

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORTA GÜÇLÜ BİR GİRDAP AKIMI FRENİ TASARIMI VE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Onur GÜLBAHÇE

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORTA GÜÇLÜ BİR GİRDAP AKIMI FRENİ TASARIMI VE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Onur GÜLBAHÇE
504101026**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101026 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Onur GÜLBAHÇE**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ **ORTA GÜÇLÜ BİR GİRDAP AKIMI FRENİ TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yard. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **17 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2013**

Babam İsmail Hakkı GÜLBAHÇE'nin aziz hatıralarına,

ÖNSÖZ

Üniversitemizde yapılan asistan kıyımlarının moral ve motivasyonumu hayli düşürdüğü bu günlerde yüksek lisans tez çalışmasında ortaya böylesine güzel bir ürün koymanın derin mutluluğunu ve sevincini yaşıyorum...

Henüz İstanbul Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde son sınıf öğrencisi iken tanışma fırsatını yakaladığım ve tanıştıktan sonra yardımını, fikirlerini ve anlayışını esirgemeyen, hem teknik hem de sosyal alanlarda örnek aldığım çok değerli hocam Yard. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımda bugüne kadar elde ettiğim bütün başarılarımın tek nedeni sevgili annem Necla GÜLBAHÇE'ye, varlığıyla hayatıma anlam ve neşe katan kız kardeşim Melike GÜLBAHÇE'ye ve üzerimden hiç bir desteğini esirgemeyen, moral ve motivasyon kaynağım manevi annem Meral ARBAK'a sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım. Ayrıca bu tez kapsamında tasarlanan fren sisteminin imalatı için teknik çizimleri hazırlayıp her konuda fikirlerini esirgemeyen manevi kardeşim Makina Müh. Altay ARBAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez kapsamında elektromanyetik analizlerde yaşadığım problemlerde hiçbir desteğini esirgemeyen Elk. Müh. Bilal DÜZGÜN ve Elk. Müh. Mert MÖKÜKCÜ'ye, ayrıca Maxwell yazılımının deneme sürümü için Figs A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tasarlanan fren sisteminin imalatında yardımlarını, desteğini ve fikirlerini esirgemeyen Elmas Makina firmasının sahibi Muammer KUYUMCU'ya, elektromagnetlerin sarımlarını yapan Özgür Bobinaj'a, bakır tel temininde yardımcı olan Emtel A.Ş.'ye, karkaslar için Metu Makina'ya teşekkürü borç bilirim.

Yardımlarına ihtiyaç duyduğum her anda kapısını çalmaktan çekinmediğim çok değerli hocalarım, Öğr. Gör. Dr. Azmi DEMİREL, Yard. Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ, Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ başta olmak üzere ismini yazamadığım İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümünde çalışan bütün öğretim üyelerine sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Araştırma görevlisi olarak İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde çalışmaya başladığım günden beri her türlü zor anımda yanımda olan, bir ağabey şefkatiyle desteğini esirgemeyen, birlikte çalışmaktan çok zevk aldığım A. Kubilay ATALAY'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu tezin hazırlanması sırasında bilgisini ve desteğini esirgemeyen, aynı odayı paylaştığım Duygu BAYRAM'a ve İ.T.Ü'deki neşe kaynağım Handan NAK'a ve ismini burada yazmakla bitiremeyeceğim bütün araştırma görevlisi arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim. Son olarak da lisansımın son yılında yurt içi yüksek lisans burs programına kabul ederek bu tezin hazırlanmasında beni maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2012

Mehmet Onur GÜLBAHÇE
Elektrik Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
2. ELEKTROMANYETİK FRENLERİN GENEL TEORİSİ	7
3. GİRDAP AKIMI FRENLERİNİN MATEMATİKSEL MODELİ.....	13
3.1 W. R. Smythe'nin Modeli	14
3.2 Schieber' in Modeli	15
3.3 Wouterse'nin Modeli.....	15
3.4 Modellerin Karşılaştırılması ve Kurulan Modellerdeki Yetersizlikler.....	17
4. GİRDAP AKIMI FRENİNİN TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	19
4.1 Sonlu Elemanlar Analizinin Temelleri.....	20
4.2 Sonlu Elemanlar Analizinde Yöntemin Belirlenmesi	20
4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yapılan Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar.....	23
4.4 Tasarım Parametrelerinin Fren Performansına Etkisi	31
4.4.1 Elektriksel iletkenliğin etkisi	32
4.4.2 Disk kalınlığının etkisi	35
4.4.3 Hava aralığının etkisi	37
4.4.4 Manyetik geçirgenliğin etkisi.....	40
4.4.5 Uyarma akımının etkisi.....	42
4.4.6 Kutup sayısının etkisi.....	45
5. SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ.....	51

KISALTMALAR

IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
ECB	: Eddy Current Brake
FEM	: Finite Elements Method

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Tasarlanan küçük güçlü fren sistemi için analiz parametreleri.	24
Çizelge 4.2 : Tasarlanan orta güçlü fren sistemi için analiz parametreleri.....	24
Çizelge 4.3 : Elektriksel iletkenliğin etkisini incelemek için yapılan analizlerde sabit tutulan analiz parametreleri.	32
Çizelge 4.4 : Fren sistemine elektriksel iletkenliğin etkisini incelemek için kullanılan malzemelerin elektriksel özellikleri.	32
Çizelge 4.5 : Disk kalınlığının frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.	35
Çizelge 4.6 : Hava aralığının frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.	37
Çizelge 4.7 : Manyetik geçirgenliğin frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.	40
Çizelge 4.8 : Uyarma akımının frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.	43
Çizelge 4.9 : Kutup sayısının frenleme momentine etkisini belirlemek için sabit tutulan analiz parametreleri.	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Eksenel ve radyal manyetik akı ve akım yoğunluğu vektörleri.	8
Şekil 2.2 : Girdap akımı frenleri için tipik frenleme momenti-hız karakteristiği.....	10
Şekil 4.1 : Tasarım akış planı.	19
Şekil 4.2 : Girdap akımı fren sisteminin Maxwell 3D ortamındaki görünümü.	21
Şekil 4.3 : Tasarlanan küçük güçlü fren sisteminin $\frac{1}{4}$ geometrideki görünümü.	22
Şekil 4.4 : Tasarlanan orta güçlü fren sisteminin $\frac{1}{4}$ geometrideki görünümü.	23
Şekil 4.5 : Tasarlanan fren sisteminin $\frac{1}{4}$ geometrideki ağ yapısının görünümü.....	23
Şekil 4.6 : Küçük güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı	25
Şekil 4.7 : Orta güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı	25
Şekil 4.8 : Küçük güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	26
Şekil 4.9 : Orta güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı	26
Şekil 4.10 : Küçük güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarının yoğunluğu.....	27
Şekil 4.11 : Orta güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarının yoğunluğu.....	27
Şekil 4.12 : Küçük güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarını vektörleri.	28
Şekil 4.13 : Orta güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarını vektörleri.	28
Şekil 4.14 : Küçük güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu vektörleri.	29
Şekil 4.15 : Orta güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu vektörleri.	29
Şekil 4.16 : Küçük güçlü fren sistemine ait 1500 min^{-1} için yapılan analiz sonucunda elde edilen frenleme momenti-zaman grafiği.....	30
Şekil 4.17 : Küçük güçlü fren sistemine ait moment-hız karakteristiği.	30
Şekil 4.18 : Küçük güçlü fren sistemine ait frenleme gücü-hız karakteristiği.	31
Şekil 4.19 : Farklı malzemeler için frenleme momenti-hız karakteristiği	33
Şekil 4.20 : Farklı malzemeler için frenleme gücü-hız karakteristiği.	33
Şekil 4.21 : Disk iletkenliğinin en yüksek frenleme momentine etkisi.	34
Şekil 4.22 : Disk iletkenliğinin kritik hız değerine etkisi.	34
Şekil 4.23 : İletken diskin farklı kalınlıkları için moment-hız karakteristiği.	36
Şekil 4.24 : İletken diskin farklı kalınlıkları için fren gücü-hız karakteristiği.	36
Şekil 4.25 : İletken disk kalınlığının en yüksek frenleme momentine etkisi.....	37
Şekil 4.26 : İletken disk kalınlığının en yüksek frenleme momentine etkisi.....	37

Şekil 4.27 : Farklı hava aralıkları için moment-hız karakteristiği	38
Şekil 4.28 : Farklı hava aralıkları için frenleme gücü-hız karakteristiği	39
Şekil 4.29 : Hava aralığının değişiminin için en yüksek frenleme momentine etkisi	39
Şekil 4.30 : Hava aralığının değişiminin kritik hız değerine etkisi	40
Şekil 4.31 : Farklı manyetik geçirgenlikler için frenleme momenti-hız karakteristiği	41
Şekil 4.32 : Bağlı manyetik geçirgenlik değişiminin en yüksek frenleme momentine etkisi.	41
Şekil 4.33 : Bağlı manyetik geçirgenlik değişiminin kritik hız değerine etkisi.....	42
Şekil 4.34 : Farklı uyarma akımları için frenleme momenti-hız karakteristiği	43
Şekil 4.35 : Farklı uyarma akımları için frenleme gücü-hız karakteristiği.....	44
Şekil 4.36 : Uyarma akımının en yüksek frenleme momentine etkisi	44
Şekil 4.37 : Farklı kutup sayıları için frenleme momenti-hız karakteristiği	45
Şekil 4.38 : Farklı kutup sayıları için frenleme gücü-hız karakteristiği	46
Şekil 4.39 : Farklı kutup sayıları ile en yüksek frenleme momentinin değişimi	46

SEMBOL LİSTESİ

A	: Manyetik vektör potansiyeli
B	: Manyetik akı yoğunluğu
B_0	: Diskin hareketsiz olduğu durumdaki bir kutup altındaki manyetik akı yoğunluğu
B_r	: Manyetik akı yoğunluğu radyal bileşeni
B_z	: Manyetik akı yoğunluğunun z-ekseni bileşenidir.
c	: diskin toplam direncinin, bir kutup altındaki disk direncine oranı
d	: disk kalınlığı
D	: Kutup çapı
E	: Elektriksel alan şiddeti
F	: Frenleme kuvveti
H_K	: Uyarma kaynağının manyetik alan şiddeti
H_T	: İletken olmayan ortamlar için manyetik alan şiddeti
J	: Girdap akımı yoğunluğu
J_K	: Uyarma kaynağının akım yoğunluğu
J_r	: Radyal girdap akımı yoğunluğu
J_z	: Eksenel girdap akımı yoğunluğu
m	: disk ekseninin kutup yüzeylerinin merkezine olan uzaklığı
N	: Devir sayısı (rpm)
p	: Kutup çifti sayısı
r	: disk yarıçapı
r_1	: Disk merkezi ile kutup merkezi arasındaki mesafe
r_m	: elektromagnet yarıçapı
T	: Frenleme torku
t	: Zaman (s)
V	: Skaler elektrik potansiyel
x	: kutup yüzeyi ile disk yüzeyi arasındaki mesafe
δ	: Dönen diskin kalınlığı
ϑ	: Kutup merkezinden ölçülen teğetsel hız
ϑ_k	: En yüksek frenleme kuvvetinin uygulandığı kritik hız değeri
ϑ_s	: Manyetik skaler potansiyeli
ξ	: Alan genişliği oranı
ρ	: disk malzemesinin öz direnci
σ	: Dönen diskin elektriksel iletkenliği
ω	: Açısal hız
ϖ	: Devir hızı
Ω	: Elektriksel direnç (ohm)
Ψ	: İndirgenmiş manyetik skaler potansiyeli
$\mathfrak{R}$	: Manyetik direnç (relüktans)
μ	: Manyetik geçirgenlik
ϕ_0	: Uyarma akımının oluşturduğu manyetik akı

ϕ : Hareket halindeki iletken diskte oluşan manyetik akı

ORTA GÜÇLÜ BİR GİRDAP AKIMI FRENİ TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

ÖZET

Girdap akımı frenleri mekanik enerjiyi ısı enerjisine dönüştüren sistemlerdir. İletken bir disk zamanla değişen manyetik akı yoğunluğuna maruz kaldığında iletkenin içinde akımlar akar. Bu akımlar kendi üzerinde kapanan akımlar olduğu ve malzeme içinde ortaya doğru çukurlaşacak şekilde dağıldığından girdap akımları adı verilir. Sistemde var olan mekanik enerji, girdap akımlarının karesi ve iletken malzemenin iç direncinin çarpımı ile harcanır. Girdap akımları akmaya başladığında kendisini oluşturan manyetik alana karşı yönde bir manyetik alan oluşturur. Bu iki manyetik alan şiddeti arasındaki ilişkiden frenleme kuvveti ortaya çıkar.

Bugüne kadar girdap akım frenlerine dair pek çok çalışma yapılmış olsa da bu fren sistemlerinin manyetik olarak pek çok problemi barındırdığı aşikârdır. Yapılan çalışmalar sonucu ortaya pek çok analitik ifade ve matematiksel model ortaya konmuştur. Ancak yapılan incelemeler dar bir hız aralığında elde edilen analitik ifadelerden oluşmaktadır. Bu modellerden en çok öne çıkanlar Smythe, Schieber ve Wauterse'nin modelleridir. Bu analitik ifadeler elde edilirken çok fazla ihmal yapıldığından, kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu çok basite indirildiğinden, malzemenin doyması önemsenmediğinden ve en önemlisi endüvi reaksiyonunun hesaba katılmamasından dolayı elde edilen ifadelerin geniş hız aralıklarında doğru sonuçlar vermesi beklenemez. Modeller endüvi reaksiyonunun ihmal edildiği doğrusal moment bölgesinde geçerlidir. Kurulan matematiksel modeller ya da yapılan analitik hesaplamalar girdap akımı frenlerinin fiziksel olgusunu anlamak ve bir takım tasarım koşulları belirlemek için ortaya konulabilir. Halen piyasada rastlanabilecek ticari frenlerin bilimsel detayları ticari kaygılar sebebi ile akademik çalışmalarda yer almamakta ve literatürde giriş ve çıkış büyüklüklerini birbirine bağlayan matematiksel ifadeler bulunmamaktadır.

Mekanik, elektriksel ve manyetik olayları içeren karmaşık bir sistem olması sebebi ile sistemin zaman bölgesinde incelenmesi fazlası ile zordur. Bu sebeple yazılabilecek durum denklemleri üzerinden sistemin cevabını görmek nerede ise imkânsızdır. Bu sebeple elde edilecek tasarımların benzetiminin yapılması ve hesap kolaylığı açısından Sonlu Elemanlar Yöntemi gibi sayısal yöntemlerin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Giriş ve çıkış büyüklüklerinin birbirine olan ilişkisi üzerinde tasarım işletme büyüklüklerinin etkisi vardır. İletken diskin geometrik, manyetik ve elektriksel özellikleri ile akıyı oluşturan kutuplar, bunların sayısı ve akıyı taşıyan hava aralığının boyu dışında akının iletken diski kesme hızı da oluşturulacak fren kuvveti üzerinde etkiye sahiptir. İletken diskin elektriksel iletkenliğinin artması fren sisteminde en yüksek frenleme momentinin artmasına ve kritik hız değerinin azalmasına neden olmuştur. İletken disk kalınlığının kalınlığının artması diskin elektriksel direncini artıracığından dolayı en yüksek frenleme momenti azalmış, kritik hız değeri de

azalmıştır. Ayrıca disk kalınlığı arttıkça girdap akımlarının aktığı yolun genişleyeceği de aşıkardır. Hava aralığının değışmesi manyetik devre üzerinde düşen manyetik gerilimi değıştireceğı için iletken diske giren manyetik akının miktarını da değıştirir. Hava aralığı arttıkça elde edilen en yüksek frenleme momenti azalır, kritik hız değeri de başka bir noktaya kayar. Disk malzemesinin manyetik geçirgenliğinin frenleme momentine etkisi incelendiğinde artan manyetik geçirgenlikle en yüksek frenleme momentinin ve kritik hızın önce arttığı daha sonra azaldığı görülür. Uyarma akımı ile frenleme momentinin karesel olarak, kutup sayısı ile doğrusal olarak değıştiğı görülmüş, bu iki durum için de kritik hız da herhangi bir değışiklik olmamıştır.

Bu çalışmada girdap akımı frenlerinin tasarımı ile ilgili net bir matematiksel model olmamasından yola çıkarak farklı tasarım büyüklüklerinin çıkış büyüklüklerine olan etkisi yeterli sayıda benzetim yapılarak incelenmiş ve fren büyüklüklerinin çıkış büyüklükleri üzerine etkisini gösterecek temel karakteristikler ve matematiksel ifadeler elde etmeye uygun bir veri tabanı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak belirlenen tasarım kriterlerinden en uygunları seçilerek orta güçte, iyileştirilmiş bir girdap akımı freni tasarımı elde edilmiştir. Tüm ön benzetimler ve iyileştirilmiş tasarım Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanan ticari bir manyetik analiz programı ile incelenmiş ve iyileştirilmiş tasarımın hız-moment, frenleme gücü-hız karakteristikleri elde edilmiştir. Böylelikle deneysel çalışma yapılabilecek bir fren sisteminin tasarımının alt yapısı oluşturulmuştur.

DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A MEDIUM POWER EDDY CURRENT BRAKE

SUMMARY

The eddy current brakes are electromechanical conversion systems which convert mechanical energy into thermal energy. When a conductive disk falls into a time-varying magnetic flux, eddy currents are induced in the conductive disk which go around the disk and these currents produces a magnetic field having an opposite polarity which is generated by external excitation current. Braking force occurs, by virtue of the action between of the two magnetic fields. A rotating conductive disk is placed in front of calculated number of pole surfaces that create a magnetic field which is unchanged according to time. Since the disk rotates, a relatively changing magnetic field passes through the conductive disk causing eddy currents to be induced inside the disk. These induced Eddy currents produce an opposing magnetic field forcing the rotating disk to slow down by means of consuming mechanical energy.

In linear applications, eddy current brakes are used to slow down a moving object by the produced braking force. In rotating applications, mostly braking torque is used to load a motor to be tested. In load tests, a conductive disk is attached to the rotating shaft of a motor which is placed in front of an unclosed magnetic path to permit the eddy current to be induced. These rotational designs must contain a magnetic field producing source which can be either a permanent magnet or an electromagnet. In designs including permanent magnets, the only way to adjust the magnetic field quantities is to adjust the length of the air-gap. Other designs consisting of wound electromagnets have additional advantages of changing the air gap flux density and the magnetic flux density inside the conductive material by changing the excitation current while the air gap length is still adjustable.

Unlike the conventional brake systems, the eddy current brakes are frictionless and less damage occurs in the materials used in the design of the brake. Also system response of the brake is more sustainable and less maintenance is needed.

Although there are lots of studies in literature about eddy current brake systems, it still accomodates many electromagnetic, electrical and mechanical problems. As a result of these studies, many analytical expressions and mathematical models are tried to be obtained. However, these analytical expressions and models are only valid for narrow speed ranges or they include many negligences. The best known models belong to Smythe, Schieber and Wauterse. Since the models include negligences, obtained analytical expressions and mathematical models do not give accurate results, but they still help to understand the physical phenomenon of the eddy current brakes and to determine the design parameters. Mostly, scientific details of commercial eddy current brake systems are not given in scientific articles because of the commercial concerns.

The braking torque-speed curve of an eddy current brake has four characteristic parts.

- When there is no relative motion between the conductive disk and the poles, there can be no Eddy current effect in the system. Since the poles are stationary, this operational point comes across the origin of the axes meaning “No torque at zero speed”. Faraday’s law show that a time invariant flux density cannot result in an electric field.

- Linear torque region: At the beginning of the rotational movement, reverse effect of the magnetic field produced by Eddy current is negligible against the main magnetic field produced by the poles, since the braking effect increases as the relative speed increases whilst magnetic circuit operates at linear regions creating linearly increasing magnetic fields.

- Critical speed: This is the speed at which the braking torque peaks. If the relative speed increases more, the reducing effect of the magnetic field created by Eddy currents becomes dominant resulting in a dramatic decrease in braking torque.

- High speed region: Beyond the critical speed, an increase in angular speed results in a greater increase in the reaction field and this weakens the total magnetic flux density and eddy currents, causing the braking torque to decrease continuously. Since all electromechanical conversion systems can all be expressed in terms of differential equations, it is possible to obtain a set of partial differential equations to describe the system mathematically. Serious effort was performed to obtain a simple mathematical model to solve these equations, but none of the studies in the literature managed to obtain a simple equation representing the relation between the input and output data for all speed regions. Those models or studies were only successful for only one speed region where the rest of the curve seems to be chaotic.

In time domain, the mathematical analysis of eddy current brake is almost impossible, due to the complexity of the problem depending on electromagnetic, mechanical properties. Therefore, mathematical methods like finite element method can be used to analyse the system, since it is a convenient numerical method which can be used to solve partial differential equations. It is widely used to solve static and dynamic problems in solid and fluid mechanics, electromagnetics and biomechanics. There is a number of multi-physics software using finite elements method to analyse problems in these fields.

The finite elements equations of eddy current brake solved by considering skin and proximity effect, motion induced eddy currents and time diffusion of magnetic fields. To simulate this problem, 3D transient optimised design parameters of Eddy current brake magnetic model was used. Only $\frac{1}{4}$ of the geometry is modelled so as to solve the problem quicker. Mesh inside the conductive disk is chosen to be non-uniform since moving eddy current regions need more mesh than non-conducting regions. The time step in transient magnetic problems is very crucial to increase the accuracy of the calculated eddy current. Finite element algorithm uses nodal solution, so time step and mesh size play an important role in obtaining a correct solution. The time step is chosen 0.5ms for a stable and correct solution.

The input and output parameters depend on too many design and operational parameters like conductive disk dimensions, the number and the dimensions of poles, excitation current, air gap distance and the specific properties of the used materials, etc. In the whole study, effects of changes in design parameters are all analysed to extend the limits of the designed eddy current brake.

Different number of designs are all analysed by altering only one design parameter while the rest are kept unchanged. The brake system are analysed for four different

electrical materials, three different magnetic materials, four different disk thickness values, four different air-gap width values, six different number of poles and six different excitation current values in order to obtain an optimised design. The altered designs are all analysed for eleven different angular speed values in order to obtain an integrated braking torque and total power dissipation vs speed characteristics. Also the results are available for interpreting the effect of the change in the parameter on the critical speed value and maximum braking torque.

In order to analyse the effect of the conductivity, four different materials are used in the analyses. The used materials are Aluminium-6061-T6, Aluminium-7075, pure Aluminium and Copper. The results show that as the conductivity increases maximum braking torque increases and the critical speed decreases.

The distribution of the Eddy currents is affected by the thickness of the conductive disk. To prove the effect of this change, four different disk thickness values which are 5mm, 10mm, 15mm, and 20mm only for the chosen material are used in the study. Increasing disk thickness increases the electrical resistance of the disk and shifts the critical speed to higher speeds and reduces the peak torque.

The air gap width affects the reluctance of the magnetic circuit excited by the magnets. If the air gap width increases, the magnetomotive force stored in the air gap increases and the flux decreases resulting in a decrease in the induced torque. It shifts the critical speed and reduces the peak torque. The effect of air gap width is investigated for four different air gap widths which are 1mm, 2mm, 4mm and 6mm.

In an eddy current brake, the relative permeability determines the flux density resulting from a given current density. The peak torque is maximized for a lower value of the relative permeability. The response to the excitation field is increasing with the relative permeability, so the magnetic flux density tends to increase. This phenomenon increases the peak torque. As the magnetic permeability increases, the total braking force and critical speed value are firstly increased and then they decrease. The effect of disk magnetic properties is investigated for three different materials having different magnetic permeability.

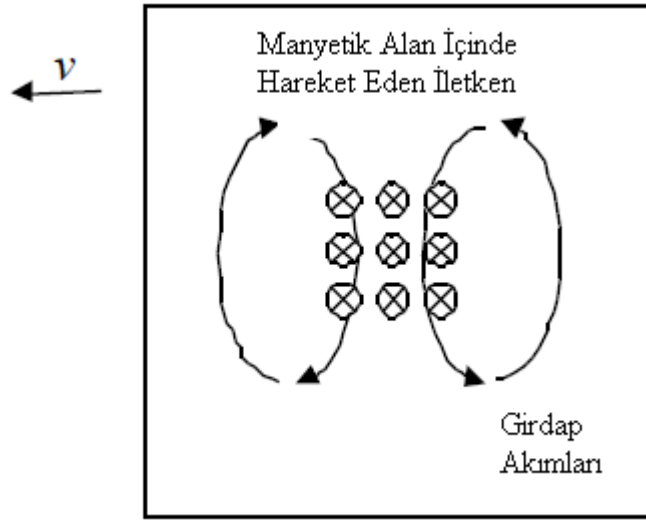
In an eddy current brake system, the braking torque is proportional to square of the excitation current and changes linearly with the number of pole pairs while the critical speed remains constant. The chosen excitation current values are 2.5, 3.75, 5, 7.5, 8.75 and 10 A, and number of poles are 8, 16, 24, 32, 40, 48.

All designs are simulated for eleven different speed levels between 50 rpm and 7500 rpm to obtain proper braking torque and total power dissipation vs speed. More than 600 simulations are completed to obtain integrated characteristics.

In this study, the effect of different design and operational quantities on output parameters is determined by analysing different Eddy current brake designs for different design constraints. All analysis is performed by finite element method. A number of simulations are performed in order to obtain the effect of design parameters. A database to associate the input and output quantities is obtained. Basic characteristics of the brake are given for different design parameters. After analysing the integrated results and curves an optimised design is completed for the practical stage of the study.

1. GİRİŞ

Faraday yasasına göre zamanla değişen bir manyetik alana maruz kalan iletkenin uçlarında bir gerilim endüklenir. Zamanla değişen manyetik alan ise ya alan içindeki iletkenin hareketiyle ya da manyetik alan kaynağının yeri ve gücü değiştirilerek elde edilebilir. İletken bir malzeme zamanla değişen bir manyetik alanın içinden geçirildiğinde Faraday yasasına göre endüklenen gerilimler sonucu oluşan akımlar moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve böylece manyetik olmayan iletken malzeme kısa devre edilmiş bir sargı gibi davranır [1]. Malzeme içindeki akan bu akımlar dönerek kendi içinde çukurlaştığı için girdap akımları adı verilmiştir.



Şekil 1.1 : Manyetik alan içinde hareket eden iletken malzemede endüklenen girdap akımları.

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye ya da mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrik makinalarında, girdap akımlarının makinanın çekirdeğinden veya sargılarından akmaya çalışması istenen bir durum değildir. Eddy ya da Foucault kayıpları olarak bilinen girdap kayıpları elektrik makinasının verimini azalmasına neden olur. Bu kayıpları azaltmak için elektrik makinalarında ilave önlemler alınır [2].

Girdap akımları bir iletkenin içinden akmaya başladığında kendini doğuran manyetik alana karşı bir manyetik alan oluşturur [3]. Birbirine zıt yönde olan bu iki manyetik alan birbirini zayıflatmaya çalışır ve sistemde frenleyici bir kuvvetin oluşmasına neden olur. Bu olgu, sürtünme olmadan enerjinin sistemden atıldığı, yeni nesil frenleme yapılarının ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Böyle bir sistemde girdap akımlarının akması zaten istenen bir durumdur ve olası en hızlı kinetik enerji tüketiminin olması için tasarımın değiştirilmesi istenir.

Manyetik olmayan iletken malzemenin sürekli ve sabit manyetik alan içindeki hareket ettiği dinamik bir sistemde, iletken malzeme elektromotor kuvveti endükleyen akı değişimine maruz kalır. Tasarım parametrelerinin belirlediği endüklenen girdap akımları malzemenin hızı ile orantılı olan bir frenleme kuvveti üretir. Sistemde var olan mekanik enerji, girdap akımlarının karesi ve iletken malzemenin iç direncinin çarpımı ile harcanır. Girdap akımları iletken malzeme içinde akmaya başladığı andan itibaren bu akımdan dolayı harcanan güç sistemden atılır. Böylece manyetik alan kaynağı ve iletken malzeme sönümleyici olarak davranır. Farklı tasarımlarla frenleme amacı ile kullanıldığı uygulamalar vardır. Fren momenti üretmeleri sebebi ile motor testlerinde motor yüklemek için kullanılırlar.

Girdap akımı fren mekanizmalarının en can alıcı ve en yaralı özelliği enerjinin sistemden sürtünme olmaksızın uzaklaştırılmasıdır. Ayrıca pek çok frenleme yapısı gerektiren uygulamada, frenleme yapısının zamanla başarımının azalması istenmez. Bu sürtünmeli fren yapıları için çok mümkün değildir. Bununla birlikte ortaya çıkan sıcaklık artışı dönen disk üzerinde olumsuz şartlar oluşturabilir. Ancak bu durum iyi bir soğutma ile ortadan kaldırılabilir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada öncelikle girdap akımı frenlerinin çalışma şekli ve üstünlüklerinden söz edilip, bu alandaki çalışmalar etraflıca incelenecektir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda elde edilen matematiksel modellerden yola çıkarak orta güçte bir girdap akımı freni tasarlanacak, tasarlanan sistemin tasarım büyüklükleri değiştirilerek her bir tasarım sonlu elmanlar yöntemi kullanılarak analiz edilecektir. Tasarlanan bu sistemlerden iyileştirilmiş olanı gerçekleştirip İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik

Makinaları Laboratuvarı'nda orta güçteki elektrik makinalarının deneyinde kullanılacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Girdap akımlarının fiziksel varlığı 1800'lü yıllardan beri bilinmektedir. Bu nedenle girdap akımı frenlerinin tarihi bu tez kapsamında irdelenemeyecek kadar geniş olup, sadece geçtiğimiz 40 yıllık dönemde fren uygulamalarına yönelik çalışmalar gözden geçirilecektir.

Girdap akımı freni üzerine ilk akademik çalışma 1971 yılında Davis ve Reitz tarafından yarı-sonsuz ve sonlu iletken ortamlarda hareket ettirilen mıknatıslar üzerindeki endüklenen kuvvetlerin incelenmesi üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada 1889 yılında Sommerfeld tarafından yapılan, sonlu iletken disk üzerindeki endüklenen girdap akımlarının hesaplarını içeren bir çalışmadan yararlanılır [4]. Sonuçlar daha önce Sommerfeld tarafından hesaplanmayan Green fonksiyonlarını sağlamaktadır ayrıca bu çalışma sonlu iletken ortamdaki sıcaklık artışının etkisi ile girdap akımlarındaki bozulmayı dikkate alarak yaklaşık bir sonuca varmayı hedeflemiştir [4].

Sonra Schieber 1974 yılında dönen sonlu iletken malzeme için frenleme momenti ifadesini yeniden gözden geçirdi ve kurduğu model ile deneysel sonuçlar birbiri ile çok iyi uyum sağladı ancak kutup yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğunun basitleştirilerek kullanılması sonuçların bozulmasına neden olacağı düşünülmektedir [5].

Bunu takip eden çalışma ise 1975 yılında yine Schieber tarafından yapılmıştır. Schieber bu çalışmada girdap akımı frenleri için dikdörtgensel mıknatısın en uygun boyutlarını analitik olarak hesapladı ve mıknatısın genişliğinin uzunluğa oranının 0,5 olması gerektiğini belirledi [6].

1980'lerin sonunda bilgisayarlardaki gelişmeler manyetik akı ve manyetik yapı arasındaki etkileşimlerin hesaplanmasını kolaylaştırdı. Kalıcı mıknatısların gücündeki artışlar girdap akımı sistemlerinin daha küçük boyutta ve daha etkin olmasına olanak sağladı. Bu ise girdap akımı frenlerinin daha küçük makinalara uyumunu kolaylaştırdı. Bütün bu gelişmeler dinamik frenleme için girdap akımı frenlerinin kullanım sıklığını artırmıştır.

1984 yılında Nagaya ve arkadaşları iki paralel mıknatıs arasında dönen sonlu boyuttaki iletken üzerindeki girdap akımlarının oluşturduğu frenleme kuvvetini inceledi. İletken üzerindeki sınır koşulları iletken şeklinden bağımsız olarak fourier serisi açılımı ile çözüldü. Ayrıca bir sarkaç düzeneği ile farklı iletkenlerle deneyler yapıldı. Deney verileri ile kurulan sayısal model birbiri ile çok uyum sağladı. İletken yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu çok karmaşık olarak ele alınmamıştır ve bu varsayımın ancak iletkenin kesit alanının mıknatısların kesit alanının on katı olduğunda geçerli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yapılan deneylerde ince iletkenler kullanıldığı için iletken boyunca akan girdap akımları ihmal edilmiştir. Deneyler sonunda bu varsayımın da ancak 5mm iletken kalınlığının altında geçerli olduğu görülmüştür [7].

Wiederick ve arkadaşları 1987 yılında elektromıknatıs kutuplar arasında dönen ince iletken disk üzerindeki girdap akımları tarafından indüklenen manyetik frenleme kuvveti için basit bir teori önerilmiştir [8]. Onların modeline göre frenleme kuvveti hız, iletkenlik ve hava aralığı ile doğrusal olarak orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. Fakat model üçüncü dereceden akıya bağımlıdır. Önerilen bu model iletkenin sınır koşullarını dikkate almadığı için modelin çok iyi olduğu söylenemez. Ayrıca Wiederick ve arkadaşları modeli formüle dökerek iki varsayımda bulunmuştur. İlki sonsuz disk yavaşça dönerken doğrusal hareket eder, ikincisi ise girdap akımı yoğunluğu elektromıknatısların iletken üzerindeki gölgesinde birbiçimdir ve geri kalan bölgelerde sıfırdır [8].

1987'deki Wiederick ve arkadaşlarının ardından 1988 yılında Heald Wiederick'in modelini örnek alarak basitleştirilmiş bir formül önerdi [9]. Bu model formülasyonun doğruluğunu %96,3'ten %99'a çıkarmıştır.

1996 yılında da Cadwell at nalı mıknatısın arasından dönen levha üzerindeki frenleme kuvvetini araştırdı. Sadece deneysel olarak bulunabilen girdap akımlarında ait parametreler için basit bir model kurdu. Ancak kurulan model ile deneysel sonuçlar çok paralel değildi. Yaptığı deneyler sonrasında ise Cadwell girdap akımlarının akım yolu uzunluğunun etkin manyetik alanın yatay uzunluğundan daha az etkili olduğunu buldu. Buna ek olarak girdap akımlarının genliğinin 1000A, yol direnci $3,5 \times 10^{-6}$ ve harcanan gücün 12 Watt olduğunu bildirdi [10].

Bütün çalışmalar sonrasında girdap akımları frenleme sistemlerinin modelleme tekniklerine göre ayarlanabilir moment için kontrol tekniklerinin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. İlk kontrol 1996 yılında Simeu ve Georges tarafından elektromıknatısların gücü değiştirilerek yapıldı [12]. Bu çalışma 1991 yılında Wauterse'in yaptığı çalışmayı kullanır [11]. Bu çalışmaya göre girdap akımı frenlerinin üç adet çalışma bölgesi bulunur. Bunlar düşük hız bölgesi, kritik hız bölgesi ve yüksek hız bölgesidir. Düşük hız bölgesinde girdap akımları tarafından üretilen manyetik indüksiyon asıl indüksiyonla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir ve hava aralığı indüksiyonu durmakta iken üretilen manyetik indüksiyondan daha azdır. Kritik hız bölgesi en yüksek frenleme kuvvetinin olduğu bölgedir. Girdap akımlarının oluşturduğu indüksiyon durağan durumdaki indüksiyonla karşılaştırıldığında ihmal edilemez. Yüksek hız bölgesinde ise hava aralığındaki indüksiyon daha fazla azalma eğiliminde olur ve hız sonsuza götürüldüğünde asıl indüksiyon girdap akımları tarafından yok edilir. Üç farklı davranış biçimlerinden ilki değişken frenleme momenti için statik ve dinamik kompanzatör yapılarının kullanımını gerekli kılar. Sonuçlar değişken girdap akımlarda döner disk hızının bozuk mukavemetin varlığında bile referans hızı takip etmeye çalıştığını göstermiştir. Buna ilaveten her iki kontrol yapısının iyi çalıştığı ancak dinamik geribesleme kontrolünün daha verimli olduğu anlaşılmıştır [12].

Lee ve Park 1999 yılında girdap akımı freni kontrolörü tasarlayıp üretti [13]. Bu kontrolör, sistemin sabit hızda sürdürmek için tasarlanmayıp doğal frenleme süresini kısaltmak için tasarlanmıştır. Önerilen bu sistem farklı yol koşullarına bağımlı olarak frenleme kuvveti oluşturabilmektir. Bu tarz kontrol sistemleri otomobil frenleme sistemlerinde kullanılmaktadır. Lee ve Park'ın yaptığı bu çalışmada girdap akımı freni modellendikten sonra kontrol tipi de modellenerek benzetimi yapıldı. Benzetim sonuçları, sistemin yüksek hızlı bölgede daha iyi olduğunu ancak düşük hızlı bölgede hızla birlikte frenleme kuvveti de azalacağından dolayı elektromagnet akımlarının artırılması gerektiğini gösterdi [13].

2001 ve 2002 yılında Lee ve Park girdap akımları fren sistemleri için analitik bir çözüm geliştirmiştir [14,15,16]. Bugüne kadar kurulmuş diğer analitik modellerden üstünlüğü birden fazla mıknatıs kullanmaya olanak sağlamasıdır. Bu modelde girdap akımları yoğunluğu bulunurken görüntü yöntemi adı verilen farklı bir yöntem kullanılmıştır. Ayrıca Lee ve Park net akım yoğunluğunu hesaplarken teğetsel

bileşeni ihmal ederek kutup yüzeyinin gölgesindeki alan üzerindeki radyal bileşeni kullanmıştır. Teğetsel bileşenin ihmal edilme sebebi radyal bileşene göre oldukça küçük olmasıdır. Radyal bileşenin sayısal olarak integrasyonu net girdap akımı eşitliğini verecektir. Bütün bunlara ek olarak endüklenen akı ile uygulanan akı arasındaki orana eşit olan manyetik Reynolds sayısı üstel bir fonksiyon olarak hesaplara dahil edilmiştir. Hesaplanan frenleme kuvveti ile deneyde ölçülen frenleme kuvveti arasında farklılıklar çıkmıştır [14,15,16]. Bu farklılıkların, birden fazla uyarma sistemi kullanıldığı için ve diğer kutup alanlarından gelen etkinin ihmal edilmesinden dolayı gerçekleştiği aşîkârdır.

2. ELEKTROMANYETİK FRENLERİN GENEL TEORİSİ

Elektromanyetik frenler kalıcı mıknatıs veya elektromagnet gibi durağan bir manyetik akı kaynağından ve mekanik enerji kaynağına bağlı dönen bir iletken diskten meydana gelir. Dönme hareketine bağlı olarak iletken disk, Faraday yasası ile ifade edilen zamanla değişen akı yoğunluğuna maruz kalır. Bu ifade $\vec{E}$: elektrik alan şiddeti, $\vec{B}$: manyetik akı yoğunluğu olmak üzere (2.1) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Meydana gelen elektrik alanın değişiminden dolayı bir akım akar ve bu akım iletken malzeme içinde kendi üzerine halkalar çizecek şekilde kapanır. Bu ifade J: girdap akım yoğunluğu, σ : malzemenin elektriksel iletkenliği olmak üzere (2.2) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

Girdap akımları ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki frenleme kuvvetinin doğmasına neden olur. İndüklenen frenleme kuvveti ve momenti r: iletken diskin yarıçapı olmak üzere (2.3) ve (2.4) numaralı eşitliklerde verilmiştir.

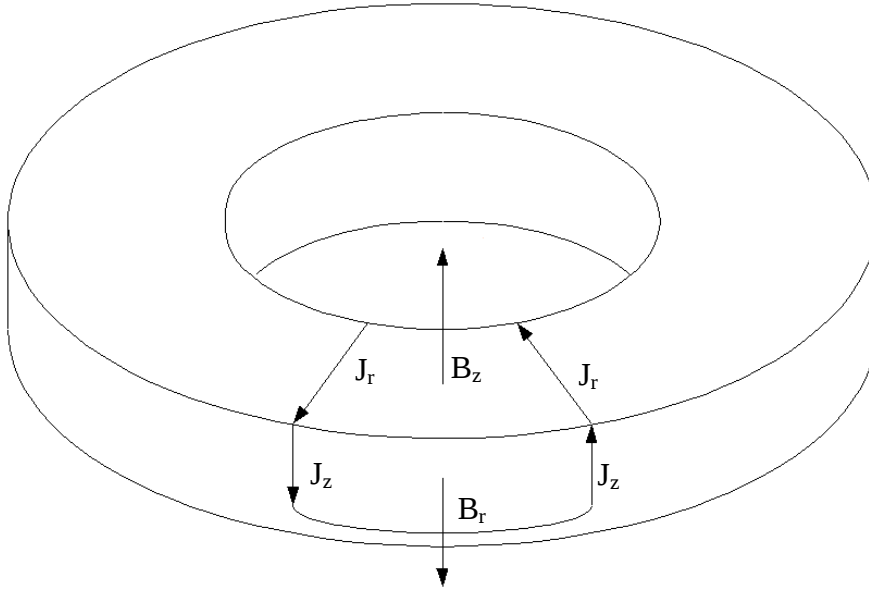
$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

$$\vec{T} = \vec{F} \cdot r \quad (2.4)$$

(2.3)'teki frenleme kuvveti eşitliğindeki manyetik akı yoğunluğu (B) ve girdap akımı yoğunluğu (J) eksenel ve radyal olmak üzere iki bileşene ayrılabilir. Eksenel ve radyal akım yoğunlukları J_z ve J_r , eksenel ve radyal manyetik akı yoğunlukları B_z ve B_r olmak üzere frenleme kuvveti (F) (2.5) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$F = J_z \cdot B_r - J_r \cdot B_z \quad (2.5)$$

Girdap akımlarından dolayı oluşan frenleme kuvveti sadece eksenel akı yoğunluğu ile radyal akım yoğunluğuna bağlı değildir. Aynı zamanda radyal akı yoğunluğu ve eksenel akı yoğunluğuna da bağlıdır.



Şekil 2.1 : Eksenel ve radyal manyetik akı ve akım yoğunluğu vektörleri.

Manyetik akı yoğunluğu vektörünün radyal bileşeni iletken disk üzerinde akan girdap akımları tarafından oluşturulur. Girdap akımlarının oluşmadığı takdirde frenleme kuvvetinin de oluşmaz.

Yukarıda verilen bir dizi elektromanyetik denklem girdap akımı frenlerinde girdap akımlarının nasıl frenleme kuvveti oluşturduğunun anlaşılması için yeterlidir. Daha detaylı bir elektromanyetik analiz için girdap akımı frenlerindeki iletken ya da iletken olmayan kısımları manyetik vektör potansiyeli A , manyetik skaler potansiyeli ϑ ile modellemek gerekir. İletken olmayan yüzeyler için toplam manyetik alan şiddeti H_T (2.6) eşitliğinde verildiği gibidir [18].

$$H_T = -\nabla \cdot \vartheta_s \quad (2.6)$$

Toplam manyetik alan şiddetinin iki adet bileşeni bulunur; bunlardan biri indirgenmiş manyetik skaler potansiyeli Ψ , diğeri ise kaynağın manyetik alan şiddeti H_K 'dir.

$$H_T = -\nabla \cdot \Psi + H_K \quad (2.7)$$

Kaynağın manyetik alan şiddeti H_K ile kaynağın akım yoğunluğu J_K arasındaki ilişki **(2.8)** numaralı eşitlikteki olduğu gibidir.

$$\nabla \times \vec{H}_K = \vec{J}_K \quad (2.8)$$

İletken olmayan bölgeler için verilecek son eşitlik, μ manyetik geçirgenlik olmak üzere **(2.9)** numaralı laplasyen eşitliğidir.

$$\nabla \cdot \mu \cdot \nabla \cdot \mathcal{G}_s = 0 \quad (2.9)$$

Girdap akımları ya da iletken bölgelerde, manyetik akı yoğunluğu B ve elektrik alan şiddeti E **(2.10)** ve **(2.11)** numaralı eşitliklerde verilmiştir. Eşitlikteki V skaler elektrik potansiyeli, ϖ ise hızdır.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.10)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V + \varpi \times \nabla \times \vec{A} \quad (2.11)$$

Skaler elektrik potansiyelinin de dahil olduğu amper yasası **(2.12)** numaralı eşitlikte verilmiştir[18].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \times \nabla \times \vec{A} = \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \varpi \times \nabla \times \vec{A} + \nabla V \right) \quad (2.12)$$

(2.11) numaralı eşitliğin diverjansı alınırsa **(2.13)** numaralı eşitlik elde edilir.

$$\nabla \cdot \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \varpi \times \nabla \times \vec{A} + \nabla V \right) = 0 \quad (2.13)$$

Skaler elektrik potansiyeli, manyetik vektör potansiyeli ve hız nicelikleriyle **(2.14)** numaralı eşitlikteki gibi yazılabilir.

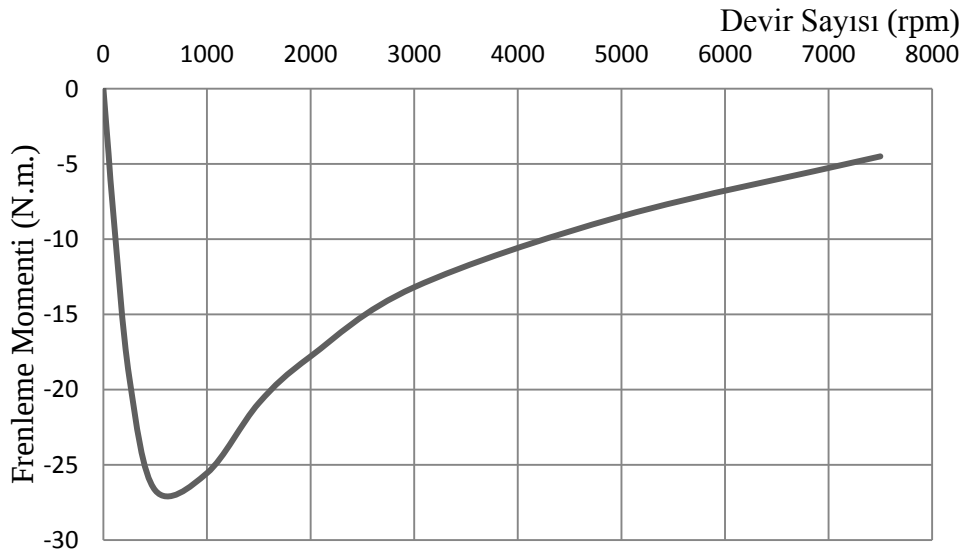
$$V = A \varpi \quad (2.14)$$

(2.14) numaralı eşitliği (2.12) numaralı eşitlikte yerine yazıldığında (2.15) numaralı eşitlik elde edilir. Bu eşitlikte sadece manyetik vektör potansiyeli, malzemenin manyetik geçirgenliği ve iletken diskin dönüş hızı bulunur.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\omega} \cdot \nabla \vec{A} - \vec{A} \cdot \nabla \vec{\omega} - \vec{A} \times \nabla \times \vec{\omega} \right) \quad (2.15)$$

Manyetik vektör potansiyeli ve iletken diskin dönüş hızı arasındaki ilişkiyi veren (2.15) numaralı eşitlik dördüncü bölümde anlatılacak olan girdap akımı freninin sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak analizinin temelini oluşturmaktadır.

Girdap akımı freni, imal edildiği malzemenin manyetik karakteristiğinin doğrusal olmamasından dolayı doğrusal bir frenleme momenti-hız karakteristiğine sahip değildir. Şekil 2.2 'de tipik bir girdap akımı freni frenleme momenti-hız karakteristiği verilmiştir.



Şekil 2.2 : Girdap akımı frenleri için tipik frenleme momenti-hız karakteristiği.

Şekil 2.2'de de görüldüğü gibi bir girdap akımı freni frenleme momenti-hız karakteristiğinin dört adet belirgin niteliği vardır:

Sıfır hızda sıfır moment: Lenz yasasına göre zamanla değişmeyen akı yoğunluğu elektrik alanı oluşturamaz, bu nedenle fren sistemi hareketsiz iken girdap akımları endüklenmez ve frenleme momenti oluşmaz.

Doğrusal moment bölgesi: Girdap akımları tarafından üretilen manyetik alan şiddeti uyarma akımının hava aralığında oluşturduğu manyetik alan şiddeti ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. Bu sebeple frenleme momenti girdap akımlarının genliği ile orantılıdır ve hız ile doğrusal olarak değişir.

Kritik hız: Frenleme momentinin en yüksek olduğu hız değeri olup, bu hız değerinden sonra girdap akımlarının oluşturmuş olduğu manyetik alan şiddeti, uyarma akımının oluşturduğu manyetik alan şiddetini zayıflatmaya başlar.

Yüksek hız bölgesi: Kritik hızın ötesinde hava aralığındaki manyetik alan şiddeti daha fazla azalma eğiliminde olur ve hız sonsuza götürüldüğünde uyarma akımının hava aralığında oluşturduğu manyetik alan şiddeti girdap akımlarının oluşturduğu manyetik alan şiddeti tarafından yok edilir.

Girdap akımı fren sistemi için elde edilen moment-hız karakteristiği asenkron makinanın moment-hız karakteristiğine çok benzerdir. Şüphesiz ki bu benzerlik iki makine arasındaki yapısal benzerlikten kaynaklanır. Bazı asenkron makinalar kısa devre edilmiş kafesler olmaksızın kütleli rotorlu olarak imal edilir [20]. Girdap akımı freni statoru doğru akımla beslenen kütleli rotorlu bir asenkron makinedir.

3. GİRDAP AKIMI FRENLERİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

Benzetim açısından ele alındığında elektromanyetik frenlerin matematiksel olarak modellenmesi çok önemli olduğundan bu kısımda elektromanyetik frenler için daha önce ortaya atılmış olan farklı modeller gözden geçirilecektir.

Elektromanyetik frenler yapısal olarak ilkel bir mekanizma gibi göründe bile hala birtakım elektromanyetik ve ısıl problemleri barındırmaktadır. Manyetik alan içinde dönen bir iletken disk üzerinde oluşan frenleme momenti analitik olarak hesaplamak oldukça karmaşıktır. Ancak birtakım kabuller yapılarak bu moment yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Elektromanyetik frenlerin manyetik işlevini açıklamak için Maxwell yasalarını şu olgu altında çözmek gereklidir; manyetik geçirgenliği μ , elektriksel iletkenliği ρ olan ferromanyetik disk alternatif polariteli manyetik kutup halkalarının yüzünde döner. Her bir kutup, doymamış olmak kaydıyla uyarma akımının yönüne bağlı olarak bir uyarma akısı ϕ_0 oluşturur. Manyetik akı çizgileri çok küçük olan hava aralığından geçerek ferromanyetik disk içinde döngüler oluşturur. Disk döndüğünde bu akı zamanın sinüzoidal işlevi olarak değişir [5].

$$\phi = \phi_0 \sin\left(\frac{p.N.t}{60}\right) \quad (3.1)$$

p=kutup çifti sayısı,

N= diskin dönüş hızı (d/d),

t=zaman (s)

Akının şiddeti devir sayısına bağlı olarak diskin içinde alternatif girdap akımları oluşturur. Bu akımlar kendi üzerinde kapanırlar. İndüklenen girdap akımlarının oluşturduğu manyetik alan ise esas alana ters yönde olduğu için bir frenleme kuvveti oluşturacaktır. Frenleme kuvveti uyarma akımının bir fonksiyonudur. Ayrıca malzemenin elektriksel direncinden dolayı girdap akımları diski ısıtır.

3.1 W. R. Smythe'nin Modeli

Symthe'nin modeli elektromanyetik frenler üzerine kurulmuş olan ilk modellerdendir. Symthe problemi sonlu yarıçaptaki bir disk üzerinde çözmüştür. Diskin her iki yüzünde girdap akımları tarafından oluşturulan manyetik alan şiddeti birbirinden üniform (birbiçim) hızla uzaklaşan görüntü çifti olarak ele alınmıştır. İlk adım kutuplar tarafından dönen disk içinde oluşan girdap akımlarının ürettiği manyetik alan şiddetinin (B) hesaplanmasıdır. Girdap akımları sadece dış kaynağın manyetik indüksiyonunu değiştirmekle oluşmaz aynı zamanda disk üzerindeki herhangi bir yerdeki girdap akımlarının oluşturduğu manyetik indüksiyonunun da değişmesiyle de oluşur. Herhangi bir noktadaki akan akımın radyal bileşeninin kutup yüzeylerindeki manyetik alan şiddeti ile integrali üretilen frenleme kuvvetini verir. Girdap akımlarının oluşturduğu akı, elektromıknatısların mıknatısiyetlerini giderici bir etki yapar. Bu nedenle ferromanyetik disk içine giren net akıyı bulmak için kutuplar tarafından üretilen akıdan girdap akımlarının ürettiği akı çıkarılmalıdır. ϕ_0 diskin durmakta iken içine giren manyetik akı, T frenleme momenti, ω açısal hız, ϕ net akı yoğunluğu, D kutupların yapısına bağlı bir katsayı, $\Re$ elektromagnetlerin relüktansı, β sabit katsayı, $\gamma=10^{-9}/\rho$ ve ρ ferromanyetik diskin hacimsel direnci olmak üzere ferromanyetik diskin hareket halindeyken içene giren toplam net akı (3.2) numaralı eşitlikte verildiği gibidir.

$$\phi = \phi_0 - \frac{\beta^2 \gamma^2 \omega^2 \phi}{\Re} = \frac{\Re \phi_0}{\Re + \beta^2 \gamma^2 \omega^2} \quad (3.2)$$

$\beta^2 \gamma^2 \omega^2 \phi$ teriminin frenleyici manyetomotor kuvveti olduğu aşıkardır. İntegrasyon işlemi sonunda frenleme momenti (3.3) eşitlikte verilmiştir.

$$T = \omega \gamma \phi^2 D = \frac{\omega \gamma R^2 \phi_0^2 D}{(R + \beta^2 \gamma^2 \omega^2)^2} \quad (3.3)$$

Model düşük hızlar için gayet olumlu sonuçlar verirken yüksek hızlarda deneysel verilerle çelişmesi modelin sadece belirli bir hız bölgesi için çalıştığını gösterir. Smyte yüksek hızlarda modelin geçersizliğini manyetomotor kuvveti ile esas akının

arasındaki ilişkinin bozulmasına neden olan manyetik malzemenin doymasıyla açıklamıştır.

3.2 Schieber' in Modeli

Schieber 1974 yılında Smythe'in modelinden farklı olan bir model ortaya koymuştur [5]. Schieber tarafından kurulan bu model Smythe'in modelinden farklı olmasına rağmen düşük hız bölgelerinde iyi sonuçlar vermiştir. Model sadece döner sistemler için değil aynı zamanda doğrusal sistemler içinde geçerli olmuştur. Schieber hiç yüksek hızlarda çalışan sistemler için araştırma yapmamıştır[3]. Schieber' in çalışmaları sonucu elde etmiş olduğu moment denklemi (3.3) ifadesinde verilmiştir.

$$T = \frac{1}{2} \sigma \delta \omega \pi r_m^2 m^2 B_z^2 \left[1 - \frac{r_m / r^2}{1 - (m / r)^2} \right] \quad (3.3)$$

Bu denklemde;

σ : Döner diskin elektriksel iletkenliği

δ : Döner diskin kalınlığı

ω : açısal hız

r_m : elektromıknatıs yarıçapı

m : disk ekseninin kutup yüzeylerinin merkezine olan uzaklığı

r : disk yarıçapı

B_z : Manyetik akı yoğunluğunun z-ekseni bileşenidir.

3.3 Wouterse'nin Modeli

Wouterse 1991 yılında Schieber ve Smythe'nin çalışmalarından etkilenecek yüksek hızlarda da iyi sonuç veren bir moment eşitliği bulmaya çalışmıştır [11]. Girdap akımı freni hareket halindeyken döner diskin hızı 9 ve manyetik indüksiyon B'nin yönüne dik olan bir elektrik alanı ($E = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$) oluşturur. En yüksek momentin vuku bulunduğu kritik hızdan daha düşük olan hızlarda; girdap akımlarından dolayı meydana gelen indüksiyon, hızın sıfır olduğu durumda oluşturulan indüksiyon (B_0) yanında

ihmal edilebilir seviyededir [14]. Bu varsayım neticesinde düşük hız bölgesinde elde edilen frenleme kuvveti (3.4) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$F = \frac{1}{4} \frac{\pi}{\rho} D^2 dB_0^2 cv \quad (3.4)$$

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{1}{\left(\left(1 + \frac{r_1}{A} \right)^2 \right) \left(\frac{A - r_1}{D} \right)^2} \right] \quad (3.5)$$

Yukarıdaki verilen (3.4) ve (3.5) numaralı eşitliklerde F frenleme kuvveti, v ise teğetsel hızdır. Diğer değişkenler ise farklı tip fren modellerinden elde edilen parametrelerdir. Düşük hız bölgeleri için elde edilen bu formül Smythe'in sonuçları ile tamamen örtüşür.

Wouterse girdap akımı frenlerini doğru akımla beslenen bir asenkron makinaya benzetir. Düşük hızlarda rotor akımlarının ürettikleri manyetik akı esas akıyı etkilemez ve hızla orantılı bir moment üretilmiş olur. Yüksek hızlarda ise rotor akımlarının ürettiği manyetik akı artık dışlardaki esas akıyı sıkıştırmaya başlar. Wouterse'nin çalışması farklı hızlarda ortaya çıkan, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun üç olağanüstü durumunu ele alır. Bunlar:

Çok düşük hızlarda akı, hızın sıfır olduğu durumdaki akıdan çok az farklıdır.

En yüksek frenleme kuvvetinin elde edildiği hızda kutup altındaki manyetik akı yoğunluğu, sıfır hızdaki manyetik akı yoğunluğu B_0 'dan önemli ölçüde azdır.

Çok yüksek hızlara çıkıldıkça da manyetik akı yoğunluğu daha çok azalma eğilimi gösterir.

Bu önermeler dahilinde Wouterse şu eşitlikleri elde etmiştir:

$$F_g = \hat{F} \frac{2}{\frac{g_k}{g} + \frac{g}{g_k}} \quad (3.6)$$

$$\hat{F} = \frac{1}{\mu_0} \sqrt{\left(\frac{c}{\xi}\right) \frac{\pi}{4} D^2 B_0^2} \sqrt{\left(\frac{x}{D}\right)} \quad (3.7)$$

$$\mathcal{G}_k = \frac{2}{\mu_0} \sqrt{\left(\frac{1}{c\xi}\right) \frac{\rho}{d}} \sqrt{\left(\frac{x}{D}\right)} \quad (3.8)$$

ρ : disk malzemesinin öz direnci

d : disk kalınlığı

D : Kutup çapı

ξ : Alan genişliği oranı

c : diskin toplam direncinin, bir kutup altındaki disk direncine oranı; orantılılık faktörü

$\mathcal{G}$: Kutup merkezinden ölçülen teğetsel hız

$\mathcal{G}_k$: En yüksek frenleme kuvvetinin uygulandığı kritik hız değeri

B_0 : Diskin hareketsiz olduğu durumdaki bir kutup altındaki manyetik alan şiddeti

x : kutup yüzeyi ile disk yüzeyi arasındaki mesafe, bu uzunluğa disk kalınlığı da dahildir.

r_1 : Disk merkezi ile kutup merkezi arasındaki mesafe

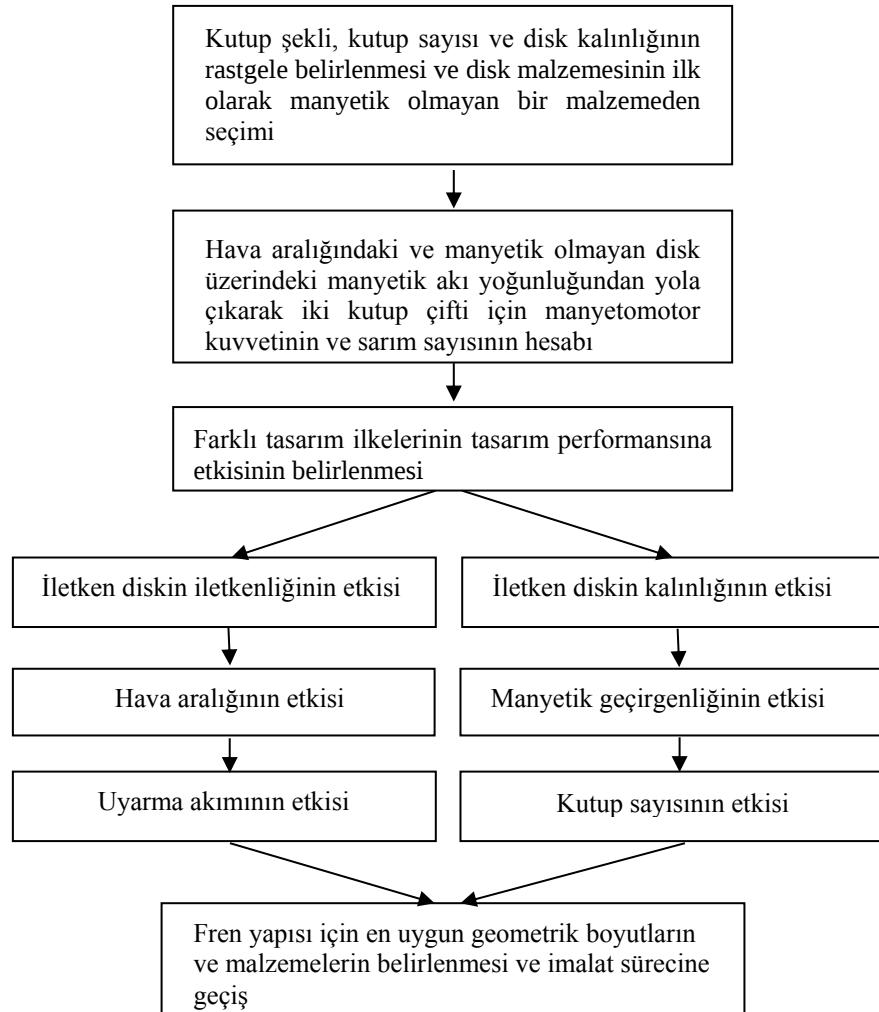
3.4 Modellerin Karşılaştırılması ve Kurulan Modellerdeki Yetersizlikler

Literatürde bu tez kapsamında yer almayan daha pek çok model vardır ve yeni bir model kurulması muhtemeldir. Analitik yaklaşımlarda elektromanyetik problemlerin daha basite indirildiği ve pek çok ihmalin yapıldığı aşikârdır. İhmaller yapılmadığı zaman da önceki bölümlerde açıklandığı gibi elektromanyetik problemleri içinden çıkılmaz bir hal almaktadır. Geçtiğimiz 40 yılda yapılan yaklaşımların en büyük eksikliği manyetik malzemedeki doymanın etkisinin ihmal edilmesidir. Ayrıca duran ve dönen kısımlardaki kullanılan malzemelerdeki yüzeylerin pürüzsüz olduğu kabul edilmiştir. Ne yazık ki pratik hayatta bu durum söz konusu değildir. Buna ilaveten sıcaklığın kullanılan malzemeler üzerinde meydana getireceği elektriksel ve manyetik pek çok olumsuz etki de göz önüne alınmamıştır. Kurulan matematiksel

modeller ya da yapılan analitik hesaplamalar girdap akımı frenlerinin fiziksel olgusunu anlamak ve birtakım tasarım koşulları belirlemek için ortaya konabilir.

4. GİRDAP AKIMI FRENİNİN TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Literatürde girdap akımı frenlerinin diğer elektrik makinaları gibi tasarımına dair ne yazık ki çok tatmin edici bilgiler bulunmamaktadır. Fren sisteminin rotoru sadece iletken bir diskten oluştuğu için rotorun analitik hesapları çok mümkün değildir. Bu sebeple literatürde var olan birkaç fren sisteminden yola çıkarak, sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir tasarım gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla istenen güç mertebesi için en uygun geometrik boyutlara ve en uygun malzemelere varılması hedeflenmiştir. Tasarımın akış planı **Şekil 4.1**'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Tasarım akış planı.

4.1 Sonlu Elemanlar Analizinin Temelleri

Sonlu elemanlar analizi karmaşık geometrili ve doğrusal olmayan malzemeler barındıran mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen sayısal modelleme tekniğidir [17]. Problem geometrisi problemi belirli bir yaklaşıklıkla sayısal olarak çözebilecek kadar çok sayıda küçük parçalara bölünür. Pratik uygulamalarda sonlu elemanlar analizi iki boyutlu ya da üç boyutludur.

Problem geometrisi ağ adı verilen yapılarla ayrıştırılır; hacim veya yüzey üzerinde düğüm adı verilen noktalar oluşturulur. Her bir düğüme o malzemenin özellikleri atanır. Periyodiklik ve simetrik özelliklerinden faydalanarak problemin boyutları sınır koşulları kullanılarak azaltılabilir. İkinci bölümde anlatılan fiziksel eşitlikler, her düğümde potansiyel fonksiyonunu en küçük yapacak şekilde çözülür. Her bir elemanın çözümü onu oluşturan düğümlerin çözümlerinin birleşiminden oluşur.

4.2 Sonlu Elemanlar Analizinde Yöntemin Belirlenmesi

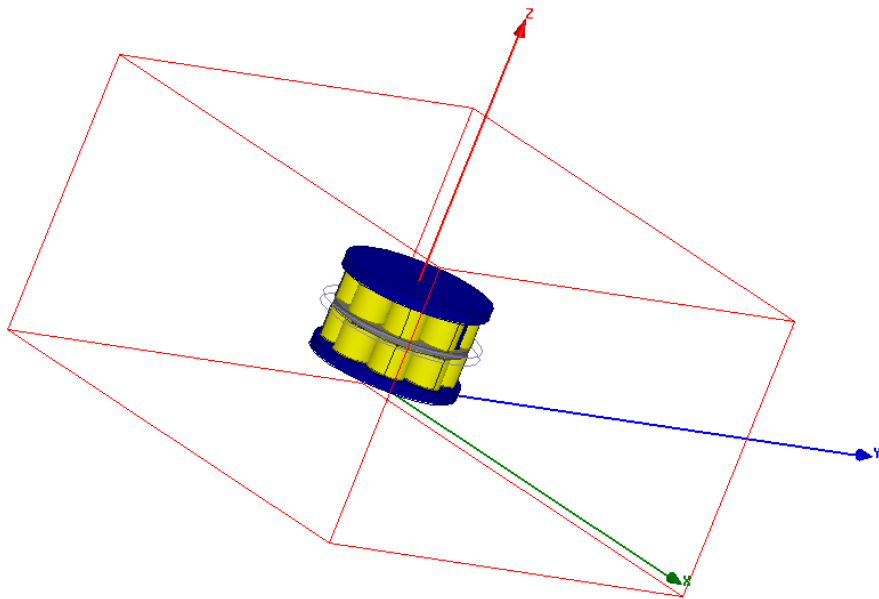
Girdap akımı freni analizine sonlu elemanlar yönteminin uygulanması birkaç farklı seçimi içerir.

- İki veya üç boyutlu analizin seçimi
- Analiz yöntemleri arasındaki seçim
- Periyodiklik ve simetri için sınır koşullarının seçimi

Geçmiş yıllarda girdap akımı freninin iki boyutlu sonlu elemanlar analizi üzerine yazılmış yayınlar bulunmaktadır[15-16]. İki boyutta sonlu elemanlar analizinin kullanılması daha az düğüm içerdiği için hızlı ve kolaydır. Fakat iki boyutlu analiz üç boyutlu analizde oluşacak birtakım etkileri hesaba katmaz. Bu sebeple elde edilen sonucun doğruluğu çok tatmin edici olmayabilir. İki boyutlu analiz yöntemi, üç boyutlu etkilerin ihmal edilebileceği ya da kolayca hesaba katılabileceği motor, transformatör gibi elektrik makinaları için uygundur. Üç boyutlu analiz ise bu etkileri göz ardı edilemeyeceği, girdap akımları gibi akım yolları çok iyi tanımlanmamış problemler için uygundur[17-18]. Üç boyutlu analiz güçlü bir işlemci, büyük bir hafıza ve iki boyutlu analizden çok daha uzun bir zamana ihtiyaç duyar. Bu, çözüm için sayıca çok fazla düğüm içermesinin bir sonucudur.

Girdap akım fren mekanizmalarının sonlu eleman analizinde faydalı olan iki yöntem vardır. Bunlardan birincisi manyetostatik analiz, diğeri ise geçici hal (transient) analizdir. Manyetostatik analiz çok daha hızlı olsa bile bir fren sisteminin her bir parçasını analiz edemez. Bu analiz çentik, delik ya da soğutma yüzeylerinin bulunmadığı ve buna ilaveten geometrinin hareket yönüne bağlı olmadığı parçalarında kullanılabilir. Geçici hal (transient) analizi yönteminde ise fren sisteminin hareketsiz halinden nominal çalışma koşullarına ulaşınca dek farklı her bir zaman için problem yeniden çözülür. Bu da fren mekanizmasındaki geçici olayların göz önüne alınmasına olanak sağlar. Geometrinin hareket yönüne bağlı olarak değiştiği uygulamalarda mutlaka kullanılmalıdır. Tasarlanan fren sisteminin moment-hız karakteristiğini manyetostatik analiz ile çıkarmak daha kısa sürse bile bu çalışmada daha doğru sonuçlar elde edebilmek ve geometrik bir takım problemleri göz önüne alabilmek için geçici hal (transient) analiz kullanılmıştır. Geçici hal (transient) analizin manyetostatik analizden daha uzun sürmesinin nedeni hem kalıcı rejime ulaşınca kadar her bir zaman dilimi için eşitliklerin yeniden çözülmesi hem de geçici hal eşitliklerinin daha karmaşık olmasıdır.

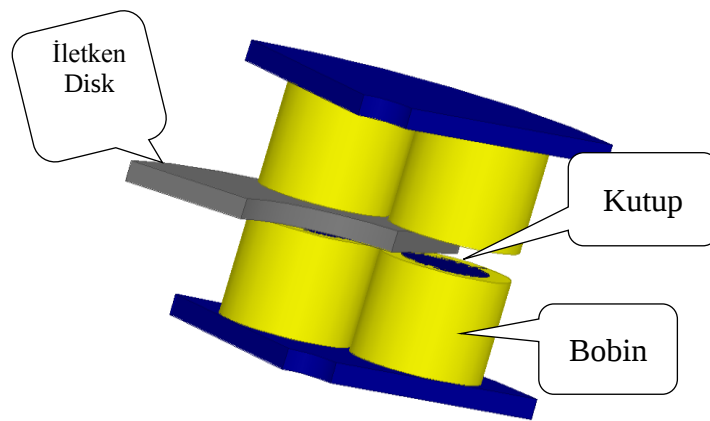
Bu çalışmada tasarlanan girdap akımı fren sistemi üç boyutlu geçici hal analizi ile analiz edilmiştir. Analiz için Ansoft firmasına ait Maxwell 3D yazılımı ile yapılmıştır. Hemen hemen bütün sonlu elemanlar yöntemini kullanan yazılımlarda olduğu gibi Maxwell 3D yazılımı da problemin periyodiklik ve simetri durumunu göz önüne alarak uygun sınır koşullarının belirlenmesine olanak sağlar.



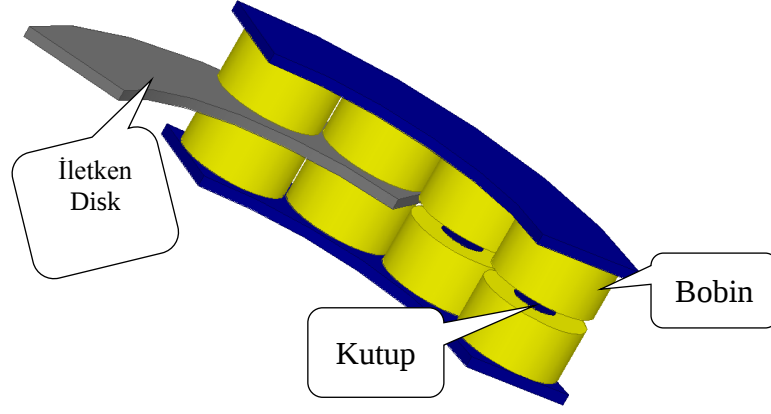
Şekil 4.2 : Girdap akımı fren sisteminin Maxwell 3D ortamındaki görünümü.

Maxwell 3D yazılımı kartezyen, küresel ve silindirik koordinat sisteminde çalışmaya olanak sağlar. Tasarlanan fren sistemi **Şekil 4.2**'de verilmiştir ve verilen yapı şekil itibarıyla silindirik olduğu için silindirik koordinat sisteminde çalışmanın çok daha kolay olacağı aşikârdır. Geometride birden fazla kutup olduğu için yazılımda periyodiklik tanımı yapılarak daha küçük geometride analiz yapılabilir. Periyodiklik tanımı yapılırken her iki yüzeydeki sınır koşulları aynı işaretle olmalıdır. Sınır koşullarının zıt işaretli olması problemin periyodik olmamasını temsil eder. Periyodiklik tanımına göre sınır koşulları tanımlanırsa problem bir kutup için çözülür lakin periyodik olmayan sınır koşulları tanımlanması halinde problem en az iki kutup için çözülür. Bu çalışmada $\frac{1}{4}$ geometride iki farklı güç mertebesine sahip bir fren sistemi için analizler yapılmıştır.

Simetri özelliği de problemin boyutunu azaltabilir fakat çalışmada yazılımın bu özelliği kullanılmamıştır. Buna ilaveten Maxwell 3D yazılımı kullanılan malzemelerin elektriksel ya da manyetik özelliklerini kullanıcının tanımlamasına olanak verir. Fakat Maxwell 3D ne manyetostatik analizde ne de geçici hal (transient) analizde sıcaklıkla değişen malzeme özelliklerini dikkate almaz. Örneğin fren sistemine ait iletken diskin elektriksel iletkenliği yazılım tarafından izotropik ve sabit olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada fren sisteminin sonlu elemanlar analizi sonuçları deneysel verilerle tam olarak uyuşmayacağı aşikârdır. Sonlu elemanlar yazılımını kullanmanın amacı bu sistemdeki manyetik, mekanik ve elektriksel özelliklerin sistemin frenleme performansına katkısının araştırılmasıdır. Bu araştırmayı yapmak ve analizlerin süresini kısaltmak amacıyla öncelikle küçük güçlü bir fren sistemi tasarlanmış ardından gerekli optimizasyonlar yapılarak daha büyük güçte bir fren sistemi tasarlanmıştır.

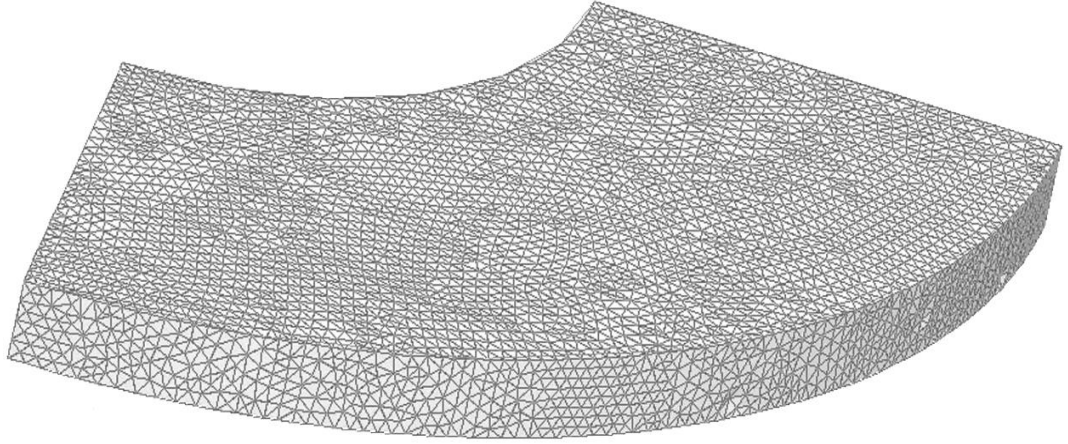


Şekil 4.3 : Tasarlanan küçük güçlü fren sisteminin $\frac{1}{4}$ geometrideki görünümü.



Şekil 4.4 : Tasarlanan orta güçlü fren sisteminin $\frac{1}{4}$ geometrideki görünümü.

Sonlu elemanlar analizinde daha doğru ve tatmin edici sonuçlar elde etmek için ağ yapısının probleme uygun seçilmesi gerekir. Ayrıca tanımlı ağ sayısı arttıkça sonuçlar da gerçeğe yakın olur. Örneğin fren sistemindeki frenleme momentinin oluşacağı iletken diskteki ağ sayısı diğer bölgelere göre sayıca daha fazla olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan yazılım, hem kendi içinde ağ tanımlama algoritması ile hem de kullanıcının kendi ağ yapısını tanımlamasına olanak vermektedir. Her iki fren sistemi içinde daha doğru sonuçlar elde edebilmek için ağ sayısı ve yapısı kullanıcı tarafından tanımlanmıştır.



Şekil 4.5 : Tasarlanan fren sisteminin $\frac{1}{4}$ geometrideki ağ yapısının görünümü.

4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yapılan Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar

Herhangi bir sonlu elemanlar yazılımı ile geçici hal analizi yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli husus zaman adımının doğru seçilmesidir. Yapılan bütün analizlerde zaman adımı 0,5 ms olarak sabit tutulmuştur.

Geçici hal analizi tasarlanan fren sistemlerini farklı hızlarda döndürme imkânı sunduğu için fren sistemlerinin moment-hız karakteristiği de elde edilmiştir. Bu kısımda ilk olarak tasarlanan küçük güçlü fren sistemi için daha sonra da orta güçlü fren sistemi için analiz sonuçları verilecektir. Verilen bütün analiz sonuçları ve şekiller devir hızı 1500 min^{-1} olduğu durumda fren sistemleri kararlı duruma eriştiklerinde alınan sonuçlar olup analiz parametreleri **Çizelge 4.1** ve **Çizelge 4.2**'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Tasarlanan küçük güçlü fren sistemi için analiz parametreleri.

Sembol	Nicelik	Değer
I	Uyarma akımı	$10A$
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
p	Kutup çifti sayısı	8
τ	Kutup adımı	90°
d	İletken disk kalınlığı	$10mm$
g	Hava aralığı genişliği	$2mm$
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	$20mm$
R	İletken disk yarıçapı	$190mm$
μ_r	İletken diskin bağıl manyetik geçirgenliği	1
σ	İletken diskin iletkenliği	$58000000\Omega^{-1}$

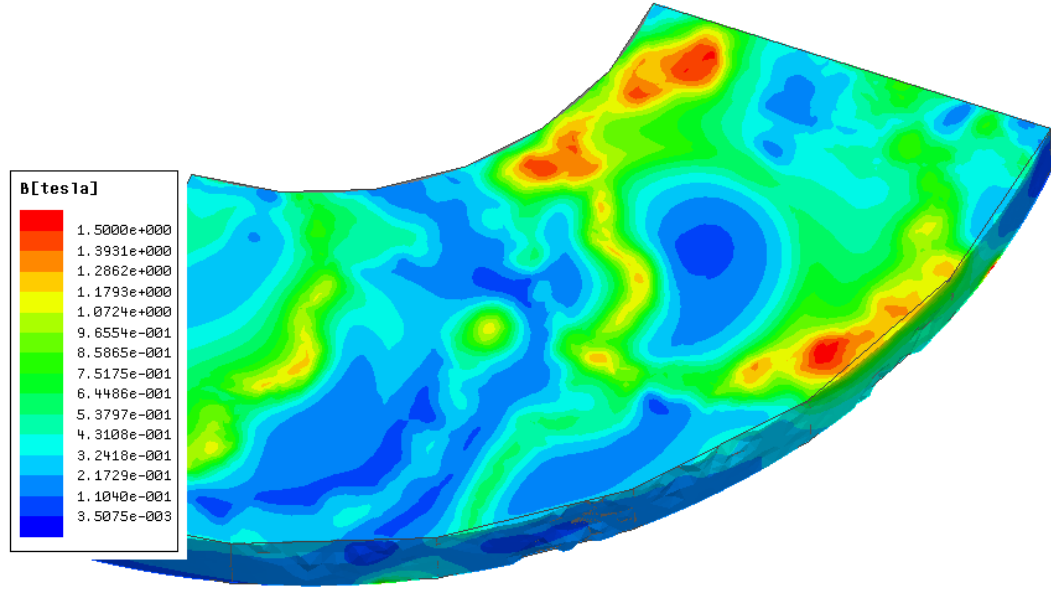
Çizelge 4.2 : Tasarlanan orta güçlü fren sistemi için analiz parametreleri.

Sembol	Nicelik	Değer
I	Uyarma akımı	$10A$
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
p	Kutup çifti sayısı	16
τ	Kutup adımı	45°
d	İletken disk kalınlığı	$10mm$
g	Hava aralığı genişliği	$2mm$
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	$20mm$
R	İletken disk yarıçapı	$300mm$
μ_r	İletken diskin bağıl manyetik geçirgenliği	1
σ	İletken diskin iletkenliği	$58000000\Omega^{-1}$

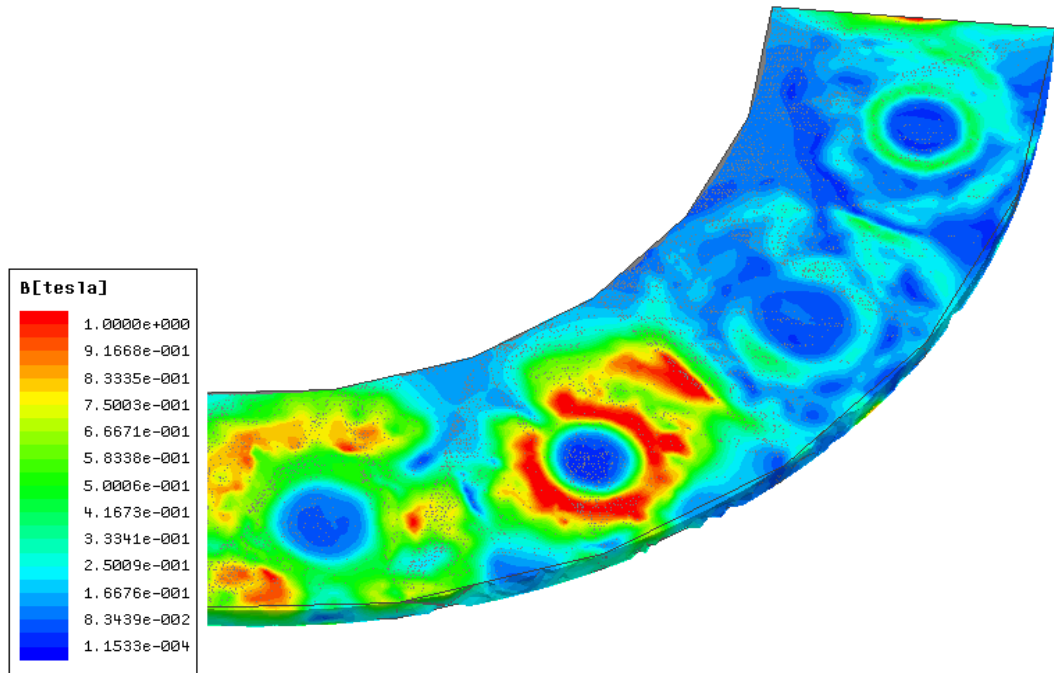
Tasarımların tekil tasarım büyüklükleri cinsinden tekil hız değeri için incelenmesinin dışında aynı tasarım farklı hız değerlerinde çalıştırılarak hıza bağlı karakteristikler de elde edilmiştir. Farklı tasarım büyüklükleri kullanılarak da benzetimler koşturulmuş ve tasarım parametrelerinin çıkış büyüklükleri üzerindeki etkisi sorgulanmıştır.

Tasarlanan her iki fren sistemi için de analizler sırasında iletken disk alüminyum, kutuplar ise çelik-1010 seçilmiştir.

Tasarlanan girdap akımı frenleri için yapılan analizlerden elde edilen iletken diskin üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları **Şekil 4.5** ve **Şekil 4.6** 'da verilmiştir.

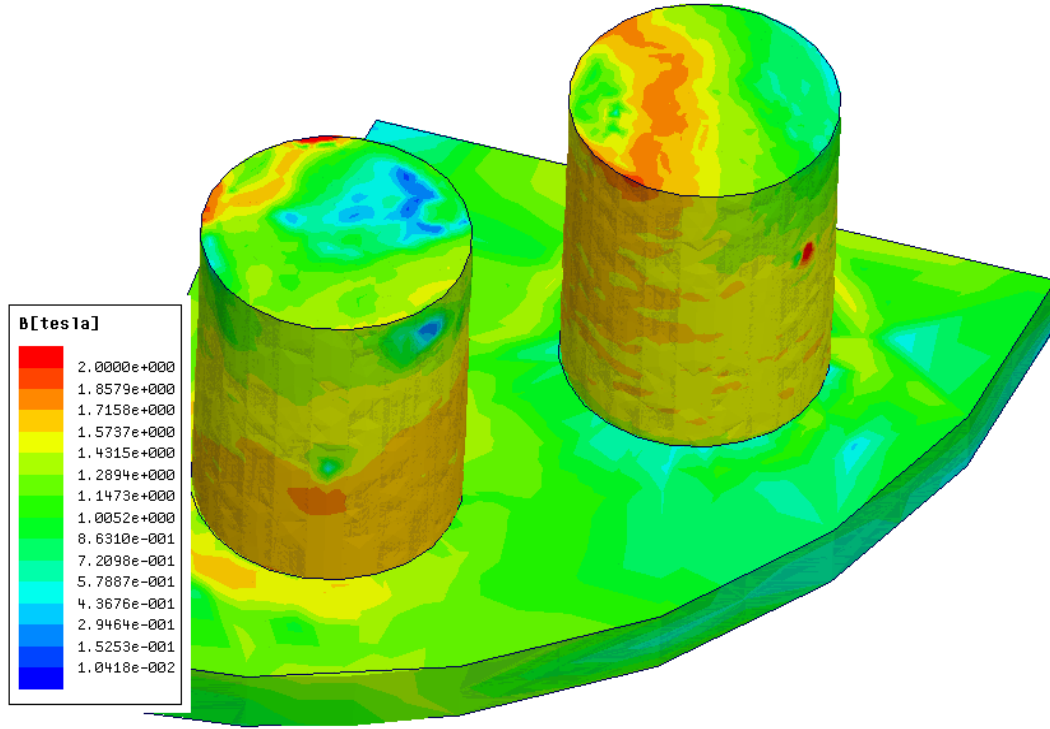


Şekil 4.6 :Küçük güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

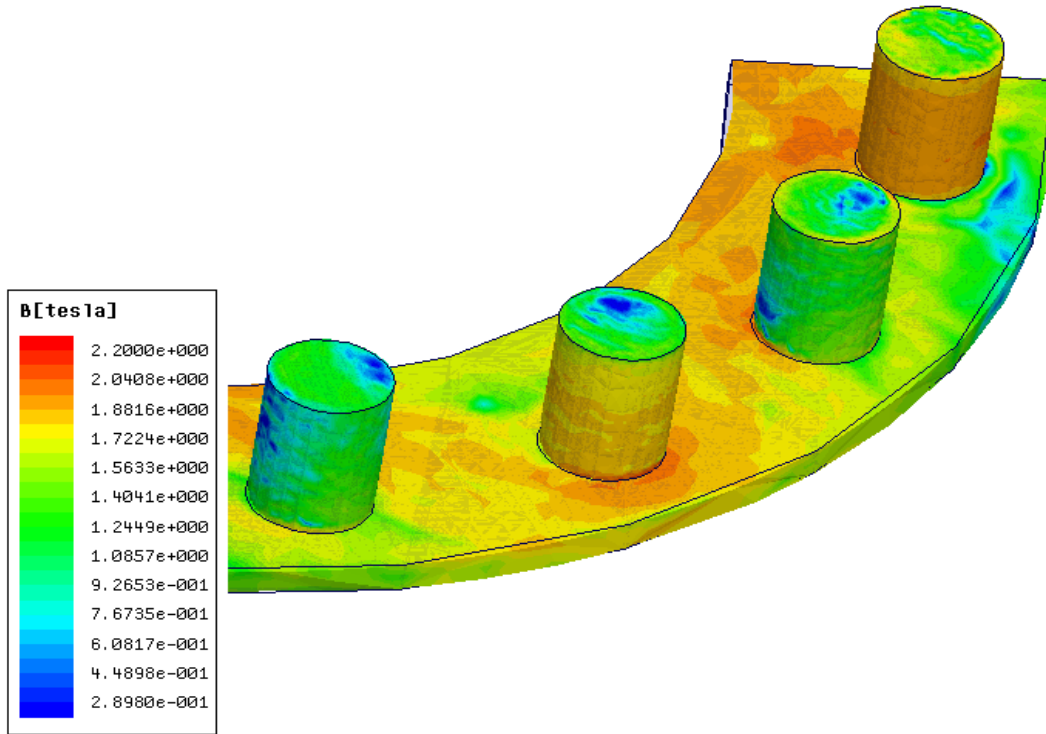


Şekil 4.7 :Orta güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

Tasarlanan girdap akımı frenleri için yapılan analizlerden elde edilen kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 'de verilmiştir.

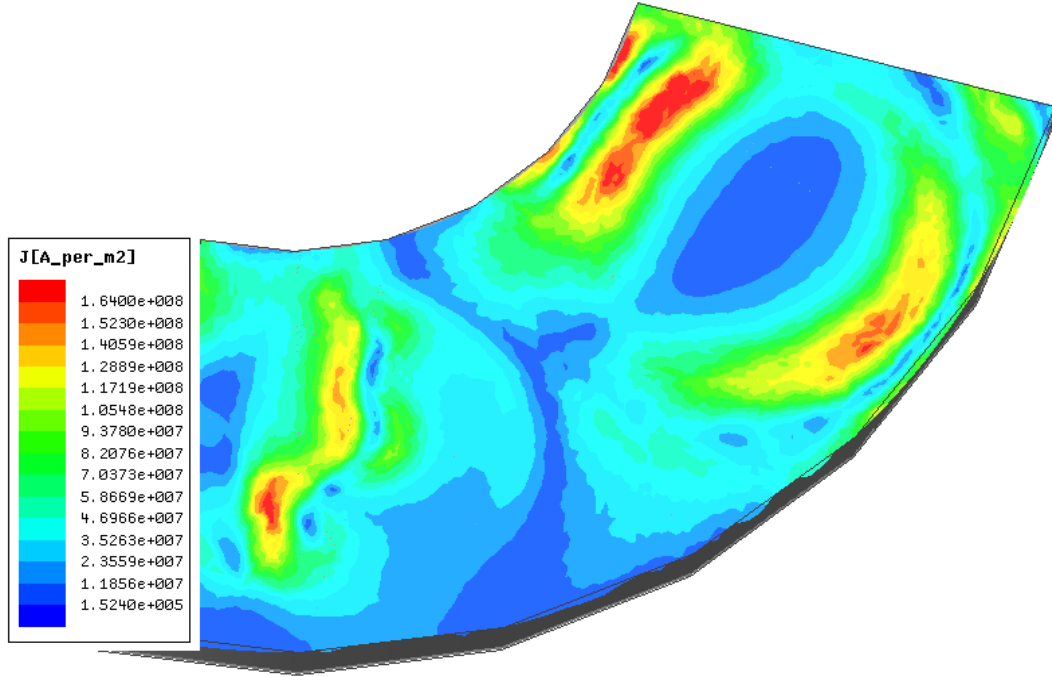


Şekil 4.8 :Küçük güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

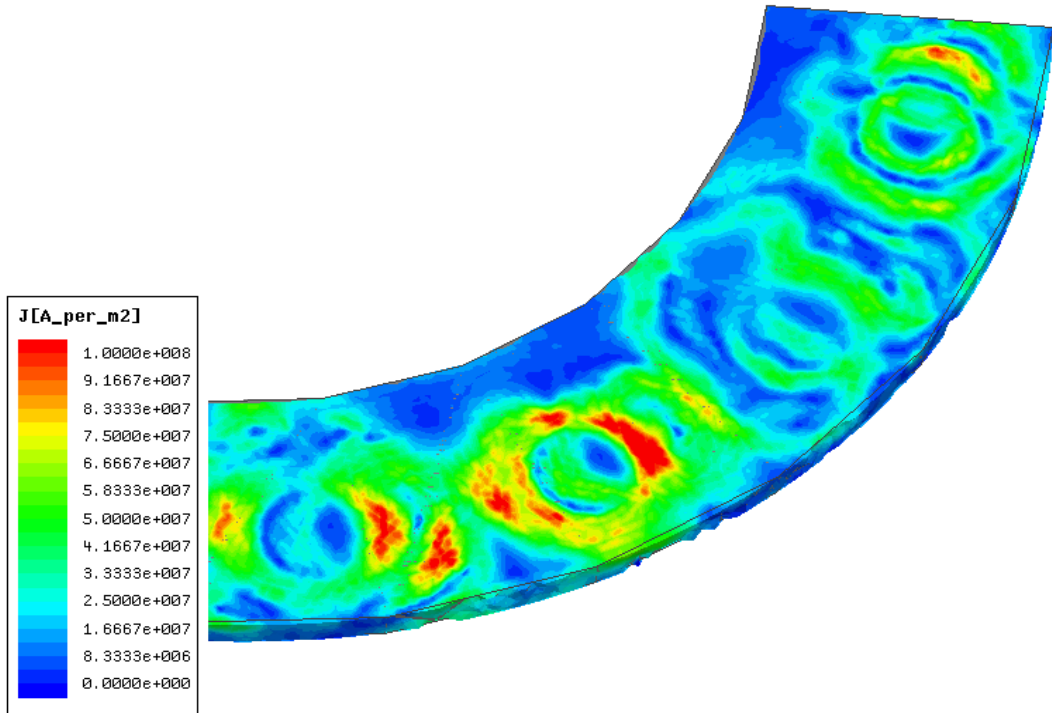


Şekil 4.9 :Orta güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

Tasarlanan girdap akımı frenleri için yapılan analizlerden elde edilen girdap akımları yoğunluğu dağılımları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 'de verilmiştir.

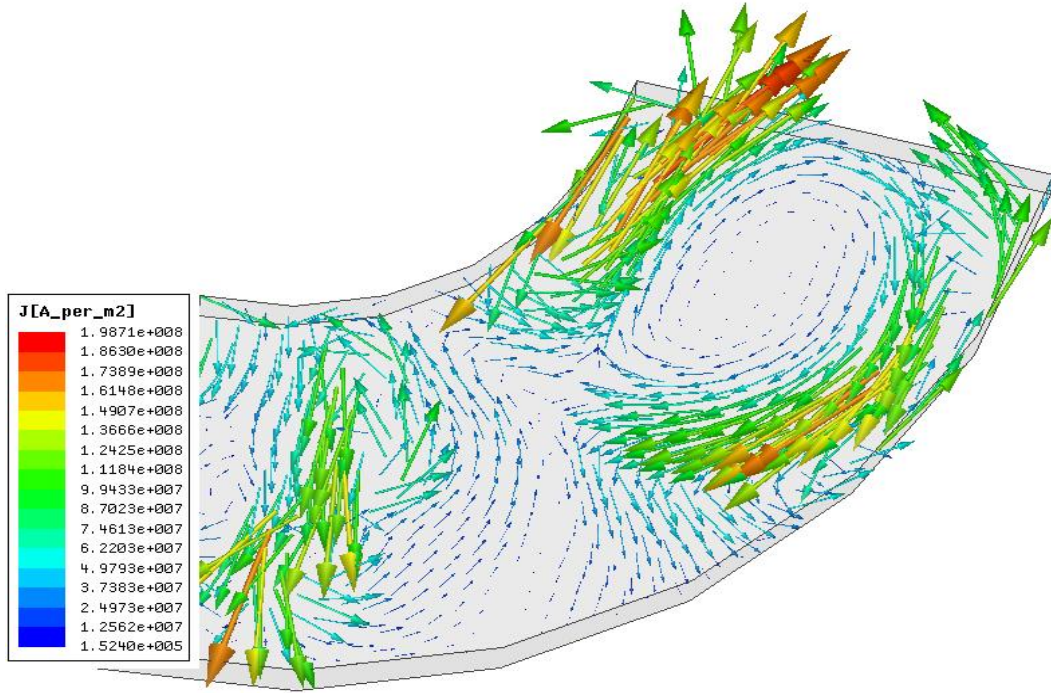


Şekil 4.10 :Küçük güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarının yoğunluğu.

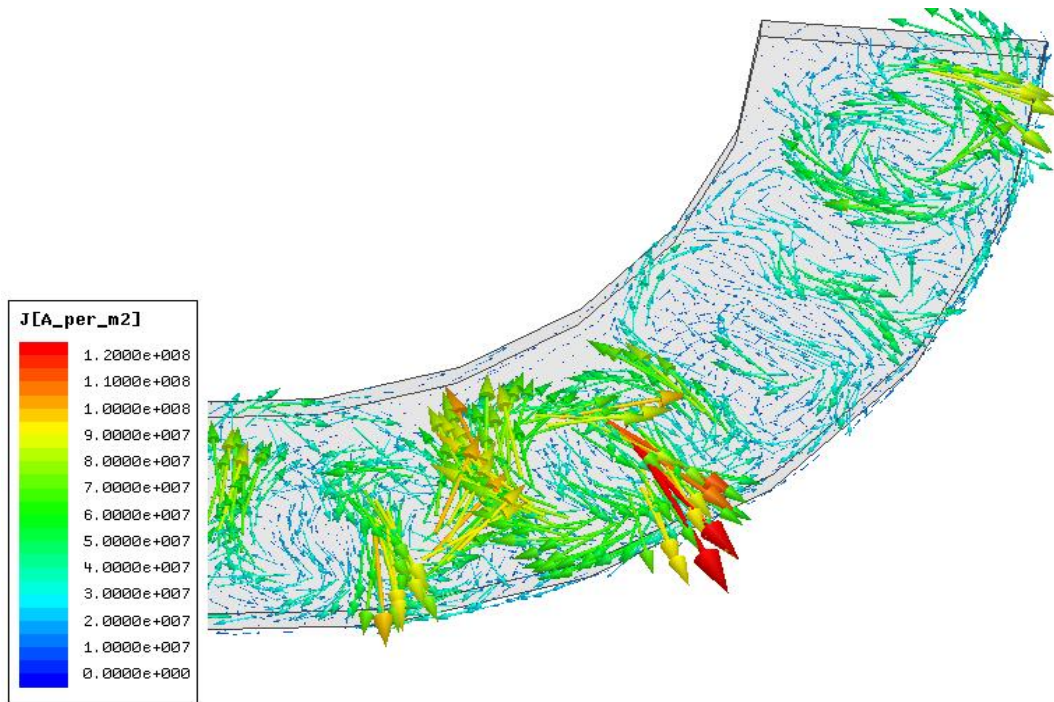


Şekil 4.11 :Orta güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarının yoğunluğu.

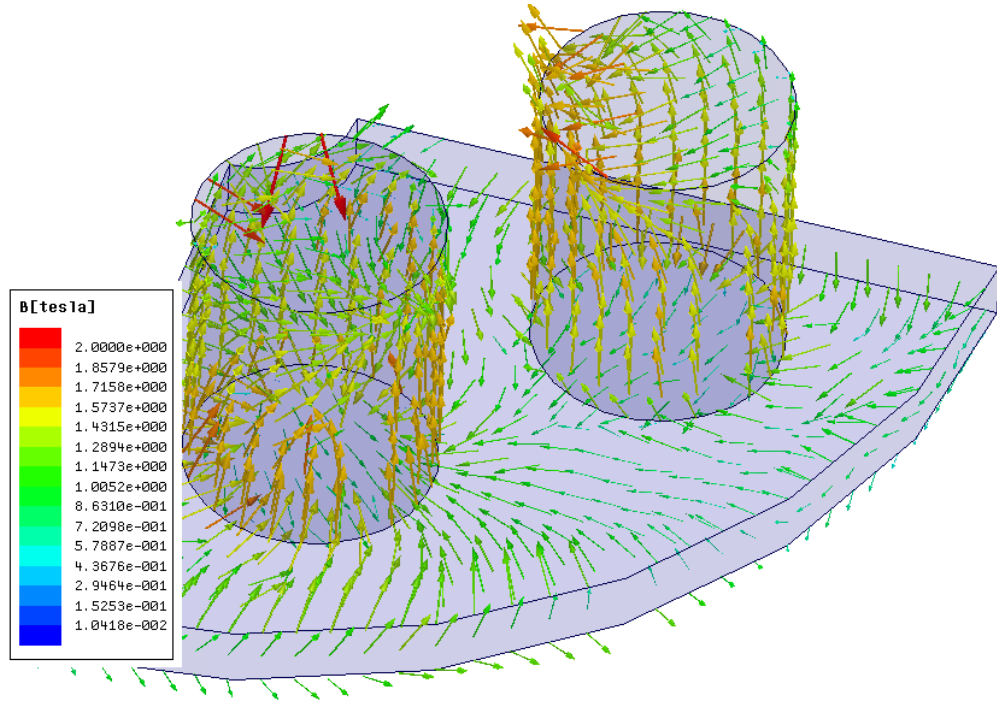
Tasarlanan girdap akımı frenleri için yapılan analizlerden elde edilen iletken disk üzerindeki girdap akımlarını vektörleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 'te verilmiştir.



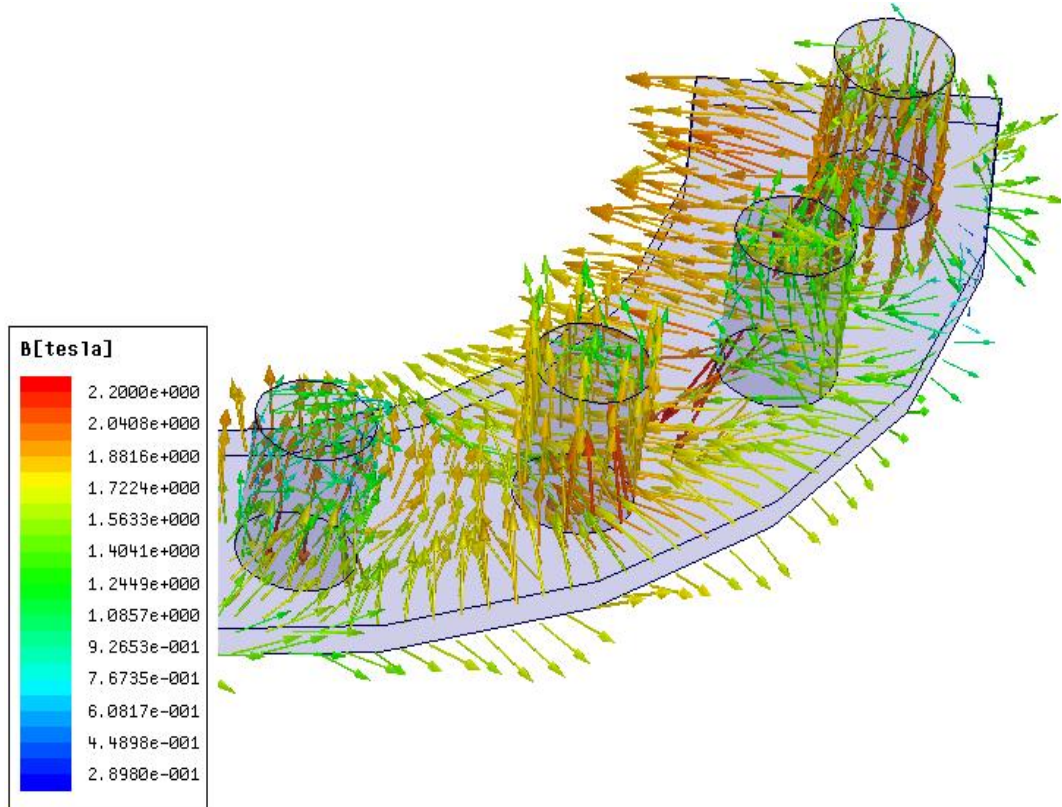
Şekil 4.12 :Küçük güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarını vektörleri.



Şekil 4.13 :Orta güçlü fren sistemine ait iletken disk üzerindeki girdap akımlarını vektörleri.

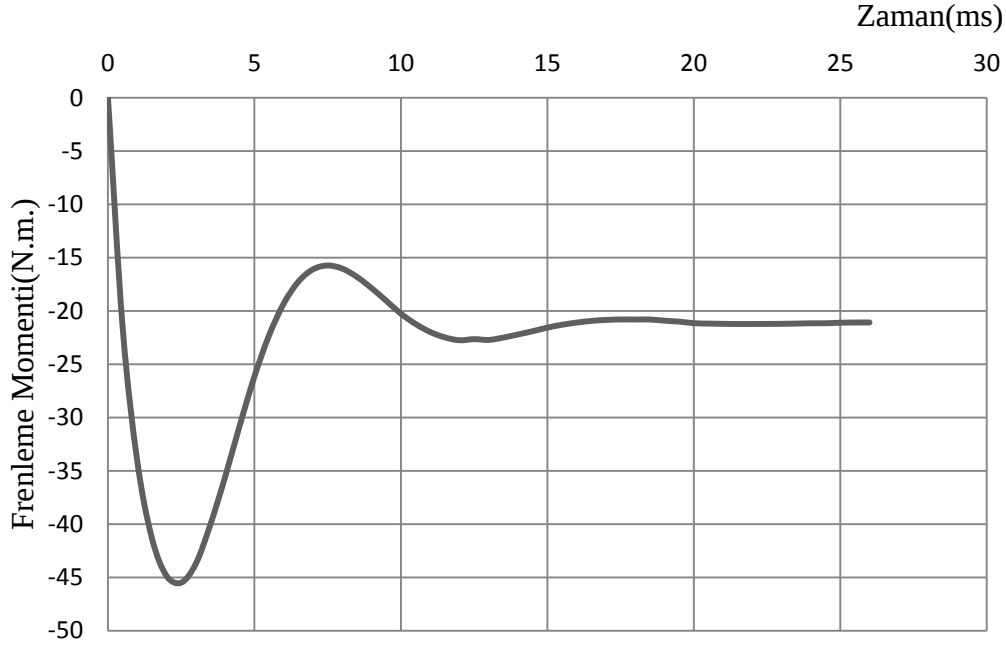


Şekil 4.14 : Küçük güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu vektörleri.



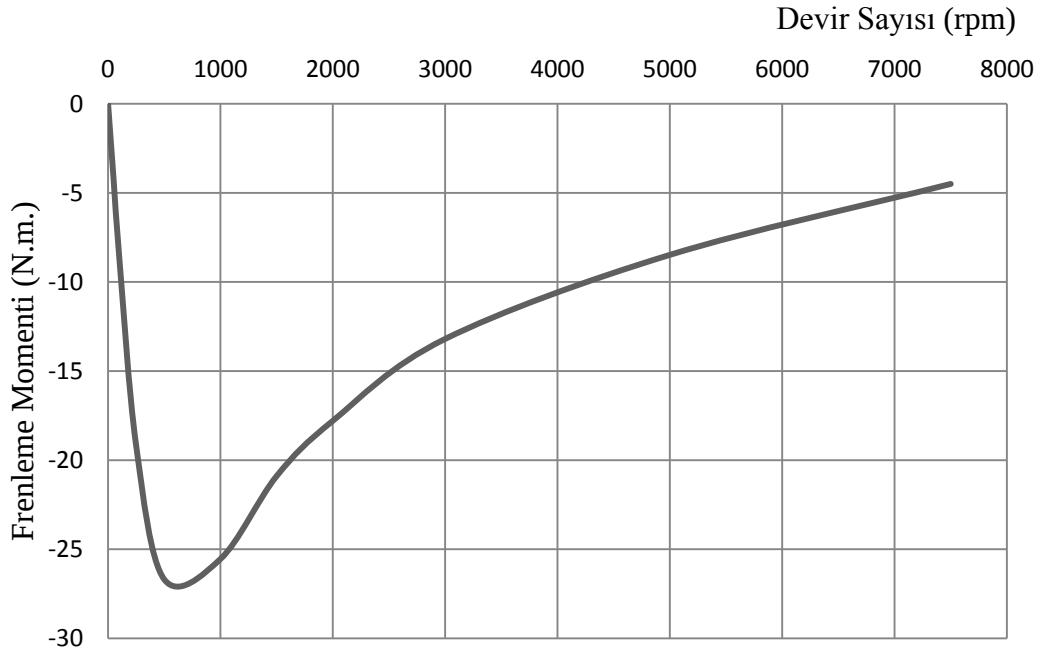
Şekil 4.15 : Orta güçlü fren sistemine ait kutuplar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu vektörleri.

Fren sisteminin 1500 min^{-1} hızdaki geçici hal analizi sonucu elde edilen frenleme momenti-zaman grafiği **Şekil 4.16**'da verilmiştir.



Şekil 4.16 :Küçük güçlü fren sistemine ait 1500 min^{-1} için yapılan analiz sonucunda elde edilen frenleme momenti-zaman grafiği.

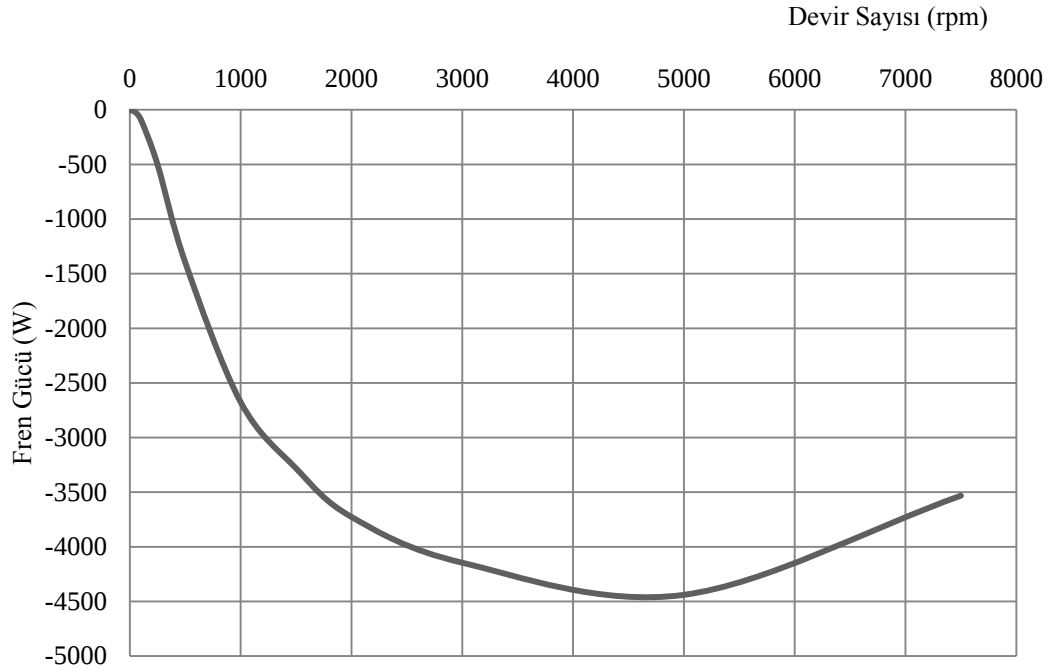
Farklı hızlarda yapılan analizler sonucunda tasarlanan girdap akımı fren sistemi için moment-hız karakteristiği belirlenmiştir. İletken diskin saf alüminyum malzeme olduğunda elde edilen moment-hız karakteristiği **Şekil 4.17**'da verilmiştir.



Şekil 4.17 : Küçük güçlü fren sistemine ait moment-hız karakteristiği.

Tasarlanan fren sistemine ait moment-hız karakteristiğinden faydalanarak iletken diskin üzerinde harcanan güç yani frenleme gücü hesaplanabilir.

Küçük güçlü fren sistemine ait frenleme gücü- hız karakteristiği **Şekil 4.18**'de verilmiştir.



Şekil 4.18 : Küçük güçlü fren sistemine ait frenleme gücü-hız karakteristiği.

Tasarlanan orta güçlü girdap akımı freni içinde **Şekil 4.16**, **Şekil 4.17** ve **Şekil 4.18** benzer olacaktır. Orta güçlü girdap akımı freni için frenleme momenti-hız karakteristiği ve fren gücü-hız karakteristiği tasarım parametrelerinin frenleme performansına etkisi bölümünde, kutup sayısının frenleme momentine etkisi alt başlığı altında verilmiştir.

4.4 Tasarım Parametrelerinin Fren Performansına Etkisi

Bu kısımda fren sistemi farklı tasarım parametreleri için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar ile bu tasarım parametrelerinin fren sisteminin performansına etkisi araştırılmıştır. Her bir analiz on bir farklı hız mertebesi için koşturulmuş, elde edilen sonuçlar ile her bir tasarım parametresi için frenleme momenti ve frenleme gücü hız karakteristiği çizilmiştir. Ayrıca bazı tasarım parametreleri için tasarım parametresi ile en yüksek frenleme momentinin ve kritik hız değerinin nasıl değiştiği de verilen sonuçlar arasındadır.

4.4.1 Elektriksel iletkenliğin etkisi

Sonlu elemanlar yöntemi ile uyarma akımı, hava aralığı, iletken disk kalınlığı, iletken diskin manyetik özelliklerinin sabit tutularak, farklı iletkenliklere sahip disklerle yapılan analiz sonuçlarına göre elde edilen moment-hız karakteristiği ve frenleme gücü-hız karakteristiği **Şekil 4.19** ve **Şekil 4.20**'de verilmiştir.

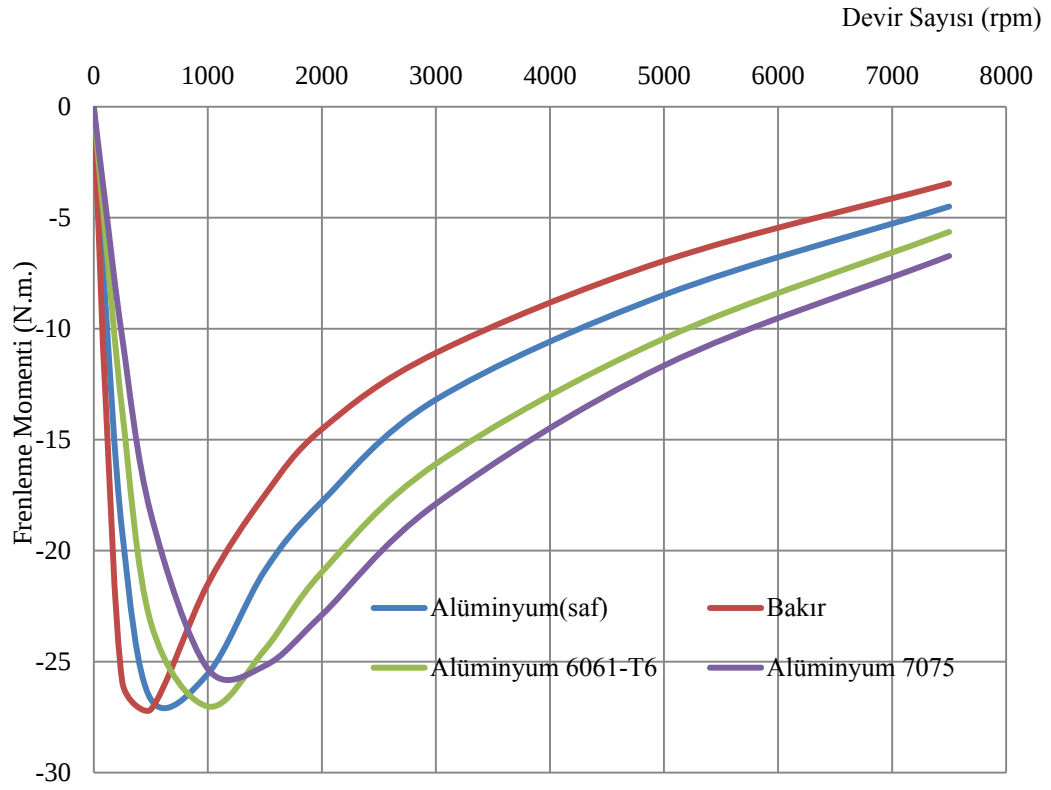
Çizelge 4.3 : Elektriksel iletkenliğin etkisini incelemek için yapılan analizlerde sabit tutulan analiz parametreleri.

Sembol	Nicelik	Değer
I	Uyarma akımı	10A
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
p	Kutup çifti sayısı	8
τ	Kutup adımı	90°
d	İletken disk kalınlığı	10mm
g	Hava aralığı genişliği	2mm
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	20mm
R	İletken disk yarıçapı	190mm
μ_r	İletken diskin bağıl manyetik geçirgenliği	1

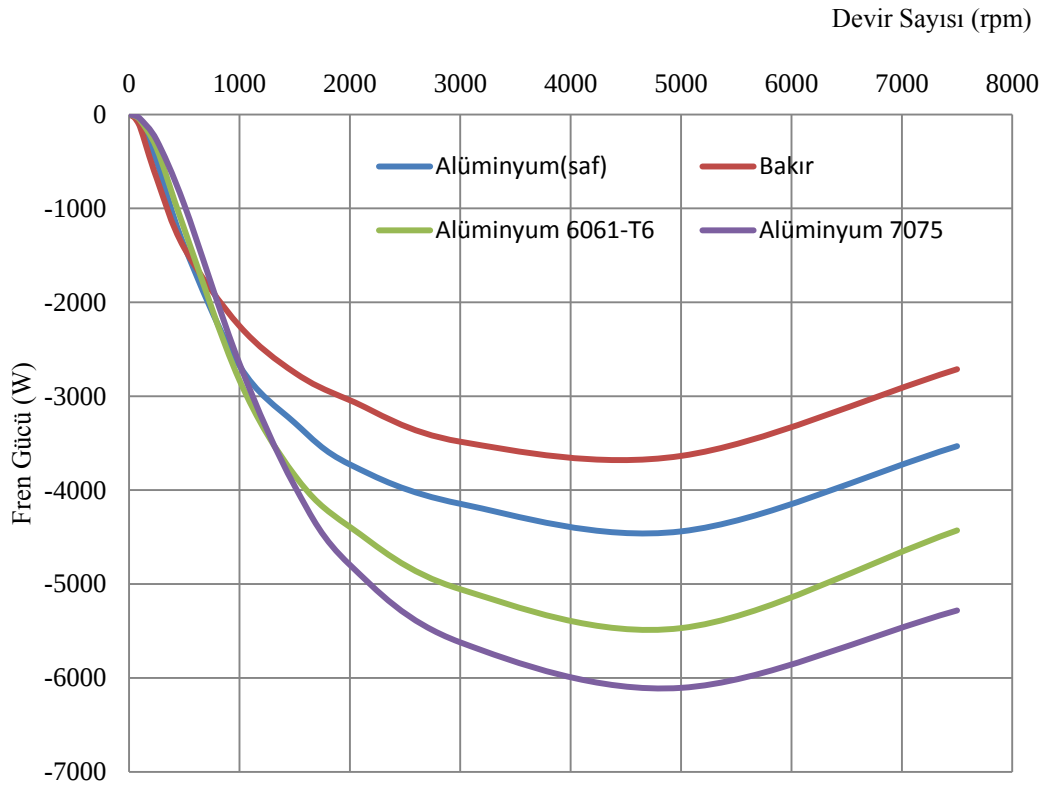
Çizelge 4.4 : Fren sistemine elektriksel iletkenliğin etkisini incelemek için kullanılan malzemelerin elektriksel özellikleri.

Malzeme	İletkenlik	Malzeme	İletkenlik
Alüminyum 6061-T6	24590000Ω ⁻¹	Bakır	38000000Ω ⁻¹
Alüminyum 7075	18560000Ω ⁻¹	Alüminyum (saf)	58000000Ω ⁻¹

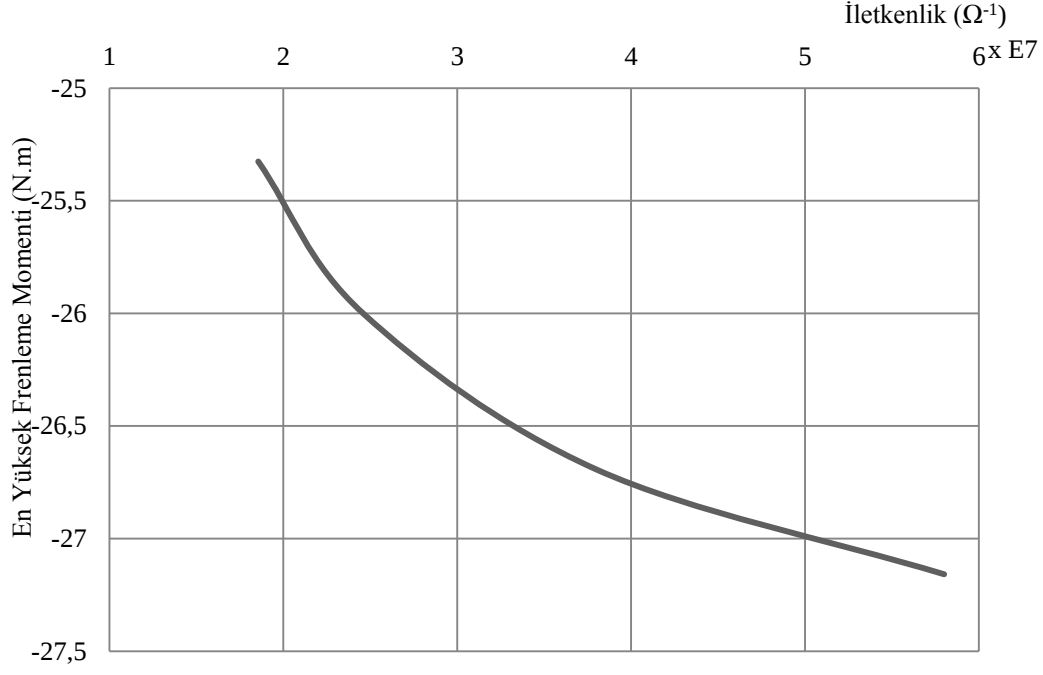
Şekil 4.21 ve **Şekil 4.22**'de verilen grafiklerde farklı iletkenliğe sahip manyetik olmayan malzemelerle yapılan analizlerde iletkenliğin değişiminin kritik hız değerini ve en yüksek momenti etkilediği görülmektedir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir: İletken diskin direncinin artması yüzeyden akan girdap akımlarının daha az halkalanmasına ve girdap akımlarının yoğunluğunun azalmasına neden olur. Girdap akımlarının daha az halkalanması radyal yöndeki manyetik akı yoğunluğunun azalmasına neden olur. Bu sebeple manyetik olmayan malzemeler için iletken diskin direncinin artması en yüksek frenleme momentinin azalmasına neden olur.



Şekil 4.19 : Farklı malzemeler için frenleme momenti-hız karakteristiği.



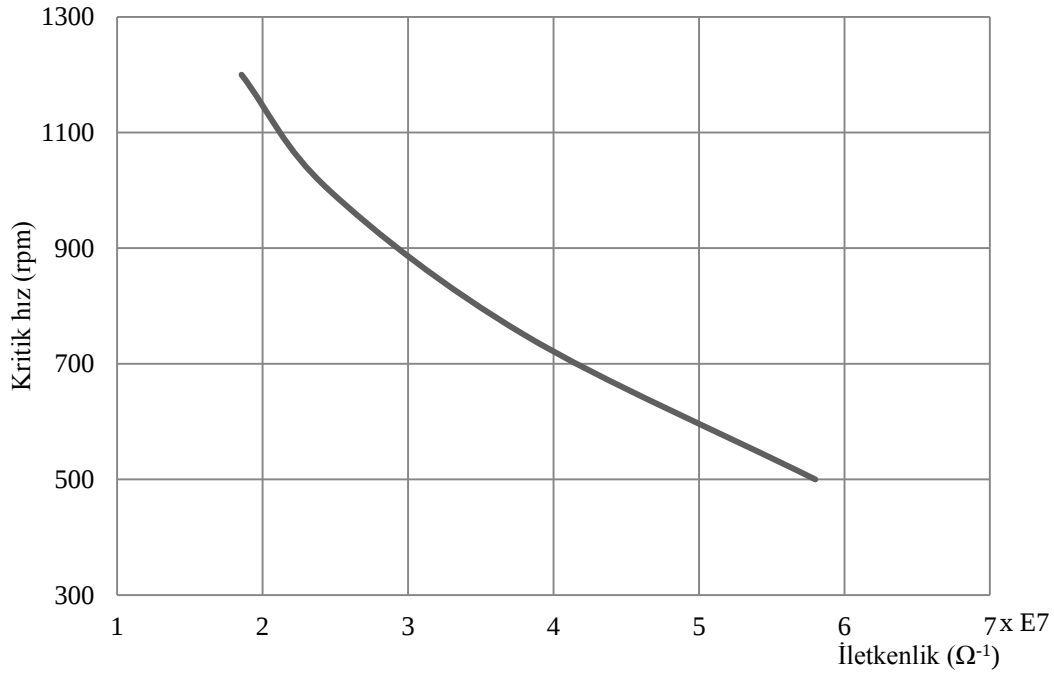
Şekil 4.20 : Farklı malzemeler için frenleme gücü-hız karakteristiği.



Şekil 4.21 : Disk iletkenliğinin en yüksek frenleme momentine etkisi.

İletken disk ferromanyetik bir malzemedan seçildiğinde bağıl geçirgenlik ve manyetik doymadan dolayı moment-hız karakteristiğindeki değerler daha farklı çıkacağı aşikârdır.

Elde edilen benzetim sonuçları Alüminyum 7075 malzemesinin iletken disk seçimi için hem elektriksel hem de mekanik açıdan daha uygun olacağını göstermiştir.



Şekil 4.22 : Disk iletkenliğinin kritik hız değerine etkisi.

4.4.2 Disk kalınlığının etkisi

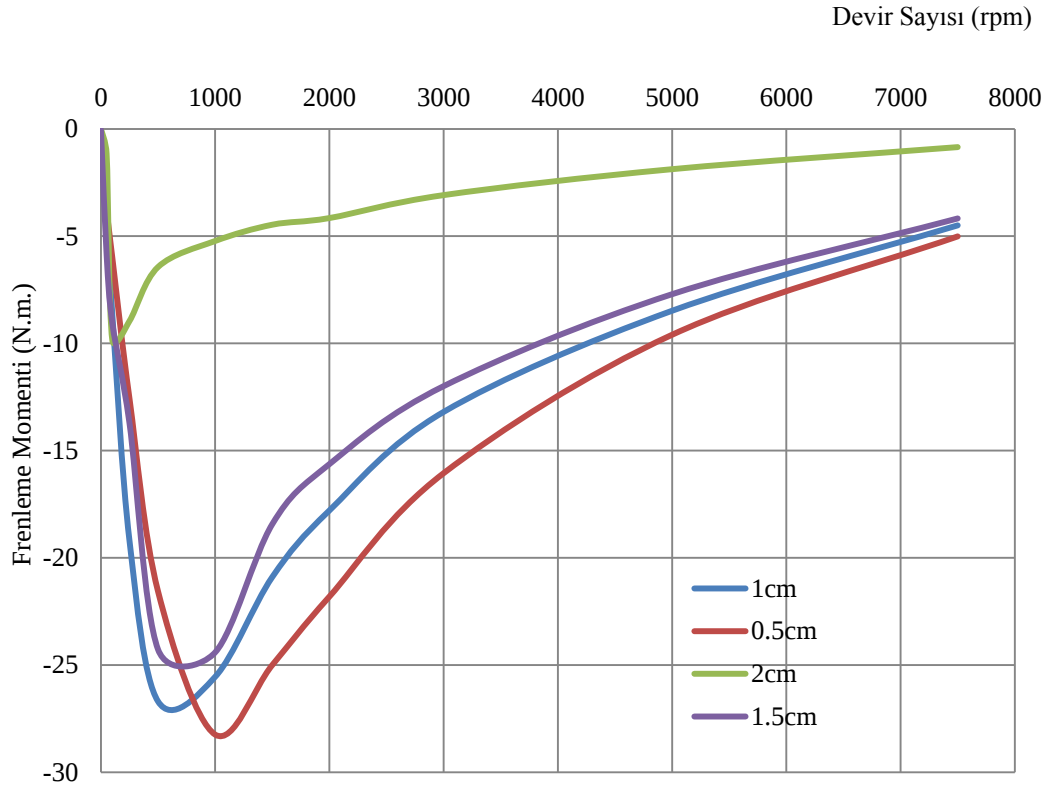
Disk kalınlığının frenleme momentinin etkisini incelemek için yapılan analizlerde hava aralığı, uyarma akımı, iletken diskin manyetik ve elektriksel özellikleri, kutup sayısı sabit değerde tutulmuş, farklı disk kalınlıkları için analizler yapılmıştır. Bu analizler sırasında sabit tutulan analiz parametreleri **Çizelge 4.5**'te verilmiştir.

Disk kalınlığının artması girdap akımlarının aktığı yolun daha fazla genişlemesine neden olur. Artan kalınlıkla iletken diskin direnci de artar, bu nedenle kritik hız değeri değişir ve en yüksek frenleme momenti başka bir noktaya kayar. İletken diskin kalınlığı diskin içinden geçen akı miktarını da değiştirir. Bu nedenle disk kalınlığının çok ince olması istenmez. Disk kalınlığını belirleyen tek etmen içinden geçen akı miktarı değildir. Buna ilaveten disk üzerindeki endüklenen momente mukavim olacak şekilde seçilmelidir. Tasarım aşamasında mekanik dayanım açısından en uygun disk kalınlığının 10mm olduğu saptanmıştır.

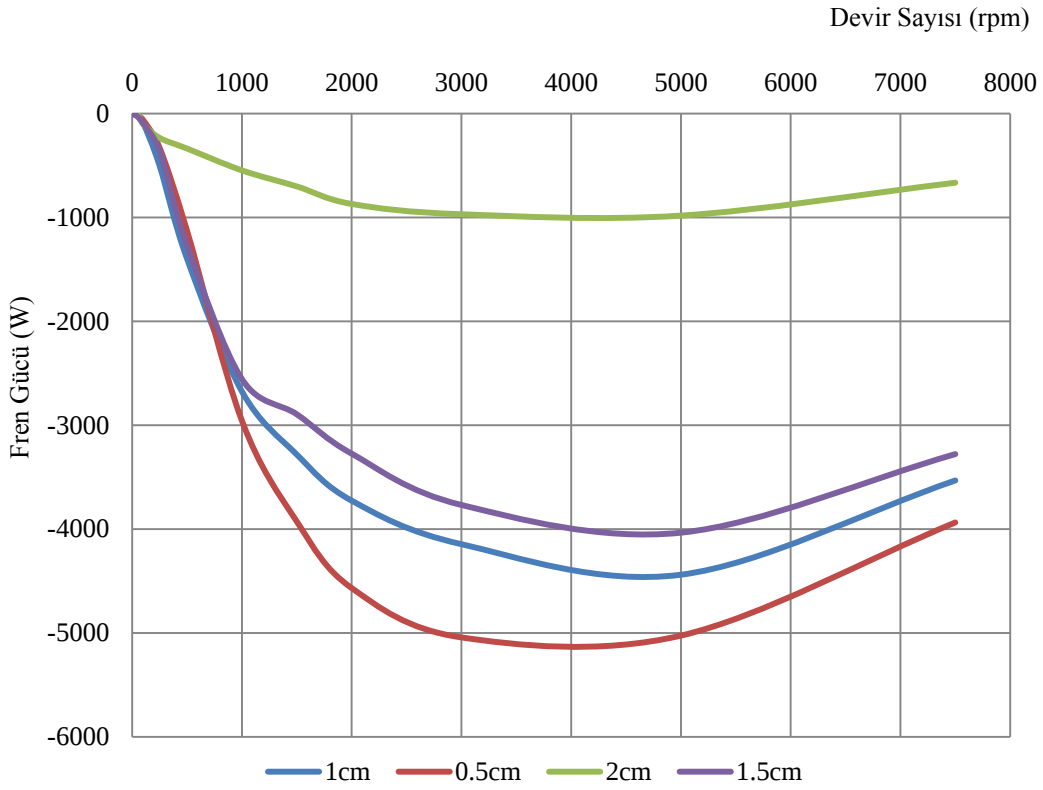
Çizelge 4.5 : Disk kalınlığının frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.

Sembol	Nicelik	Değer
I	Uyarma akımı	10A
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
p	Kutup çifti sayısı	8
τ	Kutup adımı	90°
g	Hava aralığı genişliği	2mm
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	20mm
R	İletken disk yarıçapı	190mm
μ_r	İletken diskin bağlı manyetik geçirgenliği	1
σ	İletken diskin iletkenliği	58000000Ω ⁻¹

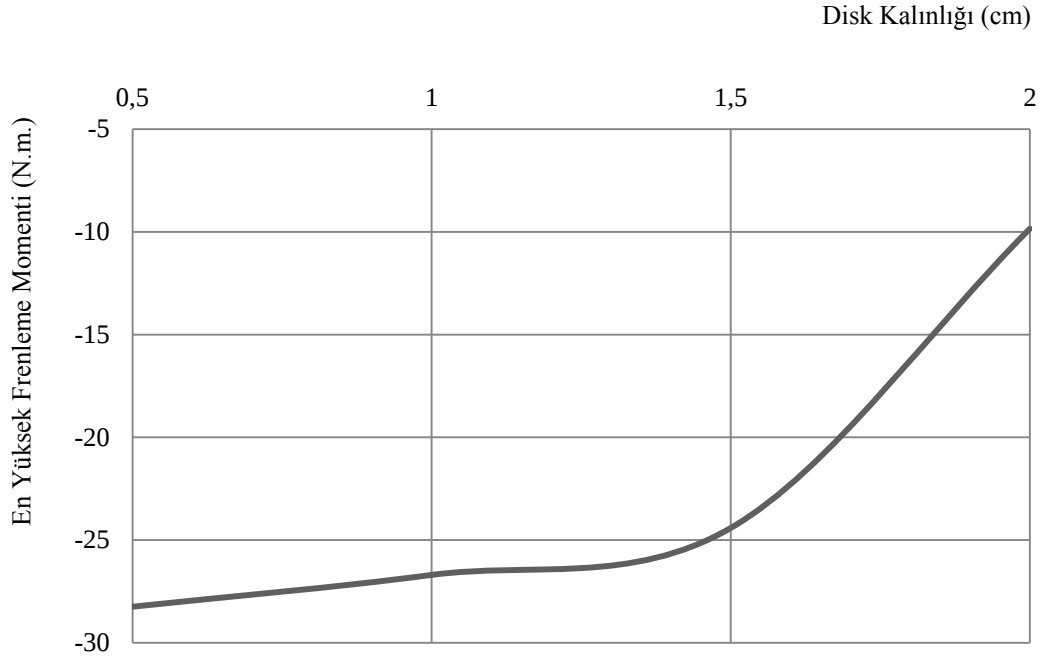
Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çok sayıda analizden sonra elde edilen moment-hız karakteristiği ve frenleme gücü-hız karakteristiği **Şekil 4.23** ve **Şekil 4.24**'te verilmiştir. Buna ek olarak disk kalınlığındaki değişimin en yüksek frenleme momentine ve kritik hıza olan etkisi **Şekil 4.25** ve **Şekil 4.26**'da verilmiştir.



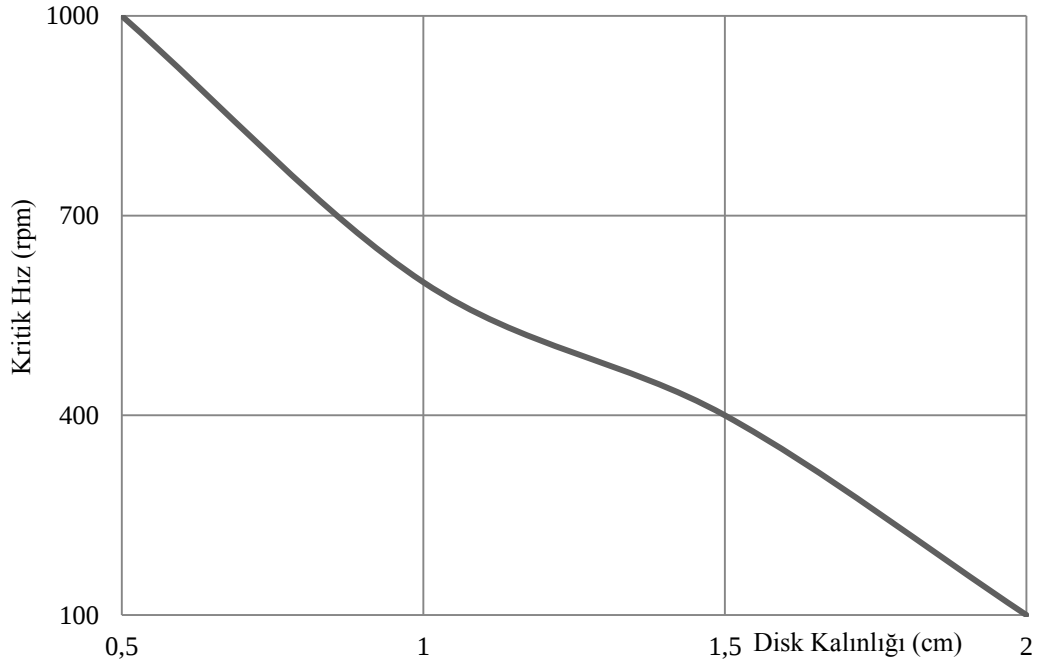
Şekil 4.23 : İletken diskin farklı kalınlıkları için moment-hız karakteristiği.



Şekil 4.24 : İletken diskin farklı kalınlıkları için fren gücü-hız karakteristiği.



Şekil 4.25 : İletken disk kalınlığının en yüksek frenleme momentine etkisi.



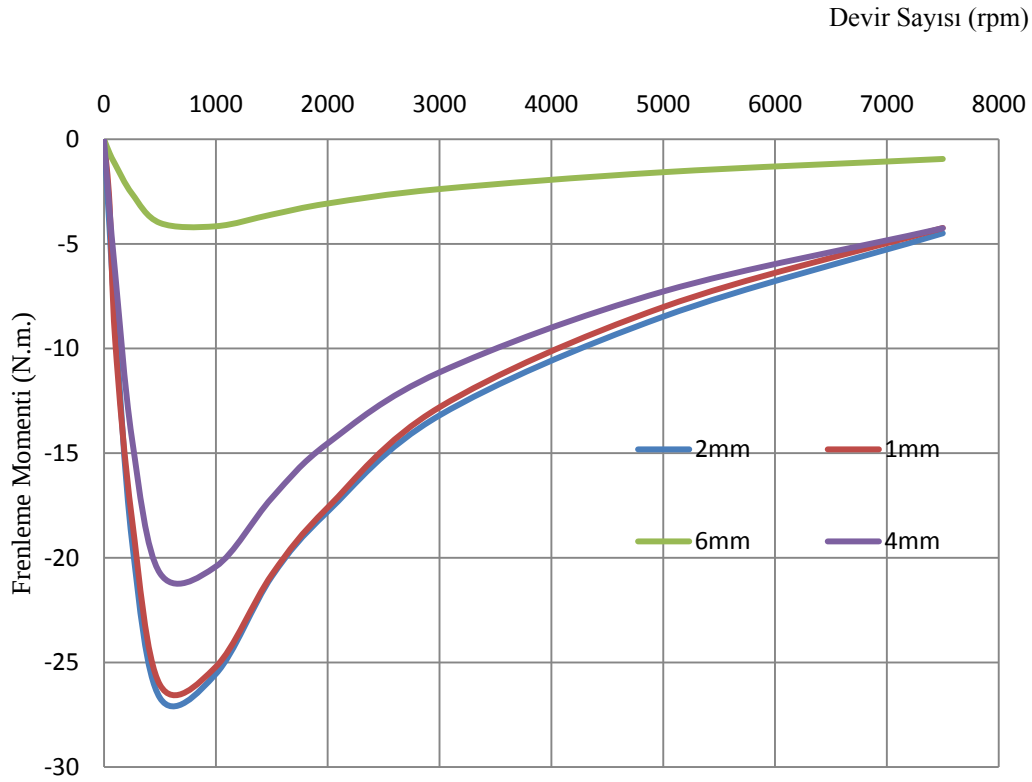
Şekil 4.26 : İletken disk kalınlığının en yüksek frenleme momentine etkisi.

4.4.3 Hava aralığının etkisi

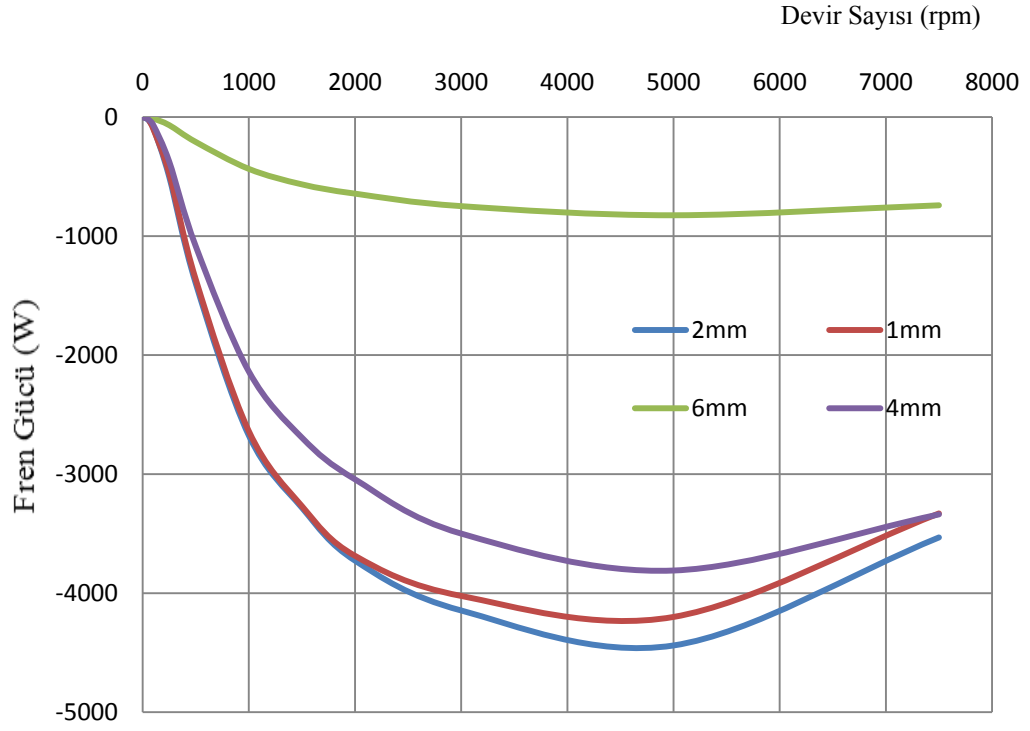
Manyetik olmayan iletken disk için uyarma akımı, disk kalınlığı, iletken diskin manyetik ve elektriksel özellikleri sabit tutularak farklı hava aralıklarında analizler yapılmıştır. Sabit kabul edilen analiz parametreleri **Çizelge 4.6'**da verilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen frenleme moment-hız karakteristiği ve frenleme gücü hız karakteristiği **Şekil 4.27** ve **Şekil 4.28'**de verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Hava aralığının frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.

Sembol	Nicelik	Değer
I	Uyarma akımı	10A
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
p	Kutup çifti sayısı	8
τ	Kutup adımı	90°
d	İletken disk kalınlığı	10mm
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	20mm
R	İletken disk yarıçapı	190mm
μ_r	İletken diskin bağıl manyetik geçirgenliği	1
σ	İletken diskin iletkenliği	$58000000\Omega^{-1}$



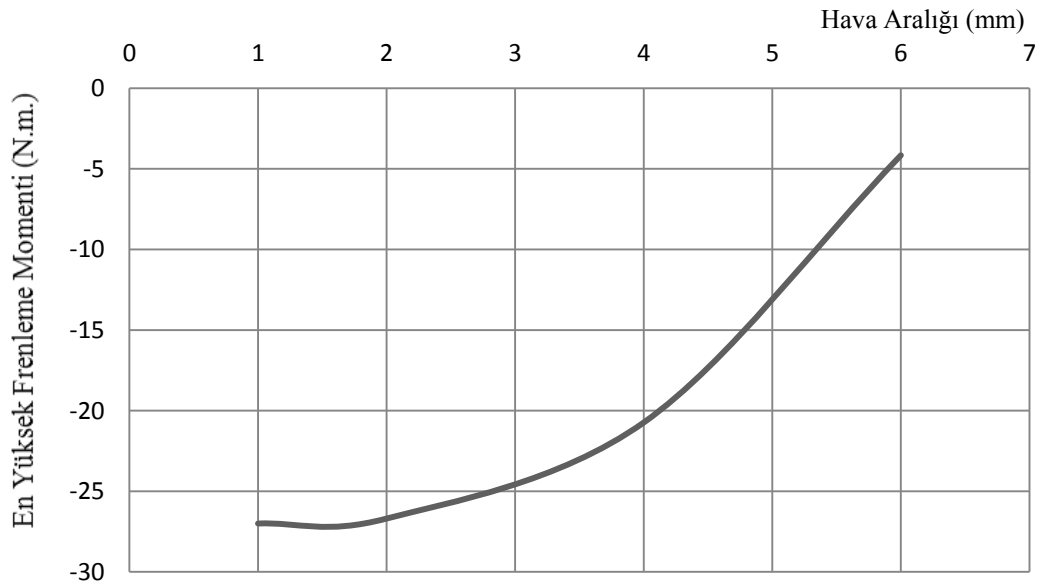
Şekil 4.27 : Farklı hava aralıkları için moment-hız karakteristiği.



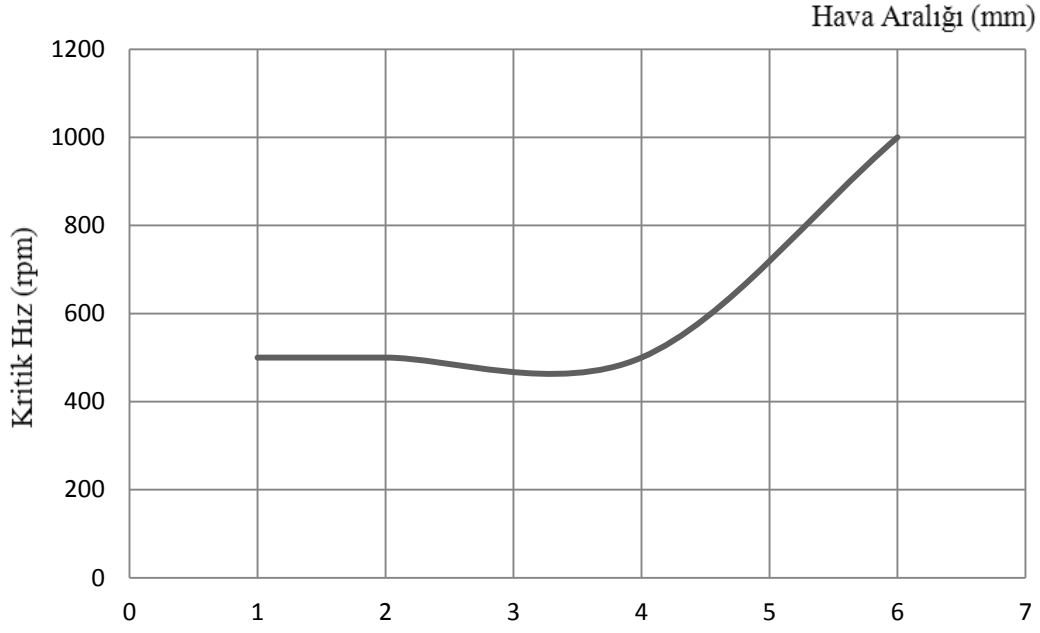
Şekil 4.28 : Farklı hava aralıkları için frenleme gücü-hız karakteristiği.

Hava aralığı elektromıknatıslar tarafından uyarılan manyetik devrenin relüktansını etkiler. İletken diskin manyetik özelliklerine göre de bu etki değişir, örneğin ferromanyetik bir disk seçimi yapılırsa diskin manyetik geçirgenliğinden dolayı bu etkinin daha fazla olacağı aşikârdır.

Analizler sonucunda elde edilen; hava aralığı değişiminin en yüksek frenleme momentine ve kritik hıza etkisi **Şekil 4.29** ve **Şekil 4.30**'da verilmiştir.



Şekil 4.29 : Hava aralığının değişiminin için en yüksek frenleme momentine etkisi.



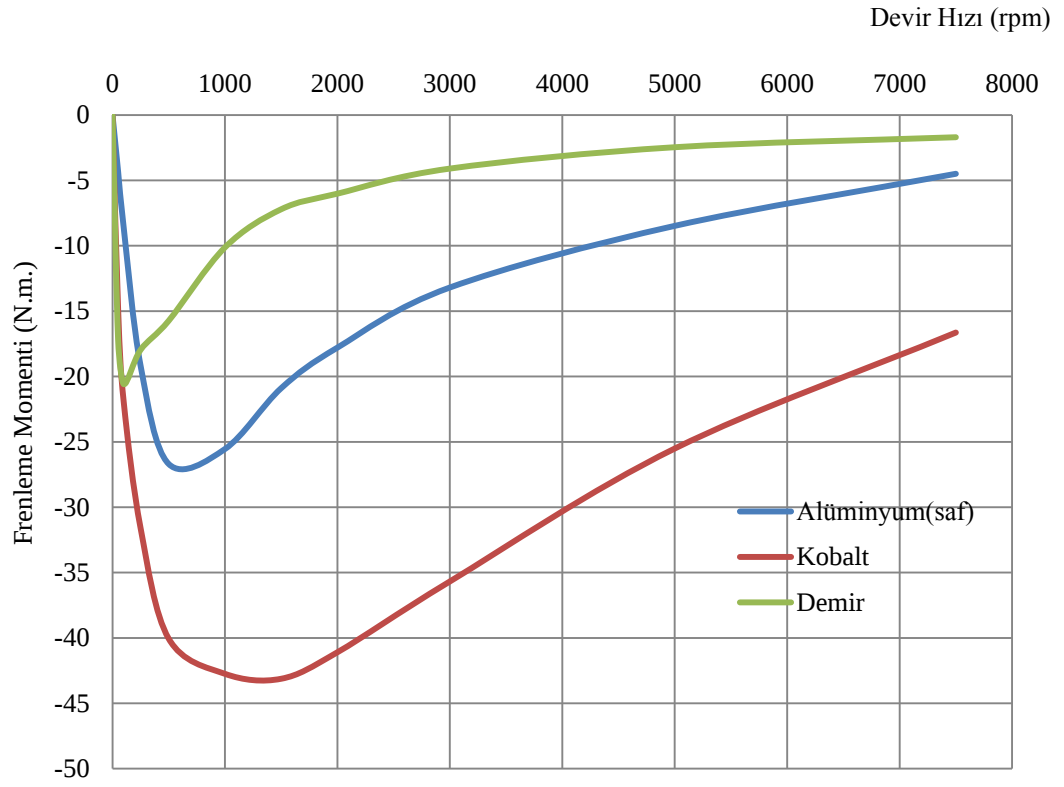
Şekil 4.30 : Hava aralığının değişiminin kritik hız değerine etkisi.

4.4.4 Manyetik geçirgenliğin etkisi

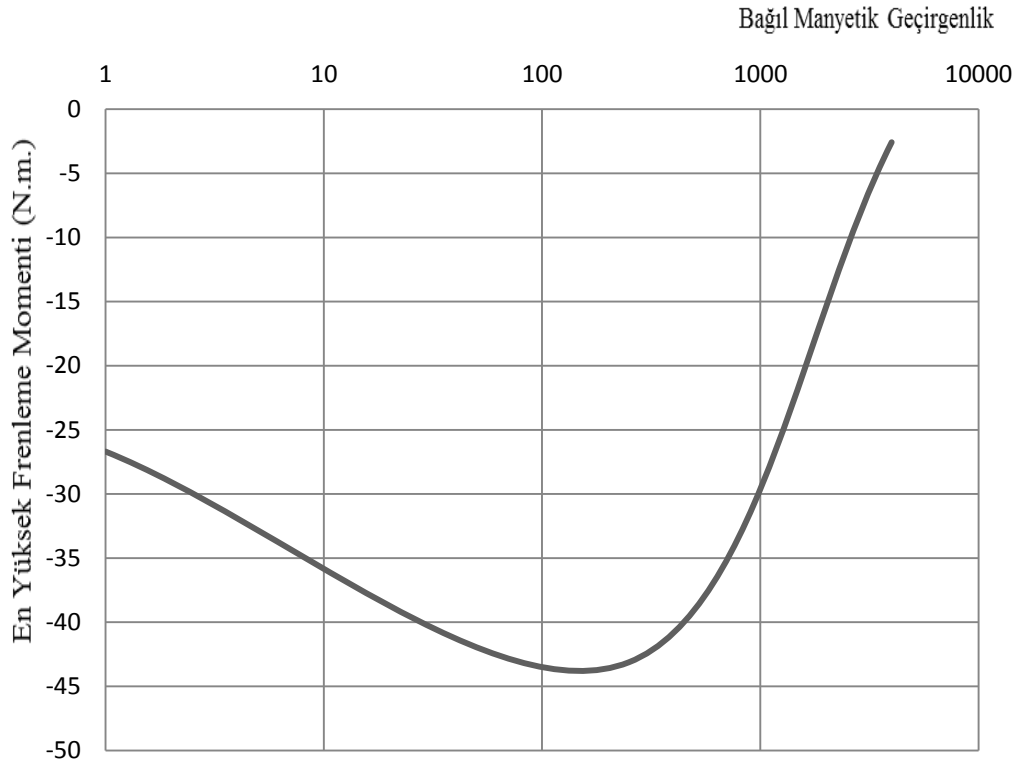
Bağıl manyetik geçirgenlik herhangi bir girdap akımı freninde verilen akım yoğunluğuna karşı ne kadar manyetik akı yoğunluğu oluşacağını belirler. Bağıl manyetik geçirgenliğin etkisini incelemek amacıyla uyarma akımı, hava aralığı, kutup sayısı, iletken diskin kalınlığı ve iletken diskin elektriksel özellikleri sabit tutularak değişik manyetik geçirgenliğe sahip üç adet malzeme için analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen frenleme momenti-hız karakteristiği **Şekil 4.31**'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Manyetik geçirgenliğin frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.

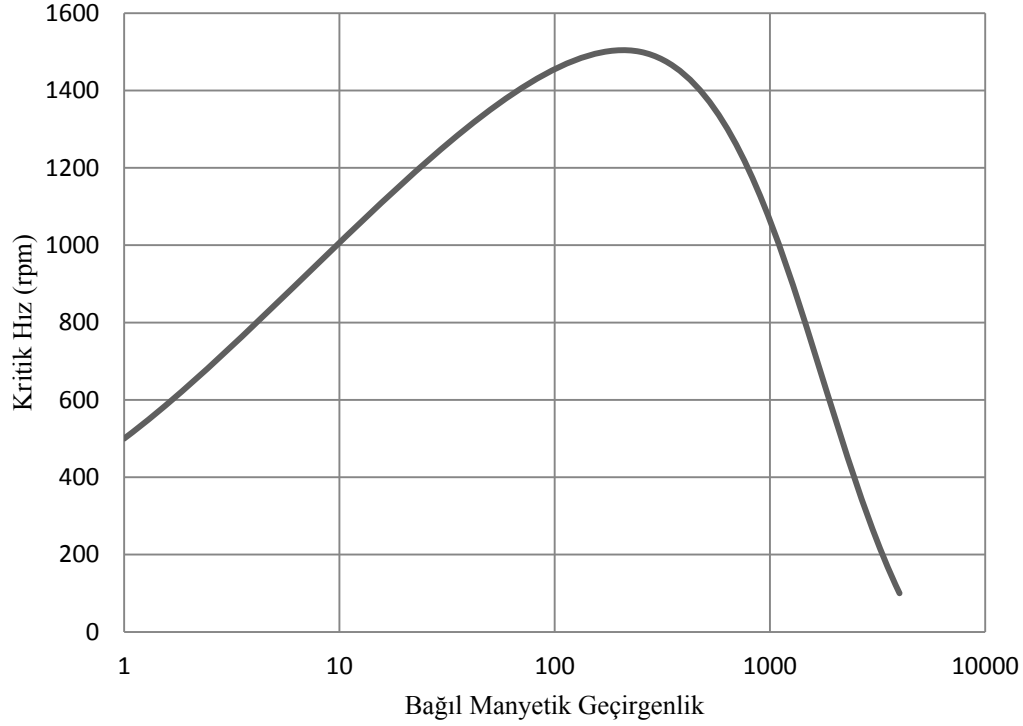
Sembol	Nicelik	Değer
I	Uyarma akımı	10A
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
p	Kutup çifti sayısı	8
τ	Kutup adımı	90°
d	İletken disk kalınlığı	10mm
g	Hava aralığı genişliği	2mm
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	20mm
R	İletken disk yarıçapı	190mm
σ	İletken diskin iletkenliği	58000000Ω ⁻¹



Şekil 4.31 : Farklı manyetik geçirgenlikler için frenleme momenti-hız karakteristiği.



Şekil 4.32 : Bağıl manyetik geçirgenliğin en yüksek frenleme momentine etkisi.



Şekil 4.33 : Bağıl manyetik geçirgenlik değişiminin kritik hız değerine etkisi.

Bağıl manyetik geçirgenliğin küçük değerlerinde moment en yüksek değerini alır. Uyarma akımının oluşturduğu alanın etkisi artan bağıl manyetik geçirgenlik ile artar bu sebeple akı yoğunluğu artma eğilimine girer. Girdap akımlarından kaynaklanan reaksiyon ile bağıl geçirgenlik daha da artar. En yüksek momentin elde edildiği bağıl manyetik geçirgenlik değeri malzemenin doyuma ulaşma noktasına bağlıdır. Çünkü doyuma noktası bir malzemenin içinden geçirilecek akı miktarını belirler.

Çalışmanın bu kısmında bağıl geçirgenlikle birlikte malzemenin iletkenliğinin de kıyaslanması gerekirdi. Ancak bu bölümde o değerlendirmeyi yapmadan sadece iletken diskin manyetik geçirgenliğinin frenleme momentini ve kritik hız değerini etkiler yorumunu yapmak tercih edilmiştir. Buna ilaveten iletken disk seçerken bağıl manyetik geçirgenliği yüksek olmayan malzemelerin seçilmesine dikkat edilmelidir.

İletken disk için en uygun malzeme kobalt olmasına rağmen malzemenin işlenemez olduğu ve kolay temin edilemediği için kobalt olarak seçilmemiş, alüminyum 7075 olarak imal edilmiştir.

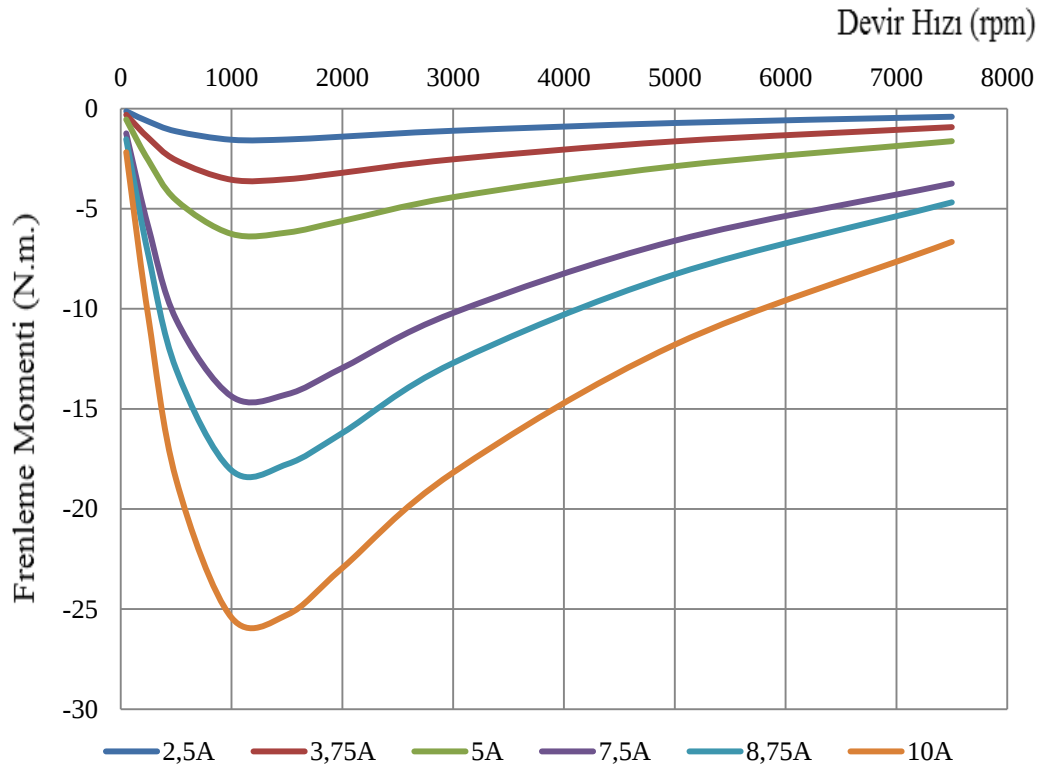
4.4.5 Uyarma akımının etkisi

Uyarma akımı girdap akımı freninde esas akıyı oluşturur. Bu bölümde uyarma akımını belirli oranlarda değiştirilerek frenleme momentine etkisi tartışılacaktır.

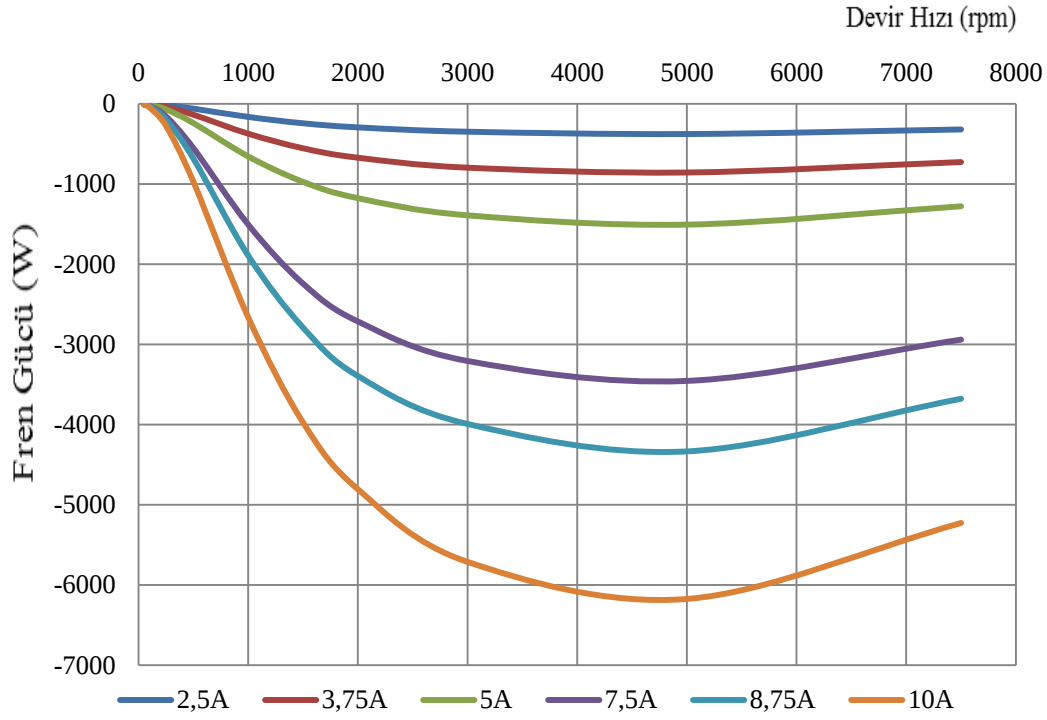
Farklı uyarma akımları altında, **Çizelge 4.8**'de verilen hava aralığı, iletken diskin elektriksel ve manyetik özellikleri, kutup sayısı, iletken diskin kalınlığı gibi parametrelerin sabit tutularak yapıldığı analizler sonucu elde edilen frenleme momenti-hız karakteristiği ve frenleme gücü-hız karakteristiği **Şekil 4.34** ve **Şekil 4.35**'te verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Uyarma akımının frenleme momentine etkisini incelemek için sabit tutulan analiz parametreleri.

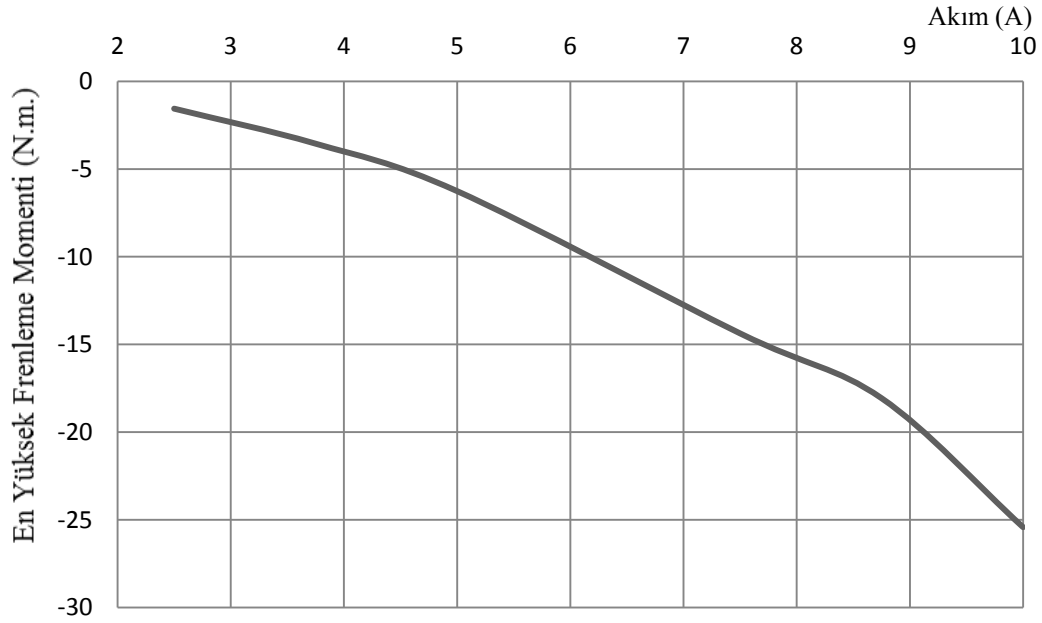
Sembol	Nicelik	Değer
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
p	Kutup çifti sayısı	8
τ	Kutup adımı	90°
d	İletken disk kalınlığı	10mm
g	Hava aralığı genişliği	2mm
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	20mm
R	İletken disk yarıçapı	190mm
μ_r	İletken diskin bağlı manyetik geçirgenliği	1
σ	İletken diskin iletkenliği	$18560000\Omega^{-1}$



Şekil 4.34 : Farklı uyarma akımları için frenleme momenti-hız karakteristiği.



Şekil 4.35 : Farklı uyarma akımları için frenleme gücü-hız karakteristiği.



Şekil 4.36 : Uyarma akımının en yüksek frenleme momentine etkisi.

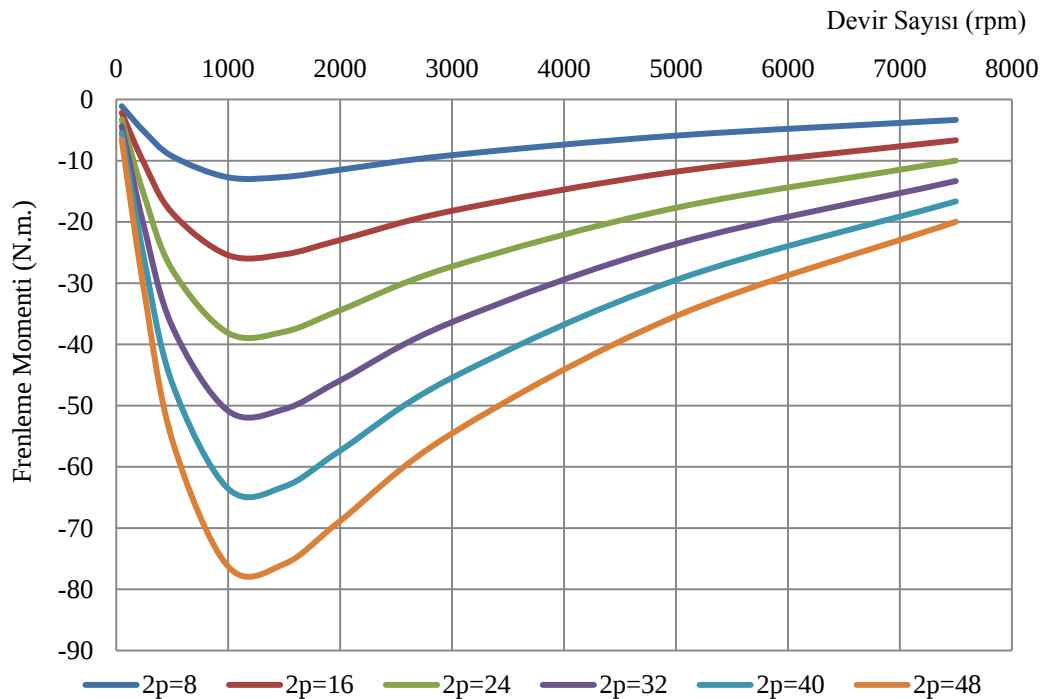
Yapılan analizler ve elde edilen grafikler çerçevesinde uyarma akımı ile frenleme momentinin karesel olarak birbirine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuca göre frenleme momentinin manyetik akıya da karesel olarak bağlı olduğu yorumu yapılabilir. Frenleme momenti-hız grafiğine bakıldığında farklı uyarma akımları için sadece en yüksek frenleme momentinin değiştiği, kritik hız değerinin tüm analizler için sabit kaldığı saptanmıştır.

4.4.6 Kutup sayısının etkisi

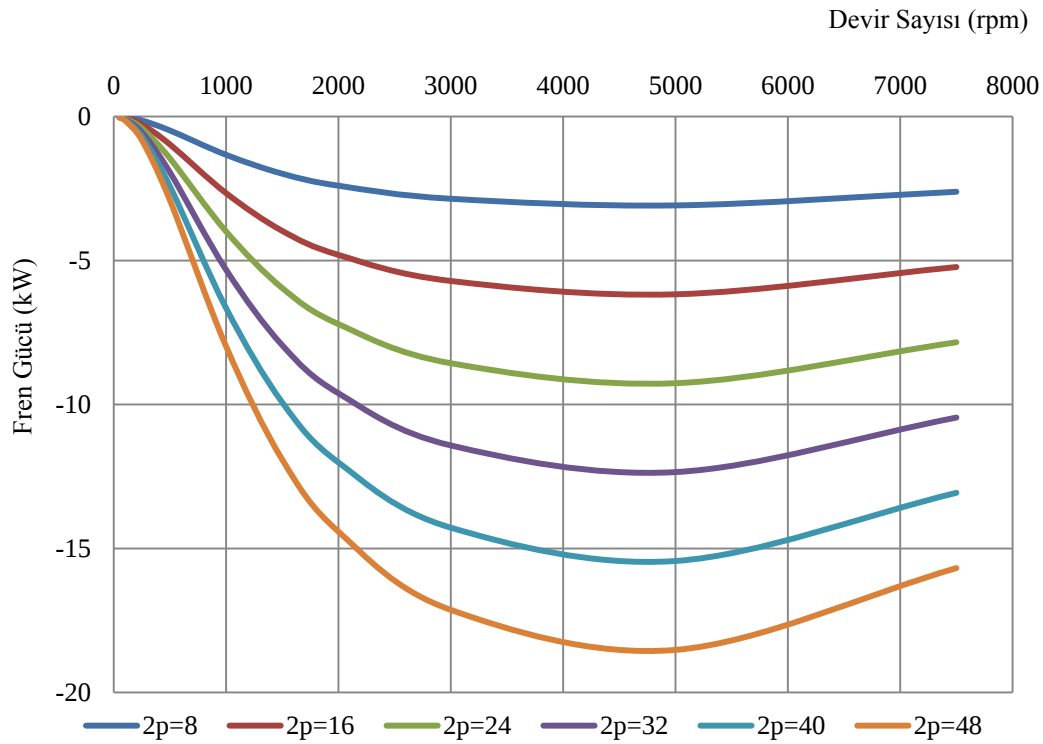
Tasarlanan fren sistemi için doğru gerilimle beslenen ve mil eksenine dik olarak, aralarında eşit açılar olacak şekilde yerleştirilen kutuplar genliği zamanla değişmeyen bir manyetik akı oluştururlar. Üretilen bu akı hareket eden iletken disk tarafından kesilir. Akı miktarının fazla olması frenleme momentinin de artması demektir. Tasarlanan fren sistemi için hava aralığı, uyarma akımı, disk kalınlığı, diskin manyetik özellikleri sabit tutulup farklı kutup sayılarında yapılan analizler sonucu elde edilen frenleme momenti-hız ve frenleme gücü-hız karakteristiği **Şekil 4.37** ve **Şekil 4.38**' de verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Kutup sayısının frenleme momentine etkisini belirlemek için sabit tutulan analiz parametreleri.

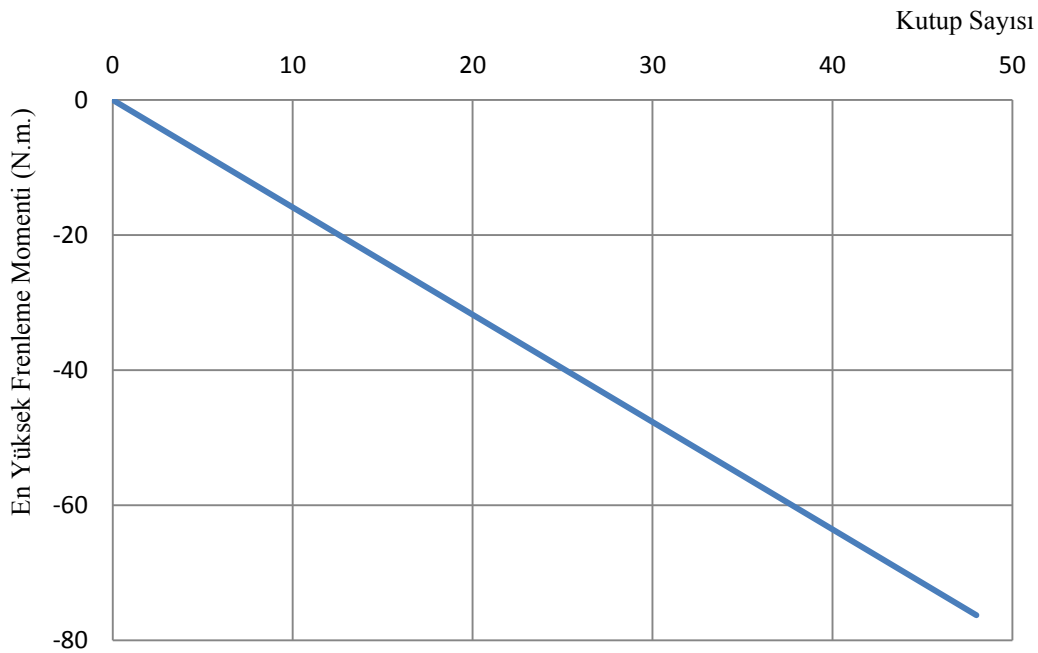
Sembol	Nicelik	Değer
I	Uyarma akımı	10A
N	Her bir kutup için sarım sayısı	300
g	Hava aralığı genişliği	2mm
r_{mag}	Elektromagnet yarıçapı	20mm
μ_r	İletken diskin bağıl manyetik geçirgenliği	1
σ	İletken diskin iletkenliği	$18560000\Omega^{-1}$



Şekil 4.37 : Farklı kutup sayıları için frenleme momenti-hız karakteristiği.



Şekil 4.38 : Farklı kutup sayıları için frenleme gücü-hız karakteristiği.



Şekil 4.39 : Farklı kutup sayıları ile en yüksek frenleme momentinin değişimi.

Yapılan analizler ve elde edilen grafikler çerçevesinde kutup sayısı ile frenleme momentinin doğrusal olarak birbirine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Frenleme momenti-hız grafiğine bakıldığında farklı kutup sayıları için sadece en yüksek frenleme momentinin değiştiği, kritik hız değerinin tüm analizler için sabit kaldığı saptanmıştır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada girdap akımı fren sistemleri üzerine geçtiğimiz 40 yılda yapılan akademik çalışmalar irdelenmiş ve ortaya konan matematiksel modellerden yola çıkarak küçük ve orta güçlü olmak üzere iki farklı fren sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu fren sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizleri sonucunda girdap akımı frenlerinin fiziksel olgusu anlaşılmış ve tasarım parametrelerinin ve önemli işletme büyüklüklerinin etkileri belirlenmiştir. Manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik bağlamında kullanılan iletken disk malzemesi, iletken disk kalınlığı, hava aralığı boyu, uyarma akımı ve kutup sayısı değişimlerinin çıkış büyüklükleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Farklı iletkenliğe sahip manyetik olmayan malzemelerle yapılan analizlerde iletkenliğin değişiminin kritik hız değerini ve en yüksek momenti etkilediği, buna ilaveten ferromanyetik malzemelerde yapılan analizlerde bağlı manyetik geçirgenliğin küçük değerlerinde frenleme momentinin en yüksek değerler aldığı görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında dört farklı malzeme ile yapılan analizlerde hem elektriksel hem de mekanik açıdan alüminyum 7075 alaşımının seçiminin fren sistemi için daha uygun olacağı aşıkârdır.

Farklı disk kalınlıklarında yapılan analizde, disk kalınlığının artmasının girdap akımlarının aktığı yolun daha fazla genişlemesine neden olduğu, artan kalınlıkla iletken diskin direncini de arttığı, bu nedenle de kritik hız değerinin değiştiği ve en yüksek frenleme momentinin başka bir noktaya kaydığı görülmüştür. İletken diskin çok ince olması mekanik olarak istenilen mukavemeti sağlamadığından yapılan analizler sonucunda fren sistemi için en uygun disk kalınlığının 10mm olduğu saptanmıştır.

Farklı hava aralığında yapılan analizlerde hava aralığının değişiminin elektromıknatıslar tarafından uyarılan manyetik devrenin relüktansını etkilediğinden kritik hız değeri ile birlikte en yüksek frenleme momentinin de değiştiği görülmüştür. Hava aralığının kontrolü ile frenlemem momentinin rahatlıkla kontrol edilebileceği yapılan analizler ile ortaya konmuştur.

Uyarma akımının frenleme momenti üzerine etkisini belirlemek için yapılan analizlerde uyarma akımı ile frenleme momentinin karesel olarak birbirine bağı olduğu anlaşılmıştır. Frenleme momenti-hız grafiğine bakıldığında farklı uyarma akımları için sadece en yüksek frenleme momentinin değiştiği, kritik hız değerinin tüm analizler için sabit kaldığı saptanmıştır. Uyarma akımının kontrolü ile frenlemem momentinin rahatlıkla kontrol edilebileceği yapılan analizler ile ortaya konmuştur.

Farklı kutup sayılarında yapılan analizlerde kutup sayısı ile frenleme momentinin doğrusal olarak birbirine bağı olduğu ve tüm analizlerde sadece en yüksek frenleme momentinin değiştiği, kritik hız değerinin tüm analizler için sabit kaldığı saptanmıştır.

Farklı tasarım parametreleri için benzetimler on bir farklı hız seviyesi için koşturulmuş ve altı farklı tasarım ilkesi için ortalama altı yüz adet analiz yapılmıştır. Bu analizlerdeki veriler bütünleştirilmiş ve her bir tasarım büyüklüğü için hıza bağımlı karakteristikler elde edilmiştir.

Elde edilen bu tasarım ilkeleri ışığında en uygun geometrik boyutlara sahip bir fren sisteminin teknik çizimleri imalatçı firmaya verilmiştir. Daha hassas frenleme momenti kontrolü yapabilmek için hem uyarma akımı, hem de hava aralığı ayarlanabilecek bir fren sistemi yapılmıştır. Sistemdeki oluşacak sıcaklığın sistemden uzaklaştırılması için fren sistemi bir yağ kazanının içine alınması ve soğutucu akışkan olarak transformatör yağı kullanılması hedeflenmektedir. Fren sisteminin işletme karakteristikleri ve soğutma hesapları, bu çalışmanın dışında tutulmuştur ve deneysel çalışma ile ilgili sonuçlar başka bir çalışma olarak tamamlanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Tacer, M. E.** Elektromekanik Enerji Dönüşümü Ders Notları, İTÜ
- [2] **Mergen, A.F., Zorlu, S.** (2009). Elektrik Makineleri-II: Asenkron Makineler, Birsen Yayınevi
- [3] **Cheng, D. K.** (2009). Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri, Palme Yayıncılık
- [4] **Davis, L. C. and Reitz, J. R.** (1971). Eddy currents in finite conducting sheets, *Journal of Applied Physics*, **Vol. 42**, 4119-4127.
- [5] **Schieber, D.** (1974). Braking torque on rotating sheet in stationary magnetic field, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, **Vol. 121**, 117-122
- [6] **Schieber, D.** (1975). Optimal dimensions of rectangular electromagnet for braking purposes, *IEEE Transactions on Magnetics*, **Vol. 11**, 948-952
- [7] **Nagaya, K., Kojima, H., Karube, Y., Kibayashi** (1984). Braking force and damping coefficient of eddy current brakes consisting of cylindrical magnets and plate conductors of arbitrary shape, *IEEE Transactions on Magnetics*, **Vol. 20**, 2136-2145
- [8] **Wiederick, H. D., Gauthier, N., Campbell, D. A., Rochon, P.** (1987). Magnetic braking: Simple theory and experiment, *American Journal of Physics*, **Vol. 138**, 153-158
- [9] **Heald, M. A.** (1988). Magnetic braking improved theory, *American Journal of Physics*, **Vol. 56**, 521-522.
- [10] **Cadwell, L. H.** (1996). Magnetic Damping: Analysis of an eddy current using an air track, *Journal of Physics*, **Vol. 64**, 917-923.
- [11] **Wouterse, J. H.** (1991). Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles, *IEE Proceedings-B*, **Vol. 138**, 153-158
- [12] **Simeu, E., Georges, D.** (1996). Modelling and control of an eddy current brake, *Control Engineers Practise*, **Vol. 4**, 19-26.
- [13] **Lee, K., Park, K.** (1999). Optimal robust control of a contact-less brake system using an eddy current, *Mechatronics*, **Vol. 9**, 615-631.
- [14] **Lee, K., Park, K.** (2001). Modelling of the eddy currents with the consideration of the induced magnetic flux, *Proceedings of IEEE International Conference on Electric and Electronic Technology*, Singapore Vol. 2, 762-768.
- [15] **Lee, K., Park, K.** (2001). Modelling of the eddy currents with the consideration of the magnetic Reynolds number, *Proceedings of International Symposium on Industrial Electronics*, South Korea Vol. 1, 678-683.

- [16] **Lee, K., Park, K.** (2002). Modelling of the eddy currents with boundry conditions by using Coulomb's law and the method of images, *IEEE Transactions on Magnetics*, Singapore Vol. 38, 1333-1340.
- [17] **Dietrich, A. B., Chabu, I. E., Cadoso, J. R.** (2001). Eddy current brake analysis using analytical and FEM calculation, *Proceedings IEEE International Electric Motor Drive Conference*, Cambridge, 458-461.
- [18] **Gulbahce, M. O., Kocabas, D. A., Habir, I.** (2012). Finite Elements Analysis of a Small Power Eddy Current Brake, *Mechatronika 2012*, December 5-7, 2012, Prague, Czech Republic
- [19] **Salon, S. J., Ergene, L. T., Wendling, P. F.** (2001). 3D Transient Magnetic Modeling of Braking Torque in a Rotating Conducting Disc, *Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001*.
- [20] **Cetin, I.** (1987). Elektrik Motörleri, 1. Kısım
- [21] **Muramatsu, K.** (1992). Comparison of coordinate systems for eddy current analysis in moving conductors, *IEEE Transaction on Magnetics*, **Vol. 28**, 1186-1189
- [22] **Muramatsu, K.** (1999). 3D eddy current analysis in moving conductor of permanent magnet type of retarder using moving coordinate system, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **Vol. 14**, 1312-1317
- [23] **Bigeon, J.** (1983). Finite element analysis of an electromagnetic brake, *IEEE Transaction on Magnetics*, **Vol. 19**, 2632-2634.
- [24] **Maxwell 3D User's Guide**, ANSOFT/ANSYS

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Onur GÜLBAHÇE

Doğum Yeri ve Tarihi: Tavas/DENİZLİ 20.03.1989

Adres: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü 7217 Ayazağa Yerleşkesi Maslak/İSTANBUL

E-Posta: ogulbahce@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü (2010)

Y. Lisans: İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü (devam ediyor)

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Elektrik Mühendisleri Odası 6. Proje Yarışması En Uygulanabilir Proje Ödülü, İ.Ü. Elektrik Elektronik Mühendisliği 2009-2010 Eğitim Öğretim Yılı Bölüm Birinciliği.

Yayın ve Patent Listesi:

- **Gulbahce, M. O.**, Kocabas, D. A., Habir, I. (2012). Finite Elements Analysis of a Small Power Eddy Current Brake. *Mechatronika 2012*, December 5-7, 2012, Prague, Czech Republic
- Karadeniz, M., **Gulbahce, M. O.**, Kocabas, D. A. (2012). A Practical Design and Analysis of a High Power DC to DC Converter. *Mechatronika 2012*, December 5-7, 2012, Prague, Czech Republic
- Atalay, A. K., Kocabas, D. A., Imeryuz, M., **Gulbahce, M. O.** (2012). Analysis of Problems in a Load System Driven by Multiple Tandem Induction Motors. *Mechatronika 2012*, December 5-7, 2012, Prague, Czech Republic

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Gulbahce, M. O.,** Kocabas, D. A., Habir, I. (2012). Finite Elements Analysis of a Small Power Eddy Current Brake. *Mechatronika 2012*, December 5-7, 2012, Prague, Czech Republic