



T.C

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**RADYAL AKI YAPILI EDDY AKIMLI MANYETİK KAVRAMA
TASARIMI VE POMPA UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havva VAHAPOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

TOKAT-2023

ETİK SÖZLEŞME



JÜRİ KABUL VE ONAY



ÖZET

RADYAL AKI YAPILI EDDY AKIMLI MANYETİK KAVRAMA TASARIMI VE POMPA UYGULAMASI

Vahapoğlu, Havva
Yüksek Lisans, Mekatronik Mühendisliği
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet Fenercioğlu
Şubat 2023, xiii+60 sayfa

Manyetik kavrama, temassız tork iletimi ile birçok avantajı beraberinde getirir. Manyetik kavrama eddy ve senkron olarak 2 topolojide incelenebilmektedir. Manyetik akının yol alma geometrisine göre kavrama radyal ve eksenel akılı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada temassız güç aktarma performansı elde etmek için eddy akımlı radyal akılı manyetik kavrama tasarımının elde edilmesi hedeflenmiştir. Tasarım kriterleri olarak sistem verimi, maliyeti ve seri üretime uygunluk göz önünde bulundurulmuştur. Analitik yöntem olarak değişken ayırma yöntemi baz alınmıştır. Burada 0.5 Nm tork ve 3000 rpm sabit hız değerleri ile farklı parametrelerin tasarımları ANSYS Maxwell programında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz edilmiştir. Analizlerde optimum tasarımı yakalamak için kutup sayısı, kavrama hızı(giriş), mıknatıs hacmi, malzeme cinsi, hava aralığı değişkenleri analiz edilmiştir. 3000 devir giriş hızına ve 1 mm hava aralığına sahip radyal akılı eddy akımlı alüminyum manyetik kavrama ile giriş mekanik gücün %71'i karşı tarafa temassız olarak aktarılmıştır. Bu sonuç analizler ile çözülmüş ve deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Manyetik analizler ve deneyler 1, 2 ve 3 mm hava aralığı için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 3 mm hava aralıklı tasarım, bir pompaya uygulanarak kapalı devre sistem içerisinde debi ve basınç testine tabi tutulmuştur. Test sonucunda pompa motoru saatte 4438 litre suyu devridaim etmeyi başarmıştır. Böylece pompada salmastra ihtiyacı ortadan kalkmış tamamen izole bir şekilde pompalama gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik kavrama, eddy akımı, elektromanyetik analiz, pompa.

ABSTRACT
RADIAL AKI STRUCTURE EDDY CURRENT MAGNETIC
COUPLING DESIGN AND PUMP APPLICATION

Vahapoğlu, Havva
Master's Thesis, Mechatronics Engineering
Thesis Advisor: Prof. Dr. Ahmet Fenercioğlu
February 2023, xiii+60 pages

The magnetic coupling brings many advantages with contactless torque transmission. Magnetic coupling can be examined in 2 topologies eddy and synchronously. According to the travel geometry of the magnetic flux, the clutch appears as radial and axial wisdom. In this study, it is aimed to obtain eddy current radial wired magnetic coupling design in order to obtain contactless power transmission performance. System efficiency cost and suitability for mass production were taken into consideration as design criteria. Variable Separation Method was used as the analytical method. Here, the design of 0.5 Nm torque and 3000 rpm constant speed values and different parameters were analyzed with the finite element method in the ANSYS Maxwell program. Poles number, coupling speed(input), magnet volume, material type and air gap variables were analyzed in order to achieve the optimum design in the analyzes. Poles number, speed, magnet volume, material type and air gap variables were analyzed in order to achieve the optimum design in the analyzes. 71% of the input mechanical power was transferred to the opposite side without any contact with the radial wedge eddy current aluminum magnetic coupling with 3000 rpm input speed and 1 mm air gap. This result was solved by analysis and confirmed by the test results. Magnetic analyses and experiments were carried out for an air gap of 1, 2 and 3 mm. In addition, the design with 3 mm air gap was applied to a pump and subjected to flow and pressure test within the closed closed system. As a result of the test, the pump motor was able to recirculate 4438 liters of water per hour. Thus, the need for sealing in the pump has been eliminated and pumping has been carried out in a completely isolated manner.

Keywords: Magnetic Coupling, eddy current, electromagnetic analysis, pump.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmaları sürecinde, çalışmalarımın tüm aşamalarında her türlü desteği sağlayan Sayın Hocam Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU'na, test aşamalarını gerçekleştirmemde yardımcı olan KORMAS firmasına ve bu yerlere gelebilmeme vesile olan aileme katkılarından ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Havva VAHAPOĞLU

Şubat, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME.....	ii
JÜRİ KABUL VE ONAY	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGE ve KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGE DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	13
3.1. Manyetizma.....	13
3.1.1. Manyetizma tarihçesi	13
3.1.2. Manyetik madde	14
3.1.3. Manyetik alan	14
3.1.4. Girdap (eddy) akım teorisi.....	16
3.2. Geometri	19
3.2.1. Radyal akı yapılı eddy akımlı manyetik kavrama modeli	19
3.2.2. Radyal akı yapılı senkron manyetik kavrama modeli.....	20
3.3. Analitik Yöntem.....	22
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	28
4.1. Eddy Akımlı Manyetik Kavrama Tasarım Modeli	28
4.2. Silindirik Yapılı Cismin Atalet Momenti.....	31

4.3.	Manyetik Analiz Sonuçları	33
4.3.1.	Kutup sayısı-verim grafiği	35
4.3.2.	Hava aralığı – verim grafiği	36
4.3.3.	Hız –verim grafiği	37
4.3.4.	Mıknatıs kalınlığı – verim grafiği	38
4.3.5.	Bakır-alüminyum ile verim grafiği	39
4.3.6.	Manyetik kavramanın avantajları	40
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
5.1.	Eddy Akımlı Kavramanın Uygulaması	41
5.1.1.	Hava aralığı -verim grafiği	46
5.1.2.	Deney ile sonlu elemanlar analiz sonuçları-verim grafiği	47
5.2.	Eddy Akımlı Kavramanın Pompa Uygulaması	50
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	54
	KAYNAKLAR	57
	ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGE ve KISALTMALAR

Simge	Açıklama
ΔT	Bağıl Fark
I	Akım (Amper)
V	Gerilim (Volt)
R	Direnç (Ohm)
B	Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
μ_0	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği (H/m)
Φ_B	Manyetik Akı (Wb)
$I_{iç}$	Alan İçindeki Net Akım
ε	Elektromotor Kuvveti(V)
η	Verim
s	Kayma
a	Uzaklık(metre)
ω	Açısal Hız (Rad/s)
ω_{re}	İndüklenen Akımların Elektrik Frekansı
ω_0	Çıkış Açısal Hız (Rad/s)
ω_i	Giriş Açısal Hız (Rad/s)
p	Kutup Sayısı
n_{sync}	Senkron Hız_(rpm)
H	Manyetik Alan Şiddeti (A/m)
M	Kalıcı Mıknatıslanma Vektörü
A	Manyetik Vektör Potansiyeli
f, φ	Gerçek ve Karmaşık Fonksiyon
h	Özel Bir Fonksiyon
J	Elektrik Akımı Yoğunluğu(A/m ²)
j	İlgili Bölgenin İndeksi
μ_r	Manyetik Bağıl Geçirgenlik(H/m)
r, θ	Değişken Değerleri
σ	Bölgenin İletkenliği
τ	Kutup Alanı

P_i	Giriş Gücü(W)
P_o	Çıkış Gücü(W)
T	Tork (Nm)
T_i	Giriş Torku (Nm)
T_o	Çıkış Torku (Nm)
I_z	Atalet Momenti ($kg.m^2$)
m	Kütle
r_1, r_2, r_3	Yarıçap
C_M	Sönümleme Faktörü
G_R	Rotor Ağırlığı(da/N)
d_r	Rotor Dış Çap
S_a	Yüzey Alanı (m^2)
n_r	Rotor Hızı (rpm)
$W/ (m.K)$	Isıl İletkenlik Katsayısı
S	Siemens(Ohm^{-1})
kp	Kilogram-kuvvet
I_g	Akı Yolu Uzunluğu (m)
R	Relüktans (1/H)
F	Manyetomotor Kuvveti (AT)
$^{\circ}C$	Santigrat Derece

Kısaltmalar

emk

2D

3D

yy

DC

SEY

BLDC

Açıklamalar

Elektromotor kuvveti

2 Boyutlu

3 Boyutlu

Yüzyıl

Doğru Akım

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Fırçasız Doğru Akım Motoru

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2. 1. Eddy akımlı manyetik kavrama görüntüsü	3
Şekil 2. 2. Patenti alınan eddy akımlı kavrama modeli (US3826937A).....	4
Şekil 2. 3. Eddy akımlı kavramanın kutup elemanının gösterimi	4
Şekil 2. 4. Tek katman a) ve çift katman b) rotorlu eddy akımlı manyetik kavrama	5
Şekil 2. 5. Oluklu bakır disk a), bakır diskin monte edildiği çıkıntılı arka demir b).....	5
Şekil 2. 6. Eksenel akılı senkron manyetik kavramanın test aşaması.....	6
Şekil 2. 7. Eddy akımlı manyetik kavramanın malzemelerinin görüntüsü	7
Şekil 2. 8. Eddy akımlı manyetik kavramanın analiz sonuçlarının karşılaştırılması	8
Şekil 2. 9. Eksenel eddy akımlı manyetik kavramanın test aşamasındaki görüntüsü.....	8
Şekil 2. 10. Analiz sürecinin tamamı	9
Şekil 2. 11. Eksenel akılı eddy akımlı manyetik kavrama.....	10
Şekil 2. 12. Eksenel a) ve radyal b) akılı eddy akımlı manyetik kavrama.....	11
Şekil 2. 13. Radyal akılı senkron manyetik kavrama	12
Şekil 2. 14. Radyal akılı eddy akımlı manyetik kavrama	12
Şekil 3. 1. Mıknatıs ve mıknatısın oluşturduğu alan.....	14
Şekil 3. 2. Mıknatısı oluşturan kutuplar ve akmakta olan alan çizgileri.....	15
Şekil 3. 3. Girdap akımı görüntüsü	17
Şekil 3. 4. Radyal akı yapıları eddy akımlı manyetik kavrama modeli	20
Şekil 3. 5. Radyal akı yapıları senkron manyetik kavrama modeli	21
Şekil 3. 6. Tasarım süreci.....	21
Şekil 4. 1. Eddy akımlı kavramanın manyetik modeli a) tam model b) ½ model	28
Şekil 4. 2. Oluşturulan tasarımın manyetik akı yoğunluğu.....	30
Şekil 4. 3. Eddy akımlı kavramanın alüminyum rotorundaki akım yoğunluğu (A/m ²). 31	
Şekil 4. 4. Silindirik içi boş bir cisim ve yarıçap gösterimi.....	32
Şekil 4. 5. Silindirik yapıları bir cisim ve yarıçap gösterimi	32
Şekil 4. 6. Farklı kutup sayılarının verim üzerindeki etkisi.....	35
Şekil 4. 7. Farklı hava aralıklarının verim üzerindeki etkisi.....	36
Şekil 4. 8. Farklı hız değerlerinin verim üzerindeki etkisi.....	37
Şekil 4. 9. Farklı mıknatıs kalınlıklarının verim üzerindeki etkisi	38

Şekil 4. 10. Farklı rotor malzemelerinin verim üzerindeki etkisi	39
Şekil 5. 1. Alüminyum borular	41
Şekil 5. 2. Alüminyum boruların kalınlıkları.....	42
Şekil 5. 3. Eddy akımlı manyetik kavrama parçası.....	43
Şekil 5. 4. Test aşaması için hazır hale getirilmiş 6 kutuplu manyetik kavrama parçası	43
Şekil 5. 5. Sürücü ve elektronik parçaları	44
Şekil 5. 6. Takometre	44
Şekil 5. 7. Test aşaması.....	45
Şekil 5. 8. Farklı hava aralıklarının verim üzerindeki etkisinin deney sonucu.....	46
Şekil 5. 9. Deney sonucu ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	47
Şekil 5. 10. Eddy akımlı manyetik kavramanın yük altındaki devrilme anı.....	49
Şekil 5. 11. Pompa gövdesi.....	50
Şekil 5. 12. Pompa rotoru(Pervane).....	50
Şekil 5. 13. Akış yönlendirme kapağı.....	51
Şekil 5. 14. Pompa testi için bir araya getirilen malzemeler	51
Şekil 5. 15. Pompa testi aşaması.....	52

ÇİZELGE DİZİNİ

<u>Çizelge No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5. 1. Alüminyum boru parametreleri	42
Çizelge 5. 2. Alüminyum malzemenin cinsi, iletkenliği ve mekanik özellikleri.....	42
Çizelge 5. 3. Eddy akımlı manyetik kavramanın analiz sonuçları.....	47
Çizelge 5. 4. Pompa testi sonuçları.....	53



1. GİRİŞ

Teknoloji yaşantımızın tamamında etkili olmaktadır. Gün geçtikçe daha çok robotik bir dünyanın içinde var olduğumuza tanık olmaktadır. İnsana olan bağımlılığı en aza indirme, çalışma zamanından kazanım elde etme, düşük toleranslı uygulamaların kullanımını artırma gibi modern hayata uyum sağlayan çokça parça ve makina hayata geçirilmiştir.

Gündelik hayatımızın farklı alanlarında makine adı altında birçok araç ve gereçler bizlere hizmet vermektedir. Bu makinaların bazılarında ise kavrama dediğimiz bir yapı mevcuttur. Bu yapı torku giriş milinden çıkış miline aktarmaktadır. Teknik olarak taşıyıcı işlevi görmektedir. Taşıdığı şey ise harekettir. Kavramanın farklı çeşitleri de vardır. Bunlardan biri de manyetik kavramadır. Bu kavrama çeşidi de diğer kavrama çeşitleri gibi çalışmaktadır. Fakat manyetik kavramanın diğer kavramalardan farkı, çalışma teorisinin elektrik yükü ve manyetik alan ile temassız gerçekleşmesidir. Günümüzde bu kavrama tipinin kullanımı artmaktadır. Bunun sebebi ise sağladığı avantajlardır.

Manyetik kavramaların genel uygulama alanlarına bakıldığında manyetik karıştırıcılar ve manyetik tahrikli pompalar karşımıza çıkar (Anonim, 2021a). Su altında ilerlemesi istenilen bir araç örnek verilebilir. Burada kullanılmak üzere sisteme bağlanmış elektrik motoru, hareket iletimini pervanelere manyetik kavrama aracılığı ile aktarabilir. Mekanik bir bağlantının söz konusu olmadığı bu yapıda temassız bir güç aktarımı sağlanır. Birbiriyle bağlantılı iki yüzey arasında zamana bağlı aşınma, kayma vb. olumsuz durumlar olası değildir yani bu durumların gözlemlendiği diğer kavrama yapılarındaki mil contactlarına gerek duyulmaz. Taraflar birbirinden tamamen izoledir. Manyetik alan yardımıyla sağlanan güç aktarımı sayesinde hassas uygulamalarda hizalama sorunlarının önüne geçilebilir. Bu gibi hassas uygulamalar için en kullanışlı kavrama yapısıdır. Karmaşık bağlantı içermemesi sayesinde bakımı daha kolay gerçekleştirilir (Anonim, 2021b). Uygulama alanlarına göre iki disk çevreleyen hava ile sıvı arasında düz bir bariyer yardımıyla izole bir ortam sağlanabilir. Bu yöntem ucuz ve basittir (Anonim, 2021a). Sıvı ve buharların sızdırılmaması için kullanılan salmastra bu

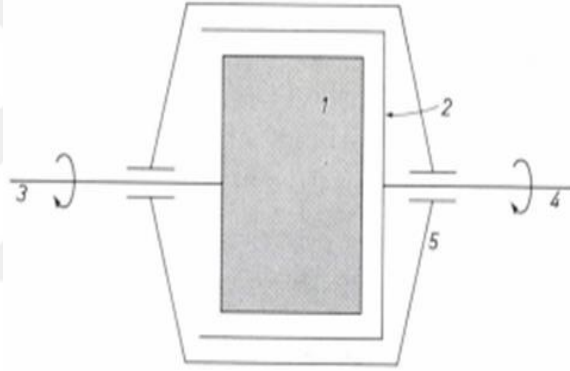
kavrama yapısında kullanılmaz. Zamanla eskimiş salmastralarının değişimi burada gerçekleşmez. Salmastralardan kaynaklı kaçak ve kayıplar bu kavrama çeşidinde oluşmayacaktır. Temassız iletimin bir diğer avantajı meydana gelebilecek titreşimleri diğer tarafa aktarmamasıdır. Senkron kavramalarda giriş mil ile çıkış mil hızı eşit olup yüksek verimlilik ile tasarım çalışmaları gerçekleştirilebilir (Fenercioğlu ve ark, 2021).

Tez çalışmasında; yukarıda bahsedilen avantajları sağlayabilen ve temassız güç aktarmak için kullanılacak eddy akımlı manyetik kavramaya değinilecek olup radyal yapıdaki eddy akımlı manyetik kavrama tasarımları yapılmaktadır. Kavrama performansını etkileyen, kutup sayısı, giriş hızı, mıknatıs kalınlığı ve hava aralığı etkileri Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analiz edilerek optimize edilmektedir. Eddy akımlı manyetik kavramanın optimize edilmiş tasarımı prototip olarak üretildikten sonra yüklenme testleri ile performansı doğrulanmaktadır. Ayrıca tercih edilen manyetik kavrama bir pompada uygulanarak debi ve basınç testleri gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışma, altı bölüm başlığı altında incelenecektir. Bu bölümler; Giriş, Literatür Özeti, Materyal ve Yöntem, Bulgular ve Tartışma, Deneysel Çalışmalar, Sonuç ve Önerilerdir. İlk olarak Giriş bölümü araştırılan konuya ait tanımlamaların yapıldığı, konunun hangi avantajlar sebebi ile araştırıldığının açıklandığı bölümdür. Literatür Özeti kısmında ise bu konunun yıllar içinde hangi amaçlar ile araştırıldığı saptanarak bilimsel çalışmaların sonuçları incelenmektedir. Materyal ve Yöntem kısmında araştırılan yapının çalışma mantığının daha iyi özümsemesini gerçekleştirmek adına konunun derinliklerine inerek açıklanmış, geometrik yapısına yer verilmiş ve analitik yöntem kısmına değinilmektedir. Bulgular ve Tartışma bölümünde SEY analizleri ile tasarım aşaması tamamlanmaktadır. Tasarlanan yapının prototipleri laboratuvarında testleri ve pompa uygulaması Deneysel Çalışmalar bölümünde yer almaktadır. Elde edilen veriler Sonuç ve Öneriler kısmında değerlendirilmektedir.

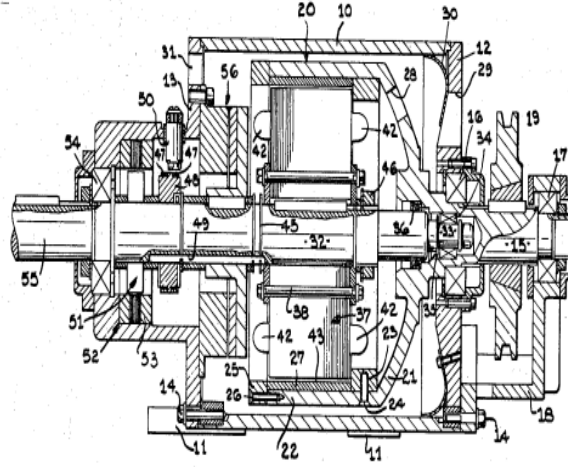
2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bahler ve Hoek (1966) heteropolar eddy akımlı kavramanın basit bir modeli ile iletilen tork ve kavramanın çıkış hızı arasında bir ilişki olduğunu bulmuştur. Homopolar yapıda eddy akımlı kavrama için de bu ilişki geçerlidir. Tasarımı kolay olan homopolar eddy akımlı kavramanın basit bir modeli, düşük güç iletimi için değişken hız sürücüsü olarak kullanılmıştır. Elektronik olarak kontrol edilebilen uyarma akımı sayesinde hız veya tork istenilen değerde sabit tutulabilmektedir. Aşağıda Şekil 2.1’de eddy akımlı manyetik kavramanın genel bir görüntüsü yer almaktadır. Yapı; endüktör (1), girdap akımının oluştuğu iletken plaka (2), giriş mili (3), çıkış mili (4) ve muhafaza elemanı (5) bölgelerini içermektedir.

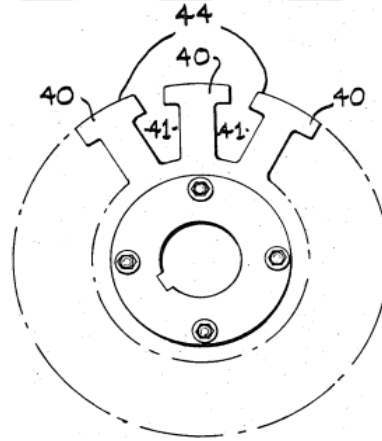


Şekil 2. 1. Eddy akımlı manyetik kavrama görüntüsü

Davies (1974) yaptığı çalışma ile eddy akımlı kavramanın teorik modelinin patentini almıştır ve model Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu kavramanın genel yapısı bir giriş şaftı (15), çıkış şaftı (55), kutup elemanı, diğer şafta bağlı bir kayıp elemanı (20) ve aradaki torkun aktarıldığı bir hava boşluğu ile tanımlanmıştır. Bu kavrama yapısı bir elektrik motoru ile kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Alan bobinlerinin (42) uyarılmasıyla çıkış hızı elde edilir. Çıkış hızı buna bağlıdır. Aşağıdaki Şekil 2.3’te eddy akımlı kavramanın kutup elemanı gösterilmektedir.

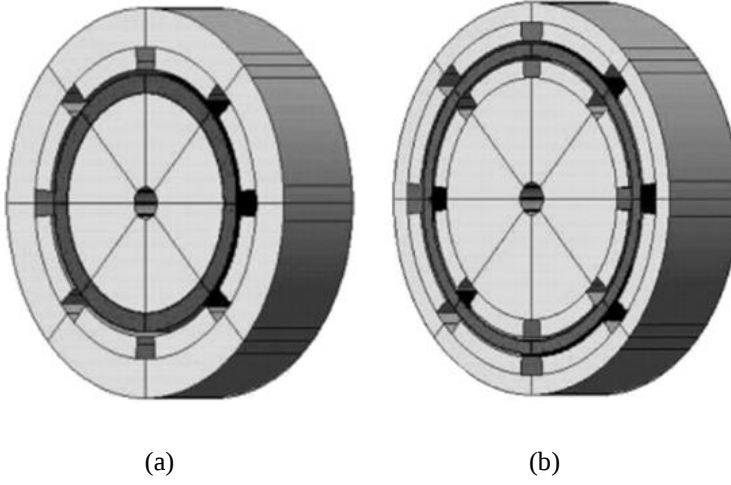


Şekil 2. 2. Patenti alınan eddy akımlı kavrama modeli (US3826937A)



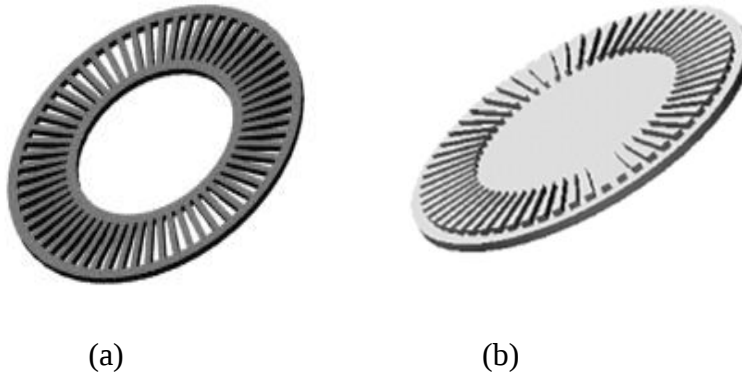
Şekil 2. 3. Eddy akımlı kavramanın kutup elemanının gösterimi

Canova ve Vusini (2005) radyal yapılı, tek ve çift katmanlı rotorda eddy akımlı kavramanın değişken ayırma yöntemi ile analitik modelini oluşturmuştur. Daha sonra Maxwell denklemlerinin kullanıldığı SEY ile asıl değerlerin elde edildiği performans değerlerine ulaşılmıştır. Farklı iki model için performans değerleri karşılaştırılmıştır. İstenilen değere göre tasarım yapılması adına örnek bir çalışma değeri taşımaktadır. Aşağıdaki Şekil 2.4'te tek ve çift katmanlı rotora sahip tasarımlar yer almaktadır.



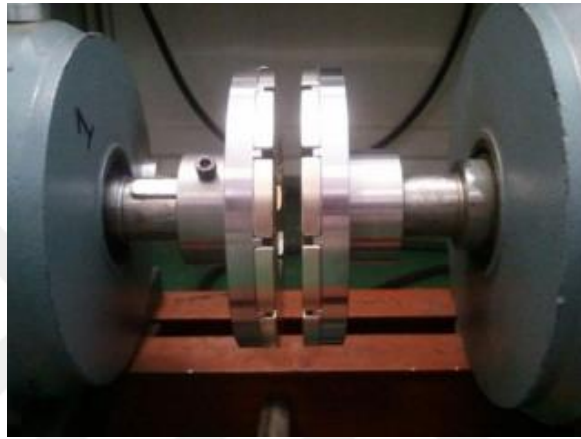
Şekil 2. 4. Tek katman a) ve çift katman b) rotorlu eddy akımlı manyetik kavrama

Razavi ve ark. (2006) sincap kafes tipi bir bağlantı diskinin tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Tasarımda gerçekleştirilmek istenilen, akım akışını kolaylaştırırken kaçak akımları önleyerek iyi bir verim elde etmektir. Eddy akımlı manyetik kavrama yapısından farklı olarak bakır plaka oluklu, bakır plakanın boyunduruğu çıkıntılı iç içe geçecek şekilde tasarlanmıştır. Oluklu bir bakır diskin çekme torkunu %15 artırdığı sonucuna varılmıştır. Karşılaşılan dezavantaj ise tasarım süreci meşakkatli olan oluklu yapıdır. Aşağıdaki Şekil 2.5'te oluklu bakır disk ve oluklu bakır diskin monte edildiği çıkıntılı boyunduruk yer almaktadır.



Şekil 2. 5. Oluklu bakır disk a), bakır diskin monte edildiği çıkıntılı arka demir b)

Lubin ve ark. (2012) eksenel manyetik kavramanın analitik yöntemini Laplace ve Poisson denklemlerine dayandırarak tasarımlarında manyetik kavramanın eksenel kuvveti ve torkunu hesaplamışlardır. Verim elde etmek için geometrik parametreler araştırılmıştır. Kutup çifti ve hava aralığının performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aşağıdaki Şekil 2.6'da eksenel akıllı senkron manyetik kavramanın test aşaması gösterilmektedir.



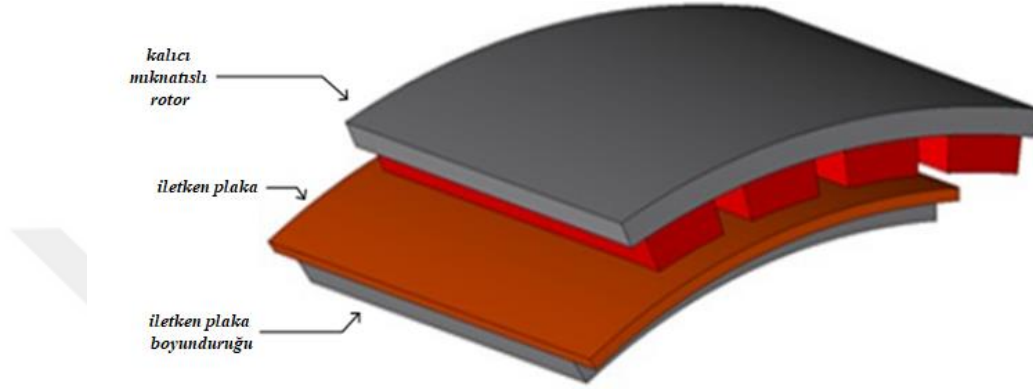
Şekil 2. 6. Eksenel akıllı senkron manyetik kavramanın test aşaması

(Lubin ve ark., 2012).

(Anonim, 2012) U.S Department Of Energy'de eskimeye başlamış eddy akımlı sürücülerin erkenden değiştirilmesinin verim üzerinde büyük bir etkiye sahip olunabileceği bulunmuştur. Farklı tork değerleri ile kullanılan eddy akımlı kavrama tipleri zamanla eski performansını göstermeyecek duruma gelebilmektedir. Bu sebeple bu tip kavramalar uzun süre kullanılması ve deforme olması yerine değiştirilmesi daha iyi olabileceği konusu, makale üzerinde açıklanmıştır.

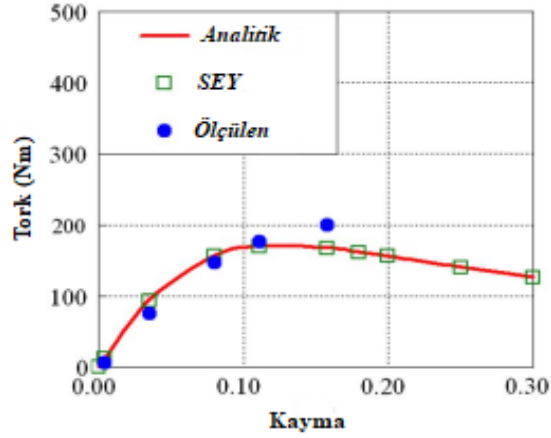
Rüzgâr enerjisi uygulamaları için kullanılan kayma-senkron kalıcı mıknatıslı generatörlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Mouton (2013) eddy akımlı kavramanın kayma-senkron kalıcı mıknatıslı generatörlerin yerine kullanılabilir olabileceğini araştırmıştır. Eddy akımlı kavrama ise karmaşık yapıdır. Bunu ise üç farklı topolojiyi

karşılaştırarak avantaj ve dezavantaj kısımlarına dikkat çekmiştir. Bu sayede kayma-senkron kalıcı mıknatıslı generatörlerde var olan tork dalgalanmaları gibi dezavantajların önüne geçilebilmiştir. Aşağıdaki Şekil 2.7’de eddy akımlı manyetik kavrama modeli gösterilmektedir.



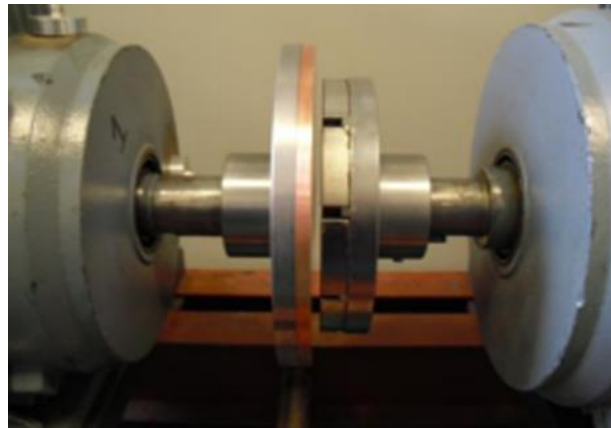
Şekil 2. 7. Eddy akımlı manyetik kavramanın malzemelerinin görüntüsü

Wang ve ark. (2014) eddy akımlı kavramanın tork iletim özelliklerini önceden tahmin etmeyi hedeflemişlerdir. Bunu ise eksenel ve radyal kalıcı mıknatıslı eddy akımlı kavrama üzerinde tasarlayarak gerçekleştirmişlerdir. Analitik hesaplamalar daha sonra SEY ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Benzer sonuçlar tespit edilip tablolara aktarılmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.8’de eddy akımlı manyetik kavramanın analiz sonuçlarının karşılaştırılması yer almaktadır.



Şekil 2. 8. Eddy akımlı manyetik kavramanın analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Lubin ve Rezzoug (2015) kararlı ve geçici durumlarda eddy akımlı kavramanın parametrelerini bulmada yardımcı bir tork denklemi oluşturmuşlardır. Analitik yöntem için eşdeğer devre modeli seçilmiştir. Karmaşık geometriler bu şekilde incelenmiştir. Tahmini sonuçlar ile analiz sonuçları arasında %10'dan daha az bir hata elde edilmiştir. Testlerden geçen model için tork formülü olumlu sonuç vermiş ve tasarım süreci için ışık kaynağı olmuştur. Aşağıdaki Şekil 2.9'da eksenel eddy akımlı manyetik kavramanın test aşamasındaki görüntüsü yer almaktadır.

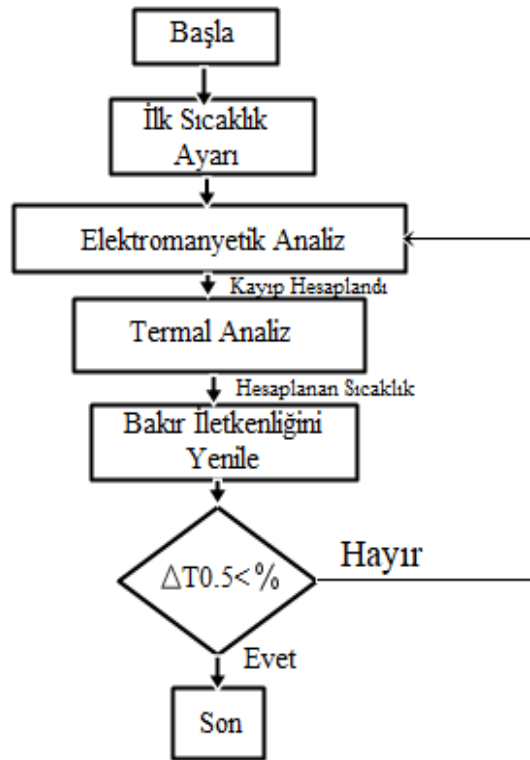


Şekil 2. 9. Eksenel eddy akımlı manyetik kavramanın test aşamasındaki görüntüsü

Lubin ve ark. (2016) manyetik kavramanın iki ana başlıkta incelenen konuları olan eddy akımlı ve senkron kavrama için tork formüllerini önermişlerdir. Bu tork formülleri hem kararlı hem de geçici durumlarda analitik yöntemlerdeki tahmini değerler için yardımcı

olmuştur. Senkron kavrama, aşırı tork yüklenmelerinde senkronizasyon kaybına yol açabileceği gözlemlenmiştir. Eddy akımlı kavramada ise böyle bir sorunun oluşmadığı ortaya konulmuştur.

Zheng ve ark. (2017) çeşitli yüklere tabi tutulan eddy akımlı kavramanın kayıp üzerindeki etkisini incelemiş ve oluşturulan modelde termal analizi hesaplamışlardır. Önce Laplace ve Poisson denklemlerine dayanan analitik hesaplama daha sonra ise termal analiz gerçekleştirilmiştir. Termal analiz sayesinde bakır levha üzerinde sıcaklık artışının neden olabileceği yüklerin etkileri incelenmiştir. Tasarımın her bir düğüm sıcaklığı termal analiz ile belirlenir. Bağlı fark $\Delta T < 0.5\%$ olmalıdır (T=düğüm sıcaklığı). Aşağıdaki Şekil 2.10’da analiz sürecinin tamamı resmedilmiştir.

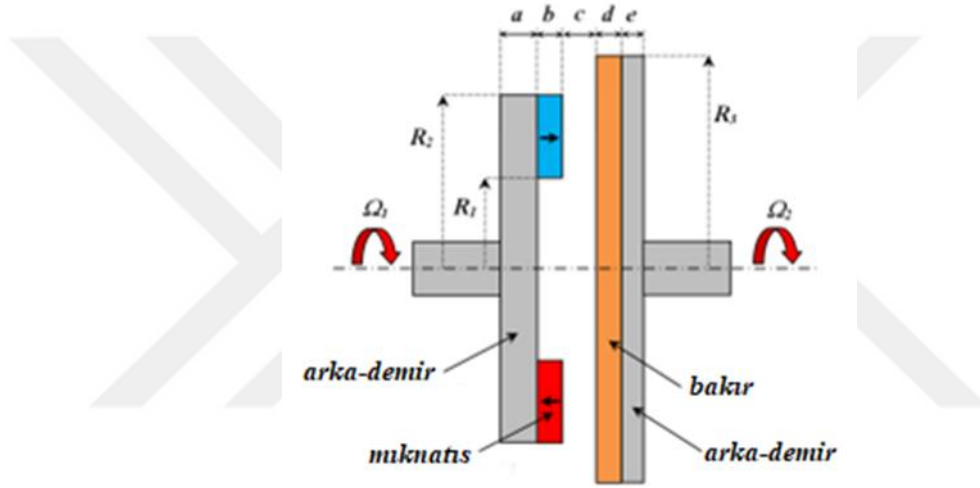


Şekil 2. 10. Analiz sürecinin tamamı

Li ve ark. (2017) eddy akımlı kavramanın sabit mıknatıslı eksenel akıllı versiyonu için bir araştırma yürütmüştür. Bu çalışmada iki boyutlu analiz yapılarak analitik sonuçlar

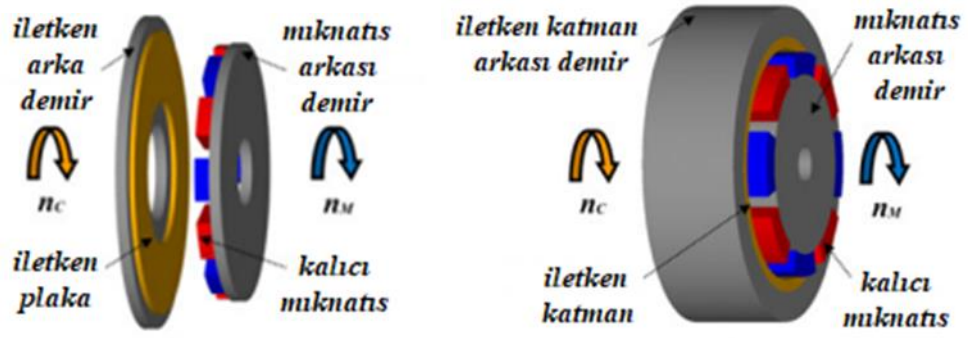
bulunmuştur. Daha sonra modelin manyetik alan ve tork değerlerinin sonuçları üç boyutlu analiz yardımıyla doğrulanarak elde edilmiştir.

Fontchastagne ve ark. (2018) eksenel eddy akımlı bir kavrama modeli tasarlamışlardır. Analitik çözümler için bir tork formülü oluşturulmuştur. Tasarımın manyetik ve termal analizi yapılmıştır. Ulaşılmak istenilen sonuç ise mıknatıs kalınlığı değişiminin model verimi üzerinde en iyi etkilere sahip olan tasarımı elde etmektir. Aşağıdaki Şekil 2.11’de eksenel akıllı eddy akımlı manyetik kavrama görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 11. Eksenel akıllı eddy akımlı manyetik kavrama

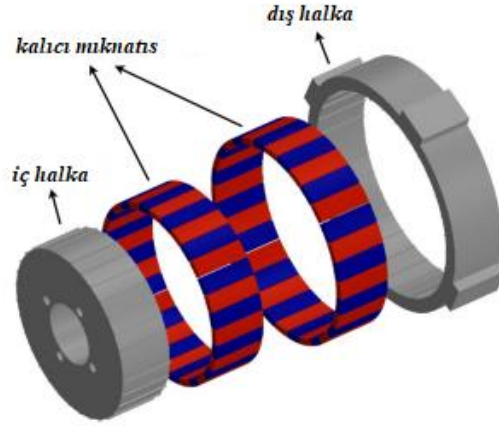
Wang ve Zhu (2018) araştırmalarında eddy akımlı kavramanın parametrelerini hesaplamak için manyetik eşdeğer devre tabanlı bir teknik sunmuştur. Sonuçlar yapılan testlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yani bu yöntem ile bu kavramanın performans parametreleri basit bir şekilde bulunmuştur. Aşağıda Şekil 2.12’de radyal ve eksenel akıllı eddy akımlı manyetik kavrama görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 12. Eksenel a) ve radyal b) akıllı eddy akımlı manyetik kavrama

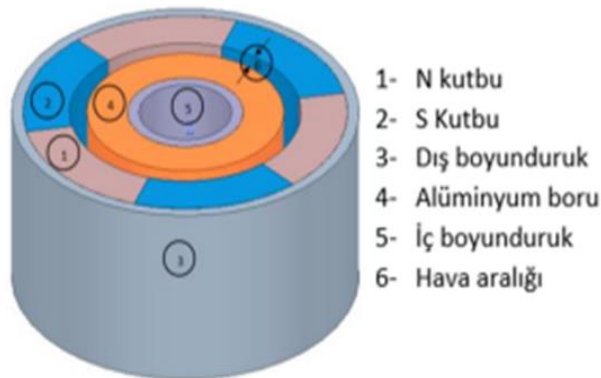
Yang ve ark. (2019) kalıcı mıknatıslı ve çift rotorlu eddy akımlı kavramanın ilk önce doğrusal olmayan performans verilerine ulaşmayı hedeflemişlerdir. Bu doğrusal olmayan performans verilerine ulaşmak için analitik modelin oluşturulması gerekir. Burada manyetik eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Faraday yasası ve Ampere Yasası ile doğrusal olmayan üç boyutlu manyetik alan modeli oluşturulmuştur. Girdap akımı alanını tanımlamak için Jenei yöntemi kullanılmıştır. Son olarak SEY ile testlerin karşılaştırılmaları gerçekleştirilmiştir.

Akçay ve ark. (2020) makalelerinde 100 Nm tork değerine çıkması hedeflenen manyetik bir kavrama tasarlamıştır. Bu kavrama yapısı radyal olarak tercih edilmiştir. Radyal olarak tercih edilmesindeki sebep eksenel yapıya göre daha fazla tork yoğunluğuna sahip olmasıdır. Önce 2D boyutta analiz yapılmış ve daha sonra SEY ile analizler desteklenmiş, deneysel olarak doğrulanmıştır. Tasarım parametrelerinde mıknatıs kalınlığı, kutup çifti sayısı, hava aralığı uzunluğu, toplam yarıçap gibi özelliklerin tasarıma etkileri araştırılmıştır. Statik torkun %80' ini aşmanın kutup kayması olaylarına neden olabileceğine kararına varılmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.13'te radyal akıllı senkron manyetik kavrama modeli yer almaktadır.



Şekil 2. 13. Radyal akılı senkron manyetik kavrama

Fenercioğlu ve ark. (2021) manyetik kavramanın performansını etkileyebilecek faktörlerin verimi üzerindeki değişimini gösteren bir makale yazmışlardır. Bu faktörler; hava aralığı, kutup sayısı, mıknatıs kalınlığı, pompa rotorunun et kalınlığı, malzemenin iletkenliği ve manyetik rotorun hızıdır. Göz önünde bulundurulan bu etkilere farklı değerler girilerek en verimli tasarım parametrelerine ulaşılmıştır. Makalede bahsi geçen manyetik kavrama pompa rotoru için kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.14’te radyal akılı eddy akımlı manyetik kavrama görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 14. Radyal akılı eddy akımlı manyetik kavrama

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Manyetizma

Manyetizma, aklımıza gelip gelebilecek neredeyse her konuyu içeren çok genel ve önemli bir kavramdır. Dünyanın manyetik alanını düşünüp daha sonra bir iletken atomun manyetik alana dahil olup onu nasıl etkileyebileceğini düşündüğümüzde bu kavramın küçümsenmeyecek derecede değerli bir kavram olduğu görülebilir. Örneğin dünyanın manyetik alanı sayesinde bal arıları, göçmen kuşlar, yunus ve balinalar yönlerini bulabilmektedir (Tanel, 2006). Dünya düzeninde yani doğal yaşam alanlarında dahi bu konudan bahsedilebilir. Gelişen teknoloji ile bu kavram hayatı olumlu manada değiştirmiştir. Fakat temelde yatan o önemli kavramın yani manyetizmanın ne olduğu tam olarak bilinmemektedir. Aslında kullandığımız cep telefonları, izlemekte olduğumuz televizyonlar, radyo vb. teknolojik aletler manyetizma konusunu içermekte olup bu konu gibi önemli buluşlara ışık tutmaktadır. Sanayide kullanılan elektromıknatıslar ile yük kaldırma-taşıma da bu sayede gerçekleşmektedir (Tanel, 2006). Günümüzde sıkça duyduğumuz elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının ana felsefesi de yine bu konudur.

3.1.1. Manyetizma tarihçesi

- “Aristoteles’e göre manyetizma hakkında ilk araştırma yapan kişi Tales’tir.
- Tıbbi malzemelerde kullanılabilir olabileceğini düşünen kişi Doktor Sushrota’dır.
- Bu konu hakkında ilk eser “The Master of Demon Valley”dir.
- Pusula icadı Alexander Neckam’a aittir.
- Manyetizma adına yazılıp mıknatıs hakkında detaylı açıklamaların bulunduğu kaybolmamış ilk eser “Epistola de magnete”dir.
- Hans Christian Ørsted elektrik akımı ile manyetizma arasında bir bağ olduğunu bulmuştur.
- Biot-Savart kuralı ile iletken tel etrafındaki manyetik alan keşfedilmiştir.
- Michael Faraday, bir iletkenin etrafında değişen bir manyetik alan varlığı söz konusu olduğunda potansiyel enerji açığa çıktığını bulmuştur.
- James Clerk Maxwell elektrik, manyetizma ve optik arasındaki ilişkiyi Maxwell denklemleri adı altında açıklamaya sunmuştur.

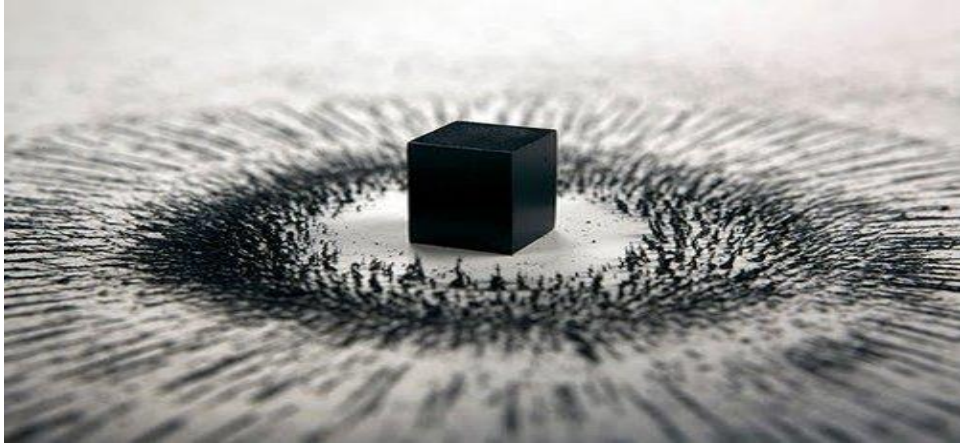
•Einstein'ın özel görelilik kavramları da bu gelişmeler ışığında ortaya çıkmıştır” (Anonim, 2021c).

3.1.2. Manyetik madde

Mıknatıslar manyetik alan oluştururlar. Bazı maddeleri çekme veya itme özelliğine sahiptirler. Mıknatısın çekim alanına dahil olan bazı maddelerde değişim gözlemlenir. Bu değişimler sonucu bir tepki oluşur. Tepki gösteren maddelerden bazıları ise;

- Demir
- Nikel
- Kobalttır.

Bu maddeler manyetik madde olarak adlandırılır. Aşağıda yer alan Şekil 3.1’de mıknatıs ve mıknatısın oluşturduğu alan gösterilmektedir.



Şekil 3. 1. Mıknatıs ve mıknatısın oluşturduğu alan
(Anonim, 2021d)

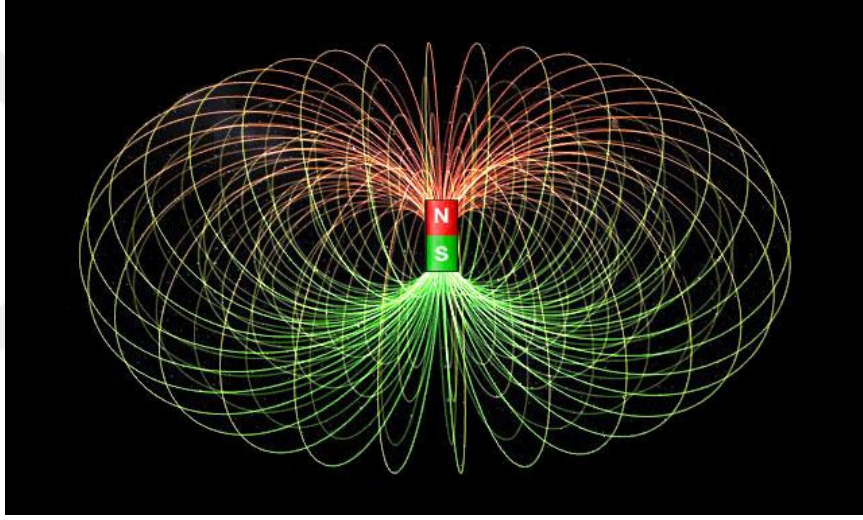
3.1.3. Manyetik alan

Manyetik alanı oluşturan birkaç temel husus vardır. Bunlar;

- Mıknatıs özelliklerini gösteren madde,

- Mıknatıs özelliklerini gösteren maddenin oluşturduğu bir alan,
- Mıknatıs özelliklerini gösteren maddenin oluşturduğu alanda akmakta olan manyetik alan çizgileri şeklindedir.

Manyetik maddenin alanı etrafında belli bir kurala göre çizgiler oluşmaktadır. Bu çizgiler kuzey kutbundan güney kutbuna doğru yol alır. Bu çizgiler belli bir alanın oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sayede mıknatıs özelliklerini gösteren maddenin çekim gücüne göre bir manyetik alan meydana gelmektedir. Mıknatısı oluşturan kutuplar ve alan çizgileri aşağıdaki Şekil 3.2’de yer almaktadır.



Şekil 3. 2. Mıknatısı oluşturan kutuplar ve akmakta olan alan çizgileri

(Anonim, 2020).

Manyetik maddeler arasında yer alan ferromanyetik malzemeler bağıl geçirgenlikleri 1’den büyük olması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bağıl geçirgenlik 1’den ne kadar büyük ise manyetik alan oluşturma olasılığı o oranda fazla olur.

Manyetik alana maruz kalan manyetik malzemeler gösterdikleri etkileşim farklılıklarına göre üçe ayrılabilir. Bunlar;

1. Diyamanyetik

2. Paramanyetik
3. Ferromanyetiktir.

Burada üç farklı gruba ayrılan malzemeler, manyetik alan etkisindeki etkileşimleri sırasıyla küçükten büyüğe verilmiştir. En fazla etkileşime sahip maddeler ferromanyetik malzemeler olduğundan bahsedilmiştir. Bu malzemeyi diğerlerinden ayıran en önemli şey manyetik alan ile olan etkileşimini sürdürebilir olmasıdır. Bu sayede projeler için oldukça önem taşır ve sıklıkla kullanılır. En düşük etkileşim gösteren malzeme ise diyamanyetik malzemedir. Paramanyetik malzeme, manyetik alan ile ne çok ne de az miktarda etkileşimi vardır. Diyamanyetik malzemeden çok, ferromanyetik malzemeden az bir etkileşimi mevcut olup manyetik alan etkisi altındaki etkileşimini tıpkı diyamanyetik malzeme gibi sürdürememektedir. (Vural, 2010).

3.1.4. Girdap (eddy) akım teorisi

İletken bir plaka ve değişen bir manyetik alanın bulunduğu yerde Faraday kanunu sebebiyle iletken üzerinde indüklemeye sebebiyle elektrik akımı oluşur. Elektrik akımı I (amper) Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

V (Volt) potansiyeli, R (ohm) direnci ifade eder.

Bu elektrik akımları oval bir görünümde ve devamlı olarak dolaşmalarından dolayı bu akımlara girdap (eddy) akımı denmektedir. Ampere kanununa göre bu alanda manyetik alan meydana gelir. Manyetik alan ifadesi Eşitlik 2’de verilmiştir.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{iç} \quad (2)$$

$\vec{B}$ (T) manyetik akı yoğunluğu, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği ($4\pi \times 10^{-7} T.m/A$), $I_{iç}$ (A) alan içindeki net akımdır (Yanagisawa, 2018).

Girdap akımlarının yönünü belirleyen ise Lenz kanunudur. Lenz kanununa göre manyetik alanının değişimine karşı koyan plakada kutuplar oluşur. Lenz kanununa göre elektromotor kuvveti ε (V) Eşitlik 3'te verilmiştir.

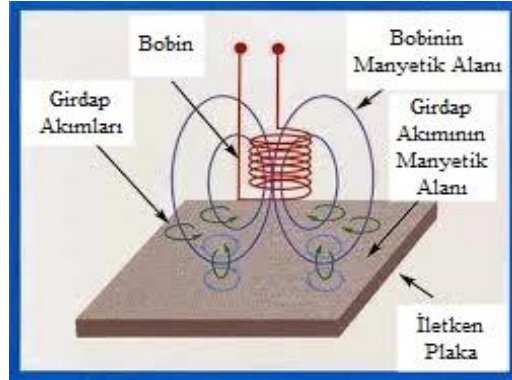
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

İfade de açıklandığı gibi elektromotor kuvvetinin yönü (-) ifade edilir.

Oluşan kutuplar ile mıknatıs arasında itme kuvveti ortaya çıkar. Burada gerçekleşen kuvvet ise Biot-Savart yasası gereği ortaya çıkmaktadır. Biot-Savart yasası Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a\pi} \quad (4)$$

a uzaklığı (m) ifade etmektedir. Aşağıda Şekil 3.3'te girdap akımı görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 3. Girdap akımı görüntüsü

(Anonim, 2021e).

Faraday yasasına göre iletkende oluşan akım, indüklenmiş elektromotor kuvveti tarafından meydana gelir ve emk Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (3)$$

Manyetik akının ϕ_B (T) zamana göre türevi şeklindedir. (- işareti Lenz yasası gereğidir.)

Bakır plakalarda indüklenen girdap akımları kayıp ve sıcaklığın artmasına neden olur. Projelerde düşük kayma değerlerinde çalışmalar gerçekleştirilmek istenmektedir. Bunun sebebi ise kayma değeri arttıkça verimin azalmasıdır.

Verim (η) Eşitlik 5’te verilmiştir.

$$\eta = 1 - s \quad (5)$$

s Kaymayı ifade etmektedir.

İndüklenen akımların elektrik frekansı kutup sayısına göre değişir.

$$\omega_{re} = 2\pi \frac{p \cdot s \cdot n_{sync}}{120} \quad (6)$$

Eşitlik 6’da kayma rotoru üzerinde indüklenen akımların elektrik frekansı formülü verilmiştir. Burada p kutup sayısı, s kayma ve n_{sync} (rpm) senkron hızı ifade eder (Mouton, 2013).

Kalıcı mıknatıs bölgesindeki manyetik indüksiyon formülü Eşitlik 7’de verilmiştir.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (7)$$

H manyetik alan yoğunluğu(A/m), M kalıcı mıknatıslanma vektörüdür.

A manyetik vektör potansiyeli olarak tanımlanırsa Eşitlik 8 ve Eşitlik 9 ile Eşitlik 10 elde edilir.

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (9)$$

İse:

$$\nabla \times B = -\nabla^2 A \quad (10)$$

Şeklinde yazılır (Zheng ve ark., 2017).

3.2. Geometri

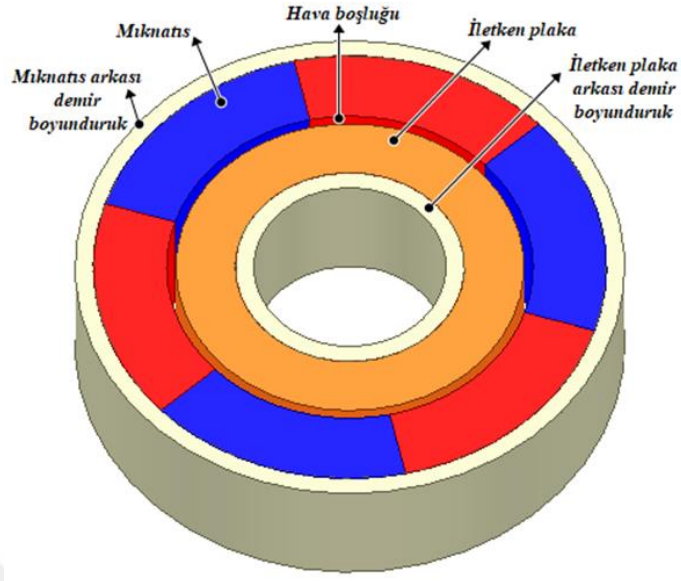
Burada eddy ve senkron kavramının geometrik yapıları incelenmiştir.

- I. Radyal yapılı eddy akımlı manyetik kavrama
- II. Radyal yapılı senkron manyetik kavrama

Manyetik kavrama, radyal manyetik kavrama olarak adlandırılmasının ana sebebi akının radyal olarak yolunu tamamlamasından dolayıdır.

3.2.1. Radyal akı yapılı eddy akımlı manyetik kavrama modeli

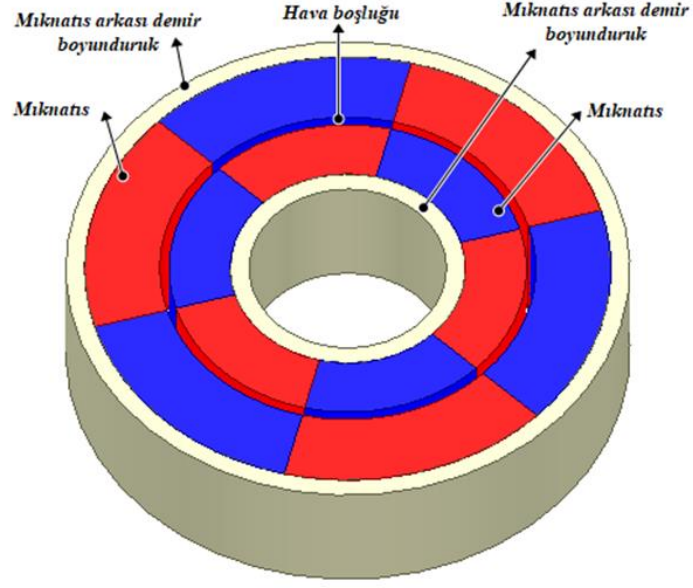
Aşağıda yer alan Şekil 3.4'te eddy akımlı kavramanın parçalarının görüntüsü yer almaktadır. Parçaları incelemek istediğimizde eddy akımının olduğu alan olan iletken plaka, iletken plakanın arkasında yer alan demir boyunduruk, kalıcı mıknatıs, kalıcı mıknatısın arkasında yer alan demir boyunduruk, giriş (mıknatıs arkası demir boyunduruk kısmına montajı gerçekleşecek olan bölge) ile çıkış (iletken plaka arkası demir boyunduruk kısmına montajı gerçekleşecek olan bölge) mili ve parçaların temassız hareketinden de anlamış olacağımız bir hava boşluğu karşımıza çıkar.



Şekil 3. 4. Radyal akı yapılı eddy akımlı manyetik kavrama modeli

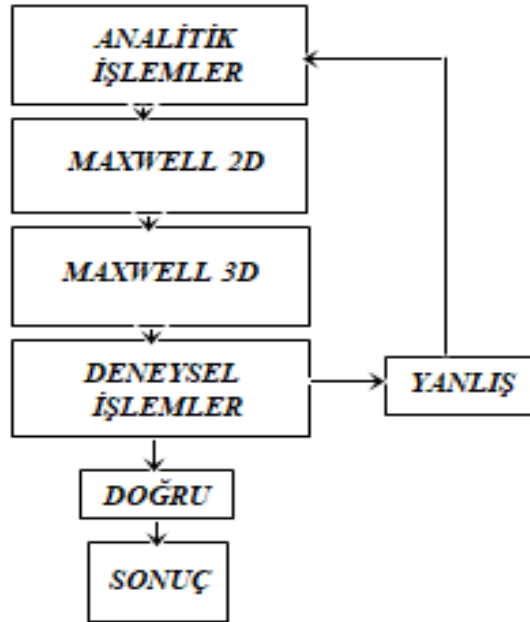
3.2.2. Radyal akı yapılı senkron manyetik kavrama modeli

Senkron kavrama iki ana diskten meydana gelmektedir. Bu diskler birbirine benzer yapılardır. Yumuşak demire yapıştırılmış kalıcı mıknatıslardan ve disk arasındaki hava boşluğundan meydana gelir. Manyetik alan mıknatıslar yardımıyla gerçekleşir ve diske aktarılan tork hava boşluğundan diğer diske geçer (Lubin ve ark., 2016). Eddy akımlı kavramada var olan iletken plaka içermez. Adından da anlaşıldığı üzere kaymanın oluşmadığı senkron manyetik kavrama türüdür. Aşağıdaki Şekil 3.5'te radyal yapılı senkron kavrama modeli yer almaktadır.



Şekil 3. 5. Radyal akı yapılı senkron manyetik kavrama modeli

Tasarım süreçleri için düzenlenen sistem aşağıda yer alan Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3. 6. Tasarım süreci

3.3. Analitik Yöntem

Projenin analizleri iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar analitik ve nümerik analiz olarak karşımıza çıkar. Analitik yöntem manyetik kavrama parametrelerinin sonuçlarını tahmini olarak öğrenip projelerde zaman tasarrufu yapmamıza yardımcı olur. Burada baz alınan analitik yöntem, değişken ayırma yöntemidir. Değişken ayırma yöntemi de Poisson ve Laplace denklemlerini içermektedir.

Poisson denkleminin genel formülü Eşitlik 11’de verilmiştir.

$$\nabla^2 \varphi = f \quad (11)$$

∇^2 laplasyen(çok katlı öklid uzayı), f ve φ gerçekte ve karmaşık fonksiyonu ifade etmektedir. Üç boyutlu olarak yazılmak istendiğinde Eşitlik 12 elde edilir.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi(x, y, z) = f(x, y, z) \quad (12)$$

$f = 0$ Olduğunda sonuç Eşitlik 13’deki gibi yazılır.

$$\Delta \varphi = 0 \quad (13)$$

(Δ laplasyene).

Silindirik koordinatlarda laplace Eşitlik 14 gibi ifade edilir.

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = 0 \quad (14)$$

Laplace denklemlerinin çözümlerine harmonik fonksiyon denilmektedir. Fonksiyon Eşitlik 15’te gösterilmiştir.

$$\Delta f = h \quad (15)$$

h Özel bir fonksiyon ise $(h(x, y, z))$ bu Poisson denklemidir (Anonim, 2021f).

Eddy akımlı kavramanın 5 ana parçası olan; mıknatısın bulunduğu sırt bölgesindeki demir boyunduruk, kalıcı mıknatıs, hava boşluğu, bakır plaka ve plakanın bulunduğu sırt bölgesindeki demir boyunduruğun manyetik alan ifadeleri çözümlenmiştir. Senkron kavramada ise eddy akımlı kavramada saydığımız 5 ana parçadan eksik olarak bakır plaka bölgesi çözümlenmelerde yer almaz. Analitik çözüm için alanlar homojen bölgelere ayrılır.

I.Bölge: Sırt bölgesindeki boyunduruk (rotor arkası)

II.Bölge: Bakır plaka (iletken plaka)

III.Bölge: Hava boşluğu

IV.Bölge: Kalıcı mıknatıs

V.Bölge: Sırt bölgesindeki boyunduruk (mıknatıs arkası)

Elektromanyetik denklem vektör potansiyeli A Eşitlik 16'da verilmiştir.

$$\nabla^2 . A = -\mu_{rj} \mu_0 J \quad (16)$$

Eşitlik 16'daki formül her bölge için ifade edilmelidir. Her bölge için genel çözüm Eşitlik 17'de gösterilmektedir.

$$A_j(r, \theta) = A_{j,r}(r) . A_{j,\theta}(\theta) \quad (17)$$

Değişkenler Eşitlik 18, Eşitlik 19 ve Eşitlik 20'de verilmiştir.

$$A_j = A_j(r, \theta) \quad (18)$$

$$A_{j,r} = A_{j,r}(r) \quad (19)$$

$$A_{j,\theta} = A_{j,\theta}(\theta) \quad (20)$$

Elektromanyetik büyüklüklerin kutup aralığı ile periyodik olduğunu varsayabiliriz. Değişkenler aşağıda yer alan Eşitlik 22 ile Eşitlik 21'deki gibi elde edilir.

$$A_j = \sum_n e^{im\theta} \cdot A_{j,r}^{(n)} \quad (21)$$

$$n = 1, 3, 5 \dots$$

$$m = \frac{\pi}{\tau n} \quad (22)$$

Bölge I, Bölge III, Bölge V'in alan denklemleri Eşitlik 23, Eşitlik 24 ve Eşitlik 25'de verilmiştir.

$$\nabla^2 \cdot A_1 = 0 \quad (23)$$

$$\nabla^2 \cdot A_3 = 0 \quad (24)$$

$$\nabla^2 \cdot A_5 = 0 \quad (25)$$

Bölge II iletken olup akım yoğunluğu Eşitlik 26'da verilmiştir.

$$J_2 = \sigma K_2 \quad (26)$$

σ Bölge II' nin iletkenliğidir.

Faraday Yasası ile K_2 Eşitlik 27’de verilmiştir.

$$rotK_2 = -\frac{dB_2}{dt} \rightarrow rotK_2 = -\frac{dB_2}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{dB_2}{d\theta} \cdot \omega \quad (27)$$

ω (Rad/s) rotorun açısal hızıdır.

Manyetik vektör potansiyeli açısından bu denklem düzenlenirse Eşitlik 28’deki gibi olmaktadır.

$$K_2 = -\frac{dA_2}{d\theta} \cdot \omega \quad (28)$$

Bölge II’ nin alan denklemi Eşitlik 29’da gösterilmektedir.

$$\nabla^2 \cdot A = \mu_{r2} \mu_0 \omega \sigma \frac{dA_2}{d\theta} \quad (29)$$

Değişken ayırma yöntemi ile 2 terime ayrılır. Terim Eşitlik 30’da yer almaktadır.

$$A_2^{(n)} \theta = e^{im\theta} r^2 \frac{d^2 A_{2,r}^{(n)}}{dr^2} + r \frac{dA_{2,r}^{(n)}}{dr} - A_{2,r}^{(n)} (m^2 + i\omega \mu_0 \mu_{r2} \sigma m r^2) = 0 \quad (30)$$

Son olarak IV.Bölge ‘nin manyetik akı yoğunluğu bileşenleri Eşitlik 31’de gösterilmektedir.

$$\begin{pmatrix} B_{4,\theta} \\ B_{4,r} \end{pmatrix} = \mu_0 \begin{pmatrix} H_{4,\theta} \\ H_{4,r} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ B_{RES} \end{pmatrix} \quad (31)$$

Dikdörtgen dalga elde edilir. Bu dalga biçimi Fourier dağılımı Eşitlik 32’deki gibi ifade edilir.

$$B_{RES} = \sum_n B_{RES}^{(n)} e^{im\theta} \quad (32)$$

Vektör manyetik potansiyelinin iki bileşeni Eşitlik 33'te verilmiştir.

$$A_{4,\theta}^{(n)} = e^{im\theta} \frac{d^2 A_{4,r}^{(n)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{4,r}^{(n)}}{dr} - \frac{m^2}{r^2} A_{4,r}^{(n)} = -i \frac{m}{r} B_{RES}^{(n)} \quad (33)$$

Son olarak denklem (sınır koşulları) Eşitlik 34'te yer almaktadır.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_{j,\theta}^{(n)}}{d\theta} &= \frac{dA_{k,\theta}^{(n)}}{d\theta} \\ \frac{1}{\mu_{j,r}} \frac{dA_{j,r}^{(n)}}{dr} &= \frac{1}{\mu_{k,r}} \frac{dA_{j,r}^{(n)}}{dr} \end{aligned} \right|_{\theta=0, r=} \quad \begin{aligned} &\text{Rotor dış çapı=hava aralığı iç çapı} \\ &\text{Hava aralığı dış çap} \\ &\text{mıknatıs iç çap} \\ &\text{mıknatıs dış çap} \end{aligned} \quad (34)$$

j ve k'nın tanımlandığı yer, Bölge V $r = \text{mıknatıs dış çap}$, $r = \infty$ olması performans değerlerini değiştirmedeğinden ifade Eşitlik 35'teki gibidir. Eşitlik 36'da r yerine rotor iç çapı yazılmıştır.

$$A_4^{(n)} \Big|_{r=\infty} = 0 \quad (35)$$

$r = \text{rotor iç çap}$ için;

$$\frac{dA_1^{(n)}}{d\theta} = 0 \Big|_{r=\text{rotor iç çap}} \quad (36)$$

Homojen bölgelere ayrılan her bir bölgenin terim ifadesi Eşitlik 37, Eşitlik 38, Eşitlik 39, Eşitlik 40, Eşitlik 41 ve Eşitlik 42'de gösterilmektedir.

$$A_1^{(n)} = (C_1^{(n)} r^m + D_1^{(n)} r^{-m}) e^{im\theta} \quad (37)$$

$$A_2^{(n)} \quad (38)$$

$$= \left(Bessel J[m, -\sqrt{-i} \sqrt{m\mu_0\mu_{r2}\sigma\omega r}] \cdot C_2^{(n)} \right) e^{im\theta} \\ + \left(Bessel Y[m, -\sqrt{-i} \sqrt{m\mu_0\mu_{r2}\sigma\omega r}] \cdot D_2^{(n)} \right) e^{im\theta} \\ A_3^{(n)} = (C_3^{(n)} r^m + D_3^{(n)} r^{-m}) e^{im\theta} \quad (39)$$

$$A_4^{(n)} = (C_4^{(n)} r^m + D_4^{(n)} r^{-m} - iB_{RES}^{(n)} m^{-1}) e^{im\theta} \quad (40)$$

$$A_5^{(n)} = (D_5^{(n)} r^{-m}) e^{im\theta} \quad (41)$$

$A_2^{(n)}$ Benzer denklemi Eşitlik 42’de verilmiştir.

$$A_2^{(n)} = (C_2^{(n)} r^\lambda + D_2^{(n)} r^{-\lambda}) e^{im\theta} \quad (42)$$

Bessel çözümünün zor olması sebebiyle yaklaşık olarak elde edilen çözüm kabul edilir.

Üstel sayılar Eşitlik 43 ve Eşitlik 44’te yer almaktadır.

$$\lambda = \sqrt[4]{m^4 + (m\mu_0\mu_{r2}\sigma \frac{\omega(hava\ aralı\đı\ iç\ \text{çap} + hava\ aralı\đı\ dış\ \text{çap})^2}{r^2})^2} e^{j\varsigma} \quad (43)$$

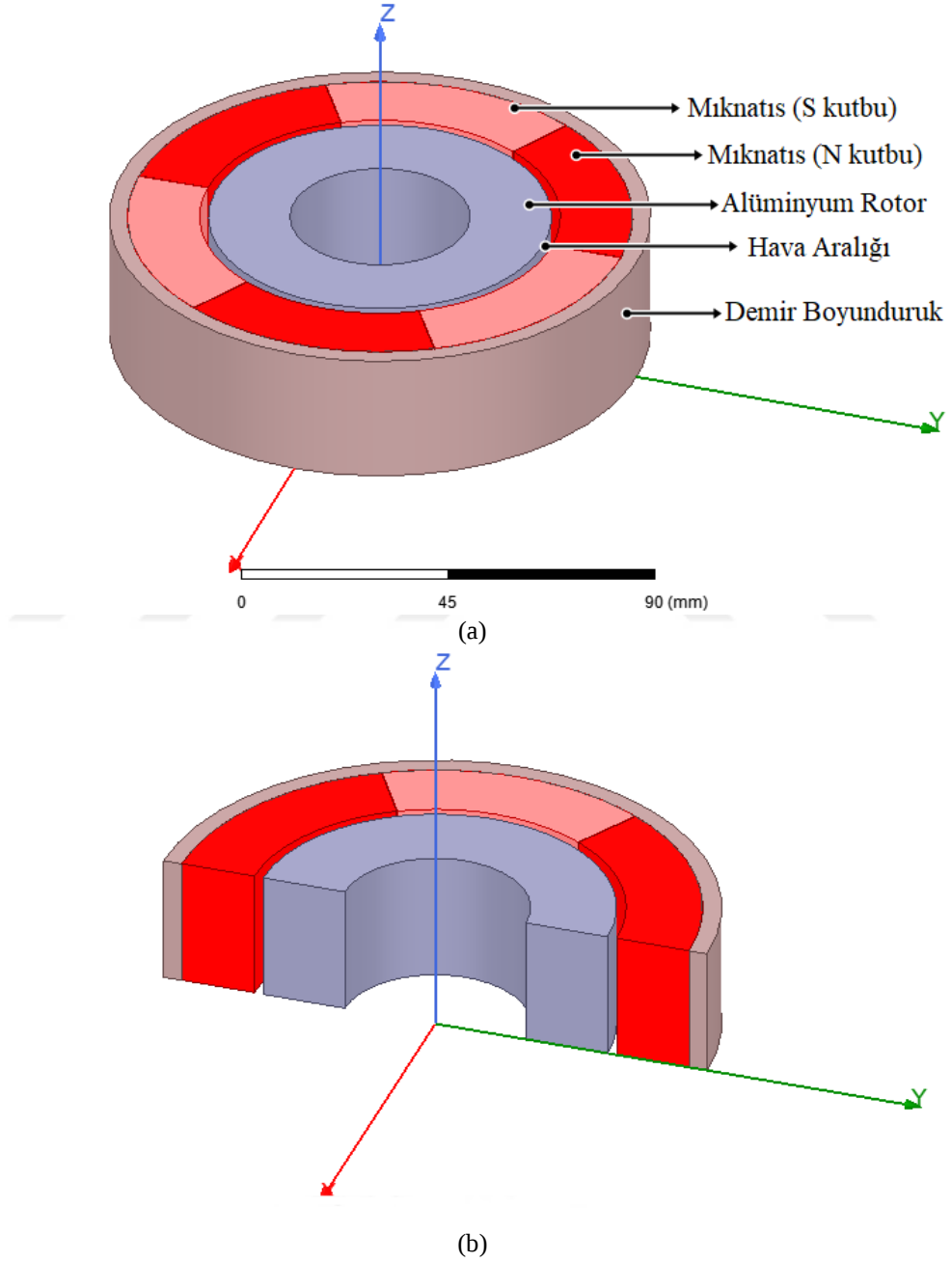
$$\varsigma = \frac{1}{2} \arctan(m^{-1}\mu_0\mu_{r2}\sigma \frac{\omega(\frac{hava\ aralı\đı\ iç\ \text{çap} + hava\ aralı\đı\ dış\ \text{çap}}{2})^2}{r^2}) \quad (44)$$

(Canova ve Vusini, 2005).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Eddy Akımlı Manyetik Kavrama Tasarım Modeli

Eddy akımlı kavramanın manyetik modeli ve parçaları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4. 1. Eddy akımlı kavramanın manyetik modeli a) tam model b) ½ model

Eddy akımlı kavramanın boyut değişkenleri ve ölçüleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

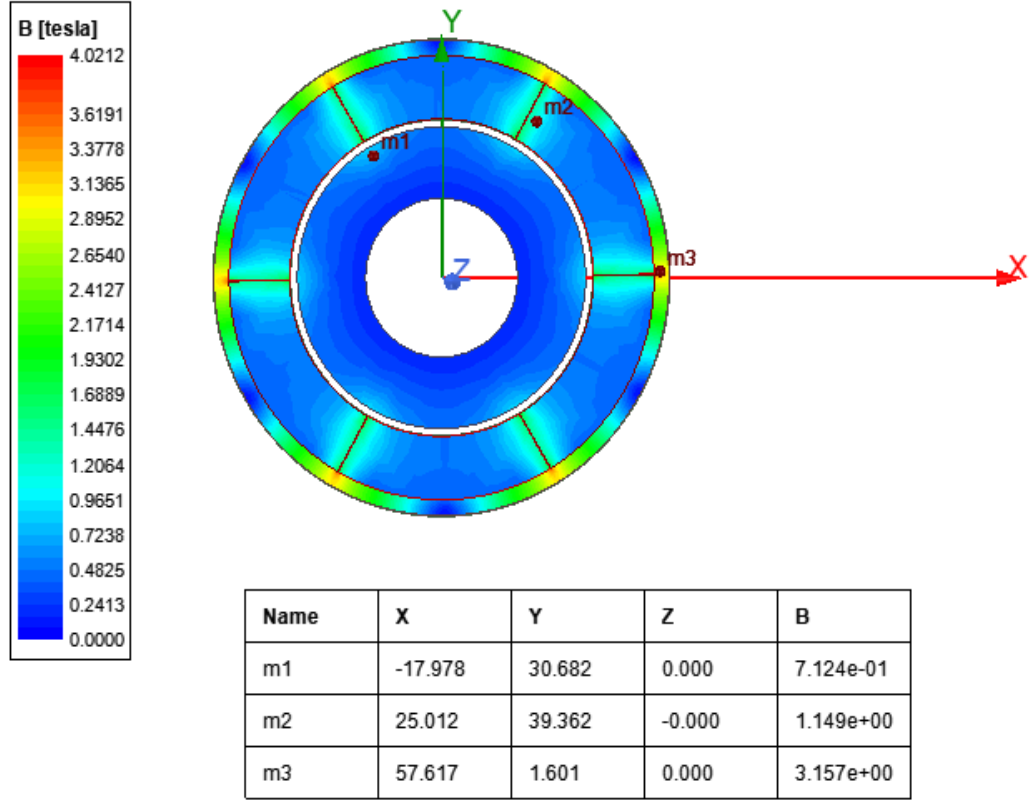
Çizelge 4. 1. Oluşturulan prototip tasarımın parametreleri ve ölçüleri

Parametreler	Boyut
<i>Rotor İç Çap</i>	20 mm
<i>Rotor Dış Çap</i>	38 mm
<i>Boyunduruk İç Çap</i>	56 mm
<i>Boyunduruk Dış Çap</i>	60 mm
<i>Kutup Sayısı</i>	6
<i>Hava Aralığı</i>	1 mm
<i>Mıknatıs Kalınlığı</i>	8 mm
<i>Rotor Malzeme Cinsi</i>	Alüminyum
<i>Mıknatıs Cinsi</i>	N48H (Br= 1.4 T ve –Hc= 976 kA/m)
<i>Boyunduruk Malzeme</i>	Steel_1010

Çizelge 4.1’de yer alan değerlerde eddy akımlı manyetik kavrama yapısı oluşturulmuştur.

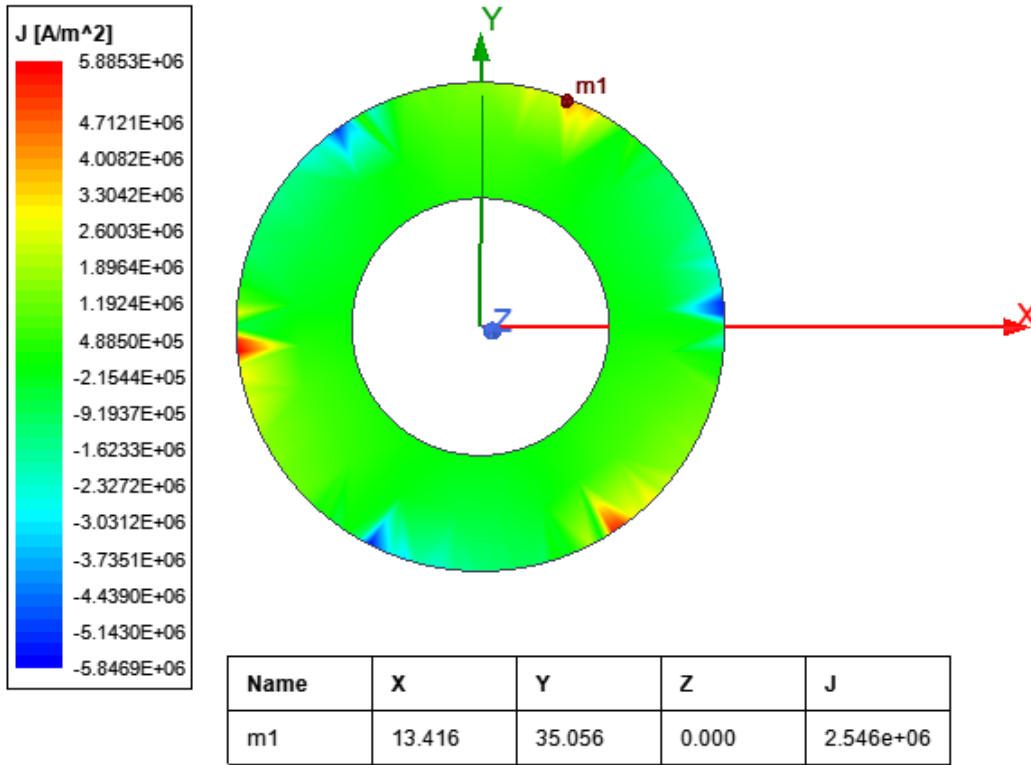
Eddy akımlı manyetik kavramanın 2 boyutlu manyetik modeli SEY ile Ansys Maxwell ile analiz edilmiştir. Analizler 3000 d/d hız 0.5 Nm yük altında yapılarak çözüm elde edilmiştir.

Eddy akımlı manyetik kavramanın boyutları incelendiğinde rotor iç çapı 20 mm, rotor dış çapı 38 mm, mıknatıs iç çapı 40 mm, mıknatıs dış çapı 56 mm, boyunduruk iç çapı 56 mm ve boyunduruk dış çapı 60 mm olarak tasarlandığı görülmektedir. Malzeme seçimi olarak rotoru alüminyum, mıknatıs cinsi N48H ve boyunduruğu Steel_1010 seçilmiştir.



Şekil 4. 2. Oluşturulan tasarımın manyetik akı yoğunluğu

Şekil 4.2’de eddy akımlı kavramanın manyetik akı yoğunluğunun dağılımı yer almaktadır. Manyetik akı yoğunluğunun en yoğun olduğu bölgeler boyunduruk kısmıdır. Ayrıca rotor (m1 noktası), mıknatıs (m2 noktası) ve boyunduruk (m3 noktası) üzerinde yer alan herhangi bir noktanın akı değerleri belirtilmiştir. Oluşturulan tasarımın manyetik akı yoğunluğu doyumun en yüksek olduğu kısımda 4.02 T değerlerine kadar çıktığı görülmektedir. Buradaki doyum azaltmak için boyunduruk kalınlığı artırılabilir. Kavrama boyutlarının ve maliyetin artmaması, üretim kolaylığı dikkate alınarak boyunduruk kalınlığı 2 mm yapılmıştır.

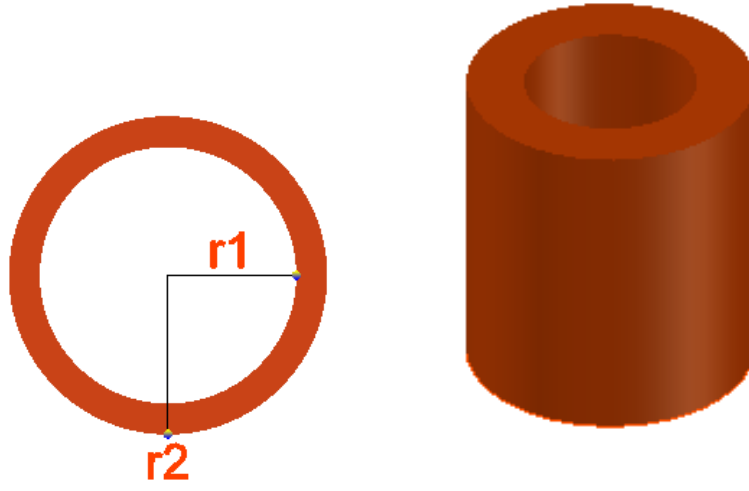


Şekil 4. 3. Eddy akımlı kavramanın alüminyum rotorundaki akım yoğunluğu (A/m²)

Yukarıda yer alan şekil 4.3'te alüminyum plakanın rotorda indüklenen eddy akımı ve akım yoğunluğu gösterilmiştir. Akım yoğunluğu maksimum 5.885 A/mm^2 değerine kadar çıkmıştır. Akım yoğunluğu yüksek sıcaklığa neden olmayacak değerler arasındadır.

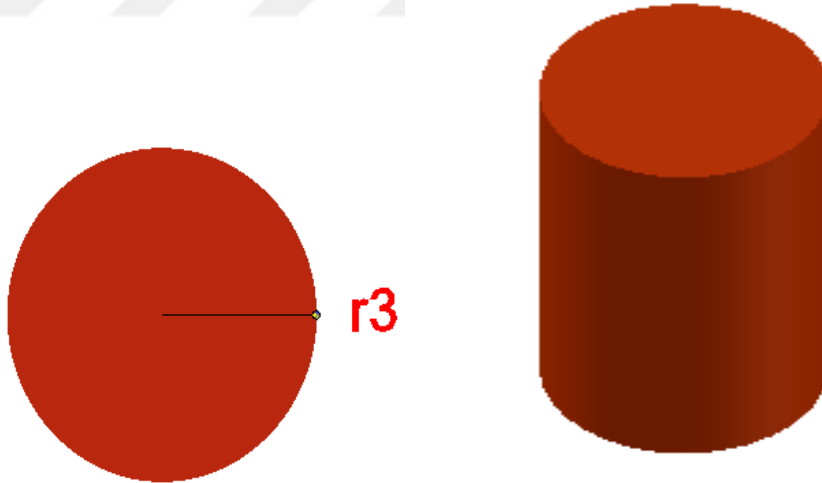
4.2. Silindirik Yapılı Cismin Atalet Momenti

Aşağıda yer alan Eşitlik 45'te Şekil 4.4'ün, Eşitlik 46'da Şekil 4.5'in atalet momenti hesabı yer almaktadır. $I_z \text{ (kg.m}^2\text{)}$ atalet momentini ifade etmekte ve m kütle anlamına gelmektedir. Yarıçaplar sırasıyla r_1, r_2, r_3 şeklindedir.



Şekil 4. 4. Silindirik içi boş bir cisim ve yarıçap gösterimi

$$I_z = \frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2) \quad (45)$$



Şekil 4. 5. Silindirik yapılı bir cisim ve yarıçap gösterimi

$$I_z = \frac{1}{2} m . r_3^2 \quad (46)$$

(Anonim,2021g).

ANSYS Maxwell analizleri gerçekleştirilirken farklı parametre değerleri için sonuçlar elde edilmiştir. Buradaki nihâi sonuçları elde ederken hesaplamalarda malzemelerin atalet momenti de hesaplatılmıştır.

Tasarım sırasında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer etki sönümleme katsayısıdır. Bu sönümleme katsayısı tasarlanan yapının salınımı sırasında bir direnç oluşması ile ortaya çıkmaktadır. Bu direnç bir nevi salınım sırasında oluşan kaymaya bağlı kendini koruma isteğidir. Maxwell analiz kısmında da her bir tasarım için bu etki dikkate alınmıştır.

Sönümleme faktörü Eşitlik 47’de, formüldeki atalet moment hesabı ise Eşitlik 48’de yer almaktadır.

$$C_M = s. \omega. I_Z \quad (47)$$

$$I_Z \cong 30. G_r d_r \quad (48)$$

Burada G_r rotorun ağırlığını (da/N cinsinden), d_r rotorun dış çapını metre cinsinden ifade edilmektedir (Marghitu ve ark., 2001).

4.3. Manyetik Analiz Sonuçları

Fizik, bilim dünyasında yeryüzünü anlamamıza yardımcı olan önemli konuları kapsayan bir kavramdır. Tarihsel olarak 19.yy’a kadar klasik fizik, 19.yy’dan sonra modern fizik olarak iki kısımda incelenebilmektedir. Manyetizma konusundaki çalışmalar modern fiziğin oluşmasında önemli rol oynamıştır. Maxwell elektrik, manyetizma ve optik konularını bir araya getiren alan denklemlerini oluşturarak elektromanyetik kavramın açıklanmasına yardımcı olmuş, yeni çalışmaların gerçekleştirilmesi adına bilim dünyasına ışık tutmuştur. Burada Maxwell’in alan denklemleri yardımı ile

gerçekleştirilen ANSYS Maxwell programında analizlerin sonuçları yer almaktadır (Uçar, 2019).

Manyetik kavramanın analizleri gerçekleştirilirken verim üzerinde büyük etkilere sahip bazı parametreler mevcuttur. Parametrelerin verimlilik, maliyet ve seri üretime uygunluk açısından optimize edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler:

- Kutup Sayısı,
- Hava Aralığı,
- Motor hızı (kavrama giriş hızı),
- Mıknatıs kalınlığı,
- Rotor malzeme cinsidir.

Farklı parametre değerleri girilerek verim, maliyet gibi etkiler göz önünde bulundurularak en iyi değerler seçilmiştir. Testler 3000 rpm hız, 1 mm hava aralığı, 8 mm kalınlığında mıknatıs, 6 kutup sayısı ile yapılmıştır.

Verim hesaplamaları, çıkış gücünün giriş gücüne oranı ile gerçekleştirilir. Eşitlik 49 verim, Eşitlik 50 çıkış gücünü P_o (W), Eşitlik 51 giriş gücünü P_i (W) ifade etmektedir.

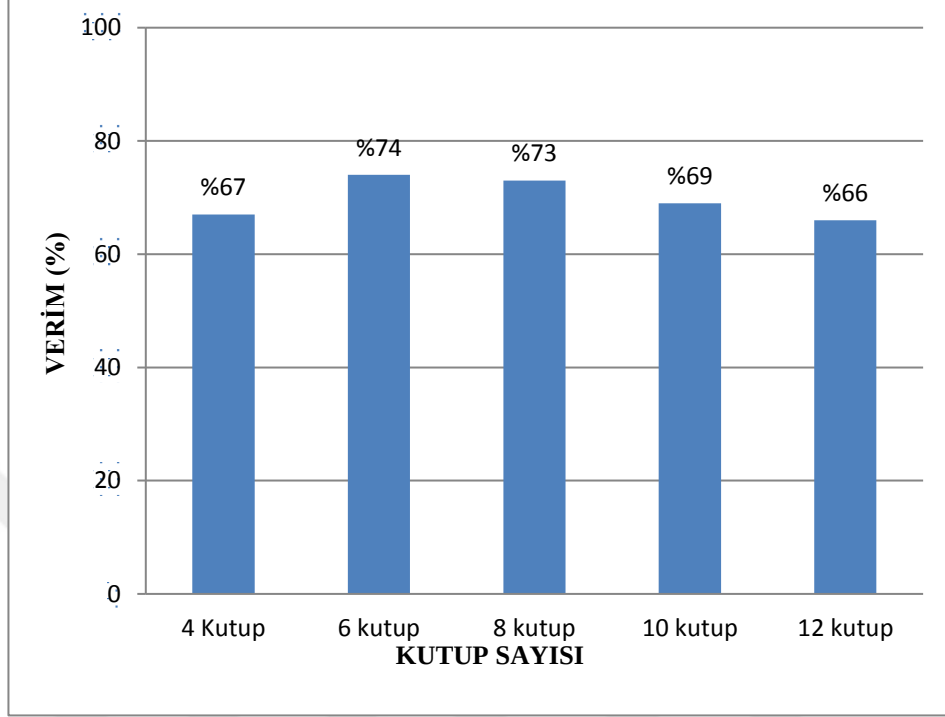
$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (49)$$

$$P_o = T_o \cdot \omega_o \quad (50)$$

$$P_i = T_i \cdot \omega_i \quad (51)$$

T_i (Nm) giriş tork değeridir. T_o Çıkış torku, ω_i Rad(s) olarak giriş açısal hızı, ω_o çıkış açısal hızıdır.

4.3.1. Kutup sayısı-verim grafiği

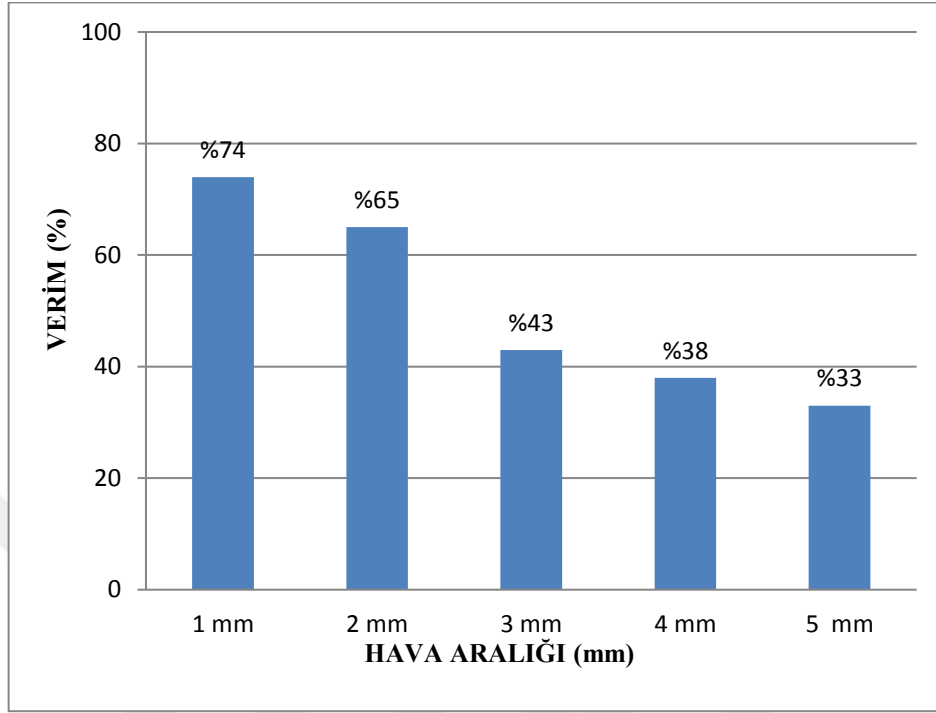


Şekil 4. 6. Farklı kutup sayılarının verim üzerindeki etkisi

Kutup sayısı, manyetik kavramanın tasarım aşamasında önemli bir faktör olarak karşımıza çıkar. Bu tasarıma sahip yapıda tork ile çıkış hızının değişimine neden olmaktadır. Manyetik kavrama yapısı 4, 6, 8, 10 ve 12 kutuplu tasarımları SEY ile analizleri yapılmıştır. Sonuçlara göre yüksek verime sahip olan kutup sayısı olarak 6 kutuplu manyetik kavrama seçilmiştir.

Mıknatıslar her zaman kuzey (North) ve güney (South) kutuplarına sahip yapılardır. Elimizdeki bir mıknatısı 2 eşit parçaya böldüğümüzde her bir parça için bu söylediğimiz kural aynen geçerli olur. Bu yüzden kutuplar çift rakamlar halinde ifade edilmektedir. Bu tasarımdaki kutup çifti sayısı $2p = 6$ şeklinde gösterilmektedir.

4.3.2. Hava aralığı – verim grafiği



Şekil 4. 7. Farklı hava aralıklarının verim üzerindeki etkisi

Manyetik kavramada tork, hava aralığından karşı tarafa aktarılırken temas olmadan iletimin gerçekleştiğini biliyoruz. Burada önemli olan husus hava aralığını istenilen ölçüde ayarlamak ve belli bir verimin elde edilmesini sağlamaktır. Şekil 4.7’de de görüldüğü üzere hava aralığı uzunluğu arttıkça akı yolu uzunluğu artmakta, boşluğun manyetik geçirgenliğinden dolayı hava aralığı relüktansı yükselmekte ve manyetik akı azalmaktadır. Bu nedenle torkun aktarılma yoğunluğu düşmekte böylece verimde düşüş gerçekleşmektedir. Burada hava aralığı ile verim arasında ters bir orantı mevcuttur.

Manyetik akı yoğunluğu formülü Eşitlik 47’de yer almaktadır.

$$B = \frac{\phi_B}{S_a} \quad (47)$$

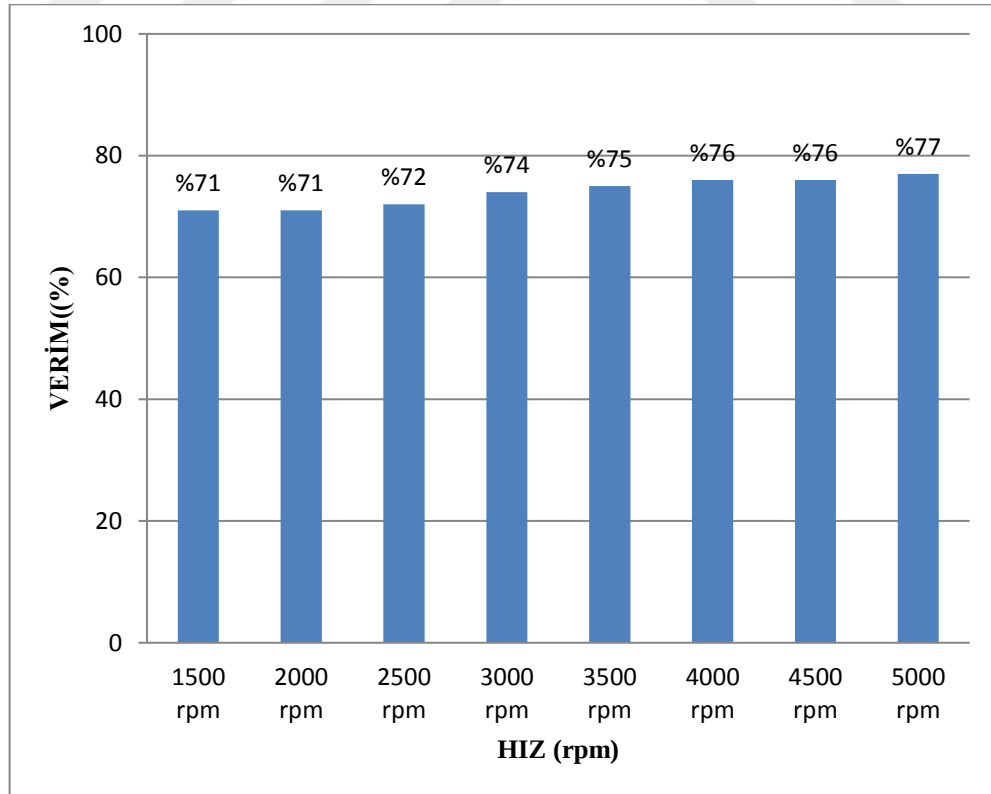
$$\Phi_B = \frac{F}{R} \quad (48)$$

Eşitlik 48’de manyetik akı Φ_B (wb) ifadesi yer almaktadır. $F(AT)$ manyetomotor kuvveti ifade etmektedir.

$$R = \frac{I_g}{\mu_0 \cdot S_a} \quad (49)$$

Şekil 4.7 incelendiğinde, verimdeki düşüşün asıl sebebi relüktanstaki artışın akının zayıflamasına neden olmasıdır. Eşitlik 49’da relüktans ifadesi yer almaktadır. R (1/H) olarak relüktansı (manyetik direnç), I_g akı yolu uzunluğu (m), μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği (H/m), S_a yüzey alanı (m^2) ifade etmektedir.

4.3.3. Hız –verim grafiği



Şekil 4. 8. Farklı hız değerlerinin verim üzerindeki etkisi

Bir elektrik motoru ile kullanılmak üzere geliştirilen bu manyetik kavramada motor hızı yani kavrama giriş hızı arttıkça buna bağlı olarak Şekil 4.8’de artış yaşanmaktadır. Hız arttıkça kayma azalmakta ve yüksek hız değerlerinde yüksek verim elde edilmektedir. Kayma formülü Eşitlik 50’de gösterilmektedir.

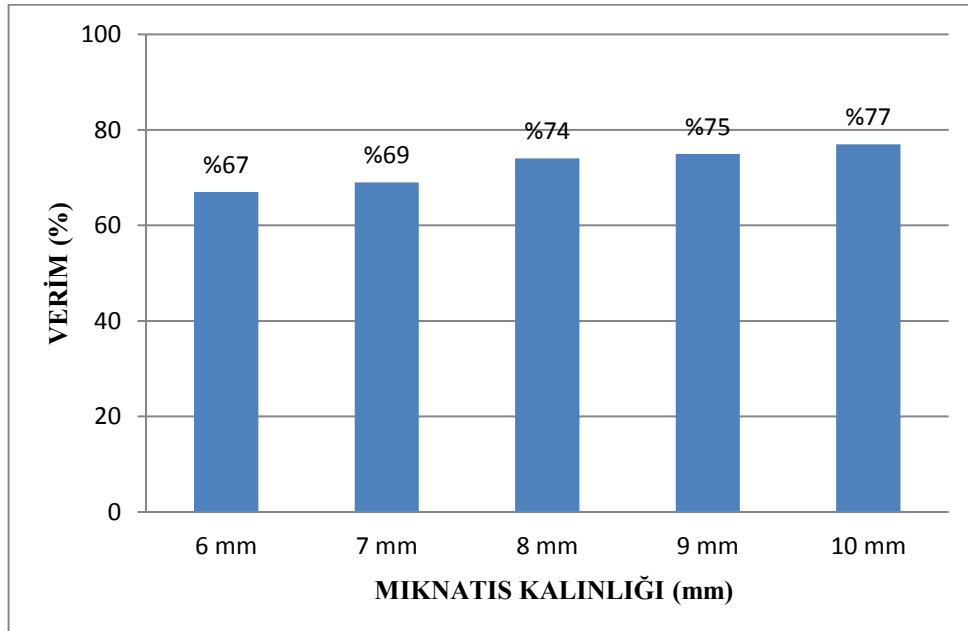
$$s = \frac{n_{sync} - n_r}{n_{sync}} \quad (50)$$

n_r Rotor hızını, n_{sync} senkron hızı ifade etmektedir.

Elektromotor kuvveti formülü Eşitlik 3’te gösterilmektedir. Eşitlik 3’te verilen Faraday yasasına göre frekans arttığı için malzemede indüklenen eddy akımı artmaktadır. Bu nedenle hız arttıkça manyetik kavramanın verimi artar.

Burada eddy akımlı manyetik kavrama için uygun olabilecek ortalama hız değeri olarak 3000 rpm uygun görülmüştür.

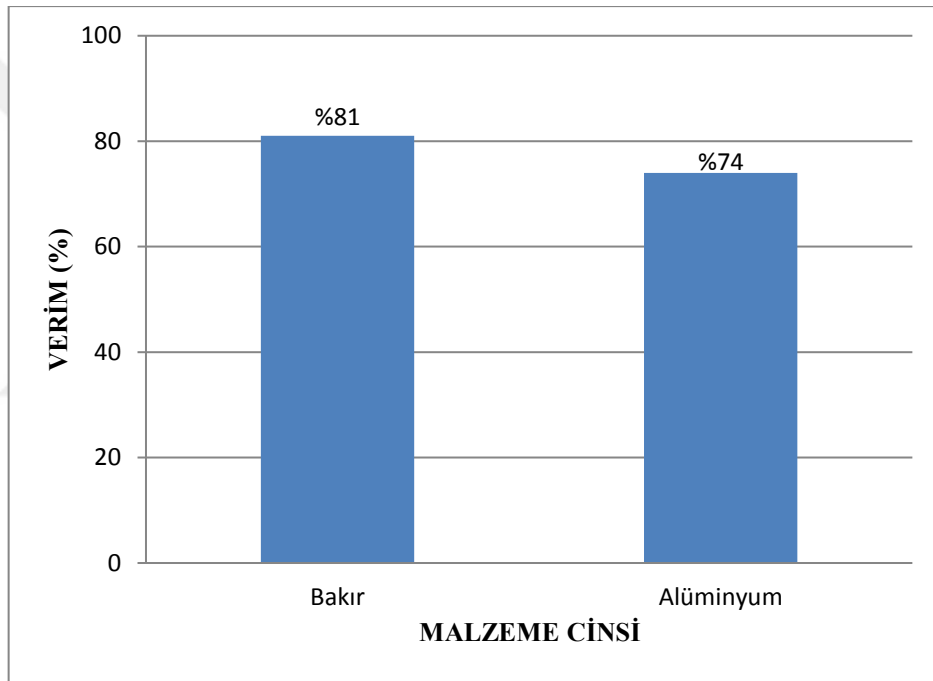
4.3.4. Mıknatıs kalınlığı – verim grafiği



Şekil 4. 9. Farklı mıknatıs kalınlıklarının verim üzerindeki etkisi

Kavramanın bir tarafından diğ er tarafına hareketin iletilmesi mıknatısın g ucu ve etkileri sayesinde gerçekleşir. Mıknatıs ne kadar g c l u ve özelliklerini sürekli gösterebiliyorsa iletim o kadar verimli hale gelmektedir. Bu yüzden eddy akımlı kavramada g c l u neodyum mıknatıslar kullanılmaktadır. Burada da g c l u mıknatıslardan olan N48H ($B_r=1.4$ T ve $-H_c=976$ kA/m) kullanılmıştır. şekil 4.9’da g r ld ğ u üzere mıknatıs kalınlığındaki artış mıknatıs hacminde artışa sebep olduğu için manyetomotiv kuvvet ve hava aralığındaki manyetik akı artar. Buna bağlı olarak verim, artış göstermektedir.

4.3.5. Bakır-al miny um ile verim grafiği



şekil 4. 10. Farklı rotor malzemelerinin verim üzerindeki etkisi

şekil 4.10’da rotor malzeme seçiminde al miny um ve bakır karşılaştırılmıştır. Rotor malzeme cinsi tercih edilirken birkaç fonksiyonu göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu  zellikler maliyet, ağırlık, iletkenlik vb. şeklindedir.

Bakır ve al miny um iletkenlikleri (bakır = 56 S, al miny um = 35.5 S) sebebiyle enerji iletim alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Dünyada neredeyse %0,01 oranında bakır ve %8 oranında al miny um bulunmaktadır. Al miny umun doğada daha fazla yer alması

ile kolay elde edilebilir olması maliyetin uygun olmasına vesile olmaktadır. Ağırlık olarak alüminyum daha hafiftir. Ayrıca bakırın daha iyi bir iletken olması artı bir yön olarak gözükürken ısı iletkenliğinin yüksek olması ve sıvı teması ile oksitlenmesi nedeniyle bakır tercih edilememiştir. En güvenli ve maliyeti uygun olan alüminyum projelerde çoğunlukla kullanılmaktadır (Sağkol, 2022).

4.3.6. Manyetik kavramanın avantajları

1. **Minimal Boyut:** Manyetik kavramalar güçlü mıknatıs özellikleriyle de küçük yapılarda imal edilebilir. Bu sayede tercih sebebidir.
2. **Sessiz Çalışma:** Kavramanın bir tarafında gerçekleşmesi olası olan ve istenmeyen titreşim diğer tarafa aktarılmaz. Böylece titreşim aktarılmadığı gibi gürültüde oluşmamış olacaktır.
3. **Yüksek Tork:** Neodyum gibi güçlü mıknatısların bulunması ile yüksek tork değerlerine çıkabilen manyetik kavramalar performansı artırmaktadır.
4. **Hava Aralığı:** Hava aralığı arttıkça manyetik relüktans artar ve manyetik akı azalır, bu nedenle hava aralığının artışı manyetik akıyı zayıflattığı için kavrama performansını olumsuz etkiler. İstenilen verim değerine göre hava aralığı uzunluğu ayarlanabilir.
5. **Düşük Atalet Momenti:** Minimal boyutlarda olan manyetik kavramaların kütle ve rotor çapı küçüktür. Eşitlik 45 ve Eşitlik 46 incelenerek de bu sonuca varılabilir (Nagrial ve ark., 2011).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Maxwell analiz sonuçlarına göre oluşturulan prototip tasarımın test aşaması gerçekleştirilmektedir. Burada hava aralığının verim üzerindeki etkisinin büyük olması sebebiyle 1 mm, 2 mm ve 3 mm hava aralığına sahip eddy akımlı manyetik kavrama tasarımı laboratuvar ortamında test edilmektedir. Maxwell analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmaktadır.

5.1. Eddy Akımlı Kavramanın Uygulaması



Şekil 5. 1. Alüminyum borular

Yukarıda yer alan Şekil 5.1’de projede kullanılan alüminyum borular yer almaktadır. Bu alüminyum boruların ölçüleri sırasıyla aşağıdaki Çizelge 5.1’de yer gösterilmektedir.

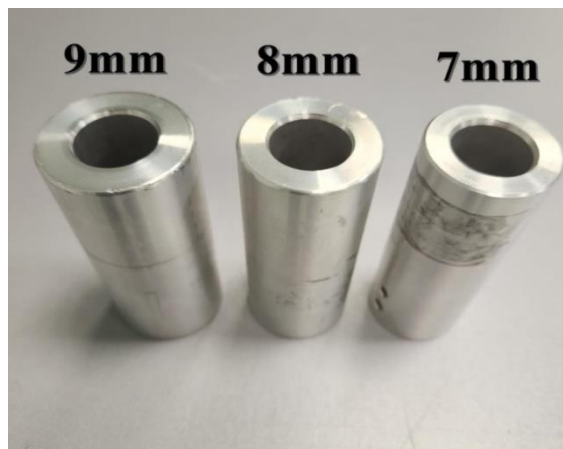
Çizelge 5. 1. Alüminyum boru parametreleri

Alüminyum boru	Rotor iç çapı	Rotor dış çap
1 numara	20 mm	38 mm
2 numara	20 mm	36 mm
3 numara	20 mm	34 mm

Çizelge 5.2’de kullanılan alüminyum malzemenin cinsine, iletkenliğine ve mekanik özelliklerine yer verilmiştir. Cinsi 6060 olarak seçilen alüminyumun elektriksel iletkenliği 35.5 Siemens (Ohm^{-1}) değerindedir.

Çizelge 5. 2. Alüminyum malzemenin cinsi, iletkenliği ve mekanik özellikleri

Alüminyum Cinsi	Çekme Mukavemeti kp/mm^2	Ergime Noktası	Yoğunluk kg/mm^3	Isıl İletkenlik W/(m.K)	Elektriksel iletkenlik S
6060	4-8	660 ° C	2,7	237	35.5



Şekil 5. 2. Alüminyum boruların kalınlıkları

Çizelge 5.1’de belirtilen ölçülerde imal edilen alüminyum borular manyetik kavramada iletken plaka görevini üstlenmektedir. Bu iletken plakaların kalınlıklarının ölçüleri ise Şekil 5.2’de yer almaktadır.

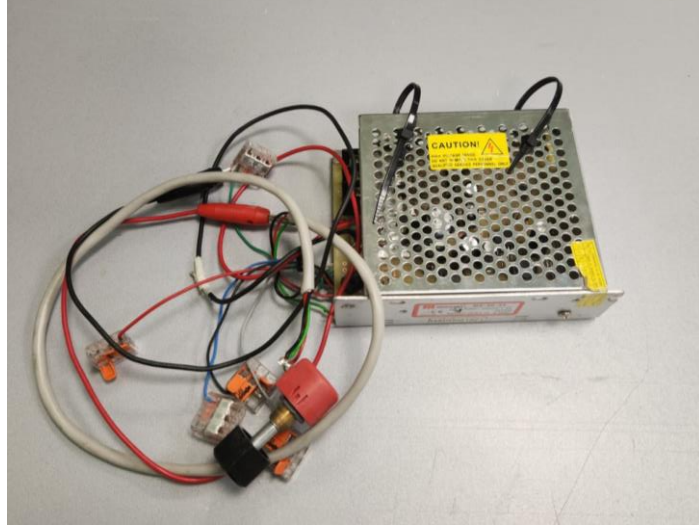


Şekil 5. 3. Eddy akımlı manyetik kavrama parçası

Yukarıdaki şekil 5.3’te manyetik kavramanın önemli bir parçası olan mıknatısın bulunduğu bölüm yer almaktadır. Mıknatıs 6 kutuplu olarak üretilmiştir. Elektronik parçaları birleştirilmek üzere test aşaması için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5. 4. Test aşaması için hazır hale getirilmiş 6 kutuplu manyetik kavrama parçası



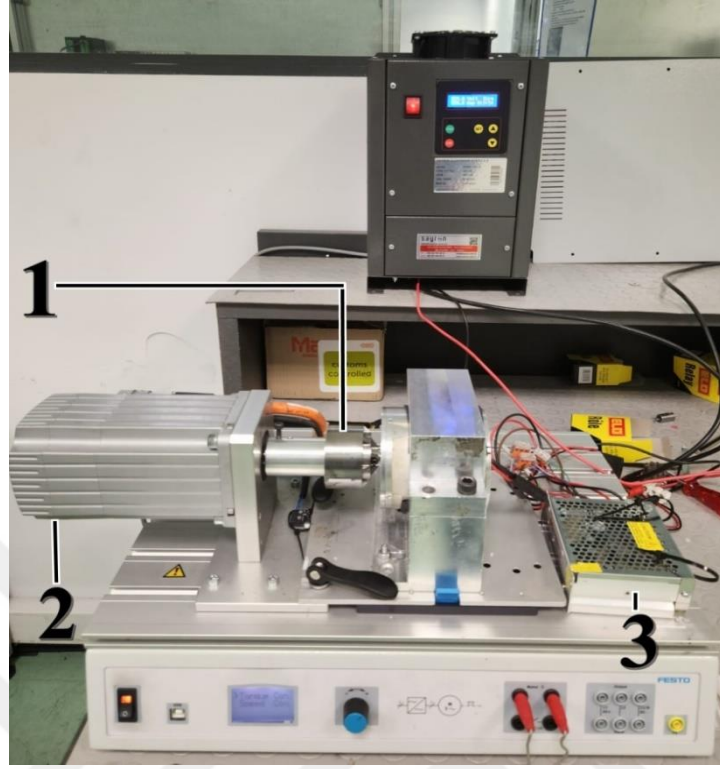
Şekil 5. 5. Sürücü ve elektronik parçaları

Şekil 5.5'te eddy akımlı manyetik kavramaya bağlanmak üzere hazırlanmış sürücü ve elektronik parçaları kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5. 6. Takometre

Şekil 5.6'da yer alan takometre, test anındaki hız ölçümü için temin edilmiştir.

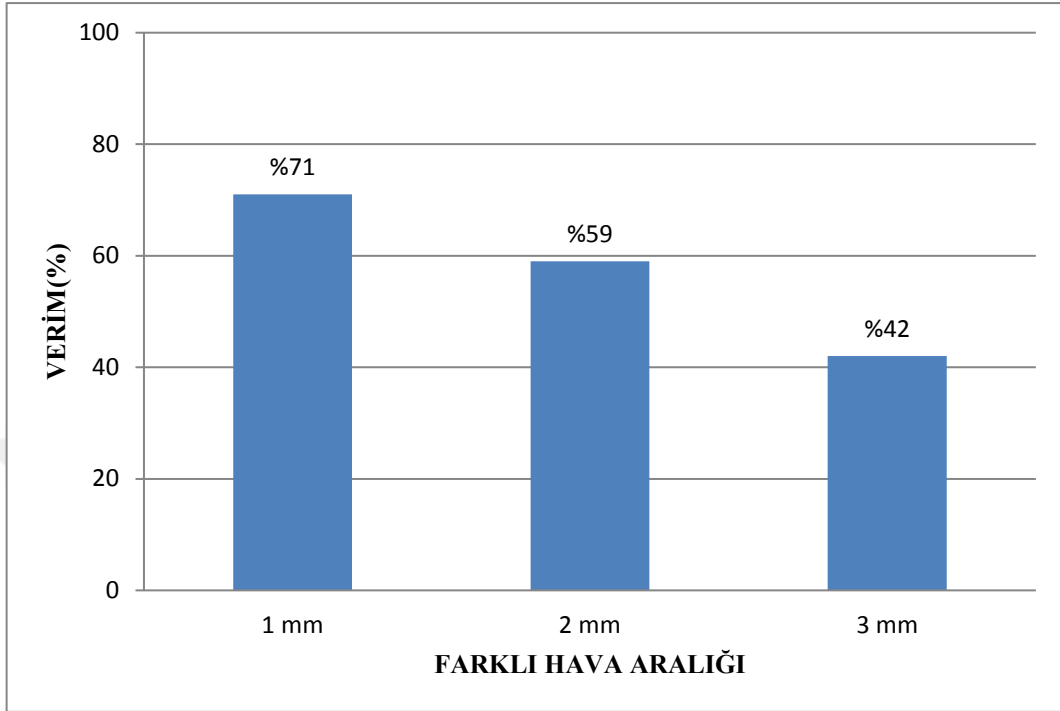


Şekil 5. 7. Test aşaması

- 1) Manyetik kavrama
- 2) Motor
- 3) Sürücü ve elektronik parçaları

Test aşaması için gereken tüm malzemeler temin edilmiştir. FESTO Drive Lab ile manyetik kavramanın yükleme testleri yapılmıştır. Güç kaynağına bağlanmış bir 24V DC motor ile manyetik kavramanın mıknatıslı tamburu istenilen hız değerine getirilmiştir. Motor çıkışında bağlı olan test sistemi ile kavramaya tork yüklemesi yapılmıştır. Böylece giriş hızı ve torku ölçülerek kavramanın giriş gücü, rotor hızı ile yükleme torku ölçülerek kavramanın çıkış gücü ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda çıkış gücünün giriş gücüne oranı ile kavrama verimi hesaplanmıştır. Bu aşamalar Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Elde edilen test sonuçları ise hesaplanarak grafik haline getirilmiştir. Şekil 5.8’de hesaplanan verilerin sonuçlarına yer verilmiştir.

5.1.1. Hava aralığı -verim grafiği



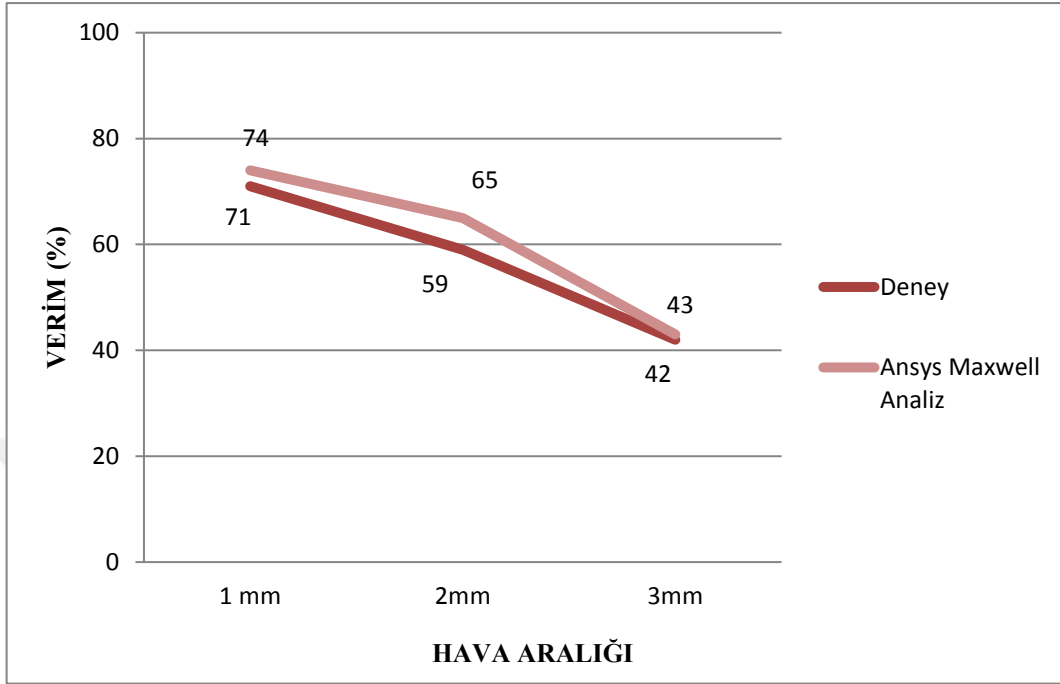
Şekil 5. 8. Farklı hava aralıklarının verim üzerindeki etkisinin deney sonucu

Test aşamasında 20 mm iç çapa sahip alüminyum rotor sabit tutulmuştur. Sırasıyla;

- 34 mm dış çapa sahip rotor ile 3 mm hava aralığı,
- 36 mm dış çap ile 2mm hava aralığı,
- 38mm dış çap ile 1 mm hava aralığı oluşturulmuştur.

Hava aralığı azaldıkça başka bir ifade ile alüminyum dış çapı büyüdükçe verim artmaktadır. Daha yüksek verim istenildiği takdirde hava aralığı daha küçük değerlere çekilebilir.

5.1.2. Deney ile sonlu elemanlar analiz sonuçları-verim grafiği



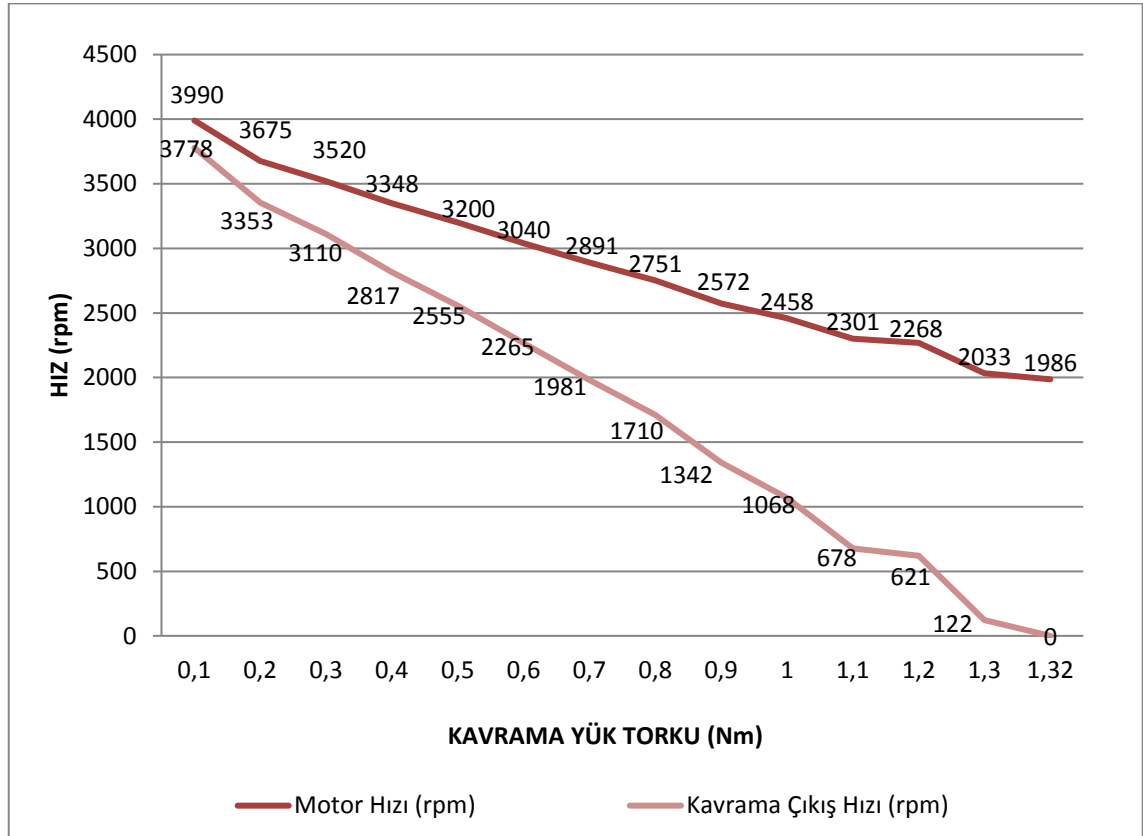
Şekil 5. 9. Deney sonucu ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Prototip tasarımın deney ve Maxwell analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki aşamada da sırasıyla 1mm, 2mm, 3mm hava aralığına sahip tasarımlar teste tabi tutulmuş, veriler elde edilmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde test sonuçlarının birbirine yakın değerlerde elde edildiği görülebilmektedir. Bahsedildiği üzere hava aralığının (bkz. Şekil 4.7 ve bkz. Şekil 5.8) verim üzerindeki etkisi; akının karşı tarafa aktarılmasında büyük mesafelerin olumsuz bir etken olduğu, verimi de bu oranda düşürdüğü gözler önüne serilmiştir. Hava aralığı küçük değerlerde tutulduğu sürece manyetik kavrama yüksek verim ile görevini yerine getirebilmektedir.

Çizelge 5. 3. Eddy akımlı manyetik kavramanın analiz sonuçları

Kavrama yük torku (Nm)	Motor Hızı (Kavrama giriş hızı) (rpm)	Kavrama Çıkış Hızı (rpm)	Motor Akım ı(A)	Motor Gerilimi (V)	Kavrama Giriş Torku (Nm)	Kavrama Verimi (%)
0,1	3990	3778	2,1	24	0,11	85,22
0,2	3675	3353	4,5	24	0,22	82,11
0,3	3520	3110	7	24	0,33	79,52
0,4	3348	2817	9,2	24	0,44	75,73
0,5	3200	2555	11,5	24	0,56	71,86
0,6	3040	2265	13,8	24	0,67	67,06
0,7	2891	1981	16	24	0,78	61,67
0,8	2751	1710	17,8	24	0,89	55,94
0,9	2572	1342	20,5	24	1,00	46,96
1	2458	1068	22,5	24	1,11	39,10
1,1	2301	678	25	24	1,22	26,52
1,2	2268	621	26,7	24	1,33	24,64
1,3	2033	122	30,6	24	1,44	5,40
1,32	1986	0	30,8	24	1,47	0,00

Yukarıda yer alan Çizelge 5.3'te, oluşturulan 1 mm hava aralığına sahip tasarımda tork ve hız değerleri değiştirilerek devrilme anı gözlemlenmek istenilmiştir. Burada 1986 rpm giriş hızına sahip kavrama 1.32 Nm tork ile yüklendiğinde devrilmenin gerçekleştiği görülmektedir. Giriş hızı 1986 rpm olan eddy akımlı manyetik kavrama, 1.32 Nm'ye kadar yükü karşılayabilmektedir.



Şekil 5. 10. Eddy akımlı manyetik kavramanın yük altındaki devrilme anı

Eddy akımlı manyetik kavrama, Şekil 5.10'da farklı kavrama giriş hızı etkisi altında yük miktarı artırılarak kavrama çıkış hızı 0 değerini görmüş ve devrilme gerçekleşmiştir.

5.2. Eddy Akımlı Kavramanın Pompa Uygulaması

Tasarımı tamamlanan ve olumlu sonuç elde edilen eddy akımlı manyetik kavrama, pompa motorlarındaki kullanımı için oldukça uygundur. Temassız çalışması sıvı bir ortam için oldukça güvenli olacaktır. Burada ise pompaya bağlanan manyetik kavramanın ne gibi sonuçlar elde edeceği araştırılmıştır.

Aşağıdaki Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de pompanın parçaları olan pompa gövdesi ve pompanın hareket ettiği alüminyum rotor kısmı yer almaktadır.



Şekil 5. 11. Pompa gövdesi



Şekil 5. 12. Pompa rotoru (Pervane)

Pompayı istenilen konuma getirmeyi sağlayan akış yönlendirme kapağı, aşağıda yer alan şekil 5.13'te gösterilmektedir.



şekil 5. 13. Akış yönlendirme kapağı

şekil 5.14'te 24 V DC motor (1) manyetik kavramaya (2), manyetik kavrama pompa gövdesine (3), pompa gövdesi pompa rotoruna (4) ve son olarak pompa rotoru da akış yönlendirme kapağına (5) bağlanmak üzere malzemeler bir araya getirilerek laboratuvar kısmında test edilmek üzere sisteme bağlanmıştır. Manyetik kavramada hava aralığına yerleştirilen pompa gövdesi nedeniyle hava aralığı 3 mm tutulmuştur ve pompa sistemi salmastrasız tamamen izole olarak gerçekleştirilmiştir.



şekil 5. 14. Pompa testi için bir araya getirilen malzemeler

Yukarıda yer alan Şekil 5.14'teki malzemeler:

1. 24 V 200 W BLDC motor
2. Manyetik Kavrama
3. Pompa Gövdesi
4. Pompa Rotoru
5. Akış Yönlendirme Kapağıdır.

Test aşaması için hazır hale getirilen malzemeler aşağıda yer alan Şekil 5.15'te gösterildiği gibi sisteme bağlanmıştır. Motor (1), test anında basıncı ölçmeye yarayan barometre (2), kontrol panosu (3), su akışını istenilen zamanda açıp kapatmaya yarayan vanalar (4), saniyedeki su akışını ölçen debimetre (5) ve kavramaya bağlı pompa (6) ile test gerçekleştirilmiştir. Kademeli olarak vanalar açılıp kapatılarak basınç kontrol edilmiştir. Su akışının saatte maksimum kaç litre değerlerini bulabileceği test edilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 5.4'te incelenebilmektedir.



Şekil 5. 15. Pompa testi aşaması

Çizelge 5. 4. Pompa testi sonuçları

Debi (litre/saat)	Basınç (bar)	Akım (Amper)	Gerilim (Volt)	Elektriksel Güç (Watt)
4438 l/s	0,08 bar	3,80 A	24,0 V	98,8 W
4010 l/s	0,12 bar	3,75 A	24,0 V	97,5 W
3470 l/s	0,17 bar	3,70 A	24,0 V	96,2 W
3000 l/s	0,21 bar	3,55 A	24,0 V	92,3 W
2564 l/s	0,24 bar	3,50 A	24,0 V	91,0 W
2005 l/s	0,26 bar	3,40 A	24,0 V	88,4 W
1528 l/s	0,30 bar	3,20 A	24,0 V	83,2 W
1084 l/s	0,32 bar	3,15 A	24,0 V	81,9 W
493 l/s	0,34 bar	3,10 A	24,0 V	80,6 W
0 l/s	0,35 bar	2,90 A	24,0 V	75,4 W

Yukarıda yer alan Çizelge 5.4 incelendiğinde vanaların kademeli olarak açılıp kapatılması esnasında basınç değeri azaltılırsa debinin artacağı sonucuna varılmaktadır. Manyetik kavrama ile 0.08 bar basınç altında 1 saatte 4438 litre su sirkülasyonu sağlanmıştır. Basınç arttıkça debi azalmıştır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Manyetik kavrama eddy akımlı (asenkon) ve senkon kavrama olarak iki farklı prensiple çalışmaktadır. Güç aktarma sistemlerinde temassız mekanik güç iletimi için manyetik kavrama tercih edilmektedir. Senkon kavramalarda her iki taraf mıknatıslardan oluşmakta ve her iki taraf eşit hızda dönmektedir. Çift taraflı mıknatıs kullanımından dolayı maliyeti yüksektir. Eddy akımlı kavramada ise tek taraflı mıknatıs kullanıldığı için daha uygun maliyetlidir. Fakat yüklendikçe hız kaybı olduğu için kayma söz konusudur. Her iki manyetik kavrama tasarımları için radyal ve eksenel yapılı olarak tasarım yapılabilir.

Tez çalışmasında radyal yapılı eddy akımlı manyetik kavrama tercih edilmiştir. Sistem pompa uygulamasına uygun olacak şekilde radyal yapılı geometri kullanılmıştır. Ayrıca iç boyunduruğa yerleştirilen mıknatıslar yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetinden etkilenmemektedir.

Tasarım çalışmalarının başında performans değerlerinin tahmini sonuçlarına ulaşmak istenildiğinde ise analitik yöntemler kullanılmaktadır. Manyetik eşdeğer devre modeli ve değişken ayırma yöntemleri manyetik kavrama tasarımlarının analitik işlemler bölümünde yer almaktadır. Bu çalışmada analitik yöntem olarak değişken ayırma yöntemine değinilmiştir. Nümerik işlemler için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini içeren Ansys Maxwell yazılımı sayesinde sonuçlar elde edilmiştir.

Projenin düzgün ilerlemesi adına tasarım süreçleri çalışma alanlarına göre kategorilere ayrılmıştır. Öncelikle uygulamaya özel olarak geometrik sınırlara göre ölçüler belirlenmiştir. Bu ölçülere göre manyetik kavramanın manyetik modeli oluşturulmuştur. Ansys Maxwell analiz kısmında farklı parametre girdilerinin eddy akımlı manyetik kavrama tasarımının verimini nasıl etkileyebileceği araştırılmıştır. Burada yer alan farklı parametreler; kutup sayısı, hava aralığı, motor hızı (kavrama giriş hızı), mıknatıs kalınlığı ve rotor malzeme cinsidir. Kutup sayısı, tasarımın parametre girdilerine göre değişkenlik gösterdiğinden buradaki tasarım için en uygun kutup sayısı olarak $2p = 6$

seçilmiştir. Hava aralığının (bkz. Şekil 4.7) seçiminde belli bir orandan söz edebilir. Hava aralığı arttıkça verimde düşüş meydana gelmektedir. Kavramanın giriş hızını arttırdığımızda (bkz. Şekil 4.8) verimde belli bir artış gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ise hız arttıkça kayma azalmakta ve verim bu oranda artmaktadır. Mıknatıs kalınlığındaki artış (bkz. Şekil 4.9) ise verimde pozitif etkilere zemin hazırlamıştır. Rotor malzeme cinsi (bkz. Şekil 4.10) olarak bakır ve alüminyum rotorlar karşılaştırılmıştır. Analiz kısmında verim sonuçları karşılaştırıldığında bakırın iletkenlik katsayısı fazla olduğundan rotoru bakır malzeme seçilen tasarımın verimi fazla çıkmıştır. Fakat kütesinin ve maliyetinin daha az olması gibi avantajları sebebi ile alüminyum rotor tercih edilmiştir.

Tasarımı netleşen manyetik kavrama sistemi prototip olarak üretilmiştir ve performansının belirlenmesi için bir yükleme testi sisteminde farklı hız ve tork değerlerinde yüklenerek test edilmiştir. Burada hava aralığına göre 3 model belirlenmiş olup 1mm, 2mm ve 3mm hava aralığı oluşturacak şekilde imal edilen rotorlar sistemde yükleme tarafına bağlanmıştır. Diğer tarafta ise mıknatıslı kavrama bir BLDC motor tarafından tahrik edilmiştir. Rotor tarafındaki yük artırılarak motorun ve rotorun hızları, torkları ve motor güçleri ölçülerek performans değerleri çıkarılmıştır.

Yüksek verim elde etmek için hava aralığı 1 mm olarak seçilmiştir. Eddy akımlı manyetik kavrama tasarımı için 3000 rpm hız değeri ile 0.5 Nm tork değeri sabit tutulmuştur. Maxwell analizleri ile deney sonuçları (bkz. Şekil 5.9) yakın değerlerde elde edilmiştir. Eddy akımlı manyetik kavramanın oluşturduğumuz tasarım parametrelerine göre torku karşı tarafa %71 oranında aktardığı ölçülerek hesaplanmıştır.

3 mm hava aralığına sahip manyetik kavrama pompa uygulamasında kullanmak için bir pompa sistemi oluşturulmuştur. Pompa salmastrasız ve tamamen izole olarak prototiplenmiştir. Bir kapalı devre sirkülasyon pompası olarak test edilmiştir. Test sonucuna (bkz. Çizelge 5.4) göre eddy akımlı manyetik kavrama ile saatte 4438 litre su akışı sağlanabilmiştir.

Tez çalışması, mekanik olarak güç aktaran ve güç aktarılan birimler arasında temas olmadan eddy akımlı manyetik kavrama yöntemleri ile güç aktarılmasını sağlayan mekanizmanın manyetik tasarımı yapılmıştır. Manyetik kavrama güç aktaran ve güç aktarılan birim arasında mekanik izolasyon sağladığı için her iki tarafta oluşan titreşim birbirini etkilemeyecektir. Manyetik kavrama ile iki birim arasında akışkan yalıtımı veya tehlikeli madde yalıtımı sağlanabilecektir.

Burada sistemin manyetik tasarım süreçleri ele alınarak analitik modelleme ve manyetik modelleme ile sistem tasarımı sunulmuştur. Her iki yöntem için dikkate alınabilecek tasarım teknik, performans ve maliyet verilerinin dikkate alındığı bir çalışma olmuştur. Öngörülen sistemin kullanılması ile birlikte mekanik bağlantı ile güç aktarımının vermiş olduğu, eksensiz bağlantı, titreşim, akışkan kaçakları ortadan kaldırılarak yalıtımın zorunlu olduğu tehlikeli ortamlara güç aktarmak mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Akcaay, Y., Giangrande, P., & Galea, M. (2020, Kasım). Design, Analysis and Dynamic Performance of Radial Magnetic Coupling. In 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 222-227). IEEE.
- Anonim, 2012. Is It Cost-Effective To Replace Old Eddy-Current Drives?, U.S. Department Of Energy,
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/motor_tip_sheet12.pdf, Washington. (2012).
- Anonim, 2020. Manyetik nedir? Manyetik alan ne demektir? Anlamı.
<https://www.lafsozlu.com/2014/12/manyetik-nedir-manyetik-alan-ne.html> (20.03.2021).
- Anonim, 2021a. Magnetic Couplings. <https://www.magnetictech.com/magnetic-couplings/>,(20.04.2021).
- Anonim, 2021b. Magnetic coupling. https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_coupling ,(02.05.2021).
- Anonim, 2021c. Manyetizma. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Manyetizma>(12.06.2021).
- Anonim, 2021d.
<http://www.jeofizikmuhendisleri.com/makaleler/manyetik.cisimlerin.siniflandirilmasi> (20.06.2021)
- Anonim, 2021e. Girdap Akımları ile Muayene.
<http://www.tdgmuhendislik.com.tr/hizmetler/48/girdapakimlariilemuayene> (17.07.2021).
- Anonim, 2021f. Poisson denklemi.
https://tr.wikipedia.org/wiki/Poisson_denklemi#:~:text=Elektrostatik%20denkleminin%20C3%A7%C3%B6z%C3%BCm%C3%BCn%C3%BC%20ortaya%20at%C4%B1p%20C3%A7%C3%B6zmektir.&text=E%20Fer%20y%C3%BCk%20yo%C4%9Funlu%C4%9Fu%20s%C4%B1f%C4%B1r%20ise,Poisson%2DBoltzman%20denkleminin%20halini%20al%C4%B1r (22.09.2021).
- Anonim, 2021g. Moment of inertia: Definition, formulas & Equation.
<https://oxscience.com/moment-of-inertia/> (22.11.2022).
- Bähler, W ve Hoek, W., 1966. An Eddy-Current Coupling Employed As A Variable-Speed Drive, Mechanical Engineering at the Technical University of Eindhoven, No. 1, pp:15-21.
- Canova, A ve Vusini, B., 2005.Analytical Modeling Of Rotating Eddy-Current Couplers, Ieee Transactions On Magnetics, Vol. 41, No. 1, pp: 24-35.

- Davies, E.J., 1974. Eddy Current Couplings, United States Patent. Sutton Coldfield, England.
- ER, E. Eksenel Akıllı İndüksiyon Motor Tasarım Arayüzü Geliştirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Şanlıurfa: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=o3GIYG4pRseK-ZIy1IgvFg&no=-TSPOSDpJYEFbGcRbDUzwA>
- Fenercioğlu, A., Aydın, E., Kocaer, T., Yıldırım, K., 2021. Santrifuj Pompa İçin Eddy Akımlı Manyetik Kavramanın Sonlu Elemanlar Analizi, Journal of New Results in Engineering and Natural Science 13, pp: 1-11.
- Fontchastagner, J., Lubin, T., Mezani, S ve Takorabet, N., 2018. Design Optimization Of An Axial-Field Eddy-Current Magnetic Coupling Based On Magneto-Thermal Analytical Model, Open Physics, De Gruyter, 16 (1), pp: 21-26.
- Lubin, T., Mezani, S ve Rezzoug, A., 2012. Simple Analytical Expressions For The Force And Torque Of Axial Magnetic Couplings, Ieee Transactions On Energy Conversion, vol. 27, No. 2, pp:536-546.
- Lubin, T., Fontchastagner, J., Mezani, S., Rezzoug, A., 2016. Comparison Of Transient Performances For Synchronous And Eddy-Current Torque Couplers, International Conference On Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, pp:695-701.
- Lubin, T ve Rezzoug, A., 2015. Steady-State And Transient Performance Of Axial-Field Eddy-Current Coupling Current Coupling, Ieee Transactions On Industrial Electronics, Institute Of Electrical And Electronics Engineers, 62(4), pp.2287-2296.
- Li, Z. Wang, D. Zheng, D ve Yu, L. (2017). Analytical Modeling And Analysis Of Magnetic Field And Torque For Novel Axial Flux Eddy Current Couplers With Pm Excitation. Aip Advances 7, 105303, pp: 1-13.
- Marghitu, D.B. Raju, P. Mazilu, D. (2001). Theory of Vibration. Mechanical Engineer's Handbook (pp:339-444). ABD. Academic Press.
- Mouton, Z., 2013. Modelling And Design Of An Eddy Current Coupling For Slipsynchronous Permanent Magnet Wind Generators, Ieee Transactions On Industrial Electronics 61, (Master Degree), South Africa: Graduate Faculty of South Africa Stellenbosch University.
- Nagrial, M. H., Rizk, J., & Hellany, A. (2011). Design Of Synchronous Torque Couplers, World Academy of Science, Engineering & Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol:5, No:7, pp: 426-431.
- Razavi, H.K., Lampérth, M.U., 2006. Eddy-Current Coupling With Slotted Conductor Disk, Ieee Transactions On Magnetics, Vol. 42, No. 3, pp:405-410.

- Sağkol,C., 2022. “Alüminyum kablo mu yoksa Bakır kablo mu?”. Türk Prysmian Kablo ve Sistemleri A.Ş. <https://tr.prysmiangroup.com/tr/aluminyum-kablo-mu-yoksa-bakir-kablo-mu> (22.08.2022).
- Tanel,Z., (2006). Manyetizma Konularının Lisans Düzeyindeki Öğretiminde, Geleneksel Öğretim Yöntemi ile İşbirlikli Öğrenme Yönteminin Etkilerinin Karşılaştırılması. (Doktora Tezi). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü.
- Uçar,S., (2019). Maxwell’in Alan Denklemleri Üzerine Bir Değerlendirme. Felsefe Arkivi, sayı:(51), syf: 261-270.
- Wang, J., Lin, H., Fang, S ve Huang, Y., 2014. A General Analytical Model Of Permanent Magnet Eddy Current Couplings, Ieee Transactions On Magnetics, vol. 50, no. 1, pp:1-9.
- Wang, J ve Zhu, J., 2018. A simple method for performance prediction of permanent magnet eddy current couplings using a new magnetic equivalent circuit model, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 65, no. 3, pp: 2487-2495.
- Vural,L., (2010). Sert Ferrit ve Ndfb Tipi Mıknatısların Karakterizasyonu Ve Tersinir Olmayan Kayıpların Yapı Üzerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yanagisawa,C. 2018. Ampere kanunu. https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/81605/mod_resource/content/1/8.%20ve%209.%20Hafta%20Manyetik%20Alan%20Kaynaklar%C4%B1%20ve%200Amper%20Yasas%C4%B1.pdf ,syf.19
- Yang, X., Liu, Y ve Wang, L., 2019. Nonlinear Modeling Of Transmission Performance For Permanent Magnet Eddy Current Coupler, Hindawi Mathematical Problems In Engineering Volume, Article ID 2098725, 14 Pages.
- Zheng, D. Wang, D. Li, S. Shi, T. Li, Z ve Yu, L. (2017). Eddy Current Loss Calculation And Thermal Analysis Of Axial-Flux Permanent Magnet Couplers. Aip Advances 7, 02511, pp: 1-11.

ÖZGEÇMİŞ

