

M.Sc. Program:
Technological & Management Advances on
Intelligent Transportation Electrification Systems

Course TE-1:
Electrical Machines Design for Transportation
Electrification

Project 01:
Υπολογισμός Ηλεκτρο-Μαγνητικών
Μεγεθών σε Μετασχηματιστή Χαμηλής
Ισχύος.



EI Transformer Core

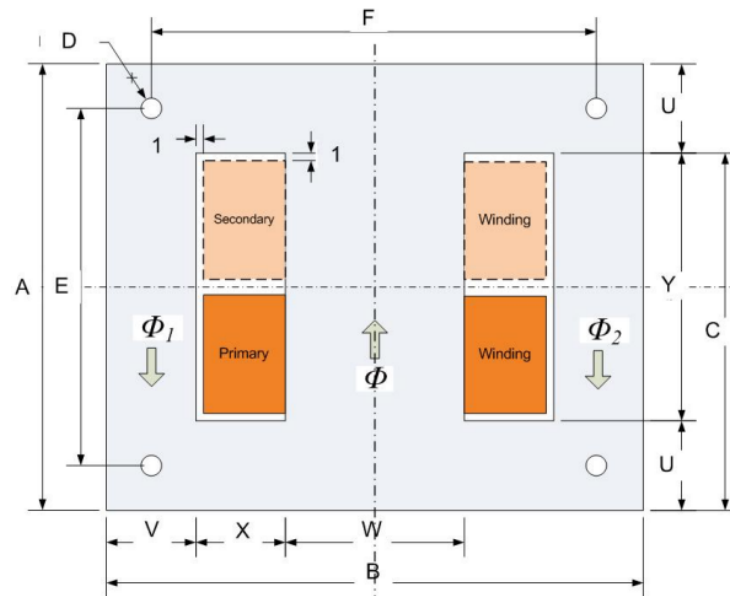
Κατασκευαστής: NICORE ELECTRICAL MANUFACTORY CO.,LTD.

Μοντέλο: EI-57

Υλικό πυρήνα: Steel 1018

Πάχος ελάσματος: 0,35mm (stacking factor 0,98)

Πρωτεύον τύλιγα: Χαλκού, διαμέτρου AWG 30, 1000 τυλίγματα, το οποίο διαπερνά ρεύμα 0,2 A



Σχ.1 – Σχέδιο πυρήνα

Product Standard															
Ei Size standard														Unit:mm	
Item	Type	A	B	C	D	E	F	U	U1	V	W	X	Y	G	
1	EI24	18	24	15				3	2.95	3	6	6	12.05		
1	EI-28	25	28	21				4	4	4	8	6	17		
2	EI-30	25	30	20				5	5	5	10	5	15		
3	EI-35	29.5	35	24.5				5	5	5	9.6	7.7	19.5		
4	EI-35L	29.5	35	24.75				4.75	4.75	5	9.6	7.7	20		
5	EI-41T	33.5	41	27.5				6	5.5	5.5	13	8.5	22	21.6	
6	EI-41(2H)	33	41	27	3.2	27	20.5	6	6	6	13	8	21		
7	EI-43(T)	33.5	43	27.5				6	5.5	6	13	9	22	21.6	
8	EI-43	34.8	43	28.2				6.6	6.6	6.6	13	8.4	21.6		
9	EI-48(2H)	40	48	32	3.5	32	24	8	8	8	16	8	24		
10	EI-48(T)	40	48	32				8	8	8	16	8	24	23.6	
11	EI-54	45	54	36				9	9	9	18	9	27		
12	EI-57(2H)	47.5	57	38	4.0	38	28.5	9.5	9.5	9.5	19	9.5	28.5		
13	EI-60(4H)	50	60	40	4.5	40	50	10	10	10	20	10	30		
14	EI-66(4H)	55	66	44	4.5	44	55	11	11	11	22	11	33		
15	EI-76.2(4H)	63.5	76.2	50.8	5	50.8	64	12.7	12.7	12.7	25.4	12.7	38.1		
16	EI-85.8(4H)	71.5	85.8	57.2	5	57.2	71	14.3	14.3	14.3	28.6	14.3	42.9		
17	EI-96(4H)	80	96	64	6	64	79	16	16	16	32	16	48		

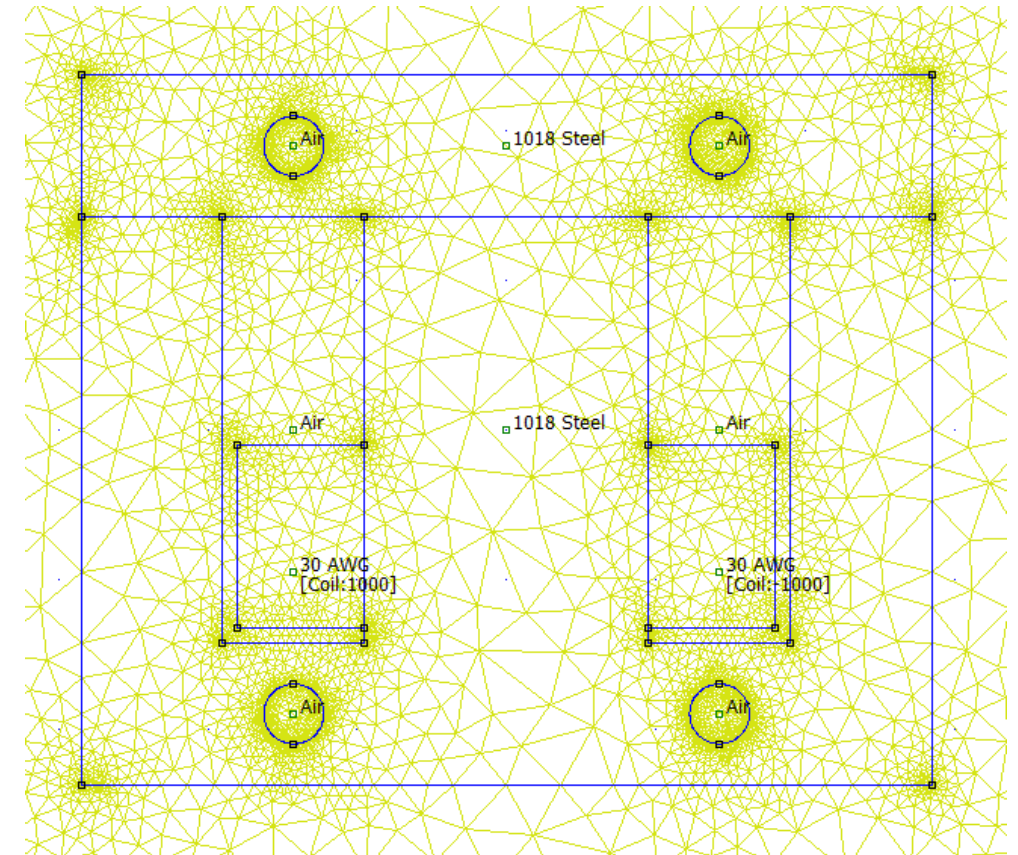
Σχ.2 - Γεωμετρικά μεγέθη πυρήνα

FEMM Model

Η μοντελοποίηση του πυρήνα στο FEMM έγινε με χρήση του MATLAB (αρχείο EI_57.m).

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα δεδομένα που ορίστηκαν για την επίλυση της προσομοίωσης:

Problem Definition	
Problem Type	Planar
Length Units	Millimeters
Frequency (Hz)	0
Depth	28.5
Solver Precision	1e-008
Min Angle	30
Smart Mesh	On
AC Solver	Succ. Approx
Previous Solution	
Prev Type	None



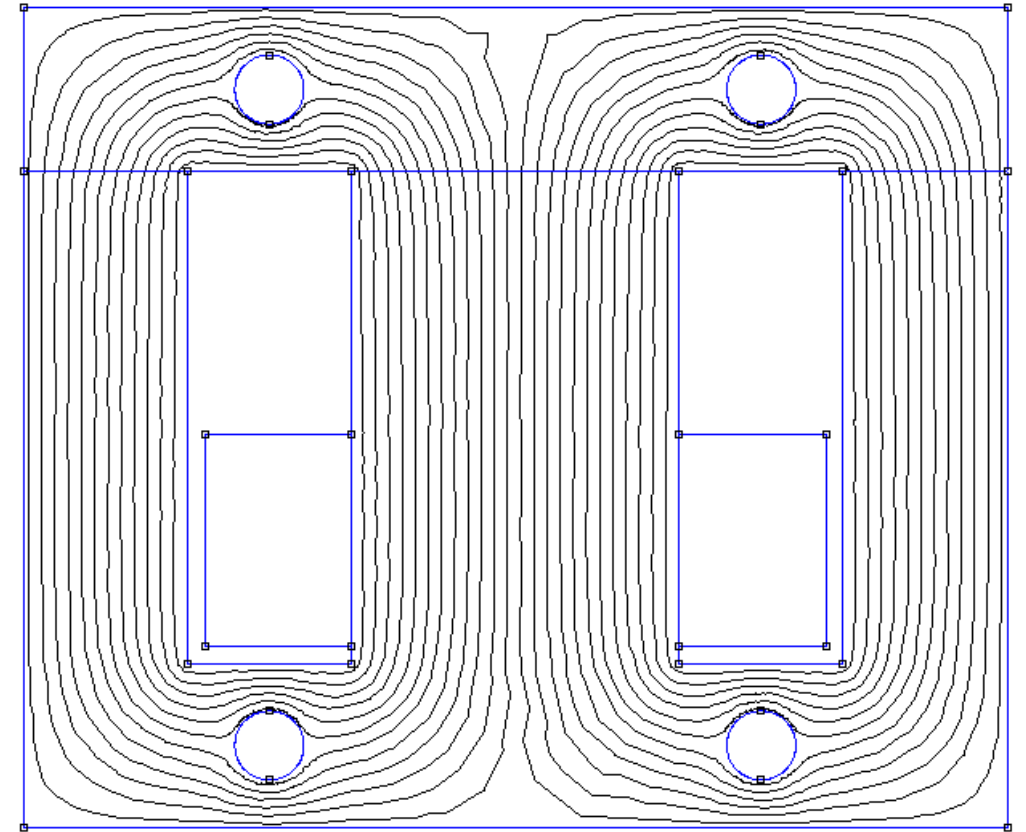
Σχ.3 – Τριγωνοποιημένο μοντέλο πυρήνα (FEMM)

2^α – Κατανομή των μαγνητικών γραμμών

Μετά την ανάλυση του συστήματος στο FEMM, μπορούμε να δούμε όλα τα βασικά ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη.

Στο Σχ.4 φαίνονται οι μαγνητικές γραμμές που δημιουργούνται λόγω της ροής ρεύματος στο πρωτεύον τυλίγμα.

Παρατηρούμε ότι οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγεται παραμένουν εντός του πυρήνα (λόγω υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας του σιδήρου) και διαμερίζονται και από τις δύο κατευθύνσεις αριστερά και δεξιά του τυλίγματος, λόγω της μορφολογίας του πυρήνα.



Σχ.4 – Μαγνητικές γραμμές πυρήνα

2^β – Πυκνότητα της μαγνητικής ροής

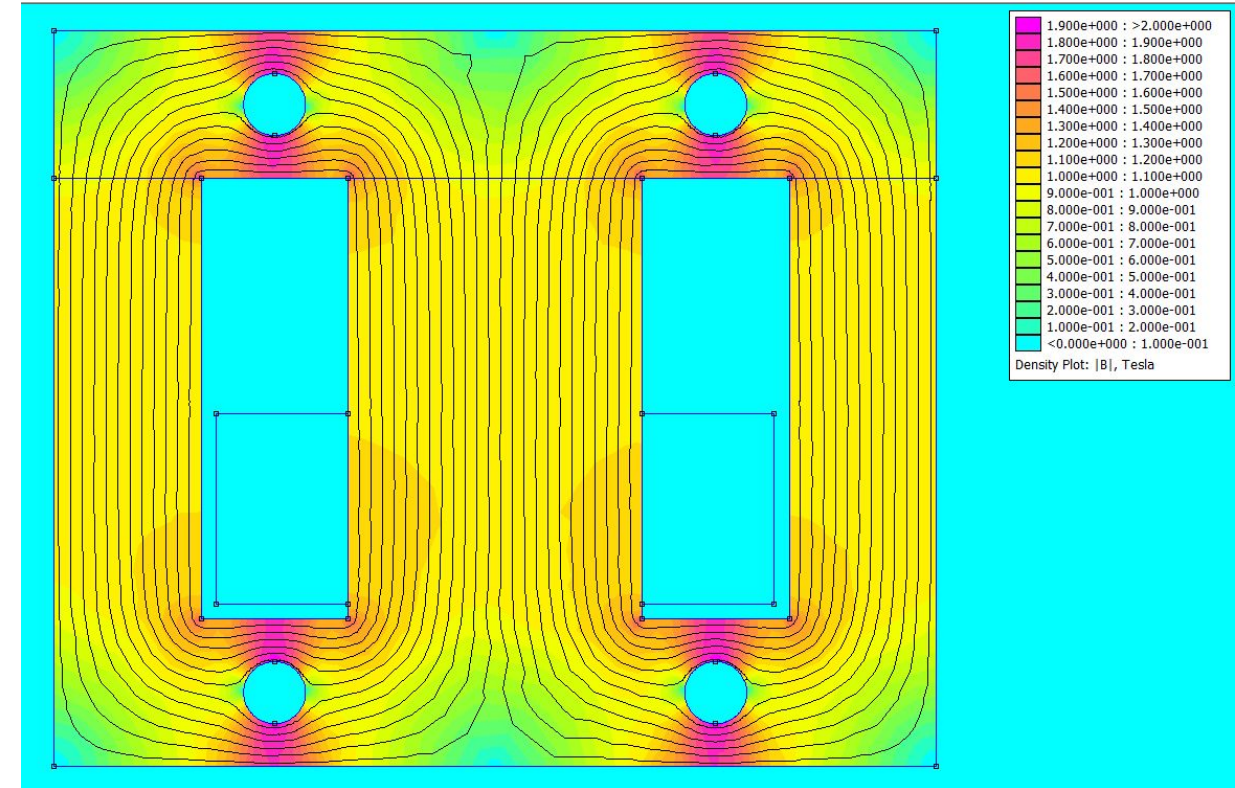
Στο Σχ.5 απεικονίζεται η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα και η αντίστοιχη χρωματική κλίμακα που δείχνει την διαβάθμιση της πυκνότητας.

Παρατηρούμε μια ομοιόμορφη πυκνότητα σε όλη την περιοχή που περνούν οι μαγνητικές γραμμές, περίπου ίση με 1 Tesla, η οποία αυξάνεται λίγο στις εσωτερικές ακμές καθώς και στα σημεία όπου υπάρχουν οι οπές. Θεωρείται λογικό, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών που περνά από τις διατομές άνω και κάτω των οπών.

Η ελάχιστη και η μέγιστη πυκνότητα υπολογίστηκε στο Matlab, χωρίζοντας την συνολική επιφάνεια του πυρήνα σε ένα πλέγμα 100x100 και λαμβάνοντας σε κάθε σημείο του πλέγματος την πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Συγκρίνοντας όλα τα σημεία, προέκυψε:

$$B_{max} = 1,9083 \text{ T}$$

$$B_{min} = 1,5005 * 10^{-4} \text{ T}$$



Σχ.5 – Απεικόνιση πυκνότητας μαγνητικής ροής

2γ – P_{Cu} και W_c του τυλίγματος

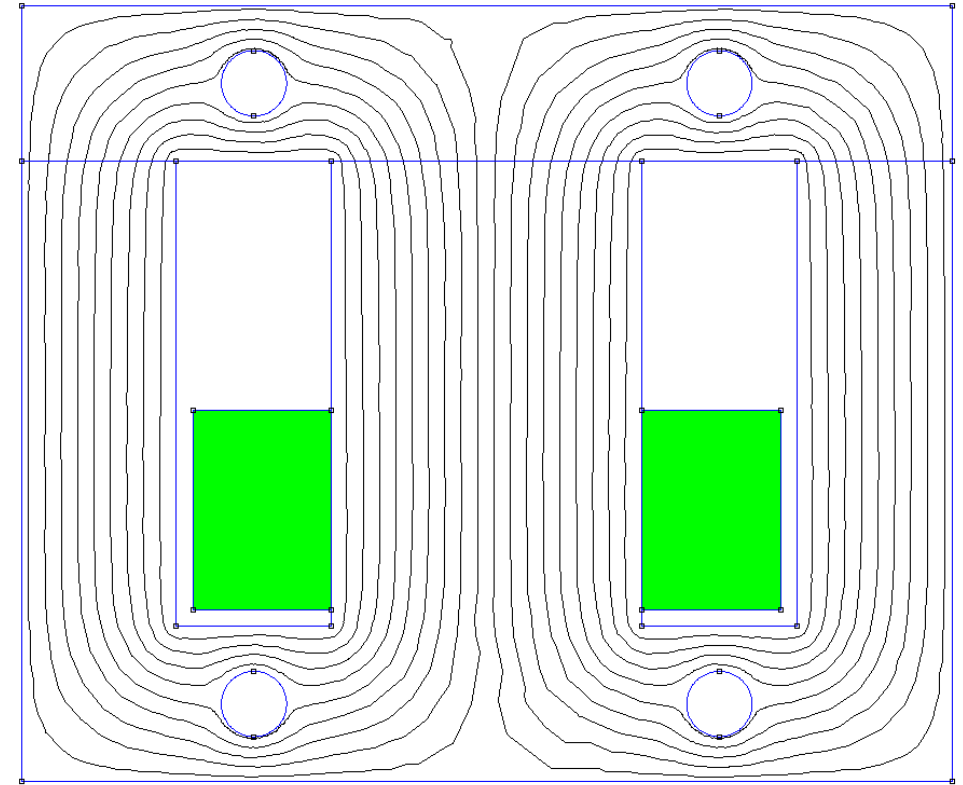
Για τον υπολογισμό των P_{Cu} και W_c , επιλέχθηκαν τα block των τυλιγμάτων και έγινε χρήση της συνάρτησης του FEMM `mo_blockintegral()`. Έτσι προέκυψε:

- Ωμικές απώλειες τυλίγματος:

$$P_{Cu} = 0,7714 \text{ W}$$

- Αποθηκευμένη ενέργεια στο τύλιγμα:

$$W_c = 1,1445 * 10^{-4} \text{ J}$$



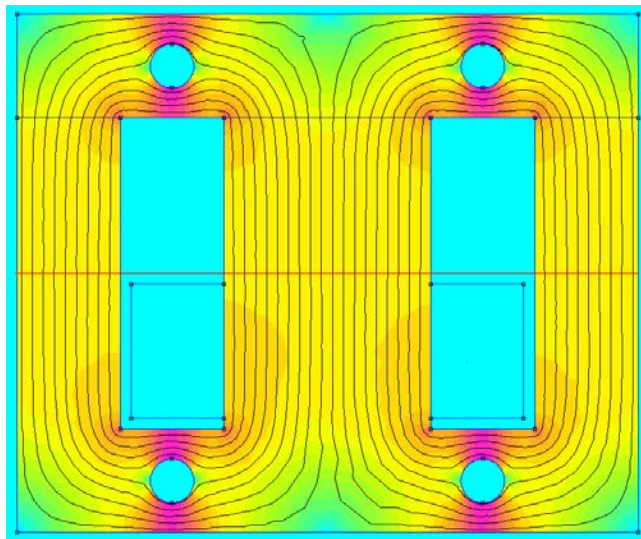
Σχ.6 – Επιλογή block τυλίγματος

$2^{\delta(\alpha)}$ – Πλάτος της πυκνότητας μαγνητικής ροής

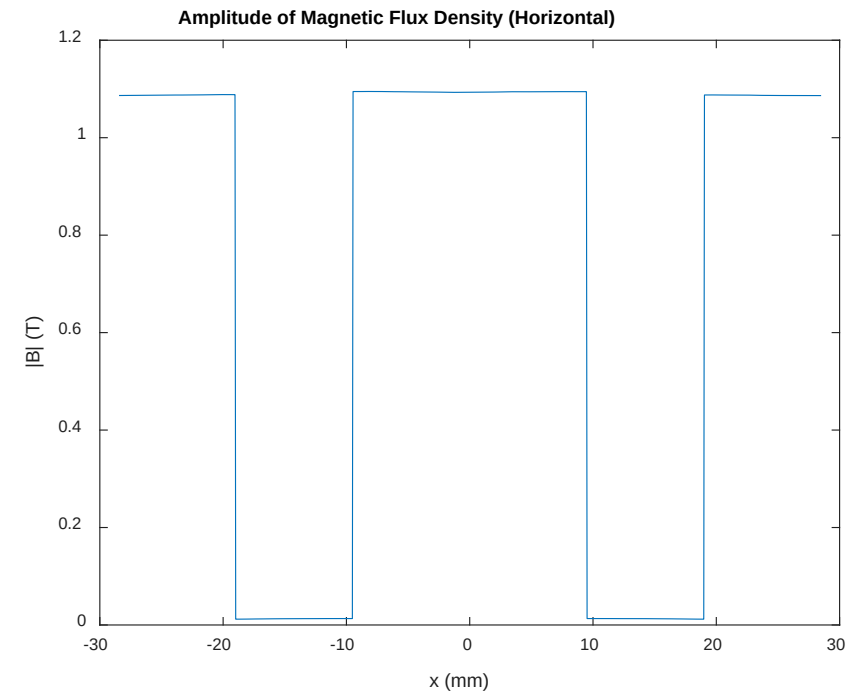
Απεικόνιση του πλάτος της πυκνότητας της μαγνητικής ροής κατά μήκος της γραμμής που διέρχεται από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας

Το διάγραμμα προέκυψε από την καταγραφή της πυκνότητας σε 1000 σημεία κατά μήκος του οριζόντιου άξονα συμμετρίας (Σχ.7).

Παρατηρούμε το διάγραμμα να παίρνει την μέγιστη πυκνότητα στα σημεία που διατρέχουν τον πυρήνα, ενώ η πυκνότητα μηδενίζεται στα σημεία του άξονα που διατρέχουν τις εσωτερικές οπές του πυρήνα, από τις οποίες και δεν περνούν μαγνητικές γραμμές.



Σχ.7– Απεικ. οριζόντιου άξονα (κόκκινη γραμμή)



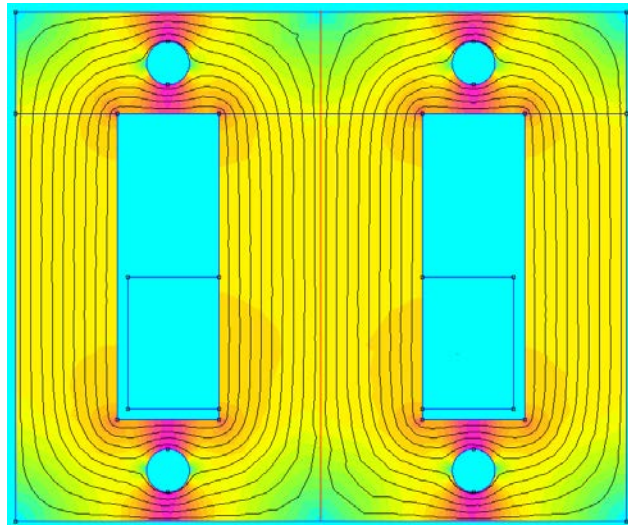
Σχ.8 – Διάγραμμα πλάτους $|B|$ στον οριζόντιο άξονα

$2^{\delta(\beta)}$ – Πλάτος της πυκνότητας μαγνητικής ροής

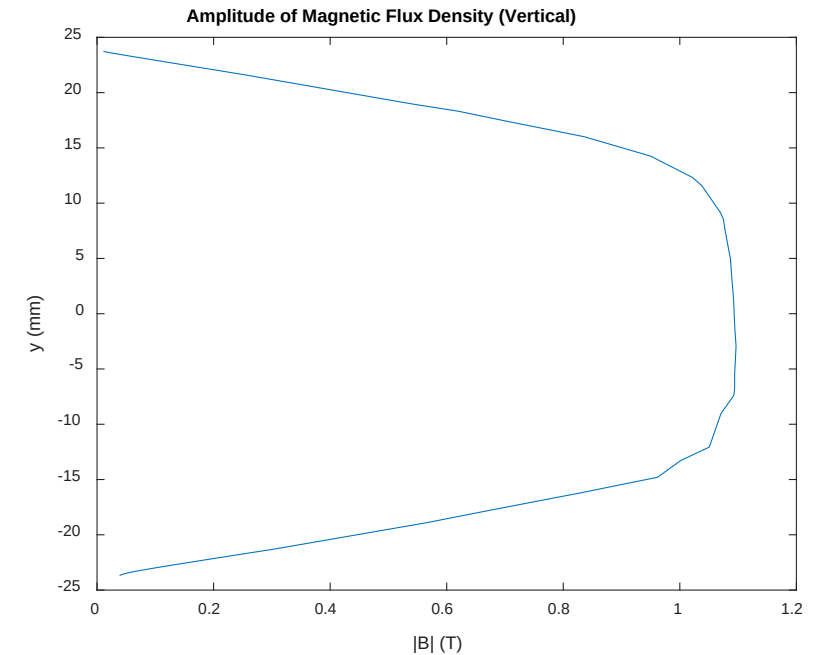
Απεικόνιση του πλάτος της πυκνότητας της μαγνητικής ροής κατά μήκος της γραμμής που διέρχεται από τον κάθετο άξονα συμμετρίας

Το διάγραμμα προέκυψε από την καταγραφή της πυκνότητας σε 1000 σημεία κατά μήκος του κάθετου άξονα συμμετρίας (Σχ.9).

Με βάση το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι στα άκρα (πάνω και κάτω) το $|B|$ σχεδόν μηδενίζεται καθώς δεν περνούν μαγνητικές γραμμές από αυτά τα σημεία. Αντίθετα, το $|B|$ μεγιστοποιείται στο μέσο (ως προς τον κάθετο άξονα) του πυρήνα.



Σχ.9– Απεικ. κάθετου άξονα (κόκκινη γραμμή)



Σχ.10 – Διάγραμμα πλάτους $|B|$ στον κάθετο άξονα

2^ε – Μαγνητική Ροή

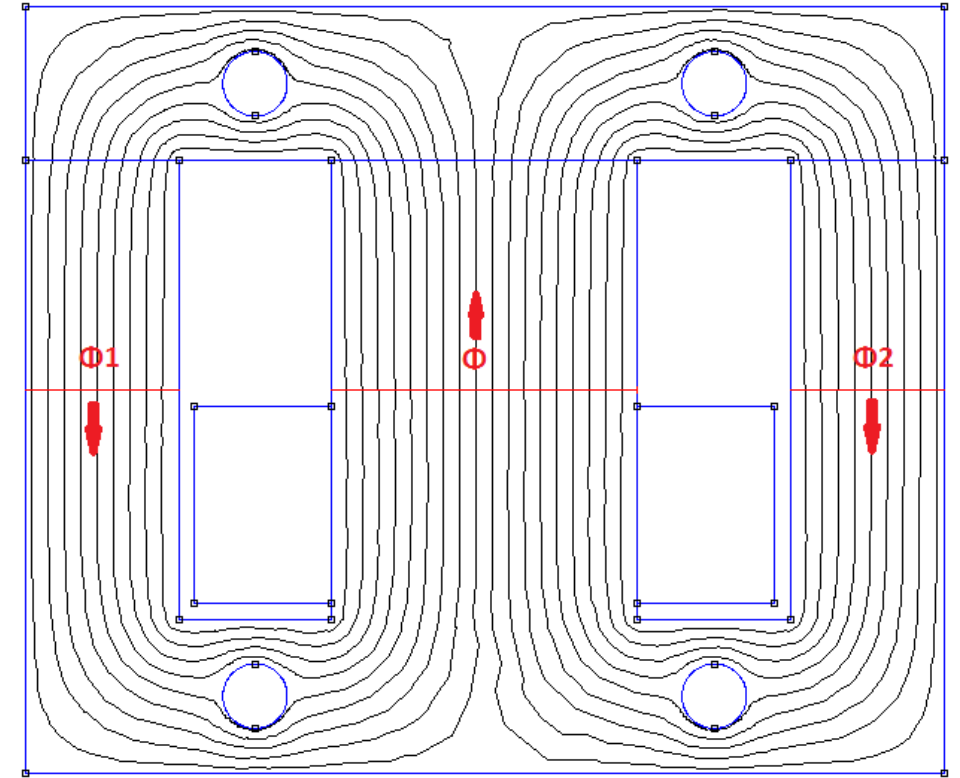
Για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής, τόσο στο κέντρο όσο και στα άκρα του πυρήνα, δημιουργήθηκαν γραμμές στις αντίστοιχες 'διατομές' και έγινε χρήση της συνάρτησης του FEMM `mo_lineintegral()`. Επομένως προέκυψαν:

$$\Phi = 5,9246 * 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_1 = -2,9446 * 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_2 = -2,9429 * 10^{-4} \text{ Wb}$$

Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν την συμμετρία στην κατανομή της μαγνητικής ροής στα 2 άκρα στη συγκεκριμένη μορφολογία πυρήνα, λόγω του σχήματος του.



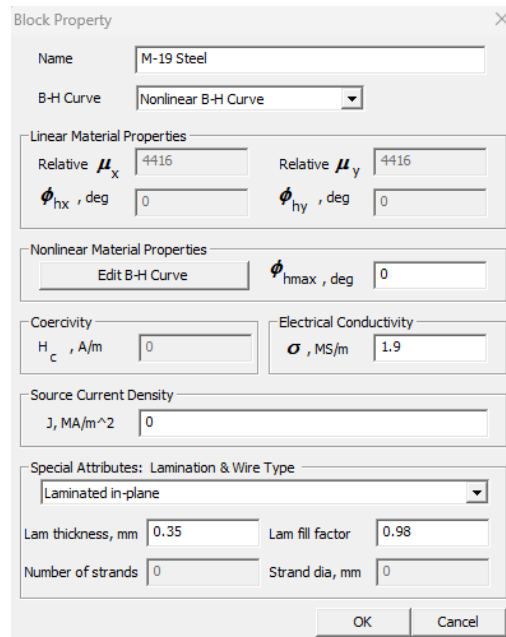
Σχ.11 – Σημεία υπολογισμού μαγν. ροής

2^{στ} – Αλλαγή υλικού πυρήνα

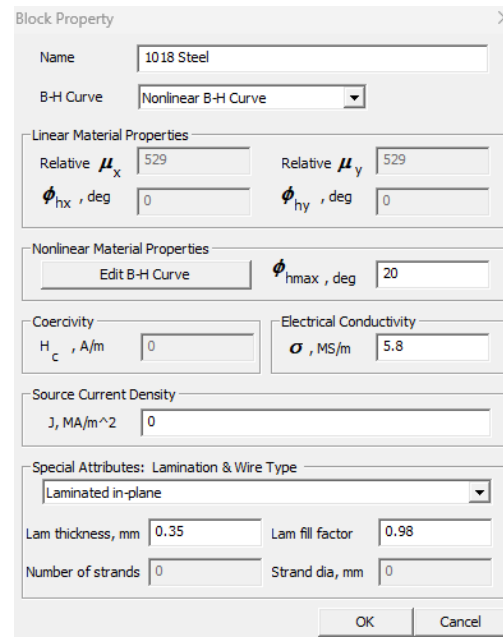
Πραγματοποιήθηκε η ίδια προσομοίωση με διαφορετικό υλικό πυρήνα (αρχείο EI_57_M19.m), προκειμένου να διαπιστωθεί ποια είναι η επίδραση του υλικού στα μαγνητοστατικά μεγέθη.

Χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πυρήνα: M-19 Steel

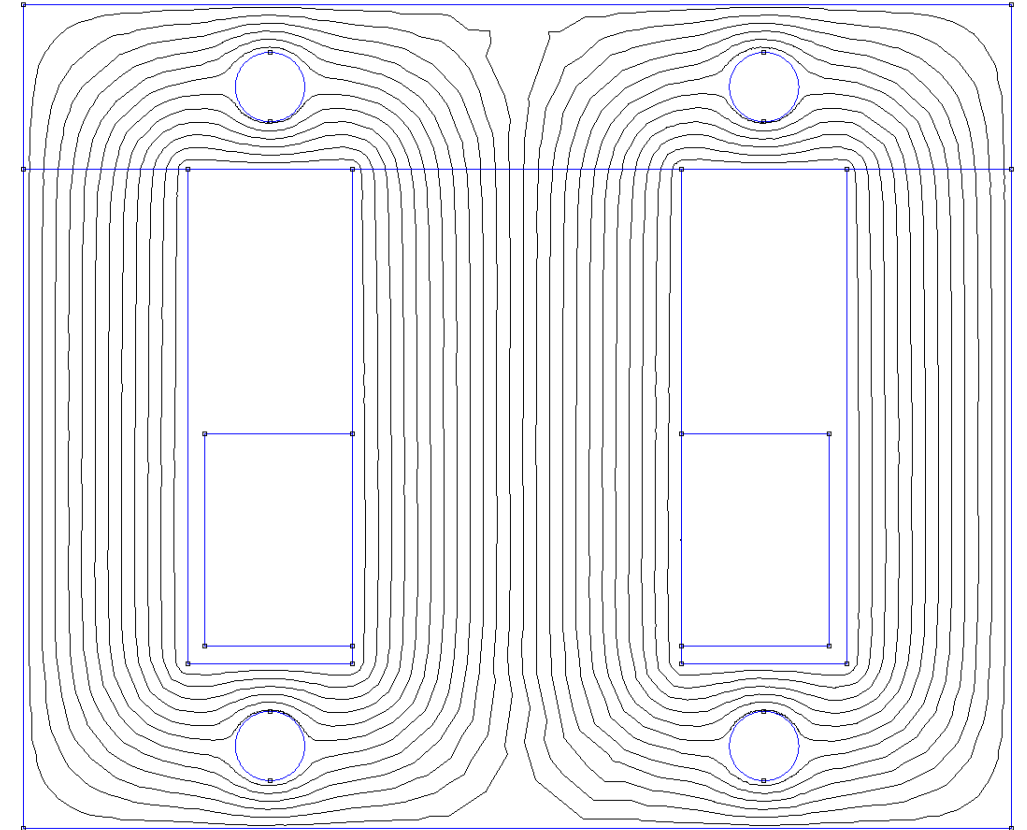
Από την σύγκριση των χαρακτηριστικών των 2 υλικών, παρατηρούμε πως ο M-19 έχει αρκετά μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα.



Σχ.12 – Χαρακτ. M-19 Steel



Σχ.13 – Χαρακτ. 1018 Steel



Σχ.14 – Μαγνητικές γραμμές πυρήνα (M-19 Steel)

2^οτ – Αλλαγή υλικού πυρήνα - Αποτελέσματα

Στο Σχ.15 απεικονίζεται η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα και η αντίστοιχη χρωματική κλίμακα που δείχνει την διαβάθμιση της πυκνότητας.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή υπολογίστηκαν:

$$B_{max} = 2,0214 \text{ T}$$

$$B_{min} = 1,6805 * 10^{-4} \text{ T}$$

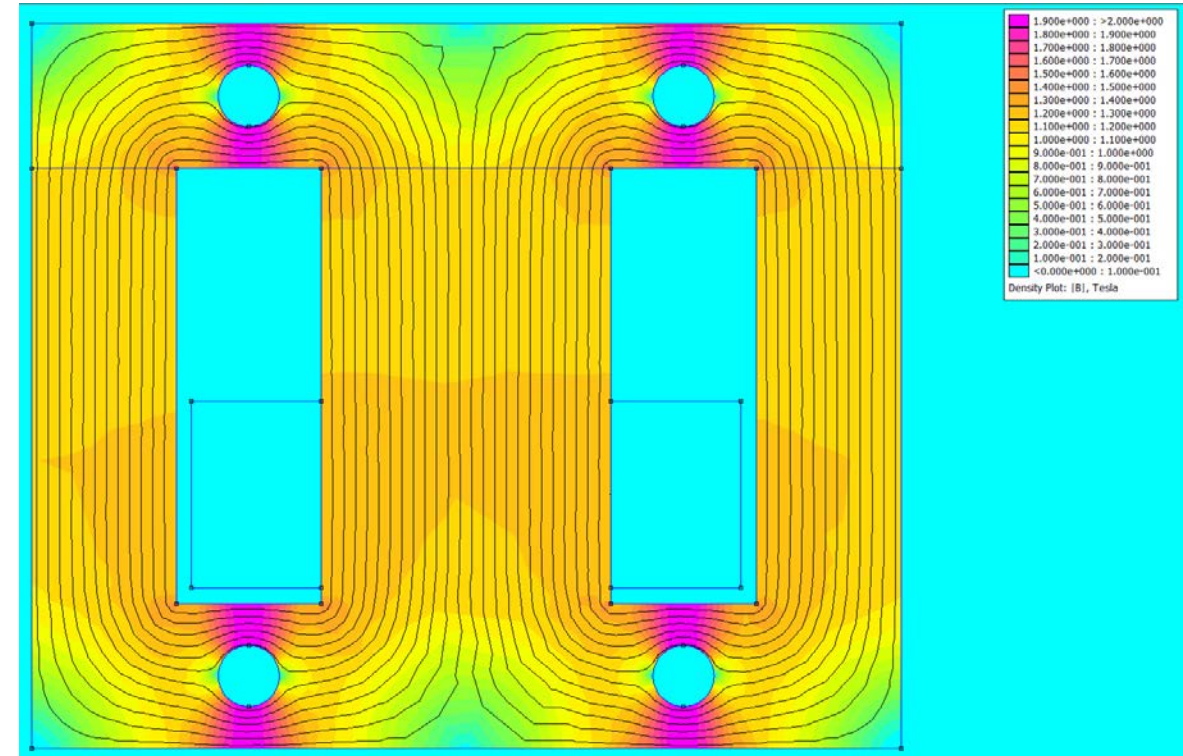
Οι τιμές της πυκνότητας σε όλο το εύρος είναι μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν με χρήση του 1018 Steel. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από την μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα του M-19.

Σε ότι αφορά τις ωμικές απώλειες και την αποθηκευμένη ενέργεια στο τύλιγμα, υπολογίστηκαν:

$$P_{Cu} = 0,7714 \text{ W}$$

$$W_c = 1,5673 * 10^{-4} \text{ J}$$

Πρόκειται για τιμές που επηρεάζονται από το τύλιγμα, γι' αυτό και δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση.

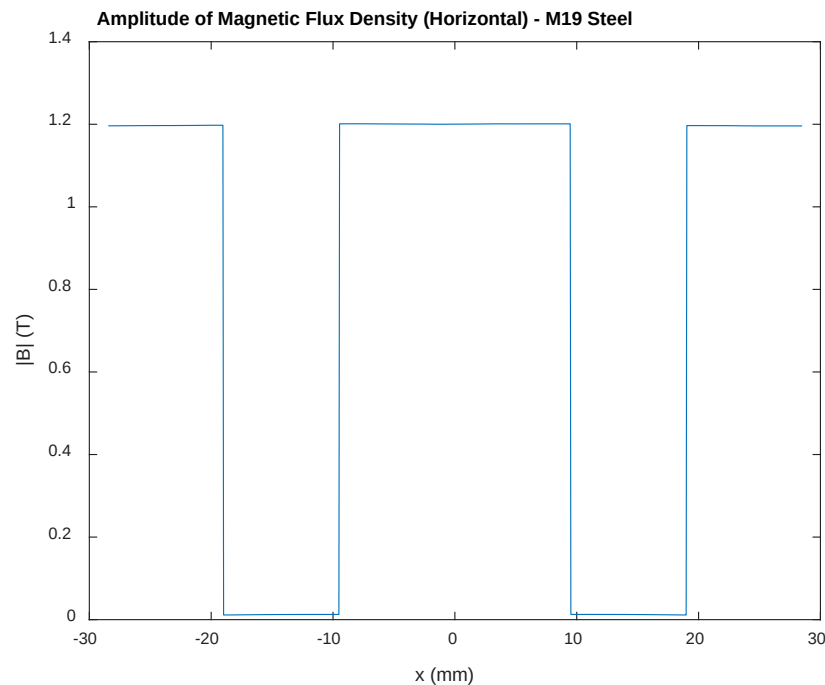


Σχ.15 – Απεικόνιση πυκνότητας μαγνητικής ροής (M-19 Steel)

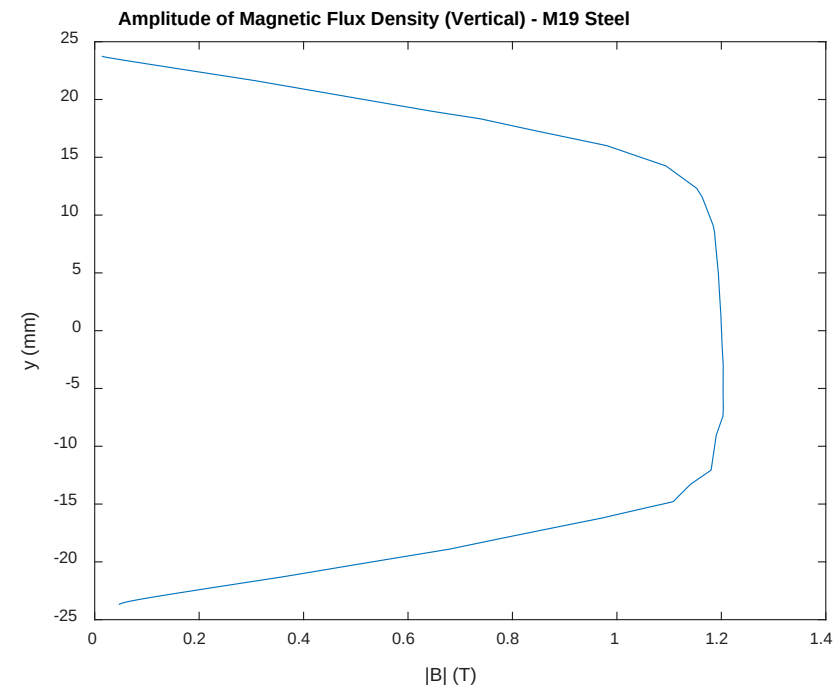
2^{στ} – Αλλαγή υλικού πυρήνα - Αποτελέσματα

Τα διαγράμματα πλάτους της πυκνότητας της μαγνητικής ροής κατά μήκος της γραμμής που διέρχεται από τον οριζόντιο και τον κάθετο άξονα συμμετρίας, φαίνονται στα Σχ.16 και Σχ.17.

Παρατηρούμε πως η συμπεριφορά του συγκεκριμένου υλικού είναι αντίστοιχη με του 1018 Steel, με μόνη διαφορά τις λίγο μεγαλύτερες μέγιστες τιμές (οι οποίες δικαιολογούνται σύμφωνα με την διαφάνεια 10).



Σχ.16 – Διάγραμμα πλάτους $|B|$ στον οριζόντιο άξονα



Σχ.17 – Διάγραμμα πλάτους $|B|$ στον κάθετο άξονα

2^οτ – Αλλαγή υλικού πυρήνα - Αποτελέσματα

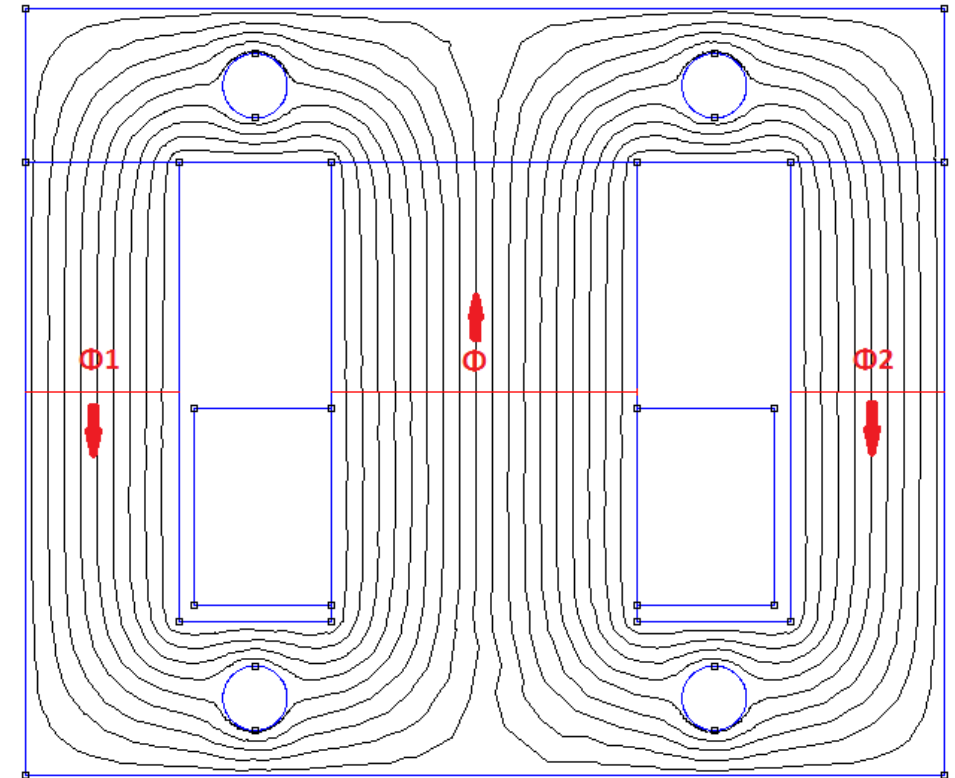
Σε ότι αφορά στον υπολογισμό της μαγνητικής ροής, από την προσομοίωση προέκυψαν οι τιμές:

$$\Phi = 6,5025 * 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_1 = -3,2408 * 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_2 = -3,2392 * 10^{-4} \text{ Wb}$$

Και πάλι, οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν την συμμετρία στην κατανομή της μαγνητικής ροής για την συγκεκριμένη γεωμετρία πυρήνα. Οι τιμές της μαγνητικής ροής είναι επίσης μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν με την προσομοίωση του 1018 Steel (κατά περίπου 0,6 Wb), γεγονός που επίσης εξηγείται με βάση την μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα του M-19.



Σχ.18 – Σημεία υπολογισμού μαγν. Ροής

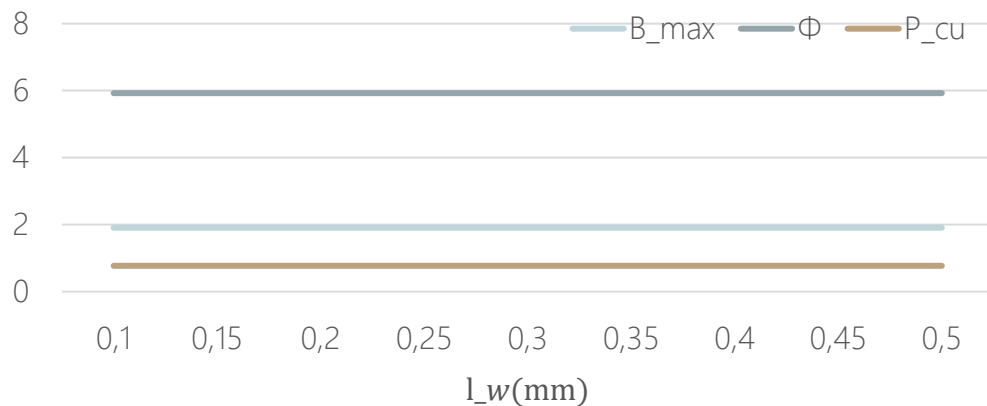
3 – Αλλαγή πάχους ελάσματος

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική διερεύνηση ως προς το πάχος του ελάσματος (l_w). Κρατώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα ίδια με τα αρχικά και το υλικό πυρήνα το 1018, αλλάχθηκε διαδοχικά μόνο το πάχος ελάσματος από 0.1 σε 0.5mm (με βήμα 0.05).

Από την διερεύνηση προέκυψε πως το πάχος του ελάσματος δεν επηρεάζει τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη του μοντέλου μας καθώς και τις απώλειες του τυλίγματος. Πρακτικά, αφορά μόνο στις απώλειες δινορευμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες:

$$B_{max} = f(l_w), \Phi = f(l_w) \text{ και } P_{Cu} = f(l_w)$$



l_w	B_{max}	Φ	Φ_1	Φ_2	P_{Cu}
0,1	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,15	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,2	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,25	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,3	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,35	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,4	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,45	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714
0,5	1,9083	5.9246e-04	-2.9446e-04	-2.9429e-04	0,7714