



# GERGİ KONTROL SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTROMANYETİK FRENLERİN TASARIM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

MÜCAHİT ERGÜNEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN** Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU

> **EŞ-DANIŞMAN** Doç. Dr. Cihat BOYRAZ

> > İSTANBUL, 2023





# GERGİ KONTROL SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTROMANYETİK FRENLERİN TASARIM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

MÜCAHİT ERGÜNEŞ

(523219022)

YÜKSEK LİSANS TEZİ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN** Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU

> **EŞ-DANIŞMAN** Doç. Dr. Cihat BOYRAZ

> > İSTANBUL, 2023

# MARMARA ÜNİVERSİTESİ

## FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Mücahit ERGÜNEŞ'in "Gergi kontrol sistemlerinde kullanılan elektromanyetik frenlerin tasarım parametrelerinin optimizasyonu " başlıklı tez çalışması, 24 Mayıs 2011 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

### Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMAC	IOĞLU	(Danışman)	
Marmara Üniversitesi			(İMZA)
Dr. Öğr. Üyesi Adı SOVADI	(Üva)		
Marmara Üniversitesi	(Uye)		(İMZA)
Dr. Öğr. Üyesi Adı SOYADI	(Üye)		
Marmara Üniversitesi			(İMZA)

### ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31/05/2011 tarih ve 12345 sayılı kararı ile Mücahit ERGÜNEŞ'in Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen	Bilimleri	Enstitüsü	Müdürü
Prof.	Dr.	Adı	SOYADI

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda değerli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tez danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU ve Doç. Dr. Cihat BOYRAZ hocalarıma ve nezdinde Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi akademik personeline, her zaman destekleri var olan aileme teşekkür ederim.

OCAK,2023

Mücahit ERGÜNEŞ

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRI
İÇİNDEKİLER II
ÖZETIV
ABSTRACTVI
SEMBOLLER
KISALTMALARIX
ŞEKİL LİSTESİX
TABLO LİSTESİ XV
1. GİRİŞ1
1.1. Literatür Araştırması
1.2. Manyetik Alan Kavramı
1.2.1. Manyetik alan şiddeti6
1.2.2. Manyetik akı yoğunluğu7
1.2.3 Manyetik akı
1.2.4. Amper formülü9
1.3. Gergi Kontrol Sistemi
1.4. Elektromanyetik Frenler10
1.4.1. Yay baskılı elektromanyetik frenler11
1.4.2. Akım baskılı elektromanyetik fren11
1.4.3. Elektromanyetik histerezis fren
1.4.4. Girdap akım fren13
1.4.5. Elektromanyetik tozlu fren14

2.	MATERYAL VE YÖNTEM	16
/	2.1. Taguchi Metodu	16
/	2.2. Sonlu Elemanlar Metodu	17
/	2.3 Elektromanyetik Tozlu Fren Optimizasyonu	18
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	25
4.	SONUÇLAR	71
KA	AYNAKÇA	74
ÖZ	ZGEÇMİŞ	78

## ÖZET

# GERGİ KONTROL SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTROMANYETİK FRENLERİN TASARIM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Bu çalışmada, gergi kontrol sistemlerinde kullanılan elektromanyetik frenlerin tasarım parametrelerinin optimizasyon çalışmaları sonlu elemanlar metodu ile yapılmıştır. Deney tasarımı Taguchi metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Gergi kontrol sistemlerinde bobin sarma veya çözme işlemleri yapılırken sabit gergi kuvveti elde etmek için bobinin torku kontrol edilmelidir. Elektromanyetik fren sistemleri akım ile tork kontrolü kabiliyeti sağladığı için tercih edilmektedirler.

Gergi kontrol sistemleri paketleme makinaları, tel germe üniteleri vb. birçok uygulama alanında vardır. Gergi kontrol sistemi incelenmiştir.

Kullanılan elektromanyetik frenler tespit edilmiştir. Elektromanyetik fren sistemlerinin çalışma prensiplerine değinilmiştir. Elektromanyetik tozlu frenlerin mevcut geniş çalışma torku aralığı nedeniyle tasarımlarında diğer elektro-mekanik frenlerden benzersizdir. Akım uyartımı ile hassas bir tork kontrolü sağlaması sebebiyle gergi kontrol sistemi için ideal bir frendir.

Tasarım parametrelerinin optimizasyonu için elektromanyetik tozlu frenler tercih edilmiştir.

Deneysel tasarımlarda parametre ve seviye sayısı arttırıldıkça yapılması gereken deney sayısı çokça artacaktır. Taguchi metodu ile daha az deney yapılarak en optimum sonuç elde edilmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında 6 parametre, 3 seviye belirlenmiştir. Eğer taguchi yönteminden faydalanılmasaydı 3^6=729 analiz hazırlanması gerekecekti. Deney tasarımı için L27 ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımı hazırlanmıştır.

%95 anlamlılık düzeyine göre etkili parametreler tespit edilmiştir. Nihai olarak etkili parametreleri değiştirerek optimum tasarımda 120 N.m tork kapasiteli bir elektromanyetik tozlu fren dijital prototipi oluşturulmuştur.

Bu çalımalar neticesinde elektromanyetik tozlu fren tasarım parametreleri hakkında birçok veri elde edilmiştir. Bu çalışma sonuçları gelecekte yapılabilecek birçok bilimsel çalışmayı ve bu tür ürünlerin geliştirilmesini destekler nitelikle olmasını temenni ederim.

### ABSTRACT

## OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC BRAKES USED IN TENSION CONTROL SYSTEMS

In this study, optimization of the design parameters of electromagnetic brakes used in tension control systems were carried out with the finite element method. Experimental design was carried out by the Taguchi method.

When coil rewinding or unwinding operations in tension control systems, the torque of the coil should be controlled in order to obtain a constant tension force. Electromagnetic brake systems are preferred because they provide torque control capability with current.

Tension control systems packaging machines, wire tensioning units, etc. are in many application areas. The tension control system has been examined.

The electromagnetic brakes used have been identified. The working principles of electromagnetic brake systems are mentioned.

Electromagnetic powder brakes are unique in their design from other electro-mechanical brakes due to the wide operating torque range available. It is an ideal brake for tension control system as it provides precise torque control with current excitation.

Electromagnetic powder brakes are preferred for optimization of design parameters.

In this thesis study, 6 parameters and 3 levels were determined. If the taguchi method was not used, 3^6=729 analyzes would have to be prepared. For the experimental design, the experimental design was prepared using the L27 orthogonal array.

Effective parameters were determined according to 95% significance level. Finally, an electromagnetic powder brake digital prototype with a torque capacity of 120 N.m was created in optimum design by changing the effective parameters.

As a result of these studies, a lot of data has been obtained about electromagnetic powder brake design parameters. I hope that the results of this study will support many future scientific studies and the development of such products.

### **SEMBOLLER**

- $\vec{H}$ : Manyetik alan şiddet vektörü
- H : Manyetik alan şiddeti
- $\vec{B}$ : Manyetik akı yoğunluk vektörü
- *B* : Manyetik akı yoğunlığu
- $\Psi_m$ : Manyetik akı
- $\mu$ : Manyetik geçirgenlik
- $\mu_0$ : Boşluğun manyetik geçirgenliği
- $\mu_R$ : Malzemenin manyetik geçirgenliği

### KISALTMALAR

DGM: Darbe Genişlik Modülasyonu

A/T: Amper/Turns

S/N: Signal Noise

# ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Bir koaksiyel (eş eksenli) kablo [15]	7
Şekil 1.2 Gergi kontrol sistemi [21]	9
Şekil 1.3 Gerginlik hesaplama formülü [22]	10
Şekil 1.4 Yay baskılı elektromanyetik fren kesiti [5]	11
Şekil 1.5 Akım baskılı elektromanyetik fren [23]	12
Şekil 1.6 Elektromanyetik histerezis fren kesiti [24]	13
Şekil 1.7 Elektromanyetik tozlu fren şematik gösterimi [29]	15
Şekil 1.8 Elektromanyetik tozlu fren çalışma prensibi [30]	15
Şekil 2.1 Elektromanyetik tozlu frenin kesiti	20
Şekil 2.2 Rotor parametre ayrıntıları	20
Şekil 2.3 Elektromanyetik analiz için yapının sonlu elemanlara ayrılması	21
Şekil 2.4 Bobinin modellenmesi	21
Şekil 2.5 St 1008 B-H eğrisi	22
Şekil 2.6 St37 B-H eğrisi	22
Şekil 2.7 Dökme demir B-H eğrisi	23
Şekil 2.8 Yapının sonlu elemanlara bölünmesi	23
Şekil 2.9 Body force density	24
Şekil 2.10 Transient sınır şartı	24
Şekil 3.1 Deney 1 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	25
Şekil 3.2 Deney 1 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	25
Şekil 3.3 Deney 2 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	26
Şekil 3.4 Deney 2 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	

Şekil 3.5 Deney 3 manyetik akı yoğunluğu dağılımı yoğunluğu	27
Şekil 3.6 Deney 3 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	27
Şekil 3.7 Deney 4 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	
Şekil 3.8 Deney 4 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	28
Şekil 3.9 Deney 5 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	29
Şekil 3.10 Deney 5 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	29
Şekil 3.11 Deney 6 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	30
Şekil 3.12 Deney 6 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	30
Şekil 3.13 Deney 7 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	31
Şekil 3.14 Deney 7 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	31
Şekil 3.15 Deney 8 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	32
Şekil 3.16 Deney 8 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	32
Şekil 3.17 Deney 9 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	33
Şekil 3.18 Deney 9 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	33
Şekil 3.19 Deney 10 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	34
Şekil 3.20 Deney 10 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	34
Şekil 3.21 Deney 11 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	35
Şekil 3.22 Deney 11 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	35
Şekil 3.23 Deney 12 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	36
Şekil 3.24 Deney 12 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	36
Şekil 3.25 Deney 13 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	37
Şekil 3.26 Deney 13manyetik akı yoğunluğu vektörleri	37
Şekil 3.27 Deney 14 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	

Şekil 3.28 Deney 14 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.29 Deney 15 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.30 Deney 15 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.31 Deney 16 manyetik akı yoğunluğu dağılımı40
Şekil 3.32 Deney 16 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.33 Deney 17 manyetik akı yoğunluğu dağılımı41
Şekil 3.34 Deney 17 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.35 Deney 18 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.36 Deney 18 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.37 Deney 19 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.38 Deney 19 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.39 Deney 20 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.40 Deney 20 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.41 Deney 21 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.42 Deney 21 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.43 Deney 22 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.44 Deney 22 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.45 Deney 23manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.46 Deney 23 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.47 Deney 24 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.48 Deney 24 manyetik akı yoğunluğu vektörleri
Şekil 3.49 Deney 25 manyetik akı yoğunluğu dağılımı
Şekil 3.50 Deney 25 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Şekil 3.51 Deney 26 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	50
Şekil 3.52 Deney 26 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	50
Şekil 3.53 Deney 27 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	51
Şekil 3.54 Deney 27 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	51
Şekil 3.55 Deney faktörleri için sinyal/gürültü oranları	52
Şekil 3.56 3 boyutlu Tork-A;B grafiği	53
Şekil 3.57 3 boyutlu Tork-A;C grafiği	53
Şekil 3.58 3 boyutlu Tork-A;D grafiği	54
Şekil 3.59 3 boyutlu Tork-A;E grafiği	54
Şekil 3.60 3 boyutlu Tork-A;F grafiği	55
Şekil 3.61 3 boyutlu Tork-B;C grafiği	55
Şekil 3.62 3 boyutlu Tork-B;D grafiği	56
Şekil 3.63 3 boyutlu Tork-B;E grafiği	56
Şekil 3.64 3 boyutlu Tork-B;F grafiği	57
Şekil 3.65 3 boyutlu Tork-C;D grafiği	57
Şekil 3.66 3 boyutlu Tork-C;E grafiği	58
Şekil 3.67 3 boyutlu Tork-C;F grafiği	58
Şekil 3.68 3 boyutlu Tork-D;E grafiği	59
Şekil 3.69 3 boyutlu Tork-D;F grafiği	59
Şekil 3.70 3 boyutlu Tork-E;F grafiği	60
Şekil 3.71 Ful faktöriyel deney sonuçları	61
Şekil 3.72 Deney 28 manyetik akı yoğunluk dağılımı	63
Şekil 3.73 Deney 28 manyetik akı yoğunluk vektörleri	63

Şeki	<b>13.74</b> Deney 29 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	64
Şeki	<b>1 3.75</b> Deney 29 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	65
Şeki	<b>1 3.76</b> Deney 30 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	65
Şeki	<b>1 3.77</b> Deney 30 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	66
Şeki	<b>1 3.78</b> Deney 31 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	66
Şeki	<b>13.79</b> Deney 31 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	67
Şeki	<b>I 3.80</b> Deney 32 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	68
Şeki	<b>I 3.81</b> Deney 32 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	68
Şeki	<b>1 3.82</b> Deney 33 manyetik akı yoğunluğu dağılımı	69
Şeki	<b>1 3.83</b> Deney 33 manyetik akı yoğunluğu vektörleri	69
Şeki	<b>1 3.84</b> Deney 31 3 boyutlu manyetik akı yoğunluk dağılımı	70
Şeki	<b>1 3.85</b> Deney 31 3 boyutlu manyetik akı yoğunluk vektörleri	71

## TABLO LÍSTESÍ

Tablo 2.1 Deney faktör ve seviyeleri	18
Tablo 2.2 Taguchi deney tablosu L27	19
Tablo 3.1 Tork değerleri	52
Tablo 3.2 Varyans analiz sonuçları	60
Tablo 3.3 Deney 28 ve rasgele deneylerin seviyeleri	62
Tablo 3.4 Deney 28 ve rasgele deneylerin sonuçları	62
Tablo 3.5 Ek olarak hazırlanan deneyler	64
Tablo 3.6 Bobin deney parametre ve sonuçları	67
Tablo 3.7 Deney 31 model özellikleri	70

### 1. GİRİŞ

Şerit malzeme; kağıt, tekstil ürünleri gibi oldukça uzun, göreceli şekilde ince ve elastiki malzemeler olarak ifade edilir [1]. Rulo şeklinde sarılarak endüstriyel proseslere giren şerit malzemelerin, uygulanan süreçler sırasında sarılma, açılma işlemlerinin hatasız bir şekilde gerçekleştirilmesi, meydana getirilen işlemin kalitesi yönünden önem arz etmektedir. Kaliteli bir sarılma veya açılma işlemi gerçekleştirilmesi için malzemelerin, açılma sırasında gerginliğinin değeri gereklilikler sonucu tespit edilen değ olması gerekir. Çalışma esnasında uygulanması gereken gergi kuvveti belli aralıkta korunamadığı durumlarda öncelikle iki problemle ortaya çıkar.

• Üretimi aksatmaya sebep olacak kopma, gergi kuvvetinin malzemenin kopma mukavemeti değerinin üstün olması durumunda gerçekleşecektir.

• Gergi kuvvetinin gerekli değerin altında olduğu durumda, şeritte malzemelerde esnemelere dolayısıyla da üretim hattında mühim aksaklılara neden olacaktır [2].

Gerginlik kontrolü için farklı sistemler ile çözüm bulmaya çalışılmıştır. Bu sistemler gergiyi direkt ölçen yada endirekt olarak ölçen sistemler olarak tasarlanabilir. Günümüz teknolojisi ile her iki yöntemle de gerginlik kuvvetinin tespiti mümkündür. Tespit edilen gergi değeri, besleme yada çekme makarasını tahrik eden elektrik motorunun hızını ayarlayan bir kontrol sistemi olarak tasarlanabileceği gibi sadece çekme bobininin sabit devirli bir motorla tahrik edildiği sistemlerde, besleme bobini üzerine bir frenleme etkisi oluşturacak kontrol sistemi olarak da tasarlanabilir.

Tekstil endüstrisinde, bilhassa dokuma alanında, besleme bobinini tahrik eden elektrik motorunun hızının kontrol edilmesi ile gerginliğin takip edildiği sistemler daha ağırlıklı olarak. Bunun yanı sıra boya-baskı, kağıt veya sac kesme gibi işlemlerde gerginlik, elektrik motoru ile besleme bobinin tahrik edildiği sistemlere görece daha kolay ve uygun maliyetlerde olan frenleme mekanizmalı gergi denetim sistemleri ile sağlanır. Frenleme mekanizma eyleyecileri türüne göre mekanik, elektromekanik, elektrohidrolik, veya elektropnömatik olabilir [3].

Gergi kontrol sisteminde kullanıldığı endüstriye göre kullanılan malzemelerin gerginlik kuvvetinin kontrolü sağlanmalıdır. Bu ürünlerin bir bobine sarılması veya çözülmesi esnasında bobinin çapına göre torku kontrol edilerek gerginlik kuvveti sabit tutulur. Bu çalışmayı sağlayabilen elektromanyetik fren teknolojilerinden de yararlanılmaktadır. Yapılan bu tez çalışması ile gergi kontrol sistemlerini, elektromanyetik fren teknolojilerini konu almıştır. Elektromanyetik tozlu frenlerin tasarımda karakteristik özelliklerinin iyileştirilmesi sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilmiştir. Taguchi metodu ile deney tasarımı hazırlanmıştır.

#### 1.1. Literatür Araştırması

Şefkat, G., [3] tarafından yapılan bu tez çalışmasında standart mekanik gergi kontrol sistemine alternatif olarak öngörülen elektromekanik bir fren mekanizması gergi kontrolü için tavsiye edilmiştir. Darbe Genişlik modülasyonu (DGM) tekniği kullanılma ve kullanılmama durumları incelenmiştir. Elektromekanik fren hataya bağlı olarak sistemi kapama-açılma şeklinde bir davranışa itmiştir. Bu da sistemin kontrolünde yeteri hassasiyetin sağlanmasını engellemiştir. Ayrıca fren balatasının çalışma esmasında oluşan gürültü sonucu sistemin farklı bir teknik ile sürülmesine itmiştir. Bunun için DGM tekniği kullanmıştır. DGM yönteminin kullanılması düzeneğin dinamik davranışını iyileştirdiğini tespit etmiştir. Gerekli olan fren kuvveti elektromekanik frende akım kontrolü ile değiştirilmesi, fren kuvvetinin değeri arttırma-azaltma yaparak frenin yüzeyden ayrılması engellenmiştir. Bu durumda gergi kuvveti titreşimli sönümlü bir dinamik davranış sergilediğini tespit etmiştir. Galışmada kullanılan elektromekanik fren sisteminin teorik olarak gergi kontrol sistemlerinde kullanılabileceği ortaya koymuştur. Elektriksel kumandalı bu sistemin kapalı çevrim bir gergi kontrol sisteminde kolaylıkla kullanabileceği tespit edilmiştir.

Gülbahçe, M.O., [4] yapmış olduğu bu tez çalışasından girdap akım frenlerinin tarihsel süreçte gelişimini, çalışma prensibi etraflıca bahsetmiştir. Matematiksel modelleri inceleyerek orta güçte bir girdap akım fren tasarımı yapmıştır. Analitik hesaplananların zorlukları ve yeterli olmaması sebebi ile sonlu elemanlar metodu ile analizleri

gerçekleştirmiştir. Çalışmada tasarım parametrelerinin performansa etkilerini incelemiştir. İncelediği parametreler şu şekildedir:

Elektriksel iletkenliğin etkisi: manyetik olmayan ve ferromanyetik malzemeler ile gerçekleştirdiği analizler sonucu olarak, iletken değişimin tork değerini etkilediği ayrıca ferromanyetik malzemeler ile optimum yüksek tork değerlerini tespit etmiştir.

Disk kalınlığının etkisi: Farklı disk kalınlıkları frenleme torkunun kalınlık azaldıkça arttığı tespit edilmiştir ancak mukavemet ve frenleme troku açısından optimum değer olarak 10mm olarak tespit etmiştir.

Hava aralığının etkisi: hava boşluğundaki açıklığın değişiminin elektromıknatıslar tarafından eylenen manyetik devrenin relüktansını etkilediğinden frenleme torkunun değiştiği tespit edilmiştir. Bu özellik ile fren torkunun kontrol edilebileceği tespit edilmiştir.

Uyarma akımının etkisi: Frenleme torku ile uyarma akımı arasında karesel bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir. Bu özellik ile fren torkunun kontrol edilebileceği tespit edilmiştir.

Kutup sayısının etkisi: Frenleme torku ile kutup sayısın arasında doğrusal bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma sonucu uyarma akımı ve hava boşluğunun değiştirilerek daha hassas bir kontrol sağlayabilecek bir fren tasarım prototipi tamamlamıştır.sistemlerinin geometri yapılarını incelemiştir. Matematiksel modelleme üzerine tanımlar paylaşmıştır. Elektromanyetik kavramından bahsetmiştir. Hava boşluklarının manyetik iletkenliğe etkisini incelemiştir. Fren tork hesaplamalarına yer vermiştir. Ferromanyetik malzeme ve özeliklerinden bahsetmiştir Yay baskılı elektromanyetik fren üzerine sonlu elemanlar çalışması yapmıştır. Elektromanyetik fren sistemleri için matematiksel modelleme konusunda güzel bir kaynak ortaya koymuştur.

Yılmaz, İ. B., [6] yapmış olduğu tez çalışmasında yay etkili elektromanyetik frenler için detaylı bilgiler paylaşmıştır. Statik, dinamik ve termal modeller oluşturmuştur. Yay etkili elektromanyetik fren tasarımı için performansı belirleyen geometrik parametreler, sargı seçimi gibi etkileri incelemiştir. Nümerik analizler ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Yay etkili elektromanyetik fren geliştirilmesi için etkili bir kaynak ortaya koymuştur.

Jun, G. ve Lamei, X. [7] yapmış oldukları çalışmada gergi kontrol sistemi için detaylı bilgiler paylaşmışlardır. Çözme ve sarma durumu için gergi kontrol sistemleri için örnek model paylaşmışlardır. Gergi kontrolü için donanımsal ve yazılımsal süreç diyagramları paylaşılmışlardır. Donanım devresinin tasarımında, hızlı çalışma hızı ve zengin çevresel ayar özelliklerine sahip kontrol çekirdeği olarak STM32F103 tek çip kullanmışlardır. Sarma ve rulo işlemine dayalı olarak yüksek performanslı bir gerilim kontrolörü tasarlamışlardır.

Xu, S., ve Wang, C., [8] yapmış oldukları çalışmada manyetik tozlu kavramaların yapı ve çalışma prensiplerini anlatmışlardır. Sonlu elemanlar metodu ve deneysel olrak ile tek ve ikili çalışma boşluklu manyetik kavramları üzerinde çalışmalardır. İkili çalışma boşluklu manyetik kavramlardan optimum sonuçlar almışlardır.

Yasa, Y., Sincar, E., Ertugrul, B.T., Mese, E., [9] hazırlamış oldukları makalede birçok endüstriyel ve robotik uygulamada yaygın olarak kullanılan elektromanyetik frenin tasarım değerlendirmelerini incelemişlerdir. Tasarım sürecini mekanik, elektriksel ve termal modeller ile incelemişlerdir. Analitik ve sonlu elemanlar metodu ile hesaplamalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Sonuçları arasında uyumluluk yakalamışlardır. Servo uygulamalarında kullanan yay baskılı elektromanyetik fren tasarımı geliştirilmesi için öenmli bir çalıma olmuştur.

Shin, H., Choi, J., Cho, H., Jang, S. [10] yapmış oldukları çalışmada kalıcı mıknatıslı girdap akım frenlerinin karakteristikleri incelemişlerdir. Tasarlanan kalıcı mıknatıslı girdap akım frenin 2 boyutlu sonlu elemanlar analiz çalışmaları yapılmıştır. Prototip olarak ürettikleri fren ile deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deney se sonlu elemanlar metodu ile elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda tork değerinde geniş bir hata payı olmasına rağmen tahmin edilebilir bir seviyede olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu hatanın rotorun görünen direncini etkilediği ve kritik hızı çok daha yüksek değerlere kaydırdığı gösterilen dönüş akımı yollarından kaynaklanabileceğini düşünmektedirler.

Özenç, O. [11] yapmış olduğu çalışmada emaye ile kaplanmış bir bakır telin büyük bobinden küçük bobine tespit edilen gerginlikte ve uygun sarımı için dizayn edilmiş ve üretilmiş

sistemin bilgisayar ile kontrolü teorik ve uygulamalı olarak incelemiştir. Klasik PID kontrolcünün iyi çıktılar vermesine karşın kayan kipli kontrolcü basit yapısının ön paln çıktığını tespit etmiştir.

Wang, C., Wang, Y., Yang, R., Lu, H. [12] yapmış oldukları araştırma çalışmasında genellikle havacılık endüstrisinde kullanılan kompozit malzemelerin üretilmesinde filament sargı makinelerinde gergi kontrolünün önemini belirtmişlerdir. Kapalı çevrim gerginlik kontrolü sistemi ile gerginlik kontrolü araştırmışlardır. PID kontrol yönetemi ile etkin bir şekilde gerginlik kontrol sistemi oluşturmuşlardır.

Wang, C., Wang, Y., Yang, R., Lu, H. [13] yapmış oldukları başka bir çalışmada gergi kontrol prensiplerini anlatmışlardır. Matematiksel model geliştirmişlerdir. Gergi kontrol sisteminde eyleyici olarak manyetik tozlu kavrama kullanarak hassas bir gerilim kontrol sistemi sunmuşlardır ve sistemin yarıçapı, ivmesi ve zaman gecikmesinin telafisi için önerilerde bulunmuşlardır. Sistemin tasarım açısından makul olduğu, performans açısından güvenilir olduğunu doğrulamışlardır.

Karna, S.K., Sahai, R [14] yapmış oldukları çalışmada taguchi metodunu genel bir bakış yapmışlardır. Taguchi metodunun anlaşılması ve uygulanması için önemli bir kaynak olmuştur.

#### 1.2. Manyetik Alan Kavramı

Manyetik alan, elektrik yüklerinin hareket etmesi şöyle ki bir elektrik akımı deviri olduğunda gerçekleşir. Yer değiştiren elektrik yükü, çevresindeki boşlukta manyetik alan türer. Manyetik alan içerisinde devinim halinde olan yükleride manyetik kuvvet etkiler. Manyetik alanın da, manyetik akı yoğunluğunun da birimi tesla (T) dır. Akım ne kadar büyük olursa manyetik alan da o kadar büyük olur. Akım ile manyetik alan arasında pozitif uyum vardır. Manyetik alan şiddeti, elektrik alanında olduğu gibi uzaklık artıkça azalır. Açıklık ile manyetik alan şiddeti arasında negatif uyum vardır. 1820 yılında Oersted tarafından yapılan deneylerde akımlar ile oluşan manyetik alanlar gözlemlenmiştir. Bir pusula içinden akım yüklü bir iletkenin çevresine konulduğunda, iletken telin boyluca eksenin tel ile dik açıda olduğu tespit edilmiştir. Biot-Savart ve Ampere tarafından iletkinin içinden akım geçme

durumunda, çevresindeki boşluğun bir yerindeki manyetik alan ölçüsünü veren ilişkiler ortaya koymuşlardır. Çoğunlukla akımın yönü, şiddeti, doğrultusu, akımın geçtiği telin şekli (dairesel, lineer biçimde, selenoid, vb.) ve akımı çevreleyen ortamın türü, manyetik alan şiddeti ile bağıntılıdır.

#### 1.2.1. Manyetik alan şiddeti

Manyetik alan şiddet vektörü  $\vec{H}$ , alandaki akım sebebi ile oluşur, manyetik alanı belirtir. Manyetik alan şiddeti

$$H = \frac{1}{2\pi r} \left[ \frac{Amper}{metre} \right] \tag{1.1}$$

verilen formül ile hesaplanır.

Vektörel notasyonda:

$$\vec{H} = \frac{I\phi}{2\pi r} \left[ \frac{Amper}{metre} \right]$$
(1.1a)

Simetrik akım dağılımında bazı soruların çaresi, manyetik alanda Amper Akım Yasasıdır. Amper Yas ası,  $\vec{H}$  kapalı bir yol boyunca integralinin akıma eşittir.

$$\oint_C H dl = I_{en} \left[ Amper \right] \tag{1.1b}$$

Bu formülde integral,  $I_{en}$  akımını çevreleyen kapalı yolu üzerinde alınmıştır. Şekil 1.1'de verile eş merkezli uzun kablonun etrafındaki manyetik alan dağılımı, Amper Yasası ile hesaplanabilir.



Şekil 1.1 Bir koaksiyel (eş eksenli) kablo [15]

İletkenler arası bölgede (a<b<r)

$$H = \frac{1}{2\pi r} \left[ \frac{Amper}{metre} \right] \tag{1.2}$$

şeklindedir.

Formülde r, içerideki iletkenin merkezinden uzaklığıdır. Dışarıdaki iletkenin dışında, kapalı akım yolu sıfır olduğu için H=0 (r>c) olur [15].

### 1.2.2. Manyetik akı yoğunluğu

$$B = \mu_0 H \left[ \left( \frac{Wb}{m^2} \right) veya \left( T \right) \right]$$
(1.3)

bağıntısı ile ifade edilir. Metre kare başına weber veya Tesla birimleri manyetik akı yoğunluğu belirtir.

Manyetik akı ise:

$$\Psi_m = \oint_S dS \left[ Wb \right] \tag{1.4}$$

ile gösterilir [16].

Manyetik malzemelerde, manyetik alan çizgilerinin başladığı ve sonu olan manyetik yükler olmadığı için manyetik akılar için:

$$\Psi_m = \oint_S dS = Q \ [Wb] \tag{1.5}$$

yazılır [17]. Manyetik alan şiddeti  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  ile ifade edilen manyetik akı yoğunluğuna sebep olur.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} [Tesla] \tag{1.6}$$

Formülde  $\mu$  alanın oluştuğu alandaki materyalin manyetik geçirgenliğidir. Birçok materyal için  $\mu$  skalerdir ve  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  ile yönleri aynıdır. Alan içinde hareket halinde olan yüke etkiyen kuvvet, manyetik akı yoğunluğudur. [18].

Genellikle şu şekilde ifade edilir.

$$\mu = \mu_0 \mu_R \left( \frac{Tesla - metre}{Amper veya} \frac{Henry}{metre} \right)$$
(1.7)

Burada  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliği ve  $\mu_R$  malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğidir.

$$\mu_0 = 4\pi x 10^{-7} [{}^{Henry}/_{metre}]$$
(1.7a)

Manyetik akı yoğunluğu B ile gösterilir. Birimi T (Tesla) dir. 1 T = 1 Vs/m<sup>2</sup> = 1 Wb/m<sup>2</sup> Uzayda ve birçok uygulamada B/H oranı (B/H = sabit = $\mu_0$ ) sabit kabul edilse dahi manyetik akı ve manyetik alan malzemelerde farklıdırlar [19].

#### 1.2.3 Manyetik akı

 $A(m^2)$  alanından nüfuz eden manyetik akının büyüklüğü integralle aşağıda belirtilmiştir:  $\Phi = \int_A \vec{B} d\vec{A} \ [weber]$ (1.8)

Burada  $\vec{B} \vec{dA}$  alanın diferansiyel faktörüdür.[15].

#### 1.2.4. Amper formülü

Vektörel bir büyüklük olan manyetik alan. Sabit bir doğrultuda salınımlar veya bir düzlemde eliptik hareketler yapar. H (A/m) ifadesi manyetik alan şiddetini temsil eder. Manyetik alanlarda akım dağılımlarının simetrik olduğu durumlarda çözümleri kolaylaştıran bağlantı vardır. Bu bağlantı Amper Çevre Yasası olarak adlandırılmaktadır. Amper çevre yasasına göre H manyetik alanının kapalı bir sınır boyunca integrali bu kapalı sınırın kalan akıma eşittir.

$$\int_{I} H dL = I \tag{1.9}$$

ile ifade edilir [20].

#### 1.3. Gergi Kontrol Sistemi

Gergi kontrol sistemi, kağıt yapımı, baskı, plastik ürünler, kauçuk endüstrisi, tekstil endüstrisi, baskı ve boyama, tel ve kablo, metalurji endüstrisi, rulo malzeme işleme endüstrisinde sarma ve çözme gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Gergi kontrol sistemi şematik olarak aşağıdaki **Şekil 1.2**'de paylaşılmıştır [21].



Şekil 1.2 Gergi kontrol sistemi [21]

Gergi kontrolü gereken sistemlerden sabit gerkinlik kuvveti sağlanması amaçlanmaktadır. Çözmeye veya sarma durumunda bobin çaplarında değişiklik olacağından tork değişimi ile bu sistem sağlanmaktadır.

Matematiksel olarak, gerilim, yarıçapa bölünen torka eşittir. Bu, bir rulo çapı arttıkça veya azaldıkça, gerilimi optimum değerde veya ayar noktasında tutmak için torkun ayarlanması gerektiği anlamına gelir. Yani temel anlamda, torku ruloya göre tek tip bir şekilde kontrol ederek gerilimi kontrol ederiz. **Şekil 1.3**'de formül verilmiştir [22].



Şekil 1.3 Gerginlik hesaplama formülü [22]

Gergi kontörlü sistemlerin yük hücreleri, çeşitli sensörler kullanılarak gerginlik kuvveti, bobin çapı gibi ölçüler ölçülür. Yapılan kontrol sistemine (kapalı-açık çevrim) tork kontrolü sağlanacak eyleyici sürülür. Hassas kontrol sağlaması sebebi ile elektromanyetik frenler çoğunlukla tercih edilir.

### 1.4. Elektromanyetik Frenler

Elektromanyetik frenler; havacılık, otomotiv, robotik, servo uygulamaları, savunma sanayi, otomasyon, asansör ve taşımacılık sektörleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır [6].

Elektromanyetik frenlerin uygulama alanlarına göre farklı çeşitlerde bulunmaktadır. Bunlar genel olarak yay baskılı, akım baskılı, elektromanyetik tozlu, histerezis, girdap akım frenler olarak adlandırılabilir. Her birinin çalışma prensibi farklı olan bu frenlerdeki ortak amaç, gerilim kontrolü ile hareket eden bir durdurmak veyahut yavaşlatmak için kullanılırlar. Farklılıklarına rağmen bobin, manyetik geçirgenliği yüksek özellikli malzemeden oluşan stator (çekirdek), rotor (armatür) vb. parçalardan oluşmaktadır.

#### 1.4.1. Yay baskılı elektromanyetik frenler

Sade bir elektromekanik konstrüksiyonu ile bu tip fren sistemleri aniden kesilen elektrik akımlarında uygulanan basit monte edilebilen sistemdir. Gerekli emniyet için dönen millerin sabitlenen konumda stabil etmesinde, atalet momentinin hareketsiz halde kalmasını sağlar. **Şekil 1.4**'te yay baskılı fren kesiti verilmiştir.



Şekil 1.4 Yay baskılı elektromanyetik fren kesiti [5]

Çalışma Prensibi: Üzerinde gerilimin olmadığı durumda fren konumundaki sistem, elektrik akımın bobinden geçmesi halinde meydana gelen elektromanyetik kuvvetin etkisi ile yay kuvvetini yenerek hava boşluğu kadar mesafeli parçayı (flanş) statöre yapıştırır. Boşta kalan balata mil ile dönebilir. Gerilim durunca aniden yayın tepki kuvveti ile flanş geri balatayı sıkıştırır. Yani fren sistemine geri döner [5].

#### 1.4.2. Akım baskılı elektromanyetik fren

Akım baskılı elektromanyetik frenler yay baskılı elektromanyetik frenlerin aksine akım verildiği zaman frenleme gerçekleşir.

Fren bobinine akım ile yüklenince fren bobin gövdesi yüzeyinde manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alan aynı doğrultudaki balata baskı flanşını kendine doğru çekerek frenlemeyi gerçekleştirir ve bu durum gerilim uygulandığı taktirde devam eder. Akım kesildiği durumda balata baskı flanşı altında bulunan lamel yay vasıtasıyla bobin gövdesi yüzeyinden ayrılır ve frenleme biter. Akım baskılı elektromanyetik fren **Şekil 1.5**'te verilmiştir [23].



Sekil 1.5 Akım baskılı elektromanyetik fren [23]

#### 1.4.3. Elektromanyetik histerezis fren

Manyetizmadaki histerezis etkisi, birbirine takılan ancak fiziksel temas halinde olmayan iki temel bileşenin - ağsı bir kutup yapısı ve özel bir çelik rotor/şaft tertibatı - kullanılmasıyla tork kontrolüne uygulanır. Kutup yapısına enerji verilene kadar, çekme kabı mil yatakları üzerinde serbestçe dönebilir. Kutup yapısına bir alan bobininden bir mıknatıslanma kuvveti uygulandığında, hava boşluğu bir akı alanı haline gelir ve rotor manyetik olarak kısıtlanır,

kutup yapısı ile rotor arasında bir frenleme veya kavrama hareketi sağlar. Şekil 5'te elektromanyetik histerezis fren kesiti verilmiştir [24].



Şekil 1.6 Elektromanyetik histerezis fren kesiti [24]

#### 1.4.4. Girdap akım fren

İletken bir malzeme zamana bağlı olarak değişen bir manyetik alan etkisinde kaldığında, manyetik akıdaki değişiklik nedeniyle malzemede girdap akımları indüklenir. Girdap akımları malzeme boyunca bir döngü halinde yolunu tamamlar ve uygulanana karşı bir manyetik alan oluşturur [25]. Ayrıca, indüklenen girdap akımları, girdap akımının etkin değerinin ve iletken malzemenin direncinin karesiyle orantılı oranda mekanik enerjiyi elektriksel olarak tüketir [26,27]. Ayrıca iki manyetik alanın polaritelerine bağlı olarak birbirlerini zayıflatırlar ve bir frenleme kuvveti oluşur Girdap akımı frenleri, tren, hız treni veya herhangi bir araç gibi hareket eden bir nesneyi yavaşlatmak ve ayrıca elektrikli makinelerin yük testleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Konvansiyonel fren sistemlerinden farklı olarak girdap akımı frenleri sürtünmesizdir ve fren tasarımında kullanılan malzemelerde daha az hasar meydana gelir. Ayrıca frenin sistem tepkisi daha sürdürülebilirdir ve daha az bakım gerektirir [28].

### 1.4.5. Elektromanyetik tozlu fren

Elektromanyetik tozlu frenler, sahip olduğu geniş çalışma torku aralığı sayesinde tasarımları diğer elektromekanik frenlerden eşsizdir. Elektromekanik bir fren gibi, gerilim ile tork neredeyse doğrusaldır; bununla birlikte, bir manyetik tozlu frende tork çok hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Bu, tel sarma, folyo ve film gerilim kontrolü ve bant gerilim kontrolü gibi gerilim kontrol sistemleri için ideal hale getirir. Seri tepki vermeleri sebebiyle manyetik kart okuyucular, ayırma makineleri ve etiketleme ekipmanları gibi yüksek döngülü uygulamalarda da tercih edilmektedir.

• Hızlı tepki ve doğru kontrol: Voltajdan torka neredeyse doğrusaldır, bu nedenle bağlantı son derece hızlıdır ve manyetik parçacık birimlerinin kontrol edilebilirliği çok doğrudur.

• Kararlı tork: Tork, hızdan bağımsızdır, ancak alana uygulanan voltaj/akım ile orantılıdır ve ünitelerin devir aralığı aralığında sabit torka izin verir.

• Uzun ömür: Manyetik parçacıkların aşınma oranı şiddetli değil kademeli olduğundan, ünitelerin ömrü çok uzundur.

• Mükemmel kayma kapasitesi: Ünitelerin mükemmel 1s1 dağılımı ve yapıları nedeniyle, sabit bir kayma modunda çalışabilirler, bu da onları gerilim kontrol uygulamaları için ideal kılar.

Şematik gösterimi Şekil 1.7'da verilmiştir [29].



Şekil 1.7 Elektromanyetik tozlu fren şematik gösterimi [29]

Elektromanyetik tozlu fren üç temel bileşenden oluşur: bir bobin, bir stator ve bir rotor.

Frene elektrik akımı verildiğinde bobin içindeki manyetik alan akımın büyüklüğü ile orantılı olarak değişmeye başlar. Manyetik alandaki değişimler, rotor ve stator arasına yerleştirilen özel tozun viskozitesini değiştirir.

Bobine bir elektrik akımı uygulandığında, parçacıklar manyetik alan kuvvet çizgileri boyunca hizalanır **Şekil 1.8**'de gösterilmiştir, rotor ve stator arasında bir sürükleme bağı oluşturur ve böylece frenleme etkisi yaratır. Akım kesildiğinde, toz merkezkaç kuvveti tarafından statora doğru itilir, böylece rotoru dönebilecek şekilde serbest bırakır [30].



Şekil 1.8 Elektromanyetik tozlu fren çalışma prensibi [30]

### 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu tez çalışmasında gergi kontrol sistemlerinde çokça kullanılan elektromanyetik frenlerden olan elektromanyetik tozlu freninin tasarım parametrelerinin optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deneysel tasarım metodu olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Optimizasyon metodu olarak sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır.

#### 2.1. Taguchi Metodu

Taguchi'nin teknikleri mühendislik tasarımında yaygın olarak kullanılmıştır [31,32] . Taguchi yöntemi, en iyi ürün kalitesi için sağlam bir süreç ve sonuç elde etmek için sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarım prosedürlerini içerir [33,34] . Taguchi'nin tekniklerinin temel güveni, parametre tasarımının kullanılmasıdır [35].Minimum varyasyon ile bir kalite özelliğinin (performans ölçüsü) en iyi seviyelerini üreten parametre (faktör) ayarlarını belirlemeye odaklanan ürün veya süreç tasarımı için bir mühendislik yöntemidir. Taguchi tasarımları, çeşitli koşullarda tutarlı ve optimum şekilde çalışan süreçlerin tasarlanması için güçlü ve verimli bir yöntem sağlar. En iyi tasarımı belirlemek için, süreci çeşitli tasarım parametre seviyelerine maruz bırakan stratejik olarak tasarlanmış bir deneyin kullanılmasını gerektirir.

Deneysel tasarım yöntemleri 20. yüzyılın başlarında geliştirildi ve o zamandan beri istatistikçiler tarafından kapsamlı bir şekilde araştırıldı, ancak uygulayıcılar tarafından kullanımı kolay değildi. Taguchi'nin deney tasarımına yaklaşımının benimsenmesi ve istatistik konusunda sınırlı bilgisi olan kullanıcılar için uygulanması kolaydır [14].

Taguchi, kayıp fonksiyonu olarak tanımlanan, bununla birlikte gürültü oranı (S/N - Signal/Noise) fonksiyonu olarak ta tanımlanan üç değişik amaca uyumlu fonksiyon vardır. Bunlar;

• Performans karakteristiği adı verilen sonucun en düşük en iyi olduğu durumda:

$$S/_{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_{i}^{2}\right)$$
(2.1)

• En yüksek (büyük) en iyi olduğu durumda:

$$S/_N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$$
 (2.2)

• Nominal en iyi olduğunda:

$$S/_{N} = 10\log(\frac{\bar{y}^{2}}{S^{2}})$$
 (2.3)

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{2.4}$$

$$S^{2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2} \text{ dir.}$$
(2.5)

Burada  $y_{i=}$  Performans karakteristiğinin i. gözlem değeri n = denemedeki test sayısı,  $\bar{y}$ = Gözlem değerlerinin ortalaması,  $S^2$  = Gözlem değerlerinin varyansı olup S/N oranı büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülür [36].

#### 2.2. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar analizi, analitik olarak hesaplanamayacak kompleks geometrili ve lineer olmayan malzeme özelliklerini içeren mühendislik problemlerinin çözümü için geliştirilen sayısal analiz tekniğidir [37]. Problem geometrisini çok sayıda küçük parçalara ayırarak, sayısal olarak çözülebilecek bir model oluşturulur[4]. Problem geometrisi mesh olarak adlandırılan işlem ile sonlu elemanlar bölünür. Bu elemanlar düğüm noktaları birleşmesi ile oluşur. Her bir düğüm noktası kadar denklemler çözülür. Matematiksel denklemler, her bir elementin davranışını tahmin etmeye yardımcı olur.

Analiz çalışmaları bilgisayar destekli mühendislik yazılımları sayesinde daha hızlı bir şekilde yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında analiz yazılımları arasında güçlü olan ANSYS ile yapılacaktır. Ansys yazılımında bir çok modül bulunmaktadır. Başlıca modüller Ansys yapısal analiz, multifizik, akışkanlar dinamiği, elektromanyetik analizler, çarpışma testleri ve burkulma testleri gibi modüller bulunmaktadır. Elektromanyetik analiz çalışmalarını Ansys Maxwell ile yapılacaktır. Ansys Maxwell, elektrik motorları, eyleyiciler, algılayıcılar, dönüştürücüler ve diğer elektromanyetik ve elektromekanik araçların analizi ve tasarımı için güçlü bir yazılımdır. Yazılım yıllardır gerek akademik çalışmalarla gerek endüstri uygulamaları ile kendini ispatlamış ve uygulamada yer bulan bir büyük yazılımdır[38].

#### 2.3 Elektromanyetik Tozlu Fren Optimizasyonu

Gergi kontrol sistemlerinde çokça kullanılan elektromanyetik sistemlerden olan elektromanyetik tozlu fren optimizasyon çalışmaları yapılması kararlaştırılmıştır. Bu çalışmada 120 Nm tork kapasitesinde bir dijital elektromanyetik tozlu fren prototipi ortaya koyulmuştur.

Deneysel tasarım yöntemi olarak taguchi metodu kullanılmıştır. Deneysel tasarımlarda değişken ve seviye sayısı çoğaldıkça yapılması gereken deney miktarı çoğalacaktır. Taguchi yöntemi ile daha az deney uygulaması yapılarak en iyi sonuç elde edilmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında 6 parametre, 3 seviye tespit edilmiştir. Eğer taguchi metodu kullanılmasaydı 3^6=729 analiz yapılması gerekecektir. Deney tasarımı için L27 ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımı hazırlanmıştır. Deney tasarımı hazırlanırken Minitab yazılımı kullanılmıştır.L27 ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımı y. Faktörler ve seviyeler **Tablo 2.1**'de verilmiştir. Deney listesi **Tablo 2.2**de verilmiştir.

	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
A:Stator Malzemesi	St 1008	St 37	Dökme Demir
B:Rotor Malzemesi	St 1008	St 37	Dökme Demir
C:Hava Boşluğu [mm]	0,5	1	1,5
D:Çıkıntı Adet	12	10	8
E:Açı (Rotor) [°]	30	45	60
F:Yanal Kalınlık (Rotor) [mm]	1	3	5

	A 1	D	0 1		•	1 .		
Tablo	2.	Denev	taktör	ve	sevive	leri		
		Deney	1011101					
FAKTÖRLER								
-----------	---	---	---	---	---	--	--	--
А	В	С	D	E	F			
1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	2	2			
1	1	1	1	3	3			
1	2	2	2	1	1			
1	2	2	2	2	2			
1	2	2	2	3	3			
1	3	3	3	1	1			
1	3	3	3	2	2			
1	3	3	3	3	3			
2	1	2	3	1	2			
2	1	2	3	2	3			
2	1	2	3	3	1			
2	2	3	1	1	2			
2	2	3	1	2	3			
2	2	3	1	3	1			
2	3	1	2	1	2			
2	3	1	2	2	3			
2	3	1	2	3	1			
3	1	3	2	1	3			
3	1	3	2	2	1			
3	1	3	2	3	2			
3	2	1	3	1	3			
3	2	1	3	2	1			
3	2	1	3	3	2			
3	3	2	1	1	3			
3	3	2	1	2	1			
3	3	2	1	3	2			

Tablo 2.2 Taguchi deney tablosu L27

Deney tasarımı hazırlandıktan sonra model tasarımları analize uygun olarak sadeleştirilerek hazırlandı. Yapı sadeleştirilmiş hali ile stator, rotor, bobin ve tozdan oluşmaktadır. Tozlar modellenirken rotordaki tepeler ile stator arasında tam dolu olacak şekilde katı model olarak modellendi. Yapının kesit alınmış hali Şekil 8 verilmiştir. Rotor üzerindeki faktörler Şekil 9 ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Hava boşluğu stator ve rotor çıkıntı tepe noktaları arasındaki boşluk miktarıdır.



Şekil 2.1 Elektromanyetik tozlu frenin kesiti



Şekil 2.2 Rotor parametre ayrıntıları

Elektromanyetik analiz için Maxwell modülü kullanılmıştır sonrasında sonuçlar transient modülü bağlanılmıştır. Maxwell modülünde malzemeler, bobin Amper/Turns tanımlanıp koşturulmuştur. Elektromanyetik analizinde yapının sonlu elemanlar ağına bölünmesi Şekil Şekil 2.3'te verilmiştir. Yapı 547884 elemana ayrılmıştır. Bobin 750 A/T olarak tanımlanmıştır Şekil 2.4'te paylaşılmıştır.



Şekil 2.3 Elektromanyetik analiz için yapının sonlu elemanlara ayrılması



Şekil 2.4 Bobinin modellenmesi

Malzemeler stator ve rotor için st1008, st37 ve dökme demir olarak deney tasarımına göre tanımlanmıştır. Bobin ve toz için sırasıyla bakır ve demir olarak tanımlanmıştır. St1008, st37 ve dökme demir için B-H eğrileri sırasıyla **Şekil 2.5**, **Şekil 2.6** ve **Şekil 2.7**'de paylaşılmıştır.







Şekil 2.6 St37 B-H eğrisi



Şekil 2.7 Dökme demir B-H eğrisi

Transient modülü için analiz işlemleri mesh, sınır şartları belirtilmesi, analizin koşturulması ve sonuç olarak tork değerlerinin alınması ile sonuçlanmıştır. Yapının sonlu elemanlara bölünmüş hali **Şekil 2.8**'de verilmiştir. Yapı 42938 elemana ayrılmıştır ve bu elemanlar 70776 düğüm noktası ile birbirine bağlanmıştır.



Şekil 2.8 Yapının sonlu elemanlara bölünmesi

Yapı body-ground revolute joint ile sınır şartı belirtilmiştir. Dönme açısı 5° olarak tanımlanmıştır. Deneysel testlerde tork anahtarı ile ölçüm yapılma durumu ortalama olarak bu şekilde gerçekleşmektedir. Maxwel modülünden elde edilen sonuçlar Body force density olarak aktarılmıştır ve **Şekil 2.9**'da gösterilmiştir. Tanımlanan dönme açısı sınır şartı **Şekil 2.10**'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Body force density



Şekil 2.10 Transient sınır şartı

## **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Taguchi deney tasarımı ile hazırlanan ve sonlu elemanlar analizi yapılan çalışmaların sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır.

Deney 1 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney 1 manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 3.2 Deney 1 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 2 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 'de gösterildi.



Şekil 3.4 Deney 2 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 3 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Deney 3 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 4 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Deney 4 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 5 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak **Şekil 3.9** ve **Şekil 3.10** 'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Deney 5 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 6 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak **Şekil 3.11** ve **Şekil 3.12** 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Deney 6 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 7 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak **Şekil 3.13** ve **Şekil 3.14** 'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.14 Deney 7 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 8 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak **Şekil 3.15**ve **Şekil 3.16** 'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Deney 8 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 9 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.17** ve **Şekil 3.18** 'de verilmiştir.





Deney 10 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.19 ve Şekil 3.20 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Deney 10 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 11 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.21** ve **Şekil 3.22** 'de verilmiştir.



Şekil 3.22 Deney 11 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 12 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.23** ve **Şekil 3.24** 'de verilmiştir.





Şekil 3.24 Deney 12 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 13 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.25 ve Şekil 3.26 'da gösterildi.



Şekil 3.26 Deney 13 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 14 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.27** ve **Şekil 3.28** 'de verilmiştir.



Şekil 3.28 Deney 14 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 15 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.29** ve **Şekil 3.30** 'da verilmiştir.





Deney 16 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.31** ve **Şekil 3.32** 'de verilmiştir.



Şekil 3.32 Deney 16 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 17 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.33 ve Şekil 3.34 'te gösterilmiştir.



Şekil 3.34 Deney 17 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 18 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.35** ve **Şekil 3.36** 'da verilmiştir.



Şekil 3.36 Deney 18 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 19 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.37 ve Şekil 3.38 'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.38 Deney 19 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 20 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.39 ve Şekil 3.40 'ta gösterilmiştir.



Şekil 3.40 Deney 20 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 21 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.41 ve Şekil 3.42 'de verilmiştir.





Deney 22 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.43** ve **Şekil 3.44** 'te verildi.



Şekil 3.44 Deney 22 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 23 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.45 ve Şekil 3.46 'da verilmiştir.



Şekil 3.46 Deney 23 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 24 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.47 ve Şekil 3.48 'de verilmiştir.



50 Şekil 3.48 Deney 24 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

100 (mm)

Deney 25 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.49 ve Şekil 3.50 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.50 Deney 25 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 26 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.51 ve Şekil 3.52 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.52 Deney 26 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 27 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.54 Deney 27 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Yapılan çalışmalar sonucu tork değerleri Tablo 3.1'deverilmiştir.

Deney	Tork [N.m]	Deney	Tork [N.m]	Deney	Tork [N.m]
1	103,64	10	100,85	19	72,845
2	118,14	11	92,316	20	58,762
3	94,038	12	70,208	21	61,168
4	91,447	13	83,741	22	65,369
5	91,293	14	85,474	23	55,597
6	83,397	15	51,288	24	60,66
7	85,844	16	75,368	25	63,501
8	85,238	17	69,748	26	45,916
9	72,916	18	41,687	27	45,943

Tablo 3.1 Tork değerleri

Taguchi'nin belirttiği üç durumdan biri olan ne kadar büyükse o kadar iyidir. Yaklaşımı ile Minitab yazılımı ile deney çalışması sinyal/gürültü oranları hesaplatılmıştır. Faktörler için sinyal/gürültü oranları **Şekil 3.55**'te verilmiştir.



Şekil 3.55 Deney faktörleri için sinyal/gürültü oranları



A ve B parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.56'da verilmiştir.

Şekil 3.56 3 boyutlu Tork-A;B grafiği

A ve C parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.57'de verildi.



Şekil 3.57 3 boyutlu Tork-A;C grafiği



A ve D parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.58'de verilmiştir.

Şekil 3.58 3 boyutlu Tork-A;D grafiği

A ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.59'da verildi.



Şekil 3.59 3 boyutlu Tork-A;E grafiği


A ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.60'ta verildi.

Şekil 3.60 3 boyutlu Tork-A;F grafiği

B ve C parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.61'de verildi.



Şekil 3.61 3 boyutlu Tork-B;C grafiği



B ve D parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.62'te verilmiştir.

Şekil 3.62 3 boyutlu Tork-B;D grafiği

B ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.63'te verilmiştir.



Şekil 3.63 3 boyutlu Tork-B;E grafiği



B ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.64'de verilmiştir.

Şekil 3.64 3 boyutlu Tork-B;F grafiği

C ve D parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.65'te verilmiştir.



Şekil 3.65 3 boyutlu Tork-C;D grafiği



C ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile **Şekil 3.66**'da verildi.

Şekil 3.66 3 boyutlu Tork-C;E grafiği

C ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.67'de verilmiştir.



Şekil 3.67 3 boyutlu Tork-C;F grafiği



D ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.68'de paylaşıldı.

Şekil 3.68 3 boyutlu Tork-D;E grafiği

D ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.69'da paylaşıldı.



Şekil 3.69 3 boyutlu Tork-D;F grafiği



E ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile **Şekil 3.70**'te verilmiştir.

Şekil 3.70 3 boyutlu Tork-E;F grafiği

Minitab ile %95 anlamlılık düzeyine göre varyans analiz yaptırılmıştır. Varyans analiz sonuçları ve parametrelerin katkı yüzdelikleri **Tablo 3.2**'de gösterilmiştir.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
А	2	67,545	33,7723	91,02	0	47,60%
В	2	26,877	13,4386	36,22	0	18,94%
С	2	0,125	0,0627	0,17	0,846	0,09%
D	2	1,799	0,8996	2,42	0,125	1,27%
Е	2	24,737	12,3685	33,33	0	17,43%
F	2	15,617	7,8083	21,04	0	11,01%
Error	14	5,195	0,371			3,66%
Total	26	141,895				100,00%

Tablo 3.2 Varyans analiz sonuçları

C ve D parametreleri %95 anlamlılık düzeyine göre anlamsız olduğu tespit edilmiştir. Oluşturulan deneyin R^2= 96,34% değeri Minitab ile hesaplatılmıştır. Regresyon denklemi aşağıdaki gibidir.

SNRA1=37,215 + 1,965 A\_1 - 0,058 A\_2 - 1,908 A\_3 + 1,217 B\_1 + 0,009 B\_2 - 1,226 B\_3- 0,003 C\_1 + 0,085 C\_2 - 0,082 C\_3 + 0,014 D\_1 - 0,323 D\_2 + 0,309 D\_3 + 0,996 E\_1+ 0,297 E\_2 - 1,292 E\_3 - 1,075 F\_1 + 0,560 F\_2 + 0,515 F\_3

Hazırlanan deney modeli ve nümerik analiz sonuçları kullanılarak ful faktöriyel deney hazırlanmıştır ve deney sonuçları Minitab kullanılarak tahmin ettirilmiştir. Ful faktöriyel deney sonuçları için tork değerleri **Şekil 3.71** verilmiştir.



Şekil 3.71 Ful faktöriyel deney sonuçları

Sinyal/gürültü oranlarının paylaşıldığı grafiğe göre maksimum tork kapasitesi elde edebileceğimiz ve deney uyumluluğunu tespit etmek için yapılan deneyler arasında olmayan

rasgele iki farklı deney analizi koşturulmuştur. Bu deney parametre seviye **Tablo 3.3**'te gösterilmiştir.

Deney	А	В	С	D	E	F
28(maksimum)	1	1	2	3	1	2
Rasgele 1	1	1	2	3	1	3
Rasgele 2	2	2	1	1	2	3

Tablo 3.3 Deney 28 ve rasgele deneylerin seviyeleri

Minitab ile bu deney sonuçları tahmin ettirilmiştir. Yapılan deneylerin tahmin ve nümerik neticeler **Tablo 3.4**' te gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Deney 28 ve rasgele deneylerin sonuçları

Deney	Tahmin Tork [N.m]	Nümerik Tork [N.m]	Yüzdelik Fark
28	117,72	119,84	1,80%
Rasgele 1	115,89	115,05	-0,12%
Rasgele 2	82,18	81	-1,44%

Görüleceği üzere sonuçlar birbiri ile gayet uyumludur. Yapılan deney modelinin uyumluluğunu bir kez daha tespit etmiş olduk. Deney 28 manyetik akı yoğunluk dağılımı ve vektörleri sıralı olarak **Şekil 3.72** ve **Şekil 3.73**'de gösterilmiştir.







Geometrik optimizasyonda en etkili faktörün E:Açı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizlere ek olarak E faktörü için üç farklı seviye daha eklenip yeni analizler koşturulmuştur. Bu durumda hazırlanan deney faktör, seviyelerler ve sonuçlar **Tablo 3.5**'te verilmiştir.

Deney	А	В	С	D	E[°]	F	Tork[N.m]
29	1	1	2	3	27,5	2	118,91
30	1	1	2	3	25	2	118,38
31	1	1	2	3	22,5	2	122,81

Tablo 3.5 Ek olarak hazırlanan deneyler

Deney 29 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak **Şekil 3.74** ve **Şekil 3.75**'da gösterilmiştir.







Şekil 3.75 Deney 29 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 30 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak **Şekil 3.76** ve **Şekil 3.77**'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.76 Deney 30 manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 3.77 Deney 30 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 31 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sırasıyla **Şekil 3.78** ve **Şekil 3.79**'te verilmiştir.



Şekil 3.78 Deney 31 manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 3.79 Deney 31 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Yapılan bu deneylerin her birinde Amper/Turn oranı sabit 750 olarak gerçekleştirilmiştir. Deney 31 için iki farklı Amper/Turn oranı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bobin parametresi değerlendirmesi için Amper/Turn ve sonuçları **Tablo 3.6**'da gösterilmiştir.

Deney	Amper/Turn	Tork [N.m]
31	750	122,81
32	700	119,97
33	800	120,54

Tablo 3.6 Bobin deney parametre ve sonuçları

Deney 32 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.80 ve Şekil 3.81'te paylaşılmıştır..





Şekil 3.81 Deney 32 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 33 manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörleri sıralı olarak Şekil 3.82 ve Şekil 3.83'de gösterilmişitir.



Şekil 3.83 Deney 33 manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Deney 31 model özellikleri Tablo 3.7'te gösterilmiştir.

Deney	31
A:Stator Malzemesi	St 1008
B:Rotor Malzemesi	St 1008
C:Hava Boşluğu [mm]	1
D:Çıkıntı Adet	8
E:Açı (Rotor) [°]	22,5
F:Yanal Kalınlık (Rotor) [mm]	3
Amper/Turn	750
Tork [N.m]	122,81

Tablo 3.7 Deney 31 model özellikleri

Deney 31 manyetik akı yoğunluk dağılımı ve vektörleri 3 boyutlu olarak sıralı olarak **Şekil 3.84** ve **Şekil 3.85**'da gösterilmiştir.



Şekil 3.84 Deney 31 3 boyutlu manyetik akı yoğunluk dağılımı



Şekil 3.85 Deney 31 3 boyutlu manyetik akı yoğunluk vektörleri

## 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada gergi kontrol sistemleri hakkında temel gereklilikler anlatılmıştır. Bu sistemler de kullanılan çeşitli elektromanyetik fren sistemlerini ve çalışma prensipleri basit bir şekilde ortaya koyulmuştur. Ülkemizde belirlenen torku üretebilen, gergi kontrol sistemlerinde veya birçok diğer sektörde kullanılabilen elektromanyetik frenler üretilmektedir. Ancak bu ürünler geliştirilmesi teknoloji transferi ile sağlanmıştır. Elektromanyetik tozlu fren akım uyartımla hassas kontrol edilebilir bir tork aralığı sağlaması sebebi bu çalışmada tasarım parametreleri optimizasyon çalışmaları için elektromanyetik tozlu frenler tercih edilmiştir. Çalışmada deney tasarımı taguchi metodu ile yapılmıştır. Minitab yazılımı kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmaları sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilmiştir. Ansys Workbench yazılımı kullanılmıştır. Taguchi ve sonlu elemanlar metodu kavramlarından bahsedilmiştir.

A: Stator malzemesi için farklı malzemeler ile yapılan çalışmalar sonucu en uygun St 1008 malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca varyans analiz sonuçları incelendiği takdirde deney modelinde tork değerine katkısı %47,60 ile A parametresi en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Stator malzemesi değişiklikleri ile elektromanyetik tozlu fren kapasiteleri kontrol edilebilir bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.

B:Rotor malzemesi için stator malzemelerinde olduğu gibi en uygun malzemenin St 1008 olduğu tespit edilmiştir. Tork değerine katkısı %18,94 olarak hesaplanmıştır. Seçilen parametreler arasında en etkili ikinci parametre olmuştur. Rotor malzemesi değişiklikleri elektromanyetik frenler için anlamlı bir parametre odluğu tespit edilmiştir.

C: Hava boşluğu %95 anlamlılık düzeyine göre anlamsız olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi tozun modellenmesinde katı ve ful dolu olarak modellenmesi olmuş olasıdır. S/N oranları göz önünde bulundurulduğu durumda1mm seçilmesi uygun olacaktır.

D: Rotor çıkıntı adeti %95 anlamlılık düzeyine göre anlamsız olduğu tespit edilmiştir. C parametresinde olduğu gibi bu durum modellemeden kaynaklanmış olabilir. S/N oranları göz önünde bulundurulduğu durumda 8 adet seçilmesi uygun olacaktır.

E: Açı parametresi için yapılan analizler sonucu en uygun açının 30° olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tork kapasitesini malzeme parametrelerinden sonra en çok etkili olan parametre %17,43 ile E parametresi olmuştur. Hedeflenen tork kapasitesini yakalamak için geometride en etkili parametre olarak tespit edilen açı parametresi seviyeleri değiştirilerek en uygun açının 22,5° olduğu tespit edilmiştir. Fren kapasitesi için etkili bir tasarım parametresi olduğu ortaya koyulmuştur.

F: Yanal kalınlık yapılan çalışmalar doğrultusunda 3mm olduğu tespit edilmiştir. Tork kapasitesine etkisi %11,01 olarak hesaplanmıştır. Elektromanyetik tozlu fren tasarım çalışmalarında dikkate alınması gerektiği gözlemlenmektedir.

Çalışma için hata değeri %3,66 hesaplanmıştır. Deney çalışması için gayet yeterli bir seviyededir. R^2=%96,34 olarak hesaplanması ve yapılan rasgele çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılması sonucu uyumlu bir deney modeli oluşturulduğu tespit edilmiştir.

72

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda 120 N.m tork kapasiteli optimum elektromanyetik tozlu fren deney 31 modeli nihai dijital prototipi ortaya konulmuştur.

Bu çalımalar neticesinde elektromanyetik tozlu fren tasarım parametreleri hakkında birçok veri elde edilmiştir. Bu çalışma sonuçları gelecekte yapılabilecek birçok bilimsel çalışmayı ve bu tür ürünlerin geliştirilmesini destekler nitelikle olmasını temenni ederim.

## KAYNAKÇA

[1] Dwivedula,R.V., Zhu, Y., Prabhakart, R.P., (2006) Characteristics of active and passive dancer: A comparative study, Control Engineering Practice, Vol:14, 409-423

[2] Şefkat, G., (1993) Bir Elektromekaniksel Sistemin Tasarımı ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.

[3] Şefkat, G., (2009) Elektromekanik Gergi Denetim Sisteminin DGM Kullanarak İyileştirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(1), 11-22.

[4] Gülbahçe, M.O., (2013). Orta Güçlü Bir Girdap Akımı Freni Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

[5] Nurkaliyev, M., (2020). Elektromanyetik Fren Sistemlerinin Matematiksel Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

[6] Yılmaz, İ.B., (2021). Yay Etkili Elektomanyetik Frenlerin Doğrusal Olmayan Analitik Yöntemler Kullanılarak Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.

[7] Jun, G., Lamei, X. (2018). The study and design of tension controller. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 113. 012150. 10.1088/1755-1315/113/1/012150.

[8] Xu, S., Wang, C., (2012). Structure analysis and design of magnetic powder clutch for vehicle based on the analysis of electromagnetic. 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2870-2873, doi: 10.1109/CECNet.2012.6201990.

[9] Yasa, Y., Sincar, E., Ertugrul, B.T., Mese, E., (2014). Design considerations of electromagnetic brakes for servo applications.IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).768-774

74

[10] Shin, H., Choi, J., Cho, H., Jang, S., (2013). Analytical Torque Calculations and Experimental Testing of Permanent Magnet Axial Eddy Current Brake. IEEE Transactions of Magnetics. Vol. 49, No. 7.

[11] Özenç, O., (2018). Bir Makara Sarım Makinasının Modellenmesi, Benzetimi ve Gergi Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, Türkiye.

[12] Wang, C., Wang, Y., Yang, R., Lu, H., (2004). Research on Precision Tension Control System Based on Neural Network. IEEE Transactions on Industrial Electtronics, 51(2).

[13] Wang, C., Wang, Y., Yang, R., Lu, H., (2005). Research on Precision Tension Control System. Springer- Verlag London Limited.

[14] Karna, S.K., Sahai, R., (2012). An Overview on Taguchi Method. International Journal of Engineering and Mathematical Sciences,1,11-12.

[15] Horton, W. F., Goldberg, S., (1995). Power Frequency Magnetic Field and Public Health.

[16] Özaktaş, H. M., (1999). Günlük Hayatta Karşılaşılan Elektromanyetik Alanlar ve İnsan Sağlığı. Bilişim Toplumuna Giderken Elektromanyetik Kirlilik Etkileri Sempozyumu, 11 Kasım, Ankara.

[17] Güler, G., Atalay, N. S., (1999). Elektrik Alanın Biyolojik Etkileri. Bilişim Toplumuna Giderken Elektromanyetik Kirlilik Etkileri Sempozyumu,11 Kasım, Ankara.

[18] Kalenderli, Ö., Yıldırım, H., Mardikyan, N, K., (1997). Yüksek Gerilim Hatları Çevresindeki Manyetik Alanların Hesabı, Biyomut 97, 13-14 Ekim, İstanbul.

[19] Güçlü, G.G., (2011). 50 Hz Elektromanyetik Alanlar Ve Biyolojik Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 4-9.

[20] Umurkan, N., Şeker, S., Çakır, H., (1995). Ulusal Orta ve Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hatlarına Yaklaşım Mesafelerinin Elektrik ve Manyetik Alanlara Göre Tespit Edilmesi.
Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, 11–17 Eylül, Bursa.

[21] http://www.sunrisescn.com/press/show.asp?/155.html erişim tarihi:24.12.21

[22]<u>https://www.montalvo.com/article-library/what-is-tension-control/</u> erişim tarihi:24.12.21

[23]<u>https://www.derelifren.com.tr/tr/%C3%A7al%C4%B1%C5%9Fma-prensipleri~117</u> erişim tarihi:05.01.22

[24] Current Contrelled Hysteresis Brakes, (1984). Magnetic Technologies LTD.

[25] Davies, E.J., (1966). General Theory of Eddy Current Couplings and Brakes. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 113, no.5, pp. 825-837.

[26] Schieber, D.,(1974). Braking Torque on Rotating Sheet in Stationary Magnetic Field," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 121, no. 2, pp. 117–122.

[27] Wiederick, H. D., (1987). Gauthier, N., Campbell, D. A., and Rochon, P., "Magnetic Braking: Simple Theory and Experiment," American Journal of Physics, vol. 55, no. 6, 500–503.

[28] Sodano, H., Bae, J., (2004). Eddy Current Damping in Structures. The Shock and Vibration Digest, vol. 36, no.6, pp. 469-478.

[29]<u>https://www.ngclark.com.au/brands/ogura/electromagnetic-particle-brake/</u> erişim tarihi:04.01.22

[30]<u>https://www.ibd-wt.de/en/brakes-for-machines/magnetic-powder-brakes/</u>erişim tarihi:04.01.22

[31] Ross., P.J., (1996). Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design - 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill.

[32] Phadke, M.S., (1989). Quality Engineering Using Robust Design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

[33] Taguchi, G., (1987). System of Experimental Design", Unipub/Kraus, International Publication.

[34] Taguchi, G., (1993). Taguchi on Robust technology development methods. ASME Press, New York, 1-40.

[35] Ealey Lance A., (1994). Quality by design Taguchi methods and US industry. 2nd ed. Sidney: Irwin professional publishing and ASI Press, p. 189–207.

[36] Taşgetiren, S., Gökçe, B., (2009). Kalite İçin Deney Tasarımı. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(1), 71-83.

[37] 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.

[38] http://www.analizansys.com/ansys-maxwell-satis-fiyati/ erişim tarihi: 24.12.21

## ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mücahit ERGÜNEŞ

**Doğum Yeri ve Tarihi:** İSTANBUL 29.10.1996

**E-posta:** mucahitergunes@gmail.com

Lisans: Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği (2019)

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (devam ediyor)

Mesleki Deneyim: MÜRGEMER- Analiz Mühendisi (09.2019-03.2020)