



**DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNİN KULLANIMINA  
UYGUN ELEKTROMİKNATIS TASARIMI VE  
ANALİZİ**

**Sena ÇEVLİKLİ**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Selim ÖNCÜ  
Doç.Dr. Adem DALCALI**

**DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNİN KULLANIMINA UYGUN  
ELEKTROMİKNATIS TASARIMI VE ANALİZİ**

**Sena ÇEVLİKLİ**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Selim ÖNCÜ  
Doç. Dr. Adem DALCALI**

**KARABÜK  
Aralık 2021**

Sena ÇEVLİKLİ tarafından hazırlanan “DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNİN KULLANIMINA UYGUN ELEKTROMİKNATIS TASARIMI VE ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Selim ÖNCÜ .....  
Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Adem DALCALI .....  
Tez Danışmanı, Devreler ve Sistemler Ana Bilim Dalı, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/12/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL ( KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Selim ÖNCÜ ( KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Emre ÇELİK ( DÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Sena ÇEVLİKLİ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNİN KULLANIMINA UYGUN ELEKTROMİKNATIS TASARIMI VE ANALİZİ**

**Sena ÇEVLİKLİ**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Selim ÖNCÜ**

**Doç. Dr. Adem DALCALI**

**Aralık 2021, 45 sayfa**

Bu çalışmada, demir çelik fabrikaları ve haddehanelerdeki demir blokların kaldırılması ve taşınması hedeflenerek iki kutuplu bir elektromıknatıs tasarımı gerçekleştirilmiştir. Taşınacak olan yükün cinsine, boyutuna göre uygun amper – sarım oranında, doyum bölgesine ulaşmadan minimum bakır kaybı ile taşıma sağlayacak şekilde bir elektromıknatıs tasarımı hedeflenmiştir. Elektromıknatısın analitik hesapları yapılarak ihtiyaca uygun elektromıknatıs modeli, bilgisayar destekli tasarım ve analiz programı ile tasarlanmış, simülasyonu gerçekleştirilerek manyetik analizleri yapılmıştır.

Bu tezde tasarımı yapılan 2 kutuplu elektromıknatısın analitik tasarımı için MATLAB programı, 2 boyut ve 3 boyutlu tasarımlar ve optimizasyon için ANSYS Maxwell

programı kullanılmıştır. Modeller üzerinde elektrik makinalarının tasarımında ve analizinde kullanılan sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Elektromıknatis, 2 kutup, Sonlu elemanlar analizi, 2 ve 3 boyutlu tasarım, Optimizasyon.

**Bilim Kodu** : 90514

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **DESIGN AND ANALYSIS OF ELECTROMAGNETS SUITABLE FOR USE IN THE IRON AND STEEL INDUSTRY**

**Sena ÇEVLİKLİ**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Electrical Electronic Engineer**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Selim ÖNCÜ**

**Assoc. Prof. Dr. Adem DALCALI**

**December 2021, 45 pages**

In this study, two pole electromagnet was designed with the aim of lifting and transporting iron blocks in iron and steel factories and rolling mills. An electromagnet has been designed in such a way that it provides transport with minimum copper loss without reaching the saturation zone at the appropriate ampere-turn ratio by using the appropriate material selection according to the type and size of the load to be carried. By analytical calculations of the electromagnet, the electromagnet model suitable for the need was designed and simulated with ANSYS Maxwell program, and magnetic analyzes were performed.

In this thesis, MATLAB program was used for the analytical design of the 2-pole electromagnet, and ANSYS Maxwell program for 2D and 3D designs and optimization. The finite element method (SEM) used in the design and analysis of

electrical machines was used on the models.

**Key Word** : Electromagnet, 2 poles, Finite element analysis, 2D and 3D design,  
Optimization.

**Science Code** : 90514



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocalarım Doç. Dr. Selim ÖNCÜ'ye ve Doç Dr. Adem DALCALI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Endüstriyel alanda kullanılan elektromıknatıslar hakkındaki tecrübelerinin paylaşımı için BOSKAY Metal A.Ő. 'ye ve KEMSAN MOTOR A.Ő'ye teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	2
LİTERATÜR .....	2
BÖLÜM 3 .....	9
ELEKTROMANYETİK ALAN VE MANYETİZMA .....	9
3.1. ELEKTROMANYETİK ALANLAR .....	9
3.1.1. Maxwell Denklemleri .....	9
3.1.2. Manyetik Geçirgenlik .....	11
3.1.3. Manyetomotor Kuvvet.....	11
3.2. MANYETİK MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI .....	13
3.2.1. Diamanyetik Malzemeler.....	13
3.2.2. Paramanyetik Malzemeler .....	13
3.2.3. Ferromanyetik Malzemeler.....	13
3.2.3.1. Curie Sıcaklığı .....	14
3.2.3.2. Histerezis Eğrisi .....	14

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 .....	16
ELEKTROMİKNATIS TASARIMI VE ANALİZİ .....	16
4.1. ELEKTROMİKNATIS .....	16
4.2. İKİ KUTUPLU ELEKTROMİKNATIS .....	17
4.2.1. Elektromıknatısın Kutupları .....	17
4.2.2. Elektromıknatısın Kullanım Alanları .....	17
4.3. SONLU ELEMANLAR METODU .....	17
4.3.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Kullanım Alanları .....	18
4.3.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihiçesi .....	18
4.4. ANSYS MAXWELL PROGRAMI .....	19
4.5.ELEKTROMİKNATIS MODELİ, TASARIM VE ANALİZLERİ.....	20
4.5.1. Elektromıknatısın 3B Tasarımı ve Manyetostatik Analizi.....	20
4.5.1.1. Analitik Hesaplamalar .....	23
4.5.1.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması .....	25
4.5.2. Simülasyon Sonuçları .....	27
BÖLÜM 5 .....	37
SONUÇLAR .....	37
KAYNAKLAR .....	39
ÖZGEÇMİŞ .....	45

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Manyetik devre ve eşdeğer devre modeli.....	12
Şekil 3.2. Manyetik histerezis eğrisi .....	15
Şekil 4.1. Elektromıknatıs .....	16
Şekil 4.2. 3 ve 5 bacaklı transformatör çekirdeğinin iki boyutlu modeli. ....	20
Şekil 4.3. Elektromıknatıs ve taşınmak istenen demir kütük. ....	20
Şekil 4.4. Elektromıknatısın 3B modeli. ....	21
Şekil 4.5. Elektromıknatısın detaylı görüntüsü. ....	21
Şekil 4.6. a) Kullanılan Steel_1010 BH eğrisi. ....	22
Şekil 4.7. Kütük amper.sarım değerinin bulunması. ....	25
Şekil 4.8. Elektromıknatıs sargı mesh görüntüsü. ....	26
Şekil 4.9. Sonlu elemanlar modelindeki elemanlar ve düğüm noktaları.....	26
Şekil 4.10. 150×150×8320 mm boyutlu yükün 3B modeli.....	27
Şekil 4.11. 150×150×8320 mm boyutlu yükün manyetostatik analiz sonucu. ....	28
Şekil 4.12. 3 Kütük kullanılarak oluşturulan 3B modeli.....	29
Şekil 4.13. 3 Kütük ile manyetostatik akı dağılımı.....	29
Şekil 4.14. 5 Kütük ile oluşturulan 3B model ve manyetostatik akı dağılımı. ....	30
Şekil 4.15. 280×360×8320 mm boyutlu yükün 3B modeli.....	31
Şekil 4.16. Farklı amper.sarım değerlerinde elde edilen manyetik akı yoğunlukları. 32	
Şekil 4.17. 280×360×8320 mm boyutlu yükün manyetostatik akı dağılımı.....	33
Şekil 4.18. 3 Beam blank kullanılarak oluşturulan 3B model. ....	34
Şekil 4.19. 3 Beam blank ile manyetostatik akı dağılımı.....	34
Şekil 4.20. 400×500×8320 mm boyutlu 2 yükün 3B modeli.....	35
Şekil 4.21. 400×500×8320 mm boyutlu 2 yükün manyetostatik akı dağılımı.....	36

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Maxwell denklemleri .....	10
Çizelge 4.1. Kullanılan malzemeler ve analitik hesaplamada kullanılan parametreler .....	22
Çizelge 4.2. Kullanılan yükün özellikleri .....	23
Çizelge 4.3. Kullanılan yüklerin hacim ve kuvvet hesabı.....	24
Çizelge 4.4. Kütük sayısına göre gereken kuvvetler.....	28

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Cu	: Bakır
Al	: Alüminyum
kh	: Histerezis kayıp katsayısı
kc	: Girdap akımı kayıp katsayısı
$\Phi$	: Manyetik akı
B	: Manyetik akı yoğunluğu
H	: Manyetik alan şiddeti
J	: Akım yoğunluğu
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik
$\mu_0$	: Manyetik geçirgenlik sabiti
T	: Tesla
$\gamma$	: Özgül Ağırlık
$\rho$	: Özkütle
g	: Yerçekimi ivmesi
$l$	: Elektromıknatıs nüve uzunluğu

### KISALTMALAR

SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
HTS	: Yüksek Sıcaklık Süper İletken

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Elektromıknatıslar en basit tanımıyla elektrik akımı yardımıyla mıknatıslık özelliği kazanan ve akım kesildiğinde bu özelliğini kaybeden sistemler olarak açıklanabilir. Elektromıknatıslar sanayinin bir çok alanında kullanılmaktadır. Ağır sanayi şartlarında çok fazla tercih edilen elektromıknatıslar, özellikle hurda işleme tesisleri, demir çelik fabrikaları, otomotiv sektörü ve hızlı tren sistemleri gibi birçok alanda iş gücünü hafifletmektedir. Bununla birlikte elektromıknatıslar, elektrik motorlarında, transformatörlerde, kontaktör ve rölelerin çalıştırılmasında ve manyetik maddelerin ayıklanmasında kullanılmaktadır. Günümüzde elektromıknatıslar endüstride metallerin ayrıştırılması ve taşınması alanlarında yaygın olarak kullanılsa da ülkemizde profesyonel olarak üretilmemektedir. Daha çok uygulamadan gelen tecrübeye ve mevcut ürünlerden örnekleme yapılarak üretim gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, demir çelik endüstrisi ve haddehanelerdeki demir kütüklerin ve hurda malzemelerin kaldırılması ve taşınması işlemlerinde kullanılacak 1,5 tona kadar kaldırma kapasiteli iki kutuplu elektromıknatıs tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım için gerekli analiz ve simülasyonlar, ANSYS Maxwell programı ile gerçekleştirilmiştir.

Tasarımda iki boyut (2B) ve üç boyutlu (3B) modeller oluşturulmuş olup manyetostatik ve transient analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elektrik makinalarının tasarımında ve analizinde kullanılan Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılmıştır. Oluşturulan tasarımda elektromıknatısın tüm manyetik özellikleri incelenmiş ve tasarım için gerekli olan manyetik akı yoğunluğu, sargı akım yoğunluğu, yük üzerinde oluşan kuvvet değerleri ve diğer tasarım parametreleri analiz edilerek sunulmuştur.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR

Elektromanyetik analiz ve tasarım programları, sonlu elemanlar metodu, mıknatıs tasarımı konuları üzerine yapılan akademik çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

#### 2.1. ULUSAL ÇALIŞMALAR

H.F. Ertuğrul ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 4 kutuplu karma bir elektromıknatıs için doğrusal motor kullanarak manyetik yastıklama sisteminin kuvvet karakteristiğini incelemişlerdir. Karma elektromıknatıslar karakteristik yapısından dolayı doğrusal değildir ve kararsız özellik gösterirler. Bu çalışmada sistem kontrolünü gerilimle uyarım yaparak sağlamışlardır. Sonuç olarak tasarlanan sistemde dengeli yastıklamanın yapılabildiğini görmüşlerdir [1].

Y.Özupak ve M.S.Mamiş 2019 yılında yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak dağıtım transformatörlerinde meydana gelen nüve kayıplarını hesaplamışlardır. Transformatörlerin manyetik nüve kayıplarını histerezis kayıp katsayısı (kh) ve girdap akımı kayıp katsayısını (kc) kullanarak hesaplamışlardır. Nüvedeki kayıpları ANSYS Maxwell ortamında transient analizler gerçekleştirerek hesaplamışlar ayrıca gerçek bir dağıtım transformatörünün nüvesindeki manyetik alan dağılımlarını analiz etmişlerdir [2].

Aynı yazarlara ait bir başka çalışmada ise sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla kısa devre durumundaki güç trafosunun sargılarında oluşan elektromanyetik kuvvetleri incelemişlerdir. Bu çalışmada, SEM kullanılarak bir güç transformatörünün geçici kısa devre akımları nedeniyle meydana gelen elektromanyetik akı yoğunluğu ve kuvvetleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların analitik sonuçlarla uyum içerisinde olduğu



görülmüş ve kullanılan tekniğin transformatörlerin tasarım aşamasında kolaylık sağlayacağı düşünülmüştür [3].

M. Aydın 2008' de yazdığı makalesinde sürekli mıknatıslı motorlar ve eksenel akıllı sürekli mıknatıslı motorlar için sistematik bir tasarım metodu üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu metodda AC ve DC sürekli mıknatıslı motorların tasarımı ve sonlu elemanlar analizinin motor tasarımında nasıl kullanılacağını açıklamıştır [4].

Bayhan S. ve arkadaşları 2010 yılında, kontrolünü mikrodenetleyici yardımıyla gerçekleştirdikleri bir fındık taşıma sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan bu sistem elektromıknatıs, mikrodenetleyici devresi, tristör sürücü devresi, konvertör devresi, ölçme ve sıfır geçiş algılama devreleri kullanılarak oluşturulmuştur. Tristör sürücü devresi ile mikrodenetleyici üzerinden elektromıknatısa uygulanan gerilimin genliği ayarlanarak farklı büyüklüklerdeki fındıklar kolaylıkla taşınabilmektedir [5].

S. Balcı 2019' da yaptığı çalışmasında DA-DA dönüştürücü devreleri için bobinde farklı nüve şekilleri kullanarak belirli bir akım ve endüktans değerinde bir bobin tasarımı gerçekleştirmiştir. Farklı nüve yapılarına göre tasarladığı indüktörlerin elektromanyetik modellemesini sonlu elemanlar analizi (SEA) ile yaparak endüktans kararlılıkları, nüve ve sargı kayıpları, mekanik özellikleri ve akı dağılımlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bu yapı yüksek güç uygulamalarında bobin tasarımlarına da model teşkil etmektedir [6].

M. Çeçen ve B. Gümüş 2018 yılında yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kademeli bir güç transformatörünün 2 boyutlu simülasyon modelini tasarlamışlardır. Çalışmada transformatörün primer ve sekonder sargı gerilimlerini, demir kaybı ve bakır kaybı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sargı tipi olarak bakır, alüminyum ve gümüş olmak üzere farklı tipte sargı malzemeleri kullanmışlardır. Analiz sonuçlarından sargı tipinin sadece sargı kaybını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Sargı kayıplarını azaltmak için bakır yerine başka tip iletkenlerin kullanabileceğini düşünmüşlerdir [7].

M.R. Minaz ve K. Yıldız 2021 yılında yaptıkları çalışmada, sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım (BLDC) motoru arızasının bir benzetimini yapmak istemişler ve sargıda oluşacak bozulmaları modellemek için stator faz devresine paralel bir empedans eklemişlerdir. Sonlu elemanlar metodunu kullanarak modelin tasarımını gerçekleştirip kısa devre arıza durumunda sargıdaki bozulmaları incelemişlerdir [8].

Y. Özüpak 2021 yılında yaptığı çalışmada, transformatörlerin nüvesinde farklı manyetik malzemeler kullanarak transformatörde oluşan kayıpları incelemiştir. Ansys Maxwell programı ile sonlu elemanlar yöntemini kullanarak transformatörün analizlerini gerçekleştirmiş ve nüvedeki manyetik akı yoğunluğu, manyetik vektör potansiyeli ve akım yoğunluğu dağılımlarını incelemiştir [9].

B. Aslan ve S. Balcı 2021 yılında, sonlu elemanlar analizini kullanarak IPM (kalıcı tip mıknatıslı) motorların ve mil motorlarının çalışma performanslarını karşılaştırmışlardır. Ansys Maxwell yazılımı kullanarak elektromanyetik modellemeleri yapmışlar ve akım, tork, nüve kaybı ve akı dağılımlarını incelemişlerdir [10].

K. Oğuz 2021 yılında yaptığı tez çalışmasında, lineer motor tasarımı bu motoru kontrol edecek sürücü tasarımını yapmıştır. Çalışmada Ansys Maxwell programı ile sonlu elemanlar metodunu kullanmış ve iki boyutlu manyetik analizler gerçekleştirmiştir. Manyetik tasarımların ardından optimize edilen parametreleri dikkate alarak motor hareketinin kontrolünü optimum seviyede sağlamış ve tasarımı prototip ürün haline getirmiştir. Elde ettiği analiz sonuçları ile prototipten elde ettiği deneysel sonuçları karşılaştırmıştır [11].

A. Dalcalı, H. Özbay ve S. Öncü 2020 yılında yaptıkları çalışmada, bir indüksiyon bobini ile farklı frekanslar altında aynı ölçülerde farklı yapıdan oluşan iş parçalarının manyetik akı yoğunluklarını ve iş parçaları üzerindeki deri etkisini incelemişlerdir. Çalışmada sonlu elemanlar analizini kullanarak çalışma frekansı ve malzeme özelliklerine göre iş parçasının ısıtılacak kısmının değişim gösterdiğini doğrulamışlardır [12].

## 2.2. ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

A.I. Dolan tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, sonlu elemanlar metodu kullanılarak DC bir elektromıknatısın optimizasyon çözümü önerilmiştir. Optimizasyondan önce statik kuvvet karakteristiği üzerindeki en etkili geometrileri belirlemek için tarama tekniği uygulanmıştır. Optimal çözüm yapılarak statik kuvvette hava aralığının %1,12 kazanç sağladığı görülmüştür [13].

I.Kostov ve S.Guninski 2017’ de, sonlu elemanlar metodu kullanılarak klape tipi bir elektromıknatısın kontrol sensörü pozisyonunun belirlenmesi üzerine bir bildiri çalışması sunmuşlardır. Çalışmada, manyetik akı yoğunluğu dağılımını elde ederek elektromıknatıs kontrolü için iki eksenli manyetik alan sensörünün kullanımını önermişler ve bu iki eksenli manyetik alan sensörünün konumunu belirlemeyi hedeflemişlerdir. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemini kullanarak manyetik alanın farklı bölgelerini analiz etmişler ve elektronik kontrol devresinde manyetik geri besleme vermek için kullanılan iki eksenli bir manyetik alan sensörünün konumunun belirlenmesini sağlamışlardır [14].

P.Di Barba ve arkadaşları 1990 yılında yayınladıkları makalede, demir nüveli elektromıknatısların optimizasyonu ile ilgili genel problemleri ele almışlardır. Demirin manyetizasyon eğrisi, çalışma koşulları, bobinlerin yapısı vb. özelliklerini dikkate alarak çeşitli elektromıknatıs modellerini incelemişler, analitik ve sayısal yöntemlerin kullanımını karşılaştırmışlardır [15].

Y.Kawase ve arkadaşları 1994 yılında, kenar elemanları ile “3D sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elektromıknatısların dinamik özelliklerinin sayısal analizi” adlı bir makale yayınlamışlardır. Bu makalede, kontaktörlerde, rölelerde ve diğer elektromanyetik cihazlarda kullanıldığı gibi AC ve DC elektromıknatısların dinamik davranışlarını doğru hesaplayabilmek için yeni bir yöntem açıklamışlardır. Yöntem, nüvelerin doğrusal olmama durumunu ve girdap akımını hesaba katan kenar elemanları ile 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntemin, elektromıknatısların optimize tasarımı için dinamik özelliklerini tahmin etmeyi mümkün kıldığını görmüşler ve deneylerle onaylamışlardır [16].

Wenzhi F.M. ve arkadaşları 2004 yılında, hava boşluğunu düzenleyen elektromıknatısın işlevini ve tasarım yöntemini açıklayan bir makale yayınlamışlardır. Elektromanyetik alan matematik modelini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak oluşturmuşlar, elektromıknatısın çalışma prensibini inceleyerek düzenleyici hava boşluğunun çekim üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir [17].

Y.Kawase ve arkadaşları 2006 yılında, kalıcı mıknatıslı elektromıknatısın çalışma karakteristiklerini 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Bu makaledeki kalıcı mıknatıslı elektromıknatıslar, iki manyetik devresi olan enerji tasarrufu sağlayan bir elektromıknatıstır. Manyetik alanın biri kalıcı mıknatıslar tarafından diğeri bobin tarafından üretilmektedir. Bu nedenle akı yoğunluğu dağılımı karmaşıktır ve ölçülmesi kolay değildir. Çalışmada, karmaşık akı yoğunluğunun zamana göre değişimini sonlu elemanlar yöntemi ile inceleyerek düşük giriş gerilimi koşullarında çalışma özelliklerini belirlemişlerdir [18].

Jaewon Lim ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada, süper yüksek hızlı manyetik kaldırma (Maglev) aracı için kaldırma elektromıknatısının tasarımı ve deney sonuçlarını sunmuşlardır. Havaya kaldırma elektromıknatısının elektromanyetik özelliklerini, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir [19].

Y.Bakhvalov ve arkadaşları 2016' da, XY koordinatlı elektrikli aktüatörlerin kabuk tipi elektromıknatıslarının optimum tasarımı adlı bir bildiri yayınlamışlardır. Bu çalışmada, ters problemlerin çözümüne ve amaç fonksiyonlarındaki manyetik indüksiyon ve çekme kuvveti üzerindeki kısıtlamaların dönüştürülmesine dayalı olarak kabuk tipi elektromıknatısların optimal tasarımı için bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem ile hava boşluğundaki manyetik indüksiyon üzerindeki kısıtlama kaldırılabilir [20].

W.Li ve J.Fang 2020 yılında, HTS (yüksek sıcaklık süper iletkeni) süspansiyon elektromıknatısının 3B sonlu eleman analizi ve optimizasyonu adlı bir bildiri yayınlamışlardır. Çalışmada, elektromanyetik süspansiyon elektromıknatısının manyetik alan dağılımını ve süspansiyon kuvvetini analiz etmek için normal iletken ve HTS elektromıknatıslarının üç boyutlu simülasyon modellerini Maxwell 3B

yazılımında tasarlamışlardır. Alüminyum bobinleri süper iletken bobinlerle değiştirerek süspansiyon performansının değişimini simüle etmek için üç boyutlu bir sonlu eleman modeli kurmuşlardır. Ayrıca elektromıknatısın nüve yapısının optimizasyon tasarımını ve performans analizlerini de yapmışlardır. Sonuçlar, yeni yapı bir HTS elektromıknatısının iyi bir süspansiyon performansına sahip olduğunu ve normal iletken elektromıknatıslara göre daha küçük boyut ve daha düşük güç tüketimi gibi avantajlara sahip olduğunu göstermiştir [21].

A.G. Vazmilov ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmalarında, elektromanyetik ayırıcı ile sıvı malzemelerden manyetik malzemeleri ayırabileceklerini düşünmüşlerdir. Elektromanyetik ayırıcı için yarı iletken dönüştürücü modeli tasarlamışlardır. Tasarlanan elektromanyetik ayırıcının manyetik sistemini sonlu elemanlar metodu ile analiz ederek tasarımın verimliliğini incelemişlerdir. Elde edilen maksimum manyetik alanın elektromıknatısın bobini ve kutupları arasında meydana geldiği sonucuna ulaşmışlardır [22].

Y.A. Makarichev ve Y.N. Ivannikov 2021 yılında, elektromıknatıs kutuplarının geometrisini değiştirerek hava boşluğundaki manyetik akı kayıplarını azaltmak ve enerji verimliliğini artırabilmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada manyetik yatağın durağan ve durağan olmayan şekilde iki farklı problemini sayısal modelleme yaparak incelemişlerdir. Sonuçlardan elektromıknatıs kutuplarının profillenmesinin manyetik kayıpları önemli ölçüde azalttığını ve verimliliği artırdığını görmüşlerdir [23].

B.A. Thango, J.A. Jordaan ve A.F. Nnachi 2021 yılında transformatörlerde meydana gelen Eddy kayıplarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizini gerçekleştirdikleri bir bildiri sunmuşlardır. Bu çalışmada transformatör sargılarında meydana gelen ısı sebebiyle oluşan kayıpları hesaplamak için Ansys Maxwell programı ile bir model geliştirmişler ve manyetik analizlerini yapmışlardır [24].

A.A. Gerasimenko ve arkadaşları 2021 yılında maglev sistemlerinin elektromanyetik çıkışındaki elektromıknatısın tasarım optimizasyonunu iyileştirmek için bir çalışma yapmışlardır. Elektromıknatıs üzerindeki akıyı artırmak için iki elektromanyetik kutup

arasına bir kompanzasyon bobini yerleştirmeyi önermişlerdir. Elektromıknatısın manyetik alan hesaplamalarını yaparak sonuçlardan manyetomotor kuvvetinin artırılması ve kutuplar arasına kompanzasyon bobini yerleştirilmesinin elektromıknatısı geliştirmek için en iyi çözümlü olduğunu düşünmüşlerdir [25].

I. Stejovski ve arkadaşları 2020 yılında asenkron makinaların elektromanyetik özelliklerini Ansys Maxwell programını kullanarak analiz ettikleri bir çalışma yapmışlardır. Üç fazlı bir jeneratör üzerinde sonlu elemanlar metodunu kullanarak elektromanyetik analizini gerçekleştirmişler ve analiz sonuçlarını sunmuşlardır [26].

A.K. Kariganaur, H. Kumar and M. Arun 2021 yılında yaptıkları çalışmada otomobil sistemlerinde istenmeyen sarsıntıları önlemek için kullanılan manyetoreolojik sıvılı amortisörlerin tasarımı ve manyetik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada sonlu elemanlar metodunu kullanarak manyetoreolojik sıvının akış bölgesindeki manyetik alan dağılımını Ansys programında analiz etmişlerdir. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip malzemeler ile sıvı akış aralığında daha yüksek akı yoğunlukları elde etmişlerdir [27].

Literatürde elektromanyetik mıknatıs tasarımının yapılması ve üretilmesi konusunda demir çelik fabrikaları ve haddehaneleri kapsayan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan taramalarda elektromanyetik tasarım, sonlu elemanlar analizi, ANSYS Maxwell programı ile tasarım ve analiz gibi benzer çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmalardan yola çıkılarak elektromanyetik tasarım hakkında elde edilen bilgiler bu tezin yapılmasında önyak olacaktır. Böylece bu çalışmada, ülkemizde analiz ve simülasyon verilerini kullanarak elektromıknatıs tasarımının yapılması ve üretiminin bu veriler ışığında gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

## BÖLÜM 3

### ELEKTROMANYETİK ALAN VE MANYETİZMA

#### 3.1. ELEKTROMANYETİK ALANLAR

Elektrik ve manyetik alanların bir araya gelişiyle elektromanyetik alanlar meydana gelmektedir [28]. İletkenler üzerinden elektrik yükleri aktığı zaman bir elektromanyetik alan meydana gelir. Meydana gelen manyetik alan, üzerinden elektrik yükü akan iletkenlerde elektromanyetik kuvvetler ile belirlenmektedir [29].

19. yüzyıllarda İskoç Fizikçi ve matematikçi olan Maxwell, değişen bir elektrik alanın değişen bir manyetik alan oluşturabileceğini öne sürerek elektrik ve manyetizmayı Maxwell denklemleri ile birleştirme başarısını göstermiştir [30].

##### 3.1.1. Maxwell Denklemleri

Zamanla değişen bir elektrik alan beraberinde bir manyetik alan üretmektedir. Maxwell denklemleri, bu alanların nasıl üretildiğini açıklamaktadır [31]. Manyetik alan içerisinde manyetik yük yoktur. Dolayısıyla manyetik alan çizgileri hiçbir zaman kesişmez, sonlanmaz ve daima kapalı döngüler oluşturur [32].

Maxwell denklemlerinin diferansiyel ve integral biçimleri Çizelge 3.1'de verilmiştir [33].

Çizelge 3.1. Maxwell denklemleri.

Türev İfadeleri	Açıklama
$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Faraday'ın İndüksiyon Yasası
$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Amper Yasası
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	Manyetizma İçin Gauss Yasası
$\nabla \cdot \vec{D} = \rho v$	Elektrik Alan İçin Gauss Yasası

Denklemlerde, elektrik alan şiddeti  $\vec{E}$  (V/m), manyetik alan şiddeti  $\vec{H}$  (A/m), manyetik akı yoğunluğu  $\vec{B}$  (T) olarak ifade edilmektedir.  $\vec{D}$  (C/m<sup>2</sup>) elektrik akı yoğunluğu,  $\vec{J}$  (A/mm<sup>2</sup>) hacim akım yoğunluğu ve  $\rho v$  (C/m<sup>3</sup>) hacim yük yoğunluğudur. Boş uzayın elektrik geçirgenliği  $\epsilon_0$  (F/m), boş uzayın manyetik geçirgenliği ise  $\mu_0$  (H/m)'dir [29].

İçerisinden akım geçirilen bir iletken etrafında manyetik alan meydana gelmektedir. Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti arasındaki bağıntı Eşitlik 3.1'de verilmiştir. Burada  $\mu$  manyetik geçirgenliktir [34].

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.1)$$

Belirli bir alandaki manyetik alan miktarının ölçüsü manyetik akı olarak adlandırılır ve sembolü “ $\Phi$ ” harfidir. Manyetik akı elektrik yükünün manyetik olarak karşılığıdır ve elde edilen toplam manyetizmanın ölçüsüdür [35]. Birim kesit alanda görülen toplam manyetik akıya ise manyetik akı yoğunluğu denilmektedir. Manyetik akı birimi weber (Wb), ve manyetik akı yoğunluğunun birimi weber/metre<sup>2</sup>'dir (Wb/m<sup>2</sup>). Uluslararası SI birimlerinde Tesla (T) birimi olarak da kullanılır. 1T = 1 Wb/m<sup>2</sup>'dir [29].

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (3.2)$$

Mıknatıs kutuplarına etki eden kuvvet ve mıknatısın kutup şiddetinin oranı manyetik alan şiddetini vermektedir. Diğer bir anlamda akımın manyetik alan meydana getirmek



için ortaya koyduğu güce manyetik alan şiddeti denilmektedir. Manyetik alan şiddetinin sembolü H harfi ile gösterilir, birimi ise amper/metre'dir (A/m) [35].

### 3.1.2. Manyetik Geçirgenlik

Manyetik geçirgenlik, bir malzemenin uygulanan manyetik alan karşısında iç mıknatıslanmasının bir ölçüsüdür. Yani bir malzemenin manyetik akıyı iletebilme yeteneğidir. Manyetik geçirgenlik sabiti ( $\mu_0$ ), Eşitlik 3.3'te verildiği üzere manyetik alan yoğunluğunun (B) manyetik alan gücüne (H) oranıdır [36].

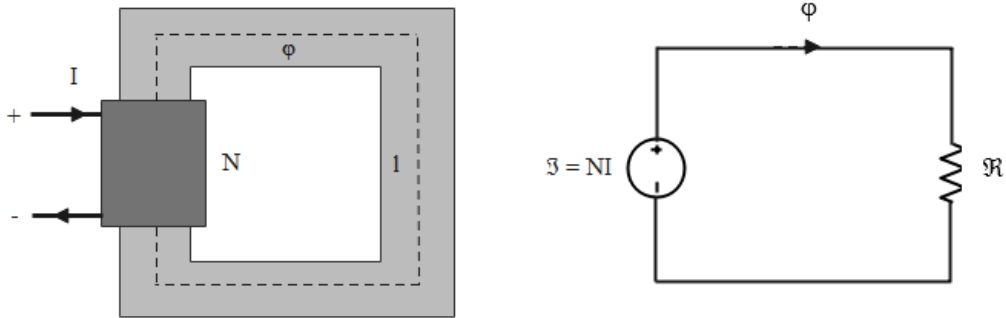
$$\mu_0\mu_r = \frac{B}{H} \quad (3.3)$$

$\mu_0$  boş uzayın manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir ve değeri  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m'dir. Manyetik akıyı kolay geçiren malzemelerin manyetik geçirgenlikleri daha yüksektir [35].

### 3.1.3. Manyetomotor Kuvvet

Elektrik devrelerindeki gerilim, manyetik devrelerde manyetomotor kuvvet (mmk), olarak düşünülebilir. Bir sargı içerisinde geçen akım, o sargının manyetomotor kuvvetini belirlemektedir.

$$\mathfrak{F} = NI \quad (3.4)$$



Şekil 3.1. Manyetik devre ve eşdeğer devre modeli.

Manyetik devreye uygulanan manyetomotor kuvveti devrede bir akı ( $\varphi$ ) üretilmesini sağlar. Mmk kuvveti ve akı arasındaki ilişki Eşitlik 3.5'te verilmiştir. Manyetik devre ise bu manyetik akının geçtiği yol olarak tanımlanabilir. Şekil 3.1'de bir manyetik devre ve eşdeğer devresi görülmektedir. N sarımlı ve I akımlı bir sargının mmk kuvveti Eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$$\varphi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathcal{R}} \quad (3.5)$$

Burada  $\mathcal{R}$ , relüktansı ifade etmektedir, birimi ise At/Wb' dir. Elektrik devrelerindeki direncin yerini relüktans olarak akıyı sınırlamaktadır. Manyetik devrelerdeki relüktansı bulmak için Eşitlik 3.6'daki denklemden yararlanılır.

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (3.6)$$

Maxwell denklemlerindeki Amper kanunundan yola çıkılarak  $l$ , nüvenin ortalama uzunluğudur. Akım taşıyan sargı iletkenleri nüvenin uzunluğunu N defa kesmektedir. Uygulanan akımdan dolayı nüve içindeki manyetik alan şiddetinin genliği Eşitlik 3.7'deki formül ile gösterilmektedir.

$$H = \frac{NI}{l} \quad (3.7)$$

## 3.2. MANYETİK MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

### 3.2.1. Diamanyetik Malzemeler

Diamanyetik malzemeler manyetik momentleri sıfır ve manyetik duyarlılıkları sıfırdan küçük malzemeler olarak bilinirler. Buna rağmen uygulanan manyetik alana tepki vermektedirler. Soy gazların tamamı diamanyetik malzeme olarak bilinir çünkü diamanyetiklerin atomik yörüngelerinde boş kabuk bulunmamaktadır [37].

Manyetik malzemelerin hepsi diamanyetik bileşene sahiptir [38]. Diamanyetiklerin, manyetik duyarlılıkları negatiftir. Bu nedenle, manyetik tepkileri uygulanan manyetik

alana zıt olur. Bu maddeler kuvvetli bir mıknatıs tarafından hafifçe itilirler. Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Bakır (Cu) diamanyetik malzemelere örnek olarak verilebilir [39].

### **3.2.2. Paramanyetik Malzemeler**

Paramanyetik malzemeler, eşlenmemiş elektron bulundurmalarından dolayı net bir manyetik momente sahiptirler ve bu net manyetik momentler rastgele sıralanmış haldedir. Manyetik momentler dışarıdan uygulanan manyetik alan doğrultusunda yönelim gösterirler ve maddede bir miktar mıknatıslanma meydana gelir [37]. Dışarıdan uygulanan manyetik alan ortadan kaldırıldığında, madde eski haline geri döner ve manyetik momentler tekrar rastgele yönelim gösterirler [40]. Paramanyetik malzemelere örnek olarak Alüminyum (Al), Platin (Pt) ve Mangan (Mn) verilebilir [39].

### **3.2.3. Ferromanyetik Malzemeler**

Ferromanyetik maddeler, sürekli olarak net bir manyetik momente sahip olan malzemelerdir [40]. Bu sebeple ferromanyetik malzemeler, zayıf bir manyetik alanın etkisi altındayken bile birbirlerine yönelmeye çalışan dipol momentlere sahiptirler. Uygulanan bu manyetik alan etkisi kalktığında birbirlerine yönelmiş olan manyetik dipollerde herhangi bir değişiklik meydana gelmez ve manyetik özellikleri kalıcı hale gelmiş olur [37]. Ferromanyetik maddelere örnek olarak Demir (Fe), Nikel (Ni), Kobalt (Co) verilebilir [39].

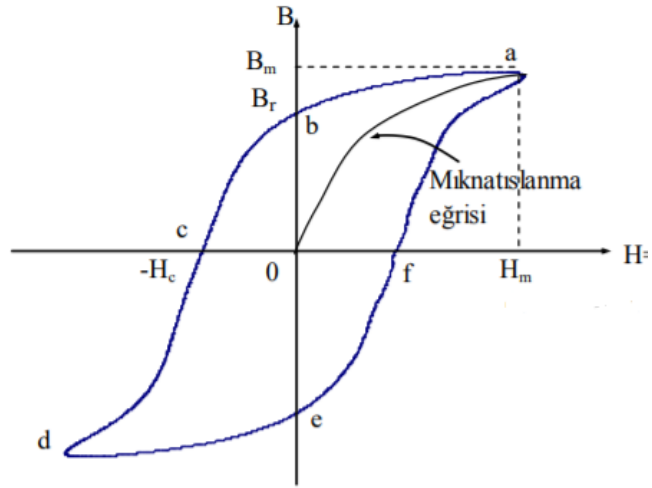
Ferromanyetik maddeler en yaygın kullanılan manyetik madde grubudur ve birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu maddelerin en önemli özellikleri yüksek geçirgenliğe sahip olmalarıdır. Ferromanyetikler, manyetik olarak kolay ve zor mıknatıslanabilir olmak üzere ikiye ayrılır. Kolay mıknatıslanabilir manyetik maddeler elektromıknatıslarda, motorlarda, transformatör ve rölelerin çekirdeklerinde kullanılırken, zor mıknatıslanabilir manyetik maddeler manyetik kayıt ortamlarında ve jeneratörlerde kullanılabilir [41].

### 3.2.3.1. Curie Sıcaklığı

Ferromanyetik maddelerin sıcaklık değerleri, kritik bir noktaya ulaştığında veya bu noktayı aştığında madde mıknatıslanma özelliğini kaybederek paramanyetik hale geçer. Bu kritik nokta Curie sıcaklığı ( $T_c$ ) olarak adlandırılır. Yani curie sıcaklığından daha düşük seviyede olan malzeme ferromanyetik özellik gösterirken curie sıcaklığının üzerine çıktığında malzeme yapısındaki ısıl dalgalanmalar çoğalarak rastgele bir manyetik moment dizilimine neden olur. Böylece malzeme paramanyetik hale geçer [37].

### 3.2.3.2. Histerezis Eğrisi

Ferromanyetik maddelerin momentleri, dışarıdan manyetik alan uygulanmadığında net manyetik momentleri sıfır olmakta ve rastgele yönelmiş halde bulunmaktadır [42]. Malzemeye manyetik alan uygulandığında ise malzemenin manyetizasyonu uygulanan manyetik alan şiddetine karşı bir eğri meydana getirir [43]. Daha önce mıknatıslanmamış ferromanyetik bir malzemenin manyetik alan şiddeti arttırıldığında manyetik akı yoğunluğu dolayısıyla da mıknatıslanması artar. Malzeme üzerine sinüsoidal bir akım uygulandığında ve bu akım maksimum değerine ulaştırıldığında malzemedeki bir mıknatıslanma meydana gelir ve Şekil 3.2’de gösterilen mıknatıslanma eğrisi oluşur. Malzeme doyuma ulaştıktan sonra uygulanan manyetik alan ortadan kaldırıldığında mıknatıslık doğrusal olarak azalmaz ve eğri ab yolunu izleyerek malzeme üzerinde artık mıknatıslık denilen bir mıknatıslanma kalır. Akım negatif alternansta arttırılmaya başlandığında mıknatıslanma azalarak eğri bcd yolunu izler. Uygulanan akımla birlikte manyetik alan sıfır değerine ulaştığında eğri def yolunu izler ve malzemedeki tekrar artık mıknatıslık kalmış olur. Akım pozitif alternansta 2. periyoduna başladığında eğri fa yolunu izler ve histerezis eğrisi meydana gelmiş olur [44,45].



Şekil 3.2. Manyetik histerezis eğrisi [46].

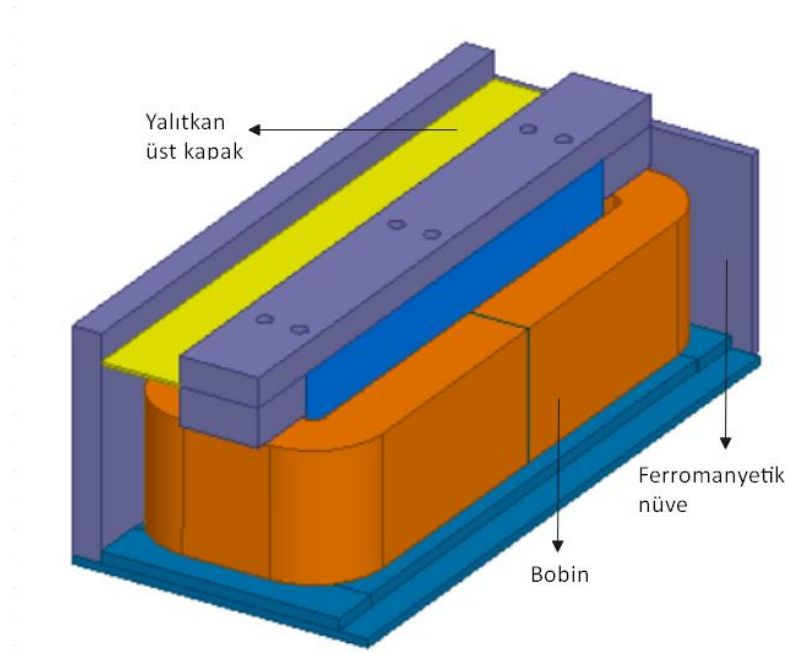
Histerezis eğrisi ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri hakkında bilgi verir [45]. Örneğin, bir malzemenin histerezis eğrisine bakılarak manyetik geçirgenliği, güç kaybı, doyuma ulaştığı manyetizasyon ve koersivitesi hakkında bilgiler edinilebilir.

## BÖLÜM 4

### ELEKTROMİKNATIS TASARIMI VE ANALİZİ

#### 4.1. ELEKTROMİKNATIS

Elektrik akımının etkisi altında kalarak mıknatıslık özelliği gösterebilen manyetik maddeler elektromıknatıs olarak adlandırılırlar. Elektromıknatıslar, demir bir nüve üzerine sarmal şekilde sarılan iletken akım geçirilmesiyle elde edilir [47]. Şekil 4.1’de bilgisayar destekli tasarım programında oluşturulmuş elektromıknatıs modeli verilmiştir.



Şekil 4.1. Elektromıknatıs.

Bobinden doğru akım geçirildiğinde etrafında manyetik bir alan oluşur. Oluşan bu manyetik alan bobinin sarıldığı, nüveyi dolaşarak nüvede bir mıknatıs özelliği meydana getirir. Elektromıknatıslarda nüve malzemesi olarak yumuşak demir veya aynı özelliklerde saclar kullanılır. Bobinden akım geçtikçe mıknatıslık özelliği devam

eder ve yakınındaki ferromanyetik maddeleri çeker. Elektromıknatısa uygulanan akım kesilirse nüve manyetik özelliğini kaybeder. Kalıcı mıknatıslara göre elektromıknatıslardan elde edilen manyetik alan daha büyük olabilmektedir [48].

## **4.2. İKİ KUTUPLU ELEKTROMİKNATIS**

### **4.2.1. Elektromıknatısın Kutupları**

Bütün mıknatıslar iki adet kutba sahiptir ve bunlar N ve S olarak gösterilirler. İki kutup aralarında manyetik kuvvet çizgilerini oluşturur. Dolayısıyla kutuplar arasında bir manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik akının yönü N kutbundan S kutbuna doğrudur [49]. Elektromıknatısta kutupların yönü iletken üzerinden geçen akım yönüne bağlı olarak değişmektedir. Manyetik alanın ve elektromıknatısın kutuplarının değiştirilmesi elektromıknatısın bağlandığı üreticinin kutuplarının değiştirilmesiyle mümkün olmaktadır [47]. Bobinin sarım sayısı ve akım şiddeti değiştirilerek elektromıknatısın çekim gücü değiştirilebilir. Bunun için Eşitlik 3.4'deki denklemden yararlanılabilir.

### **4.2.2. Elektromıknatısın Kullanıldığı Alanlar**

Elektromıknatıslar elektronik cihazların hoparlörlerinde, mikrofonlarda, buzdolabı ve çamaşır makinesinin motorlarında, elektrik motorları, alternatör, röle gibi araçların imalatında kullanılır. Ayrıca manyetik kontaktörler, röleler ve diğer elektromanyetik cihazlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. Bunların yanı sıra elektromıknatıslar, demir çelik sanayinde, metal ayıklama sistemlerinde, vinçlerde ve hidroelektrik santrallerde, hurda toplama yerlerinde kullanılmaktadır.

## **4.3. SONLU ELEMANLAR METODU**

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), karışık problemlerin daha basite dönüştürülerek kısa zamanda çözümlenebilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu metotta öncelikle çözüm bölgesi sonlu eleman adı verilen çok sayıda küçük ve birbirine bağlı olan alt bölgelere ayrılır. Daha sonra çözüme geçildiğinde bu küçük bölgeler düğüm

noktalarında birleştirilerek gerçeğe yakın sonuçlar bulunur. Elde edilen sonuç, genellikle tam doğru sonuç değildir. Bilgisayar programları ve matematiksel yöntemler yardımıyla sonlu elemanlar metodu kullanılarak problemlerde tatmin edici yaklaşıklıkta sonuçlara ulaşmak mümkündür [50].

#### **4.3.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Kullanım Alanları**

Sonlu elemanlar metodu ile herhangi bir problem için bilgisayar programının giriş verileri değiştirilerek problemin çözümü sunulabilmektedir. SEM, bu özelliği sayesinde özellikle yapısal mekanik problemler, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanların hesaplamaları vb. gibi birçok mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır [51].

SEM, elektrik makinalarının performans analizinde kullanılan bir metottur. Bu metot ile makinenin içinde veya herhangi bir yerinde hava boşluğu, akı yoğunluğu, makineye ait sargı endüktansları ve endüklenen tork gibi parametrelerin çok yüksek bir doğrulukla belirlenmesi sağlanır [52].

2B tasarım ve analizlerde sargı ve saçaklanma etkileri hesaba katılmazken, sınır koşulları kullanılarak simetrik geometrinin bir kısmı ile çalışmak yeterlidir. Geometrik yapısı simetrik olmayan elektrik makinelerinin 3B tasarım ve analizinde ise tüm yapının alınması zorunludur. Küçük makineler için 3B analizin 2B analizden elde edilen sonuçlara kıyasla daha doğru sonuçlar vermesi beklenir [53].

#### **4.3.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihçesi**

Bu metodun ismi yenilerde verilmiş olsa da sonlu elemanlar fikri yüzyıllar öncesinden gelmektedir [54]. İlk kez 1943'te Courant tarafından Sonlu elemanlar metoduna benzeyen bir yöntem ortaya konulmuştur. Courant, yöntemde üçgensel bölgelerdeki parçasal sürekli fonksiyonları tanımlamıştır. Günümüzde ise, 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Topp sonlu elemanlar metodunun bir uçağın analizinde kullanımını ele alarak perçin bağlantılı profil ile üçgensel iç gerilmeli tabaka şeklindeki sonlu elemanları kullanmışlardır [55].



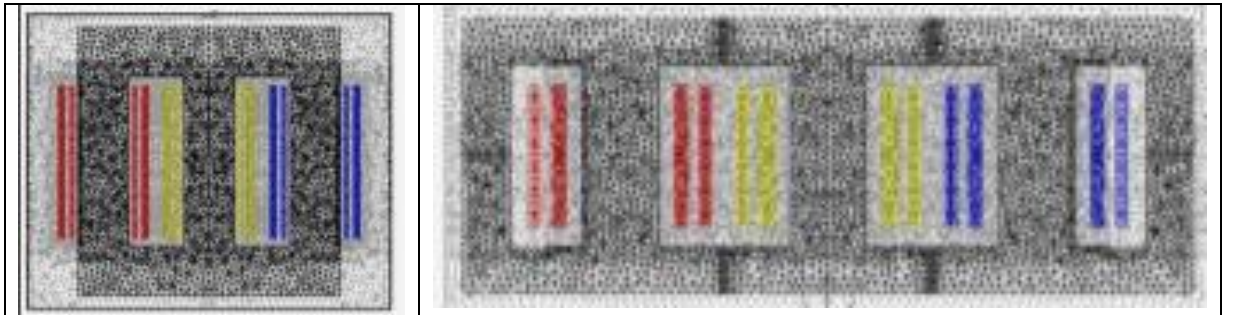
Günümüzde bilgisayarların gelişmesiyle çözümü zaman alan problemler bile kısa sürede ve gerçeğe çok yakın yaklaşık sonuçlarla çözülebilmektedir. Sonlu elemanlar paket program olarak 1970'lerde ortaya çıkmıştır. 1980'lerin sonlarında ise mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır [56].

SEM için kullanılan programlardan biri de ANSYS programıdır. ANSYS ile modelin analizi yapılırken, von mises gerilmesinin en yüksek değeri elde edilerek, gerilme yoğunluğu ve bulunduğu yerler de grafiksel olarak görülebilmektedir [57].

#### 4.4. ANSYS MAXWELL PROGRAMI

Ansys Maxwell, motorlar, aktüatörler, transformatörler, sabit mıknatıs, 2B ve 3B elektromanyetik cihaz tasarımları ve analizinde öne çıkan bir simülasyon programıdır. Program, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak zamanla değişen elektromanyetik veya elektrik alan problemlerini çözümlenebilmektedir. Ansys Maxwell programı, problemleri çözmek için uygun olan verimli ağı otomatik olarak oluşturur. Ansys'in otomatik ağ oluşturma işlemi meshing olarak adlandırılır. Bu işlem analiz sürecindeki karmaşıklığı ortadan kaldırarak verimi yüksek ve kolay kullanım sağlayan bir tasarım akışı sağlar [51,58].

Programın kullanım alanları oldukça geniştir ve buna örnek olarak bir transformatör analizi üzerinden modelin mesh yapısı görülmektedir. Analizde C.A. Charalambous ve arkadaşları, ulusal şebekeye bağlı trafo tiplerinin nüve yapısının ferrezonansa karşı duyarlılık ilişkisini sunmuşlardır. Şekil 4.4'te verilen görselde 3 bacak ve 5 bacak olarak iki transformatörün iki boyutlu sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir [59].

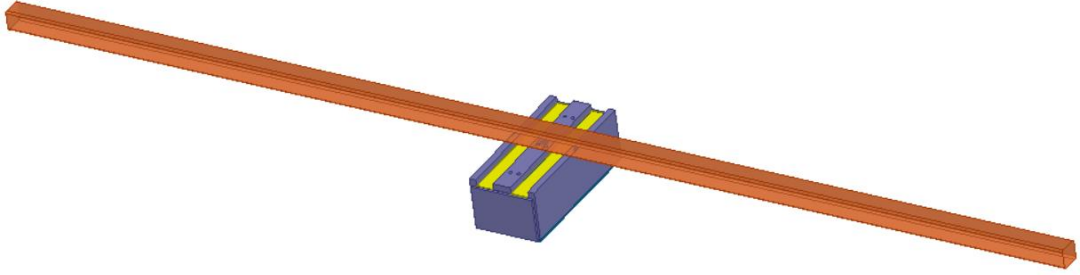


Şekil 4.2. 3 ve 5 bacaklı transformatör çekirdeğinin iki boyutlu modeli.

## 4.5. ELEKTROMİKNATIS MODELİ, TASARIM VE ANALİZLERİ

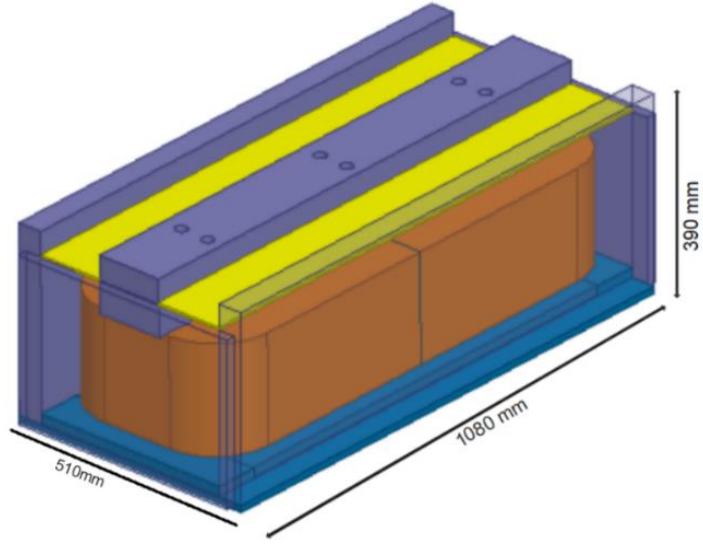
### 4.5.1. Elektromıknatısın 3B Tasarımı ve Manyetostatik Analizi

Çalışmanın bu kısmında, Şekil 4.3'te verilen kütüğün kaldırılması ve taşınması amacıyla iki kutuplu bir elektromıknatıs tasarımı yapılmıştır. Taşınması istenen kütük modeli  $150 \times 150 \times 8320$  mm boyutundadır. Öncelikle bir adet elektromıknatıs ile bu yükün hangi amper.sarım oranında kaldırılabilceği incelenmek istenmiştir.



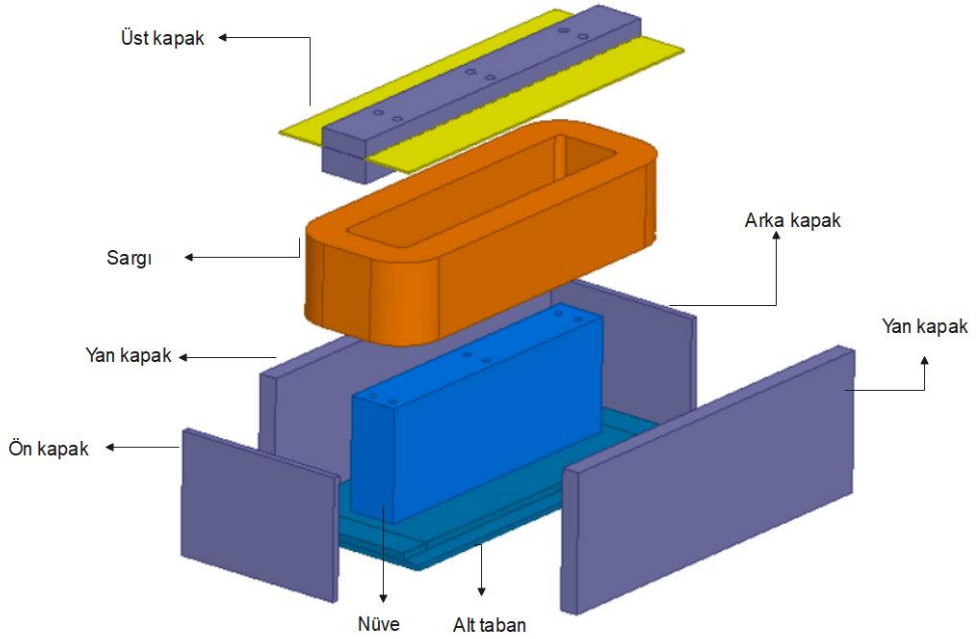
Şekil 4.3. Elektromıknatıs ve taşınmak istenen demir kütük.

Tasarlanan elektromıknatısın 3B modeli ve fiziksel ebatları Şekil 4.4'te görülmektedir. Elektromıknatısın yükü çekme kuvveti uygulanan akım ve sarım sayısı ile ayarlanabilmektedir. Bu sebeple öncelikle elektromıknatısın analitik hesaplamaları yapılarak gereken akım değeri ve sarım sayısı belirlenecektir. Elde edilen akım ve sarım sayısı analizde amper.sarım değeri olarak kullanılacak ve sonlu elamanlar yöntemi kullanılarak elektromıknatısın manyetostatik analizi yapılarak simülasyon sonuçları verilecektir.



Şekil 4.4. Elektromıknatısın 3B modeli.

Şekil 4.5'te elektromıknatısın detaylı görüntüsü bulunmaktadır. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri ve diğer parametreler Çizelge 4.1'de verildiği gibi elektromıknatısın nüve kısmında Steel\_1010 malzemesi, sargı kısmında ise 1 mm<sup>2</sup> kesitli bakır (Cu) iletkeni kullanılmıştır. Üst kapak olarak adlandırılan kısımda manyetik akı geçişi olmadığından yalıtkan bir malzeme olan grafit tercih edilmiştir. Alt taban kısmında yumuşak çelik malzemesi kullanılmıştır.

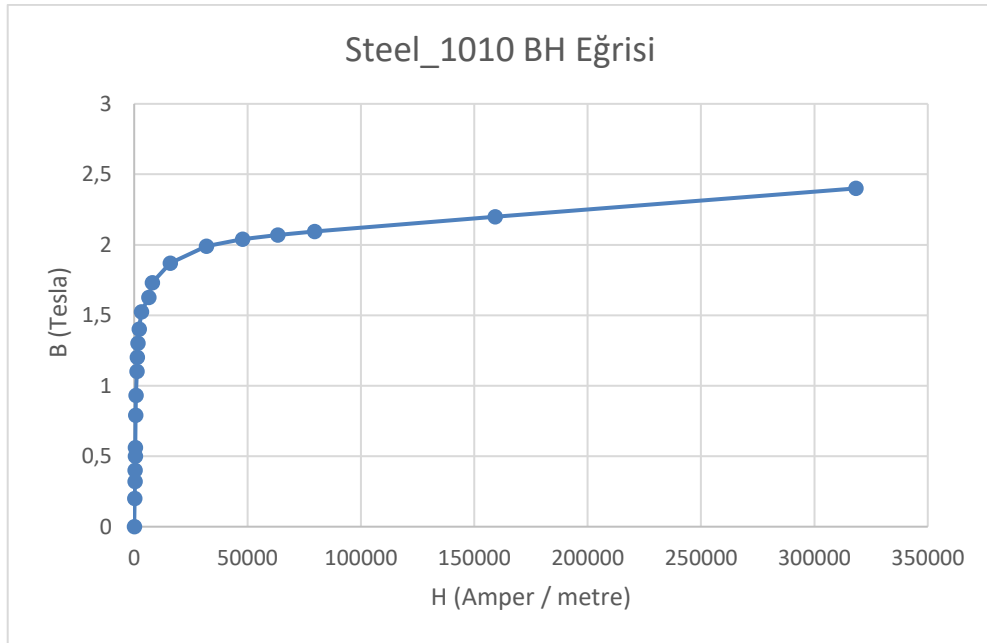


Şekil 4.5. Elektromıknatısın detaylı görüntüsü.

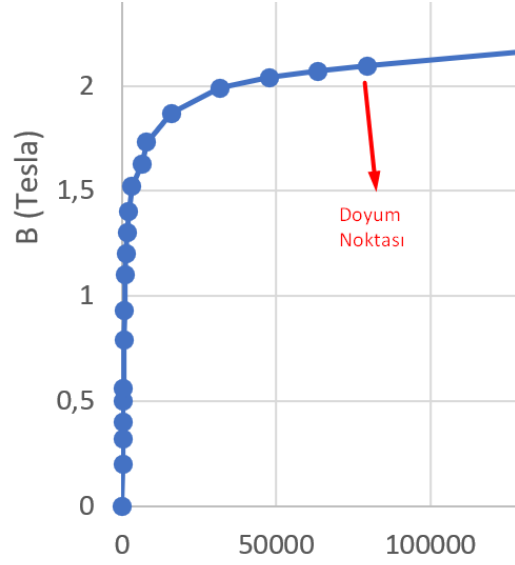
Çizelge 4.1. Kullanılan malzemeler ve analitik hesaplamada kullanılan parametreler.

Parametreler	Malzemeler	Ebatları
Nüve	Steel_1010	
Bobin	Bakır (Cu)	110 (sarım)
Bobin kesiti	Bakır (Cu)	1,5 (mm <sup>2</sup> )
$\mu_0$		$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
g		9,81 (m/s <sup>2</sup> )
J		4 (A/mm <sup>2</sup> )
I, Akım		4 (A)

Nüvede kullanılan malzemenin BH eğrisi Şekil 4.6’da verilmiştir. Manyetostatik analizler sonucundan elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları BH eğrisi dikkate alınarak yorumlanacaktır. Şekil 4.6. b’ ye bakıldığında nüve yaklaşık 2,2 Tesla değerinde doyuma ulaşmaktadır.



Şekil 4.6. a) Kullanılan Steel\_1010’un BH eğrisi.



Şekil 4.6. b) Genişletilmiş görüntü.

#### 4.5.1.1. Analitik Hesaplamalar

Taşınması hedeflenen yükler için analitik hesaplamalar yapılarak gerekli olan kuvvet değerleri elde edilmiştir. Kullanılan yüklerin malzeme özellikleri ve ebatları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Tasarımda kullanılan Steel\_1010 malzemesinin özkütlesi programda 7872 kg/m<sup>3</sup> olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 4.2. Kullanılan yüklerin özellikleri.

Yük	Malzeme	Özkütle, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ebat (mm)
Kütük	Steel_1010	7872	150×150×8320
Beam Blank	Steel_1010	7872	280× 360×8320
Beam Blank	Steel_1010	7872	400× 500×8320

Ebatları verilen kütüğün hacim değeri 0,1872 m<sup>3</sup> olarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.1’de verilen formül kullanılarak da yüklerin özgül ağırlığı 77,224 gr/cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. (Yerçekimi ivmesi, g=9,81 m/s<sup>2</sup> dir.)

$$\gamma = \rho g \quad (4.1)$$

Kütüğün kaldırılması için gereken kuvvet değeri analitik olarak hesaplanarak elektromıknatısın sarım sayısı ve akım değerleri belirlenmiştir. Eşitlik 4.2'den 1 kütüğü kaldırmak için gereken kuvvet değeri kütük ağırlığı ile yerçekimi ivmesinin çarpımından bulunmaktadır.

$$F = mg \quad (4.2)$$

Burada;

F; Çekim kuvvetini, (N)

m; Yükün kütleini, (kg)

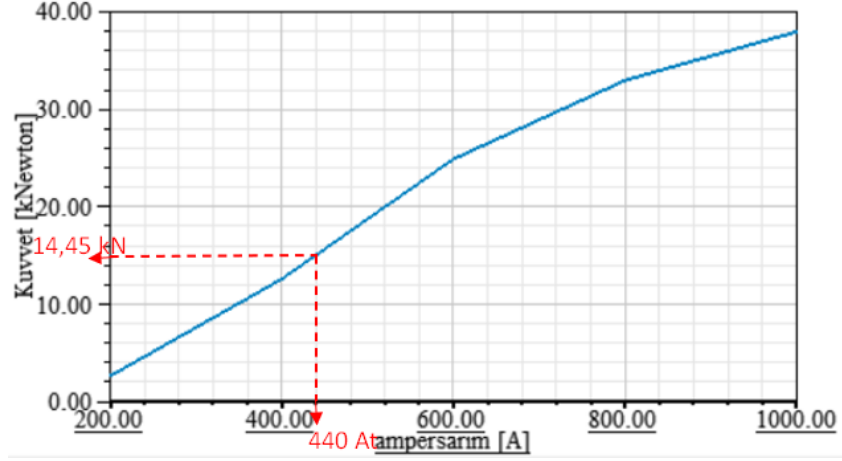
g; Yerçekimi ivmesini, (m/s<sup>2</sup>)

temsil etmektedir. Buradan 1 kütüğün kaldırılabilmesi için gereken kuvvet değeri 14456,0 N olarak hesaplanarak Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Kullanılan yüklerin hacim ve kuvvet hesabı.

Kütük Ebatları (mm)	Hacim (m <sup>3</sup> )	m (kg)	Gereken Kuvvet, F (N)
150×150×8320	0,1872	1473,6	14456,0 N
280× 360×8320	0,5495	4325,6	42434,1 N
400×500×8320	0,9304	7324,1	71849,0 N
1 m <sup>3</sup> Steel_1010: 7872 kg			

Analizde bu kütüğü tutabilmek için gereken kuvvet değeri parametrik analiz yapılarak Şekil 4.9'daki gibi bulunmuştur.

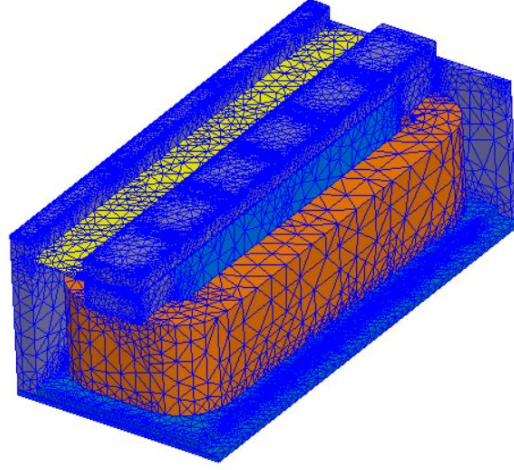


Şekil 4.7. Kütük amper.sarım değerinin bulunması.

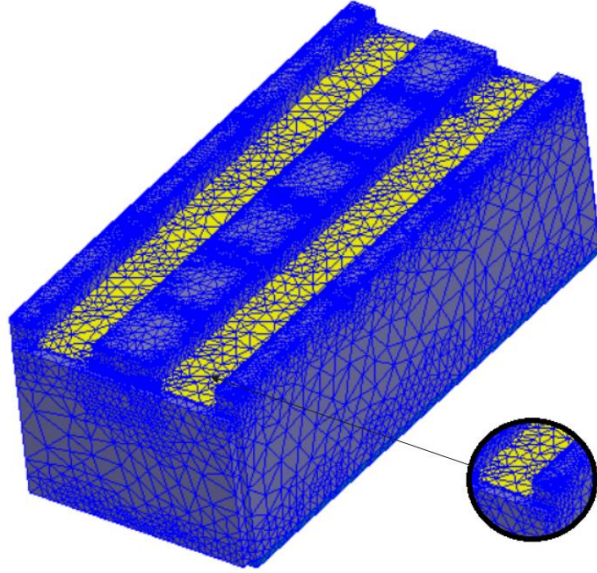
Buradan yola çıkarak her bir elektromıknatısa 440 At uyarım akımı verilmesi düşünülmüştür. 440 At uyarım için 1mm<sup>2</sup> kesitli bir iletken kullanılarak 110 adet sarım kullanılmıştır. Eşitlik 3.6'daki manyetomotor kuvveti formülünden akım değeri 4A uygulanmıştır.

#### 4.5.1.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

Çalışmada yük üzerinde oluşacak olan kaldırma kuvvetinin analizi için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Çözüm bölgeleri çok sayıda sonlu elemana ayrılarak sonuca gidilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki çalışmada tasarlanan elektromıknatısın ağ yapısı görülmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere keskin kenarlarda mesh daha fazla verilmiştir. Toplam mesh sayısı 764734' tür.



Şekil 4.8. Elektromıknatıs sargı mesh görüntüsü.



Şekil 4.9. Sonlu elemanlar modelindeki elemanlar ve düğüm noktaları.

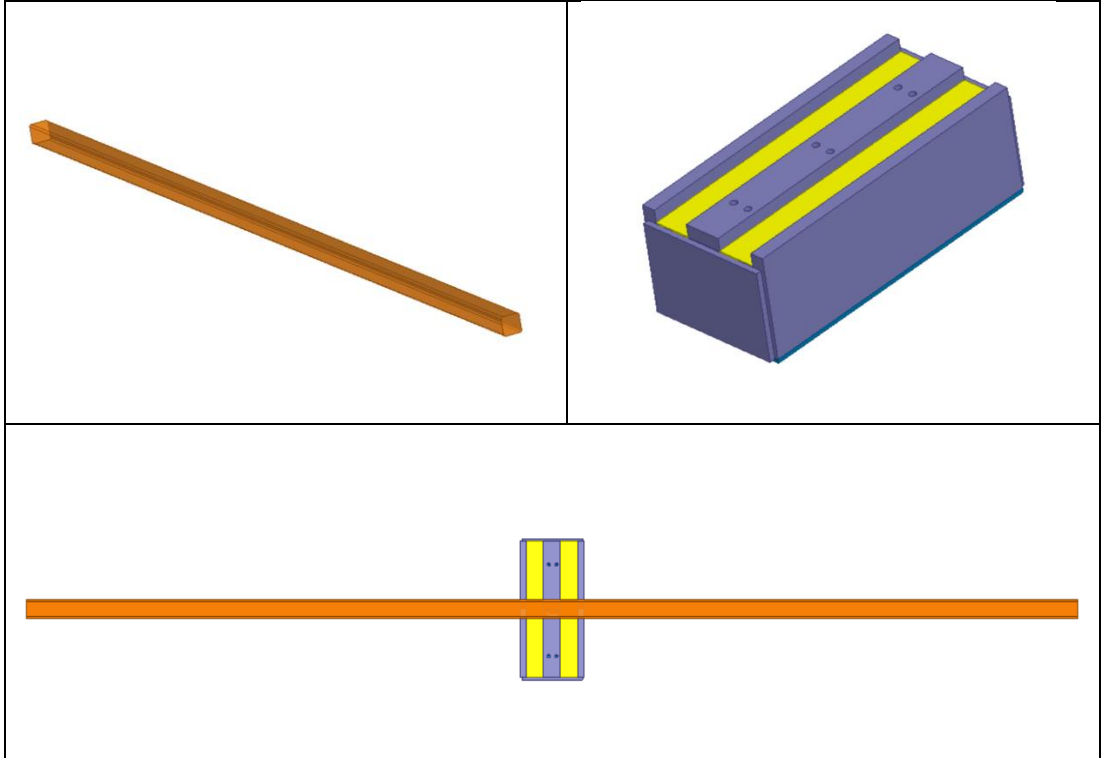
Yapılan analitik hesaplamaların ardından 1 kütüğü kaldırması hedeflenen iki kutuplu elektromıknatısın manyetostatik analizleri gerçekleştirilmiş olup simülasyon sonuçları kısmında verilmiştir. Analizlerde farklı yük sayıları ve modelleri kullanılarak farklı uyarım değerlerinde manyetostatik analiz sonuçları incelenmiştir.



#### 4.5.2. Simülasyon Sonuçları

##### 150 × 150×8320 mm Kütük

Sayfa 24’te verilen tabloda belirtildiği gibi 1 kütük 0,1872 m<sup>3</sup> hacime sahiptir. Programda 1 m<sup>3</sup> Steel\_1010 malzemesi 7872 kg olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla bir kütük 1473,6 kg olmaktadır. Buna göre bir kütüğü kaldırmak için  $1473,6 \times 9,81 = 14456$  N kuvvet gereklidir. ( $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> yerçekimi ivmesidir.) Şekil 4.10’da manyetostatik analizi yapılan modelin 3B görüntüsü verilmiştir.

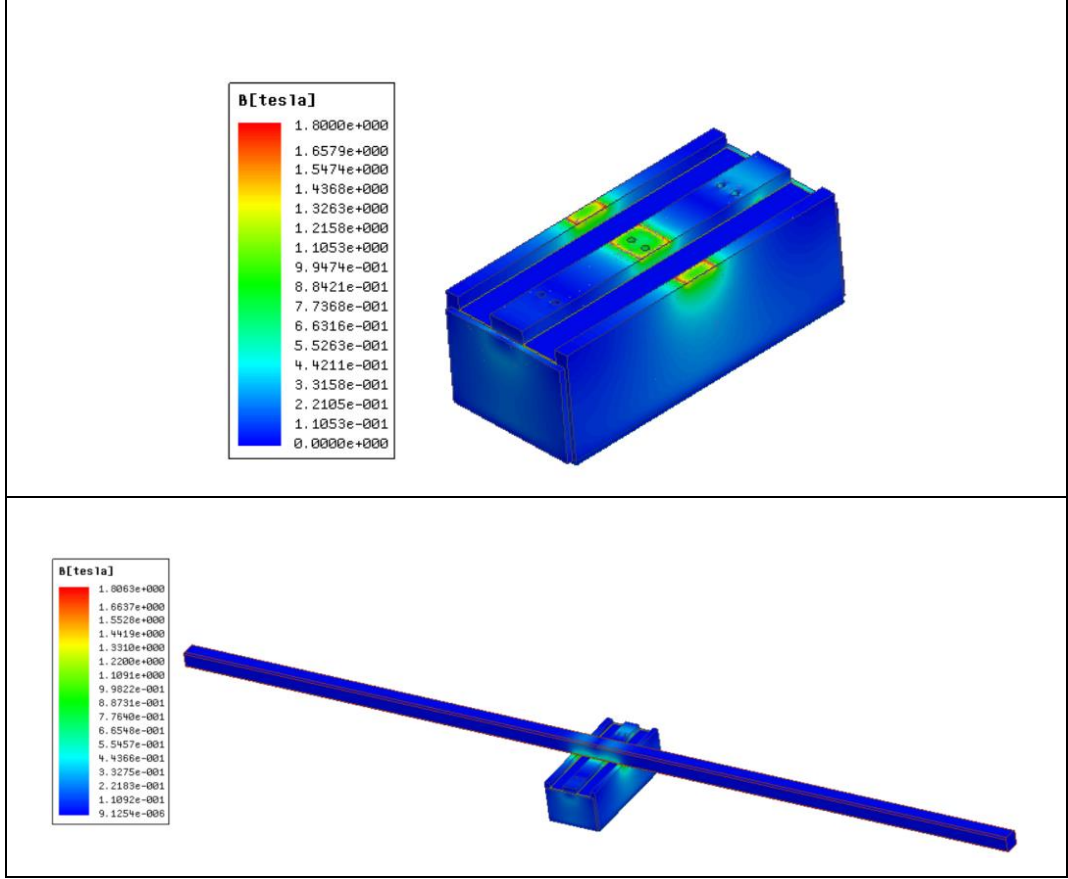


Şekil 4.10. 150×150×8320 mm boyutlu yük modeli.

##### 150 × 150×8320 mm Kütük Manyetostatik Analiz Sonucu

Tasarlanan modelin manyetostatik analizi yapılmış ve Şekil 4.11’deki manyetik akı yoğunlukları elde edilmiştir. Elde edilen manyetik akı dağılımları incelendiğinde manyetik akının yükün elektromıknatis ile temas ettiği bölgelerde yoğunlaştığı

görülmektedir. Daha önce verilen Steel\_1010 malzemesinin manyetik akı yoğunluğu dağılımını BH eğrisi dikkate alındığında nüve doyum bölgesine ulaşmamaktadır.



Şekil 4.11. 150×150×8320 mm boyutlu yük manyetik analiz sonucu.

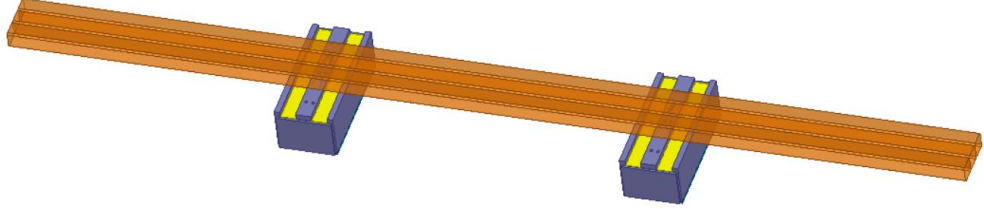
Çizelge 4.3'te farklı kütük sayıları için gereken kaldırma kuvvetleri verilmiştir. Manyetostatik analizler yapılarak sonuçlara etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.4. Kütük sayısına göre gereken kuvvetler.

Kütük Sayısı	Gereken Kuvvet (kN)
1 adet	14,45
3 adet	43,36
5 adet	72,28

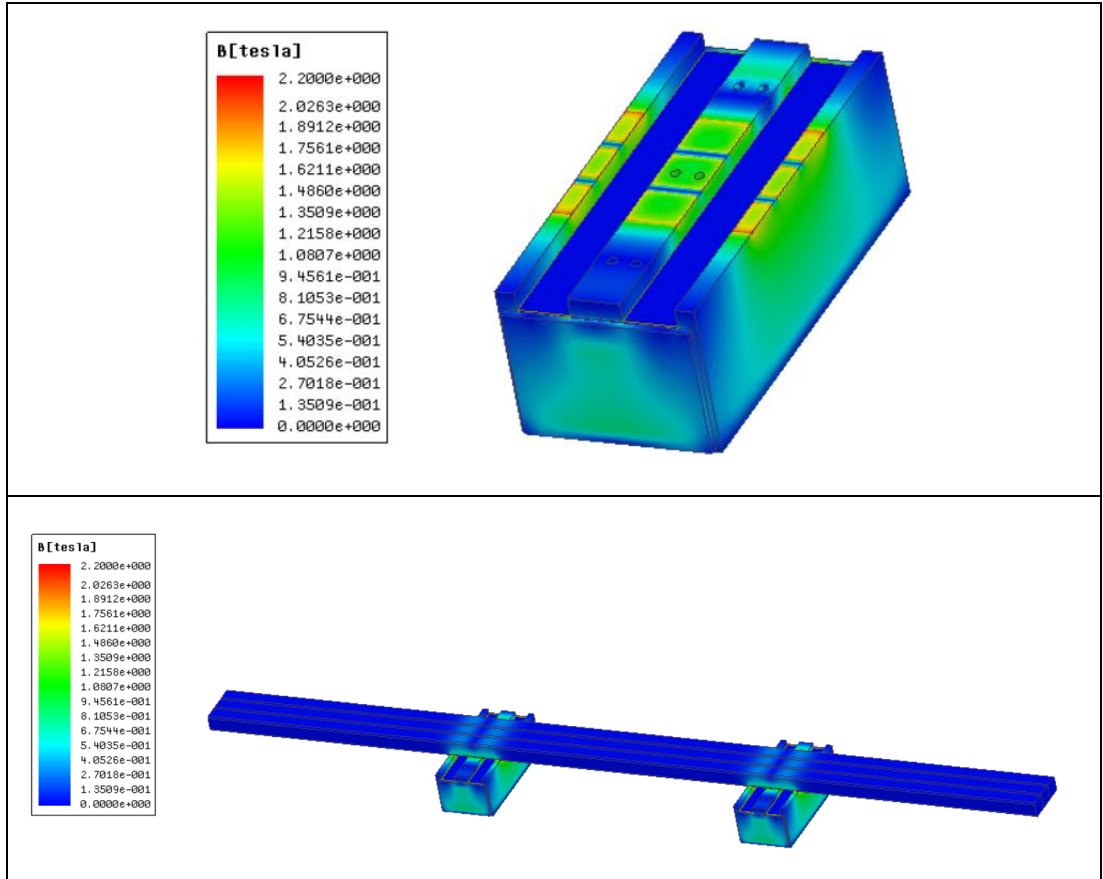
İki adet elektromıknatis kullanılarak ve farklı yük sayılarında manyetostatik analizler gerçekleştirilerek sonuçlar incelenmiştir. İki elektromıknatis ile yükün moment

dengeyi sağlanarak daha güvenilir taşıma sağlanmaktadır. Şekil 4.12’de farklı yük sayıları kullanılarak tasarlanan 3B model ve Şekil 4.13’te manyetik akı dağılımı verilmiştir.



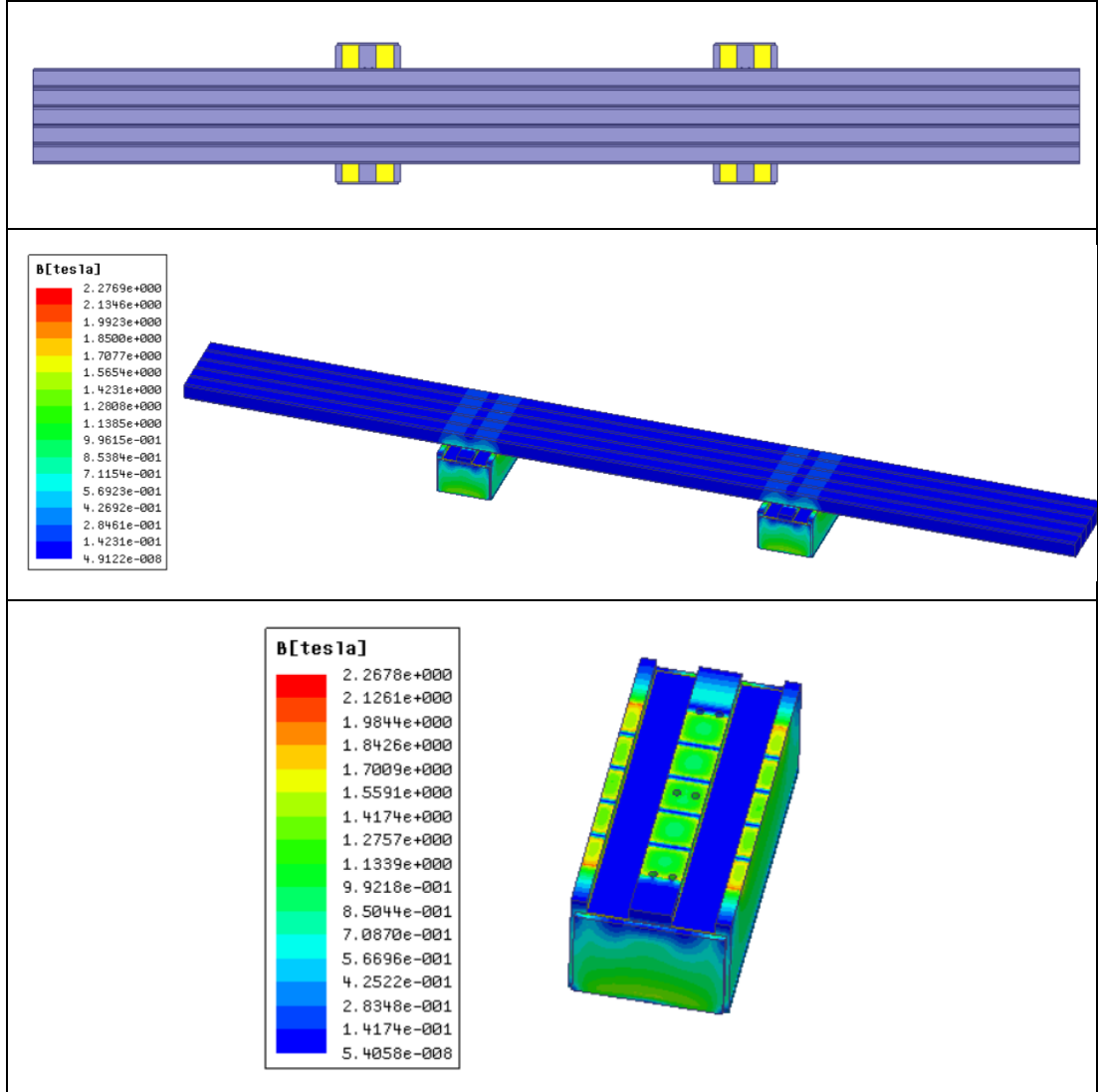
Şekil 4.12. 3 Kütük kullanılarak oluşturulan 3B model.

Bir adet yükün kaldırılması için gereken kuvvet değeri 14456 N olduğundan 3 adet yük için gereken kuvvet değeri 43368 N’dur. Yapılan parametrik analiz sonuçlarına bakılarak 1000 At uyartım verilerek manyetostatik analizi gerçekleştirilerek Şekil 4.13’te verilmiştir. 110 adet sarım sayısı kullanılarak 9,1 A akım uygulanmıştır.



Şekil 4.13. 3 Kütük ile manyetostatik akı dağılımı.

Şekil 4.14'te 5 adet kütük yükü kullanılarak yapılan manyetostatik analiz sonucu verilmiştir. 5 adet yükü kaldırmak için gereken kuvvet 72280 N olarak hesaplanmaktadır. Her bir elektromıknatısa 1500 At uyarım ile 13,6 A akım uygulanmıştır.



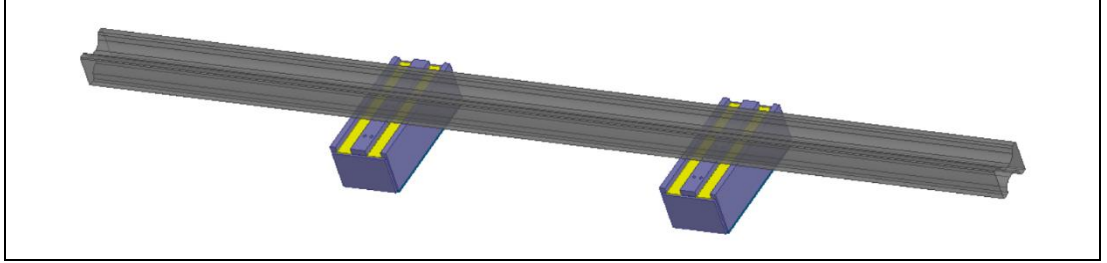
Şekil 4.14. 5 Kütük kullanılarak oluşturulan 3B model ve manyetostatik akı dağılımı.

Kullanılan kütük sayısı arttırıldığında amper.sarım oranının da arttığı görülmüştür. Kütüklerin elektromıknatısa temas ettiği noktalarda çekme kuvveti olduğundan manyetik akı yoğunlaşmıştır. Oluşan manyetik akı dağılımları incelendiğinde nüvenin

doyma ulaşmadığı görülmektedir. Amper.sarım değeri arttırılarak çekme kuvveti arttırılabilir.

### **280 × 360×8320 mm Beam Blank**

280×360×8320 mm boyutlu bir adet yük için hesaplanan hacim değeri 0,5495 m<sup>3</sup>'tür. Programda steel\_1010 malzemesinin özkütlesi 7872 kg olduğundan 1 adet beam blank yükü 4325,6 kg gelmektedir. 1 yükü kaldırmak için gereken kuvvet değeri  $4325,6 \times 9,81 = 42343,1$  N olmaktadır. ( $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> yerçekimi ivmesidir.) Şekil 4.15'te tasarlanan 3B model gösterilmektedir.

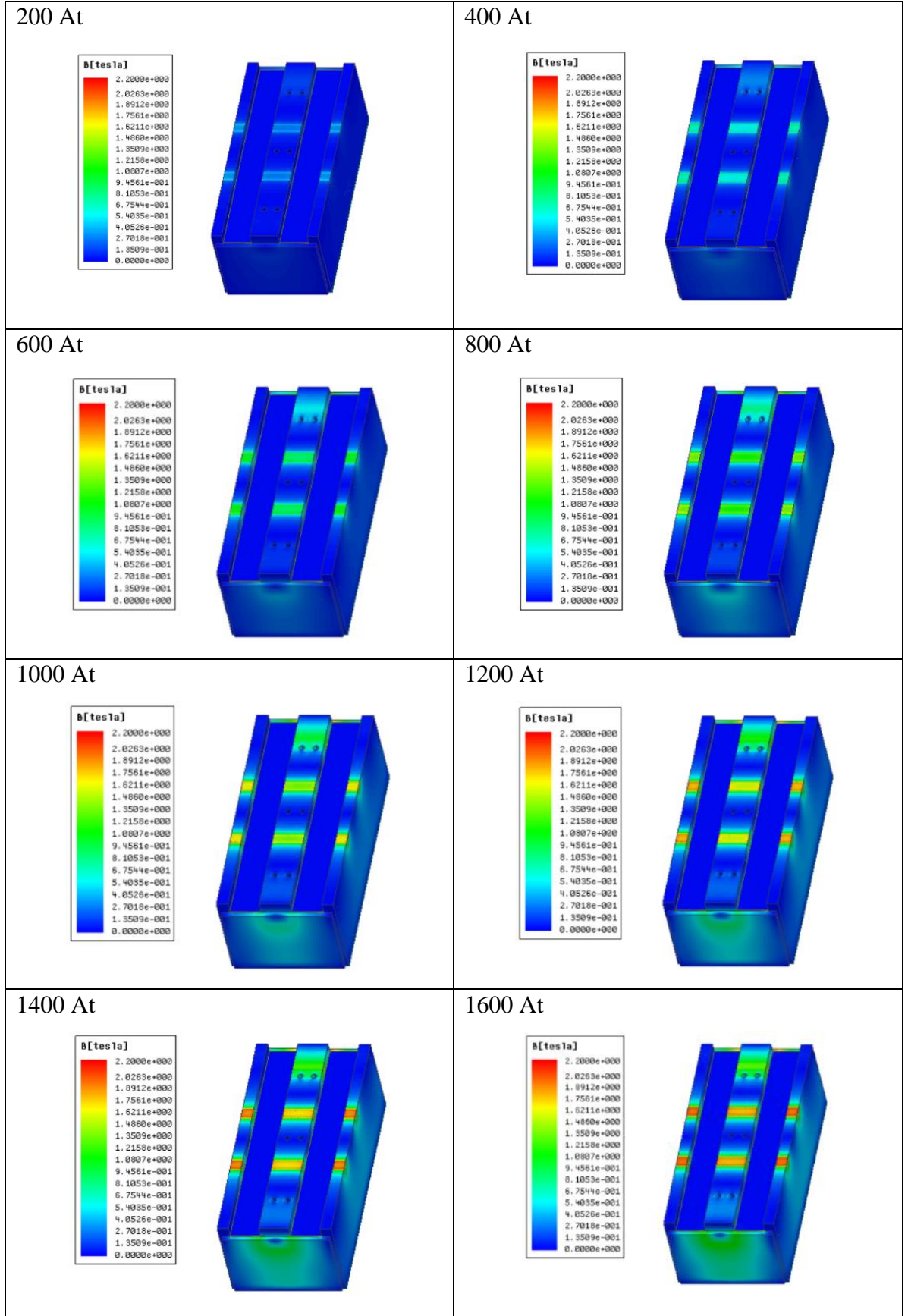


Şekil 4.15. 280 × 360×8320 mm boyutlu yükün 3B modeli.

Her bir Elektromıknatısa 1640 At uyarım verilerek 110 adet sarım için 14,9 A akım uygulanmıştır. İlk analizde uygulanan 4 A'lik akım değeri kullanılırsa sarım sayısı arttırılarak 410 adet sarım kullanılması gerekmektedir.

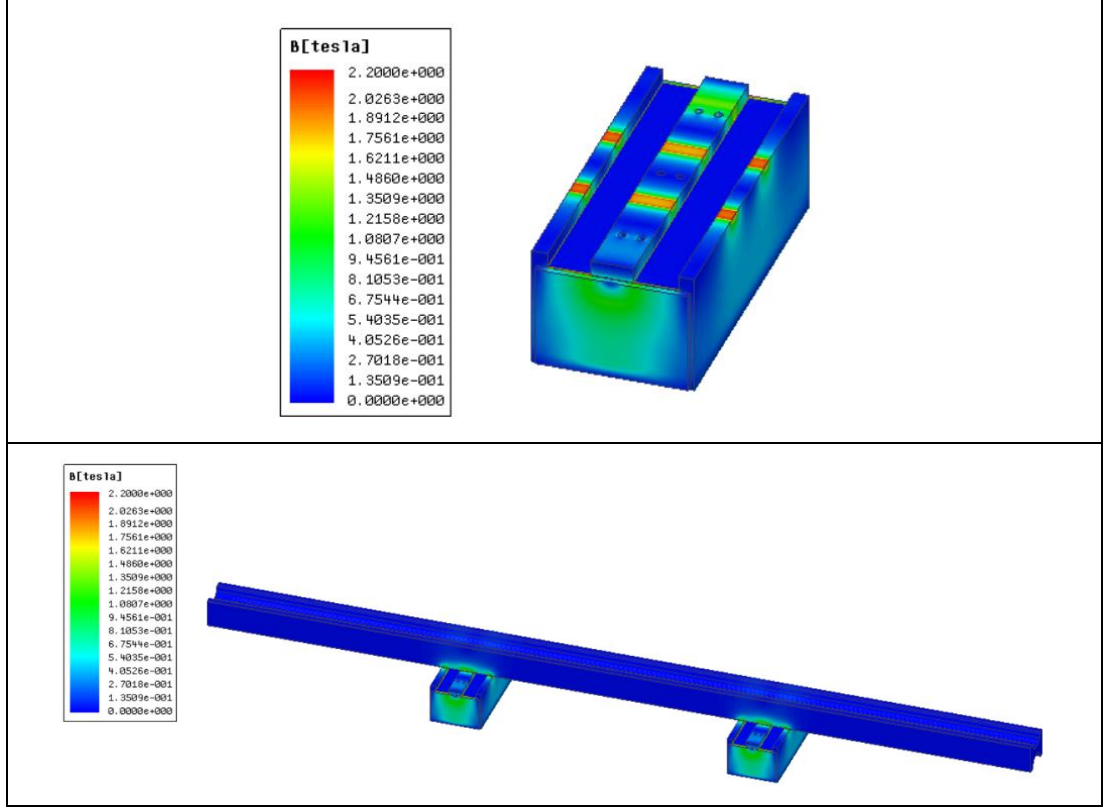
### **280 × 360×8320 Beam Blank Manyetostatik Analiz Sonucu**

Parametrik analizde uygulanan amper.sarım değerlerinin sonucunda elde edilen akı yoğunlukları Şekil 4.16'daki görsellerde görülmektedir. Amper.sarım değeri arttırıldıkça elektromıknatısın yük ile temas bölgelerinde akı yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16. Farklı amper.sarım değerlerinde elde edilen akı yoğunlukları.

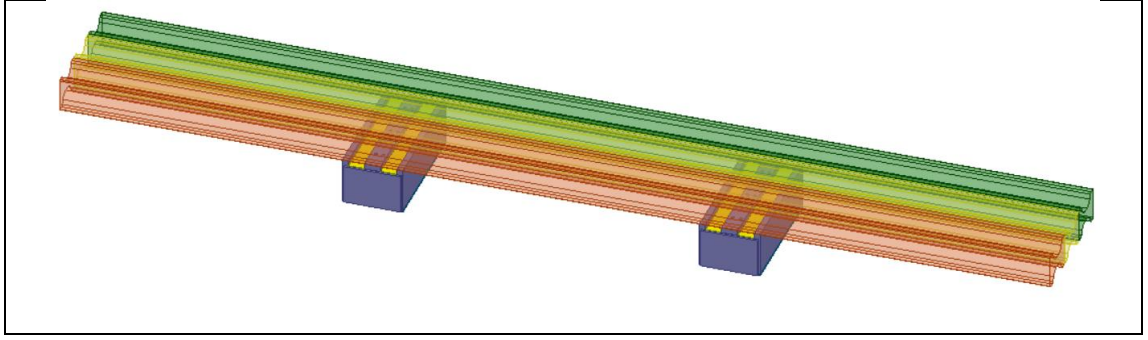
Şekil 4.17’de her bir elektromıknatısa 1640 At akım uygulandığında elde edilen manyetik akı yoğunluğu görülmektedir.



Şekil 4.17. 280 × 360×8320 mm boyutlu yükün manyetostatik akı dağılımı.

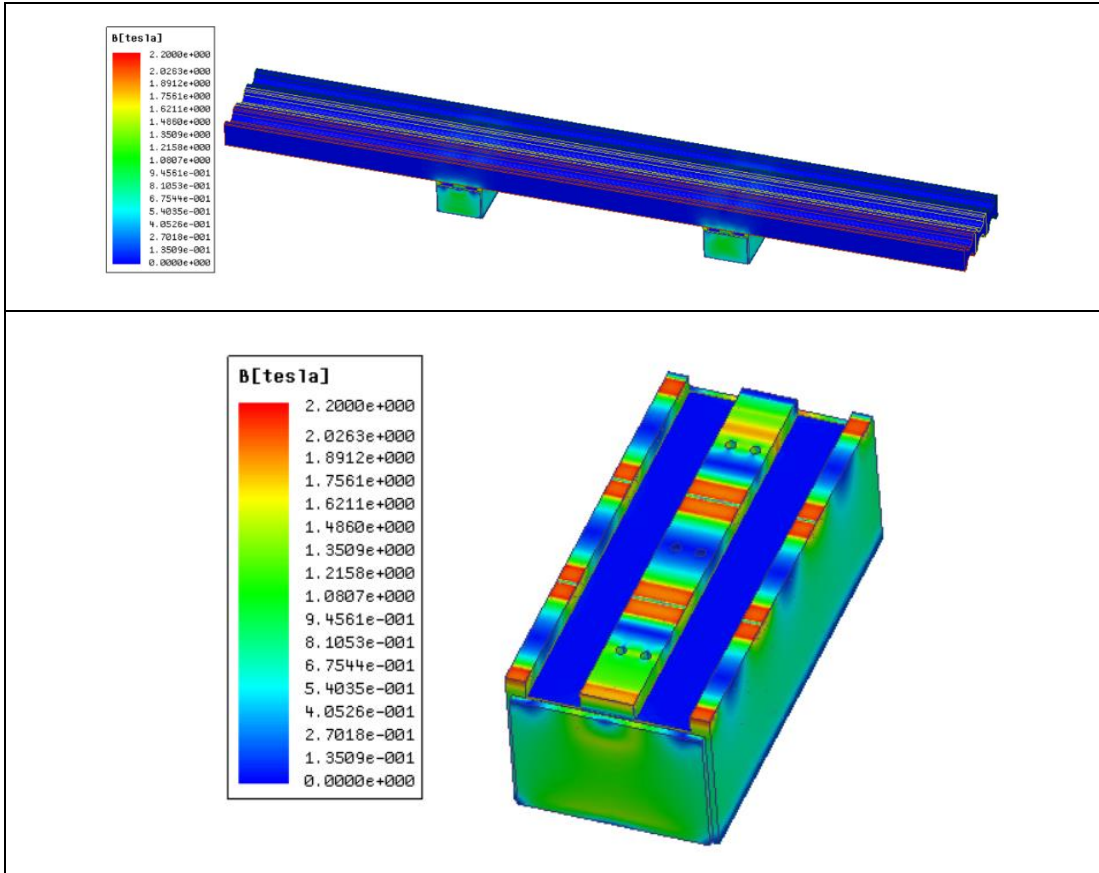
280×360×8320 mm boyutlu yük için yapılan analizler sonucunda elde edilen manyetik akı yoğunluklarından yola çıkarak elektromıknatısın yükü çektiği kısımlarda mıknatıslık artarak manyetik akının yoğunlaştığı söylenebilir. Bu nedenle manyetik alan elektromıknatıs ile demir yükün temas bölgelerinde toplanmıştır. Yük olmayan kısımlarda manyetik alan düşük olduğundan akı yoğunluğunun da oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Aynı analiz yük sayısı artırılarak gerçekleştirildiğinde elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Şekil 4.18’de 3 adet yük kullanılarak tasarlanan model verilmiştir. 3 adet yükü kaldırabilmek için gereken kuvvet değeri 127302,3 N olarak bulunmuştur.



Şekil 4.18. 3 Beam blank kullanılarak oluşturulan 3B model.

Her bir elektromıknatısa 2200 At uyarım akımı verilerek manyetostatik analizi yapılmıştır. 110 sarım kullanılarak 20 A akım uygulanmıştır. Daha yüksek sarım kullanılarak uygulanan akım değeri düşürülebilir. Sarım sayısı arttırılarak 440 adet kullanılırsa 5 A akım uygulanabilir. Elde edilen manyetik akı dağılımı Şekil 4.19'da verilmiştir.



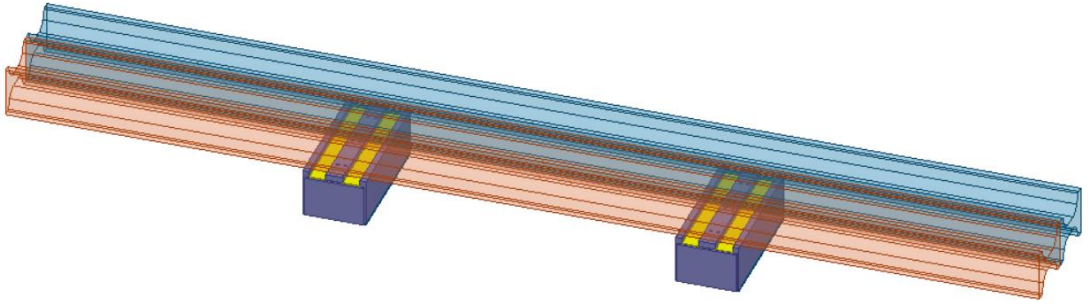
Şekil 4.19. 3 Beam blank ile manyetostatik akı dağılımı.



Kullanılan yükün temas yüzeyleri diğer yüklere kıyasla daha dar olduğundan temas noktalarında akı yoğunluğunun daha şiddetli olduğu görülmektedir.

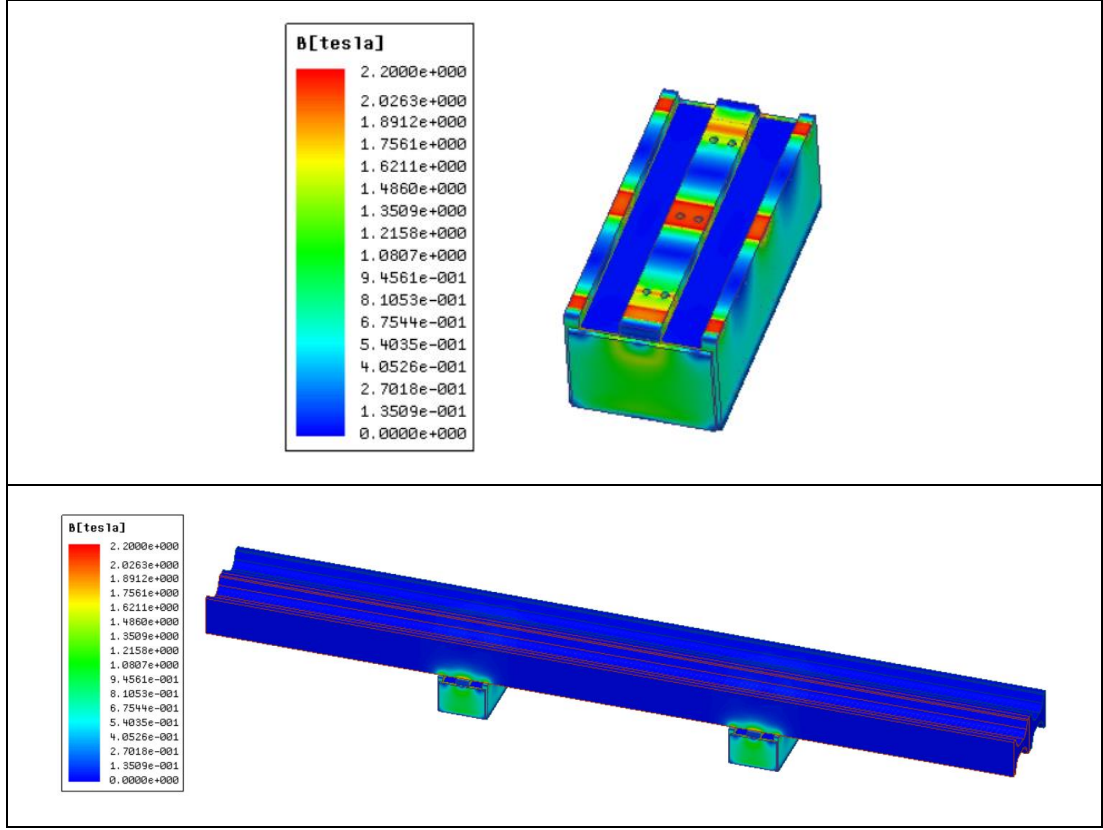
#### **400 × 500×8320 mm Beam Blank**

400×500×8320 mm boyutlu bir adet yük için hesaplanan hacim değeri 0,9304 m<sup>3</sup>'tür. Programda steel\_1010 malzemesinin özkütlesi 7872 kg olduğundan 1 adet yük 7324,1 kg gelmektedir. 1 yükü kaldırmak için gereken kuvvet değeri  $7324,1 \times 9,81 = 71849,4$  N olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.20'de tasarlanan 3B modelde 2 adet yük kaldırılmak istenmiştir. 2 yük için gereken kaldırma kuvveti 143.7 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.20. 400×500×8320 mm boyutlu 2 yükün 3B modeli.

Her bir Elektromıknatısa 3000 At uyartım ile 15 A uygulanarak sarım sayısının 200 adet yapılması düşünülmüştür. 110 adet sarım kullanılırsa 27,7 A akım uygulanacaktır. Şekil 4.23'te elde edilen manyetik akı dağılımları verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi kırmızı olarak görünen yükün temas noktalarında elde edilen akı yoğunluğu daha fazladır.



Şekil 4.21. 400×500×8320 mm boyutlu 2 yükün manyetostatik akı dağılımı.

Analiz sonuçları genel olarak incelendiğinde; manyetize edilen elektromıknatıs üzerinden akan manyetik akı nüve üzerinden akmaktadır. Elektromıknatısın demir kütüğü çekmesiyle ortaya çıkan manyetik alan artmaktadır. Elektromıknatısın ferromanyetik maddeyi çektiği yerlerde relüktans düştüğünden manyetik akı yoğunluğu artmaktadır. Manyetik akı yoğunluğu arttığından dolayı yük ile elektromıknatısın temas bölgelerinde daha fazla manyetizasyon yani mıknatıslık elde edilmiştir. Elektromıknatısın diğer kısımlarında herhangi bir ferromanyetik malzeme ile etkileşme olmadığından manyetik alan dolayısıyla manyetik akı oldukça düşük çıkmaktadır. Manyetik alan çekme kuvvetinin gerçekleştiği kısımlarda yoğunlaşmaktadır. Nüve malzemesinin BH karakteristiğinden yola çıkarak manyetik akı dağılımları incelendiğinde nüvenin doyuma ulaşmadığı görülmektedir. Uygulanan akım değerleri yapılan tasarımlar için örnek teşkil etmektedir. Farklı amper.sarım değerlerinde daha büyük yükler için de taşıma yapılması mümkündür. Bu elektromıknatıs için daha düşük akımla yüksek sarım kullanılarak da analizler yapılabilir.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında demir çelik endüstrisinde demir kütüklerin kaldırılması ve bir yerden bir yere taşınması işlemlerinde kullanılabilecek iki kutuplu elektromıknatıs tasarımı yapılarak manyetostatik analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımda kullanılan malzemeler belirlenerek özellikleri verilmiştir. Kullanılan nüve malzemesinin BH eğrisi verilerek karakteristik özellikleri incelenmiştir. Taşınması istenilen yüke göre uygun amper.sarım değerinde doyum bölgesine ulaşmadan taşıma sağlanmak istenmiştir Elektromıknatısın 3B modelleri Ansys Maxwell programı aracılığı ile tasarlanarak modeller üzerinde sonlu elamanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada 4 farklı yük modeli üzerinde manyetostatik analizler gerçekleştirilmiştir. Boyutları verilen yükleri kaldırabilmek için gereken analitik hesaplamalar yapılmış ve istenilen kaldırma yükü dikkate alınarak amper.sarım değerleri bulunmuştur. Yapılan analitik hesaplamalardan bir adet kütük yükünün kaldırılması için gereken kuvvet değeri 14,45 kN, bir adet beam blank yükünün kaldırılması için gereken kuvvet 42,4 kN ve bir adet bloom yükünün kaldırılması için gereken kuvvet değeri 60,08 kN olarak bulunmuştur. Kullanılan yük sayısına göre gereken kuvvetler hesaplanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım programında yapılan parametrik analiz sonuçlarından bu kuvvet değerlerini sağlayan amper.sarım oranları belirlenerek bobinde kullanılan sarım sayısı ve uygulanan akım değerlerinin optimumu sağlanmıştır. Kullanılan yük sayıları arttırılarak da farklı uyarım noktalarında analizler yapılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Elektromıknatısın manyetostatik analizlerinin yapılarak manyetik akı dağılımlarının elde edildiği bu çalışma sonucunda;

1. Kullanılan yükün modelinin, boyutunun ve sayısının uygulanan amper.sarım değerini etkilediği görülmüştür. Kullanılan yük sayısının artırılmasıyla uygulanan amper.sarım değeri de artmıştır.
2. Yüklerin elektromıknatısa temas yüzeylerinin de bu amper.sarım oranını etkilediği farkedilmiştir. Temas yüzeyi daha dar olan yüklerde gereken kaldırma kuvveti daha fazla olduğundan amper.sarım oranının arttığı gözlemlenmiştir.
3. Elektromıknatısın kütükler ile temas ettiği bölgelerde manyetik akının yoğunlaştığı diğer kısımlarda manyetik akının oldukça düşük çıktığı görülmüştür. Bunun nedeninin, elektromıknatısın ferromanyetik malzeme olan demir yüklere çekme kuvveti uyguladığı kısımlarda relüktansın düşmesinden kaynaklı olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla bu kısımlarda manyetik alan arttığından akı yoğunluğunun da arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
4. Nüvede kullanılan malzemenin BH karakteristiği dikkate alınarak analizlerden elde edilen maksimum akı yoğunlukları incelendiğinde nüve doyumuna ulaşmadan çekme kuvvetinin sağlandığı görülmüştür.

Literatürde bu konuyu kapsayan bir çalışmaya rastlanmadığından yapılan bu tez çalışmasının yeni ihtiyaçlara uygun elektromıknatıs tasarımı uygulamalarında literatüre kaynak sağlayacağı düşünülmüştür. Çalışmanın bilgisayar ortamında tasarım ve optimizasyonunun yapılması zamandan ve malzemedan tasarruf edilmesini sağlamıştır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak elektromıknatısın tasarımına ilişkin bu çalışmada araştırmacılar için eğitici bilgiler sunulmuştur. Bu çalışma sayesinde gerçek tasarım kriterleri kullanılarak elektromıknatıs tasarımı yapılabilecektir ve üretimi yapılacak elektromıknatısların tasarımı konusunda da örnek teşkil edebileceği öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. H.F. Ertuğrul, K. Erkan ve H. Üvet, “4 Kutuplu Karma Elektromıknatısın 3 Serbestlik Derecesinde Manyetik Yastıklama Kontrolü”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, c. 31, sayı. 3, ss. 0-0, (2016).
2. Özüpak Y., Mamiş M.S., “Dağıtım Transformatörlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Elektromanyetik Alan Analizi”, **Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi**, 4(1): 21-31, (2019).
3. Özüpak Y., Mamiş M.S., “Kısa Devre Durumunda Güç Trafosunda Meydana Gelen Elektromanyetik Kuvvetlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi”, **Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 10-22 (2019).
4. Aydın M., “Özel Uygulamalar İçin DC ve AC Sürekli Mıknatıslı Motorların Optimum Elektromanyetik Tasarımı”, **Elektrik Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Sergisi**, (2008).
5. Bayhan S., Garip İ., Beşirli M., “Mikrodenetleyici Tabanlı Fındık Taşıma Bandı Tasarımı ve Uygulaması”, **Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2010)**, (2010).
6. Balcı S., “DA-DA Dönüştürücü Devreleri İçin Çeşitli İndüktör Nüve Şekillerinin Elektromanyetik ve Mekanik Etkileri Üzerine Karşılaştırmalı Bir Benzetim”, **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, c.7, sayı.3, ss.1130-1139, (2019).
7. Çeçen M., Gümüş B., “Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanarak Farklı Tip Sargılar İçin Güç Transformatörünün 2B Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması” **DÜMF Mühendislik Dergisi**, 9:2, 701-712 (2018).
8. Minaz M.R., Yıldız K., “Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Fırçasız Doğru Akım Motorunun (BLDC) Kısa Devre Arıza Analizi”, **DÜMF Mühendislik Dergisi**, 12:1, 1-21, (2021).
9. Özüpak Y., “Farklı Nüve Malzemelerinin Transformatörün Verimi Üzerindeki Etkilerinin Analizi”, **Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, DUFED, 10 (1), 59-72, (2021).
10. Aslan B., Balcı S., “Sonlu Elemanlar Analizi ile IPM Mil Motor Performans Analizi Üzerine Karşılaştırmalı Bir Benzetim Çalışması”, **Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 2(2), 81-90, (2021).

11. Oğuz K., “Çift Taraflı Hava Çekirdekli Sabit Miknatıslı Lineer Servo Motor Tasarımı ve Uygulaması”, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, (2021).
12. Dalcalı A., Özbay H., Öncü S., “İndüksiyon Isıtmada Çalışma Frekansının Isıtma Derinliğine Etkisi”, **Mühendislik Bilimleri ve Araştırma Dergisi**, 2(1), 43-49, (2020).
13. Dolan A.I., “Optimization of DC Electromagnet Using Design of Experiments and FEM”, **International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)**, pp. 1-6, (2016).
14. I.Kostov, S.Guninski, “Determination of control sensor position in a clapper type electromagnet using FEM”, **2017 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)**, pp. 207-210, (2017).
15. P.Di Barba, P. Navarra, A. Savini and R. Sikora, “Optimum design of iron-core electromagnets”, in **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 26, no.2, pp.646-649, (1990).
16. Y.Kawase, O.Miyatani, T.Yamaguchi and S.Ito, “Numerical analysis of dynamic characteristics of electromagnets using 3-D finite element method with edge elements”, in **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 30, no. 5, pp. 3248-3251, (1994).
17. Wenzhi F.M., Li Chunguo and Liu G.S., “A study on quasiconstant force electromagnet”, **The 4<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, IPERC 2004**, pp.310-315 Vol.1. (2004).
18. Y.Kawase, T.Yamaguchi, K.Iwashita, T.Kobayashi and K.Suzuki, “3-D finite element analysis of dynamic characteristics of electromagnet with permanent magnets”, in **IEEE Transactions on Magnetics**, vol.42, no.4, pp. 1339-1342, (2006).
19. Jaewon Lim, C. Kim, J. Lee, H. Han and Doh-Young Park, “Design of magnetic levitation electromagnet for High Speed Maglev train”, **2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, pp. 1975-1977, (2013).
20. Y. Bakhvalov, V.Grechikhin, O. Kravchenko and a.Yufanova, “Optimal design of shell-type electromagnets of XY-coordinate electric actuator”, **2016 IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)**, PP. 1-4, doi:10.1109/ICPDS.2016.7756715, (2016).
21. W.Li, J.Fang, “3D Finite Element Analysis and Optimization of HTS Suspension Electromagnet”, **2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)**, pp.1-2, (2020).

22. Vozmilov A.G., Endokimov A.A., Charykov V.I., “Simulation of Semiconductor Converter for Electromagnetic Separator”, **2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)**, s. 459-463, (2020).
23. Makarichev Y.A., Ivannikov Y.N., Reduction of Magnetic Loss of Active Electromagnetic Suspension”, **2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)**, pp. 648-653, (2021).
24. Thango B.A., Jordaan J.A. and Nnachi A.F., “Analysis of Stray Losses in Transformers using Finite Element Method Modelling”, **2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica**, pp. 1-5, (2021).
25. Gerasimenko A.A., Li H., Korchagin V.O., Peng C., Wang X. and Deng Z., “Design Optimization of the Electromagnetic Turnout by Using a Compensation Coil”, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol. **31** no. **8**, pp. 1-4, (2021).
26. Sterjovski I., Arapinoski B., Atanasovski M. and Cesekovska V., “Analysis of Electromagnetic Characteristics of Asynchronous Induction Machine”, **2020 55<sup>th</sup> International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)**, pp. 137-140, (2020).
27. Kariganaur A.K., Kumar H., Arun M., “Effect of magnetic permeability, shearing length, and shear gap on magnetic flux density of the magnetorheological damper through finite element analysis”, **Materials Today: Proceedings**, 39, 1613-1619, (2021).
28. Çelik M.Z., “Yüksek Gerilim Tesislerinde Yapılan Canlı Bakım Çalışmalarında Elektromanyetik Alan Seviyeleri ve Değerlendirilmesi”, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 53-54, (2019).
29. Özüpak Y., “Transformatörlerin Elektromanyetik Alan ve Isıl Analizlerinin Sonlu Elemanlar Kullanılarak Gerçekleştirilmesi”, **İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, Malatya, 36, (2020).
30. Tanel Z., “Manyetizma Konularının Lisans Düzeyindeki Öğretiminde, Geleneksel Öğretim Yöntemi İle İşbirlikli Öğrenme Yönteminin Etkilerinin Karşılaştırılması”, **Dokuz Eylül Üniversitesi Eğitim Bilimleri Entitüsü**, Doktora Tezi, İzmir, (2006).
31. İdemem M., “Elektromagnetik Alan Teorisinin Temelleri”, İstanbul, 103 (2004).
32. Uçar S., “Maxwell’in Alan Denklemleri Üzerine Bir Değerlendirme”, **Felsefe Arkivi-Archives of Philosophy**, 51:261-270, (2019).
33. Gürdal O., “Elektromanyetik Alan Teorisi” **Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları**, Bursa, 530-537 (2017).

34. Yıldırım S. ve Tantaş K., “Sınır Elemanları Yöntemiyle İki Boyutlu Manyetik Alan Analizi” **Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi**, Elazığ, (2005).
35. Ocak C., “Elektrikli Araçlar İçin Üç Kademeli Yeni Bir Fırçasız DA Motoru Tasarımı , Analizi ve Uygulaması, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, 10-11, Ankara, (2013).
36. Wei H., Zhang Z., Hussain G., Zhou L., Li Q. Ostrikov K., “ Techniques to enhance magnetic permeability in microwave absorbing materials”, **Applied Materials Today**, 100596 19 (2020).
37. Diken S., “Co90Fe10 İnce Filmlerin Manyetik ve Yapısal Özelliklerine Altın Alt Tabaka Etkisi”, **Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Kilis, 8-10, (2013).
38. Atkinson D., “Physical Principles of Magnetic Materials, Short Course Notes”, Wolfson Centre For Magnetics Technology, **Cardiff School of Engineering University of Wales**, (1996).
39. Eşiyok M., “FeCl/Cu Süperörgülerin DC Püskürtme Metoduyla Hazırlanması, Manyetik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi”, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 5-8, (2011).
40. Özel F., “Solvotermal Yöntemle Elde Edilen Demir Oleat Kullanarak Süperparamanyetik Demir Oksit Nanoparçacıklarının Sentezi ve Karakterizasyonu”, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 17-20, (2009).
41. Çaylak O., “Ferromanyetik Amorf Tellerde Yüzeyin Kimyasal Malzemeler İle Kaplanması Çok Büyük Manyetik Empedansa Etkisinin İncelenmesi” **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, Bursa, **6-7**, (2016).
42. Çölmekçi S., “Ni/Cu Çok Katmanlı İnce Filmlerin Püskürtme Tekniğiyle Üretilmesi ve Karakterizasyonu” **Balıkesir Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 14-17, (2016).
43. Kaya B., “ Püskürtme Metoduyla Üretilen FeCr Alaşım İnce Filmlerin Yapısal ve Manyetik Özellikleri Üzerine Biriktirme ORanı ve Döner Alt Tabaka Hızının Etkilerinin İncelenmesi”, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 8-11, (2017).
44. Demir A. “Tek Saç Testi (Single Sheet Tester-SST) Yöntemi İle Nüve Malzemelerin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi”, **Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak, 4-5 (2012).
45. Hacıİsmailoğlu M.C., “Nano-kristal Toroid Manyetik Çekirdeklerde Histerezis Eğrisinin Modellenmesi”, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, Bursa, 11, (2011).



46. Küçük F., “Magnetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi ve Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak, 12 (2002).
47. Yüksek M., “Manyetik Askı Sisteminin Tasarımı ve Kontrolü”, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 23-24 (2011).
48. Bağatırlar A.G., “Manyetik Alan Kullanılarak Isı Elde Edilmesi”, **Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Çorum, 5, (2016).
49. Şenol E., “Klasik ve Modern Kontrol Metotların Performansını Karşılaştıran Gerçek Zamanlı Deney Düzenegi Tasarımı”, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 24, (2020).
50. Çil A., “Yürüyen Merdiven Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Metodu İle Analizi Ve Optimizasyonu”, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 13, (2002).
51. Teke H.İ., “Güç Transformatörlerinin Modellenmesi ve Elektromanyetik Alan analizlerinin Gerçekleştirilmesi”, **İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Malatya, 36-37, (2019).
52. Sarac V., Stefanov G., “Calculation of Electromagnetic Fields in Electrical Machines using Finite Elements Method” **University Goce Delcev Electrotechnical Faculty**, Int. J. Eng. Ind, 26(1) pp. 21-29, (2011).
53. Dalcı A., Akbaba M., “Comparison of 2D and 3D magnetic field analysis of single-phase shaded pole induction motors”, **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 19(1), pp. 1-7, (2016).
54. Rao S.S., “The Finite Element Method in Engineering Second Edition”, **Pergamon Press**, Oxford.
55. Koç S., “Asansör Kılavuz Ray Konsollarının Gerilme Analizi”, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 44-45, (2009).
56. Evren E.E., “Kiriş Elemanlardan Oluşan Bir Yapının Sonlu Eleman Analizi”, **İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek lisans Tezi, İstanbul, (2011).
57. Güler M.S. ve Şen S., “Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler”, **Ordu Üniv.Bil.Tek.Der.**, Cilt:5, Sayı:1, (2015).
58. Çoramık M., “Örnek Bir Analiz Üzerinden Ansys Maxwell Kullanımında Karşılaşılan Güçlüklere Detaylı Çözüm Önerileri”, **Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi**, Balıkesir, (2018).

59. C. A. Charalambous, Z. D. Wang, P. Jarman and M. Osborne, “Core Structure and its Association with Transformer Susceptibility towards Ferroresonance”, **Paper submitted to the International Conference on Power Systems Transients (IPST2009) in Kyoto, Japan June 3-6, (2009).**

## ÖZGEÇMİŞ

Sena ÇEVLİKLİ ilk ve orta öğretimini Kastamonu'da tamamladı. Tosya Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne başlayıp 2018 yılında mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim dalında yüksek lisansa başladı. 2021 yılında Albayrak Asansör' de Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak çalışmıştır.