



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη των επιπτώσεων της αύξησης της ονομαστικής ισχύος
τοπικά κατασκευασμένων μικρών ανεμογεννητριών με χρήση
διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πέτρος Μαρκόπουλος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη των επιπτώσεων της αύξησης της ονομαστικής ισχύος
τοπικά κατασκευασμένων μικρών ανεμογεννητριών με χρήση
διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πέτρος Μαρκόπουλος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Σεπτεμβρίου 2015

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου Σταύρος Παπαθανασίου Πάυλος Γεωργιλάκης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015

.....

Πέτρος Μαρκόπουλος

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

Copyright © Πέτρος Μαρκόπουλος, 2015

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία μελετώνται τοπικά κατασκευασμένες γεννήτριες αξονικής ροής ως μέρη μικρών ανεμογεννητριών σε αυτόνομα συστήματα. Η απόπειρα αύξησης της ισχύος των γεννητριών αυτών φέρει σημαντικές προκλήσεις που κυρίως σχετίζονται με τη βέλτιστη διαστασιολόγησή τους αλλά και την αύξηση μάζας και όγκου που συνεπάγεται η αυξημένη ισχύς. Για το λόγο αυτό διερευνώνται τα περιθώρια βελτίωσης των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων βελτιστοποίησης αλλά και οι συνέπειες της αύξησης της ισχύος και τρόποι αντιμετώπισής τους.

Στην αρχή της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες της τεχνολογίας ανοιχτού κώδικα και της ενδιάμεσης τεχνολογίας και στο ρόλο που μπορούν να έχουν οι μικρές ανεμογεννήτριες στην κάλυψη των αναγκών σε ενέργεια με σεβασμό στο περιβάλλον και τις τοπικές κοινότητες. Στη συνέχεια αναλύονται βασικές έννοιες αεροδυναμικής και η λειτουργία των αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.

Πραγματοποιείται σύγκριση δύο διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης αφού πρώτα στην αντικειμενική συνάρτηση και των δύο προστεθεί ως κριτήριο και η μάζα της γεννήτριας εκτός των ήδη υπαρχόντων (κόστος και απόδοση) και αφού συγκεκριμένα ο αλγόριθμος ολικής βελτιστοποίησης PSO προσαρμοστεί ώστε να βελτιστοποιεί τις διαστάσεις του μαγνήτη.

Σχεδιάζονται και προσομοιώνονται γεννήτριες με τέσσερις διαφορετικούς βαθμούς μαγνητών νεοδυμίου (N40, N42, N45 και N50) για έξι διαφορετικές ακτίνες φτερωτής (από 2,4 μέχρι 3,9 μέτρα με βήμα 0,3 μέτρα) και για 2 διαφορετικά πάχη μαγνήτη (10 και 20 mm). Γίνεται σύγκριση του πάχους μαγνήτη αλλά και των διαφορετικών βαθμών μαγνήτη.

Αφού βρεθούν οι βέλτιστοι μαγνήτες για κάθε γεννήτρια αναζητείται και ο βέλτιστος καθολικός μαγνήτης που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για γεννήτριες σε όλο το εύρος ακτινών φτερωτής που μελετάμε. Ο καθολικός συγκρίνεται με τους βέλτιστους μαγνήτες ανά ακτίνα φτερωτής.

Τέλος κατασκευάζεται μια γεννήτρια 5kW – για πτερύγια ακτίνας 3,0m – και οι επιδόσεις της συγκρίνονται πειραματικά με τις αντίστοιχες τιμές που βρέθηκαν από τις προσομοιώσεις.

Λέξεις κλειδιά: μικρές ανεμογεννήτριες, μόνιμοι μαγνήτες, μαγνήτες νεοδυμίου, αξονικής ροής, αυτόνομα συστήματα, βελτιστοποίηση απόδοσης-κόστους-μάζας, καθολικός μαγνήτης, ανοιχτός κώδικας, ενδιάμεση τεχνολογία, αλγόριθμος ολικής βελτιστοποίησης

Abstract

In this work axial flux permanent magnet rotors are studied as parts of small wind turbines in off-grid systems. Trying to increase the power of such turbines brings significant challenges which are mainly connected to the best possible dimensioning of the generators and the following increase of mass and volume. This is why we try to improve the optimization algorithms and study and tackle the consequences of power increase.

At the beginning of the work there is an introduction to the concepts of open source technology and intermediate technology, as well as to the role small wind turbines can have in meeting energy needs with respect to the environment and the local communities.

A comparison between different optimization methods is carried out. To do that we first add mass as an additional criterion to the objective function which already contains cost and efficiency and we also adjust the PSO algorithm to optimize the magnet's dimensions.

Generators are designed and simulated with four different Neodymium magnet degrees (N40, N42, N45, N50) for six different radii (2.4 to 3.9 meters with 0.3 meter step) and for two different magnet heights (10 and 20 mm). A comparison of the different heights and the different magnet degrees is carried out.

Having found the optimal magnets for each generator we seek the optimal universal magnet which can be satisfactorily used for generators throughout the whole radius spectrum that we study. The universal magnet is then compared with the optimal magnets per rotor radius.

Finally, a 5kW generator – designed to operate with a 3 meter diameter turbine – is manufactured, and its performance is compared in the lab with the simulation results.

Key words: small wind turbines, permanent magnets, neodymium magnets, axial flux, standalone systems, efficiency-cost-mass optimization, universal magnet, open source, intermediate technology, PSO

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την επίβλεψη της διπλωματικής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Κώστα Λατούφη για την καθοδήγηση και την υπομονή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Ακόμα το Μάριο, τον Αλέξανδρο, την Κατερίνα και τον Παναγιώτη για τη βοήθειά τους στην κατασκευή της γεννήτριας και το Θωμά για τη βοήθεια στις μετρήσεις.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	13
1.1. Μια διαφορετική προσέγγιση.....	13
1.1.1. Η γνώση ως κοινό αγαθό – η τεχνολογία ανοιχτού κώδικα	14
1.1.2. Η ενδιάμεση τεχνολογία	15
1.2. Τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες	16
1.2.1. Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggot.....	17
1.3. Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά	18
1.3.1. Βασικές έννοιες αεροδυναμικής.....	18
1.3.2. Χαρακτηριστικά ισχύος	20
1.3.3. Η κατανομή του ανέμου.....	21
1.3.4. Ο περιορισμός της ισχύος	22
Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών	24
2.1 Σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.....	24
2.2 Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής	25
2.3 Οι γεννήτριες αξονικής ροής.....	28
2.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά και τοπολογίες	28
2.3.2 Η επιλεγμένη τοπολογία: διπλός δρομέας – μονός στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου	31
2.4. Τα τυλίγματα	33
2.5 Οι μαγνήτες.....	35
2.5.1. Είδη μονίμων μαγνητών	35
2.6. Θεωρητική ανάλυση	39
2.6.1 Μαγνητική ροή – ΗΕΔ – Ηλεκτρομαγνητική ροπή	39
2.6.2 Ανάλυση του τυλίγματος	42
2.6.3 Το μαγνητικό κύκλωμα.....	45
2.6.4 Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα	50
Κεφάλαιο 3: Σχεδίαση και διαστασιολόγηση ανεμογεννήτριας αξονικής ροής	54
3.1 Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας	54
3.2 Ονομαστική και cut-in λειτουργία	55
3.3 Αριθμός πόλων – πηνίων, συχνότητα λειτουργίας.....	57
3.4 Ο στάτης και τα πηνία	58

3.4.1 Το πάχος του στάτη	58
3.4.2 Σπείρες και πάχος πηνίου	59
3.4.3 Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου.....	61
3.4.4. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου	61
3.5. Οι μαγνήτες.....	63
3.5.1. Το είδος του μαγνήτη.....	63
3.5.2. Το σχήμα του μαγνήτη	63
3.5.3. Το πάχος του μαγνήτη	64
3.5.4. Το πλάτος και το μήκος του μαγνήτη	64
3.6. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα.....	65
3.7. Οι λόγοι a_i και k_d	66
3.8. Το πάχος του σιδήρου.....	67
3.9. Κόστος, βάρος και όγκος γεννήτριας.....	68
3.9.1. Οι μαγνήτες.....	69
3.9.2. Ο σίδηρος.....	70
3.9.3. Ο χαλκός.....	72
3.9.4. Η ρητίνη.....	72
3.9.5 Τα κόντρα πλακέ.....	72
Κεφάλαιο 4: Λογισμικό Προσομοίωσης.....	74
4.1 Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave	74
4.2 Το λογισμικό FEMM.....	74
4.3 Προσομοίωση της γεννήτριας με συνδυασμό Matlab-FEMM.....	75
4.4 Οι επιδόσεις της γεννήτριας	76
4.5 Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης	78
4.6. Βελτιστοποίηση σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών	80
4.6.1. Βελτιστοποίηση με τη μέθοδο Particle Swarm Optimization (PSO)	81
4.7. Επαλήθευση ορθότητας PSO	84
4.7.1 N40	84
4.7.2. N42	85
4.7.3. N45	86
4.7.4. N50	87
4.7.5. Συμπέρασμα.....	88
Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση.....	89
5.1. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης	89

5.2. Απόρριψη διατάξεων κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.....	90
5.2.1 Κατασκευαστικοί περιορισμοί	90
5.2.2. Έλεγχος μεταβλητών	91
5.3. Εύρεση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ακτίνα φτερωτής	92
5.3.1 Μαγνήτες N40	92
5.3.2. Μαγνήτες N42	96
5.3.3. Μαγνήτες N45	97
5.3.4. Μαγνήτες N50	99
5.4. Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων με N40, N42, N45 και N50.	101
Κεφάλαιο 6: Εύρεση βέλτιστου καθολικού μαγνήτη για γεννήτριες με ακτίνα φτερωτής από 2.4 έως 3.9m.....	103
6.1. Αλγόριθμος εύρεσης καθολικού μαγνήτη	103
6.2. Σύγκριση καθολικού μαγνήτη με βέλτιστους μαγνήτες ανά ακτίνα φτερωτής	104
Κεφάλαιο 7: Κατασκευή της γεννήτριας.....	108
7.1 Η κατασκευή του δρομέα.....	108
7.2. Η κατασκευή του στάτη	113
7.3. Η συναρμολόγηση της γεννήτριας.....	117
Κεφάλαιο 8: Πειραματικές μετρήσεις.....	120
8.1. Μέτρηση της γεννήτριας σε κενό φορτίο	121
8.2 Μέτρηση της γεννήτριας σε σύνδεση με συσσωρευτές.....	123
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα	128
Παράρτημα.....	131
I. Προγράμματα σε Matlab	131
Π.1. Πρόγραμμα σειριακής αναζήτησης με δυνατότητα μετακίνησης δρομέα εντός του FEMM	131
II. Πίνακες προσομοιώσεων	139
Π.1. Μελέτη t_w	139
Π.2. Αποτελέσματα h_m 20 N42, N45, N50.....	142
Βιβλιογραφία	144

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Μια διαφορετική προσέγγιση

Αν θέλουμε να αποφύγουμε τις καταστροφικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, χρειαζόμαστε μια ταχύτατη μετάβαση σε ένα σύστημα ενέργειας βασισμένο σε καθαρές αποδοτικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή, γεωθερμική κλπ). Όσον αφορά τη αιολική ενέργεια, τα τελευταία χρόνια δημιουργούνται τεράστια αιολικά πάρκα με στόχο θεωρητικά την αντικατάσταση των συμβατικών σταθμών παραγωγής και τον περιορισμό, μέχρι την οριστική εγκατάλειψη, της καύσης ορυκτών καυσίμων.

Ωστόσο η μαζική εγκατάσταση αιολικών πάρκων με μεγάλες ανεμογεννήτριες έχει προκαλέσει σε πολλές περιπτώσεις σημαντικές κοινωνικές αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις αυτές αναδεικνύουν σημαντικά ερωτήματα τόσο ως προς το ιδιοκτησιακό καθεστώς των ανεμογεννητριών (ιδιωτικό υπό καθεστώς ακραίου ολιγοπωλίου έναντι δημοσίου) όσο και ως προς την ίδια την τεχνική των ανεμογεννητριών (μεγάλες ή μικρές ανεμογεννήτριες, κλειστές ή ανοιχτές κατασκευές, συνδεδεμένες σε εθνικά-υπερεθνικά ή τοπικά-αποκεντρωμένα δίκτυα, με ή χωρίς αποθήκευση, με αποθήκευση σε λίγες μεγάλες ή πολλές μικρές εγκαταστάσεις).

Ός προς την παραγωγή ανεμογεννητριών, θα περιοριστούμε εδώ στην παρατήρηση ότι οι μεγάλες ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων κατασκευάζονται υπό ένα ακραία ολιγοπωλιακό καθεστώς, το οποίο ενδέχεται να είναι ακόμη πιο συγκεντρωτικό και από αυτό της μεταπολεμικής κατασκευής πυρηνικών αντιδραστήρων. Ελαχιστότατες εταιρείες κατασκευής ανεμογεννητριών (με κυρίαρχες τις Vestas και Gamesa) παράγουν και εμπορεύονται ανεμογεννήτριες ύψους ουρανοξύστη, με τεχνολογία που δεν διαχέεται, αξιοποιώντας τα πιο πολύπλοκα συνθετικά υλικά. Όταν η τεχνολογία αυτή εγκαθίσταται σε κάποιο σημείο του κόσμου διευρύνει αποφασιστικά εξαρτήσεις και συγκεντρωτισμούς αντί να μεταφέρει τοπικά κάποια τεχνογνωσία. Οι ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας είναι εγκιβωτισμένες κατασκευές με αδιαφανείς μηχανισμούς που δεν προσαρμόζονται και δεν τροποποιούνται στη χρήση, ούτε και επιδιορθώνονται τοπικά.

Τα αιολικά πάρκα με τις μεγάλες ανεμογεννήτριες δεν συνδυάζονται με έρευνα σε τοπικές πολυτεχνικές κοινότητες, δεν δημιουργούν ποιοτικές θέσεις εργασίας στους προορισμούς εγκατάστασης. Οι ανεμογεννήτριες αυτές είναι πανάκριβες και επιβαρύνονται και με απρόβλεπτα μεγάλο κόστος εγκατάστασης όταν εγκαθίστανται σε βουνά (πόσο μάλλον σε βουνά νησιών) αντί σε πεδιάδες της Βόρειας Ευρώπης. Και χαρακτηρίζονται από ένα ακόμη πιο απρόβλεπτα μεγάλο κόστος απεγκατάστασης μετά από ένα σχετικά σύντομο κύκλο ζωής (λίγο περισσότερο από δύο δεκαετίες). Κόστος που δεν αναλαμβάνεται από τις εταιρείες στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής αδειοδότησης. [3]

Από το σχεδιασμό τους (π.χ. από το σχεδιασμό των πτερυγίων και των ρυθμιστικών τους μηχανισμών), οι μεγάλες ανεμογεννήτριες προσιδιάζουν σε παραγωγή ρεύματος προς εξαγωγή και όχι σε αντικατάσταση τοπικών θερμοηλεκτρικών σταθμών (π.χ. στα νησιά). Η εγκατάστασή τους δεν αφαιρεί θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς δεν έχουν σχεδιαστεί για να συνδυάζονται με μέσα αποθήκευσης ενέργειας για την περίπτωση που δεν φυσάει. Αν κλείσει ένας θερμοηλεκτρικός σταθμός σε ένα νησί του Αιγαίου δεν θα είναι επειδή

υπήρχε άμεση αντικατάσταση από κάποια αιολικά πάρκα. Απλά θα εισάγεται ρεύμα από διασύνδεση, ενώ όμως θα πρέπει να έχει προστεθεί αλλού κάποια ισοδύναμη ισχύς από θερμοηλεκτρικό σταθμό. Η μαζική εγκατάσταση αιολικών πάρκων στα νησιά και αλλού προσθέτει τελικά αντί να αφαιρεί πιέσεις για νέους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, συνήθως σε επιβαρυμένες ήδη περιβαλλοντικά περιοχές.

Σε κάποιες περιπτώσεις, ο συγκεντρωτισμός δεν έχει όρια. Αυτό συμβαίνει όταν, για παράδειγμα, στο ολιγοπώλιο μιας πολυεθνικής εταιρείας κατασκευής, προστίθεται ο έλεγχος μιας πολυεθνικής ιδιοκτήτριας εγκαταστάσεων και κάποια από τις ελάχιστες διεθνώς εταιρείες που εξειδικεύονται στην κατασκευή και προώθηση ειδικού τύπου καλωδίων μεταφοράς, όπως τα υποθαλάσσια καλώδια μεγάλου μήκους για αξιόλογο βάθος.

Στον αντίποδα, εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας μικρότερης κλίμακας 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. Χρειάζεται λοιπόν μια διαδικασία μετάβασης σε ένα καθεστώς ενεργειακής δημοκρατίας μέσα από αποφασιστική μετατόπιση της ισχύος στους λαούς, τις κοινότητες, τις μικρές τοπικές επιχειρήσεις και τους εργαζόμενους. Ενεργειακή δημοκρατία όμως δεν μπορεί να υπάρξει χωρίς την αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας και τον αποκλεισμό τεράστιων μερίδων του πληθυσμού παγκοσμίως από την πρόσβαση στον ηλεκτρισμό.

Είναι λοιπόν 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 τα παιχνίδια της αγοράς και συμφέροντα μεγάλων εταιριών.

Ο δρόμος λοιπόν για καθαρότερη ενέργεια με σεβασμό στο περιβάλλον και ταυτόχρονο σεβασμό στις ανθρώπινες κοινότητες όπως η δυνατότητα λήψης αποφάσεων και επιλογών στη ζωή, περνάει από τη διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας αλλά και η ανοιχτή διάχυση της γνώσης και η μεταφορά τεχνογνωσίας. Δύο προσεγγίσεις που συμμερίζονται αυτές τις αξίες είναι ο ανοιχτός κώδικας (open source) και η ενδιάμεση τεχνολογία (intermediate technology).

1.1.1. Η γνώση ως κοινό αγαθό – η τεχνολογία ανοιχτού κώδικα

Η τεχνολογία ανοιχτού κώδικα είναι μια φιλοσοφία που προωθεί την καθολική πρόσβαση (μέσω ελεύθερης άδειας) στο κατασκευαστικό σχέδιο ενός προϊόντος και την καθολική πρόσβαση στο σχέδιο, συμπεριλαμβανομένων και μεταγενέστερων βελτιώσεων σε αυτό, σε όλους. Αποθέτοντας τον σχεδιασμό, την παραγωγή και την τροποποίηση των προϊόντων στα χέρια του κόσμου, η τεχνολογία ανοιχτού κώδικα ελαχιστοποιεί τον έλεγχο των μεγάλων εταιριών στην τεχνολογική μας εξέλιξη.

Ο όρος «ανοιχτός κώδικας» υποδηλώνει τη δέσμευση να κάνουμε τα πάντα με ένα τρόπο που μοιράζεται τη γνώση, ενθαρρύνει την ελεύθερη διακίνηση και πρόσβαση στο σχεδιασμό ενός προϊόντος και την κατασκευή του. Υπάρχει μεγάλη πληθώρα projects

ανοιχτού κώδικα. Τα πιο γνωστά περιλαμβάνουν λογισμικό για υπολογιστές όπως ο Mozilla Firefox και λειτουργικά συστήματα όπως το android και το Linux – αλλά υπάρχουν και πάρα πολλά άλλα. [4]

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.

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

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 [6]:

- 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 [7].

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 τεχνολογία έχει δοκιμαστεί στο χρόνο και έχει αποδειχθεί απλή, αξιόπιστη και ευέλικτη. Χάρη σε σχέδια που έχουν εκδοθεί ([8], [9]) 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.

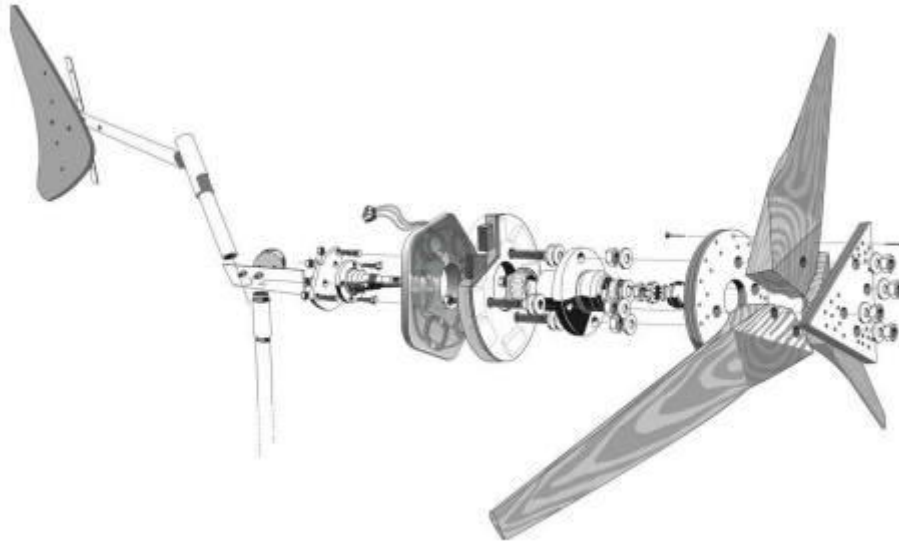
Σήμερα το ένα τρίτο περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα και φθηνά και να ηλεκτροδοτήσουν σχολεία, κλινικές και άλλα ζωτικά κέντρα μιας κοινότητας, συμβάλλοντας στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων 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 [8] 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 Piggott.

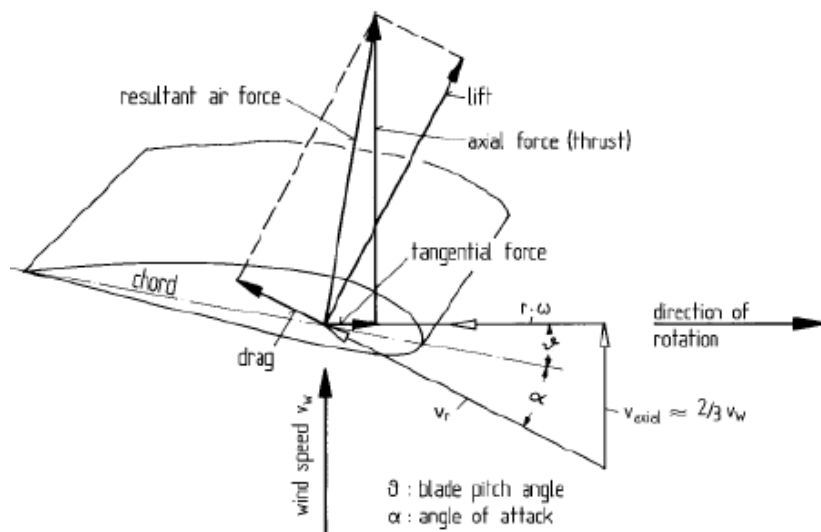


Σχήμα 1.1. Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott

1.3. Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά

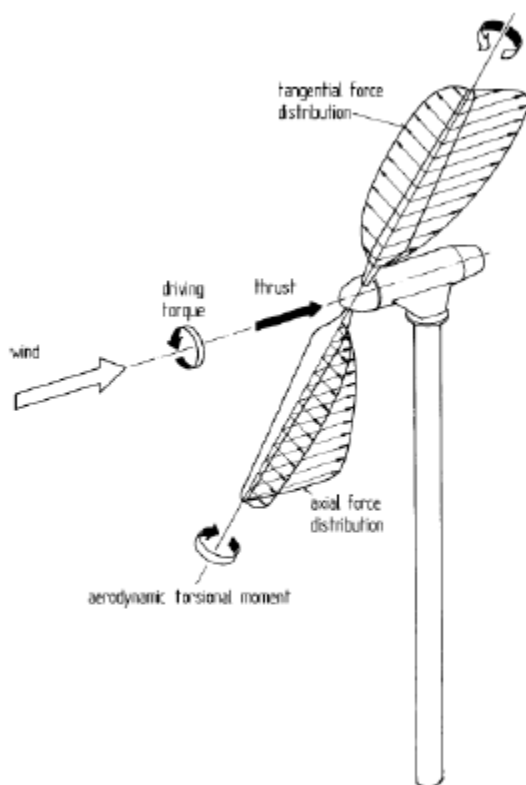
1.3.1. Βασικές έννοιες αεροδυναμικής

Ξεκινώντας τη σχεδίαση μιας ανεμογεννήτριας, πρωταρχική εργασία είναι η κατανόηση της λειτουργίας του αεροδυναμικού συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει την έλικα, το σύστημα προσανατολισμού καθώς και το σύστημα προστασίας furling. Η κατασκευή των φτερών γίνεται από το ξύλο και περιγράφεται στο [10]. Τα ξύλινα φτερά μπορεί να μη φαίνονται η καλύτερη επιλογή αλλά το μικρό τους βάρος, το χαμηλό κόστος καθώς και η ευκολία στην επεξεργασία τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Φτερωτές για μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν και με μίγματα ρητίνης, το κόστος όμως των καλουπιών είναι απαγορευτικό και συμφέρει μόνο σε περιπτώσεις μαζικής παραγωγής.



Σχήμα 1.2. Η αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας

Στο σχήμα 1.2. φαίνεται η αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας. Η ακμή στην οποία προσπίπτει ο άνεμος ονομάζεται ακμή πρόσπτωσης (leading edge) ενώ η άλλη ακμή διαφυγής (trailing edge). Η γραμμή που ενώνει τις δύο ακμές λέγεται χορδή της αεροτομής. Ο σχετικός άνεμος V_r που προσπίπτει στη φτερωτή αποτελείται από δύο συνιστώσες, την πραγματική ταχύτητα του ανέμου V_{axial} καθώς και τη μεταφορική ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου ωR . Έτσι σχηματίζονται 2 γωνίες: η γωνία πρόσπτωσης α (angle of attack) καθώς και η γωνία βήματος πτερυγίου θ . Όπως τονίζεται ο στο [11] οι δύο γωνίες συχνά συγχέονται μεταξύ τους. Είναι σημαντικό πάντως να γίνει αντιληπτό ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι αεροδυναμική παράμετρος ενώ η γωνία βήματος κατασκευαστική. Παρατηρώντας το σχήμα μπορεί κανείς απλά να θεωρήσει ότι καθώς προσπίπτει ο άνεμος ασκεί δύο δυνάμεις στη φτερωτή, τη δύναμη άνωσης (lift) και την τριβή (drag) που έχει την κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας ανέμου. Υπολογίζοντας τις δύο παραπάνω συνιστώσες για κάθε κομμάτι των φτερών μπορεί κανείς να βρει την κατανομή των δυνάμεων στη φτερωτή. Αυτό ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 1.2.. οι δυνάμεις χωρίζονται σε δύο ομάδες, μια στο επίπεδο περιστροφής (η εφαπτομενική δύναμη) και μια στο κάθετο επίπεδο (thrust). Ολοκληρώνοντας την εφαπτομενική δύναμη προκύπτει η ροπή που οδηγεί το δρομέα της γεννήτριας – η μηχανική ροπή, και ολοκληρώνοντας την κατανομή της thrust παίρνουμε τη συνολική της τιμή.



Σχήμα 1.3. Η κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται σε μια φτερωτή

Γενικά, και επιστρέφοντας στο σχήμα 1.1., η δύναμη άνωσης είναι η υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση της γεννήτριας, ενώ η δύναμη τριβής αντιτίθεται σε αυτή. Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής, με άλλα λόγια να μπορεί κανείς να αποσπάσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μηχανική ενέργεια από τον

άνεμο, ο λόγος αυτών των 2 πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Αυτόν ακριβώς το λόγο καθορίζει η γωνία πρόσπτωσης α , η ιδανική τιμή της οποίας ορίζεται γύρω στις 4 μοίρες. Για κάθε σημείο όμως της φτερωτής η συνιστώσα του σχετικού ανέμου ωR αλλάζει αφού αλλάζει η ακτίνα, με αποτέλεσμα η γωνία α να αλλάζει και εκείνη. Δεδομένης λοιπόν της θεωρητικής βέλτιστης τιμής των 4 μοιρών θα πρέπει να αλλάζει η γωνία θ προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία. Πιο κοντά στον άξονα της γεννήτριας, όπου η ακτίνα και άρα η συνιστώσα ωR είναι πολύ μικρή, η γωνία θ θα είναι μεγαλύτερη δίνοντας έτσι μια αίσθηση στρέψης στα φτερά.

1.3.2. 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

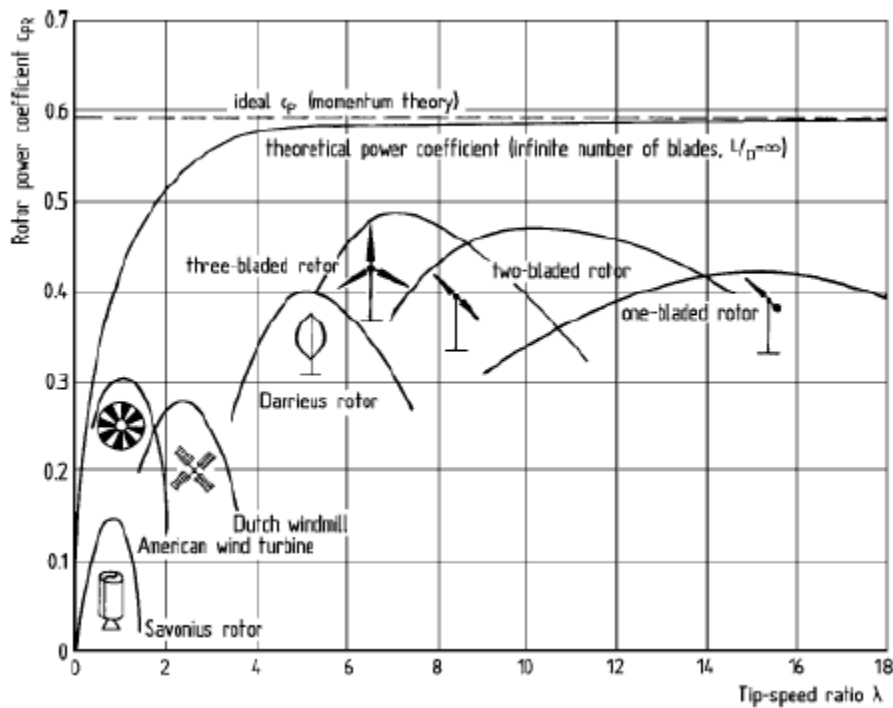
Ο αεροδυναμικός συντελεστής δεν παραμένει σταθερός κατά τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας αλλά αλλάζει σε σχέση με τον άνεμο, τις στροφές και την ακτίνα της φτερωτής. Πιο συγκεκριμένα εισάγεται στο σημείο αυτό ο λόγος ακροπτερυγίου λ για τον οποίο ισχύει:

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

Όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας.

Γενικά ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι συνάρτηση του λόγου ακροπτερυγίου και της γωνίας βήματος πτερυγίου β . Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προκύπτει βέλτιστος λόγος

ακροπτερυγίου (που μεγιστοποιεί το c_p) $\lambda_{opt}=5.5$ και μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής $c_{p,max} = 0.38$.

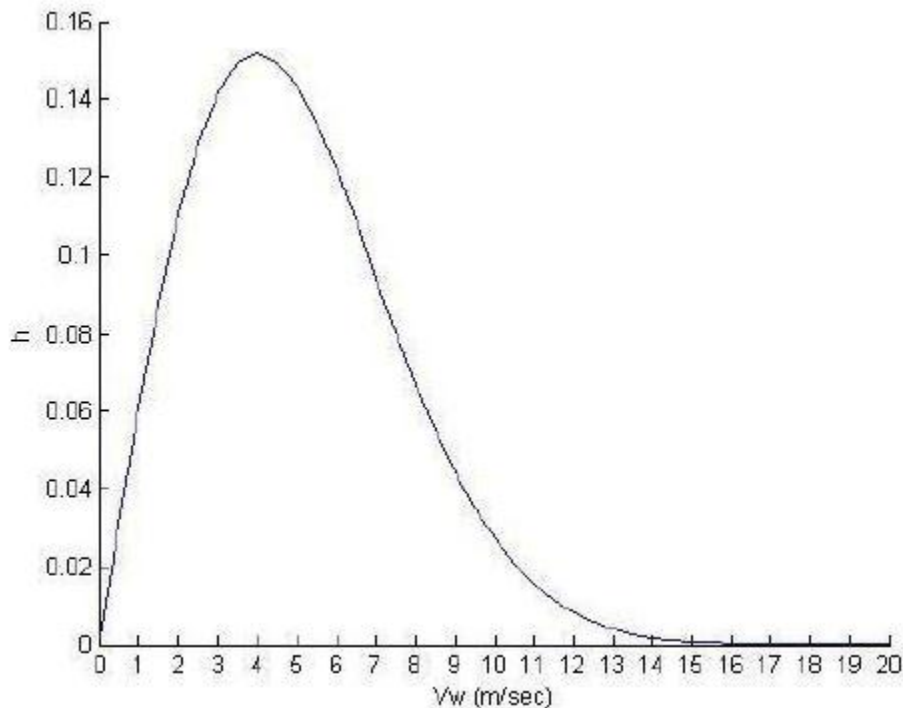


Σχήμα 1.4. οι καμπύλες $C_p - \lambda$ για διάφορους τύπων φτερωτών.

1.3.3. Η κατανομή του ανέμου

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 [6] θεωρούμε ότι ο μέσος άνεμος είναι ίσος με 5m/s και ότι η κατανομή του ανέμου έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1.5..



Σχήμα 1.5. Η στατιστική κατανομή του ανέμου για κατανομή Rayleigh και μέση τιμή ανέμου τα 5 m/s

Γνωρίζοντας την κατανομή του ανέμου, δηλαδή με απλά λόγια, πόσες φορές θα φυσήσει 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.

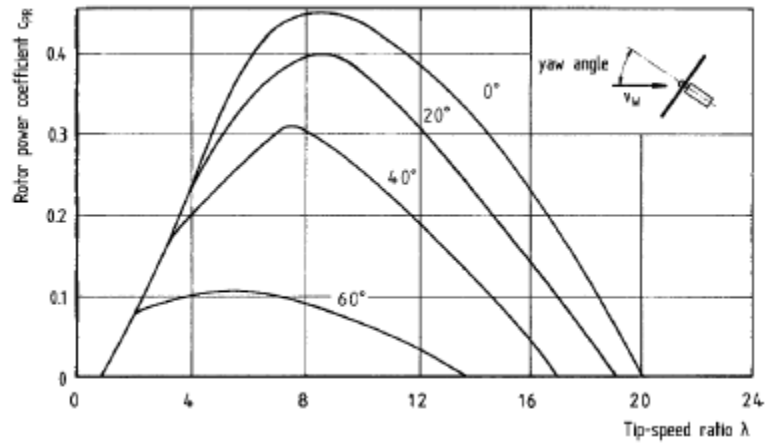
1.3.4. Ο περιορισμός της ισχύος

Κάθε ανεμογεννήτρια είναι σχεδιασμένη για έναν συγκεκριμένο άνεμο στον οποίο θα δώσει τα ονομαστικά της. Όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί πάνω από τα ονομαστικά της υπάρχει κίνδυνος βλάβης. Ο κίνδυνος αυτός αναφέρεται αρχικά στην περίπτωση όπου θα φυσήσει άνεμος μεγαλύτερος από τον ονομαστικό οπότε και το ρεύμα που θα περάσει από το τύλιγμα θα είναι μεγαλύτερο με κίνδυνο υπερθέρμανσης. Δευτερευόντως, ο κίνδυνος αφορά τα ίδια τα φτερά που μπορεί να μην αντέχουν σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Υπάρχει λοιπόν ανάγκη να περιοριστεί η ισχύς από τα ονομαστικά και μετά.

Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες αυτό γίνεται απλά αλλά αλλάζοντας τη γωνία βήματος θ , μειώνοντας έτσι το εμβαδόν της φτερωτής που βλέπει ο άνεμος και άρα και την ισχύ. Με την τεχνική αυτή (pitch control) μπορεί η ισχύς να διατηρηθεί ακριβώς στα ονομαστικά ακόμα και σε μεγαλύτερους ανέμους.

Αυτός είναι ο βασικός τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ισχύος. Πρόκειται όμως για μέθοδο πολύ ακριβή και ασύμφορη για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Έτσι αναπτύχθηκε το σύστημα furling. Η λογική του συστήματος αυτού είναι ουσιαστικά να απομακρύνει τη γεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου όταν ο άνεμος αυξάνεται επικίνδυνα. Το σύστημα furling θα μπορούσε να θεωρηθεί μέρος του συστήματος Yaw.

Πρόκειται για μια ουρά η οποία κατευθύνει γεννήτρια προς τον άνεμο όταν αλλάζει η διεύθυνσή του. Ανάλογα με το βάρος και την κατασκευή του συστήματος αυτού, για συγκεκριμένους (άνω των ονομαστικών) ανέμους ενεργοποιείται το σύστημα furling που πλέον απομακρύνει τη φτερωτή από τον άνεμο κατά τη γωνία yaw [11]. Ο περιορισμός της ισχύος (μέσω μείωσης του αεροδυναμικού συντελεστή c_p) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.6. Ο περιορισμός του αεροδυναμικού συντελεστή μέσω της γωνίας yaw

Η ακριβής λειτουργία του συστήματος furling δεν είναι ωστόσο καθορισμένη και για αυτό το λόγο δεν μπορούν να γίνουν ακριβείς υπολογισμοί της ισχύος για ανέμους άνω των ονομαστικών, και άρα ακριβείς υπολογισμοί της ενεργειακής απόδοσης μετέπειτα.

Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

2.1 Σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών

Ο βασικός τύπος γεννητριών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι σύγχρονες γεννήτριες. Σύγχρονες γεννήτριες συναντώνται στις μεγάλες συναντώνται θερμοηλεκτρικές μονάδες, σε υδροηλεκτρικά έργα, σε σταθμούς ντίζελ κτλ.

Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται είτε γεννήτριες επαγωγής είτε σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες επαγωγής μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας στο δίκτυο σε λειτουργία σταθερών στροφών, εφόσον μικρή αλλαγή στις στροφές μπορεί να επιτευχθεί με μεταβολή της ολίσθησης, είτε σε λειτουργία μεταβλητών στροφών. Οι σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται γενικά με ηλεκτρονικά ισχύος σε λειτουργία μεταβλητών στροφών.

Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν είτε να έχουν ηλεκτρική διέγερση είτε το πεδίο της διέγερσής τους να δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες. Οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών, αν και χρησιμοποιήθηκαν 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. [12]

Η χρήση μονίμων μαγνητών αντί ηλεκτρομαγνητών (ηλεκτρικής διέγερσης) στο δρομέα της γεννήτριας παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Πιο απλή κατασκευή, καθώς δεν απαιτούνται ψήκτρες για τη μεταβίβαση της ενέργειας στο δρομέα [13]
- Καλύτερη απόδοση αφού δεν υπάρχουν απώλειες διέγερσης και απώλειες στις ψήκτρες
- Αυτονομία διότι δεν απαιτείται ηλεκτρική τροφοδοσία από το δίκτυο ή από μπαταρία, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές σε απομονωμένες αγροτικές εγκαταστάσεις
- Μειωμένες απαιτήσεις σε συντήρηση λόγω της απουσίας ψηκτρών

Ένα επιπλέον 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). Για το λόγο αυτό, 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 μόνο 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. [7]

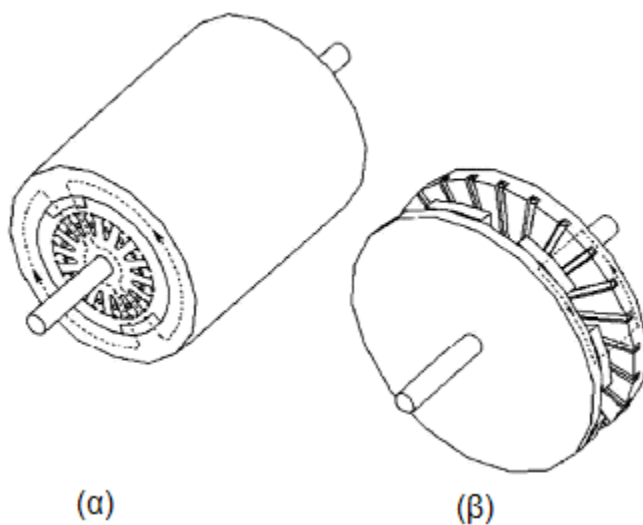
2.2 Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής

Διακρίνουμε δύο βασικά είδη μηχανών μονίμων μαγνητών:

- 1) Τις μηχανές ακτινικής ροής (RFFM)
- 2) Τις μηχανές αξονικής ροής (AFFM)

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 μηχανές αξονικής ροής.

Η βασική δομική τους διαφορά που παρατηρείται άμεσα στο 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:

- 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 δομής μπορούμε να ρυθμίσουμε ευκολότερα το μήκος διακένου.
- 4) Μεγαλώνοντας την εξωτερική διάμετρο του πυρήνα έχουμε τη δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης μεγαλύτερου αριθμού πόλων και κατ' επέκταση, λειτουργίας της μηχανής σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (ισχύει η σχέση $n=120 \cdot f/p$). Αυτό καθιστά τη γεννήτρια αξονικής ροής κατάλληλη για αιολικά συστήματα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ έλικας και γεννήτριας, που δημιουργεί επιπλέον απώλειες, απαιτεί επιπλέον συντήρηση, αυξάνει το μέγεθος και το βάρος του συστήματος και φυσικά την πολυπλοκότητα της κατασκευής.
- 5) Τέλος πολλοί δίσκοι μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερης ισχύος ή ροπής.

Στην επιλογή μεταξύ των δύο κατηγοριών, πρωτεύοντα ρόλο παίζει η εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί η μηχανή και το αν αυτή απαιτεί μια μακρύτερη και λεπτότερη σχεδίαση (ακτινική) ή μια σχεδίαση "pancake" (αξονική). Σημαντικό επίσης κριτήριο αποτελεί το κόστος καθώς η μηχανική αξονικής ροής αποδίδει την ίδια ροπή με αυτήν την αξονικής ροής χρησιμοποιώντας λιγότερο ενεργό υλικό.

Σύμφωνα με το [14], επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά στη μεταξύ τους σύγκριση με βάση δύο κριτήρια:

- A. Το λόγο μήκους (length ratio) των μηχανών ακτινικής ροής, που ορίζεται σαν το λόγο του αξονικού μήκους του στάτη προς τη διάμετρο του διακένου:

$$k_l = \frac{l_{eff}RF}{D_{gap}}$$

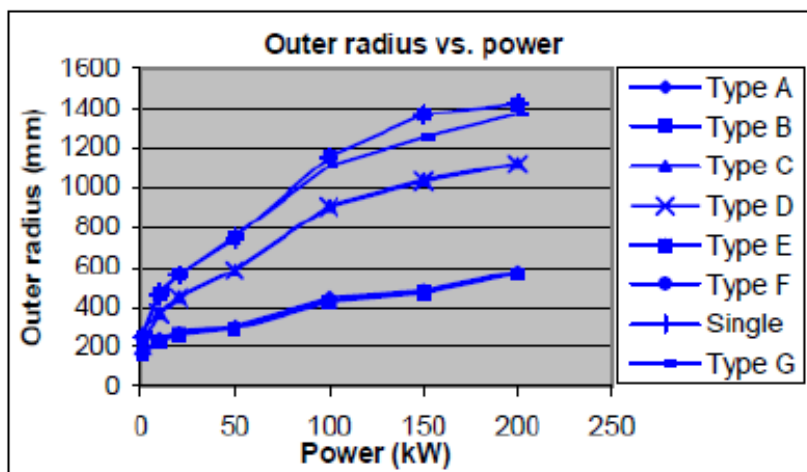
Συγκεκριμένα όταν $k_l < 0.5$, η αντίστοιχη μηχανή αξονικής ροής εμφανίζεται πιο συμφέρουσα λόγω μικρότερου όγκου.

- B. Τον αριθμό των πόλων. Για μικρό αριθμό πόλων ($p < 4$) είναι προτιμότερες οι μηχανικές ακτινικής ροής. Στην ίδια αναφορά, γίνεται σύγκριση κόστους μεταξύ αυτών των 2 ειδών μηχανής για ισχύ 55kW, όπου για μικρό αριθμό πόλων ($p < 6$) η μηχανή ακτινικής ροής προτιμάται όταν τίθεται σαν κριτήριο το κόστος, η απόδοση ή η κατασκευή αντίστοιχα, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό πόλων γίνεται πιο συμφέρουσα η χρήση μηχανής αξονικής ροής.

Πιο αναλυτικά το κόστος για τους μόνιμους μαγνήτες είναι γενικά μικρότερο για τις μηχανές αξονικής ροής λόγω του μικρότερου διακένου σε αντίθεση με το κόστος του χαλκού, που είναι μεγαλύτερο καθώς απαιτούνται περισσότερες σπείρες.

Ένα σημαντικό ζήτημα, είναι ότι, όπως αναφέρεται στο [14], όταν η ακτίνα της μηχανής αξονικής ροής γίνει ίση με το διπλάσιο του μήκους μιας ακτινικής, τότε η μηχανή αξονικής ροής χάνει τα πλεονεκτήματα που αφορούν το επίπεδο ισχύος που μπορεί αυτή να προσφέρει. Ή αντίστροφα, ένα υψηλό επίπεδο ισχύος απαιτεί μεγαλύτερο όγκο μηχανής αξονικής ροής παρά ακτινικής.

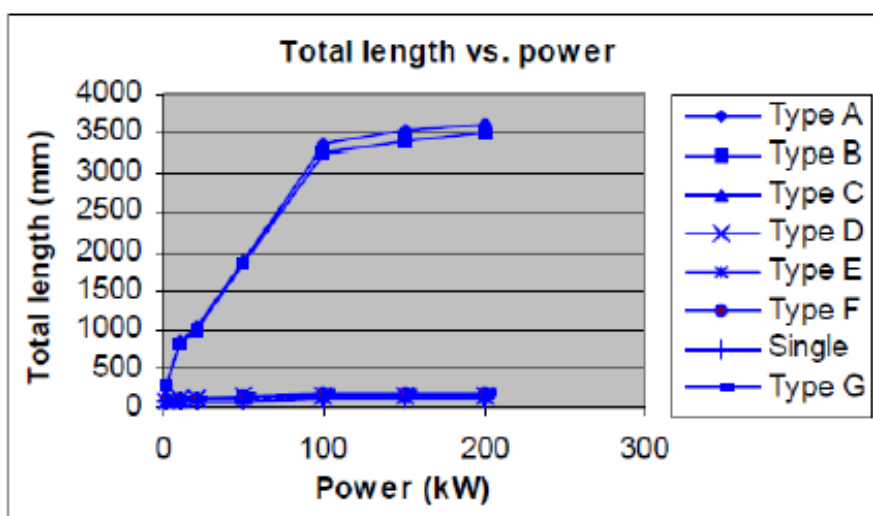
Στο παρακάτω διάγραμμα [15] βλέπουμε την εξωτερική ακτίνα για διάφορους τύπους μηχανών αξονικής και ακτινικής ροής σε σχέση με την ισχύ τους.



Σχήμα 2.2. Ακτίνες διαφόρων τύπων μηχανών σε σχέση με την ισχύ τους

Παρατηρούμε ότι οι μηχανές ακτινικής ροής (Type A και Type B) στο εύρος ισχύος από 3 έως 7 kW περίπου, εμφανίζουν ακτίνες γύρω στα 200mm, ενώ οι μηχανές αξονικής ροής (Type C έως E) για το ίδιο εύρος ισχύος εμφανίζουν ακτίνες μεγαλύτερες των 300mm.

Στο επόμενο διάγραμμα εμφανίζεται το μήκος των μηχανών σε σχέση με την ισχύ.



Σχήμα 2.3. Συνολικό μήκος μηχανής σε σχέση με ισχύ

Παρατηρούμε ότι το μήκος των μηχανών ακτινικής ροής για εύρος ισχύος 3-7 kW, κυμαίνεται από 500 έως 650 mm και επομένως ο περιορισμός $R_{out\ AF} < 2 * Length_{RF}$ που τέθηκε πιο πάνω ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση.

Άλλη μια σύγκριση των δύο κατηγοριών έχει γίνει στο [16]. Εκεί εξετάζονται δύο μικρές ανεμογεννήτριες 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. Επίσης η απόδοση της μηχανής παραμένει σταθερά υψηλή για ταχύτητες ανέμων από 3 έως 10 m/s, κάτι που ενδιαφέρει πολύ στην περίπτωση μας, καθώς στις εφαρμογές που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η γεννήτρια που μελετάμε θα συναντώνται κυρίως χαμηλές ταχύτητες ανέμου (3-5 m/s).

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

Μια ακόμα σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τοπολογιών έχει γίνει στο [17]. 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 άυλακες και αξονικής 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 από ο,τι στη μηχανή αξονικής ροής με άυλακες. Ως προς το δεύτερο κριτήριο, όμως, η μηχανή αξονικής ροής με άυλακες θα δώσει πολύ μεγαλύτερη αύξηση ροπής απ' ότι 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:

A) Μηχανές μονής πλευράς (μονός δρομέας – μονός στάτης)

- Με πυρήνα σιδήρου με άυλακες
- Με πυρήνα σιδήρου δίχως άυλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

B) Μηχανές διπλής πλευράς

I) Διπλός δρομέας – μονός στάτης (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με άυλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως άυλακες

- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

II) Διπλός στάτης – μονός δρομέας (εσωτερικός)

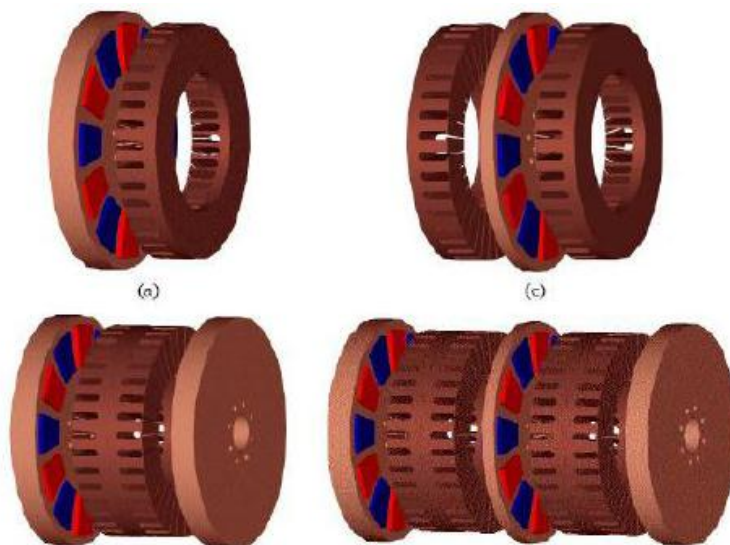
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

III) Πολλαπλών δίσκων

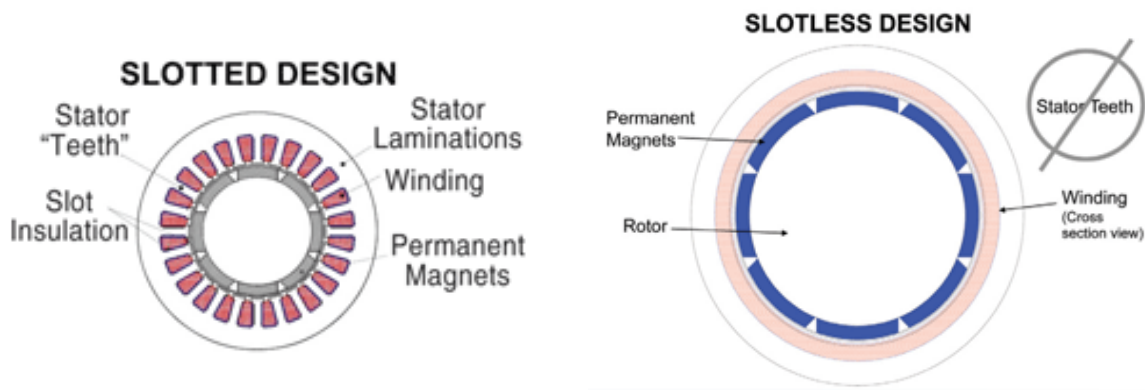
Είδαμε ότι υπάρχουν μηχανές με ή χωρίς πυρήνα και εφόσον υπάρχει πυρήνας μηχανές με ή χωρίς αύλακες.

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 δεκτός 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.



Σχήμα 2.4. Διάφορες τοπολογίες μηχανών με αύλακες



Σχήμα 2.5. Σχεδίαση με και χωρίς 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 και έτσι 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 [18].

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 [7].

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 [19].



Σχήμα 2.6. 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

¹σε 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

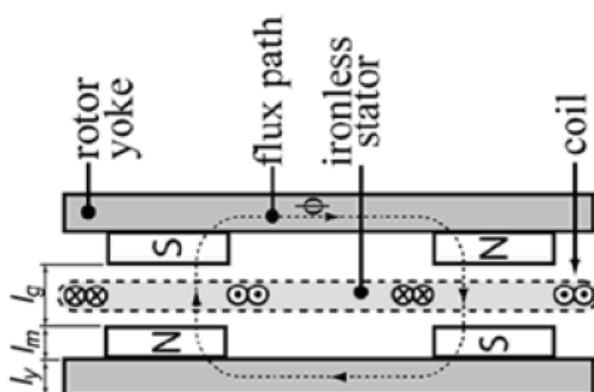
Καλή απόδοση: Σε εφαρμογές χαμηλού κόστους επιδιώκουμε μεγάλες αποδόσεις ώστε να μην έχουμε πολλές απώλειες και άρα η γεννήτρια μας να δουλεύει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά.

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 [18]. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.7., 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.



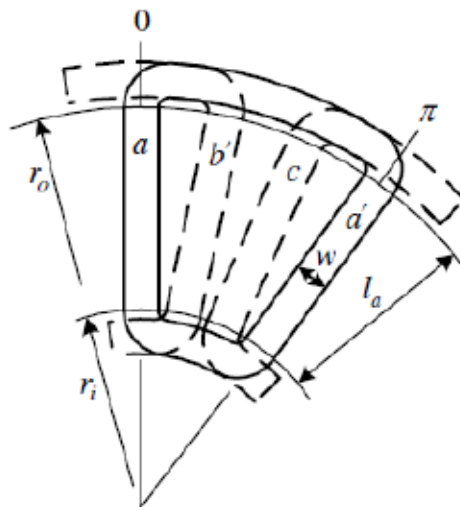
Σχήμα 2.7. το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της τοπολογίας διπλού δρομέα – μονού στάτη

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 τυλίγμα. Κάθε πλευρά πηνίου αντιστοιχίζεται στην αντίστοιχη αύλακα ενός πυρήνα σιδήρου.

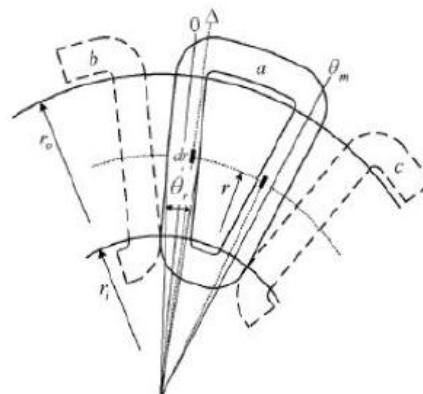
Οι διάφοροι τύποι τυλιγμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής [6]:

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



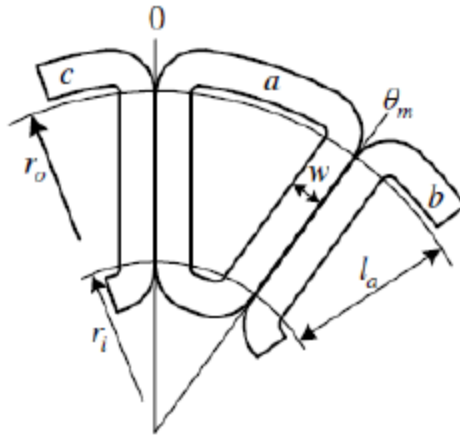
Σχήμα 2.8. Επικαλυπτόμενο τυλίγμα

2. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τυλίγμα 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.



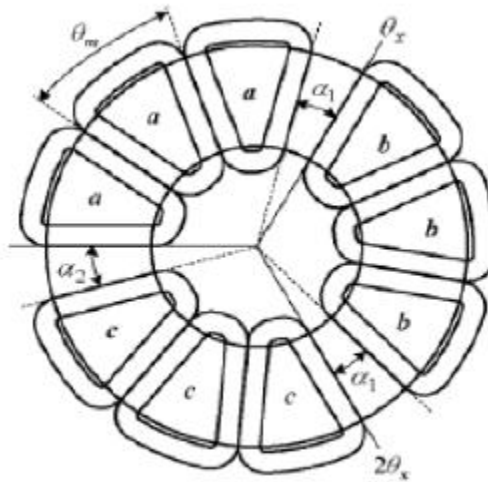
Σχήμα 2.9. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τυλίγμα μονής στρώσης

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 2.10. 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 2.11. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων

Στο συγκεντρωμένο τύλιγμα, τα άκρα τυλίγματος δεν χρειάζεται να λυγίσουν, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στο επικαλυπτόμενο, με αποτέλεσμα να είναι μικρότερο το συνολικό μήκος των πηνίων. Αυτό προσφέρει και ορισμένα πλεονεκτήματα [7]:

- Μικρότερο συνολικό όγκο χαλκού που χρειάζεται για τα πηνία
- Λιγότερες απώλειες χαλκού (χάρη στο μικρότερο όγκο χαλκού)
- Αυξημένη απόδοση
- Ευκολότερη κατασκευή του στάτη

- Χαμηλότερο κόστος τυλίγματος (χάρη στο μικρότερο αριθμό πηνίων και την απλούστερη δομή του τυλίγματος)

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 [20], 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 [20] 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 λόγω των πλεονεκτημάτων που συγκεντρώνει.

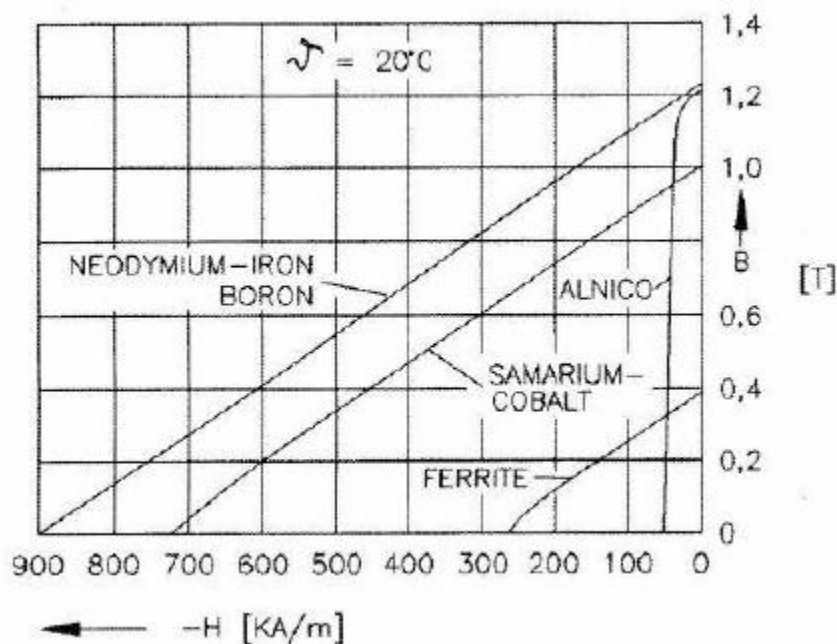
2.5 Οι μαγνήτες

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. $BaOx_6Fe_2O_3$, $SrOx_6Fe_2O_3$)
- Οι σπάνιες γαίες (π.χ. SmCo, NdFeB)

Οι καμπύλες απομαγνήτισης των παραπάνω μαγνητικών υλικών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.12. Καμπύλες απομαγνήτισης για διαφορετικά υλικά μόνιμων μαγνητών

Οι καμπύλες απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Τόσο η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B όσο και η παραμένουσα ένταση του μαγνητικού πεδίου H , μειώνονται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του μαγνήτη. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται με δύο εξισώσεις [21]:

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

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

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 $\% / ^\circ\text{C}$ (εξαιρέση οι κεραμικοί μαγνήτες όπου $\alpha_H > 0$ [22])

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 χρήση 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 [23].

Κεραμικοί μαγνήτες/ Σκληροί φερρίτες: Μια κατηγορία σκληρών φερριτών που χρησιμοποιούνται σαν μόνιμοι μαγνήτες είναι οι εξαγωνικοί φερρίτες του γενικού τύπου $\text{MOx6(Fe}_2\text{O}_3)$. Ονομάζονται και κεραμικοί μαγνήτες λόγω των ηλεκτρομονωτικών τους ιδιοτήτων. Ο πιο σημαντικός φερρίτης από την ομάδα αυτή είναι ο φερρίτης βαρίου ($\text{BaOx6Fe}_2\text{O}_3$), ο οποίος **κατασκευάστηκε** το 1952. Πιο πρόσφατα οι φερρίτες αυτοί άρχισαν να αντικαθίστανται από φερρίτες στροντίου, που έχουν το γενικό τύπο ($\text{SrOx6Fe}_2\text{O}_3$) και έχουν καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες από τους φερρίτες βαρίου.

Οι φερρίτες παράγονται με την τεχνική της κονιομεταλλουργίας και είναι διαθέσιμοι σε ιστροπικούς (C 1) και ανιστροπικούς βαθμούς (C5, C8), με τους δεύτερους να έχουν καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες. Στην περίπτωση των ανιστροπικών βαθμών, οι σκόνες των υλικών συμπίεζονται παρουσία μαγνητικού πεδίου, αποκτώντας σημαντική μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία [24]. 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 σιδηρομαγνητικά υλικά. Έχουν πολύ υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, κάτι που σημαίνει ότι κατά τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου δεν επάγονται δινορρεύματα στον όγκο του μαγνήτη, με συνέπεια πρακτικά μηδαμινές απώλειες δινορρευμάτων.

Σε σχέση με τους μαγνήτες Alnico έχουν υψηλότερη μαγνητική ένταση H (απομαγνητίζονται δυσκολότερα), αλλά χαμηλότερη παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r . Ο θερμοκρασιακός τους συντελεστής για το H είναι θετικός, που σημαίνει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η μαγνητική ένταση H 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 ($\alpha_B = -0.2\%/^{\circ}\text{C}$), 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)	MGOe	(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 ₂ 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_{cJ} : (a) 160–400 kA/m, 2000–3000 Oe (b) 700–1300 kA/m, 8700–16200 Oe (c) 700–1650 kA/m, 8700–20600 Oe (d) 800–2300 kA/m, 10000–31200 Oe. The Curie temperature of Alnico is 800–850°C, of ferrite 450°C, of SmCo₅ over 700°C and NdFeB it is 310°C. The Alnicos have a resistivity of about $50 \times 10^{-8} \Omega\cdot m$, for the ferrites it is about $10^2 \Omega\cdot m$ and for the rare earths $90\text{--}140 \times 10^{-8} \Omega\cdot m$. 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 για το B_r και Beta 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 επιστρώση, 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.

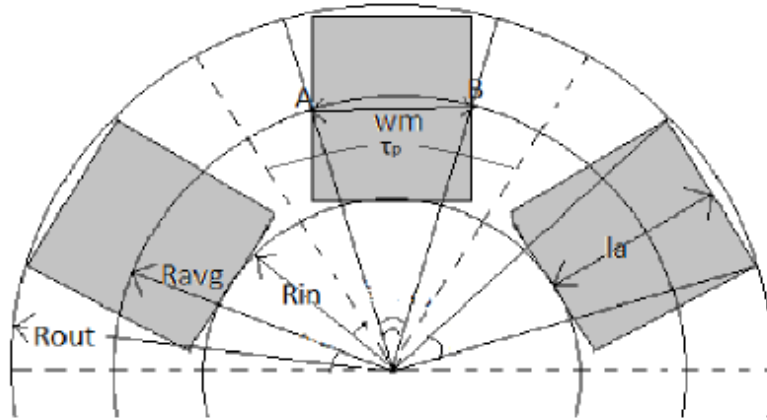
Συμπερασματικά, οι μόνιμοι μαγνήτες από σπάνιες γαίες υπερέχουν όλων των εμπορικών μαγνητικών υλικών ως προς την μαγνητική τους ισχύ. Έχουν όμως τα μειονεκτήματα ότι διαβρώνονται εύκολα, έχουν υψηλό κόστος και η τιμή και η διαθεσιμότητά τους είναι γενικά ασταθής λόγω της σπανιότητας των πρώτων υλών τους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

2.6. Θεωρητική ανάλυση

2.6.1 Μαγνητική ροή - ΗΕΔ - Ηλεκτρομαγνητική ροπή

Έστω γεννήτρια αξονικής ροπής 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 [13]. Για το πολικό βήμα μπορούμε να γράψουμε (r η ακτίνα αναφοράς και p ο αριθμός των πόλων):

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

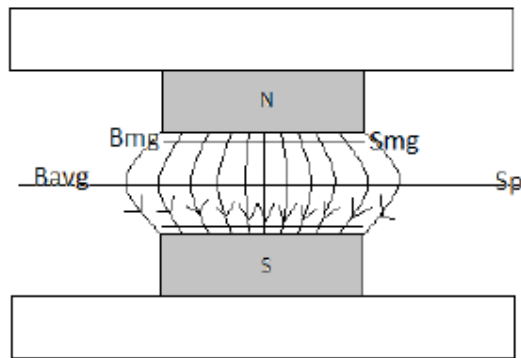


Σχήμα 2.13. Οι διάφορες ακτίνες αναφοράς και το πολικό βήμα σε μια γεννήτρια με ορθογώνιους μαγνήτες

Ένας πολύ σημαντικός συντελεστής για τη σχεδίαση της γεννήτριας είναι ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα:

$$ai(r) = \frac{w_m(r)}{\tau_p(r)}$$

Ο λόγος αυτός εξαρτάται από την ακτίνα αναφοράς r . Ας υποθέσουμε τώρα την παρακάτω διάταξη μηχανής αξονικής ροής:



Σχήμα 2.14. Πλάγια όψη ενός πολικού βήματος μιας γεννήτριας αξονικής ροής

Μπορούμε να πούμε παρατηρώντας το σχήμα ότι όλες οι δυναμικές γραμμές που διέρχονται από ένα εμβαδόν S_{mg} πολύ κοντά στην επιφάνεια του μαγνήτη θα διέρχονται (με διαφορετική πυκνότητα) και από ένα άλλο εμβαδόν S_p (το εμβαδόν του πολικού βήματος) στη μέση της γεννήτριας. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε:

$$\Phi_{avg} = \Phi_{mg} \longleftrightarrow B_{mg} \cdot S_{mg} = B_{avg} \cdot S_{avg} \longleftrightarrow \frac{B_{avg}}{B_{mg}} = \frac{S_{mg}}{S_p} \longleftrightarrow \frac{w_m}{\tau_p} = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \longleftrightarrow ai = \frac{B_{avg}}{B_{mg}}$$

Και προφανώς προκύπτει:

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

Όπου:

- B_{avg} η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής στη μέση της γεννήτριας
- B_{mg} η πυκνότητα μαγνητικής ροής λίγο πάνω από την επιφάνεια του μαγνήτη

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι η μέση τιμή του B στην επιφάνεια του μαγνήτη είναι πρακτικά ίση με την τιμή του B σε όποιο σημείο της τελευταίας θέλουμε, εξαιρουμένων των άκρων όπου το πεδίο συμπεριφέρεται διαφορετικά.

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

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

Όπου

$$ds = \frac{2\pi r}{p} dr$$

Άρα για κάποια περιοχή όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι B θα ισχύει γενικά:

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

Η ΗΕΔ μπορεί να υπολογιστεί παραγωγίζοντας τη θεμελιώδη συνιστώσα της κυματομορφής της μαγνητικής ροής [13]:

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

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

Και η ενεργός τιμή της ΗΕΔ προκύπτει:

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

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

Όπου:

- $N_\varphi = q \cdot N_c$ 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 [13] 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:

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

Έτσι, η μέση ηλεκτρομαγνητική ροπή σύμφωνα με το [19] 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 a , θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

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 $J_{max} = 4 - 5 \text{ A/mm}^2$ 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.

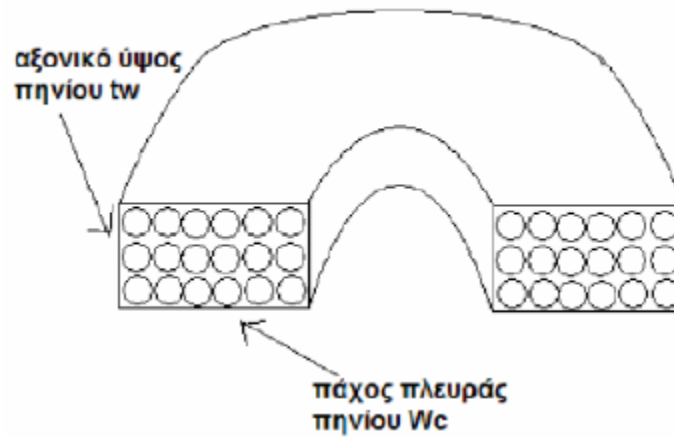
Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να γράψουμε:

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

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 είναι αρκετά μεγάλο ώστε να οδηγήσει σε μικρότερη αντίσταση του χαλκού και άρα λιγότερες απώλειες στο τύλιγμα.



Σχήμα 2.15. Το αξονικό ύψος, το πάχος πλευράς και τα ελιγμάτα ενός πηνίου.

Τα χάλκινα ελιγμάτα 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 2.19. 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 της 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 του ρεύματος γράφεται:

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

2.6.2.2 Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος

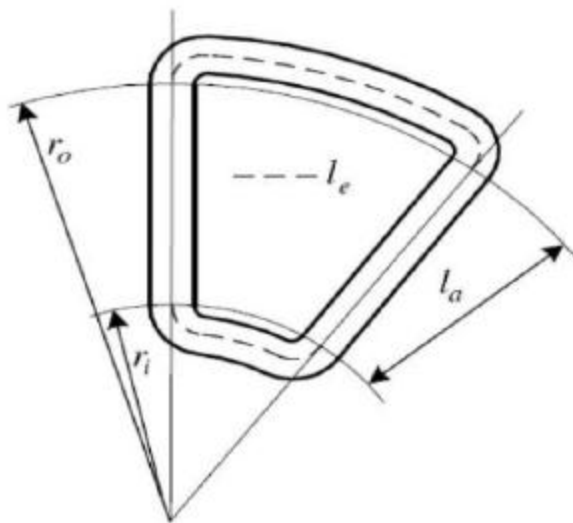
Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος, καθώς και τη συνολική μάζα του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό θα βοηθήσει πολύ αργότερα στην εκτίμηση τόσο του κόστους, όσο και του βάρους της γεννήτριας. Ιδιαίτερα η αντίσταση του τυλίγματος και κατ' επέκταση οι απώλειες που θα προκαλεί θα παίξουν 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
- $\theta_m = \frac{\pi p}{Q}$ 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 $\theta_{re} = \frac{k_d}{1+k_d} \theta_m [6]$



Σχήμα 2.16. 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 [7] 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 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

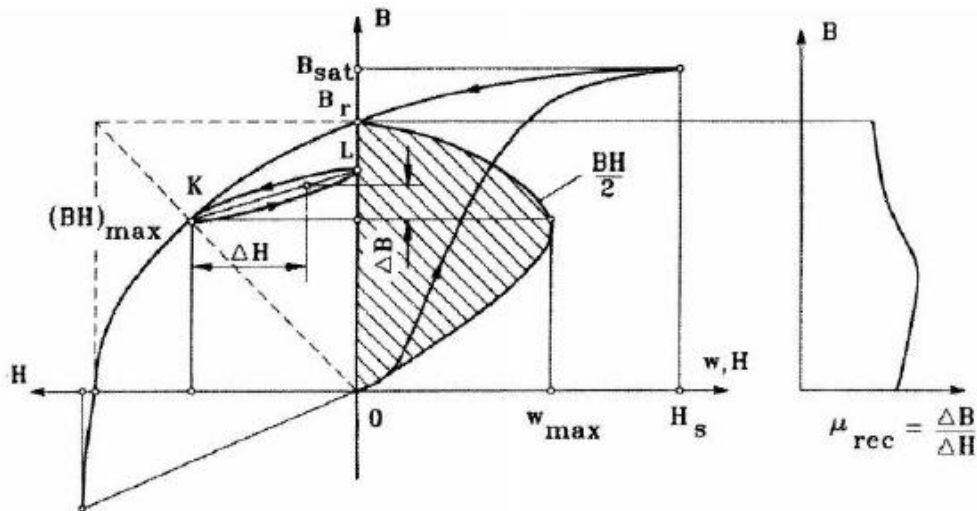
Πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάλυσή μας παίζει και η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας. Πρωτεύοντα ρόλο στο κύκλωμα αυτό έχει ο μαγνήτης, οπότε πρέπει να δούμε από τι χαρακτηρίζεται ένας μόνιμος μαγνήτης.

Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα του δρομέα αποτελείται από τους μόνιμους μαγνήτες και τον σιδερένιο δίσκο που χρησιμοποιείται για την μηχανική υποστήριξη τους. Σημαντικό είναι ότι αφού το διάκενο αέρος είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με τις αντίστοιχες γεννήτριες ακτινικής ροής, οι μαγνήτες που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να έχουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Συνήθως, οι επιφανειακοί μαγνήτες κολλούνται σε δίσκους ομαλής επιφάνειας ή σε δίσκους με κοιλότητες σχήματος ίδιου με αυτό των μαγνητών χωρίς κάποια περαιτέρω προστασία απέναντι στις ελκτικές δυνάμεις. Για την κόλληση των μαγνητών στον δίσκο χρησιμοποιούνται κόλλες βασισμένες σε σιλικόνη ή ακρυλικά. Η ελάχιστη επιτρεπτή διατμητική αντοχή των συγκεκριμένων υλικών είναι $20 \cdot 10^6$ Pa .

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν μαγνητική ροή χωρίς την παρουσία τυλίγματος διέγερσης και την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος. Όπως όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, περιγράφονται από τον βρόγχο υστέρησης B-H και επίσης μπορούν να χαρακτηριστούν και ως σκληρομαγνητικά, όπως όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά με ευρύ βρόγχο υστέρησης.

Για την ακρίβεια, η βάση για την εκτίμηση των ιδιοτήτων του μαγνήτη είναι το τμήμα του βρόγχου υστέρησης που διακρίνεται στο αριστερό πάνω τεταρτημόριο στο σχήμα 2.17 και ονομάζεται καμπύλη απομαγνήτισης [19]. Ας μεταφράσουμε αυτό το διάγραμμα με ένα

παράδειγμα. Αν σε ένα τοροειδές δείγμα, το οποίο έχει προηγουμένως μαγνητισθεί, εφαρμόσουμε ανάστροφη ένταση μαγνητικού πεδίου, το πλάτος της πυκνότητας μαγνητικής ροής θα πέσει στο επίπεδο που ορίζεται από το σημείο K. Όταν η ανάστροφη πυκνότητα μαγνητικού πεδίου απομακρυνθεί, η πυκνότητα ροής θα επιστρέψει στο σημείο L σύμφωνα με τον μικρό βρόγχο υστέρησης. Από την εφαρμογή δηλαδή του ανάστροφου πεδίου, μειώθηκε η παραμένουσα μαγνήτιση. Εφαρμόζοντας πάλι την ένταση μαγνητικού πεδίου, η πυκνότητα ροής θα μειωθεί πάλι επιστρέφοντας στο σημείο K και ολοκληρώνοντας έτσι αυτόν τον μικρό βρόγχο. Ο βρόγχος υστέρησης αυτός μπορεί να αντικατασταθεί με μικρό σφάλμα από μια γραμμή από της οποίας την κλίση μπορούμε να βρούμε την μαγνητική διαπερατότητα μ_{rec} . Όσο η αρνητική τιμή της εφαρμοζόμενης έντασης μαγνητικού πεδίου δεν ξεπερνάει την τιμή που εκφράζεται από το σημείο K η μαγνήτιση μπορεί να θεωρεί μόνιμη. Αν όμως εφαρμοσθεί ακόμα μεγαλύτερη αρνητική ένταση μαγνητικού πεδίου H, η πυκνότητα μαγνητικής ροής θα μειωθεί περισσότερο ξεπερνώντας το σημείο K και με την αφαίρεση του πεδίου H θα έχουμε μια νέα χαμηλότερη μαγνητική διαπερατότητα.



Σχήμα 2.17. Καμπύλη απομαγνήτισης, ενέργεια ενός μόνιμου μαγνήτη και μαγνητική διαπερατότητα

Η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r που διακρίνεται στο σχήμα, είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής που αντιστοιχεί στην μηδενική ένταση μαγνητικού πεδίου.

Η ένταση πεδίου H_c , είναι η τιμή της έντασης του πεδίου απομαγνήτισης που χρειάζεται ώστε να μηδενιστεί η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα υλικό που προηγουμένως έχει μαγνητιστεί.

Οι δύο αυτές μεταβλητές, B_r και H_c , μειώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση αυτή εκφράζεται από τους τύπους [19]:

$$B_r = B_{r20} \left[1 + \frac{\alpha_B}{100} (\theta_{PM} - 20) \right]$$

$$H_c = H_{c20} \left[1 + \frac{\alpha_H}{100} (\theta_{PM} - 20) \right]$$

Όπου θ_{pm} είναι η θερμοκρασία του μαγνήτη, B_{r20} και H_{c20} είναι η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής και η ένταση αντίστοιχα στους $20\text{ }^\circ\text{C}$, και $\alpha_B < 0$ και $\alpha_H < 0$ είναι θερμοκρασιακοί συντελεστές με μονάδες μέτρησης $\% / ^\circ\text{C}$.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι η καμπύλη απομαγνήτισης εξαρτάται από την θερμοκρασία.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού B , αναφέρεται σε μεγάλες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου όπου περαιτέρω αύξηση αυτού δεν έχει πλέον επίδραση στην πυκνότητα μαγνητικής ροής. Στην περιοχή του κορεσμού η ευθυγράμμιση του πεδίου είναι στην ίδια διεύθυνση με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο.

Η μαγνητική διαπερατότητα μ_{rec} , είναι ο λόγος της πυκνότητας μαγνητικής ροής προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο της καμπύλης απομαγνήτισης :

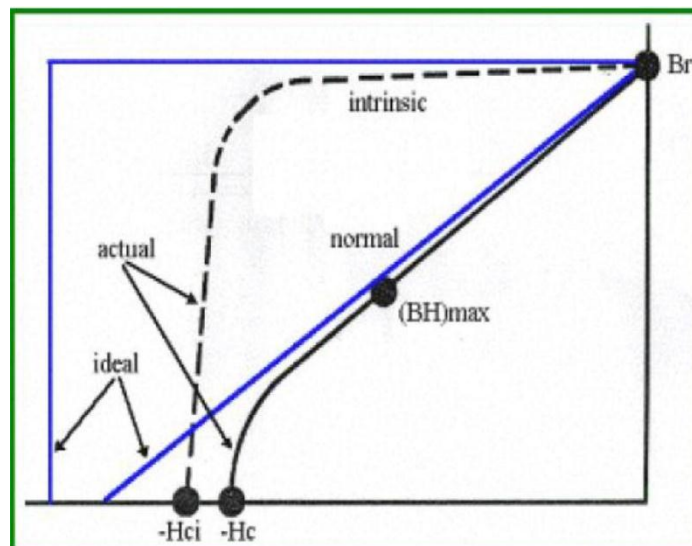
$$\mu_{rec} = \mu_0 \mu_{rrec} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

Όπου η σχετική μαγνητική διαπερατότητα παίρνει τιμές $\mu_{rrec} = 1 \dots 4.5$

Η μέγιστη μαγνητική ενέργεια ανά μονάδα που παράγεται από ένα μόνιμο μαγνήτη σε έναν εξωτερικό χώρο είναι ίση με τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας ανά όγκο:

$$w_{max} = \frac{(BH)_{max}}{2} \quad \text{J} / \text{m}^3$$

Όπου το γινόμενο $(BH)_{max}$ αναφέρεται στο σημείο μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης με συντεταγμένες τα B_{max} και H_{max} .



Σχήμα 2.18. Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης

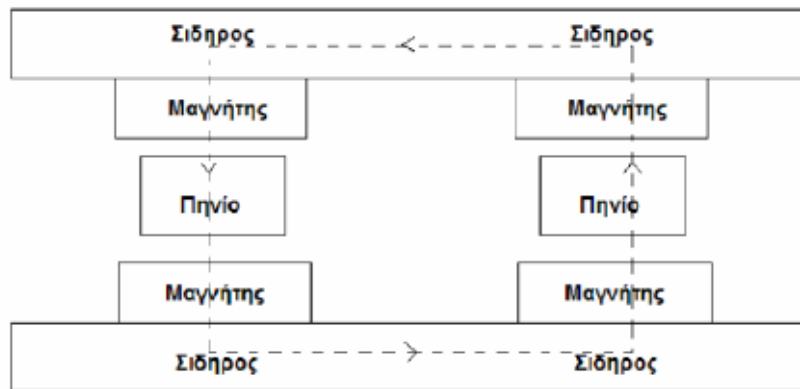
Ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισής του, που φαίνεται παραπάνω. Στην καμπύλη αυτή μας ενδιαφέρει το μέγεθος της παραμένουσας μαγνήτισης B_r (Tesla) περισσότερο, καθώς και η συνεχής δύναμη H_c (kA/m). Γενικά, ο μαγνήτης πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο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

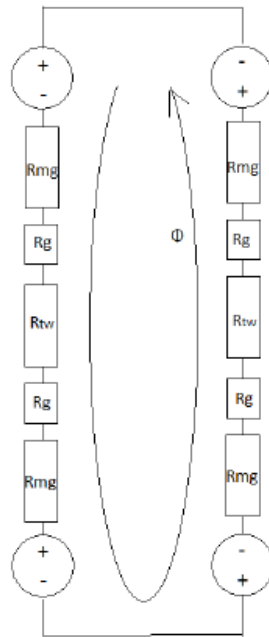
$$B_{mg} = \frac{B_r}{2} \quad (2.16)$$

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



Σχήμα 2.20. Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος έχει γίνει στο [19] από όπου προκύπτει η σχέση:

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

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 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 περίπτωση 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 [19] 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 [7].

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 [7].

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 ανά αγωγό
- ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα
- ρ_{cu} η ειδική αντίσταση του αγωγού

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 υπόψη στο παρόν κείμενο. Επιπλέον απώλειες προκαλεί και ο σίδηρος που συγκρατεί του 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 γεννήτριες δίνεται ο τύπος:

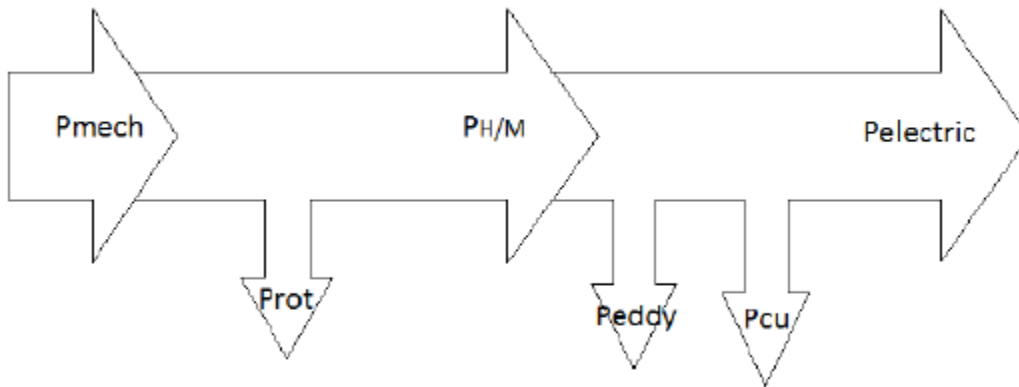
$$P_{rot} = 0.06k_{fb}(m_r + m_{sh})n \quad (2.21)$$

Όπου:

- k_{fb} συντελεστής τριβών με τιμές $1-3 \text{ m}^2/\text{s}^2$
- 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 2.21. 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.

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

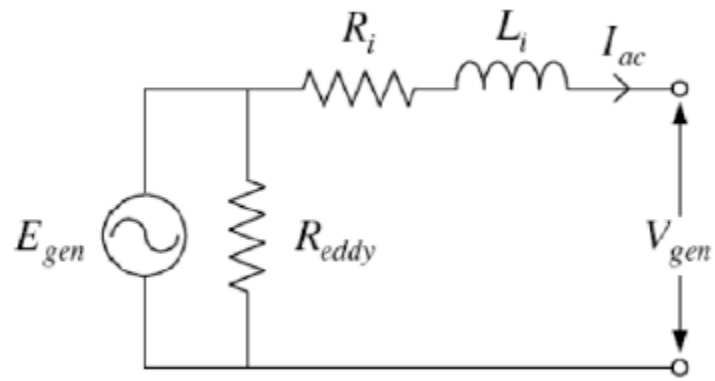
Στη συνέχεια αφαιρώντας τις απώλειες του τυλίγματος (δινορρευμάτων και ωμικές) προκύπτει η ηλεκτρική ισχύς (ισχύς εξόδου):

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

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 δινορρευμάτων 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 2.22. Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας

Η απόδοση στη συνέχεια υπολογίζεται από τον τύπο:

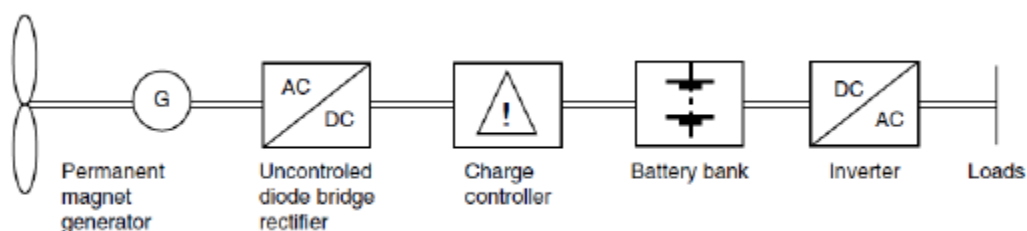
$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (2.22)$$

Κεφάλαιο 3: Σχεδίαση και διαστασιολόγηση ανεμογεννήτριας αξονικής ροής

3.1 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 της μικρής ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές φαίνεται στο σχήμα 3.1. [25].



Σχήμα 3.1. 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 εναλλασσόμενη 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 [18].

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 αποδεσμεύει 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 ακροπτερυγίου 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.

3.2 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 3m.

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

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R_t^2 v_w^3 \quad (3.1.)$$

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:

$$P_{\eta\lambda,nom} = \frac{P_{air,nom}}{\eta} \quad (3.2.)$$

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, επαναυπολογίζεται 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 [8] 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). Για τις στροφές ισχύει:

$$\lambda = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} = \frac{2\pi n}{60} \frac{\omega R_{turb}}{v_w} \rightarrow n = \frac{60 v_w \lambda}{2\pi R_{turb}} \quad (3.4)$$

- 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 $v_w = v_{w, nom} = 10 \frac{m}{s} \rightarrow n_{nom} = \frac{60 \cdot 10 \cdot 5.5}{2 \cdot \pi \cdot R_{turb}}$

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_f , 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:

$$V_{ac} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3} \cdot 1.35}$$

που ισχύει για μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση [26] (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:

$$\frac{E_{f, nom}}{E_{f, cutin}} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \rightarrow E_{f, nom} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} E_{f, cutin} \quad (3.5)$$

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια με ακτίνα πτερωτής 3.0 m:

Γεννήτρια 3.0 m	Cut –in	Ονομαστικά
v_w (ταχύτητα ανέμου)	3 m/s	10 m/s
n (στροφές)	83 rpm	175 rpm
E_f (ΗΕΔ)	22.03	46.45

Πίνακας 3.1. Ονομαστική λειτουργία και λειτουργία cut-in της γεννήτριας που θα κατασκευάσουμε (Παρατήρηση: Η ονομαστική ΗΕΔ πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω κατά τη σύνδεση σε συσσωρευτές)

3.3 Αριθμός πόλων – πηνίων, συχνότητα λειτουργίας

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια ισχύει η σχέση:

$$n_{nom} = \frac{120f}{p} \quad (3.6)$$

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 [20] βρέθηκε ότι ο αριθμός των πόλων και των πηνίων πρέπει, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ροπή, να τηρεί την εξής σχέση:

$$\frac{2Q}{3p} = 0.5 \quad (3.7)$$

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:

24 – 18 28 – 21 32 – 24 36 – 27 40 – 30 44 – 33

Οπότε για την ακτίνα με ακτίνα φτερωτής 1,2m και για $f_{nom} = 50$ Hz:

$$p = \frac{120f_{nom}}{n_{nom}} \approx 34$$

Με δεδομένο ότι από τις προσομοιώσεις για 32 και 36 πόλους σε ακτίνα 3,0m προκύπτει αμελητέα διαφορά στην απόδοση και τη μάζα, επιλέξαμε τους 32 πόλους καθώς ο μαγνήτης θεωρείται το πιο δυσεύρετο από τα υλικά της Α/Γ.

Συνολικά για τις γεννήτριες που προσομοιώσαμε επιλέξαμε αριθμό πόλων και πηνίων σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Ακτίνα φτερωτής (m)	Πόλοι	Πηνία
2.4	24	18
2.7	28	21
3.0	32	24
3.3	36	27
3.6	40	30
3.9	44	33

Πίνακας 3.2. Αριθμός πόλων – πηνίων για γεννήτριες με μαγνήτες νεοδημίου

3.4 Ο στάτης και τα πηνία

3.4.1 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 (2.18):

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

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

- Το διάκενο της γεννήτριας g , το οποίο επιλέγεται ίσο με 3mm. 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 10mm για τους μαγνήτες νεοδυμίου.
- Η παραμένουσα μαγνήτιση B_r πού για το μαγνήτη νεοδυμίου N45 ισούται με $B_{r,N45} = 1,360T$.
- Η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο B_m , θεωρείται γενικά λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στην επιφάνεια του μαγνήτη B 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 πού η διαφορά της αρχικής από τη μετρούμενη τιμή είναι μεγαλύτερη από μια τιμή πού 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_{rec} υπολογίζεται στη σχέση 2.17.

Για τη γεννήτρια που μελετάμε προέκυψε από την προσομοίωση $t_w = 15$ mm. Η συγκεκριμένη επιλογή πάχους στάτη σε συνδυασμό με μηχανικό διάκενο $g=3$ mm προκαλεί μια μείωση της μέγιστης ενέργειας που μπορεί να παράξει το μαγνητικό κύκλωμα κατά 4% περίπου για $h_m=10$ mm και 0,6% για $h_m=20$ mm.

3.4.2 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 [25]. Αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο, Φ_{max} :

$$\Phi_{max} = B_{mg} * w_m * l_a \quad (3.8)$$

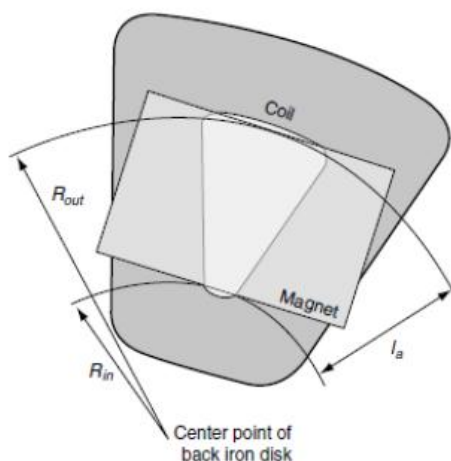
όπου w_m το πλάτος του μαγνήτη και l_a το μήκος του μαγνήτη καθώς και το ενεργό μήκος της γεννήτριας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.

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

$$N_c = \frac{\sqrt{2}E_{f, cutin}}{q * 2\pi * k_w * \Phi_{max} * n_{cutin} * \frac{p}{120}} \quad (3.9)$$

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 3.2. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα και ενεργό μήκος της γεννήτριας

Για την εύρεση του πάχους πλευράς πηνίου w_c χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί το ρεύμα που προβλέπουμε να περνά από τα τυλίγματα της γεννήτριας. Το ονομαστικό ρεύμα λοιπόν της γεννήτριας είναι:

$$I_{a,nom} = \frac{P_{nom}}{3E_{f,nom}\eta} \quad (3.10)$$

Όπου αναφερόμαστε σε ac ρεύμα πριν τον ανορθωτή.

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά το πάχος πλευράς του πηνίου:

$$w_{c,theor} = \frac{I_{a,nom} \cdot N_c}{\sqrt{\frac{2 \cdot c_q \cdot k_f \cdot t_w}{\rho}}} \quad (3.11)$$

Όπου c_q θερμικός συντελεστής ίσος με 0.3 W/cm^2 και $k_f=0.47$ ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου, που αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

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

$$s_{C,theor} = \frac{k_f \cdot w_c \cdot t_w}{N_c} \quad (3.12)$$

Ως πραγματική τιμή του s_c , 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:

$$dc = \sqrt{\frac{4s_c}{\pi}} \quad (3.13)$$

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

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

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

$$J_{max} = \frac{I_{a,nom}}{s_c}$$

η οποία δε θέλουμε να ξεπερνάει κατά πολύ τα $6-7 \text{ A/mm}^2$.

Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται κάποια από τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια με ακτίνα φτερωτής 3.0m:

Γεννήτρια 3.0m	
N_c	26
d_c	2.8 mm
w_c	22 mm

Πίνακας 3.3. Αριθμός σπειρών, διάμετρος χαλκού και πάχος πηνίου

Η συγκεκριμένη διάμετρος χαλκού ωστόσο είναι πολύ μεγάλη για να τυλιχτεί καλά το πηνίο αφού ο χαλκός θα λυγίζει πιο δύσκολα. Για το λόγο επιλέγουμε αντί ενός σύρματος διαμέτρου 2,8mm να χρησιμοποιήσουμε 4 σύρματα διαμέτρου $d_c=1.4\text{mm}$ που εν τέλει έχουν το ίδιο εμβαδόν s_c με τον αρχικό μας υπολογισμό.

3.4.3 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:

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

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.

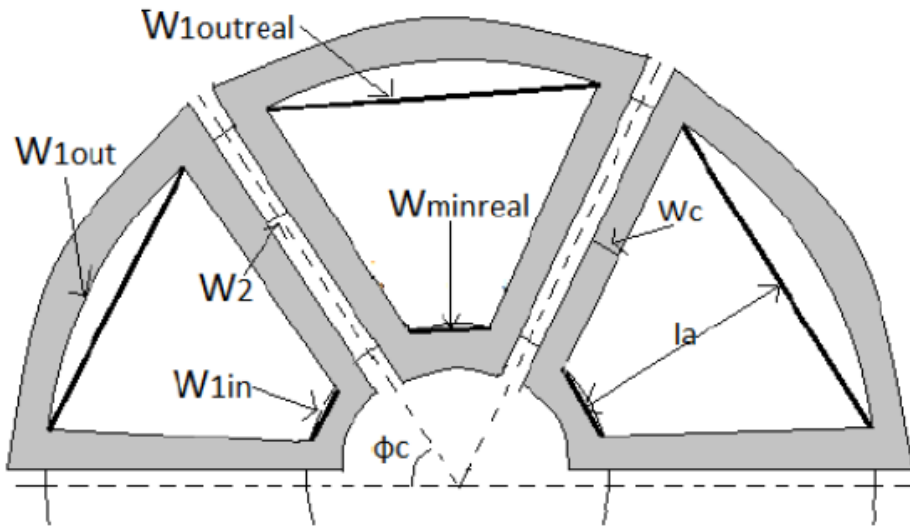
Με βάση μελέτη που έγινε σε πηνία που κατασκευάστηκαν στο χέρι [6], επιλέξαμε $k_f=0.47$ ως μία κατάλληλη τιμή. Μία εσφαλμένη εκτίμηση του συντελεστή πλήρωσης θα μπορούσε να προκαλέσει κατασκευαστικό πρόβλημα, κυρίως στην περίπτωση που αυτός προέκυπτε μικρότερος από όσο είχαμε αρχικά υπολογίσει, γιατί 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 εφαιπτόμενες πλευρές των πηνίων είναι ένας χρήσιμος οδηγός για την ευθυγράμμιση 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 διεξαχθεί ξανά η διαδικασία σχεδίασης [25].

3.4.4. 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 3.3. 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 $w_2 = 0.5\text{mm}$, 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:

$$w_1 = \frac{2\pi r}{Q} - 2w_c - w_2 \quad (3.14)$$

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:

$$w_{1,in}^{real} = 2r \sin(\varphi_c) \quad (3.15)$$

Όπου:

$$\varphi_c = \frac{2\pi w_1}{Q(w_1 + 2w_c + w_2)} \quad (3.16)$$

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 [6] 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 υπόψη 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 [6].

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 [25].

3.5. Οι μαγνήτες

3.5.1. Το είδος του μαγνήτη

Τα διάφορα είδη μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες σαν αυτή που σκοπεύουμε να κατασκευάσουμε αναλύονται στο κεφάλαιο 2. Για τη συγκεκριμένη εργασία επιλέξαμε μαγνήτες νεοδυμίου (NdFeB) λόγω της μαγνητικής τους ισχύος και τη δυνατότητά χρήσης τους σε εφαρμογές με υψηλό λόγο κόστους προς απόδοση. Το γεγονός ότι διαβρώνονται εύκολα αντιμετωπίζεται με κάποιου είδους επίστρωση, στην προκειμένη περίπτωση με εποξική ρητίνη.

Οι μαγνήτες αυτοί κατασκευάζονται σε διάφορους βαθμούς. Ο βαθμός του μαγνήτη εκφράζει πόσο ισχυρός είναι ο τελευταίος με βάση την παραμένουσα μαγνήτισή του. Για τους μαγνήτες νεοδυμίου ξεκινάνε από N30 και φτάνουν μέχρι του πολύ ισχυρούς N52. Για τη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις με βαθμούς N40, N42, N45 και N50 και διαπιστώσαμε ότι η πιο συμφέρουσα επιλογή είναι το N45.

3.5.2. 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 [6], επιλέχθηκαν τελικά οι ορθογώνιοι τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε κι 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 φθηνοί λόγω της ευκολότερης κατασκευής τους. Τα χαρακτηριστικά τους αυτά τους καθιστούν κατάλληλους για τους σκοπούς της εργασίας μας και γενικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους.

3.5.3. Το πάχος του μαγνήτη

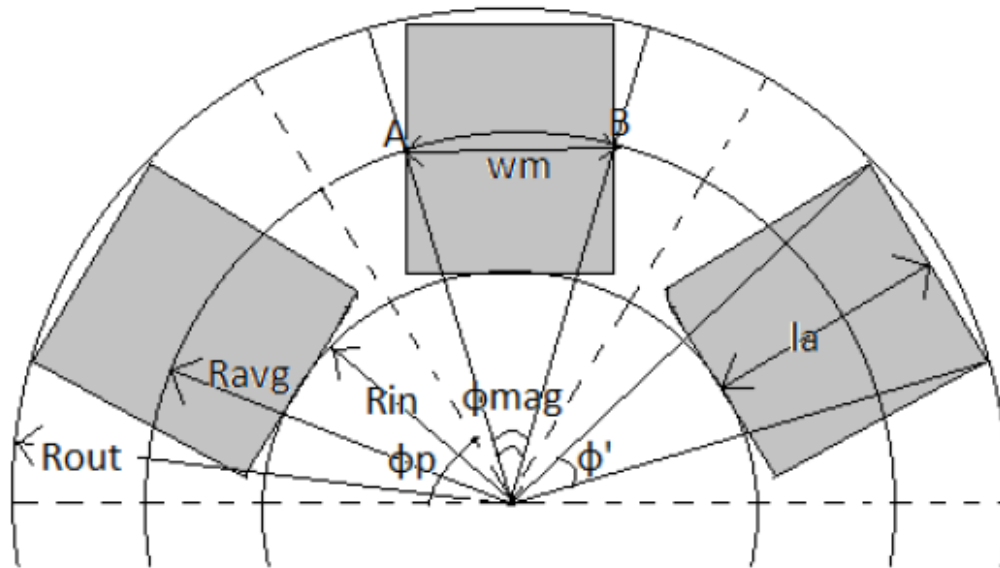
Το πάχος h_m του μαγνήτη είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει αρκετά τη σχεδίαση:

- 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 [6]. Για τη γεννήτρια που κατασκευάσαμε πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις με $h_m=h_r=10\text{mm}$ αλλά και το συνδυασμό $h_m=20\text{mm}$ και $h_r=12\text{mm}$ και η πρώτη περίπτωση αποδείχτηκε πολύ πιο συμφέρουσα οικονομικά.
- επηρεάζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο, δηλαδή την πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής, B .
- επηρεάζει το αξονικό πάχος 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 [6]. 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.

3.5.4. Το πλάτος και το μήκος του μαγνήτη

Το πλάτος w_m και το μήκος l_a του μαγνήτη είναι δυο 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 δυο αυτές διαστάσεις μας απασχολούν ιδιαίτερα, καθώς αποτελούν τις δυο μεταβλητές που βελτιστοποιούνται 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 3.4., 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 3.4. Η γεωμετρία του μαγνήτη

Όπως είπαμε, το πλάτος και το μήκος μαγνήτη είναι οι δύο μεταβλητές βελτιστοποίησης, οπότε η τιμή τους δεν υπολογίζεται από κάποια σχέση ως προς άλλες μεταβλητές, αλλά 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 $w_m=27\text{mm}$ και $l_a=58\text{mm}$.

3.6. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα

Έχοντας υπολογίσει τις απαραίτητες μεταβλητές στις προηγούμενες παραγράφους μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας [25]:

$$R_{in} = \frac{2Q \cdot w_c + Q \cdot w_m}{2\pi} \quad (3.17)$$

$$R_{out} = R_{in} + l_a \quad (3.18)$$

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

$$R_{out} = \frac{R_{in} + R_{out}}{2} \quad (3.19)$$

Κατά τη σχεδίαση μίας γεννήτριας που πρόκειται να κατασκευαστεί τοπικά με χαμηλό κόστος και απλές διαδικασίες, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη 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 [25] αναφέρεται το παράδειγμα μίας γεννήτριας με εξωτερική ακτίνα δίσκων δρομέα 240mm και πάχος 10mm, όπου διαπιστώθηκε ότι οι δίσκοι δεν ήταν τελείως 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 τόννος.

Ένας ακόμη περιορισμός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την εξωτερική ακτίνα είναι ότι οι δίσκοι του δρομέα θα πρέπει να χωράνε στο επιτραπέζιο δράπανο του εργαστηρίου. Το επιτραπέζιο δράπανο είναι ένα συνηθισμένο εργαλείο και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές χαμηλού κόστους για να ανοίξει τρύπες στους δίσκους 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 δράπανο, 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 [25].

Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για γεννήτρια φτερωτής 3,0m:

Γεννήτρια 3.0 m	
R_{in}	290.6 mm
R_{out}	348.9 mm

Πίνακας 3.5. Εσωτερική και εξωτερική ακτίνα

3.7. Οι λόγοι a_i και k_d

Από τη γεωμετρία της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13., 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 a_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:

$$a_i = \frac{w_m \cdot p}{2\pi R_{avg}}$$

Και από τη (2.3) συνεπάγεται:

$$a_i = \frac{w_m \cdot p}{2\pi R_{avg}} \quad (3.20)$$

Με δεδομένη την ακτίνα, η χρήση μεγαλύτερου σε πλάτος μαγνήτη, οδηγεί σε αύξηση του a_i οπότε και αύξηση της ισχύος. Σε περίπτωση που έχουμε δεδομένη την ισχύ, μεγαλύτερες τιμές του a_i θα οδηγήσουν σε μικρότερο όγκο. Επίσης, μεγάλες τιμές του a_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 [19,20], 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 [2].

Στον πίνακα 3.6. παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια που κατασκευάσαμε:

Γεννήτρια 3.0 m	
α_i	0.43
k_d	0.83

Πίνακας 3.6. Λόγοι α_i και k_d

3.8. 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 [25].

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 [19]:

$$F_z = \frac{B_m^2 g}{2\mu_0} S_{PM} \quad (3.21)$$

Όπου S_{PM} ενεργός επιφάνεια των μαγνητών:

$$S_{PM} = \alpha_i \pi (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (3.22)$$

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

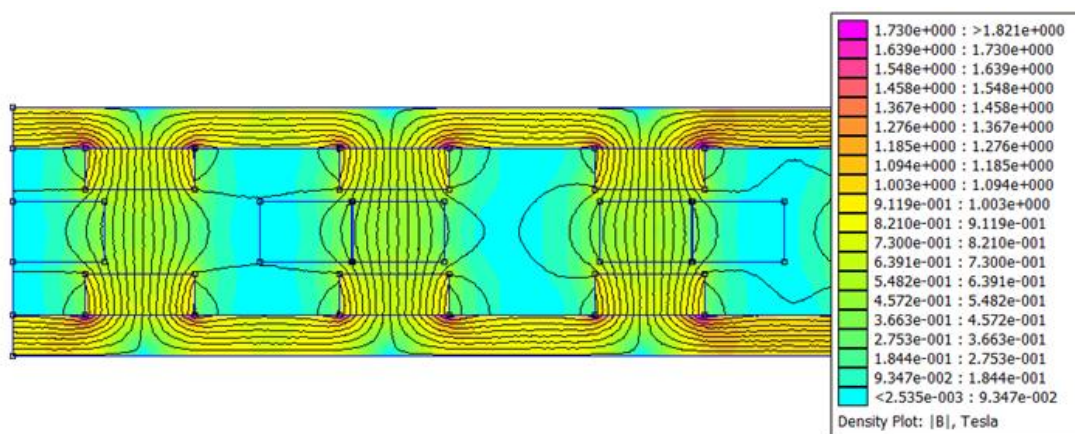
Γενικά, η απόφαση για το πάχος του σιδήρου είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο κριτήρια:

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 επιλεγεί 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 [9].

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 3.5. βλέπουμε από την προσομοίωση στο FEMM ότι ο σίδηρος στις διατάξεις που σχεδιάσαμε δεν έχει κορεστεί. Έχουμε επιλέξει μαγνήτες νεοδυμίου N45, με $h_r=h_m=10\text{mm}$.



Σχήμα 3.5. Διάγραμμα πυκνότητας μαγνητικής ροής για μαγνήτες νεοδυμίου

3.9. 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 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:

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

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:

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

3.9.1. 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 όπως στη δική μας, καταλαβαίνουμε ότι αλλαγές στο κόστος των μαγνητών θα επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματά της.

Η κοστολόγηση των μαγνητών αποτελεί δύσκολη διαδικασία, 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 σχετικά 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.

Εδώ επιλέξαμε να ακολουθήσουμε διαδικασία παρεμφερή με αυτή που ακολουθείται στο [9]. Πραγματοποιήσαμε 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 4 συναρτήσεις κόστους για μαγνήτες νεοδυμίου με διαφορετικό βαθμό (N40, N42, N45, N50).

Κόστος μαγνήτη N40:

$$C_{mag}^{N40} = 0.599 + 0.531 \cdot 10^{-3} \cdot V_{mag}^{N40}$$

Κόστος μαγνήτη N42:

$$C_{mag}^{N42} = 0.536 + 0.535 \cdot 10^{-3} \cdot V_{mag}^{N42}$$

Κόστος μαγνήτη N45:

$$C_{mag}^{N45} = 0.513 + 0.49 \cdot 10^{-3} \cdot V_{mag}^{N45}$$

Κόστος μαγνήτη N50:

$$C_{mag}^{N50} = 0.017 + 1.039 \cdot 10^{-3} \cdot V_{mag}^{N50}$$

Όπου ο όγκος, με δεδομένο ότι έχουμε επιλέξει ορθογώνιους μαγνήτες) και στις 4 σχέσεις είναι:

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

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 υπολογίζεται:

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

Όπου $\rho_{mag} = 7.5 \frac{g}{cm^3}$ για όλους τους βαθμούς μαγνητών νεοδυμίου.

3.9.2. Ο σίδηρος

Θα κοπούν δυο 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 λογική ότι κατά την παρασκευή ενός δίσκου με σπή 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 κιλό σιδήρου υπολογίζεται:

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

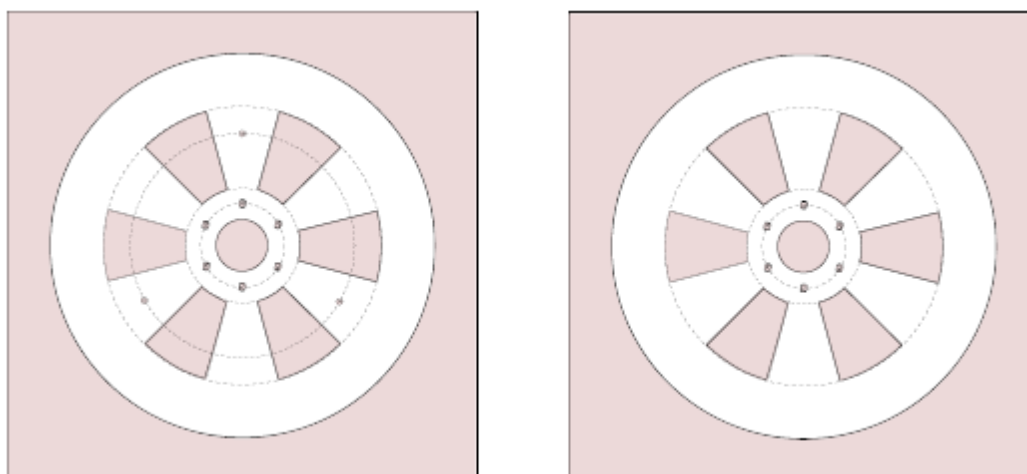
Όπου ο όρος 1.23 αντιπροσωπεύει το ΦΠΑ 23%.

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

$$V_{Fe}^{used} = 2 \cdot \pi R_{out}^2 h_r - 0.4 \cdot 2 \cdot \pi R_{in}^2 h_r$$

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

Ο όρος $0.4 \cdot 2 \cdot \pi R_{in}^2 h_r$ αφαιρείται από το συνολικό όγκο αφού ανοίγουμε τρύπες στους δίσκους προκειμένου μειωθεί η συνολική μάζα αλλά και να επιτευχθεί καλύτερος εξαερισμός της γεννήτριας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6. Οι σιδερένιοι δίσκοι της γεννήτριας που θα κατασκευάσουμε

3.9.3. 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:

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

3.9.4. 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 και καλύπτει μια επιφάνεια-δαχτυλίδι **Rout-Rin**, χωρίς να θεωρούμε ότι υπάρχει ρητίνη εκεί όπου βρίσκεται ο χαλκός.

Για τη ρητίνη στο δρομέα (δύο δίσκοι):

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

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:

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

$$\text{Όπου } \rho_{resin} = 1.36 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Για το κόστος:

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

3.9.5 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 μεγαλύτερο (*extra*) από το περιγεγραμμένο στον κύκλο ακτίνας R_{out} τετράγωνο. Τα 3 χρησιμοποιούνται στο στάτη και τα 6 στους δρομείς. 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 3.7 παρουσιάζονται κάποια από τα παραπάνω μεγέθη υπολογισμένα για τη γεννήτρια που κατασκευάσαμε:

Γεννήτρια 3.0 m	
Συνολικό κόστος	961€
Κόστος μαγνητών	584€
Κόστος χαλκού	119€
Συνολική μάζα	61.43 kg
Συνολικός όγκος	23.32 dm^3

Πίνακας 3.7. Βασικά μεγέθη της γεννήτριας προς κατασκευή

Κεφάλαιο 4: Λογισμικό Προσομοίωσης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικά το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση και την προσομοίωση των γεννητριών που θέλουμε να μελετήσουμε. Πιο συγκεκριμένα, η διαστασιολόγηση έχει μοντελοποιηθεί, οπότε παρά το πλήθος των μεταβλητών που εμπεριέχονται στην συγκεκριμένη διαδικασία, η μελέτη αρκετών διατάξεων και σε διάφορες ισχύς γίνεται πιο εύκολη. Επίσης παρουσιάζονται και αναλύονται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια, όπου και θα δώσουμε βάρος στη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων βάση των εφαρμογών που θα χρησιμοποιηθούν οι συγκεκριμένες γεννήτριες.

4.1 Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave

Πρόκειται για απλό λογισμικό που μοιάζει πολύ με τις γλώσσες Pascal και C. Χρησιμοποιείται για αρκετούς λόγους, όπως είναι η ευκολία στην υλοποίηση της μοντελοποίησης, η δυνατότητα χρήσης πολλών έτοιμων συναρτήσεων και toolboxes που περιλαμβάνει, κάνοντας έτσι εργασίες όπως η λύση πολυωνύμων ή ο μετασχηματισμός Fourier να φαίνονται απλές, καθώς και ο ιδανικός συσχετισμός του με το FEMM, πρόγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται επαναληπτική χρήση της διαστασιολόγησης με ευκολία, κάτι που θα φανεί πολύ χρήσιμο κυρίως στην διαδικασία της βελτιστοποίησης όπου και θα εξετάσουμε τις σχεδιαστικές μεταβλητές που θα προκύπτουν για τις βελτιστοποιήσεις διαφορετικών σχεδιαστικών κριτηρίων στις διάφορες ισχύς.

4.2 Το λογισμικό FEMM

Μετά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης και της βελτιστοποίησης ορισμένων μεταβλητών βάσει των κριτηρίων που έχουμε θέσει, απαιτείται η προσομοίωση της γεννήτριας σε κατάλληλο λογισμικό, ώστε να επαληθευθούν οι στόχοι της διαστασιολόγησης (ισχύς, ροπή, απόδοση, ονομαστικό ρεύμα, ονομαστική τάση κ.α.).

Το λογισμικό αυτό, που βασίζεται στη μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (**Finite Element Analysis - FEA**) 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 [6]:

$$A = \nabla \times B$$

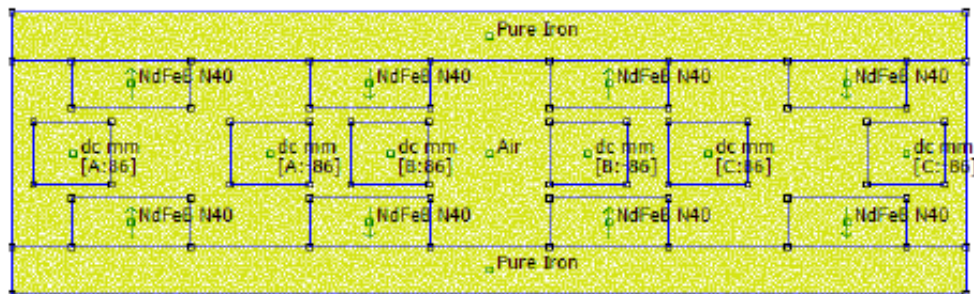
Και από το θεώρημα Stokes βρίσκεται η μαγνητική ροή Φ :

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

4.3 Προσομοίωση της γεννήτριας με συνδυασμό Matlab-FEMM

Η διάταξη της γεννήτριας μπορεί να σχεδιαστεί 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 ικανοποιητικά. 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 ανάπτυσμα αυτής. Το ανάπτυσμα αυτό δεν εξετάζεται ολόκληρο καθώς μπορεί να είναι πολύ μεγάλο, π.χ. 20 πόλοι. Η εργασία αυτή μπορεί να μειωθεί αναλύοντας μόνο ένα κομμάτι, 4 πόλους για παράδειγμα και θεωρώντας ύστερα περιοδικές συνθήκες στα σύνορα. Με τις συνθήκες αυτές το ίδιο το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται ότι αριστερά και δεξιά της διάταξης, αυτή συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο, χωρίς να χρειάζεται να την έχουμε σχεδιάσει.

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 4.1. Τομή γεννήτριας στη μέση ακτίνα στο FEMM

Το μειονέκτημα του FEMM είναι η στατικότητα του. Δεν μπορεί να δεχθεί μεταβλητές εισόδους. Για την λύση του συγκεκριμένου προβλήματος ο συνδυασμός MATLAB-FEMM είναι κατάλληλος, καθώς υπάρχει δομική επικοινωνία μεταξύ αυτών. Ό,τι κάνει ακριβώς ο σχεδιαστής στο FEMM με το χέρι γνωρίζοντας τις ακριβείς διαστάσεις της γεννήτριας, μπορεί να γραφεί με κώδικα στο MATLAB με την διαφορά πως όλες οι διαστάσεις αναπαρίστανται με μεταβλητές. Η εντολή για παράδειγμα, `mi_addsegment(x1,y1 ,x2,y2)` προσθέτει μια γραμμή που ενώνει τα σημεία $(x1 ,y1)$ και $(x2,y2)$ της σχεδίασης στο FEMM. Οι μεταβλητές αυτές μπορούν οποιαδήποτε στιγμή να αλλάξουν και να προκύψει μια νέα διάταξη. Με τη λογική αυτή γράφεται κώδικας στο MATLAB για την δημιουργία στο FEMM μια γεννήτριας αξονικής ροής απροσδιόριστων διαστάσεων.

Άλλο ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται λόγω της στατικότητας του FEMM και λύνεται με την χρήση του MATLAB, είναι πως δεν υπάρχει άμεσος τρόπος για να αντιληφθεί το πρόγραμμα 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. Η διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα και η λογική είναι η εξής: Επιλέγεται το βήμα μετακίνησης και αυτή γίνεται διαγράφοντας το πλάτος της διάταξης που αντιστοιχεί σε ένα τέτοιο βήμα από τη μία πλευρά και σχεδιάζοντας το στην άλλη, διατηρώντας πάντα τη συμμετρία. 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 μιας ηλεκτρικής περιόδου (2 πολικά βήματα) για να λάβει ο σχεδιαστής όλες τις απαραίτητες πληροφορίες.

4.4 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.

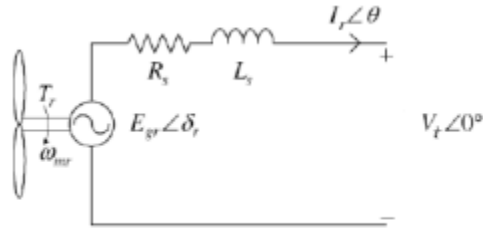
Δίνονται σαν είσοδοι από το χρήστη οι στροφές και το ρεύμα, τα οποία λαμβάνουν τιμές από μηδέν μέχρι τις ονομαστικές τους. Γνωρίζοντας τις στροφές εύκολα υπολογίζουμε τη συχνότητα και την τάση:

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

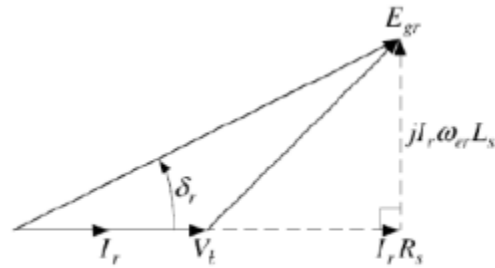
$$E_f = qFluxoc \frac{p}{2} \frac{2pm}{60} \quad (5.2)$$

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 παραγωγή 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 [6].

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



(α)



(β)

Σχήμα 4.2. (α) Το ισοδύναμο κύκλωμα και (β) το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα

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

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{I_{rms} 2\pi f L_s}{E_f} \right) \quad (4.3)$$

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.

$$V_t = E_f \cos \delta - I_{rms} q R_c \quad (4.4)$$

Όπου $q R_c$ η αντίσταση μίας φάσης, υπολογισμένη και αυτή στο κεφάλαιο 2.

Έτσι υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο:

$$P_{\eta\lambda} = 3V_t I_{rms} \quad (4.5)$$

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:

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

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

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

Τέλος υπολογίζεται η απόδοση:

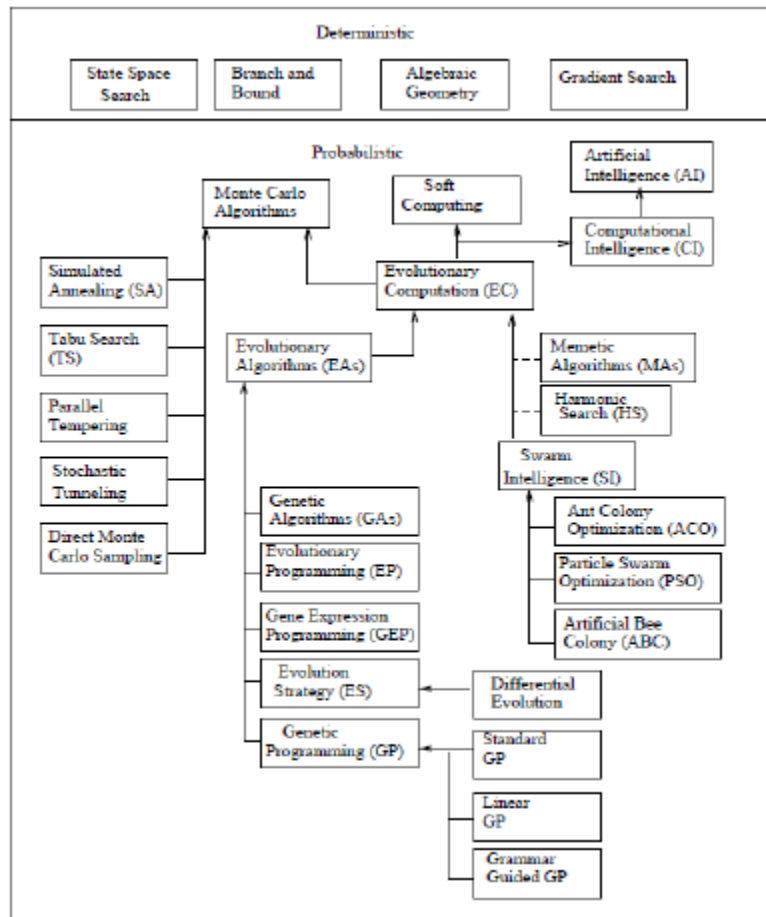
$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (4.6)$$

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.

4.5 Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης

Η επιστήμη της ολικής βελτιστοποίησης είναι ένας τομέας που αναπτύσσεται διαρκώς. Με τον όρο ολική βελτιστοποίηση εννοούμε τη διαδικασία εντοπισμού της καλύτερης δυνατής υποψήφιας λύσης ενός προβλήματος μέσα σε ένα λογικό χρονικό όριο. Παίζει σπουδαίο ρόλο σε επιστήμες όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η υπολογιστική επιστήμη και σε έρευνα που σχετίζεται με αυτά τα αντικείμενα, από την οποία προκύπτουν εφαρμογές στην μηχανική, τα οικονομικά και άλλα πεδία.

Τα προβλήματα ολικής βελτιστοποίησης είναι δύσκολο να λυθούν. Υπάρχει μια ποικιλία τεχνικών που εφαρμόζονται σε αυτά. Γενικά, οι αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τους ντετερμινιστικούς και τους πιθανολογικούς αλγόριθμους [27]. Στο παρακάτω διάγραμμα σχηματοποιείται η κατηγοριοποίηση τους.



Σχήμα 4.3. Ταξινόμηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συχνά όταν υπάρχει ξεκάθαρος συσχετισμός ανάμεσα στην πιθανή λύση και την αντικειμενική συνάρτηση. Σε αυτήν την περίπτωση ο χώρος λύσεων μπορεί να διερευνηθεί αποτελεσματικά. Αν ο συσχετισμός δεν είναι ξεκάθαρος ή οι διαστάσεις του χώρου λύσεων είναι μεγάλες τότε θα είναι πολύ δύσκολο για έναν τέτοιο αλγόριθμο να βρει το ολικό βέλτιστο. Με λίγα λόγια, στις κλασικές μεθόδους, υπάρχουν λίγες ή και καθόλου πληροφορίες για την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να βρουν το ολικό βέλτιστο. Για την ακρίβεια, θα είναι σαν να ψάχνουν μέσα σε ένα μαύρο κουτί στην περίπτωση που ο χώρος λύσεων και η αντικειμενική συνάρτηση είναι αρκετά πολύπλοκα. Η χρησιμοποίησή τους θα ήταν πιθανώς μια ατελείωτη απαρίθμηση του χώρου λύσεων ή απλά μια έρευνα σε ένα τοπικό χώρο αντί για ολόκληρο.

Στην περίπτωση λοιπόν που δεν υπάρχουν πληροφορίες για την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης, οι πιθανολογικοί αλγόριθμοι αρχίζουν και κερδίζουν έδαφος. Οι στοχαστικές προσεγγίσεις μπορούν να ανταπεξέλθουν σε τέτοιον είδους προβλήματα πιο εύκολα και πιο αποτελεσματικά από τις αντίστοιχες ντετερμινιστικές. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των αλγορίθμων είναι πως είναι απλοί και εύκολοι στην ενσωμάτωσή τους στη διαδικασία επίλυσης καθώς και ότι ανταποκρίνονται αρκετά καλά σε περιπτώσεις όπου η αντικειμενική συνάρτηση εξελίσσεται δυναμικά. Οι μέθοδοι **Monte Carlo** είναι μια κατηγορία

αλγόριθμων που αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους τυχαίες διερευνήσεις και οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι προσεγγίσεις που βασίζονται στις μεθόδους **Monte Carlo**.

Μια πολύ σημαντική διαδικασία σε πολλούς πιθανολογικούς αλγόριθμους, είναι η συλλογή των τρεχουσών πληροφοριών από τον αλγόριθμο, οι οποίες θα βοηθήσουν να αποφασιστεί ποια θα είναι η επόμενη υποψήφια λύση. Συνήθως χρησιμοποιούνται στατιστικές πληροφορίες από δείγματα του χώρου λύσεων ή κάποια αφηρημένα μοντέλα από φυσικά φαινόμενα. Τέτοιου είδους πολύ γνωστοί αλγόριθμοι είναι οι **Evolutionary Algorithms (EAs)** που είναι εμπνευσμένοι από την επιλογή και επιβίωση του ισχυρότερου στον βιολογικό κόσμο και χρησιμοποιούν κάποιους μηχανισμούς από το φυσικό κόσμο, όπως είναι η αναπαραγωγή, η μεταλλαγή και η επιλογή ώστε να προκύψουν πιθανές λύσεις σε κομμάτια του χώρου λύσεων όπου είναι πιο πιθανό να βρίσκεται η βέλτιστη λύση.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (**Genetic Algorithms - GAs**) αποτελούν στοχαστικές προσεγγίσεις που βασίζονται σε πληθυσμούς. Οι αλγόριθμοι αυτοί προσομοιώνουν την διαδικασία της φυσικής εξέλιξης, όπου η διαδικασία συντελείται από μηχανισμούς μεταλλαγής, διασταύρωσης και επιλογής. Οι αλγόριθμοι EPs (**Evolutionary Programming**) που ανήκουν στην ίδια κατηγορία με τους **GAs**, δεν περιλαμβάνουν την διασταύρωση και βασίζονται στη μεταλλαγή και την επιλογή όπως και οι αλγόριθμοι Evolution Strategy (ESs), οι οποίοι βασίζονται στην ιδέα της προσαρμογής και της εξέλιξης. Η βασική διαφορά αυτών των δύο κατηγοριών είναι πως οι αλγόριθμοι EPs δεν χρησιμοποιούν κάποιο μηχανισμό ανασχεδιασμού και χρησιμοποιούν μια στοχαστική επιλογή καθώς οι αλγόριθμοι EPs χρησιμοποιούν ντετερμινιστική διαδικασία απομακρύνοντας κάθε φορά τη χειρότερη περίπτωση από τον πληθυσμό.

Η μέθοδος **Swarm Intelligence (SI)** είναι μια ακόμα σημαντική περίπτωση που ανήκει στην κατηγορία **Evolutionary Computation** (του εξελικτικού υπολογισμού). Η λειτουργία αυτών των αλγόριθμων βασίζεται στη συλλογική συμπεριφορά των πουλιών ή μελισσών που ψάχνουν σε έναν αγρό το σημείο με την υψηλότερη πυκνότητα ανθών. Οπότε η Swarm Intelligence είναι η ιδιότητα ενός συστήματος όπου η συλλογική συμπεριφορά κάποιων παραγόντων αλληλεπιδρά τοπικά με το περιβάλλον και καθώς συνεχίζεται αυτή η διαδικασία καταλήγει σε ένα ολικό αποτέλεσμα. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με μια μέθοδο που ανήκει στην κατηγορία SI, την μέθοδο Particle Swarm Optimization (**PSO**) που αναλύεται παρακάτω.

4.6. Βελτιστοποίηση σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών

Η πολυπλοκότητα των ηλεκτρικών μηχανών κάνει την βελτιστοποίηση της σχεδίασης τους ένα αρκετά δύσκολο αντικείμενο. Σε πολλές περιπτώσεις οι προδιαγραφές της βέλτιστης αυτής σχεδίασης έρχονται σε αντιδιαστολή μεταξύ τους, για παράδειγμα η υψηλή πυκνότητα ισχύος με τον χαμηλό όγκο των μαγνητών [28]. Η μη γραμμικότητα στα υλικά και η πολυπλοκότητα στις σχέσεις πολλών γεωμετρικών παραμέτρων μετατρέπουν την βέλτιστη σχεδίαση της μηχανής σε μια βελτιστοποίηση πολλών παραμέτρων. Αυτό κάνει τους περισσότερους κλασσικούς αλγόριθμους μη αποδοτικούς για ένα τέτοιο πρόβλημα [28] και η διαδικασία αυτή πρέπει να τυποποιηθεί σαν ένα μη γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης με περιορισμούς [29].

Γενικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να ορισθεί ως εξής [29,30]:

Ξεκινώντας από το αρχικό διάνυσμα σχεδιαστικών παραμέτρων:

$$\overline{X}_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0D}], \overline{X}_0 \in R^D,$$

πρέπει να βρεθεί το τελικό διάνυσμα:

$$\overline{X}_m = [x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mD}], \overline{X}_m \in R^D$$

που θα ικανοποιεί τη συνάρτηση βελτιστοποίησης:

$$f(\overline{X}_m) = [f_1(\overline{X}_m), f_2(\overline{X}_m), \dots, f_k(\overline{X}_m)].$$

Και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς:

$$g_i(\overline{X}_m) \leq 0 \text{ for } i=1,2,\dots,n.$$

4.6.1. Βελτιστοποίηση με τη μέθοδο Particle Swarm Optimization (PSO)

Το **PSO** είναι μια εξελικτική υπολογιστική τεχνική που αναπτύχθηκε το 1995 από τους **Kennedy** και **Eberhart** [31] και είναι βασισμένη στα μοντέλα συμπεριφοράς των σμηνών από μέλισσες σε μια πεδιάδα προσπαθώντας να εντοπίσουν το σημείο με την υψηλότερη πυκνότητα λουλουδιών. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι είναι αρκετά αποδοτική στην βελτιστοποίηση δύσκολων πολυδιάστατων προβλημάτων σε διάφορα επιστημονικά πεδία [31,32].

Η πρόκληση στην βελτιστοποίηση σχεδίασης μηχανών είναι ότι οι ηλεκτρικές μηχανές είναι σύνθετα και μη γραμμικά προβλήματα, κάτι που απαιτεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να έχει την ικανότητα να αποφύγει τοπικά ελάχιστα. Επιπρόσθετα, από την στιγμή που οι υπολογισμοί στην συγκεκριμένη διαδικασία είναι επίπονοι, ο αλγόριθμος πρέπει να είναι επίσης αποδοτικός στην αναζήτηση ώστε να «τρέχει» σε μικρότερους σχεδιαστικούς κύκλους.

Αναλυτικά η μέθοδος βελτιστοποίησης PSO:

Αρχικά, πριν αρχίσει να «τρέχει» ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης πρέπει να ορισθεί η συνάρτηση που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Ένα τέτοιο παράδειγμα συνάρτησης, από μια σχεδίαση ηλεκτρικής μηχανής ακτινικής ροής είναι το παρακάτω [33]:

$$\text{output} = \text{Volume} * 10000 + \text{Weight} + (1 - \text{Eff}) * 1000 + \text{WtMgt} * 2 - \text{TperA} * 10$$

Για να συνυπολογιστούν οι διάφορες προδιαγραφές για τη σχεδίαση του κινητήρα μονίμων μαγνητών στο συγκεκριμένο παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιηθεί πέντε διαφορετικοί δείκτες ή παράμετροι βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, ο όγκος (volume (m³)), το βάρος (weight (kg)), η απόδοση (efficiency (0-100%)), το βάρος των μαγνητών (weight of the magnets (kg)) και η ροπή ανά Ampere (torque per ampere (Nm/A_{rms})) στις ονομαστικές συνθήκες. Για τη μηχανή που σχεδιάστηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση οι τιμές των παραπάνω μεγεθών κατά αντιστοιχία είναι 0.002-0.005 m³, 20-50 kg, 0.5-1, 0.5-2kg και 2-5

Nm/A_{rms} . Κάθε όρος στη συνάρτηση αρχικά κανονικοποιείται ώστε να έχουν όλοι σχετικά το ίδιο πλάτος και στη συνέχεια με συντελεστές βάρους δίνεται η ανάλογη σημασία (όσον αφορά τη βελτιστοποίηση) σε κάθε παράμετρο.

Η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος περιγράφεται περιληπτικά στα παρακάτω βήματα [31] :

- Ορίζεται ο χώρος της λύσης: πιο συγκεκριμένα ορίζονται οι παράμετροι που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε και επιλέγεται ο αριθμός των σωματιδίων που θα αποτελούν το σμήνος.
- Ορίζεται η συνάρτηση βελτιστοποίησης με τον τρόπο που είδαμε πριν.
- Αρχικοποιούμε τις θέσεις και τις ταχύτητες του τυχαίου σμήνους.
- Τα σωματίδια πετάνε στο χώρο λύσης συστηματικά. Τα ακόλουθα βήματα πραγματοποιούνται από το κάθε σωματίδιο ξεχωριστά :
 - I. Υπολογίζεται η συνάρτηση για το κάθε σωματίδιο και συγκρίνεται με το ολικό βέλτιστο "global best" ($gbest$) και το προσωπικό βέλτιστο του κάθε σωματιδίου "personal best" ($pbest$).
 - II. Ανανεώνεται η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου ανάλογα με την σχετική τιμή του $gbest$ και του $pbest$ σύμφωνα με τη σχέση :

$$v_n = \omega * v_n + c1rand() * (pbest_n - x_n) + c2rand() * (gbest_n - x_n)$$

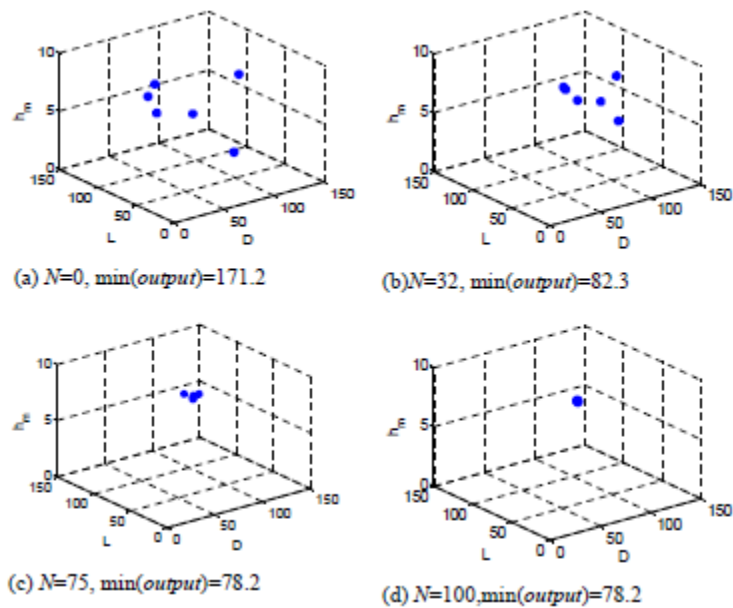
- Μετακινείται το σωματίδιο: η ταχύτητα εφαρμόζεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα Δt , το οποίο συνήθως έχει επιλεχθεί να είναι 1 και η νέα θέση είναι :

$$x_n = x_n + \Delta t * v_n$$

- Επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το 4^ο βήμα και μετά, με αυτόν τον τρόπο το κάθε σωματίδιο μετακινείται για διακριτά χρονικά διαστήματα έως ότου τα κριτήρια τερματισμού ή σύγκλισης ικανοποιηθούν.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε επιλέξει 6 σωματίδια για τον αλγόριθμο, τα οποία θα ψάξουν το συνδυασμό των τιμών των μεταβλητών που βελτιστοποιούνται για τις οποίες η συνάρτηση θα έχει την ελάχιστη τιμή. Κάθε σωματίδιο αποτελεί στην ουσία δοκιμή σχεδίασης της μηχανής, που αντιπροσωπεύεται από τον υπολογισμό της τιμής της συνάρτησης βελτιστοποίησης (αντικειμενικής συνάρτησης) και στην ουσία, στο συγκεκριμένο παράδειγμα [33], αποτελεί ένα διάλυμα τιμών των 3 μεταβλητών εισόδου, οι οποίες είναι το μήκος της μηχανής L , η διάμετρος της μηχανής D και το πάχος του μαγνήτη hm . Στην περίπτωση που υπάρχουν περιορισμοί στη σχεδίαση, όπως για παράδειγμα ο μαγνητικός κορεσμός στα δόντια του στάτη, αυτά θα μπουν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σαν «ποιινές». Πιο συγκεκριμένα, αν η πυκνότητα ροής ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο κατώφλι τότε μια τιμή μεγάλου πλάτους θα προστίθεται στη συνάρτηση και θα δείχνει στην ουσία και στα υπόλοιπα σωματίδια ότι η συγκεκριμένη σχεδίαση είναι μακριά από τη βέλτιστη, απομακρύνοντας τα από το συγκεκριμένο σημείο στο χώρο λύσεων [34]. Στην εικόνα που ακολουθεί [34] βλέπουμε τα 6 σωματίδια τα οποία ξεκινάνε από τυχαία σημεία στον χώρο

λύσεων και καταλήγουν μετά από 100 ανακυκλώσεις να συγκλίνουν όλα στο σημείο όπου βρίσκεται η βέλτιστη λύση.



Σχήμα 4.4. Οι θέσεις των σωματιδίων καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται

Τρέχοντας τον αλγόριθμο του **PSO** μερικές φορές θα παρατηρήσουμε πως μας δίνονται μια σειρά από λύσεις οι οποίες διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους και έχουν σχεδόν την ίδια τιμή συνάρτησης βελτιστοποίησης. Παρατίθεται στην συνέχεια ένας πίνακας από το παράδειγμα που προαναφέρθηκε όπου παρατηρούμε πως για δύο διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων D , L , h_m δίνονται δύο σχεδιάσεις με κοινή τιμή συνάρτησης και κριτηρίων βελτιστοποίησης.

	Design A	Design B
D (mm)	112	70.5
L (mm)	90.7	154.6
h_m (mm)	5.6	5.3
Weight (kg)	36.5	31.6
Volume (m^3)	0.0047	0.0048
Efficiency	95.7%	95.6%
Torque per Ampere (Nm/A)	3.8	3.5
Magnetic weight (kg)	1.02	1.0
Output (equation (3.39))	91.2	90.9

Πίνακας 4.1. Δύο εκδοχές βέλτιστης σχεδίασης με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης PSO

Ένα πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση, είναι πως λόγω της ευέλικτης συνάρτησης με τις παραμέτρους που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, μπορούμε να δώσουμε έμφαση με ευκολία σε ότι απαιτεί η εκάστοτε σχεδίαση, βάζοντας για παράδειγμα στον αλγόριθμο μόνο το κριτήριο του βάρους και θέτοντας υπόψη του προγράμματος τα υπόλοιπα κριτήρια σαν περιορισμούς.

4.7. Επαλήθευση ορθότητας PSO

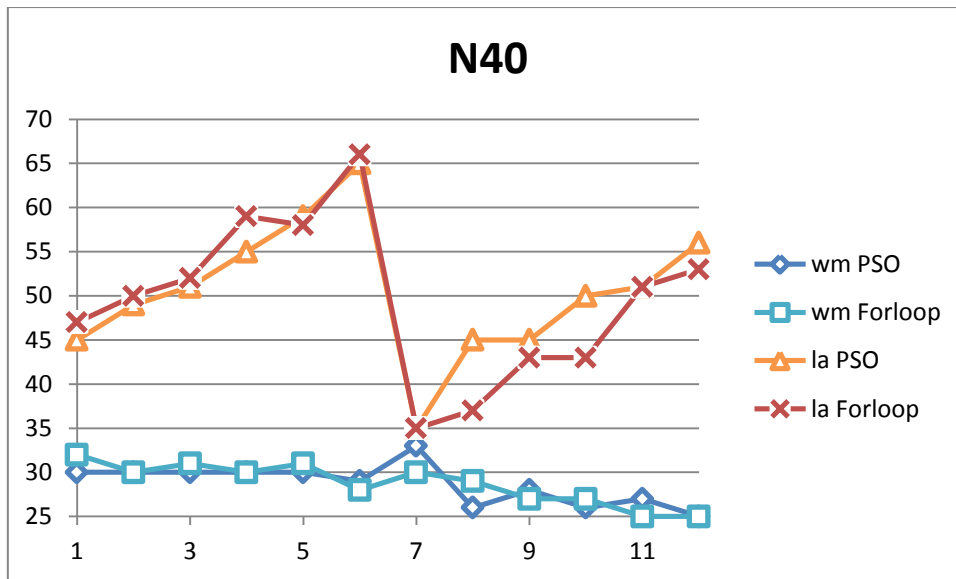
Ο αλγόριθμος PSO που φτιάχτηκε στο [2] παρουσιάζει τεράστιο πλεονέκτημα συγκριτικά με τον αλγόριθμο Brute force Search (BFS στο εξής), που βασίζεται στη χρήση του βρόχου For και πραγματοποιεί σειριακή αναζήτηση, όσον αφορά το χρόνο εκτέλεσης, είναι όμως αμφίβολο το κατά πόσο μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος καθώς αντί του ολικού ελαχίστου είναι πιθανό τα σωματίδια να «εγκλωβίζονται» σε τοπικά ελάχιστα. Προκειμένου να είμαστε σίγουροι για την αποτελεσματικότητα του PSO, συγκρίναμε τα αποτελέσματά του με αυτά του προγράμματος σειριακής αναζήτησης που μπορεί να θεωρηθεί σαφώς πιο αξιόπιστο αφού ελέγχει ολόκληρο το πεδίο ορισμού που έχουμε επιλέξει. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε είναι η εξής:

- Αρχικά προσαρμόσαμε τον αλγόριθμο PSO ώστε αντί τις μεταβλητές a_i και k_d , να βελτιστοποιεί τις διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a . Επίσης στην αντικειμενική του συνάρτηση προσθέσαμε τη μεταβλητή μάζα πολλαπλασιασμένη επί 10 όπως ακριβώς και πρόγραμμα σειριακής αναζήτησης.
- Στη συνέχεια «τρέξαμε τον αλγόριθμο για κάθε είδος μαγνήτη και ακτίνα φτερωτής 5 φορές και κρατήσαμε την καλύτερη τιμή.
- Η επαλήθευση έγινε τρέχοντας το πρόγραμμα σειριακής αναζήτησης και βρίσκοντας για την εκάστοτε ακτίνα σε κάθε είδος μαγνήτη τις βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια:

4.7.1 N40

hm	Rturb (m)	wm				la			
		PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα	PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα
10 mm	2,4	30	32	-6,25%	6,25%	45	47	-4,26%	4,26%
	2,7	30	30	0,00%	0,00%	49	50	-2,00%	2,00%
	3	30	31	-3,23%	3,23%	51	52	-1,92%	1,92%
	3,3	30	30	0,00%	0,00%	55	59	-6,78%	6,78%
	3,6	30	31	-3,23%	3,23%	59	58	1,72%	1,72%
	3,9	29	28	3,57%	3,57%	65	66	-1,52%	1,52%
20 mm	2,4	33	30	10,00%	10,00%	35	35	0,00%	0,00%
	2,7	26	29	-10,34%	10,34%	45	37	21,62%	21,62%
	3	28	27	3,70%	3,70%	45	43	4,65%	4,65%
	3,3	26	27	-3,70%	3,70%	50	43	16,28%	16,28%
	3,6	27	25	8,00%	8,00%	51	51	0,00%	0,00%
	3,9	25	25	0,00%	0,00%	56	53	5,66%	5,66%
M.O.	-	-	-	-0,12%	4,34%	-	-	2,79%	5,53%

Πίνακας 4.2. Σύγκριση PSO – BFS για όλες τις ακτίνες φτερωτής με μαγνήτες N40.

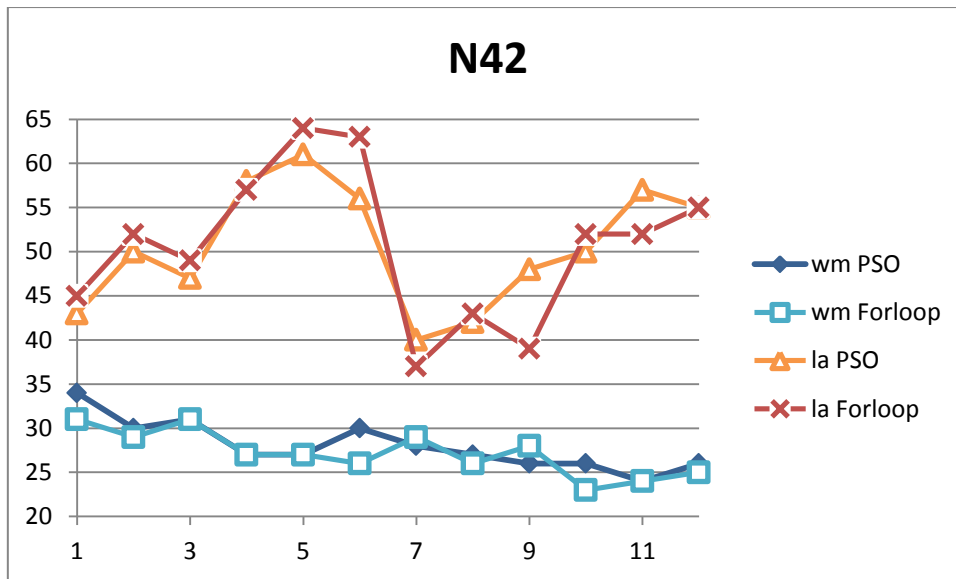


Σχήμα 4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων BFS και PSO για τις διατάξεις με μαγνήτες N40.

4.7.2. N42

hm	Rturb (m)	wm				la			
		PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα	PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα
10 mm	2,4	34	31	9,68%	9,68%	43	45	-4,44%	4,44%
	2,7	30	29	3,45%	3,45%	50	52	-3,85%	3,85%
	3	31	31	0,00%	0,00%	47	49	-4,08%	4,08%
	3,3	27	27	0,00%	0,00%	58	57	1,75%	1,75%
	3,6	27	27	0,00%	0,00%	61	64	-4,69%	4,69%
	3,9	30	26	15,38%	15,38%	56	63	-11,11%	11,11%
20 mm	2,4	28	29	-3,45%	3,45%	40	37	8,11%	8,11%
	2,7	27	26	3,85%	3,85%	42	43	-2,33%	2,33%
	3	26	28	-7,14%	7,14%	48	39	23,08%	23,08%
	3,3	26	23	13,04%	13,04%	50	52	-3,85%	3,85%
	3,6	24	24	0,00%	0,00%	57	52	9,62%	9,62%
	3,9	26	25	4,00%	4,00%	55	55	0,00%	0,00%
M.O.	-	-	3,23%	5,00%	-	-	0,68%	6,41%	

Πίνακας 4.3. Σύγκριση PSO – BFS για όλες τις ακτίνες φτερωτής με μαγνήτες N42.

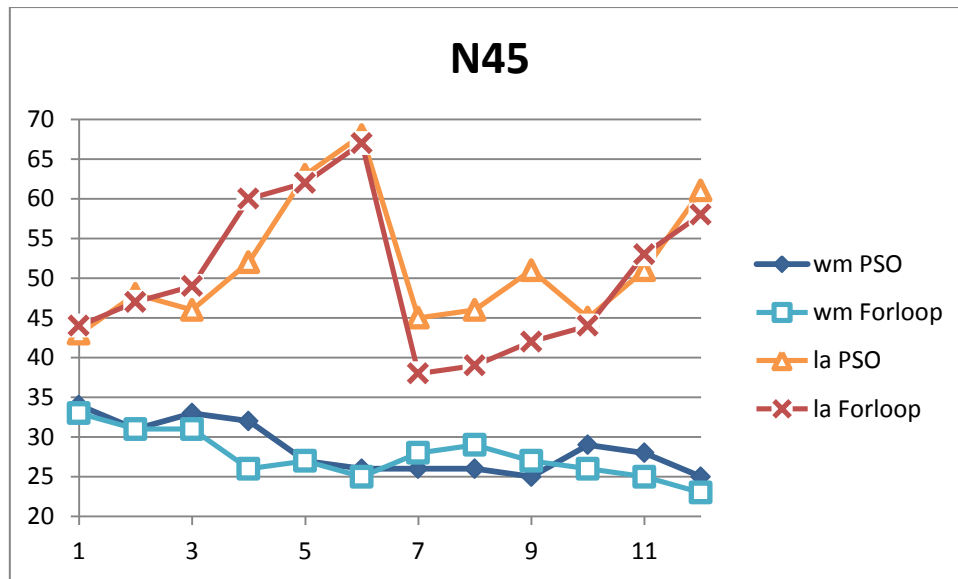


Σχήμα 4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων BFS και PSO για τις διατάξεις με μαγνήτες N40.

4.7.3. N45

hm	Rturb (m)	wm				la			
		PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα	PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα
10 mm	2,4	34	33	3,03%	3,03%	43	44	-2,27%	2,27%
	2,7	31	31	0,00%	0,00%	48	47	2,13%	2,13%
	3	33	31	6,45%	6,45%	46	49	-6,12%	6,12%
	3,3	32	26	23,08%	23,08%	52	60	-13,33%	13,33%
	3,6	27	27	0,00%	0,00%	63	62	1,61%	1,61%
	3,9	26	25	4,00%	4,00%	68	67	1,49%	1,49%
20 mm	2,4	26	28	-7,14%	7,14%	45	38	18,42%	18,42%
	2,7	26	29	-10,34%	10,34%	46	39	17,95%	17,95%
	3	25	27	-7,41%	7,41%	51	42	21,43%	21,43%
	3,3	29	26	11,54%	11,54%	45	44	2,27%	2,27%
	3,6	28	25	12,00%	12,00%	51	53	-3,77%	3,77%
	3,9	25	23	8,70%	8,70%	61	58	5,17%	5,17%
M.O.				3,66%	7,81%			3,75%	8,00%

Πίνακας 4.4. Σύγκριση PSO – BFS για όλες τις ακτίνες φτερωτής με μαγνήτες N45.

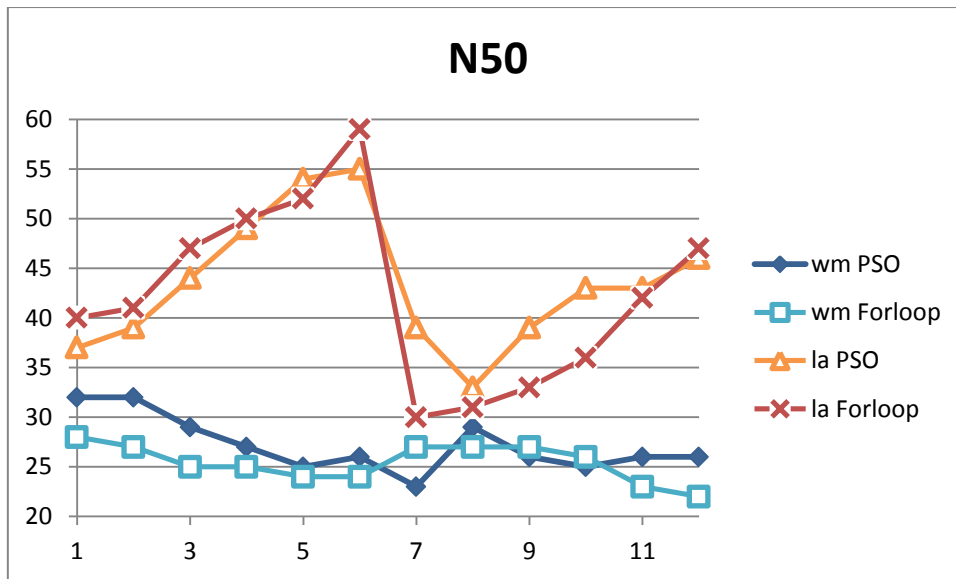


Σχήμα 4.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων BFS και PSO για τις διατάξεις με μαγνήτες N45.

4.7.4. N50

hm	Rturb (m)	wm				la			
		PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα	PSO	BFS	Σφάλμα	Σφάλμα
10 mm	2,4	32	28	14,29%	14,29%	37	40	-7,50%	7,50%
	2,7	32	27	18,52%	18,52%	39	41	-4,88%	4,88%
	3	29	25	16,00%	16,00%	44	47	-6,38%	6,38%
	3,3	27	25	8,00%	8,00%	49	50	-2,00%	2,00%
	3,6	25	24	4,17%	4,17%	54	52	3,85%	3,85%
	3,9	26	24	8,33%	8,33%	55	59	-6,78%	6,78%
20 mm	2,4	23	27	-14,81%	14,81%	39	30	30,00%	30,00%
	2,7	29	27	7,41%	7,41%	33	31	6,45%	6,45%
	3	26	27	-3,70%	3,70%	39	33	18,18%	18,18%
	3,3	25	26	-3,85%	3,85%	43	36	19,44%	19,44%
	3,6	26	23	13,04%	13,04%	43	42	2,38%	2,38%
	3,9	26	22	18,18%	18,18%	46	47	-2,13%	2,13%
M.O.	-	-	7,13%	10,86%	-	-	4,22%	9,16%	

Πίνακας 4.5. Σύγκριση PSO – BFS για όλες τις ακτίνες φτερωτής με μαγνήτες N50



Σχήμα 4.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων BFS και PSO για τις διατάξεις με μαγνήτες N50.

4.7.5. Συμπέρασμα

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σφάλμα αυξάνεται όσο αυξάνεται ο βαθμός του μαγνήτη. Ωστόσο ήδη από το N40 σε αρκετές περιπτώσεις τα σφάλματα ξεπερνούν το 5, ακόμα και το 10%. Κατά συνέπεια δεν μπορούμε να θεωρήσουμε το PSO αρκετά αξιόπιστο και να βασιστούμε αποκλειστικά σε αυτό για την εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων μαγνήτη. Οι αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι το PSO δεν αξιοποιεί το πρόγραμμα FEMM και έτσι δεν υπολογίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του μαγνήτη αλλά χρησιμοποιεί μια εκτίμηση η οποία χρήζει διερεύνησης. Αυτό που επιλέγουμε ως μέθοδο λοιπόν είναι να αξιοποιούμε τις 5 πρώτες επαναλήψεις του PSO ώστε να περιορίζουμε το πεδίο ορισμού των w_m και I_a ώστε να εξοικονομούμε χρόνο.

Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η βελτιστοποίηση της σχεδίασης της γεννήτριας 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 και η μάζα τους. Αυτές τις δυο αντικρουόμενες επιθυμίες που έχει ένας σχεδιαστής επιχειρούμε να τις φέρουμε σε ισορροπία με το κριτήριο βελτιστοποίησης που επιλέγουμε. 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/ελάχιστης μάζας ή της βέλτιστης απόδοσης.

5.1. 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 15-50 mm και 20-80 mm αντίστοιχα. Τα πεδία ορισμού προέκυψαν μετά από βιβλιογραφική μελέτη για τις πιο συχνά εμφανιζόμενες τιμές των μεταβλητών και επεκτάθηκαν λίγο σαν δικλείδα ασφαλείας.

Όσον αφορά το κριτήριο ως προς το οποίο γίνεται η εκάστοτε βελτιστοποίηση, αυτό εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Όπως έχουμε πει, μελετάμε εφαρμογές χαμηλού κόστους και επίσης μας ενδιαφέρει η καλή αξιοποίηση των υλικών που χρησιμοποιούνται αλλά και ο περιορισμός της μάζας προκειμένου η συναρμολόγηση και η μεταφορά να είναι δυνατή από λίγα άτομα χωρίς απαραίτητα τη χρήση μηχανημάτων.

Στο [1] έγινε σύγκριση ενός συνδυαστικού κριτηρίου απόδοσης – κόστους με το κριτήριο βέλτιστης απόδοσης και βέλτιστου κόστους και το συνδυαστικό κριτήριο αποδείχτηκε ότι δίνει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε συνδυαστικό κριτήριο προσθέτοντας και τη μάζα ως παράμετρο. Έτσι χρησιμοποιήθηκε συνδυαστικό κριτήριο βέλτιστης απόδοσης – ελάχιστου κόστους – ελάχιστης μάζας 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 και χωρίς η μάζα να υπερβαίνει τα 10kg/αύξηση της απόδοσης κατά 0.1.

Τα βάρη που επιλέχθηκαν 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 ή έχουν προκύψει από έρευνα στο διαδίκτυο.

5.2. Απόρριψη διατάξεων κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης

Στη διαδικασία της βελτιστοποίησης εισάγονται ορισμένοι περιορισμοί ώστε να μη λαμβάνονται υπόψη 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 τη μάζα και πολύ μικρής τιμής στην απόδοση, οπότε οι συγκεκριμένες διατάξεις αναπόφευκτα απορρίπτονται.

Επίσης, κάποιες μεταβλητές που δεν είναι εύκολο 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.

5.2.1 Κατασκευαστικοί περιορισμοί

Ο πρώτος περιορισμός που λήφθηκε υπόψη αφορά στην εσωτερική ακτίνα της γεννήτριας R_{in} 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 [6] 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:

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

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:

$$w_{1in} \leq 5$$

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

5.2.2. 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 [35] 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 ισχείς (>5 kW). Αυτό συμβαίνει γιατί με δεδομένο το $E_{f_{cutin}}$, το κάτω όριο τάσης το οποίο επιβάλλεται από τον αντιστροφέα (αντίστοιχα από τις μπαταρίες για DC σύνδεση), η ονομαστική ΗΕΔ, $E_{f_{nom}}$, της γεννήτριας παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της ισχύος που διαστασιολογείται. Αυτό με τη σειρά του έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ ισχυρών ρευμάτων στις μεγαλύτερες ισχείς (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.

5.3. Εύρεση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ακτίνα φτερωτής

Βελτιστοποιήθηκε η σχεδίαση της γεννήτριας για μαγνήτες νεοδυμίου N40, N42, N45 και N50. Για κάθε είδος μαγνήτη, μελετήθηκαν 6 μεγέθη γεννητριών, μεταβάλλοντας την ακτίνα φτερωτής από 2.4 έως 3.9 m με βήμα 0.3m.

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

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε 5 επαναλήψεις του αλγορίθμου ολικής βελτιστοποίησης PSO με πεδίο ορισμού για το w_m και το I_a , όπως είπαμε, 15-50 και 20 - 80 mm αντίστοιχα. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για πάχος μαγνήτη h_m 10 και 20 mm με το πάχος σιδήρου h_r να μεταβάλλεται από τα 10 στα 12 mm αντίστοιχα. Το πάχος του στάτη παρέμεινε σταθερό και στις 2 περιπτώσεις και ίσο με 15 mm. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα του PSO αξιοποιούνται ώστε το πεδίο ορισμού για το πρόγραμμα σειριακής αναζήτησης να μειωθούν προκειμένου να εξοικονομηθεί χρόνος. Οι παραπάνω μεταβλητές μεταβάλλονται με βήμα με βήμα 1mm για τα 2 διαφορετικά πάχη μαγνήτη.

Πιο αναλυτικά όσον αφορά το πρόγραμμα σειριακής αναζήτησης, 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.

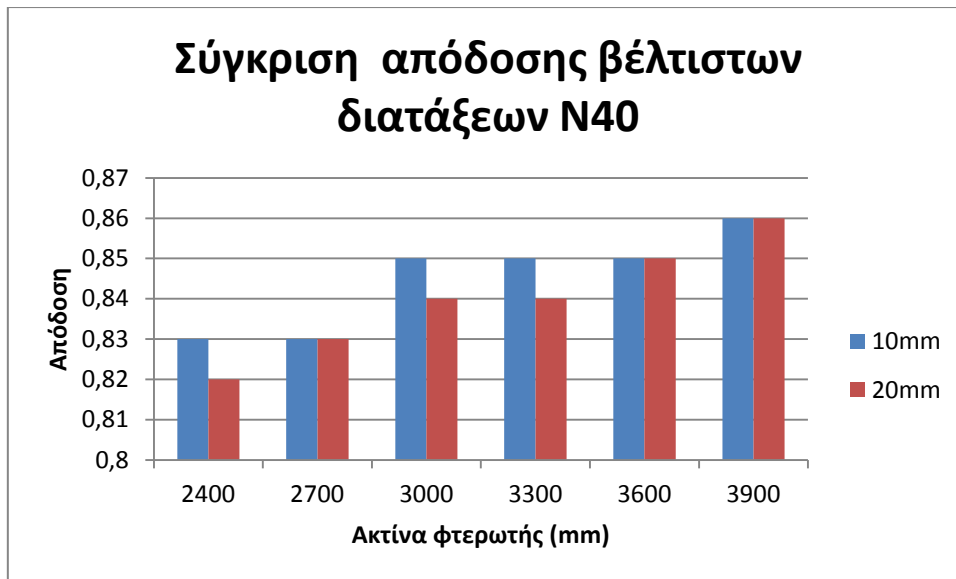
Για όλες τις διατάξεις που δεν απορρίπτονται υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, που έχει την ακόλουθη μορφή:

$$output = efficiency * 1000 - totalcost - totalmass * 10$$

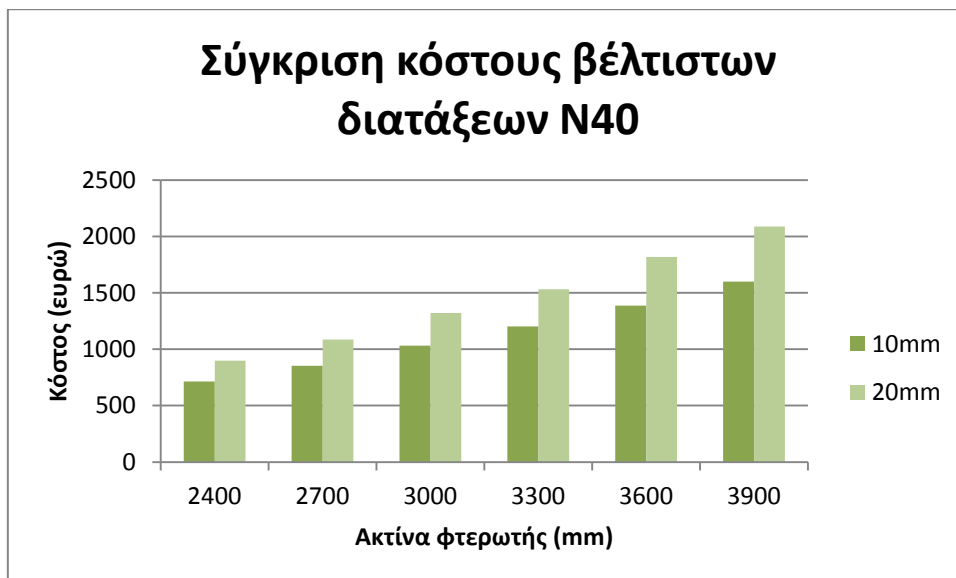
Οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη για κάθε μέγεθος γεννήτριας είναι αυτές που ορίζουν τη διάταξη η οποία μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

5.3.1 Μαγνήτες N40

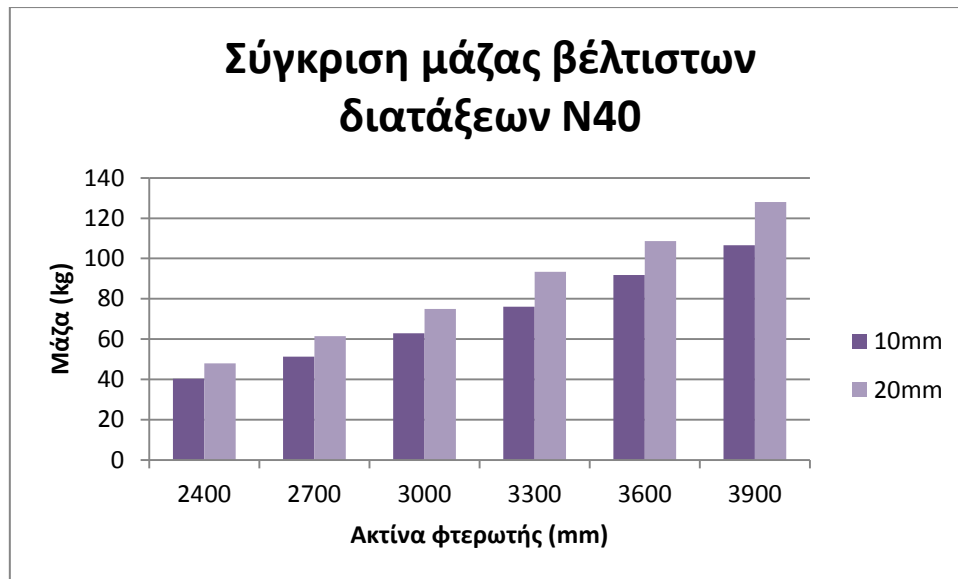
Αρχικά για κάθε είδος μαγνήτη συγκρίνουμε τις βέλτιστες γεννήτριες πάχους μαγνήτη 10 mm (και πάχους σιδήρου 10mm) με τις αντίστοιχες πάχους 20 mm (και πάχος σιδήρου 12 mm) όσον αφορά το κόστος, τη μάζα και την απόδοση. Στη συνέχεια, ακολουθώντας τη λογική του [1], αφού βρέθηκαν για κάθε μέγεθος γεννήτριας οι βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη, σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν οι γεννήτριες. Τα βασικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 5.1. Σύγκριση απόδοσης βέλτιστων διατάξεων για διαφορετικά πάχη μαγνητών N40



Σχήμα 5.2. Σύγκριση κόστους βέλτιστων διατάξεων για διαφορετικά πάχη μαγνητών N40

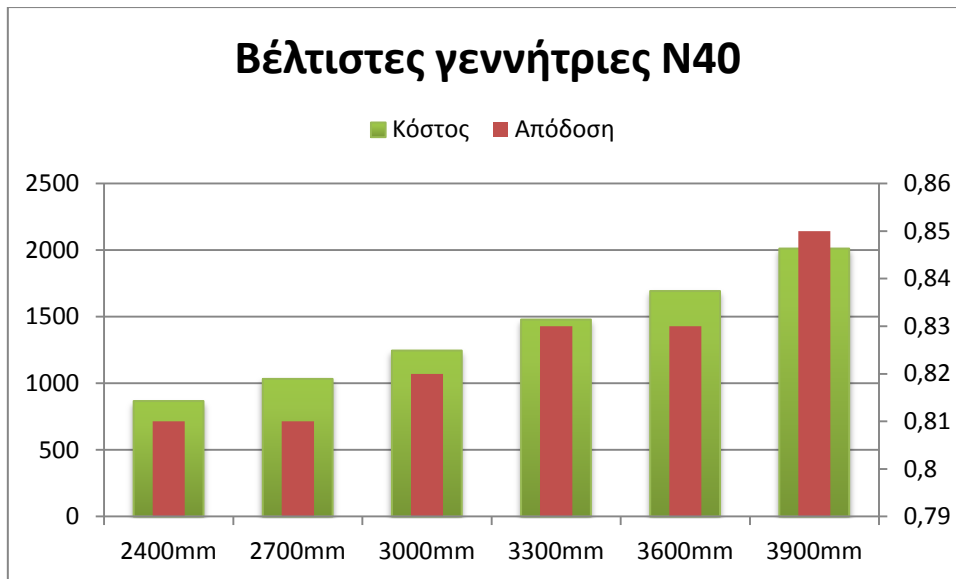


Σχήμα 5.3. Σύγκριση μάζας βέλτιστων διατάξεων για διαφορετικά πάχη μαγνητών N40

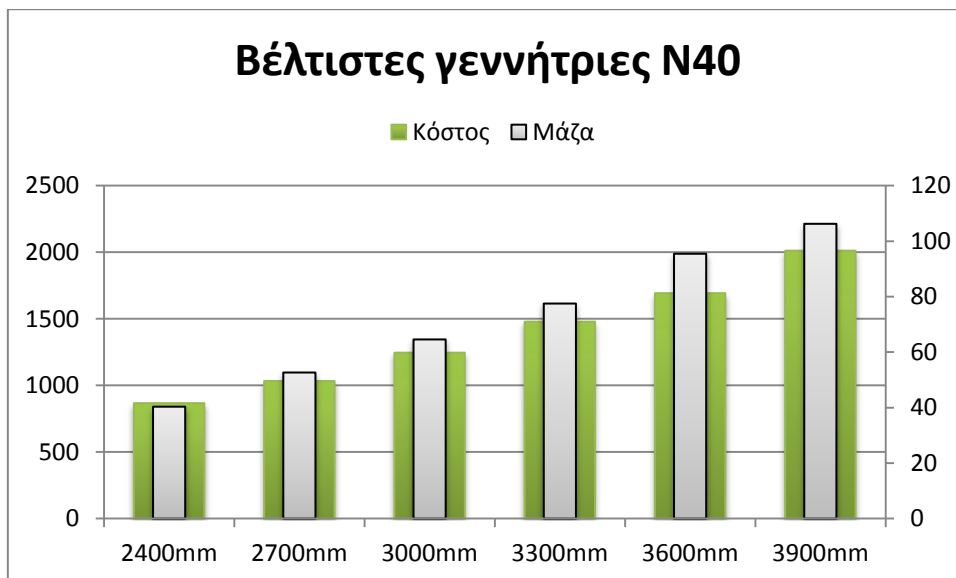
Προκύπτει σαφώς ότι το πάχος μαγνήτη 10 mm είναι καλύτερο και στις 3 παραμέτρους που εξετάζουμε. Η υπεροχή αυτή των μαγνητών πάχους 10 mm επιβεβαιώνεται από τις προσομοιώσεις για όλα τα είδη μαγνήτη και όλες τις εξεταζόμενες ακτίνες φτερωτής και κατ'επέκταση από αυτό προκύπτουν και όλες οι βέλτιστες διατάξεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια (τα αποτελέσματα της σύγκρισης για τους άλλους βαθμούς μαγνήτη υπάρχουν στο παράρτημα).

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας							
N40 hm 10	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	Μάζα (kg)
	2400mm	32	47	24	714	0.83	40.35
	2700mm	30	50	28	853	0.83	51.33
	3000mm	31	52	32	1031	0.85	62.92
	3300mm	28	59	36	1203	0.85	76.12
	3600mm	29	58	40	1386	0.85	91.81
	3900mm	27	66	44	1599	0.86	106.54

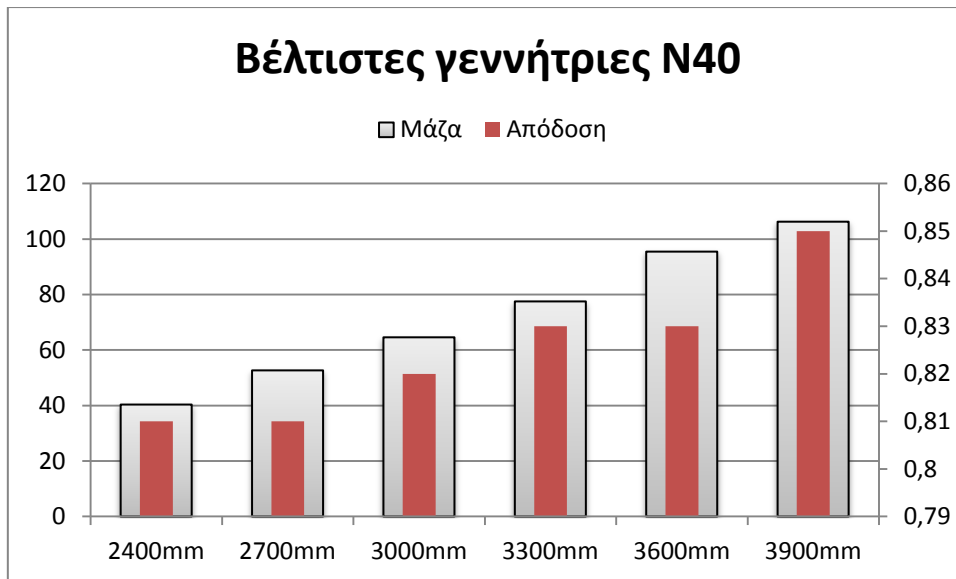
Πίνακας 5.1. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη N40 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



Σχήμα 5.4. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.5. Σύγκριση μάζας και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40

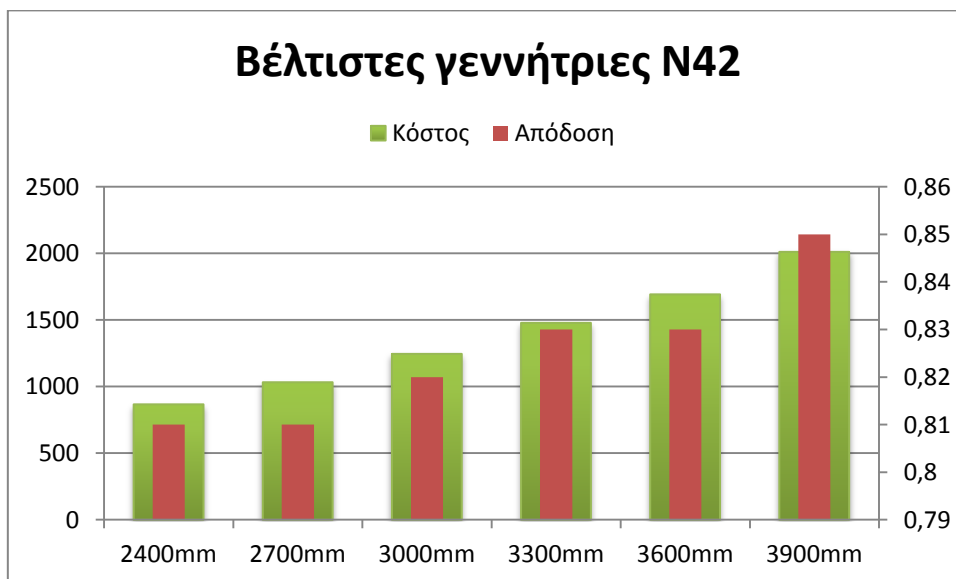


Σχήμα 5.6. Σύγκριση μάζας και απόδοσης των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N40

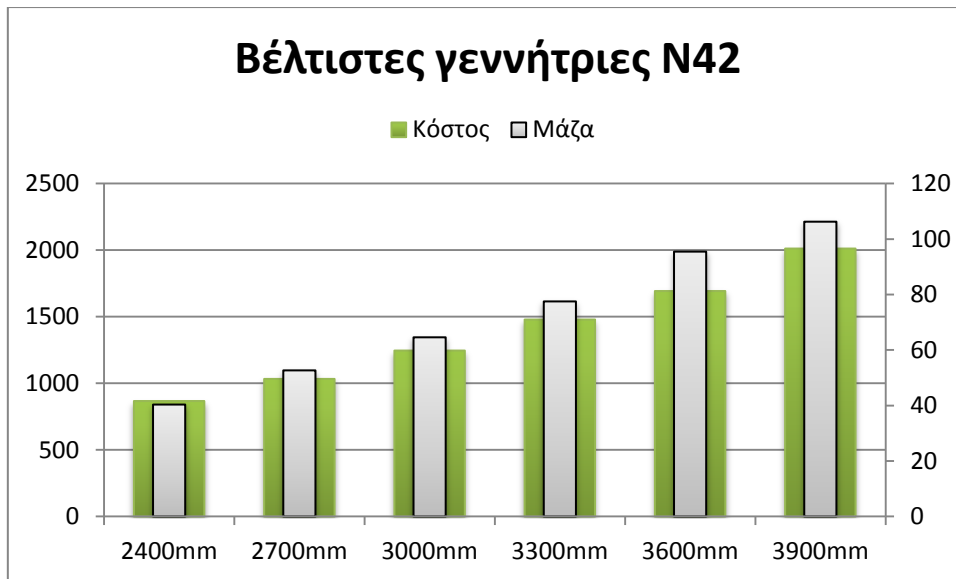
5.3.2. Μαγνήτες N42

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας							
N42 hm 10	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	Μάζα (kg)
	2400mm	31	45	24	686	0.83	40.22
	2700mm	29	52	28	847	0.84	50.07
	3000mm	31	49	32	1001	0.85	63.09
	3300mm	27	57	36	1162	0.84	76.23
	3600mm	27	64	40	1384	0.86	88.13
	3900mm	26	63	44	1543	0.85	107.93

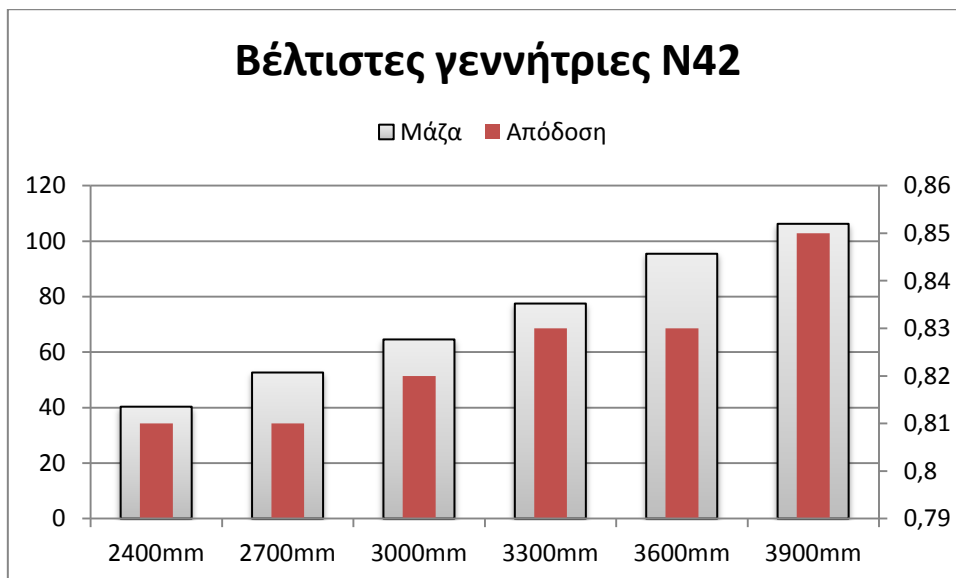
Πίνακας 5.2. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη N42 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



Σχήμα 5.7. Σύγκριση απόδοσης και κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N42



Σχήμα 5.8. Σύγκριση κόστους και μάζας των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N42

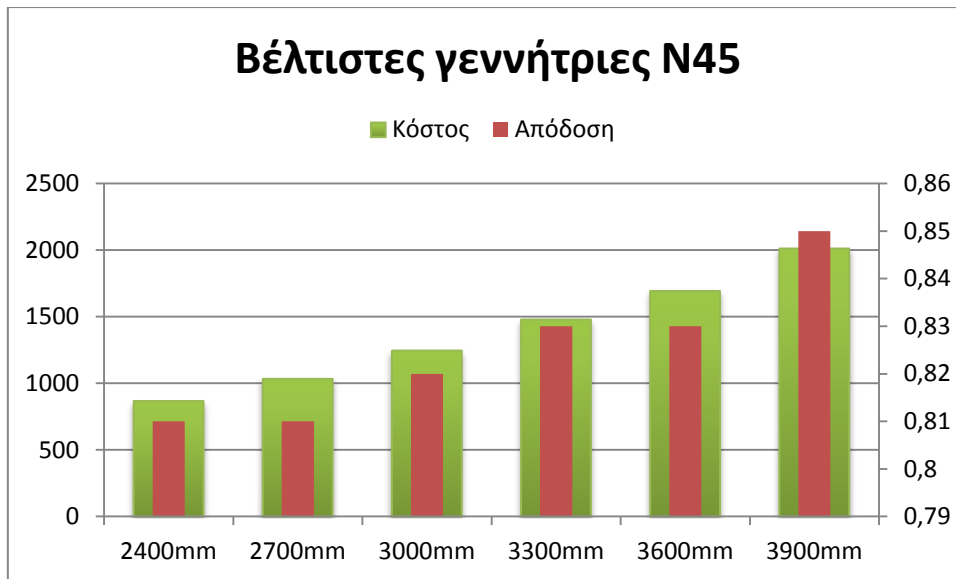


Σχήμα 5.9. Σύγκριση μάζας και απόδοσης των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N42

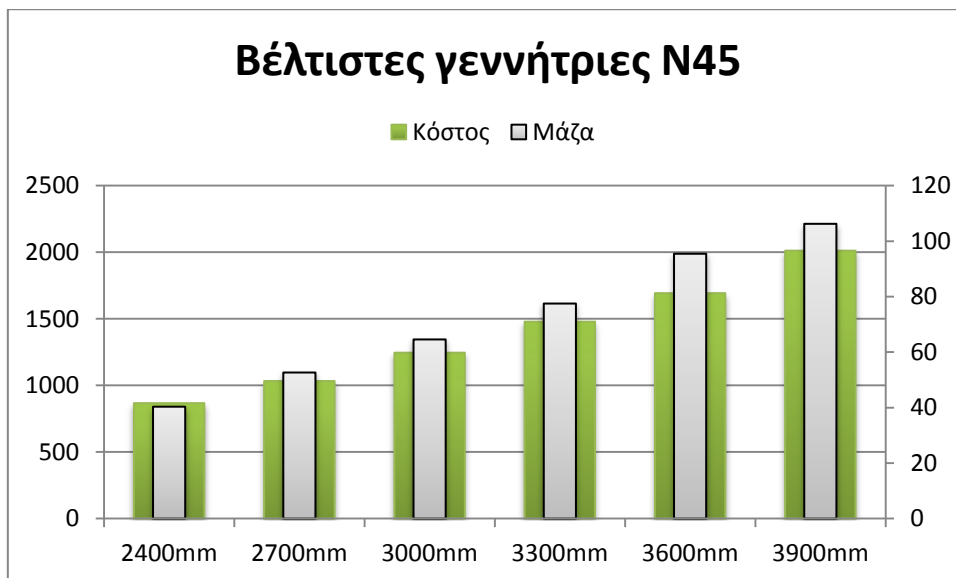
5.3.3. Μαγνήτες N45

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας							
N45 hm 10	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	Μάζα (kg)
	2400mm	33	44	24	657	0.83	38.87
	2700mm	31	47	28	788	0.84	49.37
	3000mm	31	49	32	941	0.85	61.05
	3300mm	26	60	36	1101	0.84	73.61
	3600mm	27	62	40	1289	0.85	86.67
	3900mm	25	67	44	1460	0.85	102.81

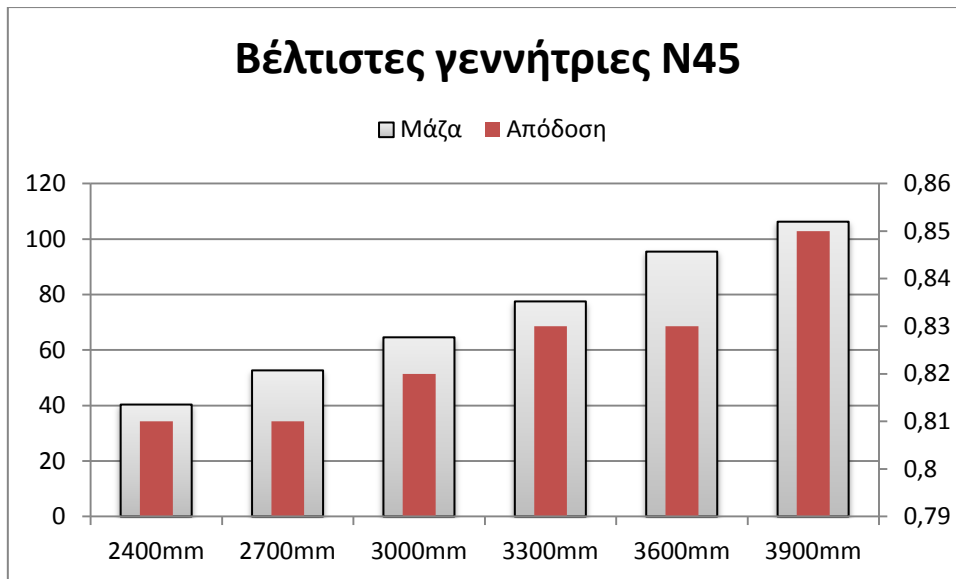
Πίνακας 5.3. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη N45 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



Σχήμα 5.10. Σύγκριση κόστους - απόδοσης των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N45



Σχήμα 5.11. Σύγκριση κόστους – μάζας των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N45

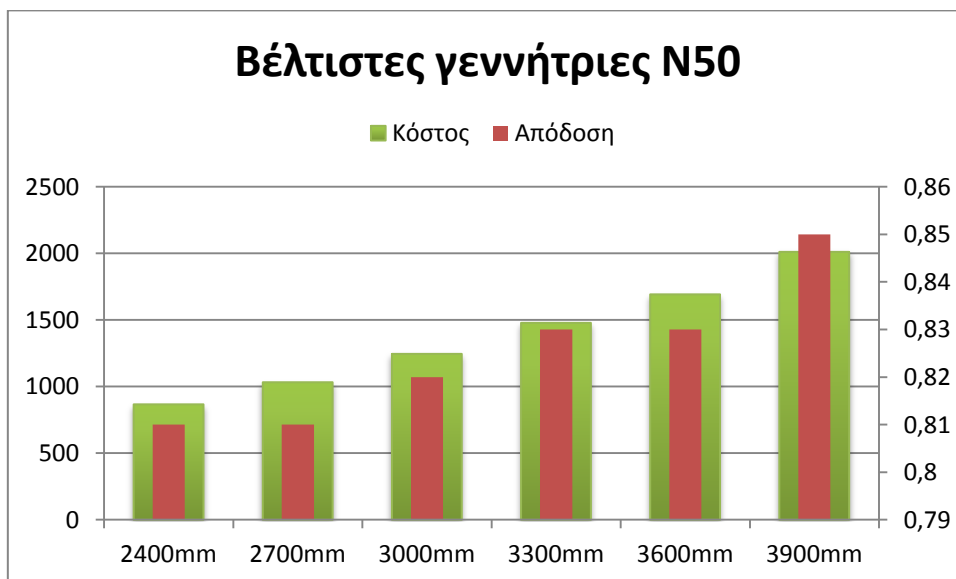


Σχήμα 5.12. Σύγκριση μάζας απόδοσης των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N45

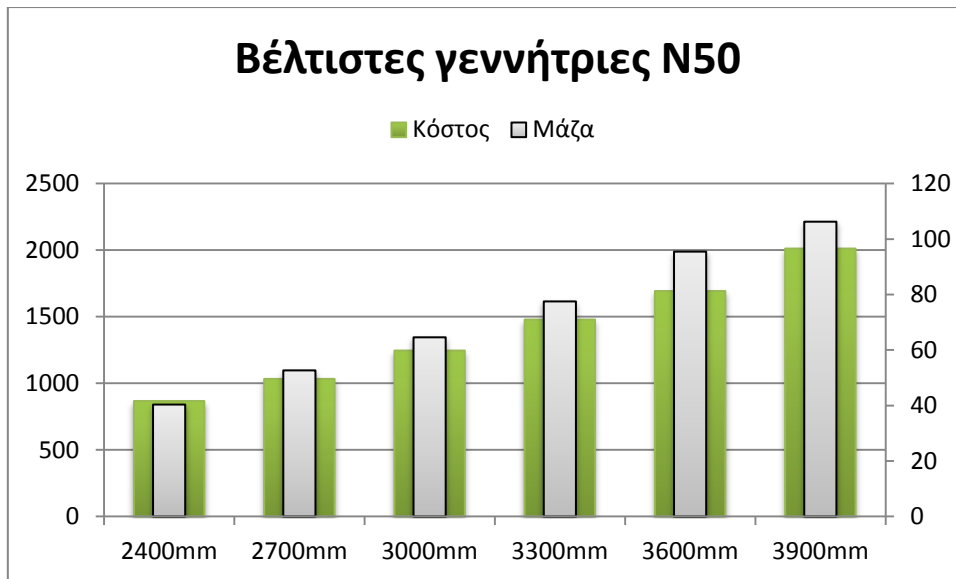
5.3.4. Μαγνήτες N50

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας							
N50 hm 10	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	Μάζα (kg)
	2400mm	28	40	24	867	0.81	40.34
	2700mm	27	41	28	1033	0.81	52.66
	3000mm	25	47	32	1246	0.82	64.58
	3300mm	25	50	36	1479	0.83	77.52
	3600mm	24	52	40	1693	0.83	95.47
	3900mm	24	59	44	2012	0.85	106.26

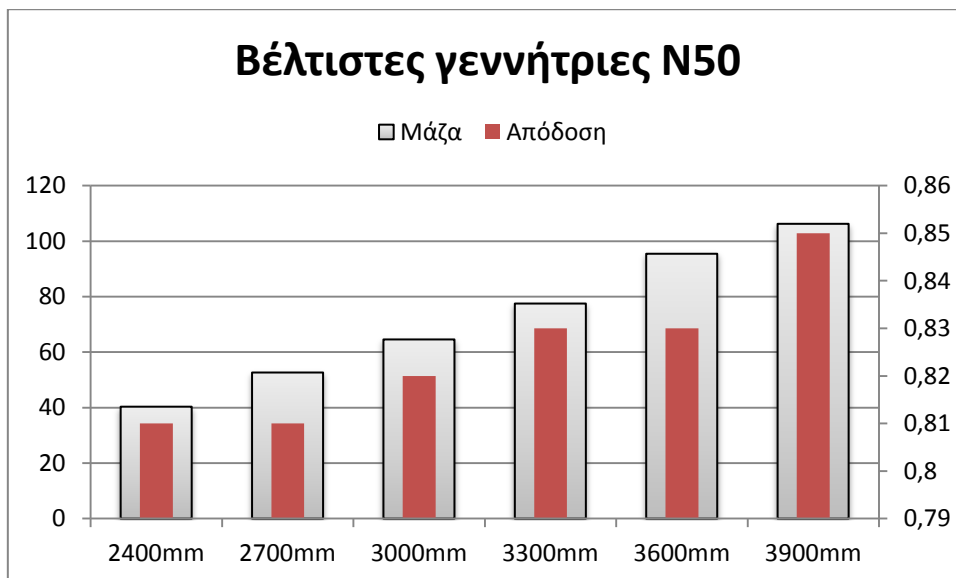
Πίνακας 5.4. Βέλτιστες διατάξεις με μαγνήτη N50 σύμφωνα με το συνδυαστικό κριτήριο



Σχήμα 5.13. Σύγκριση κόστους απόδοσης των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N50

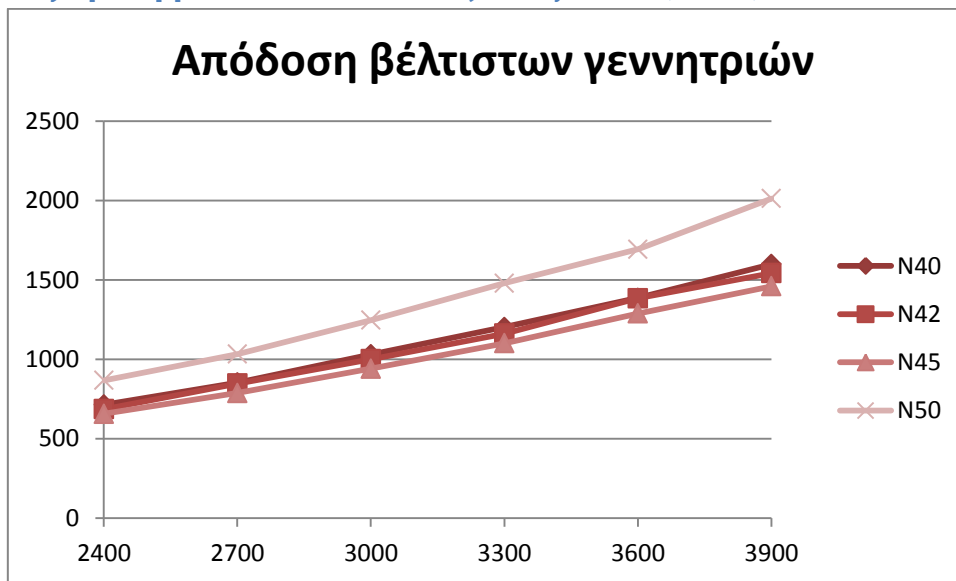


Σχήμα 5.14. Σύγκριση κόστους μάζας βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N50



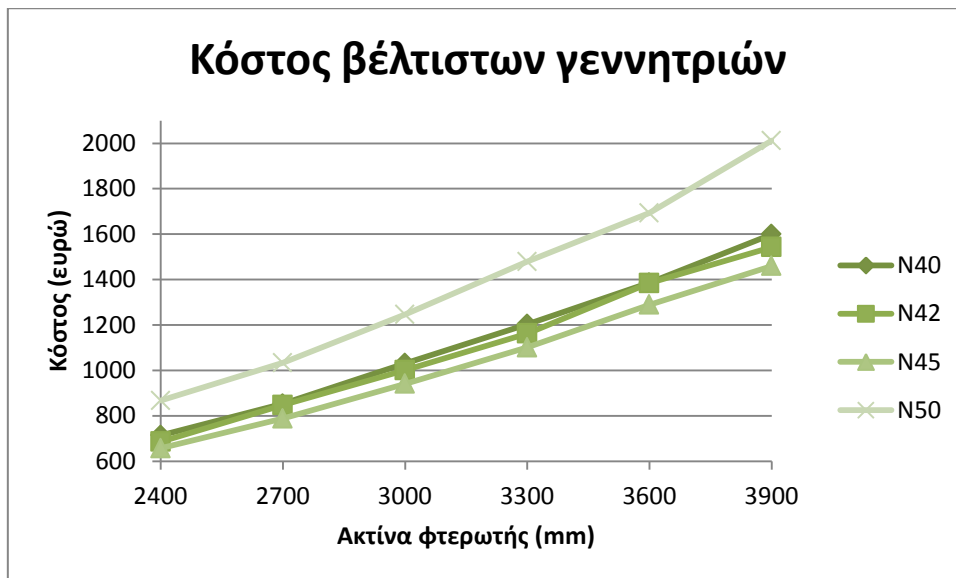
Σχήμα 5.15. Σύγκριση μάζας απόδοσης βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτη N50

5.4. Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων με N40, N42, N45 και N50.



Σχήμα 5.16. Σύγκριση απόδοσης των βέλτιστων διατάξεων με N40, N42, N45 και N50.

Διαπιστώνουμε ότι με εξαίρεση το N50 που εμφανίζει εμφανώς χαμηλότερες αποδόσεις τα άλλα τρία είδη μαγνήτη παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές χωρίς να προκύπτει σαφής ανωτερότητα κάποιου.



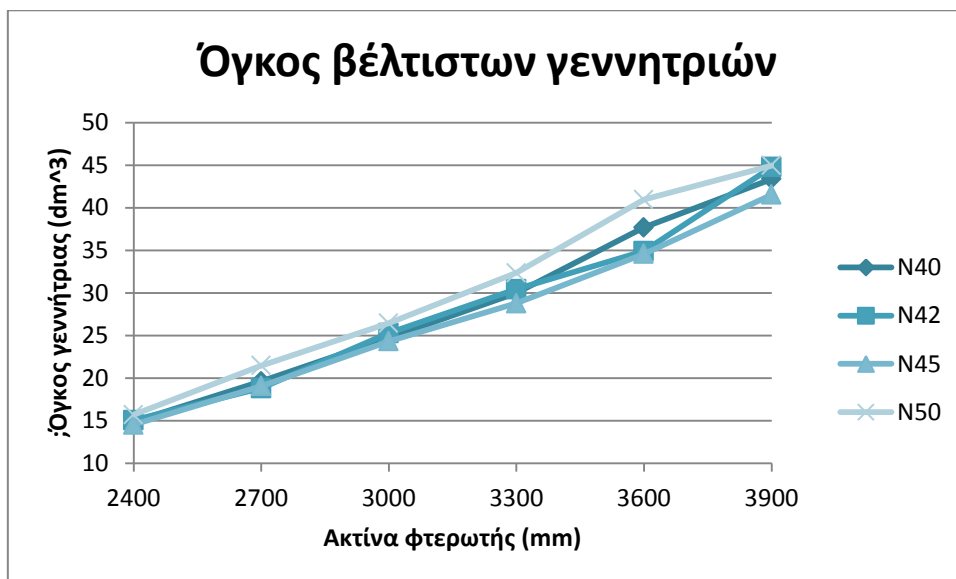
Σχήμα 5.17. Σύγκριση κόστους των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N40, N42, N45 και N50.

Στο ζήτημα του κόστους είναι σαφές ότι ενώ N42 και N40 παρουσιάζουν σχετικά παρόμοιο κόστος, οι διατάξεις με N50 κοστίζουν πολύ ακριβότερα ενώ αυτές με N45 ελαφρώς φθηνότερα.



Σχήμα 5.15. Σύγκριση μάζας των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N40, N42, N45 και N50.

Και εδώ είναι σαφές ότι οι διατάξεις με N45 είναι ελαφρώς ελαφρότερες από τις υπόλοιπες ενώ αυτές με N50 ελαφρώς βαρύτερες.



Σχήμα 5.16. Σύγκριση όγκου των βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες N40, N42, N45 και N50

Για ακόμα μία φορά φαίνεται (ειδικά όσο αυξάνεται η ακτίνα φτερωτής) ότι με N45 επιτυγχάνονται μικρότερες κατασκευές ενώ με N50 σχετικά μεγαλύτερες. Από την άλλη είναι λογικό στη μάζα και τον όγκο οι διαφορές να είναι μικρές αφού σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιούμε τον ίδιο αριθμό πόλων για ίδια ακτίνα.

Κεφάλαιο 6: Εύρεση βέλτιστου καθολικού μαγνήτη για γεννήτριες με ακτίνα φτερωτής από 2.4 έως 3.9m

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 και εδώ είναι το συνδυαστικό κριτήριο βέλτιστης απόδοσης – ελάχιστου κόστους – ελάχιστης μάζας.

6.1. 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 έστενα 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 ($output=efficiency \cdot 1000 - totalcost - totalmass \cdot 10$). 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 l_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 – μάζας συνολικά σε όλο το εύρος των γεννητριών που μελετάμε.

Η βελτιστοποίηση για εύρεση καθολικού μαγνήτη γίνεται για τους μαγνήτες νεοδυμίου βαθμού N45 που στο προηγούμενο κεφάλαιο είχαν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα (για παρόμοια απόδοση, μικρότερο κόστος και μάζα).

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου προέκυψε βέλτιστος καθολικός μαγνήτης με διαστάσεις $w_m = 27 \text{ mm}$ και $l_a = 58 \text{ mm}$.

6.2. Σύγκριση καθολικού μαγνήτη με βέλτιστους μαγνήτες ανά ακτίνα φτερωτής

Σε αυτή την παράγραφο συγκρίνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των διατάξεων που έχουν σχεδιαστεί με χρήση του καθολικού μαγνήτη, με τις διατάξεις που είχαν προκύψει από την προηγούμενη βελτιστοποίηση με μαγνήτη νεοδυμίου βαθμού N45 όπου σε κάθε ακτίνα φτερωτής βρήκαμε το βέλτιστο μαγνήτη.

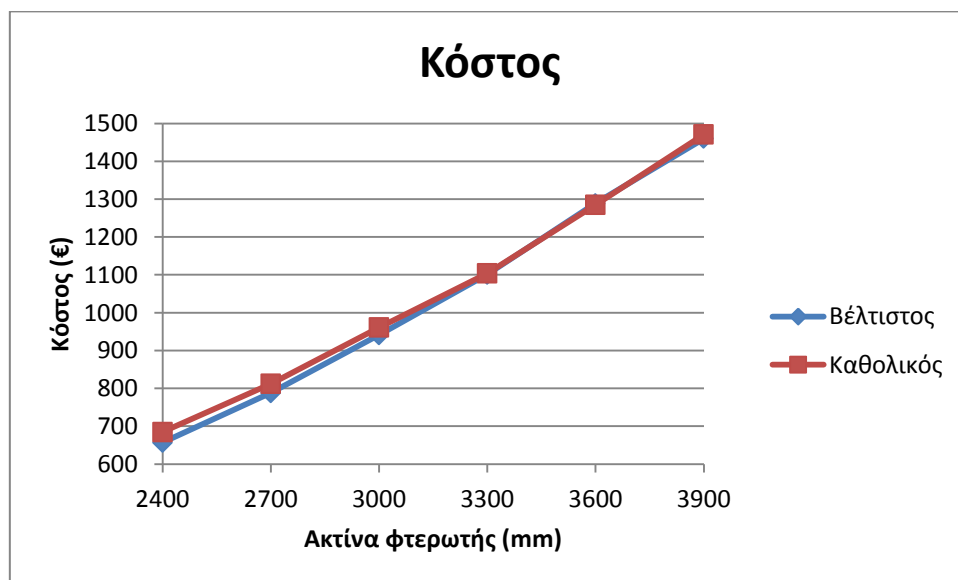
N45 hm 10	Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας						
	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	Μάζα (kg)
	2400mm	33	44	24	657	0.83	38.87
	2700mm	31	47	28	788	0.84	49.37
	3000mm	31	49	32	941	0.85	61.05
	3300mm	26	60	36	1101	0.84	73.61
	3600mm	27	62	40	1289	0.85	86.67
	3900mm	25	67	44	1460	0.85	102.81
	Γεννήτριες με τον επιλεγμένο καθολικό μαγνήτη με βάση το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας						
	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	Μάζα (kg)
2400mm	27	58	24	685	0.83	39.00	
2700mm	27	58	28	812	0.84	48.53	
3000mm	27	58	32	961	0.84	61.43	
3300mm	27	58	36	1104	0.85	73.86	
3600mm	27	58	40	1285	0.85	92.41	
3900mm	27	58	44	1471	0.85	112.23	

(A)

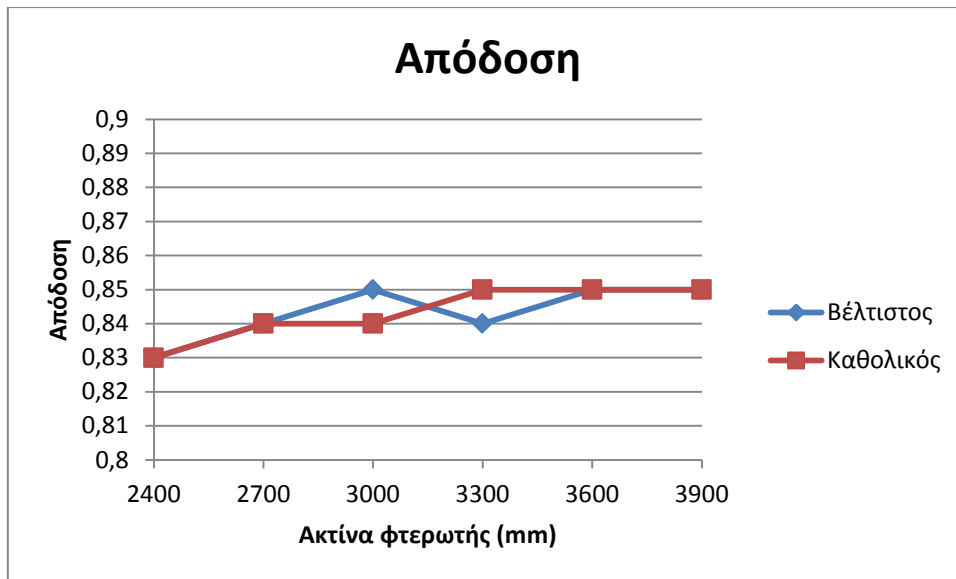
N45 hm 10								
Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας								
Ακτίνα φτερωτής	P _{nom} (W)	R _{out} (mm)	n _{cutin} (rpm)	Όγκος (dm ³)	a _i	k _d	N _c	sc (mm ²)
2400mm	3055	275.24	107	14.52	0.50	0.84	39	3.88
2700mm	3906	315.36	95	19.06	0.47	0.85	32	4.91
3000mm	4824	356.15	86	24.31	0.48	0.86	26	6.07
3300mm	5897	387.46	78	28.77	0.42	0.85	22	7.34
3600mm	6993	424.78	72	34.58	0.44	0.85	18	8.73
3900mm	8220	465.58	67	41.54	0.41	0.86	16	10.25
Γεννήτριες με τον επιλεγμένο καθολικό μαγνήτη με βάση το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας								
Ακτίνα φτερωτής	P _{nom} (W)	R _{out} (mm)	n _{cutin} (rpm)	Όγκος (dm ³)	a _i	k _d	N _c	sc (mm ²)
2400mm	3165	264.17	103	13.37	0.44	0.78	37	3.88
2700mm	3939	302.22	94	17.50	0.44	0.81	30	4.91
3000mm	5011	348.87	83	23.32	0.43	0.83	26	6.07
3300mm	5921	390.03	78	29.15	0.43	0.85	22	7.34
3600mm	7347	445.86	69	38.10	0.41	0.87	20	8.73
3900mm	8745	500.13	63	47.94	0.40	0.88	18	10.25

(B)

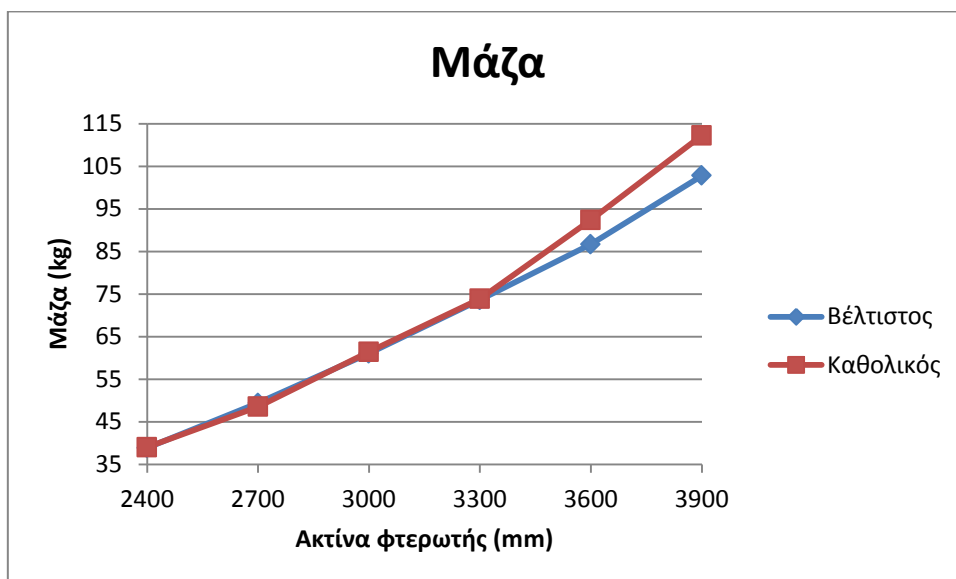
Πίνακας 6.1. (A,B): Βασικά χαρακτηριστικά γεννητριών με χρήση του καθολικού μαγνήτη N45 ή και με τον βέλτιστο ανά ακτίνα



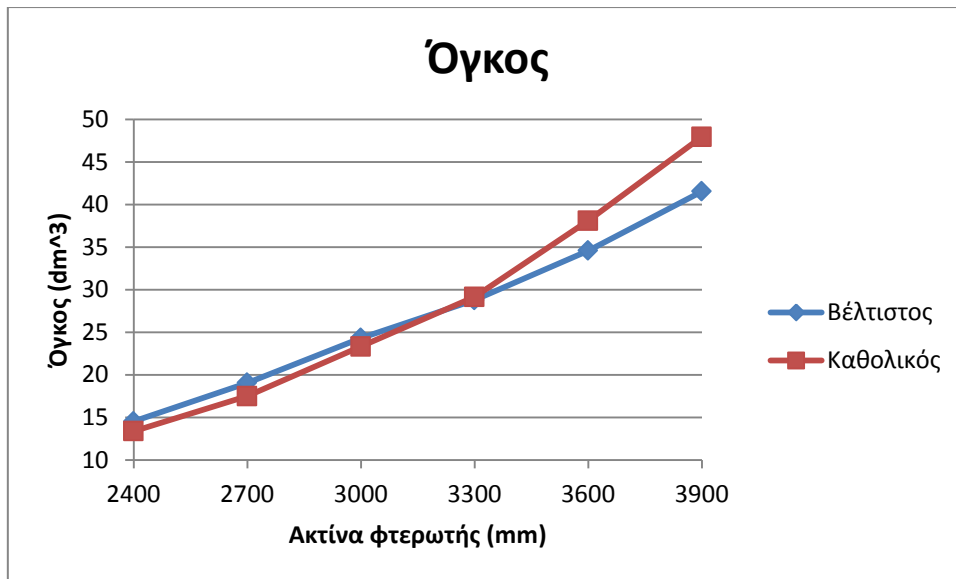
Σχήμα 6.1. Σύγκριση καθολικού μαγνήτη και βέλτιστων μαγνητών ανά φτερωτή



Σχήμα 6.2. Σύγκριση απόδοσης καθολικού μαγνήτη και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής



Σχήμα 6.3. Σύγκριση μάζας καθολικού μαγνήτη και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής



Σχήμα 6.4. Σύγκριση όγκου καθολικού μαγνήτη και βέλτιστων μαγνητών ανά ακτίνα φτερωτής

Από τα 4 διαγράμματα που προηγούνται αντιλαμβανόμαστε ότι σε γενικές γραμμές τα χαρακτηριστικά των διατάξεων με τον καθολικό είναι παρεμφερή με τα αντίστοιχα αυτών με το βέλτιστο ανά φτερωτή. Πέρα από μια πολύ μικρή αύξηση στο κόστος και μια ακόμα μικρότερη στη μάζα, βλέπουμε ότι ο καθολικός δεν υστερεί καθόλου στην απόδοση ενώ είναι ελαφρώς καλύτερος στον όγκο.

Κατ επέκταση βλέπουμε πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον καθολικό μαγνήτη στην κατασκευή γεννητριών σε αυτό το εύρος ακτίνας φτερωτής αφού τα βασικά χαρακτηριστικά των διατάξεων με χρήση του καθολικού είναι παρεμφερή με αυτά των διατάξεων από την προηγούμενη βελτιστοποίηση ενώ είναι δεδομένο πως μας συμφέρει πολύ η χρήση ενός μόνο μαγνήτη γιατί μειώνεται πολύ το κόστος παραγωγής του και αγοράς του λόγω των μεγάλων ποσοτήτων σε τυχόν παραγγελίες.

Κεφάλαιο 7: Κατασκευή της γεννήτριας

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η κατασκευή της γεννήτριας. Πρόκειται για γεννήτρια αξονικής ροής ονομαστικής ισχύος 5 kW με μαγνήτες νεοδυμίου και αποτελεί μέρος ανεμογεννήτριας με ακτίνα φτερωτής 3.0 m.

Για την κατασκευή ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του A Wind Turbine Recipe Book του Hugh Piggott [8] και ήταν δυνατή χωρίς να απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων εργαλείων ή κάποια σημαντική κατασκευαστική εμπειρία. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι ηλεκτρική σέγα, πριόνια, λίμες, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτρικός τροχός, ηλεκτροσυγκόλληση, βιδολόγος κ.ά.

7.1 Η κατασκευή του δρομέα

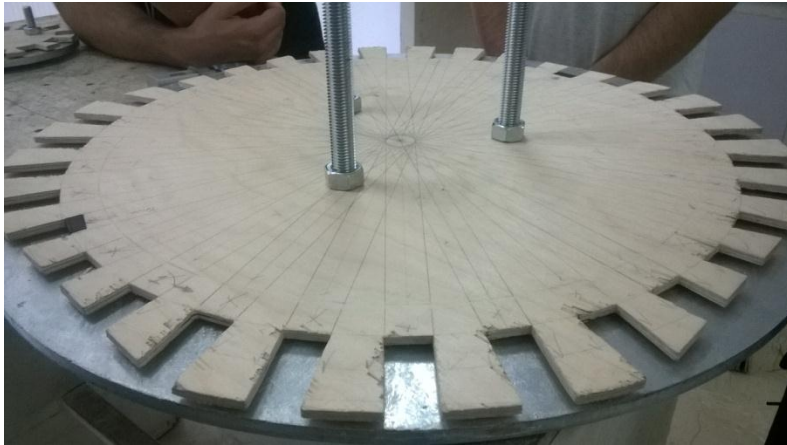
Ο δρομέας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους πάνω στους οποίους τοποθετούνται οι μαγνήτες.

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 [25].

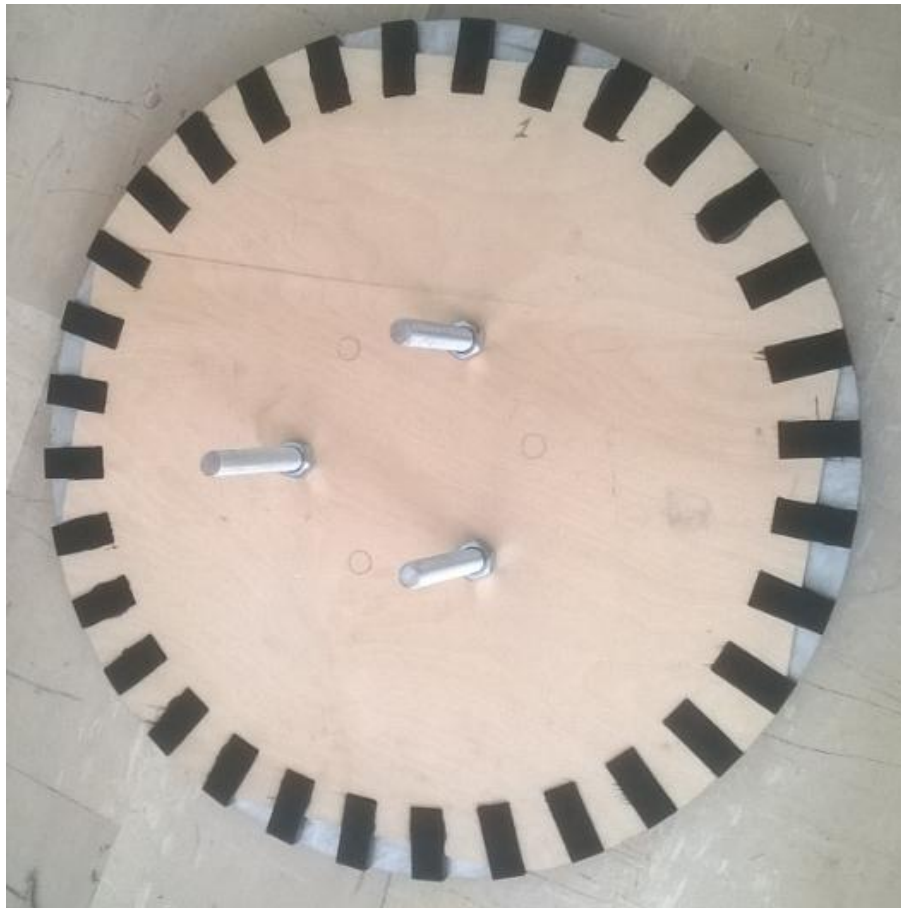
Επιπλέον, στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας βιδολόγο ανοίξαμε σε κάθε δίσκο από 3 τρύπες με σπείρωμα, οι οποίες λειτουργούν ως εξωλκέας για να αποσυναρμολογείται πιο εύκολα η γεννήτρια. Οι κοπές φαίνονται στο σχήμα 3.6..

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. 32 μαγνήτες νεοδυμίου βαθμού N45 και διαστάσεων 27X58X10 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 πού 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 αντικριστοί μαγνήτες στον απέναντι δίσκο να έχουν αντίθετη πολικότητα.



Σχήμα 7.1. Ο οδηγός των μαγνητών βιδώνεται πρώτα στον ένα και μετά στον άλλο δίσκο και τοποθετούνται οι μαγνήτες



Σχήμα 7.2. Ο δίσκος του δρομέα με τους μαγνήτες στερεωμένους και τον οδηγό ακόμα βιδωμένο μέχρι να στεγνώσει η κόλλα.



Σχήμα 7.3. Ο δίσκος μετά τη στερέωση των μαγνητών

Οι δίσκοι με τους μαγνήτες τοποθετούνται σε βινυλεστερική ρητίνη για καλύτερη μηχανική στήριξη. Όπως αναφέρεται στο [1], παρά το γεγονός ότι στη βιβλιογραφία συνιστάται συνήθως η χρήση πολυεστερικής ρητίνης για αυτό το σκοπό, η εμπειρία πολλών κατασκευαστών διεθνώς αλλά και του εργαστηρίου σε προηγούμενες κατασκευές, έχει δείξει ότι η πολυεστερική ρητίνη δεν έχει καλή προσαρμογή πάνω σε μέταλλα. Έτσι μετά από λίγο καιρό «σκάει» και δημιουργούνται κενά στα οποία εισχωρεί υγρασία.

Για την κάλυψη των μαγνητών με βινυλεστερική ρητίνη κατασκευάστηκαν δύο καλούπια – ένα για κάθε δίσκο – στα οποία τοποθετήθηκαν οι δίσκοι και έγχυση της ρητίνης. Κάθε καλούπι αποτελείται από 3 τετράγωνα κομμάτια κόντρα πλακέ. Το κάτω κόντρα πλακέ αποτελεί τη βάση στην οποία τοποθετήθηκε ο δίσκος. Από το μεσαίο κόντρα πλακέ αφαιρέθηκε εσωτερικά ένας δίσκος σε κατάλληλες διαστάσεις ώστε να δημιουργηθεί χώρος για το δίσκο και τη ρητίνη. Το πάνω κόντρα πλακέ χρησίμευσε ως καπάκι μετά την έγχυση της ρητίνης, ώστε η πλάκα που προέκυψε μετά τη στερεοποίηση της τελευταίας να είναι επίπεδη.

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

Για τη συναρμολόγηση κάθε καλουπιού βιδώθηκε η βάση με το μεσαίο τμήμα, πάνω από το δίσκο του δρομέα βιδώθηκε ο κεντρικός ξύλινος δίσκος με τη βάση και τοποθετήθηκε ο δίσκος με τους μαγνήτες. 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 καλουπιού,

αλείφθηκαν με κερί. Έτσι διευκολύνεται η αφαίρεση του καλουπιού 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.

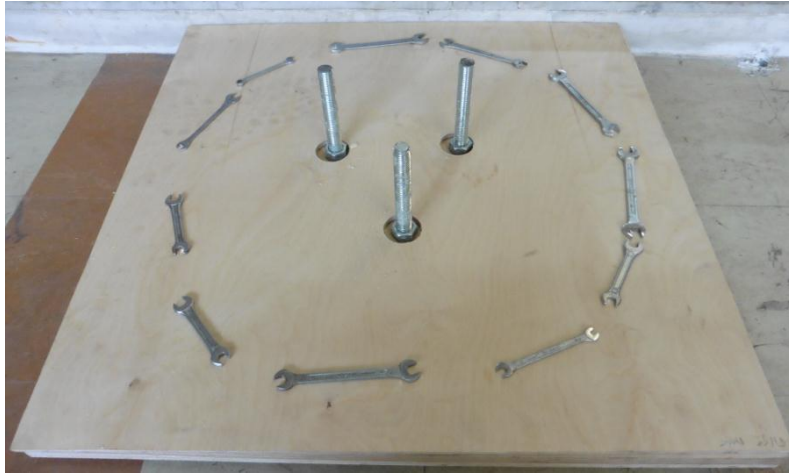


Σχήμα 7.4. α) Ανάμιξη ρητίνης, ταλκ και καταλύτη β) Έγχυση ρητίνης στο καλούπι

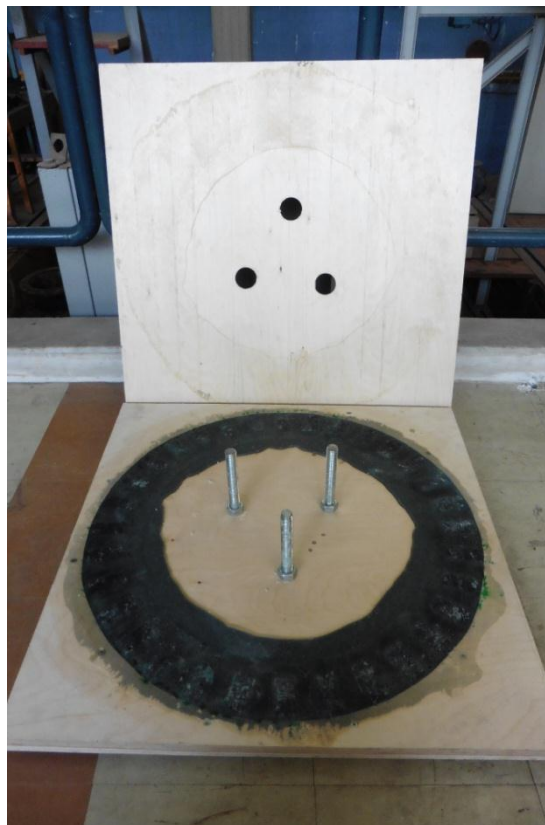
Στη συνέχεια το καλούπι σκεπάστηκε με το καπάκι, το οποίο δε χρειάζεται βίδωμα. Πάνω του τοποθετούνται μεταλλικά εργαλεία που υπάρχουν στο εργαστήριο, τα οποία έλκουν οι μαγνήτες και έτσι παραμένει κλειστό ασκώντας την απαιτούμενη πίεση προκειμένου να διαφύγει η παραπάνω ρητίνη. Οι αναλογίες ρητίνης – ταλκ – καταλύτη, οι οποίες εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος πρέπει να τηρηθούν αυστηρά ώστε να αποφευχθεί αδυναμία στερεοποίησης ή πρόωρη στερεοποίηση του μείγματος [18].

Τα καλούπια αφέθηκαν σκεπασμένα μέχρι να στερεοποιηθεί η ρητίνη, τουλάχιστον για 8 ώρες. Στη συνέχεια αποσυναρμολογήθηκαν προσεχτικά για να βγουν οι δίσκοι με τους μαγνήτες και τη ρητίνη πλέον πάνω τους που τους συγκρατεί. Η περιττή ρητίνη απομακρύνθηκε με προσοχή από όλα τα ανεπιθύμητα σημεία με τη βοήθεια μιας λίμας,

ενώ και το πάχος του δρομέα στο επιθυμητό επίπεδο με το τριβείο και έτσι οι δίσκοι ήταν πλέον έτοιμοι για χρήση.



Σχήμα 7.5. Το καλούπι δε χρειάζεται βίδωμα, αρκεί η τοποθέτηση μεταλλικών εργαλείων που έλκονται από τους μαγνήτες και έτσι ασκείται η απαραίτητη πίεση ώστε να διαφύγει η πλεονάζουσα ρητίνη



Σχήμα 7.6. Το καλούπι έχει μόλις ανοιχτεί. Είναι εμφανές ότι θα πρέπει να αφαιρεθεί η περιττή ρητίνη



Σχήμα 7.7. Ο ένας σιδερένιος δίσκος με τους μαγνήτες και τη ρητίνη αφού έχει λιμαριστεί. Οι δρομείς είναι έτοιμοι.

7.2. Η κατασκευή του στάτη

Πρώτο βήμα στην κατασκευή του στάτη είναι η κατασκευή των πηνίων. Ως τώρα έχει γίνει πολύς λόγος για τα πηνία, ειδικά όσον αφορά το συντελεστή πλήρωσης, κ. Αρχικά κατασκευάστηκε από ξύλο η μηχανή χειρός που χρησιμεύει στην περιέλιξη των πηνίων. Οι διαστάσεις της επιλέγονται ίσες με τις επιθυμητές εσωτερικές διαστάσεις των πηνίων. Τυλίχθηκαν 24 πηνία 75 σπειρών με χαλκό. Βάσει της διαστασιολόγησης ο χαλκός θα έπρεπε να έχει πάχος 6mm. Ωστόσο επειδή με τέτοιο πάχος θα ήταν υπερβολικά δύσκολο να τυλιχθεί ο χαλκός, προτιμήσαμε να τυλίγουμε ταυτόχρονα 4 διαφορετικά καλώδια πάχους 1.5mm το καθένα. Αυτή η εργασία είναι αρκετά κουραστική και χρονοβόρα και πραγματοποιήθηκε από 3 άτομα, όπου ένας κρατούσε το χαλκό τεντωμένο, ένας τύλιγε και ένας μετρούσε τις περιελίξεις. Χρειάστηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να τυλιχτούν σωστά τα πηνία χωρίς επικαλύψεις σπειρών.

Παρότι η θερμική μελέτη αποτελεί αντικείμενο άλλης εργασίας αξίζει να αναφερθεί ότι, στα πλαίσια της κατασκευής των πηνίων, σε ένα πηνίο τοποθετήθηκε αισθητήρας θερμοκρασίας. Η τοποθέτηση ήταν αρκετά δύσκολη διαδικασία καθώς αν το πηνίο προέκυπτε ήταν υπερβολικά μεγάλο θα δημιουργούσε πρόβλημα σε ολόκληρο το στάτη.

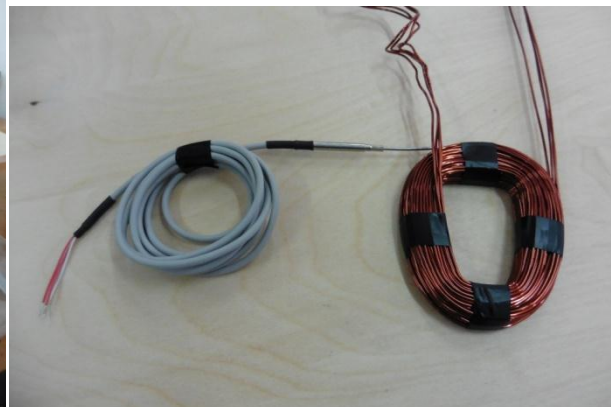
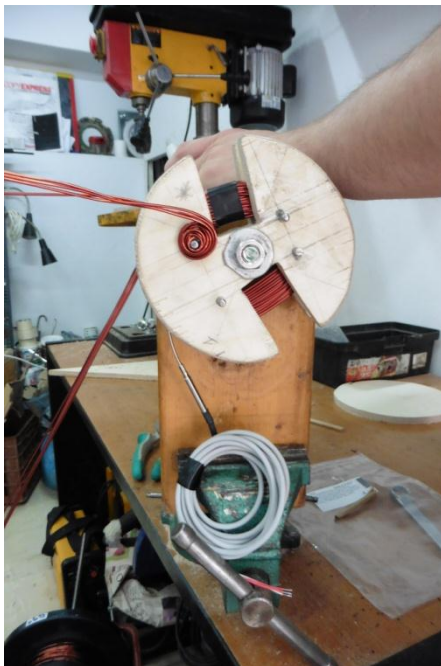


(α)



(β)

Σχήμα 7.8.α) Η μηχανή χειρός που χρησιμοποιείται για το τύλιγμα β) Η διαδικασία τυλίγματος όπου ένας κρατά τεντωμένο το χαλκό, ένας τυλίγει το πηνίο και ένας μετρά τις περιελίξεις. Είναι εμφανή τα 4 διαφορετικά καρούλια που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα αντί ενός.



Σχήμα 7.9. Η τοποθέτηση αισθητήρα θερμότητας εντός ενός από τα 24 πηνία του στάτη.

Αφού τυλίχτηκαν τα πηνία, μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους. Το αξονικό τους πάχος t_w καθώς και το πάχος πλευράς πηνίου w_c , προέκυψαν ελαφρώς μεγαλύτερα από το ζητούμενο. Έτσι μεταβάλλεται και η τιμή του συντελεστή πλήρωσης σε σχέση με την αρχική εκτίμηση. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στο ότι τα πηνία τυλίγονται στο χέρι.

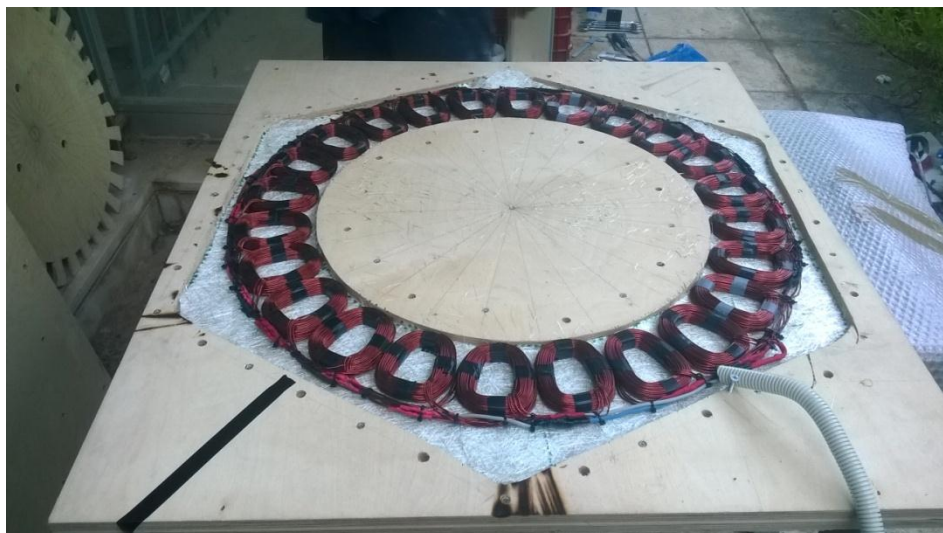
Στη γεννήτρια δεν υπάρχει πυρήνας και έτσι δεν υπάρχει και μηχανική στήριξη για τα πηνία. Η στήριξη επιτυγχάνεται και πάλι με βινυλεστερική ρητίνη, μέσα στην οποία τοποθετείται το τύλιγμα. Για το σκοπό αυτό κατασκευάσαμε ένα νέο καλούπι για το στάτη. Αποτελείται και αυτό από τρία μέρη, βάση, μεσαίο και καπάκι, τα οποία κόβονται από κόντρα πλακέ με λογικά παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε στα καλούπια του δρομέα. Στο κέντρο του μεσαίου τμήματος τοποθετήθηκε μικρότερος ξύλινος δίσκος ώστε να προκύψει κενό για να περάσει ο άξονας.

Τα άκρα των πηνίων ξεγυμνώθηκαν και χρησιμοποιώντας καλάι και κολλητήρι τα συνδέσαμε σε συνδεσμολογία αστέρα. Στα σημεία των συνδέσεων τοποθετήθηκαν θερμοσυστελλόμενα για καλύτερη προστασία της σύνδεσης. Συνδέθηκε και ο ουδέτερος ο οποίος δεν αφέθηκε στη γεννήτρια όπως συνηθίζεται αλλά βγαίνει έξω από αυτή με τις φάσεις για πειραματικούς σκοπούς.



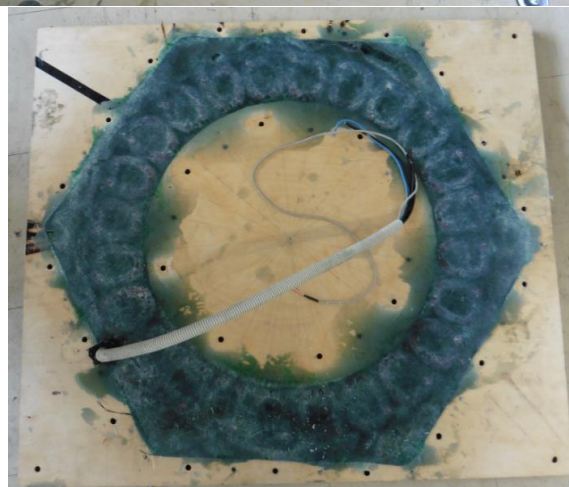
Σχήμα 7.10. Η σύνδεση σε αστέρα και τα θερμοσυστελλόμενα στα σημεία όπου τα άκρα των πηνίων συνδέονται με κολλητήρι και καλάι. Δεξιά η σύνδεση σχηματικά από το Recipe Book.

Αφού το τύλιγμα σταθεροποιήθηκε και κολλήθηκε, τοποθετήθηκε στο καλούπι το οποίο έχει αλειφθεί με κερί. Η ρητίνη, όπως ακριβώς και στο δρομέα, αναμίχθηκε με καταλύτη και ταλκ (θερμοαπαγωγή) και χύθηκε στο καλούπι. Παράλληλα τοποθετήθηκαν δύο λεπτά φύλλα από υαλονήματα στις δύο εξωτερικές πλευρές του στάτη ώστε να προσδοθεί μηχανική αντοχή.



Σχήμα 7.11. Τα πηνία τοποθετημένα πάνω σε υαλόνημα μέσα στο καλούπι λίγο πριν την έγχυση της ρητίνης.

Το καπάκι βιδώθηκε, το πλεόνασμα ρητίνης εξήλθε του καλουπιού και ο στάτης αφέθηκε να στεγνώσει. Μετά από 8 ώρες αποσυναρμολογήσαμε προσεχτικά το καλούπι και ο στάτης ήταν έτοιμος.



Σχήμα 7.12. Στην πρώτη εικόνα το καλούπι του στάτη έχει μόλις βιδωθεί. Στη δεύτερη έχουμε μόλις ανοίξει το καπάκι μετά από 8 ώρες αναμονής και η ρητίνη έχει στερεοποιηθεί.



Σχήμα 7.13. Ο στάτης αφού βγήκε από το καλούπι.

7.3. Η συναρμολόγηση της γεννήτριας



Σχήμα 7.14. Ο στάτης και οι δύο δρομείς έτοιμοι για συναρμολόγηση

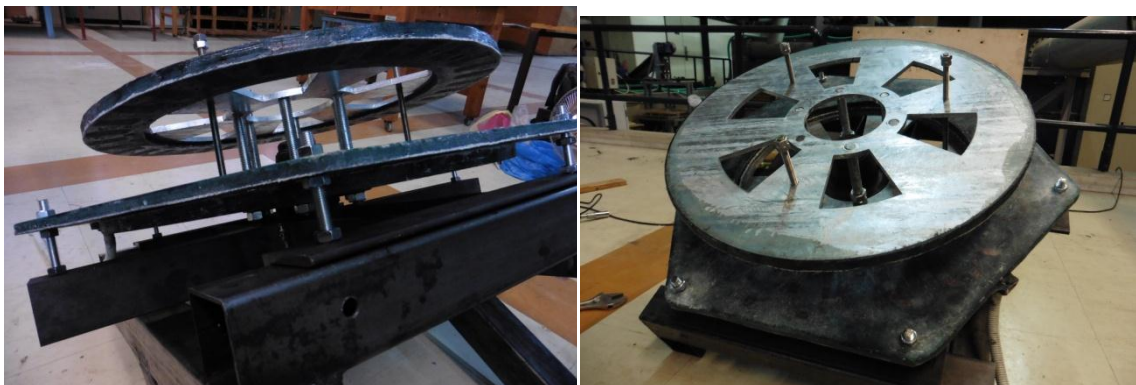
Η κατασκευή στήριξης, όπου στηρίζεται η γεννήτρια με το ρουλεμάν της, είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και τα διάφορα τμήματά της κολλάνε μεταξύ τους με ηλεκτροσυγκόλληση.



Σχήμα 7.15. Διαμόρφωση της κατασκευής στήριξης της γεννήτριας (δεξιά) και της βάσης στην οποία τοποθετήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων (αριστερά)

Για τη συναρμολόγηση της γεννήτριας, αρχικά ρυθμίστηκε η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα με τη βοήθεια παξιμαδιών που τοποθετούνται στις ντίζες του άξονα. Ρυθμίστηκε δηλαδή το διάκενο της γεννήτριας, που πρέπει να ισούται με $2g+t_w$. Στη συνέχεια προσαρμόστηκε ο στάτης, ώστε να υπάρχει το επιθυμητό μηχανικό διάκενο (g), το οποίο προέκυψε ίσο με 4 mm και αποτελείται από τον αέρα μεταξύ δρομέα – στάτη καθώς και από το πάχος της ρητίνης πάνω από τα πηνία και τους μαγνήτες.

Αφού έγινε και αυτό, ο στάτης σταθεροποιήθηκε στην τελική του θέση και πάλι με τη βοήθεια παξιμαδιών και ντιζών που βιδώνουν στην κατασκευή στήριξης.



Σχήμα 7.16. Η διαδικασία συναρμολόγησης της γεννήτριας



Σχήμα 7.17. Η γεννήτρια συναρμολογημένη.

Κεφάλαιο 8: Πειραματικές μετρήσεις

Η γεννήτρια που κατασκευάσαμε μεταφέρθηκε στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. όπου υπάρχουν τα κατάλληλα όργανα για να μετρηθεί. Στόχος των πειραματικών μετρήσεων είναι να μετρηθούν οι επιδόσεις της γεννήτριας που κατασκευάσαμε και να συγκριθούν με αυτές προέβλεπαν οι προσομοιώσεις.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που έχει σχεδιαστεί να έχει η γεννήτρια παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Γενικά χαρακτηριστικά	
Ονομαστική ισχύς	5043
Αριθμός πόλων	32
Αριθμός πηνίων	24
Διάκενο ($2g+t_w$)	23mm
Κόστος (από προσομοίωση)	961€
Μάζα (από προσομοίωση)	61.43 kg
Όγκος (από προσομοίωση)	23.32 dm ³
Στροφές cut-in	83
Τάση συσσωρευτών	48V
Δρομέας	
Δίσκοι του δρομέα	
Πάχος σιδήρου (h_r)	10
Εσωτερική ακτίνα (R_{in})	290.61mm
Εξωτερική ακτίνα (R_{out})	348.87 mm
Εσωτερική/Εξωτερική ακτίνα (k_d)	0.83
Μαγνήτες	
Πάχος (h_m)	10
Πλάτος (w_m)	27
Μήκος (l_a)	58
Πλάτος μαγνήτη/πλάτος πολικού βήματος (a_i)	0.43
Στάτης	
Πηνία	
Αξονικό πάχος (t_w)	15
Πάχος πλευράς πηνίου (w_c)	22.3693
Σπείρες/Πηνίο (N_c)	26
Διάμετρος χαλκού (d_c)	2.7797

Πίνακας 8.1. Τα βασικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας που κατασκευάστηκε

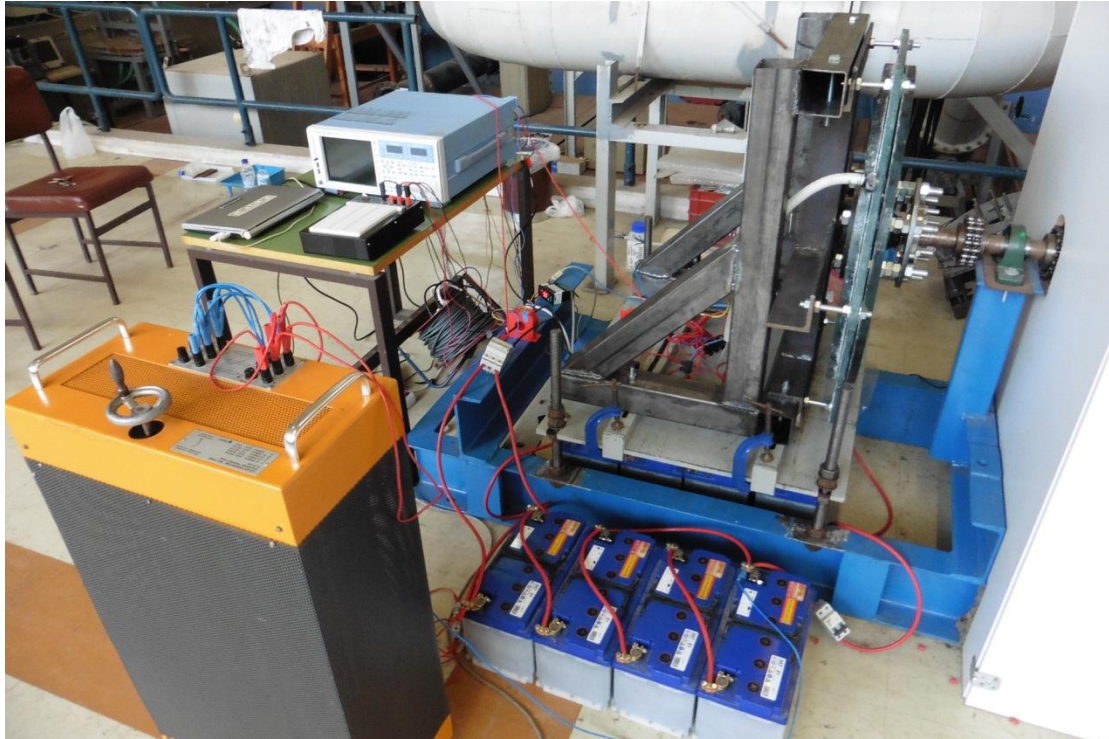
Τα όργανα και οι μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι τα εξής:

- DC κινητήρας ονομαστικής ισχύος 50HP μεταβλητών στροφών
- Ηλεκτρονικός έλεγχος στροφών
- Ροτόμετρο 500Nm
- Ψηφιακός παλμογράφος 4 καναλιών
- Ωμική αντίσταση 3kW
- 8 μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης 12 100Ah η καθεμία

- Τριφασικός ανορθωτής γέφυρας

Διεξήχθησαν τα παρακάτω πειράματα:

1. Μέτρηση της γεννήτριας σε κενό φορτίο
2. Μέτρηση της γεννήτριας σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές



Σχήμα 8.1. Η πειραματική διάταξη

8.1. Μέτρηση της γεννήτριας σε κενό φορτίο

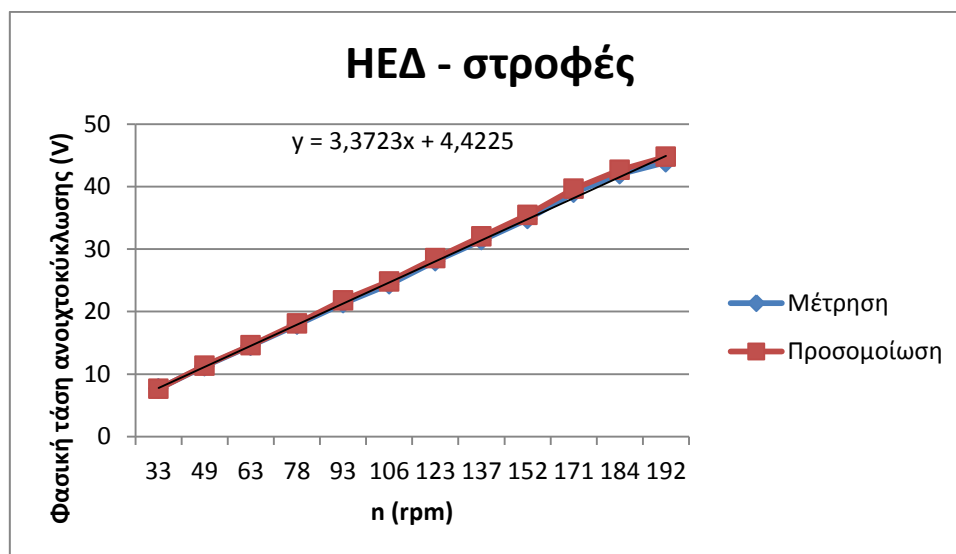
Πρόκειται ουσιαστικά για μέτρηση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε συνάρτηση με τις στροφές. Η γεννήτρια ανοιχτοκυκλώνεται και μετράται η τάση στα άκρα της. Οι στροφές του κινητήρα μεταβάλλονται από τον ηλεκτρονικό έλεγχο στροφών και η ΗΕΔ μετράται στον παλμογράφο μέχρι τις ονομαστικές στροφές. Για μεγαλύτερη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

Μετρήθηκε πολική τάση. Οι τρεις φάσεις δεν εμφανίζουν ακριβώς την ίδια ΗΕΔ. Πρόκειται για ασυμμετρία που οφείλεται σε διαφορετικό αριθμό ελιγμάτων κατά την περιέλιξη των πηνίων. Έτσι υπολογίζεται η μέση τιμή των τριών φάσεων και είναι ίση με την ΗΕΔ κάθε γεννήτριας.

Vavg φασική (V)	Vavg πολική (V)	f (Hz)	T (Nm)	Rpm (t)	Rpm (f)	Prot (W)	Ef sim (V)
7,707	13,349	9,009	6,49	33	34	22,959	7,654
11,245	19,477	13,167	6,61	49	49	34,178	11,36
14,519	25,149	17,004	7,14	63	64	47,677	14,61
17,879	30,967	20,933	7,43	78	79	61,078	18,09
21,305	36,901	24,955	7,75	93	94	75,947	21,8
24,342	42,161	28,515	8,27	106	107	92,605	24,82
28,049	48,582	32,854	8,73	123	123	112,631	28,53
31,401	54,387	36,781	9,21	137	138	133,029	32,01
34,793	60,263	40,759	9,43	152	153	150,937	35,48
39,023	67,589	45,718	10,09	171	171	181,151	39,66
41,968	72,691	49,172	10,32	184	184	199,275	42,67
43,879	76,000	51,383	10,62	192	193	214,289	44,76

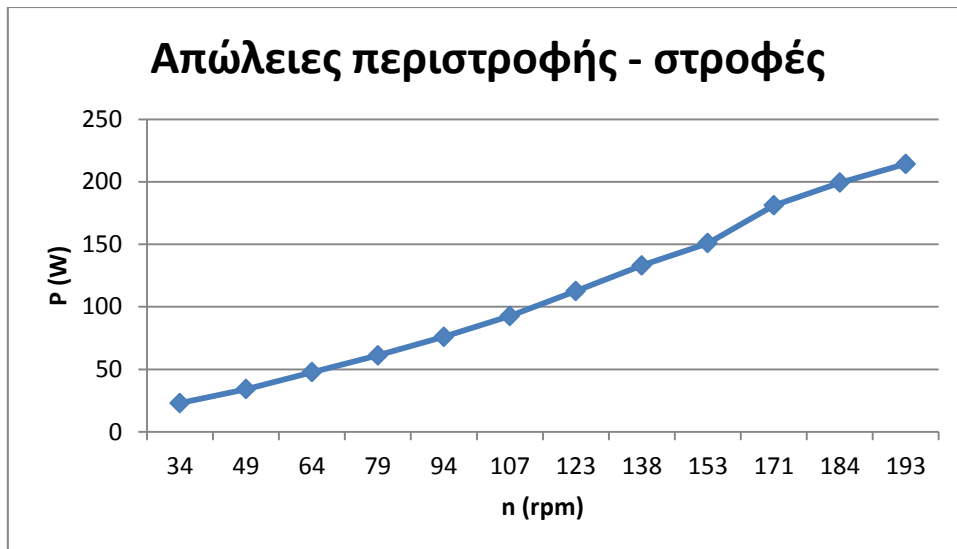
Πίνακας 8.2. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα κενού φορτίου

Με βάση τις μετρήσεις αυτές αναπαριστούμε γραφικά την ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Η ΗΕΔ μεταβάλλεται γραμμικά με την ταχύτητα περιστροφής, εφόσον αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού πεπλεγμένης ροής στο τύλιγμα [18].



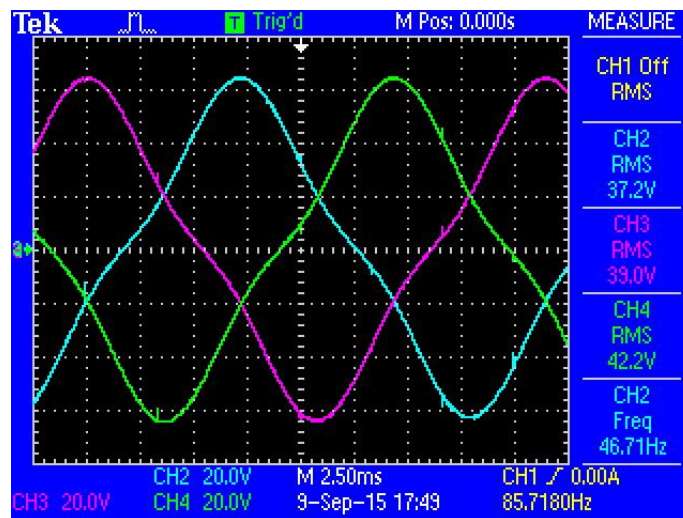
Σχήμα 8.2. Σύγκριση της καμπύλης ΗΕΔ – ταχύτητα περιστροφής που προέκυψε από την πειραματική μέτρηση της γεννήτριας και αυτής που προέκυψε από την προσομοίωση.

Τα σφάλματα κυμαίνονται από 0,65 έως 2,00%, που θεωρούνται ικανοποιητικές αποκλίσεις. Οι λόγοι των αποκλίσεων είναι αφενός κατασκευαστικοί. Είναι πιθανό, εφόσον η κατασκευή έχει γίνει στο χέρι να έχουν γίνει κάποια σφάλματα όπως για παράδειγμα στο τύλιγμα των πηνίων. Επίσης, το διάκενο, που επηρεάζει πολύ τη συμπεριφορά της γεννήτριας μπορεί να μην είναι σταθερό σε όλη την επιφάνεια των δίσκων ενώ είναι δεδομένο ότι έχει βγει κατά δύο mm μεγαλύτερο σε σχέση με τη διαστασιολόγηση (23 αντί 21). Τέλος και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων εμπεριέχει σφάλμα, όπως και το γεγονός ότι η γεωμετρία της προσομοίωσης έχει γίνει για λόγους απλότητας δισδιάστατη.



Σχήμα 8.3. Καταγραφή των απωλειών περιστροφής κατά την μέτρηση της γεννήτριας σε κενό φορτίο

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι οι απώλειες περιστροφής στον άξονα που ενώνει τη γεννήτρια με τον κινητήρα είναι πολύ υψηλές σε σχέση με αντίστοιχες μετρήσεις μικρότερων γεννητριών και αυτό οφείλεται στη μεγάλη μάζα και αδράνεια που παρουσιάζει η κατασκευή.

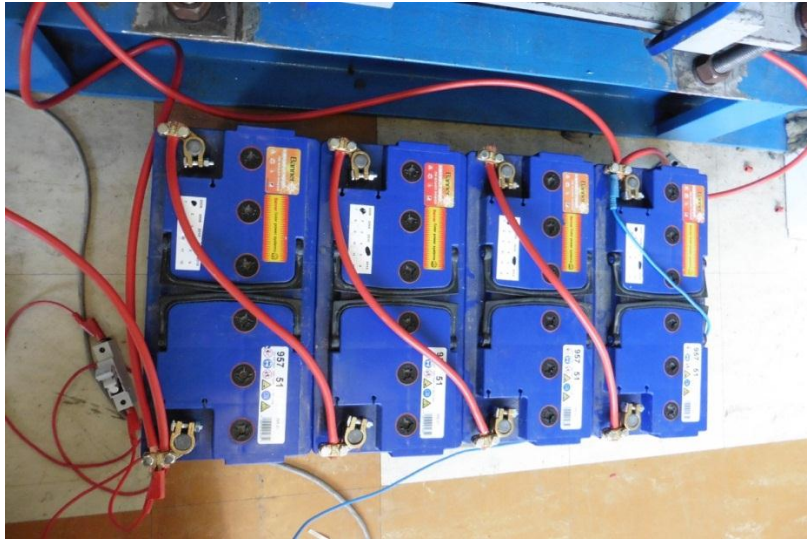


Σχήμα 8.4. Η κυματομορφή της τάσης όπως καταγράφηκε από τον παλμογράφο στη μέτρηση κενού φορτίου

8.2 Μέτρηση της γεννήτριας σε σύνδεση με συσσωρευτές

Στην έξοδο του ανορθωτή συνδέονται 2 συστάδες συσσωρευτών. Κάθε συστάδα αποτελείται από 4 συσσωρευτές τάσης 12V συνδεδεμένους σε σειρά. Οι 2 συστάδες

συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα ώστε τελικά να συντίθεται ένα σύστημα τάσης 48V. Οι στροφές μεταβάλλονται σταδιακά μέχρι να μετρηθεί το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας. Έτσι μπορεί να σχηματιστεί η καμπύλη ισχύος της γεννήτριας.



Σχήμα 8.5. Η μία εκ των 2 συστάδων συσσωρευτών

Παράλληλα με τις 2 συστάδες συσσωρευτών συνδέουμε και ένα τριφασικό ωμικό φορτίο μεταβλητής αντίστασης προκειμένου να αποφύγουμε τη διέλευση πολύ υψηλών ρευμάτων από τις μπαταρίες και κατ'επέκταση μια ενδεχόμενη καταστροφή τους.



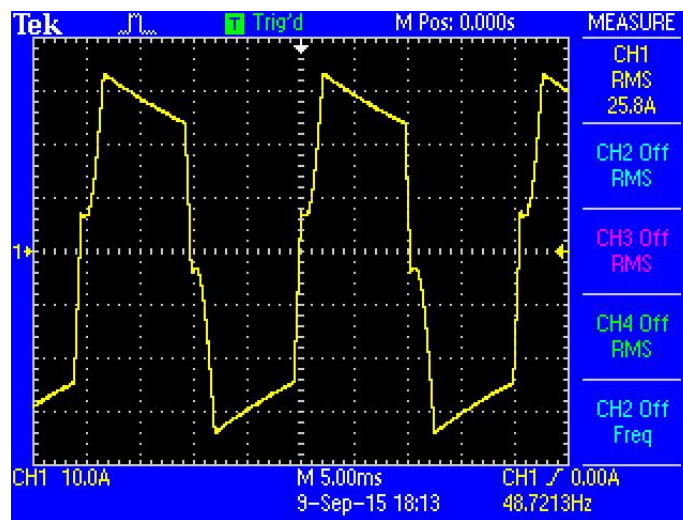
Σχήμα 8.6. Το ωμικό τριφασικό φορτίο 3kW μεταβλητής αντίστασης συνδεδεμένο παράλληλα με τις συστάδες των συσσωρευτών

Με το ροπόμετρο 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 φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

f (Hz)	n (rms)	Vavg φασικό (V)	Pel (W)	Pdc (W)	Iac (A)	Vdc (V)	Idc (A)
24,41	91,54	20,70	56,12	45,24	0,90	47,67	0,95
27,43	102,88	21,91	601,16	548,47	9,15	48,30	11,36
31,62	118,56	23,24	1518,18	1380,67	21,78	49,81	27,72
35,44	132,91	24,47	2382,10	2156,02	32,45	51,50	41,86
39,77	149,13	25,97	3318,47	2988,58	42,60	53,92	55,42
43,88	164,55	27,25	4226,55	3797,06	51,70	56,05	67,75
47,32	177,43	28,22	4969,61	4462,74	58,70	57,69	77,36
51,99	194,97	29,48	5937,75	5333,48	67,15	59,96	88,96

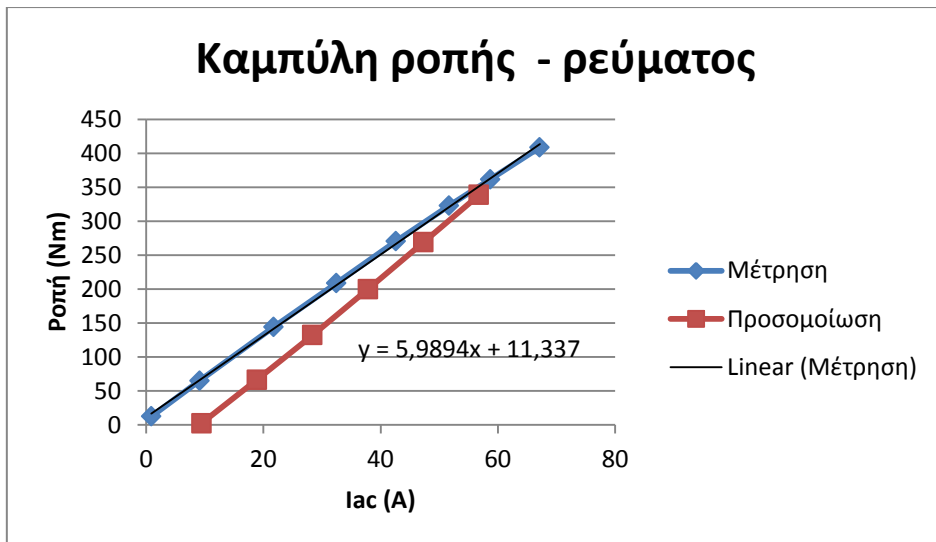
f (Hz)	n (rms)	T (Nm)	rpm(t)	Pmech (W)	Eff (gen)	Eff (rect)	Eff (sim)	T(sim) (Nm)	Iac sim (A)
24,41	91,54	12,57	91,00	120,50	0,47	0,81	-	-	-
27,43	102,88	65,17	102,00	702,10	0,86	0,91	0,90	2,4	9,46
31,62	118,56	144,30	118,00	1791,64	0,85	0,91	0,85	66,44	18,92
35,44	132,91	208,69	132,00	2904,57	0,82	0,91	0,81	132,36	28,38
39,77	149,13	270,42	148,00	4223,24	0,79	0,90	0,78	199,94	37,84
43,88	164,55	322,88	164,00	5563,73	0,76	0,90	0,76	268,86	47,3
47,32	177,43	361,48	177,00	6716,60	0,74	0,90	0,73	338,74	56,76
51,99	194,97	408,73	194,60	8344,99	0,71	0,90	0,71	409,43	66,22

Πίνακας 8.3. Μετρήσεις και υπολογισμοί από το πείραμα με συσσωρευτές

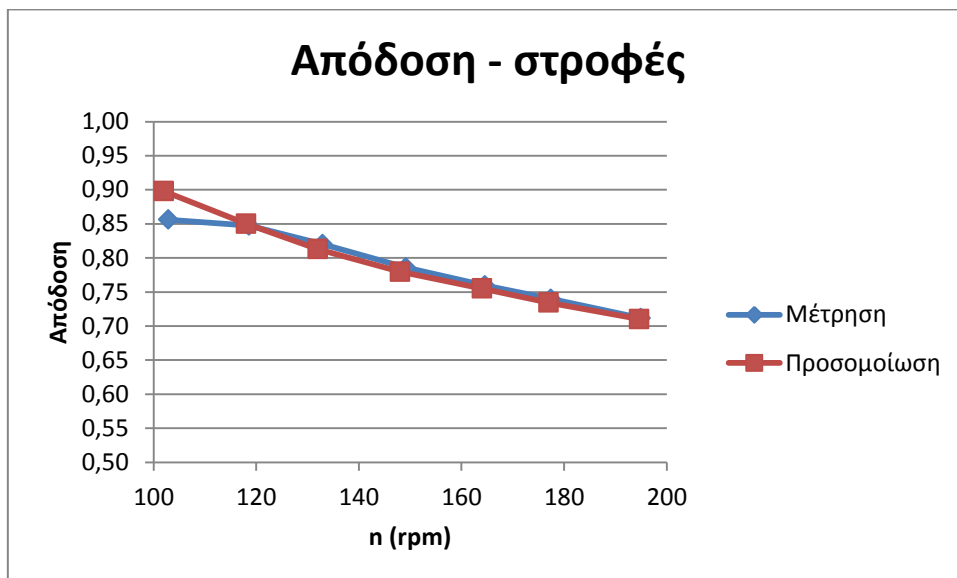


Σχήμα 8.7. Το ονομαστικό ρεύμα όπως καταγράφηκε στον παλμογράφο κατά τη μέτρηση σε σύνδεση με συσσωρευτές

Στο παρακάτω σχήμα συγκρίνεται η καμπύλη ροπής – ρεύματος όπως προέκυψε από τις μετρήσεις και την προσομοίωση:

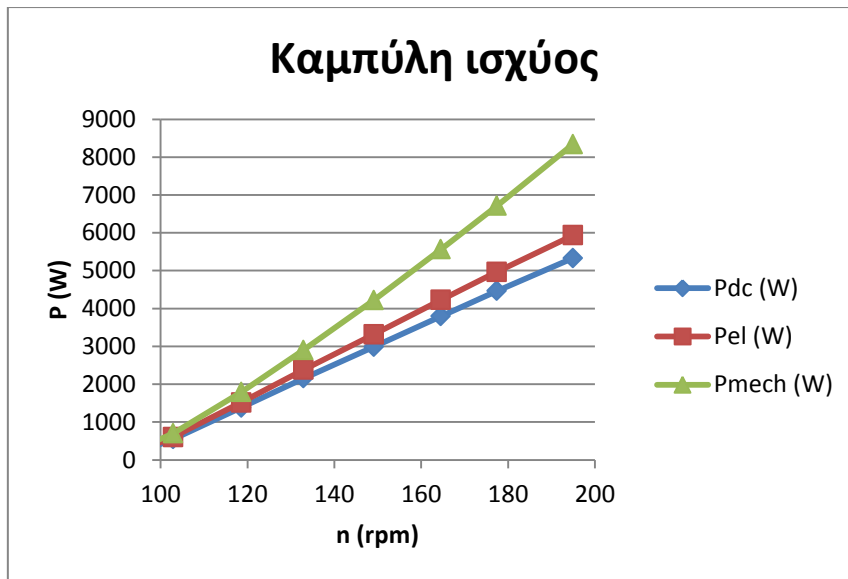


Σχήμα 8.8. Η μηχανική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα γραμμής όπως προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις και την προσομοίωση



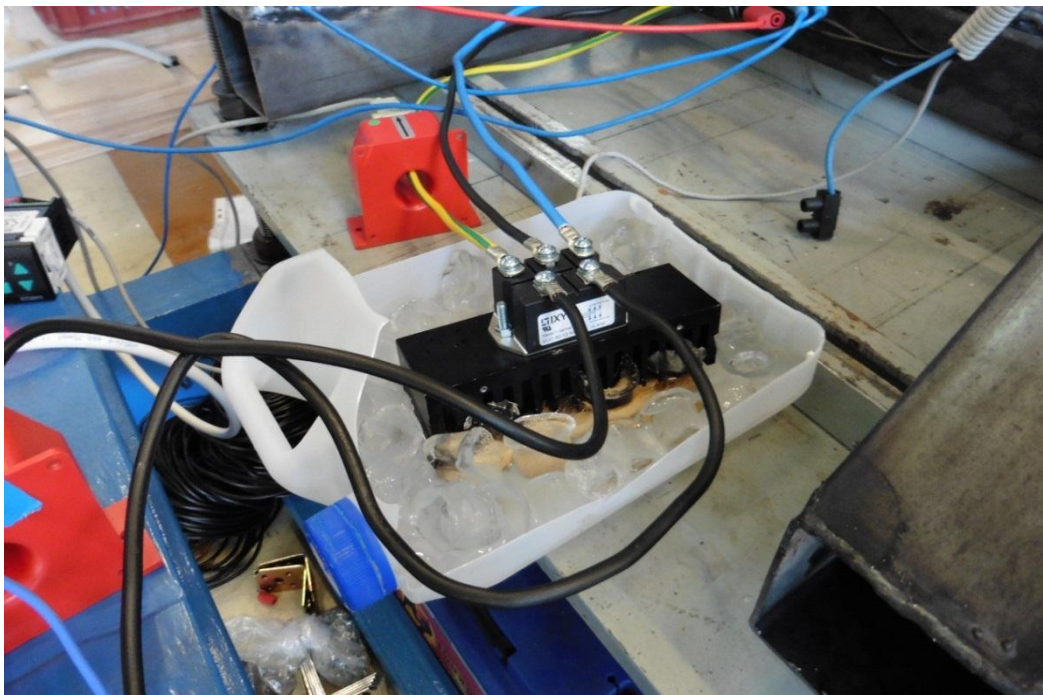
Σχήμα 8.9. Η απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής όπως προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις και την προσομοίωση

Παρατηρούμε ότι με εξαίρεση τις cut in στροφές υπάρχει ελάχιστη απόκλιση. Παρατηρούμε επίσης ότι η γεννήτρια έχει τις υψηλότερες αποδόσεις σε χαμηλές στροφές αφού εκτιμούμε ότι μικροί άνεμοι θα παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με τον ονομαστικό άνεμο.



Σχήμα 8.10. Η μηχανική ισχύς, η ηλεκτρική ισχύς και η ισχύς της γεννήτριας μετά τον ανορθωτή

Παρατηρούμε ότι οι απώλειες αυξάνονται όσο πλησιάζουμε τα ονομαστικά μεγέθη και αυτό κυρίως οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας στο στάση αλλά και στην αύξηση των απωλειών περιστροφής. Αντιθέτως οι απώλειες στον ανορθωτή είναι πρακτικά σταθερές αφού ο ανορθωτής παρουσιάζει σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων περιστροφής απόδοση περίπου 90%.



Σχήμα 8.11. Ο ανορθωτής που χρησιμοποιήσαμε.

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ως μέρη μικρών ανεμογεννητριών σε αγροτικές, αυτόνομες εγκαταστάσεις. Βασικό μέλημά μας ήταν να εντοπίσουμε τι προβλήματα δημιουργούνται κατά την σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία γεννητριών τέτοιου τύπου αυξημένης ισχύος σε σχέση με όσες έχουν κατασκευαστεί στο εργαστήριο. Παράλληλα επιδιώξαμε να βελτιώσουμε περαιτέρω τις υπάρχουσες μεθόδους βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά τις μεθόδους βελτιστοποίησης επιλέξαμε οι μεταβλητές που θα βελτιστοποιηθούν να είναι οι διαστάσεις του μαγνήτη καθώς αυτός αποτελεί το πιο ακριβό και δυσεύρετο υλικό της ανεμογεννήτριας. Έτσι προσαρμόσαμε τον αλγόριθμο ολικής βελτιστοποίησης PSO (Particle Swarm Optimization) προκειμένου να προσομοιώνει τις γεννήτριες με βάση τυχαίες τιμές των w_m και I_a και όχι των a_i και k_d όπως γινόταν σε προηγούμενες εργασίες.

Στη συνέχεια εντάξαμε στην αντικειμενική συνάρτηση τόσο του προγράμματος PSO όσο και του προγράμματος σειριακής αναζήτησης και τη μάζα ως κριτήριο βελτιστοποίησης καθώς κρίνεται κρίσιμο μέγεθος για γεννήτριες μικρού μεγέθους που κατασκευάζονται και συναρμολογούνται σε απομακρυσμένες περιοχές και χωρίς τη χρήση ακριβών μηχανημάτων και επομένως η ελαχιστοποίηση του βάρους αποτελεί σημαντική πρόκληση. Μάλιστα όσο αυξάνεται η ισχύς και συνεπώς το μέγεθος έχει νόημα η μάζα να εντάσσεται και με κάποιο συντελεστή (ειδικό βάρος) μεγαλύτερο από αυτόν που της δώσαμε εμείς (*10) προκειμένου να παίζει ακόμα πιο καθοριστικό ρόλο στις προσομοιώσεις.

Κλείνοντας το σκέλος που αφορά τις μεθόδους βελτιστοποίησης, πραγματοποιήσαμε σύγκριση των 2 μεθόδων (PSO και BFS). Η βασική τους διαφορά έγκειται στο ότι ενώ ο η σειριακή αναζήτηση (κατηγορία BFS) «σαρώνει» ολόκληρο το πεδίο ορισμού και εντοπίζει με βεβαιότητα το ολικό βέλτιστο με βάση τα κριτήρια που έχουμε θέσει, ο αλγόριθμος είναι πιθανό να «παγιδεύεται» σε τοπικά ελάχιστα και να αδυνατεί να εντοπίσει το ολικό βέλτιστο. Ωστόσο το σημαντικό πλεονέκτημα του PSO είναι η ασύγκριτα ταχύτερη εκτέλεσή του (2 λεπτά έναντι ωρών). Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις ο PSO αποκλίνει από τη βέλτιστη τιμή σε βαθμό που δεν είναι ανεκτός. Μάλιστα σε καμία περίπτωση δεν κατάφερε ο PSO να εντοπίσει με απόλυτη ακρίβεια τη βέλτιστη τιμή και για τις δύο μεταβλητές που εξετάζαμε (w_m και I_a).

Τα αίτια αυτής της αδυναμίας του PSO εντοπίζονται σε δύο παράγοντες: αρχικά στο γεγονός ότι δεν αξιοποιεί το πρόγραμμα FEMM προκειμένου να υπολογίσει την τιμή του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του μαγνήτη, B_{mg} , αλλά αντιθέτως χρησιμοποιεί μια εκτίμηση για την τιμή αυτή. Με δεδομένο όμως ότι το B_{mg} αλλάζει με το βαθμό του μαγνήτη αλλά και με το λόγο πλάτους μαγνήτη προς πλάτους πολικού βήματος a_i και επομένως η εκτίμηση αυτή χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Επίσης το PSO παρουσιάζει δυσκολία στην εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού μιας σειράς παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των σωματιδίων που διατρέχουν το πεδίο ορισμού προκειμένου να αποφεύγεται την ταχύτερη σύγκλιση των σωματιδίων που συνήθως καταλήγει σε τοπικά ελάχιστα αντί του ολικού αλλά την ίδια στιγμή η σύγκλιση να μην καθίσταται αδύνατη.

Τελικά επιλέξαμε μια ενδιάμεση μέθοδο συνδυάζοντας και τους δύο αλγορίθμους όπου ένας μικρός αριθμός επαναλήψεων του PSO (πέντε) χρησιμεύει όχι για την εύρεση των βέλτιστων τιμών διαστάσεων μαγνήτη αλλά για τον περιορισμό του πεδίου ορισμού εντός του οποίου αναζητούμε το βέλτιστο μαγνήτη με το πρόγραμμα σειριακής αναζήτησης, κερδίζοντας έτσι σημαντικά σε χρόνο εκτέλεσης.

Όσον αφορά στην εύρεση του βέλτιστου μαγνήτη, πραγματοποιήσαμε πλήθος προσομοιώσεων σε ένα μεγάλο εύρος ακτινών φτερωτής (από 2,4 μέχρι 3,9 μέτρα) για 4 διαφορετικούς βαθμούς (N40, N42, N45, N50), και 2 διαφορετικούς συνδυασμούς πάχους μαγνήτη – σιδήρου ($h_m = 10\text{mm}$, $h_r = 12\text{mm}$ – $h_m = 20\text{mm}$, $h_r = 12\text{mm}$).

Προέκυψε με σαφήνεια ότι η επιλογή μεγάλου πάχους μαγνήτη (20mm) αυξάνει το κόστος και τη μάζα της γεννήτριας (λόγω της αύξησης του μαγνήτη και του σιδήρου αντίστοιχα) σε βαθμό που την καθιστά ασύμφορη. Επίσης φάνηκε ότι για τόσο μεγάλη ισχύ, όπου η αύξηση της μάζας και του κόστους μας περιορίζει σοβαρά, η αύξηση του βαθμού του μαγνήτη δεν είναι απαραίτητα βοηθητική. Αντιθέτως η αύξηση του κόστους που ακολουθεί την αύξηση του βαθμού και η αύξηση της μάζας που προκαλεί η αύξηση του πάχους σιδήρου για την αποφυγή του κορεσμού κατέστησαν τους μαγνήτες βαθμού N45 πολύ καλύτερους από τους αντίστοιχους βαθμού N50.

Αφού για κάθε ακτίνα φτερωτής βρέθηκε ο βέλτιστος μαγνήτης, μέσω μιας προσαρμογής του προγράμματος σειριακής αναζήτησης εντοπίσαμε και τον καθολικό μαγνήτη, το μαγνήτη δηλαδή που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για όλες τις ακτίνες φτερωτής. Πρόκειται για μαγνήτη διαστάσεων 27-58-10mm βαθμού N45. Η επιλογή του καθολικού μαγνήτη έχει το πλεονέκτημα ότι ακριβώς επειδή θεωρείται κατάλληλος για πληθώρα διατάξεων μπορεί να γίνει μαζική παραγγελία ρίχνοντας σημαντικά την τιμή. Προσομοιώσαμε όλες τις γεννήτριες με το συγκεκριμένο μαγνήτη και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά του αντίστοιχου βέλτιστου προέκυψε ότι παρουσιάζουν πολύ παραπλήσια αποτελέσματα σε κόστος, απόδοση, μάζα και όγκο και το κέρδος που θα αποκομίζαμε από τη διαφορά κόστους θα ήταν μεγαλύτερο. Έτσι για την κατασκευή γεννήτριας παραγγείλαμε τον προαναφερθέντα μαγνήτη.

Στη συνέχεια κατασκευάσαμε μια γεννήτρια σχεδιασμένη για ακτίνα φτερωτής 3m και με εκτιμώμενη ισχύ 5.1kW. Η γεννήτρια μετρήθηκε στο εργαστήριο τόσο σε κενό φορτίο όσο και σε απευθείας σύνδεση με συσσωρευτές.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψε η διαπίστωση ότι η βασική δυσκολία που προκαλεί η αύξηση της ισχύος της γεννήτριας είναι η συνακόλουθη αύξηση της μάζας. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού καθίσταται αναγκαία η περαιτέρω μελέτη σχετικά με την ψύξη του στάτη εν ώρα λειτουργίας ώστε να εντοπιστεί η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος για την οποία μπορεί να γίνει σχεδίαση χωρίς να έχουμε υπερθέρμανση του στάτη. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί μείωση του χαλκού και επομένως συνολικά μείωση του όγκου και της μάζας της γεννήτριας. Η συνακόλουθη μείωση της απόδοσης δεν αποτελεί τόσο μεγάλο πρόβλημα αφού αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η απόδοση σε ανέμους σημαντικά μικρότερους του ονομαστικού, που παρουσιάζουν μεγαλύτερη συχνότητα. Επίσης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως όσο αυξάνεται η ισχύς, μπορούμε να δίνουμε μεγαλύτερο βάρος στη μάζα ως μέγεθος με βάση το οποίο γίνεται η βελτιστοποίηση και άρα η

προσθήκη συντελεστή για τη μάζα στην αντικειμενική συνάρτηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Δεύτερη διαπίστωση είναι ότι η απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές καθίσταται πιο δύσκολη σε τέτοια μεγέθη καθώς οι χαμηλές τάσεις των μπαταριών σε συνδυασμό με τη μεγάλη τάση της γεννήτριας έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλών ρευμάτων. Παρότι σε μικρότερες γεννήτριες προτιμούμε την απευθείας σύνδεση σε συσσωρευτές προκειμένου να διατηρηθεί χαμηλά το κόστος αποφεύγοντας την αγορά DC-DC μετατροπέα, η χρήση του σε τέτοιου μεγέθους γεννήτριες αξίζει να εξεταστεί. Η δυνατότητα που προσφέρει ένας τέτοιος μετατροπέας να αποσυνδέσουμε την τάση της γεννήτριας από την τάση των μπαταριών μπορεί να συμβάλει σε σημαντική μείωση της μάζας αφού για δεδομένη ισχύ θα έχουμε τη δυνατότητα να αυξήσουμε την τάση και να μειώσουμε τα ρεύματα.

Παράρτημα

I. Προγράμματα σε Matlab

Π.1. Σειριακή αναζήτηση με δυνατότητα μετακίνησης δρομέα εντός του FEMM

```
wmmin=20;
wmmax=20;
lamin=60;
lamax=60;
counter_raw=0;
bima=5;
TotalMassMatrix=zeros((wmmax-wmmin)/bima+1,(lamax-lamin)/bima+1);
EfficiencyMatrix=zeros((wmmax-wmmin)/bima+1,(lamax-lamin)/bima+1);
output=zeros((wmmax-wmmin)/bima+1,(lamax-lamin)/bima+1);
for wm=wmmin:bima:wmmax
    counter_column=0;
    counter_raw=counter_raw+1;
    for la=lamin:bima:lamax
        counter_column=counter_column+1;

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='NdFeB N45'; % choose magnetic material between 'NdFeB N40/N42/N45' and
'Ceramic 8'

if strcmp(mag_mater,'Ceramic 8')
    % Br=0.385; % Ferrite C8
    % Hc=235; % Ferrite C8
    % BHmax=27.9; % Ferrite C8
    mag_density=5; % density of Ferrite in g/cm3
end
%
if strcmp(mag_mater,'NdFeB N45')
    % Br=1.265; % NdFeB N40
    % Hc=915;% NdFeB N40
    % BHmax=314;% NdFeB N40 ?????? sosto?
    mag_density=7.5; % density of NdFeB in g/cm3
end

% % theoretical calculation of Bmg
% Hd=Hc/2;
% Bmg=BHmax/Hd; % +0.05 apo giorgi gia NdFeB N40
```

```

% Flux density on magnet surface from HP recipe and FEMM calc
if rotor==2 && strcmp(mag_mater,'NdFeB N45') % 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 N45') % 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 N45') % 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;

count=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;

% function round_2dec rounds to the third decimal point

% mechanical clearence + effective length + magnet size
g=3; % mechanical clearence gap including resin layers 0.5mm on coil and 0.5mm on magnet
%la=50; %'la' effective length and also magnet length
%wm=50; % magnet width from HP recipe book

% blade rotor
%Rturb=1.2; % turbine radius in meters
%Rturb=1.5;
Rturb=3;

```

```

tsr_cut_in=9; % cut in tip speed ratio
tsr_nom=5.5; % 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=0.38; % 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)*(cos(0.3491)*Vw_nom)^3; % rated
power in watts (proseggistika 20 moires furling)
Pnom_inst=Pnom; % instantaneous power at 10% more than nominal afairethike
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)*Ia*(10^-3);
%Flux_pole=Bp*wm*(10^-3)*Ia*(10^-3);
%Flux_pole=Bmax*wm*(10^-3)*Ia*(10^-3);
%Flux_pole=Bavg*wm*(10^-3)*Ia*(10^-3);

% number of poles
if Rturb==1.2 || Rturb==1.8
    poles=16;
else
    poles=40;
end

fnom=poles*n_nom/120; %ypologismos syxnotitas

%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=15; % 'tw' stator thickness from HP recipe book
kw=0.95; % winding coefficient
Nc_init=(sqrt(2)*EMF_cut_in)/(q*2*3.14*kw*Flux_pole*n_cut_in*poles/120); % 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

```

```

lac_max=(Pnom_inst)/(3*EMF_nom*efficiency); % EDO MALLON TO EMF_nom DEN EINAI
SOSTO maximum AC current allowing 10% overcurrent
kf=0.47; % winding fill factor
resist_cop=1.724*10^-8; % electrical resistivity of copper Ohm/m
cq=0.3; % heat coefficient W/cm2
wc_theor=((lac_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 crosssectional area mm2

select_conductor % select conductor from commercialy availabel sizes

wc=(sc*Nc)/(tw*kf); % wc after choosing commercial conductor size
Jmax=lac_max/sc; % maximum current density
Q=nphase; % also the number of phases

% rotor disks
Rin_init=(2*q*nphase*wc+q*nphase*wm)/(2*3.14);
coil_percent=0.06; % add 6% extra due to coil spacing at Rin and Rout
Rin_coil_spacing=(2*q*nphase*wc+q*nphase*wm)*coil_percent;
Rin=((2*q*nphase*wc+q*nphase*wm)+Rin_coil_spacing)/(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
according to number of coils
hr=10; % 'hr' rotor disk thickness from HP recipe book
Rin=Rout_eff-la; % inner radius at effective length

pFe=7.87; % density of iron g/cm3
BackIronVolume=2*hr*pi*(Rout^2)*10^(-3)-0.4*2*hr*pi*(Rin^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=10; % magnet thickness - in this case 10mm from HP recipe book
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 (triangular coil)
    coil_side_dist=0.5;%((2*pi*Ravg)/(q*Q))*0.13; % 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; % include kf in these calculation somehow??????
    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
    coil_hole_Rin=(2*pi*Rin-Rin_coil_spacing-2*coil_num*wc)/coil_num; % coil whole
dimensions (arc)
    coilangle_Rin=360/(2*pi*Rin/coil_hole_Rin);
    coil_hole_Rin_constr=2*Rin*sin((coilangle_Rin*pi/180)/2);% coil whole dimensions (line)
    coil_hole_Rout=(2*pi*Rout-(2*pi*Rout*coil_percent)-2*coil_num*wc)/coil_num; % coil
whole dimensions (arc) + add 14% extra due to coil spacing at Rout
    coilangle_Rout=360/(2*pi*Rout/coil_hole_Rout);
    coil_hole_Rout_constr=2*Rout*sin((coilangle_Rout*pi/180)/2);% coil whole dimensions
(line)
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); % NOT GOOD FOR THIS
TYRP OF COIL 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
%lac_max=8; % current at nominal windspeed
%cq=((lac_max*Nc*1000/wc)^2)*resist_cop/(20*kf*tw); % cq heat coefficient w/cm2

%Resistance calculation HP style!
lavgHP=lavg;

```

```

length__wire_HP=lavgHP*(Nc+2); % in mm + add 2 turns due to connection wire of coil at
the two edges
ResHP_20=(length__wire_HP)/sc/56000; % in ohm at 20 Celsius
ResHP_70=ResHP_20*1.25; % at 70 Celsius
coil_weight_constr=sc*length__wire_HP*0.009; % coil weight g
mcu_constr=coil_weight_constr*(coil_num+2); % stator weight g + 2 extra coils

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)

% calculation of losses and calculation of real efficiency at rated rpm
Iac_nom=(Pnom)/(3*EMF_nom*efficiency); % maximum AC current allowing 10%
overcurrent
Peddy=(pi*Ia*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+Peddy+Prot; % total losses
PhI=3*Iac_nom*EMF_nom*efficiency; % electrical power
efficiency_real=(PhI/(PhI+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
if strcmp(mag_mater,'NdFeB N40')
    Magcost=(0.531*Vmag*10^(-3)+0.599)*2*poles+shippingcost; %N40 in Euros
else if strcmp(mag_mater,'NdFeB N42')
    Magcost=(0.535*Vmag*10^(-3)+0.536)*2*poles+shippingcost; %N42 in Euros
else if strcmp(mag_mater,'NdFeB N45')
    Magcost=(0.49*Vmag*10^(-3)+0.513)*2*poles+shippingcost; %N45 in Euros
else if strcmp(mag_mater,'NdFeB N50')
    Magcost=(1.039*Vmag*10^(-3)+0.017)*2*poles+shippingcost; %N50 in Euros
end
end
end
end

%Copper cost
pcu=8.94;
mcu=3*Nc*q*lavg*sc*pcu*(10^(-6)); %kg lavg????
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;

%Total mass of generator
TotalMass=mcu+resinmass+BackIronMass+MagnetMass/1000;

%Total mass of 1 rotor
TotalMassRotor=(BackIronMass+MagnetMass/1000)/2;

%Total volume
TotalVolume= pi*Rout^2*(hr+hm+g+tw+g+hm+hr)/10^6;

w2=0.5; %distance between two different coils' legs
w1in=(2*pi*Rin-2*Q*wc-Q*w2)/Q; % coil hole at Rin
%Limitations
if (2*(pi)*Rin-wm*poles)<poles || (w1in-5)<=0 || (tw/wc)<=0.35 ||
(BackIronMass+MagnetMass/1000)>150
    efficiency_real=0.1;
    Totalcost=9999;
    TotalMass=1000;

end

count=count+1;

%break an infinite loop
if (count>=2) && (efficiency_real==0.1) || (count>=15)
    fprintf('autobreak')
    break
end

location_path=['C:\AFPM_mfiles\Petros_mfiles_15_6_15']; % path location to write files and
read from

```

```

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

%BackIronMassmatrix(counter_raw,counter_column)=BackIronMass;
%MagnetMassMatrix(counter_raw,counter_column)=MagnetMass/1000;
TotalMassMatrix(counter_raw,counter_column)=mcu+resinmass+BackIronMass+MagnetMa
ss/1000;
EfficiencyMatrix(counter_raw,counter_column)=efficiency_real;
TotalMassRotorMatrix(counter_raw,counter_column)=TotalMassRotor;
%output(counter_raw,counter_column)=efficiency_real
%output(counter_raw,counter_column)=totalcost
output(counter_raw,counter_column)=efficiency_real*1000-Totalcost-TotalMass*10
    end
end

result=max(output)
%result=min(output)

% rotational speed
speed=n_nom;

% maximum current to simulate and current step, set to zero for no load operation
lmax=lac_max;
l_step=lac_max;

% displacement step in mm, choose from 1,2,3 etc - check angle in deg to be 1 degree or less
step=2.9;

%solver;

```

II. Μελέτη tw

N 40

g (mm)	J/m ³	J	m ³
1	31973,2	24,9844	0,000781
2	32688,68	27,2554	0,000834
3	33725,28	29,1808	0,000865
4	33506,98	30,8291	0,00092
5	33026,57	32,2521	0,000977
6	32364,45	33,4862	0,001035

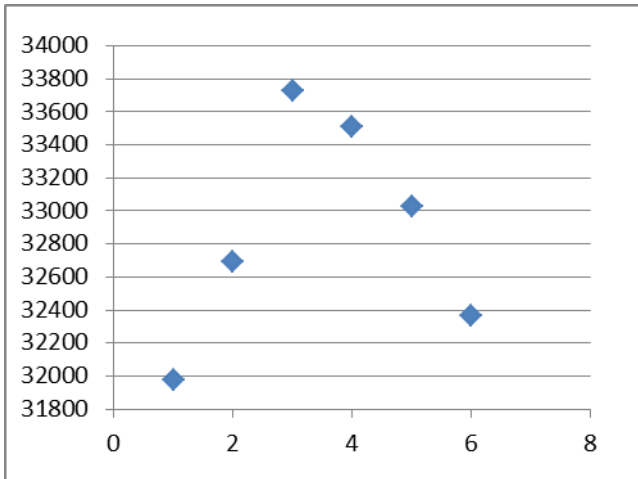
hm=10

tw=9

ai=0.41-0.36

opt airgap=15mm

for g=3 tw=9



N 40

g (mm)	J/m ³	J	m ³
1	38263,61	38,8896	0,001016
2	38266,54	40,8017	0,001066
3	38835,78	42,4312	0,001093
4	38434,45	43,979	0,001144
5	38655,12	45,2721	0,001171

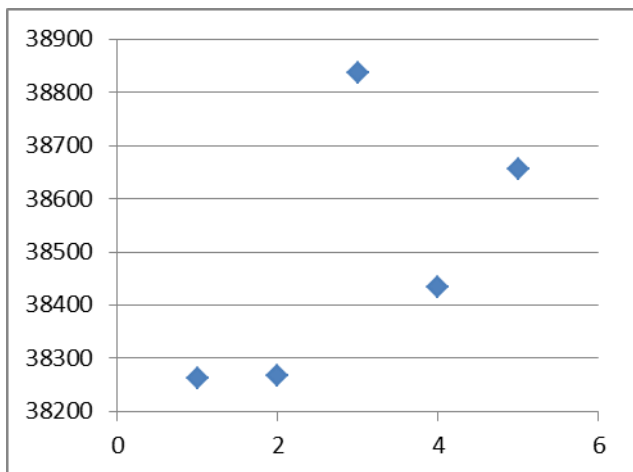
hm=20

tw=17

ai=0.48-0.46

opt airgap=23mm

for g=3 tw=17



N 42

g (mm)	J/m ³	J	m ³
1	34547,74	26,2739	0,000761
2	35294,07	28,6609	0,000812
3	36413,73	30,686	0,000843
4	35235,2	32,4192	0,00092
5	34729,51	33,9151	0,000977
6	34032,63	35,2122	0,001035

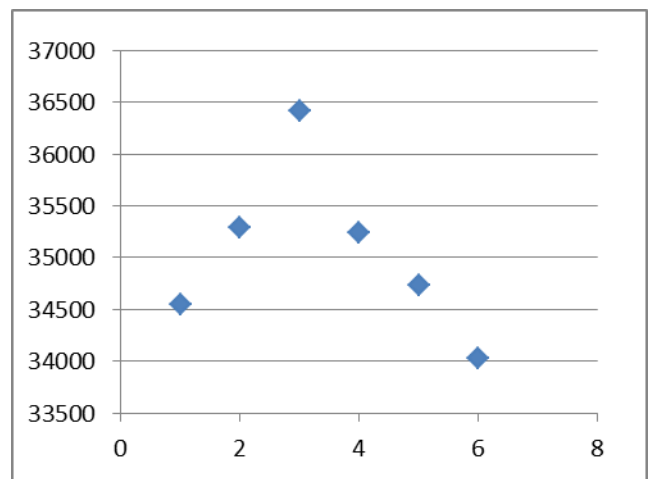
hm=10

tw=9

ai=0.42-0.36

opt airgap=15mm

for g=3 tw=9



N 42

g (mm)	J/m3	J	m3
1	40241,75	40,9001	0,001016
2	41092,9	42,8225	0,001042
3	40842,59	44,6238	0,001093
4	41239,42	46,1432	0,001119
5	40651,91	47,6107	0,001171

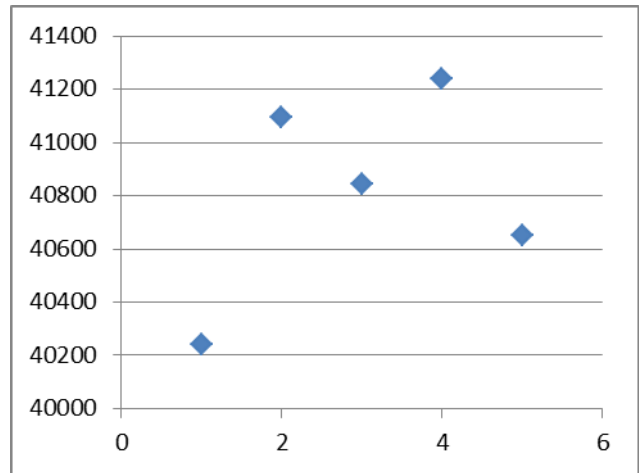
hm=20

tw=17

ai=0.51-0.46

opt airgap=25mm

for g=3 tw=19



N 45

g (mm)	J/m3	J	m3
1	40059,89	30,7031	0,000766
2	40298,45	32,8733	0,000816
3	40079,86	34,731	0,000867
4	39542,59	36,3328	0,000919
5	38784,09	37,7211	0,000973

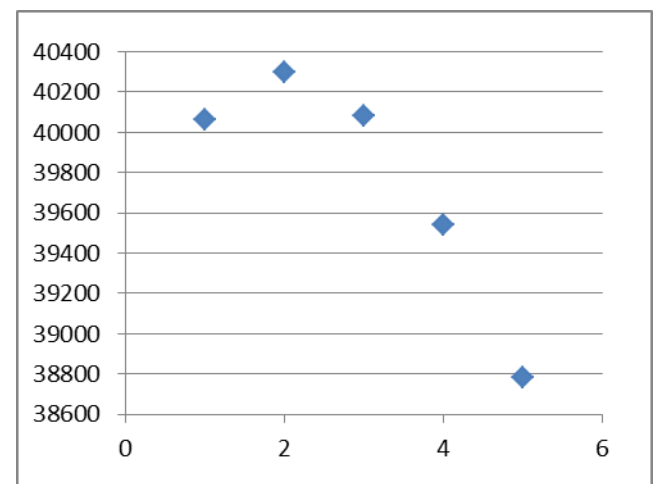
hm=10

tw=11

ai=0.43-0.39

opt airgap=15mm

for g=3 tw=9



N 45

g (mm)	J/m3	J	m3
1	44050,25	43,733	0,000993
2	44966,16	45,7724	0,001018
3	44669,05	47,6985	0,001068
4	45087,74	49,3057	0,001094
5	44425,05	50,8769	0,001145

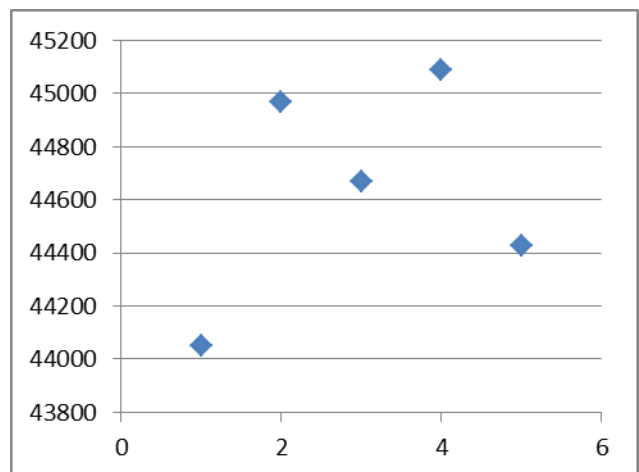
hm=20

tw=17

ai=0.49

opt airgap=25mm

for g=3 tw=19



N 50

g (mm)	J/m ³	J	m ³
1	45681,31	34,1138	0,000747
2	45919,17	36,5219	0,000795
3	45641,1	38,5854	0,000845
4	46119,47	40,3579	0,000875
5	45182,91	41,9006	0,000927

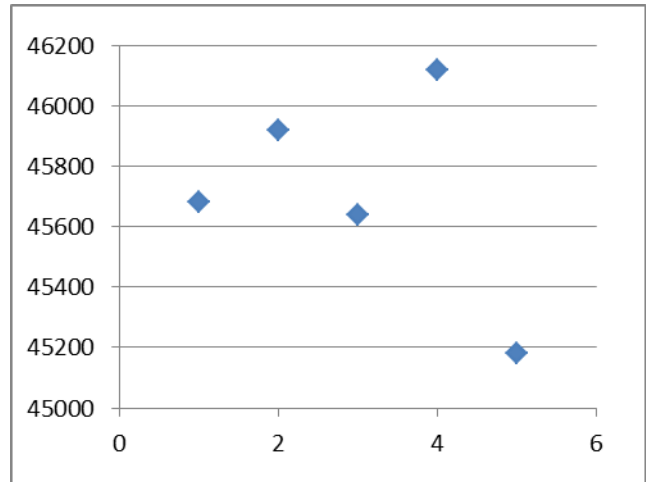
hm=10

tw=11

ai=0.44-0.41

opt airgap=19mm

for g=3 tw=13



N 50

g (mm)	J/m ³	J	m ³
1	50016,92	48,4782	0,000969
2	51039,82	50,722	0,000994
3	50675,41	52,858	0,001043
4	51130,69	54,6178	0,001068
5	50356,03	56,3625	0,001119

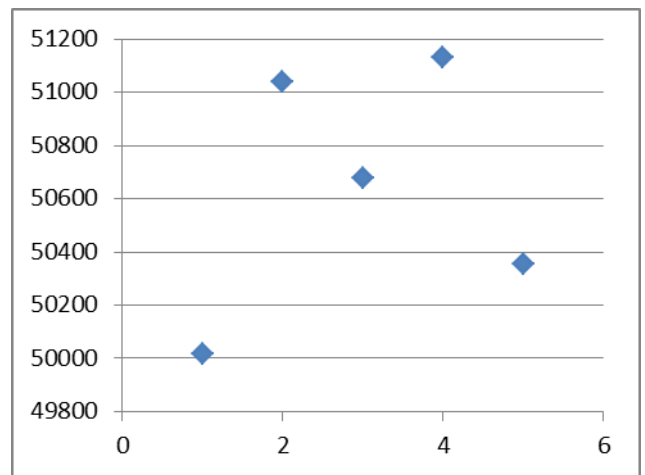
hm=20

tw=17

ai=0.51-0.48

opt airgap=25mm

for g=3 tw=19



III. Αποτελέσματα hm 20 N42, N45, N50

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας							
N42 hm 20	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	η_{cutin} (rpm)
	2400mm	29	37	24	902	0.83	98
	2700mm	26	43	28	1101	0.84	86
	3000mm	28	39	32	1279	0.84	78
	3300mm	23	52	36	1543	0.84	70
	3600mm	24	52	40	1791	0.85	65
	3900mm	25	55	44	2111	0.86	61

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας									
N42 hm 20	Ακτίνα φτερωτής	Pnom (W)	Rout (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	ai	kd	Nc	sc (mm ²)
	2400mm	3276	276.05	46.38	20.35	0.43	0.87	45	3.88
	2700mm	4221	313.28	58.98	26.21	0.40	0.86	36	4.91
	3000mm	5194	368.78	75.60	36.32	0.41	0.89	31	6.07
	3300mm	6379	394.20	89.90	41.50	0.36	0.87	25	7.34
	3600mm	7588	437.18	107.16	51.04	0.37	0.88	21	8.73
	3900mm	8893	469.78	123.31	58.93	0.40	0.88	17	10.25

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας							
N45 hm 20	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	η_{cutin} (rpm)
	2400mm	28	38	24	843	0.83	101
	2700mm	29	39	28	1036	0.84	91
	3000mm	27	42	32	1219	0.84	81
	3300mm	26	44	36	1417	0.85	73
	3600mm	25	53	40	1721	0.86	69
	3900mm	23	58	44	1952	0.86	63

Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας									
N45 hm 20	Ακτίνα φτερωτής	Pnom (W)	Rout (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	ai	kd	Nc	sc (mm ²)
	2400mm	3172	270.65	45.13	19.56	0.43	0.86	44	3.88
	2700mm	4024	310.11	57.00	25.68	0.45	0.87	34	4.91
	3000mm	5027	353.78	71.82	33.42	0.41	0.88	29	6.07
	3300mm	6133	399.92	88.85	42.71	0.39	0.89	25	7.34
	3600mm	7237	418.17	100.69	46.70	0.41	0.87	19	8.73
	3900mm	8606	461.62	120.70	56.90	0.37	0.87	17	10.25

N50 hm 20	Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας						
	Ακτίνα φτερωτής	wm (mm)	la (mm)	πόλοι	Κόστος (€)	Απόδοση	n_{cutin} (rpm)
	2400mm	27	30	24	1154	0.80	95
	2700mm	27	31	28	1405	0.82	84
	3000mm	27	33	32	1700	0.83	77
	3300mm	26	36	36	2013	0.84	70
	3600mm	23	42	40	2332	0.84	64
	3900mm	22	47	44	2723	0.84	59

N50 hm 20	Βέλτιστες γεννήτριες με το συνδυαστικό κριτήριο απόδοσης - κόστους - μάζας								
	Ακτίνα φτερωτής	Pnom (W)	Rout (mm)	Μάζα (kg)	Όγκος (dm ³)	ai	kd	Nc	sc (mm ²)
	2400mm	3269	296.36	49.13	23.45	0.37	0.90	55	3.88
	2700mm	4198	344.35	63.66	31.66	0.37	0.91	44	4.91
	3000mm	5210	386.58	78.47	39.91	0.37	0.91	35	6.07
	3300mm	6367	429.86	95.60	49.34	0.36	0.92	29	7.34
	3600mm	7641	472.28	115.29	59.56	0.32	0.91	25	8.73
	3900mm	9051	509.81	134.37	69.41	0.32	0.91	21	10.25

Βιβλιογραφία

[1] Αικατερίνη Γ. Τρουλλάκη, «Μελέτη διαφορετικών μαγνητικών υλικών για τοπικά κατασκευασμένες μικρές ανεμογεννήτριες αξονικής ροής σε εφαρμογές αγροτικής ηλεκτροδότησης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2014.

[2] Αχιλλεύς Γ. Τσιτσιμελής, «Μελέτη και σχεδίαση γεννητριών αξονικής ροής με χρήση αλγόριθμων εξελικτικού υπολογισμού για μικρές ανεμογεννήτριες αγροτικών εφαρμογών», Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π., 2013.

[3] Αριστοτέλης Τύμπας, «Βιομηχανικά Αιολικά Πάρκα έναντι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Το Παράδειγμα του Βορείου Αιγαίου», 2012.

[4] Kim Bryan, “Open Source Energy”, RedPepper 2013
<http://www.redpepper.org.uk/open-source-energy/>

[5] FLOK Society: Designing a free open knowledge society
http://en.wiki.floksociety.org/w/Research_Plan_Provided_by_the_Research_Coordinators

[6] 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.

[7] F. Rossouw, “Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications”, thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.

[8] H. Piggott, “A wind turbine recipe book”, 2009.

[9] D. Bartmann, D. Fink, “Homebrew Wind Power: Hands-on guide to harnessing the wind”, Buckville Publications, 2009.

[10] H. Piggott “How to build a wind turbine”, 2005.

[11] R. J. Wang, “Design Aspects and Optimisation of an Axial Field Permanent Magnet Machine with an Ironless Stator”, Dissertation, University of Stellenbosch, March 2003

[12] Hau E. “Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics”, second edition, Springer, 2006..

[13] Parviainen Asko, “Design of Axial-Flux Permanent Magnet Low-speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines”, 2005.

- [14] K. Nilsson, E. Segergren and M. Leijon, 'Simulation of Direct Drive Generators Designed for Underwater Vertical Axis Turbines', Fifth European Wave Energy Conference, 2003.
- [15] Yicheng C., Pragasen P., Azeem K., "PM Wind Generator Comparison of Different Topologies", Industry Applications Conference, 2004, Vol.3, pp. 1405-1412, October, 2004.
- [16] Rovio T., 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.
- [17] 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.
- [18] Π. Κοτσαμπόπουλος, "Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [19] J. Gieras, R. Wang, M. Kamper, "Axial flux permanent magnet brushless machines", second edition, Springer, 2008.
- [20] 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., p.13- 20, 3-5 May 2007.
- [21] J. F. Gieras and M. Wing, 'Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications', Second Edition, 2002.
- [22] S. Constantinides, 'Understanding and Using Reversible Temperature Coefficients', 2010.
- [23] K. J. Strnat, Professor Emeritus, University of Dayton, Ohio, "Modern Permanent Magnets for Applications in ElectroTechnology", 1990.
- [24] Σ. Καλογεροπούλου, 'Μαγνητικές ιδιότητες — Μαγνητικά υλικά', σημειώσεις εργαστηρίου, ΤΕΙ Πειραιά.
- [25] K.C. Latoufis, G.M. Messinis, P.C. Kotsampopoulos and N.D. Hatziargyriou, 'Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind Turbines', National Technical University of Athens, Reprinted from Wind Engineering, 2012.
- [26] Σ. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Εκδόσεις Συμμεών, 2007.

- [27] T. Weise, "Global Optimization Algorithms - Theory and Application". Thomas Weise, 2008, Online available at <http://www.it-weise.de/> .
- [28] W. Ouyang, D. Zarko and T. A. Lipo, "Permanent Magnet Machine Design Practice and Optimization," *2006 IEEE conference on Industrial Applications*, pp. 1905-11, Tampa, FL, 2006.
- [29] N. Bianchi, S. Bolognani and P. Frare, "Design criteria of high efficiency SPM synchronous motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, pp. 396-404, June 2006.
- [30] C. Blache and D. Paccard, "Magnetic structure design method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, pp. 2228-31, Sep. 1993.
- [31] J. Robinson and Y. Rahmat-Samii, "Particle Swarm Optimization in Electromagnetics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, pp. 397-407, February 2004.
- [32] G. K. V. Y. del Valle, S. Mohagheghi, J.-C Hernandez and R.G Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, Apr. 2008.
- [33] Yao Duan, "Method for Design and Optimization of Surface Mount Permanent Magnet Machines and Induction Machines", PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, December 2010.
- [34] Y. Wang, Y. Cheung and H. Liu, *Computational Intelligence and Security*: Springer, 2007, ISBN: 3540743766.
- [35] A. Ζαρογιάννης, «Σχεδίαση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση μικρών ανεμογεννητριών για εφαρμογές χαμηλού κόστους για σύνδεση στο δίκτυο», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2012