MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROMANYETİK KAVRAMALARIN TASARIM PARAMETRELERİNİN ANALİTİK VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE OPTİMİZASYONU

MEMET ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU

İSTANBUL, 2022

MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES

OTIMIZATION OF DESIGN PATAMETERS OF ELEKTROMAGNETIC CLUTCH BY ANALITICAL AND NUMERICAL METHODS

MEMET ÖZDEMİR

MASTER THESIS
Department of Mechanical Engineering

Thesis Supervisor
Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU

ISTANBUL, 2022

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Memet Özdemir'in "Elektromanyetik Kavramaların Tasarım Parametrelerinin Analitik ve Nümerik Yöntemlerle Optimizasyonu" başlıklı tez çalışması, 20 Eylül 2022 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU (Danışman)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ (Üye)
Yalova Üniversitesi ..... (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun … /… /2022 tarih ve …. sayılı kararı ile Memet ÖZDEMİR'in Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Adı SOYADI

MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES IN PURE AND APPLIED SCIENCES

Memet OZDEMIR, a Master of Science student of Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, defended his thesis entitled "Optimization of Design Parameters of Electromagnetic Clutch by Analitic and Numerical Methods ", on September 20, 2022 and has been found to be satisfactory by the jury members.

Jury Members

Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU (Advisor)
Marmara University .....(SIGN) .....

Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ (Jury Member)
Yalova University.....(SIGN) .....

Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR (Jury Member)
Marmara University .....(SIGN) .....

APPROVAL

Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences Executive Committee approves that Memet OZDEMIR be granted the degree of Master of Science in Department of Mechanical Engineer on September 20, 2022. (Resolution no: …).

Director of the Institute
Prof. Dr. Adı SOYADI

ÖNSÖZ

Teknolojik gelişmeler birikimli bir şekilde ilerlemekte ve her geçen gün daha iyi ürünler elde etmek için bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Hareket aktarım mekanizmaları içerisinde önemli bir yere sahip olan kavramaların geliştirilmesi de yapılan ve yapılacak bilimsel çalışma konularından biridir. Bu doğrultuda bu tez çalışmasına konu olan elektromanyetik kavrama 2005 ve 2020 yılları arasında geliştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada da elektromanyetik kavramanın torkunu etkileyen parametrelerini sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışma Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana destek olan ilgisini ve önerilerini göstermekten kaçınmayan değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmam süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, çalışmamın her evresinde desteğini ve bana olan güvenini benden esirgemeyen değerli eşim Mehrican Özdemir'e, huzur kaynağımız, biricik kızım ve oğlum Elif ve Eyüp'e, tüm hayatım boyunca her zaman yanımda olan babam Osman Özdemir'e, annem Ayşe Özdemir'e, moral kaynağım sevgili kardeşlerime, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Pressan Madeni Eşya San. Tic. A.Ş ailesine ve tez çalışmam boyunca yardımını esirgemeyen arkadaşım Vedat Karaman'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ v
İÇİNDEKİLER vi
ÖZET vii
ABSTRACT ix
SEMBOLLER xii
KISALTMALAR xiii
ŞEKİL LİSTESİ xiv
TABLO LİSTESİ xvi
1. GİRİŞ 1
1.1. Literatürde Araştırması 1
1.2. Elektromanyetik Alan Kavramı 7
1.2.1 Manyetik Alan 8
1.2.2 Manyetik Akı Yoğunluğu 9
1.2.3 Manyetik akı 10
1.3 Elektromanyetik Kavrama 11
1.4 Diğer Elektromanyetik Kavrama Çeşitleri 12
1.4.1 Çoklu Disk Kavramaları 12
1.4.2 Elektromanyetik diş kavramaları 13
1.4.3 Elektromanyetik Parçacık Kavramaları 14
1.4.4 Histerezisle Çalışan Debriyaj 15
2. METARYAL VE YÖNTEM 16
2.1 Yanıt Yüzey Metodu (RSM) 16
2.2 Sonlu Elemanlar Metodu 18
2.3 Elektromanyetik Kavramanın Tasarım ve Analizi 19
2.3.1 Geliştirilen FE Modelinin Doğrulanması 19
2.3.2 Geometri Hazırlama ve Analiz 23
2.3.3 Elektromanyetik Kavramanın Optimizasyonun 28
3. BULGULAR 34
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 56
KAYNAKLAR 59
ÖZGEÇMİŞ 62

ÖZET

ELEKTROMANYETİK KAVRAMALARIN TASARIM PARAMETRELERİNİN ANALİTİK VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE OPTİMİZASYONU

Bu çalışmada, elektromanyetik kavramanın tasarım ve analizi yapılacaktır. Elektromanyetik kavrama sistemleri paketleme makinaları, tel germe üniteleri, matbaa makinaları vb. birçok uygulama alanında vardır. Kavramın devreye girip çıkması geleneksel mekanik kavramalarda olduğu gibi mekanik bağlantıyla değil, elektromanyetik ilkesiyle gerçekleşir. Elektromanyetik kavramanın ana bileşenleri, bir bobin, bir armatür, rotor ve gövdedir. Armatür plakası sürtünme ile kaplanmıştır. Bobin rotorun arkasına yerleştirilmiştir. Kavrama devreye girdiğinde elektrik devresi bobine enerji verir ve manyetik bir alan oluşur. Kavramanın rotor kısmı mıknatıslanır. Manyetik alan rotor ve armatür arasında hava boşluğunu aştığında armatürü rotora doğru çeker. Temas yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti tork olarak aktarılır. Etkileşim süresi, manyetik alanların, ataletin ve hava boşluğunun gücüne bağlıdır. Bobinden voltaj kesildiğinde kontak kesilir. Bu tip kavramalar mekanik bağlantı kesilir kesilmez sorunsuz ve hızlı bir şekilde çalışır. Bunun yanında elektromanyetik kavrama sistemleri akım ile tork kontrolü kabiliyeti sağladığı için tercih edilir.

Ancak aktivasyon enerjisi bobinde ısı enerjisi olarak çözülür. Bu durum sorun yarabileceği için kavramanın maksimum sıcaklığı bobinin yalıtımı ile sınırlandırılır. Mekanik kavramaların uzun süren tepki sürelerinin üstesinden gelmek için önerilebilen elektromanyetik kavramanın çalışma prensibi ve avantajları göz önünde bulundurularak bu çalışma kapsamında da elektromanyetik kavrama sisteminin tasarım aşamaları ayrıntılı olarak gerçekleştirilecektir. Daha sonra kavrama sisteminin güvenli çalışmasını sağlamak için gövde, rotor, armatür, flanş ve rotor elemanların elektromanyetik kavrama tasarım parametrelerinin optimizasyon çalışmaları sonlu elemanlar metodu ile yapılıp tasarım parametreleri tespit edilecektir.

Deneysel tasarım metodu olarak kesirli deney tasarım metodu kullanılmıştır. Deneysel tasarım için kontrol edilebilen parametreler belirlendikten sonra seçilen parametreler ve belirlenen seviyeleri ile deneysel eşleştirme tablosu hazırlanmıştır. Bunun için Deney faktör ve seviyeleri tablosu kullanılmıştır. Sonrasında seçilen bu deney tablosuna göre simülasyonlar Ansys Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen çekme kuvvetlerinden sürtünme elemanının sürtünme katsayısı kullanılarak frenleme torkları hesaplanmıştır. Sonrasında Yanıt yüzeyi Metodu (RSM) kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuş ve tam eşleştirme sonucuna göre 62 deney sonucu tahmin edilmiştir. Tahmin

performansını tespit etmek için seçilen iki deney sonucu tekrar simülasyon yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden ilk olarak maksimum tork değerini veren deneysel parametreler elde edilmiştir. Elde edilen bu parametreye göre bobin yeniden dizayn edilerek beklenen tork değerine göre hesap yapılmış ve bobin maliyetleri azaltılmıştır. Ayrıca her bir eşleştirme için ağırlıklar hesaplanmış ve aynı şekilde RSM metodu ile tahmin modeli hazırlanmış ve tam eşleştirme durumu için tahmin oluşturulmuştur. Çalışmada tork ve ürün ağırlığı üzerinden iki farklı optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yanıt yüzey metodu ile tahmin edilen 62 deney için öncelikle Solidworks'ta her parametrenin (gövde, rotor, armatür, bobin ve balatalar) hatasız bir şekilde dataları hazırlanmıştır. Hazırlanan datalar Ansys analiz programına alınarak SpaceClaim'de düzensiz yüzeyler, küçük yarıçaplar temizlenerek data analiz için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan data Maxwell modülünde gerekli malzemeler tanımlandıktan sonra analiz edilmiştir.

Analiz yapılırken başlangıçta elektromanyetik kavrama açıklamaları doğrultusunda, Maxwell denklemleri, manyetik devreler hesabında kullanılacak yöntemlere yer verilecektir. Bunu yanında malzeme özellikleri, kullanılan alanlar incelenecektir. Sonuç olarak bu çalışma elektromanyetik kavramaların kullanımı hakkında daha sonra yapılacak çalışmalar için bilgilendirici ve yol gösterici bir kaynak olacaktır.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC CLUTCHES BY ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS

In this study, the design and analysis of the electromagnetic clutch will be made. Electromagnetic clutch systems are used in packaging machines, wire tensioning units, printing machines, etc. It has many application areas. Switching the concept in and out is not by mechanical connection, as in conventional mechanical clutches, but by the electromagnetic principle. The main components of the electromagnetic clutch are a coil, an armature, rotor, and housing. The armature plate is coated with friction. The coil is located behind the rotor. When the clutch is engaged, the electrical circuit energizes the coil and a magnetic field is created. The rotor part of the clutch is magnetized. When the magnetic field crosses the air gap between the rotor and armature, it pulls the armature towards the rotor. The frictional force on the contact surface is transmitted as torque. The interaction time depends on the strength of magnetic fields, inertia, and air gap. When the voltage is removed from the coil, the contact is cut. These types of couplings operate smoothly and quickly as soon as the mechanical link is broken. In addition, electromagnetic clutch systems are preferred because they provide torque control capability with the current.

However, the activation energy is dissolved in the coil as heat energy. As this can be problematic, the maximum temperature of the clutch is limited by the insulation of the coil. Considering the working principle and advantages of the electromagnetic clutch, which can be recommended to overcome the long response times of mechanical clutches, the design stages of the electromagnetic clutch system will be carried out in detail within the scope of this study. Then, to ensure the safe operation of the clutch system, the optimization studies of the electromagnetic clutch design parameters of the rotor, armature, flange, and rotor elements will be carried out with the finite element method and the design parameters will be determined.

The fractional experimental design method was used as the experimental design method. After determining the controllable parameters for the experimental design, an experimental matching table was prepared with the selected parameters and their

determined levels. For this, the Experiment factor and levels table was used. Afterward, simulations were performed with Ansys Maxwell software according to this selected experimental table and the results were obtained. Braking torques were calculated by using the friction coefficient of the friction element from the obtained pulling forces. Afterward, a prediction model was created using the Response Surface Method (RSM) and 62 experimental results were estimated according to the exact matching result. To determine the estimation performance, the results of the two selected experiments were simulated again and the results were compared. Experimental parameters, which give the maximum torque value, were obtained from the results obtained. According to this parameter obtained, the coil was redesigned and the calculation was made according to the expected torque value and the coil costs were reduced. In addition, the weights were calculated for each match, the prediction model was prepared with the RSM method in the same way, and a prediction was made for the exact match situation. In the study, two different optimization processes were carried out over torque and product weight.
For the 62 experiments estimated by the response surface method, first of all, data of each parameter (body, rotor, armature, coil, and pads) were prepared without error in Solidworks. The prepared data was taken into the Ansys analysis program, irregular surfaces and small radii were cleaned in SpaceClaim, and the data was made ready for analysis. The prepared data was analyzed after the necessary materials were defined in the Maxwell module.

The response surface method was used as the experimental design method. As the number of parameters and levels increases in experimental designs, the number of experiments to be done will increase. With the response surface method, the optimum result is obtained by making fewer experiments. In this thesis study, 7 parameters and 3 levels were determined. The experimental design was prepared using the Box-Behnken design sequence. 62 experiments were conducted with the Box-Behnken experimental design. If Box-Behnken did not use the experimental design, 3^7=2187 analyzes would have to be prepared. In this way, a significant advantage will be gained in time and development time.

While performing the analysis, in the beginning, Maxwell's equations, and methods to be used in the calculation of magnetic circuits will be included in line with the electromagnetic concept explanations. In addition, material properties and used areas will be examined. As a result, this study will be an informative and guiding resource for

future studies on the use of electromagnetic clutches.

SEMBOLLER

$\vec{H}$: Manyetik Alan Şiddet Vektörü

H : Manyetik Alan Şiddeti

$\overrightarrow{F_H}$: Manyetik Kuvvet Vektörü

F_H: Manyetik Kuvvet

$\vec{B}$: Manyetik Akı Yoğunluk Vektörü

B : Manyetik Akı Yoğunluğu

Ψ_m: Manyetik Akı

μ : Manyetik Geçirgenlik

μ_0: Boşluğun Manyetik Geçirgenliği

μ_R : Malzemenin Manyetik Geçirgenliği

Φ: Manyetik Akının Büyüklüğü

$M_k = M_s$: Moment

F_e: Kuvvet

KISALTMALAR

SH-AWD:	Süper Sürüş-Dört Tekerlekten Çekiş
FEM:	Sonlu Elemanlar Metodu
EM:	Elektromanyetik
AMT:	Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman
EMC:	Elektromanyetik Kavrama
ECBW:	Yeni Tip Elektromanyetik Kavrama
DC:	Doğru Akım
BPMEC:	Çift Durumlu Kalıcı Elektromanyetik Debriyaj
CAD:	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE:	Bilgisayar Destekli Mühendislik
RPM:	Dakikada Devir Sayısı
RSM:	Yanıt Yüzeyi Metodu
CCD:	Merkezi Kompozit Tasarım
A.T:	Amper.Turns
N.m:	Newton. Metre

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1 Elektrik Alan Çizgileri 8
Şekil 1. 2 Elektronun spin ve manyetik momenti 9
Şekil 1. 3 Üçlü bobin sistemi için manyetik akı yoğunluğu simülasyonu 10
Şekil 1. 4 Step motorun manyetik akı dağılımı. 11
Şekil 1. 5 Elektromanyetik Kavrama Ana Bileşenleri 12
Şekil 1. 6 Çoklu Disk Kavrama 13
Şekil 1. 7 Elektromanyetik diş kavrama 14
Şekil 1. 8 Elektromanyetik parçacık kavrama 14
Şekil 1. 9 Histerezisle çalışan kavrama 15
Şekil 2. 1 Sonlu Elemanlar Analizine örnek bir mesh ve sonuç görüntüsü 18
Şekil 2. 2 Hazırlanan FE doğrulama ürünün 3D CAD modeli 20
Şekil 2. 3 Doğrulama numunesi için uygulanan test işlemi 20
Şekil 2. 4 Test işleminde elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 21
Şekil 2. 5 Simülasyon sonuç grafikleri 21
Şekil 2. 6 İterasyon bazlı % enerji hatası 22
Şekil 2. 7 Elektromanyetik Kavramanın kesit ve montajı 23
Şekil 2. 8 Ansys Maxwell malzeme seçimi 23
Şekil 2. 9 Malzeme seçimi 24
Şekil 2. 10 Akım değerlerinin ve yönünün belirlenmesi 24
Şekil 2. 11 Hacim seçim ekranı ve oluşturulan hacim 25
Şekil 2. 12 Parametre ve analiz ayarları 25
Şekil 2. 13 Analiz ayarları 26
Şekil 2. 14 Analizin kontrol edilmesi 26
Şekil 2. 15 İterasyon bazlı hata oranı 27
Şekil 2. 16 Çekme kuvveti 27
Şekil 2. 17 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri 28
Şekil 2. 18 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı 28
Şekil 2. 19 İç ve dış yarıçapların gösterimi 29
Şekil 2. 20 Elektromanyetik Kavramanın değişken parametreleri 32
Şekil 2. 21 Elektromanyetik Kavramanın İzometrik ve Kesit Görünüşü 32
Şekil 2. 22 Elektromanyetik Kavramanın mesh görünümü 33
Şekil 2. 23 1008, 409 ve S275 malzemesine ait B/H eğrileri [Ansys] 33
Şekil 3. 1 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı 36
Şekil 3. 2 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri 36

Şekil 3. 3 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı 37
Şekil 3. 4 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri 37
Şekil 3. 5 Parametrelerin ana etki grafiği 38
Şekil 3. 6 RSM tork etkileşim grafiği 38
Şekil 3.7 3 boyutlu Tork-A;B grafiği 39
Şekil 3. 8 3 boyutlu Tork-A;C grafiği 40
Şekil 3.9 3 boyutlu Tork-A;D grafiği 40
Şekil 3.10 3 boyutlu Tork-A;E grafiği 41
Şekil 3. 11 3 boyutlu Tork-A;F grafiği 41
Şekil 3. 12 3 boyutlu Tork-A;G grafiği 42
Şekil 3. 13 3 boyutlu Tork-B;C grafiği 42
Şekil 3. 14 3 boyutlu Tork-B;D grafiği 43
Şekil 3. 15 3 boyutlu Tork-B;E grafiği 43
Şekil 3. 16 3 boyutlu Tork-B;F grafiği 44
Şekil 3. 17 3 boyutlu Tork-B;G grafiği 44
Şekil 3. 18 3 boyutlu Tork-C;D grafiği 45
Şekil 3. 19 3 boyutlu Tork-C;E grafiği 45
Şekil 3. 20 3 boyutlu Tork-C;F grafiği 46
Şekil 3. 21 3 boyutlu Tork-C;G grafiği 46
Şekil 3. 22 3 boyutlu Tork-D;E grafiği 47
Şekil 3. 23 3 boyutlu Tork-D;F grafiği 47
Şekil 3. 24 3 boyutlu Tork-D;G grafiği 48
Şekil 3. 25 3 boyutlu Tork-E;F grafiği 48
Şekil 3. 26 3 boyutlu Tork-E;G grafiği 49
Şekil 3. 27 3 boyutlu Tork-F;G grafiği 49
Şekil 3. 28 Ful faktöriyel deney sonuçları için tork zaman serisi grafiği 52
Şekil 3. 29 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı 53
Şekil 3. 30 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri 54
Şekil 3. 31 Ful faktöriyel deney sonuçları için ağırlık zaman serisi grafiği 54

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 Maxwell Denklemleri 19
Tablo 2 Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 22
Tablo 3 Deney faktör ve seviyeleri 30
Tablo 4 Yanıt yüzey Metodu deney tablosu Box-Behnken tasarımı 30
Tablo 5 Tork Değerleri 34
Tablo 6 Parametrelerin tek başına etki Varyans Analizi 50
Tablo 7 Parametrelerin birbiri ile etki Varyans Analiz sonuçları 50
Tablo 8 Deney maksimum ve rasgele deneylerin seviyeleri 53
Tablo 9 Deney maksimum ve rasgele deneylerin sonuçları 53
Tablo 10 Parametrelerin tek başına ağırlık etki Varyans Analizi 55
Tablo 11 En iyi ve en kötü deney şartları 57
Tablo 12 Bobin yıllık tasarruf maliyeti 58
Tablo 13 Ağırlık bazında yıllık tasarruf maliyeti 58

1. GİRİŞ

Bu tezin amacı elektromanyetik kavramaları iyi bir şekilde tanımlamak, tasarımını yapmak, malzemesini belirlemek ve sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonunu yapmaktır. Doğru kaynaklardan literatür taraması yapılıp, sanayide bulunan mevcut ürünlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amaçlanmaktadır. Tez konusu olarak belirtilen elektromanyetik kavrama sistemlerinin tasarım parametrelerinin optimizasyonu incelenecektir. Sonrası bahse konu olan, sanayinin birçok alanında kullanılan elektromanyetik kavrama sistemlerinin konstrüksiyonunun genel tanımlaması yapılacaktır. Bu kavrama sistemlerinin çalışma prensibine göre üretim esnasında karşılaşılan problemlerden biri lineer olmayan yapısı ile çözülmesi kolay olmayan elektromanyetik karakterizasyonu incelemek amaçlanmaktadır. Üzerinde deney ve çalışma yapılan ürünler Uluslararası Standartlara ve Türk Standartlarına göre imalatı sürdürülen ürünlerden seçilecektir.

Hedeflenen sonuç bu alanda yapılacak yeni çalışmalarda, araştırmacılara, mühendislere, teknik elemanlara sanayide ihtiyaç duyulan önemli bir veri kaynağı sunmaktır. Bu veri kaynağı çalışanlara sağlandığında işin kalitesini artırılacaktır. Aynı zamanda zamanı ölçülü ve verimli kullanmalarına vesile olacaktır. Çalışma içerisinde, imkânların elveriş durumlarına göre günümüz şartlarında sonlu elemanlar metodu ile tasarım parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirileceği için bu çalışma aynı zamanda sonlu elemanlar metodunun uygulaması olarak değerli bir çalışma olacaktır.

Ülkemizde istenilen torku üretebilen birçok sektörde kullanılabilen elektromanyetik kavramalar üretilmektedir. Ancak bu ürünlerin geliştirilmesi teknoloji transferi ile sağlanmıştır. Bu çalışma ile bu tipteki ürünlerin geliştirilmesi için yol gösteren bir kaynak ortaya koyulacaktır.

1.1. Literatürde Araştırması

Elektromanyetik teori ve özellikle bu teorinin teknolojiye dönüşmüş şekli olan endüstriyel ürünlerle ilgili birçok akademik çalışma yapılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalardan bazıları burada özetlenmiştir.

Chowdhary, A., Kumar, A., & Singh, S. K.,[1] tarafında yapılan çalışmada, meydana gelen yüksek tepki süresi sorununun üstesinden geldiği araştırılmıştır. Bu çalışmada, bir Elektromanyetik Kavrama tasarımını ve analizi araştırılmıştır. Kavramanın devreye

girmesi ve ayrılması elektrikle sağlanır, ancak tork mekanik olarak iletilir. Mekanik kavramalarda debriyaj tasarlama adımları ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Hesaplamalar, CAD tasarımları ve elektromanyetik kavrama parçalarının analizi detaylandırılmıştır. Kavramın güvenli çalışmasını sağlamak için tasarlanan parçalar üzerinde statik analiz yapılmış ve ayrıca bileşenlerin ömrünü tahmin etmek için yorulma analizi yapılmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda manyetik akı yoğunluğu ve kuvvet yoğunluğu gibi elektromıknatıs özellikleri hakkında manyeto statik analiz ile bilgi aktarılmıştır. Elektromanyetik kavramanın tasarımında yer alan tüm hususlar dikkate alınmıştır. Güvenli tasarımı sağlamak için elektromanyetik debriyajın çeşitli bileşenlerinin statik analizi ve yorulma analizi yapılmış. Ayrıca, kavramanın devreye girmesi için gereken manyetik kuvvetin üretildiğini göstermek için manyeto statik analiz yapılmıştır.

Kunii, R., Iwazaki, A., Sekiya, S., Kanno,[2] tarafından yapılan çalışmada, aracın dört tekerleğine de sürekli ve değişken bir şekilde torku dağıtabilen dünyanın ilk 4WD sistemi olan SH-AWD (Süper Sürüş-Dört Tekerlekten Çekiş) sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemin kullanılması ile yalpalama momentinin kontrolünde ve aracın tüm tekerlekleri arasındaki yük oranının eşitlenmesinde torkun kontrol uygulamasına olanak tanır. Bu, daha yüksek dönüş kararlılığı ve artan dönüş sınır performansı sağlar. Bu kontrol biçimleri, torku yüksek derecede doğrulukla kontrol edebilen, oldukça duyarlı bir aktüatör gerektirir. Yukarıda açıklanan işlevi yerine getirmek için, solenoid çekiminin doğrudan debriyaj üzerinde etki ettiği doğrudan bir elektromanyetik kavrama sisteminin geliştirilmesi ile mümkün kılınmıştır. Solenoid çekiminin yüksek doğrulukta kontrolünü sağlamak için solenoid hava boşluğunun tespiti gereklidir. Solenoid boşluğunun tespitini sağlamak için yeni bir konsepte dayalı bir arama bobini tipi sensor geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Sonuç olarak ayarlanan mesafeye göre manyetik devre aralığının açısını optimize ederek yüksek bir tork üretilebileceği bulunmuştur. Ayrıca bir arama bobini kullanılarak manyetik akının ölçülebildiği bulunmuş ve arama bobini voltajının zaman ekseni ve voltaj ekseni boyunca niceleme hatasını azaltarak, sıfır düzeltme ekleyerek ve arama bobini konumunu optimize ederek, yüksek doğrulukta algılama gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. Son olarak, manyetik akı tespitine dayalı olarak hedef torka göre akım düzeltme kontrolü yapılarak, mesafedeki bir değişikliğin tork üzerindeki etkisinin en aza indirilebileceği ve böylece kararlı tork kontrolünün gerçekleştirilebileceği doğrulanmıştır.

Piao, C. H., Huang, [3] tarafında yapılan çalışmada elektromanyetik kavramanın statik sürtünme torku araştırılmıştır. Tork maksimizasyonu, armatürün geometrik şekli optimize edilerek de incelenmiştir. Elektromanyetik kavramayı tasarlamak ve optimize etmek amacıyla tork tahmininde bulunmanın çok önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir. Statik sürtünme torkunu analiz etmek için bir eksen-simetrik FEM modeli oluşturulmuş ve gerçek torku değerlendirmek için bir tork test cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada, sayısal sürecin rasyonelliğini tartışmak için analitik olarak tahmin edilen tork deneysel olanla karşılaştırılmıştır. Analitik sonuç, matematiksel sürecin geçerliliğini kanıtlayan deneysel verilerle uyumluluk uygulamasıdır. Armatür şeklinin optimizasyonu sayesinde, elektromanyetik kavramanın statik torkunun da yaklaşık %30 oranında iyileştirildiği gösterilmiştir. Sayısal olarak elde edilen torkun rasyonelliğini göstermek için sayısal tork deneysel olanla karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuç, deneysel sonucu %7,1 oranında aştığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak mikro-elektromanyetik kavrama tarafından üretilen torku sayısal olarak tahmin edebilen sonlu elemanlar yöntemi sunulmuştur.

Fernando, N., [4] tarafından yapılan bu çalışmada, bir elektromanyetik kavramanın kontrolü sunulmuştur. Ele alınan kavrama, özellikle modüle edilmiş alan prensibine dayanmaktadır ve senkron koşullarda hız oranı 1.14 olan iki şafta sahiptir. Kavrama, ayırma ve tork aktarımı, stator akımlarının ve iki mil arasındaki kayma hızının manipüle edilmesiyle kontrol edildiği belirtilmiştir. Elektromanyetik kavramanın dinamik modelinin, sabit mıknatıslı senkron bir makineninki ile hemen hemen aynı olduğu bulunmuştur. Ancak elektrik hızının yerini kayma hızı dikkate alınmıştır. Giriş ve çıkış milleri arasındaki tork aktarımı ile elektriksel güç girişi arasındaki ilişki açıklanmıştır. d-q akım kontrolüne dayalı bir debriyaj kontrol stratejisi sunulmaktadır. Deneysel prototip elektromanyetik kavrama ile test yatağı kurulumu sunulmuş ve bu prototip için simülasyon sonuçları sunulmuştur. Kavrama tarafından talep edilen elektrik gücünün sadece devreye girmesi ve ayrılması geçici periyotlardaki yüksek olduğu ve kararlı durum gücünün sadece kavramadaki elektrik kayıplarını telafi etmek için gerekli olduğu gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen strateji ile kavramanın kontrol edilebildiğini göstermektedir.

Muramatsu, J., Kojima, T., [5] tarafında yapılan bu çalışmada, elektromanyetik (EM) kavrama için bir aracın kontağı kapatılarak üretilen aşırı gerilimi bastıran bir araç araştırılmıştır. EM alanının teorik olarak ele alınması yoluyla, EM kavramasındaki daha büyük bir girdap akımının, bobinden geçen manyetik akıda küçük bir zaman değişikliğine

neden olduğu için aşırı gerilim gerilimini bastırabileceği bulunmuştur. Bu nedenle önerilen yapı, debriyaj bobinini çevreleyen ve bobin ile bobin yuvası arasında yer alan düşük dirençli metal bir katmana sahiptir. Ölçülen zaman serisi aşırı gerilimi iyi ifade eden EM alan ve elektrik devresinin sayısal hesabı, önerilen yapı ile aşırı gerilimin bastırma etkisini göstermektedir. EM kavrama yapısı için, aşırı gerilimin bastırılmak için bobini çevreleyen bir bakır tabaka önerilmiştir. Bakır tabakadaki büyük girdap akımı, bobinden geçen manyetik akının zamanla değişimini bozar. Bu nedenle, basit bir yapı olmasına rağmen, önerilen kavrama, geleneksel yapıya kıyasla aşırı gerilim gerilimini %50'den fazla azaltabileceğini göstermişlerdir.

Semra U., [6] Maxwell 'in Alan Denklemleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Maxwell, iki ayrı fenomen oldukları düşünülen elektrik ve manyetizmanın bir tek fenomenin iki ayrı bileşenleri olduğunu kendi alan denklemleri ile göstermiştir. Maxwell, sadece elektromanyetizmanın temel denklemlerini geliştirmekle kalmayıp aynı zamanda bu denklemleri, elektromanyetik dalgaların varlığını öngörmede ve ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunu göstermede kullanmıştır. Bu çalışmada fizik tarihinden veriler kullanılarak, Maxwell'in alan denklemlerinin ortaya çıkışı ve etkileri araştırılmıştır.

Xu, S., & Wang, C., [7] tarafında yapılan bu çalışmada, manyetik parçacık kavramasının çalışma prensibi derinlemesine analiz edilmiş ve manyetik kavramanın bir analiz modeli olan elektromanyetik alanı oluşturulmuştur. Manyetik parçacık kavramasında elektromanyetik alanın Sonlu Elemanlar Yöntemi ve deneysel olarak doğrulaması tamamlanmıştır. Simülasyon yöntemi ve teorisinin makul olduğunu ve kavrama optimizasyonunun temeli olarak kullanılabileceğini gösteren test sonuçları analiz edilmiştir. Manyetik parçacık kavramasında manyetik alanın dağılımı hakkında kesin bir analizin olmadığı belirtilmiştir. Manyetik parçacığın çalışma aralığında daha hassas manyetik indüksiyon elde etmek için manyetik alanın alan analizi yöntemini kullanarak manyetik alan üzerinde Sonlu Eleman Analizi yapılmıştır. Aynı zamanda, manyetik parçacık kavramasının tork aktarma özelliğini hesaplamak için elektromanyetik kuvvetin sanal yer değiştirme yöntemi kullanılmıştır. Teorik hesaplama sonuçları, simülasyon ve teori yönteminin makul olduğu ve debriyaj optimizasyonunun temeli olarak kullanılabileceğini gösteren deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu ön görülmüştür.

Chen, Q., Shu, H., Chen, L., Tu, W., & Liao, C., [8] yapmış oldukları çalışmada, tekerlek

içi motora gömülü elektromanyetik kavrama olan park freni tasarımını ortaya koymaktadır. Elektromanyetik kavramanın çalışma prensibi, elektromanyetik indüksiyon altında elektromanyetik emiş üretmek olduğunu savunulmuştur. Elektromanyetik debriyajın termal tasarımı makul değilse ve elektromanyetik debriyajın termal ortamı sınırlıysa, bu da elektromanyetik debriyajın yüksek sıcaklık sorununa neden olacaktır. Elektromanyetik debriyajın çalışma performansını etkileyecek ve tekerlek içi motor için elektromanyetik debriyajın güvenlik ve hizmet ömrünü azaltacaktır.

Ranjan, A., Prasanth, S., Cherian, F., & Baskar, P., [9] yaptıkları çalışmada, daha iyi konfor ve sürdürebilirlik sağladığı için Hindistan'da Otomatik Şanzımana artan bir ilgi olduğunu ancak bu sistemin yüksek maliyeti, Hindistan pazarlarında başarılı olmayı sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, manuel şanzımanın sürüş kabiliyetini ve yakıt tüketimi özelliklerini daha düşük maliyetlerle geliştirdiği için otomasyona daha iyi bir çözüm sunan Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman (AMT) düşünülmüştür. Bununla birlikte, tork gecikmesi ve düşük konfor, AMT ile vites değiştirme süresini azaltılarak çözülebilecek sorunlar olduğu belirtilmiştir.

Elektromanyetik kavramaların önemini ve kullanılması gerektiğine yönelik bir tez çalışması Dandi tarafından 2019 yılında yapılmıştır. Dandi, W., [10] yaptığı tez çalışmasında, mevcut sürtünmeli kavrama sisteminin birçok dezavantajı olduğunu vurgulamıştır. Tork gevşemesine neden olabilecek mekanik kuvvet gerekli olduğunu söylemiştir. Ayrıca mekanik parçaların doğrudan teması, parça arızası ve mekanik gürültü olasılığını artıracağı belirtilmiştir. Bu tez, mevcut sürtünmeli kavrama sisteminin yerini alan yeni Elektromanyetik Kavrama (EMC) sistemini önermektedir.

Bochkarev, I. V., Khramshin, V. R., Voronin, S. S., & Bryakin, I. V., [11] yaptıkları çalışmada, EM manyetik çekirdek üzerindeki ek bir yüksek frekanslı elektrik alan etkisine dayanan hareketli armatür elektromanyetik mekanizmalarının (EM) teşhisi için yeni bir yöntem önermekte ve teoriler geliştirmektedir. Elektrik alan, EM çalışma parametreleriyle ilgili olmayan ve onları hiçbir şekilde etkilemeyen ilgili yüksek frekanslı elektrodinamik süreçleri harekete geçirir. EM sargısı, değeri EM'nin mevcut durumuna bağlı olan yüksek frekanslı elektrodinamik süreçlerin tanı parametrelerini kaydeden bir elektromanyetik kontrol sensörü olarak kullanılır. Sonuç olarak, geliştirilen EM izleme yöntemi, izleme görevlerine bağlı olarak, mevcut EM durumuyla doğrudan bağlantılı çeşitli bilgilendirici parametreleri kaydedebilen EM ferromanyetik manyetik çekirdeği algılamak için yüksek

frekanslı bir elektrik alanı kullanmaya dayanmaktadır. Bu, EM elemanlarında meydana gelebilecek çoğu operasyonel kusurun verimli bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Bu çalışma hareketli çekirdeklerle donatılmış herhangi bir elektromanyetik cihazda kullanılabilecek yeni bir kavramsal izleme sistemi önermektedir.

Yin, Y., Qi, C., & Qu, J., [12] yaptıkları çalışmada, yeni bir tip elektromanyetik kavrama (ECBW) sunmaktadır. ECBW'nin yapı parametreleri, ECBW'nin çalışma karakterine ve çalışma prensibine göre tasarlamışlardır. Elektromanyetik kavramanın belirlenmesindeki en önemli kısım elektromanyetik kuvvetin hesaplanmasıdır. Bu çalışma, DC solenoid elektromıknatısın elektromanyetik kuvvet hesaplama yöntemini tanıtmakta ve akım, manyetik akı yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvet arasındaki ilişkinin elektromanyetik-debriyaj simülasyon modellerini oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki simülasyon sonucu, elektromanyetik kuvvetin otomatik şanzıman gereksinimini karşıladığını göstermektedir.

Sanjulal, T., Baby, A. K., Vishnu, V., & Kumar, S., [13] yaptıkları çalışmada, yenileyici bir kavrama sistemi modelini tanıtmayı amaçlamışlar. Rejeneratif bir fren sistemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak yaptıkları yeni konsept farklıdır. Burada elektrik üretimi için elektromanyetik kavramalar kullanılmaktadır. Dört tekerlekli veya iki tekerlekli araçlarda debriyaj çalışması sırasındaki enerjiyi kullanmak için bir model geliştirmiştir. Bu sistemde debriyaj devre dışı konumundayken elektrik gücü debriyaj sistemi aracılığıyla üretilir. Bu düzenlemeyle, son günlerde araçlara takılan ek elektrikli aksesuarların işlev görmesi için kullanılabilecek fazla elektrik gücü üretilebileceği sunulmuştur. Elektromanyetik kavrama ve limit anahtarı tertibatı sayesinde atık enerjinin etkin bir şekilde geri kazanımı başarılı bir şekilde sağlanmaktadır. Bu çalışmada küçük bir kavramsal model oluşturulmuş ve güç sağlamak için bir IC motorunun yerine motor kullanılmıştır.

Bochkarev, I. V., & Khramshin, V. R., [14] yaptıkları çalışmada, sürtünme plakalı elektromanyetik kavramanın çalışma özelliklerini ve güvenilirliğini artıran yeni bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Debriyaj sabit mıknatısı tarafından üretilen çekim kuvveti, yük altında elektrikli sürücünün başlatma ve geri dönüş aralığında elektromıknatıs akışı ile ek olarak artırılır. Normalde kapalı polarize elektromanyetik kavramaya sahip tersinir elektrikli tahrikin bir bağlantı şeması sağlanmıştır. Yazarlar, bu tip kavrama ile donatılmış ters çevrilebilir asenkron elektrikli sürücünün kontrolü için bir mikroişlemci diyagramı

tasarlamanın sonuçlar sunulmuştur. Sürtünmeli plakalı elektromanyetik kavrama ile asenkron elektrikli tahrik için kontrolör tarafından sağlanan kontrol sinyallerinin üretilmesi için kontrolör programının bir akış şemasını ve geliştirilmiş programı gösterilmiştir.

Feng, D., Tan, B. Y., Yuan, Y. X., Wu, L., & Zhang, H., [15] yaptıkları çalışmada, yüksek birikme oranlı kuyu deliği yörünge kontrol aracı üzerine çalışmışlardır. Bu araç genişletilmiş erişim kuyusunun kuyu deliği yörüngesini kontrol etmek için kullanılan bir tür aşağı delik aletidir. Karmaşık çalışma ortamı nedeniyle, özel bir elektromanyetik kavrama tasarlama gereği duyulmuştur. Öncelikle özel elektromanyetik debriyajın çalışma ortamını analiz etme gerekliliği doğmuştur. Kayar dişli elektromanyetik kavrama seçilmiş ve zorlu çalışma ortamına uyum sağlamak için yapısal tasarım yapılmıştır. Eksen dönerken geçme ihtiyacını karşılamak için armatür halka dişlisi özel olarak tasarlanmıştır. Tasarımın güvenilirliği de kontrol edilmiş ve bu tür bir tasarımın zorlu ortamda çalışma gereksinimlerini karşılayabileceği kanıtlanmıştır.

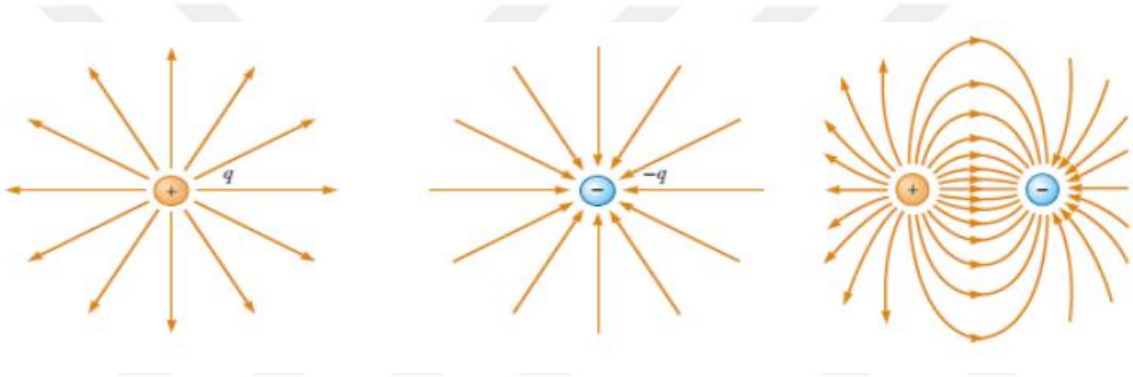
Yang, F., Gu, C., & Wang, C., [16] yaptıkları çalışmada, elektrikli araçlarda motor ve göbeklerin esnek bağlantısını gerçekleştirmek için kullanılabilen yeni bir çift durumlu kalıcı elektromanyetik debriyaj (BPMEC) ünitesi önerilmiştir. Kavramanın manyetik alan dağılımı, sonlu elemanlar yöntemi ve manyetik devre yöntemi kullanılarak tahmin edilmiştir. Daha sonra, ana boyutlar, akı sızıntı katsayısı araştırılarak optimize edilmiş ve BPMEC'nin mikro topolojisi, mıknatıslanma akımı araştırılarak optimize edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere elektromanyetik kavrama kullanım amacı doğrultusunda geliştirilen ve gelişimi devam eden bir sistemdir. Bu doğrultuda birçok sektörde elektromanyetik teori esaslı teknolojik ürünler geliştirilmiş ve bu konuda bilimsel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Özellikle günümüzde bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli mühendislik (CAE) teknolojilerinin gelişimi ile artık ürünlerin daha doğru ve etkili tasarımı için yol alınmıştır. Bu kapsamda geometrik optimizasyon, topoloji optimizasyonu ve son olarak üretken tasarım (generative design) teknolojileri ortaya çıkmıştır. Yapılan tüm çalışmalar göz önünde bulundurularak bu çalışmada da teknolojik ürünler için önemli bir ürün olan elektromanyetik kavramaların geliştirilmesine katkıda bulunmak amacıyla bir parçasının geometrik optimizasyonu üzerinde durulmuştur.

1.2. Elektromanyetik Alan Kavramı

Elektromanyetik teori ile birçok endüstriyel ürün geliştirilmiştir. Bunlara örnek

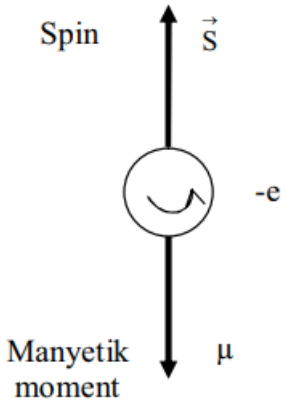
elektromanyetik frenler, kavramalar, filtreler gösterilebilir. Endüstri için son derece önemli olan bu teorinin açıklanmasına manyetik alan ile başlanabilir. Manyetik alanın ve elektrik alan elektriksel yükler ile ilişkilidir. Gözlemciye göre eğer yüklü parçacıklar sabit ise, orada sadece elektrik alan mevcuttur. Eğer yükler hareket ediyorsa, yüklü parçacıkların hareketinden dolayı gözlemci elektrik alanın yanı sıra bir de manyetik alanın etkilerini hissedecektir. Faraday ve Maxwell, bu olguların yüklerin gözlemcilere göre hareketlerinden etkilendiğini ve zamana bağlı olarak değişen manyetik alanın bir elektrik alan oluşturduğunu ve aynı zamanda, zamana bağlı olarak değişen elektrik alanın bir manyetik alan oluşturacağını ispatlamak için formülize etmişler. Elektromanyetik alan, aslında manyetik alanla elektrik alanının birleştirilmiş esas halidir [17].



Şekil 1. 1 Elektrik Alan Çizgileri [18].

1.2.1 Manyetik Alan

Manyetik alan, elektrik yüklerinin hareketi sonucunda yeni bir elektrik akımı sirkülasyonu olduğunda ortaya çıkar. Bir maddenin en küçük parçası olan atomlarda negatif yüklü olan elektronlar, çekirdek etrafında yörüngesel bir hareket yaptıkları için, kendi eksenleri etrafında da dönme hareketi yaparlar (Şekil 1.2). Elektrik yüklü parçacıklar hareket halinde ise ortamda bir değişiklik ortaya çıkar. İşte akım taşıyan bir mıknatısın ya da bir bobinin bulunduğu ortamda manyetik kuvvet olarak ortaya çıkan bu olay, manyetik alan olarak adlandırılır. Manyetik alan; yönü, şiddeti ve doğrultusu olan vektörel bir büyüklüktür. $\vec{H}$ simgesi ile gösterilir ve birimi Amper/metredir.



Şekil 1. 2 Elektronun spin ve manyetik momenti [19]

Bir $\vec{H}$ manyetik alan içerisinde υ hızı ile hareket eden q yüküne etkiyen manyetik kuvvet:

$$\overrightarrow{F_H}=q\vec{v}\mathrm{x}\vec{H} \qquad (1)$$

denklemi ile verilir. Manyetik kuvvet hem parçacığın alanına hem de hızına dik yöndedir. Manyetik kuvvetin büyüklüğü,

$$F_H=|q|vH\sin\theta \qquad (2)$$

bağıntısı ile verilir.

1.2.2 Manyetik Akı Yoğunluğu

$$B=\mu_0 H[(Wb/m^2)\ veya\ (T)] \qquad (3)$$

bağıntısı ile verilen manyetik akı yoğunluğu tesla veya metre kare başına weber birimi ile ifade edilir. Manyetik endüksiyon olarak da bilinen manyetik akı yoğunluğu, özellikle biyolojik etkileri açısından manyetik alanları karakterize etmek için kullanılır. Manyetik malzemeler için, B ve H alanları arasında çok önemli farklılıklar mevcuttur. Fakat boşlukta ve pratiklik yönünden biyolojik dokularda B/H oranı sabittir.

Manyetik akı ise;

$$\Psi_m=\int_s B.\,dS\ (Wb)=Q \qquad (4)$$

denklemi ile yazılır.

Manyetik malzemelerde, manyetik kutuplar yalıtılamadığı için manyetik alan çizgilerinin başlayıp son bulduğu manyetik yükler yoktur. Bu nedenle manyetik akılar için:

$$\Psi_m=\int_s B.\,dS=Q(Wb) \qquad (5)$$

şeklinde yazılır.

$$\vec{B}=\mu\vec{H}\ [\text{Tesla}] \qquad (6)$$

Burada μ alanın oluştuğu malzemenin manyetik geçirgenliğidir. μ çoğu malzeme için skalerdir. $\vec{B}$ ve $\vec{H}$ ile aynı yönlüdür. Manyetik akı yoğunluğu, alan içinde hareket eden yüke etkiyen kuvvet olarak tanımlanır. Manyetik malzemelerde μ farklılıklar gösterir.

Genel olarak şu şekilde ifade edilir.

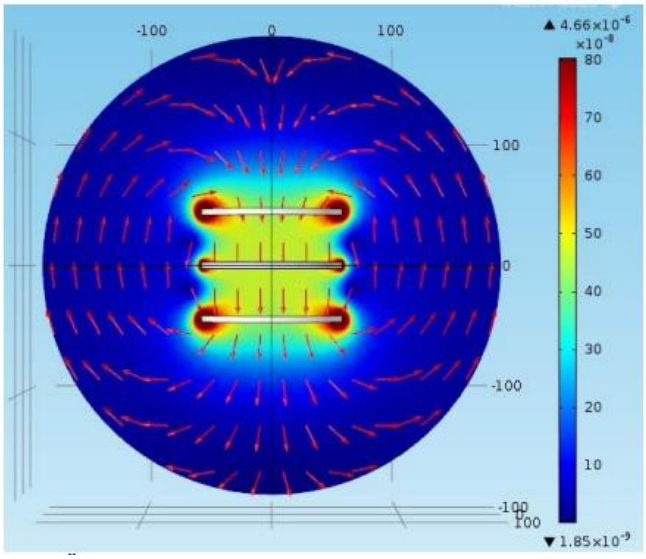
$$\mu=\mu_0\,\mu_R\,\frac{Tesla-metre}{amper} \text{ veya } \frac{Henry}{metre} \qquad (7)$$

μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği ve μ_R malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğidir.

$$\mu_0=4\pi x10^{-7}\ [\text{Henry/metre}]$$

Manyetik akı yoğunluğu, alan içinde hareket eden yüke etkiyen kuvvettir. Manyetik indüksiyon olarak da bilinir. B ile sembolize edilen büyüklüğün birimi T (Tesla)'dır. 1 T = 1 Vs/m^2 = 1 Wb/m^2

Boşlukta ve uygulamaların çoğunda B/H oranı (B/H = sabit = μ_0) sabit alınsa bile aslında manyetik alan ve manyetik akı yoğunluğu cisimlerde birbirinden farklıdır. [20]



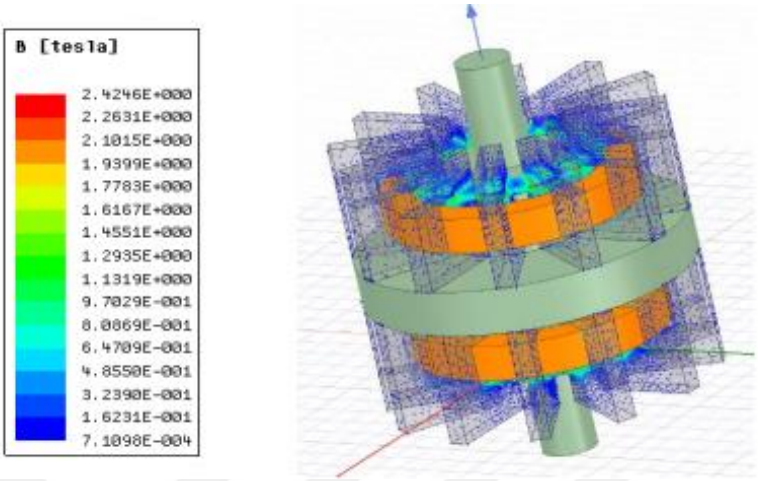
Şekil 1. 3 Üçlü bobin sistemi için manyetik akı yoğunluğu simülasyonu [21].

1.2.3 Manyetik akı

A (m^2) alanından geçen manyetik akının büyüklüğü aşağıdaki integralle verilir:

$$\Phi=\int_A \vec{B}\vec{dA}\ [\text{Weber}] \qquad (8)$$

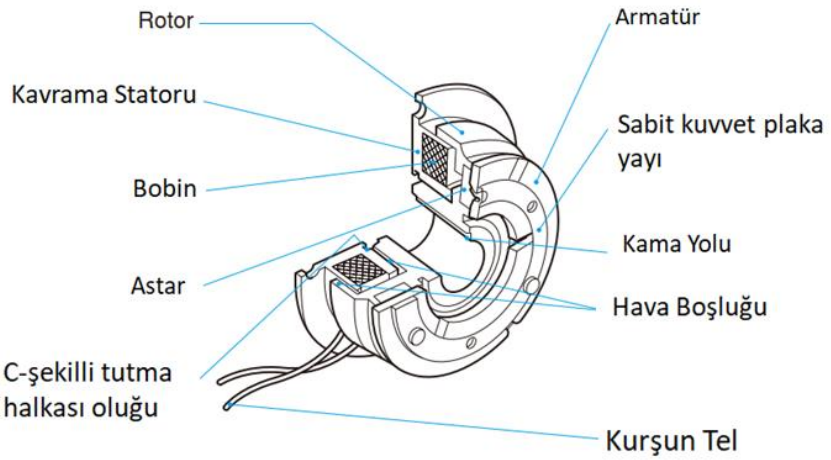
Burada $\overrightarrow{BdA}$, $\vec{B}$ ve $\overrightarrow{dA}$ vektörlerinin skaler çarpımını gösterir ve alanın diferansiyel faktörüdür. Eğer normal olarak tarafından girilmiş yüzey alanıysa o zaman Φ = B A dır [22].



Şekil 1. 4 Step motorun manyetik akı dağılımı [23].

1.3 Elektromanyetik Kavrama

Yukarda belirtilen manyetik alan uygulamaları içerisinde bulunan ve bu çalışmaya konu olan elektromanyetik kavrama, manyetik alan prensibi ile çalışan ve torku mekanik olarak ileten sistemlerdir. Bu nedenle elektromekanik kavramalar olarak anılırlar [13]. Günümüzde elektromanyetik kavramlar: sürtünmeli elektromanyetik kavrama, elektromanyetik çene montajı kavrama, manyetik toz kavrama, kayma tipi elektromanyetik kavrama gibi türleri mevcuttur [24]. Elektromanyetik kavrama, devreye girmesini kontrol etmek için bağlantı gerektirmediğinden uzaktan çalıştırma için en uygun olanıdır. Çok hızlı ve sorunsuz çalışma özelliğine sahiptir. Bununla birlikte, kavrama her devreye girdiğinde enerji elektromanyetik aktüatörde ısı olarak dağıldığından, kavramanın aşırı ısınma olasılığı vardır. Sonuç olarak, kavramanın maksimum çalışma sıcaklığı, elektromıknatıs yalıtımının sıcaklık derecesi ile sınırlıdır [13]. Elektromanyetik Kavramaların ana bileşenleri, bobin, balata, gövde, armatür ve rotor kasnağıdır. Bu parçalar dışında segman, perçin ve bilyalı yataklar gibi farklı işlevleri mevcut olan parçalarda bulunur. Örnek bir elektromanyetik kavrama bileşenleri ve kesiti Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1. 5 Elektromanyetik Kavrama Ana Bileşenleri [25].

1.4 Diğer Elektromanyetik Kavrama Çeşitleri

1.4.1 Çoklu Disk Kavramaları

Genellikle küçük bir alanda son derece yüksek tork sağlamak için çoklu diskli kavramalar kullanılır. Bu kavramalar kuru veya ıslak (yağ banyosu) kullanılabilir. Debriyajların bir yağ banyosunda çalıştırılması, ısı dağıtma kapasitesini de büyük ölçüde artırır, bu da onları çok hızlı dişli kutuları ve takım tezgâhı uygulamaları için ideal hale getirir [26].

Çoklu diskli kavramalar, elektrikle çalıştırma yoluyla çalışır ancak torku mekanik olarak iletir. Kavrama bobinine akım uygulandığında, bobin bir elektromıknatıs olur ve manyetik akı çizgileri üretir. Bu akı çizgileri, alan ve rotor arasındaki küçük hava boşluğundan aktarılır. Kavramanın rotor kısmı manyetize olur ve hem armatür hem de sürtünme disklerini çeken bir manyetik döngü oluşturur. Armatürün çekiciliği, sürtünme disklerini sıkıştırır, torku iç sürücüden dışarıdaki disklere aktarır. Çıkış diskleri, tahrik kabı aracılığıyla bir dişli, kaplin veya kasnağa bağlanır. Debriyaj, giriş ve çıkış RPM'leri eşleşene kadar kayar. Bu, tipik olarak nispeten hızlı bir şekilde gerçekleşir (0,2 - 2 saniye) [26].

Kavramadan akım kesildiğinde, armatür mil ile birlikte serbestçe dönmektedir. Yaylar, sürtünme disklerini birbirinden uzak tutar, bu nedenle debriyaj devreye girmediğinde temas olmaz ve minimum miktarda sürtünme yaratır [26].



Şekil 1. 6 Çoklu Disk Kavrama [27].

1.4.2 Elektromanyetik diş kavramaları

Tüm elektromanyetik kavramalar arasında, dişli kavramalar en küçük toplam boyutta en fazla torku sağlar. Tork herhangi bir kayma olmadan iletildiğinden, kavramalar, çok aşamalı baskı makineleri gibi zamanlamanın kritik olduğu çok aşamalı makineler için idealdir. Bazen tam zamanlamanın tutulması gerekir, bu nedenle diş kavramaları tek bir konum seçeneğiyle yapılabilir, bu da yalnızca belirli bir derece işaretinde angaje olacakları anlamına gelir. Kuru veya ıslak (yağ banyosu) uygulamalarda kullanılabilirler, bu nedenle dişli kutusu tipi tahrikler için çok uygundurlar [26].

Yüksek hızlı uygulamalarda veya 50 rpm'nin üzerindeki kavrama hızlarına sahip uygulamalarda kullanılmamalıdır, aksi takdirde debriyaja takılmaya çalışılırken debriyaj dişlerinde hasar meydana gelebilir.

Elektromanyetik dişli kavramalar, elektrikle çalıştırma yoluyla çalışır ancak torku mekanik olarak iletir. Debriyaj bobininden akım geçtiğinde, bobin bir elektromıknatıs olur ve manyetik akı çizgileri üretir. Bu akı daha sonra alan ve rotor arasındaki küçük boşluktan aktarılır. Kavramanın rotor kısmı manyetize olur ve armatür dişlerini rotor dişlerine çeken bir manyetik döngü oluşturur. Çoğu durumda, rotor, giriş (sürücü) ile tutarlı bir şekilde döner. Kavrama armatürü ve rotor devreye girer girmez kilitlenme %100 olur [26].

Debriyaj alanından akım çekildiğinde, armatür mil ile birlikte dönmekte serbesttir. Yaylar, güç serbest bırakıldığında armatürü rotor yüzeyinden uzak tutar, küçük bir hava boşluğu oluşturur ve girişten çıkışa tam ayrılma sağlar.



Şekil 1. 7 Elektromanyetik diş kavrama [27].

1.4.3 Elektromanyetik Parçacık Kavramaları

Manyetik parçacıklı kavramalar, mevcut geniş çalışma torku aralığı nedeniyle diğer elektro-mekanik kavramalardan tasarımlarında benzersizdir. Standart, tek yüzlü kavrama gibi, gerilime tork neredeyse doğrusaldır. Bununla birlikte, bir manyetik parçacıkta kavrama torku çok hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Bu, bu üniteleri tel sarma, folyo, film ve bant gerilim kontrolü gibi gerilim kontrol uygulamaları için ideal hale getirir. Hızlı tepki vermeleri nedeniyle kart okuyucular, ayırma makineleri ve etiketleme ekipmanları gibi yüksek döngülü uygulamalarda da kullanılabilirler [26].

Manyetik parçacıklar (demir talaşlarına çok benzer) toz boşluğunda bulunur. Bobinden akım geçtiğinde, oluşturulan manyetik akı, neredeyse bir manyetik parçacık çamuru gibi parçacıkları birbirine bağlamaya çalışır. Akım arttıkça, manyetik alan oluşur ve parçacıkların bağlanmasını güçlendirir. Kavrama rotoru bağlı parçacıklardan geçerek dönüş sırasında giriş ve çıkış arasında sürtünmeye neden olur. Çıkış torku gereksinimine bağlı olarak, çıkış ve giriş %100 aktarımda kilitlenebilir [26].

Debriyajdan akım kesildiğinde, giriş mil ile birlikte dönmekte neredeyse serbesttir. Manyetik parçacıklar boşlukta kaldığından, tüm manyetik parçacık kavramaları bir miktar minimum sürtünmeye sahiptir.



Şekil 1. 8 Elektromanyetik parçacık kavrama [27].

1.4.4 Histerezisle Çalışan Debriyaj

Elektrikli histerezis üniteleri son derece yüksek bir tork aralığına sahiptir. Bu üniteler uzaktan kontrol edilebildiğinden, değişen torkun gerekli olduğu test uygulamaları için idealdir. Sürükleme torku minimum olduğundan, bu üniteler herhangi bir elektromanyetik ürünün mevcut en geniş tork aralığını sunar. Güçlendirilmiş histerezis ünitelerini içeren çoğu uygulama, test standı gereklilikleri kapsamındadır. Tüm tork manyetik olarak iletildiği için temas yoktur, bu nedenle son derece uzun ömür sağlayan tork transfer bileşenlerinin hiçbirinde aşınma olmaz [26].

Akım uygulandığında manyetik akı oluşturur. Bu alanın rotor kısmına geçer. Histerezis diski rotora dokunmadan fiziksel olarak geçer. Bu diskler, akının gücüne bağlı olarak manyetize olma özelliğine sahiptir (bu, akı ortadan kalktıkça dağılır). Bu, rotor döndükçe, rotor ile histerezis diski arasındaki manyetik sürtünmenin, dönüşe neden olduğu anlamına gelir. Bir anlamda histerezis diski rotordan sonra çekilir. Gereken çıkış torkuna bağlı olarak, bu çekme sonunda %100 kilitlenme sağlayarak giriş hızıyla eşleşebilir [26].

Kavramadan akım çekildiğinde, armatür serbestçe dönebilir ve her iki eleman arasında hiçbir nispi kuvvet iletilmez. Bu nedenle, giriş ve çıkış arasında görülen tek tork, yatak sürüklemesidir [26].



Şekil 1. 9 Histerezisle çalışan kavrama [27]

2. METARYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu tez çalışmasında elektromanyetik kavramanın tasarım parametrelerinin optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deneysel tasarım metodu olarak kesirli deney tasarım metodu kullanılmıştır. Deneysel tasarım için kontrol edilebilen parametreler belirlendikten sonra seçilen parametreler ve belirlenen seviyeleri ile deneysel eşleştirme tablosu hazırlanmıştır. Bunun için Deney faktör ve seviyeleri tablosu kullanılmıştır. Sonrasında seçilen bu deney tablosuna göre simülasyonlar Ansys Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen çekme kuvvetlerinden sürtünme elemanının sürtünme katsayısı kullanılarak frenleme torkları hesaplanmıştır. Sonrasında yanıt yüzeyi metodu (RSM) kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuş ve tam eşleştirme sonucuna göre 62 deney sonucu tahmin edilmiştir. Tahmin performansını tespit etmek için seçilen iki deney sonucu tekrar simülasyon yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden ilk olarak maksimum tork değerini veren deneysel parametreler elde edilmiştir. Elde edilen bu parametreye göre bobin yeniden dizayn edilerek beklenen tork değerine göre hesap yapılmış ve bobin maliyetleri azaltılmıştır. Ayrıca her bir eşleştirme için ağırlıklar hesaplanmış ve aynı şekilde RSM metodu ile tahmin modeli hazırlanmış ve tam eşleştirme durumu için tahmin oluşturulmuştur. Çalışmada tork ve ürün ağırlığı üzerinden iki farklı optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yanıt yüzey metodu ile tahmin edilen 62 deney için öncelikle Solidworks ’ta her parametrenin (gövde, rotor, armatür, bobin ve balatalar) hatasız bir şekilde dataları hazırlanmıştır. Hazırlanan datalar Ansys analiz programına alınarak SpaceClaim’de düzensiz yüzeyler, küçük yarıçaplar temizlenerek data analiz için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan data Maxwell modülünde gerekli malzemeler tanımlandıktan sonra analiz edilmiştir. Elde edilen kuvvetler kavramalardaki tork hesaplama formülünde yerine koyularak torklar hesaplanmıştır.

2.1 Yanıt Yüzey Metodu (RSM)

İstatistiklere dayalı mevcut yöntemlerden biri Yanıt Yüzey Metodur (RSM). RSM 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmiş ve tanımlanmıştır. İlk olarak kimya endüstrisine uygulanmıştır. RSM, yeni bir ürünün formülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut ürün tasarımının iyileştirilmede, süreç optimizasyonunda ve ürün geliştirme süreçlerinde. RSM, mümkün olan en az sayıda gözlemlenebilir değerle yanıt yüzeyinde maksimum sayıda bağımlı değişkene ulaşmayı amaçlayan bir deney düzeneği

gösterir. RSM'nin temel amacı, deneysel bir çalışmada sonuç üzerinde etkili olan birçok faktörden oluşan bir tasarımda istenen özellikleri sağlayan bölgenin ve bölgenin optimum noktasının tahmin edilmesidir. RSM, süreç değişkenlerinin deneysel uzayını ve optimizasyon tekniklerini araştırmak için deneysel stratejiler içerir. Sistemin tepkisi ile ona etki eden bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan deneysel modelleme tekniklerini kullanarak. Çoklu yanıt problemlerinin çözümü, veriler elde edildikten sonra modelleme ve optimizasyon olmak üzere iki aşamada değerlendirilmektedir. Problemi tanımlarken, girdi değişkenleri (X_i, i=1, 2, …, k) ve yanıt değişkenleri (Y_j, j=1, 2, …, r) olarak kabul edilen özellikler kullanılır [28].

Çok yanıtlı yüzey problemlerini modelleme sürecinde, yanıt değişkenleri ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlamak için uygun bir fonksiyonun belirlenmesi gereklidir. Gerçek dünyadaki yanıt yüzeyi problemlerinin doğrusal olmadığı göz önüne alındığında, tahmin edilen yanıtı belirlemede ikinci dereceden polinom modellerine dayalı regresyon analizini kullanıyoruz. Bir faktörün ana etkisinin veya diğer faktörlerin etkileşiminin, yanıt değişkeninin değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olma derecesi, regresyon katsayıları kullanılarak belirlenir [29].

Gerçek yanıt fonksiyonunun formu bilinmediğinden, yanıt ile bağımsız değişkenler arasındaki gerçek fonksiyonel ilişki için uygun bir yaklaşım bulunmalıdır. Sistemin yanıtı, bağımsız değişkenin doğrusal bir fonksiyonu olarak iyi uyuyorsa yaklaşım birinci dereceden bir modeldir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (9)$$

Sistemin tepki yüzeyinde bir eğrilik varsa, ikinci dereceden bir model daha uygun olabilir;

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} x^2 x_j + \sum_{i}^{k-1} \sum_{j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (10)$$

Bu denklemde; y yanıt değişkeni, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, , \ldots \beta_k$ bilinmeyen regresyon parametreleri, x_i, x_j süreç (karar) değişkenleri (i=1, 2, …, k) ve (j=1, 2, …, k) ve ε terim hatası

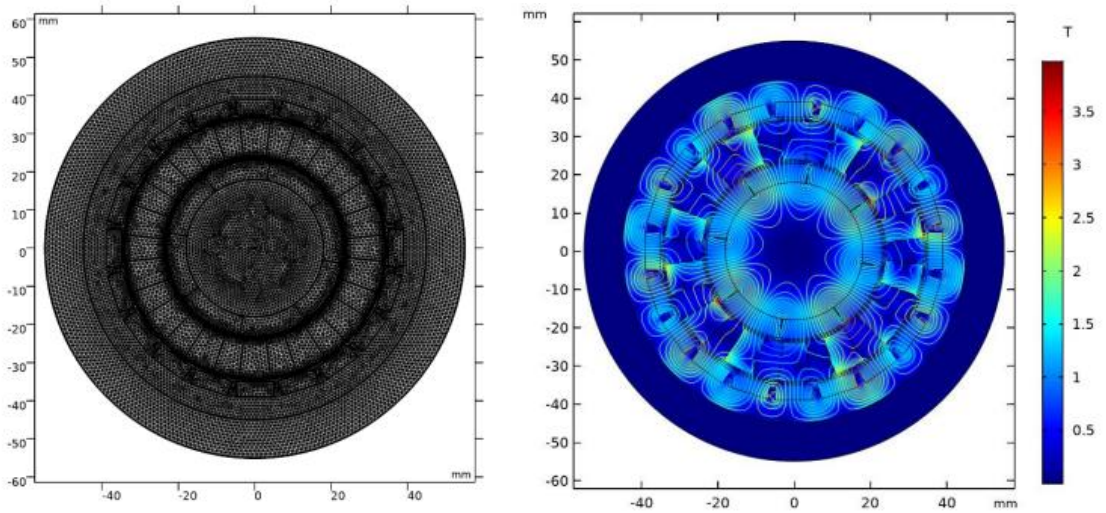
En çok kullanılan RSM; Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) ve Box-Behnken tasarımı. Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi, tam faktöriyel deneysel tasarım yönteminden daha az deneysel/sayısal sonuç gerektirir. Box-Behnken tasarımları 1960 yılında Box ve Behnken tarafından ikinci derece model parametrelerinin tahmininde kullanılan üç seviyeli tamamlanmamış çok faktörlü tasarımlardan bir tür rotasyonel tasarım geliştirildi. Box-Behnken tasarımlarındaki her faktörün üç seviyesi vardır. Box-Behnken tasarımları

CCD'lere göre daha ekonomik bir tasarım sınıfıdır. Box-Behnken tasarımları, ikinci derecede modelleri tahmin etmek, sıralı tasarımlar kurmak, modele olan güven eksikliğini analiz etmek ve bloklara izin vermek için kullanılan ve deneysel tasarımlarda etkin olarak kullanılan bir tepki yüzey tasarımıdır [28].

Her bir sistem cevabının, Box-Behnken tasarım metodu yardımıyla kontrol faktörleri ile ilişkisini belirleyebilmek için etkileşim grafikleri çizilmiş ve matematiksel denklemleri oluşturulmuştur. Ayrıca sistem cevaplarının kontrol faktörleriyle olan ilişkilerinin kontur ve yüzey grafikleri yanıt yüzey yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır. Box-Behnken tasarım metodu ile yapılması gereken 2187 deney yerine en iyi sonuçları verebilen 62 deney yapılmaktadır. Fakat bunu daha sonra yanıt yüzey metodu sayesinde ful faktöriyel deneylerin tahmin analizi optimize edilmektedir.

2.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Bu çalışmada Sonlu Elemanlar Analizi (FEM) yöntemini kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi karmaşık geometrili ve doğrusal olmayan malzemeler barındıran mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen sayısal modelleme tekniğidir [30]. Özellikle iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemleri ve sınır değer problemlerinin çözümünde uygulanır. FEM esasta geniş olan bir sistemi sonlu eleman olan daha küçük bileşenlere ayırır [3]. Problem geometrisi ağ yapılarla ayrıştırılır; hacim veya yüzey üzerinde düğüm adı verilen noktalar oluşturulur. Her bir düğüme kendi malzemenin özellikleri atanır. Periyodiklik ve simetrik özelliklerinden faydalanarak problemin boyutları sınır koşulları kullanılarak azaltılabilir [31].



Şekil 2. 1 Sonlu Elemanlar Analizine örnek bir mesh ve sonuç görüntüsü [32].

Analiz çalışmaları bilgisayar destekli mühendislik yazılımları sayesinde daha hızlı bir

şekilde yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında analiz konusunda çok güçlü olan ANSYS ile yapılacaktır. ANSYS yazılımında birçok modül bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında Ansys Maxwell ile yapılacaktır. Ansys Maxwell, elektromanyetik ve elektromekanik araçların analizi ve tasarımı için güçlü bir yazılımdır. Bu programın temelinde Maxwell denklemleri bulunmaktadır. Maxwell denklemleri, Lorentz kuvvet yasaları ile birlikte klasik elektrodinamik, klasik optik ve elektrik devrelerine kaynak oluşturan ve elektromanyetik olayları açıklayan dört denklemden oluşmaktadır. Bu dört denklemin integral formları ve türev ifadeleri aşağıda Tablo 1'de verilmiştir.

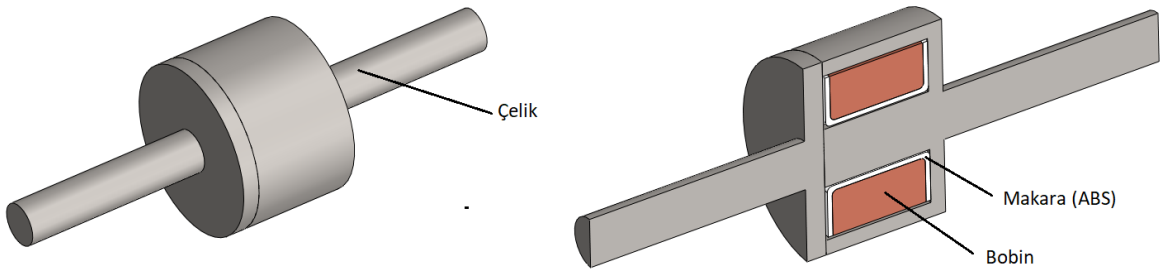
Tablo 1 Maxwell Denklemleri

İntegral Formları	Türev İfadeleri	Açıklama
$\int E.dA = \frac{Q}{\varepsilon_0}$	$\nabla .\ E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	(Coulomb Yasası)
$\int B.dA = 0$	$\nabla .\ B = 0$	(Manyetik Yük Yoktur)
$\int E.dS = -\frac{d\Phi_m}{dt}$	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	(Faraday'ın İndüksiyon Yasası)
$\int E.dS = \mu_0 I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_m}{dt}$	$\nabla \times B = \mu_0 (J + \varepsilon_0 \frac{\partial B}{\partial t})$	(Maxwell'in Yer Değiştirme Akımıyla Amper Yasası)

2.3 Elektromanyetik Kavramanın Tasarım ve Analizi

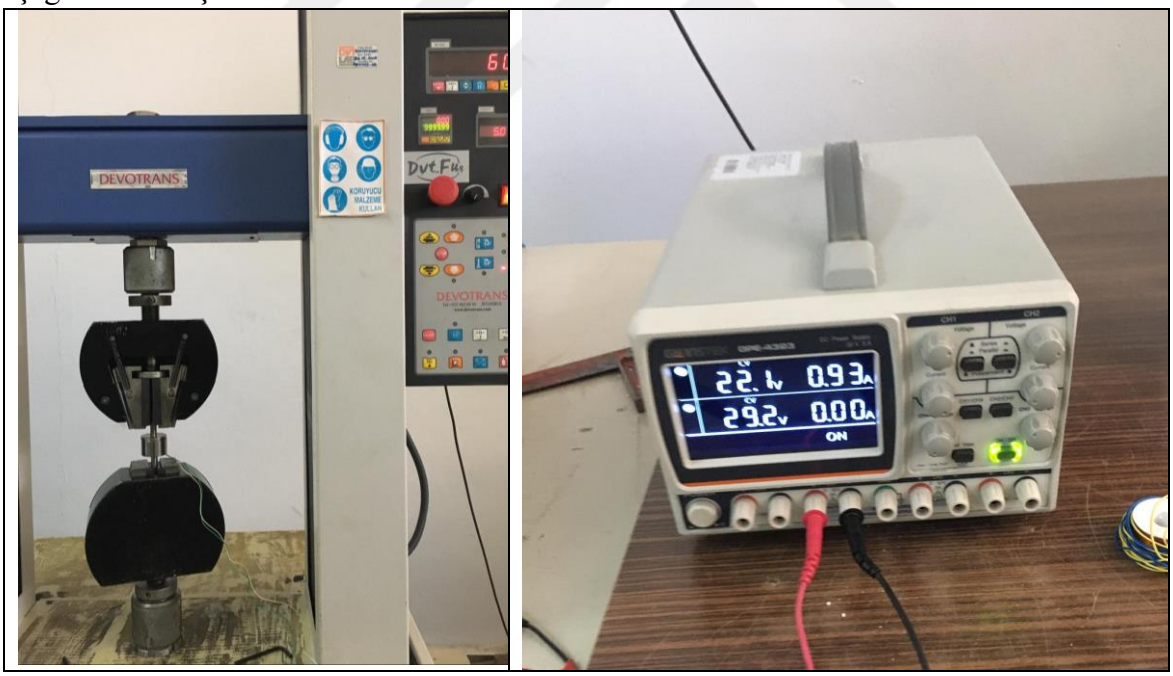
2.3.1 Geliştirilen FE Modelinin Doğrulanması

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, elektromanyetik kavramaların tasarım parametrelerinin optimizasyonu FE metodu ile gerçekleştirilecektir. Bu amaçla ticari yazılım olan Ansys Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Kullanılan yazılım ve adımlarının doğruluğunun değerlendirilmesi için bir ön deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında aşağıda geometrisi verilen bir özel çekme testi numunesi hazırlanmıştır.



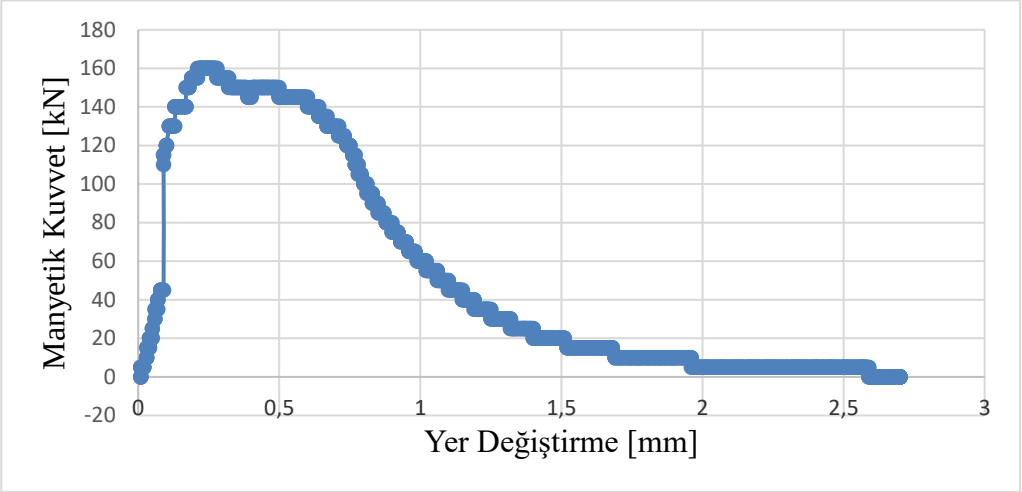
Şekil 2. 2 Hazırlanan FE doğrulama ürünün 3D CAD modeli

Test numunesinin üretimi Karbon Steel 12L14 malzemeden CNC tezgahında yapılmıştır. Üretim sonrası bobin sarımı için ABS malzemeden makara tasarımı yapılmış ve katmanlı imalat yöntemlerinden olan 3D baskı teknolojisi ile makara üretilmiştir. Makara üzerine 0.3 mm tel çapında bakır tel kullanılarak 1070 sarım gerçekleştirilmiştir. Sarımın dirence 22 Ohm'dur. Test işlemi için 55 kN kapasitesine sahip Devotrans çekme testi cihazı kullanılmıştır. İşlem için 11V gerilim, 0,5 A akım uygulanmıştır. Test işlemine ait görsel aşağıda verilmiştir.



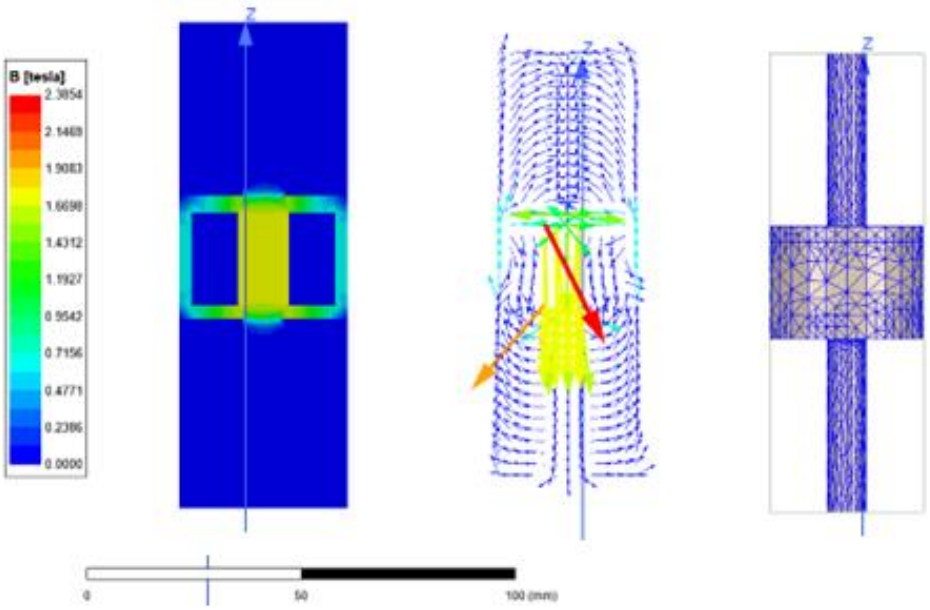
Şekil 2. 3 Doğrulama numunesi için uygulanan test işlemi

Uygulanan test işleminde sonuç olarak yer değiştirme ve kuvvet değerleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler incelendiği zaman 11 V, 0.5 A değerinde akım uygulandığı zaman elde edilen maksimum çekme kuvvetinin 160 N olduğu görülmüştür.

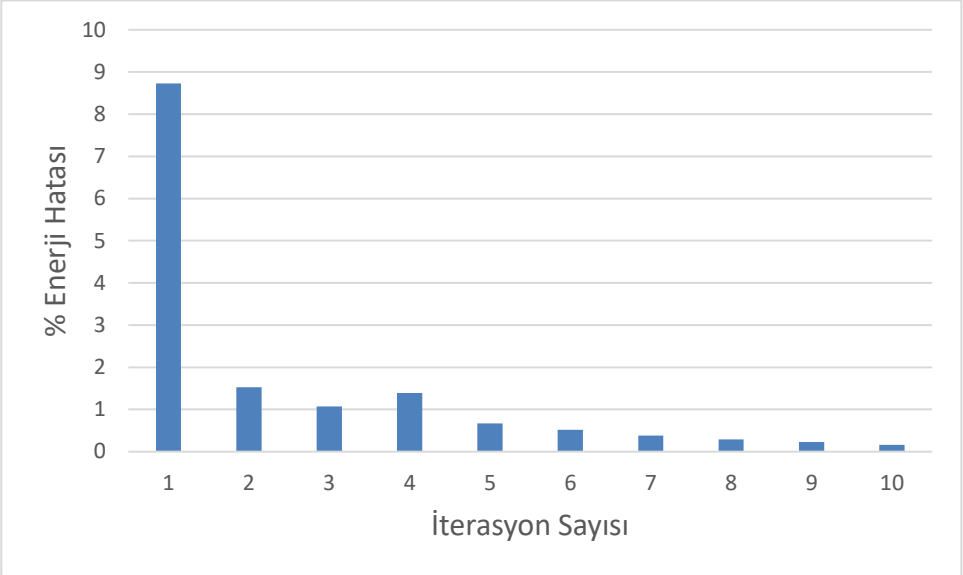


Şekil 2. 4 Test işleminde elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği

Test işlemi öncesi ise geliştirilen FE modeli test numunesine uygulanmıştır. 1070 AT değeri uygulanarak, önceki bölümlerde anlatılan ayarlar dikkate alınarak simülasyon işlemi Ansys Maxwell yazılımında yapılmıştır. Toplam enerji hatası %1'in altına inecek şekilde iterasyon başlatılmıştır. 10. İterasyon işleminde %0.16 hata değeri elde edilmiştir. Toplam eleman sayısı ise 6093 değerinden başlanılmış ve 10. İterasyon da 64797 elemana çıkmıştır. Simülasyona ait mesh, vektör grafik ve kontür grafik değerleri aşağıdaki şekilde verilmiştir. Şekil 36'da ise iterasyon bazlı % enerji hatası değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2. 5 Simülasyon sonuç grafikleri



Şekil 2. 6 İterasyon bazlı % enerji hatası

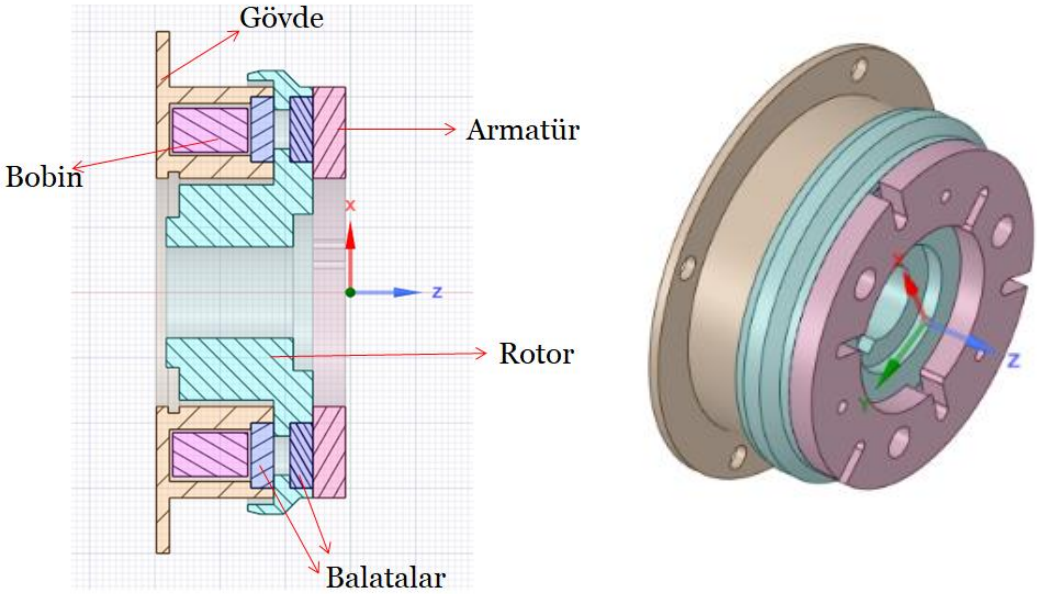
Elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Simülasyon ile elde edilen çekme kuvvetinin 172N, deneysel olarak elde edilen değerin ise 160N olduğu görülmektedir. Özellikle deneysel işlemde çekme testi cihazının eş merkez hale getirilmesinin zorluğu, iki parça halindeki test numunesinin tam olarak oturtulamaması ve yüzey aralarındaki kirliliğin bu hataya sebep olduğu değerlendirilmektedir. Elde edilen %7,5'lik bir hata payının bu tür bir simülasyonun tahmin yeteneği açasından önemli bir veri olduğu ve optimizasyon çalışması için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Tablo 2 Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre	**Deneysel**	**Simülasyon**	**% Hata**
Çekme Kuvveti [N]	160	172	%7.5

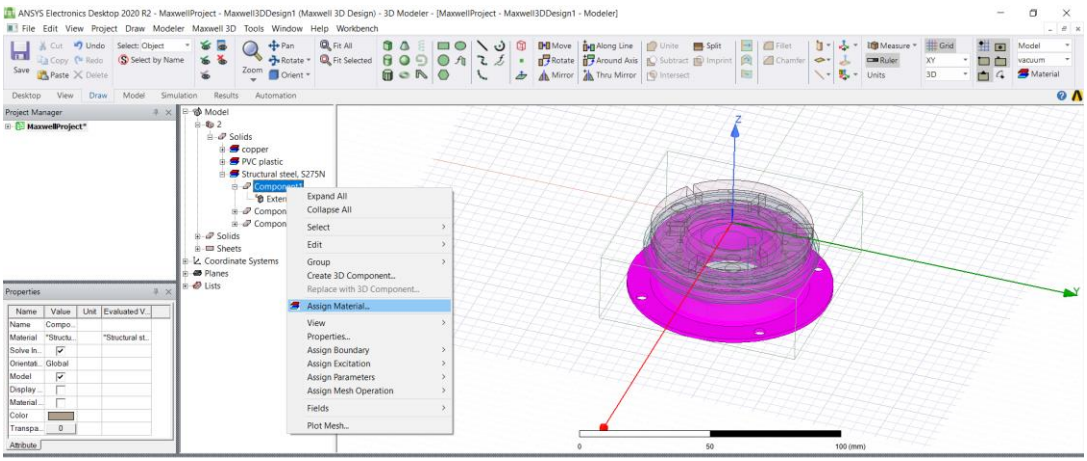
2.3.2 Geometri Hazırlama ve Analiz

Geometriyi analize hazırlamak için Solidworks yazılımında bileşenleri teker teker çizilip montaj haline getirilmiştir.

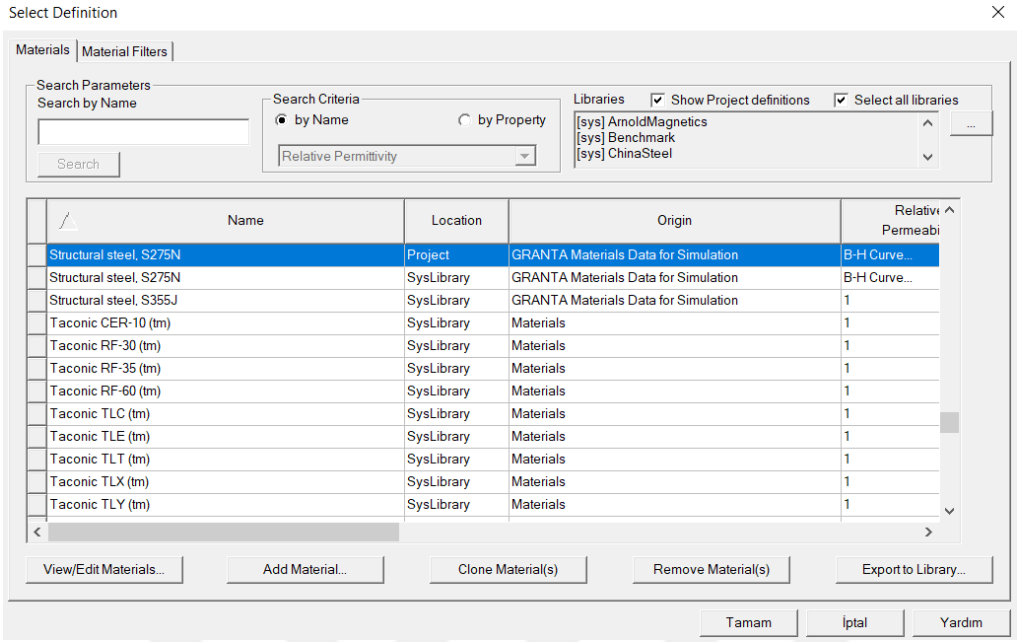


Şekil 2. 7 Elektromanyetik Kavramanın kesit ve montajı

Geometriyi analiz etmek için geometri öncelikle SpaceClaim'de düzgün hela getirilmiştir. İstenmeyen kenarlar, ayrık kenarlar, küçük yüzeyler ve çakışmalar temizlenerek uygun bir model hazırlanmıştır. Model analize hazır olduktan sonra model Ansys Maxwell modülüne alınmıştır. Modelin oluşturulması sırasında her bir yapıya bir materyal atanması gerekmektedir. Temel anlamda materyal seçimi "assign material" sekmesi tıklanarak ortaya çıkan ara yüzden (Şekil 2.3 ve şekil 2.4) daha önceden özellikleri kayıtlı olan materyallerden birisi seçilerek yapılmaktadır.

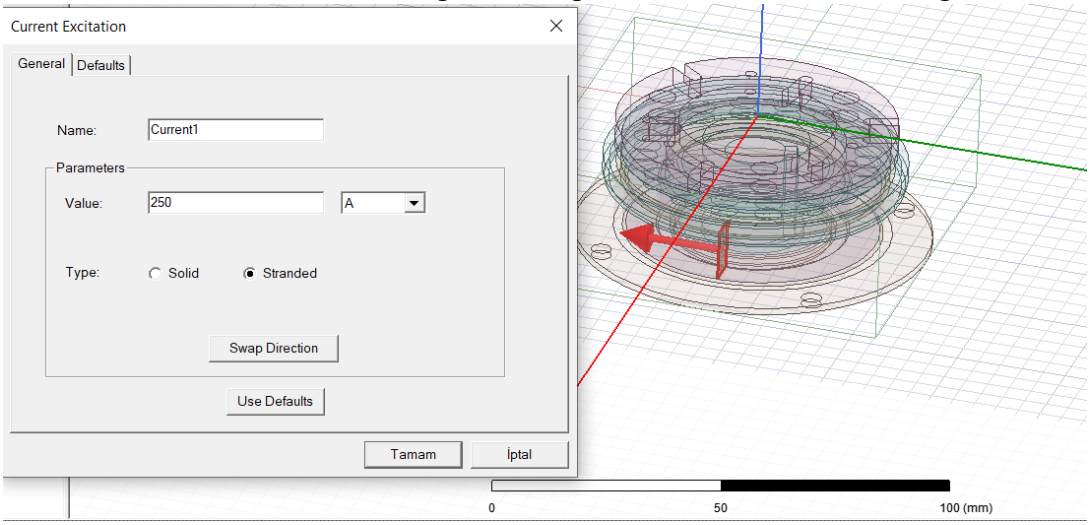


Şekil 2. 8 Ansys Maxwell malzeme seçimi



Şekil 2. 9 Malzeme seçimi

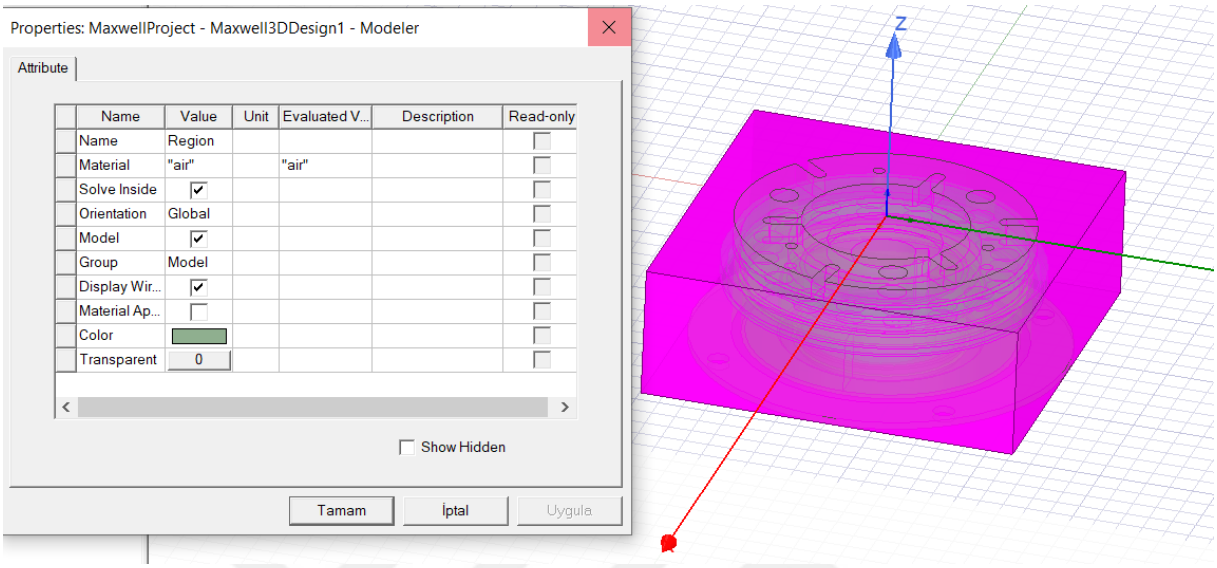
Diğer bir adımda öncelikle akımın yönünü doğru belirtilmelidir. Akım değerinin yönü doğru değilse "Swap Direction" butonu kullanılarak gerekli düzeltme yapılmalıdır. Öncelikle akımın giriş ve çıkışının gerçekleşeceği yüzey seçilir ve sağ tıklanarak "Assign Excitation-Current" yolu izlenir (Şekil 2.5). Bu tezde 250 Amper seçilmiştir. Bu değer hali hazırda ticari ürünlerde bu tork değerine sahip üründe kullanılan bobin değeridir.



Şekil 2. 10 Akım değerlerinin ve yönünün belirlenmesi

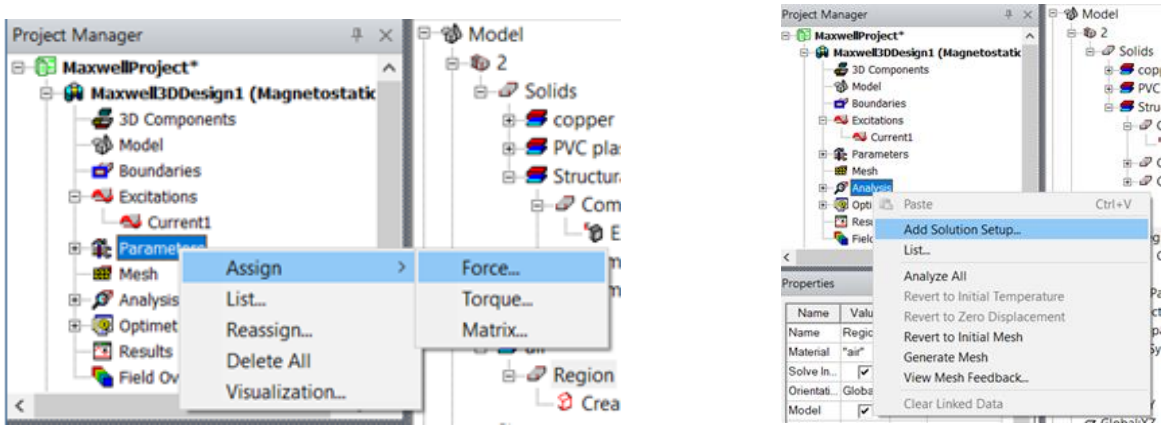
Analizin gerçekleşeceği hacim özellikle analiz süresi açısında çok önemlidir. Program kullanımı esnasında yapılan en büyük hatalardan birisi de region olarak adlandırılan analiz hacminin gereğinden büyük olarak seçilmesidir. İşlemin uzamaması için analiz hacminin küçük seçilmesi de kimi zaman analizin yetersiz sonuçlar vermesine sebep olmaktadır.

‘’Create Region” yolları izlenerek Şekil 2.6’da verilen ara yüze ulaşılabilir. Bu noktadan sonra analizin gerçekleştirileceği hacmin değerlerini ve konumu girmelidir.



Şekil 2. 11 Hacim seçim ekranı ve oluşturulan hacim

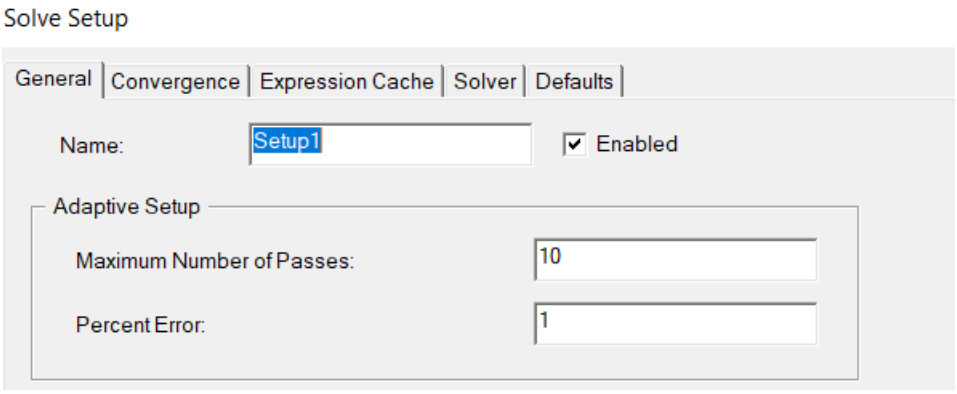
Model ile ilgili tasarım işlemlerinden sonra analize ait parametreler “Project Manager” bölmesinde yer alan “Parameter-Assign Parameter” yolu izlenerek seçilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada parametre “Force” olarak seçilmiştir (Şekil 2.7). Yine aynı bölümde bulunan bir diğer ayar da analiz ayarları kısmıdır. Analiz ayarları için ise “Add Solution Setup” yolu izlenmiştir (şekil 2.7).



Şekil 2. 12 Parametre ve analiz ayarları

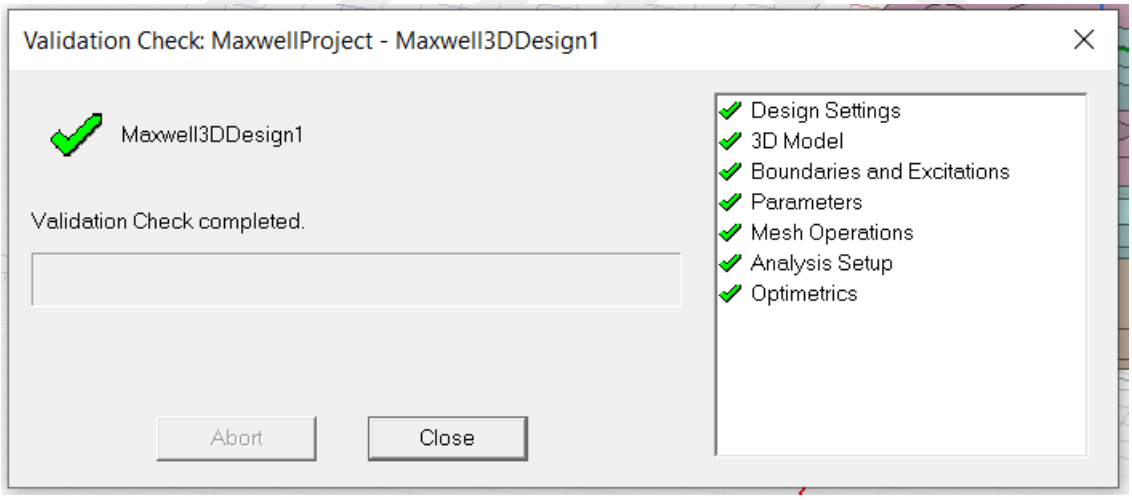
Analiz ayarlarının gerçekleştirildiği ara yüzde (Şekil 2.8) yer alan “Percent Error” bölümü çok önemlidir. Bu seçim hem analizin süresini hem de analizin doğruluğunu etkilemektedir. Eğer gerçekten detaylı ve önemli bir analiz gerçekleştirilecek ise bu değerin %1’in altında seçilmesi daha doğru sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada analizin uzun

sürmeyeceği bilindiğinden hata yüzdesi %1 seçilmiştir.



Şekil 2. 13 Analiz ayarları

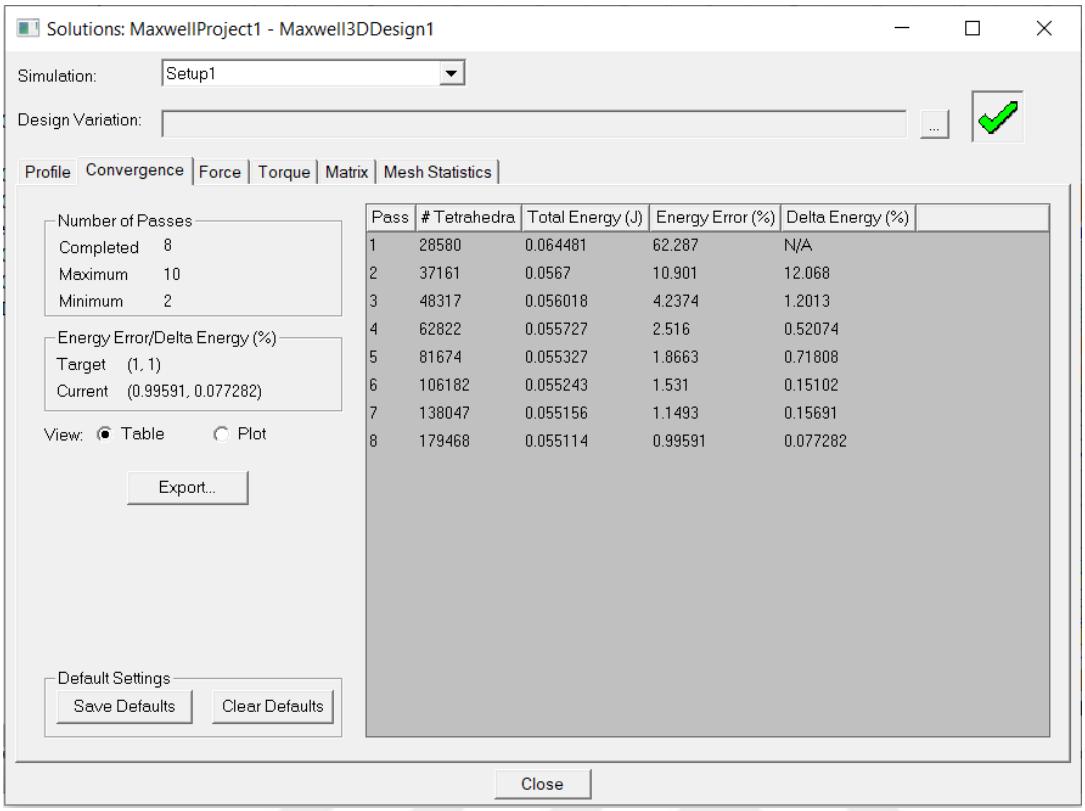
Tüm bu ayarlamaların ardından "Validate" sekmesi tıklanarak modelde ve diğer ayarlarda bir eksiklik olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu ara yüzde yer alan her bir satırın yanında yeşil bir işaret olması tüm kontroller başarılı olduğunu göstermektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2. 14 Analizin kontrol edilmesi

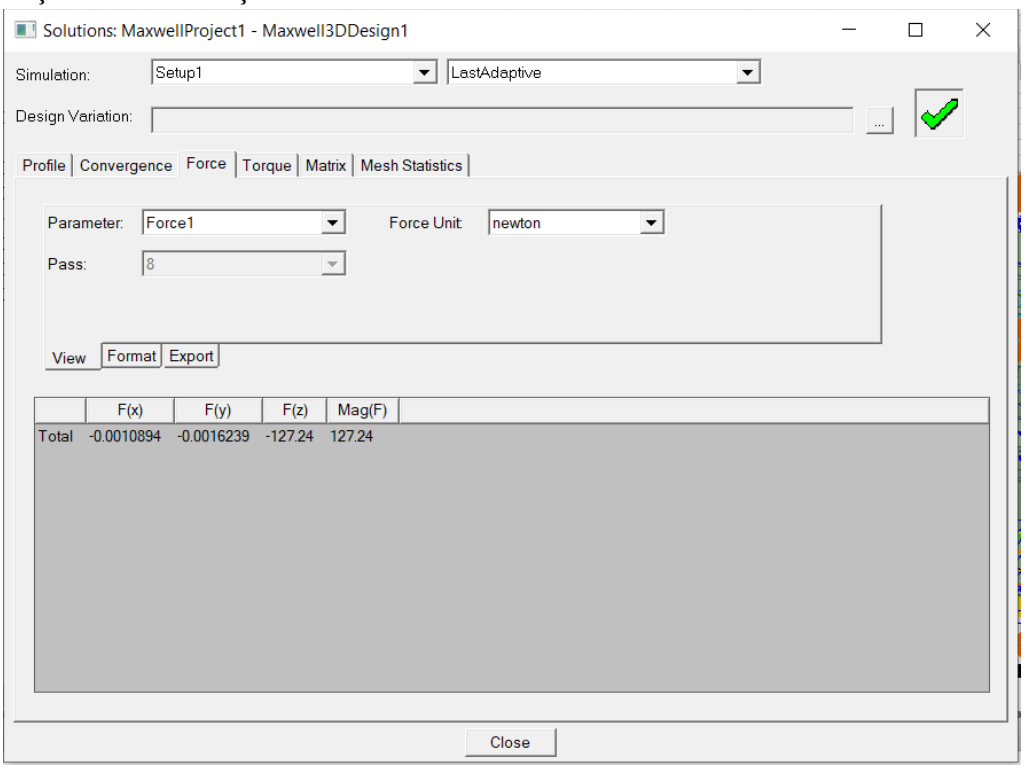
"Validation Check" işleminin başarılı olmasının ardından "Analyze All" tıklanarak analiz işlemi başlatılmıştır. Bu aşamadan sonra sonuçlar sayısal, grafik ya da görsel olarak incelenecektir.

Analizden tamamlandıktan sonra Şekil 2.8'de analiz ayarlarında 10 iterasyon ve %1'in altında bir hata oranıyla incelenecektir. İterasyon grafiği şekil 2.10'da gösterilmektedir.



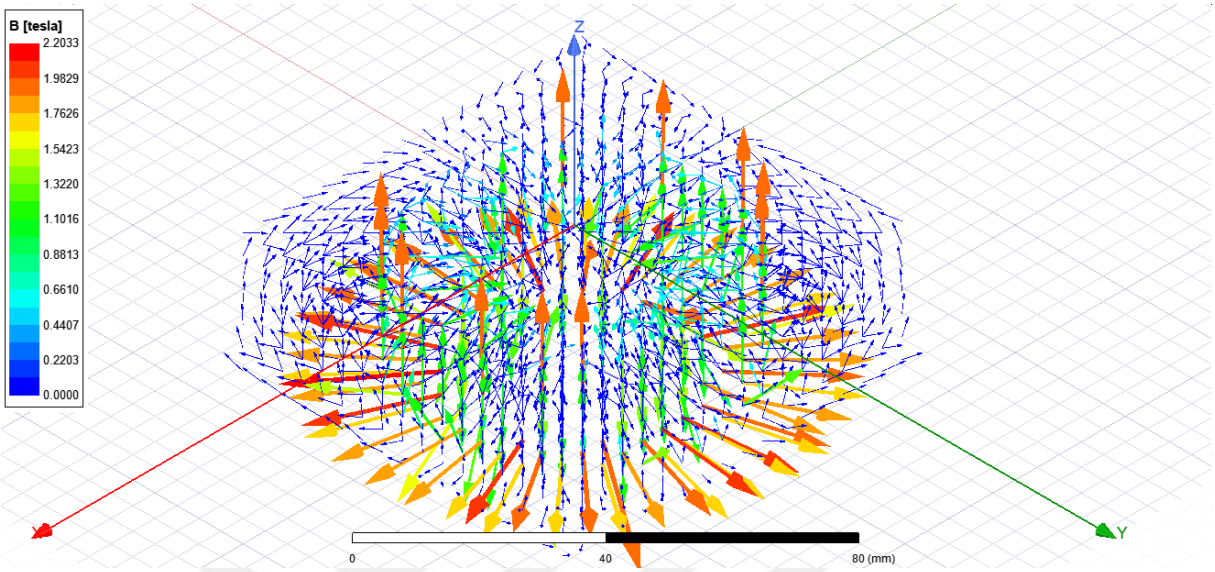
Şekil 2. 15 İterasyon bazlı hata oranı

Şekilde göründüğü gibi 8. iterasyondan sonra hata oranı %1'in altına düştüğü için koşturulma durmuştur.

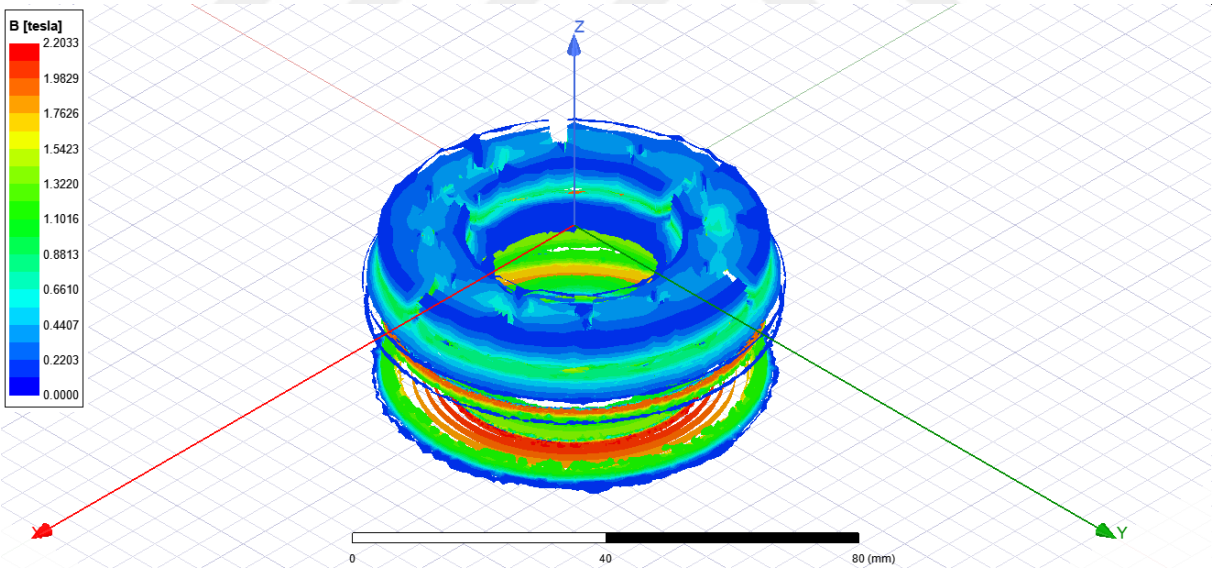


Şekil 2. 16 Çekme kuvveti

Elde edilen çekme kuvveti kavrama tork hesaplama formülünde yerine koyularak gerekli tork hesaplaması yapılacaktır.



Şekil 2. 17 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri



Şekil 2. 18 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı

2.3.3 Elektromanyetik Kavramanın Optimizasyonun

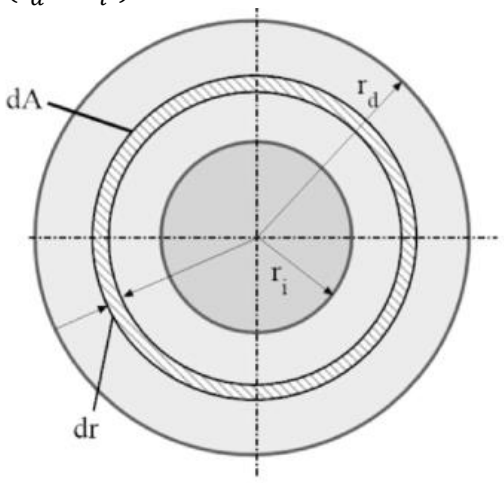
Kavrama tiplerinden olan elektromanyetik kavramanın optimizasyonun yapılması kararlaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada ticari olarak kullanılan 7 Nm tork değerine sahip elektromanyetik kavramanın değerleri referans alınmıştır. Kullanılan tork hesaplama formülü sürtünme ile iletilebilecek moment denklemine yerleştirilerek bulunur.

Birçok kavramada tek ya da arkalı önlü iki komşu yüzey olarak disk şeklindeki sürtünme yüzeyi mevcuttur. Temas noktasının her noktasında aynı basıncın oluştuğu ve sürtünme katsayısının kayma hızından etkilenmediği varsayımı ile yola çıkarılarak

$$M_k = M_s = \frac{2}{3}.\pi.p.\mu.\left(r_d^3 - r_i^3\right) \quad (11)$$

Temas basıncı, disk şeklinde bir parçanın diğerine eksen yönünde bir Fe kuvveti ile bastırılması sonucu oluşuyorsa bu kuvvet

$$F_e = \pi.p.(r_d^2 - r_i^2) \quad (12)$$



Şekil 2. 19 İç ve dış yarıçapların gösterimi

Moment eksenel kuvvet cinsinde yazıldığında

$$M_k = M_s = \frac{2}{3}.\pi.p.\mu.\left(\frac{r_d^3 - r_i^3}{r_d^2 - r_i^2}\right) \quad (13)$$

Bu tez çalışmasında kullanılan elektromanyetik kavramada çift balata olduğu için bulunan tork değerinin iki katı alınacaktır.

Deney tasarım yöntemi olarak yanıt yüzey metodu kullanılmıştır. Deneysel tasarımlarda parametre ve seviye sayısı artıkça yapılması gereken deney sayısı artacaktır. Yanıt yüzey metodu ile daha az deney yapılarak en optimum sonuç elde edilmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında 7 parametre, 3 seviye belirlenmiştir. Bu parametreler literatür araştırması ve uzman görüşü ile belirlenmiştir. Parametre olarak rotor malzemesi, rotor plaka kalınlığı, rotor plaka delik sayısı, armatür kalınlığı, gövde arka kalınlığı, gövde üst kalınlık ve gövde içi kalınlık seçilmiştir. Elektromanyetik ürünlerde en çok düşük karbonlu çelikler kullanılmaktadır. Bu kapsamda 1008, paslanmaz çelik 409 ve genel yapı çeliği malzeme seçilmiştir. Tasarım sınırları dikkate alınarak rotor plaka kalınlığı, rotor plaka delik sayısı,

armatür kalınlığı, gövde arka kalınlığı, gövde üst kalınlık ve gövde içi kalınlık belirlenmiştir. Deney tasarımı için Box-Behnken tasarımı kullanılarak deney tasarımı hazırlanmıştır. Box-Behnken tasarım dizisi kullanılarak deney tasarımı hazırlanmıştır. Full faktöriyel deney tasarımında 2187 deney yapılması gerekirken, kullanılan Yanıt yüzey deney tasarımı metodu ile bu deney sayısı 62'ye indirilmiş, yani kesirli deney yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede zaman ve geliştirme süresinden önemli avantaj elde edilmiştir. Faktörler ve seviyeler Tablo 3'te verilmiştir. Deney listesi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3 Deney faktör ve seviyeleri

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A: Rotor Malzemesi	St 1008	S275	St 409
B: Rotor Plaka Kalınlığı (mm)	2,5	2	3
C: Rotor Plaka Delik Sayısı	12	16	20
D: Armatür kalınlığı (mm)	4,5	5	5,5
E: Gövde Arka Kalınlığı(mm)	1,5	2	2,5
F: Gövde Üst Kalınlık (mm)	31,5	31	32
G: Gövde İçi Kalınlık (mm)	20,75	21	21,25

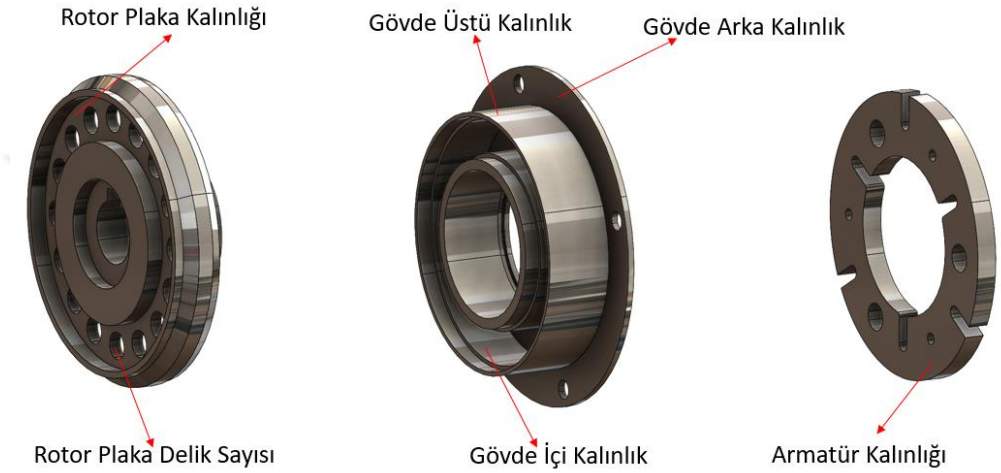
Tablo 4 Yanıt yüzey Metodu deney tablosu Box-Behnken tasarımı

FAKTÖRLER						
A	B	C	D	E	F	G
0	0	0	-1	-1	-1	0
0	0	0	1	-1	-1	0
0	0	0	-1	1	-1	0
0	0	0	1	1	-1	0
0	0	0	-1	-1	1	0
0	0	0	1	-1	1	0
0	0	0	-1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	0
-1	0	0	0	0	-1	-1
1	0	0	0	0	-1	-1
-1	0	0	0	0	1	-1
1	0	0	0	0	1	-1

-1	0	0	0	0	-1	1
1	0	0	0	0	-1	1
-1	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	0	1	1
0	-1	0	0	-1	0	-1
0	1	0	0	-1	0	-1
0	-1	0	0	1	0	-1
0	1	0	0	1	0	-1
0	-1	0	0	-1	0	1
0	1	0	0	-1	0	1
0	-1	0	0	1	0	1
0	1	0	0	1	0	1
-1	-1	0	-1	0	0	0
1	-1	0	-1	0	0	0
-1	1	0	-1	0	0	0
1	1	0	-1	0	0	0
-1	-1	0	1	0	0	0
1	-1	0	1	0	0	0
-1	1	0	1	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0
0	0	-1	-1	0	0	-1
0	0	1	-1	0	0	-1
0	0	-1	1	0	0	-1
0	0	1	1	0	0	-1
0	0	-1	-1	0	0	1
0	0	1	-1	0	0	1
0	0	-1	1	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1
-1	0	-1	0	-1	0	0
1	0	-1	0	-1	0	0
-1	0	1	0	-1	0	0
1	0	1	0	-1	0	0
-1	0	-1	0	1	0	0
1	0	-1	0	1	0	0
-1	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0	0
0	-1	-1	0	0	-1	0
0	1	-1	0	0	-1	0
0	-1	1	0	0	-1	0
0	1	1	0	0	-1	0
0	-1	-1	0	0	1	0
0	1	-1	0	0	1	0
0	-1	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Deney tasarımı hazırlandıktan sonra model tasarımları analize uygun olarak sadeleştirilerek hazırlanmıştır. İstenmeyen kenarlar, ayrık kenarlar, küçük yüzeyler ve çakışmalar giderilmiştir. Rotor üzerinde uygulayacağımız üç deney faktörü (rotor plaka kalınlığı, rotor plaka delik sayısı, armatür kalınlığı, gövde arka kalınlığı, gövde üst kalınlık ve gövde içi kalınlık) katı model olarak modellenmiştir.

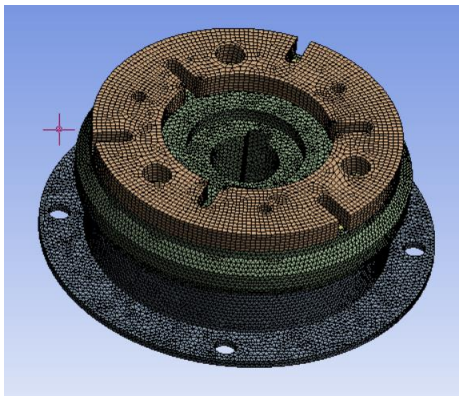


Şekil 2. 20 Elektromanyetik Kavramanın değişken parametreleri



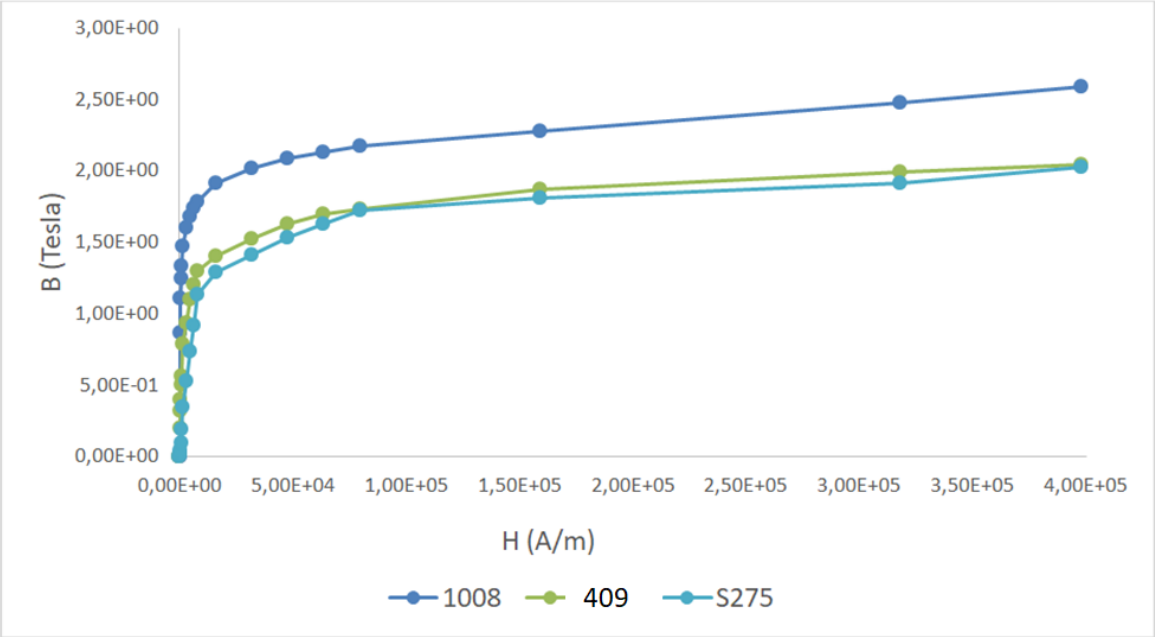
Şekil 2. 21 Elektromanyetik Kavramanın İzometrik ve Kesit Görünüşü

Elektromanyetik analiz için Maxwell modülü kullanılmıştır. Maxwell modülünde malzemeler, bobin Amper.Turns (A.T) tanımlanıp koşturulmuştur. Bobin 250 A.T olarak tanımlanmıştır. Elektromanyetik analizinde yapının sonlu elemanlar ağına bölünmesi Şekil 2.17'de verilmiştir. Model 410897 elemana ayrılmış.



Şekil 2. 22 Elektromanyetik Kavramanın mesh görünümü

Malzeme rotor için st1008, st1010 ve yapısal çelik olarak deney tasarımına göre tanımlanmıştır. St1008, paslanmaz çelik 409 ve yapısal çelik için B-H eğrileri sırasıyla Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2. 23 1008, 409 ve S275 malzemesine ait B/H eğrileri [Ansys]

3. BULGULAR

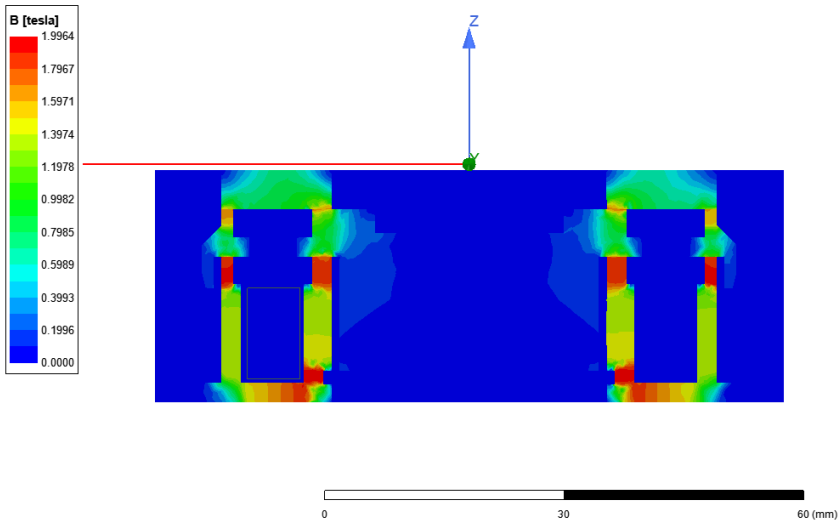
Yanıt yüzey Metot deney tasarımı ile hazırlanan ve sonlu elemanlar analizi yapılan çalışmaların sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen elektromanyetik simülasyon ile kavrama çekme kuvveti hesaplanmıştır. Hesaplanan kavrama çekme kuvvetinden, sürtünme elemanı iç çapı ve dış çapı, sürtünme katsayısı kullanılarak kavrama tork değeri N.m biriminde hesaplanmıştır. Kavrama sürtünme katsayısı 0.55 olarak üretici kataloğundan alınmıştır. Box-Behnken deney tasarım tablosuna göre elde edilen tork değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5 Tork Değerleri

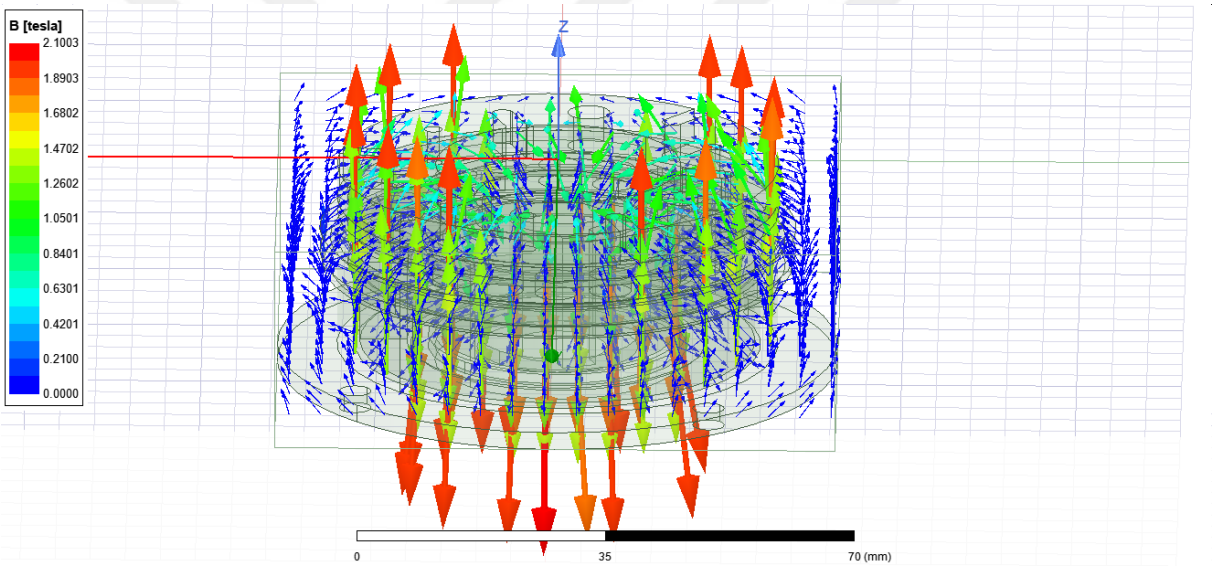
A	B	C	D	E	F	G	Tork[Nm]
0	0	0	-1	-1	-1	0	3,57
0	0	0	1	-1	-1	0	3,54
0	0	0	-1	1	-1	0	6,58
0	0	0	1	1	-1	0	6,6
0	0	0	-1	-1	1	0	4,74
0	0	0	1	-1	1	0	4,74
0	0	0	-1	1	1	0	12,87
0	0	0	1	1	1	0	12,85
-1	0	0	0	0	-1	-1	5,16
1	0	0	0	0	-1	-1	3,87
-1	0	0	0	0	1	-1	8,39
1	0	0	0	0	1	-1	7,13
-1	0	0	0	0	-1	1	5,24
1	0	0	0	0	-1	1	4,46
-1	0	0	0	0	1	1	10,51
1	0	0	0	0	1	1	8,33
0	-1	0	0	-1	0	-1	2,59
0	1	0	0	-1	0	-1	3,26
0	-1	0	0	1	0	-1	3,96
0	1	0	0	1	0	-1	7,41
0	-1	0	0	-1	0	1	2,73
0	1	0	0	-1	0	1	3,9
0	-1	0	0	1	0	1	4,12
0	1	0	0	1	0	1	9,08
-1	-1	0	-1	0	0	0	3,46
1	-1	0	-1	0	0	0	1,78
-1	1	0	-1	0	0	0	5,57
1	1	0	-1	0	0	0	4,49
-1	-1	0	1	0	0	0	3,4
1	-1	0	1	0	0	0	1,81
-1	1	0	1	0	0	0	5,85

1	1	0	1	0	0	0	4,24
0	0	-1	-1	0	0	-1	5,46
0	0	1	-1	0	0	-1	11,73
0	0	-1	1	0	0	-1	5,35
0	0	1	1	0	0	-1	11,82
0	0	-1	-1	0	0	1	5,99
0	0	1	-1	0	0	1	13,07
0	0	-1	1	0	0	1	6,19
0	0	1	1	0	0	1	13,1
-1	0	-1	0	-1	0	0	2,34
1	0	-1	0	-1	0	0	0,03
-1	0	1	0	-1	0	0	7,58
1	0	1	0	-1	0	0	6,88
-1	0	-1	0	1	0	0	7,47
1	0	-1	0	1	0	0	5,02
-1	0	1	0	1	0	0	19,09
1	0	1	0	1	0	0	14,32
0	-1	-1	0	0	-1	0	2,06
0	1	-1	0	0	-1	0	2,9
0	-1	1	0	0	-1	0	3,71
0	1	1	0	0	-1	0	6,88
0	-1	-1	0	0	1	0	3,76
0	1	-1	0	0	1	0	4,57
0	-1	1	0	0	1	0	6,72
0	1	1	0	0	1	0	11,93
0	0	0	0	0	0	0	7,86
0	0	0	0	0	0	0	7,86
0	0	0	0	0	0	0	7,86
0	0	0	0	0	0	0	7,86
0	0	0	0	0	0	0	7,86
0	0	0	0	0	0	0	7,86

En büyük en iyidir yaklaşımı ile hesaplanan tork değerleri elde edilmiş ve bu değerlerde en büyük 19,09 N.m ve en küçük 1,37 N.m tork değeri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda 19,09 N.m tork değerini veren 47. deneyin manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve 3d durumda akı yoğunluğu vektörleri sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.

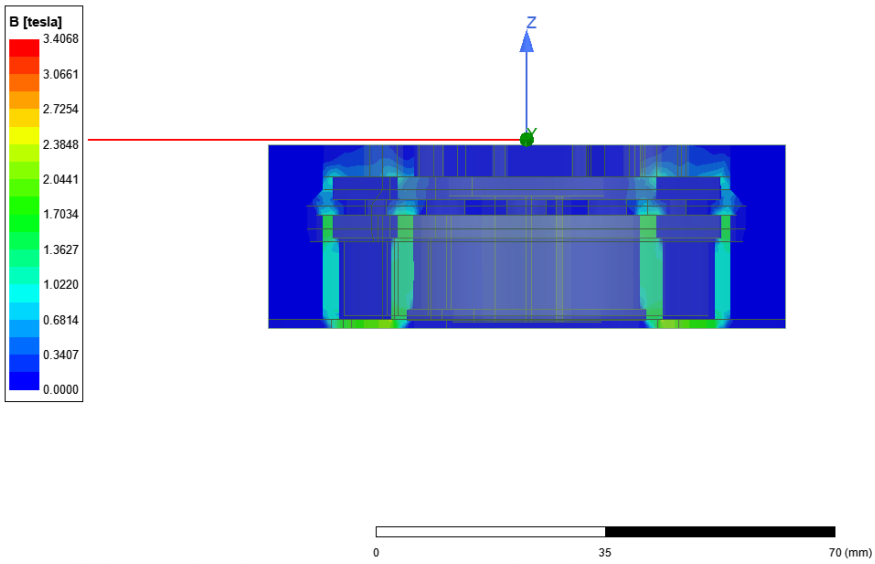


Şekil 3. 1 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı

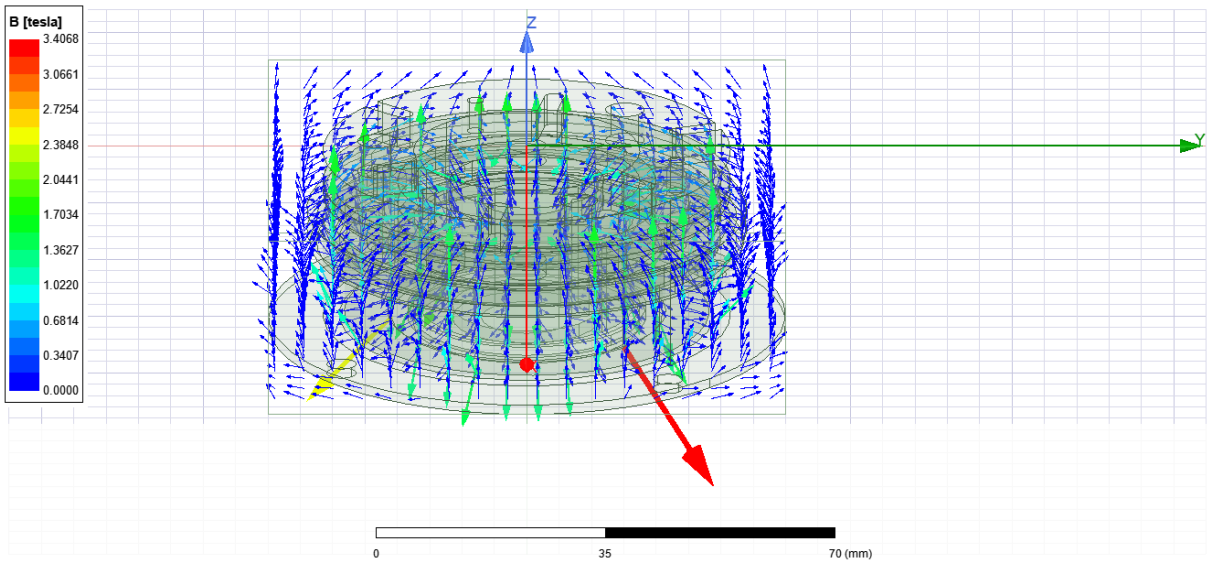


Şekil 3. 2 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Çalışmada en küçük tork değeri olan 1,37 N.m değeri 42. deneyde elde edilmiştir. En kötü sonucu veren deneyin manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve 3d manyetik akı yoğunluğu vektörleri kontur grafiği sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

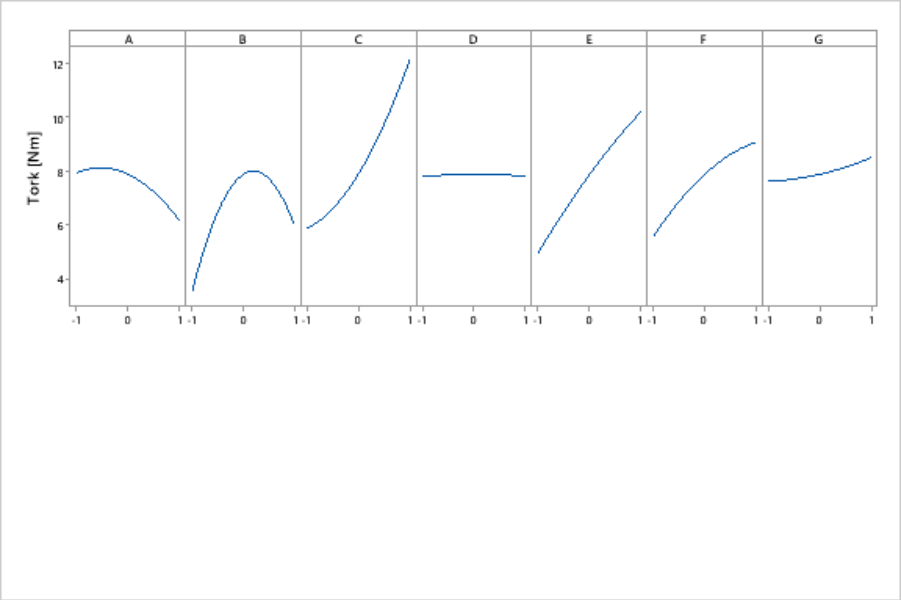


Şekil 3. 3 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 3. 4 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri

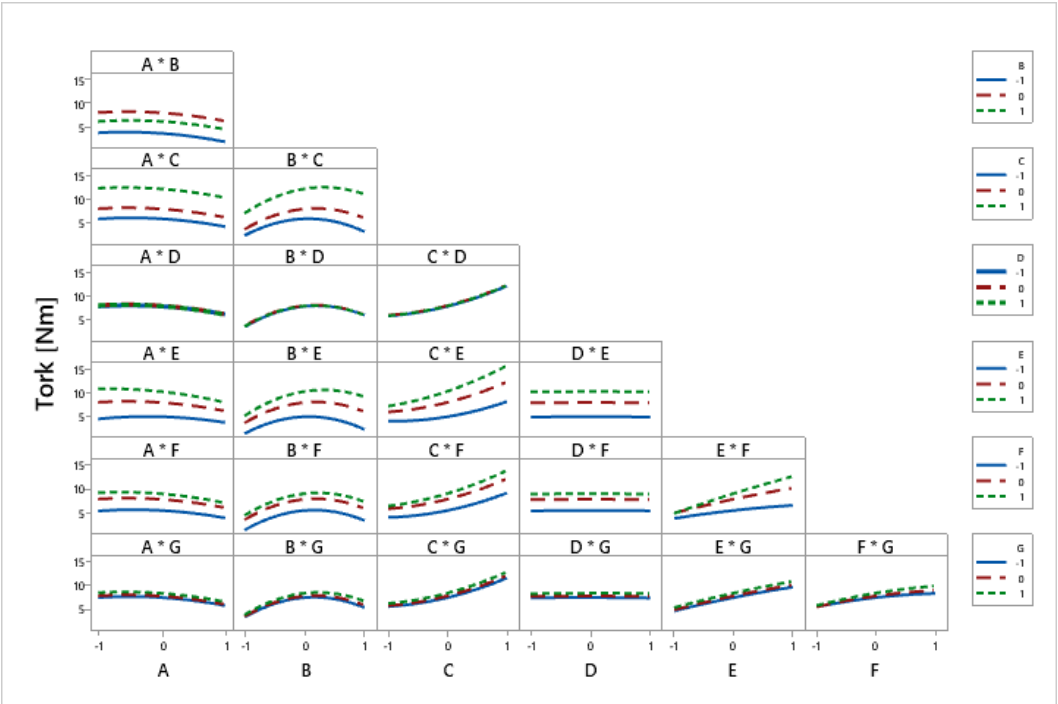
Minitab yazılımı ile parametrelerin tork üzerine olan etkilerin analiz çalışması yapılmıştır. Parametrelerin tork üzerine olan etkilerinin tek başına gösterimi şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 5 Parametrelerin ana etki grafiği

Şekil 3.5'te RSM metodu ile parametrelerin etki grafiği görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi D (Armatür Kalınlığı) parametresinin neredeyse hiç etkisinin görülmediği gözüküyor. G (gövde içi kalınlık) parametresinin etkisinin çok az olduğu gözüküyor. En etkili parametrenin C (delik sayısı) olduğu gözlemleniyor. Diğer parametrelerinin de etkili olduğu gözlemleniyor.

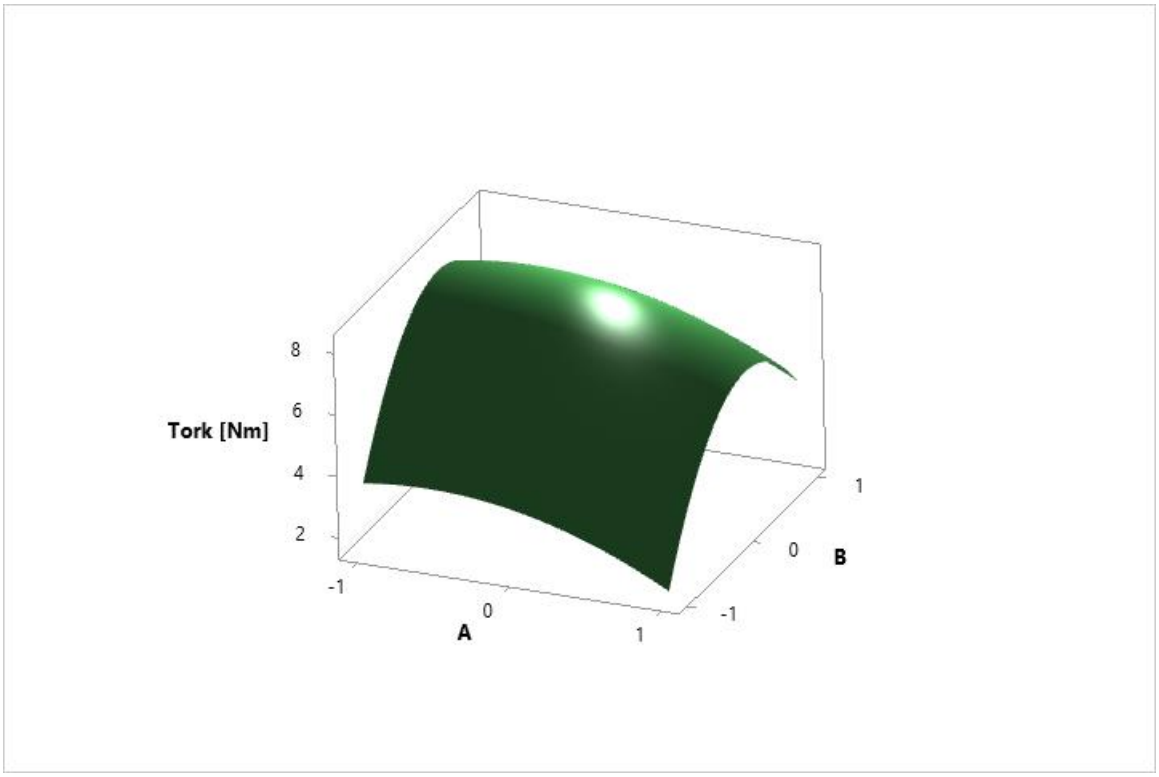
Şekil 3.5'te parametrelerin tek başına etkisini inceledik. Şimdide parametrelerin ikili biçimde tork üzerinde nasıl olduğunu şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3. 6 RSM tork etkileşim grafiği

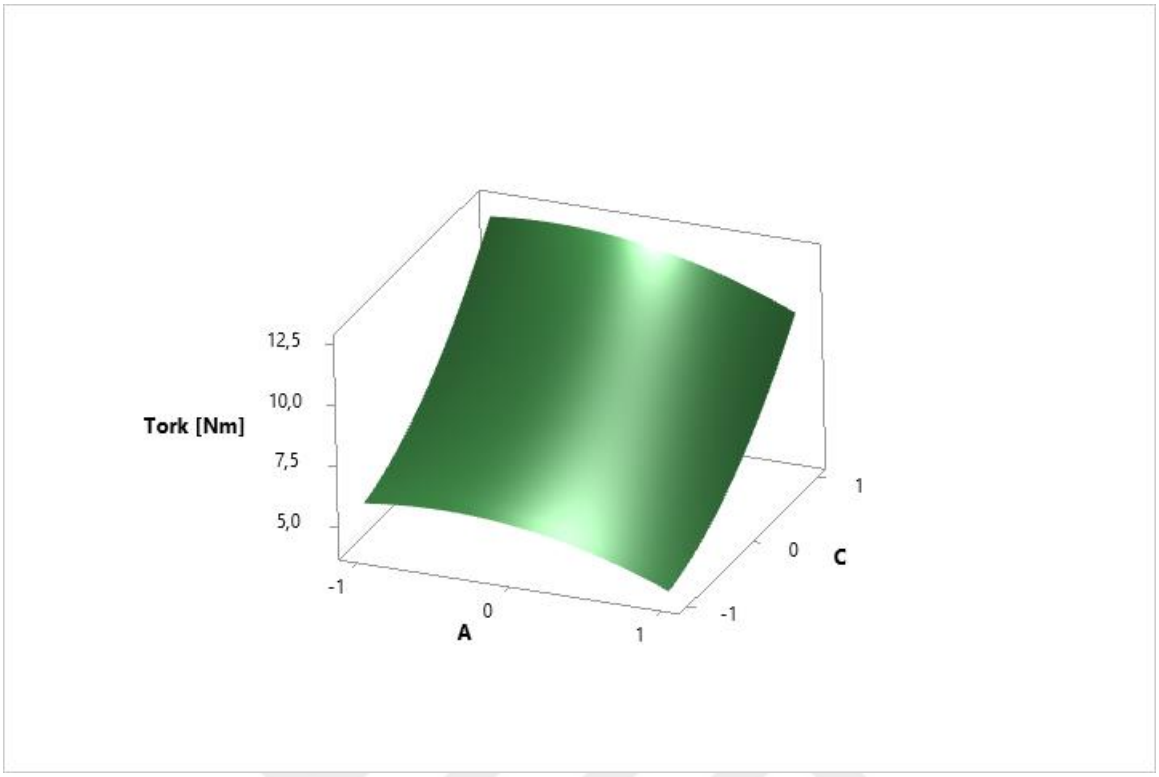
Şekil 3.5'te göründüğü gibi D parametresinin tek başına fazla bir etkisi olmadığı ama şekil 3.6'da C ve B gibi parametrelerle etkileşime girdiğinde bir anlam kazandığı görülmektedir. D ve G tek başına etkisi olmadığı gibi birbiriyle etkileşimlerinde de etkisi yok. Grafikte gözüktüğü gibi D-E, D-F ve D-G'nin etkisinin olmadığı, diğer parametrelerinin etkileşim grafiğinde etkisi olduğu gözükmektedir.

A ve B parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.7'de verilmiştir. Şekilde gözüktüğü gibi A (malzeme) ve B (rotor kalınlığı) parametreleri 0 iken tork değeri maksimum verimliliktedir.



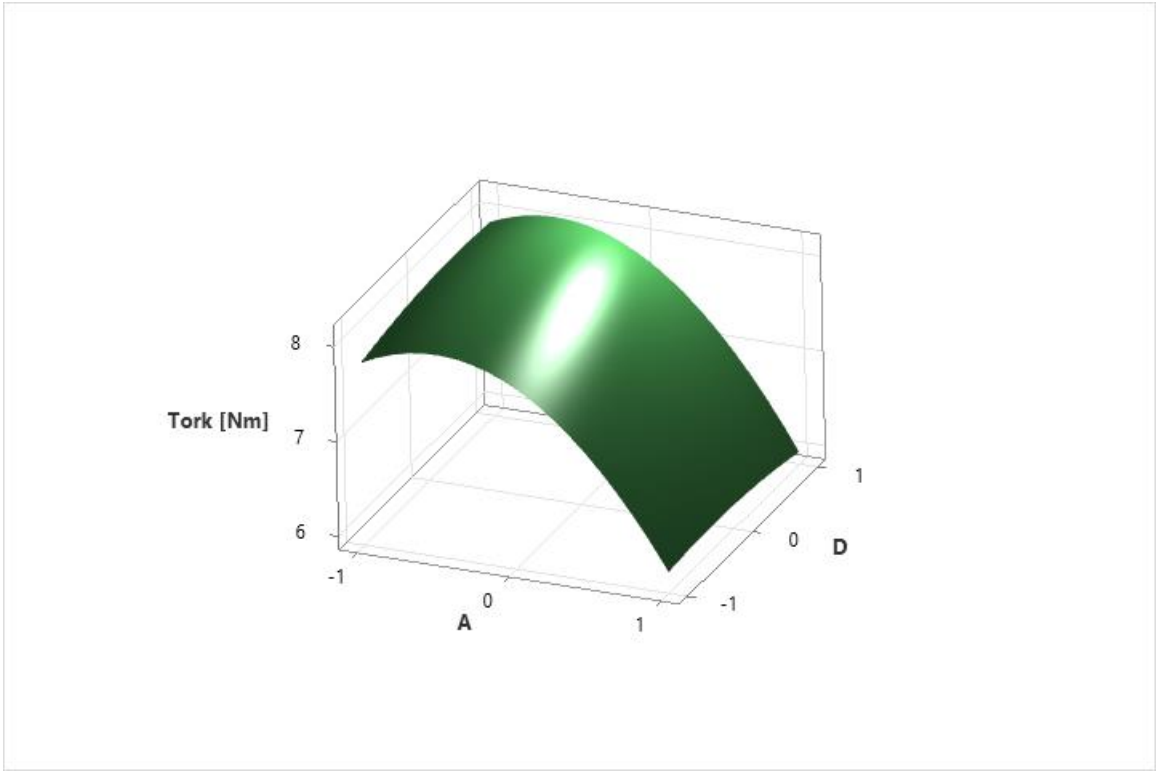
Şekil 3.7 3 boyutlu Tork-A; B grafiği

A ve C parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.8'de verilmiştir. Şekilde anlaşılacağı üzere A (malzeme) parametresi -1 de iken ve C (delik sayısı) parametresi 1 de iken tork en yüksektir.



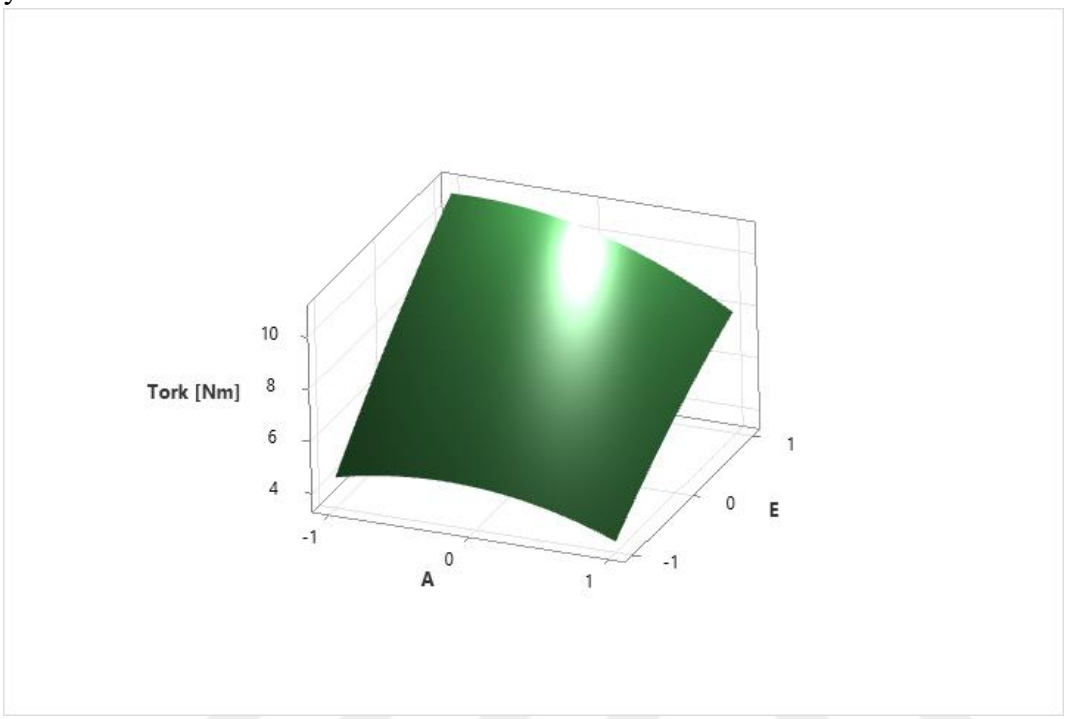
Şekil 3. 8 3 boyutlu Tork-A; C grafiği

A ve D parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekilde anlaşılacağı üzere A parametresi çok etkilidir. Hemen hemen D (armatür kalınlığı) parametresinin etkisi yok denecek kadar azdır.



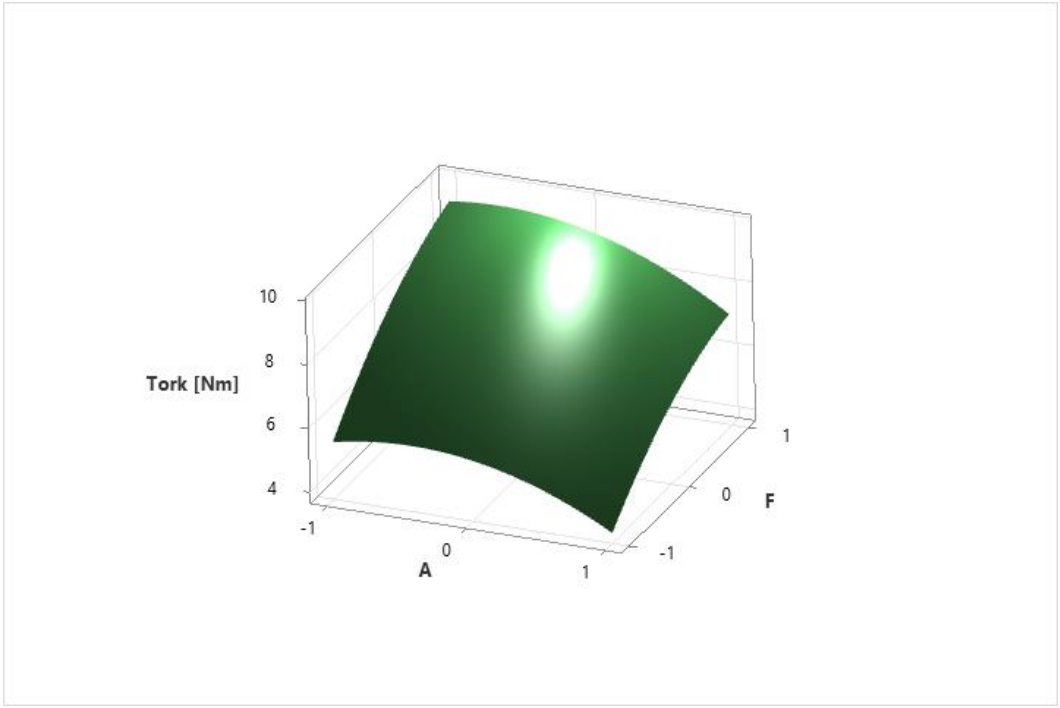
Şekil 3.9 3 boyutlu Tork-A; D grafiği

A ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.10'da verilmiştir. A parametresi -1 ve 0 da ve E (gövde arka kalınlık) parametresi 1 de iken tork değeri yüksektir.



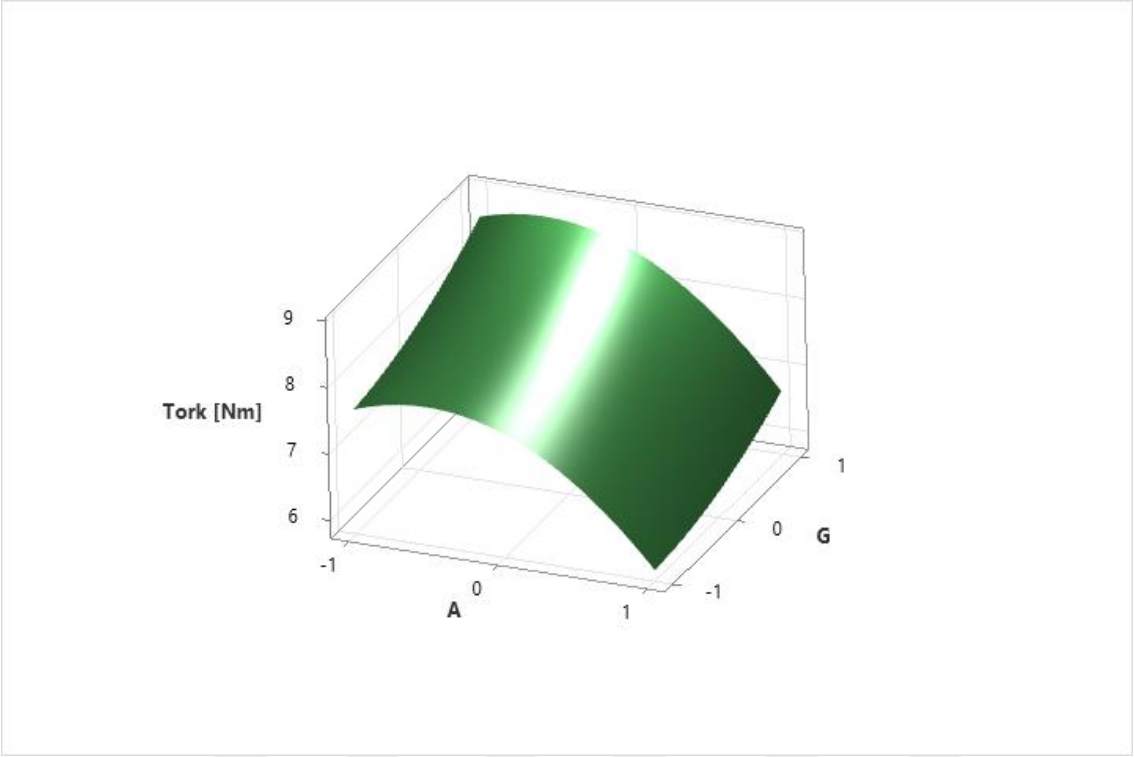
Şekil 3.10 3 boyutlu Tork-A; E grafiği

A ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.11'de verilmiştir. A parametresi -1 ve 0 da ve F (gövde üstü kalınlık) parametresi 1 de iken tork değeri yüksektir.



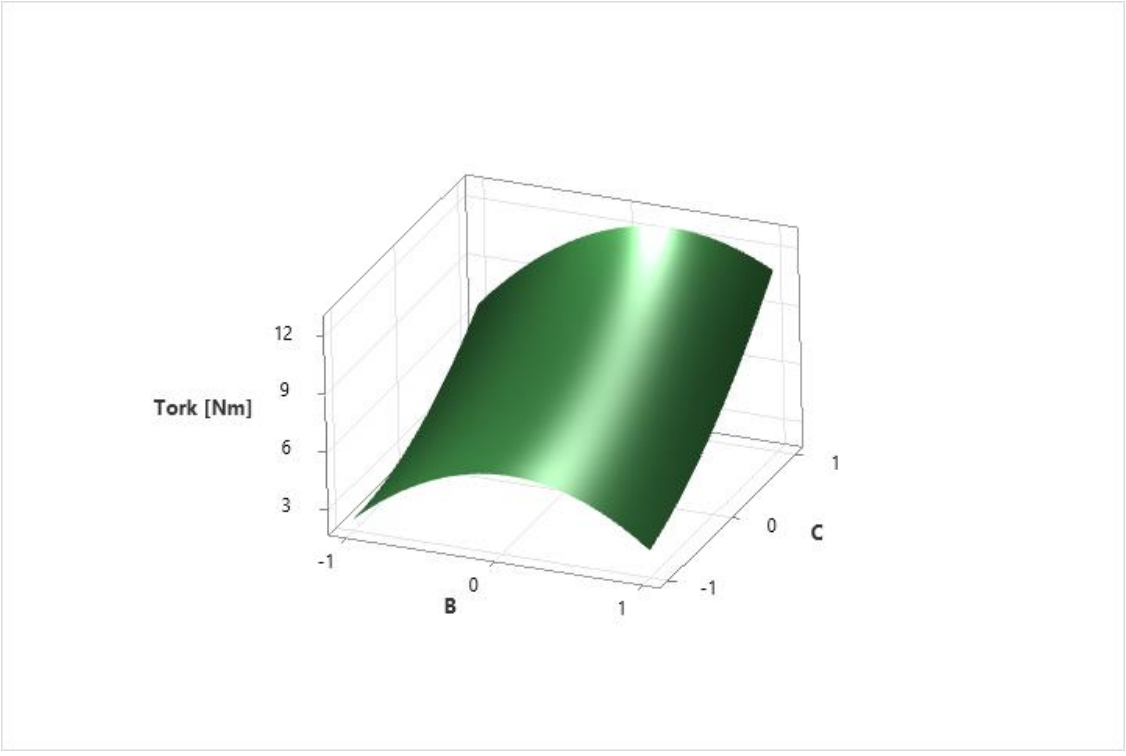
Şekil 3. 11 3 boyutlu Tork-A; F grafiği

A ve G parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.12'de verilmiştir. A parametresi 0 ve G (gövde içi kalınlık) parametresi 1 iken tork değeri yüksektir.



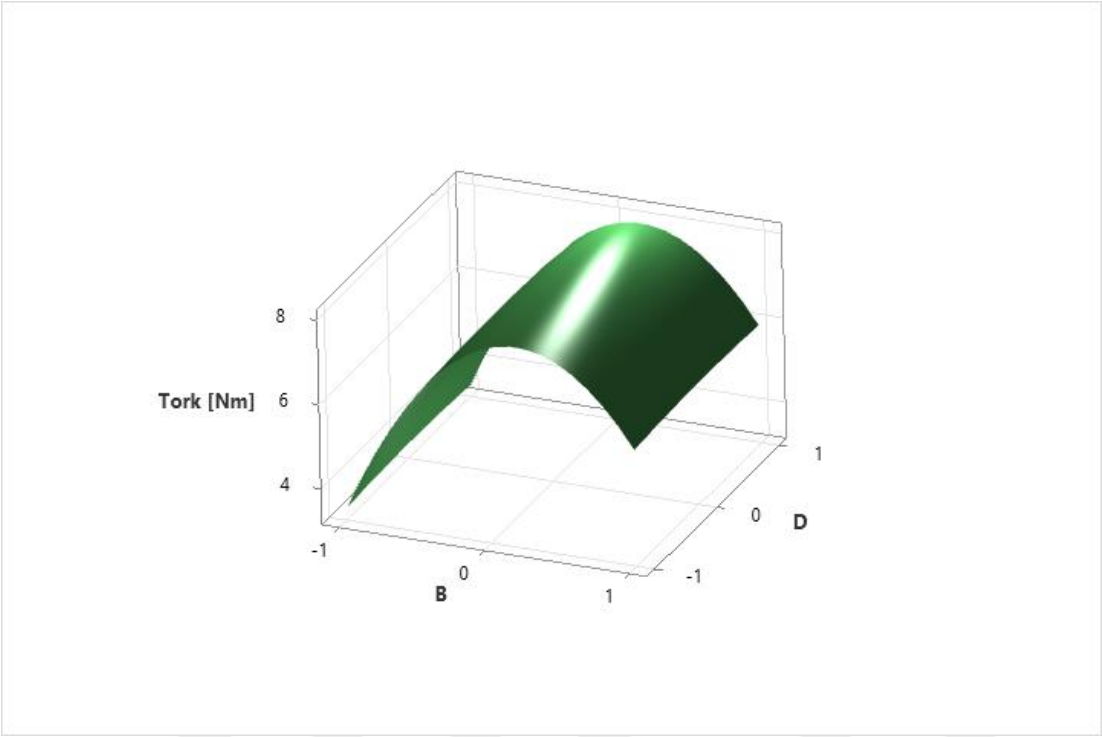
Şekil 3. 12 3 boyutlu Tork-A; G grafiği

B ve C parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.13'te verilmiştir. B parametresi 0 ve C parametresi 1 de iken tork değeri yüksektir.



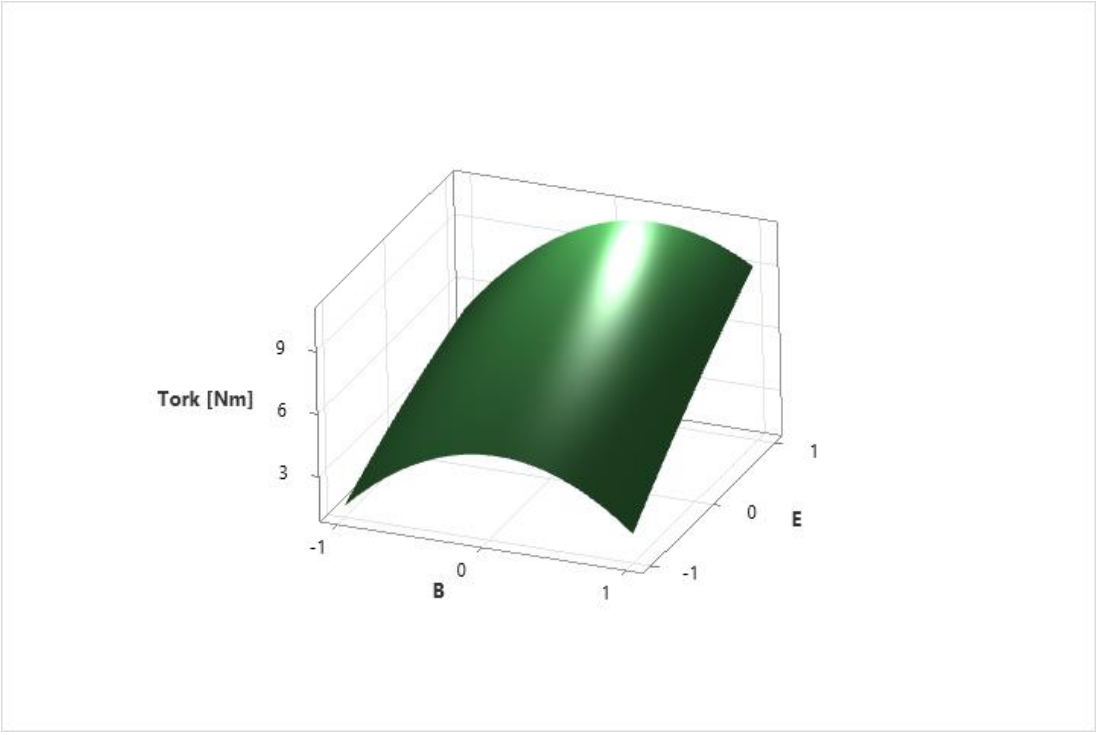
Şekil 3. 13 3 boyutlu Tork-B; C grafiği

B ve D parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.14'te verilmiştir. B parametresi 0 iken tork değeri yüksektir. D parametresi ise etkisi her 3 seviyede de aynı gösteriyor.



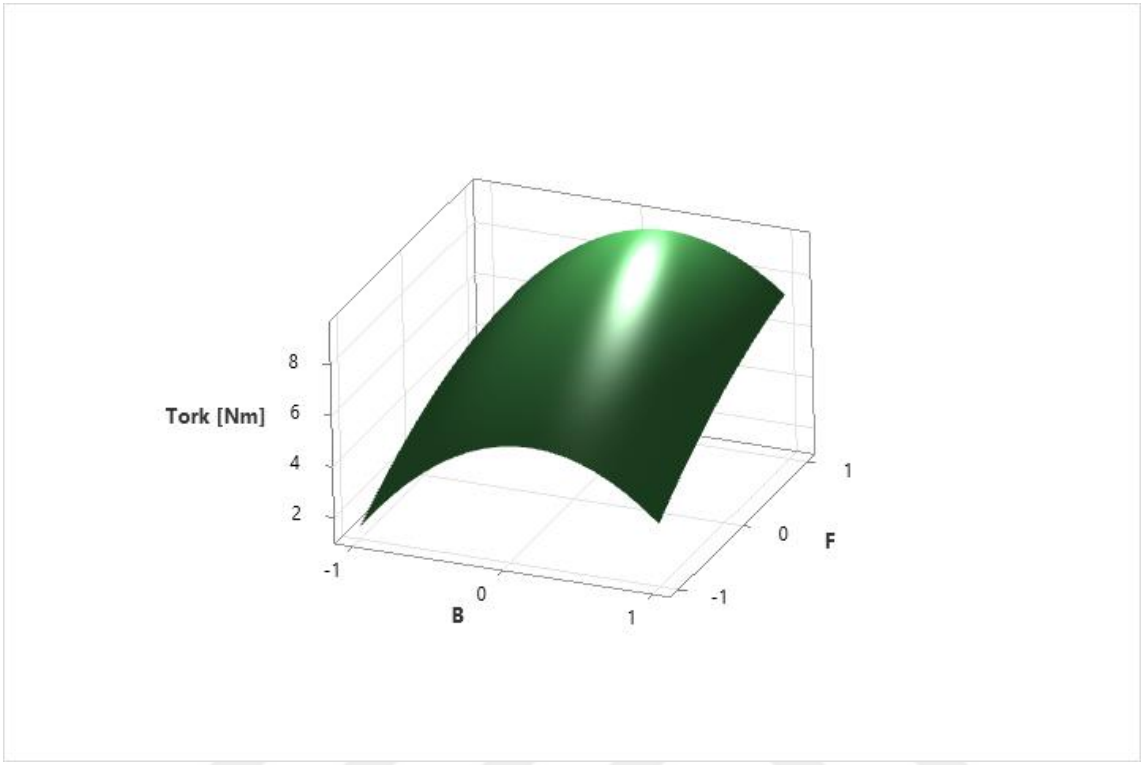
Şekil 3. 14 3 boyutlu Tork-B; D grafiği

B ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.15'te verilmiştir. B parametresi 0 ve E parametresi 1 iken tork değeri en yüksektir.



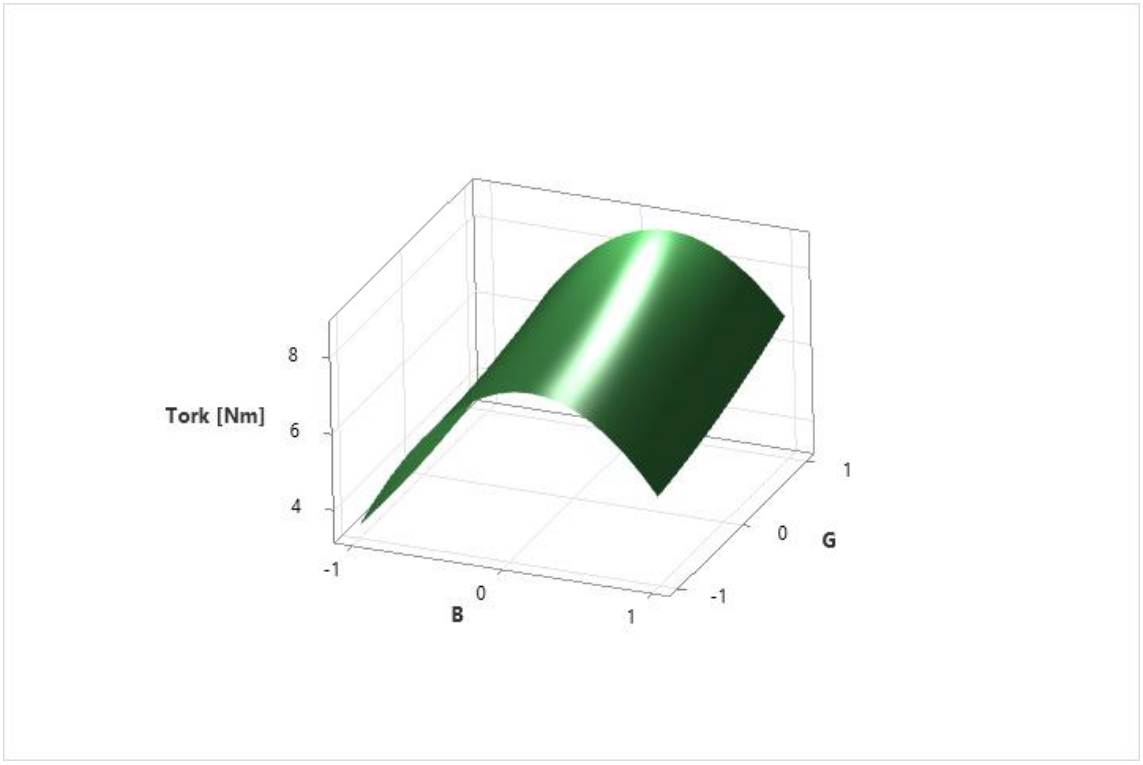
Şekil 3. 15 3 boyutlu Tork-B; E grafiği

B ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.16'da verilmiştir. B parametresi 0 ve F parametresi 1 iken tork değeri en yüksektir.



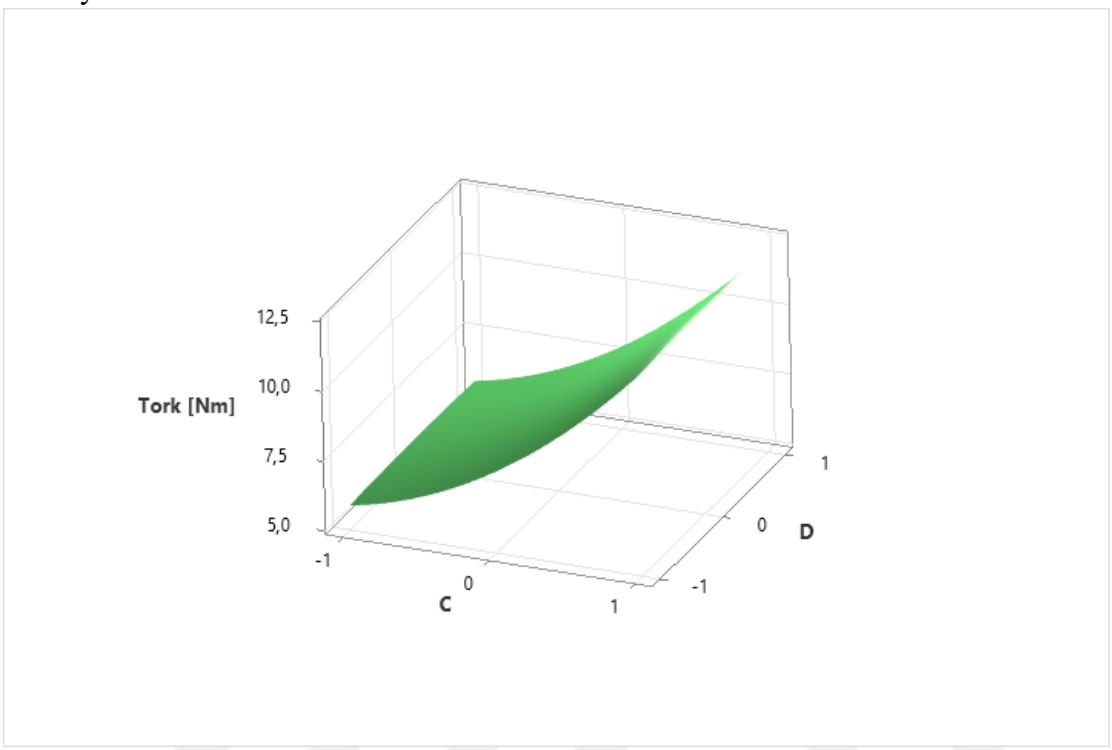
Şekil 3. 16 3 boyutlu Tork-B; F grafiği

B ve G parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.17'de verilmiştir. B parametresi 0 ve G parametresi 1 iken tork değeri en yüksektir.



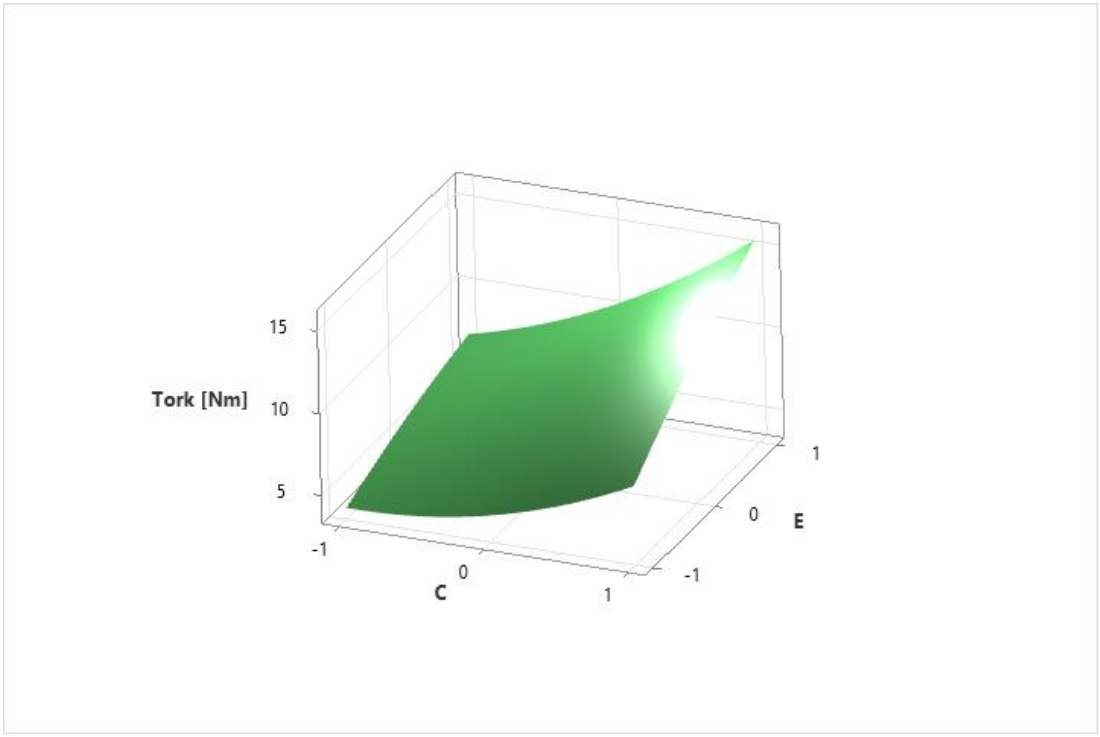
Şekil 3. 17 3 boyutlu Tork-B; G grafiği

C ve D parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.18'de verilmiştir. Şekilde anlaşılacağı üzere C parametresi 1 de çok etkilidir. Hemen hemen D parametresinin etkisi yok denecek kadar azdır.



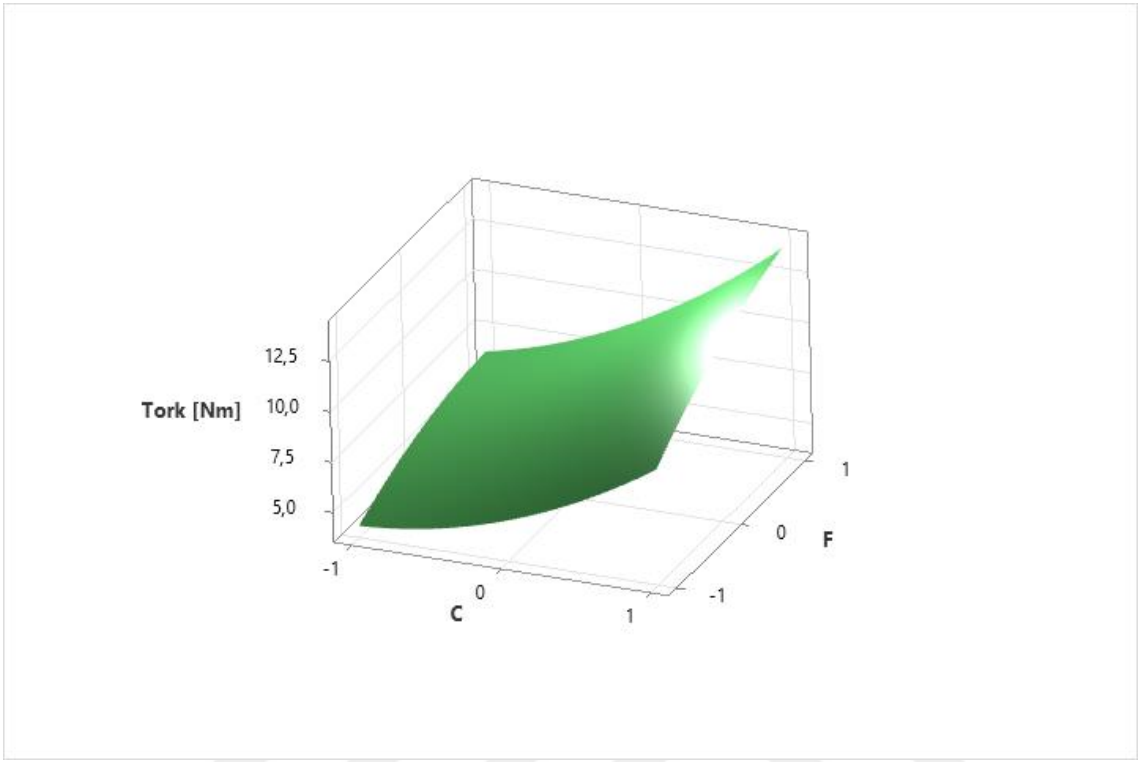
Şekil 3. 18 3 boyutlu Tork-C; D grafiği

C ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.19'da verilmiştir. Şekilde anlaşacağı üzere C ve E parametreleri 1. seviyede tork değeri en yüksektir.



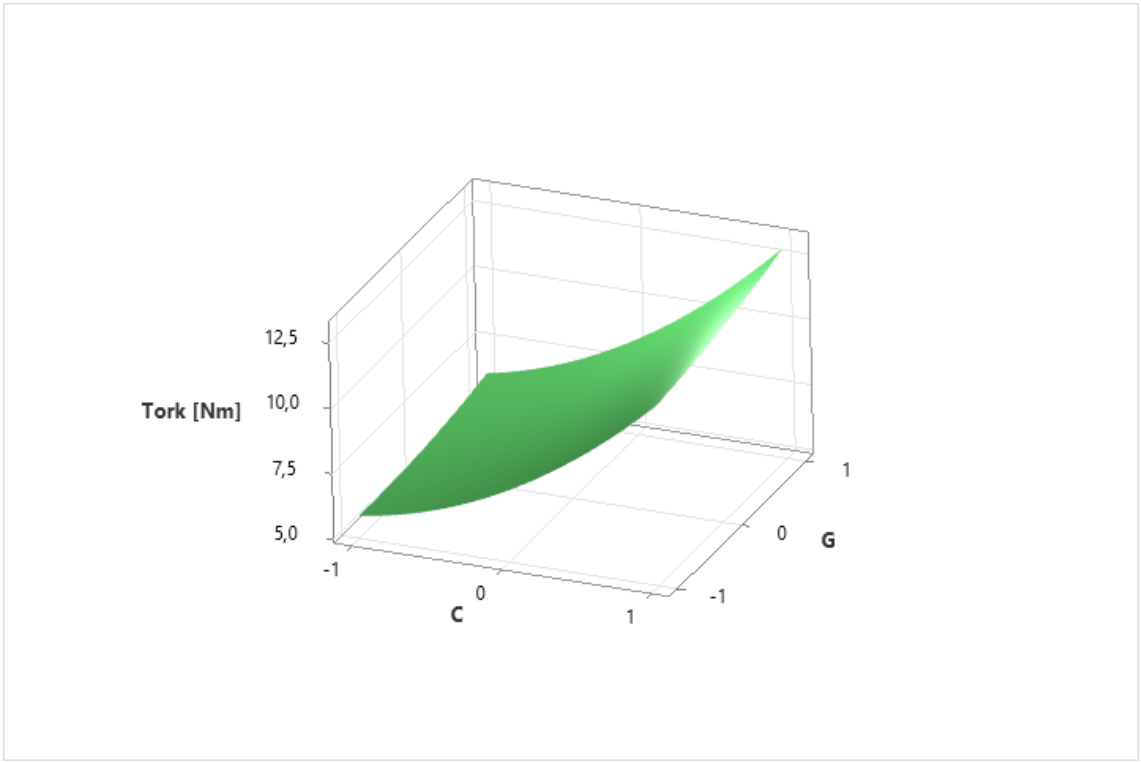
Şekil 3. 19 3 boyutlu Tork-C; E grafiği

C ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.20'da verilmiştir. Şekilde anlaşacağı üzere C ve F parametreleri 1. seviyede tork değeri en yüksektir.



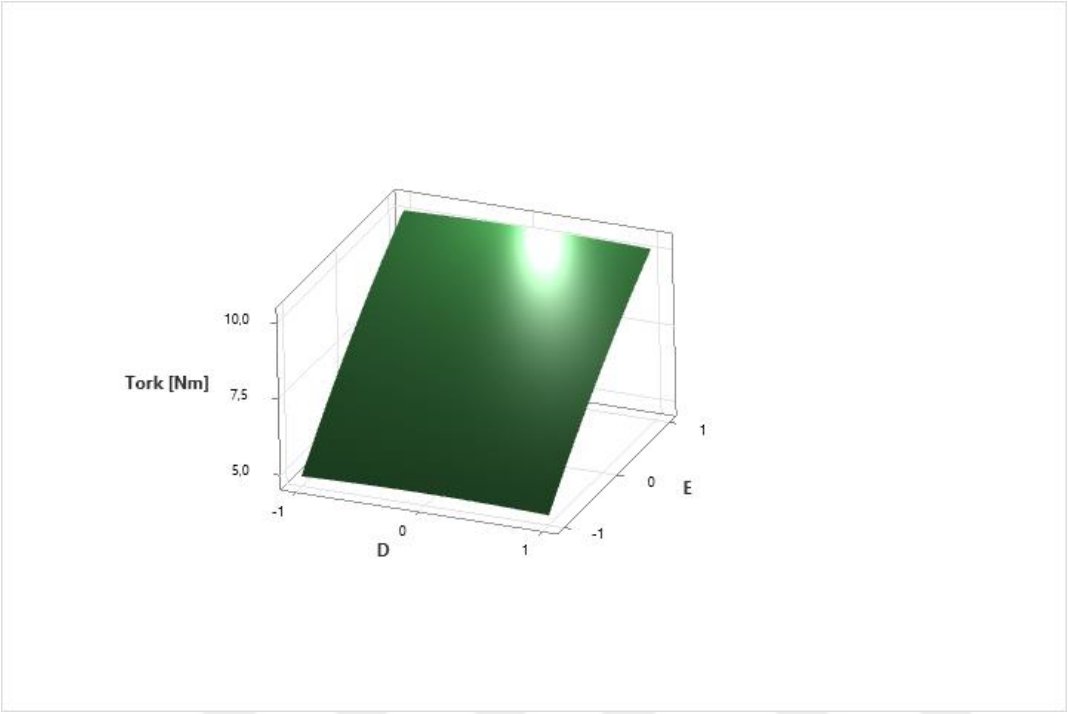
Şekil 3. 20 3 boyutlu Tork-C; F grafiği

C ve G parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.21'de verilmiştir. Şekilde anlaşacağı üzere C ve G parametreleri 1. seviyede tork değeri en yüksektir.



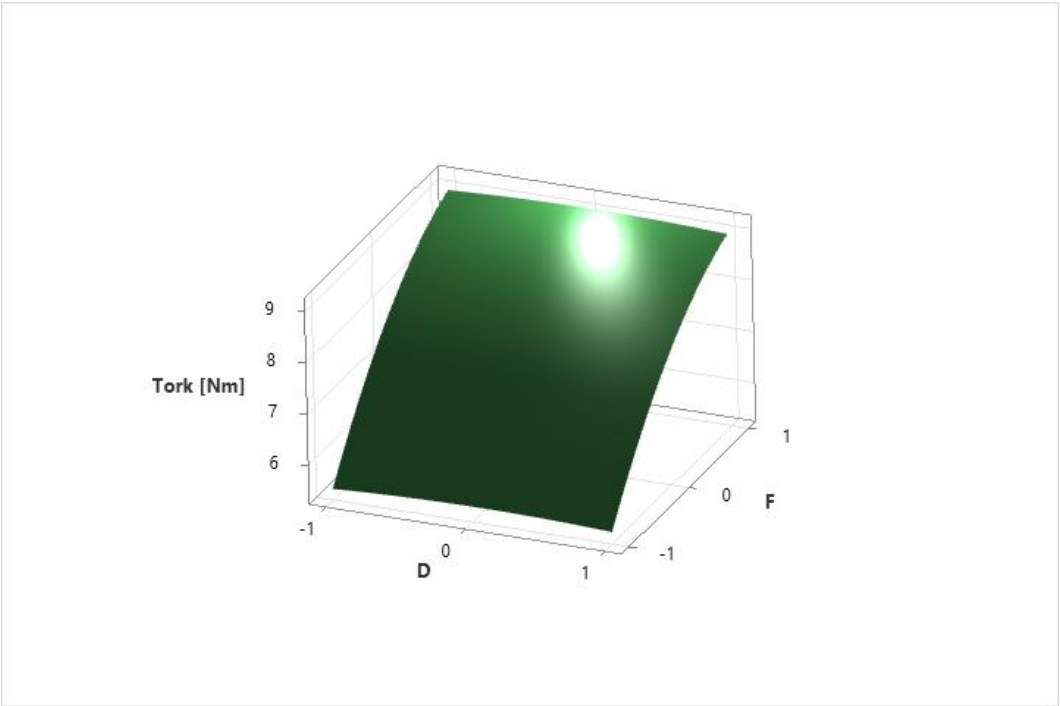
Şekil 3. 21 3 boyutlu Tork-C; G grafiği

D ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.22'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi D parametresinin etkisi yok denecek kadar azdır. E parametresi ise 1. seviyedeyken tork yüksektir.



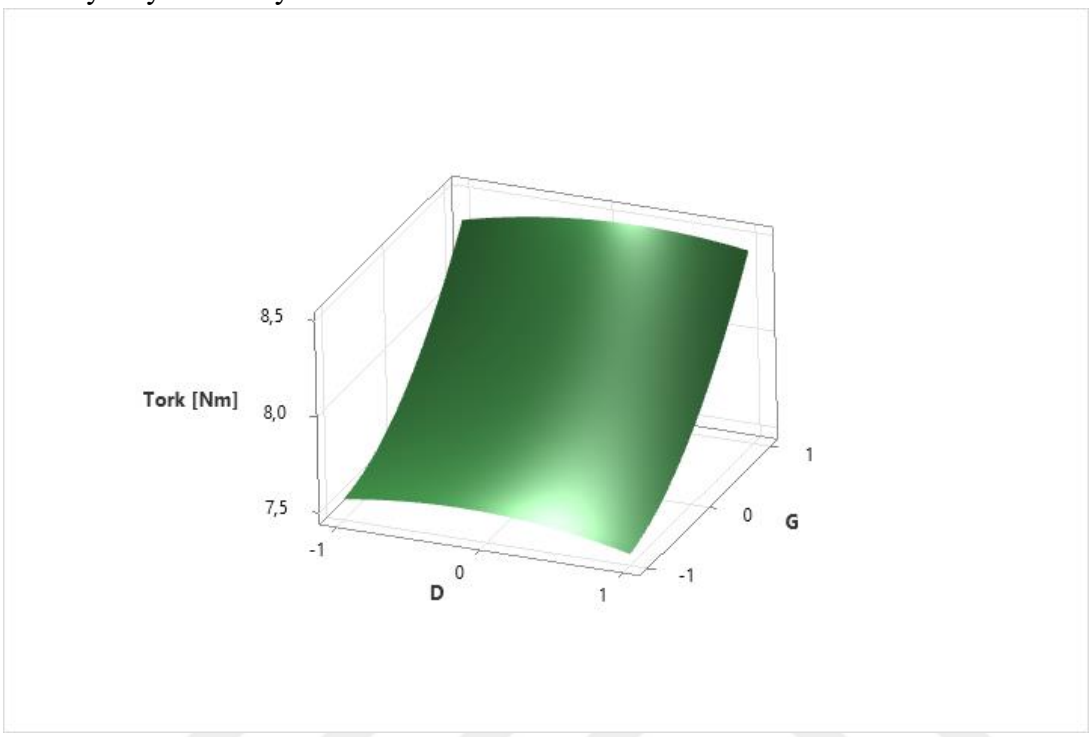
Şekil 3. 22 3 boyutlu Tork-D; E grafiği

D ve F parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.23'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi D parametresinin etkisi yok denecek kadar azdır. F parametresi ise 1. seviyedeyken tork yüksektir.



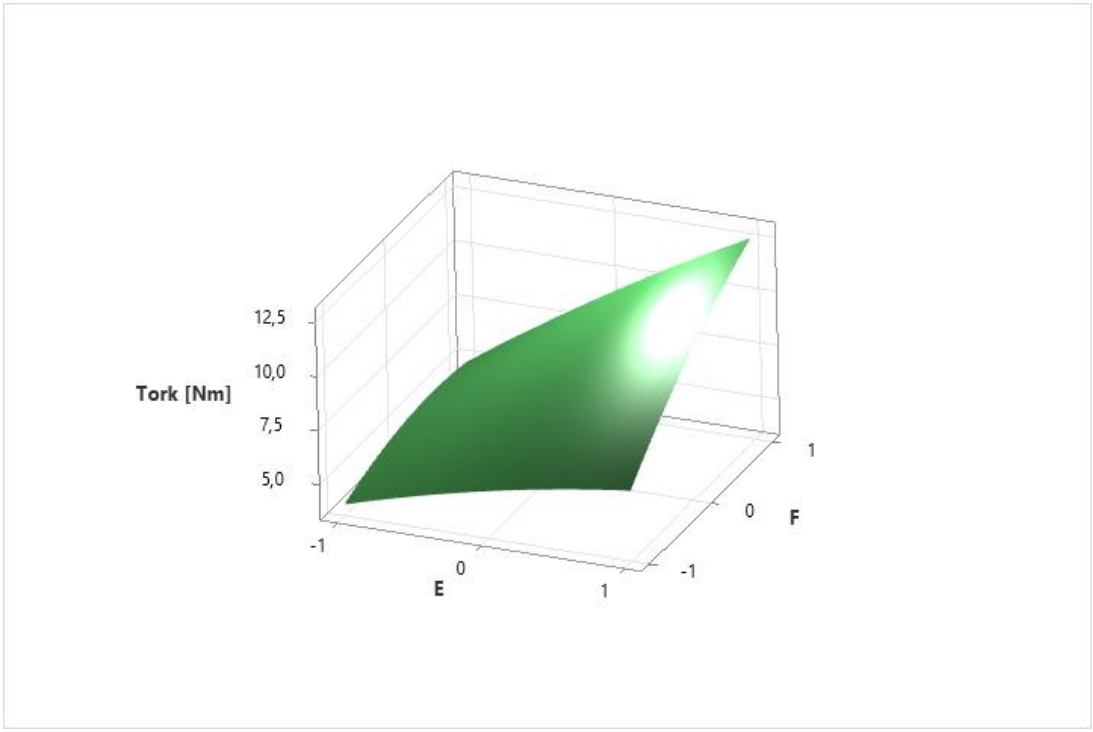
Şekil 3. 23 3 boyutlu Tork-D; F grafiği

D ve G parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.24'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi D parametresinin etkisi yok denecek kadar azdır. G parametresi ise 1. seviyedeyken tork yüksektir.



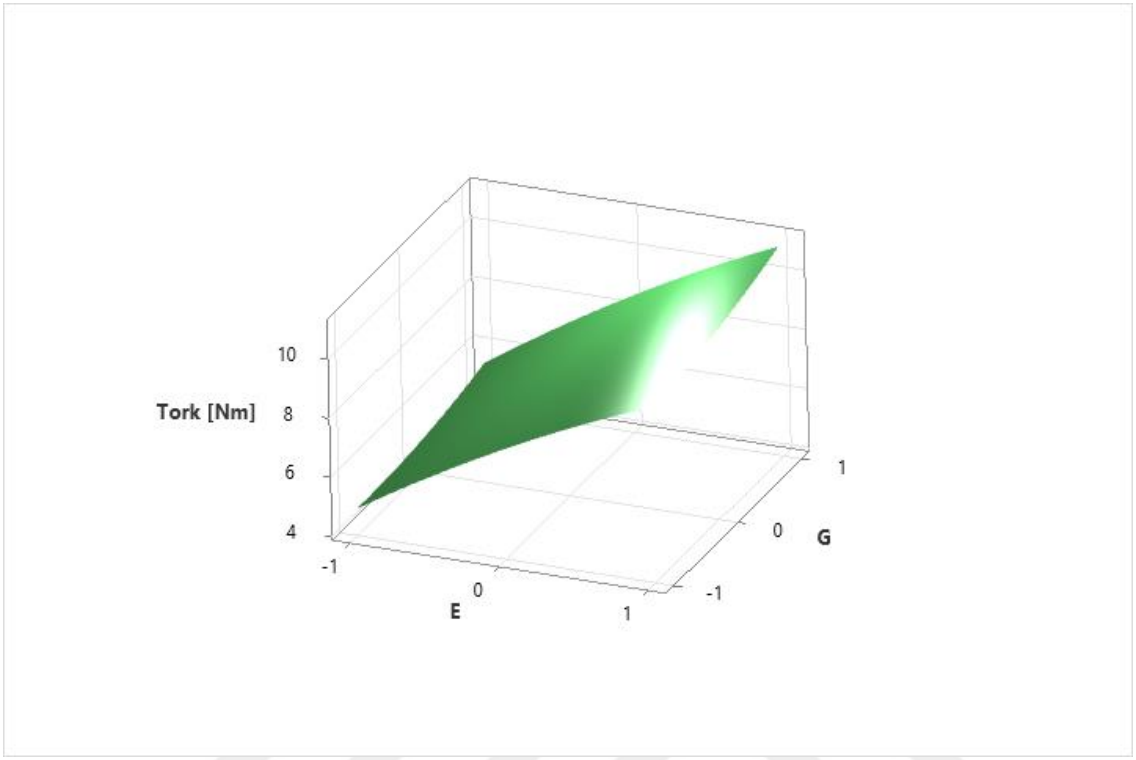
Şekil 3. 24 3 boyutlu Tork-D; G grafiği

F ve E parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.25'te verilmiştir. Şekilde anlaşacağı üzere E ve F parametreleri 1. seviyede tork değeri en yüksektir.



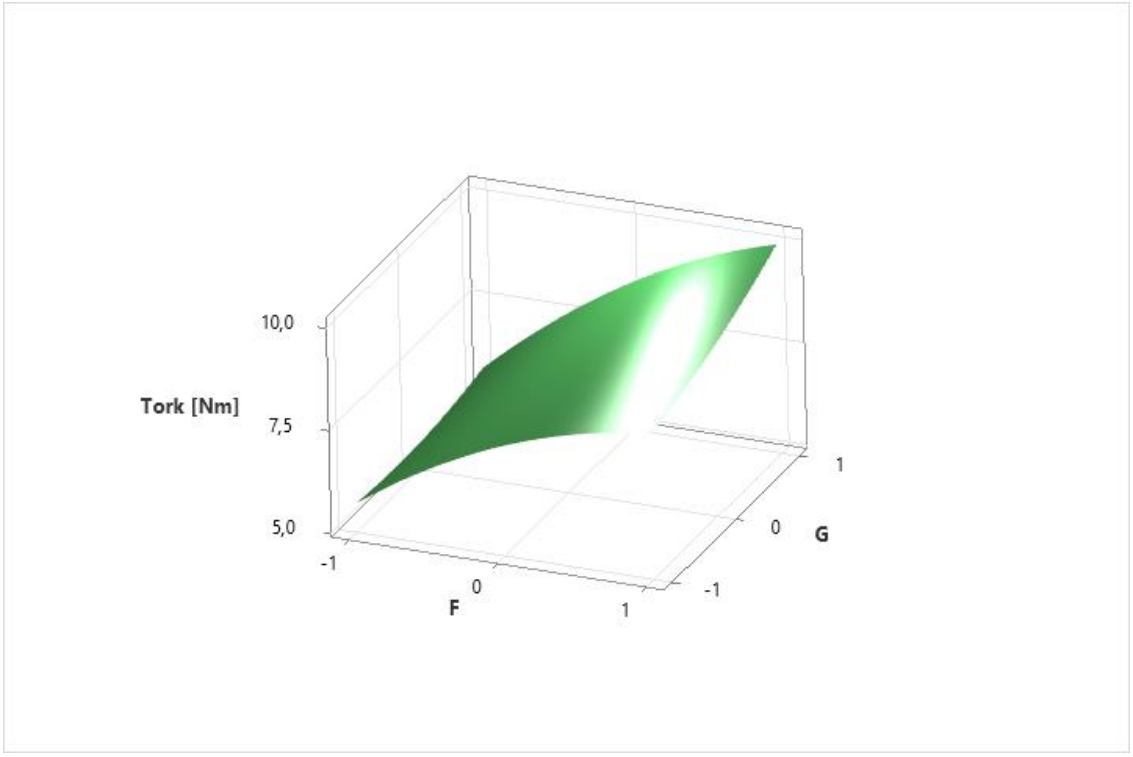
Şekil 3. 25 3 boyutlu Tork-E; F grafiği

E ve G parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.26'da verilmiştir. Şekilde anlaşacağı üzere E ve G parametreleri 1. seviyede tork değeri en yüksektir.



Şekil 3. 26 3 boyutlu Tork-E; G grafiği

F ve G parametrelerinin tork değerine etkisi 3 boyutlu grafik ile Şekil 3.27'de verilmiştir. Şekilde anlaşacağı üzere F ve G parametreleri 1. seviyede tork değeri en yüksektir.



Şekil 3. 27 3 boyutlu Tork-F;G grafiği

Minitab ile %95 anlamlılık düzeyine göre varyans analiz yaptırılmıştır. Parametrelerin tek başına etki Varyans Analiz sonuçlarının katkı yüzdelikleri tork bazında Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6 Parametrelerin tek başına etki Varyans Analizi

Parametre	DF	Karalerin Toplamı	Karalerin Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Yüzdelik Etkileşim
A	1	19.585	19.585	11.85	0.002	3,61%
B	1	37.461	37.461	22.67	0.000	6,91%
C	1	238.681	238.681	144.45	0.000	44,06%
D	1	0.001	0.001	0.00	0.797	0,00%
E	1	167.906	167.906	101.62	0.000	31,00%
F	1	73.385	73.385	44.41	0.000	13,55%
G	1	4.672	4.672	2.83	0.105	0,85%
Total		541.692				100,00%

Tablo 6'da görüldüğü gibi parametrelerin torka tek başına etkisine bakıldığında en etkili parametre %44,06 ile C (delik sayısı) parametresidir. D ve G parametrelerin nerdeyse tek başlarına hiçbir etkileri yoktur.

Parametrelerin birbiri ile yaptığı etki Varyans Analiz sonuçlarının katkı yüzdelikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7 Parametrelerin birbiri ile etki Varyans Analiz sonuçları

Parametre	DF	Karalerin Toplamı	Karalerin Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Yüzdelik Etki
A*B	1	0.039	0.039	0.02	0.879	0,01%
A*C	1	0.061	0.061	0.04	0.850	0,15%
A*D	1	0.025	0.025	0.02	0.903	0,06%
A*E	1	2.213	2.213	1.34	0.258	5,35%

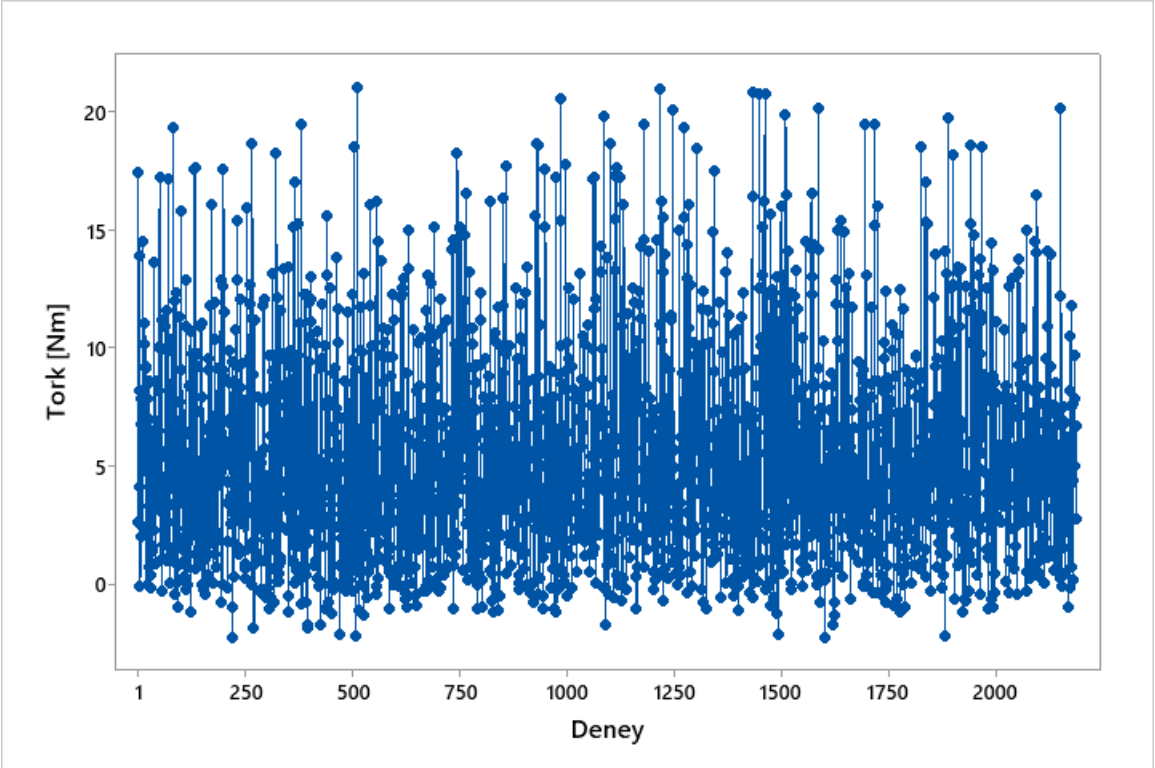
A*F	1	0.233	0.233	0.14	0.710	0,56%
A*G	1	0.022	0.022	0.01	0.909	0,05%
B*C	1	5.685	5.685	3.44	0.075	13,75%
B*D	1	0.000	0.000	0.00	0.988	0,00%
B*E	1	5.406	5.406	3.27	0.082	13,08%
B*F	1	0.503	0.503	0.30	0.586	1,22%
B*G	1	0.503	0.503	0.30	0.586	1,22%
C*D	1	0.000	0.000	0.00	0.994	0,00%
C*E	1	9.754	9.754	5.90	0.022	23,60%
C*F	1	2.740	2.740	1.66	0.209	6,63%
C*G	1	0.197	0.197	0.12	0.733	0,48%
D*E	1	0.000	0.000	0.00	0.994	0,00%
D*F	1	0.000	0.000	0.00	0.994	0,00%
D*G	1	0.008	0.008	0.00	0.994	0,02%
E*F	1	12.932	12.932	7.83	0.010	31,28%
E*G	1	0.140	0.140	0.08	0.773	0,34%
F*G	1	0.876	0.876	0.53	0.473	2,20%
Total		41.337				100%

Tablo 7'de parametrelerin birbiri ile yaptığı etkiye bakılarak en etkili ikili parametrelerin %31,28 ile E-F olarak görülmektedir. Tek başına etkili olan parametre C iken ikili etkileşime girdiğinde E-F gözükmektedir. Hiç etkisi olmayan ikili parametrelere yine tablo 7'ye bakıldığında C-D, D-E ve D-F olduğu görülmektedir. Tek başına etkisi olmayan D ve G parametreleri B ve C gibi parametrelerle oldukça anlam kazandığı yine tablo 7'de gözükmektedir.

Oluşturulan deneyin R^2= 94,65% değeri Minitab ile hesaplatılmıştır. Regresyon denklemi aşağıdaki gibidir.

Tork = 7.858- 0.903 A + 1.249 B + 3.154 C + 0.007 D + 2.645 E + 1.749 F + 0.441 G- 0.848 A*A- 3.112 B*B+ 1.124 C*C- 0.074 D*D- 0.294 E*E- 0.555 F*F + 0.180 G*G+ 0.070 A*B- 0.087 A*C- 0.056 A*D- 0.526 A*E- 0.171 A*F- 0.052 A*G + 0.843 B*C+ 0.007 B*D+ 0.822 B*E+ 0.251 B*F+ 0.251 B*G+ 0.003 C*D+ 1.104 C*E + 0.585 C*F+ 0.157 C*G+ 0.003 D*E- 0.003 D*F+ 0.031 D*G + 1.271 E*F + 0.132 E*G + 0.331 F*G

Box-Behnken deney tablosu üzerinden yapılan Yanıt yüzey analizinde her bir deney parametresi için tork hesaplaması yapılmıştır. Daha sonrasında ful faktöriyel deney tasarımı yapıldığında yapılması gereken 2187 deney Yanıt yüzey deney tasarımı tahmin formülasyonu ile tahmin edilmiştir. Ful faktöriyel deney sonuçları için zaman serisi grafiği Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3. 28 Ful faktöriyel deney sonuçları için tork zaman serisi grafiği

Şekil 3.28'de görüldüğü gibi amaçladığımız 9,5 N.m torkun üstüne çıkan oldukça deney sayısı vardır. Bu sonuçlar yeterince uygundur.

Yapılan ful faktöriyel deney tasarımında maksimum torklu olan deney ile deney uyumluluğunu tespit etmek için yapılan deneyler arasında olmayan rastgele iki farklı deney analizi yapılmıştır. Bu deney parametre seviyeleri tablo 3.d'de verilmiştir.

Tablo 8 Deney maksimum ve rasgele deneylerin seviyeleri

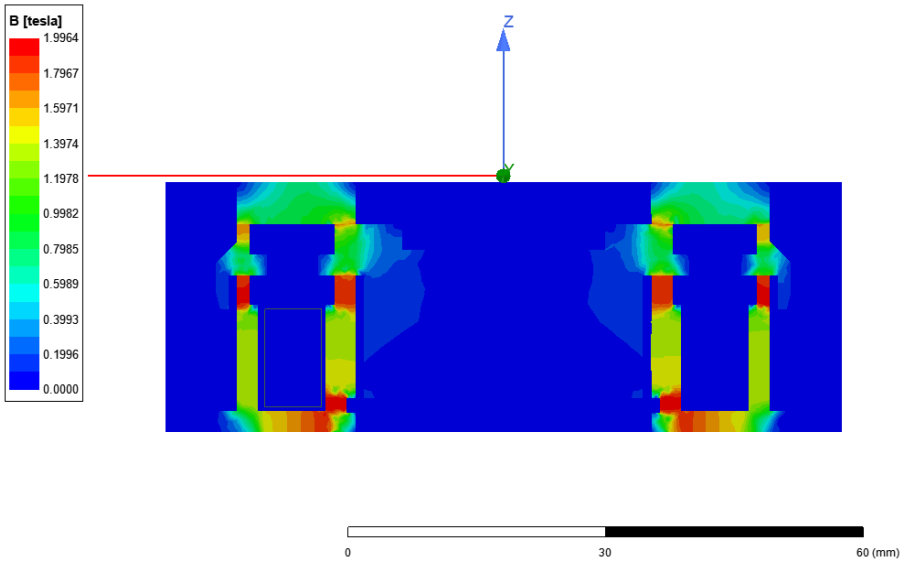
Deney No	A	B	C	D	E	F	G
511 (Maksimum)	-1	1	1	1	1	1	1
1374 (Rastgele)	1	0	1	-1	1	0	1

Minitab programı ile bu deneyler tahmin ettirilmiştir. Yapılan deneylerin numerik ve tahmin sonuçları tablo 8'de verilmiştir.

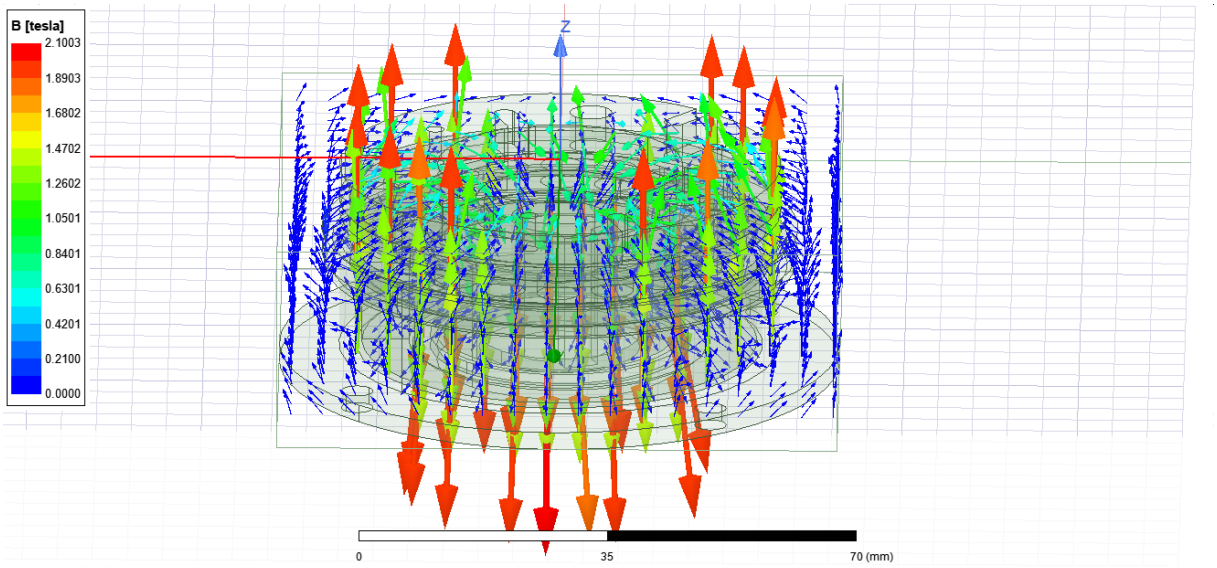
Tablo 9 Deney maksimum ve rasgele deneylerin sonuçları

Deney No	Tahmini Tork [Nm]	Nümerik Tork [Nm]	Yüzdelik Fark
511 (Maksimum)	21,04	20,06	4,65%
1374 (Rastgele)	14,02	14,61	4,20%

Tablo 9'da görüleceği üzere sonuçlar birbiri ile gayet uyumludur. Yapılan deney modelinin uyumluluğunu bir kez daha tespit edilmiştir. Deney 511 (maksimum) manyetik akı yoğunluk dağılımı ve vektörleri sırasıyla Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da verilmiştir.

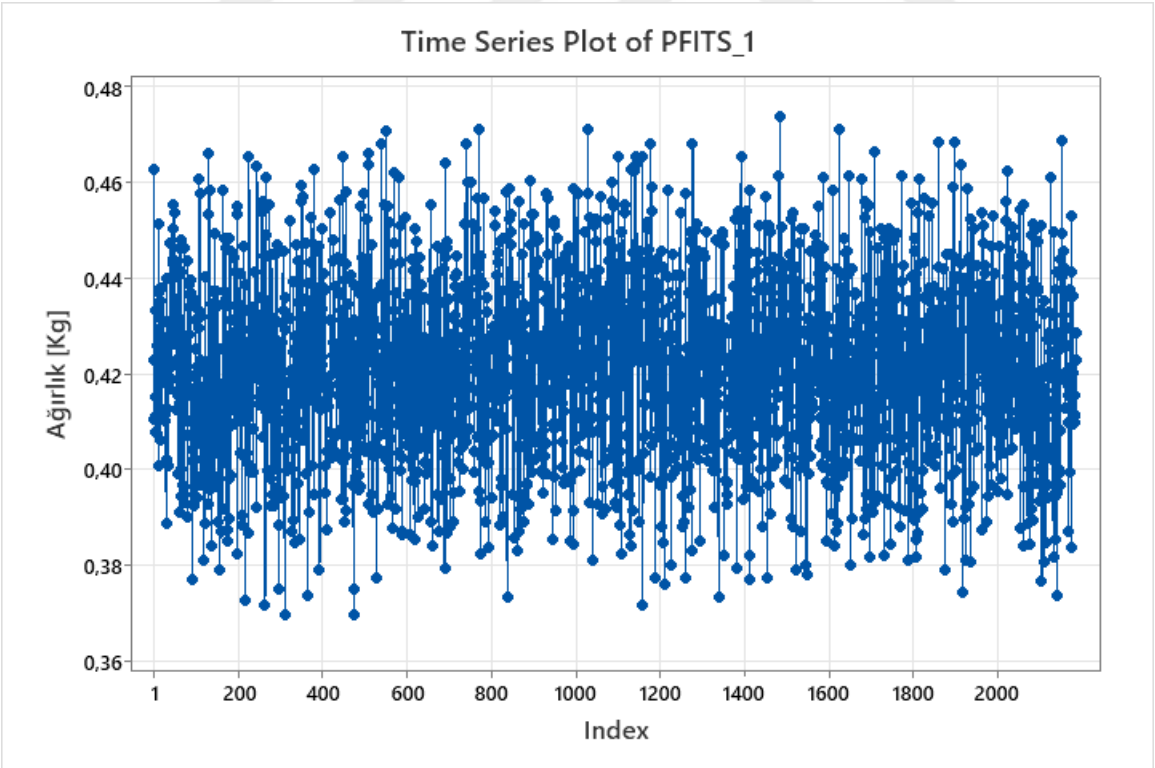


Şekil 3. 29 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 3. 30 Manyetik akı yoğunluğu vektörleri

Tasarımı yapılan elektromanyetik kavramanın ayrıca ağırlık bazında da yanıt yüzey metodu ile ful faktöriyel optimizasyonu yapılmıştır. Yapılması gereken 2187 deney için ağırlık zaman serisi grafiği şekil 3.29'da gösterilmektedir.



Şekil 3. 31 Ful faktöriyel deney sonuçları için ağırlık zaman serisi grafiği

Şekil 3.31'da gözüktüğü gibi ağırlık 0,36 kg ve 0,48 kg aralığındadır. Ağırlığın çok yoğunlaştığı bölge ise 0,42 kg bandıdır. Ağırlık optimizasyonunu yaparak üretileceği en iyi

ağırlıktaki elektromanyetik kavrama seçilebilir.

Minitab ile %99,98 anlamlılık düzeyine göre varyans analiz yaptırılmıştır. Parametrelerin tek başına etki varyans analiz sonuçlarının katkı yüzdelikleri ağırlık bazında Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10 Parametrelerin tek başına ağırlık etki Varyans Analizi

Parametre	DF	Karalerin Toplamı	Karalerin Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Yüzdelik Etkisi
A	1	0,000000	0,000000	0,000	1,000	0,00%
B	1	0,002223	0,002223	23123,10	0,000	16,54%
C	1	0,000121	0,000121	1263,60	0,000	0,90%
D	1	0,001335	0,001335	13884,43	0,000	9,94%
E	1	0,005828	0,005828	60612,93	0,000	43,35%
F	1	0,003675	0,003675	38223,90	0,000	27,34%
G	1	0,000260	0,000260	2704,43	0,000	1,93%
Total		0,013443				100,00%

Tablo 10'da görüldüğü gibi parametrelerin ağırlığa tek başına etkisine baktığımızda en etkili parametre %43,35 ile E (gövde arka kalınlık) parametresidir. A ve C parametrelerin nerdeyse tek başlarına hiçbir etkileri yoktur.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada birçok teknolojik ürünün arkasındaki teori olan elektromanyetik teori tabanlı elektromanyetik kavrama üzerinde bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında deney tasarım parametreleri olarak kavrama elemanlarının malzemeleri, kavrama çekim kuvvetini etkileyen en önemli komponet olan rotor malzemesi kalınlığı ve üzerinde bulunan delik sayısı optimize edilmiştir. Çalışmada istatistiksel deney tasarım metotlarından Yanıt yüzey deney tasarım metodu kullanılmıştır. Çalışmada 7 parametre ve her bir parametre için 3 seviye kullanılmıştır. Full faktöriyel deney tasarımında 2187 deney yapılması gerekmekte iken gerek zaman ve gerek maliyet faktörleri dikkate alınarak Box-Behnken deney tasarım tablosu kullanılmıştır. Box-Behnken deney tasarım tablosuna göre ürünlerin CAD modelleri hazırlanmış, malzeme atamaları ve gerekli elektromanyetik simülasyon adımları uygulanarak her bir deney için çekme kuvvetleri elde edilmiştir. Çekme kuvvetleri kullanılarak her bir deney için balatanın sürtünme katsayısı ve geometri ölçüleri kullanılarak kavrama tork değeri (N.m) hesaplanmıştır. Full faktöriyel deney tasarımı sayısı olan 2187 deney tahmin edilmiş ve sonuçlar grafize edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda torku en çok etkileyen parametrenin delik sayısı olduğu gözlemlenmektedir. Delik sayısının bu kadar etkili olmasının iki nedeni bulunmaktadır. Birincisi kavramayı ağırlık bazında hafifletmektedir. İkinci bir nedeni de manyetik akımın geçirgenliğini artırmaktadır. Bir diğer etkili parametre ise gövde arkası kalınlıktır. Aynı şekilde ağırlığı azalttığında daha iyi bir tork değeri elde edildiği anlaşılmaktadır.

Çalışmada sonuçlar incelendiği zaman yapılan simülasyon sonucunda elde edilen tork değerlerinin 1.37 Nm değeri ile 21.06 N.m tork değeri arasında değiştiği gözlenmiştir. En yüksek ve en düşük tork değerini veren deneyler için manyetik akı yoğunluğu 2d olarak kontur grafiği, 3d olarak ise vektör grafiği şeklinde incelenmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere düşük tork değeri veren deneyde manyetik akı yoğunluğun az olduğu ve bu yüzden çekme kuvvetinin düşük olduğu gözlenmiştir. Aşağıdaki verilen Tablo 11'de en düşük ve en yüksek tork değerini veren deneyler için parametreler verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere en kötü deney dunumu için paslanmaz çeliği 409 malzeme, 2,5mm rotor kalınlığı, 12 delik sayısı, 5mm armatür kalınlığı, 2mm gövde arka kalınlığı,32mm gövde üstü kalınlık ve 20,75 mm gövde içi kalınlık görülmektedir. En iyi durum için ise 1008 Çeliği malzeme, 3 mm rotor kalınlığı, 20 adet delik sayısı, 5,5 mm armatür kalınlığı, 2,5 mm gövde arka kalınlığı, 32mm gövde üstü kalınlık ve 21,25 mm gövde içi kalınlık bulunmaktadır.

Sonuçlar incelendiği zaman en etkili parametrenin delik sayısı olduğu görülmektedir. Üründe kullanılan delik sayısının artması, rotor komponentinden manyetik akının kolay geçtiği ve armatür plakasını daha fazla çektiği görülmektedir.

Tablo 11 En iyi ve en kötü deney şartları

Deney	A	B	C	D	E	F	G
En İyi	St 1008	3	20	5,5	2,5	32	21,25
En Kötü	St 409	2,5	12	5	1,5	31,5	21

Geliştirilecek olan üründe beklenen tork değeri 7 N.m olacaktır. Fakat elektromanyetik sistemlerde en önemli problem olan ısınma probleminden dolayı, artan sıcaklığa bağlı olarak çekme kuvveti düşmektedir. Bu düşüşten dolayı ortalama 1.4-1.7 emniyet katsayısı ile ürünler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu açıdan sonuçlar analiz edildiği zaman Şekil 3.28'de verilen sonuçlar arasından 10 N.m ile 12 N.m aralığında olanlar olduğu görülmüştür. Çalışmada optimal parametreler bu değerler arasında olacak şekilde sıralanabilir.

Üretici kataloğuna göre 1.4-1.7 emniyetine sahip tork değeri uygundur. Bundan dolayı örnek olarak seçtiğimiz en yüksek tork değerine sahip modeli optimal değere getirmek için 250 amper yerine daha düşük bir amperde getirilebilir. En yüksek tork değerine sahip olan 21.04 torkluk model uygun analiz parametreleri girildikten sonra 50 A.T değerinde optimal olan ve üretici kataloğunda uygun olan 9 N.m tork değerine getiriliyor. Buda çok önemli değerdeki bir güç tasarrufu sağlıyor.

Piao, C.H' ın yaptığı "Torque analysis and shape optimization of electromagnetic clutch" çalışmasında armatür ve rotor arasındaki etkileşim sonucu oluşan tork araştırılmıştır. Armatür ve rotor arasındaki mesafenin ne kadar az olursa daha yüksek bir tork değeri elde dileceğini savunmuşlardır. Özellike armatür şekli üzerinde değişikliğe gidilmiştir. Bu tez çalışmasında da bir parametre olarak armatürün kalınlığı üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada armatür kalınlığını değiştirmek tek başına fazla bir anlam taşımadığı ancak başka parametrelerle etkileşme girdiğinde etkisinin artığı gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise Rikiya Kunii ve arkadaşlarının yaptıkları "Development of Direct Electromagnetic Clutch" çalışmasıdır. Bu çalışmada üzerine durulan torku etkileyen bir parametre de hava boşluğudur. Solenoid kuvvet hava boşluklarına göre çok değişir. Hava

boşluğu çok olursa solenoid kuvvet çok az olur tezidir. Bu çalışmada fazla hava boşluğu olmaması için Maxwell analizi yapılmadan önce bir hava şartı tanımlanmıştır. Bu da belli sınırlar içinde hava sınırlaması koyularak daha verimli bir çalışma ortamı sağlamıştır.

Üretici kataloğu referans alındığında elde edilmesi gereken tork değeri 9 ile 10 N.m değerinde olmalıdır. Bu çalışmada bazı değerlerinin referans değerlerinin oldukça üstünde olduğu analiz sonuçlarında anlaşılmaktadır. Yapılan örnek bir çalışmada da maksimum torkun 21 N.m olduğu deney 9 N.m değerine getirmek için olması gereken 250 A.T akım değeri yerine yaklaşık 50 A.T akım değeri yeterli olacağı analizler sonucu ön görülmüştür. Güç tasarrufu bakımında değerlendirildiğinde yıllık bazda ele alındığında bu da yıllık güç tasarrufu bakımında oldukça önemsenecek bir değerdir. Bir diğer faktör ise bobin maliyetidir. Yaklaşık bobin maliyetini beşte bir değerine indirmektedir. Tablo 12'de yıllık 10000 adet üreten bir işletmeye maliyet olan ve iyileşme sonucu elde edilen tasarruf belirtilmiştir.

Tablo 12 Bobin yıllık tasarruf maliyeti

Ürün Adedi Yıllık	Ürün Başına Düşen Maliyet		Ürün Başına Azaltılan Maliyet		Toplam Tasarruf Yıllık
	Bobin Fiyatı	İşçilik	Bobin Fiyatı	İşçilik	
10.000	60 (TL)	40 (TL)	48 (TL)	0	480.000 (TL)

Yapılan bu çalışmada tork dışında birde ağırlık analizi yapılmıştır. Yapılan optimizasyon sonucunda ağırlık üzerinde de bir maliyet çalışma yapılırsa ürün başına yıllık bazında iyi bir iyileştirme yapılabilir. Hiçbir iyileştirme yapılmayan örnek kavramanın ağırlığı 500 gr olarak hesaplanmıştır. Belli parametreler değiştirilerek (delik sayısı, armatür kalınlığı, gövde arka kalınlığı, gövde üstü kalınlık ve gövde içi kalınlık) uygun tork değeri (9-10 N.m) veren modelin 450 gr'a kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Yıllık olarak elde edilen tasarruf tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13 Ağırlık bazında yıllık tasarruf maliyeti

Ürün Adedi	Ürün Başına Azaltılan Ağırlık	Malzeme fiyatı (kg başına)	Toplam Tasarruf
10.000	50gr	140 (TL)	70.000 (TL)

Yapılan bu çalışmada özellikle torkta iyileştirme yapılmıştır. Tork iyileştirmesi yapılırken ağırlıkta da oldukça bir iyileştirme olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada yüksek tork

değerini daha düşük A.T değerlerinde üretici kataloğunda bulunan değerlere düşürülmüştür. Burada oldukça önemsenecek bir güç tasarrufu sağlanmıştır. Bunun yanında da hem bobinin maliyetinde hem de kavramanın ağırlığından doğan bir maliyet iyileştirmesi de yapılmıştır. Bu iyileştirme hem malzeme tasarrufu hem de çevre kirliliği bakımında oldukça önemlidir.

Teorik olarak yapılan bu çalışma göz önüne alınarak gelecekte prototip üretimi yapılıp deneysel olarak gerçekleştirebilir. Kurulan deneylerle ömür testi yapılabilir. Üzerine çalışılan parametrelerin (malzeme, rotor kalınlığı, delik sayısı, armatür kalınlığı, gövde arkası kalınlık, gövde üzeri kalınlık ve gövde içi kalınlık) üzerinde değişiklik yapılabilir ya da farklı parametrelerle bir çalışma yapılabilir. Elektromanyetik kavrama üzerinde farklı analiz programlarıyla farklı çalışmalar yapılıp iyileştirmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Chowdhary, A., A. Kumar, and S.K. Singh, *Design and Analysis of an Electro-*

Magnetic Clutch. International Journal of Progressive Research in Science and Engineering, 2020. **1**(3): p. 89-95.
2. Kunii, R., et al., *Development of direct electromagnetic clutch system.* SAE transactions, 2005: p. 625-630.
3. Piao, C.H., et al. *Torque analysis and shape optimization of electromagnetic clutch*. in *Key Engineering Materials*. 2010. Trans Tech Publ.
4. Fernando, N. *A field modulated electromagnetic clutch with slip control*. in *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. 2016. IEEE.
5. Muramatsu, J., et al., *Proposal of electromagnetic clutch structure to suppress surge voltage.* IEEE Transactions on Magnetics, 2014. **50**(11): p. 1-4.
6. Semra, U., *Maxwell'in Alan Denklemleri Üzerine Bir Değerlendirme.* Felsefe Arkivi, 2019(51): p. 261-270.
7. Xu, S. and C. Wang. *Simulation and experimental study on electromagnetic field in magnetic particle clutch*. in *2011 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*. 2011. IEEE.
8. Chen, Q., et al., *Analysis on temperature field of electromagnetic clutch of in-wheel motor for micro-electric vehicle.* International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2016. **8**(2): p. 109-121.
9. Ranjan, A., et al. *Design and control of electromagnetic clutch actuation system for automated manual transmission*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. IOP Publishing.
10. Dandi, W., *Design of Electromagnetic Clutch System for Toyota 3L Manual Transmission*. 2019, ASTU.
11. Bochkarev, I.V., et al. *Diagnostics of Electromagnetic Friction Brakes and Clutches*. in *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2019. IEEE.
12. Yin, Y., C. Qi, and J. Qu, *The Designation and Simulation of a New Type of Electromagnetic-Clutch-By-Wire.* International Journal of Engineering and Advanced Research Technology, 2016. **2**(9): p. 13-17.
13. Sanjulal, T., et al., *Design and Fabrication of Regenerative Clutch Assembly Model.* 2016.
14. Bochkarev, I. and V. Khramshin. *Development of system for control of reversible electric drive friction-plate electromagnetic clutch*. in *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2017. IEEE.
15. Feng, D., et al. *The structure design of electromagnetic clutch in the adverse circumstances*. in *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Trans Tech Publ.
16. Yang, F., C. Gu, and C. Wang. *Magnetic field analysis and optimal design of a novel bistable permanent electromagnetic clutch*. in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2014. IEEE.
17. Yıldız, İ., *Elektromanyetik Silah Sistemlerinin Incelenmesi Ve Bir Uygulama Örneği*. 2013, Marmara Universitesi (Turkey).
18. BAKANLIĞI, Ç.V.S.G. and İ. MÜDÜRLÜĞÜ, *SAĞLIK SEKTÖRÜNDE ÇALIŞANLARIN ELEKTROMANYETİK ALAN MARUZİYETİNİN BELİRLENMESİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ.*
19. Kendir, E., *Optik lif manyetik alan algılayıcısı tasarımı ve manyetik alan ölçümü*. 2011, Akdeniz Üniversitesi.
20. Güçlü, G.G., *50 Hz elektromanyetik alanlar ve biyolojik etkileri*. Enerji Enstitüsü.
21. KÜÇÜKDERMENCİ, S., *Eksenel Hizalanmış Bobin Dizileri ile Manyetik Alan Oluşturma.* Recent Advances in Science and Technology: p. 175.

22. Horton, W.F. and S. Goldberg, *Power frequency magnetic fields and public health*. 1995: CRC Press.
23. HÜNER, E., *Düşük çözünürlüklü eksenel akılı sürekli mıknatıslı step motorun manyetik analizi.* Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 2018. **7**(3): p. 77-84.
24. Yin, Y., C. Qi, and J. Qu, *The Designation and Simulation of a New Type of Electromagnetic-Clutch-By-Wire.*
25. PULLEY, M. *What are electromagnetic clutches and electromagnetic brakes?* ; Available from: https://www.mikipulley.co.jp/EN/Products/ElectoromagneticClutchesAndBrakes/about.html.
26. encyclopedia, W.t.f. *Electromagnetic clutch*. June 2021; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_clutch.
27. CORP., O.I. *Industrial clutches and brakes*. Available from: https://ogura-clutch.com/electromagnetic_clutch.php.
28. GÜVERCİN, S. and A. Yildiz, *Optimization of cutting parameters using the response surface method.* Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 2018. **36**(1): p. 113-121.
29. Erdoğan, F., *YÜKSELTİLMİŞ D-OPTİMAL DİZAYN YÖNTEMİ KULLANILARAK MÜHENDİSLİK DİZAYNLARINDA ETKİNLİĞİN GELİŞTİRİLMESİ:'SENTETİK JET'DİZAYN OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI.* Journal of Aeronautics and Space Technologies, 2007. **3**(1): p. 51-63.
30. Dietrich, A.B., I.E. Chabu, and J. Cardoso. *Eddy-current brake analysis using analytic and FEM calculations. I. Theory*. in *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No. 01EX485)*. 2001. IEEE.
31. Gülbahçe, M.O., *Orta güçlü bir girdap akımı freni tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi*. 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi.
32. BAŞARAN, S., *Manyetik Dişli Sisteminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi.* Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (21): p. 37-42.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Memet ÖZDEMİR

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise: Nusaybin Anadolu Lisesi

Lisans: Çukurova Üniversitesi,2014 (GANO:2,47/4)

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi,2022(GANO:3,63/4)

İş Tecrübesi

Tasarım Mühendisi – Pressan Madeni Eşya San. Ve Tic. A.Ş -2017-Halen

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulmuş Bildiriler

Özdemir, M., & Hartomacıoğlu, S. (2022). Finite Element Analysis of Electromagnetic Clutch. The European Journal of Research and Development, 2(2), 475-490.