

**Project: Βελτιστοποίηση Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών (ΣΚΜΜ)  
για Ηλεκτρική Πρόωση Πολεμικού Πλοίου Περιπολίας**

**Πορεία - Ζητούμενα:**

- **Γενικά:** Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση/προσδιορισμός ορισμένων γεωμετρικών παραμέτρων που αφορούν σε σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών -ΣΚΜΜ- (synchronous permanent magnet motor - PMSM), για μια εφαρμογή ναυτικής ηλεκτροπρώωσης. Για το σκοπό αυτό θα "επιστρατευτεί" μια γνωστή και αξιόπιστη μέθοδος βελτιστοποίησης, η λεγόμενη PSO (particle swarm optimization), τόσο στη λογική της μονοκριτηριακής όσο και της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Όπως είχαμε αναφέρει, η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης (δηλ. της "έκφρασης" που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε/μεγιστοποιήσουμε) είναι πολύ σημαντική, καθώς μια διαφοροποίησή της, οδηγεί σε διαφορετικές (υπο)-βέλτιστες λύσεις. Η στοιχειώδης τοπολογία μαζί με ορισμένα μεγέθη απεικονίζεται στο **Σχ. 1** στο τέλος του παρόντος εγγράφου.

∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞

- 1) **Προκαταρκτικά:** Με την προϋπόθεση ότι έχετε εγκαταστήσει το Matlab και το FEMM, αποσυμπίστε το αρχείο **PMSM\_Project\_source.zip** που θα βρείτε και θα «κατεβάσετε» από το e-class, σε έναν φάκελο της επιλογής σας (π.χ. C:\SHM). Αποφύγετε την "Επιφάνεια εργασίας" όπως και τους Ελληνικούς χαρακτήρες στα ονόματα των φακέλων. Θα έχετε -αρχικά- 5 αρχεία:

Το **main.m**, είναι το script από το οποίο θα ξεκινάτε τις προσομοιώσεις σας,  
Το **PSO.m**, είναι ο αλγόριθμος PSO, ο οποίος θα σας πληροφορεί και για την εξέλιξη),  
Το **ObjFunc.m**, θα χρησιμοποιηθεί για την μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση (ΜΚΒ),  
Το **MOPSO.m**, είναι ο αλγόριθμος MOPSO, ο οποίος θα σας πληροφορεί και για την εξέλιξη),  
Το **MObjFunc.m**, θα χρησιμοποιηθεί για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (ΠΚΒ).

∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞

- 2) **Δοκιμές ΜΚΒ:** Ανοίξτε το **main.m**. Εξοικειωθείτε με τις μεταβλητές (δείτε τα σχόλια). Ανοίξτε το **ObjFunc.m**.

- (a) Με βάση το **Σχ. 2**, οι μεταβλητές αναζήτησης είναι 3: **α)** το  $\beta_d$  (δηλ. ο λόγος του πλάτους του πόλου του στάτη προς το πλάτος του αυλακιού), **β)** το  $t_{yokeR}$  (δηλ. το πάχος του σώματος του δρομέα) και **γ)** το  $t_{yokeS}$  (δηλ. το πάχος του σώματος του στάτη).
- (b) Στο PC που θα κάνετε τις δοκιμές θέστε στο **main.m**: PopNo=1, IterNo=1, RunNo=1 και πατήστε [Run] για να ξεκινήσει μια προσομοίωση. Όταν ολοκληρωθεί σημειώστε κάπου το "Total time so far". (Σημ.: Δεν θα δείτε το FEMM να ανοίγει, γιατί στη γραμμή του ObjFunc.m υπάρχει η εντολή openfemm(1). Εάν θέλετε να βλέπετε το FEMM ενόσω επεξεργάζεται το στιγμιότυπο, σβήστε την παρένθεση ή βάλτε openfemm(0).)
- (c) Οι ποσότητες που θα ληφθούν υπόψη για τη βελτιστοποίηση, σχετίζονται με την απόδοση ( $\eta$ ) και τη μάζα ( $M_{motor}$ ) του κινητήρα. Οι ποσότητες αυτές είναι η  $eff_{new}$  και η  $M_{new}$  και δίνονται από τις σχέσεις (η εξήγηση δεν δίνεται εδώ αλλά υπάρχει. 😊):

$$eff_{new} = \frac{e^\eta}{0.06306} - 40.995784 \quad (1) \quad \text{και} \quad M_{new} = \frac{\sqrt{M}}{0.426349} - 1.3454961 \quad (2)$$

Όπου  $M = \frac{M_{ideal}}{M_{motor}}$  ο λόγος της ιδανικής (τιμή στόχος) μάζας του κινητήρα με την όποια υπολογισμένη (η ιδανική έχει βρεθεί να είναι  $M_{ideal} = 541$  kg).

- (d) Πηγαίνετε στο τέλος του script **ObjFunc.m** (γραμμή 588-589) και "ενεργοποιήστε" την αντικειμενική συνάρτηση που δίνει βαρύτητα **60%** στην "απόδοση" και **40%** στη "μάζα".
- (e) Γυρίστε στο **main.m** και θέστε : PopNo=60, IterNo=80, RunNo=5. Υπολογίστε το συνολικό χρόνο που θα πάρει η προσομοίωση ως,

$$Hours = \frac{PopNo \quad IterNo \quad RunNo \quad "Total time so far"}{3600}$$

- (f) Προσαρμόστε κατά βούληση (π.χ. PopNo=30, IterNo=25, RunNo=3) τις παραπάνω τρεις παραμέτρους ώστε να σας "φτάσει" ο διαθέσιμος χρόνος που σκοπεύετε να "ξοδέψετε" για αυτή τη διερεύνηση. Γενικά, υπολογίστε αρκετές μέρες (!!) για το PC που θα αναλάβει.  
**Tip:** Μπορείτε και να σπάσετε την προσομοίωση ανά ένα run μέχρι να φτάσετε στο runNo. Έτσι θα έχετε ένα πλεονέκτημα και ένα μειονέκτημα: Θα μπορείτε να αποθηκεύετε ξεχωριστά τα αποτελέσματα ανά run, αλλά στο τέλος θα πρέπει να φτιάξετε το γράφημα των καμπυλών σύγκλισης μόνοι σας.
- (g) Πατήστε [Run] ώστε να αρχίσει η προσομοίωση.
- (h) Αποθηκεύστε τα αποτελέσματά σας (δηλ. τα αρχεία .mat) σε έναν φάκελο με όνομα **"SingleObj\_Optimum"**.
- (i) Δημιουργήστε ένα έγγραφο του Word με όνομα **«Group-XX.docx»**, (όπου XX ο αριθμός της Ομάδας σας). Αφού ξεκινήσετε γράφοντας τα Ονοματεπώνυμά σας και τους αριθμούς μητρώου σας, συνεχίστε δημιουργώντας έναν Πίνακα στον οποίο θα μεταφέρετε/συμπληρώσετε τις τιμές από τα αρχεία των αποτελεσμάτων και οι οποίοι θα έχουν την μορφή:

**Πίνακας 1:** Αποτελέσματα για την αντικειμενική με 60% στην "απόδοση" και 40% στο "βάρος".

Run	Best Objective value	$\beta_d$	$t_{yokeR}$	$t_{yokeS}$	Motor Efficiency (%)	Motor Weight (kg)
1						
2						
...						
RunNo						

- (j) Με βάση τις εξισώσεις (1) και (2), υπολογίστε και συμπληρώστε τις τελευταίες 2 στήλες (με γκρι).  
**Tip (Προτείνεται):** Μπορείτε ΠΡΙΝ τρέξετε την προσομοίωση να τροποποιήσετε τους κώδικες που έχετε ώστε να σας αποθηκεύουν αυτόματα τις "καλύτερες" τιμές της απόδοσης και μάζας του κινητήρα σε κάθε Run, ώστε να "γλυτώσετε" τους υπολογισμούς. Γενικά, οποιεσδήποτε τέτοιες τροποποιήσεις/βελτιώσεις θέλετε να δοκιμάσετε, να τις κάνετε με PopNo=1, IterNo=1, RunNo=1, ώστε να αποφεύγετε άσκοπες καθυστερήσεις.
- (k) Βάλτε μετά τον Πίνακα 1, το σχήμα σύγκλισης που αποθήκευσε το matlab στο τέλος της προσομοίωσης, (με όνομα **Convergence\_Curves.png**), η μορφή του οποίου είναι όπως φαίνεται στο **Σχ. 3**.
- (l) Επιλέξτε τις τιμές των μεταβλητών αναζήτησης που θεωρείτε ότι δίνουν (με βάση την παραπάνω αντικειμενική τον καλύτερο κινητήρα και προσπαθήστε να τρέξετε τον κώδικα σχεδιασμού του, ώστε να πάρετε το αρχείο **.ans** από το FEMM, μέσω του οποίου θα κάνετε copy στο έγγραφο του Word, ένα screenshot που να δείχνει την κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής όπως φαίνεται στο **Σχ. 4**.

∞∞∞∞ -- ∞∞∞∞ -- ∞∞∞∞ -- ∞∞∞∞ -- ∞∞∞∞ -- ∞∞∞∞

- 3) **Δοκιμές ΠΚΒ:** Στο **main.m** αλλάξτε στην 6<sup>η</sup> γραμμή το "@ObjFunc" σε "@MObjFunc" και στην 13<sup>η</sup> γραμμή βάλτε όπου PSO, το MOPSO.
- (a) Και σε αυτή την περίπτωση, οι μεταβλητές αναζήτησης παραμένουν οι ίδιες (δηλ.  $\beta_d$ ,  $t_{yokeR}$  και  $t_{yokeS}$ ) όπως και τα εύρη μεταβολής τους.
- (b) Δοκιμάστε μια προσομοίωση με PopNo=1, IterNo=1, RunNo=1 (στο **main.m**) για να δείτε το **"Total time so far"**, αν και δεν θα δείτε καμμία σημαντική διαφορά.
- (c) Οι ποσότητες που θα λαμβάνονται υπόψη για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, είναι απ' ευθείας η απόδοση ( $\eta$ ) και η μάζα ( $M_{motor}$ ) του κινητήρα, αλλά επειδή θέλουμε να ελαχιστοποιηθούν, οι εκφράσεις που χρησιμοποιούνται (βλ. προτελευταία γραμμή στο **MObjFunc.m**) είναι:

$$\frac{1}{\eta} \quad \frac{1}{M} \quad (3) \quad \text{όπου} \quad M = \frac{M_{ideal}}{M_{motor}} \quad (4)$$

- (d) Γυρίστε στο **main.m** και θέστε : PopNo=60, IterNo=80, RunNo=5. Υπολογίστε το συνολικό χρόνο που θα πάρει η προσομοίωση.
- (e) Προσαρμόστε κατά βούληση τις παραπάνω τρεις παραμέτρους ώστε να σας "φτάσει" ο διαθέσιμος χρόνος που σκοπεύετε να "ξοδέψετε" για αυτή τη διερεύνηση. Ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στο σημείο 2(f) σε συνδυασμό με το 2(j).

- (f) Πατήστε [Run] ώστε να αρχίσει η προσομοίωση.
- (g) Αποθηκεύστε τα αποτελέσματά σας (δηλ. τα αρχεία .mat) σε έναν φάκελο με όνομα **"MultiObj\_Optimum"**.
- (h) Στο έγγραφο του Word με όνομα **«Group-XX.docx»**, δημιουργήστε έναν Πίνακα στον οποίο θα μεταφέρετε/συμπληρώσετε τις τιμές από τα αρχεία των αποτελεσμάτων και οι οποίοι θα έχουν την μορφή:

**Πίνακας 2:** Αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την αντικειμενική  $\min[1/\eta \quad 1/M]$ .

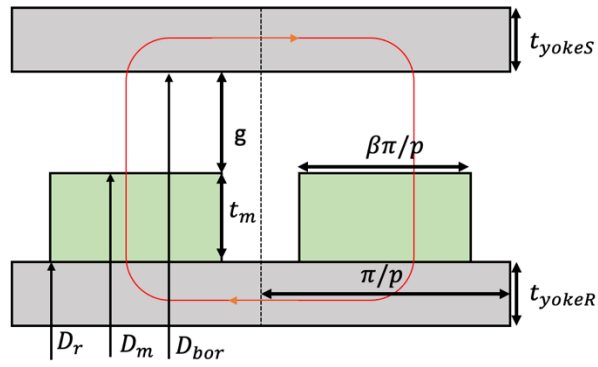
Run	Best Objective value	$\beta_\delta$	$t_{yokeR}$	$t_{yokeS}$	Motor Efficiency (%)	Motor Weight (kg)
1	,					
2	,					
...	,					
RunNo	,					

- (i) Με βάση τις εξισώσεις (3) και (4), υπολογίστε και συμπληρώστε τις τελευταίες 2. Επίσης, παρατηρήστε ότι η 2<sup>η</sup> στήλη δεν θα περιέχει 1 αλλά 2 τιμές.
- (j) Βάλτε μετά τον Πίνακα 2, το σχήμα που αποθήκευσε το matlab στο τέλος της προσομοίωσης, (με όνομα **Pareto\_Fronts.png**), η μορφή του οποίου είναι όπως φαίνεται στο **Σχ. 5**. (το σχήμα είναι ενδεικτικό, γιατί προέκυψε με μικρό αριθμό επαναλήψεων για κάθε run).
- (k) Επιλέξτε τις τιμές των μεταβλητών αναζήτησης που θεωρείτε ότι δίνουν (με βάση την παραπάνω αντικειμενική τον καλύτερο κινητήρα και προσπαθήστε να τρέξετε τον κώδικα σχεδιασμού του, ώστε να πάρετε το αρχείο .ans από το FEMM, μέσω του οποίου θα κάνετε copy στο έγγραφο του Word, ένα screenshot που να δείχνει την κατανομή της πυκνότητας μαγνητική ροής όπως φαίνεται στο **Σχ. 4**.

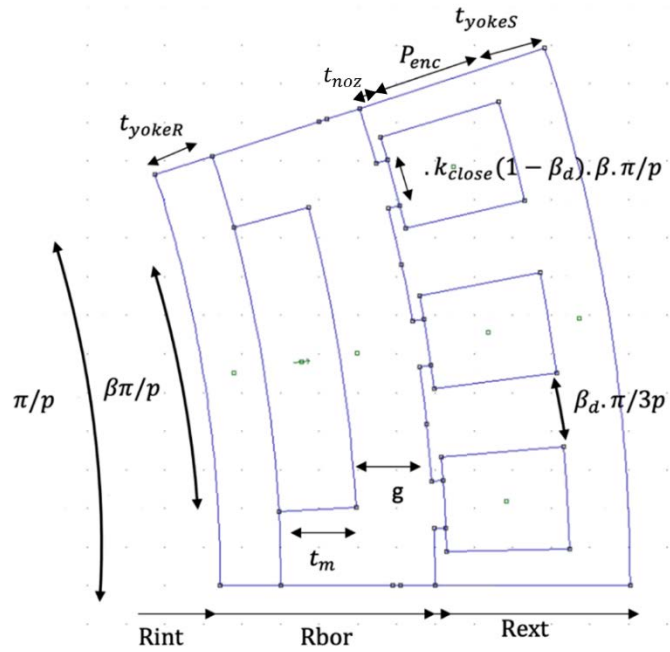
∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞ --- ∞∞∞∞

- 4) **Σχολιασμός:** Στο τέλος του εγγράφου Word, προσθέστε 2 παραγράφους με δικά σας σχόλια, κρίσεις και παρατηρήσεις για τις δύο περιπτώσεις βελτιστοποίησης (single- , multi-) αντίστοιχα.
- 5) **Διερεύνηση εκ νέου (optional):** Προσπαθήστε να επαναλάβετε τις διαδικασίες (2), (3) και (4) εάν αντί για τρεις μεταβλητές αναζήτησης έχουμε πέντε και συγκεκριμένα τις:  
 $\beta_d$  (δηλ. ο λόγος του πλάτους του πόλου του στάτη προς το πλάτος του αυλακιού),  
 $t_{yokeR}$  (δηλ. το πάχος του σώματος του δρομέα),  
 $t_{yokeS}$  (δηλ. το πάχος του σώματος του στάτη),  
 $\beta$  (δηλ. το λόγο πόλου προς το τόξο πόλου),  
 $t_m$  (δηλ. το πάχος του μαγνήτη).
- 6) **Υποβολή εργασίας:** Συγκεντρώστε **όλα** τα αρχεία σας (.docx, .m, .mat, .ans και ό, τι άλλο θεωρείται ότι χρειάζεται) και συμπίεστε τα σε ένα αρχείο με όνομα αρχείου το επώνυμό σας στα λατινικά ακολουθούμενο από τον αριθμό μητρώου σας (π.χ. **karnavast\_501.zip**). Υποβάλλετε την εργασία σας, στην περιοχή **Εργασίες** του e-class αποκλειστικά μέχρι την προθεσμία που θα έχει οριστεί εκεί (εκτιμώμενη ημερομηνία υποβολής: 30/06/2025).

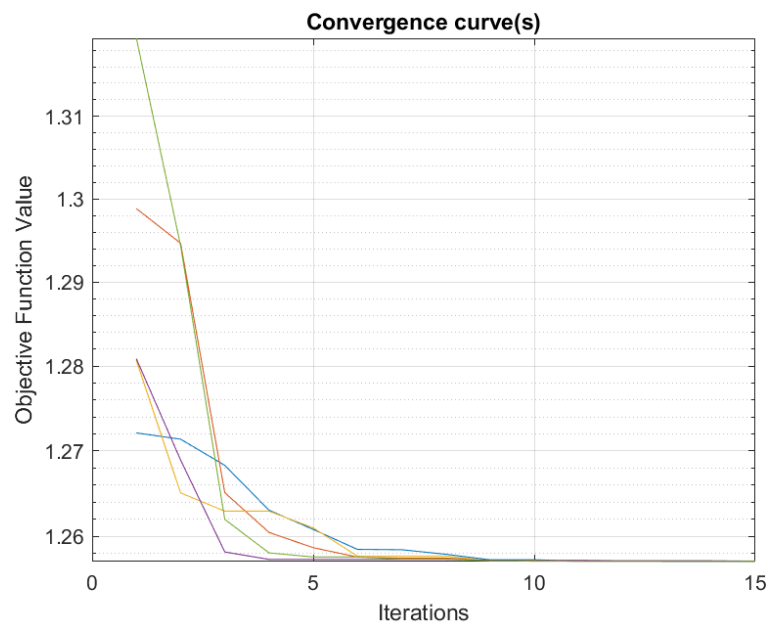
Καλή επιτυχία!



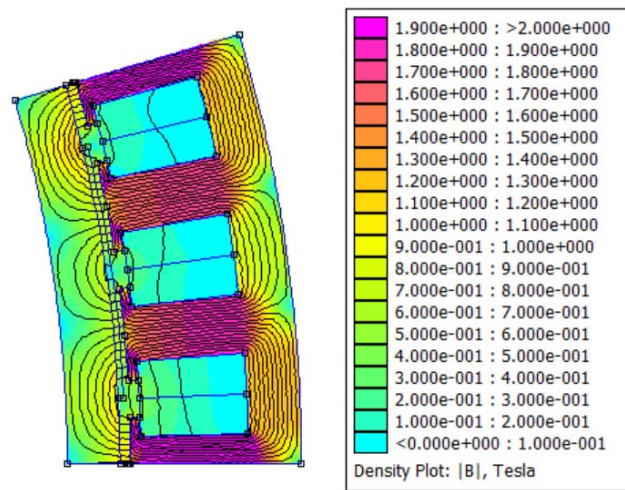
**Σχ. 1.** Στοιχειώδης απεικόνιση ενός ζεύγους πόλων του ΣΚΜΜ και βασικά μεγέθη.



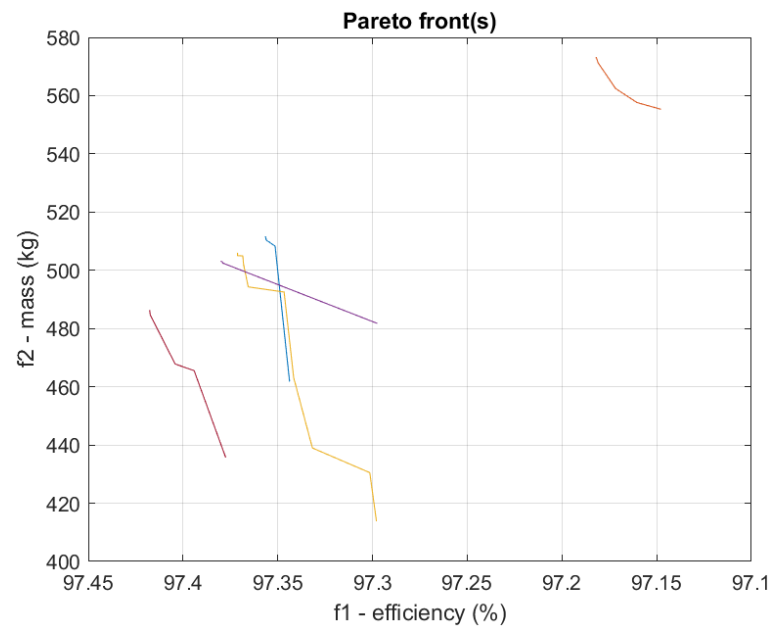
**Σχ. 2.** Απεικόνιση ενός τόξου πόλου (pole arc) του ΣΚΜΜ υπό διερεύνηση.  
(υπάρχει σκόπιμη μεγέθυνση σε κάποια μήκη για λόγους καλύτερης κατανόησης της γεωμετρίας).



**Σχ. 3.** Ενδεικτικό γράφημα καμπυλών σύγκλισης μετά από προσομοίωση, ( $IterNo=10$ ,  $RunNo=5$ ).



**Σχ. 4.** Ενδεικτική κατανομή πυκνότητας ροής (flux density) του ΣΚΜΜ υπό διερεύνηση.



**Σχ. 5.** Ενδεικτικό γράφημα Pareto μετά από προσομοίωση, (IterNo=10, RunNo=5).