



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη αριθμητικής αξονο-συμμετρικής μεθόδου για την προσομοίωση αμόρρου ανεμογεννητριών με εφαρμογή σε αιολικά πάρκα

Γιώργος Λευκός

Επιβλέπων: Β. Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή κ. Βασίλειο Ριζιώτη , που συνέβαλλε στην διατύπωση και εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα , θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον συνεπιβλέποντα Δρ. Ε.Δι.Π, κ. Ιωάννη Προσπαθόπουλο για την συνεχή καθοδήγηση και τις συμβουλές του για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την άψογη συνεννόηση και συνεργασία μας.

Πίνακας περιεχομένων

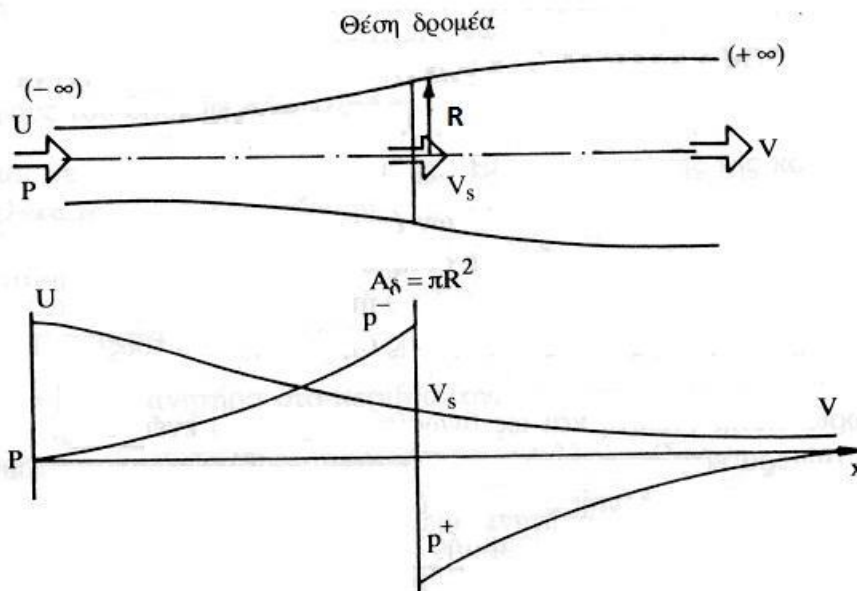
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή	
1.1 Τεχνολογικό Πρόβλημα	1
1.2 Πρότυπα Προσομοίωσης ομόρρου	2
1.3 Βιβλιογραφική Επισκόπηση	6
Κεφάλαιο 2	8
Μαθηματική διατύπωση και αριθμητική επίλυση του προβλήματος	8
2.1 Διατύπωση των εξισώσεων Navier-Stokes	8
2.2 Μοντέλο τύρβης Ainslie.....	10
2.3 Διακριτοποίηση των εξισώσεων/Αλγόριθμος SIMPLE.....	13
2.3.1 Γενική εξίσωση συναγωγής-διάχυσης	14
2.3.2 Διακριτοποίηση των εξισώσεων ορμής – Η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης	20
2.3.3 Ο αλγόριθμος SIMPLE.....	24
2.3.4 Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.....	24
Κεφάλαιο 3	27
Εφαρμογές της Μεθόδου	27
3.1 Μεμονωμένα Ανεμογεννήτρια	27
3.1.1 NIBE Α/Γ.....	27
3.1.2 Sexbierum Ανεμογεννήτρια	33
3.1.3 ECN Ανεμογεννήτρια	37
3.1.4 Παραμετρική Ανάλυση	40
3.2 Εφαρμογή σε Αιολικά Πάρκα	46
3.2.1 Πειραματικό Πάρκο EWTW.....	46
3.2.2 Paper Case.....	56
Κεφάλαιο 4	59
4.1	
Αποτίμηση.....	59
4.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	
.....	60
Βιβλιογραφία	61

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Τεχνολογικό Πρόβλημα

Η εξέλιξη και η διαμόρφωση του ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο και σχετίζεται με την αλληλεπίδραση της επιφάνειας των πτερυγίων της Α/Γ με το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. 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 Α/Γ χρησιμοποιεί ως κύρια δύναμη περιστροφής του δίσκου της μηχανής την άνωση, σε αντίθεση με τις Α/Γ παλαιότερης τεχνολογίας όπου η ισχύς της μηχανής προέρχεται από την εκμετάλλευση της οπισθέλκουσας. Ως αποτέλεσμα της αντίδρασης των πτερυγίων της Α/Γ (ώση δρομέα) και της εκμετάλλευσης ποσοστού της ισχύος του ανέμου, δημιουργείται πτώση πίεσης στο επερχόμενο ρευστό και υφίσταται έλλειμμα ταχύτητας κατάντι του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα πίεσης και ταχύτητας μιας Α/Γ ανάντι και κατάντι του δρομέα.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα ταχύτητας και πίεσης στην περιοχή της Α/Γ

Λόγω της αρχής της συνέχειας της ρευστομηχανικής, η μείωση της ταχύτητας κατάντι της μηχανής προκαλεί αύξηση της ακτίνας του ομόρρου της Α/Γ, ο οποίος αποκτά ένα κωνικό σχήμα κατάντι της ροής. Παράλληλα η αλληλεπίδραση των πτερυγίων της μηχανής με το ρευστό, εισάγουν μία περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας με αποτέλεσμα η ροή να

αποκτά μια ελικοειδή μορφή. 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.

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 την γεωμετρία του δρομέα της Α/Γ, γεγονός που οδηγεί στην κατάλληλη ρύθμιση των πτερυγίων. Επιπλέον υφίστανται απότομες μεταβολές στην πίεση και την αξονική ταχύτητα, και έντονη εξάπλωση του ομόρρου. Στον μακρινό ομόρρου, η γεωμετρία του δίσκου δημιουργεί αυξημένα επίπεδα έντασης τύρβης, η οποία είναι κυρίαρχο μέγεθος στην περιοχή αυτή. Επιπρόσθετα, ο ομόρρους της Α/Γ επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική τύρβη. Η ανάμειξη της τύρβης επιταχύνει την αποκατάσταση του ομόρρου, ως αναφορά το έλλειμμα της ταχύτητας. Στον μακρινό ομόρρου, το έλλειμμα της ταχύτητας αποκτά προφίλ Gauss, το οποίο είναι αξονοσυμμετρικό.

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). 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 Πρότυπα Προσομοίωσης ομόρρου

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, αλληλεπίδραση Α/Γ στην περίπτωση αιολικού πάρκου.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος 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)
- τριδιάστατοι επιλυτές των πλήρων εξισώσεων N-S.
- μέθοδοι προσομοίωσης των μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation)

1.2.1 Απλοποιημένα μοντέλα ομόρρου

Τα απλοποιημένα πρότυπα ομόρρου A/Γ είναι βασισμένα στην γραμμικοποίηση των εξισώσεων ορμής είτε στην εξίσωση συνέχειας 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 συνήθεις. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν ως ημιεμπειρικά ,αφού οι σταθερές τους ρυθμίζονται μέσω πειραματικών δεδομένων. Τέτοια μοντέλα είναι :

- ❖ Το πρότυπο μήκους ανάμειξης Prandtl
- ❖ Το νέο πρότυπο Prandtl
- ❖ Το μοντέλο GCL Risø
- ❖ Μοντέλο Abramovich

Τα μοντέλα Prandtl 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 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 ελλείμματος 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. Τέλος το μοντέλο Abramovich ,υποδεικνύει γραμμική εξάρτηση του ομόρρου με την απόσταση. Η χρήση των μοντέλων Prandtl και GCL στον κοντινό ομόρρου δεν έχει ιδιαίτερο νόημα.

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 .

1.2.2 Αριθμητικά μοντέλα ομόρρου

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

Η αλληλεπίδραση μεταξύ χωρίου, ανεμογεννήτριας και ροής ρυθμίζονται κατάλληλα μέσω των οριακών συνθηκών του εκάστοτε οριζόμενου προβλήματος, ενώ ταυτόχρονα δύναται να συνυπολογιστούν στις συνθήκες του προβλήματος, οι επιδράσεις που ενδεχομένως υφίστανται λόγω του περιβάλλοντος και των ατμοσφαιρικών συνθηκών μέσω της προσομοίωσης της τύρβης και φυσικά με την εισαγωγή της στις εξισώσεις Navier-Stokes. Η προσομοίωση της γεωμετρίας του δρομέα της Α/Γ μπορεί να υλοποιηθεί με τους παρακάτω τρόπους:

- Θεωρία δίσκου ορμής με σταθερό συντελεστή ώσης .
- Θεωρία δίσκου ορμής με μεταβλητό συντελεστή ώσης ο οποίος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης (Blade Element Momentum) .
- Θεωρία γραμμών ενέργειας (Actuator line) σύμφωνα με την οποία τα πτερύγια της Α/Γ προσομοιώνονται ως γραμμές κατά μήκος των οποίων τα φορτία υπολογίζονται και πάλι από τη θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης.
- Πλήρης προσομοίωση της τρισδιάστατης γεωμετρίας των πτερυγίων

Η πρώτη μέθοδος είναι λιγότερο ακριβής, αλλά ευρέως διαδεδομένη γιατί χρειάζεται ως δεδομένο μόνο την καμπύλη ώσης $C_t(U)$. Η δεύτερη και τρίτη μέθοδος χρειάζονται πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου κατά το εκπέτασμα (κατανομές χορδής και συστροφής, γεωμετρία αεροτομών), καθώς και οι καμπύλες $Cl(\alpha)$, $CD(\alpha)$ των συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας συναρτήσει της κατεύθυνσης του ανέμου. Η τρίτη μέθοδος επίσης είναι πιο χρονοβόρα από τις πρώτες δύο γιατί είναι εγγενώς μη μόνιμη. Τέλος, η τελευταία μέθοδος χρειάζεται ως δεδομένο την ακριβή

γεωμετρία των πτερυγίων η οποία συνεπάγεται τη δημιουργία πολύπλοκου αριθμητικού πλέγματος και έχει ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστικό κόστος .

Η αριθμητική προσομοίωση του δρομέα της ανεμογεννήτριας υλοποιείται εδώ με την απλοποιημένη θεωρία δίσκου ορμής με χρήση της ωστικής δύναμης που ασκείται από το δίσκο της Α/Γ στο ρευστό η οποία είναι:

$$D = 0.5\rho U_{\infty}^2 C_t A \quad (1.1.1)$$

Διευκρινίζεται εδώ ότι η παραπάνω προσομοίωση μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε σχέση με το μεγάλο υπολογιστικό κόστος που απαιτούν οι υπόλοιπες μέθοδοι.

Συνεπώς αναπτύσσοντας μία υπολογιστική μέθοδο για την προσομοίωση της ροής ,αναμένεται :

- Ακριβέστερη προσομοίωση της τύρβης
- Αξιόπιστος υπολογισμός της ροής παντού στο χώρο(ανάντι και κατάντι του δρομέα)
- Προσομοίωση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας
- Προσομοίωση της τοπογραφίας
- Ικανοποιητικότερη προσέγγιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μηχανών

1.3 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχουν ασχοληθεί διάφοροι ερευνητές και επιστήμονες με το φαινόμενο του ομόρρου μιας Α/Γ .Σε πρώτο στάδιο παρουσιάστηκαν απλοποιημένα κινηματικά μοντέλα ,τα οποία κάνουν κατά κύριο λόγο χρήση του μοντέλου του Gauss για τα προφίλ του ελλείμματος της ταχύτητας[1],[2].Μεταγενέστερα εφαρμόστηκαν μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης με διδιάστατη ή και αξονοσυμμετρική επίλυση του προβλήματος του ομόρρου μιας Α/Γ που πετυχαίνουν ένα καλύτερο αποτέλεσμα .Σε αυτό το επίπεδο αναπτύχθηκαν διάφορες μεθοδολογίες από τη χρήση της παραβολικής προσέγγισης[5] των γραμμικοποιημένων εξισώσεων της ορμής έως και την αξονοσυμμετρική επίλυση των Navier–Stokes εξισώσεων.

Τα πρώτα κινηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ,βασίστηκαν σε προφίλ ελλείμματος της ταχύτητας τύπου Gauss από εμπειρικά δεδομένα. Μετέπειτα, επιχειρήθηκε η αριθμητική προσομοίωση της ροής με χρήση διδιάστατων και αξονοσυμμετρικών μοντέλων. Ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετώπισαν όσοι ασχολήθηκαν

με το πρόβλημα του ομόρρου ήταν η αρχικοποίηση του ελλείμματος της ταχύτητας. Για παράδειγμα, η αξονοσυμμετρική επίλυση των Navier-Stokes που εφαρμόστηκε από τους Garrad Hassan & Partners Ltd.[6], έθετε ως συνθήκη εισόδου ένα εμπειρικό προφίλ ταχύτητας σε απόσταση δύο διαμέτρων κατάντι του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Υπήρξαν κάποιες προσεγγίσεις με υβριδικά σχήματα επίλυσης (hybrid) για την αντιμετώπιση αυτής της απροσδιοριστίας. Η προσομοίωση πάντως της τύρβης στα αριθμητικά μοντέλα συνήθως επιτυγχάνεται μέσω της υπόθεσης του Boussinesq. Ο J.F. Ainslie εφάρμοσε μέσω του λογισμικού WindPRO [3] την αριθμητική προσέγγιση της τυρβώδους συνεκτικότητας όπου η τελευταία προκύπτει σε συνδυασμό με την θεωρία του Prandtl για το οριακό στρώμα. Σε αυτή τη βάση υλοποιήθηκε η εργασία του University of Oldenburg(UO)Ainslie model [3]. Εδώ θα αναφερθεί ότι γενικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μοντέλα τύρβης 2 εξισώσεων (k-ε ή k-ω) σε συνδυασμό με τη θεωρία του δίσκου ορμής υποεκτιμούν το έλλειμμα ταχύτητας στον κοντινό ομόρρο. Για το λόγο αυτό έχουν εφαρμοστεί διορθώσεις που σχετίζονται με την κατάλληλη ρύθμιση της κλίμακας τύρβης. Η μέθοδος των γραμμών ενέργειας έχει αποδειχθεί ακριβέστερη, αφού χρησιμοποιεί γεωμετρικά και αεροδυναμικά δεδομένα των πτερυγίων και επιλύει τις μη μόνιμες εξισώσεις της ροής. Ο Προσπαθόπουλος [14] προσομοίωσε τη τυρβώδη συνεκτικότητα με χρήση δύο εξισώσεων (k-ω), μοντελοποιώντας το δρομέα της μηχανής σαν δίσκο ορμής. Η μέθοδος αυτή υστερεί στα σημεία του κοντινού ομόρρου καθώς τα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιήθηκαν δεν προσομοιώνουν κατάλληλα τις απότομες μεταβολές της ταχύτητας. Ο Βουτσινάς [7] 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 ρότορα.

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 [8] είτε προσομοιώνοντας ξεχωριστά τα πτερύγια ως γραμμές ενέργειας (actuator line) [9]. Ένα πλεονέκτημα αυτών των εφαρμογών είναι ότι επιτυγχάνεται η προσομοίωση της ροής του ομόρρου χωρίς να απαιτείται αρχικοποίηση του προφίλ εισόδου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε παλαιότερες μεθόδους. Η μέθοδος των γραμμών ενέργειας έχει αποδειχθεί ακριβέστερη, αφού χρησιμοποιεί γεωμετρικά και αεροδυναμικά δεδομένα των πτερυγίων και επιλύει τις μη μόνιμες εξισώσεις της ροής. Η πιο εξελιγμένη πάντως μέθοδος είναι η προσομοίωση των μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation, LES), η οποία βέβαια απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος εξαιτίας του ιδιαίτερα πυκνού πλέγματος που απαιτείται για την άμεση επίλυση των δομών στροβιλότητας που σχετίζονται με τις μεγάλες κλίμακες τύρβης. Οι Howard και Pereira αντιμετώπισαν την επίδραση του πύργου της Α/Γ στη ροή με την προηγούμενη προσομοίωση κάνοντας χρήση της θεώρησης της γεωμετρικής ομοιότητας όπου η απλοποίηση αυτή θεωρεί ουσιαστικά ότι ο σχηματισμός μεγάλων δινών εξαρτάται από την γεωμετρία της Α/Γ καθώς και του ομόρρου της. 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 Δανέζικο παράκτιο αιολικό πάρκο Horns Rev [10] [10]. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα

που αξιολογήθηκαν με το πιο απλό μοντέλο WAsP [11], το πιο σύνθετο WindFarmer που βασίζεται στη θεωρία του Ainslie [12] και το πιο πολύπλοκο WAKEFARM[13] που βασίζεται στην παραβολική επίλυση των Navier-Stokes, και τέλος τα μοντέλα Fluent και 3D-NS 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 διερευνάται η κατά το δυνατόν βέλτιστη αριθμητική προσομοίωση της ροής στον ομόρρο της ανεμογεννήτριας μέσω της αξονοσυμμετρικής επίλυσης των εξισώσεων N-S, . Η μοντελοποίηση του δρομέα της μηχανής επιτυγχάνεται μέσω της απλοποιημένης θεώρησης δίσκου-ορμής. Η μοντελοποίηση και εισαγωγή της τυρβώδους συνεκτικότητας του ρευστού στις Navier-Stokes πραγματοποιείται σύμφωνα με τα μοντέλα του Ainslie. Η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας. Μετά τον υπολογισμό της προσομοίωσης του πεδίου του ομόρρο της Α/Γ, τα δεδομένα συγκρίνονται με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για μεμονωμένες Α/Γ και αιολικά πάρκα. Επιπλέον, διερευνάται η αλληλεπίδραση μεταξύ των Α/Γ σε υποθετικό αιολικό πάρκο μεταβάλλοντας τη διάταξη των μηχανών.

Στο Κεφάλαιο 2 θα γίνει μαθηματική διατύπωση του υφιστάμενου προβλήματος, θα διατυπωθούν δηλαδή οι διακριτοποιημένες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του πεδίου, τα μοντέλα τύρβης που εφαρμόστηκαν καθώς και η αλγοριθμική μέθοδος που ακολουθήθηκε. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι εφαρμογές της παρούσας μεθόδου σε μεμονωμένες μηχανές και αιολικά πάρκα, ενώ απεικονίζονται και οι συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα. Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Μαθηματική διατύπωση και αριθμητική επίλυση του προβλήματος

Στο παρόν εδάφιο θα διατυπωθούν οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος σε διαφορική μορφή.

Στην συνέχεια αυτές οι εξισώσεις θα αδιαστατοποιηθούν με κατάλληλα μεγέθη και κατόπιν θα γίνει διακριτοποίησή τους προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αριθμητική τους επίλυση.

2.1 Διατύπωση των εξισώσεων Navier-Stokes

Οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής σε κυλινδρικές συντεταγμένες είναι:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (2.1.1)$$

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruv)}{\partial r} = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \quad (2.1.2)$$

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv^2)}{\partial r} = u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \quad (2.1.3)$$

Σε συντηρητική μορφή οι εξισώσεις ορμής γράφονται :

Χ-άξονας

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruv)}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] \quad (2.1.4)$$

r-άξονας

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv^2)}{\partial r} - \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{v}{r^2} \right] \quad (2.1.5)$$

Για την αδιαστατοποίηση των μηκών και των ταχυτήτων χρησιμοποιούνται η ακτίνα του δρομέα R και η ταχύτητα αδιατάρακτης ροής U_∞ . Η πίεση αδιαστατοποιείται με την ποσότητα ρU_∞^2 .

$$x^* = \frac{x}{R}, r^* = \frac{r}{R}, p^* = \frac{p}{\rho U_\infty^2} - \frac{p_\infty}{\rho U_\infty^2}, u^* = \frac{u}{U_\infty}, v^* = v/U_\infty$$

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

X-άξονας

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruv)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] \quad (2.1.6)$$

r-άξονας

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv^2)}{\partial r} - \frac{u^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{v}{r^2} \right] \quad (2.1.7)$$

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 $1/Re$ αντί της κινηματικής συνεκτικότητας ν , όπου Re είναι ο χαρακτηριστικός αριθμός Reynolds ως προς την ακτίνα του δρομέα, $Re = U_\infty R/\nu$.

Για την επίλυση τυρβωδών πεδίων ροής χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), οι οποίες προκύπτουν από τη μέση χρονική τιμή των εξισώσεων Navier-Stokes (averaging). Οι εξισώσεις RANS έχουν ίδια μορφή με τις Navier-Stokes, αλλά η διαδικασία της μέσης τιμής στο χρόνο εισάγει τις τυρβώδεις τάσεις πλέον των συνεκτικών. Η μοντελοποίηση των τυρβωδών τάσεων γίνεται με την υπόθεση Boussinesq, σύμφωνα με την οποία ο τανυστής των τάσεων είναι ανάλογος του τανυστή των παραμορφώσεων :

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.1.8)$$

, δ_{ij} : Kronecker delta, k: τυρβώδης κινητική ενέργεια

όπου η τυρβώδης συνεκτικότητα μ_t ορίζεται κατά αντιστοιχία με την κινηματική συνεκτικότητα για τις συνεκτικές τάσεις. Σε προβλήματα πλήρως τυρβώδους ροής οι τυρβώδεις τάσεις είναι γενικά σημαντικά μεγαλύτερες από τις συνεκτικές, που σημαίνει ότι και η τυρβώδης συνεκτικότητα είναι αντίστοιχα μεγαλύτερη από την κινηματική συνεκτικότητα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι προσέγγισης της τυρβώδους συνεκτικότητας. Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει αναλυτική περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, καθώς και των εξισώσεων του. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες εξισώσεις RANS για τυρβώδες πεδίο ροής, οι τυρβώδεις τάσεις έχουν αντικατασταθεί σύμφωνα με τη σχέση (2.1.7) (υπόθεση Boussinesq). Η ουσιαστική διαφορά σε σχέση με τις Navier-Stokes είναι ότι στις εξισώσεις

ορμής ,στο συντελεστή του όρου διάχυσης , $1/Re$ προστίθεται ο όρος $\nu_t/U_\infty R$ που περιλαμβάνει την τυρβώδη συνεκτικότητα.

Αδιάστατες εξισώσεις RANS για τυρβώδες πεδίο ροής

X-άξονα

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruv)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{1}{Re} + \frac{\nu_t}{U_\infty R} \right] \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] \quad (2.1.9)$$

r-άξονας

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv^2)}{\partial r} - \frac{u^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left[\frac{1}{Re} + \frac{\nu_t}{U_\infty R} \right] \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{v}{r^2} \right] \quad (2.1.10)$$

Τα μεγέθη που λαμβάνουν μέρος στις παραπάνω εξισώσεις είναι :

- u, v : οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά την αξονική και την ακτινική διεύθυνση της ροής
- p : Η πίεση
- ν : κινηματική συνεκτικότητα
- ν_t : τυρβώδης συνεκτικότητα
- ρ : πυκνότητα

Τα προσδιοριστέα μεγέθη του προβλήματος εδώ είναι τα u, v, p . Ο προσδιορισμός της τυρβώδους συνεκτικότητας ν_t θα γίνει σύμφωνα με το μοντέλο του Ainslie και αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

2.2 Μοντέλο τύρβης Ainslie

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της τύρβης είναι το μοντέλο Ainslie [3]. Το μοντέλο αυτό ,είναι κατά τα άλλα ένα απλό πρότυπο προσομοίωσης της τύρβης ,με χαμηλό υπολογιστικό κόστος, όμως δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και μοντελοποιεί αποτελεσματικά τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι τελευταίες πρέπει να τονιστεί 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 ανάμειξη των ομόρρων.

Οι διάφορες μελέτες που έχουν διεξαχθεί γύρω από τις Α/Γ και την ανάπτυξη του ομόρρου , υποδεικνύουν όπως άλλωστε έχει προαναφερθεί στην εισαγωγή, την ύπαρξη ενός πολυσύνθετου κοντινού ομόρρου ,ο οποίος εκτείνεται από δύο έως τέσσερεις

διαμέτρους κατάντι της ροής, όπου εντοπίζονται οι μέγιστες ενεργειακές απώλειες της ροής. Αυτό συμβαίνει διότι η αναφερθείσα περιοχή επηρεάζεται έντονα από την απορρόφηση ενέργειας από τον δρομέα της μηχανής. Η πτώση πίεσης προφανώς επηρεάζει το έλλειμμα της ταχύτητας, το οποίο συναρτήσει της διατήρησης της μάζας προκαλεί την διεύρυνση του πάχους του οριακού στρώματος του ομόρρου. Το μέγιστο έλλειμμα αναμένεται να σημειωθεί κατά τον άξονα της μηχανής ανάμεσα στην απόσταση από μία έως δύο διαμέτρους του δρομέα. Η μεγάλης κλίμακας τύρβη δημιουργείται στο οριακό στρώμα του ομόρρου, και εξαπλώνεται στον πυρήνα του ομόρρου, φτάνοντας στον άξονα του ομόρρου περίπου στις 3 με 5 διαμέτρους κατάντι της ροής. Το τελικό έλλειμμα ορμής πάντως καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ωστική δύναμη που ασκείται στη ροή από την μηχανή, το μέτρο της οποίας εξαρτάται από τον συντελεστή ώσης του δρομέα, ο οποίος και αποτελεί δείκτη για τις ρυθμίσεις λειτουργίας της μηχανής (tip-speed-ratio, pitch angle). Οπότε η αποκατάσταση της ροής πίσω από την Α/Γ συνίσταται από την επιρροή των επιπέδων τύρβης στην ατμόσφαιρα καθώς και από την ανάπτυξη τύρβης στο οριακό στρώμα του ομόρρου της. 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 της περιβαλλοντικής σταθερότητας.

Παρουσίαση εξισώσεων για την μοντελοποίηση της τύρβης

Το χρησιμοποιούμενο εργαλείο για την προσομοίωση της τύρβης στο παρόν πρόβλημα συνίσταται από τον J.F.Ainslie[3]. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ο τελικός τύπος που περιγράφει την τυρβώδη συνεκτικότητα είναι:

$$\epsilon = F [k_l b (U_0 - U_C) + K_M] \quad (2.2.1)$$

Όπου F 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.

$$F = \begin{cases} 0.65 + \left[\frac{x-4.5}{23.32} \right]^{1/3} & x < 5.5 \\ 1 & x \geq 5.5 \end{cases} \quad (2.2.2)$$

Το μέγεθος k_l σχετίζεται με το στρώμα διάτμησης του ομόρρου (wake shear layer) και είναι ανεξάρτητο από την τύρβη του 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 έλλειμμα ταχύτητας. Στην εξίσωση 2.2.1 το b είναι το εύρος (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 στον κεντρικό άξονα του ομόρρου (centerline). Τέλος το K_M συνδέεται με την ατμοσφαιρική τύρβη και η μέθοδος εκτίμησής του περιγράφεται παρακάτω.

Εκτίμηση του συντελεστή K_M

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

$$K_M = \frac{ku_* z_{hub}}{\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \quad (2.2.3)$$

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

Στην εξίσωση (2.2.3) k είναι η σταθερά Von Karman και εδώ λαμβάνεται ίση με 0.4, u_* είναι η ταχύτητα τριβής, z_{hub} είναι το ύψος του κέντρου του δρομέα της Α/Γ.

Η ταχύτητα u_* , υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$u_* = \frac{u_{hub}k}{[\ln\left(\frac{z_{hub}}{z_0}\right) + \psi_m\left(\frac{z}{L}\right)]} \quad (2.2.4)$$

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:

$$z_0 = z_{hub} e^{\left(-\frac{0,9895}{TI}\right)} \quad (2.2.5)$$

όπου TI είναι η ένταση της τύρβης

Το μέγεθος $\psi_m\left(\frac{z}{L}\right)$ μεταβάλλει τη μορφή του λογαριθμικού προφίλ του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος ανάλογα με τις συνθήκες ευστάθειας. Διακρίνουμε τις ακόλουθες 3 περιπτώσεις:

- $\psi_m\left(\frac{z}{L}\right) = 0$, ουδέτερες συνθήκες (neutral) (2.2.6α)

- $\psi_m\left(\frac{z}{L}\right) = -\frac{5z}{L}, L > 0$ ευσταθείς συνθήκες(stable) (2.2.6β)

- $\psi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \ln\left[\left(\frac{1+x^2}{2}\right)\left(\frac{1+x^2}{2}\right)\right] - 2\arctan x + \frac{\pi}{2}, L < 0$ ασταθείς(unstable)
(2.2.6γ)

Στην σχέση (2.2.5γ) το χ ορίζεται ως εξής:

$$\chi = \left(1 - \frac{16z}{L}\right)^{1/4}$$

Οι παραπάνω σχέσεις είναι ημι-εμπειρικές και προκύπτουν από τη θεωρία του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος [αναφορά] και προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα

Ο παράγοντας L ονομάζεται μήκος Monin-Obukhov που χαρακτηρίζει τις συνθήκες ευστάθειας του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος ($L > 0$ για ευσταθείς συνθήκες, $L < 0$ για ασταθείς συνθήκες). Σύμφωνα με τη θεωρία ομοιότητας Monin-Obukhov, η παραπάνω θεώρηση ισχύει στην περιοχή όπου οι κάθετες διακυμάνσεις προσανατολισμού του ανέμου, η πίεση του οριακού στρώματος, η υγρασία και η θερμοκρασία της ροής παραμένουν σταθερές. Οπότε τα αδιαστατοποιημένα χαρακτηριστικά της τύρβης εξαρτώνται από έναν περιορισμένο αριθμό παραγόντων που είναι η ταχύτητα τριβής u_* , το ύψος της μηχανής από το έδαφος z_{hub} , η θερμοκρασία της (νοητής) επιφάνειας του ρευστού θ_0 και η κινηματική θερμότητα του ρευστού W_θ . Το μήκος L είναι μία συνάρτηση αυτών των παραγόντων και περιγράφει τις συνθήκες της περιβαλλοντικής τύρβης ως εξής:

$$L = -\frac{u_*^3 \theta_0}{kgW_\theta} \quad (2.2.7)$$

, όπου k η σταθερά Von Karman και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

2.3 Διακριτοποίηση των εξισώσεων/Αλγόριθμος SIMPLE

Για την διακριτοποίηση των εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων σε συνδυασμό με κατάλληλο πλέγμα(grid). Ακολουθώντας τη λογική του Patankar [15], αρχικά (παρ.2.3.1) περιγράφεται η μέθοδος διακριτοποίησης της γενικής εξίσωσης συναγωγής-διάχυσης για τυχαίο βαθμωτό μέγεθος φ . Στη συνέχεια (παρ. 2.3.2), η απορρέουσα διακριτοποιημένη εξίσωση εφαρμόζεται για την περίπτωση όπου το μέγεθος φ αντιστοιχεί σε κάποια συνιστώσα του πεδίου ταχύτητας. Τότε η γενική-εξίσωση συναγωγής-διάχυσης ανάγεται στις εξισώσεις ορμής, με την προϋπόθεση ότι στο δεξί μέλος προστίθεται και η κλίση της πίεσης. Επειδή όμως στις εξισώσεις του ασυμπίεστου ρευστού δεν περιλαμβάνεται επιπλέον εξίσωση που υπολογίζει απευθείας την πίεση (όπως είναι π.χ. η καταστατική εξίσωση στην περίπτωση του συμπιεστού ρευστού) θα πρέπει να γίνει κατάλληλη διαχείριση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής, ώστε με να προκύψει με έμμεσο τρόπο το πεδίο ροής u, v, p . Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην παράγραφο 2.3.3 και αποτελεί τον αλγόριθμο SIMPLE. Σύμφωνα με αυτόν, η εξίσωση συνέχειας

μετατρέπεται σε μία εξίσωση για τη διόρθωση της πίεσης και το αρχικό υποτιθέμενο πεδίο πίεσης διορθώνεται επαναληπτικά, έως ότου προκύψει πεδίο ταχυτήτων που ικανοποιεί τις εξισώσεις ορμής. Τέλος, στην παράγραφο 2.3.3 διατυπώνονται οι συνοριακές συνθήκες για το συγκεκριμένο πρόβλημα ανάπτυξης αξονοσυμμετρικού ομόρρου.

2.3.1 Γενική εξίσωση συναγωγής-διάχυσης

Η γενική διαφορική μορφή της εξίσωσης της συνέχειας σε διανυσματική μορφή γράφεται ως εξής :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.3.1)$$

Αν οι εξαρτημένες μεταβλητές του προβλήματος δηλώνονται με μία γενικευμένη μεταβλητή ϕ , τότε η γενική διαφορική εξίσωση σε γενικευμένη μορφή γράφεται ως εξής :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S \quad (2.3.2)$$

Όπου Γ είναι ο συντελεστής διάχυσης, S είναι όρος πηγής και \vec{u} είναι το πεδίο της ταχύτητας (διανυσματικό).

Για αξονοσυμμετρικό πρόβλημα η γενικευμένη διαφορική εξίσωση (2.3.2) γράφεται σε κυλινδρικές συντεταγμένες (x,r) στην ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rJ_r)}{\partial r} = S \quad (2.3.3)$$

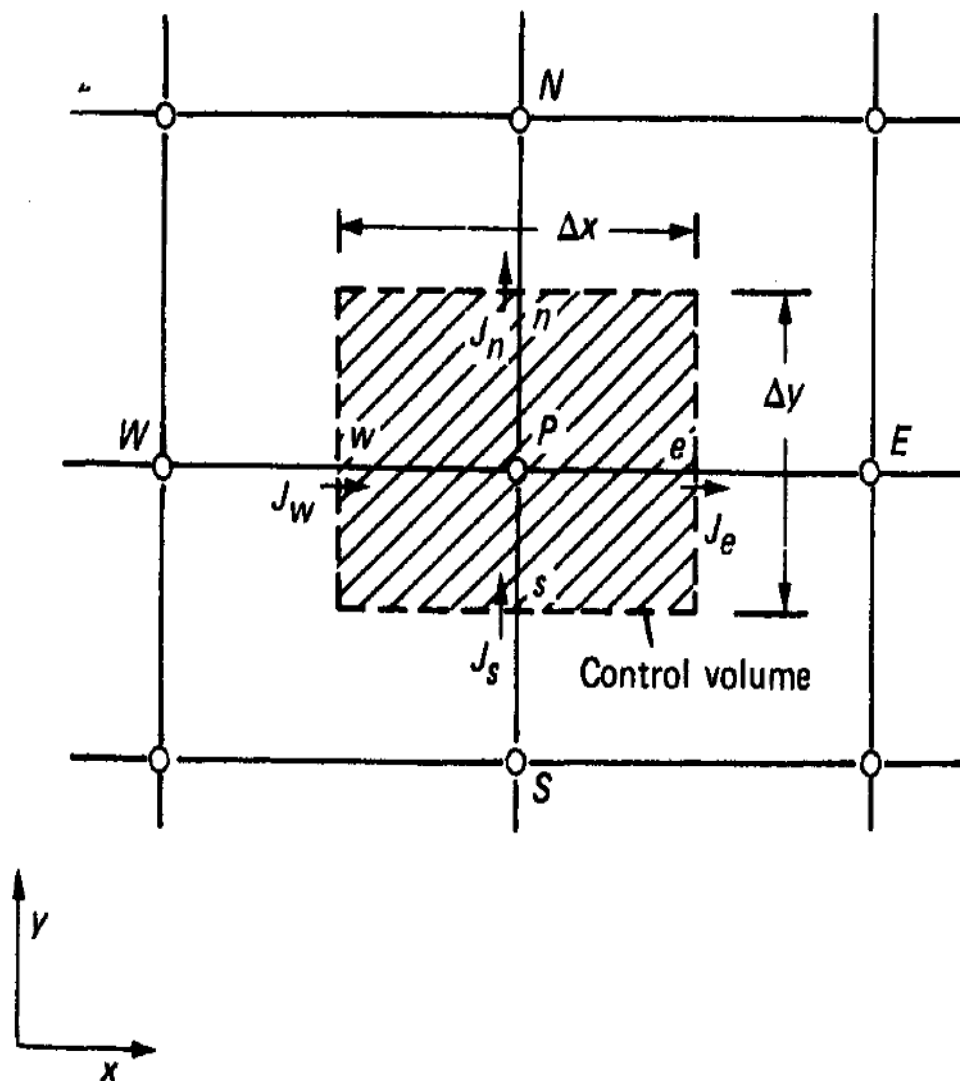
Όπου J_x και J_r οι συνολικές (συναγωγή και διάχυση) ροές ορμής ορίζονται ως εξής:

$$J_x = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.3.4)$$

$$J_r = \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (2.3.5)$$

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης 2.3.3 στον όγκο ελέγχου που απεικονίζεται στο σχήμα 2.3.1 δίνει:

$$(\rho_p \phi_p - \rho_p^0 \phi_p^0) \frac{\Delta x 2\pi r \Delta r}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_c + S_p \phi_p) \Delta x 2\pi r \Delta r \quad (2.3.6)$$



Σχήμα 2.3.1: Στοιχειώδης όγκος διακριτοποίησης της εξίσωσης 2.3.3.

όπου ο δείκτης p (point) είναι το κεντρικό σημείο του στοιχειώδους όγκου όπου υπολογίζεται η τιμή του μεγέθους ϕ και οι δείκτες e (east), w (west), n (north), s (south) είναι τα οριακά σημεία του όγκου ελέγχου όπου $J_e = \int J_x 2\pi r dr$, $J_n = \int J_r dx$, σχέσεις ολοκληρωμένες στις επιφάνειες e, n και ομοίως υπολογίζονται και υπόλοιποι όροι.

Κατά τον ίδιο τρόπο μπορούμε να ολοκληρώσουμε την εξίσωση της συνέχειας στον όγκο ελέγχου και παίρνουμε

$$(\rho_p - \rho_p^0) \frac{\Delta x 2\pi r \Delta r}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \quad (2.3.7)$$

Όπου οι συντελεστές $F_e - F_w + F_n - F_s$ είναι οι εντάσεις συναγωγής στην επιφάνεια των όγκων ελέγχου και εκφράζονται από τις εξής σχέσεις:

$$F_e = (\rho u)_e 2\pi r \Delta r \quad (2.3.8)$$

$$F_w = (\rho u)_w 2\pi r \Delta r \quad (2.3.9)$$

$$F_n = (\rho u)_n 2\pi r \Delta x \quad (2.3.10)$$

$$F_s = (\rho u)_s 2\pi r \Delta x \quad (2.3.11)$$

Εάν τώρα πολλαπλασιάσουμε την εξίσωση 2.3.7 με το μέγεθος φ_p και την αφαιρέσουμε από την εξίσωση 2.3.4 :

$$\begin{aligned} (\varphi_p - \varphi_p^0) \rho_p^0 \frac{\Delta x 2\pi r \Delta r}{\Delta t} + (J_e - F_e \varphi_p) - (J_w - F_w \varphi_p) + (J_n - F_n \varphi_p) - (J_s - F_s \varphi_p) = \\ (S_c + S_p \varphi_p) \Delta x 2\pi r \Delta r \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

Στη συνέχεια παίρνουμε:

$$J_e - F_e \varphi_p = a_E (\varphi_P - \varphi_E) \quad (2.3.13)$$

$$J_W - F_W \varphi_p = a_W (\varphi_W - \varphi_P) \quad (2.3.14)$$

Όπου:

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [-F_e, 0] \quad (2.3.15)$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [F_w, 0] \quad (2.3.16)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, P_e , P_w είναι οι αριθμοί Peclet ($P=F/D$), $A(|P|)$ είναι συνάρτηση του αριθμού Peclet και D_e, D_w , είναι οι αγωγιμότητες διάχυσης.

Η τελική διακριτοποιημένη εξίσωση συνεπώς γράφεται σύμφωνα με την ανωτέρω ανάλυση :

$$a_p \varphi_p = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W + a_N \varphi_N + a_S \varphi_S + b \quad (2.3.17)$$

Όπου

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [-F_e, 0] \quad (2.3.18\alpha)$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [F_w, 0] \quad (2.3.19\beta)$$

$$a_N = D_N A(|P_N|) + [F_N, 0] \quad (2.3.20\gamma)$$

$$a_S = D_S A(|P_S|) + [F_S, 0] \quad (2.3.21\delta)$$

$$b = S_C \Delta x 2\pi r \Delta r \quad (2.3.22)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S - S_p \Delta x 2\pi r \Delta r \quad (2.3.23)$$

Οι αντίστοιχες αγωγιμότητες διάχυσης είναι:

$$D_e = \frac{\Gamma_e 2\pi r \Delta r}{(\delta x)_e} \quad (2.3.24)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w 2\pi r \Delta r}{(\delta x)_w} \quad (2.3.25)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x 2\pi r}{(\delta x)_n} \quad (2.3.26)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x 2\pi r}{(\delta x)_s} \quad (2.3.27)$$

όπου Γ_i οι διακριτοποιημένοι συντελεστές διάχυσης .Η συνάρτηση του αριθμού Peclet $A(|P|)$ εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο σχήμα διακριτοποίησης. Σύμφωνα με το υβριδικό σχήμα ισχύει:

$$A(|P|) = [0, (1 - 0.5|P|)] \quad (2.3.28)$$

Και οι αριθμοί Peclet :

$$P_e = \frac{F_e}{D_e} \quad (2.3.29\alpha)$$

$$P_w = \frac{F_w}{D_w} \quad (2.3.29\beta)$$

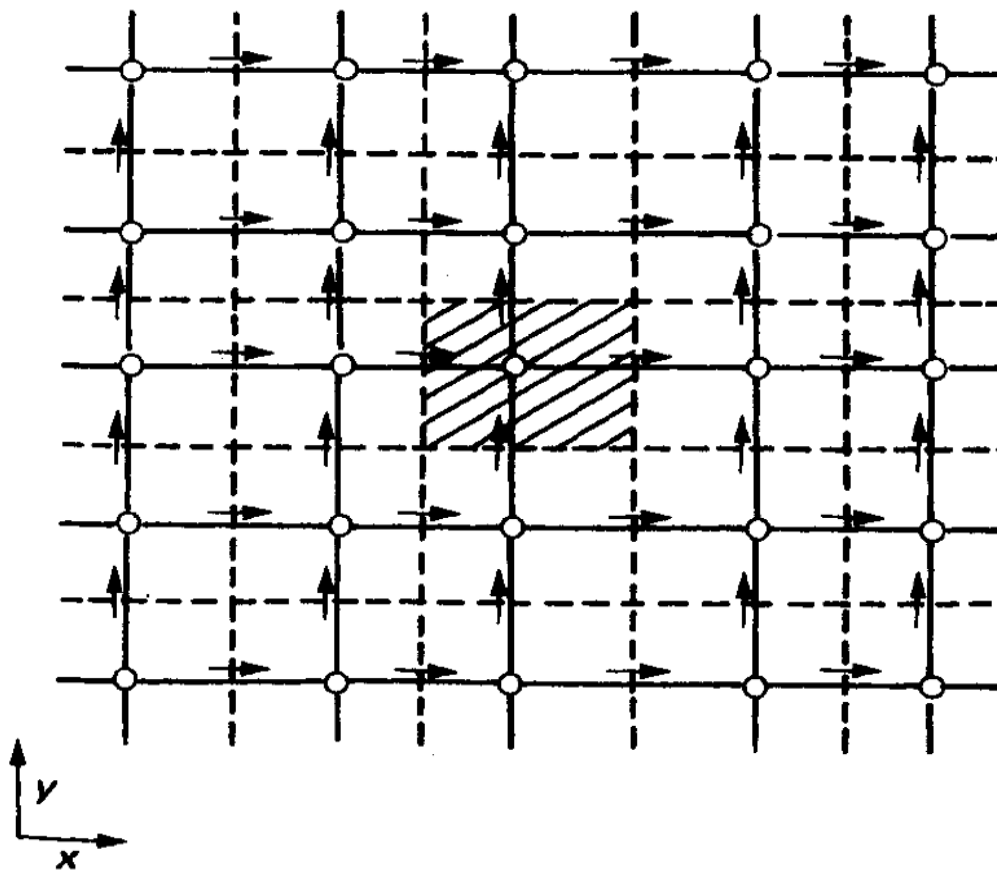
$$P_n = \frac{F_n}{D_n} \quad (2.3.29\gamma)$$

$$P_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (2.3.29\delta)$$

2.3.2 Διακριτοποίηση των εξισώσεων ορμής – Η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης

Εφόσον διατυπώθηκε η μεθοδολογία διακριτοποίησης της γενικής εξίσωσης συναγωγής-διάχυσης, θα εφαρμόσουμε τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 2.3.1 για την διακριτοποίηση των εξισώσεων του προβλήματος που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.1, δηλαδή τις εξισώσεις ορμής. Αν θεωρηθεί το πεδίο της πίεσης γνωστό(από υπόθεση), τότε η λύση των εξισώσεων ορμής γίνεται εφικτή μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας για τη μεταβλητή ϕ . Προφανώς η μεταβλητή ϕ είναι η εκάστοτε εξαρτημένη μεταβλητή προς επίλυση(u, v συνιστώσες της ταχύτητας).

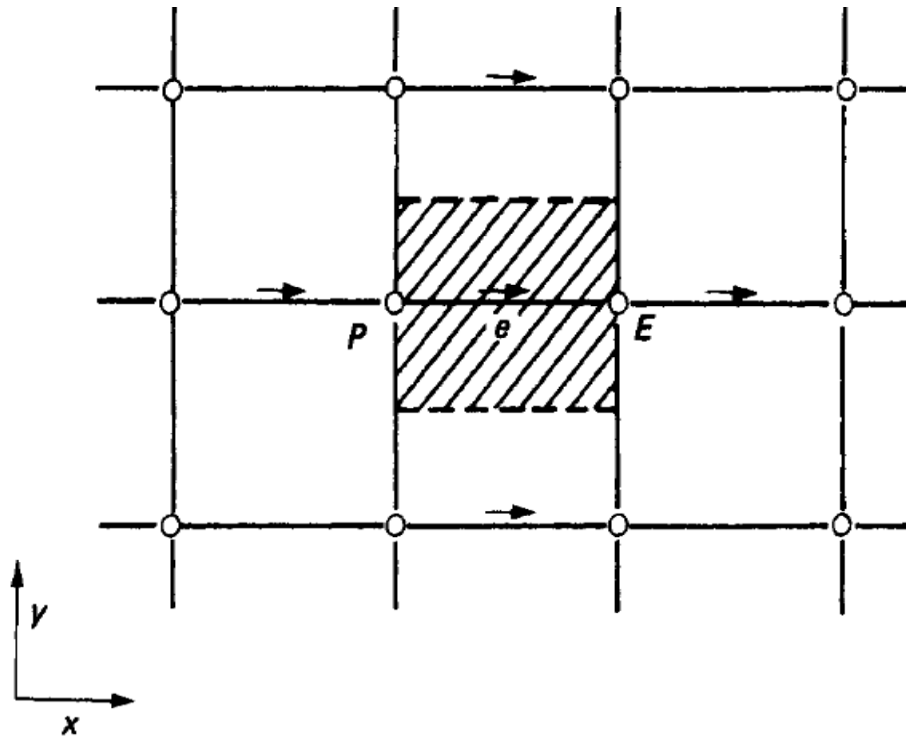
Το χωρίο υπολογισμού λαμβάνεται ορθογωνικό στο επίπεδο x, y . Για τον υπολογισμό τόσο της κάθε συνιστώσας της ταχύτητας, όσο και του πεδίου της πίεσης χρησιμοποιείται διαφορετικό υπολογιστικό πλέγμα(staggered grid). Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι γιατί η διαφορά πίεσης που περιέχεται στην εξίσωση της ορμής είναι μεταξύ ανά δύο σημείων (grid points) και όχι μεταξύ των γειτονικών. Αρχικά ορίζεται το υπολογιστικό χωρίο(grid) της πίεσης. Στην συνέχεια το πλέγμα της u συνιστώσας μετατοπίζεται $\Delta r/2$ κατά την ακτινική κατεύθυνση. Αντίστοιχα ο ορισμός του πλέγματος της v συνιστώσας επιτυγχάνεται με αντίστοιχη μετατόπιση κατά τον άξονα x . Η διεύθυνση υπολογισμού των εξαρτημένων μεταβλητών του προβλήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.2.



Σχήμα 2.3.2: Οι θέσεις υπολογισμού των συνιστωσών της ταχύτητας u, v

Η διακριτοποιημένη εξίσωση για την συνιστώσα u της ταχύτητας γράφεται σύμφωνα με την διακριτοποιημένη εξίσωση 2.3.17:

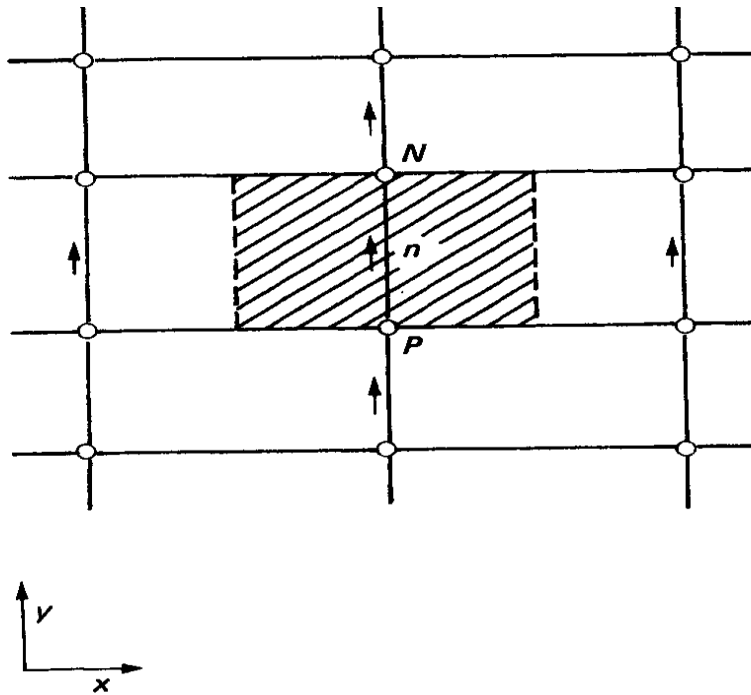
$$a_e u_e = \sum a_{nb} U_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e \quad (2.3.30\alpha)$$



Σχήμα 2.3.3: Ο στοιχειώδης όγκος υπολογισμού της συνιστώσας u .

Η διακριτοποιημένη εξίσωση για την κατεύθυνση r γράφεται κατά τον ίδιο τρόπο ως εξής:

$$a_n u_n = \sum a_{nb} U_{nb} + b + (p_P - p_N) A_n \quad (2.3.30\beta)$$



Σχήμα 2.3.4: Ο στοιχειώδης όγκος υπολογισμού της συνιστώσας v .

Η επίλυση των εξισώσεων ορμής απαιτεί δεδομένο πεδίο πίεσης p . Όταν αυτό δεν είναι γνωστό, χρησιμοποιείται μια εκτίμηση του πεδίου πίεσης p^* , η οποία μέσω κατάλληλης επαναληπτικής διαδικασίας μέσω της μετατροπής της εξίσωσης της συνέχειας σε εξίσωση διόρθωσης της πίεσης, συγκλίνει στην πραγματική τιμή p . Οι συνιστώσες u^*, v^* οι οποίες όπως προκύπτει από τα παραπάνω αντιστοιχούν σε πιέσεις πεδίου p^* , προκύπτουν από την επίλυση των ακόλουθων διακριτοποιημένων εξισώσεων της ορμής :

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (2.3.31\alpha)$$

$$a_n u_n^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n \quad (2.3.31\beta)$$

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το πεδίο ταχύτητας όπως έχει επιλυθεί βάσει της υπόθεσης $p=p^*$, δεν ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Το τελικό πεδίο p δίνεται από την εξίσωση $p = p^* + p'$, όπου p' καλείται διόρθωση της πίεσης. Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι τελικές συνιστώσες της ταχύτητας :

$$U = U^* + U'$$

$$V = V^* + V'$$

Όπου τα τονούμενα μεγέθη εισάγονται ως οι διορθώσεις των ταχυτήτων.

Εάν αφαιρέσουμε κατά μέλη την εξίσωση 2.3.31α από την εξίσωση 2.3.30α παίρνουμε

$$a_e u'_e = \sum a_{nb} u'_{nb} + (p'_P - p'_E) A_e \quad (2.3.32)$$

Παραλείποντας τον όρο $\sum a_{nb} u'_{nb}$ από την τελευταία εξίσωση προκύπτει

$$u'_e = (p'_P - p'_E) A_e \quad (2.3.33\alpha)$$

ή

$$u'_e = d_e (p'_P - p'_E) \quad (2.3.33\beta)$$

όπου

$$d_e = \frac{A_e}{a_e} \quad (2.3.34)$$

Η εξίσωση (2.3.33β) είναι ο τύπος για τη διόρθωση της ταχύτητας που μπορεί να γραφτεί ως:

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E) \quad (2.3.35)$$

Ο αντίστοιχος τύπος για τη διόρθωση της V συνιστώσας είναι :

$$u_n = u_n^* + d_n (p'_P - p'_N) \quad (2.3.36)$$

Στην συνέχεια θα εκφράσουμε την εξίσωση της συνέχειας ως εξίσωση διόρθωσης της πίεσης p' . Η εξίσωση της συνέχειας σε πολικές συντεταγμένες γράφεται:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (2.3.37)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση αυτή πάνω στον στοιχειώδη όγκο ελέγχου παίρνουμε

$$[(\rho u)_e - (\rho u)_w] 2\pi r \Delta r + [(\rho u)_n - (\rho u)_s] \Delta x = 0 \quad (2.3.38)$$

Αντικαθιστώντας λοιπόν τις εξισώσεις διόρθωσης των ταχυτήτων στην εξίσωση της συνέχειας προκύπτει η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης:

$$a_p p'_p = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b \quad (2.3.2.39)$$

Όπου :

$$a_E = \rho_e d_e 2\pi r \Delta r \quad (2.3.40\alpha)$$

$$a_W = \rho_w d_w 2\pi r \Delta r \quad (2.3.40\beta)$$

$$a_N = \rho_N d_N \Delta x \quad (2.3.40\gamma)$$

$$a_S = \rho_S d_S \Delta x \quad (2.3.40\delta)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (2.3.40\epsilon)$$

$$b = [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] 2\pi r \Delta r [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x \quad (2.3.40\sigma\tau)$$

Όπως φαίνεται από την τελευταία εξίσωση ο όρος b αποτελεί όρο πηγής μάζας , όταν ο οποίος εκμηδενιστεί ,τότε μόνον ισχύει η εξίσωση της συνέχειας δηλαδή όταν η πίεση δεν επιδέχεται πλέον διόρθωση και συνεπώς έχει επιλυθεί το τελικό πεδίο της πίεσης.

2.3.3 Ο αλγόριθμος SIMPLE

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων του πεδίου ονομάζεται SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) και αποτελείται περιγραφικά από τα παρακάτω βήματα:

1. Εκτίμηση της πίεσης του πεδίου \mathbf{p}^* .
2. Επίλυση των εξισώσεων ορμής 2.3.31 ώστε να υπολογιστεί το πεδίο των συνιστωσών των ταχυτήτων $\mathbf{U}^*, \mathbf{V}^*$
3. Επίλυση της εξίσωσης συνέχειας για τον υπολογισμό της διόρθωσης της πίεσης \mathbf{p}'
4. Υπολογισμός του \mathbf{p} από την εξίσωση διόρθωσης της πίεσης
5. Υπολογισμός των συνιστωσών της ταχύτητας \mathbf{U}, \mathbf{V} από τις εξισώσεις διόρθωσης των ταχυτήτων
6. Θεώρηση της διορθωμένης πίεσης \mathbf{p} , ως της νέας υποθετικής λύσης του πεδίου της πίεσης \mathbf{p}^* , και εκ νέου εφαρμογή των παρακάτω βημάτων μέχρι μηδενισμού του όρου πηγής μάζας της εξίσωσης της συνέχειας.

2.3.4 Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος

Το υπολογιστικό χωρίο που διακριτοποιείται εκτείνεται κατά την οριζόντια κατεύθυνση 60 ακτίνες του δρομέα της Α/Γ και κατά την ακτινική κατεύθυνση 20 ακτίνες. Ο δρομέας της μηχανής τοποθετείται στην θέση (0,0) του υπολογιστικού χωρίου αφήνοντας 10 ακτίνες ανάντι και 50 κατάντι της μηχανής κατά την κατεύθυνση x . Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος που διατυπώθηκαν για την αριθμητική επίλυσή του. Αρχικά διευκρινίζεται ότι το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ορθογωνικής μορφής ως προς το μέγεθος των όγκων ελέγχου, ώστε να επιλυθεί με την κατάλληλη ακρίβεια η ροή με το χαμηλότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος. Ο άξονας συμμετρίας του προβλήματος ορίζεται ως το κατώτερο όριο του πλέγματος για τη διόρθωση της πίεσης. Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος διατυπώνονται ως εξής:

➤ Οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας:

- Δυτικό σύνορο : $u = u_{\infty}$ (συνθήκη Dirichlet)
- Ανατολικό σύνορο: $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ (συνθήκη Neuman)
- Βόρειο σύνορο: $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ (συνθήκη Neuman)
- Νότιο σύνορο: $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ (συνθήκη συμμετρίας)

➤ Ακτινική συνιστώσα ταχύτητας:

- Δυτικό σύνορο : $v = 0$ (συνθήκη Dirichlet)
- Ανατολικό σύνορο: $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$ (συνθήκη Neuman)
- Βόρειο σύνορο: $\frac{\partial v}{\partial r} = 0$ (συνθήκη Neuman)
- Νότιο σύνορο: $v = 0$ (συνθήκη συμμετρίας)

➤ Διόρθωση πίεσης

Οι οριακές συνθήκες για τη διόρθωση της πίεσης προκύπτουν από τις οριακές συνθήκες των ταχυτήτων. Παραδείγματος χάρη για το ανατολικό όριο του πλέγματος, όταν η ταχύτητα u_e είναι γνωστή στο σύνορο, τότε δεν υφίσταται διόρθωση για την ταχύτητα αυτή. Οπότε στην διακριτοποιημένη εξίσωση (2.3.40στ) ο όρος $d_e(p'_p - p'_E)$ δεν εισάγεται καθόλου. Δηλαδή η συνοριακή μορφή της εξίσωσης της διόρθωσης της πίεσης προκύπτει εάν θέσουμε $a_E = 0$ και $u_e^* = u_e$ ενώ $a_p = a_W + a_N + a_S$ στην (2.3.40ε).

Ομοίως προκύπτουν και οι υπόλοιπες οριακές συνθήκες για τη διόρθωση της πίεσης.

- Δυτικό σύνορο: $a_W = 0$, $u_w^* = u_w$, $a_p = a_E + a_N + a_S$
- Ανατολικό σύνορο: $a_E = 0$, $u_e^* = u_e$, $a_p = a_W + a_N + a_S$
- Βόρειο σύνορο: $a_N = 0$, $u_n^* = u_n$, $a_p = a_W + a_E + a_S$
- Νότιο σύνορο: $a_S = 0$, $u_s^* = u_s$, $a_p = a_W + a_N + a_E$

Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος εισάγονται στις εξισώσεις του μέσω των συντελεστών των εξισώσεων (2.3.40) για την διόρθωση της πίεσης και των εξισώσεων 2.3.31α και 2.3.31β για την οριζόντια και την ακτινική συνιστώσα αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 3

Εφαρμογές της Μεθόδου

Σε αυτό το εδάφιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις εφαρμογές που έγιναν με την παραπάνω αριθμητική μέθοδο. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για Α/Γ με διάφορα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και για διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες τύρβης. Επιπλέον η μέθοδος εφαρμόστηκε για αιολικά πάρκα με συγκεκριμένες διατάξεις και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.

3.1 Μεμονωμένη Ανεμογεννήτρια

Κατ' αρχάς θα αναφερθούν οι περιπτώσεις για τις οποίες εφαρμόστηκε η αριθμητική μέθοδος για την προσομοίωση του ομόρρου και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα πειραματικά τους δεδομένα για ορισμένες αποστάσεις από το δρομέα της μηχανής. Οι τρεις περιπτώσεις ονομάζονται ανάλογα με την τοποθεσία του αντίστοιχου πειράματος είναι οι εξής:

- Περίπτωση NIBE
- Περίπτωση SEXBIERUM
- Περίπτωση πειραματικού πάρκου EWTW του ECN

Η σύγκριση των ταχυτήτων πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένες αποστάσεις από το δρομέα της μηχανής και για συγκεκριμένες συνθήκες. Σε αυτό το εδάφιο διερευνάται η ακρίβεια (συμπεριλαμβανομένου και του υπολογιστικού κόστους) της μεθόδου που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του ομόρρου της μηχανής μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, με τα διατιθέμενα πειραματικά δεδομένα σε συγκεκριμένες αποστάσεις από την εκάστοτε ανεμογεννήτρια.

3.1.1 Περίπτωση NIBE

Η εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση της Α/Γ NIBE έγινε για ουδέτερες περιβαλλοντικές συνθήκες (neutral). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας NIBE και οι περιβαλλοντικές συνθήκες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά και συνθήκες Α/Γ NIBE

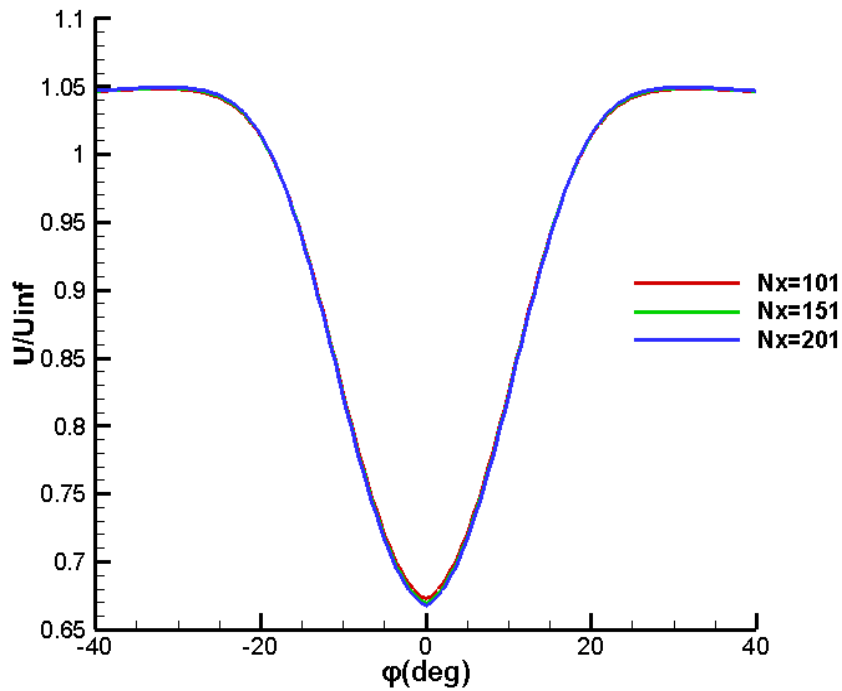
Z_{hub} (m)	45
U_{∞} (m/s)	8,55
C_t (thrust coefficient)	0,82
TI(turbulence intensity %)	9
R(radius m)	20

Στον κώδικα του παρόντος προβλήματος προκειμένου να καταστεί ο αλγόριθμος αποτελεσματικότερος (ως προς την σύγκλιση) για τα δεδομένα του προβλήματος, έγινε χρήση της τεχνικής υποχαλάρωσης (underrelaxation). Σε αυτό το πλαίσιο για κάθε ένα από τα μεγέθη(συνιστώσες ταχύτητας ,διόρθωση πίεσης) που εκτιμώνται στην αριθμητική προσομοίωση εισάγεται ένας συντελεστής υποχαλάρωσης(underrelaxation factor). Στον πίνακα 3.1.2 παρουσιάζονται οι συντελεστές υποχαλάρωσης για τα αντίστοιχα μεγέθη.

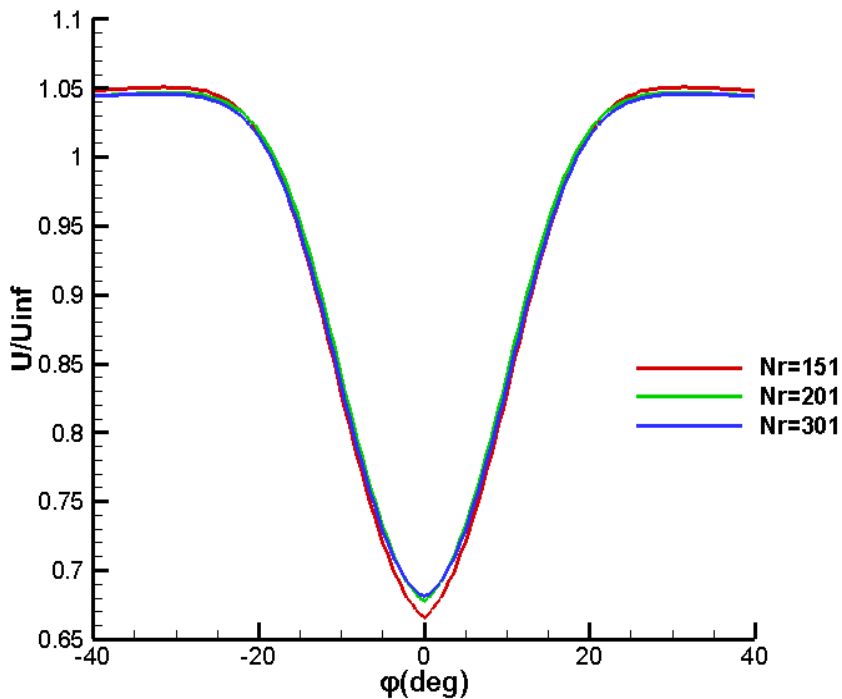
Πίνακας 3.1.2 Συντελεστές Υποχαλάρωσης (underalaxation factors)

Οριζόντια συνιστώσα U	0,1
Οριζόντια συνιστώσα V	0,1
Διόρθωση Πίεσης P'	0,05

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ομόρρου είναι ομοιόμορφο και επιλέχθηκε κατάλληλος αριθμός σημείων για την διακριτοποίηση του κατά την οριζόντια και ακτινική κατεύθυνση ώστε να αξιοποιείται η μέθοδος με την δυνατότερη ακρίβεια και με το χαμηλότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος αλλά και να υφίσταται ανεξαρτησία του πλέγματος δηλαδή η προσομοίωση του ομόρρου της Α/Γ να μην επηρεάζεται από την πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος. Αφότου έγιναν εφαρμογές για διάφορες πυκνότητες πλέγματος κατά τις δύο κατευθύνσεις , ο αριθμός των υπολογιστικών σημείων που επιλέχθηκε ως αρμόζων στο παρόν πρόβλημα είναι 151 κατά την οριζόντια κατεύθυνση και 201 κατά την ακτινική. Η ανεξαρτησία του πλέγματος κατά τις 2 κατευθύνσεις φαίνεται στα διαγράμματα 3.1.1 και 3.1.2 .

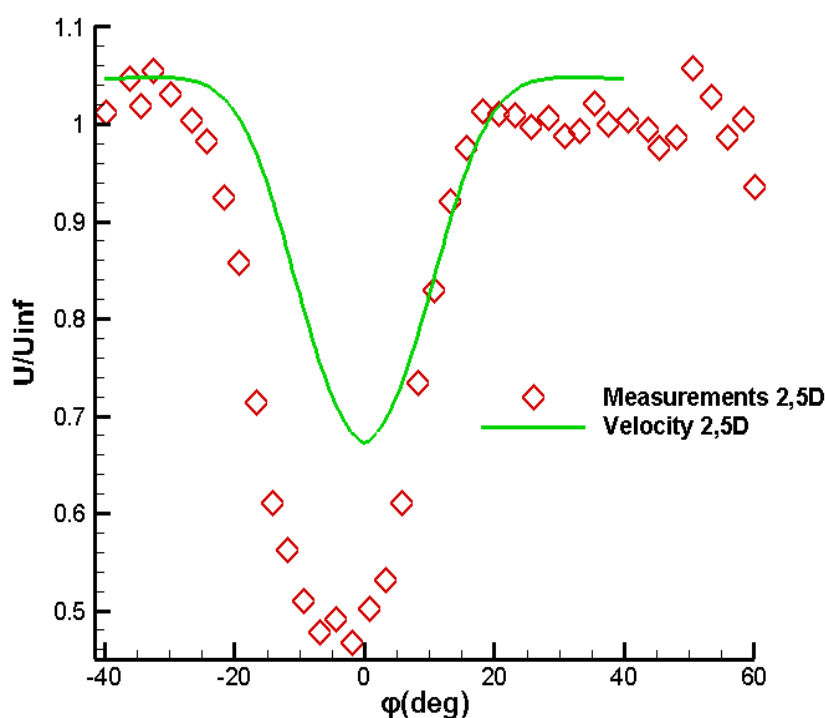


Διάγραμμα 3.1.1 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U για διαφορετικό αριθμό κόμβων πλέγματος κατά την οριζόντια κατεύθυνση, για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα στο ύψος της πλήμνης. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

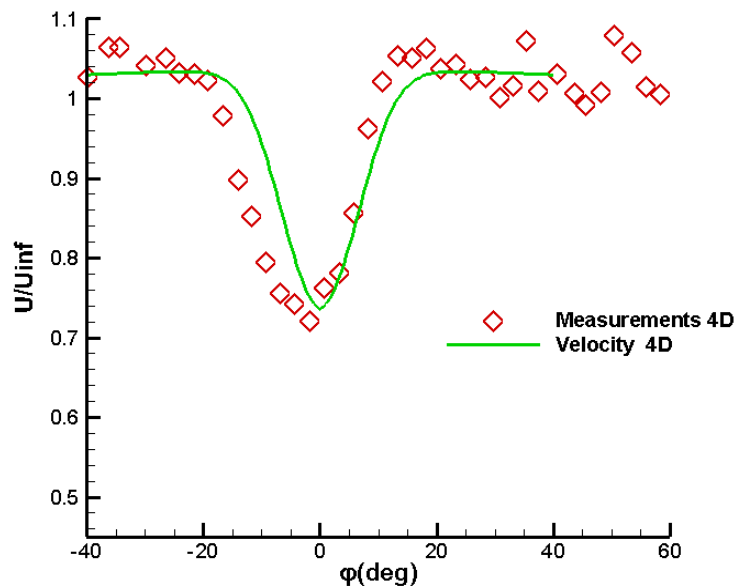


Διάγραμμα 3.1.2 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U για διαφορετικό αριθμό κόμβων πλέγματος κατά την ακτινική κατεύθυνση, για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα στο ύψος της πλήμνης. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

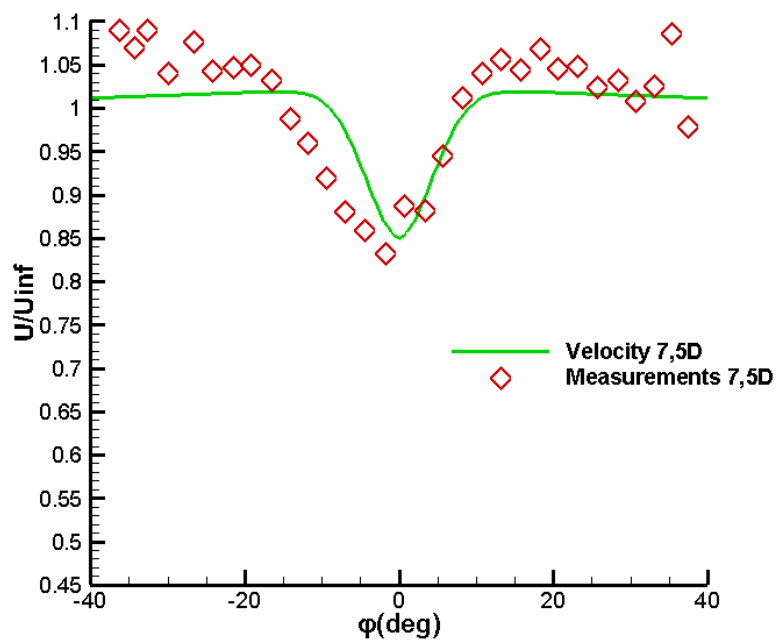
Στα διαγράμματα 3.1.3, 3.1.4 και 3.1.5 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των αδιάστατων, ως προς την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής, οριζόντιων συνιστωσών ταχύτητας με πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση πραγματοποιείται σε ένα τόξο 80 μοιρών εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας του δρομέα σε ακτίνες απόστασης 2.5, 4, 7.5 διαμέτρους από τη μηχανή. Όπως αναμένεται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ταχυτήτων στον κοντινό ομόρρου (2,5 διαμέτρους), έχουν κάποια απόκλιση ιδιαίτερα στην περιοχή του άξονα συμμετρίας. Η υποεκτίμηση ελλείμματος ταχύτητας στον κοντινό ομόρρου έχει παρατηρηθεί σε προσομοιώσεις με 3D προηγμένα υπολογιστικά εργαλεία ακόμη και μοντέλα τύρβης 2 εξισώσεων, όταν γίνεται χρήση της απλοποιημένης προσέγγισης του δίσκου ορμής, όπως εδώ. Το έλλειμμα ταχύτητας στον κοντινό ομόρρου επηρεάζεται σημαντικά τόσο από τη γεωμετρία του δρομέα, όσο και από τις δομές τύρβης μεγάλης κλίμακας. Για την ακριβέστερη προσομοίωση του δρομέα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί π.χ. ένα πρότυπο γραμμών ενέργειας (actuator line), ενώ για την ακριβέστερη προσομοίωση της τύρβης μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τεχνική προσομοίωσης μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation). Εν συνεχεία, παρατηρείται ότι στην περιοχή του μακρινού ομόρρου τα αποτελέσματα της αξονοσυμμετρικής προσομοίωσης προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα στις 4 και 7,5 διαμέτρους. Αυτό δικαιολογείται γιατί πλέον έχει πραγματοποιηθεί η τυρβώδης ανάμειξη των οριακών στρωμάτων των πτερυγίων και του ομόρρου της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 3.1.3 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Nibe για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

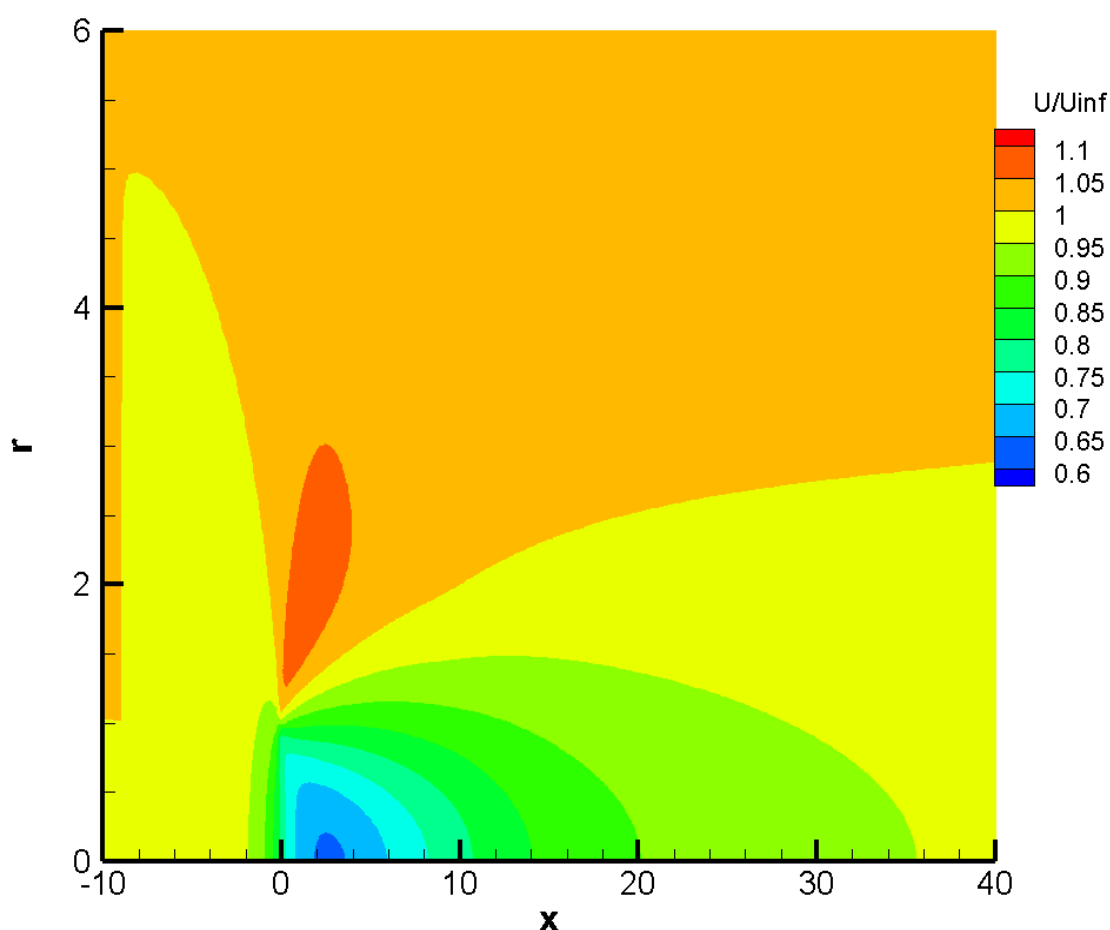


Διάγραμμα 3.1.4 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Nibe για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 4 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

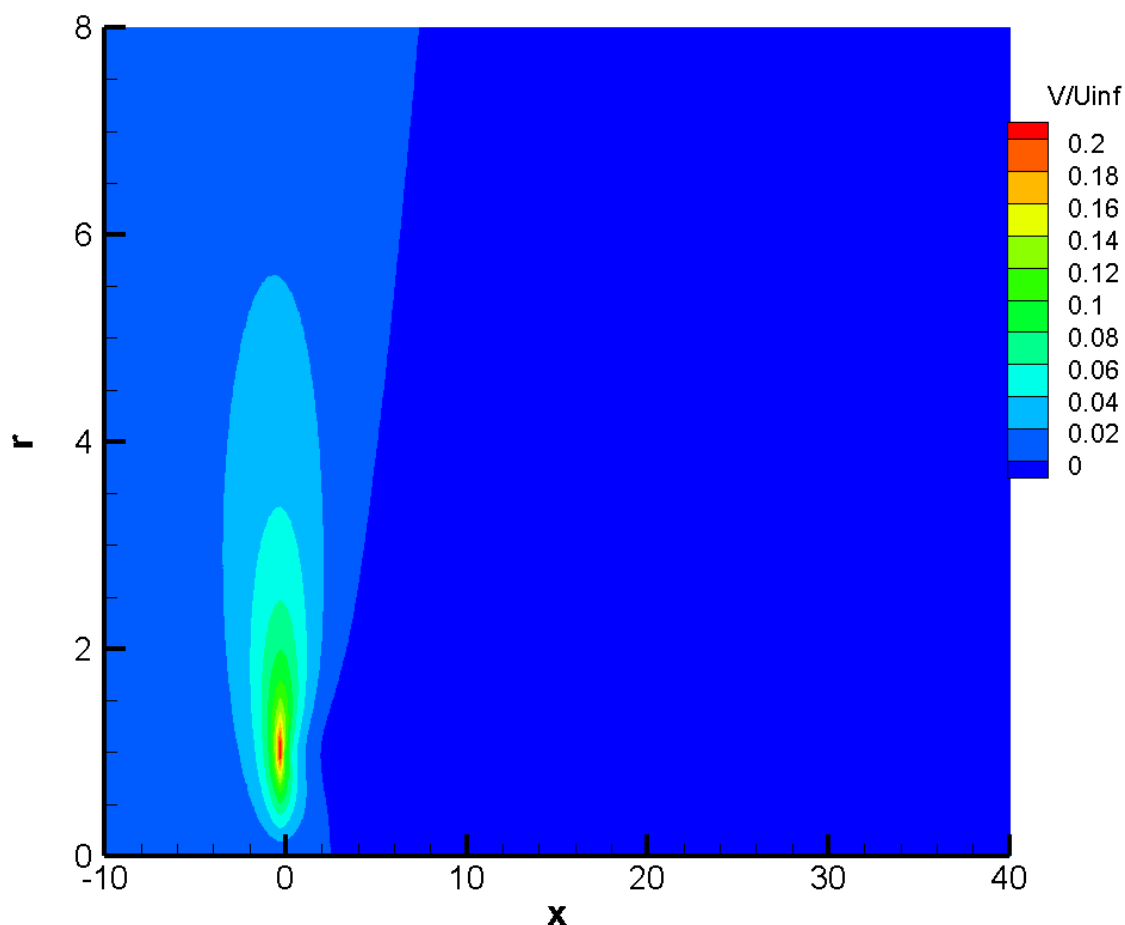


Διάγραμμα 3.1.5 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Nibe για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 7,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

Στα διαγράμματα 3.1.6 και 3.1.7 παρουσιάζονται οι ισοταχείς καμπύλες κατά την αξονική και ακτινική αντίστοιχα κατεύθυνση. Για την αξονική ταχύτητα το μέγιστο έλλειμμα υφίσταται στον άξονα συμμετρίας του πλέγματος στις 2 με 4 διαμέτρους απόσταση από τον δρομέα της μηχανής . Η ροή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.6 αποκαθίσταται όσο απομακρυνόμαστε από το δρομέα της ανεμογεννήτριας μέχρι να λάβει την αρχική τιμή της (ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής) η αξονική ταχύτητα μετά τις 40 διαμέτρους. Λόγω της διατήρησης της μάζας , εφόσον το μέγιστο έλλειμμα της αξονικής ταχύτητας βρίσκεται στον κοντινό ομόρρου της μηχανής , οι μέγιστες τιμές της ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας θα βρίσκονται κοντά στον δρομέα της ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.7. Απομάκρυνση από τον δρομέα σημαίνει μικρότερες τιμές της V συνιστώσας και σταδιακή αποκατάσταση της ροής.



Διάγραμμα 3.1.6 Ισοταχείς καμπύλες οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας U , ανεμογεννήτριας Nibe .



Διάγραμμα 3.1.7 Ισοταχείς καμπύλες ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας V , ανεμογεννήτριας Nibe.

3.1.2 Περίπτωση Sexbierum

Η εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση της Α/Γ Sexbierum έγινε για ουδέτερες (neutral) περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας Sexbierum και οι περιβαλλοντικές συνθήκες για την κάθε περίπτωση ευστάθειας (εφαρμογή στην παραμετρική ανάλυση της επόμενης παραγράφου) παρουσιάζονται στους πίνακες 3.1.3 έως 3.1.5 :

Πίνακας 3.1.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά και συνθήκες A/Γ Sexbierum(neutral)

Z_{hub} (m)	35
U_{∞} (m/s)	8,5
C_t (thrust coefficient)	0,75
TI(turbulence intensity %)	10
R(radius m)	15

Πίνακας 3.1.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά και συνθήκες A/Γ Sexbierum(stable)

Z_{hub} (m)	35
U_{∞} (m/s)	8,5
C_t (thrust coefficient)	0,75
Z_0 (Roughness length(m))	0.004
R(radius m)	15
L(Monin-Obukhov length(m))	150

Πίνακας 3.1.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά και συνθήκες A/Γ Sexbierum(unstable)

Z_{hub} (m)	35
U_{∞} (m/s)	8,5
C_t (thrust coefficient %)	0,75
Z_0 (Roughness length(m))	0.004
R(radius m)	15
L(Monin-Obukhov length(m))	-150

Στον κώδικα του παρόντος προβλήματος προκειμένου να καταστεί ο αλγόριθμος αποτελεσματικότερος (ως προς την σύγκλιση) για τα δεδομένα του προβλήματος, έγινε χρήση της τεχνικής υποχαλάρωσης (underrelaxation). Σε αυτό το πλαίσιο για κάθε ένα από τα μεγέθη(συνιστώσες ταχύτητας ,διόρθωση πίεσης) που εκτιμώνται στην αριθμητική

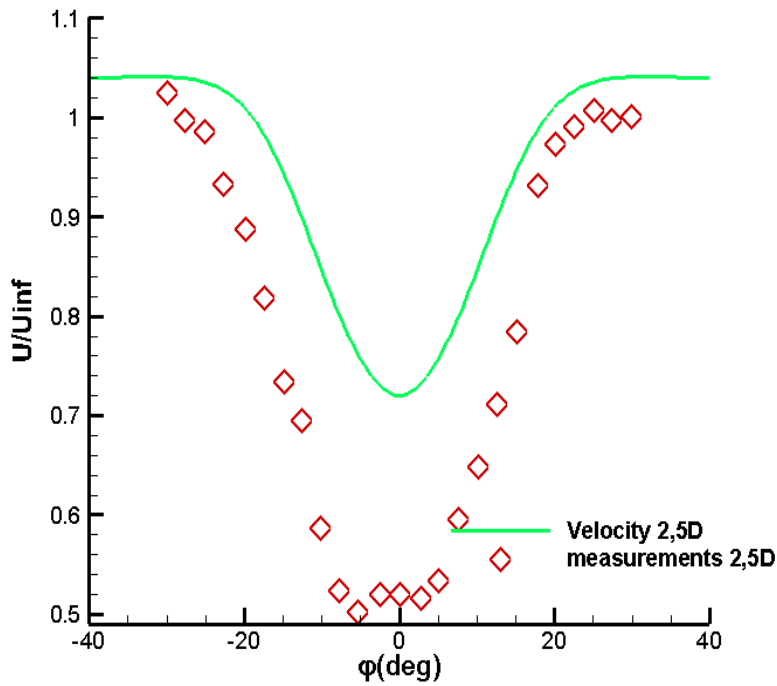
προσομοίωση εισάγεται ένας συντελεστής υποχαλάρωσης. Στον πίνακα 3.1.6 παρουσιάζονται οι συντελεστές υποχαλάρωσης για τα αντίστοιχα μεγέθη.

Πίνακας 3.1.6 Συντελεστές Υποχαλάρωσης (underrelaxation factors)

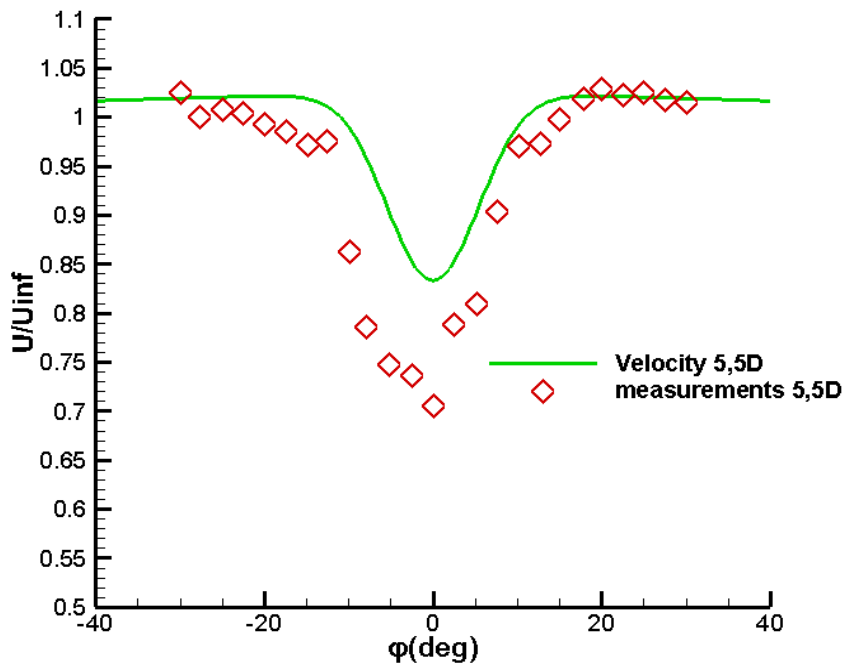
Οριζόντια συνιστώσα U	0,1
Οριζόντια συνιστώσα V	0,1
Διόρθωση Πίεσης P'	0,05

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ομόρρου είναι ομοιόμορφο και ο αριθμός των κόμβων που χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίησή του κατά την οριζόντια και ακτινική κατεύθυνση, επιλέχθηκε σύμφωνα με την φιλοσοφία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.1.1

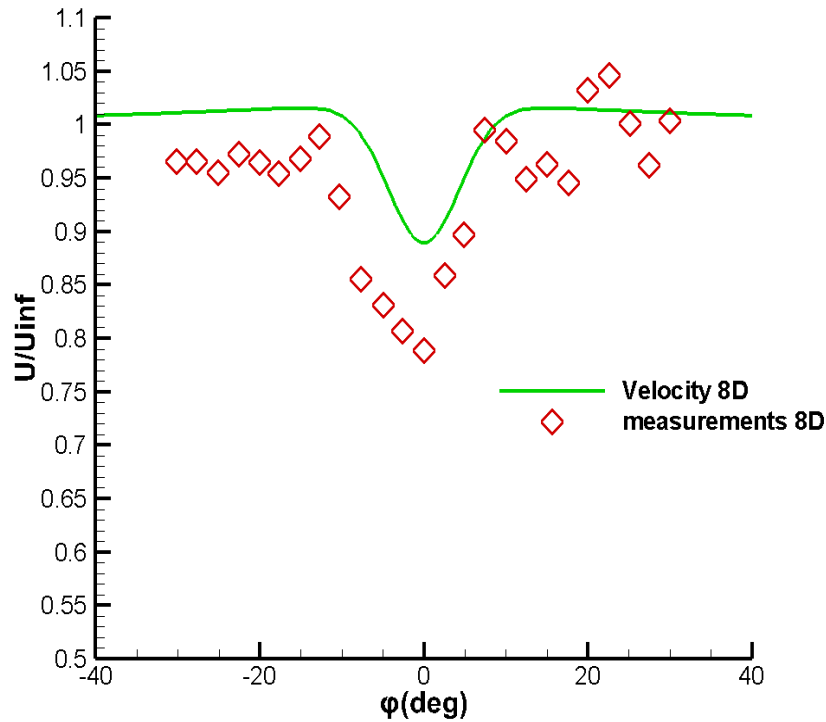
Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα διαγράμματα 3.1.8 , 3.1.9 και 3.1.10 σύγκρισης των ταχυτήτων του ομόρρου της A/Γ *Sexbierum* σε αποστάσεις 2,5 , 5,5 και 8 διαμέτρους αντίστοιχα πίσω από τον δρομέα της μηχανής , με μετρήσεις που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ των αδιάστατων, ως προς την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής, οριζόντιων συνιστωσών ταχύτητας με πειραματικά δεδομένα σε ένα τόξο 80 μοιρών εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας του δρομέα σε ακτίνες απόστασης 2.5 , 5.5 και 8 διαμέτρους από τη μηχανή. Όπως αναμένεται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ταχυτήτων στον κοντινό ομόρρου (2,5 διαμέτρους), έχουν κάποια απόκλιση ιδιαίτερα στην περιοχή του άξονα συμμετρίας. Εν συνεχεία , παρατηρείται ότι στην περιοχή του μακρινού ομόρρου τα αποτελέσματα της αξονοσυμμετρικής προσομοίωσης προσεγγίζουν περισσότερο ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα στις 5,5 και 8 διαμέτρους. Παρατηρείται σε αυτό το σημείο , ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης των ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας *Sexbierum* παρουσιάζουν μικρότερο έλλειμμα σε σχέση με της ανεμογεννήτριας *Nibe*. Αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό , εφόσον οι δύο μηχανές έχουν διαφορετικό συντελεστή ώσης(thrust coefficient) και συνεπώς ο δρομέας της κάθε μηχανής επηρεάζει διαφορετικά το έλλειμμα της ορμής σε κάθε περίπτωση και κατ'επέκταση το πεδίο ταχυτήτων. Συγκεκριμένα η A/Γ *Nibe* έχει συντελεστή ώσης 0,82 ενώ η *Sexbierum* 0,75. Γίνεται αντιληπτό πως η ωστική δύναμη που ασκείται από την δεύτερη ανεμογεννήτρια στην ροή είναι μικρότερη από την πρώτη και αυτό συντελεί στην μείωση του ελλείμματος ταχύτητας του ομόρρου της μηχανής



Διάγραμμα 3.1.8 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



Διάγραμμα 3.1.9 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 5,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



Διάγραμμα 3.1.10 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας S6x6 για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 8 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

3.1.3 Περίπτωση ECN

Η εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση της Α/Γ ECN έγινε για ευσταθείς (stable) περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας ECN και οι περιβαλλοντικές συνθήκες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.7 :

Πίνακας 3.1.7

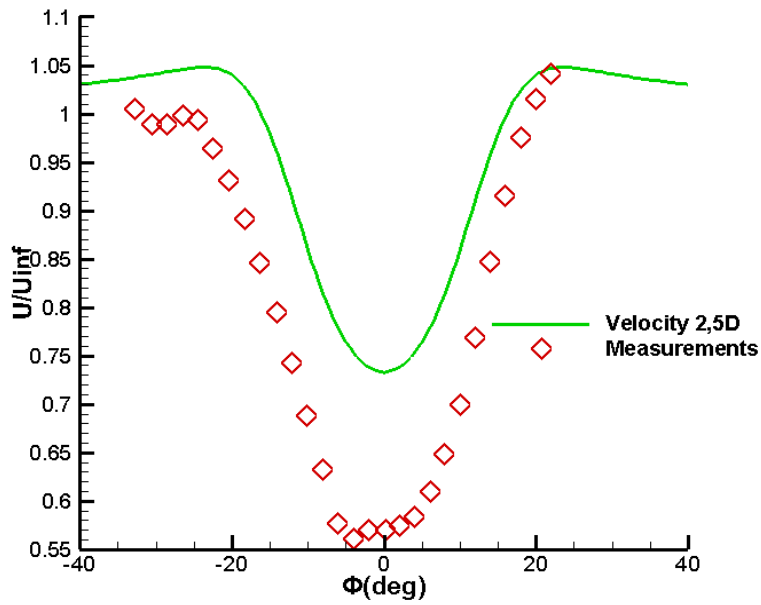
Τεχνικά χαρακτηριστικά και	συνθήκες Α/Γ ECN
Z_{hub} (m)	80
U_{∞} (m/s)	9,15
C_t (thrust coefficient)	0,76
Z_0 (roughness length(m))	0.017
R(radius m)	40
L(Monin-Obukhov length(m))	365

Σε αυτό το πλαίσιο για κάθε ένα από τα μεγέθη(συνιστώσες ταχύτητας ,διόρθωση πίεσης) που εκτιμώνται στην αριθμητική προσομοίωση εισάγεται ένας συντελεστής υποχαλάρωσης. Στον πίνακα 3.1.8 παρουσιάζονται οι συντελεστές υποχαλάρωσης για τα αντίστοιχα μεγέθη.

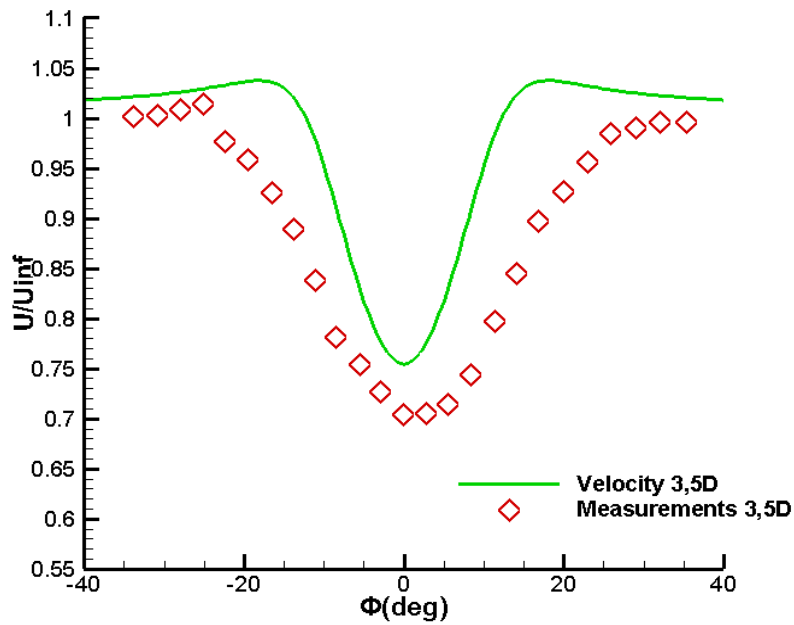
Πίνακας 3.1.8

Συντελεστές Υποχαλάρωσης (underrelaxation factors)	
Οριζόντια συνιστώσα U	0,1
Οριζόντια συνιστώσα V	0,1
Διόρθωση Πίεσης P'	0,05

Τα διαγράμματα 3.1.11 και 3.1.12 δείχνουν τη σύγκριση των ταχυτήτων του ομόρρου της Α/Γ ECN σε αποστάσεις 2,5 και 3,5 διαμέτρους αντίστοιχα πίσω από τον δρομέα της μηχανής , με μετρήσεις που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ των αδιάστατων, ως προς την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής, οριζόντιων συνιστωσών ταχύτητας με πειραματικά δεδομένα σε ένα τόξο 80 μοιρών εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας του δρομέα σε ακτίνες απόστασης 2.5 και 3.5 διαμέτρους από τη μηχανή. Όπως αναμένεται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ταχυτήτων στο τόξο ακτίνας 3,5 διαμέτρων είναι προσεγγιστικά πιο κοντά στις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις σε σχέση με την προσομοίωση στις 2,5 διαμέτρους. Πάντως όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.12 ,σε σχέση με την ανεμογεννήτρια Sexbierum η αποκατάσταση του ομόρρου είναι ελαφρώς γρηγορότερη , λόγω της μεγαλύτερης έντασης τύρβης περιβάλλοντος στην περίπτωση ECN , η οποία συντελεί στην γρηγορότερη(σε απόσταση από τον δρομέα της μηχανής) τυρβώδη ανάμειξη. Συνεπώς η ανάμειξη του ομόρρου γίνεται ταχύτερα με αποτέλεσμα η ροή να αποκαθίσταται γρηγορότερα ,οπότε η υποεκτίμηση του ελλείμματος της ταχύτητας στην ακτίνα των 2,5 διαμέτρων στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας ECN είναι μικρότερη σε σχέση με την υποεκτίμηση του ελλείμματος της πειραματικής ανεμογεννήτριας Sexbierum.



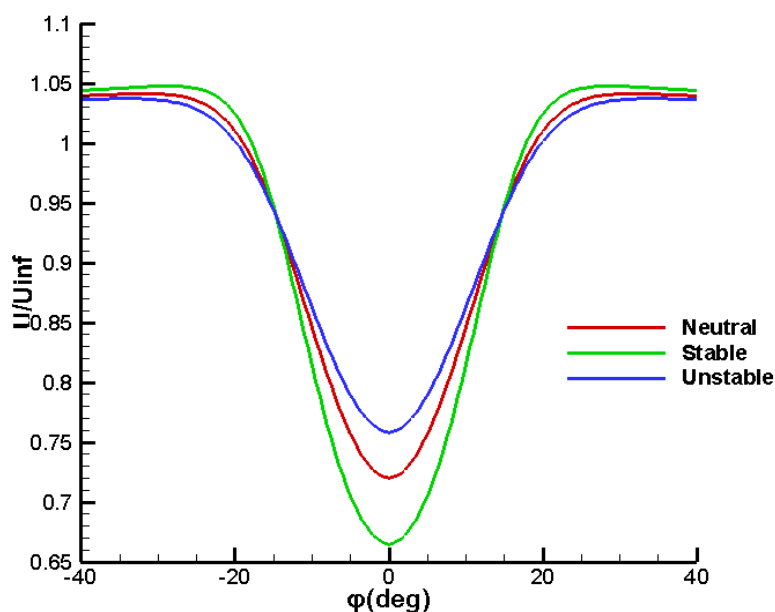
Διάγραμμα 3.1.11 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας ECN για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



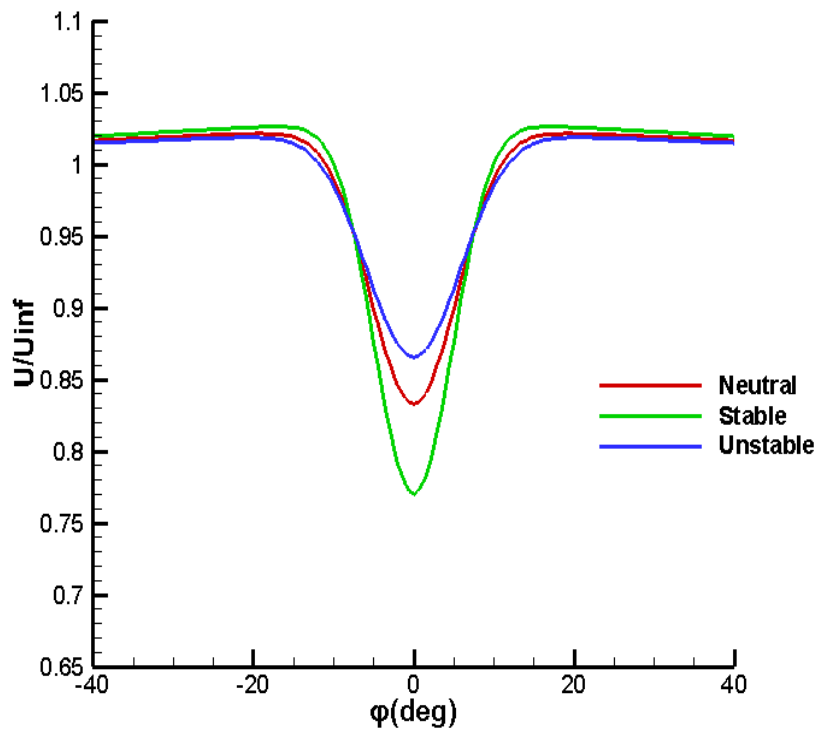
Διάγραμμα 3.1.12 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας ECN για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 3,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

3.1.4 Παραμετρική Ανάλυση

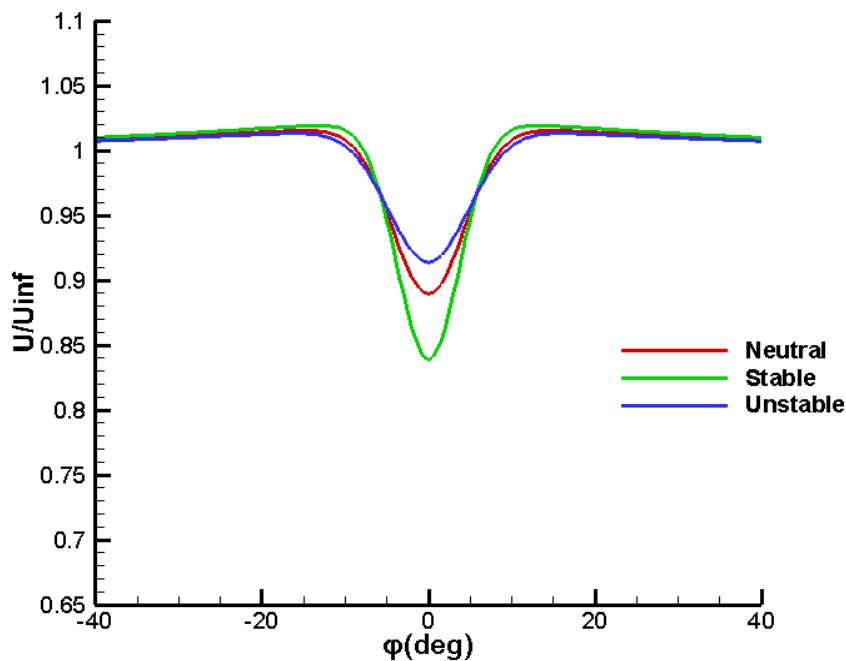
Σε αυτό το εδάφιο πραγματοποιείται σύγκριση των προφίλ της αδιάστατης, ως προς την ταχύτητα της αδιατάρακτη ροή, οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας για διαφορετικές τιμές κάποιων παραμέτρων του προβλήματος. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται ανάλυση για τις διάφορες συνθήκες ευστάθειας, ανάλυση με μεταβαλλόμενο συντελεστή ώσης (thrust coefficient) καθώς και ανάλυση για μεταβαλλόμενη τιμή της έντασης της τύρβης (turbulence intensity). Στα σχήματα 3.1.13, 3.1.14 και 3.1.15 φαίνονται οι συγκρίσεις της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας σε τόξο 80° ακτίνας 2,5, 5,5 και 8 διαμέτρων του δρομέα της μηχανής Sexbierum, για τις 3 περιπτώσεις ευστάθειας. Όπως φαίνεται στα σχήματα, οι ασταθείς συνθήκες (unstable, $L < 0$) παρουσιάζουν το μικρότερο έλλειμμα ταχύτητας σε όλο το μήκος του ομόρρου, ενώ το μεγαλύτερο οι ευσταθείς (stable $L > 0$). Αυτό οφείλεται στην επίδραση που έχει η παράμετρος $\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right)$ στο συντελεστή K_M , ο οποίος καθορίζει τη συνεισφορά της ατμοσφαιρικής τύρβης στην τυρβώδη συνεκτικότητα. Για ευσταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες, η τιμή του $\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right)$ είναι σημαντικά μεγαλύτερη της μονάδας και ελαττώνει την τυρβώδη συνεκτικότητα, καθυστερώντας την τυρβώδη ανάμιξη και την αποκατάσταση του πεδίου ταχύτητας. Αντίθετα, για ασταθείς συνθήκες, η τιμή του $\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right)$ είναι μικρότερη της μονάδας και ενισχύει την τυρβώδη συνεκτικότητα, με αποτέλεσμα την ταχύτερη αποκατάσταση του πεδίου ροής.



Διάγραμμα 3.1.13 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (φ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα για τις διάφορες συνθήκες ευστάθειας. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\varphi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

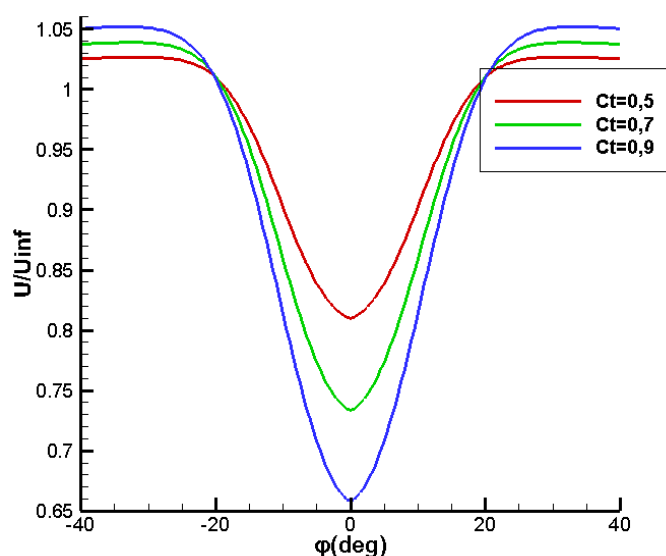


Διάγραμμα 3.1.14 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 5,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα για τις διάφορες συνθήκες ευστάθειας. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

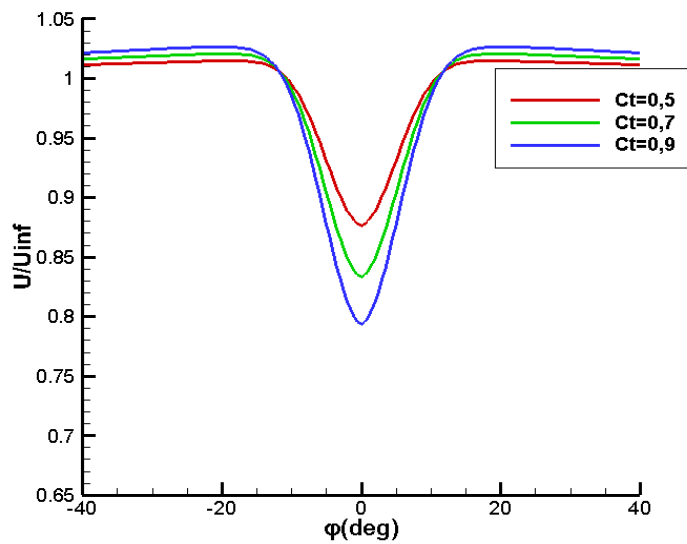


Διάγραμμα 3.1.15 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 8 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα για τις διάφορες συνθήκες ευστάθειας. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

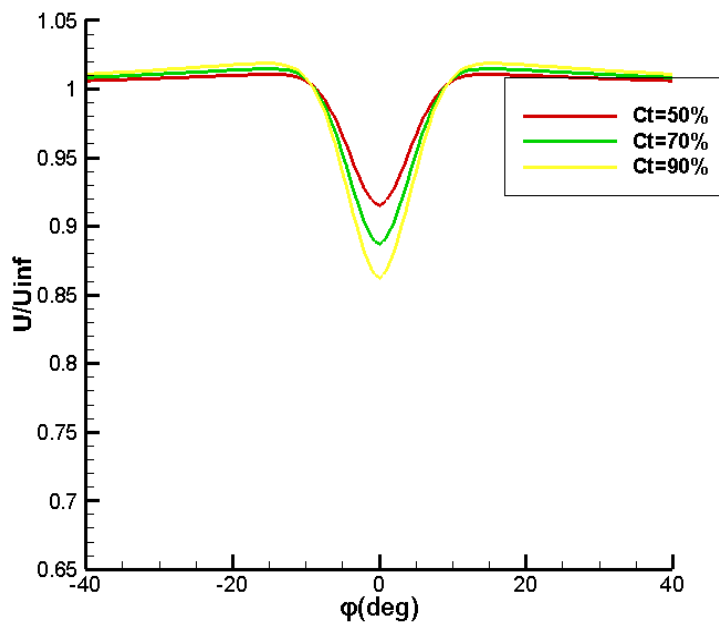
Οι συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις ταχύτητες του ομόρρου της ανεμογεννήτριας στις αντίστοιχες αποστάσεις μεταβάλλοντας το συντελεστή ώσης του δρομέα της μηχανής στο ίδιο τόξο παρουσιάζονται στα σχήματα 3.1.16 , 3.1.17 , και 3.1.18. Στην περίπτωση του μεγαλύτερου συντελεστή ώσης (0,9) εντοπίζεται το μεγαλύτερο έλλειμμα ταχυτήτων, ενώ στον ελάχιστο συντελεστή ώσης (0,5) το έλλειμμα της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας καθίσταται το χαμηλότερο. Η ωστική δύναμη του δρομέα της μηχανής αποτελεί κύριο παράγοντα απωλειών της ορμής και κατά συνέπεια των ταχυτήτων ενώ αύξησή της συντελεί στην αύξηση του ελλείμματος της ταχύτητας . Ως αποτέλεσμα μεγάλος συντελεστής ώσης συντελεί στην επιβράδυνση της αποκατάστασης της ροής στον ομόρρου της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 3.1.16 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα με μεταβαλλόμενο συντελεστή ώσης (thrust coefficient). Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

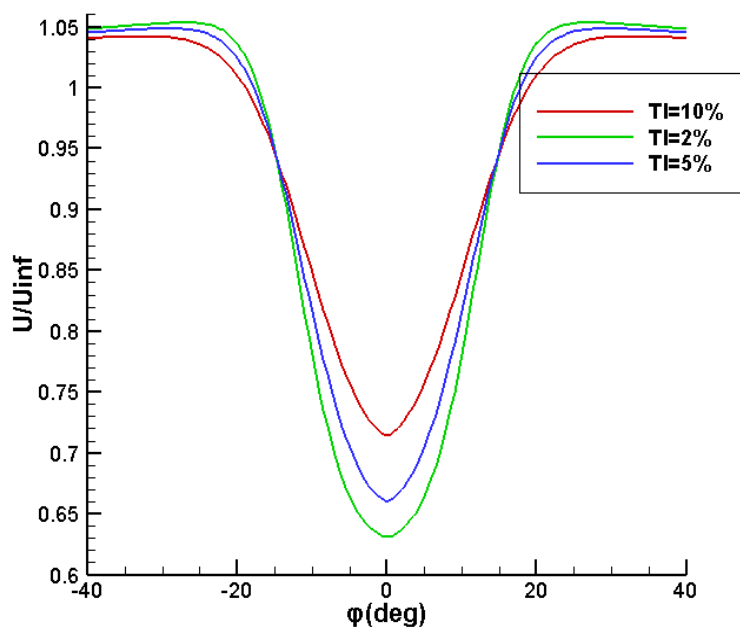


Διάγραμμα 3.1.17 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 5,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα με μεταβαλλόμενο συντελεστή ώσης(thrust coefficient). Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

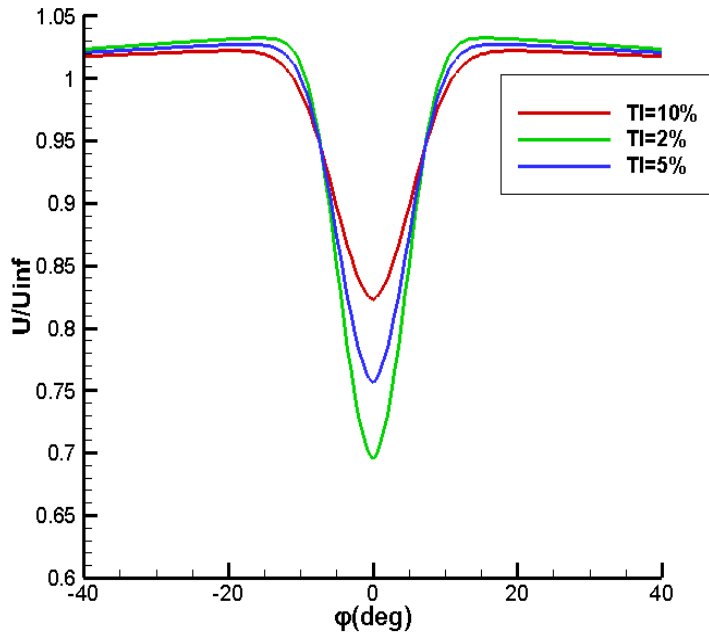


Διάγραμμα 3.1.18 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 8 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα με μεταβαλλόμενο συντελεστή ώσης(thrust coefficient). Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

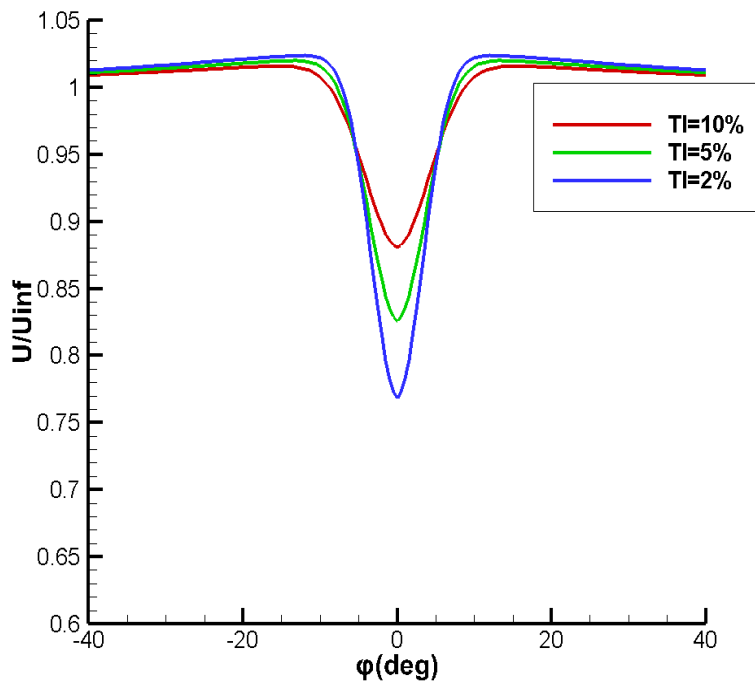
Εδώ θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα της σύγκρισης των ταχυτήτων της μηχανής με μεταβαλλόμενη την ένταση της τύρβης (turbulence intensity). Η ένταση της τύρβης είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την τύρβη του ανέμου του περιβάλλοντος. Αύξηση της έντασης της τύρβης συνεπάγεται ταχύτερη τυρβώδης ανάμειξη και ταυτόχρονα ταχύτερη ανάπτυξη του ομόρρου της μηχανής. Όπως δείχνουν τα διαγράμματα 3.1.19, 3.1.20 και 3.1.21 στο ίδιο τόξο της ίδιας απόστασης από το δρομέα της ανεμογεννήτριας, το έλλειμμα της ταχύτητας καθίσταται μεγαλύτερο όταν η ένταση της τύρβης έχει την χαμηλότερη τιμή. Υπάρχει συνεπώς αντίστροφη αναλογία μεταξύ της έντασης της τύρβης και του ελλείμματος της ταχύτητας στον ομόρρο.



Διάγραμμα 3.1.19 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Sexbierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 2,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα με μεταβαλλόμενη ένταση τύρβης (turbulence intensity) του περιβάλλοντος. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



Διάγραμμα 3.1.20 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Seshierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 5,5 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα με μεταβαλλόμενη ένταση τύρβης(turbulence intensity) του περιβάλλοντος. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



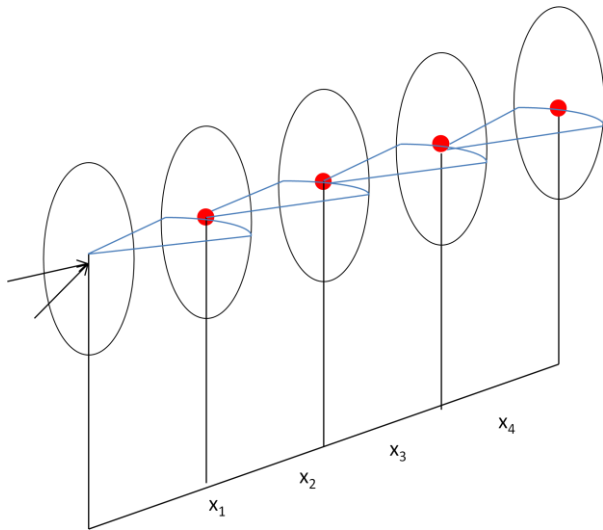
Διάγραμμα 3.1.21 Πρόλεξη της αξονικής ταχύτητας U ανεμογεννήτριας Seshierum για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου (ϕ) στο ύψος της πλήμνης, σε οριζόντια απόσταση 8 διαμέτρων από το κέντρο του δρομέα με μεταβαλλόμενη ένταση τύρβης(turbulence intensity) του περιβάλλοντος. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

3.2 Εφαρμογή σε Αιολικά Πάρκα

Η προσομοίωση του ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας είναι μεν σημαντική ούτως ώστε να προσεγγίσουμε το πεδίο των συνιστωσών των ταχυτήτων και της πίεσης, είναι δε καταλυτική για τον σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου και για την κατάλληλη τοποθέτηση των μηχανών ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης του πάρκου. Επομένως καθίσταται αδήριτη ανάγκη να εξετάσουμε στο σημείο αυτό την αλληλεπίδραση που ενδεχομένως έχουν 2 ή περισσότερες ανεμογεννήτριες που λειτουργούν ταυτόχρονα. Η βάση που παρέχει πειραματικά δεδομένα με τα οποία συγκρίνονται τα αποτελέσματα της αξονοσυμμετρικής προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το πειραματικό πάρκο EWTW του ECN όπου είναι διατεταγμένες σε σειρά 5 όμοιες ανεμογεννήτριες. Επιπλέον στην παρούσα εργασία επιχειρείται η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης του ομόρρου των μηχανών για διάφορες διατάξεις ανεμογεννητριών για ένα εύρος κατευθύνσεων του ανέμου.

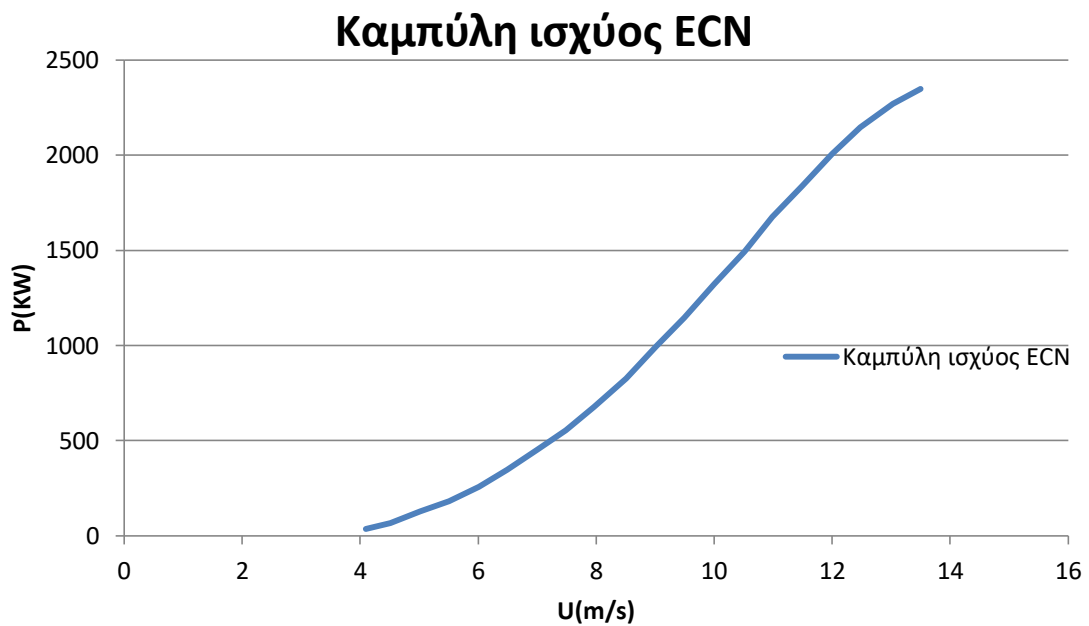
3.2.1 Πειραματικό Πάρκο EWTW

Η εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση του αιολικού πάρκου ECN έγινε για ευσταθείς περιβαλλοντικές συνθήκες (stable). Το αιολικό πάρκο EWTW αποτελείται από 5 ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε σειρά η μία πίσω από την άλλη. Η απόσταση ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες είναι όμοια και ίση με 3,8 διαμέτρους του δρομέα των μηχανών. Ο κώδικας προσομοίωσης της ροής κατά την λειτουργία των 5 μηχανών δύναται να υπολογίσει το πεδίο των ταχυτήτων μόνο για την κατεύθυνση του ανέμου που συμπίπτει με τη γραμμή των δρομέων των μηχανών, για τον λόγο ότι το πρόβλημα επιλύεται αξονοσυμμετρικά. Για τις υπόλοιπες κατευθύνσεις του ανέμου θα εφαρμοστούν μοντέλα αλληλεπίδρασης τα οποία κάνουν χρήση του ελλείμματος της ταχύτητας και της ακτίνας του του ομόρρου μεμονωμένης ανεμογεννήτριας ώστε να προσεγγίσουν την ταχύτητα εισόδου της κάθε ανεμογεννήτριας. Σε αυτό το σημείο διευκρινίζεται ότι η μηδενική κατεύθυνση ανέμου συμπίπτει με τις 275° . Συνεπώς η γωνία $\phi=0$ (σε καρτεσιανές συντεταγμένες) συμπίπτει με τον δυτικό άνεμο. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα απεικόνισης του πάρκου.



Σχήμα 3.2.1 Απεικόνιση αιολικού πάρκου EWTW

Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας ECN παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.2 και στον πίνακα 3.2.1 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι συνθήκες του πάρκου EWTW



Σχήμα 3.2.2: Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας ECN

Πίνακας 3.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά και συνθήκες Πάρκου ECN

Z_0 (Roughness length(m))	0,003
Z_{hub} (m)	80
C_t (thrust coefficient %)	78,5
R(radius m)	40
U_∞ (m/s)	7
Z_0 (Roughness length(m))	0,003
Distance between W/Ts	3,8D
TI(turbulence intensity %)	11,7
L(Monin-Obukhov length(m))	167,48

Για την προσομοίωση των 5 μηχανών με τον κώδικα επίλυσης των αξονοσυμμετρικών Navier-Stokes , το υπολογιστικό χωρίο αυξήθηκε κατά τον οριζόντιο άξονα ώστε να ισχύουν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος όπως τέθηκαν στην παράγραφο 2.3. Συγκεκριμένα πλέον κατά την οριζόντια κατεύθυνση ο χώρος εκτείνεται κατά 50 ακτίνες του δρομέα της μηχανής. Το μήκος της ακτινικής κατεύθυνσης παραμένει ως έχει. Στον πίνακα 3.2.2 παρουσιάζονται οι συντελεστές υποχαλάρωσης που εφαρμόστηκαν στην περίπτωση του πάρκου ECN.

Πίνακας 3.2.2 Συντελεστές Υποχαλάρωσης (underrelaxation factors)

Οριζόντια συνιστώσα U	0,1
Οριζόντια συνιστώσα V	0,1
Διόρθωση Πίεσης P'	0,05

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ομόρρου είναι ανομοιόμορφο και επιλέχθηκε κατάλληλος αριθμός σημείων για την διακριτοποίηση ώστε η προσομοίωση της ροής να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα μέσω της πύκνωσης του πλέγματος στις περιοχές όπου εντοπίζονται οι εντονότερες μεταβολές της ορμής. Η μέγιστη

πυκνότητα του πλέγματος επικεντρώνεται στην περιοχή κοντά στον δρομέα των μηχανών καθώς οι εντονότερες μεταβολές στις εξισώσεις ορμής του προβλήματος υφίστανται στην περιοχή των δρομέων των μηχανών. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν 281 κόμβοι κατά την ακτινική κατεύθυνση και 151 κατά την οριζόντια κατεύθυνση. Τα ελάχιστα διαστήματα Δx και Δr εντοπίζονται στην περιοχή των δρομέων των ανεμογεννητριών με $\Delta x=0.3$ και $\Delta r=0.02$.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.2.1 αλλά και από τον πίνακα 3.2.3, η εξ'αρχής υποεκτίμηση του ελλείμματος της ταχύτητας στον κοντινό ομόρρου, αφενός συντελεί στην απόκλιση της ισχύος της κάθε ανεμογεννήτριας, βλέπουμε ωστόσο ότι από την τρίτη μηχανή και μετά έχουμε μια σταθεροποίηση της ισχύος, η εγκυρότητα της οποίας πιστοποιείται και από τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζει παρακάτω ο πίνακας 3.2.4 για μηδενική κλίση ανέμου. Στα διαγράμματα 3.2.1 και 3.2.2 παρουσιάζονται οι ισοταχείς καμπύλες των συνιστωσών των ταχυτήτων U, V αντίστοιχα, αδιάστατες ως προς την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής U_∞ . Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.1 κατά τη λειτουργία 5 ανεμογεννητριών, η πρώτη στη σειρά υφίσταται το μικρότερο έλλειμμα ταχυτήτων στον ομόρρου της σε σχέση με τις άλλες 4. Οι υπόλοιπες μηχανές φαίνεται να συμπεριφέρονται παρόμοια ως προς την ροή του ομόρρου τους. Η αποκατάσταση της ροής πραγματοποιείται μετά τις 50 διαμέτρους σε απόσταση από της πρώτη μηχανή. Η δεύτερη μηχανή ($X=7,6$) φαίνεται να έχει πιο έντονο έλλειμμα ταχυτήτων στον κοντινό ομόρρου της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Πάντως διευκρινίζεται ότι το παρόν διάγραμμα παρουσιάζει τις ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας όταν βρίσκονται σε λειτουργία και οι 5 ανεμογεννήτριες, και οι ταχύτητες εισόδου των δρομέων των μηχανών δεν ταυτίζονται με αυτές που θα παρουσιαστούν στον πίνακα 3.2.3. Στο σχήμα 3.2.2 απεικονίζονται οι ισοταχείς καμπύλες της ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας όταν βρίσκονται σε λειτουργία και οι 5 μηχανές. Η μεγαλύτερη τιμή της V βρίσκεται στην περιοχή του δρομέα της πρώτης μηχανής, ενώ στους δρομείς των υπολοίπων μηχανών φαίνεται ότι η ακτινική συνιστώσα έχει παρόμοια συμπεριφορά.

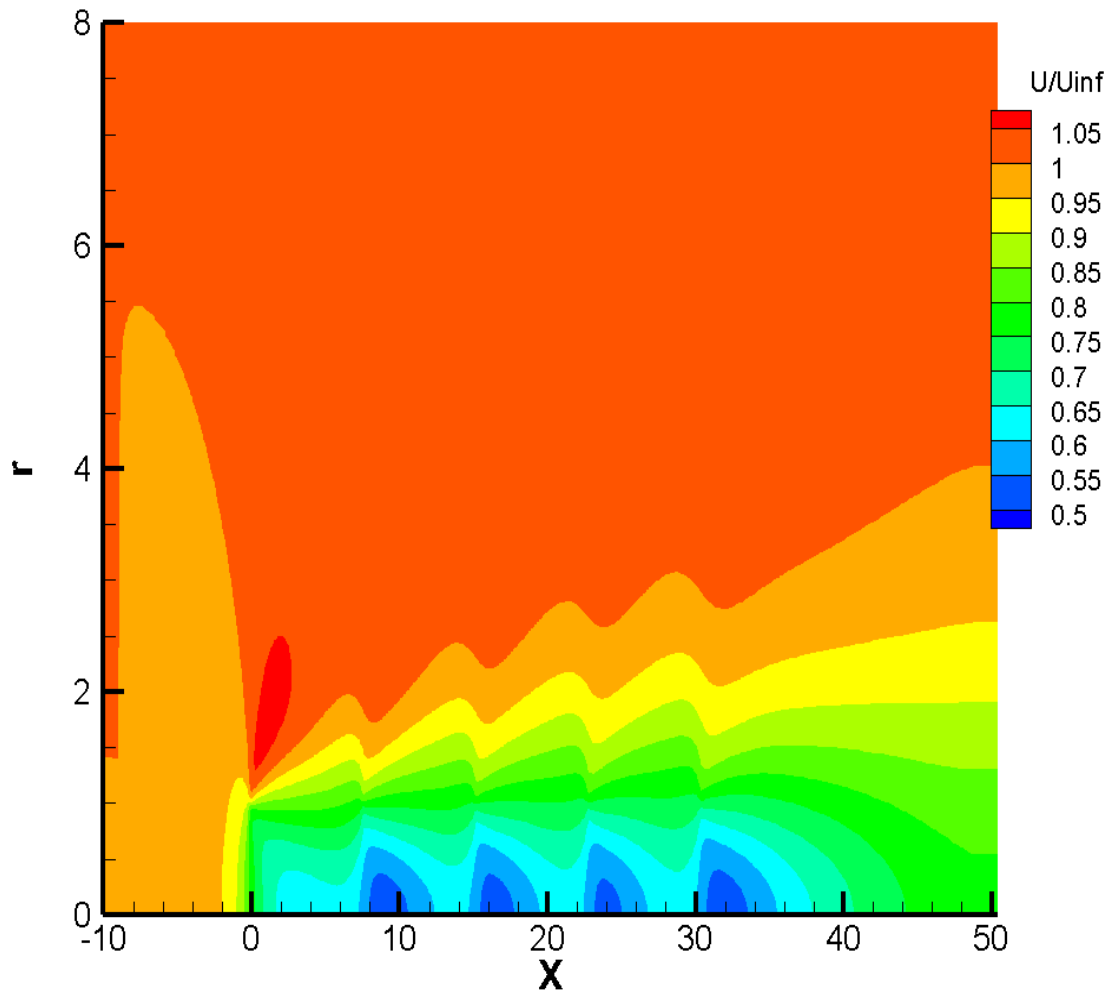
Για να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση των δρομέων των ανεμογεννητριών με τον ομόρρου των γειτονικών μηχανών, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος κώδικας που υπολογίζει για τις διαφορετικές κατευθύνσεις του ανέμου, τη σχετική θέση του δρομέα κάθε μηχανής ως προς τον εκάστοτε γειτονικό ομόρρου, καθώς και την αντίστοιχη επαγόμενη ταχύτητα στις περιοχές σκίασης του δρομέα. Ο υπολογισμός του ελλείμματος των ανεμογεννητριών έγινε με τρία διαφορετικά μοντέλα αλληλεπίδρασης, τα οποία αναγράφονται ονομαστικά παρακάτω μαζί με την γενική εξίσωσή τους :

- Προσέγγιση μέγιστου ελλείμματος: $1 - \frac{U_i}{U_\infty} = \max(1 - \frac{U_{ij}}{U_j})$ (3.2.1)

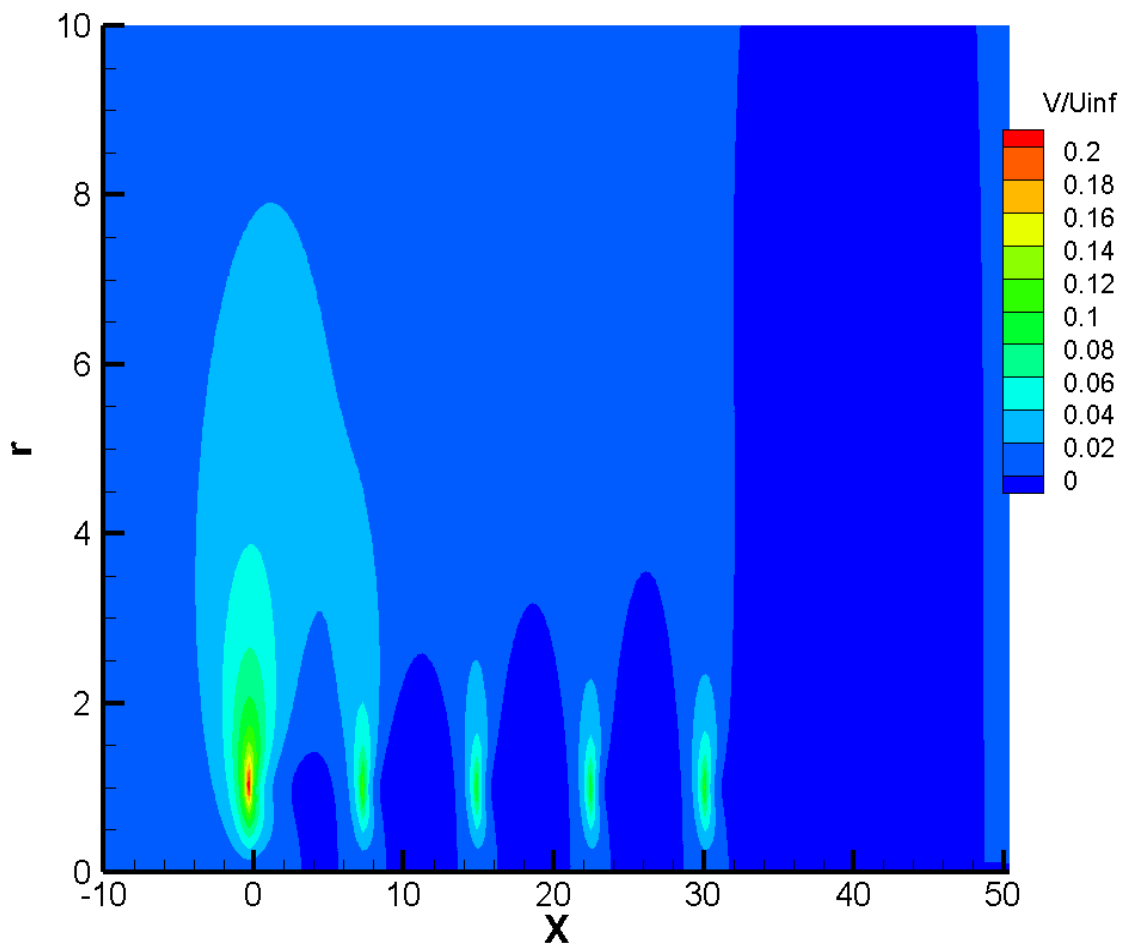
- Διατήρηση της κινητικής ενέργειας: $U_\infty^2 - U_i^2 = \sum_{j=1}^n (U_j^2 - U_{ij}^2)$ (3.2.2)

- Άθροιση τετραγώνων των ελλειμμάτων ταχύτητας: $(1 - \frac{U_i}{U_\infty})^2 = \sum_{j=1}^n (1 - \frac{U_{ij}}{U_j})^2$
(3.2.3)

Όπου U_i είναι η ταχύτητα εισόδου της κάθε ανεμογεννήτριας όπως αυτή υπολογίζεται από την αντίστοιχη μέθοδο, U_j είναι η ταχύτητα εισόδου της κάθε ανεμογεννήτριας της οποίας ο ομόρρους επηρεάζει την ανεμογεννήτρια i , και U_{ij} είναι η ταχύτητα αλληλεπίδρασης των μηχανών i, j όταν βρίσκονται σε λειτουργία μόνο οι εν λόγω ανεμογεννήτριες. Στους πίνακες 3.2.3 και 3.2.4 συγκρίνονται οι προλέξεις του ελλείμματος της ταχύτητας και της ισχύος των ανεμογεννητριών 2-5 σύμφωνα με τη διάταξή τους στο χώρο (αδιάστατης ως προς την ισχύ της πρώτης ανεμογεννήτριας), για την κατεύθυνση του ανέμου που είναι ευθυγραμμισμένη με τη σειρά των μηχανών. Παρατηρείται ότι οι προλέξεις με την προσέγγιση του μέγιστου ελλείμματος είναι πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Ικανοποιητικές είναι και οι προλέξεις του κώδικα CFD, ενώ τα υπόλοιπα μοντέλα αλληλεπίδρασης φαίνεται ότι υπερεκτιμούν το έλλειμμα και υποεκτιμούν την ισχύ των μηχανών. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται στα σχήματα 3.2.3 έως 3.2.6, όπου παρουσιάζονται οι ισχύες συναρτήσει της κατεύθυνσης του ανέμου. Όταν η σκίαση του δρομέα είναι μεγάλη, φαίνεται ότι το μοντέλο της άθροισης των τετραγώνων των ελλειμμάτων ταχύτητας, και ακόμη περισσότερο το μοντέλο διατήρησης της κινητικής ενέργειας υπερεκτιμούν το έλλειμμα της ταχύτητας και υποεκτιμούν την ισχύ. Καθώς όμως η κατεύθυνση του ανέμου αποκλίνει σε σχέση με τη γραμμή των μηχανών, οπότε και η σκίαση μεταξύ των μηχανών μειώνεται (μερική αλληλεπίδραση), παρατηρείται ότι το μοντέλο της άθροισης των τετραγώνων των ελλειμμάτων ταχύτητας συμπεριφέρεται καλύτερα, ενώ τα δύο άλλα μοντέλα υπερεκτιμούν την ισχύ (υποεκτίμηση ελλείμματος)



Διάγραμμα 3.2.1 Ισοταχείς καμπύλες U αιολικού πάρκου ECN με 5 όμοιες ανεμογεννήτριες, απόστασης 3,8 διαμέτρων από την προηγούμενη ,στο ορισμένο υπολογιστικό χωρίο.



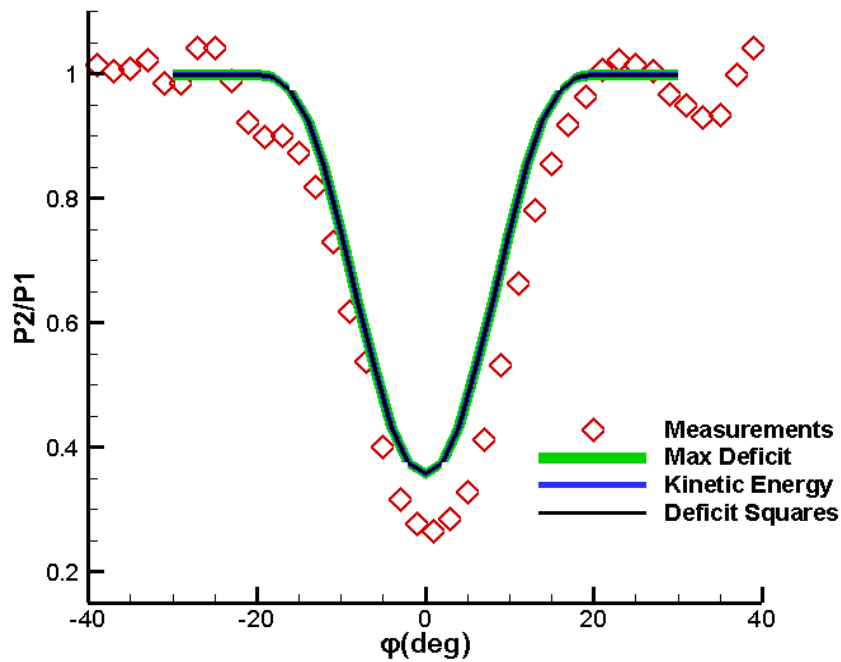
Διάγραμμα 3.2.2 Ισοταχείς καμπύλες V/U_{inf} αιολικού πάρκου ECN με 5 όμοιες ανεμογεννήτριες, απόστασης 3,8 διαμέτρων από την προηγούμενη, στο ορισμένο υπολογιστικό χωρίο.

Πίνακας 3.2.3 Σύγκριση των τιμών της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας ως προς την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής της κάθε μηχανής για κάθε μία από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους προσέγγισης της μέσης ταχύτητας του δρομέα για μηδενική κατεύθυνση ανέμου .

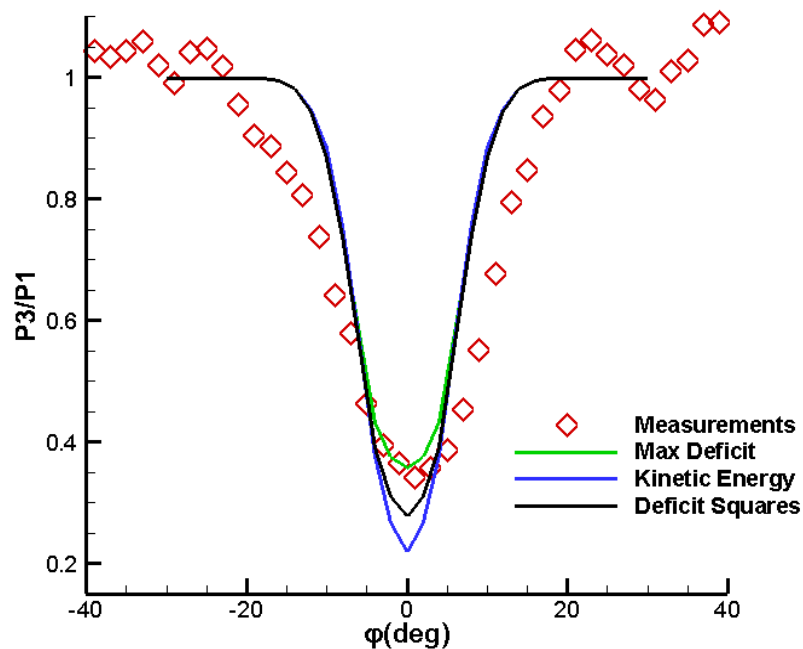
Μέθοδος	$\frac{U_2}{U_\infty}$	$\frac{U_3}{U_\infty}$	$\frac{U_4}{U_\infty}$	$\frac{U_5}{U_\infty}$
CFD	0.7620	0.7296	0.7235	0.7193
Maximum deficit approach	0.7620	0.7620	0.7620	0.7620
Conservation of kinetic energy	0.7620	0.6837	0.6499	0.6280
Sum of deficit squares	0.7620	0.7150	0.6933	0.6808

Πίνακας 3.2.4 Σύγκριση των τιμών του λόγου ισχύος της κάθε μηχανής ως προς την ισχύ της πρώτης για κάθε μία από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους προσέγγισης της μέσης ταχύτητας του δρομέα για μηδενική κατεύθυνση ανέμου .

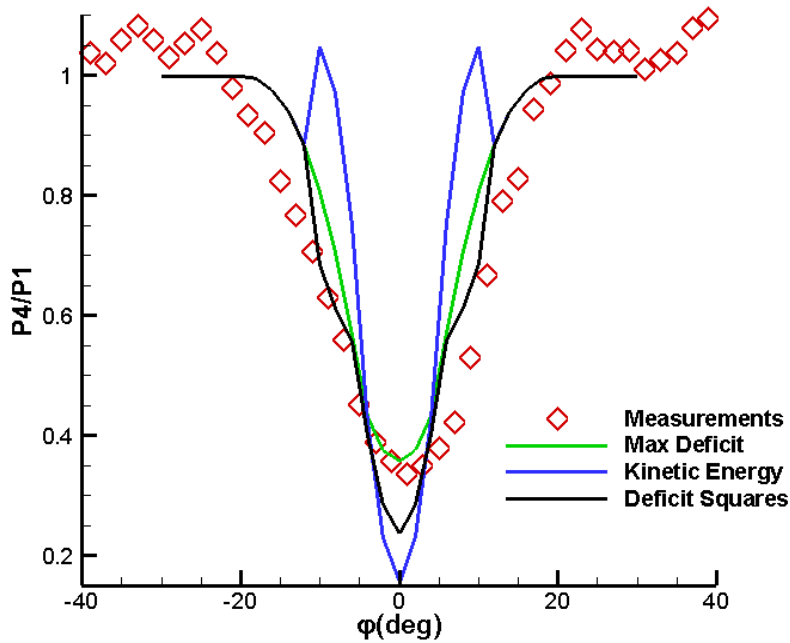
Μέθοδος	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_3}{P_1}$	$\frac{P_4}{P_1}$	$\frac{P_5}{P_1}$
CFD	0.3581	0.3026	0.2921	0.2850
Maximum deficit approach	0.3581	0.3581	0.3581	0.3581
Conservation of kinetic energy	0.3581	0.2188	0.1556	0.1264
Sum of deficit squares	0.3581	0.2773	0.2367	0.2133
Experimental Data	0.3581	0.3534	0.3470	0.3665



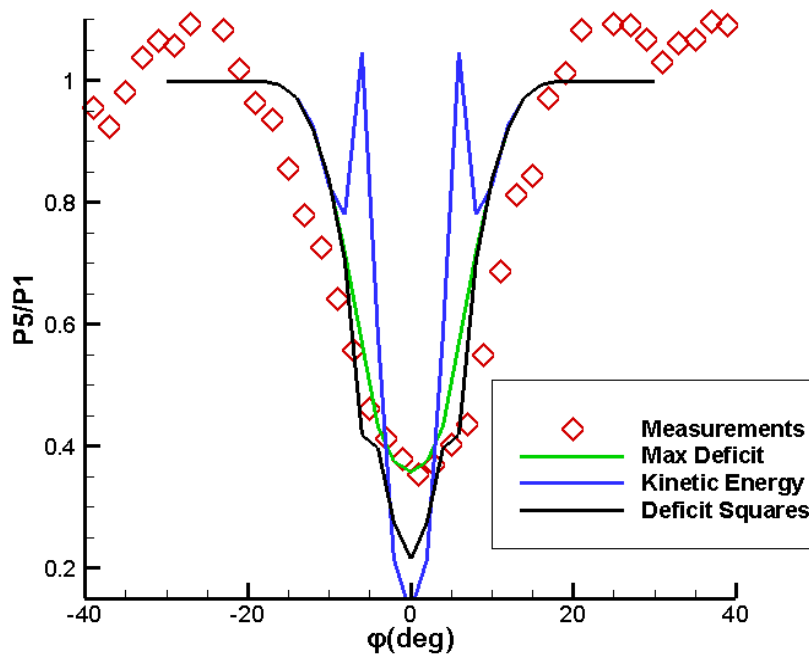
Διάγραμμα 3.2.3 Σύγκριση της αδιάστατης ,ως προς την ισχύ της πρώτης, ισχύος της δεύτερης ανεμογεννήτριας του αιολικού πάρκου ECN με τις τρεις προσεγγιστικές μεθόδους και με τα πειραματικά δεδομένα ,για διάφορες κατευθύνσεις του ανέμου. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



Διάγραμμα 3.2.4 Σύγκριση της αδιάστατης ,ως προς την ισχύ της πρώτης, ισχύος της τρίτης ανεμογεννήτριας του αιολικού πάρκου ECN με τις τρεις προσεγγιστικές μεθόδους και με τα πειραματικά δεδομένα , για διάφορες κατευθύνσεις του ανέμου. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



Διάγραμμα 3.2.5 Σύγκριση της αδιάστατης P_4/P_1 ως προς την ισχύ της πρώτης, ισχύος της τέταρτης ανεμογεννήτριας του αεροδυναμικού πάρκου ECN με τις τρεις προσεγγιστικές μεθόδους και με τα πειραματικά δεδομένα, για διάφορες κατευθύνσεις του ανέμου. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.



Διάγραμμα 3.2.6 Σύγκριση της αδιάστατης P_5/P_1 ως προς την ισχύ της πρώτης, ισχύος της πέμπτης ανεμογεννήτριας του αεροδυναμικού πάρκου ECN με τις τρεις προσεγγιστικές μεθόδους και με πειραματικά δεδομένα, για διάφορες κατευθύνσεις του ανέμου. Η μηδενική κατεύθυνση ανέμου ($\phi=0$) αντιστοιχεί σε δυτικό άνεμο.

Σε αυτό το σημείο θα γίνουν κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με τον τρόπο που έγιναν οι συγκρίσεις των ταχυτήτων και των λόγων των ισχύων. Για την περίπτωση της μηδενικής κατεύθυνσης του ανέμου στο πάρκο ECN, η προσομοίωση της ταχύτητας εισόδου στην κάθε μηχανή έγινε με μία προσέγγιση που θεωρεί ως ταχύτητα εισόδου των ανεμογεννητριών μία μέση ταχύτητα της ροής του ανέμου στην περιοχή του δρομέα της κάθε μηχανής. Τα αποτελέσματα των λόγων ισχύων προέκυψαν από γραμμική παρεμβολή που εφαρμόστηκε στην καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας ECN.

3.2.2 Αιολικό πάρκο με τυχαία διάταξη Α/Γ

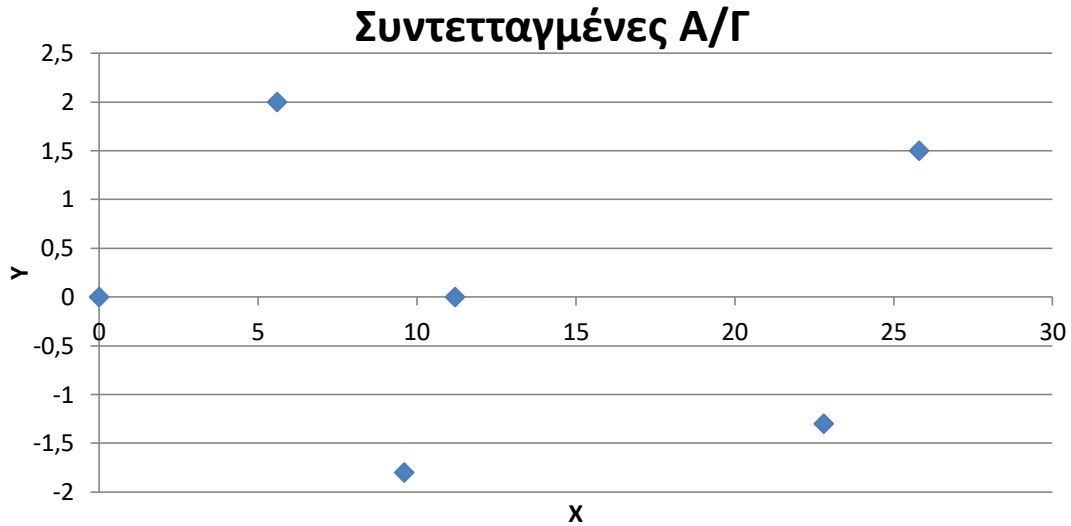
Στο παρόν εδάφιο διερευνάται μια υποθετική περίπτωση αλληλεπίδρασης μηχανών τοποθετημένων σε τυχαία διάταξη. Τα γεωμετρικά δεδομένα και ο συντελεστής ώσης των μηχανών θεωρήθηκαν ίδια με αυτά του πειραματικού πάρκου EWTW. Οι συντεταγμένες των ανεμογεννητριών επιλέχθηκαν τυχαία και αναγράφονται στον πίνακα 3.2.7 αδιάστατες ως προς την ακτίνα του δρομέα των μηχανών. Μια τέτοια υποθετική περίπτωση μας δίνει μια εικόνα της σχετικής αλληλεπίδρασης των μηχανών και μας βοηθά να εξάγουμε κάποια γενικά συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά των μοντέλων αλληλεπίδρασης. Μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την συγκέντρωση των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.2.1, παίρνουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους πίνακες 3.2.8 και 3.2.9.. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανών ουσιαστικά έγκειται στο ποσοστό επικάλυψης της περιοχής του δρομέα των μηχανών από τον ομόρροο των ανεμογεννητριών που επηρεάζουν την εκάστοτε μηχανή (ενδέχεται 2 μηχανές να μην αλληλεπιδρούν μεταξύ τους). Στην περίπτωση που αυτό το ποσοστό επικάλυψης είναι μηδενικό, οι μηχανές δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, δέχονται ως ταχύτητα πρόσπτωσης την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής του ανέμου και κατά συνέπεια αποδίδουν κατά το μέγιστο.

Πίνακας 3.2.7 Συντεταγμένες Α/Γ αδιάστατες ως προς την ακτίνα του δρομέα

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>A/Γ</i>
0	0	1
5.6	2	2
9.6	-1.8	3
10.2	0	4
22.8	-1.3	5
25.8	1.5	6

Σύμφωνα με του πίνακες 3.2.8 και 3.2.9 τα αποτελέσματα για τις διάφορες μεθόδους διαφέρουν αριθμητικά. Στον πίνακα 3.2.10 παρουσιάζονται τα ποσοστά επικάλυψης του δρομέα της κάθε μηχανής από τον ομόρρου των ανεμογεννητριών με τις οποίες αλληλεπιδρούν. Όπως βλέπουμε η δεύτερη A/G αλληλεπιδρά με τον ομόρρου μόνον της πρώτης μηχανής και καλύπτεται περίπου το 10% του εμβαδού του δρομέα. Το 90% δέχεται την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής και για αυτό ο λόγος ισχύος της μηχανής(ως προς την A/G αναφοράς) είναι αρκετά υψηλός. Η τρίτη μηχανή επικαλύπτεται κατά 29% και αλληλεπιδρά με τον ομόρρου μόνο της πρώτης μηχανής και συνεπώς ο λόγος ισχύος της θα είναι μικρότερος από της δεύτερης μηχανής. Η 4^η ανεμογεννήτρια αλληλεπιδρά με τις μηχανές 1,2,3 και συνεπώς υφίσταται τις μεγαλύτερες απώλειες ευρισκόμενη και στον κοντινό ομόρρου τους. Η ανεμογεννήτρια 5 αλληλεπιδρά με τις A/G 1,3,4 και η ανεμογεννήτρια 6 με τις 1,2,4. Προφανώς οι μεγαλύτερες απώλειες στις μηχανές υφίστανται όταν αυτές βρίσκονται στον κοντινό ομόρρου κάποιας A/G ,όπου εντοπίζονται οι μέγιστες απώλειες της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας. Η A/G 5 βρίσκεται στον ομόρρου της μηχανής 4 με ποσοστό επικάλυψης δρομέα 68% και η A/G 6 βρίσκεται αρκετά κοντά στην μηχανή 4 με ποσοστό επικάλυψης από τον ομόρρου της (της μηχανής 4) 61%. Συνεπώς αναμένεται η ισχύς της A/G 6 να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με της 5 καθώς βρίσκεται και πιο μακριά σε σχέση με τις υπόλοιπες μηχανές(μικρότερες απώλειες ροής ομόρρου) και το εμβαδόν του δρομέα της καλύπτεται σε μικρότερο ποσοστό από ότι της μηχανής 5 . Συνολικά και τα 3 μοντέλα αλληλεπίδρασης που παρουσιάζονται δείχνουν να προσεγγίζουν σε γενικές γραμμές τη συμπεριφορά των μηχανών . Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί οι μεγαλύτερες απώλειες αναμένεται να εντοπίζονται στις μηχανές 4 και 5. Οι μηχανές 2 και 3 δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό. .

Παρατηρώντας τη μηχανή 5, η οποία αλληλεπιδρά μερικώς με τον ομόρρου τριών μηχανών (2 πιο κοντινών και μιας μακρινής) και εμφανίζει μεγάλο ποσοστό επικάλυψης του δρομέα, φαίνεται ότι το μοντέλο διατήρησης της κινητικής ενέργειας εκτιμά μεγαλύτερο έλλειμμα ταχύτητας, άρα και μικρότερη ισχύ, κάτι που παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του πειραματικού πάρκου EWTW. Από την άλλη μεριά, η περίπτωση της μηχανής 4 είναι πιο σύνθετη, γιατί εμφανίζει μικρότερο ποσοστό επικάλυψης του δρομέα από τον ομόρρου των κοντινών μηχανών 2 και 3 και μεγάλο ποσοστό επικάλυψης από τη μακρινή μηχανή 1. Σε αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι οι προλέξεις των τριών μοντέλων πλησιάζουν περισσότερο. Γενικά, οι προλέξεις των τριών μοντέλων δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές εκτός από την περίπτωση μεγάλου ποσοστού επικάλυψης του δρομέα, όπου το μοντέλο διατήρησης της κινητικής ενέργειας εκτιμά χαμηλότερη ισχύ.



Διάγραμμα 3.2.8 Απεικόνιση συντεταγμένων των ανεμογεννητριών ECN.

Πίνακας 3.2.8 Σύγκριση των τιμών της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας ως προς την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής της κάθε μηχανής για κάθε μία από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους προσέγγισης της μέσης ταχύτητας του δρομέα .

Μέθοδος	$\frac{U_2}{U_\infty}$	$\frac{U_3}{U_\infty}$	$\frac{U_4}{U_\infty}$	$\frac{U_5}{U_\infty}$	$\frac{U_6}{U_\infty}$
Maximum deficit approach	0.9921	0.9746	0.8047	0.8604	0.8950
Conservation of kinetic energy	0.9921	0.9746	0.7974	0.8100	0.8897
Sum of deficit squares	0.9921	0.9746	0.8046	0.8501	0.8791

Πίνακας 3.2.9 Σύγκριση των τιμών του λόγου ισχύος της κάθε μηχανής ως προς την ισχύ της πρώτης για κάθε μία από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους προσέγγισης της μέσης ταχύτητας του δρομέα .

Μέθοδος	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_3}{P_1}$	$\frac{P_4}{P_1}$	$\frac{P_5}{P_1}$	$\frac{P_6}{P_1}$
Maximum deficit approach	0.9729	0.9163	0.4425	0.5725	0.6717
Conservation of kinetic energy	0.9729	0.9163	0.4256	0.4547	0.6564
Sum of deficit squares	0.9729	0.9163	0.4423	0.5481	0.6261

Πίνακας 3.2.10 Εμβαδόν επικάλυψης δρομέα Α/Γ από τις μηχανές που δέχεται επίδραση

Α/Γ που δέχεται επίδραση	Α/Γ που ασκεί επίδραση	Εμβαδόν επικάλυψης δρομέα (%)
2	1	9,65
3	1	28,93
4	1	100
4	2	18,53
4	3	18,36
5	1	82.64
5	3	100
5	4	68,37
6	1	72,56
6	2	100
6	4	61

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα

4.1 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 στηρίζεται στον αλγόριθμο (SIMPLE) και το πεδίο ταχυτήτων επιλύεται με την μέθοδο ADI (**Alternating Direction Implicit**) , ενώ ο δρομέας προσομοιώνεται με χρήση της απλοποιημένης θεωρία δίσκου ορμής. Το μοντέλο του Ainslie έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες της ατμοσφαιρικής ευστάθειας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υποεκτιμάται σε ένα βαθμό το έλλειμμα των ταχυτήτων στον κοντινό ομόρρου , ενώ στον μακρινό ομόρρου η προσομοίωση είναι πολύ πιο ακριβής. Η υποεκτίμηση αυτή δεν μπορεί μεν να θεωρηθεί αμελητέα , είναι δε αναμενόμενη , καθώς αντίστοιχη υποεκτίμηση υφίσταται ακόμη και με επίλυση των 3D εξισώσεων NAVIER-STOKES και χρήση μοντέλων τύρβης 2 εξισώσεων. Η παραμετρική ανάλυση υποδεικνύει ότι αύξηση του συντελεστή ώσης του δρομέα μιας μηχανής έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο έλλειμμα της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας στον ομόρρου. Αντίστοιχα αύξηση της έντασης της τύρβης του περιβάλλοντος συντελεί στην ταχύτερη τυρβώδη ανάμειξη του ομόρρου , και συνεπώς υφίσταται γρηγορότερη αποκατάσταση της ροής(μικρότερα ελλείμματα ταχυτήτων για τις ίδιες αποστάσεις πίσω από τη μηχανή). Η ανάλυση γύρω από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες ευστάθειας δείχνουν ότι το μεγαλύτερο έλλειμμα ταχυτήτων υφίσταται στην περίπτωση των ευσταθών συνθηκών, ενώ το μικρότερο έλλειμμα στην περίπτωση των ασταθών.

Στην περίπτωση του πειραματικού αιολικού πάρκου ECN (5 μηχανές σε σειρά) ο αξονοσυμμετρικός κώδικας χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της περίπτωσης όπου η κατεύθυνση του ανέμου είναι ευθυγραμμισμένη με τη γραμμή των μηχανών. Για τις υπόλοιπες κατευθύνσεις χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα αλληλεπίδρασης τα οποία λαμβάνουν ως δεδομένο τον ομόρρου μεμονωμένης μηχανής από τον αξονοσυμμετρικό κώδικα. Αν και η αρχική υποεκτίμηση της ταχύτητας της 2^{ns} σε σειρά μηχανής επηρεάζει τις προλέξεις ισχύος των κατάντι μηχανών, τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά στα πειραματικά για τις υπόλοιπες μηχανές. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο του μέγιστου ελλείμματος δίνει καλύτερες προλέξεις όταν υφίσταται η μεγαλύτερη επικάλυψη του δρομέα από τον ομόρρου των γειτονικών μηχανών, ενώ το μοντέλο άθροισης των τετραγώνων των ελλειμμάτων ταχύτητας δίνει καλύτερες προλέξεις όταν υφίσταται η αλληλεπίδραση των μηχανών είναι μερική, δηλαδή υφίσταται μικρότερη επικάλυψη του δρομέα από τον ομόρρου των γειτονικών μηχανών. Ανάλογα συμπεράσματα προέκυψαν και από τη μελέτη ενός υποθετικού αιολικού πάρκου με τυχαίες θέσεις μηχανών.

Τέλος πέρα από την αξιοπιστία της μεθοδολογίας που προκύπτει από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις τιμές των πειραματικών δεδομένων, το υπολογιστικό κόστος της εφαρμογής είναι πολύ χαμηλό σε σχέση με τα 3D μοντέλα.

4.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ως συνέχεια της παρούσης εργασίας προτείνονται οι ακόλουθες δυνατές κατευθύνσεις έρευνας:

- Περαιτέρω αξιολόγηση των μοντέλων αλληλεπίδρασης μέσω εφαρμογής της μεθοδολογίας σε μεγάλα αιολικά πάρκα όπου υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Η συστηματική διερεύνηση για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου μπορεί να εξαγάγει κατευθυντήριες γραμμές ως προς τη χρήση των μοντέλων
- Διερεύνηση εναλλακτικών μοντέλων τύρβης
- Βελτιστοποίηση του αξονοσυμμετρικού κώδικα ως προς την αριθμητική συμπεριφορά (ευστάθεια, σύγκλιση, συντελεστές υποχαλάρωσης) και πιθανή επέκταση στις τρεις διαστάσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Lissaman, P.B.S., "Wind Turbine airfoils and rotor wakes," in D. A. Spera (ed.), *Wind Turbine Technology*, ASME Press, New York, 1994, pp. 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] Ainslie, J.F: Calculating the flowfield in the wake of wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 27: 213-224. 1988
- [4] Ainslie, J. F., "Calculating the flow field in the wake of wind turbines". *J. Wind Eng. Industr. Aerodyn.*, 27 , 213–224, 1988
- [5] 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
- [6] Tindal, A., *Dynamic Loads in Wind Farms*, Final Technical Report, *CEC Project JOUR-0084-C*, 1993
- [7] 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
- [8] Larsen, G. C., Madsen, H.A., Tompsen, K., Larsen, T.J., "Wake Meandering: A Pragmatic Approach", *Wind Energy*, 2008, 11, pp. 377-395
- [9] Sørensen, J. N., and Shen, W. Z., "Numerical Modelling of Wind Turbines," *J. Fluids Engineering*, 2002, 124, pp. 393-399
- [10] 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
- [11] Troen, I., Petersen, E.L., *European Wind Atlas*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1989:656
- [12] Schepers, J.G., *ENDOW: Validation and Improvement of ECN's Wake Model*. ECN:ECN-C-03-034: Petten, The Netherlands, 2003: 113
- [13] 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

[14] J. M. Prospathopoulos, E. S. Politis, P. K. Chaviaropoulos “Modelling Wind Turbine Wakes in Complex Terrain

[15] PATANKAR,S.V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow ,Hemisphere Publishing Corporation,New York