



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την πρόλεξη του πεδίου ροής στον ομόρρου ανεμογεννήτριας και εφαρμογή στην εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης αιολικού πάρκου.

Ρόβος Ορφέας-Γεώργιος

Επιβλέπων : Β. Ριζιώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Συνεπιβλέπων : Ι. Προσπαθόπουλος, Δρ., Ε.ΔΙ.Π

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	3
Εισαγωγή.....	3
1.1 Τεχνολογικό πρόβλημα.....	3
1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	5
Κεφάλαιο 2	8
Μαθηματική περιγραφή αντιπροσωπευτικών μοντέλων προσομοίωσης του ομόρρου Α/Γ.....	8
2.1 Κινηματικά μοντέλα (Abramovich, Jensen).....	8
2.1.1 Απλοποιημένο πρότυπο ομόρρου Abramovich	8
2.1.2 Πρότυπο ομόρρου Jensen	10
2.2 Μοντέλα που βασίζονται στην απλοποιημένη εξίσωση της ορμής.....	12
Ημιεμπειρικό πρότυπο ομόρρου GCL	12
2.3 Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης του ομόρρου και προτεινόμενο μοντέλο.....	13
2.3.1 Διατύπωση εξισώσεων όρμης και συνέχειας.....	14
2.3.2 Συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.....	14
2.3.3 Μοντέλο τύρβης Ainslie.....	15
2.3.4 Διακριτοποίηση των εξισώσεων	17
Κεφάλαιο 3	19
Περιγραφή υπολογιστικού εργαλείου για την εκτίμηση της ισχύος αιολικού πάρκου	19
3.1 Εφαρμογή προτεινόμενου μοντέλου στην Α/Γ Sexbierum	19
3.2 Ενσωμάτωση σχέσεων απλουστευμένων μοντέλων για τον υπολογισμό της ακτίνας του ομόρρου και του ελλείματος ταχύτητας και προλέξεων προτεινόμενου μοντέλου	24
Κεφάλαιο 4	27
Εφαρμογή σε διατάξεις αιολικών πάρκων	27
4.1 Περίπτωση πέντε Α/Γ.....	27
4.2 Περίπτωση δέκα Α/Γ.....	33
4.3 Περίπτωση δεκατριών Α/Γ.....	41
Κεφάλαιο 5	49
Συμπεράσματα.....	49
5.1 Αποτίμηση.....	49
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	50
Βιβλιογραφία	51

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

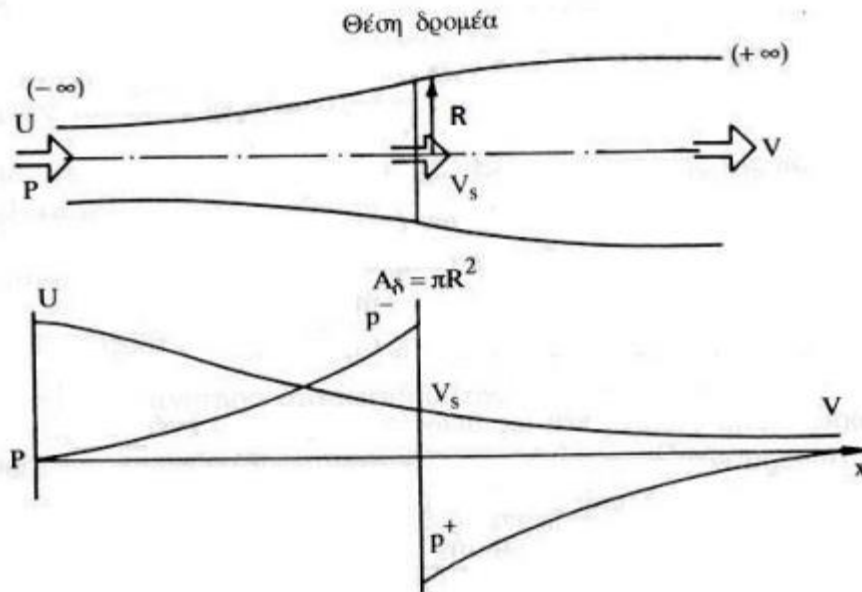
1.1 Τεχνολογικό πρόβλημα

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Δεν ρυπαίνει, είναι ανεξάντλητη και περιορίζει τη χρήση των ορυκτών καυσίμων που είναι η πηγή προέλευσης των αερίων του θερμοκηπίου που προκαλούν την υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιπρόσθετα συμβάλλει στην ενεργειακή ανεξάρτηση καθώς το «καύσιμο» είναι ο άνεμος, ο οποίος είναι άφθονος, δεν κοστίζει και αποτελεί εγχώρια πηγή. Θα αποτελούσε παράλειψη να μην αναφέρουμε το χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τα συμβατικά μέσα ηλεκτροπαραγωγής (πυρηνική ενέργεια, άνθρακας-λιγνίτης, πετρέλαιο κ.α.) και το γεγονός πως αποτελεί αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πυκνότητα της παραγόμενης ενέργειας από ανεμογεννήτρια (Α/Γ) είναι χαμηλή σε σχέση με άλλες μηχανές, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολλές μηχανές ώστε να παραχθεί μια αξιόλογη ποσότητα ενέργειας, συγκρίσιμη με αυτή των συμβατικών σταθμών. Για το λόγο αυτό οι Α/Γ τοποθετούνται σε συστοιχίες που ονομάζονται αιολικά πάρκα. Η αλληλεπίδραση των Α/Γ με τον ομόρρου των ανάντι γειτονικών μηχανών είναι ένα πολύπλοκο φυσικό φαινόμενο που επηρεάζει σημαντικά τόσο την απόδοση, όσο και τη διάρκεια ζωής τους.

Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα πίεσης και ταχύτητας μιας ανεμογεννήτριας ανάντι και κατάντι του δρομέα. Συγκεκριμένα, η συνισταμένη δύναμη που ασκείται από τον άνεμο στα πτερύγια του δρομέα της μηχανής μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες δυνάμεις, μία κάθετη (άνωση) και μία παράλληλη στη ροή (οπισθέλκουσα). Η σύγχρονη τεχνολογία χρησιμοποιεί ως κύρια δύναμη περιστροφής του δίσκου της μηχανής την άνωση, σε αντίθεση με την παλαιότερη τεχνολογία όπου η ισχύς της μηχανής προέρχεται από την εκμετάλλευση της οπισθέλκουσας. Ως αποτέλεσμα της ώσης του δρομέα και της εκμετάλλευσης ποσοστού της ισχύος του ανέμου, δημιουργείται πτώση πίεσης στο επερχόμενο ρευστό και υφίσταται έλλειμμα ταχύτητας κατάντι του δρομέα.

Οι χρόνιες μελέτες που έχουν διεξαχθεί είτε σε υπολογιστικό είτε σε πειραματικό επίπεδο, διαχωρίζουν τον ομόρρου των ανεμογεννητριών σε δύο περιοχές. Η περιοχή του κοντινού ομόρρου, όπου φτάνει σε απόσταση έως 4 διαμέτρους του δρομέα της εξεταζόμενης Α/Γ και η περιοχή του μακρινού ομόρρου σε απόσταση από 4 έως 20 διαμέτρους κατάντι του δρομέα της μηχανής. Μετά τις 20 διαμέτρους της Α/Γ θεωρείται πλήρως αποκατεστημένη η ροή, δηλαδή η μηχανή πλέον παύει να επηρεάζει το ρευστό. Οι αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ σε ένα αιολικό πάρκο κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 5 και 10 διαμέτρων.



Σχήμα 1 : Διάγραμμα ταχύτητας και πίεσης στην περιοχή της Α/Γ.

Η πρώτη περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονα φαινόμενα συνεκτικότητας λόγω της ύπαρξης υψηλής κλίμακας τύρβης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος καθώς και του οριακού στρώματος των πτερυγίων και της περιοχής διάτμησης του ομόρρου. Σε αυτήν την περιοχή, η ροή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία του δρομέα της Α/Γ. Επιπλέον υφίστανται απότομες μεταβολές στην πίεση και την αξονική ταχύτητα και έντονη εξάπλωση του ομόρρου. Στο μακρινό ομόρρου τα επίπεδα τύρβης αυξάνονται εξαιτίας της σταδιακής ανάμειξης με την ατμοσφαιρική τύρβη. Η ανάμειξη της τύρβης επιταχύνει την αποκατάσταση του ομόρρου, όσον αφορά στο έλλειμμα της ταχύτητας.

Στην περίπτωση αιολικού πάρκου υφίσταται αλληλεπίδραση του ομόρρου των Α/Γ με τις γειτονικές μηχανές. Αυτό συνεπάγεται μείωση της ισχύος των Α/Γ (εκτίθενται σε μικρότερες ταχύτητες από αυτή της αδιατάρακτης ροής) και αύξηση των φορτίων κόπωσης (εκτίθενται σε αυξημένα επίπεδα τύρβης). Στόχος είναι η μείωση των αλληλεπιδράσεων ομόρρου με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης από το πάρκο ενέργειας και ελαχιστοποίηση της κόπωσης των μηχανών λόγω αυξημένης τύρβης στον ομόρρου. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη σχεδίαση και κατά συνέπεια η βέλτιστη αξιοποίηση της ισχύος του ρευστού κατά ολόκληρη την έκταση ενός αιολικού πάρκου, είναι απαραίτητη η κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση του ομόρρου των μηχανών, ώστε να ρυθμιστούν κατάλληλα οι σχετικές θέσεις των μηχανών και να επιτευχθεί ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης του πάρκου.

1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Το πρόβλημα επίλυσης της ροής στον ομόρρου Α/Γ είναι πολύπλοκο γιατί απαιτεί την προσομοίωση αρκετών φυσικών μηχανισμών όπως: τύρβη (ατμοσφαιρική και επαγόμενη από το δρομέα της μηχανής), ατμοσφαιρική ευστάθεια, επίδραση τοπογραφίας, δυνάμεις που ασκούνται από δρομέα και αλληλεπίδραση Α/Γ στην περίπτωση αιολικού πάρκου. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι, των οποίων η πολυπλοκότητα ποικίλλει:

- απλοποιημένα πρότυπα που επιλύουν την εξίσωση της συνέχειας ή τις γραμμικοποιημένες εξισώσεις ορμής
- προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης του οριακού στρώματος (boundary layer approximation)
- απλοποιημένες αξονοσυμμετρικές εξισώσεις N-S για το μακρινό ομόρρου χρησιμοποιώντας δεδομένο αρχικό προφίλ ταχύτητας
- μέθοδοι που βασίζονται στη θεωρία μη συνεκτικής ροής (πηγές, δίπολα) και στη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας (vortex methods)
- τρισδιάστατοι επιλυτές των πλήρων εξισώσεων N-S με μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων.
- τρισδιάστατοι επιλυτές των πλήρων εξισώσεων N-S με την τεχνική των μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation)

Τα μοντέλα που βασίζονται στην εξίσωση συνέχειας ονομάζονται κινηματικά και κάνουν χρήση του μοντέλου του Gauss για τα προφίλ του ελλείματος ταχύτητας[1],[2]. Τα μοντέλα Prandtl [3] προκύπτουν από την επίλυση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης της ορμής κατά την κατεύθυνση της ροής και είναι είτε διδιάστατα, είτε αξονοσυμμετρικά. Σε αυτήν την περίπτωση το έλλειμμα της ταχύτητας στον κεντρικό άξονα (centerline velocity deficit) και η ακτίνα του ομόρρου (wake radius) μεταβάλλονται εκθετικά με την απόσταση από το δρομέα της μηχανής. Το μοντέλο GCL [4] είναι αξονοσυμμετρικό και βασίζεται επίσης στην επίλυση των γραμμικοποιημένων εξισώσεων ορμής. Επιπλέον όμως, λαμβάνει υπόψη την επίδραση του εδάφους και χρησιμοποιεί μια εμπειρική σχέση για την εκτίμηση της έντασης της τύρβης. Και εδώ, ισχύει η εκθετική μεταβολή του ελλείματος της ταχύτητας και της ακτίνας του ομόρρου με την απόσταση. Θα τονιστεί εδώ ότι τα απλοποιημένα μοντέλα λειτουργούν κυρίως για τον μακρινό ομόρρου, όπου μπορεί να γίνει η υπόθεση της ομοιότητας.

Τα μοντέλα αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι απαιτούν ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο για τον προσδιορισμό του ομόρρου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση σχεδίαση ενός πάρκου. Υστερούν πάντως στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς στα πρότυπα αυτά δεν λαμβάνονται υπόψη η μορφή του οριακού στρώματος, οι συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας και η επίδραση της τοπογραφίας.

Μεταγενέστερα εφαρμόστηκαν μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης με πρώτη τη διδιάστατη προσεγγιστική μέθοδο επίλυσης του οριακού στρώματος [5], η εφαρμογή της οποίας έδωσε

ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις, η γραμμική όμως υπέρθεση στην περίπτωση πολλών Α/Γ τα κατέστησε μη εφαρμόσιμα για αιολικά πάρκα. Σε επόμενο στάδιο εφαρμόστηκε η παραβολική προσέγγιση των εξισώσεων Navier–Stokes. Η μεθοδολογία του Crespo [6] λαμβάνει υπόψη την ατμοσφαιρική ευστάθεια και τραχύτητα, ενώ η προσομοίωση των τυρβωδών τάσεων επιτυγχάνεται με το μοντέλο k-ε. Μετέπειτα επιχειρήθηκε η αριθμητική προσομοίωση των αξονοσυμμετρικών εξισώσεων Navier-Stokes με αρχικοποίηση του ελλείματος ταχύτητας. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε από τους Garrad Hassan & Partners Ltd.[7] θέτει ως συνθήκη εισόδου ένα εμπειρικό προφίλ ταχύτητας σε απόσταση δύο διαμέτρων κατάντι του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Ο Βουτσινάς [8] εφάρμοσε μία μέθοδο που βασίζεται στην υπόθεση της μη συνεκτικής ροής με χρήση των στοιχείων στροβιλότητας στην περιοχή του δίσκου της Α/Γ για να προσομοιώσει την ανάπτυξη του ομόρρου κοντά στο δρομέα.

Την τελευταία δεκαετία η αναπτυγμένη τεχνολογία των Η/Υ μας επιτρέπει πλέον να χρησιμοποιούμε μεθόδους ακριβείας για τον υπολογισμό της ροής στον ομόρρο της Α/Γ πετυχαίνοντας τρισδιάστατη επίλυση των Navier –Stokes είτε προσομοιώνοντας το δρομέα ως δίσκο ορμής [9], είτε προσομοιώνοντας ξεχωριστά τα πτερύγια ως γραμμές ενέργειας (actuator line) [10]. Ένα πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι επιτυγχάνεται η προσομοίωση της ροής του ομόρρου χωρίς να απαιτείται αρχικοποίηση του προφίλ εισόδου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε παλαιότερες μεθόδους. Όλα αυτά τα μοντέλα προσομοίωσης μεμονωμένων Α/Γ γενικεύθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της ροής σε αιολικά πάρκα. Τα διάφορα μοντέλα αιολικών πάρκων αξιολογήθηκαν στα πλαίσια του χρηματοδοτούμενου από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα ερευνητικού έργου UpWind, όπου έγιναν συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα από τα Δανέζικα παράκτιο αιολικά πάρκα Horns Rev [11]. Τα διάφορα μοντέλα που αξιολογήθηκαν ποικίλλουν σε πολυπλοκότητα, ξεκινώντας από το πιο απλό μοντέλο WAsP [12], συνεχίζοντας με το πιο σύνθετο WindFarmer που βασίζεται στη θεωρία του Ainslie [13] και το πιο πολύπλοκο WAKEFARM [14] που βασίζεται στην παραβολική επίλυση των Navier-Stokes, καταλήγοντας τέλος στα μοντέλα Fluent και 3D N-S όπου επιλύονται οι πλήρεις τρισδιάστατες εξισώσεις N-S. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν, ότι πέραν της δυσκολίας της ακριβούς προσομοίωσης της ροής λόγω της αβεβαιότητας της μοντελοποίησης των ατμοσφαιρικών συνθηκών, τα μοντέλα γενικά υπερεκτιμούν τις απώλειες στον κοντινό ομόρρο, ενώ τις υποεκτιμούν στον μακρινό ομόρρο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται ο υπολογισμός του ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας επιλύοντας αριθμητικά την παραβολική προσέγγιση της αξονοσυμμετρικής εξίσωσης ορμής κατά την κατεύθυνση της ροής και την εξίσωση συνέχειας. Το αρχικό προφίλ ταχύτητας κατάντι του δρομέα υπολογίζεται μέσω της θεωρίας δίσκου ορμής χρησιμοποιώντας τη θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης (Blade Element Momentum). Η εισαγωγή των τυρβωδών τάσεων του ρευστού στην εξίσωση της ορμής πραγματοποιείται σύμφωνα με το μοντέλο του Ainslie. Τα αποτελέσματα για το πεδίο ροής στον ομόρρο μεμονωμένης Α/Γ εισάγονται σε υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο προσομοιώνει την αλληλεπίδραση μεταξύ πλήθους Α/Γ σε υποθετικό αιολικό πάρκο μεταβάλλοντας τη διάταξη και το πλήθος των μηχανών. Η

προσομοίωση γίνεται για όλες τις κατευθύνσεις δεδομένου ρόδου ανέμου και υπολογίζεται ο ετήσιος βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα που προκύπτουν από την εφαρμογή των απλουστευμένων μοντέλων των Abramovich, Jensen και GCL.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η παρουσίαση των απλουστευμένων μοντέλων που εφαρμόστηκαν και περιγράφεται το προτεινόμενο μοντέλο: μαθηματική διατύπωση και διακριτοποίηση εξισώσεων για την επίλυση του πεδίου ροής, μοντέλο τύρβης και αλγόριθμος επίλυσης. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η πιστοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης του ομόρρου με πειραματικά δεδομένα και περιγράφεται το υπολογιστικό εργαλείο για την εκτίμηση της ισχύος, της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και του βαθμού απόδοσης του αιολικού πάρκου. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται εφαρμογή σε διατάξεις αιολικών πάρκων για διάφορες περιπτώσεις. Τέλος στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Μαθηματική περιγραφή αντιπροσωπευτικών μοντέλων προσομοίωσης του ομόρρου Α/Γ.

Τα απλοποιημένα πρότυπα ομόρρου Α/Γ είναι βασισμένα είτε στην εξίσωση συνέχειας (κινηματικά μοντέλα) είτε στη γραμμικοποίηση των εξισώσεων ορμής και υιοθετούν την υπόθεση της ομοιότητας σύμφωνα με την οποία η σχετική μεταβολή του ελλείμματος της ταχύτητας και των τάσεων Reynolds δίνεται από την ίδια συνάρτηση (συνάρτηση ομοιότητας) σε όλες τις αξονικές θέσεις. Μαθηματικά αυτή η απλοποίηση μετουσιώνεται στο γεγονός ότι οι τελικές διαφορικές εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν, από μερικές εξισώσεις μετατρέπονται σε συνήθειες. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν και ως ημιεμπειρικά, αφού οι σταθερές τους ρυθμίζονται μέσω πειραματικών δεδομένων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα μοντέλα των Abramovich και Jensen, ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν το πρότυπο μήκους ανάμειξης Prandtl, το νέο πρότυπο Prandtl και τα μοντέλα GCL.

2.1 Κινηματικά μοντέλα (Abramovich, Jensen).

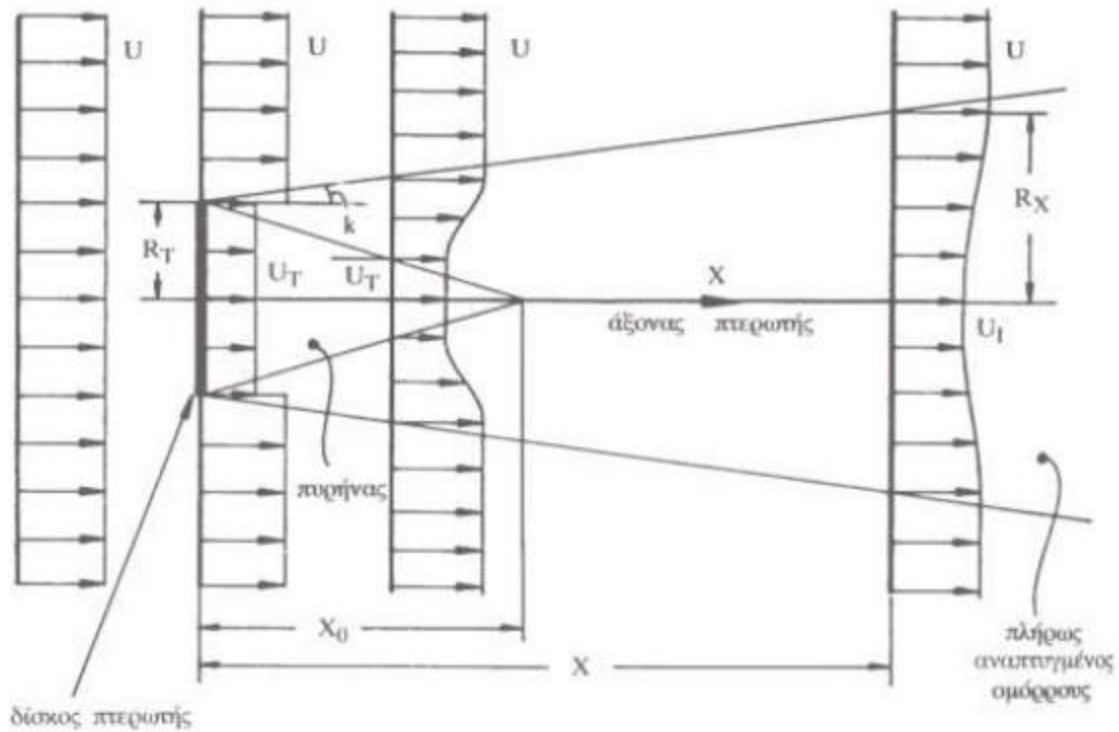
2.1.1 Απλοποιημένο πρότυπο ομόρρου Abramovich

Το απλοποιημένο πρότυπο ομόρρου του Abramovich θεωρεί ομοιόμορφη ταχύτητα της επερχόμενης ροής ανάντι της μηχανής και αξονοσυμμετρική ροή κατάντι της ανεμογεννήτριας, επομένως δεν λαμβάνει υπόψη το οριακό στρώμα που δημιουργείται λόγω της παρουσίας του εδάφους. Σύμφωνα με το μοντέλο του Abramovich ο ομόρρος χωρίζεται σε τρεις περιοχές: την αρχική, την πλήρως ανεπτυγμένη ή κύρια και την μεταβατική περιοχή, η οποία διαμεσολαβεί ανάμεσα στις δύο προηγούμενες.

Στην αρχική περιοχή, τα επίπεδα τοπικής τύρβης και τύρβης λόγω περιστροφής, είναι πολύ υψηλά, λόγω της αλληλεπίδρασης της επερχόμενης ροής με τον δρομέα της ανεμογεννήτριας. Στο τμήμα αυτό του ομόρρου δημιουργείται ο δυναμικός πυρήνας, μία περιοχή κωνικού σχήματος στην οποία η ταχύτητα της ροής είναι σταθερή και ίση με αυτήν ακριβώς μετά την περωτή.

Στην κύρια περιοχή, η τύρβη λόγω περιστροφής είναι αμελητέα και τα συνολικά επίπεδα τύρβης της ροής εμφανίζονται συνεχώς μειούμενα. Στο τμήμα αυτό του ομόρρου δεν υφίσταται δυναμικός πυρήνας και το έλλειμμα ταχύτητας είναι σημαντικά πιο μικρό από αυτό στην αρχική περιοχή. Ο ομόρρος σύμφωνα με το πρότυπο του Abramovich αναπαρίσταται σχηματικά στο

Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση ομόρρου κατά το πρότυπο Abramovich (πηγή: Ανεμοκινητήρες, Μπεργελές Γ., εκδόσεις Συμεών).

Αν U είναι η ταχύτητα του ανέμου ανάντι της ανεμογεννήτριας και C_T ο συντελεστής ώσης του δρομέα για την ταχύτητα αυτή, τότε η σταθερή ταχύτητα ανέμου ακριβώς μετά τον δρομέα και στον δυναμικό πυρήνα υπολογίζεται από τη Σχέση (2.1.1.1).

$$U_T = U \cdot \sqrt{1 - C_T} \quad (2.1.1.1)$$

Σύμφωνα με το πρότυπο του Abramovich και όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**, το πάχος του ομόρρου αυξάνεται γραμμικά, με κλίση η οποία εξαρτάται από την τοπική και τη διάχυτη τύρβη όπως φαίνεται στη Σχέση (2.1.1.2). Στην τελευταία, με τον δείκτη a συμβολίζεται η επιρροή της ατμοσφαιρικής τύρβης και με τον δείκτη m η επιρροή της τύρβης εξαιτίας του αναπτυσσόμενου ομόρρου.

$$\left[\frac{dR(x)}{dx} \right]^2 = \left[\frac{dR(x)}{dx} \right]_a^2 + \left[\frac{dR(x)}{dx} \right]_m^2 \quad (2.1.1.2)$$

$$\left[\frac{dR(x)}{dx} \right]_a = \frac{a}{0,51} \quad (2.1.1.3)$$

$$\left[\frac{dR(x)}{dx} \right]_m = \frac{0,22 \cdot (m-1)^2}{m^2 - 4 \cdot m - 1}, m = \frac{U}{U_T} \quad (2.1.1.4)$$

Με δεδομένη την κλίση της ακτίνας του ομόρρου και την ακτίνα R_0 του δρομέα είναι δυνατό να βρεθεί το μήκος του δυναμικού πυρήνα και έπειτα η ακτίνα αυτού και του ομόρρου σε τυχαία θέση x κατάντι της ανεμογεννήτριας από τις σχέσεις (2.1.1.5), (2.1.1.6) και (2.1.1.7) αντίστοιχα.

$$x_c = R_0 \cdot \frac{\sqrt{35}-1}{\frac{3}{dR(x)} dx} \quad (2.1.1.5)$$

$$R_c(x) = R_0 \cdot \frac{x_c - x}{x_c}, x < x_c \quad (2.1.1.6)$$

$$R(x) = R_0 + x \cdot \frac{dR(x)}{dx} \quad (2.1.1.7)$$

Τέλος, η ταχύτητα της ροής συναρτήσει της θέσης x και της ακτίνας r στον ομόρρου προκύπτει από τη Σχέση (2.1.1.10), αφού πρώτα υπολογιστεί το αντίστοιχο έλλειμμα ταχύτητας $\Delta U(x)$ στην κεντρική γραμμή του ομόρρου και η αδιάστατη παράμετρος $\xi(x)$ σε θέση x κατάντι της ανεμογεννήτριας (Σχέσεις (2.1.1.8) και (2.1.1.9)).

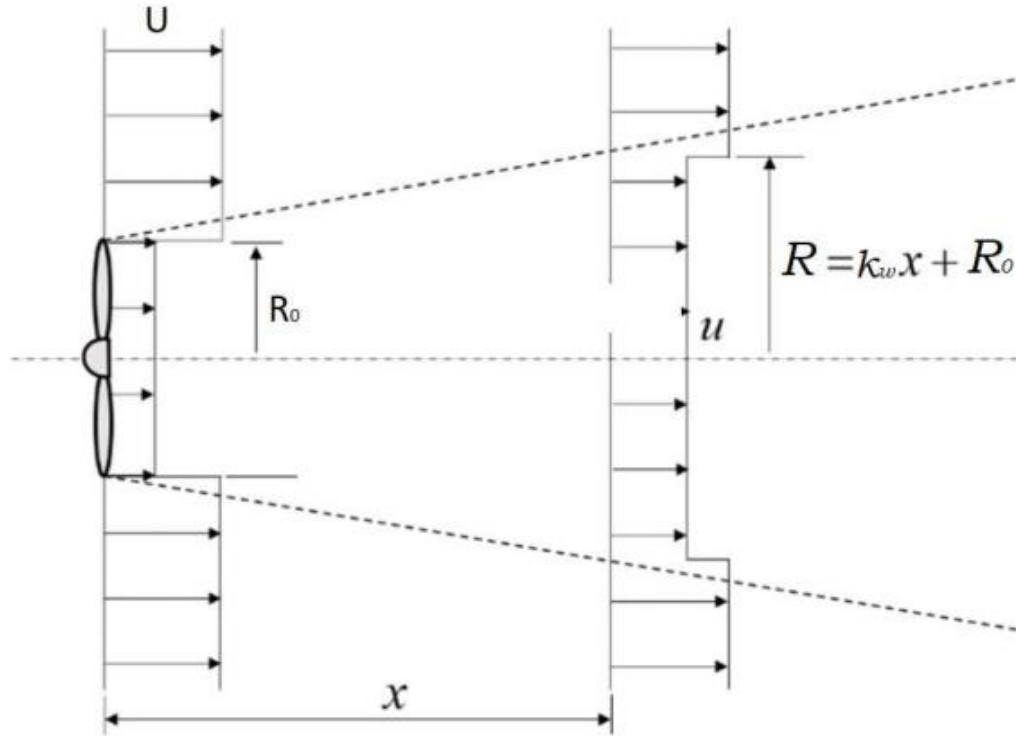
$$\Delta U(x) = \begin{cases} U - U_T & , x \leq x_c \\ \frac{35}{9} \cdot (U - U_T) \left(\frac{R_0}{R(x)} \right)^2 & , x > x_c \end{cases} \quad (2.1.1.8)$$

$$\xi(x) = \begin{cases} \frac{r - R_c(x)}{R(x) - R_c(x)} & , 0 < x < x_c, R_c(x) < r < R(x) \\ \frac{r}{R(x)} & , x > x_c, 0 < R(x) \end{cases} \quad (2.1.1.9)$$

$$u(x, r) = \begin{cases} U & , r > R(x) \\ U_T & , 0 < x < x_c, r < R_c(x) \\ U - \Delta U(x) \cdot [1 - \xi(x)^{1.5}]^2 & , \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.1.1.10)$$

2.1.2 Πρότυπο ομόρρου Jensen

Το πρότυπο του Jensen προκύπτει επίσης από την εξίσωση συνέχειας και θεωρεί γραμμική αύξηση της ακτίνας του ομόρρου συναρτήσει της απόστασης κατάντι του δρομέα. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας κατάντι του δρομέα, το οποίο εξαρτάται μόνο από την απόσταση από αυτόν, ενώ δεν μπορεί να παράξει ακριβή πρόβλεψη της μορφής του ομόρρου στην περιοχή του κοντινού ομόρρου (near wake region). 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 **Σχήμα 3**.



Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση ομόρρου κατά το πρότυπο του Jensen (πηγή: Simulated Annealing Algorithm for Wind Farm Layout Optimization: A Benchmark Study, K.Yang.)

Σύμφωνα με το πρότυπο του Jensen, από τη σχέση (2.1.2.1) υπολογίζεται η ταχύτητα U_T αμέσως μετά τον δρομέα και από τον τύπο (2.1.2.2) η σταθερή κλίση του ομόρρου k_w (decay constant). Στις σχέσεις αυτές, ως a ορίζεται ο συντελεστής αξονικής επαγωγής, ως U η ταχύτητα της ροής ανάντι της ανεμογεννήτριας, ως H_{hub} το ύψος της πλήμνης και ως z_0 το μήκος τραχύτητας του εδάφους στην περιοχή εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.

$$U_T(x) = (1 - 2 \cdot a) \cdot U \quad (2.1.2.1)$$

$$k_w = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{H_{hub}}{z_0}\right)} \quad (2.1.2.2)$$

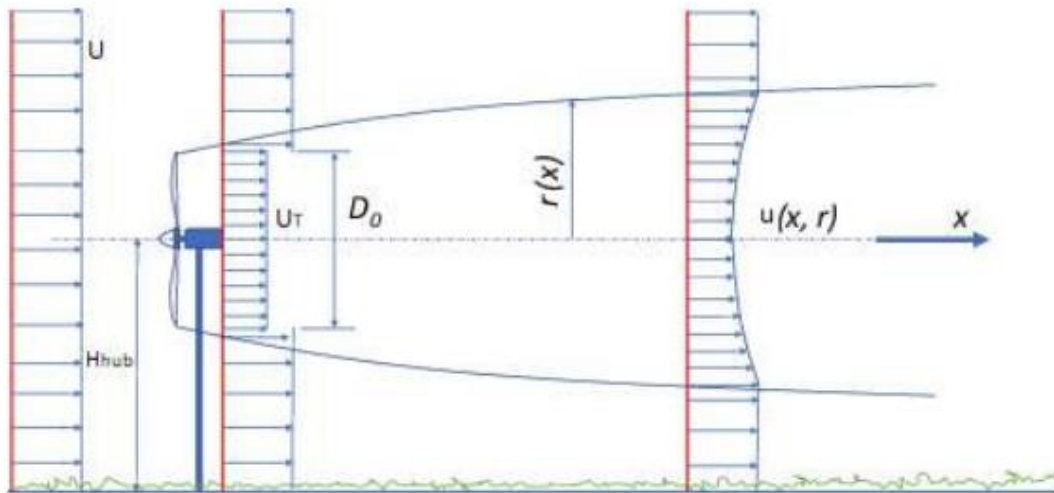
Τέλος, η ταχύτητα της ροής και η ακτίνα του ομόρρου συναρτήσει της θέσης x κατάντι του δρομέα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.1.2.3) και (2.1.2.4) αντίστοιχα.

$$u(x) = U \cdot \left[1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + k_w \cdot \frac{x}{R_0}\right)^2} \right] \quad (2.1.2.3)$$

$$R(x) = R_0 + k_w \cdot x \quad (2.1.2.4)$$

2.2 Μοντέλα που βασίζονται στην απλοποιημένη εξίσωση της ορμής Ημιεμπειρικό πρότυπο ομόρρου GCL

Το μοντέλο GCL βασίζεται στην επίλυση απλοποιημένων εξισώσεων Navier- Stokes για αξονοσυμμετρική ροή και υπό τη θεώρηση λεπτού στρώματος διάτμησης. Ο χαρακτηρισμός του ως ημιεμπειρικό προκύπτει από το γεγονός ότι το μοντέλο αυτό έχει βαθμονομηθεί με χρήση πειραματικών δεδομένων. Σε αντίθεση με το πρότυπο του Abramovich δεν περιλαμβάνει την ύπαρξη δυναμικού πυρήνα και η γεωμετρία του ομόρρου δεν έχει σταθερή κλίση, παρ' όλα αυτά και αυτό υποθέτει κατανομή σταθερής ταχύτητας ανάντι της ανεμογεννήτριας (βλ. **Σχήμα 4**). Το πρότυπο ομόρρου GCL, όπως και τα πρότυπα Abramovich και Jensen που αναφέρονται στην παρούσα μελέτη, λαμβάνει υπόψη την ένταση της τύρβης, όπως αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (2.2.8).



Σχήμα 4: Σχηματική αναπαράσταση ομόρρου κατά το πρότυπο GCL (πηγή: On the Wind Turbine Wake Mathematical Modelling, S. Bruska).

$$x_0 = \frac{9,5 \cdot D_0}{\left(2 \frac{R_{9,5}}{D_0}\right)^3 - 1} \quad (2.2.1)$$

$$R_{9,5} = 0,5 [R_{nb} + \min(H_{hub}, R_{nb})] \quad (2.2.2)$$

$$R_{nb} = \max [1,08 \cdot D_0, 1,08 \cdot D_0 + 21,7 \cdot D_0 (I_a - 0,05)] \quad (2.2.3)$$

$$R(x) = 0,5 \cdot D_0 \cdot \left(1 + \frac{C_T \cdot x}{x_0}\right)^{1/3} \quad (2.2.4)$$

όπου H_{hub} είναι το ύψος της πλήμνης της ανεμογεννήτριας και I_a η ένταση τύρβης στην υπό μελέτη περιοχή.

Τέλος, ακολουθούν οι σχέσεις υπολογισμού της ταχύτητας της ροής στην κεντρική γραμμή $U_s(x)$, της ταχύτητας σε μία τυχαία θέση x και ακτίνα r κατάντι του δρομέα της ανεμογεννήτριας

$U(x, r)$ και της έντασης της τύρβης I_{wt} σε μία θέση x στον ομόρρου, όπως αυτές υπολογίζονται σύμφωνα με το πρότυπο GCL.

$$U_S(x) = U \cdot \frac{35}{72} \cdot \left(\frac{D_0}{R(x)}\right)^2 \cdot C_T \quad (2.2.5)$$

$$u(x, r) = U \cdot \left[1 - \frac{U_S(x)}{U} \cdot f(r/R(x))\right] \quad (2.2.6)$$

$$f(r/R(x)) = \left[1 - \left(\frac{r}{R(x)}\right)^{\frac{3}{2}}\right]^2 \quad (2.2.7)$$

$$I_{wt} = \sqrt{I_a^2 + I_w^2} \quad (2.2.8)$$

$$I_w(x) = 0,29 \cdot \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-1/3} \cdot \sqrt{1 - \sqrt{1 - C_T}} \quad (2.2.9)$$

2.3 Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης του ομόρρου και προτεινόμενο μοντέλο

Τα προηγούμενα μοντέλα Abramovich, Jensen και GCL κάνουν χρήση αναλυτικών σχέσεων και ανήκουν στην κατηγορία των απλουστευμένων (engineering) μοντέλων. Τα πιο προηγμένα μοντέλα βασίζονται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής. Οι αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού της ροής είναι μέθοδοι που προσομοιώνουν τον ομόρρου της Α/Γ σε όλη την έκταση ανάντι και κατάντι της ροής επιλύοντας τις πλήρεις εξισώσεις της ορμής του ρευστού. Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής :

- Κατασκευή υπολογιστικού χωρίου
- Επιβολή συνοριακών συνθηκών
- Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων και συνοριακών συνθηκών
- Επιλογή αριθμητικής μεθόδου για την επίλυση του συστήματος των διακριτοποιημένων εξισώσεων

Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της παραβολικής μορφής της εξίσωσης της ορμής, η οποία προκύπτει εάν αγνοήσουμε την κλίση πίεσης και θεωρήσουμε ότι οι τυρβώδεις τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις συνεκτικές. Ο παραβολικός χαρακτήρας της εξίσωσης ορμής εξοικονομεί σημαντικό υπολογιστικό κόστος, απαιτεί όμως την επιβολή μιας αρχικής κατανομής ταχύτητας, η οποία αντιστοιχεί στην αξονική θέση κατάντι του δρομέα και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία του δίσκου ορμής και των στοιχείων πτερύγωσης (Blade Element Momentum). Στο ακόλουθο εδάφιο θα διατυπωθούν οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος σε διαφορική μορφή. Στη συνέχεια αυτές οι εξισώσεις θα αδιαστατοποιηθούν με τα κατάλληλα μεγέθη, θα διακριτοποιηθούν και θα περιγραφεί ο αλγόριθμος της αριθμητικής τους επίλυσης.

2.3.1 Διατύπωση εξισώσεων όρμης και συνέχειας

Οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής σε κυλινδρικές συντεταγμένες είναι :

$$r \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot r)}{\partial r} = 0 \quad (2.3.1.1)$$

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial r} = \nu_t \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \quad (2.3.1.2)$$

Για την αδιαστατοποίηση των μηκών και των ταχυτήτων χρησιμοποιούνται η ακτίνα του δρομέα R και η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής U_∞ .

$$x^* = \frac{x}{R}, r^* = \frac{r}{R}, u^* = \frac{u}{U_\infty}, v^* = \frac{v}{U_\infty} \quad (2.3.1.3)$$

Χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις προκύπτουν οι ακόλουθες αδιαστατοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes

$$r \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot r)}{\partial r} = 0 \quad (2.3.1.4)$$

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{Re_t} \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \quad (2.3.1.5)$$

Όπου το «*» έχει παραλειφθεί από τα αδιάστατα μεγέθη. Παρατηρείται ότι οι αδιάστατες εξισώσεις έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τις διαστατές με μοναδική διαφορά την εμφάνιση του πηλίκου $1/Re_t$ αντί της τυρβώδους συνεκτικότητας ν_t , όπου $Re_t = U_\infty R / \nu_t$ ετέθη κατ'αντιστοιχία του χαρακτηριστικού αριθμού Reynolds σε στρωτή ροή ως προς την ακτίνα του δρομέα ($Re = U_\infty R / \nu$), U_∞ η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής και R η ακτίνα του δρομέα.

2.3.2 Συνοριακές συνθήκες του προβλήματος

Το υπολογιστικό χωρίο που διακριτοποιείται εκτείνεται κατά την οριζόντια κατεύθυνση 50 ακτίνες του δρομέα της A/Γ και κατά την ακτινική κατεύθυνση 10 ακτίνες. Το αρχικό προφίλ εισόδου, όπως υπολογίζεται από τη θεωρία του δίσκου ορμής τοποθετείται στην θέση (0,0) του υπολογιστικού χωρίου. Σε αυτό το σημείο θα διατυπωθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Αρχικά διευκρινίζεται ότι το υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιήθηκε είναι ορθογωνικής μορφής. Ο άξονας συμμετρίας του προβλήματος ορίζεται ως το κάτω όριο του χωρίου. Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος διατυπώνονται ως εξής:

➤ Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας:

- Δυτικό σύνορο (είσοδος) : (συνθήκη Dirichlet, καθορισμός προφίλ εισόδου από θεωρία δίσκου ορμής, $U = U_{in}$)
- Βόρειο σύνορο: $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ (συνθήκη Neuman)
- Νότιο σύνορο (άξονας συμμετρίας): $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ (συνθήκη συμμετρίας)

➤ Ακτινική συνιστώσα ταχύτητας

- Νότιο σύνορο: $v = 0$ (συνθήκη συμμετρίας)

Προς επίρρωση των παραπάνω αναφέρεται πως το ανατολικό σύνορο δεν διέπεται από κάποια συνοριακή συνθήκη καθώς το πρόβλημα είναι παραβολικό.

2.3.3 Μοντέλο τύρβης Ainslie

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της τύρβης είναι το μοντέλο Ainslie [15]. Το μοντέλο αυτό, είναι ένα απλό πρότυπο προσομοίωσης της τύρβης, με χαμηλό υπολογιστικό κόστος, όμως δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και μοντελοποιεί αποτελεσματικά τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι τελευταίες ότι παίζουν καθοριστικό ρόλο όχι μόνο για την τελική διαμόρφωση της ισχύος των Α/Γ και κατά συνέπεια του αιολικού πάρκου, αλλά και για την αλληλεπίδραση που έχουν μεταξύ τους οι μηχανές καθώς και στην καταπόνηση που δέχονται τα πτερύγια μιας Α/Γ. Η τυρβώδης συνεκτικότητα όπως μοντελοποιείται παρέχει αφενός την περιγραφή της τυρβώδους ανάμιξης εξ' αιτίας της τύρβης του οριακού στρώματος του ομόρρου, και αφετέρου μία ικανοποιητική αποτίμηση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής τύρβης στην ανάμιξη των ομόρρων. Η μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής τύρβης είναι συνάρτηση της τραχύτητας του εδάφους, του ύψους της μηχανής (καθώς όσο πλησιάζουμε προς το έδαφος τα επίπεδα τύρβης είναι υψηλότερα) και των συνθηκών της ατμοσφαιρικής ευστάθειας.

Σύμφωνα με το μοντέλο του Ainslie ο τελικός τύπος που περιγράφει την τυρβώδη συνεκτικότητα είναι:

$$v_t = F \cdot [k_l \cdot b \cdot (U_0 - U_c) + K_M] \quad (2.3.3.1)$$

Όπου F είναι σταθερά εξαρτώμενη από την απόσταση από τον δρομέα της Α/Γ και περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο. Διευκρινίζεται πως στην παρακάτω εξίσωση η απόσταση x είναι αδιαστατοποιημένη ως προς την διάμετρο της Α/Γ.

$$F = \begin{cases} 0.65 + \left[\frac{x-4.5}{23.32} \right]^{1/3} & x < 5.5 \\ 1 & x \geq 5.5 \end{cases} \quad (2.3.3.2)$$

Το μέγεθος k σχετίζεται με το στρώμα διάτμησης του ομόρρου και είναι ανεξάρτητο από την τύρβη περιβάλλοντος. Πειραματικές μελέτες που διεξήχθησαν σε αεροσήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή ώσης οδήγησαν στο συμπέρασμα πως η σταθερή τιμή 0.015 αναπαράγει ικανοποιητικά το έλλειμα ταχύτητας. Στην εξίσωση (2.3.3.1) το b είναι η ακτίνα του ομόρρου της Α/Γ το οποίο υπολογίζεται αριθμητικά για όλες τις αξονικές θέσεις κατάντι της ροής ενώ U_0 είναι η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής και U_c είναι η αξονική ταχύτητα της ροής στο κεντρικό άξονα του ομόρρου. Τέλος το K_M συνδέεται με την ατμοσφαιρική τύρβη και η μέθοδος εκτίμησής του περιγράφεται παρακάτω.

Ο συντελεστής K_M εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους, το επίπεδο τύρβης του περιβάλλοντος και τις συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Στο επιφανειακό οριακό στρώμα (μέχρι 100m) ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$K_M = \frac{k \cdot u_* \cdot z_{hub}}{\varphi_m \left(\frac{z}{l} \right)} \quad (2.3.3.3)$$

Όπου $\varphi_m \left(\frac{z}{l} \right)$ συνάρτηση εξαρτώμενη από τις συνθήκες ευστάθειας ως εξής:

- $\varphi_m \left(\frac{z}{l} \right) = 1$, ουδέτερες συνθήκες
- $\varphi_m \left(\frac{z}{l} \right) = 1 + \frac{5z}{L}$, $L > 0$ ευσταθείς συνθήκες
- $\varphi_m \left(\frac{z}{l} \right) = \left(1 - \frac{16z}{L} \right)^{-0.25}$, $L < 0$ ασταθείς συνθήκες

Στην εξίσωση (2.3.3.3) k είναι η σταθερά Von Karman και εδώ λαμβάνεται ίση με 0.4, u_* είναι η ταχύτητα τριβής, z_{hub} είναι το ύψος της πλήμνης της Α/Γ.

Εφαρμόζοντας τον λογαριθμικό κανόνα για να απαλειφθεί η u_* ο Ainslie υπολόγισε την ατμοσφαιρική τύρβη για ουδέτερες συνθήκες ($\varphi_m=1$), η οποία δίνεται από την σχέση :

$$K_M = \frac{h \cdot k^2 \cdot U_\infty}{\ln \left(\frac{h}{z_0} \right)} \quad (2.3.3.4)$$

Όπου z_0 είναι η τραχύτητα του εδάφους και εξαρτάται από την ένταση της τύρβης. Για ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες (neutral conditions) υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$z_0 = z_{hub} \cdot e^{\left(-\frac{0.9895}{Tl} \right)} \quad (2.3.3.5)$$

όπου Tl είναι η ένταση της τύρβης στο ύψος της πλήμνης z_{hub} .

Η κινητική ενέργεια της τύρβης συνέεται με την τυρβώδη συνεκτικότητα μέσω της σχέσης:

$$v_t = c_\mu \cdot L \cdot \sqrt{k} \Rightarrow k = \left(\frac{v_t}{c_\mu \cdot L} \right) \quad (2.3.3.6)$$

Όπου η σταθερά $c_\mu = 0.09$ και L είναι η κλίμακα της τύρβης που λαμβάνεται ίση με τη διάμετρο της μηχανής.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανισοτροπία της ατμοσφαιρικής τύρβης, καθώς και το γεγονός ότι η επιπλέον τύρβη που δημιουργείται στον ομόρρου της Α/Γ θεωρείται ισότροπη, προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την ένταση της τύρβης [13].

$$I = \frac{1}{U_\infty} \sqrt{0.82^2 k + 0.36 \sigma_x^2} \quad (2.3.3.7)$$

Όπου $\sigma_x = I_\infty U_\infty$ είναι η τυπική απόκλιση της ατμοσφαιρικής τύρβης κατά την κύρια κατεύθυνση της ροής, U_∞ η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής και I_∞ η ένταση της ατμοσφαιρικής τύρβης.

2.3.4 Διακριτοποίηση των εξισώσεων

Για την διακριτοποίηση των εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών σε συνδυασμό με κατάλληλο πλέγμα (grid). Οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής παρουσιάστηκαν προηγουμένως (σχέσεις (2.3.1.1), (2.3.1.2)), αλλά επαναλαμβάνονται για λόγους πληρότητας συνοδευόμενες από τις εκάστοτε πεπερασμένες διαφορές που χρησιμοποιούνται για την διακριτοποίηση τους.

$$r \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot r)}{\partial r} = 0 \quad (\text{εξίσωση συνέχειας})$$

$$\text{Για τον όρο } \frac{\partial(v \cdot r)}{\partial r} \text{ γίνεται χρήση εμπρός διαφοράς : } \frac{\partial(v \cdot r)}{\partial r} = \frac{v_{i+1,j+1} \cdot r_j - v_{i+1,j} \cdot r_j}{\Delta r}$$

$$\text{Για τον όρο } r \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \text{ γίνεται χρήση της διαφοράς : } \frac{1}{2} \left[r_j \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + r_{j+1} \frac{u_{i+1,j+1} - u_{i,j+1}}{\Delta x} \right]$$

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{Re_t} \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \quad (\text{εξίσωση ορμής})$$

$$\text{Για τον όρο } \frac{\partial u}{\partial x} \text{ γίνεται χρήση εμπρός διαφοράς : } \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x}$$

$$\text{Για τον όρο } \frac{\partial u}{\partial r} \text{ γίνεται χρήση κεντρικής διαφοράς : } \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{u_{i+1,j+1} - u_{i,j-1}}{2 \cdot \Delta r}$$

$$\text{Για τον όρο } \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \text{ γίνεται χρήση κεντρικής διαφοράς : } \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \frac{u_{i+1,j+1} - 2 \cdot u_{i+1,j} + u_{i+1,j-1}}{\Delta r^2}$$

Τελικά η εξίσωση της ορμής παίρνει την εξής μορφή:

$$C_N \cdot u_{i+1,j+1} + C_P \cdot u_{i+1,j} + C_S u_{i+1,j-1} = S_u$$

Όπου οι συντελεστές C_N, C_P, C_S, S είναι ίσοι με :

- $C_N = \frac{v_{i,j}}{2 \cdot \Delta r} - \frac{1}{Re} \left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r \cdot r_j} + \frac{1}{\Delta r^2} \right)$
- $C_P = \frac{u_{i,j}}{\Delta x} + \frac{2}{Re} \cdot \frac{1}{\Delta r^2}$
- $C_S = - \left(\frac{v_{i,j}}{2 \cdot \Delta r} \right) + \frac{1}{Re} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta r \cdot r_j} - \frac{1}{\Delta r^2}$
- $S_u = \frac{u_{i,j}^2}{\Delta x}$

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος σε διακριτοποιημένη μορφή είναι :

➤ Νότιο σύνορο (συνθήκη συμμετρίας)

Στον άξονα συμμετρίας ισχύει η συνθήκη $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$, η οποία πρέπει να επιβληθεί ακριβώς στο $j = 1$, για να συμβεί αυτό εφαρμόζεται η οριακή μορφή της εξίσωσης της ορμής

$$\lim_{r \rightarrow 0} (u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{Re} \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \text{ από όπου προκύπτει } u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{2}{Re} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2}$$

την οποία διακριτοποιούμε με κεντρικές διαφορές και τη γράφουμε στη γενική μορφή:

$$C_N \cdot u_{i+1,j+1} + C_P \cdot u_{i+1,j} + C_S u_{i+1,j-1} = S_u. \text{ Τελικά προκύπτει για } j = 1$$

- $C_N(j = 1) = - \frac{4}{Re \cdot \Delta r^2}$
- $C_P(j = 1) = \frac{u_{i,1}}{\Delta x} + \frac{4}{Re} \cdot \frac{1}{\Delta r^2}$
- $S_u(j = 1) = \frac{u_{i,1}^2}{\Delta x}$

➤ Βόρειο σύνορο ($U=U_\infty$)

Στο άνω όριο ισχύει η συνθήκη $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$, από την οποία προκύπτει $u_{NJ} = u_{NJ-1}$. Για να συμβαίνει αυτό θα πρέπει:

- $C_P(j = NJ) = 1$
- $C_S(j = NJ) = -1$
- $S_u(j = NJ) = 0$

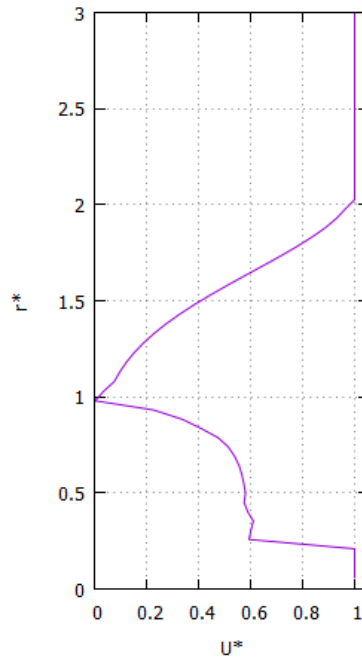
Κεφάλαιο 3

Περιγραφή υπολογιστικού εργαλείου για την εκτίμηση της ισχύος αιολικού πάρκου

3.1 Εφαρμογή προτεινόμενου μοντέλου στην Α/Γ Sexbierum

Το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόστηκε για πειραματικό αιολικό πάρκο που βρίσκεται στην περιοχή Sexbierum στην Ολλανδία. Το αιολικό πάρκο αποτελείται από 18 3-πτερες Α/Γ ονομαστικής ισχύος 310kW, διαμέτρου 30.1m και ύψους πλήμνης 35m.

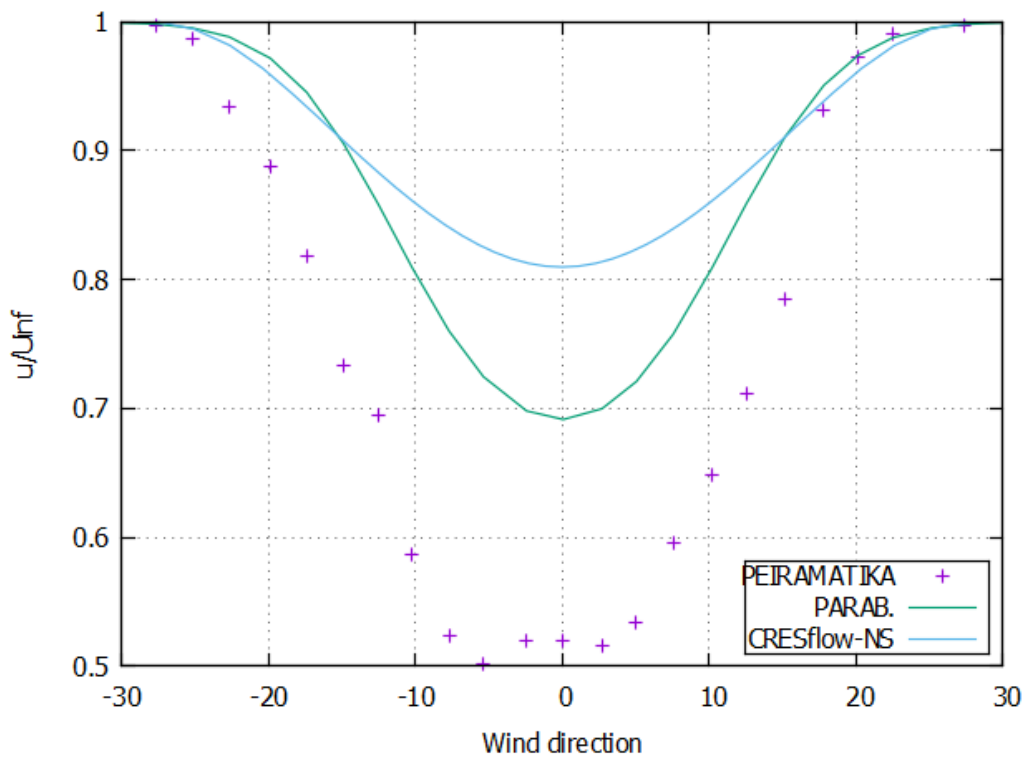
Το μοντέλο απαιτεί την επιβολή μιας αρχικής κατανομής ταχύτητας, η οποία αντιστοιχεί στην αξονική θέση $x=0$, αμέσως μετά το δρομέα. Ο υπολογισμός της κατανομής έγινε χρησιμοποιώντας την θεωρία του δίσκου ορμής και των στοιχείων πτερύγωσης (Blade Element Momentum). Αναλυτικότερα έγινε χρήση του προγράμματος *aero.f* το οποίο υπολογίζει για δεδομένη ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής και δεδομένη μηχανή το προφίλ της ταχύτητας κατάντι της Α/Γ. Τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος είναι: η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής $U_{\infty} = 8.5m/s$, η πυκνότητα του αέρα $\rho = 1.225kg/m^3$, ο αριθμός των πτερυγίων της Α/Γ $N_{BLADES} = 3$ και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής $\omega = 4.0957rad/s$. Επιπλέον απαιτείται η κατανομή της χορδής και της συστροφής του πτερυγίου, αλλά και οι πολικές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης ($C_L(\alpha), C_D(\alpha)$) για τις διάφορες τομές του πτερυγίου καθ'όλο το μήκος του. Έπειτα το πρόγραμμα υπολογίζει τον συντελεστή επαγωγής a (για κάθε διακριτοποιημένη ακτινική θέση στο δρομέα) με την βοήθεια του οποίου δύναται να υπολογιστεί το ζητούμενο προφίλ. Ο υπολογισμός του συντελεστή επαγωγής παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του προφίλ ταχύτητας V_s ακριβώς στη θέση του δρομέα και του προφίλ της ταχύτητας V κατάντι του δρομέα (**σχήμα 1**). Το πρώτο προφίλ υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής U_{∞} με τον παράγοντα (1-a) ενώ το δεύτερο με τον παράγοντα (1-2a). Το προφίλ της ταχύτητας V_s χρησιμοποιείται ως αρχική συνθήκη στη θέση $x = 0$, όπως ισχύει και για το μοντέλο του Jensen. Το προφίλ εισόδου εκτείνεται από $r = 0$ έως $r = R$, ωστόσο απαιτείται η προέκταση του έως το άνω όριο του υπολογιστικού χωρίου, η οποία έγινε για $R < r < 2R$ με τη βοήθεια μιας κατανομής Gauss με τύπο $u(j) = 1 - \frac{0.301}{s\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{1-r(j)}{s}\right)^2}$ όπου $s=0.12$. Για $r > 2R$ ισχύει $u=U_{\infty}$. Στο **Σχήμα 5** παρουσιάζεται το αδιάστατο προφίλ της ταχύτητας όπως προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία.



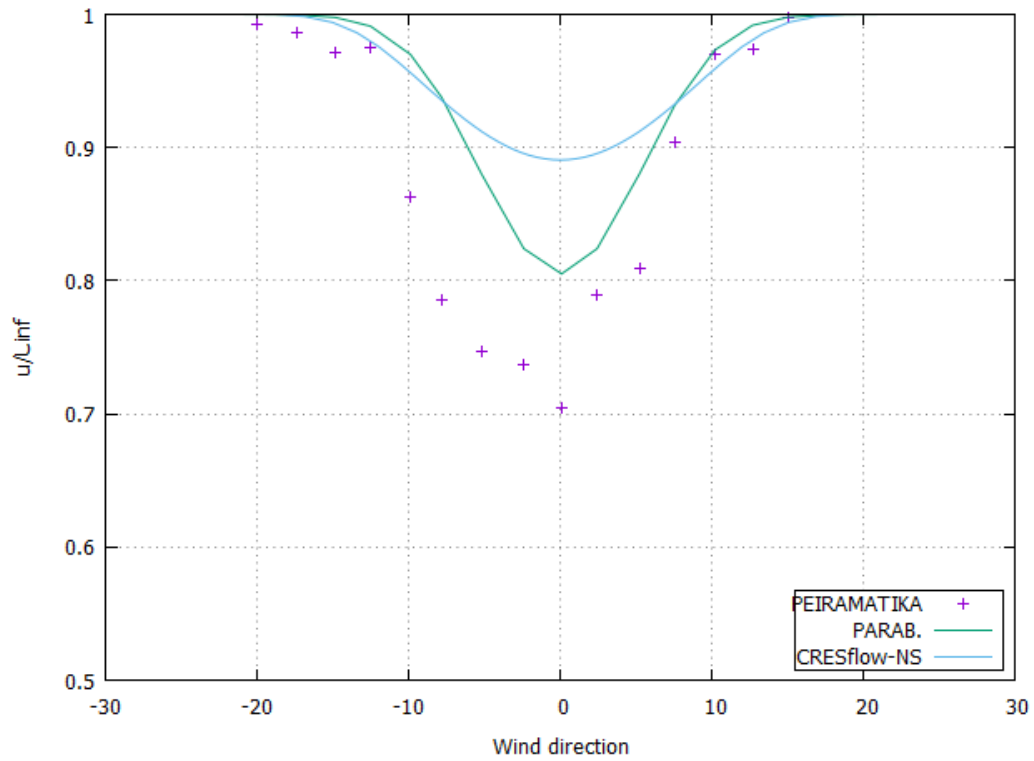
Σχήμα 5: Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας εισόδου.

Στο προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης του ομόρρου τα δεδομένα εισόδου είναι: το προφίλ της ταχύτητας εισόδου, η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής U_∞ , η ακτίνα του δρομέα $R = 15.05m$, το ύψος της πλήμνης της Α/Γ $z_{hub} = 35m$, η ένταση της τύρβης $TI = 0.1$, ο αριθμός των σημείων του πλέγματος και το συνολικό μήκος του πλέγματος (αδιαστατοποιημένο ως προς την ακτίνα του δρομέα) κατα την αξονική και κατα την ακτινική κατεύθυνση αντίστοιχα $N_i = 501, N_j = 501, x_{tot} = 50, y_{tot} = 10$. Τα αρχεία εξόδου του μοντέλου είναι η συνισταμένη ταχύτητα του ρευστού $u_m = \sqrt{u^2 + v^2}$ σε κάθε διακριτοποιημένο σημείο του πλέγματος και η ακτίνα του ομόρρου δ . Έπειτα έγινε σύγκριση με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, τα οποία δίνουν τον λόγο $\frac{u}{U_\infty}$ σε τρεις διαφορετικές αποστάσεις $d = 5R, 11R, 16R$ κατάντι της Α/Γ για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου. Από υπολογιστική άποψη είναι ισοδύναμο να γίνει μόνο μια προσομοίωση για την κατεύθυνση των 180° (αντιστοιχεί σε 0° στο σχήμα) και να ληφθούν τα αποτελέσματα σε διαφορετικά σημεία (x,y) , επάνω σε τόξο κύκλου με ακτίνα d . Η σχέση που συνδέει τις συντεταγμένες του σημείου υπολογισμού με την κατεύθυνση του ανέμου φ είναι $x = \cos \varphi \cdot d, y = \sin \varphi \cdot d$. Στα **σχήματα (6,7,8)** απεικονίζονται οι συγκρίσεις με τα πειραματικά δεδομένα και με τις προλέξεις του κώδικα CRESflow-NS, που επιλύει τις πλήρεις εξισώσεις Navier-Stokes με μοντέλο τύρβης 2 εξισώσεων k- ω , για τις αποστάσεις και αντίστοιχα. Στο **σχήμα 6** παρατηρείται ότι και οι δύο κώδικες υποεκτιμούν σημαντικά το έλλειμμα της ταχύτητας στον κοντινό ομόρρου, υποδεικνύοντας την αδυναμία των γραμμικών μοντέλων

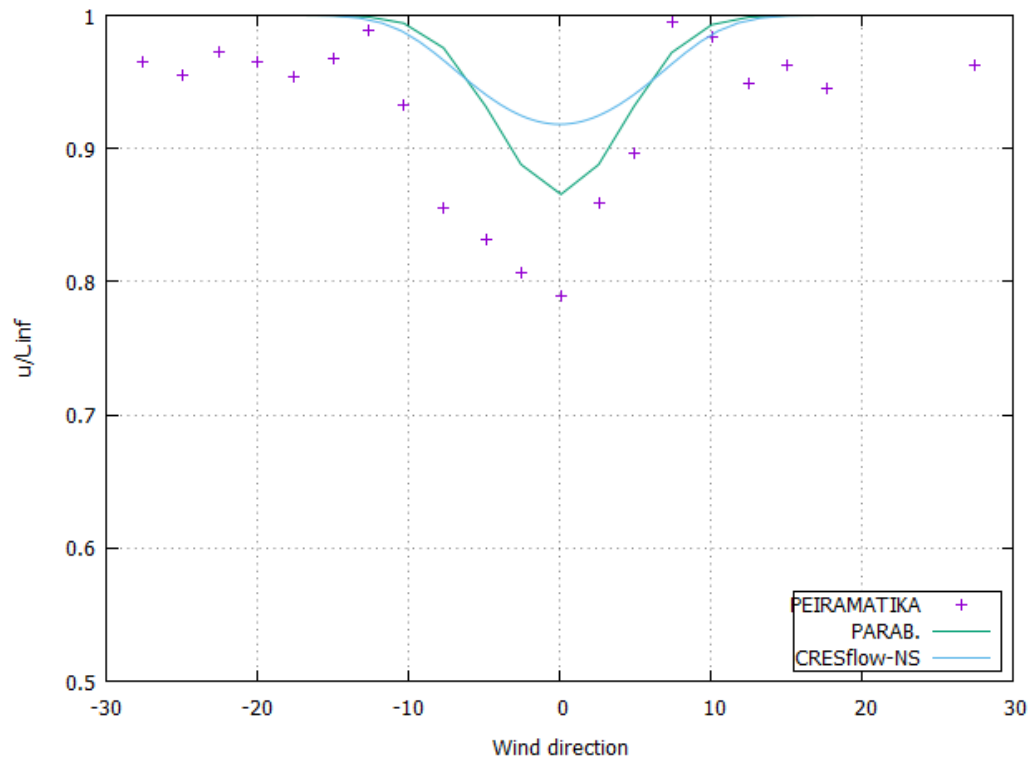
τύρβης σε αυτή την περιοχή. Η ακριβέστερη πρόλεξη του προτεινόμενου παραβολικού κώδικα (PARAB) σε αυτή την απόσταση οφείλεται στο γεγονός ότι το αρχικό προφίλ ταχύτητας λαμβάνεται από τη θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης που χρησιμοποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρομέα, ενώ ο κώδικας CRESflow-NS εφαρμόζει τη θεωρία του δίσκου ορμής με σταθερό συντελεστή ώσης C_T . Ο ρυθμός αποκατάστασης του ελλείματος της ταχύτητας στο μακρινό ομόρρου προλέγεται ικανοποιητικά από όλα τα μοντέλα ομόρρου, όπως φαίνεται στο **σχήμα 10**, το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή της αδιάστατης ταχύτητας στον κεντρικό άξονα που περνά από το κέντρο του δρομέα. Επιπρόσθετα, στο **σχήμα 9** συγκρίνεται η μεταβολή της ακτίνας του ομόρρου για τα διαφορετικά μοντέλα. Η μορφή του ομόρρου που προλέγει το προτεινόμενο μοντέλο PARAB είναι πολύ κοντά σε αυτή του GCL που χρησιμοποιεί εκθετική σχέση, ενώ διαφέρει σημαντικά από τη γραμμική μορφή των κινηματικών μοντέλων των Abramovich και Jensen.



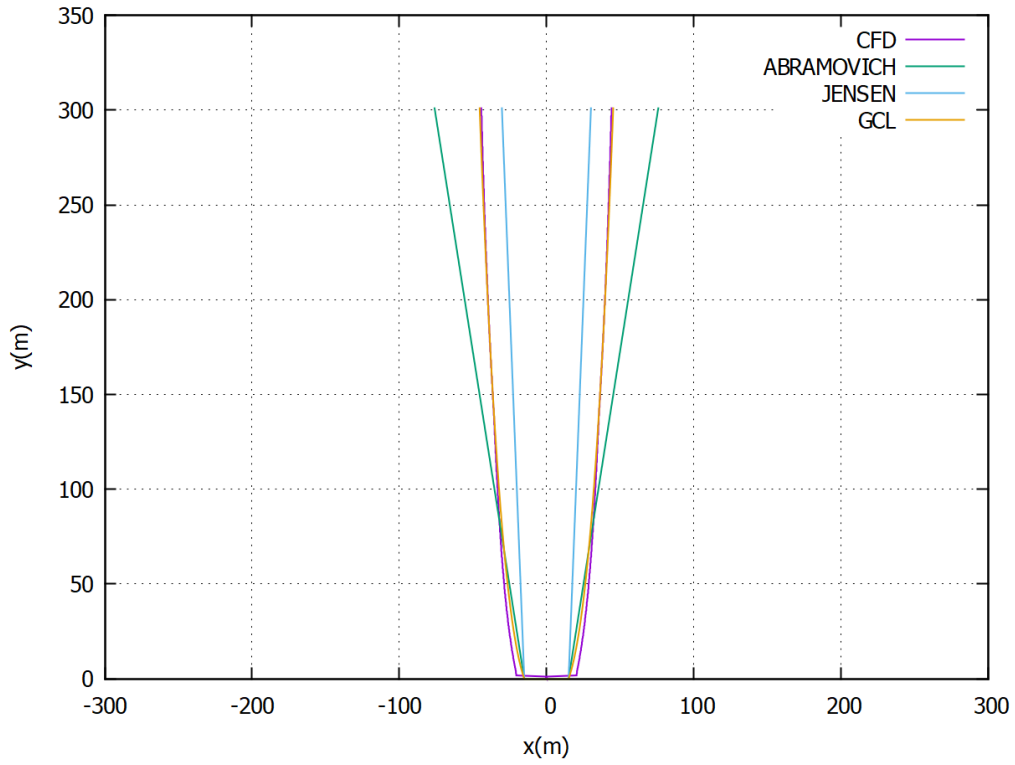
Σχήμα 6: Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειραματικά σε απόσταση 2.5 διαμέτρων κατάντι του δρομέα της Α/Γ.



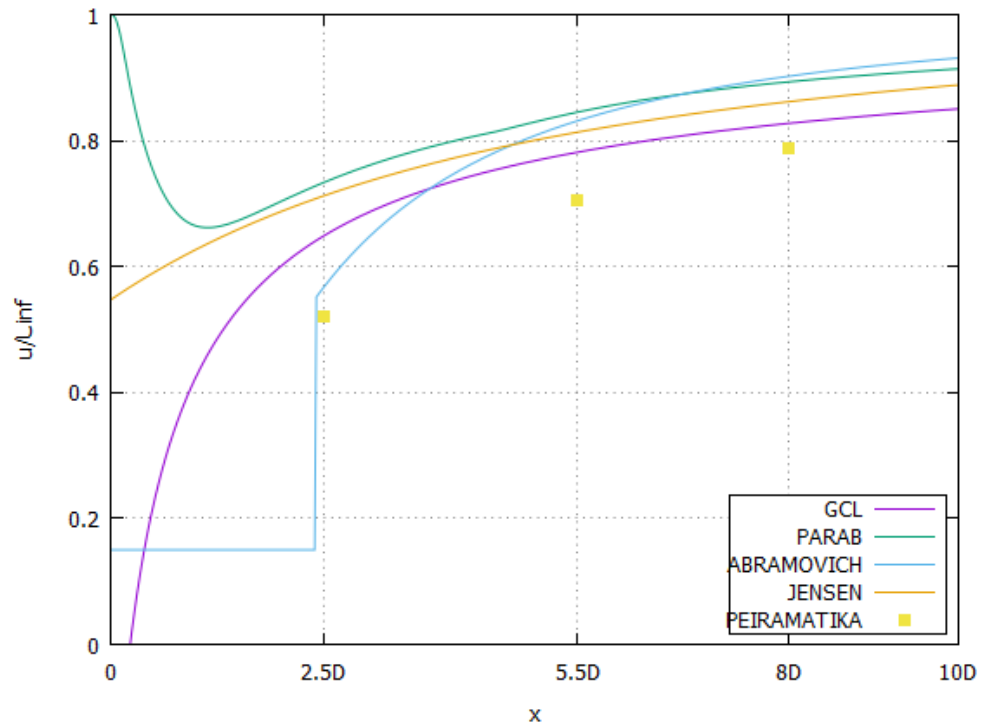
Σχήμα 7: Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειραματικά σε απόσταση 5.5 διαμέτρων κατόντι του δρομέα της Α/Γ.



Σχήμα 8: Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειραματικά σε απόσταση 8 διαμέτρων κατόντι του δρομέα της Α/Γ.



Σχήμα 9: Η ακτίνα δ του ομόρρου για όλα τα μοντέλα.



Σχήμα 10: Η ταχύτητα της ροής στην κεντρική γραμμή για όλα τα μοντέλα

3.2 Ενσωμάτωση σχέσεων απλουστευμένων μοντέλων για τον υπολογισμό της ακτίνας του ομόρρου και του ελλείματος ταχύτητας και προλέξεων προτεινόμενου μοντέλου.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα υπολογιστικό εργαλείο, στο οποίο ενσωματώνονται όλα τα μοντέλα που προαναφέρθηκαν. Το εργαλείο αυτό λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου τα παρακάτω αρχεία:

- « task.dat»: περιέχει τις συντεταγμένες των ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο
- « dfile.inp»: αποτελείται από γενικά δεδομένα αναφορικά με τις ανεμογεννήτριες, όπως οι ταχύτητες έναρξης (V_{cutin}) και αποκοπής λειτουργίας (V_{cutout}), ο αριθμός των ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο, η ονομαστική ισχύς, η ταχύτητα περιστροφής και η ακτίνα τους καθώς και μία μεταβλητή που ορίζει το πρότυπο ομόρρου που θα χρησιμοποιηθεί
- « wind rose.inp»: περιέχει το ρόδο ανέμου το οποίο βρέθηκε από το διαδίκτυο για την περιοχή Sexbierum της Ολλανδίας.

Και παράγει ως έξοδο τα εξής αρχεία δεδομένων,

- « results.dat»: περιέχει την ετήσια παραγωγή (σχέση 3.2.1) και απώλειες ενέργειας (σχέση 3.2.2), τον βαθμό απόδοσης (σχέση 3.2.3) και τον συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας του αιολικού πάρκου
- « uref.dat» και « tref.dat»: αποτελούνται από τις ταχύτητες αναφοράς και την τύρβη αναφοράς της κάθε μίας ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο συναρτήσει της ταχύτητας της αδιατάρακτης ροής και της κατεύθυνσης του ανέμου
- « omorrous.dat»: περιέχει τη γεωμετρία του ομόρρου της κάθε ανεμογεννήτριας συναρτήσει της κατεύθυνσης του ανέμου. Σημειώνεται ότι στο πρότυπο GCL καθώς και στο προτεινόμενο μοντέλο η κατανομή της ακτίνας του ομόρρου $R(x)$ συναρτήσει της απόστασης x κατάντι του δρομέα εξαρτάται από τον συντελεστή ώσης CT , ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου ανάντι της ανεμογεννήτριας. Επομένως, στα διαγράμματα στα οποία αναπαριστάται η μορφή του ομόρρου σύμφωνα με οποιοδήποτε πρότυπο, εάν δεν αναφέρεται συγκεκριμένα, η απεικόνιση γίνεται ενδεικτικά για ταχύτητα αδιατάρακτης ροής ίση με $U = 8,5 \text{ m/s}$.

Αρχικά γίνεται ανάγνωση των αρχείων εισόδου τα οποία περιγράφηκαν παραπάνω. Όσον αφορά στο προτεινόμενο μοντέλο διαβάζονται κάποια επιπρόσθετα αρχεία εισόδου, τα οποία είναι η ακτίνα του ομόρρου για κάθε αξονική θέση και η συνισταμένη ταχύτητα του ρευστού για κάθε διακριτοποιημένο σημείο για όλες τις ταχύτητες λειτουργίας της αδιατάρακτης ροής. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη καθώς η ακτίνα του ομόρρου εξαρτάται από τον συντελεστή ώσης, οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου ανάντι της Α/Γ. Έπειτα,

ορίζονται οι ταχύτητες και οι κατευθύνσεις του ανέμου της αδιατάρακτης ροής για τις οποίες γίνεται η προσομοίωση. Οι τιμές της ταχύτητας μεταβάλλονται από V_{cutin} έως V_{cutout} με βήμα $1m/s$, ενώ οι κατευθύνσεις του ανέμου από 0 έως 360° με σταθερό βήμα 22.5° . Για κάθε ταχύτητα και κάθε κατεύθυνση ανέμου γίνεται κατάταξη και αρίθμηση των Α/Γ με αυξανόμενη απόσταση, ώστε να είναι γνωστό ποιες Α/Γ επηρεάζονται από τον ομόρρου των ανάντι μηχανών. Ακολουθώντας ανάλογα με το μοντέλο που έχει επιλεγεί υπολογίζονται η ακτίνα του ομόρρου, η ταχύτητα που βλέπει κάθε δρομέας και η ένταση της τύρβης για όλες της ταχύτητες της αδιατάρακτης ροής αντιστοίχως. Επειδή όλα τα μοντέλα ομόρρου αναφέρονται σε μεμονωμένη μηχανή, άρα σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων, ορίζονται οι σχέσεις μετασχηματισμού από το τοπικό στο γενικό σύστημα συντεταγμένων του αιολικού πάρκου. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, οι υπολογισμοί δε γίνονται μόνο για το κέντρο του δρομέα, αλλά για 5 σημεία κατά μήκος της διαμέτρου και λαμβάνεται η μέση τιμή. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι κάποιο τμήμα του δρομέα μπορεί να επηρεάζεται από τον ομόρρου μιας μηχανής, ενώ κάποιο άλλο όχι. Για το μοντέλο του Abramovich γίνεται χρήση των αναλυτικών σχέσεων όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο (2.1.1), για το μοντέλο του Jensen στην παράγραφο (2.1.2) και το μοντέλο GCL στην παράγραφο (2.2). Όσον αφορά στο προτεινόμενο μοντέλο αναφέρεται πως ο κώδικας είναι σε αδιάστατη μορφή ενώ το υπολογιστικό εργαλείο σε διαστατή συνεπώς η ενσωμάτωση του προϋποθέτει τη διαστατοποίησή του. Επιπρόσθετα τα σημεία που ορίζει το προτεινόμενο μοντέλο στο υπολογιστικό χωρίο διαφέρουν από εκείνα του υπολογιστικού εργαλείου, επομένως έγινε γραμμική παρεμβολή έτσι ώστε να υπολογισθούν οι ταχύτητες στον ομόρρου.

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό πάρκο και οι ετήσιες απώλειες ενέργειας λόγω επιδράσεων ομόρρου υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$E = 8.760 \cdot \int_0^{2\pi} d\theta_w \int_0^\infty dU_w \cdot p_u(U_w, \theta_w) \cdot \sum_{i=1}^N P(U_i) \quad (3.2.1)$$

$$E_L = 8.760 \cdot \int_0^{2\pi} d\theta_w \int_0^\infty dU_w \cdot p_u(U_w, \theta_w) \cdot \sum_{i=1}^N [P(U_w) - P(U_i)] \quad (3.2.2)$$

όπου θ_w αποτελεί τη γωνία η οποία αντιστοιχεί στην κατεύθυνση του ανέμου, U_w είναι η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής, U_i είναι η ταχύτητα αναφοράς της i ανεμογεννήτριας από τις N του αιολικού πάρκου, η οποία αντιστοιχεί στην U_w , $P(U_i)$ είναι η παραγόμενη ισχύς από την i ανεμογεννήτρια, $P(U_w)$ είναι η ισχύς που θα παρήγαγε η i ανεμογεννήτρια αν είχε ταχύτητα U_w ανάντι και $p_u(U_w, \theta_w)$ είναι η πυκνότητα πιθανότητας από το ρόδο ανέμου για ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου U_w και θ_w αντίστοιχα.

Ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου εκφράζει τις απώλειες ενέργειας λόγω αλληλεπιδράσεων ομόρρου και υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.3), για συγκεκριμένη ταχύτητα και κατεύθυνση της αδιατάρακτης ροής. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ταχύτητες και κατευθύνσεις ανέμου προκύπτει από τη σχέση (3.2.4).

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N P(U_i)}{N \cdot P(U_w)} \quad (3.2.3)$$

$$\eta = \int_0^{2\pi} d\theta_w \int_0^{\infty} dU_w \cdot p_u(U_w, \theta_w) \cdot \frac{\sum_{i=1}^N P(U_i)}{N \cdot P(U_w)} \quad (3.2.4)$$

Στην παρούσα ανάλυση το υπολογιστικό εργαλείο εφαρμόστηκε για μια βέλτιστη χωροθέτηση κατά το μοντέλο GCL, το οποίο έχει προκύψει από διαδικασία βελτιστοποίησης και προσομοιώθηκαν όλα τα μοντέλα για τρεις περιπτώσεις διαφορετικού αριθμού Α/Γ (πέντε,δέκα,δεκατρείς).

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή σε διατάξεις αιολικών πάρκων

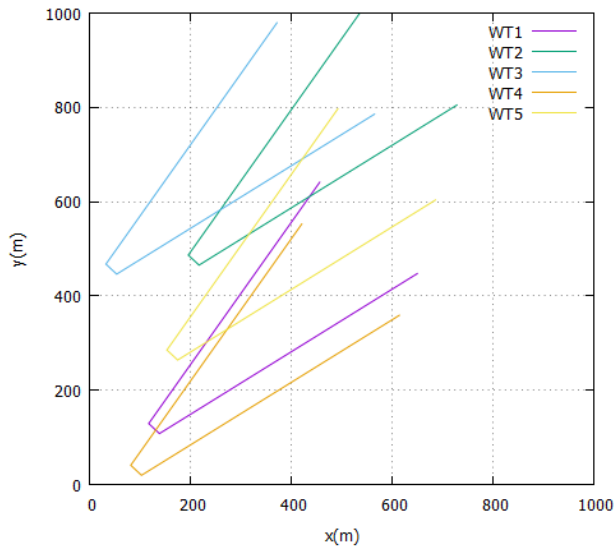
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου για χωροθετήσεις 5,10 και 13 Α/Γ, οι οποίες προέκυψαν από διαδικασία βελτιστοποίησης με το μοντέλο GCL. Για κάθε περίπτωση παρατίθενται οι συντεταγμένες των Α/Γ, η απεικόνιση του ομόρρου, η ένταση της τύρβης κάθε Α/Γ για όλες τις ταχύτητες λειτουργίας, ενώ σε πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με την ενεργειακή παραγωγή και απόδοση του αιολικού πάρκου. Η απεικόνιση του ομόρρου σε κάθε περίπτωση μελέτης παρουσιάζεται για νοτιοδυτική και δυτική-νοτιοδυτική κατεύθυνση του ανέμου (οι δύο συχνότερα εμφανιζόμενες κατευθύνσεις όπως προέκυψε από το ρόδο του ανέμου). Τέλος στο **σχήμα 59** φαίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης του αιολικού πάρκου συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος κατά περίπτωση.

4.1 Περίπτωση πέντε Α/Γ

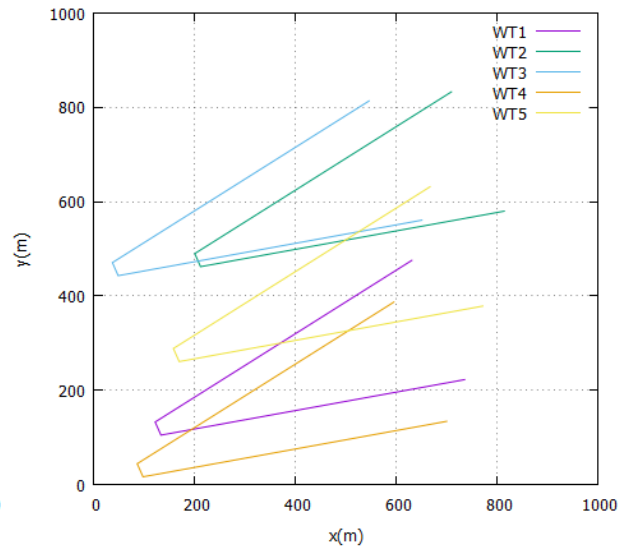
Αριθμός ανεμογεννήτριας	x [m]	y [m]
1	127.1	118.6
2	205.7	476.0
3	42.2	456.8
4	91.5	30.1
5	163.3	274.6

Πίνακας 1: Χωροθέτηση πέντε ανεμογεννητριών κατά το πρότυπο GCL.

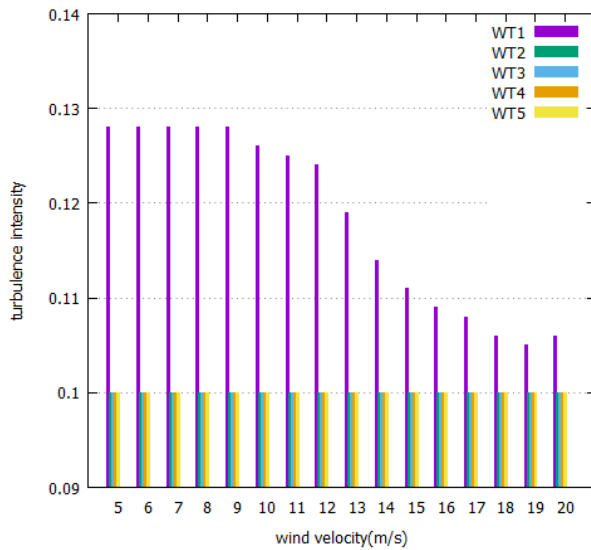
- Μοντέλο Abramovich



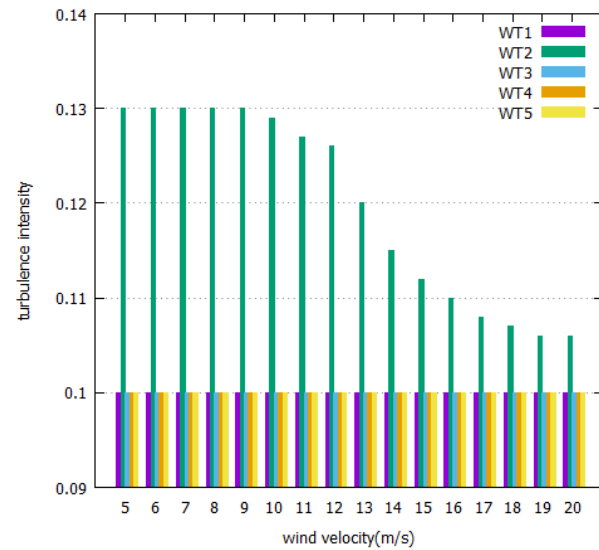
Σχήμα 11: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Abramovich για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 12: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Abramovich για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

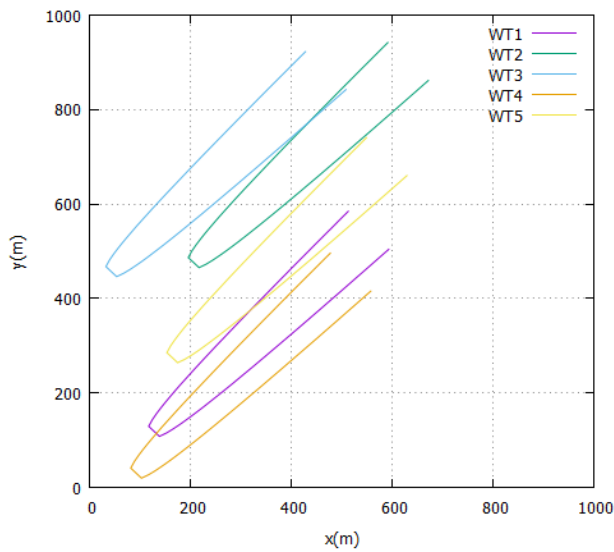


Σχήμα 13: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

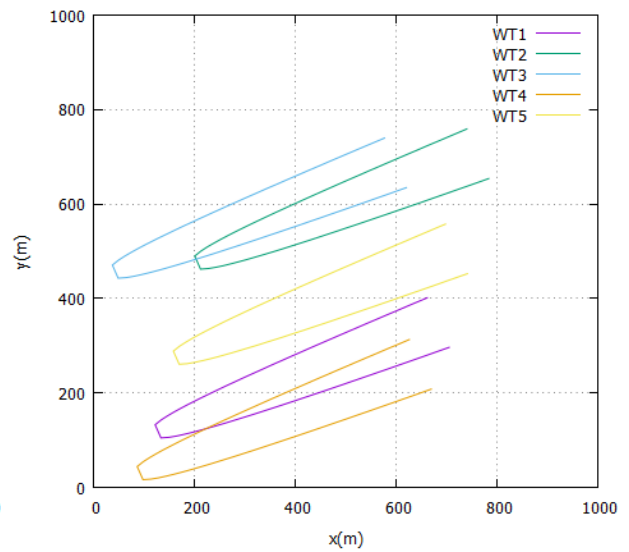


Σχήμα 14: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

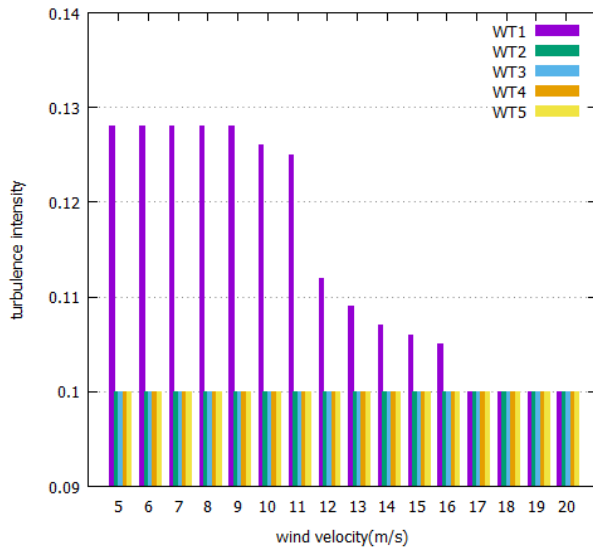
- Μοντέλο GCL



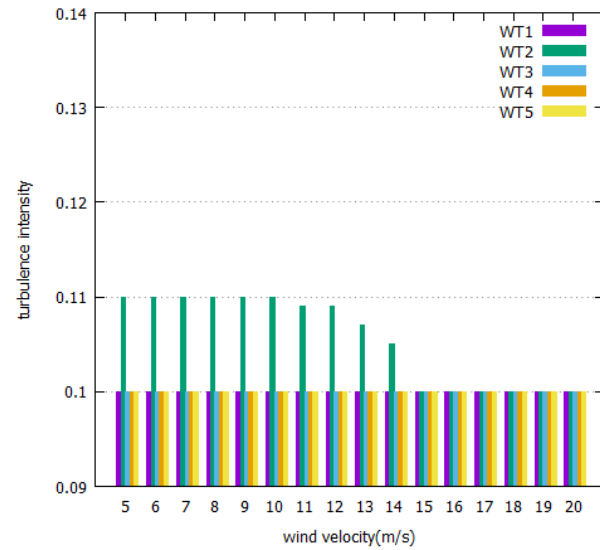
Σχήμα 15: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο GCL για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 16: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο GCL για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

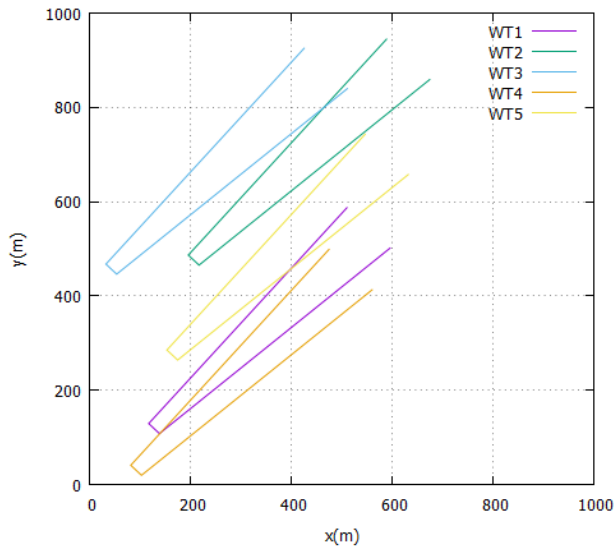


Σχήμα 17: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

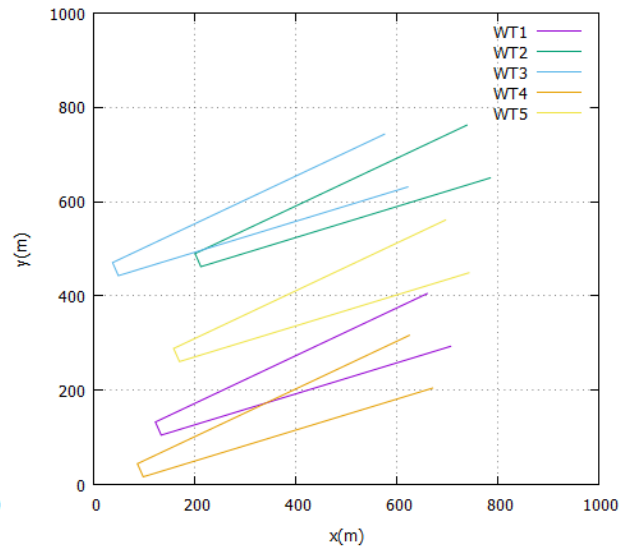


Σχήμα 18: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

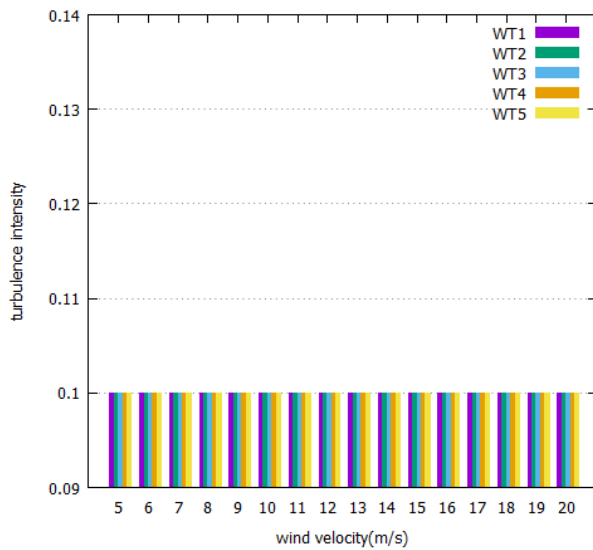
- Μοντέλο Jensen



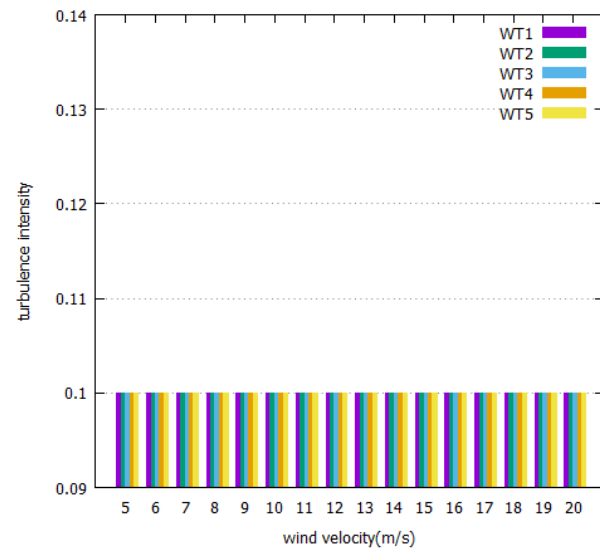
Σχήμα 19: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Jensen για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 20: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Jensen για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

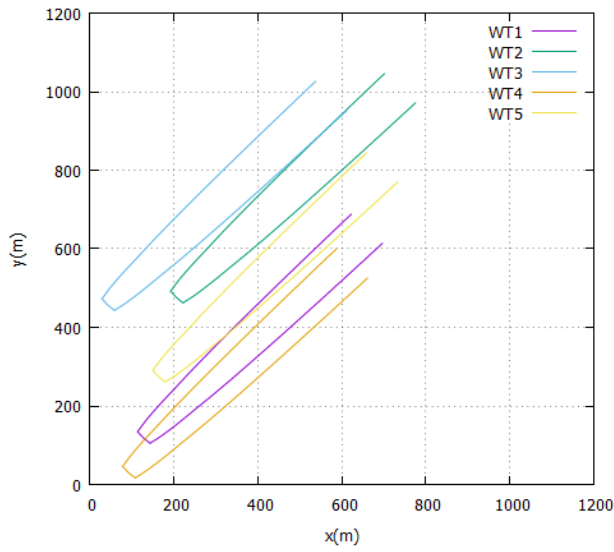


Σχήμα 21: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

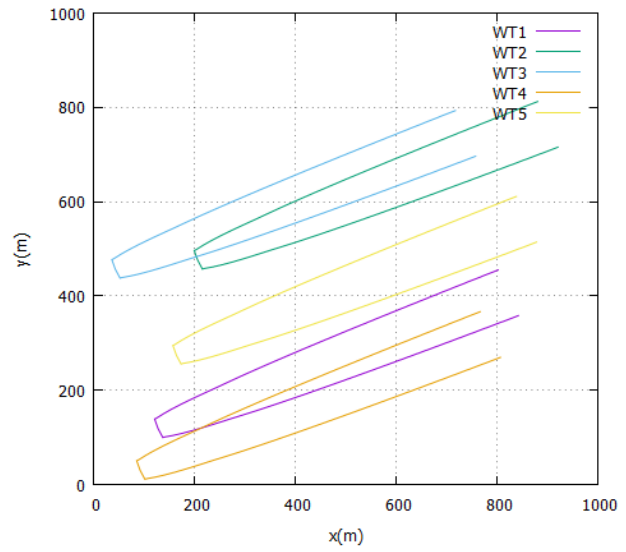


Σχήμα 22: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

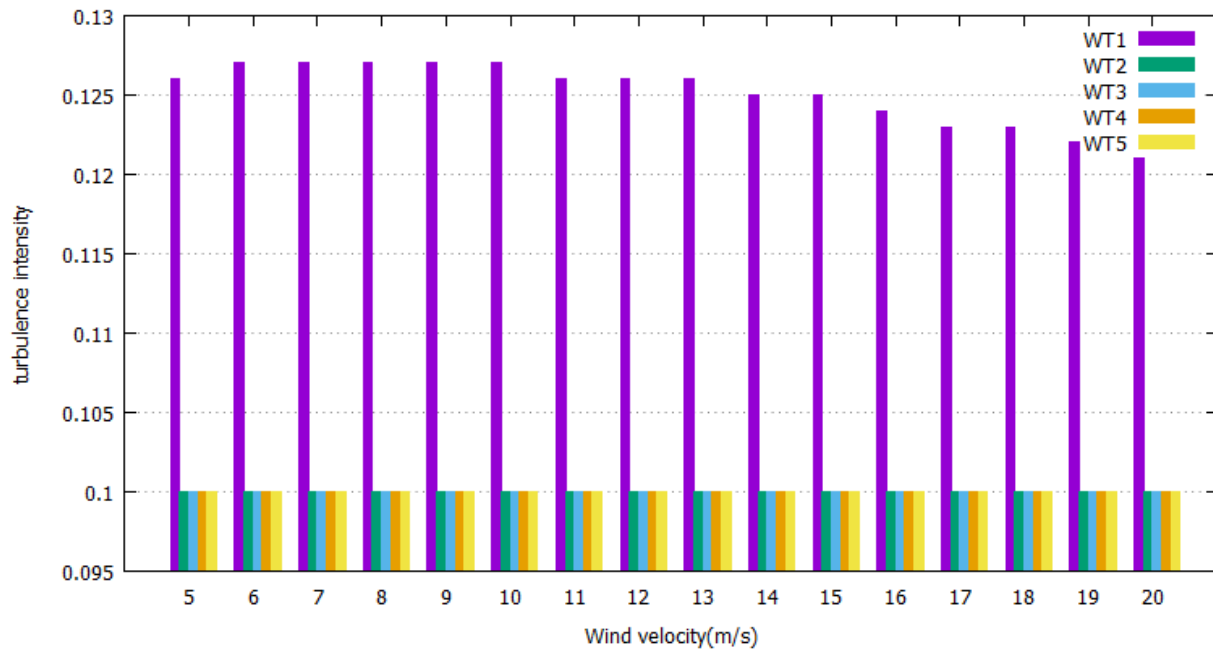
- Μοντέλο PARAB



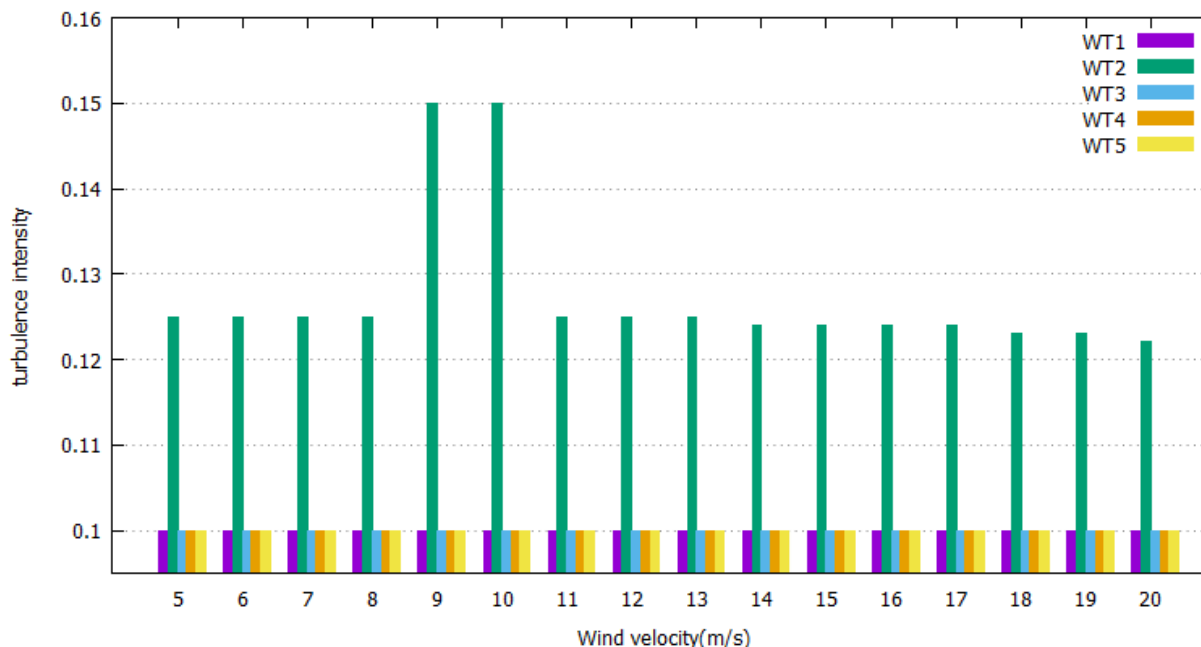
Σχήμα 23: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο PARAB για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 24: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο PARAB για κατεύθυνση ανέμου 247.5°



Σχήμα 25: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)



Σχήμα 26: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

Μοντέλο	Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια [kWh]	Ετήσιες Απώλειες Ενέργειας [kWh]	Capacity factor	Βαθμός Απόδοσης
Abramovich	4,331,674.53	124,855.99	30.9%	97.2%
GCL	4,355,148.32	101,382.20	31.1%	97.7%
Jensen	4,338,518.93	118,011.59	31%	97.4%
PARAB.	4,345,487.29	111,043.22	31%	97.5%

Πίνακας 2: Παρουσίαση ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, ετήσιων απωλειών ενέργειας, CF και βαθμού απόδοσης για όλα τα μοντέλα για χωροθέτηση 5Α/Γ κατά το μοντέλο GCL.

Ακόμα και στην περίπτωση μικρού πλήθους Α/Γ (5), παρατηρούμε διαφορές ως προς την αλληλεπίδραση, κάτι που έχει αντίκτυπο κυρίως στα επίπεδα τύρβης. Για την κατεύθυνση των 225° τα μοντέλα Abramovich και GCL προλέγουν αύξηση του επιπέδου τύρβης για την Α/Γ 1 (≈13%), καθώς αυτή επηρεάζεται από τον ομόρρου της Α/Γ 4. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για το μοντέλο του Jensen, το οποίο δεν προλέγει αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανών, καθώς η κλίση του ομόρρου είναι μικρότερη. Αντίστοιχα, στην κατεύθυνση των 247.5° η Α/Γ 2 εμφανίζει αυξημένο επίπεδο τύρβης (13% για το Abramovich, 11% για το GCL), καθώς αυτή επηρεάζεται από τον ομόρρου της Α/Γ 3. Το μοντέλο PARAB προλέγει με μεγαλύτερη ακρίβεια το επίπεδο τύρβης, καθώς το μοντέλο του Ainslie έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της τυρβώδους συνεκτικότητας και μέσω αυτής της κινητικής ενέργεια της τύρβης. Η ανάπτυξη του ομόρρου

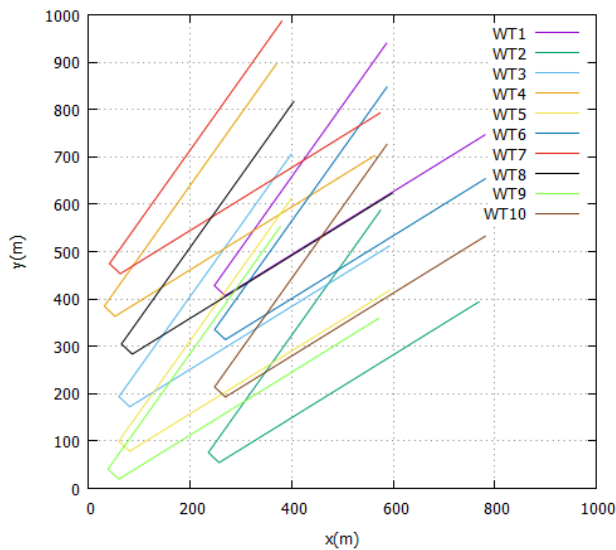
είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου GCL, καθώς και τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούν μια απλοποιημένη έκφραση της εξίσωσης της ορμής. Η αύξηση του επιπέδου τύρβης στις Α/Γ 1 και 2 για τις κατευθύνσεις 225° και 247.5° αντίστοιχα, είναι παρόμοια με αυτή που προλέγεται από τα μοντέλα Abramovich και GCL, με εξαίρεση τις ταχύτητες των 9 και 10m/s για την κατεύθυνση των 247.5°, όπου το μοντέλο PARAB δίνει επιπρόσθετη αύξηση του επιπέδου τύρβης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί πως τα αναλυτικά μοντέλα Abramovich, Jensen και GCL προλέγουν χαμηλότερα επίπεδα τύρβης εν συγκρίσει με το αριθμητικό μοντέλο PARAB. Αυτό συμβαίνει γιατί σύμφωνα με την σχέση (2.2.9) που χρησιμοποιείται από τα αναλυτικά μοντέλα υπάρχει εξάρτηση της τύρβης από την απόσταση κατάντι του δρομέα. Συνεπώς υπάρχει αδυναμία όσον αφορά στον υπολογισμό της τύρβης στον κοντινό ομόρρου για τα αναλυτικά μοντέλα και δεν θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Τέλος παρατηρείται μικρή διαφορά στον βαθμό απόδοσης μεταξύ των μοντέλων, επομένως δεν μπορεί να ληφθεί κάποιο συμπέρασμα.

4.2 Περίπτωση δέκα Α/Γ

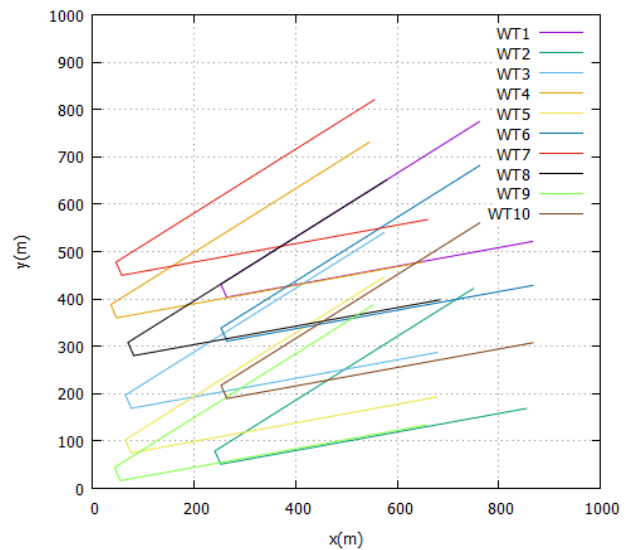
Αριθμός ανεμογεννήτριας	x[m]	Υ[m]
1	258.2	417.5
2	246.4	65.0
3	70.3	183.1
4	41.3	374.0
5	69.9	88.9
6	258.7	324.7
7	51.5	463.8
8	75.2	294.2
9	48.7	30.1
10	258.7	203.6

Πίνακας 3: Χωροθέτηση πέντε ανεμογεννητριών κατά το πρότυπο GCL.

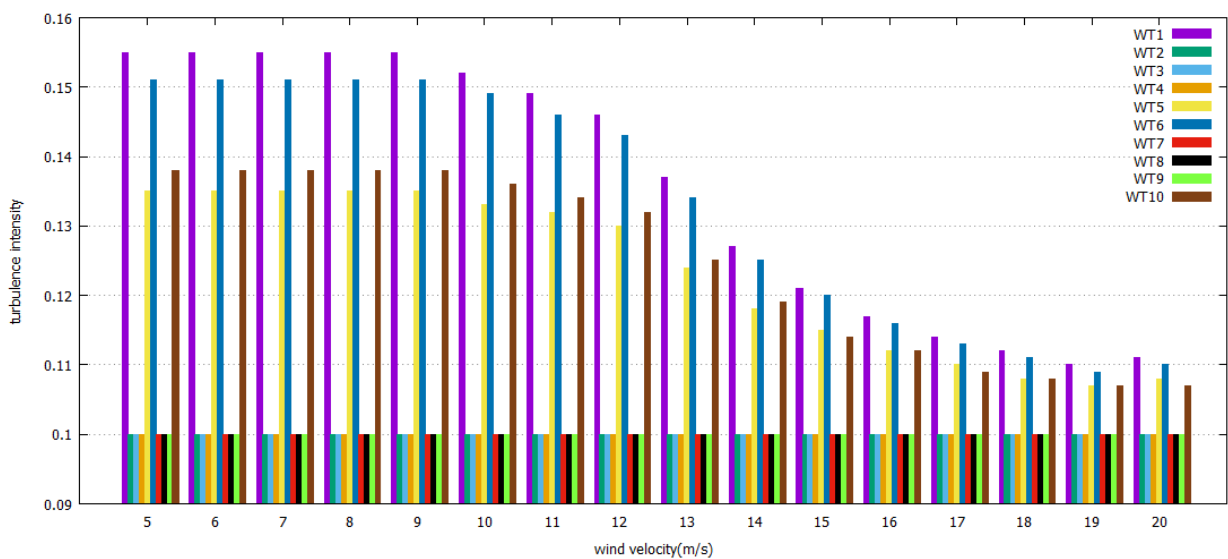
- Μοντέλο Abramovich



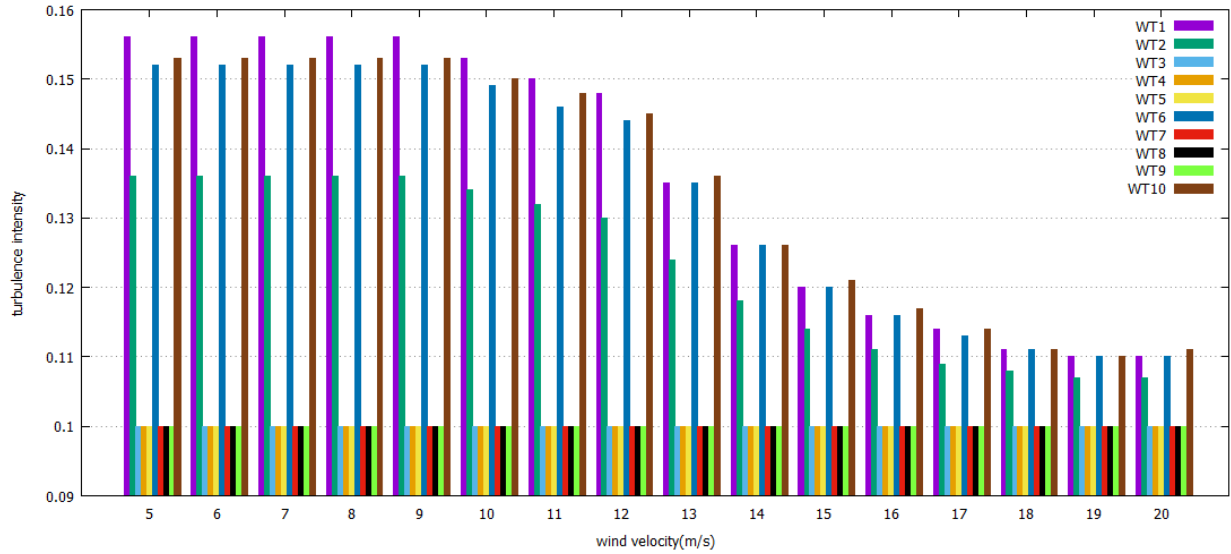
Σχήμα 27: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Abramovich για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 28: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Abramovich για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

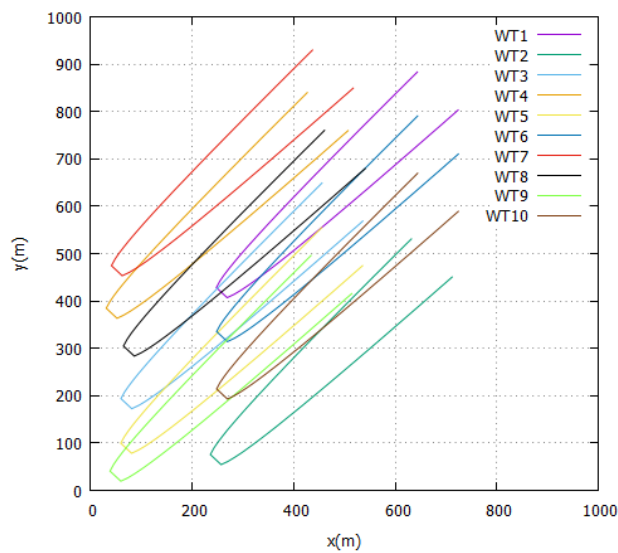


Σχήμα 29: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

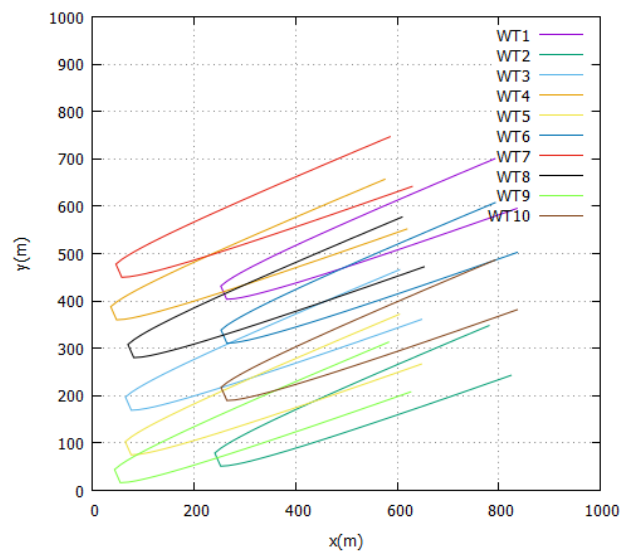


Σχήμα 30: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

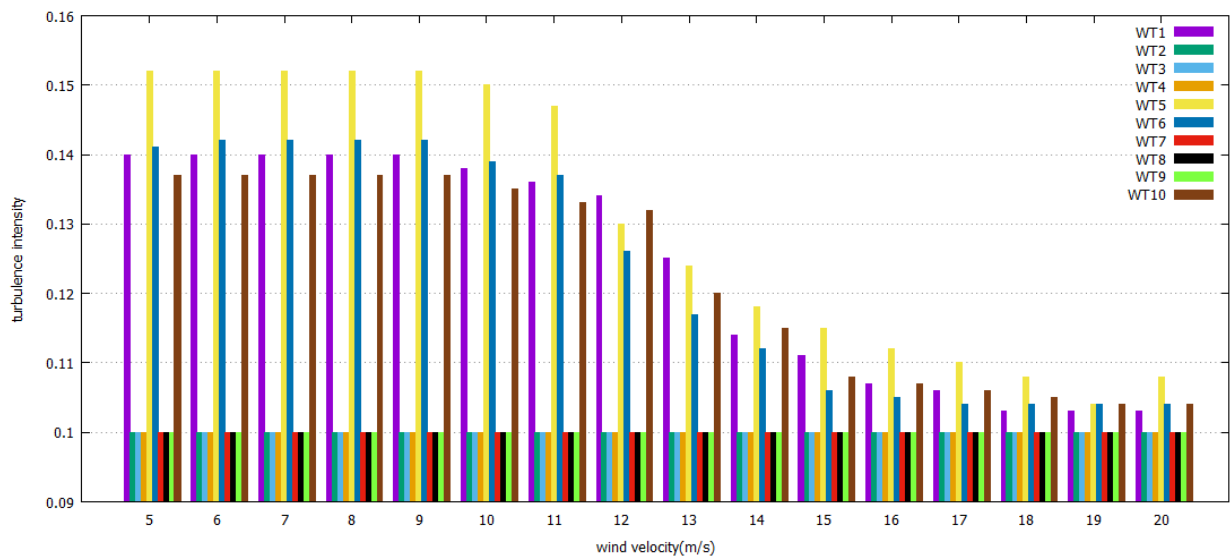
- Μοντέλο GCL



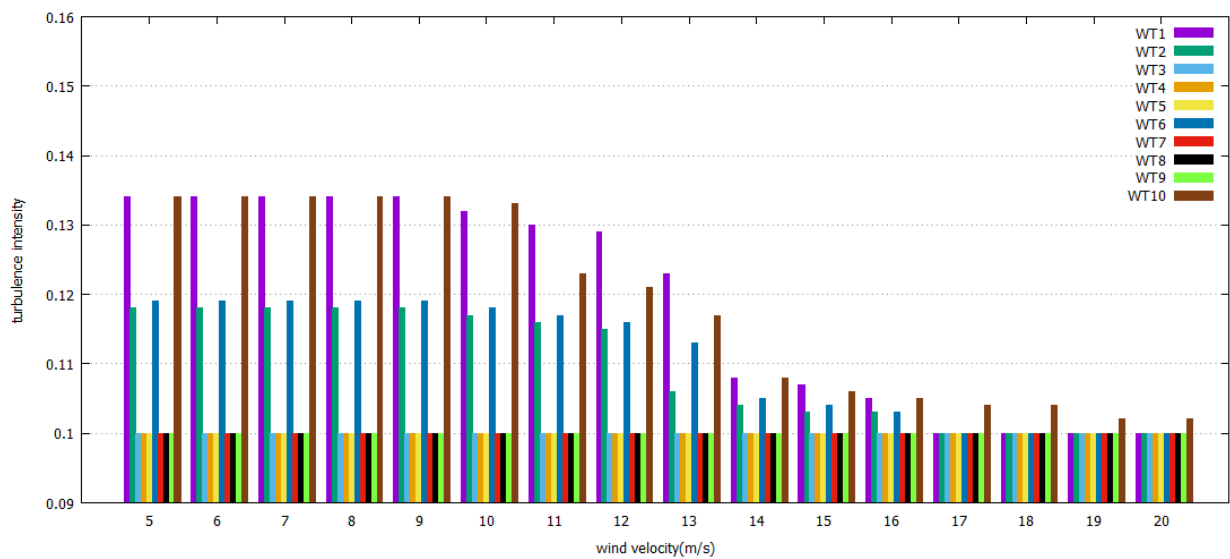
Σχήμα 31: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο GCL για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 32: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο GCL για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

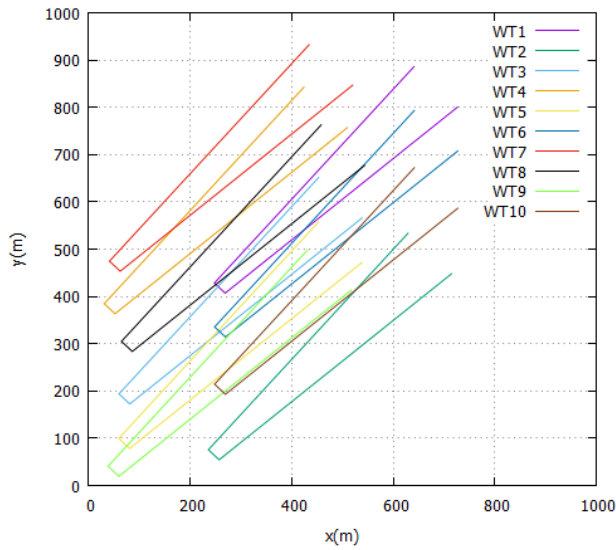


Σχήμα 33: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

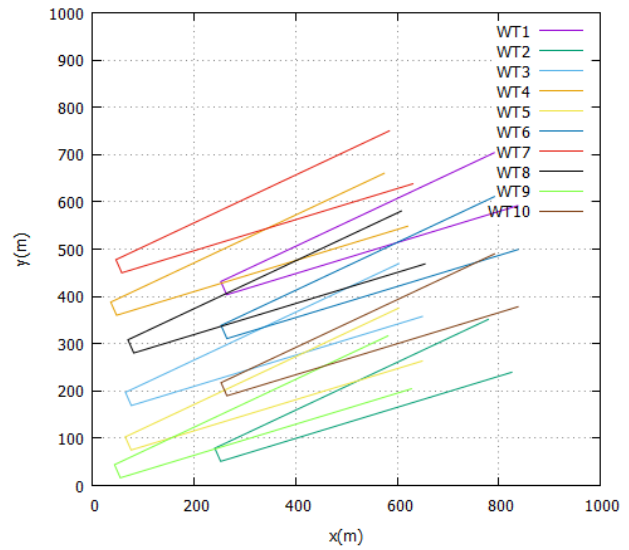


Σχήμα 34: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

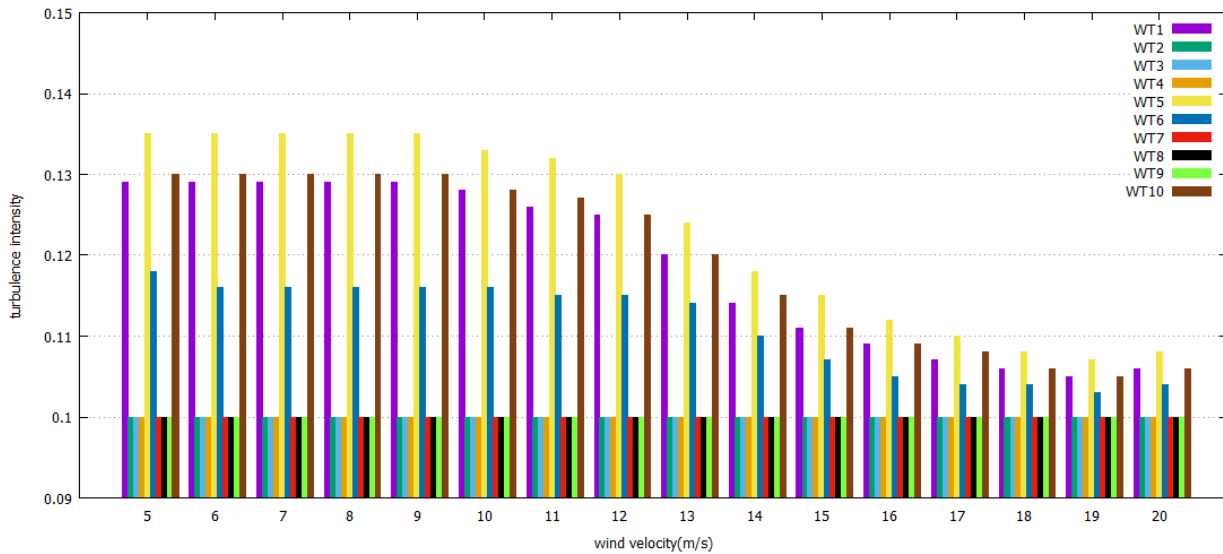
- Μοντέλο Jensen



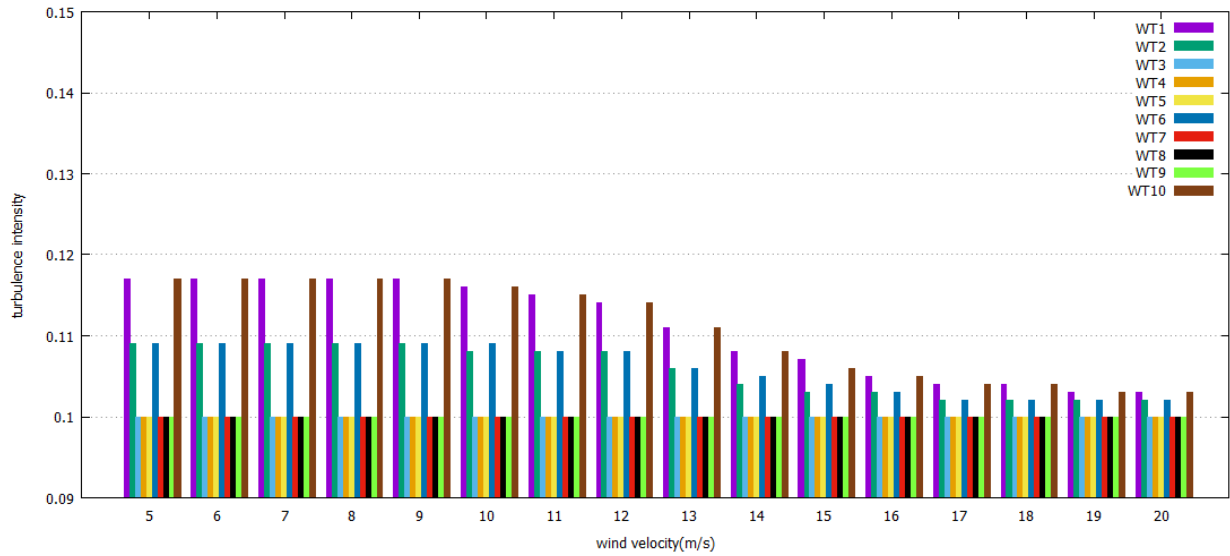
Σχήμα 35: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Jensen για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 36: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Jensen για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

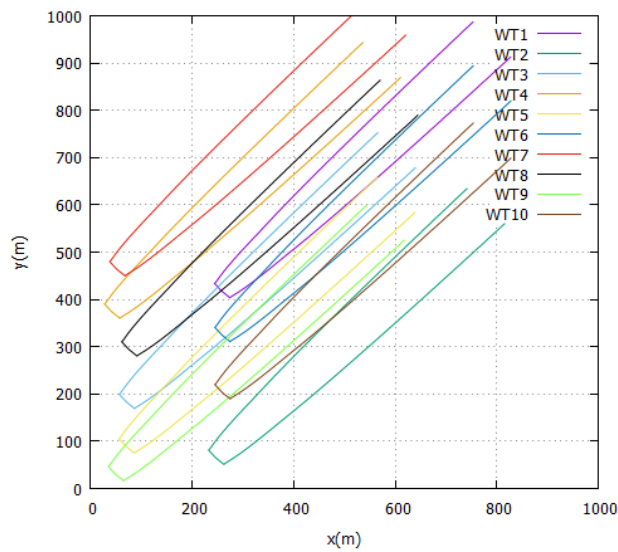


Σχήμα 37: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

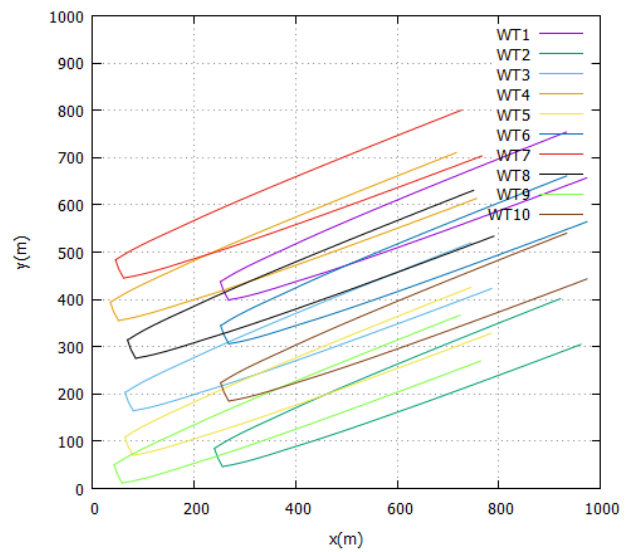


Σχήμα 38: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

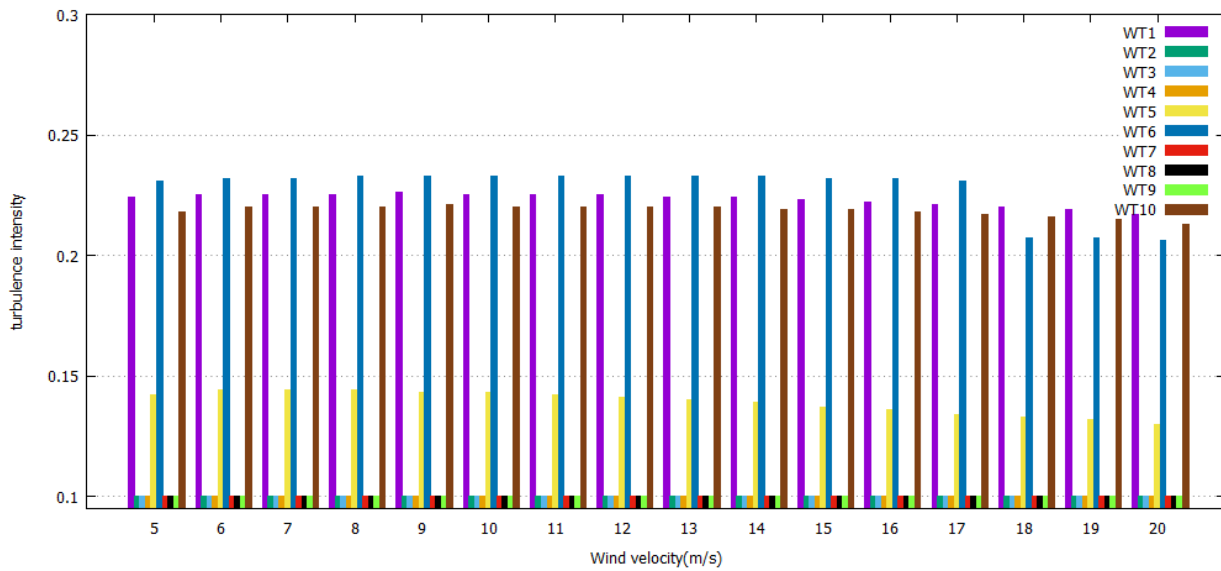
• Μοντέλο PARAB



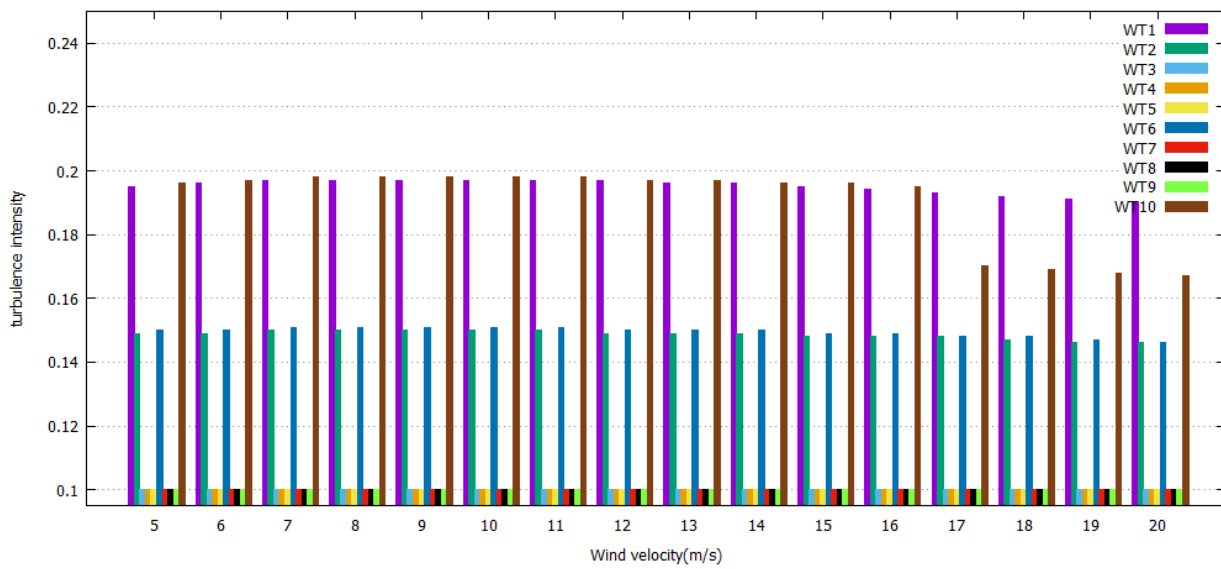
Σχήμα 39: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο PARAB για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 40: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο PARAB για κατεύθυνση ανέμου 247.5°



Σχήμα 41: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)



Σχήμα 42: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

Μοντέλο	Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια [kWh]	Ετήσιες Απώλειες Ενέργειας [kWh]	Capacity factor	Βαθμός Απόδοσης
Abramovich	8,314,579.94	598,481.09	29.7%	93.3%
GCL	8,363,228.69	549,832.34	29.8%	93.8%
Jensen	8,285,499.99	627,561.04	29.6%	93.0%
PARAB.	8,418,934.97	494,126.06	30.0%	94.5%

Πίνακας 4: Παρουσίαση ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, ετήσιων απωλειών ενέργειας, CF και βαθμού απόδοσης για όλα τα μοντέλα για χωροθέτηση 10Α/Γ κατά το μοντέλο GCL.

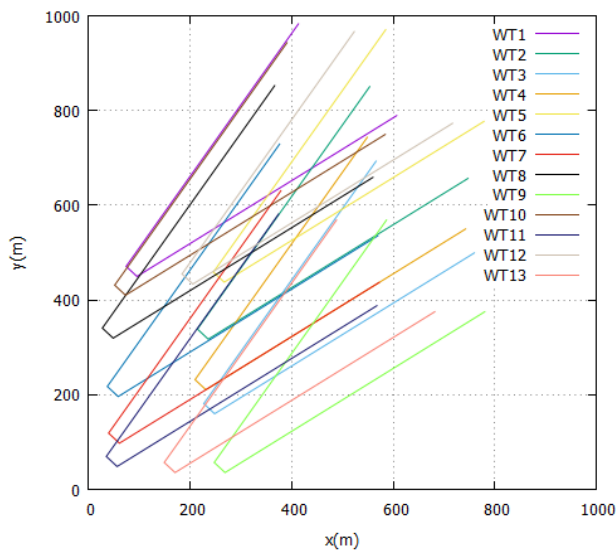
Στην περίπτωση των δέκα Α/Γ παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα τύρβης και χαμηλότερος βαθμός απόδοσης σε όλα τα μοντέλα, καθώς αυξήθηκε το πλήθος των Α/Γ και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους είναι εντονότερη. Για την κατεύθυνση των 225° όλα τα μοντέλα προλέγουν αύξηση του επιπέδου της τύρβης για τις Α/Γ 1,5,6 και 10 ενώ για την κατεύθυνση των 247.5° προλέγουν αύξηση του επιπέδου της τύρβης για τις Α/Γ 1,2,6 και 10. Η αύξηση της τύρβης στα αναλυτικά μοντέλα είναι χαμηλότερη (≈13-15%) σε σχέση με την αύξηση στο μοντέλο PARAB (≈20-25%) ομοίως με την περίπτωση της χωροθέτησης των 5Α/Γ. Αναλυτικότερα για την κατεύθυνση των 225° η Α/Γ 1 όσον αφορά στα μοντέλα GCL, Jensen και PARAB επηρεάζεται από τον ομόρρου των Α/Γ 3 και 8 ενώ στο μοντέλο Abramovich από τον ομόρρου των Α/Γ 3,5 και 8 καθώς η κλίση του ομόρρου για το μοντέλο αυτό είναι μεγαλύτερη. Η Α/Γ 5 σε όλα τα μοντέλα επηρεάζεται από τον ομόρρου της Α/Γ 9 όπως επίσης σε όλα τα μοντέλα η Α/Γ 6 επηρεάζεται από τον ομόρρου των Α/Γ 3,5 και 9. Η Α/Γ 10 στα μοντέλα Abramovich, GCL και PARAB επηρεάζεται από τον ομόρρου των Α/Γ 5 και 9 ενώ στο μοντέλο του Jensen επηρεάζεται μόνο από τον ομόρρου της Α/Γ 9 αφού η κλίση του ομόρρου είναι μικρότερη. Αντίστοιχα στην κατεύθυνση των 247.5° η Α/Γ 1 σε όλα τα μοντέλα επηρεάζεται από τον ομόρρου των Α/Γ 4 και 8, όπως επίσης σε όλα τα μοντέλα η Α/Γ 2 επηρεάζεται από τον ομόρρου της Α/Γ 9. Η Α/Γ 6 όσον αφορά στα μοντέλα Abramovich, GCL και PARAB επηρεάζεται από τον ομόρρου των Α/Γ 3 και 8 ενώ στο μοντέλο του Jensen μόνο από τον ομόρρου της Α/Γ 8. Τέλος η Α/Γ 10 στο μοντέλο του Jensen επηρεάζεται μόνο από τον ομόρρου της Α/Γ 5, στα μοντέλα GCL και PARAB από τον ομόρρου των Α/Γ 3,5 και τέλος στο μοντέλο Abramovich από τον ομόρρου των Α/Γ 3,5,9.

4.3 Περίπτωση δεκατριών Α/Γ

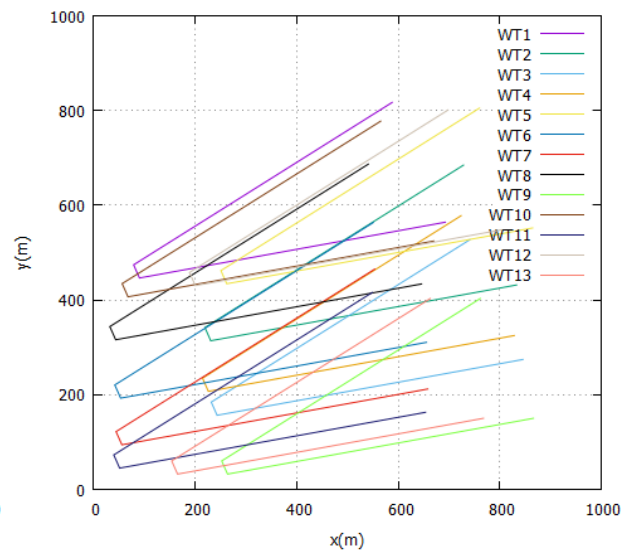
Αριθμός ανεμογεννήτριας	x[m]	γ[m]
1	84.4	460.3
2	224.9	327.8
3	237.4	170.4
4	220.2	221.0
5	256.4	448.1
6	47.3	206.6
7	49.8	108.1
8	37.5	329.9
9	258.0	46.2
10	61.8	420.6
11	45.3	58.9
12	194.5	444.1
13	159.5	46.2

Πίνακας 5: Χωροθέτηση δεκατριών ανεμογεννητριών κατά το πρότυπο GCL.

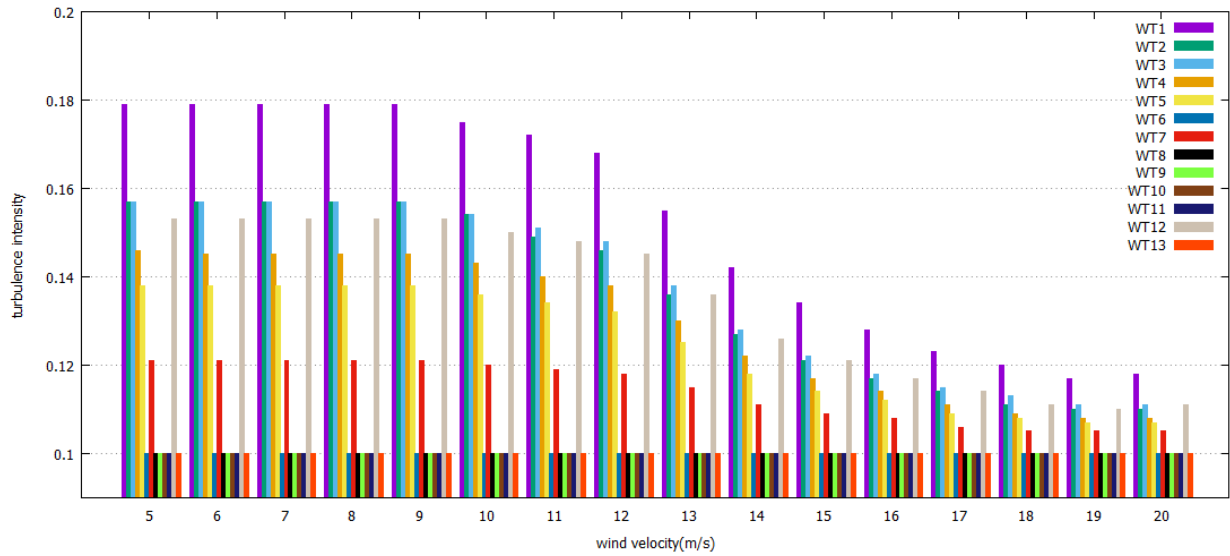
- Μοντέλο Abramovich



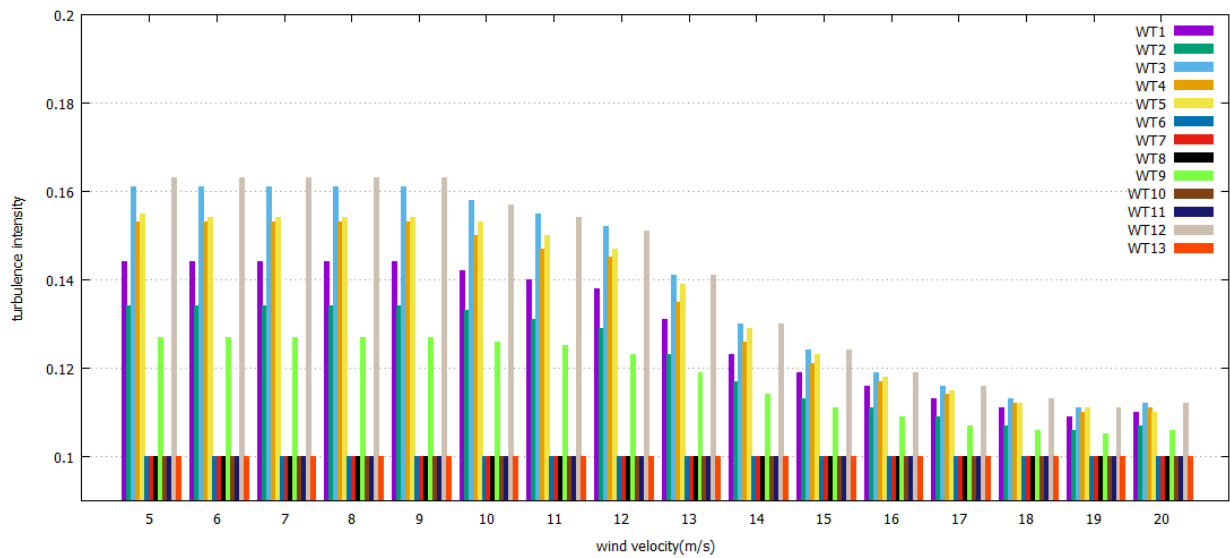
Σχήμα 43: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Abramovich για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 44: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Abramovich για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

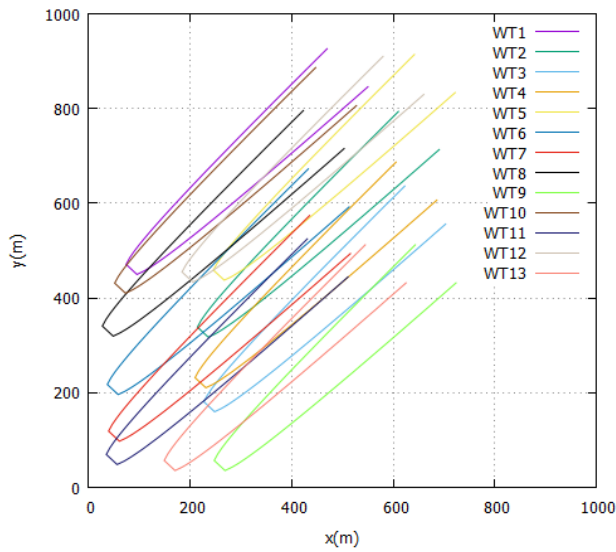


Σχήμα 45: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

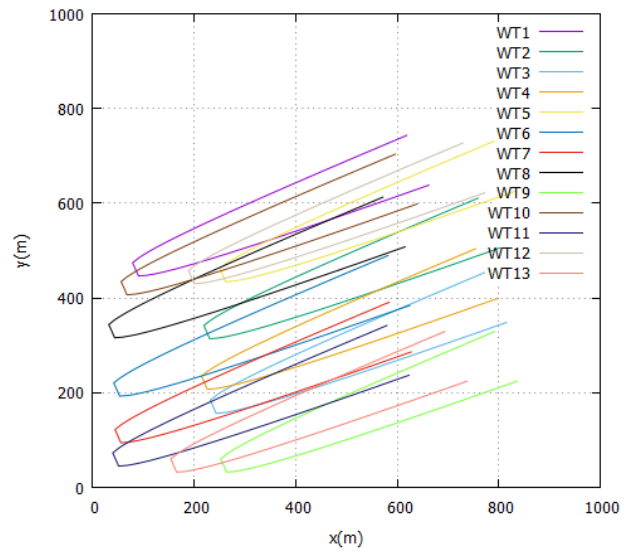


Σχήμα 46: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

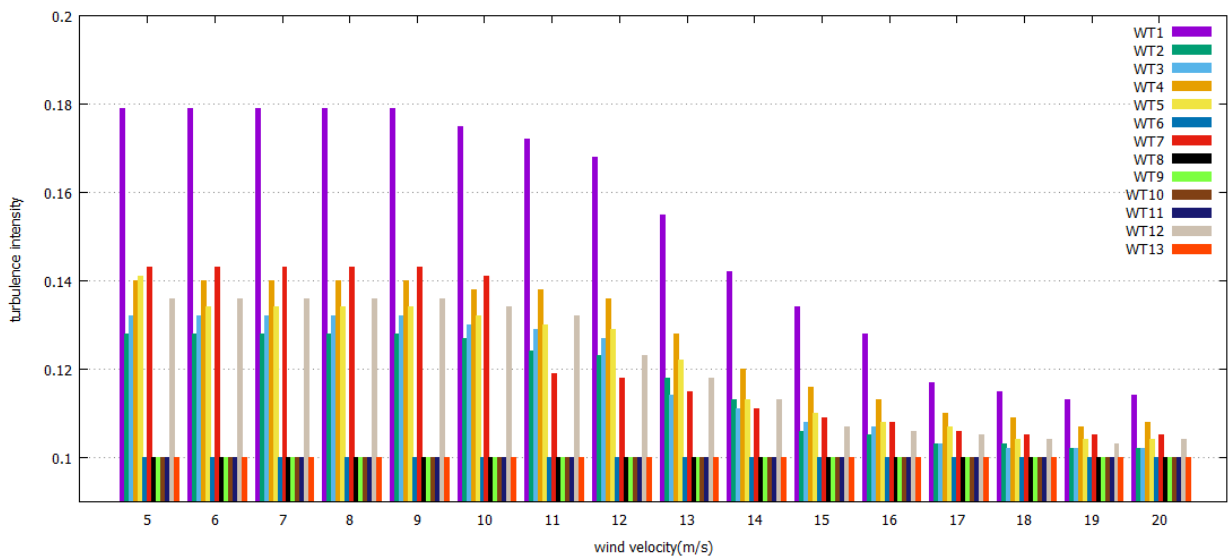
- Μοντέλο GCL



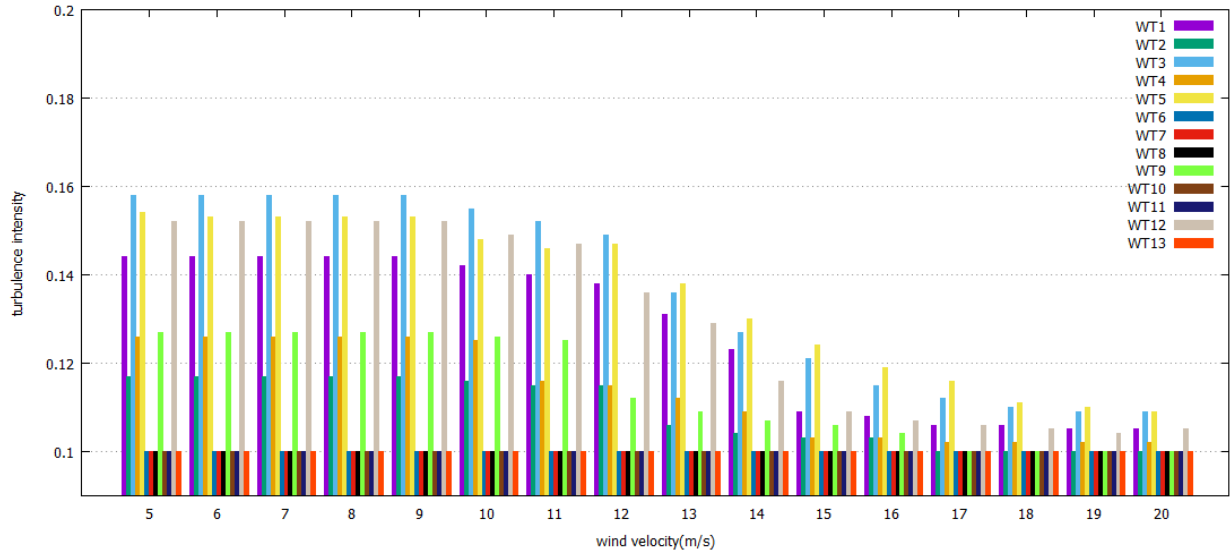
Σχήμα 47: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο GCL για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 48: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο GCL για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

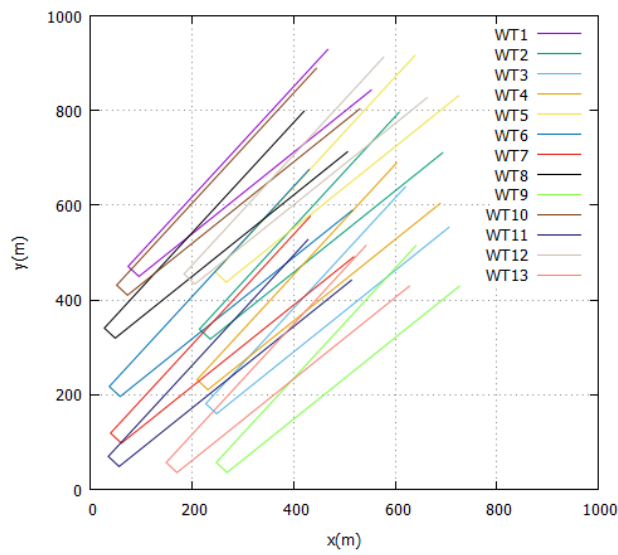


Σχήμα 49: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

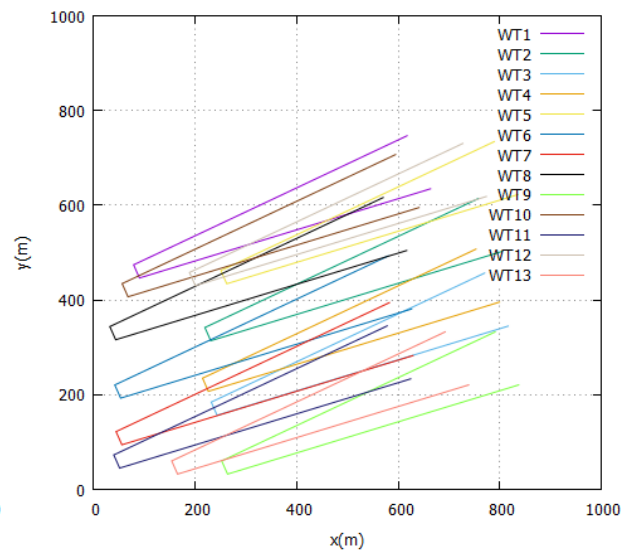


Σχήμα 50: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

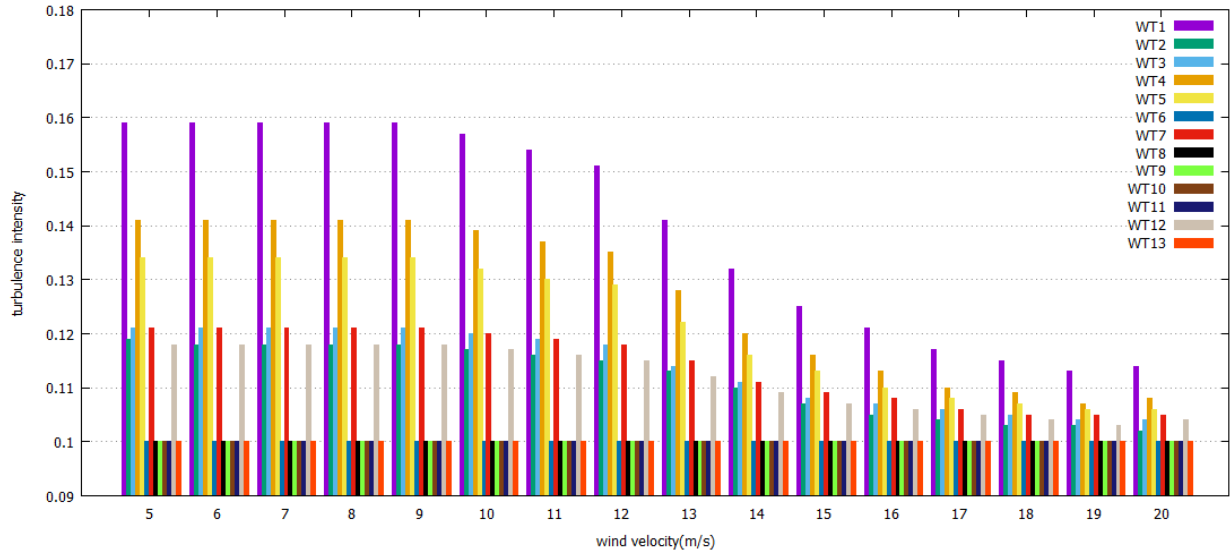
- Μοντέλο Jensen



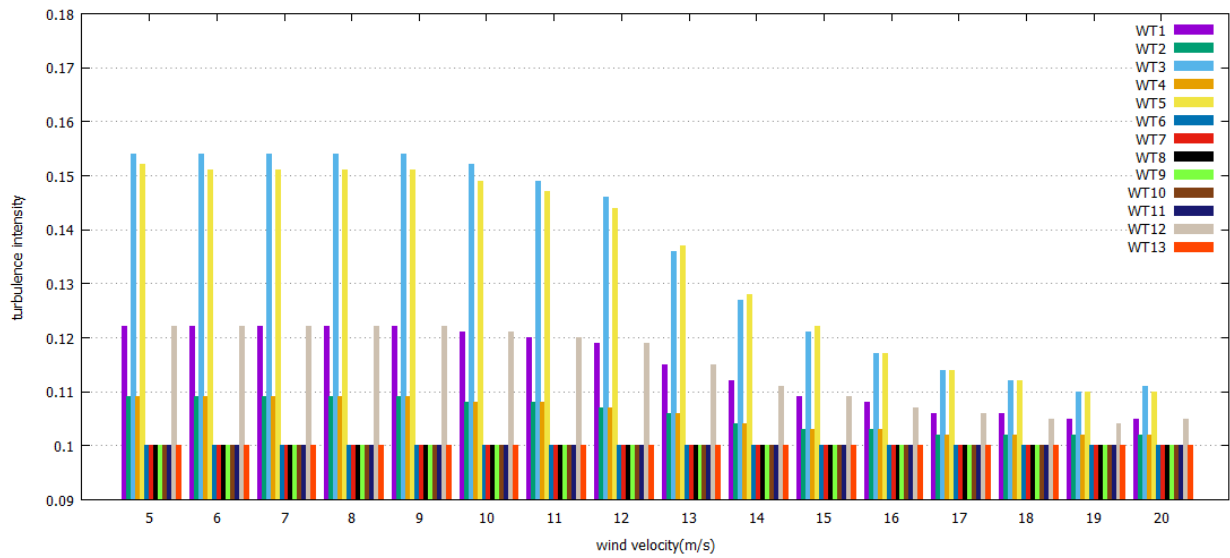
Σχήμα 51: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Jensen για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 52: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο Jensen για κατεύθυνση ανέμου 247.5°

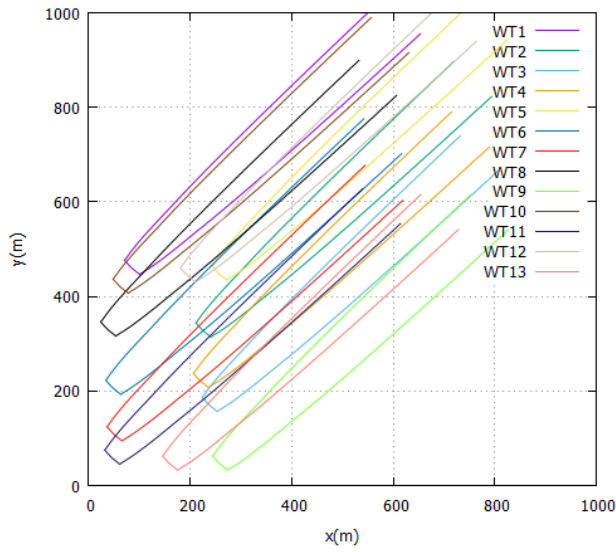


Σχήμα 53: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)

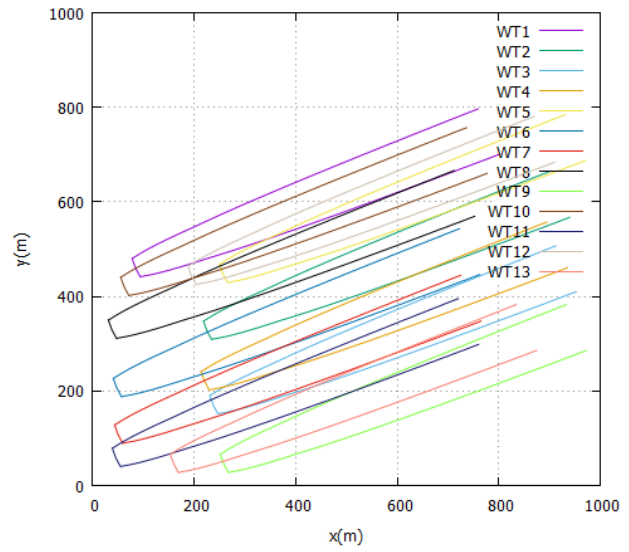


Σχήμα 54: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

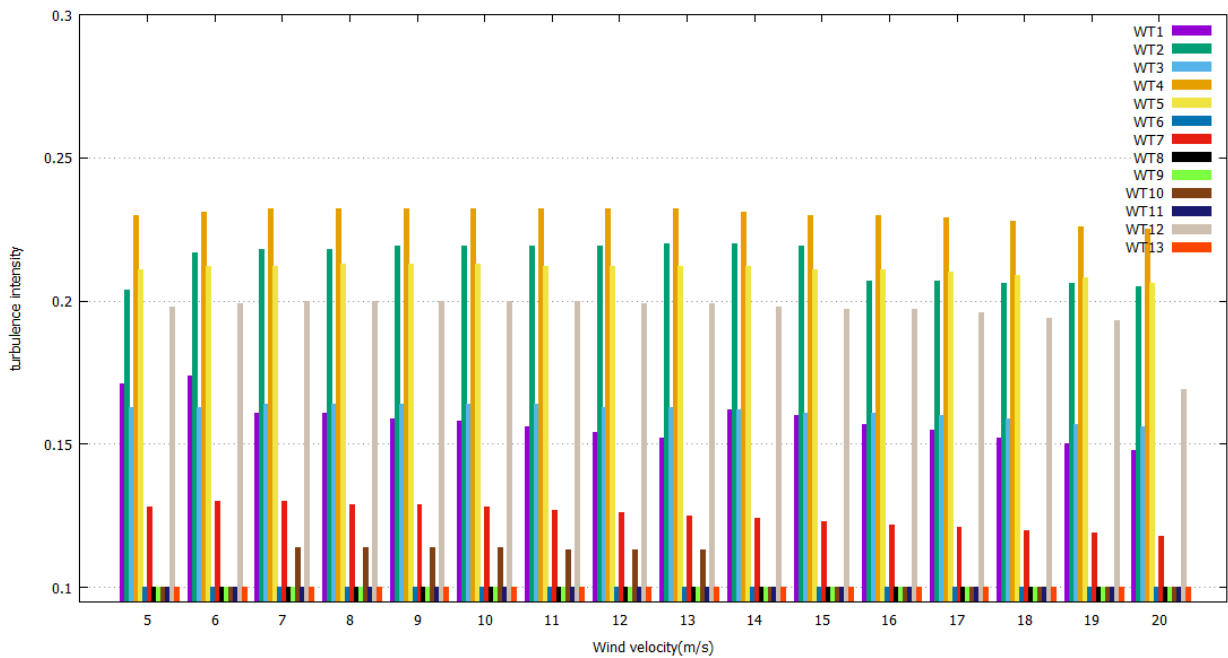
- Μοντέλο PARAB



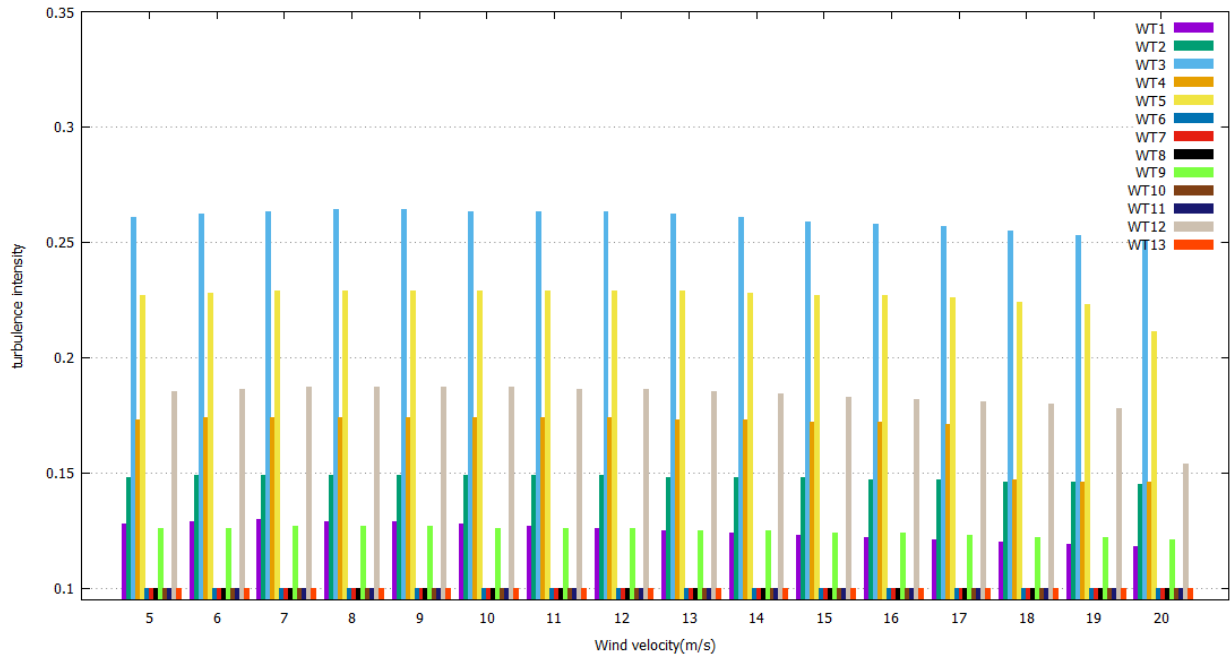
Σχήμα 55: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο PARAB για κατεύθυνση ανέμου 225°



Σχήμα 56: Ομόρρους των Α/Γ κατά το μοντέλο PARAB για κατεύθυνση ανέμου 247.5°



Σχήμα 57: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 225°)



Σχήμα 58: Ένταση της τύρβης για κάθε Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κατεύθυνση ανέμου 247.5°)

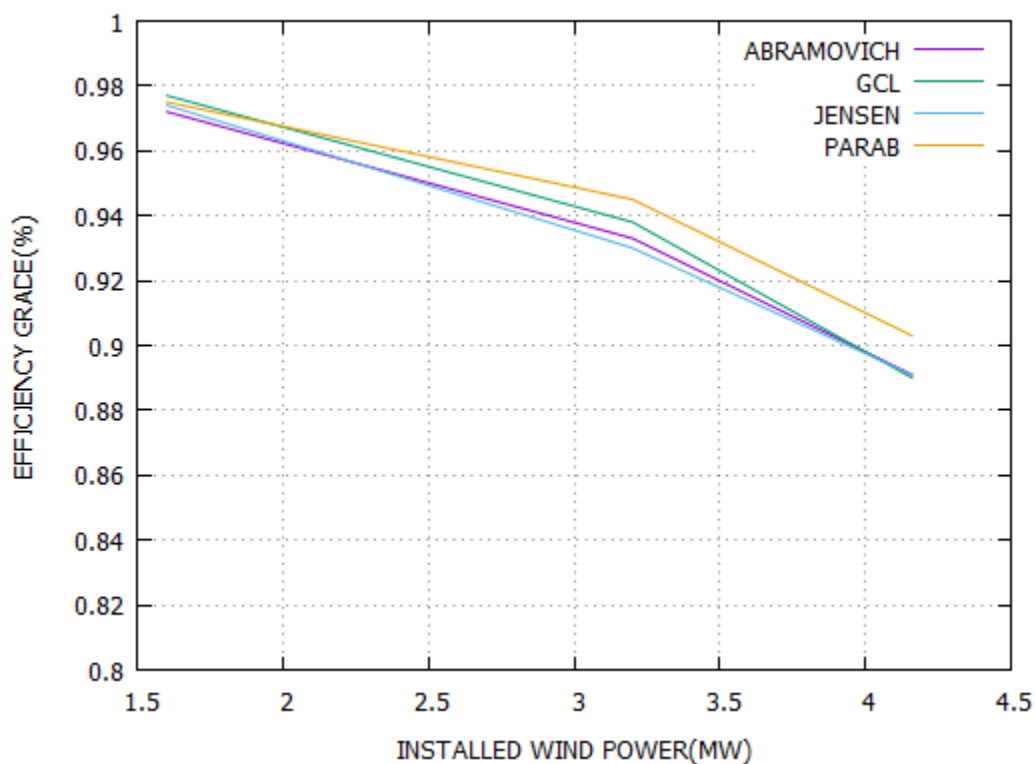
Μοντέλο	Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια [kWh]	Ετήσιες Απώλειες Ενέργειας [kWh]	Capacity factor	Βαθμός Απόδοσης
Abramovich	10,324,159.91	1,262,819.43	28.3%	89.1%
GCL	10,317,157.76	1,269,821.57	28.3%	89.0%
Jensen	10,325,617.48	1,261,361.86	28.3%	89.1%
PARAB.	10,464,600.64	1,122,378.70	28.7%	90.3%

Πίνακας 6: Παρουσίαση ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, ετήσιων απωλειών ενέργειας, CF και βαθμού απόδοσης για όλα τα μοντέλα για χωροθέτηση 13Α/Γ κατά το μοντέλο GCL.

Στην περίπτωση των δεκατριών Α/Γ παρατηρείται εντονότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανών, η οποία εκφράζεται κυρίως με αυξημένα επίπεδα τύρβης και ακόμα χαμηλότερο βαθμό απόδοσης εν συγκρίσει με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Για την κατεύθυνση των 225° όλα τα μοντέλα προλέγουν αύξηση του επιπέδου της τύρβης για τις Α/Γ 1,2,3,4,5,7 ενώ για την κατεύθυνση 247.5° προλέγουν αύξηση του επιπέδου της τύρβης για τις Α/Γ 1,2,3,4,5,9 και 12 με εξαίρεση το μοντέλο του Jensen, το οποίο δεν προλέγει κάποια αύξηση για την Α/Γ 9. Η αύξηση του επιπέδου της τύρβης στα αναλυτικά μοντέλα προλέγεται χαμηλότερη (12-16%) σε σύγκριση με το αριθμητικό μοντέλο (15-25%). Επισημαίνεται πως η αυξημένη τιμή που παρατηρείται στην κατεύθυνση των 225° όσον αφορά στα αναλυτικά μοντέλα για την Α/Γ 1,

οφείλεται στην αδυναμία του μοντέλου να προλέξει τις τιμές της τύρβης στον κοντινό ομόρρο (σχέση 2.2.9), συνεπώς η συγκεκριμένη τιμή δεν πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Παρακάτω στο σχήμα (59) φαίνεται η καμπύλη του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Παρατηρούνται σχετικά μικρές διαφορές μεταξύ των μοντέλων (μέγιστη διαφορά της τάξης του 2%), ωστόσο με την αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος παρατηρείται σε όλα τα μοντέλα αύξηση του ρυθμού μείωσης του βαθμού απόδοσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της αιολικής ισχύος συνεπάγεται αύξηση των Α/Γ, η οποία συνεπάγεται εντονότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των Α/Γ έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 59: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης του εκάστοτε μοντέλου συναρτήσει της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Αποτίμηση

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία αριθμητικής αξονοσυμμετρικής επίλυσης του ομόρρου μιας Α/Γ με εισαγωγή της τυρβώδους συνεκτικότητας σύμφωνα με το ημιεμπειρικό μοντέλο του Ainslie στις εξισώσεις Navier-Stokes. Η μεθοδολογία βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της παραβολικής μορφής της εξίσωσης της ορμής, η οποία προκύπτει εάν αγνοήσουμε την κλίση πίεσης και θεωρήσουμε ότι οι τυρβώδεις τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις συνεκτικές. Ο παραβολικός χαρακτήρας της εξίσωσης ορμής απαιτεί την επιβολή μιας αρχικής κατανομής ταχύτητας, η οποία αντιστοιχεί στην αξονική θέση κατάντι του δρομέα και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία του δίσκου ορμής και των στοιχείων πτερύγωσης (Blade Element Momentum). Σημαντικά πλεονεκτήματα του προτεινόμενου μοντέλου PARAB ως προς τα απλοποιημένα μοντέλα Abramovich, Jensen και GCL είναι η ακριβέστερη πρόλεξη του πεδίου ροής στον ομόρρου της Α/Γ, η δυνατότητα εισαγωγής ενός αρχικού προφίλ μέσω της θεωρίας των στοιχείων πτερύγωσης, καθώς και η ακριβέστερη πρόλεξη των επιπέδων της τύρβης στον ομόρρου της Α/Γ. Τα αποτελέσματα όλων των μοντέλων δείχνουν πως υποεκτιμάται το έλλειμα των ταχυτήτων στον κοντινό ομόρρου, ενώ στον μακρινό η προσομοίωση είναι πολύ πιο ακριβής. Η υποεκτίμηση αυτή είναι αναμενόμενη καθώς αντίστοιχη υποεκτίμηση υφίσταται ακόμη και με επίλυση 3D εξισώσεων N-S και χρήση μοντέλων τύρβης 2 εξισώσεων. Το μοντέλο PARAB ενσωματώθηκε σε υπολογιστικό εργαλείο για την προσομοίωση υποθετικού αιολικού πάρκου και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα μοντέλα Abramovich, Jensen και GCL. Η προσομοίωση έδειξε μικρές διαφορές των μοντέλων ως προς το βαθμό απόδοσης του αιολικού πάρκου, ωστόσο τα προλεγόμενα επίπεδα τύρβης με το μοντέλο PARAB, τα οποία συσχετίζονται άμεσα με τα κοπωτικά φορτία και τη διάρκεια ζωής των Α/Γ, είναι σημαντικά υψηλότερα, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός αιολικού πάρκου. Όλα τα μοντέλα δείχνουν ότι η αύξηση του πλήθους των Α/Γ συνεπάγεται μείωση του βαθμού απόδοσης του πάρκου και αύξηση των επιπέδων τύρβης στις κατάντι μηχανές, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση των κοπωτικών φορτίων και τη μείωση της μέσης διάρκειας ζωής των Α/Γ. Η χρήση του συγκεκριμένου υπολογιστικού εργαλείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάλληλη σχεδίαση αιολικών πάρκων με στόχο την ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των Α/Γ που θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης και της διάρκειας ζωής των μηχανών.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας προτείνονται οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική έρευνα :

- Εισαγωγή των συνθηκών ευστάθειας της ατμόσφαιρας στο μοντέλο τύρβης του Ainslie
- Διερεύνηση εναλλακτικών μοντέλων τύρβης
- Περαιτέρω αξιολόγηση του μοντέλου PARAB και του υπολογιστικού εργαλείου σε μεγάλα αιολικά πάρκα για τα οποία υπάρχουν πειραματικά δεδομένα
- Μελέτη του φαινομένου σχηματισμού μαιάνδρων (meandering) στον ομόρρου των ανεμογεννητριών, μέσω της εισαγωγής σωματιδιακού (Lagrangian) μοντέλου

Βιβλιογραφία

- [1] Lissaman P.B.S. "Wind turbine airfoils and rotor wakes". In *Wind Turbine Technology*. Spera DA(ed.). ASME Press: New York, 1994; 283-323
- [2] Voutsinas, S.G., Rados, K.G. and Zervos, A., "On the Analysis of Wake Effects in Wind Parks," *Wind Engineering*, 1990, 14, pp. 204-219
- [3] Prandtl, L. (1926) Ueber Die Ausgebildete Turbulenz. Proceedings 2nd International Congress Applied Mechanics, Zurich, 12-17 September 1926, page 62.
- [4] Larsen G. "A simple stationary semi-analytical wake model". Technical report. Technical Report Risø; 2009
- [5] Taylor PA. On wake decay and row spacing for WECS farms. In *Proceedings of 3rd International Symposium on Wind Energy Systems*. BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, 1980; 451-468.
- [6] Crespo, A., Manuel, F., Moreno, D., Fraga, E. and Hernández, J., "Numerical Analysis of Wind Turbine Wakes," *Proceedings of Delphi Workshop on Wind Energy Applications*, Delphi, 1985, pp. 15-25
- [7] Tindal, A., *Dynamic Loads in Wind Farms*, Final Technical Report, CEC Project JOUR-0084-C, 1993
- [8] Voutsinas, S. G., Rados, K. G. and Zervos A., "Wake Effects of the Rotor Geometry on the Formation and the Development of its Wake," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1992, 39, pp. 293-301
- [9] Larsen, G. C., Madsen, H.A., Tompsen, K., Larsen, T.J., "Wake Meandering: A Pragmatic Approach", *Wind Energy*, 2008, 11, pp. 377-395
- [10] Sørensen, J. N., and Shen, W. Z., "Numerical Modelling of Wind Turbines," *J. Fluids Engineering*, 2002, 124, pp. 393-399
- [11] Barthelmie, R.J., Hansen, K, Frandsen, S.T., Rathmann, O., Schepers, J.G., Schlez, W., Phillips, J., Rados, K., Zervos, A., Politis, E.S., and Chaviaropoulos, P.K., "Modelling and Measuring Flow and Wind Turbine Wakes in Large Wind Farms Offshore", *Wind Energy*, Vol. 12, No. 5, pp. 431-444, 2009
- [12] Troen, I., Petersen, E.L., *European Wind Atlas*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1989:656
- [13] Schepers, J.G., *ENDOW: Validation and Improvement of ECN's Wake Model*. ECN:ECN-C-03-034: Petten, The Netherlands, 2003: 113
- [14] Crespo, A., Hernandez, J., Fraga, E., Andreu, C., "Experimental validation of the UPM computer code to calculate wind turbine wakes and comparison with other models", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 27, pp. 77- 88
- [15] Ainslie, J.F: Calculating the flowfield in the wake of wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 27: 213-224. 1988