



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Ανάπτυξη Κώδικα Εξελικτικής Βελτιστοποίησης και  
Εφαρμογή στη Σχεδίαση Ηλεκτρικών Μηχανών  
Μόνιμων Μαγνητών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Δημόπουλος

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Ιανουάριος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Ανάπτυξη Κώδικα Εξελικτικής Βελτιστοποίησης και Εφαρμογή στη Σχεδίαση Ηλεκτρικών Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Δημόπουλος

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Στέφανος Μανιάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Ιανουάριος 2014

.....  
Νικόλαος Π. Δημόπουλος

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

Copyright © Νικόλαος Π. Δημόπουλος, 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 επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

στο Στέφανο



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός στοχαστικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης γεωμετρίας και η εφαρμογή του σε ηλεκτρικές μηχανές μόνιμων μαγνητών που προορίζονται για χρήση στην αεροπορική τεχνολογία. Η χρήση ηλεκτρικών μηχανών σε νέες εφαρμογές καθιστά ολοένα και πιο επιβεβλημένη την ανάγκη ανάπτυξης εξειδικευμένων τεχνικών βελτιστοποίησης της σχεδίασής τους. Ιδιαίτερα η χρήση ηλεκτρικών κινητήρων ως ενεργοποιητών (actuators) σε αεροπορικές εφαρμογές, με σκοπό την αντικατάσταση των υφιστάμενων υδραυλικών συστημάτων δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις για την επίτευξη κατάλληλων συμβιβασμών μεταξύ του βάρους, της επίδοσης των κινητήρων, της απόδοσής τους, καθώς και της ποιότητας ισχύος που παράγουν.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι βασισμένες στην ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών μηχανών και ιδιαίτερα των Σύγχρονων Μηχανών Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές περιορίζονται συχνά στην ανάλυση κάθε μίας μεταβλητής ξεχωριστά ή στην εύρεση του καλύτερου δυνατού συνδυασμού δύο μεταβλητών. Με τον τρόπο αυτό όμως δεν επιτυγχάνεται συνήθως η ολικά βέλτιστη γεωμετρία αλλά ένα τοπικό βέλτιστο. Η παρούσα εργασία προτείνει τον αλγόριθμο μονοκριτηριακής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO), ο οποίος επιτρέπει τον προσδιορισμό προσεγγιστικά της ολικά βέλτιστης γεωμετρίας, ελαχιστοποιώντας μια σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση κόστους. Η συνάρτηση αυτή λαμβάνει υπόψη της βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής και τα αντίστοιχα λειτουργικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν. Η επιλογή του συγκεκριμένου εξελικτικού αλγορίθμου έγινε κυρίως λόγω της ταχείας σύγκλισής του στη συγκεκριμένη εφαρμογή σε σύγκριση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος PSO υλοποιήθηκε και στη συνέχεια ελέγχθηκε η ικανότητα βελτιστοποίησης και η ταχύτητα σύγκλισής του με τη χρήση τυπικών συναρτήσεων αναφοράς. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος καλεί λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων για να προσομοιώσει τη λειτουργία του κινητήρα. Η προσομοίωση λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου όλες τις μεταβλητές γεωμετρίας και επιστρέφει τα αποτελέσματα εκείνα με βάση τα οποία διαμορφώνεται η συνάρτηση κόστους. Συγκεκριμένα επιστρέφει τη μέση ηλεκτρομαγνητική ροπή, την κυμάτωση της ροπής, το συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (HEΔ) και τέλος την απόδοση του κινητήρα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, συγκρίνονται στη συνέχεια με την αρχική σχεδίαση του κινητήρα που προέκυψε μέσω της προκαταρκτικής σχεδίασης. Επιβεβαιώνεται ότι οι γεωμετρίες που προέκυψαν από την εκτέλεση του αλγορίθμου διαθέτουν σημαντικά βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις αρχικές. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι αυτή η προτεινόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα, χωρίς μάλιστα να απαιτείται υπερβολικός υπολογιστικός χρόνος.

### Λέξεις Κλειδιά:

Σύγχρονη Μηχανή Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών, Βελτιστοποίηση Γεωμετρίας Ηλεκτρικής Μηχανής, Τεχνική Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (PSO), Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, Αεροπορική Τεχνολογία.





## Abstract

This diploma thesis deals with the development of a stochastic optimization algorithm and its implementation in a permanent magnet motor case intended for aerospace applications. The use of electric machines in new fields of application necessitates the development of specialized techniques for the design optimization. Especially the use of electric motors as actuators in aerospace applications, in replacement of the existing hydraulic systems evokes significant challenges regarding compromises amongst the weight, the performance, the efficiency and the power quality of the motor operation.

In the bibliography, several methods based on sensitivity analysis have already been proposed aiming to improve the characteristics of electric machines and especially in the case of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machines. However, these methods involve the analysis for each variable separately, or search for the best combination of two variables. Therefore, the resulting geometry is usually a sub-optimum solution. The present work proposes a search of the global optimum solution by implementing the single objective Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which can identify the globally optimal geometry. This is achieved by minimizing a composite objective function which takes into account all important geometric characteristics that affect the motor's electromagnetic behavior. The choice of this meta-heuristic algorithm was motivated mainly due to its fast convergence characteristics in the considered class of problems compared to other optimization methods.

This algorithm was implemented and tested for its optimization ability and convergence speed by using standard benchmark functions. The proposed algorithm automatically calls a finite element method model enabling accurate simulation of the steady state characteristics of the machine. The simulation input data are the values of the geometrical variables examined, while the output data are the values of the characteristics incorporated in the objective function. These characteristics are the values of the mean electromagnetic torque, the torque ripple, the total harmonic distortion factor of the back-electromotive force (EMF) and the efficiency of the motor.

The results are then compared to those of the starting geometry of the motor, which resulted from the preliminary design methodology. The comparison shows that the geometry resulted from the execution of the algorithm involves better operating characteristics especially regarding the power quality. Consequently, the proposed optimization procedure can lead to a global optimum, involving a relatively efficient computational time.

### **Key-words:**

Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine, Optimization of Electric Machine Geometry, Technique of Particle Swarm Optimization (PSO), Finite Element Method, Aerospace Technology.



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την πολύτιμη βοήθειά τους, θα ήταν δύσκολη η ολοκλήρωσή της.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της εξαιρετικά ενδιαφέρουσας εργασίας καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αθανάσιο Σαρηγιαννίδη για τις πολύτιμες επισημάνσεις, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη της καθώς και τους φίλους και συμφοιτητές με τους οποίους δουλέψαμε και ζήσαμε μαζί αυτά τα μοναδικά χρόνια.



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	6
Abstract.....	8
Ευχαριστίες.....	10
Κεφάλαιο 1    Εισαγωγή.....	16
1.1    Σκοπός της εργασίας.....	16
1.2    Η Δομή της Εργασίας .....	16
Κεφάλαιο 2    Ηλεκτρικά Συστήματα Αεροσκαφών .....	18
2.1    Η χρήση ενεργοποιητών (actuators) σε αεροσκάφη.....	18
2.2    Κίνητρα για τον εξηλεκτρισμό των αεροσκαφών.....	19
2.3    Προκλήσεις της αντικατάστασης υδραυλικών συστημάτων με ηλεκτρικά .....	21
2.4    Επιλογή τοπολογίας ηλεκτρικού κινητήρα .....	22
2.4.1    Είδη ηλεκτρικών μηχανών και χαρακτηριστικά τους.....	23
2.4.2    Σύγκριση Μηχανών Επαγωγής και Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών.....	24
2.5    Σύγχρονες Μηχανές Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών .....	24
2.5.1    Σύγχρονες μηχανές.....	24
2.5.2    Τεχνολογία Μόνιμων Μαγνητών .....	26
Κεφάλαιο 3    Προκαταρκτική Σχεδίαση Σύγχρονης Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών 28	
3.1    Προδιαγραφές του κινητήρα .....	28
3.2    Προκαταρκτική Σχεδίαση.....	29
3.2.1    Διαστασιολόγηση του διακένου.....	29
3.2.2    Επιλογή Κατάλληλου Συνδυασμού L, D.....	30
3.2.3    Πλάτος διακένου.....	32
3.2.4    Μελέτη του Στάτη .....	32
3.2.5    Υπολογισμός ειδικών Φορτίσεων.....	34
3.2.6    Γεωμετρική Διαμόρφωση Δρομέα .....	35
3.2.7    Επιλογή Κατάλληλου Τύπου Τυλίγματος .....	38
3.2.8    Τελική επιλογή τυλίγματος.....	45
3.3    Σύνοψη.....	46

Κεφάλαιο 4	Ανάπτυξη εργαλείου σχεδίασης και ανάλυσης λειτουργίας ηλεκτρικής μηχανής μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FE).....	48
4.1	Εισαγωγή στην Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων .....	48
4.1.1	Προ-επεξεργασία .....	49
4.1.2	Επίλυση Πεδίου .....	50
4.1.3	Μετ-επεξεργασία.....	50
4.2	Ανάπτυξη προγράμματος παραμετρικής σχεδίασης της μηχανής.....	50
4.2.1	Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων (ΛΠΣ) .....	51
4.3	Προδιαγραφή της δομής και των επιλογών παραμετροποίησης .....	53
4.4	Επιλογή τιμών των παραμέτρων σχεδίασης.....	58
4.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης .....	60
4.5.1	Ροπή Εξόδου .....	61
4.5.2	Κυμάτωση Ροπής Εξόδου .....	61
4.5.3	Απόδοση .....	62
4.5.4	Συντελεστής Αρμονικής Παραμόρφωσης.....	66
4.6	Προσομοίωση Μηχανής με Γεωμετρία από Προκαταρκτική Σχεδίαση .....	67
Κεφάλαιο 5	Στοχαστικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης και ανάλυση του αλγόριθμου PSO .....	70
5.1	Στοχαστικές τεχνικές .....	72
5.1.1	Τεχνικές αναζήτησης ολικού ακρότατου.....	73
5.2	Αξιολόγηση των στοχαστικών αλγορίθμων .....	74
5.2.1	Συναρτήσεις αναφοράς (benchmark functions) .....	75
5.3	Αλγόριθμος PSO .....	78
5.3.1	Εισαγωγή.....	79
5.3.2	Particle Swarm Optimization .....	79
5.3.3	Standard Particle Swarm Optimizer.....	81
5.3.4	PSO με αδράνεια .....	81
5.3.5	PSO με συντελεστή περιορισμού .....	82
5.3.6	Τοπολογίες Γειτόνων .....	83
Κεφάλαιο 6	Υλοποίηση του Αλγόριθμου Βελτιστοποίησης PSO.....	86
6.1	Υλοποίηση του Αλγορίθμου.....	86
6.1.1	Αρχικοποίηση του Πληθυσμού.....	87

6.1.2	Πυρήνας του Προγράμματος.....	90
6.1.3	Ολοκλήρωση Προγράμματος .....	91
6.2	Αξιολόγηση του Κώδικα με χρήση Συναρτήσεων Αναφοράς.....	92
6.3	Σύνοψη .....	100
Κεφάλαιο 7	Διαδικασία Βελτιστοποίησης και Αποτελέσματα.....	102
7.1	Κατάστρωση και Επεξήγηση Αντικειμενικής Συνάρτησης.....	102
7.2	Επιλογή Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών για Βελτιστοποίηση .....	103
7.2.1	Πεδίο Ορισμού Μεταβλητών Γεωμετρίας.....	104
7.3	Επιλογή Πληθυσμού και Αριθμού Επαναλήψεων.....	106
7.3.1	Μέγεθος Πληθυσμού .....	106
7.3.2	Αριθμός Επαναλήψεων .....	107
7.4	Παρουσίαση Σύγκλισης του Αλγόριθμου .....	107
7.4.1	Σύγκλιση για τοπολογία Κύκλου και Αστέρα.....	108
7.4.2	Αναλυτική Παρουσίαση Σύγκλισης .....	109
7.5	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης .....	111
7.5.1	Αρχική Σχεδίαση .....	112
7.5.2	Βελτιστοποίηση με Τοπολογία Κύκλου .....	113
7.5.3	Βελτιστοποίηση με Τοπολογία Αστέρα .....	116
7.6	Σύγκριση Αποτελεσμάτων με Αρχική Σχεδίαση.....	116
7.6.1	Βελτίωση της Κυμάτωσης Ροπής.....	118
7.7	Ανάλυση Ευαισθησίας αποτελεσμάτων .....	118
7.7.1	Ακρίβεια των αποτελεσμάτων.....	119
7.7.2	Μελέτη της περιοχής γύρω από το Βέλτιστο Σημείο .....	119
Κεφάλαιο 8	Συμπεράσματα .....	124
8.1	Ανακεφαλαίωση.....	124
8.2	Κυριότερα Συμπεράσματα.....	124
8.3	Επιστημονική Συνεισφορά της Εργασίας .....	126
8.4	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση .....	126
Βιβλιογραφία	.....	128
Λογισμικό	.....	133





# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός κώδικα βελτιστοποίησης γεωμετρίας για εφαρμογή σε μηχανή μόνιμων μαγνητών. Η μηχανή που επιχειρήθηκε να βελτιστοποιηθεί προορίζεται για χρήση στην αεροπορική βιομηχανία, και συγκεκριμένα για χρήση σε συστήματα πλοήγησης αεροπλάνων. Για τον λόγο αυτό τα κριτήρια της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση ροπής, από έναν κινητήρα συγκεκριμένων διαστάσεων, η ελαχιστοποίηση των απωλειών του και η ελαχιστοποίηση των ταλαντώσεων-διαταραχών από αυτόν, τόσο μέσω των αρμονικών του ρεύματος που τον τροφοδοτεί όσο και μέσω της κυμάτωσης της ροπής. Για την επίτευξη των παραπάνω κριτηρίων έχει σχεδιαστεί μια κατάλληλη σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση που ωθεί τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να βρει τη βέλτιστη λύση.

Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε για τη βελτιστοποίηση είναι η Τεχνική Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimizer - PSO), ο οποίος έχει αποδειχθεί κατάλληλος για την εύρεση του βέλτιστου σημείου μιας πολυδιάστατης αντικειμενικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος αυτός, είναι αρκετά αποδοτικός για την εύρεση λύσεων σε παρόμοια προβλήματα και παρέχει τη δυνατότητα χρήσης πολλών διαφορετικών τοπολογιών και μεθόδων υπολογισμού του πληθυσμού σε κάθε γενιά βελτιστοποίησης κάτι που επιτρέπει τον έλεγχο της διαδικασίας σύγκλισης, ως προς την ταχύτητά της και ως προς την εύρεση του καλύτερου εφικτού σημείου.

## 1.2 Η Δομή της Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει οκτώ κεφάλαια το κάθε ένα από τα οποία αναφέρεται σε αντίστοιχες επιμέρους εργασίες. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ο σκοπός της εργασίας, οι κυριότερες πληροφορίες που είναι απαραίτητες ώστε ο αναγνώστης να μπορέσει να κατανοήσει τη ροή της, καθώς και η διάρθρωσή της. Τα υπόλοιπα κεφάλαια περιλαμβάνουν τα εξής:

- Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Εδώ παρουσιάζονται οι εφαρμογές για τις οποίες σχεδιάζεται ο συγκεκριμένος κινητήρας. Η παρουσίαση της χρήσης ηλεκτρικών συστημάτων σε αεροπλάνα, και η αντίστοιχη ανάλυση, βοηθούν στην ιεράρχηση των στόχων της βελτιστοποίησης αλλά και των περιορισμών που τίθενται. Στη συνέχεια παρατίθεται η περιγραφή της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών των σύγχρονων κινητήρων, και ιδιαίτερα αυτών όπου αντί για τύλιγμα διέγερσης χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες.
- Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Το κεφάλαιο αυτό μαζί με το επόμενο, αφορούν τις μεθοδολογίες ανάλυσης του υπό μελέτη κινητήρα. Επιχειρείται η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα μόνιμων μαγνητών

χρησιμοποιώντας κλασικές τεχνικές με βάση την οποία έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ένας πρότυπος κινητήρας. Ο κινητήρας αυτός θα αποτελέσει αναφορά σύγκρισης για την ικανότητα του προτεινόμενου αλγόριθμου βελτιστοποίησης να βρίσκει βελτιωμένες λύσεις στα προβλήματα που κάθε φορά αντιμετωπίζει. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά και αιτιολογούνται οι περισσότερες από τις βασικές επιλογές σχεδίασης που έχουν γίνει κατά τη βελτιστοποίηση.

- Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός εργαλείου σχεδίασης και στη συνέχεια προσομοίωσης της λειτουργίας του κινητήρα. Η ανάπτυξη του εργαλείου αυτού έγινε σε Περιβάλλον Αριθμητικού Υπολογισμού (ΠΑΥ) και η ανάλυση γίνεται με τη βοήθεια λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (ΛΠΣ). Τα χαρακτηριστικά του εργαλείου αυτού παρουσιάζονται αναλυτικά, ενώ αναλύεται και η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων.
- Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Εδώ παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης γενικά και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στους στοχαστικούς αλγορίθμους. Παρουσιάζονται, τόσο τα βασικά τους χαρακτηριστικά καθώς και το πως γίνεται η αξιολόγησή τους. Τέλος παρουσιάζεται ο υιοθετούμενος αλγόριθμος PSO, η δομή του και τα κύρια χαρακτηριστικά του.
- Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η υλοποίηση του προτεινόμενου αλγόριθμου βελτιστοποίησης, με τις διάφορες επιλογές που έγιναν. Παρουσιάζεται η συμπεριφορά του κατά την επίλυση τριών τυπικών συναρτήσεων αξιολόγησης και τα αποτελέσματα διαδοχικών εκτελέσεών του. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την ικανότητα εύρεσης ολικού βέλτιστου από τον κώδικα που αναπτύχθηκε.
- Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει αναλυτικά τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου και για τις δύο τοπολογίες γειτόνων που εξετάστηκαν καθώς και τη σύγκριση τους με τα αποτελέσματα από την αρχική σχεδίαση. Περιλαμβάνεται επίσης μια παρουσίαση της πορείας σύγκλισης του αλγορίθμου. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ανάλυση ευαισθησίας και αξιολόγηση της ευρωστίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.
- Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>: Στο κεφάλαιο αυτό, επιχειρείται μια ανακεφαλαίωση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε. Παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα για τη μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε και αναφέρονται τα σημεία καινοτομίας της συγκεκριμένης εργασίας. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με μια σειρά προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση.

## Κεφάλαιο 2

### Ηλεκτρικά Συστήματα Αεροσκαφών

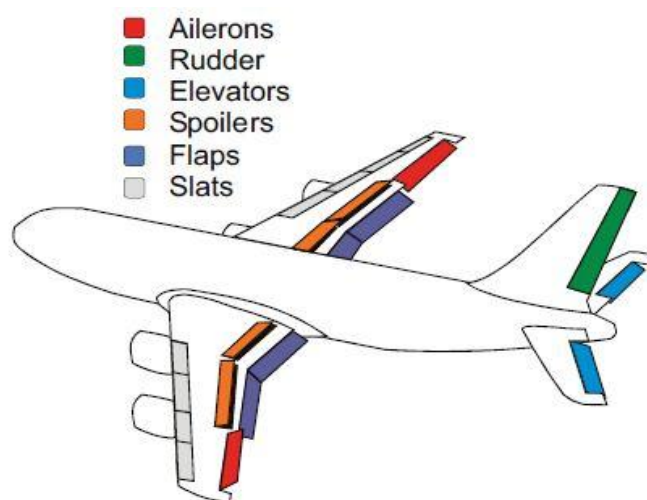
Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί μια σύντομη περιγραφή της τωρινής κατάστασης όσο αφορά τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων σε αεροσκάφη, αλλά και τις προοπτικές που υπάρχουν για ευρύτερη χρήση τους στο άμεσο μέλλον. Θα παρουσιαστούν βασικά στοιχεία λειτουργίας για αυτές τις ιδιαίτερες συνθήκες και θα αιτιολογηθεί σύντομα η επιλογή των σύγχρονων μηχανών επιφανειακών μόνιμων μαγνητών για τέτοιες εφαρμογές.

#### 2.1 Η χρήση ενεργοποιητών (actuators) σε αεροσκάφη

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται στα αεροσκάφη μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο κατηγορίες, την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα. Η πρωτεύουσα ενέργεια είναι αυτή που παράγεται από το σύστημα πρόωσης που αποτελείται από τον κινητήρα εσωτερική καύσης. Μέρος της ενέργειας που παράγεται από αυτούς τους κινητήρες μετατρέπεται σε άλλα είδη ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε όλα τα συστήματα του αεροσκάφους[1], αυτή είναι η δευτερεύουσα ενέργεια. Στα αεροσκάφη υπάρχουν τέσσερα κύρια είδη δευτερεύουσας ενέργειας[2]:

- Υδραυλική, για χρήση σε επιφάνειες ελέγχου πτήσης.
- Πνευματική, για χρήση στη διαμόρφωση και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών και στην από-παγοποίηση (de-icing) των φτερών.
- Ηλεκτρική, για τα αεροπλοϊκά συστήματα (avionics) και άλλες λειτουργίες.
- Μηχανική, για βοηθητικά στοιχεία των μηχανών, όπως αντλίες καυσίμου.

Οι ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη ώστε να αλλάζουν κατεύθυνση τόσο στο έδαφος όσο και στον αέρα. Αυτό γίνεται μέσω κινούμενων μερών. Σχεδόν πάντα οι ενεργοποιητές αυτοί είναι υδραυλικοί. Μερικά από τα κινούμενα μέρη ελέγχου παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1 Κινούμενα Μέρη Ελέγχου Αεροπλάνου[1]

## 2.2 Κίνητρα για τον εξηλεκτρισμό των αεροσκαφών

Στη διάρκεια της δεκαετίας του '80 άρχισε να εξετάζεται το ενδεχόμενο δημιουργίας πλήρως ηλεκτρικών αεροσκαφών. Μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα με ενεργειακή αποθήκευση σε μπαταρίες ήταν τα πρώτα που επιχειρήθηκε να κατασκευαστούν. Δυστυχώς είναι απαραίτητη πολύ μεγάλης κλίμακας επιστημονική έρευνα πριν καταστεί βιώσιμο ένα ηλεκτρικό εμπορικό αεροσκάφος. Το να επιτευχθεί η ισχύς και ροπή μιας τουρμπίνας από μια παρόμοιου μεγέθους ηλεκτρική εναλλακτική είναι αδύνατο με την υπάρχουσα τεχνολογία.

Λόγω του ότι η μετάβαση σε πλήρως ηλεκτρικά αεροσκάφη είναι εξαιρετικά δύσκολη αυτή τη στιγμή και θα προϋπέθετε ένα τεράστιο τεχνολογικό άλμα από το σύνολο της αεροναυπηγικής βιομηχανίας, επιλέχθηκε αρχικά η προώθηση των ηλεκτρικών συστημάτων σε όλα τα δευτερεύοντα συστήματα των αεροσκαφών.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που θα προκύψουν είναι ο διαμοιρασμός φορτίου (load sharing)[3]. Με βάση την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, τα ηλεκτρικά, πνευματικά και υδραυλικά συστήματα του αεροσκάφους υποχρησιμοποιούνται, αφού οι γεννήτριές τους σχεδιάζονται για τις υψηλότερες τιμές παρεχόμενης ισχύος, αν και κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, χρειάζονται ένα μικρό μέρος αυτής της μέγιστης ισχύος. Οι κορυφές του φορτίου του κάθε συστήματος δεν εμφανίζονται ταυτόχρονα, οπότε ένα συνδυασμένο σύστημα θα μπορούσε να σχεδιαστεί με μια συνδυασμένη αιχμή ισχύος σημαντικά μειωμένη, μειώνοντας έτσι τον όγκο και το βάρος το τελικού συστήματος. Από τις τρεις μορφές ενέργειας επιλέγεται η ηλεκτρική, γιατί είναι απολύτως απαραίτητη για τα ηλεκτρονικά και λοιπά συστήματα αεροπλοΐας καθώς και για το φωτισμό, ενώ οι ηλεκτρικές μηχανές και ο ηλεκτρικός κλιματισμός μπορούν εύκολα να υλοποιηθούν, αντικαθιστώντας εργασίες που κανονικά εκτελούνται από το υδραυλικό και το πνευματικό σύστημα αντίστοιχα.

Ο στόχος για ένα αποκλειστικά ηλεκτρικό δευτερεύον σύστημα στα αεροσκάφη είναι εξαιρετικά δύσκολο να πραγματοποιηθεί, προς το παρόν, αλλά η μετατροπή πολλών συστημάτων σε ηλεκτρικά παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων είναι και μείωση της μέγιστης παροχής ενέργειας μέσω του διαμοιρασμού φορτίου. Το κυριότερο όμως πλεονεκτήματα που προκύπτουν είναι η μείωση του βάρους και η μείωση του κόστους συντήρησης. Η μείωση του βάρους μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερο κόστος χρήσης, μέσω της μείωσης τη ποσότητας καυσίμων που είναι απαραίτητα για την πτήση, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα η χρήση των αεροπλάνων να καθίσταται πιο φιλική προς το περιβάλλον.

Η μείωση του βάρους μπορεί να προέλθει από την αφαίρεση του δικτύου σωληνώσεων του αεροσκάφους, των βαλβίδων και των υπόλοιπων συνδέσεων και την αντικατάστασή τους από ένα πολύ πιο ελαφρύ δίκτυο καλωδίωσης, το οποίο θα είναι ταυτόχρονα και πολύ πιο ευέλικτο σε σχέση με τη σχεδίαση του

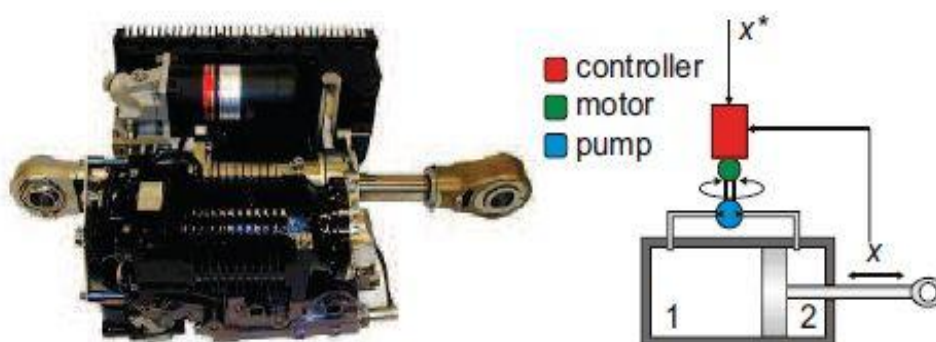
αεροσκάφους, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να βελτιώσουν τη συνολική σχεδίαση σε επίπεδα που δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν τώρα, ενώ θα επιτραπεί η πολύ πιο εύκολη παραμετροποίηση της, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες[4].

Μείωση του κόστους συντήρησης μπορεί να προέλθει από το γεγονός ότι στα ηλεκτρικά συστήματα μπορεί εύκολα να προστεθεί ένα σύστημα αυτόματης εύρεσης πιθανών σφαλμάτων του εξοπλισμού, μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων και αισθητήρων. Με τον τρόπο αυτό θα περιοριστεί σημαντικά η ανάγκη για επιθεώρηση. Τα σύγχρονα υδραυλικά συστήματα απαιτούν αντίθετα συνεχείς ελέγχους για πιθανές διαρροές, οι οποίες μπορούν μάλιστα να φθείρουν και άλλα μέρη του αεροπλάνου, αφού πολλές φορές τα υδραυλικά υγρά που χρησιμοποιούνται είναι ισχυρά διαβρωτικά. Επιπλέον η αντικατάσταση του φθαρμένου εξοπλισμού μπορεί να πραγματοποιείται πολύ ευκολότερα αφού δεν θα προϋποθέτει αποσύνδεση πολύπλοκων συστημάτων αγωγών αλλά θα απαιτεί την απλή επανασύνδεση του εξοπλισμού στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Άλλα πλεονεκτήματα που μπορούν να προκύψουν είναι η βελτιωμένη απόδοση των ηλεκτρικών συστημάτων σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα και η μεγαλύτερη ελευθερία στη σχεδίαση του αεροσκάφους (όπως αναφέρθηκε παραπάνω). Επίσης, η κατάργηση των περιορισμών του υδραυλικού δικτύου μπορεί να επιτρέψει την εγκατάσταση περισσότερων ηλεκτρικών ενεργοποιητών σε περισσότερα σημεία που θα επιτρέψουν νέα επίπεδα ελευθερίας στον έλεγχο της πτήσης, καθώς και βελτίωση των συστημάτων αυτόματου ελέγχου που θα επιτρέψουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής. Τέλος τα επίπεδα άνεσης των επιβατών μπορούν να βελτιωθούν αφού τα υδραυλικά συστήματα είναι πολλές φορές εξαιρετικά θορυβώδη, σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Παραδείγματα ενεργοποιητών που ήδη χρησιμοποιούνται:

#### Ο ηλεκτρο-υδροστατικός ενεργοποιητής



Σχήμα 2.2 Ηλεκτρο-Υδροστατικός Ενεργοποιητής[1]

Πρόκειται για ένα από τα παλαιότερα συστήματα, και πρόκειται ουσιαστικά για ένα υβριδικό σύστημα. Η λειτουργία του είναι υδραυλική, όμως η πίεση του υγρού διατηρείται και αναπτύσσεται με τη χρήση ενός μικρού ηλεκτρικού κινητήρα. Ουσιαστικά ο κινητήρας κατευθύνει το υγρό στο διαμέρισμα 1 ή στο διαμέρισμα 2 του εμβόλου (Σχήμα 2.2) ώστε να υπάρξει η αντίστοιχη κίνηση. Η χρήση του συστήματος αυτού επιτρέπει την κατάργηση του δικτύου πίεσης του υδραυλικού υγρού και την αντικατάστασή του από ηλεκτρικό δίκτυο που είναι πιο ασφαλές και αξιόπιστο.

### Ο υδραυλικός ενεργοποιητής με ηλεκτρικό εφεδρικό σύστημα



Σχήμα 2.3 Υδραυλικός ενεργοποιητής με εφεδρικό ηλεκτρικό σύστημα[1]

Στην περίπτωση αυτή, ο ηλεκτρικός κινητήρας ενεργοποιείται σε περίπτωση που το υδραυλικό σύστημα παρουσιάσει βλάβη. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μην αντικαθίσταται το κύριο υδραυλικό σύστημα αλλά καταργείται το εφεδρικό υδραυλικό σύστημα, κάτι που μπορεί να αποτελεί σημαντική βελτίωση.

### **2.3 Προκλήσεις της αντικατάστασης υδραυλικών συστημάτων με ηλεκτρικά**

Τα υδραυλικά συστήματα παρουσιάζουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ηλεκτρικά. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι[5] :

- Σχέση βάρους – ισχύος, σε αυτό τον τομέα τα ηλεκτρικά συστήματα υπολείπονται ακόμη σημαντικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε εφαρμογές όπου το βάρος είναι καθοριστικός παράγοντας επιλογής, όπως στα αεροπλάνα που εξετάζουμε, να γίνεται πολύ δύσκολη η πλήρης αντικατάστασή τους.
- Προστασία υπερφόρτισης και κατάσταση στάσης. Ακόμα και σε συνθήκες υπερφόρτισης ένας υδραυλικός ενεργοποιητής, μπορεί να τεθεί σε κατάσταση στάσης χωρίς κανένα πρόβλημα και όταν χρειαστεί μπορεί να εκκινήσει άμεσα. Αντίθετα ένα ηλεκτρικό σύστημα είναι δύσκολο να τεθεί σε κατάσταση στάσης υπό πίεση ενώ στη συνέχεια πρέπει να λυθεί το πρόβλημα της εκκίνησης υπό φορτίο.

- Εναλλασσόμενη κατεύθυνση κίνησης. Παρ' ότι οι περισσότεροι ηλεκτροκινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν με μεταβλητή ταχύτητα κίνησης, είναι δύσκολο να αλλάξουν άμεσα τη κατεύθυνση της κίνησής τους, αντίθετα με τους υδραυλικούς που μπορούν να κάνουν αυτή την αλλαγή άμεσα και χωρίς καταπόνηση.
- Εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Η χρήση ηλεκτρικών κινητήρων στα κύρια συστήματα διεύθυνσης, παρουσιάζει το σημαντικό πρόβλημα της διάρκειας ζωής των ηλεκτρικών συστημάτων, η οποία δεν είναι αρκετά μεγάλη. Αντίθετα τα υδραυλικά συστήματα παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη συνεχή καταπόνηση κάτι που τα κάνει πιο αξιόπιστα[6].

Άλλες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η είσοδος νέων ηλεκτρικών συστημάτων στη σχεδίαση των αεροσκαφών αλλά και η επέκταση της χρήσης υπάρχουσων τεχνολογιών οφείλονται στη σημαντική διαφορά της δομής και λειτουργίας ενός ηλεκτρικού συστήματος αεροπλάνου, σε σχέση με ένα κλασικό ηλεκτρικό σύστημα μιας χώρα ή μιας μεγάλη βιομηχανικής μονάδας. Οι πιο σημαντικές διαφορές είναι[7]:

- Το ηλεκτρικό δίκτυο του αεροπλάνου είναι μικρό και αδύναμο και τα φορτία που προστίθενται το επηρεάζουν σημαντικά. Αυτή η διαφορά είναι πολύ σημαντική και αλλάζει ριζικά τη φιλοσοφία της σχεδίασης τόσο του δικτύου όσο και των στοιχείων που το αποτελούν.
- Η γεννήτριες του αεροσκάφους παράγουν AC ρεύμα μεταβλητής συχνότητας και τάσης η οποία είναι μη σταθερή και μη ελεγχόμενη. Αυτή η κατάσταση διαφοροποιεί σημαντικά τις σταθερές σχεδίασης σε σχέση τις κλασικές μεθόδους.

Προκύπτει λοιπόν, με σαφήνεια, η ανάγκη για σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων ειδικευμένων στη χρήση σε αεροπλάνα. Οι κινητήρες αυτοί πρέπει να επιτυγχάνουν μεγάλη σχέση παραγόμενης ροπής και μάζας, να είναι εξαιρετικά αξιόπιστοι και να ανέχονται τα σφάλματα, ενώ πρέπει να προσαρμόζονται στις αντίξοες συνθήκες λειτουργίας των αεροσκαφών και στις ιδιαίτερες απαιτήσεις των ηλεκτρικών τους δικτύων.

## **2.4 Επιλογή τοπολογίας ηλεκτρικού κινητήρα**

Η ποικιλία των διαθέσιμων ειδών ηλεκτρικών κινητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτές τις εφαρμογές είναι εξαιρετικά μεγάλη. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή του κάθε είδους ηλεκτρικού κινητήρα, κάτι που θα μας βοηθήσει στην επιλογή της καταλληλότερης, σε σχέση πάντα και με τους παράγοντες σχεδίασης που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε και που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

### 2.4.1 Είδη ηλεκτρικών μηχανών και χαρακτηριστικά τους.

Οι ηλεκτρικές μηχανές είναι διατάξεις που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική-μηχανική. Η μετατροπή αυτή βασίζεται στην ιδιότητα της μαγνητικής ροής που μεταβάλλεται να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η σχέση αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:

$$P = e \cdot i = \frac{d\lambda}{dt} \cdot i \quad (2.1)$$

Όπου  $i$  είναι το ρεύμα και  $e$  αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη έχει αντικατασταθεί από το νόμο του Faraday με την παράγωγο της πεπλεγμένης ροής των τυλιγμάτων[8]. Σε αυτή τη βασική σχέση βασίζεται η λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών για τη μετατροπή ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα είδη ηλεκτρικών μηχανών και οι βασικές τους ιδιότητες:

- Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC). Το είδος αυτό υπερέρχει κυρίως στο γεγονός ότι ο έλεγχός του, είναι απλός, σε σχέση με τα άλλα είδη που παρουσιάζονται παρακάτω. Παρουσιάζει όμως και σημαντικά μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι οι σημαντικές του ανάγκες σε συντήρηση και η χαμηλή του αξιοπιστία, παράγοντες που θέλουμε να αποτελέσουν κάποιους από τους κύριους λόγους για τη χρήση ηλεκτρικών συστημάτων. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη συλλεκτών και ψηκτρών για τη μετάδοση του ρεύματος στο τύλιγμα του δρομέα. Το γεγονός αυτό εξηγεί και τη χαμηλή του απόδοση, αφού τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες.
- Ο κινητήρας επαγωγής EP (AC). Ο κινητήρας αυτός βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε μεγάλη ποικιλία συστημάτων κίνησης. Το χαμηλό του κόστος, ο εύκολος έλεγχος με τη βοήθεια ηλεκτρονικών ισχύος και η υψηλή του αξιοπιστία είναι οι παράγοντες που εξηγούν την τόσο ευρεία χρήση του. Ακόμη η αρκετά υψηλή του απόδοση τον κάνει κατάλληλο για εφαρμογές όπως αυτή που εξετάζουμε.
- Ο σύγχρονος κινητήρας EP (AC). Το είδος αυτό μηχανής, αποτελεί το δημοφιλέστερο είδος γεννήτριας αφού δίνει εξαιρετική απόδοση και μεγάλες δυνατότητες ρύθμισης ισχύος σε μεγάλη κλίμακα. Όμως για εφαρμογές μικρής ισχύος όπως αυτές που εξετάζουμε η κλασική σχεδίαση με τύλιγμα διέγερσης στο δρομέα παρουσιάζει πολύ σημαντικά προβλήματα, τόσο λειτουργικά όσο και κατασκευαστικά. Στην κατηγορία αυτή κυρίως μας ενδιαφέρουν οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη, αφού είναι απλές στην κατασκευή τους, έχουν σχετικά χαμηλό κόστος, μεγάλη αξιοπιστία, μεγάλο βαθμό απόδοσης και πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω μικρή ανάλυση τα δύο είδη κινητήρων που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν



είναι οι κινητήρες επαγωγής και οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών. Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών χωρίζονται σε πολλές υποκατηγορίες, ανάλογα με το αν είναι επιφανειακών μαγνητών ή οι μαγνήτες έχουν τοποθετηθεί στο εσωτερικό του δρομέα, ανάλογα με το αν παρουσιάζουν εκτυπότητα κλπ.. Από τις παραπάνω διατάξεις η πιο ενδιαφέρουσα είναι ο κινητήρας επιφανειακών μόνιμων μαγνητών μιας και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, κάτι που αποτελεί ζητούμενο σε εφαρμογές όπου ο περιορισμός του συνολικού βάρους του κινητήρα είναι εξαιρετικά σημαντικός.

#### **2.4.2 Σύγκριση Μηχανών Επαγωγής και Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών**

Η μηχανή επαγωγής (ΜΕ) αποτελεί το πιο συνηθισμένο είδος κινητήρα και χρησιμοποιείται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών[9]. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της, εκτός από αυτά που έχουν ήδη αναφερθεί, είναι η εξαιρετική δυναμική της συμπεριφορά κάτι που αυξάνει την αξιοπιστία της, ενώ η ευρεία χρήση ηλεκτρονικών ισχύος δίνει τη δυνατότητα για εξαιρετικό έλεγχο της λειτουργίας της, ειδικά σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη η λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες, μέσω εξασθένισης πεδίου[10]. Παρ' όλα αυτά το είδος αυτό παρουσιάζει και σημαντικά μειονεκτήματα σε σχέση με τις σύγχρονες μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών (ΣΜΕΜΜ), αφού έχει σχετικά μικρό μήκος διακένου, χαμηλότερη απόδοση και χειρότερο συντελεστή ισχύος. Από την άλλη πλευρά, η βελτίωση της τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών έχει κάνει τις ΣΜΜΜ μια εναλλακτική η οποία τείνει να γίνει κυρίαρχη σε εφαρμογές αεροπλοΐας[10]. Οι κύριοι παράγοντες που οδηγούν σε αυτό το γεγονός είναι η ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου που επιτρέπουν την εύκολη εκκίνηση του κινητήρα καθώς και η εξαιρετικά μεγάλη πυκνότητα ισχύος που έχουν. Μετά από σύγκριση των δύο ειδών μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι και οι δύο τοπολογίες μπορούν να καλύψουν τις αυστηρές προδιαγραφές μιας τέτοιας εφαρμογής, με κάθε μία από αυτές να παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Παρ' όλα αυτά, η εξαιρετικά μεγάλη πυκνότητα ισχύος που αποδίδει η ΣΜΕΜΜ, πάνω από τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή της ΜΕ[10] μας οδηγεί στο να επιλέξουμε αυτή τη σχεδίαση για την βελτιστοποίηση που μας απασχολεί.

### **2.5 Σύγχρονες Μηχανές Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών**

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί μια γενική περιγραφή της λειτουργίας της ΣΜΕΜΜ ώστε να γίνουν πιο σαφείς οι λόγοι που επιλέγουμε αυτή την τοπολογία, καθώς και για να γίνουν πιο εύκολα κατανοητοί οι παράμετροι της λειτουργίας και της σχεδίασης που θα αναφέρουμε αργότερα.

#### **2.5.1 Σύγχρονες μηχανές.**

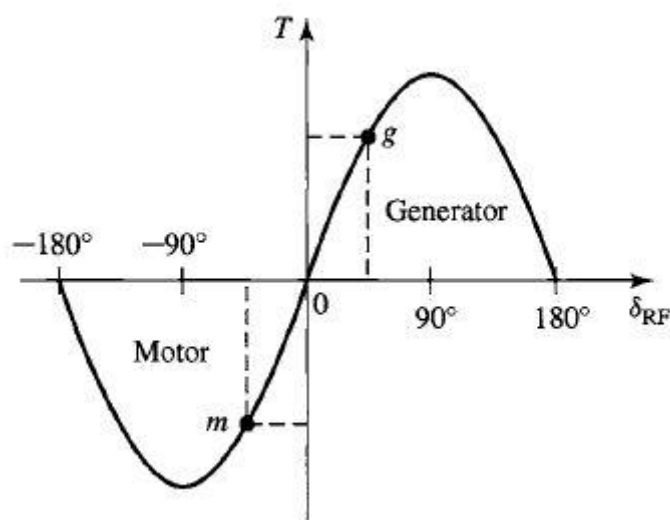
Το είδος αυτό, αποτελείται από μηχανές όπου το εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει στο τύλιγμα τυμπάνου και συνεχές ρεύμα ρέει στο τύλιγμα διέγερσης. Το τύλιγμα

τυμπάνου είναι σχεδόν πάντα στο στάτη ενώ το τύλιγμα διέγερσης στο δρομέα. Η συνεχής (dc) ισχύς που είναι απαραίτητη για το τύλιγμα διέγερσης παρέχεται από το σύστημα διέγερσης. Για την παραγωγή της ροπής τα δύο πεδία του δρομέα και του στάτη πρέπει να περιστρέφονται σε απόλυτο συγχρονισμό. Χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της σύγχρονης μηχανής σε λειτουργία μπορούν να εξαχθούν από την παρακάτω σχέση[9]:

$$T = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\text{poles}}{2}\right) \cdot \Phi \cdot F \cdot \sin \delta \quad (2.2)$$

Όπου T είναι η ροπή που παράγεται, poles ο αριθμός των πόλων της μηχανής, Φ η ροή διακένου ανά πόλο, F η μαγνητεγερτική (ΜΕΔ) δύναμη και δ η γωνία ανάμεσα στους μαγνητικούς άξονες του Φ και του F.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροπής γωνίας δ, όπου θεωρείται η σύμβαση ότι θετική ροπή σημαίνει λειτουργία γεννήτριας και αρνητική ροπή λειτουργία κινητήρα.



Σχήμα 2.4 Τυπική χαρακτηριστική συνάρτηση ροπής-γωνίας[9]

Καθώς η ροπή που ασκείται στον άξονα αυξάνεται, η γωνία ροπής αυξάνεται και αυτή μέσα από μια μικρή μηχανική επιτάχυνση του δρομέα η οποία όμως σταματάει αφού επανέλθει η ισορροπία. Η μέγιστη ροπή όπως φαίνεται παράγεται για γωνία 90 μοιρών, οπότε και το διάνυσμα της ΜΕΔ έχει τη μέγιστη απόσταση από το διάνυσμα της ροής στο διάκενο. Αν η ροπή του φορτίου συνεχίσει να αυξάνεται πέρα από αυτό το σημείο τότε η μηχανή δεν μπορεί να παράγει τη ροπή που χρειάζεται, και επέρχεται αποσυγχρονισμός. Στην κατάσταση αυτή, η μηχανή δεν μπορεί να παράγει ροπή. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα επίσης, η μηχανή αυτή, να μην μπορεί να εκκινήσει, αφού κατά την εκκίνηση τα δύο πεδία δεν είναι σε συγχρονισμό και άρα δεν παράγεται ροπή. Το πρόβλημα αυτό σε

περιπτώσεις πολύ μικρών κινητήρων, όπως σε αυτούς που θα εξετάσουμε, δεν παρουσιάζεται γιατί η αδράνεια τους είναι πολύ μικρή και μέσα σε λιγότερο από μισό κύκλο έχουν επιταχυνθεί σε σύγχρονη ταχύτητα. Για την περίπτωση που έχουν εξαρχής συνδεδεμένα πάνω τους φορτία ή σε άλλες περιπτώσεις που η αδράνεια του δρομέα είναι μεγάλη, χρησιμοποιείται οδήγηση μέσω ηλεκτρονικών ισχύος για την εκκίνησή τους. Αρχικά παρέχεται ρεύμα εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας, κοντά στο μηδέν, η οποία σταδιακά αυξάνεται μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο, με τον κινητήρα να κινείται σε όλη τη διάρκεια της εκκίνησης με σύγχρονη ταχύτητα[11, 12].

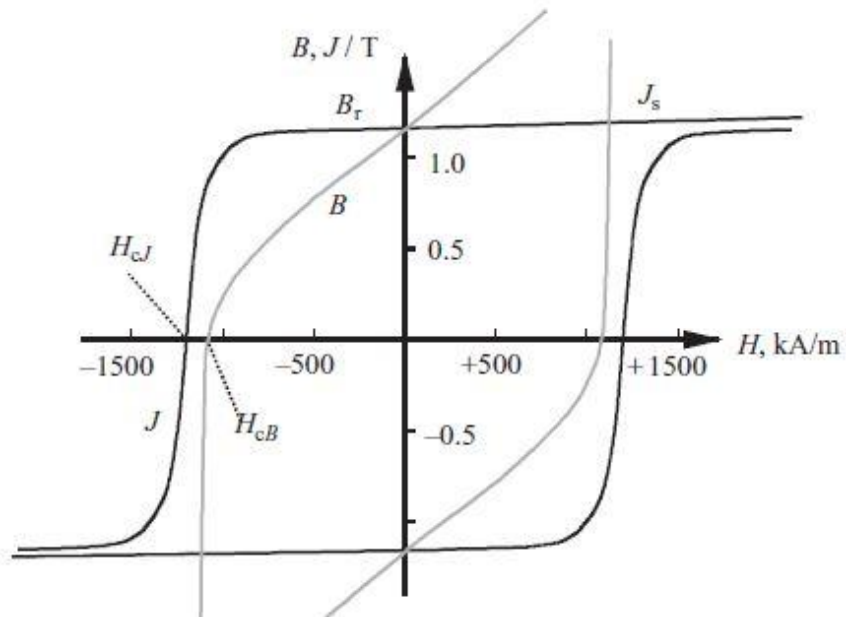
### 2.5.2 Τεχνολογία Μόνιμων Μαγνητών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο δρομέα των σύγχρονων μηχανών υπάρχει πεδίο διέγερσης. Το πεδίο αυτό στην περίπτωσή μας δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ΣΜΕΜΜ προέρχονται από τη χρήση και τις ιδιότητες των μαγνητών. Χάρη σε αυτούς, περιορίζονται σημαντικά οι συνολικές απώλειες, αφού δεν χρησιμοποιούνται συλλέκτες και ψήκτρες για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δρομέα, ενώ η μη ύπαρξη τυλίγματος δρομέα, καταργεί τις ωμικές απώλειες που υπάρχουν στα κλασικά τυλίγματα. Επίσης η κατασκευή και η συντήρηση ενός τέτοιου κινητήρα είναι εξαιρετικά απλή όπως και ο έλεγχός του.

Η επέκταση της χρήσης μόνιμων μαγνητών είναι ένα σύγχρονο φαινόμενο. Στο μεγαλύτερο μέρος του 20<sup>ου</sup> αιώνα οι μόνοι διαθέσιμοι μαγνήτες, πέρα από το φυσικό μαγνήτη που ήταν γνωστός για αιώνες, ήταν οι μαγνήτες που βασίζονταν στην τεχνολογία διάφορων ειδών ατσαλιού. Το πρώτο σημαντικό βήμα στην κατεύθυνση της γενίκευσης της χρήσης τους, ξεκίνησε τη δεκαετία του '60 με την ανακάλυψη των μαγνητών σπάνιων γαιών. Μετά την ανακάλυψη αυτών των υλικών η επόμενη σημαντική εφεύρεση ήταν οι μαγνήτες νεοδυμίου, οι οποίοι μέχρι σήμερα έχουν το μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο.

Ενώ στο παρελθόν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετώπιζαν ήταν ο εύκολος απομαγνητισμός, σήμερα αυτό το πρόβλημα έχει λυθεί. Τα σύγχρονα μαγνητικά υλικά δεν επηρεάζονται από ισχυρά εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Μόνο πολύ υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε υψηλή πιθανότητα απομαγνήτισης.

Τα σημαντικότερα από τα χαρακτηριστικά ενός μαγνητικού υλικού μπορούν να παρουσιαστούν μέσα από ένα διάγραμμα του βρόχου υστέρησης του συγκεκριμένου υλικού. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.5 Καμπύλη Μαγνήτισης Μόνιμου Μαγνήτη[13]

Όπως φαίνεται, για ένα μεγάλο εύρος τιμών, το πεδίο του μαγνήτη παραμένει σταθερό. Αν ο μαγνήτης τεθεί σε ένα πολύ ισχυρό πεδίο που ξεπεράσει το σημείο  $H_{cJ}$  τότε υπάρχει κίνδυνος απομαγνήτισης.

## Κεφάλαιο 3

### Προκαταρκτική Σχεδίαση Σύγχρονης Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση του κινητήρα που σχεδιάστηκε αρχικά και θα αιτιολογηθεί κάθε σημείο της σχεδίασης αυτής μέσω της αναλυτικής παρουσίασης της προκαταρκτικής του σχεδίασης.

#### 3.1 Προδιαγραφές του κινητήρα

##### Προδιαγραφές Σχεδίασης

##### Γεωμετρικές

(Μεταβλητή Σχεδίασης)	(Τιμή)
<b>Ακτίνα Άξονα</b>	29mm
<b>Εξωτερική Ακτίνα Πυρήνα Δρομέα</b>	32.75mm
<b>Εξωτερική Ακτίνα Στάτη</b>	46.5mm-48mm
<b>Εξωτερική Ακτίνα Κινητήρα</b>	50mm

Πίνακας 3-1

##### Ηλεκτρομηχανικές

(Μεταβλητή Σχεδίασης)	(Τιμή/ Τύπος)
<b>Μέση Ροπή</b>	31Nm @ 750RPM 15Nm @1500RPM
<b>Κυμάτωση Ροπής</b>	<0,5Nm
<b>Μορφή EMF</b>	Ημιτονική

Πίνακας 3-2

##### Άλλες

(Μεταβλητή Σχεδίασης)	(Τύπος)
<b>Τοπολογία Μαγνήτη</b>	Επιφανειακά Τοποθετημένος
<b>Τύπος Τύλιγματος</b>	Μη Επικαλυπτόμενο Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Διπλής Στρώσης

Πίνακας 3-3

Όπως φαίνεται οι προδιαγραφές του κινητήρα που πρόκειται να σχεδιάσουμε είναι εξαιρετικά αυστηρές. Κάτι που το αναμέναμε κιόλας από το γεγονός ότι πρόκειται για κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί σε αεροσκάφη. Στόχος της σχεδίασης που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια είναι να τηρηθούν όλες οι προδιαγραφές που παρουσιάζονται και αν είναι δυνατόν να ξεπεραστούν κιόλας, ώστε να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο από τις ελάχιστες δυνατές.

Θεωρώντας ονομαστικές τις προδιαγραφές για τις 750 στροφές μπορούμε να πούμε ότι ο κινητήρας που θέλουμε να σχεδιάσουμε θα έχει ονομαστική ροπή  $T_n = 31Nm$ .

Υπολογίζουμε έτσι την ονομαστική γωνιακή ταχύτητα

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n}{60} \rightarrow \omega_n = 78,5 \frac{rad}{s} \quad (3.1)$$

Η ονομαστική ισχύς της μηχανής υπολογίζεται:

$$P_n = T_n \cdot \omega_n \rightarrow P_n = 2434W \quad (3.2)$$

### 3.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Ο κύριος στόχος της προκαταρκτικής σχεδίασης είναι, με βάση τα μαγνητικά μεγέθη και τις βασικές προδιαγραφές που καθορίσαμε προηγουμένως, να δημιουργήσουμε μια αρκετά λεπτομερή σχεδίαση της μηχανής καθορίζοντας όλα τα βασικά της στοιχεία. Τα βήματα που θα ακολουθήσουμε είναι τα παρακάτω:

- Προσδιορισμός της επιφάνειας του διακένου που θα εξασφαλίσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή.
- Προσδιορισμός των διαμορφώσεων δρομέα και στάτη που θα επιτρέψουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχος μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.

#### 3.2.1 Διαστασιολόγηση του διακένου

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας διακένου γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη επιθυμητή ροπή. Η ροπή διακένου υπολογίζεται με βάση τη μέση επαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου με βάση τις επόμενες σχέσεις:

$$F_t = P_t \cdot A \quad (3.3)$$

$$T_e = \frac{1}{2} D \cdot F_t \quad (3.4)$$

Όπου,  $F_t$  η επαπτομενική δύναμη,  $P_t$  η αντίστοιχη πίεση,  $A$  επιφάνεια του δρομέα,  $D$  η διάμετρος του δρομέα μέχρι το μέσο του διακένου και  $T_e$  η ηλεκτρική ροπή που παράγεται. Η επαπτομενική πίεση στο διάκενο που προκαλείται από τα δύο μαγνητικά πεδία που βρίσκονται εκεί δίνεται από τη σχέση[13]:

$$P_t = \frac{\oint_c B_n \cdot B_t dl}{\mu_o \cdot D \cdot \pi} \quad (3.5)$$

Επειδή πρόκειται για μηχανή η οποία δεν δουλεύει συνεχώς αλλά μόνο για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα η υψηλή της απόδοσή δεν αποτελεί πρώτη προτεραιότητα. Επίσης, είναι απαραίτητο να επιτύχουμε εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ροπής, όπως άλλωστε προϋποθέτουν και οι αναλυτικές προδιαγραφές του κινητήρα. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε ως μέση τιμή της επαγωγής διακένου την αρκετά υψηλή τιμή  $B_n = B_t = 0,65T$  και τη μεταξύ τους γωνία να ισούται με 90 μοίρες. Έτσι η πίεση που ασκείται υπολογίζεται:

$$P_t = \frac{\oint_c B_n \cdot B_t dl}{\mu_o \cdot D \cdot \pi} \rightarrow P_t = \frac{\pi \cdot D \cdot B_n^2}{2 \cdot \mu_o \cdot D \cdot \pi} \rightarrow P_t = \frac{(0,65)^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 168 \frac{kN}{m^2} \quad (3.5)$$

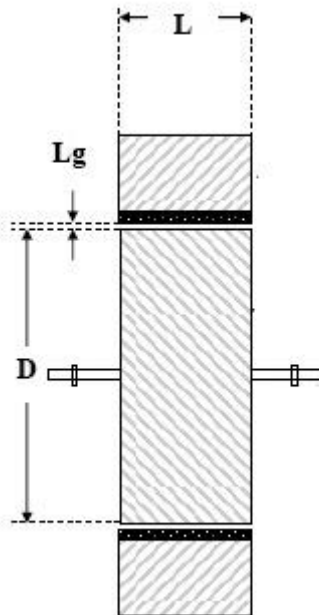
Η ηλεκτρική πίεση που προέκυψε είναι εξαιρετικά μεγάλη, αλλά αυτό είναι αναμενόμενο λόγω του γεγονότος ότι θέλουμε μια μηχανή που θα λειτουργεί για μικρά χρονικά διαστήματα, οπότε δεν θα παρουσιάζει προβλήματα υπερθέρμανσης, και θα εκμεταλλεύεται το διαθέσιμο χώρο με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Από τη σχέσεις που ήδη αναφέρθηκαν προκύπτει ότι η ηλεκτρική ροπή που παράγεται ισούται με:

$$T_e = \frac{1}{2} D \cdot P_t \cdot A = \frac{1}{2} D \cdot P_t \cdot \pi D L \quad (3.6)$$

Όπου L είναι το μήκος της μηχανής. Λύνοντας ως προς D, L με δεδομένη την μέγιστη ροπή που θέλουμε να παραχθεί προκύπτει ότι

$$D^2 L = \frac{2T_e}{\pi P_t} \rightarrow D^2 L = \frac{2 \cdot 31}{\pi \cdot 168 \cdot 10^3} = 118 cm^3 \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Επιλογή Κατάλληλου Συνδυασμού L, D



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα Βασικών Διαστάσεων Σχεδίασης Ηλεκτρικής Μηχανής[14]

Οι τιμές που λαμβάνουν οι βασικές διαστάσεις μιας μηχανής υπόκεινται σε διάφορους περιορισμούς. Η διάμετρος D, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επίδοση της μηχανής, καθώς, όπως είδαμε (σχέση 3.6), η ροπή της μηχανής αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο του D.

### Διάμετρος D

Η αύξηση της διαμέτρου του δρομέα πάνω από ένα όριο, μπορεί να οδηγήσει σε θερμικά προβλήματα καθώς μεγάλο μέρος των τυλιγμάτων θα βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή στον στάτη. Επίσης η αυξημένη μάζα του δρομέα και συνεπώς του πυρήνα, οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες πυρήνα. Τέλος υπάρχει και μηχανικός περιορισμός που οφείλεται στις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται σε δισκοειδείς μηχανές κατά την περιστροφή του δρομέα. Στην περίπτωση μας δεν υπάρχει μεγάλη απαίτηση για λειτουργία σε πολύ υψηλές ταχύτητες, κάτι που πιθανόν να οδηγούσε σε επιλογή μιας αρκετά μεγάλης διαμέτρου διακένου. Όμως ο εξαιρετικά αυστηρός περιορισμός που τίθεται σε σχέση με τη συνολική διάμετρο της μηχανής μας υποχρεώνει να κάνουμε μια επιλογή διαμέτρου σχετικά μικρή.

### Ενεργό Μήκος L

Όσο αφορά το ενεργό μήκος της μηχανής, η αύξησή του οδηγεί σε αύξηση των απωλειών πυρήνα, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει και μηχανικός περιορισμός, αφού αν το μήκος είναι πολύ μεγάλο τότε μπορεί ο δρομέας να αρχίσει να ταλαντώνεται γύρω από την κανονική του θέση, και σε ακραίες περίπτωση ακόμα και να αγγίξει τον στάτη, προκαλώντας σοβαρή φθορά της μηχανής. Από την άλλη πλευρά η αύξηση του ενεργού μήκους οδηγεί σε μείωση των απωλειών χαλκού, αφού το μεγαλύτερο μέρος των τυλιγμάτων βρίσκεται στο ενεργό μέρος του στάτη. Η συνεισφορά του μήκους στην επίδοση της μηχανής είναι γραμμική, όπως είδαμε στη σχέση 3.6. Για το λόγο αυτό, συνήθως σε μηχανές πολύ μεγάλης ισχύος που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες προτιμώνται οι μηχανές με μεγάλο μήκος και μικρή σχετικά διάμετρο, ώστε να αυξάνεται η απόδοσή τους και να μειώνεται η φυγόκεντρη δύναμη που ασκείται στο δρομέα. Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα μιας σχεδίασης με μικρή σχετικά διάμετρο διακένου και πιο μεγάλο μήκος, είναι ότι οδηγεί σε μικρότερη αδράνεια του δρομέα, κάτι που οδηγεί σε ταχύτερη δυναμική απόκριση[15]. Όπως είδαμε και προηγουμένως, στην περίπτωση μας, με δεδομένο ότι έχουμε σύγχρονη μηχανή, που δεν παρέχει ροπή εκκίνησης, είναι πολύ σημαντικό να έχει μικρή αδράνεια ο δρομέας, ώστε να μπορεί να επιταχυνθεί στη σύγχρονη ταχύτητα, ακόμα και χωρίς τη χρήση ειδικού συστήματος οδήγησης.

### Η τελική επιλογή

Μετά από δοκιμές, και με δεδομένες τις διαστάσεις που προτείνονται επιλέγουμε το ζεύγος τιμών:

$$L = 10cm, \quad D = 3,525cm \quad (3.8)$$

Άρα, υπολογίζεται ένα γινόμενο:

$$D^2L = 124,3cm^3 \quad (3.9)$$



Η τιμή αυτή είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την τιμή που βρήκαμε προηγουμένως. Το γεγονός αυτό μας εξασφαλίζει ότι η απαίτηση σε επίδοση θα επιτευχθεί σίγουρα, ενώ εξασφαλίζει ότι μεταξύ του δρομέα και του στάτη θα υπάρχει αρκετός χώρος όπου τοποθετείται ο μαγνήτης.

### 3.2.3 Πλάτος διακένου

Το πλάτος διακένου γίνεται γενικά προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Κατασκευαστικά για πάρα πολύ μικρές μηχανές είναι εφικτό να έχουμε πλάτος διακένου 0,2mm.

Στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται μια ειδική μεθοδολογία για τον υπολογισμό του πλάτους του διακένου[13]. Με βάση αυτή τη μεθοδολογία υπολογίζουμε το πλάτος διακένου. Για τις μηχανές επαγωγής που λειτουργούν σε συχνότητα 50Hz προτείνεται η παρακάτω εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό αυτό. Αναφέρεται επίσης ότι για τις μηχανές μόνιμων μαγνητών όπως η δικιά μας μπορούν να χρησιμοποιηθεί η ίδια σχέση:

$$g = 0,18 + 0,0006P^{0,4}mm \rightarrow g = 0,31mm \quad (3.10)$$

Όπου  $g$  το πλάτος διακένου και  $P$  η ισχύς της μηχανής. Επειδή όμως η μηχανή θα οδηγηθεί μέσω μετατροπέα συχνότητας και θα λειτουργεί πιθανόν σε υψηλές συχνότητες το πλάτος πρέπει να αυξηθεί κατά 60% ώστε να περιοριστούν οι απώλειες στην επιφάνεια του δρομέα. Οπότε προκύπτει:

$$g = 0,5mm \quad (3.11)$$

### 3.2.4 Μελέτη του Στάτη

Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε τον αριθμό των πόλων της μηχανής. Η σχέση που συνδέει τη συχνότητα των ρευμάτων του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, για σύγχρονη μηχανή είναι η:

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (3.12)$$

Όπου  $n_s$  είναι η σύγχρονη ταχύτητα της μηχανής,  $f$  η συχνότητα του ρεύματος και  $P$  ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η ηλεκτρική συχνότητα δεν πρέπει να λάβει πολύ υψηλές τιμές, γιατί κάτι τέτοιο θα αυξήσει τις απώλειες σιδήρου, ενώ θα οδηγήσει στην αγορά ενός αντιστροφέα υψηλού κόστους. Λόγω του γεγονότος ότι στις μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών είναι δυνατός ο συνδυασμός μεγάλου αριθμού πόλων με σχετικά λίγες άυλακες (όπως θα δούμε παρακάτω) επιλέγεται:

$$P = 20 \quad (3.13)$$

Η ηλεκτρική συχνότητα υπολογίζεται για με βάση τη μηχανική ταχύτητα της μηχανής που εξετάζουμε η οποία ισούται με 750ΣΑΛ:

$$f = 125\text{Hz} \quad (3.13)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέγιστη μαγνητική ροή ανά πόλο:

$$\Phi = \frac{B \cdot \pi \cdot L \cdot D}{P} = \frac{0,65 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 3,6 \cdot 10^{-4}}{20} = 0,367\text{mWb} \quad (3.14)$$

Ο κινητήρας που μελετάμε, όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές, οδηγείται με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα. Θεωρώντας έναν τυπικό αντιστροφέα SPWM με συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a$  μπορούμε να υπολογίσουμε την ενεργό τιμή της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Η DC τάση στην είσοδο του αντιστροφέα μπορεί να θεωρηθεί ίση με  $V_{dc} = 115\text{V}$ . Η τάση αυτή είναι ασφαλής, και μπορεί να παραχθεί από ένα τυπικό σύστημα αεροσκάφους. Για παράδειγμα σε ένα αεροσκάφος τύπου Boeing 777 η τάση του τριφασικού δικτύου ισχύος ισούται με 115V[16], η οποία μπορεί εύκολα να μετατραπεί στη συνέχεια στην τάση συνεχούς ρεύματος που θεωρήσαμε παραπάνω. Η ενεργός τιμή της τάσης τροφοδοσίας υπολογίζεται από τη σχέση[17]:

$$E = m_a \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

Θεωρούμε συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a = 0,85$  που αποτελεί μια τυπική τιμή που χρησιμοποιείται ευρέως. Η τιμή αυτή δίνει το περιθώριο να υπάρξει κάποια αύξηση της παρεχόμενης τάσης αν αυτό είναι απαραίτητο, ενώ επιτρέπει στο σύστημα διαμόρφωσης να αποδώσει καλά, περιορίζοντας για παράδειγμα προβλήματα αρμονικών.

Προκύπτει έτσι η RMS τιμή της τάσης στα άκρα των πηνίων της κάθε φάσης, για σύνδεση σε αστέρα:

$$E = 70\text{V} \quad (3.16)$$

Αφού υπολογίσαμε την τάση, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των σπειρών που χρειάζονται τα πηνία της κάθε φάσης ώστε να παραχθεί αυτή η τάση στα άκρα τους[9]:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot k_w \cdot N_i \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi \quad (3.17)$$

Όπου  $N_i$  είναι ο αριθμός των σπειρών και  $k_w$  είναι ο συντελεστής τυλίγματος.

Το τύλιγμα που επιλέξαμε για αυτή τη σχεδίαση αποτελείται από 18 αύλακες και είναι συγκεντρωμένο. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία σχεδίασης των βασικών στοιχείων της μηχανής θα παρουσιαστεί μια αναλυτική σύγκριση της τοπολογίας

συγκεντρωμένου και διανεμημένου τυλίγματος και θα αιτιολογηθεί η επιλογή του συγκεντρωμένου για την εφαρμογή μας.

Λύνοντας ως προς τον αριθμό των σπειρών και θεωρώντας  $k_w = 0,945$  [18] προκύπτει:

$$N_i = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot k_w \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi} = \frac{70}{4,44 \cdot 125 \cdot 0,945 \cdot 10 \cdot (0,367/\sqrt{2}) \cdot 10^{-3}}$$

$$\approx 60 \frac{\text{σπείρες}}{\text{φάση}} \quad (3.18)$$

Με το τύλιγμα που έχουμε θα προκύψουν περίπου 20 σπείρες ανά αύλακα της κάθε φάσης. Για τη συγκεκριμένη μηχανή επιλέγουμε τελικά τις 22 σπείρες, ώστε να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο ανοχής και να μπορούμε να επιτύχουμε ελαφρώς καλύτερες επιδόσεις.

Γνωρίζοντας την ονομαστική ισχύ της μηχανής (2434W) μπορούμε να υπολογίσουμε το ονομαστικό της ρεύμα. Θεωρούμε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, με δεδομένο ότι έχουμε σύγχρονη μηχανή. Η ισχύς που παρέχει το ηλεκτρικό κύκλωμα θα είναι σημαντικά υψηλότερη από την ισχύ εξόδου. Θεωρώντας ένα συντελεστή απόδοσης 75% περίπου τότε προκύπτει:

$$I_N = \frac{P}{3E \cdot \cos \varphi} = \frac{2343/0,75}{3 \cdot 70 \cdot 1} \approx 15,2A \quad (3.19)$$

Ο συντελεστής απόδοσης που χρησιμοποιήθηκε είναι αρκετά χαμηλός, σε σχέση με συντελεστές απόδοσης κοντά ή και πάνω από το 90% που μπορούν να επιτύχουν οι μηχανές μόνιμων μαγνητών[19], όμως αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι πρόκειται για ιδιαίτερη κατασκευή, πολύ υψηλών επιδόσεων σε σχέση με τον όγκο της, η οποία λειτουργεί για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα, οπότε είναι λογικό να έχουμε μια σχετικά μικρή απόδοση.

### 3.2.5 Υπολογισμός ειδικών Φορτίσεων

Η ειδική μαγνητική φόρτιση,  $\bar{B}$ , συνδέει τον αριθμό πόλων P με τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και τις βασικές διαστάσεις της μηχανής

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3.20)$$

Όπου L το μήκος του άξονα της μηχανής, και D η διάμετρος του διακένου.

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει συνήθως τιμές από 0,5T έως 0,7T. Το άνω όριο τίθεται από το φαινόμενο κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη και τις απώλειες πυρήνα που προκαλούνται λόγω του κορεσμού. Το κατώτερο όριο

τίθεται από την ανάγκη για επαρκή αξιοποίηση του σιδηρομαγνητικού υλικού, ώστε να γίνεται οικονομία στη χρήση του, και στο βάρος και τον όγκο της μηχανής που προκύπτει. Στην εφαρμογή μας έχει επιλεχθεί ως μέση μαγνητική φόρτιση:

$$\bar{B} = 0,65T \quad (3.21)$$

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση  $ac$ , δηλαδή το πλήθος των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο της περιφέρειας του σπλισμού:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_t \cdot I}{\pi \cdot D} = 48000 A - \frac{\varepsilon}{m} \quad (3.22)$$

Όπου ο όρος 2 του γινομένου αφορά τα τυλίγματα διπλής στρώσης και ο όρος 3 αφορά το γεγονός ότι πρόκειται για τριφασική μηχανή.

Οι τυπικές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών από 15.000 έως 45.000 A-ε/μ. Στην δική μας περίπτωση η ηλεκτρική φόρτιση είναι στο ανώτατο όριο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί έχουμε επιλέξει πάρα πολύ υψηλή πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη. Φαίνεται έτσι και ο τρόπος με τον οποίο η ειδική ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού αλλά και την επίδοση της μηχανής.

### 3.2.6 Γεωμετρική Διαμόρφωση Δρομέα

Στις μηχανές μόνιμων μαγνητών, όπου ο δρομέας δεν φέρει τύλιγμα, βασικό κριτήριο κατά το σχεδιασμό είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών πυρήνα. Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται μια τυπική καμπύλη απομαγνήτισης καθώς και μια εκτίμηση της διάστασης των μαγνητών.

Το υλικό του μόνιμου μαγνήτη που επιλέχθηκε είναι κράμα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB), που είναι το καταλληλότερο για αυτή την εφαρμογή αφού:

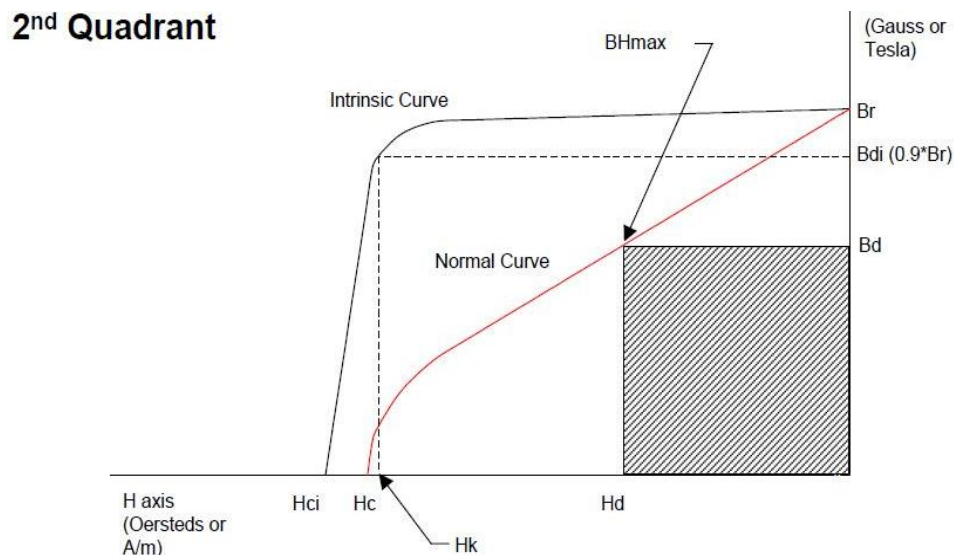
- Προσφέρει τη μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις διαθέσιμες τεχνολογίες
- Είναι ανθεκτικό σε φαινόμενα απομαγνήτισης

Ο τύπος αυτός μαγνητών παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Η ανθεκτικότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες είναι περιορισμένη σε σχέση με άλλα είδη[20].
- Το Νεοδύμιο είναι σπάνια γαία (Rare Earth Element), και όπως όλες οι σπάνιες γαίες παράγεται σχεδόν αποκλειστικά στην Κίνα, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα η πρόσβαση σε αυτό να μην είναι δεδομένη, αφού γίνεται αντικείμενο πολιτικών παιχνιδιών.

## Καμπύλη Απομαγνήτισης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη απομαγνήτισης ενός τέτοιου μαγνήτη:



Σχήμα 3.2 Τυπική Καμπύλη Μαγνήτισης Μόνιμου Μαγνήτη

Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται η παραμένουσα μαγνήτιση  $B_r$ , ενώ στον οριζόντιο το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς  $H_c$ , το οποίο εκφράζει την αντίσταση του υλικού στην απομαγνήτιση, και μετριέται σε Oersted ή σε A/m. Τέλος στο διάγραμμα παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα η καμπύλη λειτουργίας του μαγνήτη.

Κατά τη σχεδίαση, γίνεται προσπάθεια ώστε ο μαγνήτης να λειτουργεί κοντά στο σημείο μέγιστης μαγνητικής ενέργειας. Το σημείο αυτό φαίνεται στο διάγραμμα και ορίζεται από τα δύο σημεία  $H_d$  και  $B_d$ .

Για να προχωρήσουμε στη σχεδίαση παίρνουμε ως παράδειγμα τον μαγνήτη N40. Ο μαγνήτης αυτός έχει μέγιστη ενέργεια για  $H_d = -452,5 \text{ kA/m}$  και για  $B_d = 0,635 \text{ T}$ . Σε αυτό το σημείο λειτουργίας πρέπει να βρίσκεται ο μαγνήτης στο πλήρες φορτίο, άρα στο κενό φορτίο πρέπει η πυκνότητα της μαγνητικής ροής να είναι λίγο αυξημένη περίπου στο  $0,7 \text{ T}$ .

Στη συνέχεια πρέπει να εκτιμήσουμε την επίδραση του πεδίου του στάτη στη μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη. Θεωρώντας κατά προσέγγιση την καμπύλη απομαγνήτισης ως μια ευθεία γραμμή, μπορούμε να την περιγράψουμε με την εξίσωση:

$$H(B) = H_d - \frac{H_c}{B_r} \cdot B = -905 + \frac{905}{1,27} B = -905 + 713B \quad (3.22)$$

Όπου  $H$  σε  $\text{kA/m}$  και  $B$  σε  $\text{T}$ . Οι τιμές έχουν ληφθεί από το διάγραμμα [20].

Από την εξίσωση 3.22, και γνωρίζοντας την ειδική ηλεκτρική φόρτιση υπολογίζουμε ότι:

$$\Delta B = \frac{1}{713} ac = \frac{48000}{713 \cdot 10^3} = 0.067T \quad (3.23)$$

Η μικρή τιμή της μεταβολής που προέκυψε δείχνει ότι σε κάθε περίπτωση ο μαγνήτης θα χρησιμοποιείται πολύ κοντά στην περιοχή μέγιστης ενέργειας του. Επίσης η τιμή που βρέθηκε για τη μεταβολή του B μας πηγαίνει ακριβώς στο σημείο μέγιστης ενέργειας για λειτουργία σε πλήρες φορτίο, κάτι που είναι και το ιδανικό.

### Διαστασιολόγηση Μαγνήτη

Το κυριότερο στοιχείο που πρέπει να υπολογίσουμε είναι η συνολική επιφάνεια του μαγνήτη. Για να την υπολογίσουμε χρησιμοποιούμε το θεμελιώδη νόμο του ηλεκτρομαγνητισμού που συνδέει τη μαγνητική ροή με την ένταση του μαγνητικού πεδίου:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (3.24)$$

Όπου A είναι η συνολική επιφάνεια από την οποία διέρχονται οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

Η επιφάνεια A, ισούται με την επιφάνεια του μαγνήτη. Έτσι η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$B = \frac{\Phi}{L \cdot L_{mag}} \quad (3.25)$$

Όπου L είναι το ενεργό μήκος της μηχανής και  $L_{mag}$  είναι το μήκος του μαγνήτη στο διάκενο.

Η μαγνητική ροή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι γνωστές,  $\Phi = 0,367mWb$  και  $B = 0,7T$  για λειτουργία κενού φορτίου. Το ενεργό μήκος της μηχανής είναι  $L = 10cm$

Προκύπτει έτσι:

$$B = \frac{\Phi}{L \cdot L_{mag}} \rightarrow L_{mag} = \frac{\Phi}{B \cdot L} = 4,8mm \quad (3.26)$$

Το συνολικό μήκος της περιφέρειας του διακένου ανά πόλο είναι:

$$S_{pole} = \frac{2\pi \cdot (D/2)}{P} = 5,652mm \quad (3.27)$$

Όπου D η ακτίνα του διακένου και P ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Τελικά προκύπτει ποσοστό μαγνήτη στη μηχανή ίσο με:

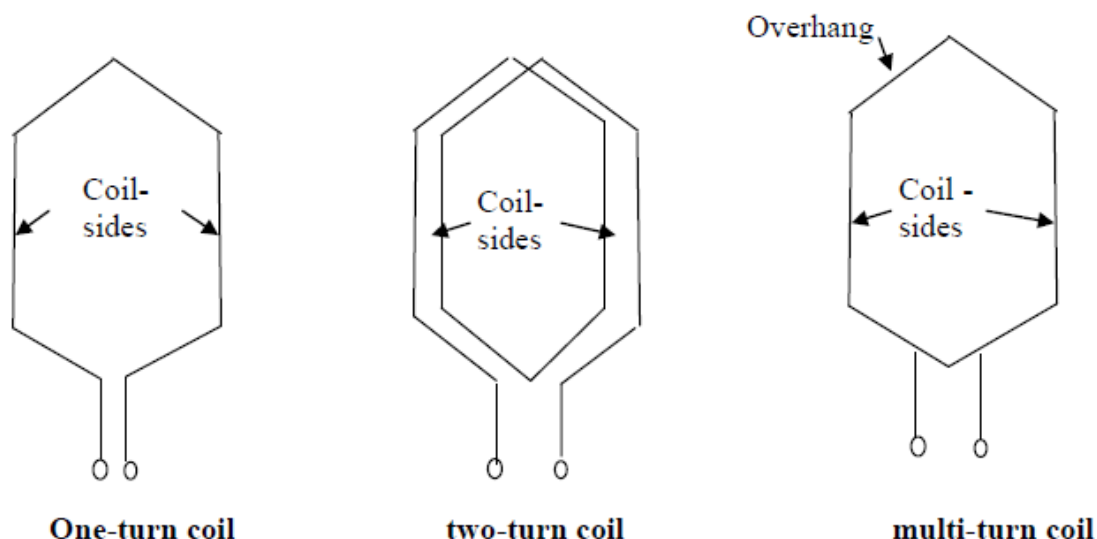
$$\theta_{mag} = \frac{L_{mag}}{S_{pole}} = 0,85 \quad (3.28)$$

Όπου  $\theta_{mag}$  είναι το ποσοστό της γωνίας του πόλου που καλύπτεται από το μόνιμο μαγνήτη.

### 3.2.7 Επιλογή Κατάλληλου Τύπου Τυλίγματος

Αρχικά θα καθορίσουμε ορισμένες βασικές έννοιες ώστε να είναι πιο εύκολη η σαφής περιγραφή των τυλιγμάτων στη συνέχεια:

- Αγωγός: ορίζεται ως το μέρος εκείνο του σύρματος που μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα και παίζει ενεργό ρόλο στη διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.
- Σπείρα: Ο κάθε αγωγός περιστρέφεται πολλές φορές ώστε με το ίδιο ρεύμα να παραχθεί ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο. Η κάθε περιστροφή αποτελεί μία σπείρα.
- Πηνίο: Οι αγωγοί που έχουν περιελιχθεί αποτελούν όλοι μαζί ένα πηνίο. Το κάθε πηνίο αποτελείται από κάποιο αριθμό σπειρών.
- Πλευρές Πηνίου: Κάθε πηνίο, με οποιοδήποτε αριθμό σπειρών έχει δύο πλευρές.



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα Πηνίου μίας σπείρας, δύο σπειρών και πολλών σπειρών αντίστοιχα

Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει σχηματικά ένα πηνίο, καθώς και τις πλευρές του.

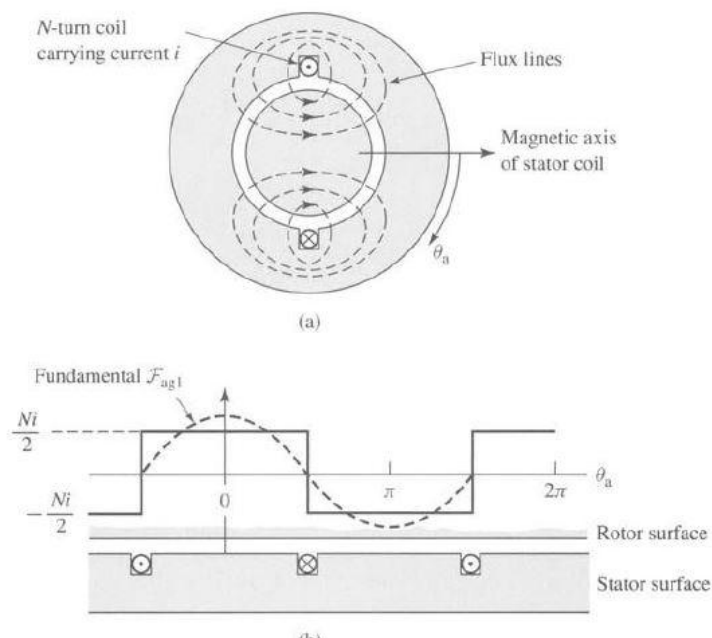
### 3.2.7.1 Διανεμημένο Τύλιγμα

Η πιο συνηθισμένη και καθιερωμένη διάταξη των τυλιγμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές είναι τα διανεμημένα τυλίγματα.

Η ιδέα του διανεμημένου τυλίγματος προέκυψε από την ανάγκη για παραγωγή μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο διάκενο (ΗΕΔ) που η μορφή της να προσεγγίζει όσο είναι δυνατόν την ημιτονική μορφή, ώστε να υπάρχει μικρή αρμονική παραμόρφωση.

Το κύμα που παράγει ένα πηνίο έχει τετραγωνική μορφή, άρα για να επιτευχθεί η επιθυμητή μορφή του παραγόμενου κύματος πρέπει να γίνει κατάλληλη τοποθέτηση των πηνίων σε πολλά αυλάκια.

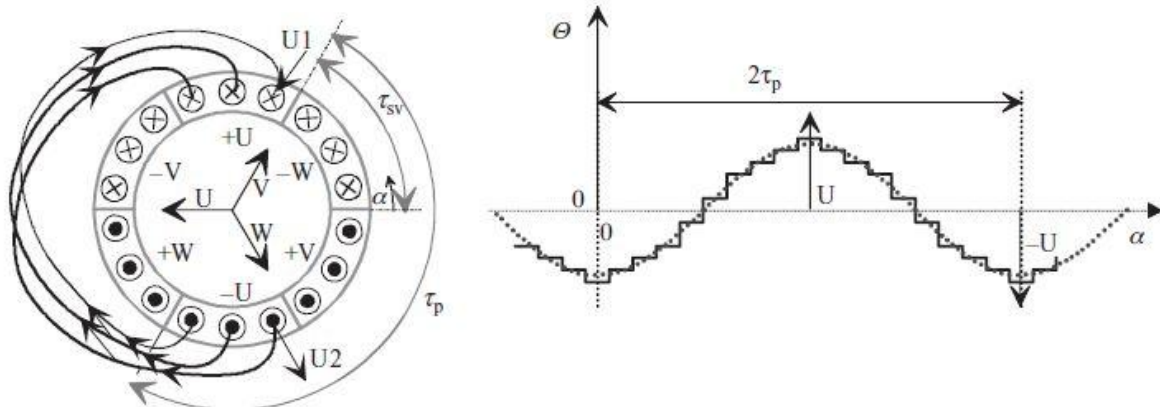
Έτσι αντί να έχουμε την παρακάτω σχεδίαση, η οποία παρουσιάζεται απλοποιημένη και η οποία δεν χρησιμοποιείται ποτέ στην πράξη[9]



Σχήμα 3.4 Κατανομή Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης στο Διάκενο για μονοφασικό τύλιγμα

Χρησιμοποιούμε τη διάταξη του διανεμημένου τυλίγματος, που στην πιο απλή μορφή παρουσιάζεται παρακάτω.





Σχήμα 3.5 Παρουσίαση Διανεμημένου Τυλίγματος και της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης που Προκύπτει αντίστοιχα[13]

Όπως φαίνεται, η μορφή του κύματος που δημιουργείται είναι πολύ πιο κοντά στην ημιτονική.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε μηχανής είναι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση:

$$q = \frac{Q}{mP} \quad (3.29)$$

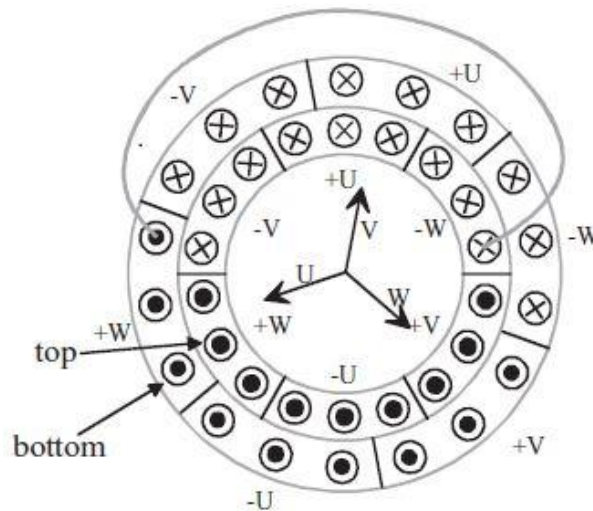
Όπου Q ο αριθμός των αυλάκων τη μηχανής, m ο αριθμός των φάσεων και P ο αριθμός των πόλων. Για τις μηχανές διανεμημένου τυλίγματος ο αριθμός αυτός είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα.

Για να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η κυματομορφή, χρησιμοποιείται η τεχνική του τυλίγματος διπλής στρώσης. Σε ένα τέτοιο τύλιγμα σε κάθε αύλακα υπάρχουν σπείρες δύο διαφορετικών φάσεων. Η τεχνική των τυλιγμάτων διπλής στρώσης χρησιμοποιείται συνήθως με μια άλλη εξαιρετικά διαδεδομένη τεχνική που αναλύεται παρακάτω.

### Τυλίγματα Πλήρους και Κλασματικού Βήματος

Ως πολικό βήμα ορίζεται η απόσταση σε μοίρες μεταξύ δύο πόλων μιας μηχανής. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των πόλων, ένα πολικό βήμα αντιστοιχεί σε 180 ηλεκτρικές μοίρες.

Το βήμα ενός πηνίου είναι η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του πηνίου. Αν η απόσταση αυτή είναι ίση με ένα πολικό βήμα τότε έχουμε τύλιγμα πλήρους βήματος. Αντίθετα αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη τότε έχουμε τύλιγμα κλασματικού βήματος. Το παρακάτω τύλιγμα για παράδειγμα είναι κλασματικού βήματος 2/3.



Σχήμα 3.6 Κλασματικό Τύλιγμα[13]

Το κλασματικό βήμα, αποτελεί μια εξαιρετικά διαδεδομένη σχεδιαστική επιλογή καθώς επιτυγχάνει μείωση των ανώτερων αρμονικών χώρου. Η μείωση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι σε κάποιες από τις αύλακες υπάρχουν αγωγοί διαφορετικών φάσεων, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα η γωνία του ρεύματος που προκύπτει να είναι μεταξύ των γωνιών των δύο φάσεων που βρίσκονται στην ίδια αύλακα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται κύματα ΜΕΔ με ενδιάμεσες τιμές, κάτι που συμβάλει στην καλύτερη μορφή της κυματομορφής. Η χρήση τυλίγματος κλασματικού βήματος έχει το μειονέκτημα ότι μειώνει το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της ΜΕΔ κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη ικανότητα παραγωγής ροπής.

### 3.2.7.2 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα

Τα τυλίγματα αυτού του είδους έχουν αναλογία αυλάκων ανά πόλο ανά φάση μικρότερο της μονάδας.

$$q = \frac{Q}{mP} < 1 \quad (3.30)$$

Το συγκεντρωμένα τυλίγματα δεν είναι μια πρόσφατη ανακάλυψη αφού η πρώτη αναφορά σε αυτά γίνεται το 1895[21]. Στη διάρκεια της δεκαετίας του '90 άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρές μονοφασικές μηχανές. Πρόσφατα έχουν γίνει πολύ δημοφιλή. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί ώστε να βρίσκονται συνδυασμοί πόλων και αυλάκων με υψηλό συντελεστή τυλίγματος.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με τα διανεμημένα τυλίγματα είναι:

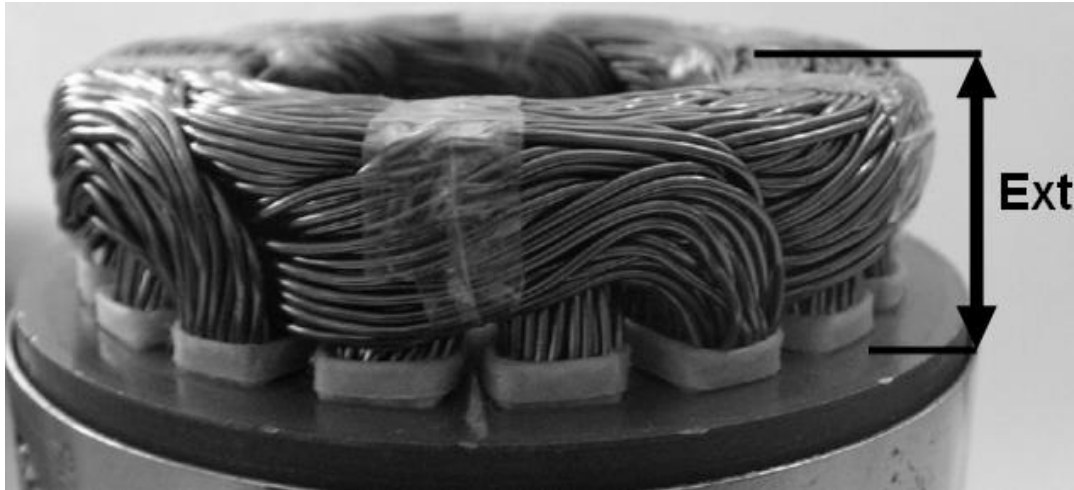
- Το τέλος των αγωγών (end windings), δηλαδή το τμήμα εκείνο των αγωγών που δεν βρίσκονται στο ενεργό μέρος της μηχανής, έχει πολύ μικρότερο μήκος, οπότε οι απώλειες χαλκού μειώνονται σημαντικά.
- Η τοποθέτησή τους γύρω από τα δόντια είναι πολύ εύκολη, αφού δεν επικαλύπτονται τα άκρα των αγωγών. Αυτό απλοποιεί την κατασκευή τους, μειώνει το κόστος της μηχανής και επιτρέπει αυξημένο συντελεστή πληρότητας.
- Κάποιες διατάξεις τους, μπορούν να οδηγήσουν σε μικρή κυμάτωση ροπής.
- Σε μηχανές μικρού μεγέθους, μπορούν να τοποθετηθούν πολλοί πόλοι, ώστε να μειωθεί η ονομαστική ταχύτητα, ενώ ο αριθμός των αυλάκων μπορεί να διατηρηθεί μικρός, ώστε η κάθε αύλακα είναι αρκετά μεγάλη και να είναι πιο εύκολη η κατασκευή της.

Στα συγκεντρωμένα τυλίγματα ο αριθμός πόλων και αυλάκων πρέπει να καθοριστεί προσεκτικά. Αλλιώς ο συντελεστής τυλίγματος μπορεί να είναι πολύ χαμηλός, η κυμάτωση της ροπής και απώλειες του δρομέα μπορεί να είναι υψηλές και η μηχανή να είναι εξαιρετικά θορυβώδης.

Η σημαντική απλοποίηση στην κατασκευή της μηχανής λόγω των πηνίων που δεν επικαλύπτονται μπορεί να γίνει κατανοητή ευκολότερα από τις παρακάτω φωτογραφίες:



Σχήμα 3.7 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα



Σχήμα 3.8 Διανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος

Στη δεύτερη περίπτωση ο όγκος των τυλιγμάτων έξω από το ενεργό μέρος της μηχανής είναι εξαιρετικά μεγάλος, οι αγωγοί είναι πιο λεπτοί, ώστε να επιτυγχάνεται αρκετά υψηλός συντελεστής πληρότητας στις κατά πολύ μικρότερες αύλακες, ενώ η διάταξη των αγωγών είναι εξαιρετικά πολύπλοκη.

#### Τυλίγματα απλής και Διπλής Στρώσης

Όπως και στην περίπτωση των διανεμημένων τυλιγμάτων, στα συγκεντρωμένα τυλίγματα είναι δυνατόν να έχουμε τόσο διατάξεις διπλής όσο και μονής στρώσης. Στα τυλίγματα διπλής στρώσης σε κάθε αύλακα περιλαμβάνονται τυλίγματα διαφορετικών φάσεων, μόνο που αντίθετα με πριν, ο διαχωρισμός των τυλιγμάτων στην αύλακα γίνεται κάθετα και όχι οριζόντια[22]:



Σχήμα 3.9 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Απλής και Διπλής Στρώσης[22]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στη διαδικασία σχεδιασμού ενός τυλιγματος είναι εξαιρετικά σημαντική η επιλογή το συνδυασμού αυλάκων και πόλων που θα κάνουμε, ώστε η λειτουργία της μηχανής να είναι ικανοποιητική. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας όπου παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί για 4 έως 40 πόλους και 6 έως 60 αύλακες[18]:

$Q_s \setminus p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
6	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866
9	0.617	0.866	0.945	0.866	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617
12	$q=1$		0.866	0.933		0.933	0.866								0.866	0.933		0.933	0.866
15			0.621	0.866		0.951	0.951		0.866	0.621								0.621	0.866
18		$q=1$		0.647	0.866	0.902	0.945		0.945	0.902	0.866	0.647							
21						0.866	0.89		0.953	0.953		0.89	0.866						
24			$q=1$			0.76	0.866		0.933	0.95		0.95	0.933		0.866	0.76			
27								0.866	0.877	0.915	0.945	0.954	0.954	0.945	0.915	0.877	0.866		
30				$q=1$					0.866	0.874		0.936	0.951		0.951	0.936		0.874	0.866
33										0.866		0.903	0.928		0.954	0.954		0.928	0.903
36					$q=1$						0.866	0.867	0.902	0.933	0.945	0.953		0.953	0.945
39												0.866	0.863		0.918	0.936		0.936	0.954
42						$q=1$							0.866		0.89	0.913		0.945	0.953
45														0.866	0.859	0.886		0.927	0.945
48							$q=1$								0.866	0.857		0.905	0.933
51																0.866		0.88	0.901
54								$q=1$									0.866	0.854	0.877
57																		0.866	0.852
60									$q=1$										0.866

$q=1/2, 1/4$		$q=3/8, 3/10$	$Q_s=21+6k, p=Q_s \pm 1, k=0, 1, 2, \dots$
$q=3/7, 3/11$		$q=5/14, 5/16$	$Q_s=24+6k, p=Q_s \pm 2, k=0, 1, 2, \dots$
$q=2/5, 2/7$		not appropriate	$kw1 < 0.866$

Σχήμα 3.10 Πίνακας Συντελεστή Τυλίγματος συναρτήσεσι Αυλακών-Πόλων[18]

### 3.2.8 Τελική επιλογή τυλίγματος

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η σχεδίαση της συγκεκριμένης μηχανής έγινε με στόχο να λειτουργεί με χαμηλή ονομαστική ταχύτητα ώστε να είναι δυνατή η χρήση της απευθείας στο μηχανισμό χωρίς το ενδιάμεσο στάδιο ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Αυτό μας οδήγησε, με βάση τις ανάγκες για ταχύτητα και τη δεδομένη τιμή της συχνότητας τροφοδοσίας να επιλέξουμε μηχανή με 20 πόλους.

Διανεμημένο Τύλιγμα: Στην περίπτωση αυτή θα έπρεπε να ισχύει ότι

$$q > 1 \rightarrow \frac{Q}{3P} > 1 \rightarrow Q > 60 \quad (3.31)$$

Όπου P ο αριθμός των πόλων και Q ο συνολικός αριθμός αυλάκων της μηχανής.

Συνεπώς θα έπρεπε να έχουμε τουλάχιστον 60 αύλακες. Στην πραγματικότητα, για να έχουμε μια ικανοποιητική λειτουργία χωρίς εξαιρετικά μεγάλο περιεχόμενο αρμονικών και κυμάτωσης ροπής θα έπρεπε να έχουμε  $q = 3$  έως 5 ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία κλασματικού βήματος. Σε αυτή την περίπτωση θα έπρεπε να φτάσουμε σε έναν αριθμό αυλάκων μεταξύ 180 και 300.

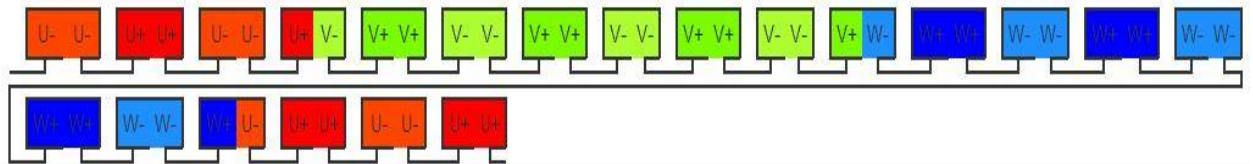
Κάτι τέτοιο θα ήταν αδύνατο. Το μέγεθος της μηχανής που σχεδιάζουμε είναι πολύ μικρό και θα οδηγούμαστε σε αύλακες που θα είχαν τόσο μικρό πλάτος που θα ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν. Επίσης η τοποθέτηση των τυλιγμάτων θα ήταν αδύνατη αφού δεν γίνεται να κατασκευαστούν τόσο λεπτοί αγωγοί, ενώ η μόνωση και μόνο των τυλιγμάτων από το σώμα του στάτη θα είχε πιθανόν μεγαλύτερο πάχος από το διαθέσιμο χώρο στην αύλακα.

Η επιλογή του διανεμημένου τυλίγματος είναι αδύνατη.

**Συνεπώς επιλέχθηκε τοπολογία συγκεντρωμένου τυλίγματος.**

Αρχικά πρέπει να επιλέξουμε έναν από τους συνδυασμούς πόλων και αυλάκων που προτείνονται. Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι για 20 πόλους, ικανοποιητική συμπεριφορά παρουσιάζει μια σχεδίαση με 18, 21 ή 24 αύλακες. Από τις περιπτώσεις αυτές επιλέγουμε αριθμό αυλάκων ίσο με 18.

Ο συντελεστής τυλίγματος για την περίπτωση αυτή είναι πολύ ικανοποιητικός, ελάχιστα μικρότερος από την περίπτωση με 21 αύλακες, ενώ το γεγονός ότι έχουμε λιγότερες αύλακες σε συγκεκριμένο χώρο επιτρέπει να έχουν κάπως μεγαλύτερο μέγεθος, κάτι που μας διευκολύνει κατασκευαστικά. Επίσης στην περίπτωση με τις 21 αύλακες η αλληλουχία φάσεων του τυλίγματος είναι εξαιρετικά πολύπλοκη όπως φαίνεται παρακάτω[23]:

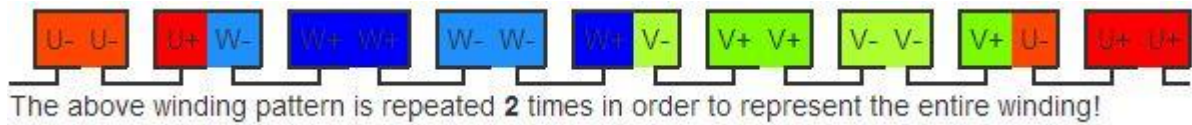


Σχήμα 3.11 Αλληλουχία Φάσεων στο Τύλιγμα P=20 και Q=21[22]

Για τους παραπάνω λόγους επιλέγουμε τύλιγμα διπλής στρώσης με

$$Q = 18$$

Η λεπτομερής δομή του τυλίγματος παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.12 Αλληλουχία Φάσεων στο Τύλιγμα P=20 Q=18[22]

Η παραπάνω σχεδίαση επαναλαμβάνεται 2 φορές μέχρι να συμπληρωθούν και οι 18 αύλακες.

### 3.3 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία σχεδίασης της ηλεκτρικής μηχανής. Η διαδικασία αυτή είχε στόχο να καλύψει με επιτυχία όλες τις προδιαγραφές της συγκεκριμένης εφαρμογής. Πολλά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από αυτή τη σχεδίαση θα διατηρηθούν κατά τη βελτιστοποίηση που θα πραγματοποιηθεί αργότερα. Επίσης η επιδόσεις της μηχανής που προέκυψε από αυτή τη σχεδίαση θα αποτελέσουν τη βάση σύγκρισης για τις βελτιστοποιημένες γεωμετρίες που θα μας δώσει ο αλγόριθμος. Αυτοί οι δύο λόγοι είναι που μας οδήγησαν σε αυτή την αναλυτική παρουσίαση.





## Κεφάλαιο 4

### Ανάπτυξη εργαλείου σχεδίασης και ανάλυσης λειτουργίας ηλεκτρικής μηχανής μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FE)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία σχεδίασης μιας μηχανής. Η διαδικασία αυτή καθορίζει τα πιο βασικά στοιχεία της σχεδίασης και εξασφαλίζει ότι οι προδιαγραφές της μηχανής θα ικανοποιούνται κατά προσέγγιση. Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε με ακρίβεια τα διάφορα χαρακτηριστικά της μηχανής πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Κατά τη διαδικασία σχεδίασης, κάναμε αρκετές απλοποιήσεις. Για παράδειγμα θεωρήσαμε την μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου άπειρη. Θεωρήσαμε επίσης τη ροή στα δόντια της μηχανής και το σώμα του στάτη παντού σταθερή, χρησιμοποιώντας μόνο το μέσο όρο της. Για να προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια την επίδοση της μηχανής χρησιμοποιούμε την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Τα κυριότερα στοιχεία που εξετάζουμε είναι η κατανομή της μαγνητικής ροής, η επαγόμενη ΗΕΔ και η κυμάτωση της ροπής.

#### 4.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

Η τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών και άλλων προβλημάτων τα οποία είναι πολύ περίπλοκα για να λυθούν με αναλυτικές τεχνικές, κυρίως επειδή περιέχουν χαρακτηριστικά υλικών τα οποία είναι μη γραμμικά. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την επίλυση ακόμα και μεγεθών που μεταβάλλονται με το χρόνο. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, το συνολικό πεδίο ανάλυσης χωρίζεται σε στοιχειώδεις επιφάνειες (ή όγκους για την περίπτωση της τρισδιάστατης ανάλυσης), που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία, και οι εξισώσεις πεδίου εφαρμόζονται σε κάθε ένα από αυτά[24].

Η μελέτη των κατανομών πεδίου, παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα. Επιτρέπει μια τοπική ανάλυση, που μπορεί να τονίσει επικίνδυνες κλίσεις πεδίου, έντασης μαγνητικού πεδίου, κορεσμό κλπ. Επιτρέπει επίσης μια καλή προσέγγιση της λειτουργίας την ηλεκτρικής συσκευής που εξετάζεται, κάτι που περιορίζει και τον αριθμό των πρότυπων που είναι απαραίτητο να κατασκευαστούν. Αυτό γίνεται γιατί επιτρέπει την λεπτομερή εξέταση των συνεπειών που έχουν μικρές μεταβολές της γεωμετρίας στην απόδοση της συσκευής.

Βέβαια η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και μειονεκτήματα, το βασικότερο από τα οποία είναι ότι η αριθμητική φύση της δίνει αποτελέσματα που είναι υποχρεωτικά προσεγγιστικά. Επίσης επειδή οι υπολογιζόμενες ποσότητες είναι διανεμημένες στο χώρο, ο απαραίτητος υπολογιστικός χρόνος μπορεί να είναι σημαντικός.

Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Προ-επεξεργασία (pre-processing)
2. Επίλυση Πεδίου (field solution)
3. Μετ-επεξεργασία (post-processing)

#### 4.1.1 Προ-επεξεργασία

Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτά είναι το στάδιο όπου ο χρήστης πρέπει να κάνει τις περισσότερες επιλογές. Τέσσερις λειτουργίες πρέπει να εκτελεστούν:

1. Καθορισμός γεωμετρίας
2. Ορισμός υλικών
3. Ορισμός προβλήματος
4. Δημιουργία πλέγματος

Ο **καθορισμός γεωμετρίας** περιλαμβάνει την σχεδίαση της μηχανής όπως αυτή θα σχεδιαζόταν σε ένα παραδοσιακό μηχανολογικό σχέδιο. Ουσιαστικά πρέπει να εισαχθούν με ακρίβεια όλες οι περιοχές, όπου στη συνέχεια θα εισαχθούν τα διάφορα υλικά. Η γεωμετρία θα πρέπει να είναι πλήρης, ώστε σε κάθε σημείο του χώρου να είναι απολύτως καθορισμένο το υλικό της. Σε περιπτώσεις όπου η ανάλυση γίνεται σε δύο διαστάσεις, η γεωμετρία που εισάγεται θα πρέπει να είναι σε κάποιο επίπεδο συμμετρίας, ώστε να μπορεί να γίνει υπολογισμός όλων των μεγεθών σε τρεις διαστάσεις. Σε αρκετές περιπτώσεις το στάδιο αυτό είναι ξεχωριστό από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και εκτελείται μέσα από σχεδιαστικά προγράμματα, με τη γεωμετρία που προκύπτει να εισάγεται στη συνέχεια στο πρόγραμμα υπολογισμού με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Ο **ορισμός των υλικών** περιλαμβάνει την εισαγωγή των βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Εισάγεται για παράδειγμα η χαρακτηριστική B-H των μαλακών και σκληρών σίδηρο-μαγνητικών υλικών, η αγωγιμότητα και άλλα. Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται και ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου, αφού τα πραγματικά, πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά των υλικών χρησιμοποιούνται κατά την επίλυση. Πολλά από τα περιβάλλοντα πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνουν έτοιμες βιβλιοθήκες υλικών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα.

Ο **ορισμός προβλήματος** περιλαμβάνει τον ορισμό των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, την επιλογή των πυκνοτήτων ρεύματος στις αντίστοιχες περιοχές που περιλαμβάνουν τα τυλίγματα και τον καθορισμό της κατεύθυνσης μαγνήτισης των μαγνητών.

Η **δημιουργία πλέγματος**, αποτελεί το σημείο όπου η γεωμετρία της μηχανής διαιρείται σε ένα σύνολο από τριγωνικά στοιχεία (ανάλυση 2D), ή σε όγκους προκαθορισμένου απλού σχήματος (για ανάλυση 3D).

#### 4.1.2 Επίλυση Πεδίου

Για την επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης χρησιμοποιούνται ειδικευμένοι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί γι' αυτό το σκοπό. Οι αλγόριθμοι αυτοί συχνά βασίζονται στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης ενέργειας, που είναι μια μαθηματική συνάρτηση που σχετίζεται με την αποθηκευμένη ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Η μερική διαφορική εξίσωση μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα, που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό από στιγμιαίες μη γραμμικές εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα άγνωστα μεγέθη του κάθε στοιχείου. Η επανάληψη είναι ουσιαστικό μέρος της επίλυσης, με τις μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης, όπως την Newton- Raphson να χρησιμοποιούνται συχνά. Η πυκνότητα ρεύματος και η ένταση του μαγνητικού πεδίου θεωρούνται σταθερές σε κάθε στοιχείο.

#### 4.1.3 Μετ-επεξεργασία

Η λύση του πεδίου που προκύπτει αποτελείται ουσιαστικά μόνο από τα βασικά ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη. Όμως η σχεδίαση απαιτεί τη γνώση πολλών άλλων ποσοτήτων, όπως τη πυκνότητα ροής, την ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται και άλλα. Η εξαγωγή αυτών των μεγεθών ονομάζεται μετ-επεξεργασία (post-processing). Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι παρακάτω ποσότητες:

- Διαγράμματα ροής.
- Υπολογισμός ροής μεταξύ δύο σημείων, κάτι που μπορεί να οδηγήσει και στον υπολογισμό αυτεπαγωγών.
- Δύναμη και Ροπή, οι οποίες υπολογίζονται συνήθως με βάση δύο μεθόδους. Τη δύναμη Lorentz και τον τανυστή Maxwell. Οι μέθοδοι αυτοί δεν είναι απολύτως ακριβείς, και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τις προτιμήσεις του χρήστη και τις ιδιαιτερότητες του κάθε προβλήματος.

Στην περίπτωσή μας θα χρησιμοποιηθεί ο τανυστής Maxwell ο οποίος δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα στο περιβάλλον που δουλεύουμε.

## 4.2 Ανάπτυξη προγράμματος παραμετρικής σχεδίασης της μηχανής

Για την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας μηχανής είναι απαραίτητο να υλοποιηθεί πρώτα ένα πρόγραμμα που να επιτρέπει την παραμετρική σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών και στη συνέχεια την

ανάλυση της λειτουργίας της. Το πρόγραμμα αυτό υλοποιήθηκε σε περιβάλλον υπολογιστικής αριθμητικής (ΠΥΑ) το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση με το πρόγραμμα επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων με δυσδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι το ΛΠΣ, το οποίο δίνει μεγάλη ευελιξία στην προσομοίωση λειτουργίας ηλεκτρικών μηχανών και ταυτόχρονα μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

#### 4.2.1 Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων (ΛΠΣ)

Το ΛΠΣ είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που επιλύει ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. Στόχος του είναι η διάσπαση του πεδίου σε μικρά στοιχεία με πολύ απλή γεωμετρία, έτσι ώστε το μικρό αλλά εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα (ουσιαστικά είναι αδύνατο να λυθεί για πολύπλοκες γεωμετρίες) να μετασχηματιστεί σε ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων που όμως είναι εύκολο να λυθούν. Το πρόβλημα γίνεται έτσι ένα πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας με πάρα πολλές άγνωστες μεταβλητές.

Το λογισμικό **Finite Element Method Magnetics** (FEMM), αναπτύχθηκε ώστε να υλοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Στόχος του είναι η επίλυση των εξισώσεων Maxwell, για κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις. Τα μαγνητικά προβλήματα που επιλύονται είναι αυτά που μπορούν να θεωρηθούν χαμηλής συχνότητας ώστε να μπορούν να αγνοηθούν τα ρεύματα μετατόπισης (displacement current). Ο επιλύτης ηλεκτροστατικών προβλημάτων θεωρεί την αντίθετη περίπτωση όπου μόνο το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται ενώ το μαγνητικό πεδίο αγνοείται. Το πρόγραμμα μπορεί να επιλύει δισδιάστατα (2D) προβλήματα ή και τρισδιάστατα (3D) συμμετρικά γύρω από άξονα προβλήματα.

#### Επίλυση Μαγνητοστατικών Προβλημάτων

Στην περίπτωση αυτή η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) και η πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $B$ ) πρέπει να υπακούουν στις σχέσεις:

$$\nabla \times H = J \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.2)$$

Για κάθε υλικό ισχύει ότι

$$B = \mu H \quad (4.3)$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, τότε ο συντελεστής  $\mu$  εξαρτάται από το  $B$ .

Στόχος του ΛΠΣ είναι να βρει πεδία που ικανοποιούν τις παραπάνω σχέσεις, μέσω του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού ( $A$ ).

$$B = \nabla \times A \quad (4.4)$$

Έτσι προκύπτει η εξίσωση που χρησιμοποιεί το ΛΠΣ[25]:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (4.5)$$

Στη γενική περίπτωση τρισδιάστατων προβλημάτων το  $A$  είναι διάνυσμα σε τρεις διευθύνσεις. Όμως στην περίπτωση των δισδιάστατων προβλημάτων και των προβλημάτων με αξονική συμμετρία το διάνυσμα  $A$  έχει μόνο μία διεύθυνση, αφού οι άλλες ισούνται με μηδέν. Το πλεονέκτημα της χρήσης του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να τηρούνται περιορίζεται σε μία μόνο εξίσωση.

#### Τα κυριότερα πλεονεκτήματά του ΛΠΣ:

- Είναι **λογισμικό ανοιχτού κώδικα**. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί δωρεάν για εκπαιδευτικούς σκοπούς, ενώ περιλαμβάνει δυνατότητες συνεργασίας με πολλά άλλα προγράμματα.
- Είναι **απλό, ακριβές, και αποδοτικό** από άποψη υπολογιστικού κόστους[26]. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι πολύ σημαντικά για την εφαρμογή μας, η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία και επίλυση πάρα πολύ μεγάλου αριθμού γεωμετριών.
- Μπορεί να **συνεργαστεί με το περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής (ΠΑΥ)**. Το γεγονός αυτό διευκολύνει πάρα πολύ την εργασία μας, αφού συνδυάζει τη λειτουργία του με τις εξαιρετικές δυνατότητες του λογισμικού ΠΑΥ. Οι δυνατότητες αυτές περιλαμβάνουν την παραγωγή σχεδιάσεων με επαναληπτικό τρόπο, μια δυνατότητα εξαιρετικά σημαντική όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Επίσης βοηθά στην περίπτωση μας στην εξαιρετική ενσωμάτωση του κώδικα βελτιστοποίησης με τη διαδικασία επίλυσης της μηχανής[27].

#### Κάποια μειονεκτήματά του:

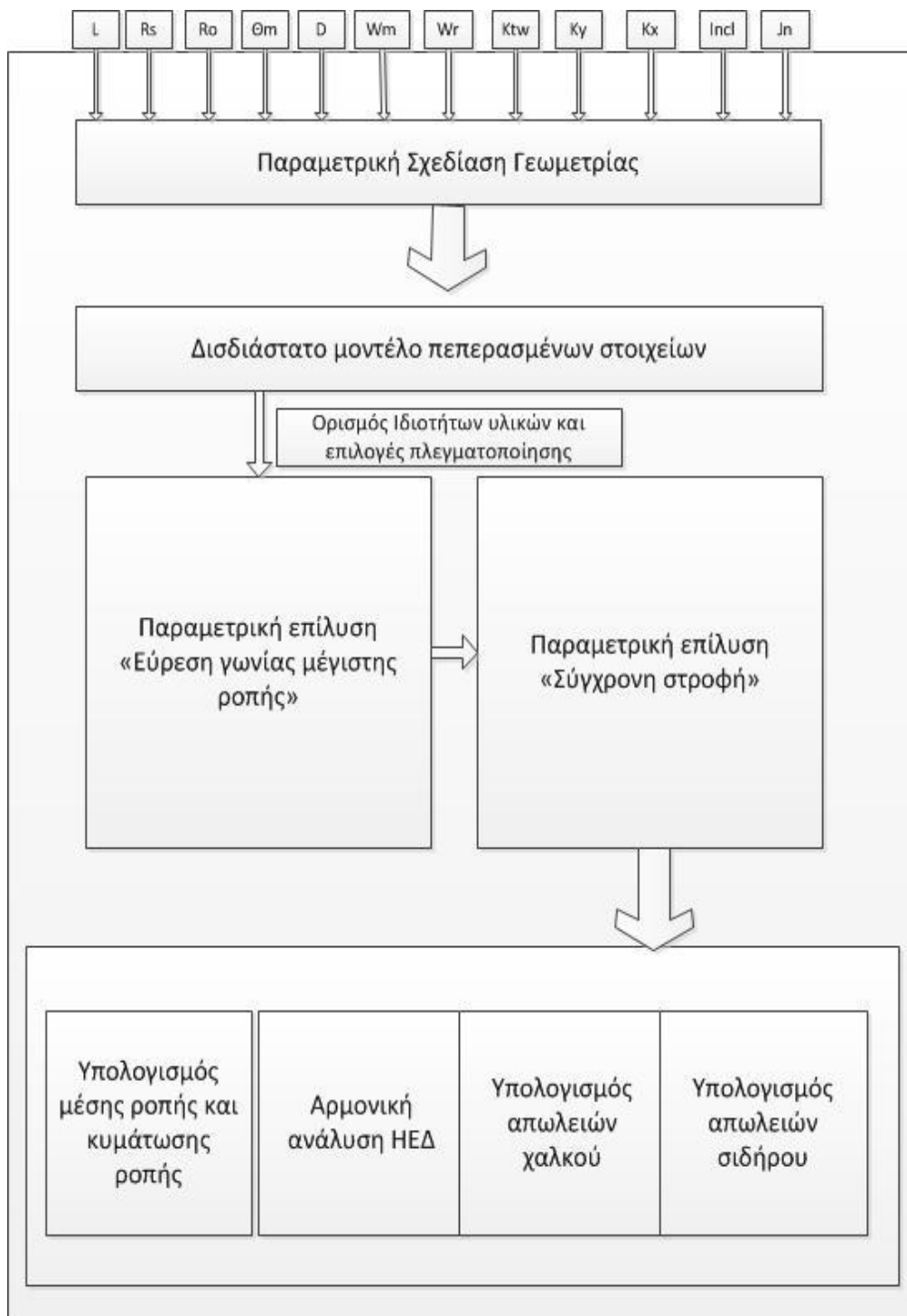
- Επιλύει μόνο δισδιάστατες γεωμετρίες ή τρισδιάστατες με άξονα συμμετρίας. Το γεγονός αυτό, δεν μας επηρεάζει σημαντικά, αφού οι ηλεκτρικές μηχανές είναι γενικά συμμετρικές ως προς ένα κεντρικό άξονα. Βέβαια, αν ήταν δυνατή η πραγματικά τρισδιάστατη προσομοίωση θα μπορούσαν να προστεθούν και πληροφορίες για τα άκρα της μηχανής και των τυλιγμάτων της, αυξάνοντας την ακρίβεια των υπολογισμών. Η πειραματική επιβεβαίωση μηχανών που τα χαρακτηριστικά τους καθορίστηκαν με βάση το ΛΠΣ δείχνουν ότι οι διαφορές είναι πολύ μικρές στην πράξη.
- Δε μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία της μηχανής όταν αυτή στρέφεται. Το πρόβλημα αυτό θα ήταν εξαιρετικά σημαντικό αν δεν

μπορούσε εύκολα να ξεπεραστεί. Η περιστροφή της μηχανής γίνεται μέσω επαναληπτικού κώδικα ΠΑΥ η οποία ουσιαστικά επιλύει το πρόβλημα σε στιγμιότυπα. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ακριβής και θα εξηγηθεί με λεπτομέρεια στη συνέχεια.

Παρακάτω δίνεται η δομή του προγράμματος σχεδίασης, με έμφαση στην παραμετροποίηση των επιμέρους μονάδων. Το σύνολο των παραμέτρων που είναι ελέγξιμες από τον χρήστη δίνονται σε μορφή πίνακα στην εικόνα 4.1, με διάκριση ως προς το είδος και τη λειτουργία τους. Οι παράμετροι αυτοί οδηγούν στην πλήρη παραμετρική σχεδίαση του κινητήρα, παρ' όλα αυτά κατά τη βελτιστοποίηση δεν χρησιμοποιούνται όλοι για λόγους που εξηγούνται στα κεφάλαια 5 και 6.

### **4.3 Προδιαγραφή της δομής και των επιλογών παραμετροποίησης**

Το πρόγραμμα αποτελείται από τις δύο κύριες δομικές μονάδες του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (επιλύτη) και του κώδικα παραμετρικής σχεδίασης-επίλυσης γεωμετρίας. Έχει αναπτυχθεί κώδικας μετ-επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων επίλυσης, που επιτρέπει την πραγματοποίηση υπολογισμών βασικών μεγεθών επίδοσης-απόδοσης των κινητήρων σε πραγματικό χρόνο (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Δομικό Διάγραμμα Προγράμματος Προσομοίωσης Λειτουργίας Ηλεκτρικής Μηχανής

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα η παραμετροποίηση των μεγεθών ενώ στις εικόνες 4.2, 4.3 και 4.4 παρουσιάζεται επακριβώς η θέση των διάφορων παραμέτρων σχεδίασης πάνω σε σχήμα της γεωμετρίας.

Οι μεταβλητές της Γεωμετρίας	
<b>L</b>	Το αξονικό μήκος της μηχανής (cm)
<b>R<sub>s</sub></b>	Η ακτίνα του άξονα (cm)
<b>R<sub>o</sub></b>	Η εξωτερική ακτίνα της μηχανής (cm)
<b>Θ<sub>m</sub></b>	Η γωνία του μαγνήτη, ως ποσοστό της συνολικής γωνίας του πόλου
<b>D</b>	Το πάχος του διακένου (cm)
<b>W<sub>m</sub></b>	Το πάχος του μαγνήτη στους πόλους (cm)
<b>W<sub>r</sub></b>	Το πάχος του πυρήνα σιδήρου στο δρομέα (cm)
<b>L<sub>t</sub></b>	Μήκος των δοντιών του στάτη, σε σχέση με το συνολικό πάχος του στάτη
<b>k<sub>tw</sub></b>	Πλάτος δοντιού του στάτη, σε σχέση με το συνολικό πλάτος που αντιστοιχεί σε μια αύλακα μαζί με το δόντι
<b>k<sub>y</sub></b>	Πλάτος της κεφαλής του δοντιού, σε σχέση με το πάχος του δοντιού
<b>k<sub>x</sub></b>	Πάχος του δοντιού σε σχέση με το συνολικό μήκος του
<b>Incl</b>	Κλίση της σύνδεσης του δοντιού με την κεφαλή του δοντιού σε μοίρες

Πίνακας 4-1

Παρακάτω παρουσιάζονται άλλες μεταβλητές σχεδίασης που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής και τον υπολογισμό των μεταβλητών εξόδου.

Λοιπές μεταβλητές σχεδίασης	
<b>J<sub>n</sub></b>	Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη (A/mm <sup>2</sup> )
<b>f</b>	Συχνότητα του ρεύματος (Hz)
<b>Fill</b>	Συντελεστής πληρότητας τυλίγματος στάτη
<b>T</b>	Θερμοκρασία τυλίγματος (°C)
<b>n<sub>q</sub></b>	Αριθμός εν σειρά αγωγών του τυλίγματος

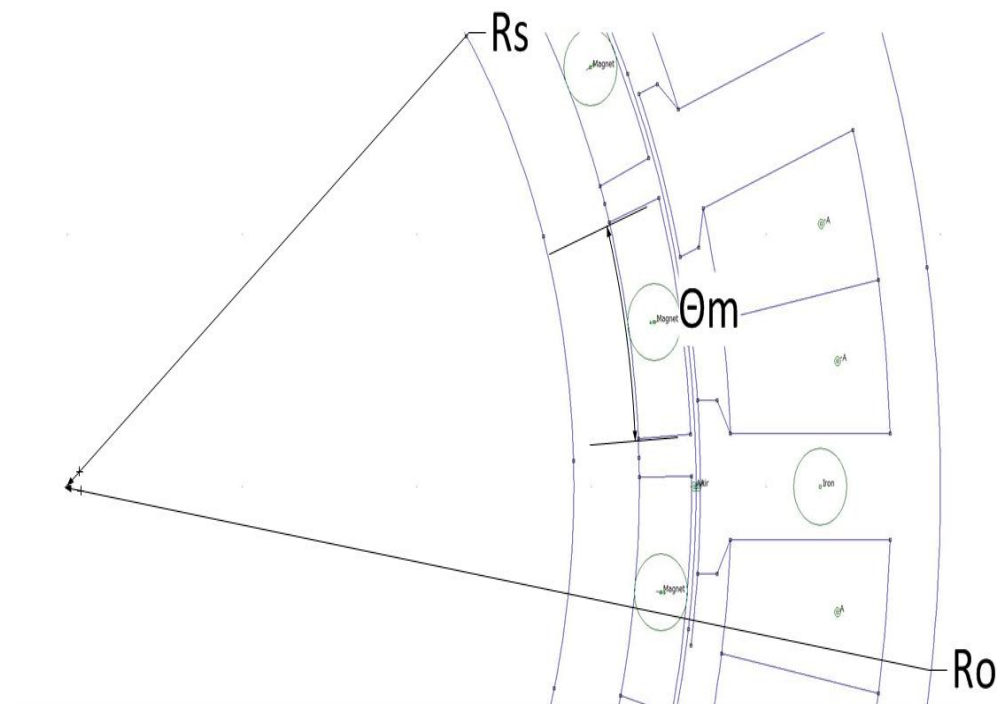
Πίνακας 4-2

Όπως φαίνεται μέσω του προγράμματος αυτού είναι δυνατή η σχεδίαση ενός μεγάλου εύρους γεωμετριών με μεγάλη ακρίβεια και η εξαγωγή χρήσιμων στοιχείων προσομοίωσης.



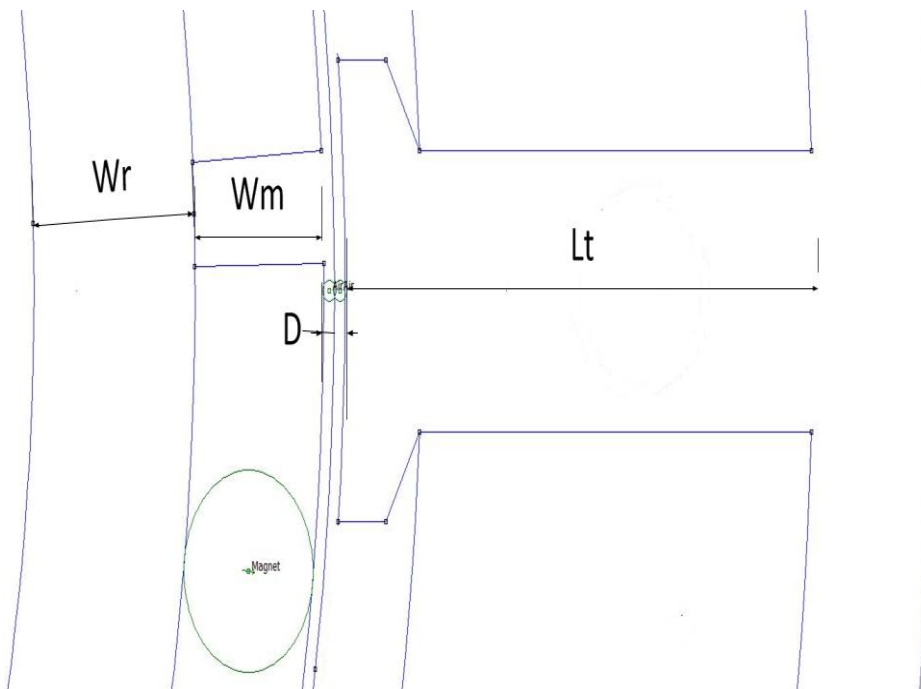
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται γραφικά οι μεταβλητές γεωμετρίας.

### Κύριες διαστάσεις τις σχεδίασης



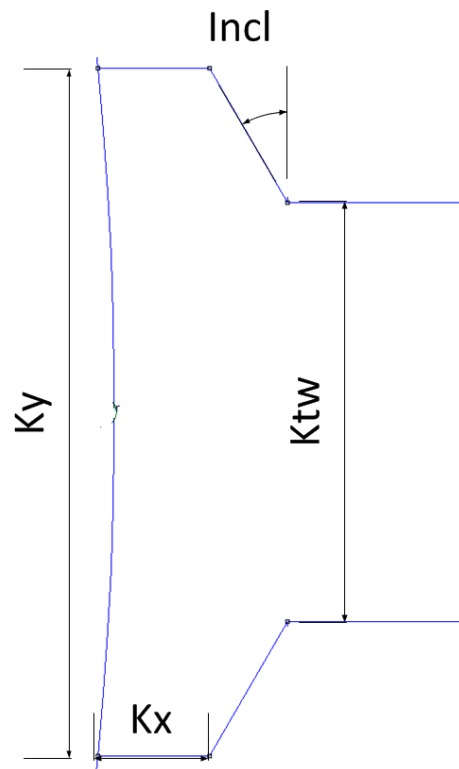
Σχήμα 4.2 Βασικές Διαστάσεις Σχεδίασης

### Λεπτομέρεια σχεδίασης



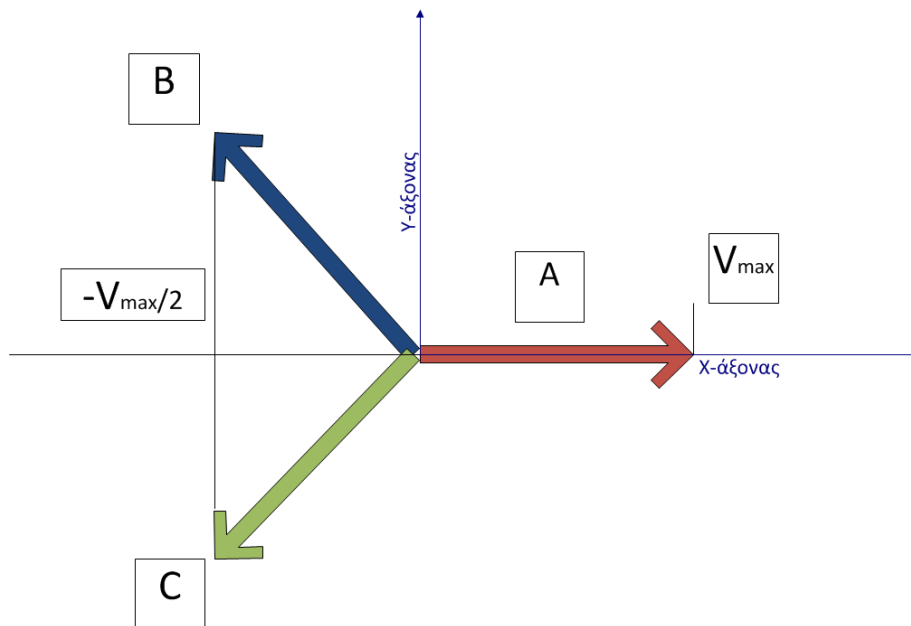
Σχήμα 4.3 Λεπτομέρεια Σχεδίασης

## Σχεδίαση Δοντιού



Σχήμα 4.4 Παράμετροι Σχεδίασης Δοντιού

Στην επιλογή ανάλυση για την «εύρεση γωνίας μέγιστης ροπής» αρχικά σχεδιάζεται η αρχική γεωμετρία της μηχανής με τη βοήθεια των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί. Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση, στον ορισμό των υλικών, ορίζεται η ροή ρεύματος στις αύλακες του σάτη. Η πυκνότητά της ροής ορίζεται σε μια αρχική κατάσταση. Το αρχικό στιγμιότυπο που επιλέχθηκε είναι τη στιγμή όπου η τιμή του ρεύματος της φάσης A είναι μέγιστη (εικόνα 4.5). Στη συνέχεια η πυκνότητα ρεύματος διατηρείται σταθερή, ενώ επιλέγοντας τον δρομέα, τον στρέφουμε κατά γωνία μίας μοίρας η οποία μας δίνει ικανοποιητική ακρίβεια (η οποία μπορεί ρυθμιστεί) μέχρι να ολοκληρωθεί μια περιστροφή κατά ένα πόλο. Σε κάθε επανάληψη υλοποιούμε την πλεγματοποίηση και τον υπολογισμό της παραμέτρου εξόδου, που σε αυτή την περίπτωση είναι η ροπή. Αποθηκεύοντας τις τιμές της ροπής για κάθε στιγμιότυπο έχουμε τη γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνίας-ροπής. Μετά από αυτό τον υπολογισμό μετακινούμε τον δρομέα στη γωνία όπου βρέθηκε ότι παράγεται η μεγαλύτερη ροπή, ώστε να είμαστε έτοιμοι για την επόμενη φάση.



Σχήμα 4.5 Διανυσματικό Διάγραμμα Τάσης κατά την Ανάλυση Εύρεσης Γωνίας Μέγιστης Ροπής

#### Παραμετρική επίλυση «σύγχρονης στροφής»

Αφού ο δρομέας έχει στραφεί στο σημείο μέγιστης ροπής αρχίζει η επόμενη φάση της προσομοίωσης. Στη φάση αυτή η πυκνότητα των ρευμάτων στο στάτη δεν διατηρείται σταθερή όπως πριν, αλλά μεταβάλλεται ημιτονοειδώς σε κάθε επανάληψη. Ταυτόχρονα περιστρέφεται ο δρομέας με βήμα ίδιο με αυτό που μεταβάλλονται τα ρεύματα του στάτη. Έτσι το διάνυσμα της μαγνητικής ροής των μαγνητών του δρομέα είναι σε συγχρονισμό με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Σε κάθε επανάληψη της ανάλυσης πραγματοποιείται εκ νέου επίλυση του προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων. Από την ανάλυση αυτή, αποθηκεύουμε σε κάθε στιγμιότυπο τη ροπή της μηχανής, την τιμή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής καθώς και άλλα στοιχεία χρήσιμα για την παραπέρα ανάλυσή μας, κυρίως σχετικά με τον υπολογισμό των απωλειών.

#### **4.4 Επιλογή τιμών των παραμέτρων σχεδίασης**

Στην παράγραφο αυτή θα εξηγήσουμε την επιλογή που κάναμε για τις παραμέτρους σχεδίασης. Οι περισσότερες από αυτές έχουν επιλεγεί με βάση την προκαταρκτική σχεδίαση του προηγούμενου κεφαλαίου. Τέτοιες είναι για παράδειγμα το αξονικό μήκος της μηχανής, η γωνία των μαγνητών, η εξωτερική ακτίνα, το πάχος του διακένου, η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής και τέλος ο αριθμός των εν σειρά αγωγών σε κάθε πηνίο.

Υπάρχουν, όμως και άλλα μεγέθη που δεν είχαν υπολογιστεί αναλυτικά, αλλά προέκυψαν με βάση γενικές αρχές σχεδίασης κατά προσέγγιση, ώστε να προκύψει μια ισορροπημένη σχεδίαση με ικανοποιητικές συνολικές επιδόσεις.

- **$R_s$ : ακτίνα άξονα δρομέα**, η παράμετρος αυτή ορίστηκε ίση με 2,9cm. Το μέγεθος αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του δρομέα να αποτελείται από μη σιδηρομαγνητικό υλικό (δηλαδή αλουμίνιο) έτσι ώστε να περιοριστούν όσο είναι δυνατόν οι απώλειες στον πυρήνα του δρομέα, αφού μειώνεται ο όγκος του. Επίσης ένας άξονας μεγάλου πάχους, μειώνει τις δονήσεις που μπορούν να προκληθούν, επιτρέποντάς μας να έχουμε ένα πολύ μικρό διάκενο, και βοηθάει στην μεταφορά της σημαντικής ροπής που αναπτύσσεται.
- **$W_m$ : πάχος μαγνήτη**, η παράμετρος αυτή ορίστηκε ίση με 0,3 cm, πάχος που είναι κατασκευαστικά εφικτό και αποτελεί τυπικό μέγεθος για βιομηχανικά φύλλα μαγνήτη που έχουν πάχος 0,012 ίντσες ή ακριβώς 0,3cm [28]. Το πάχος του μαγνήτη δεν θέλουμε να είναι πολύ μεγάλο γιατί μαγνητικά συμπεριφέρεται όπως ο αέρας έχοντας πολύ μεγάλη μαγνητική αντίσταση, κάτι που σημαίνει ότι ουσιαστικά αυξάνει τη συνολική μαγνητική αντίσταση μεταξύ δρομέα και στάτη.
- **$W_r$ : πάχος σιδήρου στο δρομέα**, η παράμετρος αυτή υπολογίστηκε μετά από αφαίρεση των υπόλοιπων παραμέτρων του δρομέα από την επιθυμητή διάμετρο διακένου, ίσο με 0,375cm.
- **$K_x, K_y, Incl$ : σχεδίαση πέλματος δοντιού**, τα μεγέθη αυτά επιλέχθηκαν έτσι ώστε να έχουμε μια ικανοποιητική σχεδίαση με βάση την σχετική εμπειρία. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων ήταν αντίστοιχα 0,1 , 1,65 και 30 μοίρες.
- **$K_{tw}, L_t$ : πάχος και μήκος δοντιού**, τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν με βάση την ανάγκη για μια μηχανή που θα έχει πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος και όπου η απόδοση δεν είναι απαραίτητο να είναι ιδιαίτερα υψηλή, κάτι που επιτρέπει να κάνουμε συμβιβασμούς ως προς τις απώλειες σιδήρου. Οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι 0,33 και 0,79 αντίστοιχα. Πρόκειται για δόντι που έχει μικρό πάχος και μεγάλο μήκος. Το γεγονός αυτό αυξάνει το διαθέσιμο χώρο της αύλακας, όπου θα τοποθετηθούν τα τυλίγματα, οπότε με τον τρόπο αυτό αυξάνονται τα διαθέσιμα αμπερ-ελίγματα, με αγωγούς μεγαλύτερης διαμέτρου, κάτι που μειώνει τις απώλειες χαλκού και αυξάνει την πυκνότητα ισχύος της μηχανής.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτελούν στοιχεία της γεωμετρίας της μηχανής. Όμως εκτός από αυτά πρέπει να καθοριστούν και μερικά ακόμη τα οποία είναι απαραίτητα για την προσομοίωση. Τα στοιχεία αυτά είναι η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα, η θερμοκρασία των τυλιγμάτων και τέλος ο συντελεστής πληρότητας των αυλάκων.

- **$J_n$ : πυκνότητα ρεύματος**, η ενεργός τιμή της ορίστηκε στα 16A/mm<sup>2</sup>. Η πυκνότητα αυτή είναι μεγαλύτερη από αυτή που προτείνεται στη βιβλιογραφία[13]. Για σύγχρονες μηχανές προτείνεται τιμή πυκνότητας ρεύμα περίπου 4 φορές μικρότερη από αυτή που επιλέξαμε. Παρ' όλα αυτά

το γεγονός ότι θέλουμε πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος χωρίς όμως να χρειάζεται η παροχή της για μεγάλη χρονική διάρκεια μας επιτρέπει να κάνουμε αυτή την επιλογή.

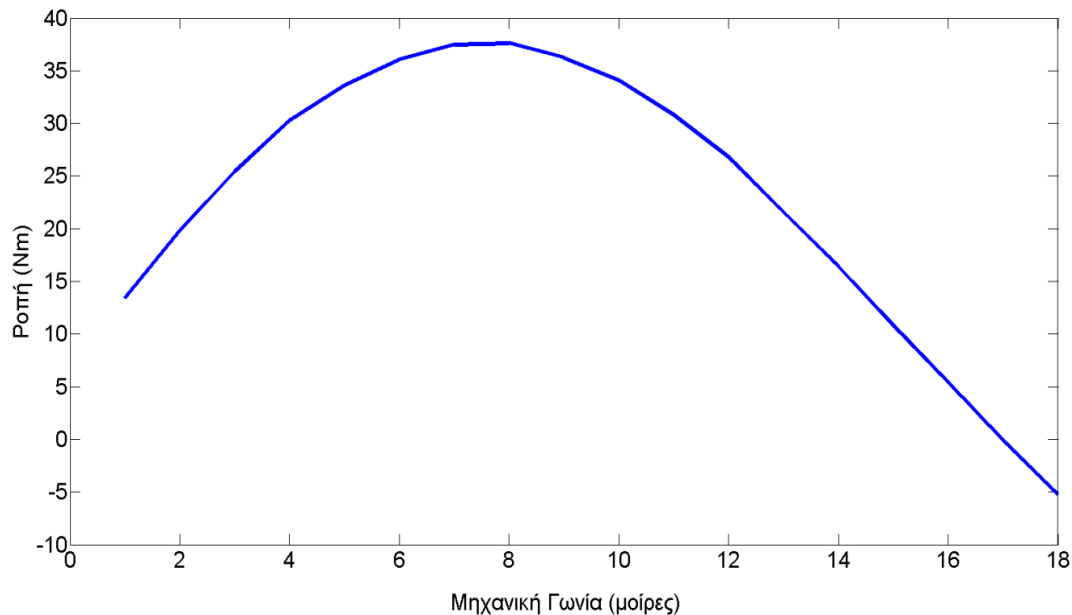
- **T: Θερμοκρασία τυλίγματος**, το μέγεθος αυτό ορίστηκε στην τιμή των 95°C. Η τιμή αυτή είναι αρκετά υψηλή και οφείλεται στην πολύ υψηλή πυκνότητα ρεύματος της μηχανής. Παρ' όλα αυτά βρίσκεται κάτω από το όριο των 100 βαθμών που ορίζουν τη μόνωση κλάσης A[29]. Πιθανόν βέβαια να είναι απαραίτητη η μόνωση με υλικά που αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μιας και το όριο της κλάσης A είναι πολύ κοντά και το γεγονός ότι ο κινητήρας θα δουλεύει αρκετά συχνά σε τέτοιες συνθήκες μπορεί να προκαλέσει φθορά της μόνωσης. Η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί σημαντικές απώλειες χαλκού, αλλά για τη συγκεκριμένη εφαρμογή η πολύ υψηλή απόδοση δεν είναι το ζητούμενο, οπότε αυτό δεν μας δημιουργεί πρόβλημα.
- **Fill: συντελεστή πληρότητας**, το μέγεθος αυτό ορίστηκε ίσο με 0,6. Πρόκειται για μια αρκετά υψηλή τιμή, η οποία είναι όμως εφικτή, ειδικά για μηχανές όπως αυτή που λειτουργούν με χαμηλή τάση, κάτι που περιορίζει τις ανάγκες για ηλεκτρική μόνωση στα τυλίγματα. Η τιμή αυτή του συντελεστή μπορεί να επιτευχθεί με προσεκτική τοποθέτηση των αγωγών[30]. Μια τιμή που θα μπορούσε να επιτευχθεί πιο εύκολα είναι γύρω στο 0,5 για απλούς αγωγούς χαμηλής τάσης[31], όμως επειδή έχουμε εφαρμογή όπου ο τελικός όγκος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο επιλέγουμε υψηλότερη αλλά εφικτή τιμή. Άλλωστε η χρήση προκατασκευασμένων τυλιγμάτων μπορεί να αυξήσει το συντελεστή πληρότητας πολύ περισσότερο.

#### 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που επιστρέφει ο κώδικας και αφορούν στα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της μηχανής, δηλαδή τη μέση ροπή εξόδου, την κυμάτωση της, τη συνολική απόδοση της μηχανής και τέλος το συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης. Τα δεδομένα αυτά δεν είναι πρωτογενή. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει τις εξισώσεις Maxwell και επιστρέφει την κατανομή του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού σε όλη τη μηχανή. Με βάση αυτό το δεδομένο μπορεί να υπολογίσει ορισμένα ακόμα στοιχεία, όπως τη ροπή, τη μαγνητική ροή, την επιφάνεια των διαφόρων στοιχείων (blocks) της σχεδίασης και άλλα. Τα στοιχεία αυτά, που θα τα θεωρήσουμε πρωτογενή, τα χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν. Τα θεωρούμε πρωτογενή με την έννοια ότι προκύπτουν άμεσα από την κλήση του προγράμματος FE, και εμείς δεν παρεμβαίνουμε στον υπολογισμό τους.

### 4.5.1 Ροπή Εξόδου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ροπή εξόδου υπολογίζεται μέσω του τανυστή Maxwell, αφού αυτός δίνει τα πιο ακριβή αποτελέσματα. Κατά την ανάλυση εύρεση γωνίας μέγιστης ροπής, στρέφουμε το δρομέα κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες όπως εξηγήσαμε παραπάνω και σε κάθε σημείο αποθηκεύουμε την τιμή της ροπής. Οι 90 ηλεκτρικές μοίρες αντιστοιχούν σε 18 μηχανικές μοίρες, όσο δηλαδή μισό πολικό βήμα. Έτσι προκύπτει το διάγραμμα ροπής γωνίας:



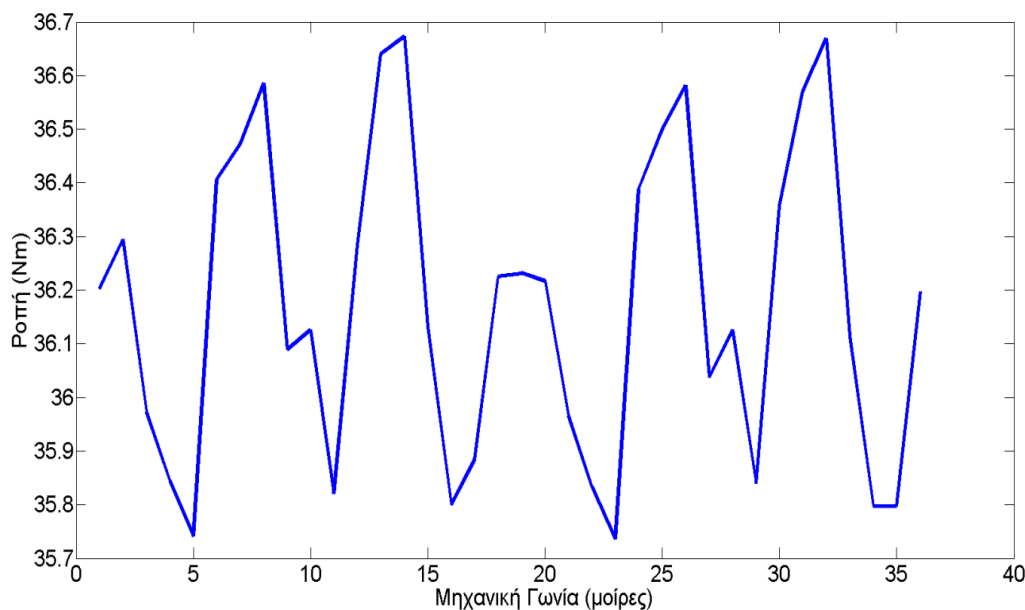
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα Ροπής-Γωνίας

Αφού στρέψουμε το δρομέα στο σημείο μέγιστης ροπής τότε αρχίζει η σύγχρονη στροφή. Η σύγχρονη στροφή γίνεται για 180 ηλεκτρικές μοίρες, ή ένα πλήρες πολικό βήμα. Ανά μία μηχανική μοίρα υπολογίζουμε τη ροπή στο διάκενο. Η μέση τιμή της ροπής εξόδου προκύπτει ως ο μέσος όρος των τιμών που βρέθηκαν κατά τη σύγχρονη περιστροφή.

### 4.5.2 Κυμάτωση Ροπής Εξόδου

Το μέγεθος αυτό είναι πολύ σημαντικός δείκτης για την ποιότητα του κινητήρα. Η αυξημένη κυμάτωση ροπής μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα και είναι ανεπιθύμητη. Τα προβλήματα που προκύπτουν είναι ο θόρυβος κατά τη λειτουργία και η μηχανική καταπόνηση του άξονα λόγω των δονήσεων που προκαλούνται[32].

Για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους χρησιμοποιούμε τα δεδομένα από την επίλυση σύγχρονης στροφής. Παρακάτω παρουσιάζεται η μορφή της ροπής που προκύπτει:



Σχήμα 4.7 Ροπή Ηλεκτρικού Κινητήρα κατά τη Σύγχρονη Περιστροφή

Η τιμή της κυμάτωσης ροπής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Όπου  $T_{max}$  είναι η μέγιστη τιμή της ροπής κατά τη σύγχρονη στροφή,  $T_{min}$  η ελάχιστη και  $T_{avg}$  η μέση τιμή της.

### 4.5.3 Απόδοση

Η απόδοση της μηχανής αποτελεί το ποσοστό της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε χρήσιμο μηχανικό έργο. Στη δική μας περίπτωση θεωρούμε την παραγωγή ροπής της μηχανής, με τις απώλειες να περιλαμβάνουν τόσο τις απώλειες στα τυλίγματα του στάτη (απώλειες χαλκού) όσο και τις απώλειες πυρήνα (απώλειες σιδήρου), τόσο στο δρομέα όσο και στο στάτη. Δεν υπολογίζουμε τις απώλειες τριβών, ανεμισμού για την απαγωγή θερμότητας και άλλες οι οποίες είναι συγκριτικά πολύ μικρές και εξαρτώνται από μηχανικά στοιχεία στην τελική κατασκευή[33], οπότε δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν.

Η ισχύς εξόδου υπολογίζεται[8]:

$$P = T_e \cdot \omega_m \quad (4.7)$$

Όπου  $P$  η ισχύς εξόδου,  $T_e$  η ηλεκτρομαγνητική ροπή που ασκείται στον άξονα και  $\omega_m$  η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Στην περίπτωση της μηχανής μας έχει ήδη υπολογιστεί και είναι ίση με

$$\omega_m = 78,5 \frac{rad}{s} \quad (4.8)$$

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογιστούν οι απώλειες χαλκού και πυρήνα. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η μέθοδος για τον υπολογισμό τους. Οι μέθοδοι υλοποιήθηκαν ως συναρτήσεις στο PAV, οι οποίες χρησιμοποιούν στοιχεία της σχεδίασης και αποτελέσματα της προσομοίωσης σε ΠΣ (FE) για να κάνουν τους υπολογισμούς.

#### 4.5.3.1 Απώλειες Τυλιγμάτων

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται υπολογίζοντας προσεγγιστικά το μήκος των αγωγών της κάθε φάσης καθώς και την ενεργό τιμή του ρεύματος που διέρχεται από κάθε αγωγό. Ο υπολογισμός ξεκινάει από την παρακάτω σχέση:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R \quad (4.9)$$

Όπου  $P_{Cu}$  είναι η ισχύς των απωλειών χαλκού,  $I$  είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος των τυλιγμάτων και  $R$  η αντίστασή τους.

Την αντίσταση των τυλιγμάτων της κάθε φάσης την υπολογίζουμε:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (4.10)$$

Όπου  $l$  είναι το μήκος του αγωγού,  $S$  η επιφάνεια της διατομής του και  $\rho$  ο συντελεστής ειδικής αντίστασης του υλικού του αγωγού. Στην περίπτωση μας ο αγωγός κατασκευάζεται από χαλκό όπου ισχύει:

$$\rho(T) = \rho_o(1 + \alpha(T - T_o)) \quad (4.11)$$

Όπου  $\rho_o$  είναι η αγωγιμότητα του χαλκού στους  $T_o = 20^\circ\text{C}$ ,  $T$  είναι η θερμοκρασία του τυλίγματος και  $\alpha$  είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης.

Το μήκος του αγωγού της κάθε φάσης υπολογίζεται:

$$l = 6 \cdot 2 \cdot n_q \cdot (L + W_t) \quad (4.12)$$

Όπου  $L$  είναι το μήκος της μηχανής,  $W_t$  είναι το πλάτος του κάθε δοντιού,  $n_q$  είναι ο αριθμίων των σπειρών του πηνίου και  $6$  είναι ο αριθμός των αυλάκων της κάθε φάσης. Το μήκος αυτό δεν συμπεριλαμβάνει μήκος για το τέλος των τυλιγμάτων επειδή έχουμε συγκεντρωμένο τύλιγμα οπότε το μήκος αυτό είναι αμελητέο.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το εμβαδόν της επιφάνειας του κάθε αγωγού. Από το ΛΠΣ παίρνουμε αρχικά το εμβαδόν της αύλακας. Όμως μόνο ένα μέρος της αποτελείται από χαλκό. Το μέρος αυτό υπολογίζεται από το συντελεστή πληρότητας (fill):

$$S_{Cu} = fill \cdot S_{slot} \quad (4.13)$$



Στη συνέχεια διαιρούμε το συνολικό εμβαδόν της διατομής του χαλκού με τον αριθμό των αγωγών που βρίσκονται στην αύλακα:

$$S_{conductor} = \frac{S_{Cu}}{n_g} \quad (4.14)$$

Τέλος πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα που διέρχεται από κάθε αγωγό. Το ρεύμα αυτό ισούται με:

$$I_{rms} = J_n \cdot S_{conductor} \quad (4.15)$$

Έτσι έχουμε όλα τα δεδομένα για να υπολογίσουμε τις απώλειες ανά φάση. Οπότε οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται:

$$P_{Cu} = 3I^2 \cdot R \quad (4.16)$$

Όπου το 3 τίθεται επειδή η αντίσταση είναι υπολογισμένη για τα τυλίγματα μόνο μίας φάσης.

#### 4.5.3.2 Απώλειες Πυρήνα

Η διαδικασία για τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου γίνεται με βάση τις τιμές απωλειών που δίνει ο κατασκευαστής. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ακριβής, αν και τα δεδομένα αυτά δεν παρουσιάζονται ακριβώς για τη συχνότητα λειτουργίας της μηχανής.

Αρχικά υπολογίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου για όλη τη μηχανή. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για κάθε στοιχείο της ανάλυσης FE. Εκτός από το μαγνητικό πεδίο, υπολογίζεται και το εμβαδόν του κάθε στοιχείου. Έτσι γνωρίζοντας τον εμβαδόν του κάθε στοιχείου, ενώ το ύψος του είναι το ενεργό μήκος της μηχανής, υπολογίζεται ο όγκος του κάθε στοιχείου. Αφού υπολογιστεί ο όγκος του κάθε στοιχείου, με βάση την πυκνότητα του χάλυβα που χρησιμοποιούμε, υπολογίζεται η μάζα του κάθε στοιχείου.

Τα δύο αυτά στοιχεία που υπολογίσαμε είναι απαραίτητα λόγω της μορφής των δεδομένων που έχουμε τα οποία είναι στην παρακάτω μορφή[34]:

f = 100Hz					f = 200Hz				
J T	H A/m 0°/90°	$\mu_a$ 0°/90°	$P_s$ W/kg 0°/90°	$S_s$ VA/kg 0°/90°	J T	H A/m 0°/90°	$\mu_a$ 0°/90°	$P_s$ W/kg 0°/90°	$S_s$ VA/kg 0°/90°
0,5	65	6147	0,77	1,36	0,5	70	5665	1,88	3,00
0,6	73	6515	1,04	1,83	0,6	79	6041	2,55	4,03
0,7	83	6718	1,34	2,38	0,7	88	6305	3,30	5,21
0,8	94	6743	1,66	3,02	0,8	99	6439	4,13	6,60
0,9	109	6575	2,01	3,80	0,9	112	6399	5,03	8,21
<b>1,0</b>	<b>128</b>	<b>6201</b>	<b>2,39</b>	<b>4,76</b>	<b>1,0</b>	<b>130</b>	<b>6121</b>	<b>6,03</b>	<b>10,22</b>
1,1	157	5594	2,81	6,03	1,1	157	5567	7,13	12,83
1,2	204	4687	3,30	7,92	1,2	203	4695	8,39	16,61
1,3	304	3405	3,88	11,31	1,3	302	3424	9,88	23,40
1,4	621	1795	4,61	20,84	1,4	620	1798	11,93	42,85
<b>1,5</b>	<b>1694</b>	<b>706</b>	<b>5,36</b>	<b>57,05</b>	<b>1,5</b>	<b>1671</b>	<b>715</b>	<b>14,14</b>	<b>116,66</b>
1,6	3877	329	6,22	146,93	1,6				
1,7					1,7				
1,8					1,8				
1,9					1,9				

Σχήμα 4.8 Απώλειες Σιδήρου συναρτήσει της Συχνότητας[34]

Όπως φαίνεται, από τα δεδομένα που έχουμε για να προκύψει η κατανάλωση ενέργειας από το χάλυβα που χρησιμοποιούμε, συνδυάζεται μια τιμή έντασης μαγνητικού πεδίου με την αντίστοιχη τιμή της συχνότητας. Το αποτέλεσμα που προκύπτει δίνεται ανά μονάδα μάζας.

Επειδή η συχνότητα λειτουργίας στην περίπτωση μας είναι  $f = 125\text{Hz}$  για να βρούμε τις αντίστοιχες τιμές κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό, κάνουμε γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών για 100 και 200Hz. Έτσι προκύπτει νέος πίνακας συσχέτισης των τιμών της έντασης μαγνητικού πεδίου με τις απώλειες.

Για να υπολογίσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια την τιμή των απωλειών για κάθε πιθανή τιμή του μαγνητικού πεδίου, κατασκευάζουμε μια συνάρτηση  $P(B)$ . Η συνάρτηση αυτή είναι έντονα μη γραμμική, οπότε για να έχουμε αρκετή ακρίβεια την προσεγγίζουμε μέσω μιας πολυωνυμικής συνάρτησης 5<sup>ου</sup> βαθμού. Με δεδομένες τις τιμές των απωλειών σε σχέση με τη συχνότητα, χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση του ΠΑΥ, polyfit για τον ορισμό της πολυωνυμικής συνάρτησης[35]. Η συνάρτηση αυτή βρίσκει ένα πολυώνυμο της μορφής:

$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1} \quad (4.17)$$

Το αποτέλεσμα της συνάρτησης είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου.

Έχοντας υπολογίσει τη συνάρτηση που συνδέει την τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου με τις απώλειες σιδήρου, ανά μονάδα μάζας, υπολογίζουμε για κάθε στοιχείο τις απώλειες, και στη συνέχεια αθροίζουμε τις απώλειες όλων των στοιχείων ώστε να έχουμε το αποτέλεσμα των συνολικών απωλειών πυρήνα.

#### 4.5.4 Συντελεστής Αρμονικής Παραμόρφωσης

Για να υπολογίσουμε το συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης πρέπει αρχικά να έχουμε τη μορφή της παραγόμενης Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης, ώστε στη συνέχεια να κάνουμε αρμονική ανάλυση της και να βρούμε το σύνολο των αρμονικών συνιστωσών. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιούμε δεν μας δίνει τη δυνατότητα για άμεσο υπολογισμό της κυματομορφής της ΗΕΔ της μηχανής. Αυτό συμβαίνει γιατί χρησιμοποιούμε τον επιλύτη μαγνητοστατικών προβλημάτων, στον οποίο προσομοιώνουμε την χρονική εξέλιξη.

Το πρώτο βήμα για να υπολογίσουμε την ΗΕΔ στα τυλίγματα της μηχανής, είναι να υπολογίσουμε την πεπλεγμένη μαγνητική ροή σύμφωνα με τη σχέση[24]:

$$\Lambda = n_q \cdot \sum \frac{1}{S_q} \int A_z dS \quad (4.18)$$

Όπου  $n_q$  είναι ο αριθμός των αγωγών σε σειρά, και το ολοκλήρωμα εκφράζει τη μέση τιμή του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού. Το άθροισμα γίνεται πάνω σε όλα τα τυλίγματα τις φάσης Α. Για τα τυλίγματα αρνητικής πολικότητας (-Α) πολλαπλασιάζουμε το ολοκλήρωμα που προκύπτει με -1. Τόσο το ολοκλήρωμα όσο και το αντίστοιχο εμβαδόν είναι πρωτογενή στοιχεία που προκύπτουν από το ΛΠΣ.

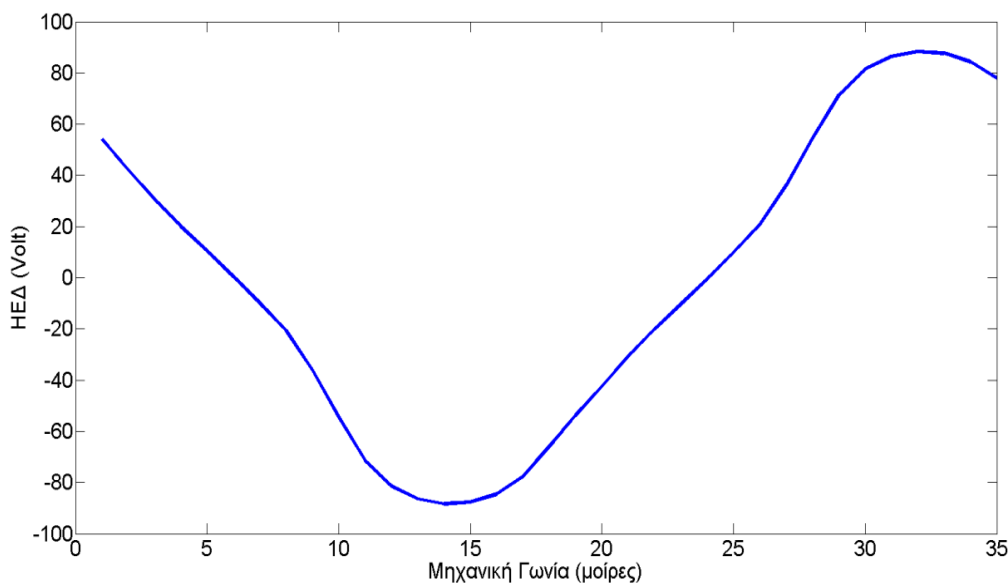
Αφού υπολογίσαμε την πεπλεγμένη μαγνητική ροή του τυλίγματος της μίας φάσης, μπορούμε να υπολογίσουμε την επαγόμενη ΗΕΔ που προκύπτει[8]:

$$emf = \frac{d\Lambda}{dt} \quad (4.19)$$

Βέβαια εμείς δεν διαθέτουμε μια συνεχή συνάρτηση του  $\Lambda$ , οπότε προσεγγίζουμε την παραπάνω συνάρτηση:

$$emf = \frac{\delta\Lambda}{\delta t} \quad (4.20)$$

Όπου,  $\delta\Lambda$  και  $\delta t$  είναι μεταβολές της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής και του χρόνου. Προκύπτει έτσι το διάγραμμα της επαγόμενης ΗΕΔ.



Σχήμα 4.9 Ηλεκτρεγερτική Δύναμη κατά τη Σύγχρονη Περιστροφή

Όπως διακρίνεται καθαρά, η μορφή της τάσης που παράγεται δεν είναι απολύτως ημιτονική. Αυτό σημαίνει ότι περιέχονται αρμονικές συνιστώσες. Για να τις προσδιορίσουμε είναι απαραίτητο να προχωρήσουμε σε αρμονική ανάλυση του συγκεκριμένου σήματος μέσω του Μετασχηματισμού Fourier. Επειδή στην περίπτωση μας έχουμε διακριτό σήμα εισόδου, προχωράμε στον υπολογισμό των αρμονικών συνιστωσών μέσω του Fast Fourier Transform[36].

Ο αλγόριθμος FFT για το σήμα εισόδου που έχουμε υπολογίζεται μέσω της ενσωματωμένης συνάρτησης του ΠΑΥ, fft[35]. Η συνάρτηση αυτή μας επιστρέφει το μέτρο όλων των αρμονικών συνιστωσών. Γνωρίζοντας τα πλάτη όλων των αρμονικών συνιστωσών υπολογίζουμε το συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (4.21)$$

Όπου  $V_1$  το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας και  $V_2, V_3, V_n$  είναι τα πλάτη όλων των αρμονικών συνιστωσών που προκύπτουν.

#### 4.6 Προσομοίωση Μηχανής με Γεωμετρία από Προκαταρκτική Σχεδίαση

Αφού ολοκληρώθηκε η ανάλυση του πως προκύπτουν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητο να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα αυτά για την περίπτωση της μηχανής που σχεδιάστηκε κατά την προκαταρκτική σχεδίαση.

Τιμές των μεταβλητών της Γεωμετρίας	
L	10,0cm
R <sub>s</sub>	2,9cm
R <sub>o</sub>	5,0cm
Θ <sub>m</sub>	0,85
D	0,05cm
W <sub>m</sub>	0,3cm
W <sub>r</sub>	0,375cm
L <sub>t</sub>	0,79
k <sub>tw</sub>	0,33
k <sub>y</sub>	1,65
k <sub>x</sub>	0,103
Incl	30°

Πίνακας 4-3

Στις περιπτώσεις όπου δεν αναφέρεται μονάδα μέτρησης, πρόκειται για κανονικοποιημένες μεταβλητές.

Με βάση τώρα αυτή τη σχεδίαση κάνουμε την προσομοίωση η οποία μας οδηγεί στα αρχικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Χαρακτηριστικά Αρχικής Σχεδίασης	
T	36,17Nm
T <sub>ripple</sub>	2,59%
THD	11,94%
eff	81,03%

Πίνακας 4-4

Τα διαγράμματα των κυριότερων χαρακτηριστικών έχουν ήδη παρουσιαστεί στα παραδείγματα της προηγούμενης παραγράφου (παράγραφος 4.5).



## Κεφάλαιο 5

### Στοχαστικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης και ανάλυση του αλγόριθμου PSO

Η εύρεση της βέλτιστης λύσης μεταξύ πολλών ή και άπειρων εναλλακτικών, είναι κάτι που απασχολεί ιδιαίτερα, ειδικά όταν πρόκειται για εφαρμογή σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών. Οι δυνατές επιλογές είναι ουσιαστικά το σύνολο όλων των δυνατών συνδυασμών των μεταβλητών, οι οποίες μπορούν να περιγράψουν ένα φαινόμενο. Αντικείμενο βελτιστοποίησης αποτελούν διάφορα μεγέθη όπως το κόστος μιας κατασκευής, η επίδοση ενός συστήματος ή συνδυασμός μεγεθών. Όταν τα μεγέθη αυτά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν ορίζουν μια αντικειμενική συνάρτηση, η τιμή της οποίας εξαρτάται από ένα σύνολο μεταβλητών. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης αποσκοπούν στην εύρεση των τιμών των μεταβλητών αυτών που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούν ένα σύνολο περιορισμών που τίθενται ανάλογα με τη φύση του προβλήματος.

Η βελτιστοποίηση ενός προβλήματος εμπλέκει τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- ένα σύνολο παραμέτρων βελτιστοποίησης, συνεχών ή διακριτών.
- ένα σύνολο περιορισμών που ορίζει το σύνολο των δυνατών τιμών που μπορούν να πάρουν οι παράμετροι βελτιστοποίησης.
- μια αντικειμενική συνάρτηση (ή κριτήριο ποιότητας), η οποία συσχετίζει τις παραμέτρους με την τιμή του μεγέθους προς βελτιστοποίηση.

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο οικογένειες, την αναλυτική και την αριθμητική-επαναληπτική.

**Η αναλυτική λύση** απαιτεί την επίλυση συστημάτων μη γραμμικών εξισώσεων ή συστημάτων μη γραμμικών εξισώσεων και ανισοτήτων, κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολο ή και αδύνατο στις περισσότερες περιπτώσεις. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων βελτιστοποίησης βασίζεται στην μαθηματική ανάλυση και προϋποθέτει πλήρη αναλυτική γνώση των συναρτήσεων για το σύνολο του πεδίου ορισμού τους. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανών, στο παρελθόν αναπτύχθηκαν πολλές μέθοδοι και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται σε εμπειρικές προσεγγιστικές σχέσεις των εξισώσεων των φυσικών μεγεθών που διέπουν τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών ώστε να καθίσταται εφικτή η εύρεση βέλτιστων σχεδιάσεων. Η προκαταρκτική σχεδίαση, όπως την ονομάζουμε σήμερα, αποτελεί την απάντηση των μηχανικών του παρελθόντος στην προσπάθεια σχεδιασμού «βέλτιστων» γεωμετριών ηλεκτρικών μηχανών. Οι μέθοδοι αυτοί, δίνουν καλά αποτελέσματα, αλλά η χρήση

απλοποιημένων εμπειρικών εξισώσεων για την επίλυση εξαιρετικά σύνθετων προβλημάτων, που θα ήταν αδύνατη με το χέρι, εκτός από εξαιρετικά απλές γεωμετρικές, τελικά περιορίζει το εύρος των λύσεων που βρίσκονται, ενώ η ακρίβειά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιτυχία των προσεγγιστικών εξισώσεων, κάτι που μάλιστα δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό.

**Η αριθμητική-επαναληπτική** μέθοδος βασίζεται στην εκτέλεση ενός αλγορίθμου επίλυσης σχεδιασμένου για εκτέλεση σε υπολογιστή, ο οποίος δεν βασίζεται σε αναλυτική γνώση των συναρτήσεων που περιγράφουν το πρόβλημα.

Χαρακτηριστικά ενός τέτοιου αλγορίθμου είναι τα εξής :

- Η ικανότητα σύγκλισης, η οποία εξασφαλίζει ότι η ακολουθία των διανυσμάτων κατάστασης τελικά προσεγγίζει μια τιμή, βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων.
- Η ταχύτητα σύγκλισης, η οποία εκφράζει το πόσο γρήγορα η δημιουργούμενη ακολουθία προσεγγίζει τη λύση του προβλήματος.

Μια αριθμητική μέθοδος είναι συσχετισμένη με έναν αλγόριθμο εύρεσης ακρότατου, ο οποίος είναι επαναληπτικός. Οι επαναλήψεις λαμβάνουν χώρα κατά μήκος μιας κατεύθυνσης ή ενός διανύσματος έρευνας. Ένα κύριο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τις αριθμητικές μεθόδους είναι ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται η κατεύθυνση έρευνας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών είναι το βήμα και ο τρόπος με τον οποίο αυτό προσδιορίζεται.

### **Ντετερμινιστικές και στοχαστικές αριθμητικές μέθοδοι βελτιστοποίησης**

Οι αριθμητικές τεχνικές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτές που δεν χρησιμοποιούν την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης (gradient-free) και σε αυτές που τη χρησιμοποιούν ως πληροφορία (gradient-based). Οι πρώτες ονομάζονται και μέθοδοι μηδενικής τάξης, καθώς δεν γίνεται χρήση της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης για την εύρεση της κατεύθυνσης έρευνας και πρακτικά όλη η πληροφορία λαμβάνεται από τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι αριθμητικές τεχνικές gradient-based λέγονται πρώτης τάξης και κάνουν χρήση της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης έρευνας. Οι μέθοδοι gradient-based είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες στα προβλήματα βελτιστοποίησης, αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι βρίσκουν μόνο τοπικές βέλτιστες λύσεις του εκάστοτε προβλήματος.

Στη σχεδίαση ενός κινητήρα, ο οποίος προσδιορίζεται από ένα σύνολο κατασκευαστικών παραμέτρων, είναι σημαντικό να μπορεί να προσδιοριστεί η ολικά βέλτιστη λύση, δηλαδή η συγκεκριμένη τιμή του συνόλου των παραμέτρων (διάνυσμα κατάστασης), που πληροί κατά βέλτιστο τρόπο τα κριτήρια της μεθόδου βελτιστοποίησης. Προκειμένου να διερευνηθεί το πρόβλημα κατά τρόπο ώστε να



προκύψει το ολικό βέλτιστο, αναπτύχθηκαν στοχαστικές τεχνικές, οι οποίες δεν έχουν πολύπλοκο προγραμματισμό και δεν απαιτούν την πληροφορία της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης. Συνήθως αυτές οι τεχνικές σαρώνουν το πεδίο ορισμού μέσω ενός μεγάλου αριθμού επαναλήψεων, πράγμα το οποίο μπορεί να είναι αρκετά απαιτητικό από πλευράς υπολογιστικού κόστους.

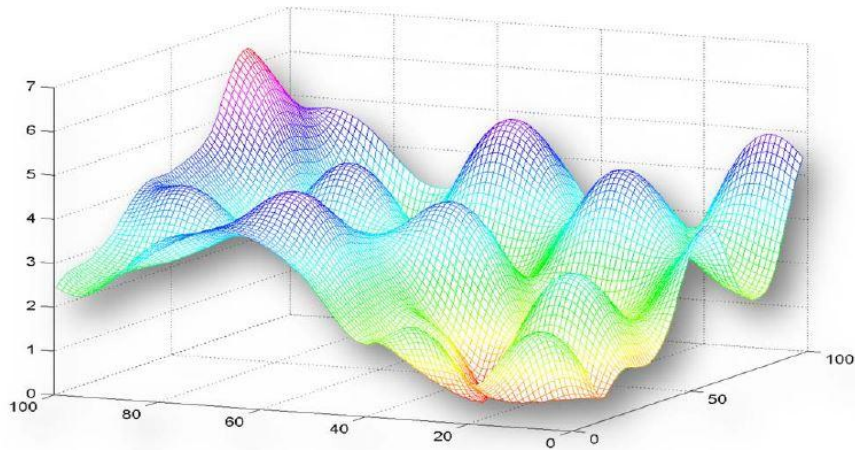
## 5.1 Στοχαστικές τεχνικές

Οι πιο διαδεδομένες από αυτές είναι οι παρακάτω:

- Προσομοιωμένη Ανόπτωση (Simulated Annealing, SA)
- Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms, GA)
- Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution, DE)
- Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO)

Σε αντίθεση με τις μεθόδους κλίσης που μπορεί να συγκλίνουν σε τοπικό ακρότατο με ντετερμινιστικό τρόπο, αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την αναζήτηση του ολικού ακρότατου αλλά απαιτούν περισσότερους υπολογισμούς και εμπεριέχουν στατιστική δικαιολόγηση. Σημαντικό μειονέκτημα των στοχαστικών μεθόδων είναι ότι απαιτείται η εμπειρική προσαρμογή τους στη φύση του προβλήματος που διερευνάται. Επίσης, η εύρεση του ολικού βέλτιστου δεν εξασφαλίζεται παρά μόνο για κυρτά προβλήματα. Όμως, οι τεχνικές αυτές συνήθως είναι απλές στην υλοποίηση και χρησιμοποιούνται λόγω του οικονομικού και ανταγωνιστικού ενδιαφέροντος που μπορεί να έχει μια τέτοια διερεύνηση. Τέλος η πιο απαιτητική υπολογιστικά αλλά απλή και ασφαλής μέθοδος για την εύρεση του ολικού βέλτιστου ενός προβλήματος είναι η σάρωση όλου του πεδίου ορισμού του με εξαντλητική ακρίβεια και σύγκριση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο χρόνος επίλυσης ωστόσο αυτής της μεθόδου είναι συνήθως μη αποδεκτός. Για περιπτώσεις όπου το εύρος τιμών που εξετάζεται είναι μικρό και το πλήθος των παραμέτρων πολύ περιορισμένο (πχ δύο) τότε μπορεί να είναι υπολογιστικά και χρονικά εφικτή η πλήρης σάρωση. Η περίπτωση της ανάλυσης ευαισθησίας αποτελεί ουσιαστικά μια τέτοια περίπτωση.

### 5.1.1 Τεχνικές αναζήτησης ολικού ακρότατου



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα Αντικειμενικής Συνάρτησης

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το γράφημα μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία εμφανίζει τοπικά ακρότατα. Στις τυπικές τεχνικές εύρεσης ακρότατων τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, το τοπικό ακρότατο λειτουργεί ως πόλος έλξης για τη λύση. Προκειμένου μια τεχνική να μπορεί να ανιχνεύσει το ολικό ακρότατο θα πρέπει να ευνοεί και βήματα προς κατευθύνσεις όπου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης απομακρύνεται από το τοπικό ακρότατο. Αυτό θα πρέπει να επιτυγχάνεται χωρίς θυσία της δυνατότητας της μεθόδου να συγκλίνει, έστω σε ένα τοπικό βέλτιστο. Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η μέθοδος ανεύρεσης ολικού ακρότατου πρέπει να ενθαρρύνει λύσεις οι οποίες θα ξεφύγουν από την έλξη του τοπικού. Υπάρχει βέβαια η πιθανότητα να απομακρυνθεί η ακολουθία της μεθόδου ακόμα και από την περιοχή γύρω από το ολικό ελάχιστο. Την τελική σύγκλιση στο ολικό ελάχιστο εξασφαλίζει ο μεγάλος αριθμός επαναλήψεων.

Συνοπτικά, οι αρχές στις οποίες θα πρέπει να στηριχθεί μια τεχνική εύρεσης ολικού ελαχίστου είναι οι εξής:

- Βραχυπρόθεσμες αυξήσεις στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης πρέπει να γίνονται ενίοτε αποδεκτές. Οι παραδοσιακές μέθοδοι σύγκλισης δεν είναι χρήσιμες αφού δεν επιτρέπουν αύξηση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Χωρίς τη συνδρομή των μεθόδων κλίσεως, κάθε κατεύθυνση που καταλήγει σε μείωση της αντικειμενικής θα πρέπει να είναι εν δυνάμει αποδεκτή.
- Αφού η θέση του ολικού ελαχίστου δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή, θα πρέπει η αναζήτηση να γίνει σε μια μεγάλη εύρους περιοχή, χωρίς κάποια προτίμηση.
- Επειδή η τιμή της συνάρτησης μπορεί να αυξηθεί σε κάποιο βήμα, θα πρέπει να υπάρχει ένας στοχαστικός τρόπος επιλογής της κατεύθυνσης έρευνας.

Για να αποδώσει αποτελέσματα μια τέτοια μέθοδος χρειάζεται μεγάλος αριθμός επαναλήψεων. Οι πολλές επαναλήψεις είναι συνδεδεμένες με την απλότητα της τεχνικής. Η ορθότητα της λύσης μπορεί να διασφαλιστεί με βάση τον αριθμό των επαναλήψεων, αφού δεν υπάρχει κάποιος άλλος τρόπος διάκρισης ενός τοπικού ακρότατου από το ολικό. Επαληθεύεται εδώ ότι η πλήρης σάρωση του πεδίου ορισμού ικανοποιεί όλα τα παραπάνω. Σε κάθε περίπτωση η κατάλληλη τεχνική είναι συνάρτηση της φύσης του επιλυόμενου προβλήματος, των απαιτήσεων του χρήστη και των υπολογιστικών εργαλείων που διατίθενται.

### **Μια πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης Ηλεκτρικής Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών**

Για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής μόνιμων μαγνητών έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της Differential Evolution [37]. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει όλες τις αρχές για την εύρεση του τοπικού ελάχιστου ικανοποιητικά, και για διαφορετικά σενάρια, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος αυτός αρχικά αξιολογεί την αντικειμενική συνάρτηση για τυχαία επιλεγμένα σημεία του πεδίου ορισμού του. Στη συνέχεια, σε κάθε επανάληψη δύο τυχαία διανύσματα επιλέγονται και η διαφορά τους χρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων σημείων ενώ στο σημείο αυτό χρησιμοποιείται και ένας παράγοντας τυχειότητας. Οι διαφορές αυτές προστίθενται σε ένα άλλο τυχαίο διάνυσμα, οπότε παράγεται το διάνυσμα προς εξέταση. Για αυτό το διάνυσμα κατάστασης, αξιολογείται η συνάρτηση κόστους, και αν προκύπτει χαμηλότερο κόστος από το αρχικό διάνυσμα κατάστασης, τότε αυτό αντικαθίσταται από το νέο διάνυσμα, αλλιώς όχι. Με τον τρόπο αυτό ανανεώνονται όλα τα σημεία, ώσπου ο αλγόριθμος να συγκλίνει σε μια βέλτιστη λύση. Ο αλγόριθμος αυτός διασφαλίζει μια γρήγορη και εύρωστη επίλυση του προβλήματος αυτού, ενώ είναι εξαιρετικά γενικός, και απλός στην εφαρμογή του, δύο σημαντικά πλεονεκτήματα όταν προσπαθούμε να επιλύσουμε τέτοιου είδους προβλήματα.

Στη συνέχεια αναλύεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία (PSO) για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στην εφαρμογή του και έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πολλών εξαιρετικά σύνθετων προβλημάτων, όπως το δικό μας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει μια εισαγωγή στον τρόπο που αξιολογούνται οι στοχαστικοί αλγόριθμοι τόσο ως προς την αποτελεσματικότητά τους στο να βρίσκουν καλές λύσεις αλλά και ως προς την ταχύτητά τους.

## **5.2 Αξιολόγηση των στοχαστικών αλγορίθμων**

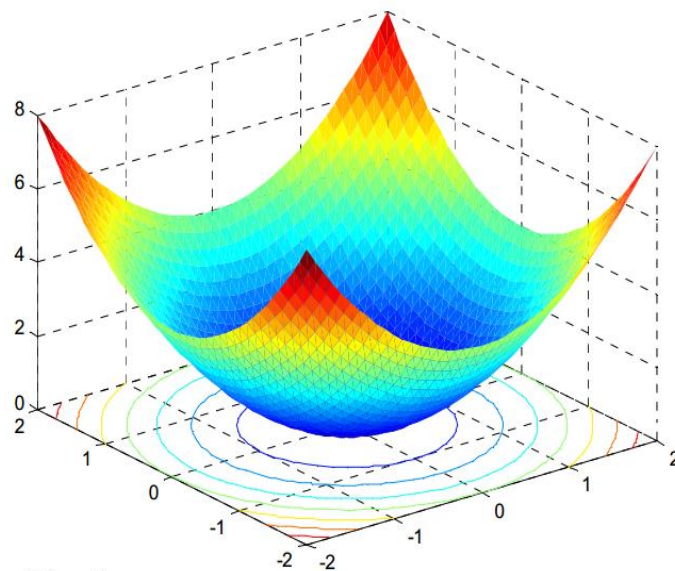
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούνται για την εύρεση λύσεων, δηλαδή ολικών ακρότατων, σε προβλήματα όπου είναι αδύνατη ή

εξαιρετικά επίπονη η αναλυτική επίλυσή τους. Συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις δεν ξέρουμε την ακριβή λύση. Το ζήτημα είναι ότι η στοχαστικότητα τους, κάνει αδύνατο να αποδειχθεί η ορθότητά τους, δηλαδή η δυνατότητά τους να λύνουν τα προβλήματα που τίθενται, αλλά και η πολυπλοκότητά τους. Το μόνο που ξέρουμε γι' αυτούς, είναι ότι έχοντας όλες τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, πιθανόν να λειτουργούν έτσι όπως το θέλουμε.

Τη λύση στο πρόβλημα αυτό τη δίνουν αναλυτικές συναρτήσεις, οι οποίες μπορούν να εκφραστούν σε πολλές διαστάσεις, ώστε να προσομοιώνουν τα προβλήματα που θα κληθούν να λύσουν. Για τις συναρτήσεις αυτές, μπορούμε με μεθόδους μαθηματικής ανάλυσης να γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια το ολικό τους βέλτιστο. Έτσι, λύνοντας το αντίστοιχο πρόβλημα με κάποια από τις στοχαστικές τεχνικές μπορούμε να κρίνουμε αν βρήκε τη λύση, ή την προσέγγισε με μεγάλη ακρίβεια και με πόση υπολογιστική προσπάθεια[12].

### 5.2.1 Συναρτήσεις αναφοράς (benchmark functions)

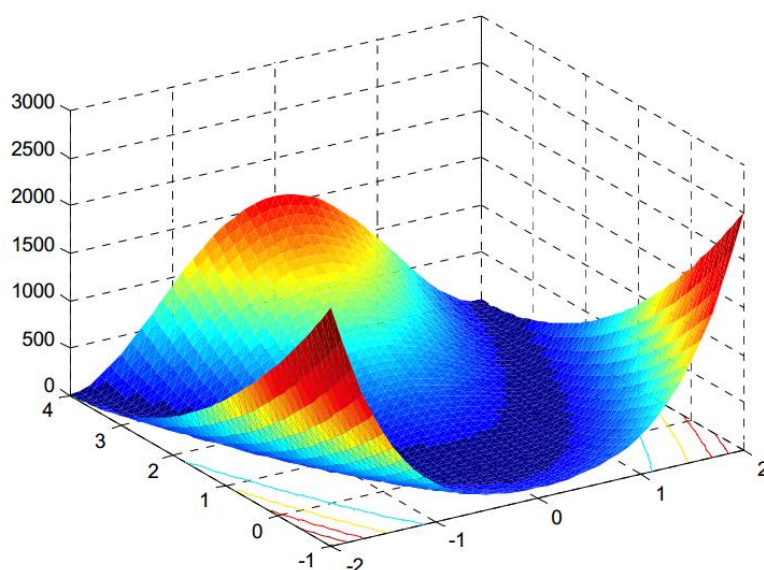
Η απλούστερη είναι η συνάρτηση τετραγώνου. Η συνάρτηση αυτή είναι γνησίως φθίνουσα και έχει μόνο ένα, ολικό ελάχιστο, στην αρχή των αξόνων. Η λύση της εξίσωσης αυτής για τις εξελικτικές τεχνικές που αναφέρθηκαν είναι εξαιρετικά εύκολη και ακριβής. Άλλες πιο σύνθετες συναρτήσεις αναφοράς παρουσιάζονται γραφικά. Οι συναρτήσεις που παρουσιάζονται είναι οι πιο δημοφιλείς.



# Sphere

Σχήμα 5.2 Δις-διάστατη Απεικόνιση Συνάρτησης Σφαίρας

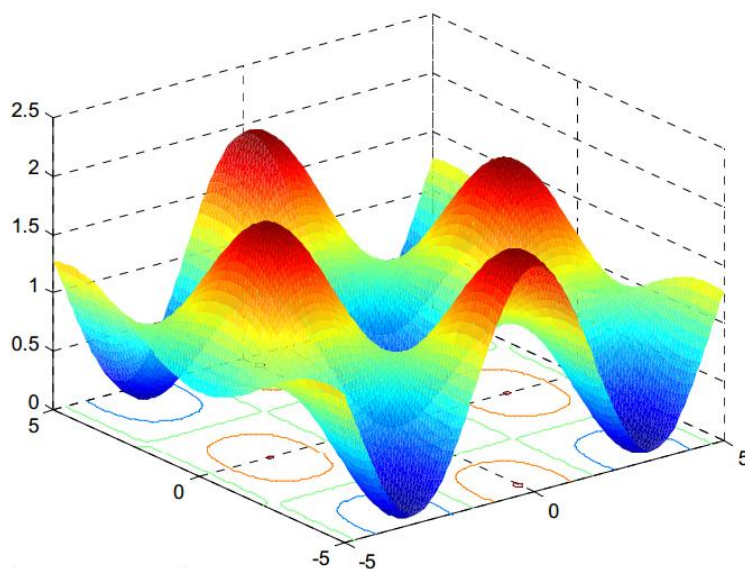
Η συνάρτηση **Rosenbrock**



## Generalized Rosenbrock

Σχήμα 5.3 Δις-διάστατη Απεικόνιση Γενικευμένης Συνάρτησης Rosenbrock

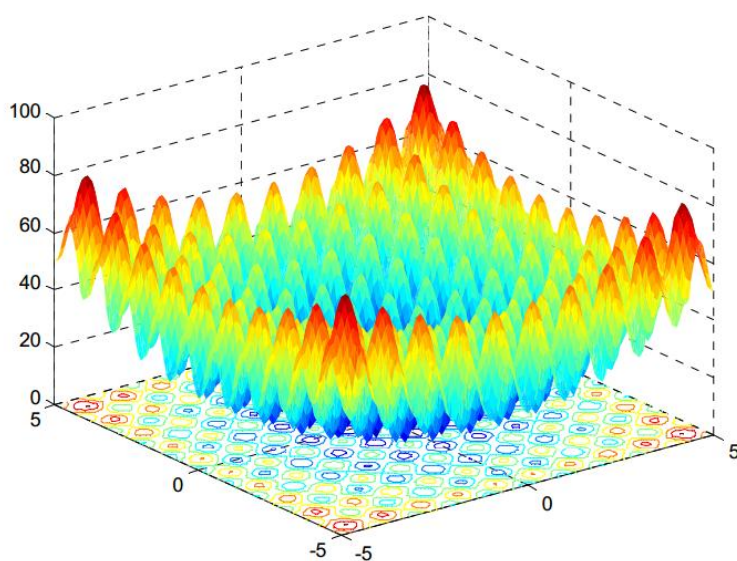
Η συνάρτηση **Griewank**



## Griewank

Σχήμα 5.4 Δις-διάστατη Απεικόνιση Συνάρτησης Griewank

## Η συνάρτηση Rastrigin



## Rastrigin

Σχήμα 5.5 Δις-διάστατη Απεικόνιση Συνάρτησης Rastrigin

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, οι συναρτήσεις αυτές, παρουσιάζουν πολλά τοπικά μέγιστα και τοπικά ελάχιστα. Οι συναρτήσεις αυτές, λοιπόν, έχουν μορφή παρόμοια με αυτή των προβλημάτων που αντιμετωπίζονται[12]. Παρακάτω δίνεται η αναλυτική σχέση των συναρτήσεων που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 5.2, 5.3, 5.4 και 5.5. Παρουσιάζονται ακόμα αναλυτικές σχέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συναρτήσεις αναφοράς και οι οποίες προτείνονται για πιο λεπτομερή διερεύνηση της συμπεριφοράς στοχαστικών αλγορίθμων. Για τις ανάγκες του προβλήματος που εξετάζουμε δεν θα χρησιμοποιηθούν, μιας και δεν κάνουμε λεπτομερή ανάλυση του αλγορίθμου PSO, αλλά εξετάζουμε τη χρήση του στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης ηλεκτρικών μηχανών.

- A. *Sphere* function, defined as  
 $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_d} x_i^2$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = 0$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-100 \leq x_i \leq 100$
- B. *Schwefel's problem*, defined as  
 $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_d} |x_i| + \prod_{i=1}^{N_d} |x_i|$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = 0$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-10 \leq x_i \leq 10$
- C. *Step* function, defined as:  
 $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_d} (\lfloor x_i + 0.5 \rfloor)^2$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = 0$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-100 \leq x_i \leq 100$
- D. *Rosenbrock* function, defined as  
 $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_d-1} (100(x_i - x_{i-1}^2)^2 + (x_{i-1} - 1)^2)$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = (1, 1, \dots, 1)$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-30 \leq x_i \leq 30$
- E. *Rotated hyper-ellipsoid* function, defined as  
 $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_d} (\sum_{j=1}^i x_j)^2$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = 0$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-100 \leq x_i \leq 100$
- F. *Generalized Schwefel Problem 2.26*, defined as:  
 $f(\mathbf{x}) = -\sum_{i=1}^{N_d} (x_i \sin(\sqrt{|x_i|}))$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = (420.9687, \dots, 420.9687)$  and  
 $f(\mathbf{x}^*) = -4426.407721$  for  $-500 \leq x_i \leq 500$
- G. *Rastrigin* function, defined as:  
 $f(\mathbf{x}) = -\sum_{i=1}^{N_d} (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = 0$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$
- H. *Ackley's function*, defined as  
 $f(\mathbf{x}) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{N_d} x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{N_d} \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = 0$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-32 \leq x_i \leq 32$
- I. *Griewank* function, defined as:  
 $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^{N_d} x_i^2 - \prod_{i=1}^{N_d} \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$ ,  
 where  $\mathbf{x}^* = 0$  and  $f(\mathbf{x}^*) = 0$  for  $-600 \leq x_i \leq 600$

#### Σχήμα 5.6 Ορισμός Συναρτήσεων Αναφοράς[12]

Η χρήση του αλγορίθμου PSO για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής, βασίζεται στο γεγονός ότι έχει αποδειχθεί αποδοτικός στην εύρεση του βέλτιστου σημείου για σύνθετα προβλήματα, που δεν είναι κυρτά, αλλά περιλαμβάνουν πολλά τοπικά ελάχιστα και μέγιστα. Το γεγονός αυτό θα αποδειχθεί για τη συγκεκριμένη υλοποίηση, μέσω μερικών συναρτήσεων αναφοράς.

### 5.3 Αλγόριθμος PSO

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια εισαγωγή στον αλγόριθμο Particle Swarm Optimization και παρουσιάζεται γραφικά η δομή του και η λειτουργία του, ενώ αναλύεται και η αρχή βελτιστότητας του. Δηλαδή η ικανότητα του να συγκλίνει σε ολικό βέλτιστο.

### 5.3.1 Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην έννοια του πληθυσμού και μοιράζεται κοινά χαρακτηριστικά με τον Γενετικό Αλγόριθμο (GE), ο οποίος είναι και παλιότερος. Οι αλγόριθμοι αυτοί αποτελούν υποσύνολο των εξελικτικών αλγορίθμων, οι οποίοι προσομοιώνουν τη φυσική εξέλιξη [38]. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι, όπως και όλοι οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε πληθυσμό περιγράφονται από μια γενική δομή που είναι κοινή σε όλους. Ο παρακάτω ψευδό-κώδικας, περιγράφει τα βασικά τους βήματα:

---

**Algorithm 1** Population Based Searches

---

```
1: procedure PBS
2:   Initialize the population
3:   repeat
4:     for  $i = 1$  to number of individuals do
5:        $G(\bar{x}_i)$  ▷  $G()$  evaluates goodness
6:     end for
7:     for  $i = 1$  to number of individuals do
8:        $P(\bar{x}_i, \theta)$  ▷ Modify each individual using parameters  $\theta$ 
9:     end for
10:  until stopping criteria
11: end procedure
```

---

Σχήμα 5.7 Ψευδο-Κώδικας Εξελικτικού Αλγορίθμου[39]

Η βασική διαφορά μεταξύ των διάφορων αλγορίθμων αυτού του είδους βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο τροποποιείται το κάθε άτομο του πληθυσμού (γραμμή 8).

### 5.3.2 Particle Swarm Optimization

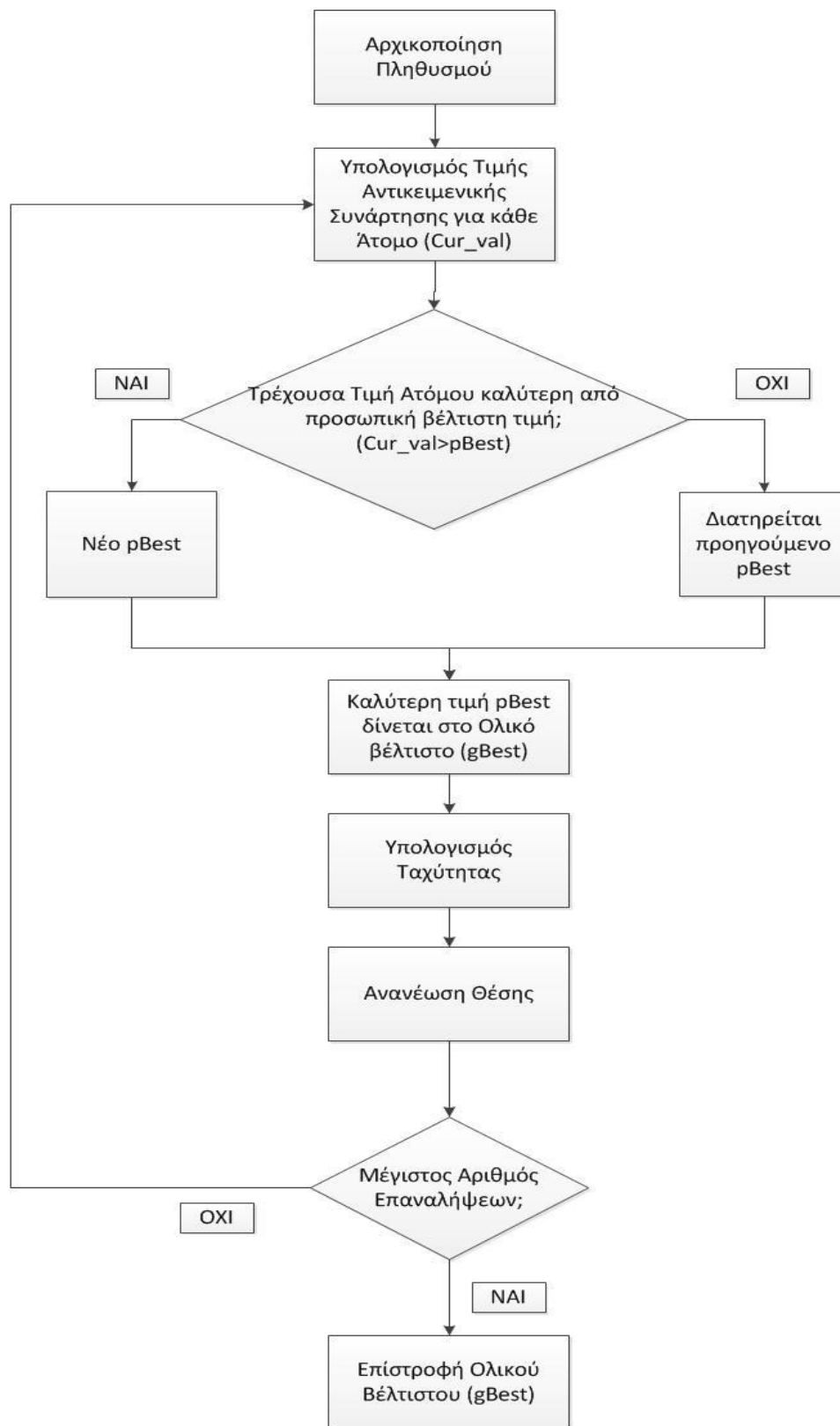
Ο αλγόριθμος PSO είναι ένας προσαρμοζόμενος αλγόριθμος βασισμένος με μια κοινωνικό-ψυχολογική μεταφορά, ένας πληθυσμός ατόμων προσαρμόζεται επιστρέφοντας με τυχαίο τρόπο σε προηγούμενως επιτυχημένες περιοχές [40].

Το σμήνος σωματιδίων (particle swarm) κάνει δύο κυρίως πράξεις, ανανέωση ταχύτητας και ανανέωση θέσης. Σε κάθε γενιά, το σωματίδιο επιταχύνεται προς την προσωπική του βέλτιστη θέση (pBest) καθώς και προς τη συνολική βέλτιστη θέση (gBest). Σε κάθε επανάληψη μια νέα τιμή ταχύτητας υπολογίζεται για κάθε σωματίδιο, συναρτήσει της τρέχουσας ταχύτητάς του και της απόστασής του από το προσωπικό και το ολικό βέλτιστο. Η νέα ταχύτητα στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της νέας θέσης του κάθε σωματιδίου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται είτε για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων είτε μέχρι να γίνει σύγκλιση.

Η παρακάτω περιγραφή αντικατοπτρίζει απόλυτα την γενική λογική του αλγορίθμου, αλλά είναι αλήθεια ότι από την πρώτη σύλληψη του αλγορίθμου έχουν δημιουργηθεί τρεις κύριες παραλλαγές αυτής της γενικής φιλοσοφίας οι



οποίες εφαρμόζονται στο πεδίο των πραγματικών αριθμών. Οι παραλλαγές αυτές διαφέρουν λίγο, στο βήμα όπου γίνεται ο υπολογισμός της ταχύτητας του κάθε σωματιδίου.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα Ροής Αλγόριθμου PSO

### 5.3.3 Standard Particle Swarm Optimizer

Ο πιο απλός τρόπος καθορισμού της ταχύτητας των σωματιδίων, ώστε σε έναν ετερογενή χώρο αναζήτησης, όπου υπάρχουν καλύτερες και χειρότερες περιοχές, τα σωματίδια να έλκονται από τις καλύτερες περιοχές είναι ο παρακάτω:

$$V_i = V_{i-1} + C_1 \cdot rand \cdot (pBestPosition - X_{i-1}) + C_2 \cdot rand(nBestPosition - X_{i-1}) \quad (5.1)$$

$i \rightarrow$  η τρέχουσα γενιά

$C_1 \rightarrow$  1η κοινωνική παράμετρος, συνήθως ίση με 2

$C_2 \rightarrow$  2η κοινωνική παράμετρος, συνήθως ίση με 2

$pBestPosition \rightarrow$  η θέση όπου το άτομο έχει το προσωπικό του βέλτιστο

$nBestPosition \rightarrow$  η θέση του γειτονικού ατόμου που έχει τη βέλτιστη τιμή

Η νέα θέση του κάθε σωματιδίου καθορίζεται από τη σχέση:

$$X_i = X_{i-1} + V_{i-1} \quad (5.2)$$

Η μέθοδος αυτή, είναι η πρώτη που παρουσιάστηκε αλλά έχει ένα βασικό μειονέκτημα. Το μειονέκτημά της είναι ότι έχει την τάση να «εκρήγνυται». Τα σωματίδια αρχίζουν να ταλαντώνονται όλο και πιο έντονα, με τις ταχύτητές τους να αυξάνονται συνεχώς. Αυτό προκαλεί αδυναμία σύγκλισης, κάτι προφανώς μη αποδεκτό από έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Μια πρώτη προσέγγιση στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι ο περιορισμός της ταχύτητας του κάθε σωματιδίου. Ο πιο απλός περιορισμός είναι να τεθεί ως ανώτατο όριο ταχύτητας το μέγιστο διάστημα του πεδίου ορισμού.

$$|V_{max}| = X_{max} - X_{min}$$

$$if V_i > |V_{max}| then V_i = |V_{max}|$$

$$else if V_i < -|V_{max}| then V_i = -|V_{max}|$$

### 5.3.4 PSO με αδράνεια

Το 1998 οι Shi και Eberhart ανέπτυξαν την ιδέα του αλγόριθμου με αδράνεια. Κατά τον υπολογισμό της ταχύτητας του κάθε σωματιδίου η προηγούμενη ταχύτητα πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή αδράνειας. Αυτός ο συντελεστής μειώνεται στη συνέχεια γραμμικά σε κάθε γενιά. Ένας μη μηδενικός συντελεστής αδράνειας εισάγει μια τάση στο σωματίδιο να συνεχίσει να κινείται στην ίδια κατεύθυνση, όπως στην προηγούμενη επανάληψη. Καθώς ο συντελεστής μειώνεται, ο αλγόριθμος από την καθολική αναζήτηση τείνει στην τοπική αναζήτηση. Με τον τρόπο αυτό, αρχικά τα σωματίδια υποχρεώνονται να εξερευνήσουν με τον καλύτερο τρόπο το σύνολο του πεδίου ορισμού, αφού το κάθε ένα τείνει να

διατηρεί την ταχύτητά του, που όμως αρχικά ήταν τυχαία. Στη συνέχεια, τα σωματίδια επιταχύνονται όλο και πιο έντονα προς τις καλύτερες περιοχές, βελτιώνοντας την ακρίβεια της εξερεύνησης και οδηγώντας τελικά σε σύγκλιση.

#### Υπολογισμός Ταχύτητας

$$V_i = w \cdot V_{i-1} + C_1 \cdot rand \cdot (pBestPosition - X_{i-1}) + C_2 \cdot rand \cdot (nBestPosition - X_{i-1}) \quad (5.3)$$

$i \rightarrow$  η τρέχουσα γενιά

$w \rightarrow$  συντελεστής αδράνειας

$C_1 \rightarrow$  1η κοινωνική παράμετρος, συνήθως ίση με 2

$C_2 \rightarrow$  2η κοινωνική παράμετρος, συνήθως ίση με 2

$pBestPosition \rightarrow$  η θέση όπου το άτομο έχει το προσωπικό του βέλτιστο

$nBestPosition \rightarrow$  η θέση του γειτονικού ατόμου που έχει τη βέλτιστη τιμή

#### Υπολογισμός νέας θέσης

$$X_i = X_{i-1} + V_{i-1} \quad (5.4)$$

#### Υπολογισμός συντελεστή αδράνειας

$$w_i = \frac{(i_{total} - i) \cdot (w_{start} - w_{end})}{i_{total}} + w_{end} \quad (5.5)$$

Παρ' ότι φαίνεται ότι δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει όριο ταχύτητας σε αυτή την περίπτωση μιας και δεν υπάρχει το πρόβλημα της συνεχούς επιτάχυνσης και των ταλαντώσεων προτείνεται να χρησιμοποιείται.

### **5.3.5 PSO με συντελεστή περιορισμού**

Ακόμα μία υλοποίηση του αλγορίθμου από τον Clerc. Η χρήση του συντελεστή περιορισμού (constriction coefficient) οδηγεί σε σύγκλιση των ατόμων με το χρόνο. Οι ταλαντώσεις τους μειώνονται και συγκεντρώνονται γύρω από προηγουμένως επιτυχημένες θέσεις. Αν η προηγούμενη καλύτερη θέση του ίδιου του σωματιδίου και των γειτόνων του είναι κοντά τότε αυτό θα ταλαντώνεται γύρω από το σταθμισμένο μέσο τους. Αν, αντίθετα βρίσκονται μακριά τότε θα εκτελεστεί μια πιο καθολική αναζήτηση. Αυτή η μέθοδος συνεπώς ισορροπεί την ανάγκη για τοπική και καθολική αναζήτηση ανάλογα με τις κοινωνικές συνθήκες.

#### Υπολογισμός συντελεστή περιορισμού

$$\chi = \frac{2k}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \text{ όπου } \varphi = C_1 + C_2, \varphi > 4 \quad (5.6)$$

#### Υπολογισμός Ταχύτητας

$$V_i = \chi \cdot [V_{i-1} + C_1 \cdot \text{rand} \cdot (pBestPosition - X_{i-1}) + C_2 \cdot \text{rand}(nBestPosition - X_{i-1})] \quad (5.7)$$

Υπολογισμός νέας θέσης, όπως στη σχέση 5.4.

### **5.3.6 Τοπολογίες Γειτόνων**

Μια σημαντική παράμετρος της λειτουργίας του αλγορίθμου που δεν έχει αναλυθεί ακόμα είναι ο ορισμός των γειτόνων του κάθε ατόμου. Ο ορισμός αυτός καθορίζει πως διαδίδεται η πληροφορία μεταξύ των ατόμων του σμήνους. Επιλέγοντας διαφορετικές τοπολογίες μπορεί να καθοριστεί κυρίως το πόσο καθολική θα είναι η αναζήτηση και το πόσο γρήγορα θα γίνει η σύγκλιση. Πρακτικά όσο περισσότερους γείτονες έχει το κάθε άτομο τόσο πιο γρήγορα γίνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου, αφού τα άτομα επιταχύνονται προς τις συνολικά καλύτερες περιοχές. Η ταχύτερη σύγκλιση έχει όμως και ένα κόστος, η εξαιρετικά γρήγορη επιτάχυνση, μειώνει την καθολικότητα της αναζήτησης και έχει σαν αποτέλεσμα, σε περιπτώσεις συναρτήσεων με πολλές καλές περιοχές, ο αλγόριθμος να συγκλίνει πιθανώς σε κάποιο τοπικό βέλτιστο, αφού η περιοχή του «ολικού» βέλτιστου δεν πρόλαβε να εξερευνηθεί πριν αρχίσει η έντονη σύγκλιση. Οι δύο πιο σημαντικότερες τοπολογίες είναι τοπολογία κύκλου και η τοπολογία αστέρα.

### 5.3.6.1 Τοπολογία Κύκλου

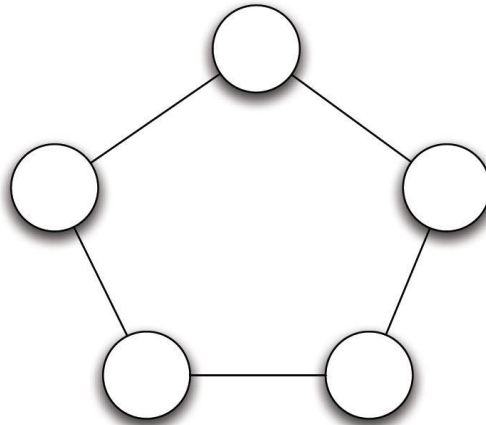


Figure 2: Circle Topology

Σχήμα 5.9 Σύνδεση Ατόμων Τοπολογία Κύκλου[39]

Αυτή η τοπολογία περιγράφει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τριών κάθε φορά ατόμων. Ουσιαστικά το κάθε άτομο έχει δύο γείτονες. Οι γείτονες αυτοί επιλέγονται τυχαία.

### 5.3.6.2 Τοπολογία Αστέρα

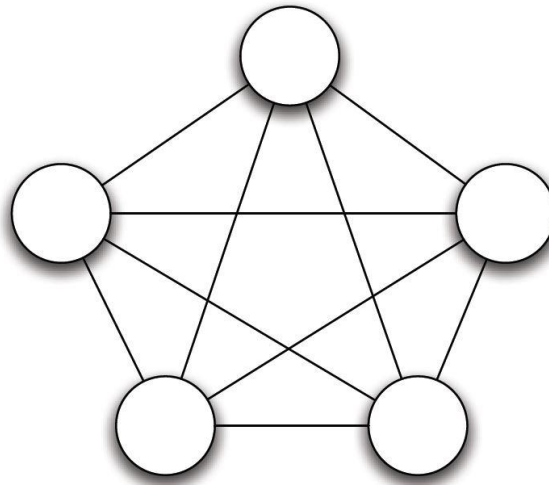


Figure 4: Star Topology

Εικόνα 5.10 Σύνδεση Ατόμων Τοπολογία Αστέρα[39]

Στην τοπολογία αυτή, όλα τα άτομα επικοινωνούν με όλα τα άλλα άτομα, ουσιαστικά γείτονες του κάθε ατόμου είναι όλα τα υπόλοιπα άτομα. Αυτό απλοποιεί τη υλοποίηση αυτής της σχέσης, αφού τελικά το βέλτιστο των γειτόνων είναι το ολικό βέλτιστο.

Στη βιβλιογραφία προτείνονται και άλλες τοπολογίες μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

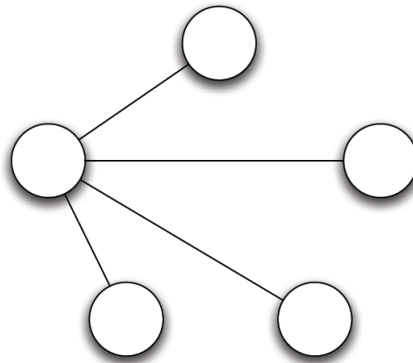
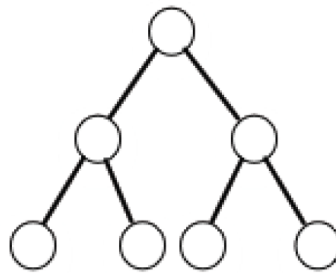


Figure 3: Wheel Topology

Σχήμα 5.11 Σύνδεση Ατόμων Τοπολογία Τροχού[39]



(f) Tree

Σχήμα 5.12 Σύνδεση Ατόμων Τοπολογία Διαδικού Δένδρου

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί επίσης τοπολογίες που βασίζονται στη χωρική γειτνίαση[41]. Οι τοπολογίες αυτές προτείνονται με σκοπό να βελτιωθεί η ταχύτητα και η ακρίβεια του αλγορίθμου. Κάθε μία από αυτές παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε κάποιου είδους προβλήματα, ενώ μπορεί να μειονεκτεί σε κάποια άλλα. Δεν υπάρχει δηλαδή μια λύση για όλα τα προβλήματα. Ανάλογα με τις προτεραιότητες και τη φύση του κάθε προβλήματος επιλέγουμε διαφορετικές τοπολογίες.

## Κεφάλαιο 6

### Υλοποίηση του Αλγόριθμου Βελτιστοποίησης PSO

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί λεπτομερώς η υλοποίηση του αλγόριθμου PSO για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Θα παρουσιαστεί η διαδικασία αξιολόγησής του, σύμφωνα με κάποιες από τις πιο διαδεδομένες συναρτήσεις αναφοράς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν, για τις δύο διαφορετικές τοπολογίες που αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε.

#### 6.1 Υλοποίηση του Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε σε περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής (MATLAB), αφού αυτό μας επιτρέπει άριστη σύνδεση με τον κώδικα προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί στο ίδιο περιβάλλον. Ο κώδικας βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο είναι η μέθοδος PSO, διαφορετική για την τοπολογία κύκλου και την τοπολογία αστέρα, και το δεύτερο είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Ο διαχωρισμός αυτό έγινε ώστε να διευκολυνθεί η ανάπτυξη του κώδικα, αφού έτσι η αντικειμενική συνάρτηση επαναχρησιμοποιείται και μεταβάλλεται εύκολα, ενώ ο πυρήνας του αλγορίθμου παραμένει αμετάβλητος.

Στο σημείο αυτό παρατίθεται ξανά ο συνοπτικός ψεύδο-κώδικας της PSO ώστε να διευκολύνει την ανάλυση που θα γίνει στη συνέχεια:

---

Algorithm 2 Particle Swarm algorithm

---

```
1: procedure PSO
2:   repeat
3:     for  $i = 1$  to number of individuals do
4:       if  $G(\vec{x}_i) > G(\vec{p}_i)$  then ▷  $G()$  evaluates goodness
5:         for  $d = 1$  to dimensions do
6:            $p_{id} = x_{id}$  ▷  $p_{id}$  is the best state found so far
7:         end for
8:       end if

9:        $g = i$  ▷ arbitrary
10:      for  $j =$  indexes of neighbors do
11:        if  $G(\vec{p}_j) > G(\vec{p}_g)$  then
12:           $g = j$  ▷  $g$  is the index of the best performer in the neighborhood
13:        end if
14:      end for

15:      for  $d = 1$  to number of dimensions do
16:         $v_{id}(t) = f(x_{id}(t-1), v_{id}(t-1), p_{id}, p_{gd})$  ▷ update velocity
17:         $v_{id} \in (-V_{max}, +V_{max})$ 
18:         $x_{id}(t) = f(v_{id}(t), x_{id}(t-1))$  ▷ update position
19:      end for
20:    end for
21:  until stopping criteria
22: end procedure
```

---

Σχήμα 6.1 Ψευδο-Κώδικας Αλγορίθμου PSO[39]

### 6.1.1 Αρχικοποίηση του Πληθυσμού

Το πρώτο βήμα είναι να ορίσουμε τέσσερα βασικά μεγέθη για την προσομοίωση.

- *popsize*, το μέγεθος του πληθυσμού
- *Nt*, τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων
- *lb*, τα κάτω όρια των μεταβλητών εισόδου
- *ub*, τα άνω όρια των μεταβλητών εισόδου

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι τα *lb*, *ub* είναι διανύσματα. Από το μήκος αυτών των διανυσμάτων προκύπτει ο συνολικός αριθμός των διαστάσεων του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Στη συνέχεια ορίζονται πίνακες όπου θα αποθηκεύονται τα βασικά στοιχεία που είναι απαραίτητο να αποθηκευτούν. Τα στοιχεία αυτά είναι:

- *pBestValue*: πίνακας διαστάσεων  $popsize \times 1$ , όπου σε κάθε επανάληψη αποθηκεύεται σε κάθε γραμμή του η προσωπική βέλτιστη τιμή του κάθε ατόμου του πληθυσμού.
- *pBestPosition*: πίνακας διαστάσεων  $popsize \times num\_dimensions$ , όπου σε κάθε επανάληψη αποθηκεύεται η θέση όπου έχει βρεθεί το προσωπικό βέλτιστο του κάθε ατόμου. Ο αριθμός των στηλών του πίνακα ισούται με τον αριθμό των διαστάσεων του προβλήματος που αντιμετωπίζουμε.
- *gBestValue*: πίνακας διαστάσεων  $1 \times 1$ , όπου αποθηκεύεται τη ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει βρεθεί.
- *gBestPosition*: πίνακας διαστάσεων  $1 \times num\_dimensions$ , όπου στις στήλες του, αποθηκεύονται οι θέσεις όπου έχει βρεθεί αυτή η ελάχιστη τιμή.
- *nBestValue*: πίνακας διαστάσεων  $popsize \times 1$ , όπου σε κάθε γραμμή αποθηκεύεται η βέλτιστη τιμή των γειτόνων του ατόμου στο οποίο ανήκει αυτή η γραμμή.
- *nBestPosition*: πίνακας διαστάσεων  $popsize \times num\_dimensions$ , όπου αποθηκεύεται η θέση που βρέθηκε η καλύτερη τιμή των γειτόνων του κάθε ατόμου.
- *Velocity*: πίνακας διαστάσεων  $popsize \times num\_dimensions$ , όπου αποθηκεύεται η ταχύτητα (ουσιαστικά μετατόπιση σε μία επανάληψη) του κάθε ατόμου.

Η λογική της αποθήκευσης η οποία διατηρείται σε όλη τη ροή του κώδικα είναι ότι τα στοιχεία αποθηκεύονται σε πίνακες, κάθε γραμμή του πίνακα περιλαμβάνει τα στοιχεία ενός ατόμου του πληθυσμού.

Σε σχέση με την ταχύτητα, αποφασίστηκε να οριστεί ένα άνω και κάτω όριο. Πρόκειται ουσιαστικά για το πόσο πολύ μπορεί να μετατοπιστεί σε μία επανάληψη το κάθε άτομο.



Το όριο αυτό τέθηκε σε κάθε διάσταση.

$$ub_{vel} = \frac{ub - lb}{5} \quad (6.1)$$

Η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάθε διάσταση, είναι το 1/5 του πεδίου ορισμού. Το να τεθεί ένα ανώτατο όριο της ταχύτητας είναι απαραίτητο ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα ταλαντώσεων στις λύσεις του προβλήματος[39]. Το όριο που προτείνεται ισούται με το πεδίο ορισμού, όμως κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό. Σε υλοποιήσεις της μεθόδου επιλέγεται ένα χαμηλότερο όριο[42], αφού στην πράξη δεν είναι απαραίτητες τόσο μεγάλες μετατοπίσεις, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε αργή σύγκλιση, χωρίς μάλιστα να βελτιωθεί το τελικό αποτέλεσμα.

Επίσης, τέθηκε και ένα κάτω όριο στο μέτρο της ταχύτητας. Το κάτω όριο αυτό έχει τη λειτουργία του να μην επιτρέπει τον μηδενισμό της ταχύτητας. Κάτι τέτοιο είναι πολύ σπάνιο να συμβεί επειδή κατά τον υπολογισμό των ταχυτήτων χρησιμοποιούνται και παράγοντες που είναι τυχαίοι αριθμοί. Όμως αν συμβεί και μηδενιστεί, τότε μπορεί η ταχύτητα του συγκεκριμένου ατόμου να παραμείνει μηδενική και στη συνέχεια, αχρηστεύοντας ουσιαστικά ένα από τα άτομα του πληθυσμού.

$$|velocity| > 10^{-15} \quad (6.2)$$

Η ελάχιστη τιμή που δόθηκε, είναι εξαιρετικά μικρή ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στη σύγκλιση του αλγορίθμου.

Μερικά ακόμα δεδομένα που χρειαζόμαστε έχουν να κάνουν με τον υπολογισμό της ταχύτητας, με βάση τη σχέση που παρουσιάστηκε παραπάνω:

$$V_i = w \cdot V_{i-1} + C_1 \cdot rand \cdot (pBestPosition - X_{i-1}) + C_2 \cdot rand(nBestPosition - X_{i-1}) \quad (6.3)$$

Οι κοινωνικοί συντελεστές τέθηκαν ίσοι με  $C_1 = C_2 = 2$

Ο συντελεστής αδράνειας, όπως εξηγήσαμε μειώνεται σε κάθε επανάληψη. Οι τιμές που παίρνει είναι:

$$w = 0,9 \dots 0,4 \quad (6.4)$$

Οι τιμές αυτές έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνουν τόσο τη σύγκλιση όσο και τη βέλτιστη τιμή που βρίσκεται[43]. Η μέθοδος γραμμικής μείωσης του συντελεστή αδράνειας, είναι μία από τις πολλές μεθόδους που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, με στόχο να βελτιωθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου[44]. Η μέθοδος αυτή φαίνεται να αποτελεί μία από τις καλύτερες και πιο αξιόπιστες εναλλακτικές που προτείνονται, ενώ η εφαρμογή της είναι εξαιρετικά απλή.

Στη συνέχεια δίνονται τυχαίες τιμές διαστάσεων και αρχικής ταχύτητας σε όλα τα άτομα του πληθυσμού.

Οι τιμές αυτές δίνονται με βάση τις παρακάτω σχέσεις, ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι τιμές που δίνονται θα είναι τυχαίες και μέσα στα όρια που έχουν τεθεί:

$$position = lb + (ub - lb) \cdot rand \quad (6.5)$$

Όπου  $lb$ , είναι το κατώτατο όριο για τη συγκεκριμένη διάσταση,  $ub$  το ανώτατο όριο για την ίδια διάσταση και τέλος  $rand$  είναι μια τυχαία τιμή μεταξύ 0 και 1.

Αντίστοιχα δίνονται τυχαίες τιμές στην αρχική ταχύτητα:

$$velocity = lb_{vel} + 2 \cdot rand \cdot ub_{vel} \quad (6.6)$$

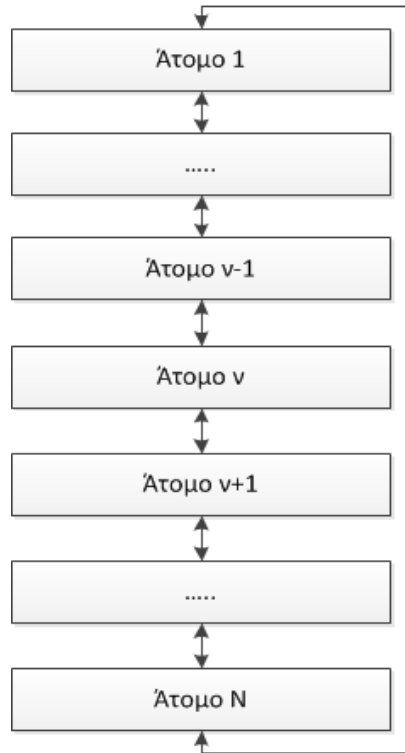
Όπου  $lb_{vel}$  είναι η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας η οποία είναι ίση με  $-ub_{vel}$ , η οποία μέγιστη τιμή της ταχύτητας έχει οριστεί παραπάνω. Στο σημείο αυτό γίνεται και έλεγχος ώστε οι τιμές της ταχύτητας να μην είναι μηδενικές.

### **Ορισμός Γειτόνων**

Για την περίπτωση της τοπολογίας κύκλου, πρέπει να οριστούν οι γείτονες του κάθε ατόμου. Δηλαδή τα δύο άλλα άτομα με τα οποία γίνεται ανταλλαγή πληροφορίας και υπολογίζεται η νέα του ταχύτητα σε κάθε επανάληψη.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η τοπολογία κύκλου, ορίζει απλώς τον αριθμό των ατόμων που επικοινωνούν μεταξύ τους, και όχι κάποια γεωγραφική γειτνίαση. Κάτι τέτοιο έχει προταθεί από μελετητές, αλλά αφορά μια διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος, από αυτή που ακολουθήσαμε, η οποία είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Με δεδομένο ότι όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα άτομα αναπαρίστανται ως γραμμές σε πίνακες, αποφασίστηκε ότι «γείτονες» του κάθε ατόμου αποτελούν τα άτομα που διαφέρουν κατά μία γραμμή στον πίνακα όπου ορίζονται τα δεδομένα τους. Το πρώτο στοιχείο του πίνακα γειτνιάζει με το τελευταίο και το δεύτερο, ενώ το τελευταίο με το προτελευταίο και το πρώτο.



Σχήμα 6.2 Ορισμός Γειτόνων Τοπολογία Κύκλου

### 6.1.2 Πυρήνας του Προγράμματος

Ο πυρήνας του προγράμματος αποτελείται από τις βασικές διεργασίες που υλοποιούν τον αλγόριθμο PSO. Η διαδικασία της αρχικοποίησης του πληθυσμού που αναφέρθηκε παραπάνω, δεν συμπεριέλαβε τη διαδικασία βασικών υπολογισμών και ανανέωσης αποτελεσμάτων, που ταυτίζονται με την αντίστοιχη επαναληπτική διαδικασία του κυρίως μέρος του αλγορίθμου και θα εξηγηθούν αναλυτικά σε αυτή την παράγραφο.

#### Υπολογισμός Αντικειμενικής Συνάρτησης

Στο σημείο αυτό, για κάθε άτομο, με βάση τη θέση του, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής του συνάρτησης. Η λειτουργία αυτή γίνεται καλώντας την συνάρτηση *ObjectiveFun*, όπου περιλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμού της. Ο υπολογισμός της μπορεί να γίνεται μέσω αναλυτικών σχέσεων, για τις περιπτώσεις των συναρτήσεων ελέγχου, είτε μέσω της προσομοίωσης της λειτουργίας της μηχανής με την επιστροφή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Η *ObjectiveFun* παίρνει ως όρισμα το διάνυσμα θέσης του κάθε ατόμου.

#### Ανανέωση Τοπικών Βέλτιστων

Κατά το βήμα υπολογισμού της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για τη συγκεκριμένη θέση, σε περίπτωση που η νέα τιμή που βρέθηκε, είναι μικρότερη από το προσωπικό βέλτιστο, τότε ανανεώνεται η τιμή και η θέση του προσωπικού βέλτιστου του συγκεκριμένου ατόμου.

### Ανανέωση Ολικού Βέλτιστου

Στο βήμα αυτό ελέγχονται όλα τα ατομικά ελάχιστα. Αν κάποιο από αυτά είναι μικρότερο από την τιμή του ολικού βέλτιστου, τότε η τιμή του ολικού βέλτιστου ανανεώνεται με αυτή τη μικρότερη τιμή. Ανανεώνεται επίσης και η αντίστοιχη θέση του ολικού βέλτιστου.

### Ανανέωση Βέλτιστων Γειτόνων

Εδώ, μέσω του πίνακα των τοπικών βέλτιστων, ελέγχεται η βέλτιστη τιμή των γειτόνων του συγκεκριμένου ατόμου. Από αυτές τις τρεις τιμές επιλέγεται η μικρότερη και τίθεται στο αντίστοιχο πεδίο. Στη συνέχεια ανανεώνεται και το αντίστοιχο διάνυσμα θέσης.

### Υπολογισμός Νέων Ταχυτήτων

Γνωρίζοντας όλα τα στοιχεία πλέον που είναι απαραίτητα, υπολογίζονται οι νέες ταχύτητες του κάθε ατόμου σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$V_i = w \cdot V_{i-1} + C_1 \cdot rand \cdot (pBestPosition - X_{i-1}) + C_2 \cdot rand(nBestPosition - X_{i-1}) \quad (6.6)$$

Για την περίπτωση της τοπολογίας κύκλου.

$$V_i = w \cdot V_{i-1} + C_1 \cdot rand \cdot (pBestPosition - X_{i-1}) + C_2 \cdot rand(gBestPosition - X_{i-1}) \quad (6.7)$$

Για την περίπτωση της τοπολογίας Αστέρα. Η θέση του ολικού βέλτιστου χρησιμοποιείται, με δεδομένο ότι όλα σωματίδια επικοινωνούν μεταξύ τους, συνεπώς ο βέλτιστος γείτονας, είναι η συνολικά βέλτιστη θέση  $gBestPosition$ .

Σε κάθε περίπτωση γίνεται έλεγχος ώστε τόσο τα δεδομένα θέσης όσο και ταχύτητας να βρίσκονται εντός των ορίων που έχουν τεθεί.

### 6.1.3 Ολοκλήρωση Προγράμματος

Ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται με δύο διαφορετικές τερματικές συνθήκες:

- Όταν επιτευχθεί βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης μικρότερη από 0,75
- Όταν ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός γενεών, που ορίζεται από τη μεταβλητή  $Nt$

Τα δύο παραπάνω κριτήρια τέθηκαν λόγω της απλότητάς τους. Με το πρώτο κριτήριο εξασφαλίζεται ότι όταν έχουμε μια ικανοποιητική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η εκτέλεση του αλγορίθμου θα ολοκληρώνεται, ώστε να γίνεται

οικονομία χρόνου. Η δεύτερη περίπτωση αποτελεί απλώς ένα άνω όριο επαναλήψεων ώστε να εξασφαλίζεται η ολοκλήρωση της εκτέλεσής του.

Από τα δύο αυτά κριτήρια διακοπής, μόνο το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε κατά την αξιολόγηση της λειτουργίας του προγράμματος, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, αφού στην περίπτωση αυτή μας ενδιαφέρει η προσέγγιση μιας πολύ μικρής βέλτιστης τιμής.

Ως τερματική συνθήκη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η σύγκλιση της θέσης των ατόμων σε μια πολύ μικρή περιοχή.

Επίσης με την ολοκλήρωση της εκτέλεσης του προγράμματος, αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα της εκτέλεσης. Αυτό γίνεται ώστε να είναι δυνατή στη συνέχεια η επεξεργασία τους και η παρουσίαση τους. Τέλος παρουσιάζεται διαγραμματικά η εξέλιξη της ιστορίας του βέλτιστου σε κάθε επανάληψη.

## **6.2 Αξιολόγηση του Κώδικα με χρήση Συναρτήσεων Αναφοράς**

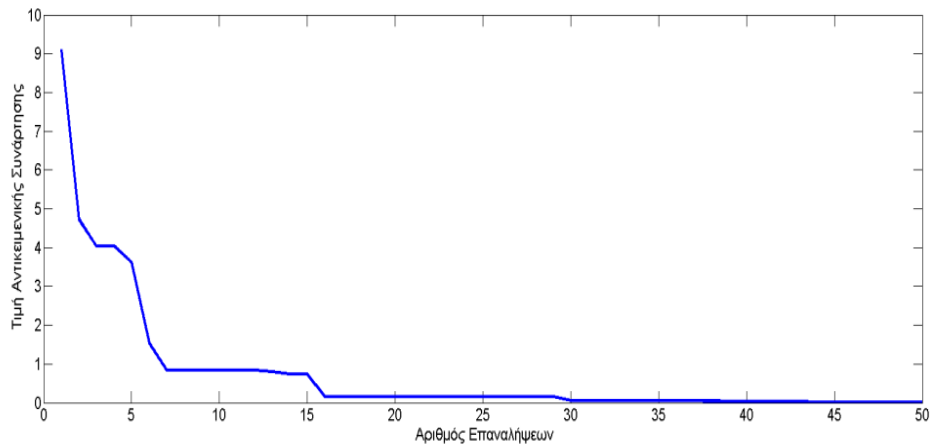
Για την αξιολόγηση του κώδικα που αναπτύχθηκε αρχικά ελέγχθηκε η συμπεριφορά του και η δυνατότητά του να προσεγγίζει το βέλτιστο μέσω τριών συναρτήσεων αναφοράς, οι οποίες έχουν ήδη αναφερθεί. Οι συναρτήσεις αυτές είναι οι:

- Sphere
- Rosenbrock
- Rastrigin

Ο αναλυτικός τύπος τους παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο σχήμα 5.6. Αρχικά παρουσιάζουμε για ένα αρκετά ευρύ πεδίο ορισμού τα διαγράμματα της ιστορίας των βέλτιστων που έχουν βρεθεί:

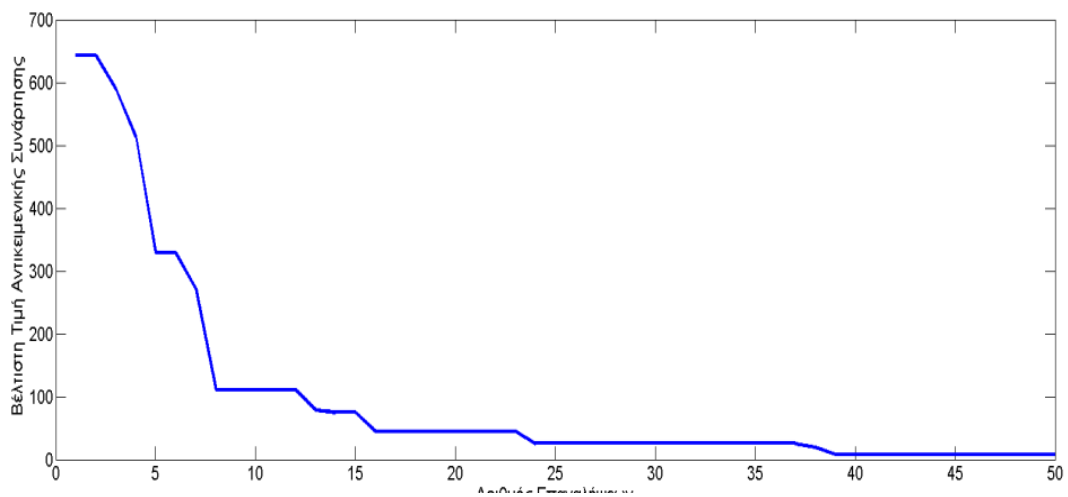
## PSO τοπολογία κύκλου

### Sphere



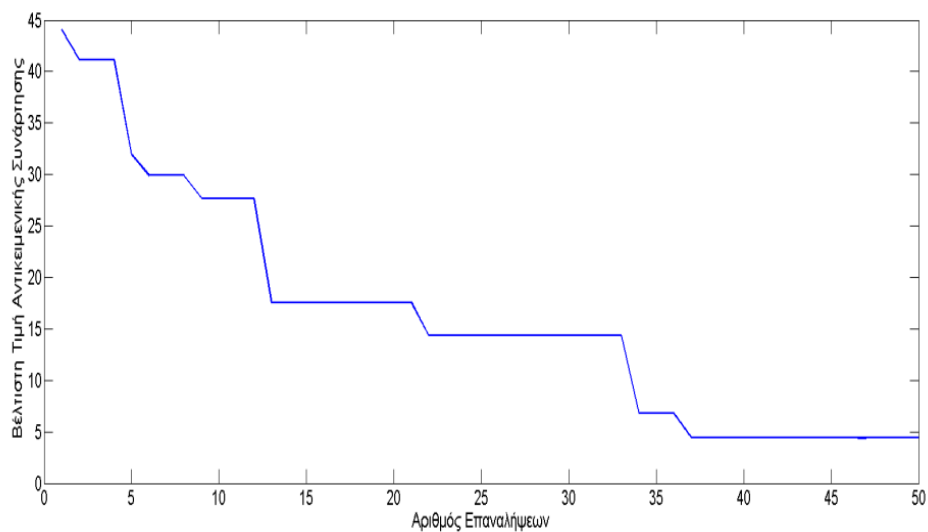
Σχήμα 6.3 Εξέλιξη Βέλτιστης Τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για Συνάρτηση Sphere

### Rosenbrock



Σχήμα 6.4 Εξέλιξη Βέλτιστης Τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για Συνάρτηση Rosenbrock

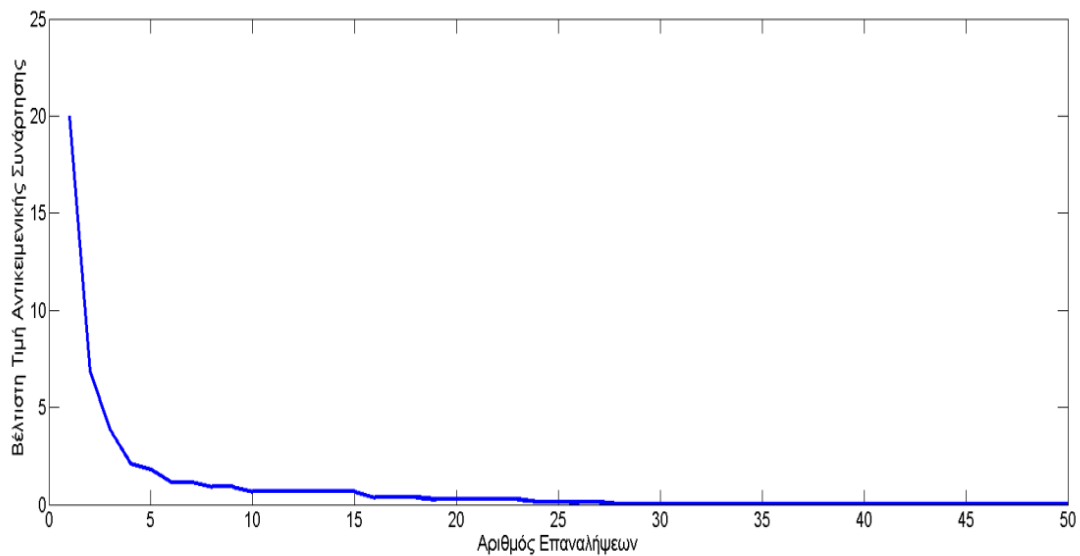
## Rastrigin



Σχήμα 6.5 Εξέλιξη Βέλτιστης Τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για Συνάρτηση Rastrigin

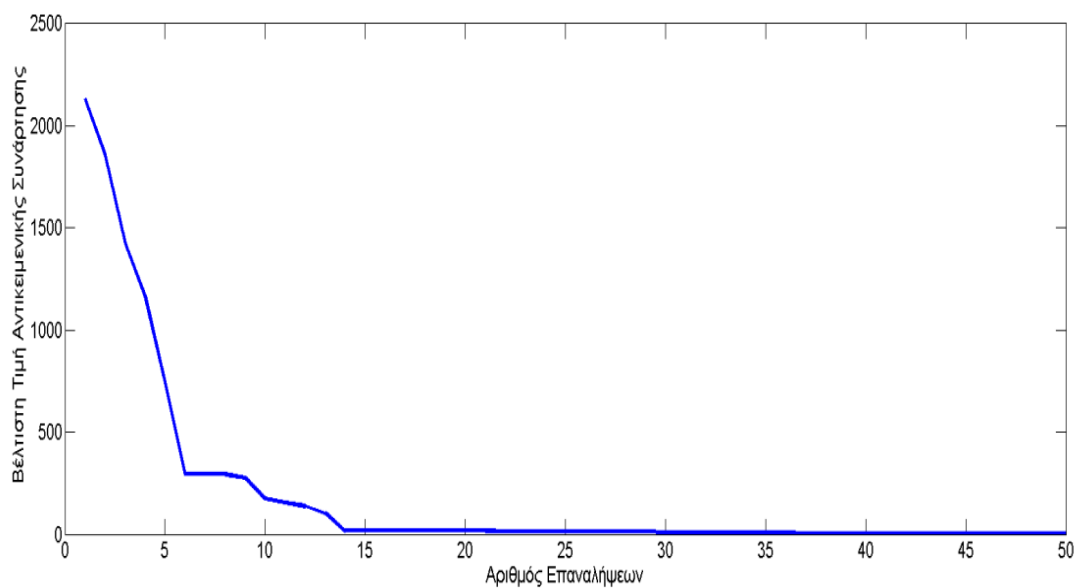
## **PSO τοπολογία Αστέρα**

### Sphere



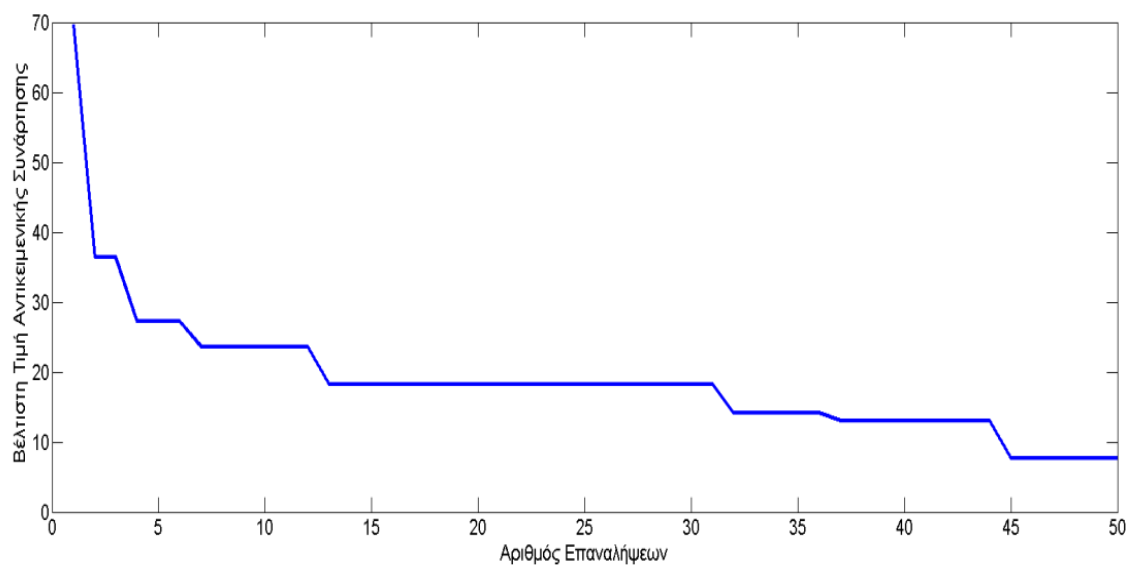
Σχήμα 6.6 Εξέλιξη Βέλτιστης Τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για Συνάρτηση Sphere

## Rosenbrock



Σχήμα 6.7 Εξέλιξη Βέλτιστης Τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για Συνάρτηση Rosenbrock

## Rastrigin



Σχήμα 6.8 Εξέλιξη Βέλτιστης Τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για Συνάρτηση Rastrigin

Όπως φαίνεται, ο αλγόριθμος και με τις δύο τοπολογίες καταφέρνει με επιτυχία να βελτιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση.

Για όλες τις συναρτήσεις που ελέγξαμε η ελάχιστη τιμή τους είναι το μηδέν.

Στη συνέχεια εκτελέσαμε τους δύο αλγόριθμους βελτιστοποίησης σε δύο διαφορετικά πεδία ορισμού, διατηρώντας σταθερό τον μέγιστο αριθμό



επαναλήψεων και τον πληθυσμό. Τα αποτελέσματα για 10 εκτελέσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Αρχικά ορίζουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου:

$$Nt = 50$$

$$popsize = 35$$

$$lb = [-0,5 | -0,4 | -0,3 | -1,2 | -0,9]$$

$$ub = [0,5 | 0,2 | 0,8 | 1,6 | 0,8]$$

Τα παραπάνω όρια, βρίσκονται γύρω από το βέλτιστο σημείο των συναρτήσεων Sphere και Rastrigin, που είναι το σημείο  $[0, 0, 0, 0, 0]$ , και περιλαμβάνουν ένα σχετικά μικρό πεδίο ορισμού. Αποφασίσουμε να έχουμε ένα πεδίο ορισμού που είναι διαφορετικό για κάθε διάσταση, ώστε να μην υπάρχει συμμετρία. Προσομοιώνουμε έτσι καλύτερα το πραγματικό πρόβλημα που θα κληθεί να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος στη συνέχεια.

Για την περίπτωση της συνάρτησης αναφοράς Rosenbrock, χρησιμοποιήσαμε διαφορετικά άνω και κάτω όρια για τον αλγόριθμο ώστε να περιλαμβάνουν το βέλτιστο που βρίσκεται στο σημείο  $[1, 1, 1, 1, 1]$ . Τα όρια αυτά υπολογίστηκαν από τα παραπάνω όρια, με την προσθήκη της μονάδας, ώστε να μετατοπιστεί με τον ίδιο τρόπο το «κέντρο». Προέκυψαν έτσι τα όρια:

$$lb = [0,5 | 0,6 | 0,7 | -0,2 | 0,1]$$

$$ub = [1,5 | 1,2 | 1,8 | 2,6 | 1,8]$$

Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του κώδικα για 10 φορές, για τα πεδία ορισμού που παρουσιάστηκαν:

PSO Circle			
	Sphere	Rosenbrock	Rastrigin
1	0,000173	0,059730	0,091657
2	0,000011	0,010953	0,064873
3	0,000078	0,028652	0,026906
4	0,000031	0,020082	0,055029
5	0,000017	0,049704	0,007945
6	0,000127	0,030290	0,024048
7	0,000101	0,016973	0,021039
8	0,000077	0,117121	0,013501
9	0,000035	0,011985	0,149045
10	0,000075	0,047011	0,182605
<b>M.O.</b>	0,0000725	0,0392501	0,0636648

Πίνακας 6-1 Βέλτιστές Τιμές Αντικειμενικής Συνάρτησης που Βρέθηκαν

PSO star			
	Sphere	Rosenbrock	Rastrigin
1	0,000035	0,030906	0,002473
2	0,000004	0,012498	0,003668
3	0,000018	0,001655	0,995217
4	0,000028	0,157681	0,002527
5	0,000006	0,159510	0,000688
6	0,000008	0,153494	0,001086
7	0,000012	0,158217	0,005404
8	0,000001	0,010699	0,002712
9	0,000038	0,030008	0,996419
10	0,000006	0,009827	0,001797
<b>M.O.</b>	0,0000156	0,0724495	0,2011991

Πίνακας 6-2 Βέλτιστές Τιμές Αντικειμενικής Συνάρτησης που Βρέθηκαν

Οι βέλτιστη τιμή των τριών συναρτήσεων αναφοράς είναι το μηδέν.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν προκύπτει ότι:

- Για τη συνάρτηση **Sphere** και οι δύο τοπολογίες προσεγγίζουν με εξαιρετική ακρίβεια το ολικό βέλτιστο. Η τοπολογία αστέρα, το προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια κάτι που πιθανόν οφείλεται στο ότι συγκλίνει πιο γρήγορα, λόγω της ταχύτερης μετάδοσης πληροφορίας μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού.
- Για τη συνάρτηση **Rosenbrock** οι δύο τοπολογίες έδωσαν και πάλι εξαιρετικά αποτελέσματα, πολύ κοντά στο ολικό βέλτιστο. Στην περίπτωση αυτή η τοπολογία κύκλου έδωσε ένα ελαφρώς καλύτερο αποτέλεσμα, σε σχέση με την τοπολογία αστέρα. Η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα της συνάρτησης δίνει ένα πλεονέκτημα στις περιπτώσεις όπου η αναζήτηση είναι όσο το δυνατόν πιο καθολική. Παρατηρείται τέλος και μια διαφορά στην κατανομή των αποτελεσμάτων, για τις δύο τοπολογίες. Στη δεύτερη περίπτωση οι μέγιστη και ελάχιστη τιμή που βρέθηκε απέχουν σαφώς περισσότερο μεταξύ τους από ότι στην πρώτη περίπτωση. Αυτό πιθανόν δείχνει ότι η πιο καθολική αναζήτηση στην τοπολογία κύκλου δίνει ένα πιο σταθερό αποτέλεσμα.
- Για τη συνάρτηση **Rastrigin** τα αποτελέσματα για την τοπολογία κύκλου είναι και πάλι εξαιρετικά, ενώ τα αποτελέσματα από την τοπολογία αστέρα είναι ικανοποιητικά, αλλά έχουν πλέον σημαντικό σφάλμα. Η δομή της τοπολογίας κύκλου φαίνεται να πλεονεκτεί και σε αυτή την περίπτωση, όπου το πρόβλημα έχει γίνει ακόμα πιο «δύσκολο» περιλαμβάνοντας πάρα πολλά τοπικά μέγιστα και ελάχιστα. Στην περίπτωση αυτή επίσης όμως, η τοπολογία αστέρα δίνει για παράδειγμα στην εκτέλεση 5, αποτέλεσμα με τεράστια ακρίβεια, κάτι που δεν επιτυγχάνεται με την τοπολογία κύκλου. Μια πιο λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων μας δείχνει ότι στην πραγματικότητα τα περισσότερα από τα αποτελέσματα στη δεύτερη περίπτωση είναι πολύ πιο ακριβή σε σχέση με την πρώτη, υπάρχουν όμως και κάποια εξαιρετικά άστοχα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι που έδωσαν το υψηλότερο μέσο όρο. Στις περιπτώσεις αυτές φαίνεται ο αλγόριθμος να έχει συγκλίνει σε λάθος σημείο. Αντίθετα στην πρώτη περίπτωση φαίνεται να γίνεται σωστή σύγκλιση σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά το γεγονός ότι η τοπική αναζήτηση είναι περιορισμένη δεν επιτρέπει να βρεθούν εξαιρετικά ακριβείς τιμές του ελάχιστου σημείου της συνάρτησης.

Για την καλύτερη εξέταση της λειτουργίας του κώδικα που αναπτύχθηκε, εξετάστηκε η λειτουργία του, με πεδίο ορισμού το οποίο είναι 10 φορές μεγαλύτερο από πριν. Τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν σταθερά, ώστε η σύγκριση να είναι πιο εύκολη. Τα διανύσματα άνω και κάτω ορίων τώρα ταυτίζονται για όλες τις συναρτήσεις:

$$lb = [-5 \mid -4 \mid -3 \mid -12 \mid -9]$$

$$ub = [5 \mid 2 \mid 8 \mid 16 \mid 8]$$

Ο λόγος που δεν έχουμε διαφορετικά όρια για τη συνάρτηση Rosenbrock είναι ότι στο πεδίο ορισμού περιλαμβάνεται τώρα το σημείο ολικού ελάχιστου.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο διαφορετικές τοπολογίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

PSO circle			
	Sphere	Rosenbrock	Rastrigin
1	0,016411	0,946258	6,782992
2	0,004899	4,211184	4,338817
3	0,005063	0,901358	7,754963
4	0,004213	0,826086	6,654769
5	0,002845	2,847130	5,267608
6	0,005795	2,038230	6,841272
7	0,026541	7,116055	8,577118
8	0,015485	4,765239	4,098698
9	0,02039	1,471923	8,397747
10	0,010042	1,492351	8,613734
<b>M.O.</b>	0,0111684	2,6615814	6,7327718

Πίνακας 6-3

PSO star			
	Sphere	Rosenbrock	Rastrigin
1	0,000658	0,27234	3,486993
2	0,004426	1,762557	4,422836
3	0,000864	12,546387	4,064769
4	0,002078	22,326682	6,929767
5	0,002287	1,707100	10,450064
6	0,002251	1,071086	2,640881
7	0,000429	15,184531	6,335532
8	0,000871	63,168251	5,064785
9	0,00038	3,029417	4,383265
10	0,000679	14,088558	4,209357
<b>M.O.</b>	0,0014923	13,5156909	5,1988249

Πίνακας 6-4

Τα αποτελέσματα για αυτό το πολύ μεγαλύτερο πεδίο ορισμού διαφέρουν σημαντικά από προηγουμένως ιδιαίτερα για τις δύο πιο δύσκολες συναρτήσεις.

Για το πρόβλημα Sphere, στην πραγματικότητα και πάλι και οι δύο συναρτήσεις δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα. Το γεγονός ότι το πρόβλημα παρουσιάζει ένα μόνο ελάχιστο διευκολύνει πάρα πολύ την επιτυχημένη επίλυσή του.

- Για τη συνάρτηση **Rosenbrock**, οι δύο τοπολογίες δίνουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Ο μέσος όρος για την τοπολογία κύκλου είναι περίπου 5 φορές μικρότερος από την περίπτωση της τοπολογίας αστέρα. Βέβαια δεν πρέπει να παραβλέπουμε ότι οι αρχικές τιμές κυμαίνονται στα επίπεδα των 2500 για ένα τόσο μεγάλο πεδίο ορισμού, οπότε έχουμε μια σημαντικότερη μείωση και στις δύο περιπτώσεις. Η ταχύτερη σύγκλιση στην δεύτερη περίπτωση οδηγεί σε κάποια αποτελέσματα τα οποία είναι πολύ μακριά από το επιθυμητό κάτι που δείχνει σύγκλιση πιθανόν σε λάθος περιοχή. Για να πετύχουμε ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να αυξήσουμε σημαντικά τον πληθυσμό ώστε να καλύπτει καλύτερα το πεδίο ορισμού, κάτι που βέβαια αυξάνει και το υπολογιστικό κόστος.
- Για τη συνάρτηση **Rastrigin**, οι δύο τοπολογίες δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Η τοπολογία αστέρα δίνει ένα ελαφρώς καλύτερο αποτέλεσμα, όμως όπως και σε άλλες περιπτώσεις τα αποτελέσματα που δίνει είναι πιο ασταθή, και κυμαίνονται σημαντικά, αντίθετα με τα αποτελέσματα της τοπολογίας κύκλου. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, κάτι που μάλλον δείχνει ότι υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερο αρχικό πληθυσμό και στις δύο περιπτώσεις.

### 6.3 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύθηκε διεξοδικά η ανάπτυξη του κώδικα βελτιστοποίησης. Παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά του και στη συνέχεια έγινε ανάλυση της λειτουργίας του. Στην ανάλυση αυτή παρουσιάστηκε η δυνατότητά του να βρίσκει βέλτιστες λύσεις μέσω διαγραμμάτων. Τέλος παρουσιάστηκε η επίδοση του αλγορίθμου για ένα μεγαλύτερο σύνολο εκτελέσεων και σε ποικίλες συνθήκες, ώστε να αποδειχθεί η καλή του λειτουργία αλλά και να δοθεί έμφαση στα προβλήματα που μπορεί να αντιμετωπίσει, καθώς και στη διαφορετική συμπεριφορά των τοπολογιών που επιλέχθηκαν.



## Κεφάλαιο 7

### Διαδικασία Βελτιστοποίησης και Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές στις οποίες βασίστηκε η βελτιστοποίηση. Θα παρουσιαστεί και θα τεκμηριωθεί η χρήση της συνάρτησης κόστους, με βάση την οποία έγινε η βελτιστοποίηση καθώς και οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν να βελτιστοποιηθούν. Στη συνέχεια θα αιτιολογηθεί η επιλογή των βασικών χαρακτηριστικών του αλγορίθμου, όπως το μέγεθος του πληθυσμού, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, καθώς και το πεδίο ορισμού των μεταβλητών γεωμετρίας. Επίσης, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναλυτικά και θα γίνει σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της αρχικής μηχανής. Τέλος θα συμπεριληφθεί μια σύντομη ανάλυση της ευρωστίας των λύσεων που βρέθηκαν.

#### 7.1 Κατάστρωση και Επεξήγηση Αντικειμενικής Συνάρτησης

Πριν ξεκινήσει η εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης πρέπει να οριστεί η αντικειμενική συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή εκφράζει ένα μέγεθος το οποίο πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από τις μεταβλητές γεωμετρίας. Στην περίπτωση μας αποφασίστηκε ότι η βελτιστοποίηση έχει στόχο την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, εκφράζοντας έτσι ουσιαστικά μια συνάρτηση κόστους. Κάποια από τις πιο συνηθισμένα χαρακτηριστικά αξιολόγησης μια μηχανής είναι:

- **Ροπή Εξόδου (T)**, η οποία εκφράζει τη μέση ροπή που παράγει η μηχανή στην κατάσταση λειτουργίας που εξετάζουμε.
- **Κυμάτωση της Ροπής Εξόδου ( $T_{ripple}$ )**, η οποία εκφράζεται ως ποσοστό της ροπής εξόδου και υπολογίζει τη μεταβλητότητα της ροπής στη διάρκεια μιας περιστροφής.
- **Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD)**, η οποία εκφράζεται και αυτή ως ποσοστό και υπολογίζει την συνολική ενέργεια που περιέχουν οι αρμονικές ΗΕΔ της μηχανής σε σχέση με την ενέργεια της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας.
- **Απόδοση (Eff)**, η οποία εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας εισόδου που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στον άξονα της μηχανής.

Στην περίπτωση μας αποφασίστηκε να συνδυαστούν όλα τα παραπάνω κύρια χαρακτηριστικά σε μία μόνο μονοκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση. Για να είναι πιο σαφής η λειτουργία της συνάρτησης αυτής, προχωρήσαμε στην κανονικοποίηση των μεγεθών που αναφέρονται θεωρώντας ως τιμές αναφοράς, τις τιμές των μεγεθών αυτών για την αρχική σχεδίαση της μηχανής. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

Χαρακτηριστικά Αρχική Σχεδίασης	
Ροπή Εξόδου -T	36,17Nm
Κυμάτωση Ροπής Εξόδου - $T_{ripple}$	2.59%
Ολική Αρμονική Παραμόρφωση - THD	11.94%
Συνολική Απόδοση - eff	81.03%

Πίνακας 7-1

Προκύπτει έτσι μια γενική σχέση για την αντικειμενική συνάρτηση:

$$Result = A \cdot \frac{36.17}{T} + B \cdot \frac{T_{ripple}}{2.59} + \Gamma \cdot \frac{THD}{11.94} + \Delta \cdot \frac{81.03}{eff} \quad (7.1)$$

Όπως φαίνεται, το αποτέλεσμα για την περίπτωση της αρχικής σχεδίασης ισούται με ένα. Επειδή ορισμένες από τις μεταβλητές θέλουμε να μειωθούν όσο το δυνατό περισσότερο, τις βάζουμε στον αριθμητή του αντίστοιχου κλάσματος ( $T_{ripple}$ , THD), αντίθετα όσες θέλουμε να αυξηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο κατά τη βελτιστοποίηση τις βάζουμε στον παρονομαστή (T, eff), ώστε η αύξησή τους, να οδηγεί σε μείωση του αντιστοίχου κλάσματος και συνεπώς του συνολικού αποτελέσματος της αντικειμενικής συνάρτησης. Εκτός από αυτά τα δεδομένα πρέπει να επιλέξουμε την βαρύτητα της κάθε μίας μεταβλητής στο συνολικό αποτέλεσμα. Η βαρύτητα της κάθε μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα ορίζεται από τους συντελεστές A, B, Γ, Δ.

Οι συντελεστές που επιλέγουμε είναι:

$$A = 35\%, B = 10\%, \Gamma = 20\%, \Delta = 35\% \quad (7.2)$$

Οι τιμές των συντελεστών A, Δ επιλέχθηκαν ίσες μεταξύ τους, γιατί πρόκειται για μεγέθη που ουσιαστικά όταν το ένα αυξάνεται, το άλλο μειώνεται, για μια μηχανή συγκεκριμένων διαστάσεων. Επίσης τους δόθηκε μεγάλη βαρύτητα αφού αποτελούν τα σημαντικότερα στοιχεία επίδοσης. Οι άλλοι δύο συντελεστές επιλέχθηκαν να έχουν σημαντικά μικρότερη βαρύτητα. Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης ήταν αρχικά αρκετά αυξημένος, οπότε αποφασίστηκε να μειωθεί αυτός κατά προτεραιότητα.

## 7.2 Επιλογή Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών για Βελτιστοποίηση

Από το σύνολο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που ρυθμίζονται μέσω του προγράμματος σχεδίασης πρέπει να επιλέξουμε ένα υποσύνολο οι οποίες θα μπορούν να μεταβληθούν κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Η ανάγκη αυτή προκύπτει για πολλούς λόγους:



- Οι μεταβλητές των εξωτερικών διαστάσεων ( $L$ ,  $R_s$ ,  $R_o$ ,  $W_t$ ) δεν μπορούν να αλλάξουν λόγω έλλειψης χώρου στη συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως. Είναι αλήθεια ότι αυτές ουσιαστικά καθορίζουν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της μηχανής και αρκετές έχουν άμεση και καθοριστική σχέση με διάφορα μεγέθη, ιδιαίτερα με τη ροπή και την απόδοση. Μια βελτιστοποίηση που θα περιλαμβάνει αυτή την ομάδα μεταβλητών θα έχει στόχο την παραγωγή μιας νέας γεωμετρίας, στην οποία άλλες μεταβλητές θα έχουν ελάχιστη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.
- Οι μεταβλητές που για αντικειμενικούς λόγους δεν μπορούν να αλλάξουν ( $D$ ,  $W_m$ ). Το πάχος του διακένου τίθεται στην τιμή που είναι η μικρότερη δυνατή από κατασκευαστικής άποψης. Το πάχος του μαγνήτη αντιστοιχεί σε τυπική τιμή, που κυκλοφορεί εμπορικά. Οπότε θα είναι δύσκολο και με υψηλό κόστος να μεταβληθεί και μάλιστα με ακρίβεια όπως θα θέλαμε εμείς.

Έτσι απομένει ένα ορισμένο σύνολο μεταβλητών γεωμετρίας οι οποίες είναι διαθέσιμες για βελτιστοποίηση. Οι μεταβλητές που αποφασίστηκε να βελτιστοποιηθούν είναι ουσιαστικά αυτές που σχετίζονται με τη σχεδίαση του δοντιού του στάτη καθώς και η γωνία του μαγνήτη. Δηλαδή οι:

Μεταβλητές Γεωμετρίας για Βελτιστοποίηση	
$\Theta_m$	Η γωνία του μαγνήτη, ως ποσοστό της συνολικής γωνίας του πόλου
$L_t$	Μήκος των δοντιών του στάτη, σε σχέση με το συνολικό πάχος του στάτη
$k_{tw}$	Πλάτος δοντιού του στάτη, σε σχέση με το συνολικό πλάτος που αντιστοιχεί σε μια αύλακα μαζί με το δόντι
$k_y$	Πλάτος της κεφαλής του δοντιού, σε σχέση με το πάχος του δοντιού
$k_x$	Πάχος του δοντιού σε σχέση με το συνολικό μήκος του

Πίνακας 7-2

Οι μεταβλητές αυτές αφορούν ένα μέρος της σχεδίασης που με βάση τις τεχνικές προκαταρκτικής σχεδίασης δεν μπορούν να προσδιοριστούν ικανοποιητικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται εμπειρικά καθιερωμένες σχεδιάσεις, οι οποίες όμως μπορεί να μην έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα σε σχέση με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

### 7.2.1 Πεδίο Ορισμού Μεταβλητών Γεωμετρίας

Ο καθορισμός του πεδίου ορισμού, αποτελεί σημαντική διαδικασία ώστε να διεξαχθεί με επιτυχία η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Το κυριότερο πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι ότι κάποιοι συνδυασμοί μεταβλητών οδηγούν σε

γεωμετρίες που δεν ορίζονται. Το γεγονός αυτό κατά την επαναληπτική εκτέλεση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης οδηγεί σε αιφνίδια διακοπή του αλγορίθμου και συνεπώς σε αποτυχία του.

Ένα παράδειγμα του πως μπορούμε να οδηγηθούμε σε ένα τέτοιο πολύ σοβαρό πρόβλημα αδυναμίας ορισμού της γεωμετρίας θα προέκυπτε αν για παράδειγμα, το πλάτος της κεφαλής που ορίζεται για κάθε δόντι ήταν εξαιρετικά μεγάλο, με αποτέλεσμα δύο δόντια να επικαλυφθούν μεταξύ τους. Αν συμβεί αυτό τότε θα δημιουργηθεί μια περιοχή όπου δεν θα έχει οριστεί κανένα υλικό. Ο λόγος είναι ότι μέσω του κώδικα ορίζουμε τα υλικά σε αυτή την περίπτωση στο μέσο του κάθε δοντιού. Αν δεν οριστεί όμως μια πλήρης γεωμετρία, όπου σε όλες τις περιοχές εντός των οριακών συνθηκών θα έχει οριστεί το μοναδικό υλικό από το οποίο θα αποτελούνται, τότε δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός των μαγνητικών πεδίων από το πρόγραμμα (ΛΠΣ). Συνεπώς η εκτέλεση του αλγορίθμου διακόπτεται και η βελτιστοποίηση αποτυγχάνει.

Με σκοπό να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα, αλλά και με στόχο να περιοριστεί κάπως το πεδίο ορισμού στα πλαίσια μιας εφικτής γεωμετρίας που να έχει νόημα ορίστηκαν τα παρακάτω όρια:

Όνομα Μεταβλητής	Κάτω Όριο	Άνω Όριο
$\Theta_m$	0,35	0,99
$L_t$	0,40	0,85
$k_{tw}$	0,20	0,55
$k_y$	1,05	1,71
$k_x$	0,02	0,15

Πίνακας 7-3

- Το άνω όριο για τη γωνία του μαγνήτη είναι το μέγιστο δυνατό, με δεδομένο ότι πρόκειται για κανονικοποιημένη μεταβλητή. Το κάτω όριο ορίζεται κάπως πιο στενά από το ελάχιστο δυνατό, αλλά και πάλι δίνεται ικανοποιητικό περιθώριο, σε σχέση με την αρχική σχεδίαση που περιελάμβανε γωνία ίση με 85%.
- Τα όρια για το μήκος και το πλάτος των δοντιών δίνονται με τη μεγαλύτερη δυνατή ευρύτητα. Φροντίζουμε όμως παράλληλα να έχουμε γεωμετρίες που βρίσκονται εντός των καλών πρακτικών σχεδίασης, ώστε να μην εξερευνούμε περιοχές που θα δίνουν σίγουρα εξαιρετικά κακές σχεδιάσεις από άποψη επιδόσεων και ποιότητας.
- Τα όρια για τα χαρακτηριστικά της κεφαλής δοντιού, τέθηκαν έτσι ώστε με το μέγιστο δυνατό πλάτος του σώματος του δοντιού και το μέγιστο πλάτος

της κεφαλής, γειτονικά δόντια να μην επικαλύπτονται. Το πάχος του δοντιού ορίστηκε μέσα στα όρια μιας λειτουργικής σχεδίασης όπως και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά. Τα κάτω όρια και στις δύο περιπτώσεις θα μπορούσαν να είναι και 1,00 και 0,00, κάτι τέτοιο όμως θα δημιουργούσε σοβαρό πρόβλημα, αφού θα ήταν αδύνατος ο ορισμός κεφαλής δοντιού, κάτι που όμως είναι απαραίτητο να ορίζεται ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα μη οριζόμενων μεταβλητών κατά τη σχεδίαση.

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα, από όλα τα παραπάνω παραδείγματα έγινε προσπάθεια να επεκταθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το πεδίο ορισμού ώστε να επιτευχθεί μια ευρύτατη αναζήτηση. Φροντίσαμε βέβαια να δίνουμε στις μεταβλητές τιμές που να έχουν νόημα.

### **7.3 Επιλογή Πληθυσμού και Αριθμού Επαναλήψεων**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως, τα δύο αυτά μεγέθη αποτελούν σημαντικούς παράγοντες καθορισμού της λειτουργίας του αλγορίθμου. Όπως φάνηκε και από τη δοκιμαστική εκτέλεση του αλγορίθμου στο προηγούμενο κεφάλαιο αν ο πληθυσμός ή ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μικρός, τότε αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να μην συγκλίνει ή να συγκλίνει σε περιοχή που δεν είναι βέλτιστη.

#### **7.3.1 Μέγεθος Πληθυσμού**

Ο ορισμός του κατάλληλου πληθυσμού είναι ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν όλοι όσοι χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο αλγόριθμο. Η περίπτωση μας είναι ιδιαίτερη κυρίως γιατί το υπολογιστικό κόστος κάθε επανάληψης είναι εξαιρετικά μεγάλο, της τάξης των μερικών ωρών. Από την άλλη πλευρά έχουμε επιλέξει ένα μικρό αριθμό διαστάσεων για το πρόβλημα που εξετάζουμε κάτι που μειώνει τις απαιτήσεις σε πολύ μεγάλο πληθυσμό. Προκύπτει έτσι η ανάγκη να βρεθεί ένας συμβιβασμός που θα επιτρέπει να γίνεται ικανοποιητική σύγκλιση, χωρίς όμως τεράστιο υπολογιστικό κόστος.

Μία πρόταση στη δημιουργία ενός standard για τη μέθοδο PSO, προτείνει ότι ο αριθμός των ατόμων δεν χρειάζεται να είναι πάρα πολύ μεγάλος. Αρκεί ένα αριθμός μεταξύ 20 και 100[45]. Μια αύξηση του αριθμού των ατόμων δίνει συνήθως μια πολύ μικρή βελτίωση στην απόδοση του αλγορίθμου[46]. Μάλιστα στη συγκεκριμένη δημοσίευση υπάρχει μια εξαιρετικά λεπτομερής ανάλυση για πολλές συναρτήσεις αναφοράς και την αντίστοιχη συμπεριφορά του αλγορίθμου.

- Με βάση το παραπάνω δεδομένο ένας προτεινόμενος πληθυσμός θα μπορούσε να είναι μεγέθους 40, όπως προτείνεται[47].

Από την άλλη πλευρά έχει προταθεί επίσης μια εμπειρική σχέση με βάση την οποία μπορεί να υπολογιστεί ένα προτεινόμενος πληθυσμός, με βάση τον αριθμό των διαστάσεων του προβλήματος που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί[48].

$$popsize = 10 + 2\sqrt{D} = 15 \quad (7.3)$$

Όπου D, ο αριθμός των διαστάσεων του προβλήματος.

Με βάση αυτές τις δύο διαφορετικές μεθοδολογίες που προτείνονται καταλήγουμε να επιλέξουμε ένα πληθυσμό που ισούται με:

$$popsize = 35$$

Ο πληθυσμός αυτό είναι πιθανόν αρκετά μεγάλος, αλλά μας εξασφαλίζει ότι θα έχουμε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα θα πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση με δύο τρόπους και αν συγκλίνουν και οι δυο στην ίδια περιοχή, τότε μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι ο πληθυσμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ικανοποιητικός.

### 7.3.2 Αριθμός Επαναλήψεων

Το μέγεθος αυτό ορίζεται κατά προσέγγιση με βάση και την προηγούμενη εμπειρία. Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια σειρά από πειράματα με τελικό αριθμό επαναλήψεων ίσο με 50. Τα αποτελέσματα για «μικρό» πεδίο ορισμού ήταν πολύ ικανοποιητικά. Συνεπώς επιλέγουμε:

$$N_t = 50$$

Οι επιλογές που κάναμε μένει να επιβεβαιωθούν από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

## 7.4 Παρουσίαση Σύγκλισης του Αλγόριθμου

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των στοχαστικών αλγορίθμων είναι η ικανότητά τους να συγκλίνουν σε μία λύση, η οποία είναι μάλιστα η βέλτιστη στο πεδίο ορισμού τους. Κατά την σχεδίαση και ανάπτυξη του κώδικα που υλοποιεί τον αλγόριθμο PSO, δόθηκε μεγάλη σημασία στη συλλογή στοιχείων που δίνουν μια σαφή εικόνα για την εξέλιξη της βελτιστοποίησης.

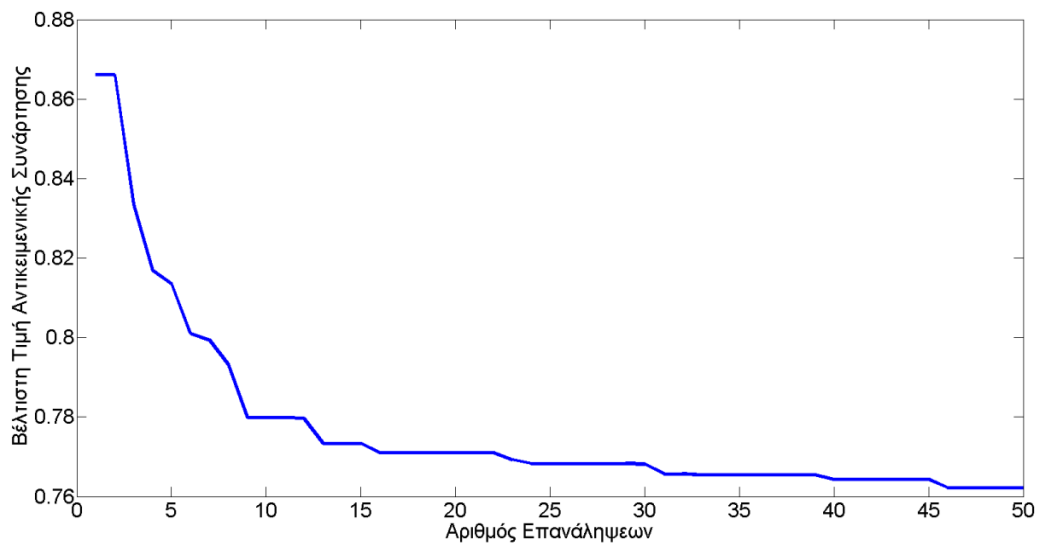
Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να γίνεται επιστροφή από την αντικειμενική συνάρτηση στο καλούν πρόγραμμα, εκτός από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και των τεσσάρων μεγεθών που οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα. Τα μεγέθη αυτά αποθηκεύονται σε πίνακα για κάθε άτομο σε κάθε επανάληψη. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό βέβαια του αλγορίθμου είναι η εξέλιξη του διανύσματος θέσης του κάθε ατόμου. Οπότε δημιουργήθηκε ένας ακόμα πίνακας όπου αποθηκεύονται όλα τα διανύσματα θέσης για όλα τα άτομα σε κάθε επανάληψη.

Με τον τρόπο αυτό έχουμε αναλυτική πληροφορία για όλη την εξέλιξη του αλγόριθμου και για το πώς κατέληξε στην επιλογή που τελικά έγινε.

#### 7.4.1 Σύγκλιση για τοπολογία Κύκλου και Αστέρα

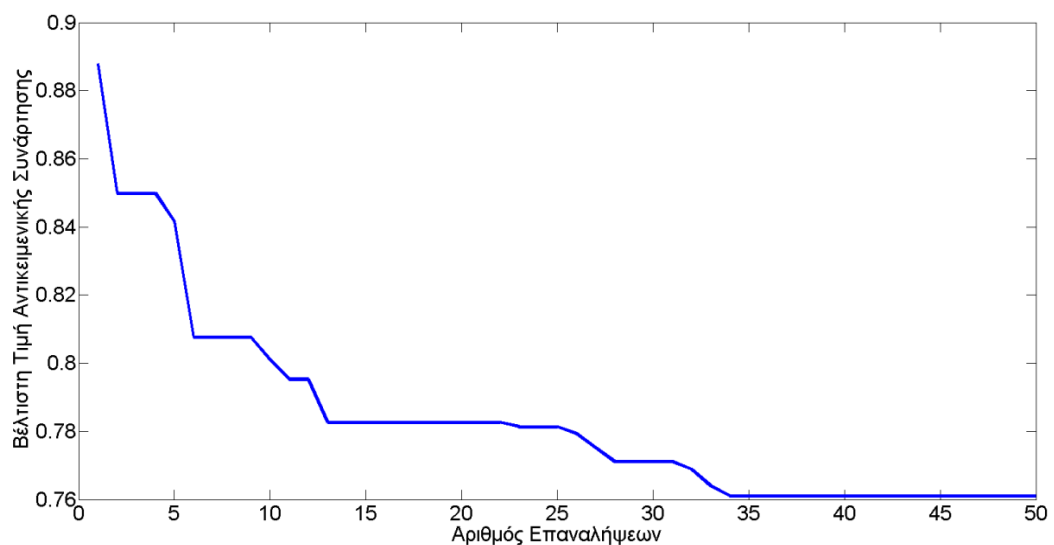
Αρχικά θα παρουσιαστεί η πορεία της σύγκλισης στη βέλτιστη τιμή για την περίπτωση των δύο διαφορετικών τοπολογιών που χρησιμοποιήθηκαν.

##### Σύγκλιση Τοπολογία Κύκλου



Σχήμα7.1 Εξέλιξη Ολικού Βέλτιστου τοπολογία Κύκλου

##### Σύγκλιση Τοπολογία Αστέρα

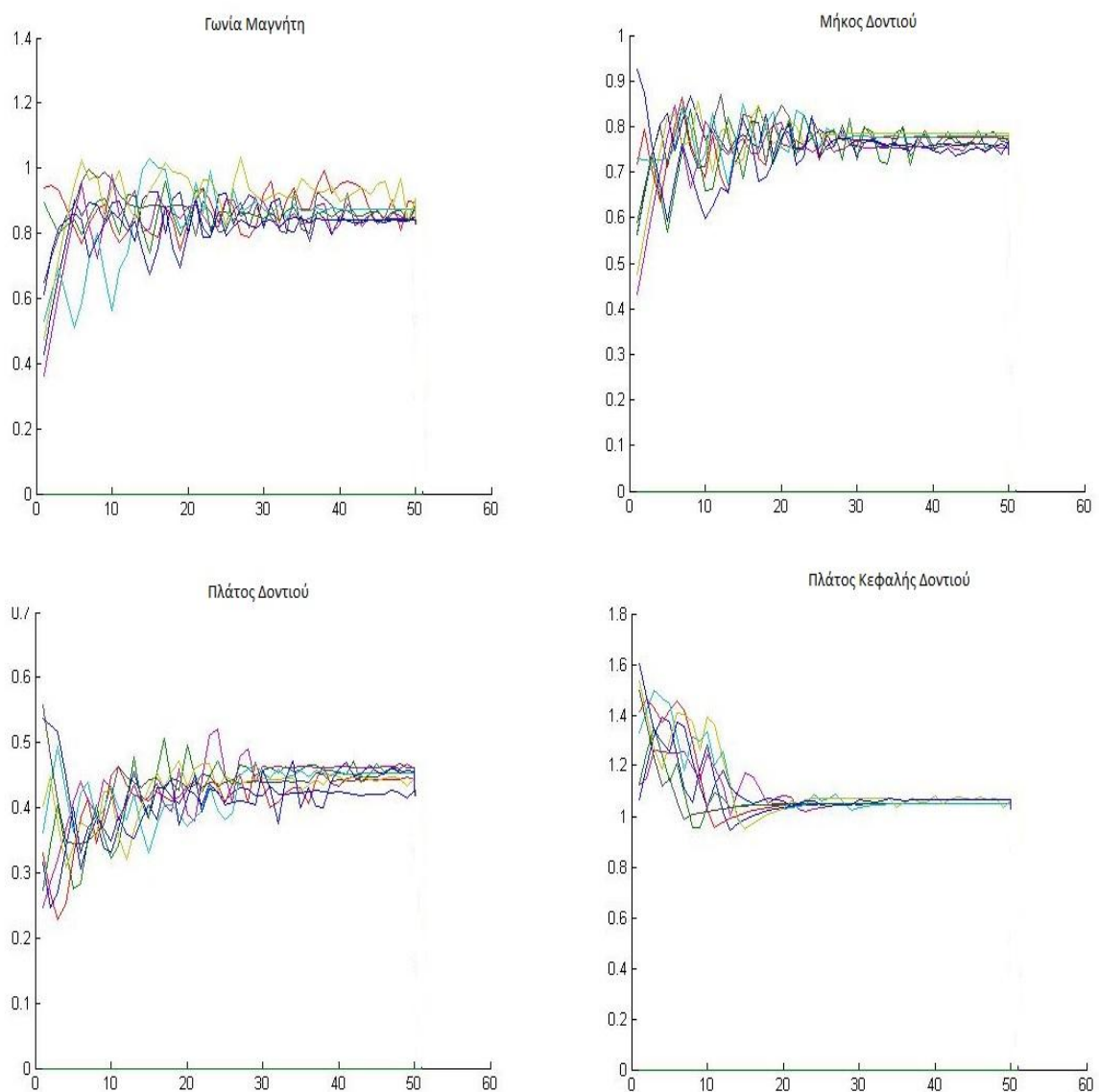


Σχήμα7.2 Εξέλιξη Ολικού Βέλτιστου τοπολογία Κύκλου

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η πορεία σύγκλισης στην περίπτωση της τοπολογίας κύκλου, είναι πιο ομαλή αλλά συνεχίζεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αντίθετα στην περίπτωση της τοπολογίας αστέρα η σύγκλιση ολοκληρώνεται πιο γρήγορα. Χαρακτηριστική είναι η εξέλιξη μεταξύ 30<sup>ης</sup> και 35<sup>ης</sup> επανάληψης όπου παρατηρείται ταχύτατη σύγκλιση λόγω της τοπικότητας της αναζήτησης, οπότε και προσεγγίζεται το ολικό βέλτιστο, οπότε στη συνέχεια δεν παρουσιάζεται περαιτέρω βελτίωση του τελικού αποτελέσματος.

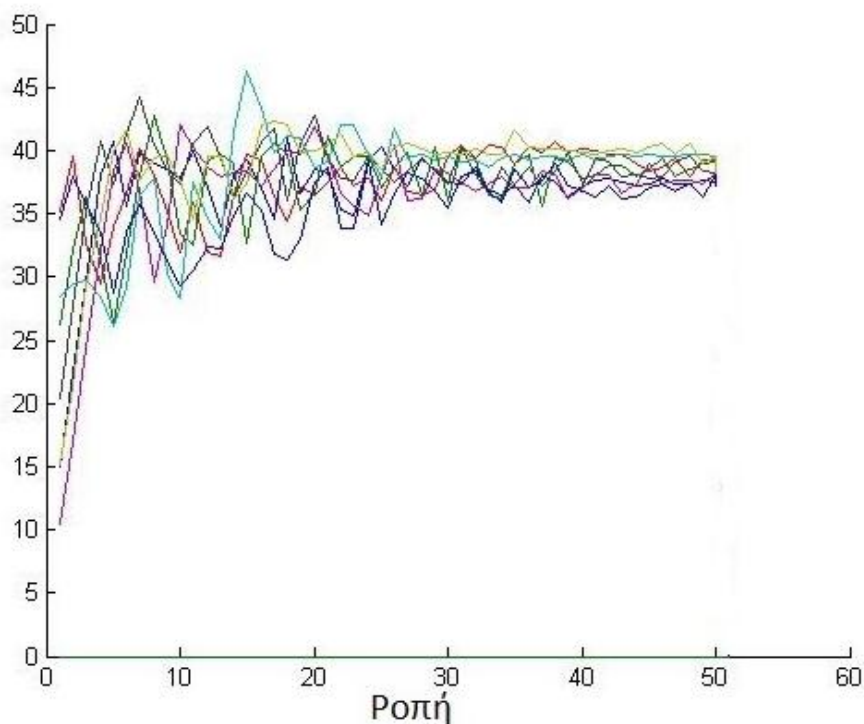
### 7.4.2 Αναλυτική Παρουσίαση Σύγκλισης

Για να καταστεί πιο σαφής η εξέλιξη του αλγορίθμου επιλέγουμε μερικά άτομα και παρουσιάζουμε την εξέλιξη των μεγεθών της γεωμετρίας τους:



Σχήμα 7.3 Εξέλιξη Γεωμετρικών Μεγεθών Διάφορων Ατόμων κατά την Εκτέλεση του Αλγορίθμου

Αντίστοιχη εξέλιξη παρουσιάζουν και τα χαρακτηριστικά της μηχανής όπως για παράδειγμα η ροπή της.



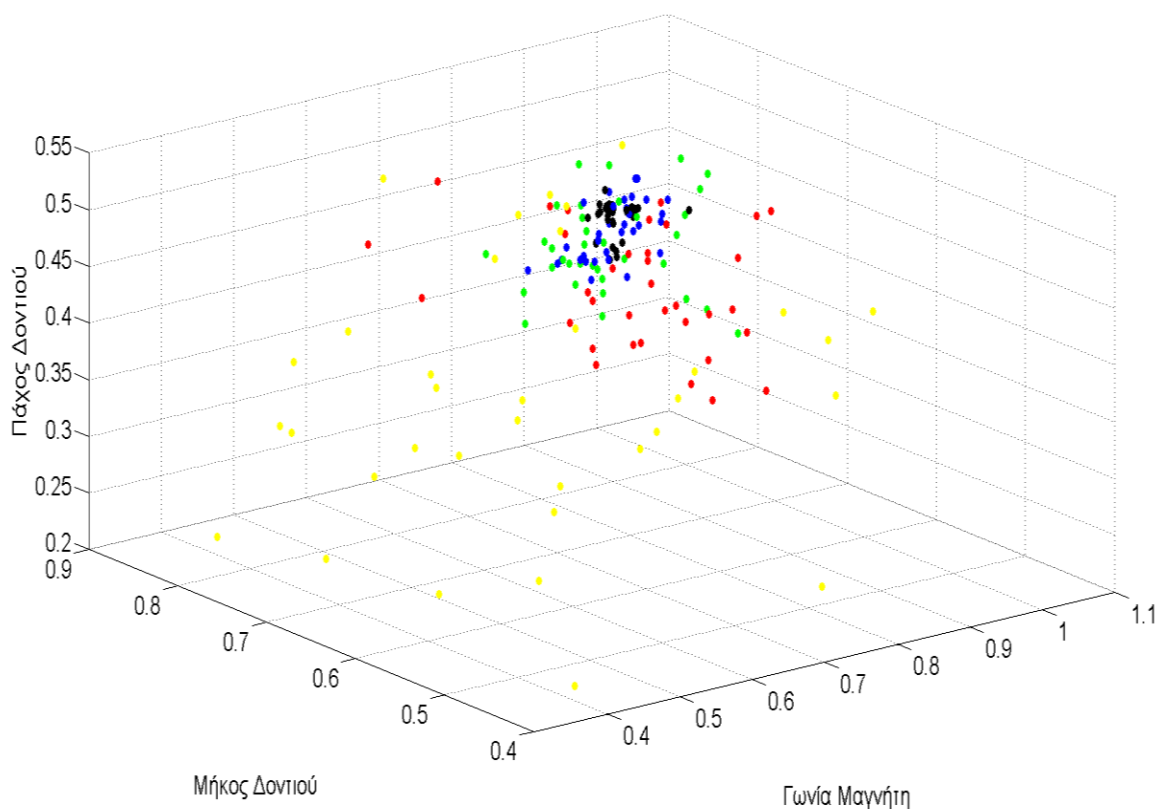
Σχήμα 7.4 Εξέλιξη Τιμής Ροπής Τυχαίων Ατόμων

Τα σχήματα που παρουσιάστηκαν προέρχονται από τα δεδομένα βελτιστοποίησης τοπολογίας κύκλου.

Από τα παραπάνω σχήματα, και κυρίως από τα σχήματα των μεταβλητών του διανύσματος θέσης, φαίνεται ότι αρχικά πράγματι πήραμε τυχαίες τιμές, αφού οι θέσεις των ατόμων απλώνονται σε μεγάλο εύρος τιμών σε όλες τις διαστάσεις. Επίσης φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα άτομα ακολουθούν μια πορεία με ταλαντώσεις οι οποίες προοδευτικά μειώνονται. Η μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων υποδηλώνει τη σύγκλιση που προκύπτει.

Έκτος όμως από τη μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων έχουμε και αλλαγή κατεύθυνσης αναζήτησης σε μία από τις περιπτώσεις. Η περίπτωση αυτή είναι του «πλάτους δοντιού» (Σχήμα 7.3). Όπως βλέπουμε αρχικά ο μέσος όρος των ταλαντώσεων βρίσκεται χαμηλότερα από το σημείο που τελικά γίνεται η σύγκλιση. Το γεγονός αυτό δείχνει την ευελιξία του αλγορίθμου που καταφέρνει παρά το γεγονός ότι αρχικά κατευθύνεται σε «λάθος» σημείο να καταλήγει τελικά σε σημείο που βελτιστοποιεί σημαντικά την αντικειμενική συνάρτηση.

Για να γίνει ακόμα πιο σαφής η σύγκλιση των ατόμων γύρω από ένα σημείο, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα τριών διαστάσεων όπου κάθε πλευρά αντιστοιχεί σε μία από τις κύριες μεταβλητές γεωμετρίας. Τα διαφορετικά χρώματα εκφράζουν τον αριθμό της επανάληψης που αντιστοιχεί το κάθε σημείο. Πιο αναλυτικά, το κίτρινο εκφράζει την πρώτη ( $1^{\eta}$ ) επανάληψη, το κόκκινο την δέκατη ( $10^{\eta}$ ), το πράσινο της εικοστή ( $20^{\eta}$ ), το μπλε την τριακοστή ( $30^{\eta}$ ) και τέλος το μαύρο την τελευταία επανάληψη ( $50^{\eta}$ ).



Σχήμα 7.5 Τρις-διάστατη Απεικόνιση Θέσης Ατόμων σε Διαφορετικές Στιγμές Εκτέλεσης του Αλγορίθμου

Όπως γίνεται απόλυτα σαφές στο τέλος της εκτέλεσης, τα μαύρα στίγματα βρίσκονται συγκεντρωμένα γύρω από μία πολύ μικρή περιοχή, σε αντίθεση με τα κίτρινα τα οποία βρίσκονται διεσπαρμένα σε όλο το πεδίο ορισμού που τους αντιστοιχεί.

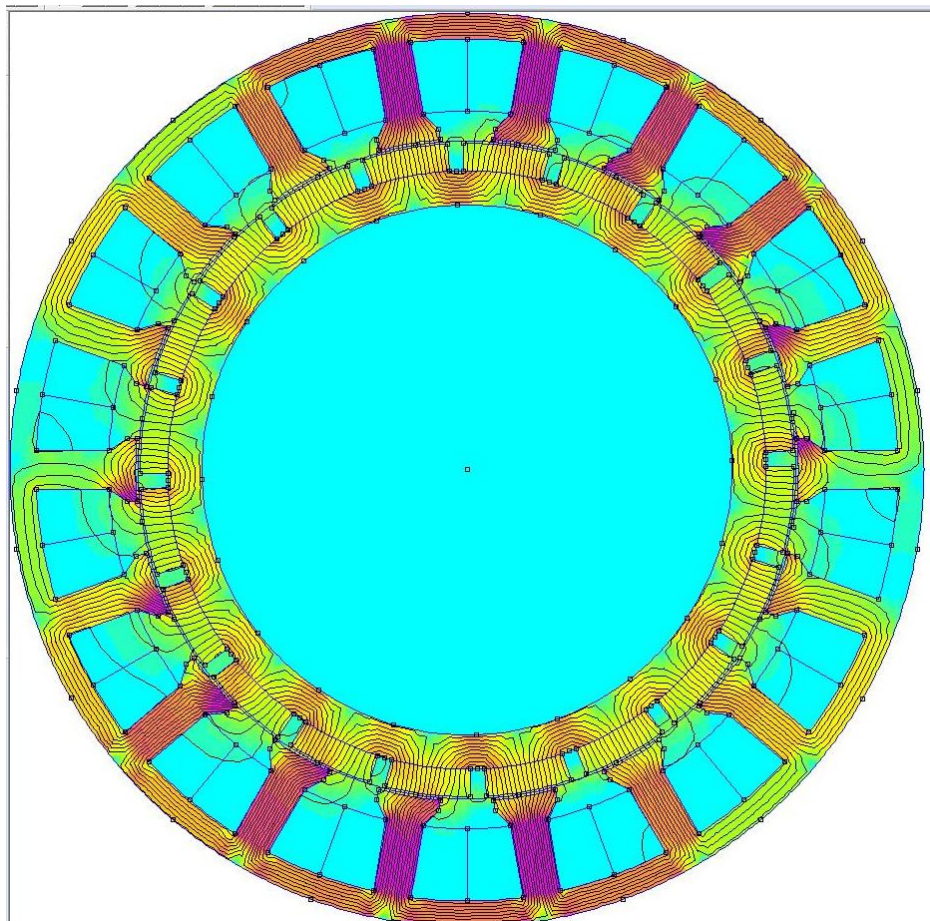
## 7.5 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Στην παράγραφο αυτή πρόκειται να παρουσιάσουμε αναλυτικά την πορεία της βελτιστοποίησης, καθώς και τα τελικά της αποτελέσματα.



### 7.5.1 Αρχική Σχεδίαση

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται πολύ συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της αρχικής σχεδίασης, ώστε να είναι πιο εύκολη η σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν στη συνέχεια.



Αρχική Γεωμετρία Ηλεκτρικής Μηχανής  
Σχήμα 7.6

Η σχεδίαση του προηγούμενου σχήματος, η οποία ήταν και η αρχική, οδηγεί στα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά της μηχανής που προκύπτει:

Χαρακτηριστικά Αρχικής Σχεδίασης	
T	36,17Nm
T <sub>ripple</sub>	2,59%
THD	11,94%
eff	81,03%

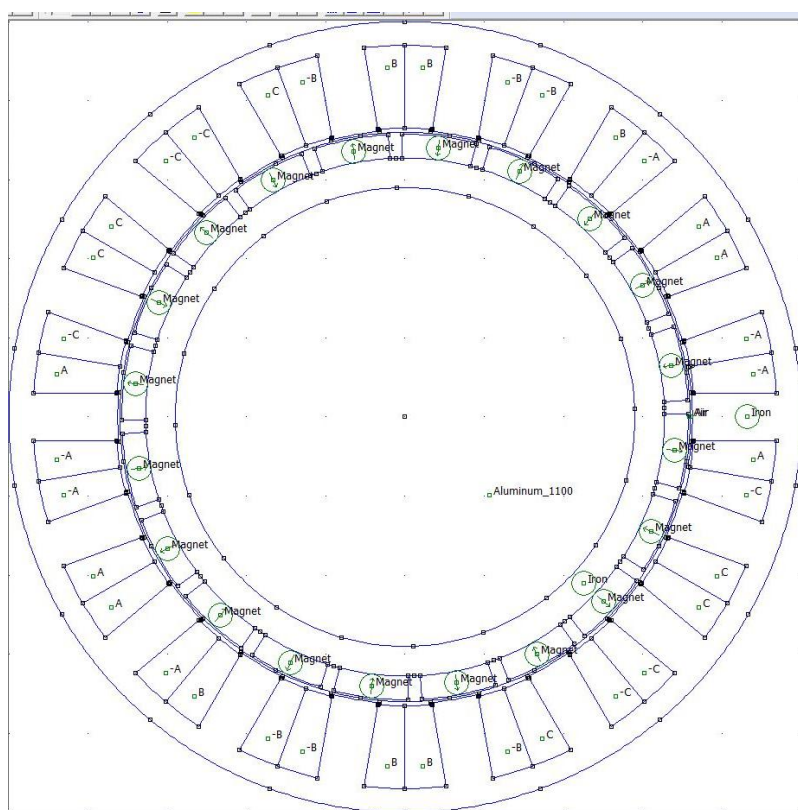
Πίνακας 7-4

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά ορίστηκε και η αντικειμενική συνάρτηση προηγουμένως.

### 7.5.2 Βελτιστοποίηση με Τοπολογία Κύκλου

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για την βελτιστοποίηση ήταν ο αλγόριθμος PSO με τοπολογία κύκλου.

Η βέλτιστη γεωμετρία που προέκυψε είναι η:



Σχήμα 7.7 Βέλτιστη Γεωμετρία από Βελτιστοποίηση με Τοπολογία Κύκλου

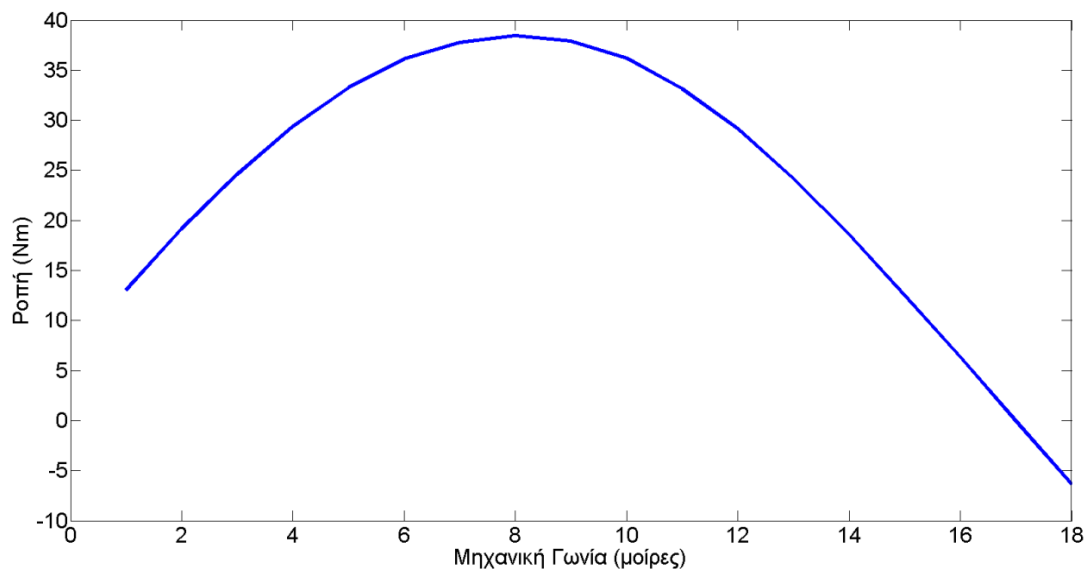
Η γεωμετρία αυτή προκύπτει από τα παρακάτω γεωμετρικά στοιχεία:

Μεταβλητές Γεωμετρίας	
$\Theta_m$	0,8482
$L_t$	0,7731
$k_{tw}$	0,4631
$k_y$	1,0500
$k_x$	0,0200

Πίνακας 7-5

Η γεωμετρία αυτή είναι εξαιρετικά ισορροπημένη. Δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα σε σχέση με την αρχική σχεδίαση, κυρίως στον τομέα των ποιοτικών χαρακτηριστικών δηλαδή το αρμονικό περιεχόμενο και την κυμάτωση της ροπής.

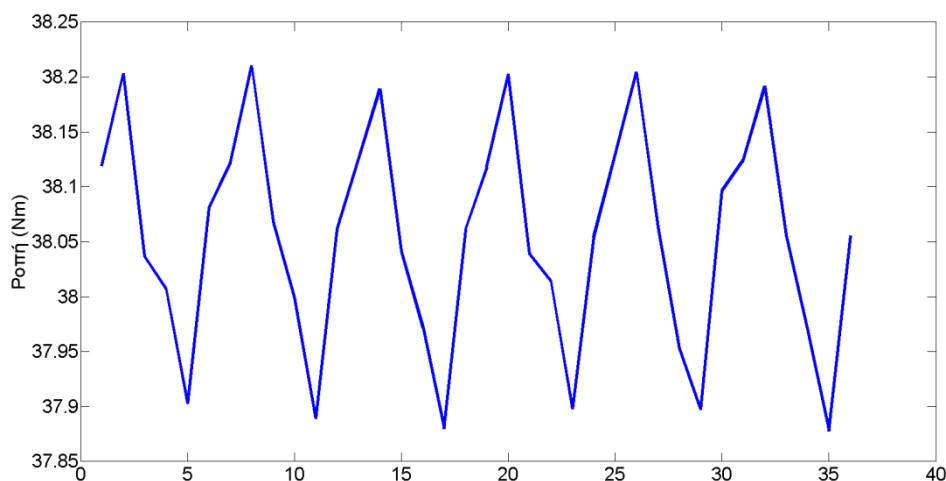
### Το Διάγραμμα Ροπής Γωνίας



Σχήμα 7.8 Διάγραμμα Ροπής-Γωνίας

Όπου φαίνεται ότι το μέγιστο της ροπής εμφανίζεται στις 90 ηλεκτρικές μοίρες.

### Ροπή κατά τη Σύγχρονη Περιστροφή

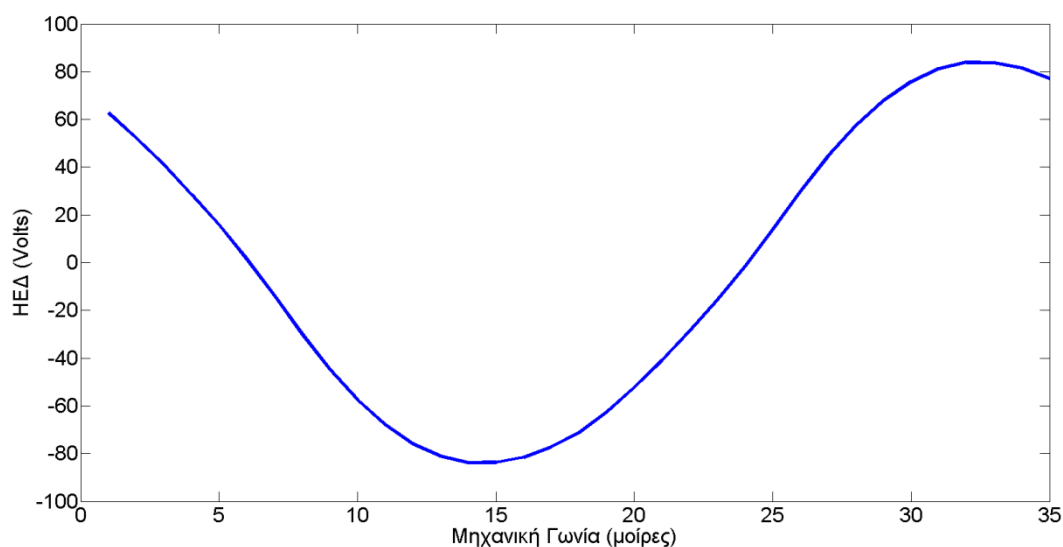


Σχήμα 7.9 Κυμάτωση Ροπής κατά τη Σύγχρονη Περιστροφή

Όπως φαίνεται, υπάρχει μια κυμάτωση, η οποία λόγω της παρουσίας φαίνεται σημαντική. Στην πραγματικότητα όμως η κυμάτωση αυτή είναι εξαιρετικά μικρή, αφού το πλάτος του διαγράμματος είναι κάτω του 0,3Nm. Επίσης φαίνεται να

υπάρχει κανονικότητα στη μορφή της ροπής που προκύπτει. Αυτό είναι μια ένδειξη ότι η ροπή που παράγεται είναι «οδοντωτή» (ή ροπή ευθυγράμμισης) (cogging torque), η οποία προκαλείται κυρίως από την έλξη μεταξύ των μόνιμων μαγνητών και του σιδήρου του στάτη.

#### Διάγραμμα Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης



Σχήμα 7.10 Διάγραμμα Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είχε σαν αποτέλεσμα μια πραγματικά σημαντική βελτίωση της μορφής της ΗΕΔ. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα πρόκειται για μορφή σχεδόν τέλεια ημιτονική.

Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηριστικά Τελικής Σχεδίασης	
T	37,82Nm
T <sub>ripple</sub>	0,88%
THD	3,70%
eff	82,54%

Πίνακας 7-6

Τα αποτελέσματα αυτά, δείχνουν με λεπτομέρεια πως και πόσο βελτιώθηκε η τελική σχεδίαση, σε σχέση με την αρχική. Είναι σαφές ότι εκτός από τις αρμονικές και την κυμάτωση ροπής, στα άλλα δύο μεγέθη δεν είχαμε εντυπωσιακή αύξηση, παρέμειναν ουσιαστικά σταθερά. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι έχουμε επιλέξει να βελτιστοποιήσουμε τη σχεδίαση επηρεάζοντας μεγέθη που δεν είναι

Κεντρικά στη σχεδίαση της μηχανής, όπως το ενεργό της μήκος, το μήκος του διακένου, η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα κλπ. Έτσι οι αλλαγές που προκύπτουν σε ροπή και απόδοση είναι πολύ μικρές, αφού τα μεγέθη που κυρίως τις επηρεάζουν δεν διαμορφώνονται εκ νέου.

### 7.5.3 Βελτιστοποίηση με Τοπολογία Αστήρα

Η γεωμετρία που προέκυψε:

Μεταβλητές Γεωμετρίας	
$\Theta_m$	0,8481
$L_t$	0,7645
$k_{tw}$	0,4653
$k_y$	1,0500
$k_x$	0,0200

Πίνακας 7-7

Όπως βλέπουμε η γεωμετρία που προέκυψε ταυτίζεται σχεδόν με την προηγούμενη. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι και οι δύο αλγόριθμοι συνέκλιναν στο ίδιο σημείο. Για όλα τα μεγέθη εκτός από το μήκος δοντιού, η απόκλιση είναι μετά τα τρίτο δεκαδικό ψηφίο. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι τα βασικά μεγέθη εκτέλεσης του αλγορίθμου που επιλέξαμε ήταν ικανοποιητικά.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε συνοπτικά τα αποτελέσματα για αυτή τη γεωμετρία:

Χαρακτηριστικά Τελικής Σχεδίασης	
T	37,38Nm
$T_{ripple}$	0,68%
THD	3,57%
eff	82,48%

Πίνακας 7-8

Όπως βλέπουμε οι διαφορές από τα αποτελέσματα προηγουμένως είναι ελάχιστες. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν ξαναπαρουσιάζουμε τα διαγράμματα για αυτή τη σχεδίαση, αφού η διαφορά τους θα είναι ελάχιστη.

## 7.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων με Αρχική Σχεδίαση

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τη σύγκριση μεταξύ της αρχικής σχεδίασης και των σχεδιάσεων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση. Στη

συνέχεια θα αναλύσουμε τους λόγους αυτής της βελτίωσης που προέκυψε στα αποτελέσματα με βάση και τα στοιχεία της θεωρίας.

Μεταβλητές Γεωμετρίας	Αρχική Σχεδίαση	PSO circle	Διαφορά (σε σχέση με αρχική)	PSO star	Διαφορά (σε σχέση με αρχική)
$\Theta_m$	0,85	0,8482	-0,0018 (-0,21%)	0,8481	-0,0019 (-0,23%)
$L_t$	0,79	0,7731	-0,0169 (-2,13%)	0,7645	0,0255 (-3,2%)
$k_{tw}$	0,33	0,4631	13,31 (+40,3%)	0,4653	0,1353 (+41,0%)
$k_y$	1,65	1,0500	-0,6 (-36,4%)	1,0500	-0,6 (-36,4%)
$k_x$	0,103	0,0200	-0,083 (-80,5%)	0,0200	-0,083 (-80,5%)
Αντικειμενική Συνάρτηση	1	0,7746	-0,2254	0,7684	-0,2316

Χαρακτηριστικά	Αρχική Σχεδίαση	PSO circle	Διαφορά (σε σχέση με αρχική)	PSO star	Διαφορά (σε σχέση με αρχική)
T	36,17Nm	37,82Nm	1,65 (+4,6%)	37,38Nm	1,21(+3,3%)
$T_{ripple}$	2,59%	0,88%	-1,71 (-66%)	0,68%	-1,91(-74%)
THD	11,94%	3,70%	-8,24% (-69%)	3,57%	-8,37(-70%)
eff	81,03%	82,48%	1,45 (+1,8%)	82,54%	1,51(+1,9%)
Αντικειμενική Συνάρτηση	1	0,7746	-0,2254	0,7684	-0,2316

Πίνακας 7-9

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι τα τελικά αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις είναι σημαντικά καλύτερα σε σχέση με τα αρχικά, κυρίως σε σχέση με την κυμάτωση ροπής και το αρμονικό περιεχόμενο. Η ροπή και στις δύο περιπτώσεις βελτιώθηκε σε σχέση με την αρχική κατά ένα ικανοποιητικό ποσοστό (4,6% και 3,3%), το οποίο πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι επιτεύχθηκε χωρίς να μεταβάλουμε τις κύριες διαστάσεις της μηχανής, που την επηρεάζουν άμεσα. Η απόδοση και στις δύο περιπτώσεις αυξήθηκε ελάχιστα (+1,8% και +1,9% αντίστοιχα). Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι παράγοντες που αφορούν

στις απώλειες, δηλαδή η πυκνότητα ρεύματος και η θερμοκρασία λειτουργίας, παρέμειναν σταθερές κατά την εκτέλεση της βελτιστοποίησης.

### 7.6.1 Βελτίωση της Κυμάτωσης Ροπής

Η κυμάτωση ροπής, όπως έχει αναλυθεί και στα πρώτα κεφάλαια, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό των ηλεκτρικών μηχανών το οποίο δημιουργεί σειρά προβλημάτων. Για το λόγο αυτό καταβάλλεται προσπάθεια να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο.

Η κυμάτωση ροπής προκαλείται από αρμονικές που περιέχει η κύρια συνιστώσα της ροπής, καθώς και από την ροπή ευθυγράμμισης. Οι αρμονικές στη ροπή, προκαλούνται κυρίως από το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος διέγερσης των τυλιγμάτων. Η ροπή ευθυγράμμισης προκαλείται κυρίως από την αλληλεπίδραση των μόνιμων μαγνητών με το στάτη[49].

Η σημαντική μείωση συνεπώς της πρώτης συνιστώσας που προκαλεί κυμάτωση στη ροπή, συνδέεται άμεσα με τη μείωση του αρμονικού περιεχομένου του ρεύματος των τυλιγμάτων. Συνεπώς ένα μέρος της πολύ σημαντικής μείωσης έχει προέλθει από τη μείωση των ανώτερων αρμονικών της τάσης.

Για τη μείωση της ροπής ευθυγράμμισης έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι. Μερικές από αυτές είναι η δημιουργία κλίσης στις αύλακες ή στους μαγνήτες, ο διαχωρισμός του μαγνήτη σε τμήματα, πρόσθετα δόντια ή αύλακες, μετατόπιση των μαγνητών και άλλες[50]. Δύο ακόμα παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο είναι η Βέλτιστη Γωνία Μαγνήτη[51] καθώς και το σχήμα του δοντιού του στάτη[52].

Στη δική μας περίπτωση έχουμε τη δυνατότητα να βελτιστοποιούμε ταυτόχρονα τους δύο αυτούς παράγοντες (που περιλαμβάνουν στην πραγματικότητα όλες τις μεταβλητές γεωμετρίας που χρησιμοποιήσαμε). Αυτό δείχνει και το σημαντικότερο πλεονέκτημα της προσέγγισης μας, που επιτυγχάνει τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας περιλαμβάνοντας ένα μεγάλο σύνολο παραγόντων που μπορεί να παίζουν ρόλο στα διάφορα χαρακτηριστικά της μηχανής που σχεδιάζουμε. Επίσης αποφεύγουμε τη χρήση εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετριών γι' αυτό το σκοπό, όπως αυτές που προτείνονται στη βιβλιογραφία.

## 7.7 Ανάλυση Ευαισθησίας αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν σύντομα ορισμένα στοιχεία που έχουν να κάνουν με την ανάλυση των βέλτιστων γεωμετριών σχεδίασης που βρέθηκαν. Θα ελεγχθεί το πως μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά της μηχανής για μικρές μεταβολές γύρω από τα σημεία όπου έχουμε βρει ότι δίνουν τη βέλτιστη σχεδίαση. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, θα επιτρέψουν να γίνει κατανοητό το γεγονός ότι στα σημεία αυτά έχουμε εμφάνιση τοπικού ελάχιστου, ενώ ταυτόχρονα

η γύρω περιοχή είναι μια γενικά καλή περιοχή όπου μπορούν να κινηθούν οι μεταβλητές της μηχανής.

### 7.7.1 Ακρίβεια των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως δίνονται με εξαιρετική ακρίβεια. Η ακρίβεια αυτή είναι της τάξης των τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων, για κανονικοποιημένες μεταβλητές. Η ακρίβεια αυτή, είναι εξαιρετικά μεγάλη, αλλά στην πραγματικότητα μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για την κατασκευή της μηχανής σε πραγματικές συνθήκες.

Το πρώτο σημείο που πρέπει να εξετάσουμε σε αυτή την κατεύθυνση, είναι το πραγματικό μέγεθος αυτής της ακρίβειας, όχι δηλαδή σε κανονικοποιημένες μεταβλητές, αλλά σε πραγματικές διαστάσεις. Τα μικρότερα μεγέθη που εκφράζονται, δηλαδή η γωνία του μαγνήτη και πάχος του δοντιού, έχουν πραγματικό μέγεθος της τάξης του εκατοστού (cm). Ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου συνεπώς σημαίνει ακρίβεια της τάξης του 0,001mm, η οποία είναι πράγματι εξαιρετικά μικρή.

Κατασκευαστικά είναι εφικτή μια ακρίβεια της τάξης του 0,025mm με μηχανήματα κοπής μετάλλου του εμπορίου, όπως φαίνεται από αρκετά παραδείγματα τέτοιων μηχανών [53], ενώ αν χρειαστεί υπάρχει δυνατότητα και για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια της τάξης 0,0125mm με χρήση μηχανημάτων laser[54][55] ή και λιγότερο. Για την κατασκευή πολύ μικρών εξαρτημάτων όπως τα μέρη της μηχανής που εξετάζουμε υπάρχει ακόμα η δυνατότητα για ακρίβεια της τάξης του 0,005mm[56]. Το γεγονός αυτό καθιστά εφικτή την κατασκευή της μηχανής με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που δίνουμε.

Παρ' όλα αυτά, φαίνεται ότι η χρήση τέτοιων μηχανημάτων πιθανόν να είναι ακριβή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι στην πράξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός μικρότερης ακρίβειας. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τον οποίο θα προχωρήσουμε στην παρακάτω ανάλυση.

### 7.7.2 Μελέτη της περιοχής γύρω από το Βέλτιστο Σημείο

Η μελέτη αυτή εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι να δείξει κατά πόσο οι λύσεις που έχουν βρεθεί είναι «εύρωστες» (robust). Δηλαδή κατά πόσο μια μικρή αλλαγή κάποιας παραμέτρου οδηγεί σε μια μικρή αλλαγή το τελικό αποτέλεσμα. Αν η αλλαγή που προκαλείται είναι σημαντική σημαίνει ότι αν το βέλτιστο σημείο που έχει βρεθεί είναι δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη (για παράδειγμα, για λόγους ακρίβειας όπως αναφέρθηκε παραπάνω) τότε η σχεδίαση που θα προκύψει μπορεί να απέχει σημαντικά από αυτή που έχουμε επιδιώξει.

Ο δεύτερος λόγος είναι για να δειχθεί ότι εξετάζοντας μία μεταβλητή στην περιοχή γύρω από τη λύση που έχει βρεθεί, πράγματι τα αποτελέσματα που προκύπτουν



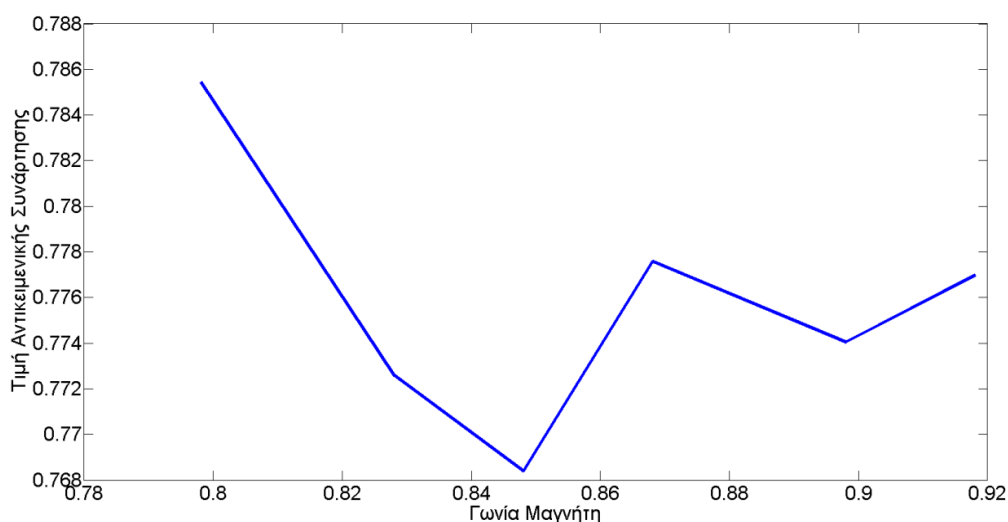
είναι χειρότερα από το βέλτιστο. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά αποδεικνύουμε ότι το σημείο που έχει βρει ο αλγόριθμος αποτελεί τοπικό βέλτιστο. Το συμπέρασμα αυτό είναι επίσης σημαντικό για την αξιολόγηση της λειτουργίας του αλγορίθμου γενικά, αλλά και των επιλογών που έγιναν κατά τη συγκεκριμένη βελτιστοποίηση. Δηλαδή κατά πόσο ο έγινε ικανοποιητική σύγκλιση ή όχι, κάτι που θα σήμαινε ότι έπρεπε πιθανόν να γίνουν ακόμα περισσότερες επαναλήψεις ώστε να έχουμε το τελικό αποτέλεσμα που επιδιώκουμε.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η μεταβολή της κάθε παραμέτρου κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό και στη συνέχεια ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της μηχανής που προκύπτει καθώς και η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενική συνάρτησης. Για κάθε μεταβλητή θα γίνουν 4εις μεταβολές που θα απέχουν από την τιμή λύση κατά:

$$\pm 0,02 \text{ και } \pm 0,05$$

Για τις περιπτώσεις των παραμέτρων σχεδίασης της κεφαλής του δοντιού, η μεταβολή θα είναι μόνο προς τα επάνω, αφού έχει ήδη προσεγγιστεί η ελάχιστη τιμή που έχουμε θέσει. Οι μεταβολές αυτές είναι μικρές, αλλά όχι ασήμαντες. Στόχος είναι να καταφέρουν να δώσουν χρήσιμα στοιχεία τόσο για την ευρωστία του αποτελέσματος όσο και για την σύγκλισή του.

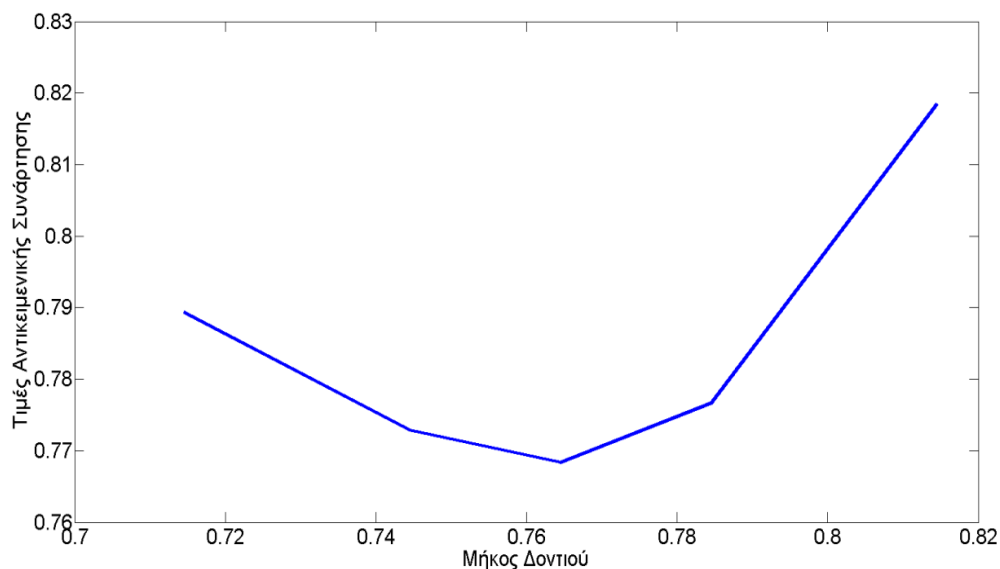
#### Ευαισθησία Γωνίας Μαγνήτη



Σχήμα 7.11 Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης για Διαφορετικές Τιμές Γωνίας Μαγνήτη

Στην περίπτωση της γωνίας μαγνήτη, φαίνεται καθαρά ότι η τιμή που έχουμε επιλέξει, δηλαδή η μεσαία τιμή του διαγράμματος, επιτυγχάνει τοπικό βέλτιστο. Φαίνεται επίσης ότι παρά την πιθανή ύπαρξη ενός άλλου τοπικού βέλτιστου στην περιοχή με μεγαλύτερη γωνία μαγνήτη, ο αλγόριθμος το έχει αποφύγει επιτυγχάνοντας την καλύτερη δυνατή τιμή.

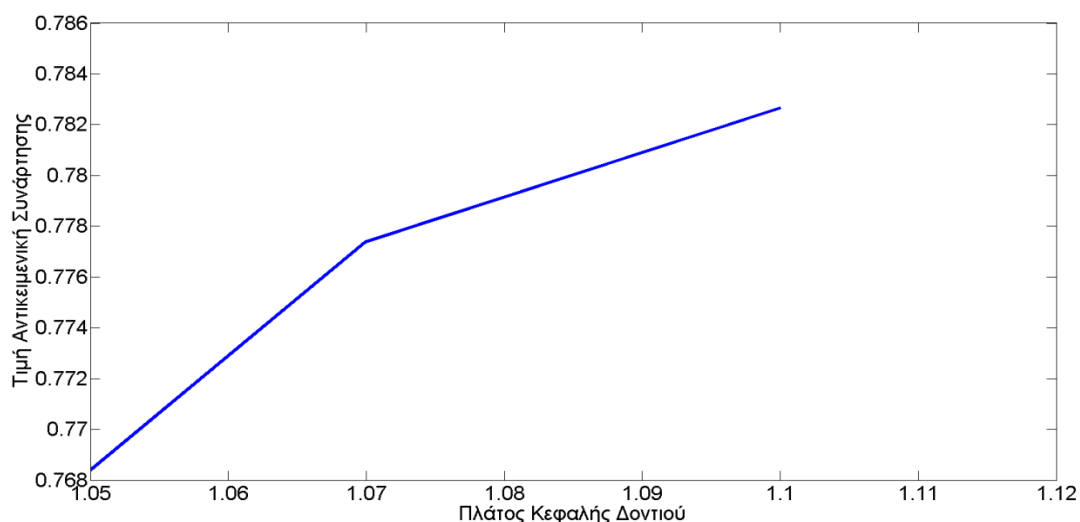
### Ευαισθησία Μήκους Δοντιού



Σχήμα 7.12 Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης για Διαφορετικές Τιμές Μήκους Δοντιού

Στην περίπτωση του μήκους δοντιού φαίνεται σαφώς ότι επιτυγχάνεται τοπικό βέλτιστο. Οι μεταβολές γύρω από το αρχικό σημείο δίνουν χειρότερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης.

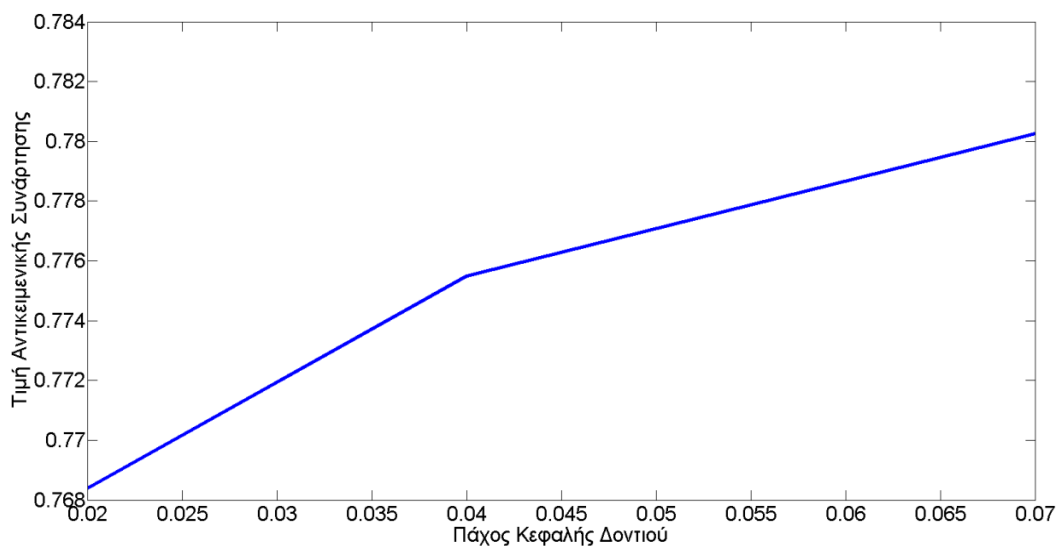
### Ευαισθησία Πλάτους Κεφαλής Δοντιού



Σχήμα 7.13 Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης για Διαφορετικές Τιμές Πλάτους Κεφαλής Δοντιού

Εδώ, όπως αναφέρθηκε δεν εξετάσαμε τη συμπεριφορά για μικρότερες τιμές από αυτή που πρότεινε ο αλγόριθμος. Είναι σαφές ότι με αυτό το δεδομένο έχουμε και πάλι βέλτιστη τιμή για την τιμή που έχει επιλεγεί.

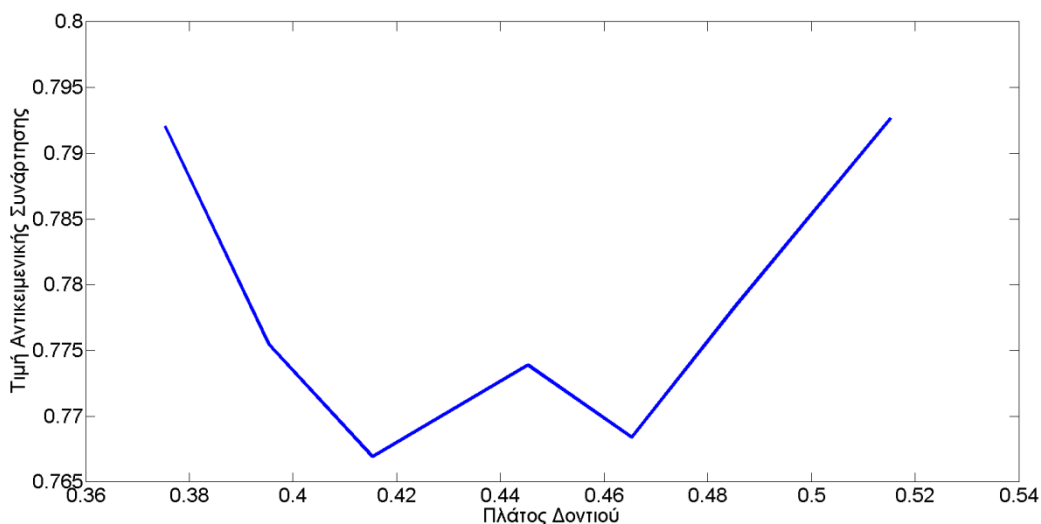
### Ευαισθησία Πάχους Κεφαλής Δοντιού



Σχήμα 7.14 Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης για Διαφορετικές Τιμές Πάχους Κεφαλής Δοντιού

Τέλος και σε αυτή την περίπτωση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος κατέληξε στη βέλτιστη τιμή της περιοχής που εξετάζουμε.

### Ευαισθησία Πάχους Δοντιού



Σχήμα 7.15 Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης για Διαφορετικές Τιμές Πάχους Δοντιού

Η μοναδική περίπτωση όπου η ανάλυση ευαισθησίας έδωσε καλύτερο αποτέλεσμα για άλλη τιμή από αυτή του αλγορίθμου είναι αυτή η περίπτωση.

Πρόκειται για την τιμή όπου το πάχος δοντιού ισούται με  $k_{tw} = 0,4153$ . Στην περίπτωση αυτή η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει μια τιμή ελάχιστα μικρότερη από τη βέλτιστη που έχει βρεθεί:  $ObjFun = 0,7669$

Η τιμή αυτή προκύπτει μάλιστα κυρίως λόγω της αυξημένης τιμής της ροπής κατά σχεδόν 1Nm, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της μηχανής έχουν χειρότερες τιμές. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι ο αλγόριθμος συνέκλινε σε σημείο που δεν είναι βέλτιστο. Βέβαια η διαφορά παραμένει ελάχιστη. Το γεγονός αυτό δείχνει και τους περιορισμούς που υπάρχουν κατά την βελτιστοποίηση με στοχαστικούς αλγόριθμους.

Από τα στοιχεία που προέκυψαν, φαίνεται σαφώς ότι σχεδόν σε κάθε περίπτωση ο αλγόριθμος επιτυγχάνει να συγκλίνει σε σημείο που αποτελεί τουλάχιστον τοπικό βέλτιστο. Η μόνη περίπτωση που δεν το πέτυχε αυτό είναι στην περίπτωση του πάχους δοντιού. Όμως και σε αυτή την περίπτωση η διαφορά ήταν ελάχιστη, της τάξης του τρίτου δεκαδικού ψηφίου.

Σε σχέση με την ευρωστία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, φαίνεται σαφώς ότι η περιοχή γύρω από τα σημεία που έχουν επιλεγεί είναι περιοχή όπου η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει ικανοποιητικές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση που έχουμε μικρή απόκλιση από τις προτεινόμενες τιμές, αυτό θα οδηγήσει μεν σε μια σχεδίαση με χειρότερα τελικά χαρακτηριστικά, αλλά αυτά θα είναι και πάλι ικανοποιητικά.

## Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό ανακεφαλαιώνονται τα κυριότερα σημεία της εργασίας και συγκεντρώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε και τις γεωμετρίες που προέκυψαν. Επισημαίνεται επίσης η επιστημονική συνεισφορά της εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

### 8.1 Ανακεφαλαίωση

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε κώδικας βελτιστοποίησης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη ολική βελτιστοποίηση κινητήρα που χρησιμοποιείται σε συστήματα ελέγχου πλοήγησης αεροσκαφών. Ο κώδικας αυτός αποτελεί προσαρμογή του αλγόριθμου Particle Swarm Optimization – PSO (Βελτιστοποίηση Σμήνους). Ο κώδικας που αναπτύχθηκε έχει προσανατολισθεί στις ανάγκες της βελτιστοποίησης ηλεκτρικών μηχανών, αλλά η λειτουργία του επιβεβαιώθηκε προκαταρκτικά χρησιμοποιώντας τυπικές συναρτήσεις αναφοράς και εκτιμάται ότι μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί για βελτιστοποίηση και άλλων προβλημάτων.

Η γεωμετρία ηλεκτρικής μηχανής που επιλέχθηκε να βελτιστοποιηθεί είναι η γεωμετρία επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως λόγω της εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας ροπής που μπορεί να επιτύχει και της μεγάλης δυνατότητας προσωρινής υπερφόρτισης, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ο λόγος είναι ότι το βάρος μπορεί να περιοριστεί σημαντικά, κάτι που καθιστά οικονομικά και τεχνικά εφικτή την εισαγωγή ηλεκτρικών κινητήρων σε εφαρμογές αεροπλοΐας.

Η αξιολόγηση της σχεδίασης της μηχανής έγινε με χρήση προγράμματος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ευέλικτος κώδικας (ΠΥΑ) ο οποίος δίνει τη δυνατότητα με συμπαγή τρόπο, να τεθούν όλα τα στοιχεία σχεδίασης του ηλεκτρικού κινητήρα, στη συνέχεια να προσομοιωθεί η λειτουργία του και τέλος να παρουσιαστούν τα αντίστοιχα ποιοτικά αποτελέσματα.

### 8.2 Κυριότερα Συμπεράσματα

Συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία που πραγματοποιήθηκε είναι τα ακόλουθα:

- Οι κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, με συγκεντρωμένα τυλίγματα χρησιμοποιώντας κλασικές μεθόδους σχεδίασης μπορεί να έχουν ποιοτικά χαρακτηριστικά που απέχουν από το ολικό βέλτιστο. Τα χαρακτηριστικά τους είναι δυνατό να βελτιωθούν σημαντικά, μέσω κατάλληλης τεχνικής βελτιστοποίησης, ιδιαίτερα σε ότι αφορά τη μείωση της κυμάτωσης ροπής και του αρμονικού περιεχομένου της παραγόμενης

ΗΕΔ, ενώ λιγότερο σε ότι αφορά την αύξηση της ροπής εξόδου και της απόδοσης.

- Ο προτεινόμενος αλγόριθμος PSO μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ηλεκτρικών μηχανών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση είναι σαφώς ικανοποιητικά. Επιπλέον, το γεγονός ότι προέκυψε ίδια βέλτιστη γεωμετρία με δύο διαφορετικές τοπολογίες γειτόνων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης αποτελεί σημαντική ένδειξη ότι πρόκειται για ολικό βέλτιστο. Επίσης η ανάλυση ευαισθησίας που έγινε, αποδεικνύει ότι τα αποτελέσματα που βρέθηκαν τοποθετούνται σε περιοχή που γενικά δίνει καλά χαρακτηριστικά σχεδίασης, ενώ σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις το σημείο σύγκλισης που βρέθηκε ήταν το καλύτερο της αντίστοιχης περιοχής.
- Μέσω της βελτιστοποίησης προέκυψε γεωμετρία όπου τα δόντια του στάτη δεν είναι πεπλατυσμένα. Ουσιαστικά ο αλγόριθμος οδήγησε στις ελάχιστες δυνατές τιμές για το πλάτος και το πάχος της κεφαλής του δοντιού. Ο περιορισμός της ροπής ευθυγράμμισης είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο επιλέγεται η κατασκευή δοντιών με πεπλατυσμένα άκρα. Όμως λόγω της συνολικής βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε, με την ταυτόχρονη επιλογή κατάλληλου συνδυασμού όλων των μεταβλητών γεωμετρίας, η ροπή ευθυγράμμισης μειώθηκε σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Η σχεδίαση που προέκυψε, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την γεωμετρία της κλασικής σχεδίασης. Στη βέλτιστη γεωμετρία η τοποθέτηση των τυλιγμάτων είναι πολύ πιο εύκολη κάτι που μπορεί να μειώσει το κόστος κατασκευής και να οδηγήσει σε αύξηση του συντελεστή πληρότητας στην αύλακα. Επισημαίνεται επίσης ότι η τοποθέτηση ακόμα και προκατασκευασμένων τυλιγμάτων είναι εφικτή παρά το μικρό μέγεθος της μηχανής.
- Στη γενική περίπτωση η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης γεωμετρίας, είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ. Συγκεκριμένα, παρά τη χρήση προηγμένου εξοπλισμού, η συνολική διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου για την κάθε τοπολογία έφτασε την μία εβδομάδα περίπου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αρχική επιλογή μεγάλου αρχικού πληθυσμού ώστε να διασφαλιστεί η πλήρης εξερεύνηση του πεδίου ορισμού. Στη συνέχεια επιχειρήθηκε δοκιμαστική εκτέλεση του αλγορίθμου για σημαντικά μικρότερο πληθυσμό (15 άτομα αντί για τα 35 που επιλέχθηκαν αρχικά) κατά την οποία προσεγγίσθηκαν με πολύ μεγάλη ακρίβεια οι προηγούμενες βέλτιστες λύσεις. Η συνολική διάρκεια της δοκιμαστικής εκτέλεσης ήταν περίπου τρεις (3) ημέρες. Αυτό δείχνει ότι είναι δυνατό να βελτιωθεί σημαντικά ο χρόνος εκτέλεσης, χωρίς σημαντική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα αναδεικνύοντας την αποδοτικότητα του προτεινομένου αλγορίθμου σε αυτή την κατηγορία προβλημάτων.

### 8.3 Επιστημονική Συνεισφορά της Εργασίας

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει αρκετά στοιχεία επιστημονικής συνεισφοράς τα οποία είναι:

- Η δημιουργία παραμετροποιημένου μοντέλου σχεδίασης μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών και ο συνδυασμός του με μοντέλο ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης σύγχρονων μηχανών. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την εύρεση βέλτιστης γωνίας ροπής, τον υπολογισμό βασικών ηλεκτρικών και μαγνητικών χαρακτηριστικών της μηχανής, καθώς και τη σύζευξή του με κατάλληλο μοντέλο βελτιστοποίησης.
- Η υλοποίηση ευέλικτου κώδικα βελτιστοποίησης βασισμένου στη μέθοδο PSO σε γλώσσα και περιβάλλον αριθμητικού υπολογισμού (ΠΑΥ). Ο κώδικας αυτός υλοποιεί τις δύο πιο σημαντικές και διαδεδομένες τοπολογίες που προτείνονται. Επίσης είναι ευέλικτος με δεδομένο ότι η λειτουργία του δεν επηρεάζεται από την αντικειμενική συνάρτηση με βάση την οποία γίνεται η βελτιστοποίηση αφού αυτή μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του εκάστοτε προβλήματος χωρίς να επηρεαστεί ο κορμός του κώδικα.
- Η επιβεβαίωση της ορθότητας του κώδικα καθώς και ο έλεγχος της λειτουργίας του, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας γενικευμένες αντικειμενικές συναρτήσεις αναφοράς. Οι συναρτήσεις αυτές κωδικοποιήθηκαν ώστε να επιτρέπουν την αξιολόγηση προβλημάτων όσων διαστάσεων καλείται κάθε φορά να επιλύσει ο κώδικας.
- Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας του διανύσματος βελτιστοποίησης, επιβεβαιώθηκε η ευρωστία του αλγορίθμου αλλά και η δυνατότητά του να επιτυγχάνει ολικά βέλτιστα.

### 8.4 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν, αναδεικνύονται και ορισμένα σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Οι προτάσεις που ακολουθούν εκτιμάται ότι μπορούν να βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά του προτεινομένου αλγορίθμου στις εφαρμογές βελτιστοποίησης γεωμετρίας ηλεκτρικών μηχανών.

- Χρήση κώδικα επίλυσης της γεωμετρίας της μηχανής που να περιλαμβάνει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στις παραμέτρους που βελτιστοποιούνται, ώστε να συμπεριληφθούν περισσότερα από τα στοιχεία που ενδεχομένως επηρεάσουν τη λειτουργία της μηχανής. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί μια πιο ικανοποιητική τελική σχεδίαση.
- Διεξοδική διερεύνηση της απόδοσης του αλγορίθμου ανάλογα με τον πληθυσμό και τον αριθμό των επαναλήψεων του. Με τον τρόπο αυτό είναι

δυνατό να προκύψει μια εξαιρετικά αποδοτική διαδικασία εύρεσης βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων σχεδίασης για τη συγκεκριμένη εφαρμογή με αντίστοιχο περιορισμό του χρόνου εκτέλεσης του κώδικα.

- Κατασκευή πρότυπου κινητήρα χρησιμοποιώντας την βελτιστοποιημένη γεωμετρία μηχανής μόνιμων μαγνητών ώστε να επιβεβαιωθούν πειραματικά τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά που προέκυψαν.



## Βιβλιογραφία

- [1] J. W. Bennett, «Fault Tollerant Electromechanical Actuators for Aircraft,» NewCastle, 2010.
- [2] J. Jones και R. Coll, «The More Aelectric Aircraft: the past and the future?,» *IEEE Colloquium in Electrical Machines and Systems*, τόμ. 1, pp. 1-4, 1990.
- [3] A. Hoffman, «Advanced Secondary Power System for Transport Aircraft,» NASA technical paper, 1985.
- [4] Francois, «Safran Magazine,» March 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.safran-group.com/IMG/pdf/EN\\_mag3\\_10-11-3.pdf](http://www.safran-group.com/IMG/pdf/EN_mag3_10-11-3.pdf). [Πρόσβαση 31 8 2013].
- [5] K. Rajesh και A. Labil, «slideshare.net,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.slideshare.net/lalitagarwalstiff/hydraulics-actuation-system>. [Πρόσβαση 02 09 2013].
- [6] «sae.org,» 8 10 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.sae.org/mags/aem/11465>. [Πρόσβαση 02 09 2013].
- [7] J. Clare, «nottingham.ac.uk,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.nottingham.ac.uk/aerospace/documents/moreelectricaircraftresearch.pdf>. [Πρόσβαση 03 09 2013].
- [8] Βουρνάς και Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: ΕΜΠ, 2006.
- [9] Fitzgerald, Kingsley και Umans, *Electric Machinery*, New York, NY, USA: McGraw Hill Higher Education, 2003.
- [10] Kakosimos, Sarigiannidis, Beniakar, Kladas και Gerada, «Induction Motors versus Permanent Magnet Actuators for Aerospace Applications,» *IEEE transactions on Industrial Electronics*, (DOI:10.1109/TIE.2013.2274425), 2013.
- [11] Gieras και Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, Basel, Switzerland: Marcel Dekker Inc., 2002.
- [12] A. Medina, G. Pulido και J. Torres, «Comparative Study of Neighbourhood

Topologies for Particle Swarm Optimizers» σε *International Joint Conference of Computational Intelligence*, Madeira, Portugal, 2009.

- [13] Pyrhonen, Jokinen και Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, West Sussex, UK: John Willey and Sons Ltd., 2008.
- [14] Α. Βήχος, *Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης*, Αθήνα, 2009.
- [15] W. Soong, «Sizing of Electrical Machines,» *Power Engineering Briefing Notes*, pp. 17-18, 26 09 2008.
- [16] K. Kamiar, «Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon,» 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ece.cmu.edu/~electricconf/2008/PDFs/Karimi.pdf>. [Πρόσβαση 14 09 2013].
- [17] Mohan, Underland και Robbins, *Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2010.
- [18] L. Florence, *Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer*, Stockholm: KTH, 2004.
- [19] Nova Torque, «R&D magazine,» 08 08 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.rdmag.com/award-winners/2012/08/permanent-magnet-produces-motor-efficiencies>. [Πρόσβαση 17 09 2013].
- [20] M. Thompson, «Practical Issues in the Use of NdFeB Permanent Magnets in Maglev, Motors, Bearings and Eddy Current Brakes,» *Proceedings of the IEEE*, 11 2009.
- [21] «Mehrphasenmaschine mit ungleicher ankerspulen und polzahl». Deutsches Reichspatent Ευρεσιτεχνία 92958, 1895.
- [22] «Emetor,» Emetor, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.emetor.com/glossary/number-of-layers/>. [Πρόσβαση 22 09 2013].
- [23] S. Meier, «Emetor.com,» Emetor, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.emetor.com/edit/windings/>. [Πρόσβαση 22 09 2013].
- [24] N. Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press, 2005.
- [25] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics User's Manual*, 2010.

- [26] K. Baltzis, «The Finite Element Method Magnetics (FEMM) Freeware Package: May it Serve as an Educational Tool in Teaching Electromagnetics,» *Springer Science*, 8 01 2009.
- [27] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM*, Foster-Miller, 2011.
- [28] The Magnet Source, «magnetsource.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.magnetsource.com/Solutions\\_Pages/zipsheet1.html](http://www.magnetsource.com/Solutions_Pages/zipsheet1.html). [Πρόσβαση 01 10 2013].
- [29] Toshiba, «<http://www.toshont.com/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.toshont.com/ag/mtrldesign/AG05%20\(Temperature%20Rise\).pdf](http://www.toshont.com/ag/mtrldesign/AG05%20(Temperature%20Rise).pdf). [Πρόσβαση 02 10 2013].
- [30] McLyman και Colonel, «Window Utilization, Magnet Wire and Insulation,» σε *Transformer and Inductor Design Handbook*, Idyllwild, Ca, USA, Marcel Dekker Inc, 2004.
- [31] B. Erickson, «ECEE Colorado University,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://ecee.colorado.edu/~ecen5797/course\\_material/Ch14slides.pdf](http://ecee.colorado.edu/~ecen5797/course_material/Ch14slides.pdf). [Πρόσβαση 02 10 2013].
- [32] R. Rabinovici, «Torque ripple, vibrations and acoustic noise in switched reluctance motors,» *HAIT Journal of Science and Engineering*, pp. 776-786, 10 July 2005.
- [33] W. Yeadon και A. Yeadon, «Losses,» σε *Handbook of Small Electric Motors*, McGraw Hill Companies, 2003, pp. 1.52-1.58.
- [34] ThyssenKruppSteel, *Power Core M235-35A*, 2009.
- [35] *MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012a*, Massachusetts, USA: The Mathworks Inc., 2012.
- [36] Oppenheim, Schaffer και Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc, 1999.
- [37] M. Beniakar, E. Tsampouris, C. Patsios και A. Kladas, «Evolutionary Optimization of Permanent Magnet Machine Design for Traction Applications,», *14<sup>th</sup> Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, (DOI 10.1109/CEFC 2010.5481649)Chicago, IL, USA, 2010.
- [38] J. Kennedy και J. Eberhart, «Tutorial on Particle Swarm Optimization,» σε *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Pasadena, California, USA, 2005.

- [39] M. Settles, «An Introduction to Particle Swarm Optimization,» Department of Computer Science, University of Idaho, Moscow, Idaho, USA, 2005.
- [40] J. Kennedy και R. Eberhart, *Swarm Intelligence*, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2001.
- [41] J. Lane, A. Engelbrecht και J. Grain, «Particle Swarm Optimizations with Spatially Meaningful Neighbours,» σε *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, (DOI 10.1109/SIS 2008.4668281) St. Louis, MO, USA, 2008.
- [42] Odhenius και Rody, «Mathworks,» 06 08 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24838-godlike-a-robust-single-multi-objective-optimizer>. [Πρόσβαση 2013 06 10].
- [43] J. Xin, G. Chen και Y. Hai, «A Particle Swarm Optimizer with Multistage Linearly-Decreasing Inertia Weight,» *International Joint Conference on Computational Science and Optimization IEEE*, pp. 505-508 (DOI 10.1109/CSO 2009.420), Sanya, Hainan, 2009.
- [44] J. C. Bansal, P. K. S. M. Saraswat, A. Verma, S. Jadon και A. Abraham, «Inertia Weight Stragies in Particle Swarm Optimization,» σε *IEEE Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, (DOI 10.1109/NaBIC 2011.6089659) Salamanca, Spain, 2011.
- [45] D. Bratton και J. Kennedy, «Defining a Standard for Particle Swarm Optimization,» σε *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, (DOI 10.1109/SIS 2007.368035) Honolulu, HI, 2007.
- [46] Y. Shi και R. C. Eberhart, «Empirical Study of Particle Swarm Optimization,» σε *IEEE Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Optimization*, (DOI 10.1109/CEC 1999.785511), Washington, DC 1999.
- [47] A. B. Rohler και S. Chen, «An Analysis of Sub-swarms in Multi-swarm Systems,» σε *Springer*, Berlin Haidelberg, 2011.
- [48] M. Clerc, «Free.fr,» 23 09 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://clerc.maurice.free.fr/pso/SPSO\\_descriptions.pdf](http://clerc.maurice.free.fr/pso/SPSO_descriptions.pdf). [Πρόσβαση 23 10 2013].
- [49] L. Dosiek και P. Pillay, «Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines,» *IEEE Transactions on Industry Applications Conference*, pp. 1565-1571, (DOI 10.1109/IAS.2006.256518), Tampa, FL, 11 2007.
- [50] D. Wang, X. Wang, Y. Yang και R. Zhang, «Optimization of Magnetic Pole Shifting

to Reduce Cogging Torque in Solid-Rotor Permanent-Magnet Synchronous Motors,» *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 1228-1234, (DOI 10.1109/TMAG.2010.20.44044) 5 2010.

[51] Z. Q. Zhu και D. Howe, «Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 407-412, (DOI 10.1109/60.900501) 12 2000.

[52] X. T. Jiang, X. W. Xing, Y. Ling και Y. P. Lu, «Theoretical and simulation analysis of influences of stator tooth width on cogging torque of BLDC motors,» *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 4602-4604, (DOI 10.1109/TMAG.2009.2022639) 10 2009.

[53] Mitshubishi, «MC Machinery Systems,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://promo.mitsubishi-world.com/waterjet-test-cut-4/pdf/Waterjet\\_Brochure.pdf](http://promo.mitsubishi-world.com/waterjet-test-cut-4/pdf/Waterjet_Brochure.pdf). [Πρόσβαση 29 10 2013].

[54] Coherent, «coherent.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.coherent.com/downloads/METABEAM\\_DS\\_1111revA\\_4.pdf](http://www.coherent.com/downloads/METABEAM_DS_1111revA_4.pdf). [Πρόσβαση 29 10 2013].

[55] Miyacki Unitek , «miyachiamerica.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.miyachiamerica.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2FProducts\\_Systems\\_LMCutting&file=0158000000187GoAAI](http://www.miyachiamerica.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2FProducts_Systems_LMCutting&file=0158000000187GoAAI). [Πρόσβαση 29 10 2013].

[56] IFG Instruments Inc, «<http://mechanicaltimeswitches.ifginstrumentsinc.com/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://mechanicaltimeswitches.ifginstrumentsinc.com/item/all-categories/ss-screw-machining-cnc-machining-grinding-services/item-1002>. [Πρόσβαση 29 10 2013].

## Λογισμικό

1. Διαδικτυακά διαθέσιμο Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων (ΛΠΣ) <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
2. Περιβάλλον Αριθμητικών Υπολογισμών (ΠΑΥ): MatLab (Mathworks) <http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html> έκδοση 2012b
3. Επαγγελματικό λογισμικό σχεδίασης διαγραμμάτων- Microsoft Visio 2010 <http://office.microsoft.com/el-gr/visio/>

