



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός Μαγνητορεολογικού Συμπλέκτη

ΚΟΥΡΤΗΣ ΛΑΜΠΡΟΣ

[1069357]

ΠΑΝΤΕΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ –ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ,

[2/2024]

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

τ_gΌριο Ροής (Pa)	PΠίεση Ρευστού (Pa)
aΎψος Αυλάκωσης (m)	TΡοπή (Nm)
τ Διατμητική Τάση (Pa)	BΠυκνότητα Μαγνητικής Ροής (T)
τ_{gr} Όριο Ροής εντός της αυλάκωσης (Pa)	IΗλεκτρικό Ρεύμα (A)
ω_1Γωνιακή Ταχύτητα Οδηγού Δίσκου (rad/s)	JΠυκνότητα Ηλεκτρικού Ρεύματος (A/m ²)
λ Συντελεστής Ενέργειας (Nm/Pc)	HΈνταση Μαγνητικού Πεδίου (A/m)
ω_2Γωνιακή Ταχύτητα Οδηγούμενου Δίσκου (rad/s)	AΔιατομή Σύρματος (m ²)
$\Delta\omega$ Διαφορά Γωνιακής Ταχύτητα (rad/s)	NΤυλίγματα Πηνίου
rΑκτίνα Δίσκου (m)	σ Αγωγιμότητα Καλωδίου (S/m)
r_{in}Εσωτερική Ακτίνα (m)	μ_0Μαγνητική διαπερατότητα (H/m)
r_{out} Εξωτερική Ακτίνα (m)	μ_0 Σχετική Μαγνητική διαπερατότητα
μ Νευτώνειο Ιξώδες (Pa*sec)	P_cΚατανάλωση Ισχύος (Watt)
ρ Πυκνότητα ρευστού (kg/m ³)	MRFΜαγνητορεολογικό Ρευστό
h Διάκενο μεταξύ Δίσκων(m)	RΕσωτερική Αντίσταση Καλωδίου (Ω)
$\dot{\gamma}$Ρυθμός Διατμητικής Παραμόρφωσης(1/s)	h_r Διάκενο μεταξύ Δίσκων εντός της αυλάκωσης (m)



Σχεδιασμός Μαγνητορεολογικού Συμπλέκτη

ΚΟΥΡΤΗΣ ΛΑΜΠΡΟΣ-1069357

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΤΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ – ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

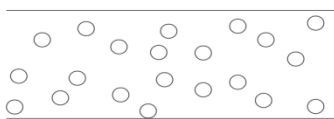
Συμπλέκτες είναι στοιχεία μηχανών που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του κινητήρα μιας διάταξης με τη υπόλοιπη διάταξη. Ο συμπλέκτης δρα σαν διακόπτης. Κατά τη διάρκεια της σύμπλεξης επιτρέπει την μεταφορά ενέργειας και ισχύος από το κινητήρα στην υπόλοιπη διάταξη, ενώ κατά την αποσύμπλεξη ο κινητήρας λειτουργεί, αλλά η παραγόμενη από αυτόν ισχύς δε μεταφέρεται στο υπόλοιπο σύστημα.

Ένας συμπλέκτης αποτελείται από 2 ή περισσότερους δίσκους. Οι δίσκοι που είναι συνδεδεμένοι με τον κινητήρα άξονα (οδηγοί δίσκοι) κατά τη σύμπλεξη ασκούν ροπή στρέψης μέσω της τριβής στους δίσκους που είναι συνδεδεμένοι με το υπόλοιπο σύστημα (οδηγούμενοι δίσκοι). Μέσω της ροπής γίνεται η μεταφορά της ισχύος από τον κινητήρα στο υπόλοιπο σύστημα. Στους περισσότερους συμπλέκτες, η ροπή δημιουργείται μέσω της ξηράς επαφής. Οι οδηγοί δίσκοι, κατά τη σύμπλεξη έρχονται σε επαφή με τους οδηγούμενους δίσκους δημιουργώντας έτσι μια δύναμη τριβής, η οποία ασκεί ροπή στους οδηγούς άξονες. Ένας συμπλέκτης τριβής, μπορεί να έχει 2 ή περισσότερους δίσκους, μπορεί να είναι κωνικός συμπλέκτης. Άλλη διάταξη είναι ο κωνικός συμπλέκτης. Σε έναν κωνικό συμπλέκτη ο οδηγός δίσκος έχει αντικατασταθεί από έναν κώνο ("αρσενικό" μέρος), ενώ ο οδηγούμενος δίσκος από έναν κοίλο κώνο ("θηλυκό μέρος"). Κατά τη σύμπλεξη το "αρσενικό" μέρος εισέρχεται στο "θηλυκό μέρος" και δημιουργείται η απαραίτητη τριβή στα τοιχώματα των δύο κώνων. Άλλη διάταξη είναι ο φυγοκεντρικός συμπλέκτης. Σε έναν φυγοκεντρικό συμπλέκτη, στην κατάληξη του οδηγού άξονα υπάρχουν στερεωμένα με ελατήρια μπλοκ τριβής. Τα μπλοκ αυτά όταν ξεπεραστεί κάποια γωνιακή ταχύτητα, αρχίζουν να ωθούνται προς το εξωτερικό μέρος. Εκεί βρίσκεται ένας δακτύλιος, ο οποίος συνδέεται με τον οδηγούμενο άξονα. Η τριβή που παράγεται στις επιφάνειά του κινεί τον οδηγούμενο άξονα. Άλλοι τύποι συμπλεκτών περιλαμβάνουν τους υγρούς συμπλέκτες, όπου ανάμεσα από τους δίσκους ρέει λιπαντικό για τη μείωση της θερμοκρασίας. Επιπλέον υπάρχουν υδραυλικοί συμπλέκτες οι οποίοι μεταφέρουν τη ροπή μέσω υγρού. Η διάταξη του συμπλέκτη αυτού είναι διάταξη στροβίλου- αντλίας. Άλλη διάταξη είναι οι μαγνητικοί συμπλέκτες που μεταφέρουν ροπή επιτυγχάνοντας σύμπλεξη

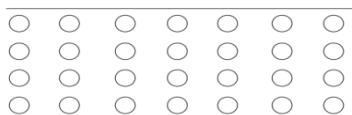
με μαγνητική δύναμη και τέλος οι συμπλέκτες μαγνητιζόμενων σωματιδίων, που επιτυγχάνουν σύμπλεξη χρησιμοποιώντας μαγνητιζόμενα σωματίδια.

ΜΑΓΝΗΤΟΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Τα μαγνητορεολογικά υγρά είναι υγρά τα οποία αποτελούνται από το υγρό “φορέας” μέσα στο οποίο είναι βυθισμένα φερομαγνητικά σωματίδια. Εν απουσία μαγνητικού πεδίου τα υγρά συμπεριφέρονται σαν νευτώνεια με τα σωματίδια τυχαία κατανεμημένα εντός του υγρού. Όταν ωστόσο βρεθεί εντός μαγνητικού πεδίου, τα σωματίδια σχηματίζουν αλυσίδες στη κατεύθυνση του πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραστική αλλαγή των ρεολογικών ιδιοτήτων του ρευστού. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται το όριο ροής τους, που σημαίνει ότι δε ρέουν αν δε ξεπεραστεί το συγκεκριμένο όριο ροής. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται κατά πολύ το ιξώδες τους. Το όριο ροής είναι συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου. Η ανταπόκριση των υγρών αυτών στις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου είναι της τάξης των μερικών ms. Επιπλέον η διαδικασία είναι αναστρέψιμη, δηλαδή σε περίπτωση που το πεδίο πάψει να υφίσταται το υγρό επιστρέφει στην πρότερη κατάστασή του. Η γρήγορη, αναστρέψιμη και κυρίως ελεγχόμενη αλλαγή των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών αυτών τα καθιστούν υποψήφια για πολλές εφαρμογές, όπως έδρανα ολίσθησης, φρένα, συμπλέκτες, αποσβεστήρες, φινίρισμα επιφανειών, ιατρική.



Εικόνα 1 Μαγνητορεολογικό ρευστό χωρίς μαγνητικό πεδίο



Εικόνα 2 Μαγνητορεολογικό ρευστό σε μαγνητικό πεδίο

ΜΑΓΝΗΤΟΡΕΟΛΟΓΙΚΟΙ ΣΥΜΠΛΕΚΤΕΣ

Οι μαγνητορεολογικοί συμπλέκτες αξιοποιούν τα μαγνητορεολογικά ρευστά προκειμένου να μεταφέρουν ροπή. Κατά τη διάρκεια της σύμπλεξης παράγεται μαγνητικό πεδίο, το οποίο διεγείρει το υγρό. Το ιξώδες του ρευστού αλλάζει άρα και η διατμητική τάση που ασκεί με αποτέλεσμα να παράγεται ικανό ποσό ροπής που να κινεί τον οδηγούμενο άξονα. Η παραγωγή του μαγνητικού πεδίου γίνεται χρησιμοποιώντας τη βασική αρχή του ηλεκτρομαγνητισμού. Όταν ρεύμα περνά από αγωγό, γύρω από αυτόν σχηματίζεται μαγνητικό πεδίο. Επομένως βασικό εξάρτημα των συμπλεκτών αυτών είναι το καλώδιο, το οποίο τυλίγεται και δημιουργεί ένα πηνίο. Κατά τη σύμπλεξη ρεύμα περνά μέσα στο πηνίο, ενώ κατά τη διάρκεια της αποσύμπλεξης, το ρεύμα σταματά να περνά. Τα πλεονεκτήματα

των μαγνητορεολογικών συμπλεκτών είναι ότι μπορούν να ελέγχουν τη ροπή εξόδου χωρίς να μεταβάλλουν κάποια άλλη παράμετρο παρά μόνο το ρεύμα εισόδου. Επιπλέον στα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνεται η γρήγορη απόκριση των ρευστών στις μεταβολές της εισόδου. Τέλος πλεονέκτημα αποτελεί επίσης το γεγονός ότι δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη σε έναν τέτοιο συμπλέκτη κάνοντας τον πιο αξιόπιστο.

ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

Για την πραγματοποίηση της εργασίας έγιναν κάποιες υποθέσεις.

1. Το κενό MRF έχει χωριστεί σε ζώνες. Σε κάθε ζώνη το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό.
2. Η ροή του MRF σε κάθε ζώνη είναι ανεξάρτητη και δεν επηρεάζεται από τη ροή στις γειτονικές ζώνες.
3. Το πρόβλημα θεωρείται ισοθερμικό. Αυτό σημαίνει ότι οι μαγνητικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών είναι σταθερές και το ιξώδες του ρευστού είναι συνάρτηση μόνο του μαγνητικού πεδίου.
4. Υποτίθεται ομοιόμορφη κατανομή των φερομαγνητικών σωματιδίων, ώστε το ρευστό να έχει τις ίδιες ιδιότητες σε κάθε σημείο.
5. Το διάκενο καταλαμβάνεται πλήρως από το MRF. Δεν υπάρχει αέρας και ως εκ τούτου διφασική ροή.
6. Η ακτινική χάρη δεν λαμβάνεται υπόψη.
7. Οι επιφάνειες τριβής είναι εντελώς λείες, δεν υπάρχει προφίλ τραχύτητας.
8. Δεν λαμβάνεται υπόψη καμία συνθήκη ολίσθησης. Το ρευστό έχει την ίδια ταχύτητα με τους δίσκους.
9. Κατά την ανάλυση της ροής, οι δυνάμεις πεδίου του ρευστού έχουν αμεληθεί.
10. $\frac{h}{r} \ll 1$ που σημαίνει ότι η πίεση και το μαγνητικό πεδίο δεν μεταβάλλονται προς την κατεύθυνση του h

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Το μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις του Maxwell.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

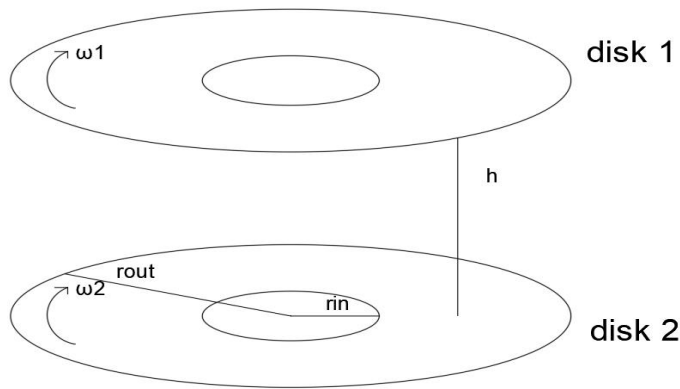
$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (3)$$

Η είσοδος για το λογισμικό ANSYS είναι η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος:

$$J = \frac{NI}{A} \quad (4)$$

Το πρόβλημα της ροής μεταξύ δύο δίσκων μπορεί να περιγραφεί ως ροή ανάμεσα από 2 περιστρεφόμενους δίσκους.



Εικόνα 3 Ροή μεταξύ 2 περιστρεφόμενων δίσκων

Οι εξισώσεις Navier – Stokes χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή της ροής

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{F} + \vec{\nabla} \sigma_{ij} \quad (5)$$

$$\text{Με } \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (5a)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (6)$$

Όταν δε εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο, το ρευστό είναι νευτώνειο υγρό. Το μοντέλο ροής που περιγράφει πιο αποτελεσματικά τη ροή των μαγνητορεολογικών ρευστών είναι το μοντέλο του Bingham.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (7)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta \omega}{h} r \quad (8)$$

$$\tau = \mu \frac{\Delta \omega}{h} r \quad (9)$$

Το μοντέλο ροής που περιγράφει πιο αποτελεσματικά τη ροή των μαγνητορεολογικών ρευστών, όταν βρίσκονται εντός μαγνητικού πεδίου είναι το μοντέλο του Bingham.

$$\tau = \tau_y(B) + \mu \dot{\gamma} \quad (10)$$

$$\tau = \tau_y(B) + \mu \frac{\Delta \omega}{h} r \quad (11)$$

Η ροπή δίνεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

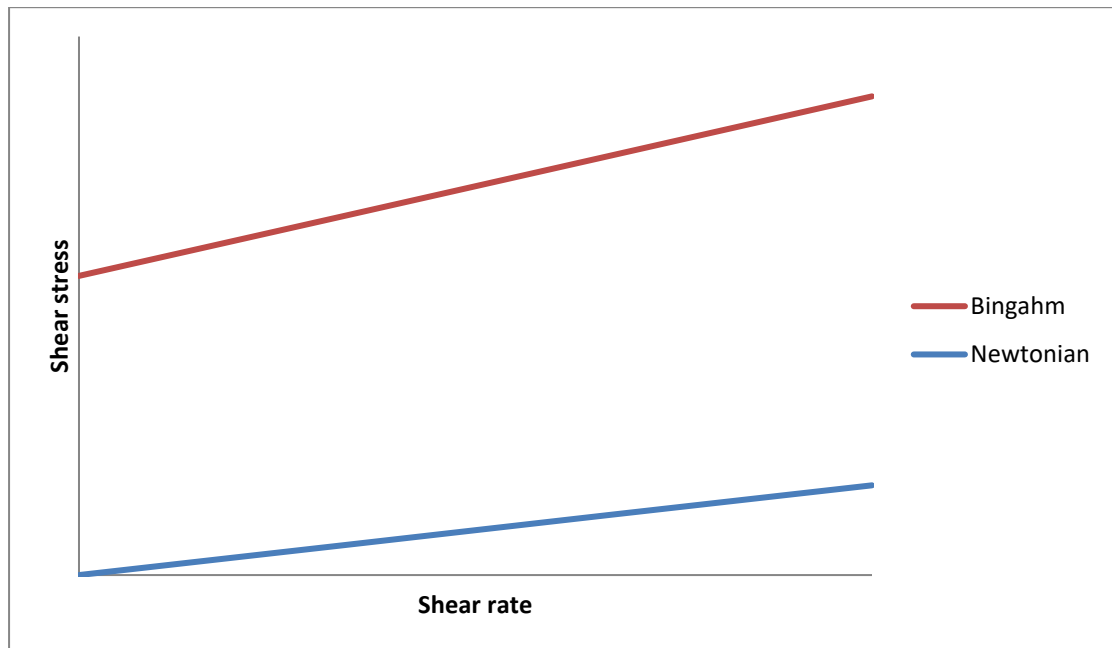
$$T = \int r \tau(r) dA \quad (12)$$

Για ροή Bingham έχουμε:

$$T = \frac{2\pi\tau_y}{3}(r_{out}^3 - r_{in}^3) + \frac{\pi\mu\Delta\omega}{2h}(r_{out}^4 - r_{in}^4) \quad (13)$$

Ενώ για νευτώνεια ροή:

$$T = \frac{\pi\mu\Delta\omega}{2h}(r_{out}^4 - r_{in}^4) \quad (14)$$



Εικόνα 4 Σύγκριση μοντέλου Bingham με νευτώνειο μοντέλο

Η κατανάλωση ενέργειας δίνεται από τον εξής τύπο:

$$P_c = I^2 R \quad (15).$$

$$R = \frac{L}{\sigma A} \quad (16)$$

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

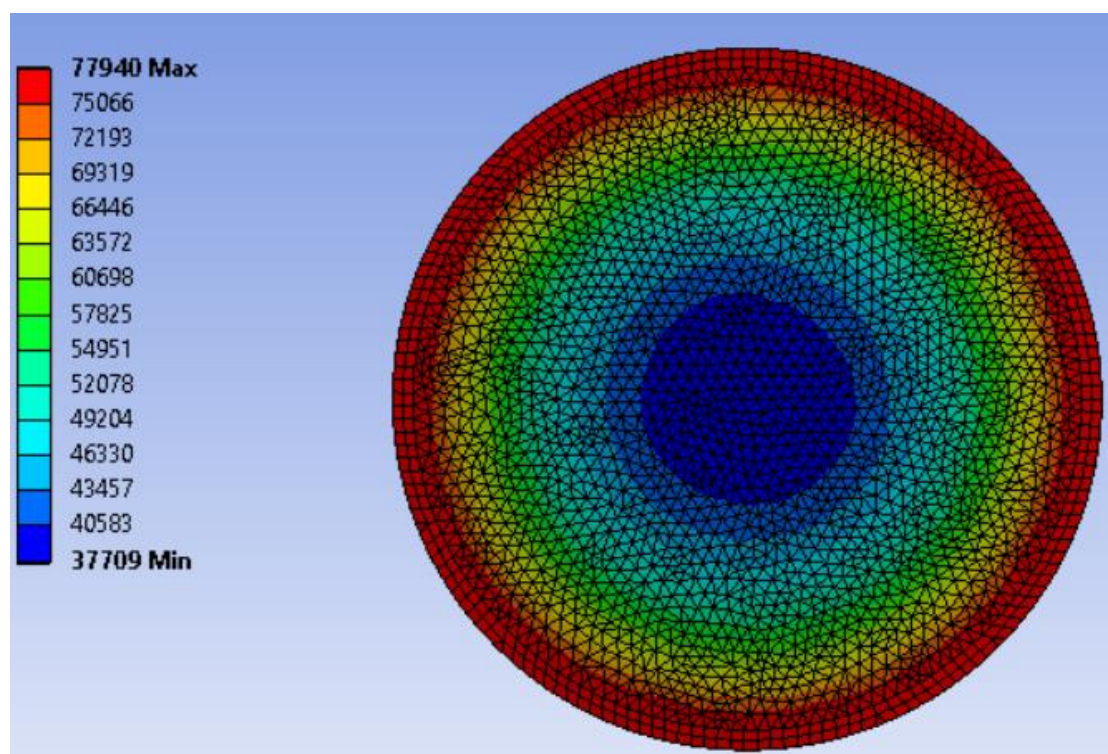
Για την επίλυση του προβλήματος αρχικά δημιουργείται ένα μοντέλο στο ANSYS magnetostatic προκειμένου να επιλυθεί το μαγνητικό πρόβλημα. Στη συνέχεια αφού είναι γνωστή η κατανομή του πεδίου ορίζεται το όριο ροής του ρευστού. Στη συνέχεια με τη χρήση του ANSYS Fluent επιλύεται το πρόβλημα ροής και βρίσκεται η διατμητική τάση και η ροπή.

ΜΟΝΤΕΛΟ ANSYS magnetostatic

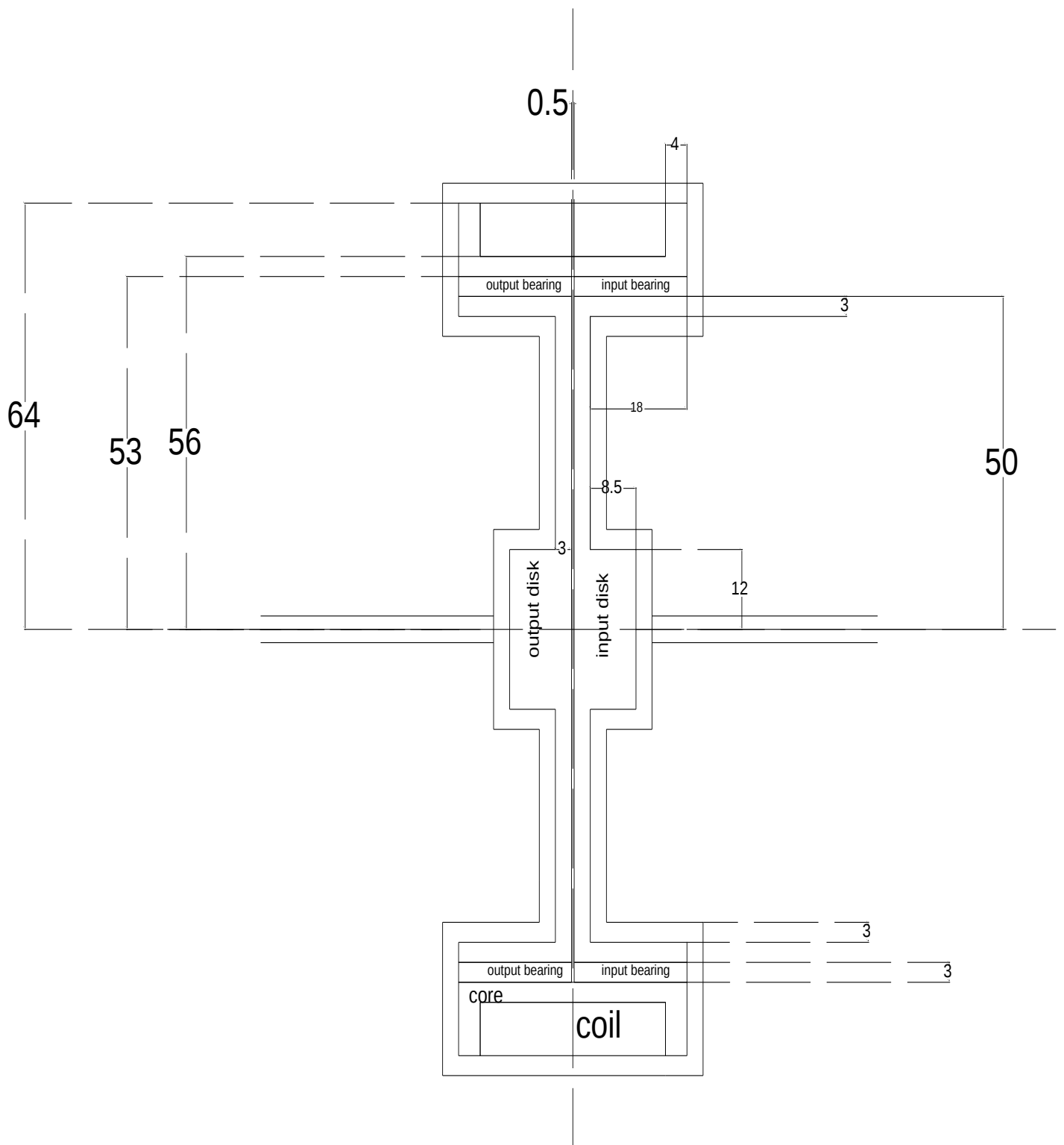
Για το μοντέλο στο ANSYS magnetostatic δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο του συμπλέκτη στο ANSYS design modeler. Οι διαστάσεις φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Τα υλικά του συμπλέκτη επιλέχθηκαν από τις βιβλιοθήκες του λογισμικού, ενώ το ρευστό επιλέχθηκε να είναι το MRF 132 DG της LORD. Οι μαγνητικές ιδιότητές του παρέχονται από τον κατασκευαστή. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΥΛΙΚΟ
ΟΔΗΓΟΣ ΔΙΣΚΟΣ	Cold low carbon steel strip
ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΟΣ ΔΙΣΚΟΣ	Cold low carbon steel strip
ΕΔΡΑΝΟ ΟΔΗΓΟΥ ΔΙΣΚΟΥ	Steel
ΕΔΡΑΝΟ ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ	Steel
ΜΑΓΝΗΤΟΡΕΟΛΟΓΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ	MRF 132 DG LORD
ΠΥΡΗΝΑΣ	Aluminum Alloy
ΠΗΝΙΟ	Copper Alloy
ΑΕΡΑΣ	Air
ΚΑΛΥΜΑ	Cold low carbon steel strip

Το πηνίο έχει 300 τυλίγματα και η διατομή του καλωδίου είναι $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Το πλέγμα αποτελείται από στοιχεία μεγέθους 0.005m για τον συμπλέκτη και 0.002m για τη περιοχή του ρευστού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πλέγματος με 409037 στοιχεία και 643123 κόμβους. Η μέση στρέβλωση είναι 0.36.



Εικόνα 5 Αποτελέσματα ANSYS magnetostatic



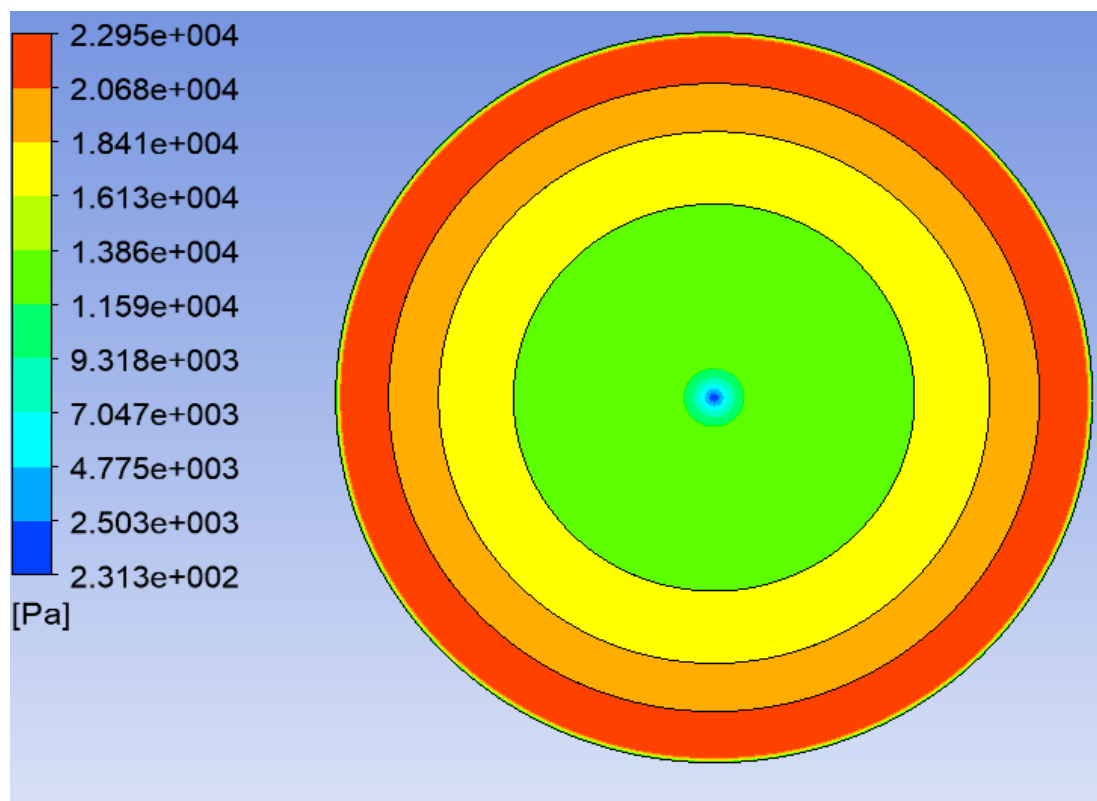
Εικόνα 6 Απεικόνιση του συμπλέκτη

MONTELO ANSYS Fluent

Για την επίλυση του προβλήματος της ροής δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του ρευστού. Το μαγνητικό πεδίο έχει μεγάλο εύρος τιμών άρα και το όριο ροής. Για το λόγο αυτό το ρευστό διαιρέθηκε σε ζώνες. Το πεδίο μετρήθηκε σε 49 σημεία. Κάθε περίπου 10kA/m δημιουργείται μια ζώνη. Η τιμή του πεδίου στη ζώνη αυτή είναι η μέση τιμή όλων σημείων περιλαμβάνει η ζώνη. Σε κάθε ζώνη το όριο ροής προκύπτει από την τιμή του πεδίου και είναι σταθερό.

Για το πλέγμα επιλέχθηκε μέγεθος στοιχείων 0.0002m που ως αποτέλεσμα έχει πλέγμα 661233 στοιχείων 895708 κόμβων και μέση στρέβλωση 0.11. Για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν 2 δίσκοι με $r_{in}=0\text{mm}$, $r_{out}=50\text{mm}$ και $h=0.5\text{mm}$. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι συγκεντρωμένοι στον παρακάτω πίνακα.

r_{in}	0mm
r_{out}	50mm
h	0.5mm
Νευτώνειο Ιξώδες	0.112 Pa*s
Πλαστικό Ιξώδες	11.2 Pa*s
ρ	3050 kg/m ³
Γωνιακή ταχύτητα εισόδου	100 rad/s
Γωνιακή ταχύτητα εξόδου	0 rad/s

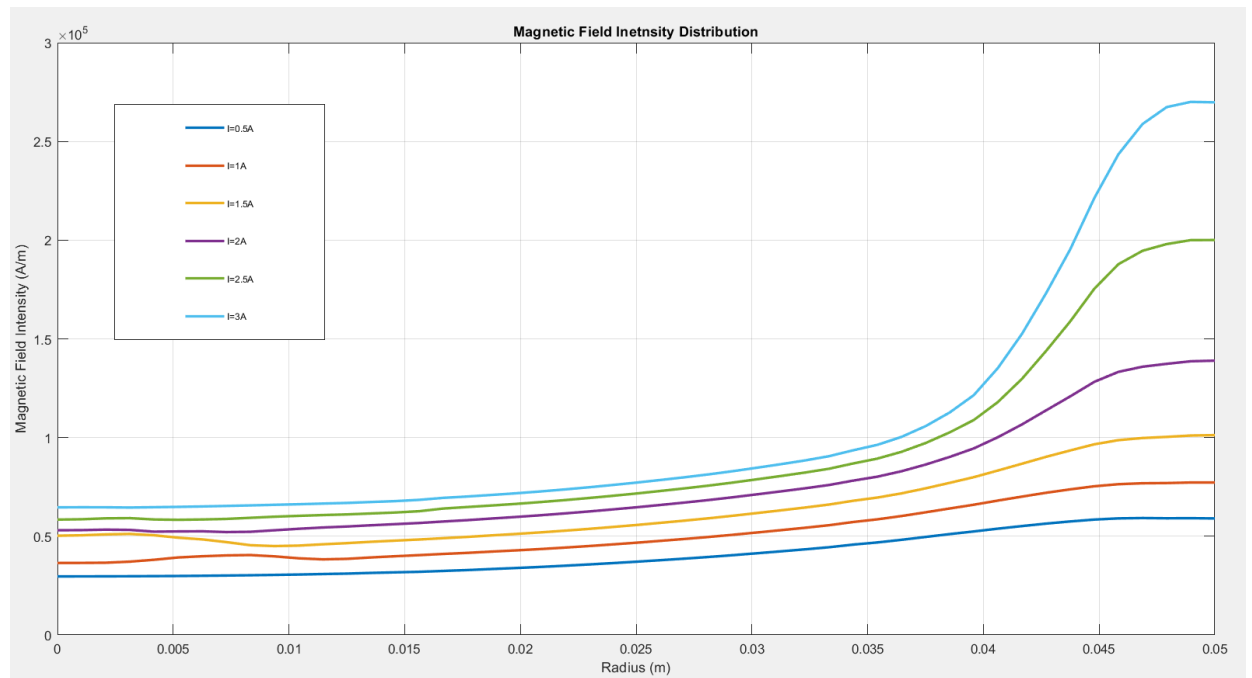


Εικόνα 7 Διατμητική Τάση

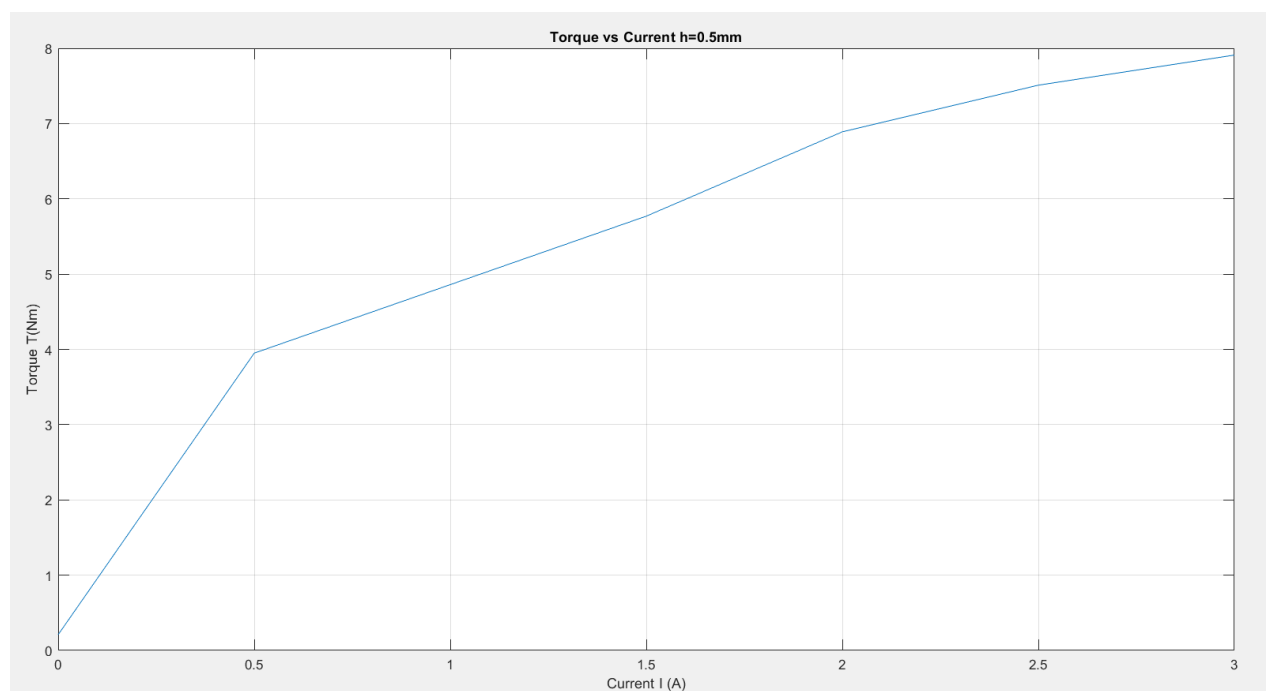
Η πιστοποίηση και για τα 2 μοντέλα έγινε με τη χρήση της εργασίας: Manish Kumar Thakur, Chiranjit Sarkar (2018) Development and performance analysis of a Magnetorheological fluid Clutch.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά ο συμπλέκτης εξετάστηκε σε είσοδο ρευμάτων από 0.5A έως 3A. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι κατανομές των πεδίων για τα διάφορα ρεύματα και η καμπύλη T-I.

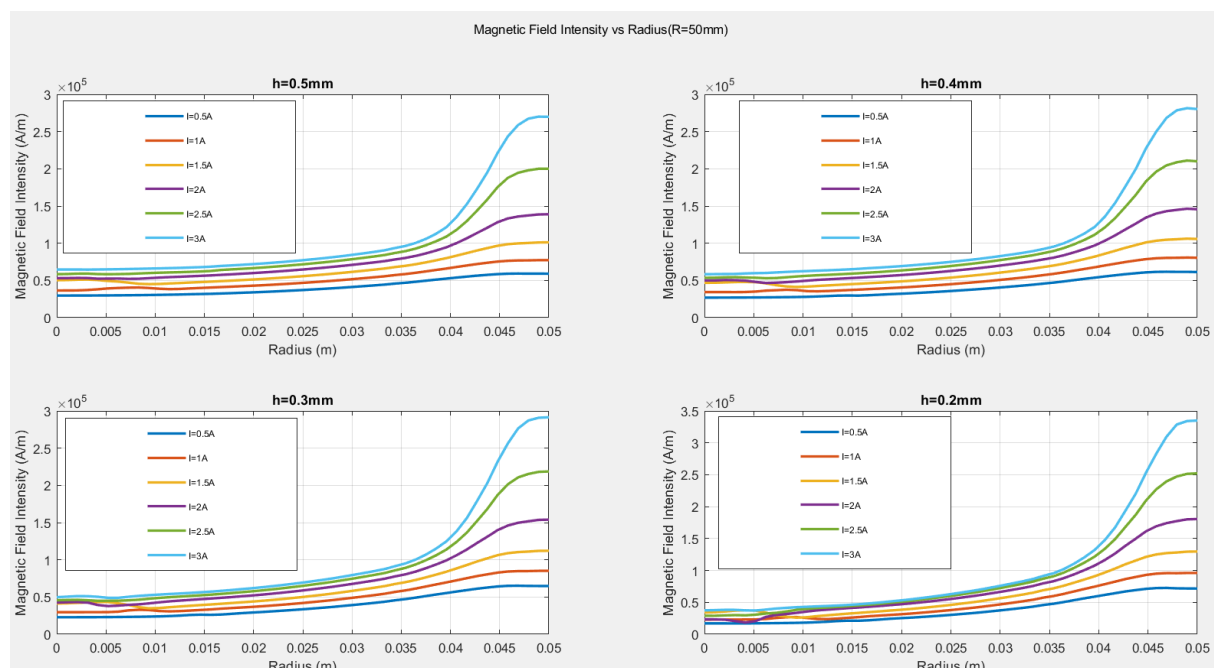


Εικόνα 8 Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου



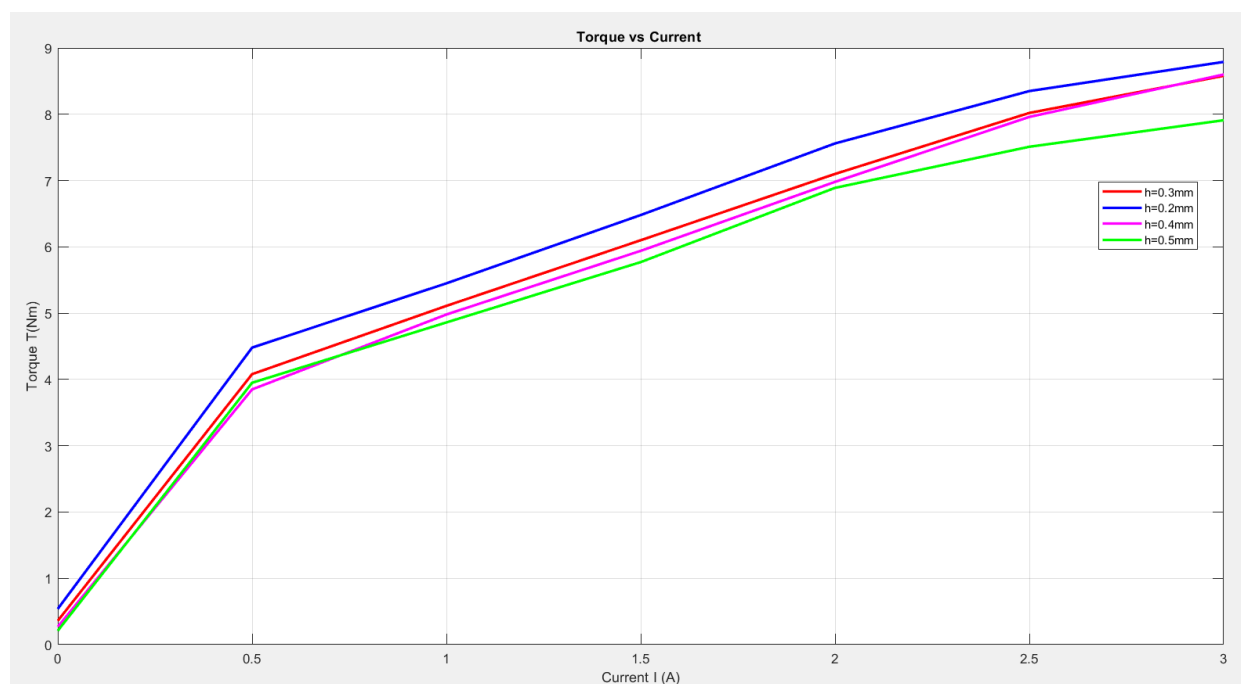
Εικόνα 9 Καμπύλη T-I

Παρατηρείται ότι η ροπή μπορεί εύκολα να ελεγχθεί μεταβάλλοντας το ρεύμα εισόδου. Επιπλέον για μεγαλύτερες τιμές ρεύματος η ροπή αυξάνεται. Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση των διάκενων μεταξύ των δίσκων.



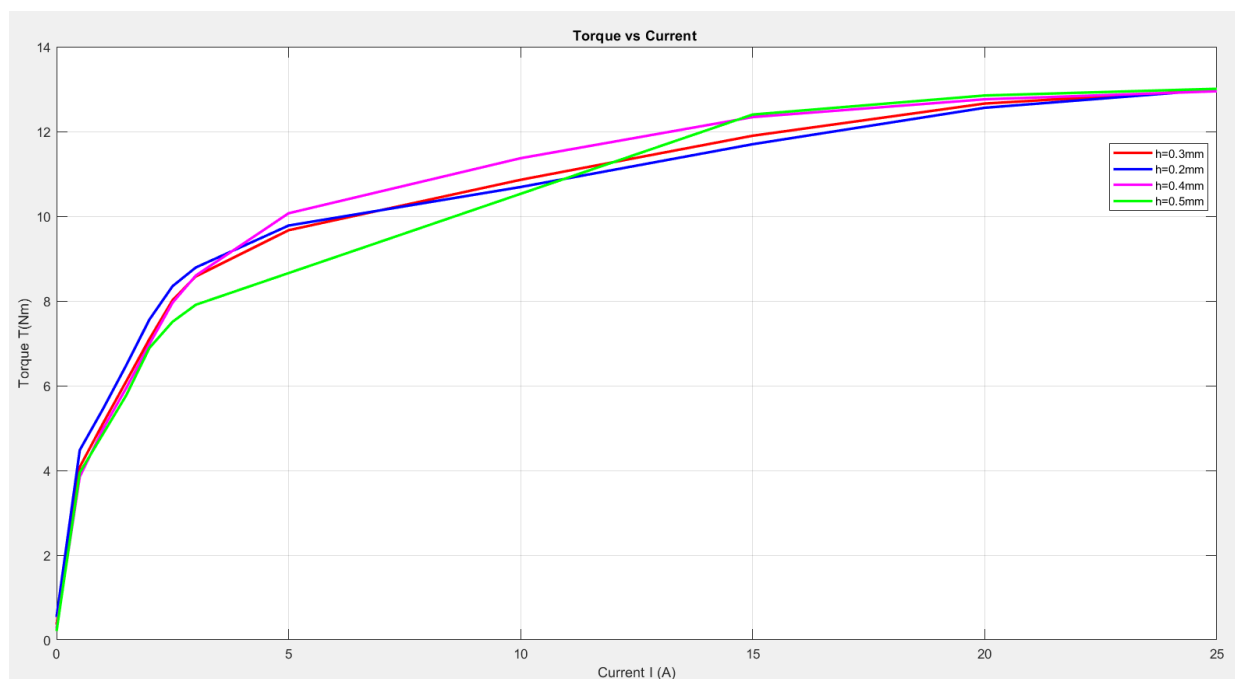
Εικόνα 10 Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου για διάφορα διάκενα

Παρατηρείται ότι για μικρότερα διάκενα το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται. Αυτό έχει επίδραση και στη ροπή καθώς όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα για μικρότερα πάχη ρευστού η ροπή αυξάνεται.



Εικόνα 11 Καμπύλες T-I για διάφορα διάκενα

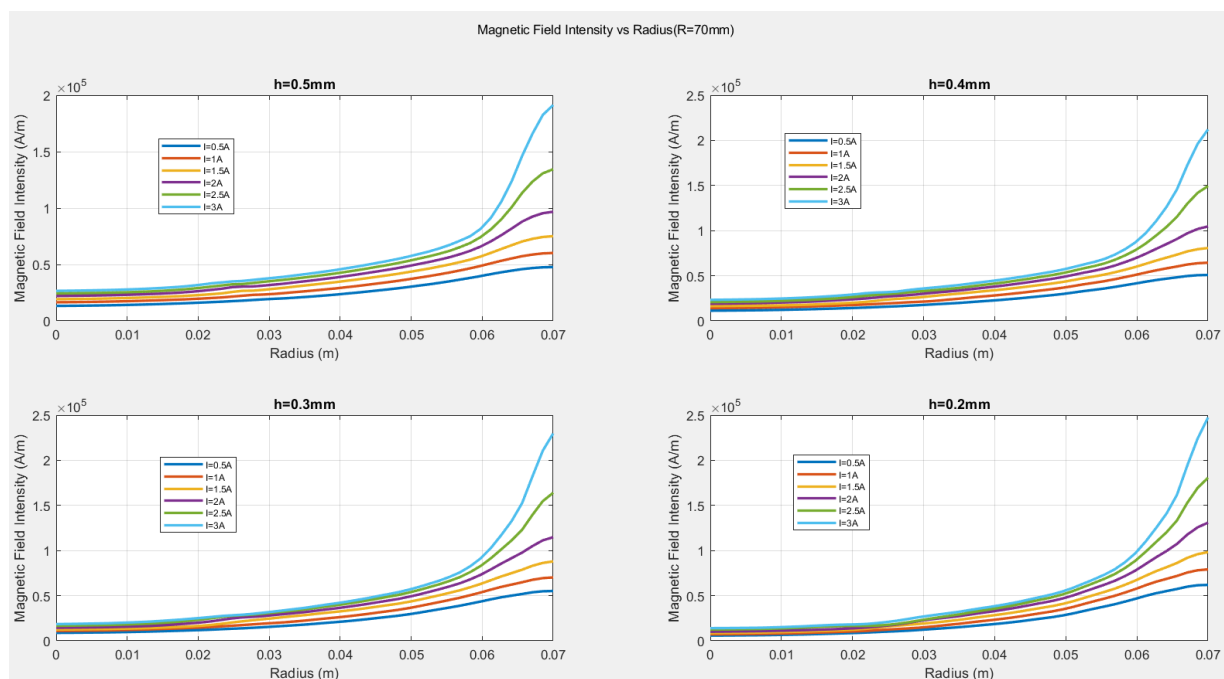
Επόμενο πεδίο μελέτης ήταν ο μαγνητικός κορεσμός. Το μαγνητορεολογικό ρευστό δε μαγνητίζεται επ' άπειρον. Για το 132 DG της LORD το μέγιστο όριο ροής είναι 49.kPa στα 300kA/m. Τα ρεύματα εισόδου είναι 5A, 10A, 15A, 20A, 25A. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες T-I για τα διάφορα διάκενα.



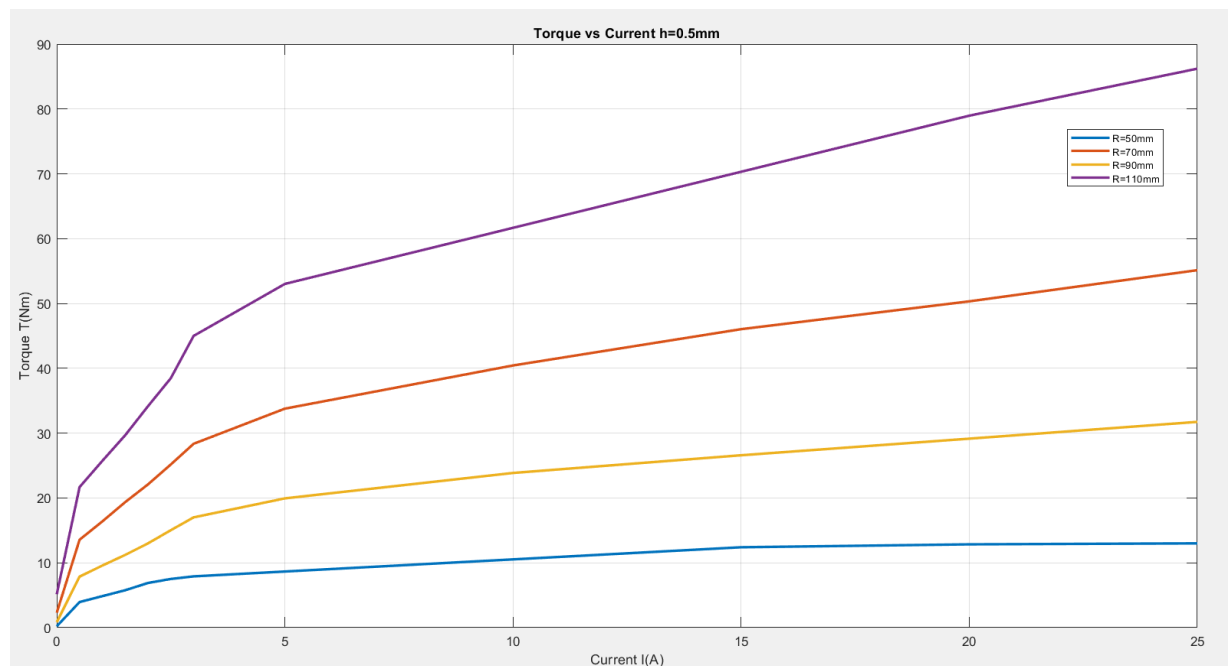
Εικόνα 12 Καμπύλες T-I για διάφορα διάκενα

Παρατηρείται ότι για πιο μεγάλα ρεύματα εισόδου τα μεγαλύτερα διάκενα αποδίδουν καλύτερα. Επιπλέον παρατηρείται ότι παρά τη μεγάλη αύξηση σε ρεύμα η ροπή δε μεταβάλλεται το ίδιο, αλλά σχεδόν παραμένει σταθερή. Η τιμή που συγκλίνουν όλες οι καμπύλες είναι η μέγιστη δυνατή τιμή για κάθε διάκενο.

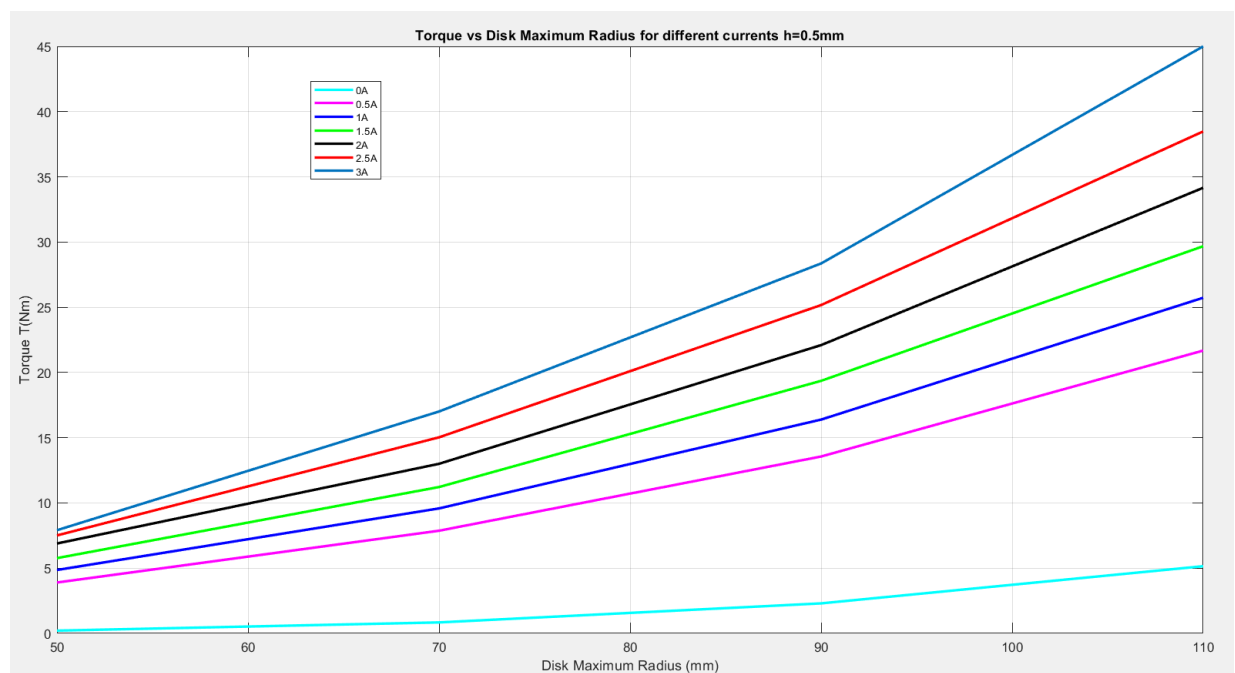
Έπειτα μελετήθηκε η επίδραση του r_{out} στη τελική ροπή. Τα r_{out} που εξετάστηκαν είναι 70mm, 90mm και 110mm. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι κατανομές του μαγνητικού πεδίου και οι καμπύλες T-I για διάφορα r_{out} .

Εικόνα 13 Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου για $r_{out}=70mm$

Για μεγαλύτερα r_{out} το πεδίο γίνεται πιο ασθενές προς το κέντρο των δίσκων. Ωστόσο όπως δείχνουν τα παρακάτω διαγράμματα η ροπή αυξάνεται, δείχνοντας ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι πιο σημαντικά από το πεδίο.



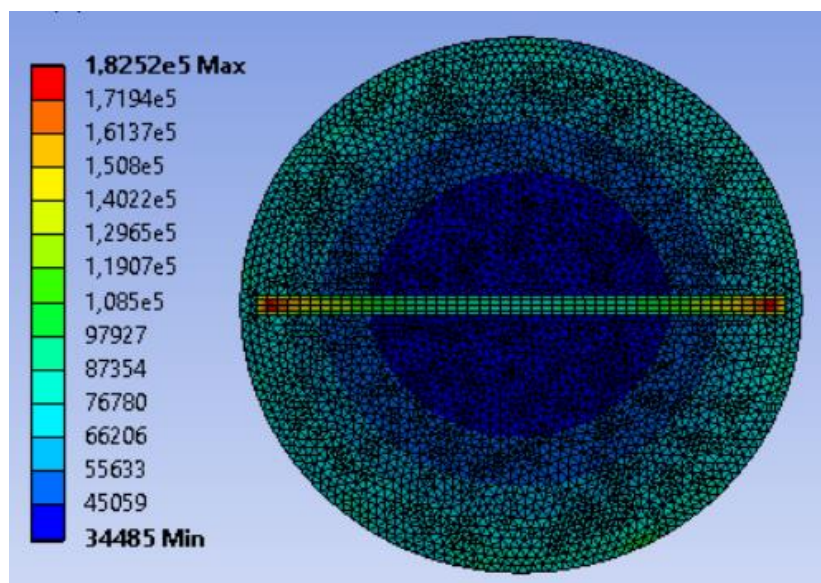
Εικόνα 14 Καμπύλη T-I για διάκενο 0.5mm



Εικόνα 15 Καμπύλη T-r

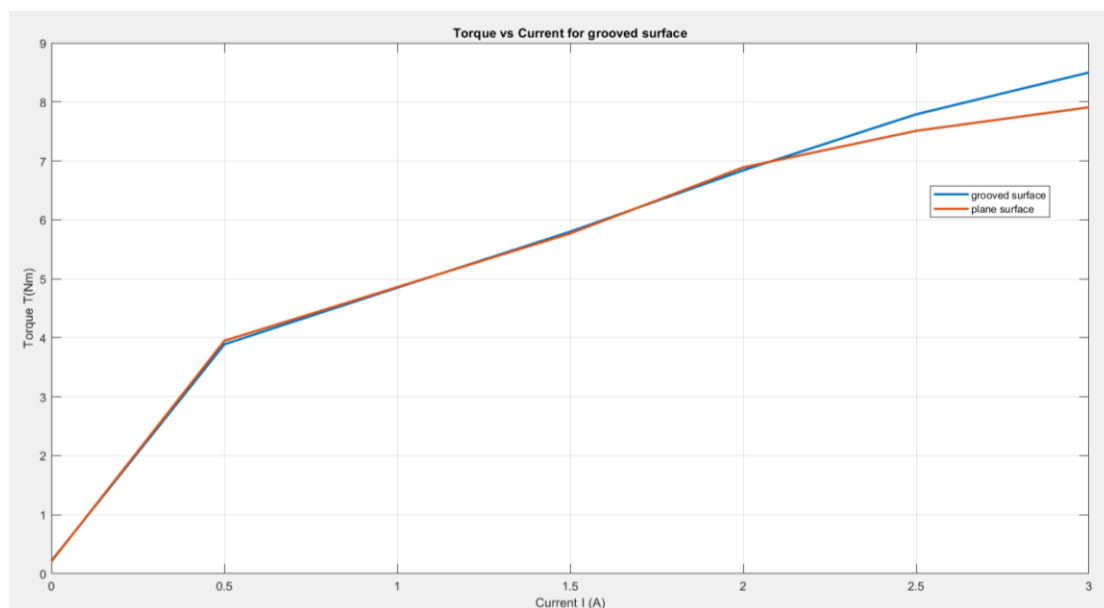
Επιπλέον φαίνεται ότι για μεγαλύτερους δίσκους ο κορεσμός επιτυγχάνεται με μεγαλύτερα ρεύματα.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση μιας ορθογώνιας εξοχής στις επιφάνειες των δύο δίσκων. Οι δίσκοι είχαν $r_{out}=50\text{mm}$ και $h=0.5\text{mm}$. Τα ρεύματα εισόδου είναι από 0.5A μέχρι 3A.



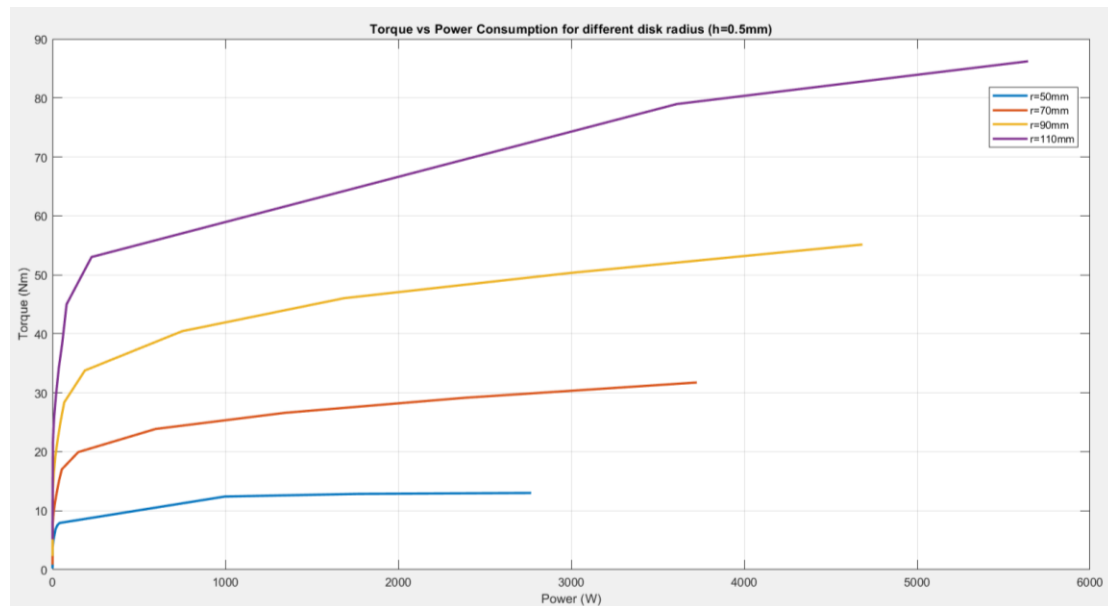
Εικόνα 16 κατανομή μαγνητικού πεδίου

Η καμπύλη T-I σε σύγκριση με επίπεδο δίσκο δείχνει ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις 2 διατάξεις.



Εικόνα 17 Καμπύλες T-I για επίπεδο δίσκο και δίσκο με αυλακώσεις

Τέλος μελετήθηκε η κατανάλωση ενέργειας από το πηνίο του συμπλέκτη. Βρέθηκε ότι οι μεγαλύτεροι συμπλέκτες για το ίδιο ποσό ενέργειας παράγουν μεγαλύτερη ροπή. Τέλος η λειτουργία για ρεύματα μεγαλύτερα των 3A είναι μη συμφέρουσα καθώς απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας για σχετικά μικρά οφέλη.

Εικόνα 18 $T-P_c$ καμπύλες για διάφορα r_{out}

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βρέθηκε ότι οι μαγνητορεολογικοί συμπλέκτες ελέγχουν πολύ εύκολα τη ροπή εξόδου τους. Κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να προτιμούνται πιο μεγάλοι δίσκοι και λειτουργία σε χαμηλά ρεύματα.