



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

**Μελέτη και σχεδίαση γεννητριών αξονικής ροής με χρήση αλγόριθμων
εξελικτικού υπολογισμού για μικρές ανεμογεννήτριες αγροτικών εφαρμογών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αχιλλεύς Γ. Τσιτσιμελής

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013



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

**Μελέτη και σχεδίαση γεννητριών αξονικής ροής με χρήση αλγόριθμων
εξελικτικού υπολογισμού για μικρές ανεμογεννήτριες αγροτικών εφαρμογών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αχιλλεύς Γ. Τσιτσιμελής

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2013.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....
Αχιλλεύς Γ. Τσιτσιμελής

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

Copyright © Αχιλλεύς Γ. Τσιτσιμελής, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματεύεται η μελέτη και βελτιστοποίηση μικρών γεννητριών αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών χωρίς πυρήνα στον στάτη για αιολικές εφαρμογές, σε εύρος ισχύος από 3 έως 6 KW, για την χρησιμοποίησή τους σε αγροτικές περιοχές.

Γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της ενδιάμεσης τεχνολογίας και δίνονται κάποιες βασικές πληροφορίες όσον αφορά την μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της ανεμογεννήτριας. Στην συνέχεια αναφέρονται κάποιες βασικές διαφορές και γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των γεννητριών ακτινικής και αξονικής ροής. Επίσης γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στα είδη και τις τοπολογίες γεννητριών του συγκεκριμένου είδους καθώς και μια στοιχειώδης ανάλυση της θεωρίας τους.

Παρουσιάζεται η πλήρης γενική διαστασιολόγηση αυτών των γεννητριών στην οποία συμπεριλαμβάνεται η εύρεση των ονομαστικών μεγεθών λειτουργίας και των διαστάσεων βασικών στοιχείων αυτών. Βρίσκονται οι διαστάσεις των μαγνητών και των πηνίων καθώς και το συνολικό κόστος, βάρος και όγκος των γεννητριών σε όλες τις ισχύς όπου και θα χρησιμεύσουν στην διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Βασισμένη στην παραπάνω διαστασιολόγηση ακολουθεί η βελτιστοποίηση με τις μεθόδους Particle Swarm Optimization (PSO) και Homogeneous Particle Swarm Optimization (HPSO) αφού πρώτα έχει γίνει αναλυτική αναφορά στην θεωρία των συγκεκριμένων αλγόριθμων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται. Οι μεταβλητές που βελτιστοποιούνται είναι ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος a_i και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d με κριτήρια το κόστος, την μάζα, τον όγκο και την απόδοση. Ακόμα χρησιμοποιούνται συνδυασμοί αυτών των κριτηρίων στην περίπτωση βελτιστοποίησης με την μέθοδο HPSO. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλυτικά με πίνακες αποτελεσμάτων και γραφικές παραστάσεις και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με χρήση του μαγνήτη N40 και του μαγνήτη N45.

Στην συνέχεια γίνεται θερμική ανάλυση σύγχρονης γεννήτριας 3 KW όπου αφού γίνει ανάλυση της σχετικής θεωρίας, χρησιμοποιείται το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τις πειραματικές μετρήσεις.

Τέλος συζητούνται τα αποτελέσματα και κατατίθενται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις Κλειδιά :

ενδιάμεση τεχνολογία, χαμηλό κόστος, μικρές ανεμογεννήτριες, γεννήτριες αξονικής ροής, μόνιμοι μαγνήτες, βελτιστοποίηση κόστους, βελτιστοποίηση μάζας, Particle Swarm Optimization (PSO), Homogeneous Particle Swarm Optimization (HPSO), αντικειμενική συνάρτηση, βαθμός μαγνήτη, θερμική ανάλυση, θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων

Abstract

Subject of the present work is the study and optimization of small axial flux coreless permanent magnet generators for wind energy rural applications, at a range of nominal power from 3 to 6 KW.

An introduction is made on the principles of appropriate technology applications while the basic concepts of energy transformations of the wind generator are presented. A comparison between AFPM and RFPM is conducted and a theoretical analysis is also presented.

The complete sizing process of these generators is presented, including the determination of the nominal operating conditions and the total set of dimensions of the generator's parts. The dimensions of coils and magnets are determined as well as the total cost, weight and volume of the generators which are going to be use in the process of optimization.

According to the previous approach the design is optimized with PSO and HPSO methods while analysing the theory of these optimizing algorithms. The pole arce to pole pitch ratio and the ratio of the internal to the external diameter are optimized for lower cost, mass, volume and higher efficiency. Also combinations of these criteria are optimized with the HPSO method. The results of these combinations and a comparison for magnet grades N40 and N45 are presented.

Further on, the thermal analysis of a 3 KW is examined. The relevant theory is analysed and the thermal model of lumped parameter is used. The results are compared with the experimental thermal measurements.

Finally, conclusions are drawn and proposals for improvements and further work are presented.

Key Words :

appropriate technology, low cost, small wind turbines, axial flux generators, permanent magnets, cost optimization, mass optimization, Particle Swarm Optimization (PSO), Homogeneous Particle Swarm Optimization (HPSO), objective function, magnet grade, thermal analysis, lumped parameter thermal model

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη για τις υποδείξεις και την καθοδήγηση του κατά την διεξαγωγή της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής και τις υποδείξεις του.

Στους γονείς μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Μικρές Ανεμογεννήτριες.....	14
1.2 Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggot.....	15
1.3 Η ενδιάμεση τεχνολογία.....	15
1.3.1 Σχεδιασμός βασισμένος στην ενδιάμεση τεχνολογία.....	15
1.3.2 Κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις.....	16
1.4 Ισχύς του ανέμου.....	17
2. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	
2.1 Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής.....	20
2.2 Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.....	23
2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά.....	23
2.2.2 Επιλεγόμενη τοπολογία (Διπλός δρομέας - μονός στάτης).....	25
2.3 Τα τυλίγματα.....	26
2.4 Θεωρητική ανάλυση.....	28
2.4.1 Μαγνητική Ροή-HEΔ.....	28
2.4.2 Ανάλυση του τυλίγματος.....	30
2.4.2.1 Ανάπτυξη ροπής.....	30
2.4.2.2 Πυκνότητα ρεύματος.....	32
2.4.2.3 Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος.....	33
2.4.3. Το μαγνητικό κύκλωμα.....	34
2.4.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα.....	38
2.4.4.1. Μελέτη απωλειών.....	38
2.4.4.2. Ισοζύγιο Ενέργειας-Ισοδύναμο Κύκλωμα.....	40
3. ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	
3.1 Ονομαστικές στροφές-Ονομαστική Τάση.....	42
3.2 Αριθμός πόλων-πηνίων, συχνότητα λειτουργίας.....	43
3.3 Οι Μαγνήτες.....	44
3.3.1 Το είδος του μαγνήτη.....	44
3.3.2 Το σχήμα του μαγνήτη.....	46
3.3.3 Οι διαστάσεις των μαγνητών.....	46
3.3.4 Ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος.....	48
3.3.5 Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής.....	48
3.3.6 Ροπή και εξωτερική ακτίνα.....	48
3.3.7 Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα.....	49
3.4 Ο στάτης και τα πηνία.....	49
3.4.1 Το πάχος του στάτη.....	49
3.4.2 Σπείρες και πάχος πηνίου.....	50
3.4.3 Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου.....	51
3.5 Το πάχος του σιδήρου.....	52
3.6 Κόστος και βάρος γεννήτριας.....	53
3.6.1 Οι μαγνήτες.....	54
3.6.2 Ο σίδηρος.....	55
3.6.3 Ο χαλκός.....	55
3.6.4 Η ρητίνη.....	56
3.6.5 Τα κόντρα πλακέ.....	56
3.7 Συνοπτικά βήματα διαστασιολόγησης.....	57
4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	
4.1 Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave.....	59
4.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	59
4.2.1 Το λογισμικό FEMM.....	59
4.2.2 Σχεδίαση της γεννήτριας και μετακίνηση του δρομέα.....	60
4.3 Βελτίωση του αλγόριθμου διαστασιολόγησης.....	60
4.4 Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης.....	63

4.5 Βελτιστοποίηση σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών.....	65
4.5.1 Βελτιστοποίηση με την μέθοδο Particle Swarm Optimization (PSO).....	65
4.5.2 Διανυσματική πολύ-παραμετρική βελτιστοποίηση.....	68
4.5.3 HPSO.....	69
5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ PSO ΚΑΙ HPSO	
5.1 Εισαγωγή.....	72
5.2 Περιορισμοί που λαμβάνονται στην διαδικασία βελτιστοποίησης.....	73
5.3 Βελτιστοποιήσεις με την μέθοδο PSO με χρήση του μαγνήτη N40 σε συχνότητα 50 Hz	74
5.4 Βελτιστοποιήσεις με την μέθοδο PSO με χρήση του μαγνήτη N45 σε συχνότητα 50 Hz και σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μαγνητών.....	92
5.5 Ανάλυση των συντελεστών βάρους στην αντικειμενική συνάρτηση.....	107
5.6 Βελτιστοποίηση με την μέθοδο HPSO σε συχνότητα 50 Hz και ανάλυση των συσχετισμών ανάμεσα στις παραμέτρους.....	111
6. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ... ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	
6.1 Σημασία της θερμικής ανάλυσης.....	124
6.2 Τρόποι μετάδοσης της θερμότητας.....	124
6.2.1 Η Αγωγή.....	124
6.2.2 Η Συναγωγή.....	125
6.2.3 Ακτινοβολία.....	129
6.3 Ψύξη των ηλεκτρικών μηχανών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.....	130
6.4 Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων.....	130
6.4.1 Θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα.....	130
6.4.2 Διατήρηση της Ενέργειας.....	132
6.5 Θερμική Ανάλυση Σύγχρονης Γεννήτριας AFPM 3 KW.....	133
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
7.1 Συμπεράσματα.....	139
7.1.1 Εξελκτικοί Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης PSO και HPSO.....	139
7.2.2 Υπολογισμός Bp βάση των ai και kd – Θερμική Ανάλυση.....	140
7.2 Προτάσεις.....	140
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	
A : Χαρακτηριστικά ισχύος και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....	142
A.1 Βασικές έννοιες αεροδυναμικής.....	142
A.2 Η κατανομή του ανέμου.....	143
A.3 Ο περιορισμός της ισχύος.....	144
B : ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ MATLAB.....	146
B.1 Κώδικας Διαστασιολόγησης.....	146
B.2 Αλγόριθμος για μέθοδο βελτιστοποίησης PSO.....	154
B.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης για μέθοδο HPSO (Pareto Front).....	157
Γ : Υπολογισμός 1 ^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής (Bp) στο διάκενο.....	159
Γ.1 Γραφικές παραστάσεις για τις ισχύς 3 έως 6 KW με χρήση του μαγνήτη N40.....	159
Γ.2 Γραφικές παραστάσεις για τις ισχύς 3 έως 6 KW με χρήση του μαγνήτη N45.....	163
Δ : Καμπύλες Pareto front για τις ισχύς 3 έως 6 KW.....	167
 Βιβλιογραφία.....	 190

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Μικρές ανεμογεννήτριες

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλη αύξηση του ενδιαφέροντος για την εκμετάλλευση του ανέμου σαν πηγή ενέργειας, ένα αποτέλεσμα του όλο και μεγαλύτερου προβληματισμού για την καταστροφή του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, ένας από τους σημαντικότερους λόγους της αλλοίωσης των κλιματικών συνθηκών, αποτελούν οι εκατομμύρια τόνοι ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της συμβατικής ενέργειας και αν αναλογιστούμε ότι οι απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας αυξάνονται διαρκώς και ραγδαία μπορεί να αντιληφθεί κανείς τι σημαίνει αυτό για την συνέχεια. Έτσι λοιπόν όλο και περισσότερα αιολικά πάρκα δημιουργούνται σαν εναλλακτική λύση απέναντι στους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν κάρβουνο και λιγνίτη. Οι πιο διαδεδομένες εναλλακτικές λύσεις μεταξύ άλλων, είναι όπως προαναφέρθηκε η αιολική ενέργεια καθώς και η ηλιακή. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί, πως η ολοένα και μεγαλύτερη διάδοση και χρησιμοποίηση αυτών των λύσεων αφορά όχι μόνο την υψηλής ισχύος ενέργεια αλλά και ενέργεια αρκετά χαμηλότερων επιπέδων. Αυτές οι δύο συμπληρωματικές μορφές παραγωγής ενέργειας γίνονται σταθερά όλο και πιο οικονομικές στην χρήση τους και θεωρούνται πολύ καλές λύσεις στην θέση των diesel γεννητριών, κυρίως για απομακρυσμένες περιοχές. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών είναι πως δεν δεσμεύουν τεράστιες εκτάσεις εύφορου εδάφους το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για καλλιέργεια.

Σε αντίθεση λοιπόν με τις γεννήτριες diesel οι ανεμογεννήτριες δημιουργούν ηλεκτρική ισχύ από μια απεριόριστη πηγή ισχύος και χωρίς καμία επιβάρυνση μόλυνσης. Μια ισχύ η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από πολύ παλιά, στους ανεμόμυλους και στους νερόμυλους.

Σε συμβατικά συστήματα ισχύος ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας, η παραγόμενη ισχύς από τα αιολικά πάρκα τροφοδοτείται απευθείας στο εθνικό δίκτυο. Στην συνέχεια, η ισχύς χρησιμοποιείται από τους καταναλωτές οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Η εναλλακτική λύση αντί της συνδέσεως στο δίκτυο είναι μικρότερα αυτόνομα συστήματα ανεμογεννητριών. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση σπιτιών, αγροκτημάτων και άλλων απομακρυσμένων περιοχών όπου η πρόσβαση στο δίκτυο δεν είναι δυνατή ή είναι αρκετά ακριβή. Τέτοιου είδους απομονωμένα, αυτόνομα συστήματα ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται κυρίως για την φόρτιση μπαταριών. Αυτή η τοπολογία, έχει αποδειχθεί στο πέρασμα των χρόνων απλή, αξιόπιστη και ευέλικτη.

Μικρές ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται αυτές που έχουν ονομαστική ισχύς έως και 70 KW, ενώ ως ιδιαίτερα μικρές ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται αυτές που η ονομαστική ισχύς τους δεν ξεπερνάει τα 10 KW. Ο τύπος έλικας που έχει επικρατήσει και στις μικρές ανεμογεννήτριες είναι η έλικα οριζόντιου άξονα περιστροφής με τρία πτερύγια. Το συνηθέστερο σύστημα αεροδυναμικού περιορισμού της ισχύος που χρησιμοποιούν είναι το σύστημα furling, αρκετές χρησιμοποιούν έλεγχο pitch και λιγότερες έλεγχο stall. Η μεγάλη πλειοψηφία των μικρών ανεμογεννητριών διαθέτει γεννήτρια μονίμων μαγνητών ενώ ένα μικρό ποσοστό διαθέτει γεννήτρια επαγωγής.

Υπάρχουν πολλές παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια μικρή ανεμογεννήτρια. Το σημαντικότερο είναι η καμπύλη ισχύος, η οποία καθορίζει την παραγόμενη ενέργεια σε ένα χρονικό διάστημα ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής που βρίσκεται η εγκατάσταση. Γενικά, τοποθετούνται σε περιοχές με χαμηλότερη ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου απ' ότι τα αιολικά πάρκα, οπότε η λειτουργία τους σε χαμηλότερους ανέμους είναι άλλη μια σημαντική παράμετρος.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε πως αυτή τη στιγμή, το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες χάρη στο χαμηλό τους κόστος, μπορούν να εγκατασταθούν και να ηλεκτροδοτήσουν ιατρικές κλινικές, σχολεία, ακόμα και ολόκληρες κοινότητες και να συμβάλουν στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων των αναπτυσσόμενων χωρών.

1.2 Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggot

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετάται και βελτιστοποιείται η μικρή ανεμογεννήτρια που έχει σχεδιαστεί από τον Hugh Piggot [1]. Το βασικό σχέδιο της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο μέγεθος, έχει κατασκευαστεί σε πολλές χώρες της Ευρώπης, στην Λατινική Αμερική και την Αφρική. Επίσης 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 στον στάτη, έχει μεγάλη απόδοση και μηδενική ροπή ευθυγράμμισης, κάτι που της επιτρέπει να εκκινεί σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Πολύ σημαντικό είναι επίσης, πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς, όπου μέσα από την κατασκευή και χρήση της, μπορούν μαθητές και φοιτητές να κατανοήσουν βασικές έννοιες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των ηλεκτρικών μηχανών και της αεροδυναμικής.

1.3 Η ενδιάμεση τεχνολογία

1.3.1 Σχεδιασμός βασισμένος στην ενδιάμεση τεχνολογία

Η «ενδιάμεση» τεχνολογία (intermediate technology) ή αλλιώς η «κατάλληλη» τεχνολογία (appropriate technology), είναι ένας τρόπος αντίληψης της τεχνολογίας ως μία ενεργή συνιστώσα στην καθημερινή διαμόρφωση των κοινωνικών σχέσεων. Εμπεριέχει την αντίληψη, πως οι ανθρώπινες κοινωνίες χρειάζεται να έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν άμεσα για το μέλλον τους σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητές τους και πως η ενδιάμεση τεχνολογία μπορεί να τις ενδυναμώσει προς αυτή την κατεύθυνση [15].

Μια μικρή ανεμογεννήτρια (Α/Γ) 1 KW [2] καθώς και μια γεννήτρια 3 KW ως μέρος ανεμογεννήτριας, κατασκευάστηκαν από τελειόφοιτους φοιτητές του ΕΜΠ στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών και στα πλαίσια εφαρμογών ενδιάμεσης τεχνολογίας, κυρίως απευθυνόμενες σε αγροτικές περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου, προσπαθώντας να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια. Οι εφαρμογές ενδιάμεσης τεχνολογίας, με βάση το Consortium for Sustainable Village-Based Development [3], έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο: Η μικρή Α/Γ που κατασκευάστηκε έχει συνολικό κόστος πρώτων υλών 600 ευρώ, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το κόστος του ιστού.

Δίνουν έμφαση στην χρήση τοπικών πρώτων υλών, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού: Τα υλικά της Α/Γ καθώς και της γεννήτριας είναι ξύλο, χάλυβας, πολυεστερική ρητίνη, χαλκός και μαγνήτες νεοδυμίου. Όλα τα υλικά μπορούν να βρεθούν τοπικά εκτός από τους μαγνήτες που έχουν αγοραστεί από το εξωτερικό.

Είναι πιο παραγωγικές από πολλές παραδοσιακές τεχνολογίες, αν και χρειάζονται σχετικά εντατική εργασία κατά την κατασκευή τους: Η Α/Γ που κατασκευάστηκε χρειάστηκε 600 εργατοώρες από ανειδίκεντους φοιτητές για να ολοκληρωθεί, αλλά παράγει ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών.

Είναι αρκετά μικρές σε κλίμακα, έτσι ώστε να είναι οικονομικά προσιτές σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο: Αυτού του τύπου η Α/Γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα οικιακό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε σε DC σύστημα για τη φόρτιση συσσωρευτών, είτε σε AC σύστημα στα πλαίσια ενός κοινοτικού μικροδικτύου.

Είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας τους, ο έλεγχός τους και η συντήρησή τους από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν την τεχνολογία χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση: Η κατασκευή της Α/Γ έγινε από ομάδα προπτυχιακών φοιτητών του ΕΜΠ, χωρίς εξειδικευμένες μηχανουργικές γνώσεις. Η συγκεκριμένη κατασκευή έχει υλοποιηθεί σε πολλά μέρη του κόσμου με τη μορφή ολιγοήμερου πρακτικού και θεωρητικού σεμιναρίου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα κατανόησης, ελέγχου και συντήρησης στους χρήστες.

Μπορεί να παραχθεί η τεχνολογία σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών και κοινοτήτων: Η Α/Γ κατασκευάστηκε σε μικρό μηχανουργείο στην κατασκήνωση «Μελτέμι» στη Ραφήνα, με τον βασικό εξοπλισμό ενός μικρού εργαστηρίου.

Προϋποθέτουν τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης: Συνολικά εργάστηκαν πέντε άτομα για την ολοκλήρωση της κατασκευής σε διάστημα τριών μηνών.

Προσφέρουν ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της: Οι φοιτητές που έχουν συμμετάσχει στο εργαστήριο κατασκευής της Α/Γ έχουν τη δυνατότητα να εξοικειωθούν με τις βασικές έννοιες λειτουργίας και σχεδιασμού γεννητριών, αεροδυναμικής και με τη χρήση βασικών μηχανουργικών εργαλείων και τεχνικών κατασκευής. Έτσι, αποκτάται η δυνατότητα τροποποίησης του σχεδιασμού της Α/Γ, όπως και βελτίωσης της διαδικασίας κατασκευής.

Είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά μέρη και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες: Η Α/Γ μπορεί να σχεδιαστεί για σύνδεση σε AC ή DC σύστημα και για διαφορετικές τιμές ονομαστικής ισχύος. Επίσης, υπάρχει μια πληθώρα εναλλακτικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως π.χ. ο κέδρος για την κατασκευή των πτερυγίων, δίνοντας έτσι έμφαση σε τοπικά υλικά που βρίσκονται σε αφθονία.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χωρίς να προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον: Η χρήση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία ανανεώσιμη πηγή, όπως είναι ο άνεμος, μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές ρυπογόνες μορφές. Βέβαια, κατά την παραγωγή ορισμένων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Α/Γ, προκαλούνται ρύποι (π.χ. στην παραγωγή χάλυβα) και επίσης χρησιμοποιούνται ορισμένα χημικά υλικά και παράγωγα πετρελαίου, όπως η πολυεστερική ρητίνη.

1.3.2 Κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις

Οι κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις της ενδιάμεσης τεχνολογίας μπορούν να συγκεντρωθούν στα εξής σημεία [15]:

Επιτρέπει την πιο αποτελεσματική ικανοποίηση των τοπικών αναγκών, γιατί οι τοπικές κοινωνίες είναι ενεργά εμπλεκόμενες στον προσδιορισμό τους και στην πραγματοποίηση των απαιτούμενων εργασιών για την ικανοποίησή τους. Για τους ίδιους λόγους είναι πιο πιθανό αυτή η τεχνολογία να είναι εναρμονισμένη με τις τοπικές παραδόσεις και αξίες.

Συνιστά στην ανάπτυξη εργαλείων που διευρύνουν την ανθρώπινη εργασία και τις ανθρώπινες δεξιότητες, σε αντίθεση με την ανάπτυξη μηχανών που υποκαθιστούν την ανθρώπινη εργασία και εξαλείφουν τις ανθρώπινες δεξιότητες.

Αντιπροσωπεύει μια εύκολα αντιληπτή και ελεγχόμενη κλίμακα δραστηριοτήτων, οργάνωσης και σφαλμάτων, στην οποία άνθρωποι χωρίς εκπαίδευση στην οργάνωση και τη διοίκηση μπορούν να συνεργαστούν και να κατανοήσουν αυτό που κάνουν.

Επιτρέπει την οικονομικότερη λειτουργία αρκετών διαδικασιών, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη μεταφοράς υλικών σε μία περίοδο που το κόστος της ενέργειας είναι αυξημένο, προκαλώντας μεγαλύτερη αλληλεπίδραση ανάμεσα στην τοπική βιομηχανία και επιτρέποντας μεγαλύτερη χρήση τοπικών πρώτων υλών και ανθρώπινου δυναμικού.

Καθιστά μη αναγκαίες πολλές ακριβές ή μη διαθέσιμες υπηρεσίες όπως την εύρεση οικονομικών πόρων, την εκπαίδευση, τη διαφήμιση, τη διοίκηση και την παροχή ενέργειας. Αποφεύγει την έλλειψη ελέγχου από την τοπική κοινωνία, που συνήθως συνεπάγεται η χρήση τέτοιων εξωτερικών υπηρεσιών. Βοηθάει στην εγκαθίδρυση μιας αυτό-συντηρούμενης και συνεχώς επεκτάσιμης δεξαμενής δεξιοτήτων στην κοινότητα, που βασίζεται σε ήδη υπάρχουσες δεξιότητες.

Παρέχει ένα μαξιλάρι ασφάλειας απέναντι στις επιρροές εξωτερικών οικονομικών αλλαγών, όπως π.χ. είναι η κατάρρευση της παγκόσμιας αγοράς ζάχαρης ή η ξαφνική μη διαθεσιμότητα φυτοφαρμάκων.

Βοηθάει στη μείωση της οικονομικής, κοινωνικής και πολιτικής εξάρτησης ανάμεσα σε άτομα, περιοχές και έθνη, αναγνωρίζοντας πως οι άνθρωποι μπορούν και θα κάνουν πράγματα για τις κοινότητές τους, εάν έχουν έναν τρόπο να τα υλοποιήσουν.



Εικόνα 1.1 : τοποθέτηση ανεμογεννήτριας για σύνδεση στο δίκτυο (Ραφήνα)

1.4 Ισχύς του ανέμου

Ο σκοπός μιας ανεμογεννήτριας είναι να μετατρέψει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστρεφόμενη μηχανική ενέργεια, η οποία στην συνέχεια θα μετατραπεί από την γεννήτρια σε ηλεκτρική ενέργεια [4]. Η κινητική ενέργεια που παρατηρείται στον άνεμο, οφείλεται στο γεγονός ότι ο άνεμος αποτελείται από κινούμενο αέρα, ο οποίος παρά την χαμηλή πυκνότητά του, έχει μάζα οπότε και την δυνατότητα να αναπτύξει κινητική ενέργεια, E_{wk} , η οποία μπορεί να υπολογισθεί από τον τύπο:

$$E_{wk} = \frac{1}{2} \rho_a V_a$$

Όπου ρ_a είναι η πυκνότητα του αέρα στο επίπεδο της θάλασσας και V_a ο όγκος του αέρα που αλληλεπιδρά με την τουρμπίνα. Η διαθέσιμη ισχύς P_a , που μπορεί να εξαχθεί από έναν συγκεκριμένο όγκο αέρα υπολογίζεται από τον τύπο :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A_s v_w^3$$

όπου A_s είναι η επιφάνεια που καλύπτεται από τα 'φτερά' και v_w είναι η ταχύτητα του ανέμου. P_a είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύς από τον άνεμο, αλλά ουσιαστικά μόνο ένα κλάσμα από αυτήν μπορεί να εξαχθεί. Κάποια από την κινητική ενέργεια στην ροή του αέρα πρέπει να διατηρηθεί ώστε ο άνεμος να μπορεί να περάσει από την τουρμπίνα. Έτσι το μηχανικό μέρος μιας ανεμογεννήτριας δεν μπορεί να αποσπάσει όλη την ενέργεια από έναν συγκεκριμένο όγκο αέρα [5]. Η μέγιστη μηχανική ισχύς P_{max} , που μπορεί να αναπτυχθεί από μια τουρμπίνα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{max} = \frac{1}{2} C_p \rho_a A_s v_w^3$$

όπου C_p είναι ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας και έχει θεωρητικό όριο ίσο με 0,593. Αυτό το όριο αναφέρεται σαν κριτήριο Betz. Αυτό το κριτήριο αντιπροσωπεύει, το μέγιστο ποσοστό από την διαθέσιμη ισχύ που μπορεί να εξαχθεί από μια ιδανική τουρμπίνα και αποτελεί στην ουσία την απόδοση της τουρμπίνας αυτής. Περαιτέρω μηχανικές ή ηλεκτρικές ατέλειες πρέπει επίσης να

ληφθούν υπόψιν. Δηλαδή το C_p αποτελεί το κλάσμα της ισχύος στην τουρμπίνα προς την συνολική διαθέσιμη ισχύ στον άνεμο. Οπότε για να μεγιστοποιηθεί η ισχύς που θα εκμεταλλευθούμε από τον άνεμο θα πρέπει ο συγκεκριμένος συντελεστής να κρατείται σε υψηλές τιμές [5].

Θέλοντας να πετύχουμε μέγιστη απόδοση στην απαγωγή της κινητικής ενέργειας του ανέμου και μετατροπή της σε μηχανική από την τουρμπίνα, η γωνιακή περιστροφική ταχύτητα της τουρμπίνας πρέπει να ταιριάζει με την ταχύτητα του ανέμου. Μια τουρμπίνα η οποία θα περιστρέφεται με μικρή ταχύτητα, στην ουσία θα επιτρέπει στον άνεμο να περνά ανεπηρέαστος από τα κενά ανάμεσα στα φτερά της έλικας, ενώ μια τουρμπίνα η οποία θα περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα στην ουσία θα αποτελεί στέρεο εμπόδιο για τον άνεμο [4]. Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, η ηλεκτρική ισχύς που θα παράγεται θα είναι ελάχιστη ή μηδαμινή. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία της τουρμπίνας είναι να προσδιοριστεί ο συντελεστής ακροπτερυγίου της τουρμπίνας. Ο συντελεστής αυτός, είναι ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου που διαπερνά την τουρμπίνα χωρίς να επηρεαστεί. Ο λόγος αυτός υπολογίζεται από την σχέση:

$$\lambda_s = \frac{r_t \omega_{mech}}{v_w}$$

όπου r_t είναι η ακτίνα της φτερωτής και ω_{mech} είναι η μηχανική γωνιακή ταχύτητα της τουρμπίνας [6]. Μια αύξηση του συντελεστή ακροπτερυγίου, έχει τα πλεονεκτήματα της αύξησης του συντελεστή ισχύος C_p και μείωση των απωλειών περιστροφής ενώ ταυτόχρονα έχει το μειονέκτημα ότι παρουσιάζει χαμηλή ροπή εκκίνησης και ακουστικό θόρυβο λόγω της ταχύτατης περιστροφής της φτερωτής [7].

Η λειτουργία μιας συγκεκριμένης γεννήτριας για τέτοιου είδους εφαρμογές μπορεί να συσχετιστεί με την ταχύτητα του ανέμου σε τρία συγκεκριμένα σημεία:

- Cut-in speed: η ταχύτητα του ανέμου όπου η γεννήτρια αρχίζει και παράγει καταναλώσιμη ισχύ στην έξοδο της.
- Rated wind speed: η ταχύτητα του ανέμου όπου η γεννήτρια παράγει την ονομαστική της ισχύ, όπου συνήθως είναι και η μέγιστη.
- Cut-out speed: η μέγιστη ταχύτητα ανέμου όπου η γεννήτρια επιτρέπεται να παράγει ηλεκτρική ισχύς, συνήθως περιορίζεται από σχεδιαστικούς περιορισμούς της γεννήτριας και από λόγους ασφαλείας.

Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

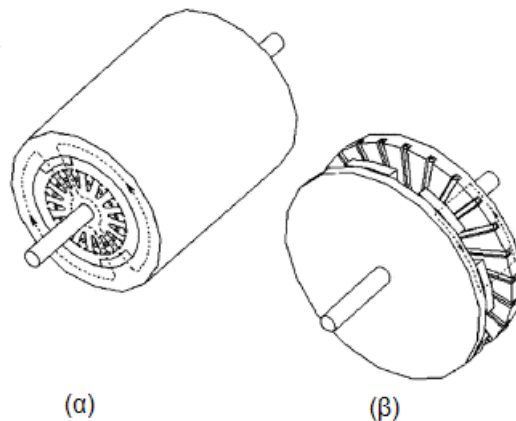
2.1 Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής

Αν και οι μηχανές μονίμων μαγνητών (PM) είναι γνωστές εδώ και αρκετό καιρό, ποτέ δε βρήκαν εκτενή χρήση καθώς η ποιότητα των μαγνητών δεν ήταν ικανοποιητική. Με τη βελτίωση όμως των μαγνητικών υλικών και ιδιαίτερα μετά την εισαγωγή του NdFeB οι μηχανές μονίμων μαγνητών ήρθαν και πάλι στο προσκήνιο. Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα και η συνεχής μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών (rare earth PMs) τα τελευταία χρόνια είναι επίσης δύο σημαντικοί παράμετροι για την ανάπτυξη αυτού του είδους των μηχανών.

Διακρίνουμε δύο βασικά ήδη τέτοιων μηχανών:

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

Η βασική δομική διαφορά τους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 είναι ότι η πρώτη έχει δισκοειδή δομή ενώ η δεύτερη κυλινδρική. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ταξιδεύει στην ακτινική διεύθυνση ενώ στη δεύτερη στη διεύθυνση του άξονα της γεννήτριας.



Σχήμα 2.1: α) μηχανή ακτινικής ροής, β) μηχανή αξονικής ροής.

Οι μηχανές αξονικής ροής άργησαν ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθούν κυρίως για τους παρακάτω λόγους:

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

Συγκρίνοντας όμως σήμερα τα δύο είδη, μπορούμε να βρούμε αρκετά πλεονεκτήματα της μηχανής αξονικής ροής [40].

- 1) Δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας ισχύος. Αυτό μπορεί εύκολα να συμβεί περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα.
- 2) Ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το μήκος του άξονα περιστροφής είναι πολύ μεγάλος. Έτσι οι μηχανές αξονικής ροής αερίζονται και ψύχονται πιο εύκολα, χωρίς εξωτερικό μηχανισμό.
- 3) Λόγω της δισκοειδούς της δομής μπορούμε πιο εύκολα να ρυθμίσουμε το μήκος διακένου.
- 4) Μεγαλώνοντας την εξωτερική διάμετρο του πυρήνα έχουμε τη δυνατότητα εγκατάστασης μεγαλύτερου αριθμού πόλων και άρα χρήσης της μηχανής αυτής σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας και χαμηλής ταχύτητας.
- 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 μηχανή αξονικής ροής αποδίδει την ίδια ροπή με αυτήν της ακτινικής ροής χρησιμοποιώντας λιγότερο ενεργό υλικό.

Σύμφωνα με το [8], οι μηχανές ακτινικής και αξονικής ροής επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά στη μεταξύ τους σύγκριση με γνώμονα 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 :

$$k_1 = \frac{l_{eff,RF}}{D_{agap}}$$

Συγκεκριμένα, όταν $k_1 < 0.5$ η αντίστοιχη μηχανή αξονικής ροής εμφανίζεται πιο συμφέρουσα λόγω μικρότερου όγκου.

B) τον αριθμό των πόλων

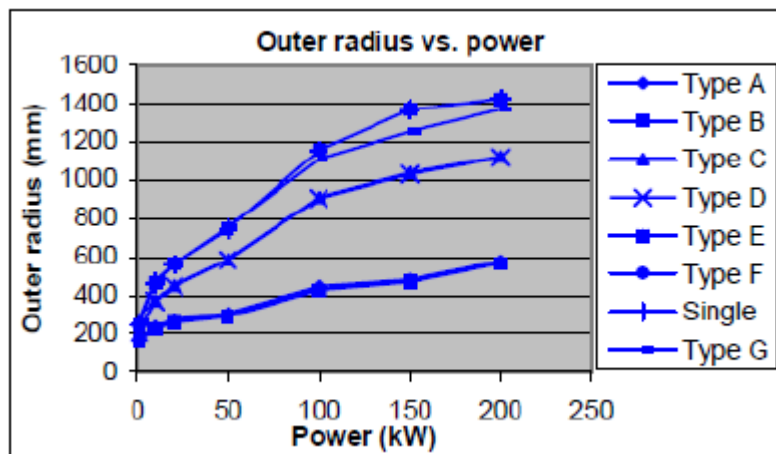
Για μικρό αριθμό πόλων ($p < 4$) είναι προτιμότερες οι μηχανές ακτινικής ροής.

Στην ίδια αναφορά, γίνεται σύγκριση κόστους μεταξύ αυτών των δύο ειδών μηχανής για ισχύ 55 KW, 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. Επιπλέον με χρήση της τελευταίας επιτυγχάνεται συνολικά μικρότερος όγκος, κάτι το οποίο είναι χρήσιμο στην περίπτωση που θέλουμε μικρό μήκος άξονα.

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 χαλκού, που είναι μεγαλύτερο καθώς απαιτούνται περισσότερες σπείρες.

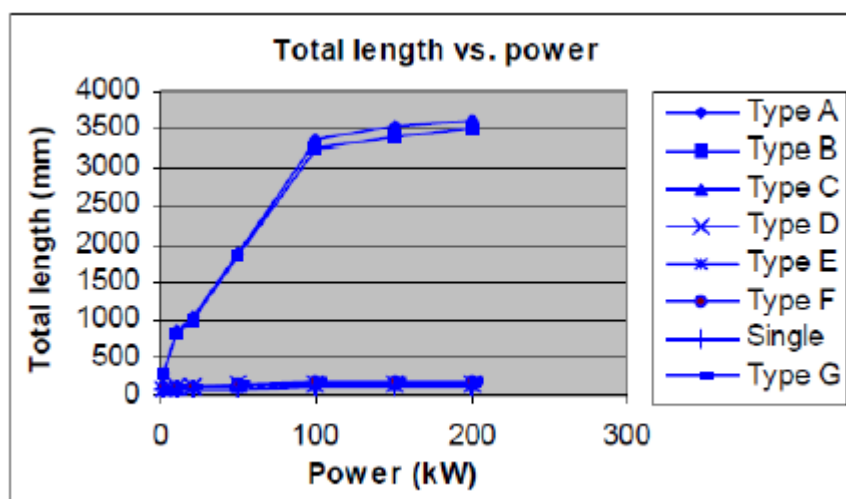
Όπως αναφέρεται στο [8], όταν η ακτίνα της μηχανής αξονικής ροής γίνει ίση με το διπλάσιο του μήκους μιας ακτινικής, τότε η μηχανή αξονικής ροής χάνει τα πλεονεκτήματά που αφορούν το επίπεδο ισχύος που μπορεί αυτή να προσφέρει. Η αντίστροφα, ένα υψηλό επίπεδο ισχύος απαιτεί μεγαλύτερο όγκο μηχανής αξονικής ροής παρά ακτινικής.

Στο παρακάτω διάγραμμα [9] παρατηρούμε την εξωτερική ακτίνα για διάφορους τύπους μηχανών αξονικής και ακτινικής ροής σε σχέση με την ισχύ τους. Έτσι οι μηχανές ακτινικής ροής (Type A και Type B) για ισχύς από 3-7 KW περίπου, εμφανίζουν ακτίνες γύρω στα 200mm, ενώ οι μηχανές αξονικής ροής (Type C έως E) για το ίδιο εύρος ισχύος, εμφανίζουν ακτίνες μεγαλύτερες από 300mm.



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

Στην επόμενη περίπτωση, εμφανίζεται το μήκος των μηχανών αυτών σε σχέση με την ισχύ. Παρατηρούμε ότι σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάμε τον αντίστοιχο περιορισμό που έχει τεθεί παραπάνω. Συγκεκριμένα, το μήκος των μηχανών ακτινικής ροής για εύρος ισχύος 3-7 KW, κυμαίνεται από 500 έως 650 mm.



Σχήμα 2.3: Συνολικό μήκος μηχανής σε σχέση με ισχύ

Άρα ο περιορισμός: $R_{out} AF < 2 * Length RF$ ικανοποιείται.

Άλλη μια σύγκριση των δύο κατηγοριών έχει γίνει στο [10]. Εκεί εξετάζονται δύο μικρές γεννήτριες 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 3-10 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 τορροειδούς τυλίγματος που χρησιμοποιήθηκε. Είναι βαρύτερη και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση μόνο κοντά στις ονομαστικές συνθήκες (10 m/s). Αυτό την καθιστά ακατάλληλη, γιατί όπως ήδη αναφέρθηκε, οι μικρές ανεμογεννήτριες πολύ συχνά υφίστανται ανέμους αρκετά χαμηλότερους από αυτούς για τους οποίους σχεδιάστηκαν.

Μια ακόμα σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών τοπολογιών έχει γίνει στο [11]. 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 ακτινικής ροής. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι το κόστος προς ροπή και η ροπή προς όγκο. Ως προς το πρώτο κριτήριο η μηχανή ακτινικής ροής είναι προτιμότερη. Με λίγα λόγια, σε μια μηχανή ακτινικής ροής, αύξηση της ροπής έχει μικρότερο κόστος συγκριτικά με την μηχανή αξονικής ροής με άυλακες. Ως προς το δεύτερο κριτήριο όμως, η μηχανή αξονικής ροής με άυλακες υπερτερεί της ακτινικής. Μια αύξηση του όγκου στην πρώτη, θα δώσει πολύ μεγαλύτερη αύξηση ροπής σε σχέση με μια αντίστοιχη αύξηση στις μηχανές ακτινικής ροής. Το ερώτημα είναι ποιο κριτήριο μας ενδιαφέρει. Σύμφωνα με το συγγραφέα σημαντικότερο είναι να μειώσουμε το κόστος και έτσι προκρίνονται οι μηχανές ακτινικής ροής.

Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι ανάλογα με την εφαρμογή, τη δομή της μηχανής, τα κριτήρια και τις παραμέτρους 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.

2.2 Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Υπάρχουν αρκετά είδη και διατάξεις μηχανών αξονικής ροής, οι οποίες 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

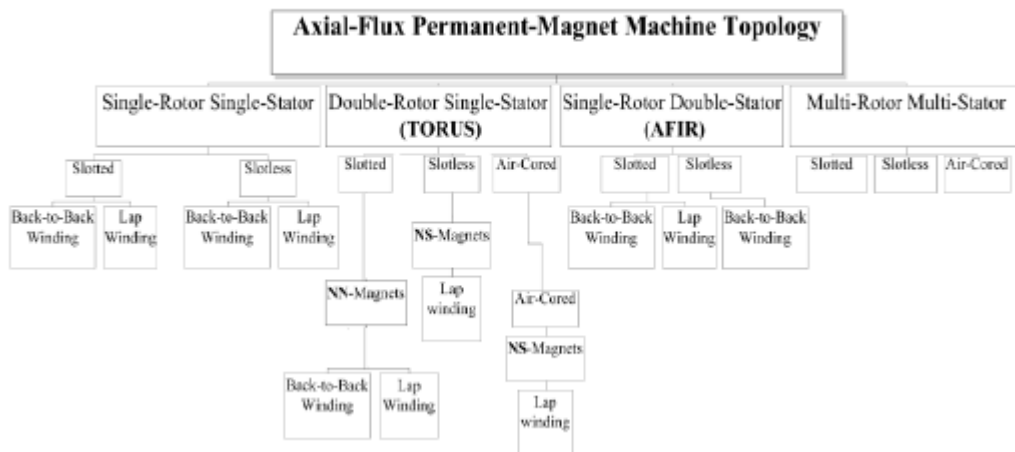
1) Διπλός δρομέας- Μονός στάτης (εσωτερικός)

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

2) Διπλός στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)

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

3) Πολλαπλών δίσκων



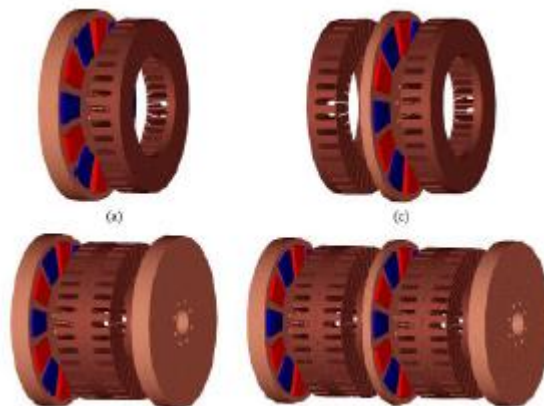
Σχήμα 2.4: Διάφορες διατάξεις μηχανών αξονικής ροής και τα πιθανά τυλίγματα

Πριν προχωρήσουμε στην επιλογή και την ανάλυση μιας από τις παραπάνω διατάξεις για την εφαρμογή μας, θα αναφερθούμε σε δύο από τα χαρακτηριστικά που επαναλαμβάνονται σε κάθε είδος, τους αύλακες και τον πυρήνα. Είδαμε ότι υπάρχουν μηχανές με ή χωρίς πυρήνα και εφόσον υπάρχει πυρήνας, μηχανές με ή χωρίς αύλακες.

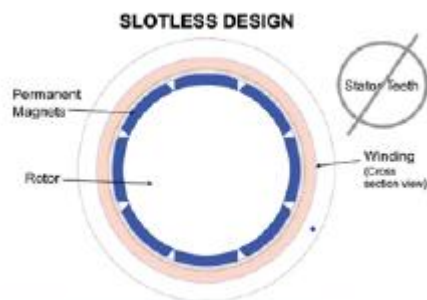
Αύλακες: Οι αύλακες εκτός των άλλων, προσφέρουν μηχανική υποστήριξη στο τύλιγμα το οποίο περνάει διαμέσου αυτών. Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνουν το διάκενο, φέρνοντας πιο κοντά το σίδηρο στους μαγνήτες, ενισχύοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο. Με αυτό τον τρόπο κερδίζουμε μεγαλύτερη ροπή με τους ίδιους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

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 αυλακών. 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.

Σχέδια μηχανών που περιλαμβάνουν αύλακες φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 2.5: Διάφορες τοπολογίες μηχανών με αύλακες.



Σχήμα 2.6: Στάτης χωρίς αύλακες στον πυρήνα

Πυρήνας: Ανυπαρξία πυρήνα σημαίνει ανυπαρξία απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Με λίγα λόγια υψηλότερη απόδοση καθώς και γραμμική σχέση ροπής-ρεύματος. Επίσης, η απουσία σιδήρου έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης και ελκτικές δυνάμεις μεταξύ στάτη και δρομέα, οπότε η εκκίνηση είναι πιο εύκολη και η κατασκευή πιο ελαφριά.

Ανυπαρξία πυρήνα όμως σημαίνει επίσης και μεγαλύτερους μαγνήτες στη γεννήτρια καθώς ο πυρήνας είναι ουσιαστικά αυτός που ενισχύει το πεδίο. Αποτέλεσμα είναι το υψηλότερο κόστος της μηχανής. Ακόμα, είναι πιο δύσκολη η ψύξη της μηχανής, κάτι όμως το οποίο δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα στην περίπτωση των μηχανών αξονικής ροής για τους λόγους που έχουμε αναφέρει πιο πάνω.

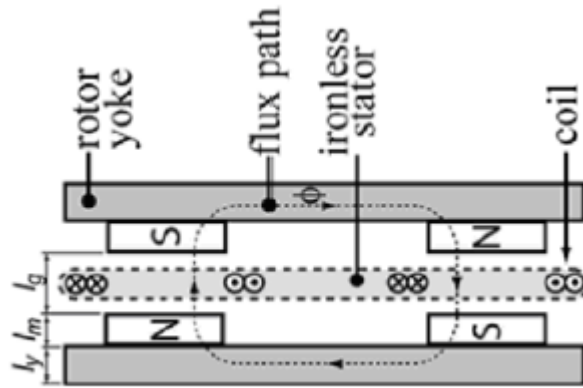


Σχήμα 2.7: Στάτης χωρίς πυρήνα

2.2.2 Επιλεγόμενη τοπολογία (Διπλός δρομέας - μονός στάτης)

Η τοπολογία αυτή, την οποία έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε έναντι των άλλων τοπολογιών μηχανών αξονικής ροής, έχει μελετηθεί εκτενώς στο [12,15,40]. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα, 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 είναι τοποθετημένο σε διαμαγνητικό, μη αγωγίμο στάτη (πιθανώς από ρητίνη). Μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο.

Μεγάλη σημασία έχει το γεγονός ότι δεν υπάρχει πυρήνας. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουμε απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόδοση της μηχανής σε σύγκριση με άλλες. Επίσης δεν εμφανίζεται ροπή ευθυγράμμισης γεγονός που επιτρέπει την εκκίνηση σε χαμηλούς ανέμους και άρα την εκμετάλλευση τους. Το μειονέκτημα του αυξημένου κόστους που έχει η συγκεκριμένη διάταξη λόγω του περισσότερου μαγνητικού υλικού που απαιτείται για ανάπτυξη μαγνητικής ροής αντισταθμίζεται από τη δυνατότητα εύκολης κατασκευής που είναι και ένα από τα ζητούμενα της εργασίας αυτής.



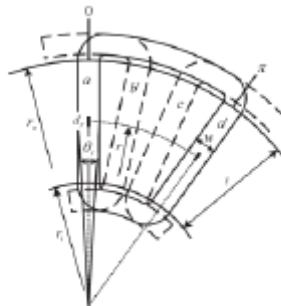
Σχήμα 2.8: Το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της τοπολογίας διπλού δρομέα-μονού στάτη.

2.3 Τα τυλίγματα

Στην τοπολογία διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα που έχουμε επιλέξει, ο πυρήνας κατασκευάζεται ουσιαστικά από κάποιο διαμαγνητικό υλικό (συνήθως ρητίνη) και εκεί τοποθετείται το τύλιγμα. Κάθε πλευρά πηνίου αντιστοιχίζεται στον αντίστοιχο αύλακα ενός πυρήνα σιδήρου.

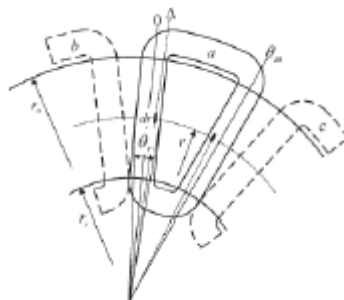
Οι διάφοροι τύποι τυλιγμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής [15]:

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



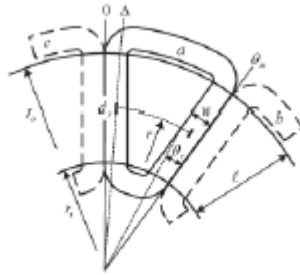
Σχήμα 2.9: Επικαλυπτόμενο τύλιγμα.

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



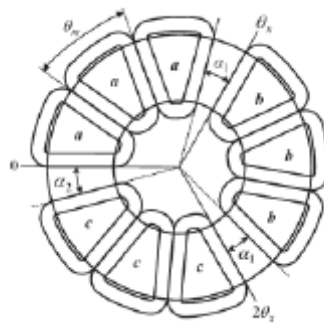
Σχήμα 2.10: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης.

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



Σχήμα 2.11: 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 2.12: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων

Στο συγκεντρωμένο τύλιγμα, τα άκρα τυλίγματος δεν χρειάζεται να λυγίσουν, αντίθετα με ότι συμβαίνει στο επικαλυπτόμενο. Αυτό προσφέρει και ορισμένα πλεονεκτήματα [4]:

- Μικρότερο μήκος πηνίων άρα και λιγότερη ποσότητα χαλκού που χρειάζεται για τα πηνία
- Λιγότερες απώλειες χαλκού
- Αυξημένη απόδοση
- Χαμηλότερο κόστος (λιγότερα πηνία)
- Ευκολότερη κατασκευή

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 του βέλτιστου αριθμητικού συνδυασμού πόλων και πηνίων λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή τυλίγματος. Σύμφωνα δε με το [13], όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο αυξάνεται και η απόδοση του συγκεντρωμένου τυλίγματος έναντι του επικαλυπτόμενου.

Στο [13] 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 στην περίπτωση του επικαλυπτόμενου τυλίγματος και η κυματομορφή της τάσης είναι πιο ημιτονοειδής σε σχέση πάλι 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.

Το τύλιγμα που επιλέγουμε στην εφαρμογή που μελετάμε, είναι το συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης.

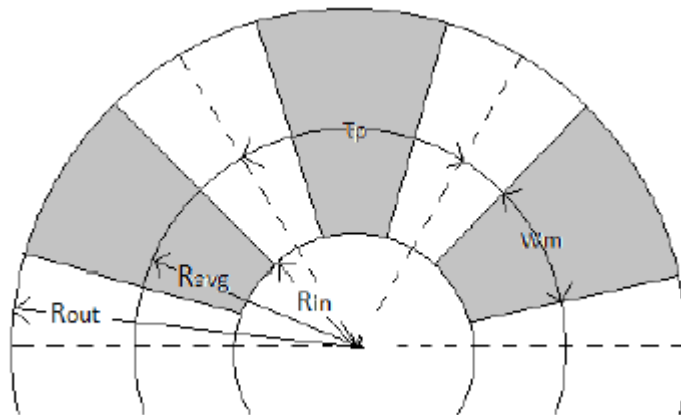
2.4 Θεωρητική Ανάλυση

2.4.1 Μαγνητική Ροή-ΗΕΔ

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

$$\tau_p = \frac{2\pi r}{p} \quad (2.1)$$

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

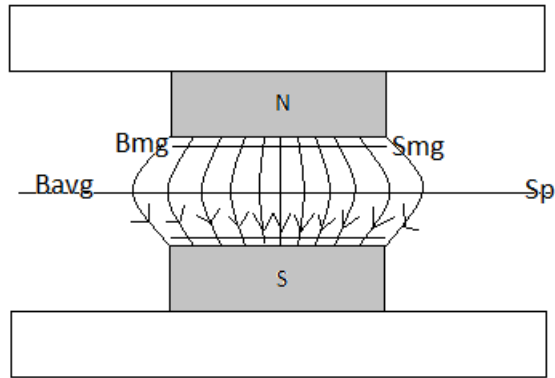


Σχήμα 2.13: Οι ακτίνες αναφοράς και το πολικό βήμα σε μια γεννήτρια με ορθογώνιους μαγνήτες

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

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

ο οποίος εξαρτάται και αυτός 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:

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

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 γενικά θα ισχύει :

$$\Phi_f = \frac{B \cdot \pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (2.2)$$

για κάποια περιοχή όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι B .

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ΗΕΔ θα θεωρήσουμε την πρώτη αρμονική του B καθώς δε γνωρίζουμε ότι η τελευταία είναι ημιτονοειδής. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε για το B που βλέπουν τα πηνία

$$B = B_p \cdot \sin(\omega_e t)$$

Πλέον η πρώτη αρμονική του B στο διάκενο, B_p , θα χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς μας και θα αποτελέσει ιδιαίτερο κεφάλαιο αργότερο για τον υπολογισμό της υπό διαφορετικά δεδομένα διαστασιολόγησης. Έτσι:

$$\Phi = B \cdot S = B_p \cdot S_p \cdot \sin(\omega_e t)$$

και για την ΗΕΔ:

$$E_f = k_w N_\phi \frac{d\Phi}{dt}$$

όπου:

- k_w ο συντελεστής τυλίγματος
- N_ϕ ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση. $N_\phi = q N_c$ όπου N_c τα ελιγματα ανά πηνίο και q τα πηνία ανά φάση.
- ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα

Αντικαθιστώντας από τη σχέση για τη ροή το εμβαδόν S_p και ορίζοντας:

$l_a = r_{out} - r_{in}$ το ενεργό μήκος της γεννήτριας και

$r_{avg} = \frac{r_{out} + r_{in}}{2}$ η μέση ακτίνα της γεννήτριας και συχνότερη ακτίνα αναφοράς

παίρνουμε τελικά μια έκφραση για την ΗΕΔ [18]:

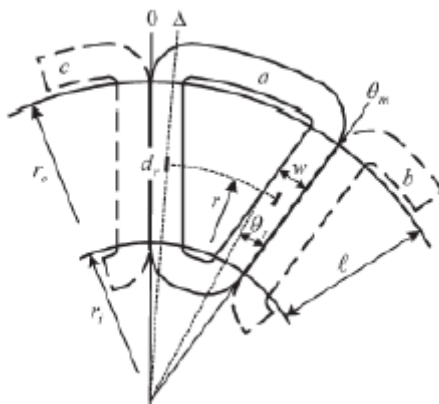
$$E_f = \frac{N_c 2\sqrt{2} q \omega_e B_p k_w l_a r_{avg}}{p} \quad (2.3)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η ανάλυση στην πραγματικότητα είναι πιο περίπλοκη από ότι υποδεικνύει η παραπάνω σχέση καθώς και οι σχέσεις που θα δούμε στην επόμενη παράγραφο εξαιτίας διαφοροποιήσεων στο ενεργό μέρος του τυλίγματος, οι οποίες όμως γίνονται αμελητέες σε μηχανές με μεγάλο αριθμό πόλων.

2.4.2. Ανάλυση του τυλίγματος

2.4.2.1. Ανάπτυξη ροπής

Όπως αναφέραμε και κατά την παρουσίαση των διαφόρων ειδών τυλιγμάτων, επιλέξαμε το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης για τη γεννήτριά μας. Το τύλιγμα αυτό αναλύεται διεξοδικά στο [13] και εδώ θα παρουσιάσουμε μερικά στοιχεία της ανάλυσης που θα μας βοηθήσουν στην εξαγωγή μιας σχέσης για τη ροπή:



Σχήμα 2.15: Η γενική μορφή του συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης.

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r C_1 \quad (2.4)$$

Οι συντελεστές που εμφανίζονται στην παραπάνω παράσταση είναι οι εξής:

$$k_{sc} = k_{wc} \sqrt{\theta_{re} \frac{q}{p}}$$

- $k_{wc} = k_p k_d$
- k_p συντελεστής βήματος
- θ_{re} ηλεκτρική γωνία πάχους πλευράς πηνίου ίση με: $\theta_{re} = \left(\frac{r_{in} - l_a}{r_{avg}}\right) \frac{\pi}{3}$
- ο λόγος q/p για το συγκεντρωμένο τύλιγμα δεν είναι σταθερός
- πρέπει $\theta_{re} \leq \theta_{re(max)}$ όπου $\theta_{re(max)} = \frac{r_{in}}{2r_{avg}} \theta_m$

Ο συντελεστής άκρων τυλίγματος ορίζεται: $k_c = (1 + \delta_c)^{-1/2}$ και ισχύουν :

- $\delta_c = \frac{l_{ec}}{l_a}$
- $l_{ec} = 2(r_{out} - r_{in}) \frac{\theta_m - 0.6\theta_{re}}{p} \quad (2.5)$

είναι το μέσο συνολικό μήκος των άκρων τυλίγματος

- $\theta_m = \frac{\pi q}{Q}$ η ηλεκτρική γωνία βήματος πηνίου (Q ο συνολικός αριθμός πηνίων της γεννήτριας)
- $\delta_c = \frac{2}{p} \cdot \frac{1 + kd}{1 - kd} \cdot (\theta_m - 0.6\theta_{re})$

Στις παραπάνω σχέσεις εμφανίζεται ένας νέος συντελεστής που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια και είναι πολύ σημαντικός για τη σχεδίαση, ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα:

$$k_d = \frac{r_{in}}{r_{out}} \quad (2.6)$$

Συνεχίζοντας την ανάλυσή μας για εξαγωγή μιας σχέσης για τη ροπή συναντάμε το συντελεστή ακτίνας:

$$k_r = \sqrt{(1 - k_d)(1 + k_d)^3}$$

και τη σταθερά μηχανής για δοσμένες απώλειες χαλκού:

$$C_1 = r_{out}^2 B_p \sqrt{\frac{1.5 P_{cu} k_f t_w}{P_t}}$$

όπου:

- k_f ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου. Ή αλλιώς το ποσοστό της ιδεατής στη γεννήτριά μας αύλακας που μπορεί να καλυφθεί με χαλκό. Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής αυτός κυμαίνονται από 0.4-0.6 και θα συζητηθούν στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης.

- t_w το αξονικό πάχος του πηνίου
- ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία t

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω παίρνουμε την τελική σχέση για τη ροπή:

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r \sqrt{\frac{1.5 P_{cu} k_f t_w}{\rho_t}} r_{out}^2 B_p \quad (2.7)$$

Στην ίδια εργασία αποδεικνύεται μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης ότι για να έχω μέγιστη ροπή η μέγιστη τιμή της γωνίας θ_{re} είναι:

$$\theta_{reopt} = \theta_{remax} = \frac{r_{in}}{2r_{avg}} \theta_m = \frac{k_d}{1 + k_d} \theta_m$$

τιμή την οποία θα χρησιμοποιήσουμε από εδώ και πέρα.

2.4.2.2. Πυκνότητα ρεύματος

Ένα στοιχείο το οποίο είναι πολύ σημαντικό όσον αφορά το τύλιγμα και επηρεάζει όλη τη δομή και το μέγεθος της γεννήτριας είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα. Συνηθισμένες τιμές της είναι $J_{max}=4-5$ (A/mm²) για μηχανές μονίμων μαγνητών [15]. Στην περίπτωση όμως μιας μηχανής αξονικής ροής μπορούμε φτάσουμε μέχρι και τα 6 (A/mm²) μιας και όπως έχουμε αναφέρει οι μηχανές αυτές έχουν πολύ καλό αερισμό σε σχέση με άλλες.

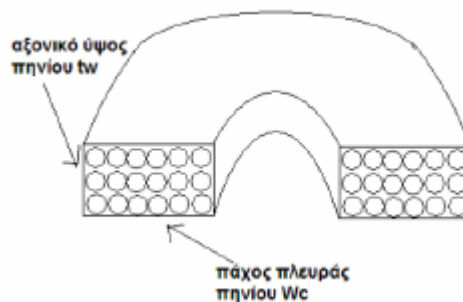
Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να γράψουμε:

$$J_{max} = \frac{I_a}{sc}$$

όπου:

- I_a το ρεύμα της γεννήτριας
- sc το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας ενός πηνίου

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



Σχήμα 2.16: Το αξονικό ύψος, το πάχος πλευράς και οι σπείρες ενός πηνίου.

Η διατομή του πηνίου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.24 μπορεί να εκφραστεί:

$$SC = \frac{N_c}{t_w w_c k_f}$$

όπου w_c το πάχος πηνίου και το t_w το αξονικό ύψος πηνίου. Το k_f όπως θα δούμε παρακάτω είναι ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου.

Άρα η πυκνότητα ρεύματος γράφεται:

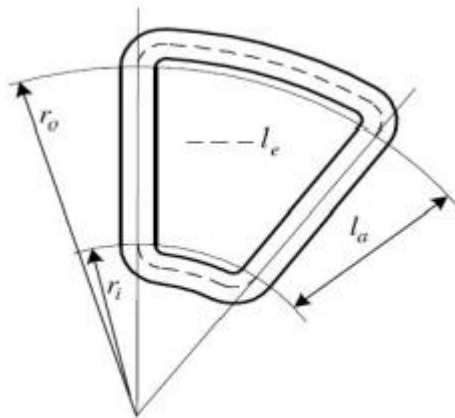
$$J_{\max} = \frac{N_c}{t_w w_c k_f} I_a \quad (2.8)$$

2.4.2.3. 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 παίξει σημαντικό ρόλο αργότερα στη βελτιστοποίησή μας. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι η αγορά του χαλκού θα γίνει με βάση το βάρος του.

Το μέσο μήκος ελίγματος l_{avg} μπορούμε να πούμε ότι είναι ίσο με το διπλάσιο ενεργό μήκος (κάθε πλευρά του πηνίου έχει μήκος όσο το ενεργό μήκος l_a) συν τα άκρα τυλίγματος l_{ec} όπως αυτά υπολογίστηκαν από τη σχέση (2.5):

$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec}$$



Σχήμα 2.17: 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:

$$R_c = N_c \cdot R_{c,ελίγματος} = N_c \rho_t \frac{l_{avg}}{SC} = N_c \rho_t \frac{(2l_a + l_{ec})}{SC} \quad (2.9)$$

όπου ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού:

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

και t_c η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια.

Η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος L_s έχει υπολογιστεί στο [4] και είναι:

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 \cdot N_c^2}{t_w} \cdot 10^{-7} \cdot K_n \quad (2.10)$$

όπου K_n η σταθερά του Nagaoka :

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

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

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

$$m_{cu} = 3 \cdot N_c \cdot l_{avg} \cdot sc \cdot p_{cu}$$

όπου p_{cu} η πυκνότητα του χαλκού.

2.4.3. Το μαγνητικό κύκλωμα

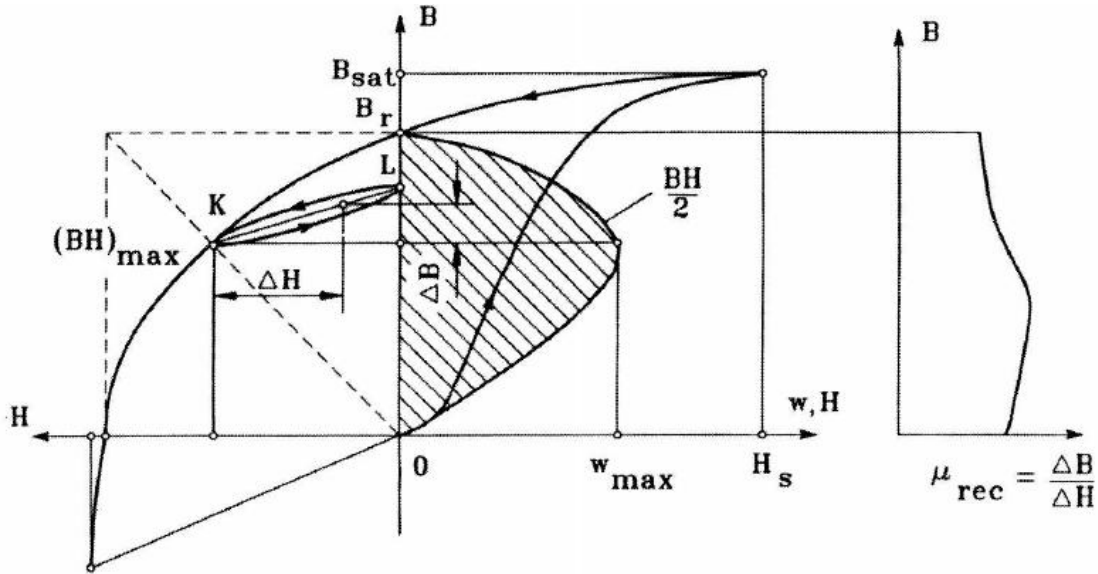
Πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάλυσή μας παίζει το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας. Πρωτεύοντα ρόλο στο κύκλωμα αυτό έχει προφανώς ο μαγνήτης και κατ' επέκταση το μαγνητικό κύκλωμα του δρομέα.

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 σκληρομαγνήτικα, 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 2.18 και ονομάζεται καμπύλη απομαγνήτισης [14]. 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 2.18: 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, η μείωση αυτή εκφράζεται από τους τύπους [14]:

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

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

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

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι η καμπύλη απομαγνήτισης εξαρτάται από την θερμοκρασία.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού B_{sat} , 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 :

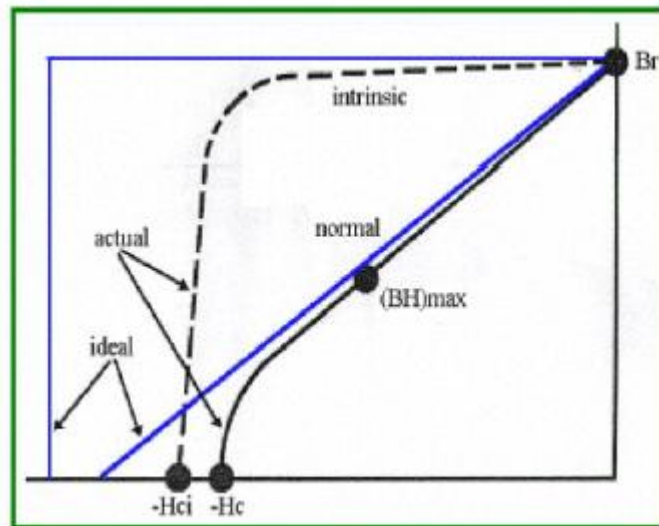
$$\mu_{rec} = \mu_o \mu_{rrec} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

όπου η σχετική μαγνητική διαπερατότητα παίρνει τιμές $\mu_{rec}=1 \dots 4.5$

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

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

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



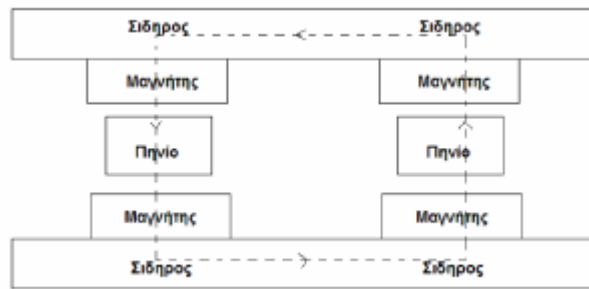
Σχήμα 2.19: Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης.

Όπως αναφέρθηκε και πάνω, ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισής του. Τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν πρακτικά, είναι η παραμένουσα μαγνήτιση B_r (Tesla) καθώς και η συνεχούσα δύναμη H_c (kA/m). Γενικά, ο μαγνήτης πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο που θα μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ενέργεια $(BH)_{max}$. Το σημείο αυτό είναι στο γόνατο της καμπύλης απομαγνήτισης και το πεδίο μπορεί να υπολογιστεί εκεί ίσο με $B = B_r / 2$. Με λίγα λόγια μπορούμε να υποθέσουμε για την πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια των μαγνητών:

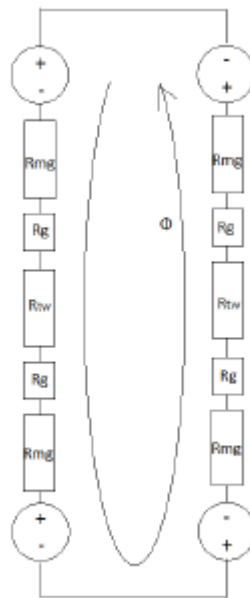
$$B_{mg} = B_r / 2 \quad (2.11)$$

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



Σχήμα 2.21: Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας.

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος έχει γίνει στο [14] από όπου προκύπτει η σχέση:

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_{rec} \frac{(g + 0.5t_w)}{h_m} k_{sat}} \quad (2.12)$$

όπου:

- μ_{rec} η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη που ορίζεται

$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_r}{H_c} \quad \text{και} \quad \mu_0 \text{ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ίση με } 4\pi \cdot 10^{-7}$$

- $k_{sat} = 1$ αφού δεν υπάρχει κορεσμός (δεν υπάρχει πυρήνας)
- h_m το πάχος του μαγνήτη (αξονικό ύψος)
- g το αξονικό ύψος του διακένου ή απλά το διάκενο

Η ανάλυση αυτή είναι καλή αν και υποθέτει ότι το πεδίο B_{mg} στην επιφάνεια του μαγνήτη διατηρείται σε όλο το αξονικό ύψος της γεννήτριας, υπόθεση που μάλλον βασίζεται στην ύπαρξη πυρήνα στη γεννήτρια. Στην 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:

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

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

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

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

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\} \quad (2.13)$$

2.4.4. 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 [40].

2.4.4.1. Μελέτη απωλειών

Απώλειες στο στάτη:

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

$$P_{cu} = 3I_{ac}^2 R_{phase} \quad (2.14)$$

Καθότι στη μελέτη μας, όπως θα δούμε, ερχόμαστε αντιμέτωποι με μεγάλες τιμές ρεύματος λόγω και της μεγάλης ισχύος που μελετάμε, 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 [14] 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 τυλίγμα, σε τέτοιο βαθμό που κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν [4]. Προκαλούνται από τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία στο τυλίγμα, 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 τυλίγμα [4].

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, οι απώλειες αυτές δεν είναι αμελητέες και δίνονται από τον τύπο :

$$P_{eddy} = \frac{\pi l_a s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}} \quad (2.15)$$

όπου:

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

Όπως φαίνεται στον τύπο, οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες της τέταρτης δύναμης της διατομής του 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 τους μαγνήτες, αλλά και αυτές είναι πολύ μικρές οπότε δε λαμβάνονται υπόψη.

Απώλειες περιστροφής:

Οι απώλειες περιστροφής ή μηχανικές απώλειες αποτελούνται από δύο συνιστώσες: Τις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και τις απώλειες ανεμισμού, Οι τελευταίες είναι πολύ μικρές και αγνοούνται. Για τις απώλειες τριβών σε μικρές μηχανές δίνεται ο τύπος [14]:

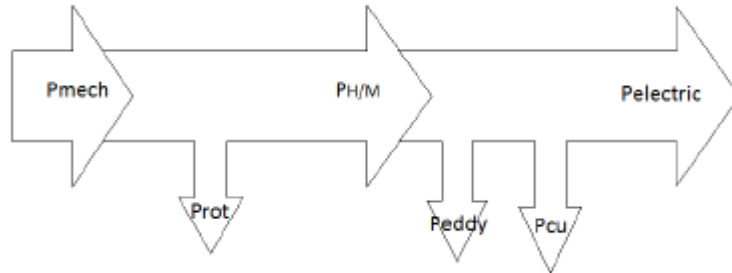
$$P_{rot} = 0.06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n \quad (2.16)$$

όπου:

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

2.4.4.2. Ισοζύγιο Ενέργειας-Ισοδύναμο Κύκλωμα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση σχηματίζουμε το ισοζύγιο ενέργειας:



Σχήμα 2.22: 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):

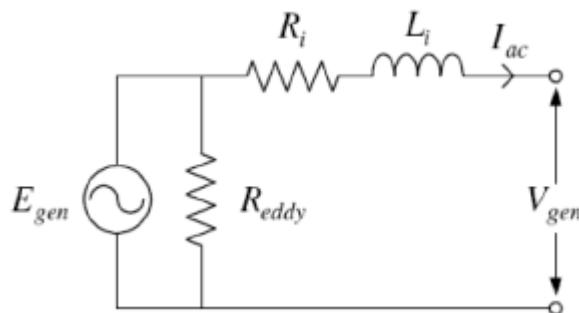
$$P_{\eta\lambda} = P_{H/M} - P_{rot} = P_{mech} - P_{rot} - P_{eddy} - P_{cu}$$

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 2.23: Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας.

Η απόδοση στη συνέχεια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (2.17)$$

Κεφάλαιο 3: Βασική διαστασιολόγηση των γεννητριών αξονικής ροής

Στη συνέχεια αυτής της εργασίας, θα εξεταστεί η βελτιστοποίηση ως προς διάφορες παραμέτρους των γεννητριών αξονικής ροής σε ένα εύρος ισχύος από 3 KW έως 6 KW με χρήση των μαγνητών N40 και N45. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε τις σχέσεις που διαστασιολογούν τις γεννήτριες αυτές ανεξαρτήτως επιπέδου ισχύος. Η διαστασιολόγηση αυτή θα γίνει με βάση τα θεωρητικά στοιχεία του προηγούμενου κεφαλαίου καθώς και με χρήση κάποιων επιπλέον σχέσεων για τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων των γεννητριών. Η σχεδίαση γίνεται με σκοπό οποιαδήποτε από αυτές τις γεννήτριες να συνδεθεί στο δίκτυο (σύνδεση AC).

3.1 Ονομαστικές στροφές-Ονομαστική Τάση

Με δεδομένο ότι μελετάμε ένα εύρος ισχύος, η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας θα είναι κάθε φορά διαφορετική. Δίνοντας την ισχύ αυτή και ορίζοντας την απόδοση που θέλουμε να έχουν οι γεννήτριες που σχεδιάζουμε, η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας δίνεται από τον τύπο:

$$P_{μηχ} = \frac{P_{ηλ}}{\eta} \quad (3.1)$$

Στο [15] η απόδοση για τη γεννήτρια αξονικής ροής 3 KW που μελετήθηκε είχε οριστεί στο 90%. Μετά από προκαταρκτική μελέτη και προσομοίωση των γεννητριών στο εύρος ισχύος που μας ενδιαφέρει με απόδοση ορισμένη στο 90% και με βάση τα αποτελέσματα αυτή της μελέτης αποφασίσαμε να θεωρήσουμε την απόδοση στο 80%. Επιλέγουμε μικρότερη απόδοση καθώς όσο ανεβαίνουμε σε ισχύ, τόσο πιο δύσκολο είναι να πετύχουμε μεγάλες αποδόσεις λόγω των αυξημένων απωλειών.

Καθώς μιλάμε για ανεμογεννήτρια, η μηχανική ισχύς που ορίζεται στον παραπάνω τύπο αντιστοιχεί στην ισχύ που αποσπά η φτερωτή από τον άνεμο. Η ισχύς αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R_t^2 v_w^3 \quad (3.2)$$

όπου φαίνεται πως η ισχύς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον άνεμο για τον οποίο σχεδιάζεται να λειτουργεί η γεννήτρια (ονομαστική λειτουργία). Από τον τύπο αυτό λύνοντας ως προς R_t , βρίσκουμε την ακτίνα της φτερωτής:

$$R_t = \sqrt{\frac{2P_{air}}{\rho C_p v_w^3}}$$

Η επιλογή του ανέμου για τον οποίο σχεδιάζεται η γεννήτρια είναι πολύ σημαντική καθώς καθορίζει το μέγεθος της φτερωτής και άρα επηρεάζει τη συνολική κατασκευή και το κόστος της ανεμογεννήτριας. Επιλέγεται άνεμος 10 m/s και όχι ένας μέσος άνεμος (5m/s), ώστε να μπορούν να αξιοποιούνται και υψηλότεροι από τον μέσο άνεμοι, οι οποίοι στα υψηλά επίπεδα ισχύος που φτάνουμε, είναι πολύ πιθανό να συναντούνται στις περιοχές τοποθέτησης των ανεμογεννητριών. Επίσης με αυτή την επιλογή περιορίζεται και η ακτίνα της φτερωτής σε πιο λογικά μήκη.

Έτσι ονομαστικός άνεμος στη σχεδίαση θεωρούνται τα 10 m/s όπου η γεννήτρια θα αποδίδει την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ. Η γεννήτρια θα μπαίνει στο σύστημα στα 3 m/s και θα διατηρεί μέσω του MPPT το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου ίσο με $\lambda_{opt}=7$.

Ισχύει για τις στροφές:

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} = \frac{2\pi n R_{turb}}{60 v_w} \rightarrow n = \frac{60 v_w \lambda_{opt}}{2\pi R_{turb}} \quad (3.3)$$

Στη συνέχεια πρέπει να καθορίσουμε το εύρος των τάσεων που θα αναπτύσσει η γεννήτρια. Όταν η γεννήτρια είναι ανοιχτοκυκλωμένη (σε κατάσταση cut-in, λίγο πριν μπει στο σύστημα) η ΗΕΔ της Εf είναι ίση με την τερματική της τάση. Δηλαδή $E_{fcutin} = V_{tcutin}$. Η τερματική αυτή τάση θα είναι ίση με την τάση στην οποία αρχίζει να λειτουργεί ο αντιστροφέας (κάτω όριο του εύρους λειτουργίας του). Αν υποθέσουμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε το WindyBoy 3300 της SMA τότε αυτός έχει εύρος λειτουργίας 200-500 V [15]. Η τάση της γεννήτριας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρώτα ανορθώνεται και μετά φτάνει στον αντιστροφέα:

$$E_{fcutin} = \frac{V_{WBcutin}}{\sqrt{3} \cdot 1.35}$$

Γενικά, για μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση ισχύει [13]:

$$V_{dc} = \sqrt{3} \cdot 1.35 \cdot V_{ac} \quad (3.4)$$

όπου Vac η φασική τάση πριν τον ανορθωτή.

Αρα, με βάση τα παραπάνω η τάση εισόδου της γεννήτριας θα είναι: $E_{fcutin} = 85,5 \text{ V}$

Για την ονομαστική ΗΕΔ:

$$\frac{E_{fnom}}{E_{fcutin}} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \rightarrow E_{fnom} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} E_{fcutin} \rightarrow E_{fnom} = 286 \text{ V} \quad (3.5)$$

όπου βέβαια είναι ίδια για όλο το εύρος ισχύος, καθώς εξαρτάται μόνο από το κάτω όριο του αντιστροφέα και τους ανέμους (cut-in και ονομαστικό) που επιλέγουμε.

Εφόσον λάβουμε υπόψη μας το άνω όριο λειτουργίας του αντιστροφέα, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 500 V, θα πρέπει να κινηθούμε αντίστροφα και με δεδομένο αυτό να καταλήξουμε σε άνεμο cut-in 4 m/s, μη μπορώντας έτσι να εκμεταλλευτούμε ανέμους 3-4 m/s οι οποίοι είναι αρκετά συχνοί σε αστικό περιβάλλον, καταλήγοντας σε μια γεννήτρια με μειωμένη ενεργειακή απόδοση.

3.2 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 θα υπολογίζουμε κάθε φορά τους πόλους της γεννήτριας έχοντας δεδομένα τη συχνότητα λειτουργίας και τις ονομαστικές στροφές :

$$p = \frac{120f_{nom}}{n_{nom}} \quad (3.7)$$

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 φυσικά 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 [13] βρέθηκε ότι ο αριθμός των πόλων και των πηνίων πρέπει, προκειμένου να μεγιστοποιείται η ροπή, να τηρεί την εξής σχέση:

$$\frac{2Q}{3p} = 0.5 \quad (3.8)$$

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. Έτσι προκύπτουν διάφοροι συνδυασμοί πόλων-πηνίων [40]:

16-12, 20-15, 24-18, 28-21, 32-24

Η συχνότητα μπορεί να λάβει τιμές από 30-60 Hz. Στην συγκεκριμένη μελέτη η συχνότητα που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτή των 50 Hz.

Η ονομαστική συχνότητα είναι σημαντική παράμετρος της διαστασιολόγησης και επιδρά άμεσα στον αριθμό των πόλων και άρα στο κόστος της γεννήτριας. Μικρή ονομαστική συχνότητα σημαίνει λιγότερους πόλους και άρα λιγότερους μαγνήτες με παράλληλη μείωση του κόστους. Σύμφωνα όμως με το [13], περισσότεροι πόλοι λόγω υψηλότερης συχνότητας, οδηγούν σε καλύτερη ροπή για το τύλιγμα που χρησιμοποιούμε καθώς και λιγότερες σπείρες στα πηνία κάτι που τα καθιστά πιο εύκολα κατασκευάσιμα.

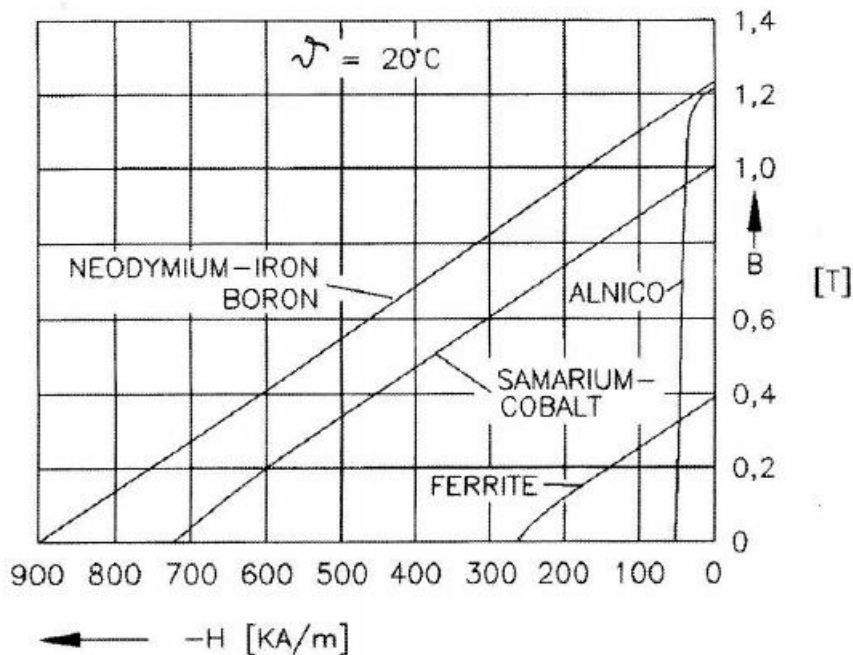
3.3 Οι Μαγνήτες

3.3.1 Το είδος του μαγνήτη

Τα είδη των μαγνητών που κυριαρχούν αυτή την στιγμή για την κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών είναι τα παρακάτω [14]:

- Alnicos (Al, Ni, Co, Fe)
- Κεραμικοί (φερίτες), όπως ο φερίτης Βαρίου ($\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) ή ο φερίτης Στροντίου ($\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)
- Οι σπάνιες γαίες, όπως το Σαμάριο-Κοβάλτιο (SmCo) και το Νεοδύμιο-Σίδηρος-Βόριο (NdFeB)

Alnico: Οι μαγνήτες Alnico κυριάρχησαν στον χώρο των κινητήρων από τα μέσα της δεκαετίας του 40' μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 60', σε ένα εύρος ισχύος από λίγα Watt μέχρι και τα 150 KW. 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 $-0.02 \% / ^\circ \text{C}$ ενώ η μέγιστη θερμοκρασία είναι $520 ^\circ \text{C}$. Η μαγνητική ένταση όμως είναι πολύ χαμηλή και η καμπύλη απομαγνήτισης είναι αρκετά μη γραμμική, έτσι οι συγκεκριμένοι μαγνήτες όσο εύκολα μαγνητίζονται το ίδιο εύκολα μπορούν να απομαγνητιστούν. Γενικά, έχουν χρησιμοποιηθεί σε DC κινητήρες δισκοειδούς τύπου με σχετικά μεγάλο διάκενο αέρος, με αποτέλεσμα η μαγνητική ροή της αντίδρασης οπλισμού να έχει αμελητέα επίδραση στους μαγνήτες. Πολλές φορές οι συγκεκριμένοι μαγνήτες προστατεύονται από την ροή της αντίδρασης οπλισμού και κατ'επέκταση από την απομαγνήτιση, με ειδικά διαμορφωμένα πέταλα στους πόλους.



Σχήμα 3.1 : καμπύλες απομαγνήτισης μονίμων μαγνητών

Φερίτες: Οι φερίτες Βαρίου και Στροντίου παράχθηκαν κυρίως στα μέσα τις δεκαετίας του 50'. Η χημική τους σύνθεση μπορεί να εκφραστεί σαν $\text{MO} \times 6(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ όπου στην θέση του M είναι το στοιχείο Ba, Sd ή Pb. Οι συγκεκριμένοι μαγνήτες είναι διαθέσιμοι σε ισοτροπικούς και ανισοτροπικούς βαθμούς. Ένας φερίτης έχει υψηλότερη μαγνητική ένταση από έναν μαγνήτη Alnico αλλά χαμηλότερη παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές είναι σχετικά υψηλοί, του B_r είναι $-0.20\% / ^\circ\text{C}$ και του H_c είναι $-0.27\% / ^\circ\text{C}$ έως $-0.40\% / ^\circ\text{C}$. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι 450°C και τα κυριότερα πλεονεκτήματα του φερίτη είναι το χαμηλό κόστος και υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, κάτι που σημαίνει πρακτικά μηδαμινές απώλειες δινορευμάτων στον όγκο του μαγνήτη. Το συγκεκριμένο είδος είναι αρκετά οικονομικό σε κινητήρες κλασματικού ίππου και χρησιμοποιούνται αρκετά σε DC κινητήρες, όπως για παράδειγμα σε ανεμιστήρες ή ηλεκτρικά παιχνίδια.

Μόνιμοι μαγνήτες από σπάνιες γαίες: Η πρώτη γενιά μονίμων μαγνητών από σπάνιες γαίες, οι οποίοι ήταν κράματα βασισμένα σε σύνθεση SmCo_5 , άρχισαν να παράγονται στις αρχές της δεκαετίας του 70. Η σύνθεση SmCo_5 έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής παραμένουσας πυκνότητας ροής, υψηλή μαγνητική ένταση και παραγωγή ενέργειας, γραμμική καμπύλη απομαγνήτισης και χαμηλό θερμοκρασιακό συντελεστή. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής του B_r είναι $-0.02\% / ^\circ\text{C}$ έως $-0.045\% / ^\circ\text{C}$ και του H_c είναι $-0.14\% / ^\circ\text{C}$ έως $-0.40\% / ^\circ\text{C}$. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι 300°C . Είναι κατάλληλοι για μηχανές μικρού όγκου και μηχανές που λειτουργούν σε αυξημένες θερμοκρασίες. Τα συγκεκριμένα υλικά είναι σχετικά ακριβά εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας.

Με την ανακάλυψη της δεύτερης γενιάς μαγνητών σπάνιων γαιών, βασισμένη στο πιο οικονομικό Νεοδύμιο (Nd), έγινε αξιοσημείωτη πρόοδος στην μείωση του κόστους των ακατέργαστων υλικών. Το Nd βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία σε σχέση με το Sm και οι συγκεκριμένοι μαγνήτες έχουν αρκετά καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες σε σχέση με αυτούς της πρώτης γενιάς αλλά μόνο σε θερμοκρασία δωματίου (η καμπύλη απομαγνήτισης τους είναι ισχυρά εξαρτημένη από την θερμοκρασία). Οι

θερμοκρασιακοί συντελεστές του Br είναι $-0.09 \% / ^\circ\text{C}$ έως $-0.015 \% / ^\circ\text{C}$ και του Hc είναι $-0.40 \% / ^\circ\text{C}$ έως $-0.80 \% / ^\circ\text{C}$. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι $250 ^\circ\text{C}$ έως $350 ^\circ\text{C}$.

Οι μαγνήτες NdFeB έχουν μεγάλη δυνατότητα στο να βελτιώνουν την επίδοση σε σχέση με το κόστος στις ηλεκτρικές μηχανές, γι αυτό το λόγο μελλοντικά θα παίξουν σπουδαίο ρόλο στην εξέλιξη των διαφόρων εφαρμογών.

Η χημική αντίδραση των μαγνητών σπάνιων γαιών είναι πανομοιότυπη με αυτή των αλκαλικών μετάλλων, όπως το Μαγνήσιο. Η αντίδραση επιταχύνεται σε αυξημένη θερμοκρασία ή υγρασία. Τα κράματα NdFeB αν εκτεθούν σε υδρογόνο, συνήθως σε ελαφρά ανεβασμένη θερμοκρασία ή και πίεση μπορούν να γίνουν εύθραυστα και με μικρή προσπάθεια να σπάσουν.

Για την προστασία των συγκεκριμένων μαγνητών από την διάβρωση, χρησιμοποιούνται επιχρίσματα δύο κατηγοριών, τα μεταλλικά και τα οργανικά. Για μεταλλικά επιχρίσματα όπως το νίκελ χρησιμοποιείται γαλβανική επεξεργασία κατά κανόνα. Τα οργανικά αποτελούνται κυρίως, από τα επιχρίσματα σκόνης που εφαρμόζονται ηλεκτροστατικά και την ρητίνη.

Αυτήν την στιγμή οι μαγνήτες NdFeB σε μεγάλες ποσότητες (παραγγελίας), δεν κοστίζουν παραπάνω από 20 Ευρώ/kg. Δεδομένου των τεράστιων ποσοτήτων που παρασκευάζονται στην Κίνα, η τιμή τους αναμένεται να πέσει κι άλλο.

Οι μαγνήτες αυτοί χαρακτηρίζονται από το βαθμό τους. Ο βαθμός του μαγνήτη εκφράζει το πόσο ισχυρός είναι με βάση την παραμένουσα μαγνήτιση του. Όσο ανεβαίνει ο βαθμός τόσο αυξάνει και το κόστος του. Οι μαγνήτες νεοδυμίου συναντώνται με βαθμούς από N30 έως N52.

Η επιλογή του βαθμού είναι πολύ σημαντική, στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας υπάρχει ελευθερία στην επιλογή αυτή καθώς η ανυπαρξία πυρήνα εξαλείφει το πρόβλημα των δινορρευμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, με βάση και την επιλογή του βαθμού N40 που είχε γίνει στο [15] για γεννήτρια 3 KW, μελετάμε δύο διαφορετικούς βαθμούς: N40M και N45M. Το γράμμα δίπλα στο βαθμό του μαγνήτη καθορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία που προτείνεται να λειτουργεί ο συγκεκριμένος μαγνήτης. Εμείς επιλέγουμε τους "M" οι οποίοι προτείνεται να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι $100 ^\circ\text{C}$. Στην επιλογή και χρήση ισχυρότερων από N40 μαγνητών, οδηγούμαστε και από το γεγονός ότι πλέον μελετάμε και ισχύς αρκετά υψηλότερες από 3 KW φτάνοντας στα 6 KW.

3.3.2 Το σχήμα του μαγνήτη

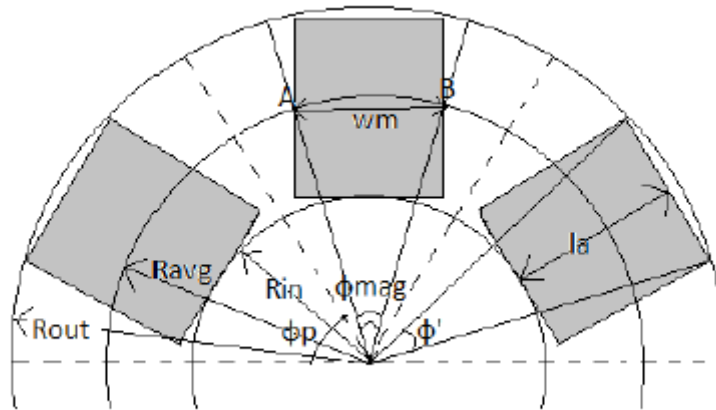
Έχουν μελετηθεί μηχανές αξονικής ροής όπου χρησιμοποιούνται μαγνήτες με διάφορα σχήματα. Τρία από αυτά που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι οι δισκοειδείς μαγνήτες, οι ορθογώνιοι και οι τραπεζοειδείς. Μετά από σύγκριση που έγινε μεταξύ ορθογώνιων και τραπεζοειδών μαγνητών στο [15], επιλέχθηκαν οι πρώτοι, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν και εδώ.

Οι ορθογώνιοι μαγνήτες, καθότι πιο δημοφιλείς, μπορούν να βρεθούν πιο εύκολα στο εμπόριο σε μεγάλο εύρος διαστάσεων, καθώς επίσης και να κατασκευαστούν πιο εύκολα και άρα με μικρότερο κόστος από ότι οι τραπεζοειδείς. Τα χαρακτηριστικά αυτά τους καθιστούν ιδανικούς για τους σκοπούς της εργασίας μας, καθώς μέσα από τη μελέτη που θα κάνουμε, θα προκύψουν μαγνήτες σε ένα εύρος διαστάσεων που θα καλύπτουν το εύρος της ισχύος που θέλουμε, πολλοί από τους οποίους πολύ πιθανόν να μη συναντώνται στο εμπόριο και άρα να πρέπει να κατασκευαστούν.

3.3.3 Οι διαστάσεις των μαγνητών

Οι κυριότερες διαστάσεις του μαγνήτη που μας ενδιαφέρουν είναι το πάχος h_m , το μήκος l_a και το πλάτος του w_m . Το πάχος του μαγνήτη είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει αρκετά την σχεδίαση. Το πρώτο θέμα που προκύπτει έχει να κάνει με το πάχος του σιδήρου και αφορά κυρίως τον μαγνητικό κορεσμό του. Για να αποφύγουμε αυτό το ανεπιθύμητο φαινόμενο, θα πρέπει το πάχος του σιδήρου να είναι ίσο με το πάχος του μαγνήτη [40]. Εύκολα αντιλαμβανόμαστε πως αυτή η διάσταση επηρεάζει και την κατανομή του πεδίου στο διάκενο, με λίγα λόγια την 1^η αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής

ροής. Μειώνοντας το πάχος του μαγνήτη, μειώνεται και το πάχος του πηνίου. Έτσι, μπορεί να οδηγηθούμε σε πηνία τα οποία θα είναι πολύ λεπτά και δύσκολα κατασκευάσιμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως μαγνήτες μεγαλύτερου πάχους είναι γενικά πιο ισχυροί, οπότε διατηρώντας τα πεδία στην γεννήτρια ίδια ώστε οι μαγνήτες να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ενέργειας, θα πρέπει να απομακρυνθούν μεταξύ τους καταλήγοντας σε πηνία μεγαλύτερου πάχους, t_w . Η κατασκευασιμότητα του πηνίου μετράται από τον λόγο αξονικού πάχους προς πάχος πλευράς t_w/w_c , ο οποίος εμπειρικά αλλά και από τις μηχανές του Hugh Piggot [17] έχει ως μέγιστη τιμή σε αυτήν την εργασία το 0.35. Για τις άλλες δύο διαστάσεις, l_a και w_m , είναι απαραίτητη η γνώση των a_i και k_d . Το μήκος του μαγνήτη l_a είναι ίσο περίπου με αυτό που ως τώρα έχει ονομαστεί ενεργό μήκος $R_{out}-R_{in}$. Στην πραγματικότητα το ενεργό μήκος της γεννήτριας είναι το μήκος του μαγνήτη, το οποίο όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3.3 δεν συμπίπτει ακριβώς με την διαφορά εξωτερικής και εσωτερικής ακτίνας. Στην περίπτωση όμως μεγάλης γεννήτριας με αρκετούς πόλους, η διαφορά αυτή είναι μικρή και μπορεί να αγνοηθεί. Για τον υπολογισμό των w_m , l_a θα μας βοηθήσει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2: Η γεωμετρία του μαγνήτη

Αφού γνωρίζουμε το a_i μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία του μαγνήτη :

$$\varphi_{mag} = a_i \varphi_p = a_i \frac{2\pi}{p}$$

όπου φ_p η γωνία του πολικού βήματος. Έτσι μπορεί να βρεθεί το τόξο AB που αντιστοιχεί στο μέσο πλάτος του μαγνήτη w_m το οποίο ψάχνουμε :

$$AB = a_i \frac{2\pi r_{avg}}{p}$$

Το τόξο αυτό θα βλέπαμε αν κάναμε το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της γεννήτριας σε μια τομή ακριβώς στη μέση της. Η πραγματική όμως διάσταση του μαγνήτη είναι :

$$w_m = 2r_{avg} \sin\left(\frac{\varphi_{mag}}{2}\right)$$

Όσον αφορά το μήκος l_a , από την στιγμή που ο ορθογώνιος μαγνήτης δεν έχει σταθερό a_i , πρέπει να βρεθεί η γωνία φ' που αντιστοιχεί στην εξωτερική ακτίνα, όπως φαίνεται και στο σχήμα :

$$\varphi'_{mag} = 2 \sin^{-1}\left(\frac{w_m}{2r_{out}}\right)$$

$$l_a = r_{out} \cos\left(\frac{\varphi'_{mag}}{2}\right) - r_{in}$$

3.3.4 Ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος

Ο λόγος αυτός είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους όλης της διαστασιολόγησης και μαζί με το kd που θα αναλυθεί παρακάτω αποτελούν τις δύο μεταβλητές που θα βελτιστοποιηθούν ως προς διάφορες παραμέτρους. Πολύ συχνά στην βιβλιογραφία θα συναντηθεί η βέλτιστη τιμή του λόγου αυτού ως $2/\pi$ [14,4]. Η συγκεκριμένη τιμή θεωρείται βέλτιστη επειδή έτσι παράγονται ημιτονοειδής τάσεις. Τα πεδία βέβαια παραμένουν μη ημιτονοειδή. Γενικά, αυξάνοντας το a_i σε μια γεννήτρια δεδομένης εξωτερικής ακτίνας, αυξάνονται οι μαγνήτες οπότε και η ισχύς στην έξοδο. Αντίστροφα, δεδομένης της ισχύος στην έξοδο, αυξάνοντας το a_i οδηγούμαστε σε μικρότερο όγκο. Υψηλή τιμή του συντελεστή αυτού, δηλαδή περισσότερο μαγνητικό υλικό, θα οδηγήσει σε μεγαλύτερες ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δίσκων του δρομέα, που σημαίνει σίδηρος μεγαλύτερου πάχους και πιο βαριά κατασκευή. Αντιλαμβανόμαστε πως αυτός ο λόγος επιδρά στο κόστος της γεννήτριας (αφού οι μαγνήτες είναι το πιο ακριβό υλικό), στον όγκο, στο βάρος, στην απόδοση και στην κυματομορφή της τάσης.

3.3.5 Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής

Το μέτρο της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής B_p , εκφράζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο. Έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξαρτάται αφενός από το είδος του μαγνήτη, αφετέρου από τη γεωμετρία. Δεν υπάρχει κάποια θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του, και μόνο για $a_i=2/\pi$ γίνεται μια εκτίμηση:

$$B_p = \frac{2\sqrt{3}B_{mg}}{\pi}$$

Το είδος του μαγνήτη θα είναι δεδομένο στην ανάλυση που θα ακολουθήσει (N40 και N45) και αυτό που θα αλλάξει θα είναι η γεωμετρία του, δηλαδή το a_i , το kd, το πάχος του μαγνήτη hm καθώς και η απόσταση μεταξύ των μαγνητών, tw. Το πάχος του μαγνήτη θα είναι δεδομένο στην διαστασιολόγηση και ίσο με 10 mm και καθορίζει άμεσα όπως έχουμε δει (δεδομένου του είδους του μαγνήτη) το tw. Έτσι, μοναδικές μεταβλητές στην ανάλυση θα είναι ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα a_i και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα kd.

Ο υπολογισμός λοιπόν του B_p εμποδίζει τη γραμμική εξέλιξη της διαδικασίας. Η εξάρτηση όμως μόνο από τις δύο αυτές μεταβλητές, είναι μια καλή προσέγγιση που μπορεί να γίνει. Έτσι, υπολογίζοντας με την βοήθεια των λογισμικών το B_p για πολλούς συνδυασμούς των a_i και kd (για τις περιπτώσεις μαγνήτη N40 και N45), μπορούμε να δημιουργήσουμε όπως θα δούμε παρακάτω, έναν πίνακα με τιμές για την πρώτη αρμονική του πεδίου που θα σχετίζεται με τις τιμές των μεταβλητών αυτών.

3.3.6 Ροπή και εξωτερική ακτίνα

Εδώ θα παρουσιαστεί ένας τρόπος υπολογισμού της εξωτερικής ακτίνας της γεννήτριας.

Η σχέση (2.4) υπολογίζει την ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Η ροπή αυτή αντιστοιχεί στην ηλεκτρομαγνητική ισχύ της γεννήτριας. Η ισχύς αυτή μπορεί να βρεθεί θεωρώντας απόδοση $\eta=80\%$ και γνωρίζοντας τη ζητούμενη ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο, η οποία στα πλαίσια της εργασίας αυτής μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται στο [1], κάθε φορά η γεννήτρια δεν πρέπει να διαστασιολογηθεί ακριβώς για την ονομαστική ισχύ στην έξοδο αλλά για λίγο παραπάνω ώστε να αντέχει σε περίπτωση ριπών ανέμου μεγαλύτερων από 10m/s. Αν και αυτή η μέθοδος είναι αρκετά αμφίβολη, εδώ θα χρησιμοποιηθεί η $P_{max}=1.1*P_{nom}$ για ασφάλεια στη διαστασιολόγηση. Πάντως η ισχύς που μπορεί να παραχθεί από μια ριπή ανέμου είναι πολύ μεγαλύτερη από την παραπάνω, η διάρκεια της όμως είναι πολύ μικρή. Ισχύει:

$$T_d = \frac{P_{H/M\max}}{\omega_{mech}} = \frac{60P_{H/M\max}}{2\pi n_{nom}} = \frac{60P_{\eta\lambda\max}}{n \cdot 2\pi n_{nom}} = \frac{1.1 \cdot 60P_{\eta\lambda nom}}{n \cdot 2\pi n_{nom}} \quad (3.10)$$

Οπότε με βάση την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο που θέλουμε και τις αντίστοιχες ονομαστικές στροφές, προκύπτει η ροπή.

Από τη σχέση (2.7) του κεφαλαίου 2 και αντικαθιστώντας όλα τα γνωστά μεγέθη, λύνοντας το τριώνυμο που προκύπτει ως προς R_{out} , εξάγεται η παρακάτω σχέση :

$$R_{out} = \sqrt[3]{\frac{T_d}{k_{wc} k_{ec} k_r J_{\max} t_w k_f B_p \sqrt{4,5q(k_d + 1) \sin\left(\frac{\theta_{re}}{p}\right) 2\Lambda}}} \quad (3.11)$$

όπου

$$\Lambda = (1 - k_d) + \frac{\theta_m - 0.6\theta_{re}}{p} (1 + k_d) \quad (3.12)$$

Για τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος στο τύλιγμα, J_{\max} , επιλέγεται η ασφαλής τιμή των 6 (A/mm²) [15]. Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου θα καθοριστεί στη συνέχεια.

3.3.7 Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα

Μετά τον υπολογισμό της εξωτερικής ακτίνας, θα υπολογιστεί η εσωτερική από τον τύπο

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

Ο λόγος αυτός επιλέγεται επίσης από τον σχεδιαστή αναλόγως με τα σχεδιαστικά κριτήρια που θέτει. Στην βιβλιογραφία συναντάται συχνά η τιμή $1/\sqrt{3}$ σαν βέλτιστη για μέγιστη ροπή [14,13] αλλά όπως θα αποδειχτεί και αργότερα είναι μια μικρή τιμή για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Γενικά, ο λόγος αυτός επηρεάζει τον όγκο της γεννήτριας και κυρίως το σχήμα του μαγνήτη καθορίζοντας το ενεργό του μήκος. Μια μικρή τιμή του k_d οδηγεί σε μαγνήτες μεγάλου ενεργού μήκους και αρα μεγάλης επιφάνειας. Αυτό οδηγεί αφενός σε μεγάλο κόστος, αφετέρου σε μεγάλη ελκτική δύναμη μεταξύ των δίσκων του δρομέα που όπως προαναφέρθηκε σημαίνει σίδηρο μεγαλύτερου πάχους και πιο βαριά κατασκευή. Με λίγα λόγια χαμηλό k_d είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε πιο ακριβή και πιο βαριά κατασκευή. Η γεννήτρια όμως θα έχει καλύτερη απόδοση, ροπή αλλά και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος καθώς θα είναι πιθανότατα μικρότερη σε όγκο. Γενικά όπως θα φανεί και μέσω των βελτιστοποιήσεων για εφαρμογές χαμηλού κόστους [17,16] θα προκύψουν υψηλές τιμές του λόγου αυτού.

3.4 Ο στάτη και τα πηνία

Στο κεφάλαιο αυτό θα διαστασιολογηθεί το τύλιγμα το οποίο περιλαμβάνεται στο στάτη.

3.4.1 Το πάχος του στάτη

Το πάχος του στάτη αντιπροσωπεύεται από το αξονικό πάχος των πηνίων t_w . Από την ανάλυση στο κεφάλαιο 2 έχει προκύψει η σχέση (2.13) για τον υπολογισμό του t_w :

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

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

- Το διάκενο της γεννήτριας g , το οποίο επιλέγεται να είναι ίσο με 3mm. Είναι μια μεγάλη τιμή γενικά 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 επιλέγεται να είναι ίσο με 10 mm [15]. Το πάχος αυτό συναντάται αρκετά συχνά σε εμπορικούς μαγνήτες.
- Η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο B_{mg} , που θεωρείται λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στην επιφάνεια του μαγνήτη και η οποία ισούται όπως αναφέραμε στη θεωρητική ανάλυση με $B_r/2$.

3.4.2 Σπείρες και πάχος πηνίου

Από την εξίσωση της τάσης που επάγεται στα τυλίγματα από τους μαγνήτες, όπως βρέθηκε στο κεφάλαιο 1, μπορούμε να υπολογίσουμε τις σπείρες ανά πηνίο λύνοντας ως προς N_c :

$$N_c = \frac{E_f p}{2\sqrt{2}q\omega_e B_p k_w l_a r_{avg}}$$

όπου

$$\omega_e = \frac{2\pi n p}{60 \cdot 2}$$

Για $n=n_{cutin}$ οι παραπάνω σχέσεις γράφονται:

$$N_c = \frac{E_{fcutin} P}{2\sqrt{2}q\omega_{ecutin} B_p k_w l_a r_{avg}} \quad (3.13)$$

όπου

$$\omega_e = \frac{2\pi n_{cutin} p}{60 \cdot 2} \quad (3.14)$$

Όλα τα μεγέθη στις παραπάνω εξισώσεις έχουν βρεθεί στο πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου. 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.

Για την εύρεση του πάχους πλευράς πηνίου w_c θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (2.8) του κεφαλαίου 2:

$$J_{\max} = \frac{N_c I_a}{t_w w_c k_f}$$

Την οποία λύνοντας ως προς w_c προκύπτει:

$$w_c = \frac{N_c I_a}{t_w J_{\max} k_f}$$

Βλέπουμε ότι χρειάζεται πρώτα να υπολογίσουμε το ρεύμα που θα περάσει τα τυλίγματα και μάλιστα το μέγιστο, προκειμένου να είμαστε ασφαλείς όταν κάποια ριπή χτυπήσει τη γεννήτρια ότι δε θα περάσει ρεύμα που δε θα μπορέσει να αντέξει το τυλίγμα. Η μικρή διάρκεια των ριπών καθώς και το αεροδυναμικό φρένο της γεννήτριας εξασφαλίζουν ότι τα ρεύματα αυτά θα είναι επίσης μικρής διάρκειας και άρα όχι πολύ επικίνδυνα. Έτσι το ονομαστικό ρεύμα δίνεται από τον τύπο:

$$I_{anom} = \frac{P_{\eta\lambda}}{3E_{fnom}\eta} \quad (A)$$

Ενώ το μέγιστο ρεύμα θα είναι:

$$I_{amax} = \frac{1.1P_{\eta\lambda}}{3E_{fnom}\eta} \quad (A)$$

Ο μόνος άγνωστος συντελεστής στον τύπο του w_c είναι ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων k_f , ο οποίος εκφράζει τη δυνατότητα να γεμίσει η ιδεατή αύλακα με χαλκό. Η μέγιστη τιμή του για αγωγούς με κυκλική διατομή προκύπτει εύκολα από τη γεωμετρία:

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

Με βάση μελέτη του συγκεκριμένου συντελεστή που έγινε [15], επιλέγεται η τιμή 0.6, τιμή στην οποία σταθεροποιείται το k_f για μεγάλο αριθμό σπειρών, γεγονός που ικανοποιεί τα δεδομένα της μελέτης μας.

Το εμβαδόν της σπείρας βρίσκεται τώρα απλά:

$$sc = \frac{I_{amax}}{J_{\max}} \quad (3.15)$$

και η διάμετρος του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί:

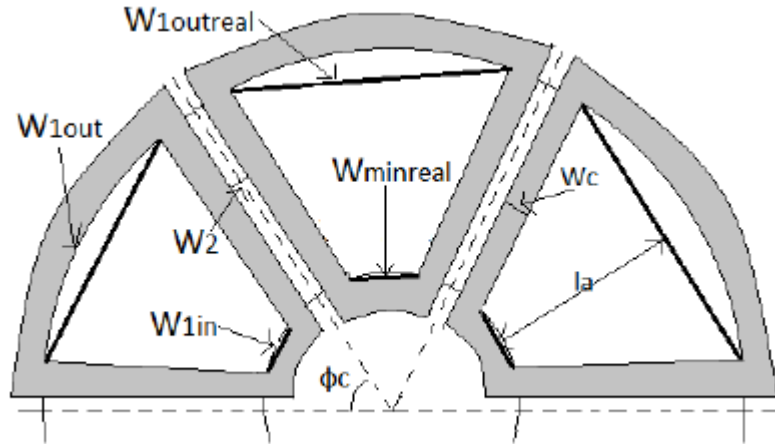
$$dc = \sqrt{\frac{4sc}{\pi}} \quad (3.16)$$

Όπως θα δούμε παρακάτω, οι τιμές αυτές θα αυξάνουν σημαντικά όσο αυξάνονται τα επίπεδα της ισχύος που μελετάμε λόγω των μεγάλων τιμών ρεύματος που καλούνται να αντέξουν τα πηνία.

3.4.3 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 :

$$w_1 = \frac{2\pi r}{Q} - 2w_c - w_2 \quad (3.17)$$

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_{1in}^{real} και w_{1out}^{real} , τα οποία λόγω της ιδιομορφίας της κατασκευής υπολογίζονται:

$$w_1^{real} = 2r \sin(\varphi_c) \quad (3.18)$$

όπου

$$\varphi_c = \frac{2\pi w_1}{Q(w_1 + 2w_c + w_2)} \quad (3.19)$$

Έτσι τελειώνει η διαστασιολόγηση του τυλίγματος, καθώς τώρα όλα τα μεγέθη είναι γνωστά. Στο [1] γίνεται μια διαφορετική διαστασιολόγηση του πηνίου που σαν βάση της έχει να ταιριάζει ο μαγνήτης ακριβώς στην ενεργό επιφάνεια του πηνίου. Η τακτική αυτή δεν είναι λανθασμένη και χρησιμοποιείται προκειμένου να βελτιώσει την κυματομορφή της τάσης. 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 διορθωθεί λίγο η 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.

3.5 Το πάχος του σιδήρου

Το πάχος του σιδήρου είναι μια πολύ σημαντική μεταβλητή της γεννήτριας. 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 [14]:

$$F_z = \frac{1}{2} \frac{B_{mg}^2}{\mu_0} S_{PM} \quad (3.20)$$

όπου

$$S_{PM} = a_i \pi (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (3.21)$$

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

Στο [15] έχει υπολογιστεί μια σχέση που συνδέει τη ροπή στα άκρα του σιδερένιου δίσκου (όπου λυγίζει πιο εύκολα) με το πάχος του σιδήρου, χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.24). Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται ως οδηγός για τη διαστασιολόγηση ενώ η τελική απόφαση θα πρέπει να λαμβάνεται στο τέλος ανεξάρτητα από αυτήν για ασφάλεια.

Γενικά, η απόφαση για το πάχος του σιδήρου είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο κριτήρια: Το πρώτο είναι η μηχανική αντοχή της γεννήτριας. Να μη λυγίσουν οι δίσκοι υπό την ελκτική δύναμη των μαγνητών. Μια λύση, άμα δε θέλουμε να έχουμε μεγάλο πάχος σιδήρου παντού, είναι να έχουμε το απαιτούμενο πάχος πίσω από τους μαγνήτες, ο υπόλοιπος δίσκος να είναι πιο λεπτός και να έχει πίσω του κολλημένες ακτίνες που θα τον συγκρατούν. Το δεύτερο είναι να μην υπάρχει κορεσμός. Άμα 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. Ένας πρακτικός τρόπος για να δει κανείς αν υπάρχει κορεσμός (αφού έχει κατασκευάσει τους δίσκους με τους μαγνήτες) είναι να τοποθετήσει στο πίσω μέρος του δίσκου έναν συνδετήρα. Άμα ο συνδετήρας κολλήσει σημαίνει ότι υπάρχει κορεσμός και δεν εκμεταλλευόμαστε όλη τη μαγνητική ροή των μαγνητών. Τα δύο κριτήρια πρέπει να ληφθούν υπόψη και να ζυγιστούν σωστά ώστε να μην προκύψει μια πολύ βαριά κατασκευή.

Ας σημειωθεί εδώ ότι στους σιδερένιους δίσκους του δρομέα μπορούν να κοπούν κάποιες σπές συμμετρικά και μακριά από τους μαγνήτες. Οι σπές αυτές θα βοηθήσουν στον ακόμα καλύτερο αερισμό της γεννήτριας και θα μειώσουν το βάρος της. Απαιτείται απόλυτα συμμετρική κοπή για να μη δημιουργούνται ανεπιθύμητες ροπές κατά την περιστροφή του δρομέα [16].

3.6 Κόστος και βάρος γεννήτριας

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται επίσης μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος και βάρος 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. 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:

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

Ενώ για το βάρος:

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

3.6.1 Οι μαγνήτες

Όπως είναι γνωστό το μεγαλύτερο μέρος του κόστους στη γεννήτρια το αποτελεί το κόστος των μαγνητών. Οπότε σε περίπτωση που το κόστος αποτελεί κριτήριο σε μια βελτιστοποίηση, καταλαβαίνουμε ότι αλλαγές στο κόστος των μαγνητών θα επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματά της. Η κοστολόγηση των μαγνητών αποτέλεσε ιδιαίτερο κομμάτι αυτής της εργασίας, καθώς δεν υπάρχει κάποια τιμή για το κιλό ενός είδους μαγνήτη. Κάθε τεμάχιο τιμολογείται ξεχωριστά ανάλογα με το είδος, το βάρος, το πάχος και το σχήμα. Έτσι, γενικά, μαγνήτες μεγαλύτερου βάρους (αλλά ίδιοι κατά τα άλλα) προφανώς θα είναι ακριβότεροι. Έχοντας επιλέξει το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη η κατάσταση διευκολύνεται λιγάκι αλλά και πάλι δεν υπάρχει κάποια ασφαλής εκτίμηση.

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

Στην συγκεκριμένη εργασία, μετά από έρευνα στο διαδίκτυο βρέθηκαν οι τιμές εμπορικών μαγνητών βαθμού N40 και N45 από ιστοσελίδες ανάλογων εμπορικών εταιριών, όπου αφού σχηματίστηκε η σχετική καμπύλη, με άξονες x και y τον όγκο και το κόστος αντίστοιχα (με τη βοήθεια του MATLAB) εστάχθηκε και η σχετική εξίσωση.

Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν 2 σχέσεις, μια για κάθε βαθμό μαγνήτη, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

Μαγνήτες N40: $(0.6186 + 9.2715 \cdot 10^{-4}) \cdot V_{mag}$

Μαγνήτες N45: $(1.8579 + 4.7408 \cdot 10^{-4}) \cdot V_{mag}$

Όπου ο όγκος σε όλες τις σχέσεις δίνεται για τους ορθογώνιους μαγνήτες από:

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

Το ολικό κόστος των μαγνητών δίνεται σε κάθε περίπτωση (θα γίνει παραγγελία 2p μαγνητών από το εξωτερικό):

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

Το συνολικό βάρος των μαγνητών θα είναι ίσο με:

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

όπου $\rho_{mag}=7.5 \text{ g/cm}^3$ για τους NdFeB όλων των βαθμών.

3.6.2 Ο σίδηρος

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

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

$$V_{Fe} = 4r_{out}^2 h_r$$

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

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

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

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

Όπου θα πρέπει να προσθέσουμε και το ΦΠΑ.

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

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

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

3.6.3 Ο χαλκός

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

$$M_{cu} = 3N_{phase} l_{avg} s c p_{cu}$$

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

$$C_{cu} = \text{copperprice} \cdot M_{cu}$$

όπου θα προσθέσουμε και το ΦΠΑ.

3.6.4 Η ρητίνη

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

Για τη ρητίνη στο δρομέα (δύο δίσκοι):

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

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:

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

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

Για το κόστος:

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

3.6.5 Τα κόντρα πλακέ

Τα κόντρα πλακέ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλουπιών και μόνο και το βάρος τους δε συμβάλλει στο συνολικό βάρος της γεννήτριας παρά μόνο στο συνολικό κόστος.

Κατά προσέγγιση θα χρησιμοποιηθούν 9 κόντρα πλακέ εμβαδού λίγο μεγαλύτερου (extra) από το περιγεγραμμένο στον κύκλο ακτίνας r_{out} τετράγωνο. Τα 3 χρησιμοποιούνται στο στάτη και τα 6 στο δρομέα. Το πάχος είναι διαφορετικά 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 δύο διαφορετικά πάχη που χρησιμοποιούνται.

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

3.7 Συνοπτικά βήματα διαστασιολόγησης

Η συνολική διαδικασία που ακολουθείται για τον καθορισμό όλων των διαστάσεων της γεννήτριας περιγράφεται παρακάτω [15]:

Βήμα 1ο: Επιλογή της επιθυμητής, κάθε φορά, ισχύος $P_{ηnom}$ και απόδοσης η . Επίσης επιλογή του εύρους των ανέμων V_{wcutin} και V_{wnom} . Υπολογισμός ακτίνας φτερωτής R_{turb} . Καθώς στη συγκεκριμένη εργασία μελετάμε ένα εύρος ισχύων, η ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας δεν είναι μοναδική οπότε όπως θα δούμε η διαστασιολόγηση επανακινεί κάθε φορά από αυτό το σημείο επιλέγοντας την νέα ισχύ που θέλουμε.

Βήμα 2ο: Υπολογισμός του εύρους των στροφών n_{cutin} και n_{nom} καθώς και του εύρους τάσεων E_{fcutin} και E_{fnom} . Εύρεση του κατάλληλου αντιστροφέα.

Βήμα 3ο: Επιλογή της ονομαστικής συχνότητας f_{nom} και εύρεση του αριθμού των πόλων p και του αριθμού των πηνίων Q .

Βήμα 4ο: Επιλέγεται το είδος, το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και το μήκος και το πλάτος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιήσουμε.

Βήμα 5ο: Δίνεται ως είσοδος η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, η τιμή της οποίας επαληθεύεται στη συνέχεια και αφού υπολογίσουμε τους υπόλοιπους συντελεστές, με τη σχέση που υπάρχει για την εξωτερική ακτίνα.

Βήμα 6ο: Υπολογίζεται η εσωτερική ακτίνα, ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα a_i καθώς και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα.

Βήμα 7ο: Υπολογίζεται το πάχος του στάτη t_w , και προσεγγιστικά το B_p .

Βήμα 8ο: Χρησιμοποιείται η σχέση για την εξωτερική ακτίνα για έλεγχο και επαλήθευση.

Βήμα 9ο: Υπολογίζεται ο αριθμός των σπειρών, το πάχος πλευράς πηνίου και η διάμετρος του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί, γνωρίζοντας το μέγιστο ρεύμα που θα περάσει από το τύλιγμα. Επίσης οι πραγματικές διαστάσεις των πηνίων.

Βήμα 10ο: Υπολογίζεται το συνολικό κόστος και το βάρος της γεννήτριας.

Σε όλη την παραπάνω διαδικασία ο σχεδιαστής πρέπει προτού ξεκινήσει να γνωρίζει:

- Τους ανέμους στους οποίους θα δουλεύει η γεννήτρια
- Το εύρος λειτουργίας του ανορθωτή
- Την ονομαστική συχνότητα
- Το βαθμό, το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη
- Τις διαστάσεις του μαγνήτη, μήκος και πλάτος
- Την εξωτερική ακτίνα που θα επαληθευτεί βέβαια κατά τη διάρκεια της διαστασιολόγησης

Στη συνέχεια κάποιες από τις μεταβλητές που αναφέρουμε παραπάνω θα υποστούν βελτιστοποίηση, έχοντας ορίσει κάποιο κριτήριο για τη βελτιστοποίηση αυτή, και οι διατάξεις που θα προκύψουν θα προσομοιωθούν.

Κεφάλαιο 4: Λογισμικό Προσομοίωσης και Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικά το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την 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 στην βελτιστοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων βάση των εφαρμογών που θα χρησιμοποιηθούν οι συγκεκριμένες γεννήτριες.

Λογισμικό Προσομοίωσης

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 εξετάζουμε τις σχεδιαστικές μεταβλητές που θα προκύπτουν για τις βελτιστοποιήσεις διαφορετικών σχεδιαστικών κριτηρίων στις διάφορες ισχύς.

4.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

4.2.1 Το λογισμικό FEMM

Μετά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης και της βελτιστοποίησης ορισμένων μεταβλητών βάση 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 [15]:

$$A = \nabla \times B$$

και από το θεώρημα Stokes βρίσκεται η μαγνητική ροή Φ :

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

4.2.2 Σχεδίαση της γεννήτριας και μετακίνηση του δρομέα

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 ανάπτυγμα αυτής. Το ανάπτυγμα 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.

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. Ότι 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 την μια πλευρά και σχεδιάζοντας το στην άλλη, διατηρώντας πάντα την 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.

4.3 Βελτίωση του αλγόριθμου διαστασιολόγησης

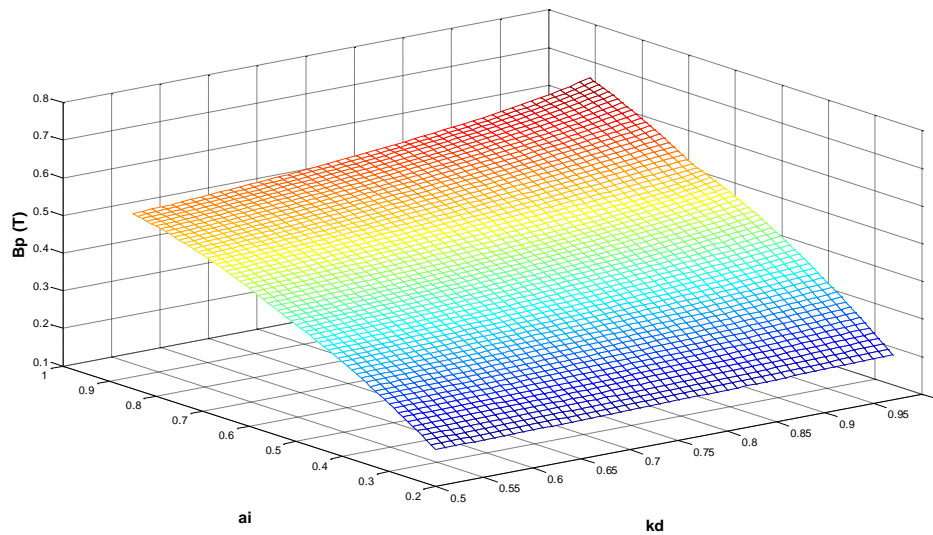
Σε πολλά σημεία της διαστασιολόγησης απαιτείται η γνώση της I^{15} αρμονικής της μαγνητικής επαγωγής B_p στο διάκενο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού δεν έχει βρεθεί, αλλά εξαρτάται από την γεωμετρία του μαγνήτη, δηλαδή από μεταβλητές όπως ο λόγος του πλάτους του μαγνήτη προς το πολικό βήμα, a_i και ο λόγος της εσωτερικής ακτίνας R_{in} προς την εξωτερική ακτίνα R_{out} , k_d .

Υπολογισμός της I^{15} αρμονικής της μαγνητικής επαγωγής (B_p)

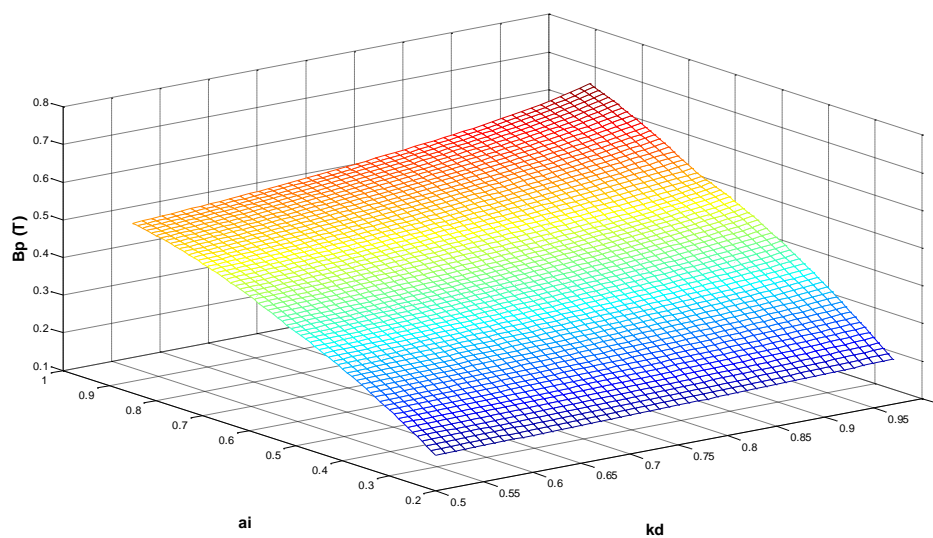
Με την χρήση των παραπάνω λογισμικών σχεδιάστηκαν διατάξεις για συνδυασμούς των a_i και k_d , όπου στο a_i δόθηκαν τιμές από 0.2 έως 0.85 και στο k_d από 0.5 έως 0.95 με βήμα 0.01. Στην συνέχεια σε κάθε διάταξη υπολογίστηκε το B_p με τον εξής τρόπο: Το FEMM υπολογίζει τη γραφική παράσταση του B για μήκος ενός πολικού βήματος και τυπώνει τα δεδομένα εξόδου θέση-πεδίο σε ένα αρχείο. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η έτοιμη συνάρτηση του MATLAB, `fft`, η οποία εκτελεί μετασχηματισμό Fourier στα παραπάνω δεδομένα. Έτσι για κάθε συνδυασμό των a_i και k_d υπολογίζεται η τιμή της πρώτης αρμονικής B_p , η οποία αποθηκεύεται σε έναν πίνακα. Η διαδικασία αυτή έγινε για όλες τις ισχύς που μελετούνται σε αυτήν την εργασία, δηλαδή για το εύρος 3 έως 6 KW με βήμα 500 W και για χρήση των μαγνητών N40 και N45. Έχοντας λοιπόν αποθηκευμένους τους συγκεκριμένους πίνακες, στην εκάστοτε διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε ισχύ και για κάθε μαγνήτη, ανάλογα με τις τιμές που θα δίνει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης (όπως θα δούμε και παρακάτω) για τις μεταβλητές a_i και k_d στον κώδικα διαστασιολόγησης, αυτός θα ανατρέχει στον κατάλληλο πίνακα και με γραμμική παρεμβολή θα βρίσκει την τιμή του B_p που θα αντιστοιχεί σε αυτές τις τιμές.

Εδώ παρουσιάζονται ορισμένες τρισδιάστατες κυματομορφές που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένους πίνακες, όπου στους άξονες x, y βρίσκονται τα a_i, k_d ενώ στον άξονα z αντιστοιχούν οι τιμές του B_p . Παρουσιάζονται για την ακρίβεια οι καμπύλες για τις ισχύς των 3 και 6 KW με χρήση και των δύο μαγνητών N40 και N45. Όλες οι καμπύλες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ.

Μαγνήτης N40

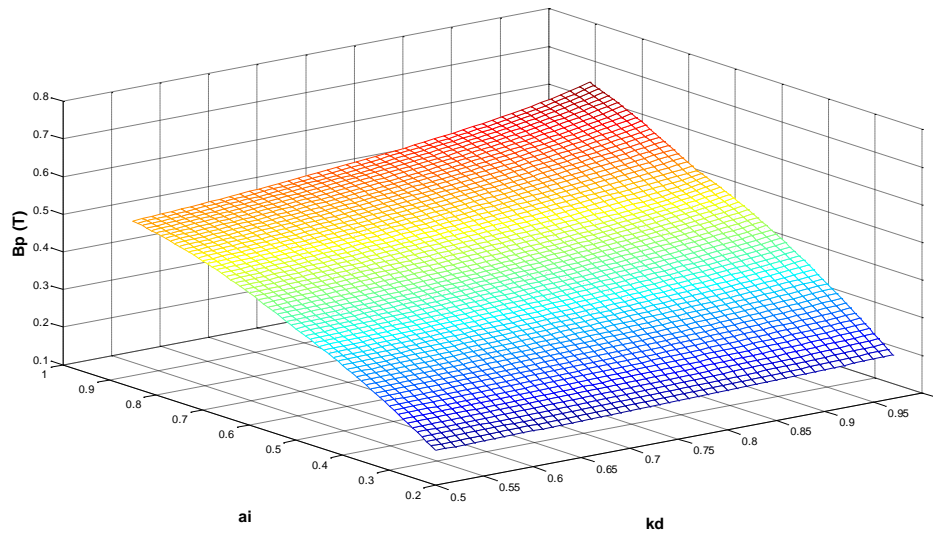


Σχήμα 4.1: καμπύλη $1^{ηs}$ αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των a_i-k_d για την ισχύ 3 KW με χρήση μαγνήτη N40

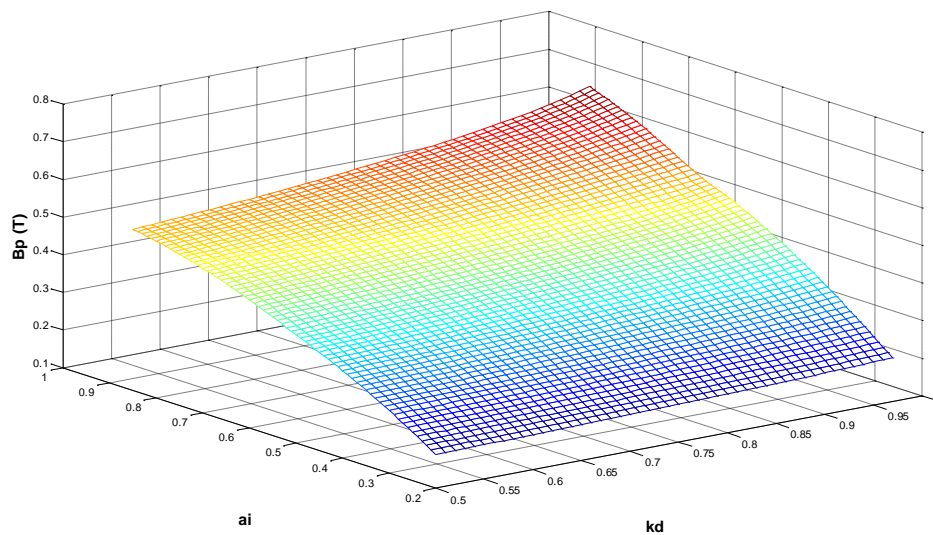


Σχήμα 4.2: καμπύλη $1^{ηs}$ αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των a_i-k_d για την ισχύ 6 KW με χρήση μαγνήτη N40

Μαγνήτης N45



Σχήμα 4.3: καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 3 KW με χρήση μαγνήτη N45



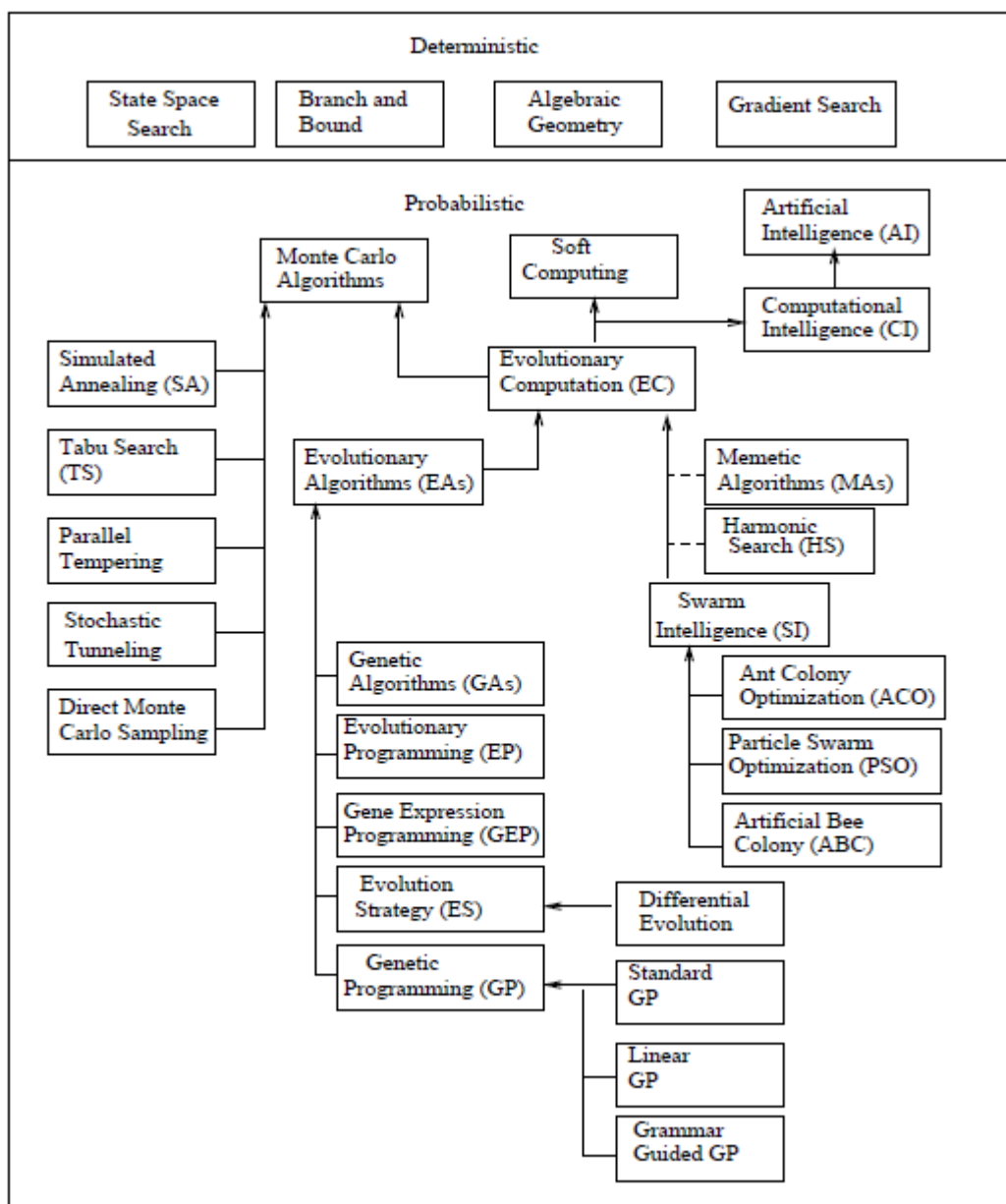
Σχήμα 4.4: καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 6 KW με χρήση μαγνήτη N45

Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

4.4 Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης

Η επιστήμη της ολικής βελτιστοποίησης είναι ένας τομέας που αναπτύσσεται διαρκώς. Με τον όρο ολική βελτιστοποίηση εννοούμε την διαδικασία εντοπισμού της καλύτερης δυνατής υπονήφιας 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 [18]. Στο παρακάτω διάγραμμα σχηματοποιείται η κατηγοριοποίηση τους.



Σχήμα 4.5 : ταξινόμηση των αλγόριθμων 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 πιθανός 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 τέτοιου είδους προβλήματα πιο εύκολα και πιο αποτελεσματικά από τις αντίστοιχες ντετερμινιστικές. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των αλγόριθμων είναι πως είναι απλοί και εύκολοι στην ενσωμάτωσή τους στην 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 πια 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) όπου είναι εμπνευσμένοι από την επιλογή και επιβίωση του ισχυρότερου στον βιολογικό κόσμο και χρησιμοποιούν κάποιους μηχανισμούς από τον 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 στην 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 ανασυνδυασμού και χρησιμοποιούν μια στοχαστική επιλογή καθώς οι αλγόριθμοι ESs χρησιμοποιούν ντετερμινιστική διαδικασία απομακρύνοντας κάθε φορά την 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 στην συλλογική συμπεριφορά των πουλιών ή μελισσών που ψάχνουν σε έναν αγρό το σημείο με την υψηλότερη πυκνότητα ανθών. Οπότε 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) όπου και αναλύεται παρακάτω.

4.5 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 [19]. 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 [19] και η διαδικασία αυτή πρέπει να τυποποιηθεί σαν ένα μη γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης με περιορισμούς [20].

Γενικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να ορισθεί ως εξής [20,21] :

Ξεκινώντας από το αρχικό διάνυσμα σχεδιαστικών παραμέτρων :

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

πρέπει να βρεθεί το τελικό διάνυσμα :

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

όπου θα ικανοποιεί την 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 :

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

4.5.1 Βελτιστοποίηση με την μέθοδο Particle Swarm Optimization (PSO)

Το PSO είναι μια εξελικτική υπολογιστική τεχνική που αναπτύχθηκε το 1995 από τους Kennedy και Eberhart [22] 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 [22,23].

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 [27] :

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

Για να συνυπολογιστούν οι διάφορες προδιαγραφές για την 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/Arms)) στις ονομαστικές συνθήκες. Για την μηχανή που σχεδιάστηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση οι τιμές των παραπάνω μεγεθών κατά αντιστοιχία είναι 20-50 kg, 0.002-0.005 m³, 0.5-1, 2-5 Nm/Arms and 0.5-2 kg. Κάθε όρος στην συνάρτηση αρχικά κανονικοποιείται ώστε να έχουν όλοι σχετικά το ίδιο πλάτος και στην συνέχεια με συντελεστές βάρους δίνεται η ανάλογη σημασία (όσον αφορά την βελτιστοποίηση) σε κάθε παράμετρο.

Η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος περιγράφεται περιληπτικά στα παρακάτω βήματα [22]:

- 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 στον 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 την σχέση:

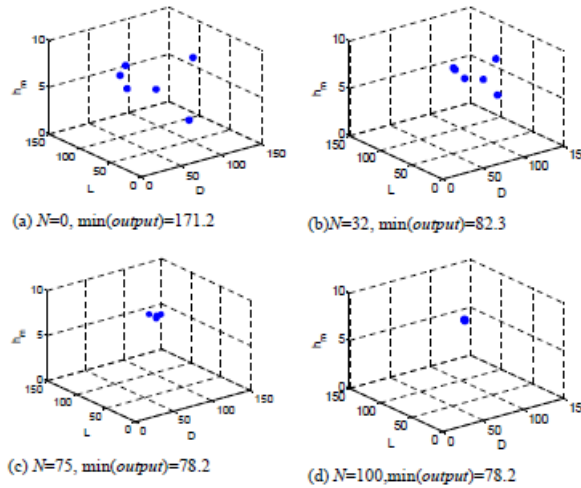
$$v_n = \omega * v_n + c1 * rand() * (pbest_n - x_n) + c2 * rand() * (gbest_n - x_n)$$

- Μετακινείται το σωματίδιο: η ταχύτητα εφαρμόζεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα Δt , το οποίο συνήθως έχει επιλεγεί 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 τον 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 [27], αποτελεί ένα διάνυσμα 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 στην σχεδίαση, όπως για παράδειγμα ο μαγνητικός κορεσμός στα δόντια του στάτη, αυτά θα μπου στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σαν ‘ποινές’. Πιο συγκεκριμένα, αν η πυκνότητα ροής ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο κατώφλι τότε μια τιμή μεγάλου πλάτους θα προστίθεται στην συνάρτηση και θα δείχνει στην ουσία και στα υπόλοιπα σωματίδια ότι η συγκεκριμένη σχεδίαση είναι μακριά από την βέλτιστη, απομακρύνοντας τα από το συγκεκριμένο σημείο στον χώρο λύσεων [24]. Στην εικόνα που ακολουθεί [27] 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 4.6 : οι θέσεις των σωματιδίων καθώς ο αριθμός των ανακυκλώσεων 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 αλγόριθμου βελτιστοποίησης για την 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 υπόψιν του προγράμματος τα υπόλοιπα κριτήρια σαν περιορισμούς.

4.5.2 Διανυσματική πολύ-παραμετρική βελτιστοποίηση

Στην μέθοδο βελτιστοποίησης που είδαμε πριν (PSO) [25], το αποτέλεσμα εξαρτάται από τους συντελεστές βάρους στην κάθε παράμετρο. Το πόσο έμφαση όμως θα δοθεί στο εκάστοτε χαρακτηριστικό που μας ενδιαφέρει εναπόκειται στην υποκειμενική αντίληψη του προβλήματος. Σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει κάποια μαθηματική προσέγγιση που να μπορεί να ποσοτικοποιήσει αυτήν την υποκειμενική αντίληψη σε αριθμητικούς συντελεστές βάρους. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου το οποίο έχει σαν συνέπεια να κερδίζουμε περιορισμένη πληροφορία. Επίσης έχουμε λίγη πληροφορία όσον αφορά τους συσχετισμούς ανάμεσα στις παραμέτρους που βελτιστοποιούμε, για παράδειγμα πόσο χάνουμε σε κόστος όταν βελτιώνουμε τον όγκο βάζοντας περισσότερο μαγνήτη.

Μια διαφορετική προσέγγιση του πολύ-παραμετρικού προβλήματος βελτιστοποίησης είναι να ορίσουμε την συνάρτηση σαν ένα διάνυσμα όπου το κάθε στοιχείο του αποτελεί μια παράμετρο προς βελτιστοποίηση. Τότε πλέον έχουμε την διανυσματική πολύ-παραμετρική βελτιστοποίηση (Vector Multi-Objective Optimization) [25] και το πρόβλημα ορίζεται ως ακολούθως:

Να βρεθεί το διάνυσμα $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ που ικανοποιεί τους m περιορισμούς ανισότητας :

$$g_i(\vec{x}) \geq 0 \quad i=0,1,2,\dots,m$$

και τους p περιορισμούς ισότητας :

$$h_i(\vec{x}) = 0 \quad i=0,1,2,\dots,p$$

και θα βελτιστοποιήσει την διανυσματική συνάρτηση :

$$f(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T$$

Σε αυτήν την μορφή η έννοια του βέλτιστου πρέπει να προσεγγιστεί διαφορετικά. Πρώτα θα οριστεί ο τρόπος με τον οποίο συγκρίνονται τα διανύσματα. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, ένα διάνυσμα \vec{x} θα επικρατεί επί ενός διανύσματος \vec{y} μόνο όταν ικανοποιούνται οι δύο παρακάτω συνθήκες :

$$f_i(\vec{x}) \leq f_i(\vec{y}) \quad \text{για κάθε } i=1,2,\dots,k$$

$$f_i(\vec{x}) < f_i(\vec{y}) \quad \text{για ένα τουλάχιστον } i=1,2,\dots,k$$

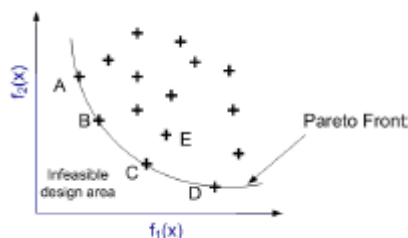
Οι βέλτιστες λύσεις της συγκεκριμένης μεθόδου ονομάζονται βέλτιστα Pareto (Pareto optimals). Το διάνυσμα \vec{x} ονομάζεται έτσι όταν δεν υπάρχει άλλο διάνυσμα \vec{y} που να έχει προκύψει σαν αποτέλεσμα και να επικρατεί του \vec{x} . Δηλαδή αφού έχουμε πρόβλημα ελαχιστοποίησης, όταν δεν υπάρχει $\vec{y} < \vec{x}$. Τα συγκεκριμένα βέλτιστα ομαδοποιούνται με την ονομασία Pareto optimal set. Επίσης όταν αυτό το set ερμηνευθεί σαν γραφική παράσταση, η καμπύλη που θα σχηματίσουν ονομάζεται Pareto front [25].

Για να αποσαφηνιστούν καλύτερα οι παραπάνω έννοιες, υποθέτουμε την σχεδίαση μιας μηχανής που η συνάρτηση βελτιστοποίησης είναι το παρακάτω διάνυσμα δύο διαστάσεων :

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x})]^T$$

όπου τα $f_1(\vec{x})$ και $f_2(\vec{x})$ μπορούν να είναι οποιοσδήποτε παράμετροι, όπως βάρους, όγκος, απόδοση

(1-απόδοση για ελαχιστοποίηση) και άλλες. Ένα τυπικό Pareto front δίνεται στην παρακάτω εικόνα όπου με + απεικονίζονται οι εφικτές σχεδιάσεις. Στην συγκεκριμένη εικόνα βλέπουμε πως η σχεδίαση C έχει μικρότερη τιμή και για τις δύο συναρτήσεις $f_1(\vec{x})$, $f_2(\vec{x})$ από την σχεδίαση E. Άρα η σχεδίαση C επικρατεί της σχεδίασης E. Βλέπουμε στην γραφική παράσταση πως οι επικρατέστερες σχεδιάσεις είναι οι A, B, C και D όπου είναι αυτές που ανήκουν στην Pareto front.



Σχήμα 4.7 : σχεδίαση μιας καμπύλης Pareto front

Η καμπύλη Pareto front στο σχήμα μπορεί να θεωρηθεί σαν όριο μεταξύ των εφικτών και μη εφικτών σχεδιάσεων. Ακόμα, από την συγκεκριμένη καμπύλη μπορούν να φανούν οι σχεδιαστικοί συσχετισμοί μεταξύ των παραμέτρων βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα είναι φανερό πως δεν γίνεται να βελτιωθεί η μια παράμετρος χωρίς να έχουμε ‘απώλειες’ στην άλλη, για παράδειγμα πηγαίνοντας από την σχεδίαση A στην σχεδίαση Δ παρατηρούμε πως η συνάρτηση $f_2(\vec{x})$ μειώνεται αλλά αναπόφευκτα υπάρχει αύξηση στην συνάρτηση $f_1(\vec{x})$. Μετά την σχεδίαση της Pareto front, ο σχεδιαστής μπορεί πλέον να αναλύσει ξεκάθαρα τους συσχετισμούς μεταξύ των παραμέτρων και να επιλέξει κάποιο σημείο πάνω στην καμπύλη που ικανοποιεί κάποια συγκεκριμένα κριτήρια. Αυτές οι επιλεγμένες σχεδιάσεις θα αποτελούν πλέον αξιόπιστες λύσεις για περαιτέρω εκτίμηση και ανάλυση.

Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει εύκολος τρόπος ώστε να βρεθεί αναλυτική έκφραση για την γραμμή ή την επιφάνεια που περιέχει τα σημεία της Pareto front. Εναλλακτικά, η συνήθης διαδικασία, είναι να υπολογιστούν μέσω της διανυσματικής συνάρτησης βελτιστοποίησης πολλά σημεία στον χώρο λύσεων και να βρεθούν τα επικρατέστερα, όπως τα A, B, C και D στο προηγούμενο παράδειγμα. Όταν θα έχουν υπολογιστεί επαρκή σημεία σε ολόκληρο των χώρο λύσεων, τότε η καμπύλη Pareto front θα μπορεί να σχεδιαστεί βασισμένη σε αυτά που θα έχουν επικρατήσει [25].

4.5.3 HPSO

Όταν λύνεται ένα πολύ-παραμετρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης η διαδικασία τερματίζεται όταν βρεθεί το ολικό βέλτιστο. Στην περίπτωση όμως ενός διανυσματικού πολύ-παραμετρικού προβλήματος βελτιστοποίησης η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου βρεθούν επαρκή Pareto βέλτιστα και σχεδιαστεί η Pareto front. Οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης που βασίζονται στην κλίση δεν έχουν σχεδιαστεί ώστε να βρίσκουν πολλαπλές βέλτιστες λύσεις, επομένως είναι δύσκολο να μετατραπούν ώστε να λύσουν ένα πολύ-παραμετρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αντιθέτως, η μέθοδος PSO μπορεί να επαναπροσδιοριστεί ώστε να χρησιμοποιηθεί και για τέτοια προβλήματα [25,26].

Το πως θα προσδιοριστεί το ολικό βέλτιστο είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα όταν εφαρμόζεται η μέθοδος PSO για διανυσματικά πολύ-παραμετρικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Στην κλασική μέθοδο PSO το ολικό βέλτιστο είναι απλά η θέση στην οποία κατέληξαν όλα τα σωματίδια έχοντας βρει την βέλτιστη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση. Στην περίπτωση της διανυσματικής πολύ-παραμετρικής βελτιστοποίησης έχουμε μια ομάδα από Pareto βέλτιστα που αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις. Αυτό δημιουργεί το πρόβλημα το πώς θα επιλεγεί το ολικό βέλτιστο gbest για κάθε σωματίδιο του σμήνους καθώς όλες οι βέλτιστες λύσεις Pareto είναι εξίσου βέλτιστες. Από την στιγμή που δεν

υπάρχει λόγος να συγκριθούν μεταξύ τους αυτές οι βέλτιστες λύσεις, μια λογική λύση είναι να επιλεγεί τυχαία μια από αυτές τις λύσεις σαν gbest και με τον ίδιο τρόπο επιλέγεται τυχαία και το pbest. Με αυτές τις παραδοχές καταλήγουμε στην μέθοδο HPSO (Homogeneous Particle Swarm Optimization) [26].

Η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος για την μέθοδο πλέον HPSO περιγράφεται περιληπτικά στα παρακάτω βήματα :

- 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 διανυσματική πλέον συνάρτηση βελτιστοποίησης, για παράδειγμα αν οι παράμετροι που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε είναι ο όγκος και η απόδοση θα έχουμε μια συνάρτηση της μορφής :

$$f(x) = [Volume, 1-Eff]$$

- Αρχικοποιούμε τις θέσεις και τις ταχύτητες του τυχαίου σμήνους.
- Δημιουργούμε στην ουσία ένα αρχείο με τις βέλτιστες λύσεις Pareto που έχουν βρεθεί από το σμήνος, στην αρχικοποίηση αυτή, τις λύσεις αποτελούν τα αρχικά σωματίδια τα οποία επικρατούν των άλλων.
- Τα σωματίδια πετάνε στον χώρο λύσης συστηματικά: τα ακόλουθα βήματα πραγματοποιούνται από το κάθε σωματίδιο ξεχωριστά :

I. Υπολογίζεται η διανυσματική συνάρτηση για το κάθε σωματίδιο και συγκρίνεται με το αρχείο Pareto. Ανανεώνεται το αρχείο Pareto με τα λύσεις των σωματιδίων που επικρατούν και απορρίπτονται οι λύσεις οι οποίες πλέον κυριαρχούνται.

II. Επιλέγονται δύο λύσεις Pareto από το αρχείο σαν gbest και pbest.

III. Ανανεώνεται η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου ανάλογα με την τιμή του gbest και του pbest σύμφωνα με την σχέση

$$v_n = \omega * v_n + c1rand() * (pbest_{n,n} - x_n) + c2rand() * (gbest_n - x_n)$$

- Μετακινείται το σωματίδιο: η ταχύτητα εφαρμόζεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα Δt , το οποίο συνήθως έχει επιλεγεί 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.

Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση σύγχρονων γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών με τις μεθόδους PSO και HPSO

5.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύεται η βελτιστοποίηση των γεννητριών αξονικής ροής σε ένα φάσμα ισχύος με τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, τους αλγόριθμους PSO και HPSO (Pareto Front) δηλαδή. Η βελτιστοποίηση αυτή θα γίνει ως προς παραμέτρους που μας απασχολούν στις συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα το κόστος, βελτιστοποιώντας σχεδιαστικές μεταβλητές όπως το λόγο πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος a_i .

Πιο συγκεκριμένα, η εκάστοτε ηλεκτρική μηχανή αναλόγως με την εφαρμογή για την οποία κατασκευάζεται ενδιαφέρει τους σχεδιαστές να ικανοποιεί συγκεκριμένες παραμέτρους, κατ'επέκταση το πρόβλημα της σχεδίασης και βελτιστοποίησης της περιστρέφεται γύρω από τις συγκεκριμένες παραμέτρους. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, η γεννήτρια σχεδιάζεται για εφαρμογή χαμηλού κόστους και ευκολία στην κατασκευή, οπότε βελτιστοποιείται η προκαταρκτική σχεδίαση κυρίως ως προς κόστος, μάζα και όγκο. Επίσης μελετάται η βελτιστοποίηση ως προς την απόδοση καθώς το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην μετέπειτα σύνδεση της ανεμογεννήτριας για την φόρτιση των μπαταριών.

Στις σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών συνήθως μεταβλητές που βελτιστοποιούνται είναι το πάχος του μαγνήτη h_m , η εξωτερική ακτίνα R_{out} , ο λόγος του πλάτους του μαγνήτη προς το πλάτος του πολικού βήματος, a_i , ο λόγος της εσωτερικής ακτίνας R_{in} προς την εξωτερική ακτίνα R_{out} , k_d , το πάχος του στάτη, στην ουσία δηλαδή το πάχος του πηνίου, t_w , καθώς και η διάμετρος του χαλκού [15,28] ή το μήκος του διακένου [29].

Οι μεταβλητές που εξετάζονται και χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο του PSO είναι ο λόγος του πλάτους του μαγνήτη προς το πλάτος του πολικού βήματος a_i καθώς και ο λόγος της εσωτερικής ακτίνας R_{in} προς την εξωτερική ακτίνα R_{out} , k_d . Παρατηρώντας τον αλγόριθμο της προκαταρκτικής σχεδίασης, όπου και χρησιμοποιούνται φυσικά οι παραπάνω μεταβλητές, είναι εύκολο να αντιληφθούμε την πολυπλοκότητα των σχέσεων όπου και λαμβάνουν μέρος πολλές γεωμετρικές μεταβλητές, επανερχόμενοι έτσι στην αναγκαιότητα για χρήση μιας μεθόδου βελτιστοποίησης όπως αυτή του PSO όπου θα είναι αποδοτική για ένα τέτοιο μη γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης με περιορισμούς. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι περιορισμοί είναι κυρίως κατασκευαστικοί, για την λειτουργικότητα δηλαδή της διαδικασίας κατασκευής της γεννήτριας, αλλά και περιορισμοί που αφορούν την ηλεκτρική συμπεριφορά της, όπως η απόδοση. Θα γίνει αναφορά πιο αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο όπου και θα εξηγηθεί η ένταξη αυτών των περιορισμών στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με την μέθοδο PSO.

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία ακολουθείται για ένα φάσμα ισχύος όπου και θα μελετηθούν οι σχεδιαστικές τάσεις αρκετών γεωμετρικών μεταβλητών με διαφορετικά σχεδιαστικά κριτήρια βελτιστοποίησης. Για την ακρίβεια, θα εξεταστούν οι ισχύος από 3 έως 6 KW με βήμα των 500 W ενώ το πεδίο ορισμού για τις μεταβλητές a_i και k_d θα είναι 0,3 έως 0,9 και 0,4 έως 0,95 αντίστοιχα. Τα πεδία ορισμού αυτά προέκυψαν μετά από βιβλιογραφική μελέτη και επεκτάθηκαν σαν δικλείδα ασφαλείας αφού η υπολογιστική ταχύτητα των λογισμικών επέτρεπε κάτι τέτοιο. Επίσης η μελέτη έγινε για δύο διαφορετικούς βαθμούς μαγνήτη. Για την ακρίβεια μελετήθηκαν μαγνήτες NdFeB βαθμού N40 και N45 όπου όπως έχει προαναφερθεί, λόγω τους κόστους αλλά και της σπουδαιότητας στην ηλεκτρική θεώρηση αποτελούν το πιο σημαντικό υλικό σε αυτήν την εφαρμογή.

Η ακριβής αλγοριθμική διαδικασία με την οποία 'τρέχει' η βελτιστοποίηση ακολουθεί μια σειριακή πορεία, όπου καλείται μέσα από το λογισμικό (MATLAB) ο αλγόριθμος του PSO ή του HPSO αντίστοιχα (Pareto Front) όπου μέσα από αυτήν την ρουτίνα καλείται κάθε φορά ο κώδικας της προκαταρκτικής σχεδίασης που με την σειρά του επιστρέφει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και έτσι μέσω της μεθόδου που έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο οι απόπειρες σχεδίασης συγκλίνουν όλο και περισσότερο στις τιμές των μεταβλητών που βελτιστοποιούνται και θα ικανοποιούν τα κριτήρια που έχουμε θέσει.

5.2 Περιορισμοί που λαμβάνονται στην διαδικασία βελτιστοποίησης

Ο πρώτος περιορισμός που λήφθηκε υπόψιν και είναι κατασκευαστικός αφορά την εσωτερική ακτίνα της γεννήτριας R_{in} και το πλάτος του ορθογώνιου μαγνήτη w_m . Πιο συγκεκριμένα πρέπει να απορρίπτονται διατάξεις όπου ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$2\pi \cdot R_{in} < w_m \cdot \text{poles}$$

Αναλυτικότερα, υπάρχει περίπτωση να προκύψει σχεδιαστικά διάταξη που οι μαγνήτες στην εσωτερική ακτίνα θα επικαλύπτονται, όποτε οι διατάξεις αυτές θα πρέπει να απορρίπτονται. Αυτό θα γίνει όπως έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο με την μορφή 'ποινών' (penalties), όπου όταν η υπορουτίνα με την συνάρτηση που αφορά τον συγκεκριμένο περιορισμό θα ικανοποιείται, θα προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση μια τιμή μεγάλου πλάτους όπου θα δείχνει στα σωματίδια που αποτελούν απόπειρες σχεδίασης να απομακρυνθούν από το συγκεκριμένο σημείο στον χώρο λύσεων.

Ο επόμενος περιορισμός που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε κατά την διάρκεια των βελτιστοποιήσεων, καθώς αρκετές φορές ο αλγόριθμος συνέκλινε σε τιμές των a_i και k_d που αφορούσαν σχεδίαση όπου η μεταβλητή w_{lin} που αφορά το μήκος της εσωτερικής πλευράς του πηνίου έχε αρνητική τιμή, πρακτικά δηλαδή οι πλάγιες πλευρές του πηνίου δεν κατέληγαν σε μια πλευρά ώστε να σχηματίζουν ένα τραπέζιο αλλά διασταυρωνόντουσαν. Για την αποφυγή και απόρριψη λοιπόν τέτοιων σχεδιάσεων χρησιμοποιήθηκε σε υπορουτίνα η παρακάτω σχέση :

$$w_{lin} < 5$$

όπου ικανοποιείται αν και εφόσον η εσωτερική πλευρά των πηνίων είναι μικρότερη από 5 mm.

Στην συνέχεια ενσωματώθηκε στον αλγόριθμο ο κατασκευαστικός περιορισμός από το βιβλίο του Hugh Piggot που αφορά τον λόγο του ύψους πηνίου t_w προς πλάτος πηνίου w_c , ο οποίος σύμφωνα με τον συγγραφέα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 0,4. Από την προηγούμενη εμπειρία των συντελεστών του εργαστηρίου σε κατασκευές παρόμοιων γεννητριών, διαπιστώθηκε ότι το όριο του 0,35 είναι αρκετό για να εξασφαλίσει την κατασκευαστική λειτουργικότητα του πηνίου, δηλαδή τοποθετήθηκε η συνάρτηση :

$$(t_w/w_c) < 0,35$$

η οποία όταν ικανοποιείται απορρίπτεται η σχεδίαση.

Τέλος χρησιμοποιήθηκε και ένας θεωρητικός περιορισμός που αφορά την απόδοση. Πιο συγκεκριμένα η προκαταρκτική σχεδίαση ξεκινά με μια προσεγγιστική τιμή για την απόδοση της γεννήτριας που έχει προκύψει βιβλιογραφικά, στο τέλος του αλγόριθμου και αφού πλέον έχει ολοκληρωθεί η σχεδίαση, υπολογίζεται και δίνεται εκ νέου τιμή στην απόδοση με βάση τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας που έχουν προκύψει και κυρίως τις απώλειες. Στην περίπτωση που αποκλίνει από την αρχική προσεγγιστική τιμή πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο, επανεκκινείται η προκαταρκτική σχεδίαση με την νέα τιμή της απόδοσης.

Η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιστρέφει την τιμή της στον κώδικα του PSO με την

προσθήκη πλέον των 'ποινών' θα έχει την μορφή :

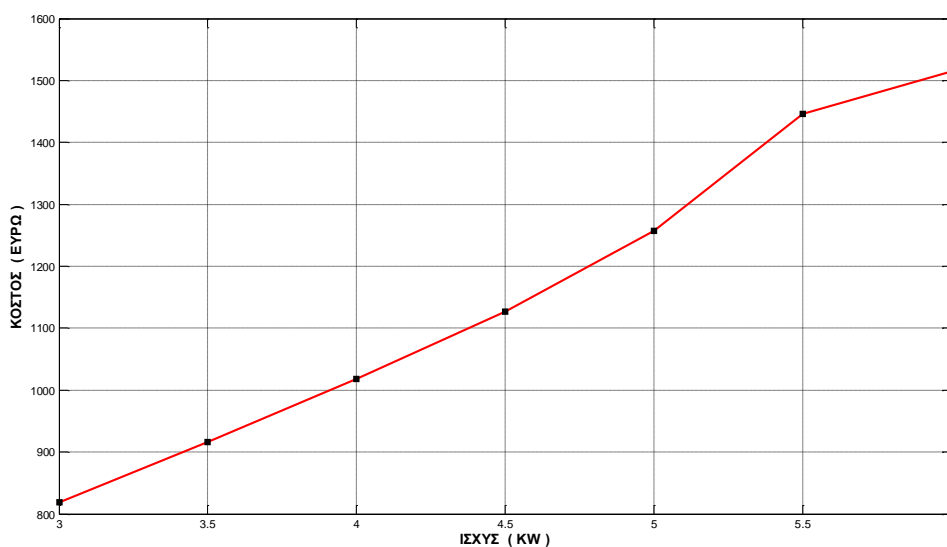
$$\text{output}=(\text{totalcost}+20*\text{totalmass}+\text{Vgen}/15)+100*(\text{penkat}+\text{penkat1}+\text{penkat2})$$

όπου αφορά την βελτιστοποίηση ως προς κόστος, μάζα και όγκο. Επίσης στην συνάρτηση φαίνονται οι συντελεστές βάρους σε κάθε παράμετρο όπου η σημασία τους που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα μελετηθεί στην συνέχεια με παραδείγματα.

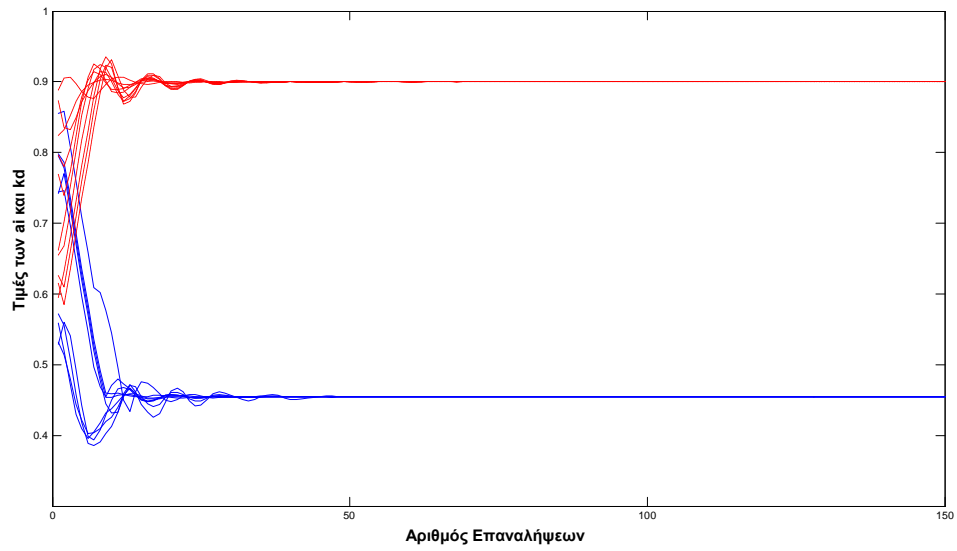
5.3 Βελτιστοποιήσεις με την μέθοδο PSO με χρήση του μαγνήτη N40 σε συχνότητα 50 Hz

Σε αυτήν την ενότητα βελτιστοποιούνται οι σύγχρονες γεννήτριες με χρήση του μαγνήτη N40, τα κριτήρια που μελετούνται είναι το κόστος, η μάζα, ο όγκος και η απόδοση. Στην συνέχεια θα μελετηθούν συνδυασμοί των κριτηρίων, πιο συγκεκριμένα κόστος-μάζα, κόστος-όγκος, μάζα-όγκος και κόστος-μάζα-όγκος. Θα αναλυθούν οι σχεδιαστικές τάσεις και οι συσχετισμοί στις παραμέτρους, για παράδειγμα σύγκριση βελτιστοποιήσεων κόστους και όγκου.

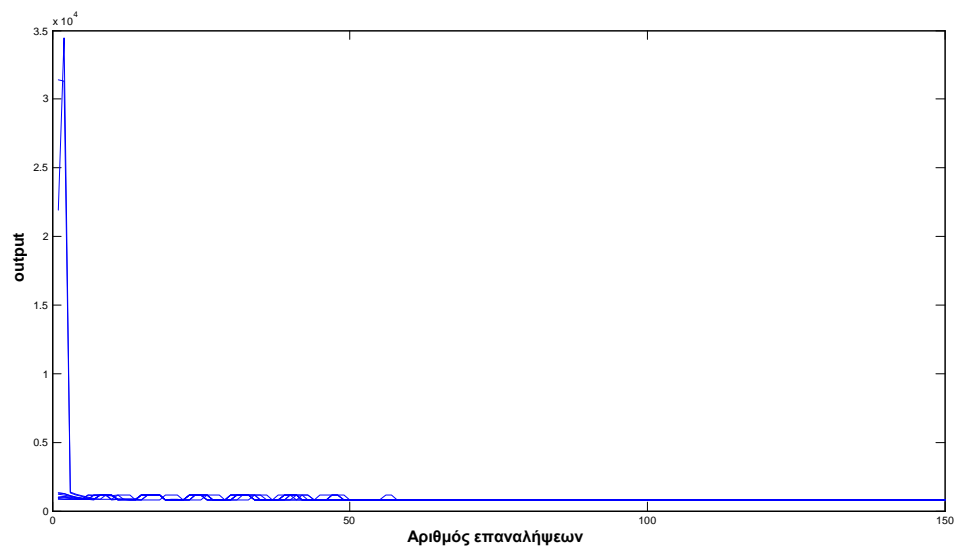
Βελτιστοποίηση κόστους



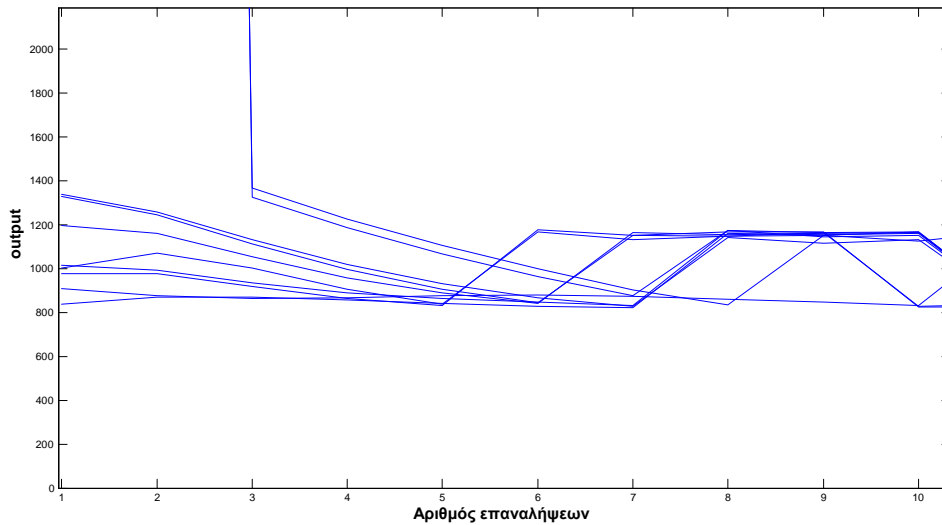
Σχήμα 5.1 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.2 : Συμπεριφορά σωματιδίων (ai;-;kd:-.-) για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N40 στα 3 KW



Σχήμα 5.3 : Συμπεριφορά σωματιδίων για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N40 στα 3 KW

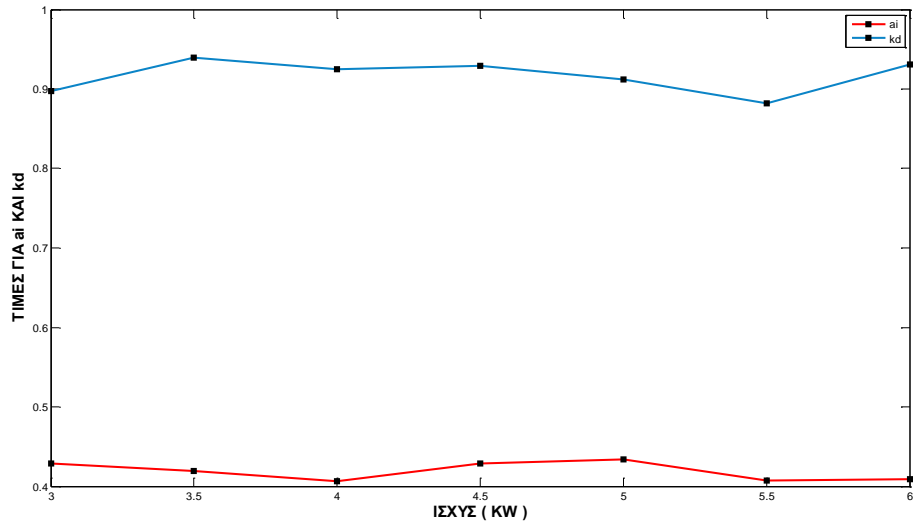


Σχήμα 5.4 : Μεγέθυνση συμπεριφοράς σωματιδίων για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N40 στα 3 KW

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	819,4008	55,9911	17.387	0,4291	0,8973
3.5	915,9657	86,2528	28.425	0,4193	0,9392
4	1.018,30	88,0288	29.287	0,4068	0,9253
4.5	1.126,50	98,2876	33.473	0,4286	0,9293
5	1.257,40	95,7966	32.698	0,434	0,9119
5.5	1.445,70	95,7657	32.674	0,4076	0,8821
6	1.515,30	142,2395	49.974	0,4092	0,9313
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
30,68	39,09	305,7088	387	37,7	0,8252
23,18	41,59	390,8781	360	35,07	0,7682
29,06	40,67	396,7582	312	30,39	0,78
29,49	39,35	424,1669	253	24,65	0,78
36,42	39,02	419,2276	219	21,33	0,78
48,98	36,06	419,0754	185	18,02	0,7775
35,16	40,2	518,2769	187	18,21	0,7436

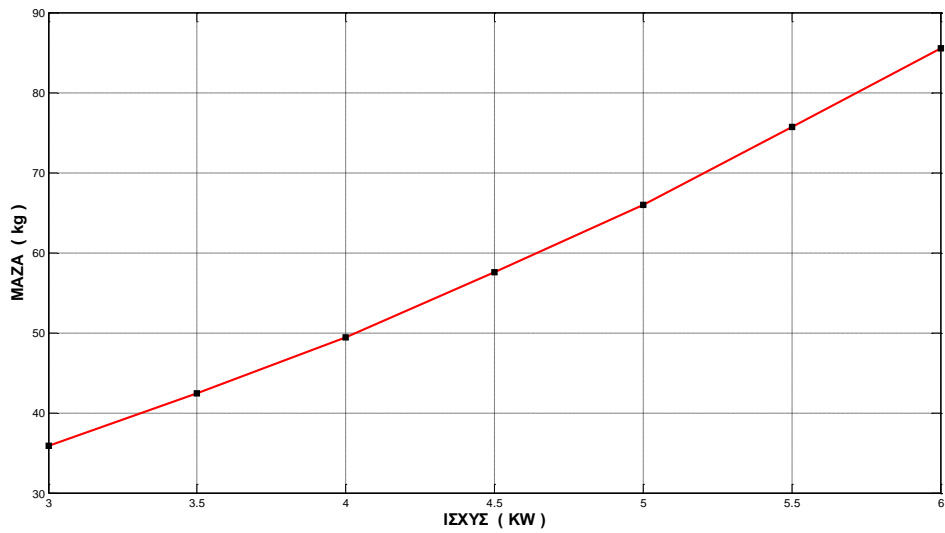
Πίνακας 5.1 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N40

Παρατηρούμε πως για να έχουμε το ελάχιστο κόστος στην κατασκευή της γεννήτριας η τιμή του ai μένει σε χαμηλά επίπεδα (Σχήμα 5.5), κάτι το οποίο είναι λογικό, καθώς οι μαγνήτες είναι το πιο ακριβό υλικό οπότε προκύπτει ελαχιστοποίηση του μαγνήτη. Χαρακτηριστική είναι επίσης η τιμή του kd η οποία κυμαίνεται σταθερά στα επίπεδα του 0,90 κάτι που σημαίνει χαμηλό ενεργό μήκος. Όσον αφορά την μάζα και τον όγκο, παρατηρούμε πως με την αύξηση της ισχύος φτάνουν σε μεγάλα επίπεδα και υπάρχει ιδιαίτερη αύξηση στις ισχύς που έχουμε αλλαγή πόλων, δηλαδή στα 3.5, στα 4.5 και στα 6 KW που συνδυάζεται επίσης με ιδιαίτερη αύξηση στην εξωτερική ακτίνα Rout. Μετά την καμπύλη ισχύος-κόστους παρατίθενται σχηματικά διαγράμματα με την συμπεριφορά των σωματιδίων κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου PSO, όπου φαίνεται η πορεία που ακολουθούν οι τιμές τους μέχρι να καταλήξουν στην τελική τιμή των ai και kd καθώς και στην τελική τιμή του κόστους.

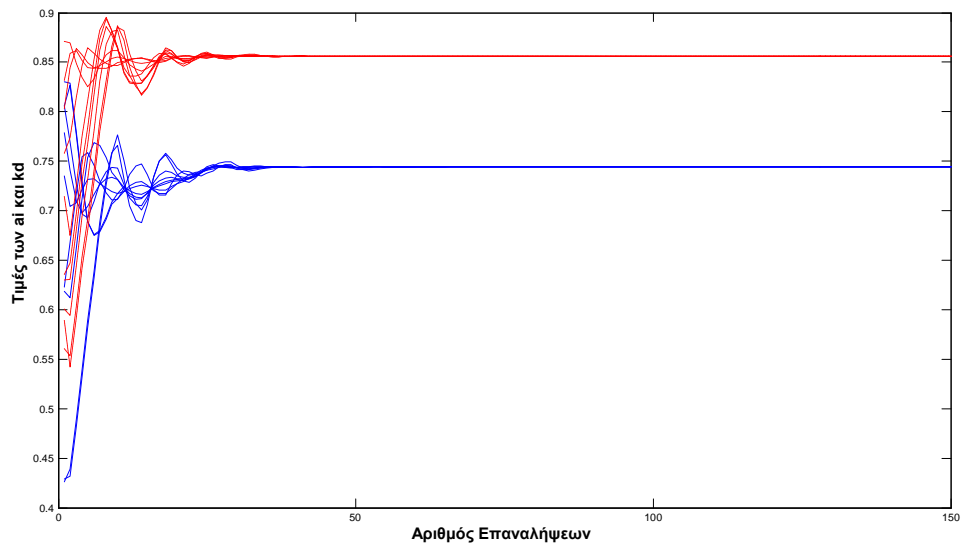


Σχήμα 5.5 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N40

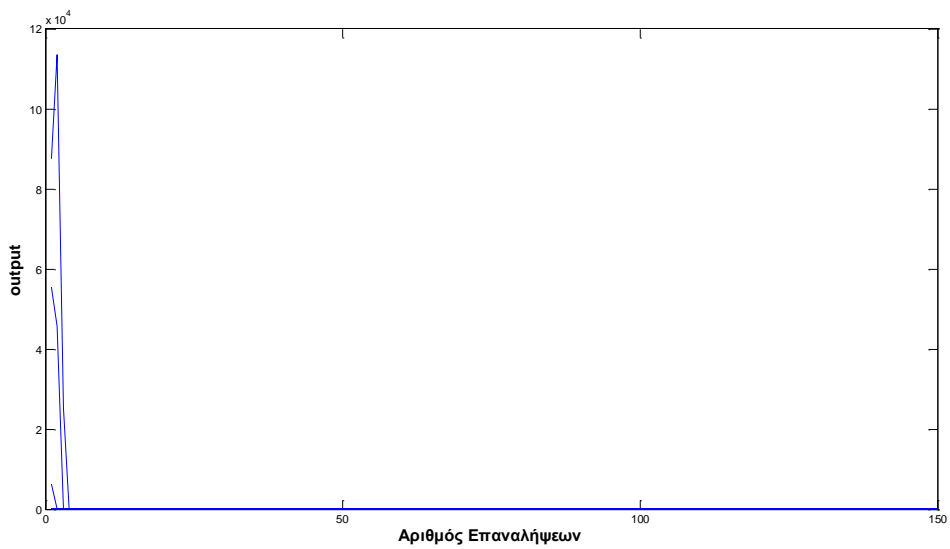
Βελτιστοποίηση μάζας



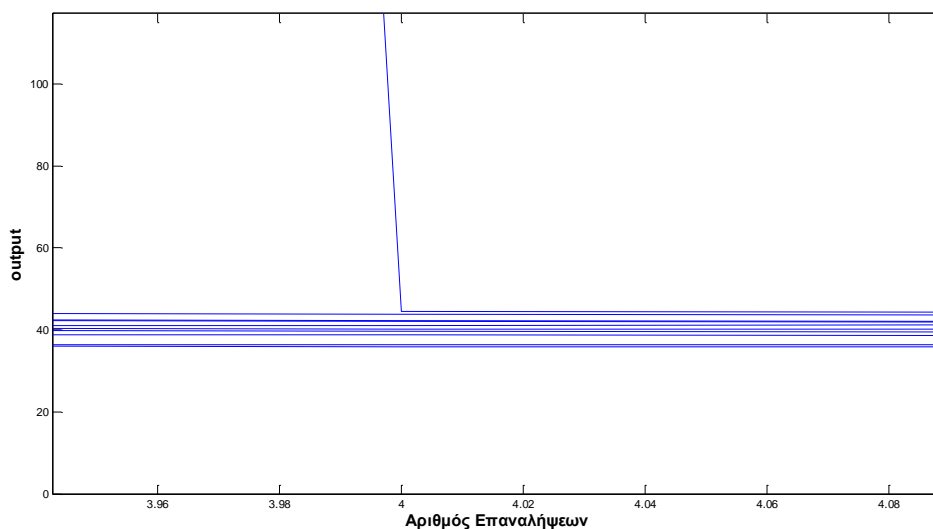
Σχήμα 5.6 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.7 : Συμπεριφορά σωματιδίων (a_i ; k_d) για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N40 στα 3 KW



Σχήμα 5.8 : Συμπεριφορά σωματιδίων για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N40 στα 3 KW

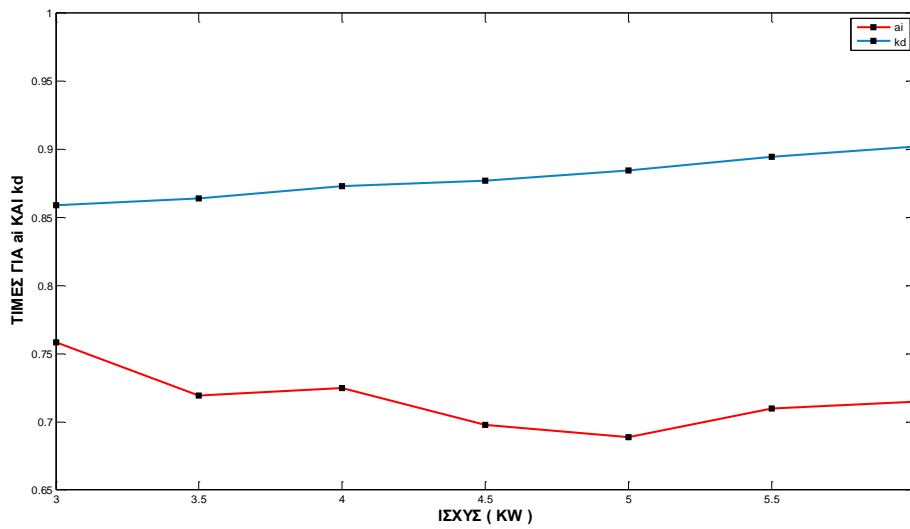


Σχήμα 5.9 : Συμπεριφορά σωματιδίων για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N40 στα 3 KW

Στην βελτιστοποίηση ως προς μάζα παρατηρούμε ότι η μάζα της γεννήτριας έχει μειωθεί αισθητά, ξεκινώντας από τα 35 kg περίπου, αυξανόμενης για κάθε τιμή της ισχύος που μελετάμε (ανά 500 W δηλαδή) κατά μέσο όρο 8 kg περίπου. Η τιμή του a_i κυμαίνεται σε μεγαλύτερα επίπεδα, σταθερά γύρω από την τιμή του 0,70 και το k_d έχει μικρότερο πλάτος σε σχέση με την βελτιστοποίηση κόστους που σημαίνει επί της ουσίας μεγαλύτερο μήκος μαγνήτη l_a (Σχήμα 5.10).

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΜΑΖΑ (kg)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	a_i	k_d
3	35,8488	931,3745	10.845	0,7586	0,8588
3.5	42,4722	1.063,10	13.475	0,7194	0,8639
4	49,4543	1.181,60	16.027	0,725	0,8733
4.5	57,5813	1.308,40	18.930	0,6977	0,8769
5	65,9327	1.434,50	22.211	0,6889	0,8845
5.5	75,7401	1.568,40	25.843	0,7096	0,8948
6	85,4898	1.696,90	29.588	0,715	0,9023
l_a (mm)	w_m (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
32,37	53,48	241,4387	316	30,78	0,8683
35,42	47,23	269,1102	244	23,77	0,8621
35,85	52,18	293,5032	232	22,6	0,8464
37,93	54,67	318,9787	224	21,82	0,8409
38,88	50,32	345,5121	182	17,73	0,8256
38,01	56,22	372,704	176	17,14	0,8111
37,96	53,24	398,7668	151	14,71	0,8073

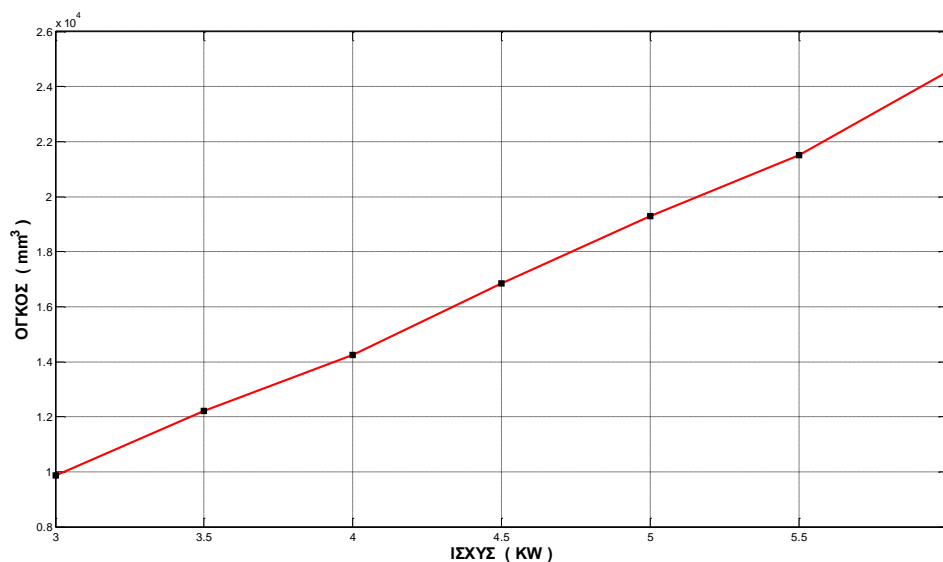
Πίνακας 5.2 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.10 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N40

Διαπιστώνουμε δηλαδή, μια σχεδιαστική τάση στην προκαταρκτική σχεδίαση για χρήση περισσότερου μαγνήτη, αφού έτσι θα καταλήξουμε σε πιο έντονο πεδίο στην γεννήτρια και σε μείωση του μεγέθους της που συνεπάγεται μείωση του βάρους, κάτι που είναι φανερό και από την αντίστοιχη μείωση στην εξωτερική ακτίνα R_{out} και στον όγκο σε σχέση με πριν. Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, μετά την καμπύλη ισχύος-μάζας παρατίθενται τα σχηματικά διαγράμματα με την συμπεριφορά των σωματιδίων, όπου φαίνεται η πορεία που ακολουθούν οι τιμές τους μέχρι να καταλήξουν στην τελική τιμή των ai και kd καθώς και στην τελική τιμή της μάζας.

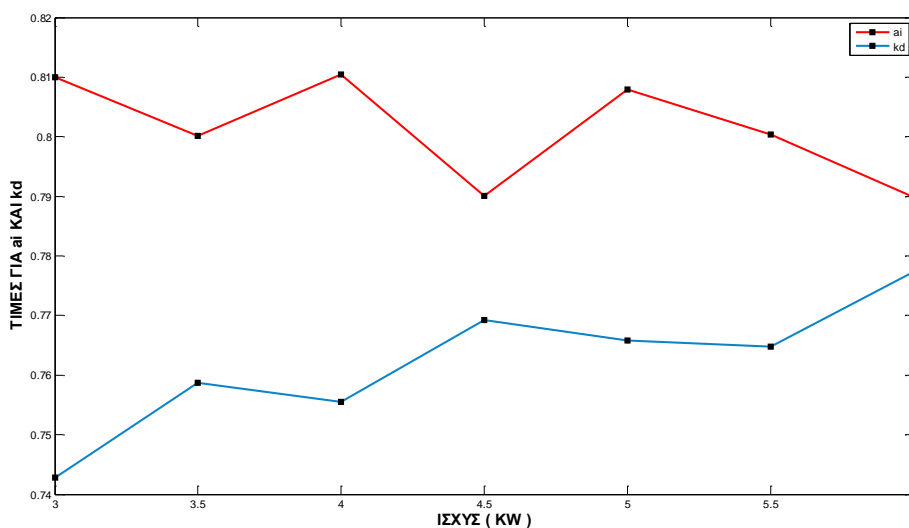
Βελτιστοποίηση όγκου



Σχήμα 5.11 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση όγκου με μαγνήτη N40

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ai	kd
3	9.871,20	1.198,40	40,8528	0,81	0,7428
3.5	12.222	1.379	49,2373	0,8001	0,7587
4	14.232	1.577,40	58,2206	0,8104	0,7555
4.5	16.856	1.737,60	67,9891	0,7901	0,7692
5	19.303	1.977,30	79,5356	0,8079	0,7658
5.5	21.506	2.149,70	89,4397	0,8004	0,7648
6	24.553	2.315,40	101,3631	0,7898	0,7774
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
52,52	46,77	210,9077	239	23,28	0,8842
55,17	43,09	233,9827	188	18,31	0,8769
59,44	46,34	248,8375	172	16,75	0,867
61,12	49,61	271,1757	168	16,36	0,8594
65,56	45,61	285,0031	132	12,86	0,8504
68,98	47,29	298,4607	125	12,17	0,8412
69,77	50,25	319,0987	123	11,98	0,835

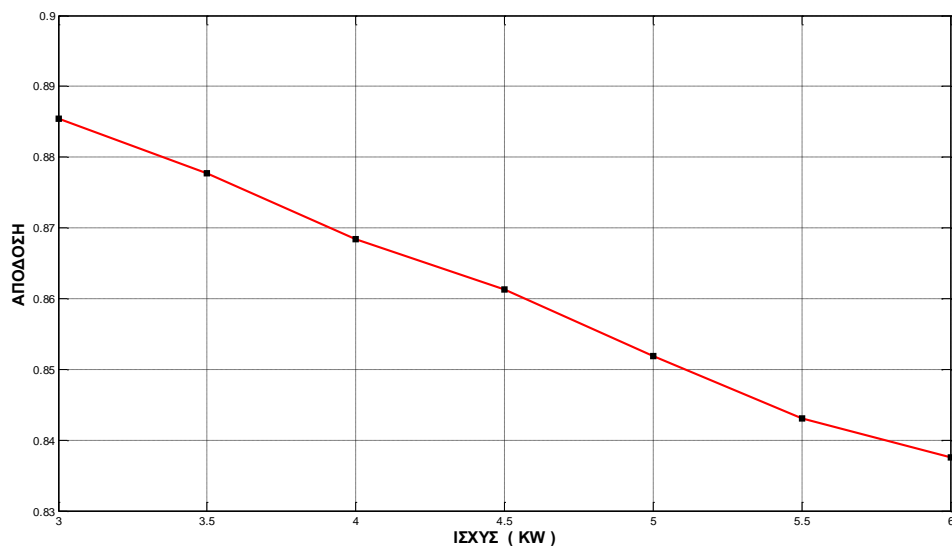
Πίνακας 5.3 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση όγκου με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.12 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση όγκου με μαγνήτη N40

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ακόμα μικρότερο όγκο ακόμα και σε σχέση με την περίπτωση όπου δόθηκε έμφαση στην μάζα. Βλέπουμε πως ξεκινάει από μια τιμή λίγο χαμηλότερης των 10.000 mm³ και αυξάνεται σε κάθε ισχύ κατά περίπου 3.000 mm³. Η μάζα συμπίπτει με την προηγούμενη περίπτωση αλλά βρίσκεται σε λίγο μεγαλύτερα επίπεδα και οι τιμές των ai, kd μεταφράζονται σε ακόμα μεγαλύτερη ποσότητα μαγνήτη, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού όπως και πριν χρειαζόμαστε έντονο μαγνητικό πεδίο για να έχουμε μείωση του όγκου, κάτι βέβαια που όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα καταλήγει και σε αρκετά μεγαλύτερο κόστος.

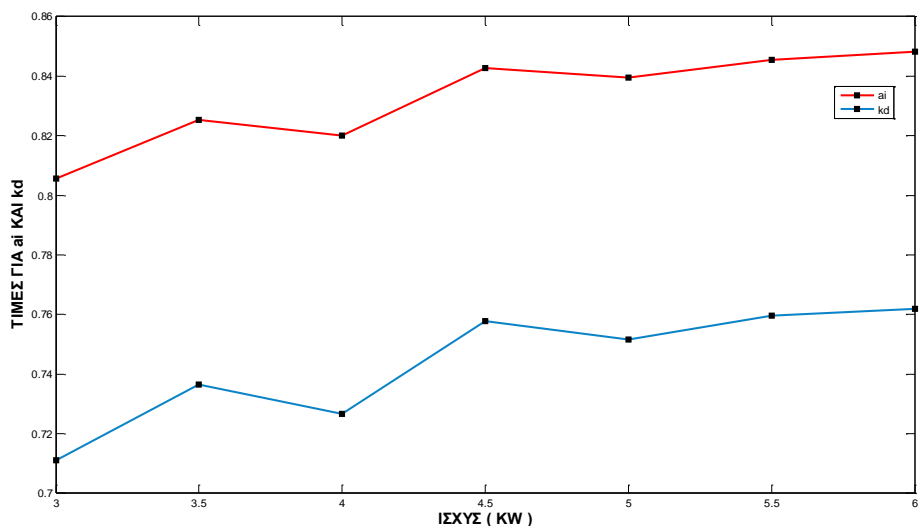
Βελτιστοποίηση απόδοσης



Σχήμα 5.13 : καμπύλη ισχύος-απόδοσης για βελτιστοποίηση όγκου με μαγνήτη N40

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΑΠΟΔΟΣΗ	ΚΟΣΤΟΣ (Euro)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai
3	0,8854	1.389,80	47,688	11.128	0,8057
3.5	0,8777	1.596,70	57,5324	13.658	0,8254
4	0,8684	1.811,70	67,4805	15.739	0,82
4.5	0,8613	1.998,90	78,7155	18.675	0,8427
5	0,8519	2.208,20	89,7273	20.912	0,8395
5.5	0,8431	2.352,60	98,7488	22.985	0,8454
6	0,8376	2.624,10	114,7888	26.367	0,8481
kd	la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)
0,7111	61,39	47,33	218,5864	214	20,85
0,7364	62,06	45,17	240,8243	172	16,75
0,7266	68,13	47,16	254,5325	156	15,19
0,7577	65,94	46,08	277,3282	133	12,95
0,7516	70,65	47,79	289,6493	124	12,08
0,7596	71,36	50,48	302,4941	119	11,59
0,762	75,07	46,95	320,0952	100	9,74

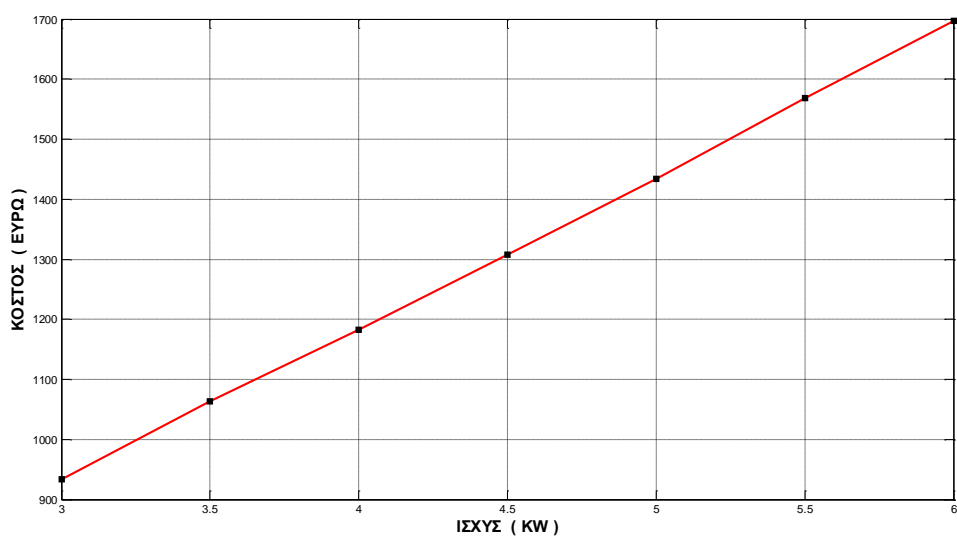
Πίνακας 5.4 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση απόδοσης με μαγνήτη N40



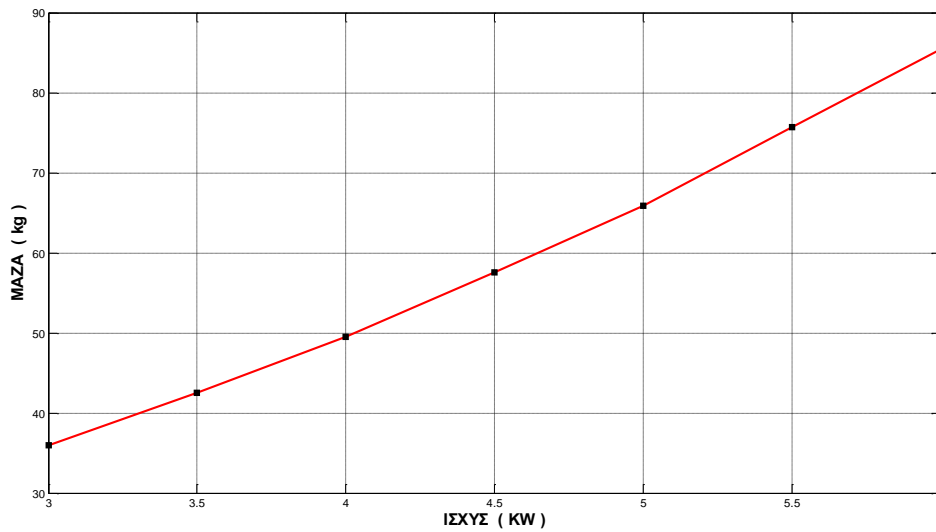
Σχήμα 5.14 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση απόδοσης με μαγνήτη N40

Παρατηρούμε πως στην βελτιστοποίηση της απόδοσης, οι βέλτιστες γεννήτριες ξεκινούν με απόδοση στις χαμηλές ισχύς περίπου 0,88, τιμή η οποία μειώνεται σε κάθε ισχύ κατά 0,01. Σχεδιαστικά βλέπουμε πως οι τάσεις παραπέμπουν στην χρησιμοποίηση αρκετού μαγνήτη, κάτι το οποίο καταλήγει σε ιδιαίτερα μεγάλα κόστη και μικρούς όγκους. Πιο συγκεκριμένα, το πλάτος του ai μένει σταθερά πάνω από την τιμή του 0,8 και το kd κινείται σε τιμές γύρω από το 0,75. Επίσης η μάζα κυρίως στις μεγαλύτερες ισχύς καταλήγει σε αρκετά μεγάλες τιμές.

Βελτιστοποίηση κόστους-μάζας



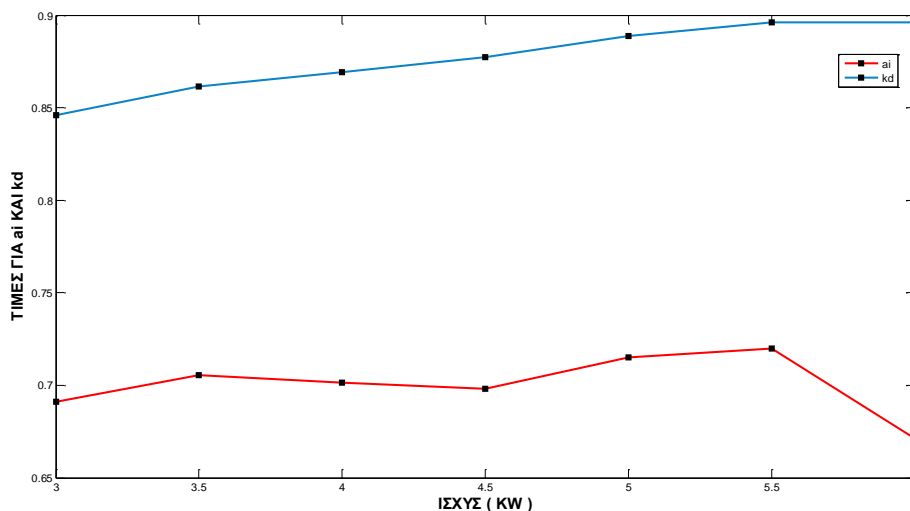
Σχήμα 5.15 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.16 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (Euro)	ΜΑΖΑ(kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	933,2797	35,9786	10.862	0,6912	0,846
3.5	1.063,10	42,5373	13.488	0,7054	0,8616
4	1.182,30	49,5054	16.029	0,7016	0,8693
4.5	1.307,60	57,6045	18.941	0,6983	0,8772
5	1.434	65,907	22.228	0,715	0,8887
5.5	1.568,50	75,7511	25.853	0,72	0,8963
6	1.696,90	85,4788	29.534	0,6712	0,896
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
35,78	48,42	241,6251	307	29,91	0,8681
36,12	46,28	269,2599	243	23,67	0,8619
37,13	50,38	293,5201	230	22,4	0,8462
37,85	54,74	319,0786	224	21,82	0,841
37,37	52,36	345,6517	184	17,92	0,8258
37,43	57,1	372,7755	177	17,24	0,8109
40,55	49,78	398,4175	149	14,51	0,8061

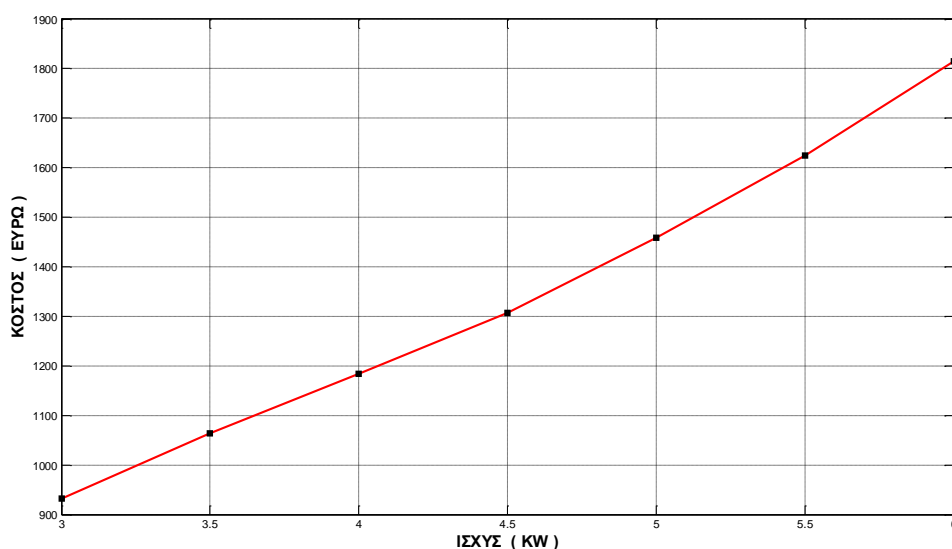
Πίνακας 5.5 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40



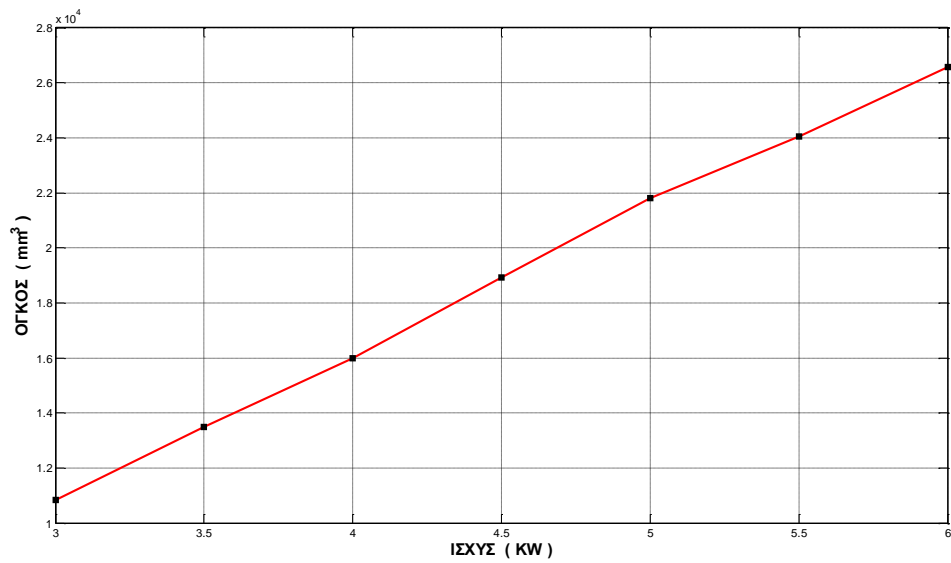
Σχήμα 5.17 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιώντας στην αντικειμενική συνάρτηση το κόστος και την μάζα της γεννήτριας με τους αντίστοιχους συντελεστές βάρους, που θα αναλυθούν στην συνέχεια με παραδείγματα, προέκυψαν τα παραπάνω αποτελέσματα. Παρατηρούμε πως η βελτιστοποίηση καταλήγει σε αποτελέσματα που είναι αρκετά όμοια με αυτά της βελτιστοποίησης για την μάζα, με ακριβότερο κόστος όμως σε σχέση με την περίπτωση όπου υπάρχει ως μοναδικό κριτήριο το κόστος, όπως διαπιστώνουμε συγκρίνοντας με τον Πίνακα 5.1.

Βελτιστοποίηση κόστους-όγκου



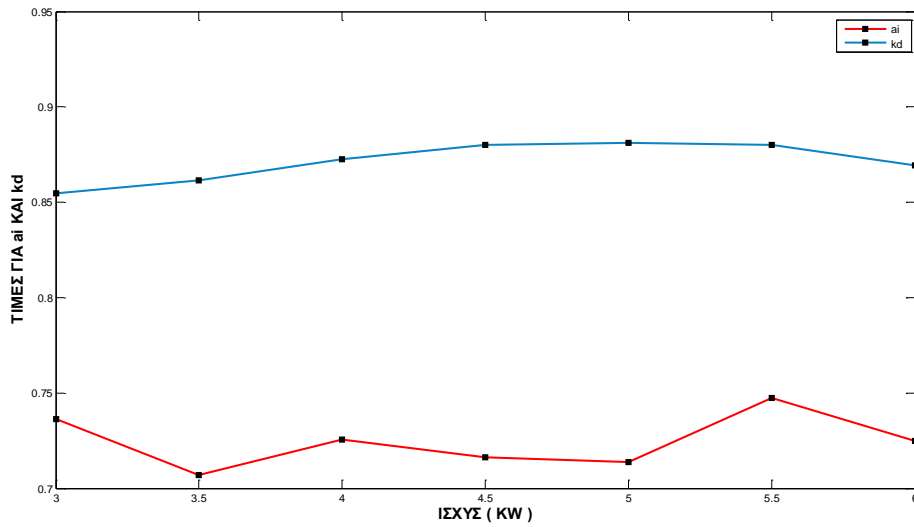
Σχήμα 5.18 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.19 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N40

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ΜΑΖΑ (kg)	ai	kd
3	931,4945	10.838	35,8567	0,7363	0,8547
3.5	1.063,70	13.478	42,5106	0,7069	0,8616
4	1.183,50	15.995	49,4832	0,7254	0,8726
4.5	1.307,70	18.928	57,5284	0,7163	0,8799
5	1.458,30	21.806	66,3367	0,7138	0,8813
5.5	1.625,10	24.059	75,8225	0,7475	0,8801
6	1.815,40	26.561	87,0765	0,7248	0,8694
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
33,44	51,76	241,3365	313	30,49	0,8685
36,09	46,36	269,1436	243	23,67	0,8619
35,99	52,1	293,0124	232	22,6	0,8469
36,89	56,22	318,9455	225	21,92	0,8414
39,23	51,2	339,8966	179	17,44	0,8286
40,98	55,53	352,1622	167	16,27	0,8202
46,43	55,43	364,6912	156	15,19	0,8203

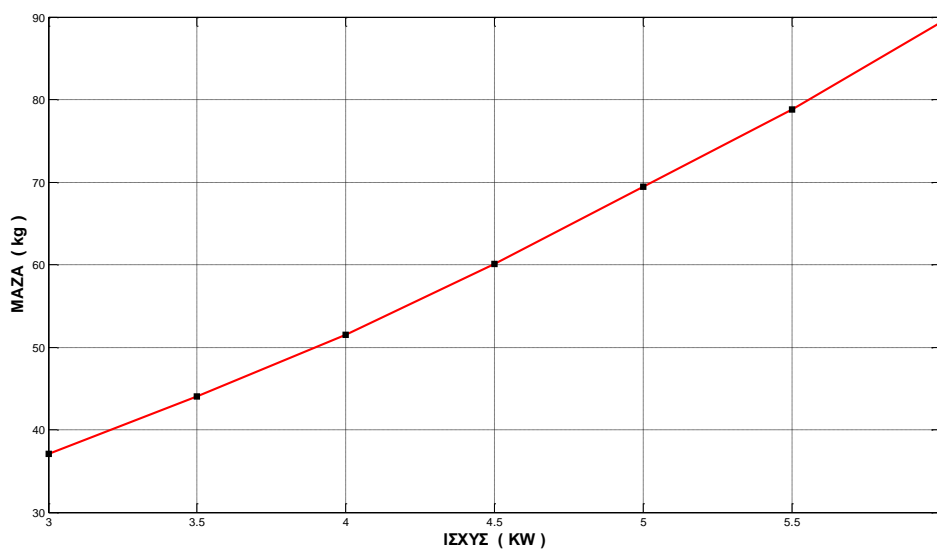
Πίνακας 5.6 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N40



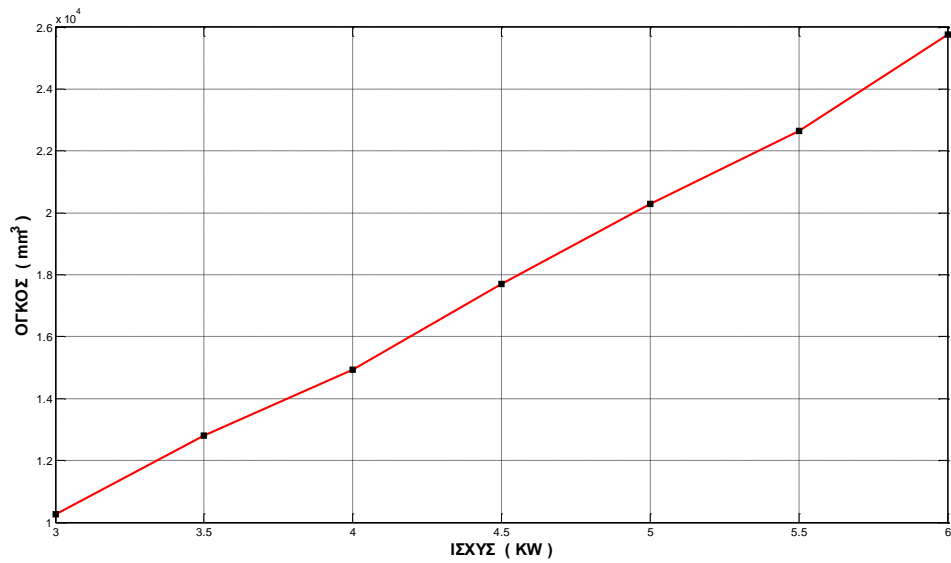
Σχήμα 5.20 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N40

Εδώ αντίστοιχα χρησιμοποιούνται σαν κριτήρια σχεδιαστικής βελτιστοποίησης το κόστος με τον όγκο, όπου βλέπουμε πως το κόστος είναι σταθερά ακριβότερο κατά 100 ευρώ από την περίπτωση όπου έχει χρησιμοποιηθεί σαν μοναδικό κριτήριο και αντίστοιχα ο όγκος είναι σταθερά μεγαλύτερος κατά 1000 mm³ περίπου από την αντίστοιχη περίπτωση. Γενικά οι σχεδιαστικές μεταβλητές ακολουθούν τις τάσεις της περίπτωσης που ο όγκος θεωρήθηκε σαν μοναδικό κριτήριο, κάτι που είναι εμφανές παρατηρώντας και τον Πίνακα 5.3.

Βελτιστοποίηση μάζας-όγκου



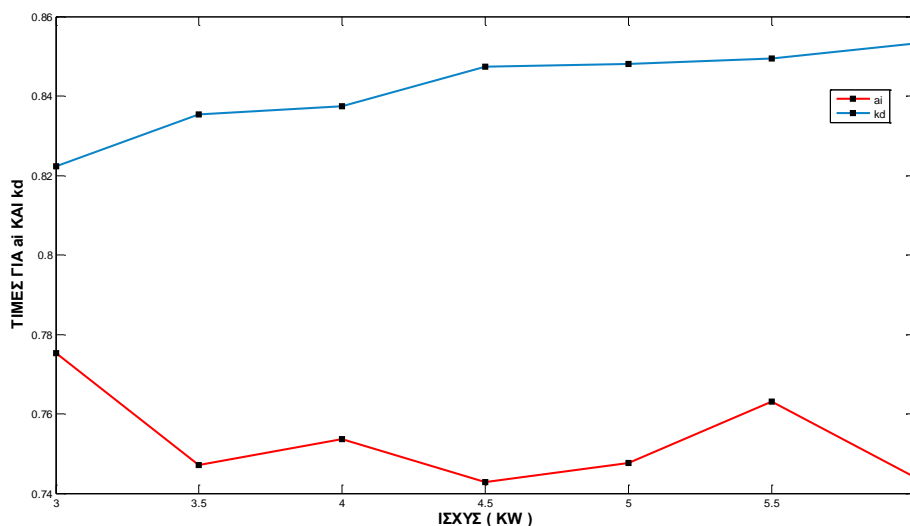
Σχήμα 5.21 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.22 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ai	kd
3	37,0773	10.259	1.010,70	0,7752	0,8223
3.5	43,9945	12.799	1.145,80	0,7472	0,8353
4	51,5352	14.940	1.294,0	0,7537	0,8375
4.5	60,0698	17.706	1.429,0	0,7429	0,8473
5	69,4284	20.291	1.600,90	0,7477	0,8481
5.5	78,7767	22.648	1.759,20	0,7631	0,8494
6	89,3161	25.754	1.904,70	0,744	0,8532
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
38,78	50,53	227,7314	285	27,76	0,8761
40,79	45,79	255,0991	224	21,82	0,8687
43,12	49,57	273,5021	208	20,26	0,8567
44,1	53,53	298,0498	203	19,77	0,8504
46,87	48,96	315,8522	161	15,68	0,8394
48,56	52,35	330,6525	152	14,8	0,8297
50,47	54,47	352,1548	148	14,41	0,8251

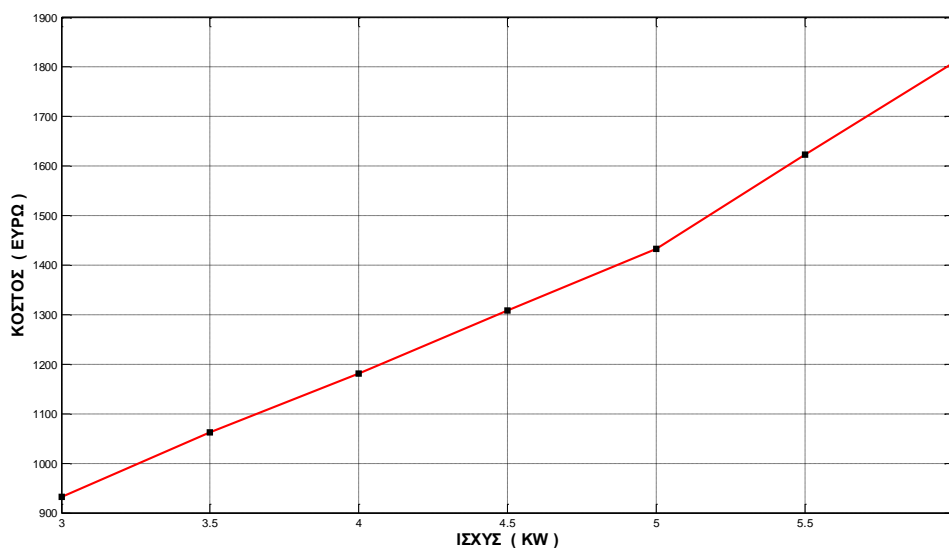
Πίνακας 5.7 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40



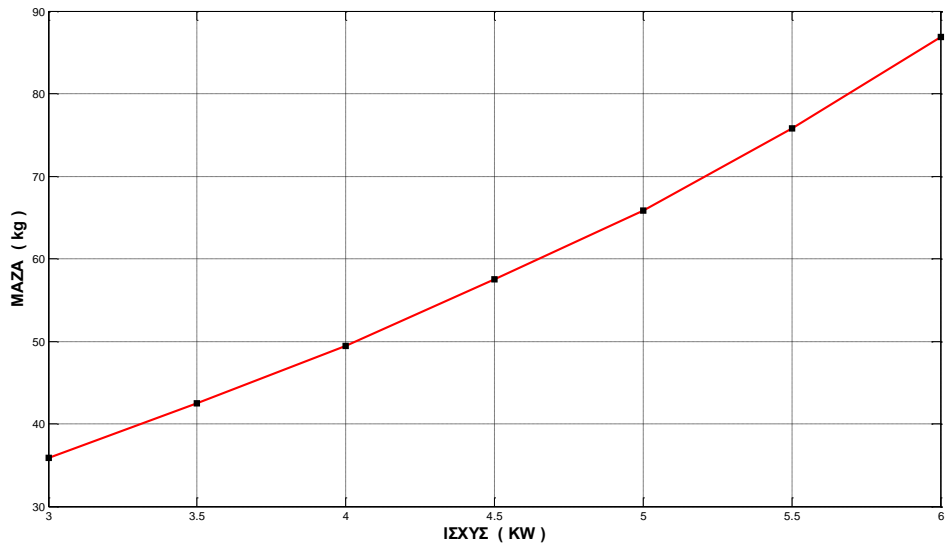
Σχήμα 5.23 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40

Σε αυτόν τον συνδυασμό σχεδιαστικών κριτηρίων, θα δούμε πως η μάζα θα καταλήξει σε τιμές λίγο μεγαλύτερες από την αντίστοιχη βελτιστοποίηση αυτής, πιο συγκεκριμένα είναι κατά μέσο όρο 2 kg αυξημένη σε κάθε ισχύ. Ο όγκος παραμένει στις ίδιες σχεδόν τιμές με τις βέλτιστες όταν χρησιμοποιείται σαν μονό κριτήριο. Οι μεταβλητές ai και kd (Σχήμα 5.23) παρατηρούμε πως έχουν τιμές ενδιάμεσες από τα πλάτη που πήραν σε κάθε υποπερίπτωση ξεχωριστά.

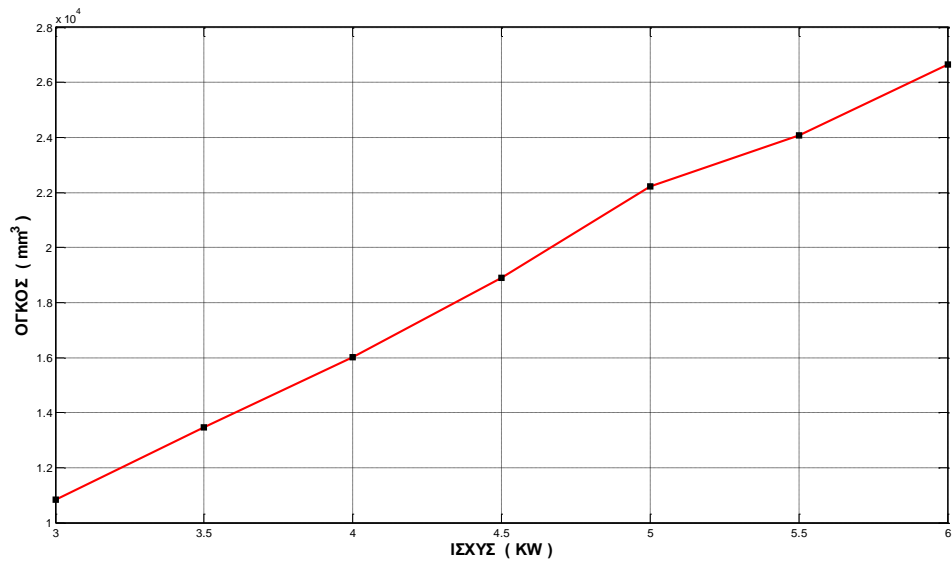
Βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου



Σχήμα 5.24 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40



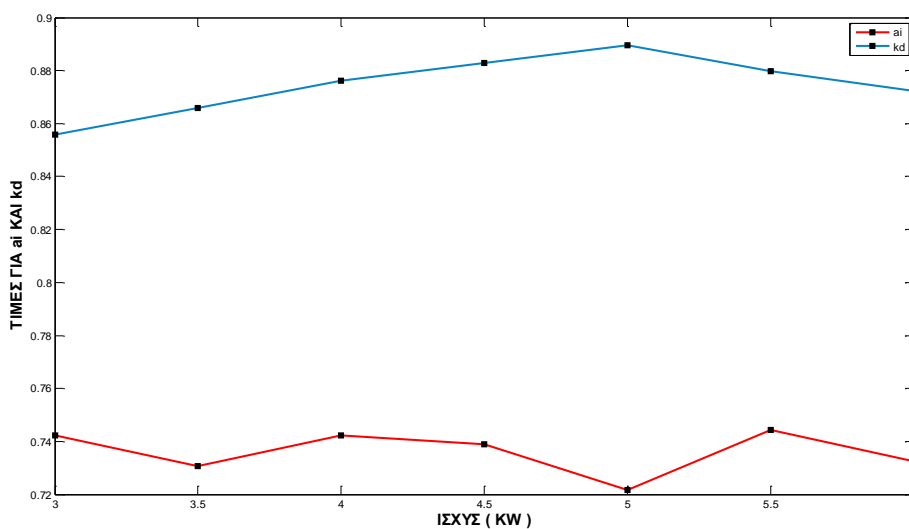
Σχήμα 5.25 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40



Σχήμα 5.26 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	931,5803	35,8609	10.841	0,7423	0,8559
3.5	1.062,80	42,4531	13.476	0,7308	0,866
4	1.181,20	49,4252	16.025	0,7424	0,8761
4.5	1.309,10	57,535	18.906	0,739	0,8829
5	1.433,60	65,8644	22.216	0,7216	0,8896
5.5	1.623,40	75,7744	24.073	0,7444	0,8799
6	1.808,60	86,9071	26.642	0,7324	0,8722
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
33,15	52,22	241,3741	314	30,59	0,8684
34,83	48,03	269,1335	245	23,87	0,8622
34,96	53,5	293,4841	234	22,79	0,8468
35,82	58,02	318,592	227	22,11	0,8419
37,03	52,85	345,5366	184	17,92	0,8262
41,07	55,32	352,4066	167	16,27	0,82
45,51	56,27	365,7928	157	15,29	0,8201

Πίνακας 5.8 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40



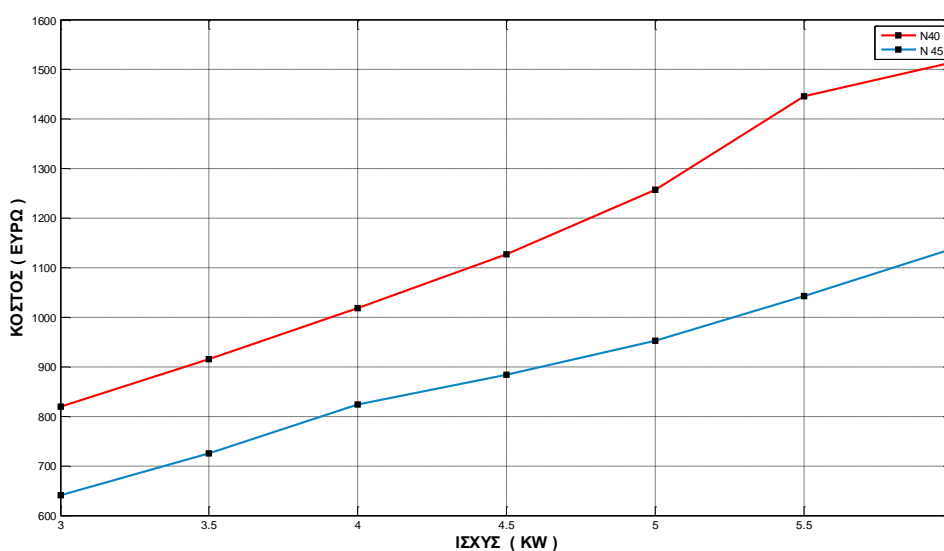
Σχήμα 5.27 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40

Στην τελευταία περίπτωση λήφθηκαν ως κριτήρια το κόστος, η μάζα και ο όγκος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν πως η συγκεκριμένη βελτιστοποίηση μας έδωσε την ελάχιστη μάζα, κόστος ανεβασμένο κατά 100 Ευρώ σε κάθε ισχύ και όγκο μεγαλύτερο κατά 1000 mm³, συγκριτικά πάντα με τις αντίστοιχες μονές βελτιστοποιήσεις, παρατηρώντας βέβαια και τους αντίστοιχους Πίνακες 5.1, 5.2, και 5.3.

5.4 Βελτιστοποιήσεις με την μέθοδο PSO με χρήση του μαγνήτη N45 σε συχνότητα 50 Hz και σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μαγνητών

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθεί η βελτιστοποίηση των σύγχρονων γεννητριών με χρήση του μαγνήτη N45, τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση όπως και οι μεταβλητές που βελτιστοποιούνται. Κατά την διάρκεια της παρουσίασης των καμπυλών και των αποτελεσμάτων γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση του μαγνήτη N40.

Βελτιστοποίηση κόστους

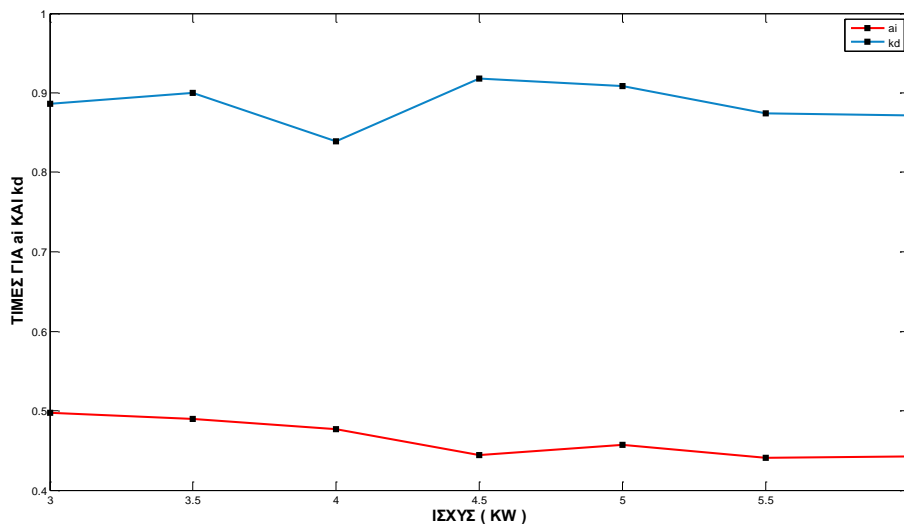


Σχήμα 5.28 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N40 και N45

Παρατηρούμε πως στην βελτιστοποίηση ως προς κόστος με χρήση του μαγνήτη N45, το κόστος ξεκινάει από τα 640 Ευρώ και αυξάνεται σε κάθε ισχύ κατά μέσο όρο περίπου 70-80 Ευρώ. Αρχικά διαπιστώνουμε το γεγονός πως το κόστος είναι ιδιαίτερα μειωμένο σε σχέση με την αντίστοιχη βελτιστοποίηση με χρήση του μαγνήτη N40 (Πίνακας 5.1), στις χαμηλές ισχύς υπάρχει μια διαφορά περίπου 200 Ευρώ, η οποία στις μεγαλύτερες καταλήγει περίπου στα 400. Αυτό φυσικά οφείλεται στο ότι το κόστος των μαγνητών N45 είναι μικρότερο. Παρατηρώντας λοιπόν το αι (Σχήμα 5.29), βλέπουμε πως κινείται σε χαμηλά επίπεδα και είναι λίγο υψηλότερο από το πλάτος του στην αντίστοιχη περίπτωση του N40, αφού λόγω του χαμηλότερου κόστους υπάρχει η δυνατότητα για χρήση παραπάνω μαγνήτη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πιο έντονου πεδίου που συνεπάγεται μικρότερη γεννήτρια σε μάζα και όγκο για την εκάστοτε ισχύ, κάτι το οποίο είναι ολοφάνερο από την σύγκριση των Πινάκων 5.1 και 5.9.

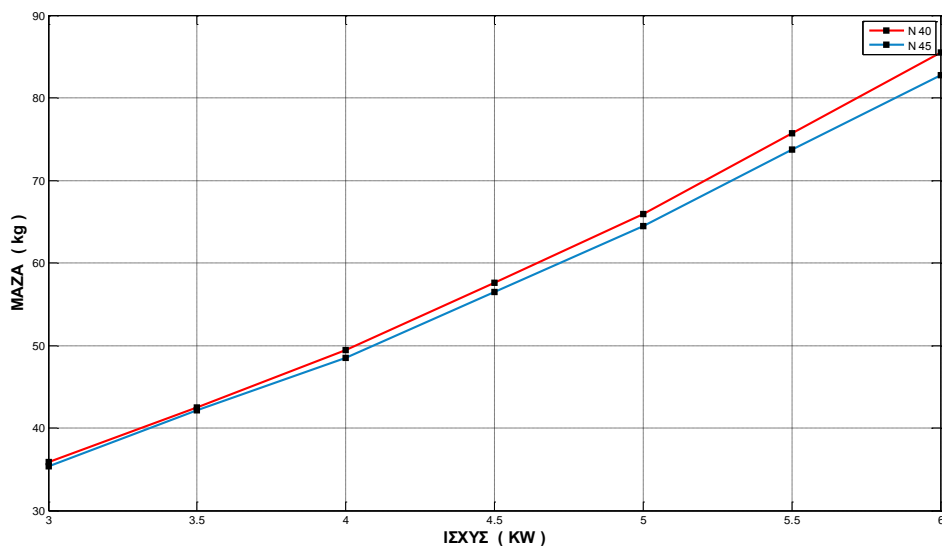
ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	641,2244	48,5026	15.016	0,497	0,8862
3.5	724,8454	59,7451	19.466	0,4897	0,9004
4	823,7632	54,384	17.625	0,4771	0,8388
4.5	884,4772	87,5041	29.950	0,444	0,918
5	952,7035	89,4871	30.790	0,4573	0,9084
5.5	1.042,60	85,5656	29.331	0,4411	0,8746
6	1.138,70	92,3556	32.033	0,4421	0,8719
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
31,2	41,49	281,842	383	34,83	0,8346
31,3	39,09	320,9024	308	28,01	0,8232
48,62	35,06	305,3526	237	21,55	0,8278
32,15	38,03	398,045	250	22,73	0,7867
36,44	39,51	403,5881	225	20,46	0,7803
48,89	36,54	393,9138	190	17,27	0,7804
52,33	33,44	411,6538	157	14,27	0,78

Πίνακας 5.9 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N45



Σχήμα 5.29 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους με μαγνήτη N45

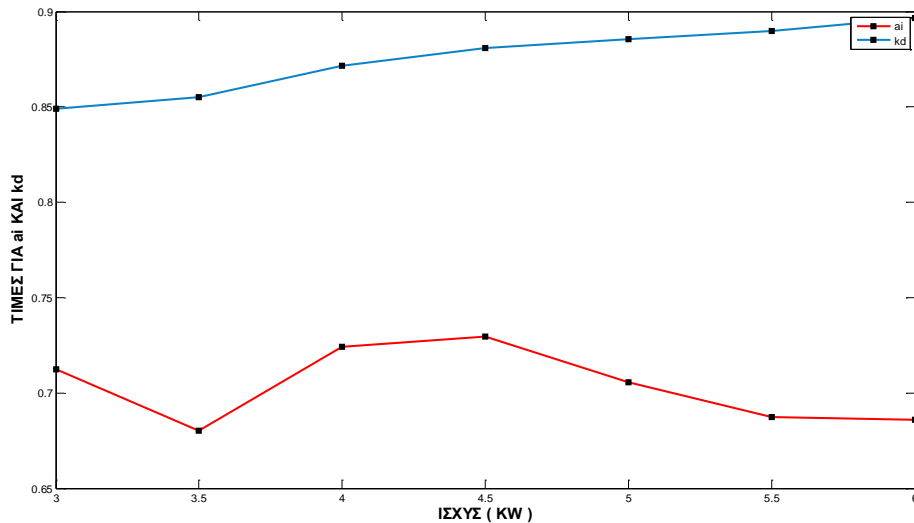
Βελτιστοποίηση μάζας



Σχήμα 5.30 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N40 και N45

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΜΑΖΑ (kg)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	35,4062	662,4346	10.722	0,7124	0,8489
3.5	42,1614	756,5841	13.422	0,6801	0,8552
4	48,4907	825,4925	15.807	0,7242	0,8716
4.5	56,4417	906,8958	18.722	0,7294	0,8807
5	64,4712	995,7331	21.908	0,7055	0,8855
5.5	73,7661	1.080,80	25.367	0,6874	0,8899
6	82,7563	1.170	28.893	0,6861	0,8965
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
34,48	49,27	238,1326	325	29,55	0,8645
37,52	44	266,4682	253	23	0,8567
35,82	51,29	289,1259	243	22,09	0,8423
36,1	56,5	314,7103	237	21,55	0,8366
37,88	50,79	340,3726	192	17,46	0,8212
39,23	53,39	366,3272	184	16,73	0,8049
39,56	49,93	390,9552	157	14,27	0,8015

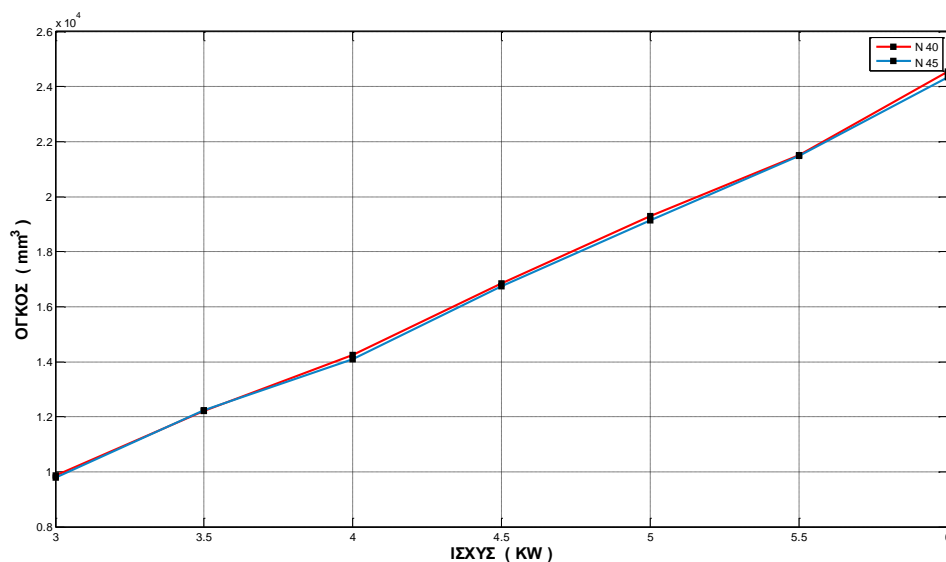
Πίνακας 5.10 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N45



Σχήμα 5.31 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση μάζας με μαγνήτη N45

Η βελτιστοποίηση μάζας ως προς τα μεγέθη της μάζας αλλά και ως προς τις σχεδιαστικές τάσεις είναι κατά μεγάλο βαθμό ίδια με την αντίστοιχη με χρήση του μαγνήτη N40 (Πίνακας 5.2). Παρατηρούμε πως κυμαίνεται από τα 35 έως τα 82 kg και το κόστος είναι ελάχιστα αυξημένο σε σχέση με την βελτιστοποίηση κόστους με χρήση του μαγνήτη N45. Επίσης το μέγεθος του όγκου έχει ελαχιστοποιηθεί, κάτι που φυσικά οφείλεται στην χρήση περισσότερου μαγνήτη όπως φαίνεται και από τις τιμές της μεταβλητής ai (Σχήμα 5.31).

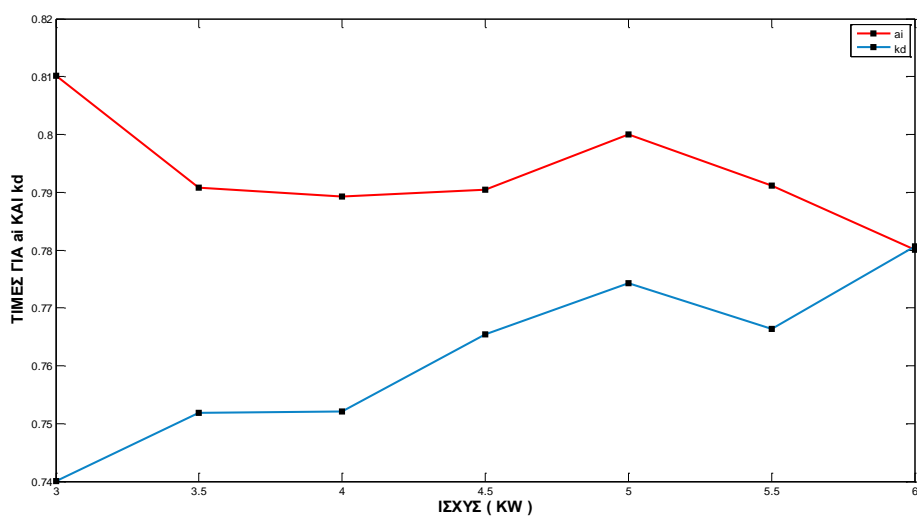
Βελτιστοποίηση όγκου



Σχήμα 5.32 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση όγκου με μαγνήτη N40 και N45

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ai	kd
3	9.783,50	797,7658	40,3949	0,8101	0,7401
3.5	12.246	925,1042	49,2928	0,7908	0,7518
4	14.098	1.020,60	56,9377	0,7893	0,7521
4.5	16.735	1.133,50	67,2556	0,7905	0,7654
5	19.140	1.249,80	76,8053	0,8	0,7743
5.5	21.473	1.372,20	87,8747	0,7912	0,7664
6	24.348	1.461,80	98,4831	0,7801	0,7806
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
52,49	46,16	208,5092	251	22,82	0,8806
56,41	42,11	232,277	197	17,91	0,8721
59,92	44,71	247,0338	181	16,46	0,862
61,45	48,98	268,1274	176	16	0,8546
63,11	45,33	284,7003	142	12,91	0,8446
68,37	46,67	297,6976	132	12	0,8346
68,51	49,53	317,8515	131	11,91	0,8287

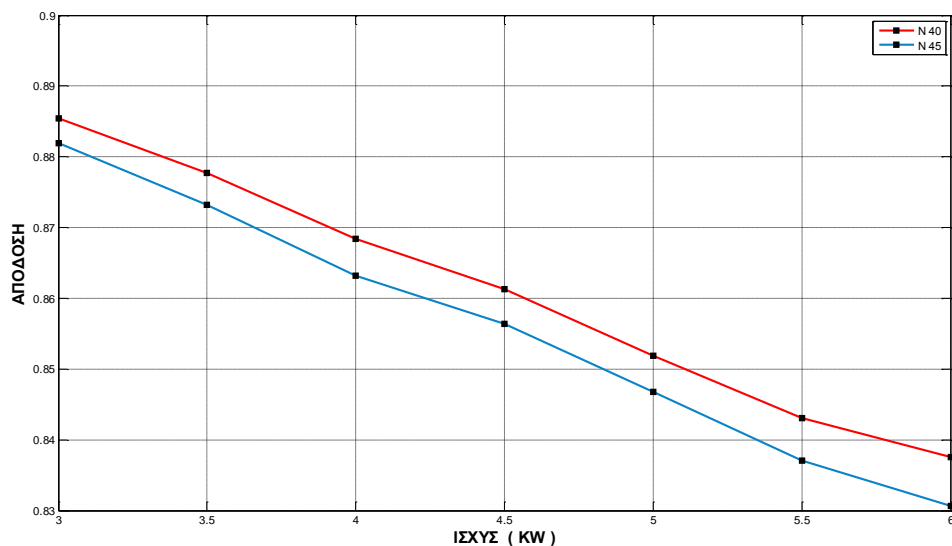
Πίνακας 5.11 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση όγκου με μαγνήτη N45



Σχήμα 5.33 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση όγκου με μαγνήτη N40

Εδώ χρησιμοποιήθηκε σαν μοναδικό κριτήριο ο όγκος. Παρατηρούμε από τον Πίνακα 5.11 πως υπάρχει σημαντική ελαχιστοποίηση της συγκεκριμένης παραμέτρου, κάτι που επιτεύχθηκε με χρήση αρκετά περισσότερου μαγνήτη όπως φαίνεται και από την τιμή του ai, η οποία είναι σταθερά γύρω από το 0,80. Η σημαντική μείωση του όγκου είναι εμφανής και από την θεαματική μείωση της ακτίνας σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις (Πίνακες 5.9 και 5.10). Συγκριτικά με την ίδια βελτιστοποίηση με χρήση του μαγνήτη N40 (Πίνακας 5.3) παρατηρούμε πως τα μεγέθη του όγκου, όπως φαίνεται και από την γραφική παράσταση σχεδόν συμπίπτουν, με ελάχιστα μειωμένο τον όγκο της δεύτερης περίπτωσης σε κάποιες ισχύς.

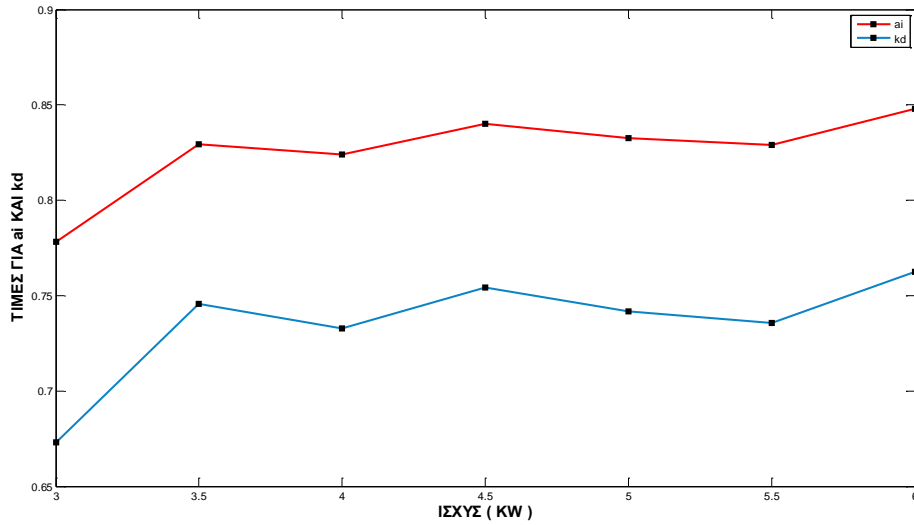
Βελτιστοποίηση απόδοσης



Σχήμα 5.34 : καμπύλη ισχύος-απόδοσης για βελτιστοποίηση απόδοσης με μαγνήτη N40 και N45

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΑΠΟΔΟΣΗ	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ	ΟΓΚΟΣ	ai
3	0,8819	938,921	48,6675	11.127	0,7781
3.5	0,8732	1.025,10	56,1845	13.580	0,8293
4	0,8632	1.145,10	65,3866	15.477	0,8241
4.5	0,8564	1.283,50	77,14	18.421	0,84
5	0,8468	1.415,10	88,3694	20.613	0,8326
5.5	0,8371	1.538,50	99,6389	22.863	0,8291
6	0,8307	1.651,40	111,5739	25.936	0,8481
kd	la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)
0,6732	68,52	43,89	214,6	213	19,37
0,7458	59,63	45,49	240,0989	185	16,82
0,7328	65,9	47,13	252,1382	168	15,27
0,7541	66,1	45,26	273,3183	140	12,73
0,7417	72,38	46,37	285,0574	129	11,73
0,7356	77,13	47,87	296,5519	121	11
0,7624	74,11	46,44	316,5677	107	9,73

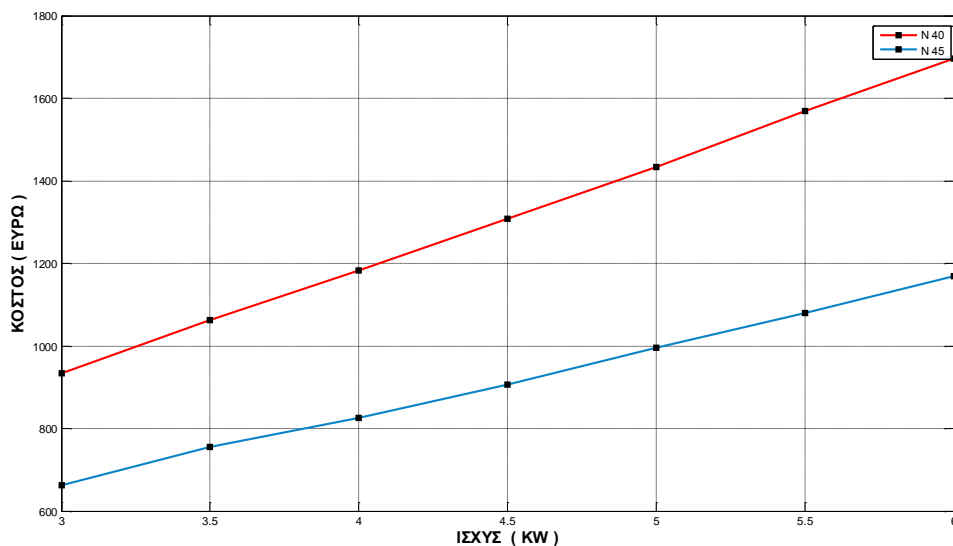
Πίνακας 5.12 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση απόδοσης με μαγνήτη N45



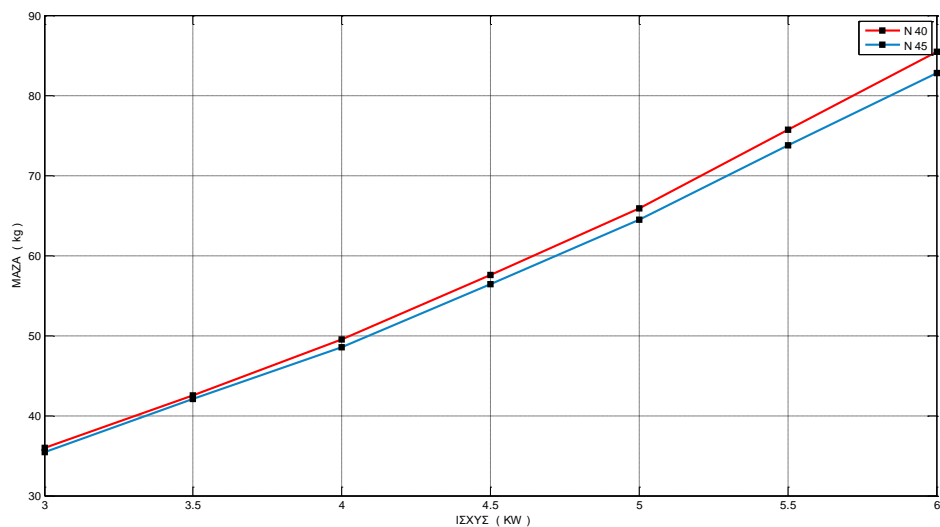
Σχήμα 5.35 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση απόδοσης με μαγνήτη N45

Στην βελτιστοποίηση της απόδοσης, παρατηρούμε πως οι τιμές της κυμαίνονται από 0,88 έως και 0,83 στις μεγάλες ισχύς. Για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση, έχει χρησιμοποιηθεί αρκετός μαγνήτης και η τιμή του ai φθάνει μέχρι και το επίπεδο του 0,85, με ότι αυτό συνεπάγεται για το κόστος των συγκεκριμένων γεννητριών. Συγκριτικά τώρα με την αντίστοιχη περίπτωση με χρήση μαγνήτη N40 (Πίνακας 5.4), οι σχεδιαστικές τάσεις είναι πανομοιότυπες και οι τιμές των αποδόσεων στα ίδια επίπεδα με μια πολύ μικρή μείωση της τάξης του 0,03 στην περίπτωση του N45.

Βελτιστοποίηση κόστους-μάζας



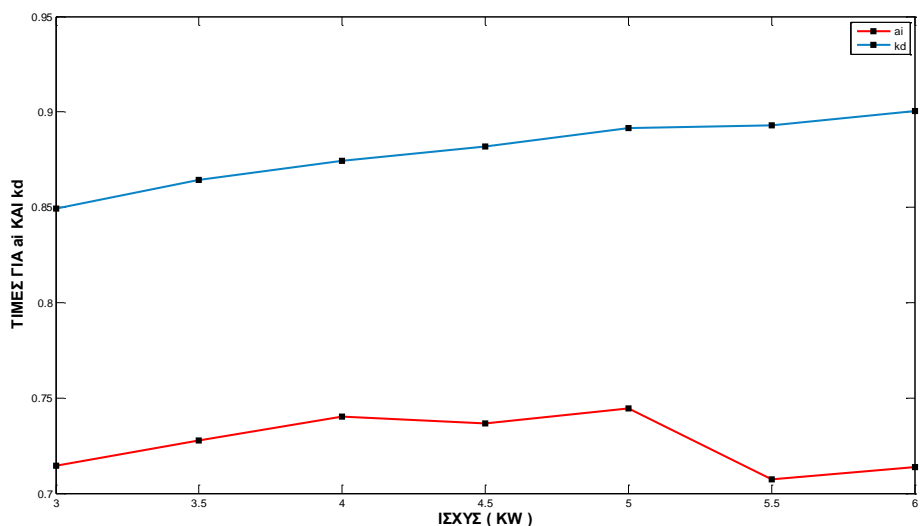
Σχήμα 5.36 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 και N45



Σχήμα 5.37 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 και N45

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	662,2939	35,3997	10.721	0,7145	0,8494
3.5	755,0091	42,0461	13.416	0,7278	0,8645
4	825,3575	48,5003	15.828	0,7404	0,8745
4.5	906,7588	56,4298	18.720	0,7365	0,8818
5	995,516	64,5112	21.970	0,7445	0,8916
5.5	1.080,10	73,7209	25.373	0,7072	0,8929
6	1.169,50	82,7754	28.939	0,7139	0,9006
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
34,35	49,42	238,1479	326	29,64	0,8646
34,88	47,32	266,4034	258	23,46	0,8575
34,95	52,56	289,3696	245	22,28	0,8421
35,73	57,08	314,6895	238	21,64	0,837
35,75	53,86	340,9059	195	17,73	0,8214
38,08	55,02	366,3592	185	16,82	0,8055
37,94	52,11	391,2655	158	14,36	0,8025

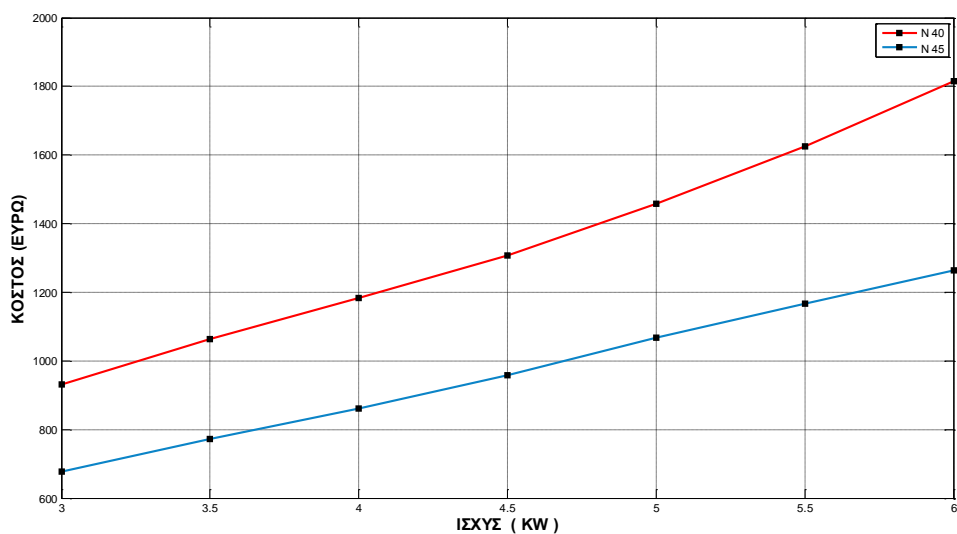
Πίνακας 5.38 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N45



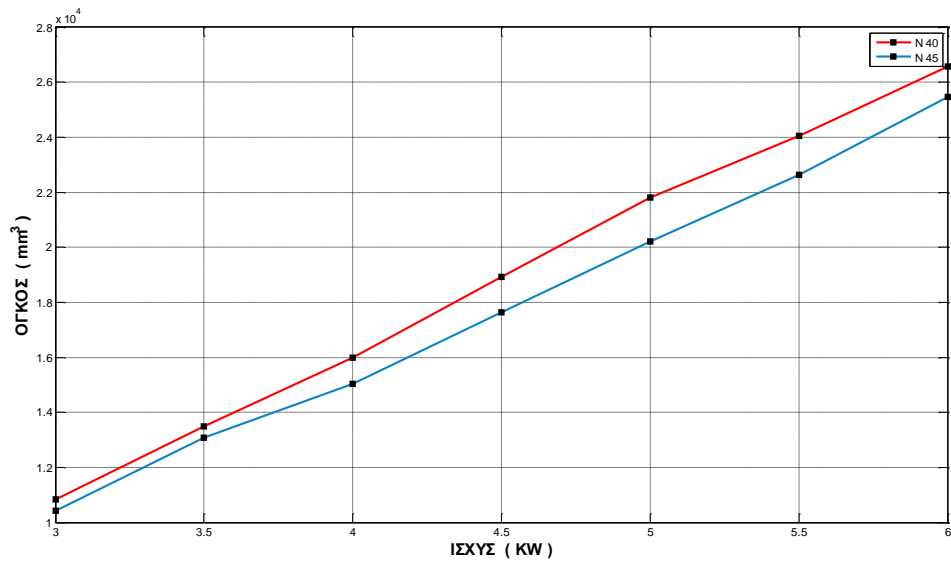
Σχήμα 5.38 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N45

Η βελτιστοποίηση του συνδυασμού κόστους-μάζας ταυτίζεται κυρίως με την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε σαν μονό κριτήριο η μάζα (Πίνακας 5.10) και κυριαρχούν οι ίδιες σχεδιαστικές τάσεις. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του μαγνήτη N40, πιο συγκεκριμένα, τα μεγέθη της μάζας συμπίπτουν με την περίπτωση βελτιστοποίησης μάζας και το κόστος είναι ελάχιστα ανεβασμένο σε σχέση με την βελτιστοποίηση κόστους, η τιμή του δηλαδή συμπίπτει με την περίπτωση της μάζας. Έτσι, όπως διακρίνουμε και από τις παραπάνω γραφικές, προκύπτουν στην μάζα και το κόστος μεταξύ των μαγνητών N40 και N45 οι διαφορές που προέκυψαν στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σαν μονά κριτήρια.

Βελτιστοποίηση κόστους-όγκου



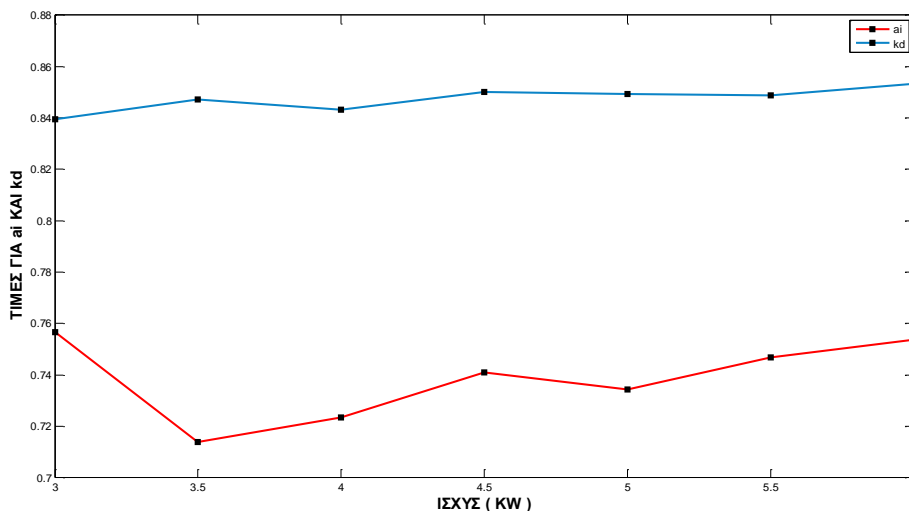
Σχήμα 5.39 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N40 και N45



Σχήμα 5.40 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση κόστους- όγκου με μαγνήτη N40 και N45

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ΜΑΖΑ (kg)	ai	kd
3	677,5973	10.418	35,842	0,7566	0,8395
3.5	772,2456	13.089	42,7124	0,7139	0,8471
4	862,0713	15.027	49,9085	0,7235	0,8431
4.5	958,2209	17.631	58,6619	0,7409	0,8501
5	1.066,70	20.201	67,5909	0,7345	0,8493
5.5	1.167,30	22.620	77,2449	0,7469	0,8488
6	1.263,10	25.470	87,5055	0,7537	0,8534
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
35,53	50,62	231,5456	315	28,64	0,8686
38,61	44,88	260,0465	246	22,37	0,8604
41,69	48,04	275,2685	224	20,37	0,8495
43,03	53,18	296,4455	216	19,64	0,8449
46,3	47,92	314,4466	171	15,55	0,8332
48,62	51,01	329,3086	161	14,64	0,8228
49,72	54,49	347,7419	156	14,18	0,4201

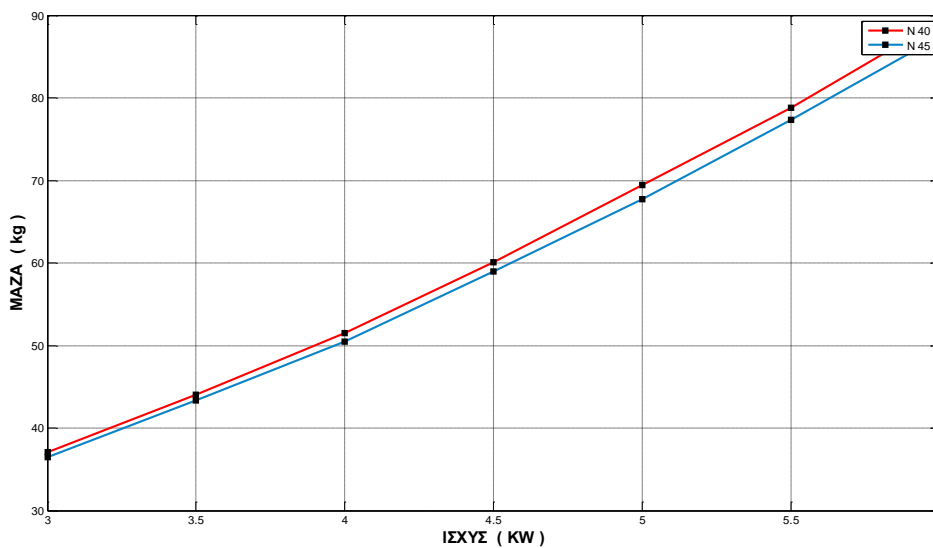
Πίνακας 5.14 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N45



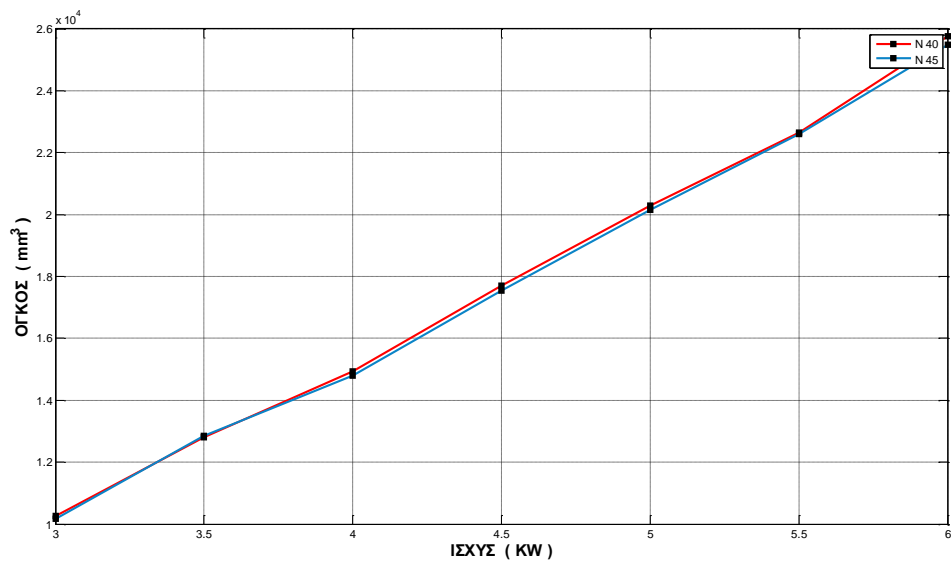
Σχήμα 5.41 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N40

Παρατηρούμε στον παραπάνω Πίνακα 5.14 πως το κόστος και ο όγκος είναι λίγο αυξημένα σε σχέση με τις βελτιστοποιήσεις κόστους και όγκου αντίστοιχα (Πίνακες 5.9 και 5.11). Βλέπουμε πως το ai δεν είναι στα επίπεδα του 0,80 (Σχήμα 5.41) όπως στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε σαν μοναδικό κριτήριο ο όγκος, αποφεύγεται δηλαδή η χρησιμοποίηση αρκετά περισσότερου μαγνήτη, καταλήγοντας έτσι σε μια τιμή κόστους όχι ιδιαίτερα πάνω από αυτήν που καταλήξαμε όταν ελαχιστοποιήθηκε το κόστος και σε μεγέθη όγκου αρκετά κοντά στα βελτιστοποιημένα. Συγκριτικά με την αντίστοιχη περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκε ο μαγνήτης N40 (Πίνακας 5.6), είναι εύκολο να αντιληφθούμε πως καταλήγουμε στην ίδια σχεδιαστική συμπεριφορά όσον αφορά τις γεωμετρικές μεταβλητές.

Βελτιστοποίηση μάζας-όγκου



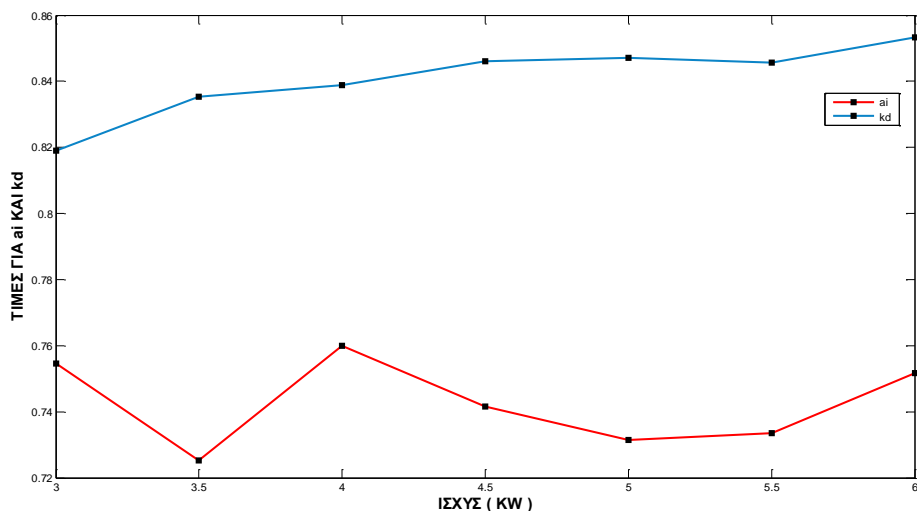
Σχήμα 5.42 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 και N45



Σχήμα 5.43 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 και N45

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ai	kd
3	36,5036	10.177	696,9035	0,7546	0,819
3.5	43,3747	12.852	789,0201	0,7252	0,8354
4	50,5081	14.798	877,4406	0,7599	0,8389
4.5	58.959	17.537	964,8545	0,7415	0,8461
5	67,7338	20.152	1.069,90	0,7314	0,847
5.5	77,3103	22.600	1.168,70	0,7336	0,8456
6	87,4638	25.474	1.262,50	0,7517	0,8533
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
39,25	48,63	225,5847	299	27,19	0,8719
40,79	44,41	254,8997	238	21,64	0,8629
42,46	49,48	270,5751	220	20	0,8522
43,94	52,78	294,6108	213	19,37	0,8456
46,93	47,52	313,6052	170	15,46	0,8335
49,69	49,97	329,0349	160	14,55	0,8226
49,79	54,36	347,8604	156	14,18	0,82

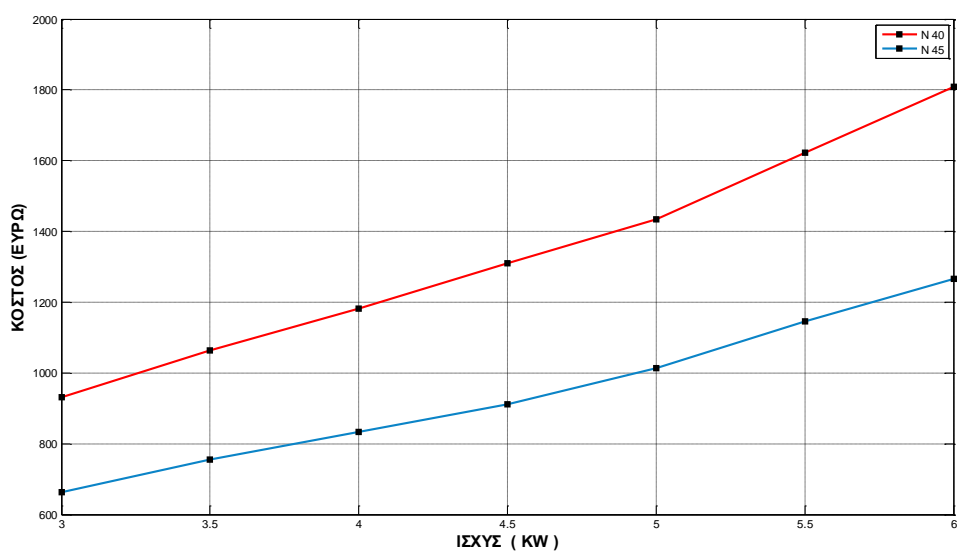
Πίνακας 5.15 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N45



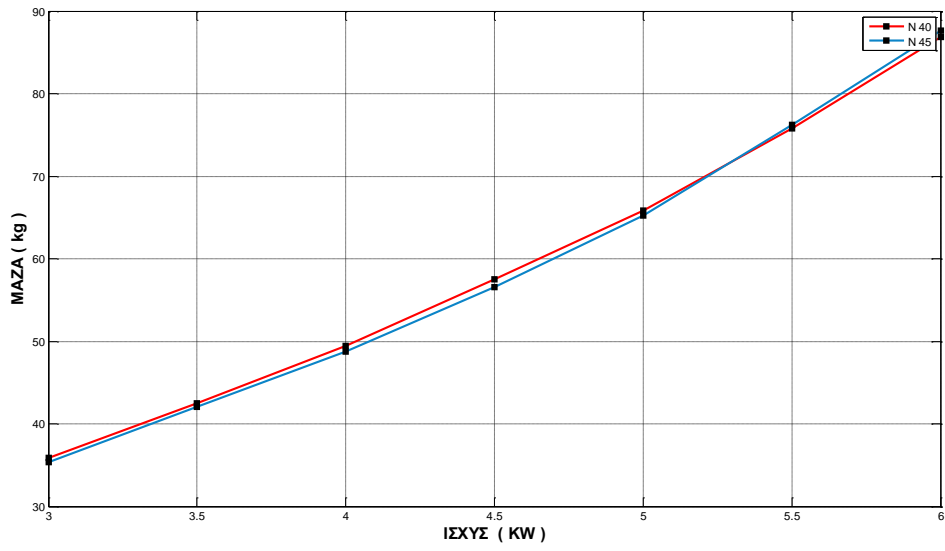
Σχήμα 5.44 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40

Στην περίπτωση μάζας-όγκου, οι τιμές σχεδόν συμπίπτουν με τις ελαχιστοποιημένες τιμές που προέκυψαν σε κάθε βελτιστοποίηση με μια μικρή αύξηση (Πίνακες 5.21, 5.22). Το κόστος συγκρατείται σε χαμηλά επίπεδα, κάτι το οποίο είναι λογικό, καθότι παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιείται παραπάνω μαγνήτης, το κόστος του μαγνήτη N45 επιτρέπει να παραμείνει η τιμή της γεννήτριας σε χαμηλά επίπεδα. Στις παραπάνω γραφικές γίνεται η σύγκριση μεταξύ των δύο μαγνητών όπου παρατηρούμε πως υπάρχουν μικρές διαφορές, επίσης με μια ματιά στους Πίνακες 5.7 και 5.15 βλέπουμε πως ακολουθούνται οι ίδιες σχεδιαστικές τάσεις.

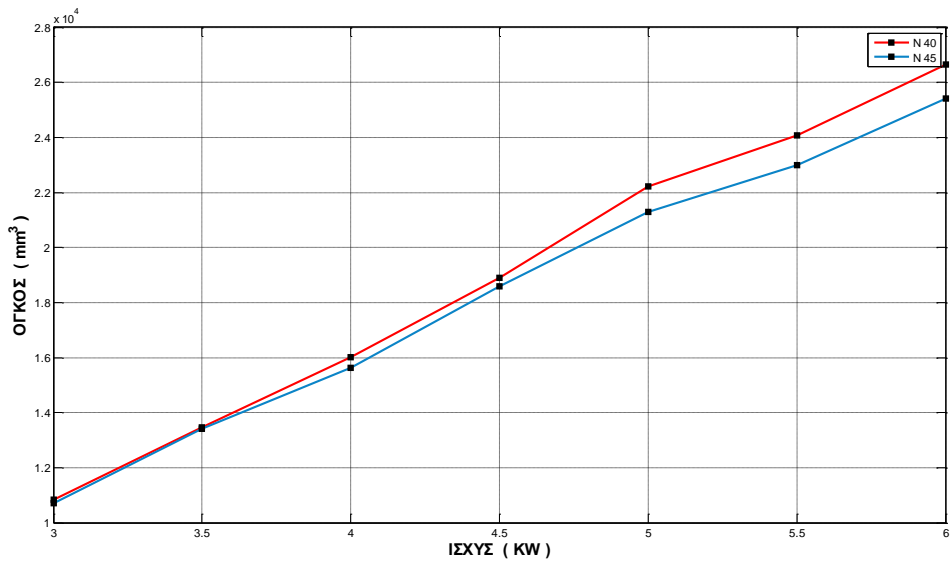
Βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου



Σχήμα 5.45 : καμπύλη ισχύος-κόστος για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 και N45



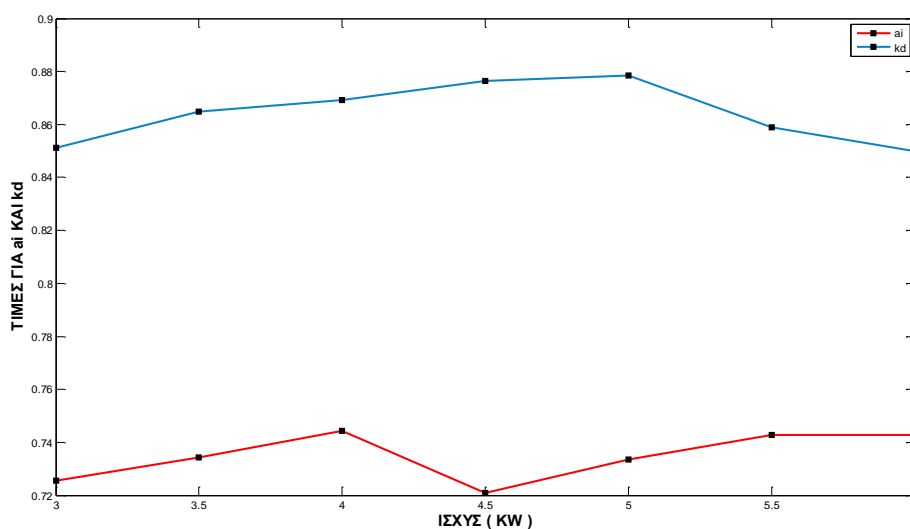
Σχήμα 5.46 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 και N45



Σχήμα 5.47 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 και N45

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	662,4426	35,3921	10.710	0,7256	0,8511
3.5	755,9197	42,0818	13.401	0,7344	0,8649
4	832,8598	48,7674	15.617	0,7443	0,8692
4.5	911,0063	56,5973	18.585	0,721	0,8765
5	1.014,40	65,2469	21.294	0,7334	0,8784
5.5	1.144,90	76,182	22.987	0,7429	0,859
6	1.266,20	87,6467	25.417	0,7429	0,85
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
33,87	50,2	237,9342	327	29,73	0,8647
34,71	47,7	266,0648	258	23,46	0,8577
36,05	52,05	285,8819	241	21,91	0,8443
37,22	55,37	312,6961	234	21,28	0,8376
39,22	51,26	331,6922	186	16,91	0,8258
46,11	51,95	335,3215	165	15	0,8202
50,82	53,5	346,9828	155	14,09	0,82

Πίνακας 5.16 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N45



Σχήμα 5.48 : καμπύλη ισχύος-(ai/kd) για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N45

Εδώ χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός των κριτηρίων κόστους, μάζας και όγκου. Υπάρχει ένας συμβιβασμός ανάμεσα σε αυτές τις παραμέτρους, για την ακρίβεια παρατηρούμε πως η τιμή της μάζας σε όλες τις ισχύς συμπίπτει με την αντίστοιχη ελαχιστοποιημένη όταν χρησιμοποιήθηκε η μάζα σαν μονό κριτήριο (Πίνακας 5.10), ενώ τα μεγέθη του κόστους και του όγκου είναι κατά λίγο υψηλότερα σε σχέση με τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις (Πίνακες 5.9 και 5.11). Οι σχεδιαστικές τάσεις που ακολουθούνται είναι οι ίδιες με αυτές στην περίπτωση του μαγνήτη N40 (Πίνακας 5.8) ενώ οι διαφορές στα μεγέθη απεικονίζονται στις παραπάνω καμπύλες.

5.5 Ανάλυση των συντελεστών βάρους στην αντικειμενική συνάρτηση

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συνάρτηση που καλείται ο αλγόριθμος του PSO να βελτιστοποιήσει, αρχικά κανονικοποιείται, ώστε να έχουν όλες οι μεταβλητές το ίδιο πλάτος και στην συνέχεια με την πρόσθεση των συντελεστών βάρους, δίνεται στο κάθε κριτήριο η ανάλογη βαρύτητα. Δηλαδή, αλλάζοντας το πλάτος των συντελεστών αυτών, μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε το πόσο μας ενδιαφέρει να ελαχιστοποιήσουμε την κάθε παράμετρο και σε ποια κριτήρια έχει δοθεί το βάρος στην σχεδίαση της γεννήτριας για την εκάστοτε εφαρμογή.

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η συνάρτηση βελτιστοποίησης, ακολουθούν δύο παραδείγματα όπου επιλέχθηκαν για τις ίδιες παραμέτρους διαφορετικοί συντελεστές.

Παράδειγμα 1^ο

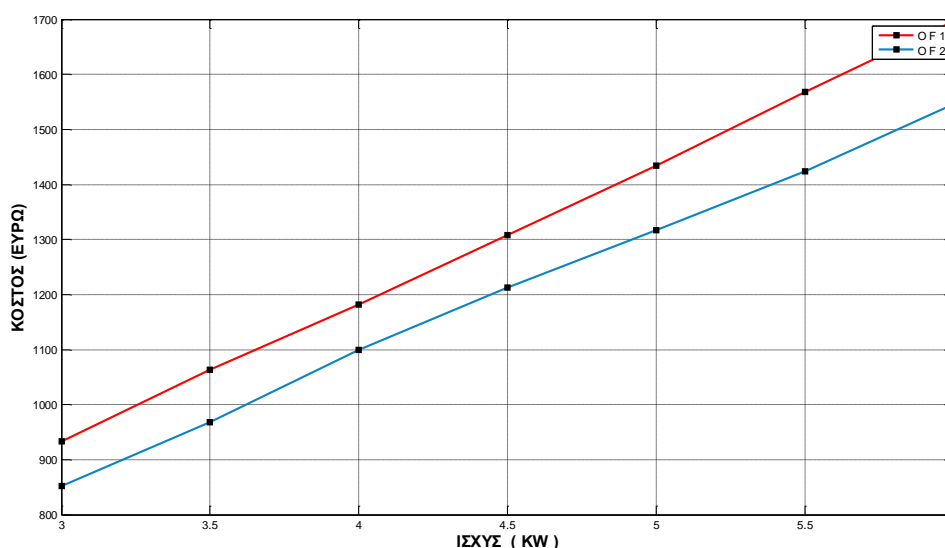
Σε αυτό το παράδειγμα, αναλύεται η αντικειμενική συνάρτηση για την βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με χρήση του μαγνήτη N40. Αρχικά, για την περίπτωση που έχει ήδη παρατεθεί, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση :

$$\text{output}=(\text{totalcost}+20*\text{totalmass})+100*(\text{penkat}+\text{penkat1}+\text{penkat2})$$

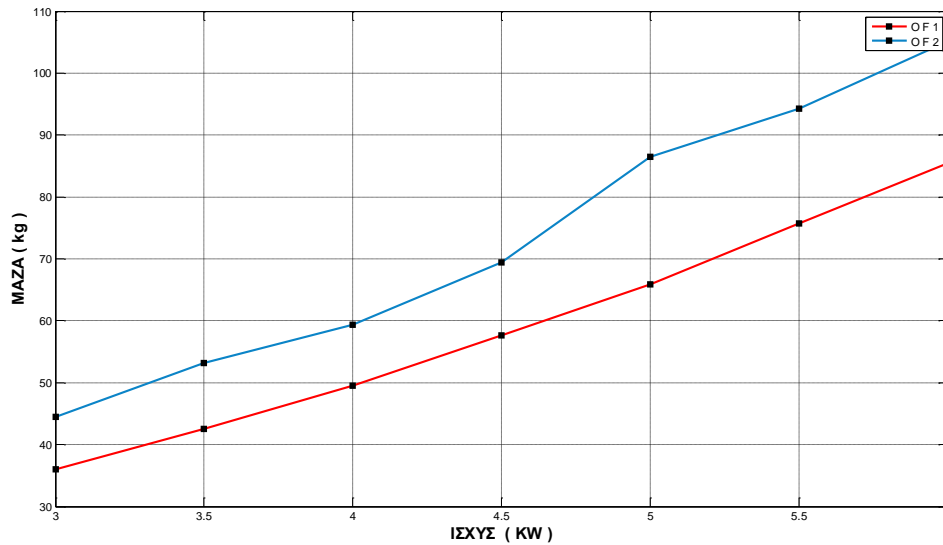
όπου παρατηρούμε και τους περιορισμούς στους οποίους έχουμε ήδη αναφερθεί. Στην συνέχεια, θέλοντας να δοθεί περισσότερο βάρος στην ελαχιστοποίηση του κόστους χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη συνάρτηση :

$$\text{output}=(\text{totalcost}+5*\text{totalmass})+100*(\text{penkat}+\text{penkat1}+\text{penkat2})$$

με διαφορετικό συντελεστή στο κριτήριο totalmass. Ακολουθούν οι καμπύλες σύγκρισης των δύο περιπτώσεων, καθώς και ο πίνακας με τα αποτελέσματα από τις βελτιστοποιήσεις χρησιμοποιώντας την δεύτερη συνάρτηση.



Σχήμα 5.49 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 για τις περιπτώσεις αντικειμενικής συνάρτησης OF1 και OF2



Σχήμα 5.50 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 για τις περιπτώσεις αντικειμενικής συνάρτησης OF1 και OF2

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (Euro)	ΜΑΖΑ(kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	852,199	44,4913	13.699	0,7289	0,9046
3.5	968,305	53,1512	17.174	0,6907	0,9094
4	1.099,20	59,3269	19.498	0,7318	0,9113
4.5	1.213,20	69,4707	23.158	0,715	0,916
5	1.317,50	86,4771	29.637	0,7017	0,9305
5.5	1.424	94,3158	32.528	0,676	0,9286
6	1.545,90	105,1829	36.779	0,6884	0,9329
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
24,11	59,16	271,3557	374	36,43	0,8477
26,27	52,45	303,8246	289	28,15	0,8421
27,22	59,26	323,7337	268	26,11	0,8289
28,07	63,27	352,8075	260	25,33	0,8243
26,49	60,66	399,126	221	21,53	0,7972
28,66	61,15	418,141	209	20,36	0,7829
28,81	58,08	444,6243	177	17,24	0,7823

Πίνακας 5.17 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 για την αντικειμενική συνάρτηση OF2

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα από τον Πίνακα 5.17 και συγκρίνοντας με τον Πίνακα 5.5 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε η πρώτη συνάρτηση, το κόστος είναι μειωμένο ενώ αντίστοιχα η μάζα και ο όγκος έχουν αυξηθεί. Ωστόσο, σημαντικό είναι να αναφερθεί πως παρά το γεγονός ότι το κόστος έχει μειωθεί αισθητά δεν έχει φθάσει την τιμή που κατέληξε η βελτιστοποίηση έχοντας ως μόνο κριτήριο το κόστος. Υπολογίζεται δηλαδή ακόμα η μάζα σαν κριτήριο προς βελτιστοποίηση αλλά με ιδιαίτερα μειωμένο το βάρος που δίνεται σε αυτήν σαν σχεδιαστικό κριτήριο.

Παράδειγμα 2^ο

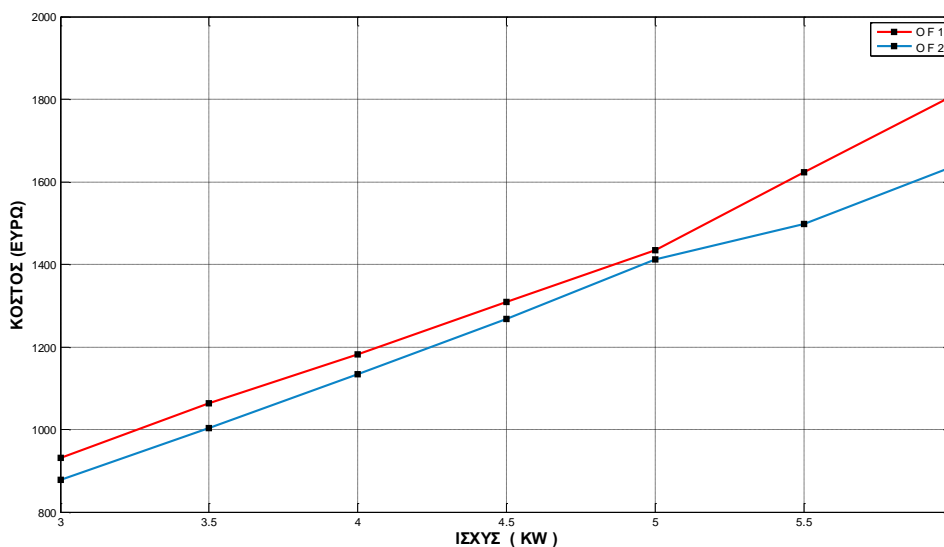
Στο δεύτερο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση της βελτιστοποίησης με κριτήρια το κόστος, την μάζα και τον όγκο. Η αρχική της μορφή ήταν :

$$\text{output}=(\text{totalcost}+20*\text{totalmass}+\text{Vgen}/15)+100*(\text{penkat}+\text{penkat1}+\text{penkat2})$$

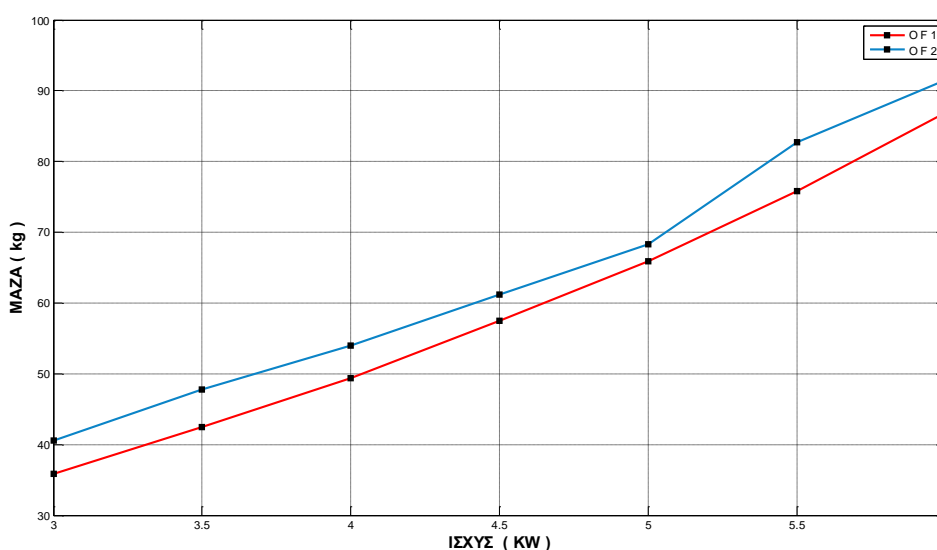
και στην συνέχεια αλλάχθηκαν οι συντελεστές ώστε να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση πάλι στο κόστος. Η νέα συνάρτηση είναι ως εξής :

$$\text{output}=(\text{totalcost}+5*\text{totalmass}+\text{Vgen}/100)+100*(\text{penkat}+\text{penkat1}+\text{penkat2})$$

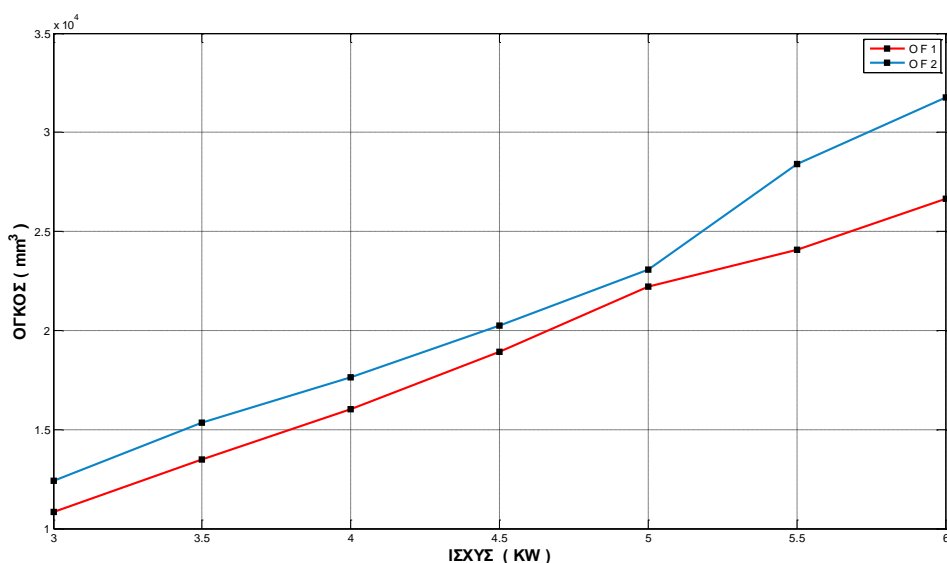
Ακολουθούν οι αντίστοιχες καμπύλες με τον πίνακα αποτελεσμάτων όσον αφορά τις σχεδιαστικές μεταβλητές.



Σχήμα 5.51 : καμπύλη ισχύος-κόστους για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για τις περιπτώσεις αντικειμενικής συνάρτησης OF1 και OF2



Σχήμα 5.52 : καμπύλη ισχύος-μάζας για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για τις περιπτώσεις αντικειμενικής συνάρτησης OF1 και OF2



Σχήμα 5.53 : καμπύλη ισχύος-όγκου για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για τις περιπτώσεις αντικειμενικής συνάρτησης OF1 και OF2

ΙΣΧΥΣ (KW)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)	ΜΑΖΑ (kg)	ΟΓΚΟΣ (mm ³)	ai	kd
3	877,8756	40,5303	12.398	0,7457	0,8887
3.5	1.003,10	47,8007	15.333	0,7128	0,8926
4	1.134,30	54,0291	17.637	0,719	0,893
4.5	1.267,50	61,2438	20.236	0,7301	0,8961
5	1.411,20	68,2642	23.085	0,7156	0,8962
5.5	1.498,10	82,7739	28.419	0,7404	0,9157
6	1.636,60	91,5276	31.780	0,6788	0,9108
la (mm)	wm (mm)	Rout (mm)	Nc	wc (mm)	efficiency
26,96	57,1	258,1507	350	34,1	0,8572
29,58	50,69	287,0841	269	26,2	0,8521
31,57	54,86	307,8978	249	24,26	0,8385
32,77	59,79	330,0224	238	23,18	0,8363
35,44	53,62	352,2562	189	18,41	0,8228
31,6	62,19	390,8387	192	18,7	0,8007
35,94	52,62	413,3009	158	15,39	0,7993

Πίνακας 5.18 : πίνακας αποτελεσμάτων για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για την αντικειμενική συνάρτηση OF2

Παρατηρούμε από τις καμπύλες αλλά και από την σύγκριση των Πινάκων 5.8 και 5.18, πως το κόστος έχει μειωθεί κατά μέσο όρο περίπου 50 Ευρώ σε κάθε ισχύ, ενώ υπάρχει μια γενική αύξηση στην μάζα και τον όγκο κατά 5-6 kg και 3000 mm³ αντίστοιχα. Παρατηρούμε δηλαδή, όπως ήταν αναμενόμενο, το βάρος να δίνεται στην μείωση το κόστους και τα υπόλοιπα σχεδιαστικά κριτήρια να μην λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψιν στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

5.6 Βελτιστοποίηση με την μέθοδο HPSO σε συχνότητα 50 Hz και ανάλυση των συσχετισμών ανάμεσα στις παραμέτρους

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, με την απλή μέθοδο του PSO είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί το βάρος που θέλει να ρίξει ο σχεδιαστής για την βελτιστοποίηση κάποιας συγκεκριμένης παραμέτρου, όπως επίσης να τονισθούν και οι συσχετισμοί ανάμεσα σε αυτά τα κριτήρια. Δηλαδή, χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα, αν σε μια σχεδίαση τα κριτήρια που έχουν τεθεί είναι το κόστος και η μάζα, το πόσο θα 'χάσει' σε κόστος ο σχεδιαστής εάν θέλει να έχει καλύτερα αποτελέσματα σε μάζα και το αντίστροφο. Έτσι λοιπόν, σε αυτήν την υποενοότητα, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος HPSO που αναλύθηκε ήδη και θα σχεδιαστούν οι καμπύλες Pareto Front που θα βοηθήσουν να αναλύσουμε τους συσχετισμούς στις πιθανές σχεδιάσεις.

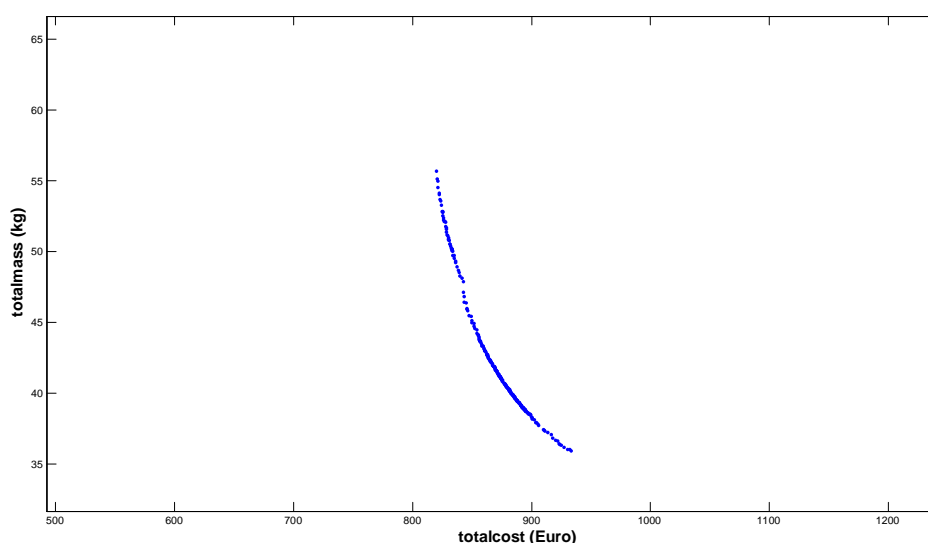
Αρχικά θα παρατεθούν οι καμπύλες που προέκυψαν από τα ζευγάρια σχεδιαστικών κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, έγινε ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς κόστος-μάζα, κόστος-όγκο και μάζα-όγκο, με χρήση των μαγνητών N40 και N45 και στο εύρος ισχύος που μελετήθηκε και πριν.

Στην συνέχεια, για να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα των καμπυλών Pareto Front, θα γίνει ένα είδος κανονικοποίησης. Για την ακρίβεια, θα επιλεγεί το ακραίο σημείο της καμπύλης, το οποίο για παράδειγμα στην περίπτωση κόστους-μάζας αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες τιμές κόστους και μάζας, τιμές με τις οποίες θα διαιρεθούν οι τιμές όλων των σημείων που αποτελούν την Pareto. Θα καταλήξουμε λοιπόν σε ένα γράφημα στο οποίο το ακραίο σημείο θα αντιστοιχεί σε μοναδιαία τιμή κόστους και μάζας και θα παρατηρήσουμε τους συσχετισμούς ανάμεσα στα εκάστοτε κριτήρια με χρήση ποσοστών.

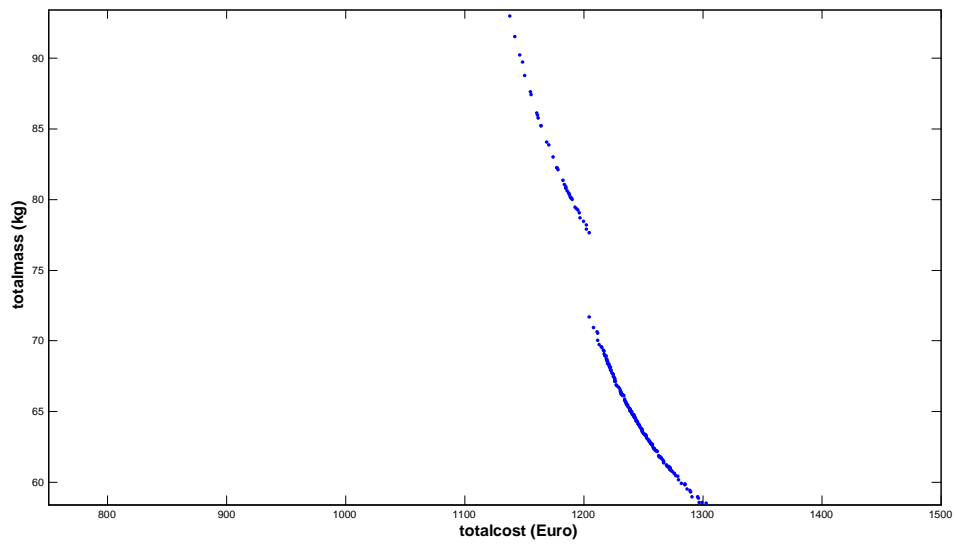
Εδώ θα παρουσιαστούν κάποια συγκεκριμένα παραδείγματα και το σύνολο των αποτελεσμάτων με την χρήση της μεθόδου HPSO παρατίθενται στο Παράρτημα Δ.

1^ο Παράδειγμα

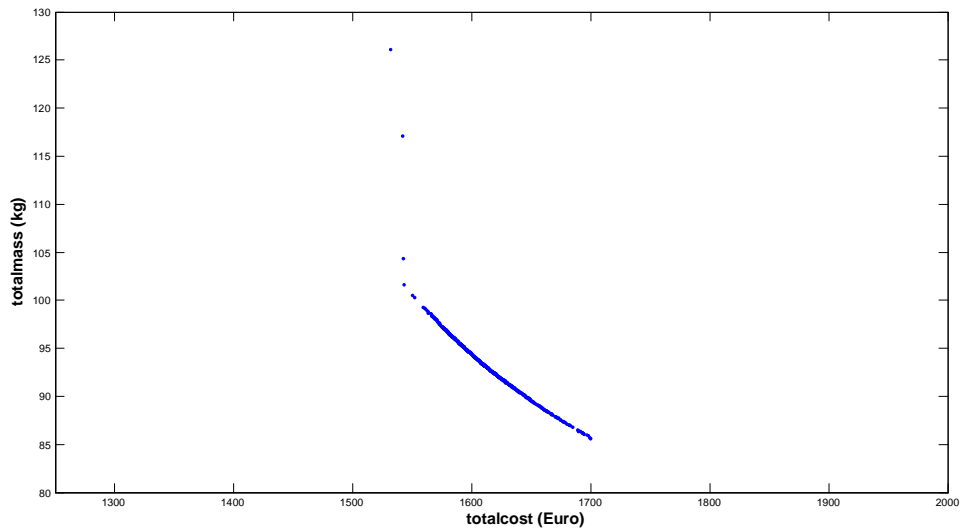
Σε αυτό το παράδειγμα θα παρουσιαστούν οι καμπύλες Pareto Front για τις ισχύς των 3, 4.5, και 6 KW για βελτιστοποίηση κόστους-μάζα με χρήση μαγνήτη N40 και στην συνέχεια θα προκύψουν τα κανονικοποιημένα γραφήματα όπου και θα συγκριθούν μεταξύ τους.



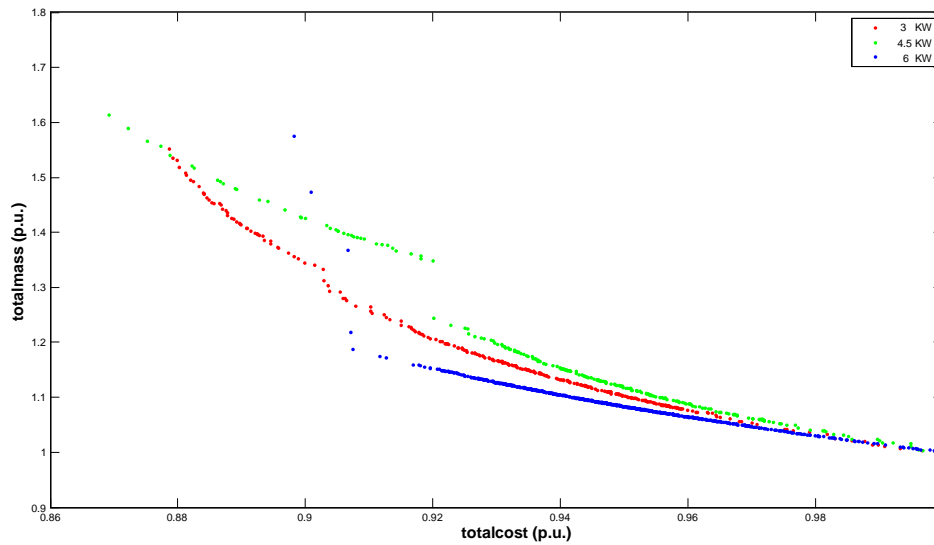
Σχήμα 5.54 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 3 KW



Σχήμα 5.55 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 4.5 KW



Σχήμα 5.56 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 6 KW

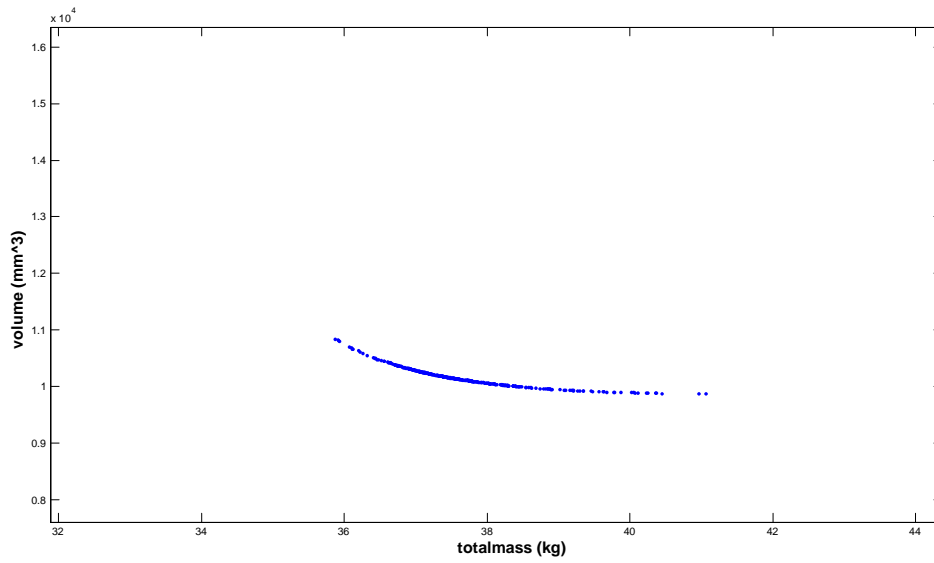


Σχήμα 5.57 : καμπύλες Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 3, 4.5, 6 KW σε ανά μονάδα σύστημα

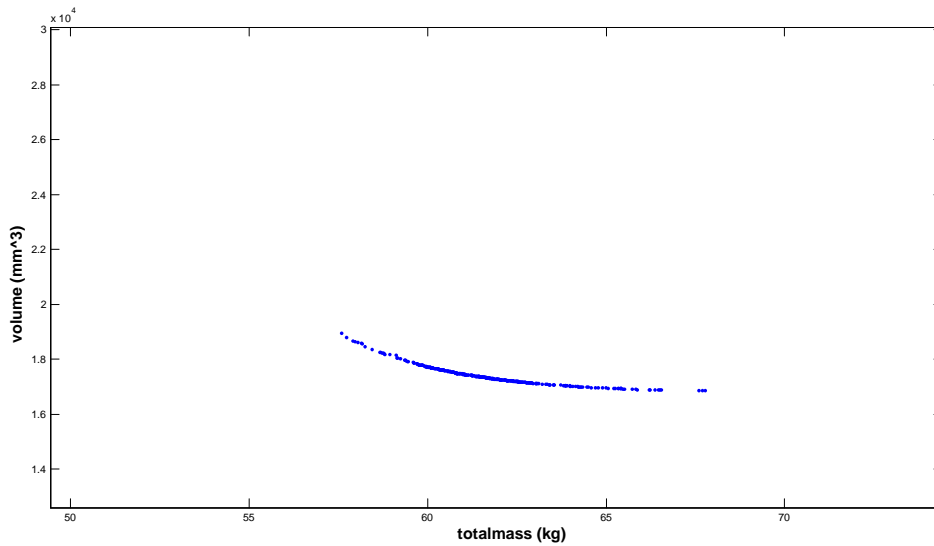
Στις 3 πρώτες καμπύλες διακρίνονται ξεκάθαρα οι συσχετισμοί ανάμεσα στην βελτιστοποίηση κόστους και στην βελτιστοποίηση μάζας, πρακτικά, πόσο δηλαδή κερδίζουμε στο κόστος δίνοντας βάρος σε αυτήν την παράμετρο, χάνοντας ταυτόχρονα σε μάζα και το αντίστροφο. Στην τελευταία καμπύλη παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες εκδοχές αυτών των γραφημάτων στους ίδιους x-y άξονες. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να συγκρίνουμε τους συσχετισμούς στις διαφορετικές ισχύς. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας την καμπύλη που αφορά την ισχύ των 3 KW, θα δούμε πως για μια βελτίωση στο κόστος της τάξης του 8-10% χρειάζεται μια αύξηση στην μάζα περίπου 20%. Για την ίδια βελτίωση στο κόστος στην ισχύ των 4.5 KW παρουσιάζεται μια αύξηση στην μάζα άνω του 25%, ενώ στα 6 KW αυτή η αύξηση είναι περίπου 15%. Για μικρή μείωση του κόστους δηλαδή, στις μικρότερες ισχύς υπάρχει ιδιαίτερη αύξηση στην μάζα σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση σε μεγαλύτερες ισχύς.

2° Παράδειγμα

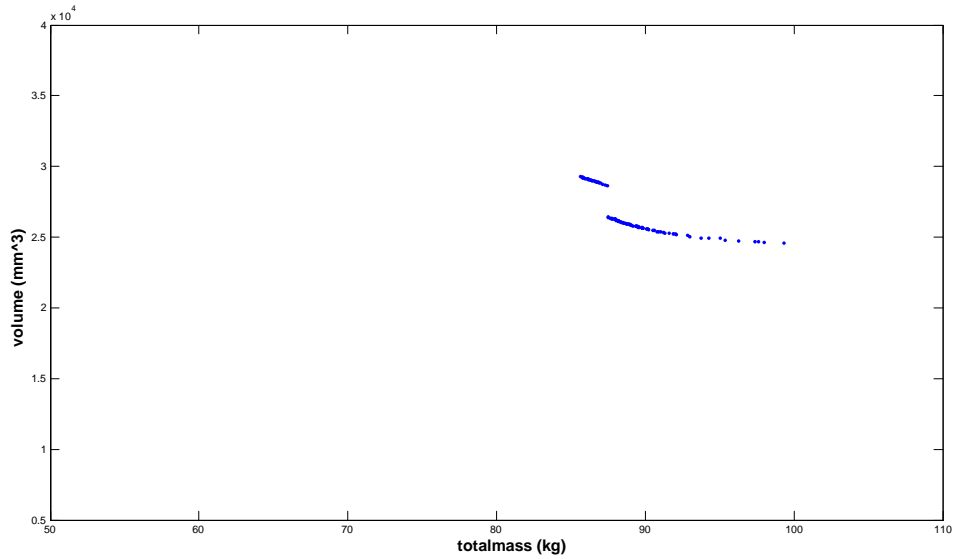
Εδώ βλέπουμε τις καμπύλες για τις ισχύς των 3, 4.5, και 6 KW για βελτιστοποίηση μάζα-όγκου αυτή την φορά, με χρήση μαγνήτη N40 και στην συνέχεια παρουσιάζονται πάλι τα κανονικοποιημένα γραφήματα όπου και συγκρίνονται μεταξύ τους.



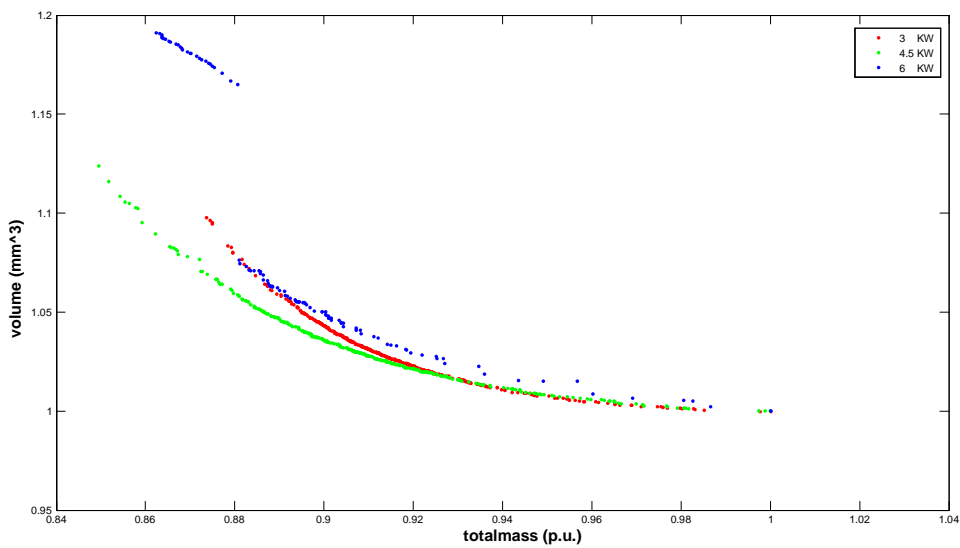
Σχήμα 5.58 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 3 KW



Σχήμα 5.59 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 4.5 KW



Σχήμα 5.60 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 6 KW

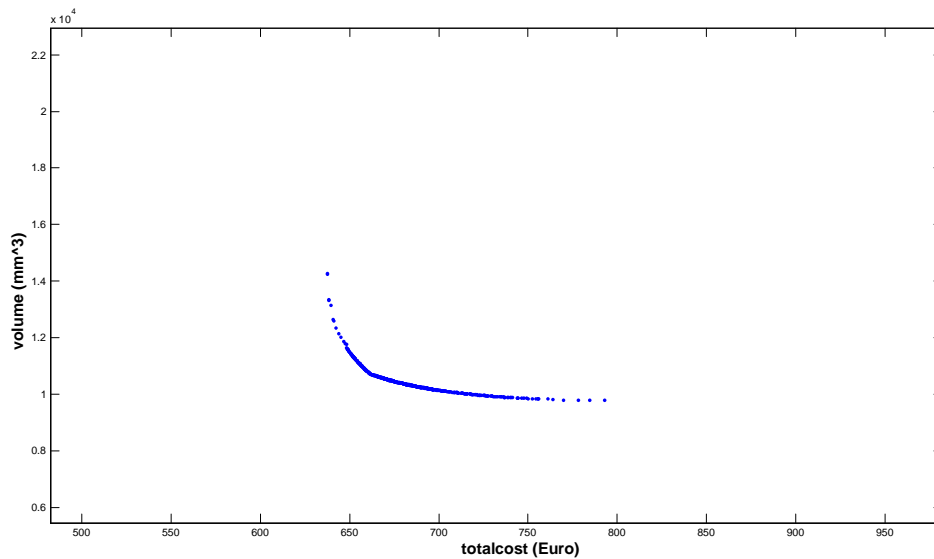


Σχήμα 5.61 : καμπύλες Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 3, 4.5, 6 KW σε ανά μονάδα σύστημα

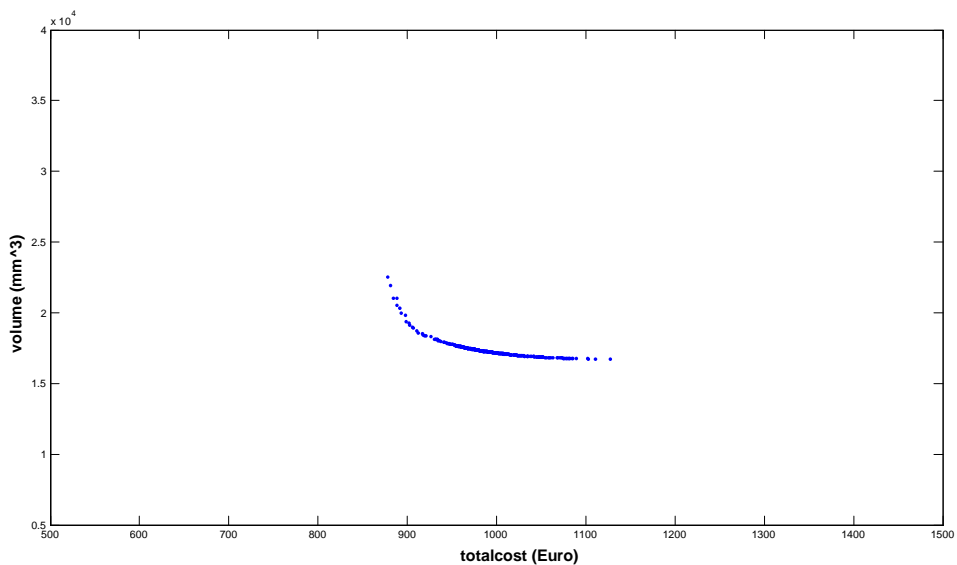
Παρατηρώντας εδώ το τελευταίο γράφημα με τις κανονικοποιημένες καμπύλες, είναι χαρακτηριστικό πως σε όλες τις ισχύς οποιαδήποτε αλλαγή σε κάποιο από τα μεγέθη, μάζα ή όγκο, επιφέρει μικρή αλλαγή στο άλλο. Διακρίνεται στο διάγραμμα πως οι τρεις καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν και για μια αλλαγή της τάξης του 10% στην μάζα η αλλαγή στον όγκο είναι 3.5-5%. Το αποτέλεσμα αυτό, μάλλον λογικό θα το χαρακτηρίζαμε αφού όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων με την μέθοδο PSO και βάση της θεωρητικής σχεδίασης, η βελτιστοποίηση του ενός από τα δύο αυτά μεγέθη πρακτικά σημαίνει και βελτιστοποίηση του άλλου.

3° Παράδειγμα

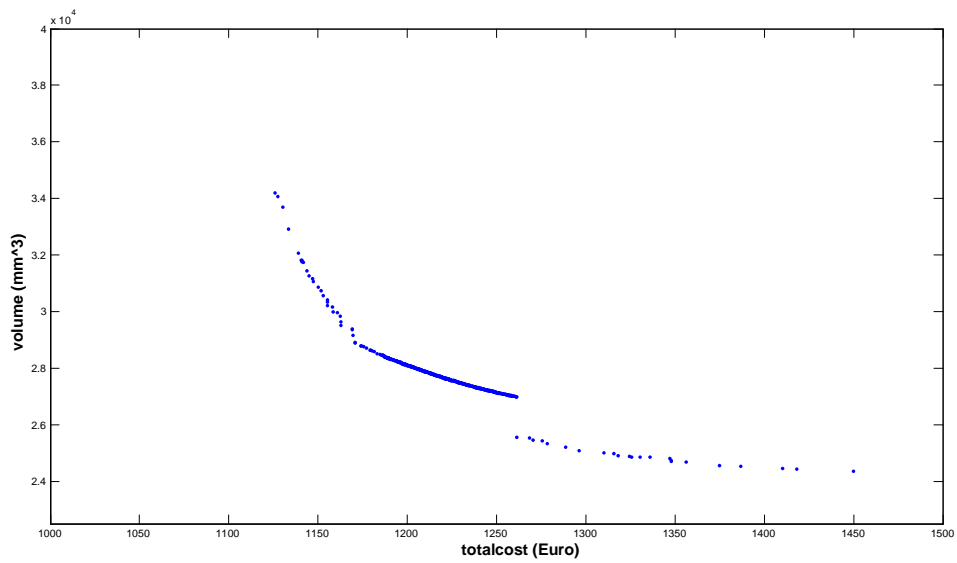
Εδώ παρατίθενται οι καμπύλες για τις ισχύς των 3, 4.5, και 6 KW για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου, με χρήση του μαγνήτη N45 αυτή την φορά και στην συνέχεια παρατίθενται τα κανονικοποιημένα γραφήματα.



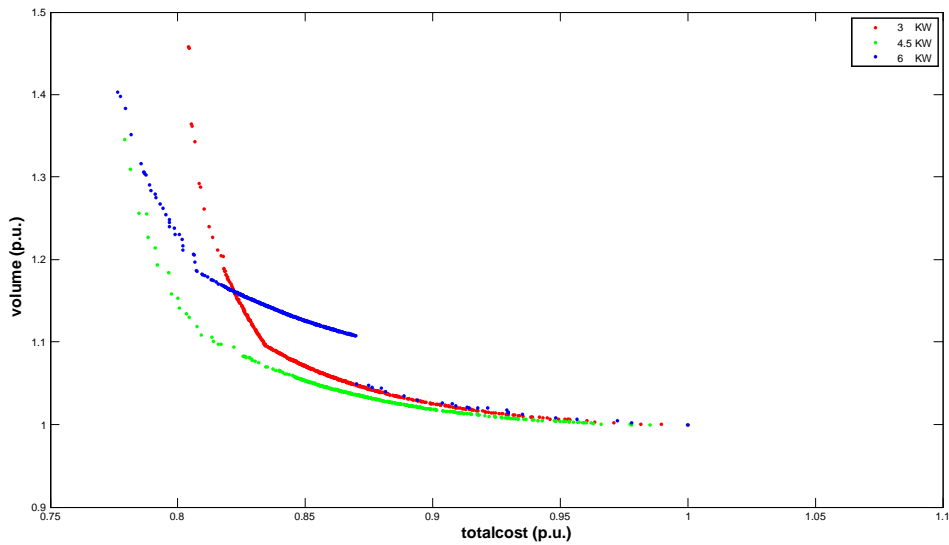
Σχήμα 5.62 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3 KW



Σχήμα 5.63 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 4.5 KW



Σχήμα 5.64 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 6 KW

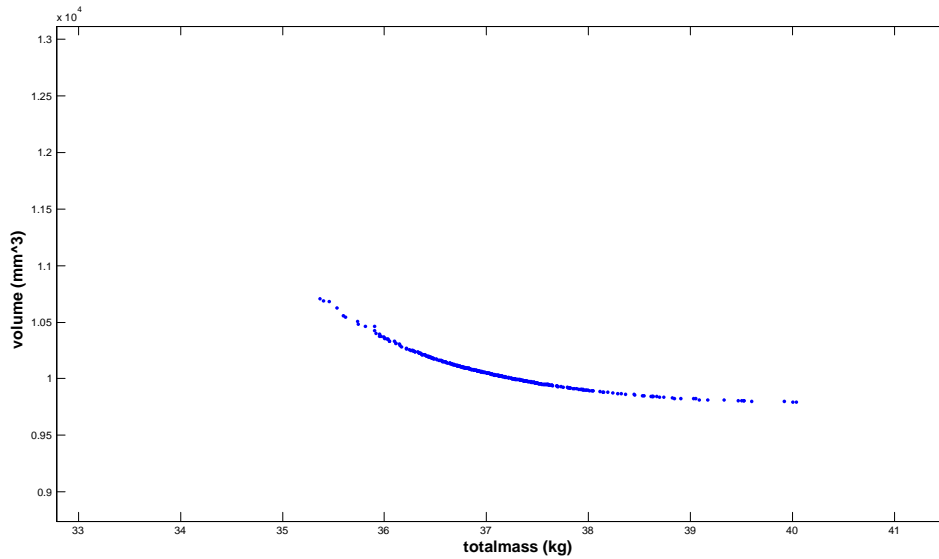


Σχήμα 5.65 : καμπύλες Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3, 4.5, 6 KW σε ανά μονάδα σύστημα

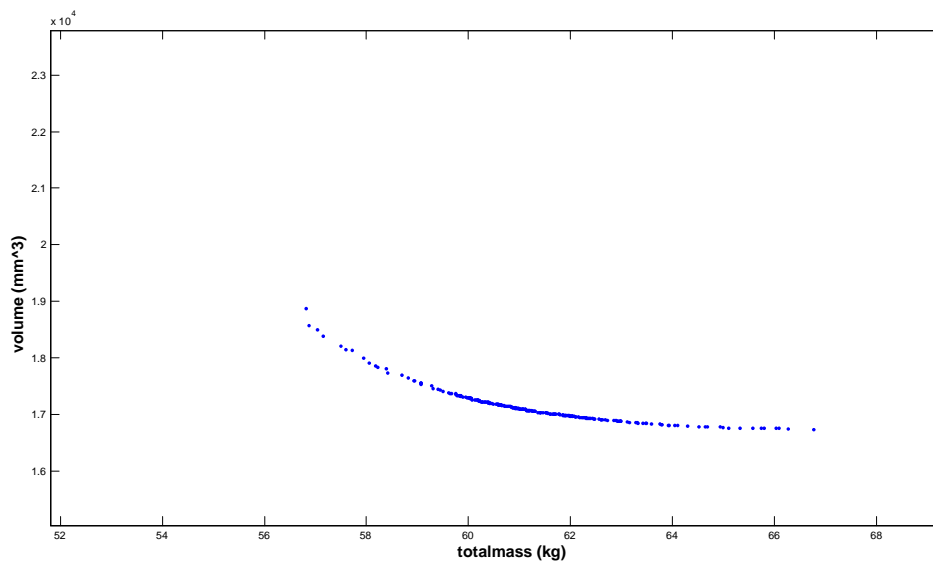
Καταρχάς σε αυτό το παράδειγμα μπορούμε να δούμε πως οι αρχικές καμπύλες κινούνται σε ένα μεγάλο εύρος κόστους και όγκου. Περνώντας μετά στο κανονικοποιημένο γράφημα, παρατηρούμε πως στις ισχύς των 3 και 4.5 KW, μια αλλαγή της τάξης του 15% στο κόστος, επιφέρει αύξηση του όγκου κατά 8-10%. Σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες ισχύς όπου η αύξηση είναι μεγαλύτερη και αγγίζει το 15%. Για μικρότερα ποσοστά μείωσης του κόστους, βλέπουμε πως οι καμπύλες συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό.

4^ο Παράδειγμα

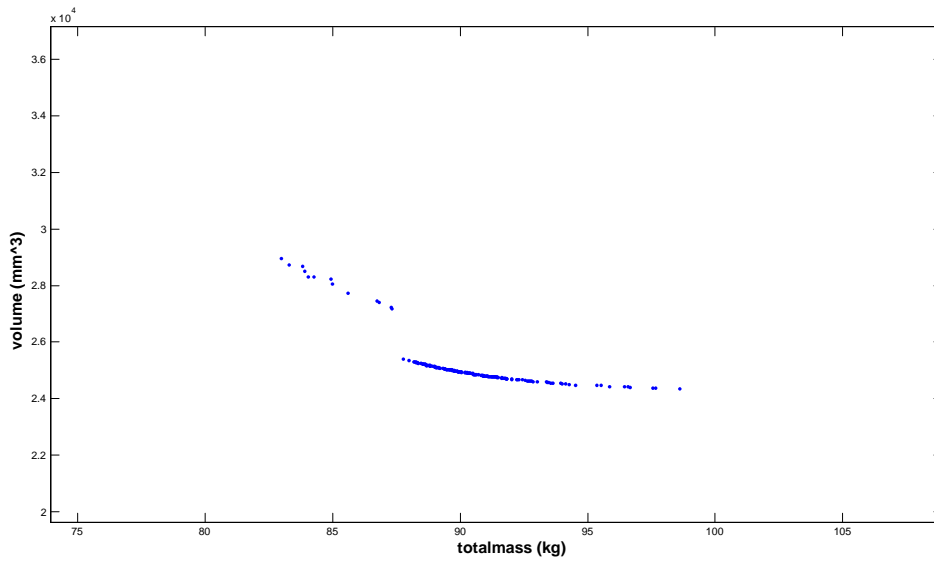
Στο 4^ο παράδειγμα χρησιμοποιούνται οι ίδιες ισχύς με τα προηγούμενα, οι οποίες έχουν θεωρηθεί ενδεικτικές για όλο το εύρος της ισχύος. Εδώ έχουμε χρήση πάλι του μαγνήτη N45 και ο συνδυασμός βελτιστοποίησης που εξετάζεται είναι της μάζας με τον όγκο.



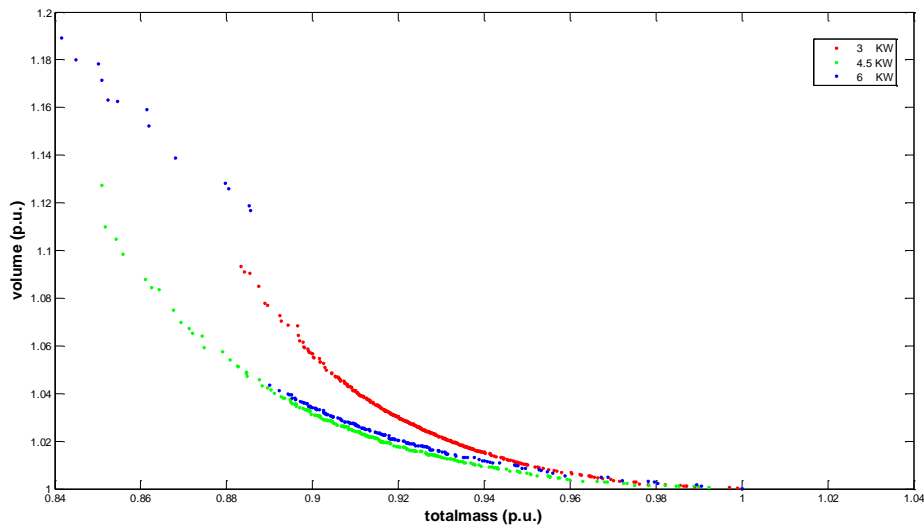
Σχήμα 5.66 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3 KW



Σχήμα 5.67 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 4.5 KW



Σχήμα 5.68 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 6 KW

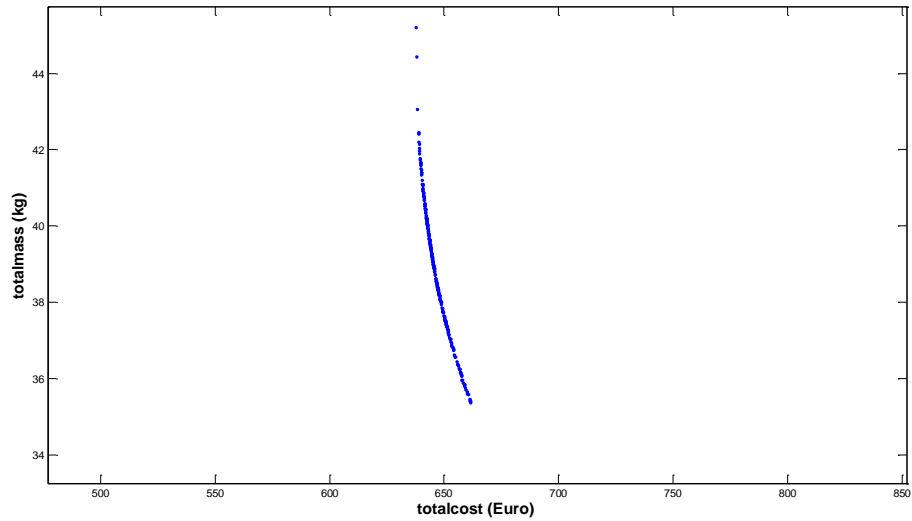


Σχήμα 5.69 : καμπύλες Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας-όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3, 4.5, 6 KW σε ανά μονάδα σύστημα

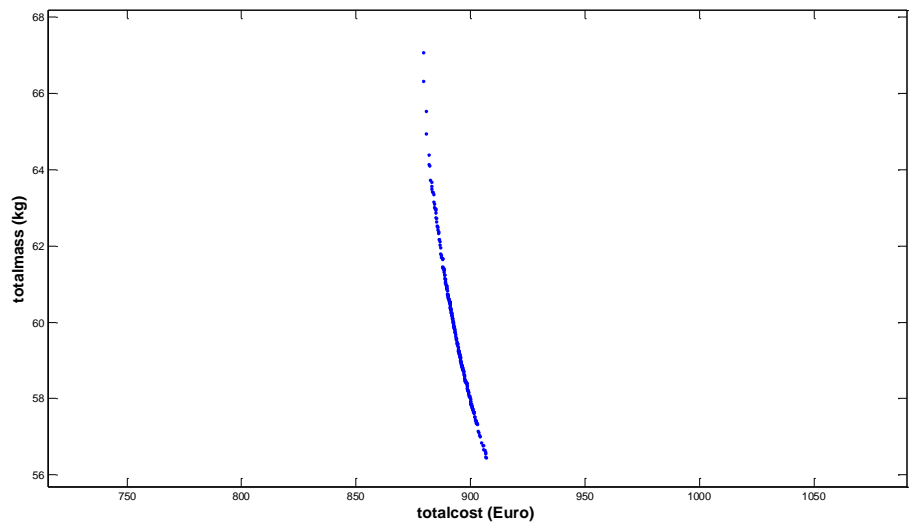
Αρχικά παρατηρούμε στα διαγράμματα που παρουσιάζουν τους συσχετισμούς με κανονικά μεγέθη, ότι στις χαμηλότερες ισχύς η μάζα και ο όγκος κινούνται σε μικρό εύρος, ενώ στην ισχύ των 6 KW η καμπύλη Pareto εκτείνεται σε μεγαλύτερο φάσμα τιμών. Κοιτώντας στην συνέχεια τις κανονικοποιημένες χαρακτηριστικές, βλέπουμε πως για μικρές μειώσεις της μάζας, έως και 5%, οι καμπύλες συμπίπτουν. Για μεγαλύτερες μειώσεις, της τάξης του 10%, οι καμπύλες των 4.5 και 6 KW συνεχίζουν να συμπίπτουν και οδηγείται η σχεδίαση σε μια αύξηση του όγκου περίπου 3% σε αντίθεση με την καμπύλη των 3 KW η οποία βλέπουμε ότι καταλήγει σε αύξηση του όγκου λίγο πάνω από το 5%.

5° Παράδειγμα

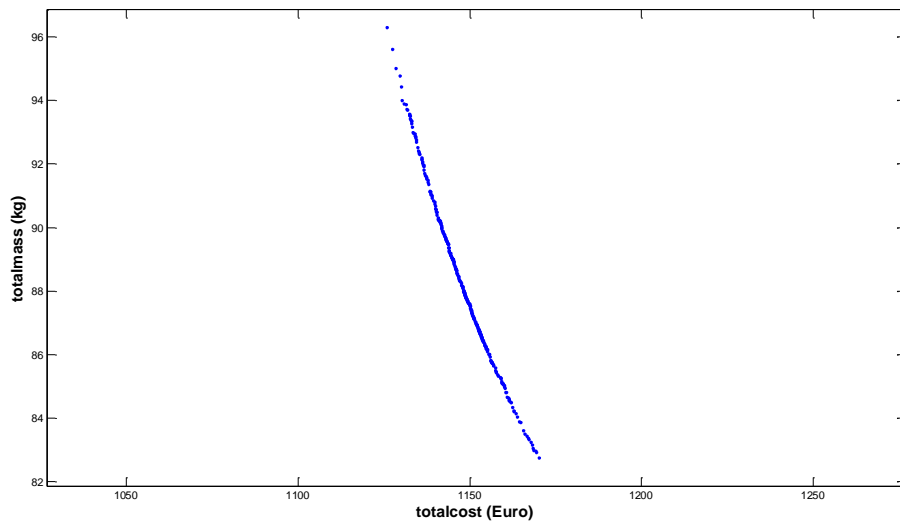
Στο τελευταίο παράδειγμα έχουν τεθεί και παρουσιάζονται σαν κριτήρια προς βελτιστοποίηση το κόστος και η μάζα με χρήση πάλι του μαγνήτη N45. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον συγκεκριμένο μαγνήτη, αφού αποτελεί την βέλτιστη λύση όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 5.4, σε σχέση βέβαια με τον μαγνήτη N40.



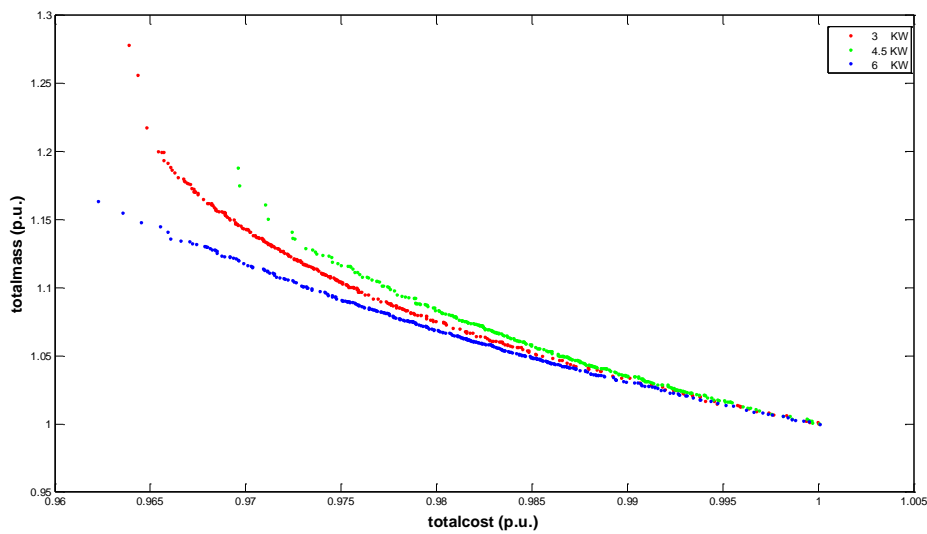
Σχήμα 5.70 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 3 KW



Σχήμα 5.71 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 4.5 KW



Σχήμα 5.72 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 6 KW



Σχήμα 5.73 : καμπύλες Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους-μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 3, 4.5, 6 KW σε ανά μονάδα σύστημα

Παρατηρώντας τα αρχικά διαγράμματα, θα δούμε πως οι καμπύλες κινούνται σε μικρό εύρος έχοντας αρκετά μικρή διαφορά μεταξύ αρχικών και τελικών τιμών, όσον αφορά την μάζα αλλά κυρίως το κόστος. Περνώντας στην συνέχεια στις κανονικοποιημένες χαρακτηριστικές, αρχικά παρατηρούμε πως το κόστος κυμαίνεται συνολικά σε ένα εύρος της τάξης του 4%. Όσον αφορά τους συσχετισμούς μεταξύ των κριτηρίων, βλέπουμε πως μια μείωση της τάξης του 3% στο κόστος, επιφέρει αύξηση περίπου 12% στην ισχύ των 6 KW, 15% στην ισχύ των 3 KW και κοντά στο 18% στα 4.5 KW.

Υποσημείωση :

Στο τέλος του συγκεκριμένου κεφαλαίου, για να έχουμε πιο ολοκληρωμένη εικόνα του συνόλου των διατάξεων στις οποίες κατέληξε η διαδικασία των βελτιστοποιήσεων, θα αναφερθούμε στο αριθμό των πόλων. Για την ακρίβεια, παρακάτω παρατίθεται δύο πίνακες που αναφέρονται στους πόλους των διατάξεων που έχουν περιγραφεί πλήρως στους πίνακες που έχουν προηγηθεί. Πιο συγκεκριμένα, ο πίνακας 5.19 αφορά τις περιπτώσεις των βελτιστοποιήσεων όπου το κριτήριο της μάζας ή του όγκου εμπεριέχονται στην αντικειμενική συνάρτηση σαν μοναδικά κριτήρια ή σε συνδυασμό με άλλα (με εξαίρεση την ισχύ των 6 KW που αφορά μόνο το κριτήριο του όγκου). Ο πίνακας 5.20 αφορά όλες τις υπόλοιπες υποπεριπτώσεις.

<u>ΙΣΧΥΣ</u>	<u>ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΩΝ</u>
3	20
3.5	24
4	24
4.5	24
5	28
5.5	28
6	28

Πίνακας 5.19 : αριθμός πόλων σε κάθε ισχύ όταν στην αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνεται η μάζα ή ο όγκος

<u>ΙΣΧΥΣ</u>	<u>ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΩΝ</u>
4	20
3.5	24
4	24
4.5	28
5	28
5.5	28
6	32

Πίνακας 5.20 : αριθμός πόλων σε κάθε ισχύ για τις υπόλοιπες υποπεριπτώσεις

Παρατηρούμε στον Πίνακα 5.19, πως οι πόλοι στις ισχύς των 4.5 KW και 6 KW (όπου είναι και οι ισχύς που παρουσιάζεται διαφορά) είναι πιο περιορισμένοι, κάτι το οποίο είναι λογικό, αφού για να περιοριστεί η μάζα και ο όγκος στην εκάστοτε διάταξη ο αλγόριθμος της αρχικής διαστασιολόγησης καταλήγει σε μειωμένη εξωτερική ακτίνα, κάτι που συνεπάγεται μειωμένο αριθμό πόλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Θερμική ανάλυση σύγχρονης γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών με το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων

6.1 Σημασία της θερμικής ανάλυσης

Κατά την διάρκεια της λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής δημιουργείται θερμότητα που οφείλεται στις απώλειες ισχύος στα μαγνητικά και ηλεκτρικά κυκλώματα αλλά και στις μηχανικές απώλειες (απώλειες περιστροφής). Για να εξασφαλιστεί μια μακρά διάρκεια ζωής για την μηχανή πρέπει αυτές οι απώλειες να μειωθούν όσον το δυνατόν περισσότερο ώστε οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται στην μηχανή να είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων για τα υλικά, όπως τις μονώσεις και τους μόνιμους μαγνήτες. Επιπρόσθετα, χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας θα μειώσουν και τις απώλειες στα τυλίγματα, καθώς αυτές εξαρτώνται από τον θερμοκρασιακό συντελεστή της ηλεκτρικής αντίστασης.

Παρά το γεγονός ότι στις ηλεκτρικές μηχανές ακτινικής ροής έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα όσον αφορά την θερμική ανάλυση, στον τομέα των μηχανών αξονικής ροής δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Δεδομένου ότι οι ηλεκτρικές μηχανές αξονικής ροής παρουσιάζουν ένα σχετικά μεγάλο διάκενο αέρα το οποίο σε κάποιες ειδικές κατηγορίες είναι και πολλαπλό, η γενικότερη αντίληψη είναι ότι έχουν καλύτερο αερισμό σε σχέση με τις αντίστοιχες ακτινικής ροής [30,31]. Από την στιγμή όμως που η εξωτερική διάμετρος αυξάνεται αργά σε σχέση με την ισχύς εξόδου, κάτι που είναι εμφανές και από τον τύπο [31] :

$$D_{out} \propto \sqrt[3]{P_{out}}$$

η υπάρχουσα ικανότητα απαγωγής της θερμότητας μπορεί να είναι ανεπαρκής να αντιμετωπίσει την υπερβολική θερμότητα σε υψηλές βαθμίδες ισχύος, κάτι που συνεπάγεται ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν πιο δραστικοί τρόποι ψύξης.

6.2 Τρόποι μετάδοσης της θερμότητας

Με τον όρο μετάδοση θερμότητας εννοούμε το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στο εσωτερικό ενός σώματος ή μεταξύ σωμάτων λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Η μετάδοση της θερμότητας είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες στην ανάλυση του και τα κυριότερα αντικείμενα της είναι οι τρόποι και οι ρυθμοί που γίνεται αυτή η μετάδοση. Η θερμότητα λοιπόν, μεταφέρεται μεταξύ των διάφορων λειτουργικών κομματιών της ηλεκτρικής μηχανής αλλά και από την μηχανή στο περιβάλλον με τον συνδυασμό τριών διαφορετικών μηχανισμών, της αγωγής, της συναγωγής και της ακτινοβολίας.

6.2.1 Η Αγωγή

Η αγωγή είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται στο εσωτερικό ενός στερεού ή ακίνητου ρευστού, όταν στο μέσο υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ενός υλικού, που οδηγούν στη μεταφορά ενέργειας από τα σωματίδια μεγαλύτερης ενέργειας σε εκείνα που έχουν χαμηλότερη ενέργεια.

Ο ρυθμός αυτής της αγωγής δίνεται από τον νόμο του Fourier

$$\Delta P_c = -kA \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{kA}{l} (\theta_{hot} - \theta_{cold}) \quad (6.1)$$

Όπου ΔP_c είναι ο ρυθμός αγωγής της θερμότητας, A είναι η επιφάνεια από όπου περνάει η ροή, l είναι το μήκος της διαδρομής από όπου διέρχεται η ροή και k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Η τελευταία προσδιορίζεται πειραματικά και δεν επηρεάζεται από θερμοκρασιακές αλλαγές. Στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί δίνονται οι θερμικές ιδιότητες από υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μηχανών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών [14].

Material (20°C)	Grade	ρ kg/m ³	c_p J/(kg °C)	k W/(m °C)
Air	-	1.177	1005	0.0267
Water	-	1000	4184	0.63
Mica	-	3000	813	0.33
Epoxy resin	-	1400	1700	0.5
Copper	-	8950	380	360
Aluminum	Pure	2700	903	237
	Alloy (cast)	2790	883	168
Steel	1% Carbon	7850	450	52
	Silicon	7700	490	20-30
Permanent magnet	Sintered NdFeB	7600 to 7700	420	9

Πίνακας 6.1: Θερμικές Ιδιότητες από χρησιμοποιούμενα Υλικά

6.2.2 Η Συναγωγή

Συναγωγή είναι η μετάδοση θερμότητας που πραγματοποιείται μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού σε επαφή με την επιφάνεια, όταν αυτά βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία.

Η συναγωγή μπορεί να διακριθεί βάση της ροής του ρευστού σε :

- Εξαναγκασμένη συναγωγή, όταν η ροή προκαλείται από ανεμιστήρες, αντλίες ή γενικότερα από εξωτερικά μέσα.
- Ελεύθερη/φυσική συναγωγή, όταν η ροή προκαλείται από τις διαφορετικές πυκνότητες που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στον όγκο του ρευστού. Η διαφορά στην πυκνότητα συνεπάγεται δυνάμεις άνωσης που τελικά προκαλούν και τη ροή.
- Συνδυασμένη συναγωγή, όταν οι δύο μορφές συναγωγής που αναφέρθηκαν συνυπάρχουν. Αυτό συμβαίνει όταν οι δυνάμεις άνωσης λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών είναι μεγάλες, ενώ η ταχύτητα του ρευστού λόγω της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας είναι μικρή.

Ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας μέσω της συναγωγής, ΔP_u δίνεται από τον νόμο του Newton για την ψύξη :

$$\Delta P_u = hA(\theta_{hot} - \theta_{cold}) \quad (6.2)$$

όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής. Ο συγκεκριμένος συντελεστής προσδιορίζεται πειραματικά και είναι μια σύνθετη συνάρτηση που εξαρτάται από την κατεύθυνση της επιφάνειας, τις ιδιότητες του υγρού, την θερμοκρασία και την ταχύτητα. Ο συντελεστής h αυξάνεται με την ταχύτητα του μέσου ψύξης σε σχέση με την επιφάνεια που ψύχεται. Για μια επιφάνεια με εξαναγκασμένο αερισμό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εμπειρική σχέση [32] :

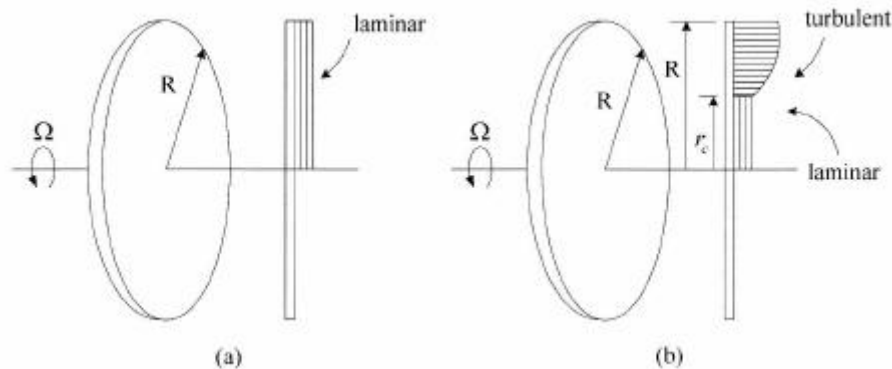
$$h_f = h_n(1 + c_h \sqrt{u}) \quad (6.3)$$

Όπου h_f και h_n είναι οι συντελεστές για την μετάδοση θερμότητας για την εξαναγκασμένη και φυσική συναγωγή αντίστοιχα, u είναι η ταχύτητα του μέσου ψύξης και c_h ($= 0.5-1.3$) είναι ένας εμπειρικός συντελεστής.

Μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής σε δισκοειδή συστήματα

Το περιστρεφόμενο δισκοειδές σύστημα παίζει σημαντικό ρόλο στον ανεμισμό και στην ψύξη των ηλεκτρικών μηχανών αξονικής ροής. Για να υπολογιστούν ακριβώς οι συντελεστές για την μεταφορά μέσω συναγωγής χρειάζεται θεωρητική και πειραματική επιβεβαίωση λόγω της πολυπλοκότητας της ροής.

Σε αυτήν την υποενότητα θα υπολογιστούν οι συντελεστές αυτοί για διάφορα μέρη των συγκεκριμένων μηχανών, βάση υπαρχόντων μοντέλων.



Σχήμα 8.1 : Ελεύθερα περιστρεφόμενος δίσκος : (a) σε ελασματώδης ροή, (b) μετάβαση από ελασματώδης σε ταραχώδη ροή

Ελεύθερα περιστρεφόμενος δίσκος

Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής στην εξωτερική επιφάνεια ενός περιστρεφόμενου δίσκου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο [33] :

$$\bar{h} = \frac{k}{R} \overline{Nu} \quad (6.4)$$

όπου R είναι η ακτίνα του δίσκου και ο μέσος αριθμός Nusselt, \overline{Nu} , δίνεται ανάλογα με τις συνθήκες ροής ως ακολούθως :

- Για συνδυασμό ελεύθερης συναγωγής και περιστροφής σε ελασματώδη ροή :

$$\overline{Nu} = \frac{2}{5} (\text{Re}^2 + Gr)^{1/4} \quad (6.5)$$

$$Gr = \frac{\beta g R^3 \pi^{(3/2)} \Delta\theta}{\nu^2} \quad (6.6)$$

Όπου Re είναι ο αριθμός του Reynolds, β είναι ο συντελεστής της θερμικής επέκτασης, ν είναι το κινηματικό ιξώδες του υγρού και Δθ είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του δίσκου και του περιβάλλοντος αέρα.

- Για συνδυασμό ελασματώδους και ταραχώδους ροής με μετάβαση σε ακτίνα r_c :

$$\overline{Nu} = 0.015 \text{Re}^{\frac{4}{5}} - 100 \left(\frac{r_c}{R}\right)^2 \quad (6.7)$$

όπου

$$r_c = (2.5 \cdot 10^5 \nu / \Omega)^{1/2} \quad (6.8)$$

Η γωνιακή ταχύτητα είναι $\Omega = 2\pi n$ όπου n είναι η περιστροφική ταχύτητα σε στροφές/δευτερόλεπτο. Συγκρίνοντας την δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ενός περιστρεφόμενου δίσκου και ενός στατικού δίσκου, θα δούμε ότι αν έχουμε έναν μεταλλικό δίσκο με διάμετρο 0.4 m που περιστρέφεται στις 1.260 ΣΑΛ, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής θα υπολογιστεί περίπου 41 $W / (m^2 C)$, ο οποίος είναι 10 φορές μεγαλύτερος από την περίπτωση όπου ο δίσκος θα ήταν ακίνητος.

Ακτινική περιφέρεια του δρομέα

Οι σχέσεις για την μεταφορά θερμότητας στην περιφέρεια του δρομέα είναι αρκετά όμοιες με αυτές ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου στον αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δίνεται από τον τύπο :

$$\overline{h}_p = \frac{k}{D_{out}} \cdot \overline{Nu} \quad (6.9)$$

όπου D_{out} είναι η εξωτερική διάμετρος του δρομέα και ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται από τον τύπο :

$$\overline{Nu} = 0,133 R_{eD}^{(2/3)} \text{Pr}^{(1/3)} \quad (6.10)$$

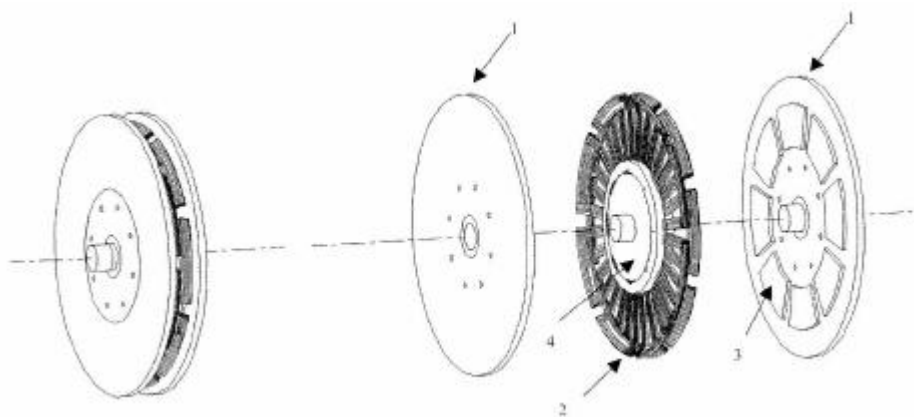
και ο αριθμός του Reynolds στην περιφέρεια του δίσκου δίνεται από τον τύπο :

$$R_{eD} = \Omega \frac{D_{out}^2}{\nu} \quad (6.11)$$

Πρέπει να σημειωθεί πως για την χρησιμοποίηση της έκφρασης για το h_r υποθέεται ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στον κύλινδρο. Από την στιγμή που το h_r είναι ανάλογο της γωνιακής ταχύτητας Ω , συνεπάγεται ότι με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας, η περιφέρεια του δρομέα παίζει όλο και σπουδαιότερο ρόλο στην απομάκρυνση της θερμότητας.

Σύστημα δρομέα-στάτη

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, μια γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών αποτελείται από περιστρεφόμενους και στατικούς δίσκους. Η σχέσεις μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ενός περιστρεφόμενου και ενός στατικού δίσκου έχουν τεράστια σημασία για τους θερμικούς υπολογισμούς. Λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων, υπάρχει μια εξαναγκασμένη ροή ανάμεσα σε αυτούς τους δίσκους, που αυξάνει την τοπική μεταφορά θερμότητας σε σχέση με έναν ελεύθερο δίσκο. Η αύξηση αυτή εξαρτάται, από τον λόγο $G=g/R$, όπου g είναι η απόσταση μεταξύ στάτη και δρομέα και R είναι η ακτίνα του δίσκου, από τον ρυθμό ροής μάζας και την περιστροφική ταχύτητα του συστήματος.



Σχήμα 6.2 : Αναλυτική άποψη γεννήτριας AFPM : 1-δίσκος δρομέα, 2-τύλιγμα στάτη, 3-μόνιμοι μαγνήτες και 4-πυρήνας

Έχοντας ακτινικά κανάλια, μια γεννήτρια τέτοιου τύπου που ψύχεται από αέρα, μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας ανεμιστήρας ανεπαρκούς σχεδίασης από άποψη ροής ρευστών. Η εφαιπτόμενη συνιστώσα της ταχύτητας είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ακτινική συνιστώσα. Έτσι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας κοντά στον περιστρεφόμενο δίσκο εξαρτάται περισσότερο από τον αριθμό περιστροφής Reynolds Re_r .

Στην βιβλιογραφία [34], δίνεται μια προσεγγιστική λύση για την ροή ανάμεσα σε έναν περιστρεφόμενο και έναν στατικό δίσκο, που συσχετίζει τον μέσο αριθμό Nusselt με τον στιγμιαίο συντελεστή της επιφάνειας του δρομέα που βρίσκεται προς την πλευρά του στάτη, C_{mo} και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\overline{Nu} = Re_r C_{mo} / \pi \quad (6.12)$$

$$C_{mo} Re_r^{1/5} = 0.333 \lambda_T$$

Όπου λ_T είναι μια παράμετρος, που δίνεται σαν συνάρτηση του ογκομετρικού ρυθμού ροής Q , από την παρακάτω εξίσωση :

$$\lambda_T = \frac{Q}{\nu R} Re_r^{-4/5} \quad (6.13)$$

Αντικαθιστώντας το λT στις παραπάνω εξισώσεις, ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται πλέον από την σχέση :

$$\overline{Nu} = 0.333 \frac{Q}{\pi \nu R} \quad (6.14)$$

Όπως προκύπτει από την βιβλιογραφία [35], για έναν μικρό λόγω διακένου ($G < 0.1$), η ροή ανάμεσα στον δρομέα και τον στάτη μπορεί να θεωρηθεί σαν όριο. Παρόλο που δεν είναι ακριβές πως ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον στάτη στον αέρα είναι κοντά σε αυτόν από τον αέρα στον δρομέα, στην προσομοίωση του θερμικού κυκλώματος μπορούν να θεωρηθούν ίδιοι.

6.2.3 Ακτινοβολία

Είναι ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σύμφωνα με την κλασσική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, ή από φωτόνια, σύμφωνα με την κβαντομηχανική. Η ένταση της ροής ενέργειας που εκπέμπεται εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος και τη φύση της επιφάνειάς του. Η μετάδοση της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας δεν απαιτεί την ύπαρξη μέσου και μπορεί να γίνει και στο κενό, αντίθετα με την αγωγή και την συναγωγή.

Η ακτινοβολία που ανταλλάσσεται ανάμεσα σε δύο επιφάνειες με διαφορά θερμοκρασίας είναι συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας, του συντελεστή εκπομπής και της γεωμετρίας των δύο επιφανειών. Αν λοιπόν μεταφέρεται θερμότητα μέσω ακτινοβολίας μεταξύ δύο επιφανειών πεπερασμένης επιφάνειας, A_1 και A_2 και θερμοκρασίας θ_1 και θ_2 (σε βαθμούς Κελσίου), τότε ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας, ΔP_r , δίνεται από τον τύπο :

$$\Delta P_r = \sigma \frac{(\theta_1 + 273)^4 + (\theta_2 + 273)^4}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (6.15)$$

όπου σ είναι η σταθερά των Stefan-Boltzmann, F_{12} είναι ένας παράγοντας που λαμβάνει υπόψη την κατεύθυνση των δύο επιφανειών και ε_1 και ε_2 είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές εκπομπής όπου εξαρτώνται από τις επιφάνειες. Στον παρακάτω Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι συντελεστές εκπομπής από υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των συγκεκριμένων ηλεκτρικών μηχανών [14].

Material	Surface condition	Emissivity, ε
Copper	Polished	0.025
Epoxy	Black	0.87
	White	0.85
Mild steel	-	0.2-0.3
Cast iron	Oxidized	0.57
Stainless steel	-	0.2-0.7
Permanent magnet, NdFeB	Uncoated	0.9

Πίνακας 6.2 : Συντελεστές Εκπομπής από υλικά που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές μηχανές AFPM

6.3 Ψύξη των ηλεκτρικών μηχανών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

Ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής, χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις για την ψύξη της. Από άποψη μεθόδου ψύξης οι συγκεκριμένες ηλεκτρικές μηχανές κατηγοριοποιούνται ως εξής [38]:

- Μηχανές με φυσικό αερισμό, όπου ο αέρας για την ψύξη τους παράγεται, από τους περιστρεφόμενους δρομείς, από τα ‘κανάλια’ που σχηματίζουν οι μόνιμοι μαγνήτες ή από άλλες διατάξεις που είναι ενσωματωμένες στα περιστρεφόμενα μέρη της μηχανής και η λειτουργία τους μπορεί να προσομοιάσει αυτήν του ανεμιστήρα. Το πλεονέκτημα των δισκοειδών αυτών μηχανών σε σχέση με τις μηχανές ακτινικής ροής είναι πως έχουν αυξημένη ικανότητα αυτό-αερισμού. Κοιτώντας την δομή μιας τέτοιας διάταξης στο σχήμα 8.2, είναι εύκολο να δούμε πως ένα ρεύμα αέρα θα εισέλθει από τις οπές εισόδου και στην συνέχεια θα εξαναγκαστεί να εξέλθει από τα ‘κανάλια’ που σχηματίζουν οι μόνιμοι μαγνήτες οι οποίοι λειτουργούν σαν ανεμιστήρας καθώς ο δρομέας περιστρέφεται.
- Μηχανές με εξωτερικό αερισμό, όπου το μέσον ψύξης ενισχύεται από επιπρόσθετες εξωτερικές διατάξεις, όπως οι ανεμιστήρες. Πιο συγκεκριμένα για διατάξεις μεσαίας ή υψηλής ισχύος, οι απώλειες λόγω της θερμότητας αυξάνονται γραμμικά με την κλίμακα της ισχύος, οπότε είναι απαραίτητη εξαναγκασμένη ψύξη με την συνδρομή εξωτερικών διατάξεων, όπως είναι η χρήση εξωτερικού ανεμιστήρα ή η ψύξη με νερό.

6.4 Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων

Τα κυκλώματα συγκεντρωμένων παραμέτρων, αποτελούμενα από ένα δίκτυο θερμικών αντιστάσεων, θερμικών χωρητικότητας, κομβικών θερμοκρασιών και πηγών θερμότητας, έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για να αναπαραστήσουν τις πολύπλοκες κατανεμημένες θερμικές παραμέτρους μιας ηλεκτρικής μηχανής [36,32,37].

6.4.1 Θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα

Το θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα στην ουσία αποτελεί ένα ανάλογο του ηλεκτρικού κυκλώματος, όπου η θερμότητα (κυκλωματικό ανάλογο του ρεύματος) που ρέει στις διαδρομές του κυκλώματος, δίνεται από μια θερμοκρασιακή διαφορά (κυκλωματικό ανάλογο της τάσης) διαιρούμενη από μια θερμική αντίσταση (κυκλωματικό ανάλογο της ηλεκτρικής αντίστασης).

Για την αγωγή, η θερμική αντίσταση εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα του υλικού, k , το μήκος l , την διατομή A_d από όπου ρέει η θερμότητα και δίνεται από τον τύπο :

$$R_d = \frac{l}{A_d k} \quad (6.16)$$

Η θερμική αντίσταση για την συναγωγή ορίζεται ως εξής :

$$R_c = \frac{1}{A_c h} \quad (6.17)$$

όπου A_c είναι η επιφάνεια συναγωγής μεταξύ των δύο περιοχών και h είναι ο συντελεστής συναγωγής.

Η θερμική αντίσταση για την ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών δίνεται από τον τύπο :

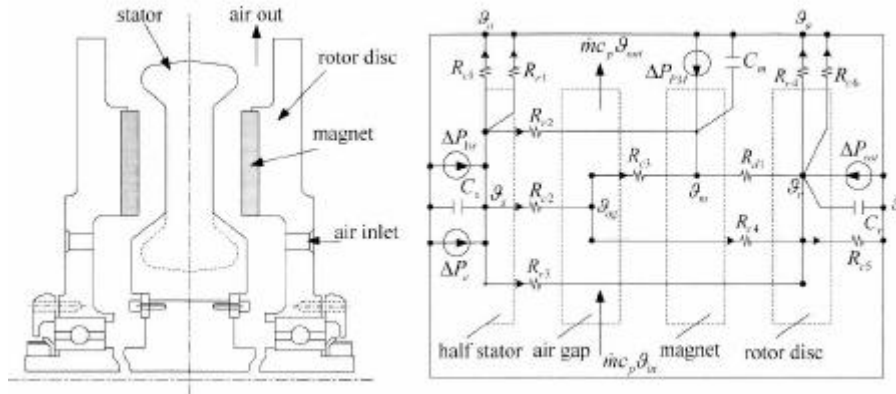
$$R_r = \frac{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}{\sigma[(\theta_1 + 273) + (\theta_2 + 273)][(\theta_1 + 273)^2 + (\theta_2 + 273)^2]} \quad (6.19)$$

Όπως φαίνεται από τον τύπο, η συγκεκριμένη θερμική αντίσταση εξαρτάται από την τρίτη δύναμη της θερμοκρασίας, από τον συντελεστή εκπομπής ε και από τον προσανατολισμό των επιφανειών που λαμβάνετε υπόψιν μέσω του συντελεστή F .

Το θερμικό κύκλωμα σε ανάλυση μόνιμης κατάστασης αποτελείται από τις θερμικές αντιστάσεις και τις πηγές θερμότητας που συνδέονται μεταξύ τους μέσω κόμβων. Για ανάλυση μεταβατικής κατάστασης συμπεριλαμβάνονται και οι θερμικές χωρητικότητες για να προσμετρηθεί η αλλαγή της εσωτερικής ενέργειας στα διάφορα μέρη της μηχανής σε σχέση με τον χρόνο. Η θερμοχωρητικότητα ορίζεται ως :

$$C = \rho V c_u = m c_u \quad (6.20)$$

όπου c_u είναι η θερμοχωρητικότητα του υλικού, ρ είναι η πυκνότητα, V και m είναι ο όγκος και η μάζα του υλικού αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια τμηματική όψη μιας γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών με στάτη χωρίς πυρήνα. Είναι εύκολο να παρατηρήσουμε ότι η μηχανή είναι συμμετρική από άποψη μεταφοράς θερμότητας και το ένα μισό από την κεντρική διαχωριστική γραμμή καθρεφτίζει το άλλο μισό. Οπότε για λόγους ευκολίας, στην ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο το μισό κομμάτι της μηχανής.



Σχήμα 6.3 : Το κύκλωμα θερμικών αντιστάσεων μηχανής AFPM με στάτη χωρίς πυρήνα

Οι πηγές θερμότητας στο σχήμα, ΔP_{1w} , ΔP_e , ΔP_{PM} και ΔP_{rot} απεικονίζουν τις απώλειες στα τυλίγματα, τις απώλειες δινορευμάτων στο μισό τύλιγμα του στάτη, τις απώλειες στους μαγνήτες και τις απώλειες περιστροφής στον ένα δίσκο του δρομέα. C_s , C_m και C_r είναι οι θερμικές χωρητικότητες του στάτη, των μονίμων μαγνητών και του δίσκου του δρομέα αντίστοιχα. Οι θερμικές αντιστάσεις που συμπεριλαμβάνονται στο κύκλωμα περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Rc1	Αντίσταση συναγωγής από το ακρο-τύλιγμα του στάτη στον περιβάλλοντα αέρα
Rc2	Αντίσταση συναγωγής από τον στάτη στο διάκενο
Rc3	Αντίσταση συναγωγής από διάκενο στους μόνιμους μαγνήτες
Rc4	Αντίσταση συναγωγής από το διάκενο στον δίσκο του δρομέα
Rc5	Αντίσταση συναγωγής από τον δίσκο του δρομέα στον περιβάλλοντα αέρα
Rc6	Αντίσταση συναγωγής από την περιφέρεια του δρομέα στον περιβάλλοντα αέρα
Rr1	Αντίσταση ακτινοβολίας από το ακρο-τύλιγμα του στάτη στο περιβάλλον
Rr2	Αντίσταση ακτινοβολίας από τον στάτη στους μόνιμους μαγνήτες
Rr3	Αντίσταση ακτινοβολίας από τον στάτη στον δίσκο του δρομέα
Rr4	Αντίσταση ακτινοβολίας από την περιφέρεια του δρομέα στο περιβάλλον
Rd1	Αντίσταση αγωγής από τους μόνιμους μαγνήτες στον δίσκο του δρομέα

Πίνακας 6.3 : περιγραφή των θερμικών αντιστάσεων

6.4.2 Διατήρηση της Ενέργειας

Στην περίπτωση που εφαρμόσουμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας, ο ρυθμός αλλαγής της εσωτερικής ενέργειας σε κάθε μέρος της μηχανής μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως :

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = C \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \Delta P_{in} - \Delta P_{out} + \dot{m}_{in} i_{in} + \dot{m}_{out} i_{out} \quad (6.20)$$

όπου U είναι η εσωτερική ενέργεια, \dot{m} είναι ο ρυθμός ροής μάζας, i είναι η ενθαλπία και C είναι η θερμική χωρητικότητα ενός συγκεκριμένου όγκου.

Για συνθήκες μόνιμης κατάστασης, ισχύει $\Delta U/\Delta t=0$, οπότε καταλήγουμε στην εξής σχέση :

$$0 = \Delta P_{in} - \Delta P_{out} + \dot{m}_{in} i_{in} + \dot{m}_{out} i_{out} \quad (6.21)$$

Αυτές οι εξισώσεις εφαρμόζονται σε κάθε μέρος της μηχανής (στάτη, μόνιμους μαγνήτες και δρομέα, διάκενο αέρος), οπότε καταλήγουμε σε μια ομάδα εξισώσεων όπου οι μόνες άγνωστες μεταβλητές είναι η θερμοκρασία του κάθε κομματιού. Αυτές οι εξισώσεις είναι αρκετά πολύπλοκες και για να λυθούν πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια υπολογιστική μέθοδος όπως είναι οι ανακυκλώσεις με την μέθοδο Gauss-Seidel. Πρέπει να σημειωθεί πως οι όροι που περιλαμβάνουν τις ενθαλπίες στην παραπάνω εξίσωση, αφορούν την εσωτερική θερμότητα που αφαιρέθηκε λόγω της ροής αέρα που εισήλθε στην μηχανή. Αυτή η ροή αέρα έχει πολύ μεγάλη σημασία για την ψύξη της μηχανής. Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας στο διάκενο αέρος στο θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι δυνατή μόνο εάν ο ρυθμός ροής μάζας μπορεί με κάποιο τρόπο να υπολογιστεί.

6.5 Θερμική Ανάλυση Σύγχρονης Γεννήτριας AFPM 3 KW

Με βάση την παραπάνω θεωρητική ανάλυση θα αναπτύξουμε την θερμική ανάλυση μιας γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών 3 KW η οποία έχει ήδη κατασκευαστεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής [15]. Θα υπολογίσουμε μέσω του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων τις τιμές τις θερμοκρασίας στα επιμέρους τμήματα της γεννήτριας στην μόνιμη κατάσταση και θα τα συγκρίνουμε με τις πειραματικές τιμές. Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης ηλεκτρικής μηχανής δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Όνομαστική Ισχύς	3 kW
Όνομαστική Συχνότητα	50 Hz
Αριθμός Πόλων	20
Αριθμός Πηνίων	15
Συνολικό Κόστος	410 €
Συνολικό Βάρος	35.48 kg
ΔΡΟΜΕΑΣ	
Χαλύβδινοι Δίσκοι	
Πάχος δίσκου	10 mm
Εξωτερική Ακτίνα	238.26 mm
Εσωτερική Ακτίνα	207.05 mm
Μαγνήτες	
Πάχος Μαγνήτη	10 mm
Πλάτος Μαγνήτη	46 mm
Μήκος Μαγνήτη (Ενεργό Μήκος)	30 mm
ΣΤΑΤΗΣ	
Πηνία	
Αξονικό Πάχος Πηνίου	13.76 mm
Πάχος Πλευράς	31.54 mm
Αριθμός Σπειρών	337
Διάμετρος Χαλκού	0.95 mm

Πίνακας 6.4 : Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας των 3 KW

Αρχικά θα υπολογίσουμε κάποιους θερμοκρασιακούς συντελεστές, κυρίως συναγωγής, που θα μας χρησιμεύσουν για τον μετέπειτα υπολογισμό των θερμικών αντιστάσεων. Για τον υπολογισμό των συντελεστών αυτών θα μας χρειαστούν οι παρακάτω σταθερές :

$$\text{Δυναμικό ιξώδες του αέρα : } \mu = 1.8467 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$$

$$\text{Πυκνότητα του αέρα : } \rho = 1.177 \text{ kg / m}^3$$

$$\text{Θερμική Αγωγιμότητα του αέρα : } k = 0.02624 \text{ W / (m}^{\circ}\text{C)}$$

Στην συνέχεια, για την εξαγωγή των εξισώσεων βάση της αρχής διαχείρισης της ενέργειας, θα χρειαστούν οι απώλειες που παρουσιάζει η γεννήτρια κατά την ονομαστική λειτουργία της. Πιο συγκεκριμένα :

$$\Delta P_{1w} = 477,975 \text{ W (απώλειες χαλκού)}$$

$$\Delta P_e = 20,844 \text{ W (απώλειες δινορευμάτων)}$$

$$\Delta P_{rot} = 18,225 \text{ W (απώλειες περιστροφής)}$$

Συντελεστής συναγωγής της εξωτερικής επιφάνειας του δίσκου του δρομέα

Ο αριθμός του Reynolds είναι :

$$Re = p \frac{\Omega D_{out}^2}{4\mu} = 1,177 \cdot \frac{2\pi \frac{300}{60} \cdot 0,47652^2}{4 \cdot 1,8467 \cdot 10^{-5}} = 113.608,817$$

και

$$Gr = \frac{\beta g R^3 \pi^{(3/2)} \Delta\theta}{\nu^2} = \frac{3,43 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 0,23826^3 \cdot 3,14^{(3/2)} (\theta_3 - \theta_2)}{(1,569 \cdot 10^{-5})^2} = 10.286.440,65(\theta_3 - \theta_2)$$

Όπου β είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα, ν είναι το κινηματικό ιξώδες και Δθ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του δίσκου και του περιβάλλοντα αέρα.

Ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται :

$$\overline{Nu} = \frac{2}{5} (Re^2 + Gr)^{1/4}$$

και ο συντελεστής συναγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$\begin{aligned} \overline{h}_{fr} &= \frac{k}{R} \overline{Nu} = \frac{k}{R} \frac{2}{5} (Re^2 + Gr)^{1/4} = \frac{0,02624}{0,23826} \frac{2}{5} (113.608,8167^2 + 10.286.440,65 \cdot (\theta_3 - \theta_2))^{1/4} = \\ &= 0,0441 \cdot (113.608,8167^2 + 10.286.440,65(\theta_3 - \theta_2))^{1/4} \quad (W / m^2 \cdot ^\circ C) \end{aligned}$$

Συντελεστής συναγωγής της περιφέρειας του δίσκου του δρομέα

Ο αριθμός Prandtl για τους 25 °C θεωρείται 0,7 και ο αριθμός του Reynolds για την περιφέρεια του δίσκου δίνεται από τον τύπο :

$$R_{eD} = \Omega \frac{D_{out}^2}{\nu} = \frac{2\pi \cdot 300}{60} \frac{0,47652^2}{1,569 \cdot 10^{-5}} = 454.432,068$$

Ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται από :

$$\overline{Nu} = 0,133 \cdot R_{eD}^{(2/3)} \cdot Pr^{(1/3)} = 0,133 \cdot (454.432,068)^{(2/3)} \cdot 0,7^{(1/3)} = 698,013$$

Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι :

$$\overline{h}_p = \frac{k}{D_{out}} \cdot \overline{Nu} = \frac{0,02624}{0,47652} \cdot 698,013 = 38,437 \quad (W / m^2 \cdot ^\circ C)$$

Συντελεστής συναγωγής συστήματος στάτη-δρομέα

Ο ονομαστικός ρυθμός ροής του αέρα στην συγκεκριμένη γεννήτρια υπολογίζεται προσεγγιστικά και βάση της βιβλιογραφίας σε $0,010-0,012 \text{ m}^3 / \text{s}$. Στην συγκεκριμένη ανάλυση θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή $0,012 \text{ m}^3 / \text{s}$. Ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται από τον τύπο :

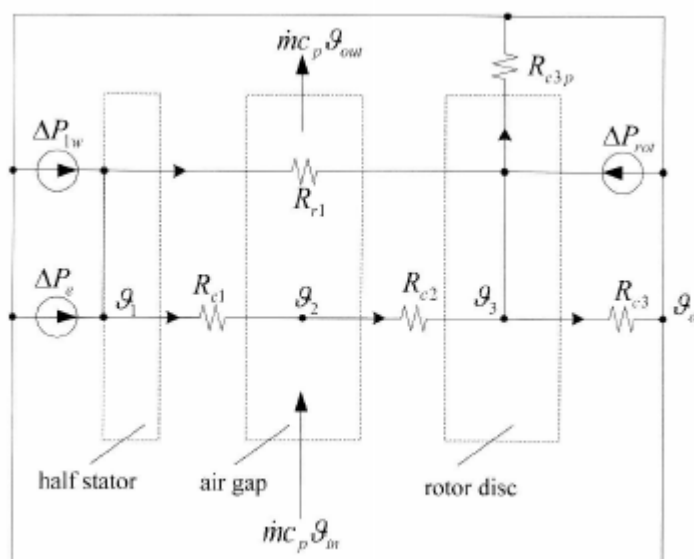
$$\overline{Nu} = 0,333 \cdot \frac{Q}{\pi \nu (D_{out} / 2)} = 0,333 \cdot \frac{0,012}{3,14 \cdot 1,569 \cdot 10^{-5} \cdot 0,23826} = 340,425$$

Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο δίσκων υπολογίζεται ως εξής :

$$\overline{h_{rs}} = \frac{2k}{D_{out}} \cdot \overline{Nu} = \frac{2 \cdot 0,02624}{0,47652} \cdot 340,425 = 37,492 \text{ (W / m}^2 \cdot \text{°C)}$$

Υπολογισμός των θερμικών αντιστάσεων και σχηματισμός συστήματος εξισώσεων

Για την ανάλυση του θερμικού κυκλώματος, όπως έχει προαναφερθεί, θα μοντελοποιηθεί η μισή διάταξη της ηλεκτρικής μηχανής. Αγνοώντας την ακτινοβολία από τον δίσκο του δρομέα στην ατμόσφαιρα και την θερμική αντίσταση αγωγής ανάμεσα στους μαγνήτες και τον δρομέα, το γενικό θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι το παρακάτω.



Σχήμα 8.4 : Απλοποιημένο θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα

(1/2) της διάταξης του Στάτη

Η αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής μεταξύ του στάτη και της ροής αέρα στο διάκενο αέρος υπολογίζεται ως εξής :

$$R_{c1} = \frac{1}{\overline{h}_{rs} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2)} = \frac{1}{37,492 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,5396^2 - 0,35102^2)} = 0,202 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

όπου για την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του στάτη που αλληλεπιδρά στην μεταφορά της θερμότητας προστέθηκε και αφαιρέθηκε το πάχος της πλευράς του πηνίου (0,03154 m) αντίστοιχα.

Η αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ του στάτη και των δίσκων του δρομέα δίνεται από την σχέση :

$$R_{r1} = \frac{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} - \frac{1}{A_1 F_{12}} - \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}{\sigma [(\theta_1 + 273) + (\theta_2 + 273)] [(\theta_1 + 273)^2 + (\theta_2 + 273)^2]} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

όπου οι επιφάνειες των δίσκων μπορούν να θεωρηθούν ίδιες,

$$A_1 = A_2 = \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) = 0,044 \text{ m}^2$$

ο συντελεστής σχήματος είναι $F_{12}=1$,

η σταθερά Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \text{K}^4)$,

ο συντελεστής εκπομπής του στάτη είναι $\varepsilon_1=0,85$

και του δρομέα, εφόσον ένα μέρος του καλύπτεται από τους μόνιμους μαγνήτες, δίνεται από τον τύπο

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{Fe} (1 - a_i) + \varepsilon_{PM} a_i = (0,3 \cdot 0,341) + (0,9 \cdot 0,659) = 0,6954$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η εξίσωση μόνιμης κατάστασης για το συγκεκριμένο κομμάτι της διάταξης γράφεται ως εξής :

$$\frac{1}{2} (\Delta P_{1w} + \Delta P_e) - \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{c1}} - \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_{r1}} = 0 \quad (6.22)$$

Διάκενο Αέρος

Η αντίσταση μεταφοράς της θερμότητας μέσω της συναγωγής από το διάκενο στον δίσκο του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί ίση με την περίπτωση της αντίστοιχης αντίστασης από τον στάτη στο διάκενο αέρος, δηλαδή $R_{c2}=R_{c1}$. Χρησιμοποιώντας όμως εδώ την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του δρομέα :

$$R_{c2} = \frac{1}{\overline{h}_{rs} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2)} = \frac{1}{37,492 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,47652^2 - 0,4141^2)} = 0,611 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

Η μάζα ροής αέρα είναι ίση με :

$$\dot{m} = \rho Q = 1,177 \cdot 0,012 = 0,0141 \text{ kg}$$

Αν υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία του αέρα στις οπές της γεννήτριας είναι ίση με την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, $\theta_{in} = \theta_a$ και η μέση θερμοκρασία στο διάκενο του αέρα είναι ίση με $\theta_2 = 1/2(\theta_{in} + \theta_{out})$, τότε η διάχυση της θερμότητας λόγω της ροής αέρα είναι :

$$\dot{m}_{out} i_{out} - \dot{m}_{in} i_{in} = \dot{m} c_p (\theta_{out} - \theta_{in}) = 2 \dot{m} c_p (\theta_2 - \theta_a) = 2 \cdot 0,0141 \cdot 1005 \cdot (\theta_2 - 20)$$

Η εξίσωση μόνιμης κατάστασης για το διάκενο αέρος γράφεται ως εξής :

$$\frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{c1}} - \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_{c2}} - 2 \cdot 0,0141 \cdot 1005 \cdot (\theta_2 - 20) = 0 \quad (6.23)$$

Δίσκος του Δρομέα

Η αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια του δίσκου στην ατμόσφαιρα είναι :

$$R_{c3} = \frac{4}{h_{fr} \cdot \pi \cdot D_{out}^2} = \frac{4}{h_{fr} \cdot \pi \cdot 0,47652^2} = \frac{5,61}{h_{fr}} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

ενώ η αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής από την περιφέρεια του δίσκου στην ατμόσφαιρα είναι :

$$R_{c3p} = \frac{4}{h_p \cdot \pi \cdot D_{out} \cdot d} = \frac{4}{38,437 \cdot 3,14 \cdot 0,47652 \cdot 0,01} = 1,739 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

Αντίστοιχα, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η εξίσωση μόνιμης κατάστασης για τον δίσκο του δρομέα γράφεται ως εξής :

$$\frac{\theta_2 - \theta_3}{R_{c2}} - \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_{r1}} + \frac{1}{2} \Delta P_{rot} - \frac{\theta_3 - \theta_a}{R_{c3}} - \frac{\theta_3 - \theta_a}{R_{c3p}} = 0 \quad (6.24)$$

Οι εξισώσεις 8.22, 8.23 και 8.24 που προέκυψαν από την αρχή διαχείριση της ενέργειας, λόγω της πολυπλοκότητας τους (και την εξάρτηση της R_{r1} από τις θ_1 και θ_2 όπως και του συντελεστή συναγωγής $\overline{h_{fr}}$ από τις θ_2 και θ_3) θα λυθούν μέσω λογισμικού (MATLAB), όπου και θα προκύψουν οι θερμοκρασίες μόνιμης κατάστασης στα επιμέρους τμήματα της γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.5 παρατίθενται οι τιμές που βρέθηκαν μέσω του θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων και οι τιμές που βρέθηκαν πειραματικά (στάτης). Διαπιστώνουμε πως ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό, κάτι που συνεπάγεται πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος για την πρόβλεψη των τιμών της θερμοκρασίας στα επιμέρους τμήματα της εκάστοτε γεννήτριας με σχετική ασφάλεια.

Τμήματα της Γεννήτριας	Μοντέλο Συγκεντρωμένων Παραμέτρων	Πειραματικές Τιμές
Στάτης	79.29 $^\circ\text{C}$	83 $^\circ\text{C}$
Διάκενο	28.9 $^\circ\text{C}$	
Δρομέας	30.71 $^\circ\text{C}$	

Πίνακας 6.5 : θερμοκρασίες μόνιμης κατάστασης στα επιμέρους τμήματα της γεννήτριας

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προτάσεις

Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των όσων μελετήθηκαν και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Εξάγονται και παρουσιάζονται κάποια βασικά συμπεράσματα πάνω στη μελέτη που προηγήθηκε και κυρίως πάνω στις νέες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση και βελτιστοποίηση των σύγχρονων γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών. Επίσης παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για την εξέλιξη και την βελτίωση της συγκεκριμένης εργασίας.

7.1 Συμπεράσματα

7.1.1 Αλγόριθμοι Εξελικτικού Υπολογισμού PSO και HPSO

Αφού αναλύθηκε η βασική διαστασιολόγηση των γεννητριών αξονικής ροής καθώς και ο υπολογισμός του βάρους και του κόστους της εκάστοτε ηλεκτρικής μηχανής, χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος αλγόριθμος για την βελτιστοποίηση των γεννητριών ως προς κόστος, βάρος, όγκο και απόδοση. Μετά από αναζήτηση σε σχετική βιβλιογραφία, χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη διαδικασία οι αλγόριθμοι εξελικτικού υπολογισμού (βελτιστοποίησης) Particle Swarm Optimization (PSO) και Homogeneous Particle Swarm Optimization (HPSO) μετά από προσαρμογή τους ως προς τον κώδικα αρχικής διαστασιολόγησης.

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι αποδείχθηκαν ιδιαίτερα ικανοποιητικές ως προς την βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) της σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών, που αποτελεί ένα μη γραμμικό πρόβλημα με ιδιαίτερη πολυπλοκότητα σε υπολογισμούς και αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, η περίπτωση του αλγόριθμου PSO αποδείχθηκε ιδιαίτερα γρήγορη και αποδοτική σαν μέθοδος, αφού για κάθε 'τρέξιμο' χρειάστηκε ελάχιστα δευτερόλεπτα για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και είχε ιδιαίτερη αποτελεσματικότητα όσον αφορά την σύγκλιση της στο ολικό ελάχιστο της εκάστοτε υποπερίπτωσης. Η μέθοδος HPSO που αποτελεί, όπως είδαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, παραλλαγή του αλγόριθμου PSO, ήταν επίσης ιδιαίτερα αποδοτική καθώς στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, αφού χρειάστηκε ελάχιστο χρόνο, κατέληξε σε ένα πλήθος εναλλακτικών βέλτιστων λύσεων, σχεδιάζοντας στην συνέχεια την καμπύλη Pareto Front.

Με την βοήθεια λοιπόν των συγκεκριμένων αλγόριθμων, βελτιστοποιήθηκαν οι συγκεκριμένες γεννήτριες ως προς τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω. Χρησιμοποιήθηκαν οι μαγνήτες N40 και N45 και η ανάλυση επεκτάθηκε σε εύρος ισχύος 3 έως 6 KW με βήμα των 500 Watt. Ήταν εύκολο να διαπιστώσουμε από τα αποτελέσματα πως οι μαγνήτες N45 ήταν αρκετά πιο οικονομικοί, κρατώντας το κόστος της γεννήτριας ακόμα και στις μεγαλύτερες ισχύς σε χαμηλά επίπεδα. Οι περιπτώσεις βελτιστοποίησης μάζας και όγκου, οι οποίες συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό (όπως προκύπτει εύκολα και από την θεωρία), κατέληξαν σε χρησιμοποίηση μεγαλύτερης ποσότητας μαγνήτη, αφού έτσι παράγεται εντονότερο μαγνητικό πεδίο και για την ίδια ισχύ εξόδου μικραίνει η διάμετρος και κατ'επέκταση η μάζα και ο όγκος της γεννήτριας. Όσον αφορά την περίπτωση της απόδοσης, η μεταβλητή α_i , η οποία ήταν η προς βελτιστοποίηση μεταβλητή μαζί με το k_d , κυμάνθηκε σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα, ανεβάζοντας το κόστος της γεννήτριας κατακόρυφα.

Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν τα ζευγάρια των σχεδιαστικών κριτηρίων και συμπεράναμε πως η εκάστοτε βελτιστοποίηση συνέκλινε στις σχεδιαστικές τάσεις που καταγράφηκαν μέσω της αντίστοιχης μονής βελτιστοποίησης, ανάλογα με το βάρος που δόθηκε σε κάθε παράμετρο ξεχωριστά στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό έγινε μέσω των συντελεστών βάρους, όπου αναλύθηκε η σημασία τους στην αντίστοιχη υποενοότητα και έγινε εμφανής η σημασία της δομής της συνάρτησης βελτιστοποίησης. Επίσης, μέσω των γραφημάτων Pareto Front, απεικονίσθηκαν ξεκάθαρα οι εκάστοτε συσχετισμοί ανάμεσα στις παραμέτρους που βρίσκονται υπό ελαχιστοποίηση, βοηθώντας έτσι τον σχεδιαστή να επιλέξει την βέλτιστη περίπτωση που εξυπηρετεί καλύτερα τις προδιαγραφές της συγκεκριμένης εφαρμογής.

7.2.2 Υπολογισμός Bp βάση των ai και kd – Θερμική Ανάλυση

Πολύ χρήσιμη αποδείχθηκε επίσης και η έρευνα που έγινε όσον αφορά την ανάλυση της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο της γεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί, δεν υπάρχει σχέση υπολογισμού της 1^{15} αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής, μια σχέση η οποία είναι απαραίτητη στην προκαταρκτική σχεδίαση. Έτσι, με τον τρόπο που περιγράφηκε στο 4^ο κεφάλαιο, αναπτύχθηκαν πίνακες για όλες τις ισχύς που εξετάζονται στην συγκεκριμένη εργασία, όπου παρουσιάζονται οι τιμές της συγκεκριμένης μεταβλητής για πολλούς συνδυασμούς των ai και kd. Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια στην διαδικασία βελτιστοποίησης, καταλήγοντας έτσι σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά την ανάλυση των πεδίων στο εσωτερικό της γεννήτριας και κατ'επέκταση σε πιο αξιόπιστα συμπεράσματα στις βελτιστοποιήσεις.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η θερμική ανάλυση μιας σύγχρονης γεννήτριας αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών 3 KW βασισμένη στο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων. Βάση των αποτελεσμάτων για τις θερμοκρασίες των επιμέρους τμημάτων της μηχανής στην μόνιμη κατάσταση και της σύγκρισης τους με τις πειραματικές τιμές, συμπεράναμε πως το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σχετική ασφάλεια για την πρόβλεψη των θερμοκρασιών λειτουργίας μόνιμης κατάστασης σε αντίστοιχες περιπτώσεις.

7.2 Προτάσεις

Βελτιωτικές προτάσεις θα μπορούσαν να γίνουν προς όλες τις κατευθύνσεις πάνω στην συγκεκριμένη εργασία, ξεκινώντας από τον κώδικα αρχικής διαστασιολόγησης και καταλήγοντας στην θερμική ανάλυση.

Καταρχάς, θα μπορούσε να μελετηθεί καλύτερα η θεωρητική ανάλυση του συγκεκριμένου τύπου γεννήτριας και να γίνουν διορθώσεις στον αλγόριθμο της αρχικής διαστασιολόγησης που να αφορούν για παράδειγμα τον τύπο υπολογισμού της εξωτερικής ακτίνας Rout ή την επιλογή της απόδοσης στην αρχή του κώδικα. Καταλήγοντας έτσι σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα στην εκάστοτε ανάλυση των πεδίων στο εσωτερικό της γεννήτριας.

Μεγαλύτερη εμβάθυνση θα μπορούσε επίσης να γίνει, όσον αφορά το μαθηματικό υπόβαθρο των αλγόριθμων εξελικτικού υπολογισμού με αποτέλεσμα την καλύτερη ενσωμάτωση τους στην διαδικασία της βελτιστοποίησης και την καλύτερη συμπεριφορά τους πάνω στην σύγκλιση στο ολικό βέλτιστο. Επίσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά κριτήρια σαν παράμετροι προς βελτιστοποίηση, όπως η πυκνότητα ισχύος ('αφήνοντας' ελεύθερη την ονομαστική ισχύ), το κόστος προς ρολή και το κόστος ανά KW. Ακόμα, μια επιλογή θα ήταν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές μεταβλητές προς βελτιστοποίηση, για παράδειγμα στην θέση των ai και kd να χρησιμοποιηθεί το πάχος του μαγνήτη hm ή οι διαστάσεις του, la και wm.

Στην συνέχεια, η διαδικασία που έγινε για όλες τις ισχύς με χρήση των μαγνητών N40 και N45 για να σχηματιστούν οι πίνακες Bp-ai-kd που αφορούν την 1^{11} αρμονική της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της γεννήτριας, θα μπορούσε να γίνει για διαφορετικές αποδόσεις σε κάθε υποπερίπτωση. Έχοντας μια εικόνα, σε ποιες αποδόσεις καταλήγουν οι βελτιστοποιήσεις, βάση των προηγούμενων αναλύσεων, να χρησιμοποιείται προσεγγιστικά ο ιδανικότερος πίνακας (look up table) καταλήγοντας έτσι σε ακριβέστερα αποτελέσματα.

Τέλος, στην περίπτωση της θερμικής ανάλυσης, θα μπορούσε να γίνει μοντελοποίηση και με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων (FEMM), πραγματοποιώντας στην συνέχεια σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων, σχηματίζοντας έτσι μια συνολικότερη εικόνα.

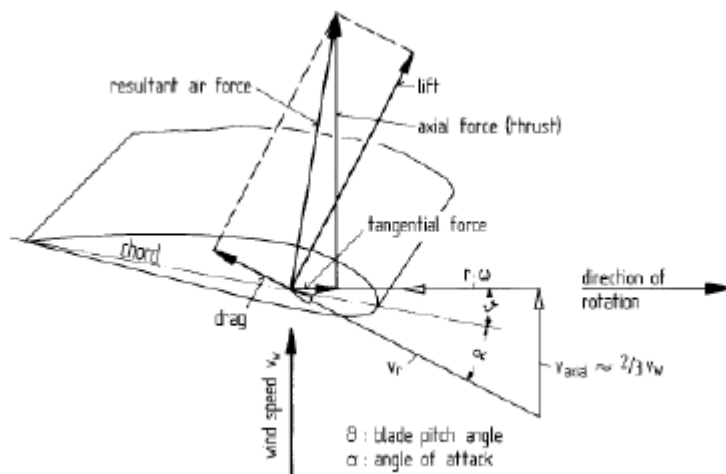
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Χαρακτηριστικά ισχύος και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

A.1 Βασικές έννοιες αεροδυναμικής

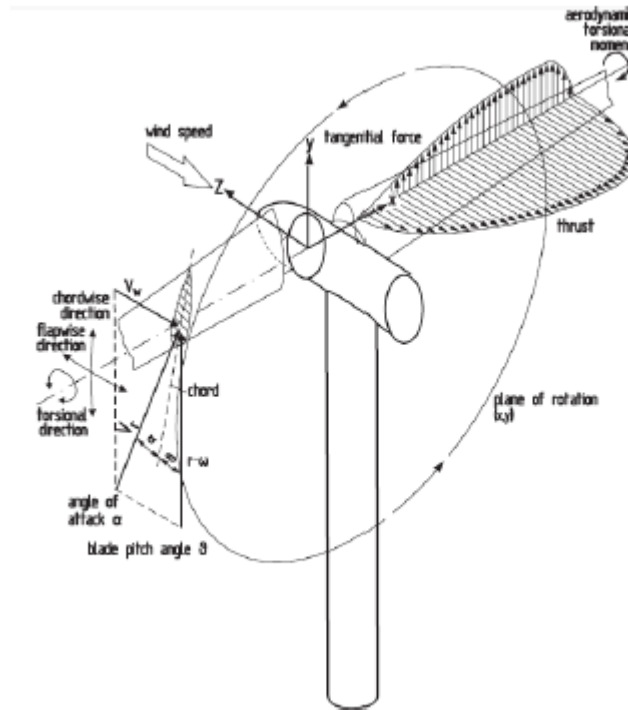
Ξεκινώντας τη σχεδίαση μιας ανεμογεννήτριας, πρωταρχική εργασία είναι η κατανόηση της λειτουργίας του αεροδυναμικού συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει την έλικα, το σύστημα προσανατολισμού καθώς και το σύστημα προστασίας furling. Η κατασκευή των φτερών γίνεται από ξύλο και περιγράφεται στο [1]. Τα ξύλινα φτερά μπορεί να μη φαίνονται η καλύτερη επιλογή, και δεν είναι όσον αφορά τις μεγάλες ανεμογεννήτριες, αλλά το μικρό τους βάρος, το χαμηλό τους κόστος καθώς και η ευκολία στην επεξεργασία τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Φτερωτές για μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν και με μείγματα ρητίνης, ωστόσο το κόστος των καλουπιών είναι απαγορευτικό και συμφέρει μόνο στην περίπτωση της μαζικής παραγωγής.



Σχήμα A.1: Η αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας.

Στο σχήμα A.1 φαίνεται η αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας. Η ακμή στην οποία προσπίπτει ο άνεμος ονομάζεται ακμή πρόσπτωσης (leading edge) ενώ η άλλη ακμή ονομάζεται 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 δύο γωνίες: η γωνία πρόσπτωσης α (angle of attack) καθώς και η γωνία βήματος θ . Όπως τονίζεται στο [39] 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 αεροδυναμικών δυνάμεων στη φτερωτή. Αυτό ακριβώς φαίνεται στο σχήμα A.2. Οι δυνάμεις χωρίζονται σε δυο

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 A.2: Η κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται σε μια φτερωτή καθώς και στο περικόγιο

Γενικά, και επιστρέφοντας στο σχήμα A.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 δύο πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Αυτόν ακριβώς το λόγο καθορίζει η γωνία πρόσπτωσης α , η ιδανική τιμή της οποίας ορίζεται γύρω στις 4° . 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° , 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.

A.2 Η κατανομή του ανέμου

Εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο σε μια ανεμογεννήτρια είναι η ενεργειακή της απόδοση. Πρόκειται ουσιαστικά για μια εκτίμηση ως προς την ενέργεια που μπορεί να δώσει η γεννήτρια σε ένα χρονικό διάστημα ενός συνήθως έτους. Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, αντιλαμβάνεται κανείς ότι από τη στιγμή που ο άνεμος σε μια περιοχή δεν είναι σταθερός, δε θα είναι σταθερή και η διαθέσιμη μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας, η οποία θα είναι δύσκολο να υπολογιστεί ούτως ή άλλως καθώς με την αλλαγή του ανέμου και των στροφών αλλάζει το λ και άρα το c_p . Γι' αυτό είναι απαραίτητη η χρήση μιας κατανομής για τον άνεμο. Σύμφωνα με το [5] η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε μια θέση περιγράφεται συνήθως από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull :

$$h(v_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k}$$

όπου k η παράμετρος μορφής και c η παράμετρος κλίμακας. Για τον ελλαδικό χώρο συνήθως ισχύει $k=1,5-2$ και εδώ επιλέγεται η τιμή 2 που δίνει την κατανομή Rayleigh :

$$h(v_w) = \frac{2}{c^2} v_w e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^2}$$

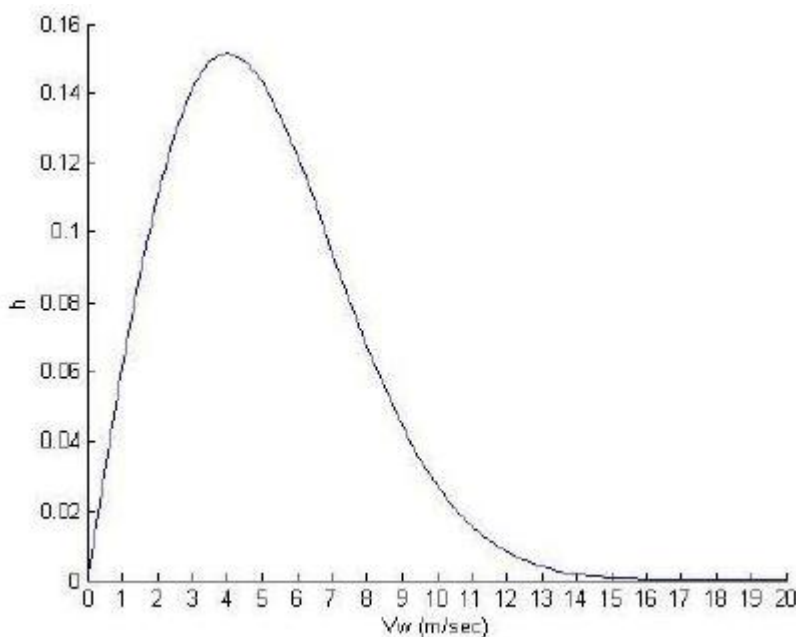
Η παράμετρος κλίμακας c καθορίζει τη μέση τιμή του ανέμου στη θέση που εξετάζεται. Γενικά ισχύει για την κατανομή Rayleigh :

$$\overline{v_w} \cong 0,866 \cdot c$$

οπότε προκύπτει η τελική κατανομή που εξαρτάται πλέον από τη μέση τιμή ανέμου :

$$h(v_w) = \frac{1,57 \cdot \overline{v_w}}{\overline{v_w}^2} e^{-0,785 \left(\frac{v_w}{\overline{v_w}}\right)^2}$$

Στην εργασία αυτή θα θεωρήσουμε ότι ο μέσος άνεμος είναι ίσος με 5m/s και έτσι προκύπτει και η μορφή της κατανομής που θα χρησιμοποιηθεί :



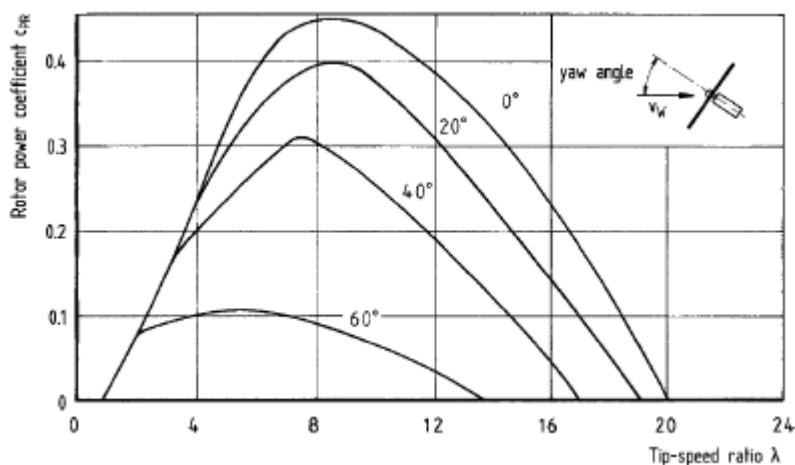
Σχήμα Α.3: Η καμπύλη $cp-\lambda$ για τη φτεροτή που θα χρησιμοποιηθεί.

Γνωρίζοντας την κατανομή του ανέμου, με απλά λόγια δηλαδή πόσες φορές θα φυσήσει με κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα, και άμα κανείς ξέρει 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, αντικείμενο επόμενου κεφαλαίου.

Α.3 Ο περιορισμός της ισχύος

Κάθε ανεμογεννήτρια είναι σχεδιασμένη για έναν συγκεκριμένο άνεμο στον οποίο θα δώσει τα ονομαστικά της. Όταν η λειτουργία λειτουργεί πάνω από τα ονομαστικά της υπάρχει κίνδυνος βλάβης.

Ο κίνδυνος αυτός αναφέρεται αρχικά στην περίπτωση όπου θα φυσήξει 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 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 την ανεμογεννήτρια 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 τη 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 [39]. Ο περιορισμός της ισχύος (μέσω μείωσης του αεροδυναμικού συντελεστή c_p) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα Α.4: Ο περιορισμός του αεροδυναμικού συντελεστή μέσω αύξησης της γωνία yaw.

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ MATLAB

B.1 Κώδικας Διαστασιολόγησης

```
function output=diastasiologhsh(para)

global Phl fnom Vgen efficiency output test tw penkat penkat1 DiscV penkat2 hr penkat3
apodosi Rturb Ia ProtN1 Plosses PcopperN1 Pair cp lamda totalcost totalmass airdens
Vwcutin Vwnom Efcutin Efnom ncutin nnom poles Q q Td Br Hc BHmax Bmg ai mrrec hm g kD
kd kp kwc kec kr Bp2 Jmax kf Rout Rin la Ravg kw we Nc Ianom wc dc wm wmout wmin
wmreal w3 w3out w3in w1 wlout wlin Ls

%look up table
load Bpaikd3000N40-085;
aimin=0.20;
aimax=0.86;
step11=0.01;
AII=[aimin:step11:aimax];
kadmin=0.45;
kdmax=0.97;
step22=0.01;
KDD=[kadmin:step22:kdmax];
%

ai=para(1);
kd=para(2);

Phl=3000;
fnom=50;
efficiency=0.80;
Pair=Phl/efficiency;
cp=0.35;
lamda=7;
airdens=1.2;
Vwcutin=3;
Vwnom=10;
EfcutinWB=200;
Efcutin=EfcutinWB/(sqrt(3)*1.35);

Rturb=sqrt(2*Pair/(airdens*cp*pi*Vwnom^3));
ncutin=60*Vwcutin*lamda/(2*pi*Rturb);
nnom=lamda*Vwnom*60/(2*pi*Rturb);
Efnom=Efcutin*(nnom/ncutin);
poles=120*fnom/nnom;

if mod(poles,4)>=2
    poles=(floor(poles/4)+1)*4;
else
    poles=floor(poles/4)*4;
end

Q=0.5*3*poles/2;
q=Q/3;
Phlmax=1.1*Phl;
PHMmax=Phlmax/efficiency;
Td=60*PHMmax/(2*pi*nnom);

%N40
Br=1.265;
Hc=915;
Hd=Hc/2;
BHmax=314;
Bd=BHmax/Hd;
Bmg=Bd+0.05;
Bmg=0.63;
Bmax=0.61;
```

```

%N45
%Br=1.35;
%Hc=923;
%Hd=Hc/2;
%BHmax=354;
%Bd=BHmax/Hd;
%Bmg=Bd+0.05;
%Bmg=0.635;
%Bavg=0.4;
%Bmax=0.62;

Bavg=ai*Bmax;
Bmean=(Bavg+Bmax)/2;
mrrec=Br/(4*pi*10^(-7)*Hc*1000);
hm=10;
g=3;

if hm==10
    tw=(2/Bmax)*[(Br*hm/mrrec)-Bmg*(g+hm/mrrec)]+0.5;
end

if hm==12
    tw=(2/Bmax)*[(Br*hm/mrrec)-Bmg*(g+hm/mrrec)]+0.25;
end

kD=1;
thitam=pi*poles/Q;
thitare=kd/(1+kd)*thitam;
kp=2*sin((thitam-thitare)/2)*sin(thitare/2)/thitare;
kwc=kp*kD*sqrt(thitare*q/poles);
deltac=(2/poles)*(1+kd)/(1-kd)*(thitam-0.6*thitare);
kec=(2+deltac)^(-0.5);
kr=sqrt(((1+kd)^3)*(1-kd));

if (hm==10) & (fnom==40)
    Bp=-0.00473+1.21747*ai-0.13874*ai^2-0.47273*ai^3+0.11932*ai^4;
    Bp2=Bp;
end

if (hm==10) & (fnom==50)
    Bp=interp2(KDD,AII,maxcn4500N40080,kd,ai);
    Bp2=Bp;
end

if (hm==12) & (fnom==40)
    Bp=0.00385+1.2171*ai-0.2727*ai^2-0.34492*ai^3+0.09084*ai^4;
    Bp2=Bp;
end

if (hm==12) & (fnom==50)
    Bp=0.00821+1.17685*ai-0.24073*ai^2-0.3777*ai^3+0.11024*ai^4;
    Bp2=Bp;
end

Jmax=6;
kf=0.55;
Temp=(1-kd)+(thitam+0.6*thitare)*(1+kd)/poles;
Temp2=sqrt(4.5*q*(kd+1)*sin(thitare/poles)*Temp);
Rout=((Td/1000)/(kwc*kec*kr*Jmax*tw*kf*Bp2*Temp2))^(1/3)*1000;
Rin=kd*Rout;
mal=(2*pi/poles)*ai;
la=Rout*cos(mal/2)-Rin;
Ravg=(Rout+Rin)/2;
lec=2*(Rout+Rin)*(thitam-0.6*thitare)/poles;
lavg=2*la+lec;

kw=0.95;
we=2*pi*ncutin*poles/120;
Nc=Efcutin*poles/(2*sqrt(2)*we*Bp*q*kw*(Ravg/1000)*(la/1000));
Nc=ceil(Nc);
Nphase=Nc*q;

```



```

Ia=1.1*Phl/(3*Efnom);
Ianom=1.1*Phl/(3*Efnom*0.85);
wc=Nc*Ianom/(Jmax*kf*tw);

dc=0.95;
sc=dc^2*pi/4;
wc=sc*Nphase/(kf*q*tw);
Jmax=Nc*Ianom/(wc*kf*tw);

p20=1.68*10^(-8);
tc=80;
pt=p20*(1+0.0039*(tc-20));
Rc=pt*Nc*lavg*10^(-3)/(sc*10^(-6));

wm=ai*2*pi*Ravg/poles;
wmout=wm;
wmin=wm;

%Πραγματική διασταση μαγνητη
magangle1=2*pi/poles;
anglereal=wm/Ravg;
wmreal=2*Ravg*sin(anglereal/2);

w3=(2*pi*Ravg-poles*wm)/poles;
w3out=(2*pi*Rout-poles*wmout)/poles;
w3in=(2*pi*Rin-poles*wmin)/poles;

w2=0.5;
w1=(2*pi*Ravg-2*Q*wc-Q*w2)/Q;
wlout=(2*pi*Rout-2*Q*wc-Q*w2)/Q;
wlin=(2*pi*Rin-2*Q*wc-Q*w2)/Q;

%Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνιού
coilanglein=2*pi*wlin/(Q*(wlin+2*wc+w2));
wlinr=2*Rin*sin(coilanglein/2);
coilangleout=2*pi*wlout/(Q*(wlout+2*wc+w2));
wloutr=2*Rout*sin(coilangleout/2);

wc=floor(wc*100)/100;
wm=floor(wm*100)/100;
wmout=floor(wmout*100)/100;
wmin=floor(wmin*100)/100;
w3=floor(w3*100)/100;
w3out=floor(w3out*100)/100;
w3in=floor(w3in*100)/100;
w1=floor(w1*100)/100;
wlout=floor(wlout*100)/100;
wlin=floor(wlin*100)/100;
tw=floor(tw*100)/100;
la=floor(la*100)/100;

Kn=(1+0.9*lavg/(2*pi*tw)+0.32*2*pi*wc/lavg+0.84*wc/tw)^(-1);
Is=[q*((lavg/1000)^2)*(Nc^2)*(10^(-7))/(tw/1000)]*Kn;
tp=2*pi*Ravg/poles;

pmag=7.5;
Smag=wm*la;
Vmag=wm*la*hm;
Mmag=pmag*Vmag*10^(-3); %g
shippingcost=Vmag*2*poles*20/(24*13800);
%cost for N40
Magcost=(0.6186+9.2715*10^(-4)*Vmag)*2*poles+shippingcost;
%cost for N45
Magcost=(1.8579+4.7408*10^(-4)*Vmag)*2*poles+shippingcost;

pcu=8.94;
mcu=3*Nphase*lavg*sc*pcu*(10^(-6)); %kg
copperprice=12; %E/kg
coppercost=1.23*copperprice*mcu;

```

```

ironprice=1; %E/kg
pFe=7.87; %g/cm3
roph=Rout*(10^(-3))*0.5*(0.62^2)*Smag*10^(-6)*poles/(4*pi*10^(-7));
DiscV=3.13036*10^(-4)+1.18768*10^(-6)*roph; %xoris papers
hr=DiscV*10^(9)/(pi*(Rout^2)); %mm

if hr<10
    hr=10;
end

IronVolume=2*hr*pi*(Rout^2)*10^(-3);
IronMass=IronVolume*pFe*10^(-3); %kg
ironcost=1.23*ironprice*IronMass;

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;

woodS=(2*(Rout*10^(-3)+0.1))^2;
woodcost=3*woodS*17.6+6*woodS*22.4;

AxisMass=pi*7.5^2*2*pFe;

%Ολικό κόστος
totalcost=Magcost+coppercost+ironcost+resincost+woodcost;
totalmass=resinmass+IronMass+mcu+Mmag/1000;
othermass=resinmass+mcu+Mmag/1000;
othercosts=coppercost+ironcost+resincost+woodcost;
aiout=wm*poles/(2*pi*Rout);
aiin=wm*poles/(2*pi*Rin);

Vgen=10^(-3)*pi*(Rout^2)*(2*hr+2*hm+2*g+tw);

PcopperN1=3*Ia^2*q*Rc;
PddyN1=(pi*la*10^(-3))*((dc*10^(-3))^4)*(Eo^2)*(2*pi*nnom*poles/120)^2*Q*Nc)/(32*pt);
ProtN1=(0.06*2*(IronMass+Mmag*2*poles*10^(-3)+AxisMass*10^(-3))/60)*nnom;
Plosses=PcopperN1+PddyN1+ProtN1;
apodosi=(Phl/(Phl+PcopperN1+PddyN1+ProtN1));

if abs(apodosi-efficiency)<0.02

flope=10;
penkat=penaltyfunction(wlin,flope);

test1=2*pi*Rin;
test2=wm*poles;
penkat1=penaltyfunction1(test1,test2,flope);

penkat2=penaltyfunction2(tw,wc,flope);

% PSO
output=totalcost+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=Vgen+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=totalmass+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(totalcost+20*totalmass)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(totalcost+Vgen/15)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(20*totalmass+Vgen/15)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(totalcost+20*totalmass+Vgen/15)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%HPSO
output=[totalcost+(100*(penkat+penkat1+penkat2)),totalmass+(100*(penkat+penkat1+penkat2))];

else
    efficiency=apodosi;

Pair=Phl/efficiency;
cp=0.35;
lamda=7;
airdens=1.2;

```

```

Vwcutin=3;
Vwnom=10;
EfcutinWB=200;
Efcutin=EfcutinWB/(sqrt(3)*1.35);

Rturb=sqrt(2*Pair/(airdens*cp*pi*Vwnom^3));
ncutin=60*Vwcutin*lamda/(2*pi*Rturb);
nnom=lamda*Vwnom*60/(2*pi*Rturb);
Efnom=Efcutin*(nnom/ncutin);
poles=120*fnom/nnom;

if mod(poles,4)>=2
    poles=(floor(poles/4)+1)*4;
else
    poles=floor(poles/4)*4;
end

Q=0.5*3*poles/2;
q=Q/3;
Phlmax=1.1*Phl;
PHMmax=Phlmax/efficiency;
Td=60*PHMmax/(2*pi*nnom);

%N40
Br=1.265;
Hc=915;
Hd=Hc/2;
BHmax=314;
Bd=BHmax/Hd;
Bmg=Bd+0.05;
Bmg=0.63;
Bmax=0.61;

%N45
%Br=1.35;
%Hc=923;
%Hd=Hc/2;
%BHmax=354;
%Bd=BHmax/Hd;
%Bmg=Bd+0.05;
%Bmg=0.635;
%Bavg=0.4;
%Bmax=0.62;

Bavg=ai*Bmax;
Bmean=(Bavg+Bmax)/2;
mrrec=Br/(4*pi*10^(-7)*Hc*1000);
hm=10;
g=3;

if hm==10
    tw=(2/Bmax)*[(Br*hm/mrrec)-Bmg*(g+hm/mrrec)]+0.5;
end

if hm==12
    tw=(2/Bmax)*[(Br*hm/mrrec)-Bmg*(g+hm/mrrec)]+0.25;
end

kD=1;
thitam=pi*poles/Q;
thitare=kd/(1+kD)*thitam;
kp=2*sin((thitam-thitare)/2)*sin(thitare/2)/thitare;
kwc=kp*kD*sqrt(thitare*q/poles);
deltac=(2/poles)*(1+kD)/(1-kD)*(thitam-0.6*thitare);
kec=(2+deltac)^(-0.5);
kr=sqrt(((1+kD)^3)*(1-kD));

if (hm==10) & (fnom==40)
    Bp=-0.00473+1.21747*ai-0.13874*ai^2-0.47273*ai^3+0.11932*ai^4;
    Bp2=Bp;
end

```

```

if (hm==10) & (fnom==50)
    Bp=interp2 (KDD,AII,maxcn4500N40080,kd,ai);
    Bp2=Bp;
end

if (hm==12) & (fnom==40)
    Bp=0.00385+1.2171*ai-0.2727*ai^2-0.34492*ai^3+0.09084*ai^4;
    Bp2=Bp;
end

if (hm==12) & (fnom==50)
    Bp=0.00821+1.17685*ai-0.24073*ai^2-0.3777*ai^3+0.11024*ai^4;
    Bp2=Bp;
end

Jmax=6;
kf=0.55;
Temp=(1-kd)+(thitam+0.6*thitare)*(1+kd)/poles;
Temp2=sqrt(4.5*q*(kd+1)*sin(thitare/poles)*Temp);
Rout=((Td/1000)/(kwc*kec*kr*Jmax*tw*kf*Bp2*Temp2))^(1/3)*1000;
Rin=kd*Rout;
mal=(2*pi/poles)*ai;
la=Rout*cos(malakia/2)-Rin;
Ravg=(Rout+Rin)/2;
lec=2*(Rout+Rin)*(thitam-0.6*thitare)/poles;
lavg=2*la+lec;

kw=0.95;
we=2*pi*ncutin*poles/120;
Nc=Efcutin*poles/(2*sqrt(2)*we*Bp*q*kw*(Ravg/1000)*(la/1000));
Nc=ceil(Nc);
Nphase=Nc*q;

Ia=1.1*Phl/(3*Efnom);
Ianom=1.1*Phl/(3*Efnom*0.85);
wc=Nc*Ianom/(Jmax*kf*tw);

dc=0.95;
sc=dc^2*pi/4;
wc=sc*Nphase/(kf*q*tw);
Jmax=Nc*Ianom/(wc*kf*tw);

p20=1.68*10^(-8);
tc=80;
pt=p20*(1+0.0039*(tc-20));
Rc=pt*Nc*lavg*10^(-3)/(sc*10^(-6));

wm=ai*2*pi*Ravg/poles;
wmout=wm;
wmin=wm;

%Πραγματική διαστοση μαγνητη
magangle1=2*pi/poles;
anglereal=wm/Ravg;
wmreal=2*Ravg*sin(anglereal/2);

w3=(2*pi*Ravg-poles*wm)/poles;
w3out=(2*pi*Rout-poles*wmout)/poles;
w3in=(2*pi*Rin-poles*wmin)/poles;

w2=0.5;
w1=(2*pi*Ravg-2*Q*wc-Q*w2)/Q;
wlout=(2*pi*Rout-2*Q*wc-Q*w2)/Q;
wlin=(2*pi*Rin-2*Q*wc-Q*w2)/Q;

%Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνιου
coilanglein=2*pi*wlin/(Q*(wlin+2*wc+w2));
wlinr=2*Rin*sin(coilanglein/2);
coilangleout=2*pi*wlout/(Q*(wlout+2*wc+w2));
wloutr=2*Rout*sin(coilangleout/2);

```

```

wc=floor(wc*100)/100;
wm=floor(wm*100)/100;
wmout=floor(wmout*100)/100;
wmin=floor(wmin*100)/100;
w3=floor(w3*100)/100;
w3out=floor(w3out*100)/100;
w3in=floor(w3in*100)/100;
w1=floor(w1*100)/100;
wlout=floor(wlout*100)/100;
wlin=floor(wlin*100)/100;
tw=floor(tw*100)/100;
la=floor(la*100)/100;

Kn=(1+0.9*lavg/(2*pi*tw)+0.32*2*pi*wc/lavg+0.84*wc/tw)^(-1);
Ls=[q*((lavg/1000)^2)*(Nc^2)*(10^(-7))/(tw/1000)]*Kn;
tp=2*pi*Ravg/poles;

pmag=7.5; %g/cm3
Smag=wm*la;
Vmag=wm*la*hm;
Mmag=pmag*Vmag*10^(-3); %g
shippingcost=Vmag*2*poles*20/(24*13800);
%cost for N40
Magcost=(0.6186+9.2715*10^(-4)*Vmag)*2*poles+shippingcost;
%cost for N45
Magcost=(1.8579+4.7408*10^(-4)*Vmag)*2*poles+shippingcost;

pcu=8.94;
mcu=3*Nphase*lavg*sc*pcu*(10^(-6)); %kg
copperprice=12; %E/kg
coppercost=1.23*copperprice*mcu;

ironprice=1; %E/kg
pFe=7.87; %g/cm3
roph=Rout*(10^(-3))*0.5*(0.62^2)*Smag*10^(-6)*poles/(4*pi*10^(-7));
DiscV=3.13036*10^(-4)+1.18768*10^(-6)*roph; %xoris papers
hr=DiscV*10^(9)/(pi*(Rout^2)); %mm

if hr<10
    hr=10;
end

IronVolume=2*hr*pi*(Rout^2)*10^(-3);
IronMass=IronVolume*pFe*10^(-3); %kg
ironcost=1.23*ironprice*IronMass;

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;

woodS=(2*(Rout*10^(-3)+0.1))^2;
woodcost=3*woodS*17+6*woodS*22.4;

AxisMass=pi*7.5^2*2*pFe;

%Ολικό κόστος
totalcost=Magcost+coppercost+ironcost+resincost+woodcost;
totalmass=resinmass+IronMass+mcu+Mmag/1000;
othermass=resinmass+mcu+Mmag/1000;
othercosts=coppercost+ironcost+resincost+woodcost;
aiout=wm*poles/(2*pi*Rout);
aiin=wm*poles/(2*pi*Rin);

Vgen=10^(-3)*pi*(Rout^2)*(2*hr+2*hm+2*g+tw);

flope=10;
penkat=penaltyfunction(wlin,flope);

```

```

test1=2*pi*Rin;
test2=wm*poles;
penkat1=penaltyfunction1(test1,test2,flope);

penkat2=penaltyfunction2(tw,wc,flope);
%PSO
output=totalmass+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=totalcost+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=Vgen+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(totalcost+10*totalmass)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(totalcost+Vgen/15)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(20*totalmass+Vgen/15)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%output=(totalcost+20*totalmass+Vgen/15)+100*(penkat+penkat1+penkat2);
%HPSO
output=[totalcost+(100*(penkat+penkat1+penkat2)),totalmass+(100*(penkat+penkat1+penkat
2))];

end

end

```

B.2 Αλγόριθμος για μέθοδο βελτιστοποίησης PSO

```
clear all
close all

global Ph1 fnom Vgen efficiency apodosi Plosses hr DiscV penkat penkat1 Ia penkat2
penkat3 ProtN1 PcopperN1 tw output test totalmass Pair cp lamda totalcost airdens
Vwcutin Vwnom Efcutin Efnom ncutin nnom poles Q q Td Br Hc BHmax Bmg ai mrrec hm g kD
kd kp kwc kec kr Bp2 Jmax kf Rout Rin la Ravg kw we Nc Ianom wc dc wm wmount wmin
wmreal w3 w3out w3inw1 wlout wlin Ls;

%% parameters setup
n_particle=10; % numbers of particles
Vmax=[0.05 0.05]; %velocity band
inertia=[0.7 0.7]; %inertia constant
phi1=[0.3 0.3]; %self acceleration constant
phi2=[0.7 0.7]; %social acceleration constant
iteration_max=150; % maximum iterations
n_variable=2; % number of design variables

%% initialization
% d=10000*ones(round(n_variable*n_particle),round(iteration_max));
d(:,1)=[0.6*rand(n_particle,1)+0.3;0.5*rand(n_particle,1)+0.4];

for k=1:n_particle
input=[d(k,1) d(k+n_particle,1)];
S(k,1)=functiondiast3(input);
end

Smin=S; %minimum for each particle
dmin=d; %optimum position for each particle

v(1:n_particle,2)=2*Vmax(1)*(rand(n_particle,1)-0.5); %initialize velocity for ai
v(n_particle+1:n_particle*2,2)=2*Vmax(2)*(rand(n_particle,1)-0.5); %initialize
velocity for kd
%v(n_particle*2+1:n_particle*3,2)=2*Vmax(3)*(rand(n_particle,1)-
%0.5);
%v(n_particle*3+1:n_particle*4,2)=2*Vmax(4)*(rand(n_particle,1)-
%0.5);

[Gmin i]=min(Smin); %global minimum
dGmin=[d(i) d(i+n_particle)]; %global optimum position

%% Searching

tic

for i=2:iteration_max;
d(:,i)=d(:,i-1)+v(:,i);
%S(:,i)=exp(d(:,i)).*sin(2*pi*d(:,i))+5e2*(2+sign(d(:,i)-5)-
%sign(d(:,i)));

parfor k=1:n_particle
input=[d(k,i) d(k+n_particle,i)];
S(k,i)=functiondiast3(input);
end

%%update local minimum and position
for k=1:n_particle
if Smin(k)>S(k,i)
Smin(k)=S(k,i);
dmin(k)=d(k,i);
dmin(k+n_particle)=d(k+n_particle,i);
%dmin(k+n_particle*2)=d(k+n_particle*2,i);
%dmin(k+n_particle*3)=d(k+n_particle*3,i);
end;
end;
```

```

%%update global minimum and position
if Gmin>min(Smin)
[Gmin j]=min(Smin);
dGmin(1)=dmin(j);
dGmin(2)=dmin(j+n_particle);
%dGmin(3)=dmin(j+n_particle*2);
%dGmin(4)=dmin(j+n_particle*3);
end

%%update velocity
v(1:n_particle,i+1)=inertia(1)*v(1:n_particle,i)+phi1(1)*rand*(dmin(1:n_particle)-
d(1:n_particle,i))+phi2(1)*rand*(dGmin(1)-d(1:n_particle,i));

v(n_particle+1:n_particle*2,i+1)=inertia(2)*v(n_particle+1:n_particle*2,i)+phi1(2)*ran
d*(dmin(n_particle+1:n_particle*2)-
d(n_particle+1:n_particle*2,i))+phi2(2)*rand*(dGmin(2)-
d(n_particle+1:n_particle*2,i));

%v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1)=inertia(3)*v(n_particle*2+1:n_partic
%le*3,i)+phi1(3)*rand*(dmin(n_particle*2+1:n_particle*3)-
%d(n_particle*2+1:n_particle*3,i))+phi2(3)*rand*(dGmin(3)-
%d(n_particle*2+1:n_particle*3,i));

%v(n_particle*3+1:n_particle*4,i+1)=inertia(4)*v(n_particle*3+1:n_partic
%le*4,i)+phi1(4)*rand*(dmin(n_particle*3+1:n_particle*4)-
%d(n_particle*3+1:n_particle*4,i))+phi2(4)*rand*(dGmin(4)-
%d(n_particle*3+1:n_particle*4,i));

%%band of velocity
v(1:n_particle,i+1)=min(v(1:n_particle,i+1),Vmax(1));
v(1:n_particle,i+1)=max(v(1:n_particle,i+1),-Vmax(1));

v(n_particle+1:n_particle*2,i+1)=min(v(n_particle+1:n_particle*2,i+1),Vmax(2));
v(n_particle+1:n_particle*2,i+1)=max(v(n_particle+1:n_particle*2,i+1),-Vmax(2));

%v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1)=min(v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+
%1),Vmax(3));
%v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1)=max(v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+
%1),-Vmax(3));

%v(n_particle*3+1:n_particle*4,i+1)=min(v(n_particle*3+1:n_particle*4,i+
%1),Vmax(4));
%v(n_particle*3+1:n_particle*4,i+1)=max(v(n_particle*3+1:n_particle*4,i+
%1),-Vmax(4));
end;

dGmin;
Gmin;
toc

%% Plot
t=1:iteration_max;
figure(1)

for n=2:n_particle
plot(t,d(n,:));
hold on;
end

for n=n_particle+1:n_particle*2
plot(t,d(n,:), 'r-.');
hold on;
end

%for n=n_particle*2+1:n_particle*3
%plot(t,d(n,:), 'g--');
%hold on;
%end

%for n=n_particle*3+1:n_particle*4
%plot(t,d(n,:), 'y-o');
%hold on;
%end

```



```
hold off
xlabel('Number of iterations')
ylabel('Values of ai and kd')
title('Particle behavior(DiasGap:-;Length:-.-)')

figure(2)
for n=1:n_particle
plot(t,S(n,:));
hold on;
end
hold off
xlabel('Number of iterations')
ylabel('value of objective function')
title('Output of each particle')
```

B.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης για μέθοδο HPSO (Pareto Front)

```
clear all
close all

global Phl fnom Vgen efficiency apodosi Plosses penkat penkat1 penkat2 penkat3 ProtN1
Rturb tw output test totalmass Pair cp lamda totalcost airdens Vwcutin Vwnom Efcutin
Efnom ncutin nnom poles Q q Td Br Hc BHmax Bmg ai mrrec hm g kD kd kp kwc kec kr
Bp2Jmax kf Rout Rin la Ravg kw we Nc Ianom wc dc wm wmout wmin wmreal w3 w3out w3inw1
wlout wlin Ls;

%% parameters setup
n_particle=100; % numbers of particles
Vmax=[0.01 0.01]; %velocity band
inertia=[0.7 0.7]; %inertia constant
phi1=[0.3 0.3]; %self acceleration constant
phi2=[0.3 0.3]; %social acceleration constant
iteration_max=200; % maximum iterations

%% initialization
d(:,1)= [0.6*rand(n_particle,1)+0.3;0.57*rand(n_particle,1)+0.4];
magn=500;

for k=1:n_particle
input(k,:)=d(k,1) d(k+n_particle,1)];
p_mout=functiondiast3(input(k,:));
Sp(k,:)=p_mout;
end

for k=1:n_particle
input(k,:)=d(k,1) d(k+n_particle,1)];
input(1,:)=0.3 0.4];
p_mout=functiondiast3(input(k,:));
Sp(k,:)=p_mout;
end

v(1:n_particle,2)=2*Vmax(1)*(rand(n_particle,1)-0.5); %initialize velocity for ai
v(n_particle+1:n_particle*2,2)=2*Vmax(2)*(rand(n_particle,1)-0.5); %initialize
velocity for kd
%v(n_particle*2+1:n_particle*3,2)=2*Vmax(3)*(rand(n_particle,1)-0.5);

% setup an archive for pareto front
front=paretofront(Sp);
archd=input(front,:); % setup an archive of pareto front
arch=Sp(front,:); % setup an archive of pareto front

ndSmin=round(rand*length(arch));
if ndSmin==0
ndSmin=1;
end

ndGmin=round(rand*length(arch));
if ndGmin==0
ndGmin=1;
end

dSmin=input(ndSmin,:);
dGmin=input(ndGmin,:);
% Smin=S; %minimum for each particle
% dmin=d; %optimum position for each particle
% [Gmin i]=min(Smin); %global minimum
% dGmin=[d(i) d(i+n_particle) d(i+n_particle*2)]; %global optimum position
%% Searching
for i=2:iteration_max;
d(:,i)=d(:,i-1)+v(:,i);

for k=1:n_particle
input(k,:)=d(k,i) d(k+n_particle,i)];
p_mout=functiondiast3(input(k,:));
Sp(k,:)=p_mout;
end
```

```

% Update archive
Sp1=[Sp;arch];
input1=[input;archd];
front=paretofront(Sp1);
archd=input1(front,:); % setup an archive of pareto front, the particle position
arch=Sp1(front,:); % setup an archive of pareto front, the particle output

[m,n]=size(arch);

if m==1
    ndSmin=1;
    ndGmin=1;
else

ndSmin=round(rand*length(arch));
if ndSmin==0
ndSmin=1;
end

ndGmin=round(rand*length(arch));
if ndGmin==0
ndGmin=1;
end

% update global and local minimum
dSmin=archd(ndSmin,:);
dGmin=archd(ndGmin,:);

%%update velocity
v(1:n_particle,i+1)=inertia(1)*v(1:n_particle,i)+phi1(1)*rand*(dSmin(1)-
d(1:n_particle,i))+phi2(1)*rand*(dGmin(1)-d(1:n_particle,i));
v(n_particle+1:n_particle*2,i+1)=inertia(2)*v(n_particle+1:n_particle*2,i)+phi1(2)*ran
d*(dSmin(2)-d(n_particle+1:n_particle*2,i))+phi2(2)*rand*(dGmin(2)-
d(n_particle+1:n_particle*2,i));
%v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1)=inertia(3)*v(n_particle*2+1:n_particle*3,i)+phi1(3
)*rand*(dSmin(3)-d(n_particle*2+1:n_particle*3,i))+phi2(3)*rand*(dGmin(3)-
d(n_particle*2+1:n_particle*3,i));
%%band of velocity
v(1:n_particle,i+1)=min(v(1:n_particle,i+1),Vmax(1));
v(1:n_particle,i+1)=max(v(1:n_particle,i+1),-Vmax(1));
v(n_particle+1:n_particle*2,i+1)=min(v(n_particle+1:n_particle*2,i+1),Vmax(2));
v(n_particle+1:n_particle*2,i+1)=max(v(n_particle+1:n_particle*2,i+1),-Vmax(2));
%v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1)=min(v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1),Vmax(3));
%v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1)=max(v(n_particle*2+1:n_particle*3,i+1),-Vmax(3));
end;

plot(arch(:,1),arch(:,2),'.');
axis([500 2000 50 110]);
xlabel('totalcost');
ylabel('totalmass');
%zlabel('volume');
hold;

```

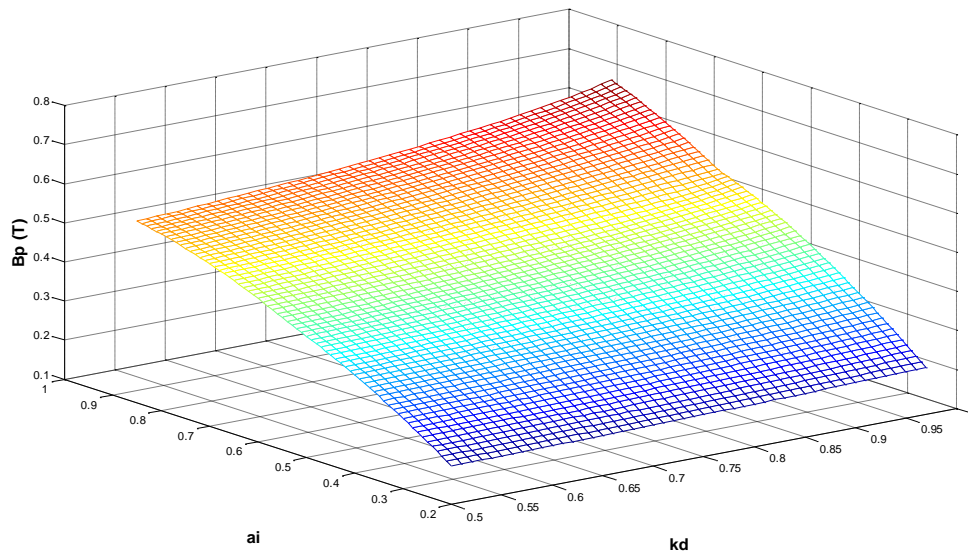

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Υπολογισμός 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής (B_p) στο διάκενο

Όπως προαναφέρθηκε αναλυτικά στο 4^ο Κεφάλαιο, βάση των λογισμικών (FEMM-MATLAB), έχει υπολογιστεί η 1^η αρμονική της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο γεννητριών που αντιστοιχούν σε διατάξεις που σχεδιάστηκαν για αρκετούς συνδυασμούς των ai-kd. Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες κυματομορφές που προέκυψαν για όλες τις ισχύς που μελετούνται στην παρούσα εργασία με χρήση των μαγνητών N40 και N45.

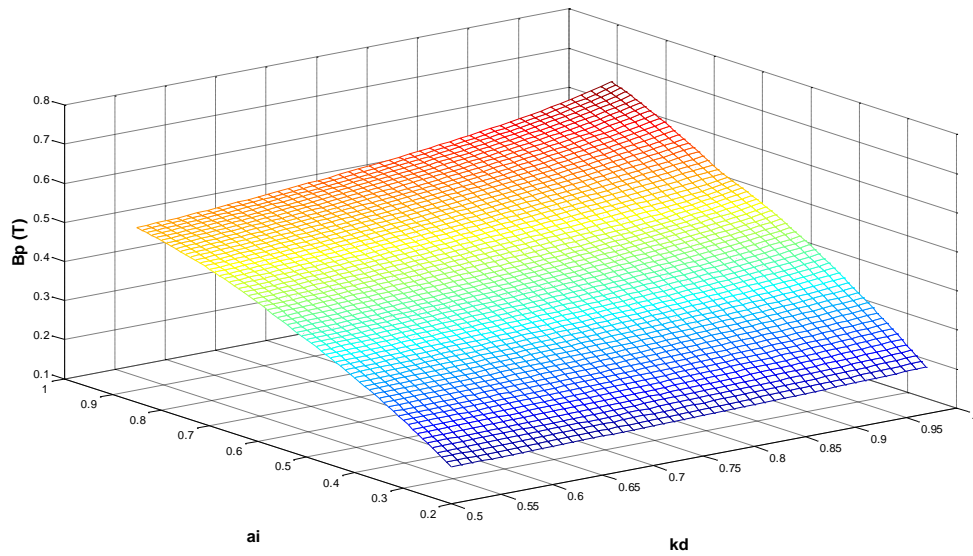
Γ.1 Γραφικές παραστάσεις για τις ισχύς 3 έως 6 KW με χρήση του μαγνήτη N40

Γ.1.1



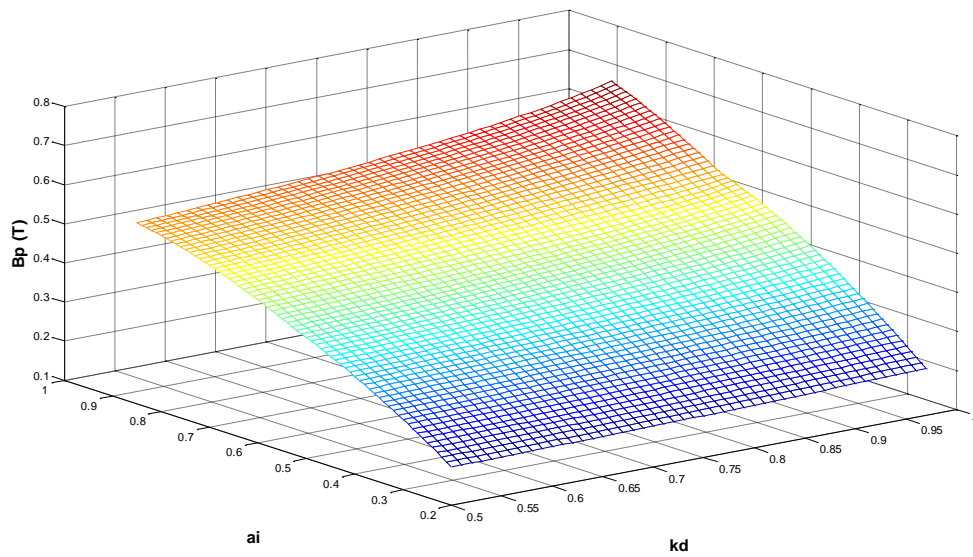
Σχήμα Γ.1 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai-kd για την ισχύ 3 KW με χρήση μαγνήτη N40

Γ1.2



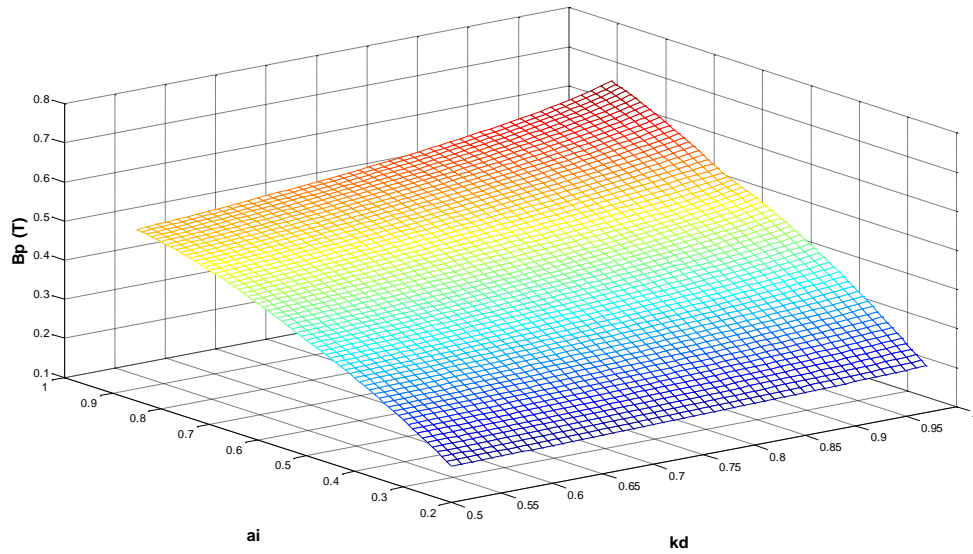
Σχήμα Γ.2 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 3.5 KW με χρήση μαγνήτη N40

Γ1.3



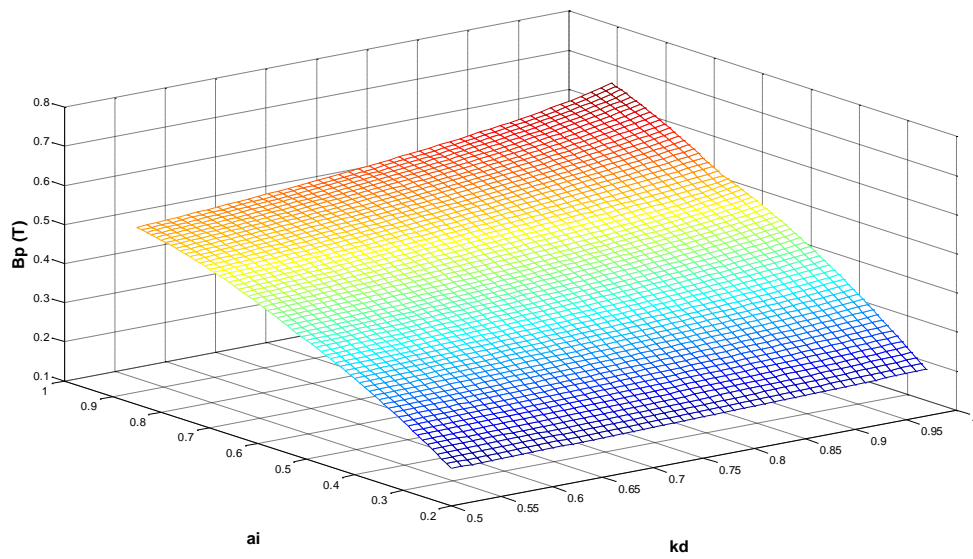
Σχήμα Γ.3 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 4 KW με χρήση μαγνήτη N40

Γ1.4



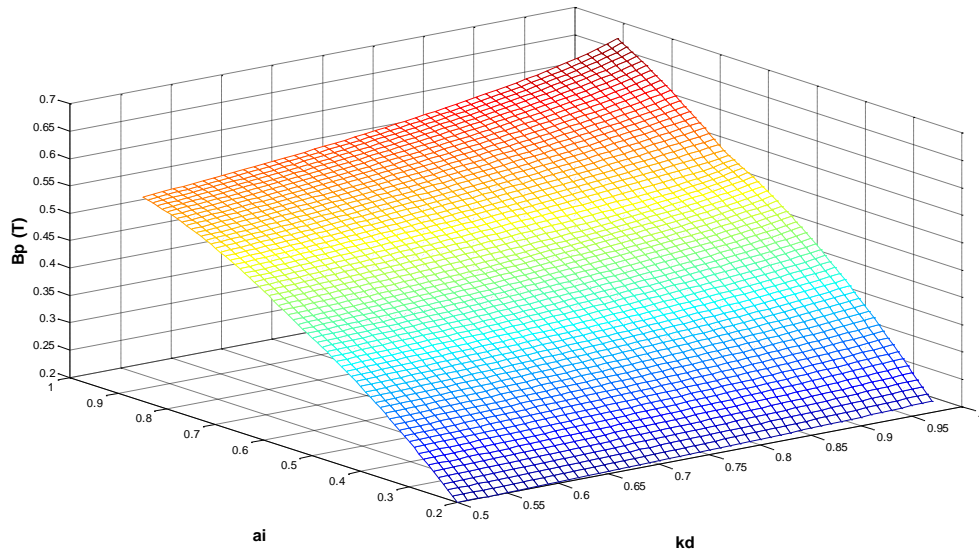
Σχήμα Γ.4 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai-kd για την ισχύ 4.5 KW με χρήση μαγνήτη N40

Γ1.5



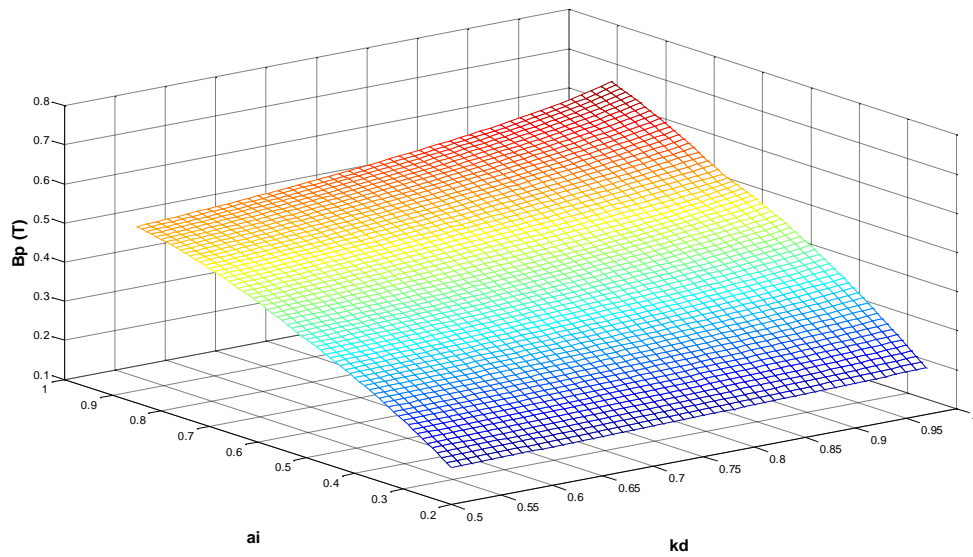
Σχήμα Γ.5 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai-kd για την ισχύ 5 KW με χρήση μαγνήτη N40

Γ1.6



Σχήμα Γ.6 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 5.5 KW με χρήση μαγνήτη N40

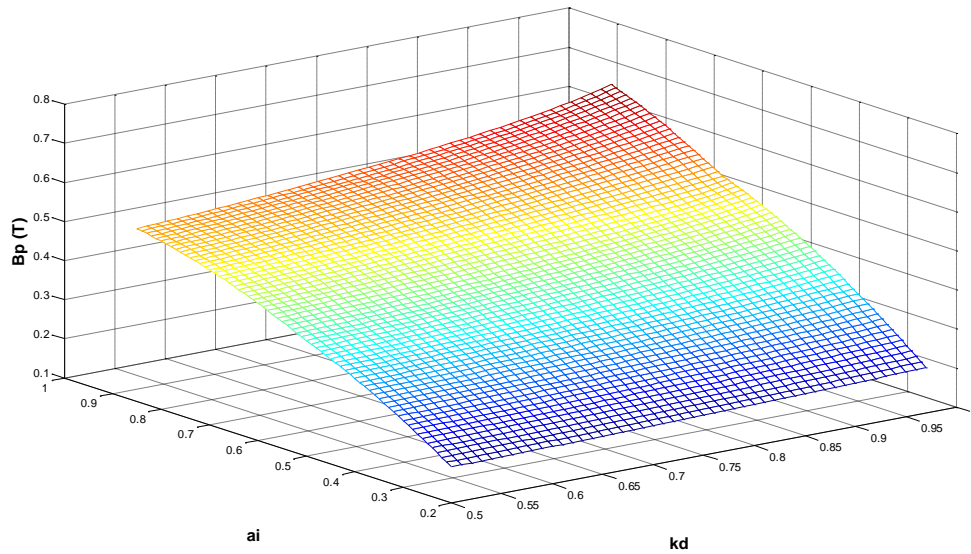
Γ1.7



Σχήμα Γ.7 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 6 KW με χρήση μαγνήτη N40

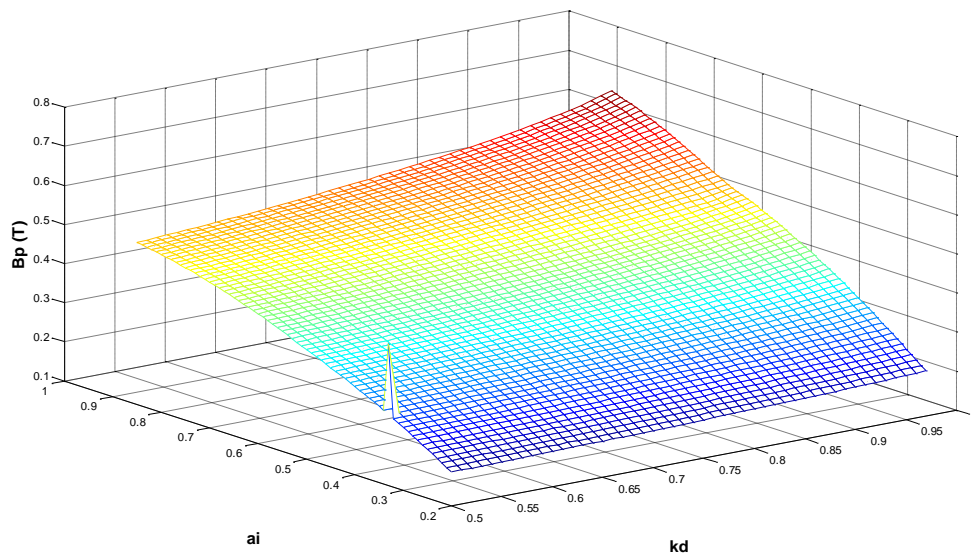
Γ.2 Γραφικές παραστάσεις για τις ισχύς 3 έως 6 KW με χρήση του μαγνήτη N45

Γ2.1



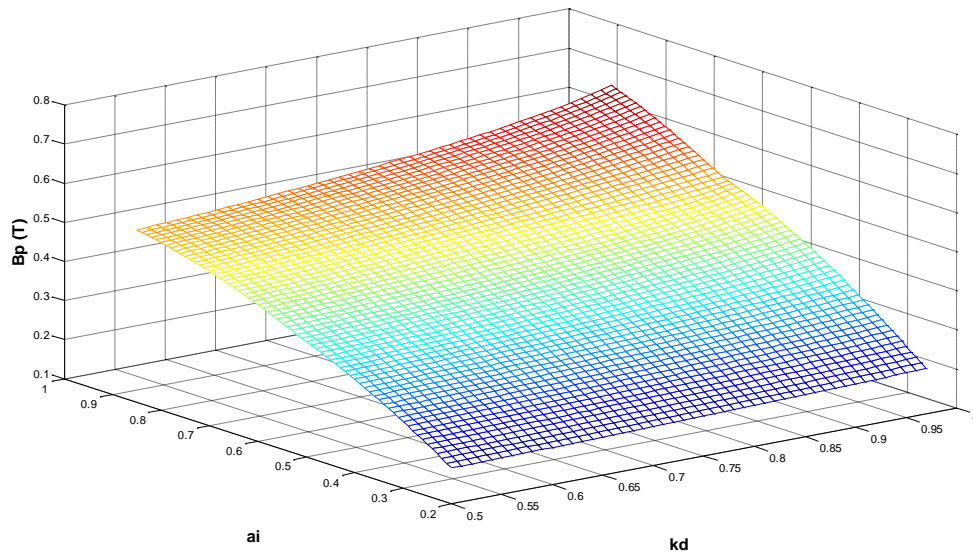
Σχήμα Γ.8 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 3 KW με χρήση μαγνήτη N45

Γ2.2



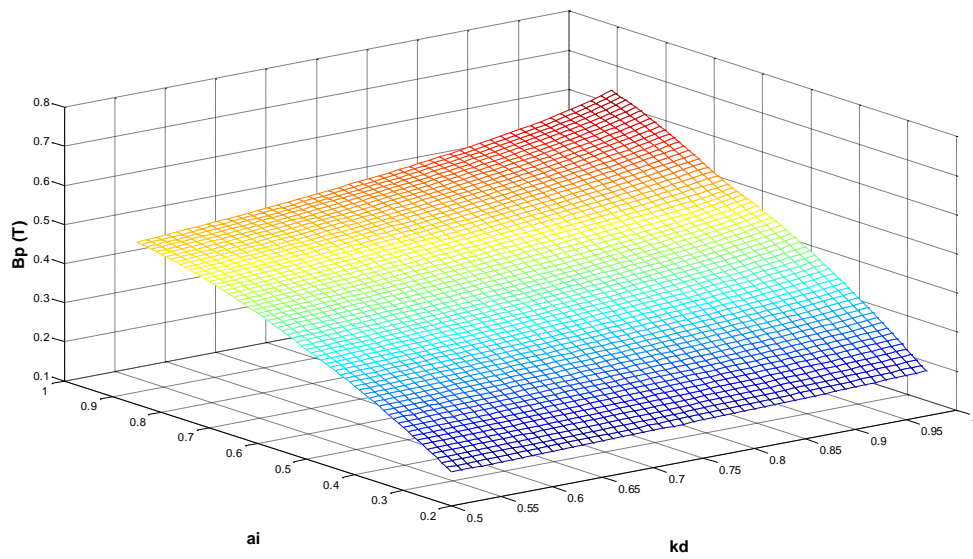
Σχήμα Γ.9 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 3.5 KW με χρήση μαγνήτη N45

Γ2.3



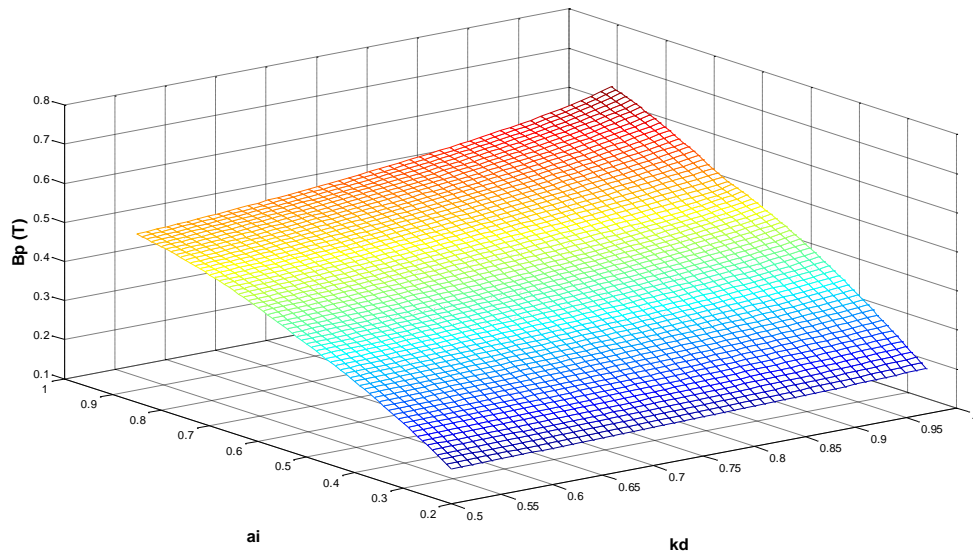
Σχήμα Γ.10 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 4 KW με χρήση μαγνήτη N45

Γ2.4



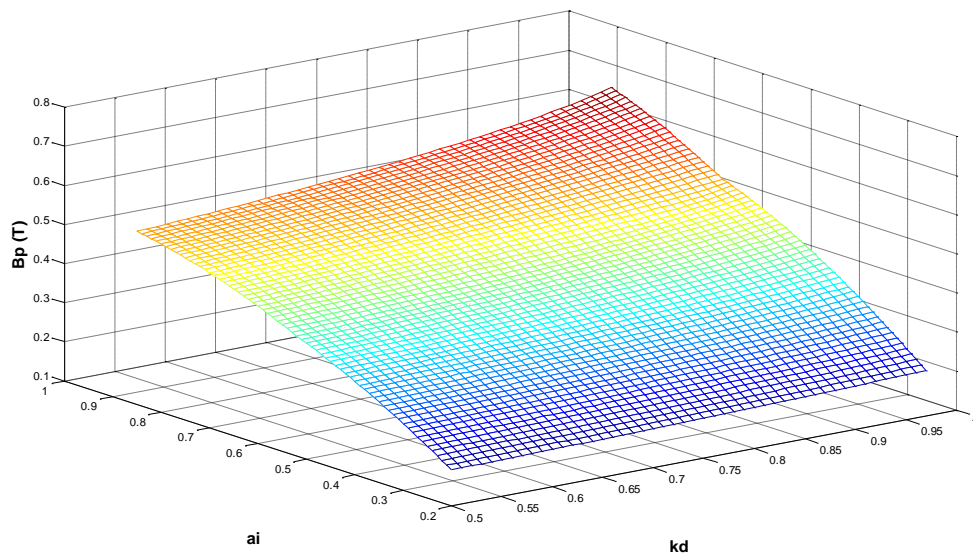
Σχήμα Γ.11 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 4.5 KW με χρήση μαγνήτη N45

Γ2.5



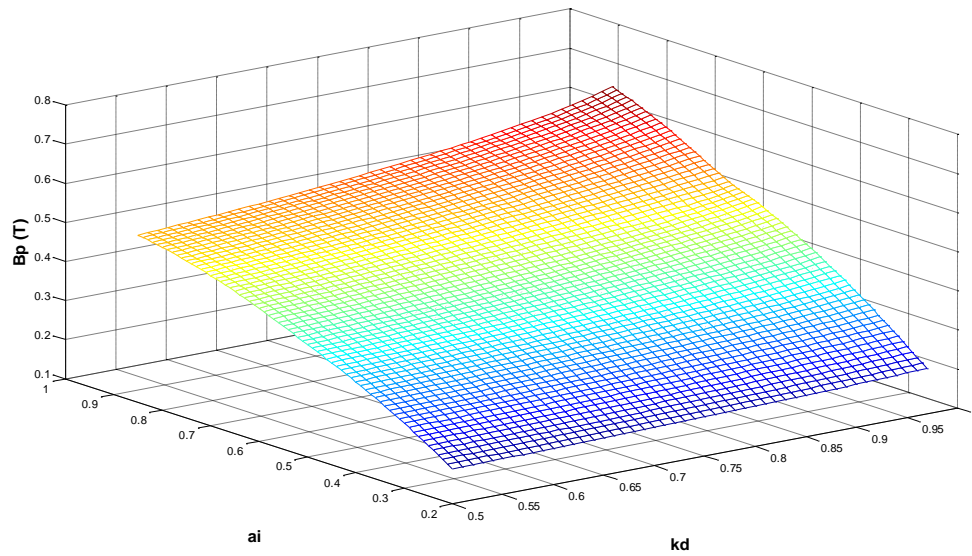
Σχήμα Γ.12 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 5 KW με χρήση μαγνήτη N45

Γ2.6



Σχήμα Γ.13 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των ai - kd για την ισχύ 5.5 KW με χρήση μαγνήτη N45

Γ2.7



Σχήμα Γ.14 : καμπύλη 1^{ης} αρμονικής μαγνητικής επαγωγής για συνδυασμούς των a_i - k_d για την ισχύ 6 KW με χρήση μαγνήτη N45

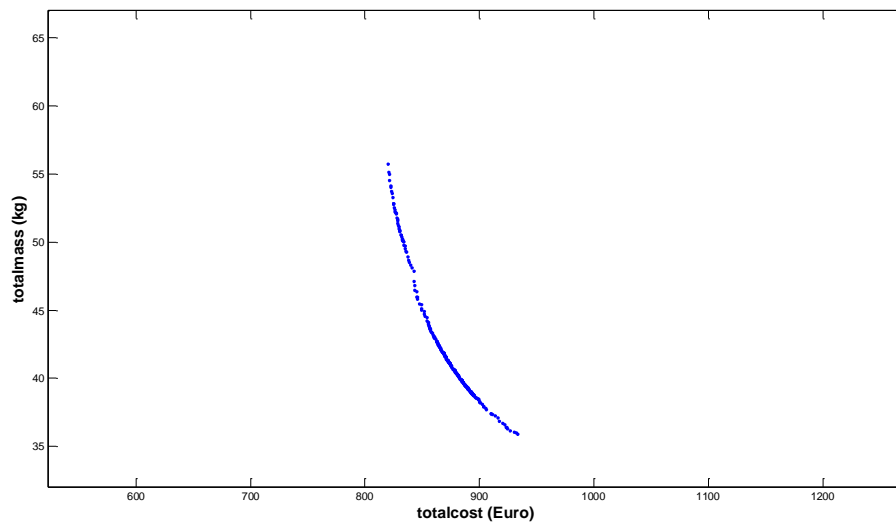
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Καμπύλες Pareto front για τις ισχύς 3 έως 6 KW

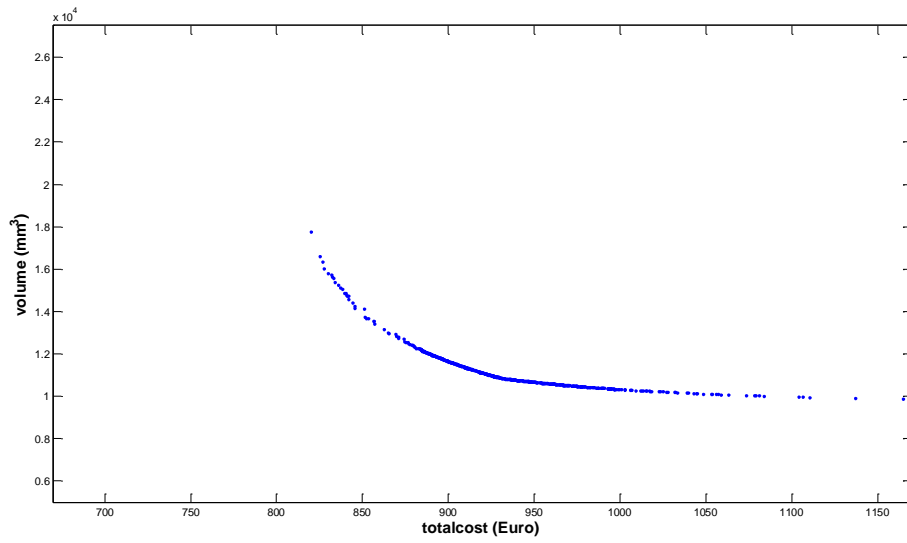
Όπως είδαμε στο 5^ο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδο βελτιστοποίησης HPSO για να απεικονισθούν οι συσχετισμοί ανάμεσα στις παραμέτρους που βελτιστοποιήθηκαν όπου και παρουσιάστηκαν 4 παραδείγματα αναλυτικά. Σε αυτό το παράρτημα, παρατίθενται οι καμπύλες Pareto Front για όλες τις ισχύς που εξετάζονται στην παρούσα εργασία και για όλα τα ζευγάρια παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, πιο συγκεκριμένα, κόστος-μάζα, κόστος-όγκος και μάζα-όγκος, με χρήση των μαγνητών N40 και N45.

ΜΑΓΝΗΤΗΣ N40

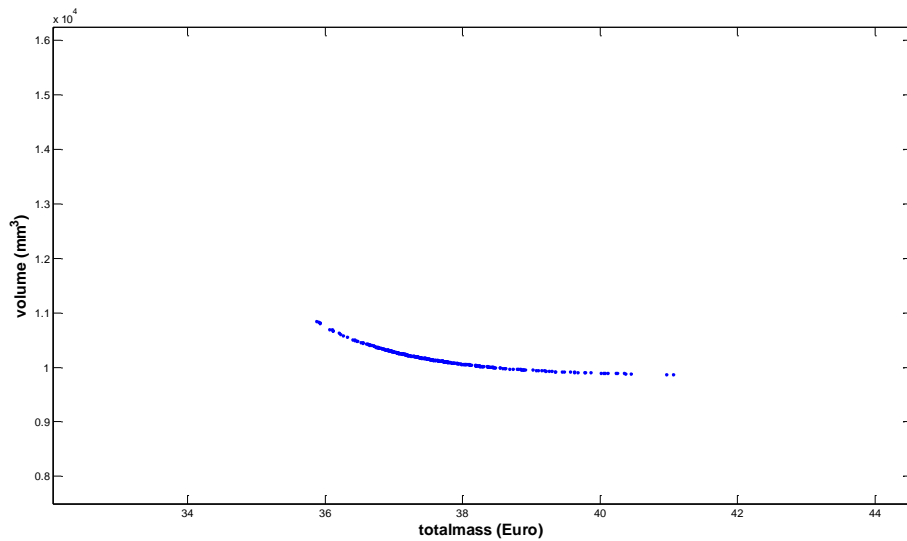
ΙΣΧΥΣ 3 KW



Σχήμα Δ.1 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 3 KW

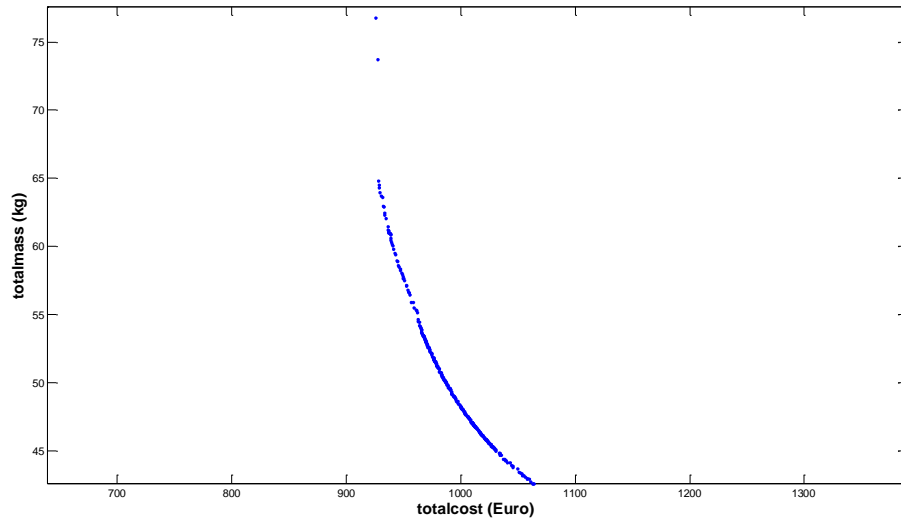


Σχήμα Δ.2 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 3 KW

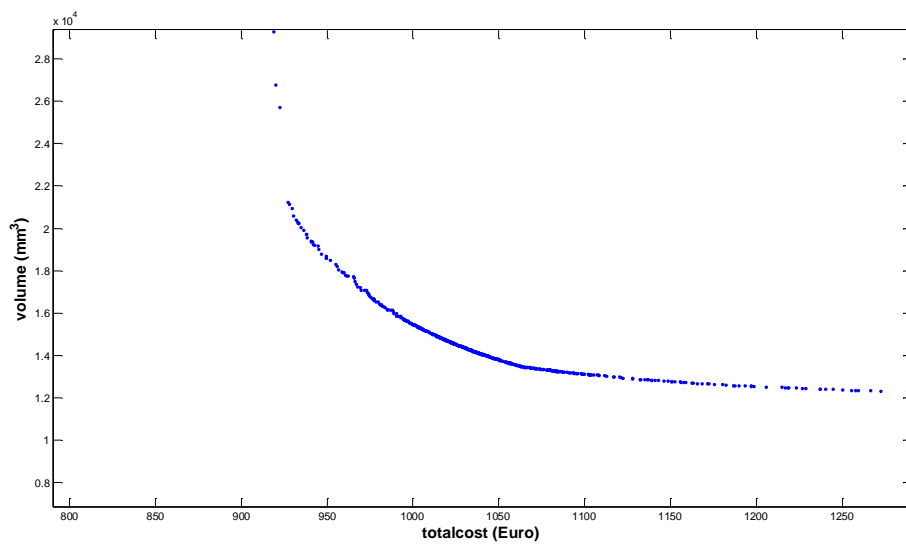


Σχήμα Δ.3: καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 3 KW

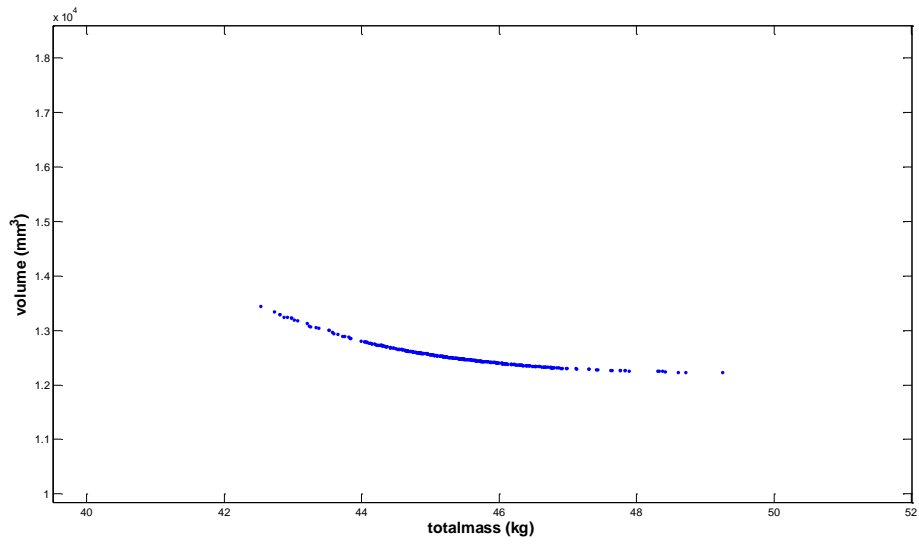
ΙΣΧΥΣ 3.5 KW



Σχήμα Δ.4 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 3.5 KW

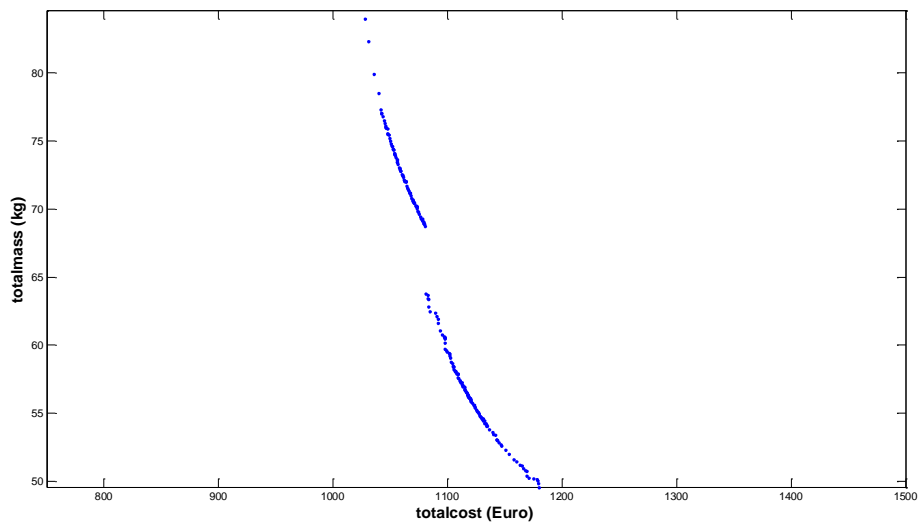


Σχήμα Δ.5 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 3.5 KW

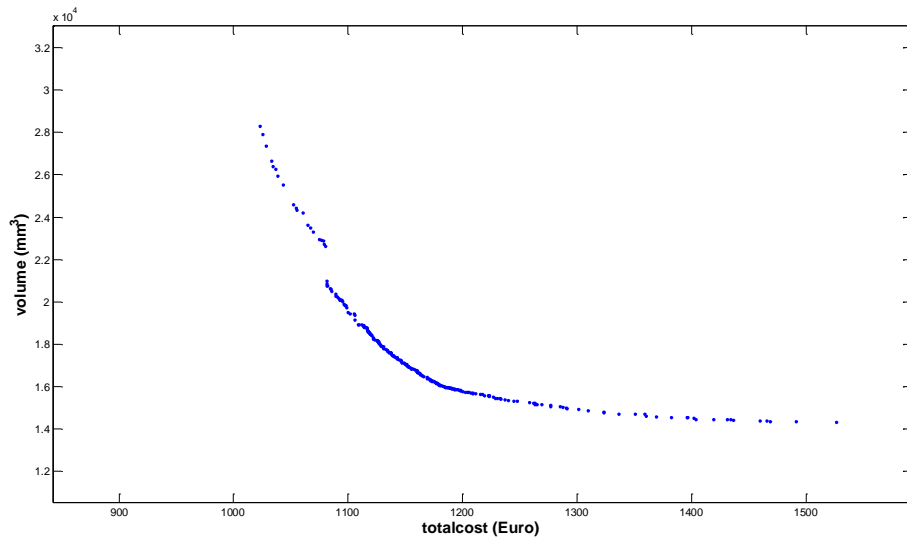


Σχήμα Δ.6 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 3.5 KW

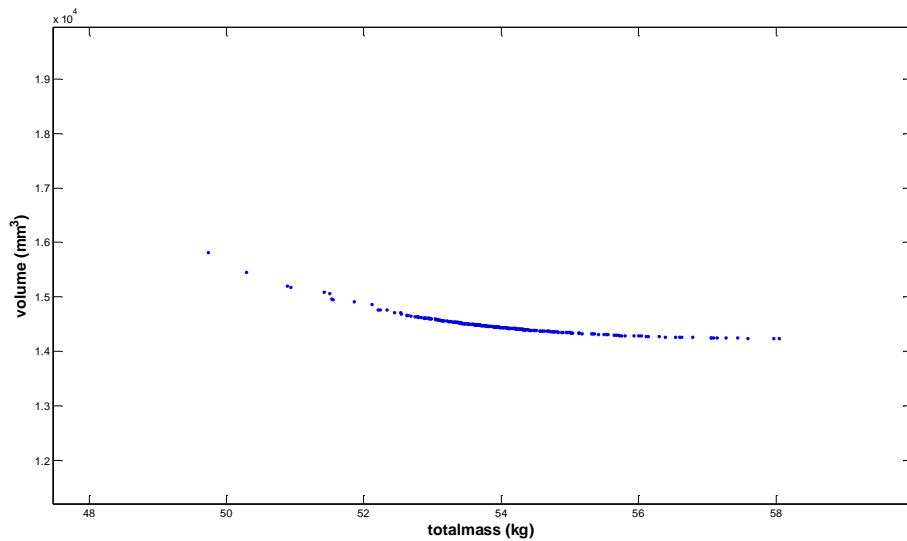
ΙΣΧΥΣ 4 KW



Σχήμα Δ.7 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 4 KW

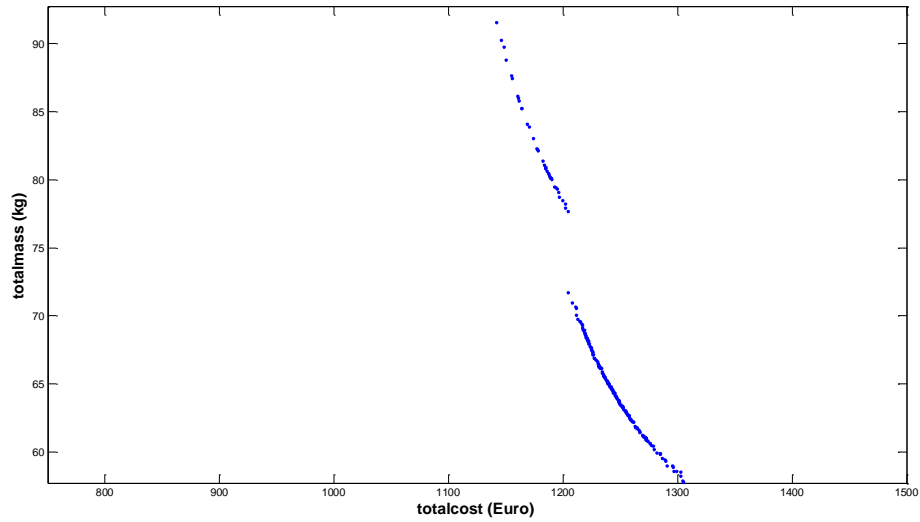


Σχήμα Δ.8: καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 4 KW

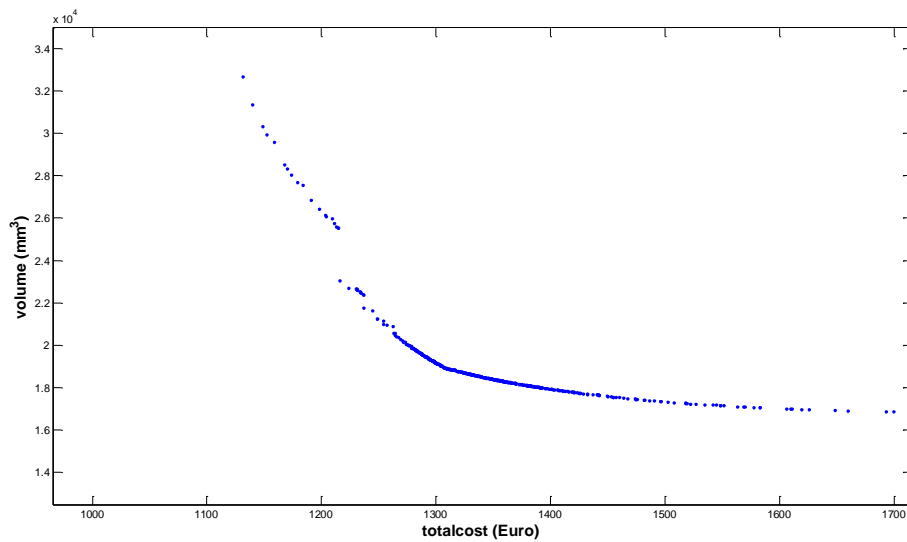


Σχήμα Δ.9 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 4 KW

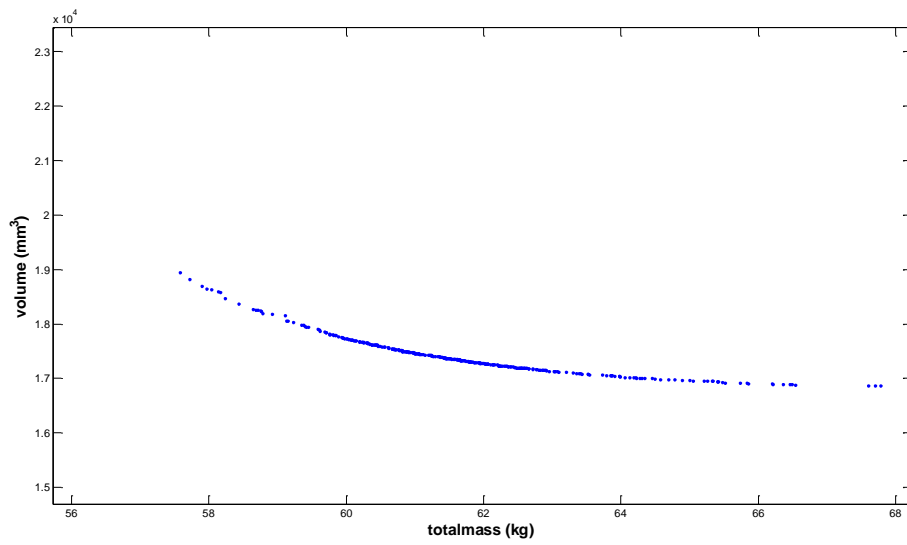
ΙΣΧΥΣ 4.5 KW



Σχήμα Δ.10 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 4.5 KW

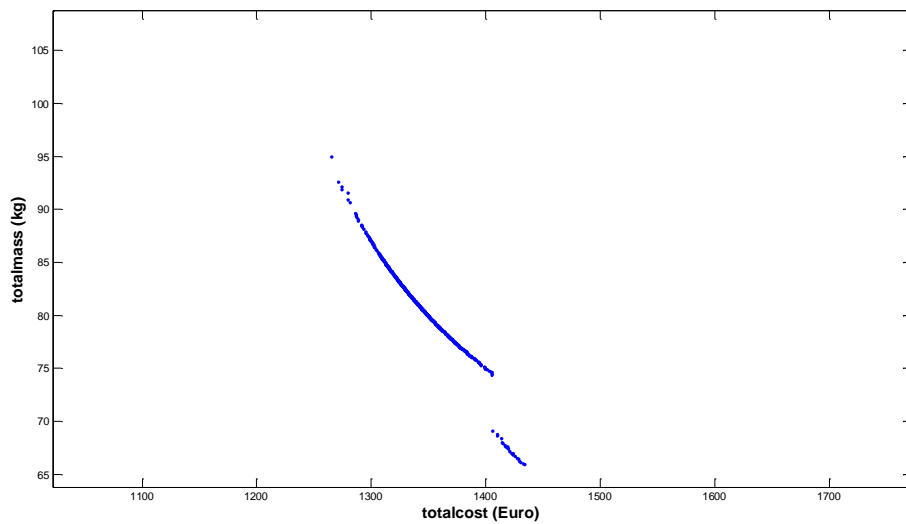


Σχήμα Δ.11 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 4.5 KW

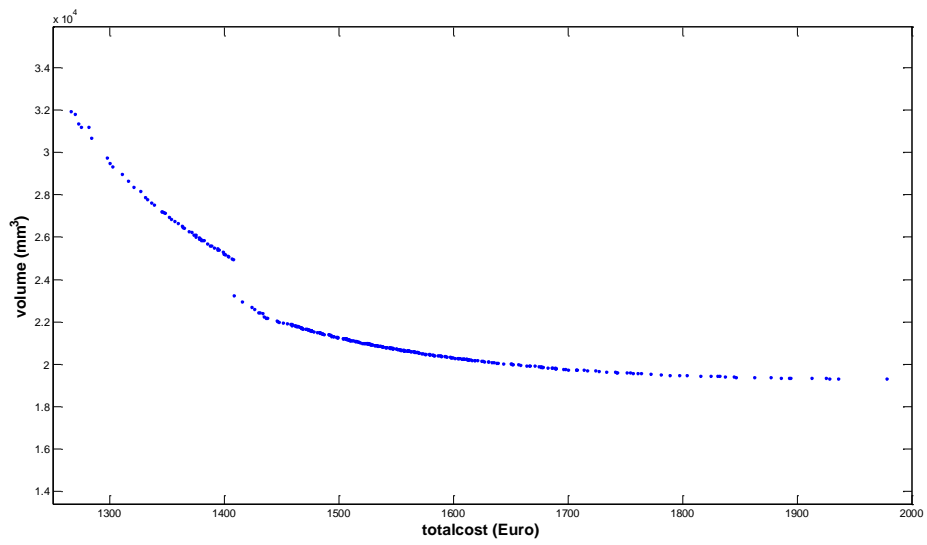


Σχήμα Δ.12 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 4.5 KW

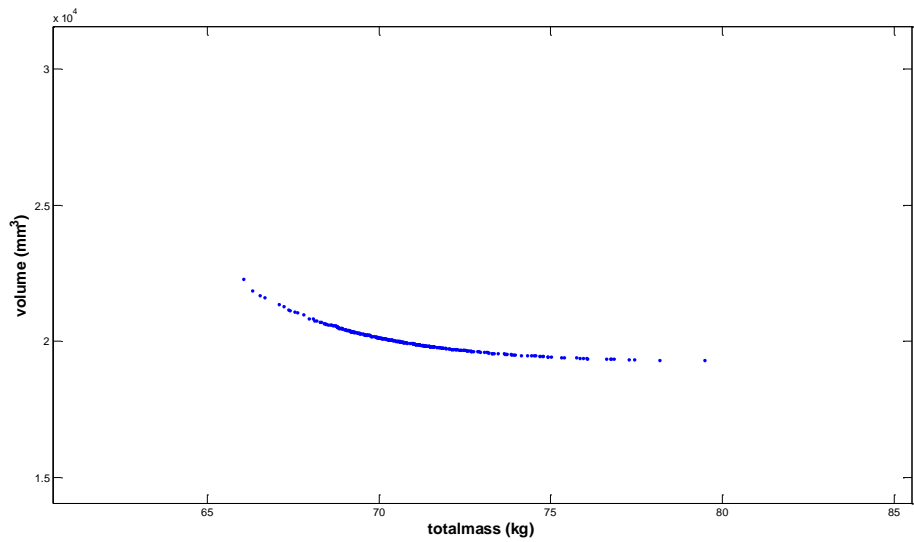
ΙΣΧΥΣ 5 KW



Σχήμα Δ.13 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 5 KW

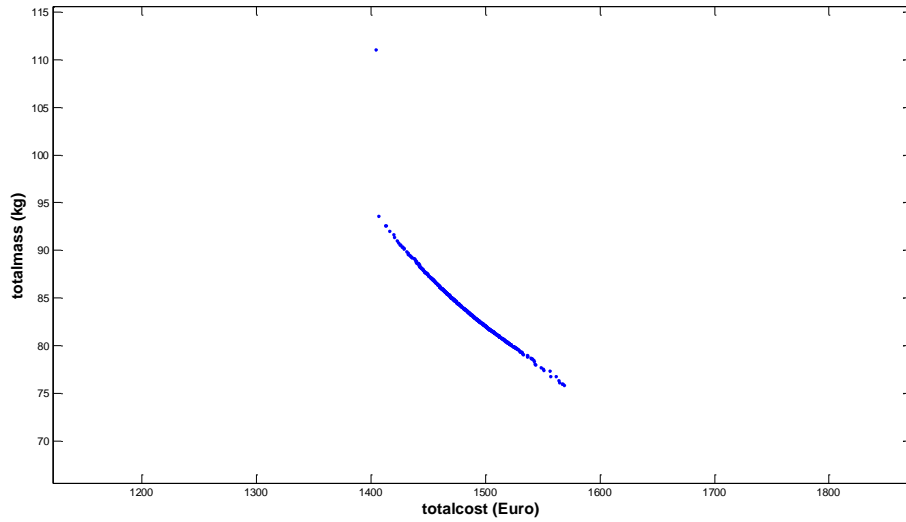


Σχήμα Δ.14 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 5 KW

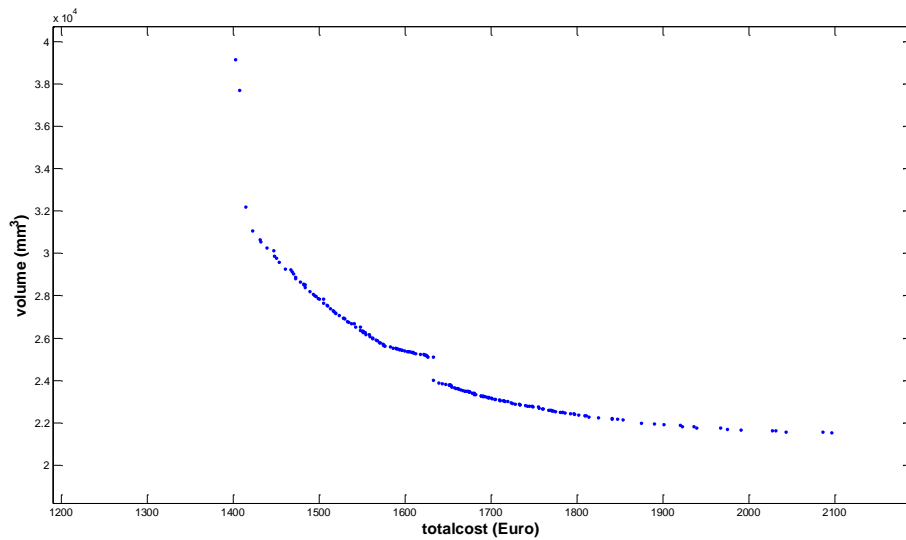


Σχήμα Δ.15 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 5 KW

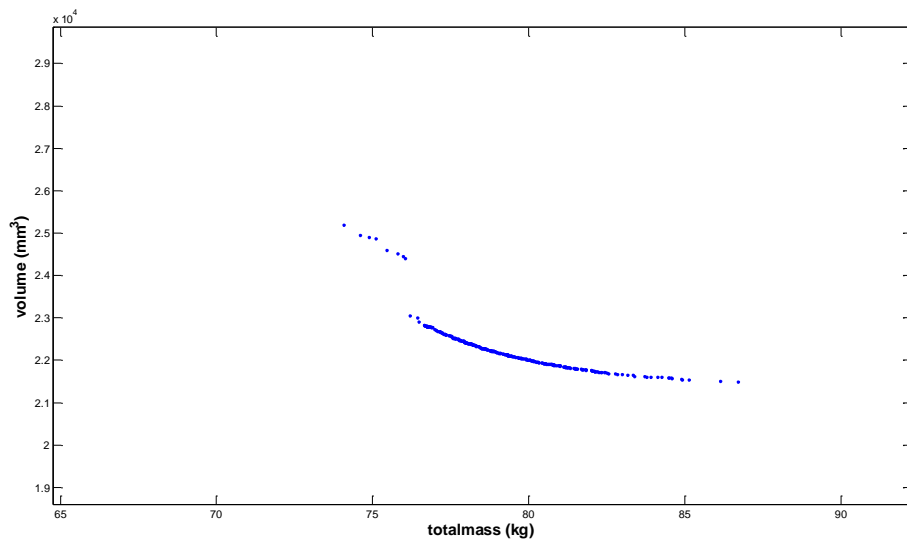
ΙΣΧΥΣ 5.5 KW



Σχήμα Δ.16 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 5.5 KW

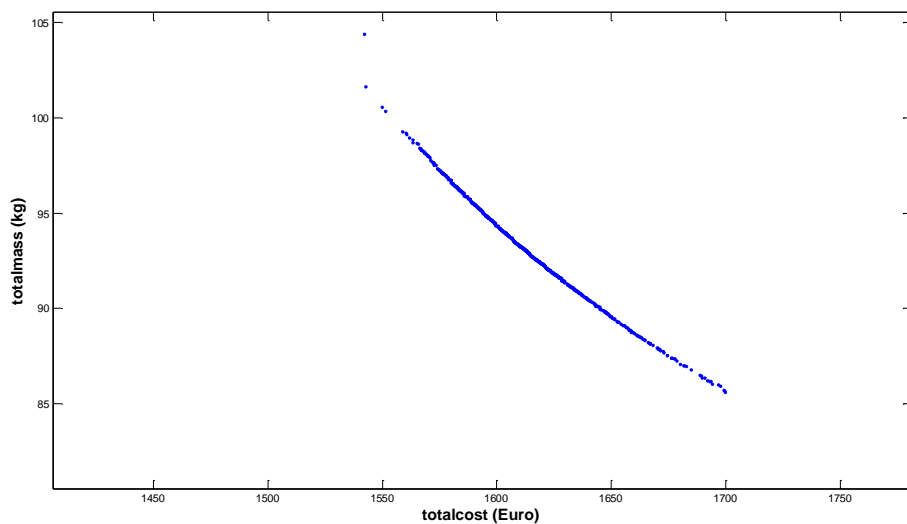


Σχήμα Δ.17 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 5.5 KW

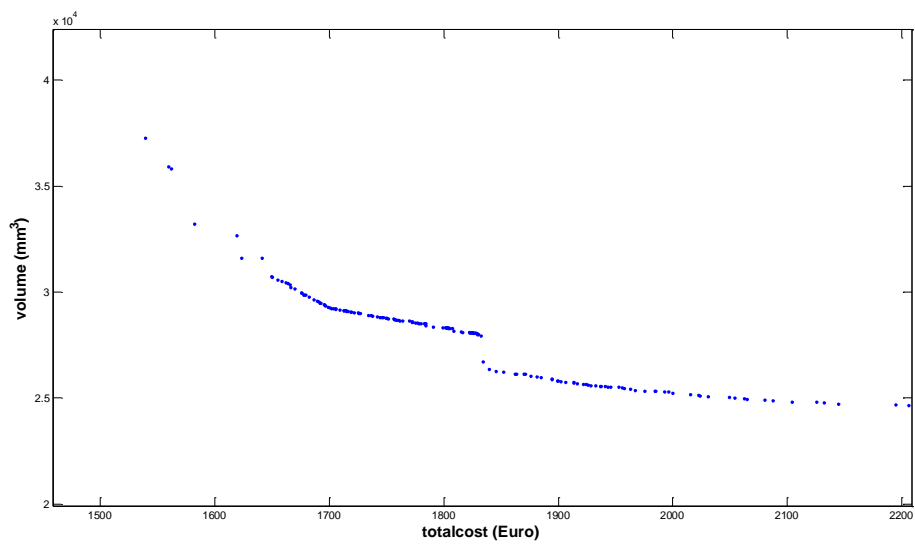


Σχήμα Δ.18 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 5.5 KW

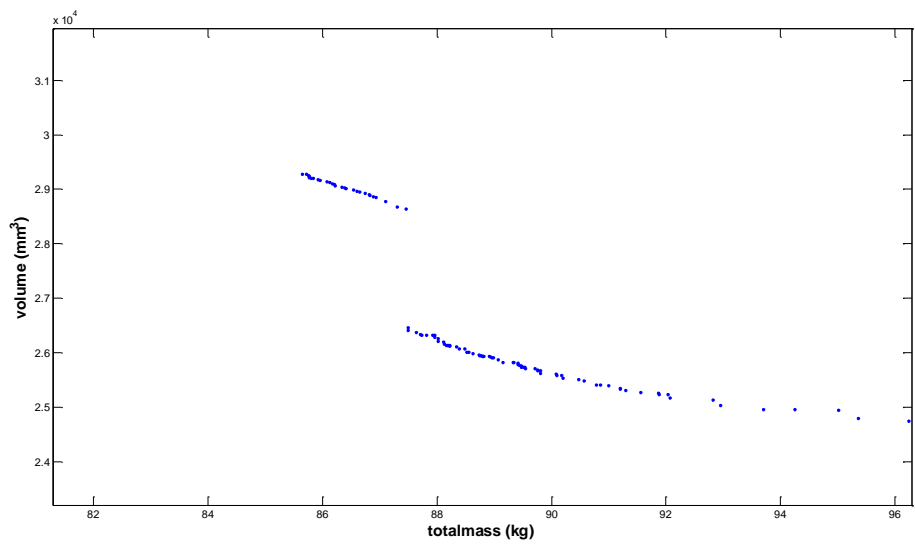
ΙΣΧΥΣ 6 KW



Σχήμα Δ.19 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N40 για ισχύς 6 KW



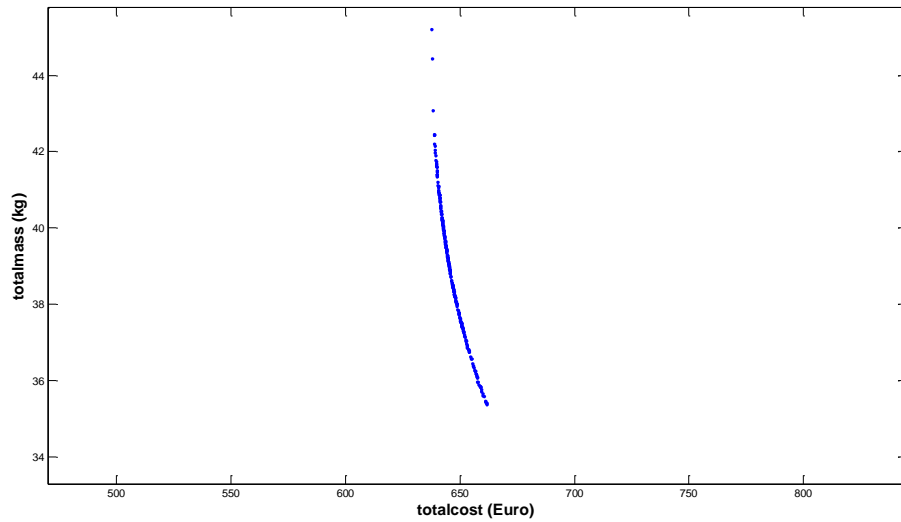
Σχήμα Δ.20 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 6 KW



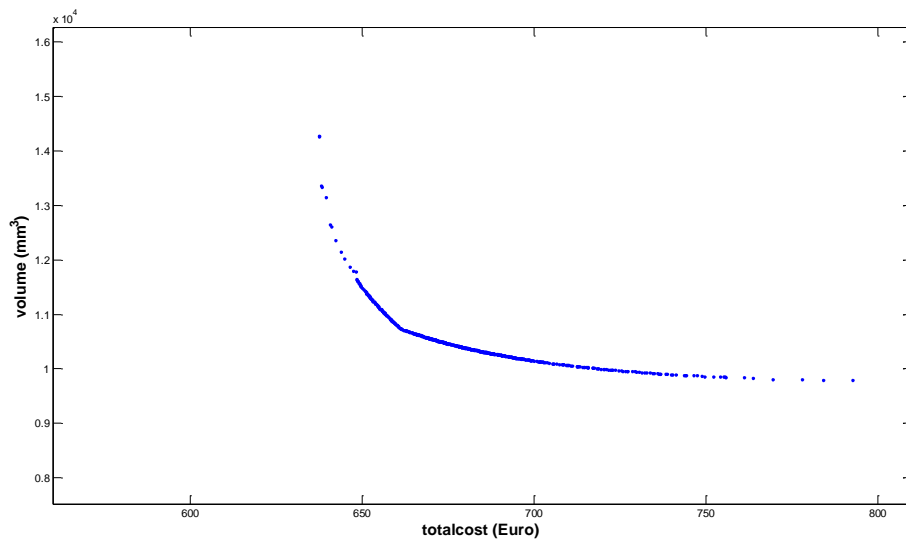
Σχήμα Δ.21 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N40 για ισχύς 6 KW

ΜΑΓΝΗΤΗΣ N45

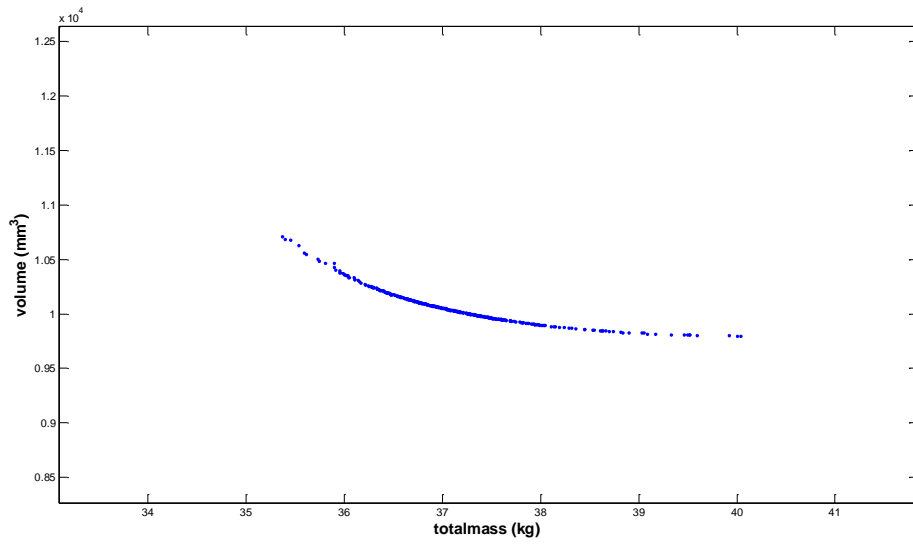
ΙΣΧΥΣ 3 KW



Σχήμα Δ.22 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 3 KW

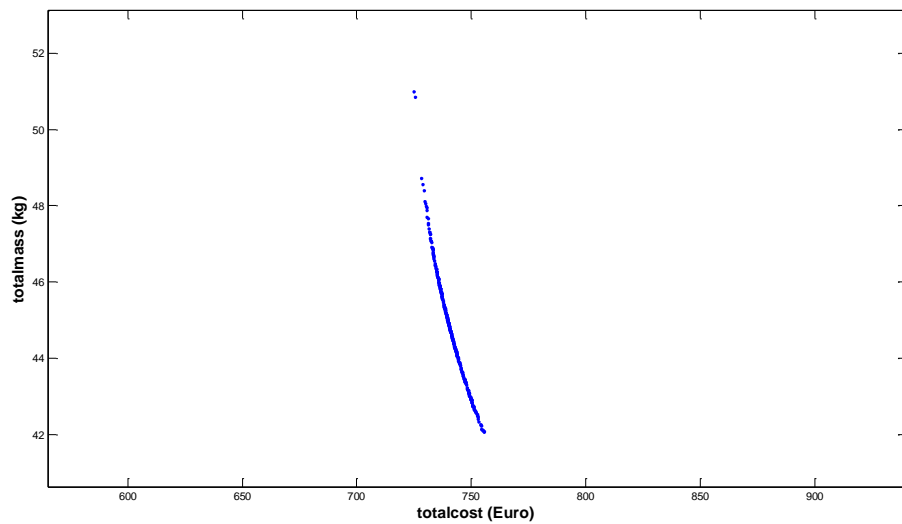


Σχήμα Δ.23 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3 KW

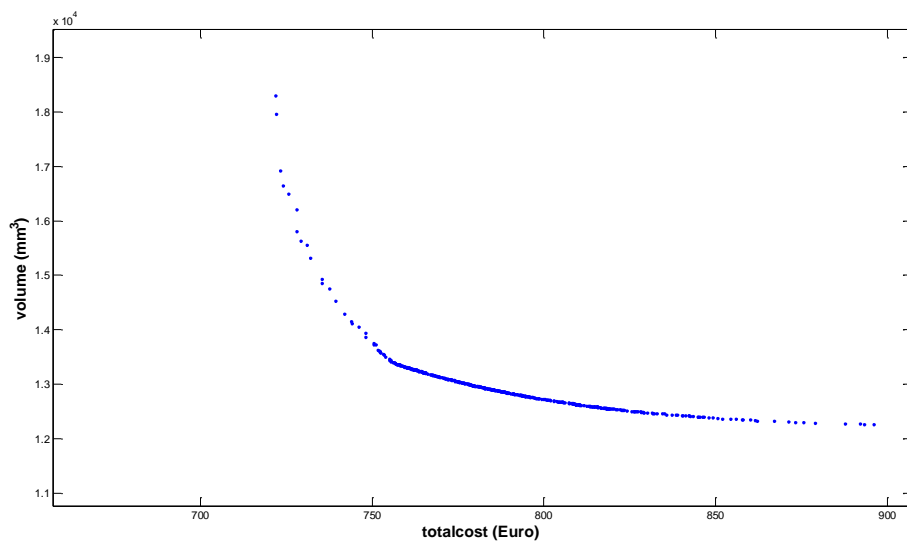


Σχήμα Α.24 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3 KW

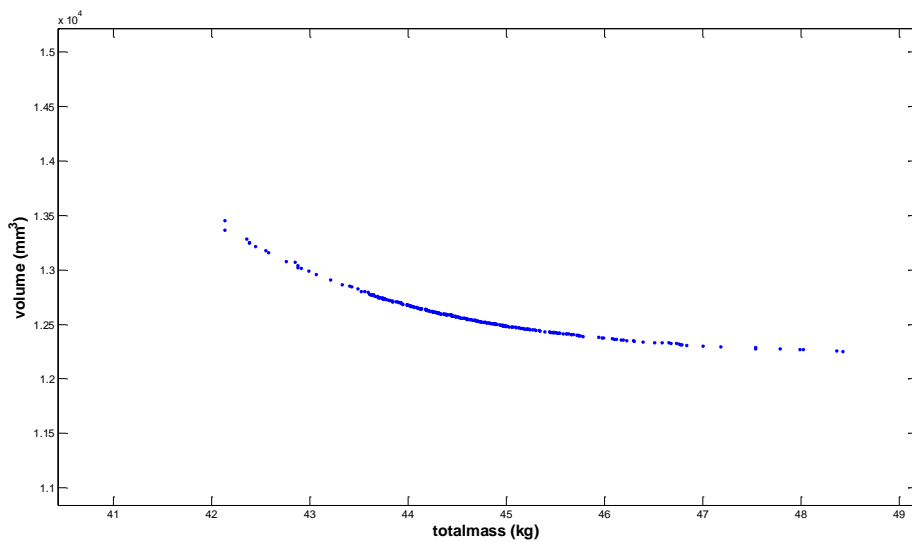
ΙΣΧΥΣ 3.5 KW



Σχήμα Α.25 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 3.5 KW

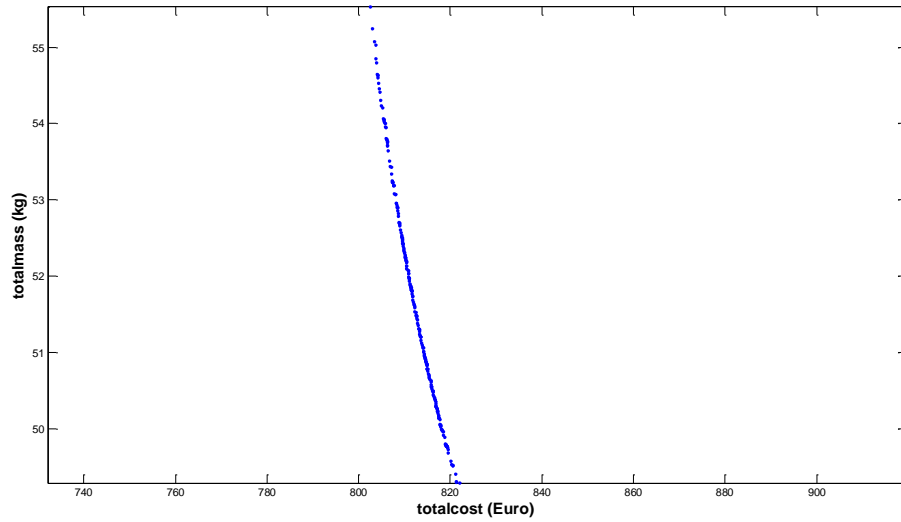


Σχήμα Δ.26 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3.5 KW

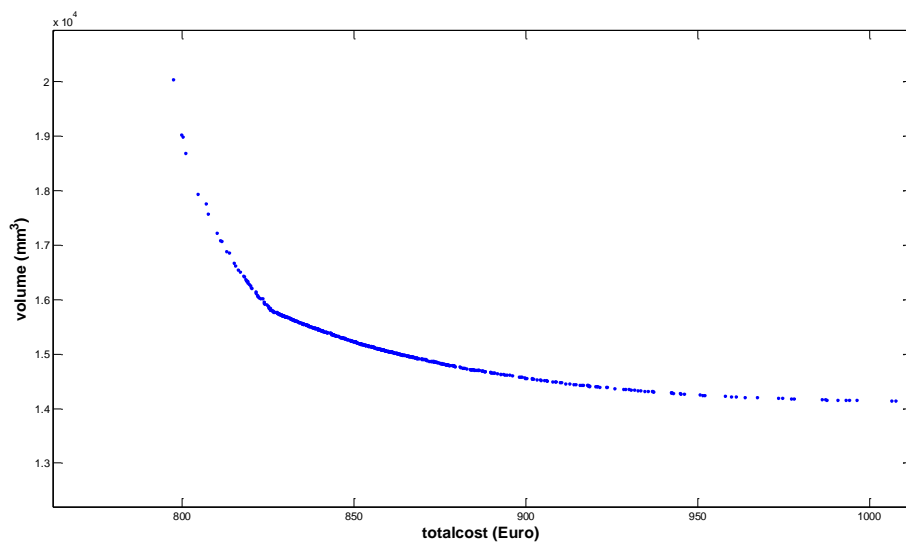


Σχήμα Δ.27 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 3.5 KW

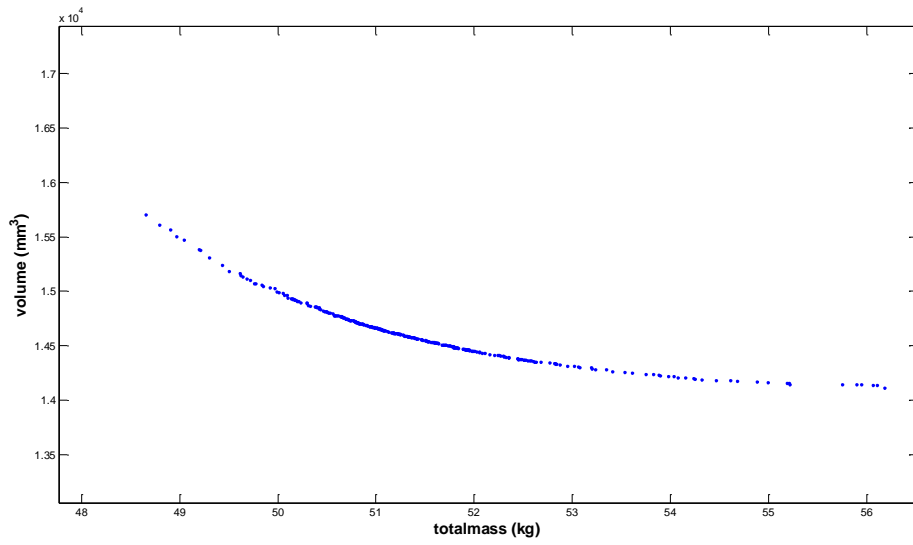
ΙΣΧΥΣ 4 KW



Σχήμα Δ.28 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 4 KW

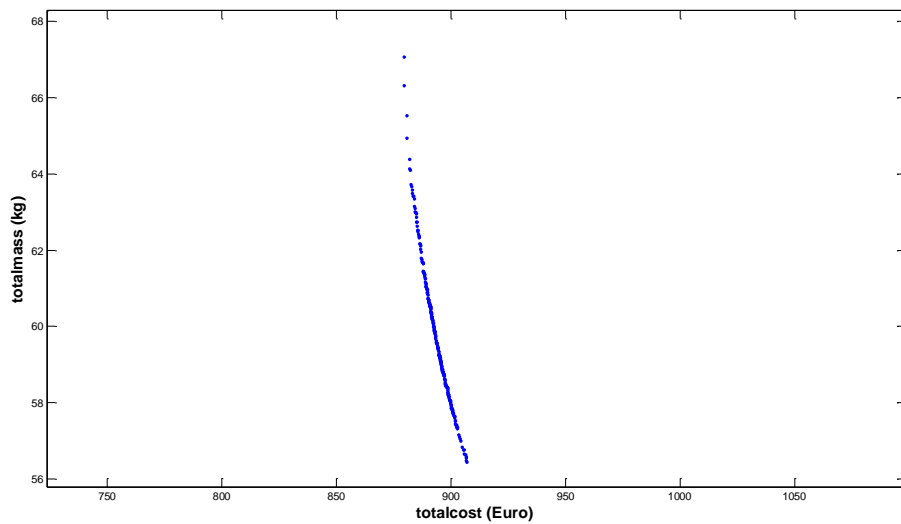


Σχήμα Δ.29 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 4 KW

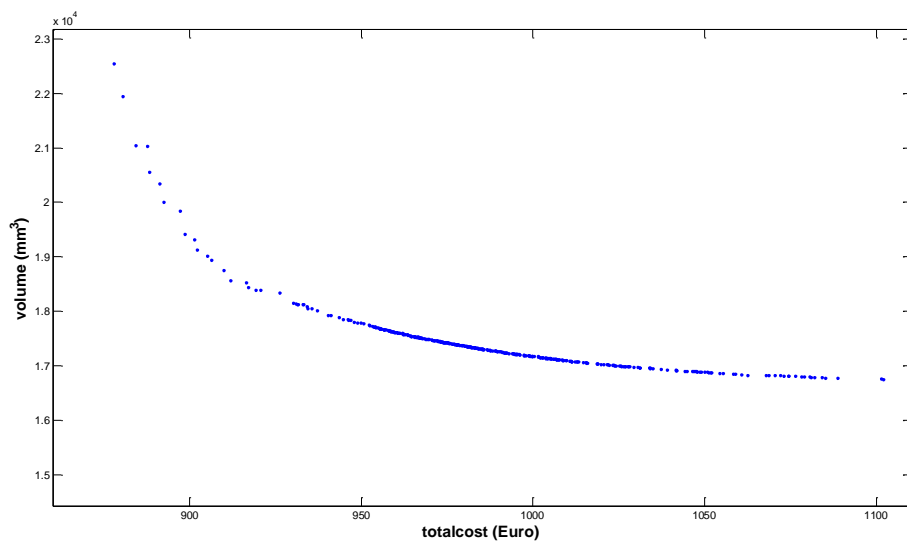


Σχήμα Α.30 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 4 KW

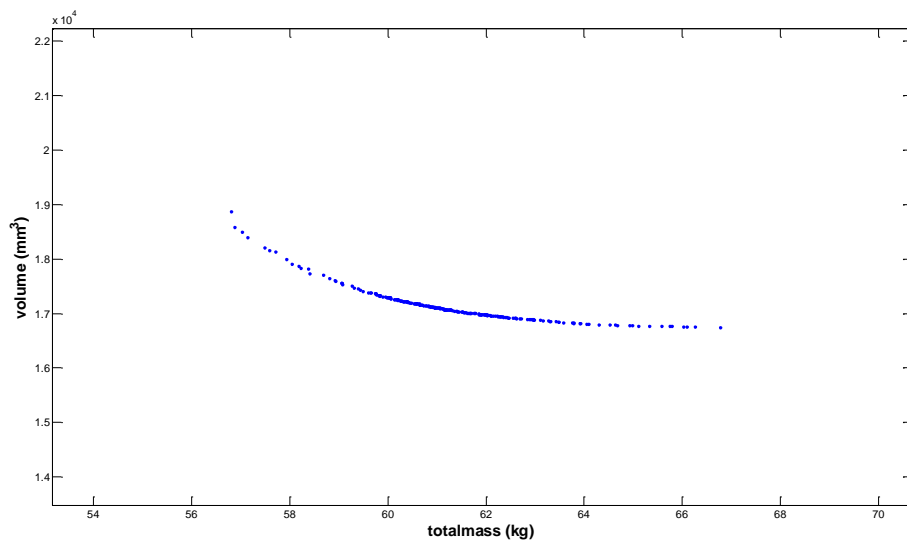
ΙΣΧΥΣ 4.5 KW



Σχήμα Α.31 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 4.5 KW

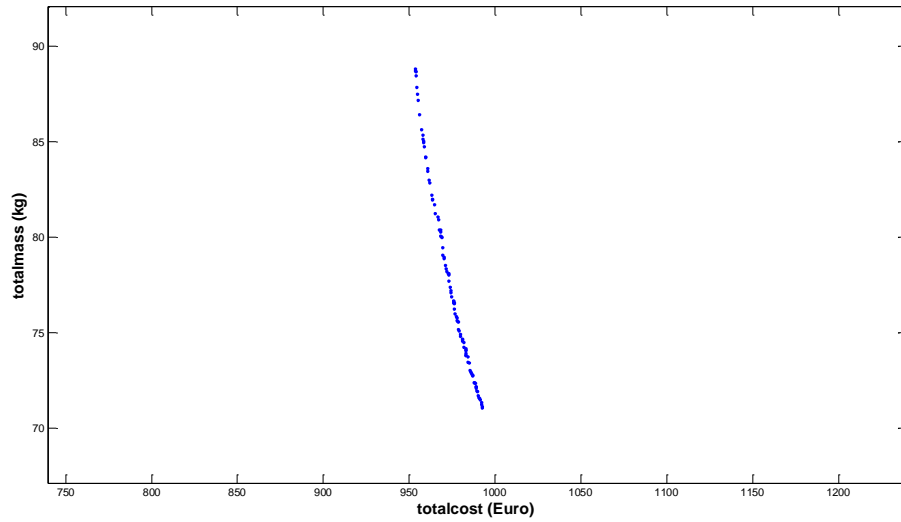


Σχήμα Α.32 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 4.5 KW

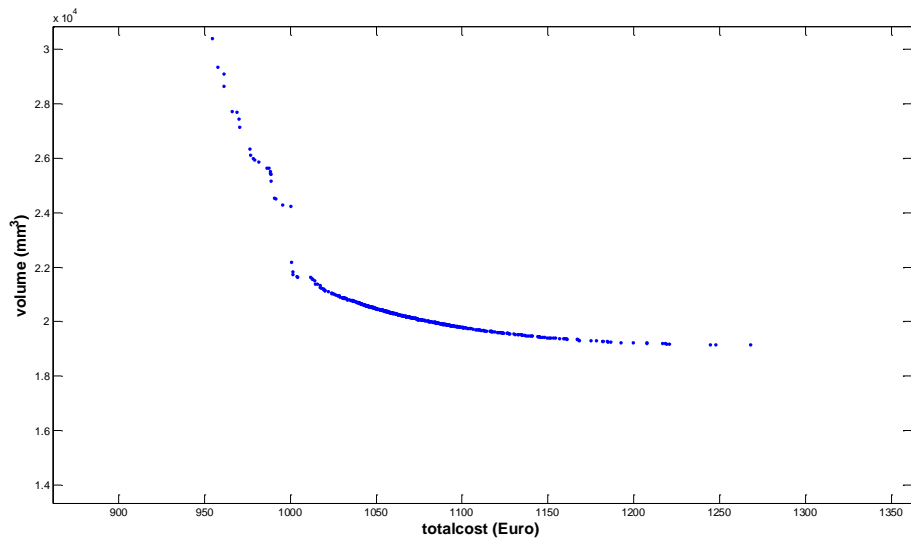


Σχήμα Α.33 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 4.5 KW

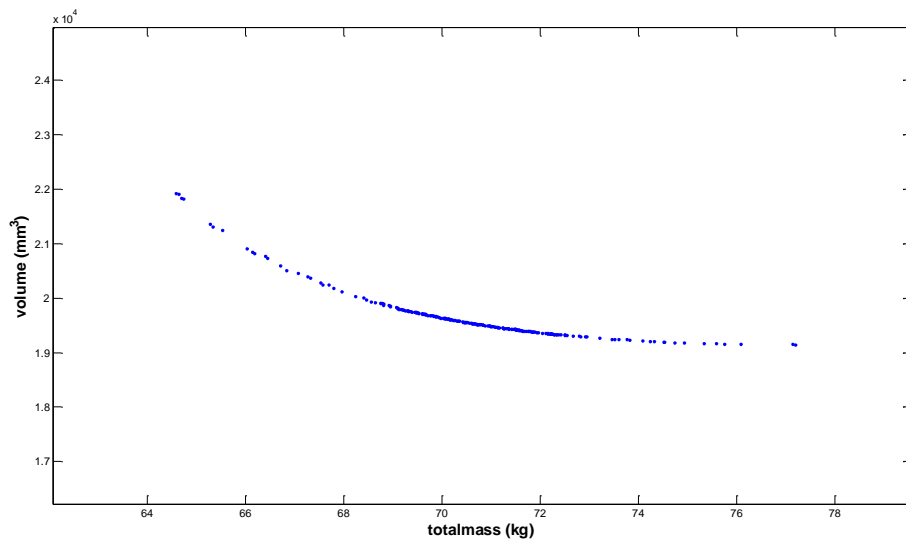
ΙΣΧΥΣ 5 KW



Σχήμα Δ.34 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 5 KW

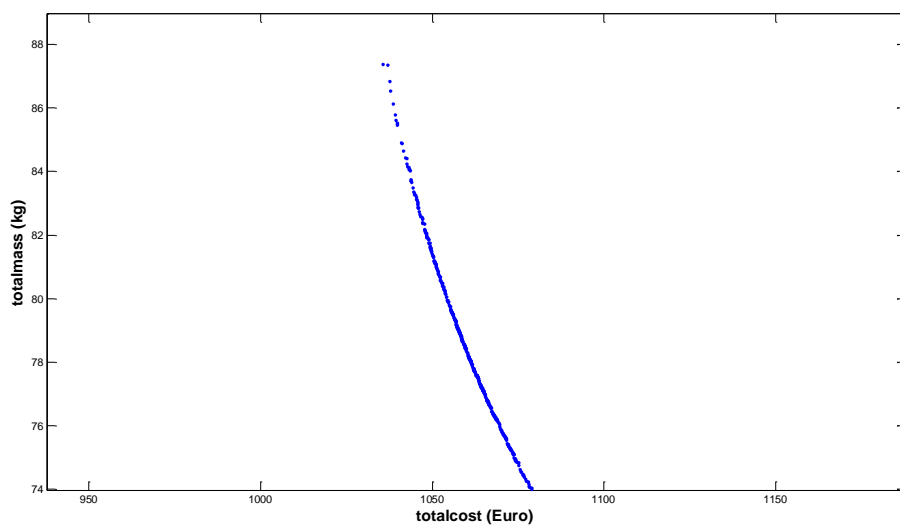


Σχήμα Δ.35 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 5 KW

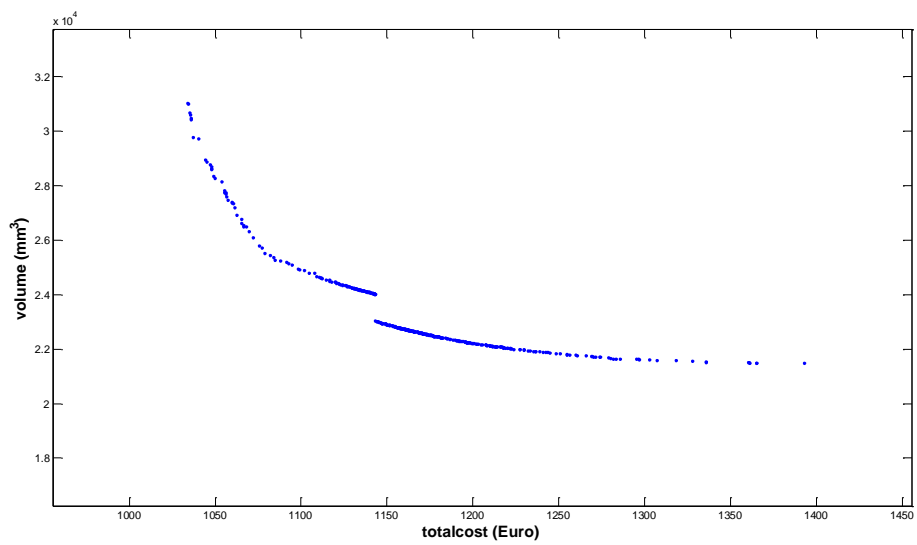


Σχήμα Δ.36 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους -μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 5 KW

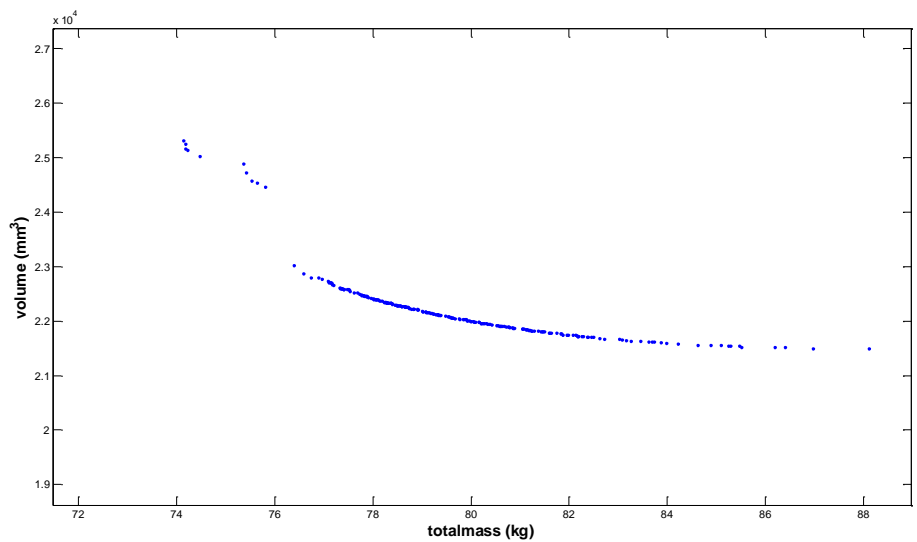
ΙΣΧΥΣ 5.5 KW



Σχήμα Δ.37 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 5.5 KW

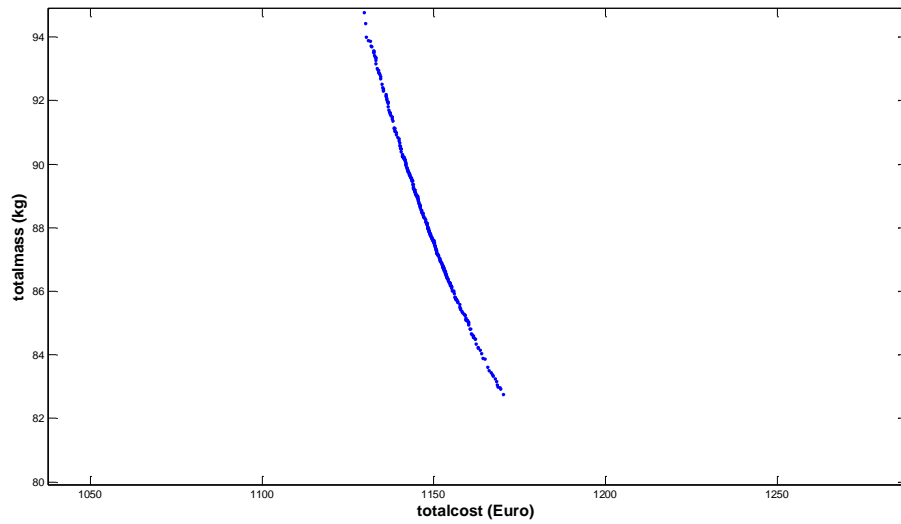


Σχήμα Α.38 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 5.5 KW

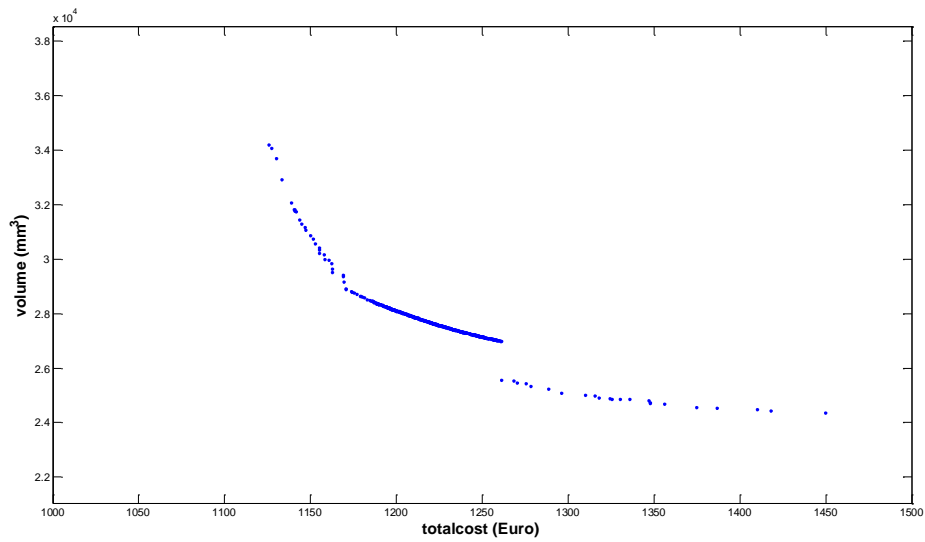


Σχήμα Α.39 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 5.5 KW

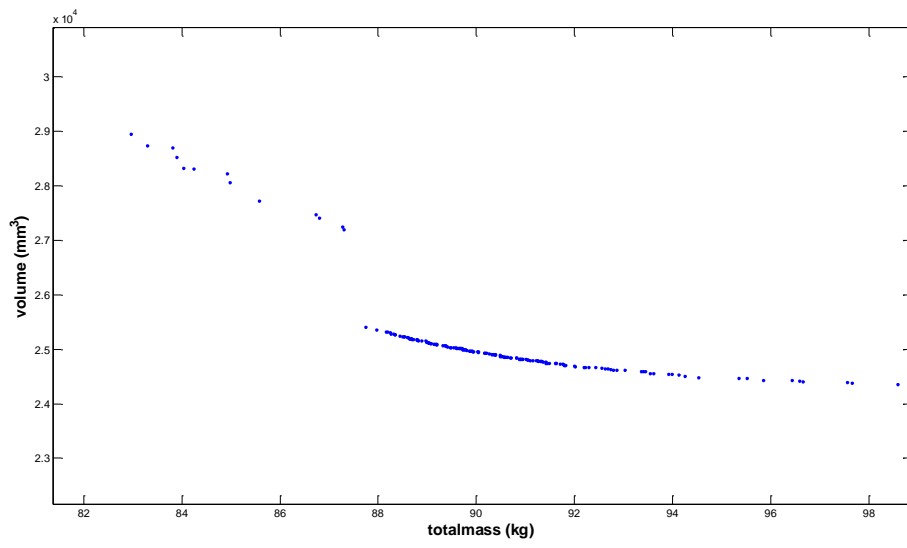
ΙΣΧΥΣ 6 KW



Σχήμα Δ.40 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - μάζας με μαγνήτη N45 για ισχύς 6 KW



Σχήμα Δ.41 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση κόστους - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 6 KW



Σχήμα Δ.42 : καμπύλη Pareto front για βελτιστοποίηση μάζας - όγκου με μαγνήτη N45 για ισχύς 6 KW

Βιβλιογραφία

- [1] Piggott H. "How to build a wind turbine", 2005.
- [2] Κοτσαμπόπουλος Π., "Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [3] Consortium for Sustainable Village-Based Development, http://villageearth.org/pages/Appropriate_Technology/ATSourcebook/Introduction.php
- [4] Rossouw F., "Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications", thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.
- [5] Παπαθανασίου Σ., "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων", Ε.Μ.Π, 2008.
- [6] B. Borowy and Z. Salameh, "Dynamic Response of a stand-alone wind energy conversion system with battery energy storage to a wind gust", Energy Conversion, IEEE Transaction on, vol. 12, no. 1, pp. 73-78, 1997.
- [7] D. A. Spera, Ed., Wind Turbine Technology. ASME Press, 1994.
- [8] Parviainen Asko, "Design of Axial-Flux Permanent Magnet Low-speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines", 2005.
- [9] Yicheng C., Pragasen P., Azeem K., "PM Wind Generator Comparison of Different Topologies", Industry Applications Conference, 2004, Vol.3, pp. 1405-1412, October, 2004.
- [10] 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.
- [11] Dubois M., Polinder H., Ferreira J., "Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines", In P Helm (Ed.), Proceedings (pp. 5-8). Munich: WIP, January 2001.
- [12] Κοτσαμπόπουλος Π., "Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [13] Kamper M., Wang R., Rossouw F., "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils", Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.1, no., pp.13-20, 3-5 May 2007.
- [14] Gieras J., Wang R., Kamper M. "Axial flux permanent magnet brushless machines", second edition, Springer, 2008.
- [15] Μεσσήνης Γεώργιος, "Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης", 2011.
- [16] Bartmann D., Fink D., "Homebrew Wind Power: Hands-on guide to harnessing the wind", Buckville Publications, 2009.
- [17] Piggot H., "A wind turbine recipe book", 2009.
- [18] T. Weise, "Global Optimization Algorithms - Theory and Application". Thomas Weise, 2008, Online available at <http://www.it-weise.de/>.
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] C. Blache and D. Paccard, "Magnetic structure design method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, pp. 2228-31, Sep. 1993.
- [22] J. Robinson and Y. Rahmat-Samii, "Particle Swarm Optimization in Electromagnetics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, pp. 397-407, February 2004.
- [23] 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.
- [24] Y. Wang, Y. Cheung and H. Liu, *Computational Intelligence and Security*: Springer, 2007, ISBN: 3540743766.
- [25] C. A. Coello, G. B. Lamont and D. A. V. Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2 ed. Boston: Springer, 2007, ISBN: 0306467623.
- [26] S. K. Huang, K. Koo and J. S. Lee, "Homogeneous Particle Swarm Optimizer for Multi-Objective Optimization Problem," *International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning*, Cairo, Egypt, 2005.
- [27] Yao Duan, "Method for Design and Optimization of Surface Mount Permanent Magnet Machines and Induction Machines", Phd Thesis, Georgia Institute of Technology, December 2010.
- [28] Sadeghierad M., Darabi A., Lesani H., Monsef H., "Power-to-volume of the High Speed Generators", *World Applied Sciences Journal* 7 (3), pp. 393-398, 2009.
- [29] Sadeghierad M., Darabi A., Lesani H., Monsef H., "Air Gap Optimization of High-Speed Axial-Flux PM Generator", *Journal of Applied Sciences* 9 (10), pp. 1915-1921, 2009.
- [30] Chan C.C. (1982). "Axial-field electrical machines with yokeless armature core." Phd Thesis, University of Hong Kong.
- [31] Gieras J.F., and Wing M. (2002). "Permanent magnet motor technology: design and applications." 2nd ed., Marcel Dekker, New York.
- [32] Kostenko M., and Piotrovsky L. (1974). "Electrical Machines. Vol.1: Direct Current Machines and Transfonners." Moscow: Mir Publishers.
- [33] Wong W. Y. (1977). "Heat transfer for engineers." Longmans.
- [34] Owen J.M. (1989). "An approximate solution for the flow between a rotating and a stationary disk," *ASME Journal of Turbomachinery* Vol. 111, No.4, pp.323-332.
- [35] Owen J.M. (1971). "The Reynolds analogy applied to flow between a rotating and a Stationary disc," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.14, pp.451-460.
- [36] Engelmann R.H., and Middendorf W.H. (ed.) (1995). "Handbook of electric motors." Marcel Dekker, Inc., New York.
- [37] Spooner E., and Chalmers B.J.(1992). "TORUS: a slotless toroidal-stator, permanent-magnet generator," *Proc. of IEE, Pt. B EPA* Vol. 139, pp.497-506.

[38] Λαναράς Λ. Ευάγγελος, ‘Θερμική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών’, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2011.

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

[40] Ζαρόγιαννης Θ. Αθανάσιος, ‘Σχεδίαση, Βελτιστοποίηση και Προσομοίωση Μικρών Ανεμογεννητριών για Εφαρμογές Χαμηλού Κόστους για Σύνδεση στο Δίκτυο’, Διπλωματική Εργασία, 2012.