



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ρευστών

# Υπολογισμός αεροδυναμικού θορύβου ευρέως φάσματος από δρομείς ανεμογεννητριών

Διπλωματική Εργασία  
Καλομενοπούλου Γεωργία

Επιβλέποντες:  
Β.Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής  
Ι.Προσπαθόπουλος, Δρ., Ε.ΔΙ.Π.

Αθήνα 2020



# Ευχαριστίες

Στον Δρ. Ε.ΔΙ.Π. κ. Ιωάννη Προσπαθόπουλο για τη συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Στους καθηγητές κ. Β. Ριζιώτη και κ. Σπ. Βουτσινά για το πολύ ενδιαφέρον θέμα και τη συνολική επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας.



# Περίληψη

Η ραγδαία διάδοση της αιολικής ενέργειας έχει εντείνει την ανάγκη μελέτης των επιπτώσεων των ανεμογεννητριών στο περιβάλλον. Στην προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος της ακουστικής όχλησης επιχειρεί να συμβάλει η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσοντας ένα εργαλείο εκτίμησης του αεροδυναμικού θορύβου ευρέως φάσματος από δρομείς ανεμογεννητριών. Η υβριδική μεθοδολογία που μελετάται συνδυάζει τις ημιεμπειρικές σχέσεις των Brooks, Pope και Marcolini για την εκτίμηση του παραγόμενου θορύβου με τον δισδιάστατο επιλυτή Foil2w για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής γύρω από τις αεροτομές των πτερυγίων. Η αξιοπιστία της μεθοδολογίας ελέγχεται, στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Αφού πιστοποιηθεί, ο κώδικας εφαρμόζεται σε δρομείς σύγχρονων ανεμογεννητριών και διερευνάται η επίδραση των γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων στην παραγωγή του θορύβου.

## Abstract

The rapid spread of wind energy has intensified the need to study the effects of wind turbines on the environment. The present thesis attempts to contribute in the effort to address the problem of acoustic disturbance by developing a prediction tool of the aerodynamic noise from wind turbine rotors. The hybrid methodology being studied combines the semi-empirical noise prediction model of Brooks, Pope and Marcolini with the two-dimensional solver Foil2w to determine the flow field characteristics around the blade airfoils. The reliability of the methodology is then checked using available experimental data. Once certified, the code is applied to rotors of modern wind turbines and the effect of geometric and functional parameters on noise production is investigated.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>7</b>
1.1	Το τεχνολογικό πρόβλημα . . . . .	7
1.2	Μέθοδοι υπολογισμού - Βιβλιογραφική επισκόπηση . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Περιγραφή μεθοδολογίας</b>	<b>11</b>
2.1	Αεροδυναμικός κώδικας Foil2w . . . . .	11
2.2	Αεροακουστικός κώδικας . . . . .	13
2.2.1	Αυτοεπαγόμενος θόρυβος . . . . .	13
2.2.2	Θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης . . . . .	19
2.3	Υπολογισμός από δρομέα ανεμογεννήτριας . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Πιστοποίηση μεθοδολογίας</b>	<b>23</b>
3.1	Σύγκριση με μετρήσεις σε αεροσήραγγα . . . . .	23
3.2	Σύγκριση με μετρήσεις πλήρους κλίμακας . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Εφαρμογή σε δρομείς σύγχρονων ανεμογεννητριών</b>	<b>33</b>
4.1	Εκτίμηση θορύβου ανεμογεννήτριας αναφοράς . . . . .	33
4.2	Σύγκριση με ανεμογεννήτριες ισχύος 20 MW . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>51</b>





# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Το τεχνολογικό πρόβλημα

Ο αυξανόμενος κίνδυνος της κλιματικής αλλαγής και οι ολοένα και μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις έχουν καταστήσει αναγκαία την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παγκοσμίως. Σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια απεξάρτησης από τις συμβατικές μορφές ενέργειας έχει λάβει η εκμετάλλευση του ανέμου, με τον αριθμό των αιολικών πάρκων να αυξάνεται συνεχώς, τόσο στην Ελλάδα όσο και στον κόσμο.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις κύριες εναλλακτικές λύσεις στο ενεργειακό πρόβλημα. Παρ' όλα αυτά η ανέγερση ενός αιολικού πάρκου μπορεί να επιφέρει σημαντικά προβλήματα. Βασική επίπτωση κατά την κατασκευή αποτελεί η αλλοίωση του περιβάλλοντος της περιοχής, ενώ κατά την λειτουργία είναι πιθανό να επηρεαστεί η τοπική ορνιθοπανίδα. Για τον άνθρωπο, μεγάλη σημασία έχει η οπτική όχληση όταν οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται κοντά σε κατοικημένες περιοχές ή σε σημεία φυσικής ή πολιτιστικής ομορφιάς. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες είναι δυνατό να επηρεάσουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να προκαλέσουν παρεμβολές λόγω της ανάκλασης του μεταδιδόμενου σήματος στις επιφάνειες των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Ακόμη μεγαλύτερο, όμως, είναι το πρόβλημα του θορύβου που εκπέμπει η ανεμογεννήτρια κατά τη λειτουργία της, με αποτέλεσμα να έχουν πλέον θεσμοθετηθεί όρια στα επίπεδα παραγόμενου θορύβου για να αποφευχθεί η ακουστική όχληση. Είναι, επομένως, απαραίτητο κατά την σχεδίαση μιας νέας ανεμογεννήτριας να πραγματοποιείται, εκτός από αεροδυναμική και στατική μελέτη, και αεροακουστικός έλεγχος της κατασκευής.

Ο εκπεμπόμενος θόρυβος μίας ανεμογεννήτριας χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: τον μηχανικό και τον αεροδυναμικό θόρυβο. Ο μηχανικός θόρυβος παρουσιάζει διακριτούς τόνους και παράγεται από τα κινούμενα ηλεκτρομηχανολογικά εξαρτήματα της κατασκευής, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, η ηλεκτρογεννήτρια και τα έδρανα στήριξης. Αντιμετωπίζεται κατά την επιλογή των επιμέρους στοιχείων ή με εσωτερική ηχομονωτική επικάλυψη στο κέλυφος της κατασκευής. Ο αεροδυναμικός θόρυβος οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πτερυγίων και του πύργου με τη ροή του αέρα, με την αντιμετώπιση του να βασίζεται στον βελτιωμένο σχεδιασμό των πτερυγίων. Προέρχεται από τρία είδη ηχητικών πηγών, τα οποία παράγουν αντίστοιχα τρία είδη θορύβου: τον θόρυβο πάχους ή μονοπολικό θόρυβο, τον θόρυβο φόρτισης ή διπολικό θόρυβο και τον τετραπολικό θόρυβο. Αρχικά, η κίνηση των περιστρεφόμενων πτερυγίων προκαλεί διαταραχές στη ροή λόγω της εκτόπισης μέρους του όγκου του ρευστού και δημιουργεί τον θόρυβο πάχους. Ο θόρυβος φόρτισης οφείλεται στις μεταβολές των φορτίων στην επιφάνεια των πτερυγίων. Αιτία των μεταβολών αυτών αποτελεί οποιαδήποτε μεταβολή του πεδίου ροής, όπως η αλλαγή του μέτρου ή της διεύθυνσης της σχετικής ταχύτητας. Τέλος, ο τετραπολικός θόρυβος προέρχεται από τις διαταραχές του οριακού στρώματος στα πτερύγια και την αποβαλλόμενη στροβιλότητα στην ακμή εκφυγής, καθώς και από την αλληλεπίδραση των πτερυγίων με την ατμοσφαιρική τύρβη. Ο μονοπο-

λικός και διπολικός θόρυβος ανήκουν κυρίως στο χαμηλόσυχο κομμάτι του θορύβου μιας ανεμογεννήτριας, ενώ ο τετραπολικός αποτελεί κυρίως υψίσυχο θόρυβο ευρέως φάσματος.

Για τον προσδιορισμό του συνολικού θορύβου που παράγει μία ανεμογεννήτρια απαιτείται η εκτίμηση και η σύνθεση όλων των επιμέρους συνεισφορών. Το μηχανικό μέρος του ήχου έχει ήδη μελετηθεί και οι μέθοδοι υπολογισμού και μείωσης του είναι γνωστοί. Η βελτιωμένη σχεδίαση των μηχανολογικών εξαρτημάτων έχει εξαλείψει τους διακριτούς τόνους του θορύβου, με αποτέλεσμα να μην αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Ως προς το αεροδυναμικό μέρος, μεθοδολογίες υπολογισμού του μονοπολικού και διπολικού θορύβου έχουν αναπτυχθεί για αεροναυτικές εφαρμογές, όπως έλικες αεροσκαφών, συμπιεστές και στρόβιλους αεροκινητήρων και δρομείς ελικοπτέρων. Στις εφαρμογές αυτές, η υψηλή ταχύτητα περιστροφής των δρομέων οδηγεί σε αυξημένα επίπεδα θορύβου πάχους και φόρτισης, καθώς και σε μετατόπισή τους σε υψηλότερες και πιο ενοχλητικές συχνότητες. Ο τετραπολικός θόρυβος, στις περιπτώσεις αυτές, θεωρείται αμελητέος και ο υπολογισμός του δεν είναι απαραίτητος. Αντίθετα με την αεροναυπηγική, στις ανεμογεννήτριες οι δρομείς περιστρέφονται με χαμηλότερες ταχύτητες, με αποτέλεσμα ο θόρυβος πάχους και φόρτισης να είναι μειωμένος και να εμφανίζεται σε χαμηλότερες, λιγότερο ενοχλητικές συχνότητες. Παράλληλα, τα υψηλά επίπεδα της ατμοσφαιρικής τύρβης κοντά στο έδαφος συντελούν στην αύξηση του τετραπολικού θορύβου, του οποίου η συνεισφορά είναι πλέον σημαντική και δε μπορεί να παραλειφθεί.

Ο τετραπολικός θόρυβος στις ανεμογεννήτριες αποτελεί υψίσυχο ήχο ευρέως φάσματος, γεγονός που καθιστά τον υπολογισμό του με αριθμητικές μεθόδους πολύπλοκο και χρονοβόρο συγκριτικά με τον μονοπολικό και διπολικό θόρυβο. Το υψηλό υπολογιστικό κόστος έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη υβριδικών μεθόδων που συνδυάζουν εμπειρικές σχέσεις βασισμένες σε πειραματικές μελέτες με διαστάτους επιλυτές του πεδίου ροής γύρω από αεροτομές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται ένα τέτοιο υβριδικό εργαλείο με στόχο τον υπολογισμό του αυτοεπαγόμενου αεροδυναμικού θορύβου και του θορύβου λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης.

## 1.2. Μέθοδοι υπολογισμού - Βιβλιογραφική επισκόπηση

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στην περίπτωση της ροής γύρω από ανεμογεννήτρια ο τετραπολικός θόρυβος είναι ιδιαίτερα σημαντικός και δε μπορεί να παραλειφθεί. Αντίθετα, όμως, από το θόρυβο χαμηλών συχνοτήτων, για τον υπολογισμό του απαιτούνται, εκτός από τη μεταβολή του μέσου πεδίου ταχύτητας, και οι μεταβολές των τάσεων που οφείλονται στη τυρβώδη ροή, αυξάνοντας σημαντικά τη δυσκολία των υπολογισμών.

Ο προσδιορισμός του τετραπολικού θορύβου μπορεί να επιτευχθεί με δύο κατηγορίες μεθόδων. Η πρώτη αποτελεί τις υπολογιστικές μεθόδους που βασίζονται στον προσδιορισμό της ακουστικής πίεσης. Η ακουστική πίεση μπορεί με τη σειρά της να υπολογιστεί με δύο τρόπους, την επίλυση της κυματικής εξίσωσης ή την επίλυση των ακουστικών εξισώσεων Euler. Η δεύτερη κατηγορία αφορά σε ημιεμπειρικά πρότυπα που βασίζονται σε πειραματικές μετρήσεις και στην επιμέρους ανάλυση των διακριτών μηχανισμών θορύβου.

Η μη ομογενής κυματική εξίσωση διατυπώθηκε αρχικά από τον Lighthill (1952, 1954) [1,2] για ελεύθερη ροή χωρίς στερεά σύνορα. Η ακουστική πηγή, σε αυτή την περίπτωση, προέρχεται από τις διαταραχές του πεδίου ταχύτητας λόγω της τύρβης και εξαρτάται από τη χρονική μεταβολή των συνεκτικών και τυρβωδών διατμητικών τάσεων. Ο Powell (1964) [3] ανέπτυξε, στη συνέχεια, το μη ομογενές κομμάτι της εξίσωσης, ώστε οι ακουστικές πηγές να εκφράζονται μέσω της στροβιλότητας του πεδίου ροής. Τη θεωρία της ελεύθερης ροής του Lighthill επέκτεινε ο Curle (1955) [4] υπολογίζοντας τις ακουστικές πιέσεις που οφείλονται σε στερεά σύνορα μέσω ενός διπολικού όρου, ο οποίος προκύπτει από τη χρονική μεταβολή των ορθών τάσεων. Τη μη ομογενή κυματική εξίσωση ανέπτυξαν περαιτέρω οι Ffowcs - Williams και Hawkings (1969) [5], εισάγοντας τη συνεισφορά της κίνησης του στερεού συνόρου, το οποίο συμπεριφέρεται ως ακουστικό μονόπολο. Οι παραπάνω διατυπώσεις μπορούν να υπολογίσουν με ακρίβεια τα επίπεδα μονοπολικού και διπολικού θορύβου, με τη διαδικασία να γίνεται πιο πολύπλοκη στην περίπτωση τετραπολικού ήχου, καθώς απαιτείται ο υπολογισμός χωρικών ολοκληρωμάτων. Επιπλέον, δε λαμβάνουν υπόψη τους μηχανισμούς απόσβεσης κατά τη διάδοση των ακουστικών κυμάτων, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε μικρές αποστάσεις από την ακουστική πηγή.

Η ακουστική πίεση μπορεί, εναλλακτικά, να υπολογιστεί μέσω των γραμμικοποιημένων εξισώσεων Euler για το μέσο πεδίο ροής, τα χαρακτηριστικά του οποίου προκύπτουν από την επίλυση του αεροδυναμικού προβλήματος. Οι μεθοδολογίες που βασίζονται στις ακουστικές εξισώσεις Euler λαμβάνουν υπόψη τους μηχανισμούς που επηρεάζουν τη διάδοση, όπως η διάθλαση των ακουστικών κυμάτων και η ατμοσφαιρική απορρόφηση και επομένως είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του θορύβου σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων πραγματοποιείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων όγκων. Στην περίπτωση, όμως, των υψηλών συχνοτήτων, όπου τα μήκη κύματος λαμβάνουν μικρές τιμές, απαιτούνται πυκνά πλέγματα και σχήματα υψηλής ακριβείας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα αριθμητικής διάχυσης και διασποράς. Ως αποτέλεσμα, η μέθοδος των ακουστικών εξισώσεων Euler έχει ιδιαίτερα υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Λόγω των δυσκολιών που εμφανίζουν οι υπολογιστικές μέθοδοι στην αεροακουστική και ιδιαίτερα στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, έχει παράλληλα αναπτυχθεί μια σειρά από ημιεμπειρικές σχέσεις υπολογισμού που βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα. Η πιο εμπεριστατωμένη ημιεμπειρική ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί από τους Brooks, Pope και Marcolini (1989) [6] της Εθνικής Υπηρεσίας Αεροναυπηγικής και Διαστήματος των ΗΠΑ (NASA), οι οποίοι διεξήγαγαν πειραματικές μετρήσεις σε αεροτομές NACA 0012 ποικίλων μεγεθών, για διαφορετικές ταχύτητες αέρα και γωνίες προσβολής. Οι Brooks, Pope και Marcolini μελέτησαν πέντε διακριτούς μηχανισμούς αυτοεπαγόμενου θορύβου, δηλαδή του θορύβου που οφείλεται στην αλληλεπίδραση της αεροτομής με τις διαταραχές της ροής στο οριακό στρώμα και τον ομόρροο. Ανέπτυξαν σχέσεις για το θόρυβο λόγω τυρβώδους οριακού στρώματος, αποκολλημένου οριακού στρώματος, αποβολής στροβιλότητας στρωτού οριακού στρώματος, αμβλείας ακμής εκφυγής και ακροπτερυγίου. Στη μελέτη τους δεν αναλύεται ο θόρυβος που προκύπτει από την αλληλεπίδραση της αεροτομής με την ατμοσφαιρική τύρβη, ο οποίος περιγράφηκε, αρχικά, από τον Amiet (1975,1976) [7,8] και συμπεριλήφθηκε, στη συνέχεια, στα ημιεμπειρικά πρότυπα των Grosveld (1985) [9] και Lawson (1993) [10].

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση του θορύβου ευρέως φάσματος που εκπέμπει ο δρομέας μίας ανεμογεννήτριας κατά τη λειτουργία του. Η αεροδυναμική

επίλυση του προβλήματος, η οποία προσδιορίζει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής, πραγματοποιείται με τον κώδικα συνεκτικής - μη συνεκτικής αλληλεπίδρασης Foil2w [11,12]. Για την αποφυγή του υψηλού υπολογιστικού κόστους των αριθμητικών μεθόδων, το αεροακουστικό πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση των ημιεμπειρικών μοντέλων προσομοίωσης. Ο αυτοεπαγόμενος θόρυβος μίας αεροτομής της ανεμογεννήτριας, προκύπτει με αναγωγή των σχέσεων των Brooks, Pope και Marcolini από τη NACA 0012 στην πραγματική αεροτομή, ενώ ο θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης προσδιορίζεται με βάση το πρότυπο του Amiet και την επέκταση του Lawson.

Τα επιμέρους μέρη της μεθοδολογίας που ακολουθείται αναλύονται εκτενέστερα στο κεφάλαιο που ακολουθεί. Στη συνέχεια, η μεθοδολογία πιστοποιείται με υπάρχοντες πειραματικές μετρήσεις και εφαρμόζεται σε δρομείς σύγχρονων ανεμογεννητριών.

## 2. Περιγραφή μεθοδολογίας

Το πρόβλημα υπολογισμού του παραγόμενου θόρυβου γύρω από αεροτομή χωρίζεται στο αεροδυναμικό και στο αεροακουστικό κομμάτι. Για τον υπολογισμό των απαραίτητων αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε αεροτομής χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας συνεκτικής - μη συνεκτικής αλληλεπίδρασης Foil2w [11,12]. Από τα χαρακτηριστικά αυτά, επιλύεται στη συνέχεια το αεροακουστικό πρόβλημα, που βασίζεται στις σχέσεις των Brooks, Pope και Marcolini [6] και στο μοντέλο του θορύβου λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης του Lowson [10]. Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς για τα διάφορα τμήματα και θέσεις του δρομέα, μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό θόρυβο που παράγει η ανεμογεννήτρια κατά τη λειτουργία της.

### 2.1. Αεροδυναμικός κώδικας Foil2w

Ο κώδικας Foil2w [11,12] αναπαριστά το πεδίο ταχύτητας τοποθετώντας πηγές και δίνες στροβιλότητας κατά μήκος της επιφάνειας της αεροτομής και του ομόρρου. Η παραπάνω μη συνεκτική μεθοδολογία συνδυάζεται με μια συνεκτική διόρθωση που βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων του οριακού στρώματος σε ολοκληρωματική μορφή. Η αλληλεπίδραση της συνεκτικής και της μη συνεκτικής ροής πραγματοποιείται με μία διανομή κάθετης ταχύτητας στην επιφάνεια της αεροτομής και στον ομόρρο, η οποία αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας της συνεκτικής ροής συγκριτικά με τη μη συνεκτική στο πάχος του οριακού στρώματος. Οι συζευγμένες μη γραμμικές εξισώσεις που προκύπτουν από την παραπάνω μεθοδολογία επιλύονται ταυτόχρονα, διευκολύνοντας τη σύγκλιση και σε περιπτώσεις ισχυρής αποκόλλησης.

Η μεθοδολογία του Foil2w βασίζεται στον ορισμό μίας ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής, η οποία αποτελείται από τη συνεισφορά του μη συνεκτικού πεδίου και από μία συνεκτική διόρθωση.

$$\vec{u}_e(\vec{x}, t) = \vec{u}(\vec{x}, t) + \vec{u}^*(\vec{x}, t) \quad (2.1)$$

όπου  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  το μη συνεκτικό πεδίο,  $\vec{u}^*(\vec{x}, t)$  η συνεκτική διόρθωση και  $\vec{u}_e(\vec{x}, t)$  το ισοδύναμο μη συνεκτικό πεδίο.

Οι εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας διατυπώνονται σε ολοκληρωματική μορφή ως προς το ισοδύναμο μη συνεκτικό πεδίο. Η εξίσωση της συνέχειας αποτελεί συνοριακή συνθήκη κατά τον υπολογισμό της ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής, ενώ από τις εξισώσεις ορμής και ενέργειας προκύπτουν τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται, επιπλέον, μια σειρά από εμπειρικές σχέσεις, μια εξίσωση προσδιορισμού του σημείου μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή, καθώς και μία εξίσωση υπολογισμού των τυρβωδών τάσεων στο οριακό στρώμα.

Τα χαρακτηριστικά της ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής δίνονται από την εξίσωση:

$$\vec{u}_e(\vec{x}, t) = \vec{U}_\infty(t) + \nabla\varphi(\vec{x}, t) + \nabla \times (\psi(\vec{x}, t)\vec{k}) + \vec{u}^*(\vec{x}, t) = \vec{u}(\vec{x}, t) + \vec{u}^*(\vec{x}, t) \quad (2.2)$$

όπου:

$\vec{U}_\infty(t)$  η επ'άπειρον ταχύτητα της ροής

$\varphi(\vec{x}, t)$  το δυναμικό της ροής

$\psi(\vec{x}, t)$  η ροϊκή συνάρτηση

$\vec{k}$  το κάθετο διάνυσμα στο δισδιάστατο πεδίο

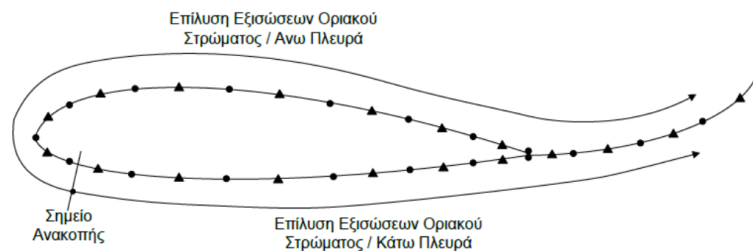
Το πεδίο ταχύτητας της μη συνεκτικής ροής  $\vec{u}$  προκύπτει από την ολοκληρωματική μορφή του δυναμικού και της ροϊκής συνάρτησης, σε συνδυασμό με την συνθήκη μη εισχώρησης. Από την εξίσωση της συνέχειας για την ισοδύναμη μη συνεκτική ροή υπολογίζεται η κάθετη ταχύτητα στην επιφάνεια της αεροτομής, από την οποία προκύπτει, μέσω των συνοριακών συνθηκών, η συνεκτική διόρθωση  $\vec{u}^*$ .

Στις παραπάνω σχέσεις προστίθεται επιπλέον η συνθήκη Kelvin για τον ρυθμό της κυκλοφορίας και η συνθήκη της έντασης της αποβαλλόμενης στροβιλότητας στην ακμή εκφυγής.

### Αριθμητική επίλυση

Για την επίλυση του προβλήματος χωρίζουμε την αεροτομή σε  $N$  στοιχεία ( $N + 1$  κόμβοι), με την αρίθμηση να ξεκινά στην ακμή εκφυγής και να συνεχίζει στην κάτω πλευρά της αεροτομής. Μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων έχουμε στην ακμή πρόσπτωσης και στην ακμή εκφυγής, όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών. Επιπλέον, χωρίζουμε σε  $N_w$  τμήματα το φύλλο του ομόρρου, με την αρίθμηση να ξεκινά από το σημείο εκφυγής του φύλλου.

Οι εξισώσεις του οριακού στρώματος διακριτοποιούνται με πεπερασμένες διαφορές, με την επίλυση να ξεκινά στο σημείο ανακοπής και να ακολουθεί ξεχωριστά την άνω και κάτω πλευρά της αεροτομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Το τμήμα που περιέχει το σημείο μετάβασης χωρίζεται σε δύο στοιχεία, όπου πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί της στρωτής και τυρβώδης ροής αντίστοιχα.



Σχ.2.1: Επίλυση ροής γύρω από αεροτομή

Για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του προβλήματος, επιλύεται αρχικά η περίπτωση της μόνιμης, ασυμπίεστης, μη συνεκτικής ροής. Σε κάθε χρονικό βήμα που ακολουθεί, επιλύονται ταυτόχρονα οι εξισώσεις του οριακού στρώματος και οι εξισώσεις της ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο κώδικας Foil2w χρησιμοποιήθηκε σε μόνιμη ροή για τον υπολογισμό του πάχους  $\delta$  και του πάχους μετατόπισης  $\delta^*$  του οριακού

στρώματος, τα οποία απαιτούνται στη συνέχεια για την αεροακουστική επίλυση της αεροτομής.

## 2.2. Αεροακουστικός κώδικας

Ο θόρυβος ευρέως φάσματος μίας πτέρυγας διακρίνεται στον αυτοεπαγόμενο θόρυβο, που οφείλεται στα αεροδυναμικά φαινόμενα του τοπικού πεδίου ροής κατά μήκος της αεροτομής, και στον θόρυβο λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης. Ο υπολογισμός του πρώτου βασίζεται στις ημιεμπειρικές σχέσεις που ανέπτυξαν οι Brooks, Pope και Marcolini [6] για την αεροτομή NACA 0012. Για τον υπολογισμό του θορύβου λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο δισδιάστατων αεροτομών που χρησιμοποίησε ο Lowson [10] και βασίζεται στον Amiet [7,8].

### 2.2.1. Αυτοεπαγόμενος θόρυβος

Οι Brooks, Pope και Marcolini βασίστηκαν σε πειραματικές μετρήσεις σε πτέρυγες μικρού πλάτους αεροτομής NACA 0012, για διαφορετικές τιμές της χορδής, της γωνίας πρόσπτωσης και της ταχύτητας του αέρα. Αναγνώρισαν και μοντελοποίησαν 5 μηχανισμούς παραγωγής θορύβου.

Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds, αναπτύσσεται τυρβώδες οριακό στρώμα γύρω από την αεροτομή, το οποίο παράγει θόρυβο καθώς αλληλεπιδρά με την ακμή εκφυγής (Turbulent Boundary Layer - Trailing Edge Noise, *TBL-TE*). Σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds, το οριακό στρώμα είναι στρωτό και ο θόρυβος οφείλεται στην αποβολή στροβιλότητας στην ακμή εκφυγής (Laminar Boundary Layer - Vortex Shedding Noise, *LBL-VS*). Σε μη μηδενικές γωνίες πρόσπτωσης, μπορεί επιπλέον να εμφανιστεί αποκόλληση κοντά στην ακμή εκφυγής στην πλευρά υποπίεσης, με αποτέλεσμα την αποβολή τυρβώδους στροβιλότητας. Σε πολύ μεγάλες γωνίες, εμφανίζεται αποκόλληση μεγάλης κλίμακας που παράγει θόρυβο χαμηλότερων συχνοτήτων. Αποβολή στροβιλότητας παρουσιάζεται, επίσης, λόγω της αμβλείας ακμής εκφυγής της αεροτομής (Trailing Edge Bluntness - Vortex Shedding Noise). Τέλος, ένα σημαντικό ποσοστό του θορύβου οφείλεται στην αποβολή στροβιλότητας του ακροπερυγίου (Tip Vortex Formation Noise).

Οι προκύπτουσες σχέσεις ισχύουν για σύστημα συντεταγμένων στην ακμή εκφυγής της αεροτομής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

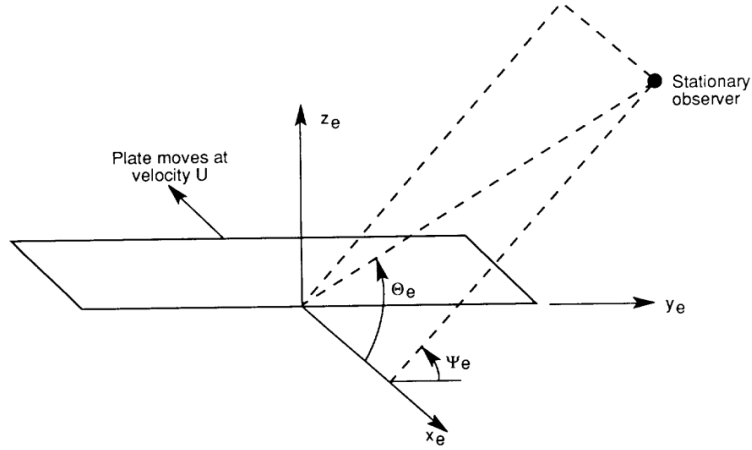
Ανάλογα με το είδος της ακουστικής πηγής οι Brooks, Pope και Marcolini ορίζουν δύο συναρτήσεις κατευθυντικότητας.

$$\bar{D}_h = \frac{2 \sin^2 (\Theta_e/2) \sin^2 \Psi_e}{(1 + M \cos \Theta_e)[1 + (M - M_c) \cos \Theta_e]^4} \quad (2.3)$$

$$\bar{D}_l = \frac{\sin^2 (\Theta_e/2) \sin^2 \Psi_e}{(1 + M \cos \Theta_e)^4} \quad (2.4)$$

όπου  $\Theta_e, \Psi_e$  οι γωνίες του Σχήματος 2.2,  $M$  ο αριθμός Mach της ροής και  $M_c \approx 0.8M$  ο αριθμός Mach της ροής μετά την ακμή εκφυγής.

Η σχέση (2.3) αντιστοιχεί σε θόρυβο τετραπολικής φύσης όπου το μέγεθος των δυνάμεων είναι συγκρίσιμο ή μικρότερο από τις διαστάσεις της πτέρυγας. Η σχέση αυτή

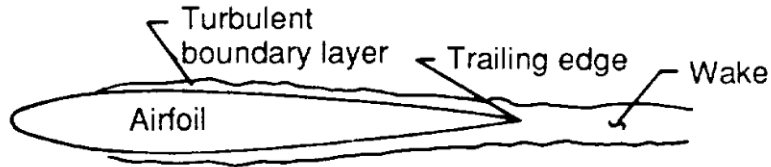


Σχ.2.2: Σύστημα συντεταγμένων

μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μη μηδενική γωνία πρόσπτωσης με αμελητέα σφάλματα. Σε μεγάλες, όμως, γωνίες πρόσπτωσης, όπου παρατηρείται αποκόλληση του οριακού στρώματος, το μέγεθος των δυνάμεων είναι συγκρίσιμο ή μεγαλύτερο της χορδής και απαιτείται η χρήση της σχέσης (2.4) που αντιστοιχεί σε θόρυβο διπολικής φύσης.

### Θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος (TBL-TE)

Ο θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος οφείλεται στην αλληλεπίδραση της τύρβης του οριακού στρώματος, στην πλευρά υποπίεσης και υπερπίεσης, με την ακμή εκφυγής της αεροτομής.



Σχ.2.3: Μηχανισμός θορύβου τυρβώδους οριακού στρώματος

Το φάσμα του θορύβου προκύπτει, σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας, από το λογαριθμικό άθροισμα τριών όρων:

$$SPL_{TBL} = 10 \log \left( 10^{SPL_a/10} + 10^{SPL_s/10} + 10^{SPL_p/10} \right) \quad (2.5)$$

όπου  $SPL_s$  η συνεισφορά της πλευράς υποπίεσης (suction side),  $SPL_p$  η συνεισφορά της πλευράς υπερπίεσης (pressure side) και  $SPL_a$  η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης.

Συγκεκριμένα,

$$SPL_p = 10 \log \left( \frac{\delta_p^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + A \left( \frac{St_p}{St_1} \right) + (K_1 - 3) + \Delta K_1 \quad (2.6)$$

$$SPL_s = 10 \log \left( \frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + A \left( \frac{St_s}{St_1} \right) + (K_1 - 3) \quad (2.7)$$



$$SPL_a = 10 \log \left( \frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + B \left( \frac{St_s}{St_2} \right) + K_2 \quad (2.8)$$

όπου:

$\delta_s^*, \delta_p^*$  το πάχος μετατόπισης της πλευράς υποπίεσης και υπερπίεσης αντίστοιχα

$M$  ο αριθμός Mach της ροής

$L$  το μήκος της ακμής εκφυγής

$\bar{D}_h$  συνάρτηση κατευθυντικότητας

$r_e$  η απόσταση του παρατηρητή

$K_1$  εμπειρική σταθερά, συνάρτηση του αριθμού Reynolds ως προς τη χορδή  $R_c$

$\Delta K_1$  εμπειρική σταθερά, συνάρτηση του αριθμού Reynolds ως προς το  $\delta_p^*$  και της γωνίας πρόσπτωσης

$K_2$  εμπειρική σταθερά, συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης και του αριθμού Mach

Οι συναρτήσεις A,B αποτελούν εμπειρικές συναρτήσεις του αριθμού Strouhal και του αριθμού Reynolds ως προς τη χορδή.

Για τους αριθμούς Strouhal ισχύει:

$$St_p = \frac{f \delta_p^*}{U} \quad St_s = \frac{f \delta_s^*}{U} \quad (2.9)$$

$$St_1 = 0.02M^{-0.6} \quad (2.10)$$

$$St_2 = St_1 \cdot \begin{cases} 1 & a < 1.33^\circ \\ 10^{0.0054(a-1.33)^2} & 1.33^\circ \leq a \leq 12.5^\circ \\ 4.72 & 12.5^\circ < a \end{cases} \quad (2.11)$$

όπου  $f$  η συχνότητα,  $U$  η ταχύτητα της ροής και  $a$  η γωνία πρόσπτωσης.

Σε μη μηδενικές γωνίες πρόσπτωσης μπορεί να δημιουργηθεί αποκόλληση στην πλευρά υποπίεσης κοντά στην ακμή εκφυγής, η οποία οδηγεί σε αποβολή στροβιλότητας και συνεπώς παραγωγή θορύβου. Σε μεγάλες γωνίες εμφανίζεται αποκόλληση μεγάλης κλίμακας κατά μήκος μεγάλου ποσοστού της χορδής, η οποία οδηγεί σε θόρυβο χαμηλότερων συχνοτήτων. (Σχήμα 2.4)

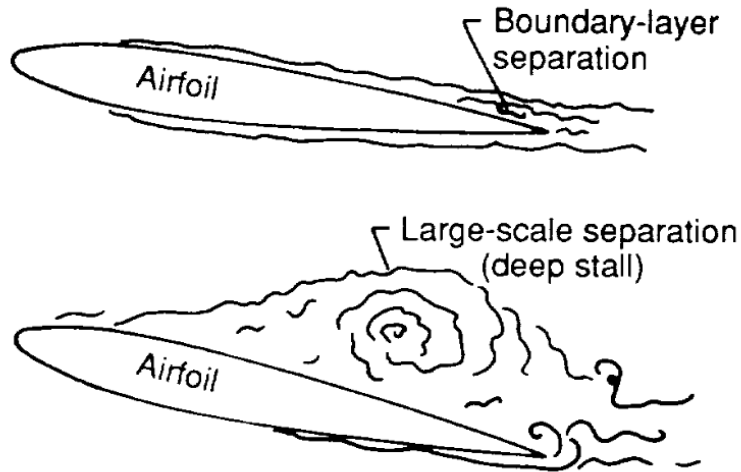
Με βάση τους Brooks, Pope και Marcolini, γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη της μεταβλητής  $\gamma_0 = 23.43M + 4.651$  ή των  $12.5^\circ$ , αντιστοιχεί σε κατάσταση αποκόλλησης και οι παραπάνω σχέσεις γίνονται:

$$SPL_p = \infty \quad (2.12)$$

$$SPL_s = \infty \quad (2.13)$$

$$SPL_a = 10 \log \left( \frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_l}{r_e^2} \right) + A' \left( \frac{St_s}{St_2} \right) + K_2 \quad (2.14)$$

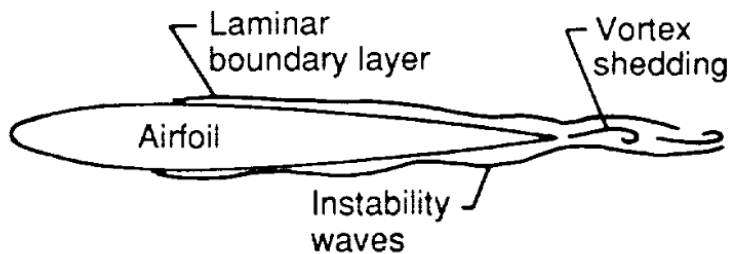
όπου  $A'(R_c) = A(3R_c)$ ,  $R_c$  ο αριθμός Reynolds της ροής ως προς την χορδή και  $\bar{D}_l$  η συνάρτηση κατευθυντικότητας για χαμηλές συχνότητες.



Σχ.2.4: Θόρυβος αποκολλημένου οριακού στρώματος

### Θόρυβος στρωτού οριακού στρώματος (LBL-VS)

Σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή θορύβου οφείλεται στις αστάθειες του οριακού στρώματος που οδηγούν σε αποβολή στροβιλότητας από την ακμή εκφυγής. Για να αποφευχθεί ο συγκεκριμένος μηχανισμός θορύβου, επιλέγεται συχνά η εξαναγκασμένη μετάβαση του οριακού στρώματος σε τυρβώδες (tripping).



Σχ.2.5: Μηχανισμός θορύβου στρωτού οριακού στρώματος

Το φάσμα του θορύβου του στρωτού οριακού στρώματος είναι, σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας, ίσο με:

$$SPL_{LBL} = 10 \log \left( \frac{\delta_p M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + G_1 \left( \frac{St'}{St'_{peak}} \right) + G_2 \left[ \frac{R_c}{(R_c)_0} \right] + G_3(\alpha) \quad (2.15)$$

όπου:

- $\delta_p$  το πάχος του οριακού στρώματος στην πλευρά υπερπίεσης
- $(R_c)_0$  τιμή αναφοράς του αριθμού Reynolds, συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης
- $\alpha$  η γωνία πρόσπτωσης

Οι συναρτήσεις  $G_1, G_2, G_3$  εξαρτώνται από τους αριθμούς Strouhal, τον αριθμό Reynolds ως προς τη χορδή  $R_c$  και τη γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$ .

Για τους αριθμούς Strouhal ισχύει:

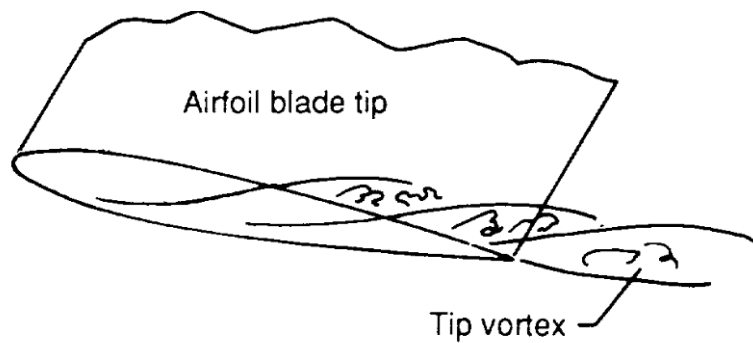
$$St' = \frac{f\delta_p}{U} \quad (2.16)$$

$$St'_{peak} = 10^{-0.04a} \cdot \begin{cases} 0.18 & R_c \leq 1.3 \cdot 10^5 \\ 0.001756R_c^{0.3931} & 1.3 \cdot 10^5 < R_c \leq 4 \cdot 10^5 \\ 0.28 & 4 \cdot 10^5 < R_c \end{cases} \quad (2.17)$$

όπου  $f$  η συχνότητα και  $U$  η ταχύτητα της ροής.

### Θόρυβος ακροπτερυγίου (Tip vortex noise)

Καθώς η ροή διέρχεται από το ακροπτερύγιο, εμφανίζεται στρόβιλος μεγάλου συνεκτικού πυρήνα και έντονα τυρβώδης ανακυκλοφορούσα ροή. Ο θόρυβος θεωρείται ότι παράγεται κατά την αλληλεπίδραση του στρόβιλου με την ακμή εκφυγής κοντά στην περιοχή του ακροπτερυγίου.



Σχ.2.6: Μηχανισμός θορύβου ακροπτερυγίου

Το φάσμα του θορύβου προσομοιώνεται, σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας, από τη σχέση:

$$SPL_{TIP} = 10 \log \left( \frac{M^2 M_{max}^3 l^2 \bar{D}_h}{r_e^2} \right) - 30.5(\log(St'') + 0.3)^2 + 126 \quad (2.18)$$

όπου:

$St'' = fl/U_{max}$  ο αριθμός Strouhal

$f$  η συχνότητα

$l$  η διάμετρος του πυρήνα του στρόβιλου με  $l/c \approx 0.008a_{tip}$

$c$  η χορδή της αεροτομής

$a_{tip}$  η γωνία πρόσπτωσης στο ακροπτερύγιο

$M_{max}$  ο μέγιστος Mach της ροής με  $M_{max}/M \approx (1 + 0.036a_{tip})$

$U_{max} = c_o M_{max}$  η αντίστοιχη ταχύτητα

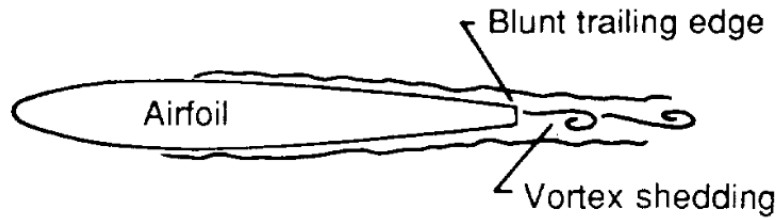
Οι παραπάνω εξισώσεις προέκυψαν από μετρήσεις σε πτέρυγες με στρογγυλεμένα ακροπτερύγια. Στην περίπτωση επίπεδου ακροπτερυγίου, η τιμή της διαμέτρου του πυρήνα του στρόβιλου  $l$  δίνεται από τη σχέση:

$$l/c = \begin{cases} 0.0230 + 0.0169a_{tip} & 0^\circ \leq a_{tip} \leq 2^\circ \\ 0.0378 + 0.0095a_{tip} & 2^\circ < a_{tip} \end{cases} \quad (2.19)$$

Σύμφωνα με τις μετρήσεις των Brooks και Marcolini, το επίπεδο ακροπτερούγιο αντιστοιχεί σε μικρή αύξηση του θορύβου στις υψηλές συχνότητες.

### Θόρυβος αποκομμένης ακμής εκφυγής (TE bluntness)

Η αμβλεία ακμή εκφυγής ενός πτερυγίου παράγει θόρυβο λόγω αποβολής στροβιλότητας, ο οποίος παρουσιάζει κορυφές σε διακριτές συχνότητες. Ο θόρυβος αυτός εξαρτάται από το πάχος και τη γωνία της ακμής εκφυγής, με τις οξείες ακμές να είναι οι πιο ανθόρυβες.



Σχ.2.7: Θόρυβος αποκομμένης ακμής εκφυγής

Το φάσμα του θορύβου λόγω αποκομμένης ακμής εκφυγής, σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας, δίνεται από τη σχέση:

$$SPL_{BLUNT} = 10 \log \left( \frac{hM^{5.5}L\bar{D}_h}{r_e^2} \right) + G_4 \left( \frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi \right) + G_5 \left( \frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi, \frac{St'''}{St'''_{peak}} \right) \quad (2.20)$$

όπου:

$h$  το πάχος της αεροτομής στην ακμή εκφυγής

$\Psi$  η γωνία της ακμής εκφυγής

$\delta_{avg}^* = \frac{\delta_p^* + \delta_s^*}{2}$  η μέση τιμή του πάχους μετατόπισης του οριακού στρώματος

Οι συναρτήσεις  $G_4, G_5$  εξαρτώνται από τους αριθμούς Strouhal και τη γεωμετρία της ακμής εκφυγής.

Για τους αριθμούς Strouhal ισχύει:

$$St''' = \frac{fh}{U} \quad (2.21)$$

$$St'''_{peak} = \begin{cases} \frac{0.212 - 0.0045\Psi}{1 + 0.235(h/\delta_{avg}^*)^{-1} - 0.0132(h/\delta_{avg}^*)^{-2}} & 0.2 \leq h/\delta_{avg}^* \\ 0.1h/\delta_{avg}^* + 0.095 - 0.00243\Psi & h/\delta_{avg}^* < 0.2 \end{cases} \quad (2.22)$$

όπου  $f$  η συχνότητα και  $U$  η ταχύτητα της ροής.

## 2.2.2. Θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης

Η ροή του ανέμου που συναντά ο δρομέας δεν είναι στρωτή αλλά τυρβώδης. Η αλληλεπίδραση της τύρβης αυτής με τα πτερύγια παράγει θόρυβο ευρέως φάσματος, ο οποίος σε λειτουργία υψηλής ισχύος ή σε μεγάλες ταχύτητας ανέμου αποτελεί και τον θόρυβο με την μεγαλύτερη ένταση κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Σύμφωνα με το πρότυπο που ανέπτυξε ο Amiet για δισδιάστατη αεροτομή, το φάσμα του θορύβου που οφείλεται στην ατμοσφαιρική τύρβη περιγράφεται σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας από τις παρακάτω εξισώσεις, για υψηλές και χαμηλές συχνότητες αντίστοιχα.

$$SPL_{TURB}^H = 10 \log \left( \frac{\rho_o^2 c_o^2 L L_t \bar{D}_h M^3 U^2 I^2 K^3}{(1 + K^2)^{7/3} r_e^2} \right) + 58.4 \quad (2.23)$$

$$SPL_{TURB}^L = 10 \log(LFC) + SPL_{TURB}^H \quad (2.24)$$

όπου:

- $\rho_o$  η πυκνότητα του αέρα
- $c_o$  η ταχύτητα του ήχου
- $L$  το μήκος της ακμής εκφυγής
- $L_t$  η κλίμακα της τύρβης
- $\bar{D}_h$  συνάρτηση κατευθυντικότητας
- $M$  ο αριθμός Mach της ροής
- $U$  η ταχύτητα της ροής
- $I$  η ένταση της τύρβης
- $K = \pi f c / U$  το μήκος κύματος
- $r_e$  η απόσταση του παρατηρητή

Η κλίμακα της τύρβης είναι δυνατό να εκτιμηθεί με βάση τη διάμετρο του δρομέα της μηχανής. Εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$L_t = 8.1 \Lambda_1, \quad \Lambda_1 = \begin{cases} 0.7 z_{hub} & z_{hub} < 60m \\ 42 & z_{hub} \geq 60m \end{cases} \quad (2.25)$$

όπου  $z_{hub}$  το ύψος του δρομέα.

Η ένταση της τύρβης είναι ίση με:

$$I = \frac{\sigma_x}{u} \quad (2.26)$$

όπου  $\sigma_x$  η ρίζα της μέσης χρονικά τιμής του τετραγώνου της διαταραχής  $\overline{u'^2}$  της ταχύτητας  $u$ .

Με βάση την εξίσωση της ατμοσφαιρικής ταχύτητας για ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z_{hub}}{z_o} \quad (2.27)$$

και τη σχέση  $\sigma_x = 2.4135 u_*$ , που προκύπτει από το τοπικό ισοζύγιο τύρβης για επίπεδο έδαφος και κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$I = \frac{2.4135k}{\ln(z_{hub}/z_o)} \quad (2.28)$$

όπου:

- $u$  η ταχύτητα της ροής
- $u_*$  η ταχύτητα διατμητικής τάσης
- $k = 0.4$  η σταθερά Von Karman
- $z_{hub}$  το ύψος της πλήμνης του δρομέα
- $z_o$  το μήκος τραχύτητας του εδάφους

Η σχέση (2.28) προσφέρει μία εκτίμηση της τιμής της έντασης της τύρβης όταν είναι γνωστή η τραχύτητα του εδάφους.

Ο όρος LFC αποτελεί διορθωτικό συντελεστή για τις χαμηλές συχνότητες και είναι ίσος με:

$$LFC = 10S^2MK^2\beta^{-2} \quad (2.29)$$

$$\beta = 1 - M^2 \quad (2.30)$$

$$S^2 = \left[ \frac{2\pi K}{\beta^2} + \left( 1 + 2.4 \frac{K}{\beta^2} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (2.31)$$

Ο Amiet πρότεινε αρχικά τη χρήση της εξίσωσης των υψηλών συχνοτήτων για συχνότητες μεγαλύτερες μίας χαρακτηριστικής τιμής, η οποία όμως έρχεται σε αντίθεση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για να επιτύχει μια ομαλή μετάβαση από τις χαμηλές στις υψηλές συχνότητες, που να συμφωνεί με τις πειραματικές μετρήσεις, ο Lawson εισήγαγε την έκφραση:

$$SPL_{TURB} = 10 \log \left( \frac{LFC}{1 + LFC} \right) + SPL_{TURB}^H \quad (2.32)$$

### 2.3. Υπολογισμός από δρομέα ανεμογεννήτριας

Για την επίλυση του αεροακουστικού προβλήματος σε δρομέα ανεμογεννήτριας, το περύγιο χωρίζεται σε στοιχεία εντός των οποίων η γεωμετρία θεωρείται σταθερή. Σε κάθε στοιχείο θεωρούμε πως η ροή είναι δισδιάστατη και μπορούμε να εφαρμόσουμε τον αεροδυναμικό και αεροακουστικό κώδικα.

Από τη γεωμετρία της ανεμογεννήτριας και τα χαρακτηριστικά της ροής υπολογίζουμε σε κάθε θέση τα δεδομένα εισόδου του αεροδυναμικού κώδικα Foil2w, από τον οποίον προκύπτουν, στη συνέχεια, το πάχος  $\delta$  και το πάχος μετατόπισης  $\delta^*$  του οριακού στρώματος, για την πλευρά υποπίεσης και υπερπίεσης της αεροτομής. Καθώς ο αεροακουστικός κώδικας βασίζεται σε μετρήσεις της NACA 0012, απαιτείται αναγωγή στην αντίστοιχη αεροτομή του στοιχείου περύγωσης. Για τον σκοπό αυτό οι αεροδυναμικοί υπολογισμοί πραγματοποιούνται δύο φορές, για την NACA 0012 και για την

πραγματική αεροτομή και υπολογίζονται οι αντίστοιχοι λόγοι ομοιότητας μεταξύ των αεροτομών.

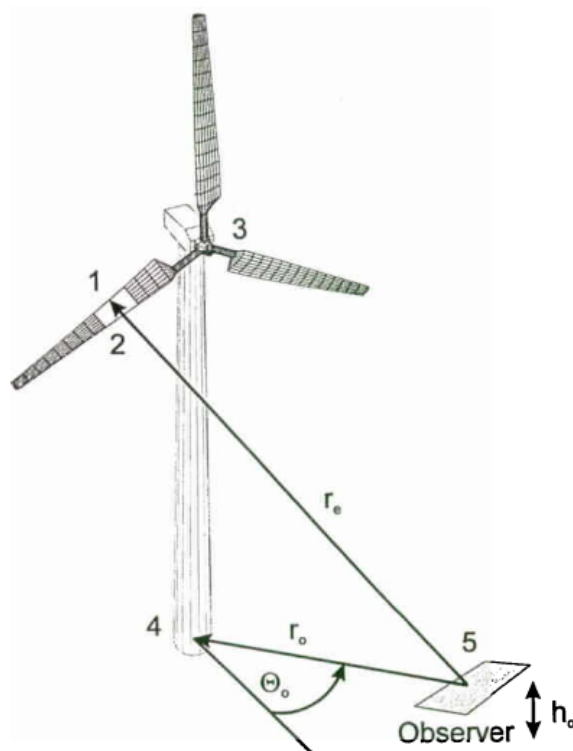
$$\alpha_{\delta} = \frac{\delta_{air\ foil}}{\delta_{0012}}$$

Οι λόγοι ομοιότητας πολλαπλασιάζονται στη συνέχεια με τις πειραματικές τιμές των Brooks, Pore και Marcolini, οπότε και προκύπτουν τα τελικά μεγέθη του πάχους και του πάχους μετατόπισης του οριακού στρώματος για κάθε πλευρά της αεροτομής. Με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος να είναι γνωστά, μπορεί να επιλυθεί στη συνέχεια ο αεροακουστικός κώδικας.

Ο συνολικός θόρυβος που εκπέμπει ένα στοιχείο του πτερυγίου υπολογίζεται από το λογαριθμικό άθροισμα των επιμέρους πηγών θορύβου.

$$SPL_{TOT} = 10 \log (10^{SPL_{TBL}/10} + 10^{SPL_{LBL}/10} + 10^{SPL_{BLUNT}/10} + 10^{SPL_{TIP}/10} + 10^{SPL_{TURB}/10})$$

Η θέση του παρατηρητή ορίζεται πάντα ως προς την ακμή εκφυγής (Σχήμα 2.8). Αφού υπολογιστεί ο παραγόμενος θόρυβος από κάθε στοιχείο του πτερυγίου, περιστρέφουμε το πτερύγιο κατά μικρή γωνία και επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς έως ότου να καλύψει μία πλήρη περιστροφή. Το τελικό φάσμα του θορύβου ολόκληρου του δρομέα προκύπτει από το λογαριθμικό άθροισμα της μέσης τιμής της έντασης για μία περιστροφή για το σύνολο των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.



Σχ.2.8: Θέση παρατηρητή ως προς την ανεμογεννήτρια





### 3. Πιστοποίηση μεθοδολογίας

Για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του αεροακουστικού κώδικα που αναπτύχθηκε, απαιτείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο μελέτες, οι οποίες περιλαμβάνουν τη μέτρηση του θορύβου πτερυγίων μεμονωμένων αεροτομών σε αεροδυναμική σήραγγα και τη μέτρηση του παραγόμενου ήχου ανεμογεννήτριας στο περιβάλλον. Πρώτο βήμα της πιστοποίησης του αεροακουστικού κώδικα αποτέλεσε ο έλεγχος του θορύβου τυρβώδους και στρωτού οριακού στρώματος, με βάση μετρήσεις σε αεροσήραγγα του Εθνικού Εργαστηρίου Αεροδιαστημικής της Ολλανδίας (NLR) (2004) [13]. Στη συνέχεια, με σκοπό να ελεγχθεί το σύνολο των υπολογισμών σε πραγματικό δρομέα, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις πλήρους κλίμακας της ανεμογεννήτριας WTS-4 από την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος των ΗΠΑ (NASA) (1983,1989) [14,15].

#### 3.1. Σύγκριση με μετρήσεις σε αεροσήραγγα

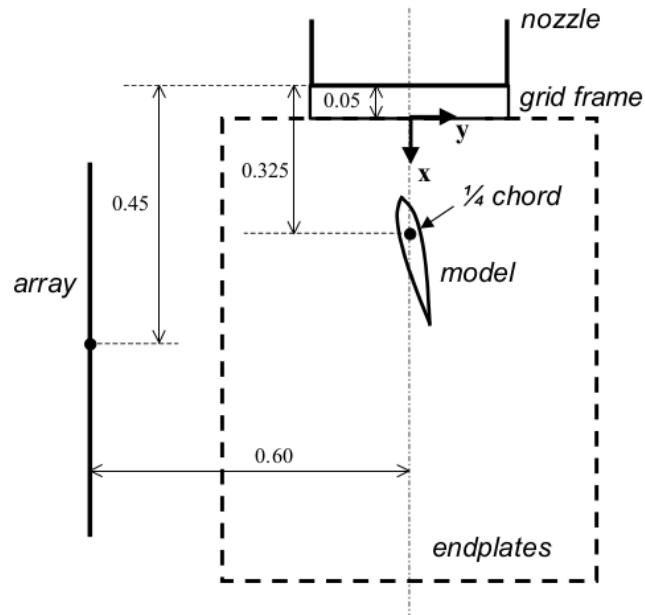
Το Ολλανδικό Εθνικό Εργαστήριο Αεροδιαστημικής (NLR), σε συνεργασία με το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας των ΗΠΑ (NREL) [13], πραγματοποίησε μετρήσεις για έξι αεροτομές που χρησιμοποιούνται σε δρομείς ανεμογεννητριών (S822, S834, FX63-137, SG6043, SH3055, SD2030), καθώς και για την NACA 0012, τα επίπεδα θορύβου της οποίας συνέκρινε με τις αντίστοιχες μετρήσεις των Brooks, Pope και Marcolini της NASA [6].

Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν πτέρυγες μήκους 0.509m και χορδής 0.2286m με ακμή εκφυγής αμελητέου πάχους ώστε να αποφευχθεί ο θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής. Για να προσομοιωθεί η τραχύτητα και η άμεση μετάβαση σε τυρβώδες οριακό στρώμα τοποθετήθηκαν κατάλληλες ταινίες zigzag (tripping tapes) κοντά στο χείλος προσβολής. Η γεωμετρία της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

Το μικρό πάχος της ακμής εκφυγής, σε συνδυασμό με την απουσία ατμοσφαιρικής τύρβης και θορύβου ακροπτερυγίου, επιτρέπει τον έλεγχο της διαδικασίας υπολογισμού του θορύβου τυρβώδους και στρωτού οριακού στρώματος.

Στο πλαίσιο της πιστοποίησης του αεροακουστικού κώδικα χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμες μετρήσεις των αεροτομών NACA 0012, S822 και S834. Συγκεκριμένα, εκτιμήθηκε ο παραγόμενος θόρυβος της NACA 0012 για γωνίες προσβολής  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  και  $5.3^\circ$  σε ταχύτητα ροής 31.7m/s και των S822, S834 για γωνίες  $0^\circ$ ,  $4.4^\circ$  και  $7.9^\circ$  σε ταχύτητα ροής 32m/s. Και στις τρεις αεροτομές μελετήθηκαν οι περιπτώσεις πλήρως τυρβώδους ροής (tripped) και ροής με ελεύθερη μετάβαση (untripped), με τα τελικά αποτελέσματα να παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.2 - 3.4.

Στο Σχήμα 3.2 δίνονται τα επίπεδα θορύβου της αεροτομής NACA 0012 για γωνίες  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  και  $5.3^\circ$ . Παράλληλα με τις μετρήσεις του NLR, για τις γωνίες πρόσπτωσης  $0^\circ$ ,  $2^\circ$  και  $4^\circ$ , παρατίθενται τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των



Σχ.3.1: Πειραματική διάταξη μετρήσεων σε αεροσήραγγα

Brooks, Pope και Marcolini της NASA. Και στις δύο σειρές μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα ίδιας γεωμετρίας και χορδής, με τη μοναδική σημαντική διαφορά να συναντάται στον τρόπο τοποθέτησης των ταινιών τραχύτητας στο χείλος προσβολής, με σκοπό την επίτευξη της άμεσης μετάβασης σε τυρβώδες οριακό στρώμα.

Συγκρίνοντας τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα παρατηρούμε πως η γενική μορφή του φάσματος αναπαράγεται σωστά. Καθώς οι εμπειρικές σχέσεις που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2 ρυθμίστηκαν με βάση τις μετρήσεις της NASA, η συμπεριφορά των αριθμητικών αποτελεσμάτων αντικατοπτρίζει, έως ένα βαθμό, τις διαφορές ανάμεσα στις δύο σειρές πειραματικών μετρήσεων.

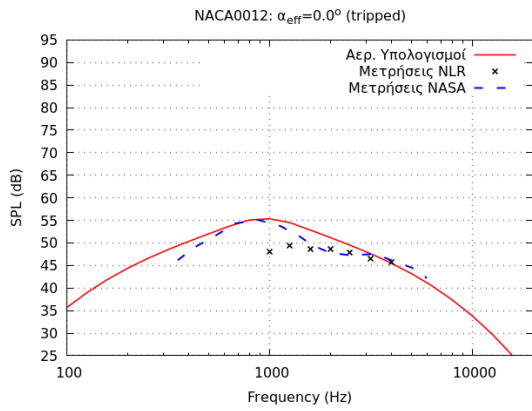
Στην περίπτωση της ελεύθερης μετάβασης (untripped) εμφανίζονται κορυφές στην περιοχή των 1000 - 2000 Hz που οφείλονται στο θόρυβο στρωτού οριακού στρώματος. Αν και οι κορυφές αυτές εντοπίζονται στις ίδιες περίπου συχνότητες με τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρείται σε όλες τις γωνίες μία υπερεκτίμηση του θορύβου σε σχέση με τις μετρήσεις των Brooks, Pope και Marcolini. Συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα με τις μετρήσεις του NLR, παρατηρούμε πως επιτυγχάνεται καλή συμφωνία στις μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης των  $4^\circ$  και  $5.3^\circ$ . Στις μικρότερες, όμως, γωνίες παρουσιάζονται αποκλίσεις, γεγονός που, πιθανώς, οφείλεται στη διαφορετική εκτίμηση του σημείου μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη.

Η περίπτωση του πλήρως τυρβώδους οριακού στρώματος (tripped) χαρακτηρίζεται και στις 4 γωνίες από θόρυβο ευρέως φάσματος, χωρίς διακριτούς τόνους. Τα επίπεδα και η μορφή του θορύβου έρχονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις μετρήσεις της NASA, οι οποίες, όμως, παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές σε σχέση με τα αντίστοιχα δεδομένα του NLR. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν δύο κορυφές, στα 1 και 3 kHz, με την πρώτη να μην εμφανίζεται στις μετρήσεις του NLR. Για μη μηδενικές γωνίες πρόσπτωσης, οι κορυφές αυτές πιθανώς οφείλονται στις διαφορετικές συνεισφορές των πλευρών υποπίεσης και υπερπίεσης ή σε αποκόλληση του οριακού στρώματος της πλευράς υποπίεσης. Σε μηδενική, όμως, γωνία, λόγω της συμμετρίας της αεροτομής, η διπλή κορυφή δε μπορεί να εξηγηθεί. Στην παραπάνω μη αναμενόμενη μορφή των μετρήσεων της NASA αναφέρεται και προσπαθεί να αιτιολογήσει η μελέτη του NLR. Σύμφωνα με

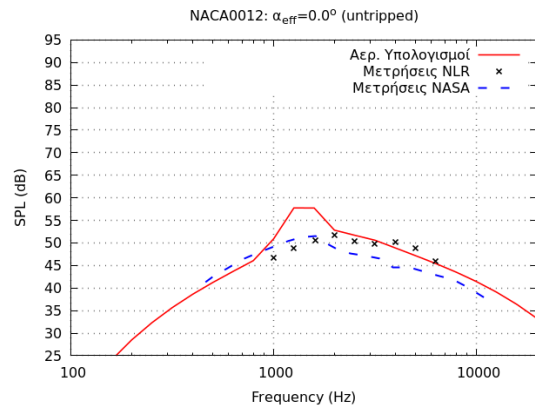
το NLR, μία πιθανή εξήγηση αποτελεί η ύπαρξη εξωτερικών πηγών στα σημεία τομής της αιχμής εκφυγής του πτερυγίου με τις πλαϊνές πλάκες της πειραματικής διάταξης. Εναλλακτικά, η διπλή κορυφή ίσως οφείλεται σε αντανάκλασεις ή φαινόμενα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών στην ίδια περιοχή. Τέλος, πιθανή αιτία αποτελεί η διαφορετική μέθοδος τοποθέτησης των ταινιών τραχύτητας στο χείλος προσβολής, η οποία μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη του τυρβώδους οριακού στρώματος και, συνεπώς, τα παραγόμενα επίπεδα ήχου.

Στα Σχήματα 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αεροτομών S822 και S834 αντίστοιχα για γωνίες  $0^\circ$ ,  $4.4^\circ$  και  $7.9^\circ$ . Όμοια με την NACA 0012, η πλήρως τυρβώδης ροή (tripped) διακρίνεται από θόρυβο ευρέως φάσματος, ενώ η ροή με ελεύθερη μετάβαση (untripped) παρουσιάζει κορυφές στην περιοχή των 1000 - 2000 Hz. Στην περίπτωση της πλήρως τυρβώδους ροής (tripped) για γωνίες πρόσπτωσης  $0^\circ$  και  $4.4^\circ$ , επιτυγχάνεται καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα και για τις δύο αεροτομές. Στα διαγράμματα της ελεύθερης μετάβασης (untripped) η συνεισφορά του θορύβου ευρέως φάσματος λόγω του τυρβώδους οριακού στρώματος αναπαράγεται σωστά. Για την αεροτομή S822, όμως, εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα στις αριθμητικές και πειραματικές τιμές ως προς την πρόλεξη του θορύβου στρωτού οριακού στρώματος. Συγκρίνοντας τις καμπύλες των αεροακουστικών υπολογισμών και τα πειραματικά δεδομένα για τις 3 γωνίες, παρατηρούμε μια διαφορά φάσης ορισμένων μοιρών στο σχηματισμό της κορυφής του θορύβου στρωτού οριακού στρώματος. Επιπλέον, στις μεγαλύτερες γωνίες των  $4.4^\circ$  και  $7.9^\circ$ , διαφορά παρουσιάζεται και στην μέγιστη ένταση του θορύβου. Οι διαφορές αυτές δεν παρατηρούνται στον ίδιο βαθμό στις μετρήσεις της NACA 0012, στην οποία βασίζονται οι ημιεμπειρικές σχέσεις του αεροακουστικού κώδικα και, επομένως, προέρχονται πιθανά από τον υπολογισμό των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών και την αναγωγή των σχέσεων στην εκάστοτε αεροτομή. Μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς την πρόλεξη του θορύβου στρωτού οριακού στρώματος θα μπορούσε, ίσως, να επιτευχθεί με τη χρήση κώδικα CFD για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών παραμέτρων.

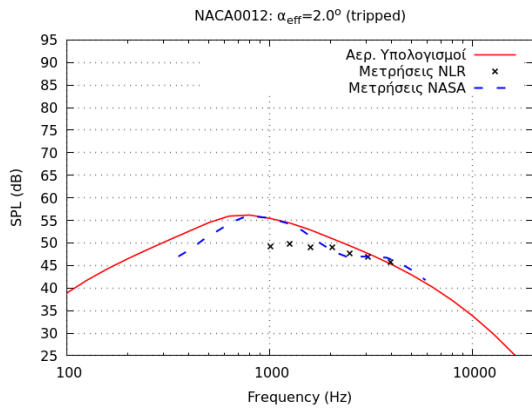
Στα διαγράμματα της πλήρους τυρβώδους ροής (tripped) για γωνία  $7.9^\circ$  των αεροτομών S822, S834, τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν κορυφές που δεν αντανάκλωνται στις καμπύλες του αεροακουστικού κώδικα. Τα αποτελέσματα αυτά των μετρήσεων, τα οποία δεν μπορούν να εξηγηθούν από κάποιον από τους μηχανισμούς που αναλύθηκαν, αναφέρονται από τη μελέτη του NLR ως μη τυπικά, καθώς η μορφή τους διαφέρει από τον αντίστοιχο θόρυβο ευρέως φάσματος που απαντάται σε διαφορετικές γωνίες ή ταχύτητες ροής. Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποίησε το NLR, οι αιχμές αυτές αντιστοιχούν σε μη συμμετρικές πηγές ως προς τον άξονα της αεροτομής και πιθανώς οφείλονται σε κάποιο μεταβατικό τρισδιάστατο φαινόμενο της ροής.



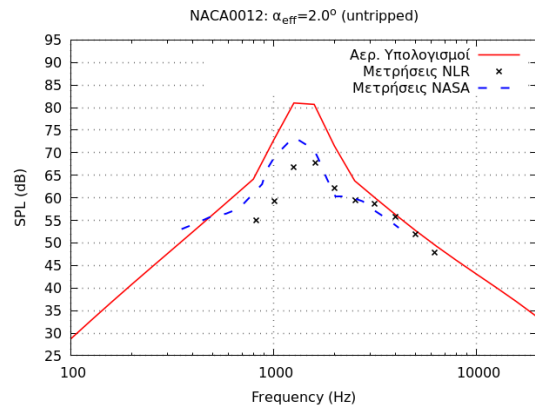
(a)



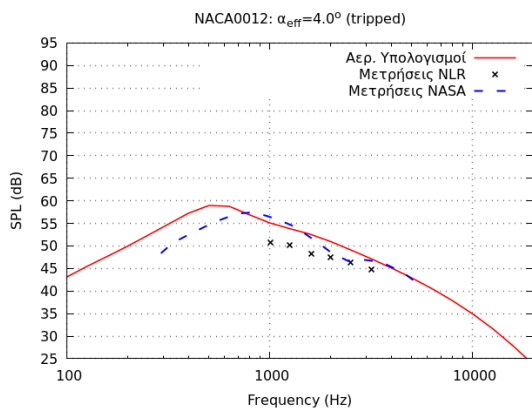
(b)



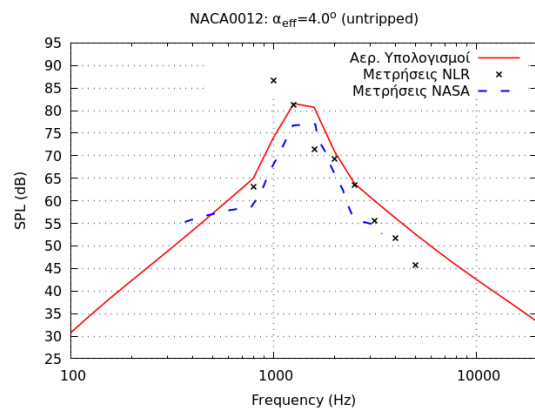
(c)



(d)

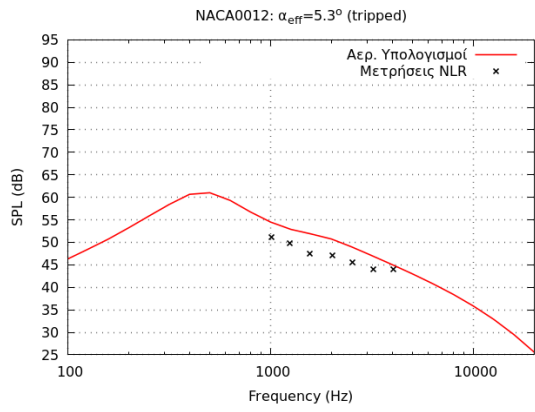


(e)

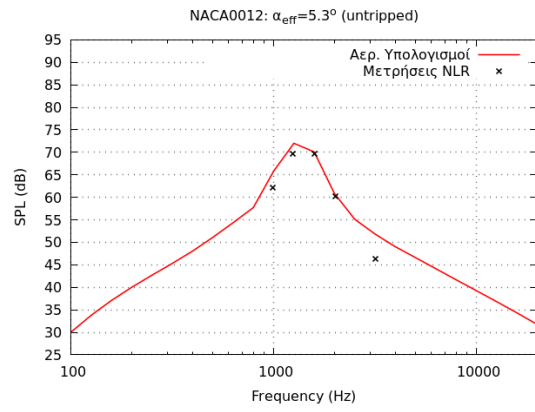


(f)

Σχ.3.2α: Σύγκριση αεροακουστικών υπολογισμών με μετρήσεις θορύβου της αεροτομής NACA 0012 για ταχύτητα ροής 31.7 m/s

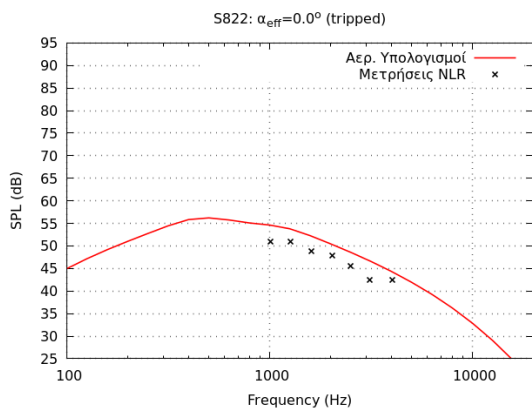


(a)

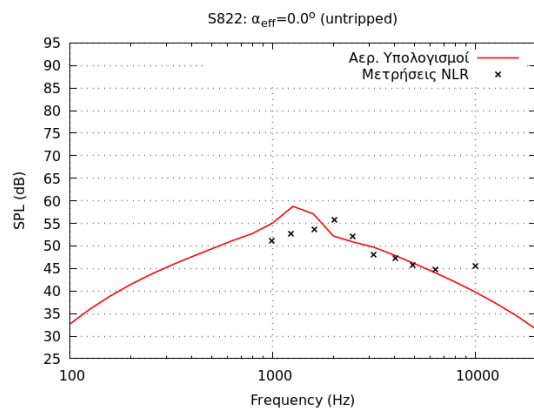


(b)

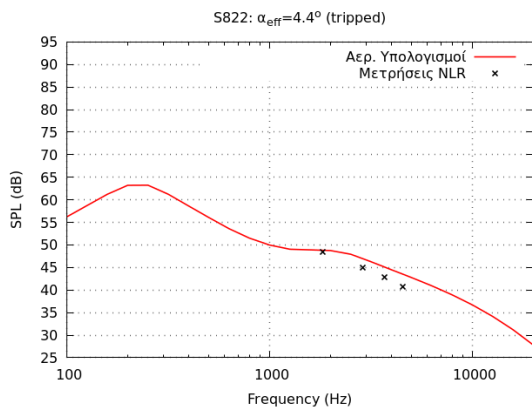
Σχ.3.2b: Σύγκριση αεροακουστικών υπολογισμών με μετρήσεις θορύβου της αεροτομής NACA 0012 για ταχύτητα ροής 31.7 m/s



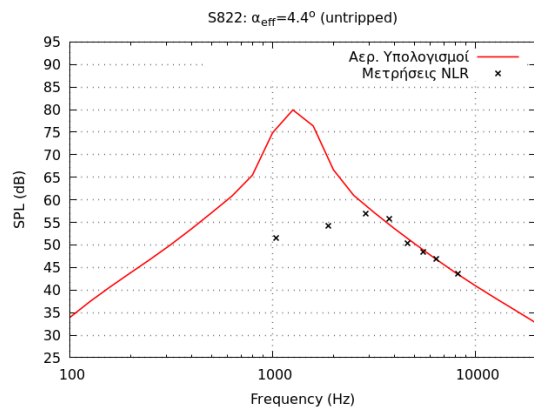
(a)



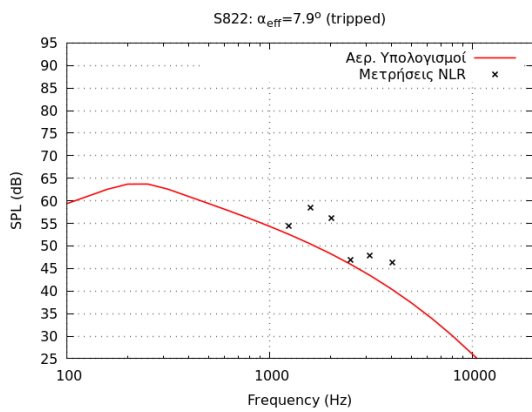
(b)



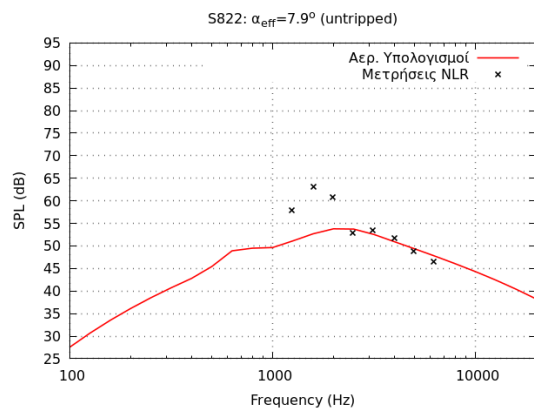
(c)



(d)

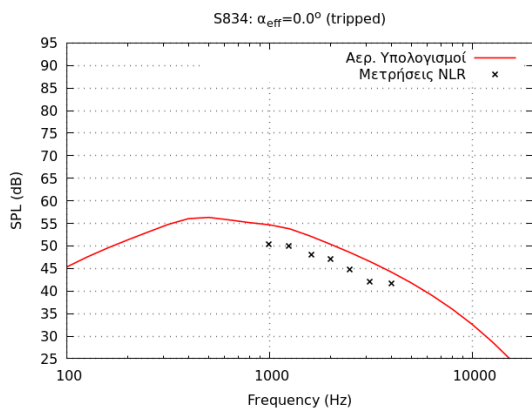


(e)

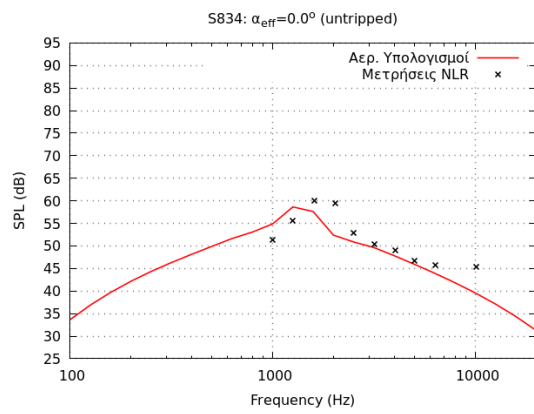


(f)

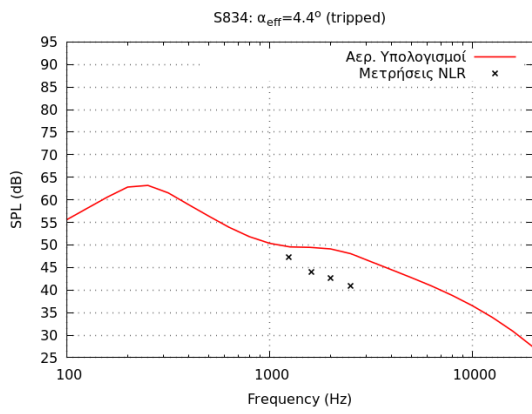
Σχ.3.3: Σύγκριση αεροακουστικών υπολογισμών με μετρήσεις θορύβου της αεροτομής S822 για ταχύτητα ροής 32 m/s



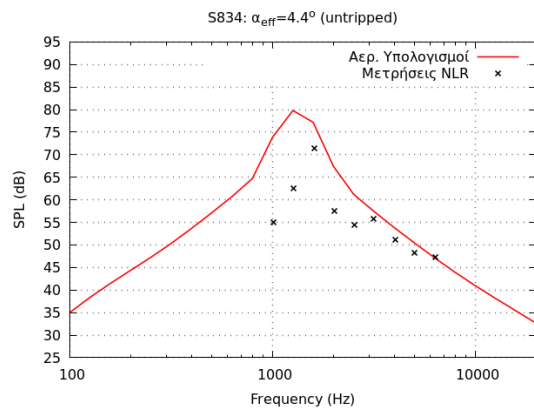
(a)



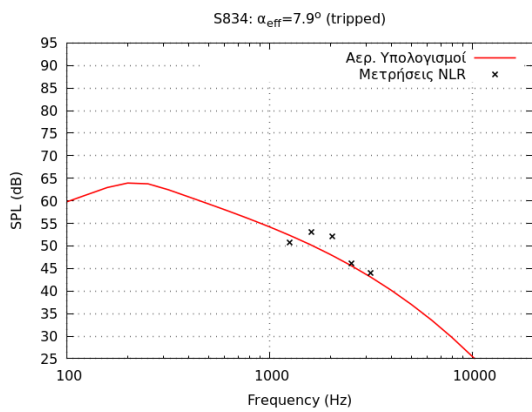
(b)



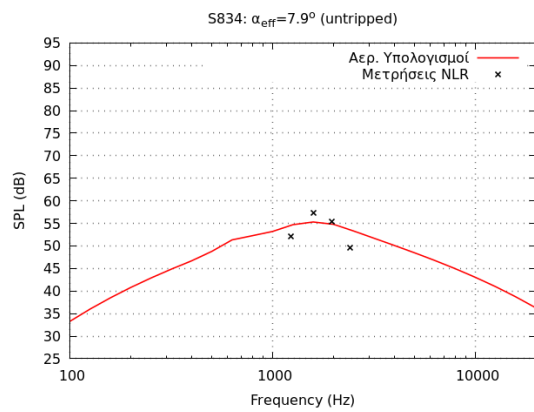
(c)



(d)



(e)



(f)

Σχ.3.4: Σύγκριση αεροακουστικών υπολογισμών με μετρήσεις θορύβου της αεροτομής S834 για ταχύτητα ροής 32 m/s

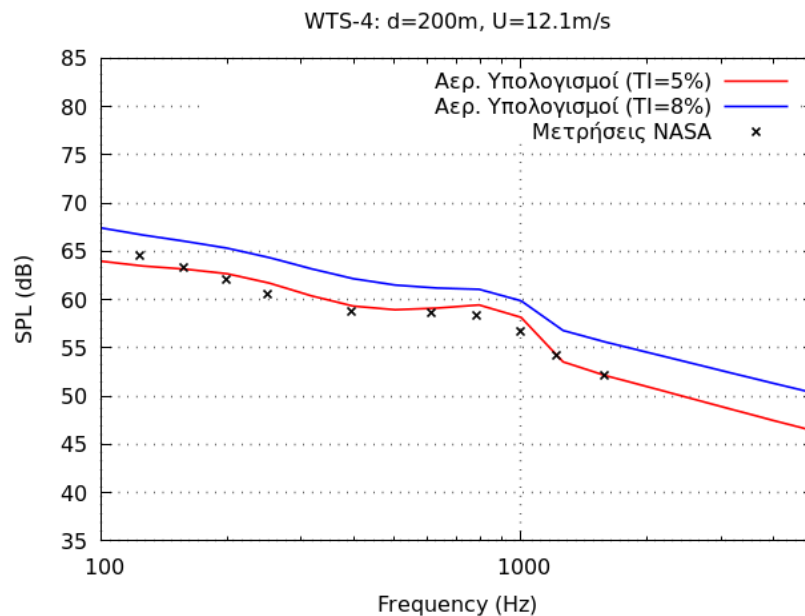
### 3.2. Σύγκριση με μετρήσεις πλήρους κλίμακας

Η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος των ΗΠΑ (NASA) μελέτησε, το 1983 και 1989, τα επίπεδα θορύβου γύρω από την ανεμογεννήτρια WTS-4 [14,15], με σκοπό την ανάπτυξη της βάσης ακουστικών δεδομένων και τη βελτίωση των μεθόδων εκτίμησης του παραγόμενου θορύβου. Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διαφορετικές γωνίες, αποστάσεις και συνθήκες λειτουργίας.

Οι μετρήσεις πλήρους κλίμακας της NASA προσφέρουν τη δυνατότητα πιστοποίησης του συνολικού αεροακουστικού κώδικα, ελέγχοντας το σύνολο των επιμέρους πηγών θορύβου, καθώς και τη διαδικασία υπολογισμού του θορύβου από δρομέα ανεμογεννήτριας.

Η WTS-4 αποτελεί ανεμογεννήτρια ισχύος 4.2 MW και ταχύτητας περιστροφής 30rpm, με ύψος πύργου 80m. Έχει δρομέα δύο πτερυγίων, τοποθετημένο κατάντι του πύργου (downwind) και διαμέτρου 79.2m. Τα πτερύγια χαρακτηρίζονται από αεροτομή NACA 23036 στην ρίζα (χορδή 1.64m και συστροφή 16°) και NACA 23012 στο ακροπτερύγιο (χορδή 4.69m και συστροφή -1°). Για την εκτίμηση του παραγόμενου θορύβου από τον αεροακουστικό κώδικα λαμβάνονται υπόψη τα παραπάνω διαθέσιμα στοιχεία γεωμετρίας και οι συνθήκες λειτουργίας του δρομέα. Η έλλειψη, όμως, ακριβών στοιχείων όσον αφορά στη γεωμετρία της ακμής εκφυγής και στην ατμοσφαιρική τύρβη κατέστησε αναγκαία την χρήση υποθέσεων και την εκτέλεση δοκιμών. Στα παρακάτω αποτελέσματα έχει θεωρηθεί ένταση τύρβης (TI) 5% και πάχος ακμής εκφυγής ίσο με το 1.5% της χορδής, κατά μήκος ολόκληρου του πτερυγίου.

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται το φάσμα του θορύβου σε απόσταση 200m από την ανεμογεννήτρια, με ταχύτητα ανέμου 12.1 m/s, για δύο διαφορετικές τιμές της έντασης τύρβης (5%, 8%).



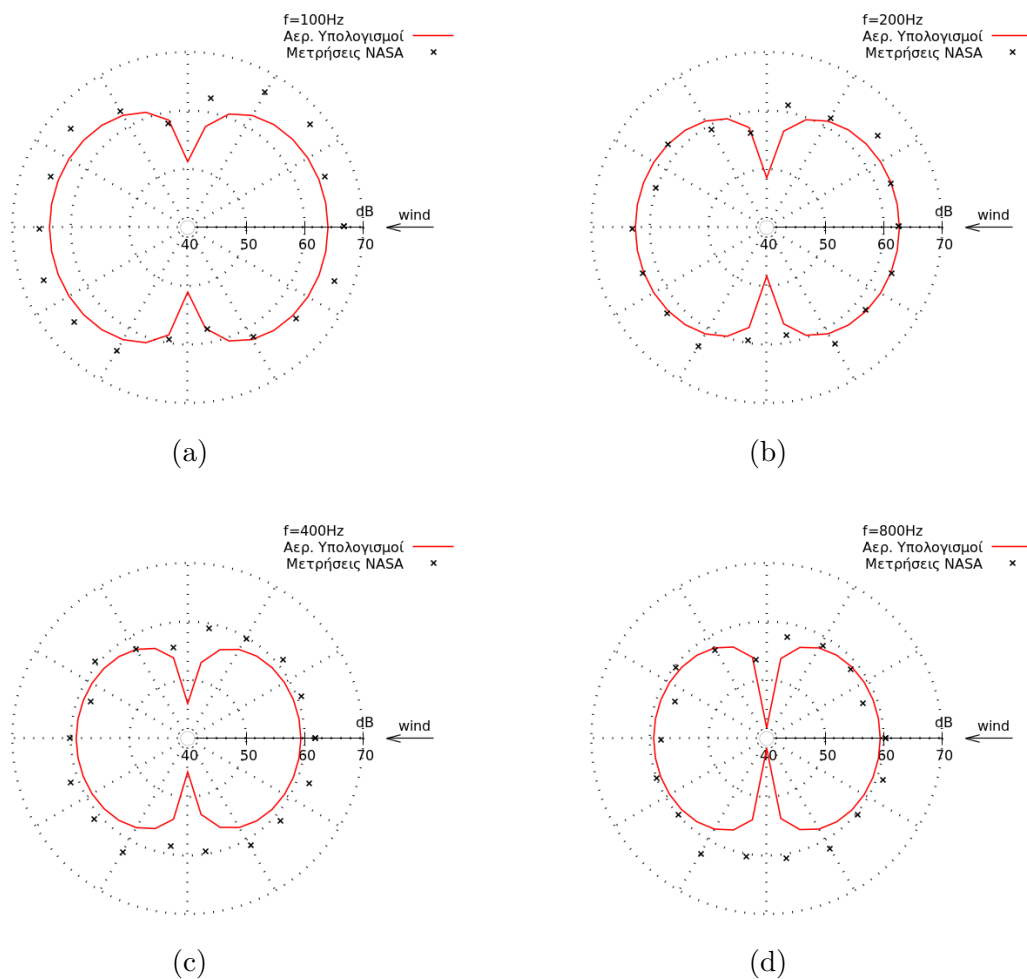
Σχ.3.5: Σύγκριση αεροακουστικών υπολογισμών με μετρήσεις θορύβου της ανεμογεννήτριας WTS-4 για ένταση τύρβης 5 και 8%

Η μορφή των αποτελεσμάτων του αεροακουστικού κώδικα ταιριάζει με τα διαθέσιμα δεδομένα, με πολύ καλή συμφωνία να παρατηρείται για ένταση τύρβης 5%. Η αύξηση



της τιμής αυτής οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα θορύβου σε όλο το εύρος των συχνοτήτων. Η κορυφή που παρουσιάζει η καμπύλη στην περιοχή των 700 - 1000 Hz οφείλεται στη συνεισφορά του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής και συνεπώς εξαρτάται ιδιαίτερα από το πάχος της ακμής εκφυγής κατά μήκος του πτερυγίου, η τιμή του οποίου έχει υποτεθεί ίση με 1.5% της χορδής. Για ένταση τύρβης 8% ο θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης αυξάνεται και τείνει να υπερκαλύψει την κορυφή που δημιουργεί ο θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής.

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα πολικά διαγράμματα θορύβου γύρω από την ανεμογεννήτρια για 4 διαφορετικές συχνότητες (100, 200, 400, 800 Hz). Οι μετρήσεις της NASA πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 200m και για ταχύτητα ανέμου 12.1m/s. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν 18 μικρόφωνα τοποθετημένα κυκλικά γύρω από τη βάση της μηχανής ανά 20°. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με 30 rpm και αντιστοιχεί σε συχνότητα διέλευσης πτερυγίου από τον πύργο 1 Hz, με αποτέλεσμα οι παραπάνω συχνότητες να αποτελούν αρμονικές. Στα διαγράμματα η ροή του ανέμου είναι οριζόντια από δεξιά προς τα αριστερά.



Σχ.3.6: Σύγκριση αεροακουστικών υπολογισμών με πολικές μετρήσεις θορύβου της ανεμογεννήτριας WTS-4 σε απόσταση 200m και ταχύτητα ανέμου 12.1 m/s

Οι τιμές των αριθμητικών αποτελεσμάτων έρχονται σε καλή συμφωνία με τις μετρήσεις, αναπαράγοντας το διπολικό χαρακτήρα των ακουστικών πηγών, δηλαδή μέγιστες εντάσεις στη διεύθυνση του ανέμου και ελάχιστες στο επίπεδο περιστροφής του δρομέα. Σε συμφωνία με το φάσμα του Σχήματος 3.5, παρατηρούμε μείωση των επιπέδων θορύβου με την αύξηση της συχνότητας. Στα πολικά διαγράμματα των 400 και 800 Hz τα επίπεδα του θορύβου είναι παρόμοια λόγω της συνεισφοράς του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής, που παρουσιάζει μέγιστο στα 800 Hz. Καθώς ο αεροακουστικός κώδικας υποθέτει ομοιόμορφο πεδίο ταχύτητας και ατμοσφαιρικής τύρβης και δε λαμβάνει υπόψη την επίδραση του πύργου, τα επίπεδα του θορύβου παρουσιάζουν απόλυτη συμμετρία τόσο ως προς τη διεύθυνση του ανέμου όσο και ως προς το επίπεδο του δρομέα.

## 4. Εφαρμογή σε δρομείς σύγχρονων ανεμογεννητριών

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε εφαρμόζεται σε δρομείς σύγχρονων ανεμογεννητριών υψηλής απόδοσης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του ευρωπαϊκού προγράμματος INNWIND [16] για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Το πρόγραμμα αυτό αποτέλεσε συνεργασία ερευνητικών κέντρων, πανεπιστημίων και κατασκευαστών από 11 ευρωπαϊκές χώρες, με στόχο το σχεδιασμό καινοτόμων υπεράκτιων ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας (10 - 20 MW).

Μία από τις καινοτομίες που προτάθηκαν ήταν η σχεδίαση δρομέων χαμηλής επαγωγής και χαμηλού βάρους (Low Induction Rotor, LIR) ώστε να επιτευχθεί η αύξηση της ισχύος με το μικρότερο δυνατό κόστος. Για την αξιολόγηση του δρομέα LIR χρησιμοποιήθηκε ως βάση δρομέας αναφοράς 10 MW και μελετήθηκε η αύξηση της ισχύος στα 20 MW με δύο τρόπους: με διπλασιασμό του εμβαδού του δρομέα χωρίς αλλαγή της γεωμετρίας των πτερυγίων (Upscaled Reference Wind Turbine, URWT) και με χρήση του δρομέα LIR.

Στις ακόλουθες παραγράφους διερευνάται η ακουστική συμπεριφορά του αρχικού δρομέα αναφοράς 10 MW και εκτιμάται η επίδραση στα επίπεδα θορύβου από την αύξηση της ισχύος, υιοθετώντας την LIR ή την URWT σχεδίαση.

### 4.1. Εκτίμηση θορύβου ανεμογεννήτριας αναφοράς

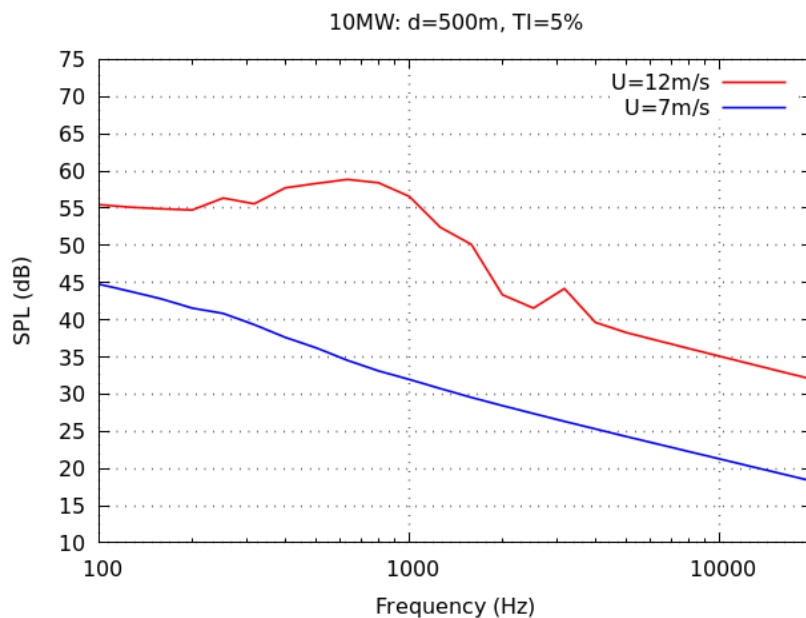
Η ανεμογεννήτρια αναφοράς ισχύος 10 MW έχει ύψος πύργου 119m και δρομέα τριών πτερυγίων ακτίνας 89.15m. Τα πτερύγια αποτελούνται από τις αεροτομές FFA-480, FFA-360, FFA-301 και FFA-241, με πάχη 48%, 36%, 30.1% και 24.1% αντίστοιχα. Τα επίπεδα του παραγόμενου θορύβου σε απόσταση 500m και ταχύτητες ροής 7 και 12 m/s παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Και στις δύο περιπτώσεις έχει θεωρηθεί ροή με ελεύθερη μετάβαση και ένταση τύρβης (TI) ίση με 5%. Στα Σχήματα 4.2 και 4.3 διακρίνονται οι επιμέρους συνιστώσες του θορύβου σε ταχύτητα ροής 12 m/s και 7 m/s αντίστοιχα: θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος (TE), στρωτού οριακού στρώματος (LBL), ακροπτερυγίου (Tip), αμβλείας ακμής εκφυγής (Blunt) και ατμοσφαιρικής τύρβης (Turb).

Το φάσμα του θορύβου σε ταχύτητα 12 m/s, η οποία αντιστοιχεί σε ονομαστική ισχύ, παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα σε όλο το εύρος των συχνοτήτων λόγω του θορύβου ατμοσφαιρικής τύρβης. Επιπλέον, παρατηρείται η δημιουργία κορυφής στην περιοχή των 300 - 1000 Hz. Από το Σχήμα 4.2 παρατηρούμε πως η κορυφή αυτή οφείλεται στο θόρυβο αμβλείας ακμής εκφυγής (Blunt), ενώ σημαντική συνεισφορά έχουν, επίσης, ο θόρυβος ατμοσφαιρικής τύρβης (Turb) και ο θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος (TE). Αντίθετα μικρές είναι οι συνεισφορές του θορύβου στρωτού οριακού στρώματος (LBL) και του θορύβου ακροπτερυγίου (Tip).

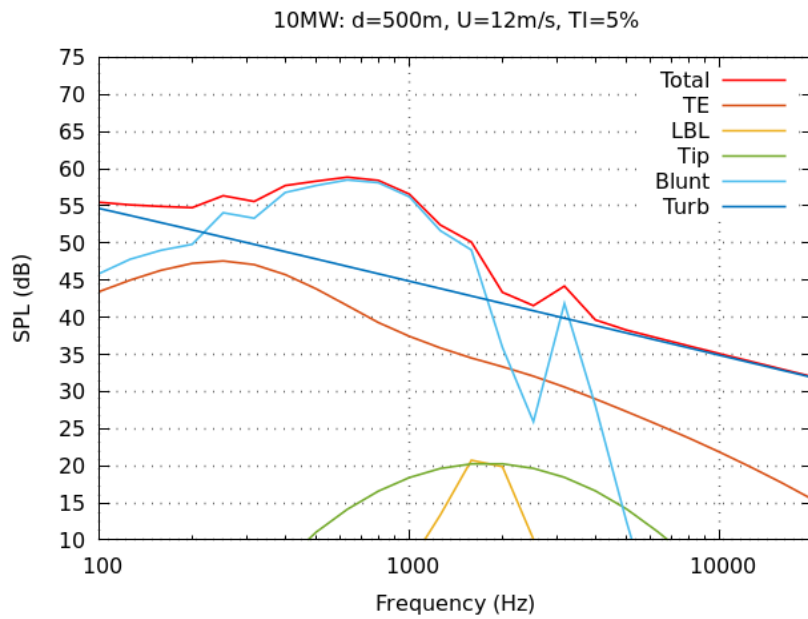
Σε ταχύτητα 7 m/s, όλες οι συνιστώσες του θορύβου παρουσιάζουν μειωμένα επίπεδα θορύβου, εκτός από τον θόρυβο στρωτού οριακού στρώματος (LBL), ενώ παρατηρείται και μία μετατόπιση προς τις χαμηλότερες συχνότητες του φάσματος. Ο θόρυβος ατμοσφαιρικής τύρβης (Turb) υπερिशύει των υπολοίπων, με τον θόρυβο τυρβώδους οριακού στρώματος (TE), αμβλείας ακμής εκφυγής (Blunt) και στρωτού οριακού στρώματος (LBL) να οδηγούν σε μικρή αύξηση σε συχνότητες χαμηλότερες των 600 Hz. Τέλος, αντίθετα με την περίπτωση των 12 m/s, ο θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος δεν εμφανίζει διπλή κορυφή και η μορφή του παραπέμπει σε κατά-σταση αποκόλλησης, όπου ο θόρυβος προκύπτει από έναν μοναδικό όρο (εξ.2.14). Το γεγονός αυτό εξηγείται από τις υψηλότερες γωνίες πρόσπτωσης που δέχονται τα πτερύγια εξαιτίας της εφαρμογής μηδενικής γωνίας βήματος σε ταχύτητα λειτουργίας 7 m/s.

### Επίδραση έντασης τύρβης

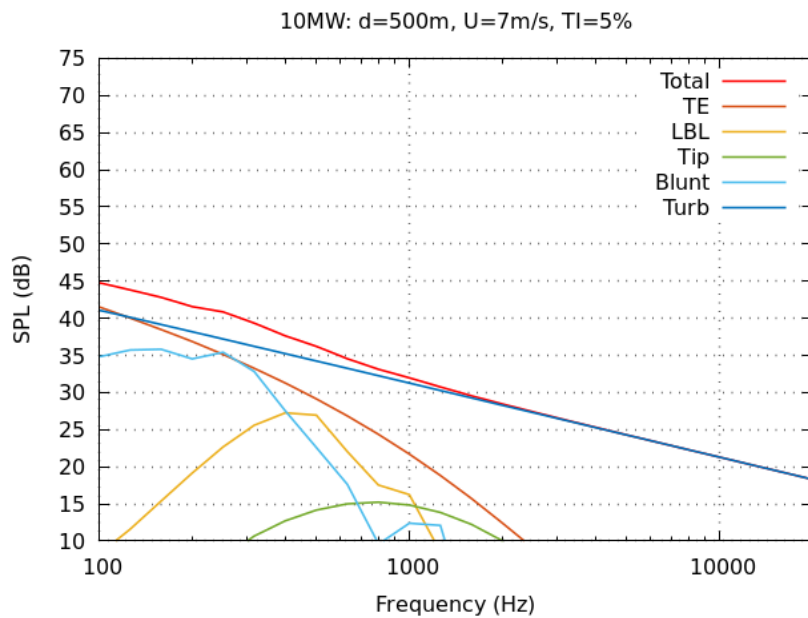
Η επίδραση της έντασης της τύρβης (TI) στα επίπεδα παραγόμενου θορύβου διακρίνεται στα Σχήματα 4.4 και 4.5. Αύξηση της τιμής της έντασης της τύρβης οδηγεί σε αύξηση του θορύβου ατμοσφαιρικής τύρβης σε όλο το εύρος των συχνοτήτων. Στην περίπτωση των 7 m/s, όπου ο θόρυβος ατμοσφαιρικής τύρβης υπερिशύει των υπολοίπων συνιστωσών, αυτό μεταφράζεται σε αύξηση των συνολικών επιπέδων θορύβου σε ολόκληρο το φάσμα. Σε ταχύτητα ροής 12 m/s, σε εύρος συχνοτήτων 300 - 1000 Hz, όπου υπερिशύει ο θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής, τα επίπεδα θορύβου παραμένουν σταθερά.



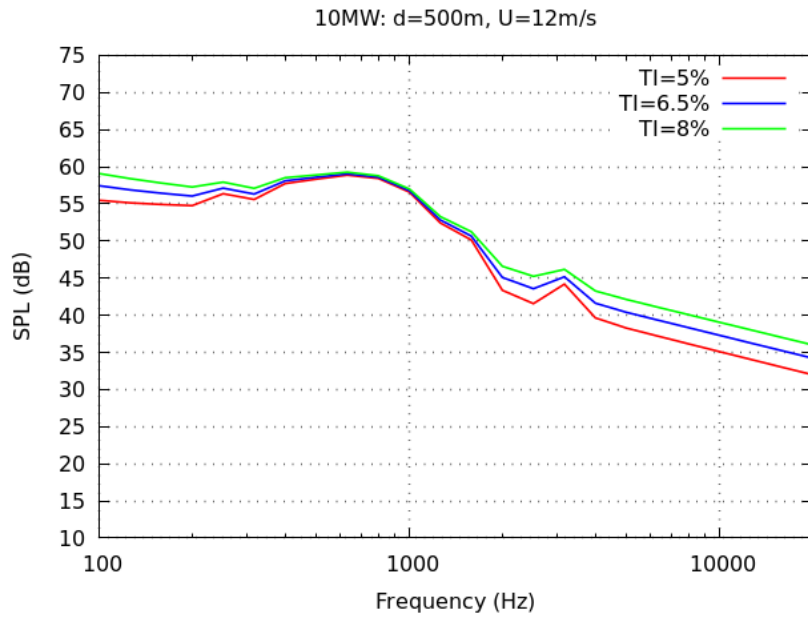
Σχ.4.1: Θόρυβος ανεμογεννήτριας αναφοράς 10 MW σε ταχύτητα ροής 7 και 12 m/s



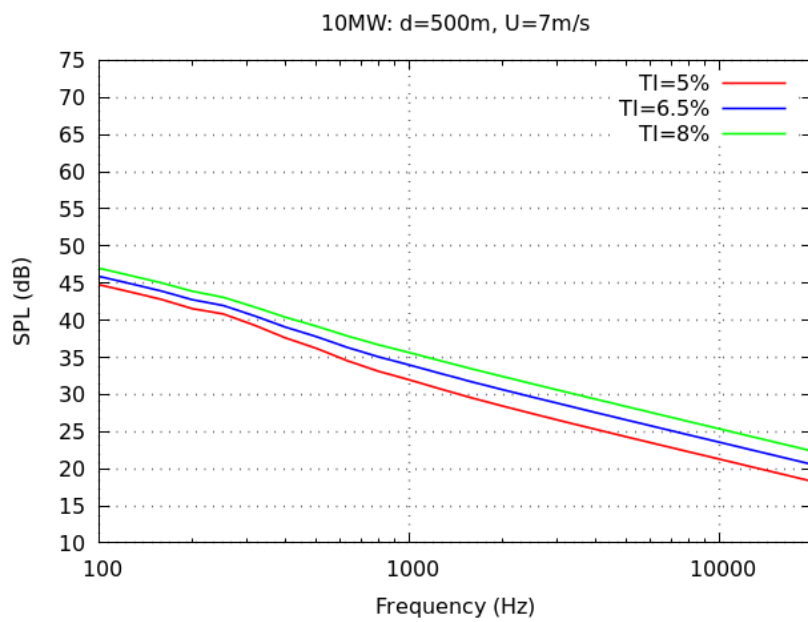
Σχ.4.2: Επιμέρους συνιστώσες θορύβου ανεμογεννήτριας αναφοράς 10 MW σε ταχύτητα ροής 12 m/s



Σχ.4.3: Επιμέρους συνιστώσες θορύβου ανεμογεννήτριας αναφοράς 10 MW σε ταχύτητα ροής 7 m/s



Σχ.4.4: Επίδραση έντασης τύρβης σε ταχύτητα ροής 12 m/s



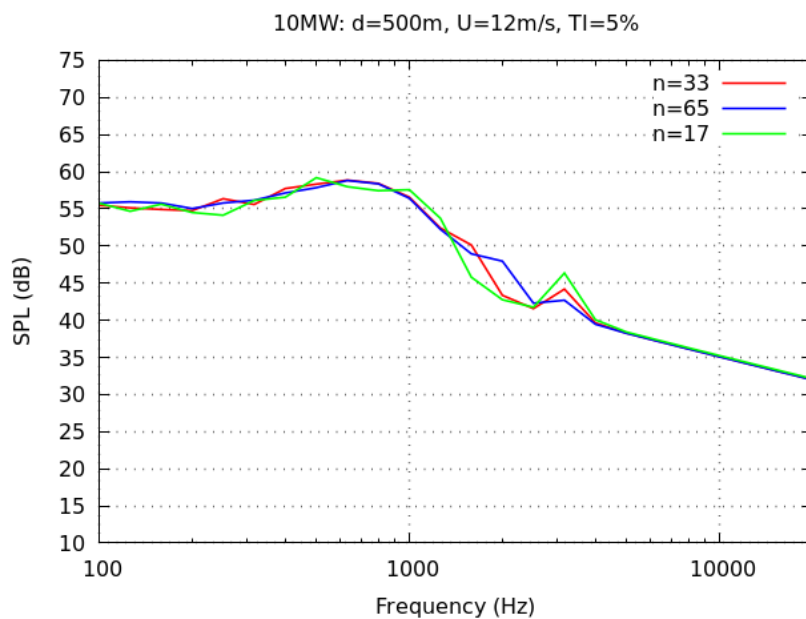
Σχ.4.5: Επίδραση έντασης τύρβης σε ταχύτητα ροής 7 m/s

## Έλεγχος διακριτοποίησης

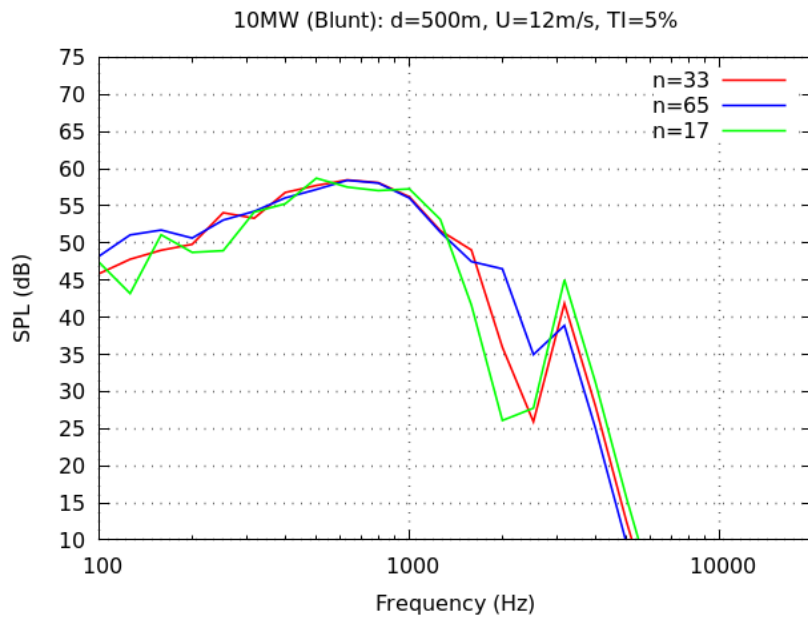
Οι παραπάνω υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με πτερύγιο χωρισμένο σε 33 τμήματα (33 σημεία). Προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση της διακριτοποίησης του πτερυγίου στην εκτίμηση του παραγόμενου θορύβου, οι υπολογισμοί επαναλήφθηκαν για πτερύγιο 17 και 65 τμημάτων (17 και 65 σημεία αντίστοιχα). Τα συνολικά αποτελέσματα για ταχύτητα ροής 12 m/s παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6. Οι διαφορές στο συνολικό φάσμα δεν είναι σημαντικές καθώς οι μεταβολές μεταξύ των τριών περιπτώσεων είναι αμελητέες για τον θόρυβο ατμοσφαιρικής τύρβης, τυρβώδους οριακού στρώματος και ακροπτερυγίου. Μεγαλύτερες διαφορές εμφανίζονται στα επίπεδα θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής (Blunt) και στρωτού οριακού στρώματος (LBL) τα οποία παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.7 και 4.8, με τα τελευταία να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα και να μην επηρεάζουν το συνολικό φάσμα.

Στην περίπτωση του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής, αύξηση των σημείων οδηγεί σε ομαλοποίηση της καμπύλης, με την περιοχή των 500 - 1000 Hz να εμφανίζει καλή ταύτιση για διακριτοποίηση 33 και 65 τμημάτων, ενώ η κορυφή των 3000 - 4000 Hz παρουσιάζει διαφορές έντασης περίπου 3 dB. Ο θόρυβος στρωτού οριακού στρώματος χαρακτηρίζεται από κορυφή σταθερής συχνότητας, η μέγιστη τιμή της οποίας μειώνεται με την αύξηση των σημείων.

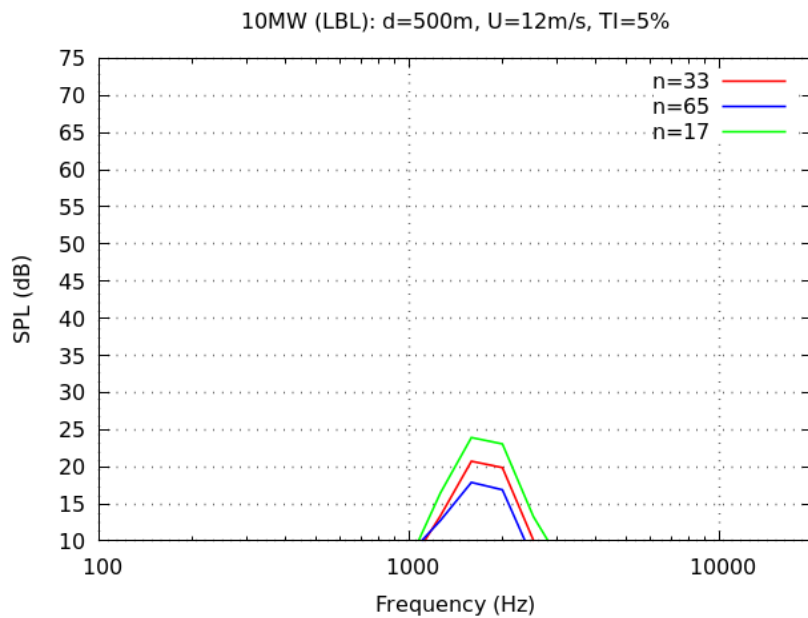
Η διακριτοποίηση των 33 σημείων επιλέχτηκε ώστε να αποτυπώνεται ικανοποιητικά η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πτερυγίου. Όπως παρατηρούμε στο φάσμα του θορύβου, η αύξηση των σημείων έχει ως αποτέλεσμα οι αιχμές του φάσματος να ελαττώνονται και η καμπύλη να ομαλοποιείται για την περιοχή 100 - 1000 Hz. Η πυκνότερη, όμως, διακριτοποίηση, όπως στην περίπτωση των 65 σημείων, δημιουργεί στοιχεία με μικρό λόγο εκπετάσματος προς χορδή ( $\Delta s/c < 1$ ) στο μεγαλύτερο μέρος του πτερυγίου. Μια τέτοια επιλογή δεν προτιμήθηκε επειδή τα πειράματα των Brooks, Pope και Marcolini, στα οποία βασίζονται οι υπολογισμοί, πραγματοποιήθηκαν για λόγους  $\Delta s/c > 1$  ώστε να προσομοιώνεται ο διδιάστατος χαρακτήρας της ροής.



Σχ.4.6: Επίδραση διακριτοποίησης του πτερυγίου στο φάσμα του συνολικού θορύβου σε ταχύτητα ροής 12 m/s



Σχ.4.7: Επίδραση διακριτοποίησης του πτερυγίου στον θόρυβο αμβλείας ακμής εκφυγής σε ταχύτητα ροής 12 m/s



Σχ.4.8: Επίδραση διακριτοποίησης του πτερυγίου στον θόρυβο στρωτού οριακού στρώματος σε ταχύτητα ροής 12 m/s

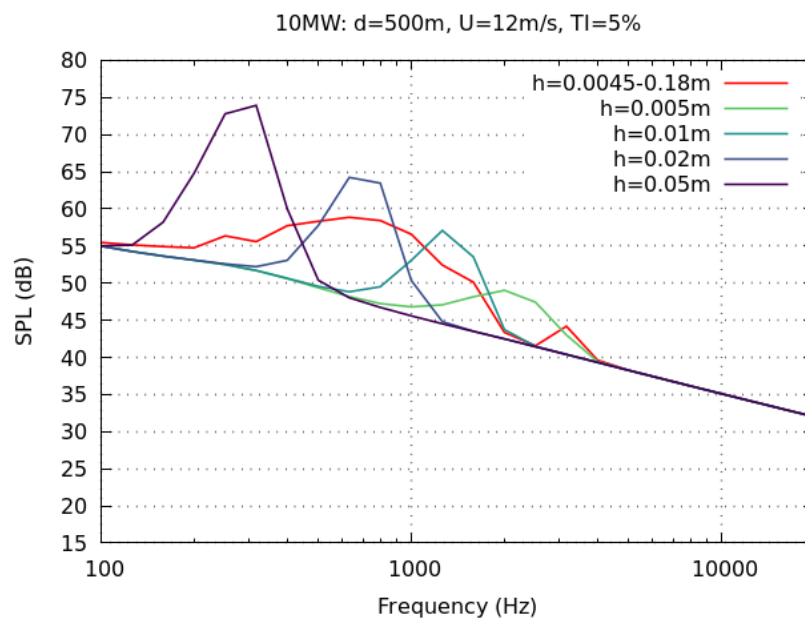


## Επίδραση πάχους αμβλείας ακμής εκφυγής

Στους παραπάνω αεροακουστικούς υπολογισμούς είναι σημαντικό να αναφερθεί η έλλειψη ακριβών δεδομένων όσον αφορά στην τιμή του πάχους της ακμής εκφυγής κατά μήκος των πτερυγίων. Το μέγεθος αυτό εκτιμήθηκε ως ποσοστό της χορδής με βάση τη γεωμετρία της εκάστοτε αεροτομής. Στη μεγάλη, όμως, κλίμακα των ανεμογεννητριών που μελετώνται, όπου επιδιώκεται το μικρότερο δυνατό πάχος ακμής εκφυγής, η πραγματική του τιμή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από κατασκευαστικούς και οικονομικούς παράγοντες.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται τα επίπεδα θορύβου για διαφορετικές κατανομές του πάχους ακμής εκφυγής. Αρχικά ακολουθείται η κατανομή που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως και ορίζεται ως μεταβλητό ποσοστό της χορδής συναρτήσει της ακτίνας του πτερυγίου ( $h=0.18\text{m}$ ) και χαμηλότερες προς το ακροπερύγιο ( $h=0.0045\text{m}$ ). Το 80% του πτερυγίου χαρακτηρίζεται από πάχος ακμής εκφυγής μικρότερο του  $0.1\text{m}$ , ενώ πάνω από 60% έχει τιμές μικρότερες των  $0.05\text{m}$ . Στις υπόλοιπες περιπτώσεις ορίζουμε σταθερή τιμή του πάχους κατά μήκος ολόκληρου του πτερυγίου. Συγκεκριμένα, τίθεται ίσο με  $0.005$ ,  $0.01$ ,  $0.02$  και  $0.05\text{m}$  αντίστοιχα.

Ορίζοντας σταθερό πάχος ακμής εκφυγής σε όλο το μήκος του πτερυγίου η καμπύλη αλλάζει μορφή και αποκτά έναν πιο διακριτό χαρακτήρα, εμφανίζοντας κορυφές μικρότερου εύρους συχνοτήτων. Η αύξηση της τιμής του πάχους οδηγεί σε αυξημένα επίπεδα θορύβου, καθώς και σε μετατόπιση των μέγιστων εντάσεων σε χαμηλότερες συχνότητες.



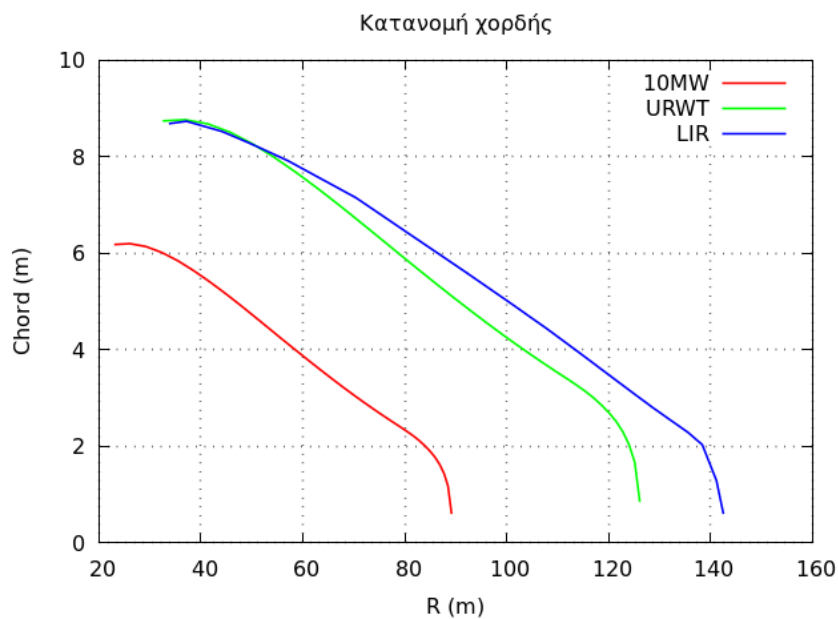
Σχ.4.9: Επίδραση πάχους αμβλείας ακμής εκφυγής σε ταχύτητα ροής 12 m/s

## 4.2. Σύγκριση με ανεμογεννήτριες ισχύος 20 MW

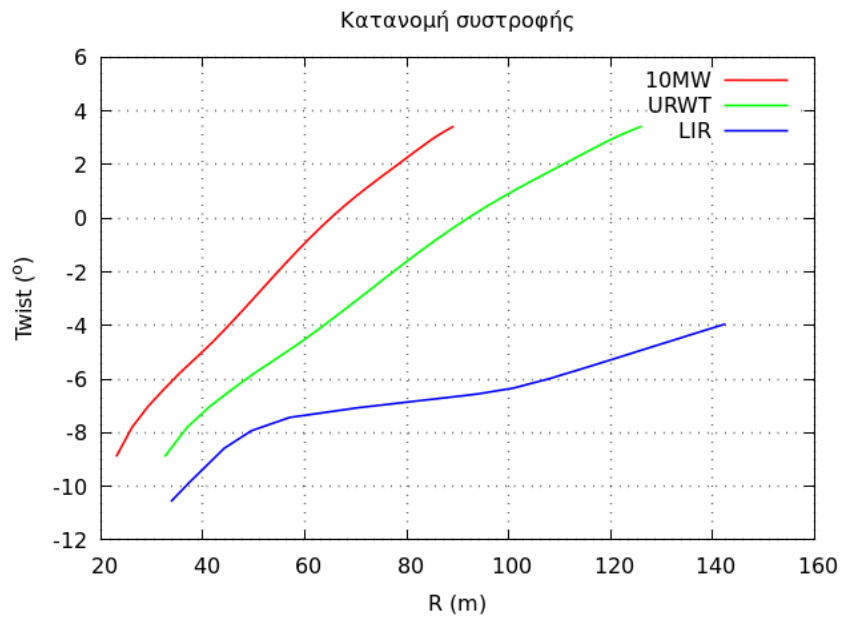
Για να μελετηθεί η επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων των πτερυγίων στην παραγωγή του θορύβου, πραγματοποιήθηκε αεροακουστική ανάλυση των δρομέων των ανεμογεννητριών LIR (Low Induction Rotor) και URWT (Upscaled Reference Wind Turbine) ισχύος 20 MW.

Η ανεμογεννήτρια URWT έχει γεωμετρία ακριβώς ίδια με την ανεμογεννήτρια αναφοράς, με τη μοναδική διαφορά να απαντάται στην κλίμακα, καθώς χαρακτηρίζεται από δρομέα διπλάσιου εμβαδού, ακτίνας 126.1m. Στην περίπτωση της LIR, η οποία αποτελείται από δρομέα ακτίνας 142.5 m, η γεωμετρία των αεροτομών είναι ίδια μέχρι πάχους 36%, που αντιστοιχεί περίπου στο 20% του συνολικού μήκους του πτερυγίου. Για πάχος μικρότερο του 36%, το πτερύγιο αποτελείται από δύο αεροτομές χαμηλής άνωσης (Low lift) με λόγο στρωτής - τυρβώδους ροής 20% - 80% (πάχη 30% και 26% αντίστοιχα). Η τελευταία καλύπτει πάνω από 50% του συνολικού του μήκους.

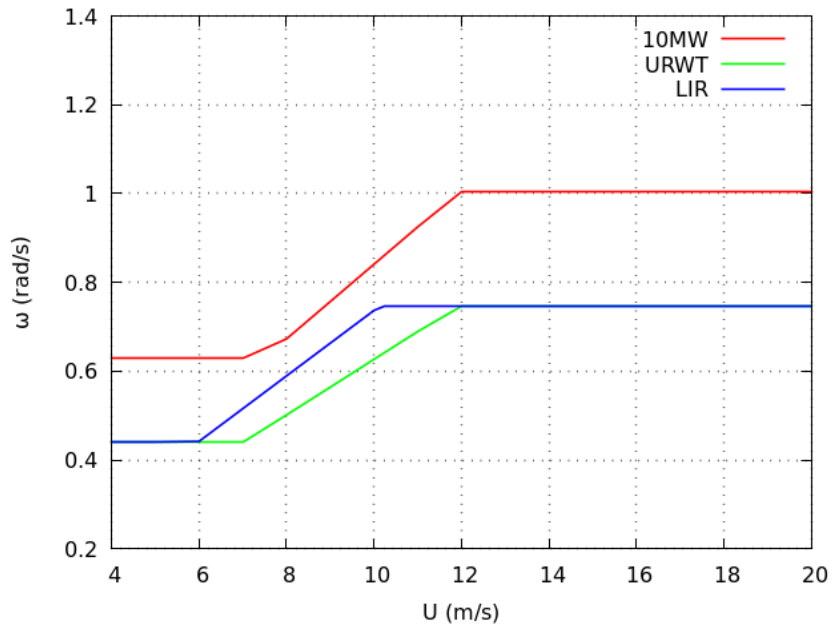
Η κατανομή της χορδής και της συστροφής των πτερυγίων, καθώς και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.10, 4.11 και 4.12 που ακολουθούν. Η ανεμογεννήτρια URWT έχει γεωμετρία ίδια με την ανεμογεννήτρια αναφοράς και επομένως παρουσιάζει κατανομή χορδής και συστροφής ανάλογη με τη σχεδίαση των 10 MW. Αν και η LIR διακρίνεται από πτερύγια μεγαλύτερου μήκους, το εύρος της κατανομής των χορδών είναι στα ίδια επίπεδα με την URWT, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση τιμή του λόγου εκπετάσματος προς χορδή. Επιπλέον, εμφανίζει μεγαλύτερες απόλυτες τιμές συστροφής κατά μήκος του πτερυγίου. Όσον αφορά στην ταχύτητα περιστροφής των δρομέων, η απαίτηση για ίση μηχανική ροπή έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές της LIR σε σχέση με την URWT για ταχύτητες ανέμου 6 - 12 m/s. Και οι δύο ανεμογεννήτριες των 20 MW έχουν χαμηλότερη ταχύτητα σε σχέση με την ανεμογεννήτρια αναφοράς.



Σχ.4.10: Κατανομή της χορδής κατά μήκος των πτερυγίων του δρομέα αναφοράς 10MW και των δρομέων LIR και URWT



Σχ.4.11: Κατανομή της συστροφής κατά μήκος των πτερυγίων του δρομέα αναφοράς 10MW και των δρομέων LIR και URWT



Σχ.4.12: Γωνιακή ταχύτητα του δρομέα αναφοράς 10MW και των δρομέων LIR και URWT συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

Στα Σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται τα φάσματα θορύβου των τριών ανεμογεννητριών σε απόσταση 500m και για ταχύτητες ροής 7 και 12 m/s αντίστοιχα. Η ένταση της τύρβης (TI) έχει θεωρηθεί ίση με 5%.

Σε ταχύτητα 7 m/s η ανεμογεννήτρια LIR παρουσιάζει υψηλότερα επίπεδα θορύβου σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Οι αυξημένες αυτές τιμές οφείλονται στον υψηλότερο θόρυβο λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης, καθώς και στον αυξημένο θόρυβο τυρβώδους οριακού στρώματος και θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής στις χαμηλότερες συχνότητες. Και στους τρεις δρομείς, στις υψηλές συχνότητες υπερικχύει ο θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης. Στην περίπτωση της URWT, η οποία έχει όμοια γεωμετρία με την ανεμογεννήτρια αναφοράς, το φάσμα του θορύβου δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη μεγαλύτερη κλίμακα και εμφανίζει μικρές διαφορές.

Σε ταχύτητα ροής 12 m/s και οι δύο ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με την ανεμογεννήτρια αναφοράς. Στην περίπτωση της LIR ο θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης αποτελεί και πάλι την κύρια συνιστώσα αεροδυναμικού θορύβου, με τον θόρυβο αμβλείας ακμής εκφυγής να δημιουργεί μικρή αιχμή στα 500 - 600 Hz. Παρά το μεγαλύτερο μέγεθος του δρομέα, παρατηρούμε πως η LIR δεν παράγει πλέον περισσότερο θόρυβο σε όλο το φάσμα συχνοτήτων, καθώς σε εύρος 200 - 2000 Hz οι εντάσεις των URWT και 10 MW είναι μεγαλύτερες. Οι υψηλές αυτές τιμές οφείλονται στην κορυφή που σχηματίζει ο θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής, ο οποίος υπερικχύει πλέον του θορύβου λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης σε σημαντικό μέρος του φάσματος. Το φάσμα της ανεμογεννήτριας URWT έχει παρόμοια μορφή με την περίπτωση αναφοράς, χαρακτηρίζεται, όμως, από τη μετατόπιση της κορυφής του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής σε χαμηλότερες συχνότητες. Στις υψηλές συχνότητες, όπου η συνεισφορά του θορύβου αυτού είναι αμελητέα, οι εντάσεις λαμβάνουν ξανά τιμές ίδιες με την ανεμογεννήτρια ισχύος 10 MW.

Για καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των γεωμετρικών παραμέτρων στην παραγωγή του θορύβου, στα Σχήματα 4.15 - 4.19 παρουσιάζεται η συμπεριφορά των επιμέρους συνεισφορών του θορύβου σε ταχύτητες ροής 7 και 12 m/s.

Για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας η LIR παρουσιάζει υψηλότερα επίπεδα θορύβου λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης σε σχέση με τις σχεδιάσεις URWT και 10 MW, με τη διαφορά μεταξύ των εντάσεων, όμως, να μειώνεται σε ταχύτητα 12 m/s (Σχήμα 4.15). Οι υψηλότερες τιμές οφείλονται στο μεγαλύτερο μήκος πτερυγίου της ανεμογεννήτριας, το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερους τοπικούς Mach στο εξωτερικό μέρος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20. Οι ανεμογεννήτριες URWT και 10 MW χαρακτηρίζονται από παρόμοια επίπεδα θορύβου και στις δύο ταχύτητες ροής παρά τη διαφορά στην κλίμακα των δρομέων. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το κοινό εύρος τιμών του αριθμού Mach κατά μήκος των πτερυγίων, λόγω της υψηλότερης ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας αναφοράς.

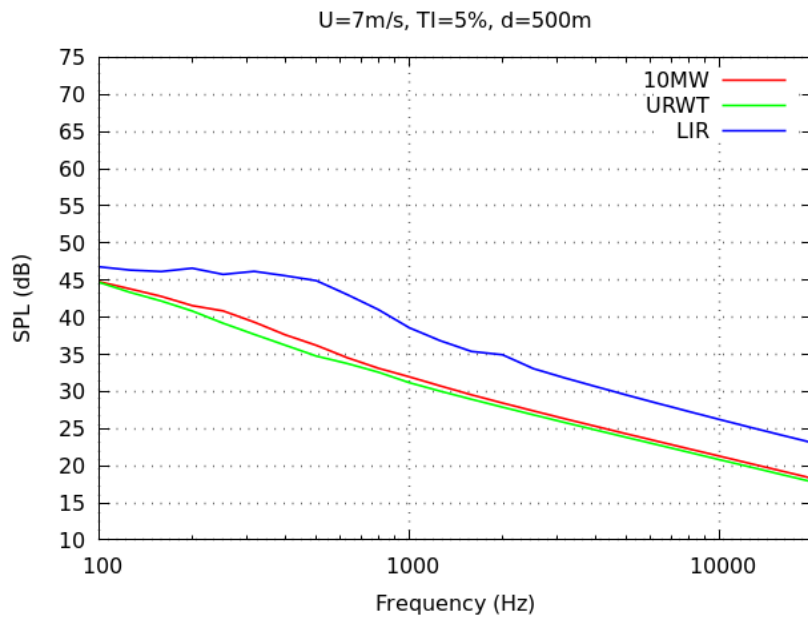
Τα φάσματα του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής για τις τρεις ανεμογεννήτριες παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.16. Αν και οι σχεδιάσεις URWT και 10 MW διακρίνονται από μικρότερο μήκος πτερυγίου και χαμηλότερες τιμές του αριθμού Mach, σε ταχύτητα 12 m/s, ο θόρυβος αυξάνεται σημαντικά και ξεπερνάει τα επίπεδα της αντίστοιχης συνιστώσας της LIR. Η καμπύλη του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής της ανεμογεννήτριας URWT έχει μορφή ίδια με την περίπτωση αναφοράς, παρουσιάζει, όμως, υψηλότερη μέγιστη τιμή και μετατόπιση σε χαμηλότερες συχνότητες. Τα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου της LIR, σε ταχύτητα 12 m/s, οφείλονται στην επίδραση του μέσου πάχους μετατόπισης του οριακού στρώματος  $\delta_{avg}^* = (\delta_p^* + \delta_s^*)/2$  στους υπολογισμούς μέσω του λόγου  $h/\delta_{avg}^*$  (εξ.2.20). Τα πάχη μετατόπισης της πλευράς υπερ-

πίεσης και υποπίεσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.21 και 4.22 αντίστοιχα. Λόγω των μεγάλων γωνιών πρόσπτωσης λαμβάνουν υψηλότερες τιμές κοντά στη ρίζα του πτερυγίου, ενώ στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας LIR εμφανίζεται μία ασυνέχεια σε ακτίνα 50 - 60 m. Σε ταχύτητα 7 m/s το μέσο πάχος μετατόπισης της σχεδίασης LIR είναι λίγο μικρότερο από το πάχος των ανεμογεννητριών URWT και 10 MW. Η αύξηση, όμως, της τιμής του πάχους μετατόπισης της πλευράς υποπίεσης  $\delta_s^*$  οδηγεί σε αρκετά μεγαλύτερο μέσο πάχος σε ταχύτητα 12 m/s. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται ο λόγος  $h/\delta_{avg}^*$  που με τη σειρά του μειώνει τα επίπεδα του θορύβου.

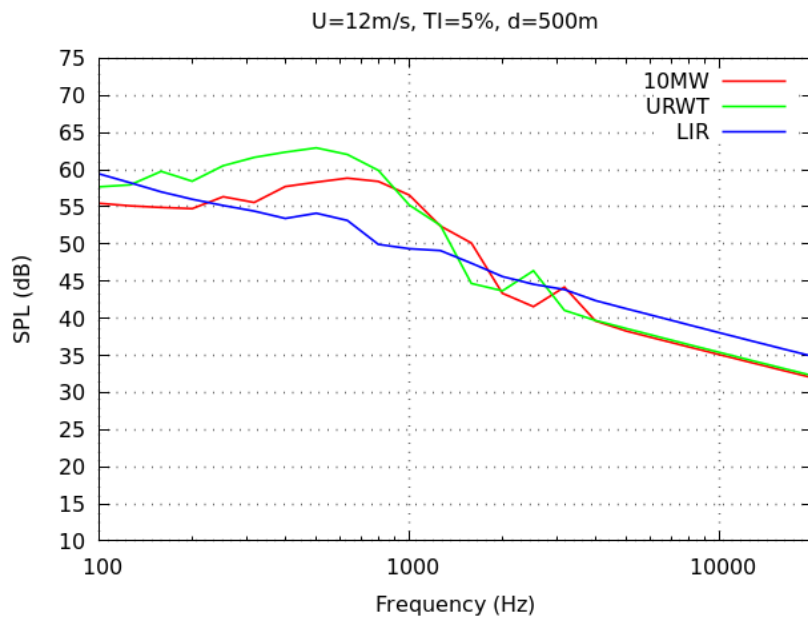
Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζονται τα φάσματα του θορύβου τυρβώδους οριακού στρώματος. Λόγω του μεγαλύτερου μήκους των πτερυγίων και των υψηλότερων τιμών του αριθμού Mach, η LIR εμφανίζει υψηλότερα επίπεδα θορύβου και στις δύο ταχύτητες ροής με τη διαφορά να μειώνεται σημαντικά στα 12 m/s. Η URWT παρουσιάζει και πάλι καμπύλη παρόμοιας μορφής με την ανεμογεννήτρια αναφοράς, με αυξημένες μέγιστες τιμές και μετατόπιση σε χαμηλότερες συχνότητες. Στην περίπτωση της LIR το φάσμα έχει διαφορετική μορφή και εμφανίζει κορυφές σε χαμηλότερες συχνότητες σε ταχύτητα 12 m/s. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα στις διαφορετικές κατανομές του πάχους μετατόπισης, όπως αυτές φαίνονται στα Σχήματα 4.21 και 4.22.

Τα φάσματα του θορύβου ακροπτερυγίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.18. Ο θόρυβος ακροπτερυγίου εξαρτάται κυρίως από τον τοπικό αριθμό Mach, τη χορδή και τη γωνία πρόσπτωσης στο ακροπτερύγιο. Αν και η ανεμογεννήτρια LIR έχει υψηλότερες τιμές του αριθμού Mach, και χορδή παρόμοιου μεγέθους με την σχεδίαση URWT, χαρακτηρίζεται από χαμηλότερα επίπεδα θορύβου, με τη μέγιστη ένταση σε ταχύτητα 7 m/s να είναι μικρότερη των 10 dB. Οι διαφορές αυτές που εμφανίζουν τα επίπεδα θορύβου μπορούν να εξηγηθούν από τις κατανομές της γωνίας πρόσπτωσης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.23. Εξαιτίας της διαφορετικής συστροφής (Σχ.4.11) και της μηδενικής γωνίας βήματος σε ταχύτητα ροής 7 m/s, η ανεμογεννήτρια LIR δέχεται πολύ μικρή γωνία πρόσπτωσης, με αποτέλεσμα να παράγει αρκετά χαμηλά επίπεδα θορύβου. Σε ταχύτητα 12 m/s, όπου οι γωνίες πρόσπτωσης στο ακροπτερύγιο λαμβάνουν παρόμοιες τιμές και για τις τρεις ανεμογεννήτριες, τα επίπεδα του θορύβου παρουσιάζουν κοντινές μέγιστες τιμές.

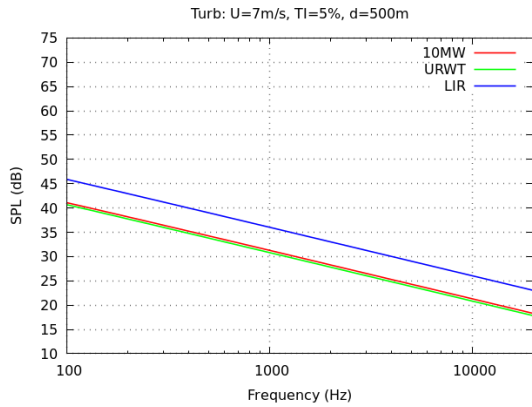
Τέλος, στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζεται η συνεισφορά του θορύβου στρωτού οριακού στρώματος. Παρά το αυξημένο μέγεθος και τους υψηλότερους αριθμούς Mach, ο παραγόμενος θόρυβος της ανεμογεννήτριας LIR παραμένει σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα, με μία μικρή αύξηση να παρατηρείται σε ταχύτητα 12 m/s. Οι ανεμογεννήτριες URWT και 10 MW παρουσιάζουν μεγαλύτερες εντάσεις σε ταχύτητα ροής 7 m/s, με τα επίπεδα του θορύβου να μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας. Η συμπεριφορά αυτή των καμπυλών φανερώνει την επίδραση που έχει στον παραγόμενο θόρυβο η γωνία πρόσπτωσης (Σχ.4.23). Εν αντιθέσει με τον θόρυβο ακροπτερυγίου, σημασία έχει η συνολική κατανομή της γωνίας πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου. Σε ταχύτητα 7 m/s, η σχεδίαση LIR δέχεται αρκετά μικρές γωνίες με αποτέλεσμα ο θόρυβος να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μείωση των γωνιών πρόσπτωσης των σχεδιάσεων URWT και 10 MW και αύξηση των γωνιών της LIR, γεγονός που αντανακλάται στα αντίστοιχα φάσματα θορύβου.



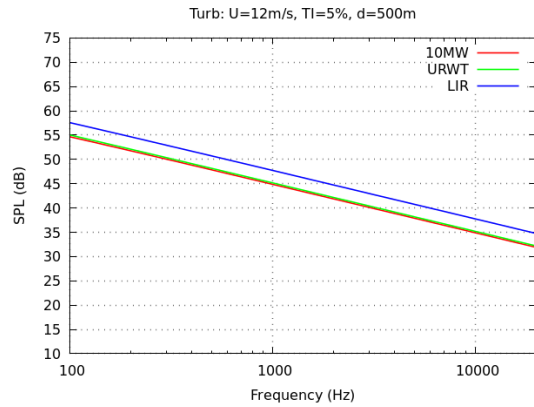
Σχ.4.13: Θόρυβος ανεμογεννήτριας αναφοράς 10MW και ανεμογεννητριών LIR, URWT σε ταχύτητα ροής 7m/s



Σχ.4.14: Θόρυβος ανεμογεννήτριας αναφοράς 10MW και ανεμογεννητριών LIR, URWT σε ταχύτητα ροής 12m/s

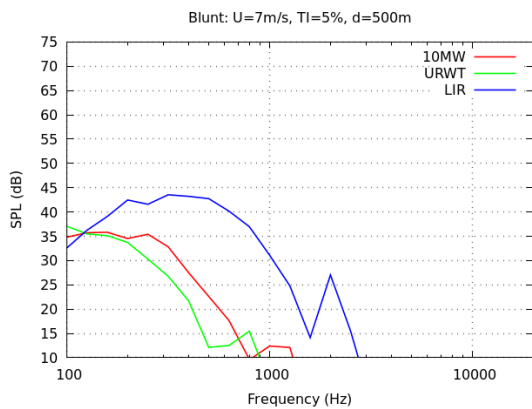


(a)

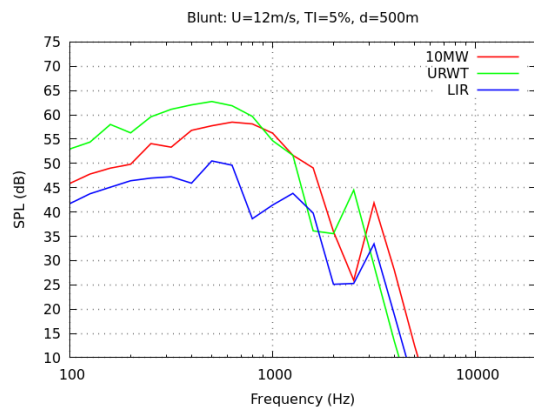


(b)

Σχ.4.15: Θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s

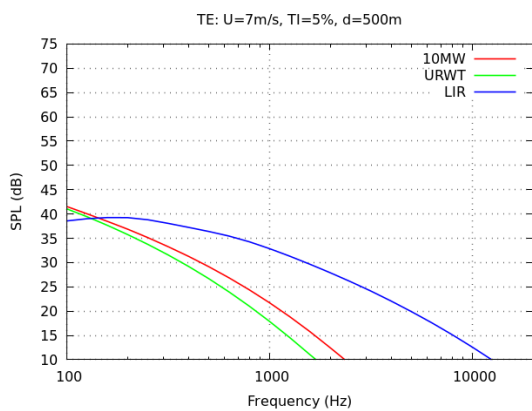


(a)

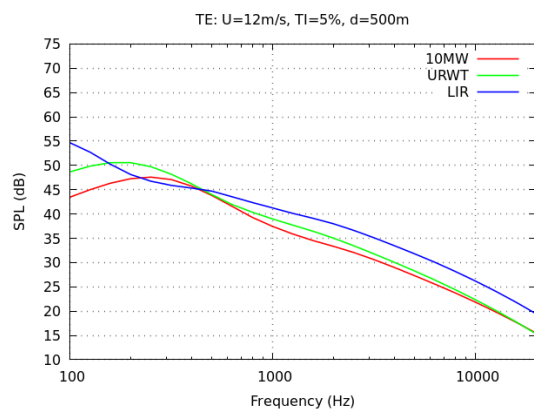


(b)

Σχ.4.16: Θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s

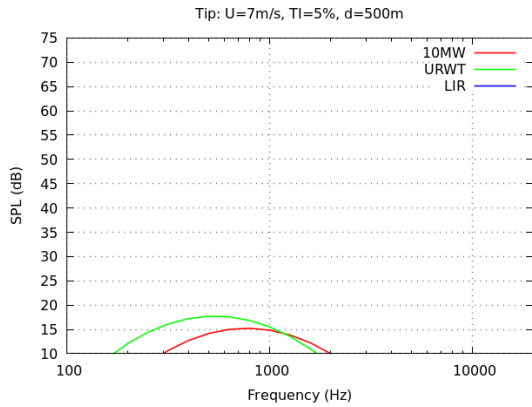


(a)

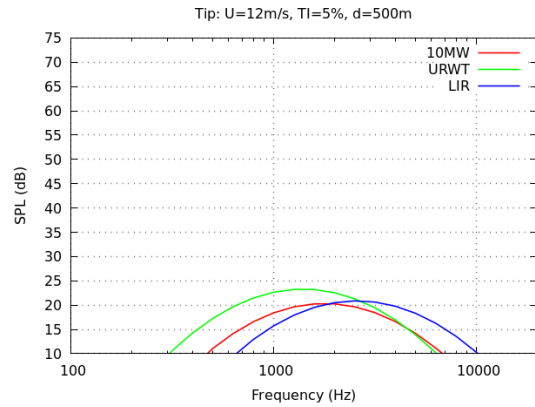


(b)

Σχ.4.17: Θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s

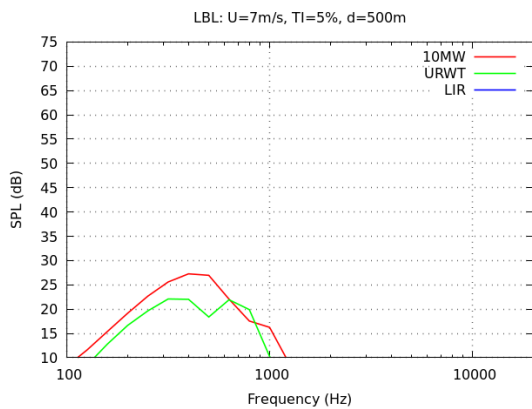


(a)

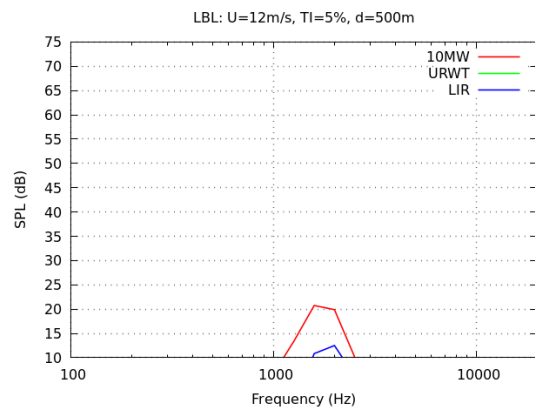


(b)

Σχ.4.18: Θόρυβος ακροπτερυγίου ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s

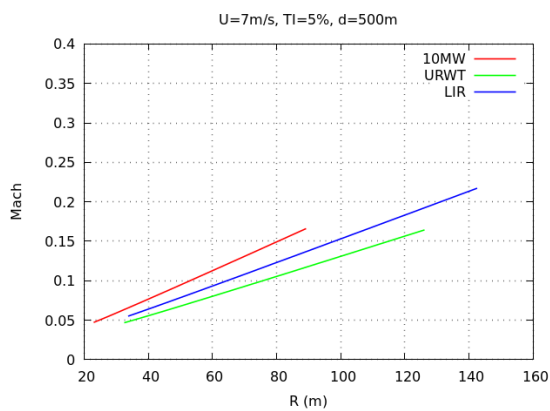


(a)

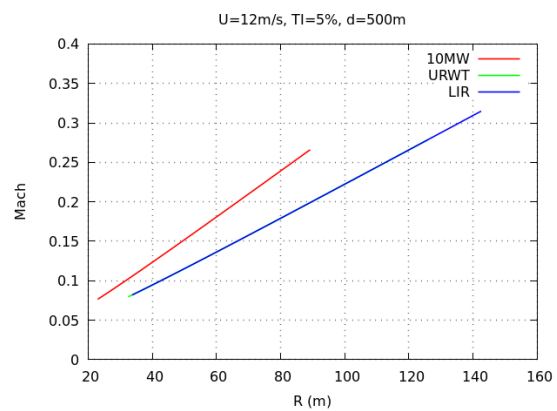


(b)

Σχ.4.19: Θόρυβος στρωτού οριακού στρώματος ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s



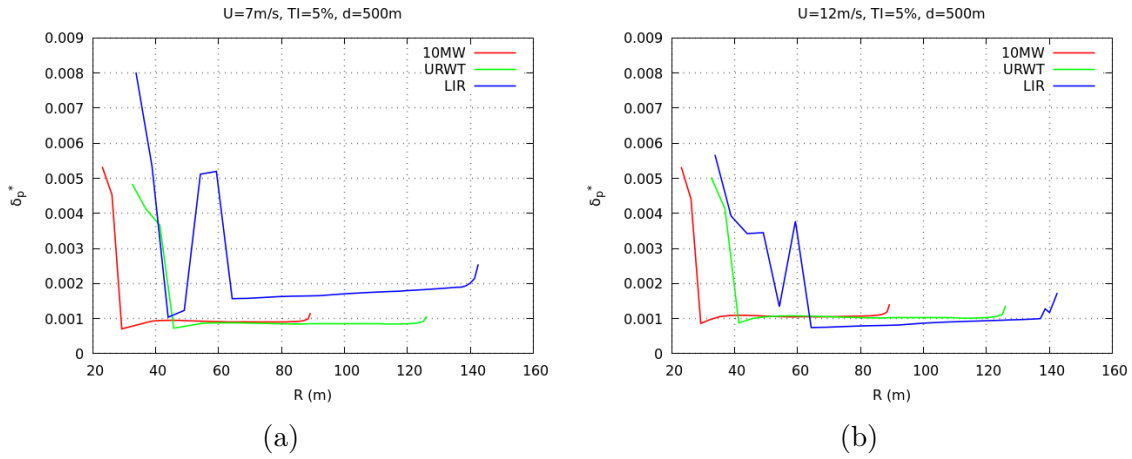
(a)



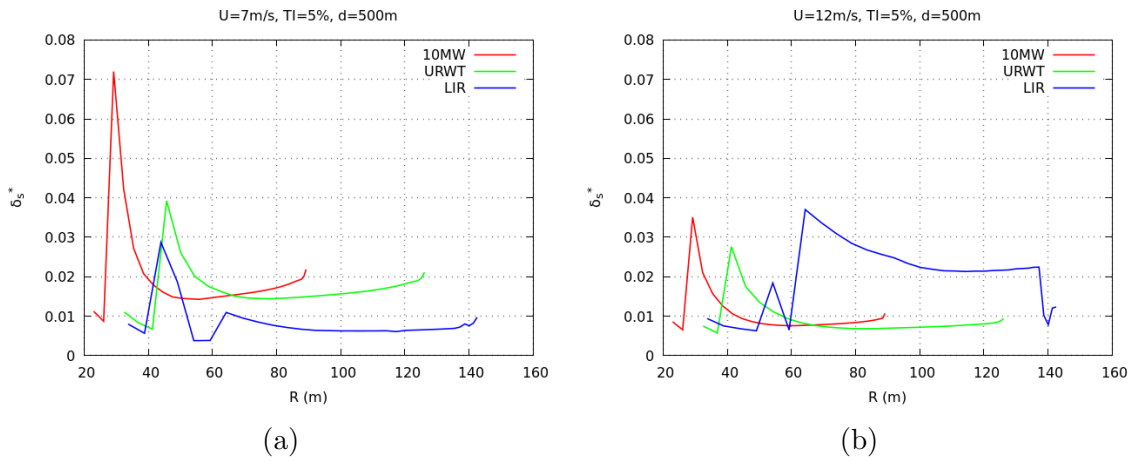
(b)

Σχ.4.20: Αριθμός Mach κατά μήκος των πτερυγίων των ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s

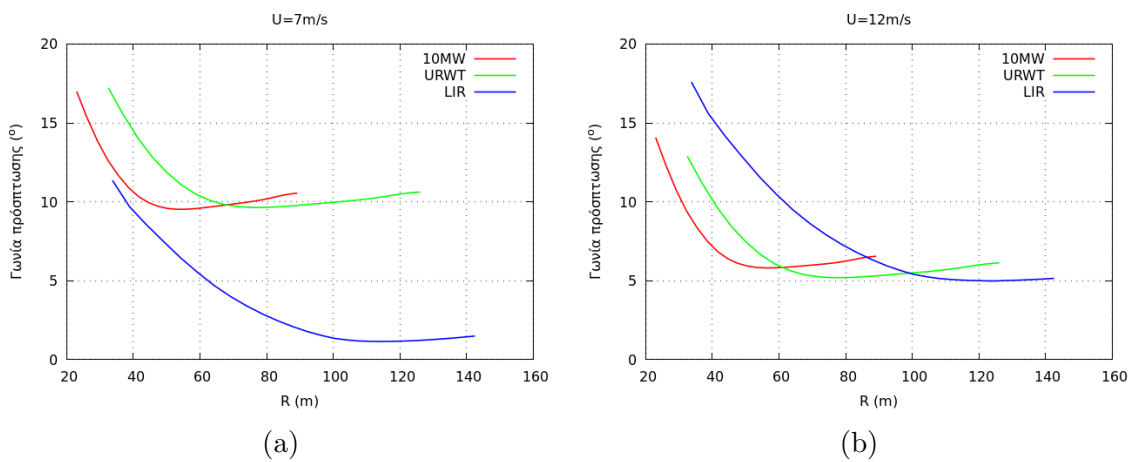




Σχ.4.21: Πάχος μετατόπισης της πλευράς υπερπίεσης κατά μήκος των πτερυγίων των ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s



Σχ.4.22: Πάχος μετατόπισης της πλευράς υποπίεσης κατά μήκος των πτερυγίων των ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s



Σχ.4.23: Γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος των πτερυγίων των ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητες ροής 7 και 12m/s

## **A-σταθμισμένα επίπεδα θορύβου**

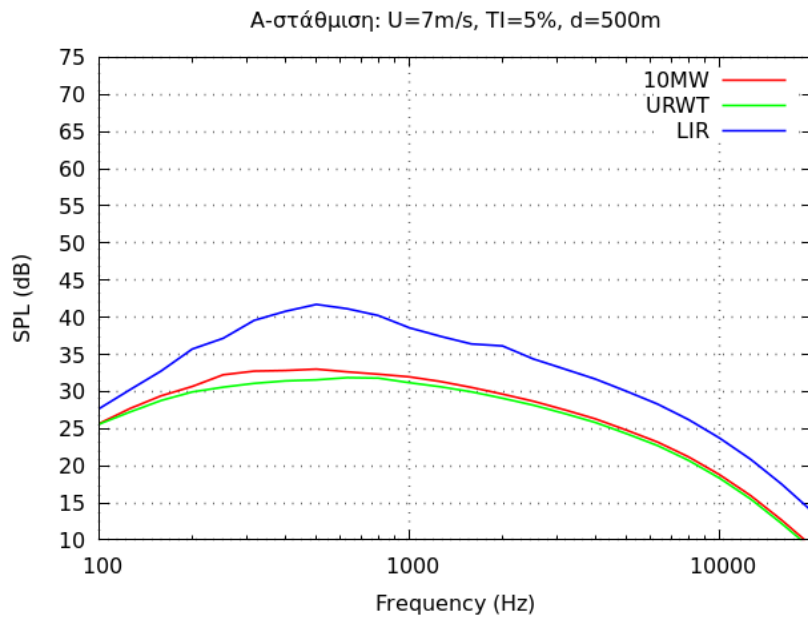
Για να εκτιμηθεί η ακουστική όχληση που προκαλεί ο θόρυβος στον άνθρωπο, εφαρμόζεται A-στάθμιση στα φάσματα θορύβου των ανεμογεννητριών για ταχύτητες ροής 12 m/s και 7 m/s. Το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται ως πιο ενοχλητικές τις συχνότητες των 1000 - 4000 Hz, με αποτέλεσμα τα επίπεδα θορύβου να παίρνουν την μορφή των Σχημάτων 4.24 και 4.25. Καθώς δίνεται μικρότερο βάρος στις χαμηλές συχνότητες, οι καμπύλες παρουσιάζουν μέγιστες εντάσεις στην περιοχή των 700 - 1000 Hz. Ο θόρυβος ατμοσφαιρικής τύρβης, ο θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής και ο θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος παραμένουν οι σημαντικότερες συνεισφορές του φάσματος.

## **Πολικά διαγράμματα θορύβου**

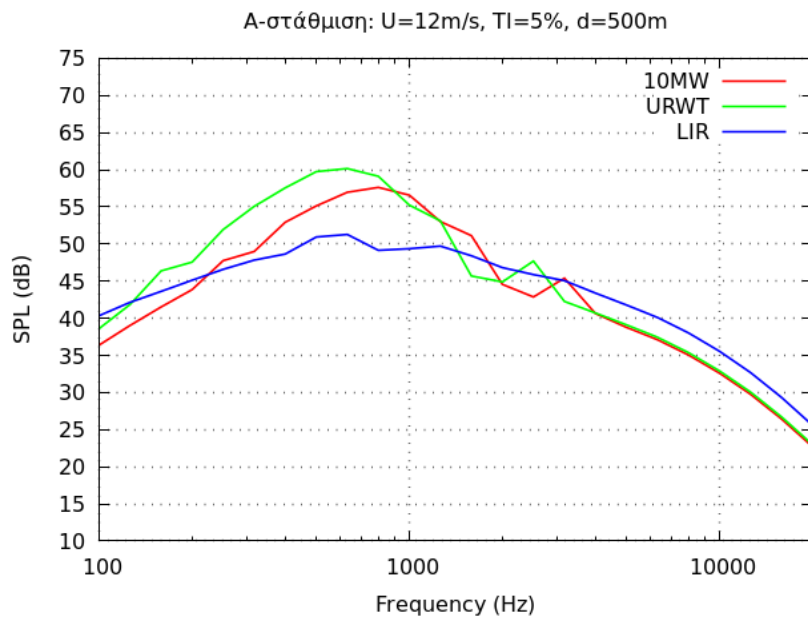
Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των επιπέδων θορύβου σε απόσταση 500m περιφερειακά των ανεμογεννητριών. Ο εκτιμώμενος A-σταθμισμένος θόρυβος σε ταχύτητα ροής 12 m/s και ένταση τύρβης 5% παρουσιάζεται για 6 διαφορετικές συχνότητες (200, 400, 800, 1000, 2000, 4000 Hz) στο Σχήμα 4.26.

Τα πολικά διαγράμματα έχουν μορφή όμοια με την περίπτωση της ανεμογεννήτριας WTS-4 που αναλύθηκε στην ενότητα 3.2. Τα αποτελέσματα αναπαράγουν το διπολικό χαρακτήρα των ακουστικών πηγών, εμφανίζοντας μέγιστες τιμές στον άξονα της ταχύτητας και ελάχιστες στο επίπεδο του δρομέα.

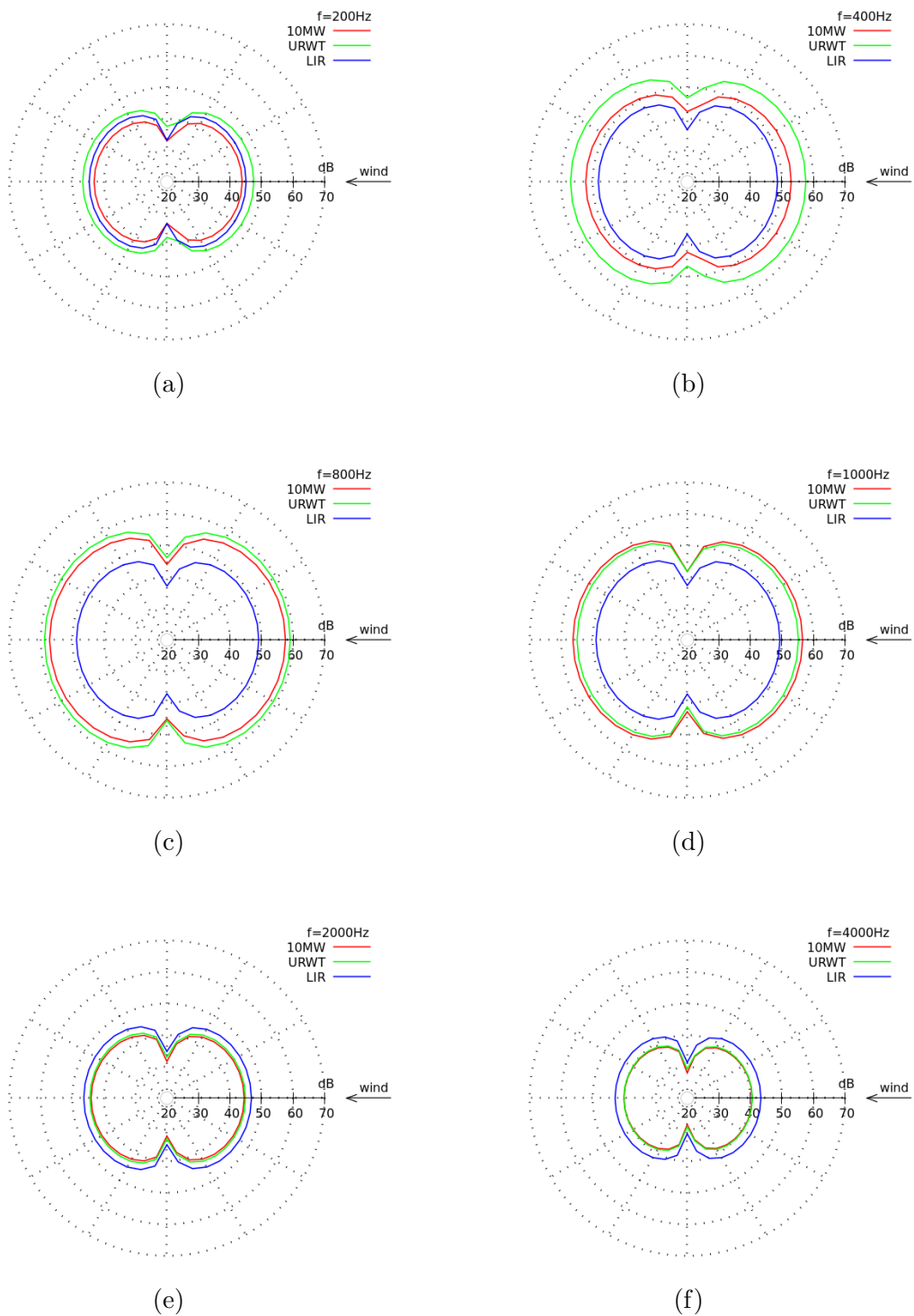
Σε συμφωνία με το A-σταθμισμένο φάσμα θορύβου για ταχύτητα 12 m/s (Σχήμα 4.25), οι τρεις ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν μέγιστα επίπεδα θορύβου στη περιοχή των 200 - 2000 Hz. Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας URWT παρατηρούμε την άνοδο και, εν συνεχεία, την πτώση της έντασης του θορύβου λόγω της κορυφής που εμφανίζει ο θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής, με τις μέγιστες εντάσεις να παρατηρούνται στα 400 - 800 Hz. Με μία διαφορά φάσης μερικών συχνοτήτων, αντίστοιχη εικόνα αποτυπώνεται στις καμπύλες της ανεμογεννήτριας αναφοράς, η οποία λαμβάνει τα υψηλότερα επίπεδα θορύβου στα 600 - 1000 Hz. Για συχνότητες μεγαλύτερες των 2000 Hz, η συνεισφορά του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής μειώνεται και οι εντάσεις πέφτουν σε επίπεδα χαμηλότερα της σχεδίασης LIR.



Σχ.4.24: Α-σταθμισμένο φάσμα θορύβου ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητα ροής 7m/s



Σχ.4.25: Α-σταθμισμένο φάσμα θορύβου ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε ταχύτητα ροής 12m/s



Σχ.4.26: Πολικά διαγράμματα θορύβου ανεμογεννητριών 10MW, LIR και URWT σε απόσταση 500m και ταχύτητα ροής 12m/s

## 5. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός εργαλείου υπολογισμού του αεροδυναμικού θορύβου ευρέως φάσματος που εκπέμπει ο δρομέας μίας ανεμογεννήτριας. Χρησιμοποιήθηκε μία υβριδική μέθοδος που συνδυάζει τις ημιεμπειρικές σχέσεις των Brooks, Pope και Marcolini [6] με τον δισδιάστατο επιλυτή Foil2w [11,12] για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής γύρω από τις αεροτομές των πτερυγίων.

Προκειμένου να πιστοποιηθεί η αξιοπιστία της μεθοδολογίας, τα αποτελέσματα των αεροακουστικών υπολογισμών συγκρίθηκαν με υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις. Αρχικά, ελέγχθηκε η εκτίμηση του θορύβου τυρβώδους και στρωτού οριακού στρώματος με βάση τις μετρήσεις τριών αεροτομών σε αεροσήραγγα του Εθνικού Εργαστηρίου Αεροδιαστημικής της Ολλανδίας (NLR) [13]. Η μορφή του φάσματος αναπαράγεται ικανοποιητικά από τις αριθμητικές προλέξεις και για τους δύο μηχανισμούς θορύβου. Παρουσιάζονται, ωστόσο, ορισμένες διαφορές ανάμεσα στις μετρήσεις του NLR και τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα των Brooks, Pope και Marcolini, από τα οποία έχουν παραχθεί οι ημιεμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του θορύβου. Συγκεκριμένα, στο φάσμα της πλήρως τυρβώδους ροής οι μετρήσεις των Brooks, Pope και Marcolini εμφανίζουν διπλή κορυφή, με αποτέλεσμα η διαφορά αυτή να αντικατοπτρίζεται στη σύγκριση των αεροακουστικών προλέξεων με τις μετρήσεις του NLR. Επιπλέον, σε ορισμένες γωνίες πρόσπτωσης παρατηρείται μία υπερεκτίμηση του θορύβου στρωτού οριακού στρώματος από τους αριθμητικούς υπολογισμούς, γεγονός που πιθανώς οφείλεται σε λανθασμένη εκτίμηση του σημείου μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς την εκτίμηση του θορύβου στρωτού οριακού στρώματος θα μπορούσε να επιτευχθεί με χρήση κώδικα CFD για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών παραμέτρων. Ο έλεγχος του συνολικού αεροακουστικού κώδικα για την προσομοίωση περιστρεφόμενου δρομέα ανεμογεννήτριας βασίστηκε στις μετρήσεις πλήρους κλίμακας της Εθνικής Υπηρεσίας Αεροναυπηγικής και Διαστήματος των ΗΠΑ (NASA) [14,15]. Η μορφή του φάσματος και τα επίπεδα του θορύβου ήρθαν σε πολύ καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις, ενώ καλή συμφωνία παρατηρήθηκε, επίσης, στα πολικά διαγράμματα θορύβου, τα οποία αναπαράγουν σωστά το διπολικό χαρακτήρα της ροής. Είναι σημαντικό, ωστόσο, να αναφερθεί πως για τους παραπάνω υπολογισμούς ήταν απαραίτητη η χρήση υποθέσεων εξαιτίας της έλλειψης ακριβών στοιχείων όσον αφορά στη γεωμετρία της ακμής εκφυγής και στην ατμοσφαιρική τύρβη.

Το τελευταίο μέρος της εργασίας αφιερώθηκε στην εφαρμογή του κώδικα που αναπτύχθηκε σε δρομείς σύγχρονων ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα εκτιμήθηκε ο παραγόμενος θόρυβος τριών διαφορετικών δρομέων (10MW, URWT, LIR) που σχεδιάστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος INNWIND [16] και μελετήθηκε η επίδραση στον θόρυβο των επιμέρους λειτουργικών και γεωμετρικών παραμέτρων. Η διακριτοποίηση των πτερυγίων έγινε χρησιμοποιώντας 33 στοιχεία με πύκνωση προς το ακροπτερύγιο ώστε να προσομοιώνονται ικανοποιητικά τα γεωμετρικά χαρακτηρι-

στικά. Και για τις τρεις ανεμογεννήτριες, ο θόρυβος ατμοσφαιρικής τύρβης, ο θόρυβος αμβλείας ακμής εκφυγής και ο θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος αναδείχθηκαν ως οι κύριες συνιστώσες του τελικού φάσματος. Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας αναφοράς ισχύος 10 MW, σε ταχύτητα ροής 7 m/s ο θόρυβος λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης υπερσχύει των υπόλοιπων συνιστωσών. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στα 12 m/s οδηγεί σε αύξηση των επιπέδων θορύβου σχεδόν όλων των επιμέρους συνεισφορών κυρίως εξαιτίας της μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής που αυξάνει σημαντικά τον αριθμό Mach, με τον θόρυβο αμβλείας ακμής εκφυγής να δημιουργεί αιχμή στην περιοχή των 300 - 2000 Hz. Εκτός από τον δρομέα ισχύος 10 MW μελετήθηκαν δύο σχεδιάσεις αυξημένης παραγωγής 20 MW. Η σχεδίαση URWT έχει γεωμετρία όμοια με την περίπτωση αναφοράς αλλά χαρακτηρίζεται από δρομέα διπλάσιου εμβαδού, ενώ η σχεδίαση LIR έχει πιο λεπτά πτερύγια μεγαλύτερου μήκους και διαφορετικές αεροτομές στο εξωτερικό μέρος. Ο διπλασιασμός της ισχύος διατηρώντας την ίδια γεωμετρία (URWT) δεν επηρεάζει σημαντικά το φάσμα του θορύβου, καθώς η μεγαλύτερη κλίμακα αντισταθμίζεται από τη χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής, με αποτέλεσμα ο αριθμός Mach να διατηρείται σε παρόμοια επίπεδα. Σε ταχύτητα 7 m/s, όπου υπερσχύει ο θόρυβος ατμοσφαιρικής τύρβης, παρατηρούνται επίπεδα θορύβου ίδια με την ανεμογεννήτρια αναφοράς. Στα 12 m/s διακρίνεται μικρή αύξηση των εντάσεων στο χαμηλόσυχο κομμάτι του φάσματος εξαιτίας του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής, το πάχος της οποίας είναι μεγαλύτερο στον δρομέα URWT. Αντίθετα, ο διπλασιασμός της ισχύος με τη σχεδίαση LIR επιδρά σημαντικά στο φάσμα του θορύβου. Σε ταχύτητα 7 m/s, το μεγαλύτερο μήκος των πτερυγίων οδηγεί σε υψηλότερες τιμές του αριθμού Mach, με συνέπεια την παραγωγή υψηλότερων επιπέδων θορύβου σε όλες τις κύριες συνιστώσες. Η διαφορετική γεωμετρία των αεροτομών στο εξωτερικό μέρος των πτερυγίων δημιουργεί, παράλληλα, αυξημένες τιμές του πάχους μετατόπισης του οριακού στρώματος. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε ταχύτητα 12 m/s και οδηγεί σε μειωμένες τιμές του θορύβου λόγω αμβλείας ακμής εκφυγής σε σχέση με την ανεμογεννήτρια αναφοράς. Ως αποτέλεσμα, η σχεδίαση LIR παρουσιάζει χαμηλότερα επίπεδα θορύβου στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες και ελαφρώς υψηλότερα (2 - 3 dB) στις υψηλές.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παραπάνω εργασία μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο γρήγορης εκτίμησης του αεροδυναμικού θορύβου που παράγει ο δρομέας μίας ανεμογεννήτριας. Λόγω της έλλειψης, ωστόσο, επαρκών δεδομένων κατά την πιστοποίηση της μεθοδολογίας, είναι απαραίτητο να ερευνηθεί περαιτέρω η αξιοπιστία των υπολογισμών του θορύβου αμβλείας ακμής εκφυγής και ατμοσφαιρικής τύρβης, οι οποίοι αποτελούν δύο από τις σημαντικότερες συνεισφορές του συνολικού θορύβου. Παράλληλα, για τη βελτίωση της ακρίβειας είναι απαραίτητη η επικαιροποίηση των ημειμπειρικών σχέσεων χρησιμοποιώντας αποτελέσματα σύγχρονων πειραμάτων, όπως αυτό που πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Εργαστήριο Αεροδιαστημικής της Ολλανδίας (NLR). Τέλος, ως μελλοντική εργασία προτείνεται η ενσωμάτωση του εργαλείου σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης με στόχο τη σχεδίαση αθόρυβων ανεμογεννητριών οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.

## Βιβλιογραφία

- [1] Lighthill M.J. “On Sound Generated Aerodynamically: I. General Theory”. In: *Proceedings of the Royal Society of London Ser.A.Vol.211* (1952), pp. 564–587.
- [2] Lighthill M.J. “On Sound Generated Aerodynamically: II. Turbulence as a Source of Sound”. In: *Proceedings of the Royal Society of London Ser.A.Vol.222* (1954), pp. 1–32.
- [3] Powell A. “Theory of Vortex Sound”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 36.1 (1964), pp. 177–195.
- [4] Curle N. “The Influence of Solid Boundaries Upon Aerodynamic Sound”. In: *Proceedings of the Royal Society of London Ser.A.Vol.231* (1955), pp. 506–514.
- [5] Ffowcs Williams J.E. and Hawkings D.L. “Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 264.1151 (1969), pp. 321–342.
- [6] Brooks T.F., Pope D.S., and Marcolini M.A. *Airfoil Self Noise and Prediction*. Tech. rep. NASA RP-1218. National Aeronautics and Space Administration, July 1989.
- [7] Amiet R.K. “Acoustic Radiation From an Airfoil in a Turbulent Stream”. In: *Journal of Sound and Vibration* 41.4 (1975), pp. 407–420.
- [8] Amiet R.K. “Noise Due to Turbulent Flow Past a Trailing Edge”. In: *Journal of Sound and Vibration* 47.3 (1976), pp. 387–393.
- [9] Grosveld F.W. “Prediction of Broadband Noise from Horizontal Axis Wind Turbines”. In: *Journal of Propulsion and Power* 1.4 (1985), pp. 292–299.
- [10] Lowson M.V. *Assessment and Prediction of Wind Turbine Noise*. Tech. rep. W/13/00284/REP. ETSU, 1993.
- [11] Βασιλίδης Α. Ριζιώτης. “Διερεύνηση της δυνατότητας προσομοίωσης της απώλειας στήριξης με στροβιλές μεθοδολογίες”. Διπλωματική Εργασία. Τομέας Ρευστών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- [12] Vasilis A. Riziotis and Spyros G. Voutsinas. “Dynamic stall modelling on airfoils based on strong viscous-inviscid interaction coupling”. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 56 (2008), pp. 185–208.
- [13] Paul Migliore and Stefan Oerlemans. “Wind Tunnel Aeroacoustic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines”. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 126.4 (Nov. 2004), pp. 974–985.

- [14] Kevin P. Shepherd and Harvey H. Hubbard. *Measurements and Observations of Noise from a 4.2 Megawatt (WTS-4) Wind Turbine Generator*. Tech. rep. NASA CR-166124. National Aeronautics and Space Administration, May 1983.
- [15] Kevin P. Shepherd, William L. Willshire Jr, and Harvey H. Hubbard. *Comparisons of Measured and Calculated Sound Pressure Levels Around a Large Horizontal Axis Wind Turbine Generator*. Tech. rep. NASA TM-100654. National Aeronautics and Space Administration, Mar. 1989.
- [16] Peter Hjuler Jensen, Takis Chaviaropoulos, and Anand Natarajan. *LCOE Reduction for the next generation offshore wind turbines*. Tech. rep. INNWIND project, Oct. 2017.
- [17] Καλλιόπη Π. Πόθου. “Ανάλυση αεροδυναμικού θορύβου σε περιστρεφόμενους δρομείς”. Διδακτορική Εργασία. Τομέας Ρευστών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1997.
- [18] Peter Fuglsang and Helge Aagaard Madsen. *Implementation and verification of an aeroacoustic noise prediction model for wind turbines*. Tech. rep. Risø-R-867(EN). Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, Mar. 1996.