



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

**Μελέτη διαφορετικών μαγνητικών υλικών για τοπικά
κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες αξονικής ροής σε
εφαρμογές αγροτικής ηλεκτροδότησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Γ. Τρουλλάκη

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2014



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

**Μελέτη διαφορετικών μαγνητικών υλικών για τοπικά
κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες αξονικής ροής σε
εφαρμογές αγροτικής ηλεκτροδότησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Γ. Τρουλλάκη

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Μαρτίου 2014.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης

Αθήνα, Μάρτιος 2014

.....
Αικατερίνη Γ. Τρουλλάκη

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

Copyright © Αικατερίνη Γ. Τρουλλάκη, 2014

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 το συγγραφέα.

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

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία μελετώνται γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ως μέρη μικρών ανεμογεννητριών σε αυτόνομα συστήματα. Η πλειοψηφία των γεννητριών αυτών κατασκευάζονται σήμερα με μαγνήτες νεοδυμίου (NdFeB), οι οποίοι αν και είναι εξαιρετικά ισχυροί μαγνήτες, έχουν συσχετιστεί με διάφορα προβλήματα οικονομικής, κοινωνικής, περιβαλλοντικής και λειτουργικής φύσεως. Για αυτούς τους λόγους, διερευνάται η αλλαγή του μαγνητικού υλικού της γεννήτριας και συγκεκριμένα η δυνατότητα αντικατάστασης των μαγνητών νεοδυμίου με κεραμικούς μαγνήτες (σκληροί φερρίτες).

Στην αρχή της εργασίας γίνεται μία εισαγωγή στις έννοιες της ανοιχτής γνώσης και της ενδιάμεσης τεχνολογίας και στο ρόλο που μπορούν να έχουν οι μικρές ανεμογεννήτριες στην κάλυψη ανθρώπινων αναγκών με σεβασμό στο περιβάλλον.

Αναλύεται θεωρητικά η λειτουργία των γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών και διερευνάται το θέμα του μαγνητικού υλικού αυτών των γεννητριών. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από ερωτηματολόγιο που δημιουργήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, σχετικά με τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες και βάσει αυτών και της βιβλιογραφικής έρευνας, αποφασίζεται η μελέτη γεννητριών με φερρίτες.

Σχεδιάζονται και προσομοιώνονται γεννήτριες με φερρίτες και γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου για τέσσερα μεγέθη ακτίνας πτερυγίων και βελτιστοποιούνται οι διαστάσεις μαγνήτη για καθεμία από αυτές ώστε να βελτιστοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια.

Αφού βρεθούν οι βέλτιστοι μαγνήτες για κάθε γεννήτρια, αναζητάται και ο βέλτιστος καθολικός μαγνήτης (ένας για κάθε μαγνητικό υλικό) που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για γεννήτριες σε όλο το εύρος ακτίνων φτερωτής που μελετάμε. Για κάθε υλικό, ο καθολικός μαγνήτης συγκρίνεται με τους βέλτιστους μαγνήτες ανά ακτίνα φτερωτής καθώς και με τον πιο διαδεδομένο εμπορικό μαγνήτη της αγοράς.

Τέλος, κατασκευάζεται μία γεννήτρια 850W με φερρίτες -για πτερύγια ακτίνας 1.2m- και οι επιδόσεις της συγκρίνονται πειραματικά με μίας ίδιας ισχύος γεννήτριας με μαγνήτες νεοδυμίου.

Λέξεις κλειδιά: μικρές ανεμογεννήτριες, μόνιμοι μαγνήτες, φερρίτες, αξονικής ροής, αυτόνομα συστήματα, βελτιστοποίηση απόδοσης-κόστους, καθολικός μαγνήτης, ερωτηματολόγιο, ανοιχτός κώδικας, ενδιάμεση τεχνολογία

Abstract

In this work axial flux permanent magnet generators are studied as parts of small wind turbines in off-grid systems. The majority of these generators are manufactured today with neodymium magnets (NdFeB), which, although extremely powerful magnets, have been associated with various problems of economic, social, environmental and functional nature.

For these reasons, the change of the magnetic material of the generator and, in particular, the possibility of replacing neodymium magnets with ceramic magnets (hard ferrites) is investigated.

At the beginning of the work, an introduction to the concepts of open knowledge and intermediate technology is made, as well as to the role that small wind turbines can have in meeting human needs while preserving the environment.

The operation of axial flux permanent magnet generators is analyzed in theory and the subject of the material of these generators is investigated. We present the results of a questionnaire on locally manufactured small wind turbines that was created as part of this work and, based on them and literature research, we decide to study generators with ferrites.

Ferrite generators and neodymium generators are designed and simulated for four sizes of blade rotor radius and the magnet dimensions for each of them are optimized according to certain criteria.

Having found the optimal magnets for each generator, we seek the optimal universal magnet (one for each magnetic material) that can be satisfactorily used for generators throughout the range of radii that we study. For each material, the universal magnet is compared with the optimal magnets per rotor radius and with the most common commercial magnet in the market.

Finally, a 850W ferrite generator –designed to operate with a 2.4m diameter rotor– is manufactured, and its performance is compared in the lab with the performance of an equivalent power typical generator with neodymium magnets.

Key words: small wind turbines, permanent magnet, ferrites, axial flux, standalone systems, efficiency-cost optimisation, universal magnet, questionnaire, open source, intermediate technology

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κώστα Λατούφη για την καθοδήγηση και την υπομονή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας αυτής της διπλωματικής. Τη φίλη μου Ρόμυ, για την καθοριστική της βοήθεια στη δημιουργία του ερωτηματολογίου και τη συνεχή ενθάρρυνσή της. Και το Χρυσόστομο για το μοναδικό του ρόλο στην αρχή και στο τέλος αυτής της εργασίας.

Στη γιαγιά μου



Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Μία διαφορετική προσέγγιση.....	15
1.1.1. Η γνώση ως κοινό αγαθό.....	16
1.1.2. Η ενδιάμεση τεχνολογία.....	17
1.2. Τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες.....	18
1.2.1. Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott.....	19
1.2.2. Χαρακτηριστικά ισχύος.....	20

2. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

2.1. Σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.....	23
2.2. Σύγκριση γεννητριών αξονικής και ακτινικής ροής.....	24
2.3. Οι γεννήτριες αξονικής ροής.....	26
2.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά και τοπολογίες.....	26
2.3.2. Η επιλεγμένη τοπολογία.....	29
2.4. Τα τυλίγματα.....	31
2.5. Οι μαγνήτες.....	34
2.5.1. Είδη μονίμων μαγνητών	34
2.5.2. Γιατί να αντικατασταθούν οι μαγνήτες νεοδυμίου.....	39
2.6. Θεωρητική ανάλυση.....	40
2.6.1. Μαγνητική ροή – ΗΕΔ – Ηλεκτρομαγνητική ροπή.....	40
2.6.2. Ανάλυση του τυλίγματος.....	43
2.6.2.1. Πυκνότητα ρεύματος.....	43
2.6.2.2. Αντίσταση και αυτεπαγωγή του τυλίγματος.....	44
2.6.3. Το μαγνητικό κύκλωμα.....	46
2.6.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα.....	49
2.6.4.1. Μελέτη απωλειών.....	50
2.6.4.2. Ισοζύγιο ενέργειας – Ισοδύναμο κύκλωμα.....	51

3. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟΠΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

3.1. Περιγραφή και στόχοι της έρευνας.....	55
3.2. Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	56
3.2.1. Στατιστική παρουσίαση με γραφήματα.....	56
3.2.2. Συμπεράσματα.....	79

4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΦΕΡΡΙΤΕΣ

4.1. Εισαγωγή.....	81
4.2. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας.....	82
4.3. Ονομαστική και cut-in λειτουργία	83
4.4. Αριθμός πόλων-πηνίων, συχνότητα λειτουργίας.....	85
4.5. Ο στάτης και τα πηνία.....	87
4.5.1. Το πάχος του στάτη.....	87
4.5.2. Σπείρες και πάχος πηνίου	88
4.5.3. Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου.....	90
4.5.4. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου.....	91
4.6. Οι μαγνήτες.....	93
4.6.1. Το σχήμα του μαγνήτη.....	93
4.6.2. Το πάχος του μαγνήτη.....	94
4.6.3. Το πλάτος και το μήκος του μαγνήτη.....	95
4.7. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα.....	96
4.8. Οι λόγοι a_i και k_d	97
4.9. Το πάχος του σιδήρου.....	98
4.10. Κόστος, βάρος και όγκος γεννήτριας	100
4.10.1. Οι μαγνήτες.....	101
4.10.2. Ο σίδηρος	103
4.10.3. Ο χαλκός	103
4.10.4. Η ρητίνη	104
4.10.5. Το κόντρα πλακέ	105

5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave	107
5.2. Το λογισμικό FEMM.....	107
5.3. Προσομοίωση της γεννήτριας με συνδυασμό Matlab-FEMM	108
5.4. Οι επιδόσεις της γεννήτριας.....	110

6. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

6.1. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης	113
6.2. Απόρριψη διατάξεων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.....	114
6.2.1. Κατασκευαστικοί περιορισμοί.....	114
6.2.2. Έλεγχος μεταβλητών.....	115
6.3. Εύρεση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ακτίνα φτερωτής.....	116
6.3.1. Μαγνήτες C8.....	117
6.3.1.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	117
6.3.1.2. Σύγκριση κριτηρίων και βελτιστοποίηση μεγαλύτερης ακρίβειας με το επιλεγμένο κριτήριο.....	119
6.3.2. Μαγνήτες N40.....	123
6.3.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	123
6.3.2.2. Σύγκριση κριτηρίων και βελτιστοποίηση μεγαλύτερης ακρίβειας με το επιλεγμένο κριτήριο.....	125
6.3.3. Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων με C8 και βέλτιστων διατάξεων με N40.....	128

7. ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ

7.1. Αλγόριθμος εύρεσης καθολικού μαγνήτη.....	131
7.2. Εμπορικοί και καθολικοί μαγνήτες	132
7.3. Σύγκριση διατάξεων με χρήση καθολικού και χρήση εμπορικού μαγνήτη.....	133
7.3.1. Μαγνήτες C8.....	133
7.3.2. Μαγνήτες N40.....	137
7.4. Σύγκριση καθολικού με βέλτιστους μαγνήτες ανά ακτίνα φτερωτής.....	140

8. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

8.1. Η κατασκευή της γεννήτριας.....	145
8.1.1. Η κατασκευή του δρομέα	145
8.1.2. Η κατασκευή του στάτη.....	149
8.1.3. Η συναρμολόγηση της γεννήτριας	153
8.2. Πειραματικές μετρήσεις δύο γεννητριών με διαφορετικό μαγνητικό υλικό....	154
8.2.1. Μέτρηση των γεννητριών σε κενό φορτίο.....	157
8.2.2. Μέτρηση των γεννητριών υπό φορτίο.....	159
8.2.2.1. Μέτρηση των γεννητριών υπό ωμικό τριφασικό φορτίο..	160
8.2.2.2. Μέτρηση των γεννητριών σε σύνδεση με συσσωρευτές..	163
8.2.3. Μέτρηση της θερμοκρασίας του στάτη.....	174
8.2.4. Μέτρηση της αντίστασης του στάτη.....	176

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	179
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Προγράμματα σε Matlab.....	183
Βιβλιογραφία.....	197

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Μία διαφορετική προσέγγιση

Οι αξίες που λειτούργησαν ως κατευθυντήριες δυνάμεις για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας είναι ο σεβασμός στην ύπαρξη της γης και στην ύπαρξη κάθε ανθρώπου. Στις παρούσες συνθήκες με την εξάντληση των φυσικών πόρων, την περιβαλλοντική μόλυνση, την κοινωνική ανισότητα και την εκμετάλλευση φύσης και ανθρώπου, οι αξίες αυτές εκφράζονται ως ανάγκη

- για στροφή προς καθαρούς, ανανεώσιμους πόρους,
- χρήση των φυσικών πόρων με σύνεση
- κοινωνική ισότητα και διασφάλιση της ανθρώπινης αξιοπρέπειας
- μη-βία και μη-εκμετάλλευση

Στο πεδίο της ενέργειας, ο δρόμος για την κάλυψη της πρώτης από αυτές τις ανάγκες είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, γεωθερμική, κ.α.), για τις οποίες τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον. Όσον αφορά την αιολική ενέργεια, τεράστια αιολικά πάρκα έχουν αρχίσει να δημιουργούνται για να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας από άνθρακα. Παράλληλα, παρόμοιας κλίμακας κινήσεις γίνονται και για τις άλλες μορφές ενεργειακής παραγωγής, προκειμένου να περιοριστεί η καύση ορυκτών καυσίμων.

Παρ' όλα αυτά, η λογική της συγκεντρωτικής, μεγάλης κλίμακας παραγωγής δεν εξυπηρετεί πάντα τις ανάγκες των τοπικών κοινωνιών. Μικρότερης κλίμακας εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας είναι κοντά στις κοινωνίες που τις χρησιμοποιούν και είναι πιο συναφείς με αυτές και το περιβάλλον. Έτσι, εξυπηρετούν καλύτερα τις ανάγκες τους και έχουν πολλαπλάσια οφέλη.

Είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλιστεί ενεργειακή πρόσβαση σε κοινωνίες με λιγότερες ευκαιρίες, καθώς αυτό θα έχει αντίκτυπο στην εκπαίδευση, την υγεία και την τοπική οικονομική ανάπτυξη. Ταυτόχρονα, είναι σημαντικό για την αξιοπρέπεια μιας κοινωνίας και την αξιοπιστία του συστήματος, η πρόσβαση στην ενέργεια να ελέγχεται τοπικά ώστε να μην εξαρτάται από παιχνίδια της αγοράς και συμφέροντα μεγάλων εταιριών.

Γι' αυτό λοιπόν, ο δρόμος για καθαρότερη ενέργεια με σεβασμό στο περιβάλλον και ταυτόχρονο σεβασμό στην ανθρώπινη αξιοπρέπεια και σε δικαιώματα όπως η δυνατότητα λήψης αποφάσεων και επιλογών στη ζωή, είναι μέσω της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας.

Μία ζωτικής σημασίας συνθήκη για αυτό το σκοπό, είναι η ανοιχτή διάχυση της γνώσης και η μεταφορά τεχνογνωσίας σε κάθε κοινότητα. Δύο προσεγγίσεις που συμμαρρίζονται αυτές τις αξίες είναι ο ανοιχτός κώδικας (open source) και η ενδιάμεση τεχνολογία (intermediate technology).

1.1.1. Η γνώση ως κοινό αγαθό

Η φιλοσοφία του ανοιχτού κώδικα βασίζεται στην ιδέα ότι η γνώση είναι κοινό αγαθό και το να αποκρύπτεται, να αγοράζεται και να ιδιωτικοποιείται είναι ενάντια στα συμφέροντα των ανθρώπων αλλά και της εξέλιξης της ίδιας της γνώσης. Όταν η γνώση είναι ανοιχτή σε όλους προωθείται η συνεργατική δημιουργικότητα και η καινοτομία επιταχύνεται.

Όταν υπάρχουν και οι υποδομές (infrastructure) για να διευκολύνουν τη συλλογική οργάνωση και τη συνεργασία, βλέπουμε ότι δίνεται η ευκαιρία στους ανθρώπους που έχουν πραγματικά το πάθος και το κίνητρο για καινοτομία, να συνεργάζονται, να δημιουργούν και να εξελίσσουν προϊόντα και υπηρεσίες με τρόπο που δε θα μπορούσαν να κάνουν οι εμπειρογνώμονες μιας εταιρίας. Σήμερα, λόγω της ευρείας χρήσης του διαδικτύου, είναι πολύ πιο εύκολο για τους ανθρώπους να οργανωθούν σε δίκτυα και δημιουργήσουν συλλογικά αξία, πχ. πολύπλοκες δομές όπως είναι η Wikipedia, τα αυτοκίνητα ανοιχτού κώδικα, οι δορυφόροι p2p, κ.α.

Για τη μετάβαση σε μια κοινωνία ανοιχτής γνώσης έχει σημασία η δημιουργία των συνθηκών εκείνων που θα επιτρέψουν στη γνώση να διαδοθεί. Αυτές οι συνθήκες είναι [1]:

- η ανάπτυξη των δεξιοτήτων των ανθρώπων (πχ με εκπαιδευτικά σεμινάρια)
- η αποκέντρωση των μεθόδων παραγωγής (στην ενέργεια, τη γεωργία, τη βιομηχανία)
- η δημιουργία κατάλληλων αδειών (licenses) που θα αναγνωρίζουν και θα καλύπτουν τις έννοιες του ανοιχτού κώδικα, της αλληλεγγύης και των κοινών
- η δημιουργία ανοιχτών, ασφαλών και αποκεντρωμένων τεχνικών υποδομών
- η κάλυψη των βασικών ανθρώπινων αναγκών (στέγαση, υγεία, διατροφή, ενέργεια, μεταφορές) μέσω ανοιχτών, συλλογικών δομών

Αν και μας αρέσει να σκεφτόμαστε ότι η εφεύρεση είναι μια στιγμή δημιουργίας από μια μοναχική ιδιοφυΐα, η αλήθεια είναι ότι η δημιουργικότητα είναι περισσότερο συσσωρευτική και συνεργατική και, όπως το ανοιχτό λογισμικό, εξελίσσεται σε βάθος χρόνου.

1.1.2. Η ενδιάμεση τεχνολογία

Η ενδιάμεση τεχνολογία (intermediate technology) ή αλλιώς κατάλληλη τεχνολογία (appropriate technology) είναι τεχνολογία μικρής κλίμακας, αποκεντρωμένη, τοπικά ελεγχόμενη, εντάσεως-εργασίας και φιλική προς το περιβάλλον. Βασίζεται στην αντίληψη πως οι ανθρώπινες κοινωνίες χρειάζεται να έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν άμεσα για το μέλλον τους σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητές τους, και έχει στόχο να τις ενδυναμώσει προς αυτή την κατεύθυνση. Ο όρος «ενδιάμεση τεχνολογία» διατυπώθηκε πρώτη φορά το 1973 στο βιβλίο του E.F.Schumacher, “Small is beautiful. A Study of Economics As If People Mattered”.

Πρόκειται για ένα συμβιβασμό ανάμεσα σε παραδοσιακές τεχνολογίες και τη δυτική υψηλή τεχνολογία με τρόπο που να ενθαρρύνει την οικονομική ανάπτυξη σε φτωχές κοινωνίες, δημιουργώντας πολλές βιώσιμες θέσεις εργασίας. Η ιδέα είναι ότι αυτό οδηγεί σε μια πολύ πιο δημοκρατική και συμμετοχική μορφή ανάπτυξης, που μπορεί να διατηρηθεί από την τοπική κοινωνία, σε αντίθεση με την εφαρμογή των τελευταίων δυτικών τεχνολογιών, οι οποίες μπορούν να χρηματοδοτηθούν και να διαχειριστούν μόνο από μια ελίτ, κάτι που τελικά θα οδηγήσει σε κοινωνική πόλωση και καταστροφή των ντόπιων βιομηχανιών χαμηλής τεχνολογίας.

Οι εφαρμογές ενδιάμεσης τεχνολογίας έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [2]:

- Απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο.
- Δίνουν έμφαση στην χρήση τοπικών πρώτων υλών, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού.
- Είναι πιο παραγωγικές από πολλές παραδοσιακές τεχνολογίες, αν και χρειάζονται σχετικά εντατική εργασία κατά την κατασκευή τους.
- Είναι αρκετά μικρές σε κλίμακα, έτσι ώστε να είναι οικονομικά προσιτές σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο.
- Είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας τους, ο έλεγχός τους και η συντήρησή τους από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν την τεχνολογία χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση.
- Μπορεί να παραχθεί η τεχνολογία σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών και κοινοτήτων.
- Προϋποθέτουν τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης.
- Προσφέρουν ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της.
- Είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά μέρη και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χωρίς να προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον.

- Σχεδιάζονται για να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και όχι για να χαλάσουν (planned obsolescence).

Η ενδιάμεση τεχνολογία αποτελεί μεν ένα συμβιβασμό σε σχέση με τη δυτική υψηλή τεχνολογία αλλά και μία επανεξέταση του ορισμού της τεχνολογίας και των σκοπών που αυτή εξυπηρετεί.

1.2. Τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι τεχνολογίες ιδιαίτερα κατάλληλες για παραγωγή μικρής κλίμακας και επιλέγονται ήδη ως βιώσιμες εναλλακτικές των συμβατικών γεννητριών στην ύπαιθρο και σε απομακρυσμένες περιοχές. Συγκεκριμένα για εφαρμογές σε αγροτικές εγκαταστάσεις, οι ανεμογεννήτριες έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν καταλαμβάνουν μεγάλες επιφάνειες γης που θα μπορούσε να καλλιεργηθεί [3].

Όσον αφορά τη σύνδεση των ανεμογεννητριών, μπορούν είτε να συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε να αποτελέσουν μικρότερες, αυτόνομες εγκαταστάσεις αποθηκεύοντας την ενέργειά τους σε μπαταρίες. Τέτοιες αυτόνομες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών βρίσκουν εφαρμογή σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση στο δίκτυο είναι πρακτικά αδύνατη ή/και πολύ ακριβή.

Αυτή η τοπολογία έχει δοκιμαστεί στο χρόνο και έχει αποδειχθεί απλή, αξιόπιστη και ευέλικτη. Χάρη σε σχέδια που έχουν εκδοθεί ([4], [5]) και σε πρακτικά σεμινάρια που διεξάγονται για την κατασκευή μικρών ανεμογεννητριών, δίνεται η δυνατότητα σε ανθρώπους χωρίς εξειδικευμένη γνώση και με απλά εργαλεία και υλικά, να κατασκευάσουν οι ίδιοι μια μικρή ανεμογεννήτρια, καθώς και να τη συντηρούν και να την επισκευάζουν. Λόγω της δημοτικότητας και της χρησιμότητας αυτών των αυτόνομων συστημάτων είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία τους.

Σήμερα το ένα τρίτο περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα και φθηνά και να ηλεκτροδοτήσουν σχολεία, κλινικές και άλλα ζωτικά κέντρα μιας κοινότητας, συμβάλλοντας στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της. Άλλες εφαρμογές που μπορούν να έχουν σε αγροτικό επίπεδο είναι η σύνδεσή τους με αντλίες νερού για ύδρευση και άρδευση και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κέντρα φόρτισης συσσωρευτών.

1.2.1. Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott

Το βασικό σχέδιο [4] αυτής της ανεμογεννήτριας σε μεγαλύτερο ή μικρότερο μέγεθος έχει κατασκευαστεί σε πολλές χώρες της Ευρώπης, στη Λατινική Αμερική, στην Αφρική, έχει αποτελέσει τη βάση εμπορικού προϊόντος και έχει κατασκευαστεί σε σχολεία και πανεπιστημιακά ιδρύματα.

Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας είναι η δυνατότητα ιδιοκατασκευής της, χρησιμοποιώντας υλικά όπως ξύλο, χάλυβα, χαλκό και απλά εργαλεία χωρίς να προϋποθέτει κάποια ιδιαίτερη εμπειρία. Επίσης, λόγω της απουσίας πυρήνα στο στάτη, έχει υψηλή απόδοση και μηδενική ροπή ευθυγράμμισης, κάτι που της επιτρέπει να εκκινεί σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Τέλος, είναι σημαντικές και οι εκπαιδευτικές δυνατότητες που προσφέρει, εφόσον μέσα από την κατασκευή και λειτουργία της, μπορούν φοιτητές και μαθητές να κατανοήσουν βασικές έννοιες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των ηλεκτρικών μηχανών και της αεροδυναμικής.

Στην εργασία αυτή, η κατασκευή (αλλά όχι η σχεδίαση) της γεννήτριας βασίζεται στις μεθόδους που αναφέρονται στο εγχειρίδιο του Hugh Piggot.



Small is beautiful

Σχήμα 1.1. Εγκατάσταση μικρής α/γ που έχει κατασκευαστεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής στην κατασκήνωση «Μελτέμι» στη Ραφήνα.

1.2.2. Χαρακτηριστικά ισχύος

Ο άνεμος, λόγω της κίνησής του, έχει κινητική ενέργεια, ένα μέρος της οποίας μπορούν να αποσπάσουν τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας μετατρέποντάς τη σε μηχανική ενέργεια.

Το γεγονός ότι τα πτερύγια δε μπορούν να αποσπάσουν όλη την ενέργεια του ανέμου εκφράζεται μέσω του αεροδυναμικού συντελεστή, ο οποίος σύμφωνα με το νόμο του Betz, έχει μέγιστη τιμή $c_{p,max} = 0.593$. Λόγω κατασκευαστικών ατελειών, βέβαια, η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή στην πραγματικότητα είναι ακόμα μικρότερη.

Στη συνέχεια, η μηχανική ενέργεια εισέρχεται στη γεννήτρια, η οποία μετατρέπει ένα μέρος της σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το άλλο μέρος χάνεται ως απώλειες. Η μηχανική ισχύς που εισέρχεται στη γεννήτρια δίνεται από τη σχέση:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho c_p \pi R_{turb}^2 v_w^3 \quad (1.1)$$

όπου:

- ρ η πυκνότητα του ανέμου
- c_p ο αεροδυναμικός συντελεστής
- R_{turb} η ακτίνα της φτερωτής
- v_w η ταχύτητα του ανέμου

Ο αεροδυναμικός συντελεστής δεν παραμένει σταθερός κατά τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας αλλά αλλάζει σε σχέση με τον άνεμο, τις στροφές και την ακτίνα της φτερωτής. Πιο συγκεκριμένα εισάγεται στο σημείο αυτό ο λόγος ακροπτερυγίου λ για τον οποίο ισχύει:

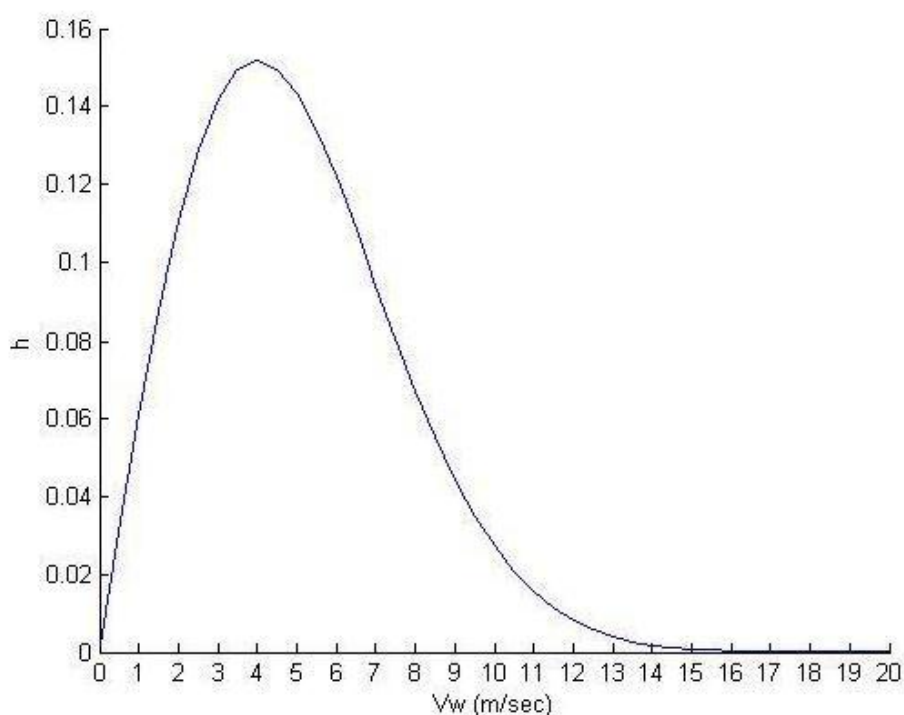
$$\lambda = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} \quad (1.2)$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας.

Γενικά, ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι συνάρτηση του λόγου ακροπτερυγίου και της γωνία βήματος πτερυγίου β . Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προκύπτει βέλτιστος λόγος ακροπτερυγίου (που μεγιστοποιεί το c_p) $\lambda_{opt} = 7$ και μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής $c_{p,max} = 0.35$ [2].

Βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών είναι η καμπύλη ισχύος βάσει της οποίας μπορεί να βρεθεί η ενεργειακή απόδοση, το ποσό δηλαδή της ενέργειας που παράγεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συνήθως ενός έτους. Η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από την κατανομή του ανέμου και είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι οι μικρές ανεμογεννήτριες τοποθετούνται συνήθως σε περιοχές όπου ο άνεμος είναι αρκετά χαμηλός.

Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιώντας την ανάλυση που έχει γίνει στο [2] θεωρούμε ότι ο μέσος άνεμος είναι ίσος με 5m/s και ότι η κατανομή του ανέμου έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2. Η στατιστική κατανομή του ανέμου για κατανομή Rayleigh και μέση τιμή ανέμου τα 5m/s.

Γνωρίζοντας την κατανομή του ανέμου, δηλαδή με απλά λόγια, πόσες φορές θα φυσήξει με κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα, και αν ξέρει κανείς την καμπύλη ισχύος (ποια η παραγόμενη ισχύς για κάθε άνεμο) της ανεμογεννήτριας, μπορεί εύκολα να βρεθεί η ενέργεια που θα δώσει η γεννήτρια σε ένα χρόνο.

Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

2.1. Σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών

Οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών, αν και χρησιμοποιήθηκαν και στο παρελθόν ως ανεμογεννήτριες, δεν είχαν ευρεία χρήση, καθώς η ποιότητα των μαγνητών δεν ήταν ικανοποιητική. Με τη βελτίωση, όμως, των μαγνητικών υλικών, και ιδιαίτερα με την ανάπτυξη των μαγνητών νεοδυμίου (NdFeB) τη δεκαετία του 80', οι μηχανές μονίμων μαγνητών ήρθαν και πάλι στο προσκήνιο [6].

Η χρήση μονίμων μαγνητών αντί ηλεκτρομαγνητών (ηλεκτρικής διέγερσης) στο δρομέα της γεννήτριας έχει διάφορα πλεονεκτήματα:

- πιο απλή κατασκευή, καθώς δε χρειάζονται ψήκτρες για τη μεταβίβαση της ενέργειας στο δρομέα [7].
- καλύτερη απόδοση αφού δεν υπάρχουν απώλειες διέγερσης ούτε απώλειες στις ψήκτρες
- αυτονομία, καθώς δεν απαιτείται ηλεκτρική τροφοδοσία από το δίκτυο ή από μπαταρία, κάτι σημαντικό για εφαρμογές σε απομονωμένες αγροτικές εγκαταστάσεις
- λιγότερες απαιτήσεις σε συντήρηση, λόγω της απουσίας ψηκτρών

Ένα άλλο πλεονέκτημα των γεννητριών μονίμων μαγνητών είναι ότι ο συντελεστής ισχύος δε μειώνεται όταν αυξάνονται οι πόλοι, όπως συμβαίνει στις γεννήτριες επαγωγής λόγω αύξησης της αυτεπαγωγής διαρροής (leakage inductance). Γι' αυτό το λόγο, οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών είναι κατάλληλες για λειτουργία με πολλούς πόλους και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ως ανεμογεννήτριες άμεσης κίνησης (direct-drive).

Από την άλλη, οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών έχουν το μειονέκτημα ότι η τάση εξόδου μπορεί να ελεγχθεί μόνω μέσω των στροφών της γεννήτριας και όχι μέσω της τάσης διέγερσης, αφού για δεδομένες στροφές έχουμε συγκεκριμένη τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τάση εξόδου της γεννήτριας να μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται οι στροφές [3].

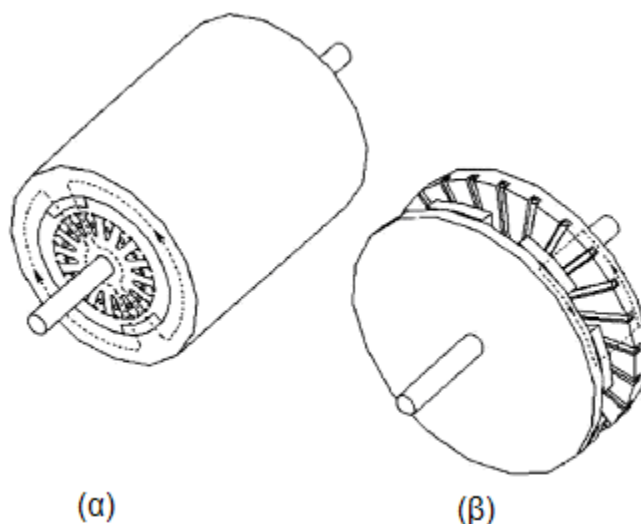
2.2. Σύγκριση γεννητριών αξονικής και ακτινικής ροής

Διακρίνουμε δύο βασικά είδη μηχανών μονίμων μαγνητών:

- 1) Τις μηχανές ακτινικής ροής (RFPM)
- 2) Τις μηχανές αξονικής ροής (AFPM)

Για λόγους συντομίας, σε αυτό το σύγγραμμα οι μηχανές μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής θα αναφέρονται απλά ως μηχανές ακτινικής ροής και οι μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής θα αναφέρονται ως μηχανές αξονικής ροής.

Η βασική δομική τους διαφορά, που παρατηρείται άμεσα στα σχήμα 2.1, είναι ότι η πρώτη έχει κυλινδρική δομή, ενώ η δεύτερη δισκοειδή. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ταξιδεύει στην ακτινική διεύθυνση, ενώ στη δεύτερη στη διεύθυνση του άξονα της γεννήτριας.



Σχήμα 2.1. Μηχανή μονίμων μαγνητών α) ακτινικής ροής, β) αξονικής ροής.

Οι μηχανές αξονικής ροής άργησαν ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθούν, κυρίως για τους παρακάτω λόγους [2]:

- Ανάπτυξη υψηλής ελκτικής δύναμης μεταξύ στάτη και δρομέα
- Δυσκολίες που είχαν να κάνουν με την κατασκευή του πυρήνα της μηχανής
- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Δυσκολία στην τελική συναρμολόγηση

Συγκρίνοντας όμως σήμερα τις δύο μηχανές μπορούμε να βρούμε αρκετά πλεονεκτήματα της μηχανής αξονικής ροής:

- 1) Δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας ισχύος. Αυτό μπορεί εύκολα να συμβεί περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα.
- 2) Ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το μήκος του άξονα περιστροφής είναι πολύ μεγάλος. Έτσι οι μηχανές αξονικής ροής αερίζονται και ψύχονται πιο εύκολα, χωρίς εξωτερικό μηχανισμό.
- 3) Λόγω της δισκοειδούς της δομής μπορούμε πιο εύκολα να ρυθμίσουμε το μήκος διακένου.
- 4) Μεγαλώνοντας την εξωτερική διάμετρο του πυρήνα έχουμε τη δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης μεγαλύτερου αριθμού πόλων και, άρα, λειτουργίας της μηχανής σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (ισχύει η σχέση $n=120*f/p$). Αυτό καθιστά τη γεννήτρια αξονικής ροής κατάλληλη για αιολικά συστήματα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.
- 5) Τέλος, πολλοί δίσκοι μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερης ισχύος ή ροπής.

Συμπερασματικά, οι μηχανές αξονικής ροής είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για κάποιες εφαρμογές ειδικού σκοπού, όπου οι ιδιότητές τους τους δίνουν ξεκάθαρα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μηχανών ακτινικής ροής.

Αποτελέσματα από ποσοτικές μελέτες όπου συγκρίνονται μηχανές αξονικής και ακτινικής ροής έχουν παρουσιαστεί σε άλλες διπλωματικές ([8],[2]). Παρατίθενται χαρακτηριστικά τα αποτελέσματα μιας μελέτης που έχει γίνει στο [9].

Συγκρίνονται μία μικρή γεννήτρια αξονικής ροής και μία ακτινικής που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αιολικές εφαρμογές. Η γεννήτρια αξονικής ροής δεν περιλαμβάνει πυρήνα σιδήρου σε αντίθεση με τη μηχανή ακτινικής ροής. Και οι δύο είναι σχεδιασμένες ώστε να δίνουν την ίδια ροπή, στις ίδιες στροφές και με την ίδια τάση εξόδου. Τα αποτελέσματα συνοπτικά έδειξαν τα εξής:

Αξονική ροή: Η κατασκευή είναι αρκετά απλή και φθηνή. Είναι σχετικά ελαφριά και πραγματοποιείται καλή απαγωγή θερμότητας δίχως εξοπλισμό αερισμού. Τέλος, η απόδοση της μηχανής παραμένει σταθερά υψηλή για ταχύτητες ανέμων από 3-10 m/s, κάτι που ενδιαφέρει πολύ στην περίπτωση μας καθώς στις εφαρμογές που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η γεννήτρια που μελετάμε, θα συναντώνται και αρκετά χαμηλές ταχύτητες ανέμου (3-5 m/s).

Ακτινική Ροή: Η κατασκευή είναι αρκετά πιο πολύπλοκη κυρίως λόγω του τορροειδούς τυλίγματος που χρησιμοποιήθηκε και πιο ακριβή. Είναι βαρύτερη και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση μόνο κοντά στις ονομαστικές συνθήκες (10 m/s). Αυτό την καθιστά ακατάλληλη καθώς οι μικρές ανεμογεννήτριες πολύ συχνά υφίστανται ανέμους αρκετά χαμηλότερους από αυτούς για τους οποίους σχεδιάστηκαν.

Μια ακόμα σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών τοπολογιών έχει γίνει στο [10]. Στη μελέτη αυτή ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής παράγει πολλές μηχανές αξονικής και ακτινικής ροής αφού του έχουν δοθεί συγκεκριμένες παράμετροι. Συγκρίνονται δηλαδή εικονικές μηχανές αξονικής ροής με αύλακες και ακτινικής ροής. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι το κόστος προς ροπή και η ροπή προς όγκο.

Ως προς το πρώτο κριτήριο η μηχανή ακτινικής ροής είναι προτιμότερη. Με λίγα λόγια σε μια μηχανή ακτινικής ροής αύξηση της ροπής έχει μικρότερο κόστος απ' ό,τι στη μηχανή αξονικής ροής με αύλακες. Ως προς το δεύτερο κριτήριο, όμως, η μηχανή αξονικής ροής με αύλακες υπερτερεί της ακτινικής. Μια αύξηση του όγκου στις μηχανές αξονικής ροής θα δώσει πολύ μεγαλύτερη αύξηση ροπής απ' ό,τι στις μηχανές ακτινικής ροής. Το ερώτημα είναι ποιο κριτήριο μας ενδιαφέρει.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι ανάλογα με την εφαρμογή, τη δομή της μηχανής και τα κριτήρια που θέλουμε να ικανοποιούνται άλλοτε προκρίνονται οι μηχανές αξονικής ροής και άλλοτε οι μηχανές ακτινικής ροής και τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μηχανών πρέπει να ζυγιστούν καλά πριν κάνουμε την τελική μας επιλογή.

2.3. Οι γεννήτριες αξονικής ροής

2.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά και τοπολογίες

Υπάρχουν αρκετά είδη και διατάξεις μηχανών αξονικής ροής, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

α) Μηχανές μονής πλευράς (Μονός δρομέας-Μονός στάτης)

- Με πυρήνα σιδήρου με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

β) Μηχανές διπλής πλευράς

1) Διπλός δρομέας- Μονός στάτης (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

2) Διπλός στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

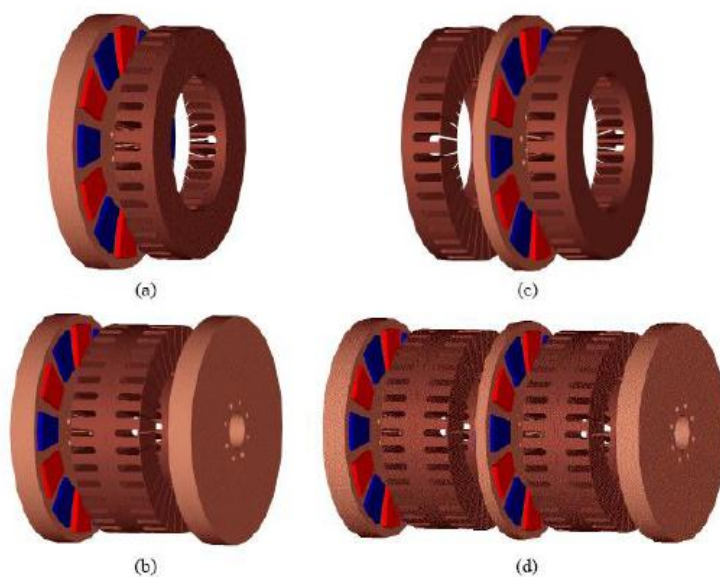
3) Πολλαπλών δίσκων

Πριν προχωρήσουμε καλό είναι να κάνουμε μια αναφορά σε δύο από τα χαρακτηριστικά που επαναλαμβάνονται σε κάθε είδος. Τις αύλακες και τον πυρήνα. Είδαμε ότι υπάρχουν μηχανές με ή χωρίς πυρήνα και εφόσον υπάρχει πυρήνας μηχανές με ή χωρίς αύλακες.

Αύλακες: Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνουν το διάκενο, φέρνοντας πιο κοντά το σίδηρο στους μαγνήτες, ενισχύοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο. Έτσι έχουμε μεγαλύτερη ροπή με τους ίδιους μαγνήτες. Άμεσο δηλαδή αποτέλεσμα της ύπαρξης αυλάκων είναι η μείωση του όγκου των μαγνητών και άρα και του κόστους της μηχανής, αφού το κόστος των μαγνητών είναι αρκετά υψηλό. Οι αύλακες, εκτός των άλλων, προσφέρουν και μηχανική υποστήριξη στο τύλιγμα το οποίο περνάει από αυτές.

Το μειονέκτημα είναι η δημιουργία ροπής ευθυγράμμισης (Cogging Torque), η οποία οφείλεται στα δόντια (teeth). Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται καθώς οι μαγνήτες έλκονται περισσότερο από το σίδηρο όταν περνούν μπροστά από τις αύλακες από ότι όταν περνούν από το διάκενο μεταξύ των αυλάκων. Αν αφήσουμε ελεύθερο το σύστημα θα κινηθεί ώστε να ευθυγραμμιστεί κάπου. Αυτό μας δυσκολεύει γενικά στην εκκίνηση της γεννήτριας, ιδιαίτερα όταν σε αιολικές εφαρμογές έχουμε να αντιμετωπίσουμε χαμηλούς ανέμους. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μείωση της απόδοσης, δονήσεις στη μηχανή και δημιουργία θορύβου. Επίσης έχουμε και ελκτική δύναμη μεταξύ δρομέα και στάτη που μπορεί να παραμορφώσει τους δίσκους της γεννήτριας.

Σχέδια μηχανών που περιλαμβάνουν και αύλακες φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 2.2. Διάφορες τοπολογίες μηχανών με αύλακες.

Πυρήνας: Ανυπαρξία πυρήνα σημαίνει ανυπαρξία απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Οι απώλειες στους μαγνήτες και στους δίσκους του δρομέα είναι αμελητέες. Συνεπώς, οι μηχανές χωρίς πυρήνα μπορούν να λειτουργήσουν με υψηλότερη απόδοση από ότι άλλες τοπολογίες.

Επίσης, η απουσία σιδήρου έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης και μαγνητικός κορεσμός με αποτέλεσμα η σχέση ροπής-ρεύματος να είναι γραμμική και η κυματομορφή της τάσης σχεδόν ημιτονοειδής. Παράλληλα, δεν υπάρχουν ελκτικές δυνάμεις μεταξύ στάτη και δρομέα, γεγονός που επιτρέπει την πιο εύκολη εκκίνηση της μηχανής αλλά και την πιο εύκολη συναρμολόγησή της. Τέλος, αφού δεν υπάρχουν αύλακες ούτε σίδηρος στο στάτη, η κατασκευή της μηχανής είναι πιο εύκολη και πιο ελαφριά [8].

Ανυπαρξία όμως πυρήνα σημαίνει και πιο ασθενές μαγνητικό πεδίο, καθώς ο πυρήνας είναι ουσιαστικά αυτός που ενισχύει το πεδίο. Επομένως, απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό για την ενίσχυση του πεδίου, με αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος της μηχανής [3].

Επίσης, παρά την απουσία απωλειών πυρήνα, κατά τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές συχνότητες, μπορεί να αναπτυχθούν σημαντικές απώλειες δινορρευμάτων στα τυλίγματα του στάτη της μηχανής [11].



Σχήμα 2.3. Στάτης χωρίς πυρήνα

2.3.2. Η επιλεγμένη τοπολογία: διπλός δρομέας-μονός στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου

Η γεννήτρια που κατασκευάσαμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αξονικής ροής, διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα σιδήρου, για λειτουργία χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

Τα κριτήρια βάσει των οποίων επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τοπολογία συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ	ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΟΥ ΙΚΑΝΟΠΟΙΕΙΤΑΙ
Γεννήτρια μονίμων μαγνητών	Δεν υπάρχουν ψήκτρες για τη διέγερση	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή κατασκευή • Ελαφριά και συμπαγής κατασκευή [12] • Λιγότερες απώλειες (καλύτερη απόδοση) • Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση
	Δεν απαιτείται ηλεκτρική παροχή ή μπαταρίες για τη διέγερση της γεννήτριας	<ul style="list-style-type: none"> • Αυτονομία • Λιγότερες απώλειες (καλύτερη απόδοση)
Γεννήτρια αξονικής ροής	Δισκοειδής κατασκευή	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή κατασκευή • Συμπαγής κατασκευή [13]
	Χρήση λιγότερου σιδήρου και λιγότερου μαγνητικού υλικού ¹ [13]	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος
	Εύκολη ψύξη χωρίς εξωτερικό μηχανισμό	<ul style="list-style-type: none"> • Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση
Διπλός δρομέας-μονός στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου	Δεν υπάρχουν απώλειες πυρήνα	<ul style="list-style-type: none"> • Καλή απόδοση
	Δεν υπάρχουν αύλακες ούτε σιδηροπυρήνας	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή κατασκευή • Ελαφριά κατασκευή
	Δεν υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης ούτε έλξη στάτη-δρομέα	<ul style="list-style-type: none"> • Εκκίνηση σε χαμηλούς ανέμους • Εύκολη συναρμολόγηση
Direct-drive ανεμογεννήτρια	Δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων	<ul style="list-style-type: none"> • Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση • Απλή κατασκευή • Ελαφριά κατασκευή • Χαμηλό κόστος • Λιγότερες απώλειες (καλύτερη απόδοση)

Πίνακας 2.1. Πλεονεκτήματα της επιλεγμένης τοπολογίας βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων

¹ σε σχέση με τη γεννήτρια ακτινικής ροής

Συνοπτική επεξήγηση κριτηρίων

Απλή κατασκευή: δυνατότητα κατασκευής της ανεμογεννήτριας σε μια απλή βιοτεχνία ή εργαστήριο, χωρίς εξειδικευμένα εργαλεία, από ανθρώπους χωρίς ιδιαίτερη προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία.

Ελαφριά και συμπαγής κατασκευή – Εύκολη συναρμολόγηση: δυνατότητα συναρμολόγησης και ανύψωσης χωρίς εξειδικευμένα μηχανήματα

Χαμηλό κόστος: Ανεμογεννήτρια οικονομικά προσβάσιμη από ομάδες ανθρώπων με λιγότερες ευκαιρίες

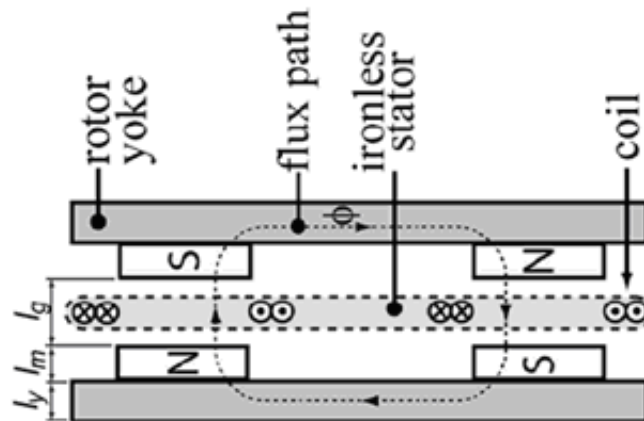
Καλή απόδοση: Σε εφαρμογές χαμηλού κόστους επιδιώκουμε μεγάλες αποδόσεις ώστε να μην έχουμε πολλές απώλειες και άρα η γεννήτρια μας να δουλεύει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά.

Εκμετάλλευση χαμηλών ανέμων: Εφαρμογές και σε περιοχές όπου οι ταχύτητες ανέμου δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Αυτονομία: Σημαντική παράμετρος για εφαρμογές σε απομονωμένες, αγροτικές εγκαταστάσεις, όπου πιθανώς δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε υλικά και τεχνικούς.

Λίγες απαιτήσεις σε συντήρηση: Καταλληλότητα για εφαρμογές σε απομονωμένες, αγροτικές εγκαταστάσεις με μειωμένη πρόσβαση σε υλικά και τεχνικούς συντήρησης. Δυνατότητα λειτουργίας από ανθρώπους χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις.

Η τοπολογία που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε, έχει μελετηθεί εκτενώς στο [8]. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.4., ο δρομέας είναι διπλός και φέρει τους μαγνήτες και στις δύο πλευρές του. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον απέναντι και τον διπλανό του. Το τύλιγμα, καθώς δεν υπάρχει πυρήνας, είναι τοποθετημένο σε διαμαγνητικό, μη αγωγίμο στάτη (συχνά από ρητίνη). Μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο.



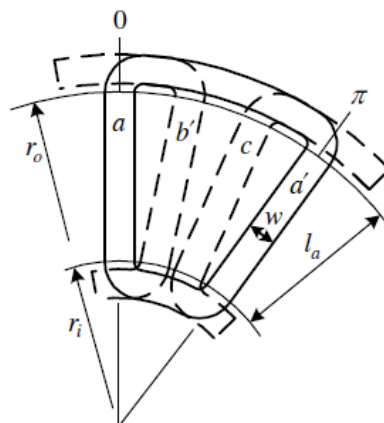
Σχήμα 2.4. Το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της τοπολογίας διπλού δρομέα-μονού στάτη.

2.4. Τα τυλίγματα

Στην τοπολογία διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα, ο «πυρήνας» κατασκευάζεται ουσιαστικά από κάποιο διαμαγνητικό υλικό (συνήθως ρητίνη) και εκεί τοποθετείται το τύλιγμα. Κάθε πλευρά πηνίου αντιστοιχίζεται στην αντίστοιχη αύλακα ενός πυρήνα σιδήρου.

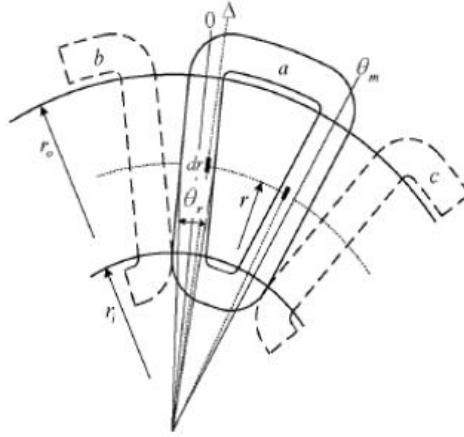
Οι διάφοροι τύποι τυλιγμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής [2]:

1. Επικαλυπτόμενο τύλιγμα. Είναι διανεμημένο σε ιδεατές αύλακες όπως φαίνεται και στο σχήμα. Το ένα πηνίο τοποθετείται πάνω στο άλλο και γι' αυτό το τύλιγμα ονομάζεται επικαλυπτόμενο. Για να συμβεί αυτό οι άκρες του τυλιγματος πρέπει να λυγίσουν με αποτέλεσμα να γίνονται πιο μακριές.



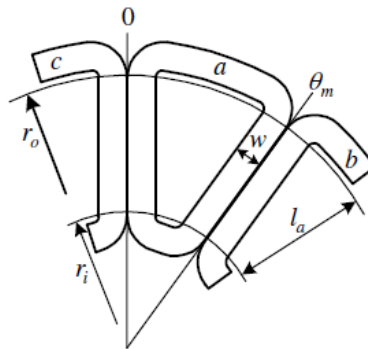
Σχήμα 2.5. Επικαλυπτόμενο τύλιγμα.

2. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης. Τα πηνία σε αυτήν την περίπτωση είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε ιδεατή αύλακα έχω μια πλευρά πηνίου ενώ τα πηνία έρχονται σε επαφή μόνο στην εσωτερική ακτίνα του στάτη.



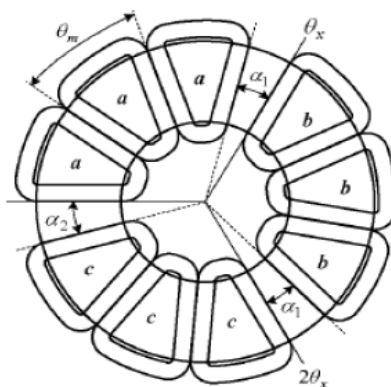
Σχήμα 2.6. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης.

3. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης. Όπως και πριν τα πηνία είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε, όμως, ιδεατή αύλακα συναντάμε δύο πλευρές διαφορετικών πηνίων. Οι δύο πλευρές εφάπτονται μεταξύ τους τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική ακτίνα.



Σχήμα 2.7. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης.

4. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων. Όλα τα πηνία που ανήκουν στην ίδια φάση τοποθετούνται σε διπλανές θέσεις και σχηματίζουν μια ομάδα φάσης.



Σχήμα 2.8. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων.

Στο συγκεντρωμένο τύλιγμα, τα άκρα τυλίγματος δεν χρειάζεται να λυγίσουν, αντίθετα με ότι συμβαίνει στο επικαλυπτόμενο, με αποτέλεσμα να είναι μικρότερο το συνολικό μήκος των πηνίων. Αυτό προσφέρει και ορισμένα πλεονεκτήματα [3]:

- Μικρότερο συνολικό όγκο χαλκού που χρειάζεται για τα πηνία
- Λιγότερες απώλειες χαλκού (χάρη στο μικρότερο όγκο χαλκού)
- Αυξημένη απόδοση
- Χαμηλότερο κόστος (χάρη στο μικρότερο αριθμό πηνίων και την απλούστερη δομή του τυλίγματος)
- Ευκολότερη κατασκευή του στάτη

Το μειονέκτημα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι η ανάπτυξη χαμηλότερης ηλεκτρομαγνητικής ροπής λόγω του χαμηλού συντελεστή τυλίγματος. Αυτή η δυσκολία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να ξεπεραστεί με κατάλληλη σχεδίαση, όπως είναι η αύξηση του αριθμού των πόλων και η εύρεση της βέλτιστης αριθμητικής αναλογίας πόλων – πηνίων, λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή τυλίγματος.

Σύμφωνα δε με το [14], όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο αυξάνεται και η απόδοση του συγκεντρωμένου τυλίγματος έναντι του επικαλυπτόμενου. Έτσι η χρήση συγκεντρωμένου τυλίγματος θα λέγαμε ότι επιβάλλεται σε γεννήτριες με μεγάλο αριθμό πόλων.

Στο [14] συγκρίνονται τα διάφορα είδη τυλιγμάτων που αναφέραμε παραπάνω και αποδεικνύεται πως το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης αναπτύσσει υψηλότερη ροπή από τα υπόλοιπα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η πεπλεγμένη ροή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση αυτή. Επίσης, όπως αναφέραμε και παραπάνω η μάζα του χαλκού που χρησιμοποιείται είναι σημαντικά μικρότερη από ότι με το επικαλυπτόμενο τύλιγμα και τέλος η κυματομορφή της τάσης είναι πιο ημιτονοειδής σε σχέση με αυτή που προκύπτει με χρήση επικαλυπτόμενου τυλίγματος. Πρέπει όμως εδώ να σημειώσουμε

ότι το τύλιγμα αυτό έχει μεγαλύτερα άκρα σε σχέση με το συγκεντρωμένο μονής στρώσης.

Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης για τα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνει.

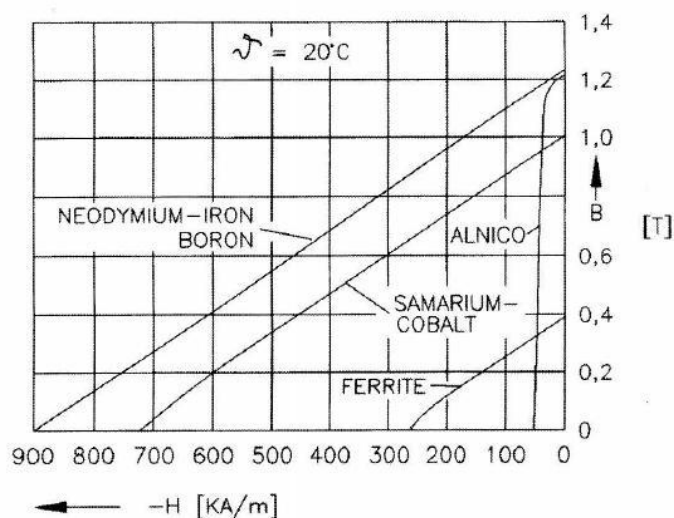
2.5. Οι μαγνήτες

2.5.1. Είδη μονίμων μαγνητών

Τα είδη των μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών είναι τα παρακάτω:

- Alnicos (Al, Ni, CO, Fe)
- Κεραμικοί / Σκληροί φερρίτες (π.χ. $BaOx6Fe_2O_3$, $SrOx6Fe_2O_3$)
- Οι σπάνιες γαίες (π.χ. SmCo, NdFeB)

Οι καμπύλες απομαγνήτισης των παραπάνω μαγνητικών υλικών φαίνονται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9. Καμπύλες απομαγνήτισης για διαφορετικά υλικά μονίμων μαγνητών

Οι καμπύλες απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Τόσο η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r , όσο και η παραμένουσα ένταση του μαγνητικού πεδίου H_c , μειώνονται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του μαγνήτη. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται με δύο εξισώσεις [15]:

$$B_r = B_{r,20} \left[1 + \frac{\alpha_B}{100} (\vartheta_{PM} - 20) \right] \quad (2.1)$$

$$H_c = H_{c,20} \left[1 + \frac{\alpha_H}{100} (\vartheta_{PM} - 20) \right] \quad (2.2)$$

όπου:

- ϑ_{PM} η θερμοκρασία του μόνιμου μαγνήτη
- $B_{r,20}$ η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής στους 20°C
- $H_{c,20}$ η παραμένουσα ένταση μαγνητικού πεδίου στους 20°C
- $\alpha_B, \alpha_H < 0$ θερμοκρασιακοί συντελεστές για το B_r και το H_c αντίστοιχα, σε %/°C (εξαιρέση οι κεραμικοί μαγνήτες, όπου $\alpha_H > 0$ [16])

Όσο πιο χαμηλές αρνητικές τιμές (κοντά στο 0) έχουν οι θερμοκρασιακοί συντελεστές, τόσο λιγότερο επηρεάζεται η απομαγνήτιση του συγκεκριμένου υλικού από τη θερμοκρασία. Για θετικές τιμές, μάλιστα, των συντελεστών (όπως συμβαίνει στους κεραμικούς μαγνήτες), το υλικό απομαγνητίζεται πιο δύσκολα με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Alnico: Οι μαγνήτες Alnico είναι κράματα σιδήρου που περιέχουν τα στοιχεία αλουμίνιο, νικέλιο και κοβάλτιο, από τα αρχικά των οποίων πήραν και το όνομά τους (Al-Ni-Co). Κυριάρχησαν στον χώρο των ηλεκτρικών μηχανών στο εύρος ισχύος από λίγα Watt μέχρι και 150 kW, από τα μέσα της δεκαετίας του 40' μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του 60'. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων μαγνητών είναι η υψηλή παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής και οι χαμηλοί θερμοκρασιακοί συντελεστές. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής για το B_r είναι $\alpha_B = -0.02\%/^{\circ}\text{C}$ ενώ η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι 520°C, υψηλότερη από όλων των μαγνητών που εξετάζουμε. Δυστυχώς, η μαγνητική ένταση των Alnico είναι πολύ χαμηλή και η καμπύλη απομαγνήτισής τους εξαιρετικά μη-γραμμική, με αποτέλεσμα, όσο εύκολα μαγνητίζονται το ίδιο εύκολα να απομαγνητίζονται.

Επιπλέον, περιέχουν μεγάλη ποσότητα κοβαλτίου (το οποίο έχει υψηλή τιμή και περιορισμένη διαθεσιμότητα) χωρίς όμως να το χρησιμοποιούν αποδοτικά λόγω της χαμηλής τους μαγνητικής έντασης. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που μετά τη δεκαετία του '80 μειώθηκε σημαντικά η κατανάλωση μαγνητών Alnico. Παρ' όλα αυτά, οι μαγνήτες αυτοί εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε κάποιες εφαρμογές όπου η μαγνητική τους σταθερότητα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η καλή αντίσταση στη διάβρωση αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα [17].

Κεραμικοί μαγνήτες/ Σκληροί φερρίτες: Μια κατηγορία σκληρών φερριτών που χρησιμοποιούνται σαν μόνιμοι μαγνήτες είναι οι εξαγωνικοί φερρίτες του γενικού τύπου $MO \times 6(Fe_2O_3)$. Ονομάζονται και κεραμικοί μαγνήτες λόγω των ηλεκτρομονωτικών τους ιδιοτήτων. Ο πιο σημαντικός φερρίτης από την ομάδα αυτή είναι ο φερρίτης βαρίου ($BaO \times 6Fe_2O_3$), ο οποίος κατασκευάστηκε το 1952. Πιο πρόσφατα οι φερρίτες αυτοί άρχισαν να αντικαθίστανται από φερρίτες στροντίου, που έχουν το γενικό τύπο ($SrO \times 6Fe_2O_3$) και έχουν καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες από τους φερρίτες βαρίου.

Οι φερρίτες παράγονται με την τεχνική της κονιομεταλλουργίας και είναι διαθέσιμοι σε ισοτροπικούς (C1) και ανισοτροπικούς βαθμούς (C5, C8), με τους δεύτερους να έχουν καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες. Στην περίπτωση των ανισοτροπικών βαθμών, οι σκόνες των υλικών συμπίεζονται παρουσία μαγνητικού πεδίου, αποκτώντας σημαντική μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία [18]. Ο φερρίτης C8 κατασκευάζεται με τη μέθοδο της υγρή συμπίεσης (οι σκόνες των υλικών αναμειγνύονται με νερό πριν συμπιεστούν), η οποία παρέχει ακόμα καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες.

Οι κεραμικοί μαγνήτες είναι σιδηριμαγνητικά υλικά. Έχουν πολύ υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, κάτι που σημαίνει ότι κατά τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου δεν επάγονται δινορρέυματα στον όγκο του μαγνήτη, με συνέπεια πρακτικά μηδαμινές απώλειες δινορρευμάτων.

Σε σχέση με τους μαγνήτες Alnico έχουν υψηλότερη μαγνητική ένταση H_c (απομαγνητίζονται δυσκολότερα), αλλά χαμηλότερη παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r . Ο θερμοκρασιακός τους συντελεστής για το H_c είναι θετικός, που σημαίνει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η μαγνητική ένταση H_c που απαιτείται για να τους απομαγνητίσει αυξάνεται. Δηλαδή, οι φερρίτες γίνονται πιο ανθεκτικοί στην απομαγνήτιση όταν θερμαίνονται. Η μαγνητική τους ισχύ, βέβαια, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ($\alpha_B = -0.2\%/^{\circ}C$), γενικά πάντως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα.

Οι φερρίτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές χαμηλού κόστους μιας και είναι ιδιαίτερα φθηνοί λόγω της εύκολης κατεργασίας και του χαμηλού κόστους των πρώτων υλών.

Τέλος, επειδή η ίδια η σύνθεσή τους περιέχει οξειδία του σιδήρου, δε μπορούν να οξειδωθούν περαιτέρω. Είναι μαγνήτες που δε διαβρώνονται και δεν απαιτούν καμία προστασία από διάβρωση σε περιβάλλοντα υγρά ή θαλασσινά.

Material	B_r (T)	$(BH)_{max}$		H_{cB}		μ_r
		(kJm ³)	MGsOe	(kA/m)	Oe	
Alnico						
Normal anisotropic	1.1–1.3	36–43	4.5–5.4	46–60	580–750	2.6–4.4
Columnar	1.35	60	7.5	60	750	1.8
High coercivity	0.8–0.9	42–46	5.3–5.8	95–150	1200–1900	2.0–2.8
Columnar high H_{cB}	1.05	74	9.2	120	1500	1.8
Ferrites (ceramics)						
Barium isotropic (a)	0.22	8.0	1.0	130–155	1600–1900	1.2
Barium anisotropic (a)	0.39	28.5	3.6	150	1880	1.05
Strontium anisotropic (a)	0.36–0.43	24–34	3.0–4.3	240–300	3000–3800	1.05
La,Co substituted Sr ferrite (a)	0.42–0.44	33–36	4.1–4.5	320–330	4000–4100	1.05
Bonded ferrite						
Isotropic (a)	0.14	4.0–4.3	0.50–0.54	80–100	1000–1250	1.1
Anisotropic (a)	0.20–0.28	7–15	0.9–1.9	140–210	1700–2600	1.15
Samarium cobalt						
SmCo ₅ sintered (b)	0.9	160–180	20–23	640–700	8000–8800	1.05
SmCo ₅ bonded (b)	0.3–0.75	25–110	3–14	250–550	3000–6900	1.05–1.15
Sm ₂ Co ₁₇ sintered (c)	0.9–1.1	150–240	19–30	600–820	7500–10 000	1.1
Neodymium iron boron						
NdFeB sintered (d)	1.0–1.4	200–370	25–46	800–1050	10 000–13 000	1.05
NdFeb bonded (d)	0.45–0.75	35–90	4.4–11.3	300–540	3800–6800	1.15
Others						
CrFeCo anisotropic	1.3	32–48	4–6	45–50	560–630	2.5–3.5
FeCoVCr anisotropic	0.85	15	1.9	28	350	5

* B_r , remanence; $(BH)_{max}$, energy product; H_{cB} , coercivity; μ_r , relative recoil permeability. † Intrinsic coercivity H_{cI} : (a) 160–400 kA/m, 2000–5000 Oe (b) 700–1300 kA/m, 8700–16200 Oe (c) 700–1650 kA/m, 8700–20600 Oe (d) 800–2500 kA/m, 10000–31200 Oe. The Curie temperature of Alnico is 800–850°C, of ferrite 450°C, of SmCo over 700°C and NdFeB it is 310°C. The Alnicos have a resistivity of about $50 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$, for the ferrites it is about $10^7 \Omega\text{-m}$ and for the rare earths $90\text{--}140 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$. processmodeling.org

Πίνακας 2.2. Μαγνητικά χαρακτηριστικά μόνιμων μαγνητικών υλικών

Material	Grade	Temp. Range		Max Use °C	Alpha(α) % / °C	Beta (β) % / °C	Tc °C
		Min °C	Max °C				
Alnico, cast	5	20	100+	520	-0.02	-0.01	900
Alnico, cast	8	20	100+	520	-0.02	-0.01	860
Sm ₂ Co ₁₇	27 MGOe	20	120	350	-0.035	-0.20	810
SmCo ₅	20 MGOe	20	120	250	-0.04	-0.40	700
NdFeB, bonded	MQP-A, -O	20	100	110, 140	-0.13	-0.40	310
NdFeB, bonded	MQP-B	20	100	110	-0.11	-0.40	360
NdFeB, bonded	MQP-C, D	20	100	125, 110	-0.07	-0.40	470
NdFeB, sintered	L-38UHT	20	180	180	-0.10	-0.50	350
NdFeB, sintered	N38UJ	20	180	180	-0.12	-0.55	310
NdFeB, sintered	N48M	20	100	100	-0.12	-0.65	310
Ferrite, sintered	C-5, -8	20	120	250	-0.20	0.27	450

Πίνακας 2.3. Θερμοκρασιακοί συντελεστές μόνιμων μαγνητικών υλικών. Alpha (α) είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής για το B_r και Beta (β) ο θερμοκρασιακός συντελεστής για το H_c .

Μόνιμοι μαγνήτες από σπάνιες γαίες: Η πρώτη γενιά μόνιμων μαγνητών από σπάνιες γαίες άρχισε να παράγεται στις αρχές της δεκαετίας του 70' και ήταν κράματα Σαμαρίου-

Κοβαλτίου βασισμένα στη σύνθεση SmCo_5 . Οι μαγνήτες αυτοί έχουν πολύ υψηλή παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r , υψηλή μαγνητική ένταση H_c και παραγωγή ενέργειας $(BH)_{\max}$, γραμμική καμπύλη απομαγνήτισης και χαμηλό θερμοκρασιακό συντελεστή. Είναι κατάλληλοι για μηχανές μικρού όγκου, λόγω της μεγάλης πυκνότητας ισχύος τους, και μηχανές που λειτουργούν σε αυξημένες θερμοκρασίες. Έχουν, όμως, πολύ υψηλό κόστος εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται.

Τη δεκαετία του 80', με την ανακάλυψη μίας δεύτερης γενιάς μαγνητών σπάνιων γαιών βασισμένης στο πιο οικονομικό Νεοδύμιο (Nd), μειώθηκε αρκετά το κόστος των πρώτων υλών. Το Νεοδύμιο υπάρχει σε μεγαλύτερη αφθονία σε σχέση με το Σαμάριο και οι μαγνήτες Νεοδυμίου (NdFeB) έχουν αρκετά καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες σε σχέση με αυτούς της πρώτης γενιάς, αλλά μόνο σε θερμοκρασία δωματίου (η καμπύλη απομαγνήτισής τους είναι ισχυρά εξαρτημένη από τη θερμοκρασία). Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρήσης τους σε εφαρμογές με υψηλό λόγο απόδοσης προς κόστος.

Ένα σοβαρό μειονέκτημα των μαγνητών Νεοδυμίου είναι η ευπάθειά τους ως προς τη διάβρωση σε περιβάλλοντα με υγρασία και, κυρίως, με θαλασσινό νερό. Για αυτό το λόγο οι συγκεκριμένοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται πάντα με κάποιου είδους επίστρωση, η οποία μπορεί να είναι μεταλλική ή οργανική. Για τις μεταλλικές, π.χ. Νικέλιο ή Κασσίτερος, χρησιμοποιείται κατά κανόνα γαλβανική επεξεργασία. Οργανικές επιστρώσεις που συνηθίζονται είναι η ηλεκτροστατική βαφή πούδρας (powder coating), διάφορα βερνίκια και ρητίνες.

Οι μαγνήτες Νεοδυμίου χαρακτηρίζονται από το βαθμό τους, ο οποίος εκφράζει το πόσο ισχυρός είναι ο μαγνήτης με βάση την παραμένουσα μαγνήτισή του. Οι βαθμοί ξεκινάνε από N30 και φτάνουν έως τους πολύ ισχυρούς N52 και, βέβαια, όσο ανεβαίνει ο βαθμός, τόσο αυξάνει και το κόστος του μαγνήτη.

Συμπερασματικά, οι μόνιμοι μαγνήτες από σπάνιες γαίες υπερέχουν όλων των εμπορικών μαγνητικών υλικών ως προς την μαγνητική τους ισχύ. Έχουν όμως τα μειονεκτήματα ότι διαβρώνονται εύκολα, έχουν υψηλό κόστος και η τιμή και η διαθεσιμότητά τους είναι γενικά ασταθής λόγω της σπανιότητας των πρώτων υλών τους και του μονοπωλίου ουσιαστικά που έχει η Κίνα στην παραγωγή τους.

2.5.2. Γιατί να αντικατασταθούν οι μαγνήτες Νεοδυμίου

Για την κατασκευή μαγνητών Νεοδυμίου χρειάζονται οι σπάνιες γαίες νεοδύμιο και δυσπρόσιο, σε ποσοστό 30% και 3% αντίστοιχα [19]. Υπάρχουν, όμως, συγκεκριμένα προβλήματα σχετικά με την εξάρτηση από αυτά τα μέταλλα:

Αστάθεια στην τιμή τους. Μεταξύ Αυγούστου 2009 και Αυγούστου 2011 η τιμή του νεοδυμίου αυξήθηκε κατά 1000% [20]. Δεδομένου ότι το κόστος για το νεοδύμιο και το δυσπρόσιο αποτελεί το 60% και 35% αντίστοιχα, του κόστους του μαγνήτη, αλλαγές στην τιμή αυτών των μετάλλων επηρεάζουν καθοριστικά την τιμή των μαγνητών.

Ανασφάλεια στη διαθεσιμότητά τους. Η Κίνα, που το 2010 κατείχε το 97% της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών [20], έχει κατά καιρούς μειώσει τις εξαγωγές σπάνιων γαιών, για διάφορους οικονομικοπολιτικούς λόγους. Ένας λόγος είναι ότι με την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Κίνα, αυξάνεται και θα αυξηθεί κι άλλο τα επόμενα χρόνια, η εγχώρια ζήτηση για τις σπάνιες γαίες, οπότε η Κίνα παίρνει μέτρα ώστε να μην εξαντληθούν τα αποθέματά της. Επίσης, προτιμάει αντί να εξάγει την πρώτη ύλη (το μαγνήτη) να εξάγει προϊόντα υψηλής τεχνολογίας που χρησιμοποιούν την πρώτη ύλη, ώστε η προστιθέμενη αξία να μένει στη χώρα.

Σοβαρό περιβαλλοντικό κόστος εξαιτίας των ενεργοβόρων τεχνικών εξόρυξης και καθαρισμού των μεταλλευμάτων και απόρριψης των παραπροϊόντων τους. Παρά το όνομά τους, οι σπάνιες γαίες υπάρχουν σε αρκετή ποσότητα στο φλοιό της γης, όμως η πρόσβαση σε αυτές σε καθαρή μορφή χωρίς προσμείξεις είναι μια δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία με σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και τις τοπικές κοινωνίες.

Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα των μαγνητών νεοδυμίου είναι ότι είναι πολύ επιρρεπείς στη διάβρωση. Ιδιαίτερα σε θερμά και υγρά περιβάλλοντα και σε παραθαλάσσιες περιοχές η διάβρωση κάνει τους μαγνήτες να διωγκώνονται με αποτέλεσμα να αποκολλώνται από το δρομέα, να έρχονται σε επαφή και να τρίβονται στο στάτη και τελικά να οδηγούν στην ακινητοποίηση της γεννήτριας λίγα χρόνια μετά την εγκατάστασή της [21].



Σχήμα 2.10. Διαβρωμένοι μαγνήτες νεοδυμίου σε γεννήτρια αξονικής ροής.

Για αυτούς τους λόγους είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης άλλων, πιο οικονομικών και προσιτών μαγνητικών υλικών για τις γεννήτριες μονίμων μαγνητών. Άλλωστε, στόχος αυτής της εργασίας είναι η σχεδίαση μιας γεννήτριας χαμηλού κόστους, με υλικά όσο το δυνατόν τοπικά και εύκολα προσβάσιμα.

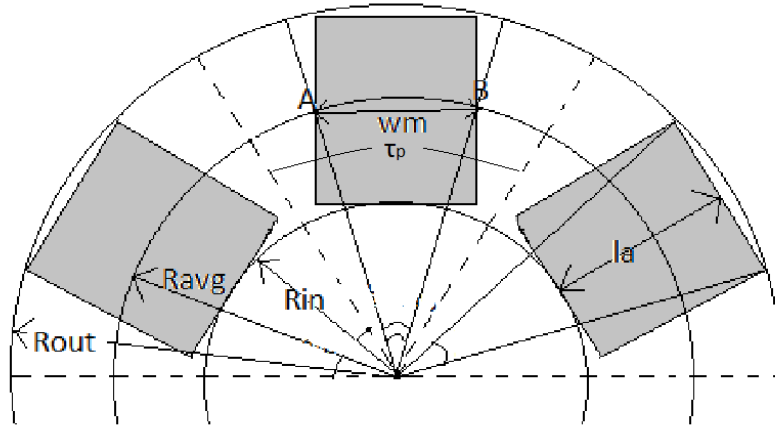
2.6. Θεωρητική Ανάλυση

2.6.1. Μαγνητική Ροή – ΗΕΔ – Ηλεκτρομαγνητική ροπή

Έστω γεννήτρια αξονικής ροής με τραπεζοειδείς μαγνήτες και πηνία. Το πολικό βήμα τ_p καθώς και το πλάτος του μαγνήτη w_m δεν είναι σταθερά αλλά εξαρτώνται από την ακτίνα στην οποία αναφερόμαστε [8]. Για το πολικό βήμα μπορούμε να γράψουμε:

$$\tau_p(r) = \frac{2\pi r}{p} \quad (2.3)$$

όπου r η ακτίνα αναφοράς και p ο αριθμός των πόλων.



Σχήμα 2.11. Οι διάφορες ακτίνες αναφοράς και το πολικό βήμα σε μια γεννήτρια με ορθογώνιους μαγνήτες

Ένας πολύ σημαντικός συντελεστής για τη σχεδίαση της γεννήτριας είναι ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος:

$$a_i(r) = \frac{w_m(r)}{\tau_p(r)} = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \quad (2.4)$$

όπου:

- B_{avg} η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο
- B_{mg} η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο έχει ημιτονοειδή μορφή αν ο λόγος αυτός ισούται με $a_i = \frac{2}{\pi}$.

Έστω τώρα ότι θέλουμε να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ_f :

$$\Phi_f = \int_{r_{in}}^{r_{out}} B dS$$

όπου $dS = \frac{2\pi r}{p} dr$ η στοιχειώδης επιφάνεια ανά πόλο

Θεωρώντας $B = B_{avg}$ έχουμε:

$$\Phi_f = \int_{r_{in}}^{r_{out}} a_i B_{mg} \frac{2\pi r}{p} dr = a_i B_{mg} \frac{\pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (2.5)$$

Η ΗΕΔ μπορεί να υπολογιστεί παραγωγίζοντας τη θεμελιώδη συνιστώσα της κυματομορφής της μαγνητικής ροής [8]:

$$\Phi_{f1} = \Phi_f \sin \omega t \rightarrow$$

$$E_f = k_w N_\phi \frac{d\Phi_{f1}}{dt} = 2\pi f k_w N_\phi \Phi_f \cos \omega t$$

και η ενεργός τιμή της ΗΕΔ προκύπτει:

$$E_f = \pi \sqrt{2} f k_w N_\phi \Phi_f = \pi \frac{\sqrt{2}}{2} p k_w N_\phi \frac{n}{60} \Phi_f \rightarrow$$

$$E_f = \frac{\pi \cdot p \cdot n \cdot q \cdot N_c \cdot k_w \cdot \Phi_f}{60 \sqrt{2}} \quad (2.6)$$

όπου:

- $N_\phi = q \cdot N_c$ ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση, όπου N_c τα ελίγματα ανά πηνίο και q τα πηνία ανά φάση
- k_w ο συντελεστής τυλίγματος

Σύμφωνα με το [8] η ηλεκτρομαγνητική δύναμη F_x στο δρομέα μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο της μαγνητικής και ηλεκτρικής φόρτισης $B_{avg} \cdot A$ και της ενεργούς επιφάνειας των μαγνητών $S = \pi(r_{out}^2 - r_{in}^2)$.

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση (line current density) στην εσωτερική ακτίνα r_{in} είναι:

$$A = \frac{m_1 N_\phi I_a}{\pi r_{in}} \quad (2.7)$$

Έτσι, η μέση ηλεκτρομαγνητική ροπή σύμφωνα με το [11] ισούται με:

$$T_d = F_x r_{in} = 2\pi B_{avg} A (r_{out}^2 - r_{in}^2) r_{in} = 2\pi B_{avg} A r_{out}^3 (k_d - k_d^3) \quad (2.8)$$

όπου k_d είναι ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα που ισούται με:

$$k_d = \frac{r_{in}}{r_{out}} \quad (2.9)$$

Ο λόγος αυτός είναι ένας σημαντικός συντελεστής της σχεδίασης και μαζί με το λόγο α_i θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 4.

Από τη σχέση (2.8) βλέπουμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή στις μηχανές αξονικής ροής είναι ανάλογη με την εξωτερική ακτίνα στον κύβο.

2.6.2. Ανάλυση του τυλίγματος

2.6.2.1. Πυκνότητα ρεύματος

Ένα στοιχείο το οποίο είναι πολύ σημαντικό όσον αφορά το τύλιγμα και επηρεάζει όλη τη δομή και το μέγεθος της γεννήτριας είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα. Συνηθισμένες τιμές της είναι $J_{max} = 4 - 5 A/mm^2$ για μηχανές μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση, όμως, μιας μηχανής αξονικής ροής μπορούμε να φτάσουμε μέχρι και τα $6 A/mm^2$, μιας και όπως έχουμε αναφέρει οι μηχανές αυτές έχουν πολύ καλό αερισμό σε σχέση με άλλες.

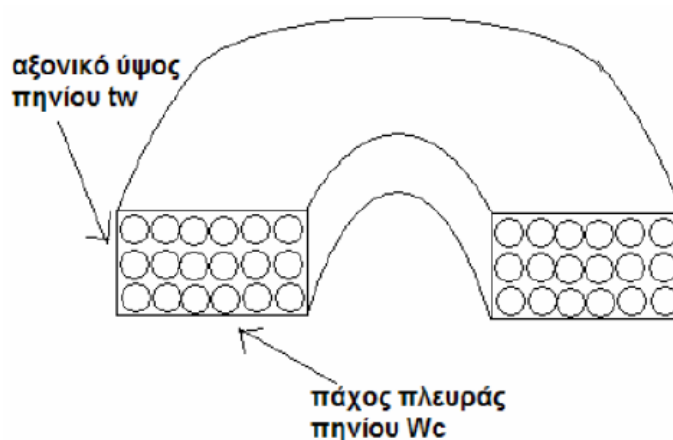
Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να γράψουμε:

$$J_{max} = \frac{I_{a,max}}{sc} \quad (2.10)$$

όπου:

- $I_{a,max}$ το μέγιστο ρεύμα της γεννήτριας
- sc το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας ενός πηνίου

Όπως θα δούμε αργότερα το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου, sc , παίζει σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα σε μεγάλες ισχύεις όπου τα ρεύματα είναι αρκετά υψηλά και άρα, το εμβαδό αυτό πρέπει να ναι αρκετά μεγάλο ώστε να οδηγήσει σε μικρότερη αντίσταση του χαλκού και άρα λιγότερες απώλειες στο τύλιγμα.



Σχήμα 2.12. Το αξονικό ύψος, το πάχος πλευράς και τα ελίγματα ενός πηνίου.

Τα χάλκινα ελίγματα δεν καταλαμβάνουν ολόκληρη τη διατομή του πηνίου, εξαιτίας της κυκλικής διατομής τους και της μόνωσης που διαθέτουν. Για αυτό, ορίζεται ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου, k_f , που είναι ίσος με την επιφάνεια του χαλκού που βρίσκεται στη διατομή ενός πηνίου προς τη συνολική επιφάνεια της διατομής:

$$k_f = \frac{S_{copper}}{w_c \cdot t_w} = \frac{N_c \cdot sc}{w_c \cdot t_w} \quad (2.11)$$

όπου N_c ο αριθμός των ελιγμάτων του πηνίου, w_c το πάχος πηνίου και το t_w το αξονικό ύψος πηνίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16. Αυτή είναι η θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του k_f . Στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης θα μελετηθεί περισσότερο αυτός ο συντελεστής και το πώς υπολογίζεται τελικά η τιμή του.

Το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας μπορεί τώρα να εκφραστεί:

$$sc = \frac{k_f \cdot w_c \cdot t_w}{N_c} \quad (2.12)$$

Άρα η πυκνότητα ρεύματος γράφεται:

$$J_{max} = \frac{N_c I_{a,max}}{k_f w_c t_w}$$

2.6.2.2. Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος, καθώς και τη συνολική μάζα του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό θα βοηθήσει πολύ αργότερα στην εκτίμηση τόσο του κόστους, όσο και του βάρους της γεννήτριας. Ιδιαίτερα η αντίσταση του τυλίγματος και κατ' επέκταση οι απώλειες που θα προκαλεί θα παίζει σημαντικό ρόλο αργότερα στη βελτιστοποίησή μας. Επίσης, ας μην ξεχνάμε ότι η αγορά του χαλκού θα γίνει με βάση το βάρος του.

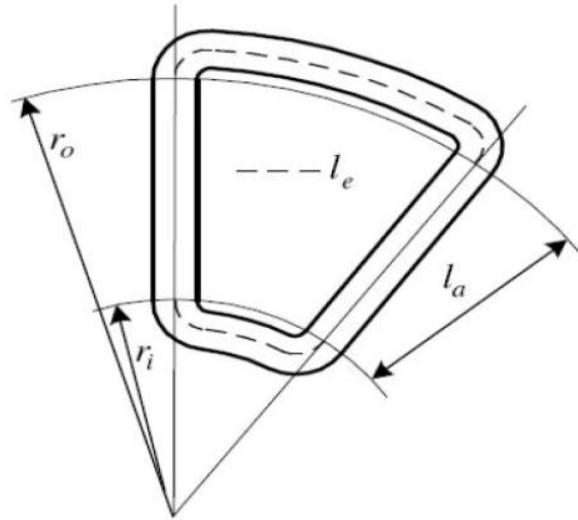
Για το συγκεντρωμένο τύλιγμα, το οποίο επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε, το μέσο μήκος ελίγματος l_{avg} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec} \quad (2.13)$$

όπου

- $l_a = R_{out} + R_{in}$ το ενεργό μήκος της γεννήτριας

- $l_{ec} = 2(R_{out} + R_{in}) \frac{\theta_m - 0.6\theta_{re}}{p}$ τα άκρα τυλίγματος
- $\theta_m = \frac{\pi p}{\rho}$ η ηλεκτρική γωνία βήματος πηνίου (Q ο συνολικός αριθμός πηνίων της γεννήτριας)
- θ_{re} η ηλεκτρική γωνία πάχους πλευράς πηνίου, της οποίας χρησιμοποιούμε τη μέγιστη τιμή $\theta_{re} = \frac{k_d}{1+k_d} \theta_m$ [2]



Σχήμα 2.13. Κάτοψη του πηνίου όπου φαίνονται και τα άκρα τυλίγματος.

Γνωρίζοντας το συνολικό μήκος ενός ελίγματος μπορούμε πλέον να βρούμε την αντίσταση ενός πηνίου με N_c ελίγματα:

$$R_c = N_c \rho_t \frac{l_{avg}}{sc} = N_c \rho_t \frac{(2l_a + l_{ec})}{sc} \quad (2.14)$$

όπου ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού:

$$\rho_t = \rho_{20} (1 + 0.0039(t_c - 20)) \quad \rho_{20} = 1.68 \cdot 10^{-8}$$

και t_c η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια.

Η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος L_s έχει υπολογιστεί στο [3] και είναι:

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 \cdot N_c^2}{t_w} \cdot 10^{-7} \cdot K_n \quad (2.15)$$

όπου K_n η σταθερά του Nagaoka :

$$K_n = \frac{1}{1 + 0.9 \frac{l_{avg}}{2\pi t_w} + 0.32 \frac{2\pi w_c}{l_{avg}} + 0.84 \frac{w_c}{t_w}}$$

Πρόκειται ουσιαστικά για έναν συντελεστή διόρθωσης καθώς κατά τη λειτουργία της γεννήτριας τα πηνία μαγνητίζονται καθιστώντας το πεδίο μη ομοιόμορφο.

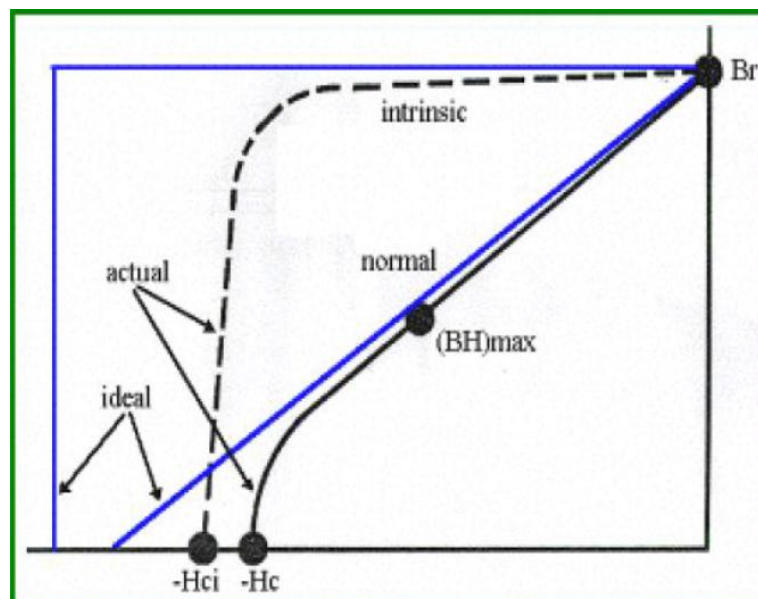
Τέλος, η μάζα χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί υπολογίζεται απλά από τον τύπο της πυκνότητας:

$$m_{cu} = 3N_{\phi} l_{avg} s c \rho_{cu}$$

όπου ρ_{cu} η πυκνότητα του χαλκού.

2.6.3. Το μαγνητικό κύκλωμα

Πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάλυσή μας παίζει και η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας. Πρωτεύοντα ρόλο στο κύκλωμα αυτό έχει ο μαγνήτης, οπότε πρέπει να δούμε από τι χαρακτηρίζεται ένας μόνιμος μαγνήτης.



Σχήμα 2.14. Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης.

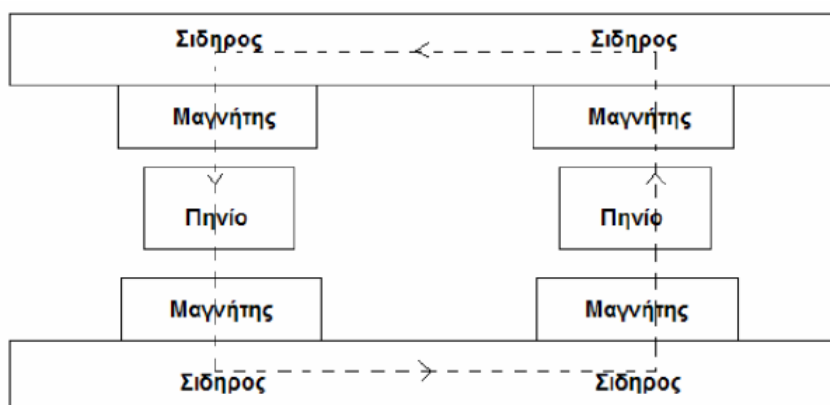
Ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισής του, που φαίνεται παραπάνω. Στην καμπύλη αυτή μας ενδιαφέρει το μέγεθος της παραμένουσας μαγνήτισης B_r (Tesla) περισσότερο, καθώς και η συνεχούσα δύναμη H_c (kA/m). Γενικά, ο μαγνήτης πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο που θα μπορεί να

αποδώσει τη μέγιστη ενέργεια $(BH)_{\max}$. Το σημείο αυτό είναι στο γόνατο της καμπύλης απομαγνήτισης και το πεδίο μπορεί να υπολογιστεί εκεί ίσο με $B = B_r/2$. Με λίγα λόγια μπορούμε να υποθέσουμε για την πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια των μαγνητών:

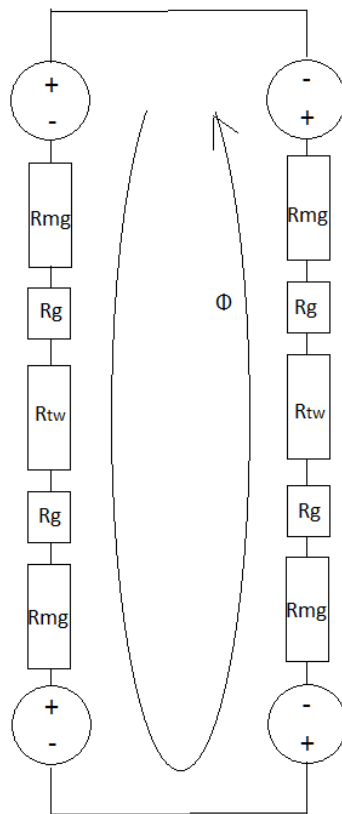
$$B_{mg} = \frac{B_r}{2} \quad (2.16)$$

Φυσικά κάθε μόνιμος μαγνήτης έχει δικές του χαρακτηριστικές ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος και το πόσο ισχυρός είναι (βαθμός του μαγνήτη), οι οποίες θα μας δώσουν και τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση του μαγνήτη αυτού.

Μια πλάγια όψη της γεννήτριας καθώς και το αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα που προκύπτει από αυτή φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.15. Η πλάγια όψη της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του κυκλώματος.



Σχήμα 2.16. Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας.

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος έχει γίνει στο [11] από όπου προκύπτει η σχέση:

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} \frac{(g+0.5tw)}{h_m} k_{sat}} \quad (2.17)$$

όπου:

- μ_{rrec} η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη ίση με $\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_r}{H_c}$
- και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ίση με $4\pi \cdot 10^{-7}$.
- $k_{sat} = 1$ αφού δεν υπάρχει κορεσμός (δεν υπάρχει πυρήνας)
- h_m το πάχος του μαγνήτη (αξονικό ύψος)
- g το αξονικό ύψος του διακένου ή απλά το διάκενο

Η ανάλυση αυτή είναι καλή, αν και υποθέτει ότι το πεδίο B_{mg} στην επιφάνεια του μαγνήτη διατηρείται σε όλο το αξονικό ύψος της γεννήτριας, υπόθεση που μάλλον βασίζεται στην ύπαρξη πυρήνα στη γεννήτρια. Στην περίπτωσή μας, όμως, δεν υπάρχει πυρήνας και θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι το πεδίο εξασθενεί στο μέσο τουλάχιστον της γεννήτριας. Έτσι, μια πιο καλή προσέγγιση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας ότι στα διάκενα της

γεννήτριας έχουμε πεδίο B_{mg} ενώ στην περιοχή των πηνίων (ύψος t_w) έχουμε B_{max} , τη μέγιστη δηλαδή τιμή της κυματομορφής του B όπου αναφερόμαστε στο σημείο που βρίσκεται στη μέση της γεννήτριας.

Για το μαγνητικό κύκλωμα θεωρούμε τους μαγνήτες πηγές τάσης με τάση:

$$V = \frac{h_m B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}}$$

τη μαγνητική ροή Φ ρεύμα με μέτρο:

$$I = B \cdot S$$

και τα υλικά στα οποία ταξιδεύει η τελευταία (αέρας και μαγνήτης) αντιστάσεις:

$$R_{mg} = \frac{h_m}{S \mu_0 \mu_{rrec}}$$

$$R_g = \frac{g}{S \mu_0}$$

$$R_{tw} = \frac{t_w}{S \mu_0}$$

Εφαρμόζοντας, λοιπόν, έναν απλό νόμο του Ohm και κάνοντας τις παραπάνω παραδοχές για την πυκνότητα μαγνητικής ροής σε κάθε σημείο μπορούμε να γράψουμε και την παρακάτω σχέση η οποία απαιτεί επαλήθευση μέσω προσομοίωσης στον υπολογιστή πριν χρησιμοποιηθεί:

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\} \quad (2.18)$$

2.6.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα

Στο σημείο αυτό γίνεται μελέτη των απωλειών σε μια μηχανή αξονικής ροής με μόνιμους μαγνήτες η οποία δεν έχει πυρήνα. Εξάγεται το ισοδύναμο κύκλωμα για τη μοντελοποίηση αυτών καθώς και το ισοζύγιο ενέργειας. Οι απώλειες μπορούν γενικά να χωριστούν σε απώλειες στο στάτη, απώλειες στο δρομέα και απώλειες περιστροφής.

2.6.4.1. Μελέτη απωλειών

Απώλειες στο στάτη:

-**Απώλειες χαλκού:** Οι απώλειες χαλκού αποτελούν τη μεγαλύτερη συνιστώσα απωλειών και είναι οι ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη:

$$P_{cu} = 3I_{ac}^2 R_{phase} \quad (2.19)$$

Καθότι στη μελέτη μας, όπως θα δούμε, ερχόμαστε αντιμέτωποι με μεγάλες τιμές ρεύματος, οι απώλειες χαλκού παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και βασικό μας μέλημα είναι ο περιορισμός τους, τόσο για να επιτύχουμε την επιθυμητή απόδοση όσο και για να εξαλείψουμε φαινόμενα υπερθέρμανσης.

Στην παρούσα εργασία το επιδερμικό φαινόμενο έχει αγνοηθεί. Στο [11] υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού συμπεριλαμβανομένου και του επιδερμικού φαινομένου.

-**Απώλειες δινορρευμάτων:** Συνήθως οι απώλειες δινορρευμάτων εμφανίζονται στον πυρήνα της γεννήτριας. Η ανυπαρξία πυρήνα εξαλείφει τις απώλειες αυτές. Απώλειες δινορρευμάτων εξακολουθούν, όμως, να υπάρχουν στο τύλιγμα, σε τέτοιο βαθμό που κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν [3].

Προκαλούνται από τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία στο τύλιγμα, τα οποία δημιουργούνται όταν οι μόνιμοι μαγνήτες περνούν πάνω από τους αγωγούς του τυλίγματος. Σε περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί σε σχετικά υψηλές συχνότητες, τα παραγόμενα δινορρεύματα προκαλούν σημαντικές απώλειες στη μηχανή. Οι απώλειες αυτές οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και σε μείωση της απόδοσης της μηχανής.

Το επιδερμικό φαινόμενο, που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα των απωλειών αυτών, μπορεί να περιοριστεί με χρήση πολύκλωνων αγωγών στο τύλιγμα [3].

Οφείλουμε να αναφέρουμε εδώ ότι μπορούμε να επιτύχουμε περιορισμό των δινορρευμάτων, με περιέλιξη και αντιμετάθεση των αγωγών του τυλίγματος. Σε περίπτωση όμως που οι σπείρες σε κάθε πηνίο είναι πολλές, αρκεί η περιέλιξη για να μειωθούν τα δινορρεύματα.

Στην εφαρμογή που μελετάμε, στην οποία έχουμε μεγάλο αριθμό πόλων (και άρα υψηλή συχνότητα), οι απώλειες αυτές δεν είναι αμελητέες και δίνονται από τον τύπο:

$$P_{eddy} = \frac{\pi l_a d c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}} \quad (2.20)$$

όπου:

- $N_p=1$ ο αριθμός των παράλληλων κλώνων ανα αγωγό
- ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα
- ρ_{cu} η ειδική αντίσταση του χαλκού

Όπως φαίνεται στον τύπο, οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες της τέταρτης δύναμης της διατομής του χαλκού, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία των πολύκλωνων αγωγών.

Απώλειες στο δρομέα:

Απώλειες υπάρχουν και στο δρομέα. Συγκεκριμένα στους μόνιμους μαγνήτες υπάρχουν απώλειες οι οποίες οφείλονται σε αρμονικές υψηλής τάξης της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Δίχως πυρήνα οι απώλειες αυτές είναι πολύ μικρές και δε λαμβάνονται υπόψιν στο παρόν κείμενο. Επιπλέον απώλειες προκαλεί και ο σίδηρος που συγκρατεί τους μαγνήτες, αλλά και αυτές είναι πολύ μικρές οπότε δε λαμβάνονται υπόψη.

Απώλειες περιστροφής:

Οι απώλειες περιστροφής ή μηχανικές απώλειες αποτελούνται από δύο συνιστώσες: Τις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και τις απώλειες ανεμισμού. Οι τελευταίες είναι πολύ μικρές και αγνοούνται. Για τις απώλειες τριβών σε μικρές μηχανές δίνεται ο τύπος [11]:

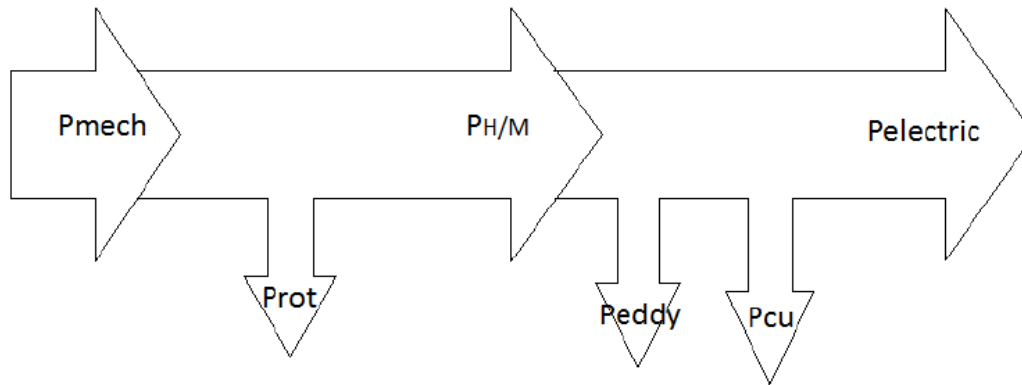
$$P_{rot} = 0.06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n \quad (2.21)$$

όπου:

- k_{fb} συντελεστής τριβών με τιμές 1-3 m^2/s^2
- m_r η μάζα του δρομέα σε kg
- m_{sh} η μάζα του άξονα σε kg
- n οι στροφές της γεννήτριας

2.6.4.2. Ισοζύγιο ενέργειας – Ισοδύναμο κύκλωμα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση σχηματίζουμε το ισοζύγιο ενέργειας:



Σχήμα 2.17. Το ισοζύγιο ενέργειας της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα.

Είσοδος της γεννήτριας είναι η αεροδυναμική ή μηχανική ισχύς την οποία θα συμβολίζουμε με P_{mech} ή P_{air} . Είναι η ισχύς που μπορεί να απορροφήσει η φτερωτή από τον άνεμο. Αφαιρώντας τις απώλειες περιστροφής προκύπτει η εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς:

$$P_{H/M} = P_{mech} - P_{rot}$$

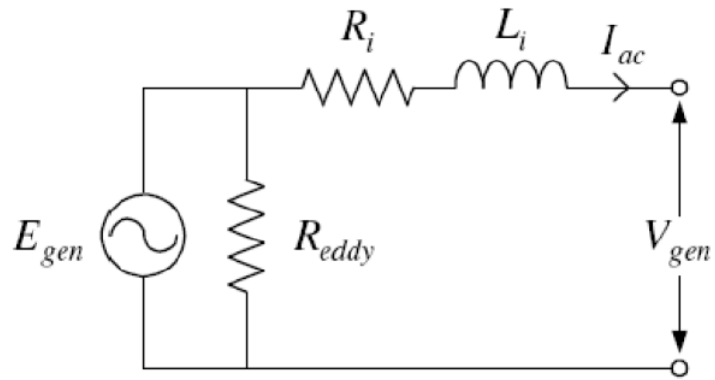
Στη συνέχεια αφαιρώντας τις απώλειες του τυλίγματος (δινორρευμάτων και ωμικές) προκύπτει η ηλεκτρική ισχύς (ισχύς εξόδου):

$$P_{\eta\lambda} = P_{H/M} - P_{eddy} - P_{cu} = P_{mech} - P_{rot} - P_{eddy} - P_{cu}$$

Οι παραπάνω απώλειες παρουσιάζονται και στο παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα, όπου η R_{eddy} έχει τοποθετηθεί παράλληλα με την αντι-ΗΕΔ, για να παρουσιάσει τις απώλειες δινორρευμάτων και δεν είναι μια πραγματική αντίσταση. Η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

$$R_{eddy} = \frac{3 \cdot E_{gen}^2}{P_{eddy}}$$

όπου η E_{gen} είναι η RMS τιμή της αντι-ΗΕΔ.



Σχήμα 2.18. Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας.

Η απόδοση στη συνέχεια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (2.22)$$

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρονική έρευνα για τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες

3.1. Περιγραφή και στόχοι της έρευνας

Στα πλαίσια της μελέτης μας συντάξαμε ένα ερωτηματολόγιο που απευθύνεται σε χρήστες και κατασκευαστές μικρών ανεμογεννητριών που έχουν κατασκευαστεί τοπικά.

Μερικοί στόχοι αυτής της έρευνας είναι:

- να καταγραφούν κοινά προβλήματα ώστε να διαπιστωθεί η ανάγκη έρευνας σε αυτή την κατεύθυνση
- να συγκεντρωθούν και να ανταλλαχθούν ιδέες, καλές πρακτικές, τροποποιήσεις σε υπάρχοντα σχέδια και εγχειρίδια
- να προσδιοριστεί το προφίλ των χρηστών - κατασκευαστών τοπικά κατασκευασμένων μικρών α/γ
- να αξιολογηθεί η εξέλιξη τέτοιων εγχειρημάτων ως προς τη συχνότητα, την αποτελεσματικότητα, την αυτονομία, τα κίνητρα και την ικανοποίηση των συντελεστών τους

Το ερωτηματολόγιο είναι χωρισμένο σε δέκα θεματικές ομάδες ερωτήσεων, έχει συνολικά περίπου 120 ερωτήσεις και υποερωτήσεις εκ των οποίων άλλες είναι υποχρεωτικές και άλλες προαιρετικές και απαιτεί περίπου 20 λεπτά προκειμένου να απαντηθεί ολοκληρωμένα.

Οι τρεις πρώτες ομάδες ερωτήσεων είναι πιο γενικές και αφορούν τα προσωπικά στοιχεία και το προφίλ του ερωτώμενου καθώς και σχετικά σεμινάρια που τυχόν έχει συμμετάσχει. Από εκεί και πέρα οι ερωτήσεις επικεντρώνονται σε μία συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια που έχει λειτουργήσει ή/και κατασκευάσει ο ερωτώμενος. Στο τέλος του ερωτηματολογίου, αν κάποιος θέλει να δώσει στοιχεία και για κάποια άλλη ανεμογεννήτρια, δίνεται αυτή η δυνατότητα χωρίς να χρειάζεται να ξανασυμπληρωθούν οι πρώτες γενικές ομάδες ερωτήσεων. Επίσης, στο τέλος του ερωτηματολογίου παρουσιάζονται κάποια πρόχειρα στατιστικά και γραφήματα από επιλεγμένες ερωτήσεις.

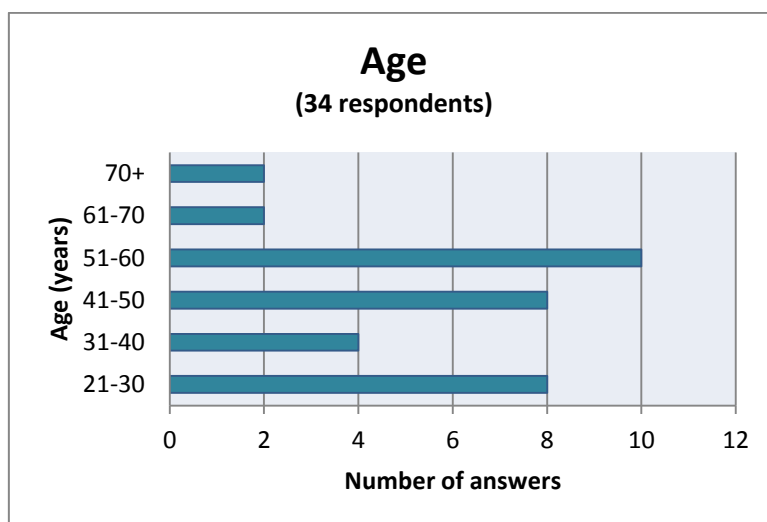
Η γλώσσα του ερωτηματολογίου είναι τα αγγλικά. Προκειμένου να βρεθούν συμμετέχοντες, η έρευνα δημοσιεύτηκε σε blogs, forums και ιστοσελίδες που χρησιμοποιούν άνθρωποι που ενδιαφέρονται για το θέμα. Μέχρι στιγμής (Φεβρουάριος 2014) έχουν συμπληρωθεί 34 ερωτηματολόγια, από τα οποία τα 23 είναι πλήρως και τα

11 μερικώς συμπληρωμένα. Οι απαντήσεις αυτές επεξεργάστηκαν σε Excel και τα στατιστικά αποτελέσματα από επιλεγμένες ερωτήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια. Όλα τα αποτελέσματα υπάρχουν στον ιστότοπο του εργαστηρίου <http://rurerg.net/> στην καρτέλα Survey. Ο αριθμός των συμμετεχόντων βέβαια είναι ακόμα μικρός, παρ' όλα αυτά μπορούν να εξαχθούν κάποια πρώτα συμπεράσματα.

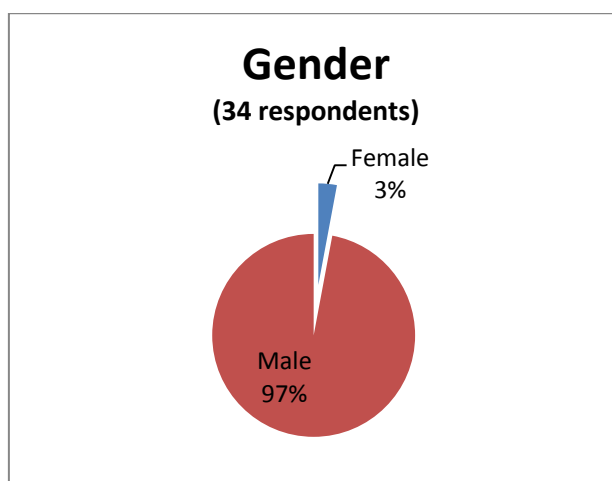
3.2. Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων

3.2.1. Στατιστική παρουσίαση με γραφήματα

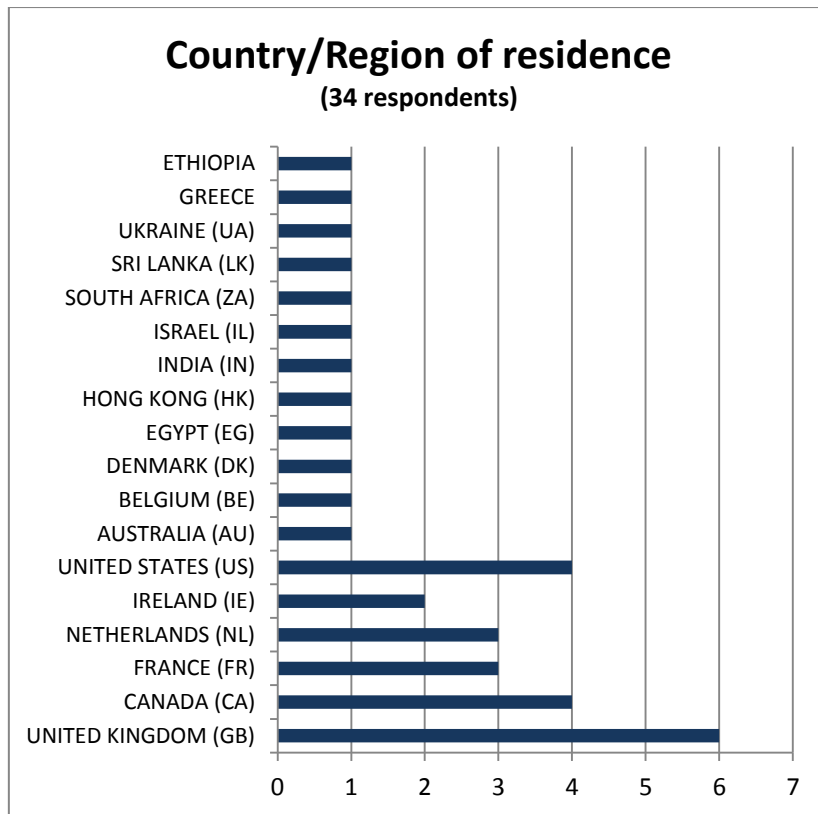
Ομάδα 1: Προσωπικά δεδομένα



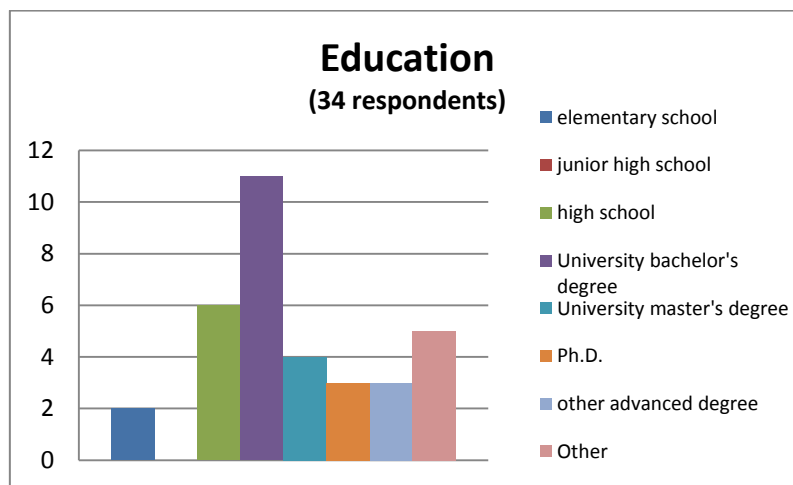
Σχήμα 3.1. Ηλικία



Σχήμα 3.2. Φύλο



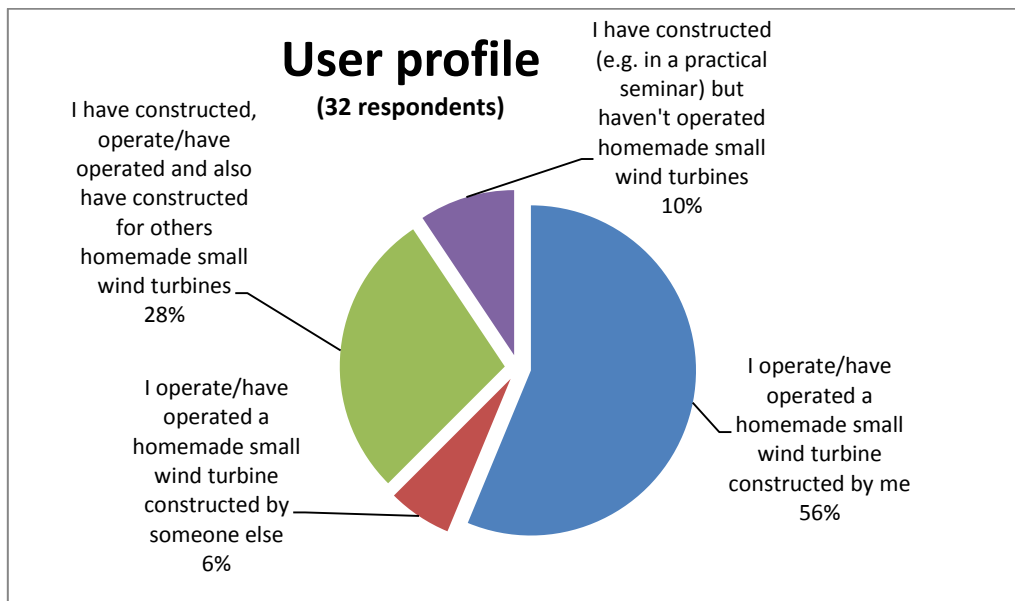
Σχήμα 3.3. Τόπος κατοικίας



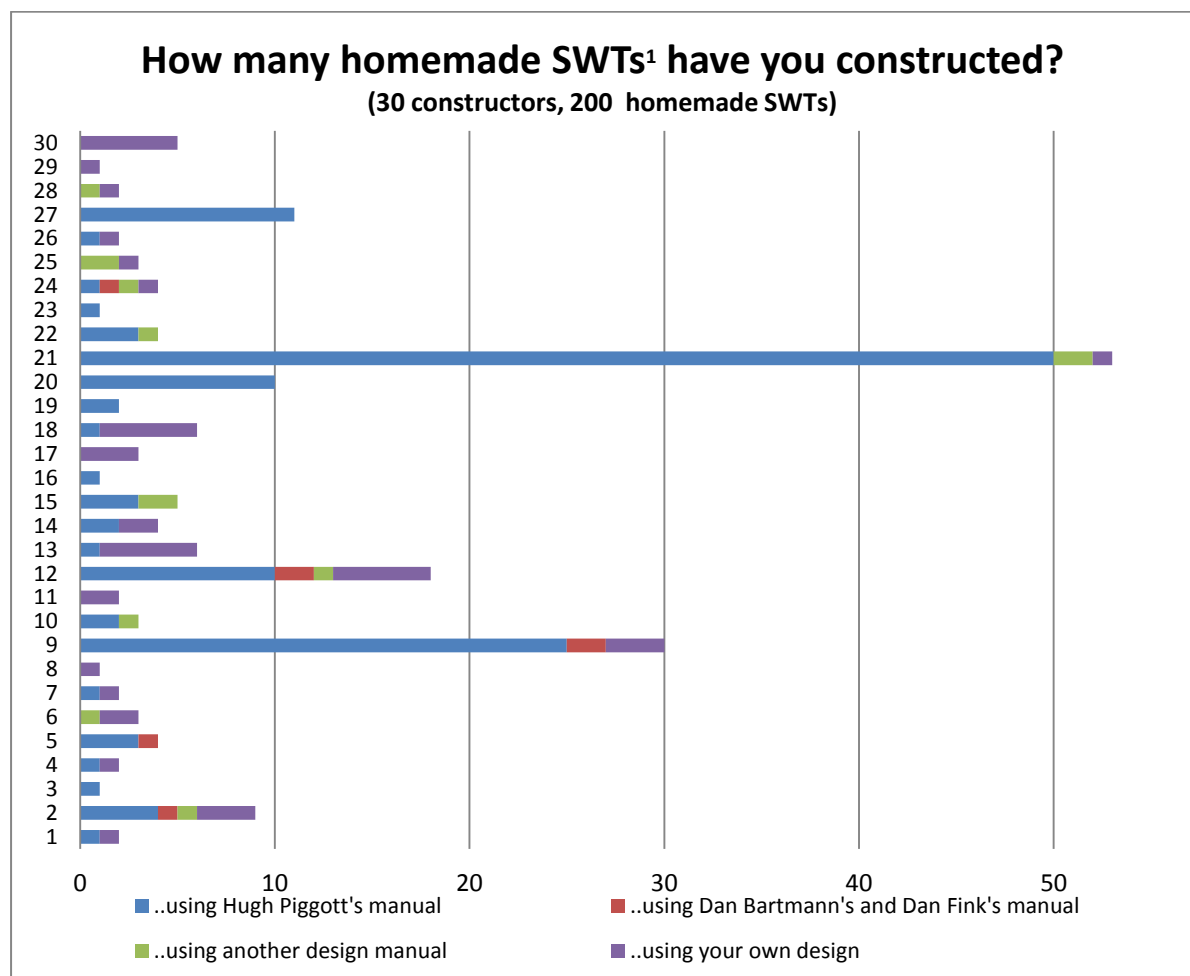
Σχήμα 3.4. Εκπαίδευση

Οι ερωτήσεις αυτές στοχεύουν στο να δημιουργήσουν μία πρώτη εικόνα του συμμετέχοντα. Από τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι οι άνθρωποι που ασχολούνται με τοπικά κατασκευασμένες μικρές α/γ είναι κυρίως άντρες (97%). Περισσότεροι από τους μισούς είναι ηλικίας 40–60 ετών ενώ υπάρχει και ένα ποσοστό 24% με ηλικία 20–30 ετών. Το 60% διαμένει στο Ηνωμένο Βασίλειο, τον Καναδά, τις ΗΠΑ, τη Γαλλία και την Ολλανδία. Τέλος, τα $\frac{3}{4}$ έχουν πτυχίο τριτοβάθμιας εκπαίδευσης.

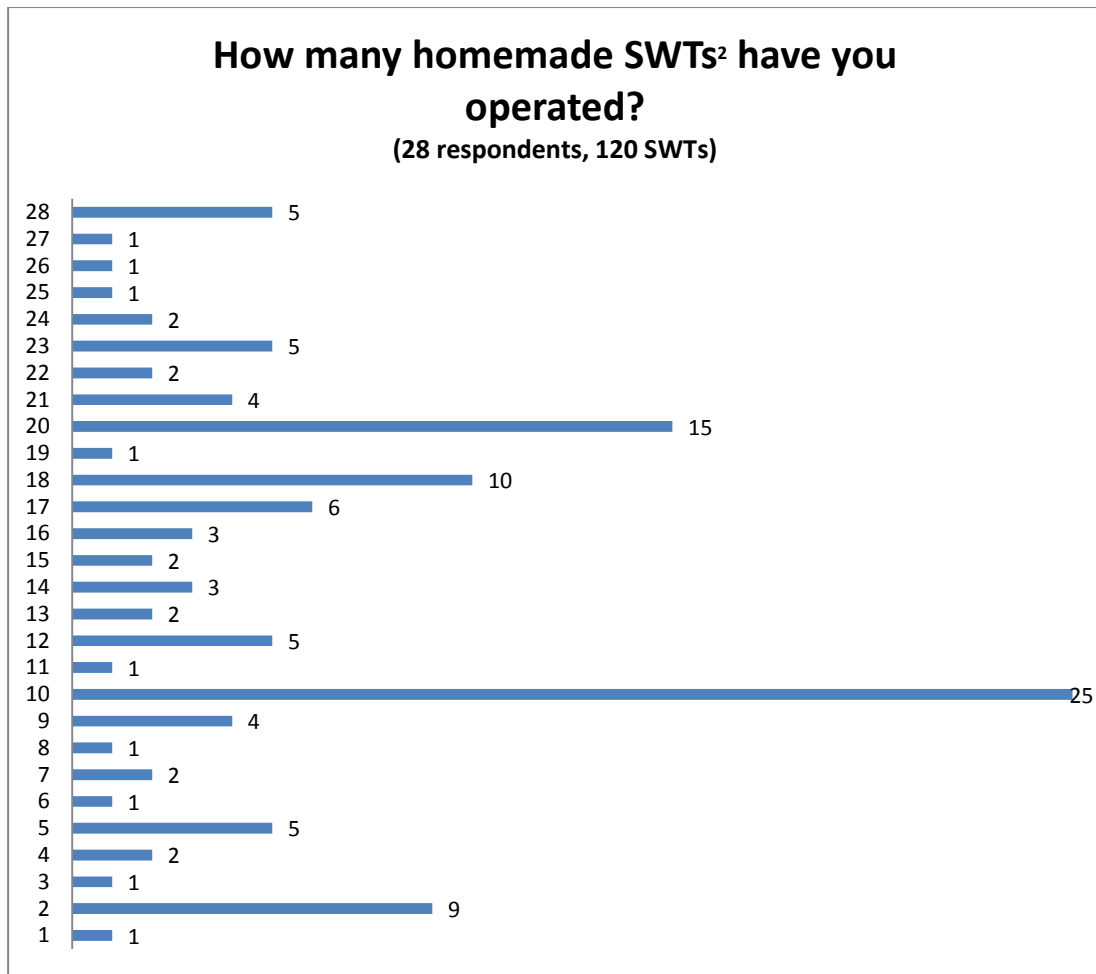
Ομάδα 2: Προφίλ ερωτώμενου



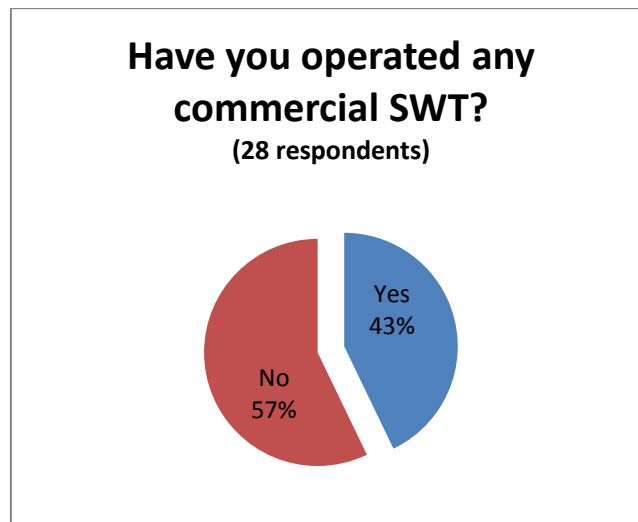
Σχήμα 3.5. Προφίλ ερωτώμενου



Σχήμα 3.6. Αριθμός τοπ. κατ. μικρών α/γ που έχουν κατασκευαστεί με διαφορετικά εγχειρίδια ή χωρίς

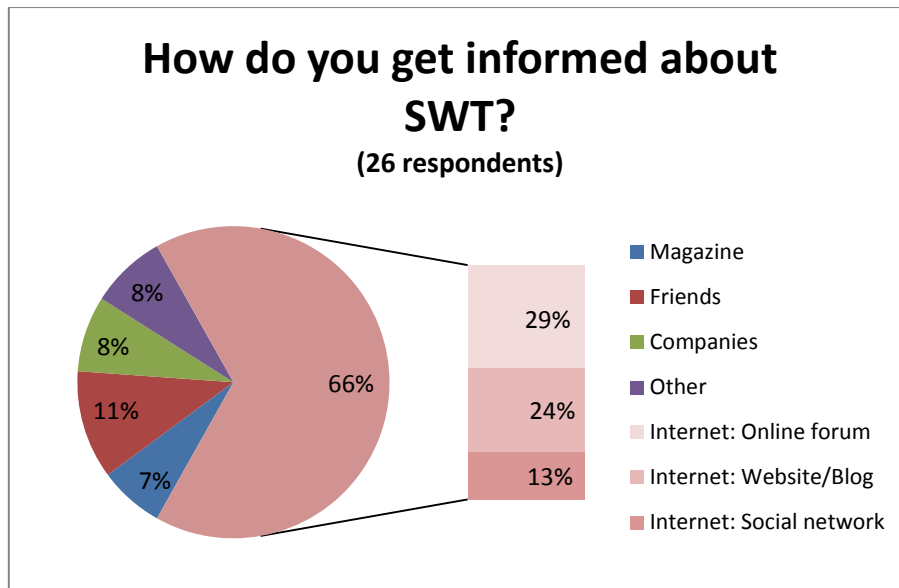


Σχήμα 3.7. Αριθμός τοπ. κατ. μικρών α/γ που έχει λειτουργήσει ο κάθε ερωτούμενος



Σχήμα 3.8. 'Έχεις λειτουργήσει κάποια εμπορική α/γ;'

² Small Wind Turbines



Σχήμα 3.9. 'Πώς ενημερώνεσαι σχετικά με τις μικρές ανεμογεννήτριες;'

Στη δεύτερη ομάδα οι ερωτήσεις αφορούν πιο συγκεκριμένα το πώς σχετίζεται ο κάθε ερωτώμενος με το θέμα που μελετάμε. Το 94% των ερωτώμενων έχουν κατασκευάσει και το 90% έχουν λειτουργήσει οι ίδιοι μία τοπικά κατασκευασμένη μικρή α/γ, ενώ το 84% έχουν εμπειρία και στην κατασκευή και στη λειτουργία.

Διαπιστώνουμε επίσης ότι από αυτούς που έχουν εμπειρία στην κατασκευή:

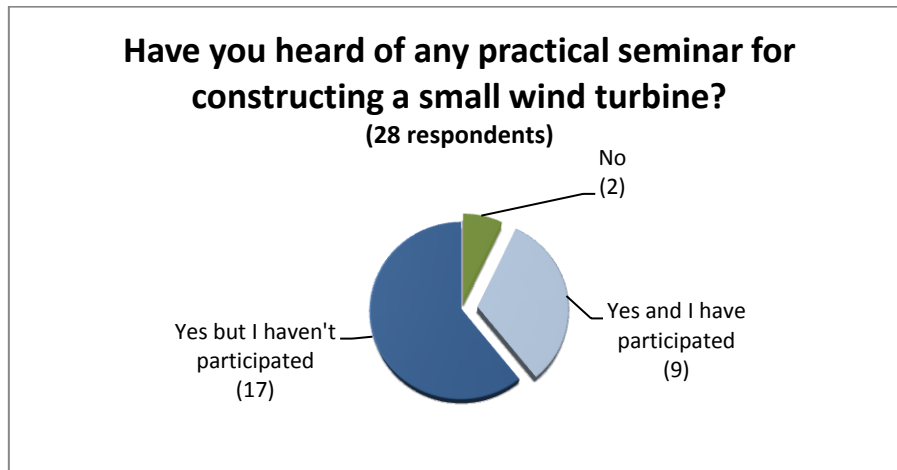
- σχεδόν όλοι (83%) έχουν κατασκευάσει περισσότερες από μία ανεμογεννήτριες
- το 77% έχει κατασκευάσει τουλάχιστον μία ανεμογεννήτρια βάσει του σχεδίου του Hugh Piggott
- πολλοί είναι και αυτοί (67%) που έχουν κατασκευάσει α/γ με δικό τους σχέδιο.

Μία ενδιαφέρουσα (και αναμενόμενη) παρατήρηση είναι ότι από τις 200 α/γ που έχουν κατασκευαστεί από τους ερωτώμενους, οι 135 βασίζονται στο σχέδιο του Hugh Piggott.

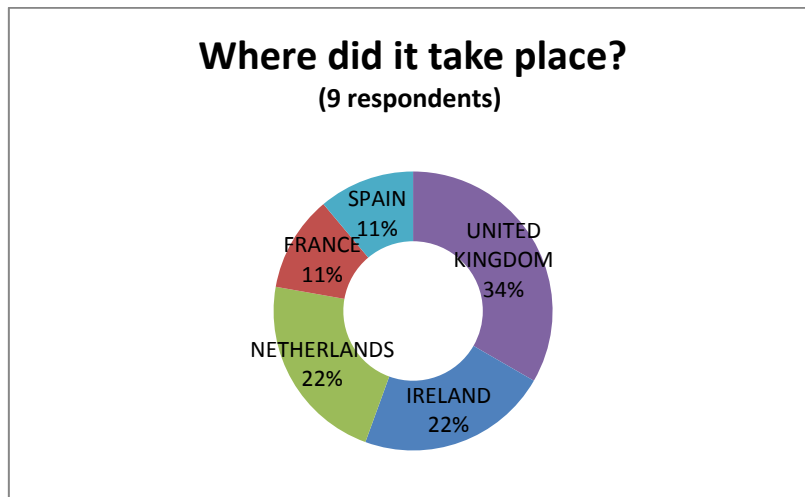
Επίσης, παρατηρούμε ότι από όσους έχουν εμπειρία στη λειτουργία τοπ. κατ. μικρών α/γ, το 68% έχει λειτουργήσει πάνω από μία τέτοια α/γ, ενώ το 43% έχει λειτουργήσει και κάποια εμπορική α/γ.

Τέλος, η κύρια πηγή πληροφόρησης σχετικά με τις μικρές α/γ είναι το διαδίκτυο σε ποσοστό 66% και ακολουθούν οι φίλοι με 11%.

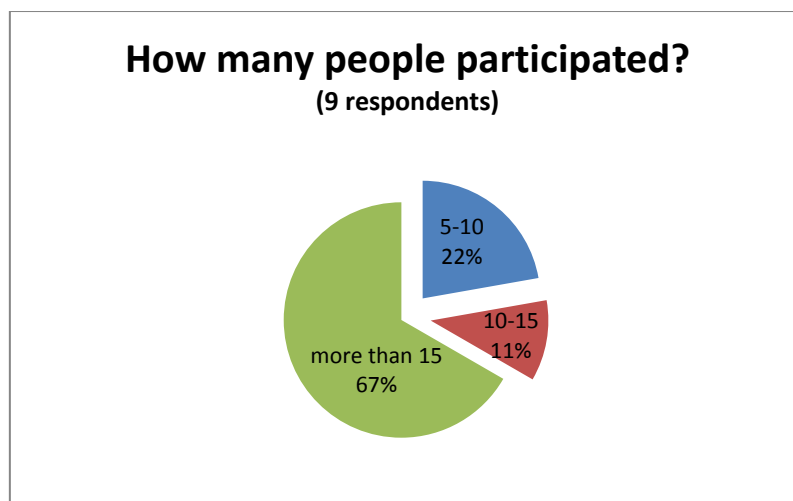
Ομάδα 3: Συμμετοχή σε σεμινάρια



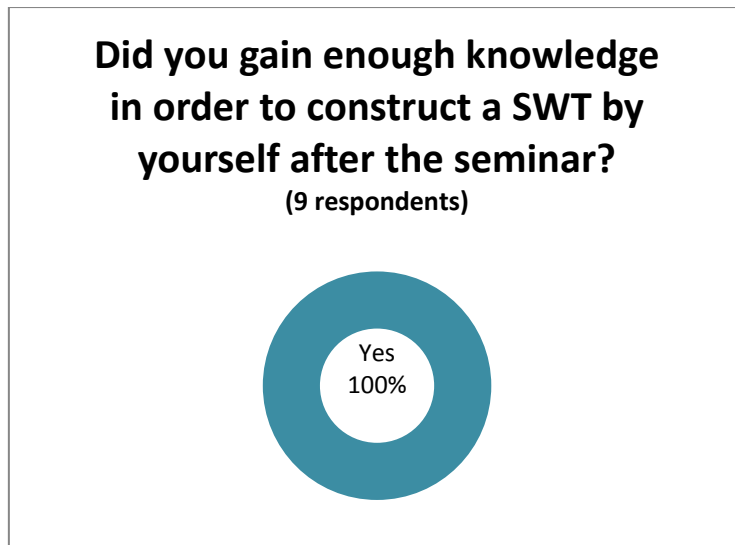
Σχήμα 3.10. 'Έχεις ακούσει για κάποιο πρακτικό σεμινάριο κατασκευής μικρής α/γ;'



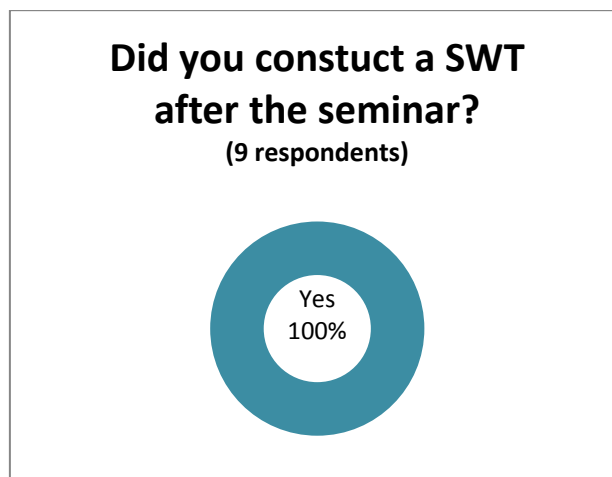
Σχήμα 3.11. 'Που πραγματοποιήθηκε;'



Σχήμα 3.12. 'Πόσα άτομα συμμετείχαν;'



Σχήμα 3.13. ‘Απέκτησες αρκετή γνώση για να κατασκευάσεις ο ίδιος/η ίδια μία μικρή α/γ μετά το σεμινάριο;’

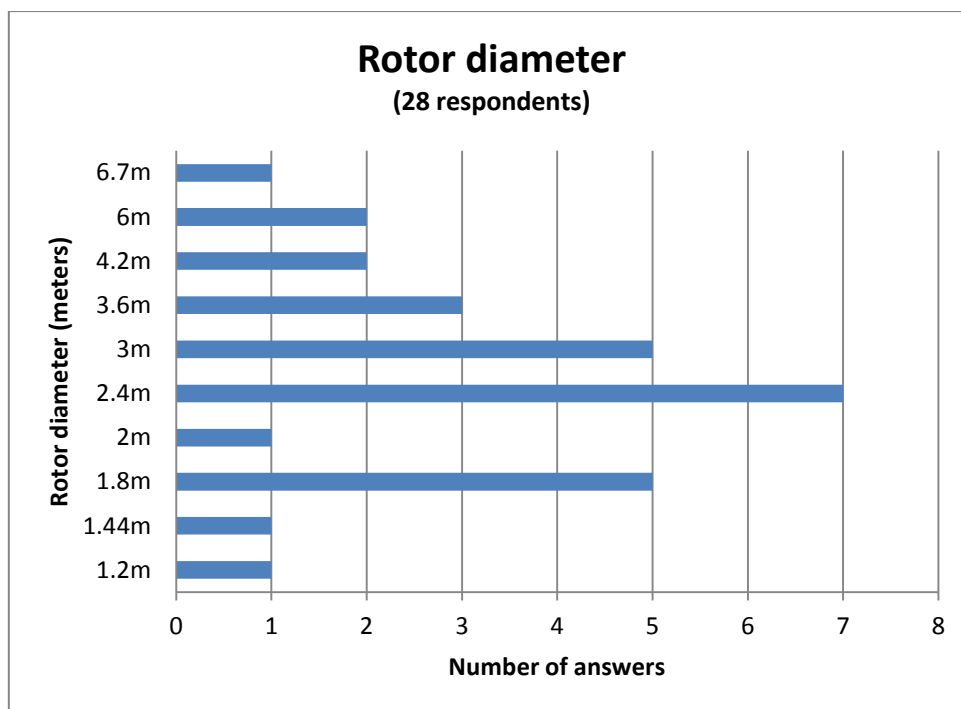


Σχήμα 3.14. ‘Κατασκεύασες κάποια μικρή α/γ μετά το σεμινάριο;’

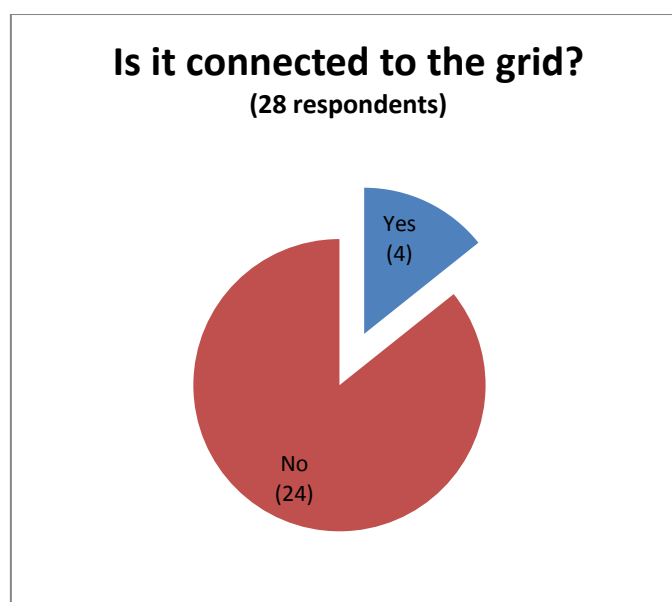
Αυτή η ομάδα ερωτήσεων αφορά τη συμμετοχή σε σεμινάρια κατασκευής μικρής ανεμογεννήτριας προκειμένου να διαπιστωθεί η συχνότητα, η εξέλιξη και η αποτελεσματικότητά τους. Το 93% των ερωτηθέντων έχει ακούσει για κάποιο σεμινάριο και το 32% έχει συμμετάσχει σε τουλάχιστον ένα. Επίσης, φαίνεται ότι τέτοια σεμινάρια οργανώνονται κυρίως στην Ευρώπη (9 στους 9 απάντησαν ότι το σεμινάριο διεξήχθη σε ευρωπαϊκή χώρα) και ότι έχουν αρκετά μεγάλο αριθμό συμμετεχόντων (το 67% δηλώνει συμμετοχή πάνω από 15 ατόμων). Τέλος, όλοι δηλώνουν ότι το σεμινάριο τους παρείχε τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες για να κατασκευάσουν οι ίδιοι μία μικρή ανεμογεννήτρια, κάτι που όντως έκαναν στη συνέχεια.

Οι επόμενες ερωτήσεις αφορούν μία συγκεκριμένη α/γ που έχει κατασκευάσει ή/και λειτουργήσει ο κάθε ερωτώμενος.

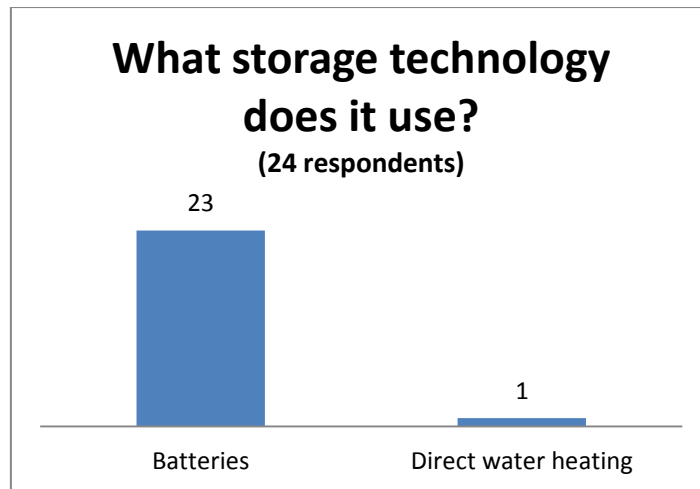
Ομάδα 4: Βασικά χαρακτηριστικά της μικρής ανεμογεννήτριας



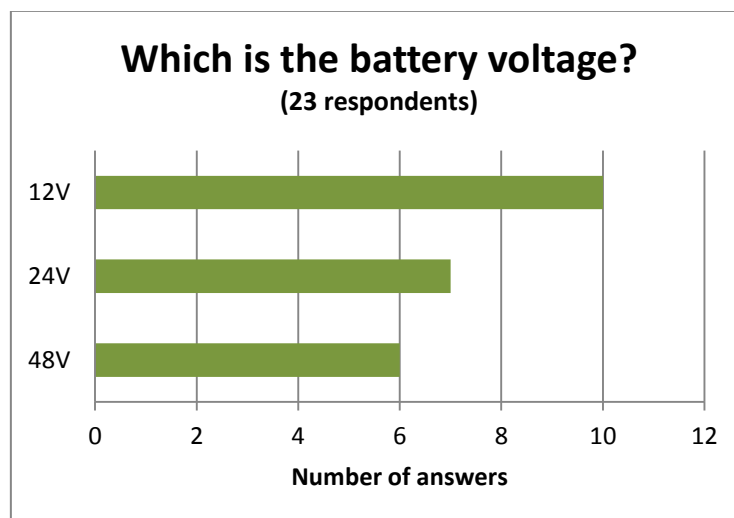
Σχήμα 3.15. Διάμετρος φτερωτής



Σχήμα 3.16. 'Είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο;'

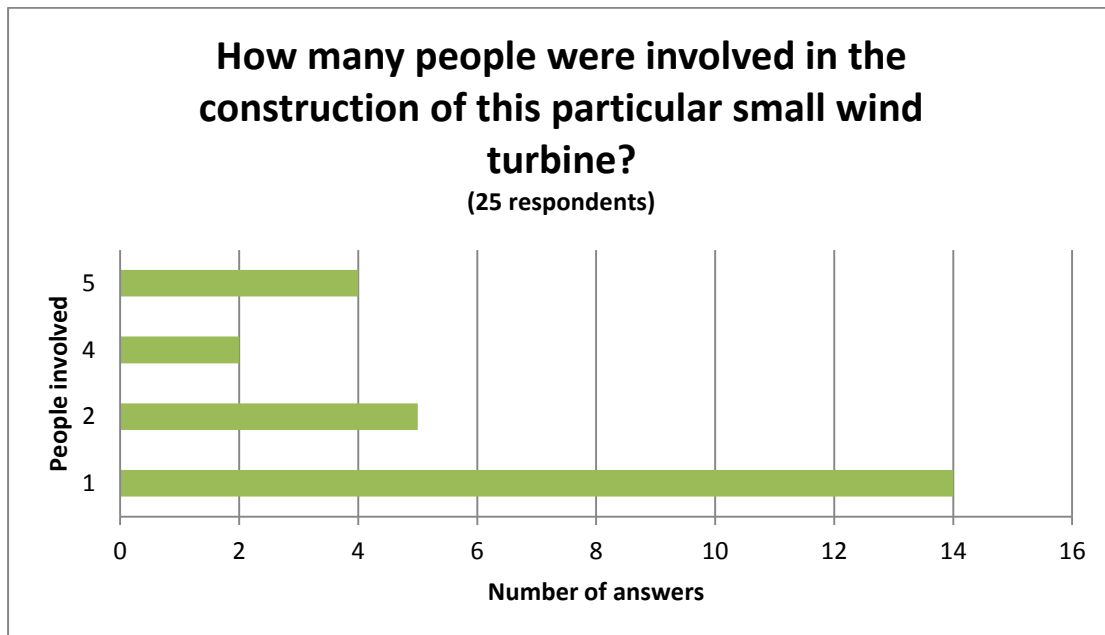


Σχήμα 3.17. ‘Τι τεχνολογία αποθήκευσης χρησιμοποιεί;’

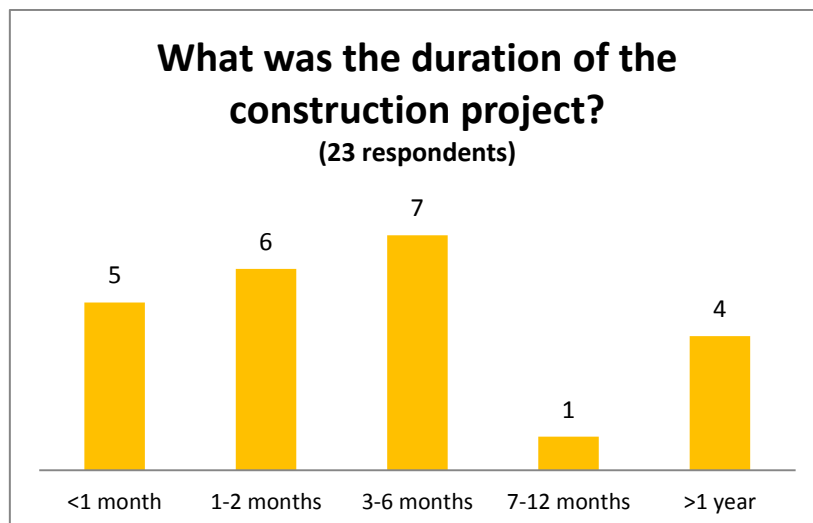


Σχήμα 3.18. ‘Ποια είναι η τάση της μπαταρίας;’

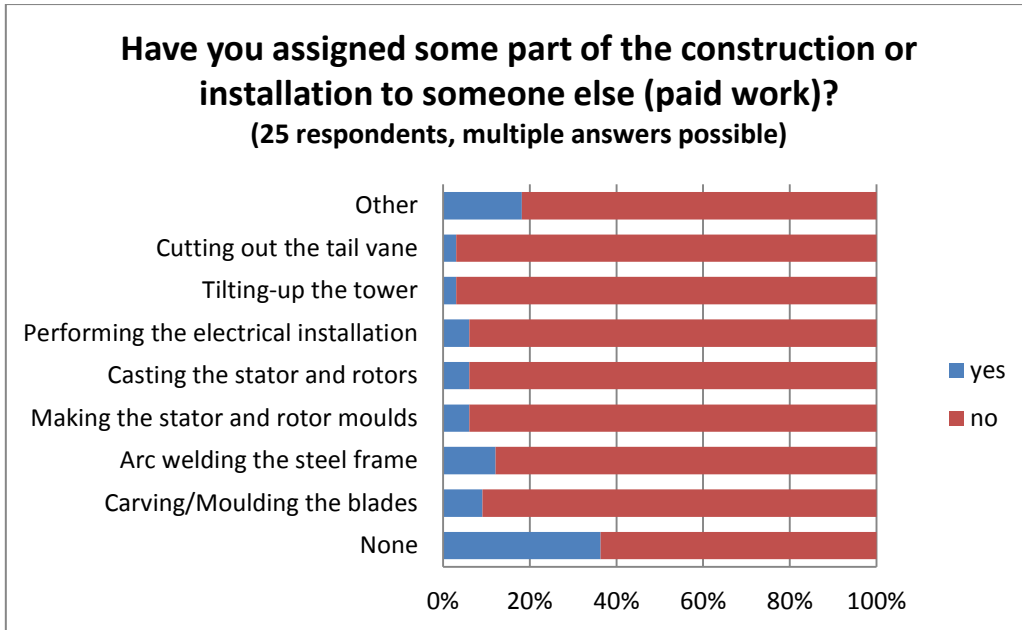
Σε αυτή την ομάδα ερωτήσεων ζητούνται τα βασικά χαρακτηριστικά της μικρής ανεμογεννήτριας που θα περιγράψει στη συνέχεια ο ερωτώμενος. Καταγράφονται συνολικά 28 α/γ οι οποίες έχουν ακτίνες φτερωτής από 1.2 έως 6.7 μέτρα. Από αυτές μόνο οι 4 είναι συνδεδεμένες σε δίκτυο, ενώ οι υπόλοιπες (εκτός από 1) χρησιμοποιούν συσσωρευτές για την αποθήκευση της ενέργειας.



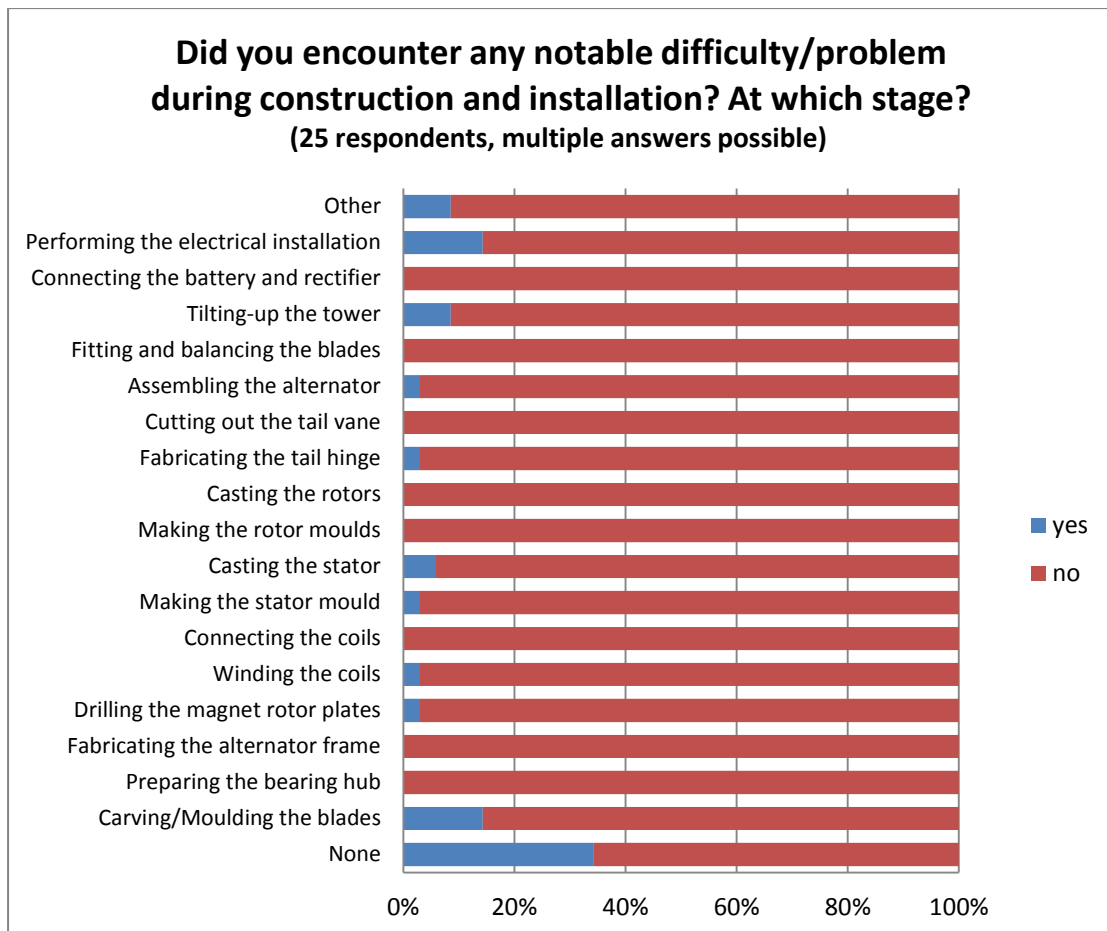
Σχήμα 3.19. 'Πόσα άτομα συμμετείχαν στην κατασκευή της συγκεκριμένης μικρής α/γ;'



Σχήμα 3.20. 'Ποια ήταν η χρονική διάρκεια της κατασκευής;'



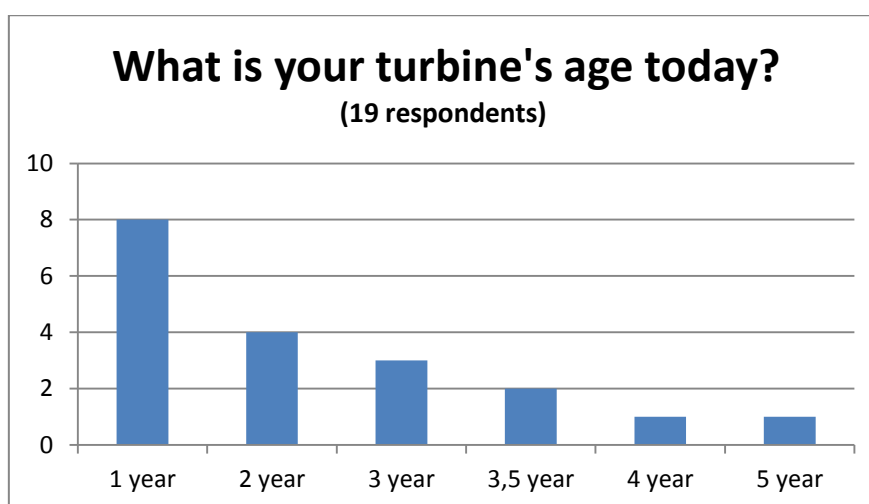
Σχήμα 3.21. ‘Ανέθεσες κάποιο μέρος της κατασκευής/εγκατάστασης σε κάποιον άλλο (επί πληρωμή);’



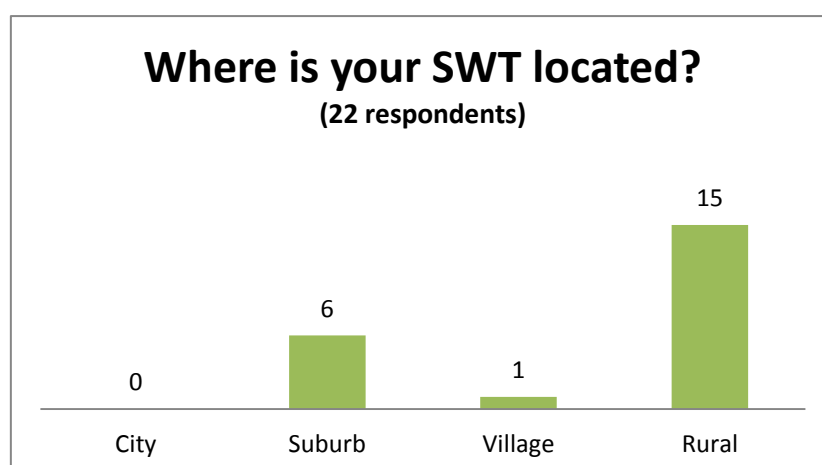
Σχήμα 3.22. ‘Συνάντησες κάποια σημαντική δυσκολία κατά την κατασκευή και την εγκατάσταση; Σε ποιο στάδιο;’

Οι ερωτήσεις αυτές αφορούν τη διαδικασία κατασκευής της μικρής ανεμογεννήτριας. Στην κατασκευή συμμετείχαν από 1 έως 5 άτομα αν και το 56% κατασκευάστηκε από 1 μόνο άτομο. Το 78% των ανεμογεννητριών κατασκευάστηκαν σε λιγότερο από 6 μήνες και το 48% σε λιγότερο από 2 μήνες. Επίσης, 36% των ερωτηθέντων δηλώνει ότι δεν πλήρωσε εξωτερική εργασία σε κανένα στάδιο της κατασκευής και της εγκατάστασης. Τέλος, οι δυσκολίες που συναντήθηκαν αφορούν κυρίως την κατασκευή των πτερυγίων και την εκτέλεση της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

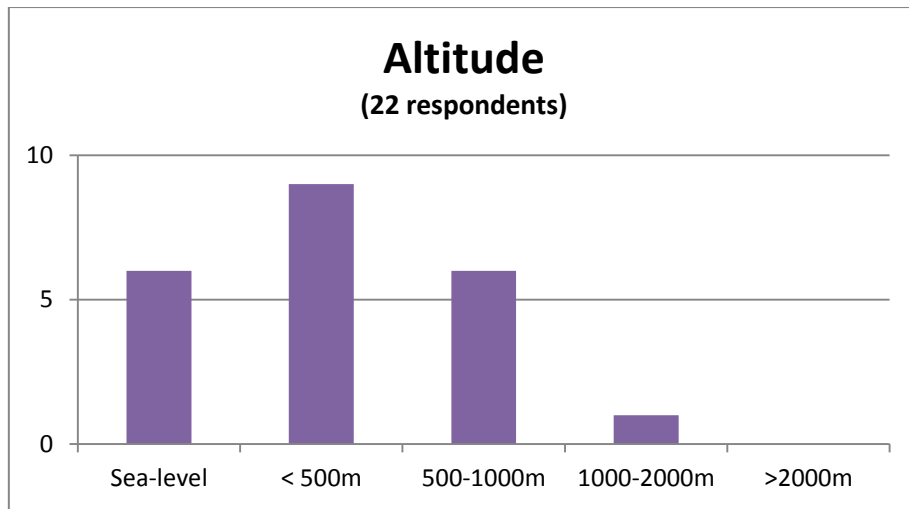
Ομάδα 6: Η λειτουργία της μικρής ανεμογεννήτριας



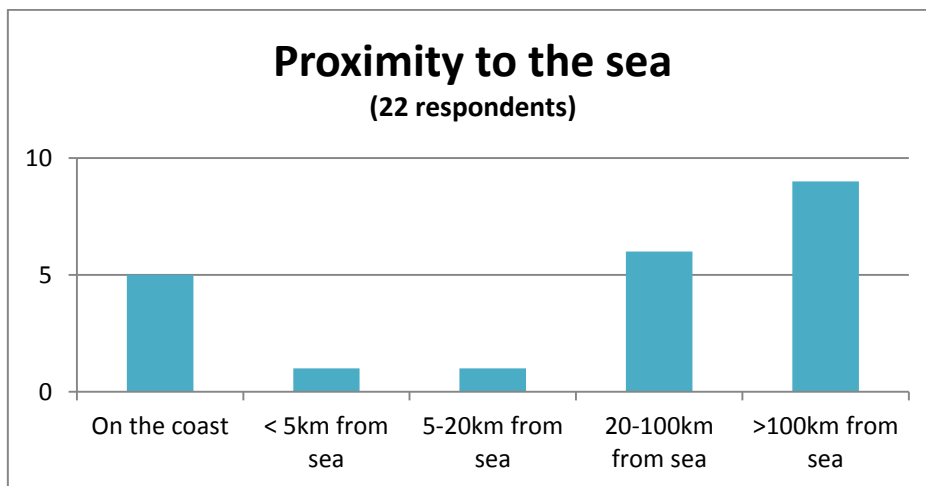
Σχήμα 3.23. 'Τι ηλικία έχει η α/γ σήμερα;'



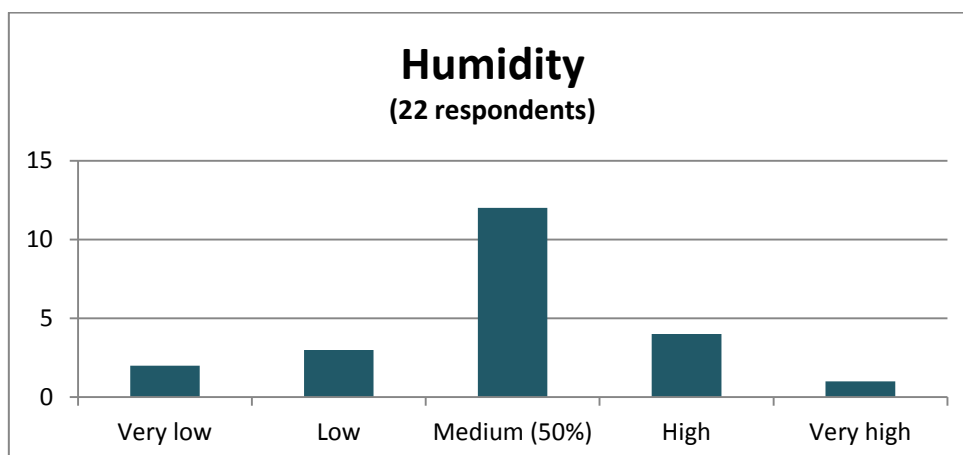
Σχήμα 3.24. 'Που είναι εγκατεστημένη η α/γ;'



Σχήμα 3.25. Υψόμετρο



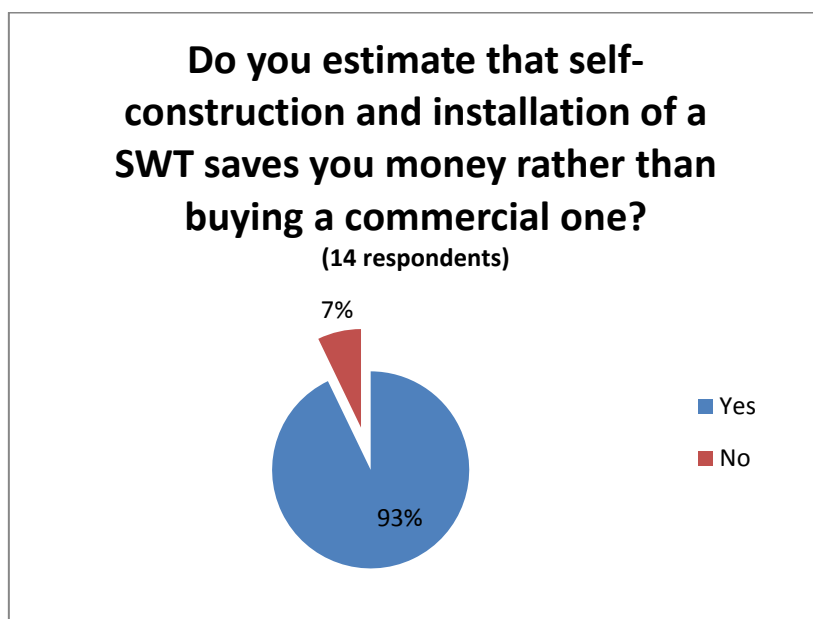
Σχήμα 3.26. Εγγύτητα στη θάλασσα



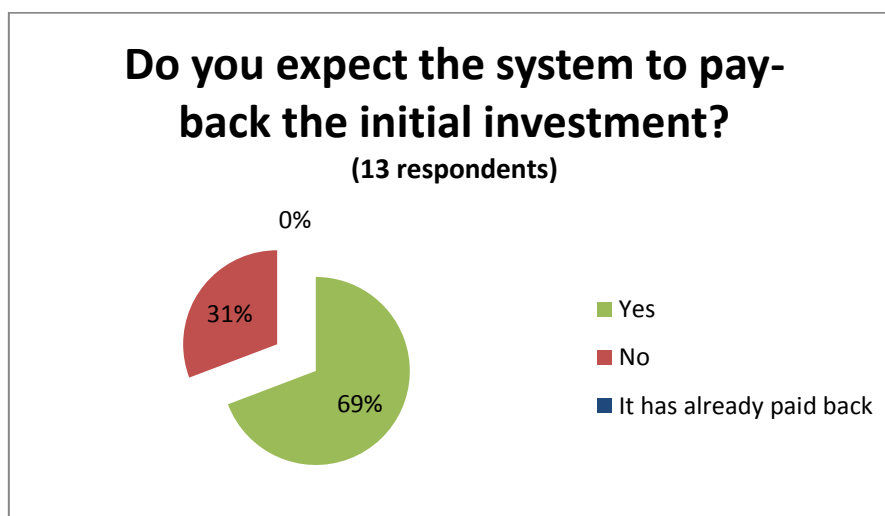
Σχήμα 3.27. Υγρασία

Οι περισσότερες απαντήσεις αφορούν σε ανεμογεννήτριες ηλικίας 1 έτους. Το 68% είναι εγκατεστημένες σε αγροτικές περιοχές, ενώ καμία δε βρίσκεται μέσα σε πόλη. Οι περιοχές εγκατάστασης κατά πλειοψηφία έχουν υψόμετρο από 0-1000m, ποσοστό υγρασίας γύρω στο 50% και διάφορες αποστάσεις από τη θάλασσα.

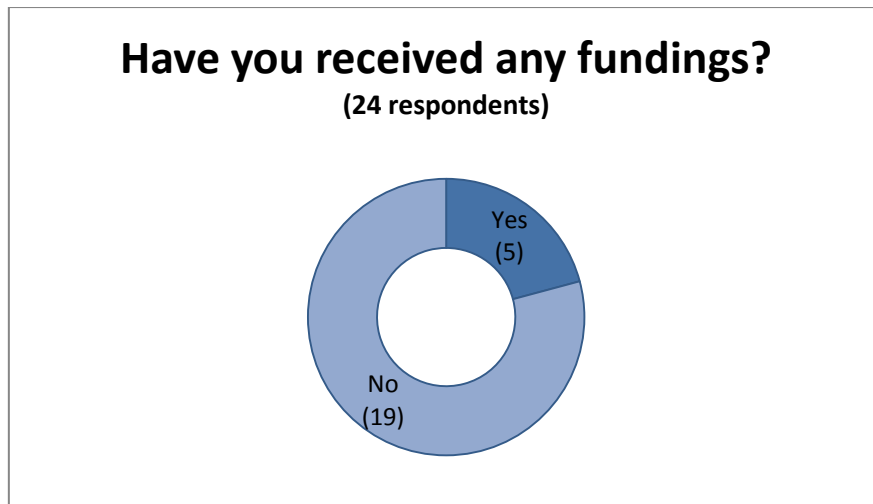
Ομάδα 7: Κόστος κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας



Σχήμα 3.28. ‘Εκτιμάς ότι εξοικονομείς χρήματα κατασκευάζοντας και εγκαθιστώντας ο ίδιος μία μικρή α/γ σε σχέση με το να αγοράσεις μία εμπορική;’



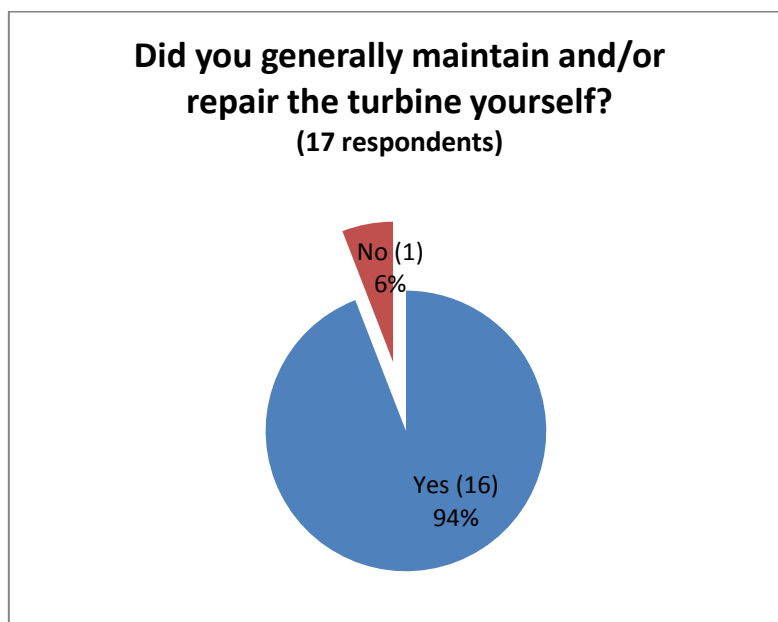
Σχήμα 3.29. ‘Προσδοκείς ότι το σύστημα θα αποσβέσει την αρχική επένδυση;’



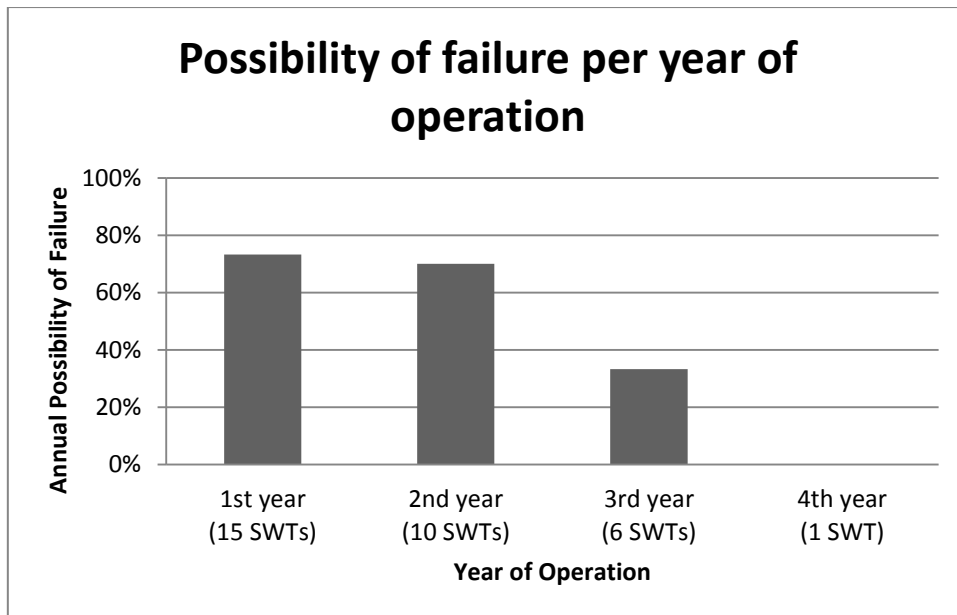
Σχήμα 3.30. ‘Έχεις λάβει κάποια χρηματοδότηση;’

Σχεδόν όλοι οι ερωτώμενοι (93%) πιστεύουν ότι η κατασκευή και εγκατάσταση μίας μικρής ανεμογεννήτριας από τους ίδιους είναι πιο οικονομική σε σχέση με την αγορά μίας αντίστοιχης εμπορικής. Από την άλλη, μόνο το 69% πιστεύει ότι θα αποσβέσει την αρχική του επένδυση. Τέλος, μόνο 5 από τους 24 έχουν λάβει κάποια επιδότηση (κρατική, πανεπιστημιακή, εταιρική, κ.α.).

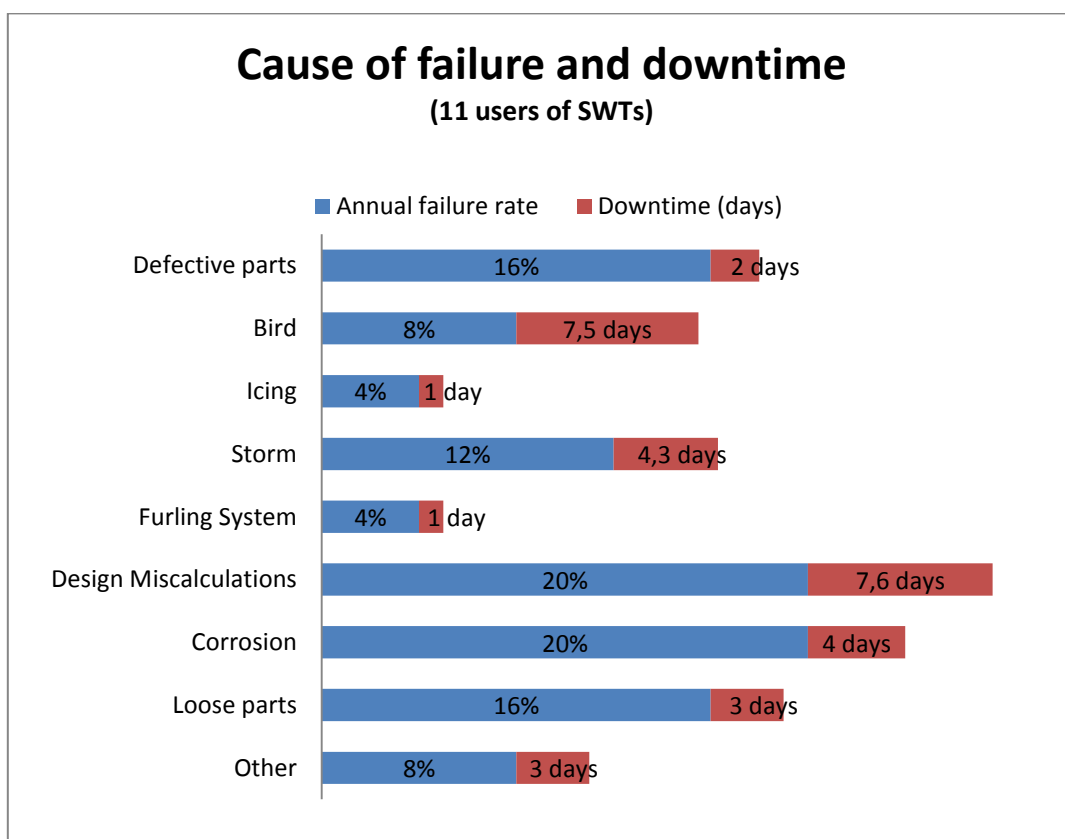
Ομάδα 8: Βλάβες και συντήρηση



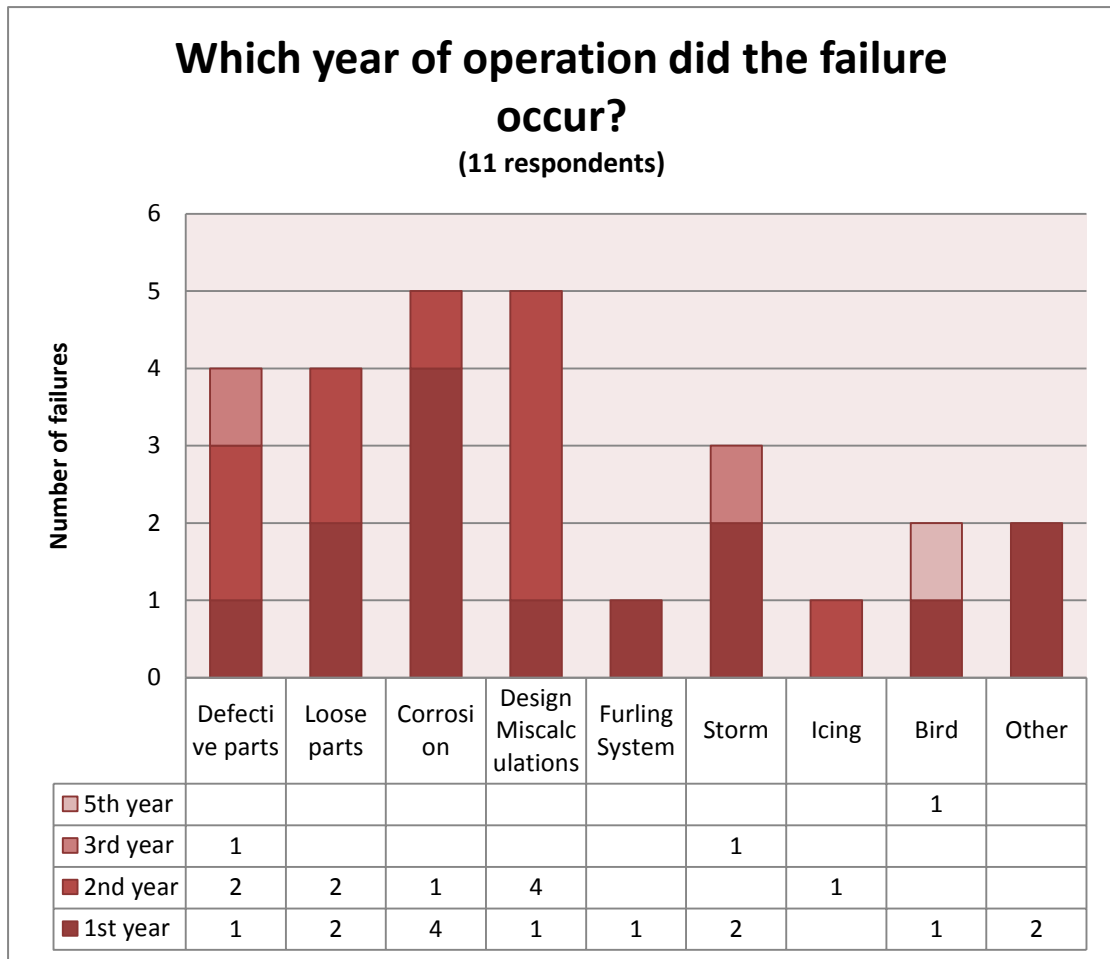
Σχήμα 3.31. ‘Ανέλαβες ο ίδιος/η ίδια τη συντήρηση και επισκευή της ανεμογεννήτριας;’



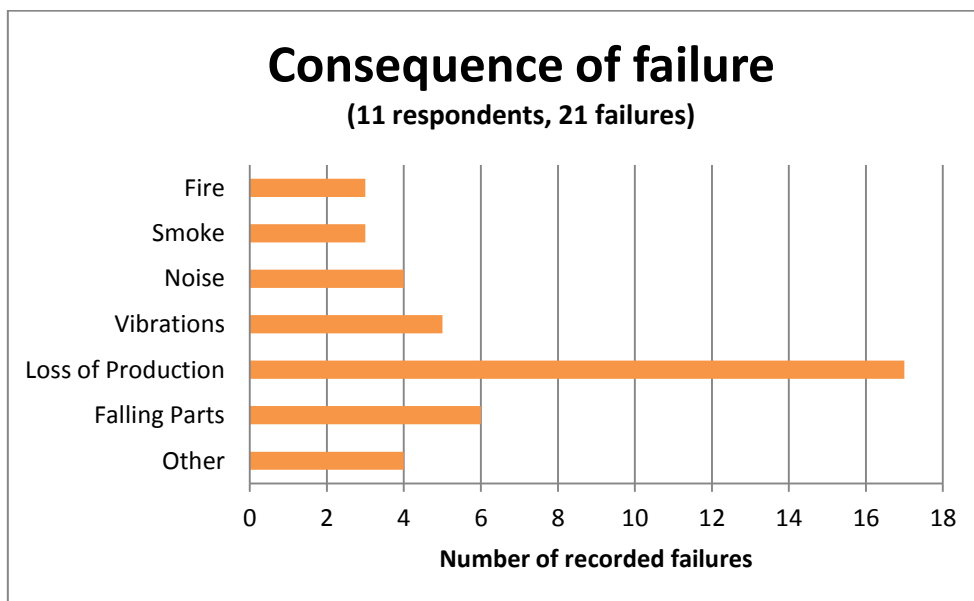
Σχήμα 3.32. Πιθανότητα βλάβης ανά έτος λειτουργίας



Σχήμα 3.33. Αίτιο βλάβης και χρόνος διακοπής



Σχήμα 3.34. Αριθμός βλαβών ανά έτος λειτουργίας της α/γ και ανά αίτιο βλάβης

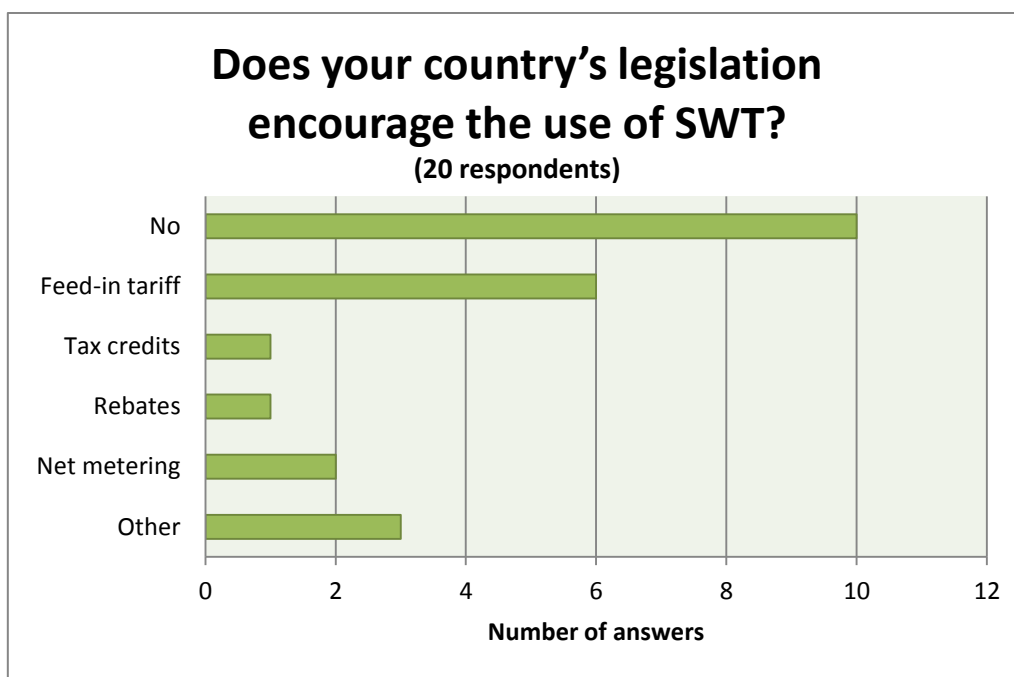


Σχήμα 3.35. Συνέπεια της βλάβης

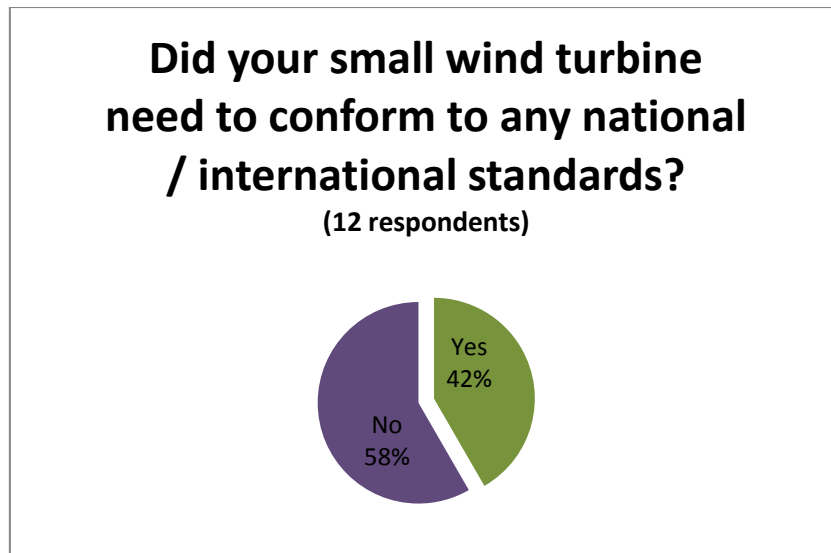
Μία εντυπωσιακή αλλά ταυτόχρονα αναμενόμενη διαπίστωση είναι ότι 16 στους 17 ερωτώμενους συντηρούν και επισκευάζουν οι ίδιοι τη μικρή α/γ. Επίσης, στο σχήμα 3.32 βλέπουμε ότι η πιθανότητα βλάβης είναι ιδιαίτερα υψηλή τα δύο πρώτα χρόνια λειτουργίας της α/γ (73.3% τον πρώτο χρόνο και 70% το δεύτερο). Στη συνέχεια εξετάζονται οι αιτίες μιας βλάβης σε σχέση με το χρόνο διακοπής. Παρατηρούμε ότι οι πιο συχνά εμφανιζόμενες αιτίες είναι οι λανθασμένοι υπολογισμοί κατά τη σχεδίαση και η διάβρωση των μαγνητών, με ετήσια πιθανότητα εμφάνισης 20%.

Στο Σχήμα 3.34, βλέπουμε ότι για τις βλάβες που συμβαίνουν κατά το πρώτο έτος λειτουργίας της α/γ η βασική αιτία είναι η διάβρωση των μαγνητών. Τέλος, οι συνέπειες των σφαλμάτων είναι διάφορες, αλλά τα περισσότερα (17 από τα 21) οδηγούν και σε απώλεια της παραγωγής της ανεμογεννήτριας.

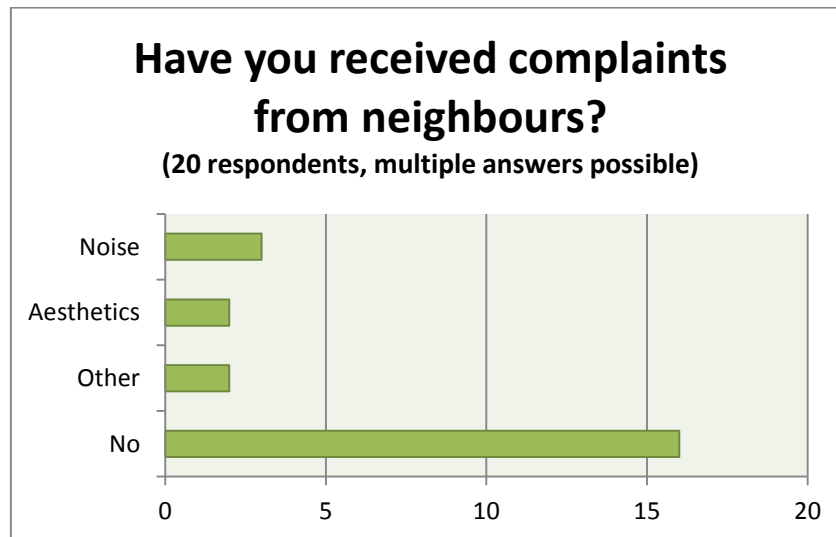
Ομάδα 9: Νομικά θέματα και προβλήματα



Σχήμα 3.36. ‘Η νομοθεσία της χώρας σου ενθαρρύνει τη λειτουργία μικρής α/γ;



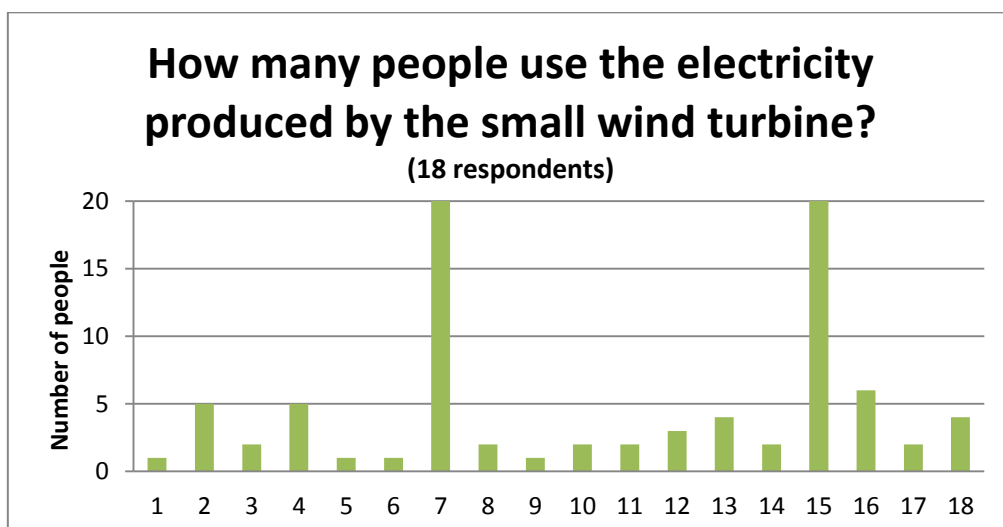
Σχήμα 3.37. ‘Έπρεπε η μικρή α/γ να ικανοποιεί κάποια εθνικά/διεθνή πρότυπα;’



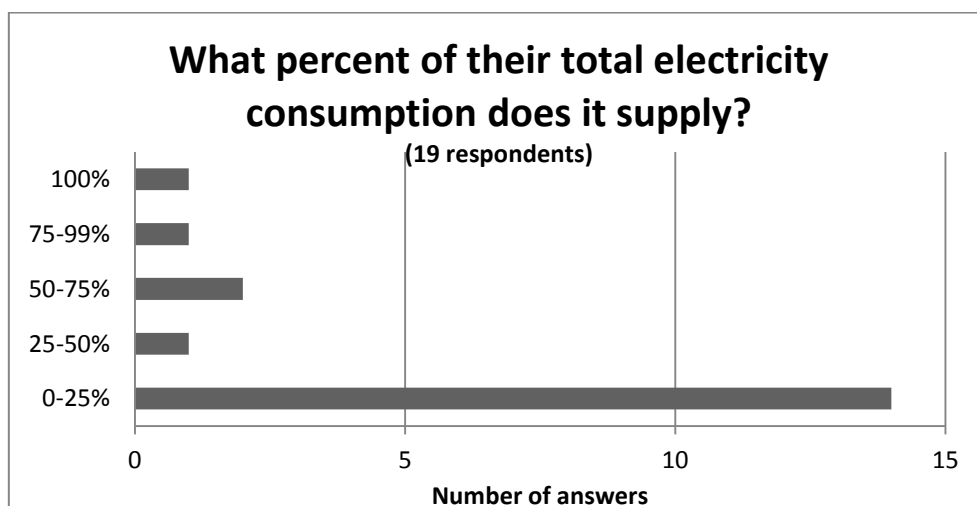
Σχήμα 3.38. ‘Έχεις δεχθεί παράπονα από γείτονες;’

Το 50% των ερωτηθέντων δηλώνει ότι η νομοθεσία στη χώρα τους δεν ενθαρρύνει τη λειτουργία μικρής α/γ. Επίσης, ένα ποσοστό 42% δηλώνει ότι η α/γ του έπρεπε να ικανοποιεί κάποιο εθνικό ή διεθνές πρότυπο. Τέλος, σε σχέση με τυχόν παράπονα από γείτονες, το 80% δηλώνει ότι δεν αντιμετωπίζει τέτοιο πρόβλημα, κάτι που είναι λογικό αφού είδαμε ότι οι περισσότερες από αυτές τις εγκαταστάσεις είναι αγροτικές.

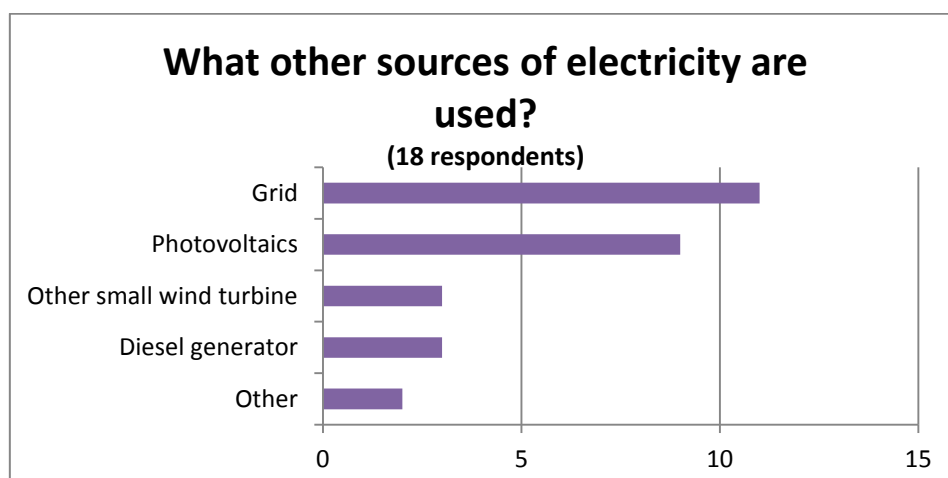
Ομάδα 10: Γενική αξιολόγηση της λειτουργίας της μικρής ανεμογεννήτριας



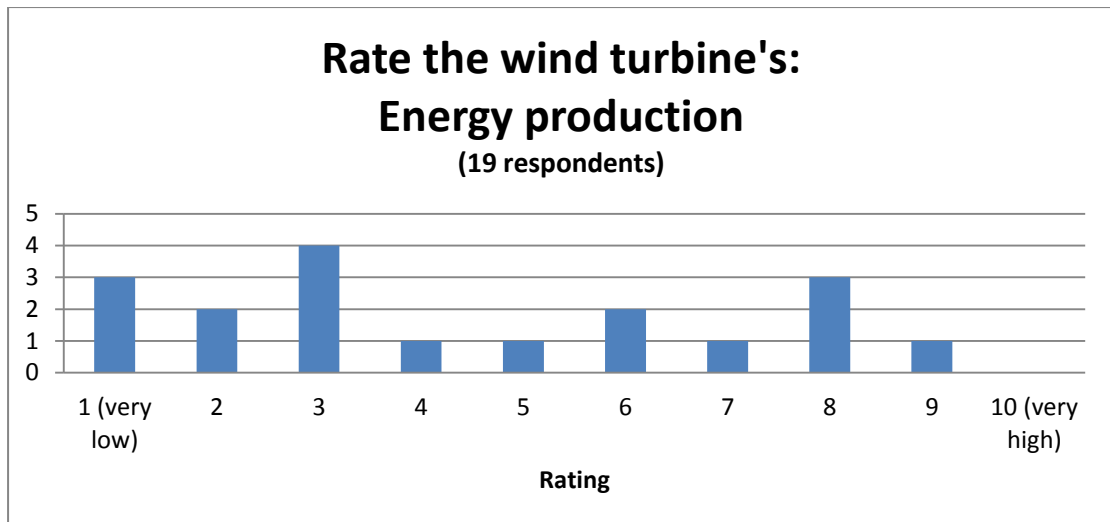
Σχήμα 3.39. 'Πόσοι άνθρωποι χρησιμοποιούν την ενέργεια που παράγεται από την α/γ;'



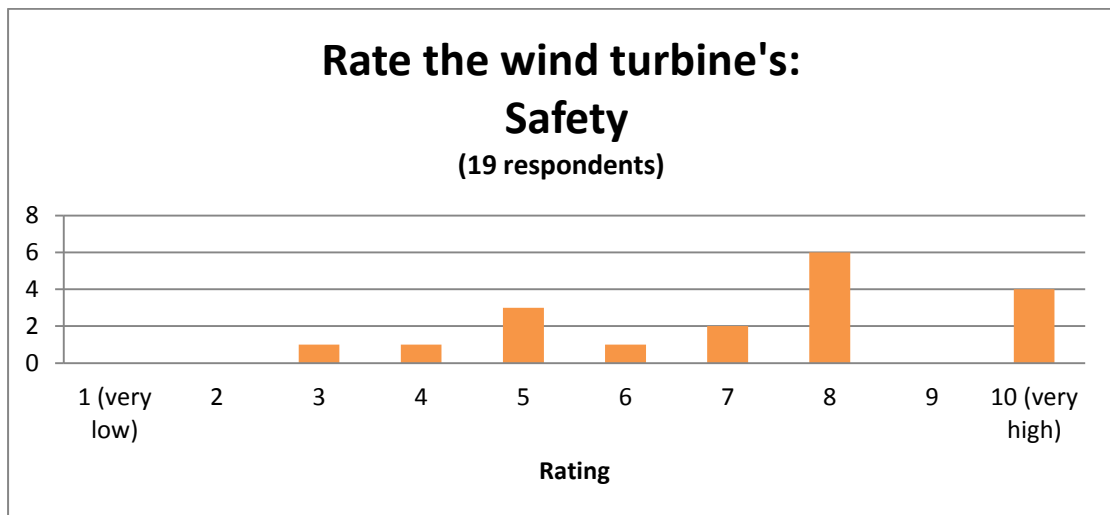
Σχήμα 3.40. 'Τι ποσοστό της συνολικής τους ηλεκτρικής κατανάλωσης παρέχει;'



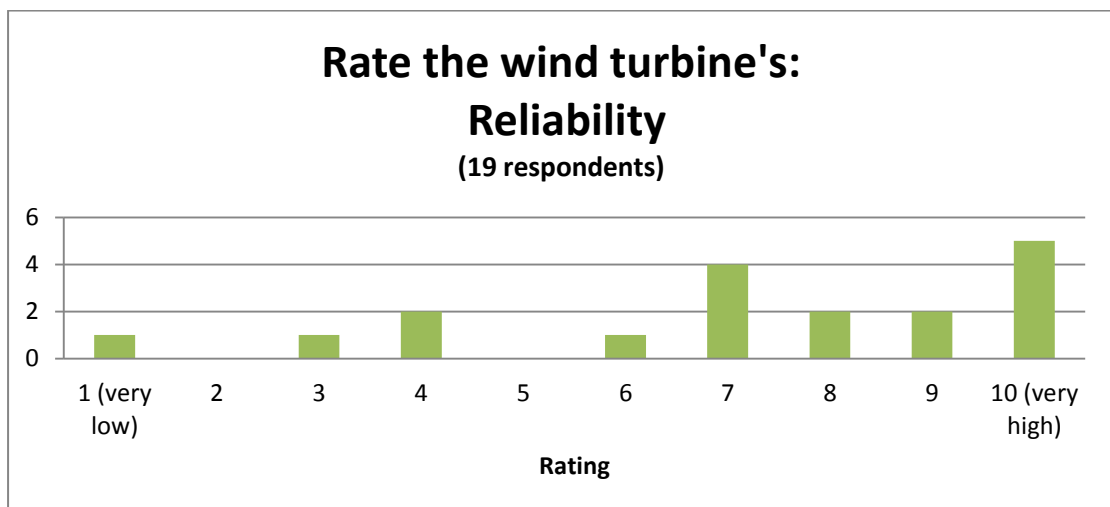
Σχήμα 3.41. 'Τι άλλες πηγές ηλεκτρισμού χρησιμοποιούνται;'



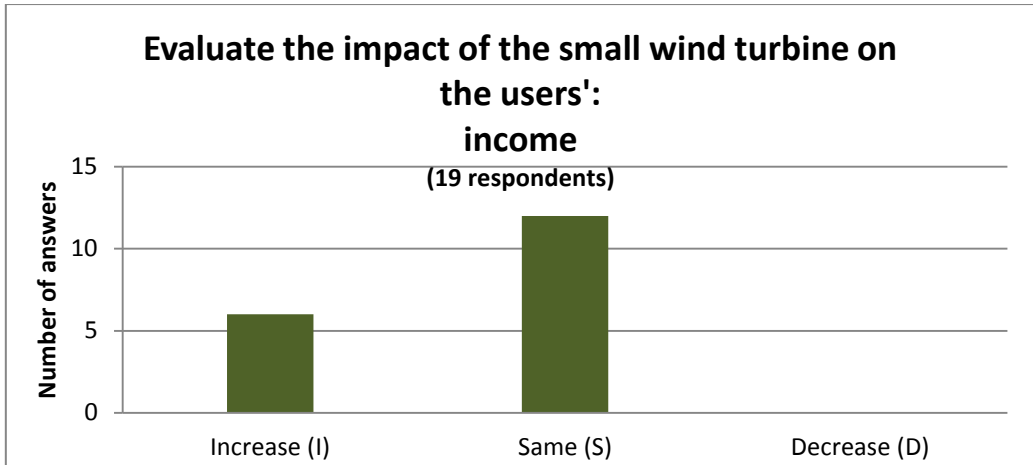
Σχήμα 3.42. Αξιολόγηση της ενεργειακής παραγωγής



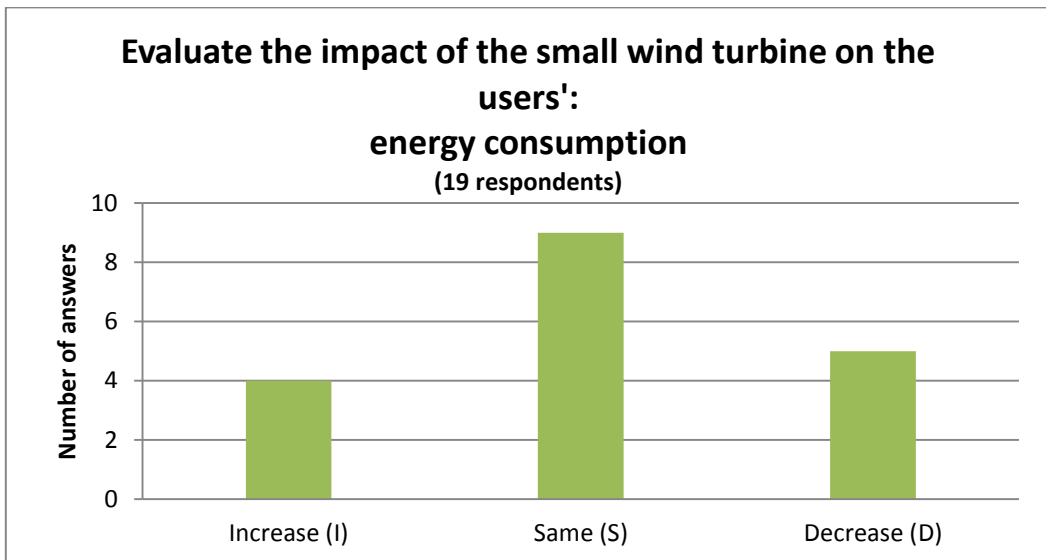
Σχήμα 3.43. Αξιολόγηση της ασφάλειας



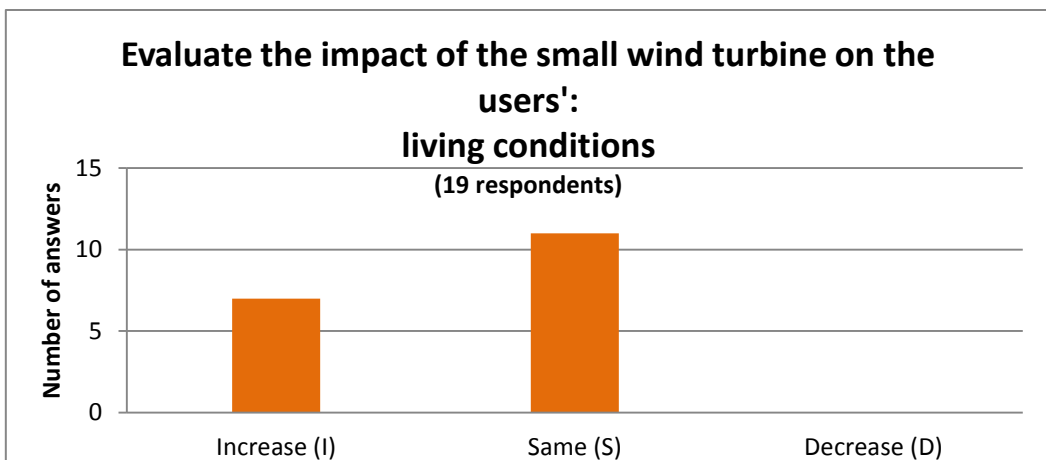
Σχήμα 3.44. Αξιολόγηση της αξιοπιστίας



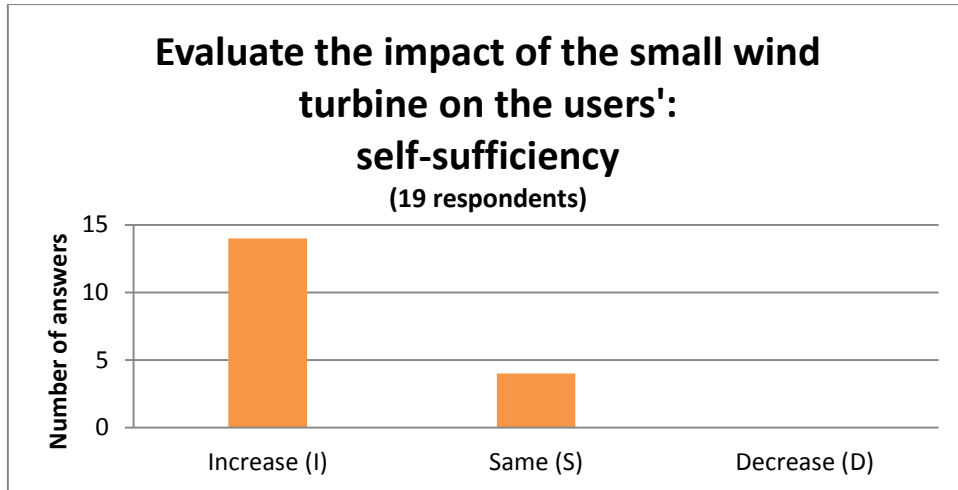
Σχήμα 3.45. Επίδραση στο εισόδημα των χρηστών



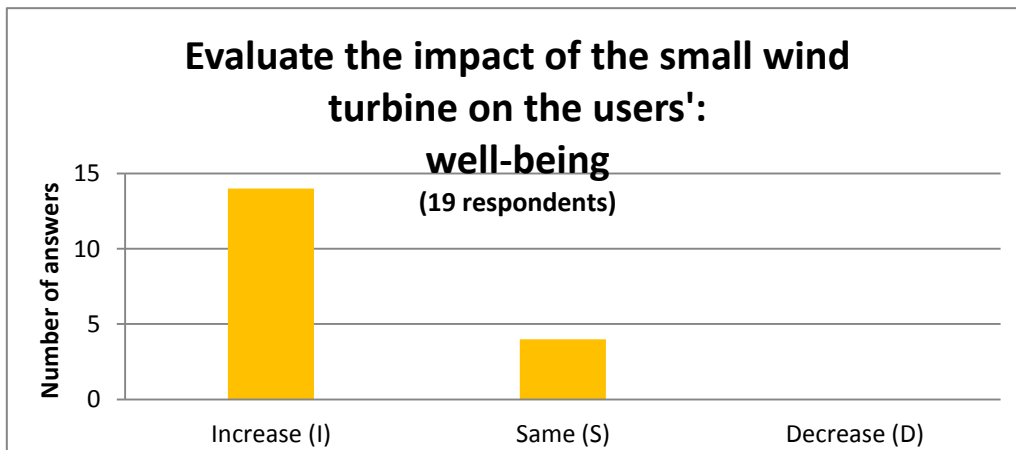
Σχήμα 3.46. Επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας των χρηστών



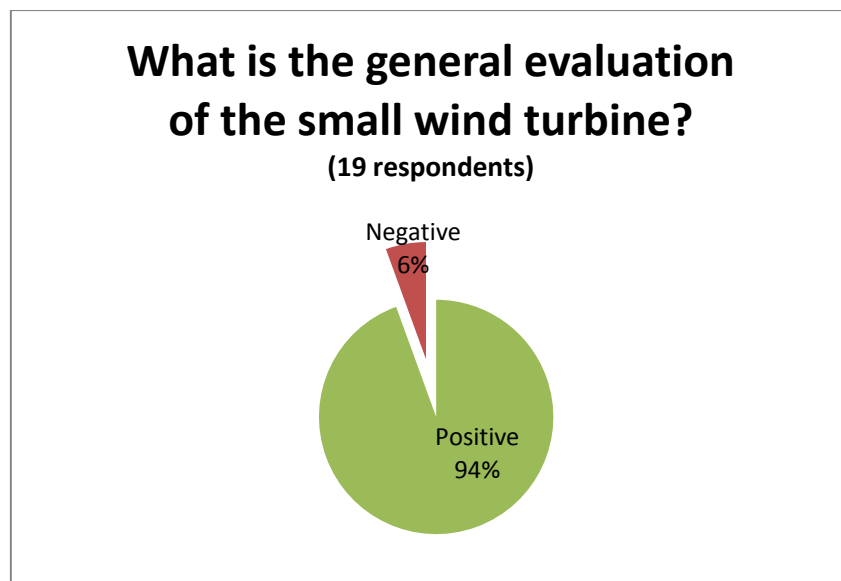
Σχήμα 3.47. Επίδραση στις συνθήκες διαβίωσης των χρηστών



Σχήμα 3.48. Επίδραση στην αυτάρκεια των χρηστών



Σχήμα 3.49. Επίδραση στην ευεξία των χρηστών



Σχήμα 3.50. 'Ποια είναι η γενική αξιολόγηση της μικρής ανεμογεννήτριας;'

Στην τελευταία ομάδα ερωτήσεων γίνεται μια γενική αξιολόγηση από την εμπειρία λειτουργίας της μικρής α/γ. Το 72% των ερωτηθέντων δηλώνει ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται από 1-4 άτομα. Επίσης, οι περισσότεροι (74%) υπολογίζουν ότι η ηλεκτρική ενέργεια αυτή αποτελεί ένα ποσοστό 0-25% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνουν. Συμπληρωματικά, φαίνεται ότι χρησιμοποιούνται κυρίως το δίκτυο και φωτοβολταϊκά.

Στη συνέχεια αξιολογείται η α/γ ως προς κάποια χαρακτηριστικά και φαίνεται ότι γενικά οι χρήστες είναι ικανοποιημένοι από την αξιοπιστία και την ασφάλεια της μικρής α/γ, αλλά όχι και τόσο από την ενεργειακή της παραγωγή. Στα Σχήματα 3.45. – 3.49. εκτιμάται η επίδραση της μικρής α/γ στο εισόδημα, την κατανάλωση ενέργειας, τις συνθήκες διαβίωσης, την αυτάρκεια και την ευεξία των χρηστών. Σε όλους αυτούς τους παράγοντες φαίνεται ότι η επίδραση είναι θετική και ιδιαίτερα στην αυτάρκεια και την ευεξία. Τέλος, στην ερώτηση 'Ποια είναι η γενική αξιολόγηση για τη μικρή ανεμογεννήτρια' το 94% των ερωτηθέντων απαντάει 'Θετική'.

3.2.2. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι ερωτώμενοι έχουν μεγάλο βαθμό συμμετοχής σε όλα τα στάδια από την κατασκευή και την εγκατάσταση μέχρι τη λειτουργία και τη συντήρηση της μικρής ανεμογεννήτριας. Οι περισσότεροι έχουν κατασκευάσει και λειτουργήσει πάνω από μία μικρή α/γ και κάνουν οι ίδιοι συντήρηση και επισκευή σε περίπτωση βλάβης. Επίσης, αξιολογώντας οι ίδιοι τα εγχειρήματά τους δηλώνουν ικανοποιημένοι με την αυτάρκεια και την ευημερία που τους προσφέρει η μικρή α/γ, την ασφάλεια και την αξιοπιστία της αλλά λιγότερο με την ενεργειακή της παραγωγή.

Διαπιστώνεται ο σημαντικός ρόλος των πρακτικών σεμιναρίων κατασκευής μικρής α/γ για τη διάδοση της γνώσης και τη βιωματική μάθηση. Όλοι όσοι συμμετείχαν σε κάποιο τέτοιο σεμινάριο δήλωσαν ότι τους παρείχε γνώση και δεξιότητες ώστε να κατασκευάσουν και οι ίδιοι μία μικρή α/γ.

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εγχειρίδιο με το οποίο κατασκευάζονται σήμερα «homemade» μικρές α/γ είναι αυτό του Hugh Piggott, στο οποίο έχει βασιστεί σε αρκετά σημεία και η δική μας μελέτη. Οπότε υπάρχει ενδιαφέρον να επιχειρήσουμε να

βελτιστοποιήσουμε αυτές τις γεννήτριες ώστε να ικανοποιούν καλύτερα τις ανάγκες των χρηστών τους.

Η πλειοψηφία των μικρών α/γ που καταγράφηκαν δεν είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο και βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές.

Διαπιστώνεται ότι τα δύο πρώτα χρόνια λειτουργίας της μικρής α/γ η πιθανότητα να συμβεί κάποια βλάβη είναι ιδιαίτερα μεγάλη και ότι σχεδόν όλες οι βλάβες οδηγούν σε απώλεια της παραγωγής και ακινητοποίηση της α/γ. Επομένως, είναι σημαντικό να διερευνηθούν τα αίτια των βλαβών και η δυνατότητα αποφυγής τους.

Ένα βασικό πρόβλημα που φαίνεται να αντιμετωπίζουν αρκετοί χρήστες είναι αυτό της διάβρωσης των μαγνητών της γεννήτριας. Μαζί με τους λανθασμένους υπολογισμούς κατά τη σχεδίαση, αποτελεί το νούμερο 1 λόγο πρόκλησης βλάβης στις τοπικά κατασκευασμένες μικρές α/γ. Μάλιστα οι περισσότερες βλάβες λόγω διάβρωσης είναι πιθανόν να συμβούν ήδη από τον πρώτο χρόνο λειτουργίας της α/γ. Αυτή η διαπίστωση αποτελεί ένα επιπλέον κίνητρο για τη μελέτη άλλων μαγνητικών υλικών που θα μπορέσουν να αντικαταστήσουν τους «επίμαχους» μαγνήτες νεοδυμίου στις μηχανές μονίμων μαγνητών.

Μία πιθανή εναλλακτική μαγνητικού υλικού για τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών είναι οι κεραμικοί μαγνήτες/σκληροί φερρίτες, οι οποίοι και επιλέχθηκαν για την κατασκευή και μελέτη της γεννήτριας στην παρούσα εργασία. Στο εξής οι μαγνήτες αυτοί θα αναφέρονται απλά ως φερρίτες.

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση και διαστασιολόγηση ανεμογεννήτριας αξονικής ροής με φερρίτες

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε την πλήρη διαστασιολόγηση μιας ανεμογεννήτριας 850W με πτερύγια ακτίνας 1.2 m και με γεννήτρια αξονικής ροής με φερρίτες ως μαγνητικό υλικό.

Αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε φερρίτες βαθμού C8 καθώς έχουν καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες από τους μικρότερους βαθμούς, υπάρχουν σχετικά διαθέσιμοι στο εμπόριο και έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη στην κατασκευή μικρών ανεμογεννητριών με σχέδιο του Hugh Piggott αλλά και με άλλα ερασιτεχνικά σχέδια.

Ένας από τους σκοπούς αυτής της εργασίας είναι να μελετηθεί η γεννήτρια με φερρίτες συγκριτικά με μία γεννήτρια αξονικής ροής με μαγνήτες νεοδυμίου, που είχε κατασκευαστεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής [8]. Για αυτό το σκοπό δεν κρίθηκε σκόπιμη η κατασκευή μίας γεννήτριας ίδιων γεωμετρικών διαστάσεων, καθώς όπως είδαμε οι φερρίτες σαν υλικό έχουν πολύ διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες από τους μαγνήτες νεοδυμίου, οπότε θα προέκυπταν δύο γεννήτριες με πολύ διαφορετικές επιδόσεις που θα απαιτούσαν και διαφορετικά πτερύγια. Αντί αυτού σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μία γεννήτρια με φερρίτες με στόχο να έχει την ίδια απόδοση, και άρα την ίδια ονομαστική ισχύ, με την υπάρχουσα γεννήτρια μαγνητών νεοδυμίου.

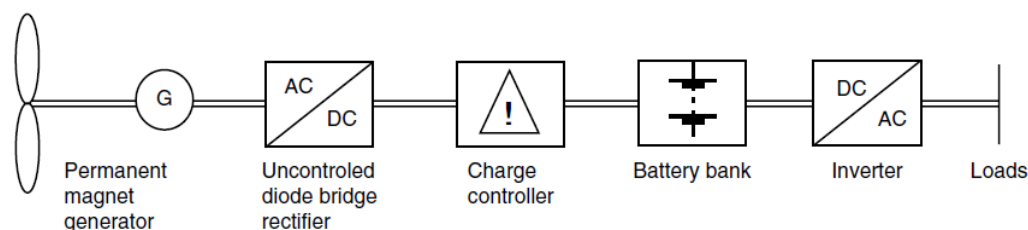
Έτσι, έχουμε δύο γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 850W που ταιριάζουν με πτερύγια ακτίνας 1.2 m, η μία κατασκευασμένη με μαγνήτες νεοδυμίου N40 και σχεδιασμένη σύμφωνα με το [4], και η άλλη κατασκευασμένη με φερρίτες C8 και με τη σχεδίαση που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο. Οι επιδόσεις των δύο γεννητριών συγκρίνονται στο Κεφάλαιο 8.

Οι σχέσεις διαστασιολόγησης που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο ισχύουν ανεξαρτήτως της ακτίνας των πτερυγίων της γεννήτριας και του υλικού των μαγνητών (εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά). Οι ίδιες σχέσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να διαστασιολογήσουμε και να προσομοιώσουμε γεννήτριες με φερρίτες και γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου διαφόρων τιμών ακτίνας πτερυγίων.

4.2. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας

Όπως στις περισσότερες εφαρμογές μικρών αυτόνομων συστημάτων, η σύνδεση της μικρής ανεμογεννήτριας που μελετάμε θα είναι DC (σύνδεση στο DC ζυγό συσσωρευτών).

Η σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές φαίνεται στο σχήμα 4.1. [22].



Σχήμα 4.1. DC σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές

Η έξοδος της γεννήτριας (AC) αρχικά διέρχεται από έναν μη ελεγχόμενο τριφασικό ανορθωτή διόδων ώστε να είναι εφικτή η σύνδεσή της στους συσσωρευτές. Στη συνέχεια ένας μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης μετατρέπει τη συνεχή τάση των συσσωρευτών σε εναλασσόμενη καθορίζοντας την τάση και τη συχνότητα λειτουργίας. Ένας διπολικός διακόπτης τοποθετείται πριν τον ανορθωτή για να βραχυκυκλώνει τη γεννήτρια και να τη διατηρεί σταματημένη όταν χρειάζεται να γίνουν εργασίες στην εγκατάσταση [8].

Απαραίτητη για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές είναι η ύπαρξη ενός ηλεκτρονικού ρυθμιστή φόρτισης. Η αποστολή του ρυθμιστή φόρτισης είναι η προστασία των συσσωρευτών και η αποδοτική λειτουργία τους. Όταν ο βαθμός φόρτισης των συσσωρευτών φτάνει κάτω από μία ορισμένη τιμή και υπάρχει ζήτηση ισχύος από τα φορτία, ο ρυθμιστής φόρτισης ανοίγει ένα διακόπτη και σταματά η παροχή ισχύος. Αντίστοιχα, όταν ο βαθμός φόρτισης των συσσωρευτών είναι υψηλός και η ανεμογεννήτρια παράγει ισχύ, τροφοδοτείται με ισχύ ένα απορριπτικό φορτίο ώστε να αποφευχθεί υπερφόρτιση των συσσωρευτών.

Το απορριπτικό φορτίο είναι μία ωμική αντίσταση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση νερού. Το απορριπτικό φορτίο είναι απαραίτητο διότι μία ανεμογεννήτρια δε μπορεί απλά να αποσυνδεθεί όταν οι μπαταρίες είναι γεμάτες, όπως γίνεται στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών. Αυτό θα σήμαινε ανοιχτοκύκλωση της ανεμογεννήτριας και άρα, ελεύθερη περιστροφή των πτερυγίων σε ανεξέλεγκτες ταχύτητες, με συνέπεια συνήθως την καταστροφή της ανεμογεννήτριας.

Ανάλογα με την ποιότητα του ρυθμιστή φόρτισης, μπορούν να ακολουθηθούν αλγόριθμοι για τη φόρτιση και την εκφόρτιση των συσσωρευτών, ώστε να γίνει πιο αποδοτική η λειτουργία τους και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους. Συνήθως ο ανορθωτής με το ρυθμιστή φόρτισης και το απορριπτικό φορτίο είναι ενσωματωμένα σε μία συσκευή.

Όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης της μικρής ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές, μπορεί να γίνει είτε απευθείας είτε παρεμβάλλοντας σύστημα μεγιστοποίησης της ισχύος (MPPT). Ένα σύστημα MPPT εξασφαλίζει μέγιστη παραγωγή ισχύος σε κάθε άνεμο γιατί αποδεδμεύει την ανεμογεννήτρια από τη σταθερή χαμηλή τάση των συσσωρευτών και της επιτρέπει να μεταβάλλει τις στροφές της ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Διατηρεί έτσι το λόγο ακροπερυγίου σταθερό στη βέλτιστη τιμή του, λ_{opt} , και τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος στη μέγιστη τιμή του, $C_{p,max}$. Είναι όμως ακριβό και στην πράξη δε χρησιμοποιείται ποτέ σε εφαρμογές χαμηλού κόστους.

4.3. Ονομαστική και Cut-in λειτουργία

Ξεκινώντας τη διαστασιολόγηση μιας ανεμογεννήτριας το πρώτο που πρέπει κανείς να αποφασίσει είναι η ακτίνα των πτερυγίων. Όπως είπαμε στην αρχή του κεφαλαίου, θα περιγράψουμε πιο συγκεκριμένα τη σχεδίαση μίας ανεμογεννήτριας με ακτίνα φτερωτής 1.2m.

Από τη σχέση (1.1.) υπολογίζεται η ισχύς που αποσπά η φτερωτή από τον άνεμο, που είναι η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R_t^2 v_w^3 \quad (4.1)$$

Για ονομαστική ταχύτητα ανέμου (που σε αυτή τη σχεδίαση θεωρούνται τα 10 m/s) μπορούμε να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας από τη σχέση:

$$P_{\eta\lambda,nom} = \frac{P_{air,nom}}{\eta} \quad (4.2)$$

Ο υπολογισμός της απόδοσης η της ανεμογεννήτριας γίνεται ως εξής: δίνεται αρχικά μία προσεγγιστική τιμή στην απόδοση και αφού υπολογιστούν οι άλλες μεταβλητές της σχεδίασης, ξαναυπολογίζεται η απόδοση από τη σχέση (2.22). Σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών, τότε επαναλαμβάνεται η σχεδίαση με τη νέα τιμή για την απόδοση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνουν οι δύο τιμές. Η

διαδικασία αυτή ελέγχου της απόδοσης και κάποιων μεταβλητών περιγράφεται πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο της βελτιστοποίησης.

Σε ονομαστικό άνεμο, λοιπόν, η γεννήτρια θα αποδίδει την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ, λειτουργώντας με το βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου, που για τα περισσότερα πτερύγια που περιγράφονται στο [4] είναι ίσος με $\lambda_{opt}=7$. Εφόσον δε χρησιμοποιείται MPPT, ο λόγος αυτός δε διατηρείται σταθερός, αλλά μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Για να επιτευχθεί ο βέλτιστος λόγος ακροπτερυγίου σε ένα μέσο άνεμο γύρω στα 5m/s, ορίζουμε το λόγο ακροπτερυγίου ίσο με $\lambda_{cutin}=9$, όταν η γεννήτρια μπαίνει στο σύστημα (γύρω στα 3 m/s). Ισχύει για τις στροφές:

$$\lambda = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} = \frac{2\pi n R_{turb}}{60 v_w} \rightarrow n = \frac{60 v_w \lambda}{2\pi R_{turb}} \quad (4.3)$$

- για $v_w = v_{w,cutin} = 3 \frac{m}{s} \rightarrow n_{cutin} = \frac{60 \cdot 3 \cdot 9}{2 \cdot \pi \cdot R_{turb}}$
- για $v_w = v_{w,nom} = 10 \frac{m}{s} \rightarrow n_{nom} = \frac{60 \cdot 10 \cdot 7}{2 \cdot \pi \cdot R_{turb}}$

όπου:

$v_{w,cutin}$ η ταχύτητα ανέμου στην οποία αναπτύσσεται η ροπή εκκίνησης της γεννήτριας,
 $v_{w,nom}$ η ταχύτητα ανέμου στην οποία η γεννήτρια παράγει την ονομαστική της ισχύ.

Αφού καθορίστηκε το εύρος λειτουργίας των στροφών, πρέπει να καθοριστεί το εύρος των τάσεων που θα αναπτύσσει η γεννήτρια.

Η ΗΕΔ, E_t , της γεννήτριας είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της. Όταν η γεννήτρια είναι ανοιχτοκυκλωμένη (από μηδενικές στροφές μέχρι στροφές cut-in), η ανορθωμένη ΗΕΔ της είναι μικρότερη από την τάση της μπαταρίας και δεν περνάει ρεύμα στη μπαταρία. Οπότε, η ΗΕΔ είναι ίση με την τερματική τάση της γεννήτριας. Ακριβώς πριν μπει η γεννήτρια στο σύστημα θα ισχύει: $E_{f,cutin} = V_{t,cutin}$.

Η τερματική αυτή τάση (ac) συνδέεται με την τάση των συσσωρευτών (dc) σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{ac} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3} \cdot 1.35} \quad (4.4)$$

που ισχύει για μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση [23] (αφού η τάση της γεννήτριας πρώτα ανορθώνεται και μετά φτάνει στις μπαταρίες).

Άρα, για μπαταρίες 48V, η ΗΕΔ για να μπει η γεννήτρια στο σύστημα θα είναι:

$$E_{f,cutin} = V_{t,cutin} = \frac{V_{batt}}{\sqrt{3} \cdot 1.35} = \frac{48}{\sqrt{3} \cdot 1.35} = 20.53 \text{ V}$$

Για την ονομαστική ΗΕΔ:

$$\frac{E_{f,nom}}{E_{f,cutin}} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \rightarrow E_{f,nom} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} E_{f,cutin} \quad (4.5)$$

Στον Πίνακα 4.1. παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια με ακτίνα φτερωτής 1.2m:

<i>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1.2m</i>	<u>Cut-in</u>	<u>Ονομαστικά</u>
v_w (άνεμος)	3 m/s	10 m/s
n (στροφές)	215 ΣΑΛ	557 ΣΑΛ
E_f (ΗΕΔ)	20.53 V	53.2 V

Πίνακας 4.1. Ονομαστική λειτουργία και λειτουργία cut-in της γεννήτριας που θα κατασκευάσουμε

4.4. Αριθμός πόλων-πηνίων, συχνότητα λειτουργίας

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια ισχύει η σχέση:

$$n_{nom} = \frac{120f}{p} \quad (4.6)$$

όπου p ο αριθμός των πόλων και f η συχνότητα λειτουργίας σε Hz.

Από τη σχέση αυτή υπολογίζονται κάθε φορά οι πόλοι της γεννήτριας έχοντας δεδομένα την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας και τις ονομαστικές στροφές, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τα εξής:

Προκειμένου να προκύψει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα (διαφορά 120° μεταξύ των τριών φάσεων) ο αριθμός των πόλων p πρέπει να είναι διαφορετικός από τον αριθμό των πηνίων Q . Οι πόλοι πρέπει να είναι ζυγός αριθμός και κάθε πόλος αντιστοιχεί σε δύο μαγνήτες (έναν σε κάθε δίσκο του δρομέα), ενώ τα πηνία πρέπει να διαιρούνται με το 3 καθώς η γεννήτρια έχει 3 φάσεις. Μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης [14] βρέθηκε ότι ο αριθμός των πόλων και των πηνίων πρέπει, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ροπή, να τηρεί την εξής σχέση:

$$\frac{2Q}{3p} = 0.5 \quad (4.7)$$

Με λίγα λόγια πρέπει ο αριθμός των πόλων να διαιρείται με το 4 και ο αριθμός των πηνίων με το 3. Έχοντας υπολογίσει δηλαδή τον αριθμό των πόλων, από αυτή τη σχέση υπολογίζουμε τον αριθμό των πηνίων. Προκύπτουν έτσι οι εξής συνδυασμοί πόλων-πηνίων:

8 – 6, 12 – 9, 16 – 12, 20 – 15, 24 – 18, 28 – 21, 32 – 24

Οπότε, για τη γεννήτρια με ακτίνα φτερωτής 1.2 m και για $f_{nom} = 50\text{Hz}$:

$$p = \frac{120f_{nom}}{n_{nom}} = 10.8 \rightarrow 12 \text{ πόλοι}$$

Στις γεννήτριες με φερρίτες προκειμένου να αυξήσουμε την απόδοση, ώστε να είναι συγκρίσιμη με την αποδοση μιας γεννήτριας νεοδυμίου ίδιου μεγέθους φτερωτής, αυξήσαμε τον αριθμό των πόλων στο αμέσως επόμενο επίπεδο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι βάλουμε περισσότερο μαγνητικό υλικό και έτσι μπορέσαμε να επιτύχουμε την ίδια ονομαστική ισχύ με λιγότερα ελίγματα, δηλαδή λιγότερες απώλειες και άρα, καλύτερη απόδοση.

Αυξάνοντας, βέβαια, τους πόλους αυξάνεται και η συχνότητα λειτουργίας, άρα και οι απώλειες δινορρευμάτων στο τύλιγμα. Οι απώλειες όμως αυτές είναι πολύ μικρότερες από τις απώλειες χαλκού που μειώνουμε βάζοντας περισσότερους μαγνήτες. Επίσης, δε μας ενδιαφέρει να λειτουργεί η γεννήτρια σε συγκεκριμένη συχνότητα (π.χ. στη συχνότητα του δικτύου) γιατί, έτσι κι αλλιώς η έξοδος της γεννήτριας θα ανορθωθεί. Επιπλέον, αυξάνεται και το κόστος, αλλά στην περίπτωση των συγκεκριμένων μαγνητών που είναι φθινοί, η αύξηση αυτή είναι μικρή και αντισταθμίζεται από τη μείωση κόστους λόγω της αφαίρεσης χαλκού.

Οπότε, για τις γεννήτριες με φερρίτες επιλέξαμε αριθμό πόλων και πηνίων σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Ακτίνα φτερωτής	πόλοι	πηνία
1.2 m	16	12
1.5 m		
1.8 m	20	15
2.1 m		

Πίνακας 4.2. Αριθμός πόλων – πηνίων για τις γεννήτριες με φερρίτες

4.5. Ο στάτης και τα πηνία

4.5.1. Το πάχος του στάτη

Το πάχος του στάτη αντιπροσωπεύεται από το αξονικό πάχος των πηνίων t_w . Με βάση την ανάλυση στο κεφάλαιο 2 αυτό υπολογίζεται από τη σχέση (2.17):

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\}$$

Οι μεταβλητές που εμφανίζονται σε αυτή τη σχέση είναι οι εξής:

- Το διάκενο της γεννήτριας g , το οποίο επιλέγεται ίσο με 2.5mm. Είναι μια αρκετά μεγάλη τιμή για το διάκενο, αλλά επιλέγεται έτσι για κατασκευαστικούς λόγους και προκειμένου να υπάρχει αρκετό φυσικό κενό μεταξύ των τριών δίσκων της γεννήτριας ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα.
- Το πάχος των μαγνητών h_m , το οποίο, όπως θα δούμε, επιλέχθηκε ίσο με 20mm για τους φερριτες και 10mm για τους μαγνήτες νεοδυμίου.
- Η παραμένουσα μαγνήτιση B_r που για το φερρίτη C8 ισούται με $B_{r,C8}=0.385$ και για το μαγνήτη νεοδυμίου N40 με $B_{r,N40}=1.265$
- Η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο B_{max} , θεωρείται γενικά λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στην επιφάνεια του μαγνήτη B_{mg} , η οποία, όπως αναφέραμε στη θεωρητική ανάλυση, μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι ίση με $B_r/2$. Επειδή όμως τα δύο αυτά μεγέθη είναι δύσκολο να υπολογιστούν με καλή ακρίβεια από θεωρητικές σχέσεις, τους δίνουμε μια προσεγγιστική τιμή στην αρχή της διαστασιολόγησης και αφού σχεδιαστεί η διάταξη μετράται η τιμή τους στο FEMM. Σε περίπτωση που η διαφορά της αρχικής από τη μετρούμενη τιμή είναι μεγαλύτερη από μια τιμή που έχουμε ορίσει, η διαστασιολόγηση επαναλαμβάνεται με αρχική τιμή τη μετρούμενη της προηγούμενης διάταξης, μέχρι να συγκλίνουν οι δύο τιμές. Η διαδικασία αυτή του ελέγχου κάποιων μεταβλητών περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο της βελτιστοποίησης.
- Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη μ_{rrec} υπολογίζεται στη σχέση 2.17.

Για τη γεννήτρια που μελετάμε προέκυψε από την προσομοίωση $t_w = 13 \text{ mm}$.

4.5.2. Σπείρες και πάχος πηνίου

Τα ελίγματα των πηνίων μπορούν να υπολογιστούν με έναν απλοποιημένο τρόπο χρησιμοποιώντας βασικές ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις και θεωρώντας την πυκνότητα της μαγνητικής ροής B σχεδόν ημιτονοειδή [22]. Αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο, Φ_{max} :

$$\Phi_{max} = B_{mg} \cdot w_m \cdot l_a \quad (4.8)$$

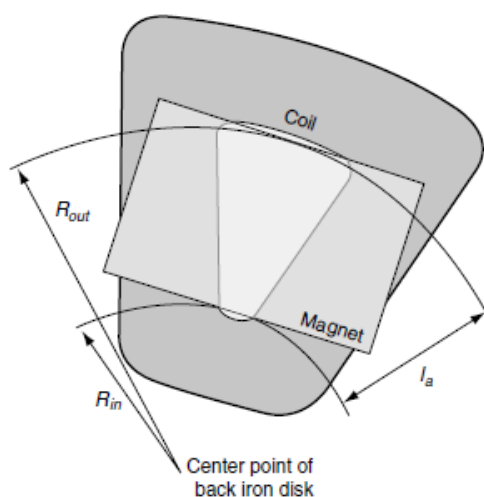
όπου w_m το πλάτος του μαγνήτη και l_a το μήκος του μαγνήτη, καθώς και το ενεργό μήκος της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.

Τα ελίγματα ανά πηνίο υπολογίζονται στη συνέχεια με την παρακάτω σχέση:

$$N_c = \frac{\sqrt{2}E_{f,cutin}}{q \cdot 2\pi \cdot k_w \cdot \Phi_{max} \cdot n_{cutin} \cdot \frac{p}{120}} \quad (4.9)$$

όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος και $q = Q/3$, ο αριθμός των πηνίων ανά φάση (για τριφασική γεννήτρια).

Ο συντελεστής k_w δεν πρέπει να συγχέεται με τους άλλους συντελεστές που έχουμε ορίσει στην ανάλυση του τυλίγματος για την εύρεση της ροπής. Είναι και αυτός ένας συντελεστής τυλίγματος (συντελεστής χρησιμοποίησης τυλίγματος) και ισούται με 0.95.



Σχήμα 4.2. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα και ενεργό μήκος της γεννήτριας

Για την εύρεση του πάχους πλευράς πηνίου w_c χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί το μέγιστο ρεύμα που προβλέπουμε να περάσει από τα τυλίγματα της γεννήτριας. Το κάνουμε αυτό προκειμένου να είμαστε ασφαλείς όταν κάποια ριπή χτυπήσει τη γεννήτρια ότι δε θα περάσει ρεύμα που δε θα μπορέσει να αντέξει το τύλιγμα. Η μικρή διάρκεια των ριπών καθώς και το αεροδυναμικό φρένο της γεννήτριας εξασφαλίζουν ότι τα ρεύματα αυτά θα είναι επίσης μικρής διάρκειας και άρα όχι πολύ επικίνδυνα. Έτσι, το μέγιστο ρεύμα είναι:

$$I_{\alpha,max} = \frac{1.1P_{nom}}{3E_{f,nom}\eta} \quad (4.10)$$

και το ονομαστικό ρεύμα:

$$I_{\alpha,nom} = \frac{P_{nom}}{3E_{f,nom}\eta} \quad (4.11)$$

όπου μιλάμε και στις δύο περιπτώσεις για ac ρεύμα, πριν τον ανορθωτή.

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά το πάχος πλευράς πηνίου :

$$w_{c,theor} = \frac{I_{\alpha,max} \cdot N_c}{\sqrt{\frac{2 \cdot cq \cdot k_f \cdot t_w}{\rho}}} \quad (4.12)$$

όπου cq θερμικός συντελεστής με μέγιστη τιμή το 0.3 W/cm^2 και $k_f=0.55$ ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου, ο οποίος αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε θεωρητικά το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου από τη σχέση (2.11) :

$$sc_{theor} = \frac{k_f \cdot w_c \cdot t_w}{N_c} \quad (4.13)$$

Ως πραγματική τιμή του sc , όμως, θεωρούμε την αμέσως μεγαλύτερη τιμή που υπάρχει διαθέσιμη στο εμπόριο. Με βάση αυτή επιλέγεται και η αντίστοιχη διάμετρος χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί, σύμφωνα με τη σχέση:

$$dc = \sqrt{\frac{4sc}{\pi}} \quad (4.14)$$

Με τη νέα τιμή για το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου και εκτελώντας την ίδια διαδικασία προς τα πίσω βρίσκουμε τις πραγματική τιμή για το πάχος πλευράς πηνίου w_c :

$$w_c = \frac{sc \cdot N_c}{k_f \cdot t_w}$$

Η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα υπολογίζεται τώρα:

$$J_{max} = \frac{I_{a,max}}{sc}$$

η οποία δε θέλουμε να είναι πολύ μεγαλύτερη από τα $6 A/mm^2$.

Στον Πίνακα 4.3. παρουσιάζονται κάποια από τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια με ακτίνα φτερωτής 1.2m.

<i>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1.2m</i>	
N_c	75
dc	1.4 mm
w_c	16 mm

Πίνακας 4.3. Αριθμός σπειρών, διάμετρος χαλκού και πάχος πηνίου

4.5.3. Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου

Ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων k_f εκφράζει τη δυνατότητα να γεμίσει η ιδεατή αύλακα με χαλκό. Η μέγιστη τιμή του για αγωγούς με κυκλική διατομή προκύπτει εύκολα από τη γεωμετρία:

$$k_{f,max} = \frac{sc}{S_{αύλακας}} = \frac{\pi R^2}{4R^2} = \frac{\pi}{4} = 0.785$$

Στην πραγματικότητα, όμως, επειδή τα πηνία τυλίγονται με το χέρι, η τιμή του συντελεστή πλήρωσης είναι μικρότερη και εξαρτάται από το σχήμα του πηνίου, τον αριθμό των ελιγμάτων και τη διατομή του χαλκού.

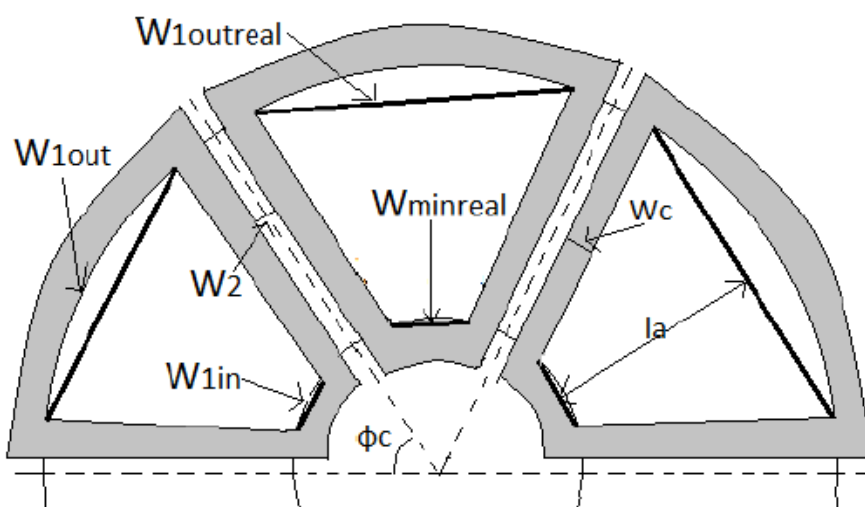
Με βάση μελέτη που έγινε σε πηνία που κατασκευάστηκαν στο χέρι [2], επιλέξαμε $k_f=0.55$ ως μία κατάλληλη τιμή. Μία εσφαλμένη εκτίμηση του συντελεστή πλήρωσης θα μπορούσε να προκαλέσει κατασκευαστικό πρόβλημα, κυρίως στην περίπτωση που αυτός προέκυπτε μικρότερος από όσο είχαμε αρχικά υπολογίσει, γιατί τότε τα πηνία δε θα χωρούσαν στο καλούπι του στάτη. Αν προέκυπτε μεγαλύτερος από την αρχική εκτίμηση,

τότε θα υπήρχε κενό ανάμεσα στα πηνία, αλλά αυτό δε θα προκαλούσε τόσο σοβαρό πρόβλημα. Θα σήμαινε, βέβαια, κακή αξιοποίηση του όγκου της γεννήτριας καθώς και δυσκολία στη συμμετρική διάταξη των πηνίων στο καλούπι του στάτη, αφού οι επαπτόμενες πλευρές των πηνίων είναι ένας χρήσιμος οδηγός για την ευθυγράμμισή τους. Για αυτούς τους λόγους πρέπει τα πηνία να κατασκευάζονται πριν ολοκληρωθεί η φάση της διαστασιολόγησης, ώστε να μετράται ο συντελεστής πλήρωσής τους. Αν ο μετρούμενος συντελεστής είναι κοντά στον εκτιμώμενο, τότε η σχεδίαση μπορεί να υλοποιηθεί. Διαφορετικά, πρέπει να διαξαχθεί ξανά η διαδικασία σχεδίασης [22].

4.5.4. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου

Στην παράγραφο αυτή δίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό των λοιπών διαστάσεων του πηνίου που θα χρειαστούν τόσο για την προσομοίωση της γεννήτριας όσο και για την κατασκευή των πηνίων.

Η ενεργός επιφάνεια του πηνίου θα έχει σχήμα τραπέζιο. Το μήκος του πηνίου θα είναι ίσο με το ενεργό μήκος της γεννήτριας l_a . Οι υπόλοιπες διαστάσεις, οι οποίες εικονίζονται και στο σχήμα, βρίσκονται ως εξής:



Σχήμα 4.3. Οι πραγματικές και θεωρητικές διαστάσεις των πηνίων.

Θεωρούμε ότι τα πηνία, τα οποία πρέπει να εφάπτονται μεταξύ τους, έχουν μια ελάχιστη απόσταση της τάξης του $w_2 = 0.5mm$, προκειμένου να διευκολύνουμε την προσομοίωση. Την απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του πηνίου την ονομάζουμε w_1 και την υπολογίζουμε στη μέση, εξωτερική και εσωτερική ακτίνα αντίστοιχα:

$$w_1 = \frac{2\pi r}{Q} - 2w_c - w_2 \quad (4.15)$$

όπου στο r τίθεται η επιθυμητή ακτίνα. Αυτή είναι η διάσταση της προσομοίωσης.

Για την κατασκευή των πηνίων οι απαιτούμενες διαστάσεις είναι το ενεργό μήκος, το πάχος πλευράς και το $w_{1,in}^{real}$ και $w_{1,out}^{real}$, τα οποία λόγω της ιδιομορφίας της κατασκευής υπολογίζονται:

$$w_{1,in}^{real} = 2r \sin(\varphi_c) \quad (4.16)$$

όπου

$$\varphi_c = \frac{2\pi w_1}{Q(w_1 + 2w_c + w_2)} \quad (4.17)$$

Έτσι τελειώνει η διαστασιολόγηση του τυλίγματος, καθώς τώρα όλα τα μεγέθη είναι γνωστά. Μία τελευταία παρατήρηση θα γίνει μόνο σχετικά με το σχήμα των πηνίων: στο [2] γίνεται μια διαφορετική διαστασιολόγηση του πηνίου που σαν βάση της έχει να ταιριάζει ο μαγνήτης ακριβώς στην ενεργό επιφάνεια του πηνίου. Αυτή είναι μία καλή και συνήθης τακτική, που χρησιμοποιείται προκειμένου να βελτιώσει την κυματομορφή της τάσης, όταν δε λαμβάνονται υπόψιν άλλες σχεδιαστικές παράμετροι, όπως το a_i και το k_d . Σε περίπτωση που το a_i είναι πολύ διαφορετικό από την τιμή $2/\pi$ που προσφέρει ημιτονοειδή τάση αυτή η τακτική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διορθώσει λίγο την κυματομορφή.

Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό δεδομένου ενός συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης. Αλλαγή του τυλίγματος και απομάκρυνση από τους συντελεστές που έχουν υπολογιστεί στο κεφάλαιο 2 μπορεί να επιτρέψει κάτι τέτοιο, με την επίπτωση όμως της μείωσης της ισχύος διατηρουμένης της ακτίνας ή της αύξησης της ακτίνας (και άρα του βάρους και του κόστους) διατηρουμένης της ισχύος [2].

Άλλωστε, επειδή συχνά αναφερόμαστε στην ποιότητα των κυματομορφών εξόδου της γεννήτριας, αξίζει να αναφερθεί το εξής. Όταν συνδέουμε την έξοδο της γεννήτριας σε μια μη ελεγχόμενη ανόρθωση διόδων, αναπόφευκτα παραμορφώνονται οι κυματομορφές της και αυξάνεται το αρμονικό τους περιεχόμενο, οπότε η επίτευξη μιας ημιτονοειδούς τάσης στην έξοδο της γεννήτριας δεν έχει τελικά τόση σημασία για τις επιδόσεις του συστήματος [22].

4.6. Οι Μαγνήτες

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.5.2 κατασκευάσαμε μία γεννήτρια με φερρίτες βαθμού C8. Μελετήθηκαν, όμως, και οι γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου βαθμού N40, καθώς έγινε συγκριτική μελέτη μεταξύ των δύο ειδών γεννητριών, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επόμενα κεφάλαια.

Στον πίνακα 4.4. [21] συγκρίνονται οι μαγνητικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μαγνήτη νεοδυμίου βαθμού N40 και του φερρίτη βαθμού C8.

Material Properties	Neodymium (N40)	Ferrite (C8)	Unit
Br	12900	3900	Gauss
H _c	12400	3200	Oersteds
H _{ci}	12000	3250	Oersteds
BH _{max}	40	3.5	MGOe
Maximum Operating Temperature	130	300	°C
Temperature Coefficient of Br	-0.11	-0.20	%/°C
Density	0.271	0.18	Lb/in ³
Curie Temperature	310	450	°C
Modulus of Elasticity	151	150-180	1000N/m ²
Recoil Permeability	10.5	1.1-1.2	
Flexural Strength	250	50-100	(N/mm ²)
Compressive Strength	1100	700-900	(N/mm ²)
Vicker's Hardness	550-650	500-600	
Pull force between rectangular magnet and soft iron plate	25.34	4.24	Kg
Electrical Resistivity	160	1010	μ ohm cm
Density	7.4	4.8-5	g/cc

Πίνακας 4.4. Σύγκριση ιδιοτήτων των μαγνητών νεοδυμίου N40 και των φερριτών C8, όπου Remanance (B_r): μετράει την ισχύ του μαγνητικού πεδίου, Coercivity (H_c): η αντίσταση των υλικών στην απομαγνήτιση, Energy Product (BH_{max}): πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας, Curie temperature (T_c): θερμοκρασία στην οποία το υλικό χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες.

4.6.1. Το σχήμα του μαγνήτη

Έχουν μελετηθεί μηχανές αξονικής ροής με διάφορα σχήματα μαγνητών. Τρία βασικά που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι οι δισκοειδείς μαγνήτες, οι ορθογώνιοι και οι τραπεζοειδείς. Μετά από σύγκριση που έγινε μεταξύ ορθογώνιων και τραπεζοειδών

μαγνητών στο [2], επιλέχθηκαν τελικά οι ορθογώνιοι τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε και εμείς.

Οι ορθογώνιοι μαγνήτες, καθότι πιο δημοφιλείς, μπορούν να βρεθούν πιο εύκολα έτοιμοι στο εμπόριο σε μεγάλο εύρος διαστάσεων και καλύτερες τιμές. Αλλά και στην περίπτωση που θα χρειαστεί ο κατασκευαστής να παραγγείλει μαγνήτες που δεν υπάρχουν ήδη στο εμπόριο, οι ορθογώνιοι θα είναι πιο φθινοί λόγω της ευκολότερης κατασκευής τους. Τα χαρακτηριστικά τους αυτά τους καθιστούν κατάλληλους για τους σκοπούς της εργασίας μας και γενικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους.

4.6.2. Το πάχος του μαγνήτη

Το πάχος h_m του μαγνήτη είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει αρκετά τη σχεδίαση:

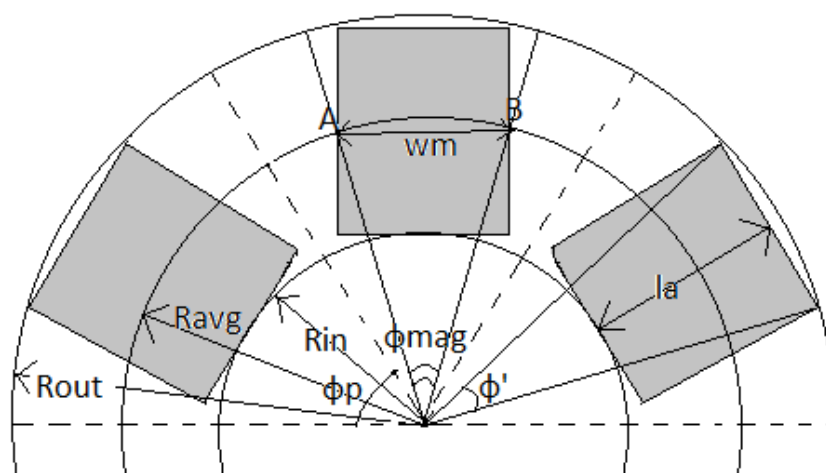
- επηρεάζει το πάχος του σιδήρου που συγκρατεί τους μαγνήτες. Αν πρόκειται για μαγνήτες νεοδυμίου, το πάχος του σιδήρου πρέπει να είναι περίπου ίσο με το πάχος του μαγνήτη για να μην υπάρχει μαγνητικός κορεσμός στο σίδηρο [2]. Για τις γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου επιλέξαμε $h_m=h_r=10\text{mm}$. Για τις γεννήτριες με φερριτες επιλέξαμε μεγαλύτερο πάχος μαγνήτη, $h_m=20$, γιατί οι μαγνήτες αυτοί δεν είναι τόσο ισχυροί, οπότε από τη μία δεν υπήρχε κίνδυνος κορεσμού του σιδήρου και από την άλλη, αν είχαν μικρότερο πάχος, θα έπρεπε να μικρύνει πολύ το διάκενο και να έρθουν οι μαγνήτες πιο κοντά για να έχει η γεννήτρια την επιθυμητή ισχύ.
- επηρεάζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο, δηλαδή την πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής, B_p .
- επηρεάζει το αξονικό πάχος t_w των πηνίων. Αν αυξήσουμε το πάχος του μαγνήτη διατηρώντας τα πεδία στη γεννήτρια ίδια, ώστε οι μαγνήτες να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ενέργειας, θα πρέπει οι μαγνήτες να απομακρυνθούν μεταξύ τους, άρα να αυξηθεί το αξονικό πάχος των πηνίων [2]. Αντίθετα, μειώνοντας πολύ το πάχος μαγνήτη μπορεί να οδηγηθούμε σε πολύ λεπτά πηνία τα οποία θα είναι δύσκολο να κατασκευαστούν στο χέρι. Η κατασκευασσιμότητα των πηνίων μετράται μέσω του λόγου $\frac{t_w}{w_c}$. Σε αυτή την εργασία ο λόγος αυτός έχει ως μέγιστη τιμή το 0.35, δηλαδή για μεγαλύτερες τιμές τα πηνία δεν είναι αποδεκτά.

Λαμβάνοντας αυτά υπόψιν, αλλά και σχετικά αυθαίρετα, αποφασίζουμε το πάχος μαγνήτη πριν από τη διαστασιολόγηση και το διατηρούμε σταθερό ανεξαρτήτως της ισχύος της γεννήτριας.

4.6.3. Το πλάτος και το μήκος του μαγνήτη

Το πλάτος w_m και το μήκος l_a του μαγνήτη είναι δύο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της διαστασιολόγησης, και με δεδομένο το πάχος h_m , καθορίζουν πλήρως το μαγνήτη που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί κάθε φορά. Οι δύο αυτές διαστάσεις θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα, καθώς αποτελούν τις δύο μεταβλητές που θα βελτιστοποιηθούν στη συνέχεια με βάση διάφορα κριτήρια.

Το μήκος του μαγνήτη l_a είναι ίσο με το ενεργό μήκος της γεννήτριας, που είναι σχεδόν ίσο με $R_{out} - R_{in}$. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4., το μήκος του μαγνήτη δε συμπίπτει ακριβώς με τη διαφορά εξωτερικής και εσωτερικής ακτίνας –ένα μικρό κομμάτι της απόστασης $R_{out} - R_{in}$ «περισσεύει» πάνω από το μαγνήτη. Στην περίπτωση, όμως, μεγάλης μηχανής με πολλούς πόλους, η διαφορά αυτή είναι μικρή και μπορεί να αγνοηθεί.



Σχήμα 4.4. Η γεωμετρία του μαγνήτη

Όπως είπαμε, το πλάτος και το μήκος μαγνήτη είναι οι δύο μεταβλητές βελτιστοποίησης, οπότε η τιμή τους δε θα υπολογίζεται από κάποια σχέση ως προς άλλες μεταβλητές, αλλά θα εισάγεται από το σχεδιαστή, όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια.

Για τη γεννήτρια που κατασκευάσαμε οι τιμές που επιλέχθηκαν για το πλάτος και το μήκος μαγνήτη, μετά από βελτιστοποίηση και έρευνα ως προς τους διαθέσιμους μαγνήτες στην αγορά, ήταν $w_m = l_a = 50 \text{ mm}$.

4.7. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα

Έχοντας υπολογίσει τις απαραίτητες μεταβλητές στις προηγούμενες παραγράφους μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας [22].

$$R_{in} = \frac{2Q \cdot w_c + Q \cdot w_m}{2\pi} \quad (4.18)$$

$$R_{out} = R_{in} + l_a \quad (4.19)$$

Υπολογίζουμε και τη μέση ακτίνα R_{avg} , η οποία χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της γεννήτριας:

$$R_{avg} = \frac{R_{in} + R_{out}}{2} \quad (4.20)$$

Κατά τη σχεδίαση μίας γεννήτριας που πρόκειται να κατασκευαστεί τοπικά με χαμηλό κόστος και απλές διαδικασίες, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ένας παράγοντας σχετικά με την εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, που είναι και η εξωτερική ακτίνα των δίσκων του δρομέα. Όσο μεγαλώνει η εξωτερική ακτίνα, οι απλές και φθηνές μέθοδοι κοπής των χαλύβδινων δίσκων οδηγούν σε ανομοιόμορφα κομμένους δίσκους. Στο [22] αναφέρεται το παράδειγμα μίας γεννήτριας με εξωτερική ακτίνα δίσκων δρομέα 240mm και πάχος 10mm, όπου διαπιστώθηκε ότι οι δίσκοι δεν ήταν τελειώς επίπεδοι, αλλά λίγο κυρτοί, με αποτέλεσμα να μην είναι εντελώς παράλληλοι μεταξύ τους. Αυτό είχε ως συνέπεια την αναποτελεσματική ρύθμιση του μηχανικού διακένου και άρα χαμηλότερη ονομαστική ισχύ από την αναμενόμενη. Η αιτία ήταν ότι για να μειωθεί το κόστος κατασκευής, χρησιμοποιήθηκε για την κοπή των δίσκων ένας παντογράφος πλάσμα, αντί κάποιας πιο σύνθετης και ακριβής μηχανής, όπως θα ήταν ένας τόρνος.

Ένας ακόμη περιορισμός που πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την εξωτερική ακτίνα είναι ότι οι δίσκοι του δρομέα θα πρέπει να χωράνε στο επιτραπέζιο δρόπανο του εργαστηρίου. Το επιτραπέζιο δρόπανο είναι ένα συνηθισμένο εργαλείο και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές χαμηλού κόστους για να ανοίξει τρύπες στους δίσκους του δρομέα, από τις οποίες θα περάσουν οι ντίζες που θα αποτελέσουν και τον άξονα της γεννήτριας. Αν οι δίσκοι είναι πολύ μεγάλοι και δε χωράνε στο επιτραπέζιο δρόπανο, οι τρύπες θα πρέπει να ανοιχθούν με τρυπάνι χειρός, με συνέπεια την αύξηση και του χρόνου κατασκευής αλλά και της πιθανότητας κακής ευθυγράμμισης, εξαιτίας δυσκολιών στο κεντράρισμα του ρουλεμάν στους δίσκους [22].

Στον Πίνακα 4.5. παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια με ακτίνα φτερωτής 1.2m.

<i>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1.2m</i>	
R_{in}	156 mm
R_{out}	207.5 mm

Πίνακας 4.5. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα

4.8. Οι λόγοι α_i και k_d

Από τη γεωμετρία της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11., και με δεδομένες τις διαστάσεις w_m και l_a του μαγνήτη, καθώς και την εσωτερική, εξωτερική και μέση ακτίνα της γεννήτριας, μπορούμε να υπολογίσουμε τους λόγους α_i και k_d , οι οποίοι θα χρειαστούν στη συνέχεια της διαστασιολόγησης.

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, για το λόγο πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος ισχύει:

$$\alpha_i = \frac{\text{πλάτος μαγνήτη}}{\text{πλάτος πολικού βήματος}} = \frac{w_m}{\tau_p}$$

και από τη (2.3) συνεπάγεται:

$$\alpha_i = \frac{w_m \cdot p}{2\pi R_{avg}} \quad (4.21)$$

Με δεδομένη την ακτίνα, η χρήση μεγαλύτερου σε πλάτος μαγνήτη, οδηγεί σε αύξηση του α_i οπότε και αύξηση της ισχύος. Σε περίπτωση που έχουμε δεδομένη την ισχύ, μεγαλύτερες τιμές του α_i θα οδηγήσουν σε μικρότερο όγκο. Επίσης, μεγάλες τιμές του α_i , δηλαδή περισσότερο μαγνητικό υλικό, θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερες ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δίσκων του δρομέα, και άρα, σίδηρο μεγαλύτερου πάχους και πιο βαριά κατασκευή.

Στο κεφάλαιο 2 συναντήσαμε και το λόγο εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}}$$

Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά η τιμή $1/\sqrt{3}$ σαν βέλτιστη για μέγιστη ροπή [24,25], αλλά είναι μια μικρή τιμή για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Ο συντελεστής k_d σχετίζεται άμεσα με το σχήμα του μαγνήτη και συγκεκριμένα με το ενεργό του μήκος. Μικρές τιμές του k_d οδηγούν σε μαγνήτες μεγάλου ενεργού μήκους και άρα μεγάλης επιφάνειας. Αυτό σημαίνει αφενός μεγάλο κόστος, αφετέρου μεγάλες ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δίσκων του δρομέα, δηλαδή –όπως είπαμε– σίδηρο μεγάλου πάχους και βαριά κατασκευή. Η γεννήτρια όμως θα έχει καλύτερη απόδοση, ροπή και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, καθώς θα είναι πιθανότατα μικρότερη σε όγκο. Γενικά, πάντως, σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, όπως η δική μας, το k_d τείνει να παίρνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές [26].

Στον Πίνακα 4.6. παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια που κατασκευάσαμε:

<i>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1.2m</i>	
a_i	0.704
k_d	0.757

Πίνακας 4.6. Λόγοι a_i και k_d

4.9. Το πάχος του σιδήρου

Το πάχος του σιδήρου, h_r , είναι πολύπλοκο να υπολογιστεί από θεωρητικές εξισώσεις και έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία μόνο με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων [22].

Είναι μια πολύ σημαντική μεταβλητή της γεννήτριας, καθώς καθορίζει άμεσα το βάρος της και συμβάλλει έντονα στη μηχανική της αντοχή. Και οι δύο δίσκοι του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από σίδηρο πάνω στον οποίο τοποθετούνται οι μαγνήτες περιμετρικά. Οι μαγνήτες, όπως έχει ειπωθεί, είναι σε διάταξη N-S-N-S, κάθε μαγνήτης δηλαδή έχει απέναντί του μαγνήτη της αντίθετης πολικότητας, με αποτέλεσμα να ασκούνται ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δύο δίσκων. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται [11]:

$$F_z = \frac{B_{mg}^2}{2\mu_0} S_{PM} \quad (4.22)$$

όπου S_{PM} η ενεργός επιφάνεια των μαγνητών:

$$S_{PM} = \alpha_i \pi (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (4.23)$$

Παρατηρούμε ότι η ελκτική δύναμη εξαρτάται από το βαθμό του μαγνήτη (B_{mg}), από τις διαστάσεις της γεννήτριας και από το α_i .

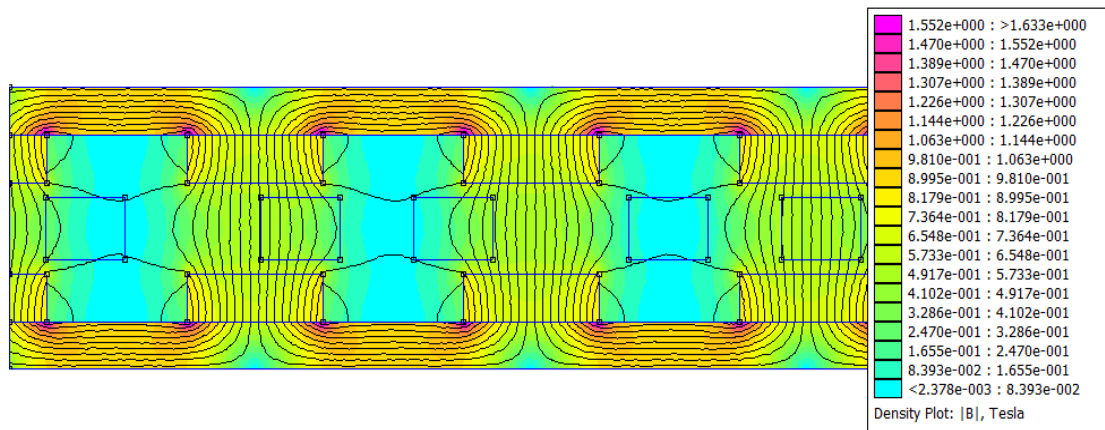
Γενικά, η απόφαση για το πάχος του σιδήρου είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν δύο κριτήρια:

Το πρώτο είναι να εξασφαλιστεί η μηχανική αντοχή της γεννήτριας, δηλαδή να μη λυγίσουν οι δίσκοι υπό τις ελκτικές δυνάμεις των μαγνητών. Ένας τρόπος να μειωθούν αυτές οι ελκτικές δυνάμεις είναι να επιλεγθεί ένας χαμηλός λόγος α_i και ένας υψηλός λόγος k_d κατά τη σχεδίαση της γεννήτριας. Αυτός ο συνδυασμός ουσιαστικά οδηγεί σε μαγνήτες με μικρότερη ενεργό επιφάνεια και, άρα, μειωμένη ελκτική δύναμη.

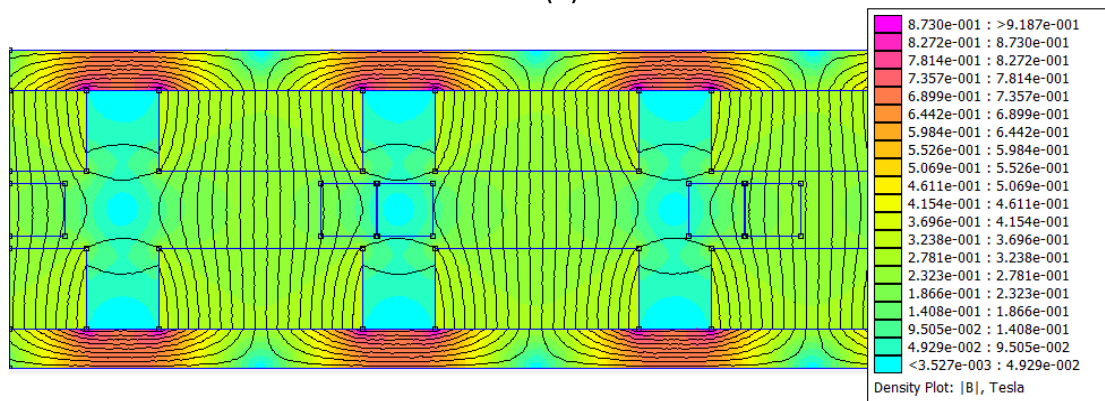
Μια λύση, επίσης, αν δε θέλουμε να έχουμε μεγάλο πάχος σιδήρου παντού, είναι να έχουμε το απαιτούμενο πάχος πίσω από τους μαγνήτες και ο υπόλοιπος δίσκος να είναι πιο λεπτός και να έχει πίσω του κολλημένες ακτίνες που θα τον συγκρατούν. Μια άλλη λύση είναι να κοπούν κάποιες οπές στους σιδερένιους δίσκους του δρομέα, συμμετρικά και μακριά από τους μαγνήτες. Οι οπές αυτές θα βοηθήσουν στον ακόμα καλύτερο αερισμό της γεννήτριας και θα μειώσουν και το βάρος της. Απαιτείται απόλυτα συμμετρική κοπή για να μη δημιουργούνται ανεπιθύμητες ροπές κατά την περιστροφή του δρομέα [5].

Το δεύτερο είναι να μην υπάρχει κορεσμός. Αν ο σίδηρος είναι πολύ λεπτός το υλικό θα μπει στον κορεσμό, οι δυναμικές γραμμές θα οδεύουν εκτός του υλικού, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλες απώλειες. Για το σίδηρο ένα πεδίο γύρω στα 1.6 T (ή και λιγότερο) στο εσωτερικό του δίνει ασφάλεια ως προς τον κορεσμό.

Στο σχήμα 4.5, βλέπουμε από την προσομοίωση στο FEMM ότι ο σίδηρος στις διατάξεις που σχεδιάσαμε δεν έχει κορεστεί. Στην πρώτη γεννήτρια, με μαγνήτες νεοδυμίου N40, έχουμε επιλέξει $h_r=h_m=10\text{mm}$, ενώ στη δεύτερη, με φερρίτες C8, είναι $h_r=10\text{mm}$ και $h_m=20\text{mm}$.



(α)



(β)

Σχήμα 4.5. Διάγραμμα πυκνότητας μαγνητικής ροής για α) μαγνήτες νεοδυμίου και β) φερρίτες

4.10. Κόστος, βάρος και όγκος γεννήτριας

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος, βάρος και όγκο της γεννήτριας σε συνάρτηση με τις διαστάσεις της. Τα βασικά υλικά από τα οποία κατασκευάζεται η γεννήτρια είναι τα εξής:

- Μαγνήτες
- Σίδηρος
- Χαλκός
- Ρητίνη
- Κόντρα πλακέ

Καθώς οι τιμές των παραπάνω υλικών δεν είναι σταθερές στο χρόνο, οι σχέσεις για τα κόστη που παρουσιάζονται παρακάτω βασίζονται σε τρέχουσες τιμές. Ιδιαίτερα στις τιμές των μαγνητών νεοδυμίου οι διακυμάνσεις, όπως έχουμε πει, είναι μεγάλες. Όσα υλικά

παραγγέλλονται από το εξωτερικό δεν επιβαρύνονται με ΦΠΑ αλλά με έξοδα αποστολής, ενώ στα υπόλοιπα θεωρήθηκε ΦΠΑ 23%.

Η εξίσωση κόστους θα είναι:

$$C_{total} = (1 + \Phi PA)(C_{Fe} + C_{Cu} + C_{resin} + C_{wood}) + C_{mag}^{tot}$$

Ενώ για το βάρος:

$$M_{total} = M_{mag} + M_{Fe} + M_{Cu} + M_{resin}$$

Τέλος, ο συνολικός όγκος της γεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$V_{total} = \pi R_{out}^2 \cdot (2h_r + 2h_m + 2g + t_w)$$

4.10.1. Οι μαγνήτες

Όπως είναι γνωστό, ένα μεγάλο μέρος του κόστους στη γεννήτρια το αποτελεί το κόστος των μαγνητών. Ειδικά στις γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου, οι μαγνήτες είναι με διαφορά το πιο ακριβό υλικό. Οπότε σε περίπτωση που το κόστος αποτελεί κριτήριο σε μια βελτιστοποίηση, καταλαβαίνουμε ότι αλλαγές στο κόστος των μαγνητών θα επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματά της.

Η κοστολόγηση των μαγνητών αποτέλεσε ιδιαίτερο κομμάτι αυτής της εργασίας, καθώς δεν υπάρχει κάποια τιμή για το κιλό ενός είδους μαγνήτη. Κάθε τεμάχιο τιμολογείται ξεχωριστά ανάλογα με το είδος, το βάρος, το πάχος και το σχήμα. Έτσι, γενικά, μαγνήτες μεγαλύτερου βάρους (αλλά ίδιοι κατά τα άλλα) προφανώς θα είναι ακριβότεροι. Έχοντας επιλέξει το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη η κατάσταση διευκολύνεται λιγάκι αλλά και πάλι δεν υπάρχει κάποια ασφαλής εκτίμηση.

Επιπλέον, άλλο κόστος έχει ένας μαγνήτης που υπάρχει ήδη στο εμπόριο και χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες και άλλο ένας μαγνήτης νέος, για τον οποίο η εταιρεία πρέπει να κατασκευάσει καλούπι από την αρχή. Έτσι, η χρήση κάποιου εμπορικού μαγνήτη κρίνεται σκόπιμη για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Από την άλλη μεριά θα μπορούσε κανείς να κοστολογήσει το μαγνήτη που έχει παραγγείλει όχι στην τιμή που τον πλήρωσε, αλλά στην τιμή που θα πλήρωνε κάποια χρόνια μετά, όταν ο μαγνήτης αυτός θα ήταν εμπορικός. Ο προσδιορισμός, όμως, μιας τέτοιας σχέσης δεν είναι εύκολη εργασία.

Η διαδικασία που ακολουθείται εδώ για την εύρεση της συνάρτησης κόστους των μαγνητών είναι η εξής: Πρώτα επικοινωνήσαμε με εταιρείες παραγωγής μαγνητών, οι οποίες μας έδωσαν κάποια στοιχεία από τα οποία εκτιμήσαμε ότι το κόστος μιας γεννήτριας κατασκευασμένης με μη εμπορικούς μαγνήτες είναι αρκετά μεγάλο και μάλλον απαγορευτικό για εφαρμογές χαμηλού κόστους όπως η δική μας.

Στη συνέχεια έγινε έρευνα στο διαδίκτυο για τους εμπορικούς μαγνήτες και συγκεντρώθηκαν κόστη για μαγνήτες διαφόρων διαστάσεων. Τα παραπάνω κόστη χρησιμοποιήθηκαν για να εξάγουμε μια σχέση μεταξύ όγκου μαγνήτη και κόστους (σε €). Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν δύο συναρτήσεις κόστους: μια για κεραμικό μαγνήτη C8 και μία για μαγνήτη νεοδυμίου N40.

Κόστος μαγνήτη C8:

$$C_{mag}^{C8} = 0.4105 + 10^{-5} \cdot V_{mag}^{C8}$$

Κόστος μαγνήτη N40:

$$C_{mag}^{N40} = 1.9849 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot V_{mag}^{N40}$$

Όπου ο όγκος και στις δύο σχέσεις είναι (ορθογώνιοι μαγνήτες):

$$V_{mag} = l_a \cdot w_m \cdot h_m$$

Για παραγγελία $2p$ μαγνητών από το εξωτερικό, όπου p ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας, το συνολικό κόστος των μαγνητών δίνεται σε κάθε περίπτωση:

$$C_{mag}^{tot} = C_{mag} \cdot 2p + \text{έξοδα αποστολής}$$

Ενώ το συνολικό βάρος των μαγνητών θα είναι ίσο με:

$$M_{mag} = \rho_{mag} \cdot V_{mag} \cdot 2p$$

όπου $\rho_{mag}^{N40} = 7.5 \frac{g}{cm^3}$ για τους μαγνήτες N40

και $\rho_{mag}^{C8} = 5 \frac{g}{cm^3}$ για τους μαγνήτες C8.

4.10.2. Ο σίδηρος

Θα κοπούν δύο δίσκοι σιδήρου. Η εξωτερική τους ακτίνα θα είναι ίση με R_{out} αλλά η εσωτερική ακτίνα δε θα είναι R_{in} . Η ακτίνα αυτή εξαρτάται από το ρουλεμάν όπως θα δούμε και αργότερα. Αυτό όμως δεν έχει σημασία γιατί ο σιδηρουργός δε χρεώνει το βάρος αυτού ακριβώς του κομματιού που ζητήθηκε, αλλά του συνολικού σιδήρου που κατανάλωσε εκείνος, με την έννοια ότι κατά την παρασκευή ενός δίσκου με οπή στο κέντρο του προκύπτουν κομμάτια άχρηστα στο σιδηρουργό τα οποία χρεώνεται εκείνος που κάνει την παραγγελία.

Μια ασφαλής εκτίμηση για τον όγκο του σιδήρου που θα χρησιμοποιηθεί είναι ότι ο σχεδιαστής θα πληρώσει τελικά το περιγεγραμμένο στον κύκλο τετράγωνο πάχους h_r , το οποίο θα έχει όγκο:

$$V_{Fe} = 4R_{out}^2 h_m$$

Δεδομένης της πυκνότητας του σιδήρου $\rho_{Fe} = 7.87 \text{ g/cm}^3$ βρίσκουμε τη μάζα:

$$m_{Fe} = \rho_{Fe} V_{Fe}$$

Άρα το τελικό κόστος για το σίδηρο με δεδομένη από τον κατασκευαστή την τιμή ανά κιλο σιδήρου υπολογίζεται:

$$C_{Fe} = 1.23 \cdot \text{ironprice} \cdot m_{Fe}$$

όπου ο όρος 1.23 αντιπροσωπεύει το ΦΠΑ 23%.

Για το τελικό βάρος του σιδήρου (δύο δίσκοι) υπολογίζουμε διαφορετικό όγκο:

$$V_{Fe}^{used} = 2 \cdot \pi R_{out}^2 h_r$$

$$M_{Fe} = \rho_{Fe} V_{Fe}^{used}$$

4.10.3. Ο χαλκός

Η συνολική μάζα χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των πηνίων δίνεται:

$$M_{cu} = 3 \cdot N_{phase} \cdot l_{avg} \cdot SC \cdot \rho_{cu}$$

Η πυκνότητα του χαλκού είναι ίση με $\rho_{cu}=8.94 \text{ g/cm}^3$. Το συνολικό κόστος του χαλκού (με ΦΠΑ 23%) θα είναι:

$$C_{cu} = 1.23 \cdot copper \ price \cdot M_{cu}$$

4.10.4. Η ρητίνη

Ρητίνη χρησιμοποιείται και στο δρομέα και στο στάτη για μηχανική στήριξη της κατασκευής. Καλύπτει ολόκληρο το δίσκο των μαγνητών, άρα έχει ύψος όσο ο μαγνήτης και όγκο τον όγκο του δίσκου αφαιρουμένου του όγκου των μαγνητών. Όσον αφορά στο στάτη, έχει ύψος το αξονικό ύψος των πηνίων t_w και καλύπτει μια επιφάνεια-δαχτυλίδι $R_{out}-R_{in}$, χωρίς να θεωρούμε ότι υπάρχει ρητίνη εκεί όπου βρίσκεται ο χαλκός.

Για τη ρητίνη στο δρομέα (δύο δίσκοι):

$$V_{resin}^{rotor} = 2\pi(R_{out}^2 - R_{in}^2)(1 - \alpha_i)h_m$$

Για τη ρητίνη στο στάτη:

$$V_{resin}^{stator} = t_w[\pi(R_{out}^2 - R_{in}^2) - Qw_c l_a + (\pi(R_{out} + w_c)^2 - \pi R_{out}^2)]$$

όπου συμπεριλαμβάνεται και η ρητίνη που απαιτείται για την κάλυψη των άκρων του τυλίγματος.

Η ρητίνη αναμειγνύεται με θερμοαπαγωγική σκόνη (ταλκ) σε αναλογία 1:1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση μάζας και πυκνότητας της ρητίνης οπότε ο όγκος μένει πρακτικά σταθερός. Ωστόσο προστίθεται ποσότητα ταλκ όση και της ρητίνης με αποτέλεσμα το βάρος να διπλασιάζεται. Για τη μάζα της ρητίνης που θα χρειαστούμε γράφουμε:

$$M_{resin} = 2\rho_{resin}(V_{resin}^{rotor} + V_{resin}^{stator})$$

όπου $\rho_{resin}=1.36 \text{ g/cm}^3$.

Για το κόστος:

$$C_{resin} = resin \ price \cdot M_{resin}/2$$

4.10.5. Τα κόντρα πλακέ

Τα κόντρα πλακέ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλουπιών και μόνο και το βάρος τους δε συμβάλλει στο συνολικό βάρος της γεννήτριας παρά μόνο στο συνολικό κόστος. Κατά προσέγγιση θα χρησιμοποιηθούν 9 κόντρα πλακέ εμβαδού λίγο μεγαλύτερου (extra) από το περιγεγραμμένο στον κύκλο ακτίνας R_{out} τετράγωνο. Τα 3 χρησιμοποιούνται στο στάτη και τα 6 στο δρομέα. Το πάχος τους είναι διαφορετικό και ο ξυλουργός κόβει μόνο συγκεκριμένες τιμές αυτών. Γενικά μπορεί κανείς να γράψει:

$$S_{wood} = 4\pi(R_{out} + extra)^2$$

$$C_{wood} = 3S_{wood}price1 + 6S_{wood}price2$$

όπου price1 και price2 οι τιμές ανά m^2 για τα δύο διαφορετικά πάχη που χρησιμοποιούνται.

Η συγκεκριμένη κοστολόγηση είναι αρκετά προσεγγιστική καθώς και άλλα κομμάτια ξύλου χρησιμοποιούνται για την κατασκευή, πέρα από τα 9 που απαιτούνται για τα καλούπια.

Στον Πίνακα 4.7. παρουσιάζονται κάποια από τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια που κατασκευάσαμε:

<i>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1.2m</i>	
Συνολικό κόστος	282 €
Κόστος μαγνητών	126 €
Κόστος χαλκού	44 €
Συνολική μάζα	25.77 kg
Συνολικός όγκος	10.69 dm^3

Πίνακας 4.7. Κόστος, μάζα και όγκος γεννήτριας

Κεφάλαιο 5: Λογισμικό Προσομοίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε για τη μοντελοποίηση της προηγούμενης διαδικασίας (Κεφάλαιο 4) στον υπολογιστή. Η ύπαρξη τόσων πολλών μεταβλητών στο πρόβλημα της διαστασιολόγησης και οι πολλές τιμές που μπορούν αυτές να λάβουν καθιστούν αναγκαία τη μοντελοποίηση της διαδικασίας. Έτσι, επιτυγχάνεται εύκολη και γρήγορη αλλαγή μεταβλητών, καθώς και βελτιστοποίησή τους, και δίνεται η δυνατότητα μελέτης ενός εύρους ισχύος γεννητριών.

5.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab(-Octave)

Πρόκειται για απλό λογισμικό που μοιάζει πολύ με τις γλώσσες Pascal και C, γλώσσες που γνωρίζει ο σύγχρονος μηχανικός. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο λογισμικό είναι, κυρίως, οι πολλές έτοιμες συναρτήσεις και toolboxes που περιλαμβάνει, κάνοντας εργασίες όπως η λύση πολυωνύμων, η εξαγωγή εξισώσεων ή ο μετασχηματισμός Fourier να φαίνονται απλές, αλλά και η δυνατότητα επικοινωνίας του με το FEMM, πρόγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω.

Έτσι, όλη η παραπάνω διαδικασία γράφεται σε κώδικα Matlab, ώστε όχι μόνο να αποφεύγονται οι χρονοβόρες πράξεις με το χέρι, αλλά και να μπορεί να γίνει επαναληπτική χρήση της διαστασιολόγησης ώστε να εξετάζουμε την επιρροή όλων των μεταβλητών στο πρόβλημα.

5.2. Το λογισμικό FEMM

Μετά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης και της βελτιστοποίησης ορισμένων μεταβλητών απαιτείται η προσομοίωση της γεννήτριας σε κατάλληλο λογισμικό, ώστε να επαληθευθούν οι στόχοι της διαστασιολόγησης (ισχύς, ροπή, απόδοση, ονομαστικό ρεύμα και τάση κ.α.). Το λογισμικό αυτό βασίζεται στη μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA).

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το FEMM (Finite Element Method Magnetics) [<http://femm.foster-miller.com>]. Πρόκειται για ελεύθερο λογισμικό που χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να λύσει μαγνητικά και ηλεκτροστατικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις. Δίνει τη δυνατότητα μέτρησης πολλών μεγεθών όπως η

μαγνητική επαγωγή, η πεπλεγμένη ροή, η ένταση του μαγνητικού πεδίου κ.ά. Μπορεί να μετρήσει το ζητούμενο μέγεθος όπου ακριβώς θέλει ο χρήστης χωρίζοντας το πρόβλημα σε τρίγωνα για τα οποία υπολογίζει το διανυσματικό δυναμικό A . Το διανυσματικό δυναμικό έχει τη διεύθυνση του άξονα z και μέτρο που εξαρτάται από τις τιμές στους άξονες x και y όταν το πρόβλημα τίθεται στους δύο τελευταίους άξονες και μόνο. Γενικά ισχύει:

$$A = \nabla \times B$$

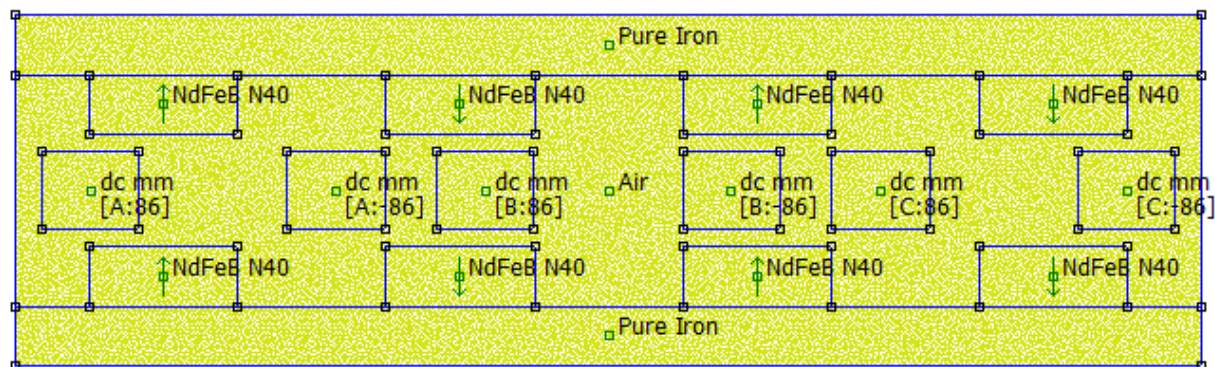
και από το θεώρημα Stokes βρίσκεται η μαγνητική ροή Φ :

$$\Phi = \int_S B dS = \int \nabla \times A \cdot dS = \oint_C A dl$$

5.3. Προσομοίωση της γεννήτριας με συνδυασμό Matlab-FEMM

Η διάταξη της γεννήτριας μπορεί να σχεδιαστεί στο FEMM στις δύο διαστάσεις ως εξής: Θεωρείται μια τομή της δισκοειδούς δομής της γεννήτριας σε όποια ακτίνα είναι επιθυμητή, αρκεί αυτή να είναι αντιπροσωπευτική. Συνήθως η τομή γίνεται στη μέση ακτίνα R_{avg} και τα αποτελέσματα είναι αρκετά αντιπροσωπευτικά. Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να γίνουν τομές και στην εσωτερική και εξωτερική ακτίνα και να βρεθεί τελικά ο μέσος όρος του ζητούμενου μεγέθους. Όσο περισσότερες οι τομές τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια. Αφού έχει γίνει η τομή, θεωρείται το ευθύγραμμο ανάπτυγμα αυτής. Το ανάπτυγμα αυτό δεν εξετάζεται ολόκληρο καθώς μπορεί να είναι πολύ μεγάλο, αλλά μόνο ένα κομμάτι, π.χ. 4 πολικά βήματα και θεωρώντας ύστερα περιοδικές συνθήκες στα σύνορα. Με λίγα λόγια, το ίδιο το πρόγραμμα καταλαβαίνει ότι αριστερά και δεξιά της διάταξης υπάρχει η ίδια διάταξη και ως μη φαίνεται. Έτσι, γίνεται σωστή απεικόνιση και υπολογισμός των πεδίων δίχως να έχει σημασία ο αριθμός των επαναλήψεων που θα ήθελε ο σχεδιαστής να έχει η διάταξη.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τομή στη μέση ακτίνα (R_{avg}) μιας γεννήτριας αξονικής ροής με μαγνήτες νεοδυμίου N40, όπως αναπαρίσταται στο FEMM. Οι μικρές κίτρινες κουκίδες είναι τα τρίγωνα στα οποία έχει χωρίσει το πρόγραμμα τη διάταξη προκειμένου να λύσει το πρόβλημα.



Σχήμα 5.1. Τομή γεννήτριας στη μέση ακτίνα στο FEMM

Το μειονέκτημα του FEMM είναι η στατικότητα του. Δε μπορεί να δεχθεί μεταβλητές εισόδους. Ο σχεδιαστής πρέπει να γνωρίζει όλες τις διαστάσεις και με το χέρι να τις περάσει στο FEMM σχεδιάζοντας σημεία και γραμμές. Ο συνδυασμός Matlab – FEMM είναι ο κατάλληλος για τη λύση του προβλήματος αυτού, καθώς το ένα πρόγραμμα μπορεί δομικά να επικοινωνεί με το άλλο. Ότι ακριβώς κάνει ο σχεδιαστής με το χέρι στο FEMM γνωρίζοντας τις διαστάσεις της γεννήτριας μπορεί να γραφεί με κώδικα στο Matlab, με τη διαφορά ότι εκεί όλες οι διαστάσεις αναπαρίστανται από μεταβλητές. Η εντολή π.χ. `mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)` προσθέτει μια γραμμή που ενώνει τα σημεία $(x1, y1)$ και $(x2, y2)$ του πλέγματος στο FEMM. Οι μεταβλητές μπορούν οποιαδήποτε στιγμή να αλλάξουν και να προκύψει μια νέα διάταξη. Με αυτή τη λογική γράφεται κώδικας στο Matlab για τη δημιουργία στο FEMM μιας μηχανής αξονικής ροής απροσδιόριστων διαστάσεων. Τώρα ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να μελετήσει στατικά όποια γεννήτρια θέλει.

Άλλο ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται λόγω της στατικότητας του FEMM και λύνεται με τη χρήση του Matlab είναι πως δεν υπάρχει άμεσως τρόπος για να αντιληφθεί το FEMM την περιστροφή του δρομέα και, άρα, τη συνολική λειτουργία της γεννήτριας, ώστε να βρεθούν τάσεις, ρεύματα, ισχύς, απόδοση και άλλα μεγέθη που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση της γεννήτριας.

Με χρήση και πάλι του Matlab και επιλέγοντας το επιθυμητό βήμα μετακίνησης (συνήθως 1 μηχανική μοίρα ή και λιγότερο ανάλογα με την ακρίβεια που επιζητείται), διαγράφουμε το πλάτος της διάταξης που αντιστοιχεί σε ένα βήμα από τη μία πλευρά και το σχεδιάζουμε στην άλλη. Με προσοχή πάντα στη διατήρηση της συμμετρίας της διάταξης ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα στην περιοδικότητα. Η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε στάδια και, ανάλογα με το κομμάτι που μεταφέρεται κάθε στιγμή, μπορεί να διαφέρει. Ολοκληρώνεται με την πλήρη μεταφορά ενός μαγνήτη, ενώ αρκεί η

ολοκλήρωση μίας ηλεκτρικής περιόδου (2 πολικά βήματα) για να λάβει ο σχεδιαστής όλες τις απαραίτητες πληροφορίες. Παρ' όλα αυτά η μετακίνηση μπορεί να γίνει όσες φορές είναι επιθυμητό και με ό,τι χαρακτηριστικά επιθυμεί ο σχεδιαστής [2].

5.4. Οι επιδόσεις της γεννήτριας

Αφού έχει μελετηθεί το μαγνητοστατικό πρόβλημα μπορούν πλέον να βρεθούν και οι επιδόσεις της γεννήτριας ώστε να επαληθευθεί η θεωρία που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγησή της.

Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα μετακίνησης του δρομέα και για κάθε μετακίνηση λαμβάνεται μέσω του FEMM απευθείας μέτρηση της πεπλεγμένης ροής για καθεμία από τις τρεις φάσεις του τυλίγματος σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης ($I=0$). Το πεδίο που δημιουργεί ο στάτης καθώς διαρρέεται από ρεύμα είναι πολύ μικρό (απουσία πυρήνα) και για αυτό υπολογίζουμε την RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης και μόνο.

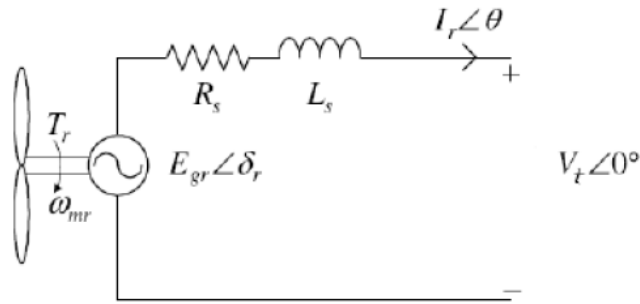
Δίνονται σαν είσοδοι από το χρήστη οι στροφές και το ρεύμα, τα οποία λαμβάνουν τιμές από μηδέν μέχρι τις ονομαστικές τους. Γνωρίζοντας τις στροφές εύκολα υπολογίζουμε τη συχνότητα και την τάση:

$$f = \frac{np}{120} \quad (5.1.)$$

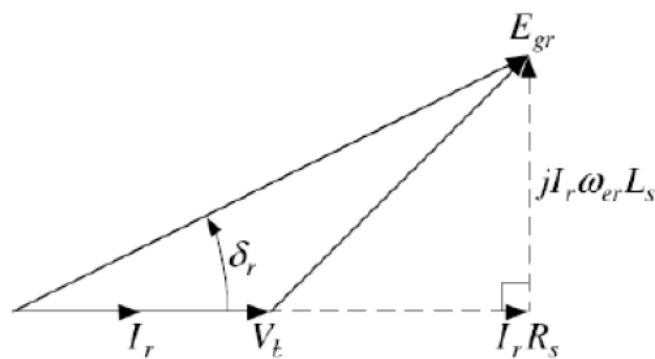
$$E_f = qFluxoc \frac{p}{2} \frac{2pn}{60} \quad (5.2)$$

όπου n οι ονομαστικές στροφές και Fluxoc η RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης. Η ΗΕΔ σε αυτό το σημείο υπολογίζεται κατά μέτρο και η γραφική της απεικόνιση δεν είναι δυνατή, καθώς δεν υπάρχει κάποια συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής για να γίνει παραγωγισή της και να προκύψει η ΗΕΔ. Έτσι επιστρατεύεται ο ορισμός της παραγωγού (στοιχειώδεις διαφορές) για την απεικόνισή της. Για να γίνει όμως αυτό πρέπει να υπάρχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια (μικρό βήμα) στην ανάλυση [2].

Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται καθώς και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα φαίνονται παρακάτω:



(α)



(β)

Σχήμα 5.2. (α) Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας και (β) το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα

Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα βρίσκουμε τη γωνία ισχύος δ και την τερματική τάση της γεννήτριας:

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{I_{rms} 2\pi f L_s}{E_f} \right) \quad (5.3)$$

όπου I_{rms} το ρεύμα της γεννήτριας το οποίο δίνεται ως είσοδος από το χρήστη και L_s η αυτεπαγωγή του τυλίγματος όπως έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 2.

$$V_t = E_f \cos \delta - I_{rms} q R_c \quad (5.4)$$

Όπου qR_c η αντίσταση μίας φάσης, υπολογισμένη και αυτή στο κεφάλαιο 2.

Έτσι υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο:

$$P_{\eta\lambda} = 3V_t I_{rms} \quad (5.5)$$

και οι απώλειες:

$$P_{cu} = 3I_{rms}^2 q R_c$$

$$P_{eddy} = \frac{\pi l_a s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}}$$

οπότε βρίσκεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή:

$$P_{H/M} = P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy}$$

$$T_{H/M} = \frac{P_{H/M}}{\omega} = \frac{P_{H/M} 60}{2\pi n}$$

Υπολογίζονται κατά τα γνωστά οι απώλειες περιστροφής και βρίσκεται η μηχανική ισχύς και ροπή:

$$P_{rot} = 0.06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n$$

$$P_{mech} = P_{H/M} + P_{rot}$$

$$T_{mech} = \frac{P_{mech} 60}{2\pi n}$$

Τέλος υπολογίζεται η απόδοση:

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (5.6)$$

Όλα τα παραπάνω γράφονται και αυτά στη γλώσσα λογισμικού Matlab. Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στο παράρτημα. Τώρα υπάρχει δυνατότητα να σχεδιαστεί και να προσομοιωθεί οποιαδήποτε γεννήτρια αξονικής ροής αλλά και να γίνει βελτιστοποίηση της σχεδίασης. Αυτή είναι και η θεματολογία του επόμενου κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 6: Βελτιστοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η βελτιστοποίηση της σχεδίασης για τις γεννήτριες αξονικής ροής που μελετάμε.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι από τη μία να μεγιστοποιηθεί η απόδοση των γεννητριών και από την άλλη να ελαχιστοποιηθεί το κόστος κατασκευής τους. Αυτές τις δύο αντικρουόμενες επιθυμίες που έχει ένας σχεδιαστής θα προσπαθήσουμε να τις φέρουμε σε ισορροπία με το κριτήριο βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε. Κάθε σχεδιαστής βέβαια, σύμφωνα και με τις δικές του προτεραιότητες, θα μπορούσε να ρυθμίσει αυτό το κριτήριο, όπως θα δούμε στη συνέχεια, ώστε να εξυπηρετεί περισσότερο το στόχο του ελάχιστου κόστους ή της βέλτιστης απόδοσης.

6.1. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης

Το πρώτο που πρέπει να καθοριστεί είναι οι μεταβλητές που θα βελτιστοποιηθούν. Μπορεί η τιμή των μεταβλητών αυτών να είναι ήδη γνωστή στο σχεδιαστή αλλά να μη γνωρίζει αν είναι βέλτιστη ή να είναι εντελώς άγνωστη και να πρέπει με κάποια διαδικασία να αποφασίσει. Παραδείγματα μεταβλητών που επιλέγονται να βελτιστοποιηθούν σε άλλες παρόμοιες εργασίες είναι: η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα, ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος, το πάχος του μαγνήτη, το πάχος του στάτη, το πάχος του σιδήρου, ο βαθμός του μαγνήτη, η διάμετρος του χαλκού και το μήκος του διακένου.

Θεωρώντας το μαγνήτη ως το πιο κρίσιμο υλικό της σχεδίασης, οι μεταβλητές που επιλέξαμε να βελτιστοποιήσουμε είναι οι διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a (πλάτος και μήκος μαγνήτη αντίστοιχα), με πεδίο ορισμού 20–100 mm. Τα πεδία ορισμού προέκυψαν μετά από βιβλιογραφική μελέτη για τις πιο συχνά εμφανιζόμενες τιμές των μεταβλητών και επεκτάθηκαν λίγο σαν δικλείδα ασφαλείας.

Όσον αφορά τα κριτήρια ως προς τα οποία γίνεται η βελτιστοποίηση, αυτά εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής. Όπως έχουμε πει, μελετάμε εφαρμογές χαμηλού κόστους και επίσης μας ενδιαφέρει η καλή αξιοποίηση των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν τρία κριτήρια βελτιστοποίησης:

- Κριτήριο βέλτιστης απόδοσης
- Κριτήριο ελάχιστου κόστους
- Συνδυαστικό κριτήριο βέλτιστης απόδοσης - ελάχιστου κόστους με βάρη που επιλέχθηκαν σύμφωνα με τη λογική ότι θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση αλλά χωρίς το κόστος να υπερβαίνει τα 100€/αύξηση της απόδοσης κατά 0.1.

Τα βάρη που επιλέχθηκαν στο συνδυαστικό κριτήριο είναι σίγουρα υποκειμενικά και θα ήταν καλό ο κάθε σχεδιαστής, σύμφωνα με τις προτεραιότητές του, να επιλέξει τα ανάλογα βάρη.

Να σημειωθεί επίσης ότι η μελέτη του κόστους βασίζεται σε τρέχουσες τιμές των υλικών οι οποίες έχουν δοθεί από τις εταιρίες που τα εμπορεύονται.

6.2. Απόρριψη διατάξεων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης

Στη διαδικασία της βελτιστοποίησης εισάγονται ορισμένοι περιορισμοί ώστε να μη λαμβάνονται υπόψιν οι διατάξεις που δεν τους ικανοποιούν. Οι περιορισμοί αυτοί εισάγονται στον κώδικα ως λογικές σχέσεις που όταν ικανοποιούνται, έχουν ως αποτέλεσμα την απόδοση πολύ μεγάλης τιμής στο κόστος και πολύ μικρής τιμής στην απόδοση, οπότε οι συγκεκριμένες διατάξεις αναπόφευκτα απορρίπτονται.

Επίσης, κάποιες μεταβλητές που δεν είναι ευκολο να υπολογιστούν θεωρητικά, αλλά μας ενδιαφέρει να προσεγγιστούν με μεγάλη ακρίβεια, παίρνουν αρχικά μία προσεγγιστική τιμή, στη διάρκεια της διαστασιολόγησης επαναπροσδιορίζονται και η σχεδίαση εκτελείται επαναληπτικά μέχρι η τιμή τους να συγκλίνει. Αν μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση, τότε η διάταξη απορρίπτεται.

6.2.1. Κατασκευαστικοί περιορισμοί

Ο πρώτος περιορισμός που λήφθηκε υπόψιν αφορά στην εσωτερική ακτίνα R_{in} της γεννήτριας και το πλάτος του μαγνήτη w_m . Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ορθογώνιος μαγνήτης, όπως συμβαίνει στην εργασία αυτή, υπάρχει περίπτωση να προκύψει σχεδιαστικά διάταξη, όπου οι μαγνήτες επικαλύπτονται στην εσωτερική ακτίνα. Για να είναι υλοποιήσιμη η σχεδίαση θα πρέπει οι μαγνήτες οριακά να εφάπτονται στην εσωτερική ακτίνα, οπότε πρέπει να απορρίπτονται οι διατάξεις για τις οποίες ισχύει:

$$2 \cdot \pi \cdot R_{in} < w_m \cdot p$$

Ένας ακόμα κατασκευαστικός περιορισμός αφορά στην κατασκευή των πηνίων. Τα πηνία τυλίγονται με το χέρι με ένα εργαλείο που επίσης κατασκευάζεται με το χέρι. Αυτό δημιουργεί ορισμένους περιορισμούς στο σχήμα πηνίου που μπορεί να παραχθεί. Πιο συγκεκριμένα, τα πηνία δε μπορεί να είναι πολύ λεπτά σε σχέση με το μήκος τους (πολύ «πλακέ») γιατί τότε δε θα μπορούν να βγουν από το εργαλείο διατηρώντας το σχήμα τους. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται μέσω του λόγου αξονικού ύψους πηνίου προς πάχος πλευράς πηνίου, t_w/w_c , που σύμφωνα με το [2] πρέπει να είναι: $t_w/w_c > 0.4$. Όμως, από την προηγούμενη εμπειρία στο εργαστήριο σε κατασκευές παρόμοιων γεννητριών, διαπιστώθηκε ότι το όριο του 0.35 είναι αρκετό για να εξασφαλίσει την κατασκευαστική λειτουργικότητα του πηνίου. Οπότε η συνάρτηση που προστέθηκε και οδηγεί στην απόρριψη των διατάξεων που την ικανοποιούν είναι:

$$\frac{t_w}{w_c} < 0.35$$

Τέλος, κατά τη διάρκεια των βελτιστοποιήσεων προέκυψε η ανάγκη για έναν περιορισμό στην ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η εσωτερική πλευρά του πηνίου w_{1in} . Συγκεκριμένα, αρκετές φορές η βελτιστοποίηση οδηγούσε σε διατάξεις που η μεταβλητή αυτή είχε αρνητική τιμή, δηλαδή οι πλάγιες πλευρές του πηνίου δεν κατέληγαν σε μία πλευρά ώστε να σχηματίζουν ένα τραπέζιο αλλά διασταυρώνονταν. Για την απόρριψη, λοιπόν, τέτοιων σχεδιάσεων χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$w_{1in} < 5$$

που οδηγεί στην απόρριψη της διάταξης αν και εφόσον η εσωτερική πλευρά των πηνίων είναι μικρότερη από 5mm.

6.2.2. Έλεγχος μεταβλητών

Οι μεταβλητές που ελέγχονται και επαναπροσδιορίζονται κατά τη διάρκεια της διαστασιολόγησης είναι η απόδοση, η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο, B_p , και η πυκνότητα μαγνητικής ροής λίγο πάνω από την επιφάνεια του μαγνήτη, B_{mg} .

Στο [27] αναφέρεται πως όταν δεν ελέγχεται η απόδοση (μέσω υπολογισμού των απωλειών της διάταξης που προκύπτει), η μετρούμενη ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από την προσδοκώμενη ισχύ, λόγω των πολύ μεγάλων

απωλειών κυρίως στο τύλιγμα, ειδικά σε μεγαλύτερες ισχύεις (>5 kW). Αυτό συμβαίνει γιατί με δεδομένο το $E_{f, \text{cutin}}$, το κάτω όριο τάσης το οποίο επιβάλλεται από τον αντιστροφέα (αντίστοιχα από τις μπαταρίες για DC σύνδεση), η ονομαστική ΗΕΔ, $E_{f, \text{nom}}$, της γεννήτριας παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της ισχύος που διαστασιολογείται. Αυτό με τη σειρά του έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ ισχυρών ρευμάτων στις μεγαλύτερες ισχύεις (της τάξης των 8 A) και άρα οδηγεί σε μεγάλες απώλειες στο τύλιγμα.

Η απόδοση, λοιπόν, δίνεται σαν είσοδος στην αρχή της διαστασιολόγησης, και αφού χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι υπόλοιπες παράμετροι της διάταξης, υπολογίζεται ξανά από τη σχέση (2.22). Σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση μεταξύ της απόδοσης που έχει οριστεί στην αρχή της διαστασιολόγησης και της υπολογισμένης απόδοσης μετά τη σχεδίαση, τότε επαναλαμβάνεται η σχεδίαση με τη νέα τιμή για την απόδοση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνουν οι δύο τιμές (αυτή που ορίζεται στην αρχή της διαστασιολόγησης και αυτή που μετράται στο τέλος από τον τύπο) ή μέχρι να γίνουν 15 επαναλήψεις. Αν τότε δεν υπάρχει σύγκλιση, η διάταξη απορρίπτεται.

Αντίστοιχα, οι τιμές για το B_p , το B_{mg} , το B_{max} και το B_{avg} δίνονται σαν είσοδοι στην αρχή της διαστασιολόγησης και αφού αυτή ολοκληρωθεί, σχεδιάζεται η διάταξη στο femm και μετρώνται εκεί οι τιμές αυτών των μεγεθών. Σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση στις τιμές που δόθηκαν ως είσοδοι για τα B_p και B_{mg} , και στις μετρούμενες, τότε οδηγούμαστε σε εκ νέου διαστασιολόγηση με αρχικές τιμές για τα B_p , B_{mg} , B_{max} και B_{avg} αυτές που μετρήθηκαν. Αν μετά από 15 επαναλήψεις δεν υπάρχει σύγκλιση, η διάταξη απορρίπτεται.

6.3. Εύρεση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ακτίνα φτερωτής

Βελτιστοποιήθηκε η σχεδίαση της γεννήτριας για φερρίτες C8 και για μαγνήτες νεοδυμίου N40. Για κάθε είδος μαγνήτη, μελετήθηκαν 4 μεγέθη γεννητριών, μεταβάλλοντας την ακτίνα φτερωτής από 1.2 έως 2.1m με βήμα 0.3m.

Σκοπός της βελτιστοποίησης ήταν η εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων μαγνήτη για κάθεμια από τις γεννήτριες, με βάση το εκάστοτε κριτήριο.

Το πεδίο ορισμού για το w_m και το I_a , όπως είπαμε, είναι 20–100 mm. Οι παραπάνω μεταβλητές μεταβάλλονται με βήμα 10mm για τα κριτήρια απόδοσης και κόστους, και με βήμα 1mm για το συνδυαστικό κριτήριο, αφού καταλήξαμε ότι δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Πιο αναλυτικά, αρχικά επιλέγεται η ακτίνα φτερωτής της γεννήτριας, R_{turb} , και για την ακτίνα αυτή, δίνονται επαναληπτικά οι τιμές των w_m και I_a , με βάση τις οποίες σχεδιάζεται κάθε φορά μια διαφορετική γεννήτρια. Όλες οι διατάξεις που σχεδιάζονται πριν την επιλογή της βέλτιστης, ελέγχονται με βάση τους περιορισμούς που αναφέραμε παραπάνω και, αναλόγως, απορρίπτονται ή όχι.

Για όλες τις διατάξεις που δεν απορρίπτονται υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, που -αναλόγως το κριτήριο- έχει τη μορφή που φαίνεται στον πίνακα:

Κριτήριο	Αντικειμενική συνάρτηση
Κριτήριο βέλτιστης απόδοσης	Output=efficiency
Κριτήριο ελάχιστου κόστους	Output=totalcost
Συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης-κόστους	Output=efficiency*1000-totalcost

Πίνακας 6.1. Μορφή αντικειμενικής συνάρτησης για τα διαφορετικά κριτήρια

Οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη για κάθε μέγεθος γεννήτριας είναι αυτές που ορίζουν τη διάταξη η οποία μεγιστοποιεί (ή αντίστοιχα ελαχιστοποιεί, για το κριτήριο ελάχιστου κόστους) την αντικειμενική συνάρτηση.

6.3.1. Μαγνήτες C8

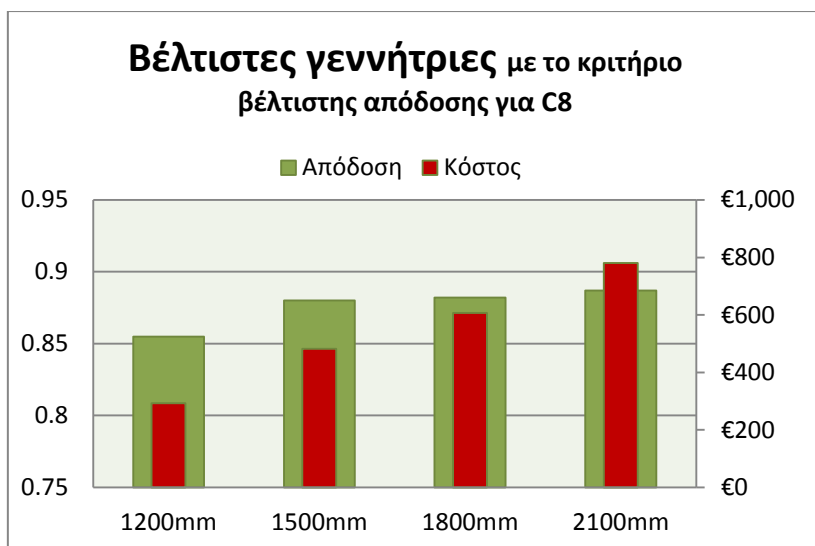
Αφού βρέθηκαν, σύμφωνα με κάθε κριτήριο, οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη για κάθε μέγεθος γεννήτριας, σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν οι γεννήτριες. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται παρακάτω.

6.3.1.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Κριτήριο βέλτιστης απόδοσης

Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης					
	Ακτίνα φτερωτής	w_m	I_a	Κόστος	Απόδοση
∞	1200mm	60mm	50mm	292.4€	0.855
	1500mm	70mm	80mm	481.6€	0.88
	1800mm	70mm	80mm	606.8€	0.882
	2100mm	80mm	90mm	780.3	0.887

Πίνακας 6.2. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης

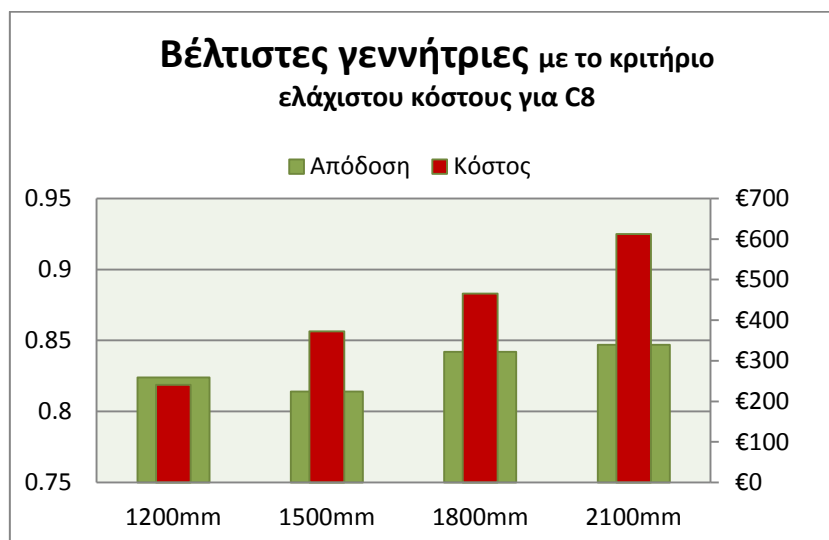


Σχήμα 6.1. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης

Κριτήριο ελάχιστου κόστους

Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το κριτήριο ελάχιστου κόστους					
C8	Ακτίνα φτερωτής	w_m	l_a	Κόστος	Απόδοση
	1200mm	40mm	40mm	240.7€	0.824
	1500mm	50mm	50mm	372.4€	0.814
	1800mm	50mm	50mm	465.9€	0.842
	2100mm	50mm	70mm	612.6€	0.847

Πίνακας 6.3. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το κριτήριο ελάχιστου κόστους

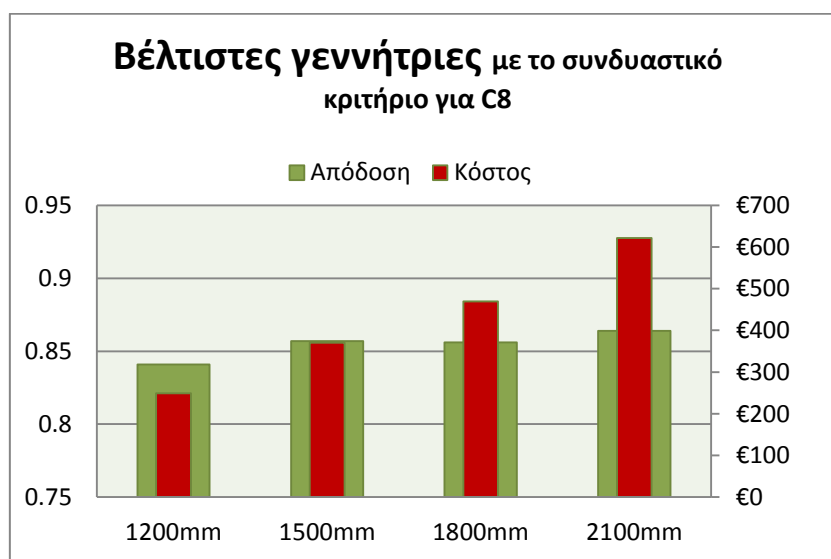


Σχήμα 6.2. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το κριτήριο ελάχιστου κόστους

Συνδυαστικό κριτήριο βέλτιστης απόδοσης-ελάχιστου κόστους

Συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης-κόστους					
C8	Ακτίνα φτερωτής	w_m	l_a	Κόστος	Απόδοση
	1200mm	50mm	40mm	249.3€	0.841
	1500mm	60mm	50mm	370.4€	0.857
	1800mm	50mm	60mm	469.8€	0.856
	2100mm	60mm	70mm	621.8€	0.864

Πίνακας 6.4. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



Σχήμα 6.3. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο

6.3.1.2. Σύγκριση κριτηρίων και βελτιστοποίηση μεγαλύτερης ακρίβειας με το επιλεγμένο κριτήριο

Παρακάτω φαίνεται το κόστος και η απόδοση των βέλτιστων διατάξεων για κάθε μέγεθος γεννήτριας. Έτσι, μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα των διαφορετικών κριτηρίων και να επιλεγθεί αυτό που μας ικανοποιεί περισσότερο.

Σύγκριση κριτηρίων για κάθε γεννήτρια

R _{turb} =1200mm					
∞	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	60mm	50mm	292.4€	0.855
	Ελάχ. κόστους	40mm	40mm	240.7€	0.824
	Συνδυαστικό	50mm	40mm	249.3€	0.841

R _{turb} =1500mm					
∞	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	70mm	80mm	481.6€	0.88
	Ελάχ. κόστους	50mm	50mm	363.3€	0.842
	Συνδυαστικό	60mm	50mm	370.4€	0.857

R _{turb} =1800mm					
∞	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	70mm	80mm	606.8€	0.882
	Ελάχ. κόστους	50mm	50mm	465.9€	0.842
	Συνδυαστικό	50mm	60mm	469.8€	0.856

R _{turb} =2100mm					
∞	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	80mm	90mm	780.3	0.887
	Ελάχ. κόστους	50mm	70mm	612.6€	0.847
	Συνδυαστικό	60mm	70mm	621.8€	0.864

Πίνακας 6.5. Σύγκριση κριτηρίων βελτιστοποίησης για το μαγνήτη C8

Αναφέρουμε ως παράδειγμα τη σύγκριση των κριτηρίων για τις γεννήτριες με R_{turb}=1200mm:

Συγκρίνοντας τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο το ελάχιστο κόστος και τη βέλτιστη γεννήτρια με το συνδυαστικό κριτήριο παρατηρούμε ότι η δεύτερη γεννήτρια κοστίζει 9€ παραπάνω και έχει απόδοση 0.841, αντί 0.824 που έχει η πρώτη.

R _{turb} =1200mm			
∞	Κριτήριο	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	292.4€	0.855
	Ελάχ. κόστους	240.7€	0.824
	Συνδυαστικό	249.3€	0.841

Πίνακας 6.6. Σύγκριση κριτηρίου ελάχιστου κόστους και συνδυαστικού κριτηρίου για το μαγνήτη C8

Επίσης, συγκρίνοντας τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο τη βέλτιστη απόδοση και τη βέλτιστη γεννήτρια με το συνδυαστικό κριτήριο βλέπουμε πάλι ότι η τελευταία έχει απόδοση 0.841 (αντί 0.855 που έχει η πρώτη) αλλά κοστίζει 43€ λιγότερο.

$R_{\text{turb}}=1200\text{mm}$			
∞	Κριτήριο	Κόστος	Απόδοση
	<i>Βέλτ. απόδοσης</i>	292.4€	0.855
	<i>Ελάχ. κόστους</i>	240.7€	0.824
	<i>Συνδυαστικό</i>	249.3€	0.841

Πίνακας 6.7. Σύγκριση κριτηρίου βέλτιστης απόδοσης και συνδυαστικού κριτηρίου για το μαγνήτη C8

Τέλος, συγκρίνουμε τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο τη βέλτιστη απόδοση και τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο το ελάχιστο κόστος. Παρατηρούμε ότι η πρώτη έχει καλύτερη απόδοση (0.855 έναντι 0.824 της δεύτερης) αλλά κοστίζει 52€ περισσότερο.

$R_{\text{turb}}=1200\text{mm}$			
∞	Κριτήριο	Κόστος	Απόδοση
	<i>Βέλτ. απόδοσης</i>	292.4€	0.855
	<i>Ελάχ. κόστους</i>	240.7€	0.824
	<i>Συνδυαστικό</i>	249.3€	0.841

Πίνακας 6.8. Σύγκριση κριτηρίου βέλτιστης απόδοσης και κριτηρίου ελάχιστου κόστους για το μαγνήτη C8

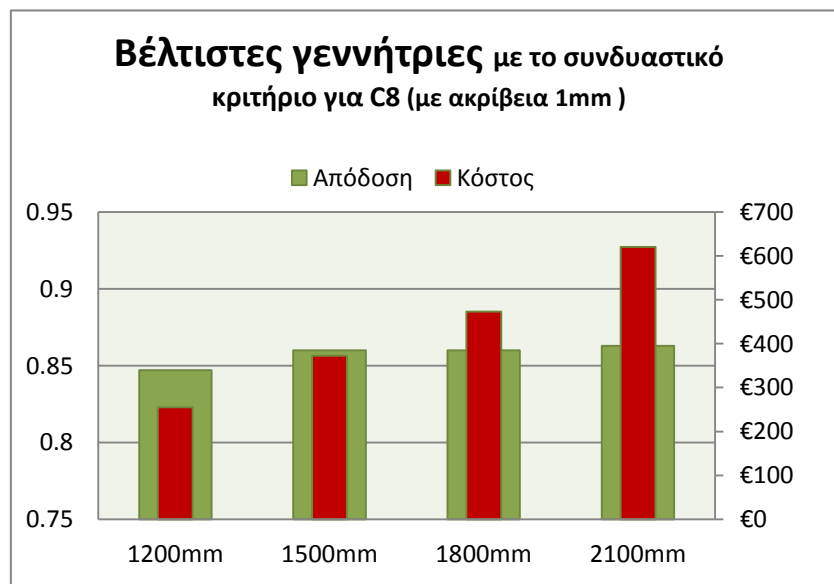
Με βάση τις δύο πρώτες συγκρίσεις θεωρούμε ότι τα αποτελέσματα με το συνδυαστικό κριτήριο μας ικανοποιούν περισσότερο σε σχέση με τα άλλα δύο κριτήρια. Αντίθετα από την τελευταία σύγκριση δεν ξεχωρίζουμε ξεκάθαρα ως προτιμότερο κάποιο από τα δύο κριτήρια.

Αφού επιλέξαμε ως βέλτιστο κριτήριο το συνδυαστικό, επαναλάβαμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης με αυτό μόνο το κριτήριο για όλα τα μεγέθη γεννητριών. Αυτή τη φορά μεταβάλαμε τις μεταβλητές βελτιστοποίησης (πλάτος και μήκος μαγνήτη) ανά 1mm ώστε να βρούμε το βέλτιστο μαγνήτη για κάθε μέγεθος γεννήτριας με καλή ακρίβεια. Οι βέλτιστες διατάξεις και κάποια βασικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω:

Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης-κόστους					
C8	Ακτίνα φτερωτής	w_m	l_a	Κόστος	Απόδοση
	1200mm	49mm	45mm	256€	0.846
	1500mm	60mm	52mm	374.9€	0.859
	1800mm	55mm	57mm	477.7€	0.859
	2100mm	63mm	66mm	626€	0.863

Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης-κόστους									
C8	Ακτίνα φτερωτής	P_{nom} (W)	R_{out} (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm^3)	a_i	k_d	N_c	sc (mm^2)
	1200mm	793.5	199.5	23.61	9.87	0.71	0.773	81	1.37
	1500mm	1245.7	253.4	38.31	15.93	0.68	0.793	70	2.27
	1800mm	1784.7	297.3	51.93	21.94	0.65	0.81	54	2.98
	2100mm	2433.6	345.4	70.24	29.62	0.64	0.81	47	4.06

Πίνακας 6.9. Χαρακτηριστικά βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



Σχήμα 6.4. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη C8 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο

Δύο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ελεγχθούν για τις συγκεκριμένες διατάξεις έχουν σχέση με το βάρος και την εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας. Θεωρούμε ως ανώτατο όριο βάρους για τη γεννήτρια τα 30kg/δίσκο ώστε να μπορεί ένας μέσος άνθρωπος να σηκώσει τα κομμάτια και να τη συναρμολογήσει. Η μεγαλύτερη από τις παραπάνω γεννήτριες ζυγίζει 70kg, από τα οποία περίπου 11kg ζυγίζουν τα πηνία και η ρητίνη, οπότε κάθε δίσκος του δρομέα ζυγίζει λιγότερο από 30kg.

Ένας δεύτερος περιορισμός είναι η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας να μην ξεπερνάει το 1/6 της ακτίνας των πτερυγίων, ώστε να μην επηρεάζει την αεροδυναμική τους συμπεριφορά. Υπολογίζοντας το 1/6 της εξωτερικής ακτίνας των παραπάνω διατάξεων βλέπουμε και πάλι ότι είμαστε, οριακά έστω, εντός του ορίου.

6.3.2 Μαγνήτες N40

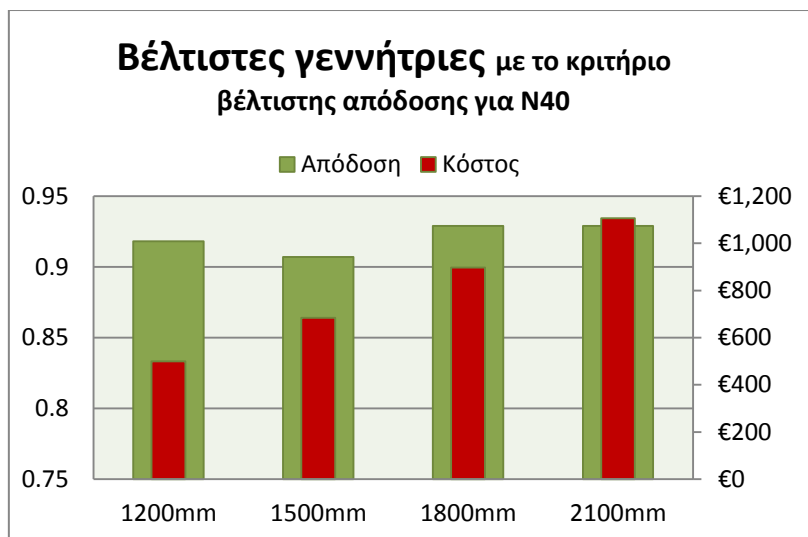
Και πάλι, αφού βρέθηκαν οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη για κάθε μέγεθος γεννήτριας και σύμφωνα με κάθε κριτήριο, σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν οι γεννήτριες.

6.3.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Κριτήριο βέλτιστης απόδοσης

Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης					
N40	Ακτίνα φτερωτής	w_m	l_a	Κόστος	Απόδοση
	1200mm	40mm	80mm	499.9€	0.918
	1500mm	50mm	90mm	683.9€	0.907
	1800mm	50mm	90mm	897€	0.929
	2100mm	70mm	80mm	1106€	0.929

Πίνακας 6.10. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης

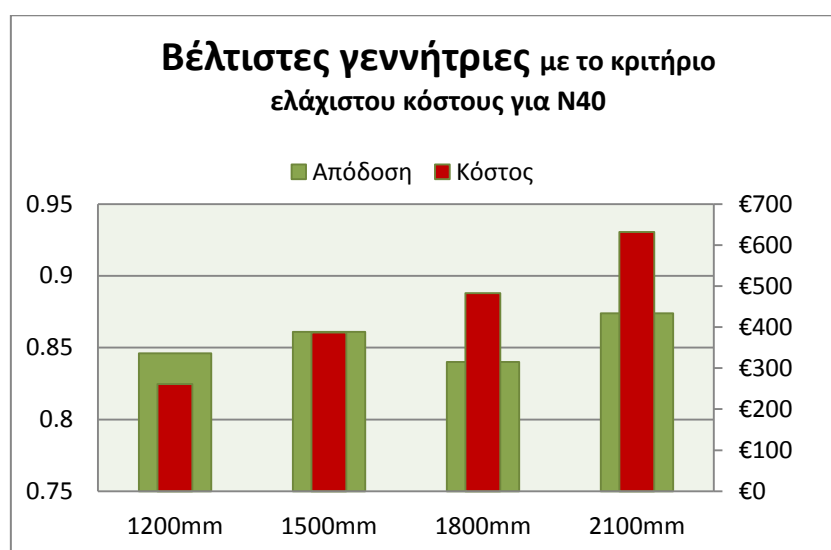


Σχήμα 6.5. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης

Κριτήριο ελάχιστου κόστους

Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το κριτήριο ελάχιστου κόστους					
N40	Ακτίνα φτερωτής	w_m	l_a	Κόστος	Απόδοση
	1200mm	30mm	30mm	261.6€	0.846
	1500mm	30mm	50mm	387€	0.861
	1800mm	30mm	40mm	483€	0.84
	2100mm	40mm	50mm	632.1€	0.874

Πίνακας 6.11. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το κριτήριο ελάχιστου κόστους

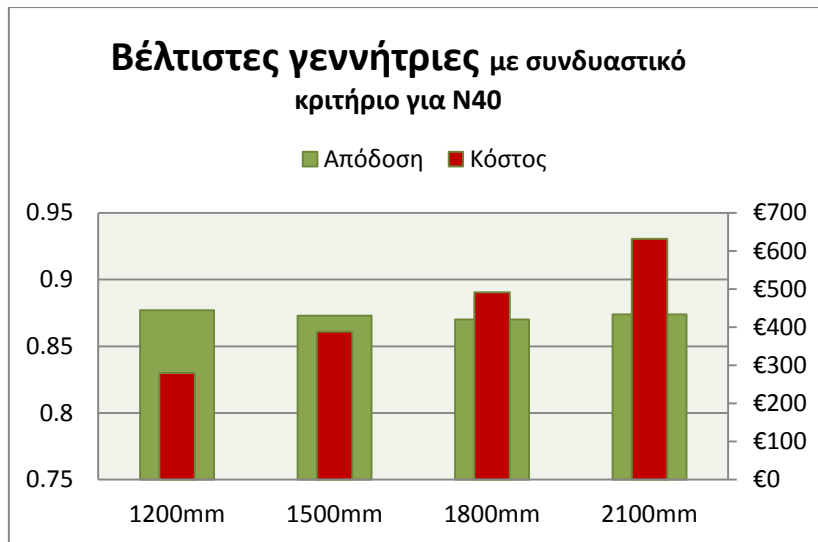


Σχήμα 6.6. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το κριτήριο ελάχιστου κόστους

Συνδυαστικό κριτήριο βέλτιστης απόδοσης-ελάχιστου κόστους

Συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης-κόστους					
N40	Ακτίνα φτερωτής	w_m	l_a	Κόστος	Απόδοση
	1200mm	30mm	40mm	279.7€	0.877
	1500mm	40mm	40mm	388€	0.873
	1800mm	30mm	50mm	491.5€	0.87
	2100mm	40mm	50mm	632.1€	0.874

Πίνακας 6.12. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



Σχήμα 6.7. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο

6.3.2.2. Σύγκριση κριτηρίων και βελτιστοποίηση μεγαλύτερης ακρίβειας με το επιλεγμένο κριτήριο

Όπως κάναμε στην προηγούμενη ενότητα για τους φερρίτες, θα συγκρίνουμε και εδώ τα αποτελέσματα των διαφορετικών κριτηρίων για να επιλεγθεί αυτό που μας ικανοποιεί περισσότερο. Παρακάτω φαίνεται το κόστος και η απόδοση των βέλτιστων διατάξεων για κάθε μέγεθος γεννήτριας:

N40	R _{turb} =1200mm				
	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	40mm	80mm	499.9€	0.918
	Ελάχ. κόστους	30mm	30mm	261.6€	0.846
Συνδυαστικό	30mm	40mm	279.7€	0.877	

N40	R _{turb} =1500mm				
	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	45mm	75mm	691.3€	0.929
	Ελάχ. κόστους	30mm	50mm	387€	0.861
Συνδυαστικό	40mm	40mm	388€	0.873	

N40	R _{turb} =1800mm				
	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	50mm	90mm	897€	0.929
	Ελάχ. κόστους	30mm	40mm	483€	0.84
Συνδυαστικό	30mm	50mm	491.5€	0.87	

N40	R _{turb} =2100mm				
	Κριτήριο	w _m	l _a	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	70mm	80mm	1106€	0.929
	Ελάχ. κόστους	40mm	50mm	632.1€	0.874
	Συνδυαστικό	40mm	50mm	632.1€	0.874

Πίνακας 6.13. Σύγκριση κριτηρίων βελτιστοποίησης για το μαγνήτη N40

Θα αναφέρουμε ως παράδειγμα τη σύγκριση των κριτηρίων για τις γεννήτριες με R_{turb}=1800mm.

Συγκρίνοντας τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο το ελάχιστο κόστος και τη βέλτιστη γεννήτρια με το συνδυαστικό κριτήριο παρατηρούμε ότι η δεύτερη γεννήτρια κοστίζει 8.5€ περισσότερο και έχει απόδοση 0.87, αντί 0.84 που έχει η πρώτη.

N40	R _{turb} =1800mm		
	Κριτήριο	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	897€	0.929
	Ελάχ. κόστους	483€	0.84
	Συνδυαστικό	491.5€	0.87

Πίνακας 6.14. Σύγκριση κριτηρίου ελάχιστου κόστους και συνδυαστικού κριτηρίου για το μαγνήτη N40

Επίσης, συγκρίνοντας τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο τη βέλτιστη απόδοση και τη βέλτιστη γεννήτρια με το συνδυαστικό κριτήριο βλέπουμε ότι η πρώτη έχει μεν καλύτερη απόδοση (0.93 αντί 0.87 που έχει η δεύτερη) αλλά κοστίζει 406€ περισσότερο.

N40	R _{turb} =1800mm		
	Κριτήριο	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	897€	0.929
	Ελάχ. κόστους	483€	0.84
	Συνδυαστικό	491.5€	0.87

Πίνακας 6.15. Σύγκριση κριτηρίου βέλτιστης απόδοσης και συνδυαστικού κριτηρίου για το μαγνήτη N40

Τέλος, συγκρίνουμε τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο τη βέλτιστη απόδοση και τη βέλτιστη γεννήτρια με κριτήριο το ελάχιστο κόστος. Παρατηρούμε ότι η πρώτη έχει καλύτερη απόδοση (0.93 έναντι 0.84 της δεύτερης) αλλά κοστίζει 414€ περισσότερο.

N40	R _{turb} =1800mm		
	Κριτήριο	Κόστος	Απόδοση
	Βέλτ. απόδοσης	897€	0.929
	Ελάχ. κόστους	483€	0.84
Συνδυαστικό	491.5€	0.87	

Πίνακας 6.16. Σύγκριση κριτηρίου βέλτιστης απόδοσης και κριτηρίου ελάχιστου κόστους για το μαγνήτη N40

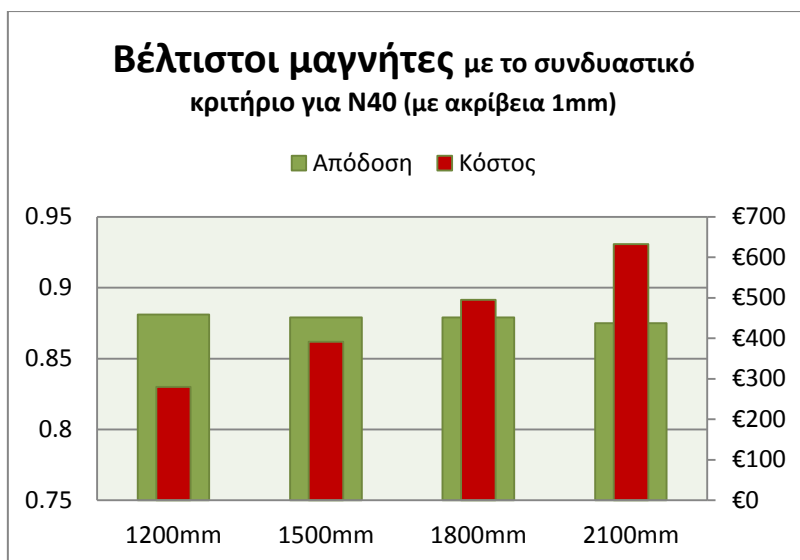
Με βάση τις παραπάνω συγκρίσεις θεωρούμε ότι τα αποτελέσματα με το συνδυαστικό κριτήριο μας ικανοποιούν περισσότερο σε σχέση με τα άλλα δύο κριτήρια. Το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης επιλέγει γεννήτριες με μεγάλους μαγνήτες οπότε το κόστος αυξάνεται κατακόρυφα, λόγω της πολύ υψηλής τιμής των συγκεκριμένων μαγνητών. Αντίθετα το συνδυαστικό κριτήριο και το κριτήριο ελάχιστου κόστους επιλέγουν γεννήτριες με παρόμοιο κόστος αλλά οι γεννήτριες του συνδυαστικού κριτηρίου έχουν αρκετά καλύτερη απόδοση.

Αφού επελέγη το συνδυαστικό κριτήριο ως βέλτιστο, επαναλάβαμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης με αυτό μόνο το κριτήριο για όλα τα μεγέθη γεννητριών αλλά μεταβάλλοντας τις μεταβλητές βελτιστοποίησης ανά 1mm. Οι βέλτιστες διατάξεις και τα βασικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω:

N40	Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης-κόστους				
	Ακτίνα φτερωτής	w _m (ανά mm)	l _a (ανά mm)	Κόστος	Απόδοση
	1200mm	34mm	36mm	280€	0.881
	1500mm	39mm	43mm	391.2€	0.879
	1800mm	36mm	44mm	495.3€	0.879
	2100mm	39mm	52mm	633.1€	0.875

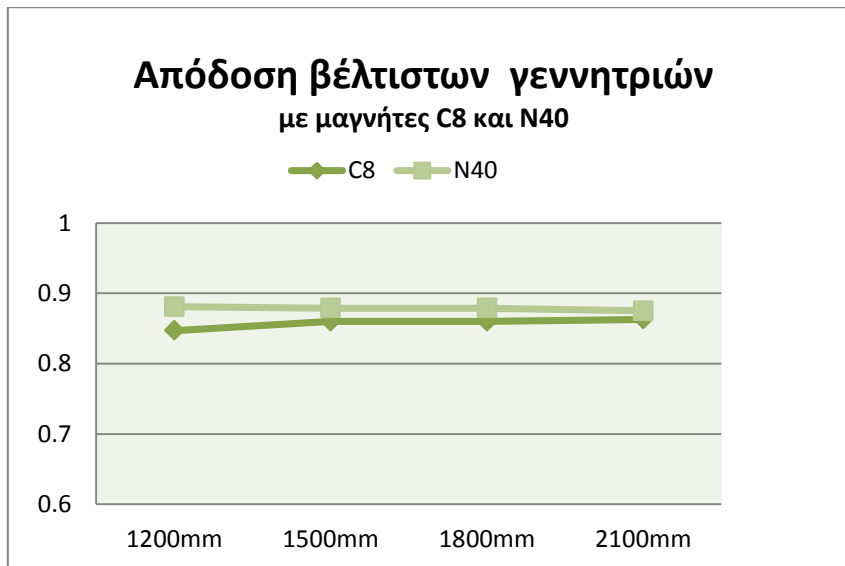
N40	Βέλτιστες γεννήτριες σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης-κόστους								
	Ακτίνα φτερωτής	P _{nom} (W)	R _{out} (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	a _i	k _d	N _c	sc (mm ²)
	1200mm	821.5	142.3	12.91	3.75	0.53	0.75	103	1.37
	1500mm	1272	185.5	22.36	6.38	0.46	0.77	94	2.27
	1800mm	1822.6	220.4	30.43	9	0.46	0.8	67	2.98
	2100mm	2464.2	259.7	42.59	12.5	0.43	0.8	61	4.06

Πίνακας 6.17. Χαρακτηριστικά βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



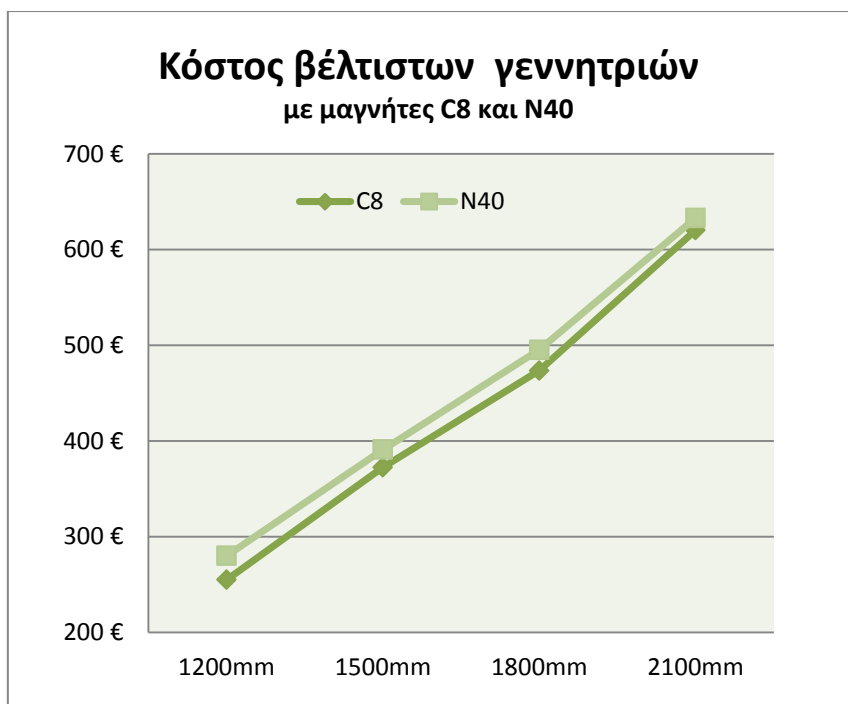
Σχήμα 6.8. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο

6.3.3. Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες C8 και βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N40



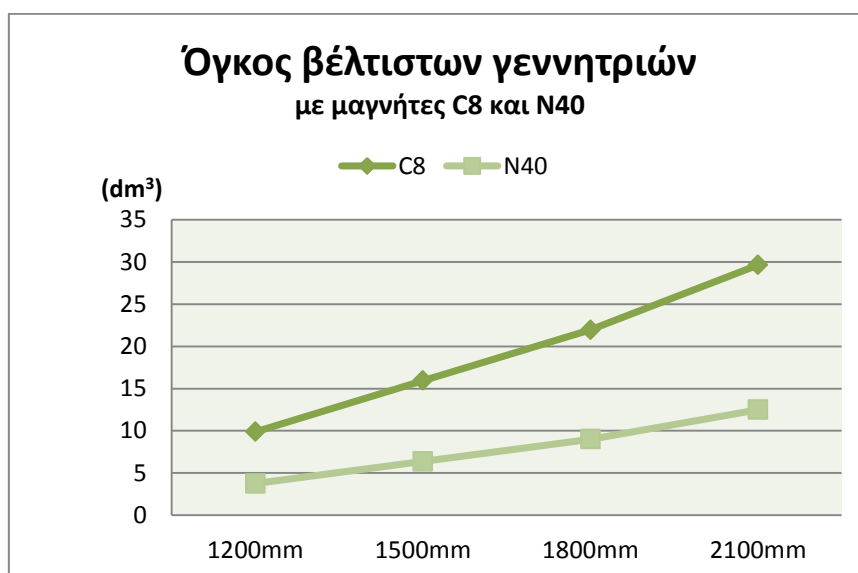
Σχήμα 6.9. Σύγκριση απόδοσης των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες C8 και N40

Οι γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου φαίνεται να έχουν λίγο καλύτερη απόδοση από τις αντίστοιχες γεννήτριες με φερρίτες, ειδικά για την πιο μικρή διάμετρο φτερωτής, αλλά η διαφορά αυτή μειώνεται όσο μεγαλώνει η διάμετρος.

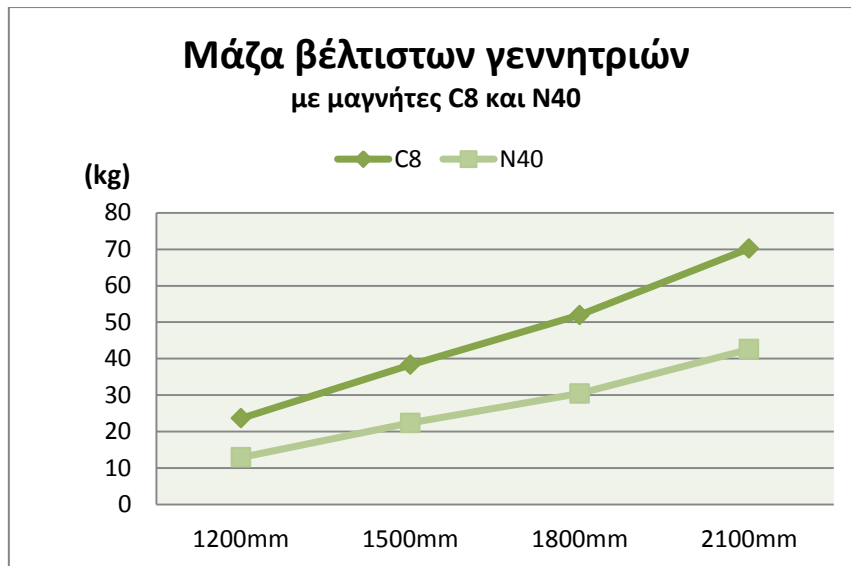


Σχήμα 6.10. Σύγκριση κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες C8 και N40

Από την άλλη βλέπουμε ότι οι γεννήτριες με φερρίτες έχουν λίγο μικρότερο κόστος, ειδικά για την πιο μικρή διάμετρο φτερωτής, αλλά με την αύξηση της διαμέτρου η διαφορά μειώνεται.



Σχήμα 6.11. Σύγκριση όγκου των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες C8 και N40



Σχήμα 6.12. Σύγκριση μάζας των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες C8 και N40

Στα σχήματα 6.11. και 6.12. φαίνεται η μεγάλη διαφορά στον όγκο και στη μάζα που έχουν οι γεννήτριες με τα δύο διαφορετικά μαγνητικά υλικά. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού στις γεννήτριες με φερρίτες, προκειμένου να πετύχουμε ίδια απόδοση με τις γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου, αυξήσαμε τους πόλους, γεγονός που οδήγησε και σε σημαντική αύξηση της διαμέτρου της γεννήτριας.

Κεφάλαιο 7: Εύρεση βέλτιστου καθολικού μαγνήτη για γεννήτριες με R_{turb} από 1.2 έως 2.1m

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, αναζητούμε τις διαστάσεις (μήκος και πλάτος) που θα μας δώσουν το βέλτιστο μαγνήτη ο οποίος θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος διαστάσεων φτερωτής που μελετάμε. Η χρήση ενός μόνο μαγνήτη είναι επιθυμητή δεδομένου ότι μειώνεται πολύ το κόστος παραγωγής του και αγοράς του λόγω των μεγαλύτερων ποσοτήτων σε τυχόν παραγγελίες. Επίσης, λόγω της μεγαλύτερης ζήτησης που θα έχει ένας μαγνήτης κατάλληλος για πολλές διαφορετικές γεννήτριες, αυξάνεται και η πιθανότητα άμεσης διαθεσιμότητάς του στην αγορά.

Το κριτήριο της βελτιστοποίησης εδώ είναι το συνδυαστικό κριτήριο, αφού, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, φέρνει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

7.1. Αλγόριθμος εύρεσης καθολικού μαγνήτη

Η διαδικασία που ακολουθούμε για την εύρεση του καθολικού μαγνήτη είναι η εξής:

Αρχικά μεταβάλλουμε εξωτερικά τις διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a , που είναι και οι μεταβλητές που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Παίρνουν ένα μεγάλο εύρος τιμών ώστε να καλύψουμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τους. Στη συνέχεια μεταβάλλουμε την ακτίνα φτερωτής που θέλουμε να έχει κάθε φορά η γεννήτρια και άρα την ισχύ που θέλουμε να παράγει. Οι γεννήτριες που σχεδιάζονται ελέγχονται έπειτα με βάση τους περιορισμούς που έχουμε περιγράψει στο προηγούμενο κεφάλαιο και αν δεν τους ικανοποιούν απορρίπτονται. Από τις γεννήτριες που μένουν, επιλέγεται αυτή που μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση του συνδυαστικού κριτηρίου ($\text{output} = \text{efficiency} * 1000 - \text{totalcost}$). Έτσι, για δεδομένες διαστάσεις μαγνήτη κάθε φορά, έχουμε σχεδιάσει τις βέλτιστες γεννήτριες σε όλο το εύρος διαστάσεων φτερωτής.

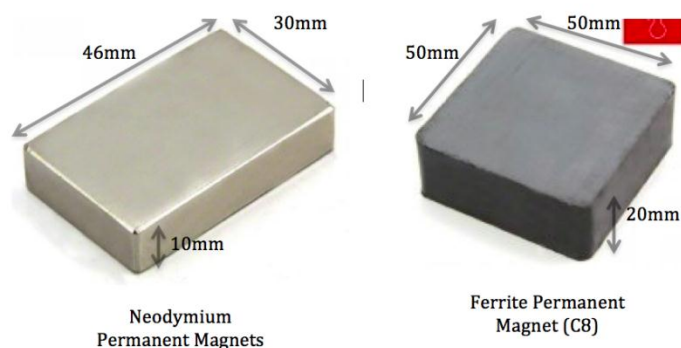
Στο σημείο αυτό, υπολογίζεται το άθροισμα των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης για τις γεννήτριες αυτές και αποθηκεύεται σε έναν πίνακα. Το άθροισμα αυτό θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την επιλογή του καθολικού μαγνήτη. Η διαδικασία αυτή

επαναλαμβάνεται για όλους τους συνδυασμούς w_m και I_a , οπότε στο τέλος για κάθε μαγνήτη έχουμε κρατήσει το άθροισμα των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης των βέλτιστων -για κάθε ακτίνα φτερωτής- διατάξεων που σχεδιάζονται με χρήση αυτού. Τέλος, συγκρίνοντας τα αθροίσματα αυτά βρίσκουμε το μέγιστο και επιλέγουμε το μαγνήτη που μας το δίνει, καθώς μέγιστο άθροισμα σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος μαγνήτης μας δίνει το βέλτιστο συνδυασμό απόδοσης – κόστους συνολικά σε όλο το εύρος των γεννητριών που μελετάμε.

Η βελτιστοποίηση για εύρεση καθολικού μαγνήτη γίνεται για τους φερρίτες βαθμού C8 και τους μαγνήτες νεοδυμίου βαθμού N40.

7.2. Εμπορικοί και καθολικοί μαγνήτες C8 και N40

Στο σχήμα 7.1. [21] φαίνονται οι διαστάσεις του μαγνήτη νεοδυμίου και του φερρίτη που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα στην κατασκευή γεννητριών αξονικής ροής με το σχέδιο του Piggott.



Σχήμα 7.1. Διαστάσεις μαγνήτη νεοδυμίου και φερρίτη για κατασκευή α/γ αξονικής ροής με το σχέδιο του Piggott

Οι μαγνήτες αυτοί, που στο εξής θα αναφέρονται ως εμπορικοί μαγνήτες, θα συγκριθούν στη συνέχεια με τους αντίστοιχους καθολικούς μαγνήτες και θα εκτιμηθεί αν αξίζει να αντικατασταθούν από αυτούς.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το εύρος τιμών που παίρνουν οι μεταβλητές βελτιστοποίησης κατά τη διαδικασία αναζήτησης καθολικού μαγνήτη καθώς και οι τελικές διαστάσεις των δύο καθολικών μαγνητών που βρέθηκαν (ένας για κάθε είδος μαγνήτη):

Ακτίνα φτερωτής	Εξεταζόμενο εύρος διαστάσεων μαγνήτη (mm)	
	C8	N40
1200mm	w _m : 20-90 l _a : 20-100	w _m : 20-100 l _a : 20-100
1500mm	w _m : 30-100 l _a : 20-100	w _m : 20-100 l _a : 20-100
1800mm	w _m : 30-100 l _a : 20-100	w _m : 20-100 l _a : 20-100
2100mm	w _m : 35-100 l _a : 30-100	w _m : 20-100 l _a : 20-100
	Κοινό εύρος (mm)	
	w _m : 35-90 l _a : 30-100	w _m : 20-100 l _a : 20-100
	Διαστάσεις καθολικού μαγνήτη (mm)	
	w _m =55 l _a =62	w _m =39 l _a =49

Πίνακας 7.1. Εύρος τιμών μεταβλητών βελτιστοποίησης και διαστάσεις καθολικού μαγνήτη.

Βλέπουμε ότι οι φερρίτες δεν εξετάζονται στο εύρος 20-100mm όπως στην προηγούμενη διαδικασία βελτιστοποίησης (κεφάλαιο 6), αλλά για w_m : 35-90mm και l_a : 30-100mm. Μικρώναμε το πεδίο ορισμού γιατί κατά την προηγούμενη βελτιστοποίηση οι διατάξεις για τις τιμές των w_m και l_a που δε συμπεριλάβαμε στο νέο πεδίο τιμών απορρίφθηκαν.

Οπότε ο καθολικός μαγνήτης C8 είναι ο $55 \times 62 \text{ mm}$ και ο καθολικός μαγνήτης N40 ο $39 \times 49 \text{ mm}$. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι μαγνήτες αυτοί με τους αντίστοιχους εμπορικούς.

7.3. Σύγκριση διατάξεων με χρήση καθολικού και με χρήση εμπορικού μαγνήτη

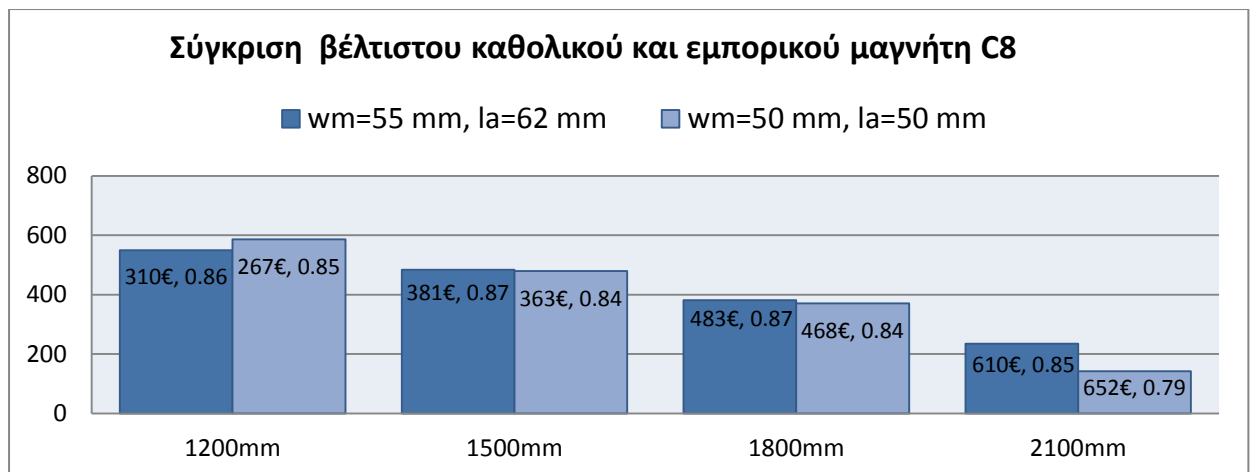
7.3.1. Μαγνήτες C8

C8	w _m =55, l _a =62 (βέλτιστος)	Output=1000*Απόδοση-Κόστος Συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους	Απόδοση	Κόστος (€)
	1200mm	549.9	0.86	310.1
	1500mm	483.7	0.865	381.3
	1800mm	381.6	0.865	483.4
	2100mm	234.9	0.845	610.1
	w _m =l _a =50 (εμπορικός)	Output=1000*Απόδοση-Κόστος Συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους	Απόδοση	Κόστος (€)
	1200mm	586.2	0.852	266.8
	1500mm	479.7	0.843	363.3
	1800mm	370.7	0.839	468.3
	2100mm	141.8	0.794	652.2

C8	wm=55, la=62 (βέλτιστος)	P _{nom} (W)	R _{out} (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	a _i	k _d	N _c	sc (mm ²)
	1200mm	809.2	207	24.95	10.64	0.80	0.70	52	1.37
	1500mm	1256.1	246.3	36.56	15.05	0.66	0.75	64	2.27
	1800mm	1808.3	292.3	50.19	21.21	0.67	0.79	49	2.98
	2100mm	2359	349.11	72.88	30.25	0.55	0.82	57	4.06
	wm=la=50 (εμπορικός)	P _{nom} (W)	R _{out} (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	a _i	k _d	N _c	sc (mm ²)
	1200mm	802.9	199.1	23.42	9.84	0.74	0.75	71	1.37
	1500mm	1201.1	253.5	39.35	15.96	0.56	0.8	88	2.27
	1800mm	1719.5	306	55.63	23.24	0.57	0.84	68	2.98
	2100mm ³	2181.1	384.6	89.18	36.71	0.44	0.87	79	4.06

Πίνακας 7.2. Βασικά χαρακτηριστικά γεννητριών με χρήση του καθολικού και του εμπορικού μαγνήτη C8.

Στο σχήμα 7.2. παρουσιάζεται συγκριτικά η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του συνδυαστικού κριτηρίου (1000*Απόδοση-Κόστος) για όλες τις διαστάσεις γεννητριών με χρήση του καθολικού και του εμπορικού μαγνήτη C8. Η τιμή αυτή έχει νόημα μόνο συγκριτικά και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο καλύτερη είναι η συγκεκριμένη διάταξη σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο. Για κάθε γεννήτρια φαίνονται στο σχήμα και οι τιμές που παίρνουν η απόδοση και το κόστος.



Σχήμα 7.2. Σύγκριση αντικειμενικής συνάρτησης, απόδοσης και κόστους του καθολικού και του εμπορικού μαγνήτη C8

³ Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει με άρση του περιορισμού $t_w/w_c \leq 0.35$.

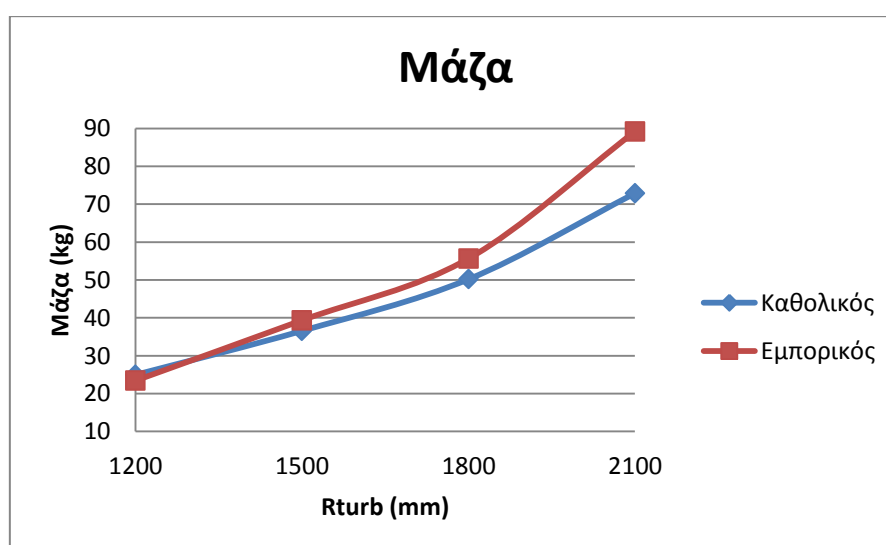
Ο καθολικός μαγνήτης έχει για όλες τις γεννήτριες καλύτερη απόδοση από τον εμπορικό και μάλιστα, για τη μεγαλύτερη γεννήτρια ($R_{\text{turb}}=2100\text{mm}$) έχει και καλύτερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος, οπότε εκεί υπερτερεί σημαντικά.

Γενικά ο καθολικός φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα από τον εμπορικό μαγνήτη για όλες τις γεννήτριες εκτός αυτής με $R_{\text{turb}}=1200\text{mm}$, όπου, σύμφωνα πάντα με το συνδυαστικό κριτήριο, ο εμπορικός μαγνήτης είναι λίγο καλύτερος.

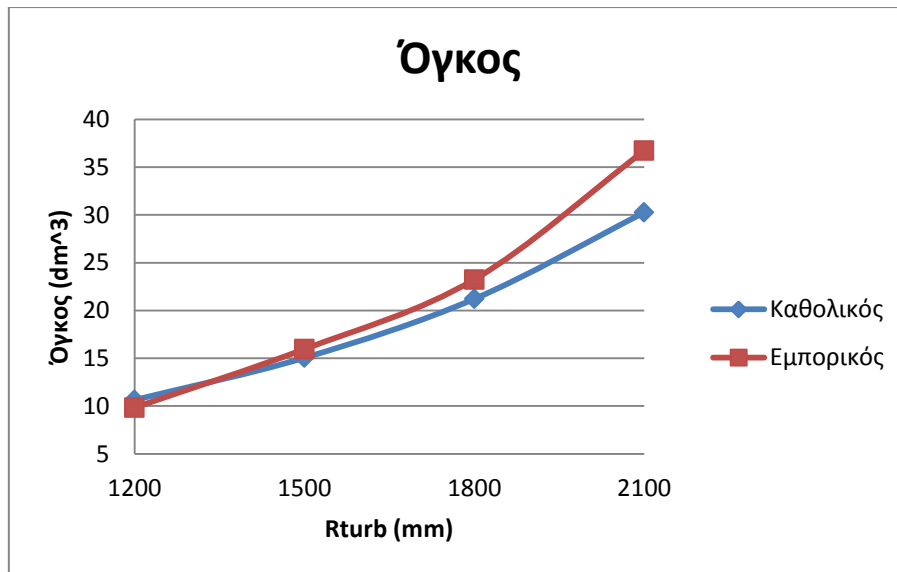
Με βάση το σχήμα 7.2. μπορούμε να πούμε ότι με μια μέση αύξηση κόστους κατά 8.5€ έχουμε μέση αύξηση απόδοσης κατά 0.027 αν χρησιμοποιούμε τον καθολικό μαγνήτη αντί του εμπορικού.

Πάντως πρέπει να επισημανθεί ότι ακόμα και για τη μεγαλύτερη γεννήτρια, το πλεονέκτημα του καθολικού μαγνήτη έναντι του εμπορικού στην απόδοση κατά 0.06 δε θα ίσχυε πρακτικά κατά τη λειτουργία δύο τέτοιων ανεμογεννητριών. Έχουμε κάνει βελτιστοποίηση της απόδοσης σε ονομαστική λειτουργία, που σημαίνει ότι τις αποδόσεις αυτές θα έχουν οι γεννήτριες στον ονομαστικό άνεμο, 10m/s. Στην πράξη μια ανεμογεννήτρια λειτουργεί πιο συχνά στο μέσο άνεμο και όχι στον ονομαστικό. Εκεί η απόδοσή της θα είναι ένα ποσοστό της βέλτιστης απόδοσης που είναι σχεδιασμένη να έχει στον ονομαστικό άνεμο.

Στη συνέχεια συγκρίνουμε τις διατάξεις με τους διαφορετικούς μαγνήτες ως προς τη μάζα και τον όγκο, που είναι δύο κρίσιμες παράμετροι για τη σχεδίαση γεννητριών με φερρίτες, καθώς τείνουν να πάρουν αρκετά μεγάλες τιμές και πρέπει να ελέγχονται.



Σχήμα 7.3. Σύγκριση μάζας καθολικού και εμπορικού μαγνήτη C8



Σχήμα 7.4. Σύγκριση όγκου καθολικού και εμπορικού μαγνήτη C8

Βλέπουμε ότι όσο αυξάνει η ακτίνα φτερωτής, οι διατάξεις με τον εμπορικό μαγνήτη έχουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές μάζας και όγκου. Ειδικά για τη γεννήτρια με $R_{\text{turb}}=2100\text{mm}$ η μάζα παίρνει τιμή εκτός του ορίου που έχουμε θέσει (μέγιστο βάρος 30kg για κάθε δίσκο του δρομέα). Επίσης, εξετάζοντας τις εξωτερικές ακτίνες των γεννητριών με τον εμπορικό μαγνήτη στον Πίνακα 7.2. βλέπουμε ότι και εκεί έχουμε υπέρβαση του ορίου (η εξωτερική ακτίνα να μην υπερβαίνει το 1/6 της ακτίνας των περυγίων) για τη μεγαλύτερη γεννήτρια.

Ενώ λοιπόν, ως προς την απόδοση και το κόστος, ο καθολικός μαγνήτης δεν παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα υπέρ του εμπορικού, συγκρίνοντας τη μάζα και τον όγκο των γεννητριών που κατασκευάζονται με αυτούς, διαπιστώνουμε ότι ο εμπορικός μαγνήτης φέρνει δυσμενή αποτελέσματα, που για τη μεγαλύτερη γεννήτρια μάλιστα είναι και απαγορευτικά, καθώς παραβιάζουν τους περιορισμούς που έχουμε θέσει. Επομένως, η χρήση του καθολικού μαγνήτη C8 ($w_m=55\text{mm}$, $l_a=62\text{mm}$) αντί του εμπορικού ($w_m=l_a=50\text{mm}$), θα είχε σημαντικά πλεονεκτήματα. Η αντικατάσταση βέβαια ενός μαγνήτη στην αγορά με έναν άλλο δεν είναι κάτι που μπορεί να γίνει από τη μία μέρα στην άλλη και από μεμονωμένους χρήστες. Ιδιαίτερα πάντως για τη μεγαλύτερη γεννήτρια συνιστάται, εφόσον δεν αυξάνεται απαγορευτικά το κόστος, η χρήση του βέλτιστου μαγνήτη που βρέθηκε στο κεφάλαιο 6.

7.3.2. Σύγκριση βέλτιστου καθολικού και εμπορικού μαγνήτη N40

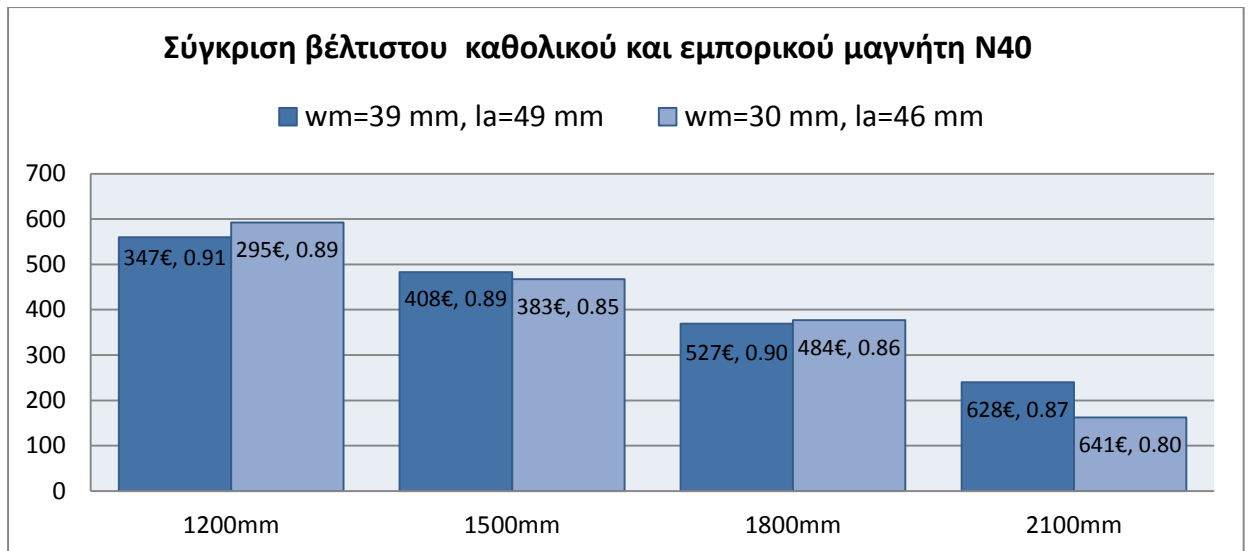
N40	wm=39, la=49 (βέλτιστος)	Output=1000*Απόδοση-Κόστος Συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους	Απόδοση	Κόστος (€)
	1200mm	559.6	0.907	347.4
	1500mm	483	0.891	408
	1800mm	369	0.896	527
	2100mm	239.8	0.868	628.2
	wm=30, la=46 (εμπορικός)	Output=1000*Απόδοση-Κόστος Συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους	Απόδοση	Κόστος (€)
	1200mm	592.2	0.887	294.8
	1500mm	467.2	0.85	382.8
	1800mm	376.6	0.861	484.4
	2100mm	162	0.803	641

N40	wm=39, la=49 (βέλτιστος)	Pnom (W)	Rout (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	ai	kd	Nc	sc (mm ²)
	1200mm	844	142.5	12.41	3.76	0.64	0.65	66	1.37
	1500mm	1290.2	181.6	21.25	6.11	0.48	0.73	83	2.27
	1800mm	1856.7	213.7	28.25	8.47	0.53	0.77	56	2.98
	2100mm	2440.1	265.3	44.55	13.05	0.41	0.81	65	4.06
	wm=30, la=46 (εμπορικός)	Pnom (W)	Rout (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	ai	kd	Nc	sc (mm ²)
	1200mm	830	140.3	12.55	3.65	0.49	0.67	92	1.37
	1500mm	1228.9	194.2	25.24	6.99	0.34	0.76	115	2.27
	1800mm	1785.4	226.6	32.78	9.52	0.38	0.8	77	2.98
	2100mm ⁴	2277.2	299.1	58	16.58	0.28	0.85	90	4.06

Πίνακας 7.3. Βασικά χαρακτηριστικά γεννητριών με χρήση του καθολικού και του εμπορικού μαγνήτη N40.

Στο σχήμα 7.3. παρουσιάζεται συγκριτικά η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του συνδυαστικού κριτηρίου, καθώς και η απόδοση και το κόστος για όλες τις διαστάσεις γεννητριών με χρήση του καθολικού και του εμπορικού μαγνήτη N40.

⁴ Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει με άρση του περιορισμού $t_w/w_c \leq 0.35$.



Σχήμα 7.3. Σύγκριση αντικειμενικής συνάρτησης, απόδοσης και κόστους του καθολικού και του εμπορικού μαγνήτη N40

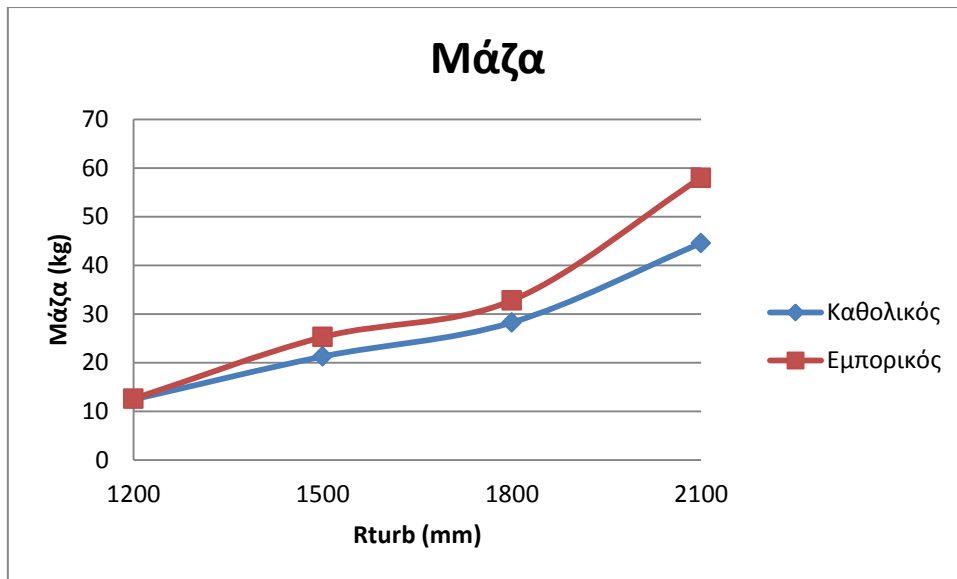
Ο καθολικός μαγνήτης έχει για όλες τις γεννήτριες καλύτερη απόδοση από τον εμπορικό και μάλιστα, για τη μεγαλύτερη γεννήτρια ($R_{\text{turb}}=2100\text{mm}$) έχει και καλύτερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος, οπότε εκεί υπερτερεί σημαντικά.

Γενικά ο καθολικός έχει μεγαλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης από τον εμπορικό μαγνήτη για τις γεννήτριες με $R_{\text{turb}}=1500\text{mm}$ και $R_{\text{turb}}=2100\text{mm}$ και μικρότερη τιμή για τις γεννήτριες με $R_{\text{turb}}=1200\text{mm}$ και $R_{\text{turb}}=1800\text{mm}$.

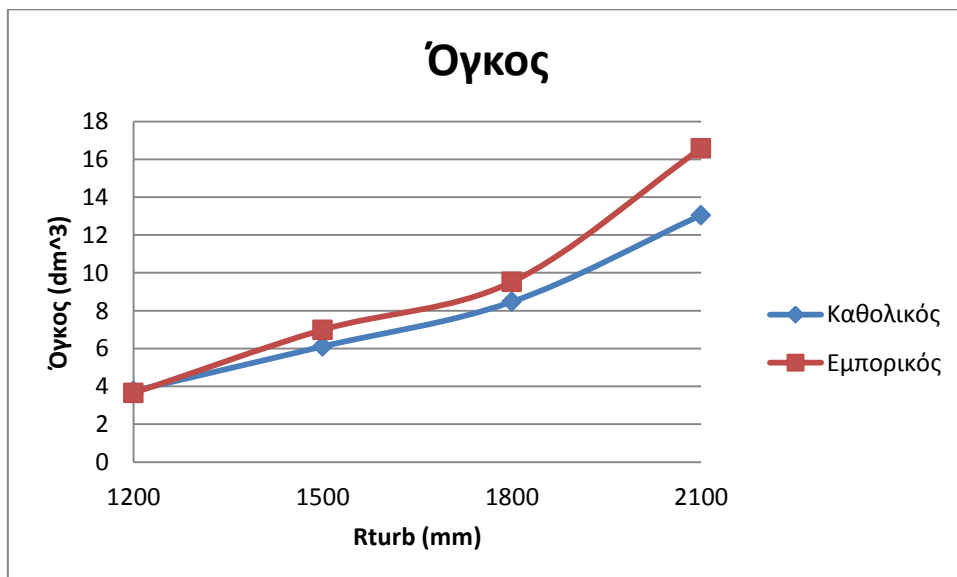
Με βάση το σχήμα 7.3. μπορούμε να πούμε ότι με μια μέση αύξηση κόστους κατά 27€ έχουμε μέση αύξηση απόδοσης κατά 0.04 αν χρησιμοποιούμε τον καθολικό μαγνήτη αντί του εμπορικού.

Επισημαίνουμε και πάλι ότι αυτή η αύξηση απόδοσης θα παρατηρούνταν κατά την ονομαστική λειτουργία των γεννητριών. Σε συνθήκες μέσου ανέμου, που είναι οι συνηθέστερες, οι αποδόσεις όλων των γεννητριών που αναπαρίστανται στο σχήμα 7.3. θα ήταν αρκετά μικρότερες και δεν είναι βέβαιο ότι ο καθολικός μαγνήτης θα παρείχε μεγαλύτερη απόδοση από τον εμπορικό. Μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση θα ήταν να γίνει η βελτιστοποίηση της απόδοσης στο μέσο άνεμο που θα λειτουργούν οι ανεμογεννήτριες.

Στη συνέχεια συγκρίνονται οι διατάξεις του Πίνακα 7.3. ως προς τη μάζα και τον όγκο τους.



Σχήμα 7.4. Σύγκριση μάζας καθολικού και εμπορικού μαγνήτη N40



Σχήμα 7.5. Σύγκριση όγκου καθολικού και εμπορικού μαγνήτη N40

Βλέπουμε ότι ο καθολικός μαγνήτης επιτυγχάνει αρκετά μικρότερες τιμές μάζας και όγκου, ιδιαίτερα για τις μεγαλύτερες γεννήτριες. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα και βάσει αυτού κυρίως (μιας και οι διαφορές στην απόδοση και το κόστος δεν ήταν σημαντικές) μπορούμε να πούμε ότι έχει νόημα μία αντικατάσταση του εμπορικού μαγνήτη N40 ($w_m=30\text{mm}$, $l_a=46\text{mm}$) από τον καθολικό ($w_m=39\text{mm}$, $l_a=49\text{mm}$).

Βέβαια, αυτό δε μπορεί να συμβεί τόσο εύκολα στην αγορά, εκτός αν υπάρξει μαζική ζήτηση ή μαζική παραγωγή του καθολικού μαγνήτη. Πάντως, ιδιαίτερα για τη

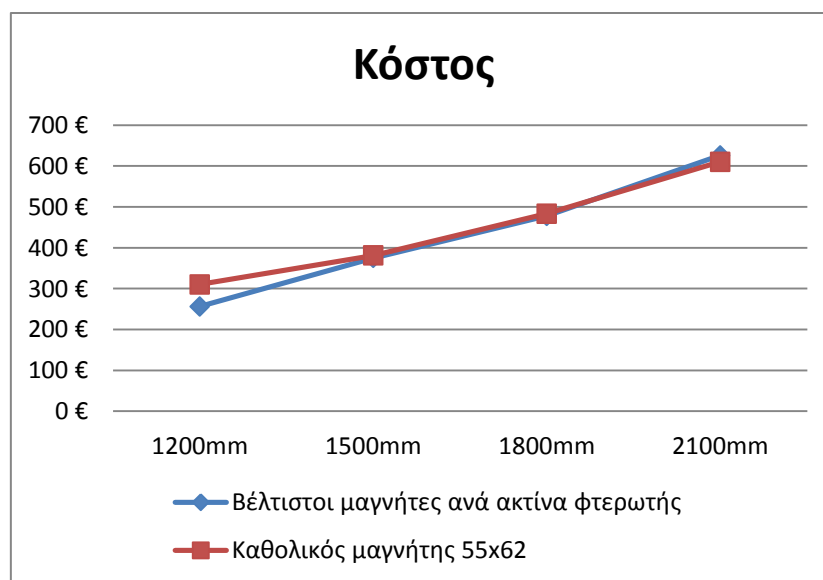
μεγαλύτερη γεννήτρια, συνιστάται, εφόσον δεν αυξάνεται απαγορευτικά το κόστος, η χρήση του βέλτιστου μαγνήτη που βρέθηκε στο κεφάλαιο 6.

7.4. Σύγκριση καθολικού μαγνήτη με βελτιστούς μαγνητες ανά ακτίνα φτερωτής

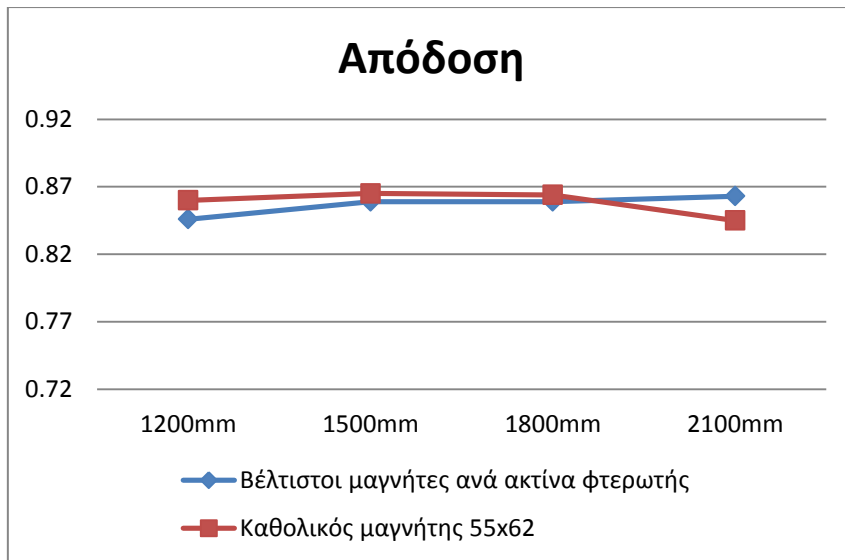
Σε αυτή την παράγραφο θα συγκρίνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των διατάξεων που έχουν σχεδιαστεί με χρήση του καθολικού μαγνήτη, με τις διατάξεις που είχαν προκύψει από την προηγούμενη βελτιστοποίηση όπου σε κάθε ακτίνα φτερωτής βρήκαμε το βέλτιστο μαγνήτη.

Φερρίτες C8

Παρακάτω συγκρίνονται οι γεννήτριες που χρησιμοποιούν τον καθολικό μαγνήτη ($w_m=55\text{mm}$, $l_a=62\text{mm}$) με εκείνες που χρησιμοποιούν το μαγνήτη που προέκυψε ως βέλτιστος για την ακτίνα τους από την προηγούμενη βελτιστοποίηση, ως προς το κόστος, την απόδοσή, τη μάζα και τον όγκο τους.

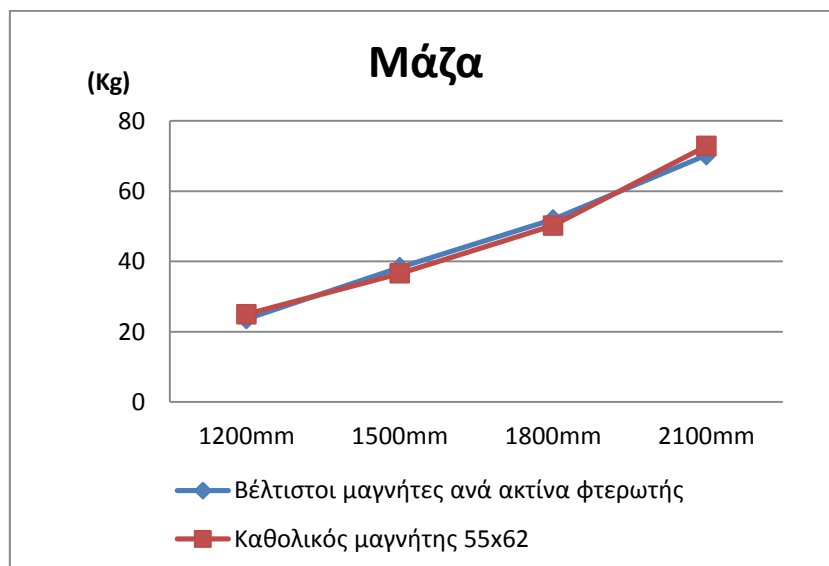


Σχήμα 7.6. Σύγκριση κόστους καθολικού μαγνήτη C8 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

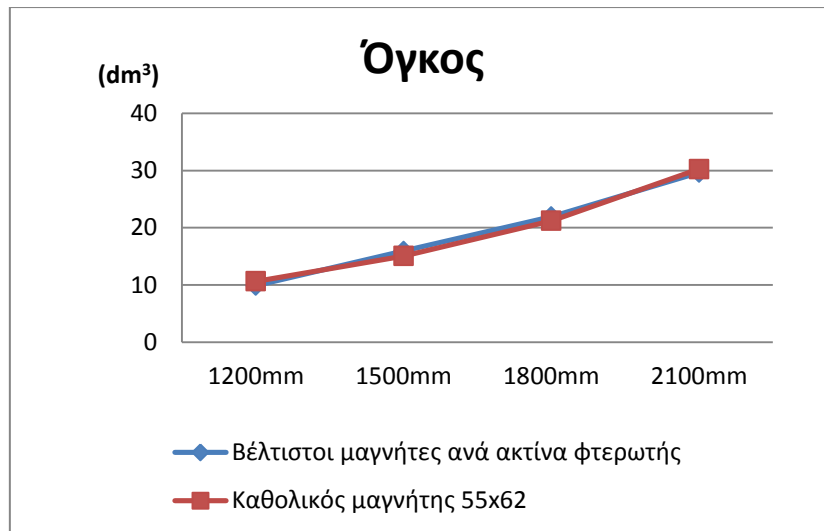


Σχήμα 7.7. Σύγκριση απόδοσης καθολικού μαγνήτη C8 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

Στα σχήματα 7.6. και 7.7. παρατηρούμε ότι ο καθολικός μαγνήτης έχει μεν μεγαλύτερο κόστος αλλά έχει και καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους βέλτιστους μαγνήτες ανά ακτίνα φτερωτής. Εξαίρεση είναι η διάταξη με ακτίνα φτερωτής 2100mm για την οποία ο καθολικός μαγνήτης επιφέρει λίγο χαμηλότερη απόδοση και λίγο χαμηλότερο κόστος. Οι διαφορές πάντως, τόσο στο κόστος όσο και στην απόδοση, είναι πολύ μικρές.



Σχήμα 7.8. Σύγκριση μάζας καθολικού μαγνήτη C8 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

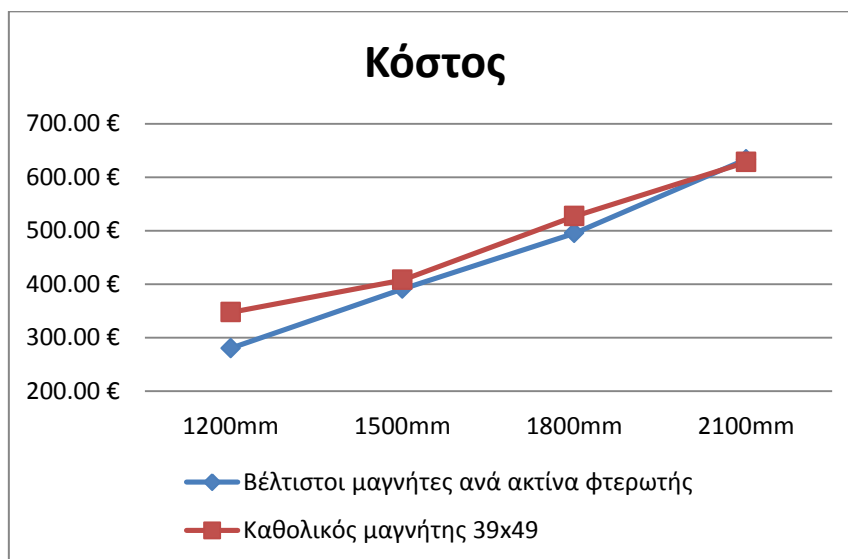


Σχήμα 7.9. Σύγκριση όγκου καθολικού μαγνήτη C8 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

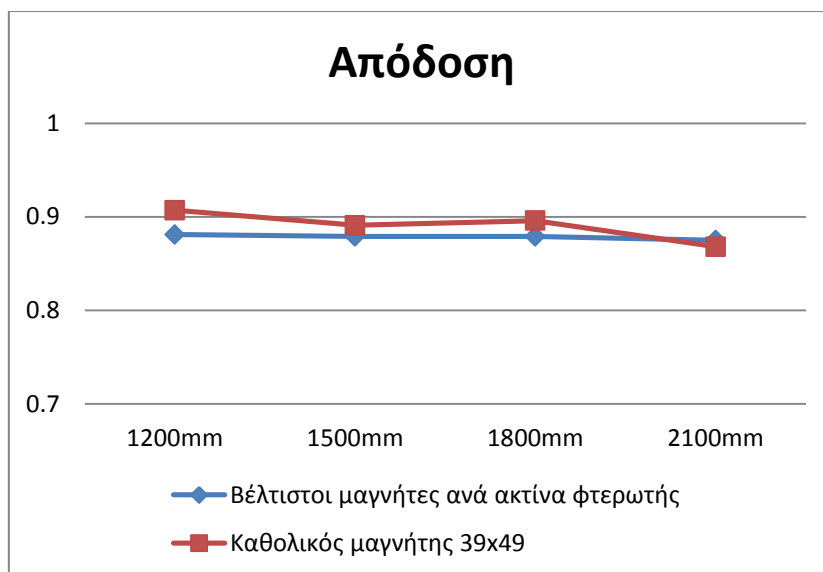
Στα σχήματα 7.8. και 7.9. παρατηρούμε ότι η μάζα και ο όγκος παίρνουν πολύ παραπλήσιες τιμές για τις διατάξεις που χρησιμοποιούν τον καθολικό μαγνήτη και τις βέλτιστες διατάξεις ανά ακτίνα φτερωτής.

Μαγνήτες νεοδυμίου N40

Παρομοίως συγκρίνονται οι γεννήτριες που χρησιμοποιούν τον καθολικό μαγνήτη ($w_m=39\text{mm}$, $l_a=49\text{mm}$) με εκείνες που χρησιμοποιούν το μαγνήτη που προέκυψε ως βέλτιστος για την ακτίνα τους από την προηγούμενη βελτιστοποίηση, ως προς το κόστος, την απόδοση, τη μάζα και τον όγκο τους.

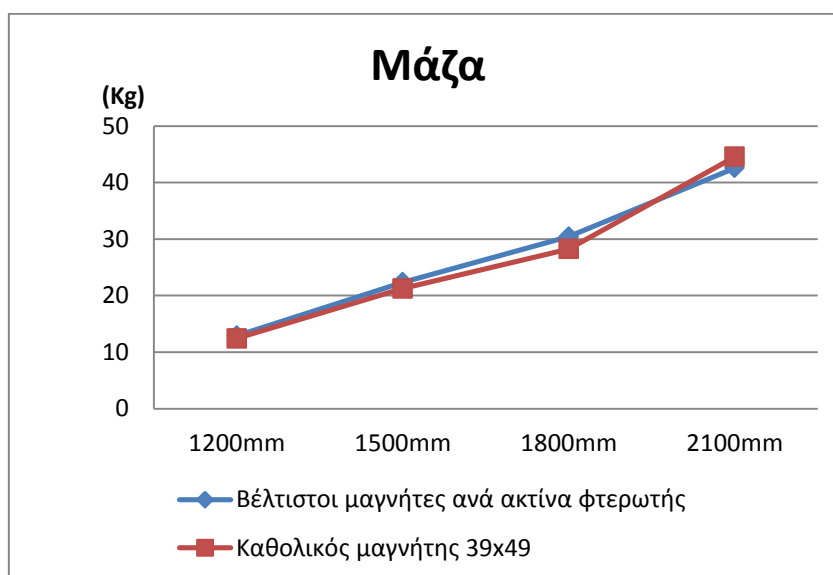


Σχήμα 7.10. Σύγκριση κόστους καθολικού μαγνήτη N40 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

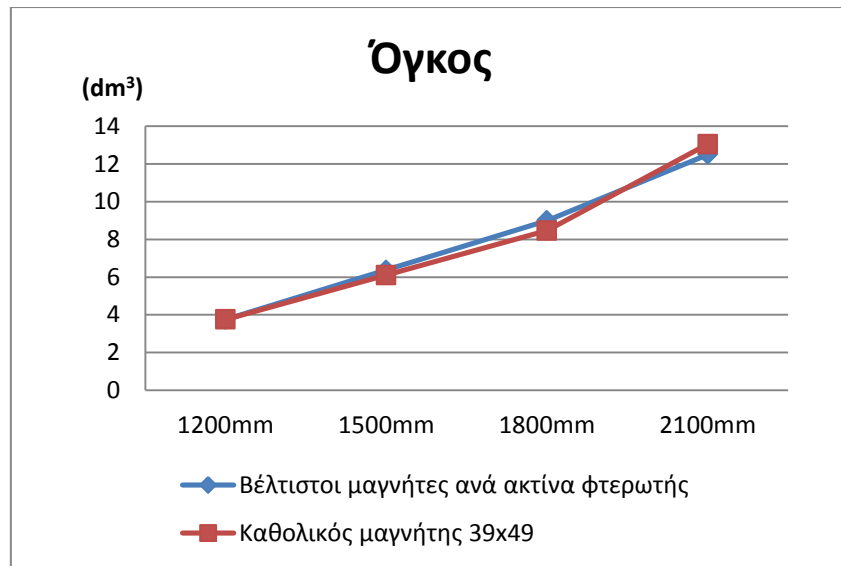


Σχήμα 7.11. Σύγκριση απόδοσης καθολικού μαγνήτη N40 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

Στα σχήματα 7.10. και 7.11. παρατηρούμε ότι ο καθολικός μαγνήτης έχει μεν μεγαλύτερο κόστος αλλά έχει και καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους βέλτιστους μαγνήτες ανά ακτίνα φτερωτής. Οι διαφορές πάντως, τόσο στο κόστος όσο και στην απόδοση, είναι μικρές και μειώνονται με την αύξηση της ακτίνας φτερωτής.



Σχήμα 7.12. Σύγκριση μάζας καθολικού μαγνήτη N40 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής



Σχήμα 7.13. Σύγκριση όγκου καθολικού μαγνήτη N40 και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

Τέλος, στα σχήματα 7.12. και 7.13. παρατηρούμε ότι η μάζα και ο όγκος παίρνουν πολύ παραπλήσιες τιμές για τις διατάξεις που χρησιμοποιούν τον καθολικό μαγνήτη και τις βέλτιστες διατάξεις ανά ακτίνα φτερωτής.

Από τη σύγκριση των δύο προσεγγίσεων, τόσο για μαγνήτες νεοδυμίου όσο και για φερρίτες, βλέπουμε πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον καθολικό μαγνήτη στην κατασκευή γεννητριών σε αυτό το εύρος ακτίνας φτερωτής καθώς τα χαρακτηριστικά των διατάξεων με χρήση αυτού είναι παρεμφερή με αυτά των διατάξεων από την προηγούμενη βελτιστοποίηση και με δεδομένο πως μας συμφέρει πολύ η χρήση ενός μόνο μαγνήτη γιατί μειώνεται πολύ το κόστος παραγωγής του και αγοράς του λόγω και των μεγάλων ποσοτήτων σε τυχόν παραγγελίες.

Κεφάλαιο 8: Κατασκευή και μέτρηση της γεννήτριας

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η κατασκευή και η μέτρηση μιας γεννήτριας αξονικής ροής ονομαστικής ισχύος περίπου 850W κατασκευασμένης με φερρίτες, ως μέρος ανεμογεννήτριας με ακτίνα φτερωτής 1.2m. Η γεννήτρια αφού κατασκευάστηκε, μετρήθηκε στο εργαστήριο και μελετήθηκε συγκριτικά με μία γεννήτρια ίδιας ονομαστικής ισχύος, αλλά κατασκευασμένης με μαγνήτες νεοδυμίου.

8.1. Η κατασκευή της γεννήτριας

Η κατασκευή της γεννήτριας βασίζεται στις οδηγίες που βρίσκονται στο [4] και μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να χρειάζονται εξειδικευμένα εργαλεία ούτε κάποια σημαντική κατασκευαστική εμπειρία. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι ηλεκτρική σέγα, πριόνια, λίμες, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτρικός τροχός, ηλεκτροσυγκόλληση, βιδολόγος κ.α.

8.1.1. Η κατασκευή του δρομέα

Ο δρομέας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους πάνω στους οποίους τοποθετούνται οι μαγνήτες.

Οι δίσκοι αυτοί δεν κόπηκαν στο εργαστήριο αλλά παραγγέλθηκαν έξω με κοπή λέιζερ. Από το κέντρο των δίσκων αφαιρέθηκε μικρός κυκλικός δίσκος, ώστε να μπορεί να συνδεθεί το ρουλεμάν και ανοίχθηκαν πέντε μικρές τρύπες, από τις οποίες θα περάσουν ντίζες που θα αποτελέσουν και τον άξονα της γεννήτριας. Επίσης, κόπηκαν και 5 μεγαλύτερες τρύπες σε ακτίνα μικρότερη από την εσωτερική για καλύτερο αερισμό της γεννήτριας. Αυτό είναι καλό να γίνεται σε γεννήτριες όπου λόγω της μεγάλης διαμέτρου τους παρεμποδίζεται ο καλός αερισμός του τυλίγματος. Το μέγεθος των τρυπών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για να αερίζεται η γεννήτρια αλλά όχι τόσο ώστε να υπάρχει κίνδυνος παραμόρφωσης των δίσκων από τις ελκτικές δυνάμεις των μαγνητών [22].

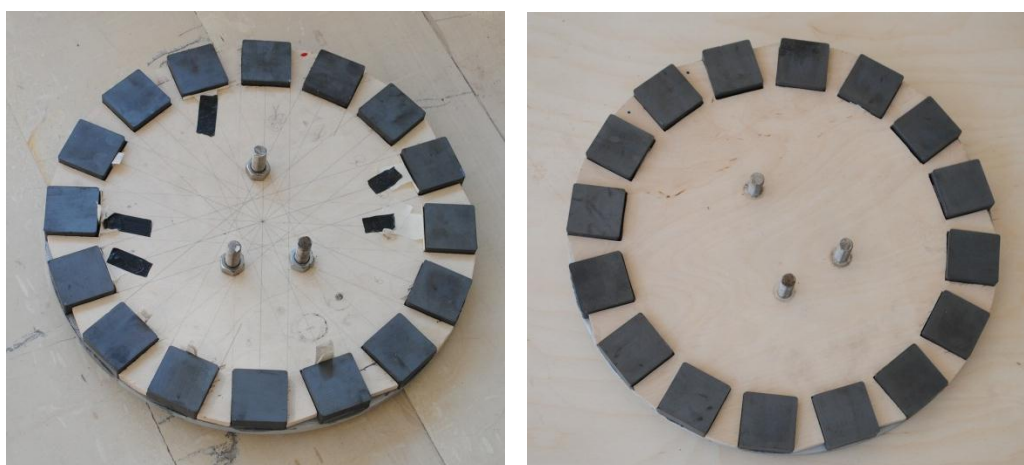
Επιπλέον, στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας βιδολόγο ανοίξαμε σε κάθε δίσκο από 3 τρύπες με σπείρωμα, οι οποίες λειτουργούν ως εξωλκείας για να αποσυναρμολογείται πιο εύκολα η γεννήτρια. Όλες αυτές οι κοπές στους δίσκους φαίνονται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1. Οι δύο δίσκοι του δρομέα μετά την κοπή λέιζερ

Οι δίσκοι τρίβονται με το τριβείο ώστε να αφαιρεθεί η εξωτερική επίστρωση σκουριάς. Αυτό χρειάζεται προκειμένου να μπορούν οι μαγνήτες με σιγουριά να κολλήσουν στο χάλυβα, καθώς η σκουριά αυτή δεν είναι σταθερή.

Στη συνέχεια τοποθετούνται στους δίσκους οι μαγνήτες. 16 φερριτες βαθμού C8 και διαστάσεων 50x50x20 mm τοποθετούνται στην περιφέρεια κάθε δίσκου δημιουργώντας μία όσο το δυνατόν περισσότερο συμμετρική διάταξη. Προκειμένου να γίνει αυτό σχεδιάζεται και κόβεται ένας οδηγός από κόντρα πλακέ που δείχνει ακριβώς που πρέπει να τοποθετηθούν οι μαγνήτες. Ο οδηγός βιδώνεται στο χαλύβδινο δίσκο και στη συνέχεια τοποθετούνται και στερεώνονται οι μαγνήτες με κόλα εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών. Σε αυτό το σημείο χρειάζεται προσοχή ώστε διαδοχικοί μαγνήτες σε κάθε δίσκο καθώς και αντικρυστοί μαγνήτες στον απέναντι δίσκο να έχουν αντίθετη πολικότητα.



Σχήμα 8.2. Ο οδηγός των μαγνητών βιδώνεται πρώτα στο ένα και μετά στον άλλο χαλύβδινο δίσκο και τοποθετούνται οι μαγνήτες.



Σχήμα 8.3. Ο δίσκος του δρομέα μετά τη στερέωση των μαγνητών με κόλα.

Για καλύτερη μηχανική στήριξη οι δίσκοι με τους μαγνήτες θα τοποθετηθούν σε βινυλεστερική ρητίνη. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται συνήθως η χρήση πολυεστερικής ρητίνης για αυτό το σκοπό, αλλά από την εμπειρία του εργαστηρίου σε προηγούμενες κατασκευές καθώς και από εμπειρίες άλλων κατασκευαστών σε φόρουμ, έχει διαπιστωθεί ότι η πολυεστερική ρητίνη δεν έχει καλή προσαρμογή πάνω σε μέταλλα, με αποτέλεσμα ύστερα από λίγο καιρό να «σκάει» και να δημιουργούνται κενά στα οποία εισχωρεί υγρασία.

Για την κάλυψη των μαγνητών με βινυλεστερική ρητίνη πρέπει να κατασκευαστούν δύο καλούπια –ένα για κάθε δίσκο- στα οποία θα τοποθετηθούν οι δίσκοι και θα γίνει η έγχυση της ρητίνης. Κάθε καλούπι αποτελείται από 3 τετράγωνα κομμάτια κόντρα πλακέ. Το κάτω κόντρα πλακέ είναι η βάση και το πάνω θα χρησιμεύσει ως καπάκι μετά την έγχυση της ρητίνης, ώστε η πλάκα που θα προκύψει να είναι επίπεδη. Από το μεσαίο κόντρα πλακέ αφαιρείται εσωτερικά ένας δίσκος σε κατάλληλες διαστάσεις ώστε να δημιουργηθεί ο χώρος που θα τοποθετηθεί ο δίσκος του δρομέα.

Τα τετράγωνα κομμάτια είναι αρκετά μεγάλα ώστε να χωράει ο δίσκος του δρομέα, αλλά να υπάρχει και περίσσειμα σε ξύλο ώστε να μπορεί να βιδωθεί η κατασκευή. Το πάχος της βάσης και του καπακιού είναι σχετικά αυθαίρετα (χοντρή βάση, λεπτό καπάκι), ενώ το πάχος του μεσαίου τετραγώνου είναι περίπου ίσο με το πάχος των μαγνητών και του σιδήρου.

Για να μην καλυφθεί όλος ο δίσκος με ρητίνη, αλλά μόνο ο εξωτερικός δακτύλιος όπου βρίσκονται οι μαγνήτες, τοποθετείται και βιδώνεται στο κέντρο του καλουπιού, πάνω στο δίσκο του δρομέα, ένας δίσκος από κόντρα πλακέ με ακτίνα λίγο μικρότερη από την εσωτερική ακτίνα της γεννήτριας και πάχος όσο οι μαγνήτες. Έτσι, η πλάκα που θα προκύψει θα είναι κενή στο κέντρο της ώστε να μπορεί να περιστρέφεται ο άξονας της γεννήτριας.

Για τη συναρμολόγηση κάθε καλούπιού βιδώνεται η βάση με το μεσαίο τμήμα. τοποθετείται οι δίσκος με τους μαγνήτες, και πάνω από το δίσκο του δρομέα βιδώνεται και ο κεντρικός ξύλινος δίσκος με τη βάση. Πριν από την έγχυση ρητίνης όλα εκείνα τα σημεία στα οποία η ρητίνη δεν πρέπει να κολλήσει, όπως ο κεντρικός δίσκος και τα τοιχώματα του καλούπιού, αλείφονται με κερί. Έτσι διευκολύνεται η αφαίρεση του καλούπιού μετά τη στερεοποίηση της ρητίνης.

Η βινυλεστερική ρητίνη βρίσκεται σε υγρή μορφή και για να στερεοποιηθεί χρειάζεται να αναμειχθεί με κατάλληλη ποσότητα καταλύτη, ο οποίος είναι και αυτός σε υγρή μορφή. Στο μείγμα προστίθεται και κατάλληλη ποσότητα ταλκ ώστε να αποκτήσει πυκνότητα. Στη συνέχεια χύνεται η ρητίνη και από πάνω ενσωματώνεται ένα λεπτό φύλλο από υαλονήματα για αντοχή στις καταπονήσεις και τη φυσική φθορά. Επίσης, στην περιφέρεια γύρω από τους μαγνήτες, τοποθετείται μέσα στη ρητίνη μεταλλικό σύρμα που ενισχύει και αυτό την αντοχή της κατασκευής.



(α)

(β)

Σχήμα 8.4. (α) Έγχυση ρητίνης στο καλούπι, (β) Τοποθέτηση σύρματος γύρω από τους μαγνήτες.



Σχήμα 8.5. Τοποθέτηση φύλλου από υαλονήματα μέσα στη ρητίνη

Στη συνέχεια το καλούπι σκεπάζεται με το καπάκι, το οποίο δε χρειάζεται βίδωμα. Πάνω του τοποθετούνται μεταλλικά εργαλεία που υπάρχουν στο εργαστήριο, τα οποία έλκουν οι μαγνήτες και έτσι παραμένει κλειστό ασκώντας την απαιτούμενη πίεση προκειμένου να διαφύγει η παραπάνω ρητίνη. Οι αναλογίες, οι οποίες εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος πρέπει να τηρηθούν αυστηρά ώστε να αποφευχθεί αδυναμία στερεοποίησης ή πρόωρη στερεοποίηση του μείγματος [8].

Τα καλούπια αφήνονται σκεπασμένα μέχρι να στερεοποιηθεί η ρητίνη, τουλάχιστον για 8 ώρες. Στη συνέχεια αποσυναρμολογούνται προσεχτικά για να βγουν οι δίσκοι με τους μαγνήτες και τη ρητίνη πλέον πάνω τους που τους συγκρατεί. Με προσοχή απομακρύνεται η περιττή ρητίνη από όλα τα ανεπιθύμητα σημεία με τη βοήθεια μιας λίμας, ενώ με το τριβείο ρυθμίζεται το πάχος του δρομέα στο επιθυμητό επίπεδο. Οι δύο δίσκοι είναι πλέον έτοιμη για χρήση.

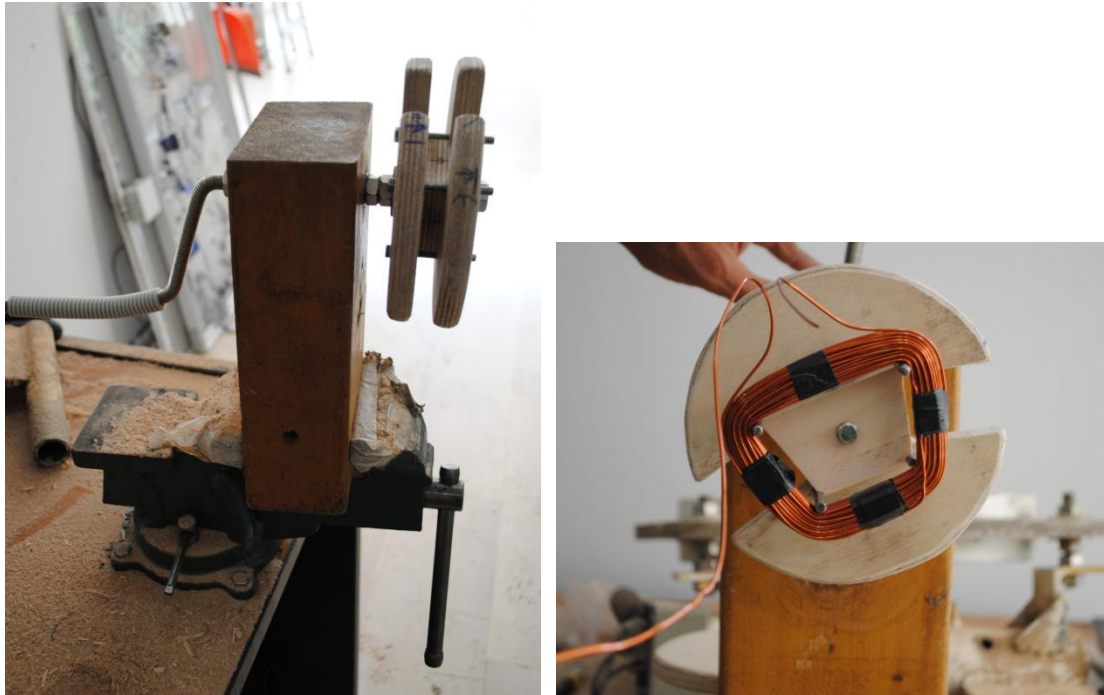


Σχήμα 8.6. (α) Απομάκρυνση της περιττής ρητίνης με λίμα, (β) Ο δίσκος του δρομέα έτοιμος για χρήση.

8.1.2. Η κατασκευή του στάτη

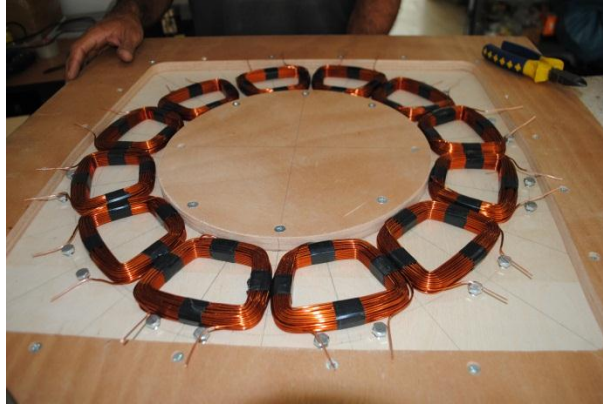
Πρώτο βήμα στην κατασκευή του στάτη είναι η κατασκευή των πηνίων. Ως τώρα έχει γίνει πολύς λόγος για τα πηνία, κυρίως μέσω του συντελεστή πλήρωσης, k_f . Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσει η διαδικασία κατασκευής των πηνίων καθώς και του στάτη.

Αρχικά κατασκευάζεται από ξύλο η μηχανή χειρός που χρησιμεύει στην περιέλιξη των πηνίων. Οι διαστάσεις της επιλέγονται ίσες με τις επιθυμητές εσωτερικές διαστάσεις των πηνίων. Τυλίγονται 12 πηνία 75 σπειρών με χαλκό διαμέτρου 1.4 mm. Αυτή η εργασία είναι αρκετά κουραστική και χρονοβόρα και καλό είναι να γίνει από 3 άτομα, ώστε ένας να κρατάει το χαλκό τεντωμένο, ένας να τυλίγει και ένας να μετράει τις περιελίξεις. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να τυλιχτούν σωστά τα πηνία χωρίς επικαλύψεις σπειρών.



Σχήμα 8.7. Τα πηνία τυλίγονται με τη βοήθεια μηχανήματος-οδηγού που κατασκευάζεται με το χέρι ανάλογα με τις επιθυμητές διαστάσεις πηνίου. Στο κέντρο του οδηγού φαίνεται ο αποστάτης.

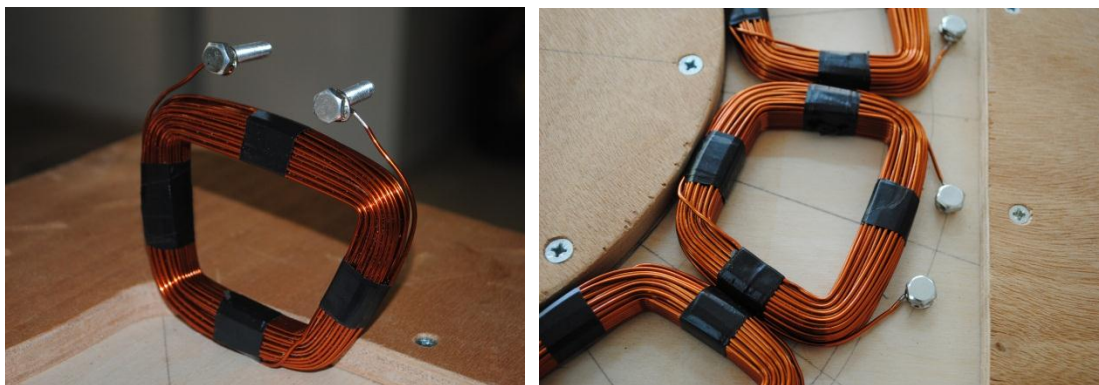
Αφού τυλιχτούν τα πηνία λαμβάνονται μετρήσεις που αφορούν τις διαστάσεις τους. Το αξονικό πάχος των πηνίων t_w , καθώς και το πάχος πλευράς πηνίου w_c , προέκυψαν λίγο μεγαλύτερα από το ζητούμενο, κατά 1 και 2 mm αντίστοιχα. Επίσης, υπολογίζοντας πάλι το συντελεστή πλήρωσης του κάθε πηνίου από τη σχέση: $k_f = \frac{N_c \cdot \pi \cdot (\frac{d_c}{2})^2}{w_c \cdot t_w}$ με τις νέες τιμές για τα t_w και w_c , βρήκαμε ότι είναι ίσος με 0.52 αντί 0.55 που είχαμε θεωρήσει κατά τη διαστασιολόγηση. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι τυλίγουμε τα πηνία στο χέρι. Έπειδή, λοιπόν, τα πηνία που κατασκευάσαμε προέκυψαν λίγο μεγαλύτερα από ότι περιμέναμε, αυξήσαμε την εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας τόσο ώστε να χωράνε ακριβώς τα πηνία στο στάτη, εφαπτόμενα μεταξύ τους. Στη συνέχεια, η διαστασιολόγηση επαναλήφθηκε με τις νέες τιμές για την ακτίνα και τις διαστάσεις των πηνίων.



Σχήμα 8.8. Τα πηνία που κατασκευάστηκαν τοποθετημένα στο καλούπι του στάτη με τις πλευρές τους να εφάπτονται.

Στη γεννήτρια δεν υπάρχει πυρήνας, έτσι δεν υπάρχει και μηχανική στήριξη για τα πηνία. Η στήριξη επιτυγχάνεται και πάλι με βινυλεστερική ρητίνη, μέσα στην οποία θα τοποθετηθεί το τύλιγμα. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα νέο καλούπι για το στάτη.

Αποτελείται και πάλι από τρία μέρη. Βάση, μεσαίο και καπάκι, τα οποία κόβονται από κόντρα πλακέ στην ίδια περίπου λογική με τα καλούπια του δρομέα. Στο κέντρο του μεσαίου τμήματος τοποθετείται μικρότερος ξύλινος δίσκος ώστε να προκύψει κενό για να περάσει ο άξονας. Σημαδεύονται οι θέσεις των πηνίων στο καλούπι, αλλά τα άκρα τους δε συνδέονται σε συνδεσμολογία αστέρα (ή τριγώνου) όπως γίνεται συνήθως σε αυτό το στάδιο. Γυμνώνουμε τις άκρες των πηνίων και, χρησιμοποιώντας καλάι και κολλητήρι, στερεώνουμε τα άκρα τους σε βίδες, οι οποίες θα μείνουν έξω από τη ρητίνη, ώστε να υπάρχει δυνατότητα επιλογής σύνδεσμολογίας κατά τις πειραματικές μετρήσεις.



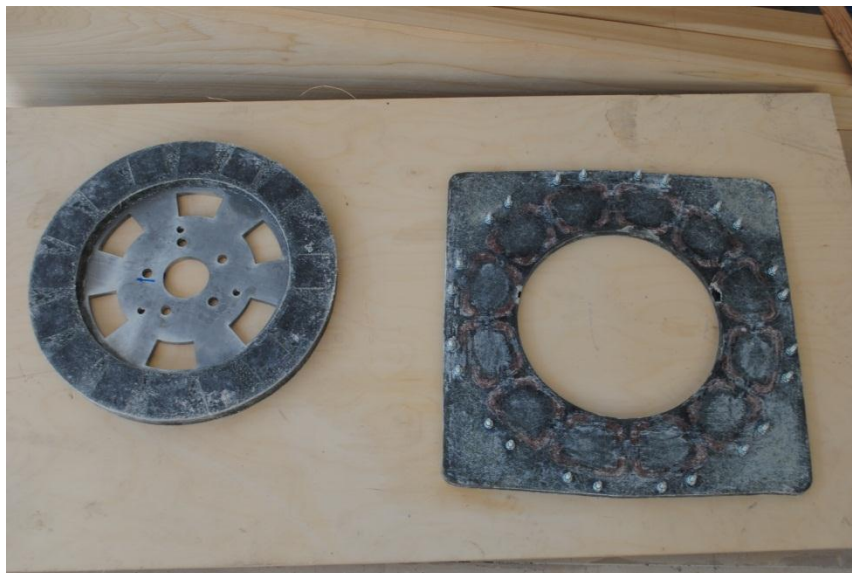
Σχήμα 8.9. Τα πηνία αφού έχουν στερεωθεί με καλάι στις βίδες που θα επιτρέπουν αλλαγή συνδεσμολογίας.

Αφού το τύλιγμα έχει σταθεροποιηθεί και κολληθεί τοποθετείται στο καλούπι το οποίο έχει αλειφθεί με κερί. Η ρητίνη, όπως ακριβώς και στο δρομέα, αναμειγνύεται με καταλύτη και ταλκ (θερμοαπαγωγή) και χύνεται στο καλούπι. Παράλληλα τοποθετούνται δύο λεπτά φύλλα από υαλονήματα στις δύο εξωτερικές πλευρές του στάτη ώστε να προσδοθεί μηχανική αντοχή.



Σχήμα 8.10. Έγχυση ρητίνης στο καλούπι του στάτη

Το καπάκι βιδώνεται, το πλεόνασμα ρητίνης εξέρχεται του καλουπιού και ο στάτης αφήνεται να στεγνώσει. Το καλούπι αποσυναρμολογείται προσεχτικά και ο στάτης είναι έτοιμος.



Σχήμα 8.11. Ο στάτης και ένας από τους δρομείς αφού βγήκαν από το καλούπι.

8.1.3. Η συναρμολόγηση της γεννήτριας

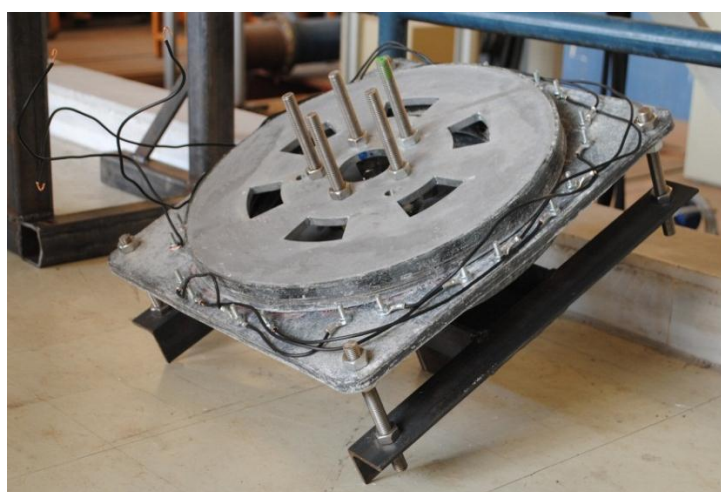
Η κατασκευή στήριξης, όπου θα στηρίζεται η γεννήτρια με το ρουλεμάν της, είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και τα διάφορα τμήματά της κολλάνε μεταξύ τους με ηλεκτροσυγκόλληση.

Για τη συναρμολόγηση της γεννήτριας, αρχικά ρυθμίζεται η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα με τη βοήθεια παξιμαδιών που τοποθετούνται στις ντίτζες του άξονα. Ρυθμίζεται δηλαδή το διάκενο της γεννήτριας, που πρέπει να ισούται με $2g+t_w$. Στη συνέχεια προσαρμόζεται ο στάτης, ώστε να υπάρχει το επιθυμητό μηχανικό διάκενο (g), το οποίο θέλουμε να είναι ίσο με 2.5 mm και αποτελείται από τον αέρα μεταξύ δρομέα-στάτη καθώς και από το πάχος της ρητίνης πάνω από τα πηνία και τους μαγνήτες.

Όταν έχει γίνει και αυτό, ο στάτης σταθεροποιείται στην τελική του θέση και πάλι με τη βοήθεια παξιμαδιών και ντιζών που βιδώνουν στην κατασκευή στήριξης.



Σχήμα 8.12. Η γεννήτρια συναρμολογείται και ρυθμίζεται το διάκενό της ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τις σχεδιαστικές προδιαγραφές.



Σχήμα 8.13. Πλέον η γεννήτρια είναι έτοιμη να μετρηθεί στο εργαστήριο.

8.2. Πειραματικές μετρήσεις και σύγκριση των δύο γεννητριών

Η γεννήτρια με φερρίτες που κατασκευάσαμε καθώς και η γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου που είχε κατασκευαστεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής [8], μεταφέρονται στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. όπου υπάρχουν τα κατάλληλα όργανα για να μετρηθούν.

Στόχος των πειραματικών μετρήσεων είναι από τη μία, να μετρηθούν οι επιδόσεις της γεννήτριας που κατασκευάσαμε και από την άλλη, να συγκριθούν οι επιδόσεις δύο γεννητριών αξονικής ροής με διαφορετικό μαγνητικό υλικό, μίας κατασκευασμένης με φερρίτες και μίας κατασκευασμένης με μαγνήτες νεοδυμίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που έχει σχεδιαστεί να έχει κάθε γεννήτρια παρουσιάζονται στον πίνακα 8.1.

Μαγνητικό υλικό	NdFeB N40	Ferrite C8
<u>Γενικά χαρακτηριστικά</u>		
Όνομαστική ισχύς	850W	850W
Αριθμός πόλων	12	16
Αριθμός πηνίων	9	12
Διάκενο ($2g+t_w$)	20mm	19mm
Κόστος ⁵ (από προσομοίωση)	308€	282€
Μάζα ⁶ (από προσομοίωση)	12.47 kg	25.77 kg
Όγκος (από προσομοίωση)	3.9dm ³	10.7dm ³
Στροφές cut-in	215	215
Τάση συσσωρευτών	48V	48V
<u>Δρομέας</u>		
Δίσκοι του δρομέα		
Πάχος σιδήρου (h_r)	10mm	10mm
Εσωτερική ακτίνα (R_{in})	103.2mm	156mm
Εξωτερική ακτίνα (R_{out})	150mm	207.5mm
Εσωτερική/εξωτερική ακτίνα (k_a)	0.692	0.757
<u>Μαγνήτες</u>		
Πάχος (h_m)	10mm	20mm
Πλάτος (w_m)	30mm	50mm
Μήκος (l_a)	46mm	50mm
Πλάτος μαγνήτη/πλάτος πολικού βήματος (a_i)	0.454	0.704

⁵ Κόστος μαγνητών, σιδήρου, χαλκού, ξύλου και ρητίνης

⁶ Μάζα μαγνητών, σιδήρου, χαλκού και ρητίνης

Στάτης		
Πηνία		
Αξονικό πάχος (t_w)	13mm	14mm
Πάχος πλευράς πηνίου (w_c)	21.6mm	16mm
Σπείρες/πηνίο (N_c)	90	75
Διάμετρος χαλκού (d_c)	1.5mm	1.4mm

Πίνακας 8.1. Τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο γεννητριών



Σχήμα 8.14. (α) Η γεννήτρια νεοδυμίου 850W και (β) η αρκετά μεγαλύτερων διαστάσεων γεννήτρια με φερρίτες 850W.

Τα όργανα και η μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι τα εξής:

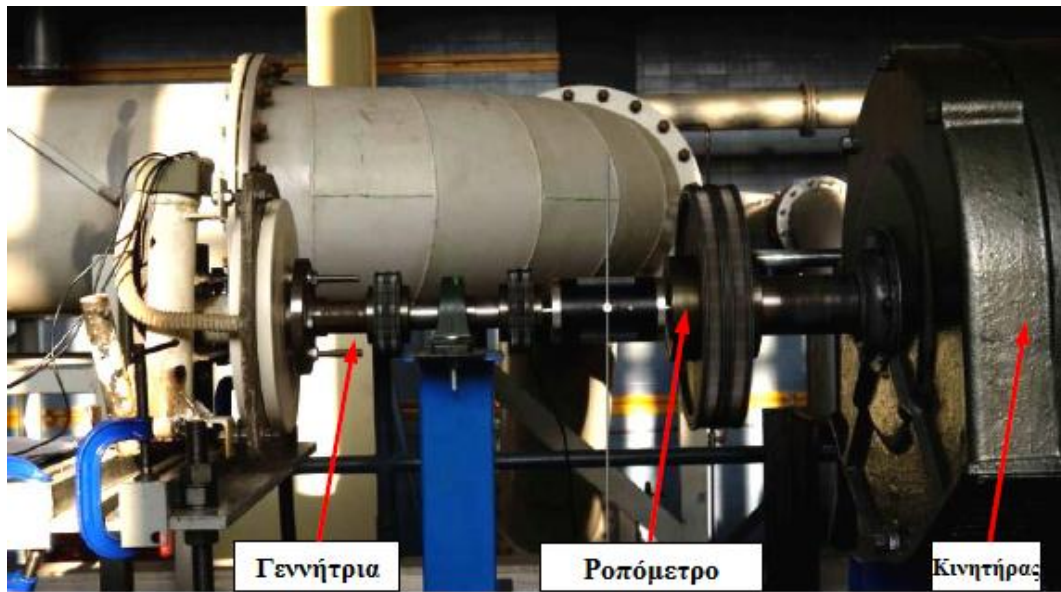
- DC κινητήρας ονομαστικής ισχύος 50HP μεταβλητών στροφών
- ηλεκτρονικός έλεγχος στροφών
- ροπόμετρο 500Nm
- ψηφιακός παλμογράφος 4 καναλιών
- ωμική αντίσταση 3kW
- 4 μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης 12V 100Ah η καθεμία
- τριφασικός ανορθωτής γέφυρας
- θερμόμετρο υπέρυθρων

Διεξήχθησαν τα παρακάτω πειράματα:

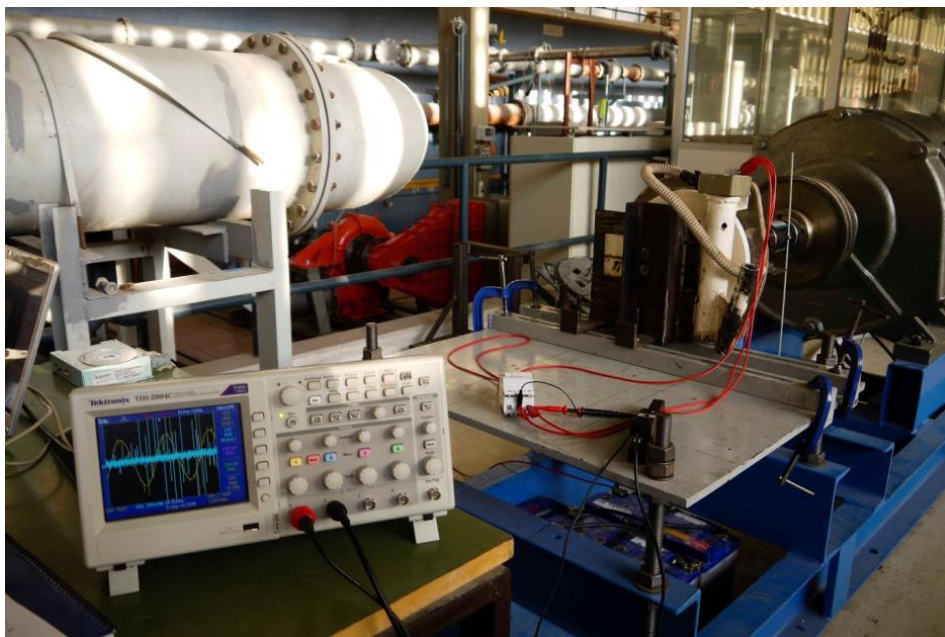
1. Μέτρηση της γεννήτριας σε κενό φορτίο
2. Μέτρηση της γεννήτριας υπό φορτίο
 - ωμικό τριφασικό
 - σύνδεση σε συσσωρευτές
3. Μέτρηση της θερμοκρασίας του στάτη

4. Μέτρηση της αντίστασης του στάτη

Για τη γεννήτρια νεοδυμίου δεν ήταν δυνατό να ληφθούν μετρήσεις για φασικά μεγέθη, καθώς δεν είχαμε πρόσβαση στον ουδέτερο. Στη γεννήτρια με φερριτες υπήρχε αυτή η δυνατότητα γιατί κατά την κατασκευή αφήσαμε για αυτό το σκοπό τα άκρα των πηνίων έξω από τη ρητίνη.



Σχήμα 8.15. Η γεννήτρια, το ροπόμετρο και ο κινητήρας συνδέονται στον ίδιο άξονα



Σχήμα 8.16. Η πειραματική διάταξη

8.2.1. Μέτρηση της γεννήτριας σε κενό φορτίο

Πρόκειται ουσιαστικά για τη μέτρηση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε συνάρτηση με τις στροφές. Η γεννήτρια ανοιχτοκυκλώνεται και μετράται η τάση στα άκρα της. Οι στροφές του κινητήρα μεταβάλλονται από τον ηλεκτρονικό έλεγχο στροφών και η ΗΕΔ μετράται στον παλμογράφο μέχρι τις ονομαστικές στροφές. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, οι στροφές υπολογίζονται από τη συχνότητα που μετράει ο παλμογράφος μέσω της σχέσης $n=120f/p$.

Για τη γεννήτρια νεοδυμίου μετρήθηκε πολική τάση ενώ για τη γεννήτρια με φερρίτες φασική τάση. Οι τρεις φάσεις δεν εμφανίζουν ακριβώς την ίδια ΗΕΔ. Πρόκειται για ασυμμετρία που οφείλεται σε διαφορετικό αριθμό ελιγμάτων ανά φάση λόγω σφάλματος κατά την περιέλιξη των πηνίων. Έτσι υπολογίζεται η μέση τιμή των τριών φάσεων, η οποία φαίνεται στην τελευταία στήλη κάθε πίνακα και είναι ίση με την ΗΕΔ κάθε γεννήτριας.

Φερρίτες:

f (Hz)	n (rpm)	$E_{f,\phi,a}$ (V)	$E_{f,\phi,b}$ (V)	$E_{f,\phi,c}$ (V)	$E_{f,\phi,avg}$ (V)
6.52	48.86	4.47	4.55	4.44	4.49
13.23	99.23	9.04	8.89	9.11	9.01
19.92	149.40	13.70	13.60	13.90	13.73
26.60	199.50	18.60	17.90	18.20	18.23
33.22	249.15	22.80	22.50	23.20	22.83
40.00	300.00	27.70	27.40	27.80	27.63
46.51	348.83	32.40	31.80	32.50	32.23
53.00	397.50	36.70	36.10	36.70	36.50
59.81	448.58	41.40	40.80	41.40	41.20
66.67	500.03	45.60	45.70	46.10	45.80
73.31	549.83	51.40	49.70	50.70	50.60

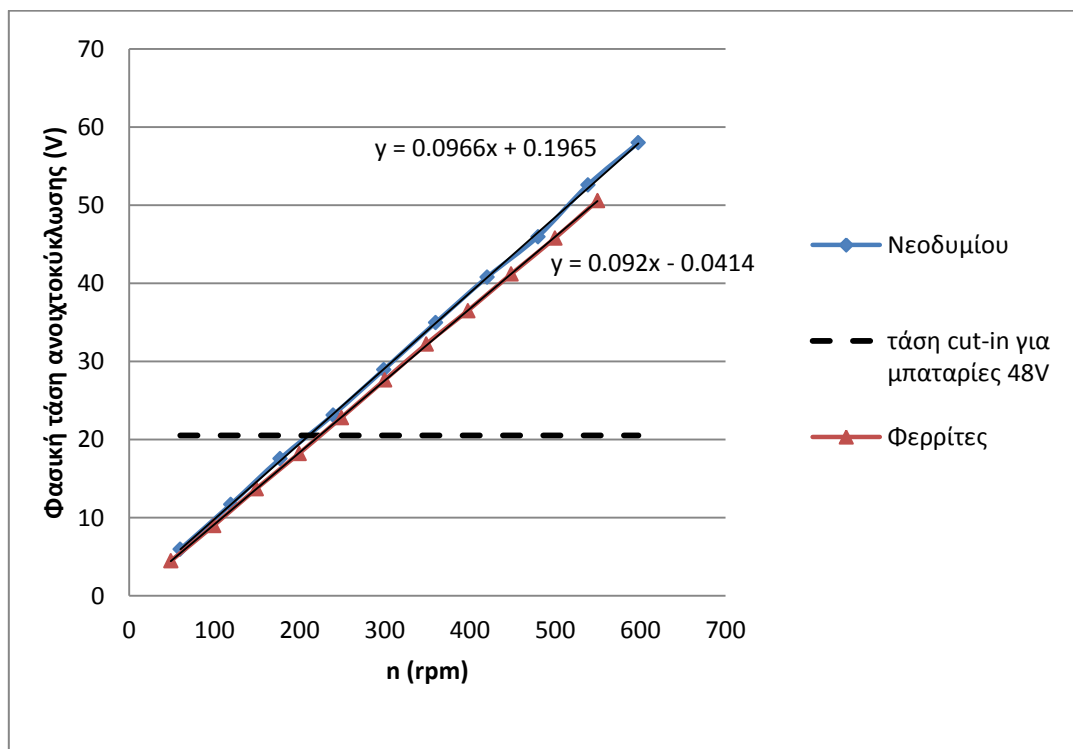
Πίνακας 8.2. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα κενού φορτίο για τη γεννήτρια με φερρίτες

Νεοδυμίου:

f (Hz)	n (rpm)	$E_{f,\pi,ab}$ (V)	$E_{f,\pi,bc}$ (V)	$E_{f,\pi,ac}$ (V)	$E_{f,\pi,avg}$ (V)	$E_{f,\phi,avg}$ (V)
5.98	59.85	10.15	10.4	10.5	10.35	5.98
11.93	119.30	19.9	20.4	20.6	20.30	11.72
17.70	177.00	29.7	29.9	31.6	30.40	17.55
23.93	239.30	39.6	40.3	40.4	40.10	23.15
29.90	299.00	49.7	50.6	50.2	50.17	28.96
35.97	359.70	59.9	60.8	61	60.57	34.97
42.04	420.35	69.55	72.6	69.9	70.68	40.81
47.98	479.80	77.9	80.6	80.4	79.63	45.98
53.85	538.50	91.75	91.1	90.4	91.08	52.59
59.78	597.75	99.35	101	101	100.45	57.99

Πίνακας 8.3. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα κενού φορτίο για τη γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου

Με βάση τις μετρήσεις αυτές αναπαριστούμε γραφικά την ηλεκτρεγερτική δύναμη κάθε γεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Η ΗΕΔ μεταβάλλεται γραμμικά με την ταχύτητα περιστροφής, εφόσον αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στο τύλιγμα [8].

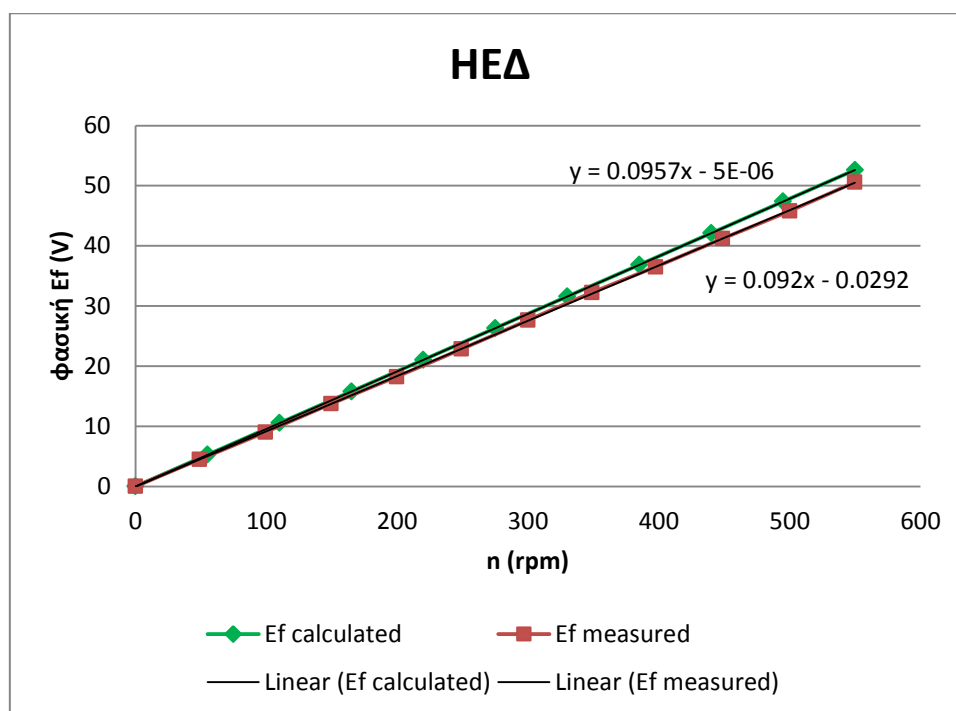


Σχήμα 8.17. Σύγκριση της καμπύλης ΗΕΔ - ταχύτητα περιστροφής για τις δύο γεννήτριες.

Αν και η γεννήτρια που κατασκευάσαμε σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει ίδιο n_{cutin} με τη γεννήτρια νεοδυμίου, βλέπουμε ότι η ΗΕΔ που αναπτύσσει είναι γενικά λίγο μικρότερη. Από την εξίσωση κάθε γραμμής, θέτοντας $y = 20.5V$ (η cut-in τάση που πρέπει να αναπτύξει η γεννήτρια για να ξεκινήσει να φορτίζει 48V μπαταρίες), βρίσκουμε $n_{cutin} = 222 rpm$ για τη γεννήτρια με φερρίτες και $n_{cutin} = 210 rpm$ για τη γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου, ενώ και οι δύο έχουν σχεδιαστεί να έχουν cut-in στις 215 στροφές.

Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι κατά την προσομοίωση υπολογίσαμε το n_{cutin} ως τις στροφές όπου η ανορθωμένη dc τάση γίνεται 48V, θεωρώντας λόγο ανόρθωσης $\sqrt{3} \cdot 1.35$, κάτι που δεν ισχύει ακριβώς στην πραγματικότητα. Δηλαδή, εφόσον ο πραγματικός λόγος ανόρθωσης ήταν λίγο μικρότερος από τον θεωρητικό, είναι λογικό να χρειάζονται παραπάνω στροφές για να φτάσει η ανορθωμένη τάση τα 48V.

Στο παρακάτω σχήμα συγκρίνουμε τη σχέση της ΗΕΔ με τις στροφές, όπως μετρήθηκε και όπως προσομοιώθηκε, για τη γεννήτρια με φερρίτες.



Σχήμα 8.18. Σύγκριση της φασικής ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής, όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως υπολογίστηκε στην προσομοίωση.

Για ταχύτητα περιστροφής 200 rpm η απόκλιση της τιμής της προσομοίωσης από τη μετρούμενη τιμή είναι 4.7%, σφάλμα που θεωρείται αρκετά ικανοποιητικό.

Αφενός οι λόγοι είναι κατασκευαστικοί. Είναι πιθανό, εφόσον η κατασκευή έχει γίνει στο χέρι, να έχουν γίνει κάποια σφάλματα, όπως για παράδειγμα κατά την περιέλιξη των πηνίων. Επίσης, το διάκενο, που επηρεάζει πολύ τη συμπεριφορά της γεννήτριας, μπορεί να μην είναι σταθερό σε όλη την επιφάνεια των δίσκων και ίσο με 2.5mm. Τέλος, και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εμπεριέχει σφάλμα, όπως και το γεγονός ότι η γεωμετρία της προσομοίωσης έχει γίνει για λόγους απλότητας δισδιάστατη.

8.2.2. Μέτρηση της γεννήτριας υπό φορτίο

Στη συνέχεια οι γεννήτριες συνδέονται με φορτίο, πρώτα ωμικό τριφασικό και μετά σε μπαταρίες ώστε να μετρηθούν οι επιδόσεις τους.

8.2.2.1. Μέτρηση της γεννήτριας υπό ωμικό τριφασικό φορτίο

Συνδέουμε στα άκρα της γεννήτριας ένα τριφασικό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο. Οι στρόφες διατηρούνται σταθερές στις 350 στρόφες και μεταβάλλουμε το ωμικό φορτίο ώστε να μεταβάλλεται το ρεύμα από 0.5 έως 4.5A. Για κάθε ρεύμα λαμβάνεται μέτρηση της μηχανικής ροπής που ασκεί ο κινητήρας στη γεννήτρια μέσω του ροπόμετρου και με τον παλμογράφο καταγράφεται το ac ρεύμα και τάση.

Μεταβάλλοντας την αντίσταση του φορτίου μεταβάλλεται το ρεύμα που το διαρρέει άρα και η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Έτσι, κάθε φορά που αυξάνουμε το ρεύμα του φορτίου, οι στρόφες της γεννήτριας μειώνονται και για να τις κρατήσουμε στην επιθυμητή τιμή χρειάζεται να δώσουμε παραπάνω ισχύ στον DC κινητήρα [8].

Τα μετρούμενα μεγέθη καθώς και οι υπολογισμένες τιμές της μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος και της απόδοσης φαίνονται στους Πίνακες 8.4. και 8.5.

Φερρίτες:

n (rpm)	Ρεύμα (A)	Ροπή (Nm)	Τερματική πολική τάση (V)	Μηχανική Ισχύς (W)	Ηλεκτρική Ισχύς (W)	Απόδοση
348	0.49	1.55	54.39	56.49	45.97	0.81
348	1.02	1.67	53.64	60.86	94.76	1.56
348	1.50	2.98	52.89	108.60	137.40	1.27
348	2.00	4.33	52.02	157.80	180.20	1.14
348	2.48	5.70	51.62	207.72	221.71	1.07
348	2.99	6.96	50.11	253.64	259.53	1.02
348	3.49	8.21	48.79	299.33	294.91	0.99
348	3.80	9.30	47.63	339.02	313.50	0.92
348	4.51	12.16	46.53	442.99	363.51	0.82

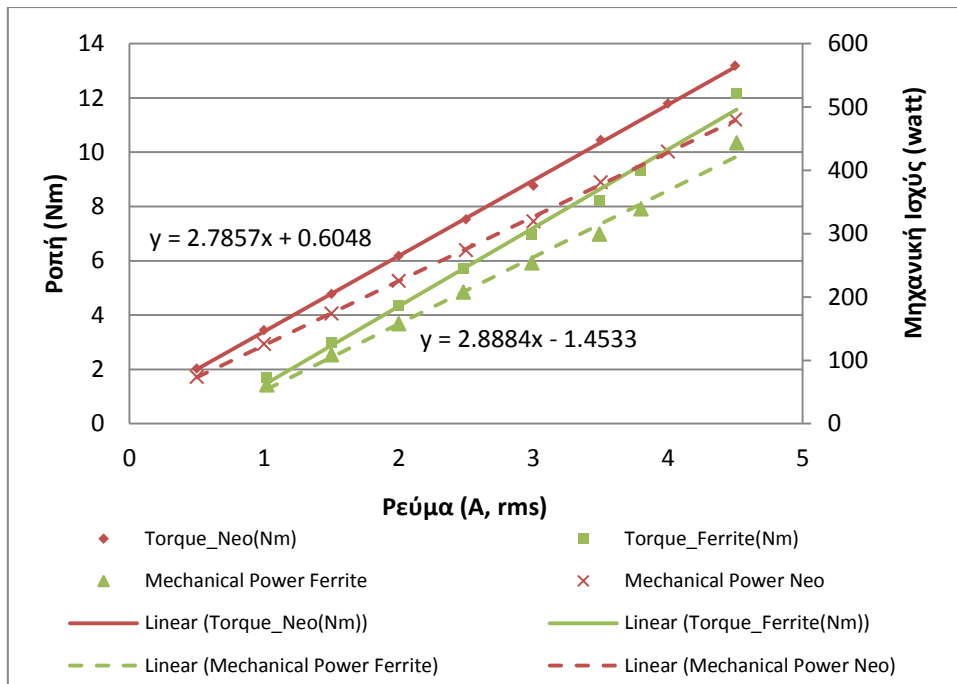
Πίνακας 8.4. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με ωμικό τριφασικό φορτίο για τη γεννήτρια με φερρίτες

Νεοδυμίου:

n (rpm)	Ρεύμα (A)	Ροπή (Nm)	Τερματική πολική τάση (V)	Μηχανική Ισχύς (W)	Ηλεκτρική Ισχύς (W)	Απόδοση
348	0.50	2.03	57.60	73.93	49.88	0.67
348	1.00	3.45	57.10	125.63	98.90	0.79
348	1.50	4.77	56.60	173.94	147.05	0.85
348	2.00	6.18	56.00	225.33	193.99	0.86
348	2.50	7.52	55.10	273.93	238.59	0.87
348	3.00	8.76	54.80	319.15	284.75	0.89
348	3.50	10.45	53.80	380.80	326.15	0.86
348	4.00	11.79	53.30	429.67	369.27	0.86
348	4.50	13.18	52.80	480.30	411.54	0.86

Πίνακας 8.5. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με ωμικό τριφασικό φορτίο για τη γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου

Ιδανικά θα θέλαμε να μεταβάλουμε το ρεύμα μέχρι την ονομαστική του τιμή για να διαπιστωθεί η λειτουργία της γεννήτριας σε υψηλότερους ανέμους, αλλά μας περιόρισε η αντίσταση που χρησιμοποιήσαμε, η οποία έχει ονομαστικό ρεύμα 5Α. Με βάση τις τιμές στους παραπάνω πίνακες λοιπόν, αναπαριστούμε γραφικά τη σχέση της ροπής με το ρεύμα και της μηχανικής ισχύος με το ρεύμα. Οι εξισώσεις στο διάγραμμα αντιστοιχούν στις γραμμές της ροπής.



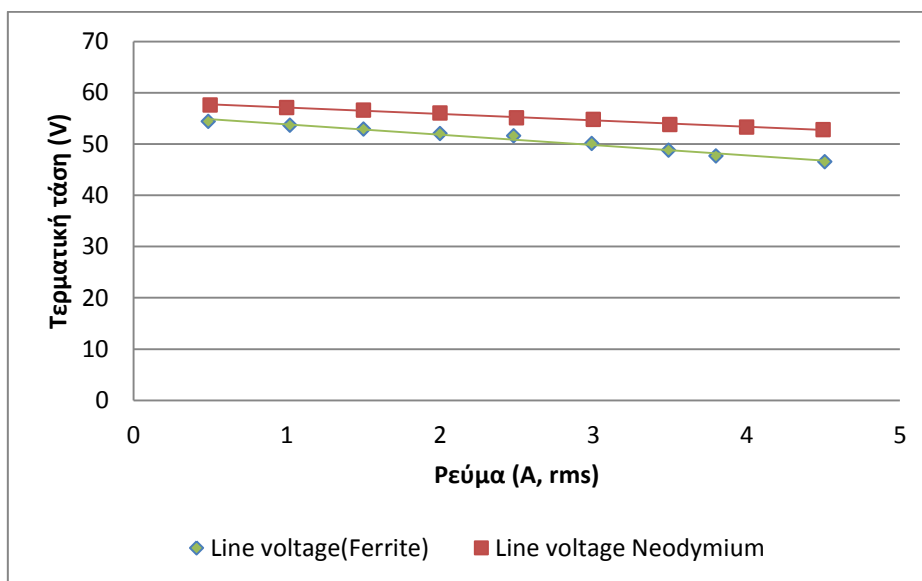
Σχήμα 8.19. Η μηχανική ροπή και ισχύς των γεννητριών σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.

Όπως βλέπουμε οι γραμμές της ροπής και της ισχύος έχουν παρόμοια κλίση για τις δύο γεννήτριες. Όμως, η γεννήτρια νεοδυμίου παράγει κατά μέσο όρο 1.7Nm παραπάνω ροπή και 61W παραπάνω ισχύ για ίδιο ρεύμα και στροφές, από τη γεννήτρια με τους φερρίτες.

Ας συγκρίνουμε τη θεωρητική τιμή της ροπής για τις δύο γεννήτριες. Από τη σχέση (2.8) βλέπουμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή για δεδομένο ρεύμα εξαρτάται από την εξωτερική ακτίνα στον κύβο, το k_d , το B_{avg} , τα ελίγματα και την εσωτερική ακτίνα. Επειδή οι ακτίνες παίρνουν παραπλήσιες τιμές για τις δύο γεννήτριες (η εξωτερική ακτίνα είναι 0.2 και 0.15m για τη γεννήτρια με φερρίτες και τη γεννήτρια νεοδυμίου αντίστοιχα), όπως και το k_d (0.75 και 0.7 αντίστοιχα) και ο αριθμός των ελιγμάτων (900 και 810 αντίστοιχα), το μέγεθος που παίζει τελικά καθοριστικό ρόλο στην τιμή της ροπής είναι το B_{avg} το οποίο έχει σχεδόν διπλάσια τιμή στη γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου. Έτσι, από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι η γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου έχει μεγαλύτερη ροπή για δεδομένο ρεύμα, κάτι που εξηγεί τις πειραματικές μετρήσεις.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι το ροπόμετρο που χρησιμοποιήσαμε δεν είναι κατάλληλο για μέτρηση μικρών τιμών ροπής, καθώς έχει σφάλμα 0.1% στα 500Nm, δηλαδή 0.5Nm σφάλμα σε όλες τις ροπες. Ένα τέτοιο σφάλμα είναι αρκετά μεγάλο για τις τιμές ροπής που μετράμε (0-13Nm σε αυτό το πείραμα). Επίσης, οι τιμές της ροπής εμφανίζουν έντονη ταλάντωση λόγω δονήσεων στον άξονα. Γι' αυτούς τους λόγους, καταγράφουμε τις μετρήσεις του ροπόμετρου για χρονικό διάστημα 15 δευτερολέπτων περίπου και στη συνέχεια εξάγουμε το μέσο όρο.

Επίσης, συγκρίνεται η τερματική τάση συναρτήσει του ρεύματος για τις δύο γεννήτριες. Βλέπουμε ότι η γεννήτρια με τους φερριτες έχει λίγο χαμηλότερη τάση από τη γεννήτρια νεοδυμίου και η διαφορά αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα.



Σχήμα 8.20. Η τερματική τάση των γεννητριών σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.

Αυτό οφείλεται κατά ένα μέρος στη μεγαλύτερη ΗΕΔ που αναπτύσσει για ίδιες στροφές η γεννήτρια νεοδυμίου, αλλά και στη μικρότερη αντίσταση στάτη που έχει αυτή, όπως θα δούμε σε επόμενο πείραμα.

8.2.2.2. Μέτρηση της γεννήτριας σε σύνδεση με συσσωρευτές

Στην έξοδο του ανορθωτή συνδέονται 4 συσσωρευτές τάσης 12V συνθέτοντας ένα σύστημα τάσης 48V. Οι στροφές μεταβάλλονται σταδιακά μέχρι να παρατηρηθεί ότι το σύστημα δίνει ενέργεια στις μπαταρίες και στη συνέχεια αυξάνονται μέχρι να μετρηθεί το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας. Έτσι, μπορεί να σχηματιστεί η καμπύλη ισχύος κάθε γεννήτριας.

Με το ροτόμετρο καταγράφουμε τη μηχανική ροπή και με τον παλμογράφο AC και DC ρεύμα και τάση, καθώς και συχνότητα, από την οποία υπολογίζουμε στη συνέχεια τις στροφές. Οι μετρήσεις και τα υπολογισμένα μεγέθη για τις δύο γεννήτριες φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Φερρίτες:

n (rpm)	T (Nm)	V _{ac} ⁷ (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	P _{mech} (W)	P _{el} (W)	EffGen	EffTot ⁸
198	0.63	19.07	0.10	48.80	0.10	13.06	5.72	0.44	0.37
210.9	0.60	20.13	0.10	48.80	0.10	13.25	6.04	0.46	0.37
239.1	1.60	21.23	0.54	49.00	0.68	40.06	34.40	0.86	0.83
253.4	4.36	22.37	1.76	50.40	1.92	115.67	118.10	1.02	0.84
272.9	6.32	23.83	2.36	52.40	2.90	180.63	168.74	0.93	0.84
287.1	8.56	24.47	3.26	53.60	4.12	257.36	239.28	0.93	0.86
324.4	11.22	25.37	4.29	55.10	5.32	381.13	326.47	0.86	0.77
334.8	13.75	26.23	5.26	56.50	6.70	482.08	413.96	0.86	0.79
356.7	16.01	26.90	6.18	57.30	8.09	598.03	498.73	0.83	0.78
372.5	18.31	27.50	7.16	58.40	9.31	714.14	590.70	0.83	0.76
392.3	20.25	28.13	7.85	59.10	10.40	831.80	662.54	0.80	0.74
411.2	22.36	28.60	8.82	59.90	11.60	962.72	756.76	0.79	0.72
436.3	24.56	29.00	9.76	60.70	12.90	1122.06	849.12	0.76	0.70
454.1	26.38	29.37	10.6	60.9	14.1	1254.32	933.86	0.74	0.68

Πίνακας 8.6. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με συσσωρευτές για τη γεννήτρια με φερρίτες

Νεοδυμίου:

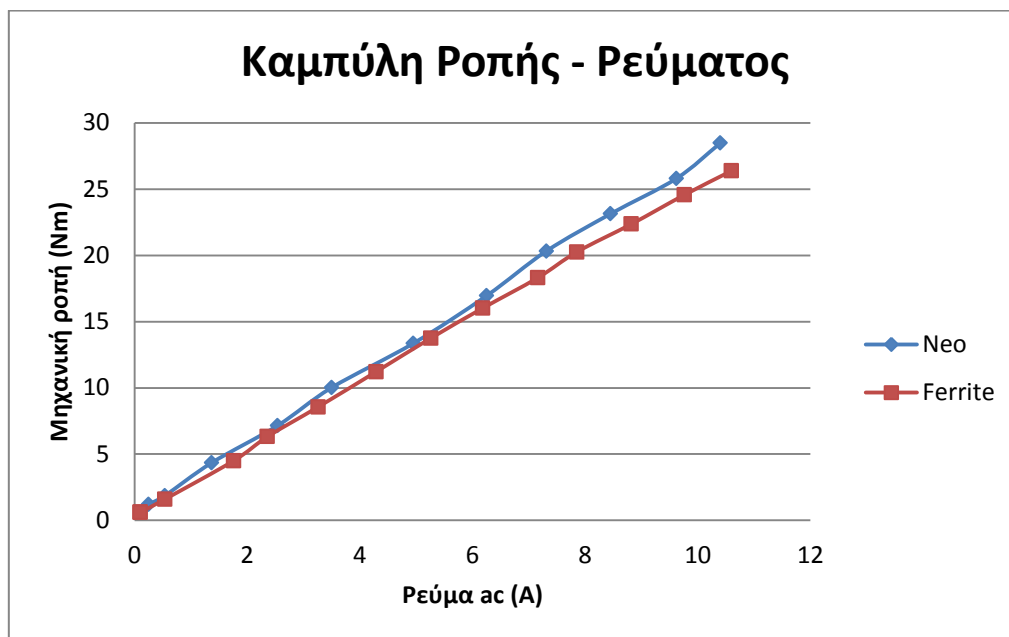
n (rpm)	T (Nm)	V _{ac} (V)	I _{ac} (A)	V _{dc} (V)	I _{dc} (A)	P _{mech} (W)	P _{el} (W)	EffGen	EffTot
204	1.20	19.4	0.25	46.90	0.26	25.68	14.55	0.57	0.47
213	1.86	20	0.54	47.00	0.59	41.55	32.33	0.78	0.67
229	4.35	20.9	1.37	48.10	1.68	104.31	85.90	0.82	0.77
243	7.15	20.4	2.54	49.40	3.00	182.04	155.74	0.86	0.81
258	10.02	22.6	3.50	50.20	4.43	270.76	237.64	0.88	0.82
273	13.36	21.9	4.95	50.80	6.10	381.94	325.80	0.85	0.81
288	16.95	23.8	6.25	51.50	7.80	511.25	446.00	0.87	0.79
304	20.32	23.9	7.31	51.90	9.52	646.82	524.18	0.81	0.76
319	23.13	24.4	8.45	52.30	11.00	772.72	617.63	0.80	0.74
334	25.80	24.3	9.62	52.80	12.40	902.49	701.48	0.78	0.73
348	28.47	25	10.40	53.10	13.90	1,037.61	779.98	0.75	0.71

Πίνακας 8.7. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με συσσωρευτές για τη γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου

⁷ Φασική τάση

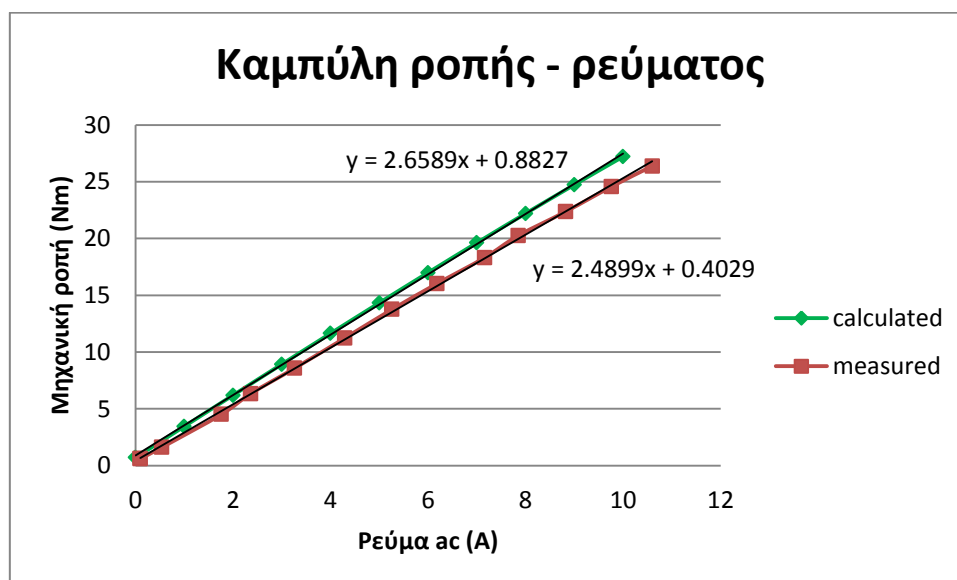
⁸ Συνολική απόδοση συστήματος γεννήτριας και ανορθωτή

Στο σχήμα 8.21. φαίνεται η αναλογική σχέση της ροπής με το ρεύμα και βλέπουμε ότι οι γεννήτριες έχουν πολύ παρόμοιες καμπύλες.



Σχήμα 8.21. Η μηχανική ροπή των γεννητριών σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.

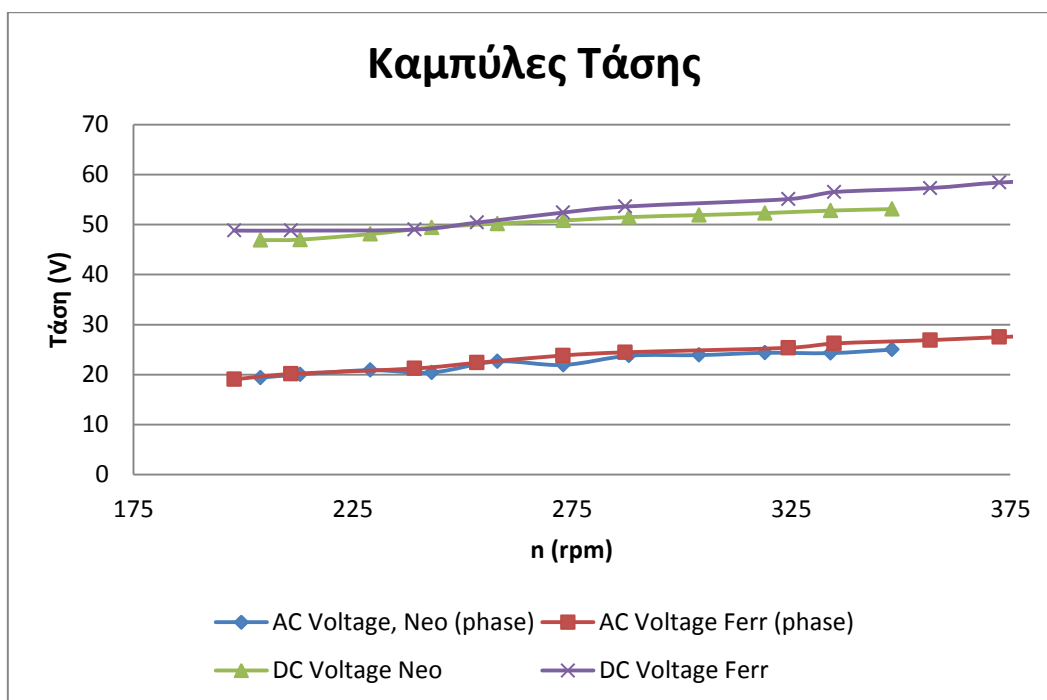
Για τη γεννήτρια με φερρίτες συγκρίνεται στο σχήμα 8.22. η καμπύλη ροπής-ρεύματος όπως αυτή προέκυψε από τις μετρήσεις και από την προσομοίωση:



Σχήμα 8.22. Η μηχανική ροπή της γεννήτριας με φερρίτες σε σχέση με το ρεύμα γραμμής, όπως προέκυψε από την προσομοίωση και τις πειραματικές μετρήσεις.

Το σφάλμα της προσομοίωσης από την πραγματική τιμή στις 410 στροφές είναι 8.8%, απόκλιση που οφείλεται, όμως, κυρίως, στο σφάλμα του ροτόμετρου, εφόσον το χρησιμοποιούμε κοντά στο κάτω όριο της εμβέλειάς του (0-500 Nm).

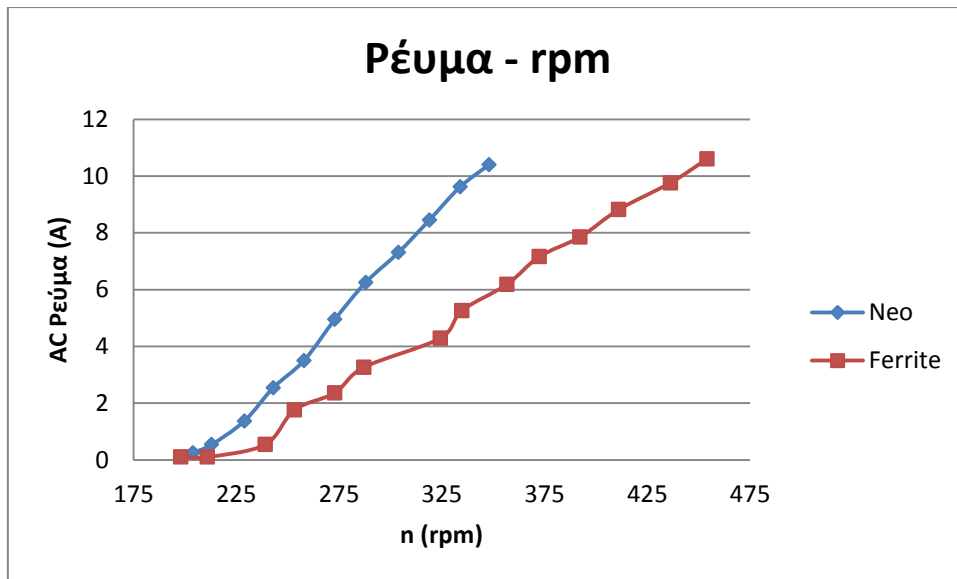
Στο επόμενο σχήμα αναπαρίστανται γραφικά οι τάσεις των δύο γεννητριών σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 8.23. Η τερματική τάση (dc και ac) των γεννητριών σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

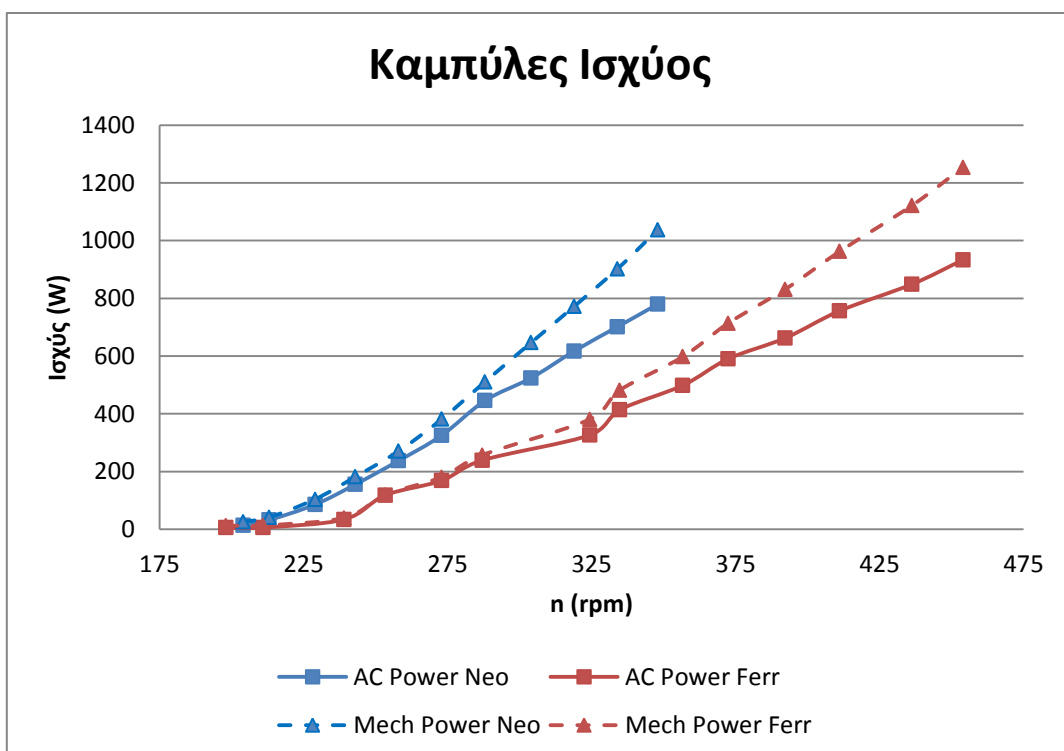
Παρατηρούμε ότι η τάση (dc και ac) έχει πολύ μικρή μεταβολή με την αύξηση των στροφών, καθώς οι μπαταρίες επιβάλλουν την τάση τους στο σύστημα.

Επειδή όμως περισσότερες στροφές σημαίνει μεγαλύτερη ΗΕΔ όπως είδαμε στο πείραμα κενού φορτίου, και αφού η τερματική τάση είναι περίπου σταθερή, τελικά περισσότερες στροφές μεταφράζεται σε μεγαλύτερο ρεύμα. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 8.24.



Σχήμα 8.24. Το ρεύμα των γεννητριών σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

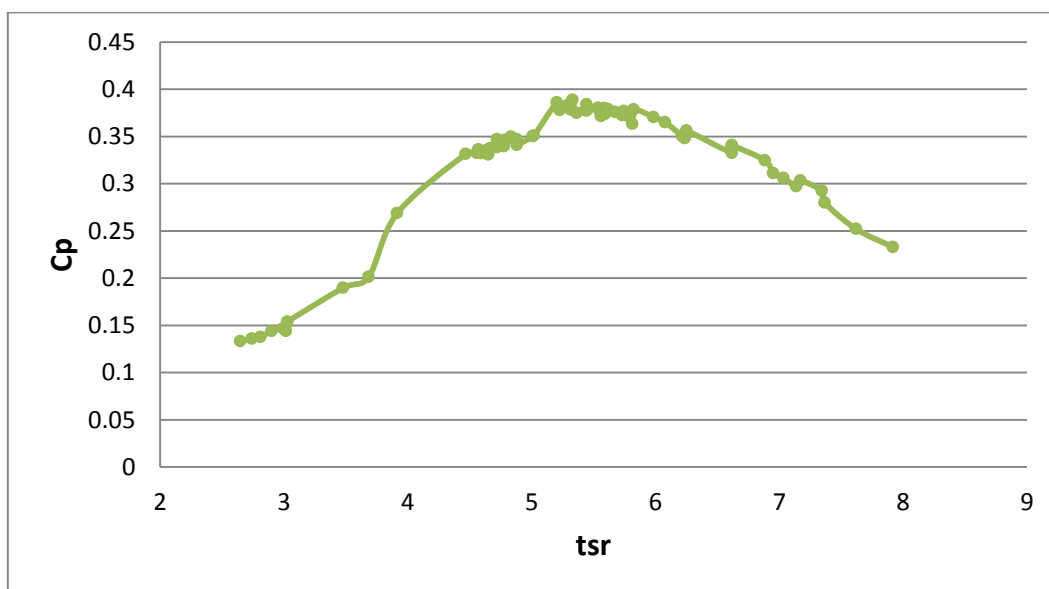
Στη συνέχεια βλέπουμε τις καμπύλες ισχύος των δύο γεννητριών. Εδώ παρατηρούμε ότι στις ίδιες στροφές η γεννήτρια νεοδυμίου παράγει μεγαλύτερη ισχύ, ή αλλιώς, η γεννήτρια με τους φερρίτες χρειάζεται να αναπτύξει περισσότερες στροφές ώστε να παράγει μία συγκεκριμένη ισχύ.



Σχήμα 8.25. Η μηχανική και η ηλεκτρική ισχύς των γεννητριών σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

Για παράδειγμα, φαίνεται ότι η γεννήτρια νεοδυμίου θα παράγει την ονομαστική της ισχύ περίπου στις 375 στροφές, ενώ η γεννήτρια με τους φερρίτες παράγει την ίδια ονομαστική ισχύ στις 435 στροφές. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην αρκετά μεγαλύτερη αντίσταση στάτη που έχει η γεννήτρια με φερρίτες.

Μία γεννήτρια με μεγαλύτερη αντίσταση έχει μικρότερη ροή ρεύματος και άρα μικρότερη ροπή για δεδομένες στροφές [31]. Αυτό δεν είναι απαραίτητα κακό για μία ανεμογεννήτρια που δεν έχει έλεγχο γωνίας βήματος (pitch control), όπως συνηθίζεται σε μικρές α/γ σε αγροτικές εφαρμογές. Μία ανεμογεννήτρια δε λειτουργεί γενικά στις ονομαστικές της στροφές, όπως μία συνήθης γεννήτρια για ηλεκτροπαραγωγή, αλλά στις στροφές που αντιστοιχούν στο μέσο άνεμο της περιοχής, ο οποίος τυπικά βρίσκεται στα 5 m/s σε αγροτικές περιοχές. Σε αυτή την ταχύτητα ανέμου θέλουμε να μεγιστοποιούμε τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος της φτερωτής μας, άρα να λειτουργούμε στη βέλτιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου, λ_{opt} .



Σχήμα 8.26. Καμπύλη c_p - λ για πτερύγια ακτίνας 1.2m και ταχύτητα ανέμου 5.5 m/s [32]

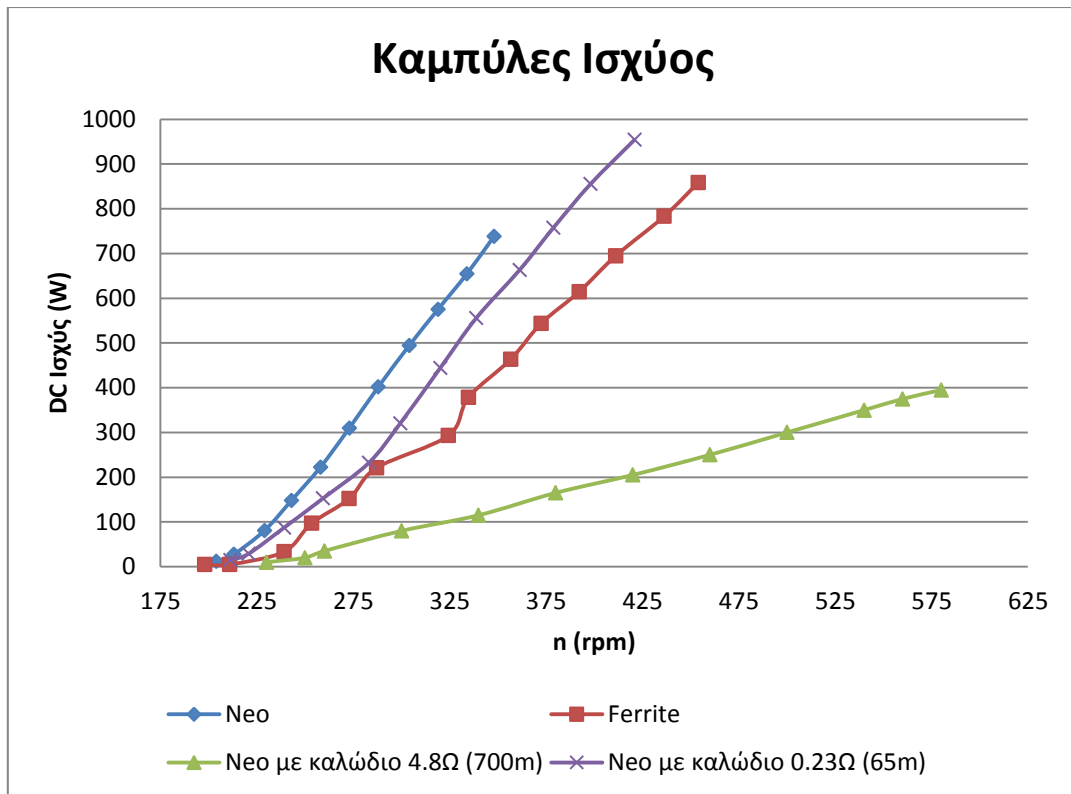
Μεγάλη ροπή σε χαμηλές στροφές προκαλεί τα πτερύγια να λειτουργούν στην περιοχή stall σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, εμποδίζοντας τα να εκμεταλλευτούν την κινητική ενέργεια του ανέμου. Από την άλλη, πολύ μικρή ροπή έχει ως αποτέλεσμα τα πτερύγια (και η γεννήτρια) να αναπτύσσουν μεγαλύτερες ταχύτητες ακροπτερυγίου από τη βέλτιστη.

Όπως είπαμε, η ροπή επηρεάζεται από την αντίσταση, γι' αυτό το λόγο είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η πιο κατάλληλη αντίσταση που πρέπει να έχει μια γεννήτρια σε μια συγκεκριμένη περιοχή (με συγκεκριμένη κατανομή ανέμου) και για συγκεκριμένη τάση συσσωρευτών, ώστε να εκμεταλλεύεται με βέλτιστο τρόπο την ενέργεια των μέσων ανέμων. Αυτή η αντίσταση μπορεί να βρίσκεται εν μέρει στο στάτη και εν μέρει στο καλώδιο σύνδεσης της γεννήτριας με τον ανορθωτή. Έτσι, αν η γεννήτρια έχει πολύ μικρή αντίσταση στο στάτη, θα χρειαστεί να συνδεθεί με καλώδιο μεγαλύτερης αντίστασης προκειμένου το σύστημα να έχει τις απώλειες που απαιτούνται για βέλτιστη λειτουργία. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται ένα λεπτό και μακρύ καλώδιο, πχ. 30-100m, όπως συμβαίνει συχνά σε αγροτικές εγκαταστάσεις, όπου, για παράδειγμα, η ανεμογεννήτρια θα τοποθετηθεί σε ένα μικρό λόφο κοντά στον οικισμό.

Από την άλλη, αν η συνολική αντίσταση που απαιτείται υπάρχει ήδη μέσα στη γεννήτρια θα προκύψει πρόβλημα αν αυτή η γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί και με ένα αρκετά μακρύ καλώδιο. Σε αυτή την περίπτωση η συνολική αντίσταση στάτη και καλωδίου θα είναι πιο μεγάλη από τη βέλτιστη τιμή, οι απώλειες θα είναι πολύ μεγάλες και η απόδοση του συστήματος θα μειωθεί εξαιτίας της αύξησης του λ πάνω από τις βέλτιστες τιμές.

Οι δύο γεννήτριες που μελετάμε εδώ φαίνεται ότι αποτελούν παραδείγματα των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Στο [31], όπως και στο [33], έχουν γίνει πειράματα συνδέοντας τη γεννήτρια νεοδυμίου που μελετάμε, με καλώδια διαφορετικής αντίστασης. Στο σχήμα 8.27, φαίνονται οι καμπύλες ισχύος για αυτές τις διατάξεις. Να σημειωθεί ότι στη διάταξη με το καλώδιο 0.23Ω είναι συνδεδεμένος και ένας ρυθμιστής φορτίου, ο οποίος όταν η τάση των συσσωρευτών φτάσει μία συγκεκριμένη τιμή, συνδέει στο κύκλωμα ένα απορριπτικό φορτίο.

Παρομοιάζοντας το σύστημά μας με ένα ποδήλατο, μία μεγάλη αντίσταση στο καλώδιο και στη γεννήτρια αντιστοιχεί σε χαμηλή ταχύτητα στο ποδήλατο (πολλές στροφές/ χαμηλή ροπή). Επειδή όμως σε μια α/γ όπως αυτές που μελετάμε δε μπορείς να αλλάξεις ταχύτητα ενώ «οδηγείς» πρέπει να αποφασίσουμε από την αρχή ποια είναι η καλύτερη «ταχύτητα» για να οδηγήσουμε στο συγκεκριμένο «δρόμο» (στις συγκεκριμένες συνθήκες ανέμου) με το βέλτιστο τρόπο.

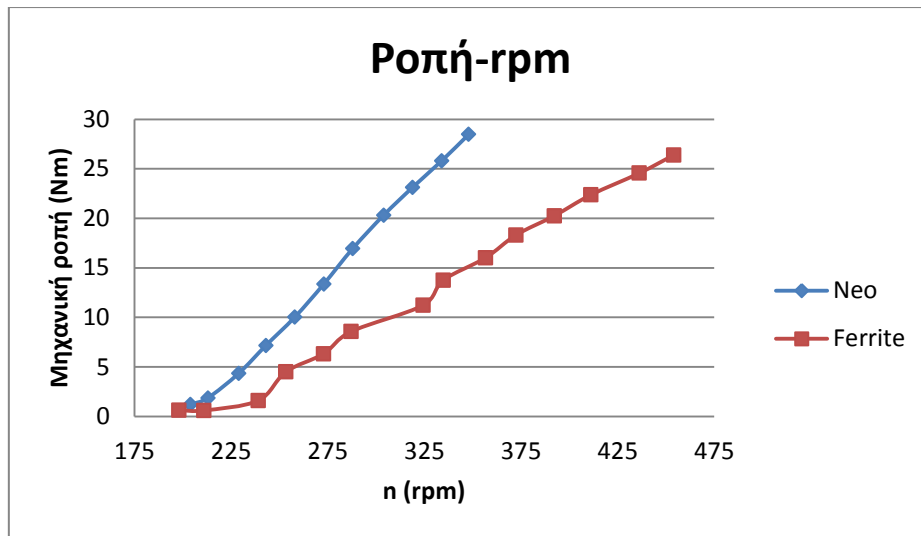


Σχήμα 8.27. Καμπύλες ισχύος γεννητριών με διαφορετική αντίσταση

Παρατηρούμε ότι η κλίση της καμπύλης ‘Neo με καλώδιο 0.23Ω’ μοιάζει αρκετά με την κλίση της καμπύλης ‘Ferrite’ μέχρι περίπου τις 285 στροφές. Σε εκείνο το σημείο η κλίση της πρώτης αυξάνεται λίγο, γιατί συνδέεται παράλληλα στους συσσωρευτές το απορριπτικό φορτίο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική αντίσταση.

Βλέπουμε λοιπόν ότι προσθέτοντας εξωτερική αντίσταση στη γεννήτρια νεοδυμίου η συμπεριφορά της πλησιάζει αυτή της γεννήτριας με τους φερρίτες. Βέβαια αν προσθέσουμε πολύ μεγάλη εξωτερική αντίσταση (Neo με καλώδιο 4.8Ω) παρατηρούμε ότι η κλίση της καμπύλης ισχύος γίνεται πολύ μικρότερη και από την κλίση της γεννήτριας με φερρίτες.

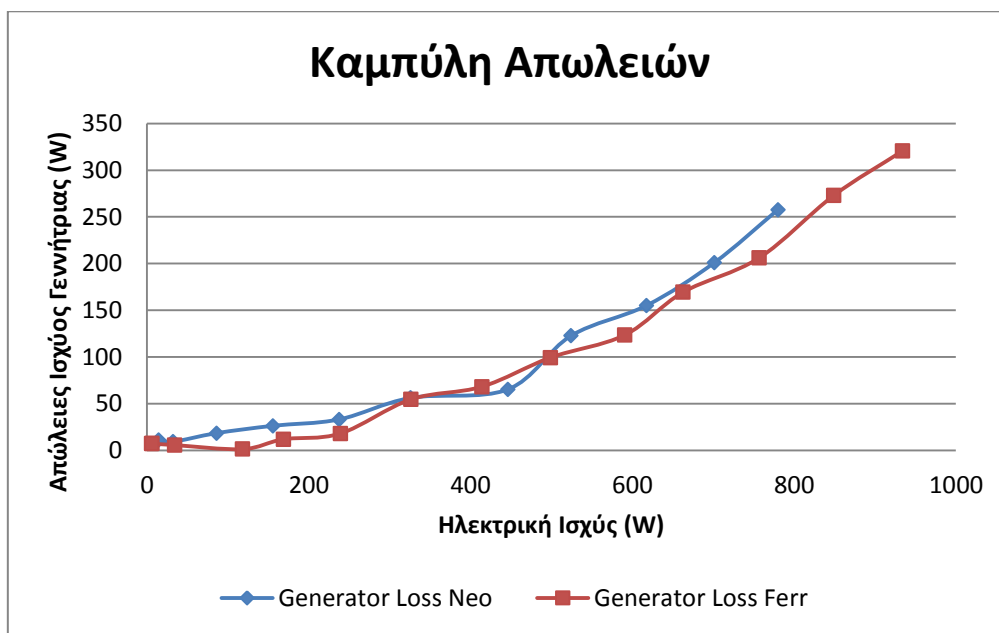
Παρακάτω συγκρίνονται οι κάμπυλες της ροπής με τις στροφές για τις δύο γεννήτριες.



Σχήμα 8.28. Η μηχανική ροπή των γεννητριών σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

Εδώ φαίνεται η επίδραση της ροπής στην παραγόμενη ισχύ αφού οι κλίσεις είναι σχεδόν ίδιες με τις κλίσεις των καμπύλων ισχύος στο προηγούμενο διάγραμμα.

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι καμπύλες απωλειών κάθε γεννήτριας (ηλεκτρικών και περιστροφής) σε συνάρτησι με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.

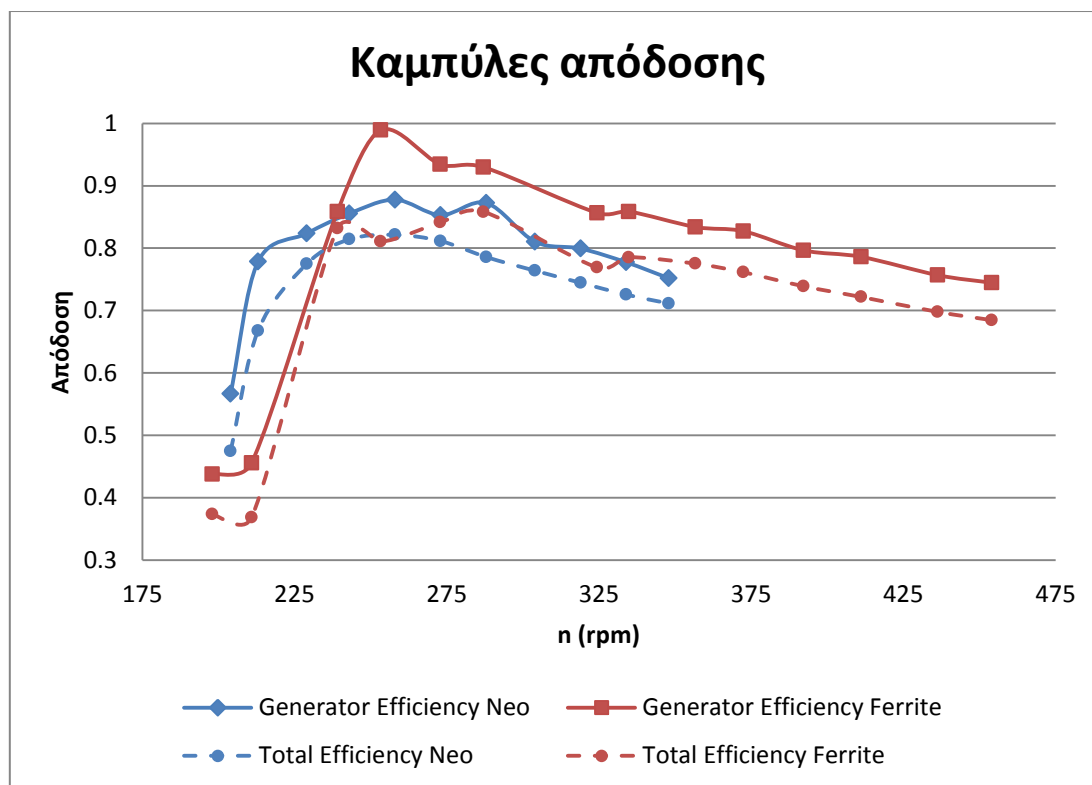


Σχήμα 8.29. Οι απώλειες ισχύος των γεννητριών σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.

Εδώ παρατηρούμε ότι οι απώλειες για κάθε παραγόμενη ισχύ παίρνουν πολύ κοντινές τιμές για τις δύο γεννήτριες, αν και η γεννήτρια με φερριτές φαίνεται να έχει λίγο μικρότερες απώλειες. Η διαφορά δεν είναι σημαντική και ενδέχεται να προκύπτει λόγω

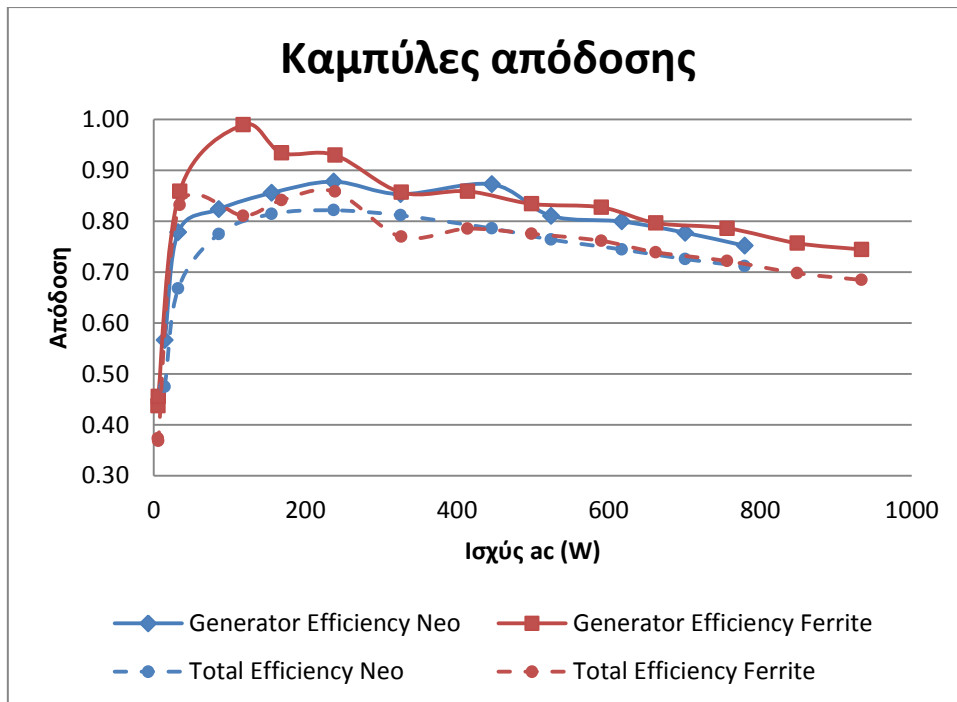
σφάλματος των οργάνων, και ιδιαίτερα του ροπόμετρου, αλλά και λόγω διαφοράς στη φόρτιση των μπαταριών κατά τη διεξαγωγή κάθε πειράματος.

Τέλος, συγκρίνεται η απόδοση των δύο γεννητριών καθώς και η συνολική απόδοση του συστήματος, που περιέχει και την απόδοση του ανορθωτή, ως προς τις στροφές.



Σχήμα 8.30. Η απόδοση των γεννητριών σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.

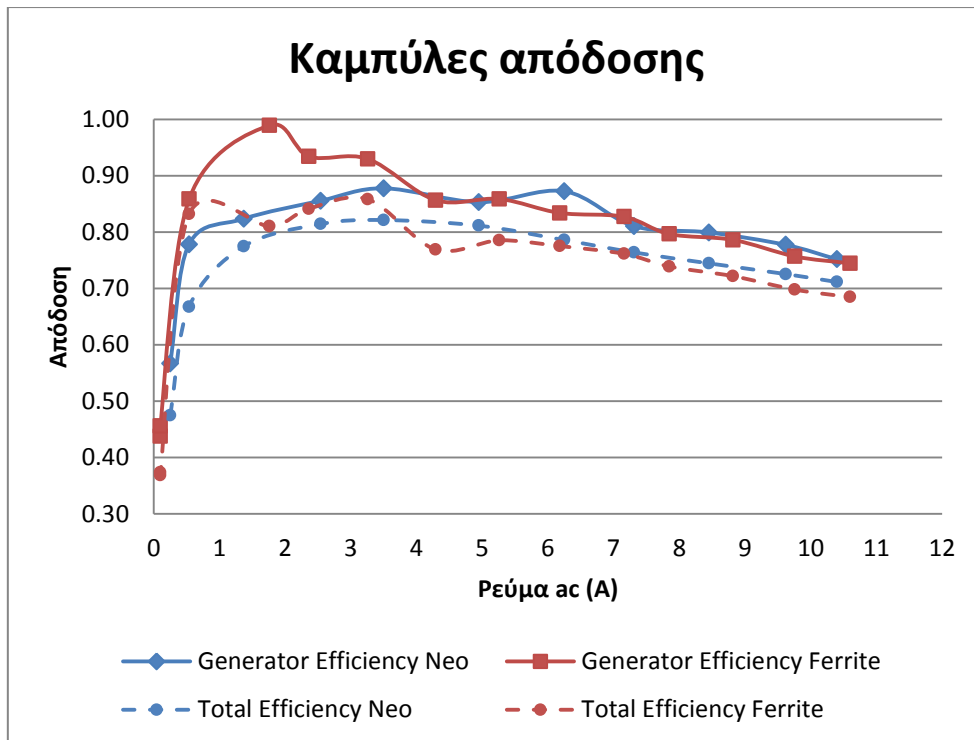
Εδώ παρατηρούμε ότι η γεννήτρια με φερρίτες έχει καλύτερη απόδοση μετά περίπου τις 240 στροφές. Η διαφορά εξηγείται από το γεγονός ότι για ίδιες στροφές η γεννήτρια με φερρίτες έχει μικρότερη ροή ρεύματος και άρα λιγότερες ηλεκτρικές απώλειες. Βέβαια, για ίδιες στροφές η γεννήτρια με φερρίτες έχει και λιγότερη παραγωγή ισχύος. Γι'αυτό το λόγο, συγκρίνουμε την απόδοση των δύο γεννητριών σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ.



Σχήμα 8.31. Η απόδοση των γεννητριών σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.

Χωρίς την εξάρτηση από τις στροφές, οι τιμές της απόδοσης ανά ισχύ παίρνουν πολύ κοντινές τιμές. Μία μικρή διαφορά που φαίνεται να υπάρχει ακόμα στις καμπύλες απόδοσης της γεννήτριας μπορεί να οφείλεται, πέρα από τα σφάλματα των οργάνων, και σε διαφορετική φόρτιση των μπαταριών κατά τη διεξαγωγή των δύο πειραμάτων. Είναι πιθανό κατά τη μέτρηση της γεννήτριας με φερρίτες οι μπαταρίες να είχαν μεγαλύτερο βαθμό φόρτισης, γεγονός που επέτρεψε στη γεννήτρια να αναπτύξει λίγο υψηλότερη τάση και χαμηλότερο ρεύμα και επομένως, λιγότερες απώλειες και μεγαλύτερη απόδοση. Βέβαια, η γεννήτρια με μαγνήτες νεοδυμίου έχοντας υψηλότερο ρεύμα ανέπτυξε λίγο υψηλότερη dc ισχύ (ανά ισχύ ac) οπότε η συνολική απόδοση των δύο γεννητριών είναι σχεδόν ίδια.

Παραθέτουμε και το διάγραμμα της απόδοσης των δύο γεννητριών σε σχέση με το ρεύμα, όπου και πάλι βλέπουμε ότι οι καμπύλες έχουν παραπλήσιες τιμές για τις δύο γεννήτριες.



Σχήμα 8.32. Η απόδοση των γεννητριών σε σχέση με το ρεύμα γραμμής.

8.2.3. Μέτρηση της θερμοκρασίας του στάτη

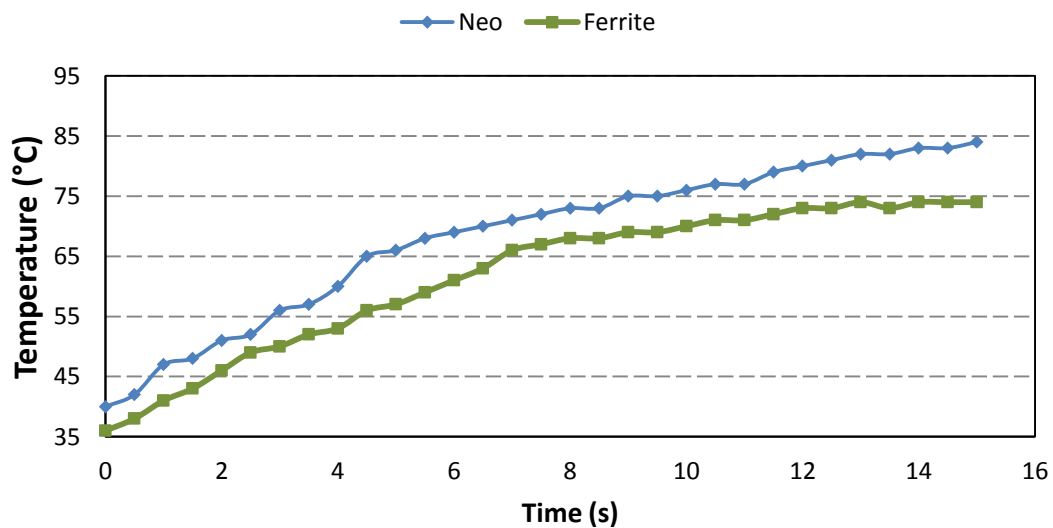
Κατά τη λειτουργία της γεννήτριας χάνεται ενέργεια με τη μορφή θερμότητας στην αντίσταση των τυλιγμάτων. Η θερμοκρασία του στάτη αυξάνεται και αυτό προκαλεί αύξηση της αντίστασης των τυλιγμάτων και περαιτέρω απώλειες. Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος σοβαρής βλάβης αν η θερμοκρασία αυξηθεί πολύ και καταστροφής της γεννήτριας, αν αυξηθεί πέρα από το σημείο τήξης της ρητίνης όπου βρίσκονται τα πηνία.

Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό να μετρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας της γεννήτριας ενώ αυτή λειτουργεί για αρκετή ώρα. Η διαδικασία είναι η εξής: όπως και πριν, συνδέουμε τη γεννήτρια μέσω του ανορθωτή στους συσσωρευτές και τη λειτουργούμε στην ονομαστική της ισχύ. Στη συνέχεια, με ένα θερμόμετρο υπέρυθρων σημαδεύουμε το στάτη και παίρνουμε μετρήσεις της θερμοκρασίας ανά 30 δευτερόλεπτα για 15 λεπτά συνολικά. Το θερμόμετρο σημαδεύεται στο θερμότερο σημείο του πιο θερμού πηνίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.33.



Σχήμα 8.33. Μέτρηση της θερμοκρασίας του σάτη με θερμόμετρο υπέρυθρων

Τα αποτελέσματα για κάθε γεννήτρια συγκρίνονται στο σχήμα 8.34.



Σχήμα 8.34. Αύξηση της θερμοκρασίας του σάτη κατά την ονομαστική λειτουργία για τις δύο γεννήτριες

Βλέπουμε ότι η θερμοκρασία της γεννήτριας νεοδυμίου όταν λειτουργεί σε ονομαστικές στροφές είναι αρκετά υψηλότερη από τη θερμοκρασία της γεννήτριας με φερρίτες. Κατά τα πρώτα λεπτά, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι περίπου ο ίδιος για τις δύο γεννήτριες, αλλά, ενώ μετά από 12 λεπτά περίπου η θερμοκρασία αρχίζει να σταθεροποιείται για τη γεννήτρια με τους φερρίτες, για τη γεννήτρια νεοδυμίου συνεχίζει να αυξάνεται, με αρκετά μικρότερο βέβαια ρυθμό.

Η γεννήτρια με τους φερρίτες λοιπόν, ενώ έχει μεγαλύτερη αντίσταση στάτη (όπως θα δούμε στο επόμενο πείραμα) και άρα περισσότερες θερμικές απώλειες, καθώς και μεγαλύτερη διάμετρο, κάτι που δυσκολεύει την ψύξη της, λειτουργεί σε αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται από τις μεγάλες τρύπες που ανοίχθηκαν στους δίσκους του δρομέα της και της επιτρέπουν να αποβάλλει τη θερμότητα μακριά από το στάτη.

Παρόλο που στο πείραμα οι θερμοκρασίες για τη γεννήτρια νεοδυμίου άρχισαν να πλησιάζουν το σημείο τήξης της ρητίνης (100°C), στην πραγματικότητα σε μία ανεμογεννήτρια η θερμοκρασία θα είναι πολύ χαμηλότερη, εξαιτίας του εξαιρετικού αερισμού που προσφέρει ο άνεμος.

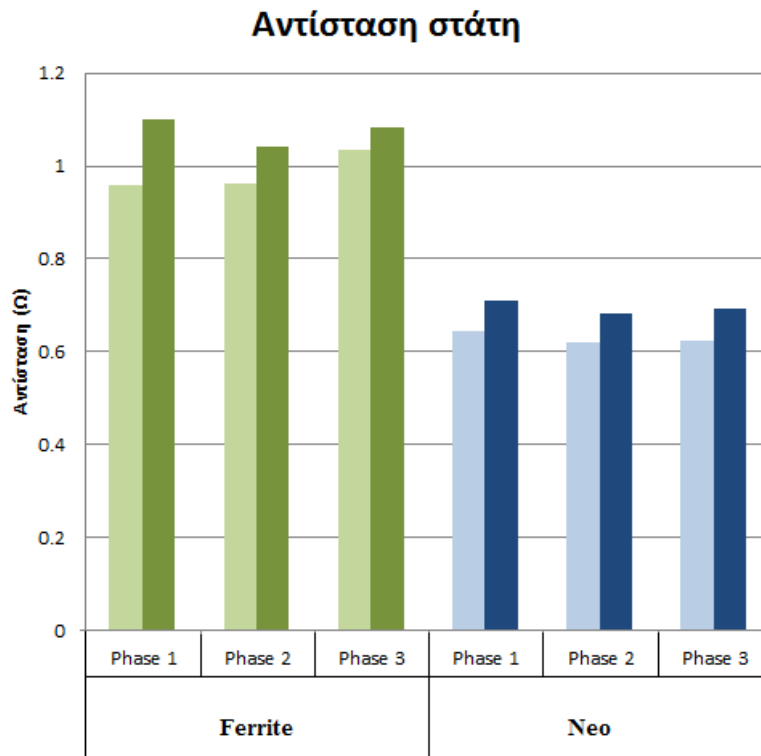
8.2.4. Μέτρηση της αντίστασης του στάτη

Η αντίσταση του στάτη επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της γεννήτριας, καθορίζοντας την ισχύ που χάνεται ως θερμότητα κατά τη λειτουργία της. Αυτή η θερμότητα αυξάνει και τη θερμοκρασία λειτουργίας του στάτη, περιορίζοντας το χρόνο ζωής του, γι' αυτό και πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

Σε αυτό το πείραμα μετρήσαμε την αντίσταση κάθε φάσης του τυλίγματος σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες. Με ένα τροφοδοτικό δώσαμε διάφορες τάσεις σε κάθε φάση της γεννήτριας και μετρήσαμε το ρεύμα που αναπτύσσεται κάθε φορά. Έτσι, από το νόμο του Ohm υπολογίσαμε στη συνέχεια την αντίσταση κάθε φάσης. Στη γεννήτρια νεοδυμίου συνδέαμε το τροφοδοτικό σε δύο φάσεις κάθε φορά, καταγράφαμε το ρεύμα και στη συνέχεια η αντίσταση κάθε φάσης προέκυπτε από τη σχέση: $R_a = \frac{V_{ab} + V_{ac} - V_{bc}}{I_{ab} - I_{ac} - I_{bc}}$ και αντίστοιχα για τις άλλες δύο φάσεις.

Αρχικά πήραμε μετρήσεις σε θερμοκρασία δωματίου και στη συνέχεια αφήσαμε τη γεννήτρια να λειτουργήσει για 15 λεπτά στα ονομαστικά της ώστε να θερμανθεί και ξαναπήραμε μετρήσεις.

Στο σχήμα 8.35, φαίνεται η αντίσταση για τις 3 φάσεις κάθε γεννήτριας, με ανοιχτό χρώμα στη χαμηλή θερμοκρασία και με σκούρο χρώμα στην υψηλή θερμοκρασία.



Σχήμα 8.35. Σύγκριση της αντίστασης στάτη των δύο γεννητριών

Είναι φανερό ότι, ανεξαρτήτως θερμοκρασίας, η γεννήτρια με τους φερρίτες έχει αρκετά μεγαλύτερη αντίσταση στάτη (κατά μέσο όρο 56% μεγαλύτερη από του νεοδυμίου), κάτι που επιβεβαιώνει τα συμπεράσματά μας στα προηγούμενα πειράματα.

Μέση αντίσταση στάτη		
Θερμοκρασία	Ferrite	Neo
Χαμηλή	0.986 Ω	0.628 Ω
Υψηλή	1.076 Ω	0.695 Ω

Πίνακας 8.8. Μέσος όρος της αντίστασης στάτη των 3 φάσεων για κάθε γεννήτρια στη χαμηλή και την υψηλή θερμοκρασία.

Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα και προτάσεις

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ως μέρη μικρών ανεμογεννητριών σε αγροτικές, αυτόνομες εγκαταστάσεις.

Οι γεννήτριες αυτές, τα τελευταία χρόνια, κατασκευάζονται σχεδόν αποκλειστικά με μαγνήτες νεοδυμίου. Βάσει βιβλιογραφικής έρευνας, καθώς και ενός ερωτηματολογίου που δημιουργήσαμε και απαντήθηκε από χρήστες και κατασκευαστές τοπικά κατασκευασμένων μικρών ανεμογεννητριών, διαπιστώσαμε ότι υπάρχουν σημαντικοί λόγοι για την αντικατάσταση των μαγνητών αυτών. Η εξάρτηση από τα σπάνια μέταλλα από τα οποία φτιάχνονται οι μαγνήτες νεοδυμίου, έχει φέρει την Κίνα σε μια μονοπωλιακή θέση εξαγωγέα που ελέγχει την τιμή και τη διαθεσιμότητά τους. Επίσης, η εντατική παραγωγή τους έχει μεγάλο περιβαλλοντικό κόστος στις τοπικές κοινωνίες της Κίνας, καθώς η πρόσβαση στην καθαρή μορφή των μετάλλων είναι μία ενεργοβόρος και ρυπογόνος διαδικασία.

Επιπλέον, καταγράφηκαν αρκετές βλάβες σε μικρές ανεμογεννήτριες λόγω διάβρωσης των μαγνητών νεοδυμίου, οι οποίες συνήθως συνέβαιναν από τον πρώτο χρόνο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και σε όλες τις περιπτώσεις προκαλούσαν την ακινητοποίηση της. Είναι γνωστό, άλλωστε, ότι οι μαγνήτες αυτοί είναι εξαιρετικά ευπαθείς στη διάβρωση, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με θαλασσίνο νερό. Αυτό αποτελεί σοβαρό πρόβλημα στην περίπτωση τοπικά κατασκευασμένων μικρών ανεμογεννητριών όπου οι χρήστες χρειάζεται να κάνουν οι ίδιοι συντήρηση και επισκευή.

Ως αντικαταστάτες των μαγνητών νεοδυμίου χρησιμοποιήθηκαν οι, λιγότερο ισχυροί αλλά πολύ πιο φτηνοί και άφθονοι, φερρίτες. Επιπλέον, οι φερρίτες δε διαβρώνονται, κάτι που τους κάνει ιδιαίτερα κατάλληλους για εφαρμογές ενδιάμεσης τεχνολογίας.

Η σχεδίαση έγινε με στόχο οι γεννήτριες με φερρίτες να έχουν συγκρίσιμη απόδοση με γεννήτριες νεοδυμίου που ταιριάζουν με ίδιο μέγεθος πτερυγίων. Διαπιστώθηκε ότι αυξάνοντας τους πόλους μπορούσαμε να επιτύχουμε μία συγκεκριμένη ισχύ με λιγότερα ελίγματα στο στάτη και, άρα, λιγότερες απώλειες και καλύτερη απόδοση. Η χρήση περισσότερων μαγνητών δεν αποτέλεσε πρόβλημα για το κόστος, καθώς οι φερρίτες έχουν χαμηλή τιμή.

Από την προσομοίωση και βελτιστοποίηση των γεννητριών διαπιστώθηκε ότι μπορούν να σχεδιαστούν γεννήτριες με φερρίτες και γεννήτριες με μαγνήτες νεοδυμίου με παρόμοιες αποδόσεις. Οι γεννήτριες που σχεδιάστηκαν με φερρίτες είχαν επιπλέον μικρότερο

κόστος, αλλά αρκετά μεγαλύτερη μάζα και όγκο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμός βελτιστοποίησης επέλεγε μεγαλύτερου μεγέθους μαγνήτες για τις γεννήτριες με φερρίτες, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να μεγαλώσει η εξωτερική ακτίνα, δηλαδή η διάμετρος των χαλύβδινων δίσκων του δρομέα.

Αφού βρέθηκαν για κάθε μαγνητικό υλικό, οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη για γεννήτριες με ακτίνες πτερυγίων από 1.2 έως 2.1m, βρέθηκαν για κάθε μαγνητικό υλικό και οι βέλτιστες διαστάσεις ενός καθολικού μαγνήτη, ο οποίος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος ακτίνων πτερυγίων που εξετάσαμε. Το πλεονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι το μικρότερο κόστος και η μεγαλύτερη διαθεσιμότητα που συνεπάγεται ένας μαγνήτης με μεγαλύτερη ζήτηση. Συγκρίνοντας τους καθολικούς μαγνήτες με τους βέλτιστους-ανά-ακτίνα-πτερυγίων, διαπιστώσαμε ότι οι πρώτοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά σε όλο το εύρος ακτίνων φτερωτής, εφόσον έχουν πολύ παραπλήσια αποτελέσματα με τους δεύτερους σε κόστος, απόδοση, μάζα και όγκο.

Επιπλέον, συγκρίθηκε ο καθολικός μαγνήτης κάθε υλικού με τον αντίστοιχο πιο διαδεδομένο εμπορικό μαγνήτη που υπάρχει αυτή τη στιγμή στην αγορά και διαπιστώθηκε ότι φέρνει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όσον αφορά τη μάζα και τον όγκο των γεννητριών. Συγκεκριμένα για τη μεγαλύτερη γεννήτρια με φερρίτες που συνδυάζεται με ακτίνα πτερυγίων 2.1m, η σχεδίαση με τον εμπορικό μαγνήτη οδηγεί σε τιμές μάζας και εξωτερικής ακτίνας που υπερβαίνουν τους περιορισμούς που έχουμε θέσει προκειμένου, πρώτον να μπορεί το βάρος της γεννήτριας να χειριστεί από ένα μέσο άνθρωπο και δεύτερον να μην παρεμβαίνει ο όγκος της γεννήτριας στην αεροδυναμική των πτερυγίων.

Στη συνέχεια, κατασκευάσαμε μία γεννήτρια με φερρίτες για ακτίνα πτερυγίων 1.2m, με βάση τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, αλλά με διαστάσεις μαγνήτη τις πιο κοντινές που βρήκαμε στην αγορά. Η γεννήτρια αυτή κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει ίδια απόδοση με μία γεννήτρια νεοδυμίου για ίδια πτερύγια, που είχε κατασκευαστεί σύμφωνα με το σχέδιο του Hugh Piggott στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής.

Μετρώντας πειραματικά τις δύο γεννήτριες σε ανοιχτοκύκλωση παρατηρήσαμε ότι αναπτύσσουν σχεδόν την ίδια ΗΕΔ ανά ταχύτητα περιστροφής. Επίσης, το σφάλμα της προσομοίωσης σε σχέση με την πραγματικότητα για τη γεννήτρια με φερρίτες ήταν αρκετά μικρό.

Σε σύνδεση των γεννητριών με συσσωρευτές παρατηρήσαμε ότι αναπτύσσουν παρόμοια ροπή σε σχέση με το ρεύμα, καθώς και σχεδόν ίδια τάση σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. Επίσης, διαπιστώσαμε ότι είχαν σχεδόν την ίδια απόδοση ανά παραγόμενη ισχύ, που ήταν και ο στόχος της σχεδίασης.

Από την άλλη παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στο ρεύμα που διαρρέει κάθε γεννήτρια σε σχέση με τις στρόφες και παρομοίως στην ισχύ που παράγει η καθεμία σε σχέση με τις στρόφες. Η γεννήτρια με φερρίτες ανέπτυξε την ονομαστική ισχύ 850W σε αρκετά υψηλότερες στρόφες από τη γεννήτρια νεοδυμίου, με αποτέλεσμα η καμπύλη ισχύος της να «γέρνει» προς τα δεξιά. Την ίδια μορφή είχε και η καμπύλη της ροπής σε σχέση με τις στρόφες.

Αυτό το φαινόμενο εξηγείται από την αρκετά υψηλότερη (κατά μέσο όρο 56% μεγαλύτερη από της γεννήτριας νεοδυμίου) αντίσταση στάτη που έχει η γεννήτρια με φερρίτες. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται σε γεννήτριες όταν συνδέονται με αγωγούς μεγάλου μήκους και άρα, μεγάλης αντίστασης. Ο αγωγός σύνδεσης και πώς επηρεάζει τη λειτουργία της γεννήτριας είναι ένα θέμα που μελετάμε συχνά στις μικρές ανεμογεννήτριες.

Συχνά η σύνδεση με αγωγό μεγάλης αντίστασης είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας με μικρή αντίσταση στο στάτη. Για δεδομένη περιοχή και συσσωρευτές υπάρχει συγκεκριμένη βέλτιστη αντίσταση που πρέπει να έχει το σύστημα ανεμογεννήτρια-αγωγός σύνδεσης για μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας ώστε, από τη μία η γεννήτρια να μην αναπτύσσει τη μέγιστη ροπή της σε χαμηλές στρόφες (και χαμηλές ταχύτητες ανέμου) γιατί θα έχει μικρότερο λ από το βέλτιστο σε μέσες ταχύτητες ανέμου, και από την άλλη να μη λειτουργεί διαρκώς σε χαμηλές ροπές και, άρα, υψηλές στρόφες, παράγοντας πολύ λίγη ισχύ εξαιτίας της αύξησης του λ σε τιμές μεγαλύτερες του βέλτιστου.

Οπότε μία γεννήτρια με χαμηλή αντίσταση στάτη μπορεί, συνδεδεμένη με τον κατάλληλο αγωγό, να έχει τη βέλτιστη συμπεριφορά. Μία γεννήτρια, όμως, με υψηλή αντίσταση ενδέχεται να έχει πρόβλημα αν πρέπει να συνδεθεί και με αγωγό μεγάλου μήκους, όπως συμβαίνει συχνά στις αγροτικές εγκαταστάσεις. Θα μπορούσε, βέβαια, μία τέτοια ανεμογεννήτρια, με μεγάλη αντίσταση στο στάτη και μακρύ και λεπτό καλώδιο, να είναι κατάλληλη σε μία περιοχή με υψηλότερη μέση τιμή ανέμου, όπου θα είχε τη δυνατότητα να μεγιστοποιήσει το λ σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.

Παρ' όλα αυτά, επειδή οι εφαρμογές που εξετάζουμε αφορούν συνήθως περιοχές με χαμηλούς ανέμους, θα ήταν καλό σε επόμενες μελέτες γεννητριών με φερρίτες, να εισαχθεί κάποιος περιορισμός στη μέγιστη αντίσταση στάτη που σχεδιάζεται να έχει η γεννήτρια.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΕ MATLAB

Π.1. Διαστασιολόγηση της γεννήτριας

```
clear all % clear all previous variables in MATLAB

addpath('c:\femm42\mfiles'); % add FEMM mfiles to MATLAB

% choose between single or double rotor topology
rotor=2; % double rotor (2) or single rotor with metal disk (1) or
single rotor (0)
extra=40; % extra space in the case of rotor (0) in order to allow
for magnetic field to expand

efficiency_real=0.80; % estimated generator efficiency at rated power
efficiency=0; % initialize variable

% magnetic material
mag_mater='Ceramic 8'; % choose magnetic material between 'NdFeB N40'
and 'Ceramic 8'

% Flux density on magnet surface from HP recipe and FEMM calc
if rotor==2 && strcmp(mag_mater,'NdFeB N40') % for double rotor
    Bmg_real=0.62; % Initialize parameter for NdFeB
    Bp_real=0.4; % Intialize parameter as a value smaller than
Bmg_real
else
    Bmg_real=0.237; % Initialize parameter for Ferrite C8
    Bp_real=0.1; % Intialize parameter as a value smaller than
Bmg_real
end

if rotor==1 && strcmp(mag_mater,'NdFeB N40') % for single rotor and
metal disk
    Bmg_real=0.44; % Initialize parameter for NdFeB
    Bp_real=0.2; % Intialize parameter as a value smaller than
Bmg_real
else
    Bmg_real=0.176; % Initialize parameter for Ferrite C8
    Bp_real=0.1; % Intialize parameter as a value smaller than
Bmg_real
end

if rotor==0 && strcmp(mag_mater,'NdFeB N40') % for single rotor
    Bmg_real=0.3; % Initialize parameter for NdFeB
    Bp_real=0.1; % Intialize parameter as a value smaller than
Bmg_real
else
    Bmg_real=0.14; % Initialize parameter for Ferrite C8
    Bp_real=0.1; % Intialize parameter as a value smaller than
Bmg_real
end
```

```

Bavg=0.4;
Bmax_real=0.5;
Bp=0; % initialize variables
Bmg=0;
Bmax=0;

while (abs(efficiency_real-efficiency)>0.01) || (abs(Bp_real-
Bp)>0.001) || (abs(Bmg_real-Bmg)>0.001)

efficiency=efficiency_real; % part of the efficiency loop
Bp=Bp_real; % part of the Bp loop
Bmg=Bmg_real; % part of the Bmg loop
Bmax=Bmax_real;

% mechanical clearance + effective length + magnet size
g=3; % mechanical clearance gap including resin layers 0.5mm on coil
and 0.5mm on magnet
wm=50; % magnet width
la=50; % 'la' effective length and also magnet length

% blade rotor
Rturb=1.2; % turbine radius in meters
tsr_cut_in=9; % cut in tip speed ratio
tsr_nom=7; % rated tip speed ratio
Vw_cut_in=3; % cut in wind speed
Vw_nom=10; % rated-nominal windspeed
n_cut_in=(60*Vw_cut_in*tsr_cut_in)/(2*3.14*Rturb); % cut in rpm
cp=0.35; % aerodynamic power coefficient

% battery
V_batt=48; % battery voltage

% rated power
air_dens=1.2; % air density
Pnom=0.5*air_dens*cp*efficiency*3.14*(Rturb^2)*Vw_nom^3; % rated
power in watts
Pnom_inst=Pnom*1.1; % instantaneous power at 10% more than nominal
n_nom=(60*Vw_nom*tsr_nom)/(2*3.14*Rturb); % rated rpm

% EMF at cut-in
EMF_cut_in=V_batt/(sqrt(3)*1.35); % EMF at cut-in (not including
voltage drop 1.4V at rectifier)

% EMF at rated windspeed
EMF_nom=(n_nom/n_cut_in)*EMF_cut_in;

% flux per pole
Flux_pole=Bmg*wm*(10^-3)*la*(10^-3);

% number of poles
if Rturb==1.2 || Rturb==1.5
    poles=16;
    %poles=12; for N40
else

```



```

        poles=20;
        %poles=16; for N40
end

%coils
coil_num=poles*0.75; % 3 coils to 4 magnets
nphase=3; % number of phases
q=coil_num/nphase; % Number of coils in phase group for 3 phase
system
coil_FEMM=coil_num/q; % FEMM will use part of the stator according to
phase coil number
tw=13; % 'tw' stator thickness
kw=0.95; % winding coefficient
Nc_init=(sqrt(2)*EMF_cut_in)/(q*2*3.14*kw*Flux_pole*n_cut_in*poles/12
0); % Number of turns Nc per coil
Nc=round(Nc_init); % round to exact number of turns
%Idc=Pnom/Vbatt; % dc current at rated wind speed
Iac_max=(Pnom_inst)/(3*EMF_nom*efficiency);
kf=0.55; % winding fill factor
resist_cop=1.724*10^-8; % electrical resistivity of copper Ohm/m
cq=0.15; % heat coeffiecient W/cm2
wc_theor=((Iac_max*Nc)/(sqrt(2*cq*(10^4)*kf*tw*(10^-
3)/resist_cop)))*(10^3); %'wc' coil leg width in mm
sc_theor=(kf*wc_theor*tw)/Nc; % conductor crossectional area mm2

select_conductor % select conductor from commercially availabel sizes

wc=(sc*Nc)/(tw*kf); % wc after choosing commercial conductor size
Jmax=Iac_max/sc; % maximum current desinty
Q=nphase; % also the number of phases

% rotor disks
Rin=(2*q*nphase*wc+q*nphase*wm)/(2*3.14);
% calculate segment due to magnet placed as a chord on the disk
rts=roots([1 2*(la+Rin) -(wm/2)^2]); % Rout=segment+la+Rin
for i=1:2
    if rts(i,1)>0
        segment=rts(i,1);
    end
end

Rout=Rin+la+segment; % 'Rout' outer radius
Dout=2*Rout; % outside diameter
Rout_eff=Rout-segment; % The outer radius of the effective length of
the generator
Ravg=round_2dec(Rout_eff-la/2); % 'Ravg' radius in the middle of the
effective length
L_half=round_2dec(2*(pi)*Ravg/q); % Part of the perimeter at Ravg to
be drawn in FEMM acccording to number of coils
hr=10; % 'hr' rotor disk thickness from HP recipe book

pFe=7.87; % density of iron g/cm3
BackIronVolume=2*hr*pi*(Rout^2)*10^(-3); % 2 rotor disks volume in
cm3
BackIronMass=BackIronVolume*pFe*10^(-3); % 2 rotor disks mass in kgr

magnet_num=coil_num/0.75; % number of rotor magnets, 3 coils to 4
magnets

```

```

magnet_FEMM=magnet_num/q; % FEMM will use only the part of the rotor
that covers three coils
hm=20; % magnet thickness for C8
%hm=10; % magnet thickness for N40
dist_magnet=round_2dec((2*pi*Ravg-magnet_num*wm)/magnet_num); %
Distance between magnets at Ravg

% ai and kd
kd=Rin/Rout_eff; % inner to outer radius ratio
ai=wm/(wm+dist_magnet); % pole arc to pole pitch (magnet width) ratio

% Choose stator winding type
coil_type=2; % choose (1) for single layer winding or (2) for double
layer winding
if coil_type==2 % for double layer concentrated winding (triangle
coil)
    coil_side_dist=0.5; % Space between coils at Ravg
    coil_spacing=coil_side_dist; % make these variables the same
    coil_whole=round_2dec((2*(pi)*Ravg-
((2*wc+coil_side_dist)*coil_num))/coil_num); % length of coil whole
at Ravg is wm
    thitam=pi*poles/coil_num; % calculation for lavg of coil
    thitare=kd/(1+kd)*thitam;
    lec=2*(Rout+Rin)*(thitam-0.6*thitare)/poles;
    lavg=2*la+lec;
    Kn=(1+0.9*lavg/(2*pi*tw)+0.32*2*pi*wc/lavg+0.84*wc/tw)^(-1); %
the Nagaoka constant for the calculation of phase inductance
    Ls=(q*((lavg/1000)^2)*(Nc^2)*(10^(-7))/(tw/1000))*Kn; % phase
inductance
end
if coil_type==1 % for single layer concentrated winding (rectangular
coil)
    coil_whole=wm; % length of coil whole at Ravg is wm
    coil_spacing=round_2dec((2*(pi)*Ravg-
((2*wc+coil_whole)*coil_num))/coil_num); % Space between coils at
Ravg
    lavg=2*(wm+la)+3.14*wc; % average length of a turn or wire in
coil, from HP recipe book p56
    Kn=(1+0.9*lavg/(2*pi*tw)+0.32*2*pi*wc/lavg+0.84*wc/tw)^(-1); the
Nagaoka constant for the calculation of phase inductance
    Ls=(q*((lavg/1000)^2)*(Nc^2)*(10^(-7))/(tw/1000))*Kn; % NOT GOOD
phase inductance
end

% calculation of coil resistance at operating temp
p20=1.68*10^(-8); % specific resistance of copper at 20 deg
tc=70; % coil operating temperature
pt=p20*(1+0.0039*(tc-20)); % specific resistance of copper at
operating temp
Rc=pt*Nc*lavg*10^(-3)/(sc*10^(-6)); % coil resistance
Rphase=Rc*q; % phase resistance
resist_cop=1.724*10^(-8); % electrical resistivity of copper Ohm/m

%Resistance calculation HP style!
lavgHP=lavg;
length_wire_HP=lavgHP*Nc; % in mm
ResHP_20=(length_wire_HP)/sc/56000; % in ohm at 20 Celsius
ResHP_70=ResHP_20*1.25; % at 70 Celsius
coil_weight=sc*length_wire_HP*0.009; % coil weight g

```

```

stator_weight=coil_weight*coil_num; % stator weight g

VolumeMagnet=la*wm*hm*magnet_num*2; % Total magnet volume of rotors
in mm3
MagnetMass=mag_density*VolumeMagnet*10^(-3); % Magnet mass in g
hub_diam=3; % bearing hub axis radius in cm
hub_length=7.5; % bearing hub axis length in cm
BearingHubMass=pi*hub_diam^2*hub_length*pFe; % Rotational mass of
bearing hub in g (length and radius in cm)

% rotational speed
speed=450;

% maximum current to simulate and current step, set to zero for no
load operation
I_max=0;
I_step=0;

% displacement step in mm, choose from 1,2,3 etc - check angle in deg
to be 1 degree or less
step=2;

% calculation of losses and calculation of real efficiency at rated
rpm
Iac_nom=(Pnom)/(3*EMF_nom*efficiency); % maximum AC current allowing
10% overcurrent
Pddy=(pi*la*10^(-3))*((dc*10^(-
3))^4)*(Bp^2)*((2*pi*n_nom*poles/120)^2)*coil_num*Nc)/(32*pt); % eddy
current losses
Prot=(0.06*2*(BackIronMass+MagnetMass*10^(-3)+BearingHubMass*10^(-
3))/60)*n_nom; % rotational losses
Pcopper=3*Iac_nom^2*q*Rc; % ohmic losses
Plosses=Pcopper+Pddy+Prot; % total losses
Phl=3*Iac_nom*EMF_nom*efficiency; % electrical power
efficiency_real=(Phl/(Phl+Plosses)); % real efficiency

%Magnet cost
Vmag=wm*la*hm;
shippingcost=Vmag*2*poles*20/(24*13800);
Magcost=(0.4105+10^(-5)*Vmag)*2*poles+shippingcost; %C8 in euros
%Magcost=(1.9849+4*10^(-4)*Vmag)*2*poles+shippingcost; %N40 in euros

pmag=5; %g/cm3 magnet density for C8
%pmag=7.5; %g/cm3 magnet density for N40
Mmag=pmag*Vmag*poles*2*10^(-3); %g

%Copper cost
pcu=8.94;
mcu=3*Nc*q*lavg*sc*pcu*(10^(-6)); %kg
copperprice=12; %E/kg
coppercost=1.23*copperprice*mcu;

%Iron cost
ironprice=1; %E/kg
pFe=7.87; %g/cm3
IronVolume=2*hr*pi*(Rout^2)*10^(-3);
IronMass=IronVolume*pFe*10^(-3); %kg

```

```

ironcost=1.23*ironprice*IronMass;

%Resin cost
resinprice=11.23; %E/kg
ResinVolume=pi*(Rout^2-Rin^2)*tw*10^(-3); %cm3
presin=1.36; %g/cm3
resinmass=presin*ResinVolume*10^(-3);%kg
resincost=1.23*resinmass*resinprice;

%Wood cost
woodS=(2*(Rout*10^(-3)+0.1))^2;
woodcost=3*woodS*17.6+6*woodS*22.4;

%Total cost of generator
totalcost=Magcost+coppercost+ironcost+resincost+woodcost;
totalmass=resinmass+IronMass+mcu+Mmag/1000;%kg
othermass=resinmass+mcu+Mmag/1000;
Vgen=10^(-3)*pi*(Rout^2)*(2*hr+2*hm+2*g+tw);

w2=0.5; %distance between two different coils' legs
wlin=(2*pi*Rin-2*Q*wc-Q*w2)/Q; % coil hole at Rin
%Limitations
if (2*(pi)*Rin-wm*poles)<poles || (wlin-5)<=0 || (tw/wc)<=0.35
    efficiency_real=0.1;
    efficiency=0.1;
    totalcost=9999;
end

Bp_ai_kd_WindEng % draw the rotor to calculate Bp and Bmg

Flux_pole_BOOK=ai*Bmax*(3.14/(8*poles))*((Rout*2*0.001)^2)*(1-kd^2);
% from AFPM book page 40

Bp_real=Bpmax; % ??Nc=23, Nc=25(for top of coil) choose the first
harmonic of B as field value
Bmg_real=Bmg; % ??Nc=19 choose the value of B at the magnet surface
as field value
Bmax_real=Bmax;
Bmavg_real=Bavg;

end

solver % run solver

```

Π.2. Μετακίνηση του δρομέα σε περιβάλλον Matlab-FEMM

```
depth=1a; % '1a' effective length is the depth of FEMM 2D - in this
case 30mm
msize=1; % Local element size no greater than msize in FEMM

if Imax==0 % loop only at opencircuit
    Irms=0; % zero rms current
    temp_var=1; % set to 1 just in order to make one loop in j
else
    Irms=0:I_step:Imax; % else currents will go from 0 to Imax in
steps of I_step, create matrix
    temp_var=(Imax/I_step+1); % set number of current loops to make
in j
end

j=1; % this variable is used to count steps in current changes

d=0; % this variable is used as a count of the steps

if rotor == 2 || rotor == 0 % set hr=hr+hm for easy construction of
second rotor
    hr=hr+hm;
end

%for j=1:(Imax+1) % loop for all current values
for j=1:temp_var % loop for all current values according to step

openfemm; % open FEMM
newdocument(0); % new document
mi_probdef(0,'millimeters','planar',1E-8,depth,30,0); % define
problem
msize=1; % Local element size no greater than msize

drawcoils_1800 % draws coils in FEMM

if rotor == 0 % extra space in the case of rotor (0) in order to
allow for magnetic field to expand
    mem=tw;
    tw=tw+extra;
end

drawrotordisks_1800 % draws rotor disks in FEMM
drawmagnets_1800 % draws magnets in FEMM

addmaterials_1800 % adds materials to be used in the problem
addcircuits_1800 % adds three phases of the circuit
addbounds_1800 % adds boundary conditions of arrangement

setmagnets_1800 % set magnets properties

if rotor == 0 % set tw back to original value
    tw=mem;
end

setcoils_1800 % set coil properties
```

```

if rotor == 0 % extra space in the case of rotor (0) in order to
allow for magnetic field to expand
    tw=tw+extra;
end

drawbounds_1800 % draw and set boundary conditions
set_air_iron_1800 % set properties for air and rotor disks

if rotor == 0 % set tw back to original value
    tw=mem;
end

mi_saveas('temp.fem'); % temporary FEMM file

sumsquareA=0; % variables for calculating RMS voltages
sumsquareB=0;
sumsquareC=0;
counter=1; % counts number of time flux linkage is calculated for a
certain value of current

displacement=0; % initialize displacement of rotor
d=d+1; % counter of steps
flux_linkage % calculation of flux linkage for initial position
BpCALC % calculate Bp for initial position

% move until first magnet reaches boundary according to step
i=1;
for i=1:floor((dist_magnet/2)/step)

selectrotor_1800 % select magnets
mi_movetranslate(step,0); % move them by one step
displacement=displacement+step; % add this step to displacement
i=i+1; % counter for loop
d=d+1; % counter of steps
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage % calculations of flux linkage

end

% move magnets one more time reaching out of boundary
selectrotor_1800
mi_movetranslate(step,0);
displacement=displacement+step;
% length of magnet reaching out of boundary according to step
ypol=round_2dec(step-((dist_magnet/2)-
floor((dist_magnet/2)/step)*step));
% move magnet reaching out of boundary to the other side
mag_dir=-90; % set direction of magnetic field for this magnet
movemagnet_ypol_1800 % move part of the magnet to opposite side
% take measurements for this step
d=d+1;
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage

k=1; % counter for loop

```

```

for k=1:magnet_FEMM/2 % move magnets for one electric period

% move until other side of magnet reaches boundary according to step
i=1;
for i=1:floor((wm-ypol)/step)

selectrotor_1800
mi_movetranslate(step,0);
displacement=displacement+step;
d=d+1;
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage
i=i+1;

end

% move magnets one more time reaching out of boundary
selectrotor_1800
mi_movetranslate(step,0);
displacement=displacement+step;
% length of magnet reaching out of boundary according to step
ypol_2=round_2dec(step-(wm-ypol-floor((wm-ypol)/step)*step));
movemagnet_ypol_2_1800
% take measurements for this step
d=d+1;
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage

if k==magnet_FEMM/2
    break
end

% move until second magnet reaches boundary according to step
i=1;
for i=1:floor((dist_magnet-ypol_2)/step)

selectrotor_1800
mi_movetranslate(step,0);
displacement=displacement+step;
d=d+1;
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage
i=i+1;

end

if mag_dir==-90 % reverse magnetic field direction for the next
magnet
    mag_dir=90;
else if mag_dir==90;
    mag_dir=-90;
end
end
end

```

```

% move magnets one more time reaching out of boundary
selectrotor_1800
mi_movetranslate(step,0);
displacement=displacement+step;
% length of magnet reaching out of boundary according to step
ypol=round_2dec(step-(dist_magnet-ypol_2-floor((dist_magnet-
ypol_2)/step)*step));
% move magnet reaching out of boundary to the other side
movemagnet_ypol_1800
% take measurements for this step
d=d+1;
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage

k=k+1;
end

% move until first magnet reaches initial position according to step
i=1;
for i=1:floor(((dist_magnet/2)-ypol_2)/step)

selectrotor_1800
mi_movetranslate(step,0);
displacement=displacement+step;
d=d+1;
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage
i=i+1;

end

% final step with what is left to complete 360 degrees
ypol_3=round_2dec(L_half/2-floor((L_half/2)/step)*step);
selectrotor_1800
mi_movetranslate(ypol_3,0);
displacement=displacement+ypol_3;
d=d+1;
counter=counter+1; % increase for next flux linkage measurement point
in time
flux_linkage

% calculate RMS for Flux linkage
FluxRmsA=sqrt(sumsquareA/counter);
FluxRmsB=sqrt(sumsquareB/counter);
FluxRmsC=sqrt(sumsquareC/counter);
FluxRms(j)=(FluxRmsA+FluxRmsB+FluxRmsC)/3;

if step>3 % use derivative only for small steps
    % calculate RMS Voltages
    Varms=q*FluxRmsA*poles/2*2*pi*speed/60;
    Vbrms=q*FluxRmsB*poles/2*2*pi*speed/60;
    Vcrms=q*FluxRmsC*poles/2*2*pi*speed/60;
    Vrms(j)=(Varms+Vbrms+Vcrms)/3;
    V_rms=Vrms(j);
else

```



```

    deriv_rms % calculate the rms value of Voltage from derivative of
Flux linkage
    V_RMS(j)=V_rms;
end

if j==1 % for the first itteration with no load current calculate rms
for EMF
    Ef=V_rms;
end

% closefemm;

end

if rotor == 2 || rotor == 0 % set hr back to its original value
    hr=hr-hm;
end

```

II.3. Οι επιδόσεις της γεννήτριας

```
clear n freqN Ef deltaN deltaNdeg VtN PelN PcopperN Peddy PHMN ProtN
PmechmeanN THMN TmechmeanN Trot effHMN efftotalN Vdc Idc Pdc

Fluxoc=FluxRms(1); % do not take into account chages in flux linkage
due to currents
%Fluxoc=FluxRms; % do take into account chages in flux linkage due to
currents

Bp=Bpmax(1); % do not take into account chages in Bp due to currents
%Bp=Bpmax; % do take into account chages in Bp due to currents

N_max=557; % maximum rpm to run
N_min=0; % minimum rpm to run
N_step=55.7; % step to increase rpm by

I_step=0.1; % when you do not take into account changes in flux
linkage
Imax=19; % when you do not take into account changes in flux linkage

Irms=0:I_step:Imax; % current range and step as in solver

for i=1:(Imax/I_step+1)
    n(1)=N_min; % start from minimum rpm
    for j=1:(N_max/N_step+1)
        freqN(j)=n(j)*poles/120; % calculate frequency
        %Fluxoc=FluxRms(i); % in order to change flux linkage with
current
        %Bp=Bpmax(i); % in order to change Bp with current
        Ef(j)=q*Fluxoc*(poles/2)*2*pi*n(j)/60; % calculate EMF from
deltaN(i)=asin(Irms(i)*2*pi*freqN(j)*Ls/Ef(j)); % power angle
in radians
        deltaNdeg(i)=deltaN(i)*180/pi; % power angle in degrees
        if Ef(j)*cos(deltaN(i))>=Irms(i)*q*Rc % if currents flow then
calculate Vt
            VtN(i,j)=Ef(j)*cos(deltaN(i))-Irms(i)*q*Rc; % calculate
terminal voltage
        else
            VtN(i,j)=0; % no current - no load - open circuit voltage
        end
        PelN(i,j)=3*VtN(i,j)*Irms(i); % electrical power
        PcopperN(i)=3*Irms(i)^2*q*Rc; % copper losses
        PeddyN(j)=(pi*la*10^(-3))*((dc*10^(-
3))^4)*(Bp^2)*((2*pi*n(j)*poles/120)^2)*Q*Nc)/(32*pt); % eddy current
losses in coils
        PHMN(i,j)=PelN(i,j)+PcopperN(i)+PeddyN(j); % electromagnetic
power
        ProtN(j)=(0.06*2*(BackIronMass+MagnetMass*10^(-
3)+BearingHubMass*10^(-3))/60)*n(j); % frictional losses in the
bearing hub
        PmechmeanN(i,j)=PHMN(i,j)+ProtN(j); % mechanical power
        THMN(i,j)=PHMN(i,j)*60/(2*pi*n(j)); % electromagnetic torque
        TmechmeanN(i,j)=PmechmeanN(i,j)*60/(2*pi*n(j)); % mechanical
torque
        Trot(j)=ProtN(j)*60/(2*pi*n(j)); % Torque of friction losses
```

```

        effHMN(i,j)=PelN(i,j)/PHMN(i,j)*100;      % electromagnetic
efficiency
        efftotalN(i,j)=(PelN(i,j)/PmechmeanN(i,j))*100; % generator
efficiency
        efftotalN(1,j)=0; % zero efficiency for zero rpm
        Vdc(i,j)=VtN(i,j)*sqrt(3)*1.35; % DC voltage after rectifier
        Idc(i)=sqrt(3/2)*Irms(i); % DC current after rectifier
        Pdc(i,j)=Vdc(i,j)*Idc(i); % DC power atfer rectifier
        if j~=(N_max/N_step+1) % stop at final value of rpm or add
rpm step
            n(j+1)=n(j)+N_step;
        end
    end
end
end

```


Βιβλιογραφία

- [1] FLOK Society: Designing a free open knowledge society, http://en.wiki.floksociety.org/w/Research_Plan_Provided_by_the_Research_Coordinators
- [2] Γ. Μεσσήνης, «Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2011.
- [3] F. Rossouw, “Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications”, thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.
- [4] H. Piggott, “A wind turbine recipe book”, 2009.
- [5] D. Bartmann, D. Fink, “Homebrew Wind Power: Hands-on guide to harnessing the wind”, Buckville Publications, 2009.
- [6] R. J. Wang, “Design Aspects and Optimisation of an Axial Field Permanent Magnet Machine with an Ironless Stator”, Dissertation, University of Stellenbosch, March 2003.
- [7] K. Nilsson, E. Segergren and M. Leijon, ‘Simulation of Direct Drive Generators Designed for Underwater Vertical Axis Turbines’, Fifth European Wave Energy Conference, 2003.
- [8] Π. Κοτσαμπόπουλος, “Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [9] T. Rovio, Vihriälä H., Söderlund L., Kriikka J., “Axial and radial flux generators in small scale wind power production”, In: Helm, P., Zervos, A. (eds.), Proceedings of 2001 European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001 s. 1094-1097.
- [10] M. Dubois, H. Polinder, J. Ferreira, “Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines”, In P Helm (Ed.), Proceedings (pp. 5-8). Munich: WIP, January 2001.

- [11] J. Gieras, R. Wang, M. Kamper, "Axial flux permanent magnet brushless machines", second edition, Springer, 2008.
- [12] E. Hau, "Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics", second edition, Springer, 2006.
- [13] A. Parviainen, "Design of Axial-Flux Permanent Magnet Low-speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines", 2005.
- [14] M. Kamper, R. Wang, F. Rossouw, "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils", Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.1, no., pp.13-20, 3-5 May 2007.
- [15] J. F. Gieras and M. Wing, 'Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications', Second Edition, 2002.
- [16] S. Constantinides, 'Understanding and Using Reversible Temperature Coefficients', 2010.
- [17] K. J. Strnat, Professor Emeritus, University of Dayton, Ohio, "Modern Permanent Magnets for Applications in ElectroTechnology ", 1990.
- [18] Σ. Καλογεροπούλου, 'Μαγνητικές ιδιότητες – Μαγνητικά υλικά', σημειώσεις εργαστηρίου, ΤΕΙ Πειραιά.
- [19] Petter Eklund, 'Design of a Ferrite Permanent Magnet Rotor for a Wind Power Generator, Uppsala Universitet, 2013.
- [20] S. Eriksson, Hans Bernhoff, 'Rotor design for PM Generators Reflecting the Unstable Neodymium Price' In Proceedings of the 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, pp.1419–1423, IEEE, Marseille, France, 2–5 Sept. 2012.
- [21] J. Sumanik-Jeary, K. Silwal, T. Wastling, K. Latoufis, "Comparison of locally manufactured AFPM generator technologies for wind applications and field testing of small wind turbines", ICCS/NTUA within the framework of DERri, 2013.
- [22] K.C. Latoufis, G.M. Messinis, P.C. Kotsampopoulos and N.D. Hatziaargyriou, 'Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind

Turbines', National Technical University of Athens, Reprinted from Wind Engineering, 2012.

[23] Σ. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Εκδόσεις Συμείων, 2007.

[24] J. Gieras, R. Wang, M. Kamper, "Axial flux permanent magnet brushless machines", second edition, Springer, 2008.

[25] M. Kamper, R. Wang, F. Rossouw, "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils", Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.1, no., pp.13-20, 3-5 May 2007.

[26] Α. Τσιτσιμελλής, «Μελέτη και σχεδίαση γεννητριών αξονικής ροής με χρήση αλγορίθμων εξελικτικού υπολογισμού για μικρές ανεμογεννήτριες αγροτικών εφαρμογών», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2013.

[27] Α. Ζαρογιάννης, «Σχεδίαση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση μικρών ανεμογεννητριών για εφαρμογές χαμηλού κόστους για σύνδεση στο δίκτυο», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2012.

[28] Greaves M.C., Walker G.R., Walsh B.B., "Design optimisation of Ironless Motors based on Magnet selection" Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEAUST, vol. 21, no. 1, pp. 49-56.

[29] Widyan M.S., "Design, Optimization, Construction and Test of Rare-Earth Permanent-Magnet Electrical Machines with New Topology for Wind Energy Applications", Technischen Universitat Berlin, 2006.

[30] Hosseini S.M., Miraslim A.M., Mirzaei M., "Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial-Flux Coreless Permanent-Magnet Generator", IEEE transactions on magnetics, Vol. 44, No. 1, pp.75-80, January 2008.

[31] J. Alber, K. Latoufis, 'Designing a Measuring Campaign for Axial Flux Permanent Magnet Generators of Small-Scale Wind Turbines', ICCS/NTUA within the framework of DERri, 2012.

[32] J. P. Monteiro, M. R. Silvestre, H. Piggott, J. C. André, 'Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade

Element Momentum codes', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 123, Part A, Pages 99–106, December 2013

[33] Θ. Πάζιος, «Μελέτη σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών σε μικρής κλίμακας εφαρμογές με αποθήκευση σε συσσωρευτές και μελέτη,σχεδίαση και κατασκευή ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών με απορριπτικό φορτίο.», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2012.