



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μετρήσεις θορύβου τοπικά κατασκευασμένων
μικρών ανεμογεννητριών σε απευθείας
σύνδεση με συσσωρευτές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Ι. Ματζάκος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μετρήσεις θορύβου τοπικά κατασκευασμένων
μικρών ανεμογεννητριών σε απευθείας σύνδεση
με συσσωρευτές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Ι. Ματζάκος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Ιουλίου 2016

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....
Αλέξανδρος, Ι. Ματζάκος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλέξανδρος, Ματζάκος, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του ακουστικού θορύβου μιας μικρής ανεμογεννήτριας, καθώς επίσης και η επιρροή των αρμονικών ρεύματος που δημιουργούνται κατά τη σύνδεση σε συσσωρευτές στο τελικό ακουστικό αποτέλεσμα.

Γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, της αιολικής ενέργειας και των εργαλείων που μας επιτρέπουν την εκμετάλλευσή της, τις ανεμογεννήτριες. Επιπλέον αναλύεται η έννοια του ήχου και η σχέση του με τον άνθρωπο.

Στη συνέχεια γίνεται βιβλιογραφική έρευνα για την έννοια του θορύβου, για την προέλευση του σε μηχανές και αναλυτικότερα σε ανεμογεννήτριες, ενώ παρουσιάζονται και τρόποι μείωσης του. Παράλληλα αναφέρονται οι επιπτώσεις του θορύβου στην ανθρώπινη υγεία και εισάγονται έννοιες όπως τριφασικός ανορθωτής, αρμονικές ρεύματος και φίλτρα αποκοπής των αρμονικών ρεύματος.

Παρουσιάζεται το πρότυπο IEC 61400.11 και οι διαδικασίες που ορίζει για την καταγραφή και ανάλυση του εκπεμπόμενου ακουστικού θορύβου μιας ανεμογεννήτριας.

Ακολουθούν μετρήσεις ακουστικού θορύβου σε εργαστηριακό περιβάλλον για σύνδεση γεννήτριας με φορτίο, με συσσωρευτές και με συσσωρευτές με χρήση φίλτρου αποκοπής αρμονικών. Παράλληλα γίνεται καταγραφή των αρμονικών ρεύματος που δημιουργούνται κατά τη σύνδεση με συσσωρευτές.

Με βάση το πρότυπο IEC 61400.11 γίνονται μετρήσεις θορύβου μικρής ανεμογεννήτριας σε πεδίο δοκιμών και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του εργαστηριακού πειράματος.

Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα και κατατίθενται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις κλειδιά : Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, αιολική ενέργεια, μικρές ανεμογεννήτριες, ήχος, θόρυβος, ηχορύπανση, μετρήσεις θορύβου, αρμονικές ρεύματος, φίλτρα αποκοπής αρμονικών

Abstract

Subject of the present thesis is the study of the acoustic noise of a small wind generator and the effect of current harmonics that are created by the use of rectifiers in battery connected applications to the final acoustic result.

An introduction is made on the principles of Renewable Energy Sources, wind energy and on the tools that allow us to exploit it, wind turbines. Also the definition of sound is presented and its relation with human.

Then, a literature search is made for the meaning of noise, the origin of noise in machines and in more detail in wind turbines, while ways of noise reduction are presented. Alongside, the effects of noise are indicated in human health and concepts such as three-phase rectifier, current harmonics and cutoff filter for current harmonics are introduced.

IEC 61400.11 standard is presented and the procedures defined for the recording and analysis of the noise emission of a wind turbine.

Further on, acoustic measurements in the lab follow for load connected generator, battery connected generator and battery using harmonic notch filter connected generator. At the same time recording of the current harmonics is done.

Based on the IEC 61400.11 standard, small wind turbine noise measurements in field tests are made and the results are compared with the results of the laboratory experiment.

Finally conclusions are drawn and proposals for improvements and further work are suggested.

Key words : Renewable Energy Sources, wind energy, small wind turbines, sound, noise, noise pollution, acoustic measurements, current harmonics, cutoff filters for current harmonics

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας και την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη για την καθοδήγηση, τις υποδείξεις και τη στήριξη του κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς η συνεισφορά και η βοήθεια του ήταν καταλυτικές για την πραγματοποίησή της. Επιπλέον ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Νάσο Βασιλάκη από το Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για τις συμβουλές του καθώς επίσης και τον συμφοιτητή Ηλία Κατσαμπίρη για τη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια των διπλωματικών εργασιών μας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου, Γιάννη και Ερωφίλη, και τον αδερφό μου, Αντώνη, για την συνολική πνευματική και οικονομική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του φίλους και συμφοιτητές μου, όσους έμειναν και όσους έφυγαν, για όσα περάσαμε μαζί κατά τα χρόνια της φοίτησης μου και με διαμόρφωσαν ως άνθρωπο. Ευχαριστώ τους Αντώνη, Μίλτο, Σεβαστιανό, Μάριο, Γιάννη, Βασίλη, Στέλιο, Θοδωρή, Αντρέα, Μιχάλη, Αριστέα, Γιώργο, Νίκο, Στέφανο, Κοσμά και Πολύζο.

Στον Παναγιώτη

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	20
1.1	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	20
1.2	Αιολική ενέργεια	21
1.2.1	Γενικά.....	21
1.2.2	Άνεμος.....	22
1.2.3	Ανεμογεννήτριες	24
1.3	Ήχος.....	29
1.3.1	Τι είναι ήχος; (Wang, et al., 2006).....	29
1.3.2	Διάκριση των ήχων	29
1.3.3	Διάδοση του ήχου	29
1.3.4	Χαρακτηριστικά του ήχου	32
1.4	Ήχος και άνθρωπος	37
1.4.1	Ανατομία και μηχανισμός λειτουργίας του αφτιού.....	37
1.4.2	Η συχνοτική απόκριση του ανθρώπινου αφτιού	39
1.5	Σκοπός και Δομή της Εργασίας	41
2	Θόρυβος	43
2.1	Θόρυβος	43
2.2	Ακουστικός θόρυβος.....	43
2.3	Πηγές θορύβου σε ηλεκτρικές μηχανές.....	44
2.4	Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος σε σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές	45
2.4.1	Προέλευση ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.....	45
2.4.2	Έλεγχος ηλεκτρομαγνητικού θορύβου	47
2.5	Ο Θόρυβος στις ανεμογεννήτριες.....	51
2.5.1	Μηχανικός θόρυβος.....	52
2.5.2	Αεροδυναμικός θόρυβος	53
2.5.3	Υπόηχοι από ανεμογεννήτριες.....	55
2.5.4	Τρόποι μείωσης θορύβου	57
2.5.5	Θόρυβος από μικρές ανεμογεννήτριες.....	62
2.6	Επιπτώσεις θορύβου	63
2.7	Μέτρηση θορύβου	64
2.8	Καμπύλες κατάταξης θορύβου	71

3	Πρότυπο IEC 61400.11 και μεθοδολογία μετρήσεων.....	73
3.1	Σκοπός του προτύπου	73
3.2	Περιγραφή της μεθόδου	73
3.3	Όργανα μέτρησης.....	74
3.3.1	Εξοπλισμός ακουστικών μετρήσεων.....	74
3.3.2	Εξοπλισμός μη ακουστικών μετρήσεων.....	75
3.4	Μετρήσεις και τοποθέτηση οργάνων	75
3.4.1	Τοποθέτηση οργάνων	75
3.4.2	Ακουστικές μετρήσεις	77
3.4.3	Μη ακουστικές μετρήσεις.....	78
3.5	Διαδικασίες μείωσης δεδομένων	79
3.5.1	Ταχύτητα ανέμου	79
3.5.2	Διόρθωση για θόρυβο υποβάθρου.....	79
3.5.3	Φαινόμενα επίπεδα ηχητικής ισχύος	80
3.5.4	Επίπεδα ανά τριτοκτάβες.....	81
3.5.5	Τονικότητα.....	81
4	Μετρήσεις θορύβου εργαστηρίου.....	90
4.1	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	92
4.2	ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	95
4.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	96
4.3.1	ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ	96
4.3.2	ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	101
4.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ Α – C ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ.....	103
4.5	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ C-ΣΤΑΘΜΙΣΗ.....	104
5	Μετρήσεις θορύβου στο πεδίο δοκιμών	110
5.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	110
5.2	ΠΕΔΙΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΡΑΦΗΝΑΣ.....	110
5.2.1	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΝ	111
5.2.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	113
5.2.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	115
5.3	ΠΕΔΙΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΑΡΑΘΩΝΑ	120
5.3.1	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΝ	120
5.3.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	121
5.3.3	ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑ ΤΡΙΤΟΚΤΑΒΕΣ	125

5.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ - ΠΕΔΙΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ	143
6	Συμπεράσματα - προοπτικές.....	148
6.1	Συμπεράσματα	148
6.2	Προοπτικές	149
7	Βιβλιογραφία.....	152

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1 Πλανητικοί άνεμοι κατά τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο	23
Εικόνα 1.2 : Θαλάσσια και απόγεια αύρα	24
Εικόνα 1.3 : Ρεύματα αέρα σε βουνό.....	24
Εικόνα 1.4 : Α/Γ οριζόντιου άξονα	25
Εικόνα 1.5 : Α/Γ κάθετου άξονα	25
Εικόνα 1.6 : Μέρη τυπικής Α/Γ.....	28
Εικόνα 1.7 : Διαμήκες και εγκάρσιο κύμα.....	30
Εικόνα 1.8 : Φαινόμενα ανάκλασης και διάθλασης	30
Εικόνα 1.9 : Φαινόμενο περίθλασης.....	31
Εικόνα 1.10 : Φαινόμενο συμβολής.....	31
Εικόνα 1.11 : Φαινόμενο Doppler	31
Εικόνα 1.12 : Χροιά ηχητικού σήματος	37
Εικόνα 1.13 : Ανατομία ανθρώπινου αφτιού.....	39
Εικόνα 1.14 : Απόκριση ανθρώπινου αφτιού	40
Εικόνα 1.15 : Καμπύλες Fletcher και Munson	41
Εικόνα 2.1 : Δημιουργία και μετάδοση θορύβου σε ηλεκτρικές μηχανές.	45
Εικόνα 2.2 : Τριφασικός ανορθωτής γέφυρας με διόδους.....	49
Εικόνα 2.3 : Κυματομορφές τάσης και ρεύματος τριφασικού ανορθωτή γέφυρας με διόδους.	50
Εικόνα 2.4 : Πηγές μηχανικού θορύβου : Συνεχόμενες γραμμές αερόφερτος θόρυβος, διακεκομμένες γραμμές στερεόφερτος θόρυβος.	52
Εικόνα 2.5 : Αεροδυναμικός θόρυβος ανεμογεννητριών	53
Εικόνα 2.6 : Περιπτώσεις θορύβου εξαιτίας ατμοσφαιρικής αναταραχής	54
Εικόνα 2.7 : Ταξινόμηση θορύβων ανεμογεννήτριας.....	55
Εικόνα 2.8 : Τυπική απεικόνιση ήχου χαμηλών συχνοτήτων και υποήχου ανεμογεννήτριας.....	56
Εικόνα 2.9 : Τυπική κατανομή φάσματος ηχητικής πίεσης από γεννήτριες με τον δρομέα ανάντη και κατάντη.....	57
Εικόνα 2.10 : Κανονικοποιημένο φάσμα ηχητικής πίεσης για διαφορετικούς λόγους η/λ ...	60
Εικόνα 2.11 : Επιρροή της γεωμετρίας του άκρου του πτερυγίου στον παραγόμενο θόρυβο	60
Εικόνα 2.12 : Θόρυβος για διάφορα σχήματα κορυφής πτερυγίου.....	62
Εικόνα 2.13 : Καμπύλες διόρθωσης A, C και Z στάθμισης.....	69
Εικόνα 2.14 : Καμπύλες NC	72
Εικόνα 2.15 : Καμπύλες NR	72
Εικόνα 3.1 : Τοποθέτηση μικροφώνου στην πλακέτα μετρήσεων - Κάτοψη	85
Εικόνα 3.2 : Τοποθέτηση μικροφώνου στην πλακέτα – Πλάγια όψη.....	86
Εικόνα 3.3 : Θέσεις τοποθέτησης μικροφώνων.....	86
Εικόνα 3.4 : Επίδειξη μεγεθών R_0 και R_1 για γεννήτρια οριζοντίου άξονα.	87
Εικόνα 3.5 : Επιτρεπτές θέσεις για το μετεωρολογικό ιστό - Κάτοψη.....	87
Εικόνα 3.6 : Επιτρεπτές θέσεις για το μετεωρολογικό ιστό – Πλάγια όψη	88
Εικόνα 3.7 : Επίδειξη του $L_{70\%}$ σε κρίσιμη ζώνη	88

Εικόνα 3.8 : Επίδειξη του κριτηρίου $L_{70\%} + 6$ dB.....	88
Εικόνα 3.9 : Επίδειξη του επιπέδου $L_{pn,avg}$	89
Εικόνα 3.10 : Επίδειξη κατηγοριοποίησης όλων των φασματικών γραμμών	89
Εικόνα 4.1 : Συνδεσμολογία γεννήτριας με τριφασικό φορτίο	90
Εικόνα 4.2 : Συνδεσμολογία γεννήτριας με συσσωρευτή χωρίς φίλτρο	91
Εικόνα 4.3 : Συνδεσμολογία γεννήτριας με συσσωρευτή με χρήση φίλτρου	91
Εικόνα 4.4 : Εικόνα ηχομέτρου κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων.....	92
Εικόνα 4.5 : Ηχομονωτικό κουτί.....	94
Εικόνα 4.6 : Πλάκες πετροβάμβακα.....	95
Εικόνα 4.7 : Διάγραμμα $Leq[dBA]$ - $Leq[dBC]$ 1 Ampere.....	96
Εικόνα 4.8 : Διάγραμμα $Leq[dBA]$ - $Leq[dBC]$ 3 Ampere.....	97
Εικόνα 4.9 : Διάγραμμα $Leq[dBA]$ - $Leq[dBC]$ 5 Ampere.....	97
Εικόνα 4.10 : Διάγραμμα $Leq[dBA]$ - $Leq[dBC]$ 7 Ampere.....	98
Εικόνα 4.11 : Διάγραμμα $Leq[dBA]$ - $Leq[dBC]$ 9 Ampere.....	98
Εικόνα 4.12 : Συνολικό διάγραμμα επιπέδων ηχητικής πίεσης ανά διάταξη με A στάθμιση	99
Εικόνα 4.13 : Συνολικό διάγραμμα επιπέδων ηχητικής πίεσης ανά διάταξη με C στάθμιση	99
Εικόνα 4.14 : Φασματική Ανάλυση (A) – 1A	103
Εικόνα 4.15 : Φασματική Ανάλυση (C) – 1A.....	104
Εικόνα 4.16 : Φασματική ανάλυση (C) 3A	105
Εικόνα 4.17 : Φασματική ανάλυση (C) 5A	106
Εικόνα 4.18 : Φασματική ανάλυση (C) 7A	107
Εικόνα 4.19 : Φασματική ανάλυση (C) 9A	108
Εικόνα 5.1 : Τοποθέτηση πλατφόρμας μετρήσεων	112
Εικόνα 5.2 : Τοποθέτηση ηχομέτρου στην πλατφόρμα μετρήσεων.....	112
Εικόνα 5.3 : Θέση μετεωρολογικού ιστού σε σχέση με την ανεμογεννήτρια	113
Εικόνα 5.4 : Διάγραμμα $LAeq$ – ταχύτητας ανέμου Ραφήνας	117
Εικόνα 5.5 : Τοποθέτηση ηχομέτρου σε βράχο	121
Εικόνα 5.6 : Διάγραμμα $LAeq$ – ταχύτητας ανέμου Μαραθώνα	122
Εικόνα 5.7 : Φασματική ανάλυση μετρήσεων θορύβου στο πεδίο δοκιμών Μαραθώνα...	142
Εικόνα 5.8 : Καμπύλη ρεύματος – ταχύτητας ανέμου.....	145
Εικόνα 5.9 : Σύγκριση ηχοστάθμης 1 A – 4 m/s	145
Εικόνα 5.10 : Σύγκριση ηχοστάθμης 3 A – 5 m/s	146
Εικόνα 5.11 : Σύγκριση ηχοστάθμης 7 A – 6 m/s	146
Εικόνα 5.12 : Σύγκριση ηχοστάθμης 9 A – 7 m/s	146

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 : Αντιστοιχία dB με μPa και καθημερινά ηχητικά φαινόμενα	35
Πίνακας 2.1 : Ενδεικτικές επιδράσεις θορύβου στον άνθρωπο	64
Πίνακας 2.2 : Μέγιστα επιτρεπτά όρια ηχορύπανσης.....	64
Πίνακας 2.3 : Συνήθεις οκτάβες.....	67
Πίνακας 2.4 : Διορθώσεις σταθμίσεων A και C ανά οκτάβα	71
Πίνακας 3.1 : Ενδεικτικές τιμές μήκους τραχύτητας	79
Πίνακας 3.2 : Ανάλυση συχνοτήτων.....	82
Πίνακας 4.1 : Σύγκριση θορύβου διατάξεων με φίλτρο και χωρίς φίλτρο με A στάθμιση ..	100
Πίνακας 4.2 : Σύγκριση θορύβου διατάξεων με φίλτρο και χωρίς φίλτρο με C στάθμιση ..	101
Πίνακας 4.3 : Συνήθεις τριτοκτάβες.....	102
Πίνακας 4.4 : Αρμονικές ρεύματος 1A	105
Πίνακας 4.5 : Αρμονικές ρεύματος 3A	106
Πίνακας 4.6 : Αρμονικές ρεύματος 5A	107
Πίνακας 4.7 : Αρμονικές ρεύματος 7A	107
Πίνακας 4.8 : Αρμονικές ρεύματος 9A	108
Πίνακας 4.9 : Παρατηρούμενη αύξηση ανά τριτοκτάβα και αρμονικές	109
Πίνακας 4.10 : THDi% συνολικό	109
Πίνακας 4.11 : THDi% 5 ^{ης} αρμονικής.....	109
Πίνακας 4.12 : THDi% 7 ^{ης} αρμονικής.....	109
Πίνακας 5.1 : Πίνακας επίδειξης επεξεργασίας δεδομένων Wind speed και LAeq	116
Πίνακας 5.2 : Πίνακας κατάταξης δεδομένων με βάση την ταχύτητα ανέμου	118
Πίνακας 5.3 : Πίνακας αναγωγής δεδομένων σε ακέραιες τιμές ταχύτητας ανέμου	119
Πίνακας 5.4 : Ηχητική ισχύς ανεμογεννήτριας.....	119
Πίνακας 5.5 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου.....	123
Πίνακας 5.6 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου.....	124
Πίνακας 5.7 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους και υπολογισμός επιπέδου ηχητικής ισχύος	124
Πίνακας 5.8 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 1-11	127
Πίνακας 5.9 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 12-22	128
Πίνακας 5.10 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 23-33	129
Πίνακας 5.11 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 1-11	131
Πίνακας 5.12 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 12-22	132
Πίνακας 5.13 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 23-3	133

Πίνακας 5.14 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 4m/s	135
Πίνακας 5.15 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 5m/s	136
Πίνακας 5.16 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 6m/s	137
Πίνακας 5.17 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 7m/s	138
Πίνακας 5.18 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα α.....	139
Πίνακας 5.19 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 9m	140
Πίνακας 5.20 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 10m/s	141
Πίνακας 5.21 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ρεύματος και αναγωγή σε προκαθορισμένες ταχύτητες ανέμου	144

1 Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια αναδεικνύεται όλο και περισσότερο το θέμα της έντονης κλιματικής αλλαγής εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου με δυσμενή αποτελέσματα τόσο στο ευρύτερο γήινο οικοσύστημα όσο και για τον ίδιο τον άνθρωπο, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, την αύξηση της στάθμης των θαλάσσιων υδάτων και την συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών συνθηκών. Αιτία του φαινομένου αυτού αποτελούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν κυρίως από την εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων, όπως του πετρελαίου, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο άνθρωπος σήμερα, άλλωστε, είναι δέσμιος της ενέργειας για να συντηρήσει τον τεράστιο τεχνολογικό κόσμο που έχει δημιουργήσει. Τα γεγονότα αυτά σε συνδυασμό με την ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και συνεπώς την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν οδηγήσει ή πιο εύστοχα έχουν κάνει μονόδρομο την αποδοτικότερη χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας και τη μεγαλύτερη αξιοποίηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Ο όρος εναλλακτικές μορφές ενέργειας ή αλλιώς Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αναφέρεται κυρίως στις ακόλουθες μορφές (Κανελοπούλου, 2008):

- την αιολική, την κινητική ενέργεια που οφείλεται στον άνεμο
- την ηλιακή, την παραγόμενη από τον ήλιο ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας
- την γεωθερμική, μια μορφή θερμικής ενέργειας που εγκλείεται στα έγκατα της γης
- την υδροηλεκτρική, την κινητική ή δυναμική ενέργεια υδάτινων μαζών από φράγματα ή υδατοπτώσεις
- τις κυψέλες καυσίμου (ή υδρογόνου), των διατάξεων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο
- την ενέργεια της παλίρροιας και των θαλάσσιων κυμάτων, μορφών κινητικής και δυναμικής ενέργειας που περιέχεται στις υδάτινες μάζες θαλάσσιου νερού
- και την ενέργεια της βιομάζας, τη χημική ενέργεια των φυτών υπό μορφή υδατανθράκων οι οποίοι σχηματίστηκαν κατά τη φωτοσύνθεση.

Είναι δε πλέον ευρέως γνωστό ότι η χρήση αυτών των ανεξάντλητων μορφών ενέργειας έχει πολλαπλά οφέλη με βασικότερα εξ αυτών αφενός μεν τις μειωμένες εκπομπές ρύπων, γι' αυτό άλλωστε ονομάζονται και ήπιες, αφετέρου δε το χαμηλό κόστος παραγωγής τους.

Σήμερα, από τις παραπάνω εναλλακτικές μορφές ενέργειας η αιολική είναι η ευρύτερα αξιοποιούμενη και η μόνη με την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε μεγέθη ανάλογα με αυτά των συμβατικών πηγών (Παπαδόπουλος, 1997). Αυτό συμβαίνει με τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική με τη χρήση

κατάλληλων μηχανών οι οποίες ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν οι ανεμογεννήτριες καθώς και ο θόρυβος που παράγουν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

1.2 Αιολική ενέργεια

1.2.1 Γενικά

Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια, αφότου άρχισε ο άνθρωπος να ενδιαφέρεται για τη μηχανική ισχύ. Στην Αίγυπτο σώζονται οικοδομήματα ανεμόμυλων που προορίζονταν για την άλεση σιτηρών και την άντληση νερού με ηλικία μεγαλύτερη των 3000 ετών, ενώ ιστορικές πηγές αναφέρουν την ύπαρξη ανεμόμυλων στη Βαβυλωνία περί τον 7^ο π.Χ. αιώνα με τους οποίους γινόταν η άρδευση της πεδιάδας της Μεσοποταμίας. Οι εφαρμογές της αιολικής ενέργειας ωστόσο δεν σταματούν εδώ. Πολλές χώρες όφειλαν τον πλούτο και τη ναυτιλιακή τους ικανότητα στον άνεμο που κινούσε τα ιστιοφόρα τους. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα τα πλοία κινούνταν με τη βοήθεια του ανέμου, πριν να εκτοπιστούν από τα ατμοκίνητα και στη συνέχεια τα πετρελαιοκίνητα πλοία.

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των μη ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, αλλά και έναντι των άλλων ήπιων μορφών. Αρχικά πρέπει να τονιστεί ότι η αιολική ενέργεια είναι μια αστείρευτη πηγή ενέργειας. Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη και περίπου μόλις το 2% αυτής μετατρέπεται σε αιολική (Μπεργελές, 2005). Σύμφωνα με τον Άγγλο καθηγητή της μετεωρολογίας Brunt η συνολική ισχύς των ανέμων στη γη ανέρχεται σε $3 \cdot 10^{17}$ kWh από την οποία όμως μόνο ένα μέρος είναι εκμεταλλεύσιμο και είναι της τάξης των $2 \cdot 10^{10}$ kWh κατά τον Αμερικανό μετεωρολόγο Willet. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α. είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν στη χώρα.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα που μπορεί να αναφερθεί είναι πως η αιολική ενέργεια παρέχεται δωρεάν, υπάρχει σε μεγάλη πληθώρα τοποθεσιών γεγονός που την κάνει προσιτή σε όλους, ενώ, τέλος, τα έξοδα εγκατάστασης και μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης είναι σχετικά μικρά συγκριτικά με την περίπτωση των υδροηλεκτρικών σταθμών που εγκαθίστανται σε συγκεκριμένες περιοχές και πολλές φορές απομακρυσμένες.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που δεν πρέπει να παραληφθεί είναι τα περιβαλλοντικά οφέλη από την αξιοποίηση της. Χαρακτηριστικά για κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από αιολικά πάρκα αντί για συμβατικά, συνεπάγεται αποφυγή έκλυσης

ενός περίπου κιλού διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Έτσι για μια συνηθισμένη ανεμογεννήτρια 750 kW στην Ελλάδα που έχει μέση ετήσια παραγωγή της τάξης των 2,25 εκατομμυρίων kWh αποτρέπεται η έκλυση 2250 τόνων CO₂.

Τέλος είναι σημαντικό το γεγονός ότι η αιολική ενέργεια είναι ανεξάρτητη από κοινωνικές διαταραχές και πολέμους με αποτέλεσμα να παραμένει ανεξάρτητη από ακραίες μεταβολές τιμών.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα που εντοπίζεται είναι ότι ο άνεμος δεν πνέει με σταθερή ταχύτητα όλη τη διάρκεια του 24ώρου, γεγονός που προκαλεί πρόβλημα αποταμίευσης της ενέργειας σε περιόδους άπνοιας. Οι διάφορες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου εξαρτώνται τόσο από τις γεωγραφικές και τοπογραφικές συνθήκες των διαφόρων περιοχών όσο και από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Κάποιες από τις λύσεις που υπάρχουν είναι η χρήση συσσωρευτών, είτε η άντληση νερού και η εναποθήκευση του σε υψηλότερη στάθμη. Μια ακόμα λύση που εφαρμόζεται είναι η χρήση της αιολικής ενέργειας παράλληλα με άλλες πηγές ενέργειας τις οποίες αντικαθιστά όταν αυτό είναι εφικτό με αποτέλεσμα σημαντική μείωση κατανάλωσης καυσίμων. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και άλλα μειονεκτήματα τα οποία αφορούν στις αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στα οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

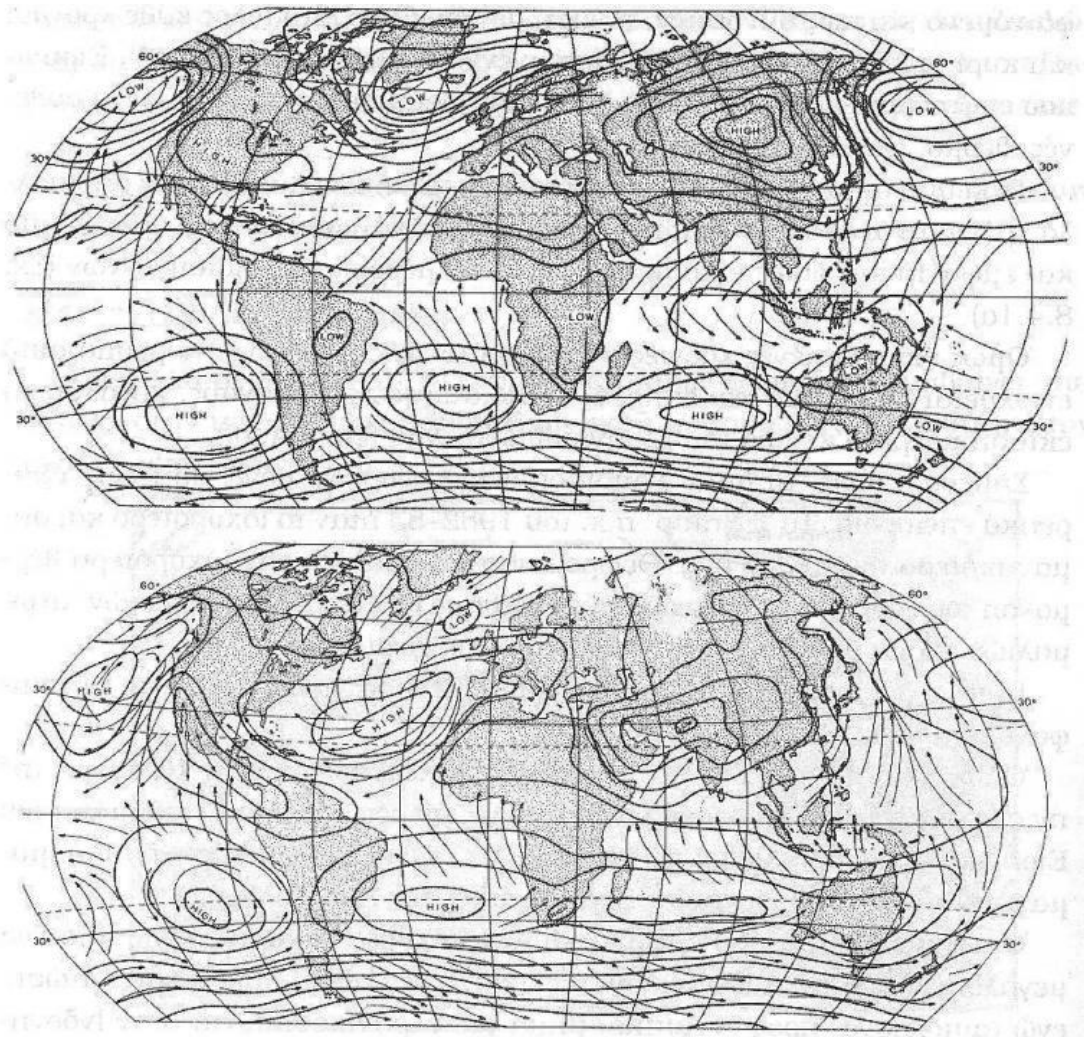
Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι η αιολική ενέργεια αποτελεί μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό, η οποία παρέχεται δωρεάν και αποτελεί σήμερα μια από τις καταλληλότερες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με κάποια προβλήματα στην αποθήκευση της για περιόδους άπνοιας, τα οποία ωστόσο δεν είναι αξιόπεραστα.

1.2.2 Άνεμος

Ο άνεμος είναι κίνηση αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα κυρίως λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Η ακτινοβολία του ηλίου απορροφάται από την επιφάνεια της γης και στη συνέχεια επιστρέφεται στην ατμόσφαιρα. Εξαιτίας τόσο της διαφορετικότητας της φύσης του εδάφους (έδαφος, θάλασσα, βουνό, έρημος, δάσος, πόλη) όσο και της έκθεσης αυτού στην ακτινοβολία του ηλίου λόγω γεωγραφικού πλάτους και εποχής υπάρχει ανισοκατανομή στην απορρόφηση θερμότητας από περιοχή σε περιοχή. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας, πυκνότητας και πίεσης στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την μετακίνηση των αέριων μαζών, δηλαδή τη δημιουργία ανέμων (Νικολάκης, 2002). Πιο αναλυτικά μπορούν να αναφερθούν:

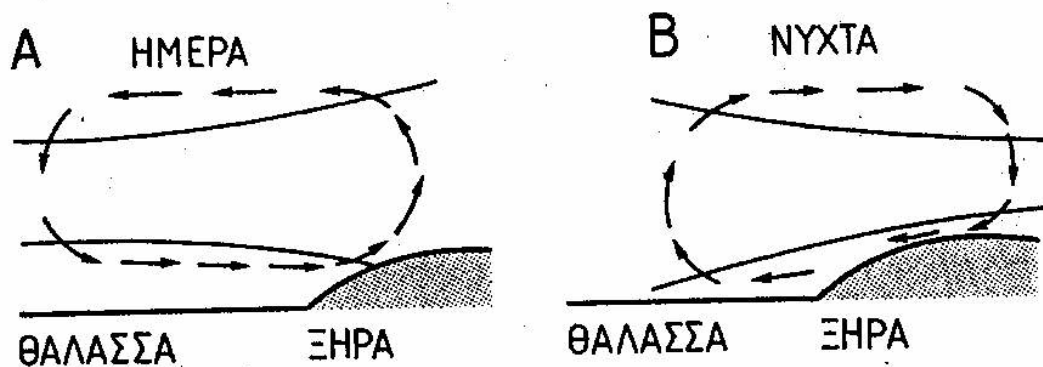
- οι πλανητικοί ή παγκόσμιοι άνεμοι που οφείλονται στη μεγαλύτερη θέρμανση της επιφάνειας της γης κοντά στον Ισημερινό και στην τροπική

γενικότερα ζώνη από ότι στους Πόλους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κρύοι επιφανειακοί άνεμοι να κατευθύνονται από τους Πόλους προς τον Ισημερινό για να αντικαταστήσουν τον θερμότερο αέρα που ανυψώνεται στις τροπικές περιοχές.



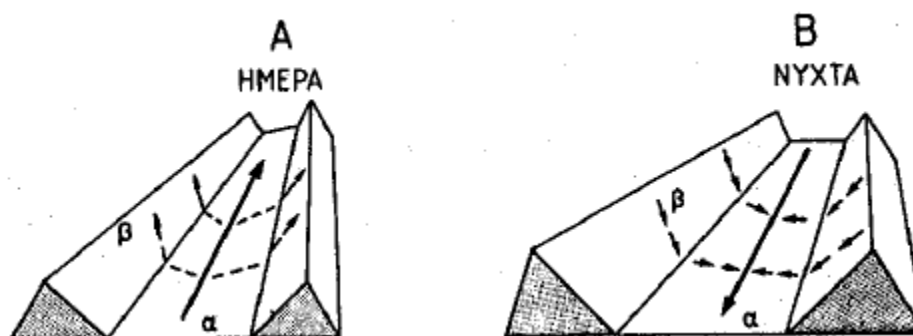
Εικόνα 1.1 Πλανητικοί άνεμοι κατά τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο

- τα τοπικά παραλιακά ρεύματα. Ως γνωστό οι θάλασσες έχουν μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα από το έδαφος, αφού εκτός από την εξάτμιση των υδάτων θερμότητα μεταφέρεται προς τις κρύες υδάτινες μάζες. Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας ο αέρας που βρίσκεται πάνω από την ξηρά θερμαίνεται περισσότερο σε σχέση με τον αέρα που βρίσκεται πάνω από νερό. Ο θερμός αέρας ανυψώνεται ενώ ο κρύος αέρας τήνει να πάρει τη θέση του με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανέμου. Η αντίστροφη διαδικασία λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της νύχτας αφού η θερμοκρασία του εδάφους ελαττώνεται γρηγορότερα από τη θερμοκρασία της θάλασσας με αποτέλεσμα ο αέρας της ξηράς να μεταφέρεται προς τη θάλασσα, ενώ ο θερμότερος αέρας πάνω από τη θάλασσα ανυψώνεται.



Εικόνα 1.2 : Θαλάσσια και απόγεια αύρα

- Παρόμοια τοπικά ρεύματα δημιουργούνται και στις βουνοπλαγιές που προσανατολίζονται προς τον ήλιο, αφού κατά τη διάρκεια της ημέρας θερμαίνονται γρηγορότερα με αποτέλεσμα την ανύψωση αέριων μαζών στις πλαγιές αυτές και αντικατάστασης τους από πιο κρύες μάζες ανέμου.



Εικόνα 1.3 : Ρεύματα αέρα σε βουνό

- Τέλος, δεν πρέπει να ξεχάσουμε να αναφερθούμε σε εποχιακούς ανέμους όπως οι Μουσώνες και σε ετήσιους γνωστούς και ως Μελτέμια. Οι άνεμοι αυτοί δημιουργούνται με παρόμοιο τρόπο με τους προαναφερθέντες, οφείλονται δηλαδή στην ανομοιογενή θέρμανση ηπείρων και ωκεανών. Πάνω από τις ηπείρους εμφανίζονται μεγαλύτερες πιέσεις κατά το χειμώνα και μικρότερες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες συγκριτικά με τους ωκεανούς. Σαν αποτέλεσμα, κατά το χειμώνα πνέουν ξηροί και ψυχροί άνεμοι ηπειρωτικής προέλευσης, ενώ αντίθετα κατά το θέρος πνέουν υγροί και δροσεροί θαλάσσιοι άνεμοι (Κανελοπούλου, 2007).

1.2.3 Ανεμογεννήτριες

Ανεμογεννήτριες(A/Γ) ονομάζονται τα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, οι μηχανές δηλαδή οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

Σήμερα υπάρχουν πολλά είδη ανεμοκινητήρων τα οποία χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες :

- *Οριζοντίου άξονα:* Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ο δρομέας είναι τύπου έλικας και βρίσκεται συνεχώς παράλληλα με το έδαφος. Υπάρχουν ωστόσο δυο υποκατηγορίες. Αυτές στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου και αυτές στις οποίες ο άξονας είναι κάθετος στην κατεύθυνση ροής του ανέμου (cross-wind). Για την πρώτη υποκατηγορία έχουμε περαιτέρω διαχωρισμό με βάση τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης και τη διεύθυνση του ανέμου. Αν ο δρομέας βρίσκεται μπροστά από τον πύργο λέγεται ανάντη (upwind) ενώ σε περίπτωση που βρίσκεται πίσω, λέγεται κατάντη (downwind).



Εικόνα 1.4 : Α/Γ οριζόντιου άξονα

- *Κατακόρυφου άξονα:* Στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα ο άξονας περιστροφής τους είναι κάθετος στο έδαφος και κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 1.5 : Α/Γ κάθετου άξονα

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας είναι συνάρτηση του μεγέθους της και της ταχύτητας του ανέμου.

Τα τυπικά μεγέθη των εμπορικών Α/Γ είναι (Παπαθανασίου, 2008) :

1. Ισχύς : 500 – 5000kW
2. Διάμετρος δρομέα : 40 – 120m
3. Δρομείς τριών πτερυγίων
4. Ύψος : 50 – 120m
5. Εύρος ταχυτήτων ανέμου : 3 - 30m/s
6. Ονομαστική ταχύτητα ανέμου : 12 – 16m/s
7. Ονομαστική ταχύτητα δρομέα : 12 – 40 rpm
8. Εύρος ταχυτήτων δρομέα : 8 – 40 rpm
9. Κόστος : περίπου 1000 ευρώ/kW

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει κατά κράτος οι Α/Γ οριζοντίου άξονα με δυο ή τρία πτερύγια με ποσοστά άνω του 90%. Για το λόγο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των τμημάτων που αποτελούν μια τυπική Α/Γ οριζοντίου άξονα.

Α) Δρομέας (ΚΑΠΕ, n.d.) (Μπεργελές, 2005)

Ο σχεδιασμός του δρομέα αποτελεί το σημαντικότερο ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος, καθώς ο στόχος είναι να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των διαφόρων παραμέτρων που συνθέτουν το δρομέα όπως η ταχύτητα περιστροφής, η διάμετρος δρομέα, ο αριθμός πτερυγίων κ.α.. Συνήθως το κριτήριο επιλογής είναι ένας συνδυασμός μεγιστοποίησης της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας με το ελάχιστο κόστος παραγωγής της. Αποτελούνται από δυο ή τρία πτερύγια με μορφή πτερυγίων των ελίκων των αεροσκαφών. Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων δεν έχουν ξεκαθαρίσει ακόμα. Έτσι παρατηρούμε ότι σε μικρές Α/Γ τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ξύλο, υαλόνημα ή πολυουρεθάνη, σε μεσαίου μεγέθους υαλόνημα και τέλος σε μεγάλο μεγέθους χρησιμοποιούνται ανθρακονήματα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα τους.

Β) Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών ή αλλιώς κιβώτιο ταχυτήτων (για τις μεγάλες Α/Γ, καθώς οι μικρές συνήθως δεν έχουν), το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.

Γ) Ηλεκτρική γεννήτρια

Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι σύγχρονη ή επαγωγική η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Δ) Σύστημα πέδησης

Η ακινητοποίηση του δρομέα μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Αυτοί είναι :

- Μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου ή και ενεργοποίησης της αεροπέδης στο ακροπτερύγιο
- Στροφή του ίδιου του δρομέα ώστε να γυρίζει παράλληλα προς τον άνεμο
- Αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης του πτερυγίου με την ενεργοποίηση αεροπέδης
- Πέδηση του άξονα

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι ο τελευταίος και υλοποιείται με τη χρήση ενός συνηθισμένου δισκόφρενου που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.

Ε) Σύστημα προσανατολισμού

Το σύστημα προσανατολισμού αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. Έτσι σε Α/Γ με ανάντη τοποθέτηση δρομέα μικρού ή μεσαίου μεγέθους χρησιμοποιείται καθοδηγητικό πτερύγιο (ουρά) ενώ σε μεγαλύτερου μεγέθους Α/Γ χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από ανεμοδείκτη.

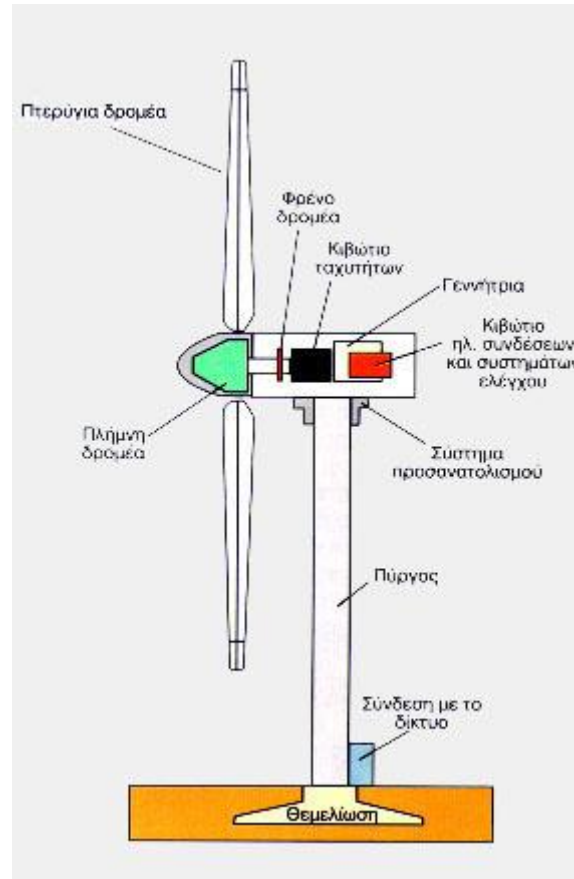
Στις Α/Γ με κατάντη τοποθέτηση του δρομέα δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού αλλά παρουσιάζονται άλλα προβλήματα όπως αυξημένος θόρυβος και αυξημένες καταπονήσεις στα πτερύγια.

Στ) Πύργος

Ο πύργος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανική εγκατάσταση. Οι επικρατέστεροι τύποι πύργων είναι ο σωληνωτός και ο τύπου δικτυώματος. Κριτήρια επιλογής μεταξύ των δυο τύπων είναι το κόστος, η ευκολία μεταφοράς στον τόπο εγκατάστασης και η ευκολία ανέγερσης. Ο σωληνωτός είναι αισθητικά πιο ωραίος, το εσωτερικό του μπορεί να αποτελεί θάλαμο στέγασης όλων των οργάνων της Α/Γ και να έχει εσωτερική σκάλα ή και ανελκυστήρα πρόσβασης στο κουβούκλιο στην κορυφή. Ωστόσο παρουσιάζει δυσκολία στη μεταφορά και στην εγκατάσταση, ενώ έχουν παρατηρηθεί και φαινόμενα συντονισμού λόγω χαμηλής ιδιοσυχνότητας (μικρότερη από αυτήν του δρομέα). Ο πύργος τύπου δικτυώματος από την άλλη είναι ευκολότερος στη μεταφορά και στην επί τόπου συναρμολόγηση και ανάρτηση, ελαφρύτερος, και φθηνότερος, ενώ έχει υψηλή ιδιοσυχνότητα με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν φαινόμενα συντονισμού.

Ζ) Ηλεκτρονικός πίνακας και πίνακας ελέγχου

Οι πίνακες αυτοί είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Ο πίνακας ελέγχου πιο συγκεκριμένα παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της Α/Γ φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.



Εικόνα 1.6 : Μέρη τυπικής Α/Γ

Παρά τα πολλαπλά οφέλη από τη χρήση των ανεμογεννητριών για την εκμετάλλευση μιας ήπιας μορφής ενέργειας όπως είναι η αιολική, υπάρχουν και κάποιες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Αυτές συγκεντρωτικά είναι (Κανελοπούλου, 2008):

- Αλλοίωση της αισθητικής του περιβάλλοντος χώρου.
- Κλιματικές αλλοιώσεις.
- Επίδραση στην πανίδα (θάνατοι πουλιών από πρόσκρουση με πύργους ή φτερωτές)
- Ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις
- **Ηχορύπανση**

1.3 Ήχος

Ο ήχος και η ικανότητα του ανθρώπου να τον αντιλαμβάνεται θεωρούνται στις μέρες μας αυτονόητα και σπανίως λαμβάνονται υπόψη τόσο ο ρόλος του στην εξέλιξη και στην επιβίωση του ανθρώπινου είδους όσο και στην καθημερινότητα. Ο ήχος είναι ένας από τους κύριους τρόπους επικοινωνίας, εντόπισης τροφής και αντίληψης κινδύνων. Μπορεί να προκαλέσει τέρψη με το άκουσμα μουσικής ή μιας ευχάριστης μελωδίας, ωστόσο μπορεί να προκαλέσει και δυσφορία με τη μορφή θορύβου. Ο θόρυβος θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

1.3.1 Τι είναι ήχος; (Wang, et al., 2006)

Δόνηση είναι η περιορισμένη παλινδρομική κίνηση ενός σωματιδίου ενός ελαστικού σώματος ή μέσου σε εναλλασσόμενες αντίθετες κατευθύνσεις από τη θέση ισορροπίας του, όταν αυτή διαταραχθεί. Για να μπορέσει να δονηθεί ένα σύστημα θα πρέπει να έχει δυο χαρακτηριστικά, ελαστικότητα και μάζα. Το πλάτος της δόνησης είναι η μέγιστη μετατόπιση του δονούμενου τμήματος ή σώματος από τη θέση ισορροπίας του.

Ο ήχος ορίζεται ως δονήσεις που διαδίδονται μέσω ενός ελαστικού μέσου, στερεού, υγρού ή αέριου με συχνότητα η οποία είναι ανιχνεύσιμη από το ανθρώπινο αυτί. Πιο απλά ο ήχος είναι οποιαδήποτε μεταβολή της πίεσης σε ένα μέσο την οποία αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος.

1.3.2 Διάκριση των ήχων

Ο ήχος διακρίνεται σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες. Αυτές είναι:

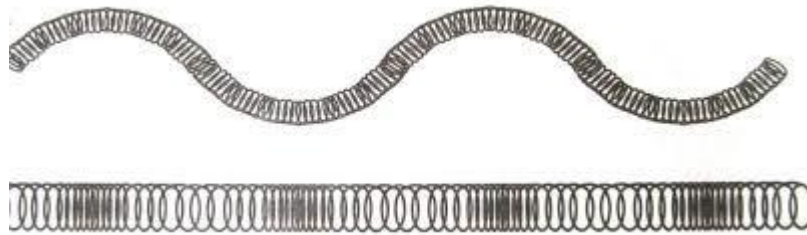
- Απλός ήχος ή τόνος ο οποίος οφείλεται σε αρμονική ταλάντωση ορισμένης συχνότητας
- Φθόγγος ή σύνθετος ήχος που μπορεί να αναλυθεί σε πολλούς απλούς ήχους των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους συχνότητας.
- Θόρυβος, αντιστοιχεί σε ακανόνιστα ηχητικά κύματα χωρίς περιοδικότητα.
- Κρότος, ήχος με απότομη μεταβολή της εντάσεως του και μικρή διάρκεια.

1.3.3 Διάδοση του ήχου

Όταν αναφερόμαστε σε διάδοση ήχου αναφερόμαστε σε διάδοση ηχητικών κυμάτων. Ένα ηχητικό κύμα παράγεται από ένα δονούμενο σώμα και μπορεί να οριστεί ως μια μηχανική διαταραχή που μεταδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα μέσω ενός ελαστικού μέσου. Συνεπώς στο απόλυτο κενό δεν μεταδίδεται ηχητική ενέργεια.

Τα κύματα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που διαδίδονται, στα διαμήκη και στα εγκάρσια. Διαμήκη κύματα ονομάζονται αυτά που διαδίδονται παράλληλα στη διεύθυνση ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης. Εγκάρσια κύματα είναι αυτά που διαδίδονται κάθετα

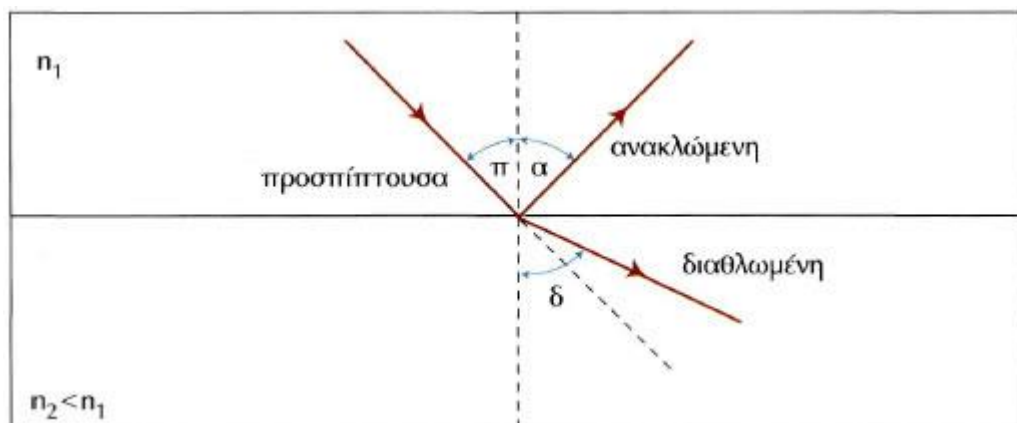
στη διεύθυνση ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης (Αποπ., 2014). Στα υγρά και στα αέρια τα ηχητικά κύματα διαδίδονται πάντα ως διαμήκη, ενώ στα στερεά διαδίδονται είτε ως διαμήκη είτε ως εγκάρσια.



Εικόνα 1.7 : Διαμήκες και εγκάρσιο κύμα

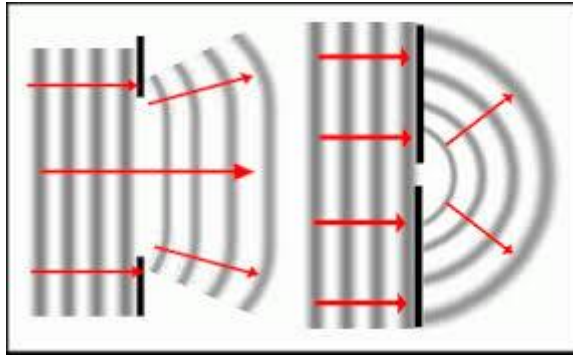
Κατά τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε κάποια χαρακτηριστικά φαινόμενα. Τα φαινόμενα αυτά είναι:

- Η ανάκλαση. Ανάκλαση παρατηρείται όταν στο μέσο διάδοσης του κύματος παρεμβάλλεται μια διαχωριστική επιφάνεια η οποία προκαλεί αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος. Σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης η γωνία πρόσπτωσης του κύματος με την διαχωριστική επιφάνεια είναι πάντα ίση με την γωνία ανάκλασης.



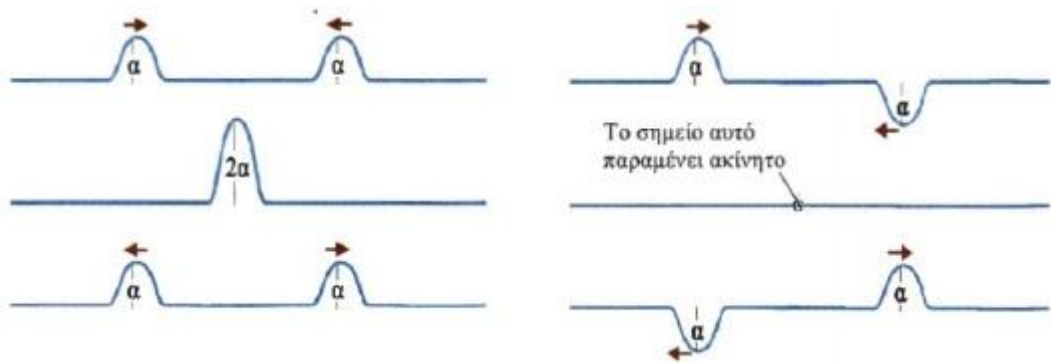
Εικόνα 1.8 : Φαινόμενα ανάκλασης και διάθλασης

- Η διάθλαση. Διάθλαση είναι η αλλαγή κατεύθυνσης ενός διαδιδόμενου κύματος από ένα μέσο σε ένα άλλο με διαφορετικές ιδιότητες (π.χ. πυκνότητα, θερμοκρασία).
- Η περίθλαση. Περίθλαση είναι η ικανότητα των ηχητικών κυμάτων να απλώνονται είτε όταν διαπερνούν ένα εμπόδιο δια μέσου μιας οπής είτε όταν περνούν γύρω του.



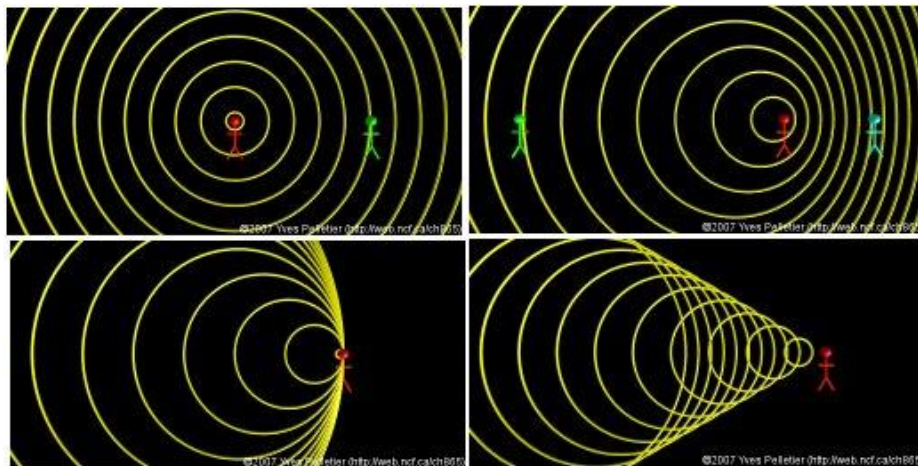
Εικόνα 1.9 : Φαινόμενο περίθλασης

- Η συμβολή. Όταν ηχητικά κύματα παραγόμενα από δυο διαφορετικές πηγές διαδίδονται στο ίδιο μέσο, τότε η συνολική διατάραξη που επιδέχεται κάθε μάζα προκύπτει από το άθροισμα των μετατοπίσεων που θα της προκαλούσε κάθε κύμα ξεχωριστά.



Εικόνα 1.10 : Φαινόμενο συμβολής

- Φαινόμενο Doppler. Το φαινόμενο Doppler είναι η αντίληψη διαφορετικής συχνότητας του ίδιου ηχητικού κύματος όταν η πηγή και ο παρατηρητής βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους. Αυτό που παρατηρείται είναι η αύξηση της συχνότητας του ήχου όταν η ηχητική πηγή πλησιάζει έναν παρατηρητή, ενώ το ακριβώς αντίθετο παρατηρείται όταν παρατηρητής και πηγή απομακρύνονται.



Εικόνα 1.11 : Φαινόμενο Doppler

1.3.4 Χαρακτηριστικά του ήχου

Συγκεντρωτικά, τα χαρακτηριστικά του ήχου μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται τα χαρακτηριστικά εκείνα που είναι ανεξάρτητα από την προσωπική αντίληψη του ακροατή και ονομάζονται αντικειμενικά. Τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά είναι επιστημονικώς ανιχνεύσιμα και μετρήσιμα. Τέτοια είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, το μήκος κύματος, η συχνότητα, η περίοδος και η ένταση. Αντίστοιχα υπάρχουν και υποκειμενικά χαρακτηριστικά όπως το ύψος, η ακουστότητα και η χροιά.

Ταχύτητα διάδοσης κύματος ονομάζεται η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το ηχητικό κύμα στο μέσο διάδοσης και εξαρτάται τόσο από το υλικό στο οποίο διαδίδεται όσο και από τη θερμοκρασία του υλικού, ενώ διέπεται από το θεμελιώδη νόμο της κυματικής:

$$u = f \cdot \lambda$$

Εξίσωση 1.1

Όπου u η ταχύτητα διάδοσης του κύματος,

f η συχνότητα ταλάντωσης και

λ το μήκος κύματος.

- Στα στερεά η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού μέσου. Αποδεικνύεται ότι :

$$u = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Εξίσωση 1.2

Όπου B το μέτρο ελαστικότητας του όγκου και

ρ η πυκνότητα

- Για τα αέρια ισχύει:

$$u = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}}$$

Εξίσωση 1.3

$$, \text{ όπου } \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

C_p και C_v είναι ειδικές θερμότητες υπό σταθερή πίεση και όγκο αντίστοιχα,

Τ η θερμοκρασία σε Kelvin και τέλος

$R=8.3144621 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ η σταθερά των ιδανικών αερίων.

- Ειδικότερα για τη διάδοση ήχου στον αέρα σε ελεύθερο πεδίο και για θερμοκρασίες από 0 έως 30°C ισχύει με μεγάλη ακρίβεια η παρακάτω σχέση (Wang, et al., 2005):

$$u = 331 + 0.6T_c$$

Εξίσωση 1.4

Όπου T_c η θερμοκρασία σε °C.

Ο ήχος κινείται με μεγάλες ταχύτητες στα στερεά, μεσαίες ταχύτητες στα υγρά και μικρές ταχύτητες στα αέρια, ενώ παράλληλα πρέπει να σημειωθεί ότι διαδίδεται γρηγορότερα σε θερμά σώματα σε σύγκριση με κρύα. Για παράδειγμα ο ήχος στα ασφάλι μεταφέρεται με 6000m/s, στο νερό με 1480m/s ενώ στον αέρα με 344m/s περίπου. Αντίστοιχα η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα σε θερμοκρασία 0°C είναι περίπου 330m/s ενώ σε θερμοκρασία 100°C είναι 386m/s.

Συχνότητα ορίζεται ως ο αριθμός των μεταβολών της πίεσης ανά δευτερόλεπτο, συμβολίζεται με f και μετριέται σε Hz. Η συχνότητα χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο τόνος κάθε ήχου. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο οξύτερος είναι ο ήχος, ενώ όσο χαμηλότερη είναι τόσο πιο μπάσος είναι ο ήχος. Ένα φυσιολογικό άτομο αντιλαμβάνεται συχνότητες από 20Hz μέχρι 20.000Hz (ή 20kHz). Προφανώς υπάρχουν ήχοι με συχνότητα εκτός των ορίων της ανθρώπινης ακοής. Οι ήχοι αυτοί δεν γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο. Ωστόσο άλλοι οργανισμοί με διαφορετικό ακουστικό φάσμα ενδέχεται να τους αντιλαμβάνονται. Για παράδειγμα το δελφίνι έχει ακουστικό φάσμα από 150 έως 150.000Hz. Ήχοι με συχνότητα κάτω των 20Hz ονομάζονται υπόηχοι. Υπόηχοι παράγονται τόσο από φυσικά φαινόμενα (σεισμοί, μεταβολές ατμοσφαιρικής πίεσης) όσο και από ανθρώπινη δραστηριότητα (συστήματα εξαερισμού) και έχει παρατηρηθεί ότι αν και δεν είναι ακουστοί από τον άνθρωπο μπορούν να προκαλέσουν βιολογικές διαταραχές. Ήχοι με συχνότητα μεγαλύτερη των 20kHz ονομάζονται υπέρηχοι. Οι υπέρηχοι δεν είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο σε αντίθεση με τους υπόηχους, ενώ μάλιστα χρησιμοποιούνται στην ιατρική και στη φυσιοθεραπεία.

Περίοδος ονομάζεται η διάρκεια του χρόνου μέσα στον οποίο ένα περιοδικό φαινόμενο ολοκληρώνει μια πλήρη επανάληψη. Είναι το αντίστροφο της συχνότητας, συμβολίζεται με T και μετριέται σε δευτερόλεπτα (sec).

Μήκος κύματος ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος. Από την κυματική θεωρία γνωρίζουμε ότι το μήκος κύματος είναι το πηλίκο μεταξύ της ταχύτητας του κύματος και της συχνότητας του. Συνεπώς παρατηρούμε ότι είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη συχνότητα του και αυτό με τη

σειρά του οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ήχοι υψηλής συχνότητας έχουν μικρό μήκος κύματος, ενώ ήχοι χαμηλής συχνότητας έχουν μεγάλο μήκος κύματος.

Ένταση του ήχου ορίζεται η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που διαπερνά κάθετα μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού. Είναι δηλαδή η ισχύς ανά εμβαδό, μετριέται σε watts/m^2 , συμβολίζεται με I και η εξίσωσή της είναι:

$$I = \left(\frac{E}{t}\right) \frac{1}{A}$$

Εξίσωση 1.5

Η ένταση αλλιώς περιγράφεται ως εύρος μεταβολής της πίεσης. Ο ασθενέστερος ήχος που μπορεί να αντιληφθεί ένας άνθρωπος έχει εύρος $20\mu\text{Pa}$, ενώ ο ισχυρότερος ήχος είναι έως και ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερος 200N/m^2 . Παρατηρούμε δηλαδή ότι η ανθρώπινη αντίληψη για τον ήχο δεν είναι γραμμική με την ακουστική πίεση. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι αν η μέτρηση του ήχου γινόταν σε Pa θα προέκυπταν μεγάλα και δύσχρηστα ποσά. Για τον λόγο αυτό έχει εισαχθεί μια ειδική μονάδα, το bel (προς τιμήν του Alexander Graham Bell) που συγκρίνει τις εντάσεις δυο ήχων αντί για τη χρήση των απόλυτων μεγεθών τους. Η εξίσωση που ορίζει το bel είναι:

$$1\text{bel} = \log_{10}\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

Εξίσωση 1.6

Από τη εξίσωση αντιλαμβανόμαστε ότι αν δυο ήχοι διαφέρουν κατά ένα bel ο ένας έχει δεκαπλάσια ένταση σε σχέση με τον άλλο. Επειδή η μονάδα bel είναι μεγάλη χρησιμοποιείται το decibel(dB), το ένα δέκατο του bel. Το decibel δεν είναι μια απόλυτη μονάδα μέτρησης αλλά μια αναλογία μεταξύ ενός μετρούμενου μεγέθους και ενός συμφωνημένου επιπέδου αναφοράς. Ως ηχητική πίεση αναφοράς χρησιμοποιούνται τα $20\mu\text{Pa}$. Το κατώφλι ακοής ορίζεται ως 0dB. Επομένως για κάθε ηχητική πίεση εκφρασμένη σε $20\mu\text{Pa}$ πολλαπλασιασμένη επί 10 προστίθενται 20dB. Με αυτόν τον τρόπο αφού τα $20\mu\text{Pa}$ αντιστοιχούν σε 0dB, τα $200\mu\text{Pa}$ αντιστοιχούν σε 20dB ενώ η μέγιστη ηχητική πίεση που δέχεται χωρίς να προκληθεί πρόβλημα στο ανθρώπινο αφτί ($1.000.000*20\mu\text{Pa}$) μεταφράζεται σε 120dB. Ο πόνος αρχίζει στα 140dB.

Η κλίμακα των dB παρέχει μια πολύ καλύτερη προσέγγιση της αντίληψης από τον άνθρωπο της σχετικής ακουστότητας του ήχου συγκριτικά με την κλίμακα των μPa . Αυτό συμβαίνει επειδή το ανθρώπινο αφτί αντιδρά σε λογαριθμική μεταβολή της στάθμης ηχητικής πίεσης. Είναι σημαντικό να τονίσουμε κάποιες σημαντικές ιδιότητες της κλίμακας decibel σχετικά με την ανθρώπινη αντίληψη του ήχου. Για κάθε αύξηση της ηχητικής πίεσης κατά 10dB, πραγματοποιείται διπλασιασμός της έντασης του ήχου, ενώ ανάλογα ισχύει ότι για κάθε υποδιπλασιασμό της έντασης

του ήχου έχουμε μείωση της ηχητικής πίεσης κατά 10 dB (Δρίβας, 2005). Μια άλλη ιδιαιτερότητα είναι ότι μια αλλαγή 3 dB έχει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα όσον αφορά το πώς καταλαβαίνουμε το θόρυβο, ανεξάρτητα από το αρχικό του επίπεδο. Δηλαδή μια αλλαγή από τα 50 στα 53 dB θα προκαλέσει την ίδια αίσθηση όσο μια αλλαγή από τα 70 στα 73 dB. Τέλος άλλη μια σημαντική ιδιότητα είναι η μείωση της έντασης του θορύβου κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης ανάμεσα στην πηγή και στο δέκτη (Wall, 2000). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με την αντιστοιχία dB σε μPa και τα αντίστοιχα καθημερινά φαινόμενα με αυτά τα επίπεδα ηχητικής πίεσης.

Στάθμη ηχητικής πίεσης σε ντεσιμπέλ (dB)	Ηχητική πίεση σε μικροπασκάλ (μPa)	Συνθήκες περιβάλλοντος
0	20	Κατώφλι της ακοής
10	63	Θρόσισμα των φύλλων των δέντρων
20	200	Στούντιο ηχογραφήσεων
30	630	Υπνοδωμάτιο τη νύχτα
40	2.000	Βιβλιοθήκη
50	6.300	Ήσυχο γραφείο
60	20.000	Συνομιλία (1 m από το στόμα του ομιλούντος)
70	63.000	Μέση ένταση ραδιοφώνου
74	100.000	Ελαφρά τροχαία κίνηση
80	200.000	Τυπικό εργοστάσιο
90	630.000	Μετρό
100	2.000.000	Συμφωνική ορχήστρα (fortissimo)
110	6.300.000	Ορχήστρα ροκ
120	20.000.000	Απογείωση αεροσκάφους (στα 25 m)
140	200.000.000	Όριο του πόνου

Πίνακας 1.1 : Αντιστοιχία dB με μPa και καθημερινά ηχητικά φαινόμενα

Από τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά ενός ηχητικού κύματος που περιγράφηκαν παραπάνω πηγάζουν τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά με τα οποία γίνεται αντιληπτό το κύμα από το ανθρώπινο αφτί.

Ακουστότητα είναι το χαρακτηριστικό εκείνο βάσει του οποίου αντιλαμβάνεται κάθε άνθρωπος ξεχωριστά αν ένας ήχος είναι ισχυρός ή ασθενής. Με άλλα λόγια είναι το μέγεθος του προκαλούμενου ακουστικού αισθήματος και εξαρτάται από το πλάτος, τη συχνότητα και το είδος του ήχου. Το ανθρώπινο αφτί δεν παρουσιάζει την ίδια ευαισθησία σε όλες τις συχνότητες. Η διαφοροποίηση της ευαισθησίας ανάλογα με τη συχνότητα είναι πιο έντονη στις χαμηλές στάθμες ηχητικής πίεσης σε σύγκριση με τις υψηλές. Έτσι κατά τη μέτρηση ακουστικού θορύβου, δεδομένου ότι δυο ήχοι ίσης έντασης αλλά διαφορετικής συχνότητας δεν επηρεάζουν το αίσθημα της ακοής το ίδιο έντονα, κρίνονται υποκειμενικά ως ήχοι διαφορετικής ακουστότητας. Το ακουστικό αίσθημα αυξάνεται βραδύτερα από την ένταση. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι αν ένας ήχος έχει διπλάσια ακουστότητα από έναν άλλο, στην πραγματικότητα έχει δεκαπλάσια ένταση. Τη σύνδεση μεταξύ ακουστότητας και έντασης μελέτησαν οι Weber και Fechner και κατέληξαν στο παρακάτω συμπέρασμα το οποίο είναι γνωστό ως νόμος της ψυχοφυσικής των

Weber & Fechner: το υποκειμενικό αίσθημα (B) οποιουδήποτε εξωτερικού οπτικού ή ακουστικού ερεθίσματος είναι ανάλογο του λογαρίθμου της έντασης (I) του ερεθίσματος.

$$B \approx \log I$$

Εξίσωση 1.7

Ο νόμος Weber – Fechner εξειδικεύεται για τον ήχο ως εξής: το υποκειμενικό αίσθημα του ηχητικού ερεθίσματος είναι η ακουστότητα B η οποία ορίζεται συναρτήσει της έντασης I και μιας σταθερής έντασης I_0 που αντιστοιχεί στο κατώφλι ακοής:

$$B = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

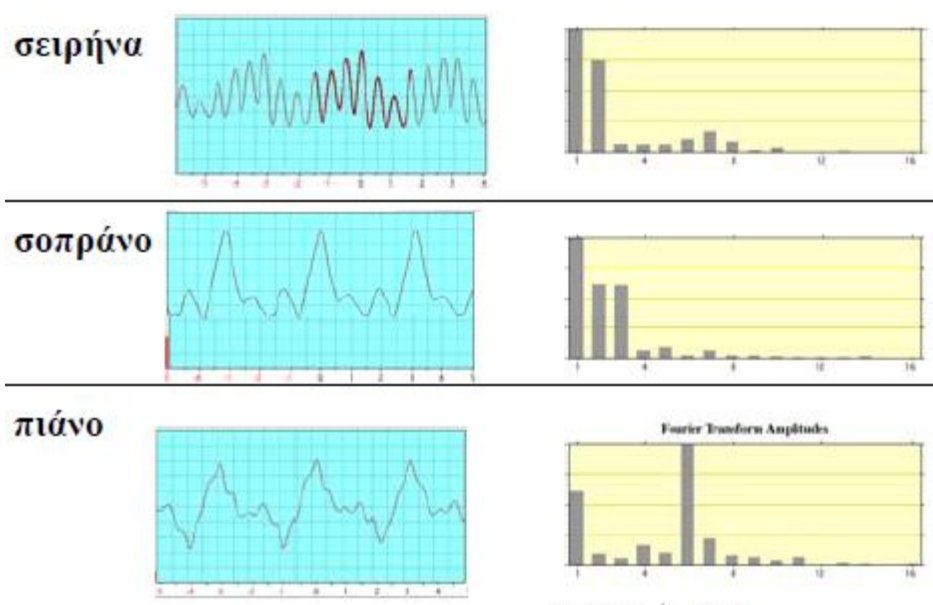
Εξίσωση 1.8

Σε μονάδες dB(decibel), όπου $I_0=10^{-12}$ Watt/m² το κατώφλι ακοής.

Η ηχητική στάθμη αναφοράς των 0dB SPL επιλέχθηκε κατάλληλα ώστε να βρίσκεται κοντά στο μέσο απόλυτο κατώφλι ακουστότητας του ανθρώπου για έναν απλό ήχο (ημιτονοειδή) των 1000Hz. Το απόλυτο κατώφλι ακουστότητας ορίζεται ως η ελάχιστη στάθμη ενός ήχου χωρίς εξωτερικές παρεμβολές που μπορεί να γίνει αντιληπτή. Το μέσο απόλυτο κατώφλι ακουστότητας του ανθρώπου στα 1000Hz είναι περίπου 6,5dB. Ωστόσο σε διαφορετική συχνότητα στο κατώφλι ακουστότητας αντιστοιχεί διαφορετική ένταση ήχου. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται η σχετική ακουστότητα η οποία μετριέται σε phons. Phon είναι η μονάδα μέτρησης της φυσιολογικής έντασης του ήχου και εκφράζει τα dB που θα έπρεπε να έχει ο ήχος συχνότητας 1000Hz ώστε να δίνει το ίδιο ακουστικό συναίσθημα με τον δοθέντα ήχο.

Το ύψος (pitch) του ήχου ενώ είναι τόσο ξεκάθαρο να το αντιληφθούμε, παραμένει δύσκολο να οριστεί εύστοχα. Σύμφωνα με το αμερικάνικο εθνικό ινστιτούτο προτύπων (American National Standards Institute – ANSI) ορίζεται ως: «ύψος είναι το χαρακτηριστικό της ακουστικής αίσθησης σύμφωνα με το οποίο οι ήχοι μπορούν να παραταχθούν σε μια σκάλα που εκτείνεται από χαμηλά σε ψηλά». Από το πρότυπο επισημαίνεται επίσης ότι «το ύψος εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα σε συχνότητες του ακουστικού ερεθίσματος, αλλά επίσης εξαρτάται και από την ηχητική πίεση και την κυματομορφή του ερεθίσματος». (Ballou, 2008) (ANSI, 1994) Απλούστερα, ύψος είναι το υποκειμενικό χαρακτηριστικό εκείνο το οποίο περιγράφει την απόκριση του αφτιού στην συχνότητα. Όσο μεγαλύτερη συχνότητα έχει ένα ηχητικό κύμα, τόσο πιο οξύς είναι ο ήχος, ενώ αντίστοιχα όσο μικρότερη συχνότητα έχει τόσο πιο βαρύς είναι (Σπυρίδης, 1988)

Χροιά (timbre) του ήχου είναι η αντίληψη μας για το χρώμα του ήχου. Είναι το χαρακτηριστικό εκείνο που επιτρέπει τη διάκριση δυο ήχων του ίδιου ύψους και της ίδιας ακουστότητας που παράγονται από διαφορετικές πηγές. Η χροιά αναφέρεται σε σύνθετους ήχους και εξαρτάται από τους απλούς ήχους οι οποίοι συνθέτουν τους ήχους αυτοί. Κάθε περιοδικός ήχος μπορεί να αναλυθεί σε ένα άθροισμα συνημιτονικών συναρτήσεων με διάφορα πλάτη και φάσεις αλλά και συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους συχνότητας. Οι συχνότητες αυτές αποκαλούνται αρμονικές. Το πλήθος και το σχετικό πλάτος των αρμονικών αυτών είναι υπεύθυνο για το υποκειμενικό αίσθημα της χροιάς ενός ήχου. Μάλιστα, το 1960 στα εργαστήρια Bell-ΗΠΑ μελετήθηκε το φαινόμενο αυτό. Καταγράφηκαν ήχοι σειρήνας, σοπράνο και πιάνου με την ίδια συχνότητα και ένταση. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε το συμπέρασμα ότι αν κόψουμε τις ανώτερες αρμονικές, οι ήχοι μεταξύ τους είναι ίδιοι.



Εικόνα 1.12 : Χροιά ηχητικού σήματος

1.4 Ήχος και άνθρωπος

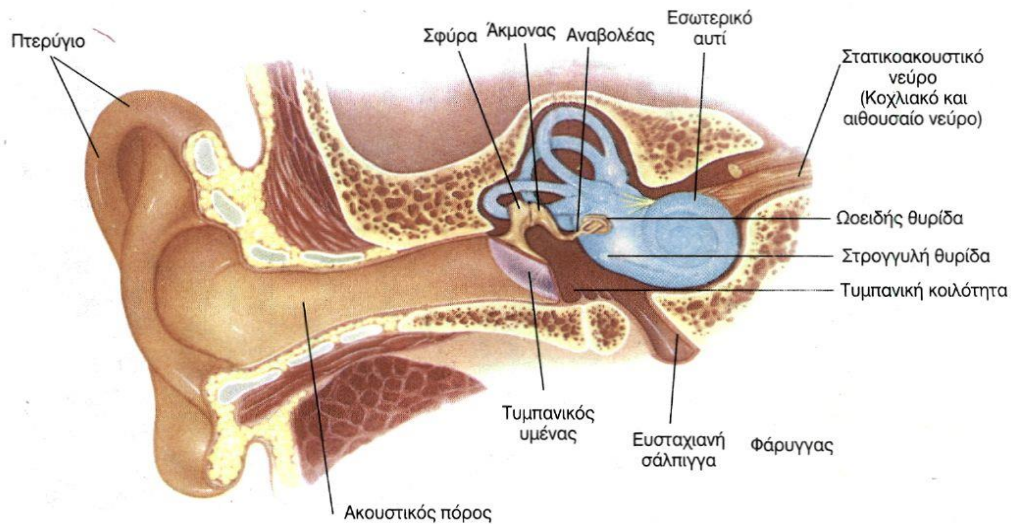
1.4.1 Ανατομία και μηχανισμός λειτουργίας του αφτιού

Μελετώντας την επιστήμη της ακουστικής δεν είναι δυνατό να μην αναφερθούμε στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα. Το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα είναι εντυπωσιακό αλλά και πολυσύνθετο. Δουλειά του είναι να μετατρέπει τις μεταβολές πίεσης στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο επεξεργάζεται ο εγκέφαλος και μετατρέπει στον ήχο τον οποίο αντιλαμβάνεται ο ακροατής. Το αισθητήριο όργανο της ακοής του ανθρώπου είναι το αφτί. Το όργανο αυτό περικλείεται στο κροταφικό οστό και διαιρείται σε τρία μέρη, το εξωτερικό αφτί, το μέσον αφτί και τέλος το εσωτερικό αφτί.

Το *εξωτερικό αφτί* αποτελείται από το πτερύγιο (χοάνη αγωγής ηχητικών κυμάτων) και έξω τον ακουστικό πόρο, ο οποίος καταλήγει στην τυμπανική μεμβράνη ή τύμπανο το οποίο χωρίζει το εξωτερικό από το μέσον αφτί. Η τυμπανική μεμβράνη είναι μια λεπτή λειτουργική μεμβράνη με πάχος 0.1mm και εμβαδό 65mm². Το πλάτος των ταλαντώσεων του τυμπάνου μπορεί να φτάσει τα 10⁻¹¹m ενώ σε ηχητικές εντάσεις πάνω από 160dB μπορεί να υποστεί διάτρηση.

Το *μέσο αφτί* είναι μια αεροφόρος κοιλότητα στην οποία βρίσκονται τρία ακουστικά οστά: η αλλιώς ακουστική άλυσος που είναι η σφύρα, ο άκμονας και ο αναβολέας. Τα οστά αυτά λειτουργούν ως ένα σύστημα γωνιακών μοχλών, για να δημιουργούν ηχητικές δονήσεις στο έσω ους. Ο χώρος μεταξύ τυμπανικού υμένα και του έσω ωτός ονομάζεται το κοίλο του τυμπάνου. Μέρος του μέσου αφτιού είναι και η ευσταχιανή σάλπιγγα η οποία αποτελεί αεραγωγό σωλήνα μέσω του οποίου το μέσο αφτί επικοινωνεί με τον ρινοφάρυγγα. Η λειτουργία της ευσταχιανής σάλπιγγας είναι η εξισορρόπηση της πίεσης του αέρα στις δυο πλευρές του τυμπάνου. Τέλος, άλλο ένα τμήμα του μέσου ου είναι η μαστοειδής απόφυση που αποτελεί τη συνέχεια του και παριστά μια οστέινη αεροφόρο δομή του κροταφικού οστού του κρανίου.

Το *έσω αφτί* ονομάζεται και λαβύρινθος λόγω της πολύπλοκης κατασκευής του. Μέσα στον λαβύρινθο υπάρχει ένα υγρό που λέγεται λέμφος. Τα βασικά τμήματα του είναι ο κοχλίας, η αίθουσα και οι τρεις ημικυκλικοί σωλήνες. Στο τοίχωμα του κοίλου του τυμπάνου που αντιστοιχεί στην αίθουσα υπάρχουν δυο οπές, η ωσειδής και η στρογγυλή θυρίδα. Ο κοχλίας είναι ένας ελικοειδής σωλήνας και μέσα σε αυτόν βρίσκεται το αισθητήριο όργανο της ακοής ή όπως είναι γνωστό όργανο του Corti. Από το έσω αφτί, τέλος, ξεκινά το ακουστικό νεύρο που καταλήγει στα αντίστοιχα εγκεφαλικά κέντρα του ακουστικού φλοιού του εγκεφάλου. Μικροσκοπικά τριχίδια που συνδέονται με τις απολήξεις του ακουστικού νεύρου καλύπτουν το εσωτερικό του κοχλίου. Το ακουστικό νεύρο ανατομικά διαιρείται στο αιθουσαίο και στο κοχλιακό. Το πρώτο μέρος είναι υπεύθυνο σε συνεργασία με άλλα όργανα όπως τα μάτια για την ισορροπία του σώματος, ενώ το δεύτερο είναι υπεύθυνο για την ακοή.



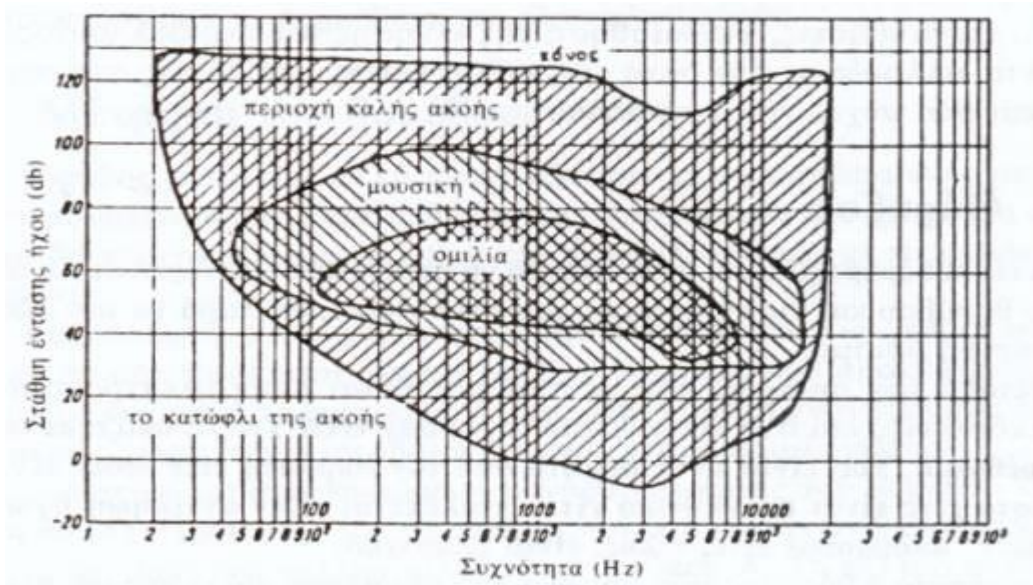
Εικόνα 1.13 : Ανατομία ανθρώπινου αφτιού

Η αίσθηση της ακοής μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες συνιστώσες. Το μηχανικό σύστημα συλλέγει και μεταδίδει της ηχητικές πληροφορίες στα τριχωτά κύτταρα του κοχλία. Τα αισθητήρια κύτταρα μετατρέπουν τον μηχανικό παλμό σε ηλεκτρικό (νευρικό) ο οποίος με τη σειρά του μεταδίδεται μέσω των κοχλιακών νεύρων στον εγκέφαλο. Τα σήματα αυτά μεταφέρονται στον ακουστικό φλοιό του εγκεφάλου όπου και αποκωδικοποιούνται και παρέχουν την αντίστοιχη πληροφορία στον εγκέφαλο. Πιο συγκεκριμένα τα ηχητικά κύματα του περιβάλλοντος προκαλούν τη δόνηση του τυμπάνου. Αυτές οι δονήσεις συνεχίζουν περνώντας μέσα από τα οστάρια του μέσου ωτός και προς το έσω ου διαμέσου της ωοειδούς θυρίδας. Από εκεί μεταδίδονται στο υγρό του κοχλία, όπου οι μικροσκοπικές τρίχες αισθάνονται τις δονήσεις και τις μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα που μεταδίδονται στον εγκέφαλο μέσω του ακουστικού νεύρου.

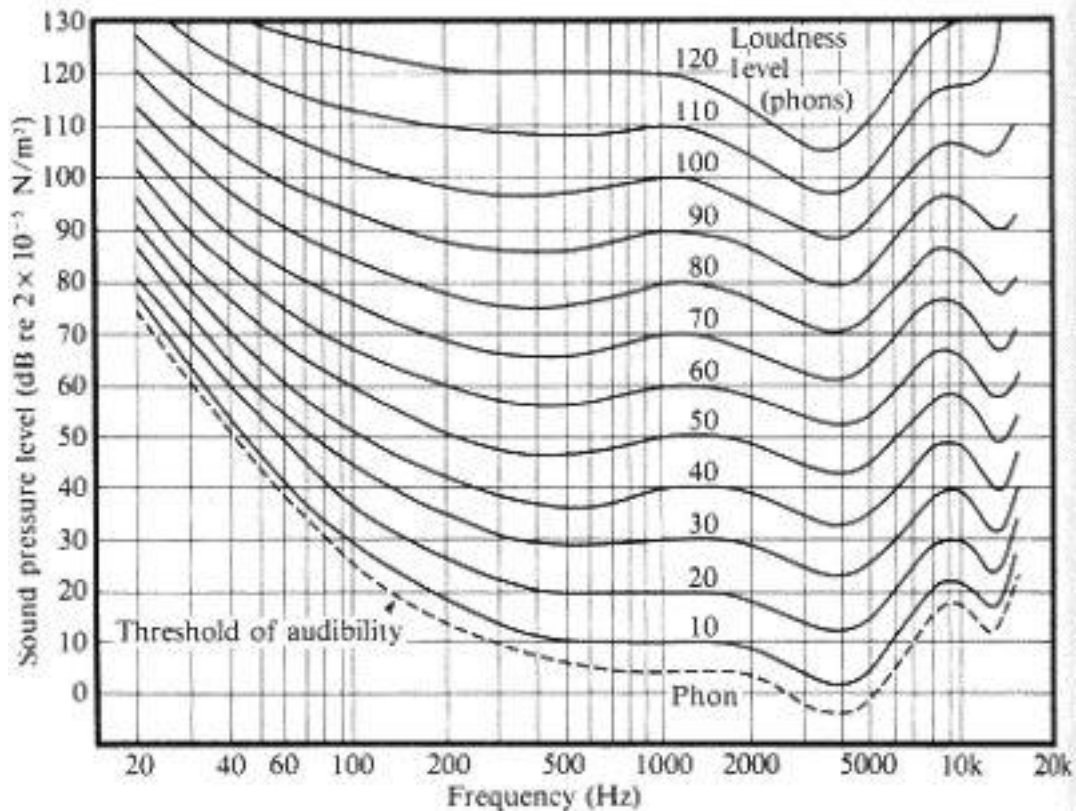
1.4.2 Η συχνотική απόκριση του ανθρώπινου αφτιού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για να γίνει αντιληπτός ένας ήχος από τον άνθρωπο θα πρέπει να πληροί δυο προϋποθέσεις. Αφενός θα πρέπει ο ήχος να βρίσκεται εντός του ανθρώπινου ακουστικού φάσματος, δηλαδή να έχει συχνότητα από 16Hz έως 20 kHz και αφετέρου να έχει κατάλληλη ένταση ώστε να γίνεται αντιληπτός από το ανθρώπινο αφτί. Το κατώφλι ακουστότητας, η ελάχιστη ένταση δηλαδή που απαιτείται για να γίνει αντιληπτός ένας ήχος είναι συνάρτηση της συχνότητας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξάρτηση της έντασης του ήχου που αντιλαμβανόμαστε από τη συχνότητα του ήχου. Για διαφορετικές συχνότητες ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται διαφορετικά την ένταση του ήχου. Μεγαλύτερη ευαισθησία παρουσιάζεται στις συχνότητες από 1 kHz μέχρι 5 kHz, που αποτελούν και τις συχνότητες της ανθρώπινης ομιλίας, όπως φαίνεται από την εικόνα 1.14. Αντίστοιχα υπάρχει και το όριο πόνου που είναι η καμπύλη που αντιστοιχεί στην υψηλότερη στάθμη του ήχου πάνω από την οποία επέρχεται πόνος (Rossing, 2013). Στο διάγραμμα 1.15 παρουσιάζεται η συσχέτιση του πραγματικού ήχου με τον ήχο

που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος για όλες τις συχνότητες του ανθρώπινου ακουστικού φάσματος. Οι καμπύλες αυτές είναι γνωστές και ως καμπύλες Fletcher και Munson. Οι δυο ερευνητές κατασκεύασαν μια δέσμη καμπυλών ελάχιστης ακουστότητας όπου φαίνεται ότι η ευαισθησία της ακοής μεταβάλλεται όχι μόνο με τη συχνότητα αλλά και με την ένταση. Όσο μικρότερη είναι η ένταση τόσο μικρότερη η ευαισθησία της ακοής και τόσο μεγαλύτερη στάθμη απαιτείται για να γίνει ακουστή μια συγκεκριμένη συχνότητα.



Εικόνα 1.14 : Απόκριση ανθρώπινου αφτιού



Εικόνα 1.15 : Καμπύλες Fletcher και Munson

1.5 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση του ακουστικού θορύβου που παράγεται από μικρές ανεμογεννήτριες. Παραπάνω περιγράφηκαν εισαγωγικές έννοιες όπως ο ήχος και οι ανεμογεννήτριες.

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται η έννοια του θορύβου καθώς επίσης και η προέλευση του σε μηχανές γενικά και σε ανεμογεννήτριες ειδικότερα. Αναφέρονται οι επιπτώσεις της έκθεσης στο θόρυβο ενώ προτείνονται και τρόποι μείωσης του. Παράλληλα εξηγούνται οι μετρήσεις θορύβου και τα διάφορα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή και κατηγοριοποίηση ενός θορύβου.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το πρότυπο IEC 61400.11 καθώς και οι διαδικασίες που αυτό ορίζει για μετρήσεις θορύβου μικρής ανεμογεννήτριας.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται μετρήσεις θορύβου γεννήτριας ανεμογεννήτριας σε εργαστηριακό περιβάλλον. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές

διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές ήταν σε σύνδεση με τριφασικό φορτίο, σε σύνδεση με συσσωρευτές και σε σύνδεση με συσσωρευτές με χρήση φίλτρου αποκοπής αρμονικών ρεύματος. Γίνεται καταγραφή και ανάλυση της επιρροής των αρμονικών στο συνολικό παραγόμενο θόρυβο της γεννήτριας.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται μετρήσεις στο πεδίο δοκιμών. Υπολογίζεται ο εκπεμπόμενος θόρυβος της ανεμογεννήτριας σε συνάρτηση με την ταχύτητα ανέμου ενώ γίνεται και φασματική ανάλυση του θορύβου ανά τριτοκτάβες. Επιπλέον γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων εργαστηρίου με τα αποτελέσματα του πεδίου δοκιμών.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια ανακεφαλαίωση όσων προηγήθηκαν και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις των κεφαλαίων 4 και 5. Τέλος αναφέρονται οι προοπτικές και οι δυνατότητες μεταγενέστερης μελέτης της έρευνας της εργασίας.

2 Θόρυβος

2.1 Θόρυβος

Στις μέρες μας, ως θόρυβος σε καθημερινή χρήση αναφέρεται οποιοσδήποτε ανεπιθύμητος ήχος. Ωστόσο στην πραγματικότητα ο θόρυβος είναι μια ευρύτερη έννοια. Συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει ανεπιθύμητες παρεμβολές ή διαταραχές σε μια διαδικασία. Για το λόγο αυτό υπάρχουν διάφορα ήδη θορύβου που παρουσιάζονται παρακάτω :

- **Ηχητικός θόρυβος.** Ένας ηχητικός θόρυβος μπορεί να αποτελείται από συχνότητες που είτε ακούγονται είτε όχι. Όταν ο θόρυβος αυτός είναι στις συχνότητες του ακουστικού φάσματος του ανθρώπου λέγεται ακουστικός θόρυβος.
- **Θόρυβος δεδομένων.** Στην επιστήμη της πληροφορικής ο θόρυβος συνήθως αφορά παραμορφώσεις σε σύνολα δεδομένων, είτε συστηματικές είτε τυχαίου χαρακτήρα.
- **Ηλεκτρικός θόρυβος.** Στην επιστήμη της ηλεκτρονικής, τόσο τα αναλογικά όσο και τα ψηφιακά συστήματα εμφανίζουν θόρυβο ως αποτέλεσμα του θερμικού θορύβου ο οποίος οφείλεται με τη σειρά του στην κίνηση των φορέων του ηλεκτρικού φορτίου μέσα στο κύκλωμα. Επιπλέον, θόρυβος εμφανίζεται από επαγωγή, εξαιτίας δηλαδή ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών από το περιβάλλον.
- **Οπτικός θόρυβος.** Σε μια οπτική αποτύπωση υπάρχει σχεδόν πάντα οπτικός θόρυβος. Θόρυβος μπορεί να είναι η σκόνη, η βροχή, η ομίχλη και γενικά ότι αλλοιώνει την οπτική πληροφορία που φτάνει σε έναν οπτικό αισθητήρα.
- **Γονιδιακός θόρυβος.** Οι δραστηριότητες και διάφορες διαδικασίες των γονιδίων υπόκεινται στην επίδραση του θορύβου. Για παράδειγμα, κατά τη δημιουργία αντιγράφων γίνονται λάθη, εισάγονται δηλαδή διαφοροποιήσεις (θόρυβος) με αποτέλεσμα την παραγωγή προβληματικών κυττάρων.

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στον ακουστικό θόρυβο και πιο συγκεκριμένα στον ακουστικό θόρυβο που παράγεται από μικρές ανεμογεννήτριες, καθώς επίσης και στον τρόπο μέτρησής του.

2.2 Ακουστικός θόρυβος

Στην επιστήμη της ακουστικής ο θόρυβος ορίζεται με δυο τρόπους (ΕΛΟΤ-556, 1994):

- 1) Κάθε ακανόνιστος απεριοδικός ήχος που η στιγμιαία του τιμή αυξομειώνεται, γενικά με τυχαίο τρόπο
- 2) Κάθε ανεπιθύμητος ήχος

Ακουστικός είναι λοιπόν ο ηχητικός θόρυβος που βρίσκεται σε συχνότητες που μπορεί να συλλάβει η αίσθηση της ακοής. Διαχωρίζεται σε δυο κατηγορίες :

- Στον θόρυβο περιβάλλοντος (ambient noise). Θόρυβος περιβάλλοντος ορίζεται ως ο θόρυβος που εκπέμπεται από συγκεκριμένες πηγές, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος ενός κλιματιστικού σε ένα γραφείο και
- Στον θόρυβο βάθους (background noise) ο οποίος ορίζεται ως ο θόρυβος που εκπέμπεται από όλες τις πηγές που βρίσκονται στο περιβάλλον.

Άλλη μια κατηγοριοποίηση του θορύβου μπορεί να γίνει με βάση τον τρόπο μεταβολής του. Έτσι έχουμε :

- Τον σταθερό θόρυβο, ο οποίος παρουσιάζει αμελητέες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της μέτρησης.
- Τον μεταβλητό θόρυβο, ο οποίος μεταβάλλεται αλλά όχι ραγδαία.
- Τον κυμαινόμενο θόρυβο, ο οποίος αλλάζει συνεχώς και σε μεγάλο βαθμό.

Από τη μαθηματική ανάλυση του θορύβου αποδεικνύεται ότι αποτελείται από άπειρους απλούς ήχους των οποίων οι συχνότητες δεν έχουν καμία σχέση μεταξύ τους. Η χρήση του υποκειμενικού όρου “ανεπιθύμητος” δεν είναι τυχαία. Ο υποκειμενικός παράγοντας παίζει σημαντικότατο ρόλο στην κατάταξη ενός ήχου ως θορύβου, ενοχλητικού ή όχι. Πάρα πολύ συχνά ο ίδιος ήχος είναι για κάποιον ευχάριστος ενώ για κάποιον άλλο αποτελεί ενόχληση. Ακόμα και το ίδιο πρόσωπο, αναλόγως την ψυχική του διάθεση, μπορεί να έχει διαφορετικές αντιδράσεις στο άκουσμα ενός ήχου. Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν αν ένας ήχος θεωρείται θόρυβος είναι (Crocker, 1998):

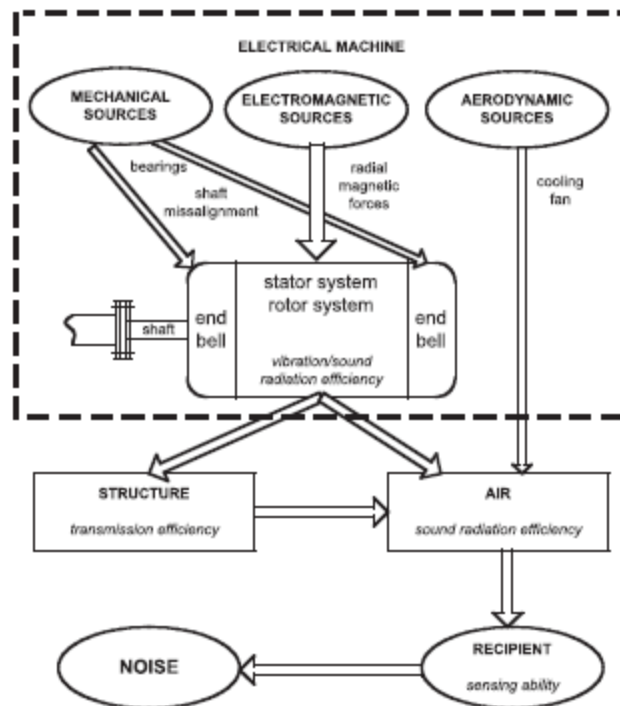
- Επίπεδο ηχητικής πίεσης
- Περιεχόμενο συχνοτήτων ή εύρος ζώνης
- Διάρκεια
- Παρουσία απλών ήχων (τόνοι) ή μεταβατικών καταστάσεων
- Διαλειπτότητα
- Ώρα της ημέρας
- Τοποθεσία ή δραστηριότητα

2.3 Πηγές θορύβου σε ηλεκτρικές μηχανές

Οι δονήσεις και ο θόρυβος που παράγονται από τις ηλεκτρικές μηχανές μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Οι συχνότητες ενδιαφέροντος για τις δονήσεις γενικά είναι από 0 μέχρι 1000Hz ενώ για τον θόρυβο είναι από 1000Hz και άνω. Οι τρεις κατηγορίες είναι (Wang, et al., 2006):

- Ηλεκτρομαγνητικές δονήσεις και θόρυβος που σχετίζονται με παρασιτικά φαινόμενα εξαιτίας ανώτερων αρμονικών, ανισορροπία φάσεων, τυχόν σχισμές στον πυρήνα, μαγνητικό κορεσμό και άλλα.
- Μηχανικές δονήσεις και θόρυβος που σχετίζεται με τη μηχανική διάταξη και πιο συγκεκριμένα με τα ρουλεμάν.

- Αεροδυναμικές δονήσεις και θόρυβος που σχετίζονται με τη ροή του αέρα εξαερισμού δια μέσου ή γύρω από τη μηχανή.



Εικόνα 2.1 : Δημιουργία και μετάδοση θορύβου σε ηλεκτρικές μηχανές.

2.4 Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος σε σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές

2.4.1 Προέλευση ηλεκτρομαγνητικού θορύβου

Οι σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα, τόσο σε οικιακές συσκευές όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι σημαντικό λοιπόν να λειτουργούν παράγοντας όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Για το λόγο αυτό πρέπει να κατανοήσουμε την ακουστική τους συμπεριφορά. Στην ενότητα αυτή θα γίνει ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου των μηχανών αυτών. Ο ακουστικός θόρυβος που εκπέμπεται από μια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα φαινόμενο στο οποίο ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία της μηχανής και η δομή του στάτη αλληλεπιδρούν. Δηλαδή αναφερόμαστε σε δονήσεις και θόρυβο μηχανικής φύσεως που παράγεται ωστόσο εξαιτίας ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχουν τρεις κύριες πηγές θορύβου στις ηλεκτρικές μηχανές, όμως σε μηχανές με ονομαστική ισχύ μικρότερη των 15 kW και ταχύτητα περιστροφής μικρότερη των 1500 ΣΑΛ, όπως στην περίπτωση μας, η κύρια πηγή ακουστικού θορύβου είναι ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης (Beranek & Ver, 2003).

Οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που συνεισφέρουν στη δόνηση και στην παραγωγή θορύβου των ηλεκτρικών μηχανών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες (Torregrossa, et al., 2011). Αυτές είναι :

- 1) Δυνάμεις που δρουν στο στάτη και στο δρομέα. Τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας διεγείρουν κύματα μαγνητικής ροής στο διάκενο με αποτέλεσμα να παράγεται μαγνητική πίεση. Η μαγνητική αυτή πίεση ασκεί δυνάμεις με ακτινικές διευθύνσεις στις ενεργές επιφάνειες τόσο του στάτη όσο και του δρομέα με αποτέλεσμα να προκαλούνται παραμορφώσεις. Ως εκ τούτου αναπτύσσονται δονήσεις και θόρυβος. Μάλιστα οι δυνάμεις αυτές είναι υπεύθυνες για την πλειοψηφία των ακτινικών και εφαπτομενικών δονήσεων στις ηλεκτρικές μηχανές (Wang, et al., 2006).
- 2) Δυνάμεις που δρουν στις ρευματοφόρες περιελίξεις του στάτη. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να αναπτύξουν δονήσεις στα πηνία ικανές να καταστρέψουν τη μόνωση και να δημιουργήσουν βραχυκύκλωμα. Το γεγονός αυτό είναι επικίνδυνο καθώς μπορεί να προκαλέσει μόνιμη βλάβη στα πηνία εξαιτίας του μεγάλου ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται Laplace.
- 3) Η Τρίτη πηγή δονήσεων είναι οι πιεζομαγνητικές δυνάμεις. Οι δυνάμεις αυτές αναπτύσσονται όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό εισέρχεται σε μαγνητικό πεδίο. Ένας βαριά κορεσμένος στάτης που υπόκειται σε ταχέως μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία αναπτύσσει ισχυρές τέτοιες δυνάμεις, οι οποίες μπορούν να αλλάξουν το σχήμα και τις διαστάσεις του. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις οι πιεζομαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται θεωρούνται αμελητέες συγκριτικά με τις ακτινικές και δεν υπολογίζονται (Miniger, et al., 2007).

Εκτός από τις δυνάμεις που αναφέρθηκαν, στην εκπομπή ακουστικού θορύβου συμβάλουν και παλμοί ροπής. Υπάρχουν τρεις πηγές διακύμανσης ροπής σε κάθε ηλεκτρική μηχανή (Wang, et al., 2006) :

- 1) το cogging effect, η αλληλεπίδραση δηλαδή μεταξύ μαγνητικής ροής του δρομέα και της μεταβλητής διαπερατότητας του διακένου εξαιτίας των αυλακώσεων του στάτη. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία της βαρύνουσας ροπής στρέψης (cogging torque).
- 2) Η παραμόρφωση της ημιτονοειδούς κατανομής της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.
- 3) Η διαφορά μεταξύ της διαπερατότητας του διακένου στους δυο άξονες. Συνέπεια του γεγονότος αποτελεί η ανάπτυξη της ροπής απροθυμίας (reluctance torque).

Τέλος άλλος ένας παράγοντας που συμβάλλει στην παρουσία δονήσεων είναι η εκκεντρότητα του δρομέα. Τα πεδία εκκεντρότητας είναι υπεύθυνα για :

- 1) Πρόκληση ανισοροπίας μαγνητικής έλξης. Η ανισοροπία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση του άξονα και να μεγενθύνει περαιτέρω την ανισοροπία της μαγνητικής έλξης.

- 2) Επαγωγή τάσεων στις παράλληλες τροχιές των περιελίξεων του στάτη και τη δημιουργία ρευμάτων εξίσωσης.
- 3) Μείωση της μηχανικής ακαμψίας του άξονα η οποία συνεπάγεται μείωση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα λόγω αυξημένης μαγνητικής έλξης.

Συνολικά, συμπεραίνουμε ότι οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις κυριαρχούν στις δονήσεις και τον ακουστικό ήχο που παράγεται από μια ηλεκτρική μηχανή. Οι δυνάμεις αυτές κατά κύριο λόγο προέρχονται από τις αρμονικές ρεύματος, τις αρμονικές των αυλακώσεων και τη διάταξη των μαγνητών. Όταν μάλιστα η συχνότητα των ασκούντων δυνάμεων είναι παραπλήσια ή συμπίπτει με τη θεμελιώδη συχνότητα του στάτη, επέρχεται συντονισμός και ο κινητήρας μπορεί να παράγει υψηλά επίπεδα θορύβου και υψηλές κορυφές δόνησης (Yu & Tang, 2006).

2.4.2 Έλεγχος ηλεκτρομαγνητικού θορύβου

Για τη μείωση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου έχουν ερευνηθεί τόσο ενεργητικής φύσεως όσο και παθητικής φύσεως μέθοδοι. Οι μέθοδοι ενεργού ελέγχου μειώνουν άμεσα τις δυνάμεις που δρουν στη μηχανή (Miniger, et al., 2008) (Trzynadlowski, 2006), ενώ αυτές του παθητικού ελέγχου ασχολούνται κυρίως με τη γεωμετρία της μηχανής ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα συντονισμού (Lee, et al., 2006) και να μειώνονται με αυτόν τον τρόπο οι δονήσεις και ο παραγόμενος θόρυβος. Στην εργασία αυτή οι μετρήσεις θορύβου έγιναν σε μια υπάρχουσα γεννήτρια ανεμογεννήτριας. Δεν υπήρχε συνεπώς η δυνατότητα να επέμβουμε στη γεωμετρία και στη σχεδιάσή της. Έτσι ασχοληθήκαμε με μεθόδους ενεργητικού ελέγχου και συγκεκριμένα με τη μείωση των αρμονικών ρεύματος και την επίδρασή τους στο συνολικό επίπεδο θορύβου που εκπέμπει η γεννήτρια.

2.4.2.1 Αρμονικές ρεύματος – Μη γραμμικά φορτία

Αρμονική μιας κύμανσης είναι μια συνιστώσα συχνότητας του σήματος η οποία είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας. Αν δηλαδή το σήμα έχει θεμελιώδη συχνότητα f , οι αρμονικές έχουν συχνότητες $2f$, $3f$ και ούτω καθεξής.

Οι αρμονικές είναι βασικά το αποτέλεσμα του εκσυγχρονισμού των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και της χρήσης των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος. Ειδικότερα η χρήση τροφοδοτικών ισχύος με διακοπτική λειτουργία για τον έλεγχο των φορτίων και τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος οδηγεί σε ανεπιθύμητες συχνότητες που υπερτίθενται στην τάση τροφοδοσίας. Η αρμονική παραμόρφωση προκαλείται κυρίως από εξοπλισμό που παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή από μη γραμμικά φορτία συνδεδεμένα στο δίκτυο.

Τα μη γραμμικά φορτία αλλοιώνουν την ημιτονοειδή φύση του εναλλασσόμενου ρεύματος, με αποτέλεσμα τη ροή αρμονικών ρευμάτων στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει, διότι το ρεύμα που διαπερνά ένα μη γραμμικό φορτίο δεν είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα του. Μη γραμμικά φορτία υπάρχουν τόσο σε βιομηχανικούς όσο και σε οικιακούς καταναλωτές. Συνήθη μη γραμμικά φορτία

είναι οι ρυθμιστές στροφών κινητήρων, οι ηλεκτροσυγκολλήσεις, τα UPS, οι λαμπτήρες εκκένωσης, τα τροφοδοτικά υπολογιστών, οι **ανορθωτές** και πολλά άλλα. Τα προβλήματα που προκαλούν είναι αρκετά και σημαντικά. Τα χαρακτηριστικότερα από αυτά είναι :

- Αυξημένες απώλειες στα καλώδια
- Μείωση συντελεστή ισχύος
- Συντονισμός με αποτέλεσμα την καταστροφή πυκνωτών και μετασχηματιστών
- Αρμονική παραμόρφωση τάσης με συνέπεια τις αυξημένες απώλειες στους κινητήρες
- Παρεμβολές σε κυκλώματα ελέγχου και τηλεπικοινωνιών
- Καταπόνηση ηλεκτρικών συσκευών

2.4.2.2 Ο τριφασικός ανορθωτής γέφυρας

Οι ανορθωτές είναι ηλεκτρονικές συσκευές που μετατρέπουν το εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή. Υπάρχουν πολλοί τρόποι υλοποίησης ανορθωτών με την πιο κοινή μέθοδο να είναι με διόδους ημιαγωγών. Λόγω του ότι οι διόδοι είναι ημιαγωγοί των οποίων η έναυση δεν μπορεί να ελεγχθεί, κατά συνέπεια και η τάση εξόδου αυτών των ανορθωτικών διατάξεων δεν ελέγχεται. Δηλαδή όταν η τάση εισόδου αυτών των διατάξεων παρουσιάζει αυξομειώσεις, τότε και η συνεχής τάση εξόδου παρουσιάζει αυξομειώσεις. Για τον λόγο αυτό οι ανορθώσεις τέτοιου τύπου ονομάζονται μη ελεγχόμενες και συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν υπάρχει ανάγκη σταθεροποίησης της συνεχούς τάσης εξόδου. Ωστόσο πολλές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται ανορθωτές απαιτούν συνεχές σταθερό ρεύμα. Στις περιπτώσεις αυτές η έξοδος του ανορθωτή εξομαλύνεται με ένα ηλεκτρονικό φίλτρο. Κάποιες από τις περιοχές που βρίσκουν εφαρμογή οι ανορθωτές είναι οι ακόλουθες:

- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Συστήματα τροφοδοσίας ηλεκτρικών τρένων και τρόλεϊ
- Συστήματα ζυγών συνεχούς ρεύματος
- Τροφοδοτικά ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

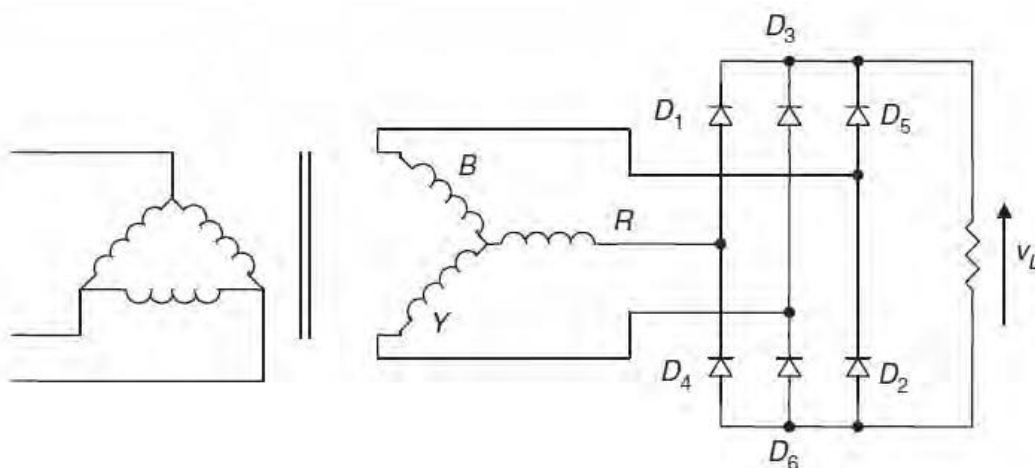
Οι ανορθωτές είναι είτε μονοφασικοί είτε πολυφασικοί, με τους τριφασικούς να αποτελούν τους πιο σημαντικούς σε βιομηχανικές εφαρμογές καθώς και στη μετάδοση ενέργειας. Επιπλέον μπορούν να χωριστούν σε ημιανορθωτές ή σε ανορθωτές πλήρους ανόρθωσης.

Κατά την ημιανόρθωση άγεται είτε το θετικό είτε το αρνητικό μέρος του εναλλασσόμενου ρεύματος εισόδου, ενώ παράλληλα εμποδίζεται το υπόλοιπο. Ωστόσο η μέση τάση εξόδου είναι χαμηλότερη από την τάση εισόδου. Η ημιανόρθωση σε μονοφασικούς ημιανορθωτές επιτυγχάνεται με μία μόλις διόδο ενώ σε τριφασικούς με τρεις. Το αποτέλεσμα ωστόσο που προκύπτει είναι η παραγωγή ενός παλμικού, μιας κατεύθυνσης, συνεχούς ρεύματος. Οι ημιανορθωτές

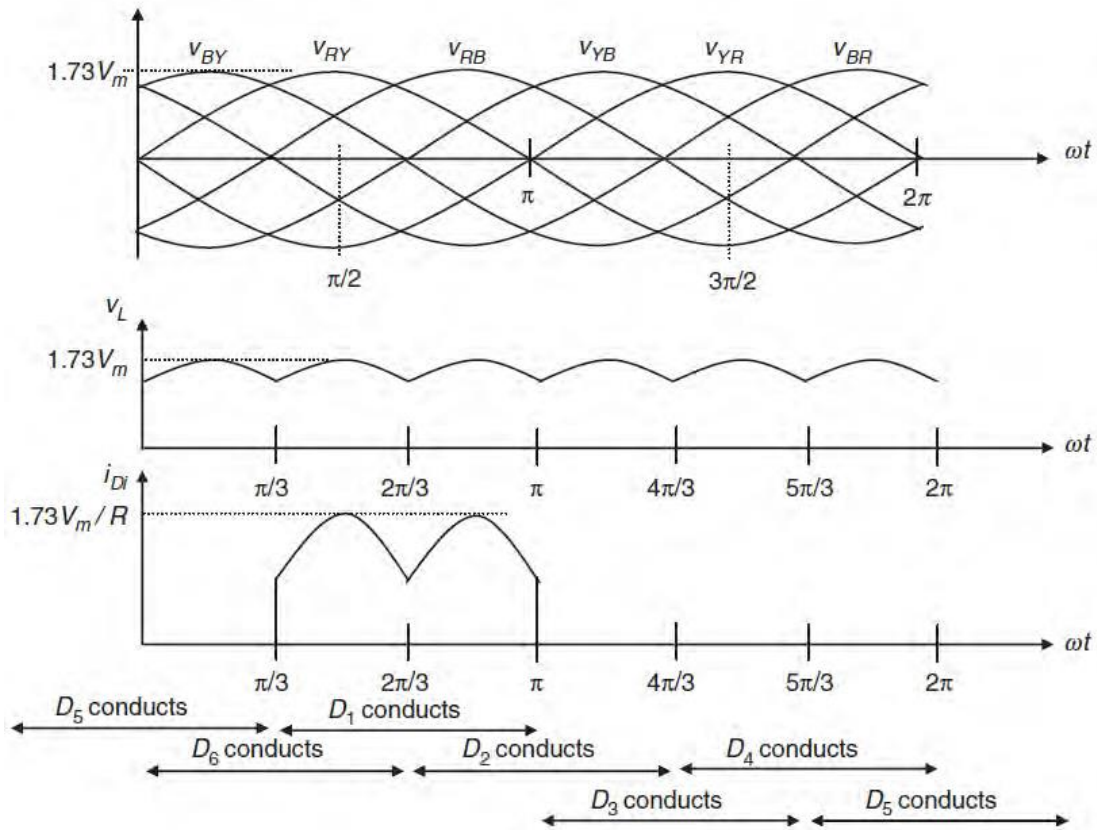
εισάγουν πολύ περισσότερο κυματισμό από τους ανορθωτές πλήρους ανόρθωσης με συνέπεια να χρειάζεται περισσότερο φιλτράρισμα για την εξάλειψη των αρμονικών συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο.

Κατά την πλήρη ανόρθωση μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου η εισαγόμενη κυματομορφή σε μια κυματομορφή σταθερής πολικότητας, θετικής ή αρνητικής, στην έξοδο. Η πλήρης ανόρθωση συνεπώς μετατρέπει τις δυο πολικότητες της κυματομορφής εισόδου στην παλμική DC έξοδο και παράγει μια υψηλότερη μέση τάση εξόδου συγκριτικά με την ημιανόρθωση. Η ανόρθωση συνήθως επιτυγχάνεται με τη χρήση γέφυρας, δηλαδή τέσσερις διόδοι σε σχηματισμό γέφυρας για μονοφασική διάταξη ή έξι διόδοι για τριφασική διάταξη.

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται ένας τριφασικός ανορθωτής γέφυρας (*three-phase bridge rectifier*) με διόδους και ωμικό φορτίο και στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Θεωρούμε ότι το κύκλωμα είναι ιδανικό. Κάθε χρονική στιγμή άγει μία διόδος από την πάνω ομάδα (D_2, D_4, D_6) και μία διόδος από την κάτω ομάδα (D_1, D_3, D_5). Από την πάνω ομάδα θα άγει η διόδος που έχει την άνοδό της στο υψηλότερο δυναμικό, ενώ οι άλλες δύο πολώνονται ανάστροφα. Αντίστοιχα, από την κάτω ομάδα θα άγει η διόδος που έχει την κάθοδό της στο χαμηλότερο δυναμικό. Κάθε διόδος άγει για 120° ενώ η αρίθμηση των διόδων φανερώνει τη σειρά με την οποία άγουν.



Εικόνα 2.2 : Τριφασικός ανορθωτής γέφυρας με διόδους



Εικόνα 2.3 : Κυματομορφές τάσης και ρεύματος τριφασικού ανορθωτή γέφυρας με διόδους.

Στην προκείμενη εργασία ασχοληθήκαμε με έναν τριφασικό, μη ελεγχόμενο ανορθωτή γέφυρας έξι διόδων. Αποτέλεσμα της χρήσης ενός τέτοιου ανορθωτή είναι η παραγωγή συνεχούς ρεύματος που περιέχει έξι διακριτούς παλμούς ανά κύκλο της συχνότητας ρεύματος εισόδου στην έξοδό του. Για το λόγο αυτό αναφέρεται συχνά ως γέφυρα έξι παλμών.

Η παρουσία αρμονικών υπολογίζεται μέσω του δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη που χρησιμοποιείται ευρέως ως άμεση εικόνα της ποιότητας του δικτύου σε ένα σημείο είναι η συνολική διαταραχή λόγω αρμονικών ρεύματος (THDi). Ο δείκτης αυτός προκύπτει από το άθροισμα των τετραγώνων του πλάτους κάθε αρμονικής διαιρεμένο με το τετράγωνο της συνιστώσας στη θεμελιώδη συχνότητα.

$$THDi = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^n I_k^2}{I_1^2}}$$

Εξίσωση 2.1

Όπου I_k η ενεργός τιμή του ρεύματος της αρμονικής τάξης k και I_1 η ενεργός τιμή του ρεύματος της θεμελιώδους συνιστώσας.

2.4.2.3 Φίλτρα

Για την αντιμετώπιση των αρμονικών χρησιμοποιούνται διάφορα φίλτρα που σκοπό έχουν την εξάλειψη των αρμονικών που εκχέονται στο δίκτυο. Τα φίλτρα αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, στα παθητικά, τα ενεργά και τα υβριδικά. Τα υβριδικά αποτελούν συνδυασμό των παθητικών και των ενεργών φίλτρων. Τα ενεργά φίλτρα αποτελούνται από διακοπτικές διατάξεις χωρίς την παρουσία παθητικών στοιχείων. Τα πιο διαδεδομένα φίλτρα ωστόσο είναι τα παθητικά και αποτελούνται από πυκνωτές, επαγωγές και αντιστάσεις. Οι αρμονικές παρεμποδίζονται με τη βοήθεια μιας μεγάλης εν σειρά μιγαδικής αντίστασης, μιας παράλληλης μικρής μιγαδικής αντίστασης ή με συνδυασμό των δυο. Δηλαδή τα φίλτρα συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα είτε γίνεται συνδυασμός των δυο συνδέσεων. Ένα φίλτρο σε σειρά πρέπει να μεταφέρει ολόκληρο το ρεύμα του κυρίως κυκλώματος και πρέπει να είναι μονωμένο. Ένα παράλληλα τοποθετημένο φίλτρο, ωστόσο, γειώνεται στο ένα άκρο και διαρρέεται μόνο από αρμονικό ρεύμα για το οποίο είναι ρυθμισμένο, μαζί με κάποιο μικρό ποσοστό του θεμελιώδους ρεύματος. Έτσι, τα παράλληλα φίλτρα είναι αρκετά φθηνότερα από τα εν σειρά ίδιας αποτελεσματικότητας και προτιμώνται για απλές κατασκευές.

Τα φίλτρα μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Τα φίλτρα συντονισμού (high Q filter) συντονίζονται σε μια ή δυο από τις κατώτερες αρμονικές όπως η 5^η και η 7^η. Τα φίλτρα απόσβεσης (low Q filter) αν συνδεθούν παράλληλα προσφέρουν μικρή μιγαδική αντίσταση για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων που μπορούν να συμπεριλάβουν για παράδειγμα μέχρι και την 17^η αρμονική. Για τον λόγο αυτόν έχουν γίνει γνωστά και ως υψιπερατά.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα βαθυπερατό LC φίλτρο με συχνότητα αποκοπής

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 140$$

Εξίσωση 2.2

Όπου L=3.8 mH, C=120 μF σε συνδεσμολογία αστέρα. Το φίλτρο είναι δηλαδή συντονισμένο στα 140 Hz και φιλτράρει καλύτερα από 280 ΣΑΛ και άνω. Το παραπάνω φίλτρο είναι στοιχείο μελέτης και κατασκευής στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του συμφοιτητή Ηλία Κατσαμπίρη.

2.5 Ο Θόρυβος στις ανεμογεννήτριες

Εξαιτίας, αφενός, της εκτεταμένης συσσώρευσης των αιολικών πάρκων και αφετέρου της αύξησης του πληθυσμού σε παγκόσμια κλίμακα, η επιρροή του θορύβου των ανεμογεννητριών στις ζωές των περιοίκων είναι ένα πρόβλημα που θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη. Τα επιτρεπόμενα όρια θορύβου για τις ανεμογεννήτριες ποικίλουν από χώρα σε χώρα, αλλά παρά τις διαφορές μπορούμε

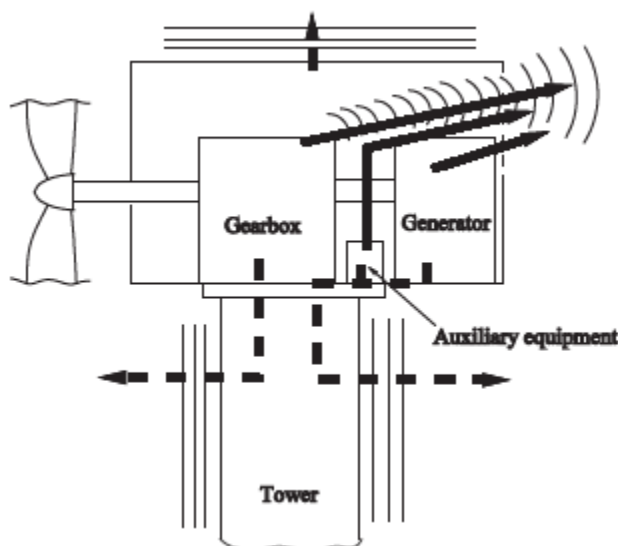
να πούμε ότι κατά τις νυχτερινές ώρες τα όρια στις ευρωπαϊκές χώρες κυμαίνονται από 35-40dBA.

Υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες θορύβου από Α/Γ: ο μηχανικός θόρυβος και ο αεροδυναμικός θόρυβος. Για μια σύγχρονη μεγάλη Α/Γ ο επικρατέστερος θόρυβος είναι ο αεροδυναμικός.

2.5.1 Μηχανικός θόρυβος

Ο μηχανικός θόρυβος δημιουργείται από τα μηχανικά μέρη στην άτρακτο της Α/Γ. η κύρια πηγή θορύβου είναι το κιβώτιο ταχυτήτων, αλλά σημαντικές συνιστώσες προέρχονται και από την γεννήτρια. Οι ανεμιστήρες ψύξης και οι άλλες βοηθητικές συσκευές συμβάλλουν στον συνολικό θόρυβο.

Ανάλογα με το μονοπάτι διάδοσης του θορύβου, ο μηχανικός θόρυβος χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες. Στον αερόφερτο, τον θόρυβο δηλαδή που μεταδίδεται άμεσα στην ατμόσφαιρα όπως για παράδειγμα ο θόρυβος που εκπέμπεται από το κιβώτιο ταχυτήτων και διαχέεται από τα ανοίγματα της ατράκτου και στον στερεόφερτο θόρυβο. Ο στερεόφερτος οφείλεται στις δονήσεις και μεταδίδεται μέσω των στερεών δομικών στοιχείων της κατασκευής, είναι έμμεσος θόρυβος και αποτελεί την μεγαλύτερη συμβολή του μηχανικού θορύβου.



Εικόνα 2.4 : Πηγές μηχανικού θορύβου : Συνεχόμενες γραμμές αερόφερτος θόρυβος, διακεκομμένες γραμμές στερεόφερτος θόρυβος.

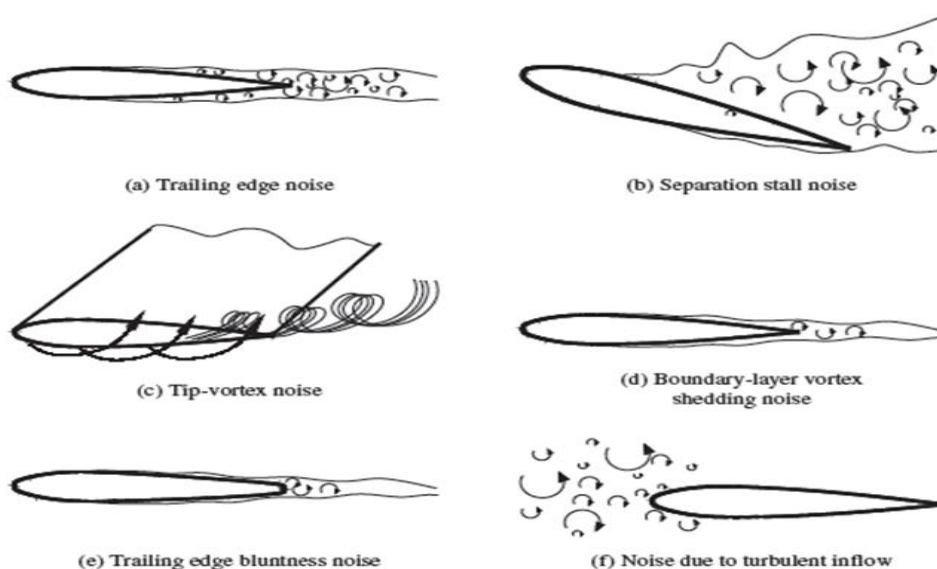
Ο θόρυβος και οι δονήσεις στο κιβώτιο ταχυτήτων οφείλονται στη μετάδοση σφάλματος των εμπλεκόμενων γραναζιών. Το σφάλμα μετάδοσης ορίζεται ως η διαφορά της επιθυμητής με την πραγματική θέση του κινούμενου γραναζιού.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι όσο πιο ακριβές είναι το κιβώτιο τόσο λιγότερο θόρυβο παράγει. Διαφορές, ακόμα, εντοπίζονται ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους γραναζιών. Τα γρανάζια με ελλειπτικά δόντια είναι λιγότερο θορυβώδη από αυτά με τα σπειρωτά, ενώ τα επικυκλικά είναι συνήθως αρκετά θορυβώδη. Τέλος, σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η φθορά των οδοντωτών τροχών, καθώς αυξάνεται το πλάτος των παραγόμενων δονήσεων. Παραδειγματικά αξίζει να αναφερθεί ότι διπλασιασμός του σφάλματος μετάδοσης συνεπάγεται αύξηση κατά 6dB σε επίπεδο θορύβου.

2.5.2 Αεροδυναμικός θόρυβος

Σύμφωνα με τον Lawson (Lawson, 1993) ο αεροδυναμικός ήχος των ανεμογεννητριών χωρίζεται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Θόρυβος διακριτών συχνοτήτων στη συχνότητα περιστροφής της έλικας της φτερωτής καθώς και στις αρμονικές της.
- Πηγές αυτό-εισαχθέντα θορύβου
 - Θόρυβος από το πίσω άκρο της κάθε έλικας.
 - Θόρυβος εξαιτίας του διαχωρισμού-stall.
 - Θόρυβος εξαιτίας της δημιουργίας δινών στα άκρα κάθε έλικας.
 - Θόρυβος εξαιτίας της δημιουργίας δινών κατά μήκος του επιπέδου της έλικας (boundary layer vortex shedding noise)
 - Θόρυβος εξαιτίας της δημιουργίας δινών από το πίσω άκρο της έλικας.
- Θόρυβος εξαιτίας εισροής ανομοιόμορφου, ταραχώδους αέρα.



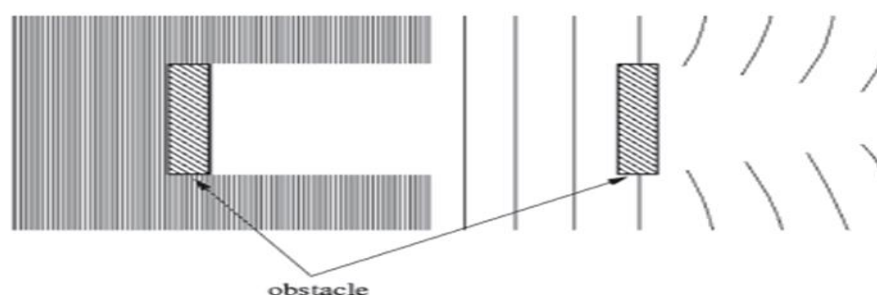
Εικόνα 2.5 : Αεροδυναμικός θόρυβος ανεμογεννητριών

Η πρώτη ομάδα πηγών θορύβου περιλαμβάνει κυρίως συνιστώσες χαμηλής συχνότητας εξαιτίας της ανομοιόμορφης φόρτισης των πτερυγίων λόγω των

απόνερων μεγάλων κτιριακών κατασκευών ή ποικίλων συνιστωσών ταχύτητας στην ατμόσφαιρα.

Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει πηγές θορύβου που παράγονται από την περιστροφή της ίδιας της φτερωτής και θα εμφανίζονταν ακόμη και αν η εισροή αέρα ήταν τελείως ομοιογενής! Αναλυτικότερα, ο θόρυβος του άκρου της ουράς οφείλεται στην αλληλεπίδραση των ταραχώδων δινών που παράγονται και στο άκρο εκφυγής της αεροτομής όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5. Οι ίδιες οι δίνες είναι μια σχετικά αδύναμη πηγή θορύβου, αλλά η επίδρασή τους ενισχύεται όταν βρίσκονται στην περιοχή μιας επιφάνειας όπως στην περίπτωση αυτή. Ο θόρυβος διαχωρισμού-stall εμφανίζεται όταν η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια είναι πολύ μεγάλη και η ροή αρχίζει να χωρίζεται. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο θόρυβος αυτός είναι τόσο ισχυρός που υπερσχύει των υπολοίπων. Στο άκρο του πτερυγίου σχηματίζεται μια δίνη λόγω διαφοράς πίεσης στις πλευρές πίεσης και αναρρόφησης. Οι διακυμάνσεις της πίεσης εξαιτίας της δίνης αυτής δημιουργούν και τον αντίστοιχο θόρυβο. Ο θόρυβος των δινών κατά μήκος του επιπέδου της έλικας εμφανίζεται όταν παρουσιάζονται τυχόν ανωμαλίες – ανομοιομορφίες στο επίπεδο αυτό. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ενώ ο θόρυβος του άκρου της ουράς έχει ευρυζωνικό χαρακτήρα, ο θόρυβος των δινών κατά μήκος του επιπέδου της έλικας παρουσιάζει τονικότητα. Τέλος, ο θόρυβος λόγω της δημιουργίας δινών από το πίσω άκρο της έλικας δημιουργούνται όταν το πάχος του άκρου ξεπεράσει ένα κρίσιμο όριο. Όταν το όριο αυτό ξεπεραστεί εμφανίζεται τονικός ήχος.

Στην τρίτη ομάδα περιλαμβάνεται ο θόρυβος που οφείλεται στην ατμοσφαιρική αναταραχή. Λόγω ανομοιομορφίας του εισερχόμενου αέρα οι έλικες δέχονται ασταθή φόρτωση, γεγονός που γεννά θόρυβο. Συνήθως παράγονται δυο είδη θορύβου, ένας χαμηλής συχνότητας όταν το μήκος των αναταραχών του αέρα είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος του πτερυγίου και ένας υψηλής όταν το μήκος των αναταραχών είναι μικρότερο από το μήκος του πτερυγίου(εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 : Περιπτώσεις θορύβου εξαιτίας ατμοσφαιρικής αναταραχής

Συνολικά, σύμφωνα με τον Lowson, οι πηγές θορύβου που αυτοδημιουργούνται κυριαρχούν σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου κοντά στην ταχύτητα εκκίνησης, ενώ κατά την λειτουργία της α/γ σε ονομαστική ισχύ επικρατεί ο θόρυβος εξαιτίας των αναταραχών του αέρα.

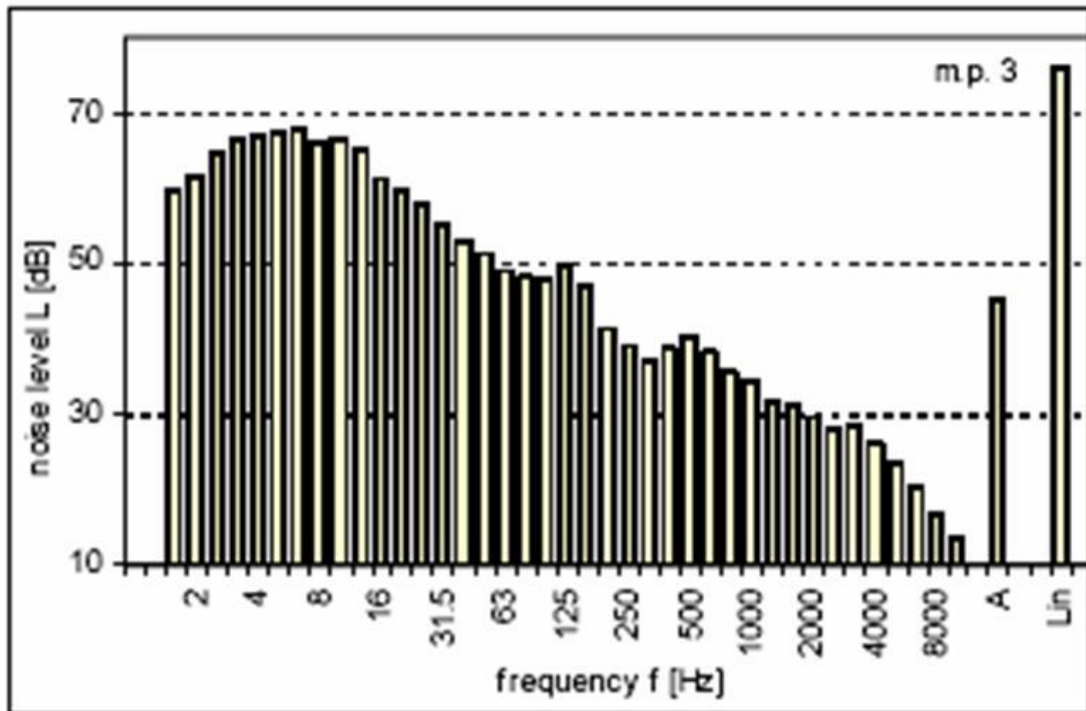
Type or indication	Mechanism	Main characteristics & importance
Low-frequency sound		
Steady thickness noise; steady loading noise	Rotation of blades or rotation of lifting surfaces	Frequency is related to blade passing frequency, not important at current rotational speeds
Unsteady loading noise	Passage of blades through tower velocity deficit or wakes	Frequency is related to blade passing frequency, small in cases of upwind rotors, though possibly contributing in case of wind farms
Inflow turbulence sound	Interaction of blades with atmospheric turbulence	Contributing to broadband noise; not yet fully quantified
Airfoil self-noise		
Trailing-edge noise	Interaction of boundary layer turbulence with blade trailing edge	Broadband, main source of high frequency noise ($770 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$)
Tip noise	Interaction of tip turbulence with blade tip surface	Broadband; not fully understood
Stall, separation noise	Interaction of turbulence with blade surface	Broadband
Laminar boundary layer noise	Non-linear boundary layer instabilities interacting with the blade surface	Tonal, can be avoided
Blunt trailing edge noise	Vortex shedding at blunt trailing edge	Tonal, can be avoided
Noise from flow over holes, slits and intrusions	Unstable shear flows over holes and slits, vortex shedding from intrusions	Tonal, can be avoided

Εικόνα 2.7 : Ταξινόμηση θορύβων ανεμογεννήτριας

2.5.3 Υπόηχοι από ανεμογεννήτριες

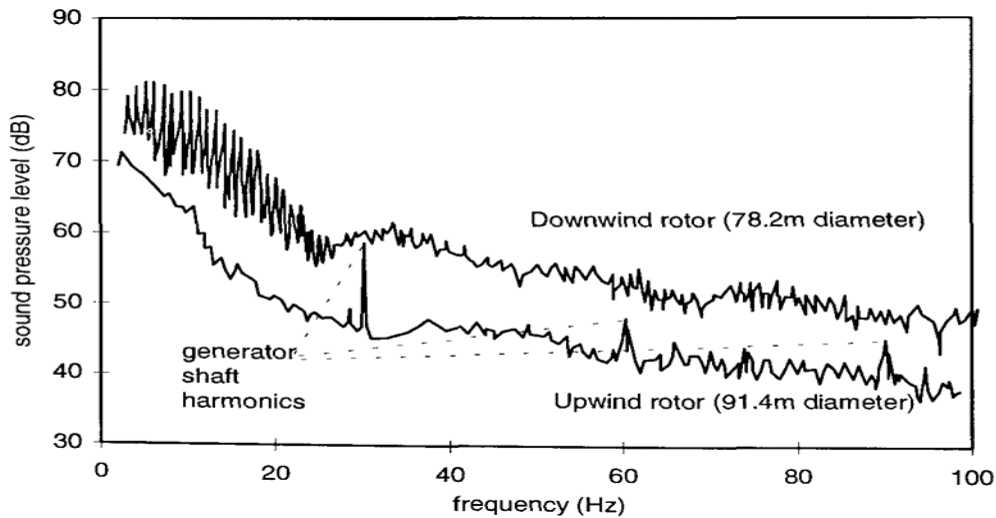
Όταν αναφερόμαστε σε υπόηχους από ανεμογεννήτριες είναι εξαιρετικά σημαντικό να διαχωρίζουμε τις Α/Γ με δρομείς κατάντη και ανάντη του πύργου. Στα αρχικά στάδια κατασκευής α/γ είχαν επικρατήσει οι γεννήτριες με τον δρομέα κατάντη, γεγονός που παρουσίασε σημαντικά επίπεδα υποήχων. Για τον λόγο αυτό σήμερα δεν χρησιμοποιείται αυτό το μοντέλο και έχουν επικρατήσει οι α/γ με ανάντη δρομέα. Το μοντέλο αυτό εκπέμπει ήχους ευρείας ζώνης που περιλαμβάνει ήχους χαμηλής συχνότητας αλλά και κάποιους υπόηχους. Ένα σύνηθες φαινόμενο που παρατηρείται από τους πολέμιους των ανεμογεννητριών είναι η παρουσίαση του ήχου που παράγεται κατά το πέρασμα των πτερυγίων από το επίπεδο του πύργου ως υπόηχος ή ήχος χαμηλής συχνότητας, ωστόσο ο ήχος αυτός δεν περιέχει καθόλου χαμηλές συχνότητες (Rogers, et al., 2002).

Μια τυπική απεικόνιση του ήχου χαμηλών συχνοτήτων και υπόηχων που παράγονται από μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια παρουσιάζεται στην εικόνα 2.8. Παρατηρούμε ότι τα ύψη ανά συχνότητα είναι χαμηλότερα από τα όρια αντίληψης ήχου του ανθρώπου όπως έχει παρουσιαστεί παραπάνω.



Εικόνα 2.8 : Τυπική απεικόνιση ήχου χαμηλών συχνοτήτων και υποήχου ανεμογεννήτριας

Επιπροσθέτως, στην εικόνα 2.9 παρουσιάζεται μια τυπική κατανομή φάσματος ηχητικής πίεσης από γεννήτριες με τον δρομέα ανάντη και κατόντη του πύργου.



Εικόνα 2.9 : Τυπική κατανομή φάσματος ηχητικής πίεσης από γεννήτριες με τον δρομέα ανάντη και κατόντη

2.5.4 Τρόποι μείωσης θορύβου

Σήμερα, υπάρχουν αρκετά μοντέλα πρόβλεψης θορύβου μιας ανεμογεννήτριας, ακόμη και ενός αιολικού πάρκου. Το πρόβλημα με τα μοντέλα αυτά εντοπίζεται στο ότι ενώ δίνουν μια γενική εκτίμηση του παραγόμενου θορύβου από ένα πτερύγιο ή μια γεννήτρια, συχνά αποτυγχάνουν να προβλέψουν ορθά τη φασματική ανάλυση του θορύβου. Ωστόσο, πλέον έχουν γίνει κατανοητοί οι μεμονωμένοι μηχανισμοί παραγωγής θορύβου με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής μεθόδων μείωσης του θορύβου ακόμη και αν δεν είναι δυνατόν ο θόρυβος να προβλεφθεί σωστά. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριοι τρόποι μείωσης θορύβου των ανεμογεννητριών.

Θεωρώντας ότι όλες οι τονικές συνιστώσες εξαιτίας ατελειών στα πτερύγια μπορούν να αποφευχθούν με τον κατάλληλο σχεδιασμό και υλοποίηση καταλήγουμε στους τρεις βασικούς μηχανισμούς παραγωγής θορύβου από ανεμογεννήτρια. Αυτοί είναι ο θόρυβος από το πίσω άκρο του πτερυγίου, ο θόρυβος από την κορυφή του πτερυγίου καθώς και ο θόρυβος από την εισροή ταραχώδους ανέμου.

A) Μείωση ταχύτητας άκρης πτερυγίου

Σύμφωνα με μελέτες έχει αποδειχθεί ότι τόσο ο θόρυβος από την άκρη του πτερυγίου όσο και ο θόρυβος από την εισροή ανέμου σχετίζονται με την ταχύτητα του πτερυγίου (Rogers, et al., 2002). Μάλιστα όσο μεγαλύτερη ταχύτητα έχει το πτερύγιο, τόσο περισσότερος και ο θόρυβος, ενώ τέλος πρέπει να τονιστεί ότι το

άκρο του πτερυγίου έχει και τη μεγαλύτερη ταχύτητα. Η ταχύτητα του πτερυγίου δίνεται από τον τύπο :

$$V_{tip} = \sqrt{\left(\Omega \frac{D}{2}\right)^2 + v_w^2} = \Omega \frac{D}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda}}$$

Εξίσωση 2.3

Όπου Ω είναι η συχνότητα περιστροφής της φτερωτής,

D η διάμετρος της,

V_w η ταχύτητα ανέμου και τέλος

λ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου.

Συνεπώς βλέπουμε ότι η μείωση της ταχύτητας του πτερυγίου μπορεί να γίνει είτε με μείωση των στροφών είτε με μείωση της διαμέτρου. Ωστόσο οποιαδήποτε μείωση θα επιφέρει και μείωση της απόδοσης της γεννήτριας. Μια εκτίμηση της μείωσης της απόδοσης μιας γεννήτριας μπορεί να γίνει εάν γνωρίζουμε την καμπύλη ισχύος της. Από την καμπύλη προκύπτει ο συντελεστής c_p ο οποίος με τη σειρά του είναι μια συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ .

B) Μείωση γωνίας πρόσπτωσης ανέμου

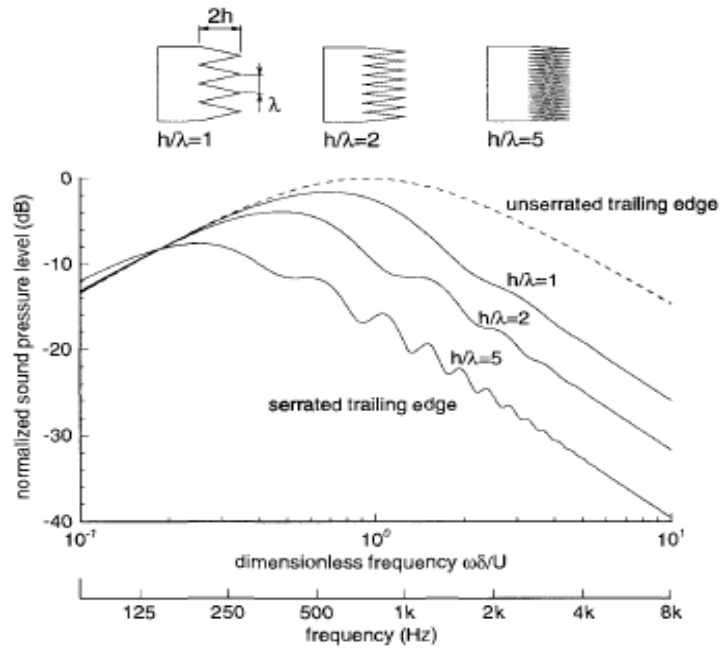
Μια άλλη μέθοδος μείωσης του θορύβου είναι με τον έλεγχο της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια (modified pitch control). Σύμφωνα με τις μετρήσεις σε εμπορικές ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια του πειράματος DEWI καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μειώνοντας κατά 1° τη γωνία πρόσπτωσης μειώνεται το επίπεδο ηχητικής πίεσης περίπου κατά 1dB(A). Φυσικά με τη μείωση της γωνίας θα έχουμε και μείωση της απόδοσης της γεννήτριας (Klug, et al., 1995).

Γ) Μείωση θορύβου από το πίσω άκρο του πτερυγίου

Ο μηχανισμός παραγωγής θορύβου από το πίσω άκρο των πτερυγίων έχει μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια πειραμάτων σε σήραγγα. Τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι η ένταση του ήχου που παράγεται από την αλληλεπίδραση ροής αέρα με επίπεδη επιφάνεια εξαρτάται από την ταχύτητα μετάδοσης του αέρα, την γωνία πρόσπτωσης της ροής στην επιφάνεια, την κλίμακα μήκους της περιοχής στροβιλισμού και από την κανονικοποιημένη ένταση της τύρβης. Τέλος η ένταση εξαρτάται από την απόδοση σκέδασης της άκρης του πτερυγίου, όπως επίσης και από την ακουστική αντίσταση της.

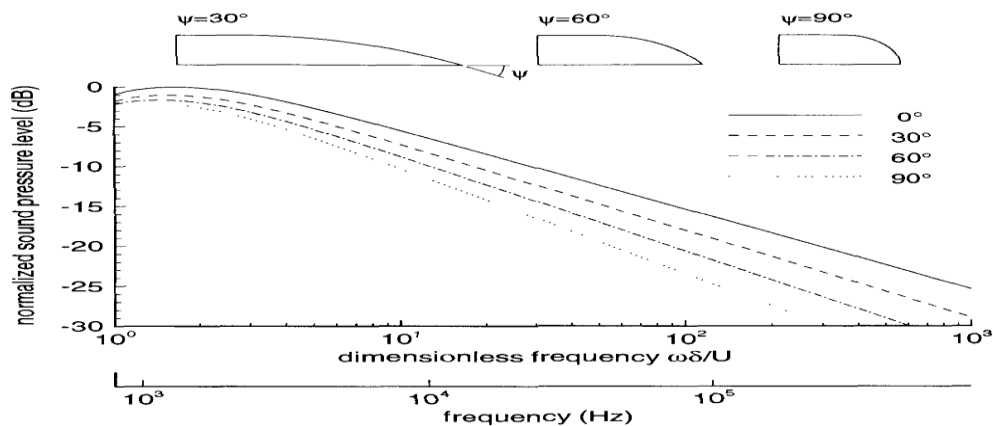
Μια πιθανή λύση για τον περιορισμό των περισσότερων από τα παραπάνω φαινόμενα θα ήταν η μείωση των στροφών περιστροφής της γεννήτριας, ωστόσο θα έχουμε και αισθητή μείωση στην απόδοση της γεννήτριας όπως και στην πρώτη περίπτωση. Μια άλλη προτεινόμενη λύση θα ήταν η διαφοροποίηση του σχήματος του σώματος του πτερυγίου, ωστόσο στην παρούσα φάση δεν είναι γνωστό ποιο σχήμα πτερυγίου θα προκαλούσε την βέλτιστη απόδοση της α/γ με τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο. Η ισχυρή εξάρτηση της έντασης θορύβου με τη γωνία μεταξύ της κύριας ροής αέρα και του επιπέδου του πίσω άκρου της φτερωτής υποδηλώνει ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση με τη χρήση λείου πτερυγίου με σχήμα φτερού. Ωστόσο αυτό δεν είναι πρακτικό για πτερύγια ανεμογεννητριών που έχουν μήκος 20-30 m. Η απόδοση σκέδασης της άκρης του πτερυγίου μπορεί να μειωθεί αν της δώσουμε λοξευμένο σχήμα ή αν μειώσουμε την ακουστική της αντίσταση. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πορώδους υλικού. Μια ακόμα λύση θα ήταν αν η άκρη είχε οδοντωτό σχήμα. Οι τελευταίες λύσεις αποτελούν σημαντικό μέρος της έρευνας για τη μείωση θορύβου των ανεμογεννητριών ενώ παρουσιάζονται και ως οι πιο ελπιδοφόρες. Για τον λόγο αυτό θα γίνει μια εκτενέστερη ανάλυση τους παρακάτω.

Για τη μελέτη της επίδρασης του οδοντωτού σχήματος της άκρης των πτερυγίων έλαβαν χώρα δυο πειράματα σε ανεμοσήραγγα (Dassen, et al., 1994), (Klug, et al., 1995). Και οι δυο αυτές έρευνες δρομολογήθηκαν από μια θεωρητική περιγραφή του Howe σύμφωνα με την οποία τα οδοντωτά σχήματα θα προκαλούσαν μείωση του θορύβου. Σύμφωνα με τον Howe η μείωση μπορεί να είναι της τάξεως των 20 dB ή και μεγαλύτερη ανάλογα με τον λόγο του μήκους και του πλάτους του δοντιού (h/λ), του πάχους του οριακού στρώματος και του μήκους του δοντιού (δ/h), και της συχνότητας $\omega\delta/V$ που βασίζεται στο πάχος του οριακού στρώματος, δ , και στην ταχύτητα μετάδοσης των δινών, V , στην πίσω άκρη του πτερυγίου (Howe, 1991). Παρακάτω στην εικόνα 2.10 παρουσιάζεται το κανονικοποιημένο φάσμα ηχητικής πίεσης για διαφορετικούς λόγους h/λ . Στην πράξη ωστόσο δεν επαληθεύτηκε η θεωρητικά αναμενόμενη μείωση της έντασης του θορύβου. Σήμερα βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο από το βρετανικό πανεπιστήμιο Cambridge σε συνεργασία με τρία αμερικάνικα πανεπιστήμια η χρήση επικάλυψης από εκτυπωμένα τμήματα τα οποία προσομοιάζουν τη δομή των φτερών κουκουβάγιας. Οι κουκουβάγιες είναι εξαιρετικοί θηρευτές και αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι πετούν αθόρυβα χάρη στη δομή των φτερών τους. Μάλιστα οι δοκιμές σε αεροδυναμικές σήραγγες έδειξαν μείωση της τάξεως των 10dB (Econews, 2015).



Εικόνα 2.10 : Κανονικοποιημένο φάσμα ηχητικής πίεσης για διαφορετικούς λόγους h/λ

Από τη μελέτη της επιρροής της γεωμετρίας του άκρου του πτερυγίου στον παραγόμενο θόρυβο το συμπέρασμα ήταν ότι τα πιο ελπιδοφόρα αποτελέσματα προέκυψαν από πτερύγιο με επίπεδη πλευρά και λοξευμένο άκρο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11 . Μάλιστα, σύμφωνα με τον Howe (Howe, 1991) τα καμπυλωτά άκρα έχουν επίδραση στην διάδοση θορύβου μόνο σε συχνότητες αρκετά υψηλές έτσι ώστε το άκρο να θεωρείται ευθεία σφήνα σε αποστάσεις της τάξης της κλίμακας μήκους της ανατάραξης του ανέμου. Από τα πειράματα αποδείχθηκε ότι αν η γωνία ψ είναι μικρότερη των 30° δεν εμφανίζεται το φαινόμενο του διαχωρισμού της ροής του αέρα που εισάγει με τη σειρά του περισσότερο θόρυβο.

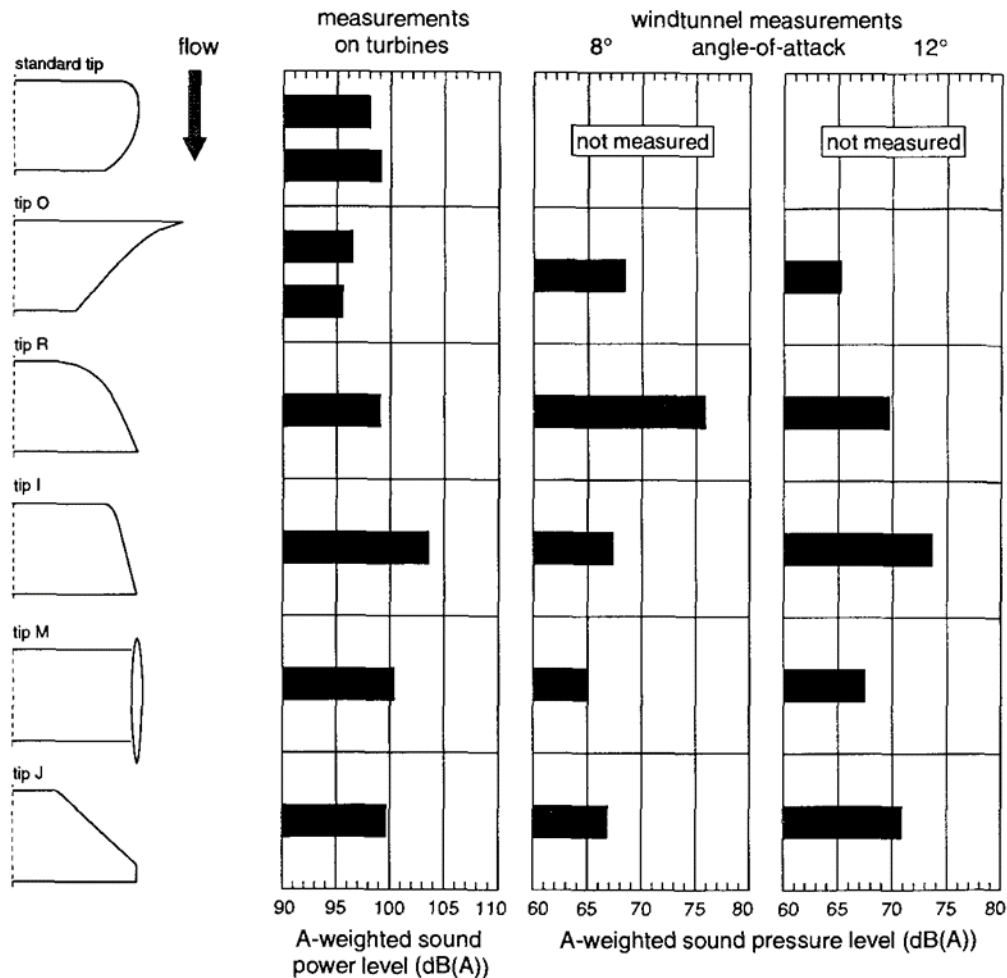


Εικόνα 2.11 : Επιρροή της γεωμετρίας του άκρου του πτερυγίου στον παραγόμενο θόρυβο

Ακόμη μελετήθηκε η ιδέα της μεταβλητής επιφανειακής αντίστασης για τη μείωση του θορύβου από το άκρο ουράς. Επιφανειακή αντίσταση ορίζεται ο λόγος των διακυμάνσεων πίεσης στην επιφάνεια της φτερωτής ως προς τις διακυμάνσεις της ταχύτητας. Ο τελευταίος όρος είναι μηδενικός για άκαμπτες επιφάνειες με αποτέλεσμα η επιφανειακή αντίσταση να τείνει στο άπειρο. Άλλωστε αυτή η ασυνέχεια είναι και ο λόγος της περίθλασης και ενίσχυσης των κυμάτων του αέρα. Σύμφωνα με τον Hayden λοιπόν, αν μειωθεί αυτή η ασυνέχεια της αντίστασης θα μειωθεί και η σκέδαση του θορύβου και ο τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι με τη χρήση ελαστικού ή πορώδους υλικού. Για το λόγο αυτό έλαβε χώρα το πείραμα DELTA στο οποίο χρησιμοποιήθηκε πορώδες υλικό στο άκρο ουράς σε κανονικής κλίμακας α/γ. Η μείωση ηχητικής πίεσης που επιτεύχθηκε ήταν της τάξεως του 0.5 dB, σχεδόν ασήμαντη.

Δ) Μείωση θορύβου από την κορυφή του πτερυγίου

Οι πρώτες προσπάθειες για μείωση του αεροδυναμικού θορύβου στις ανεμογεννήτριες εστίαζαν στο σχήμα της κορυφής των πτερυγίων, κυρίως εξαιτίας του γεγονότος ότι σχεδόν όλος ο θόρυβος δημιουργείται από το εξωτερικό 10-20% της φτερωτής. Ο θόρυβος από τις κορυφές των πτερυγίων σχετίζεται με τον τοπικό διαχωρισμό της ροής του ανέμου γύρω από την κορυφή και με τη δημιουργία δινών ανέμου μόλις ο αέρας περάσει από την κορυφή. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα στα οποία δοκιμάστηκαν διάφορα σχήματα κορυφής πτερυγίων τόσο σε αεροδυναμικές σήραγγες όσο και σε ανοιχτά πεδία δοκιμών. Το πείραμα DELTA είναι ένα από τα σημαντικότερα εξ' αυτών. Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικά σχέδια κορυφής τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 2.12. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι μόνο το άκρο O είχε χαμηλότερες ηχητικές εκπομπές από το άκρο αναφοράς. Τα ίδια σχέδια δοκιμάστηκαν σε αεροδυναμική σήραγγα για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης ανέμου. Η μείωση που παρατηρήθηκε στο άκρο O είναι εμφανής μόνο για γωνία πρόσπτωσης 12°, ενώ το άκρο M παρουσίασε συνολικά μικρότερη εκπομπή θορύβου, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις μετρήσεις σε ανοιχτό πεδίο.



Εικόνα 2.12 : Θόρυβος για διάφορα σχήματα κορυφής πτερυγίου

2.5.5 Θόρυβος από μικρές ανεμογεννήτριες

Ο ήχος είναι πιθανό να αποτελέσει έναν από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς περιορισμούς για τις μικρές ανεμογεννήτριες. Οι μικρές α/γ χρησιμοποιούνται συνήθως για οικιακή ενέργεια ή για συγκεκριμένα φορτία είτε σε διασυνδεδεμένα συστήματα είτε μόνες τους. Εξαιτίας αυτής της εγγύτητας με την ανθρώπινη δραστηριότητα μπορούν να προκαλέσουν παράπονα θορύβου. Εξάλλου, έχει παρατηρηθεί σε πολλές περιπτώσεις μικρές α/γ να παράγουν περισσότερο θόρυβο από μεγάλες. Είναι επίσης πιθανό οι μικρές α/γ να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής και άρα υψηλότερες ταχύτητες κορυφών των πτερυγίων. Για προστασία από υπερφόρτωση υπάρχει και το σύστημα furling (κύλησης) το οποίο είναι ένας μηχανισμός περιορισμού της ισχύος που παράγεται από τη γεννήτρια με την εν μέρει αποστροφή της φτερωτής από την κύρια κατεύθυνση του ανέμου. Αυτοί οι τρόποι λειτουργίας μπορούν να επιδεινώσουν την παραγωγή θορύβου και να προκαλέσουν σημαντική αύξηση.

2.6 Επιπτώσεις θορύβου

Ο ήχος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχει πολλές ευεργετικές ιδιότητες για τον άνθρωπο, ωστόσο υπάρχει και ένα αναπόσπαστο τμήμα που είναι η δημιουργία θορύβου. Το πρόβλημα του θορύβου είναι συνάρτηση της ανθρώπινης δραστηριότητας και συνεπώς του πληθυσμού, γι' αυτό άλλωστε εμφανίζεται εντονότερα το φαινόμενο της ηχορύπανσης στις μεγαλουπόλεις. Σήμερα ο θόρυβος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς ρύπους που υποβαθμίζουν το αστικό περιβάλλον. Μόνο ο κυκλοφοριακός θόρυβος υπολογίζεται ότι βλάπτει την υγεία του ενός τρίτου των Ευρωπαίων πολιτών. Οι επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο είναι πολλαπλές και ποικίλες. Ξεκινούν από έναν απλό εκνευρισμό και μπορούν καταλήξουν σε μόνιμες βλάβες του οργανισμού. Αναλυτικότερα, οι κύριοι κίνδυνοι του θορύβου για την ανθρώπινη υγεία σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization) (WHO, 2008) είναι :

- Βλάβη στην ακοή. Συνίσταται στην αύξηση του κατωφλίου και ενίοτε συνοδεύεται από βουητό στις συχνότητες από 3000-6000 Hz.
- Παρεμπόδιση της επικοινωνίας μέσω ομιλίας.
- Παρεμπόδιση ύπνου. Οι οχλήσεις που προκαλούνται σχετίζονται με δυσκολία στον ύπνο, ανεπιθύμητη αφύπνιση και αϋπνία. Η παρεμπόδιση του ύπνου θεωρείται από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις του θορύβου, καθώς η καλή ποιότητα ύπνου είναι απαραίτητη για την καλή ψυχική και σωματική υγεία του ανθρώπου.
- Ψυχικές ασθένειες. Ο περιβαλλοντικός θόρυβος πιστεύεται ότι δεν προκαλεί άμεσα ψυχικές ασθένειες αλλά είναι πιθανό να επιδεινώσει ήδη υπάρχοντα προβλήματα.
- Μειωμένη απόδοση στη δουλειά και το σχολείο. Στα πλαίσια ερευνών έχει αποδειχτεί ότι συνθήκες με αυξημένο περιβαλλοντικό θόρυβο επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση εργαζομένων και παιδιών. Καθώς δημιουργούνται προβλήματα στην συγκέντρωση.
- Όχληση. Η προκαλούμενη όχληση είναι υποκειμενική και διαφορετική για κάθε άτομο. Εξαρτάται από την στάθμη θορύβου, το φάσμα συχνοτήτων, την ώρα της ημέρας, τη διάρκεια της έκθεσης, την κατάσταση του ατόμου.
- Επιρροή στην κοινωνική συμπεριφορά. Οι επιπτώσεις του περιβαλλοντικού θορύβου μπορούν να αποτιμηθούν με βάση την επίδραση στην κοινωνική συμπεριφορά. Μελέτες έχουν δείξει ότι άτομα που εκτίθενται σε στάθμες αυξημένου θορύβου παρουσιάζουν μειωμένη διάθεση για παροχή βοήθειας, ενώ αναπτύσσουν ανταγωνιστικές και επιθετικές συμπεριφορές.
- Καρδιαγγειακές επιπτώσεις.
- Ορμονικές αντιδράσεις με πιθανές συνέπειες στον ανθρώπινο μεταβολισμό και την αποτελεσματικότητα του ανοσοποιητικού συστήματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με τις ενδεικτικές επιδράσεις των ποικίλων σταθμών θορύβου στην υγεία.

Στάθμη θορύβου decibel	Συναίσθημα Επίδραση	Επιδράσεις		Χαρακτηριστικά παραδείγματα
		Στο αυτί	Στην ομιλία	
140	Πολύ οδυνηρό	Μη αναστρέψιμες ζημιές στο αυτί		Χώρος δοκιμών για Πνευματικό τρυπάνι
130	Οδυνηρό			
120	Ανυπόφορο			
110	Δύσκολα υποφερτό	Απώλεια ακοής μετά από σύντομη έκθεση	Η συνομιλία είναι αδύνατη	Χώρος τυπογραφείου Χώρος επεξεργασίας μετάλλου
100	Πολύ θορυβώδης	Απώλεια ακοής μετά από σχετικά μακροχρόνια έκθεση	Η συνομιλία είναι εφικτή σε απόσταση λίγων εκατοστών από το αυτί	Πολύ θορυβώδης δρόμος Σχολική καντίνα
90	Θορυβώδης		Συνομιλία με έντονη φωνή και «παραστατική» συμπεριφορά	
80	Μέση επίδραση			θορυβώδης δρόμος
70	Χαμηλή επίδραση	Η ομιλία «καλύπτεται»	Όριο για χρήση τηλεφώνου	Γραφείο
60	Χρημία		Ήρεμη και εύκολη συνομιλία	Χαμηλή στάθμη ραδιοφώνου Γραφείο με ήρεμες συνθήκες λειτουργίας
50	Πολύ ηρεμία		Καταληπτή ακόμα και συνομιλία «ψίθυρος» σε απόσταση 1 μ	Πολύ προστατευμένη από άποψη θορύβου αίθουσα
40	Σιωπή	Ο παρατηρητής άκουει τους ήχους του σώματός του		Επιτυγχάνεται μόνο σε πολύ ειδικούς εργαστηριακούς χώρους

Πίνακας 2.1 : Ενδεικτικές επιδράσεις θορύβου στον άνθρωπο

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εξέδωσε έναν οδηγό μέγιστων επιτρεπτών τιμών για την ηχορύπανση σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Ο πίνακας παρουσιάζεται παρακάτω για να γίνουν πιο εύκολα αντιληπτά τα επιτρεπτά όρια της έντασης θορύβου ανάλογα με το περιβάλλον.

Περιβάλλον	Επιπτώσεις στην Υγεία	Ένταση θορύβου (dB)	Διάρκεια έκθεσης (ώρες)	Μέγιστη τιμή – Στιγμιαία τιμή (dB)
Εξωτερικοί χώροι	Σοβαρή ενόχληση ημέρα και νύχτα	55	16	-
Εξωτερικοί χώροι	Μικρή ενόχληση ημέρα και νύχτα	50	16	-
Κατοικίες – Εσωτερικοί χώροι	Κατανόηση ομιλίας, μικρή ενόχληση ημέρα και νύχτα	35	16	45
Δωμάτια ύπνου	Διαταραχή ύπνου τη νύχτα	45	8	60
Σχολικές αίθουσες	Ενόχληση στην κατανόηση ομιλίας	35	Διάρκεια μαθήματος	
Δωμάτια ύπνου για προσχολική ηλικία	Διαταραχή ύπνου	30	Διάρκεια ύπνου	45
Σχολικές αυλές	Ενόχληση	55	Διάρκεια ημέρας	-
Νοσοκομεία θάλαμοι	Διαταραχή ύπνου	30	8	40
Νοσοκομεία ιατρεία		30	16	
Βιομηχανία, εμπορικές επιχειρήσεις, μαγαζιά, συγκοινωνίες	Επίδραση στην ακοή	70	24	110
Τελετές, φεστιβάλ, συναυλίες κλπ.		100	4	110
Συγκεντρώσεις σε κλειστό χώρο		85	1	110
Μουσική και άλλοι ήχοι από ηχεία και ακουστικά		85	1	110
Σειρήνες από παιχνίδια, πυροσβεστική κλπ				140

Πίνακας 2.2 : Μέγιστα επιτρεπτά όρια ηχορύπανσης

2.7 Μέτρηση θορύβου

Ανάλογα με τη μελέτη θορύβου που απαιτείται χρησιμοποιούνται διαφορετικά μεγέθη-δείκτες από τους οποίους εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Για

παράδειγμα σε μελέτη έκθεσης θορύβου σε εργασιακό περιβάλλον υπολογίζονται δείκτες έκθεσης σε συγκεκριμένες εντάσεις θορύβου εξαρτώμενοι από τη διάρκεια της έκθεσης και από τους δείκτες αυτούς συμπεραίνεται αν εφαρμόζονται ή όχι οι εκάστοτε κανονισμοί. Για την μέτρηση θορύβου μιας μηχανικής συσκευής, όπως στην περίπτωση μας μια ανεμογεννήτρια, απαιτείται η μέτρηση κάποιων μεγεθών όπως η στάθμη ηχητικής πίεσης, η στάθμη ηχητικής ισχύος, η ανάλυση του ακουστικού φάσματος σε οκτάβες και σε τριτοκτάβες, ενώ χρησιμοποιούνται και κάποια φίλτρα ή σταθμίσεις. Όλες αυτές οι έννοιες θα αναλυθούν στη συνέχεια για ευκολότερη κατανόηση.

Το επίπεδο έντασης του ήχου (L1) ορίζεται από την εξίσωση :

$$L_1(dB) = 10 \log_{10}(I_1/I_0)$$

Εξίσωση 2.4

Είναι φανερό ότι ένας αριθμός σε decibels παριστάνει έναν λόγο εντάσεων και όχι μια απόλυτη ένταση και για τον λόγο αυτό ορίζεται το I_0 σαν στάθμη αναφοράς. Η συνήθης στάθμη αναφοράς που χρησιμοποιείται είναι $I_0=10^{-12} \text{Watt/m}^2$. Η ηχητική στάθμη που προσδιορίζεται σύμφωνα με τα παραπάνω αναφέρεται ως στάθμη έντασης ήχου ή αλλιώς στάθμη ηχητικής έντασης και ορίζεται ως η ποσότητα της ακουστικής ενέργειας που διαπερνά μια μονάδα επιφάνειας.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που συνδέει την ένταση με την πίεση για επίπεδα ή σφαιρικά κύματα:

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot u}$$

Εξίσωση 2.5

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του ομογενούς μέσου διάδοσης και u η ταχύτητα του ήχου στην παραπάνω σχέση καταλήγουμε στην εξής :

$$L_p = 10 \log \frac{P}{P_{ref}^2} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

Εξίσωση 2.6

Η σχέση αυτή αντιστοιχεί στην στάθμη πίεσης ήχου ή στάθμη ηχητικής πίεσης (Sound Pressure Level ή SPL). P είναι η μέση ενεργός τιμή της πίεσης και $P_{ref}=2 \cdot 10^{-5} \text{N/m}^2$ είναι η τιμή αναφοράς της πίεσης.

Η στάθμη ισχύος ήχου ή στάθμη ακουστικής ισχύος (SWL) ονομάζεται η ενέργεια που παράγει η πηγή προς το χρόνο που διαρκεί η παραγωγή αυτή, συμβολίζεται με L_w και ορίζεται από τη σχέση :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}$$

Εξίσωση 2.7

Όπου $W_{ref} = I_{ref} \cdot S_{ref} = 10^{-12} \text{W/m}^2 \cdot 1 \text{m}^2 = 10^{-12} \text{W}$ η ισχύς αναφοράς. Η στάθμη ακουστικής ισχύος σε αντίθεση με την στάθμη ακουστικής πίεσης είναι αντικειμενικό μέγεθος και δεν εξαρτάται από φυσικά μεγέθη όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, η απορροφητικότητα και η πυκνότητα του μέσου διάδοσης. Είναι δηλαδή το μέγεθος εκείνο το οποίο ορίζει την ικανότητα της πηγής να αλλάζει την πίεση του μέσου διάδοσης αλλάζοντας την ισχύ της ακουστικής πηγής.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ανθρώπινο αφτί δεν παρουσιάζει την ίδια ευαισθησία σε όλες τις συχνότητες, ενώ το ακουστικό ανθρώπινο φάσμα περιορίζεται στις συχνότητες από 16 Hz μέχρι 20 kHz. Παράλληλα, η ύπαρξη μονότονων τόνων σε θόρυβο είναι ιδιαίτερα ενοχλητική για τον άνθρωπο. Εν τέλει οι λόγοι για τους οποίους μετριέται ο θόρυβος εμπλέκουν ανθρώπους, συνεπώς έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον η ανθρώπινη αντίδραση στον θόρυβο παρά ο ήχος σαν φυσικό φαινόμενο. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για την κατάλληλη μέτρηση και ανάλυση του θορύβου. Οι μετρήσεις θορύβου πραγματοποιούνται με ειδικά όργανα μέτρησης, τα ηχώμετρα. Τα ηχώμετρα είναι σχεδιασμένα ώστε να παρέχουν αντικειμενικά και επαναλήψιμα αποτελέσματα μετρήσεων της στάθμης ηχητικής πίεσης, η οποία αποτελεί το αποτέλεσμα καταγραφής των μεταβολών της πίεσης του αέρα (ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., n.d.). Η μέτρηση της στιγμιαίας ηχητικής στάθμης δεν είναι πολύ εύκολη ούτε ακριβής, ενώ στην περίπτωση που θέλουμε να καταγράψουμε την στιγμιαία στάθμη ενός κυμαινόμενου θορύβου η δυσκολία αυξάνει σημαντικά. Τη λύση του προβλήματος τη δίνει ένα άλλο μέγεθος, η ισοδύναμη στάθμη θορύβου (L_{eq}) η οποία μετριέται σε db. Η ισοδύναμη στάθμη θορύβου είναι ο χρονικός μέσος όρος του θορύβου, έχει δηλαδή σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με αυτό του πραγματικού θορύβου. Με άλλα λόγια η στάθμη L_{eq} αντιπροσωπεύει την ηχοστάθμη ενός αμετάβλητου θορύβου που προκαλεί την ίδια ενόχληση με τον κυμαινόμενο θόρυβο. Η σχέση που ορίζει τη στάθμη αυτή είναι :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0(t)} \right)^2 \right]$$

Εξίσωση 2.8

Οι περισσότεροι ήχοι αποτελούνται από διάφορες συχνότητες. Για να εκτιμήσουμε σωστά την υποκειμενική αντίληψη ενός θορύβου θα έπρεπε να μετρηθεί η ένταση του για κάθε συχνότητα, πράγμα πρακτικά αδύνατο. Για την περιγραφή του θορύβου μετριέται η στάθμη της ηχητικής έντασης σε καθορισμένες περιοχές συχνοτήτων, οι οποίες ονομάζονται ζώνες συχνοτήτων ή φασματικές

ζώνες. Στην επιστήμη της ακουστικής η περιοχή συχνοτήτων χωρίζεται σε ζώνες ογδός ή οκτάβες και τελικά γίνεται μόνο μία μέτρηση σε κάθε οκτάβα. Οκτάβα είναι κάθε ζώνη συχνοτήτων που ο λόγος της αρχικής συχνότητας f_1 με την τελική f_2 ισούται με 2. Η οκτάβα είναι μονάδα μέτρησης διαστήματος συχνοτήτων και λαμβάνει την ονομασία της από την κεντρική συχνότητα του κάθε διαστήματος. Ο λόγος δυο συνεχόμενων κεντρικών συχνοτήτων ισούται επίσης με 2. Για πιο λεπτομερή ανάλυση του σήματος η περιοχή συχνοτήτων χωρίζεται σε ζώνες μικρότερου εύρους, τις ζώνες τριτοκτάβας (Σωτηροπούλου, 1996). Στις τριτοκτάβες ισχύει :

$$f_2/f_1 = 2^{1/3}$$

Εξίσωση 2.9

Στον παρακάτω πίνακα (Acoustics, 2002b) παρουσιάζονται οι συνήθεις οκτάβες με τις κεντρικές τους συχνοτήτες.

Οκτάβα	Κεντρική συχνότητα οκτάβας (Hz)	Όρια συχνοτήτων οκτάβας (Hz)
1	16	11-22
2	31.5	22-44
3	63	44-88
4	125	88-175
5	250	175-350
6	500	350-700
7	1000	700-1400
8	2000	1400-2800
9	4000	2800-5600
10	8000	5600-11200
11	16000	11200-22400

Πίνακας 2.3 : Συνήθεις οκτάβες

Το σήμα που λαμβάνει το ηχώμετρο μπορεί να υποστεί διαφόρων τύπων επεξεργασία. Συνηθίζεται να διέρχεται από κατάλληλο σταθμιστικό κύκλωμα, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η περίπλοκη απόκριση του ανθρώπινου αφτιού

κατά συχνότητα στο ακουστικό φάσμα. Σταθμιστικό κύκλωμα είναι το κύκλωμα εκείνο το οποίο παρεμβάλλεται στα όργανα μέτρησης ήχου και έχει τη δυνατότητα να περιορίζει ή να ενισχύει κατά πλάτος και σε διαφορετικό βαθμό τις διάφορες συνιστώσες του ηχητικού φάσματος. Έτσι έχουν δημιουργηθεί τα διεθνώς τυποποιημένα κυκλώματα A, B, C, D προοριζόμενα για χρήση σε διάφορες περιπτώσεις. Εκτός από τα προαναφερθέντα σταθμιστικά κυκλώματα ορισμένα ηχόμετρα έχουν επίσης γραμμικό κύκλωμα L_{in} ή αλλιώς Z, το οποίο επιτρέπει στο ηχητικό σήμα να διέλθει αδιαμόρφωτο. Από τα φίλτρα αυτά τα B και D έχουν σχεδόν καταργηθεί και χρησιμοποιούνται κυρίως το A και λιγότερο τα C και Z. Αναλυτικότερα έχουμε :

Σταθμιστικό κύκλωμα A (A weighted sound pressure level):

Η Α-ζυγισμένη ηχοστάθμη (dBA) είναι ένα φυσικό μέγεθος που μετρά τη στάθμη του ήχου σε dB, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπ' όψη την ποικίλη ευαισθησία του οργάνου της ακοής στις διάφορες συχνότητες. Μια εκτίμηση θορύβου που έχει φιλτραριστεί από Α-συνάρτηση βάρους αποτελεί μια καλή προσέγγιση του πως το ανθρώπινο αφτί αντιλαμβάνεται αυτό το θόρυβο. Επομένως για να περιγραφεί ένας ήχος που περιέχει μεγάλη ποικιλία συχνοτήτων με ένα τρόπο αντιπροσωπευτικό της ανθρώπινης απόκρισης πρέπει να περιοριστεί η επίδραση των υψηλών και μεσαίων συχνοτήτων σε σχέση με τις μεσαίες συχνότητες που μένουν ως έχουν. Η τελική ηχοστάθμη λέγεται Α-σταθμισμένη ή στάθμη θορύβου και μετρείται σε dBA.

Η Α-σταθμισμένη ηχοστάθμη προσαρμόζει τις τιμές των dB αναφορικά με την ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού στις διάφορες συχνότητες του φάσματος και μετά αθροίζει τις διαφορετικές στάθμες. Προσομοιάζει καλύτερα από τις υπόλοιπες ηχοστάθμες την υποκειμενική αντίληψη του ανθρώπου για την ένταση του ήχου γι' αυτό και είναι η πιο διαδεδομένη.

Ο τύπος που ορίζει τη διόρθωση που πρέπει να υποστεί το χωρίς ζύγισμα dB είναι :

$$W_A = 10 \log \frac{1.562339 \cdot f^4}{(f^2 + 107.65265^2) \cdot (f^2 + 737.86223^2)} + 10 \log \frac{2.24288 \cdot 10^6 \cdot f^4}{(f^2 + 20.598997^2) \cdot (f^2 + 12194.22^2)}$$

Εξίσωση 2.10

Σταθμιστικό κύκλωμα C (C weighted sound pressure level)

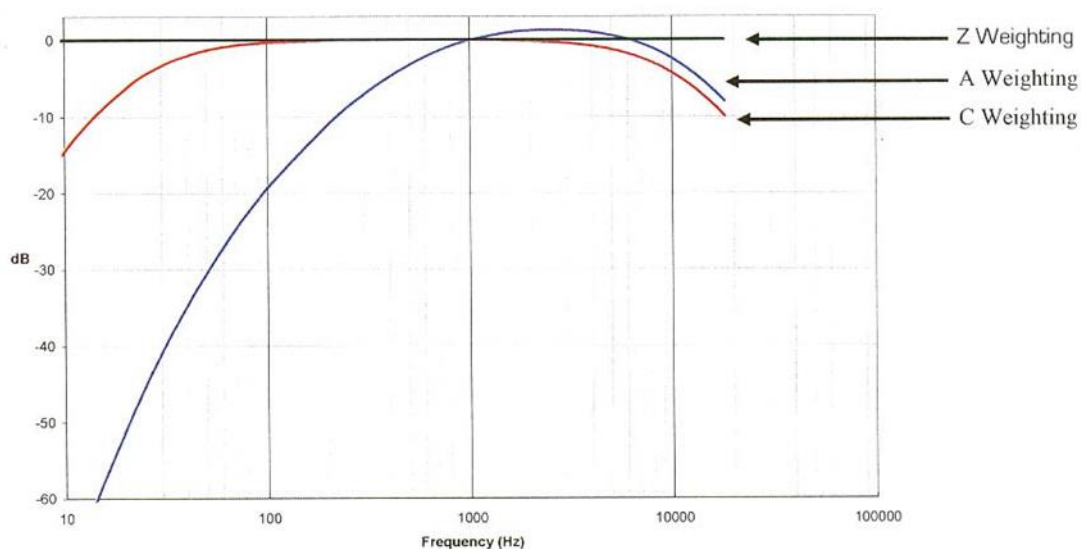
Το σταθμιστικό κύκλωμα C χρησιμοποιείται συνήθως για μετρήσεις υψηλότερου επιπέδου και για καθορισμό επιπέδων ηχητικής πίεσης ακμών (Peak-sound pressure

levels). Αν και η A στάθμιση χρησιμοποιείται ευρέως για μετρήσεις θορύβου γενικού σκοπού, η C στάθμιση συσχετίζεται καλύτερα με την ανθρώπινη απόκριση σε υψηλά επίπεδα θορύβου και μετριέται σε dBС.

Σταθμιστικό κύκλωμα Z (Z weighted sound pressure level)

Το σταθμιστικό κύκλωμα Z (Zero = μηδέν) υποδεικνύει ότι δεν έχει κάποια στάθμιση συχνότητας. Στην πραγματικότητα υπάρχει στάθμιση της τάξεως του ± 1.5 dB στο εύρος από 10 μέχρι 20000 Hz. Η στάθμιση Z εισήχθη για να αντικαταστήσει το γραμμικό κύκλωμα ή αλλιώς επίπεδη στάθμιση και επιτρέπει στο σήμα να διέρχεται αδιαμόρφωτο. Μετριέται σε dBZ.

Παρακάτω στην εικόνα 2.13 εμφανίζονται οι καμπύλες διόρθωσης συχνότητας για τις τρεις σταθμίσεις ενώ στον πίνακα 2.4 υπάρχουν οι διορθώσεις για τις σταθμιστικές κλίμακες A και C.



Εικόνα 2.13 : Καμπύλες διόρθωσης A, C και Z στάθμισης

Κέντρο συχνότητας (Hz)	Διόρθωση (dB)	
	A	C
20	-50.5	-6.2
25	-44.7	-4.4
31.5	-39.4	-3.0

40	-34.6	-2.0
50	-30.2	-1.3
63	-26.2	-0.8
80	-22.5	-0.5
100	-19.1	-0.3
125	-16.1	-0.2
160	-13.4	-0.1
200	-10.9	0.0
250	-8.6	0.0
315	-6.6	0.0
400	-4.8	0.0
500	-3.2	0.0
630	-1.9	0.0
800	-0.8	0.0
1000	0.0	0.0
1250	0.6	0.0
1600	1.0	-0.1
2000	1.2	-0.2
2500	1.3	-0.3
3150	1.2	-0.5
4000	1.0	-0.8
5000	0.5	-1.3
6300	-0.1	-2.0
8000	-1.1	-3.0
10000	-2.5	-4.4

12500	-4.3	-6.2
16000	-6.6	-8.5
20000	-9.3	-11.2

Πίνακας 2.4 : Διορθώσεις σταθμίσεων A και C ανά οκτάβα

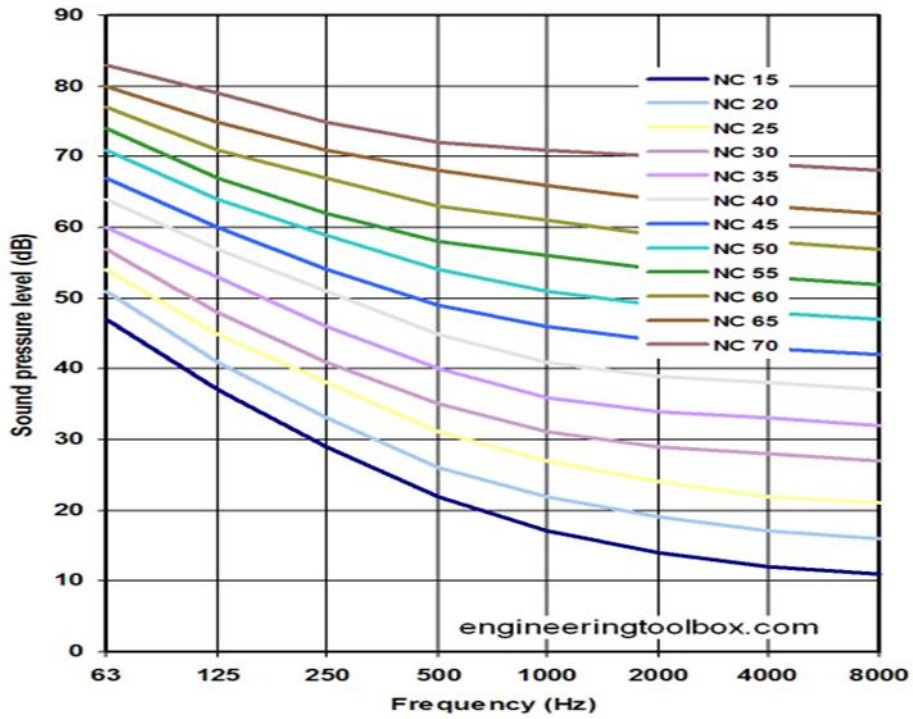
2.8 Καμπύλες κατάταξης θορύβου

Από το 1950 έχει ξεκινήσει μια προσπάθεια θεσμοθέτησης των καμπυλών κατάταξης θορύβου που βασίζονται στις καμπύλες απόκρισης του ανθρώπινου αφτιού. Ωστόσο η εκτίμηση της ανεκτής στάθμης θορύβου δεν είναι εύκολη υπόθεση καθώς σημαντικό ρόλο παίζει ο υποκειμενικός παράγοντας. Οι καμπύλες κριτηρίων θορύβου ισχύουν μόνο για συνεχείς, με ευρύ φάσμα και χωρίς καθαρούς τόνους θορύβους. Ο διαχωρισμός τους υπόκειται ανάλογα με τη χρήση της κάθε μίας. Οι καμπύλες είναι οι εξής :

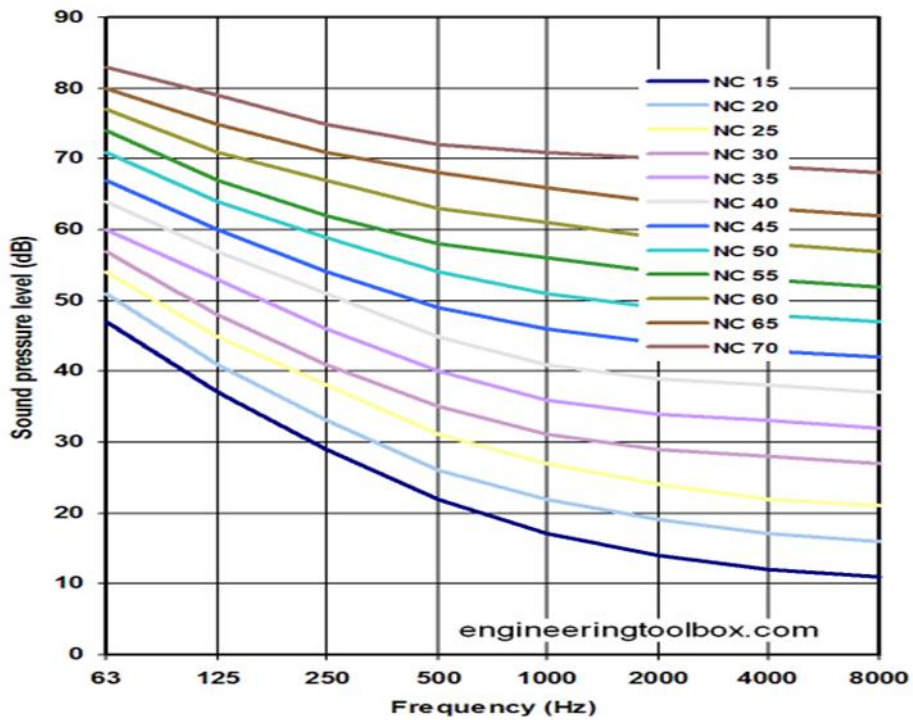
- NC (Noise Criteria)
- PNC (Preferred Noise Criteria)
- NR (Noise Rating)
- BNL (Background Noise Level)
- dBA (ηχοστάθμη)

Οι καμπύλες NC χρησιμοποιούνται για θόρυβο βάθους, οι PNC για τους πρόσθετους θορύβους σε ανοιχτές κατόψεις γραφείων, θαλάμων νοσοκομείων για ακουστική ιδιωτικότητα στην επικοινωνία, οι BNL για θόρυβο βάθους σε χώρους όπου η ομιλία είναι πρωταρχική λειτουργία και τέλος οι NR στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Για το dBA έχει γίνει ανάλυση παραπάνω. Οι καμπύλες είναι βελτιωμένες όσον αφορά την απόκριση του ανθρώπου σε υψηλές και χαμηλές συχνότητες αλλά δεν είναι τυποποιημένες κατά ΕΛΟΤ ή ISO οπότε έχουν μάλλον ποιοτικό χαρακτήρα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες NC και NR που χρησιμοποιούνται περισσότερο.



Εικόνα 2.14 : Καμπύλες NC



Εικόνα 2.15 : Καμπύλες NR

3 Πρότυπο IEC 61400.11 και μεθοδολογία μετρήσεων

Για τις μετρήσεις θορύβου της ανεμογεννήτριας εφαρμόστηκε το πρότυπο IEC 61400.11 με τίτλο «Ανεμογεννήτριες - Τεχνικές μετρήσεων ακουστικού θορύβου» (61400-11, 2006). Σύμφωνα με το πρότυπο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θα έπρεπε να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, οι προϋποθέσεις αυτές τηρήθηκαν στο μέγιστο δυνατό βαθμό όπου ήταν δυνατό, ωστόσο υπήρξαν περιπτώσεις κατά τις οποίες εξωγενείς παράγοντες δεν επέτρεψαν την εφαρμογή τους.

3.1 Σκοπός του προτύπου

Το πρότυπο IEC 61400 έχει σκοπό να παράσχει μια μεθοδολογία η οποία θα εξασφαλίζει συνέπεια και ακρίβεια στις μετρήσεις και στην ανάλυση των ακουστικών εκπομπών από ανεμογεννήτριες. Παρουσιάζονται διαδικασίες μετρήσεων που επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό των ηχητικών εκπομπών μιας ανεμογεννήτριας. Αυτό συμπεριλαμβάνει χρησιμοποίηση μεθόδων αξιολόγησης ηχητικών εκπομπών σε τοποθεσίες κοντά στη γεννήτρια, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα εξαιτίας της διάδοσης του ήχου, αλλά αρκετά μακριά ώστε να μετριέται ο πραγματικός, πεπερασμένος ήχος της πηγής. Οι διαδικασίες προορίζονται να διευκολύνουν τον χαρακτηρισμό του θορύβου μιας ανεμογεννήτριας σε σχέση με ένα εύρος ταχυτήτων και κατευθύνσεων ανέμου. Το πρότυπο αυτό δεν περιορίζεται σε ανεμογεννήτριες συγκεκριμένου μεγέθους ή τύπου. Έτσι η τυποποίηση των διαδικασιών αυτών θα διευκολύνει επιπλέον τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ανεμογεννητριών.

3.2 Περιγραφή της μεθόδου

Στην ενότητα αυτή ορίζονται οι διαδικασίες που θα χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση, την ανάλυση και την αναφορά των ακουστικών εκπομπών μιας ανεμογεννήτριας. Ο εξοπλισμός και η βαθμονόμηση του προσδιορίζονται για να εξασφαλίσουν ακρίβεια και συνέπεια τόσο στις ακουστικές όσο και στις μη ακουστικές μετρήσεις. Επιπλέον προσδιορίζονται όλες οι απαιτούμενες μη ακουστικές μετρήσεις που χρειάζονται για τον προσδιορισμό των ατμοσφαιρικών συνθηκών, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν τις ακουστικές εκπομπές.

Η εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφεται στο πρότυπο παρέχει την ηχοστάθμη της ακουστικής πίεσης, την ανάλυση ανά τριτοκτάβες του εκπεμπόμενου ακουστικού φάσματος και την ανάλυση της τονικότητας του φάσματος αυτού για ακέραιες ταχύτητες ανέμου από τα 6m/s μέχρι τα 10m/s για μια ανεμογεννήτρια.

Οι μετρήσεις γίνονται σε τοποθεσίες κοντά στην γεννήτρια με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επιρροής από το έδαφος, από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες ή

και από εισαγωγή θορύβου από τον άνεμο. Για να ληφθεί υπόψη το μέγεθος της ανεμογεννήτριας που βρίσκεται υπό εξέταση χρησιμοποιείται μια απόσταση αναφοράς R_0 , βασισμένη στις διαστάσεις της γεννήτριας αυτής.

Οι μετρήσεις γίνονται με μικρόφωνο το οποίο έχει τοποθετηθεί σε μια σανίδα στο έδαφος ώστε αρχικά να μειωθεί ο θόρυβος που δημιουργείται από τον αέρα και κατά δεύτερον να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση από τα διάφορα ήδη εδάφους.

Οι μετρήσεις της ηχοστάθμης της ακουστικής πίεσης και της ταχύτητας ανέμου γίνονται ταυτόχρονα, ανά μικρά χρονικά διαστήματα και για ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου. Οι μετρούμενες ταχύτητες ανέμου μετατρέπονται στις αντίστοιχες ταχύτητες ανέμου σε ύψος αναφοράς 10m και σε μήκος τραχύτητας αναφοράς της τάξεως των 0,05m. Τα επίπεδα θορύβου στις αέριες ταχύτητες ανέμου των 6,7,8,9 και 10m/s αρχικά καθορίζονται και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της φαινόμενης σταθμισμένης-Α εκπεμπόμενης ακουστικής ισχύος.

3.3 Όργανα μέτρησης

Για την εφαρμογή του προτύπου πραγματοποιήθηκαν τόσο ακουστικές όσο και μη ακουστικές μετρήσεις. Ο εξοπλισμός που απαιτείται όσο και αυτός που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται παρακάτω.

3.3.1 Εξοπλισμός ακουστικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται έχουν σκοπό τον προσδιορισμό της συνεχούς, ισοδύναμης σταθμισμένης-Α ηχητικής πίεσης, του ανά τριτοκτάβες ακουστικού φάσματος και του φάσματος στενής ζώνης. Για τις παραπάνω μετρήσεις απαιτείται ηχόμετρο με τα εξής χαρακτηριστικά :

- Πρέπει να είναι τύπου 1 σύμφωνα με το IEC 61804 και η διάμετρος του μικροφώνου δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 13mm.
- Θα πρέπει να έχει σταθερή απόκριση συχνότητας γύρω από ένα φάσμα συχνοτήτων το οποίο εκτείνεται από 45Hz μέχρι 11200Hz.
- Τα φίλτρα τα οποία χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι κλάσης 1 σύμφωνα με το πρότυπο IEC61260.
- Για τον καθορισμό του φάσματος στενής ζώνης ο εξοπλισμός πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις για όργανα τύπου 1 και για ένα εύρος συχνοτήτων από 20Hz μέχρι 11200Hz σύμφωνα με το IEC 61651.

Επιπλέον, για την εξάλειψη της επίδρασης τόσο του εκάστοτε εδάφους όσο και του ανέμου, το μικρόφωνο πρέπει να τοποθετηθεί στο κέντρο μιας επίπεδης πλατφόρμας από σκληρό υλικό, με το διάφραγμα του μικροφώνου να βρίσκεται σε επίπεδο κάθετο με την πλατφόρμα και ο άξονας του μικροφώνου να δείχνει προς την α/γ όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Η πλατφόρμα θα πρέπει να είναι κυκλική ή τετράγωνη με διάμετρο ή πλευρά αντίστοιχα τουλάχιστον ενός μέτρου και

κατασκευασμένη από υλικό ακουστικά σκληρό, όπως από ξύλο κόντρα πλακέ πάχους τουλάχιστον 12mm ή από μέταλλο πάχους 2.5mm. Για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης στα αποτελέσματα των μετρήσεων εξαιτίας των γωνιών της σανίδας μετρήσεων, η σανίδα πρέπει να τοποθετηθεί επίπεδα στο έδαφος. Οποιοδήποτε κενό η γωνία κάτω από τη σανίδα πρέπει να ομαλοποιηθεί χρησιμοποιώντας χώμα. Εκτός από την πλατφόρμα χρησιμοποιείται και ανεμοθώρακας για την αντιανεμική προστασία του μικροφώνου. Ο ανεμοθώρακας τοποθετείται στο κέντρο της πλατφόρμας μετρήσεων γύρω από το διάφραγμα του μικροφώνου όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2. Όπου χρειάζεται χρησιμοποιείται και δευτερεύον αντιανεμικό, μεγαλύτερο από το πρωτεύον, το οποίο τοποθετείται στο κέντρο της πλατφόρμας συμμετρικά ως προς το κύριο.

Ολόκληρο το σύστημα των μετρήσεων πρέπει να βαθμονομείται πριν και μετά το πέρας των μετρήσεων σε μια ή και περισσότερες συχνότητες από ακουστικό βαθμονομητή κλάσης 1 σύμφωνα με το IEC 60942 για περιορισμό των σφαλμάτων μέτρησης.

Τέλος, απαιτείται σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων για την μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων ως μέρος του εξοπλισμού.

3.3.2 Εξοπλισμός μη ακουστικών μετρήσεων

Για τον πλήρη καθορισμό των περιβαλλοντικών συνθηκών κάτω από τις οποίες γίνονται οι ακουστικές μετρήσεις χρησιμοποιείται εξοπλισμός μη ακουστικών μετρήσεων. Ο εξοπλισμός αυτός αποτελείται από ανεμόμετρο, ανεμοδείκτη, θερμομέτρο, πιεσόμετρο και εργαλεία μέτρησης απόστασης. Το ανεμόμετρο και ο εξοπλισμός επεξεργασίας του σήματος που παράγει δεν πρέπει να έχει απόκλιση μεγαλύτερη από $\pm 0,2$ m/s σε ταχύτητες ανέμου από 4m/s μέχρι 12m/s. Επιπλέον θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να μετράει το μέσο όρο της ταχύτητας του ανέμου σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, συγχρονισμένα με τις ακουστικές μετρήσεις. Ο ανεμοδείκτης με τη σειρά του πρέπει να έχει μέγιστη απόκλιση της τάξης των $\pm 6^{\circ}$, ενώ η θερμοκρασία πρέπει να μετριέται με ακρίβεια $\pm 1^{\circ}\text{C}$ και η ατμοσφαιρική πίεση με ακρίβεια ± 1 kPa αντίστοιχα.

3.4 Μετρήσεις και τοποθέτηση οργάνων

3.4.1 Τοποθέτηση οργάνων

3.4.1.1 Τοποθέτηση οργάνων ακουστικών μετρήσεων

Ένα μικρόφωνο και προαιρετικά άλλα τρία μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι τέσσερις τοποθεσίες στις οποίες θα πρέπει να τοποθετηθούν τα μικρόφωνα γύρω από την ανεμογεννήτρια παρουσιάζονται στην εικόνα 3.3. Η θέση μέτρησης που βρίσκεται πίσω από το δρομέα της ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται ως η θέση

αναφοράς όπως φαίνεται και από το σχήμα. Η κατεύθυνση των τοποθεσιών δεν θα πρέπει να έχει απόκλιση μεγαλύτερη των $\pm 15^\circ$ αναφορικά με την κατεύθυνση του ανέμου την στιγμή της μέτρησης. Η οριζόντια απόσταση R_0 από τον κάθετο άξονα που βρίσκεται τοποθετημένη η γεννήτρια μέχρι τη θέση κάθε μικροφώνου πρέπει να μετρηθεί με ακρίβεια της τάξεως του 2%, ενώ η ανοχή ως προς τη διατήρηση του μήκους αυτής ανέρχεται στο 20%. Η οριζόντια απόσταση δίνεται από τον τύπο:

$$R_0 = H + \frac{D}{2}$$

Εξίσωση 3.1

Όπου :

H είναι η κάθετη απόσταση από το έδαφος μέχρι το κέντρο του δρομέα

D η διάμετρος του δρομέα.

Η γωνία φ όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4 πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των 25° και 40° .

3.4.1.2 Τοποθέτηση οργάνων μέτρησης ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου

Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης πρέπει να τοποθετηθούν μπροστά από τον δρομέα σε ύψος μεταξύ των 10m και του ύψους του κέντρου του δρομέα. Τα όργανα θα πρέπει να τοποθετηθούν σε απόσταση μεταξύ των 2D και 4D από το κέντρο του δρομέα. Η επιτρεπόμενη περιοχή που επιτρέπεται να τοποθετηθούν το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης φαίνεται στην εικόνα 3.5.

Η γωνία β δίνεται από τον τύπο:

$$\beta = \frac{z - z_{ref}}{H - z_{ref}} (\beta_{max} - \beta_{min}) + \beta_{min}$$

Εξίσωση 3.2

Όπου :

z : το ύψος του ανεμόμετρου

z_{ref} : το ύψος αναφοράς (10m)

H : το ύψος του κέντρου του δρομέα

β_{max} : η μέγιστη γωνία β , $\beta_{max} = 90^\circ$

β_{min} : η ελάχιστη γωνία β , $\beta_{min} = 30^\circ$

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το ανεμόμετρο δεν πρέπει να είναι στον απόηχο κανενός κτιρίου, συμπεριλαμβανομένης και της ανεμογεννήτριας. Ο απόηχος της ανεμογεννήτριας θεωρείται περίπου ίσος με το δεκαπλάσιο της διαμέτρου του δρομέα και με κατεύθυνση πίσω από τον δρομέα. Επιπλέον, το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης θα πρέπει να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην παρεμβαίνουν το ένα στο άλλο.

3.4.2 Ακουστικές μετρήσεις

Οι ακουστικές μετρήσεις θα πρέπει να επιτρέπουν τον καθορισμό των παρακάτω πληροφοριών σχετικά με την εκπομπή θορύβου από την ανεμογεννήτρια στις ακέραιες ταχύτητες ανέμου των 6, 7, 8, 9 και 10 m/s (η ταχύτητα ανέμου μετριέται σε ύψος αναφοράς 10m και σε μήκος τραχύτητας αναφοράς 0,05m). Οι πληροφορίες αυτές είναι:

- Το φαινόμενο επίπεδο ακουστικής ισχύος
- Τα επίπεδα θορύβου ανά τριτοκτάβες
- Η τονικότητα

3.4.2.1 Απαιτήσεις ακουστικών μετρήσεων

Για την σωστή λήψη δεδομένων απαιτούνται μια σειρά προϋποθέσεων κατά τη διάρκεια των ακουστικών μετρήσεων. Οι απαιτήσεις αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια :

1. Το ηχόμετρο πρέπει να βαθμονομείται σε τουλάχιστον μια συχνότητα πριν και μετά από κάθε μέτρηση, ή σε περίπτωση που το μικρόφωνο αποσυνδεθεί για επανατοποθέτηση.
2. Όλα τα ακουστικά σήματα πρέπει να καταγραφούν και να αποθηκευτούν για ανάλυση.
3. Περίοδοι με παρεμβολή θορύβου υποβάθρου (όπως για παράδειγμα από κάποιο αεροπλάνο) πρέπει να παραλειφθούν.
4. Ο θόρυβος περιβάλλοντος πρέπει να μετριέται με την ανεμογεννήτρια σταματημένη, αμέσως πριν ή μετά από κάθε σειρά μετρήσεων θορύβου της ανεμογεννήτριας και με παραπλήσιες συνθήκες περιβάλλοντος.
5. Οι μετρήσεις πρέπει να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων ανέμου.

3.4.2.2 Ακουστικές μετρήσεις στη θέση αναφοράς

3.4.2.2.1 Α-σταθμισμένο επίπεδο ηχητικής πίεσης

Το ισοδύναμο συνεχές Α-σταθμισμένο επίπεδο ηχητικής πίεσης του θορύβου της ανεμογεννήτριας πρέπει να μετρηθεί από τη θέση αναφοράς με μια σειρά τουλάχιστον 30 μετρήσεων, παράλληλα με τη μέτρηση της ταχύτητας ανέμου. Κάθε μέτρηση θα πρέπει να έχει διάρκεια τουλάχιστον 1 λεπτού. Τουλάχιστον τρεις

μετρήσεις πρέπει να έχουν απόκλιση μικρότερη από $\pm 0,5\text{m/s}$ γύρω από κάθε ακέραια τιμή ταχύτητας ανέμου.

Για τον θόρυβο υποβάθρου πρέπει να γίνουν τουλάχιστον 30 μετρήσεις συνολικά, καλύπτοντας το εύρος των ταχυτήτων ανέμου.

3.4.2.2.2 Μετρήσεις θορύβου ανά τριτοκτάβες

Το φάσμα θορύβου ανά τριτοκτάβες της γεννήτριας στη θέση αναφοράς θα πρέπει να προσδιορισθεί ως ο μέσος όρος τουλάχιστον τριών φασμάτων, το κάθε ένα από τα οποία θα μετριέται για τουλάχιστον 1 λεπτό, σε κάθε ακέραια τιμή ταχύτητας ανέμου. Ως ελάχιστο πρέπει να μετρηθούν τριτοκτάβες με κεντρικές συχνότητες από 50 Hz μέχρι 10kHz.

Οι μετρήσεις θορύβου υποβάθρου πρέπει να ικανοποιούν τις ίδιες απαιτήσεις.

3.4.2.2.3 Μετρήσεις στενής ζώνης

Για κάθε ακέραια τιμή ταχύτητας ανέμου απαιτούνται τουλάχιστον 2 λεπτά Α-σταθμισμένου θορύβου τόσο με την ανεμογεννήτρια σε λειτουργία, όσο και εκτός λειτουργίας. Τα 2 λεπτά μετρήσεων θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά σε ακέραιες τιμές ταχύτητας ανέμου

3.4.3 Μη ακουστικές μετρήσεις

Οι παρακάτω μη ακουστικές μετρήσεις είναι απαραίτητες.

3.4.3.1 Μετρήσεις ταχύτητας ανέμου

Αν χρησιμοποιηθεί ανεμόμετρο για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, τα αποτελέσματα θα πρέπει να προσαρμοστούν για ύψος 10m και μήκος τραχύτητας αναφοράς σύμφωνα με την εξίσωση 3.3.

Το ίδιο ισχύει και για τις μετρήσεις θορύβου με την ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας.

Τα δεδομένα αυτά πρέπει να συλλεχθούν και στη συνέχεια από αυτά να προκύψουν οι μέσοι όροι για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους με τις ακουστικές μετρήσεις.

3.4.3.2 Κατεύθυνση ανέμου

Η κατεύθυνση του ανέμου θα παρατηρείται από έναν ανεμοδείκτη για να εξασφαλίσουμε ότι οι θέσεις των ακουστικών μετρήσεων βρίσκονται εντός των προβλεπόμενων ορίων, ενώ επίσης για να μετράμε τη θέση του ανεμοδείκτη. Τα στοιχεία θα συλλεχθούν και θα υπολογιστούν οι μέσοι όροι για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους των ακουστικών μετρήσεων.

3.4.3.3 Άλλες ατμοσφαιρικές συνθήκες

Η πίεση και η θερμοκρασία του αέρα πρέπει να μετριοούνται και να καταγράφονται τουλάχιστον κάθε 2 ώρες.

3.5 Διαδικασίες μείωσης δεδομένων

3.5.1 Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα ανέμου που μετριέται σε ύψος z ή καθορίζεται από τις μετρήσεις της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε ύψος H θα πρέπει να διορθωθούν στις ταχύτητες ανέμου v_s σε συνθήκες αναφοράς σύμφωνα με την εξίσωση :

$$V_S = V_Z \left[\frac{\ln \left(\frac{z_{ref}}{z_{0ref}} \right) \ln \left(\frac{H}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{H}{z_{0ref}} \right) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \right]$$

Εξίσωση 3.3

Όπου

Z_{0ref} : το μήκος τραχύτητας αναφοράς, 0,05m

Z_0 : το μήκος τραχύτητας

H : το ύψος του κέντρου του δρομέα

Z_{ref} : το ύψος αναφοράς, 10m

Z : το ύψος του ανεμόμετρου

Το μήκος τραχύτητας Z_0 μπορεί να υπολογιστεί με μετρήσεις ταχύτητας ανέμου σε διαφορετικά ύψη ή να εκτιμηθεί σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Τύπος εδάφους	Μήκος τραχύτητας Z_0
Νερό, χιόνι, αμμώδης περιοχές	0,0001m
Ανοιχτές/επίπεδες/γυμνές/με κουρεμένο γρασίδι περιοχές	0,01m
Χαμηλή βλάστηση	0,05m
Προάστια, δάση, θαμνώδες έδαφος	0,3m

Πίνακας 3.1 : Ενδεικτικές τιμές μήκους τραχύτητας

3.5.2 Διόρθωση για θόρυβο υποβάθρου

Χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που περιγράφονται στις παρακάτω παραγράφους, όλα τα μετρημένα επίπεδα ηχητικής πίεσης θα πρέπει να διορθωθούν για τον υπολογισμό της επιρροής του θορύβου υποβάθρου. Για τα

επίπεδα θορύβου υποβάθρου των οποίων ο μέσος όρος είναι 6dB ή περισσότερα κάτω από το συνδυασμό των θορύβων ανεμογεννήτριας και υποβάθρου, η διορθωμένη τιμή θα προκύψει χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο :

$$L_S = 10 \log[10^{(0.1L_{S+n})} - 10^{(0.1L_n)}]$$

Εξίσωση 3.4

Όπου :

L_S : το ισοδύναμο συνεχές επίπεδο ηχητικής πίεσης, σε dB, όταν η γεννήτρια λειτουργεί μόνη της

L_{S+n} : το ισοδύναμο συνεχές επίπεδο ηχητικής πίεσης, σε dB, του συνδυασμού γεννήτριας και υποβάθρου

L_n : το ισοδύναμο συνεχές επίπεδο ηχητικής πίεσης του υποβάθρου, σε dB

Αν το ισοδύναμο συνεχές επίπεδο ηχητικής πίεσης του συνδυασμού ανεμογεννήτριας και υποβάθρου, L_{S+n} , είναι μικρότερο από 6dB αλλά μεγαλύτερο από 3dB από το επίπεδο του υποβάθρου, τότε αυτό διορθώνεται με αφαίρεση 1,3dB αλλά όλα τα διορθωμένα αποτελέσματα σημαδεύονται με έναν αστερίσκο, “*”. Αυτά τα δεδομένα δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό του φαινομένου επιπέδου ηχητικής ισχύος ή της κατευθυντικότητας. Αν η διαφορά είναι μικρότερη από 3dB πρέπει να αναφερθεί ότι ο θόρυβος της ανεμογεννήτριας είναι μικρότερος από τον θόρυβο υποβάθρου.

3.5.3 Φαινόμενα επίπεδα ηχητικής ισχύος

Από το πρότυπο προτείνεται να χρησιμοποιηθεί μια 4^{ου} βαθμού παλινδρόμηση. Ωστόσο, ακόμη και με τη βοήθεια υπολογιστή αυτό είναι δύσκολο και χρονοβόρο. Διαφορετικά προτείνεται να χρησιμοποιηθεί ομαδοποίηση δεδομένων και γραμμική παρεμβολή μεταξύ των διαστημάτων ομαδοποίησης για τον καθορισμό των επιπέδων ηχητικής ισχύος για ακέραιες τιμές ταχυτήτων ανέμου. Οι ομάδες θα έχουν 1m/s πλάτος, ανοιχτό στο κάτω άκρο και κλειστό στο άνω. Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα στοιχείο σε κάθε πλευρά της ακέραιης τιμής. Από την παραπάνω ανάλυση θα καθοριστεί η τιμή του $L_{Aeq,k}$ για ταχύτητες από 6m/s μέχρι και 10m/s. Το $L_{Aeq,k}$ είναι το αποτέλεσμα της επίλυσης 2^{ου} βαθμού παλινδρόμησης για τις ακέραιες τιμές ταχυτήτων ανέμου.

Παρόμοια ανάλυση πρέπει να γίνει για τα 30 ή περισσότερα δεδομένα του θορύβου υποβάθρου. Οι τιμές του $L_{Aeq,k}$ για τις ακέραιες τιμές ταχυτήτων πρέπει να διορθωθούν με τον θόρυβο υποβάθρου στις ίδιες τιμές και να χαρακτηριστούν ως $L_{Aeq,c,k}$.

Το φαινόμενο επίπεδο ηχητικής ισχύος $L_{WA,k}$ υπολογίζεται από τα διορθωμένα επίπεδα ηχητικής πίεσης $L_{Aeq,c,k}$ στις ακέραιες τιμές ταχυτήτων ανέμου στη θέση αναφοράς χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \log \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right]$$

Εξίσωση 3.5

Όπου

$L_{Aeq,c,k}$: είναι το διορθωμένο, A-σταθμισμένο επίπεδο ηχητικής πίεσης υποβάθρου στις ακέραιες τιμές ταχυτήτων ανέμου και υπό συνθήκες αναφοράς

R_1 : είναι η απόσταση από το κέντρο του δρομέα μέχρι το μικρόφωνο όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4

S_0 :είναι η περιοχή αναφοράς, 1m^2

Η σταθερά των 6dB στην εξίσωση χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση του σχεδόν διπλασιασμού της ηχητικής πίεσης που προκύπτει κατά τις μετρήσεις πάνω στην κυκλική πλατφόρμα.

3.5.4 Επίπεδα ανά τριτοκτάβες

Τα επίπεδα θορύβου ανά τριτοκτάβες της γεννήτριας πρέπει να διορθωθούν με τα αντίστοιχα επίπεδα θορύβου υποβάθρου ανά τριτοκτάβες.

3.5.5 Τονικότητα

3.5.5.1 Γενική μεθοδολογία

Η παρουσία τόνων στο θόρυβο σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου πρέπει να καθοριστεί από την ανάλυση στενής ζώνης.

Η τονική ανάλυση πρέπει να καλύπτει το ίδιο εύρος ταχυτήτων ανέμου με τις μετρήσεις των επιπέδων ηχητικής ισχύος. Για κάθε ομαδοποιημένη ταχύτητα ανέμου, οι δυο μονόμετρες περιόδους που βρίσκονται πιο κοντά στην ακέραια τιμή ταχύτητας ανέμου πρέπει να αναλυθούν.

Οι δυο μονόμετρες μετρήσεις πρέπει να χωριστούν σε 12 περιόδους των 10 δευτερολέπτων , από τις οποίες θα προκύψουν 12 φάσματα στενής ζώνης χρησιμοποιώντας το παράθυρο Hanning.

Η ανάλυση συχνοτήτων πρέπει να είναι μεταξύ του εύρους που φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Συχνότητα Hz	Λιγότερα από 2000	2000-5000
Ανάλυση συχνότητας	2 με 5 Hz	2 με 12,5 Hz

Πίνακας 3.2 : Ανάλυση συχνότητων

Για κάθε φάσμα των 10 δευτερολέπτων, όπου $j=1$ με 12 και $k=6,7,8,9,10$:

- Το επίπεδο ηχητικής πίεσης $L_{pt,j,k}$ των τόνων πρέπει να καθοριστεί
- Το επίπεδο ηχητικής πίεσης του επικαλυπτόμενου θορύβου $L_{pn,j,k}$ σε μια κρίσιμη ζώνη γύρω από τον τόνο πρέπει να καθοριστεί
- Η τονικότητα $\Delta L_{tn,j,k}$, η διαφορά μεταξύ ηχητικής πίεσης τόνου και επικαλυπτόμενου θορύβου πρέπει να υπολογιστεί

Η ολική τονικότητα ΔL_k υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των 12 υποδιαιρέσεων $\Delta L_{tn,j,k}$.

Το εύρος ζώνης μιας κρίσιμης ζώνης πρέπει να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$Critical\ Bandwidth = 25 + 75 \left(1 + 1.4 \left[\frac{f_c}{1000} \right]^2 \right)^{0.69}$$

Εξίσωση 3.6

Όπου f_c είναι η κεντρική συχνότητα σε Hz.

3.5.5.2 Εντοπισμός πιθανών τόνων

Μια προκαταρκτική εξέταση των τόνων είναι απαραίτητη για την κατηγοριοποίηση των γραμμών των φασμάτων.

Η ακόλουθη διαδικασία χρησιμοποιείται για την αναγνώριση πιθανών τόνων:

- Εντοπισμός τοπικών μεγίστων στο φάσμα
- Υπολογισμός μέσου όρου σε κάθε κρίσιμη ζώνη που έχει κέντρο κάποιο τοπικό μέγιστο, χωρίς να υπολογίζεται η γραμμή του τοπικού μεγίστου και οι δυο ακριανές γραμμές.
- Αν το τοπικό μέγιστο είναι πάνω από 6dB από τον μέσο όρο του θορύβου επικάλυψης, τότε είναι ένας πιθανός τόνος

3.5.5.3 Κατηγοριοποίηση των γραμμών του φάσματος στην κρίσιμη ζώνη

Η κρίσιμη ζώνη πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε η κεντρική της συχνότητα να συμπίπτει με τη συχνότητα που είναι πιθανός τόνος. Για πιθανούς τόνους με συχνότητες μεταξύ 20Hz και 70Hz η κρίσιμη ζώνη είναι 20Hz μέχρι 120Hz.

Μέσα σε κάθε κρίσιμη ζώνη, κάθε γραμμή του φάσματος χαρακτηρίζεται ως τόνος, ως επικάλυψη θορύβου ή τίποτα από τα δυο χρησιμοποιώντας την παρακάτω διαδικασία.

A) Υπολογίζουμε το $L_{70\%}$ επίπεδο ηχητικής πίεσης, όπου το $L_{70\%}$ είναι ο μέσος όρος του 70% των γραμμών του φάσματος στην κρίσιμη ζώνη με το χαμηλότερο επίπεδο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.7.

B) Καθορίζουμε ένα κρίσιμο επίπεδο το οποίο ισούται με το $L_{70\%} + 6\text{dB}$ όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8.

- Μια γραμμή χαρακτηρίζεται ως συγκάλυψη αν το επίπεδο της είναι χαμηλότερο από το κρίσιμο επίπεδο. $L_{pn,avg}$ είναι ο μέσος όρος όλων των γραμμών που χαρακτηρίζονται επικαλύψεις (εικόνα 3.9).
- Μια γραμμή χαρακτηρίζεται ως τόνος αν το επίπεδό της ξεπερνάει το $L_{pn,avg} + 6\text{dB}$.
- Όπου υπάρχουν πολλές γειτονικές γραμμές που χαρακτηρίζονται ως τόνοι, αναγνωρίζεται μόνο η γραμμή με το υψηλότερο επίπεδο. Οι γειτονικές γραμμές τότε, χαρακτηρίζονται ως τόνοι μόνο αν τα επίπεδα τους διαφέρουν λιγότερο από 10dB από την γραμμή με το υψηλότερο επίπεδο.
- Μια γραμμή χαρακτηρίζεται ως τίποτα από τα δυο αν δεν μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως τόνος ή ως επικάλυψη. Οι γραμμές αυτές του φάσματος δεν χρησιμοποιούνται περαιτέρω στην ανάλυση (εικόνα 3.10)

3.5.5.4 Καθορισμός του επιπέδου του τόνου

Το επίπεδο ηχητικής πίεσης του τόνου $L_{pt,j,k}$ ορίζεται ως το άθροισμα όλων των γραμμών ενός φάσματος που χαρακτηρίζονται τόνοι σε μια κρίσιμη ζώνη. Όπου αυτό περιλαμβάνει δυο ή περισσότερες γειτονικές γραμμές εφαρμόζεται μια διόρθωση για τη χρήση του Hanning window. Αυτό απαιτεί τη διαίρεση του αθροίσματος με 1,5.

3.5.5.5 Διορθώσεις για θόρυβο υποβάθρου

Ένα φάσμα 2 λεπτών στενής ζώνης θορύβου υποβάθρου πρέπει να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας τις δυο μονόμετρες μετρήσεις που βρίσκονται πλησιέστερα στην ακέραια τιμή ταχύτητας ανέμου. Για σύγκριση με την αντίστοιχη ανάλυση θορύβου της ανεμογεννήτριας, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι οι τόνοι δεν προέρχονται από τον θόρυβο υποβάθρου. Το $L_{pn,avg,j,k}$ πρέπει να διορθωθεί σύμφωνα με την εξίσωση 3.4, χρησιμοποιώντας το επίπεδο θορύβου υποβάθρου στην ίδια κρίσιμη ζώνη και τις ακέραίες τιμές ταχύτητας ανέμου όπως χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση τονικότητας. Το επίπεδο θορύβου υποβάθρου υπολογίζεται από τον μέσο όρο όλων των γραμμών στην κρίσιμη ζώνη. Το επίπεδο θορύβου υποβάθρου πρέπει να είναι τουλάχιστον 6dB χαμηλότερο από το επίπεδο θορύβου της ανεμογεννήτριας στην σχετική κρίσιμη ζώνη. Αν αυτό δεν

ισχύει, θα πρέπει να καταγραφεί ότι ο θόρυβος επικάλυψης επηρεάζεται από τον θόρυβο υποβάθρου.

3.5.5.6 Καθορισμός του επιπέδου θορύβου επικάλυψης

Το επίπεδο θορύβου επικάλυψης, $L_{pn,j,k}$, καθορίζεται ως εξής:

$$L_{pn,j,k} = L_{pn,avg,j,k} + 10 \log \left[\frac{\text{Critical bandwidth}}{\text{Effective noise bandwidth}} \right]$$

Εξίσωση 3.7

Όπου $L_{pn,avg,j,k}$, είναι ο διορθωμένος μέσος όρος των φασματικών γραμμών που χαρακτηρίζονται επικαλύψεις στην κρίσιμη ζώνη του υποβάθρου.

Το αποτελεσματικό εύρος ζώνης θορύβου είναι 1,5 φορές η ανάλυση συχνότητας, η οποία περιλαμβάνει την διόρθωση για τη χρήση του Hanning window.

3.5.5.7 Καθορισμός τονικότητας

Η διαφορά μεταξύ επιπέδου τόνου, $L_{pt,j,k}$, και επιπέδου θορύβου επικάλυψης στην αντίστοιχη κρίσιμη ζώνη δίνεται από:

$$\Delta L_{tn,j,k} = -10 \log \left[\frac{\text{Critical bandwidth}}{\text{Effective noise bandwidth}} \right]$$

Εξίσωση 3.8

Τα 12 $\Delta L_{tn,j,k}$ μετατρέπονται ως μέσος όρος σε ένα ΔL_k , $k=6,7,8,9,10$ για κάθε ταχύτητα ανέμου.

Τόνοι σε διαφορετικά φάσματα με συχνότητες μέσα στο 10% του κρίσιμου εύρους φάσματος πρέπει να θεωρούνται ως ο ίδιος τόνος. Σε αυτήν την περίπτωση η μέση συχνότητα χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ακουστικότητας.

3.5.5.8 Ακουστικότητα

Για κάθε τιμή ΔL_k μια διόρθωση εξαρτώμενη από τη συχνότητα πρέπει να εφαρμοστεί για να αντισταθμίσει την απόκριση του ανθρώπινου αφτιού για τόνους διαφορετικής συχνότητας.

Η "τονική ακουστικότητα", $\Delta L_{a,k}$, καθορίζεται ως:

$$\Delta L_{a,k} = \Delta L_k - L_a$$

Εξίσωση 3.9

Όπου L_a είναι το κριτήριο ακουστικότητας εξαρτώμενο από συχνότητα και ορίζεται ως εξής:

$$L_a = -2 - \log \left[1 + \left(\frac{f}{502} \right)^{2.5} \right]$$

Εξίσωση 3.10

Όπου f είναι η συχνότητα του τόνου σε Hz.

Να σημειωθεί εδώ ότι το κριτήριο αυτό έχει καθοριστεί από ακουστικές εξετάσεις και αντικατοπτρίζει την υποκειμενική απόκριση ενός “τυπικού” ακροατή σε χρονικά αμετάβλητους τόνους διαφορετικών συχνοτήτων.

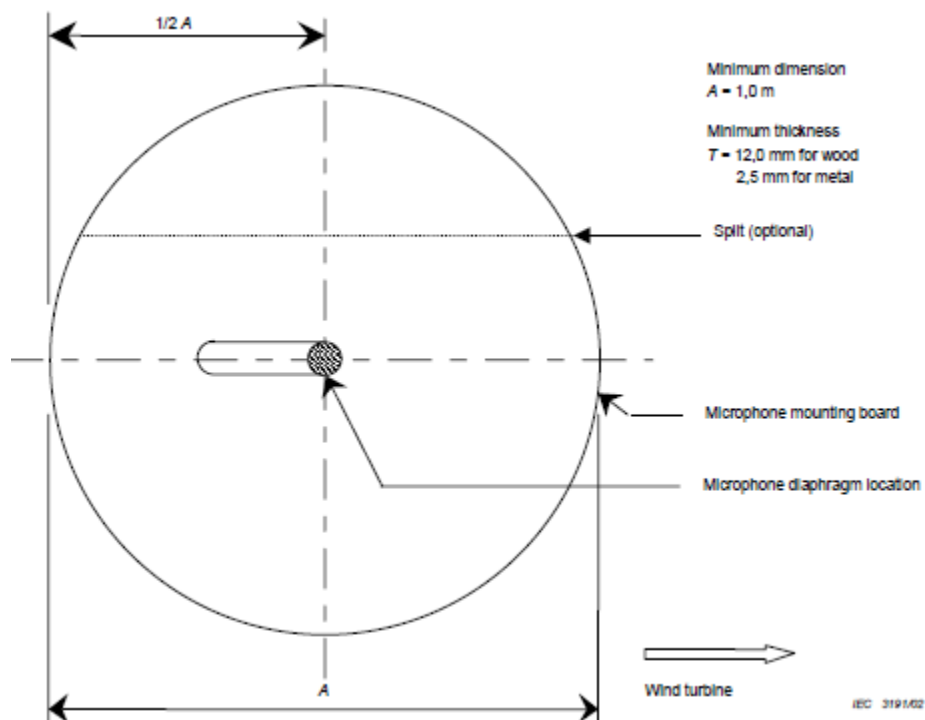
Η αντίστοιχη τιμή του $\Delta L_{a,k}$ πρέπει να υπολογίζεται για κάθε τιμή του ΔL_k . Για τονικές ακουστικότητες που πληρούν τον όρο:

$$\Delta L_{a,k} \geq -3.0 \text{ dB}$$

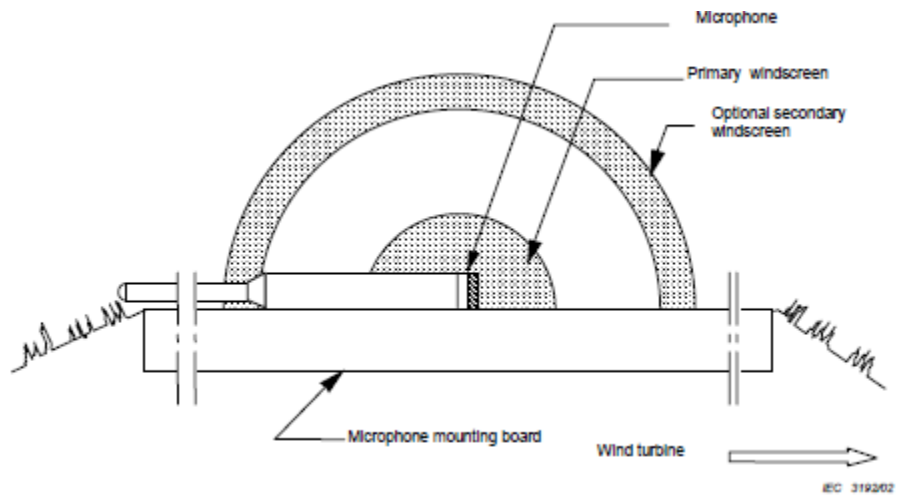
Εξίσωση 3.11

οι τιμές του $\Delta L_{a,k}$ πρέπει να αναφερθούν.

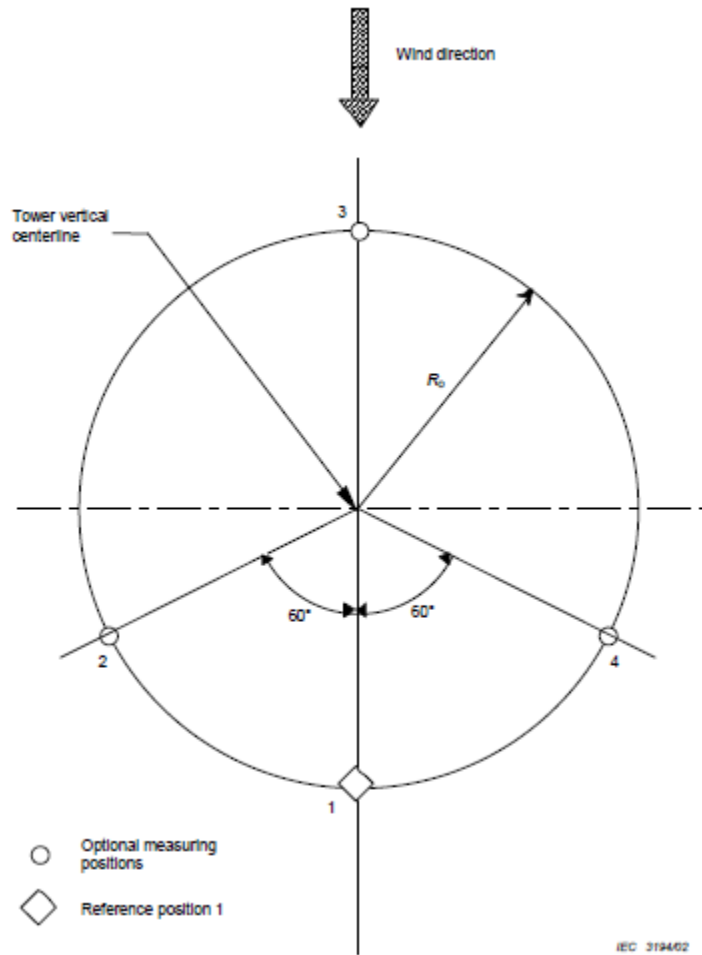
Για τονικές ακουστικότητες που δεν πληρούν τον παραπάνω όρο δεν υπάρχει απαίτηση αναφοράς των τιμών τους.



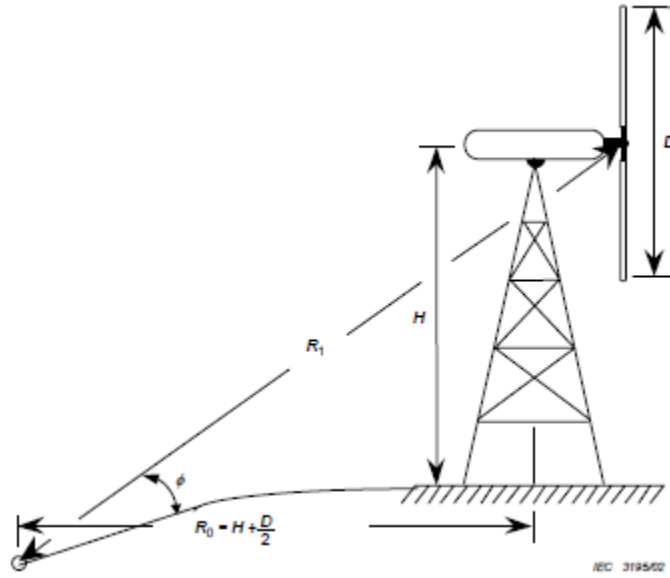
Εικόνα 3.1 : Τοποθέτηση μικροφώνου στην πλακέτα μετρήσεων - Κάτωψη



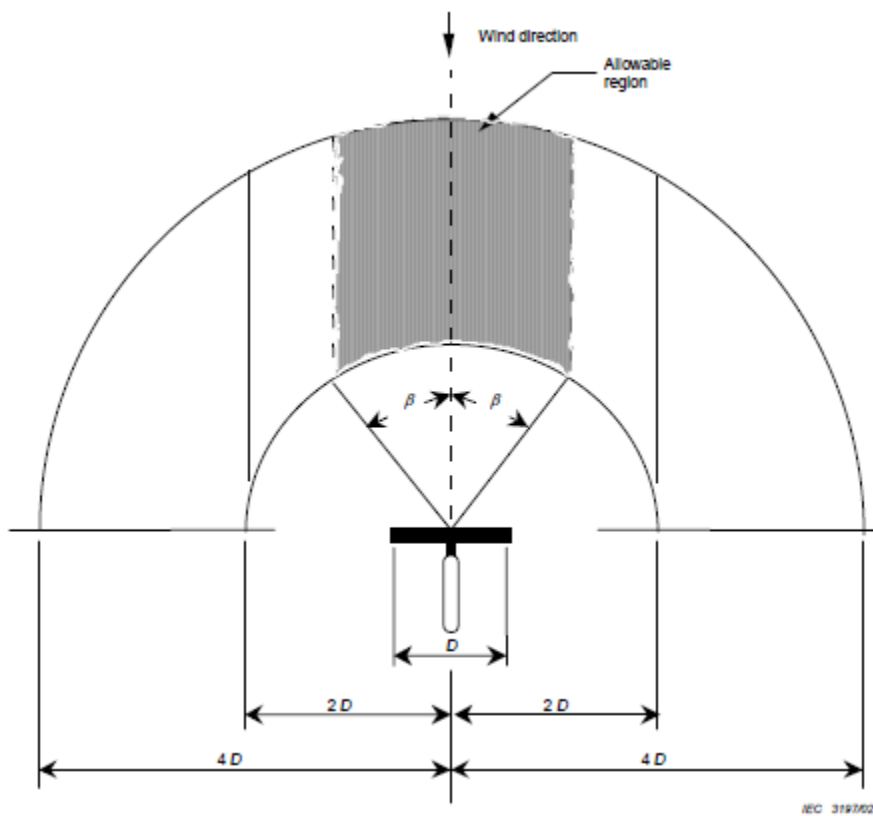
Εικόνα 3.2 : Τοποθέτηση μικροφώνου στην πλακέτα – Πλάγια όψη



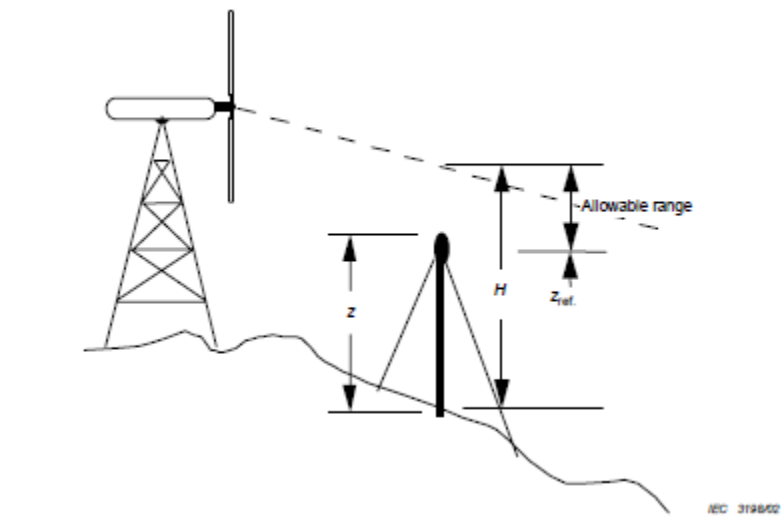
Εικόνα 3.3 : Θέσεις τοποθέτησης μικροφώνων



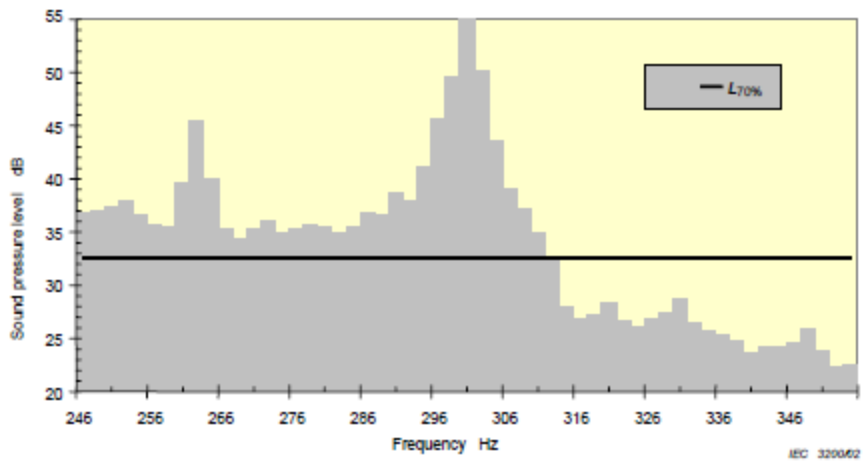
Εικόνα 3.4 : Επίδειξη μεγεθών R_0 και R_1 για γεννήτρια οριζοντίου άξονα.



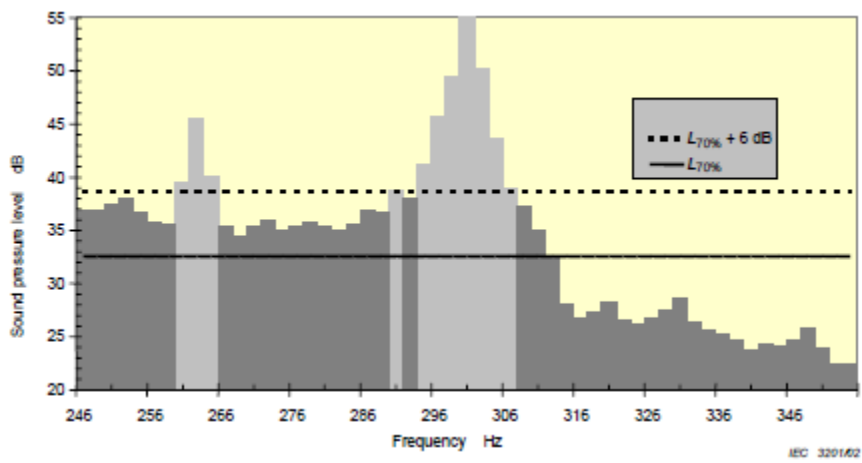
Εικόνα 3.5 : Επιτρεπτές θέσεις για το μετεωρολογικό ιστό - Κάτοψη



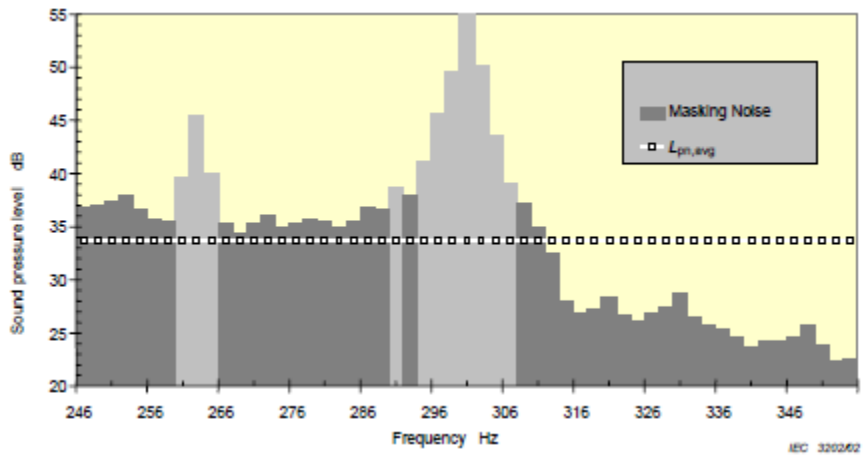
Εικόνα 3.6 : Επιτρεπτές θέσεις για το μετεωρολογικό ιστό – Πλάγια όψη



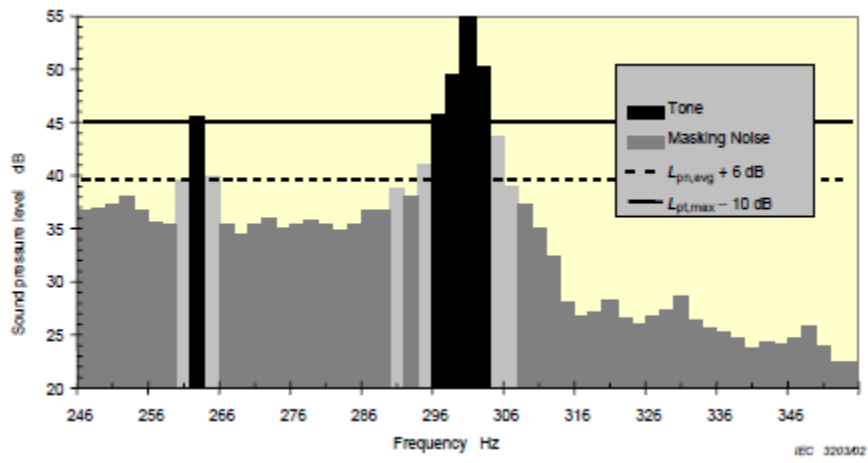
Εικόνα 3.7 : Επίδειξη του $L_{70\%}$ σε κρίσιμη ζώνη



Εικόνα 3.8 : Επίδειξη του κριτηρίου $L_{70\%} + 6 \text{ dB}$



Εικόνα 3.9 : Επίδειξη του επιπέδου $L_{pn,avg}$



Εικόνα 3.10 : Επίδειξη κατηγοριοποίησης όλων των φασματικών γραμμών

4 Μετρήσεις θορύβου εργαστηρίου

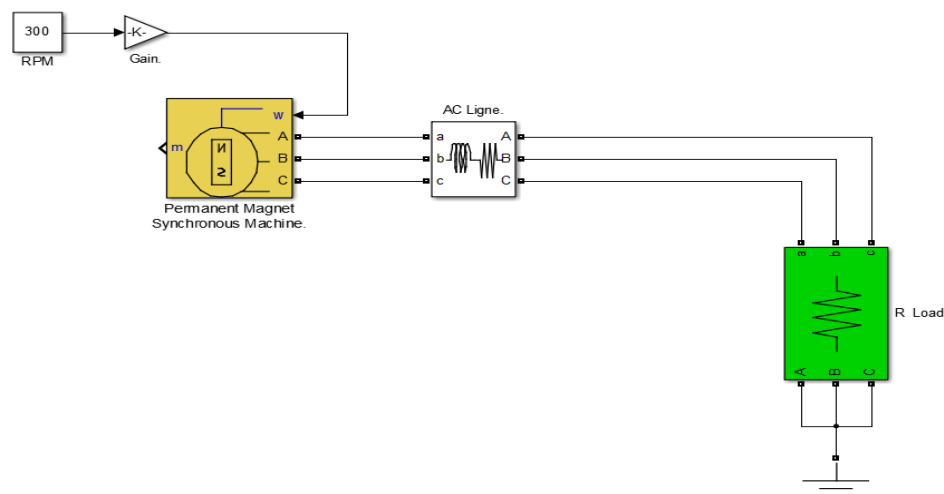
Η διπλωματική εργασία χωρίστηκε σε δυο μέρη. Αρχικά έγιναν μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον ενώ στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις σε πεδίο δοκιμών για πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στο πεδίο δοκιμών έγιναν αρκετές προσπάθειες αρχικά στην περιοχή Μελέμι στη Ραφήνα και στη συνέχεια στην περιοχή του Μαραθώνα, ωστόσο οι μετρήσεις αυτές θα αναλυθούν παρακάτω.

Οι μετρήσεις εργαστηρίου είχαν διπλό σκοπό. Αφενός αποσκοπούσαν στην εξοικείωση με τη χρήση του εξοπλισμού και αφετέρου έγιναν δοκιμές διάφορων διατάξεων καθώς και μελέτη της επιρροής αυτών στην παραγωγή θορύβου. Η χρήση των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν είχαν σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των αρμονικών ρεύματος που παράγονται κατά τη λειτουργία της γεννήτριας σε συνδυασμό με τις ανορθωτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην συνολική εκπομπή θορύβου. Εφαρμόσαμε δηλαδή μεθόδους ενεργού ελέγχου όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, μειώνοντας τις δυνάμεις που ασκούνται εντός της μηχανής.

Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής :

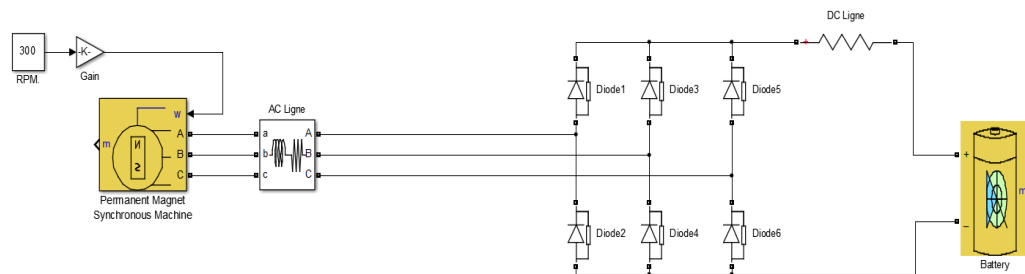
A) διάταξη αναφοράς. Έγιναν μετρήσεις με τη γεννήτρια στο κενό, ώστε να υπάρχει μια αναφορά για το συνολικό θόρυβο βάθους εκτός του ηλεκτρικού.(**Βάθους**)

B) διάταξη φορτίου. Μετρήσεις με τη γεννήτρια συνδεδεμένη απευθείας σε ωμικό τριφασικό φορτίο ώστε να μην υπάρχει παρουσία αρμονικών.(**3Φ φορτίο**)



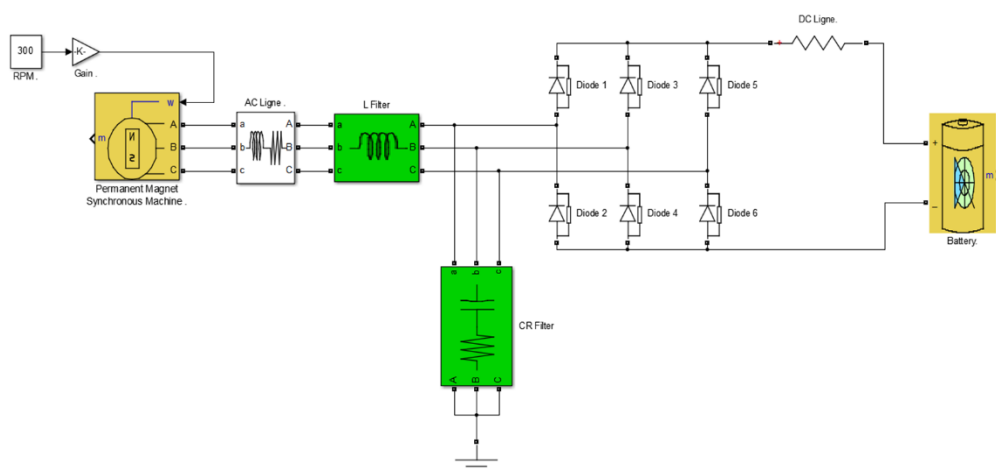
Εικόνα 4.1 : Συνδεσμολογία γεννήτριας με τριφασικό φορτίο

Γ) διάταξη συσσωρευτή χωρίς φίλτρο. Μετρήσεις με τη γεννήτρια συνδεδεμένη σε μπαταρίες με τη μεσολάβηση τριφασικού 6-παλμικού ανορθωτή, ώστε να έχουμε παρουσία αρμονικών χωρίς φιλτράρισμα. **(Χωρίς φίλτρο)**



Εικόνα 4.2 : Συνδεσμολογία γεννήτριας με συσσωρευτή χωρίς φίλτρο

Δ διάταξη συσσωρευτή με χρήση φίλτρου. Μετρήσεις με τη γεννήτρια συνδεδεμένη σε μπαταρίες με τη μεσολάβηση τριφασικού 6-παλμικού ανορθωτή όπως στην προηγούμενη περίπτωση, αλλά με τη διαφορά ότι προστέθηκε φίλτρο για τον περιορισμό των αρμονικών που παράγονται από τον ανορθωτή. **(Με φίλτρο)**



Εικόνα 4.3 : Συνδεσμολογία γεννήτριας με συσσωρευτή με χρήση φίλτρου

4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Έγιναν δυο σειρές μετρήσεων. Στην πρώτη μέτρηση για την καταγραφή του επιπέδου της στάθμης θορύβου που παράγει η γεννήτρια, χρησιμοποιήθηκε Α στάθμιση. Στη δεύτερη σειρά μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τόσο η Α στάθμιση όσο και η C στάθμιση. Η Α στάθμιση είναι φίλτρο που κόβει τις υψηλές και τις χαμηλές συχνότητες προσομοιάζοντας με αυτόν τον τρόπο την απόκριση του ανθρώπινου αφτιού. Η C στάθμιση χρησιμοποιήθηκε καθώς κόβει μόνο τις υψηλές συχνότητες προσφέροντας έτσι πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα στις χαμηλές συχνότητες.



Εικόνα 4.4 : Εικόνα ηχομέτρου κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων

Για την πρώτη σειρά μετρήσεων καταγράφηκαν τα επίπεδα στάθμης θορύβου της γεννήτριας σε ένα ευρύ φάσμα από τα 16Hz έως τα 20kHz, όσο είναι και το ανθρώπινο ακουστικό φάσμα, ενώ παράλληλα καταγράφηκαν η μέση τάση εξόδου της γεννήτριας, η μέση ένταση ρεύματος της γεννήτριας, η ροπή που παράγεται, η συχνότητα ρεύματος καθώς και οι διάφορες αρμονικές που παράγονται από τον ανορθωτή. Οι μετρήσεις είχαν διάρκεια 16sec η κάθε μία και έγιναν για διάφορες

τιμές ρεύματος. Οι τιμές αυτές ήταν 1, 3, 5, 7 και 9 A. Συνολικά, δηλαδή, καταγράφονταν τα προαναφερθέντα στοιχεία, για τις παραπάνω τιμές παραγόμενου ρεύματος σε όλες τις διατάξεις.

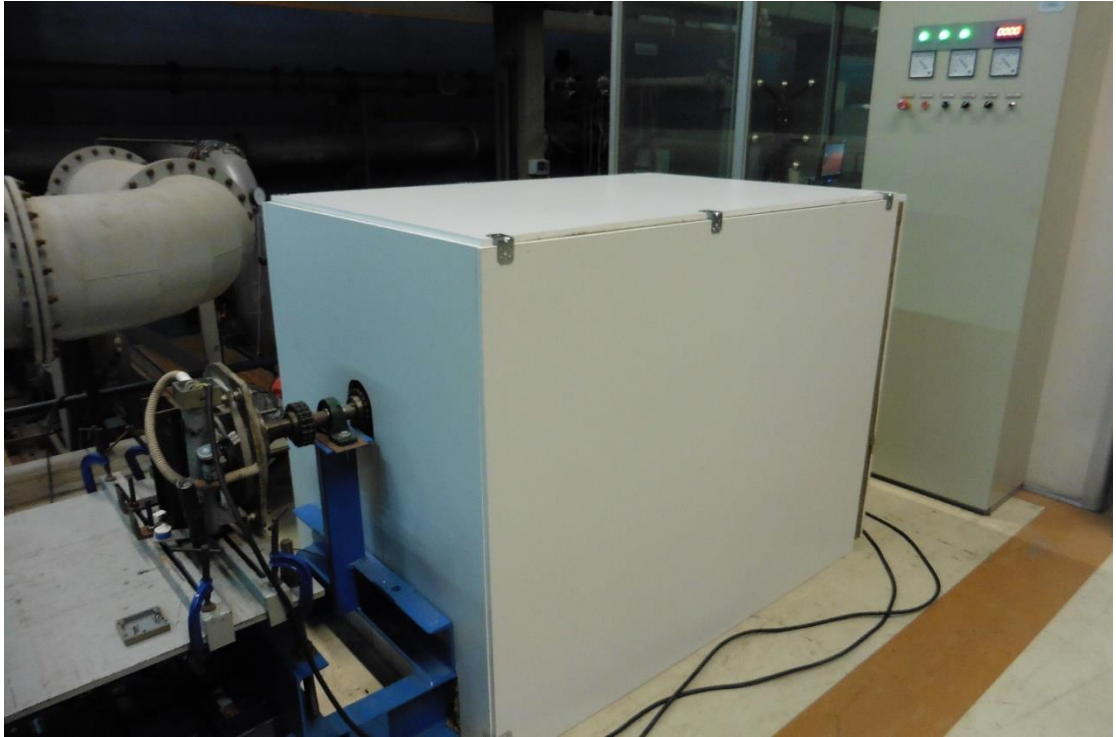
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναλύεται στη συνέχεια. Αρχικά ρυθμίζαμε τις στροφές του κινητήρα που έστρεφε τη γεννήτρια μας ώστε αυτή να παράγει την τιμή ρεύματος που χρειαζόμασταν κάθε φορά. Στη συνέχεια καταγράψαμε τα μεγέθη για τη γεννήτρια στο κενό ως ένδειξη αναφοράς, κατόπιν τα αντίστοιχα για σύνδεση με φορτίο, ύστερα για σύνδεση με ανορθωτή και μπαταρίες, ώστε να εμφανιστούν αρμονικές, και τέλος για σύνδεση με ανορθωτή, φίλτρο και μπαταρίες, με σκοπό τη μείωση των ανωτέρω αρμονικών και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδρασή τους στον παραγόμενο από τη γεννήτρια θόρυβο.

Στη δεύτερη σειρά μετρήσεων ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, με τη διαφορά ότι κάθε μέτρηση πραγματοποιούνταν δυο φορές. Την πρώτη φορά χρησιμοποιούσαμε στάθμιση A, ενώ τη δεύτερη στάθμιση C.

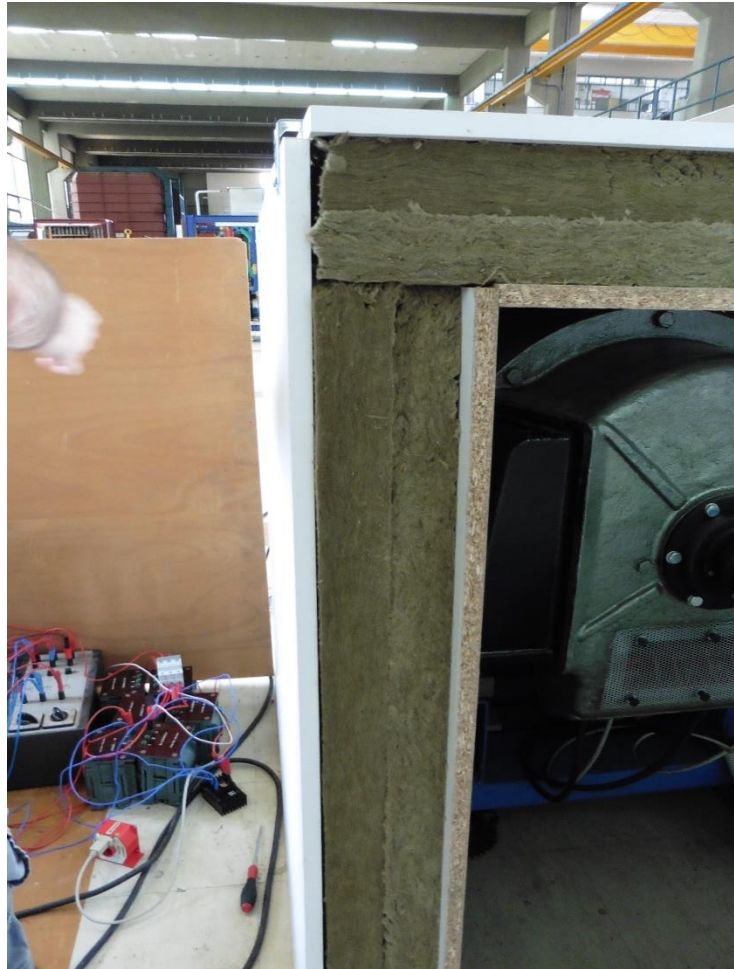
Για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο “καθαρή” εικόνα του θορύβου που παράγει η γεννήτρια, τα πειράματα εκτελέστηκαν στο εργαστήριο Μηχανολόγων Μηχανικών διαφορετικές μέρες και ώρες χωρίς την παρουσία αυξημένου περιβαλλοντικού θορύβου. Για την επίτευξη χαμηλού περιβαλλοντικού θορύβου οι μετρήσεις έλαβαν χώρα απογευματινές και βραδινές ώρες, ενώ μετρήσεις έγιναν και πρωινές ώρες Σαββάτου. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό καθώς ο κινητήρας περιστροφής της γεννήτριας ήταν ιδιαίτερα θορυβώδης. Για το λόγο αυτόν έγινε προσπάθεια ηχομόνωσής του με τη δημιουργία πλαισίου με ηχομονωτικό υλικό. Η κατασκευή έγινε κατόπιν υποδείξεως επαγγελματία ηχολήπτη. Η κατασκευή αποτελείται από ένα εσωτερικό πλαίσιο, ένα εξωτερικό πλαίσιο, ενώ ενδιάμεσα παρεμβάλλεται ηχομονωτικό υλικό. Το εσωτερικό πλαίσιο είναι από ξύλο mdf το οποίο περικλείει τον κινητήρα χωρίς να έρχεται σε επαφή μαζί του για την αποφυγή μεταφοράς δονήσεων και στηρίζεται στο έδαφος. Το εξωτερικό πλαίσιο είναι επίσης από mdf, ίδιου σχήματος με το εσωτερικό αλλά μεγαλύτερων διαστάσεων ώστε να το περικλείει και παράλληλα να υπάρχει χώρος για την τοποθέτηση του ηχομονωτικού υλικού. Το διάκενο μεταξύ των δυο πλαισίων είναι 10cm. Όλες οι πλευρές είναι βιδωμένες μεταξύ τους για μεγαλύτερη σταθερότητα και εξασφάλιση παρόμοιων συνθηκών διεξαγωγής των μετρήσεων. Εξάιρεση αποτελεί η πίσω πλευρά η οποία είναι αποσπώμενη και κατασκευασμένη από τα ίδια υλικά. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να υπάρχει αφενός η δυνατότητα ελέγχου του κινητήρα και αφετέρου να είναι εφικτός ο απαραίτητος εξαερισμός – ψύξη του κινητήρα όταν δεν εκτελούνται μετρήσεις. Το ηχομονωτικό υλικό που επιλέχθηκε είναι πετροβάμβακας εξαιτίας της ευκολίας εύρεσης και χρήσης του σε συνδυασμό με την χαμηλή τιμή και την σχετικά καλή ηχομονωτική του δυνατότητα. Χρησιμοποιήθηκαν τόσο σκληρές όσο και μαλακές πλάκες πετροβάμβακα πάχους 5cm η κάθε μία σε όλο το επικαλυπτόμενο

εμβαδόν. Οι διαφορετικές αυτές πλάκες έχουν διαφορετική πυκνότητα και είναι κατάλληλες για την αποκοπή διαφορετικών συχνοτήτων θορύβου. Φωτογραφίες από την κατασκευή του ηχομονωτικού καλουπιού παρατίθενται παρακάτω.

Τέλος, οι μετρήσεις αυτές αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου και επεξεργάζονται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.5 : Ηχομονωτικό κουτί



Εικόνα 4.6 : Πλάκες πετροβάμβακα

4.2 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Για την καταγραφή των μετρούμενων μεγεθών χρειαστήκαμε τον κατάλληλο εξοπλισμό. Το ηχόμετρο που χρησιμοποιήσαμε είναι της εταιρίας Brüel&Kjær , μοντέλο 2271, κλάσης 1. Το μικρόφωνο με το οποίο είναι εξοπλισμένο το συγκεκριμένο ηχόμετρο είναι τύπου 4189. Είναι ένα πυκνωτικό, μόνιμα πολωμένο μικρόφωνο που χαρακτηρίζεται από υψηλή πιστότητα, χαμηλό θόρυβο και επίπεδη απόκριση. Ο βαθμονομητής είναι τύπου 4231, επίσης κλάσης 1. Τα παραπάνω όργανα πληρούν τις προϋποθέσεις του προτύπου IEC 61400.11 για μετρήσεις θορύβου μικρών ανεμογεννητριών που εφαρμόσαμε στις μετρήσεις πεδίου δοκιμών, οπότε θεωρήθηκαν αξιόπιστα και για τις μετρήσεις εργαστηρίου.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός από το εργαστήριο ΣΗΕ ο οποίος αποτελούνταν από τα παρακάτω όργανα :

- Ροπόμετρο
- Αμπεροτσιμπίδα
- Βολτόμετρο
- Συσκευή καταγραφής δεδομένων/παλμογράφος της Yokogawa
- Φορητός υπολογιστής

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των ηχογραφήσεων καθώς και για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε μορφή .xls, επεξεργάσιμη από το Microsoft Office Excel είναι το Measurement Partner Suite της Brüel&Kjær.

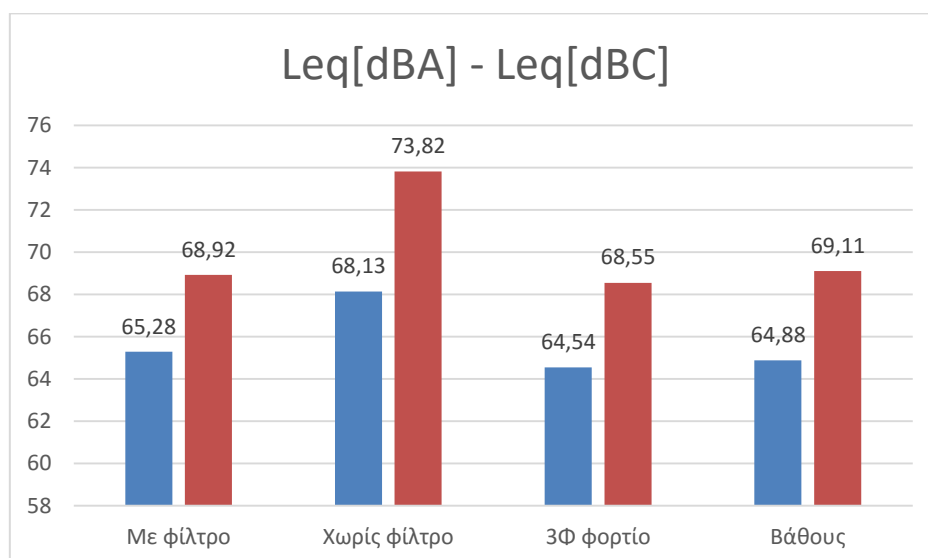
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στην παρακάτω ενότητα γίνεται ανάλυση των μετρήσεων που καταγράφηκαν. Σε κάθε πείραμα τα μεγέθη που μετρούσαμε εκτός από την ηχοστάθμη θορύβου της γεννήτριας ήταν η ροπή της γεννήτριας, η τάση εξόδου, το ρεύμα εξόδου καθώς και οι αρμονικές που δημιουργούνταν εξαιτίας του ανορθωτή. Επιπλέον το ηχόμετρο έχει τη δυνατότητα φασματικής ανάλυσης του μετρούμενου ήχου η οποία και χρησιμοποιήθηκε για καλύτερη κατανόηση του παραγόμενου θορύβου καθώς επίσης και για λεπτομερέστερη ανάλυση και διαχωρισμό των πηγών του. Το χαρακτηριστικό μέγεθος που μετρούσαμε για τον καθορισμό του επιπέδου θορύβου είναι η ισοδύναμη στάθμη θορύβου, L_{eq} , το οποίο περιγράφεται στο κεφάλαιο 2, ενώ για την φασματική ανάλυση επιλέξαμε ανάλυση ανά τριτοκτάβες. Όλες οι μετρήσεις είναι κατηγοριοποιημένες ανά ampere.

4.3.1 ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

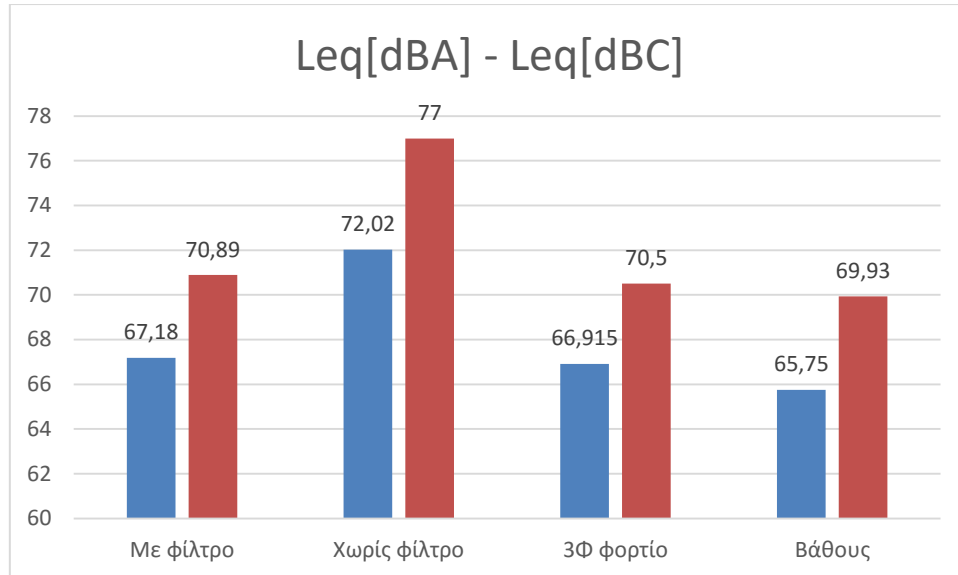
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα με την ισοδύναμη στάθμη θορύβου ανά διάταξη. Όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με Α-στάθμιση έχουν ομαδοποιηθεί για να προκύψει ο μέσος όρος. Οι μετρήσεις με C-στάθμιση παρουσιάζονται ξεχωριστά.

1 AMPERE



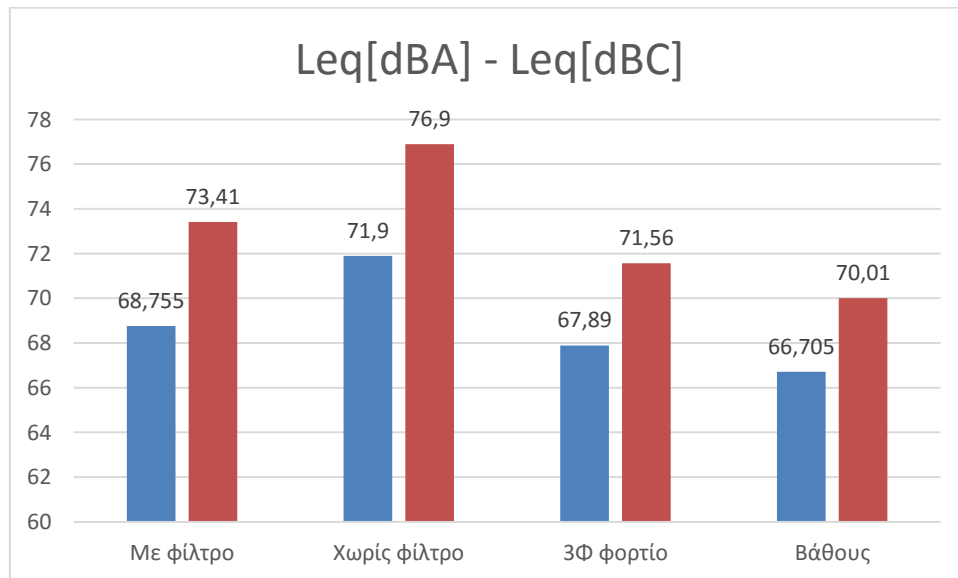
Εικόνα 4.7 : Διάγραμμα Leq[dBA] - Leq[dBC] 1 Ampere

3 AMPERE



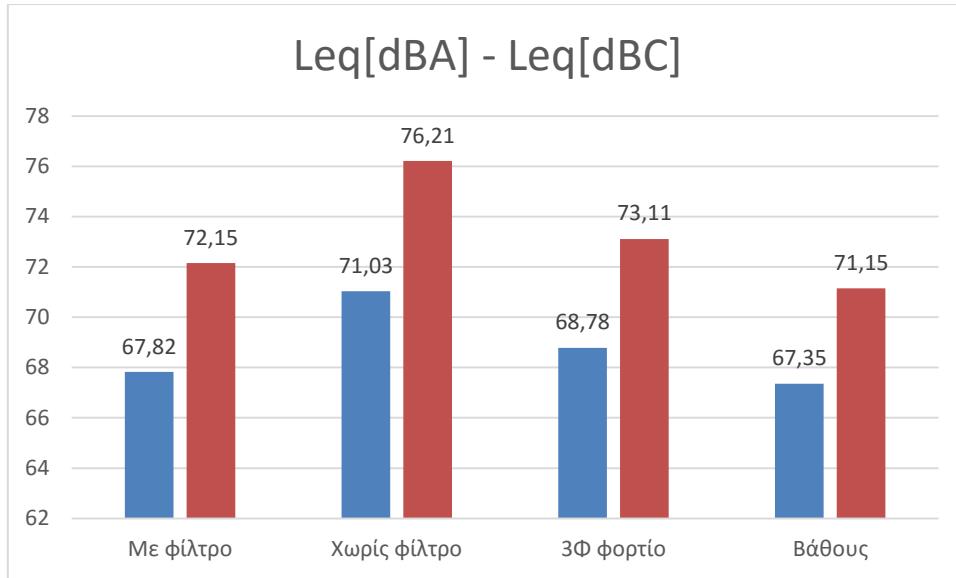
Εικόνα 4.8 : Διάγραμμα Leq[dBA] - Leq[dBC] 3 Ampere

5 AMPERE



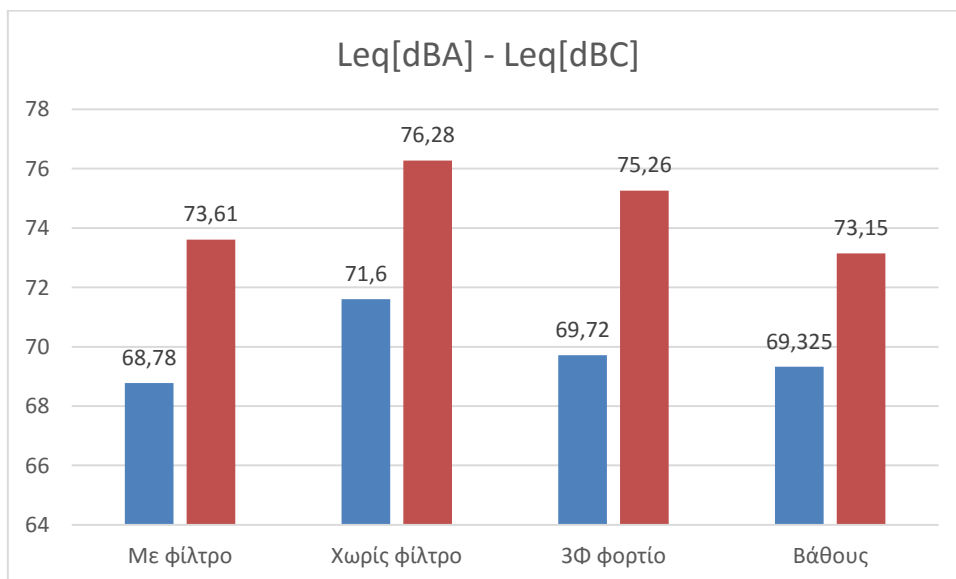
Εικόνα 4.9 : Διάγραμμα Leq[dBA] - Leq[dBC] 5 Ampere

7 AMPERE

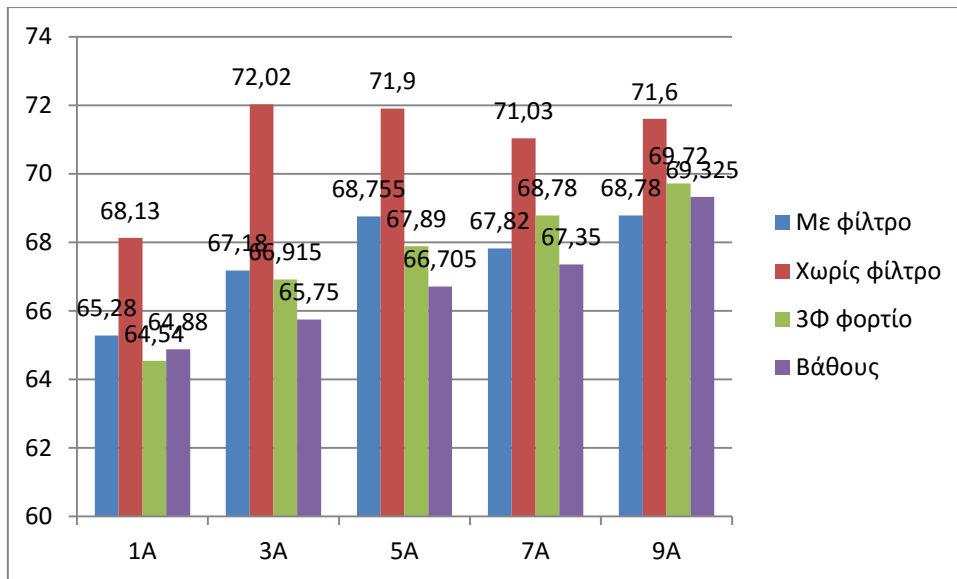


Εικόνα 4.10 : Διάγραμμα Leq[dBA] - Leq[dBC] 7 Ampere

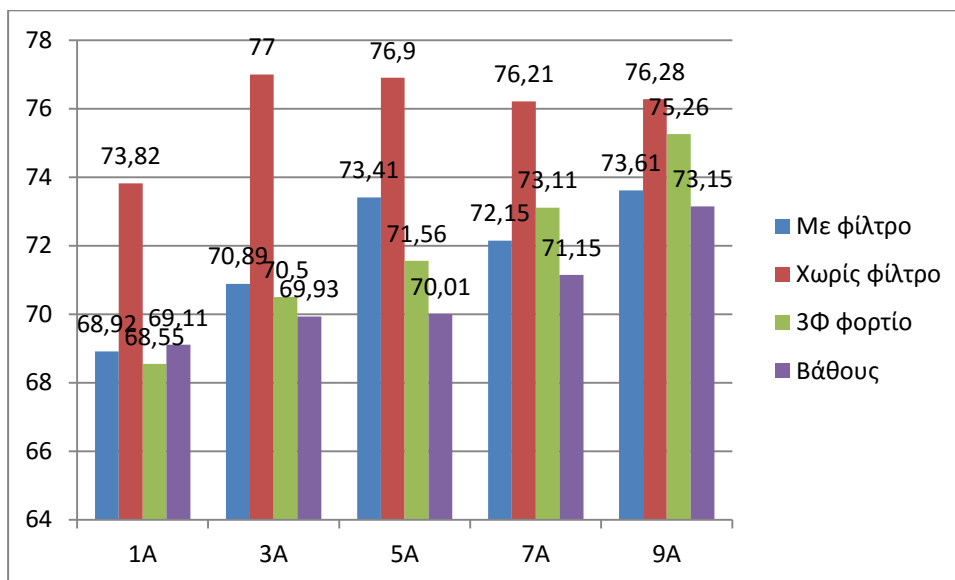
9 AMPERE



Εικόνα 4.11 : Διάγραμμα Leq[dBA] - Leq[dBC] 9 Ampere



Εικόνα 4.12 : Συνολικό διάγραμμα επιπέδων ηχητικής πίεσης ανά διάταξη με A στάθμιση



Εικόνα 4.13 : Συνολικό διάγραμμα επιπέδων ηχητικής πίεσης ανά διάταξη με C στάθμιση

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του παραγόμενου θορύβου από τη γεννήτρια. Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε ότι τα επίπεδα έντασης είναι αρκετά υψηλά καθώς η χαμηλότερη ένταση που μετρήθηκε είναι περίπου 64dB, αρκετά περισσότερα δηλαδή από τα όρια ανοχής σύμφωνα με τη νομοθεσία της χώρας. Ωστόσο ο λόγος που μπορεί να οφείλεται αυτό είναι το ότι οι μετρήσεις έγιναν από απόσταση ενός μέτρου, τη στιγμή που μια γεννήτρια τέτοιων διαστάσεων τοποθετείται σε ύψος τουλάχιστον 10 m, σε ανοιχτό πεδίο και κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ιδιότητα του ήχου να εξασθενεί με την απόσταση είναι καθυστερητικοί παράγοντες σχετικά με την εναρμονισμένη με τους κανόνες λειτουργίας της. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις τόσο με τη A-στάθμιση

όσο και με τη C-στάθμιση, αν και έχουν μια διαφορά 4-6 dB στις αντίστοιχες μετρήσεις, παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Η διαφορά μπορεί εύκολα να εξηγηθεί καθώς όπως έχουμε ήδη αναφέρει τόσο η A όσο και η C στάθμιση αποτελούν διορθώσεις του καθαρού μετρούμενου θορύβου. Οι διορθώσεις στη C στάθμιση είναι σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες στην A στάθμιση στις χαμηλές συχνότητες, γεγονός που εξηγεί το χαμηλότερο επίπεδο που μετρήθηκε με το A φίλτρο. Η όμοια συμπεριφορά που παρατηρούμε είναι ότι ως επί το πλείστον το επίπεδο θορύβου στην αναφορά είναι το χαμηλότερο, ο θόρυβος από τη σύνδεση με φορτίο αυξάνεται όσο αυξάνεται και το ρεύμα στην έξοδο της γεννήτριας, ενώ το επίπεδο της έντασης θορύβου στη σύνδεση με φίλτρο παρουσιάζει μείωση συγκριτικά με το επίπεδο της έντασης θορύβου στη σύνδεση χωρίς φίλτρο που είναι και το υψηλότερο σε όλες τις περιπτώσεις. Μάλιστα παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ των δυο εντάσεων στις περισσότερες περιπτώσεις ξεπερνάει τα 3dB. Το όριο των 3dB, επειδή αναφερόμαστε σε λογαριθμική πρόσθεση εντάσεων, συνεπάγεται υποδιπλασιασμό της μετρούμενης έντασης όταν χρησιμοποιείται το φίλτρο. Η μείωση αυτή αποτελεί πολύ σημαντικό εύρημα καθώς αποδεικνύει την επιρροή των αρμονικών ρεύματος στην παραγωγή θορύβου και δίνει πρόσφορο έδαφος στο πεδίο έρευνας των φίλτρων αυτών για την βελτιστοποίηση της κατασκευής και χρήσης τους σε ανεμογεννήτριες που λειτουργούν σε απομακρυσμένες περιοχές ώστε να παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια στην εκάστοτε κοινωνία χωρίς να προκαλούν προβλήματα ηχορύπανσης. Στη συνέχεια παρατίθενται πίνακες στους οποίους παρουσιάζεται η μείωση σε dB και σε ποσοστό για τις διατάξεις με φίλτρο και χωρίς φίλτρο.

A στάθμιση	Χωρίς φίλτρο	Με φίλτρο	Μείωση	Ποσοστό %
1A	68,13	65,28	2,85	4,183179216
3A	72,02	67,18	4,84	6,720355457
5A	71,9	68,755	3,145	4,374130737
7A	71,03	67,82	3,21	4,519217232
9A	71,6	68,78	2,82	3,938547486
Συνολικό				4,747086026

Πίνακας 4.1 : Σύγκριση θορύβου διατάξεων με φίλτρο και χωρίς φίλτρο με A στάθμιση

C στάθμιση	Χωρίς φίλτρο	Με φίλτρο	Μείωση	Ποσοστό %
1A	73,82	68,92	4,9	6,637767543
3A	77	70,89	6,11	7,935064935

5A	76,9	73,41	3,49	4,538361508
7A	76,21	72,15	4,06	5,327384858
9A	76,28	73,61	2,67	3,500262192
Συνολικό				5,587768207

Πίνακας 4.2 : Σύγκριση θορύβου διατάξεων με φίλτρο και χωρίς φίλτρο με C στάθμιση

4.3.2 ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί η φασματική ανάλυση των παραπάνω μετρήσεων θορύβου. Η ανάλυση έγινε ανά τριτοκτάβες. Με την ανάλυση αυτή καθορίζεται η ένταση του ήχου σε κάθε τριτοκτάβα και να εξάγονται συμπεράσματα τόσο για το είδος του θορύβου (για παράδειγμα θόρυβος χαμηλής συχνότητας) όσο και για την προέλευση του. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τριτοκτάβες, οι κεντρικές τους συχνότητες καθώς και τα όρια συχνοτήτων ανά τριτοκτάβα. Ο πίνακας αυτός είναι απαραίτητος ώστε να μπορέσουμε να ταυτοποιήσουμε σε ποια τριτοκτάβα ανήκει ο ήχος κάθε αρμονικής ρεύματος που μελετάται.

Τριτοκτάβα	Κεντρική Συχνότητα τριτοκτάβας (Hz)	Όρια συχνοτήτων τριτοκτάβας (Hz)
1	12,5	11-13,85913
2	16	13,85913-17,46141
3	20	17,46141-22
4	25	22-27,71826
5	31,5	27,71826-34,92282
6	40	34,92282-44
7	50	44-55,43653
8	63	55,43653-69,84565
9	80	69,84565-88
10	100	88-110,8731
11	125	110,8731-139,6913
12	160	139,6913-176
13	200	176-220,4862

14	250	220,4862-277,7952
15	315	277,7952-350
16	400	350-440,9724
17	500	440,9724-555,5904
18	630	555,5904-700
19	800	700-881,9447
20	1000	881,9447-1111,181
21	1250	1111,181-1400
22	1600	1400-1763,889
23	2000	1763,889-2222,361
24	2500	2222,361-2800
25	3150	2800-3527,779
26	4000	3527,779-4444,723
27	5000	4444,723-5600
28	6300	5600-7055,558
29	8000	7055,558-8889,446
30	10000	8889,446-11200
31	12500	11200-14111,12
32	16000	14111,12-17778,89
33	20000	17778,89-22400

Πίνακας 4.3 : Συνήθεις τριτοκτάβες

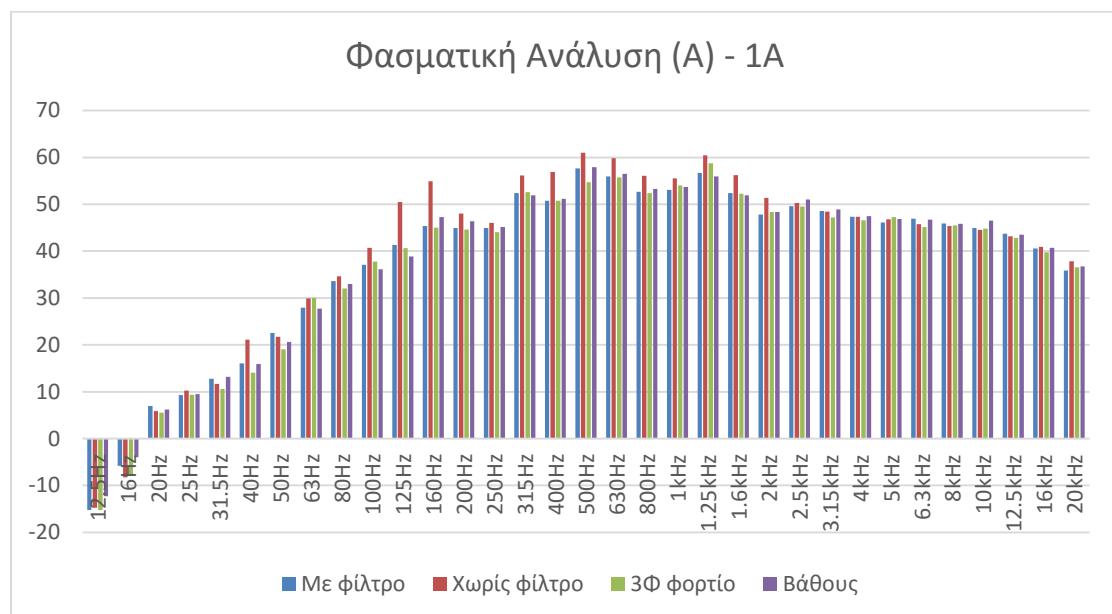
Όπως και στο επίπεδο στάθμης θορύβου, έτσι και στη φασματική ανάλυση πραγματοποιήθηκαν δυο ειδών μετρήσεις. Για κάθε διάταξη χρησιμοποιήθηκαν τόσο η Α στάθμιση όσο και η C. Ωστόσο στην παρακάτω ενότητα θα ασχοληθούμε μόνο με τις καταγραφές της C στάθμισης καθώς έχουν μικρή διόρθωση στις χαμηλές συχνότητες του μετρούμενου θορύβου και τα αποτελέσματα γίνονται πιο εύκολα κατανοητά. Αρχικά, λοιπόν, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της ίδιας μέτρησης με τη χρήση των δυο φίλτρων ώστε να δικαιολογηθεί η επιλογή του C, ενώ στη συνέχεια

παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης όλων των περιπτώσεων με τη χρήση του φίλτρου αυτού. Παράλληλα παρουσιάζονται και οι κυριότερες αρμονικές που δημιουργούνται από τη χρήση του ανορθωτή σε μια προσπάθεια να καθορίσουμε την επιρροή των αρμονικών αυτών στον παραγόμενο θόρυβο της γεννήτριας.

4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ Α - C ΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

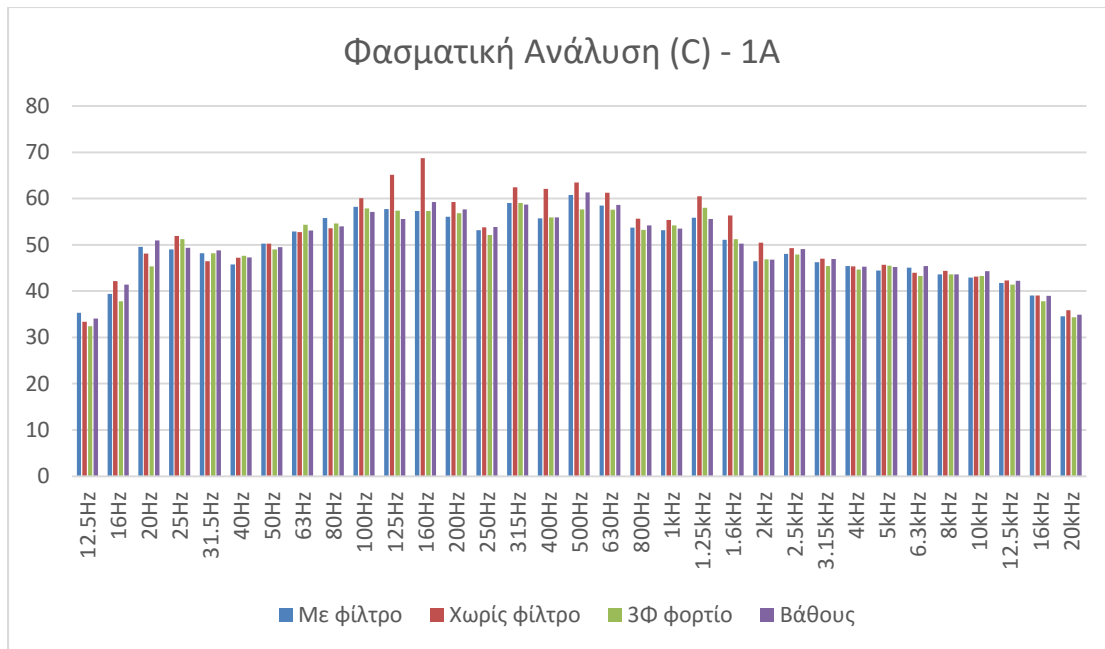
Για τη σύγκριση μεταξύ των δυο σταθμίσεων επιλέξαμε τα διαγράμματα με τη φασματική ανάλυση του εκπεμπόμενου θορύβου για την παραγωγή 1Α.

Α-ΣΤΑΘΜΙΣΗ



Εικόνα 4.14 : Φασματική Ανάλυση (Α) – 1Α

Σ-ΣΤΑΘΜΙΣΗ



Εικόνα 4.15 : Φασματική Ανάλυση (C) – 1A

Οι δυο μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν διαδοχικά, ενώ όλα τα μετρούμενα μεγέθη διατηρήθηκαν αμετάβλητα για την διασφάλιση ίδιων συνθηκών εκτέλεσης του πειράματος. Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε μια έντονη διαφοροποίηση στις χαμηλές συχνότητες (12,5 Hz με 315Hz) με την A στάθμιση μάλιστα να εμφανίζει και αρνητικές τιμές. Στις υπόλοιπες τριτοκτάβες η συμπεριφορά των δυο φίλτρων είναι παραπλήσια, με την C στάθμιση να καταγράφει αυξημένες κατά μερικά dB εντάσεις θορύβου. Οι λόγοι αυτοί μας οδήγησαν στην επιλογή του C φίλτρου για την διεκπεραίωση των υπόλοιπων μετρήσεων.

4.5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ C-ΣΤΑΘΜΙΣΗ

Ο διαχωρισμός των μετρήσεων έγινε και σε αυτήν την περίπτωση με βάση τα παραγόμενα Ampere. Έμφαση δόθηκε στον εντοπισμό των τριτοκτάβων στις οποίες ανήκουν οι αρμονικές 5 και 7 που αποτελούν τις κύριες αρμονικές ρεύματος στην περίπτωση μας. Στις περιπτώσεις που υπάρχει έντονη διαφοροποίηση για μια έως δυο συνδεσμολογίες αλλά δεν αφορούν τις αρμονικές ρεύματος απαιτείται περεταίρω διερεύνηση. Αν το φαινόμενο ήταν γενικότερο θεωρήθηκε ότι υπάρχει αυξημένος θόρυβος στη συγκεκριμένη τριτοκτάβα και δεν αναλύθηκε περισσότερο. Για παράδειγμα μια τέτοια περίπτωση είναι στην τριτοκτάβα των 1.25 kHz όπου παρατηρείται αυξημένος θόρυβος για όλες τις συνδεσμολογίες σε όλες τις περιπτώσεις όπως θα δούμε παρακάτω. Αναλυτικά έχουμε :

1 AMPERE

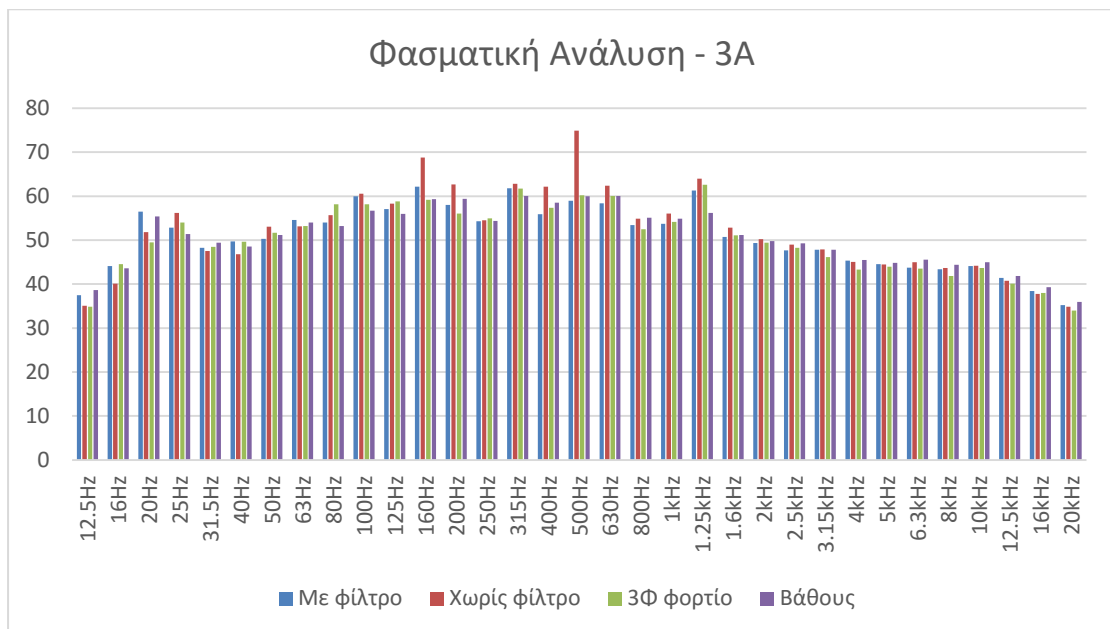
Με φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(νο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
36,63487	1,027228	22,04803	1,02564	19,164		18,086	5,503	0,539	0,375

Χωρίς φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(νο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
38,01982	1,013408	23,7915	1,02088	48,268		44,096	16,813	1,042	7,284

Πίνακας 4.4 : Αρμονικές ρεύματος 1A

Το διάγραμμα παρουσιάζεται παραπάνω. Σε αυτό παρατηρείται έντονη αύξηση θορύβου για τη συνδεσμολογία μπαταρίας στις τριτοκτάβες των 125 Hz και 160 Hz. Οι συχνότητες της 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής είναι περίπου 119 Hz και 166 Hz αντίστοιχα. Ανήκουν δηλαδή στις τριτοκτάβες που παρατηρείται αύξηση. Επιπλέον από τη χρήση του φίλτρου παρατηρείται μείωση του THD[%] της 5^{ης} αρμονικής κατά 59% και του συνολικού THD[%] κατά 60%.

3 AMPERE



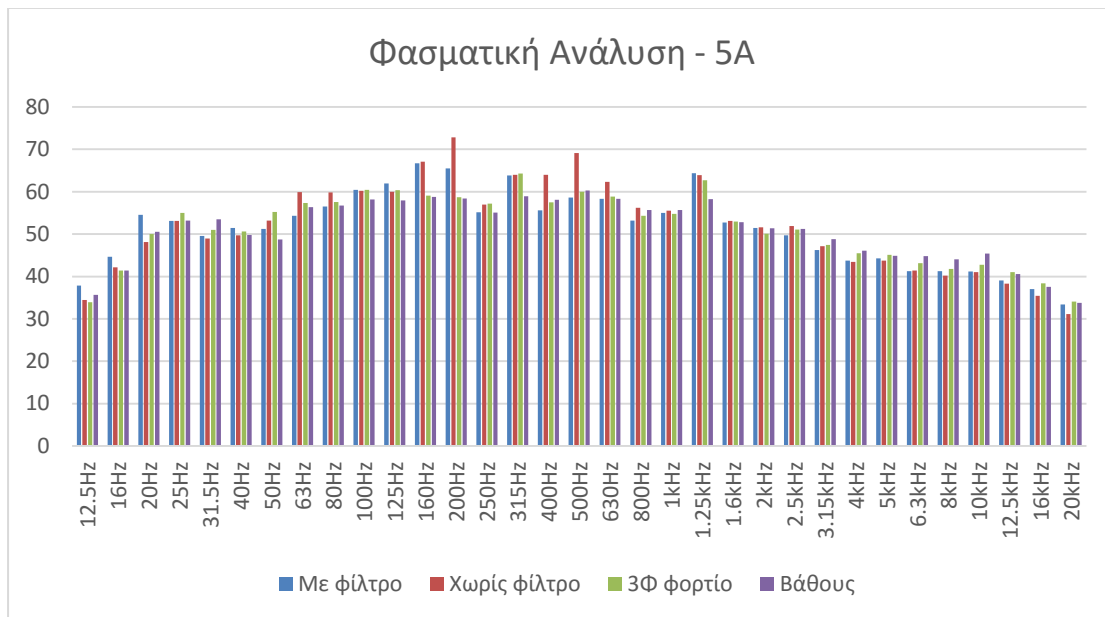
Εικόνα 4.16 : Φασματική ανάλυση (C) 3A

Με φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
39,2123814	2,959764	26,00061	2,96367	20,453	19,918	4,14	0,285	0,879	
Χωρίς φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
39,9506917	2,95786	26,98405	2,97061	29,81	28,632	4,78	0,75	5,615	

Πίνακας 4.5 : Αρμονικές ρεύματος 3A

Στην περίπτωση των 3 Ampere παρατηρείται έντονη αύξηση του θορύβου συνδεσμολογίας μπαταρίας αρχικά στα 160 Hz και στα 200 Hz, ενώ αύξηση παρατηρείται και στα 400, στα 500 και στα 630 Hz. Οι συχνότητες 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής είναι 135 Hz και 189 Hz . Η 5^η αρμονική βρίσκεται οριακά εκτός της 12^{ης} τριτοκτάβας με κεντρική συχνότητα τα 160 Hz ενώ η 7^η αρμονική παρατηρείται εντός της 13^{ης} τριτοκτάβας. Η μείωση του THD[%] της πέμπτης αρμονικής είναι της τάξεως του 55% ενώ του συνολικού 56%.

5 AMPERE



Εικόνα 4.17 : Φασματική ανάλυση (C) 5A

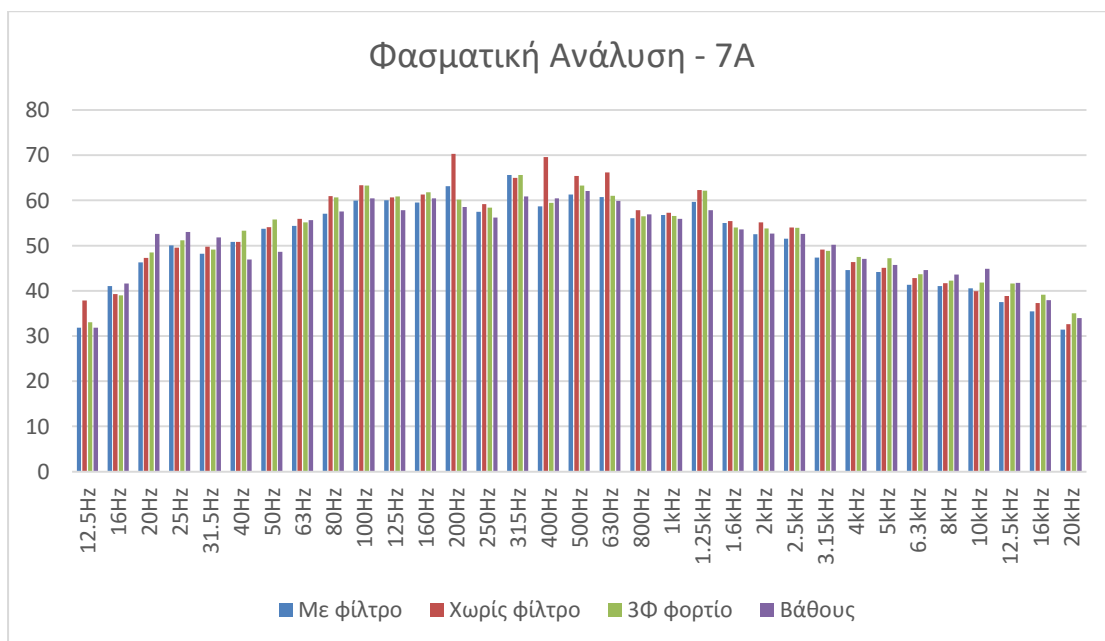
Με φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
40,715595	4,998211	29,32712	5,0063	13,717	13,141	3,754	0,155	0,122	

Χωρίς φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
41,51991552	4,951281	30,17962	4,96451	23,795	22,689	5,711	0,646	3,167	

Πίνακας 4.6 : Αρμονικές ρεύματος 5A

Στις μετρήσεις των 5 Ampere υπάρχει αύξηση θορύβου της συνδεσμολογίας μπαταρίας ξανά στα 160 και 200 Hz, ωστόσο εμφανίζεται αυξημένος θόρυβος και στα 400, 500 και 630 Hz. Η 5^η και η 7^η αρμονική έχουν συχνότητες 151 Hz και 211 Hz. Ανήκουν δηλαδή στις τριτοκτάβες των 160 και 200 Hz. Η μείωση του THD[%] τόσο της πέμπτης όσο και του συνολικού είναι περίπου 42%.

7 AMPERE



Εικόνα 4.18 : Φασματική ανάλυση (C) 7A

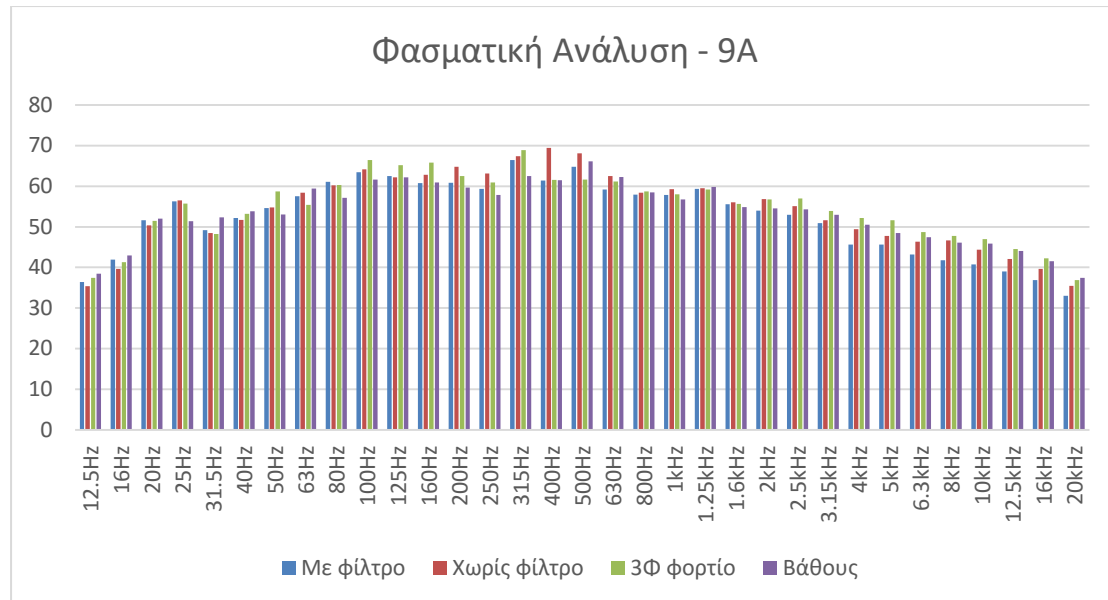
Με φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
41,9123125	7,021072	32,61204	7,01867	9,901	9,384	3,025	0,105	0,414	

Χωρίς φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vο.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
42,86653667	6,885063	33,24295	6,90434	19,936	18,708	6,209	0,502	1,881	

Πίνακας 4.7 : Αρμονικές ρεύματος 7A

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αύξηση κυρίως στα 200 Hz, ωστόσο υπάρχει αύξηση και στα 400, 500 και 630 Hz. Η 5^η και η 7^η αρμονική έχουν συχνότητες 166 και 232 Hz. Βρίσκονται δηλαδή οριακά κάτω και πάνω από την τριτοκτάβα των 200 Hz που παρατηρείται αύξηση. Η μείωση του THD[%] της 5^{ης} αρμονικής και του συνολικού είναι περίπου 50%.

9 AMPERE



Εικόνα 4.19 : Φασματική ανάλυση (C) 9A

Με φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vo.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
43,28322807	8,978783	36,19246	8,99618	7,409	6,951	2,417	0,086	0,47	

Χωρίς φίλτρο			Μεσαία μέτρηση(vo.20)						
Average V[V]	Average I[A]	Average f[Hz]	I[A]	thd[%]	5η	7η	9η	11η	
44,28491481	8,966775	36,78804	8,9798	16,76	15,431	6,002	0,399	1,794	

Πίνακας 4.8 : Αρμονικές ρεύματος 9A

Τέλος, στα 9 Ampere εμφανίζεται μικρή αύξηση στα 200 και 250 Hz, ενώ μεγαλύτερη εμφανίζεται στα 400 και 500 Hz. Η 5^η και η 7^η αρμονική έχουν συχνότητες 184 και 258 Hz αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση ο THD[%] της 5^{ης} αρμονικής μειώνεται κατά 55% ενώ ο συνολικός κατά 56%.

Συνολικά τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

	Αύξηση στα :	5η Αρμονική	7η Αρμονική
1A	125, 160 Hz	119 Hz	166 Hz
3A	160, 200 Hz	135 Hz	189 Hz
5A	160, 200 Hz	151 Hz	211 Hz
7A	200 Hz	166 Hz	232 Hz

9A	200, 250 Hz	184 Hz	258 Hz
----	-------------	--------	--------

Πίνακας 4.9 : Παρατηρούμενη αύξηση ανά τριτοκτάβα και αρμονικές

	THDi χωρίς φίλτρο [%]	THDi με φίλτρο [%]	Μείωση [%]
1A	48,268	19,164	60
3A	29,81	20,453	31
5A	23,795	13,717	42
7A	19,936	9,901	50
9A	16,76	7,409	56

Πίνακας 4.10 : THDi% συνολικό

	THDi 5ης χωρίς φίλτρο [%]	THDi 5ης με φίλτρο [%]	Μείωση [%]
1A	44,096	18,086	59
3A	28,632	19,918	30
5A	22,689	13,141	42
7A	18,708	9,384	50
9A	15,431	6,951	55

Πίνακας 4.11 : THDi% 5^{ης} αρμονικής

	THDi 7ης χωρίς φίλτρο [%]	THDi 7ης με φίλτρο [%]	Μείωση [%]
1A	16,813	5,503	67
3A	4,78	4,14	13
5A	5,711	3,754	34
7A	6,209	3,025	51
9A	6,002	2,417	60

Πίνακας 4.12 : THDi% 7^{ης} αρμονικής

Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση θορύβου της συνδεσμολογίας μπαταρίας συγκριτικά με τις υπόλοιπες συνδεσμολογίες στις τριτοκτάβες που ανήκουν οι συχνότητες των 5^{ωv} και 7^{ωv} αρμονικών ρεύματος. Στις περιπτώσεις που δεν επαληθεύεται αυτή η διαπίστωση οι συχνότητες βρίσκονται οριακά εκτός της τριτοκτάβας που παρατηρείται αύξηση, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα μετρήσεων ή σε σφάλμα του διαθέσιμου εξοπλισμού. Παράλληλα σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις η διαφορά μεταξύ συνδεσμολογίας μπαταρίας και φίλτρου είναι εμφανής, εκτός από την περίπτωση των 5 Ampere στα 160 Hz, γεγονός που επιβεβαιώνει αρχικά τη συμβολή των αρμονικών στην παραγωγή θορύβου καθώς επίσης και την αποδοτική λειτουργία του φίλτρου τόσο ως προς την αποκοπή των αρμονικών, όσο και ως προς τον περιορισμό του θορύβου που αυτές παράγουν.

5 Μετρήσεις θορύβου στο πεδίο δοκιμών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα στα πεδία δοκιμών αρχικά της Ραφήνας και στη συνέχεια του Μαραθώνα. Σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι η εφαρμογή του προτύπου IEC 61400.11 για μετρήσεις θορύβου σε μικρές ανεμογεννήτριες ώστε να καθορίσουμε τον παραγόμενο θόρυβο της γεννήτριας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας καθώς επίσης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα αποτελέσματα των μετρήσεων εργαστηρίου. Στην παρούσα εργασία δεν ήταν δυνατό να εκτελεστεί το σύνολο των μετρήσεων που περιγράφονται από το πρότυπο, όπως επίσης και η εναρμονισμένη με τους κανόνες εκτέλεση τους καθώς δεν το επέτρεπαν οι εγκαταστάσεις και οι δυνατότητες του υπάρχοντος εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα δεν έγινε η ανάλυση τονικότητας στο καταγεγραμμένο ακουστικό φάσμα, δηλαδή ο εντοπισμός ύπαρξης διακριτών τόνων στον θόρυβο της γεννήτριας. Ωστόσο έγινε ο καθορισμός του επιπέδου ηχητικής ισχύος της γεννήτριας και η φασματική ανάλυση του παραγόμενου θορύβου σε συνάρτηση με την ταχύτητα ανέμου.

5.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για τις ακουστικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν :

- Ηχόμετρο και βαθμονομητής τύπου 1 σύμφωνα με το IEC 61804. Το ηχόμετρο, το μικρόφωνο και ο βαθμονομητής περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.
- Πλατφόρμα μετρήσεων από κόντρα πλακέ τετραγωνικού σχήματος με πλευρές 1m και πάχος 12mm.
- Αντιανεμική προστασία μικροφώνου που παρείχε ο κατασκευαστής του ηχομέτρου.

Για τις μη ακουστικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν :

- Ανεμόμετρο
- Ανεμοδείκτης
- Θερμόμετρο
- Πιεσόμετρο
- Αμπερόμετρο
- Σύστημα συγχρονισμού - καταγραφής των παραπάνω μη ακουστικών δεδομένων.

5.2 ΠΕΔΙΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΡΑΦΗΝΑΣ

Οι πρώτες προσπάθειες έλαβαν χώρα στο πεδίο δοκιμών της Ραφήνας. Πρόκειται για παραθαλάσσιο θαμνώδη χώρο με βράχια, δίπλα σε οικισμό και κοντά

στο αεροδρόμιο Αθηνών. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε στο χώρο αυτό ήταν αρκετές με τις κυριότερες να είναι η κίνηση του αεροδρομίου και ο θόρυβος που προερχόταν από τα αεροπλάνα που πετούσαν στην περιοχή, ο θόρυβος από τους παφλασμούς των κυμάτων στα βράχια, ο θόρυβος προερχόμενος από κατοίκους της περιοχής καθώς επίσης και οι προϋπάρχουσες εγκαταστάσεις οι οποίες δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις του προτύπου και δεν υπήρχε η δυνατότητα να τροποποιηθούν.

5.2.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΝ

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια που χρησιμοποιήσαμε και στα εργαστηριακά πειράματα. Η ανεμογεννήτρια ήταν οριζοντίου άξονα, μεταβλητών στροφών, με τον δρομέα ανάντη και τοποθετήθηκε σε ύψος 12 m. Η φτερωτή αποτελούνταν από τρεις έλικες μήκους 1.2 m η κάθε μια ενώ έγινε σύνδεση με μπαταρίες. Ο έλεγχος των στροφών γινόταν παθητικά (passive stall), ενώ η λειτουργία του εκκινούσε για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 8 m/s.

Η πλατφόρμα μετρήσεων τοποθετήθηκε σε όσο το δυνατόν καταλληλότερο σημείο πίσω από τη γεννήτρια και κατά τη διεύθυνση του κυρίαρχου ανέμου. Η οριζόντια απόσταση του κέντρου της πλατφόρμας, όπου και τοποθετείται το μικρόφωνο, από το σωλήνα στήριξης της γεννήτριας (R_0) ήταν 13.95m, ενώ η γωνία που σχηματίζεται από την πλατφόρμα και τη νοητή ευθεία που εκτείνεται μεταξύ μικροφώνου και δρομέα (ϕ) ήταν 39° . Τα επιτρεπτά όρια είναι για τη γωνία μεταξύ 25° και 40° ενώ για την απόσταση R_0 από 10.56m έως 15.84m. Επιπλέον η γωνία μεταξύ της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου και της ευθείας από την Α/Γ και το κέντρο της πλατφόρμας ήταν 14° , οριακά εντός των ορίων των 15° .



Εικόνα 5.1 : Τοποθέτηση πλατφόρμας μετρήσεων



Εικόνα 5.2 : Τοποθέτηση ηχομέτρου στην πλατφόρμα μετρήσεων

Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης ήταν τοποθετημένα σε ύψος 12 m και 11 m αντίστοιχα, σε μετεωρολογικό ιστό ο οποίος βρισκόταν σε απόσταση 9 m από το σωλήνα στήριξης της γεννήτριας. Τα όρια για την απόσταση του μετεωρολογικού σωλήνα από την ανεμογεννήτρια κυμαίνονται μεταξύ των 4.8 m και 9.6 m. Οι γωνίες των οργάνων αυτών με την κύρια κατεύθυνση ανέμου ήταν 50° και 52° , ενώ τα όρια όπως περιγράφονται από το πρότυπο είναι από 0° έως 90° για το ανεμόμετρο και από 0° έως 60° για τον ανεμοδείκτη.



Εικόνα 5.3 : Θέση μετεωρολογικού ιστού σε σχέση με την ανεμογεννήτρια

Οι θέσεις του θερμόμετρου και του πιεσόμετρου ήταν στο μετεωρολογικό ιστό, ωστόσο δεν υπάρχουν περιορισμοί και για αυτόν το λόγο δεν καταγράφηκαν.

5.2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

5.2.2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Από τις μετρήσεις αυτές καθορίζονται τα επίπεδα στάθμης ηχητικής πίεσης της γεννήτριας και η φασματική ανάλυση ανά τριτοκτάβες του παραγόμενου από τη γεννήτρια θορύβου σε συνάρτηση με την ταχύτητα ανέμου. Το εύρος ταχυτήτων ανέμου για το οποίο είναι επιθυμητός ο καθορισμός των ανωτέρων μεγεθών είναι, για διακριτές ακέραιες τιμές, από 6m/s μέχρι 10 m/s. Τόσο για τα επίπεδα ηχητικής πίεσης όσο και για τη φασματική ανάλυση απαιτούνται μετρήσεις με τη γεννήτρια σε λειτουργία και με τη γεννήτρια κλειστή για τον καθορισμό του θορύβου βάθους. Για το λόγο αυτό όλες οι μετρήσεις γίνονταν με τη γεννήτρια σε λειτουργία και

κλειστή εναλλάξ σε σύντομα χρονικά διαστήματα για την εξασφάλιση παρόμοιων συνθηκών περιβάλλοντος. Για το πρώτο μέγεθος έγιναν καταγραφές της ισοδύναμης στάθμης θορύβου με χρήση A στάθμισης, γνωστό ως LAeq, για χρονικά διαστήματα διάρκειας τουλάχιστον ενός λεπτού. Παράλληλα καταγράφονταν και οι μετρήσεις των υπολοίπων οργάνων. Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονταν για επεξεργασία.

Για τη φασματική ανάλυση το ηχόμετρο ρυθμιζόταν έτσι ώστε να καταγράφει το LAeq για κάθε κεντρική συχνότητα των τριτοκτάβων που αναφέρονται στον πίνακα 4.3. Και σε αυτήν την περίπτωση καταγράφονταν οι μετρήσεις των υπόλοιπων οργάνων και αποθηκεύονταν τα δεδομένα για επεξεργασία.

Τέλος, πριν και μετά από κάθε μέτρηση γινόταν βαθμονόμηση του ηχομέτρου.

5.2.2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια και για τον καθορισμό των επιπέδων στάθμης ηχητικής πίεσης και για τη φασματική ανάλυση. Αρχικά γίνεται εξαγωγή των μετρήσεων του ηχομέτρου με το λογισμικό της εταιρείας κατασκευής του, Measurement Partner Suite, και συγχρονισμός των δεδομένων αυτών με τα δεδομένα από το σύστημα καταγραφής των ενδείξεων του ανεμόμετρου, του ανεμοδείκτη, του θερμόμετρου και του πιεσόμετρου. Κατόπιν γίνεται αφαίρεση δεδομένων με ενοχλητικούς θορύβους όπως για παράδειγμα ένα διερχόμενο αεροπλάνο, ένα γάβγισμα σκύλου ή ένα διερχόμενο αυτοκίνητο. Στη συνέχεια γίνεται διόρθωση της μετρούμενης ταχύτητας σε συνθήκες αναφοράς και ομαδοποίηση των δεδομένων ανά 60, ώστε να υπάρχουν ομαδοποιημένα δεδομένα με μέσους όρους ανά λεπτό. Ύστερα γίνεται κατάταξη των δειγμάτων αυτών ανάλογα με την καταγεγραμμένη ταχύτητα ανέμου του κάθε δείγματος. Οι διακριτές τιμές ταχύτητας ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν είναι από 3m/s έως 14m/s. Οι κανόνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι κανόνες της στρογγυλοποίησης. Δηλαδή όταν ένα δείγμα έχει τιμή με πρώτο δεκαδικό ψηφίο μεγαλύτερο ή ίσο του 5 κατατάσσεται στην αμέσως μεγαλύτερη διακριτή ταχύτητα ανέμου, σε διαφορετική περίπτωση κατατάσσεται στην ίδια τιμή με το ακέραιο μέρος του. Έτσι δημιουργούνται τα διάφορα bins ταχυτήτων με πλήθος δειγμάτων. Αν το πλήθος των δειγμάτων για κάθε bin είναι μικρότερο των τριών ή δεν υπάρχει δείγμα και από τις δυο πλευρές του bin, το bin δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην υπόλοιπη ανάλυση. Μετά, για κάθε bin ξεχωριστά βρίσκεται ο μέσος όρος τόσο της ταχύτητας ανέμου των δειγμάτων του όσο και των επιπέδων ηχητικής πίεσης. Συνήθως τα νέα δεδομένα δεν βρίσκονται στο κέντρο του bin αλλά αρκετά κοντά. Για να τα γίνει διόρθωση ώστε κάθε δείγμα να αναχθεί στο κέντρο του κάθε bin εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιώντας δυο γειτονικά bin. Έτσι υπολογίζεται το επίπεδο ηχητικής πίεσης κάθε ταχύτητας ανέμου στην οποία υπάρχουν αρκετά

δεδομένα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις μετρήσεις με τη γεννήτρια σε λειτουργία και χωρίς αυτήν. Τέλος, για τις αντίστοιχες τιμές ανέμου γίνεται σύγκριση των δεδομένων. Αν η διαφορά μεταξύ θορύβου γεννήτριας και βάρους είναι μεγαλύτερη των 6dBA τότε υπολογίζεται η στάθμη ηχητικής ισχύος, αν η διαφορά είναι μεταξύ των 3dBA και των 6dBA χρησιμοποιείται μια διόρθωση του 1.3dBA αλλά δεν χρησιμοποιούνται τα στοιχεία αυτά για τον καθορισμό του επιπέδου ηχητικής ισχύος, ενώ αν η διαφορά είναι μικρότερη των 3dBA αναφέρεται ότι ο θόρυβος βάρους υπερκαλύπτει τον θόρυβο της γεννήτριας.

Στην φασματική ανάλυση ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη διαφορά ότι γίνεται για κάθε κεντρική συχνότητα των τριτοκτάβων που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον πρέπει να τονιστεί ότι σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ενδεχόμενο σε κάποιες συχνότητες ο θόρυβος βάρους να είναι μεγαλύτερος από αυτόν της γεννήτριας και να προκύπτουν αρνητικοί αριθμοί.

5.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Τα αρχικά δεδομένα ξεπερνούσαν τις 3.5 ώρες μετρήσεων και συνεπώς το σύνολο των δειγμάτων ήταν μεγαλύτερο των 200. Ωστόσο μετά την αφαίρεση των άκυρων δεδομένων τα έγκυρα σημεία ήταν μόλις 105. Από αυτά τα περισσότερα ανήκαν σε μετρήσεις θορύβου με τη γεννήτρια σε λειτουργία γεγονός που καθιστούσε δύσκολη την εξαγωγή συμπερασμάτων όπως θα αναφερθεί παρακάτω.

Οι καταγεγραμμένες μετρήσεις ανέμου ανάχθηκαν σε συνθήκες αναφοράς χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.3 από το πρότυπο. Στην περίπτωση μας είναι :

$$V_S = V_Z \left[\frac{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{0ref}}\right) \ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H}{z_{0ref}}\right) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right] = 1.016998301 V_z$$

Όπου

Z_{0ref} : το μήκος τραχύτητας αναφοράς, 0,05m

Z_0 : το μήκος τραχύτητας, 0.3m εφόσον βρισκόμαστε θαμνώδες έδαφος

H : το ύψος του κέντρου του δρομέα, 12m

Z_{ref} : το ύψος αναφοράς, 10m

Z : το ύψος του ανεμόμετρου, 12m

Στη συνέχεια έγινε συγχρονισμός των μετρήσεων στάθμης ηχητικής πίεσης με τις ανηγμένες ταχύτητες ανέμου και ομαδοποιήθηκαν σε ομάδες των 60 δεδομένων. Η ομαδοποίηση για τις ταχύτητες ανέμου γίνεται αριθμητικά. Για τα επίπεδα ηχητικής

πίεσης κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό καθώς πρόκειται για λογαριθμικά μεγέθη. Το LAeq που καταγράφεται από το ηχόμετρο προκύπτει από την εξίσωση 2.8 :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0(t)} \right)^2 \right]$$

Συνεπώς για την ομαδοποίηση αυτού του μεγέθους πολλαπλασιαζόταν με 0.1 και χρησιμοποιούνταν ως εκθέτης του 10. Τα μεγέθη που προέκυπταν ομαδοποιούνταν αριθμητικά, ενώ για την εξαγωγή εκ νέου ηχητικής πίεσης απαιτείται λογαρίθμηση με βάση το 10 και πολλαπλασιασμός και πάλι με το 10. Η εξαγωγή όμως δεδομένων ηχητικής πίεσης δεν εφαρμόζόταν σε αυτό το σημείο καθώς απαιτούνταν νέα ομαδοποίηση στα bin της ταχύτητας του ανέμου. Παρακάτω παρατίθεται μέρος ενός πίνακα με αυτές τις μετρήσεις ώστε να γίνει πιο εύκολα κατανοητό.

Project name	LAeq	10^0.1spli	10^0.1spli averages	Wind speed corrected averages	Spl averaged
001	59,66	924698,1739	1592353,135	11,01868367	62,02039
	59,52	895364,7655	1422873,699	10,82280734	61,53166
	59,91	979489,9854	1038366,95	10,04234726	60,16351
	60,77	1193988,104	882248,5716	9,437719892	59,45591
	60,29	1069054,879	1145894,471	10,55072019	60,59145
	60,63	1156112,242	814663,6942	9,331524214	59,10978

Πίνακας 5.1 : Πίνακας επίδειξης επεξεργασίας δεδομένων Wind speed και LAeq

Όπου το LAeq είναι οι καταγεγραμμένες από το ηχόμετρο τιμές

Το 10^0.1spli είναι το μέγεθος στο οποίο μετατρέπουμε το LAeq για να μπορέσουμε να ομαδοποιήσουμε και να βρούμε τον μέσο όρο.

Το 10^0.1 spli averages είναι ο μέσος όρος 60 δειγμάτων 10^0.1spli.

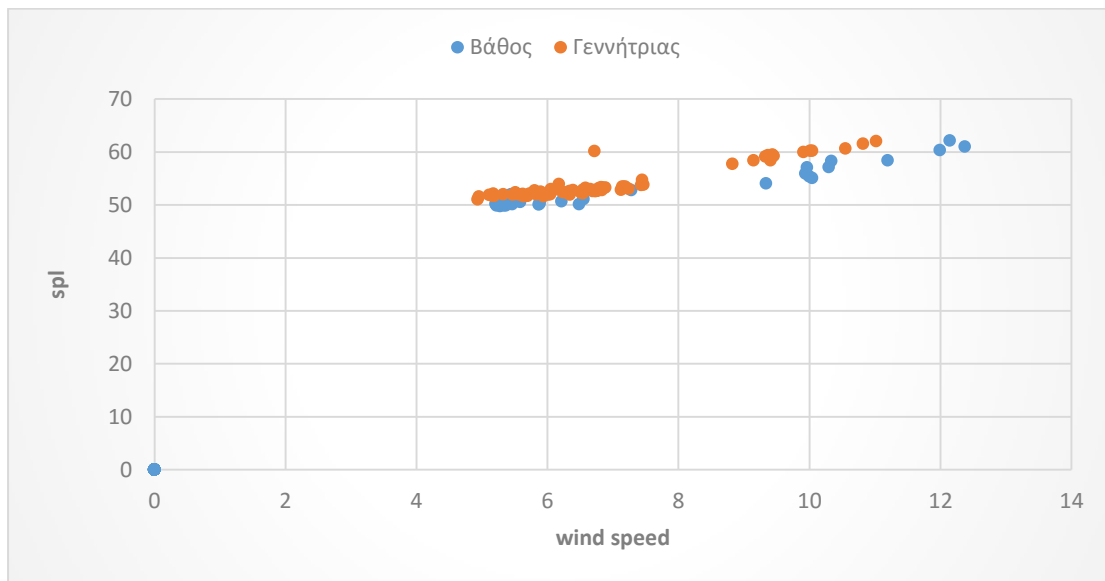
Το wind speed corrected averages είναι μέσοι όροι 60 δειγμάτων ταχύτητας ανέμου που έχουν αναχθεί σε συνθήκες αναφοράς και κάθε κελί της στήλης αυτής αντιστοιχεί στο διπλανό κελί της στήλης 10^0.1 spli averages.

Τέλος το spl averaged αντιστοιχεί στον μέσο όρο 60 δειγμάτων LAeq και ισούται με

$$spl\ averaged = 10 \log_{10}(10^{0.1spl\ averages})$$

Εξίσωση 5.1

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα LAeq – ταχύτητας ανέμου της γεννήτριας και του βάρους των μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών της Ραφήνας από το οποίο μπορούμε να εξάγουμε τα πρώτα συμπεράσματα σχετικά με τις μετρήσεις που έχουμε και τη συμπεριφορά του θορύβου της γεννήτριας και του θορύβου βάρους.



Εικόνα 5.4 : Διάγραμμα LAeq – ταχύτητας ανέμου Ραφήνας

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι τα δείγματα θορύβου της γεννήτριας είναι σαφώς περισσότερα από τα αντίστοιχα για τον θόρυβο βάρους και εκτείνονται σε περισσότερες ταχύτητες ανέμου. Επίσης φαίνεται ότι δεν υπάρχουν δείγματα για ταχύτητες ανέμου από 7m/s έως 9m/s ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου αυτά είναι λιγοστά. Τέλος παρατηρείται ότι τα επίπεδα του θορύβου τόσο της γεννήτριας όσο και του βάρους αυξάνονται ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου, όπως είναι λογικό, όμως βρίσκονται αρκετά κοντά γεγονός στο οποίο θα γίνει αναφορά στη συνέχεια.

Από τον πίνακα 5.1 τα στοιχεία από τις στήλες wind speed corrected averages και $10^{0.1 spl\ averages}$ μεταφέρθηκαν σε άλλο πίνακα στον οποίο γίνεται η κατάταξη των στοιχείων ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου. Στον πίνακα αυτόν έγινε αρχικά η κατάταξη των στοιχείων και στη συνέχεια προέκυψαν νέα ομαδοποιημένα δεδομένα ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων για κάθε bin ταχύτητας ανέμου. Τα στοιχεία αυτά δεν είναι ακριβώς στο κέντρο του κάθε bin οπότε και τροποποιήθηκαν ανάλογα, χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ δυο

γειτονικών bin. Παρακάτω παρουσιάζονται μέρη του πίνακα για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Wind speed bins				
	4,6-5,5		5,6-6,5	
Count (n)	10 ^{0.1} spli averages	Wind speed	10 ^{0.1} spli averages	Wind speed
1	126555,1962	4,933627854	195440,4727	6,055484127
2	153006,499	5,109927824	174492,8298	6,232692136
3	161605,4202	5,173152196	171000,3417	6,259631776
4	157343,7215	5,325751082	187443,0942	6,392477074
5	142791,2855	4,953735911	154813,4228	6,343560358
6	146235,189	5,16699547	156286,8722	5,571881437
7	155133,6825	5,470755912	145343,2718	5,941511999
8	147646,1875	5,189657582	156264,3828	6,016337173
Sum	1190317,182	41,32360383	1341084,688	48,81357608
Sum/n	148789,6477	5,165450479	167635,586	6,10169701
SPL	51,72572715		52,24366217	

Πίνακας 5.2 : Πίνακας κατάταξης δεδομένων με βάση την ταχύτητα ανέμου

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται δυο από τα bin της ταχύτητας ανέμου και μερικά από τα στοιχεία κατανεμημένα με βάση την ταχύτητα ανέμου του καθενός. Στο αντίστοιχο κελί sum προκύπτει το άθροισμα της στήλης που βρίσκεται από πάνω του, ενώ στο sum/n προκύπτει ο αριθμητικός μέσος όρος των δεδομένων για κάθε bin ταχύτητας ανέμου. Στο κελί spl υπολογίζεται η ηχητική πίεση για κάθε bin. Παρατηρείται ότι στο bin των 5 m/s ο μέσος όρος ταχύτητας των δειγμάτων είναι 5,1654 m/s , ενώ αντίστοιχα και στα 6 m/s ο μέσος όρος δεν συμπίπτει με το κέντρο του bin. Ωστόσο σύμφωνα με το πρότυπο οι τελικές μετρήσεις πρέπει να αφορούν διακριτές ταχύτητες ανέμου από 6 m/s μέχρι 10 m/s. Η τροποποίηση αυτή παρουσιάζεται παρακάτω.

Wind speed bins	Wind averages	speed	count	SPL averages

5	5,165450479	8	51,7257272
6	5,969018849	24	52,3048666
Wind speed bins	slope	offset	Int spl
5	0,72070962	48	51,6064854
6	1,449804561	43,65	52,3497832

Πίνακας 5.3 : Πίνακας αναγωγής δεδομένων σε ακέραιες τιμές ταχύτητας ανέμου

Σε αυτόν τον πίνακα βλέπουμε τον υπολογισμό του τελικού spl για ταχύτητα ανέμου κεντραρισμένη στο bin.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε τόσο για τον θόρυβο της γεννήτριας όσο και για τον θόρυβο βάθους. Στο σημείο αυτό γίνεται εκ νέου αφαίρεση δεδομένων που δεν πληρούν τις προϋποθέσεις που τίθενται από το πρότυπο. Όσα bin έχουν πλήθος μετρήσεων μικρότερο των 3 και όσα bin έχουν μετρήσεις μόνο από τη μια πλευρά τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τέλος ακολουθεί η σύγκριση της στάθμης ηχητικής πίεσης διόρθωση της στάθμης ηχητικής πίεσης της γεννήτριας για τον θόρυβο βάθους και ο υπολογισμός της φαινόμενης στάθμης ηχητικής ισχύος της γεννήτριας όπου αυτή επιτρέπεται. Τα τελικά αποτελέσματα των μετρήσεων θορύβου στο πεδίο δοκιμών της Ραφήνας είναι :

Wind speed bins	Spl γεννήτριας	Spl βάθους	Spl corrected	διαφορά	SPL (power)
5	51,606485	50,45563979		1,150846	
6	52,349783	50,62043283		1,72935	
7	53,799588				
8					
9	58,345483				
10	60,107646	56,44709832	58,80764551	3,660547	*
11	61,754547				
12		60,70586846			

Πίνακας 5.4 : Ηχητική ισχύς ανεμογεννήτριας

Όπως είναι φανερό για αρκετές από τις μεταβλητές που πρέπει να καθοριστούν δεν υπάρχει επαρκής αριθμός στοιχείων. Αυτό θα μπορούσε να λυθεί με

περισσότερες μετρήσεις ωστόσο οι διαφορές μεταξύ spl γεννήτριας και spl βάθους στις τιμές που είναι δυνατό να γίνει σύγκριση είναι πολύ μικρές. Το SPL δεν μπορεί να υπολογιστεί για καμία ταχύτητα ανέμου ενώ στα 4m/s και 5m/s ο θόρυβος βάθους υπερκαλύπτει τον θόρυβο της γεννήτριας.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ο θόρυβος βάθους της περιοχής είναι υψηλός και δεν ενδείκνυται για περαιτέρω μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας. Για το λόγο αυτό δεν έγιναν περισσότερες μετρήσεις και δεν έγινε η φασματική ανάλυση του μετρούμενου θορύβου, αλλά βρέθηκε άλλο πεδίο δοκιμών καταλληλότερο για τη συγκεκριμένη εργασία.

5.3 ΠΕΔΙΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Η δεύτερη φάση των μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών έλαβε χώρα στην περιοχή του Μαραθώνα. Ο χώρος επιλέχθηκε καθώς προϋπήρχαν εγκαταστάσεις ενώ βρίσκεται μακριά από θορυβώδεις περιοχές όπως αεροδρόμια, δρόμοι ταχείας κυκλοφορίας και οικισμοί. Τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν ήταν ο θόρυβος από την πανίδα της περιοχής όπως σκύλοι, γάτες και, κυρίως, τζιτζίκια καθώς επίσης και οι ίδιες οι εγκαταστάσεις που δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις του προτύπου και ήταν αδύνατο να τροποποιηθούν. Για την αντιμετώπιση του θορύβου επιλέχθηκαν μέρες όπου επικρατούσε συννεφιά, ενώ οι μετρήσεις διεξάγονταν κυρίως πρωινές ώρες. Για τα προβλήματα των εγκαταστάσεων θα αναφερθούμε παρακάτω.

5.3.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΝ

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια που χρησιμοποιήσαμε στα εργαστηριακά πειράματα και στο πεδίο δοκιμών της Ραφήνας. Η ανεμογεννήτρια τοποθετήθηκε σε ύψος 12m, η φτερωτή αποτελούνταν από τρεις έλικες μήκους 1.2m η κάθε μια ενώ έγινε σύνδεση με μπαταρίες ακριβώς όπως και στο πεδίο δοκιμών της Ραφήνας.

Η πλατφόρμα μετρήσεων δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί καθώς το έδαφος ήταν βραχώδες και δεν υπήρχε χωμάτινη επιφάνεια με σχετικά ομαλό περίγυρο ώστε να μην επηρεαστούν οι μετρήσεις. Για το λόγο αυτό το ηχόμετρο τοποθετήθηκε σε έναν βράχο χωρίς εγχοπές, όσο το δυνατόν επίπεδο, με λοξευμένες γωνίες σε κατάλληλο σημείο πίσω από τη γεννήτρια και κατά τη διεύθυνση του κυρίαρχου ανέμου. Η οριζόντια απόσταση του μικροφώνου από το σωλήνα στήριξης της γεννήτριας (R_0) ήταν 12.65m, ενώ η γωνία που σχηματίζεται από την πλατφόρμα και τη νοητή ευθεία που εκτείνεται μεταξύ μικροφώνου και δρομέα (ϕ) ήταν 40° . Τα επιτρεπτά όρια είναι για τη γωνία μεταξύ 25° και 40° ενώ

για την απόσταση R_0 από 10.56m έως 15.84m. Επιπλέον η μέση γωνία μεταξύ της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου και της ευθείας από την Α/Γ και το κέντρο της πλατφόρμας ήταν 13° , εντός των ορίων των 15° .



Εικόνα 5.5 : Τοποθέτηση ηχομέτρου σε βράχο

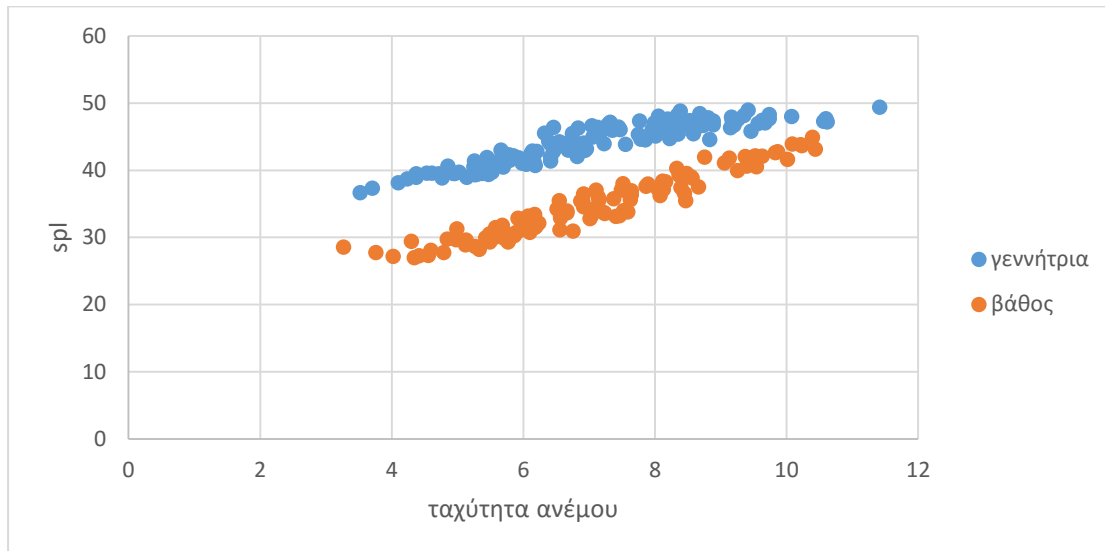
Στις εγκαταστάσεις δεν υπήρχε μετεωρολογικός σωλήνας. Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης τοποθετήθηκαν στην κολώνα στήριξης της ανεμογεννήτριας σε ύψος 10.2m. Οι γωνίες των οργάνων αυτών με την κύρια κατεύθυνση ανέμου ήταν πολύ μικρές, ενώ τα όρια όπως περιγράφονται από το πρότυπο είναι από 0° έως 36° και για τα δυο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αναφέρεται παραπάνω.

5.3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μετά την πρώτη επεξεργασία των μετρήσεων και την απαλοιφή των άκυρων δεδομένων, τα ομαδοποιημένα στοιχεία που προέκυψαν ήταν 249, καταναμημένα σχεδόν αναλογικά σε θόρυβο βάθους και θόρυβο γεννήτριας και για εύρος ταχυτήτων ανέμου από 4 m/s έως 10 m/s. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το επίπεδο ηχητικής πίεσης του θορύβου της γεννήτριας και του θορύβου βάθους της περιοχής σε συνάρτηση με την ταχύτητα ανέμου.



Εικόνα 5.6 : Διάγραμμα LAeq – ταχύτητας ανέμου Μαραθώνα

Από το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνονται όσα αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο σχετικά με την κατάταξη των δειγμάτων. Επιπλέον διακρίνεται ότι δεν υπάρχουν σημεία με σημαντική διαφορά από το σύνολο των υπολοίπων, δείγμα του ότι η απαλοιφή άκυρων ή εσφαλμένων μετρήσεων έγινε ορθά. Παράλληλα είναι εμφανής η διαφορά των επιπέδων ηχητικής πίεσης μεταξύ γεννήτριας και βάθους ιδιαίτερα στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, γεγονός ενθαρρυντικό για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Για λόγους συντομίας και ευκολίας κατανόησης επιλέχθηκε να μην παρουσιαστούν όλα τα δεδομένα και οι διαδικασίες που αναλύθηκαν παραπάνω. Στη συνέχεια εμφανίζονται μόνο οι πίνακες με τα συνολικά στοιχεία για κάθε ταχύτητα ανέμου και η μετατροπή των δεδομένων αυτών για ακέραιες ταχύτητες ανέμου τόσο για τον θόρυβο της γεννήτριας όσο και για τον θόρυβο βάθους. Τέλος, γίνεται σύγκριση των επιπέδων ηχητικής πίεσης της ανεμογεννήτριας και βάθους για κάθε ταχύτητα ανέμου και υπολογίζονται τα φαινόμενα επίπεδα ηχητική ισχύος.

Wind speed bins	Wind speed averages	count	SPL averages
4	4,052837671	6	38,84161656

5	5,086179565	18	40,33222876
6	5,994804984	27	42,5747692
7	7,000545843	25	44,93608632
8	8,097911803	21	46,99322424
9	8,902906451	23	47,66871899
10	9,73787569	6	48,49748247
Wind speed bins	slope	offset	Int spl
4	1,442515985	32,99533343	38,76539737
5	2,468058222	27,77924147	40,11953257
6	2,347838518	28,49993515	42,58696625
7	1,874614294	31,81276302	44,93506308
8	0,839129496	40,19802759	46,91106355
9	0,992567678	38,83198181	47,76509091
10	0,019354788	48,30900795	48,50255583

Πίνακας 5.5 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αθροιστικά οι κατανεμημένες μετρήσεις ταχύτητας ανέμου και ηχητικής πίεσης με την ανεμογεννήτρια σε λειτουργία. Επίσης εμφανίζεται το πλήθος των μετρήσεων για κάθε bin ενώ γίνεται και ο υπολογισμός του επιπέδου ηχητικής πίεσης για τις ακέραιες τιμές ταχυτήτων ανέμου.

Παρακάτω ακολουθεί ο αντίστοιχος πίνακας για τις μετρήσεις με την ανεμογεννήτρια κλειστή.

Wind speed bins	Wind speed averages	count	SPL averages
4	4,16916284	5	28,5874066
5	5,119053339	11	30,1662147
6	5,874120992	25	32,5268444

7	6,974470891	26	35,4874898
8	8,017955299	22	38,6910435
9	9,087979734	12	42,1745961
10	9,981616899	11	44,2255093
Wind speed bins	slope	offset	Int spl
4	1,662094809	21,66	28,306242
5	3,126381672	14,16	29,7940085
6	2,690639995	16,72	32,8655395
7	3,070054234	14,08	35,5658656
8	3,25558221	12,59	38,6325886
9	2,295017822	21,32	41,972681
10	2,295017822	21,32	44,2676988

Πίνακας 5.6 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε αέριες ταχύτητες ανέμου

Στη συνέχεια γίνεται διόρθωση των επιπέδων ηχητικής πίεσης της γεννήτριας για τον θόρυβο βάθους και υπολογίζεται το επίπεδο ηχητικής ισχύος σε κάθε ταχύτητα ανέμου.

Wind Speed	Spl γεννήτριας	Spl βάθους	Difference	Spl Corrected	Sound Power Level
4	38,765397	28,30624195	10,45916	38,35596758	68,7594407
5	40,119533	29,79400852	10,32552	39,69666566	70,10013878
6	42,586966	32,86553946	9,721427	42,09730626	72,50077938
7	44,935063	35,56586556	9,369198	44,40139038	74,8048635
8	46,911064	38,63258859	8,278475	46,21216663	76,61563974
9	47,765091	41,972681	5,79241	46,46509091	*
10	48,502556	44,26769882	4,234857	47,20255583	*

Πίνακας 5.7 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους και υπολογισμός επιπέδου ηχητικής ισχύος

Από τον πίνακα αυτόν εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρείται ότι για ταχύτητες ανέμου από 4 m/s έως 8 m/s οι διαφορές στα επίπεδα ηχητικής πίεσης μεταξύ γεννήτριας και βάρους είναι μεγαλύτερες των 6 dBA. Αυτό σημαίνει ότι ο θόρυβος της γεννήτριας υπερκαλύπτει τον θόρυβο βάρους και είναι διακριτός από τον άνθρωπο. Στην στήλη *Sp1 corrected* παρουσιάζονται τα διορθωμένα επίπεδα ηχητικής πίεσης της ανεμογεννήτριας για οριζόντια απόσταση 13.75 m από αυτήν, δηλαδή από την απόσταση στην οποία είχε τοποθετηθεί το μικρόφωνο του ηχομέτρου. Τα επίπεδα αυτά δεν ξεπερνούν τα 48 dBA, την ώρα που τα χαμηλότερα θεσμοθετημένα όρια για περιοχές με κατοικίες σε επαφή ανέρχονται στα 45 dBA. Ωστόσο αυτό δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, καθώς όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο η στάθμη της ηχητικής πίεσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Μειώνεται δηλαδή κατά 6 dBA για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Συνεπώς αν η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια βρισκόταν σε απόσταση 27 m από μια κατοικία, η λειτουργία της δεν θα ξεπερνούσε τα όρια θορύβου, ενώ η απόσταση αυτή είναι μια μάλλον λογική τιμή για ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές. Στην στήλη *Sound Power Level* υπολογίζεται η στάθμη ηχητικής ισχύος για τις ταχύτητες ανέμου που είναι εφικτό. Συνολικά, φαίνεται ότι το επίπεδο ακουστικής πίεσης του θορύβου της γεννήτριας είναι αρκετά υψηλότερο από το αντίστοιχο του θορύβου βάρους για χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ωστόσο όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου τόσο αυξάνεται και η ηχοστάθμη του θορύβου βάρους, ενώ η ηχοστάθμη του θορύβου της γεννήτριας αυξάνεται μεν, αλλά με μικρότερο ρυθμό. Έτσι, για ταχύτητες ανέμου από 4 m/s μέχρι και 8 m/s ο θόρυβος της ανεμογεννήτριας ξεπερνάει αισθητά τον θόρυβο βάρους και μπορεί να γίνει ακουστός από τον άνθρωπο, ενώ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 8 m/s η διαφορά μεταξύ των δυο θορύβων αρχίζει να καλύπτεται και να γίνεται δυσδιάκριτη.

5.3.3 ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑ ΤΡΙΤΟΚΤΑΒΕΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η φασματική ανάλυση του καταγραμμένου θορύβου της ανεμογεννήτριας. Η μεθοδολογία τόσο των μετρήσεων όσο και της ανάλυσης αυτών έχει εξηγηθεί νωρίτερα. Έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίδιοι πίνακες με τη διαφορά ότι για κάθε μέτρηση δεν καταγράφονταν μόνο μια συνολική στάθμη θορύβου, αλλά η στάθμη θορύβου κάθε τριτοκτάβας από τα 12.5 Hz έως τα 20 kHz. Οι τριτοκτάβες που συμπεριλαμβάνονται σε αυτό το εύρος συχνοτήτων είναι 33, επομένως και οι πίνακες που προέκυψαν είναι μεγάλοι. Για το λόγο αυτό δεν έχουν συμπεριληφθεί όλα τα βήματα, παρά μόνο τα αρχικά αθροιστικά δεδομένα για κάθε bin ταχύτητας ανέμου καθώς επίσης και τα τελικά αποτελέσματα που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του επιπέδου ηχητικής πίεσης της γεννήτριας. Κάθε πίνακας έχει χωριστεί σε 3 μέρη.

Αρχικά παρουσιάζονται οι μετρήσεις θορύβου ανά τριτοκτάβα με τη γεννήτρια σε λειτουργία.

WS bin	WS avr	Spl cnt	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
4	4,052837671	6	-7,67206	-3,75609	-1,57254	0,182186	2,126126	5,619803	8,208546	11,00453	12,78359	14,32318	14,53489
5	5,086179565	18	-3,4327	-0,35554	2,432223	4,855795	6,192522	8,222522	10,55363	12,68539	15,11323	16,31661	17,12591
6	5,994804984	27	0,31959	3,697695	6,767107	9,229287	10,60355	11,25418	13,03337	14,59251	16,54815	17,4852	18,04498
7	7,000545843	25	2,227652	5,96493	8,838837	10,74464	12,30555	13,31666	14,74353	16,2178	17,93949	19,31884	19,95435
8	8,097911803	21	5,617853	10,09934	13,20792	15,45842	17,0643	18,12797	19,01443	19,89468	21,21195	22,34467	22,94372
9	8,933263712	24	7,845604	11,975	15,08582	17,76902	19,92663	20,72835	21,42623	22,16775	23,08318	23,82453	24,38766
10	9,759154685	5	11,18314	16,62269	19,83666	23,01658	25,98034	26,1924	27,13644	28,25662	28,01715	27,05469	27,74097
WS bin		Int Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
4			-7,88883	-3,92997	-1,77731	-0,05679	1,9182	5,486719	8,088635	10,91858	12,66447	14,22125	14,4024
5			-3,78859	-0,73997	2,021076	4,440986	5,774154	7,934981	10,31843	12,5045	14,97713	16,20578	17,03874
6			0,329446	3,709406	6,777808	9,237114	10,61234	11,26483	13,04221	14,60091	16,55534	17,49468	18,05484
7			2,225965	5,962873	8,836663	10,7423	12,30318	13,31427	14,74141	16,21597	17,93786	19,31733	19,95286
8			5,356738	9,879496	12,98781	15,18759	16,7288	17,82318	18,73174	19,62826	20,99262	22,17122	22,77447
9			8,115295	12,35056	15,46971	18,19305	20,4158	21,16987	21,88765	22,65976	23,48187	24,08555	24,65863
10			11,33598	16,38419	19,71409	22,70963	25,3129	25,75294	26,6251	27,52649	27,39725	26,77618	27,33705

Πίνακας 5.8 : Κατανομημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 1-11

WS bin	WS avr	Spl cnt	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
4	4,052837671	6	17,64074	17,47592	17,93027	24,90107	26,20533	32,34038	28,10889	27,83136	27,81598	28,84934	29,1426
5	5,086179565	18	20,3358	23,48746	20,81377	26,4849	28,46723	33,83295	29,60325	29,26006	29,16109	29,94929	30,01989
6	5,994804984	27	21,37085	28,05109	23,89701	28,21604	30,58439	35,18173	32,33544	32,32804	32,10526	32,82296	32,49231
7	7,000545843	25	22,61396	31,01054	26,87399	31,01802	33,29412	35,7569	35,64428	35,46366	35,04856	35,58296	35,06127
8	8,097911803	21	24,49165	31,06902	29,36268	34,15477	36,18584	37,21666	37,81621	37,60203	37,34361	37,55994	36,95188
9	8,933263712	24	25,58819	30,71193	30,33191	35,4283	37,25789	37,79346	38,74157	38,18701	37,8686	38,09755	37,34939
10	9,759154685	5	27,71628	31,13664	31,52528	37,15554	39,39213	38,24893	38,81877	38,80326	38,36007	38,49167	37,66732
WS bin		Int Spl	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
4			17,50294	17,16854	17,78283	24,82009	26,08967	32,26406	28,03248	27,75831	27,7472	28,7931	29,09774
5			20,23763	23,05462	20,52134	26,32071	28,26643	33,70502	29,34411	28,96908	28,88184	29,67674	29,78539
6			21,37727	28,06638	23,91239	28,23052	30,59839	35,1847	32,35253	32,34423	32,12046	32,83722	32,50558
7			22,61303	31,01051	26,87275	31,01646	33,29268	35,75617	35,6432	35,46259	35,04742	35,58197	35,06033
8			24,36312	31,11088	29,24907	34,0055	36,06018	37,14905	37,70775	37,53347	37,28207	37,49692	36,90528
9			25,76015	30,74625	30,42834	35,56787	37,43034	37,83027	38,74781	38,23681	37,90831	38,1294	37,37508
10			27,51655	31,0269	31,43484	37,21664	39,59142	38,10776	38,78957	38,7484	38,33282	38,42498	37,66238

Πίνακας 5.9 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 12-22

WS bin	WS avr	Spl cnt	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
4	4,052837671	6	27,64227	24,12322	21,25966	22,7527	22,10762	20,60212	15,98363	16,68231	11,53272	7,974569	4,472496
5	5,086179565	18	27,98504	24,22547	21,52459	23,01264	22,84906	21,64232	17,309	19,09172	15,00091	10,04919	6,525901
6	5,994804984	27	30,1633	26,02809	23,57471	24,74498	24,82148	23,12429	18,56928	20,71129	17,47007	12,37835	8,484228
7	7,000545843	25	32,53833	28,41281	26,45744	27,1591	27,05471	24,57918	19,78984	21,84857	18,77226	14,61637	10,16304
8	8,097911803	21	34,34583	30,16049	28,51298	29,11224	28,94158	25,98448	21,51755	23,00062	20,16274	17,49909	12,7447
9	8,933263712	24	34,69513	30,87596	29,44524	29,71383	29,56124	26,65534	22,47034	23,68606	21,05173	18,62233	13,9777
10	9,759154685	5	35,11187	31,84633	30,46221	30,31866	30,08859	27,27391	23,6491	24,51694	22,14038	20,26527	15,81576
WS bin		Int Spl	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
4			27,62474	24,11799	21,24611	22,73941	22,06971	20,54893	15,91586	16,55911	11,35538	7,868488	4,3675
5			27,77845	24,0545	21,33015	22,84834	22,66199	21,50176	17,18947	18,93811	14,76672	9,828282	6,340161
6			30,17557	26,04041	23,5896	24,75745	24,83301	23,13181	18,57558	20,71717	17,4768	12,38991	8,4929
7			32,53743	28,41194	26,45641	27,15813	27,05377	24,57848	19,78898	21,848	18,77156	14,61494	10,16175
8			34,30489	30,07663	28,4037	29,04173	28,86895	25,90585	21,40587	22,92027	20,05854	17,36743	12,60018
9			34,72881	30,95437	29,52742	29,7627	29,60385	26,70532	22,56559	23,7532	21,1397	18,75509	14,12622
10			35,16094	32,01543	30,58289	30,35874	30,10093	27,3545	23,85853	24,66289	22,36448	20,54443	16,18046

Πίνακας 5.10 : Κατανομημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας και αναγωγή σε αέριες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 23-33

Στους παραπάνω πίνακες παρουσιάζονται αρχικά τα επίπεδα στάθμης ηχητικής πίεσης ανά τριτοκτάβα (Spl) και ανά ταχύτητα ανέμου. Κάθε τριτοκτάβα συμβολίζεται με την κεντρική της συχνότητα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εύρεση των αντίστοιχων επιπέδων ηχητικής πίεσης για ακέραιες τιμές ταχυτήτων ανέμου (int Spl). Ο πίνακας 5.8 συμπεριλαμβάνει από την 1^η μέχρι την 11^η τριτοκτάβα, ο 5.9 από τη 12^η έως την 22^η και ο 5.10 από την 23^η έως την 33^η.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι πίνακες για μετρήσεις θορύβου βάθους.

WS bin	WS avr	Spl cnt	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
4	4,169163	5	-8,50336	-4,97181	-3,00186	-0,76869	1,664595	4,517105	7,15513	9,693283	12,40684	12,69382	13,40121
5	5,079311	13	-4,26526	-1,03116	1,224248	2,512691	4,042014	5,727869	7,730501	10,37163	12,49298	12,58668	12,44105
6	5,90544	24	0,143009	4,177411	6,825768	8,842368	9,968907	10,87695	11,88927	13,06762	14,30949	14,75075	15,31905
7	6,972395	27	1,802509	6,120624	9,094651	10,68088	12,51213	13,65979	14,38866	14,9632	15,8478	16,4059	16,85739
8	8,017955	22	5,020457	9,026249	12,31167	15,06408	16,86166	17,40373	18,22568	18,43163	19,05239	22,17649	19,63929
9	9,126588	11	8,251496	11,995	15,74494	18,11185	20,07954	20,85217	21,1279	21,57522	22,08605	22,08508	22,47724
10	9,981617	11	9,484476	13,78339	17,7204	19,73043	21,53354	22,57576	23,77481	23,9444	23,91493	24,02028	24,34338
WS bin		Int Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
4			-9,29107	-5,70423	-3,78734	-1,37857	1,222721	4,292069	7,04819	9,567203	12,39083	12,71374	13,57967
5			-4,68847	-1,5312	0,686482	1,905019	3,473012	5,233539	7,331244	10,1128	12,31859	12,37893	12,16475
6			0,290084	4,34963	7,02685	9,005308	10,1943	11,12358	12,11079	13,23562	14,44582	14,89744	15,45539
7			1,887471	6,19734	9,179588	10,79661	12,62697	13,75864	14,48997	15,05478	15,93241	16,55826	16,93084
8			4,968128	8,978167	12,25606	15,01472	16,80954	17,34788	18,17868	18,38072	19,00326	22,17797	19,59332
9			8,068951	11,73023	15,45247	17,87221	19,86427	20,59699	20,73603	21,22446	21,81528	21,79857	22,20095
10			9,510985	13,82184	17,76287	19,76522	21,5648	22,61282	23,83172	23,99534	23,95425	24,06189	24,3835

Πίνακας 5.11 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 1-11

WS bin	WS avr	Spl cnt	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
4	4,169163	5	12,96308	13,84711	13,71844	14,02158	14,86505	16,49028	17,02601	18,70291	19,50336	18,32191	16,1314
5	5,079311	13	14,02551	15,08063	15,50534	15,0211	15,99974	17,63986	18,5848	19,78069	20,61442	18,9874	16,8543
6	5,90544	24	16,8645	18,71027	19,42805	19,35633	19,69951	20,94581	21,53132	22,65064	23,18182	21,78837	20,13834
7	6,972395	27	18,09792	19,82604	22,20135	24,27012	23,53291	23,68323	24,56965	25,67218	25,92355	24,96228	23,67257
8	8,017955	22	20,59382	22,14748	24,40759	28,98393	28,71466	26,63923	27,77413	28,61488	28,78294	28,00436	26,7045
9	9,126588	11	23,27191	24,46803	26,92424	33,31718	35,05756	30,73141	31,03532	31,85027	31,80641	31,24882	30,09587
10	9,981617	11	24,60709	25,52602	27,57558	34,31917	38,32721	32,55148	32,17064	33,47312	33,1275	32,55261	31,52886
WS bin		Int Spl	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
4			12,76561	13,61784	13,38632	13,83581	14,65416	16,27662	16,73629	18,50259	19,29685	18,19822	15,99704
5			13,75296	14,73217	15,12875	14,6049	15,64455	17,32248	18,30192	19,50516	20,36794	18,71849	16,53902
6			16,97382	18,80916	19,67384	19,79182	20,03925	21,18842	21,80059	22,91843	23,42481	22,06966	20,45156
7			18,16382	19,88733	22,2596	24,39457	23,66972	23,76128	24,65426	25,74987	25,99905	25,0426	23,75262
8			20,55045	22,1099	24,36683	28,91374	28,61193	26,57296	27,72131	28,56248	28,73398	27,95181	26,64958
9			23,07423	24,3114	26,82781	33,16884	34,57349	30,46195	30,86723	31,61	31,61082	31,05579	29,88372
10			24,6358	25,54877	27,58959	34,34071	38,3975	32,59061	32,19505	33,50802	33,15591	32,58064	31,55967

Πίνακας 5.12 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 12-22

WS bin	WS avr	Spl cnt	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
4	4,169163	5	14,49694	13,58489	12,79066	13,63257	12,25393	11,31178	10,14023	8,905785	7,554151	6,177279	3,22718
5	5,079311	13	15,09821	14,10347	14,08952	14,08523	13,16059	12,24737	10,90548	9,823164	8,585747	7,398371	4,435288
6	5,90544	24	18,97799	17,75871	16,52497	15,99261	15,39279	14,68653	13,69274	12,65316	11,62978	10,76465	7,725603
7	6,972395	27	21,77824	19,69959	18,01229	17,11645	16,60085	15,87945	14,64667	14,17959	13,40386	12,68275	9,248542
8	8,017955	22	24,89015	22,66035	20,88557	19,63018	18,95676	18,18666	16,94815	16,58273	15,77871	15,10277	11,40677
9	9,126588	11	28,42843	26,20481	24,24566	22,79074	21,84111	20,92699	19,62485	19,3985	18,62521	17,83825	14,06556
10	9,981617	11	29,89663	27,7544	25,77378	24,34611	23,41517	22,39083	21,0761	20,8756	20,14674	19,48798	15,58083
WS bin		Int Spl	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
4			14,38519	13,4885	12,54925	13,54844	12,08541	11,13788	9,997996	8,735278	7,362415	5,950324	3,002637
5			14,72573	13,75255	13,85571	13,90211	12,94629	12,0132	10,63789	9,551474	8,293509	7,075196	4,119406
6			19,22617	17,93073	16,65679	16,09221	15,49985	14,79226	13,77728	12,78844	11,78701	10,93464	7,860575
7			21,86041	19,77776	18,08815	17,18282	16,66305	15,94037	14,70743	14,24303	13,46657	12,74665	9,305525
8			24,83285	22,60295	20,83115	19,57899	18,91004	18,14227	16,9048	16,53713	15,73261	15,05847	11,36371
9			28,21106	25,97539	24,01942	22,56047	21,60807	20,71027	19,40999	19,17981	18,39995	17,59401	13,84122
10			29,9282	27,78772	25,80664	24,37955	23,44901	22,42231	21,10731	20,90735	20,17945	19,52345	15,6134

Πίνακας 5.13 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ηχοστάθμης θορύβου βάθους και αναγωγή σε ακέραιες ταχύτητες ανέμου για τριτοκτάβες 23-3

Στη συνέχεια ακολουθεί η διόρθωση της ηχοστάθμης της γεννήτριας για τον αντίστοιχο θόρυβο βάθους. Υπολογίζεται η διαφορά της ηχητικής πίεσης της γεννήτριας και του βάθους για κάθε τριτοκτάβα και ταχύτητα ανέμου. Αν η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη των 6 dBA εφαρμόζεται η εξίσωση 3.4 και το κελί χρωματίζεται με πράσινο χρώμα. Αν η διαφορά είναι μεταξύ των 3 dBA και 6 dBA, αφαιρείται από την ηχοστάθμη της γεννήτριας η σταθερή ποσότητα 1.3 dBA και το κελί χρωματίζεται με κίτρινο χρώμα, ενώ τέλος αν η διαφορά είναι μικρότερη των 3 dBA ή αρνητική θεωρούμε ότι ο θόρυβος βάθους υπερκαλύπτει τον θόρυβο της γεννήτριας για τη συγκεκριμένη συχνότητα και το κελί χρωματίζεται με κόκκινο χρώμα. Κάθε πίνακας αντιστοιχεί και σε μια ταχύτητα ανέμου. Τέλος σχεδιάστηκε διάγραμμα με τη διορθωμένη στάθμη ηχητικής πίεσης για κάθε ταχύτητα ανέμου σε κάθε τριτοκτάβα συχνοτήτων. Έτσι έχουμε :

WS bin	4	Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
Gen			-7,88883	-3,92997	-1,77731	-0,05679	1,9182	5,48672	8,08864	10,91858	12,66447	14,22125	14,4024
Back			-9,29107	-5,70423	-3,78734	-1,37857	1,22272	4,29207	7,04819	9,5672	12,39083	12,71374	13,57967
Diff			1,40224	1,77426	2,01003	1,32179	0,69548	1,19465	1,04045	1,35138	0,27363	1,50751	0,82273
Cor													
			160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
Γεννήτρια			17,50294	17,16854	17,78283	24,82009	26,08967	32,26406	28,03248	27,75831	27,7472	28,7931	29,09774
Βάθους			12,76561	13,61784	13,38632	13,83581	14,65416	16,27662	16,73629	18,50259	19,29685	18,19822	15,99704
Διαφορά			4,73732	3,55069	4,39651	10,98428	11,43552	15,98744	11,29619	9,25572	8,45035	10,59488	13,1007
Διόρθωση			16,20294	15,86854	16,48283	24,45928	25,76584	32,15325	27,69767	27,20958	27,07763	28,39686	28,87968
			2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
Γεννήτρια			27,62474	24,11799	21,24611	22,73941	22,06971	20,54893	15,91586	16,55911	11,35538	7,86849	4,3675
Βάθους			14,38519	13,4885	12,54925	13,54844	12,08541	11,13788	9,998	8,73528	7,36242	5,95032	3,00264
Διαφορά			13,23955	10,62949	8,69686	9,19097	9,9843	9,41105	5,91786	7,82383	3,99296	1,91816	1,36486
Διόρθωση			27,41372	23,72504	20,6163	22,18188	21,61039	20,0207	14,61586	15,77571	10,05538		

Πίνακας 5.14 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 4m/s

WS bin	5	Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
Gen			-3,78859	-0,73997	2,02108	4,44099	5,77415	7,93498	10,31843	12,5045	14,97713	16,20578	17,03874
Back			-4,68847	-1,5312	0,68648	1,90502	3,47301	5,23354	7,33124	10,1128	12,31859	12,37893	12,16475
Diff			0,89988	0,79122	1,33459	2,53597	2,30114	2,70144	2,98719	2,3917	2,65854	3,82685	4,87399
Cor												14,90578	15,73874
			160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
Γεννήτρια			20,23763	23,05462	20,52134	26,32071	28,26643	33,70502	29,34411	28,96908	28,88184	29,67674	29,78539
Βάθους			13,75296	14,73217	15,12875	14,6049	15,64455	17,32248	18,30192	19,50516	20,36794	18,71849	16,53902
Διαφορά			6,48468	8,32245	5,39259	11,71581	12,62188	16,38254	11,04219	9,46392	8,5139	10,95824	13,24637
Διόρθωση			19,13254	22,36335	19,22134	26,01784	28,02223	33,60396	28,98829	28,44764	28,22277	29,31367	29,5747
			2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
Γεννήτρια			27,77845	24,0545	21,33015	22,84834	22,66199	21,50176	17,18947	18,93811	14,76672	9,82828	6,34016
Βάθους			14,72573	13,75255	13,85571	13,90211	12,94629	12,0132	10,63789	9,55147	8,29351	7,0752	4,11941
Διαφορά			13,05271	10,30194	7,47444	8,94622	9,7157	9,48856	6,55158	9,38663	6,47321	2,75309	2,22076
Διόρθωση			27,5579	23,62921	20,47423	22,25619	22,17164	20,98345	16,10357	18,40671	13,65829		

Πίνακας 5.15 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 5m/s

WS bin	6	Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
Gen			0,32945	3,70941	6,77781	9,23711	10,61234	11,26483	13,04221	14,60091	16,55534	17,49468	18,05484
Back			0,29008	4,34963	7,02685	9,00531	10,1943	11,12358	12,11079	13,23562	14,44582	14,89744	15,45539
Diff			0,03936	-0,64022	-0,24904	0,23181	0,41804	0,14125	0,93142	1,36529	2,10952	2,59724	2,59946
Cor													
			160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
Γεννήτρια			21,37727	28,06638	23,91239	28,23052	30,59839	35,1847	32,35253	32,34423	32,12046	32,83722	32,50558
Βάθους			16,97382	18,80916	19,67384	19,79182	20,03925	21,18842	21,80059	22,91843	23,42481	22,06966	20,45156
Διαφορά			4,40346	9,25722	4,23855	8,43869	10,55914	13,99628	10,55194	9,4258	8,69565	10,76756	12,05402
Διόρθωση			20,07727	27,51785	22,61239	27,559	30,19872	35,00811	31,95217	31,81791	31,49047	32,45712	32,22615
			2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
Γεννήτρια			30,17557	26,04041	23,5896	24,75745	24,83301	23,13181	18,57558	20,71717	17,4768	12,38991	8,4929
Βάθους			19,22617	17,93073	16,65679	16,09221	15,49985	14,79226	13,77728	12,78844	11,78701	10,93464	7,86057
Διαφορά			10,9494	8,10968	6,93281	8,66525	9,33316	8,33955	4,7983	7,92872	5,68979	1,45527	0,63232
Διόρθωση			29,81173	25,31136	22,60615	24,12269	24,29461	22,44349	17,27558	19,9542	16,1768		

Πίνακας 5.16 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 6m/s

WS bin	7	Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
Gen			2,22597	5,96287	8,83666	10,7423	12,30318	13,31427	14,74141	16,21597	17,93786	19,31733	19,95286
Back			1,88747	6,19734	9,17959	10,79661	12,62697	13,75864	14,48997	15,05478	15,93241	16,55826	16,93084
Diff			0,33849	-0,23447	-0,34292	-0,05431	-0,32378	-0,44437	0,25144	1,1612	2,00545	2,75907	3,02202
Cor													18,65286
			160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
Γεννήτρια			22,61303	31,01051	26,87275	31,01646	33,29268	35,75617	35,6432	35,46259	35,04742	35,58197	35,06033
Βάθους			18,16382	19,88733	22,2596	24,39457	23,66972	23,76128	24,65426	25,74987	25,99905	25,0426	23,75262
Διαφορά			4,4492	11,12318	4,61315	6,62188	9,62296	11,9949	10,98894	9,71272	9,04837	10,53938	11,30771
Διόρθωση			21,31303	30,66153	25,57275	29,95032	32,79112	35,47278	35,2828	34,97189	34,46999	35,18039	34,72645
			2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
Γεννήτρια			32,53743	28,41194	26,45641	27,15813	27,05377	24,57848	19,78898	21,848	18,77156	14,61494	10,16175
Βάθους			21,86041	19,77776	18,08815	17,18282	16,66305	15,94037	14,70743	14,24303	13,46657	12,74665	9,30552
Διαφορά			10,67703	8,63418	8,36827	9,97531	10,39072	8,63811	5,08155	7,60497	5,305	1,86829	0,85623
Διόρθωση			32,14896	27,77227	25,77301	26,69781	26,63751	23,93943	18,48898	21,02	17,47156		

Πίνακας 5.17 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 7m/s

WS bin	8	Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
Gen			5,35674	9,8795	12,98781	15,18759	16,7288	17,82318	18,73174	19,62826	20,99262	22,17122	22,77447
Back			4,96813	8,97817	12,25606	15,01472	16,80954	17,34788	18,17868	18,38072	19,00326	22,17797	19,59332
Diff			0,38861	0,90133	0,73175	0,17287	-0,08074	0,4753	0,55306	1,24754	1,98936	-0,00675	3,18115
Cor													21,47447
			160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
Γεννήτρια			24,36312	31,11088	29,24907	34,0055	36,06018	37,14905	37,70775	37,53347	37,28207	37,49692	36,90528
Βάθους			20,55045	22,1099	24,36683	28,91374	28,61193	26,57296	27,72131	28,56248	28,73398	27,95181	26,64958
Διαφορά			3,81268	9,00098	4,88224	5,09175	7,44825	10,57609	9,98644	8,97098	8,5481	9,54511	10,25571
Διόρθωση			23,06312	30,52666	27,94907	32,7055	35,19853	36,75101	37,24867	36,94492	36,62858	36,98574	36,47521
			2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
Γεννήτρια			34,30489	30,07663	28,4037	29,04173	28,86895	25,90585	21,40587	22,92027	20,05854	17,36743	12,60018
Βάθους			24,83285	22,60295	20,83115	19,57899	18,91004	18,14227	16,9048	16,53713	15,73261	15,05847	11,36371
Διαφορά			9,47205	7,47368	7,57255	9,46274	9,95891	7,76357	4,50107	6,38315	4,32593	2,30897	1,23647
Διόρθωση			33,78449	29,22054	27,56887	28,52014	28,40678	25,11044	20,10587	21,78531	18,75854		

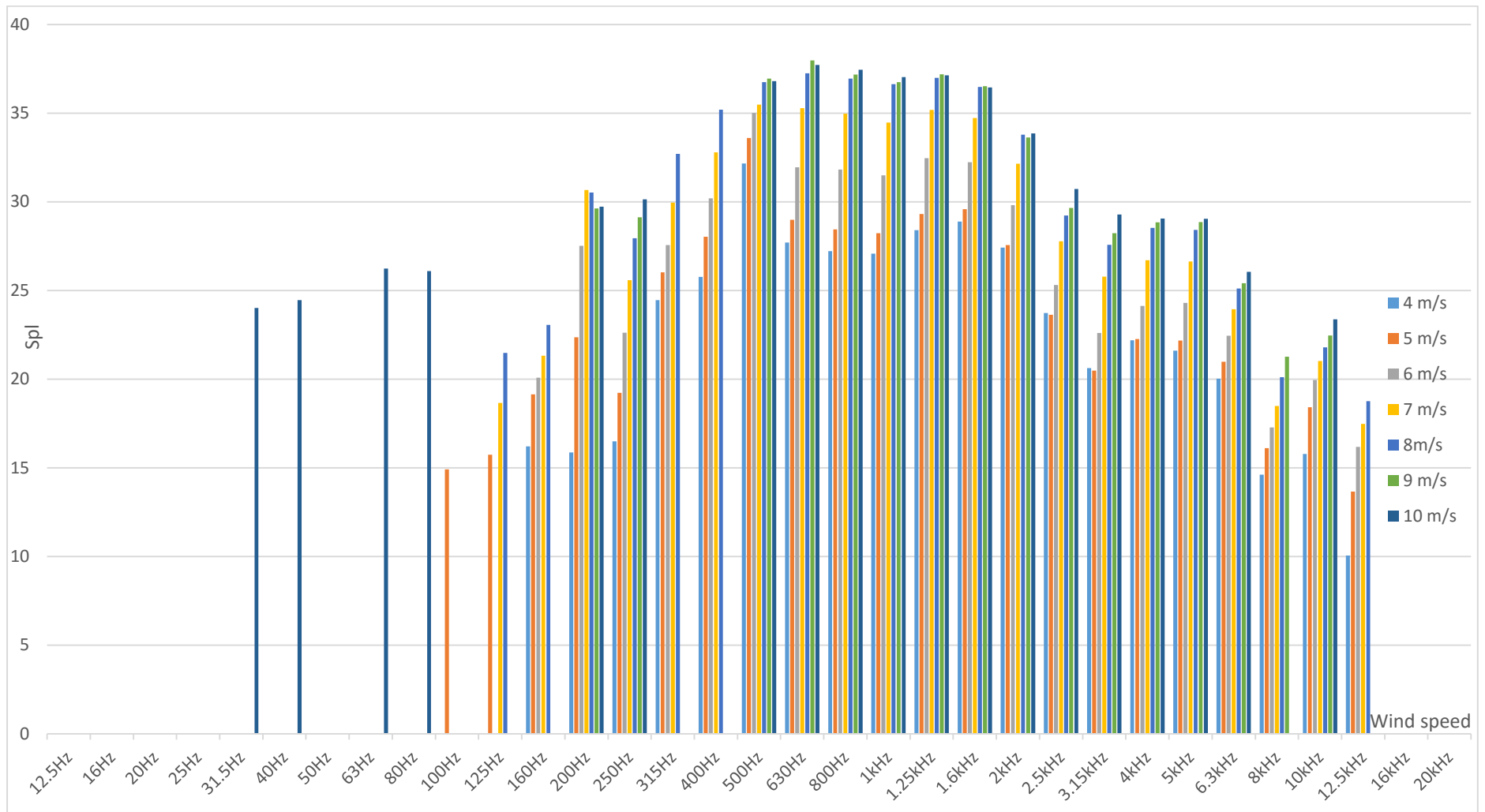
Πίνακας 5.18 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα α

WS bin	9	Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
Gen			8,11529	12,35056	15,46971	18,19305	20,4158	21,16987	21,88765	22,65976	23,48187	24,08555	24,65863
Back			8,06895	11,73023	15,45247	17,87221	19,86427	20,59699	20,73603	21,22446	21,81528	21,79857	22,20095
Diff			0,04634	0,62033	0,01724	0,32084	0,55153	0,57288	1,15162	1,4353	1,66659	2,28698	2,45768
Cor													
			160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
Γεννήτρια			25,76015	30,74625	30,42834	35,56787	37,43034	37,83027	38,74781	38,23681	37,90831	38,1294	37,37508
Βάθους			23,07423	24,3114	26,82781	33,16884	34,57349	30,46195	30,86723	31,61	31,61082	31,05579	29,88372
Διαφορά			2,68592	6,43485	3,60054	2,39904	2,85686	7,36832	7,88058	6,62681	6,29749	7,07361	7,49136
Διόρθωση				29,62661	29,12834			36,95088	37,97554	37,17204	36,74743	37,18102	36,52283
			2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
Γεννήτρια			34,72881	30,95437	29,52742	29,7627	29,60385	26,70532	22,56559	23,7532	21,1397	18,75509	14,12622
Βάθους			28,21106	25,97539	24,01942	22,56047	21,60807	20,71027	19,40999	19,17981	18,39995	17,59401	13,84122
Διαφορά			6,51775	4,97898	5,508	7,20223	7,99578	5,99506	3,1556	4,57339	2,73975	1,16108	0,285
Διόρθωση			33,63324	29,65437	28,22742	28,84515	28,85365	25,40532	21,26559	22,4532			

Πίνακας 5.19 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 9m

WS bin	10	Spl	12.5Hz	16Hz	20Hz	25Hz	31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz
Gen			11,33598	16,38419	19,71409	22,70963	25,3129	25,75294	26,6251	27,52649	27,39725	26,77618	27,33705
Back			9,51099	13,82184	17,76287	19,76522	21,5648	22,61282	23,83172	23,99534	23,95425	24,06189	24,3835
Diff			1,82499	2,56235	1,95122	2,9444	3,7481	3,14012	2,79338	3,53115	3,443	2,71429	2,95355
Cor							24,0129	24,45294		26,22649	26,09725		
			160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
Γεννήτρια			27,51655	31,0269	31,43484	37,21664	39,59142	38,10776	38,78957	38,7484	38,33282	38,42498	37,66238
Βάθους			24,6358	25,54877	27,58959	34,34071	38,3975	32,59061	32,19505	33,50802	33,15591	32,58064	31,55967
Διαφορά			2,88076	5,47813	3,84525	2,87593	1,19391	5,51715	6,59452	5,24039	5,17691	5,84434	6,1027
Διόρθωση				29,7269	30,13484			36,80776	37,71579	37,4484	37,03282	37,12498	36,44002
			2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
Γεννήτρια			35,16094	32,01543	30,58289	30,35874	30,10093	27,3545	23,85853	24,66289	22,36448	20,54443	16,18046
Βάθους			29,9282	27,78772	25,80664	24,37955	23,44901	22,42231	21,10731	20,90735	20,17945	19,52345	15,6134
Διαφορά			5,23275	4,22771	4,77625	5,97919	6,65192	4,9322	2,75122	3,75554	2,18503	1,02098	0,56705
Διόρθωση			33,86094	30,71543	29,28289	29,05874	29,04311	26,0545		23,36289			

Πίνακας 5.20 : Διόρθωση ηχοστάθμης θορύβου γεννήτριας για θόρυβο βάθους, για ταχύτητα ανέμου 10m/s



Εικόνα 5.7 : Φασματική ανάλυση μετρήσεων θορύβου στο πεδίο δοκιμών Μαραθώνα

Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται αυξημένος θόρυβος στις τριτοκτάβες των 200 και 500 Hz, κυρίως για χαμηλές ταχύτητες ανέμου, από 4 έως 8 m/s. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4 στις συχνότητες των 200 και 500 Hz παρατηρείται αυξημένος θόρυβος και στις μετρήσεις εργαστηρίου. Στην τριτοκτάβα των 200 Hz συνήθως εντοπίζεται κάποια αρμονική, ενώ για την τριτοκτάβα των 500 Hz απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ - ΠΕΔΙΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

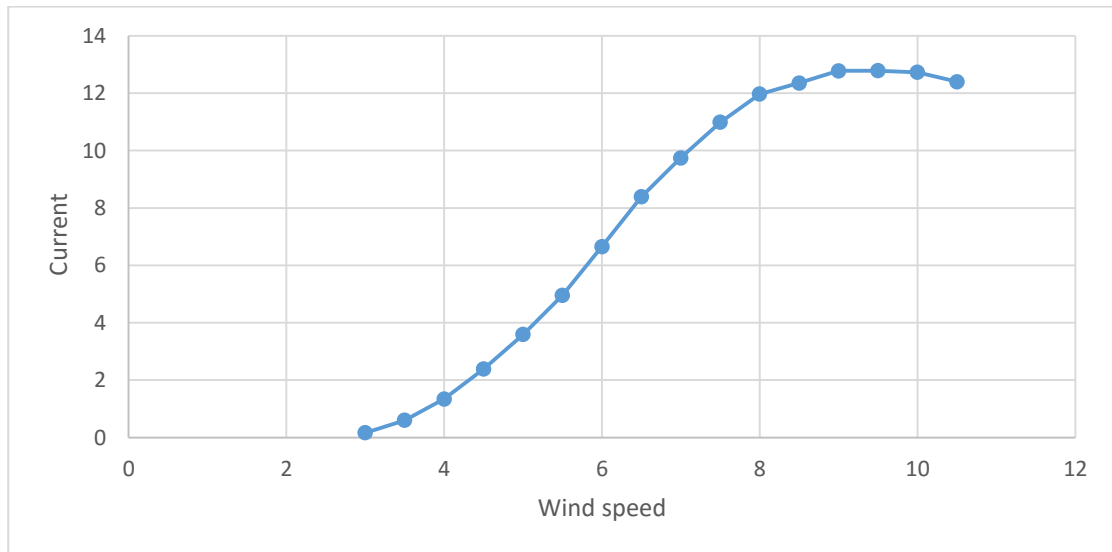
Αρχικά για να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δυο πειραμάτων θα πρέπει να αναφερόμαστε σε όμοια μεγέθη, καθώς τα πειράματα εργαστηρίου έγιναν με κριτήριο το ρεύμα που παρήγαγε η γεννήτρια ενώ στο πεδίο δοκιμών κριτήριο ήταν η ταχύτητα ανέμου. Για το λόγο αυτόν, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών έγινε καταγραφή και του παραγόμενου ρεύματος ώστε να δημιουργηθεί η καμπύλη ρεύματος – ταχύτητας ανέμου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια με τις μετρήσεις θορύβου. Αρχικά έγινε η καταγραφή των δεδομένων ενός αμπερομέτρου παράλληλα με τις υποδείξεις του ανεμομέτρου. Στη συνέχεια έγινε ομαδοποίηση των δεδομένων ανά 60 δείγματα. Τα νέα δεδομένα κατατάσσονταν σε κατηγορίες ανάλογα με τον μέσο όρο της ταχύτητας ανέμου στην οποία αντιστοιχούσαν. Ύστερα έγινε εκ νέου ομαδοποίηση ανά bin ταχύτητας ανέμου. Τα δεδομένα αυτά δεν ήταν κεντραρισμένα στην κεντρική τιμή του bin στο οποίο ανήκαν, οπότε έγινε η αναγκαία μετατροπή στις απαιτούμενες τιμές. Τέλος δημιουργήθηκε η καμπύλη ρεύματος – ταχύτητας ανέμου.

wind speed bins	wind speed averages	count	Cur Avr
3	2,464412	2	-0,08789
3,5	3,277742	3	0,300926
4	3,802078	8	1,008708
4,5	4,242556	12	1,756953
5	4,771425	15	3,052886
5,5	5,242288	17	4,157284
6	5,736356	8	5,69536
6,5	6,295283	7	7,72623

7	6,76428	7	9,24545
7,5	7,262723	12	10,29848
8	7,825527	8	11,92757
8,5	8,265533	13	12,03526
9	8,705135	15	12,63581
9,5	9,273728	8	12,90904
10	9,669783	5	12,68582
10,5	10,1741	2	12,75255
wind speed bins	slope	offset	int Cur
3	0,478055279	-1,266015788	0,16815005
3,5	1,349862579	-4,123574909	0,600944116
4	1,698711532	-5,449925781	1,344920345
4,5	2,45038582	-8,638946249	2,387789939
5	2,345474671	-8,138370588	3,589002766
5,5	3,113088938	-12,16242594	4,959563224
6	3,633516003	-15,14778077	6,65331525
6,5	3,23929835	-12,66606917	8,389370107
7	2,11264602	-5,045077841	9,743444302
7,5	2,894591114	-10,72412828	10,98530508
8	0,24472997	10,01243278	11,97027254
8,5	1,366139919	0,743381883	12,3555712
9	0,480524741	8,452781708	12,77750438
9,5	-0,563605988	18,13576569	12,78150881
10	0,132322349	11,40628975	12,72951324
10,5	-1,079809719	23,73863666	12,40063461

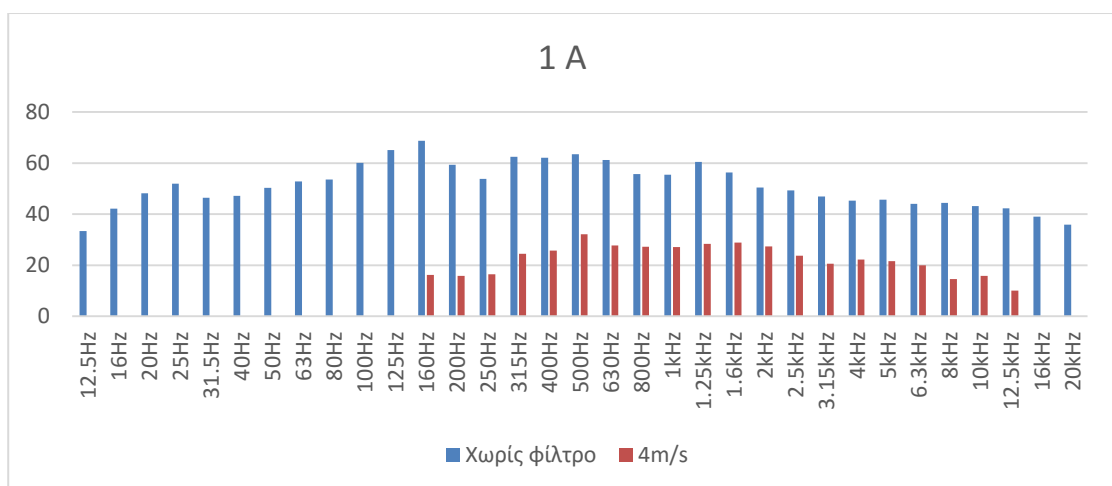
Πίνακας 5.21 : Κατανεμημένες Μετρήσεις ρεύματος και αναγωγή σε προκαθορισμένες ταχύτητες ανέμου

Αναλυτικότερα στον πίνακα 5.21 εμφανίζονται τα τελικά δεδομένα ρεύματος και ταχύτητας ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση της καμπύλης, η οποία με τη σειρά της εμφανίζεται στο σχήμα 5.3.

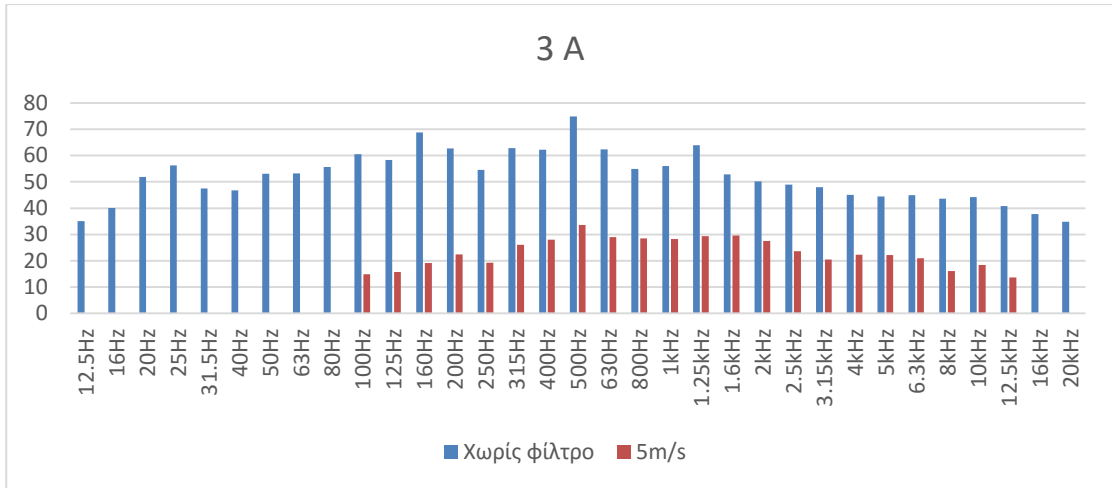


Εικόνα 5.8 : Καμπύλη ρεύματος – ταχύτητας ανέμου

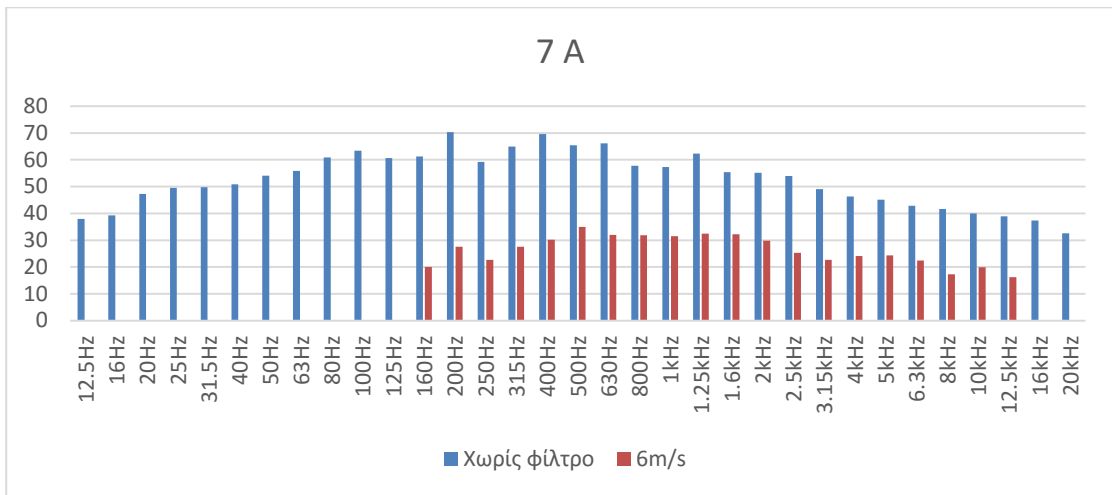
Από τα ανωτέρω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι τα ρεύματα για τα οποία έχουν γίνει μετρήσεις στο εργαστήριο δεν αντιστοιχούν στις ακέραιες τιμές ταχύτητας ανέμου για τις οποίες έχει υπολογιστεί ο εκπεμπόμενος θόρυβος της ανεμογεννήτριας. Για το λόγο αυτό θα γίνει μια κατά προσέγγιση σύγκριση. Έτσι, για την αντιστοιχία του 1 A θα χρησιμοποιηθεί ταχύτητα ανέμου 4 m/s, για τα 3 A τα 5 m/s, για τα 5 A δεν θα χρησιμοποιηθεί κάποια ταχύτητα ανέμου καθώς δεν βρίσκεται κοντά σε κάποια ακέραιη τιμή, για τα 7 A αντιστοιχούν τα 6 m/s και τέλος για τα 9 A τα 7m/s. Τα διαγράμματα που προκύπτουν είναι τα εξής :



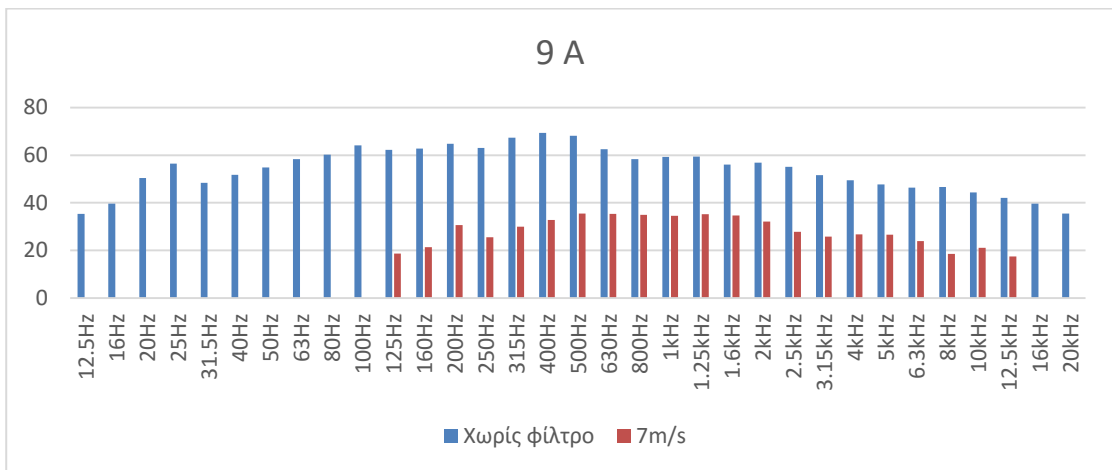
Εικόνα 5.9 : Σύγκριση ηχοστάθμης 1 A – 4 m/s



Εικόνα 5.10 : Σύγκριση ηχοστάθμης 3 A – 5 m/s



Εικόνα 5.11 : Σύγκριση ηχοστάθμης 7 A – 6 m/s



Εικόνα 5.12 : Σύγκριση ηχοστάθμης 9 A – 7 m/s

Στα παραπάνω διαγράμματα δεν ενδιαφέρει τόσο η διαφορά έντασης μεταξύ των διαγραμμάτων όσο η συμπεριφορά του θορύβου της γεννήτριας ανά συχνότητα.

Στο διάγραμμα του 1 A είχαν εντοπιστεί οι αρμονικές στις τριτοκτάβες των 125 και 160 Hz στο κεφάλαιο 4. Από το διάγραμμα της ταχύτητας ανέμου των 4 m/s δεν μπορούμε να αποφανθούμε σχετικά με τις συχνότητες αυτές καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα για χαμηλότερες τιμές. Ωστόσο από τη συνολική εικόνα δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια αύξηση σε αυτή την περιοχή των συχνοτήτων.

Στο διάγραμμα των 3 A είχαν παρατηρηθεί αυξήσεις έντασης εξαιτίας των αρμονικών ρεύματος στις τριτοκτάβες των 160 και 200 Hz. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μια αύξηση για τις αντίστοιχες συχνότητες και για το διάγραμμα ταχύτητας ανέμου 5 m/s.

Στο διάγραμμα των 7 A υπάρχει αύξηση και για τα δεδομένα εργαστηρίου και για τα δεδομένα του πεδίου δοκιμών στην τριτοκτάβα των 200 Hz.

Τέλος, στο διάγραμμα των 9 A παρατηρείται αύξηση στα 200 Hz και για τις δυο περιπτώσεις.

6 Συμπεράσματα - προοπτικές

6.1 Συμπεράσματα

Ο θόρυβος που παράγεται κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, μικρών και μεγάλων, αποτελεί σήμερα ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα για την ακόμα μεγαλύτερη διάδοση τους. Στην εργασία αυτή έγιναν μετρήσεις θορύβου μιας μικρής ανεμογεννήτριας τόσο σε συνθήκες εργαστηρίου όσο και σε πεδίο δοκιμών. Σκοπός των μετρήσεων ήταν ο υπολογισμός του εκπεμπόμενου θορύβου κατά τη λειτουργία της γεννήτριας καθώς επίσης και ο καθορισμός της επιρροής των αρμονικών ρεύματος που δημιουργούνται από τη χρήση ανορθωτικών διατάξεων για σύνδεση με μπαταρίες στον παραγόμενο θόρυβο.

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο 4^ο κεφάλαιο, για την εύρεση της επίδρασης των αρμονικών ρεύματος έγιναν εργαστηριακά πειράματα κατά τα οποία δοκιμάστηκαν διαφορετικές συνδεσμολογίες. Οι συνδεσμολογίες αυτές ήταν σύνδεση με φορτίο, σύνδεση με μπαταρίες και σύνδεση με μπαταρίες αλλά με χρήση φίλτρου αποκοπής αρμονικών ρεύματος. Το φίλτρο αυτό κατασκευάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του συμφοιτητή Ηλία Κατσαμπίρη. Οι μετρήσεις αυτές για τις διάφορες διατάξεις έδειξαν αφενός ότι η συνδεσμολογία με μπαταρίες χωρίς φίλτρο παράγαγε τον περισσότερο θόρυβο σε όλες τις περιπτώσεις, αφετέρου το σημαντικό ρόλο που παίζουν σε αυτήν τη διαφορά κυρίως η 5^η και η 7^η αρμονική. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη χρήση ενός απλού φίλτρου κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικά, καθώς επιτεύχθηκε συνολική μείωση θορύβου της τάξεως του 5.6% συγκριτικά με την απλή σύνδεση με μπαταρίες.

Από τις μετρήσεις θορύβου στο πεδίο δοκιμών του Μαραθώνα έγινε ο καθορισμός του εκπεμπόμενου θορύβου μικρής ανεμογεννήτριας για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μετρήσεων αυτών προκύπτει ότι σε απόσταση περίπου 14 m ο θόρυβος που εκπέμπει η ανεμογεννήτρια για ταχύτητες ανέμου από 4 m/s μέχρι και 8 m/s είναι διακριτός και μάλιστα σε επίπεδα έντασης που ξεπερνούν τα θεσμοθετημένα πλαίσια για περιοχές σε επαφή με κατοικίες. Για ταχύτητες ανέμου 9 και 10 m/s η διαφορά του επιπέδου ηχητικής πίεσης της γεννήτριας με του αντίστοιχου του θορύβου βάθους της περιοχής μειώνεται και δεν είναι ξεκάθαρο αν ο θόρυβος της γεννήτριας είναι διακριτός.

Τέλος, από τη σύγκριση των δεδομένων εργαστηρίου και πεδίου δοκιμών συμπεραίνεται ότι οι αρμονικές ρεύματος που δημιουργούνται από τη χρήση ανορθωτικών διατάξεων για σύνδεση ανεμογεννήτριας με συσσωρευτές συμβάλλουν στον παραγόμενο θόρυβο, κυρίως στη συχνότητα των 200 Hz. Το

γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη μείωση θορύβου που επέφερε η χρήση του φίλτρου στις εργαστηριακές δοκιμές ανοίγει νέους ορίζοντες έρευνας και μελέτης της εφαρμογής φίλτρων αποκοπής αρμονικών ρεύματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

6.2 Προοπτικές

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασία προέκυψαν πλήθος προβλημάτων και αποριών που χρήζουν μεταγενέστερης έρευνας.

Στο πλαίσιο των εργαστηριακών μετρήσεων ελέγχθηκε η επιρροή των αρμονικών ρεύματος στον συνολικό εκπεμπόμενο θόρυβο της γεννήτριας. Οι μετρήσεις αφορούσαν διάφορες βασικές διατάξεις και γίνονταν για παραγωγή ρεύματος 1, 3, 5, 7 και 9 A. Για μια πιο αναλυτική μελέτη είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μετρήσεων για πληθώρα ρευμάτων, γεγονός που θα καθιστούσε και ευκολότερη τη σύγκριση των μετρήσεων αυτών με πραγματικές μετρήσεις στο πεδίο δοκιμών.

Για τον περιορισμό του θορύβου που παρήγαγε ο κινητήρας που έστρεφε τη γεννήτρια κατασκευάστηκε ένα ηχομονωτικό κουτί. Ωστόσο, για καλύτερο αποτέλεσμα θα μπορούσαν να τοποθετηθούν αντικραδασμικά στοιχεία στη βάση στήριξης του κινητήρα, ώστε να μειωθούν και οι μεταδιδόμενες από τον κινητήρα στη γεννήτρια δονήσεις, ενώ ενδεχομένως να απαιτείται μελέτη για την επιλογή των υλικών κατασκευής του κουτιού.

Επιπλέον, για τον περιορισμό των αρμονικών ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ένα παθητικό φίλτρο στο οποίο δεν έγιναν τροποποιήσεις. Θα μπορούσε λοιπόν να εξεταστεί μεγαλύτερο πλήθος επιλογών φίλτρου ώστε να βρεθεί το φίλτρο με τα κατάλληλα στοιχεία το οποίο θα επιτυγχάνει το καλύτερο ακουστικό αποτέλεσμα. Παράλληλα όμως, επειδή τα φίλτρα τείνουν να ρίχνουν την απόδοση της γεννήτριας, ενώ τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν μεγάλο κόστος, καλό θα ήταν η επιλογή του φίλτρου να γινόταν με βάση κάποιο κριτήριο στο οποίο θα συνυπολογίζεται το κόστος παραγωγής, η απόδοση της γεννήτριας και το τελικό ακουστικό αποτέλεσμα.

Δεν θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι στη φασματική ανάλυση του κεφαλαίου 4 ένα κομμάτι των μετρήσεων δεν έχει επεξηγηθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Σε ότι αφορά τις μετρήσεις στο πεδίο δοκιμών εφαρμόστηκε το πρότυπο IEC 61400.11. Όπως έχει προαναφερθεί αντιμετωπίστηκαν διάφορα προβλήματα που είχαν να κάνουν με την τοπολογία της περιοχής και τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Μια πρώτη πρόταση θα ήταν η βελτίωση των εγκαταστάσεων ή η επιλογή

διαφορετικού πεδίου δοκιμών καταλληλότερου για μετρήσεις θορύβου, ώστε να γίνουν μετρήσεις με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα.

Επίσης, λόγω περιορισμένων δυνατοτήτων του εξοπλισμού μετρήσεων, δεν εφαρμόστηκε το πρότυπο εξολοκλήρου καθώς δεν έγινε μελέτη τονικότητας στον εκπεμπόμενο θόρυβο. Μια πρόταση λοιπόν θα ήταν η εύρεση καταλληλότερου εξοπλισμού ώστε να γίνει πιο ολοκληρωμένη μελέτη του θορύβου που παράγει η γεννήτρια.

Ακόμα, θα ήταν χρήσιμη η διεξαγωγή μετρήσεων σε διαφορετικές αποστάσεις από τη γεννήτρια ώστε να καθοριστεί επακριβώς η απόσταση στην οποία η συγκεκριμένη γεννήτρια είναι δυνατό να τοποθετηθεί κοντά σε οικισμό.

Τέλος, τα θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του φίλτρου σε πειραματικό επίπεδο καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή φίλτρων στο πεδίο δοκιμών, ώστε να γίνει μια πραγματική αποτίμηση της μεθόδου και να εξεταστεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας η απόδοση του φίλτρου.

7 Βιβλιογραφία

61400-11, I., 2006. *Wind turbine generator systems- Part 11: Acoustic noise measurment techniques*, s.l.: IEC.

Acoustics, I. o., 2002b. *Certificate of Competence in Environmental Noise Measurements*, Birmingham: Institute of Acoustics.

Anon., 2014. *wikipedia.org*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%B3%CE%BA%CE%AC%CF%81%CF%83%CE%B9%CE%B1_%CE%BA%CF%8D%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1

[Πρόσβαση November 2015].

ANSI, 1994. *Acoustical Terminology SI*. New York: s.n.

Ballou, G., 2008. *Handbook for sound engineers*. 4 επιμ. s.l.:FocalPress.

Beraneck, L. & Ver, I., 2003. *Noise and Vibration Control Engineering*. New York: Wiley Interscience.

Crocker, M., 1998. *Handbook of acoustics*. New York: s.n.

Dassen, M., Parchen, R., Bruggeman, J. & Hagg, F., 1994. *Wind tunnel measurments of the aerodynamic noise of blade sections*. Thessaloniki, European Wind Energy Association, pp. 791-798.

Econews, 2015. *econews.gr*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.econews.gr/2015/06/22/koukouvagia-anemogennitries-123113/>

[Πρόσβαση 29 11 2015].

Howe, M., 1991. The influence of surface rounding trailing edge noise. *The journal of the acoustical society of America*, 90(1), pp. 482-487.

ΚΑΠΕ, Κ. Α. Π. κ. Ε. Ε., n.d. *www.cres.gr/kape*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm

Klug, H., Osten, T., Jakobsen, J. & Andersen, B., 1995. *Aerodynamic Noise from Wind Turbines and Rotor Blade Modification*, s.l.: s.n.

Lee, S.-H. και συν., 2006. *Optimal design to reduce acoustic noise in interior permanent magnet motor using response surface methodology*. s.l., IEEE Industrial Application Conference.

Lowson, V., 1993. A new prediction model for wind turbine noise. Στο: s.l.:s.n., pp. 177-182.

Miniger, X., Galopin, N., Boiullault, F. & Gabsi, M., 2007. Analysis of Electromagnetic Strains on a Structure such as Switched Reluctance Machine. *European Physical Journal-Applied Physics*, Τόμος 39, pp. 191-196.

- Miniger, X. και συν., 2008. Semiactive and active piezoelectric vibration controls for switched reluctance machine. *IEEE transaction Energy Conversion*, 23(1), pp. 78-85.
- Rogers, A., Manwell, J. F. & Wright, S., 2002. *Wind turbine Acoustic Noise*, Boston: s.n.
- Rossing, T. D., 2013. *Springer Handbook of Acoustics*. 2 επιμ. California: Springer.
- Torregrossa, D. και συν., 2011. Multiphysics Finite-Element Modeling for Vibration and Acoustic Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions of Energy Conversion*, 26(2), pp. 490-500.
- Trzynadlowski, A. m., 2006. Active attenuation of electromagnetic noise noise in an inverter-fed automotive electric drive system.. *IEEE transactions Power Electronics* , 21(3), pp. 693-700.
- Wall, D., 2000. *Industrial Hygiene Made Easy*. s.l.:Moran Associates.
- Wang, C., Cho Lai, J. & Gieras, J. F., 2006. *Noise of polyphase electric motors*. 1 επιμ. s.l.:CRC Press Taylor & Francis Group.
- Wang, L., Pereira, N. & Hung, Y.-T., 2005. *Advanced air and noise pollution control*. 2 επιμ. New Jersey: Humana Press.
- WHO, 2008. <http://www.euro.who.int>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise>
[Πρόσβαση 20 January 2016].
- Yu, S. & Tang, R., 2006. *Electromagnetin and Mechanical Characterizations of Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Machine*. s.l., IEEE transactions on Magnetics.
- Δρίβας, Σ., 2005. *Θόρυβος αυτός ο άγνωστος*. s.l.:ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε..
- ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., n.d. *Ο Θόρυβος στην Εργασία*, Αθήνα: Υπουργείο Απασχόλησης και Κοινωνικής Προστασίας.
- ΕΛΟΤ-556, 1994. *Ακουστική-Ορολογία περιβαλλοντικής ακουστικής*. Αθήνα: ΕΛΟΤ.
- Κανελοπούλου, Ε., 2007. *Εφαρμοσμένη κλιματολογία*. Αθήνα: Συμμετρία.
- Κανελοπούλου, Ε., 2008. *Ήπιες μορφές ενέργειας*. Αθήνα: Συμμετρία.
- Μπεργελές, Γ., 2005. *Ανεμικινητήρες*. 2η επιμ. Αθήνα: Συμεών.
- Νικολάκης, Δ., 2002. *Κλιματολογία*. Αθήνα: s.n.
- Παπαδόπουλος, Μ., 1997. *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπαθανασίου, Σ., 2008. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Σημειώσεις παραδόσεων*. ΑΘΗΝΑ: εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σπυρίδης, Χ., 1988. *Μια Εισαγωγή στη Φυσική της Μουσικής*. Θεσσαλονίκη: s.n.

Σωτηροπούλου, Α., 1996. *Εμβάθυνση στο σχεδιασμό χώρων ακρόασης*. Αθήνα:
Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π..