμα που είναι παχύ στο κέντρο του και λεπτό στις άκρες του κι έτσι παίζει ρόλο το ύψος (Εικόνα 5.14). Έτσι, το μοντέλο FLORIS υπερεκτιμά την σκίαση και κατ' επέκταση τις απώλειες, με αποτέλεσμα να υποεκτιμά την αποδιδόμενη ισχύ και τελικώς να υποεκτιμά τον υπολογιζόμενο συντελεστή ισχύος  $C_{P,3}$ . Η διόρθωση αυτή είναι σημαντικό να γίνει στο μοντέλο σε μελλοντική εργασία καθώς θα βελτιώσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η αιτιολόγηση αυτή άπτεται και της μικρής υποεκτίμησης των συντελεστών  $C_{P,2}$  των διατάξεων Α και Β.



**Εικόνα 5.13:** Κάτοψη ανεμογεννητριών με πολλαπλή επικάλυψη ομόρρων.



**Εικόνα 5.14:** Η σκιασμένη περιοχή μιας ανεμογεννήτριας που βρίσκεται σε μερική επικάλυψη ομόρρου.

Συμπερασματικά, το μοντέλο FLORIS παρά τις μικρές υποεκτιμήσεις των συντελεστών ισχύος των κατάντι ανεμογεννητριών στις διατάξεις Α και Β καθώς και την μικρή υπερεκτίμηση του συντελεστή ισχύος της Α/Γ 2 και την πιο σημαντική υποεκτίμηση του συντελεστή ισχύος της Α/Γ 3 της διάταξης Γ, προβλέπει σε σημαντικά ικανοποιητικό βαθμό τα αποτελέσματα της εκτροπής του ομόρρου λόγω απόκλισης και για τις τρεις διατάξεις των Α/Γ. Μπορεί λοιπόν να δώσει ικανοποιητική ακρίβεια στους υπολογισμούς του και να αποδώσει την βέλτιστη γωνία εκτροπής και θεωρείται πλέον πιστοποιημένο και ικανό να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση της αποδιδόμενης ισχύος σε πραγματικό αιολικό πάρκο με πολλές ανεμογεννήτριες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### 6.1 Διαμόρφωση και επιβεβαίωση διαδικασίας βελτιστοποίησης

Αφότου έχει στηθεί και πιστοποιηθεί το μοντέλο του ομόρρου στο προηγούμενο κεφάλαιο, επόμενο βήμα είναι η διαμόρφωση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος μέσω της απόκλισης των ανεμογεννητριών και η επιβεβαίωση της λειτουργίας της.

Για να γίνει αυτό, θα εφαρμοστεί στην απλή διάταξη Α των τριών ανεμογεννητριών όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, με την χρήση του γενετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό, εντός του οποίου καλείται και υλοποιείται ο αλγόριθμος της FORTRAN με το μοντέλο του FLORIS.

Ο συγκεκριμένος γενετικός επιστρέφει την μεγιστοποίηση της συνάρτησης ενέργειας που είναι η αντικειμενική συνάρτηση του αλγορίθμου. Για να λειτουργήσει, δέχεται ως είσοδο ένα εύρος αναζήτησης με κάτω και άνω όριο, εν προκειμένω των γωνιών εκτροπής της κάθε ελεγχόμενης ανεμογεννήτριας. Η ανάπτυξη του έγινε με τρόπο τέτοιο ώστε να αποφεύγεται όσο είναι δυνατόν η παγίδευση σε τοπικά ακρότατα και να βρίσκει το ολικό μέγιστο. Επί προσθέτως, είναι απαραίτητο η συνάρτηση να λαμβάνει θετικές (μη-μηδενικές) τιμές σε κάθε σημείο του εύρους αναζήτησης. Τέλος ορίζεται η ακρίβεια των δεκαδικών ψηφίων του αποτελέσματος, η πιθανότητα μετάλλαξης, καθώς και ο αριθμός των γενεών/επαναλήψεων.

Σε πρώτο στάδιο, ελέγχεται η ικανότητα του βελτιστοποιητή να βρίσκει την βέλτιστη γωνία εκτροπής στην περίπτωση που η γωνία της Α/Γ 1 είναι ελεύθερη, ενώ οι γωνίες των Α/Γ 2 και Α/Γ 3 διατηρούνται σταθερές και ίσες με 0°.

Να σημειωθεί ότι σε όλες τις αναζητήσεις που ακολουθούν, πραγματοποιήθηκαν για Βόρειο άνεμο σε εύρος ταχυτήτων 5m/s έως 10m/s.

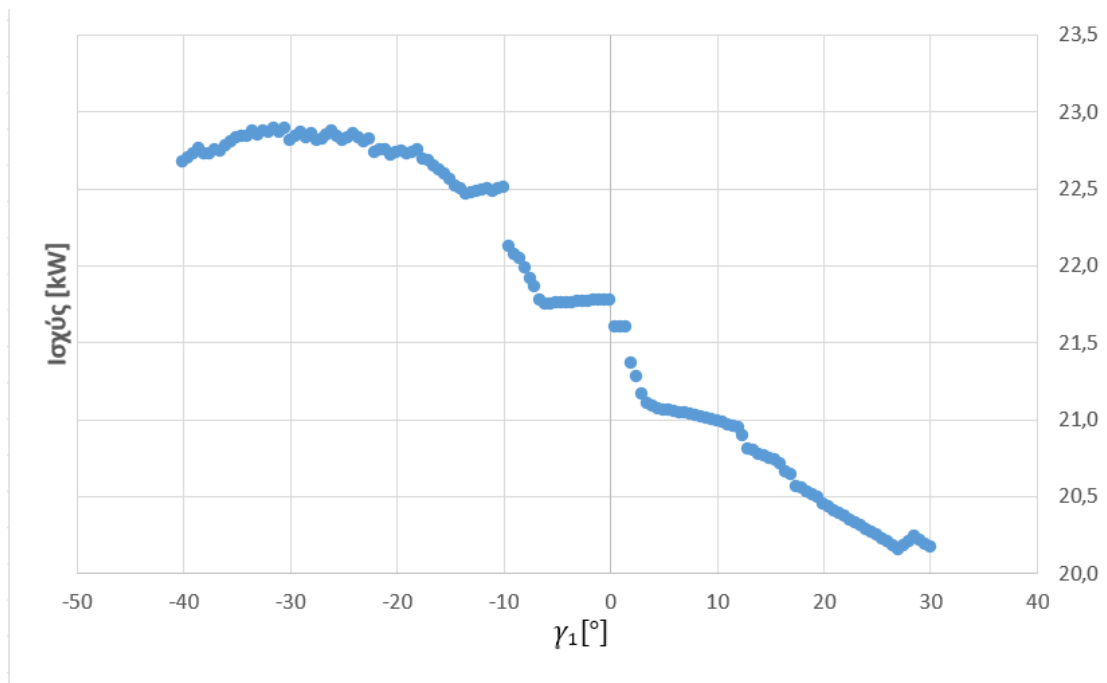
Αναζητώντας στο εύρος (-45°, -10°) για την  $\gamma_1$  το αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς (που υπολογίζεται από το μοντέλο για όλες τις γωνίες στις 0°) είναι:

Γωνία $\gamma_1$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
0°	21,772	+5,14%
-30,5° (βέλτιστη)	22,893	

**Πίνακας 6.1:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για βέλτιστη γωνία  $\gamma_1$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη Α.

Όπως διαπιστώνεται, η απόκλιση  $-30,5^\circ$  της γωνίας  $\gamma_1$  αποδίδει ισχύ  $22,893 \text{ kW}$ , σημαντικά βελτιωμένη κατά  $+5,14\%$ , σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ  $21,772 \text{ kW}$  έχοντας όλες τις ανεμογεννήτριες στις  $0^\circ$ .

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του αποτελέσματος, καταγράφεται χειροκίνητα η ισχύς που δίνει το μοντέλο FLORIS σε ένα εύρος τιμών από τις  $-40^\circ$  έως τις  $+30^\circ$ , με βήμα  $0,5^\circ$ . Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 6.1).



**Εικόνα 6.1:** Αποδιδόμενη ισχύς διάταξης A συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$ .

Διαπιστώνεται ότι πράγματι η βέλτιστη γωνία εκτροπής της ελεύθερης Α/Γ 1 είναι η  $-30,5^\circ$ , γεγονός που επιβεβαιώνει στο στάδιο αυτό την λειτουργία του βελτιστοποιητή.

Σε δεύτερο στάδιο, ελέγχεται η ικανότητα του βελτιστοποιητή να βρίσκει τις βέλτιστες γωνίες εκτροπής στην περίπτωση που η γωνία της Α/Γ 1 και η γωνία της Α/Γ 2 είναι ελεύθερες, ενώ η γωνία της Α/Γ 3 διατηρείται σταθερή και ίση με  $0^\circ$ .

Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι έγινε μια πολύ σημαντική βελτίωση στο μοντέλο αναπαράστασης του ομόρρου το οποίο μέχρι πρότινος λάμβανε υπόψιν τις απώλειες ισχύος που οφείλονται στην απόκλιση του δρομέα (απώλειες δίσκου) μόνο της πρώτης ανεμογεννήτριας που συναντούσε ο άνεμος. Πλέον, έγινε προσθήκη στον κώδικα έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψιν και να υπολογίζονται οι απώλειες δίσκου και όλων των κατάντι ανεμογεννητριών που ορίζονται για το εκάστοτε πείραμα.

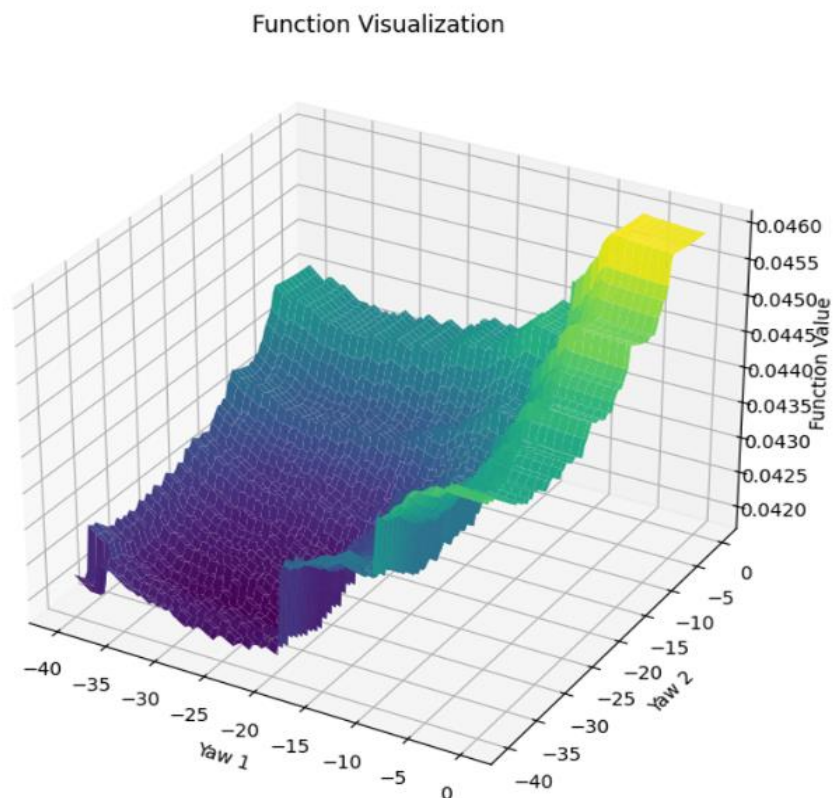
Αναζητώντας στο εύρος  $(-45^\circ, -20^\circ)$  για την  $\gamma_1$  και την  $\gamma_2$  το αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς είναι:

Γωνία $\gamma_1$	Γωνία $\gamma_2$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
$0^\circ$	$0^\circ$	21,772	+10,1%
$-25,8^\circ$ (βέλτιστη)	$-32,8^\circ$ (βέλτιστη)	23,961	

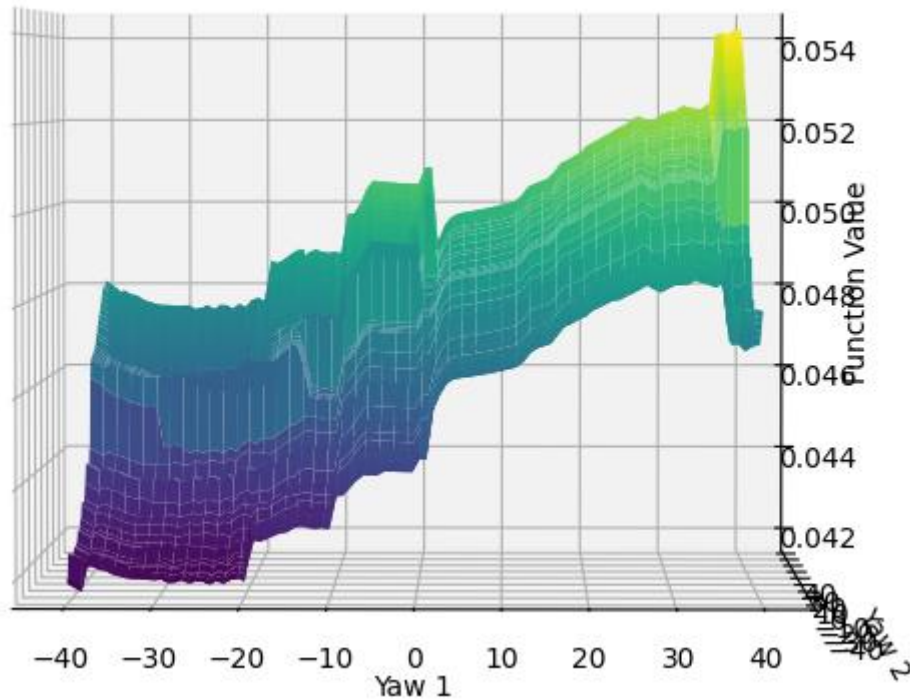
**Πίνακας 6.2:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για βέλτιστες γωνίες  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη A.

Όπως διαπιστώνεται, η απόκλιση  $-25,8^\circ$  της γωνίας  $\gamma_1$  και η απόκλιση  $-32,8^\circ$  της γωνίας  $\gamma_2$  αποδίδουν ισχύ  $23,961 \text{ kW}$ , πολύ σημαντικά βελτιωμένη κατά  $+10,1\%$ , σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ  $21,772 \text{ kW}$  έχοντας όλες τις ανεμογεννήτριες στις  $0^\circ$ .

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του αποτελέσματος, δημιουργείται 3-D διάγραμμα που αναπαριστά το αντίστροφο της ισχύος που δίνει το μοντέλο FLORIS σε ένα εύρος τιμών από τις  $-40^\circ$  έως τις  $+40^\circ$  για τις γωνίες των δύο πρώτων ανεμογεννητριών (Εικόνα 6.2 και Εικόνα 6.3).



**Εικόνα 6.2:** Αποδιδόμενη ισχύς διάταξης A συναρτήσει των γωνιών  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$ .



**Εικόνα 6.3:** Αποδιδόμενη ισχύς διάταξης A συναρτήσει των γωνιών  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  (πλαινή όψη γραφήματος).

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι δημιουργείται στο εύρος  $(-35^\circ, -20^\circ)$  μια «κοιλιάδα» βέλτιστων τιμών με πολύ μικρή διαφορά η μία από την άλλη. Πρόκειται δηλαδή για πολλά τοπικά ελάχιστα (που δημιουργούνται από τους πολλούς συνδυασμούς της γωνίας  $\gamma_1$  με την  $\gamma_2$ ) τα οποία έχουν ελάχιστη διαφορά ή και ίδια τιμή με το ολικό ελάχιστο. Στην περίπτωση αυτή επιβεβαιώνεται η ορθότητα του βελτιστοποιητή ο οποίος δίνει ορθά αποτελέσματα. Μετέπειτα ωστόσο, όσο αυξάνεται ο αριθμός των εισαγόμενων ελεύθερων γωνιών ανεμογεννητριών η εύρεση του ολικού ελαχίστου/μεγίστου δυσχεραίνει.

Τέλος, ελέγχεται η ικανότητα του βελτιστοποιητή να βρίσκει τις βέλτιστες γωνίες εκτροπής στην περίπτωση που και οι τρεις γωνίες είναι ελεύθερες.

Αναζητώντας στο εύρος  $(-45^\circ, -20^\circ)$  για την  $\gamma_1$  και την  $\gamma_2$ , και στο εύρος  $(-10^\circ, +10^\circ)$  για την  $\gamma_3$  το αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς είναι:

Γωνία $\gamma_1$	Γωνία $\gamma_2$	Γωνία $\gamma_3$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	21,772	+9,9%
$-23,8^\circ$	$-31,9^\circ$	$-0,3^\circ$	23,920	

**Πίνακας 6.3:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για βέλτιστες γωνίες  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  και  $\gamma_3$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη A.

Στην περίπτωση αυτή, ο βελτιστοποιητής επιβεβαιώνει και πάλι τα αποτελέσματα καθώς δίνει σχεδόν ίδιες γωνίες με αυτές της ακριβώς προηγούμενης περίπτωσης. Είναι αναμενόμενο η A/Γ 3 να μην συμμετέχει στην βελτίωση του αποτελέσματος καθώς δεν έχει κατάντι ανεμογεννήτριες και δεν είναι σκόπιμο να κάνει κάποια στρέψη. Η ισχύς αποδίδεται ελαφρώς μειωμένη στο δεύτερο δεκαδικό σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση αλλά πρόκειται για αμελητέα διαφορά της τάξης του  $\frac{23,920-23,961}{23,961} = -0,2\%$  και δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις με χρήση του γενετικού επιβεβαιώθηκαν και από την χρήση του global αλγορίθμου βελτιστοποίησης, η συσχέτιση των οποίων φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

1 ελεύθερη μεταβλητή (γωνία της Α/Γ 1)		
	$\gamma_1$	Ισχύς [kW]
Γενετικός	-30,5°	22,893
Global	-30,5°	22,893
Διαφορά	0°	0

**Πίνακας 6.4:** Σύγκριση αποτελεσμάτων global και γενετικού αλγορίθμου της παραγόμενης ισχύος για βέλτιστη γωνία  $\gamma_1$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη Α.

2 ελεύθερες μεταβλητές (γωνίες της Α/Γ 1 και Α/Γ 2)			
	$\gamma_1$	$\gamma_2$	Ισχύς [kW]
Γενετικός	-25,8°	-32,8°	23,961
Global	-25,8°	-32,9°	23,954
Διαφορά	0°	0,1°	0,03 %

**Πίνακας 6.5:** Σύγκριση αποτελεσμάτων global και γενετικού αλγορίθμου της παραγόμενης ισχύος για βέλτιστες γωνίες  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη Α.

3 ελεύθερες μεταβλητές (οι γωνίες των τριών Α/Γ)				
	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	Ισχύς [kW]
Γενετικός	-23,8°	-31,9°	-0,3°	23,920
Global	-23,9°	-33,3°	0,625°	23,928
Διαφορά	0,1°	1,4°	0,925°	0,03 %

**Πίνακας 6.6:** Σύγκριση αποτελεσμάτων global και γενετικού αλγορίθμου της παραγόμενης ισχύος για βέλτιστες γωνίες  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  και  $\gamma_3$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη Α.

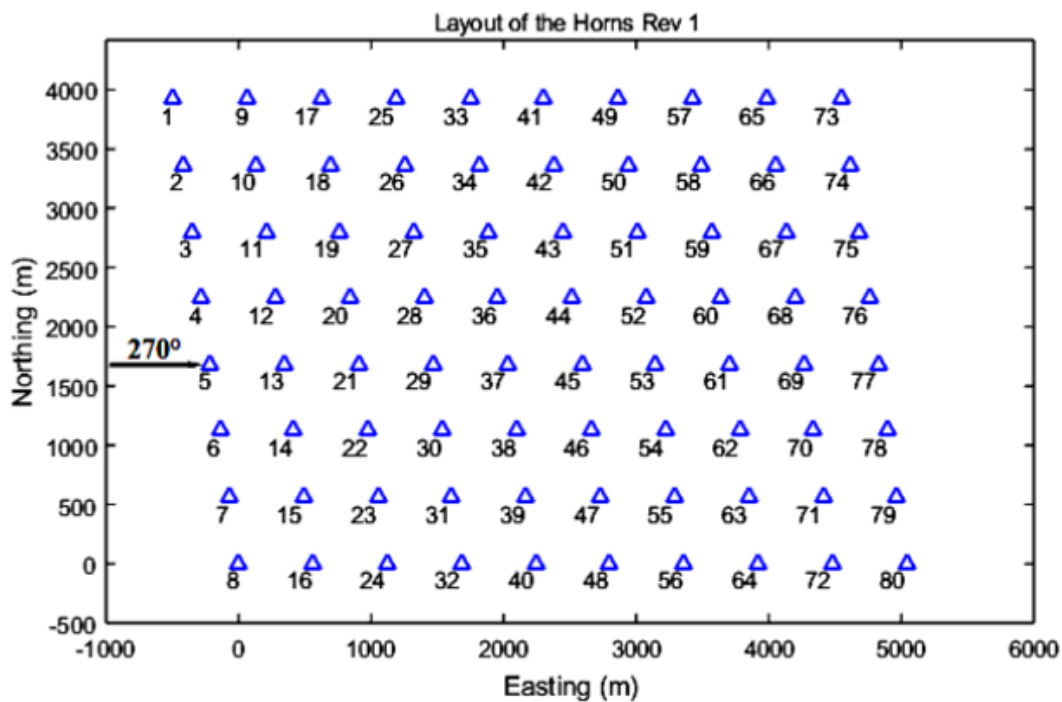
Όπως διαπιστώνεται, υπάρχει μια εξαιρετικά καλή ταύτιση μεταξύ των δύο αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστων γωνιών. Συμπληρωματικά, για περαιτέρω επιβεβαίωση, καθένας εκ των δύο αλγορίθμων δοκιμάστηκαν σε διαφόρων ειδών δοκιμαστικών συναρτήσεων (test functions) εύρεσης ολικού ακρότατου, όπου και πάλι επιβεβαίωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Τα παραπάνω αποτελέσματα συνηγορούν στην επιβεβαίωση και πιστοποίηση λειτουργίας του βελτιστοποιητή.

## 6.2 Εφαρμογή βελτιστοποίησης σε πραγματικό αιολικό πάρκο

Στο σημείο αυτό, αφότου έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες πιστοποιήσεις, τόσο του μοντέλου αναπαράστασης ομόρρου όσο και της διαδικασίας βελτιστοποίησης, θα γίνει μελέτη και εφαρμογή σε πραγματικό αιολικό πάρκο και συγκεκριμένα στο HORNS REV 1.

Πρόκειται για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο ισχύος 160 MW το οποίο κατασκευάστηκε από δανέζικη εταιρεία στην Βόρεια θάλασσα, 14-20 km από την ακτή της Δανίας.

Αποτελείται από 80 ανεμογεννήτριες Vestas τύπου V80 κάθε μία από τις οποίες παράγει 2 MW. Οι ανεμογεννήτριες είναι διατεταγμένες σε πλέγμα 8 επί 10 υπό κλίση σε μια περιοχή 5 km επί 3,8 km, με απόσταση 560 m μεταξύ τους προς όλες τις κατευθύνσεις (Εικόνα 6.4).



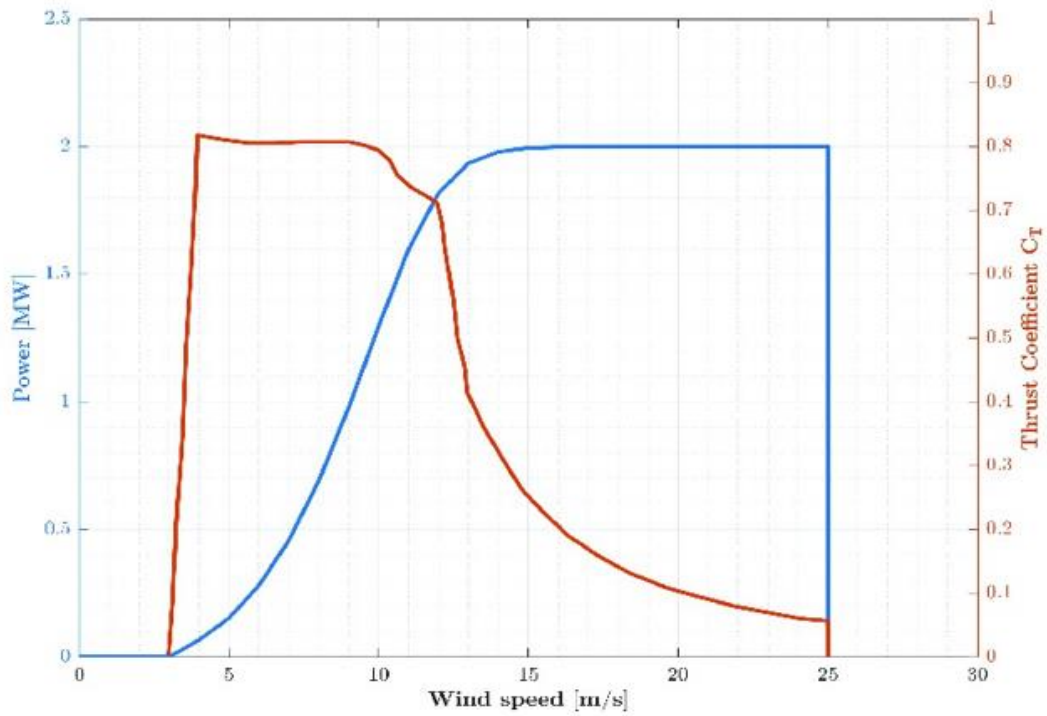
**Εικόνα 6.4:** Διάταξη αιολικού πάρκου HORNS REV 1.

Η V80 αποτελεί μια ανεμογεννήτρια με έλεγχο βήματος (pitch), οριζόντιου άξονα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τρία πτερύγια
- Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς 2.000 kW
- Η διάμετρος του ρότορα της είναι 70.0 m
- Το ύψος της πλήμνης είναι 80.0 m
- Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 15.0 m/s
- Η ταχύτητα  $cut_{in}$  είναι 4.0 m/s
- Η ταχύτητα  $cut_{out}$  είναι 25.0 m/s

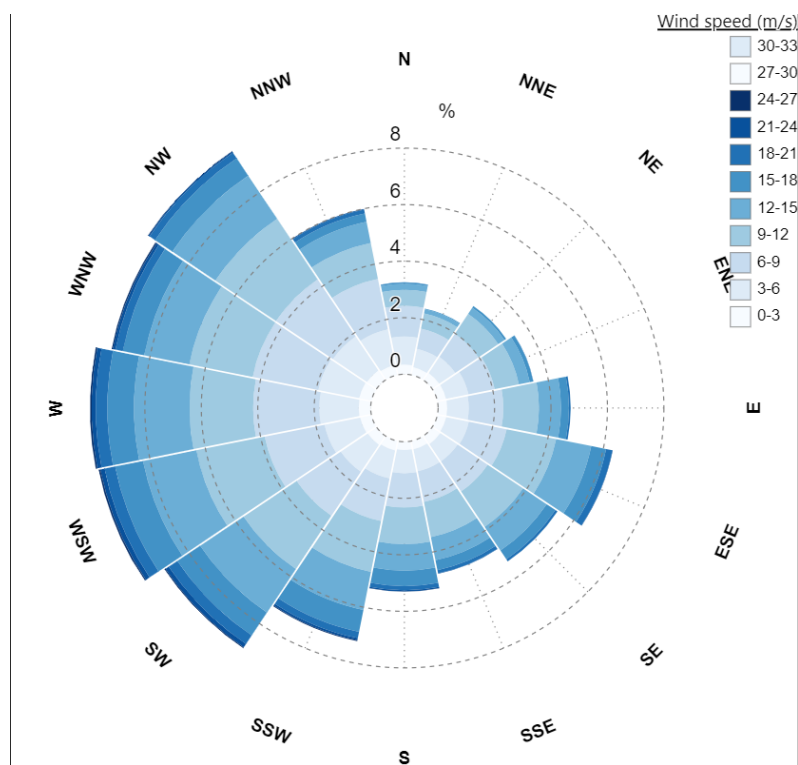
Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν συμπεριληφθεί στα μοντέλα για την μελέτη που ακολουθεί διατηρώντας τις παραμέτρους  $k_{e,i}$ ,  $k_{r,i}$ ,  $k_{e,\gamma}$ ,  $k_d$  και  $k_p$  ίδιες καθώς είναι αδιάστατες και δεν εξαρτώνται από τις ανεμογεννήτριες.

Επίσης, εισήχθη στο μοντέλο η νέα καμπύλη ισχύος, η οποία σε συνδυασμό με την καμπύλη ώσης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 6.5).



**Εικόνα 6.5:** Καμπύλη ισχύος και καμπύλη ώσης αιολικού πάρκου HORNS REV 1.

Τέλος, τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καταγράφηκαν στη διάρκεια ενός έτους στο ύψος της πλήμνης. Το ροδόγραμμα κατανομής των ταχυτήτων απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 6.6).



**Εικόνα 6.6:** Ροδόγραμμα ανέμου περιοχής αιολικού πάρκου HORNS REV 1.



### 6.2.1 Εφαρμογή βελτιστοποιητή στην γωνία της Α/Γ 1

Αρχικά, αν και έχει πιστοποιηθεί ο βελτιστοποιητής στο προηγούμενο κεφάλαιο, ελέγχεται ως περίπτωση εφαρμογής επιβεβαίωσης στο πραγματικό αιολικό πάρκο η ικανότητα του να βρίσκει την βέλτιστη γωνία εκτροπής στην περίπτωση που η γωνία της Α/Γ 1 είναι ελεύθερη, ενώ οι υπόλοιπες 79 Α/Γ διατηρούνται σταθερές και ίσες με 0°.

Να σημειωθεί ότι η αναζήτηση έγινε σε εύρος ταχυτήτων 10m/s έως 11m/s, στη Δυτική κατεύθυνση που είναι και η επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου.

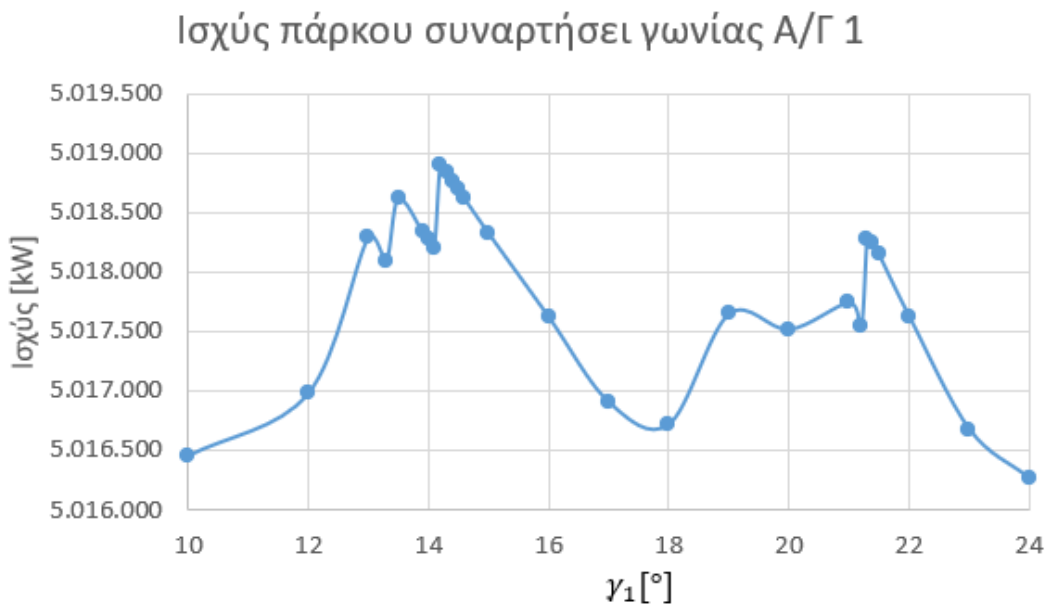
Αναζητώντας στο εύρος (-35°, +35°) για την  $\gamma_1$  το αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς (που υπολογίζεται από το μοντέλο για όλες τις γωνίες στις 0°) είναι:

Γωνία $\gamma_1$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
0°	5.013.817	+0,1%
14,2° (βέλτιστη)	5.018.911	

**Πίνακας 6.7:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για βέλτιστη γωνία  $\gamma_1$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη του HORNS REV 1.

Όπως διαπιστώνεται, η απόκλιση 14,2° της γωνίας  $\gamma_1$  αποδίδει ισχύ βελτιωμένη κατά +0,1%, σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ έχοντας όλες τις Α/Γ στις 0°, βελτίωση η οποία για τα δεδομένα του μεγέθους του πάρκου δεν θεωρείται μικρή. Λαμβάνεται ταυτόχρονα η πληροφορία κατεύθυνσης της αναζήτησης και σε περισσότερες Α/Γ η οποία θα είναι σε θετικές γωνίες και σε εύρη που κυμαίνονται γύρω από το βέλτιστο της  $\gamma_1$ .

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του αποτελέσματος, καταγράφεται χειροκίνητα η ισχύς που δίνει το μοντέλο FLORIS σε ένα εύρος τιμών από τις +12° έως τις +22°. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 6.7).



**Εικόνα 6.7:** Αποδιδόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου HORNS REV 1 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_1$ .

Εντοπίζονται δύο τοπικά μέγιστα, το ένα αποδίδει ισχύ 5.018.911 kW για  $\gamma_1=14,2^\circ$  (το οποίο συγκριτικά είναι το ολικό μέγιστο) και το άλλο αποδίδει ισχύ 5.018.282 kW για  $\gamma_1=21,3^\circ$ . Η διαφορά τους είναι πολύ μικρή, σε τάξη μεγέθους εκατοντάδας, και ποσοστιαία διαφέρουν μόλις 0,01%.

Εξάγονται δύο συμπεράσματα. Από την μια επιβεβαιώνεται απόλυτα ο υπολογισμός του βελτιστοποιητή στις  $\gamma_1=14,2^\circ$ . Από την άλλη διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια διακύμανση στα τοπικά μέγιστα που οδηγούν με διαφορετική γωνία σε παρόμοιο αποτέλεσμα αποδιδόμενης ισχύος. Για να εξηγηθεί αυτό γίνεται η παρακάτω διερεύνηση. Με τον εξωτερικό κώδικα της FORTRAN καταγράφονται για ταχύτητα ανέμου  $10\text{m/s}$  ποιες τιμές ταχύτητας ( $u_{ref}$ ) και ισχύος υπολογίζονται για τις ανεμογεννήτριες A/G 1, A/G 9 και A/G 17 του πάρκου για τιμές  $\gamma_1=0^\circ$ ,  $\gamma_1=14,2^\circ$  και  $\gamma_1=21,3^\circ$ .

A/A	$\gamma_1=0^\circ$		$\gamma_1=14,2^\circ$		$\gamma_1=21,3^\circ$	
	$u_{ref}$ [m/s]	Power [kw]	$u_{ref}$ [m/s]	Power [kw]	$u_{ref}$ [m/s]	Power [kw]
1	10,000	1.341,000	10,000	1.268,662	10,000	1.181,729
9	8,368	806,458	8,879	959,638	9,154	1.049,093
17	8,459	833,693	8,443	829,008	8,413	820,020
sum Power		2.981,151	sum Power	3.057,308	sum Power	3.050,842

**Πίνακας 6.8:** Αποδιδόμενη ισχύς και ταχύτητα των A/G 1, A/G 9 και A/G 17 για διαφορετικές γωνίες εκτροπής  $\gamma_1$ .

Παρατηρείται ότι μεγαλώνοντας την γωνία  $\gamma_1$  της A/G 1 μικραίνει η ισχύς που αποδίδει καθώς ο άνεμος της ελεύθερης ροής αντιμετωπίζει ολοένα και μικρότερη επιφάνεια του δρομέα της. Ταυτόχρονα όμως μικραίνει η σκίαση της κατάντι ανεμογεννήτριας A/G 9 κι έτσι αυξάνεται η αποδιδόμενη της ισχύς.

Το ανάποδο συμβαίνει μειώνοντας την γωνία  $\gamma_1$  της A/G 1. Δηλαδή αυξάνεται η ισχύς που αποδίδει καθώς ο άνεμος της ελεύθερης ροής αντιμετωπίζει ολοένα και μεγαλύτερη επιφάνεια του δρομέα της και ταυτόχρονα μεγαλώνει η σκίαση της κατάντι ανεμογεννήτριας A/G 9 με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποδιδόμενη της ισχύς.

Υπάρχουν λοιπόν γωνίες  $\gamma_1$  όπου συνδυαστικά τα φαινόμενα απώλειας/κέρδους ισχύος λόγω στροφής δίσκου της ανάντι A/G και εκτροπής της σκίασης των κατάντι A/G αποδίδουν με μικρή διαφορά ακρίβειας την ίδια ισχύ. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει πως με την είσοδο περισσότερων ελεύθερων γωνιών για παραπάνω A/G τα τοπικά μέγιστα θα πληθύνουν και πως πολλοί συνδυασμοί διαφορετικών γωνιών δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα.

Αθροίζοντας την αποδιδόμενη ισχύ των μηχανών A/G 1, A/G 9 και A/G 17, οι οποίες επηρεάζονται περισσότερο από την τιμή της  $\gamma_1$ , παρατηρείται ότι στο τοπικό μέγιστο  $\gamma_1=14,2^\circ$  δίνουν sum Power=3.057,308 kW ενώ στο τοπικό μέγιστο  $\gamma_1=21,3^\circ$  δίνουν sum Power=3.050,842 kW. Πρόκειται για μια αμελητέα διαφορά της τάξης των 6,5 kW την οποία ωστόσο στην συγκεκριμένη περίπτωση ο βελτιστοποιητής καταφέρνει να την εντοπίσει και να βρει το ολικό μέγιστο που υπερτερεί οριακά στις  $\gamma_1=14,2^\circ$ .

Τέλος, αξίζει να σχολιαστεί το πως επιδρά η στροφή της πρώτης (A/G 1) ανεμογεννήτριας στις κατάντι A/G. Αρχικά, με όλες τις A/G στις  $0^\circ$ , η A/G 9 σημειώνει μια ισχυρή πτώση (σε σχέση με το να ήταν ανεπηρέαστη) της ισχύος της κατά  $\frac{806,458-1.341,000}{1.341,000} = -39,9\%$ , γεγονός αναμενόμενο καθώς δέχεται την πλήρη επίδραση του ομόρρου της A/G 1.

Η αντίστοιχη μείωση της ισχύος της A/G 17 είναι  $\frac{833,693-1.341,000}{1.341,000} = -37,8\%$ . Η μείωση αυτή είναι ελαφρώς μικρότερη από εκείνη της A/G 9 παρά το γεγονός ότι η A/G 17 βρίσκεται στον ομόρρο των δύο ανάντι ανεμογεννητριών. Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι το φαινόμενο της επικάλυψης πολλαπλών ομόρρων δεν είναι αθροιστικό.

Στην Α/Γ 17 μάλιστα ξεκινά η αποκατάσταση της ροής καθώς η ταχύτητα αρχίζει να αυξάνει ( $\frac{8,459-8,368}{8,368} = +1,1\%$ ). Αυτό συμβαίνει διότι στην Α/Γ 9 υπάρχει έλλειμα ταχύτητας  $\frac{8,368-10,000}{10,000} = -16,3\%$  οδηγώντας σε πιο ασθενή ομόρρου. Η επίδραση που δέχεται η Α/Γ 17 είναι κυρίως από την Α/Γ 1, κι έτσι σε συνδυασμό με το ότι απέχουν πιο πολύ δικαιολογείται η έναρξη της ανάκτησης της κανονικής ροής στο σημείο αυτό.

Στην συνέχεια, όταν υπεισέρχεται στροφή  $\gamma_1=14,2^\circ$  στην πρώτη μηχανή, σημειώνεται, σε σχέση με την αρχική κατάσταση, αύξηση της ισχύος της Α/Γ 9 κατά  $\frac{959,638-806,458}{806,458} = +19\%$  λόγω της μερικής εκτροπής του ομόρρου. Ταυτόχρονα, σημειώνεται περαιτέρω ισχνή μείωση της ισχύος της Α/Γ 17 κατά  $\frac{829,008-833,693}{833,693} = -0,6\%$ . Αυτό συμβαίνει διότι καθώς μεγάλο μέρος της σκιάς που δεχόταν η Α/Γ 9 από την Α/Γ 1 απομακρύνεται λόγω της εκτροπής με αποτέλεσμα να αποκαθίσταται η ροή στην Α/Γ 9 και η ταχύτητα της αυξάνει κατά  $\frac{8,879-8,368}{8,368} = +6,1\%$  ισχυροποιώντας τον ομόρρου της. Έτσι η Α/Γ 17 δέχεται πλέον κυρίως την επίδραση του ομόρρου της Α/Γ 9. Με άλλα λόγια, στην περίπτωση της εκτροπής της  $\gamma_1$ , η μηχανή Α/Γ 17 είναι για την Α/Γ 9 ότι ήταν η Α/Γ 9 για την Α/Γ 1 στην περίπτωση της μη-εκτροπής ( $\gamma_1 = 0^\circ$ ). Πράγματι, οι ισχύς των μηχανών σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αντίστοιχα 829,008 kW για την Α/Γ 17 και 806,458 kW για την Α/Γ 9, οι οποίες διαφέρουν κατ' απόλυτη τιμή μόλις  $\frac{|829,008-806,458|}{\frac{829,008+806,458}{2}} = 2,7\%$ .

Τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά ίδια και στην περίπτωση με στροφή  $\gamma_1=21,3^\circ$ .

### 6.2.2 Εφαρμογή βελτιστοποιητή στην γωνία της Α/Γ 8

Στην συνέχεια, ελέγχεται η ικανότητα του βελτιστοποιητή να βρίσκει την βέλτιστη γωνία εκτροπής στην περίπτωση που η γωνία της Α/Γ 8 είναι ελεύθερη, ενώ οι υπόλοιπες 79 Α/Γ διατηρούνται σταθερές και ίσες με  $0^\circ$ , στις ίδιες παραμέτρους ανέμου με την προηγούμενη περίπτωση.

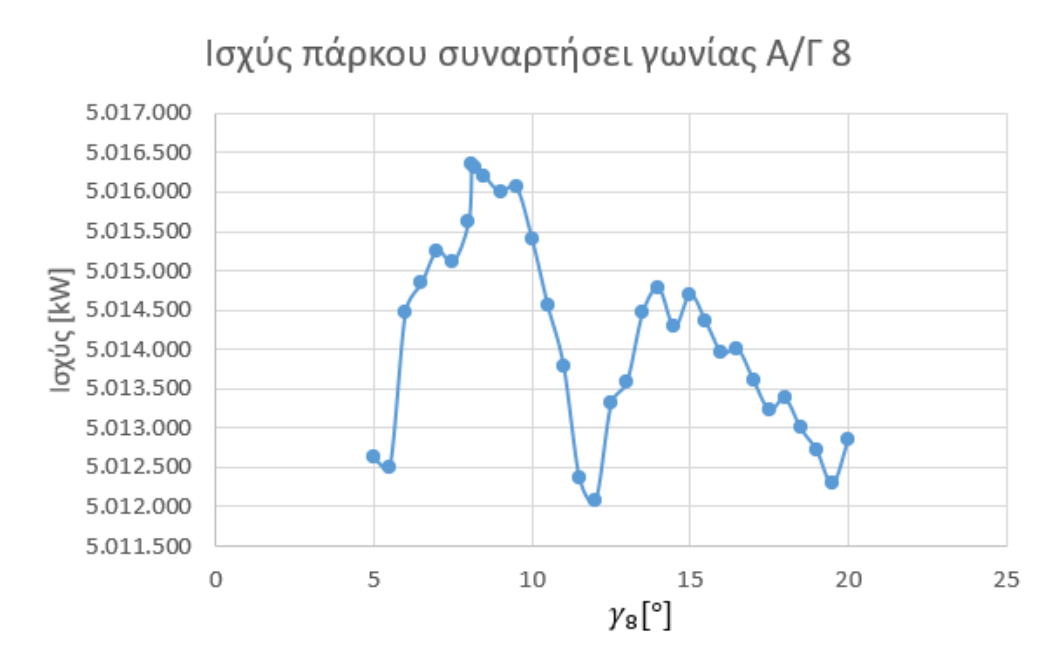
Αναζητώντας στο εύρος ( $0^\circ, +35^\circ$ ) για την  $\gamma_1$  το αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς (που υπολογίζεται από το μοντέλο για όλες τις γωνίες στις  $0^\circ$ ) είναι:

Γωνία $\gamma_8$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
$0^\circ$	5.013.817	+0,05%
$8,1^\circ$ (βέλτιστη)	5.016.348	

**Πίνακας 6.9:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για βέλτιστη γωνία  $\gamma_8$  με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη του HORNS REV 1.

Όπως διαπιστώνεται, η απόκλιση  $8,1^\circ$  της γωνίας  $\gamma_8$  αποδίδει ισχύ βελτιωμένη κατά +0,05%, σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ έχοντας όλες τις Α/Γ στις  $0^\circ$ , βελτίωση παρόμοια με της προηγούμενης περίπτωσης. Εν προκειμένω, καθώς γίνεται λόγος για πολύ μικρές ποσοστιαίες βελτιώσεις να σημειωθεί ότι η μικρή διαφορά σε σχέση με την βελτιστοποίηση της γωνίας της Α/Γ 1 έχει να κάνει και με το ότι η ψηφιοποίηση της χωροθεσίας του πάρκου έγινε χειροκίνητα με το αντίστοιχο εργαλείο και υπάρχουν μικρές αποκλίσεις από την πραγματική θέση των ανεμογεννητριών, όπου για τόσο μικρές βελτιώσεις μπορούν να έχουν κάποια επίδραση στο αποτέλεσμα.

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του αποτελέσματος, καταγράφεται χειροκίνητα η ισχύς που δίνει το μοντέλο FLORIS σε ένα εύρος τιμών από τις  $+5^\circ$  έως τις  $+20^\circ$ . Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο παρακάτω διάγραμμα:



**Εικόνα 6.8:** Αποδιδόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου HORNS REV 1 συναρτήσει της γωνίας  $\gamma_8$ .

Διαπιστώνεται και πάλι ότι υπάρχουν πολλά τοπικά μέγιστα με κυριότερα εκείνα γύρω από τις 8° και τις 14°. Το ένα αποδίδει ισχύ 5.016.348 kW για  $\gamma_8=8,1^\circ$  (το οποίο συγκριτικά είναι το ολικό μέγιστο) και το άλλο αποδίδει ισχύ 5.014.786 kW για  $\gamma_8=14^\circ$ . Η διαφορά τους είναι σε τάξη μεγέθους χιλιάδας, και ποσοστιαία διαφέρουν μόλις 0,03%, ποσοστό αμελητέο στην βελτίωση ενέργειας.

Επιβεβαιώνεται και πάλι ο υπολογισμός του βελτιστοποιητή στις  $\gamma_8=8,1^\circ$  και διαπιστώνεται, εκ νέου, ότι υπάρχει μια διακύμανση στα τοπικά μέγιστα που οδηγούν με διαφορετική γωνία σε παρόμοιο αποτέλεσμα αποδιδόμενης ισχύος.

### 6.2.3 Εφαρμογή βελτιστοποιητή στην γωνία των Α/Γ 1 και Α/Γ 8

Τέλος, έχοντας βρει τις βέλτιστες γωνίες για την Α/Γ 1 ( $\gamma_1=14,2^\circ$ ) και Α/Γ 8 ( $\gamma_8=8,1^\circ$ ), το συνδυαστικό αποτέλεσμα ισχύος που αποδίδουν κάνοντας χρήση εξωτερικά του μοντέλου FLORIS είναι 5.021.400 kW.

Εφαρμόζοντας τώρα τον βελτιστοποιητή και αναζητώντας στοχευμένα στο εύρος (+5°, +25°) για την  $\gamma_1$  και την  $\gamma_8$  το αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς (που υπολογίζεται από το μοντέλο για όλες τις γωνίες στις 0°) είναι:

Γωνία $\gamma_1$	Γωνία $\gamma_8$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
0°	0°	5.013.817	+0,15%
8,1° (βέλτιστη)	14,2° (βέλτιστη)	5.021.442	

**Πίνακας 6.10:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για βέλτιστες γωνίες  $\gamma_1$  και  $\gamma_8$  με ισχύ αναφοράς, για την διάταξη του HORNS REV 1.

Όπως διαπιστώνεται, ο βελτιστοποιητής καταφέρνει και πάλι να βρει απόλυτα τις βέλτιστες γωνίες έχοντας αυτή τη φορά δύο ελεύθερες μεταβλητές (design variables). Μάλιστα, η αποδιδόμενη ισχύς βελτιστοποιείται κατά +0,15% σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

## 6.2.4 Εφαρμογή βελτιστοποίησης στις γωνίες όλης της πρώτης σειράς Α/Γ

Έχοντας επιβεβαιώσει και κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας του βελτιστοποιητή ακολουθεί η εφαρμογή του στο αιολικό πάρκο έχοντας αυτή τη φορά ως ελεύθερες μεταβλητές τις γωνίες όλων των ανεμογεννητριών της πρώτης σειράς του πάρκου, δηλαδή οχτώ (8) design variables.

Με αναζήτηση στο εύρος ( $+5^\circ, +20^\circ$ ) για καθεμία από τις οχτώ γωνίες των Α/Γ, το βέλτιστο αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ της αρχικής κατάστασης είναι:

$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	$\gamma_8$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	5.013.817	+0,5%
$12,5^\circ$	$19,6^\circ$	$6,9^\circ$	$11,1^\circ$	$18,2^\circ$	$5,0^\circ$	$5,4^\circ$	$8,5^\circ$	5.038.950	

**Πίνακας 6.11:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για τις βέλτιστες γωνίες όλης της πρώτης σειράς ανεμογεννητριών με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη του HORNS REV 1.

Η βελτίωση της ισχύος κατά +0,5% (+25.133 kW) με την εφαρμογή απόκλισης γωνιών αρχίζει και γίνεται αξιοσημείωτη για τα δεδομένα του πάρκου.

Ως προς τις βέλτιστες γωνίες παρατηρείται μια ανομοιομορφία στις αποδιδόμενες τιμές οι οποίες εντοπίζονται σε ένα εύρος με ελάχιστο τις  $\gamma_6=5,0^\circ$  και μέγιστο τις  $\gamma_2=19,6^\circ$ . Η διακύμανση αυτή είναι αναμενόμενη, καθότι όπως αποδείχτηκε στις προηγούμενες υποενότητες, οι συνδυασμοί των γωνιών μιας ανεμογεννήτριας σε συνδυασμό με την επίδραση τους στις κατάντι ανεμογεννήτριες παρουσιάζει τοπικά μέγιστα στην αποδιδόμενη ισχύ που είναι πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους ακόμη κι όταν η διαφορά των γωνιών είναι αρκετές μοίρες. Ως εκ τούτου, οι συνδυασμοί εκείνοι που αποδίδουν ισχύ με διαφορές στην χιλιάδα ή/και την εκατοντάδα του kW, πληθαίνουν, οδηγώντας σε τέτοιου είδους αποτελέσματα.

Ενδεικτικά, για τις περιπτώσεις των γωνιών της Α/Γ 1 και Α/Γ 8 που το βέλτιστο αποτέλεσμα τους είναι αποδεδειγμένο με βεβαιότητα και ακρίβεια στις προηγούμενες υποενότητες, στη συγκεκριμένη αναζήτηση λαμβάνεται τιμή  $\gamma_1=12,5^\circ$  (διαφορά  $1,7^\circ$  από την βέλτιστη) και  $\gamma_8=8,5^\circ$  (διαφορά  $0,4^\circ$  από την βέλτιστη).

Η διακύμανση αυτή των τοπικών/ολικών μεγίστων μπορεί να φανεί χαρακτηριστικά και από την παρακάτω αναζήτηση που έγινε με τα ίδια design variables στο εύρος ( $+10^\circ, +30^\circ$ ) και παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα σε συνδυασμό με την ακριβώς προηγούμενη αναζήτηση:

Εύρος Αναζήτησης	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	$\gamma_8$	Ισχύς [kW]
( $+5^\circ, +20^\circ$ )	$12,5^\circ$	$19,6^\circ$	$6,9^\circ$	$11,1^\circ$	$18,2^\circ$	$5,0^\circ$	$5,4^\circ$	$8,5^\circ$	5.038.950
( $+10^\circ, +30^\circ$ )	$14,9^\circ$	$20,0^\circ$	$12,4^\circ$	$10,0^\circ$	$10,0^\circ$	$10,1^\circ$	$20,0^\circ$	$10,0^\circ$	5.038.493
Διαφορά	$+2,4^\circ$	$+0,4^\circ$	$+5,5^\circ$	$-1,1^\circ$	$-8,2^\circ$	$+5,1^\circ$	$+14,6^\circ$	$+1,5^\circ$	-457 (-0,009%)

**Πίνακας 6.12:** Αποτελέσματα και σύγκριση ισχύος και βέλτιστων γωνιών για αναζήτηση σε διαφορετικό εύρος γωνιών στο βελτιστοποιητή, για την διάταξη του HORNS REV 1.

Όπως γίνεται αντιληπτό ακόμη κι επιμέρους, μεγάλες διαφορές μοιρών μπορούν να οδηγήσουν σε μια ανεπαίσθητη διαφορά της ισχύος (-0,009%), η οποία πρακτικά δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Ωστόσο, για κάποιον διαχειριστή ενός αιολικού πάρκου, σε πρακτικό επίπεδο, όταν εφαρμόζει τον έλεγχο της εκτροπής του ομόρρου θα το κάνει για ένα πιο σταθερό και συγκεκριμένο σύνολο γωνιών, που δεν παρουσιάζει έντονη διασπορά. Με άλλα λόγια, διαχωρίζοντας το εύρος στροφής λόγου χάρη ανά 5°, οι τιμές των γωνιών που είναι γύρω από μία τιμή της διαίρεσης του εύρους, θα προσαρμόζονται σε αυτή τη τιμή. Π.χ. η τιμή της  $\gamma_1$  που έλαβε τιμές 12,5° και 14,9° θα προσαρμόζεται στις 15,0°, αντίστοιχα η τιμή της  $\gamma_3$  που έλαβε τιμές 6,9° και 12,4° θα προσαρμόζεται στις 10,0° κ.ο.κ. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα όπου έχει επανυπολογιστεί εξωτερικά στο μοντέλο FLORIS και η νέα αποδιδόμενη ενέργεια:

$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	$\gamma_8$	Ισχύς [kW]
15,0°	20,0°	10,0°	10,0°	15,0°	10,0°	15,0°	10,0°	5.035.504

**Πίνακας 6.13:** Προσαρμοσμένες τιμές γωνιών και αποδιδόμενη ισχύς για την πρώτη σειρά ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου HORNS REV 1.

Με την νέα τιμή, το ποσοστό βελτίωσης της ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση είναι +0,43%, ενώ πριν την προσαρμογή των γωνιών η βελτίωση ανερχόταν στο +0,50%.

Δεδομένων των ποσοστών βελτίωσης σε κάθε περίπτωση, η πτώση κατά 0,07% (3.446 kW) της αποδιδόμενης ισχύος δεν θεωρείται αμελητέα καθώς πρόκειται για διαφορά  $\frac{0,43-0,5}{0,5} = -14\%$ .

Έτσι, η προσαρμογή των γωνιών για το διαχειριστή πρακτικά δεν θεωρείται σκόπιμη. Ωστόσο, με την εφαρμογή βελτιστοποίησης σε ολόένα και περισσότερες σειρές ανεμογεννητριών αναμένεται η προσαρμογή αυτή να μην παίζει σημαντικό ρόλο κι έτσι να είναι σκόπιμη η εφαρμογή της.

### 6.2.5 Εφαρμογή βελτιστοποίησης στις γωνίες όλης της πρώτης και της δεύτερης σειράς Α/Γ

Έχοντας ως αφετηρία την μελέτη και ανάλυση της βελτιστοποίησης στην πρώτη σειρά Α/Γ, εφαρμόζεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπόψιν και τη δεύτερη σειρά ανεμογεννητριών του πάρκου, με ελεύθερες μεταβλητές όλες τις γωνίες τους, δηλαδή δεκαέξι (16) design variables.

Με αναζήτηση στο εύρος (+5°, +20°) για καθεμία από τις δεκαέξι γωνίες των Α/Γ, το βέλτιστο αποτέλεσμα που λαμβάνεται και συγκρίνεται με την ισχύ της αρχικής κατάστασης (5.013.817 kW) είναι:

$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	$\gamma_8$	Ισχύς [kW]	Μεταβολή Ισχύος
12,5°	20,0°	20,0°	20,0°	20,0°	16,3°	12,5°	14,5°	5.057.297	+0,87%
$\gamma_9$	$\gamma_{10}$	$\gamma_{11}$	$\gamma_{12}$	$\gamma_{13}$	$\gamma_{14}$	$\gamma_{15}$	$\gamma_{16}$		
20,0°	20,0°	19,1°	20,0°	20,0°	20,0°	20,0°	8,7°		

**Πίνακας 6.14:** Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για τις βέλτιστες γωνίες όλης της πρώτης και της δεύτερης σειράς ανεμογεννητριών με την ισχύ αναφοράς, για την διάταξη του HORNS REV 1.

Η βελτίωση της ισχύος κατά +0,87% αποκτά σημαντικό ενδιαφέρον και αναδεικνύει την χρησιμότητα της εφαρμογής εκτροπής του ομόρρου.

Οι τιμές των γωνιών παρουσιάζουν και πάλι μια σχετικά μικρή ανομοιομορφία και εφαρμόζεται προσαρμογή γωνιών στο πλαίσιο της λογικής της προηγούμενης υποενότητας.

Τα αποτελέσματα της προσαρμογής αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα όπου έχει επανυπολογιστεί εξωτερικά στο μοντέλο FLORIS και η νέα αποδιδόμενη ενέργεια:

$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	$\gamma_8$	Ισχύς [kW]
15,0°	20,0°	20,0°	20,0°	20,0°	15,0°	15,0°	15,0°	5.055.161
$\gamma_9$	$\gamma_{10}$	$\gamma_{11}$	$\gamma_{12}$	$\gamma_{13}$	$\gamma_{14}$	$\gamma_{15}$	$\gamma_{16}$	
20,0°	20,0°	20,0°	20,0°	20,0°	20,0°	20,0°	10,0°	

**Πίνακας 6.15:** Προσαρμοσμένες τιμές γωνιών και αποδιδόμενη ισχύς για την πρώτη και δεύτερη σειρά ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου HORNS REV 1.

Με την νέα τιμή, το ποσοστό βελτίωσης της ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση είναι +0,83%, ενώ πριν την προσαρμογή των γωνιών η βελτίωση ανερχόταν στο +0,87%.

Δεδομένων των ποσοστών βελτίωσης σε κάθε περίπτωση, η πτώση κατά 0,04% (2.136 kW) της αποδιδόμενης ισχύος θεωρείται αμελητέα καθώς πρόκειται για διαφορά  $\frac{0,83-0,87}{0,87} = -4,6\%$  και κρίνεται ως σκόπιμη η προσαρμογή των γωνιών από τον διαχειριστή του βελτιστοποιητή του πάρκου.

Όπως αναμενόταν, με την εφαρμογή βελτιστοποίησης και στην δεύτερη σειρά ανεμογεννητριών η προσαρμογή των γωνιών δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στη μεταβολή της ισχύος κι έτσι είναι σκόπιμη η εφαρμογή της όσο αυξάνεται ο αριθμός των μηχανών που υπεισέρχεται στην βελτιστοποίηση.

### 6.3 Συμπεράσματα και προτάσεις

Ύστερα από όλη την μελέτη που προηγήθηκε εξάγεται το συμπέρασμα ότι το υπολογιστικό εργαλείο FLORIS είναι ένα αρκετά καλό και αξιόπιστο μοντέλο αναπαράστασης του ομόρρου το οποίο αντιλαμβάνεται και υπολογίζει αρκετά καλά την επίδραση της εκτροπής και των επικαλύψεων του ομόρρου. Ύστερεί όμως σε μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων καθότι υπερεκτιμά την σκίαση και συνεπώς τις απώλειες ισχύος. Μια σημαντική βελτίωση που μπορεί να γίνει είναι ακριβώς αυτή η ενσωμάτωση της αντίληψης της τρίτης διάστασης του ομόρρου στο μοντέλο οδηγώντας σε αποτελέσματα ακόμη πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Ως προς το κομμάτι της βελτιστοποίησης, γίνεται αντιληπτό πως πρόκειται για μια δυναμική διαδικασία. Δεν αρκεί η απλή εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος στον optimizer και η αναμονή των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Απαιτείται, η έντονη αλληλεπίδραση μαζί του και η αντίληψη του τρόπου λειτουργίας του η οποία με διάφορες δοκιμές δίνει την κατεύθυνση αναζήτησης και αξιολόγησης του εξερχόμενου αποτελέσματος. Έχοντας κατά νου αυτά, ο συγκεκριμένος γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι ικανός να δώσει αποτελέσματα που είναι πολύ κοντά στο βέλτιστο.

Έγινε επίσης αντιληπτό, ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης δημιουργεί μια πληθώρα τοπικών μεγίστων, πολύ κοντά μεταξύ τους σε απόλυτη τιμή, που προκύπτει από διάφορους συνδυασμούς γωνιών εκτροπής με τις κατάντι ανεμογεννήτριες κι έτσι είναι

αναμενόμενο οι βέλτιστες γωνίες να παρουσιάζουν μεταξύ τους πολλές φορές μεγάλη διακύμανση.

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο, ο χειριστής του πάρκου να προσαρμόσει τις βέλτιστες γωνίες σε συγκεκριμένες τιμές που θα έχει διαιρέσει το εύρος της στροφής προκειμένου να υπάρχει μια σχετική ομοιομορφία, λιγότερη καταπόνηση των μηχανών και απλούστευση της διαδικασίας.

Όπως παρατηρήθηκε, κάτι τέτοιο αν εφαρμοστεί μόνο για την πρώτη σειρά ανεμογεννητριών επηρεάζει το αποτέλεσμα της αποδιδόμενης ισχύος και η σχετική επίδραση είναι αρκετά σημαντική. Όσο όμως υπεισέρχονται στην βελτιστοποίηση ολοένα και περισσότερες μηχανές, η επίδραση αυτή γίνεται όλο και λιγότερο σημαντική καθιστώντας τη προσαρμογή των γωνιών αναγκαία και συνάμα θετικά επιδραστική για το σύνολο του πάρκου.

Τέλος, ήδη από την ενσωμάτωση και της δεύτερης σειράς ανεμογεννητριών στην βελτιστοποίηση φάνηκε ότι επιδρούν σημαντικά στην βελτίωση της ισχύος καθιστώντας σκόπιμη την εισαγωγή της εκτροπής του ομόρρου.

Μελλοντικά λοιπόν, σε επόμενες εργασίες, θα ήταν πολύ χρήσιμο να μελετηθεί η σταδιακή προσθήκη όλων των υπόλοιπων σειρών μηχανών στη βελτιστοποίηση μέχρι το τέλος. Μπορεί επίσης να μελετηθεί η βελτιστοποίηση σε άλλο εύρος ταχύτητας ανέμου καθότι διαφοροποιείται ο ομόρρους, επίσης η μελέτη σε άλλη κατεύθυνση ανέμου όπου διαφοροποιείται η σχετική διάταξη των μηχανών. Ακόμη μπορεί να γίνει μια πιο σύνθετη μελέτη ταυτόχρονης βελτιστοποίησης τόσο ως προς την θέση κάθε μηχανής όσο και ως προς την γωνία εκτροπής κάθε μίας από αυτές. Βέβαια, ένα τέτοιο πρόβλημα θα διαθέτει πολύ μεγάλο αριθμό design variables και θα απαιτούσε μεγάλο υπολογιστικό χρόνο.

Τέλος, ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, με τρόπο τέτοιο που να μπορεί να αντιλαμβάνεται καλύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τα τοπικά μέγιστα που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους και να συγκλίνει γρηγορότερα και πιο αποδοτικά.



## Βιβλιογραφία

- [1] Britannica, “Wind Energy”. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/wind-energy>.
- [2] Solar Schools, “Wind Energy Explained - Knowledge Bank”. [Online]. Available: <https://solarschools.net/knowledge-bank/renewable-energy/wind/wind-expanded>.
- [3] U.S. Department of Energy, “Wind Energy Basics”. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-basics>.
- [4] Hellenic Wind Energy Association (HWEA/ELETAEN), “Wind Energy Statistics,” Wind Energy Statistics, 2022. [Online]. Available: <https://eletaen.gr/statistics/>.
- [5] International Energy Agency (IEA), “Wind Energy in Greece,” IEA Wind TCP, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea-wind.org>.
- [6] Global Wind Energy Council (GWEC), “Global Wind Report 2023,” Global Wind Report, 2023. [Online]. Available: <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>.
- [7] European Commission, “National Energy and Climate Plan of Greece,” European Commission, 2022. [Online]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/el\\_final\\_necp\\_main\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/el_final_necp_main_en_0.pdf).
- [8] K. Yang and K. Cho, "Simulated Annealing Algorithm for Wind Farm Layout Optimization: A Benchmark Study," *Energies*, vol. 12, no. 23, p. 4403, 2019, doi: 10.3390/en12234403.
- [9] S. Kanev, E. Bot, and J. Giles, “Wind Farm Loads under Wake Redirection Control,” *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 15, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13164088.
- [10] B. Jing, Z. Qian, Y. Pei, L. Zhang, and T. Yang, “Improving wind turbine efficiency through detection and calibration of yaw misalignment,” *Renewable Energy*, vol. 160, pp. 1217–1227, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.07.063.
- [11] B. Dou, T. Qu, L. Lei, and P. Zeng, “Optimization of wind turbine yaw angles in a wind farm using a three-dimensional yawed wake model,” *Energy*, vol. 209, p. 13, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118415.
- [12] Α. Ζερβός, Γ. Κάραλης, “Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2018
- [13] Η. Λιώκη-Λειβαδά, Μ. Ασημακοπούλου, “Ηπιες και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Σύγχρονες Τεχνολογίες”, Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία, 2014, σελ. 296
- [14] A. Lewinschal, "A Simple Method for Calculations of Wake Effects in Wind Farms with Influence of Atmospheric Stability," M.S. thesis, Dept. of Earth Sciences, Uppsala Univ., 2019.
- [15] A. N. Vicente, “Validation of wind turbine wake models,” University of Coimbra, 2018.
- [16] R. Shakoor, M. Y. Hassan, A. Raheem, and Y.-K. Wu, "Wake effect modeling: A review of wind farm layout optimization using Jensen's model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1048-1059, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.229.
- [17] C. Bay, J. King, P. Fleming, et al., "FLORIS: A Brief Tutorial," presented at the 5th Wind Energy Systems Engineering Workshop, Pamplona, Spain, Oct. 2-4, 2019. NREL/PR-5000-75661.

- [18] NREL, "Wake Models," FLORIS. [Online]. Available: [https://nrel.github.io/floris/wake\\_models.html](https://nrel.github.io/floris/wake_models.html).
- [19] J. Schreiber, E. M. Nanos, F. Campagnolo, and C. L. Bottasso, "Verification and Calibration of a Reduced Order Wind Farm Model by Wind Tunnel Experiments," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 854, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/854/1/012041.
- [20] X. Μακρόπουλος, Α. Ευστρατιάδης, "Γενετικοί Αλγόριθμοι", ΕΜΠ, Αθήνα, 2018, σελ.9 [Online]. Available: [https://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1031/document/2017-18/Lecture\\_GeneticAlgorithms\\_Hydroinf\\_2018.pdf](https://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1031/document/2017-18/Lecture_GeneticAlgorithms_Hydroinf_2018.pdf).
- [21] "scipy.optimize.shgo," SciPy v1.9.0 Reference Guide. [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.shgo.html>.
- [22] Π. Θεολογίτου, "Βελτιστοποίηση παραγωγής αιολικού πάρκου μέσω ελέγχου του ομόρρου των ανεμογεννητριών με ρύθμιση της γωνίας απόκλισης τους," Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2022.