T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROMANYETİK FREN SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Maxat NURKALIYEV

DANIŞMAN
Prof. Dr. Erol UZAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2020

Bu çalışma, 8.12.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Erol UZAL (Danışman)
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Şule KAPKIN
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Erman ASLAN
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaş
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Metin Orhan KAYA
İstanbul Teknik Üniversitesi
Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi

Doç. Dr. Yener TAŞKIN
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Her akademik araştırmalar ve çalışmalar gibi, bu çalışmada da, dinamik hız ile gelişen teknoloji dünyasında, insanlık uğrunda, elektromekanik alanındaki araştırma ve çalışmalara katkı sağlamak için ele alınmıştı. Emniyet faktörü ve hassasiyet gerektiği tüm sistemlerde kullanılan elektromanyetik fren sistemleri, Savunma Sanayisi başta olmak üzere asansör ve matbaa gibi sektörlerin vazgeçilmez bir parçasıdır. Dolayısıyla, bu çalışmamızda imkan nispetince amacımıza ve çalışma kapsamına ulaşmaya çalıştık. Yani elektromanyetik alanın büyüklüklerini inceleyerek mekanik davranışının matematiksel modelini oluşturmaya çalıştık. Bu alandaki tüm verileri gözden geçirerek, elektromanyetik frenin sayısal boyutunu modellemeye çalıştık. İmalata açısından baktığımızda, kaliteli, yerli ürünlerin üretilmesine faydası olup ve 'Yerli Üretim' projesine âcizane katkımız sağlanacak ise, bu bizim için bir onurdur.

Uzun süren Yüksek lisans eğitim yolculuğu süresince, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen tüm hocalarıma, tüm süreçte ve tez aşamasında gece-gündüz emeği geçen sayın Prof. Dr. Erol UZAL hocama, tüm teknik destekleri ve personeli ile yanımda, omuz omuza, deney ve teknik çalışmalarımızda yardım eden EMF Elektromanyetik Fren ve Kavrama A. Ş kadrosuna şükranlarımız sonsuz. Her zaman destekleyen sevgili dostlarımıza ve ailemize teşekkürlerimizi bir borç biliriz.

Aralık 2020 Maxat NURKALIYEV

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
1.1. AMAÇ 3
1.2. TEZ KAPSAMI 4
2. GENEL KISIMLAR **7**
2.1. ELEKTROMANYETİK FREN VE KAVRAMA SİSTEMLERİNİN GEOMETRİK YAPISI 7
2.1.1. Yay Baskılı Elektromanyetik Fren. (YBF) 8
2.1.2. Akım Baskılı Elektromanyetik Fren (ABF) 11
2.1.3. Akım Baskılı Elektromanyetik Kavrama (ABK) 13
2.1.4. Akım Baskılı Elektromanyetik Fren ve Kavrama Grupları. (ABG) 15
2.1.5. Elektromanyetik Tozlu Fren ve Kavrama Sistemleri. (ABTF/ABTK) 17
2.1.6. Servo Motor Elektromanyetik Frenleri (SMF) 20
2.1.7. Doğal Mıknatıslı Elektromanyetik Fren (DMF) 21
3. Malzeme VE YÖNTEM **23**
3.1. MATEMATİKSEL MODELLEMENİN TANIMLARI 23
3.1.1. Model Geliştirme Etkinliği 23
3.1.2. Matematiksel Modelleme Niçin Gerekli? 23
3.1.3. Matematiksel Modelleme 24
3.1.4. Matematiksel Modellemenin Tanımı 24
3.1.5. Matematiksel Modelleme Yaklaşımları 26
3.1.6. Realistik veya Uygulamalı Modelleme. 26
3.1.7. Bağlamsal Modelleme 26
3.1.8. Eğitimsel Modelleme 27

3.1.9. Epistemolojik veya Teorik Modelleme 27
3.1.10. Bilişsel Modelleme 27
3.2. MODEL GELİŞTİRME 27
3.2.1. Elektromanyetik Kavramı 28
3.2.2. Maxwell Denklemlerinin Diferansiyel Förmülleri 30
3.2.3. Maxwell Denklemlerinin İntegral Förmülleri 32
3.3. MANYETİK ALANLARIN HESAPLANMASI VE HAVA BOŞLUKLARININ MANYETİK İLETKENLİĞİNİN DENEYSEL ÇALIŞMASI 34
3.3.1. Manyetik Devreler 36
3.3.2. Ampere Yasası 36
3.3.3. Ampere Yasasını Manyetik Devre Hesabında Kullanma Yöntemi 37
3.3.4. Manyetik Devre için Ohm'un Yasası. Linear ve Nonlinear Manyetik Dirençler 38
3.4. DEĞİŞKEN MANYETOMOTOR KUVVETLİ MANYETİK DEVRELERİN HESAPLANMASININ ÖZELLİKLERİ 39
3.4.1. Çekirdekteki (Statördeki) Kayıplar 40
3.5. FERROMANYETİK MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ 41
3.6. MANYETİK DEVRENİN HAVA BOŞLUĞUNUN AYARLANMASI 42
3.7. ELEKTROMEKANİK ENERJİ DÖNÜŞÜMÜN PRENSİPLERİ 45
3.7.1. Enerji Yöntemi 46
3.7.2. Enerji Dengesi 47
3.7.3. Tek Bobinli İndüksyon Manyetik Alan Sistemlerindeki Enerji 48
3.7.4. Enerjiden Manyetik Kuvvet ve Tork Belirleme 49
3.7.5. Akı Bağlantısı [λ] (The Flux Linkage) 50
3.7.6. Koenerjiden (Conergy) Manyetik Kuvvet ve Tork Belirleme 51
4. BULGULAR 54
4.1. KUVVET SİSMELERİ 54
4.2. ÖRNEK FREN SİSTEMİN İNCELENMESİ 54
4.2.1. Yay Kuvvetinin Hesaplanması 57
4.2.2. Frenin Çevre Kuvveti ve Sürtünme Momenti hesabı 57
4.2.3. Elektromanyetik Kuvvetin Hesaplanması 60
4.2.3.1. Endüktans Çevre Uzunluğunun Hesaplanması 62
4.2.4. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz 72
4.2.5. Deney 75
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 78

5.1. DURUM DEĞERLENDİRME 78
5.2. SONUÇ 81
KAYNAKLAR 82
EKLER 84
ÖZGEÇMİŞ 92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Elektrik motora montajı yapılmış elektromanyetik fren. 2

Şekil 2.1: Elektromanyetik frenler. 7

Şekil 2.2: Yay baskılı fren (YBF). 8

Şekil 2.3: Yay baskılı fren kesiti. 10

Şekil 2.4: Akım Baskılı Elektromanyetik Fren (ABF). 11

Şekil 2.5: Akım baskılı frenin kesiti. 12

Şekil 2.6: Akım baskılı kavrama türleri. 13

Şekil 2.7: Akım baskılı kavrama kesiti. 14

Şekil 2.8: Akım baskılı fren ve kavrama grubu. 15

Şekil 2.9: Akım baskılı grubun kesiti. 16

Şekil 2.10: Akım baskılı elektromanyetik tozlu fren. 17

Şekil 2.11: Akım baskılı elektromanyetik tozlu fren kesiti. 18

Şekil 2.12: Servo motor freni. 20

Şekil 2.13: Doğal mıknatıslı fren. 21

Şekil 3.1: Elektromanyetik Fren Parçaları. 28

Şekil 3.2: Düz bir iletken ve bobinin manyetik alanı. 34

Şekil 3.3: Nüfuz eden manyetik akının belirlenmesi: a) keyfi bir yüzey; b) düzgün bir manyetik alanda düz yüzey. 35

Şekil 3.4: Ampere yasası. 37

Şekil 3.5: Halka manyetik devre. 38

Şekil 3.6: B (H) Bağımlılığı - histerezis döngüsü. 41

Şekil 3.7: Fren montajında hava boşluğu ayarı. 44

Şekil 3.8: Elektromekanik enerji dönüşümün prensibinin basit şeması. 45

Şekil 3.9: Manyetik devre örneği. 46

Şekil 3.10 Elektromanyetik röle şeması. 49

Şekil 3.11: Tek bobinli sistemde enerji ve koenerjinin grafiksel davranışı. 52

Şekil 3.12: λ sabit olduğunda, Δx'in tek bobinli sistemdeki enerjiye etkisi ve enerji değişiminin grafiği 52

Şekil 3.13: *i* sabit olduğunda, Δx'in tek bobinli sistemdeki enerjiye etkisi ve enerji değişiminin grafiği 53

Şekil 4.1: Elektromanyetik fren sistemi için gerekli parçalar. 55

Şekil 4.2 Fren sisteminin genel çizimi. 55

Şekil 4.3: Elektromanyetik büyüklükler. 62

Şekil 4.4: Manyetik devredeki manyetik akı akış şeması. Yandan görünüş. 63

Şekil 4.5: Manyetik devredeki manyetik akı akış şeması. Üstten görünüş. 64

Şekil 4.6: Alan kesitinin değeri. 68

Şekil 4.7: Statörün üç boyuttaki katı resminde kesit alan değerleri. 68

Şekil 4.8: Paket programında analiz 73

Şekil 4.9: Baskı flanşın yer değiştirme pozisyonları: (a) elektromanyetik etkisinden statöre yapışık hali; (b) yayın etkisinden balatayı sıktığı hali. 74

Şekil 4.10: Statördeki manyetik alan dağılımı. 74

Şekil 4.11: Baskı flanşındaki manyetik alan dağılımı 75

Şekil 4.12: Montaj sıralaması 75

Şekil 4.13: Elektrik ve tork değerleri. 76

Şekil 4.14: Torklu anahtar ile statik torku testi. 77

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Maxwell denklemlerinin diferansiyel formüllerinin ifadesi.....31

Tablo 3.2: Maxwell denklemlerinin integral formüllerinin ifadesi. 33

Tablo 4.1: Frenin Torkuna göre sıralanması. 56

Tablo 4.2: Kullanılan balata malzemesinin sürtünme katsayısı tablosu.....58

Tablo 4.3: Endüktans çevre uzunluğunun alternatif değerleri.....67

Tablo 4.4: Alan değerlerinin karşılaştırılması. 67

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

A_{kesit} : S yüzeyindeki alan [m^2]

A_{balata} : Balatanın sürtünecek yüzey alanı A [m^2]

B : Manyetik endüksiyon (SI birimlerinde - [Tesla = Wb / m2 = $Wb/m2$]

B_{frm} : Ferromanyetik malzemedeki manyetik endüksiyon (SI birimlerinde - [Tesla = Wb / m2 = $Wb/m2$]

B_g : Hava boşluğundaki manyetik endüksiyon (SI birimlerinde - [Tesla = Wb / m2 = $Wb/m2$]

B_m : Maksimum manyetik endüksiyon (SI birimlerinde - [Tesla = Wb / m2 = $Wb/m2$]

B_{ort} : Manyetik endüksiyon (SI birimlerinde - [Tesla = Wb / m2 = $Wb/m2$]

c : Vakumda ışığın hızı (299 792 458 [m / s])

D : Elektrik indüksiyonu (SI birimlerinde - [Kulon / m2])

d : Çelik çekirdeğin kalınlığı [m]

$d_{ortalama}$: Ortalama sürtünme çapı [m]

E : Elektrik alan şiddeti (SI birimlerinde - [V / m])

$F_{çevre}$: Sürtünme yüzeindeki çevre kuvveti [N]

F_{em} : Elektromanyetik alan kuvveti [N]

F_{yay} : Sistemdeki yay tepki kuvveti [N]

f : Çeliğin ters mıknatıslanma sıklığı

g : Hava boşluğı (air gap) [m]

G : Çekirdek kütlesi [kg]

H : Manyetik alan şiddeti(SI birimlerinde [A / m])

H_{ort} : Ortalama manyetik alan şiddeti (SI birimlerinde [A / m])

H_g : Hava boşluğundaki manyetik alan şiddeti (SI birimlerinde [A / m])

H_{frm} : Ferromanyetik malzemedeki manyetik alan şiddeti (SI birimlerinde [A / m])

I, *i* : **S** yüzeyden geçen elektrik akımı (SI birimlerinde - [A]

k_{girdap} : Deneysel alınan katsayı [N/mm]

k_{fren} : Fren emniyet katsayı

k_r : Sabit katsayı

k_{yay} : Yay sabit katsayısı

L : Endüktans [H]

$\mathbf{L}_{yay}$: Yay uzunluğu [mm]

$\boldsymbol{l}$: Kapalı kontu, manyetik akı orta çizgisi uzunluğu [m]

$\boldsymbol{l_g}$: Hava boşluğu manyetik akı uzunluğu [m]

$\boldsymbol{l_{frm}}$: Ferromanyetik malzemede manyetik akı uzunluğu [m]

$\boldsymbol{l_{pratik}}$: Sanayi ortamında kullanılan manyetik akı uzunluğu [m]

$\boldsymbol{l_x}$: Üzerinden integrali alınan kontur uzunluğu [m]

$\mathbf{M}_{fren}$: Fren momenti [Nm]

$\mathbf{M}_{sürtünme}$: Sürtünme momenti [Nm]

N : Bakır telin sarım sayısı [adet]

$\mathbf{n_0}$: Maksimum motor devir sayısı [d/dak]

$\mathbf{P}_{çelik}$: Ferromanyetik malzemedeki enerji kaybı [J]

$\mathbf{P}_{girdap}$: Girdap akımından kaynaklı enerji kaybı [J]

$\mathbf{P}_{fren}$: Fren güç tüketimi [W]

$\mathbf{P}_{motor}$: Motorun nominal gücü [W]

$\mathbf{P_r}$: Histeresis nedei ile kayıp [J]

p : Özgül yüzey basıncı [N/mm^2]

$\mathbf{R}_{bobin}$: Bobin direnci [Ω]

$\mathbf{R_m}$: Manyetik devrenin manyetik direnci

$\mathbf{r_x}$: Çember yarıçapı [mm]

S : Yüzey

t : Zaman [sanye]

U : Gerilim [V]

$\mathbf{W}_{elektrik}$: Elektrik enerji [W]

$\mathbf{W}_{ema}$: Manyetik alanda depolanan enerji [J]

$\mathbf{W}_{mekanik}$: Mekanik enerji [J]

x : Bir yöne doğru hareket mesafesi

Φ : Manyetik akı [Wb]

α : H ve dl vektörlerinin arasındaki açı

λ : Akı bağlantısı (The Flux Linkage)

α : H ve dl vektörlerinin arasındaki açı

∇ : del işlemcisidifferansyel öperatörü

∇×E : *rot*E – E vektörünün rotoru

∇*E : divE – E vektörünün divarjansı

μ_a : Ortamın manyetik geçirgenlik katsayısı [H/m]

μ_0 : Ferromanyetik olmayan malzemenin (hava gibi) vakuumda manyetik geçirgenlik katsayısı $4\pi * 10^{-7}$ [H/m]

μ : Manyetik geçirgenlik katsayısı [H/m]

μ_{balata} : Balatanın sürtünme katsayısı

ρ : Çekirdek malzemenin özgül direnci

Ψ : Manyetik devredeki gerilim

Kısaltmalar	**Açıklama**
CGS	: Gauss ölçü birim sistemi
em	: Elektromanyetik
emf	: Elektromanyetik fren
ema	: Elektromanyetik alan
frm	: Ferromanyetik
mmk	: Manyetomotor kuvvet
emf	: Elektromanyetik fren
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROMANYETİK FREN SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Maxat NURKALIYEV

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Erol UZAL

Tez kapsamı boyunca, sanayide kullanılan elektromanyetik fren sistemlerine uygun sayısal yöntem geliştirilmeye çalışıldı. Öncellikle, giriş kısmında tezin amacı ile kapsamı açıklandıktan sonra, genel kısımda ise elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerinin geometrik yapısı ile özellikleri, fren sistemlerinin tüm tiplerine göre detaylandırıldı. Modellemeye geçilmeden önce, matematiksel modellemenin tanımları, nedeni, model oluşturma etkinliği, yaklaşımlarına açıklama yapılıp, modelleme türlerine kısaca ifadeler yapıldı.

Model geliştirmede ise, başlangıçta elektromanyetik kavramına açıklama yapılıp, Maxwell denklemleri, manyetik devreler hesabında kullanılacak yöntemlere yer verildi. Sırasıyla, Ampere, Ohm yasalarını gösterip, manyetomotor kuvvetli manyetik devrelerin hesaplanmasının özellikleri ifade edilmeye çalışıldı. Genel bir ifade ile, statördeki enerji kaybı ile ferromanyetik malzeme özelliklerine değindik.

Manyetik devrelerin önemli parçası olan hava boşluğunun ayarlamasına açıklama yapıldıktan sonra, elektromekanik enerji dönüşümün prensipleri, enerji yöntemi, enerji dengesi ifade edildi. Daha sonra tek bobinli indüksiyon manyetik alan sistemlerindeki enerji, örnek üzerinden akı bağlantısı(the flux linkage) ile koenerji(coenergy) konularıyla manyetik kuvvet ve tork belirlemenin teorik kısımlar tamamlandı.

Gözden geçirdiğimiz yöntemler üzerinden bulgular kısmında örnek fren sistemini detayli teknik resimleri ile inceledik. Daha sonra frenin kuvvet sistemlerini oluşturarak, yayın tepki kuvvetini,

frenin çevre kuvveti ile, fren balatasının sürtünme momenti hesabı yapıldı. Bahse konu yay kuvvetini yenerek fren flanşını kendine doğru çekecek bir mekanik davranışa yol açan elektromanyetik kuvvet hesabını yaptık.

Aralık 2020, 109 sayfa.

Anahtar kelimeler: elektromekanik, elektromanyetik, fren, kuvvet, tork, manyetik devre

SUMMARY

M.Sc. THESIS

THE MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC BRAKING SYSTEMS

Maxat NURKALIYEV

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Erol UZAL

Throughout the thesis, a numerical method has been tried to be developed in accordance with the electromagnetic brake systems used in industry. First of all, after explaining the purpose and scope of the thesis in the introduction, general the geometric structure and properties of the electromagnetic brake and clutch systems were detailed according to all types of brake systems. Before starting modeling, the definitions, reasons, modeling efficiency and approaches of mathematical were explained and brief statements were made to the types of modeling.

On the model development, an explanation was givento the concept of electromagnetics at the beginning, and Maxwell's equations and methods to be used in magnetic circuits were included. By showing the Ampere's and Ohm's laws respectively, the propertiesof the computation of magnetomotor force magnetic circuits were tried to be expressed. In general terms, we touched on the energy loss in the stator and the ferromagnetic material properties.

After explaining the adjustment of the air gap, which is an important part of magnetic cicuits, the principles of electromechanical energy conversion, the energy method, energy balance were expressed. Later, the theoretical parts of determing magnetic force and torque with the energy in single coil induction magnetic field systems, the flux linkage and coenergy issues were completed.

Based on the methods we reviewed, we examined the sample brake system with detailed tehcnical drawings in the findings section. Then, by creating the force systems of the brake, the reaction force of the spring, the circumferential force of the brake, and the friction moment of the brake pad were calculated. We calculated the electromagnetic force that overcomes this spring force and causes a mechanical action that will pull the brake flange towards itself.

December 2020, 109 pages.

Keywords: electromechanical, electromagnetic, brake, force, torque, magnetic circuit

1. GİRİŞ

Modern sanayi, elektrikli trenler, vapurlar, uçaklar, büro ve ev aygıtları elektrik motorsuz düşünülemez. Elektrik motorlarının en önemli özelliği; hem en mükemmel enerji olan elektrik enerjisini kullanması, hem de kolay ve ekonomik bir şekilde kontrol edilebilir olmasıdır. Elektrik motorları aldıkları elektrik enerjisini, manyetik enerji yardımıyla mekanik enerjiye çeviren günümüzün en yararlı ve vazgeçilemez aygıtlarından birisidir. Elektromanyetik frenlerin elektrik motorların ve redüktörlerin gölgesinde kalmasından dolayı günümüzde duyururluğu azdır. Halbuki, tüm motor ve redüktörün kullanıldığı pek çok alanda da frenin önemli rolü vardır. Çünkü frenleme momenti dönme hızının bir fonksiyonudur. Moment kontrolünün gerektiği pek çok uygulamada (sarma sistemleri gibi) bu tip frenler tercih edilir. Dolayısıyla sistemi isteksiz, kaza gibi çeşitli öngörülemeyen dinamik güçlerin hareketinden sağlar. Adeta, bir emniyet faktörüdür. Bu kadar önem sağlamasına rağmen Dünyada çeşitli alanlardaki tüm sırlar çözülürken, hala da gizem taşıyan sistem Elektromanyetik Fren ve Kavrama Sistemleri yakından tanıyalım.

Manyetik alanı, 1881 yılında Michail Faraday'ın elektrik ve mekanik enerjileri arasındaki ilişkiyi keşfedip, Maxwell ile Bio-Savart ve Ampere gibi bilim adamlarının da geliştirmesiyle ileriye götürülen elektromekanik enerji dönüşümü yolculuğu, ivme kazanarak ve her alanımıza yayılarak devam etmektedir. Adından da anlaşılacağı gibi elektromekanik sistemler elektrik ve mekanik sistemlere sahip iki kısımdan oluşmaktadır. Mühendisler, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren veya tam tersini yapan bir elektromekanik sistemin elektrik ve mekanik yanlarını ilgilendiren matematiksel formülleri çıkararak, sistemi modellemeye ve bu sayede sistemin daha verimli çalışmasına uğraşırlar, bu çalışmalar en küçük elektromekanik dönüştürücülerden (röleler, sensörler v.b),en büyüğüne kadar (alternatörler, büyük güçlü motorlar, transformatörler) aynı matematiksel denklemlerle analiz edilmektedir.

Yani basit dil ile anlatmış olursak elektrik enerjisinin geriliminden oluşan manyetik alanın kuvveti ile hareket eden bir mili aynı elektromanyetik kuvvet ile hareketsizliği sağlamak.

Elektromekanik sistemde elektrik enerjisi ile mekanik enerji denklemlerini ilişkilendiren büyüklükler gerilim (***V***), akım (***I, i***), güç (***P***) , hız (***v***), kuvvet (***F***) ve torkdur (***T***). Bu ilişkilendirmede elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşürken, dönüşüm keskin bir şekilde olmamakta, geçiş işlemi manyetik enerji sağlamaktadır.

Tabiki de doğal olarak klasik fren ile kıyaslamaya başlarsınız ve kafanızda soru işaretleri çoğalır. Sektörü yakından takip eden biri olarak ve her başvurulan problemlere mühendislik çözüm üreten bir mühendis olarak sık sık karşılaştığımız sorulardan biri. Konstrüksiyonları hemen hemen elektromanyetik kumandalı sürtünmeli kavramalarla aynıdır. Sadece bir yarı sabit sisteme bağlıdır. Elektromanyetik frenler uygun maliyetli bir çözüm oluşturmamasına karşın, tahrik tarafı ile döndürülen tarafın kesinlikle ayrılması gereken yerlerde tercih edilirler.



Şekil 1.1: Elektrik motora montajı yapılmış elektromanyetik fren.

Diğer klasik fren sisteminden farkını anlamanız için genel olarak fren sistemi için tanım ve sınıflandırma vermiş olursak aşağıdaki belirttiğimiz gibi olur:

Bir makinada, hareket halindeki bir elemanı veya eleman grubunu ya da komple makinenin hareketini yavaşlatmak veya durdurmak, zira hareketsiz mili stabil etmek için suni bir direnç oluşturan sistem fren sistemi olarak adlandırılır. (Temiz, Vedat; İTÜ Makine Fakültesi, 2018)

Frenleme prensibine göre sınıflandırmaları yapılabilir:

1. Mekanik frenler

2. Elektromanyetik frenler

3. Hidrodinamik frenler

Fren sistemlerini iki grupta düşünmek mümkündür.

• ***Normalde aktif halde olan frenler:*** Fren, makinayı çalıştıran operatörden ya da sistemde mevcut kontrol organından gelen bir dış etkiye maruz kalmadığı durumda aktif haldedir yani frenleme yapmaktadır. Sürtünmeli frenlerde sürtünme momenti frenin yapısındaki yaylar tarafından oluşturulmaktadır. Dış etki söz konusu olduğunda yay kuvveti devre dışı kalır ve frenleme ortadan kalkar. Endüstriyel uygulamaların çok büyük çoğunluğunda bu durum söz konusu olur. Frenlerin yapısı da buna uygundur.

• ***Normalde aktif olmayan frenler:*** Fren, dış etki olmadan devre dışıdır. Frenleme dış etki olması durumunda ortaya çıkar. Dış etki ortadan kalktığında yapısında bulunan yaylar freni devre dışı bırakır. Taşıt frenleri bu tür fren uygulamalarına örnektir. (Temiz, Vedat; İTÜ Makine Fakültesi, 2018)

Her ikisinde de metal elemanlar arasındaki boşluk oldukça önemli bir faktördür. Aşağıdaki bölümlerde detaylı açıklayacağız.

1.1. AMAÇ

Bu tezin amacı, matematiksel modellemenin tanımlarını ayrıntılı bir şekilde yaparak, matematiksel modellemenin makine ve sanayi alanındaki üretim ile bir arada olmasını sağlamaktır. Doğru kaynaklardan literatür taraması yapılıp, sanayide bulunan mevcut ‘Yerli Üretim’ ürünlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amaçlanmaktadır. Tez konusu olarak

belirttiğim Elektromanyetik fren sistemlerinin matematiksel modellenmesi incelenecektir. Öncellikle frenin mekanik özelliği açıklanır. Sonrası bahsekonu olan, sanayinin birçok alanında kullanılan elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerinin konstrüksiyonunun genel tanımlaması yapılır. Bu fren sistemlerinin çalışma prensibine göre üretim esnasında karşılaşılan problemlerden biri lineer olmayan yapısı ile çözülmesi kolay olmayan elektromanyetik karakterizasyonu incelemek amaçlanmaktadır. Daha sonra sayısal yöntemler ile bir matematiksel model geliştirerek 'Yerli Üretim' ürünlerinin tasarım açısından uygun ve kolay bir çözüm oluşturulması planlanmaktadır. Üzerinde deney ve çalışma yapacağım ürünler Uluslararası Standartlara ve Türk Standartlarına göre imalatı sürdürülen ürünlerden seçilecektir.

Hedeflediğim sonuç bu alanda yapılacak yeni çalışmalarda, araştırmacılara, mühendislere, teknik elemanlara sanayide ihtiyaç duyacağı önemli matematiksel veri kaynağı sunmaktır. Bu veri kaynakları çalışanlara sağlandığında, hem işin kalitesini, hem de zamanı ölçülü ve verimli kullanmamıza vesile olacaktır. Çalışma içerisinde, imkanların elveriş durumlarına göre günümüz şartlarında non-lineer analizi yapabilmek için kullanılan sonlu eleman yöntemi program paketlerinin birini kullanarak bahsettiğim elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerinin ayrı ayrı incelenerek gerekli matematiksel analizini yapmak ve analizin ortaya çıkan sonucunu değerlendirmek amacımın bir parçasıdır.

1.2. TEZ KAPSAMI

Günümüzde matematiksel modelleme sadece matematik alanında değil, teknoloji, mimarlık, ekonomi, mühendislik, tıp ve daha birçok farklı alanlarda matematiksel modelleme kullanılmaktadır. Toplumda yaşanan hızlı değişime ayak uydurabilmek için teknoloji ile barışık üretimimizde de bir matematiksel modellemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü matematiksel modelleme gerçek yaşamda karşılaşılan durumların matematiksel olarak ifade edilmesidir. Matematiksel modelleme sürecinde matematiğin dışında bir konu ele alınır ve bu konu matematiksel olarak ifade edilir, böylece matematiksel teknikler orijinal konuya ışık tutmak için kullanılabilir. Araştırılmasını ve geliştirilmesini kapsayacağım konu – elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerinin matematiksel modellenmesidir. Elektromanyetik fren ve kavrama sistemleri gerek geometrik yapı, gerekse elektromanyetik özelliği sebebiyle non-lineer

bir sisteme sahiptir. Bu nedenle, bu sistemlerin matematiksel modelinin kurulması için lineer olmayan denklemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla, tez kapsamında geliştirilmesini amaçladığım elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerinin parçalarının üretiminde de ne kadar kuvvet kontrolünün gerektiğini bilmek bizim için her açıdan bir avantaj olacaktır. Uygulama esnasında ihtiyaç duyulan matematiksel modelleri araştırılacak mevcut fren özellikleri aşağıdaki gibidir;

- 5 Nm. – 3200 Nm. tork aralığında Yay Baskılı Elektromanyetik Fren (YBF) – sade konstrüksyona sahip olan bu ürün grubunda frenler kontrollü veya kontrolsüz elektrik kesilmelerinde devreye giren kolay montajlı sistemdir. Savunma sanayi (sarp kurma kolu) başta olmak üzere kaldırma ve taşıyıcı makine sistemlerinde, asansörlerde, tekstil, tarım, gıda ve birçok alanın makinelerinde ve rüzgar jeneratörü vs., emniyet talep edilen çalışma için hassasiyet gerektiren dönen millerin istenen pozisyonunda stabil olması ile dönme ataletinin durdurulmasında kullanılır. [1]

- 7 Nm – 1500 Nm. tork aralığında Akım Baskılı Fren (ABF) ve 7 Nm. – 3000 Nm. tork aralığında Akım Baskılı Kavrama (ABK) – gövdesindeki bobine verilen akımı ile oluşan manyetik alanın gücü ile şaftlar ve bağlı yükler üzerinde kavrama, ayırma veya frenleme işlemi için kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Aynı fren ve kavramayı bir arada yani bir gövde içerisinde montaj ettiğimize Akım Baskılı Grup halide de tasarlanabilir.

- 5 Nm – 500 Nm. tork aralığında Akım Baskılı Tozlu Fren (ABTF) – bu tip frenlerin çalışma sistemi yapısındaki hava boşluğunu metal tozu ile çeşitli gerilimlerde ayarlanarak sistemin şartına göre tork ayarlanabilmesi bu fren sistemin önemli avantajıdır. Zamana göre fren sistemindeki metal doz değiştirilerek bakımı yapılıp uzun ömürlü kullanılabilir.

Geliştirilen matematiksel modellerin yorumlaması yapılıp eksikler tamamlanır. Günümüzde, nonlineer özellikteki elektromanyetik sistemler genellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak model edilebilmektedir. Dolayısıyla imkân nispetince frenlerin bazılarının sonlu eleman analizi yapılır. Sonlu eleman yöntemi ile yapılan analiz sonucu oluşturulan bir matematiksel

[1] Elektromanyetik Fren çeşitleri https://www.emffren.com.tr/tr Elektromanyetik Fren ve kavrama Sistemleri A.Ş. internet sitesinden izinli alınmıştır.

modelleme ile birlikte değerlendirmeye çalışılacaktır. Elektromanyetik frenin analizini hızlandırmak için elektromanyetik analize etkisi olmayan tüm parçalar göz ardı edilecektir. Böylelikle sadece elektromanyetik analizinde etkisi olan; statör, baskı flanşı (rotor) ve bobin dikkate alınacaktır. Ama buna rağmen metal elemanlar arasındaki boşluk oldukça önemli bir faktör olduğu için standart ve toleranslara yeterince dikkat edilecektir. Tez çalışması süresince, kullanacağım elektromanyetik fren ve kavrama sistemleri (marka ve logo başta olmak üzere TÜBİTAK ve KOSGEB destekli AR-GE çalışmaları sonucunda katma değeri daha yüksek Tozlu Fren ve Kavramalar, Fren-Kavrama Grupları, Servo Motor Frenleri, Doğal Mıknatıslı Fren ve Kavramalarının açıklamaları, teknik çizimleri, lisanslı paket programları, ve Atölye imkanları), bünyesinde makine mühendisi olarak görev yaptığım EMF Elektromanyetik Fren ve Kavrama Sistemleri Ltd. Şti.'ye ait olup tüm haklar saklıdır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ELEKTROMANYETİK FREN VE KAVRAMA SİSTEMLERİNİN GEOMETRİK YAPISI

Yükarıda belirttiğimiz gibi Elektromanyetik Fren Sistemlerinin tüm sırlarını gün ışığına çıkmarmayı düşünüyoruz. Çünkü elektromanyetik fren ve kavrama sistemleri hakkında bilgi nerdeyse hiç olmayıp, bu yüzden de makine tasarımcılarının çözüm arayıp çeşitli yabancı fabrikalara başvurduğunu literatür taramasında rastladık. Dolayısıyla, ihtiyaç sahipleri bu sistem hakkında bilgileri olması maksatı ile bu tez çalışmamızda geniş ve kapsamlı anlatmaya çalışacağız.



Şekil 2.1: Elektromanyetik frenler.

Aşağıda, EMF Elektromanyetik Fren ve Kavrama Sistemleri Ltd. Şti.'nin tasarımı olan bu elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerin geometrik yapısı ve özellikleri görülmektedir. (*Teknik Resimleri özel izin ile, genel bilgiler ise açık kaynaktan alınmıştır*).

2.1.1. Yay Baskılı Elektromanyetik Fren. (YBF)



Şekil 2.2: Yay baskılı fren (YBF).

Sade bir elektromekanik konstrüksyonu 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.

Fren sisteminin karakteristiği:

Sanayi ortamında 11 ebatta, 3Nm – 3200Nm tork aralığında, fren balatasının sürtünme katsayısı yüksek, belirli standartlara göre bobin termal izolasyonu mevcut, 24 V ve 220 V gerilimde sessiz çalışan, elektronik (encoder, adaptör, elkumanda, vs.) sistemlerle donatılmış şekilde imal edilebilmektedir. Sistemin bütün parçaları elektrik cihazların sınıflandırılmasına göre IP özelliklerde kaplamalıdır.

Kullanım alanı: *robot ve otomat ünitelerine akuple edilmiş, yük taşıyıcı ve kaldırıcı veya iş makinaları. Tiyatro gösterilerinde gerekli sahnede kaldırma indirme vazifesi yapan ünitelerde de tercih edilmekte.*

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.*



Şekil 2.3: Yay baskılı fren kesiti.

Yay Baskılı Fren tanımı olarak: 1 - Bobin; 2 - Baskı flanşı; 3 - Statör (Gövde); 4 - Balata diski; 5 - Yay; 6 - Montaj Flanşı; 7 - Balatalar; 8 - Dişli Göbek; 9 - İtici pim; 10 - Tork Ayar Vidası; 11 - Çalışma Boşluğu S'lü; 12 - Montaj cıvatası.

2.1.2. Akım Baskılı Elektromanyetik Fren (ABF)



Şekil 2.4: Akım Baskılı Elektromanyetik Fren (ABF).

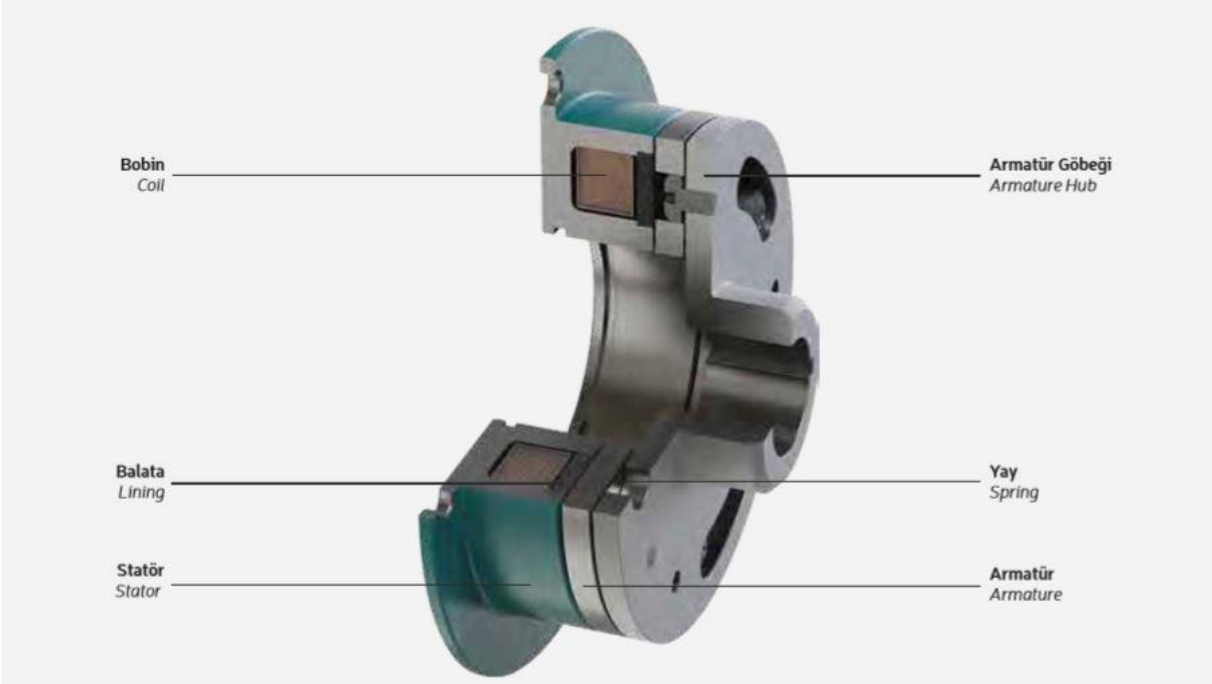
Elektromekanik yapısı ile, bu tip elektromanyetik fren sistemi yukarıdaki frenin tam zıt pozisyonda çalışmaktadır. Yani elektrik akımın verilmesi ile oluşan elektromanyetik kuvvet etkisinde kalıp, sabit olan statöre, mil ile birlikte dönen parça (armatür göbeğine sabitlenmiş flanş olabilir) atalet momenti ve ivme gibi yükler.

Fren sisteminin karakteristiği: *Sanayide bu tip frenler 7 çeşit ebatta, 7,5 Nm-480 Nm torklar aralarında, üç değişik tasarımla, balatanın yüksek sürtünme katsayısı ile, bir sanyeden daha küçük çalışma modunda, aynı şekilde sıcaklığa dayanıklı termal izolasyona sahip, 24 V DC geriliminde sessiz çalışan, bir şekilde imal edilmektedir. Montajı ve konstrüksyonu kolaydır.*

Kullanım alanı: *shaft/mildeki dönmede sabit konum istenildiği zaman boşluksuz olarak karşımıza çıkan bir tercihtir. Robot kolu gibi otomasyon sistemlerinde stabil konumda sabitlendirme gçrevi taşımaktadır. Diğer bir durum ise, elektrik akımı vererek fren sistemi gerektiren tüm ünitelerde kullanılabilir.*

Çalışma Prensibi: *Fren sisteminin çalışması, elektrik akımının verilmesiyle meydana gelen elektromanyetik kuvvetin etkisi ile sürtünerek statöre yapışıp sabit kalır. Ne zaman gerilim kesilir, o zaman serbest kalarak mekanizmada kendi görevini taşır. Elektrik devredeki çeşitli elektronik cihazlar ile frenin açılıp kapatılmasının süresi bir sanyenin altında gerçekleşir.*

NOT: Hava boşluğu ayarını sıklıkla ölçmek gerekir.



Şekil 2.5: Akım baskılı frenin kesiti.

Akım Baskılı Elektromanyetik fren tanımı olarak: 1 - Bobin; 2 - Armatür Göbeği; 3 - Statör (Gövde); 4 - Balata diski; 5 – Bant yay; 6 – Armatür (Flanş).

2.1.3. Akım Baskılı Elektromanyetik Kavrama (ABK)



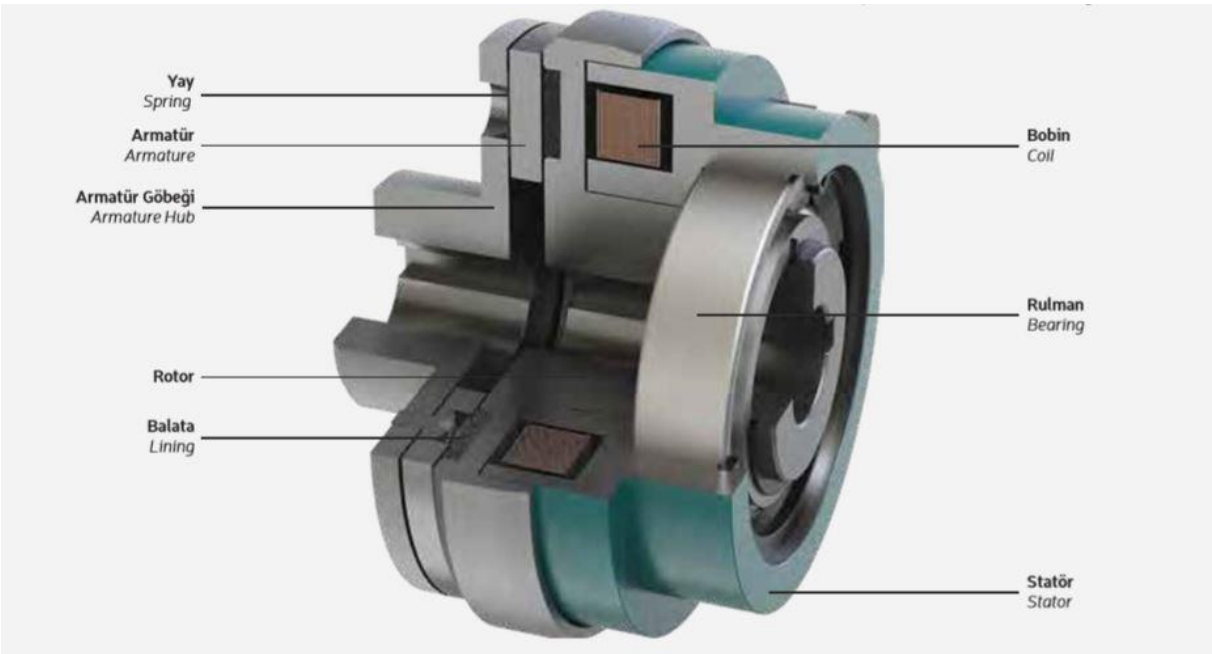
Şekil 2.6: Akım baskılı kavrama türleri.

Elektromekanik yapısı ile, fren sisteminden daha çok kavrama grubuna dahil bir üründür. Bahsekonu, elektromanyetik kavrama, bünyesinde bulunan bobine elektrik akımı verildiğinde dönen mile bağlı parça (flanş/rotor) elektromanyetik kuvvet etkisinde bobin tarafa yanaşarak statör ile rulman yataklı bağlantısı sayesinde dönme momenti aktararak harekete devam ettiren sistemdir.

Kavrama sistemlerinin karakteristiği: *Sanayi rtoamında bulunan kavramalar genelde 10 yakın standart ölçülerde, 7,5 – 3000 Nm torklar aralarında, 4 çeşit tasarım ile, yüksek katsayılı balatası ile, 24 V DC gerilimde sessis çalışması ile imal edilmektedir.*

Kullanım alanı: *Matbaa sistemlerinde sayfaları birleştirme ve ayarlamada aç/kapa veya yakala/bırak görevi yapması için kullanılmaktadır.*

Çalışma Prensibi: *Elektromanyetik kavrama, dönme momentini elektrik akımın verilmesi ile meydana gelen elektromanyetik kuvvet etkisi ile ferromanyetik malzemelerin bir birini çekmesi halinde aktarır. Flanşa sabitlenen plakalı yay gerilimin kaybolması sonucunda eski pozisyona getirmektedir. Bir sanyede 10 defa aç/kapa veya yakala/bırak görevi yapabilmektedir. Ara ara hava boşluğu ayarı yapılması gerekir.*



Şekil 2.7: Akım baskılı kavrama kesiti.

Akım Baskılı Elektromanyetik kavrama tanımı olarak: 1 - Bobin; 2 - Bant yay; 3 – Armatür (Flanş); 4 – Armatür Göbeği; 5 - Rotor; 6 – Balata Diski; 7 - Statör; 8 – Rulman.

2.1.4. Akım Baskılı Elektromanyetik Fren ve Kavrama Grupları. (ABG)



Şekil 2.8: Akım baskılı fren ve kavrama grubu.

Birden fazla elektromekanik yapıların bir gövdede montaj edilmesi ile grup adını taşıyan bu tür sistemler, yapısı sade olan kapsüllerde toplanıp, elektromotor ve redüktör standart arayüzey bağlantıları (IEC B5, B14) ile akuple edilmektedir. .

Sistemin Karakteristiği: *Matbaa ve tekstil makinalarında gördüğüm fren ve kavrama uygulamaları, 7 farklı ebatta, 7,5-480 Nm tork aralarında, yüksek katsayılı balata ile, termal izolasyon ve 24 V DC sessiz çalışan, çeşitli montaj bağlantılarıyla imal edilebilmektedir.*

Kullanım alanı: *Matbaa sektöründe kitap sayfalarını ayarlama, sayma, paketleme makinalarında doldurma veya boşaltma mekanizması gibi güç aktarım faaliyetlerinde kullanılmaktadır.*

Çalışma Prensibi: *Sistemin bir tarafı, eketromotor mili ile dönmektedir. Ne zaman tesisin ikinci tarafına güç aktarılması gerekir, o zaman elektrik akımın bobine verilmesi ile meydana gelen*

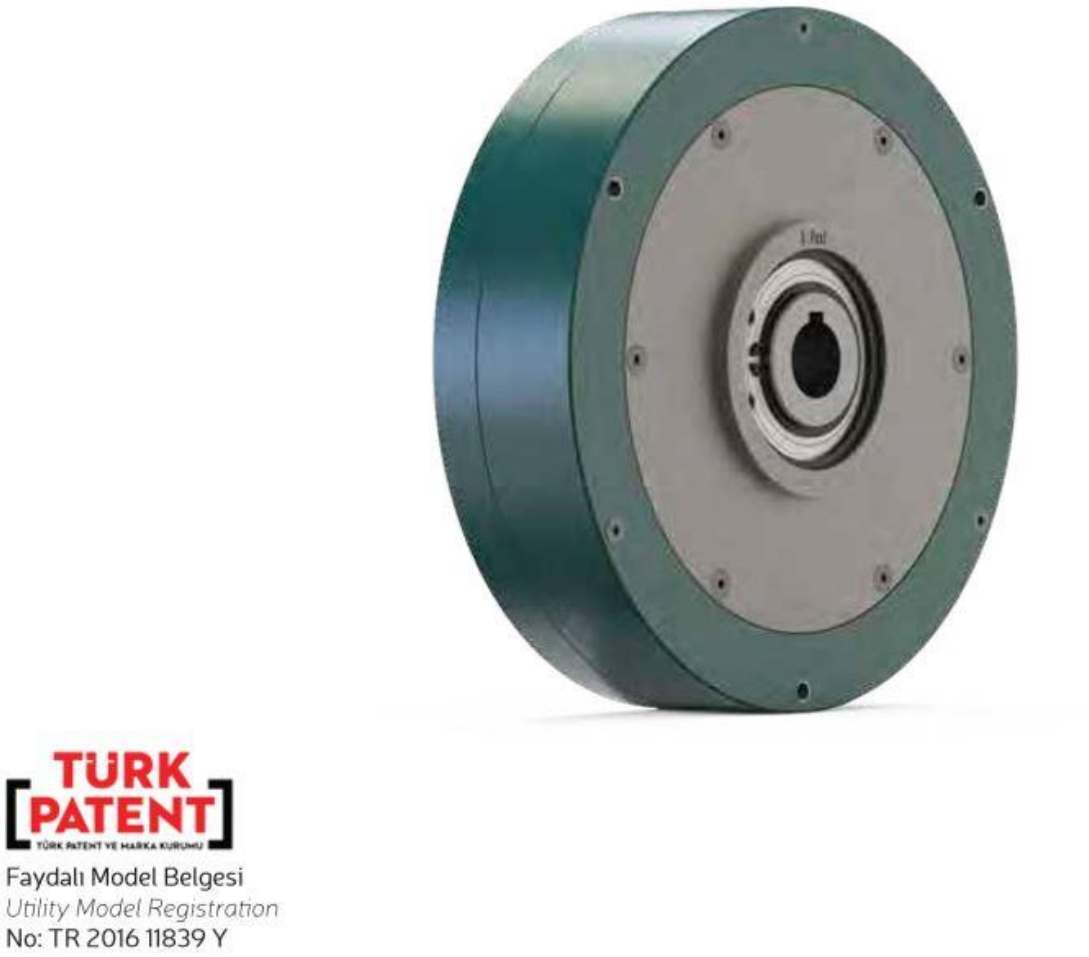
elektromanyetik kuvvet etkisi ile flanşı kendine doğru çekerek güç aktarım yapar. Veya fren devreye girerek frenleme görevi de taşıyabilir. .



Şekil 2.9: Akım baskılı grubun kesiti.

Akım Baskılı Elektromanyetik Fren ve Kavrama Grupları tanımı olarak: 1 – Akım Baskılı Elektromanyetik Kavrama sistemi; 2 - Akım Baskılı Elektromanyetik Fren sistemi; 3 – Kapsül (Gövde); 4 – Giriş ve Çıkış Milleri; 5 – Giriş ve Çıkış Millerin rulmanları; 6 – Klemens Kutusu; 7 – Ayak veya B5 Flanş olabilir; 8 – Montaj deliği.

2.1.5. Elektromanyetik Tozlu Fren ve Kavrama Sistemleri. (ABTF/ABTK)



Şekil 2.10: Akım baskılı elektromanyetik tozlu fren sistemi.

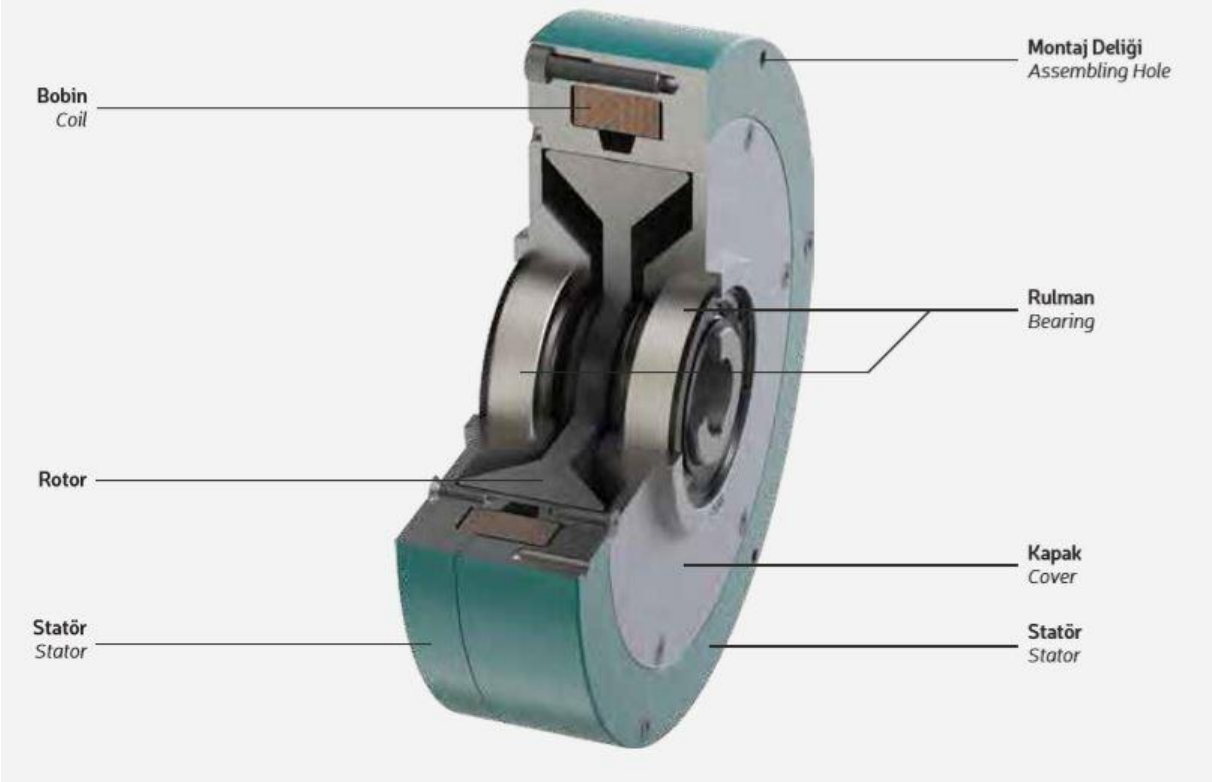
Tozlu fren dediğimizde, toz bu fren sisteminin neresindedir? Aynı şekilde gövde görevi gören statör ve rotor arasındaki hava boşluğunu gerilim sayesinde elektromanyetik kuvvet etkisine maruz kalan metal tozparçacıkları doldurmaya çalışır. Gerilim seviyesine göre ayarlanabilir özelliğe sahip bir fren sistemidir.

Fren sisteminin karakteristiği: Tekstil sektöründe sık karşılaştığımız bu tip frenler, 6 farklı ebatta, 35- 1000 Nm tork arasında, sürtünmesiz olarak sınıflandırılmış, (185° C) kadar

sıcaklığa dayanabilen, 24 V DC kadar indirilip yükseltilebilen gerilim ayarlı, kolay parçalanıp toplanan bir fren çeşididir.

Kullanım alanı: Tekstil sektöründeki kumaş sarma ve iplik bobinindeki germe görevi gören voltajın durumuna göre ise farklı torklarda hizmet verilecek tesislerin vazgeçilmezidir.

Çalışma Prensibi: *Rulman yataklı rotor ve sabitlenmiş statörün arasındaki hava boşluğuna elektromanyetik kuvvet etkisi altında diziklenmeye çalışan metal toz parçacıkları sayesinde dönme momentine direnç oluşturularak hız azaltıp frenlemeye çalışılır. Gerilim olmayınca serbest dönen rotor bir sonraki işleme kadar boş dönmektedit. Kısa mesafeli periyodik çalışmalarda tercih edilir. Uzak çalışma için tartışılır konumdarır.*



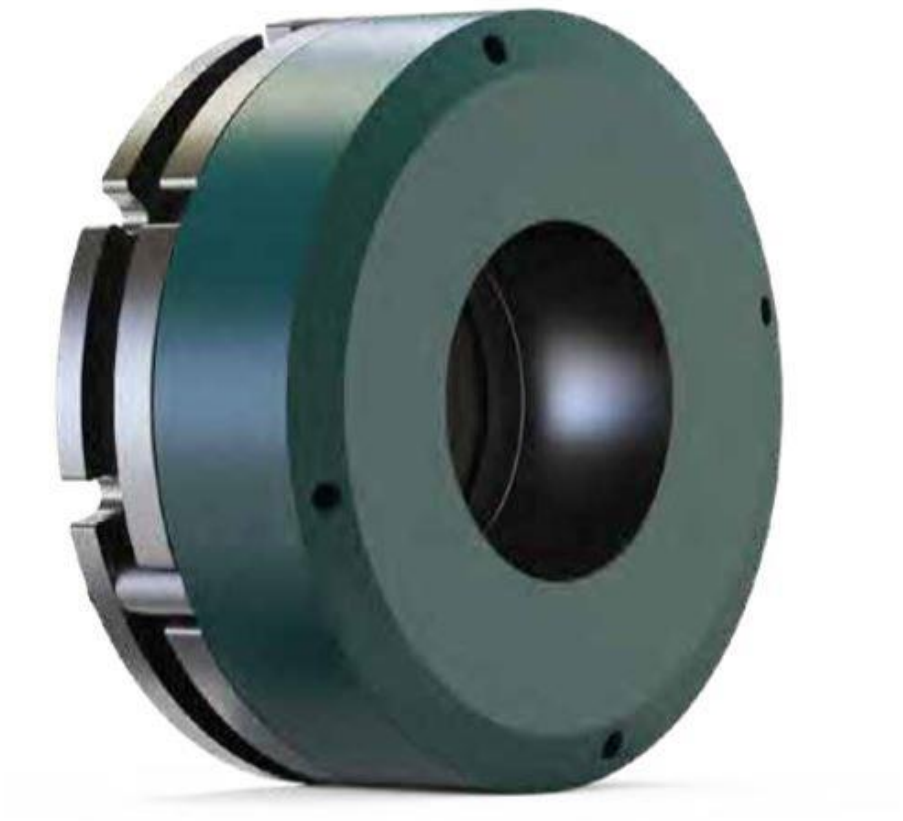
Şekil 2.11: Akım baskılı elektromanyetik tozlu fren kesiti.

Elektromanyetik Tozlu Fren ve Kavrama Sistemleri tanımı olarak: 1 – Bobin; 2 - Statörler (Erkek-Dişi); 3 – Rotor; 4 – Kapaklar; 5 – Rulmanlar; 6 – Montaj deliği; 7 – Metal Toz.

Elektromanyetik tozlu fren ve kavrama sistemleri sırasıyla; Kontrolü açma ve sarma, tork kontrolleri, tork sınırlamaları, hız kontrollü, kontrollü başlama, gerilim kontrolü, poşet yapma

makinası ve sürekli form matbaa makinası gibi sistem ünitelerinde kullanılmaktadır. Genel olarak elektromekanik yapıları nerdeyse elektromanyetik kumandalı, sürtünmeli kavramalarla aynıdır. bir yarı sabit sisteme bağlı olan statör elektromekanik yapıda çekirdek rölündedir. Elektromanyetik frenler uygun maliyetli bir çözüm oluşturmamasına karşın, emniyet faktörü ve hassasiyet gerektiği tüm sistemde tahrik tarafı ile döndürülen tarafın kesinlikle ayrılması gereken yerlerde tercih edilirler.

2.1.6. Servo Motor Elektromanyetik Frenleri (SMF)



Şekil 2.12: Servo motor freni.

Elektromekanik yapısı yay baskılı elektromanyetik fren sistemlerine benzeyen servo motor frenin elektromekanik yapısı yay uygulamalı/baskılı fren sistemlerin konstrüksyonuna pek yakındır. Servomotorun sanayide diğer elektromotara göre pek çok avantajı olduğu gibi servo motor fren sistemin de aynı şekilde hasssasiyetleri söz konusudur.

Fren sisteminin karakteristiği: *Daha çok savunma Sanayisinde tercih edilen servomotor fren sistemleri bir çok ebatlarda, 2,5 – 140 Nm tork arasında, yüksek katsayılı özel balatası ile, 24*

V DC sessiz yüksek hızda çalışabilecek şartlarda imal edilmektedir. Elektronik cihazlar ile donanımdırılarak çok alana faydası var.

Kullanım alanı: *tank kulesindeki servomotorun fren sistemi olarak, sarp kurma kolu, zırhlı savaş vasıtalarındaki dürbün, silah gibi ünitelerin sabitlenme durumunda stabil etmesinde, çeşitli roket kanatçıklarındai robotun kol gibi uzuvlarında kullanılır. Ayrıca, çamaşır makinasında da var.*

Çalışma Prensibi: *Üzerinde gerilimin olmadığı durumda sistem fren konumunda, 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 kesilince aniden yayın tepki kuvveti ile flanş geri balatayı sıkıştırır. Yani fren sistemine geri döner*

2.1.7. Doğal Mıknatıslı Elektromanyetik Fren (DMF)



Şekil 2.13: Doğal mıknatıslı fren.

Elektromekanik ve doğal mıknatısın bir yapıda olduğu bu serideki doğal mıknatıslı fren sistemleri, statöre özel yerleştirilen doğal mıknatısın çekme kuvvetinin etkisi altında kalan hareketli parça (flanşlı armatür göbeği) statöre yanaşır. Kuvvetli doğal mıknatıs ile tasarlanarak iyi performans elde edilebilir sistemdir.

Doğal Mıknatıslı fren sisteminin karakteristiği: 0,1 Nm – 40 Nm kadar çeşitli ebatlarda, boşluksuz fren tercih edilen sistemler iöin, 24 V Dc gerilimizde sessiz yüksek devride çalışma şartlarında tasarlanır.

Kullanım alanı: Doğal mıknatıstan etkilenmeyecek, elktronik mikro cihazlarda tercih edilir. Diş Doktorun, amelyat cihazlarında kullanılır.

Çalışma Prensibi: *Statöre yerleşen doğal mıknatıs kuvvetinin etkisinde olan hareketli parça, aynı statörde sabitlenen bobine elektrik akım verilmesinden meydana gelen elektromanyetik kuvvet, doğal mıknatısın kuvvetini kaparak, etkisiz hale getirmektedir. Gerilim kesilince fren modune dönmektedir.*

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MATEMATİKSEL MODELLEMENİN TANIMLARI

3.1.1. Model Geliştirme Etkinliği

Model geliştirme etkinlikleri (model eliciting activities), sonunda bir sayısal rakam ya da bir kelime ile yanıtı bulunan geleneksel problemler olmayıp, rutin olmayan-karmaşık gerçek dünya durumlarını ifade eden, kişilerden bu durumu matematiksel olarak yorumlamasını ve bu durumdan yararlanacak bireylerin karar vermesine yardım etmek amacıyla süreci veya yöntemi matematiksel olarak formülleri ile ifade edip modellenmeyi gerektiren, olası farklı çözümler içeren problem durumlarıdır (Akt Erarslan, 2011). Lesh ve arkadaşları (2000) bir model geliştirme etkinliğinin sahip olması gereken altı özelliğini şu şekilde açıklamışlardır. Model geliştirme prensibi: Etkinlik model oluşumuna izin verecek şekilde tasarlanmalıdır. Gerçeklik prensibi: Etkinlik gerçek veya gerçeğe yakın verilere dayanan, anlamlı ve bireylerin günlük yaşamıyla ilişkili olmalıdır. Öz değerlendirme prensibi: Bireyler kendi kendilerini değerlendirebilmeli veya çözümlerinin etkililiğini ölçebilmelidirler. (Tutak & Güder, 2014)

Model dokümantasyon prensibi: *Bireyler kendi düşünme süreçlerini (varsayımlar, amaçlar ve çözüm yolları) çözümleri içinde gösterebilmelidir. Model genelleme prensibi: Ortaya konulan çözümler genellenebilir veya benzer başka durumlara kolayca adapte edilebilir olmalıdır Etkili prototip prensibi: Üretilen model mümkün olduğunca basit fakat matematiksel olarak da bir o kadar önemli olmalıdır.* (Tutak & Güder, 2014)

3.1.2. Matematiksel Modelleme Niçin Gerekli?

Bir problemi çözerken modellemenin kullanılmasının birçok nedeni vardır. Bir demir parçasına bakır telin sarılması nedeni ile gözle görünmeyen çekme veya itme örneği gibi, problemin çözümünü bulmak için deneysel yöntemlere başvurmanın maliyeti yüksek olabilir. Yerçekiminin sıfır olduğu bir ortamda cisimlerin nasıl hareket ettiklerinin ortaya konulması gibi, deneysel yollara başvurmak imkânsız olabilir. Güçlüklerin yaşandığı her durumda sistemlerin nasıl davranacağını öngörebilmek amacıyla modelleme

yaklaşımından yararlanılır. Matematik eğitiminde de modelleme yapmak oldukça önemlidir. 45 ile 112 arasında kaç tane doğal sayı vardır? Gibi soruların cevabını öğrenmek için modelleme yaklaşımından yararlanılır. Burada önce küçük sayılar ele alınır ve uygun model etkinlikleri kullanılarak bir genellemeye ulaşılır. Matematiğin tüm konularında modelleme yapmak oldukça zordur. (Tutak & Güder, 2014)

Hem matematik hem de farklı alanlarda modelleme yapmak, problemin güçlüğünü ortadan kaldırabilir. Bundan dolayı ortaya çıkan problemleri çözmek veya farklı yaklaşımlar elde etmek için modellemeye başvurulur.

3.1.3. Matematiksel Modelleme

Matematik genellikle gerçek yaşamdan ayrı ve sadece okullarda yapılan izole edilmiş bir bilim olarak görülür. Günümüz dünyasında insana fayda sağlayacak bilgiye verilen önemin artması ve insanın yaşantısı yoluyla ve önceki bilgilerle bağlar kurarak anlamlı bir şekilde öğrendiği bilgilerin ön plana çıkması matematiğe olan algıların da değişmesine yol açmıştır. (Tutak & Güder, 2014)

Günümüz bilgi toplumu artık matematiği günlük yaşamla bağdaştırmakta, soyut olan bu bilimin gerçek yaşamla ilişkisi kurularak somutlaştırılmasına çalışıldığı görülmektedir. Soyut bir bilim olan matematiği somutlaştırmak için kullanılan en önemli yöntemlerden biri modelleme yöntemidir. Aslında matematik; gerçek dünya olaylarına, problemlerine modelleme yoluyla çözümler üreten sistematik bir düşünme yoludur. Modelleme; var olan bir problemi matematiksel sembollere, gösterimlere çevirme olarak tanımlanabilir. Matematik gerçek dünya ile ilişkilendirildiğinde bütün matematiksel kavramların köklerinin gerçek dünyada var olduğu görülür. (Tutak & Güder, 2014)

3.1.4. Matematiksel Modellemenin Tanımı

Çağımızda, bilim adamları etrafımızdaki dünyayı daha iyi bir seviyede anlayabilmek ve sonrasında teknik sorunlara çözümler bulmak için, her şeyi matematiksel

terimlerle temsil ederler. Başka bir deyişle bilim adamları, gerçeği matematiksel bir dille ifade etmeye çalışırlar. Gerçeği matematiksel bir dille taklit etmeye yardım eden bu işlem ve düşünce şekline, matematiksel modelleme adı verilir. (Tutak & Güder, 2014)

Modelleme matematiğin bilimsel bilgi üretme yöntemidir. Matematiksel modelleme gerçek yaşamda karşılaşılan durumların matematiksel olarak ifade edilmesidir. Matematiksel modelleme sürecinde matematiğin dışında bir konu ele alınır ve bu konu matematiksel olarak ifade edilir, böylece matematiksel teknikler orijinal konuya ışık tutmak için kullanılabilir. Bu anlamda modelleme, çok yönlü bir problem çözme sürecidir (Blum ve Niss, 1991). Bununla birlikte Lingefjard'a (2002) göre matematiksel modelleme yukarıda bahsedilen anlamın ötesinde, bir fenomenin gözlemlenmesi, ilişkilerin ortaya çıkarılması, matematiksel analizlerin yapılması, sonuçların elde edilmesi ve modelin tekrar yorumlanması süreçlerini içerir. (Tutak & Güder, 2014)

Matematiksel modelleme karmaşık, bir matematiksel aktivitedir ve modellemeyi öğretme, öğrenme ve uygulamaları, matematiksel düşünmenin ve öğrenmenin birçok yönlerini içerir (Akt Aydın, 2008). Niss'e (1998) göre matematiksel modelleme, gerçek dünya durumlarının, beklentilerinin bir kısmını temsil etmek üzere seçilen bir veya birden fazla matematiksel oluşumların ve aralarındaki ilişkilerin birleşimidir. Galbraith ve Catworthy (1990) matematiksel modellemeyi, gerçek hayat içerisinde yapılandırılmamış problemlere matematiğin uygulamasının yapılması şeklinde tanımlamışlardır. (Tutak & Güder, 2014)

Matematiksel modelleme en genel anlamıyla matematik veya matematik dışındaki bir olayı, olguyu, olaylar arasındaki ilişkileri matematiksel olarak ifade etmeye çalışma, bu olaylar ve olgular içerisinde matematiksel örüntüler ortaya çıkarma sürecidir. Bu tanım matematiksel modellemenin en genel ve liberal tanımıdır (Verschaffel, Greer ve De Corte, 2002). (Tutak & Güder, 2014)

3.1.5. Matematiksel Modelleme Yaklaşımları

Matematiksel modelleme son yıllarda matematik eğitimi araştırmacılarının ilgisini çeken bir konudur (Mousoulides ve diğerleri, 2005). Matematiksel modelleme ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalarda bahsedilen matematiksel modelleme tanımları ve yaklaşımları birbirinden farklı teorik temellere dayanmaktadır (Kaiser ve diğerleri,2006).

Her bir modelleme yaklaşımın matematik eğitimi açısından tanımı, amacı ve müfredatta uygulanma biçimi de arklılık göstermektedir. Dolayısı ile matematiksel modelleme ile ilgili bütün dünya literatüründe kabul görecek tek bir tanım vermek mümkün görünmemektedir. Kaiser'e (2005) göre literatürde var olan modelleme yaklaşımları beş tanedir. Bunlar aşağıda verilmiştir.

3.1.6. Realistik veya Uygulamalı Modelleme.

Bu yaklaşıma göre matematiksel modelleme gerçek hayatta matematiğin pratik uygulamalarını ifade etmektedir. Matematiksel modelleme öğrencilerin farklı düşüncelere, problemlere, matematiksel ve matematiksel olmayan kavramlara anlam verme akt ivitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu yaklaşımda matematiksel modeller ve bunların gerçek hayat uygulamaları, matematiksel modelleme tanımının odak noktasıdır. Izard, J., Haines, C. , Crouch, R. , Neill, N. (2003) gibi isimler modellemeye realistik bir açıdan bakmaktadırlar. (Tutak & Güder, 2014)

3.1.7. Bağlamsal Modelleme

Modeller farklı notasyon sistemleriyle dış dünyaya aktarılan, karmaşık sistemleri oluşturma, tanımlama ve açıklama sürecinde kullanılan, kuralları, işlemleri, ilişkileri ve daha farklı yapıları içeren zihindeki kavramsal sistemlerdir.

Matematiksel modelleme var olan bu modellerin kullanıldığı ya da yeni kavramsal modellerin oluşturulduğu bir süreçtir. Modelleme sürecinde verilenleri kullanarak hedefe ulaşma sürecinde katı ve tek bir prosedür uygulaması söz konusu değildir. (Tutak & Güder, 2014)

Bunun aksine modelleme sürecinde bir çözüme ulaşmak için verilenler ile hedef arasında birden fazla deneme-yanılma prosedürü söz konusudur. Matematik eğitiminin en önemli amacı öğrencilerin yasadıkları olayları yorumlayabilecekleri zihinsel yapılar (kavramsal sistemler) geliştirmelerine yardımcı olmaktır. Bu yaklaşımın önemli temsilcileri Lesh ve Doerr' dur. (Tutak & Güder, 2014)

3.1.8. Eğitimsel Modelleme

Bu modelleme yaklaşımı didaktik ve bağlamsal modelleme olmak üzere ikiye ayrılır. Bu yaklaşımın temel hedefleri pedagojik ve konu ilişkilidir. Didaktik modelleme yaklaşımında öğrenme süreçlerinin tasarlanması ve geliştirilmesi hedeflenirken; bağlamsal modelleme yaklaşımında kavram tanıtımı ve gelişimi hedeflenir. Bu yaklaşımın önemli temsilcileri Niss ve Freudenthal' dir. (Tutak & Güder, 2014)

3.1.9. Epistemolojik veya Teorik Modelleme

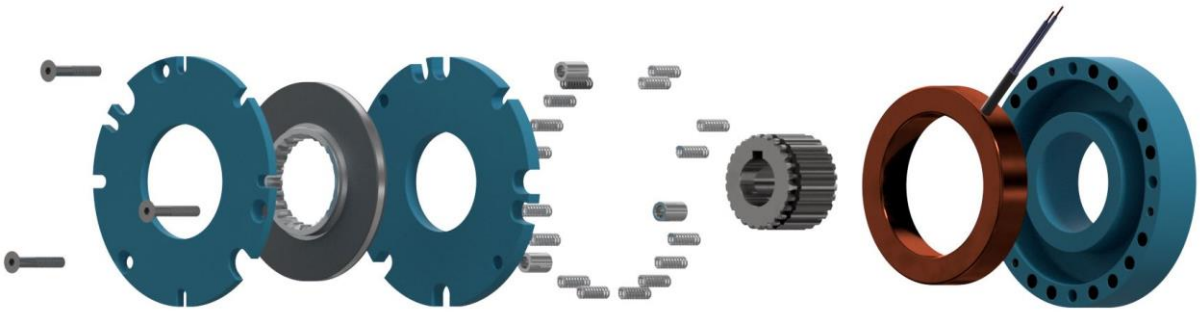
Bu modelleme yaklaşımı teorilere dayanır. Bu yaklaşımda teori gelişimine katkıda bulunma amaçlanır. Epistemolojik veya teorik modelleme yaklaşımının kaynağı roman epistemolojisine dayanır. Bu yaklaşımın önde gelen isimleri Brousseau, Chevallard'dir. (Tutak & Güder, 2014)

3.1.10. Bilişsel Modelleme

Bu modelleme yaklaşımı modelleme sürecinde oluşan zihinsel süreçlerin analiz edilmesini ve bu zihinsel süreçlerin anlaşılmasını sağlamayı hedef edinir. Bilişsel modelleme yaklaşımında modeller zihinsel veya fiziksel resimler olarak kullanılır. Bu yaklaşımda matematiksel düşünme süreçlerinin gelişimin sağlamak için modelleme soyutlama, genelleme gibi zihinsel süreçler olarak ele alınır.

3.2. MODEL GELİŞTİRME

Frenleme momenti dönme hızının bir fonksiyonudur. Moment kontrolünün gerektiği pek çok uygulamada (sarma sistemleri gibi) bu tip frenler tercih edilir. Metal elemanlar arasındaki boşluk oldukça önemli bir faktördür.



Şekil 3.1: Elektromanyetik Fren Parçaları.

Elektromanyetik frenin elektromekanik yapısı: sabit olan statör, elektromanyetiğin kaynağı bobin, elektromanyetik alana maruz kalacak rotor veya sürtünmeli flanş gibi parçalardan oluşur. Rotorlu yapı ise mile kama ile bağlıdır. Bizim durumda statör ile flanş arasında yay sistemi var. Hava boşluğunun oldukça önemli bir faktör olduğunu daha öncede hatırlatmıştık. Statör ile flanş veya statör ile rotor arasında bir hava boşluğu olmalı ki, elektromekanik sistem oluşsun. Birde flanşın sürtünmeli tarafı sürtünme katsayısına göre seçilmiş balata ile dişli sistem ile mile bağlanılı.

Geliştireceğimiz matematiksel modellemede mekanik kuvvete etki eden elektromanyetik büyüklükleri tanımlayarak başlayacağız. Elektriksel büyüklükleri sabit alacağız ve konu dışı olduğundan da bazı mikroskopik olayların katsayılarını göz ardı edeceğiz.

3.2.1. Elektromanyetik Kavramı

James Clerk Maxwell tarafından formüle edilen denklemler, 19. yüzyılın başlarında yapılan bir dizi önemli deneysel keşiften ortaya çıktı. 1820'de Hans Christian Oersted, bir telden geçen galvanik akımın pusulanın manyetik iğnesinin sapmasına neden olduğunu keşfetti. Bu keşif, o dönemde bilim adamlarından büyük ilgi gördü. Aynı 1820'de Biot ve Savard deneysel olarak akım (Biot - Savard yasası) tarafından üretilen manyetik indüksiyon için ifadeyi buldular ve André Marie Ampere ayrıca akımın geçtiği iki iletken arasında belirli bir mesafede etkileşimin gerçekleştiğini keşfetti. Ampere "elektrodinamik" terimini ortaya attı ve doğal manyetizmanın bir mıknatıstaki dairesel akımların varlığı ile ilişkili olduğu hipotezini ortaya attı. (Staelin, David H, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Istitute of Technology , 2011)

Akımın, Oersted tarafından keşfedilen bir mıknatıs üzerindeki etkisi, Michael Faraday'i mıknatısın akımlar üzerinde ters bir etkisinin olması gerektiği fikrine götürdü. Uzun deneylerden sonra, 1831'de Faraday, bir iletkenin yakınında hareket eden bir mıknatısın iletkende bir elektrik akımı oluşturduğunu keşfetti. Bu fenomen elektromanyetik indüksiyon olarak adlandırıldı. Faraday, yükler ve akımlar arasında bulunan belirli bir ortam olan "kuvvet alanı" kavramını tanıttı. Onun mantığı doğası gereği nitelikseldi, ancak Maxwell'in araştırması üzerinde büyük bir etkisi oldu. (Staelin, David H, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Istitute of Technology , 2011)

Faraday'ın keşiflerinden sonra, eski elektromanyetizma modellerinin (Ampere, Poisson, vb.) Eksik olduğu ortaya çıktı. Yakında, Weber'in uzun vadeli eyleme dayanan teorisi ortaya çıktı. Bununla birlikte, bu zamana kadar, yerçekimi teorisi dışındaki tüm fizik, yalnızca kısa menzilli etkileşim (optik, termodinamik, sürekli ortam mekaniği vb.) İle ilgilendi. Gauss, Riemann ve diğer bazı bilim adamları, ışığın elektromanyetik bir doğaya sahip olduğunu, böylece elektromanyetik fenomen teorisinin de yakın mesafede olması gerektiğini öne sürdüler. Bu ilke Maxwell'in teorisinin temel bir özelliği haline geldi. (Staelin, David H, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Istitute of Technology , 2011)

Bilinen deneyleri analiz eden Maxwell, elektrik ve manyetik alanlar için bir denklem sistemi elde etti.

Fizikteki çoğu denklemin yazımı, birimler sisteminin seçimine bağlı değildir. Ancak elektrodinamikte durum böyle değildir. Maxwell denklemlerindeki birim sisteminin seçimine bağlı olarak, çeşitli katsayılar (sabitler) ortaya çıkar. Uluslararası Birimler Sistemi (SI) mühendislik ve öğretimde standarttır, ancak fizikçiler arasında CGS'nin rakip birimler sistemine kıyasla yararları ve dezavantajları hakkındaki tartışmalar devam etmektedir [25]; burada ve bundan sonra, CGS altında, yalnızca simetrik Gauss CGS sistemi kastedilmektedir. CGS sisteminin elektrodinamikteki avantajı, içindeki tüm alanların aynı boyuta sahip olması ve birçok bilim insanına göre denklemlerin daha basit ve daha doğal bir şekilde yazılmasıdır [26]. Bu nedenle SGS, elektrodinamik üzerine bilimsel yayınlarda ve teorik fizik öğretiminde, örneğin Landau ve Lifshitz tarafından teorik fizik dersinde kullanılmaya devam ediyor. Bununla birlikte, pratik uygulamalar için, çoğu isimsiz ve belirsiz olan, CGS'ye dahil edilen

ölçü birimleri genellikle elverişsizdir. SI sistemi standartlaştırılmıştır ve kendi kendine daha tutarlıdır; tüm modern metroloji bu sisteme dayanmaktadır. Ayrıca SI sistemi genel fizik derslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, SI ve CGS sistemlerinde farklı yazılırlarsa tüm oranlar ayrıca iki versiyonda verilmektedir. (Griffiths, 2008)

3.2.2. Maxwell Denklemlerinin Diferansiyel Förmülleri

Maxwell denklemleri vektör notasyonunda, bileşen gösteriminde sekize indirgenen dört denklem sistemidir (iki vektör denklem her biri üç bileşen artı iki skaler olan [28]) dört vektör fonksiyonunun 12 bileşeni için doğrusal birinci dereceden kısmi diferansiyel denklemler (***D, E, H, B***) :

Adı	**CGS**	**SI**	**Yaklaşık sözlü ifade**
Gaus Yasası	$\nabla * D = 4\pi\rho$ (1 a)	$\nabla * D = \rho$ (1 b)	Elektrik yükü, elektrik indüksiyonunun kaynağıdır.
Manyetik Alan için Gauss Yasası	$\nabla * B = 0$ (2 a)	$\nabla * B = 0$ (2 b)	Manyetik yük tespit edilmedi
Faraday'ın indüksiyon yasası	$\nabla \times E = -\frac{1}{c}\frac{\partial B}{\partial t}$ (3 a)	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ (3 b)	Manyetik indüksiyondaki bir değişiklik, bir girdap elektrik alanı oluşturur.

Ampere kanunu	$\nabla \times H = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c}\frac{\partial D}{\partial t}$ (4 a)	$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t}$ (4 b)	Elektrik akımı ve elektrik indüksiyonundaki değişiklikler bir girdap manyetik alanı oluşturur

Tablo 3.1: Maxwell denklemlerinin diferansiyel formüllerinin ifadesi.

ρ - harici bir elektrik yükünün yığın yoğunluğu (SI birimlerinde - [C / m³]);

j - elektrik akımı yoğunluğu (iletim akımı yoğunluğu) (SI birimlerinde - [A / m²]); en basit durumda - bir tür yük taşıyıcı tarafından üretilen bir akım durumunda, basitçe **j=u ρ** bu taşıyıcıların belirli bir noktanın çevresindeki (ortalama) hızının **u**, **ρ** ise bu tür taşıyıcıların yük yoğunluğu olduğu (genellikle çakışmaz) olarak ifade edilir.

c - vakumda ışığın hızı (299 792 458 [m / s]);

E - elektrik alan şiddeti (SI birimlerinde - [V / m]);

H - manyetik alan şiddeti (SI birimlerinde - [A / m]);

D - elektrik indüksiyonu (SI birimlerinde - [Kulon / m2]);

B - manyetik indüksiyon (SI birimlerinde - [Tesla = Wb / m2 = $^{Wb}/_{m^2} = kg * s^{-2} * A^{-1}$]);

∇ del işlemcisidifferansyel öperatörü

$\nabla \times E \equiv rot\boldsymbol{E} - \boldsymbol{E}$ vektörünün rotoru.

$\nabla * E \equiv div\boldsymbol{E} - \boldsymbol{E}$ vektörünün divarjansı

Yukarıdaki Maxwell denklemleri, elektromanyetik alanın uyarıldığı ortamın özelliklerini içermediğinden henüz tam bir elektromanyetik alan denklem sistemi oluşturmamaktadır.

(Staelin, David H, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Istitute of Technology , 2011)

3.2.3. Maxwell Denklemlerinin İntegral Förmülleri

Ostrogradsky - Gauss formülünü ve Stokes teoremini kullanarak Maxwell'in diferansiyel denklemlerine integral denklemler şeklinde verilebilir:

Adı	**CGS**	**SI**	**Yaklaşık sözlü ifade**
Gaus Yasası	$\oint_s D * ds = 4\pi \mathrm{Q}$ (5 a)	$\oint_s D * ds = \mathrm{Q}$ (5 b)	Kapalı bir yüzeyden elektrik indüksiyonunun akışı, bu yüzey tarafından sınırlanan hacimdeki serbest yük miktarı ile orantılıdır.
Manyetik Alan için Gauss Yasası	$\oint_s B * ds = 0$ (6 a)	$\oint_s B * ds = 0$ (6 b)	Kapalı bir yüzeyden manyetik indüksiyon akışı sıfırdır (manyetik yük bulunmamıştır.
Faraday'ın indüksiyon yasası	$\oint_1 E * dl = -\frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int_s B * ds$	$\oint_1 E * dl = -\frac{d}{dt}\int_s B * ds$	Açık bir yüzeyden geçen manyetik indüksiyon akısındaki değişim, karşıt işaret ile alındığında, elektrik alanın yüzeyin sınırı

	(7 a)	(7 b)	olan kapalı bir döngüdeki dolaşımı ile orantılıdır.
Ampere kanunu	$\oint_1 H * dl = \frac{4\pi}{c} I + \frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int_s D * ds$ (8 a)	$\oint_1 H * dl = I + \frac{d}{dt}\int_s D * ds$ (8 b)	Serbest yüklerin toplam elektrik akımı ve elektrik indüksiyonunun açık bir yüzeyden akısındaki değişim, yüzeyin sınırı olan kapalı bir devrede manyetik alanın dolaşımı ile orantılıdır.

Tablo 3.2: Maxwell denklemlerinin integral formüllerinin ifadesi.

s- Gauss teoremi durumunda, ***v*** hacmi sınırlayan iki boyutlu bir kapalı yüzey ve Faraday ve Ampere – Maxwell yasaları durumunda açık bir yüzey (***l***-sınırı kapalı bir konturdur).

$Q = \int_v \rho dv$ – hacimsel v elektrik yükü, **s** yüzeyle sınırlıdır (SI birimlerinde - [Kulon]);

$I = \int_s j * ds$ – **s** yüzeyden geçen elektrik akımı (SI birimlerinde - [A])

Kapalı bir yüzey üzerinde integral alırken, alan elemanınıns **ds** vektörü hacimden dışa doğru yönlendirilir. Açık bir yüzey üzerinden entegrasyon sırasındaki **ds** oryantasyonu, kontur ***dl*** integralini dönmesi yönünde dönerken "vidalanan" sağ vidanın yönü ile belirlenir. (Staelin, David H, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Istitute of Technology , 2011)

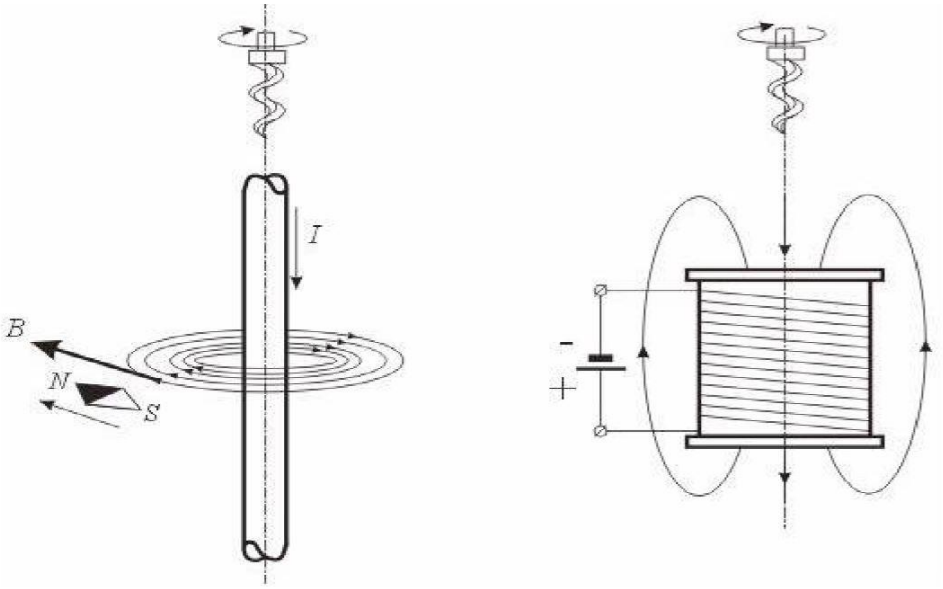
3.3. MANYETİK ALANLARIN HESAPLANMASI VE HAVA BOŞLUKLARININ MANYETİK İLETKENLİĞİNİN DENEYSEL ÇALIŞMASI

Manyetik çizgilerin yönü ve onları oluşturan akımın yönü, sağ vidanın iyi bilinen sağ el kuralıyla birbirine bağlıdır.

Sağ el kuralı.

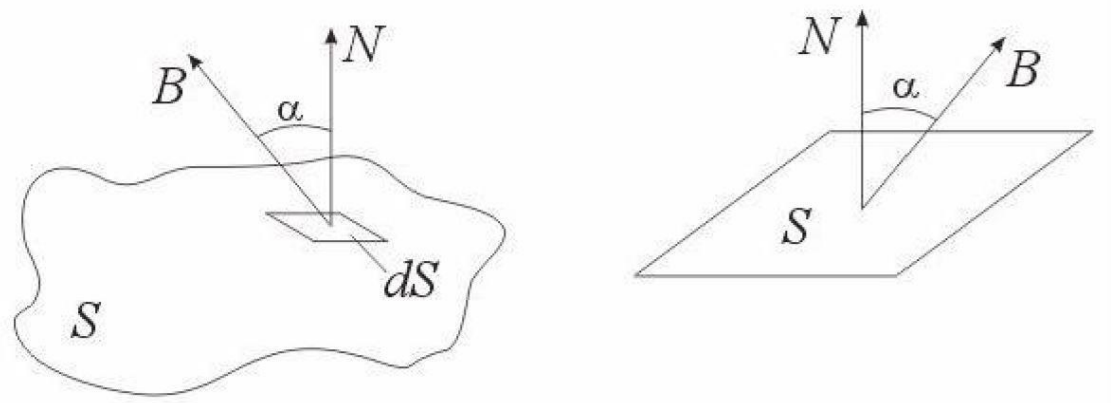
Manyetik alanın yoğunluğunu ve yönünü karakterize eden ana birim tesla ile ölçülen ***B*** manyetik indüksyon vektörüdür. Vektör ***B*** manyetik çizgiye teğet olarak yönlendirilir, vektörün yönü, manyetik alanın dikkate alınan noktasına yerleştirilen manyetik okun ekseni ile çakışır. ***B*** değeri, manyetik bir alana yerleştirilmiş akım taşıyan bir iletkenin bir elemanına etki eden mekanik kuvvet tarafından belirlenir. Tüm noktalarda alan aynı büyüklük ve yöne sahipse, böyle bir alana tek tip denir. ***B*** sadece ***I*** değerine değil, aynı zamanda çevrenin manyetik özelliklerine de bağlıdır. (Becker, 1964)

Manyetik alanı karakterize eden ikinci önemli birim, Weber [Wb] ile ölçülen manyetik akıdır ***Φ***.



Şekil 3.2: Düz bir iletken ve bobinin manyetik alanı.

Sonsuz küçük bir alandan geçen temel manyetik akı ***Φ, dΦ = B cos α dA*** değeri olarak adlandırılır, burada ***α, dA*** alanına yön ve normal arasındaki açıdır.



a b

Şekil 3.3: Nüfuz eden manyetik akının belirlenmesi: a) keyfi bir yüzey; b) düzgün bir manyetik alanda düz yüzey.

S yüzeyindeki alan A [m^2]

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos\alpha \, dA \qquad (9)$$

Manyetik alan düzgünse ve yüzey **S** bir düzlemse

$$\Phi = B\,A \qquad (10)$$

Manyetik alanları incelerken ve manyetik yapıları hesaplarken - manyetik alan şiddetini **H** kullanırız (SI birimlerinde [A / m])

$$B = \mu_a H \qquad (11)$$

$\boldsymbol{\mu_a}$ - ortamın manyetik geçirgenlik katsayısı

Ferromanyetik olmayan malzemeler ve ortamlar için (ahşap, kağıt, bakır, alüminyum, hava) μa, vakumun manyetik geçirgenliğinden farklı olmayıp $\boldsymbol{\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}}$ **[H / m]** (Henry / metre) eşittir. (Ivanov, Solovyev, & Frolov V. Ya., 2012)

μ_a ferromanyetik malzemelerde değişken olup, **B** manyetik indüksyona bağlıdır.

3.3.1. Manyetik Devreler

Herhangi bir elektromanyetik, bir çelik çekirdekten (Bizim durumda Statör) oluşur - manyetik bir devre ve üzerine bir elektrik akımının geçtiği yalıtılmış tel dönüşleriyle sarılmış bir bobin, birde hareketli parça (rotor) flanştan oluşur.

Manyetik akı hatlarının kapalı olduğu çeşitli bölümlerin kombinasyonu: ferromanyetik (çelik) ve ferromanyetik olmayan (hava) ile manyetik bir devre oluşturur. (Yazdanpanah, Reza; Mirsalim, Mojtaba, Electrical Machines and transformers Research laboratory, Department of Electrical Engineering. , 2014)

3.3.2. Ampere Yasası

Manyetik devre hesaplamasının temelini Ampere Yasası oluşturmaktadır:

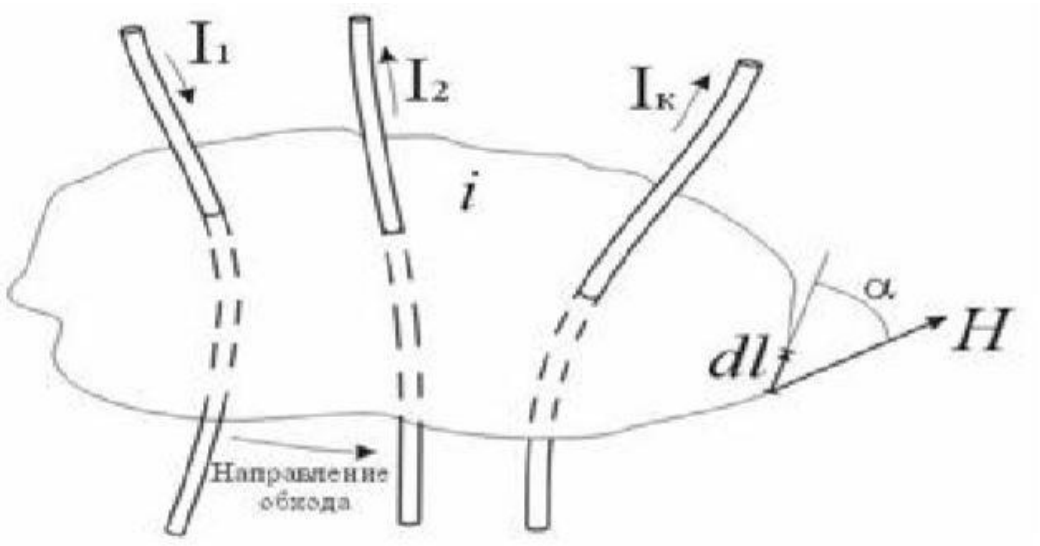
$$\oint Hdl = \oint H * \cos\alpha \ dl = \sum I \qquad (12)$$

H - manyetik alan şiddeti (SI birimlerinde - [A / m]);

dl – kapalı kontur l uzunluğunun elemanı

α – H ve ***dl*** vektörlerinin arasındaki açı;

∑I – l konturdan geçen akımların cebirsel toplamı.

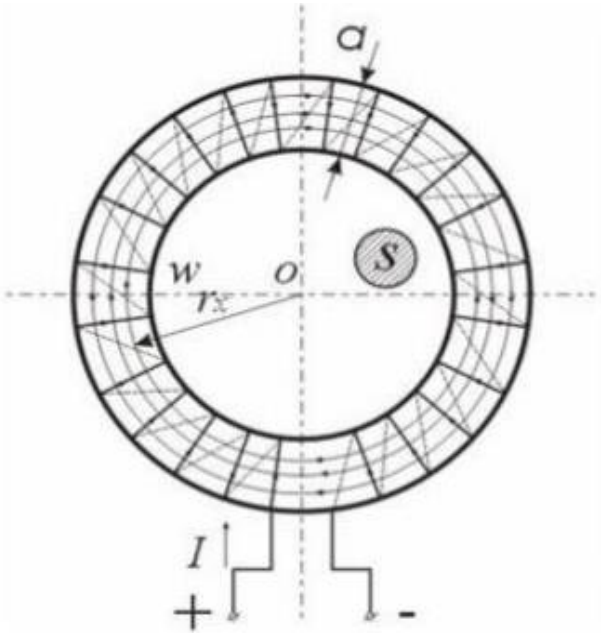


Şekil 3.4: Ampere yasası.

Konturu atlamak için kabul edilen yön ve bu akımın yönü sağ vidanın (Sağ el) kuralıyla ilişkiliyse, L konturuna giren I akımı pozitif olarak kabul edilir. (Ivanov, Solovyev, & Frolov V. Ya., 2012)

3.3.3. Ampere Yasasını Manyetik Devre Hesabında Kullanma Yöntemi

Homojen bir malzemeden yapılmış bir toroid halka şeklinde yapılmış basit bir manyetik devre düşünelim.



Şekil 3.5: Halka manyetik devre.

Bobin sarim sayısı ***N*** vardır ve akım ***I*** etrafında akar. Halkanın içindeki manyetik çizgiler, O noktasında merkezleri olan eşmerkezli dairelerdir. Ampere yasasını, manyetik devreden geçen manyetik çizgilerden biriyle çakışan Cx konturuna uygularız. Bu durumda şunları dikkate alacağız:

a. ***H*** ve ***dl*** çakışıyor, dolaytısıyla ***α= 0***;
b. $\boldsymbol{H_x}$ büyüklüğü konturun her noktasında homojendir;
c. Kontura giren toplam akım ***IN*** eşittir.

O zaman

$$\oint H_k \cos\alpha \, dl = H_k \oint dl = H_k l_k = IN \qquad (13)$$

Burada da,

$$H_k = \frac{IN}{L_x} = \frac{IN}{2\pi r_x} \; [\boldsymbol{A/m}] \qquad (14)$$

l_x – üzerinden integrali alınan kontur uzunluğu

r_x – çember yarıçapı

Halka içerisinde H vektörünün değeri r_x mesafe uzunluğuna bağlıdır. Eğer α halka kalınlığı <<d, ise H değeri ile çekirdek ebatından fazla değil. Bu durumda, manyetik devrenin tüm kesiti için manyetik alan şiddetinin bir değerini hesaba katmaya izin verilir:

$H_{ort} = IN/l$,

l – manyetik çizginin orta çizgisinin uzunluğu

3.3.4. Manyetik Devre için Ohm'un Yasası. Linear ve Nonlinear Manyetik Dirençler

Düzgün bir sargıya sahip dairesel bir manyetik devrede, tüm manyetik alan halkanın içinde yoğunlaşır.

Bu durumda, dağıtılmış sargılı bir manyetik devrede manyetik akıyı tanımlayalım.

$\Phi=B_{ort}\ A_{kesit}$ ile $B_{ort}=\mu_a\ H_{ort}$ ilişkilendirerek

$$\Phi=\int_s d\Phi=B_{ort}\ A_{kesit}=\ \mu_a\ H_{ort}\ A_{kesit} \qquad (15)$$

$$\Phi=\mu_a A_{kesit}\ \frac{IN}{l}=\frac{IN}{\frac{l}{\mu_a A_{kesit}}}=\frac{F}{R_m} \qquad (16)$$

elde ederiz.

Manyetik akı **Φ**, manyetomotor kuvveti (mmk) olarak adlandırılan **IN = F** çarpımına bağlıdır.

$l / (\mu_a A) = R_m$ değeri genellikle manyetik devrenin manyetik direnci olarak adlandırılır (elektrik direnci $r = l / \gamma A_{kesit}$ ile benzer şekilde).

Havanın (boşlukların) manyetik direnci doğrusaldır, çünkü $\mu_a = \mu_0$ = sabittir. Çekirdeğin manyetik direnci doğrusal değildir – μ_a, manyetik indüksiyona bağlıdır. (Ivanov, Solovyev, & Frolov V. Ya., 2012)

Mıknatıslanma kuvveti F emk'nin etkisine benzetilirse, Ohm yasasının doğru akım devresi için ifadesine benzer bir ilişki elde edilecektir. Bu bağlamda, formül IN = F genellikle bir manyetik devre için Ohm yasası olarak adlandırılır. Bu benzetmenin biçimsel olduğu ve elektrik ve manyetik devrelerdeki işlemlerin fiziksel özünün farklı olduğu unutulmamalıdır.

3.4. DEĞİŞKEN MANYETOMOTOR KUVVETLİ MANYETİK DEVRELERİN HESAPLANMASININ ÖZELLİKLERİ

Çelik çekirdekli bir bobin içeren AC devrelerindeki fiziksel süreçler, DC devrelerindeki işlemlere kıyasla bir dizi özelliğe sahiptir. Bu özelliklerin, elektrikli cihazların ve AC makinelerin tasarımı ve teknik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır.

AC devrelerindeki ferromanyetik elemanlar, histerezis ve girdap akımları nedeniyle ek çekirdek kayıplarına sahiptir. Kayıpları azaltmak için çelik çekirdek, birbirinden izole edilmiş ince plakalardan lamine edilir. (Abbott, Ergeneman, Kummer, Hirt, & Nelson, 2007)

3.4.1. Çekirdekteki (Statördeki) Kayıplar

Çelikte $P_{çelik}$ kayıp olarak adlandırılan çekirdekteki kayıplar, besleme geriliminin frekansı arttıkça artar. Alternatif manyetik akı Φ, çelik çekirdekte akış eksenine dik düzlemlerde kapalı olan girdap akımlarını (Foucault akımları) indükler. Bu akımlar çeliğin ısınmasına neden olarak verimi düşürür, elektromanyetik yapıların yük kapasitesinin sınırlandırılmasına da sebep olur. Çelik manyetik çekirdekteki enerji kayıpları, elektrikli çelik saç kalınlığındaki azalma (0.1 ÷ 0.5 mm) ile önemli ölçüde azaltılır.

$$P_{girdap} = k_{girdap}\, f^2 B_m^2\, d^2 / \rho \qquad (17)$$

k_{girdap} – deneysel alınan katsayı;

f -çeliğin ters mıknatıslanma sıklığı;

B_m – maksimum manyetik indüksiyon;

d – çelik çekirdeğin kalınlığı;

ρ - çekirdek malzemenin özgül direnci.

Girdap akımlarından kaynaklanan kayıplara ek olarak, histerezis oluşumu nedeniyle alternatif bir manyetik akıya sahip çelik bir manyetik çekirdekte kayıplar meydana gelir.

$$P_r = k_r\, f\, B_m^2\, G \qquad (18)$$

k_r – sabit katsyı;

G – çekirdek kütlesi kg cinsinden.

Girdaplı akışlarından ve histerezisten kaynaklanan toplam kayıplar

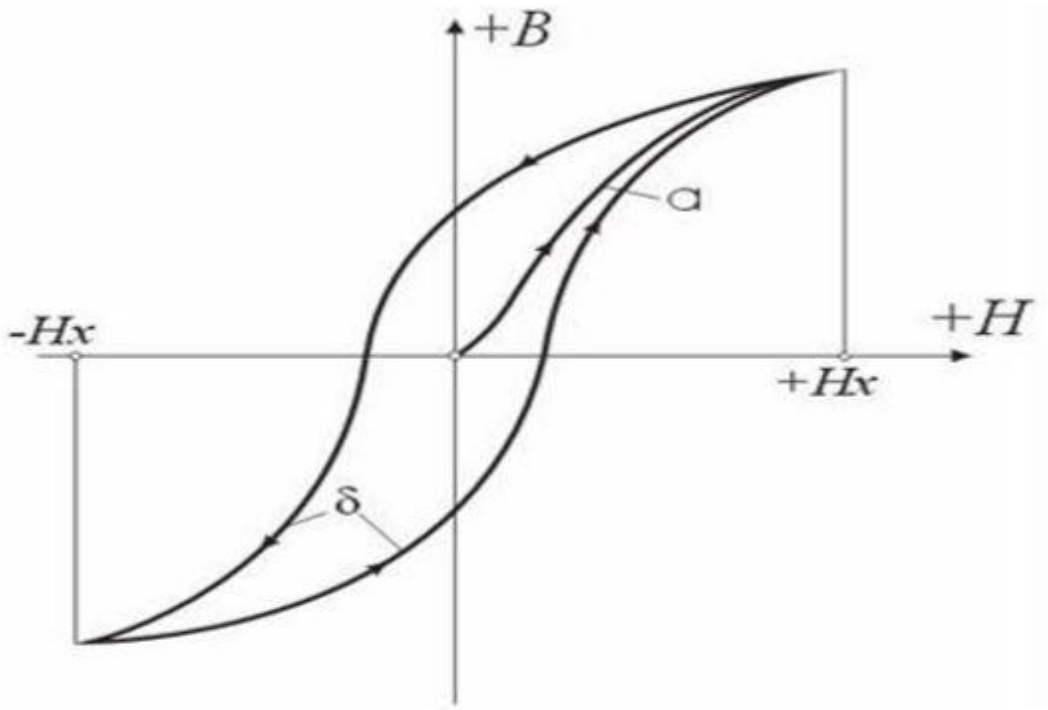
$$P_{çelik} = P_{girdap} + P_r\ [W] \qquad (19)$$

çelikteki manyetik kayıplar veya kayıplar olarak adlandırılır. (Li, Yang, & Li, 2019)

3.5. FERROMANYETİK MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenliğinin μ_a değişken olduğu ve manyetik indüksyona bağlı olduğu bilinmektedir. Bu, manyetik direncin R tutarsızlığını gerektirir ve manyetik devrelerin hesaplamalarını önemli ölçüde karmaşıklaştırır. Bu nedenle, ferromanyetik bölgeler içeren manyetik devreleri hesaplamak için, B = f (H) bağımlılığını temsil eden mıknatıslanma eğrilerine sahip olmak gerekir. Bu bağımlılıklar deneysel olarak elde edilir - kapalı manyetik devreleri dağıtılmış bir sargı ile test edilir. (Vanderline, 2005)

Mıknatıslanmanın başlangıç eğrisi olarak adlandırılan eğri ***a***, numunenin ilk mıknatıslanmasına karşılık gelir.



Şekil 3.6: B (H) Bağımlılığı - histerezis döngüsü.

Manyetik alan kuvveti + Hx'ten –Hx'e değiştiğinde numune döngüsel mıknatıslanmaya maruz kalırsa, grafik histerezis döngüsü olarak bilinen kapalı bir eğriyi temsil eder.

Manyetik alan kuvvetinin kademeli olarak artan değerleri için döngüsel mıknatıslanma işlemi tekrarlanırsa, bir histerezis döngüsü ailesi elde edilebilir ve manyetik alan

gücündeki + Hmax ila –Nmax aralığında bir değişime karşılık gelen sınırlayıcı histerezis döngüsü elde edilebilir, H'de Hmax üzerinde bir artış gerekli olmayacaktır. Sınırlayıcı histerezis döngüsü, artık manyetik indüksiyonun ve zorlayıcı kuvvet Hc değerini belirler. Histerez döngülerinin köşelerini birleştiren eğriye ana mıknatıslanma eğrisi denir. Bu eğriler referans kılavuzlarda verilmiştir ve manyetik devre hesaplamalarında kullanılır.

Döngüsel manyetizasyonun tersine çevrilmesi süreci, fizik dersinden bilindiği gibi, histerez döngüsünün alanıyla orantılı enerji tüketimi gerektirir.

Bu bağlamda, sürekli manyetizasyon tersine çevrilmesi koşulları altında çalışan elektrikli cihazların manyetik çekirdeklerinin (örneğin, transformatörler), dar bir histerezis döngüsüne sahip ferromanyetik malzemelerden yapılması tavsiye edilir. Bu tür ferromanyetik malzemeler yumuşak manyetik olarak adlandırılır (elektrikli sac ve nikel, demir ve diğer bileşenlerden oluşan permalloy gibi bir dizi özel alaşım).

Yükarıdaki prensiplere dayanarak Doğal mıknatısların üretimi için geniş bir histerezis döngüsüne (δ eğrileri) sahip, büyük bir artık indüksiyona ve büyük bir zorlayıcı kuvvete sahip ferromanyetik malzemelerin kullanılması tavsiye edilir. Bu tür ferromanyetik malzemeler manyetik olarak sert (tungsten, krom ve alüminyum içeren bir dizi demir alaşımı) olarak adlandırılır.

3.6. MANYETİK DEVRENİN HAVA BOŞLUĞUNUN AYARLANMASI

Daha yükarıda belirttiğimiz gibi parçaların arasındaki hava boşluğu oldukça önemli. Ayrıca bir araştırma konusudur. Deneysel olarak, manyetik bir devrenin hava boşluğundaki manyetik alanların hareketinin mekanik tezahürünü, boşluğun büyüklüğüne, manyetik alanı uyaran akımın gücüne ve hava boşluğunun şekline bağlı olarak araştırmak mümkündür.

Manyetik bir alandaki mekanik kuvvetler, çeşitli elektromanyetik rölelerin, fren ve kavramaların vb. temelini oluşturan elektromıknatıslar oluşturmak için teknolojide yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, manyetik bir alandaki mekanik kuvvetler, elektromanyetik bir fren sistemi temelinde incelenmiştir. Tasarımı, içine bobin sabitlenmiş gövde (statör) ile flanş arasında yay

kuvveti etkileyen zırhlı manyetik çekirdekli bir elektromanyetik yapıya dayanmaktadır. Bobine gerekli gerilim sağlandığında yayın tekme kuvvetini yenerek flanş gövdeye (statöre) yapışmaktadır. Ne zaman gerilim kesilirse elektromanyetik etkininde kaybolmasıyla yayın tepki kuvveti flanşı baştaki pozisyonuna ötelemektedir.

Bu flanşın ikinci yüzeyi ise sürtünme özelliğine sahip balata ile örtüşmektedir. Yani balata iki tarafında baskı kuvveti uygulayacak flanş ile akuple motora montajı sağlayacak flanş arasında sürtünmektedir. Statör ile flanş ve arasındaki hava boşluğu ile birlikte manyetik devre oluşturmaktadır. Teknolojide, bu manyetik devreyi kullanarak yukarıda da belirttiğimiz gibi çeşitli elektromekanik sistem, cihaz gibi yapılar tasarlanmaktadır. Bundan sonra manyetik devre unsurlarına sırasıyla; statör, flanş, balata, hava boşluğu gibi terminolojiyi kullanacağız. Durdurma, solenoid bobine monte edilir.

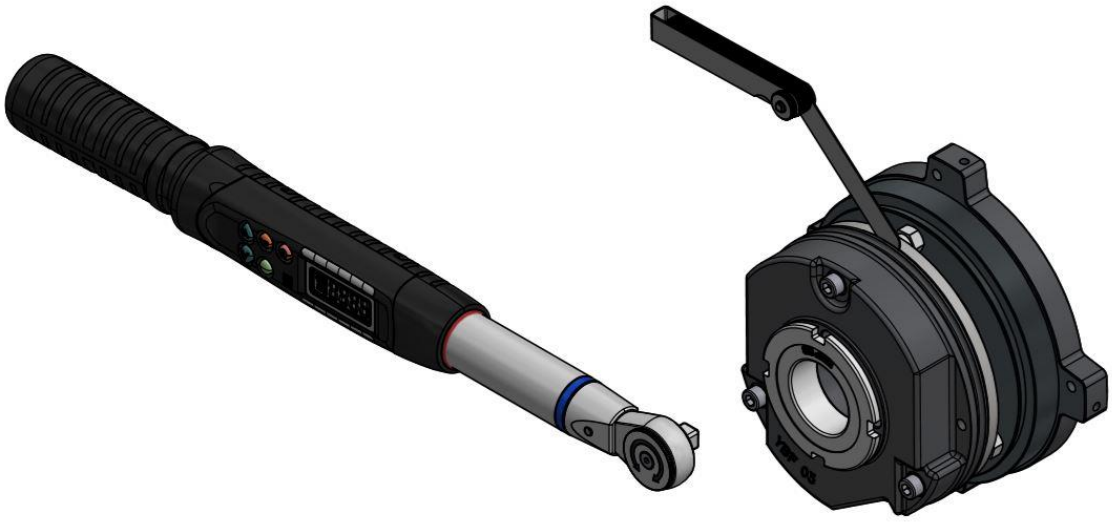
Akım bobinden geçtiğinde, manyetik indüksiyon, flanşı yay kuvvetini yenerek çekildiği, manyetik indüksiyon kuvvet çizgileri boyunca hareket eden manyetik devrede meydana gelir. Statör ile flanş arasındaki hava boşluğu flanşın hareket etmesine izin verir.

Fren sistemi dikey olarak yerleştirildiğinde ve flanşın üst kısmında iken, flanşı çeken manyetik alandaki kuvvetler, flanşın yerçekimi kuvvetini (ağırlık diyeceğiz) aşmak için çalışma yapar. Statör ile flanş arasındaki hava boşluğunun boyutunu önceden ayarlama ve flanşı etki eden yerçeki kuvvetini değiştirme imkanı olan böyle bir cihaz, manyetik bir alandaki mekanik kuvvetlerin incelenmesine izin verir. Teknolojide, bu tür çalışmalara bir elektromanyetiğin çekiş kuvvetlerinin çalışmaları denir.

Akım baskılı fren ve kavrama grubu olarak baktığımızda flanşın ağırlık düzenlemesi hem mekanik olarak (örneğin, ağırlıklar veya yaylar kullanılarak veya ikinci bobinin elektromanyeti - mekanik kuvvetleri kullanılarak) gerçekleştirilebilir. İkinci yöntem, ikinci elektromanyetikteki akımı değiştirerek flanşın etkin ağırlığını sorunsuz bir şekilde ayarlamanıza izin verdiği için deney uygulamasında daha uygundur. Bununla birlikte, bu seçeneği uygulamak için, ilk önce ikinci elektromanyetikteki mevcut güç ile flanşın etkin ağırlığı arasında bir uygunluk kurulması gerekir. Ek olarak, kurulumdaki birinci elektromanyetiğin manyetik devresinin çalışılan boşluğundaki mekanik kuvvetlerin hesaplanması olasılığını sağlamak ve basitleştirmek için, birinci ve ikinci manyetik devrelerin

(ana elektromanyetiğin ve yardımcıların manyetik devreleri) indüksiyon hatlarını "ayırmak", aralarında (ve esas olarak flanşa giren armatür segmentinde) gereklidir. Hem birinci hem de ikinci elektromanyetikte) yüksek manyetik dirence sahip bir bölüm. Bu, hem armatürde manyetik olmayan bir segment oluşturarak hem de (ve bu kurulumda uygulanır) her iki elektromanyetiğin bobinleri tarafından oluşturulan manyetik akıların dallanma noktasında armatür çubuğunun bölümünü önemli ölçüde azaltarak elde edilebilir.

Laboratuvar ortamında frenin montajı esnasında hava boşluğu ayarı Şekil 3-7 de gösterilmiştir. İki bloktan oluşur: biri tork ayar vidasını sıkarken ölçüm alınması ve öbürü çakı ile hava boşluğu sağlamak. Bundan sonra bir konektör vasıtasıyla elektriksel olarak bağlanan bir güç kaynağı ile elektromanyetik değerlere göre fren çalışmasını kontrol etmek.



Şekil 3.7: Fren montajında hava boşluğu ayarı.

3.7. ELEKTROMEKANİK ENERJİ DÖNÜŞÜMÜN PRENSİPLERİ



Şekil 3.8: Elektromekanik enerji dönüşümün prensibinin basit şeması.

Elektromekanik enerji dönüştürme süreci, yapıların ilgili işlevlerine bağlı olduğu dönüştürme cihazının elektrik veya manyetik alanı aracılığıyla gerçekleşir. (Staelin, David H, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Istitute of Technology , 2011)

Tezin bu kısmı konumuzun esas ve nihai kısmı da diyebiliriz. Çünkü elektromekanik enerji dönüşümü ilkelerine ve bu işlevi yerine getiren cihazların analizine ayrılmıştır. Dönüşüm ortamı olarak manyetik alanları kullanan sistemlerin analizine vurgu yapılır. Kavramlar ve teknikler, elektromekanik enerji dönüşümünü içeren çok çeşitli mühendislik durumlarına uygulanabilir. Enerji yöntemine dayanarak, manyetik alan tabanlı elektromekanik sistemlerdeki kuvvetler ve torklar için ifadeler geliştireceğiz. Elektrikli ve mekanik formlar arasında enerji dönüşümü için elektromekanik mekanizmalar geliştirilmiştir. Genel olarak, elektromekanik enerji dönüşümleri üç kategoriye ayrılabilir:

1. Transdüserler (ölçüm ve kontrol için). Bu cihazlar farklı formlardaki sinyalleri dönüştürür. Örnekler mikrofonlar, pikaplar ve hoparlörlerdir.

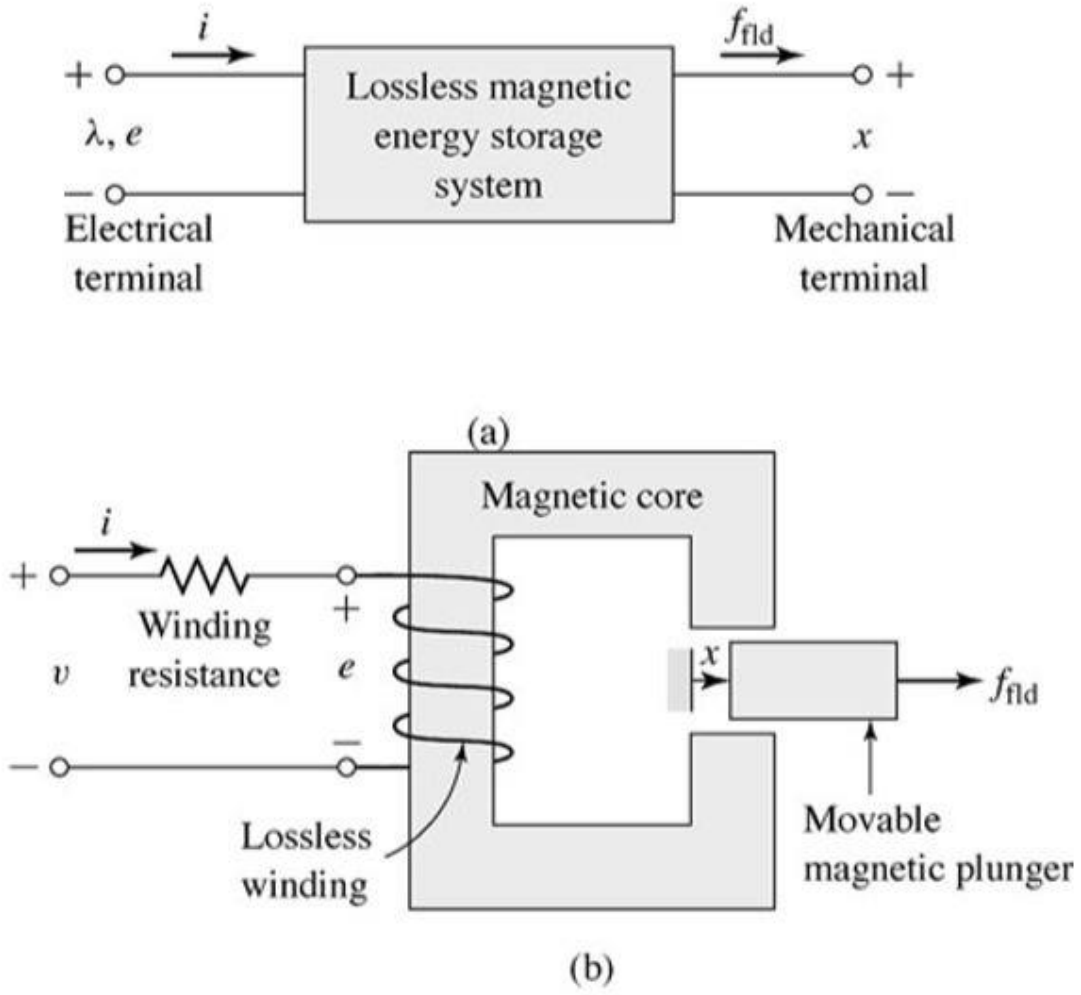
2. Kuvvet üreten mekanizmalar (doğrusal hareket makinalar). Bu tür donanımlar çoğunlukla röleler, solenoidler (doğrusal aktüatör) ve elektromanyetik gibi doğrusal hareket sürücüleri için kuvvet üretir.

3. Sürekli enerji dönüşüm ekipmanı. Bu mekanizmalar döner modda çalışır. Bir cihaz, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürse jeneratör veya başka bir yol yaparsa (elektrikten mekanik) motor olarak bilinir.

Konumuz dışında kaldığı içi ve aynı zamanda elektrik enerjisin detayı olduğu için Lorenz Kuvvet yasasını açıklamayacağız. (Sen, 2012)

3.7.1. Enerji Yöntemi

Enerji Korunumu prensibine dayanarak; Enerji ne yaratılır, ne de yok edilir, sadece şekil olarak değişir. (Sen, Eletromechanical Energy Conversion, 2012, s. 93)



Şekil 3.9: Manyetik devre örneği.

Şeklin a şıkkında manyetik alan tabanlı elektromekanik enerji dönüştürme cihazı.

- İki terminal ile kayıpsız manyetik enerji depolama sistemi;
- Eerik teriki değişken terminali var; **U** (elektrik gerilim), ***i*** (elektrik akım) ;
- Mekanik terminalde iki değişken var: $\boldsymbol{F_{alan}}$ (alan kuvveti), ***x*** (pozisyon)
- Kayıpsız mekanizması enerji depolama mekanizmasında ayırılır:

a) Elektriksel kayıp: Ohmsal kayıp…
b) Mekaniksel kayıp: sürtünme, windage…

Şeklin b şıkkında ise: elektriksel ile mekaniksel terminallerin arasındaki etkileşim elektromekanik enerji dönüşümü manyetik depolanan enerjinin ortamı ile oluşur.

W_{ema} – manyetik alanda depolanan enerji:

$$\frac{dW_{ema}}{dt} = Ui - F_{em}\frac{dx}{dt} \qquad (20)$$

$$U = \frac{d\lambda}{dt} \qquad (21)$$

$$dW_{ema} = id\lambda - F_{em}dx \qquad (22)$$

Bu (22) denklem, bize akının fonksiyonu olarak ve mekanik terminalin pozisyonu olarak sadece kuvveti çözmek için olanak sağlar. Ve bu denklemler Enerji Yönteminin temelini oluşturur.

3.7.2. Enerji Dengesi

$$\left\{\begin{matrix}Enerji\\Kaynaklarından\\Enerjinin\\Girişi\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}Mekanik\\Enerji\\Çıkışı\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}Manyetik\\alanda\\depolanan\\enerji\\artışı\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}Isısya\\dönüştürülen\\enerji\end{matrix}\right\}$$

Depolanan kayıpsız enerji sistemin tanımlama yeteneği Enerji Yönteminin özüdür. Bu da, mode3lleme sürecinin bir parçası olarak matematiksel yapılır. Kayıpsız manyetik enerji depolama için yükarıdaki (20) ile (22) förmüllerini yeniden düzenleyip

$$dW_{elektrik} = dW_{mekanik} + dW_{ema} \qquad (23)$$

Burada,

$dW_{elektrik}$ = $id\lambda$= Elektrik enerji girişinin diferansyeli;

$dW_{mekanik}$= $F_{alan}dx$= mekanik enerji çıkışının diferansyeli;

dW_{ema}= manyetik enerji depolamanın değişim diferansyeli.

Burada, U değişen manyetik depolanmış enerji ile elektrik terminallerinde indüklenen voltajdır.

$$dW_{elektrik} = Ui\ dt \qquad (24)$$

Temel enerji dönüşüm süreci, bağlantı alanını elektrik ile mekanik sistem üzerindeki etkisini ve reaksiyonunu içeren bir süreçtir.

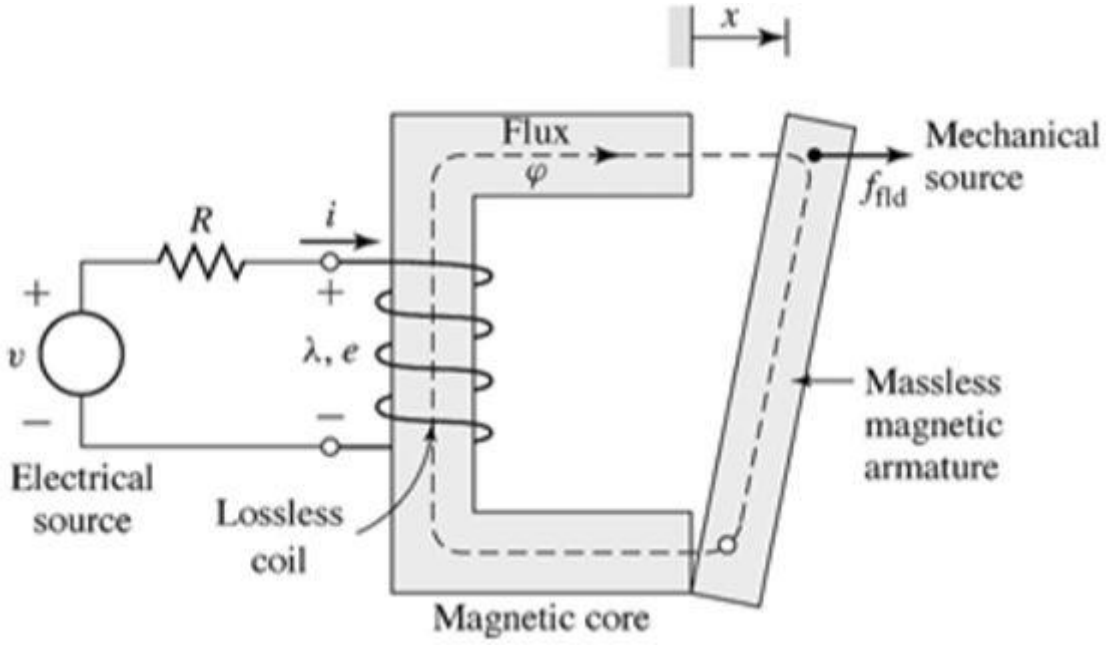
(23) ile (24) denklemlerini birleştir isek sonuç:

$$dW_{elektrik} = Ui\ dt = dW_{mekanik} + dW_{ema} \qquad (25)$$

3.7.3. Tek Bobinli İndüksyon Manyetik Alan Sistemlerindeki Enerji

Tek bobinden indüklenen enerji dönüşüm sistemleri ile ilgileneceğiz. Manyetik devreler, manyetik alanda önemli miktarda enerjinin depolandığı sabit ve hareketli parçalar arasındaki hava boşluğuna sahiptir. (Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2012)

Bu alan enerji dönüşüm ortamı olarak işlev görür ve enerjisi elektrik ve mekanik sistemler arasındaki rezervuardır.



Şekil 3.10 Elektromanyetik röle şeması.

Baskın enerji depolaması hava boşluğunda meydana gelir ve manyetik devrenin özellikleri hava boşluğunun boyutlarına göre belirlenir.

$$\lambda = L(x)i \qquad (26)$$

$$dW_{mekanik} = F_{em}dx \qquad (27)$$

$$dW_{ema} = id\lambda - F_{em}dx$$

(22) förmülünü tekrar gözden geçirmiş olursak, W_{ema} değeri λ ve *x* değerleri ile istisnai bir şekilde belirtilir. Bu nedenle, λ ve *x* durum değişkenleri olarak adlandırılır.

Manyetik enerji depolama sistemi kayıpsız olduğundan, korunumlu (konservatif) sistemdir, nihai değerlerine bakılmaksızın aynıdır.

3.7.4. Enerjiden Manyetik Kuvvet ve Tork Belirleme

Manyetik depolanan enerji W_{ema} bağımsız olup, değişkenleri λ ile x tarafından benzersiz şekilde belirlenen durum fonksiyonudur.

$$dW_{ema}(\lambda, x) = id\lambda - F_{em}dx \qquad (28)$$

$$dF(x_1, \quad x_2) = \frac{\partial F}{\partial x_1}\Big|_{x_2} dx_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2}\Big|_{x_1} dx_2 \qquad (29)$$

$$dW_{ema}(\lambda, \ x) = \frac{\partial W_{ema}}{\partial \lambda}\Big|_{x} d\lambda + \frac{\partial W_{ema}}{\partial x}\Big|_{x} dx \qquad (30)$$

Bu denklemler karşılaştırılıp, aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$i = \frac{\partial W_{ema}(\lambda, x)}{\partial \lambda}\Big|_{x} \qquad (31)$$

$$F_{em} = \frac{\partial W_{ema}(\lambda, x)}{\partial x}\Big|_{\lambda} \qquad (32)$$

Bildiğimiz üzere W_{ema} , λ ve ***x***'in fonsiyonu olarak, $i(\lambda, x)$ çözmek için kullanılabilir. (32) formülü ile $F_{em}(\lambda, x)$ elektromanyetik kuvvetin mekanik davranışını (kuvvetini) hesaplamak için kullanılabilir. Kısmi türevi, λ akı bağlantısı sabit tutulurken alınır. (Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2012)

3.7.5. Akı Bağlantısı [λ] (The Flux Linkage)

Devre teorisinde, λ akı bağlantısı iki uçlü bir elemanın özelliğidir. Bu, bir manyetik akının eşdeğeridir ve bir zaman integrali olarak tanımlanır.

$$\lambda = \int \Psi \, dt \qquad (33)$$

Buradaki, Ψ manyetik devredeki gerilim veya iki terminal arasındaki potansiyel farktır. Bu tanım, bir oran olarak ta farklı biçimde de yazılabilir:

$$\Psi = \frac{d\lambda}{dt} \qquad (34)$$

Faraday, bir iletkende üretilen elektromotor kuvvetinin büyüklüğünün bir kapalı döngü (sarım), ve o döngüden geçen toplam manyetik akının değişim hızı ile orantılıdır. [Faraday indüksiyon Yasası]. Dolayısıyla, tipik bir indüktans için, (bobin), akı bağlantısı yüzeyden geçen toplam manyetik alan olan manyetik akıya eşdeğer (yani yüzeye normal). Yani bobinin sarım sayısı ve manyetik indüksiyon ile belirlenir.

$$\lambda = \int_{A_{kesit}} \vec{B} \, d\vec{S} \qquad (35)$$

Uzayda belirli bir noktada birim alan başına akının geçmesi. Böyle bir sistemin en basit örneği, bobindir. Bu durumda akı bağlantısı tel sarımından geçen akıdır.

Bir bobin sarımı ile sınırlanan yüzey boyunca **Φ** akısı, bobinden bağımsızdır. Ayrıca, her dönüşün tam olarak bir sarım oluşturduğu N sayılı sarım, her dönüş değerleri farklı olan, aynı akıyı bağlayacaktır. Hepsinin toplam akı bağlantısı:

$$\lambda = N\Phi \qquad (36)$$

Mühendislik birimlerinde (The Flux Linkage) Akı bağlantısı tanımını alır. İki terminal arasındaki bağlantıyı belirler. Yani Akı Bağlantısı elektrik sistemi veya terminali mekanik sisteme veya terminale bağlar. (Chua, 1971)

3.7.6. Koenerjiden (Conergy) Manyetik Kuvvet ve Tork Belirleme

Koenergy tam olarak ortak enerji olarak ta adlandırılmaktadır. Koenerjinin herhangi bir fiziksel ifadesi yoktur. Bazen sistemle ilişkili mekanik kuvveti hesaplamak için gerekir. Bu nedenle, ikili enerji biçimidir, ancak sistemin mekanik kuvvetini hesaplamak için kullanılması dışında fiziksel bir değeri (miktar, tutar, vs.) veya yorumu yoktur. Sadece, i ile λ arasındaki ilişkiyi temsil ettiğini varsayalım. (Sen, Eletromechanical Energy Conversion, 2012)

Enerjiden manyetik kuvvet ve tork belirleme förmüllerini tekrar gözden geçirdikten sonra, koenerji, kuvvetin doğrudan akımın bir fonsiyonu olarak elde edebildiği değerdir. Drurum fonksiyonu olarak enerji veya koenerji seçimi tamamen bir kolaylık meselesidir. ***W'alan(i,x)*** koenerji ***i*** ve ***x***'in fonskiyonu olarak belirleyebiliriz,

$$dW'_{ema}(i,x) = i\lambda - W_{ema}(\lambda,x) \qquad (37)$$

$$d(i,\lambda) = id\lambda + \lambda di \qquad (38)$$

$$dW'_{ema}(i,x) = d(i\lambda) - dW_{ema}(\lambda,x) \qquad (39)$$

$$dW'_{ema}(i,x) = \lambda\, di - F_{em}dx \qquad (40)$$

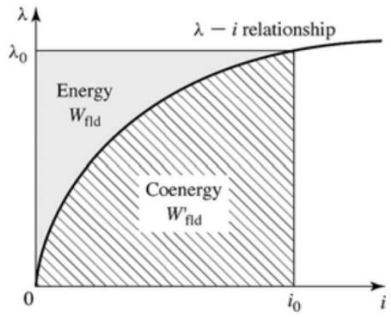
ve benzer şekilde, ***W'alan(i,x)*** koenerji iki bağımsız değişkenler ***i*** ile ***x***'in durum fonksiyonu olarak görülebilir.

$$dW'_{ema}(i,\ x) = \frac{\partial W'_{ema}}{\partial i}\,|_x\, di + \frac{\partial W'_{ema}}{\partial x}\,|_i\, dx \qquad (41)$$

$$\lambda = \frac{\partial W'_{ema}(i,x)}{\partial i}\,|_x \qquad (42)$$

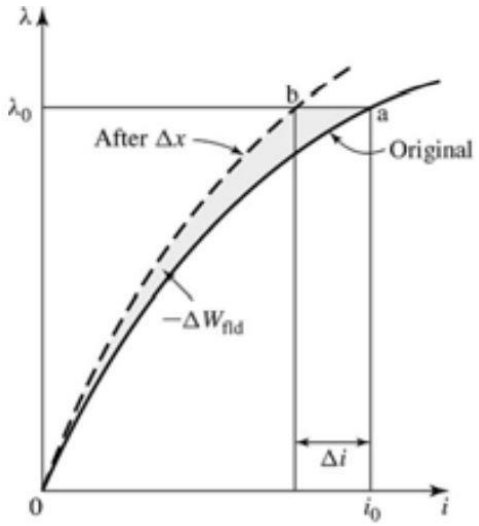
$$F_{em} = \frac{\partial W'_{ema}(i,x)}{\partial x} \,|_i \qquad (43)$$

Enerji ve koenerji her iki sistemde de aynı sonucu verir.



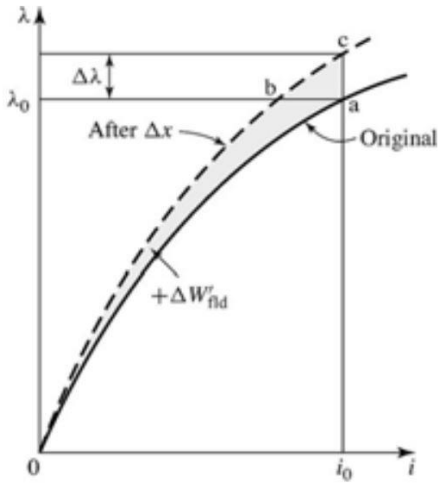
Şekil 3.11: Tek bobinli sistemde enerji ve koenerjinin grafiksel davranışı.

$$F_{em} = \frac{\partial W_{ema}(\lambda,x)}{\partial x} \,|_\lambda \cong \lim_{\Delta x \to 0} \left(\frac{-\Delta W_{ema}}{\Delta x}\right)|_\lambda$$



Şekil 3.12: λ sabit olduğunda, Δx'in tek bobinli sistemdeki enerjiye etkisi ve enerji değişiminin grafiği.

$$F_{em} = \frac{\partial W'_{ema}(i,x)}{\partial x} \,|_i \cong \lim_{\Delta x \to 0} \left(\frac{\Delta W_{ema}}{\Delta x}\right)|_i$$



Şekil 3.13: *i* sabit olduğunda, Δx'in tek bobinli sistemdeki enerjiye etkisi ve enerji değişiminin grafiği.

4. BULGULAR

4.1. KUVVET SİSMELERİ

Eğer bir kuvvetin, bir yol boyu hareket etmesine izin verilirse, mekanik iş yapmış olur. Benzer şekilde, eğer tork dönüş mesafesi boyu hareket ederse, iş yapmış olur. Matematiksel olarak elektromanyetik kuvvetin mekanik kuvvete olar etkisini üzerinde çalıştığımız fren sisteminde hesaplayıp sonucu yorumlayacağız.

Dikkat edeceğimiz husus, elektromanyetik frenlerin akuple edilecek elektromotorun etkilenecek eksenel kuvvet, radyal, linear yükler konumuz dışında olup göz ardı edilecektir. Çünkü elektromanyetik alanın oluşturacağı kuvvetin mekanik davranışına etkisi yoktur.

Uluslararası Birimler Sisteminin (SI) ölçü için birimlerinde güç Watt'tır, tork Newton*Metredir. Ayrıca, Newton*Metre biriminin ölçü olarak dengi bir enerji birimi olan Jouldür. Ancak, tork için, bu birim vektörel ölçüdür, enerji için skaler ölçüdür.

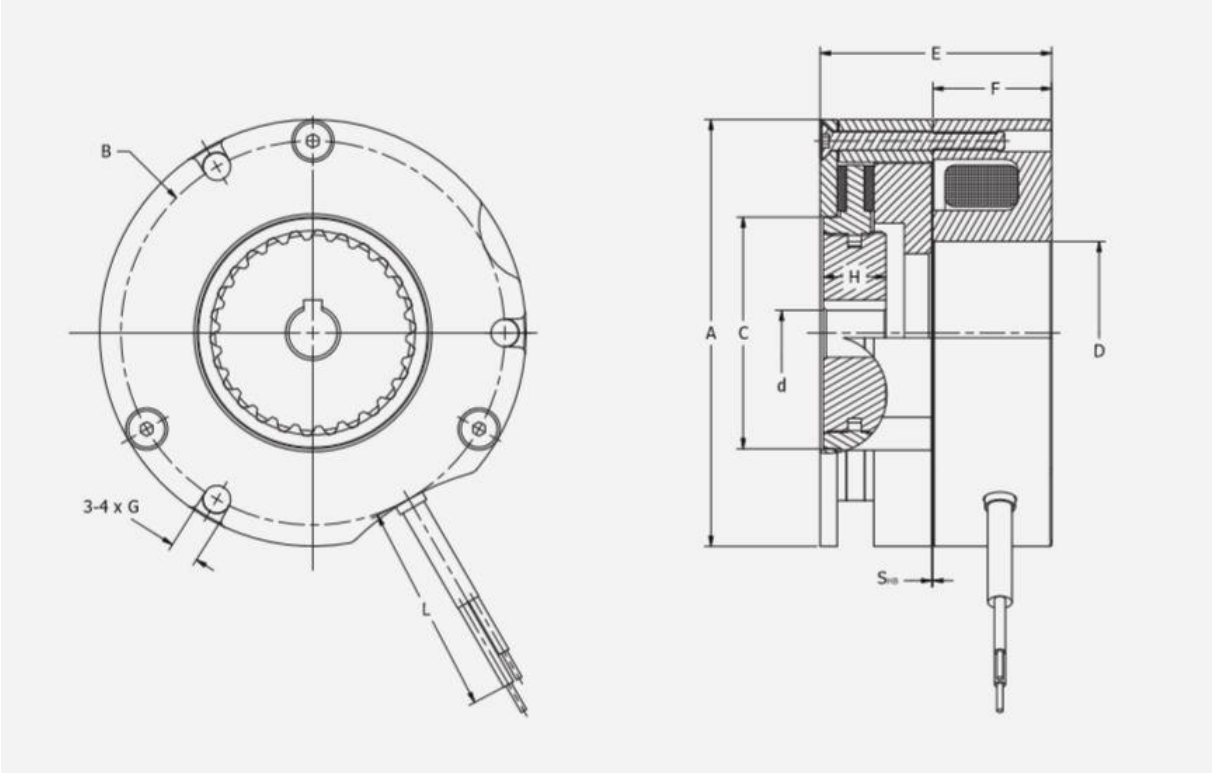
4.2. ÖRNEK FREN SİSTEMİN İNCELENMESİ

Üzerinde çalışacağımız, yukarıdaki kısımlarda teknik açıklamaları yapılan elektromanyetik fren ve kavrama sistemleri içerisinde servo motor için akuple olacak elektromanyetik fren sistemini ele alacağız. Tüm parçaların teknik resimlerini EK'ten bkz..



Şekil 4.1: Elektromanyetik fren sistemi için gerekli parçalar.

Servo motor hassas bir motor. Fren sistemi servo motorun milini stabil ve sabit tutması için akuple olunacaktır. Dolayısıyla, daha hassas yapıya sahiptir. Servo Motorların çeşitli gerilim ve torkta motorları olduğu gibi, bunlar için akuple olacak frenlerinde aynı şekilde motor sınıfına göre farklı torklarda frenler imal edilmektedir.



Şekil 4.2 Fren sisteminin genel çizimi.

SMF	T_F (Nm)	A	B	C	d	D	E	F	G	L	H	S_{HB}	Ağırlık (Kg) Weight
02	0,4	30	25	13	4	6.85	21.50	14,	3.20	400	10.00	0.10	0.10
04	0,8	37	32	15.50	4	6.85	23.50	15.50	3.20	400	10.00	0.10	0.12
06	1,5	45	40	15.10	4	11	23.60	15.50	3.20	400	10.00	0.10	0.20
08	2,5	50	45	17.10	6	11	26,	20	4.30	400	10.00	0.15	0.25
10	3,5	59	52	30	9	26.50	30.75	20	4.30	250	10.00	0.15	0.45
12	5,5	70	63	38	8	30	38	19.50	4.30	400	10.30	0.15	0.74
14	7,0	70	63	35	8	30	31.15	19.50	4.30	400	10.00	0.15	0.82
16	9,0	70	63	38	10	30	38	19.50	4.30	250	10.30	0.15	0.95
18	17	88	80	40	17	35	35	21	4.90	400	24.00	0.15	1.15
20	25	88	80	40	17	35	40	25	4.90	400	24.00	0.15	1.75
22	40	100	90	50	17	45	40	25	6.00	400	19.00	0.15	2.25
24	65	120	112	61	17	55	45	25	7.00	500	20.00	0.20	2.90
26	100	145	120	70	20	55	60	30	9.00	500	20.00	0.20	4.10
28	140	165	145	84	22	58	72	40	9.00	500	19.00	0.25	6.85

Bütün ölçüler mm'dir
Kama standardı DIN 6885/1
Standart voltaj 24 V DC

All dimensions in mm
Keyway acc. to DIN 6885/1
Standard voltage 24 V DC

Tablo 4.1: Frenin Torkuna göre sıralanması.

4.2.1. Yay Kuvvetinin Hesaplanması

Fren sisteminde 16 adet yay bulunmaktadır.

Yay detayi: $\boldsymbol{L_{yay}}$ = 18,50 mm; tel çapı $\boldsymbol{d_{yay}}$= 0,95 mm; sistemdeki uzunluk $\boldsymbol{L_{yay/sistem}}$= 13,15 mm; yay katsayısı $\boldsymbol{k_{yay}}$= 17,86 N/mm.

$$F_{yay} = k_{yay} * x \tag{44}$$

$$\boldsymbol{F_{yay}} = 17{,}86 \text{ N/mm} * 5{,}35\text{mm} = 95{,}55 \text{ N}$$

Sistemde 16 yay bulunmaktadır. Dolayısıyla, 13,15 mm kadar sıkışan yayın tepki

$$16 * 95{,}55 \text{ N} = 1529 \text{ N}$$

kuvvetindeki yayı 13,00 mm'ye kadar yani 0,15 mm ötelemek için lazım olan elektromanyetik kuvvet lazım.

$$F_{em} > F_{yay} \tag{45}$$

Elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerin çalışması için yukarıdaki şart esas alınacaktır. $\boldsymbol{F_{yay}}$ yay kuvvetinin ayrıca dönme momentine de etkisi vardır.

4.2.2. Frenin Çevre Kuvveti ve Sürtünme Momenti hesabı

Düz sürtünmeli frene diskli fren yada bizim durumumuzda yay baskılı fren denilir. Disklerin arasında bulunan balatanı bir tarafını tespit flanşı sabit öbür tarafına baskı flanşı yay kuvveti ile baskı uygulamaktadır. Baskı uygulanan balata dişli bağlantı ile mile bağlıdır. Balataya uygulanan kuvvet ile sürtünme kuvvetini hesaplayarak fren momentini bulabiliriz.

İlk olarak çevre kuvvetini hesaplayalım:

$$F_{çevre} = p\mu A_{balata} \tag{46}$$

p - Özgül yüzey basıncı [N/m^2]

$$p = \frac{F_{yay}}{A_{balata}} = \frac{1529\ N}{0{,}0025} = 611600\ \frac{N}{m^2};$$

μ_{balata} – balatanın sürtünme katsayısı [0.60]

Friction Material for Industrial and Automotive Applications, Clutch Fancings, Brake Linings and Special Shapes

BERAL

Eurobremsband GmbH

Home | Products | Technical data | Development | Production

Material overview (main ones)

Material rolled	Description	Application	Oil Resistance	μ max <250°C	μ min <250°C	μ average <250°C	P [g/cm³]	u [cm³/kwh]	p [N/cm²]	t Cont[C°]	t Short[C°]	v max[m/s]
Beral 1105	flexible, without metal, -Rubber-Resin based, with fibres	Industrial brakes, Centrifugal Clutches	poor	0,43	0,41	0,42	1,71	0,08	10 - 150	250	400	20
Beral 1106	flexible, with metal fibres, -Rubber-Resin based	Industrial brakes, drum brake linings	poor	0,66	0,63	0,64	2,17	0,11	10 - 150	250	400	20
Beral 1109	flexible, with metal fibres, -Rubber-Resin based	Industrial brakes, drum brake linings, Crane Linings	poor	0,58	0,53	0,56	2,18	0,18	10 - 150	200	350	25
Beral 1117	flexible, with metal fibres, -Rubber-Resin based	Drum brake linings for Agriculture Vehicules	poor	0,48	0,42	0,45	2,20	0,16	5 - 150	280	380	25
Beral 1120	without metal, -Rubber-Resin based	Electromagnetic Brakes and Clutches - Anti Sticking	poor	0,37	0,28	0,33	2,19	0,32	10 - 150	250	350	25
Beral 1121/1119	flexible, without metal, -Rubber-Resin based	Electromagnetic Clutches and Brakes	poor	0,42	0,32	0,39	2,06	0,11	10 - 150	250	350	25
Beral 1122	flexible, without metal, -Rubber-Resin based	Electromagnetic Clutches and Brakes	very good	0,42	0,31	0,38	2,06	0,10	10 - 150	250	350	25
Beral 1126	flexible, with metal, -Rubber-Resin based, with fibres	Drum Brake Linings for Trailer and Industrial Applications	poor	0,64	0,54	0,58	2,30	0,38	10 - 150	200	350	20
Beral 1127	flexible, with metal fibres, -Rubber-Resin based	Drum Brake Linings	poor	0,45	0,41	0,43	2,10	0,36	10 - 150	250	400	30
Beral 1137	flexible, with brass fibres, -Rubber-Resin based	Drum Brake Linings	poor	0,49	0,45	0,47	2,13	0,28	10 - 150	250	450	30
Beral 1143	flexible, without metal, -Rubber-Resin based	Electromagnetic Brakes and Clutches - Elevator Applications	poor	0,53	0,47	0,50	2,18	0,10	10 - 150	250	400	30
Beral 1150	flexible, without metal, -Rubber-	Electromagnetic Brakes and Clutches (High	poor	0,66	0,49	0,60	1,76	0,07	15 - 150	250	350	30
Beral 1155	flexible, without metal, -Rubber-Resin based	Electromagnetic Brakes and Clutches - Anti Sticking	poor	0,52	0,49	0,50	2,17	0,19	15 - 150	250	300	25

Tablo 4.2: Kullanılan balata malzemesinin sürtünme katsayısı tablosu[2].

A_{balata} – sürtünecek yüzey alanı [0,0025 m^2];

[2] Frende kullanılan balata: http://www.eurobremsband.com/index.php/technical-data.html

$$F_{çevre} = 611600 \frac{N}{m^2} * 0{,}60 * \ 0{,}0025\ m^2 = 917{,}40\ N$$

Sürtünme momenti fren yapısı ile ilişkilidir. Kuvvet büyüklüğü, sürtünme yüzeyi, balata kalitesi ve malzemesi vs. $\boldsymbol{F_{çevre} = F_{sürtünme}}$.

Sürtünme Momenti:

$$M_{sürtünme} = \frac{1}{2} F_{çevre} d_{ortalama} \qquad (47)$$

$\boldsymbol{d_{ortalama}}$ – ortalama sürtünme çapı [0.055 m]

$$M_{sürtünme} = \frac{1}{2} * \ 917{,}40\ N * \ 0{,}055m = 25{,}23\ Nm$$

Yani frenin statik torku T= 25,23 Nm. Fren bu değer altında emniyettedir.

Üzerinde çalıştığımız frenin statik torkunu **Tablo.** Da gördüğümüz gibi 17 Nm olarak sunmaktadır. Balata özelliğine göre 25,23 Nm tork alınabiliyor.

Bu hesaba ilaveten akuple edilecek elektrik motor gücüne göre de static tork hesabı yapılmaktadır.

Sanayi ortamında, elektrik motor için yaklaşım yolu ile fren seçiminde motorun gücü ve en yüksek devrine göre:

$$M_{fren} = \frac{P_{motor}}{(\frac{2\pi * n_0}{60})} * k_{fren} \qquad (48)$$

M_{fren} - fren momenti [Nm]

P_{motor} – motorun nominal gücü [W]

n_0 – maksimum motor devir sayısı [d/dak]

k_{fren} – fren emniyet katsayısı [$k_{fren} \geq 2$]. Motor torkunun en az 1,5-2 katı olması lazım.

Üzerinde çalıştığımız freni akuple edeceğimiz motor gücü P_{motor}= 2.0 kW, torku T_{motor}= 7,7 Nm, devri n_0= 3000 devir/dakika, servo sürücü gerilimi U = 220 V.

Dolayısıyla, fren seçimi için yükarıdaki förmülden:

$$M_{fren} = \frac{P_{motor}}{(\frac{2\pi * n_0}{60})} * k_{fren} = \frac{2000\ W}{\frac{2\pi * 3000 d/dk}{60}} * 2 = 12{,}73\ Nm$$

Bizim frenin torku T=25,23 Nm ise, frene ihtiyac duyulan tork T= 12,73 Nm. Fren torkunun hemen hemen iki katı aşağısında kalmaktadır. İşte geliştirdiğimiz matematiksel modelleme ile standart fren seçimini bobbin gücünü, akımı düşürerek tork optimizasyonu yapılabilir.

4.2.3. Elektromanyetik Kuvvetin Hesaplanması

Çalışmamızın en önemli yeri bu elektromanyetik kuvvetin mekanik kuvvetine dönüşüp yay kuvvetini yenmesidir. Yukarıdaki bölümlerde de bahsedilen ve hep hatırlayacağımız, parçaların arasındaki hava boşluğunun mesafesidir. Bu elektromanyetik devrenin bir parçasıdır. Üzerinde çalıştığımız frenin elektromanyetik bir devrenin hava boşluğundaki manyetik alanların dağılımının mekanik davranışı, hava boşluğun büyüklüğüne ve akımın gücüne bağlıdır.

Elektromanyetik alanda oluşan mekanik kuvvetler, elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerinin ana yapısıdır.

Tezin bu kısmında, elektromanyetik alandaki mekanik kuvvetler, elektromanyetik alanın oluşturduğu kuvvet bir elektromanyetik fren sisteminde incelenecektir. Tasarımı, Şekilde gösterilen Statör ile Baskı flanşı arasında bir yay sistemi olan, sırasıyla baskı flaşı ile montaj flanşı arasında balata sıkışmaktadır. Statöre sabitlenen bobine gerilim verildiğinde, oluşan elektromanyetik kuvvete maruz kalacak baskı flanşı yay kuvvetini [F_{yay}= 1529 N] yenerek statöre ötelenip yapışacaktır. Elektromanyetik frenin bilinen elektriksel verilerine göre geliştirdiğimiz matematiksel modeleme ve yöntemler ile elektromanyetik alanın oluşturduğu mekanik kuvveti bulacağız.

Üzerinde çalıştığımız frenin bilinen bilinen elektriksel değerleri:

1. Gerilim: ***U***=24 V DC ±%10;

1. Bobin: 0,28 mm çapında bakır tel. ***N***=1080 spir sarım.

2. Güc Tüketimi (20 C° de): $\boldsymbol{P_{fren}}$=10,15 Watt ±%7;

3. Bobin Direnci (20 C° de): $\boldsymbol{R_{bobin}}$=52,10-57,60**Ω**.

4. İstenilen çalışma gerilimi: $\boldsymbol{U_{18}}$ =18 V DC;

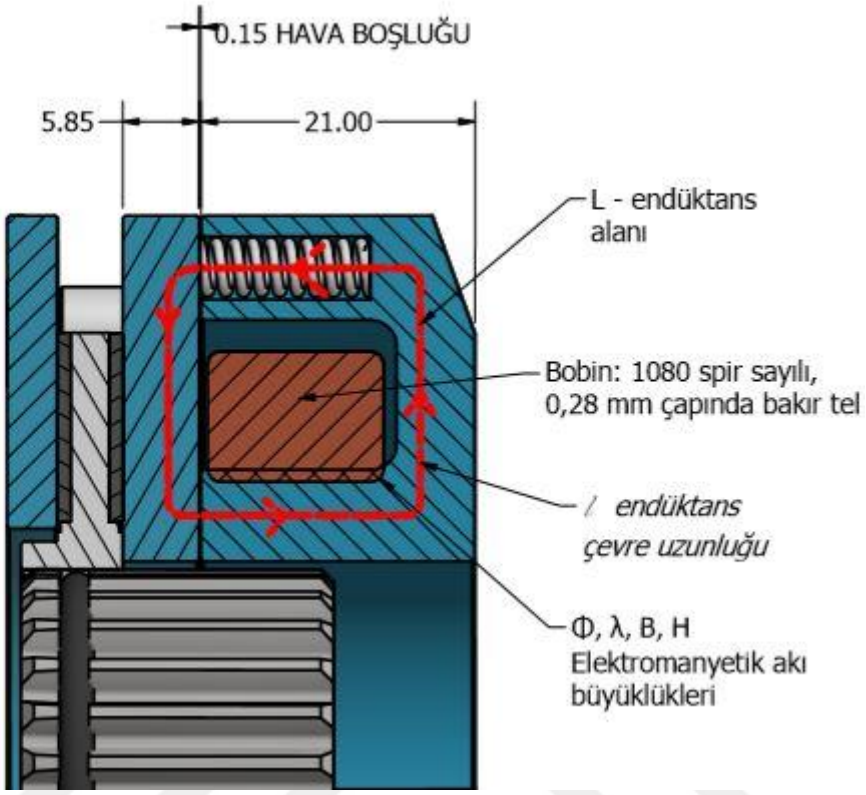
5. Yeniden bağlanma direnci: $\boldsymbol{U_5}$ =5 V DC;

6. Elektriksel Yalıtım: H kalite izolasyon (185 C°).

18 V ve ***24 V*** için akımı hesapladığımızda:

$$I = \frac{U}{R} \qquad (49)$$

$$I_{18\,V} = \frac{18}{52{,}10} = 0{,}34\ A; \qquad I_{24\,V} = \frac{24}{57{,}60} = 0{,}42\ A$$

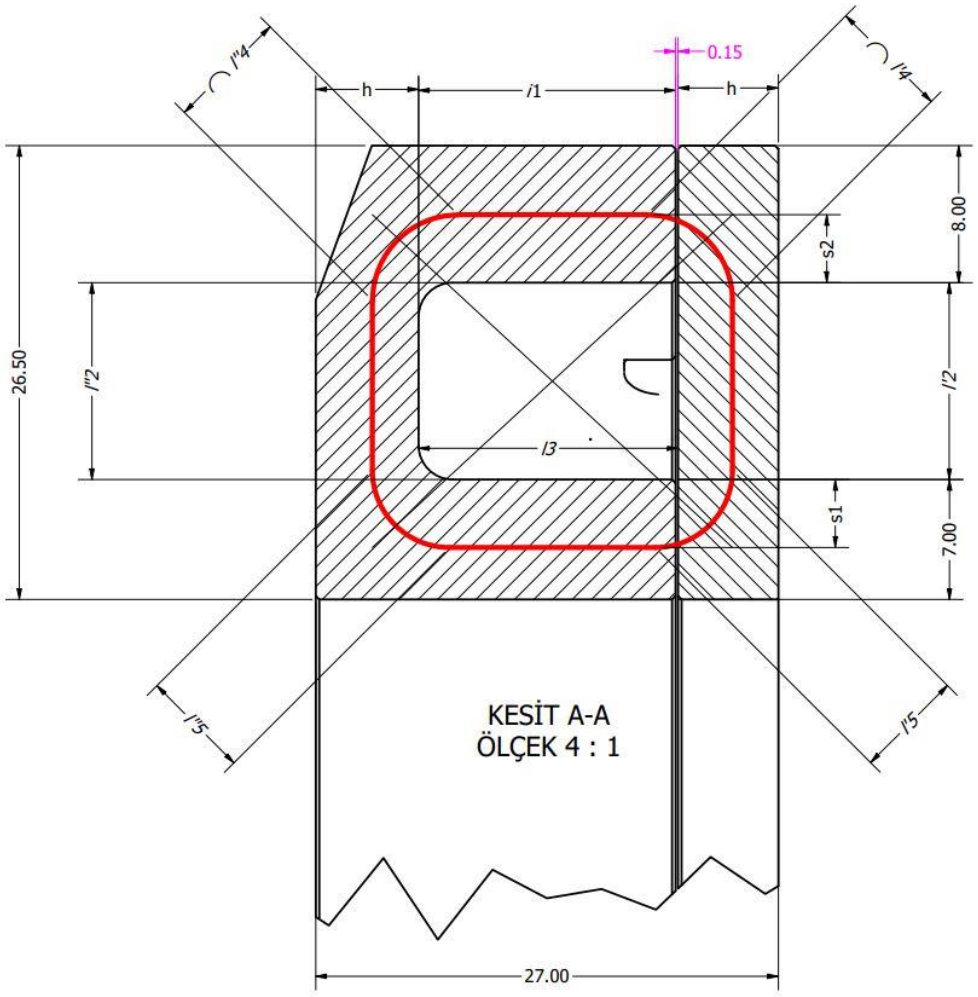


Şekil 4.3: Elektromanyetik büyüklükler.

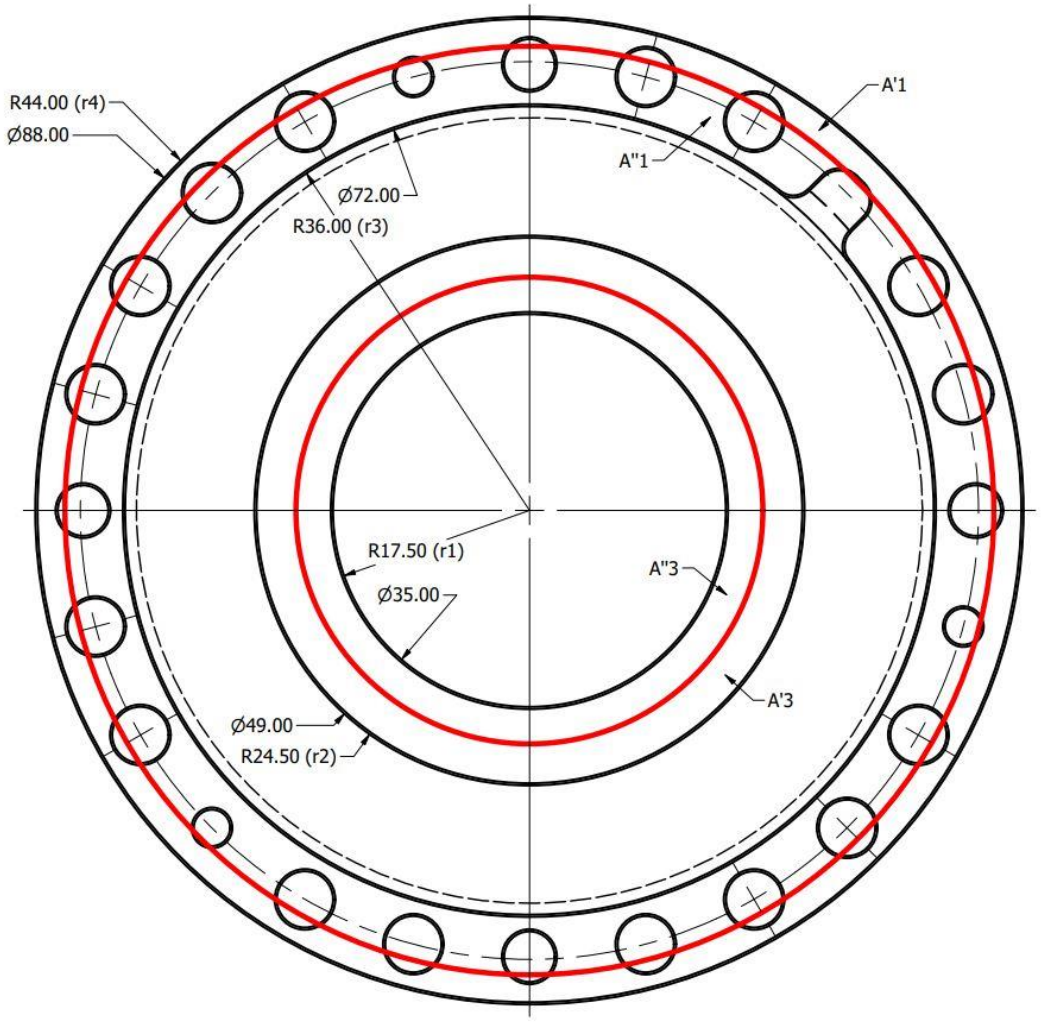
4.2.3.1. Endüktans Çevre Uzunluğunun Hesaplanması

Manyetik devre parçalarının (statör, flanş ve hava boşluğu) etkili parametrelerini hesaplayalım. Bizim manyetik devre yapı özelliğine göre zırhlı çekirdek sınıfına girmektedir. Dolayısıyla, zırhlı çekirdek için parametre hesap yöntemini kullanacağız.[3] Yanı sıra sanayi ortamındaki basit hesapların değerleri ile karşılaştırarak ilerleyeceğiz.

[3] https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4294825/4294825823.pdf (MEK 205-66) GOST28899-91/ . Devletlerarası Stardart'ının direktifine göre bobin için zırhlı çekirdekteki manyetik detayın efektif parametrelerinin hesabı. Örnek 3.6.



Şekil 4.4: Manyetik devredeki manyetik akı akış şeması. Yandan görünüş.



Şekil 4.5: Manyetik devredeki manyetik akı akış şeması. Üstten görünüş.

Manyetik devrenin kesit alanı.

$$A_1 = A_1' + A_1''$$

Eşitlik şartı

$$A_1' = A_1''$$

Ferromanyetik çekirdek (statör) üzerinden geçen, manyetik akının çevre uzunluğu çizgisinin bobinden ne kadar uzak mesafede (s_1, s_2) olduğunu hesaplayalım.

$$s_1 = r_2 - \sqrt{\frac{r_1^2+r_2^2}{2}} = 24{,}5-\sqrt{\frac{17{,}5^2+24{,}5^2}{2}} = 3{,}21 \text{ mm.}$$

$$s_2 = -r_3 - \sqrt{\frac{r_3^2+r_4^2}{2}} = -36 + \sqrt{\frac{36^2+44^2}{2}} = 4{,}2 \text{ mm.}$$

$$A_1 = \pi(r_4 - r_3)(r_4 + r_3) = \pi(44-36)(44+36) = 2010{,}62mm^2 = 0{,}002m^2$$

$$A_3 = \pi(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = \pi(24{,}5-17{,}5)(24{,}5+17{,}5) = 923{,}63mm^2 = 0{,}0009m^2$$

$$l_4 = l_4' + l_4'' = \frac{\pi}{4}(2s_2 + h) = \frac{\pi}{4}(2 * 4{,}2 + 6) = 11{,}31mm = 0{,}011m$$

$$l_5 = l_5' + l_5'' = \frac{\pi}{4}(2s_1 + h) = \frac{\pi}{4}(2 * 3{,}21 + 6) = 9{,}75mm \cong 0{,}01m$$

$$A_4 = \frac{\pi}{2}(r_4^2 - r_3^2 + 2r_3h) = \frac{\pi}{2}(44^2 - 36^2) + 2 * 36 * 6 = 1683{,}89mm^2 = 0{,}0017m^2$$

$$A_5 = \frac{\pi}{2}(r_2^2 - r_1^2 + 2r_2h) = \frac{\pi}{2}(24{,}5^2 - 17{,}5^2) + 2 * 24{,}5 * 6 = 923{,}63mm^2 = 0{,}00092m^2$$

Ferromanyetik çekirdek katsayısı C_1 için:

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{1}{\pi h}\log_e\frac{r_3}{r_2} = \frac{0{,}733}{6}\log_{10}\frac{36}{24{,}5} = 0{,}02mm^2 = 2 * 10^{-8}m^2$$

Ferromanyetik çekirdek katsayısı C_2 için:

$$\frac{l_2}{A_2^2} = \frac{1}{2\pi^2 h^2}\,\frac{r_3 - r_2}{r_3 r_2} = \frac{1}{2\pi^2 6^2}\,\frac{36 - 24{,}5}{36 * 24{,}5} = 0{,}000018mm^2 = 1{,}8 * 10^{-12}m^2$$

$$C_1 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i} = \frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} + \frac{l_4}{A_4} + \frac{l_5}{A_5} =$$

$$= \frac{15}{2010{,}62} + 0{,}02 + \frac{15}{923{,}63} + \frac{11{,}31}{1683{,}89} + \frac{9{,}75}{923{,}63} = \ 0{,}06mm^{-1}$$

$$C_2 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i^2} = \frac{l_1}{A_1^2} + \frac{l_2}{A_2^2} + \frac{l_3}{A_3^2} + \frac{l_4}{A_4^2} + \frac{l_5}{A_5^2} =$$

$$= \frac{15}{2010{,}62^2} + 0{,}000018 + \frac{15}{923{,}63^2} + \frac{11{,}31}{1683{,}89^2} + \frac{9{,}75}{923{,}63^2} = \ 0{,}000055mm^{-1}$$

Bu elde ettiğimiz değerler ile manyetik devrenin hesabının temelini oluşturan büyüklükleri bulacağız. Literatürde gördüğümüz teorik veya analitik olarak efektif değerleri sırası ile bulabiliriz:

Endüktans çevre uzunluğun efektif $\boldsymbol{l_e}$ değeri:

$$l_e = \frac{C_1^2}{C_2} = 65{,}45mm = 0{,}065m$$

Hesaplara göre:

$$l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 15 + 11{,}5 + 15 + 11{,}31 + 9{,}75 = 62{,}56\,mm = 0{,}63m$$

Sanayi ortamında pratik hesap parçanın yandan kesidinin dış ve iç kenarlarının çevre uzunluğunun ortalaması kabul edip hesaplarında kullanmaktadırlar:

$$l_{pratik} = \frac{l_{dış} + l_{nüve}}{2} = \ \frac{104{,}1 + 51}{2} = 77{,}5mm = 0{,}077m$$

Bu hesaplara baktığımızda değerler hemen hemen bir birlerine yakındırlar.

Endüktans çevre uzunluğu	l_e	l	l_{pt}
m	0,065	0,063	0,077

Tablo 4.3: Endüktans çevre uzunluğunun alternatif değerleri.

Efektif değerlerin kullanılması, eğer tasarım açısından bir engeli yok ise tercih edilir. Bu nedenle, tez çalışması süresince $\boldsymbol{l_e}$ değerini kullanabiliriz.

Aynı şekilde $\boldsymbol{A_{kesit}}$ hesabı içinde $\boldsymbol{A_e}$ olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$A_e = \frac{C_1}{C_2} = 1091mm^2 =$$

Hesaba göre:

$$A_{kesit} = A_1 + A_3 = 2010{,}62 + 923{,}63 = 2934{,}25mm^2 = 0{,}00293m^2$$

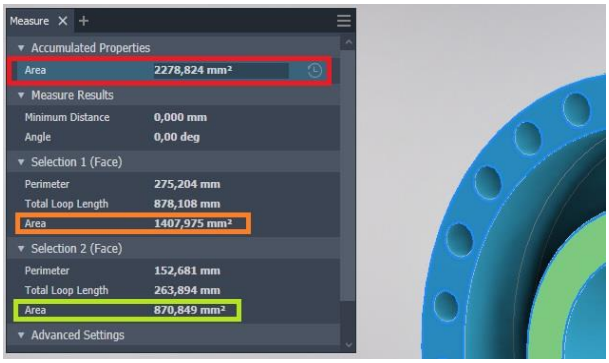
Sanayi pratiğinde, $A = \pi r^2$ kullanarak iç ve dış çemberden farkını çıkararak hesaplamaktadır.

$A_{pr} = 2940mm^2 = 0{,}00294m^2$ gibi karşımıza çıkmaktadır.

Alan kesit	A_e	A_{kesit}	A_{pr}
mm^2	1091	2934,25	2940

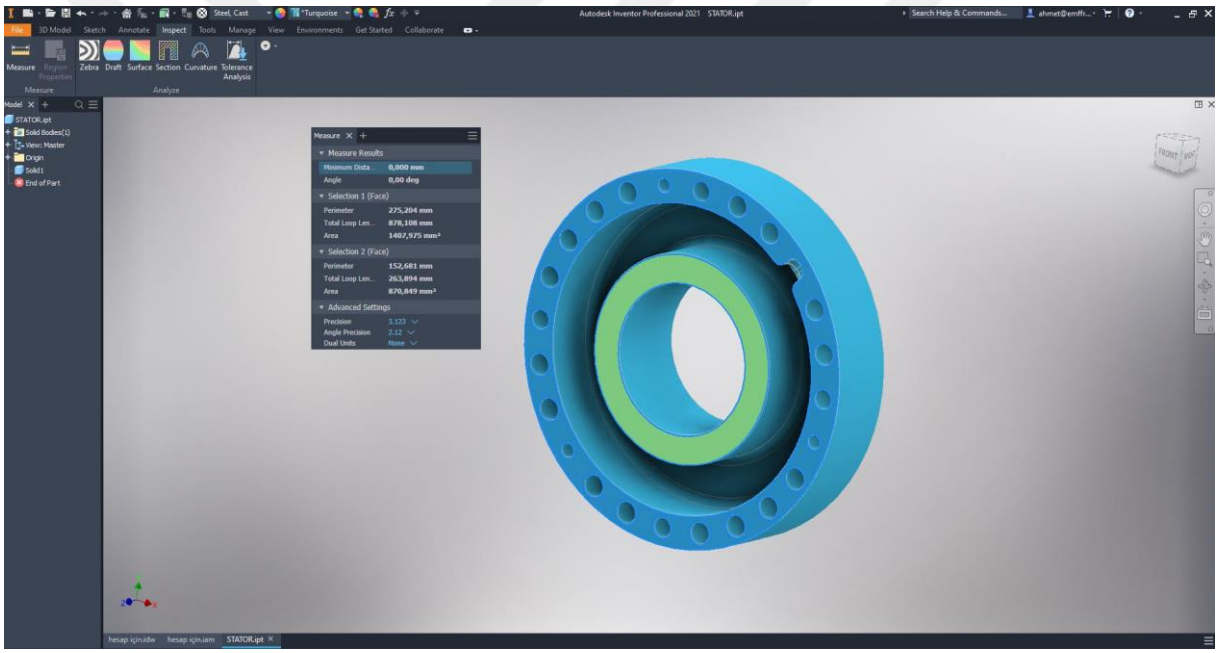
Tablo 4.4: Alan değerlerinin karşılaştırılması.

Evet baktığımızda, efektif alanın daha küçük kaldığını görmekteyiz. Tabi ki, efektif değer önemlidir. Sanayi pratiği ile parçanın ölçülerine göre hesap ta aynı şekilde neredeyse eşit değerdedir. Bizim statörde teorik ve pratik hesapta göz ardı edilen 16 adet yayın, bağlantı deliklerinin ve kablo çıkış yerinin oluşturduğu alan farkı çıkarılmamıştır. O yüzden paket programdan 3 boyut katı çiziminden gerekli kesit alanlarını seçerek değerlere bakabiliriz.



Gerekli iki alanı (yeşil ve turuncu) seçip toplamını (kırmızı) $\boldsymbol{A_{kesit}}$ = 2278,8 mm^2 = =0,0023m^2 olarak kabul etmemiz, bundan sonraki hesaplarda kesit alanı değeri olarak kullanmamız daha doğru sonuca ulaştırır.

Şekil 4.6: Alan kesitinin değeri.



Şekil 4.7: Statörün üç boyuttaki katı resminde kesit alan değerleri.

Aynı şekilde manyetik devre parçalarının efektif hacmini de hesaplayabiliriz. Fakat tez konu dışına çıkmamak amacı ile şimdilik kullanmayacağımız değerleri bırakıyoruz. Sadece $\boldsymbol{H_e}$ manyetik akı yoğunluğun efektif değerlenine bakılıp karşılaştırlabiliriz.

$$H_e = \frac{Ni}{l_e}10^3 = \frac{1080 * 0{,}42\ A}{65{,}45mm}10^3 = 6930{,}5\ [A/m]$$

$$H_{frm} = \frac{Ni}{l_{frm}}10^3 = \frac{1080 * 0{,}42\ A}{65{,}15mm}10^3 = 6962{,}3\ [A/m]$$

$$H_g = \frac{Ni}{2l_g} 10^3 = \frac{1080 * 0{,}42\ A}{2 * 0{,}15mm} 10^3 = 1512000\ [A/m]$$

(8 b) förmülünü getirip

$$\oint_1 H * dl = I + \frac{d}{dt} \int_s D * ds$$

$$\oint_1 H * dl = Ni = H_e l_e = H_{frm} l_{frm} + H_g l_g = Ni$$

Eşitliği sağlayabilir miyiz, bakalım.

6930,5*0,065 =1080*0,42

450,5 ≈ 453,6 [A/m]

Yani küsüratları tam kullandığımızda tam çıkmaktadır

453,59 = 453,6 [A/m]

B manyetik indüksiyon ile H manyetik alan şiddeti vektörleri elektrik akımdaki gibi μ geçirgenlik katsayısı tensörü ile bağlıdır. (11) förmülüne göre;

$$B_{frm} = \mu_a H = \mu_0 \mu H = 4\pi * 10^{-7} * 100 * 6930{,}5 = 0{,}86\ T$$

Sanayide, pratikte kullanılan yöntem ile ferromanyetik statördeki indüksiyon:

$$B_{frm} = \frac{U * 10^6}{4 f A_{kesit} N} = \frac{24 * 10^6}{4 * 3 * 2278 * 1080} = 0{,}81\ T$$

Baktığımız gibi, analitik çözümden pek farkı yoktur.

Aynı şekilde de, prat

$$B_g = \mu_0 H_g = 4\pi * 10^{-7} * 1512000 = 1{,}89\, T$$

Sanayide ise hava boşluğundaki endüksiyon:

$$B_g = \mu_0 \frac{Ni}{2l_g} = 4\pi * 10^{-7} \frac{1080 * 0{,}42}{0{,}0003} = 1{,}9\, T$$

O zaman toplam manyetik devrenin endüksiyonu B= 1,98 T olup böyle bir yapıya uygun olduğunu literatür ve pratikte görmekteyiz. Endüksiyon her zaman, B<2 şartını tutmalıdır. Aksi hali kabul edilemez. Ayrıca paket programlardan daha net rakamlara ulaşabiliriz. İmkan nispetince denemeye çalışacağız. Mümkünse değerleri de karşılaştırıp yorumlayacağız.

Manyetik akı (15) göre;

$$\Phi = \int_s d\Phi = B*A = B_{ort}\, A_{kesit} = \mu_a\, H_{ort}\, A_{kesit}$$

$$\Phi = 1{,}98 * 0{,}0023 = 0{,}0045\, Wb$$

Manyetik akının sapması olmadığından, akının küzey (statörden) kutuptan ayırıldığını ve hava boşluğunu geçerek güney (flanşa) kutuba giren akı eşleşmelidir.

Toplam akı yoğunluğu.

$$\Phi = \mu_0 A_{kesit} \frac{Ni}{2g} = 4\pi * 10^{-7} * 0{,}0023 * \frac{1080 * 0{,}42}{2 * 0{,}00015} = 0{,}00437\, Wb$$

Manyetik akının da aynı şekilde hemen hemen pratik hesap ile analitik hesabın değerlerinin eşleştiğini görmekteyiz.

Akı bağlantısı, (The Flux Linkage) bobin ile ilişkili şekilde NΦ eşit olduğundan (36) göre

$$\lambda = N\Phi = 1080 * 0{,}0045 = 4{,}86$$

Sırası ile, endüktans,

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{4{,}86}{0{,}42} = 11{,}6\, H$$

Diğer bir förmülisayon ile

$$L_g(0{,}0015) = \mu_0 \frac{N^2 * A_{kesit}}{2g} = 4\pi * 10^{-7} * \frac{1080^2 * 0{,}0023}{2 * 0{,}0015} = 11{,}23\ H$$

Buradaki g formüllerdeki x'tir.

Tabi, küsuratları yuvarladığımız için ufak bir küsurat farkı var. Fakat endüktans iyidir.

Enerji yöntemine göre elektrik enerjisinden elektromekanik dönüşüm sürecinde manyetik depolanan enerji (32) göre;

$$F_{em} = \frac{\partial W_{ema}(\lambda, x)}{\partial x} \mid_{\lambda}$$

Şekiller 3.11, 3.12, ve 3.13 gösterdiği gibi lineer sistemlerin analizinde enerji veya koenerjiye bakılmaksızın kuvvet için aynı ifadelerin elde edildiği gösterir:

$$W_{ema} = W'_{ema} = \int_0^{\lambda} \frac{\lambda}{L_g(g)} d\lambda = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0^2}{L_g(g)}$$

O zaman, sistem için ferromanyetik malzemenin içindeki akı ihmal edilir ve statör ile flanş arasındaki F_{yay}=1529 N tepki kuvvetini yenerek flanşı statör tarafına hareket ettiren elektromanyetik kuvvet şu şekilde olacaktır:

$$F_{em} = -\frac{\lambda_0^2}{2} * \frac{\partial}{\partial g} * \frac{1}{L_g(g)} = \frac{\mu_0 i^2 N^2 A_{kesit}}{2g^2}$$

$$F_{em} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A_{kesit}} = \frac{0{,}0045^2}{2 * 4\pi * 10^{-7} * 0{,}0023} = 3509, N = 3{,}5\ kN$$

$$F_{em} = A_{kesit} \frac{B_g^2}{2\mu_0} = 0{,}0023 * \frac{1{,}9^2}{2 * 4\pi * 10^{-7}} = 3305{,}3\ N = 3{,}3\ kN$$

Kuvvet (-) işareti ile olacaktır. Çünkü hava boşluğu mesafesi g → 0.

Literatürde analitik çözümü açıklarken, hava boşluğu yeterince küçük kalacaktır. Dolayısıyla, elektrik akım kesintisiz ise ferromanyetik malzemede doygunluk hale ulaşıp akı yoğunluğu sabit değere yaklaşacaktır. Bunun endüksiyonu ise 1,8 T. (bizim hesapta 1,98 T, yani teorideki değere yakınız.)

Bu kuvvetten fazla kuvvet yapamaz çünkü parçalar yapışıktır. Fakat bizim yay tepkisini tutabilmesi için yeterlidir.

Tez çalışmamızda planladığımız elektromanyetik kuvvetin manuel hesaplama yöntemini gözden geçirdik.

4.2.4. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz

Sonlu elemanlar analizi, analiz etmek için geliştirilmiş sayısal bir modelleme tekniğidir. Karmaşık geometrilerle doğrusal olmayan malzeme özelliklerine sahip mühendislik problemleri ayrıştırarak çalışır. İki yada üç boyutlu çok sayıda küçük elemanlara ayırılan yapı ile pratik uygulamalarda sayısal olarak tahmin edilebilir ve çözülebilir.

Geliştirilen model geometrisi, meşleme (mesh) ile ayrıştırılır, yani çok sayıda nokta adı verilen düğümler, hacimlerin veya yüzeylerin içinde oluşturulur. Modellenen nesneyi oluşturan her düğümlere (node) malzemenin fonksyonu olarak bir dizi özellikler tayin edilir. Sınır koşulları ise, modellenen nesnenin çevre şartlarını tanımlamak ve simetri ve periyodikliğine göre problemin boyutunu azaltmak için kullanılır. Fiziksel denklemler, her düğümdeki (node) ‘potansiyel fonksiyonu’ en aza indirgeyerek çözülür. Çözüm ise, her bir elemanın içindeki düğümlerin (node) çözümlerinin birleşimi ile elde edilir.

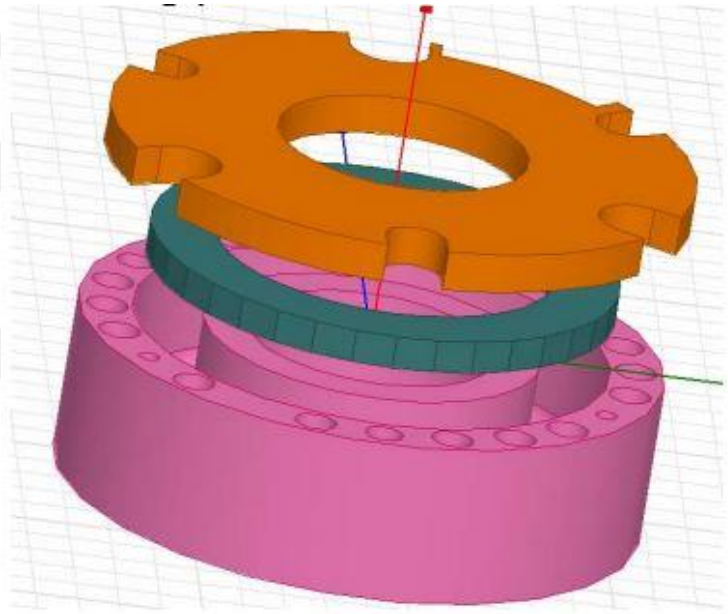
Elektromanyetik frenin analizine sonlu elemanlar yöntemlerin uygulanması için birkaç seçenek içerir:

- İki boyutlu ve üç boyutlu analiz arasında seçim yapma;
- Analiz yöntemleri arasında seçim yapma;
- Sınır koşullarını, periyodiklik ve simetrileri belirleme;

- Malzemenin yakınsama düzeyine karar verilmesi.

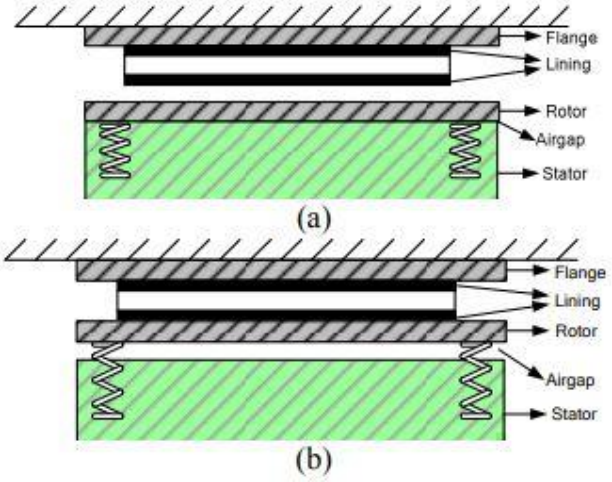
Elektromanyetik frenin analizini imkanımız nispetince faydalanabilmemiz adına, sonlu elemanlar analizi süresini kısaltmak için sadece statör, bobin ve baskı flanşı dikkate alınır çünkü diğer parçalar elektromanyetik davranış üzerinde önemli etkiye sahip değildir.

Sonlu elemanlar analizi paket programlarından Ansoft-Maxwell 3D programı ile gerçekleştirilir. Sonlu elemanlar analizi Şekil 4-8 de gösterilmektedir.



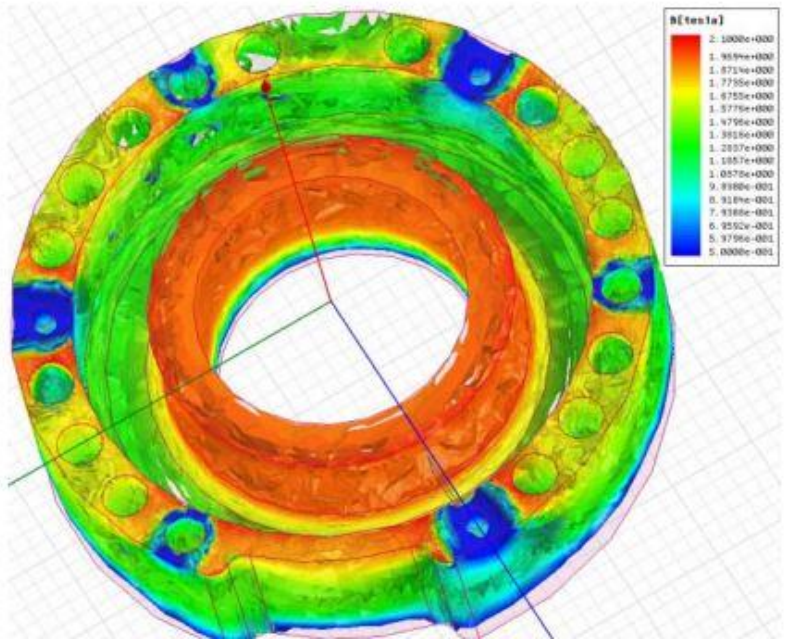
Şekil 4.8: Paket programında analiz.

Maksimum ve minimum hava boşluğu pozisyonları Şekil 4-9 dan bakabiliriz.

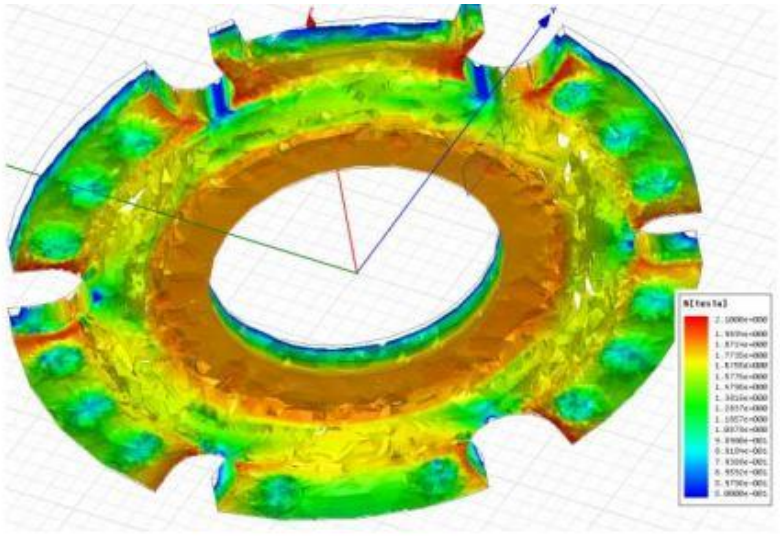


Şekil 4.9: Baskı flanşın yer değiştirme pozisyonları: (a) elektromanyetik etkisinden statöre yapışık hali; (b) yayın etkisinden balatayı sıktığı hali.

Manyetik doygunluk koşulu bobin gücü ile hava boşluğunun çok kısa olduğunu hesaba katmalıdır. Şekil 4-10 ile 4-11 de statör ile fbaskı flanşındaki manyetik alanın dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.10: Statördeki manyetik alan dağılımı.



Şekil 4.11: Baskı flanşındaki manyetik alan dağılımı.

Özellikle hem statörün, hem baskı flanşın iç kısmındaki manyetik alanın indüksyonu 2 Tesla civarındadır. Bu değer de sanayi ortamındaki kullanılan ferromanyetik malzeme için iyi değerdir. Daha yüksek değer tavsiye edilmez. Bizim manuel hesabımızda bulunan değer 1,98 T. Analiz sonucuna göre elektromanyetik fren sistemlerinde, manyetik alan indüksiyonu **B＜2 T** koşulu değerinde tasarlanması gerekir.

4.2.5. Deney

Üzerinde çalıştığımız freni tez çalışmamız için değerleri gözden geçirelim.

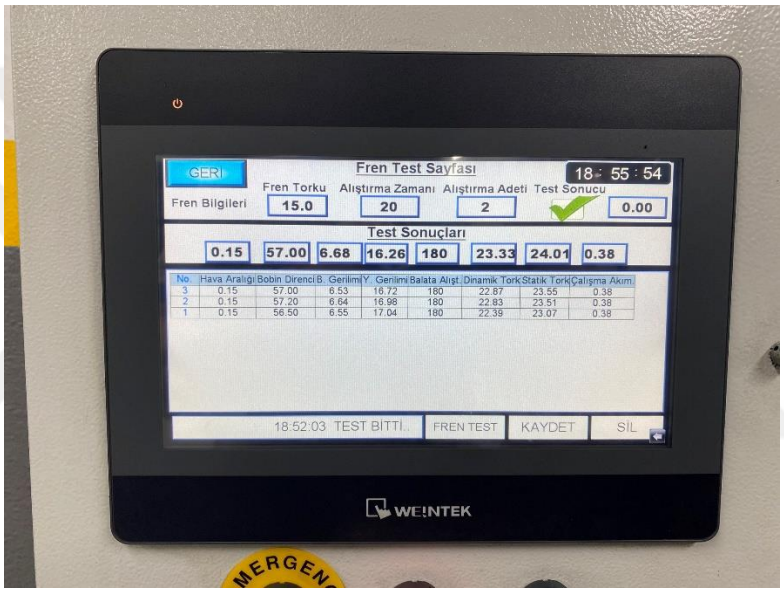


Şekil 4.12: Montaj sıralaması.

İçine bobinin epoxy ile sabitlenmiş statöre yayları yerleştirdik. Sonra baskı flanşını yayların üzerine koyduk. Bağlantı vidasını geçtiği deliklere hava boşluğunun ayarı için ayar borusu

olarak adlandırılıan parçayı yerine koyduk. Baskı flanşın üzerine balatayı koyduktan sonra tespit veya montaj flanşı olarak adlandırılan parçayı yerleştirdik. Vidaları sıkarken hava boşluğun eşit bir şekilde bırakılması için çakı ile ayarına dikkat ettik. Montajı tamamladıktan sonra elektrik değerleri test edildi. Fren sistemi çalışır vaziyetteydi.

Statik hem dinamik tork kontrolü aşağıda Şekil 4-13 ile Şekil 4-14 te gördüğümüz gibi, sanayi ortamında imkan nispetince test ettik.



Şekil 4.13: Elektrik ve tork değerleri.



Şekil 4.14: Torklu anahtar ile statik torku testi.

Bu değerlere baktığımızda yukarıdaki modellememizdeki değerlere pek yakındır. Sanayi ortamında elektromanyetik fren imalatındaki pratik hesabından fazla farkı olmadığını düşünüyoruz.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. DURUM DEĞERLENDİRME

Çalışmamızın giriş kısmında alan sektörüne genel bilgi vererek tez amacını ve kapsayacağı konuları geniş bir şekilde ifade etmeye çalıştık. Elektromanyetik frenin diğer fren sistemlerinden farkına açıklama yaptık. Çünkü fren denilince klasik fren sistemi göz önüne gelmektedir.

Ayrıca, elektromanyetik fren veya fren sistemi olarak hem literatür taraması hem de diğer araştırmaları yaparken Girdap akımlı fren (Eddy Current Brake) ile farkını ayırmak ta çalışmanın önemli bir parçası olduğunu beyan etmek isterim. Çünkü elektromanyetik fren sistemnleri ile girdap akımlı fren arasındaki fiziksel büyüklüklerin davranışları ve değerleri veya sabit katsayılar arasında ciddi bir farklar vardır. Aynı şekilde indüsiyon yasaları nedeniyle, manyetik alan değiştiğinde iletkenlerin içerisinde oluşan çembersel elektriksel akım söz konusudur. Bizim elektromanyetik fren sistemlerin incelendiği alanda girdap akımları Enerji korunumuna göre, yani sistemdeki enerji dengesinde bir kayıp enerji olarak ifade edilmektedir.

Çalışmamızın genel kısmında, sanayi ortamında sürekli kullanılan ve tercih edilen elektromanyetik fren ve kavrama sistemlerine açıklama yaparak kullanım alanlarını ve özelliklerini ifade ettik. Detaylı açıklama vermemizin nedeni, frenin esas görevi ve kullanım şekli ticari amaçlar hariç, bilgi nerdeyse yok halinde olan ortamda bilgi sağlamaktı. Yükarıdaki belirttiğim gibi girdap akımlı fren ile farkına aydınlık getirmek için elektromanyetik fren sistemlerin tüm parçalarının da geometrik yapısını tanıtmak çalışmamızın bir görevi olduğunu düşündük.

Uzun süren bir araştırma ve literatür taramasından sonra malzeme ve yöntem kısmında detaylandırdığımız gibi, açık kaynaklardan, referanslı ve önerilen kitapları kullanarak matematiksel yapı oluşturmaya başladık. Bu bölümü oldukça, benzer teorik ve analitik örneklerde kullanılan fiziksel formülleri sıralayıp bir model geliştirmeye çalıştık. Karşılaşılan problemleri hem burada bildireceğimiz gibi, hem de sonuç kısmında kararlaştıracağımız gibi aşağıdakiler ifade edebiliriz:

- Öncellikle, elimize alıp çalışmasını devam eden elektromanyetik fren sistemlerine tam özel olarak geliştirilen veya örnek çalışmanın bulunulmaması;
- Ferromanyetik malzemelerin net bir şekilde ifade edilen (tablo gibi) özelliklerine göre elektromanyetik alanın malzemedeki davranışlarının etaylarının olmaması;
- Elektromanyetik alan konusunda çalışırken, elektrik bilgisi yetersizliği duyuldu;
- Maxwell denklemini incelerken, elektromanyetik hesaplamada tam sonuca ulaşmak için tensör hesabı gerektirdiği durumla karşılaştık.

Bu durumda, literatür açıklamalarına istinaden bazı değerlerin pek etkliyecek rakamlar olmadığından göz ardı ettik. Veya örnek çalışmalardaki gibi yaklaşık değerler alındı.

Matematiksel model geliştirilirken, elektromanyetik fren parçalarının malzeme özelliklerindeki elektromanyetik alanın etkisi veya davranışından kaynaklana elektromanyetik kuvveti hesaplamada üç farklı yol olduğunu öğrendik.

Bunlar:

- Lorentz kuvvet yasası;
- Enerji yöntemi;
- Fotonik kuvvet.

Dolayısıyla, enerji yöntemi ile matematiksel modelleme geliştirmeye çalışıldı. Çünkü diğer yöntemler için daha profesyonel veya bir ekip çalışması gibi birkaç kişi ile desteklenmesi kanaatindeyiz.

Daha sonra bulgular kısmında, sanayi ortamında kullanılar elektromanyetik fren sistemlerinden bir tanesini ele alıp, tüm parçalarının Autodesk INVENTOR paket programıyla katı çizimlerini oluşturduk. Çizilen katı çizimlerinden teknik resimlerini hazırlayıp tüm kullanılan parçaları inceledik. Sonra, sabit elektrik değerleri aldıktan sonra förmüller ile akım, direnci bulduk.

Açık literatür kaynaklarından aldığımız förmüller ile tüm gerekli büyüklükleri/değerleri hesaplamaya çalıştık. Hesaplanan değerleri bir taraftan sanayi ortamında pratiğinde bulunan değerler ile karşılaştırarak devam ettik. Hesabın sonucu fren sistemindeki elektromanyetik kuvvetin yay kuvvetini yenecek kadar kuvvet oluşturabilmesi.

Bu çalışma, sanayi ortamındaki elektromanyetik fren imalatı için bulunulmaz bir fayda kazandırdığını imalattaki kişilerden defalarca duyduk.

Elektromanyetik fren sistemlerinin matematiksel modelin geliştirilmesi:

- Fren tasarımında statör ve flanş gibi etkileyecek parçaların parametrelerini eskisi gibi numuneye göre değil, net bir matematiksel modelin hesaplama yöntemine göre tasarlanmasına;
- Talep edilen fren torkuna göre bobin gücünün değeri ölçülü halde tasarlanmasına;
- Net bir hesabın getirdiği malzeme tasarrufunda maaliyetin azalmasına;
- Savunma sanayi gibi hassas ürün talep edenlere tüm parametrelerin tam ölçülendirilmesine;

önemli bir şekilde avantajlar sağlar.

Elektromanyetik fren sistemlerinin otomasyon ve robot yapısının bir parçası olarak stratejik ürünler içerisine dahil olmaktadır. O yüzden, 'Yerli Üretim' ve millileştirme hedefinde, bizim çalıştığımız konu ve benzeri çalışmaların önemli röl oynadığını bilmekteyiz. Zaten tez çalışmamıza başlarken esas gayemiz, sanayi ortamına, mühendislere, akademisyenlere ufak ta olsa katkı sağlamaktı.

Tabi, tezimizi başlarken hedeflendiğimiz hedeflerin biri, tüm elektromanyetik frenlerin hesabını yapmaktı. Ve çeşitli tablolar üreterek optimizasyon sağlamaktı. Sonlu elemanlar Yöntemi, MATLAB üzerinde simülasyon yapmak gibi hedeflerimize teknik desteğin eksikliğinden, günümüz şartlarında, zaman kısıtlaması gibi maddi unsurlardan dolayı gerçekleştiremedik.

Bu çalışmanın devamını doktora seviyesinde, profesyonel ekip (elektrik mühendisi, fizikçi gibi uzmanların bulunduğu ortamda) ile tüm detaylar incelenerek araştırılabilir.

Kullandığımız parçalar, yaptığımız deneyler, oluşturduğumuz katı boyutlu çizimler ile teknik resimler Uluslararası Standartlara ve Türk Standartlarına uygun şekilde yürütüldü.

5.2. SONUÇ

Tez çalışmamızda, kullanılan malzeme ve yöntemler, geliştirilen matematiksel modelleme ve bulgular detaylı incelenip, çeşitli elektromanyetik fren sistemlerinin değerlerini hesaplayarak modelin uygunluğu kontrol edilmesi gerekir. Paket programlarındaki sonuçları analitik çözümün sonuçları ile detaylı karşılaştırıp yorumlanması lazım.

Ayrıca, elektromanyetik kuvveti Lorentz kuvvet yasasına göre hesaplanan değeri Enerji yöntemi ile alınan değer arasındaki fark karşılaştırılıp bakılmalı.

Enerji yöntemindeki Akı bağlantısı (The Flux linkage) değeri hakkında araştırma yapılması gibi enerji ve Koenerji (Conergy) alanında tüm incelikler öğrenilmesini görmekteyiz.

Bu çalışmada DC akımı üzerinde çalışan fren sistemini inceledik, AC akımlı fren için benzer bir çalışma yapılmasını öngörmekteyiz.

Bir sonraki çalışmalarda enerji dengesindeki gördüğümüz enerji kayıbından olan ısıyı dahil etmeliyiz. Çünkü belirli ortamlarda ısı limiti elektromanyetik sistemde etkisini göstermektedir.

Emniyet faktörü taşıdığı için elektromanyetik fren sistemlerinin optimizasyonu her zaman ön planda olması gerektiğini düşünmekteyiz. Tabii ki de diğer fren modellerinin de değerlerine bakılmalı. Birçok denemeden sonra modelin optimizasyonu yapılır.

KAYNAKLAR

Abbott, J., Ergeneman, O., Kummer, M., Hirt, A., & Nelson, B. (2007). Modeling Magnetic Torque and Force for Controlled Manipulation of Soft -Magnetic Bodies. *IEEE Transaction on Robotics*.

Becker, R. (1964). *Electromagnetic Fields and Interactions.* Dover Publications INc.

Chua, L. (1971). Memristor - The Missing Circuit Element. *IEEE Transaction Circuit Theory / vol. CT 18 NO 5*, 507-50198.

Griffiths, D. J. (2008). Introductıon to Electrodynamics. 352: Benjamin Cummings Inc.

Ivanov, I., Solovyev, G., & Frolov V. Ya. (2012). *Electrotechnic (Elektrtekhnika i osnova Elektroniki.* Tolyatti: Povoljski University .

Li, L., Yang, G.-L., & Li, Z.-X. (2019). Magneto-Thermal coupling analysis of the permanent magnet eddy current brake under intensive impact load. *VibroEngineering Procedia*.

Sen, P. (2012). Eletromechanical Energy Conversion. *Principles of Electric machines and Power Electronics* (s. 93). içinde Ontario: Wilay.

Sen, P. (2012). *Principles of Electric Machines and Power Electronics.* Ontarıo: Wıley.

Staelin, David H, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Istitute of Technology . (2011). *Electromagnetics and Applications.* Cambridge: Copyright.

Temiz, Vedat; İTÜ Makine Fakültesi. (2018). Frenler. *Makina Elemanları.* içinde İstanbul.

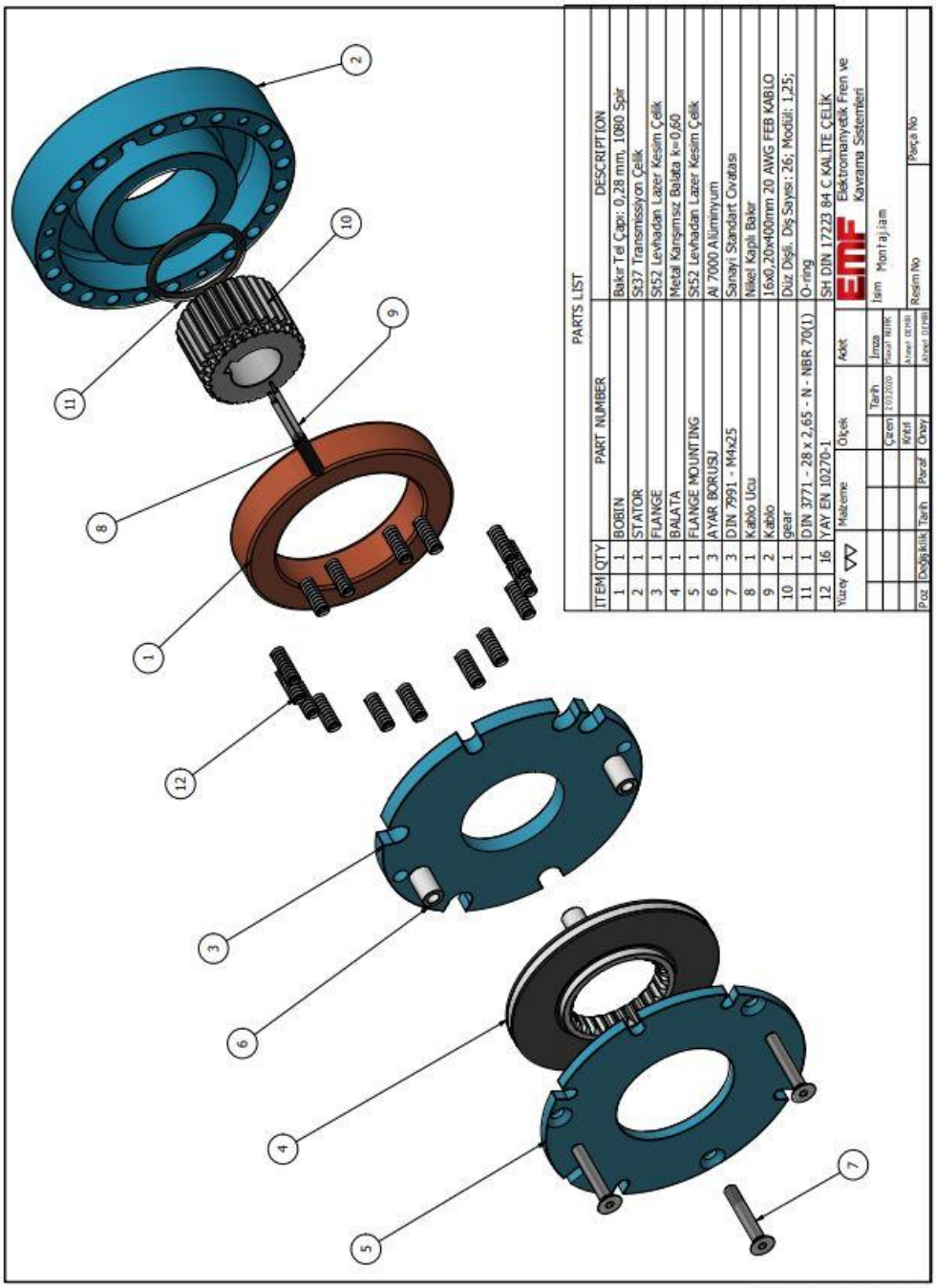
Tutak, T., & Güder, Y. (2014). Matematiksel Modellemenin Tanımı, Kapsamı ve Önemi. *Turkish Journal of Educational Studies,*.

Vanderline, J. (2005). *Classical Electromagnetic theory / Introduction to the Theory of Ferromagnetism.* Kluwer Academic Publisher.

Yazdanpanah, Reza; Mirsalim, Mojtaba, Electrical Machines and transformers Research laboratory, Department of Electrical Engineering. . (2014). Axial-Flux Wound Excitation Eddy Current Brakes: Analytical Study and Parametric Modeling. *IEEE Transaction ın Magnetics*.

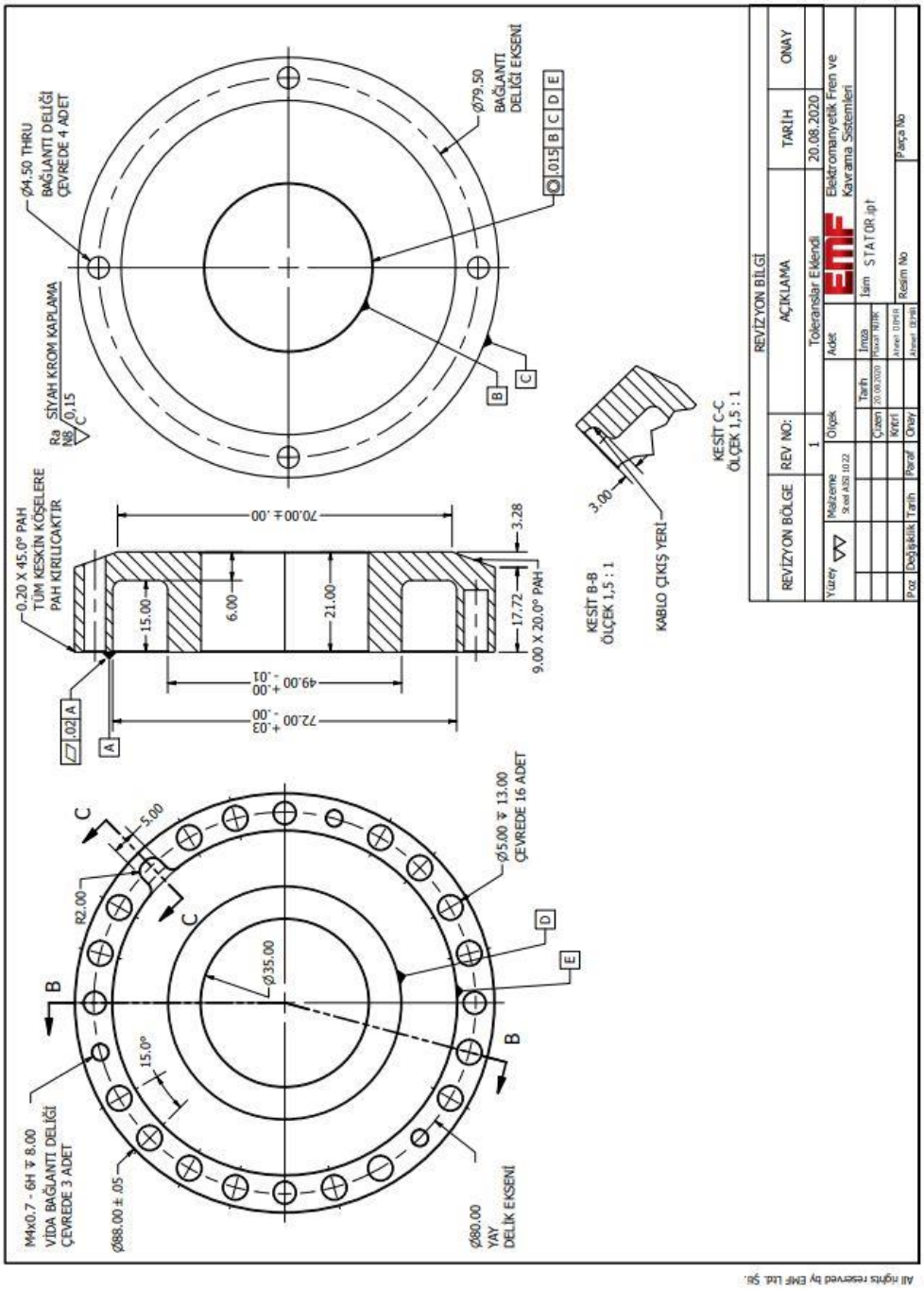
EKLER

Ek 1



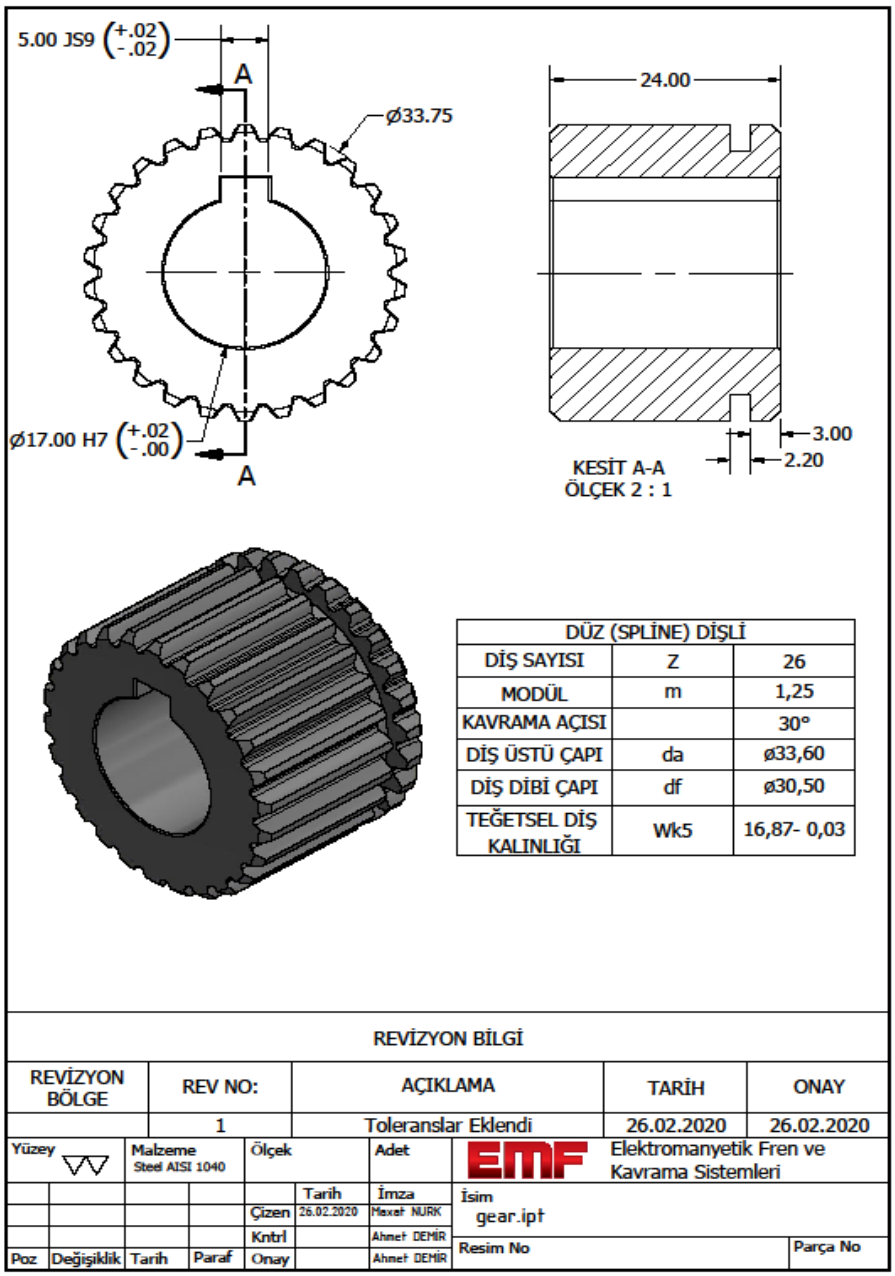
All rights reserved by EMF Ltd. Şti.

Ek 2



All rights reserved by EMF Ltd. Şti.

Ek 3



DÜZ (SPLİNE) DİŞLİ		
DİŞ SAYISI	Z	26
MODÜL	m	1,25
KAVRAMA AÇISI		30°
DİŞ ÜSTÜ ÇAPI	da	ø33,60
DİŞ DİBİ ÇAPI	df	ø30,50
TEĞETSEL DİŞ KALINLIĞI	Wk5	16,87- 0,03

REVİZYON BİLGİ

REVİZYON BÖLGE	REV NO:	AÇIKLAMA	TARİH	ONAY
	1	Toleranslar Eklendi	26.02.2020	26.02.2020

Yüzey | Malzeme: Steel AISI 1040 | Ölçek | Adet | EMF Elektromanyetik Fren ve Kavrama Sistemleri

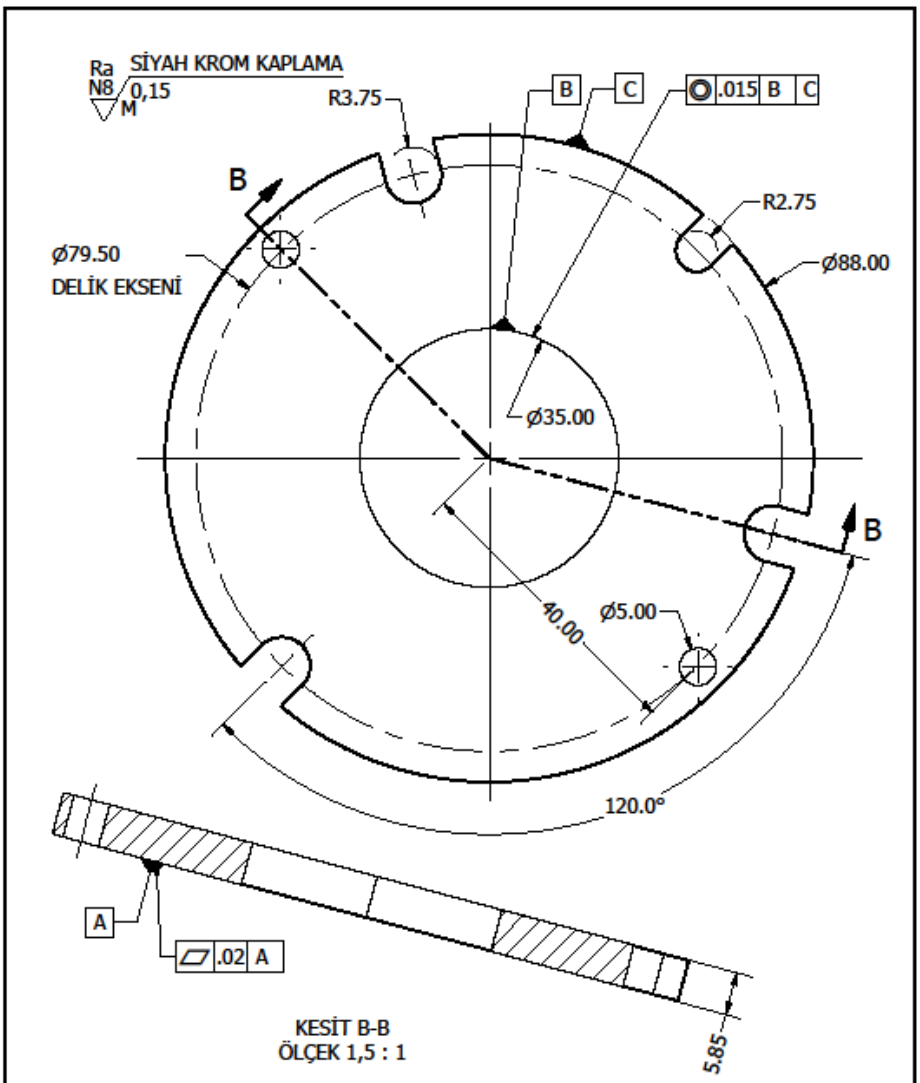
	Tarih	İmza
Çizen	26.02.2020	Mavat NURK
Kntrl		Ahmet DEMİR
Onay		Ahmet DEMİR

İsim: gear.ipt

Poz | Değişiklik | Tarih | Paraf | Resim No | Parça No

All rights reserved by EMF Ltd. Şti.

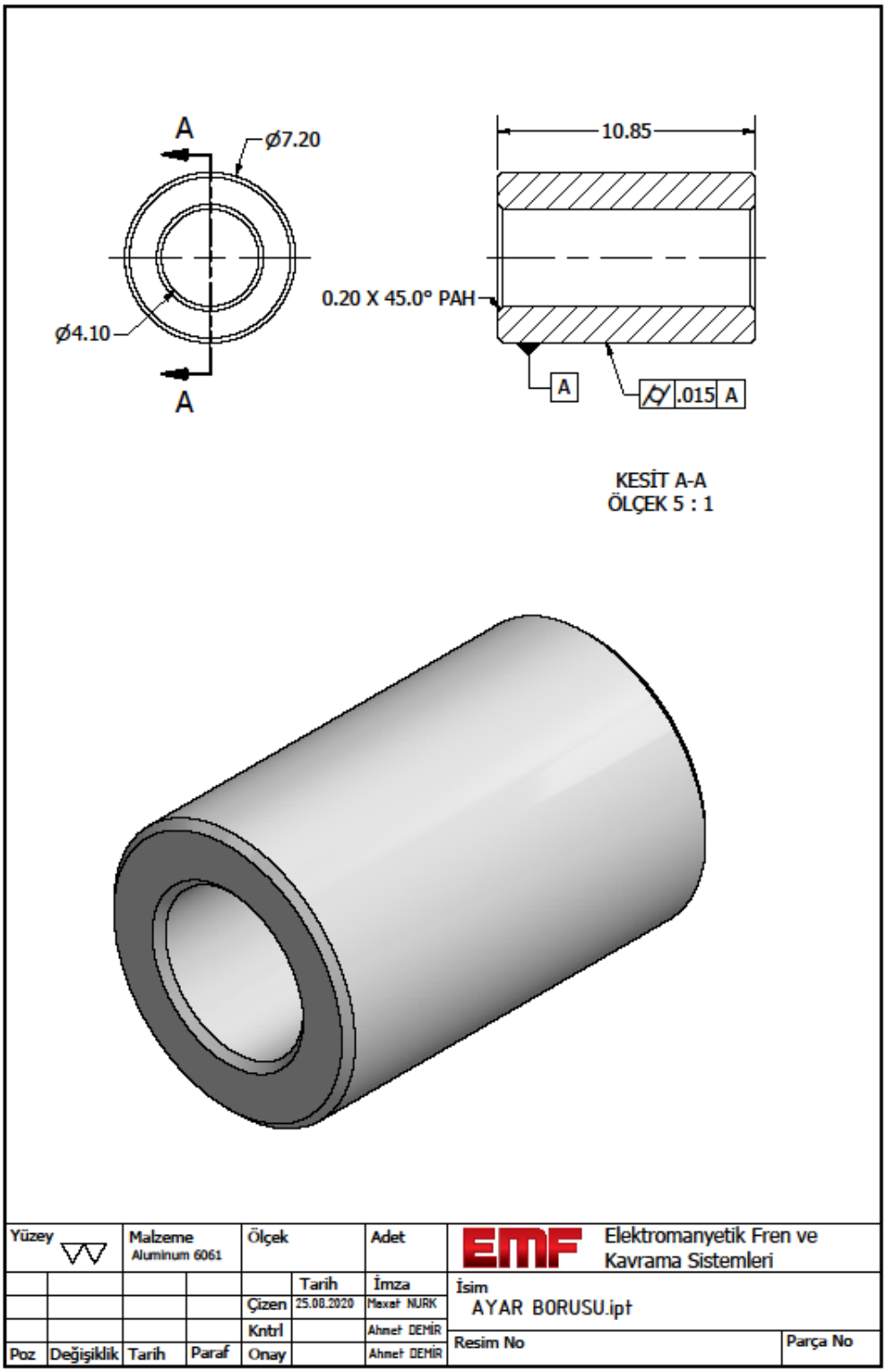
Ek 4



All rights reserved by EMF Ltd. Şti.

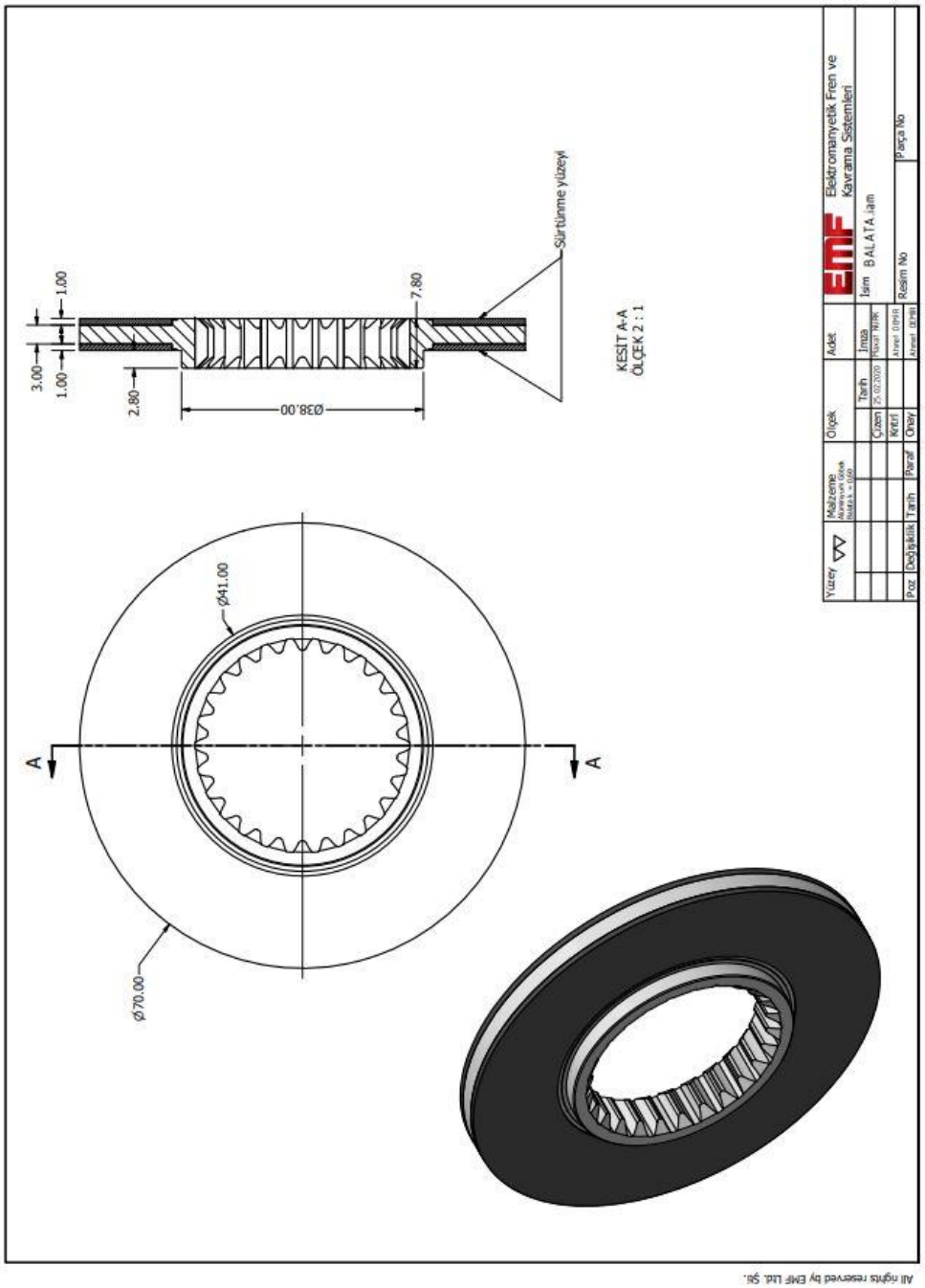
Yüzey		Malzeme		Ölçek		Adet	EMF Elektromanyetik Fren ve Kavrama Sistemleri
					Tarih	İmza	İsim FLANGE.ipt
				Çizen	24.08.2020	Mesut NURK	
				Kntrl		Ahmet DEMİR	Resim No / Parça No
Poz	Değişiklik	Tarih	Paraf	Onay		Ahmet DEMİR	

Ek 5



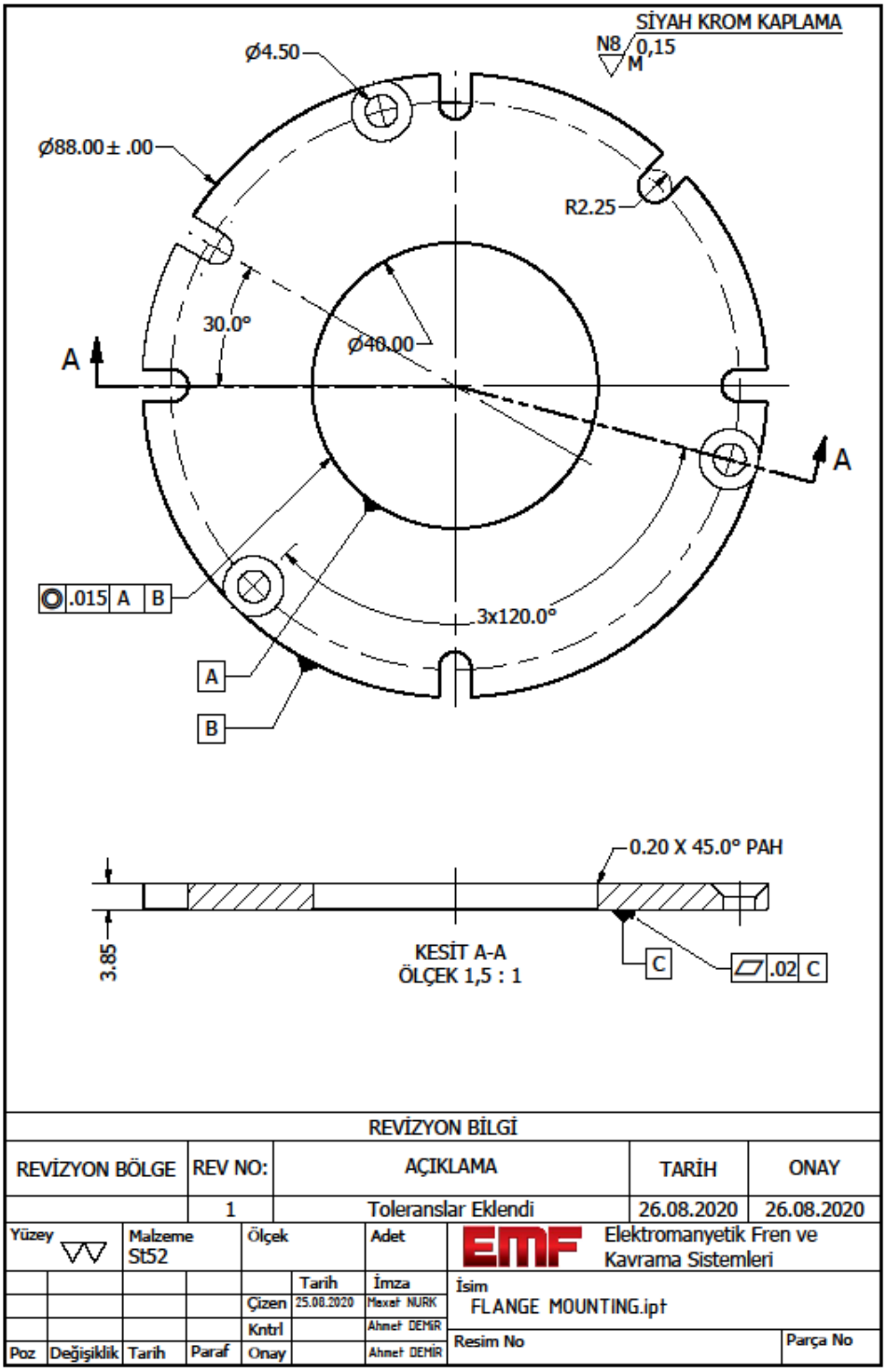
All rights reserved by EMF Ltd. Şti.

Ek 6

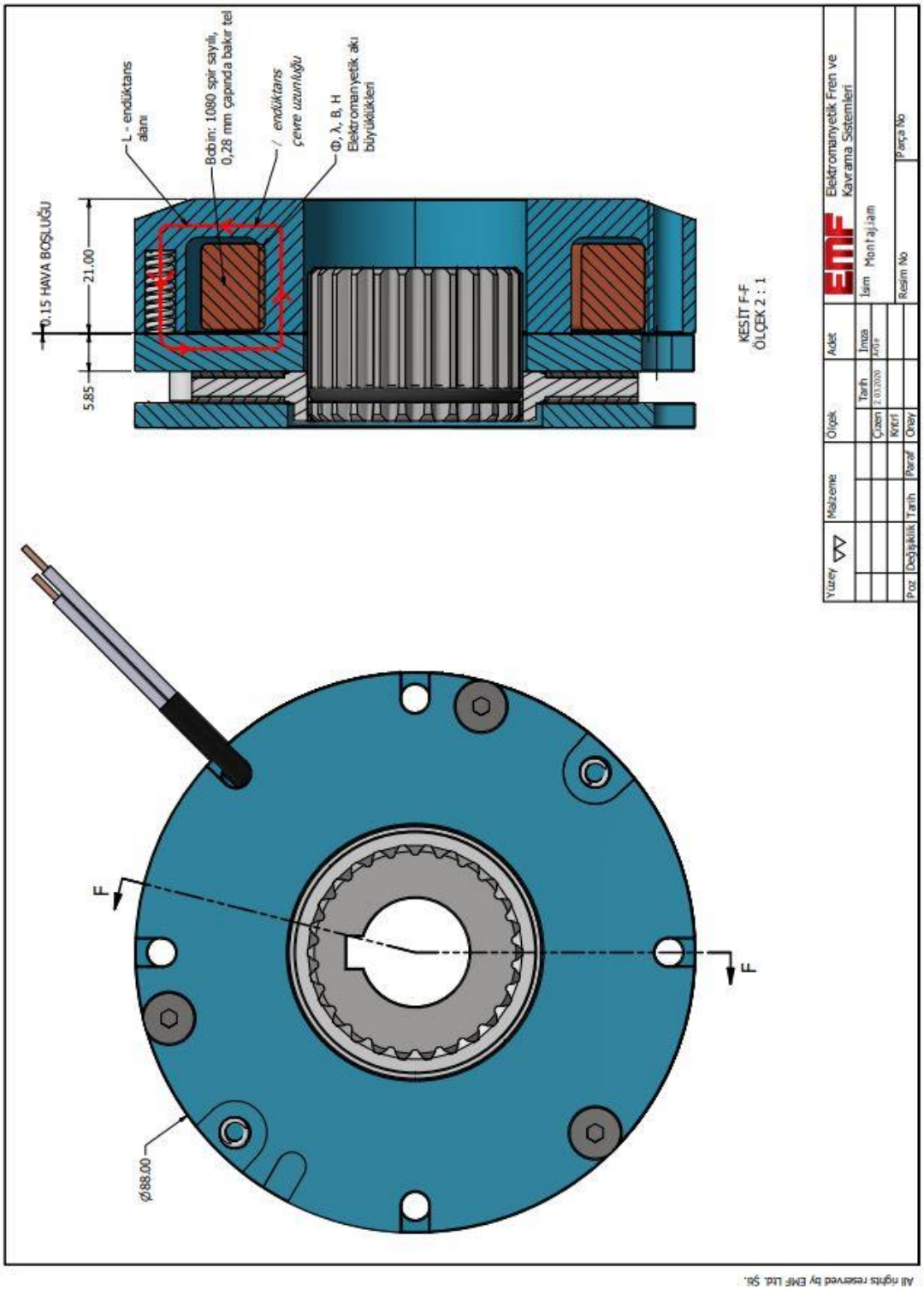


All rights reserved by EMF Ltd. Şti.

Ek 7


SİYAH KROM KAPLAMA
N8 0,15 M
Ø4.50
Ø88.00± .00
R2.25
30.0°
Ø40.00
A
A
.015 A B
3x120.0°
A
B
0.20 X 45.0° PAH
3.85
KESİT A-A
ÖLÇEK 1,5 : 1
C
.02 C
REVİZYON BİLGİ
REVİZYON BÖLGE
REV NO:
AÇIKLAMA
TARİH
ONAY
1
Toleranslar Eklendi
26.08.2020
26.08.2020
Yüzey
Malzeme
St52
Ölçek
Adet
EMF
Elektromanyetik Fren ve Kavrama Sistemleri
Tarih
İmza
İsim
FLANGE MOUNTING.ipt
Çizen
25.08.2020
Mesut NURK
Kntrl
Ahmet DEMİR
Poz
Değişiklik
Tarih
Paraf
Onay
Ahmet DEMİR
Resim No
Parça No
All rights reserved by EMF Ltd. Şti.

Ek 8


L - endüktans alanı
Bobin: 1080 spir sayılı, 0,28 mm çapında bakır tel
l - endüktans çevre uzunluğu
Φ, λ, B, H Elektromanyetik akı büyüklükleri
0.15 HAVA BOŞLUĞU
21.00
5.85
KESİT F-F
ÖLÇEK 2 : 1
F
F
Ø88.00
EMF
Elektromanyetik Fren ve Kavrama Sistemleri
İsim Montaj.iam
Resim No
Parça No
Yüzey
Malzeme
Ölçek
Adet
Tarih
İmza
Çizen
Kontrl
Onay
Poz
Değişiklik
Tarih
Perak
All rights reserved by EMF Ltd. Şti.